江西财经大学
JIANGXI UNIVERSITY OF FINANCE AND ECONOMICS

学校代码 _____
密　　级 _____
中图分类号 _____
UDC _____

硕士学位论文
MASTER DISSERTATION

论文题目（中文）：基于哨兵2号卫星影像的森林资源资产价值评估研究——以江西省吉安市为例

论文题目（英文）：Research on the Valuation of Forest Resources Assets Based on Sentinel-2 Satellite Image -A Case Study of Ji 'an City in Jiangxi Province

作　　者：郑瑞　　导　　师：李洪义 教授

申请学位：硕士　　学院名称：旅游与城市管理学院

学科专业：土地资源管理　　研究方向：自然资源管理

二〇二三年六月

中国知网 https://www.cnki.net

本论文受下列项目资助：

江西省自然资源厅科技课题：面向国土空间优化管控的江西省生态保护红线监测关键技术研究（编号：202327）

省自然科学基金面上项目，项目编号：20212BAB205022

中国知网 https://www.cnki.net

摘　　要

当前，全球发展进入新的阶段，自然资源在社会中的重要性日益提升，各国关于自然资源的管理迈上新的台阶，在政策制定、市场搭建、体系建设方面形成各有特色的模式。森林资源资产作为自然资源资产的重要拼图，为人类提供林木产品和各类生态系统服务，具有不可替代的价值。本文以吉安市森林资源资产为研究对象，从森林资源资产的价值内涵出发，基于经济及生态价值双重视角构建森林资源资产价值评估框架及体系，引入基于遥感技术的森林蓄积量识别方法，以期在前人研究的基础上进一步拓宽研究路径，创新森林资源资产经济价值核算思路及方法，同时为森林资源资产负债表编制提供支持，体现研究的实践价值。

在新时代背景下，自然资源的价值内涵应有新的体现，即使是未经过开发的自然资源同样具有价值，但目前自然资源价值内涵界定的相关理论研究还需进一步深入完善，为自然资源资产的价值评估提供理论依据。本文首先梳理了当前国内外的研究进展，明确自然资源的价值内涵和类别，并以此为基础确定本研究中核算的价值范围，建立起核算框架，分别从经济价值和生态价值展开具体核算。在经济价值的核算中，将森林蓄积量作为林木价值的计算基础，根据哨兵 2 号遥感数据，基于机器学习的思想选择多元线性回归，随机森林回归、人工神经网络进行建模估测，以市场价值法得出吉安市森林资源资产的经济价值。而生态价值则采取功能价值法与当量因子法相结合的模式，计算出评估对象的水源涵养、土壤保持、固碳释氧、净化大气功能量，进而得出生态价值。

本研究的主要结论如下：

（1）各蓄积量估测模型精度差异明显，森林资源资产全年经济价值较高，空间集聚特征明显。影像单波段发射率、纹理特征因子、植被指数、坡度与森林蓄积量的相关性均较为显著，坡向对森林蓄积量的影响则较小。此外根据样点建立的三种模型中，多元逐步回归模型表现最差；而人工神经网络模型精度较为理想；决策树个数和最大决策树深度分别为 200 和 3 的参数水平下的随机森林模型精度最高，建模效果最佳，可以作为吉安地区森林蓄积量估测工作的选择。测算出 2019 年吉安市森林蓄积量约为 1.30 亿立方米，经济价值约为 58.02 亿元。森林林木蓄积量及价值量较高的地区主要是分布在东西两侧罗霄山脉及雩山山脉所在区域，这些区域山脉分布广，林地面积大同时林木生长状况良好。

（2）森林资源资产提供了巨大的生态服务功能量。2019 年吉安市森林资源资产水源涵养量为 123.55 亿立方米；土壤保持功能量为 805.97 万吨，其中营养物质氮磷钾保持量分别为 64235.88 吨、10800.01 吨、127343.41 吨；森林资源资产年固碳量为 492.29

中国知网　https://www.cnki.net

万吨，释氧量 1318.00 万吨；年吸收 SO_2 功能量 25.79 万吨，年滞尘量为 3999.20 万吨。

（3）各类型生态系统服务价值高低差异显著。2019 年吉安市森林资源资产的生态价值总量为 356.67 亿元。固碳释氧价值最高，达 190.87 亿元，占全市生态总价值比重分别为 53.51%；其次是水源涵养价值，82.78 亿元，占比 23.21%；再次是净化大气价值，为 63.08 亿元，占比 17.69%；最少的是土壤保持价值，19.94 亿元，占全市生态总价值比重分别为 5.59%。

（4）总价值方面。2019 年吉安市森林资源资产经济和生态总价值达 414.69 亿元，其中经济价值 58.02 亿元，占总价值的 13.99%，生态价值 356.67 亿元，占总价值的 86.01%，生态服务相较于实物林木产品提供了更高的价值。森林资源资产单位面积价值为 22947.43 元/公顷。

本研究可以丰富网格尺度上的理论研究成果，为实现森林资源的保护与合理开发提供理论基础。另一方面，在相关核算领域，引入基于遥感技术的森林蓄积量评估是一种新方法。本研究可克服传统的森林资源经济价值数据基础的不足，引入基于遥感技术的森林蓄积量评估方法，在保证了研究数据精度的同时兼顾数据获取效率，对经济价值测算的基础——实物量进行测算，进一步创新现有森林资源资产价值核算方法。

关键词：森林资源资产价值；经济价值；生态价值；哨兵 2 号；随机森林回归

中国知网 https://www.cnki.net

Abstract

At present, global development has entered a new stage, the importance of natural resources in society is increasing, and the management of natural resources in various countries has taken a new step, forming models with their own characteristics in policy making, market building and system construction. As an important puzzle of natural resource assets, forest resource assets provide forest products and various ecosystem services for human beings and have irreplaceable values. This thesis takes forest resource assets in Ji'an City as the research object, starts from the value connotation of forest resource assets, builds a framework and system of forest resource asset value assessment based on both economic and ecological value perspectives, and introduces a forest stock identification method based on remote sensing technology, with a view to further broadening the research path on the basis of previous studies, innovating ideas and methods of forest resource asset economic value accounting, and at the same time providing support for The study aims to further broaden the research path on the basis of previous studies, innovate the ideas and methods of economic value accounting of forest resources assets, and provide support for the compilation of forest resources balance sheet to reflect the practical value of the study.

In the context of the new era, the value connotation of natural resources should be reflected in a new way, and even the unexploited natural resources have value as well. This thesis firstly compares the current research progress at home and abroad to clarify the value connotation and categories of natural resources, and on this basis, determines the value scope of the accounting in this study, establishes the accounting framework, and starts the specific accounting from economic value and ecological value respectively. In the accounting of economic value, forest stock is taken as the basis of forest value calculation, and based on the remote sensing data of Sentinel 2, multiple linear regression, random forest regression and artificial neural network are selected based on the idea of machine learning for modeling and estimation, and the economic value of forest resource assets in Ji'an City is derived by the market value method. The ecological value was calculated by combining the functional value method with the equivalent factor method, and the amount of water connotation, soil conservation, carbon sequestration and oxygen release, and atmospheric purification functions of the assessed objects were calculated, and then the ecological value was derived.

The main conclusions of this study are as follows:

中国知网 https://www.cnki.net

(1) The accuracy of each accumulation estimation model differs significantly, and the annual economic value of forest resource assets is high with obvious spatial clustering characteristics. The correlation between image single-band emissivity, texture feature factor, vegetation index, slope and forest stock is significant, while the effect of slope direction on forest stock is small. In addition, among the three models established based on the sample points, the multiple stepwise regression model performed the worst; while the artificial neural network model had better accuracy; the random forest model with the number of decision trees and the maximum decision tree depth of 200 and 3, respectively, had the highest accuracy and the best modeling effect, and could be used as the choice for forest stock estimation in Ji'an. The final result is that the forest stock in Ji'an in 2019 is about 130 million cubic meters, and the economic value is about 5.802 billion yuan. The areas with high forest stock and value are mainly distributed in the areas where the Luoxiao Mountain Range and the Summer Mountain Range are located on the east and west sides, and these areas have a wide distribution of mountains and a large woodland area as well as good forest growth conditions.

(2) Forest resource assets provide huge amount of ecological service functions. 12.355 billion cubic meters of water connotation; 8.0597 million tons of soil conservation function, of which 64,235.88 tons, 10,800.01 tons and 127,343.41 tons of nutrient nitrogen, phosphorus and potassium are maintained respectively; annual carbon sequestration of forest resource assets in 2019 is 4,922,900 tons and 13,180,000 tons of oxygen release; the annual SO2 absorption function is 257,900 tons and the annual dust retention is 39,999,200 tons.

(3) The difference in the high and low value of each type of ecosystem services is significant. the total ecological value of forest resource assets in Ji'an City in 2019 was 35.667 billion yuan. The value of carbon fixation and oxygen release is the highest, amounting to 19.087 billion yuan, accounting for 53.51% of the total ecological value of the city, respectively; followed by the value of water connotation, 8.278 billion yuan, accounting for 23.21%; again, the value of purifying the atmosphere, 6.308 billion yuan, accounting for 17.69%; the least is the value of soil conservation, 1.994 billion yuan, accounting for 5.59% of the total ecological value of the city, respectively. 5.59%.

(4) In terms of total value. the total economic and ecological value of forest resource assets in Ji'an reached 41.469 billion yuan in 2019, of which the economic value was 5.802 billion yuan, accounting for 13.99% of the total value, and the ecological value was 35.667 billion yuan, accounting for 86.01% of the total value, with ecological services providing a higher

中国知网 https://www.cnki.net

value compared to physical forest products. The unit area value of forest resource assets is 22,947.43 Yuan/ha.

This study can enrich the theoretical research results on the grid scale and provide the theoretical basis for realizing the protection and rational development of forest resources. On the other hand, the introduction of remote sensing technology-based forest stock assessment is a new method in the related accounting field. This study can overcome the deficiencies of the traditional data base of economic value of forest resources, introduce the method of forest stock assessment based on remote sensing technology, ensure the accuracy of research data while taking into account the efficiency of data acquisition, measure the physical volume, which is the basis of economic value measurement, and further innovate the existing method of forest resource asset value accounting.

Key Words: Forest resource asset value; Economic value; Ecological value; Sentinel 2; Random forest regression

中国知网 https://www.cnki.net

目 录

1 绪论.....1
1.1 研究背景.....1
1.2 研究目的与意义.....2
1.2.1 研究目的.....2
1.2.2 研究意义.....2
1.3 研究内容.....3
1.4 研究技术路线.....3
2 研究综述.....5
2.1 自然资源与森林资源资产价值内涵研究进展.....5
2.2 森林资源资产经济价值研究进展.....6
2.2.1 森林资源资产经济价值核算研究进展.....6
2.2.2 基于遥感技术的森林蓄积量识别研究进展.....7
2.3 森林资源资产生态价值研究进展.....9
2.3.1 森林生态系统服务功能研究进展.....9
2.3.2 生态价值评估方法进展.....10
2.4 研究评述.....11
3 研究区概况及数据来源.....13
3.1 研究区概况.....13
3.1.1 地理位置.....13
3.1.2 自然条件.....13
3.1.3 社会经济概况.....14
3.2 数据来源.....14
4 理论基础与研究方法.....15
4.1 理论基础.....15
4.1.1 马克思劳动价值理论.....15
4.1.2 效用价值论.....15
4.1.3 生态系统服务功能价值论.....15
4.1.4 可持续发展理论.....16
4.2 研究方法.....16
4.2.1 直接市场法.....16
4.2.2 多元逐步回归模型.....16
4.2.3 人工神经网络模型.....17
4.2.4 随机森林模型.....17
4.2.5 生态系统服务功能量法.....17

中国知网 https://www.cnki.net

5 森林资源资产价值评估框架的构建 19
5.1 评估原则.....19
5.2 评估指标及方法的确定.....19
5.2.1 经济价值.....19
5.2.2 生态价值.....20
5.3 评估框架示意图.....22
6 吉安市森林资源资产价值评估 24
6.1 经济价值评估.....24
6.1.1 森林蓄积量估测.....24
6.1.2 林木价值评估.....36
6.2 生态价值评估.....37
6.2.1 水源涵养价值.....37
6.2.2 土壤保持价值.....40
6.2.3 固碳释氧价值.....44
6.2.4 净化大气价值.....47
6.2.5 生态价值小结.....49
6.3 总价值核算.....53
7 结论与讨论.....55
7.1 研究结论.....55
7.2 创新点.....56
7.3 不足与展望.....56
参考文献.....58

中国知网 https://www.cnki.net

1 绪论

1.1 研究背景

自然资源不仅是国家发展之基、生态之源、民生之本（张天培，2021），更对人类社会的存在与发展具有支撑意义。我国自然资源制度体系在长期的工作中不断丰富完善，制定了包括自然资源有偿使用制度、自然资源用途管制制度和自然资源许可制度在内的一系列制度，以制度为支撑点，让自然资源管理工作有据可依。

当前，全球发展进入新的阶段，作为支撑社会发展的重要砥柱，自然资源在社会中的重要性日益提升，全球各国关于自然资源的管理迈上新的台阶，在政策制定、市场搭建、体系建设方面形成各有特色的模式。我国同样如此，2013 年，党的十八届三中全会提出要“探索编制自然资源资产负债表，对领导干部实行自然资源资产离任审计”，这无疑是在治理方式和管理方式上的创新之举。2022 年，党的二十大报告中指出：尊重自然、顺应自然、保护自然是当前我国全面建设社会主义现代化国家的内在要求，要坚持山水林田湖草沙一体化保护和系统治理，为新时期的自然资源管理指明了方向。在党中央和政府的领导下，我国形成了富有中国特色，人与自然和谐共生的自然资源管理体系。当前我国正在进一步探索自然资源资产有偿使用和生态补偿、生态产品价值实现机制等制度，这需要传统的土地资源管理向自然资源管理进行转变。

社会发展掀开新的篇章，对应地，自然资源同样具有时代性意义（黄贤金等，2019），也有了新的工作要求。进行自然资源资产价值核算工作，有利于“摸清家底”，明晰当前自然资源现状，在此基础上有针对性地开发利用自然资源，实现开发与保护的协同，促进高质量发展。我国学术界对自然资源资产核算开展了包括森林资源（郭韦杉等，2021a）、矿产资源（何利等，2020）、水资源（石薇等，2021；贾亦真等，2022）、土地资源（王俊杰等，2021）和自然资源资产负债表（李雪敏，2021）等领域的研究，并取得了一定成果。森林资源资产作为自然资源资产的重要拼图，为人类提供林木产品和各类生态系统服务，具有不可替代的价值。但是在以往片面追求经济的快速发展而忽略自然资源和生态环境承载力的历史背景下，森林资源的管理与保护工作面临着数量与质量下降，生物多样性减少等严峻挑战。随着可持续发展、绿色发展、高质量发展观念的贯彻落实，森林资源管理与保护工作也迎来变革，国家对森林资源工作的重视上升到新的台阶，这要求我们的发展要站在新的高度，要站在全局系统的角度对森林资源进行谋划，统筹管理。做好森林资源资产价值评估工作是践行习近平“绿水青山就是金山银山”理念的重要体现，是探索“两山转化”实现路径的关键举措，也是全面建成社会主义现代化强国

中国知网 https://www.cnki.net

的工作要求。

江西省作为生态大省，2022 年在全省 166900 平方公里的辽阔大地上实现了 63.35%的森林覆盖率，位居全国第二，而吉安市位于江西省中部，赣江中游，生态条件优越，全市森林覆盖率高达 67.67%，市域内森林资源丰富，储量多、种类全，价值高。同时吉安市也是江西省重要的生态示范区、水源涵养区、生物多样性维护区和生态山地丘陵地区旅游示范区，具备一定典型样区意义。

1.2 研究目的与意义

1.2.1 研究目的

本文以吉安市森林资源资产为评估对象，从森林资源资产的价值内涵出发，基于经济及生态价值双重视角构建森林资源资产价值评估框架及体系，引入基于遥感技术的森林蓄积量识别方法，以期在前人研究的基础上进一步拓宽研究路径，创新森林资源资产经济价值核算思路及数据采集方法。

此外，生态价值同样是森林资源资产价值核算工作不可或缺的一部分，但生态价值是一个系统性的价值，怎么确定森林资源的生态价值？本文基于生态系统服务功能量法，从网格尺度，评估森林资源资产各项生态系统服务价值，对此问题进行回答。

最终以完整的评估体系、过程和结果为完善全民所有森林资源资产清查工作提供新的参考，为吉安市森林资源资产管理提供数据基础和评定依据。

1.2.2 研究意义

(1)实践意义

本研究可以为森林资源资产负债表编制提供支持。森林资源资产作为自然资源资产的重要拼图，深入做好森林资源资产的价值核算，可以推动森林资源资产负债表编制的实践工作。本研究以实物量为基础，以价值量为成果，进行森林资源资产价值评估，研究所得结果可以作为森林资源资产负债表编制提供参考，对完善全民所有自然资源资产清查工作安排等具有重要意义。同时，基于遥感技术的蓄积量估测目前已形成较为完整的技术和理论体系，研究估测结果精度较高，具备现实可行性，是新时代森林蓄积量估算工作的有益探索。本研究对森林蓄积量的遥感估测研究的探索有利于自然资源统一调查监测技术体系，为自然资源调查监测信息自动处理平台的构建提供参考（陈军等，2022）。另外，当前我国正在进一步探索自然资源资产有偿使用和生态补偿、生态产品价值实现机制等制度，这需要传统的土地资源管理向自然资源管理进行转变。目前自然资源资产出让的试点均需要在生态价值得到体现，本研究可以为相关工作提供有效支持。

中国知网 https://www.cnki.net

(2)学术价值

本研究有利于丰富森林资源资产价值核算体系。近几十年来，专家学者对森林资源资产价值不间断的探究取得了许多理论成果，主要集中在森林资源资产价值分类方法、评估模型，评估方法等方面，但在核算体系建设的探索方面尚未形成统一的认识。因此本文在前人研究的基础上，结合对森林资源资产价值内涵的界定，从评估可操作性的角度出发，构建涵盖经济和生态价值的核算体系。同时在研究尺度上，以网格为评估单元填补尺度上的缺口，进一步丰富森林资源资产价值核算体系。

另一方面，目前在核算研究领域，引入基于遥感技术的森林蓄积量评估方法是一种崭新的模式。传统的森林资源经济价值核算数据选择多直接采用林业调查数据，本研究在经济价值的测算中，引入基于遥感技术的森林蓄积量评估方法，在保证了研究数据精度的同时兼顾数据获取效率，对经济价值测算的基础——实物量进行测算，进一步创新现有森林资源资产价值核算方法。

1.3 研究内容

首先，明确界定本研究中的自然资源资产和森林资源资产，森林资源资产价值等相关概念，对研究理论基础进行阐述；在价值内涵和理论基础上，以吉安市森林资源资产为研究对象，构建森林资源资产价值评估框架，确定具体核算方法；

其次，基于哨兵 2 号数据，结合林业二调小班数据，采用多元逐步回归模型和随机森林模型以及人工神经网络模型分别进行建模估算 2019 年吉安市森林蓄积量，并以此为基础进行森林经济价值的计算；

最后，从水源涵养、土壤保持、固碳释氧和净化大气等四个生态系统服务功能评估 2019 年吉安市森林资源资产的生态价值。

1.4 研究技术路线

本研究主要分为五部分，按照提出问题，解决问题的思路。首先提出问题，确定选题的研究目的，思考其在当前背景下的理论意义与现实意义；随后对相关的研究进展进行梳理，明确自然资源资产和森林资源资产价值的内涵，并对其具体的评估内容进行详细分析，对现状及问题进行把控从而为本研究提供参考；再明确本次研究的相关理论以及方法，根据现有理论及方法确定具体的价值核算框架，探索理论创新和方法创新，最终完成本次价值评估并研究形成结论，解决问题。

森林资源资产价值评估所包含的内容是多方面的，又进一步地以具体类别的价值核算来体现，这是本研究分经济价值和生态价值来进行价值核算的核心思路。

中国知网 https://www.cnki.net

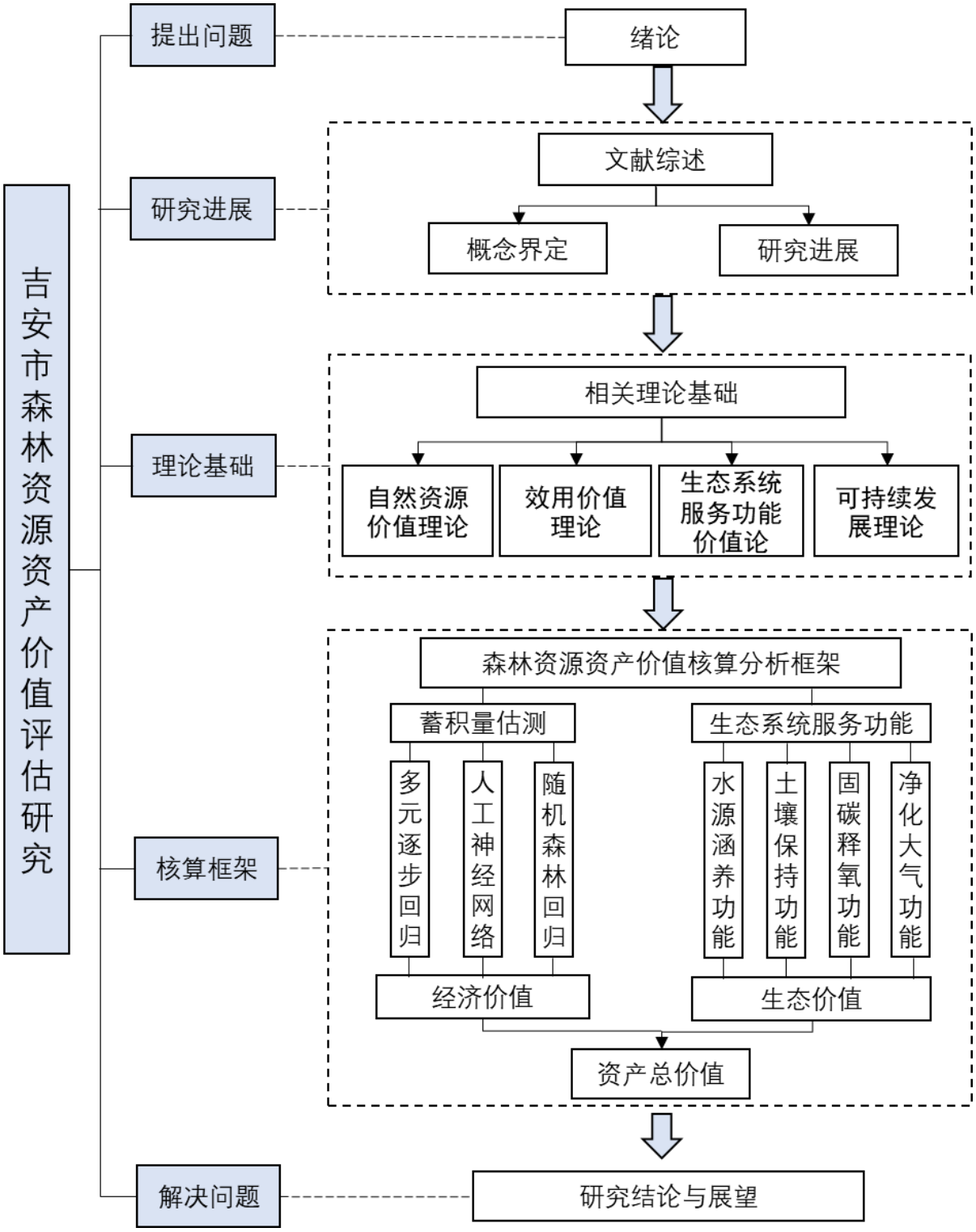


图 1.1 技术路线图

Fig. 1.1 Technology roadmap

中国知网 https://www.cnki.net

2 研究综述

2.1 自然资源与森林资源资产价值内涵研究进展

自然资源的定义上存在广义与狭义上的区分：广义上的自然资源包括了环境因素和生态条件等，而狭义上的自然资源只针对实物性资源。自然资源资产这一表述则是在自然资源的基础上引申而出的，这同样是一个尚未达成统一认知的概念。胡咏君等（2018）认为自然资源资产与自然资源没有本质区别，广义的自然资源资产就是自然资源，而《中国国民经济核算体系（2016）》中指出“自然资源资产是指纳入核算范围的具有稀缺性、有用性及产权明确的自然资源，包括土地资源、矿产资源、能源资源、林木资源和水资源等”。此观点得到较多学者的认可（朱道林等，2017；严金明等，2018；宋马林等，2022）。在国外，学者们对自然资源资产的特征：稀缺性（Barbier,2019）、有用性（Leach et al.,2019）、产权明晰（Helm, 2019）也有类似表述。综合国内外自然资源资产相关表述，郭韦杉等（2021b）对其概念进行辨析，发现在满足了稀缺性及产权明确的前置条件后，各类表述所包含的要素和组件是基本一致的，稀缺性及产权明确性也是自然资源资产最为根本的特征。本研究认为《中国国民经济核算体系（2016）》中给出的定义较为准确，在文中予以沿用，即自然资源资产是指产权明晰且具有稀缺性及有用性的自然资源。由于自然资源资产的多功能性，其价值内涵相应的也具有多重性，不仅包括实体的经济价值，也包括非实体的水源涵养、固碳释氧等生态价值及粮食安全，文化传承等社会价值，因而也有诸多学者将研究目光聚焦于自然资源资产的经济价值，生态价值，社会价值等方面，从这三个角度展开研究（谷树忠和李维明，2015；苏浩和吴次芳，2020；杨昔等，2020）。在生态文明发展的新阶段，谭荣（2023）关于自然资源资产提出了全新的价值逻辑，即自然资源不开发也具有价值，这从侧面体现出自然资源资产价值的多重性，不仅包含可开发的经济价值，还包括不可开发的生态价值和社会价值。综合上述内容，本研究将自然资源资产价值定义为具有稀缺性及有用性且产权清晰的自然资源，为人类提供的生态，经济及社会效益的总和。

森林资源占据了地球陆地面积的 32%，是自然资源的主要组成部分，不仅给人类社会生产生活提供大量重要的物质生产资料，也对人类的生活有着非物质层面的影响。学术界关于森林资源价值的认识是一个循序渐进的过程。马克思劳动价值论认为价值由人类投入的无差别劳动决定，依此理论，早期的学者们认为未经人类劳动的森林资源是没有价值的。但随着理论和实践的完善，学者们对森林资源价值的探讨不再拘泥于劳动价值论，学者们逐渐认识到森林资源不仅具有使用价值，同样具有价值，就算是未经开发

中国知网 https://www.cnki.net

的森林资源也同样如此。随着制度及理论的进一步丰富，对森林资源资产价值内涵的认知逐渐形成以下三种观点：一是从森林资源的功能角度出发，认为森林资源价值由使用价值和非使用价值构成（高云峰，2005），值得注意的是这种观点将生态服务的价值也归入了使用价值，不过目前使用价值与非使用价值的划分方式已经较少应用于整个森林资源的价值评估，更多的应用于森林游憩价值的评估；二是将森林资源资产价值分为直接价值和间接价值（苏军德等，2021），直接价值主要指现存的林木价值和林下产品净现值，间接价值主要指生态系统服务的价值；三是将森林资源资产价值分为经济、生态、社会三个方面的价值（郑沛等，2020；欧朝蓉，2020），它不仅为人类提供以木材产品为主的经济价值，也为人类提供固碳释氧、水土保持、气候调节、生物多样性保护等生态价值以及景观游憩和文化服务等社会价值（时少华等，2022；Bsch et al.,2019）。

从早期森林资源无价值论到如今的各种关于森林价值的分类体系，凝聚了无数学者们的思考，也促成了理论与实践研究上的进步，但是仍有一些尚未解决的问题。例如在森林资源资产价值核算的具体内容、采用何种方法等方面上仍存在不少难点和争议。同时，考虑到森林资源资产的多方面性，涉及领域的多元性，在对森林资源资产价值研究探讨时，需要注意多学科的协同交叉研究和不同研究部门的综合协作（吴国雄等，2020）。本研究认为，在当前的发展趋势下，经济、生态及社会价值的分类体系更符合时代背景，因此本研究对森林资源资产价值的定义为森林资源为人类提供的经济、生态效益之和。由于社会效益外部性强，核算方法尚不成熟，因此本研究中对社会价值不予以探讨，只针对经济价值及生态价值进行评估。

2.2 森林资源资产经济价值研究进展

2.2.1 森林资源资产经济价值核算研究进展

广义上的森林资源资产经济价值指人类能通过森林资源获得的各类能够以货币量化的经济效益，狭义上的森林资源资产经济价值指林木产品在现在或未来市场中的交易价值，更多意义上是价格的体现。本研究中所指的森林资源资产经济价值为狭义的价值含义。

在国外，对森林资源资产价值的评估研究已有一段历史，最早是 19 世纪德国学者 Cotta 提出生产费用价法，将营造森林需要的费用与单利利息作为整体来量化林木价格，计算林木价值。1993 年联合国颁发了综合环境经济核算体系（SEEA），全球多国和地区的学者以此为参照进行了全面的自然资源资产价值核算，这其中也包括森林资源。在 SEEA 体系的影响下，美洲、欧洲等地相继颁发了林木资源价值的核算标准，资源环境

中国知网 https://www.cnki.net

核算逐渐从学术研究走向实际应用的领域。2003 年联合国统计署对 SEEA 体系进行更新，推荐森林资源估价采用市场价法和净现值法，并于 2012 年进一步完善。

在经济价值的评估研究已经形成一个较为成熟的工作流程体系，采用的方法包括直接市场法、收益法、还原法等等。依据森林资源清查数据, 对中国林地资源、林木资源的存量和流量进行了实物量与价值量核算, 形成了中国森林资源统计核算的技术体系（张卫民，2019）。李维长（2000）对多种评估方法进行分析，认为林地资产的价值评估采用收益现值法和现行市价法，林木资产价值评估宜采用成本方式的评价方法和收益方式的评价方法是比较理想的选择。谢哲根等（2016）引入序列林价理论，综合应用成本法、收益法、市场法 3 种评估方法，对浙江省龙泉市杉木用材林价值进行评估。陈安琪（2017）指出传统资产评估方法在实践中忽略了林木资产所包含的选择权，而实物期权法能够反映不确定性带来的柔性价值，在一定程度上弥补了传统评估方法的缺陷，因此基于实物期权法对吉安东固林场森林资源价值进行评估，并与传统方法进行对比。郭韦杉等（2021）考虑了资产的存量属性及价值的跨期实现问题，认为自然资源资产价值核算中价格的确定尤为重要，因此基于资产定价原则进行推导出价格计算公式，确定核算中的价格基准，以此为基础估算出陕北佳县林木的经济价值。

无论是何种评估方式，都有一个重要的基础——实物量，正如朱道林等（2019）所说“自然自然资源资产核算应以实物量核算为主、以价值量核算为辅”，价值量的计算应以实物量为基础。因此，如何快速获取实物量数据，是开展价值核算的基础。本研究重点探讨如何利用遥感技术等多源数据，识别出吉安市森林蓄积量作为实物量，而后评估森林的经济价值。

2.2.2 基于遥感技术的森林蓄积量识别研究进展

在本研究中，基于遥感技术的森林蓄积量估测结果是评估经济价值的数据基础，因此将相关研究进行梳理如下：

综合国内外研究可以发现，目前学术界使用的遥感数据可以分为三类：光学遥感数据、微波遥感数据及多源遥感数据。光学遥感数据是国内外学者们进行森林蓄积量估测的常用数据，为国内外广大学者所选择，主要数据类别有 Landsat（龙依等，2021）、哨兵 2 号（Mura et al.,2018）等，与其他两类遥感数据相比，它数据来源获取简单，成本较低，具有良好的普适性。微波遥感数据相比于传统的光学遥感数据更具优势，可全天候、全天时地获取图像和数据，并且由于它具有更好的穿透性，发射的微波可以深入林层，因此获取的数据更为精准（刘兆华，2021）。机载激光雷达是主动式微波遥感技术的一种，适用于收集大范围森林数据，在国外森林调查工作中提供了有力支持（Bottalicoa

中国知网 https://www.cnki.net

et al., 2017 ; Nilsson et al., 2017 ; Strimbu et al., 2017）。国内学者同样使用机载激光雷达数据开展了森林蓄积量估测研究，结果也取得较高精度（孙忠秋等，2021；金京等，2021），但是其成本较高，不适宜大面积的测算。

哨兵 2 号卫星携带有一枚多光谱传感器，分辨率达到 10 米，能够提供有关农业种植相关的监测信息，同时对于监测森林植被也有显著的作用。当前国内外学者基于哨兵 2 号数据对森林蓄积量估测展开了诸多尝试。Mura 等（2018）在研究中采用哨兵 2 号和 Landsat 8 OLI、Rapid Eye 扫描仪数据对意大利的两个研究区采用最近邻法进行蓄积量估测，研究发现哨兵 2 号的精度要高于另外两类数据。陈松（2020）等结合哨兵 2 号卫星影像与机载 LiDAR 数据建立联立方程组建模反演，验证了基于哨兵 2 号卫星影像两种数据组合估测的可行性。在对内蒙古地区的森林蓄积量估测研究中，庞晓燕等（2021）采用哨兵 2 号数据同样取得了较好的估测结果。综合国内外研究来看，基于哨兵 2 号数据的森林蓄积量估测已形成较为完整的研究体系，其研究结果相比较传统的多光谱影像数据精度更高，当前哨兵 2 号卫星影像是遥感估测森林蓄积量的理想选择。

预测反演模型的选择正在由单一走向多元。传统的森林蓄积量估测主要是依据研究区样地的坡向坡度信息以及遥感影像的波段信息进行回归分析，建模方法主要以线性回归为主。李崇贵等（2006）著作的《森林蓄积量遥感估测理论与实现》介绍了最小二乘估计、岭估计以及稳健估计三种线性回归的模型，这是我国在遥感估测森林蓄积量领域较早的探索。实践证明这种方法具备一定普适性，直到如今很多学者的研究中都能看到此方法的运用，同样基于这个思路，王佳等（2014）采用多元线性回归模型，基于样地数据与资源三号卫星、地形因子信息分别对针叶林和阔叶林进行蓄积量估测，所得模型均通过显著性检验。随着研究的慢慢深入，学者们认识到由于实际应用中蓄积量与遥感因子之间是否存在线性关系是不确定的，他们开始将机器学习的算法引入森林蓄积量的遥感估测之中（Esteban, et al,2019; Charmakar, 2021; Mura et al.,2018），以提高森林蓄积量估测模型精度。同时学者们不再局限于单一的模型方法，尝试在研究中使用多种模型相互补充，优中选优。曹霖等（2018）在研究中采用多元线性回归，偏最小二乘法，随机森林，支持向量机等 4 种不同的回归建模方式反演蓄积量，研究表明随机森林法的预测结果精度最高。肖越（2021）采用 5 种模型分别采用两套遥感数据分别对森林蓄积量进行估测, 最终支持向量机(SVM)算法在该研究 5 种蓄积量估测模型中取得了最佳的表现。Chirici 等（2019）结合多源数据,采取两种非参数（随机森林和 k-NN）和两种参数（多元线性回归和地理加权回归）预测方法对意大利中部地区森林蓄积量进行估测，结果表明模型辅助估算比 NFI 提供的基于原始数据的估算更精确。在信息技术逐步完善的当下，通过多种方法进行估测所花费的成本及精力也在慢慢下降，综合多元化方法的蓄

中国知网 https://www.cnki.net

积量估测在实践中的可行性进一步增强，数字应用技术平台的搭建，也必将加速这一过程。

2.3 森林资源资产生态价值研究进展

森林为社会和人类福祉提供了一系列有形和无形的服务（Ceccherini et al.,2020），有形服务通常指林木产品，无形服务则包括生态系统服务和社会服务。森林资源资产生态价值主要通过对森林资源的生态系统服务功能价值进行评估来确定（殷楠等，2021）。森林生态系统服务功能是指森林生态系统与生态过程所维持人类来意生存的自然环境条件与效用（王兵，2019），而价值评估则是对其的货币化表达。

2.3.1 森林生态系统服务功能研究进展

《森林生态系统服务功能评估规范》（GB/T 38582-2020）提出从支持、调节、供给、文化服务等四个方面，九个具体类别展开生态功能的评估，国内很多学者则是从其中挑选出部分类别进行森林生态系统服务功能的评估（罗佳等，2022；孙庆祥等，2020），而本文则是选取水源涵养、土壤保持、固碳释氧、净化大气四个类别的功能开展评估。因此对相关研究做出梳理。

在水源涵养功能方面 InVEST 模型是当前使用比较广泛的方法，无论是国外还是国内，无论是大尺度还是小范围，不同的学者们采用 InVEST 展开了广泛的水源涵养研究，从美国印第安纳州（Wang et al.,2017）到我国河南淅川县（殷格兰，2017）再到汉江盆地（QI et al.,2019），在森林水源涵养量，价值量以及影响因素等方面取得了深入的进展。除此之外，遥感技术也被引入到森林水源涵养能力的评估，牛腾等（2022）、龙芊芊等（2022）基于植被光谱特征，分别对西藏林芝和雅鲁藏布大峡谷地区的森林水源涵养能力进行研究，探究不同植被类型对水源涵养能力的影响。进一步地，徐亚莉等（2023）结合多源遥感数据，使用尺度上推模型，分析植被因子和环境因子影响下的杂谷脑流域森林水源涵养功能特征和空间分布特征，为亚高山地区森林水源涵养功能的评估给出有益参考。

在土壤保持功能方面，当前水土流失方程模型和参照《森林生态系统服务功能评估规范》是比较主流的方法。水土流失方程是直接根据土壤可蚀性因子、坡长坡度因子等计算出流失量，董蕊等（2020）基于 CERN 从年际变化和空间特征对国内各典型森林生态系统的土壤保持能力进行了测算。实质上 InVEST 模型的土壤保持模块也是基于优化后的水土流失模型去进行评价（邹文涛，2020），例如周彬等（2010）基于 InVEST 模型对北京市山区各类型林地土壤保持能力进行了分析。另一方面，许庭毓等（2021）和张

中国知网 https://www.cnki.net

心语等（2022）在研究中，参照《森林生态系统服务功能评估规范》给出的核算公式，分别对辽宁省和雄安新区的森林固土保肥能力进行评估。

在固碳释氧功能方面，森林的固碳释氧价值是其生态价值体现的重要一环。在此领域森林的碳储量一直以来都是学者们研究的热点（Charmakar S，2020），而专门的释氧能力研究较为少见，通常是以 NPP 为基础，和固碳能力一同进行评估。有学者对非洲热带山地森林的高地上的碳储量进行了探索，非洲热带森林以不到全球陆地面积的 10%的覆盖，储存了 40-50%的陆地植被碳，并贡献了超过三分之一的初级生产力，该研究进一步揭示了发现其在不同空间，不同海拔高低的变化（Cuni-Sanchez, A，2021），而在国内，关于森林固碳能力的探讨也是长期的焦点。胡峻嶍等（2019）基于生物量和转换系数，确定四川省乔木层碳储量。冯源等（2020）从长期时间尺度上评估了 2009—2030 年湖北省兴山县森林生态系统总、净固碳释氧服务价值的时空变化。随着“双碳”战略目标的提出，关于森林固碳功能的研究也愈发火热。张祥华等（2022）分三个阶段，结合边际减排成本理论对我国森林固碳量成本的跨期分配测算最优方案，推动碳中和实现。

在净化大气功能方面，国内外学者也有广泛而深入的研究进展，从大尺度到小尺度，从国家到具体山脉，研究内容包括功能量、价值量、影响因素、空间特征等等。Song 等(2016)在评估韩国森林净化空气功能价值时，将人口密度作为影响其服务价值的重要社会因素。丛日征等（2017）以省级行政区为尺度以陕西省森林为研究对象，唐茜（2019）以重庆市歌乐山森林为研究对象，选择提供负离子、吸收污染物、滞尘 3 个指标展开大气净化功能的评估，由于地区及尺度的差异在功能总量上虽无法比较，但分森林类别的净化大气功能是存在相似特征的。随着生态文明建设的逐步落地，人们对于空气质量的关注度与日俱增，在学术领域，关于陆地上广袤森林的净化大气功能的研究也会迎来更多的关注。

2.3.2 生态价值评估方法进展

当前国内外对森林生态系统服务功能价值的评估主要采取两种方法：功能价值法及当量因子法。功能价值法是一种基于实物量的价值评估方法，以森林为例就是通过对森林生态系统所形成或提供的各种实物量进行量化，再细化其具体价值。在这一方面，国家林业局批准发布的《森林生态系统服务功能评估规范》(LY/T1721-2008)给国内学者提供了可供参考的评估体系，并在之后持续更新，目前最新的是 2020 年发布的规范。在《森林生态系统服务功能评估规范》指导下，国内学者们结合森林资源清查数据和相应的生态学参数，计算出森林资源资产各类生态服务的物质量，或者说功能量，进而计算出价值量。在实践工作中，技术条件的飞跃发展让森林生态系统定位研究网络(CFERN)

中国知网 https://www.cnki.net

台站数量在国内逐渐得到普及，这给相关研究提供了技术支撑和保障，也带来了极大的便利。另一方面随着学者们对生态服务功能运行机理研究的深入，不同森林类型的单一生态服务功能价值以及单一树种的不同林龄的变化过程对森林资源价值的影响也取得了精而深的研究成果（裴厦等，2015；Sutherland et al.,2016）。通过功能价值法评估得到的一般是森林资源某一时点的静态价值，但外部条件是变化的，为了能在动态评估中得到更科学的结果，很多学者在原有功能价值法的基础上进行优化，利用修正系数实现对森林生态系统服务价值进行动态评估。例如 Li 等（2017）在动态研究中引入空间异质性系数、资源稀缺性系数以及社会发展系数，用于比较不同规模的森林生态服务价值。各学者的研究结果表明，总体而言，功能价值法评估结果精度较高，可操作性较强。

而当量因子法最早应用当量因子法的学者是 Costanza（1997），分 17 种功能首次估算了全球的生态系统服务价值。我国学者谢高地（2003）结合国内外研究提出了“中国陆地生态系统服务价值当量因子表”，此方法的实质是以专家知识为基础来进行打分，量化价值。另外他指出当量因子的确定是一项成体系的工作，不仅受经济发展水平的影响，还受到降水量多少、土壤性质、植被指数、地形等因素的影响。依据此理论，谢高地在 2015 年对此前的成果进一步完善修正，使森林生态系统服务的价值能在时间、空间、社会和经济等不同维度下得到量化，通过将当量因子表与时空动态调节因子相结合，实现动态评估的目的。修正后的价值当量因子表包括 6 个一级类，森林就是其中之一，并且细分成了四种类型，这为后续学者们的研究提供了参考（张占忠等，2022）。当量因子法在实际应用的过程中较为简单，对数据要求小，特别适用于区域和大尺度的评估。而原有的静态的当量因子法也在逐步地发展中纳入将动态因子纳入评估体系，使得它一定程度上实现了对生态系统服务价值的动态评估，增强了实用性。但是当量因子表归根到底仍然是依据专家经验进行量化的，主观性较强，相对而言评估结果的精确性还存在一些不足。

考虑到两种方法的优缺点，本研究以功能价值法为主，适当结合当量因子法，以完成对吉安市森林资源资产生态价值的系统评估。

2.4 研究评述

前人的研究已取得较为丰富的成果，在价值内涵、经济价值核算、生态价值核算等方面探索出了比较成型的道路，为现有森林资源资产价值的核算研究提供了坚实的基础。通过对既往相关研究的梳理，总结出以下要点：

（1）对森林资源资产价值的评估具有重要的实践价值和理论价值，学术界对森林资源资产的价值内涵，价值分类进行了全面探讨。在新时代背景下，自然资源的价值内

中国知网 https://www.cnki.net

涵应有新的体现，即使是未经过开发的自然资源同样具有价值，但目前自然资源价值内涵界定的相关理论研究还需深入，需明确如何进一步在马克思劳动价值论与效用价值论的基础上形成新时代的更为科学合理的自然资源资产价值理论体系。

（2）在森林资源资产价值核算方法上还需进一步完善。森林资源的经济价值和生态价值，需采用不同的核算方法。经济价值主要是林地及林木产品的价值，其核算的重要基础为实物量，主流方法为基准地价法和市场价值法；对森林资源资产生态价值的核算，当前主要有功能价值法及当量因子法，随着遥感技术等地理信息工具的应用和发展，功能价值法的完善程度也在逐步提高。但是在核算标准，核算流量或者存量仍未统一，甚至在同一文章内也会有混淆，如何确定核算方法的选择，如何进行现有方法的完善这是在后续研究中亟待解决的问题。

（3）经济价值的研究更需要创新。关于森林资源的价值，目前学术界更为关注的是生态价值，尤其是在加快生态文明建设，“双碳”目标的时代背景下，更是吸引了大部分学者的注意，进展迅速。而关于经济价值的研究则进展缓慢。经济价值的核算不仅要关注产品价格的确定，同时也可以从研究数据，研究路径着手实现新的突破。对于森林经济价值的核算，另一关键点在于实物量基础，现有研究多直接采取林业清查提供的蓄积量数据，存在一些不足之处。基于遥感数据的森林蓄积量估测，为经济价值的核算提供了新的思路，这也是本研究进行基于遥感技术的森林蓄积量估测研究的重要原因。

中国知网 https://www.cnki.net

3 研究区概况及数据来源

3.1 研究区概况

3.1.1 地理位置

吉安市是江西省下辖地级市，位于江西省中部，属赣江中游地区，赣江航道贯穿境内。地理位置介于北纬 25°58'32"~27°57′50"、东经 113°46′~115°56′之间，东西宽约 208 公里，南北长约 218 公里，面积 25283 平方公里，下辖 2 区 10 县 1 市。如图 3.1 所示。

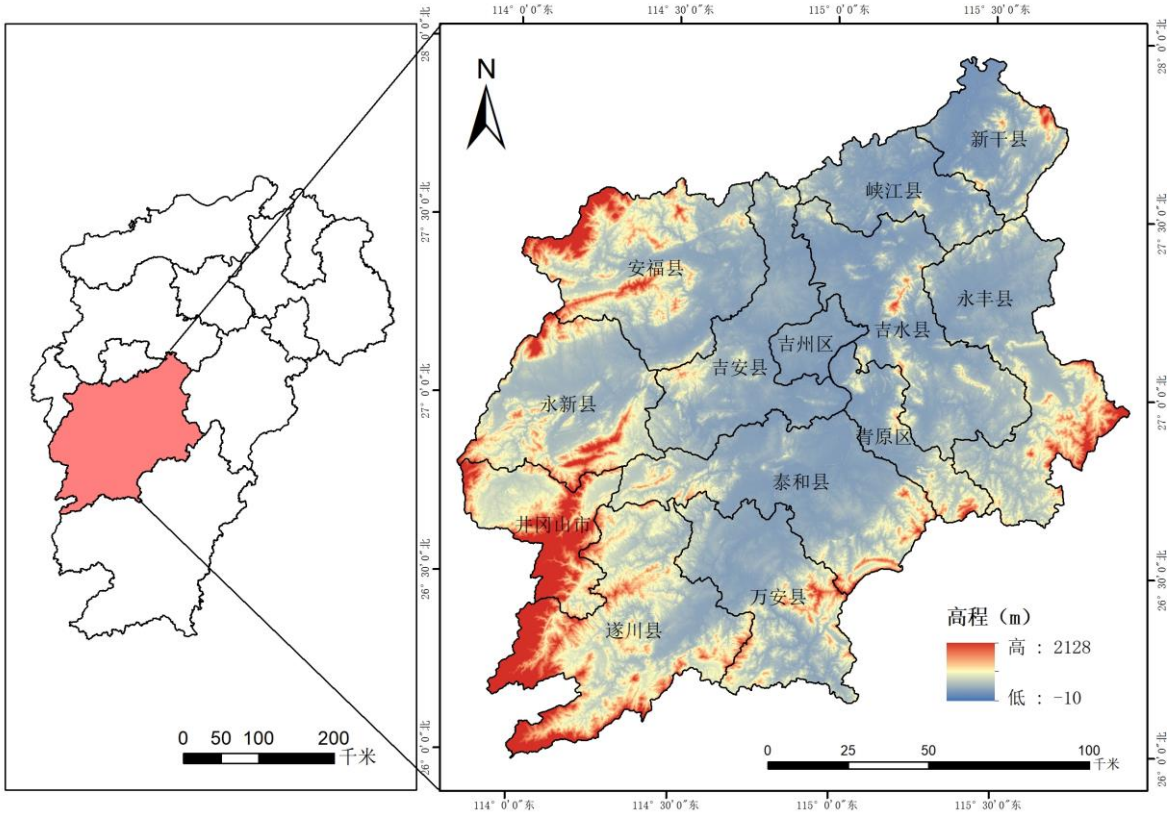


图 3.1 吉安市区位示意图

Fig. 3.1 Diagram of the location of Ji'an City

3.1.2 自然条件

吉安市属亚热带季风气候，高温天气和雨季集中在夏季，冬季气候温和，降雨较少，全年四季分明。境内主要为山地丘陵盆地地貌，分中山、低山、高丘、低丘、岗阜台地、河谷平原、谷盆地七类，面积占比分别为 7.59%、21.17%、17.86%、27.89%、7.53%、17.37%、0.59%。低丘是境内分布最广的地貌类型，占总面积的 27.89%。雩山山脉和罗

中国知网 https://www.cnki.net

霄山脉分列东西两端。

根据 2019 年林业二调数据，吉安市 2019 年林业用地面积约 27106957 亩，约占全市国土面积的 71.48%，全市森林覆盖率达 67.67%。境内主要野生植物有 3513 种，占全国总数的 11％。其中列入《国家重点保护野生植物名录（第一批）》的植物有 55 种，列入《江西省重点保护植物名录》的植物有 163 种。

3.1.3 社会经济概况

2019 年吉安市地区生产总值总共 2085.41 亿元，较 2018 年增长 8.1%，其中以第二产业和第三产业为主，增加值占比分别为 45.33%、44.39%，第一产业增加值占比 10.28%。全年进出口总额 490.84 亿元，增长 27.8%，全年全市完成社会消费品零售总额 576.48 亿元，增长 12.1%。年末全市常住人口为 495.97 万人，全年全市农村居民人均可支配收入 15227 元，城镇居民人均可支配收入 37543 元。

3.2 数据来源

研究所用数据主要包括 2019 年哨兵 2 号遥感影像数据、土地利用数据、DEM数据、降水和蒸散发数据、林业二调数据和土壤数据等。其中Sentinel-2 遥感数据来源于欧洲空间局“哥白尼”计划网站（https://scihub.copernicus.eu/）；土地利用类型数据来源于武汉大学杨杰和黄昕教授团队；DEM（数字高程模型）数据来自地理空间数据云（http://www.gscloud.cn/）；降水量、蒸散发数据来自国家地球系统科学数据中心（http://www.geodata.cn/）；土壤数据来源于国家地球系统科学数据中心的世界土壤数据库(HWSD)；林业二类调查数据来源于吉安市林业局。

表 3.1 数据概况

Tab. 3.1 Data overview

数据名称	分辨率	数据来源	用途
Sentinel-2 遥感数据	10m	https://scihub.copernicus.eu	森林蓄积量估测
土地利用数据	矢量	土地利用变更调查数据库	水源涵养功能计算
高程和坡度数据	30m	地理空间数据云 GDEM 产品	森林蓄积量估测
降雨数据	1km	国家地球系统科学数据中心	水源涵养功能以及土壤保持功能评价
蒸散发数据	1km	国家地球系统科学数据中心	水源涵养功能评价
土壤类型数据	1km	世界土壤数据库	土壤保持功能计算
植物净初级生产力	500m	美国国家航空航天局	净化大气功能评价
林业二调数据	矢量	吉安市林业局	优势树种信息提取

中国知网 https://www.cnki.net

4 理论基础与研究方法

4.1 理论基础

4.1.1 马克思劳动价值理论

什么样的物品具有价值？按照马克思劳动价值论，回答这个问题首先要区分使用价值和价值，而产生这种区别的原因又在于劳动的二重性。马克思劳动价值论认为商品的使用价值由具体劳动决定，这里的具体劳动指的是人们在生产产品的过程中投入的实际劳动量。而价值则是由人类的无差别劳动决定的，这是一种抽象的劳动，这个活动过程就是商品价值形成的过程。使用价值是价值的基础，价值寓于使用价值。

4.1.2 效用价值论

效用价值论是根据物品对人们存在的效用大小、物品本身的稀缺性以及产生的边际效用来评价物品的价值量，对人类而言效用越大的物品越有价值。效用价值论可以对任意时点的现象进行解释。在此之前西方有研究对人类自身的需求、森林供给能力和价值量三者之间的关系进行了论证。由于自然资源的日益紧缺，人们为了保持生产经营和经济收益，选择对其加大投入，同时也产生了边际效益的变化，这让效用价值论在森林资源价值评估领域的运用提供了可能。

4.1.3 生态系统服务功能价值论

1970 年紧急环境问题研究所在提出服务概念的同时，也梳理出具有环境服务功能的自然生态系统：土壤形成、水土保持、气候调节等。之后，生态系统服务功能的内涵和构成研究成为学者关注的热点，影响最深远的当属 Costanza 等在《Nature》上发表的成果和 2001 年启动的千年生态系统评估。自此，国际生态研究热点转变为生态系统服务，且供给，调节，文化和支持等服务功能是生态系统服务的重要组成部分的观点得到广泛认同。

将经济法则融入自然资本领域是生态系统服务功能价值评估的基础，货币化估测生态系统服务功能的方法也逐渐得到应用。不同的生态系统服务评估方法具有不同的尺度研究，但是其基石依然是市场价值论和生态经济学原理。当量因子法与功能价值法是价值量评估的两种大致方法。当量因子法基于样本进行功能分析并识别不同类型自然资源的相同特征，受到 Costanza 和谢高地等学者的推广。通过不同生态系统服务的单位面积价值的确定，可以将各类因子系数换算为统一的标准“当量”。功能价值法的代表人物为

中国知网 https://www.cnki.net

欧阳志云。其首先具体分析不同生态系统服务的实际功能，然后再进行总结，一般运用代替市场法、直接市场法和模拟市场法等方法开展估测。

4.1.4 可持续发展理论

可持续发展理论核心在于在满足当前发展需求的前提下，又不影响后代人的长远福祉。考虑经济、生态和社会三个方面，既强调在发展中保持经济效率的持续性，同时也十分注重生态环境的问题，在理念贯彻中体现了社会公平正义。可持续发展理论既是人类在新世纪发展行为的理论基石，也是有效推进新时期环保工作的实践指南。其强调经济社会发展的压力要与自然环境承载力保持平衡，在经济社会发展的同时兼顾生态环境保护，用可持续发展的眼光和方法开发利用自然资源。为高效管理和利用森林资源，保障森林资源的生态价值，森林资源价值评估应更兼顾性的关注资源型资产本身所产生的经济与生态效益，并完善森林资源资产价值评估内容和范围。

4.2 研究方法

4.2.1 直接市场法

本文首先进行森林经济价值的核算，本文研究的经济价值仅限于林木价值，采用直接市场法计算。直接市场法是在观察企业生产经营过程基础上，对观察和量度的环境质量变化进行测算，度量被评价的环境质量与环境标准之间的变动，然后直接参考市场价格对这一变动的条件或结果进行测算的一类方法。采用直接市场法计算森林资源资产经济价值的公式为林木价值=森林林木市场单价×数量。

4.2.2 多元逐步回归模型

林木价值的计算以森林蓄积量为计算基础。本文森林蓄积量采用遥感估测，主要用到三种模型，一是多元逐步回归模型。

在进行回归分析时，如果自变量很多，其中有的因素可能对于变量的影响不是很大，而且 x 之间可能不完全相互独立的，可能存在种种互相作用的关系。在这种情况下可用逐步回归分析，进行 x 因子的筛选。

逐步回归是通过将变量逐步地引入模型，不仅对每个解释变量都进行一次 F 检验，还对已经选入的解释变量逐个进行 t 检验。如果先前引入的解释变量由于新解释变量的加入而使得相关性变得不再显著时，则将其删除，从而确保每次引入新的变量之前回归方程中只包含显著性变量。直到所有相关性显著的解释变量全部入选回归方程，且方程中不包含任何不显著的变量时，得到最优解释变量集。

中国知网 https://www.cnki.net

多元逐步回归模型操作便捷，可实现性强，具有很好的可解释性，但是对异常值较为敏感，对于非线性数据的建模效果较差。模型一般公式如下：

$$y = A_1x_1 + A_2x_2 + \cdots + A_ix_i + b \tag{4.1}$$

4.2.3 人工神经网络模型

二是人工神经网络，它是 1986 年由 Rumelhart 和 McClelland 为首的科学家提出的一种按误差反向传播(即误差反传)训练的多层前馈网络，其算法称为 BP 算法。从结构上讲，BP 网络主要包括输入层、隐藏层和输出层。输入层主要是输入数据；隐含层可以看做输入与输出之间的数据分析加工厂，通过各种参数（权重，偏差值）以及激活函数等其他数据处理方法与两边建立联系；输出层则用来输出结果。

整个模拟学习过程的主要原理包括信号的正向传播和误差的反向传播：输入层的神经元负责接受外界发来的各种信息，将其传递给隐含层神经元，隐含层神经元将接收到的信息进行处理变换，输出结果，这个过程就是 BP 神经网络的正向传播过程。而当实际输出与预期输出之间的误差过大时，就开始误差的反向传播的阶段，从输出层开始，误差按照梯度下降的方法对各层权值进行修正。通过不断训练，当输出的误差减小到可接受程度或者达到预先设定的学习迭代次数时，训练结束，BP 神经网络完成学习。

4.2.4 随机森林模型

三是随机森林模型。随机森林模型是一种典型的基于 Bagging 算法的机器学习模型，随机森林模型会在原始数据集中随机抽样，根据设置的 n 的数量构成 n 个不同的样本数据集，然后根据这些数据集生成多个不同的决策树模型，最后根据这些决策树模型的平均值（针对回归模型）或者投票情况（针对分类模型）来获取最终结果。其首先是一种并联的思想，同时创建多个树模型，并且相互之间是不会有任何影响，使用相同参数，其中最重要的参数是 n_estimators（决策树个数）和 max_depth（最大决策树深度）。

随机森林模型准确性高，训练速度快，对离散型数据和连续型数据都可以很好处理，同时训练过程中不会受缺失值影响，可以有效保证结果的精度。随机森林模型也存在一些缺点，一方面，当存在过多噪声数据时会过拟合；另一方面数据属性取值划分较多会对随机森林产生一定干扰。总体来说，比较适用于森林蓄积量的估测。

4.2.5 生态系统服务功能量法

生态系统服务指农田、森林等生态系统在正常状态下为保障自然生态环境和谐稳定所发挥的功能和作用。目前学术界通常将其分为调节、供给、文化和支持等四个功能。生态系统自身的规模与功能决定了这些服务功能的大小与作用。不同生态系统服务功能

中国知网 https://www.cnki.net

的价值量化方式是相异的，功能量法是生态系统单位功能价值化方法，在本研究中，对不同类型的生态系统服务功能采用了不同的价值化方法。其中水源涵养价值和土壤保持价值采用市场价值法，固碳释氧价值和净化大气价值采用影子工程法。

中国知网 https://www.cnki.net

5 森林资源资产价值评估框架的构建

5.1 评估原则

对森林资源资产价值评估框架的构建，设置以下原则：

科学性原则。对森林资源资产的价值评估是一项科学性、系统性的工作，所建立的评估指标框架应该是科学的、合理的。因此需要秉持科学谨慎的态度，构建以森林资源资产的价值内涵界定为基础的评估框架，进行合理的价值类别分类，例如本文分为经济价值和生态价值两个大类，根据类别设置评估框架，并对评估体系中的指标选取进行科学考量，选择具有代表性的指标进行细化。

定量分析与定性分析相结合的原则。森林资源资产提供的价值既包括有形的经济价值也包括无形的经济价值，要做好二者的兼顾，统一核算性质，明确是作为存量核算还是流量核算。评估过程中，要考虑到森林资源资产类型的多样性，在选择指标时要分有形资产的价值和无形资产价值选择不同指标分别进行量化。经济价值要以实物量为基础，生态价值要以功能量为基础，以确保森林资源资产价值评估结果的可靠性。

可操作性原则。森林资源资产价值评估工作需要考虑实际工作的时效性、评估精度和成本。因此在构建评估体系时需要综合考虑以下方面：数据的可获取性、研究区的实际情况以及评估方法的可实现性，避免出现数据难以获取和评估效果不佳的情况。并且本研究以吉安市为研究区，必须保证评估结果能够落实到各县、区，以便具体对各县（市、区）的相关情况进行统计和分析。

5.2 评估指标及方法的确定

5.2.1 经济价值

林木价值的评估主要分为两部分，一是林木实物量的评估，也就是森林蓄积量的确定，二是以实物量为基础的价值量计算。研究中对于以木材形式产生的价值在资产存量中予以扣除，仅计算其当年产生的流量价值，以便与生态价值的计算达成统一。

其中森林蓄积量在本研究中通过遥感估测的方法来确定，以 sentinel-2 卫星影像为底图，采用随机森林模型，人工神经网络模型和多元逐步回归模型，分别进行建模，最终选择最优模型进行蓄积量的估测，得到实物量。

价值量计算采用直接市场法，先获取研究区域内的森林蓄积量和平均出材率，再乘以市场价格。具体公式如下：

中国知网 https://www.cnki.net

$$Eu = M \times r \times v \times Pm \tag{5.1}$$

式中：Eu 为林木资源价值，M 为森林资源蓄积量，r 为木材平均出材率，v为蓄积量年均增长率，Pm为活立木市场销售价格。

5.2.2 生态价值

森林为社会和人类福祉提供了一系列有形和无形的服务，它不仅为人类提供木材产品，也为人类提供水源涵养、水质净化、土壤保持、固碳释氧和生物多样性保护等生态价值。

(1)水源涵养价值

森林水源涵养功能是指森林生态系统中林冠和枯枝落叶层对降水进行截留、渗透以及林地对降雨蒸散发的调控能力。本研究水源涵养部分主要测算生态系统调节水资源的服务功能。采用直接市场法，以吉安市中心城区自来水价格核定水源涵养服务价值，具体公式如下：

$$V_{ew} = WY \times P_w \tag{5.2}$$

式中：WY为水源涵养功能量；P_w为单位体积（立方米）水资源价格；V_{ew}为森林水源涵养价值。

其中，水源涵养功能量以网格尺度计算得到。采用当前应用广泛的水量平衡法（沈钰仟等，2020），基于 Budyko 水热耦合平衡原理，结合大气降水、蒸散发和植物有效利用水含量等指标，以降水量减去实际蒸散量计算得到单位面积生态系统内产水量，将其作为水源涵养服务功能量。具体核算可以运用 InVEST 3.8 water yield 模块实现，计算公式如下：

$$Y(x) = \left(1 - \frac{AET(x)}{P(x)}\right) \times P(x) \tag{5.3}$$

式中，$Y(x)$为栅格单元x的年产水量（mm）；AET(x)为栅格单元x的年实际蒸发量（mm）；$P(x)$为栅格单元x的年降水量（mm）。

$$\frac{AET(x)}{P(x)} = 1 + \frac{PET(x)}{P(x)} - \left[1 + \left(\frac{PET(x)}{P(x)}\right)^{\omega}\right]^{1/\omega} \tag{5.4}$$

$$PET(x) = K_c(x) \times ET_0(x) \tag{5.5}$$

$$W(x) = \frac{AWC(x) \times Z}{P(x)} + 1.25 \tag{5.6}$$

式中：$PET(x)$为栅格单元x的潜在蒸散量(mm)；$ET_0(x)$表示栅格单元x的参考作物蒸散量(mm)；$K_c(x)$为作物蒸散发系数；$AWC(x)$为土壤有效含水量(mm)；W（x）是表示自然气候土壤特性的参数，其含义为植被可利用含水量与降水量的比值；Z 为 Zhang 系数。

中国知网 https://www.cnki.net

(2)土壤保持价值

森林生态系统服务功能中的土壤保持功能，指的是森林林冠层、枯落物等各个层次消减雨水的侵蚀能量，从而减少土壤流失，保持土壤的功能（潘莹等，2021）。通过土壤持留，能够提供有利于作物生长发育的营养物质（N、P、K），而这部分营养物质的价值一定程度上可以体现土壤保持的价值。因此，土壤保持服务价值可以通过土壤保持量中的营养物质价值化予以实现。

$$V_{es} = \sum Q_{sm} \times Q_{ei} \times P_{ei}(i = N, P, K) \tag{5.7}$$

式中：Q_{sm}为土壤保持量；Q_{ei}为土壤中的氮（N）、磷（P）、钾（K）含量；Pei 为 N、P、K 的价格；V_{es}为森林土壤保持服务价值。

土壤保持量主要基于通用土壤流失方程（RUSLE）计算，主要公式如下：

$$A_{act} = R \times K \times L \times S \times C \times P \tag{5.8}$$

$$A_{pot} = R \times K \times L \times S \tag{5.9}$$

$$A_{soi} = A_{pot} - A_{act} \tag{5.10}$$

A_{soi}为单位面积土壤保持量，单位为 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$；$A_{act}$为单位面积实际土壤侵蚀量，单位为 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$；$A_{pot}$ 为单位面积潜在土壤侵蚀量，单位为 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$。$R$ 为降雨侵蚀力因子; K 为土壤可蚀性因子; L 为坡长因子；S 为坡度因子; C 为植被覆盖与管理因子；P 为土壤保持工程措施因子。

(3)固碳释氧价值

森林是生态系统中的重要一环，广袤的森林资源通过光合作用以及呼吸作用吸收二氧化碳，释放氧气，保持大气中氧气和二氧化碳达成动态平衡，这对于整个人类乃至生物圈的生存与发展具有举足轻重的作用。

森林的固碳释氧功能采取具体数值进行量化，每形成 1 吨干物质，就会从大气中吸收 1.63 吨 CO_2，同时将会释放出 1.19 吨 O_2，采取影子工程法，通过碳汇交易价格和工业制氧价格计算其固碳释氧价值，公式如下：

$$V_1 = U_C \times P_1 \tag{5.11}$$

$$U_C = 1.63 \times Ec \times B_{NPP} \tag{5.12}$$

式中：V_1为森林年固碳功能价值总量（元/a）；U_C为森林年固碳功能量；Ec为 CO_2 中碳的含量 27.27%；B_{NPP}为植物净生产力（$t/hm^2/a$）；P_1为碳汇交易价格（元/t）。

$$V_2 = U_O \times P_2 \tag{5.13}$$

$$U_O = 1.19 \times B_{NPP} \tag{5.14}$$

式中：V_2为森林年释氧价值量（元/a）；U_O为森林年释氧功能量；B_{NPP}为植物净生

中国知网 https://www.cnki.net

产力（t/hm^2/a）；P_2为工业制氧价格（元/t）。

(4)净化大气价值

森林能够有效吸收 SO_2、氮氧化物等多种对人体有害的气体；此外森林还拥有提供负离子、滞尘、滞纳 PM10 和滞纳 PM2.5 等功能，能够为提高人居环境和生活质量发挥巨大的作用（刘胜涛等，2019）。目前对森林生态系统净化大气的价值主要采用影子工程法。由于数据获取原因，本文只考虑森林吸收 SO_2 价值与滞尘价值。

吸收 SO_2 价值量计算公式为:

$$R_1 = Q \times A \times C \tag{5.15}$$

式中：R_1为森林年吸收 SO_2 价值量（元/a）；Q 为森林单位面积吸收 SO_2 实物量（kg/hm^2/a）；A 为林分面积（hm^2）；C 为 SO_2 治理费用（元/kg）；

再通过降尘的清理费用将实物量转化为价值量，其计算公式为：

$$R_2 = B \times Q \times A \tag{5.16}$$

式中：R_2为森林年滞尘价值量（元）；B 为清理降尘费用（元）；Q 为森林单位年滞尘量（kg/hm^2/a）；A 为林分面积（hm^2）。

5.3 评估框架示意图

本文研究框架如下：

从经济价值及生态价值两方面开展核算。一方面以 sentinel-2 卫星影像为基础，提取出单波段反射率、纹理特征因子和植被指数等因子，结合 DEM 数据，在多元逐步回归、人工神经网络和随机森林回归三种模型中择优选择，估算出森林蓄积量，以市场价格确定经济价值。

另一方面，以降水、土壤、蒸散发和 NPP（植被净初级生产力）数据为基础，采用 Invest 模型和栅格计算器，计算出水源涵养、土壤保持、固碳释氧和净化大气等功能的生态系统服务功能量，得到吉安市森林资源资产的生态价值。

最终将经济价值和生态价值汇总，得到吉安市森林资源资产总价值，并分行政区进行分析。

中国知网 https://www.cnki.net

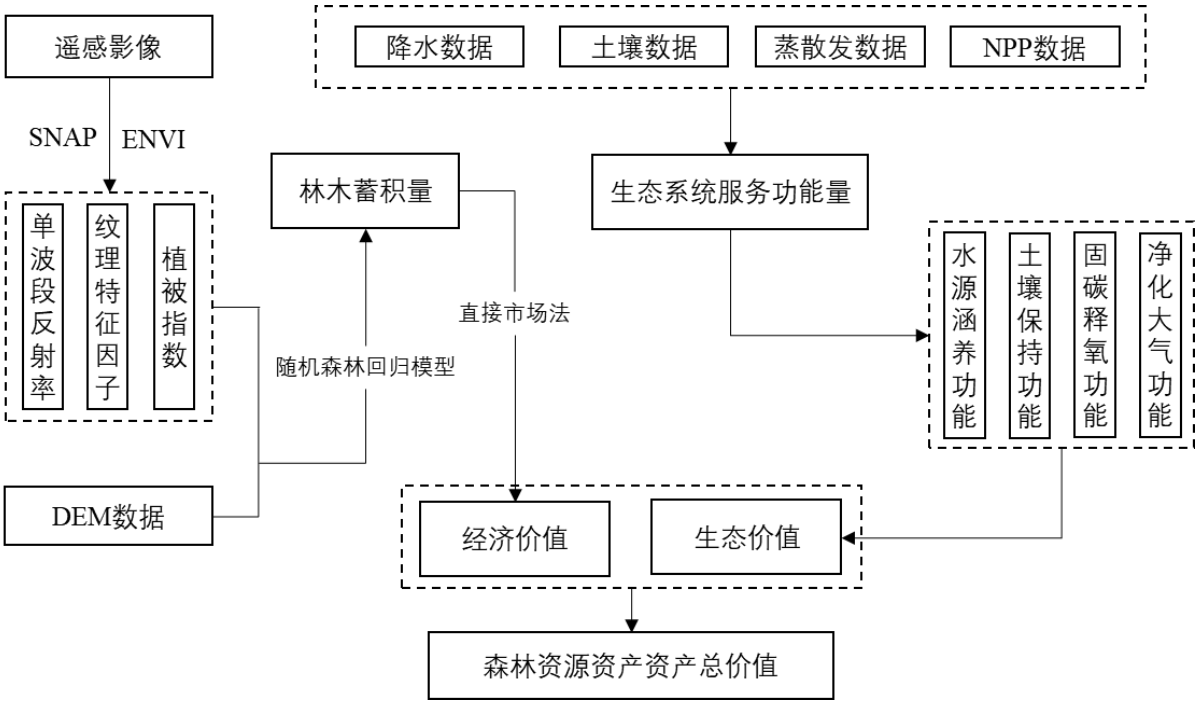


图 5.1 评估框架示意图

Fig. 5.1 Schematic diagram of the assessment framework

中国知网 https://www.cnki.net

6 吉安市森林资源资产价值评估

6.1 经济价值评估

经济价值是森林资源资产价值不可或缺的一部分，也是森林资源资产价值评估与分析的重要研究内容。本研究中森林资源资产的经济价值以林木资源的价值来衡量。其中林木的实物量（即森林活立木蓄积量）作为价值量核算的物质基础，在核算过程中的重要性不言而喻。

传统的森林蓄积量估算方式在大尺度区域的估测中需要大量的实地调查，工作量大，时间成本和经济成本较高，同时大尺度调查所采用的材积方程存在对县级以下范围的森林蓄积量估测难以取得准确结果的问题（曹霖等，2018）。而随着森林资源资产相关工作的推进，日益增长的评估需求使得成本、时间和空间等限制因素对调查工作的约束作用越发显著（邬紫荆、曾辉，2021）。

相比较而言，基于遥感技术的蓄积量估测只需运用少量样地数据进行估测，工作量小，时效性强，成本较低，且目前已形成较为完整的技术和理论体系，研究估测结果精度较高，具备现实可行性，是新时代森林蓄积量估算工作的有益探索。反演工作通常以林业二调工作的样地作为依据，因此本文首先根据哨兵 2 号卫星影像和林业二调矢量提取的样点信息，采用多元逐步回归，随机森林回归及人工神经网络三种方式，选择精度最高的模型估测出吉安市林木资源的实物量，再进一步以直接市场法核算其价值。

6.1.1 森林蓄积量估测

(1)影像预处理

研究所用影像为来源于欧洲空间局“哥白尼”计划网站（https://scihub.copernicus.eu/）的 Sentinel-2A 的 L2A 级卫星影像。哨兵 2 号（Sentinel-2）包含两颗卫星，分别为 Sentinel-2A 和 Sentinel-2B，相位差为 180°，两颗相同的 sentinel-2 卫星在平均海拔为 786 km 的太阳同步轨道上同时运行。其中 Sentinel-2A 卫星发射于 2015 年 6 月 23 日，卫星运行时间接近 8 年，该卫星影像覆盖 13 个光谱波段，幅宽达 290 千米。地面分辨率分别为 10m、20m 和 60m。其中 B2、B3、B4、B8 分辨率为 10m，分别为红绿蓝近红外波段，B5、B6、B7、B8A、B11、B12 分辨率为 20m，其余 3 个波段分辨率为 60m。研究区影像共由 8 景影像拼接而成，云量均小于 5%，时间跨度从 2019 年 10 月 19 日到 2019 年 11 月 21 日。

原始遥感影像通常存在辐射畸变问题。进入传感器的辐射强度在图像上表现为亮度

中国知网 https://www.cnki.net

值（或灰度值），辐射强度越大，亮度值就越大。当太阳辐射相同时，图像上亮度的差异直接反映了地面反射率的差异。而由于传感器本身的误差、大气对辐射的影响以及地形对辐射的影响，会使影像存在辐射畸变，需要进行辐射校正。当研究中需要用到地物反射时，就必须对大气和光照等因素有充分的考虑。而本文的研究中包括定量反演、精确识别地物等，需要使用影像上真实反映对太阳光的辐射情况，因此需要对原始影像进行大气校正。L2A 级影像已经进行了辐射校正、几何校正、正射校正和大气校正，可以直接用于研究。

由于哨兵 2 号影像数据采用了独特的数据保存格式，不能直接使用 ENVI 打开原格式数据，因此使用欧空局发布的专用软件 SNAP 重采样为 10m 分辨率的数据。此步骤一是可以在通过重采样将数据转换为 ENVI 可以打开的格式，二是将栅格大小统一为 10×10m，方便森林蓄积量单位的统一。而后使用 ENVI 进行镶嵌，将吉安市行政区内各帧影像组合为一幅完整影像，再根据行政边界进行按掩膜裁切得到研究区范围影像，并将坐标转换为 WGS-1984-UTM-zone-50N。最终得到研究区影像如下图所示。

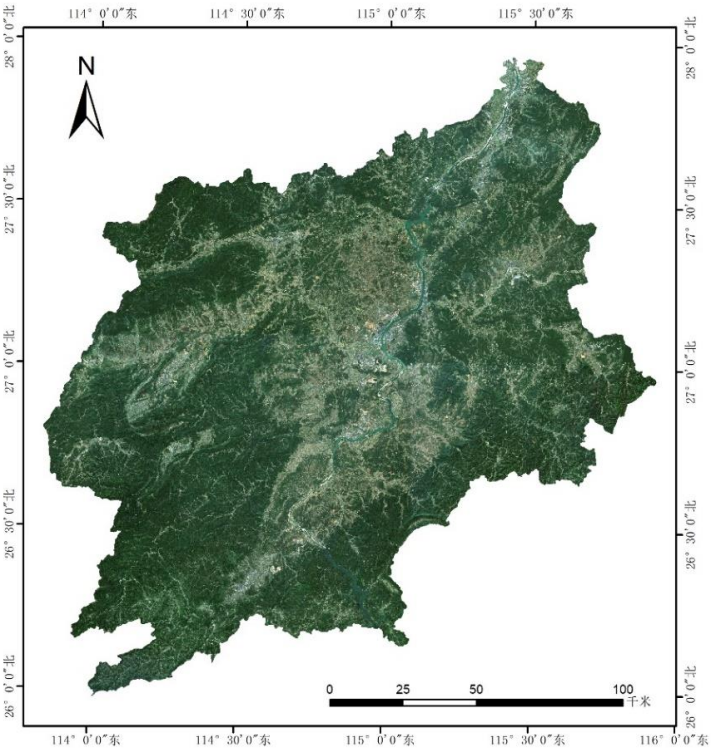


图 6.1 吉安市 sentinel-2 影像图

Fig. 6.1 Image of sentinel-2 in Ji 'an City

(2)信息因子的提取

森林蓄积量的估测以各信息因子作为建模变量。经过多年的探索，学者们发现在建模方程中引入遥感纹理特征因子和植被指数，能有效提高模型精度（王月婷等，2015；

中国知网 https://www.cnki.net

杨柳等，2017）。因此参考前人研究成果，本文选取的主要建模变量包括 5 个类别，分别是遥感影像单波段反射率，植被指数，纹理特征，地形数据和样地信息，其中样地信息作为因变量。

①单波段反射率

单波段反射率能直观地反映地物光谱特征。遥感影像经大气校正后，其对应的栅格单元像素值就是波段的反射率，其中包含着大量地物信息。既往研究表明，单波段反射率与森林蓄积量之间存在较大相关性，对森林蓄积量的估测结果具有重要影响。因此，本研究将其作为建模备选信息因子之一。使用 ENVI 中的 Layer stacking 将哨兵 2 号影像中分辨率 20m 以上的 10 个单波段分别导出作为特征因子，包括分辨率 10 米的波段 2、3、4、8，对应蓝、绿、红、近红外 4 个波段，以及分辨率为 20 米的波段 5、6、7、8A、11、12。

②植被指数

植被指数是反映植被在可见光、近红外波段反射与土壤背景之间差异的指标，各个植被指数在一定条件下能用来定量说明植被的生长状况。建立植被指数的目的是有效地综合各有关的光谱信号，增强植被信息，减少非植被信息。对于森林蓄积量的估测而言，植被指数的这一特性恰与之契合。因此，基于单独提取出的各波段，利用波段运算工具计算以下 9 个植被指数因子，包括 6 个常见植被指数（归一化植被指数、归一化红外指数、差值植被指数、比值植被指数、绿光叶绿素指数、增强型植被指数）和根据 sentinel-2A 卫星特有的红边波段提取的 3 个植被指数（改进的归一化红边植被指数、比值红边植被指数、红边叶绿素指数）。

表 6.1 各植被指数计算方式

Tab. 6.1 Calculation methods of each vegetation index

因子名称	计算公式
归一化植被指数	NDVI=(B8-B4)/(B8+B4)
归一化红外指数	NDII=(B8-B11)/(B8+B11)
差值植被指数	DVI=B8-B4
比值植被指数	RVI=B8/B4
绿光叶绿素指数	CIgreen=(B8/B3)-1
增强型植被指数	EVI= 2.5×(B8-B4)/(B8+6×B4-7.5×B2+1)
改进的归一化红边植被指数	mNDVIre=(B8-B5)/(B8+B5-2×B2）
比值红边植被指数	RVIre=B8/B5
红边叶绿素指数	CIre=(B8/B5)-1

中国知网 https://www.cnki.net

③纹理特征因子

当前，纹理分析在遥感图像、 X 射线照片、细胞图像判读和处理方面有广泛的应用。在森林蓄积量的估测研究中，纹理因子越来越多被引入模型中，且效果显著。杨柳等（2017）研究发现：纹理因子参与建模可以减少地形阴影对模型的影响，且和地形因子联合参与建模时，可以适当提高模型精度。灰度共生矩阵一种目前常用的纹理特征描述方法。本文通过灰度共生矩阵提取 8 个广泛应用的纹理因子作为备选建模因子，即二阶矩（second moment）、对比度（contrast）、相异性（dissimilarity）、熵（entropy）、相关性（correlation）、均值（Mean）、方差（variance）和协同性（homogeneity）。

首先对在 ENVI 中对影像波段进行主成分分析，结果如图 6.2，表 6.2 所示。

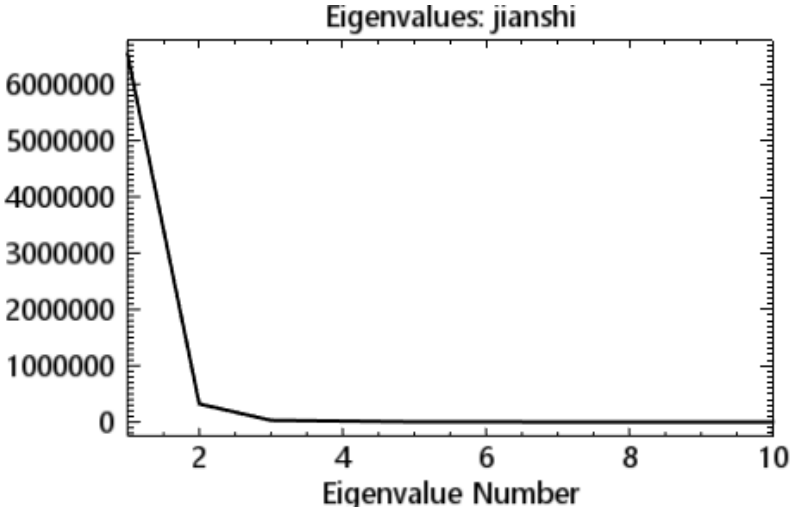


图 6.2 主成分分析结果图

Fig. 6.2 Result of principal component analysis

表 6.2 主成分分析结果

Tab. 6.2 Results of principal component analysis

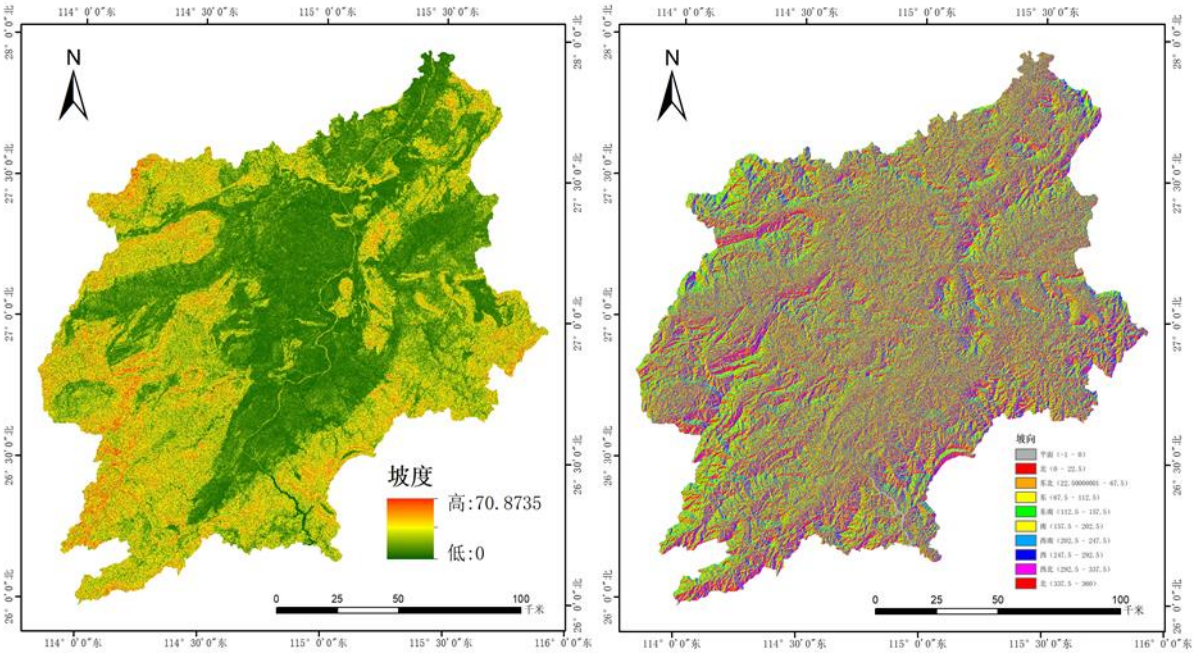
PC	Eigenvalue	Percent
PC1	6531458.39	94.44%
PC2	322263.21	4.66%
PC3	30879.76	0.45%
PC4	17888.58	0.26%
PC5	4202.75	0.06%
PC6	3102.17	0.04%
PC7	2113.69	0.03%
PC8	1828.61	0.03%
PC9	1435.47	0.02%
PC10	613.54	0.01%

中国知网 https://www.cnki.net

由图表可知，信息主要集中在 PC1 中，因此选择 PC1 进行纹理因子提取。由于不同窗口大小的纹理因子信息会影响预测结果，为取得更好的建模效果，本研究选择 5×5、7×7、11×11 等 3 个窗口大小进行提取。在 SNAP 软件中，提取纹理因子在各窗口四个方向的纹理均值，经相关性分析对比后，7×7 窗口下的纹理特征因子相关性最高，故将该窗口下的 8 个纹理特征因子作为备选变量。

④地形数据

地形数据包括坡度和坡向。既往研究表明坡度和坡向等地形因子是影响森林蓄积量的重要因素，因此，基于 30m 分辨率的吉安市数字高程模型数据（来源于地理空间数据云），使用 Arcgis10.2 中 3D 分析模块提取坡度和坡向因子，具体如图 6.3 所示。由图 6.3 可以发现吉安市地形坡度范围在 0 度~70.87 度之间，空间特征表现为中部地区坡度较为平缓，四周尤其是西部南部罗霄山脉所处地区坡度较高。



(a) 坡度图　　(b) 坡向图

图 6.3 吉安市坡度坡向图

Fig. 6.3 Slope direction map of Ji'an City

⑤样地信息数据

样地信息数据是检验模型精度的重要依据。基于吉安市 2019 年林业二调样地数据，依样点信息计算出所有样地点森林的亩平均蓄积量，根据拉依达准则剔除噪声数据，即 $|X_i - \bar{X}| > 3\sigma$ 的数据，再剔除实际地类为非林地的样点，最终得到有效林地样点共计 621 个，其分布情况如图 6.4 所示。

中国知网 https://www.cnki.net

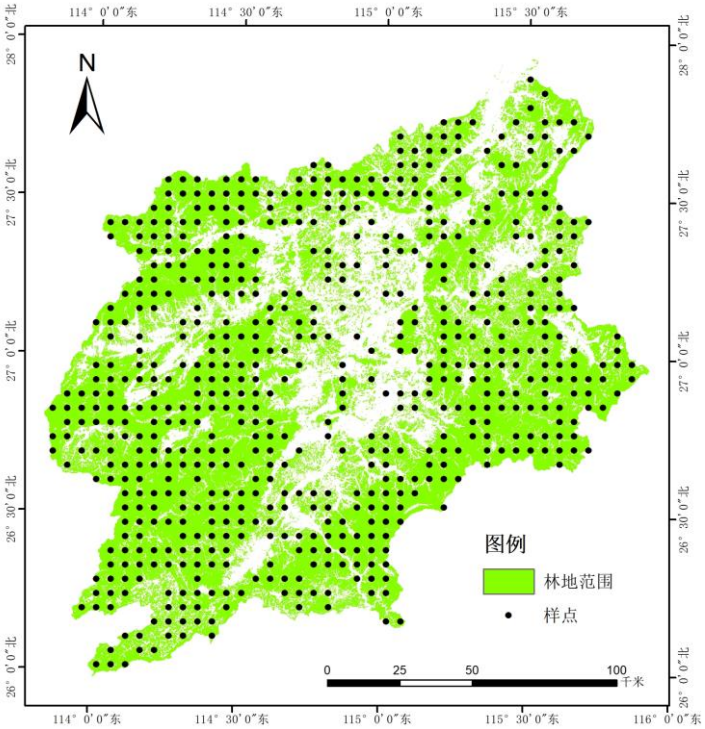


图 6.4 有效林地样点分布图

Fig. 6.4 Distribution of effective forest plots

(3)估测模型的建立

①建模因子的筛选

在模型建立之前，需要将各因子进行筛选，剔除相关性不显著的因子。

将提取的 10 个单波段因子，8 个纹理因子，9 个植被指数因子以及 2 个地形因子共计 29 个备选因子作为因变量，通过“多值提取至点”工具提取至样地点。在 SPSS 中利用皮尔逊系数进行相关性检验。

首先是各单波段因子的相关性分析，由表 6.3 可知，影像单波段反射率与森林蓄积量的相关性较为显著。10 个单波段因子中有 7 个在 0.01 水平显著相关，相关性最高的波段达到-0.187**，将这 7 个波段反射率纳入建模因子。

表 6.3 单波段反射率与森林蓄积量相关性

Tab. 6.3 Correlation between single band reflectance and forest stock

波段号	B2	B3	B4	B5	B6
相关性	-0.124**	-0.116**	-0.173**	-0.169**	0.057
波段号	B7	B8	B8A	B11	B12
相关性	0.093*	0.138**	0.090*	-0.129**	-0.187**

注：表中“**”表示在 0.01 水平（双侧）显著相关，“*”表示在 0.05 水平（双侧）显著相关。下同。

中国知网 https://www.cnki.net

其次是纹理特征因子，由表 6.4 可知，纹理因子中，除相关性（correlation）外，其余 7 个因子相关性显著，7 个显著因子中，相关性最高的因子为信息熵，达-0.319**，相关性最低的是二阶矩，值为 0.129**。具体如下表所示。

表 6.4 纹理因子与森林蓄积量相关性

Tab. 6.4 Correlation between texture factors and forest stock

因子名称	二阶矩	对比度	相异性	信息熵
相关性	0.129**	-0.139**	-0.226**	-0.319**
因子名称	相关性	均值	方差	协同性
相关性	0.033	-0.172**	-0.172**	0.312**

从表 6.5 可知，9 个植被指数均在 0.01 的水平显著相关，其中以 Clre（红边叶绿素指数）和 RVIre（比值红边植被指数）为最高，相关性达到 0.356，相关性最小的植被指数因子是 EVI，值为 0.117，将其全部纳入因子。

表 6.5 植被指数与森林蓄积量相关性

Tab. 6.5 Correlation between vegetation index and forest stock

因子	RVIre	RVI	NDVI	NDII	mNDVIre
相关性	0.356**	0.237**	0.240**	0.255**	0.308**
因子	DVI	Clre	CIgreen	EVI	
相关性	0.177**	0.356**	0.290**	0.117**	

最后是坡度及坡向因子，如表 6.6 所示：坡向因子相关性较小，未达到双尾相关，坡度因子则在 0.01 水平下相关性较为显著，因此剔除坡向因子，保留坡度因子。

表 6.6 坡度坡向因子相关性分析

Tab. 6.6 Correlation analysis of slope aspect factors

因子名称	坡向	坡度
相关性	-0.034	0.129**

②多元逐步回归模型

本次多元逐步回归模型的建立通过 SPSS 软件实现，将训练样本导入软件中后选择分析-回归-线性-步进，经过 5 次自动输入和剔除变量，得到森林蓄积量预测模型为：

$$V = 0.789 \times \mathrm{Clre} - 2.354 \times \mathrm{SM} - 0.921 \times \mathrm{EN} + 9.796 \quad (6.1)$$

根据此模型，将检验样本代入模型计算，分析验证集样地实测值与估测值之间的相关性并绘制线性回归图。如图 6.5 所示，验证集样点的实测值与估测值之间的决定系数 R^2=0.2477，预测精度不够理想，不建议作为本研究中吉安市森林蓄积量估测模型选择。

中国知网 https://www.cnki.net

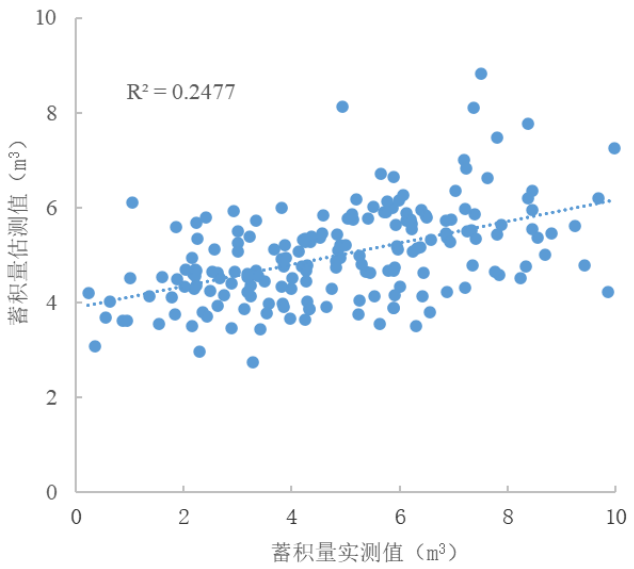


图 6.5 多元逐步回归实测值与估测值线性关系

Fig. 6.5 Linear relationship between measured value and estimated value by multiple stepwise regression

③人工神经网络模型

本次神经网络拟合预测采用 MATLAB R2019a 软件中的 Neural Net Fitting 工具箱实现。按照软件默认设置将隐藏层数值设为 10，同时调整 epoch 参数，不断观察自动拟合结果的相关参数精度，经多次模拟，得到最优训练结果，此时样本相关系数 R=0.79677。

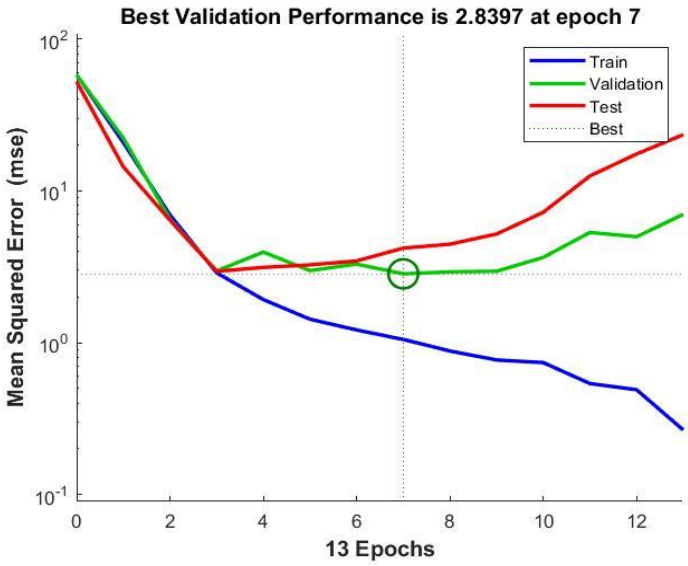


图 6.6 epoch 最佳验证性能图

Fig. 6.6 Best validation performance of epoch

中国知网 https://www.cnki.net

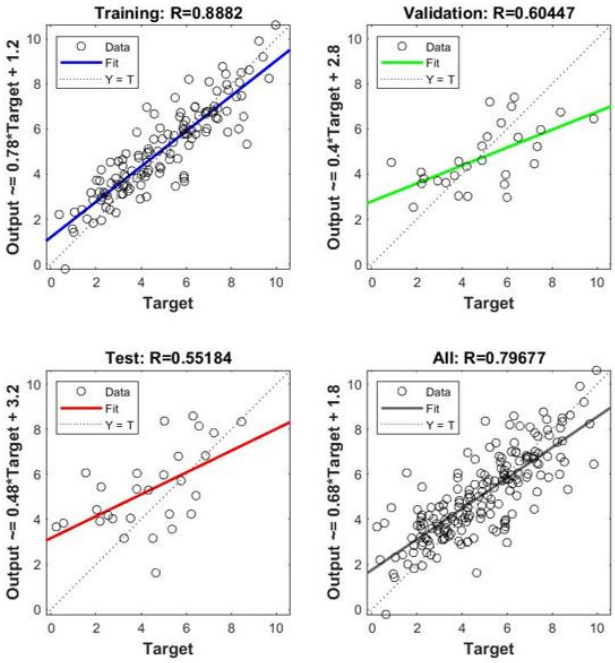


图 6.7 训练模型结果回归图

Fig. 6.7 Regression diagram of training model results

Epoch 是梯度下降法的重要参数，一个 epoch 是指整个数据集正向反向训练一次，由图 6.6 可知当 epoch=7 时，模型取得最佳验证效果，MSE 达到最小值。

根据上述参数建立神经网络模型对 187 个验证集数据进行训练，如图 6.7 所示，全部验证样本系数 R=0.79677。再将实测值与估测值建立线性回归方程，如图 6.8 所示，拟合方程 R^2=0.6348，模型拟合效果较好。

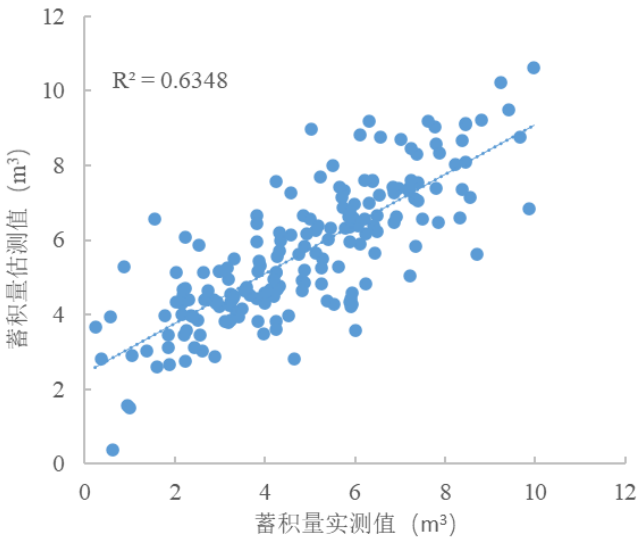


图 6.8 人工神经网络实测值与估测值线性关系

Fig. 6.8 Linear relationship of measured value and estimated value of artificial neural network

中国知网 https://www.cnki.net

④随机森林模型

本次随机森林回归模型利用 Anaconda3 实现，Anaconda3 是一个广泛应用于科学计算的 Python 发行版，集成了诸多常用的数据包。本次研究调用 ensemble 包中的 Random forest Regressor 库，使用 Jupyter Notebook 模块编写代码，通过反复练习，不断调整最重要的两个参数，即决策树个数（n_estimators）和最大决策树深度（max_depth），找到最优组合。具体参数调整过程如下表所示。

表 6.7 随机森林回归参数精度验证表

Tab. 6.7 Precision verification table of random forest regression parameters

决策树个数	最大决策树深度	MAE	MSE	RMSE	R^2
50	3	1.116	1.901	1.379	0.6765
50	4	1.052	1.816	1.345	0.6876
50	5	1.131	1.933	1.39	0.6861
100	3	1.11	1.913	1.383	0.6933
100	4	1.054	1.794	1.339	0.7019
100	5	1.084	1.816	1.348	0.7158
150	3	1.095	1.872	1.362	0.7073
150	4	1.055	1.805	1.344	0.7057
150	5	1.08	1.8	1.342	0.7167
200	3	1.091	1.861	1.364	0.7178
200	4	1.056	1.82	1.349	0.7128
200	5	1.075	1.792	1.339	0.7146

决策树个数以 50 为间距进行选取，在 50、100、150、200 之间依次测试，最大决策树深度在 3、4、5 之间进行取值。随后将各参数水平下的验证样本蓄积量估测结果与实测值进行对比分析。由表 6.7 可知，随着决策树个数的增加，样本数据集的各指标精度也随之增加。进一步观察发现，当决策树个数和最大决策树深度分别设置为 200 和 3 时，该参数水平下的 MAE、MSE、RMSE 等指标值较为稳定，精度处于较高水平且决定系数最高，达到 0.7178，因此将该参数组合作为随林森林回归模型的参数选择，输入模型生成训练结果。

将 200；3 的参数水平下的样本估测结果与实测值进行线性回归拟合分析，可以发现预测效果较好。拟合图如图 6.9 所示：

中国知网 https://www.cnki.net

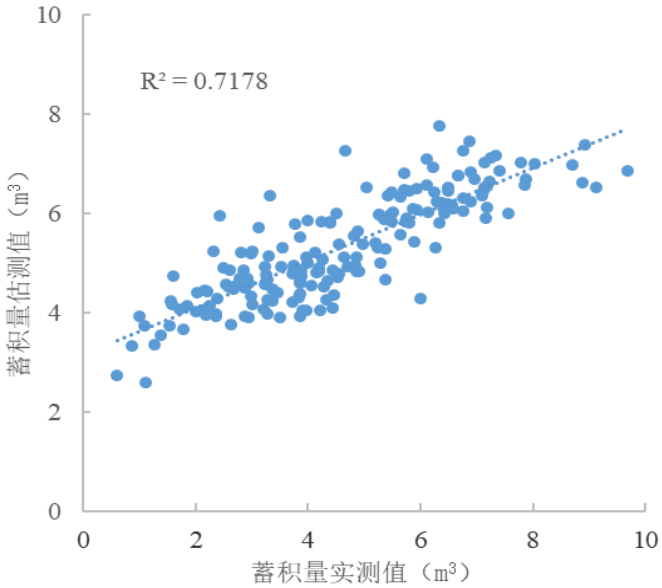


图 6.9 随机森林回归实测值与估测值线性关系

Fig. 6.9 Linear relationship between measured and estimated values of random forest regression

⑤模型精度检验

对于上述各模型精度的检验采取以下指标进行评价，分别为决定系数（R^2），平均绝对误差（MAE），均方误差（MSE），均方根误差（RMSE），通过综合对比 4 个指标，准确分析实际预测误差的大小情况进行模型选择。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2} \tag{6.2}$$

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|y_i - \hat{y}_i| \tag{6.3}$$

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2 \tag{6.4}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2} \tag{6.5}$$

式中：y_i为实测值，$\hat{y}_i$为预测值，$\bar{y}$为样本平均值，n 为样本数。

本研究将 70%的样点（共计 434 个）作为训练样点，将 30%的样点（共计 187 个）作为验证样点。而后根据验证样本的实测值与估测值，采用 4 个指标进行精度评价。如表 6.8 所示：多元逐步回归模型在三种估测模型中预测精度最低，人工神经网络模型表现相对较好，R^2 达到 0.6348，三种模型中预测效果最好的是随机森林模型，R^2 为 0.7178，平均绝对误差（MAE）为 1.091，均方误差（MSE）为 1.861，均方根误差（RMSE）为 1.364。因此选择随机森林回归模型作为最终蓄积量估测选择。各指标具体如表 6.8 所示。

中国知网 https://www.cnki.net

表 6.8 各模型精度比较表

Tab. 6.8 Precision comparison table of each model

模型	MAE	MSE	RMSE	R^2
多元逐步回归	1.539	3.601	1.898	0.2477
人工神经网络	1.239	2.403	1.550	0.6348
随机森林回归	1.091	1.861	1.364	0.7178

(4)森林蓄积量估测结果

在 ENVI 中，将 24 个建模因子的栅格数据使用 Layer Stacking 工具合成为一幅多波段影像。而后在 ArcGIS 10.2 中使用采样工具，将多波段影像作为输入要素，以重采样得到的 100m×100m 林地范围栅格数据作为采样位置，获取栅格信息点的数据。剔除多波段影像因子为-9999 的异常值后，将保留的信息点数据重新使用决策树个数和最大决策树深度分别设置为 200 和 3 的随机森林模型进行反演训练。得到森林蓄积量估测值。将信息点 XY 坐标点与森林蓄积量连接至同一属性表后，通过“点转栅格”得到吉安市森林蓄积量估测空间分布情况如图 6.10 所示。

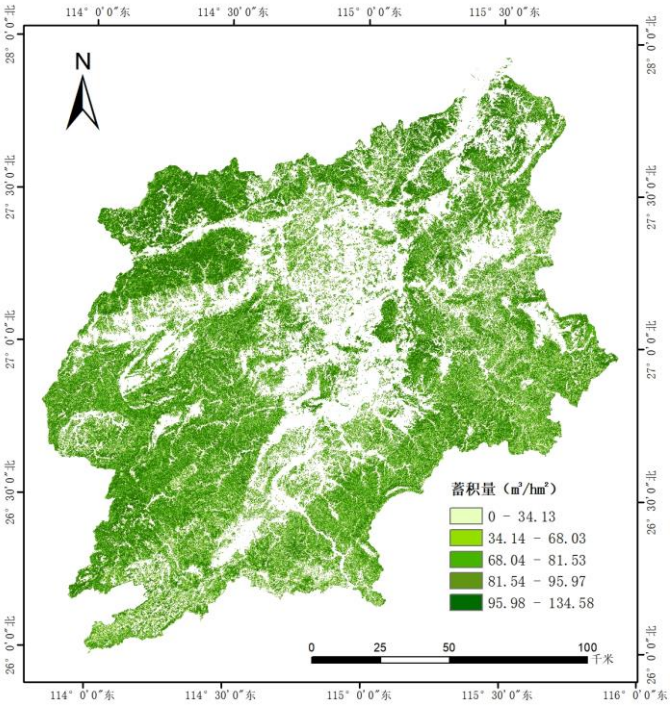


图 6.10 吉安市 2019 年森林蓄积量估测结果图

Fig. 6.10 Results of forest stock volume estimation in Ji 'an City in 2019

估测结果显示，单位面积蓄积量最大值为 134.58 m^3/hm^2，最小值为 18.42 m^3/hm^2，总量为 1.30 亿 m^3，与林业二调结果 1.15 亿 m^3 相比，总体精度达到 88.7%。在空间上，吉安市森林蓄积量呈现出西北部、西南部、东北部较高，中部及东南部较低的特征。

中国知网 https://www.cnki.net

6.1.2 林木价值评估

根据吉安市森林蓄积量估测结果，将其代入公式（5.1）进行计算。其中林木出材率 r 取值 0.65，活立木市场销售价格参考（夏俊涛，2022）取值为 1610 元/m^3。吉安市森林蓄积量从 2012 年的 0.82 亿立方米增长至 2019 年的 1.15 亿立方米，年均增长率约为 4.26%。利用 ArcGIS 中“以表格显示分区统计”功能，统计吉安市各县（市、区）的森林蓄积量及林木资源价值。统计结果显示，2019 年吉安市森林蓄积量共 1.30 亿立方米，分县（市、区）来看，森林蓄积量较大的县依次为遂川县、安福县、永丰县和永新县，其蓄积量依次为 0.19 亿立方米、0.17 亿立方米、0.14 亿立方米和 0.12 亿立方米，占比分别为 14.24%、12.95%、10.98%和 9.15%。森林蓄积量最少行政区的为吉州区，吉州区属吉安市中心城区，区域面积小且人类建设活动更为频繁，开发强度大，使得地区林地面积小，因而森林蓄积量极小，占比仅为 0.52%。

2019 年，吉安市森林林木资源资产价值量为 58.02 亿元。林木资源价值量较大的县（市、区）为遂川县、安福县、永丰县和永新县，其林木资源价值量分别为 8.27 亿元、7.51 亿元、6.37 亿元和 5.31 亿元。因价值量为蓄积量与林木出材率和单价的乘积，所以各县（市、区）的价值量占比大小与蓄积量一致。对比图表发现，森林林木蓄积量及价值量较高的地区主要是分布在东西两侧罗霄山脉及雩山山脉所在区域，这些区域山脉分布广，林地面积大同时林木生长状况良好。

各县（市、区）林木价值量如表 6.9 所示，空间分布如图 6.11 所示。

表 6.9 吉安市森林林木资源资产价值表

Tab. 6.9 Value of forest tree resources in Ji 'an City

行政区	活立木蓄积量（亿立方米）	林木价值量（亿元）	占比（%）
新干县	0.05	2.27	3.92
峡江县	0.07	3.07	5.30
吉安县	0.09	3.93	6.77
安福县	0.17	7.51	12.95
吉水县	0.12	5.26	9.06
青原区	0.05	2.14	3.69
永丰县	0.14	6.37	10.98
泰和县	0.12	5.28	9.10
井冈山市	0.09	3.81	6.56
万安县	0.10	4.50	7.75
遂川县	0.19	8.27	14.24
永新县	0.12	5.31	9.15
吉州区	0.01	0.30	0.52
吉安市	**1.30**	**58.02**	**—**

中国知网 https://www.cnki.net

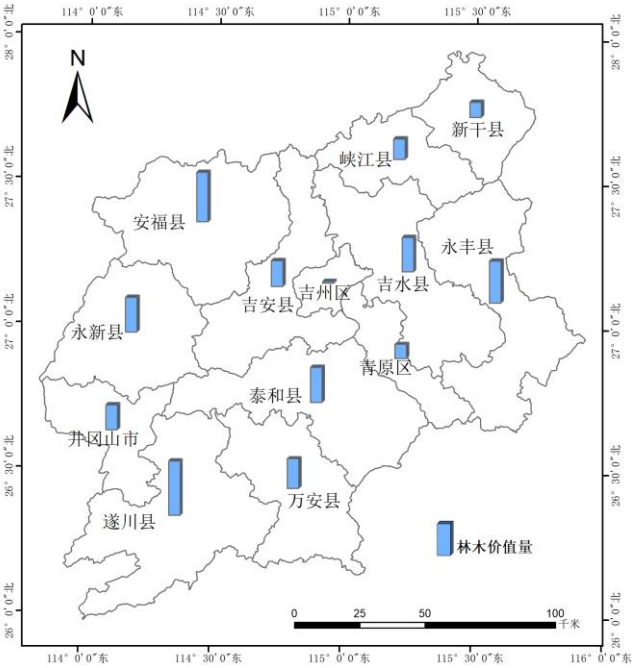


图 6.11 吉安市林木资源价值量空间分布图

Fig. 6.11 Spatial distribution of value of forest resources in Ji 'an City

6.2 生态价值评估

6.2.1 水源涵养价值

首先计算吉安市森林资源资产水源涵养功能量。需要用到的数据包括降雨量数据、潜在蒸散发量栅格数据、土地利用类型数据、土壤深度数据、植物可利用水含量、流域矢量图、生物物理系数表以及 Z 参数。其中，Z 参数取值按 0.2N 确定（N 为年降雨事件次数）。降雨数据和蒸散发量数据均为从国家地球系统科学数据中心下载而来的 NC 格式数据，因此需使用 ArcGIS 中的多维工具下的“创建 NETCDF 栅格图层”工具读取，分别导出 12 个月的数据，并生成栅格文件，再经过栅格计算得到全年平均数据。植物可利用水含量（PAWC）一般指田间持水量和萎蔫点之间的差值，通常用体积含水量表示，该数据由研究区土壤数据计算得到，研究区相关土壤数据均来源于世界土壤数据库(HWSD)，植物可利用水含量计算公式如下：

$$PAWC = 54.509 - 0.132(sand)^2 - 0.055\text{silt} - 0.006(silt)^2 - 0.738clay$$

$$+0.007(clay) \times (-2.668)OM + 0.501（OM）^2 \qquad （6.1）$$

式中，sand、 silt、 clay 分别为土壤中砂粒、粉粒、粘粒含量（%）；OM 为有机质含量（%）。

中国知网 https://www.cnki.net

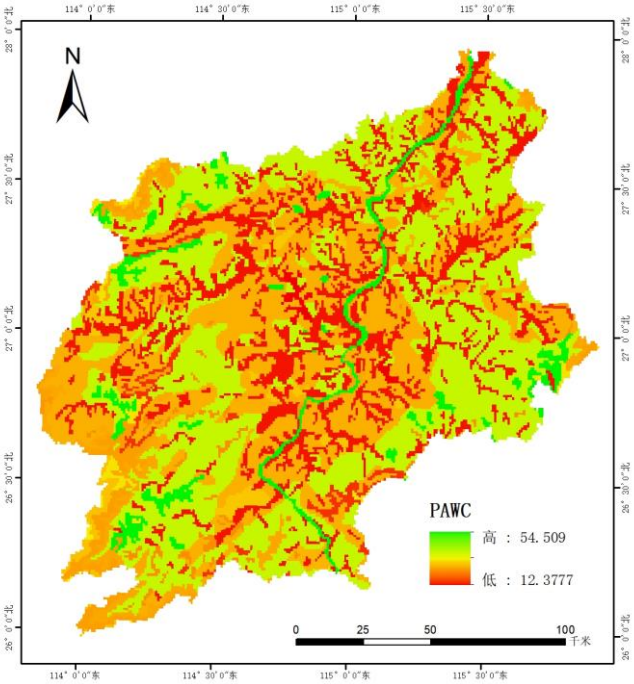


图 6.12 吉安市植物可利用水含量图

Fig. 6.12 Available water content of plants in Ji 'an City

生物系数表取值参考前人研究（2022，李莹莹；赵亚茹，2019），如表 6.10 所示。

表 6.10 生物物理系数表

Tab. 6.10 Biophysical coefficient

土地利用类型	地类代码	蒸散发系数	根系深度	LULC_veg
耕地	10	0.65	400	1
森林	20	1	1000	1
草原	30	0.6	300	1
灌木地	40	0.398	2000	1
湿地	50	1.2	100	1
水域	60	1	1	0
不透水表面	80	0.3	1	0
裸土地	90	0.5	1	0
雪地	100	0.3	1	0

注：LULC_veg 为使用的实际蒸散发 AET 计算赋值，有植被覆盖土地利用类型赋值为 1，其他土地利用类型（湿地、城市用地、水体等）赋值为 0。

使用 InVEST 工具中的产水量模块，将数据对应输入数据框后得到全域水源涵养功能量计算结果，再根据林地范围数据“按掩膜提取”从吉安市全域水源涵养量中提取森林资源资产水涵养功能量分布，得到功能量高低如图 6.13 所示。

中国知网 https://www.cnki.net

根据图 6.13 可以发现，单位面积水源涵养功能量最低为 50.10mm/m^2/年，最高为 1503.28 mm/m^2/年，高值区主要分布在吉安市东部的雩山山脉和西部的罗霄山脉，且东部山区平均水源涵养能力要高于西部山区。2019 年吉安市森林水源涵养功能量如表 6.10 所示，共计 123.55 亿立方米。功能量较高的县依次为遂川县、永丰县、安福县、吉水县，价值量分别为 17.77 亿立方米、16.23 亿立方米、13.96 亿立方米、11.90 亿立方米。

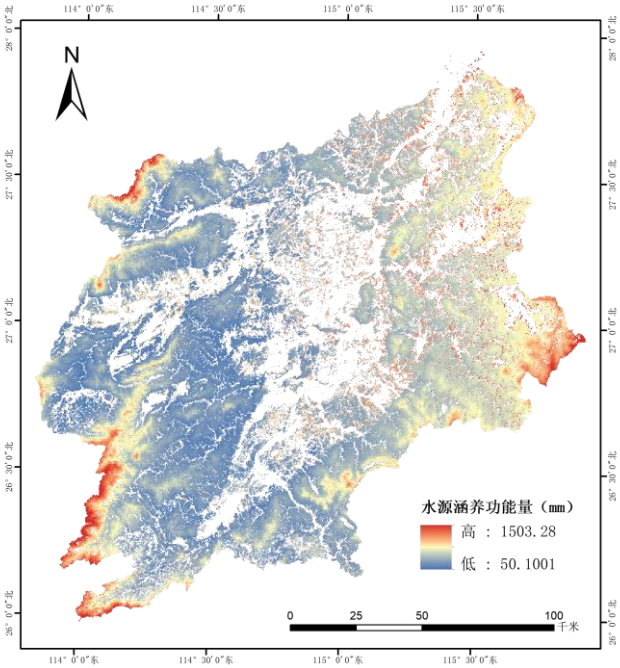


图 6.13 吉安市森林资源资产水源涵养功能量图

Fig. 6.13 Water conservation function quantity diagram of forest resource assets in Ji 'an City

利用栅格计算器，将功能量代入公式（5.2）进行计算，根据吉安市人民政府发布的数据（https://www.jian.gov.cn/news-show-16438.html），居民生活用水一级用水（30 立方米/月）水价为 1.4 元/立方米、二级用水（31-40 立方米/月）水价为 2.1 元/立方米、三级用水（41 立方米/月以上）水价为 4.2 元/立方米。按照《城市居民生活用水量标准》，吉安市居民一级水价用水量最多，因此本研究采用一级用水价格 1.4 元/立方米进行核算。

最终核算出 2019 年吉安市森林资源资产水源涵养服务价值量如表 6.10 所示。总价值为 82.78 亿元。价值量较高的县依次为遂川县、永丰县、安福县、吉水县，价值量分别为 24.88 亿元、22.72 亿元、19.54 亿元、16.67 亿元，占比分别为 14.38%、13.14%、11.30%、9.64%；价值量最低的行政单元仍为吉州区，仅有 0.48 亿元，其占比相较森林蓄积量略有提高，为 0.58%，其次是青原区，价值量 3.08 亿元，占比 3.72%。与吉州区一样，青原区大部分区域属于吉安市中心城区，且行政区森林资源面积较小，故而区域林地水源涵养能力也较小。总体上各区县水源涵养价值量与林木价值量的占比大小顺序

中国知网 https://www.cnki.net

趋向一致，部分县（区、市）排名顺序有略微变化。

表 6.11 吉安市森林资源资产水源涵养功能价值表

Tab. 6.11 Water conservation function value table of forest resource assets in Ji 'an City

行政区	功能量（亿立方米）	价值量（亿元）	占比（%）
新干县	5.17	7.24	4.19
峡江县	6.44	9.01	5.21
吉安县	7.76	10.87	6.28
安福县	13.96	19.54	11.30
吉水县	11.90	16.67	9.64
青原区	4.60	6.43	3.72
永丰县	16.23	22.72	13.14
泰和县	11.15	15.60	9.02
井冈山市	8.04	11.25	6.51
万安县	9.50	13.30	7.69
遂川县	17.77	24.88	14.38
永新县	10.32	14.44	8.35
吉州区	0.72	1.01	0.58
吉安市	**123.55**	**172.97**	—

6.2.2 土壤保持价值

土壤保持价值的核算同样以土壤保持功能量为基础，通过 ArcGIS 栅格计算器，将各因子代入公式（5.5）、（5.6）、（5.7）计算。其中坡长坡度因子利用 ArcGIS 从 DEM 数据中提取，植被覆盖与管理因子参照谭炳香等提出的算法计算。此外，降雨侵蚀力因子 R 反映降雨引起土壤流失的潜在能力，根据降水量数据计算，公式如下：

$$R = 4.17 \times \sum_{i=1}^{12} \frac{Ji^2}{J} - 152 \tag{6.2}$$

式中 Ji 为月降水量（mm）；J 为年降水量；i 为月份。

土壤可侵蚀性因子 K 是衡量地表土壤抗蚀性的指标，反映土壤对侵蚀的敏感性，为标准小区（坡长 22.12m，坡度为 9%）下单位降雨侵蚀力形成的单位面积上的土壤流失量。采用 EPIC 模型计算，公式如下：

$$K = A \times B \times C \times D \tag{6.3}$$

$$A = \{0.2 + 0.3exp[-0.0256m_s(1 - msilt\ /100)]\} \tag{6.4}$$

$$B = [m_{silt}/(m_c + m_{silt})]^{0.3} \tag{6.5}$$

$$C = \{1 - 0.25orgC/[orgC + exp\ (3.72 - 2.95orgC)]\} \tag{6.6}$$

$$D = E \div F \tag{6.7}$$

中国知网 https://www.cnki.net

$$E = [1 - 0.7(1 - m_s/100)] \tag{6.8}$$

$$F = \{(1 - m_s/100) + exp[-5.51 + 22.9(1 - m_s/100)]\} \tag{6.9}$$

式中，K 为土壤可蚀性因子，表示为标准小区下单位降雨侵蚀力形成的单位面积上的土壤流失量。m_c 、m_{silt} 、m_s 和$orgC$分别为粘粒（＜0.002mm）、粉粒（0.002～0.05mm）、砂粒（0.05～2mm）和有机碳的百分含量（%）。上述土壤质地数据来自国家地球系统科学数据中心的世界土壤数据库(HWSD)。

土壤保持措施因子 P 的值域为 0~1，数值 0 代表该区域无侵蚀，数值 1 为未采取水保措施的地区，取值参考（刘洋，2020）确定。

表 6.12 土壤保持措施因子对照表

Tab. 6.12 Comparison of Soil Conservation Measures

土地利用类型	林地	湿地	灌木林	疏林地	果园	草地	水体	建设用地	未利用地
P	1	1	1	1	0.7	1	0	0	1

根据土壤保持各因子提取结果，得到吉安市土壤保持功能量，将其“按掩膜提取”，得到吉安市森林资源资产土壤保持功能量。图 6.15 功能量分布图，图 6.16 为降雨侵蚀力因子、土壤可侵蚀性因子、坡长因子、坡度因子、植被覆盖与管理因子、土壤保持工程措施因子的示意图。

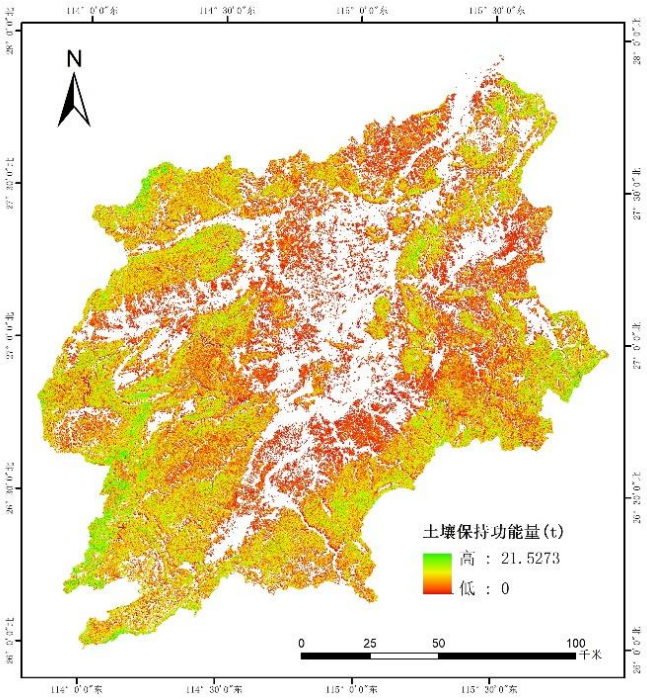


图 6.14 吉安市森林资源资产土壤保持功能量图

Fig. 6.14 Soil Conservation Function of Forest Resources Assets in Ji'an City

中国知网 https://www.cnki.net

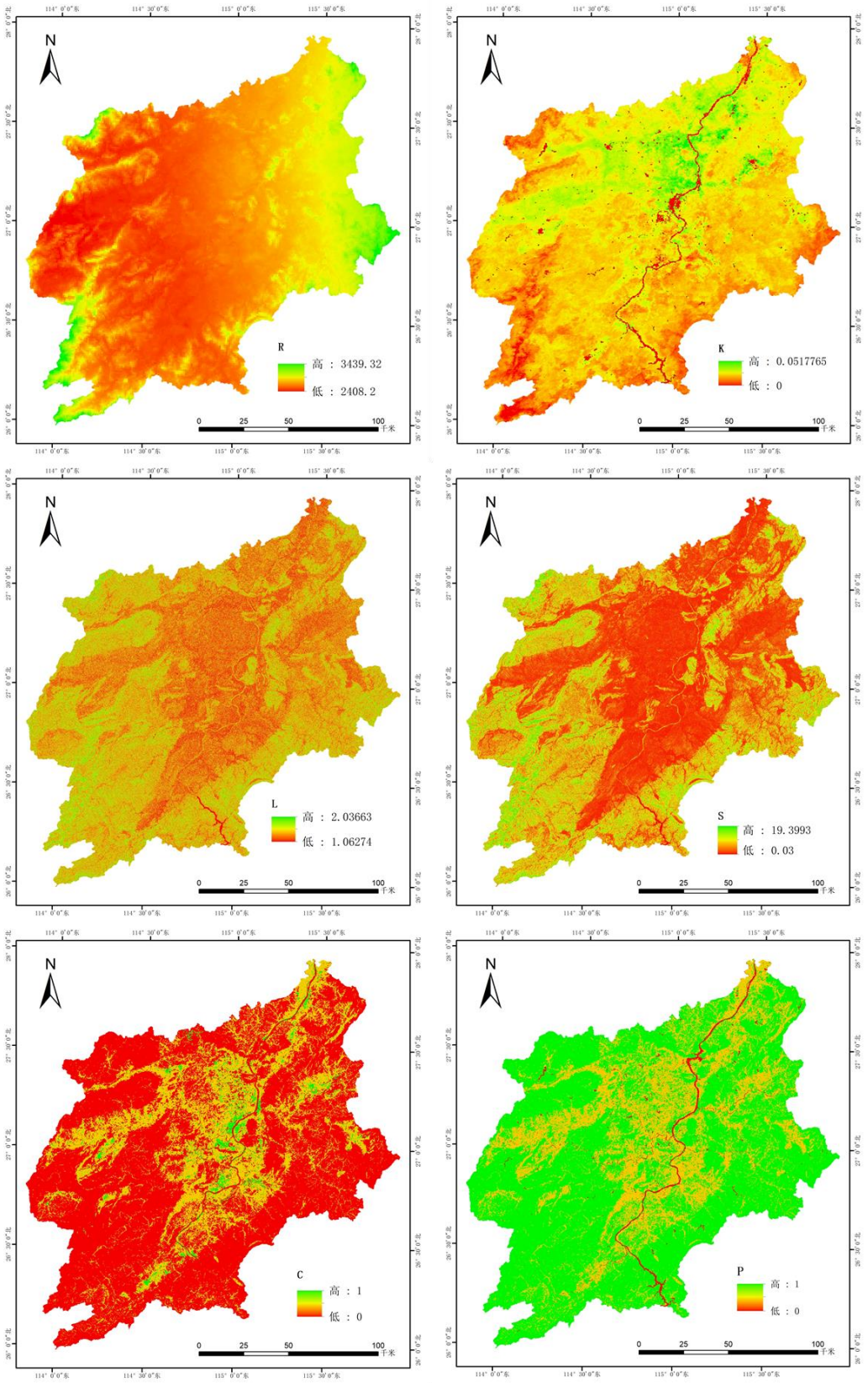


图 6.15 土壤保持各因子分布图

Fig. 6.15 Distribution of Soil Conservation Factors

中国知网 https://www.cnki.net

随后计算土壤保持功能的价值。本研究中土壤保持服务价值以土壤保持功能量中的营养物质价值来衡量，包括氮、磷、钾三种元素。通过查阅相关文献确定江西地区森林土壤中氮磷的含量（刘耀辉，2021）及土壤中钾的含量（刘冰权，2022），氮的含量为 7.97 g/kg、磷的含量为 1.34 g/kg、钾的含量取其均值为 15.80 g/kg。其次根据中国化肥网的相关数据，磷酸二铵化肥价格为 3950 元/吨，其中氮含量为 18%，磷含量占比为 46%，氯化钾化肥价格为 2200 元/吨，其中钾含量占比约 57%。各参数取值如下表所示。

表 6.13 土壤保持功能参数取值表

Tab. 6.13 Values of soil conservation function parameters

营养成分	在土壤中的含量（g/kg）	化肥价格（元/吨）	在化肥中的含量（%）
氮	7.97	3950	18
磷	1.34	3950	46
钾	15.80	2200	57

表 6.14 吉安市森林资源资产土壤保持功能价值表

Tab. 6.14 Value table of soil conservation function of forest resource assets in Ji 'an City

行政区	功能量（万吨）	氮含量（吨）	磷含量（吨）	钾含量（吨）	价值量（亿元）	占比（%）
新干县	30.64	2441.99	410.57	4841.08	0.76	3.80
峡江县	28.40	2263.62	380.58	4487.47	0.71	3.52
吉安县	36.06	2873.72	483.16	5696.97	0.89	4.47
安福县	107.11	8536.67	1435.27	16923.38	2.65	13.29
吉水县	61.78	4923.92	827.86	9761.36	1.53	7.66
青原区	28.24	2250.86	378.44	4462.18	0.70	3.50
永丰县	91.97	7329.64	1232.34	14530.53	2.28	11.41
泰和县	66.59	5307.20	892.30	10521.16	1.65	8.26
井冈山市	68.06	5424.41	912.01	10753.55	1.68	8.44
万安县	61.97	4938.86	830.37	9790.97	1.53	7.69
遂川县	143.93	11471.22	1928.66	22740.95	3.56	17.86
永新县	80.40	6407.51	1077.30	12702.46	1.99	9.97
吉州区	0.83	66.26	11.14	131.35	0.02	0.10
吉安市	**805.97**	**64235.88**	**10800.01**	**127343.41**	**19.94**	**—**

使用“栅格计算器”和“以表格显示分区统计功能”，对土壤保持功能量和氮磷钾含量以及价值量进行统计。如表 6.14 所示，2019 年吉安市森林资源资产土壤保持功能总量为 805.97 万吨，其中土壤保持功能量在 100 万吨以上的县（市、区）有两个，分别为遂川县及安福县。土壤保持功能量较高的县（市、区）和其具体功能量值依次为遂川县 143.93 万吨、安福县 107.11 万吨、永丰县 91.97 万吨、永新县 80.40 万吨，这几个县土

中国知网 https://www.cnki.net

壤保持能力较强，是吉安市土壤保持服务功能的主要承载区域，而功能量最低的行政区为吉州区，仅为 0.83 万吨，与其他县（市、区）相比其量级显著降低。此外，根据计算吉安市森林资源资产土壤保持氮总量为 64235.88 吨，磷总量为 10800.01 吨，钾总量为 127343.71 吨。

按照氮磷钾三类营养物质相应价值进行计算，吉安市森林土壤保持总价值为 19.94 亿元，价值量由高到低依次为遂川县 3.56 亿元，占比 17.86%；安福县 2.65 亿元，占比 13.29%；永丰县 2.28 亿元，占比 11.41%；永新县 1.99 亿元，占比 9.97%。土壤保持价值量最低的行政区为吉州区 0.02 亿元，占比 0.10%，其次是青原区和峡江县，青原区价值量为 0.70 亿元，占比 3.50%；峡江县价值量 0.71 亿元，占比 3.52%。这与吉安市国土空间规划划定的水土流失治理区保持一致。与林木价值和水源涵养价值相比，峡江县土壤保持价值排名下降明显，该县土壤保持能力弱，需加强森林保护工作，巩固区域内森林土壤保持能力，减少水土流失，以提高森林土壤保持价值。

6.2.3 固碳释氧价值

本研究森林资源资产的固碳释氧价值以植物净初级生产力（NPP）为基础进行测算，NPP 数据采美国国家航空航天局提供的 LP DAAC 数据集，该数据由美国宇航局 Terra 卫星收集的原始数据处理而来，数据原始分辨率为 500 米。吉安市 2019 年植物净初级生产力高低分布如图 6.16 所示。

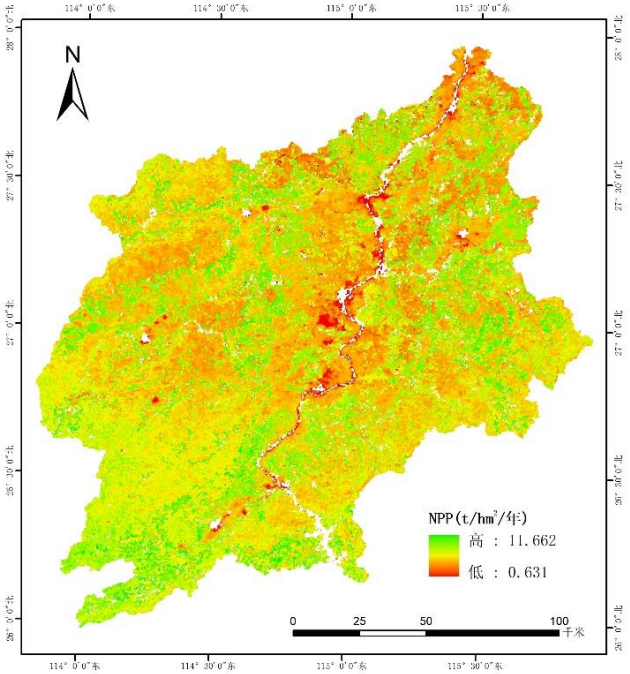


图 6.16 吉安市植物净初级生产力分布图

Fig. 6.16 Distribution of net primary productivity of plants in Ji 'an City

中国知网 https://www.cnki.net

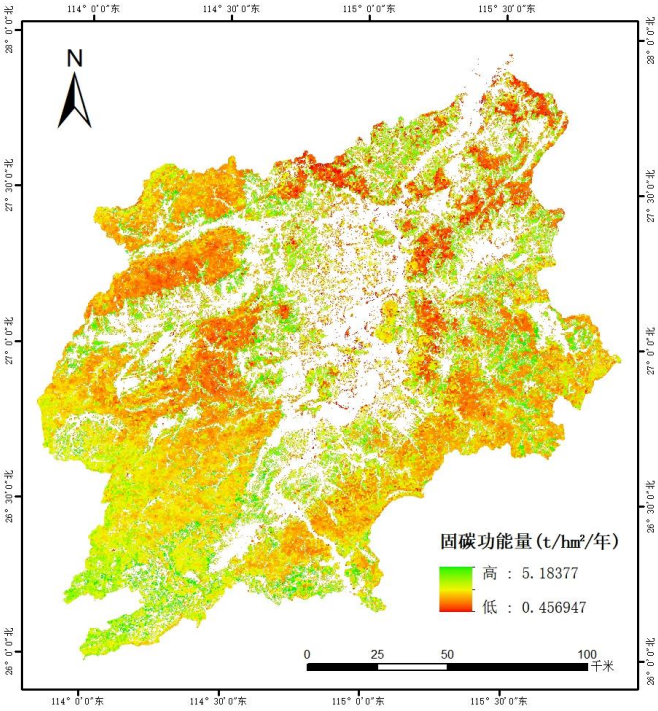


图 6.17 吉安市森林资源资产固碳功能量图

Fig. 6.17 Carbon sequestration function of forest resource assets in Ji 'an City

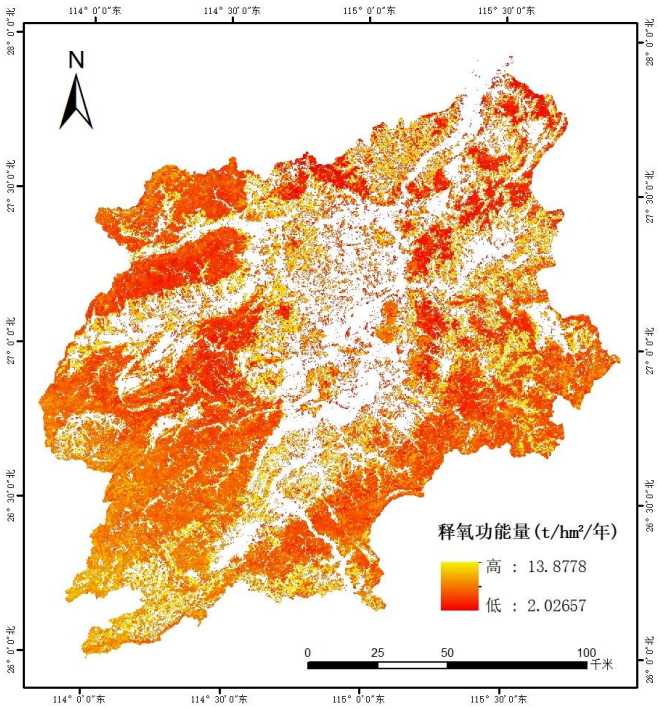


图 6.18 吉安市森林资源资产释氧功能量图

Fig. 6.18 Oxygen release function of forest resource assets in Ji 'an City

中国知网 https://www.cnki.net

表 6.15 吉安市森林资源资产固碳释氧功能价值表

Tab. 6.15 Value table of carbon sequestration and oxygen release function of forest resources assets in Ji 'an City

行政区	固碳功能量（万吨）	固碳价值量（亿元）	释氧功能量（万吨）	释氧价值量（亿元）	总价值（亿元）	占比（%）
新干县	16.61	1.99	44.52	4.45	6.45	3.38
峡江县	23.91	2.87	63.93	6.39	9.26	4.85
吉安县	32.96	3.95	88.35	8.83	12.79	6.70
安福县	56.97	6.84	152.61	15.26	22.10	11.58
吉水县	43.57	5.23	116.55	11.65	16.88	8.85
青原区	17.07	2.05	45.69	4.57	6.62	3.47
永丰县	56.48	6.78	151.18	15.12	21.90	11.47
泰和县	45.64	5.48	122.09	12.21	17.69	9.27
井冈山市	33.21	3.99	89.01	8.90	12.89	6.75
万安县	41.05	4.93	109.87	10.99	15.91	8.34
遂川县	78.41	9.41	209.91	20.99	30.40	15.93
永新县	43.94	5.27	117.67	11.77	17.04	8.93
吉州区	2.48	0.30	6.63	0.66	0.96	0.50
吉安市	**492.29**	**59.07**	**1318.00**	**131.80**	**190.87**	**—**

依公式（5.12）（5.14）使用“栅格计算器”计算出吉安市全域固碳释氧功能量，并裁剪出吉安市森林资源资产固碳释氧功能量，采取碳税法，参考《森林生态系统服务功能评估规范》，固碳价格取值 1200 元/t，工业制氧价格取值 1000 元/t 计算出其价值量。通过“以表格显示分区统计功能”，对固碳释氧功能量及价值量进行统计。固碳和释氧功能量在空间上分别如图 6.16 和 6.17 所示。中部地区地形较为平坦人类开发活动较为频繁，城镇化水平高，植被净初级生产力较低，西南部地区的植被净初级生产力最高，因而西南部的遂川县的固碳释氧功能量在全市的县（市、区）级行政区中为最高，中部尤其是作为中心城区的吉州区固碳释氧功能量相较其他县（市、区）显著降低。具体各县（市、区）功能量及价值量如表 6.15 所示。

功能量较高的县（市、区）依次为遂川县、安福县、永丰县、泰和县，固碳功能量分别为 78.41 万吨、56.97 万吨、56.48 万吨、45.64 万吨；释氧功能量分别为 209.91 万吨、152.61 万吨、151.18 万吨、122.09 万吨。吉州区以固碳功能量 2.48 万吨，释氧功能量 6.63 万吨位列最后，其次是新干县和青原区，分别以 16.61 万吨、17.07 万吨的固碳功能量和 44.52 万吨、44.69 万吨的释氧功能量排在吉州区前两位。

固碳释氧价值总量为190.87亿元，按价值量高低排序，排名较前的县依次为遂川县

中国知网 https://www.cnki.net

30.40亿元，占比15.93%；安福县22.10亿元，占比11.58%；永丰县21.90亿元，占比11.47%；泰和县17.69亿元，占比9.27%；吉州区价值量最少，为0.96亿元，占比0.50%，新干县和青原区的价值量分别为6.45亿元和6.62亿元，占比分别为3.38%和3.47%。

6.2.4 净化大气价值

本研究中森林资源资产的净化大气价值由吸收 SO_2的价值和滞尘价值组成。首先参考《中国生物多样性国情研究报告》计算吸收 SO_2和滞尘的功能量。单位面积林分年吸收 SO_2功能量按不同树种类型分别取值：针叶林215.6 kg/hm^2/年、阔叶林88.65 kg/hm^2/年、针阔混交林152.125 kg/hm^2/年、竹林为48.718 kg/hm^2/年、灌木林为40.136 kg/hm^2/年。滞尘功能量方面，针叶林为33.2t/hm^2/年、阔叶林为10.11 t/hm$^{2/}$年，针阔混交林取针叶林、阔叶林的平均值21.66t/hm^2/年，竹林和灌木林均为10.11t/hm^2/年。

根据2019年林业二类调查数据提取出不同优势树种的林地，并进行分类，将矢量格式数据转换为栅格数据以进行“栅格计算器”计算。将各类优势树种林地分别代入单位功能量计算得到吉安市森林资源资产吸收 SO_2和滞尘功能量如图6.20和图6.21所示。可以看出，大气净化功能量的高低在空间上分布比较均衡，区内林地净化大气功能量总体而言较高，低值区主要是西北部、东南部和西南部的灌木林、竹林集中生长区域，呈带状分布。分县（市、区）统计如表6.16所示，2019年森林净化大气功能量较高的县（市、区）依次为遂川县吸收 SO_2功能量3.26万吨，滞尘功能量520.06万吨；安福县吸收 SO_2功能量2.88万吨，滞尘功能量446.63万吨；吉水县吸收 SO_2功能量2.81万吨，滞尘功能量431.81万吨；永丰县吸收 SO_2功能量2.76万吨，滞尘功能量431.65万吨。功能量较低的县（市、区）主要是吉州区、青原区和新干县，吸收 SO_2功能量分别为0.22万吨、0.97万吨、1.08万吨，滞尘功能量分别为33.34万吨、148.11万吨、170.13万吨。

大气净化的价值量采用影子工程法，参照国家林业和草原局发布的《森林生态系统服务功能评估规范》（GB/T 38582-2020）取值，工业治理 SO_2的费用为1.2元/千克，工业削减粉尘的费用为0.15元/千克，将其代入公式（5.15）（5.16），计算得出吉安市森林资源资产价值量如表6.16所示。吉安市森林资源资产大气净化价值总量为63.08亿元，价值量较高的县依次为遂川县、安福县、吉水县、永丰县，有且仅有这四个县（市、区）价值量占比在10%以上，具体数值分别为8.19亿元、7.04亿元、6.81亿元、6.80亿元，占比分别为12.98%、11.16%、10.80%、10.78%。此外，价值量较低的区县由低到高依次为吉州区0.53亿元，占比为0.84%；青原区2.34亿元，占比3.71%。

中国知网 https://www.cnki.net

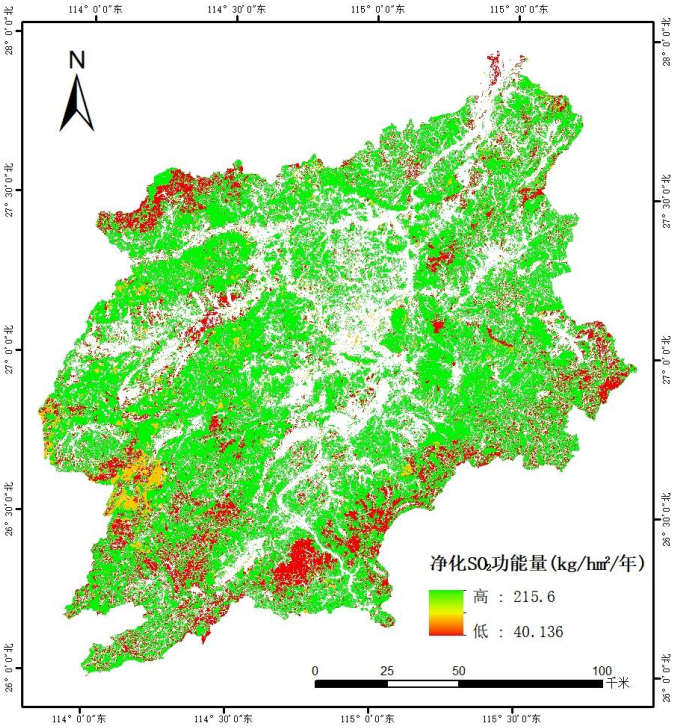


图 6.19 吉安市森林资源资产净化 SO_2 功能量图

Fig. 6.19 SO_2 function quantity diagram of forest resource assets purification in Ji 'an City

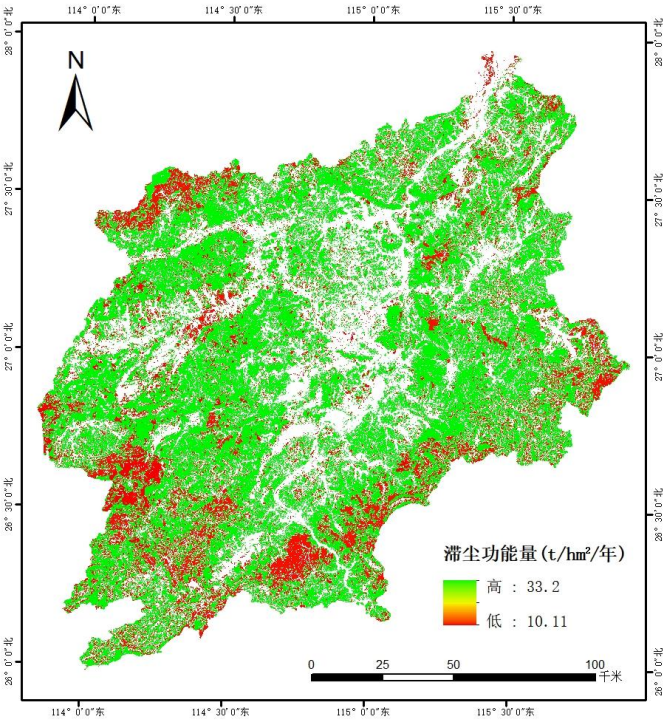


图 6.20 吉安市森林资源资产滞尘功能量图

Fig. 6.20 Functional quantity of dust retention of forest assets in Ji 'an City

中国知网 https://www.cnki.net

表 6.16 吉安市森林资源净化大气价值量表

Tab. 6.16 Air purification value of forest resources in Ji 'an City

行政区	吸收 SO_2 功能量（万吨）	吸收 SO_2 价值量（亿元）	滞尘功能量（万吨）	滞尘价值量（亿元）	总价值（亿元）	占比（%）
新干县	1.08	0.13	170.13	2.55	2.68	4.25
峡江县	1.41	0.17	220.08	3.30	3.47	5.50
吉安县	2.35	0.28	358.48	5.38	5.66	8.97
安福县	2.88	0.35	446.63	6.70	7.04	11.16
吉水县	2.81	0.34	431.81	6.48	6.81	10.80
青原区	0.97	0.12	148.11	2.22	2.34	3.71
永丰县	2.76	0.33	431.65	6.47	6.80	10.78
泰和县	2.50	0.30	385.31	5.78	6.08	9.64
井冈山市	1.28	0.15	193.25	2.90	3.05	4.84
万安县	2.02	0.24	315.10	4.73	4.97	7.88
遂川县	3.26	0.39	520.06	7.80	8.19	12.98
永新县	2.25	0.27	345.25	5.18	5.45	8.64
吉州区	0.22	0.03	33.34	0.50	0.53	0.84
吉安市	**25.79**	**3.09**	**3999.20**	**59.99**	**63.08**	**—**

6.2.5 生态价值小结

本研究在计算出 2019 年各生态价值功能量的基础上，再通过直接市场法、影子工程法、碳税法对水源涵养、土壤保持、固碳释氧、净化大气四个类别的生态价值进行评估，得到 2019 年吉安市森林资源资产的生态价值总量为 356.67 亿元。

从类别上分析，四个类别中固碳释氧价值最高，达 190.87 亿元，占全市生态总价值比重约为 53.51%；其次是水源涵养价值，为 82.78 亿元，占全市生态总价值比重约为 23.21%；再次是净化大气价值，为 63.08 亿元，占全市生态总价值比重约为 17.69%；最少的是土壤保持价值，19.94 亿元，占全市生态总价值比重约为 5.59%。

分县（市、区）看，吉安市各县（市、区）森林资源不同类别生态价值构成也有所不同。

新干县森林资源资产生态价值总量为13.35亿元。分类别看：固碳释氧功能价值量最高，其次是水源涵养功能价值，再是净化大气功能价值，土壤保持价值最低。具体价值分别为6.45亿元、3.46亿元、2.68亿元、0.76亿元，占全县森林生态总价值比重分别为48.31%、25.92%、20.07%、5.69%。

峡江县森林资源资产生态价值总量为 17.75 亿元。分类别看：固碳释氧功能价值量最高，其次是水源涵养功能价值，再是净化大气功能价值，土壤保持价值最低。具体价

中国知网 https://www.cnki.net

值分别为 9.26 亿元、4.31 亿元、3.47 亿元、0.70 亿元，占全县森林生态总价值比重分别为 52.17%、24.28%、19.55%、3.94%。

吉安县森林资源资产生态价值总量为 24.54 亿元。分类别看：固碳释氧功能价值量最高，与其他县不同，吉安县第二高的价值类别为净化大气价值，再是水源涵养功能价值，土壤保持价值仍为最低。具体价值分别为 12.79 亿元、5.66 亿元、5.20 亿元、0.89 亿元，占全县森林生态总价值比重分别为 52.12%、23.06%、21.19%、3.63%。

安福县森林资源资产生态价值总量为 41.14 亿元。分类别看：固碳释氧功能价值量最高，其次是水源涵养功能价值，再是净化大气功能价值，土壤保持价值最低。具体价值分别为 22.10 亿元、9.35 亿元、7.04 亿元、2.65 亿元，占全县森林生态总价值比重分别为 53.72%、22.73%、17.11%、6.44%。

吉水县森林资源资产生态价值总量为 33.20 亿元。分类别看：固碳释氧功能价值量最高，其次是水源涵养功能价值，再是净化大气功能价值，土壤保持价值最低。具体价值分别为 16.88 亿元、7.98 亿元、6.81 亿元、1.53 亿元，占全县森林生态总价值比重分别为 50.84%、24.04%、20.51%、4.61%。

青原区森林资源资产生态价值总量为12.73亿元。固碳释氧功能价值>水源涵养功能价值>净化大气功能价值>土壤保持价值。价值量分别为6.62亿元、3.08亿元、2.34亿元、0.70亿元，占全区森林生态总价值比重分别为52.00%、24.19%、18.38%、5.50%。

永丰县森林资源资产生态价值总量为41.85亿元。固碳释氧功能价值>水源涵养功能价值>净化大气功能价值>土壤保持价值。价值量分别为21.90亿元、10.87亿元、6.81亿元、2.28亿元，占全县森林生态总价值比重分别为52.33%、25.97%、16.27%、5.45%。

泰和县森林资源资产生态价值总量为32.88亿元。固碳释氧功能价值>水源涵养功能价值>净化大气功能价值>土壤保持价值。价值量分别为17.69亿元、7.47亿元、6.08亿元、1.65亿元，占全县森林生态总价值比重依次为53.80%、22.72%、18.49%、5.02%。

井冈山市为县级市，区域内森林资源资产生态价值总量为23.01亿元。从类别构成看：固碳释氧功能价值量最高，其次是水源涵养功能价值，再是净化大气功能价值，土壤保持价值最低。具体价值分别为12.89亿元、5.39亿元、3.05亿元、1.68亿元，占全市森林生态总价值比重分别为56.02%、23.42%、13.26%、7.30%。

万安县森林资源资产生态价值总量为28.78亿元。分类别看：固碳释氧功能价值量最高，其次是水源涵养功能价值，再是净化大气功能价值，土壤保持价值最低。具体价值分别为15.91亿元、6.37亿元、4.97亿元、1.53亿元，占全县森林生态总价值比重分别为55.28%、22.13%、17.27%、5.32%。

遂川县森林资源资产生态价值总量为全市最高，共54.06亿元。分类别看：固碳释氧

中国知网 https://www.cnki.net

功能价值量最高，其次是水源涵养功能价值，再是净化大气价值，土壤保持价值最低。具体价值分别为30.40亿元、11.91亿元、8.19亿元、3.56亿元，占全县森林生态总价值比重分别为56.23%、22.03%、15.15%、6.59%。

永新县森林资源资产生态价值总量为31.39亿元。分类别看：固碳释氧功能价值量最高，其次是水源涵养功能价值，再是净化大气功能价值，土壤保持价值最低。具体价值分别为17.04亿元、6.91亿元、5.45亿元、1.99亿元，占全县森林生态总价值比重分别为54.28%、22.01%、17.36%、6.34%。

吉州区森林资源资产生态价值总量为全市最少，仅1.99亿元。分类别看：固碳释氧功能价值量最高，净化大气功能价值紧随其后，再是水源涵养功能价值，土壤保持价值最低。具体价值分别为0.96亿元、0.48亿元、0.53亿元、0.02亿元，占全区森林生态总价值比重分别为48.24%、26.63%、24.12%、1.01%。土壤保持价值比重与其他县（市、区）相比也是存在显著差距。

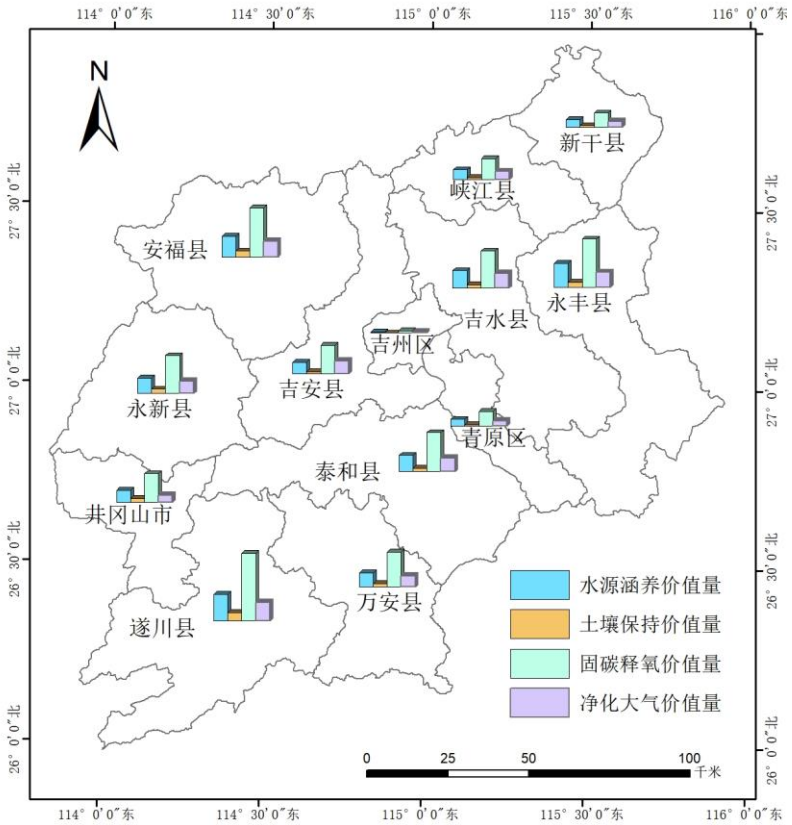


图 6.21 吉安市森林资源资产生态价值总量图

Fig. 6.21 Total ecological value of forest resources assets in Ji 'an City

中国知网 https://www.cnki.net

表 6.17 吉安市森林资源资产生态价值总量表

Tab. 6.17 Total ecological value of forest resources assets in Ji 'an City

行政区	水源涵养		土壤保持		固碳释氧		净化大气		生态价值总量	
	价值量（亿元）	占比（%）	价值量（亿元）	占比（%）	价值量（亿元）	占比（%）	价值量（亿元）	占比（%）	价值量（亿元）	占比（%）
新干县	3.46	25.92	0.76	5.69	6.45	48.31	2.68	20.07	13.35	3.74
峡江县	4.31	24.28	0.70	3.94	9.26	52.17	3.47	19.55	17.75	4.98
吉安县	5.20	21.19	0.89	3.63	12.79	52.12	5.66	23.06	24.54	6.88
安福县	9.35	22.73	2.65	6.44	22.10	53.72	7.04	17.11	41.14	11.53
吉水县	7.98	24.04	1.53	4.61	16.88	50.84	6.81	20.51	33.20	9.31
青原区	3.08	24.19	0.70	5.50	6.62	52.00	2.34	18.38	12.73	3.57
永丰县	10.87	25.97	2.28	5.45	21.90	52.33	6.81	16.27	41.85	11.73
泰和县	7.47	22.72	1.65	5.02	17.69	53.80	6.08	18.49	32.88	9.22
井冈山市	5.39	23.42	1.68	7.30	12.89	56.02	3.05	13.26	23.01	6.45
万安县	6.37	22.13	1.53	5.32	15.91	55.28	4.97	17.27	28.78	8.07
遂川县	11.91	22.03	3.56	6.59	30.40	56.23	8.19	15.15	54.06	15.16
永新县	6.91	22.01	1.99	6.34	17.04	54.28	5.45	17.36	31.39	8.80
吉州区	0.48	24.12	0.02	1.01	0.96	48.24	0.53	26.63	1.99	0.56
吉安市	**82.78**	**23.21**	**19.94**	**5.59**	**190.87**	**53.51**	**63.08**	**17.69**	**356.67**	**—**

注：水源涵养、土壤保持、固碳释氧、净化大气等小类的占比为占本行政区生态价值总量的比重；生态价值总量的占比为占整个吉安市的比重。

中国知网 https://www.cnki.net

6.3 总价值核算

根据统计结果，2019 年吉安市森林资源资产经济和生态总价值共计 414.69 亿元。其中经济（林木）价值 58.02 亿元，占总价值的 13.99%；生态价值 356.67 亿元，占总价值的 86.01%。可以看到生态服务相较于实物林木产品提供了更高的价值，说明森林资源的生态价值潜力巨大，是森林资源资产价值不可忽视的部分。

总体上全市 13 个县（市、区）的森林资源资产价值可以分为五个层级，遂川县，安福县、永新县为第一层级，森林资源资产价值占全市比重均超过 10%；吉水县、泰和县、永新县、万安县为第二层级，价值占全市比重在 8%~10%之间；吉安县和井冈山市为第三层级，价值占比分别为 6.87%、6.47%；峡江县、新干县、青原区为第四层级，价值占全市比重在 3%~5%之间；最后是吉州区，森林资源资产价值与吉安市其余县（市、区）存在数量级的差距，占比仅为 0.55%。

分县（市、区）具体分析，遂川县的各类生态价值和林木价值一直稳居第一，因此其森林资源资产总价值也是最高，为 62.33 亿元，占全市森林资源资产总价值的 15.03%；其次是安福县，总价值 48.65 亿元，占比 11.73%；再是永丰县，以 48.22 亿元的总价值，占全市 11.63%的比重。这是价值量较高的第一层级的三个县（市、区），而价值量较低的第四、第五层级的区县，由高到低分析，峡江县森林资源资产总价值 20.82 亿元，占全市比重 5.02%；新干县总价值 15.62 亿元，占比 3.77%；青原区总价值 14.87 亿元，占比 3.59%。森林资源资产总价值最低的吉州区，仅 2.29 亿元，占全市比重仅有 0.55%，与其他县（市、区）呈现数量级的差距。

进一步地，从表 6.18 可以得知各县（市、区）森林资源资产的单位面积价值。吉安市森林资源资产单位面积价值为 22947.43 元。与总价值不同，2019 年单位面积价值最高的行政区为井冈山市，每公顷森林资源资产价值 25131.61 元；其次是总价值处于倒数第二的青原区，每公顷森林资源资产价值为 24270.79 元，位居正数第二；最低的仍为吉州区，每公顷森林资源资产价值为 15262.65 元。总价值第一的遂川县，单位森林资源资产价值为 24153.61 元，位列全市第三。通过比较不难发现，森林面积是影响价值的直接因素，遂川县凭借全市最大的林地面积，其森林资源资产的价值也占据全市第一，而单位面积价值较高的井冈山市和青原区，由于森林面积小，只能屈居其后，尤其是青原区，在林木价值、生态价值、总价值等方面仅高于吉州区。另外，吉州区作为吉安市中心城区，森林面积小是一方面，单位面积森林资源资产价值同样最低，这是城市主体功能定位导致的。作为中心城区，吉州区行政区面积较小且肩负城市发展的重担，在发展的过程中可能对森林资源的管理与保护工作存在不足。

中国知网 https://www.cnki.net

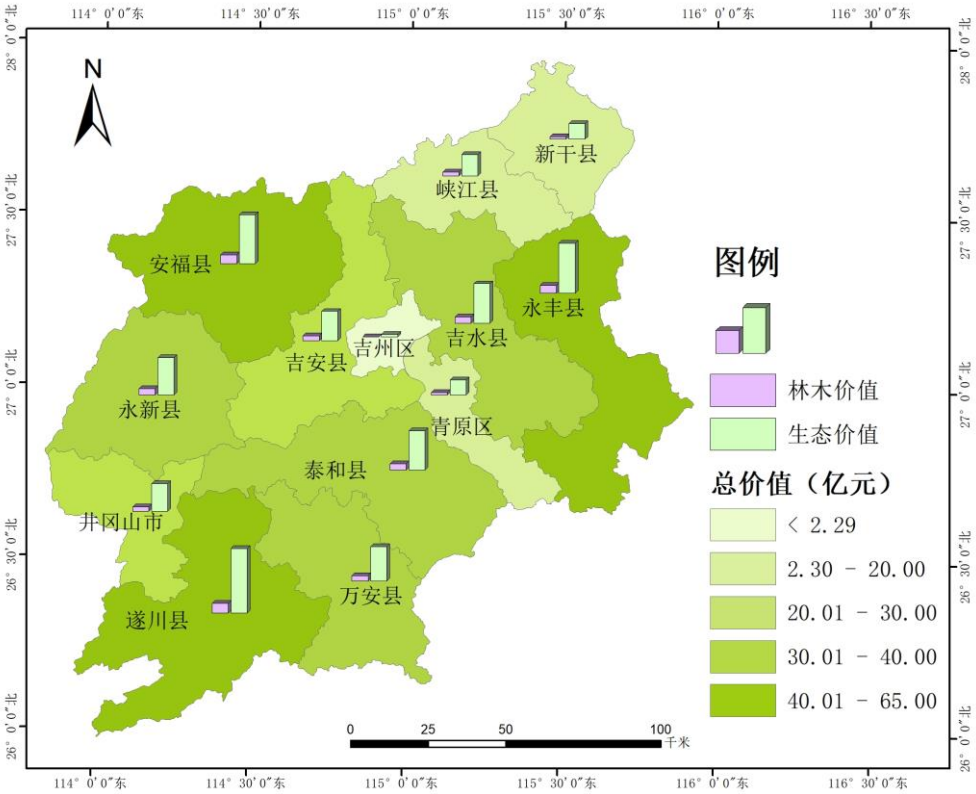


图 6.22 吉安市 2019 年森林资源资产价值总量图

Fig. 6.22 Total value of forest resources assets in Ji 'an City in 2019

表 6.18 吉安市 2019 年森林资源资产价值量

Tab. 6.18 Value of forest resources assets in Ji 'an City in 2019

行政区	林地面积（万公顷）	林木价值（亿元）	生态价值（亿元）	总价值（亿元）	单位面积价值（元/公顷）	占比（%）
新干县	7.23	2.27	13.35	15.62	21613.74	3.77
峡江县	8.76	3.07	17.75	20.82	23772.27	5.02
吉安县	13.41	3.93	24.54	28.47	21231.12	6.87
安福县	20.98	7.51	41.14	48.65	23189.27	11.73
吉水县	16.89	5.26	33.20	38.46	22771.36	9.27
青原区	6.13	2.14	12.73	14.87	24270.79	3.59
永丰县	20.53	6.37	41.85	48.22	23492.00	11.63
泰和县	17.39	5.28	32.88	38.16	21950.12	9.20
井冈山市	10.67	3.81	23.01	26.82	25131.61	6.47
万安县	14.98	4.50	28.78	33.28	22214.04	8.02
遂川县	25.80	8.27	54.06	62.33	24153.61	15.03
永新县	16.45	5.31	31.39	36.70	22310.23	8.85
吉州区	1.50	0.30	1.99	2.29	15262.65	0.55
吉安市	180.71	58.02	356.67	414.69	22947.43	100.00

中国知网 https://www.cnki.net

7 结论与讨论

7.1 研究结论

本文以江西省吉安市森林资源资产为例，明确森林资源资产的概念，构建价值评估体系，选择不同评估方法，从经济价值和生态价值两方面进行价值评估研究。首先根据遥感数据估测出吉安市 2019 年的森林蓄积量，计算出经济价值；其次以生态系统服务功能量法计算2019年森林资源资产生态价值，最后将二者汇总并从县级尺度展开分析。研究主要结论如下：

（1）结合多元逐步回归模型和随机森林模型以及人工神经网络模型分别进行建模估测森林蓄积量，以此为基础计算经济价值。建模过程中发现，影像单波段发射率、纹理特征因子、植被指数、坡度与森林蓄积量的相关性均较为显著，坡向对森林蓄积量的影响则较小。此外根据样点建立的三种模型中，多元逐步回归模型表现最差，R^2 仅为 0.2477，不能胜任蓄积量估测工作；而人工神经网络模型精度较为理想，R^2 达到 0.6348，可以作为备选模型；随机森林模型精度最高，R^2 为 0.7178，建模效果最为理想，可以作为吉安地区森林蓄积量估测工作的选择。最终得出 2019 年吉安市森林蓄积量约为 1.30 亿立方米，经济价值约为 58.02 亿元，森林林木蓄积量及价值量较高的地区主要是分布在东西两侧罗霄山脉及雩山山脉所在区域，这些区域山脉分布广，林地面积大且林木生长状况良好。

（2）在生态价值方面，从水源涵养、土壤保持、固碳释氧、净化大气四个类别进行了功能量和价值量的核算。功能量方面，根据 Invest 工具计算得到 2019 年吉安市森林资源资产水源涵养量为 123.55 亿立方米；根据土壤流失方程（RUSLE）计算得到土壤保持功能量为 805.97 万吨，其中营养物质氮磷钾保持量分别为 64235.88 吨、10800.01 吨、127343.41 吨；森林资源资产年固碳量为 492.29 万吨，释氧量 1318.00 万吨；净化大气功能中，森林资源资产年吸收 SO_2 功能量 25.79 万吨，年滞尘量为 3999.20 万吨。

价值量方面， 2019 年吉安市森林资源资产的生态价值总量为 356.67 亿元。从类别上分析，四个类别中固碳释氧价值最高，达 190.87 亿元，占全市生态总价值比重约为 53.51%，其次是水源涵养价值，82.78 亿元，占全市生态总价值比重约为 23.21%，再次是净化大气价值，为 63.08 亿元，占全市生态总价值比重约为 17.69%，最少的是土壤保持价值，19.94 亿元，占全市生态总价值比重约为 5.59%。生态价值高低的空间分布与林木蓄积量的特征类似。

（3）2019 年吉安市森林资源资产经济和生态总价值达 414.69 亿元，其中经济价值

中国知网 https://www.cnki.net

58.02 亿元，占总价值的 13.99%，生态价值 356.67 亿元，占总价值的 86.01%。可以看到生态服务相较于实物林木产品提供了更高的价值。总体上全市 13 个县（市、区）的森林资源资产价值可以分为五个层级。按从高到低顺序排列，遂川县，安福县、永新县为第一层级，吉水县、泰和县、永新县、万安县为第二层级；吉安县和井冈山市为第三层级；峡江县、新干县、青原区为第四层级；最后是吉州区。在单位面积价值方面，最高的行政区为井冈山市，每公顷森林资源资产价值 25131.61 元，其次是总价值处于倒数第二的青原区，每公顷森林资源资产价值为 24270.79 元，总价值第一的遂川县，单位森林资源资产价值为 24153.61 元，位列全市第三。最低的仍为吉州区，每公顷森林资源资产价值为 15262.65 元。总的来说，森林面积是影响价值的最直接因素。

7.2 创新点

目前为止，众多国内外学者森林资源资产价值不间断的探究取得了许多理论成果，主要集中在森林资源资产价值分类方法、评估模型，评估方法等方面，其评价尺度多以行政区为主，本研究可以丰富网格尺度上的理论研究成果，为实现森林资源的保护与合理开发提供理论基础。

另一方面，目前在相关核算领域，引入基于遥感技术的森林蓄积量评估是一种新方法。传统的森林资源经济价值核算数据选择多直接采用林业调查数据，该数据在小尺度调查中使用的一元材积表因树种材积偏高，易造成林分调查蓄积量偏高，而大尺度的材积方程则存在对县级以下范围的森林蓄积量估测难以取得准确结果的问题。本研究在经济价值的测算中，引入基于遥感技术的森林蓄积量评估方法，在保证了研究数据精度的同时兼顾数据获取效率，对经济价值测算的基础——实物量进行测算，进一步创新现有森林资源资产价值核算方法。

7.3 不足与展望

本文在研究中进行了一定创新，但仍存在一些不足：

（1）经济价值评估中，对于森林蓄积量的估测，结合各类模型的优缺点，最终选择了三种模型进行评估，分别是多元逐步回归模型、人工神经网络模型和随机森林回归模型，虽取得了不错的精度，但是并非最优解，还存在优化的空间，在后续的研究中可以在参数的调整上进行更多尝试，同时可以引入其他的模型方法对研究予以完善。另外林木价格的确定也还有进一步细化的空间，需要加以改进。

（2）在本研究中，对森林资源资产价值的核算范围是该年内的流量价值，其中对于林地本身的流量价值本研究未能给予一个明确的概念界定和科学评估方法，因而在本研

中国知网 https://www.cnki.net

究的价值评估未将其纳入评估范围，这一点在后续的研究中还需要继续完善。

森林资源资产价值评估工作，对于摸清自然资源家底具有重要意义，能有效促进“两山”转化理论的实践，增强人们对资源的保护利用意识。当前的森林资源资产价值评估工作虽然存在一些不足，但同样在资源资产负债表编制方面和森林资源管理制度方面取得了较好的成果，相信在今后不断的完善中可以取得更多更有意义的实践成果。

中国知网 https://www.cnki.net

参考文献

[1] Barbier E B. The concept of natural capital[J].Oxford Review of Economic Policy, 2019,35(1):14-36.

[2] Bottalico F, Chirici G, Giannini R, et al. Modeling Mediterranean forest structure using airborne laser scanning data[J]. International Journal of Applied Earth Observations & Geoinformation, 2017, 57: 145-153.

[3] Bsch M, Elsasser P, Franz K, et al. Forest ecosystem services in rural areas of Germany: Insights from the national TEEB study[J]. Ecosystem Services, 2018, 31(6): 77-83.

[4] Charmakar S, Oli B N, Joshi N R, et al. Forest Carbon Storage and Species Richness in FSC Certified and Non-certified Community Forests in Nepal[J]. Small-scale Forestry, 2021,20(2):199-219.

[5] Costanza R, D'Arge R, Groot R, et al. The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital[J]. Nature,1997, 387(15): 253-260.

[6] Costanza R, de Groot R, Sutton P, et al. Changes in the global value of ecosystem services[J]. Global Environmental Change,2014,26(1): 152-158.

[7] Cuni-Sanchez, A, Sullivan M , Platts P, et al. High aboveground carbon stock of African tropical montane forests[J]. Nature, 2021, 596(7378): 536-542.

[8] Ceccherini G, Duveiller G, Grassi G, et al. Abrupt increase in harvested forest area over Europe after 2015[J]. Nature, 2020, 583(7814): 72-77.

[9] Chirici G, Giannetti F, Mcroberts R E, et al. Wall-to-wall spatial prediction of growing stock volume based on Italian National Forest Inventory plots and remotely sensed data[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2019, 84: 101959.

[10] Grassi G, House J, Dentener F, et al. The key role of forests in meeting climate targets requires science for credible mitigation[J]. Nature Climate Change, 2017, 7(3): 220-226.

[11] Esteban J, Mcroberts R E, Alfredo Fernández-Landa, et al. Estimating Forest Volume and Biomass and Their Changes Using Random Forests and Remotely Sensed Data[J]. Remote Sensing,2019, 11(16):1944.

[12] Helm D. Natural capital: assets, systems, and policies[J]. Oxford Review of Economic Policy, 2019, 35(1):1-13.

[13] Li T, Cui Y, Liu A. Spatiotemporal dynamic analysis of forest ecosystem services using "big data": A case study of Anhui province, central -eastern China[J]. Journal of Cleaner Production,2017,142: 589 - 599.

[14] Leach K, Grigg A, O'Connor B, et al. A common framework of natural capital assets for use in

中国知网 https://www.cnki.net

public and private sector decision making[J]. Ecosystem Services, 2019, 36:100899.

[15] Mura M, Bottalico F, Giannetti F, et al. Exploiting the capabilities of the Sentinel-2 multi spectral instrument for predicting growing stock volume in forest ecosystems[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018, 66:126-134.

[16] Nilsson M, Nordkvist K, Jonzén J, et al. et al. A nationwide forest attribute map of Sweden predicted using airborne laser scanning data and field data from the National Forest Inventory[J]. Remote Sensing of Environment, 2017,194:447-454.

[17] Qi W H, Li H R, Zhang Q F, et al. Forest restoration efforts drive changes in land-use/land-cover and water-related ecosystem services in China's Han River Basin[J]. Ecological Engineering, 2019, 126: 64-73.

[18] Song C, Lee W, Choi H, et al. Spatial assessment of ecosystem functions and services for air purification of forests in South Korea[J]. Environmental Science & Policy,2016,63: 27-34.

[19] Strimbu V F, Ene L T, Gobakken T, et al. Post stratified change estimation for large area forest biomass using repeated ALS strip sampling[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2017, 47(6):839-847.

[20] Sutherland I J, Gergel S E, Bennett E M. Seeing the forest for its multiple ecosystem services: Indicators for cultural services in heterogeneous forests[J]. Ecological Indicators, 2016, 71: 123-133.

[21] Wang Y Y, Aallah S, SHAO G F. Spatially explicit return on investment to private forest conservation for water purification in Indiana, USA[J].Ecosystem Services, 2017, 26:45-57.

[22] 陈安琪,崔偌晗,张卫民.基于实物期权法的林木资产价值评估——以江西吉安东固采育林场为例[J].林业经济,2017,39(11):70-75+92.

[23] 曹霖,彭道黎,王雪军,等.应用 Sentinel-2A 卫星光谱与纹理信息的森林蓄积量估算[J].东北林业大学学报,2018,46(09):54-58.

[24] 陈军,武昊,张继贤,等.自然资源调查监测技术体系构建的方向与任务[J].地理学报,2022,77(05):1041-1055.

[25] 陈松,孙华,吴童,等.基于 Sentinel-2 与机载激光雷达数据的误差变量联立方程组森林蓄积量反演研究[J].中南林业科技大学学报,2020,40(12):10-19.

[26] 丛日征,王兵,牛香,等.陕西省森林生态系统净化大气环境功能价值评估[J].西北林学院学报,2017,32(05):75-82.

[27] 董蕊,任小丽,盖艾鸿,等.基于 CERN 的典型森林生态系统土壤保持功能估算分析[J].生态学报,2020(07):1-11.

[28] 冯源,田宇,朱建华,等.森林固碳释氧服务价值与异养呼吸损失量评估[J].生态学报,2020,40(14):5044-5054.

中国知网 https://www.cnki.net

[29] 高云峰,江文涛.北京市山区森林资源价值评价[J].中国农村经济,2005(07):19-29+50.

[30] 谷树忠,李维明.自然资源资产价值及其评估[N].中国经济时报,2015-11-27(014).

[31] 郭韦杉,李国平,王文涛.自然资源资产价值核算研究-以陕北佳县林木资源为例[J].干旱区资源与环境,2021,35(07):1-7.

[32] 郭韦杉,李国平,王文涛.自然资源资产核算：概念辨析及核算框架设计[J].中国人口·资源与环境,2021,31(11):11-19.

[33] 何利,范振林,沈镭,等.基于 SEEA2012 的矿产资源资产核算研究[J].财会月刊,2020(20):62-69.

[34] 胡峻嵋,黄访,铁烈华,等.四川省森林植被固碳经济价值动态[J].生态学报,2019,39(01):158-163.

[35] 胡咏君,谷树忠.自然资源资产研究态势及其分析[J].资源科学,2018,40(06):1095-1105.

[36] 黄贤金.自然资源统一管理:新时代、新特征、新趋向[J]. 资源科学,2019,41(1):1-8.

[37] 贾亦真,沈菊琴,王晗.区域水资源资产确认、计量及报表编制[J].自然资源学报,2022,37(12):3297-3312.

[38] 金京,岳彩荣,李春干,等.基于 ALS 数据和哑变量技术森林蓄积量估测[J].林业资源管理,2021(1): 77-85.

[39] 李维长.林地、林木资产评估应该使用的方法[J].经济问题探索,2000(08):104-106.

[40] 李晓赛,朱永明,赵丽,等. 基于价值系数动态调整的青龙县生态系统服务价值变化研究[J].中国生态农业学报,2015,23(3): 373- 381.

[41] 李雪敏.自然资源资产负债表的理论研究与实践探索[J].统计与决策,2021,37(21):14-19.

[42] 李莹莹,马晓双,祁国华,等.基于参数本地化 InVEST 模型的安徽省水源涵养功能研究[J].长江流域资源与环境,2022,31(02):313-325.

[43] 刘冰权,魏星星,邓锦明,等.江西省寻乌县长宁-吉潭地区土壤养分地球化学评价及影响因素分析[J].东华理工大学学报(自然科学版),2022,45(02):136-140.

[44] 刘胜涛,牛香,王兵,等.宁夏贺兰山自然保护区森林生态系统净化大气环境功能[J].生态学杂志,2019,38(2) : 420-426.

[45] 刘洋.基于 InVEST 模型的疏勒河流域生态系统服务功能时空演变[D].兰州:甘肃农业大学,2020.

[46] 刘耀辉,郑淇元,文杰,等.江西省森林土壤碳氮磷含量及其化学计量比特征分析[J].南方林业科学,2021,49(02):42-46.

[47] 刘兆华.基于多源遥感数据的森林蓄积量估测研究[D].长沙:中南林业科技大学,2021.

[48] 龙芊芊,周仁浩,岳德鹏,等.基于光谱特征的雅鲁藏布大峡谷森林枯落物水源涵养能力反演研究[J].光谱学与光谱分析,2022,42(01):229-235.

[49] 龙依,蒋馥根,孙华,等.基于 HLS 数据的森林蓄积量遥感反演[J].森林与环境学

中国知网 https://www.cnki.net

报,2021,41(06):620-628.

[50] 罗佳,黎蕾,姜芸,等.湖南省森林生态系统服务功能价值评估[J].生态科学,2022,41(04):70-77.

[51] 牛腾,卢杰,于佳鑫,等.基于光谱特征的高寒山区森林生态系统水源涵养分布反演研究[J].光谱学与光谱分析,2022,42(02):530-536.

[52] 潘莹,郑华,易齐涛,等.流域生态系统服务簇变化及影响因素——以大清河流域为例[J].生态学报,2021,41(13):5204-5213.

[53] 庞晓燕,刘海松,年学东,等.应用 Sentinel-2A 卫星遥感影像估测森林蓄积量[J].东北林业大学学报,2021,49(07):72-77+90.

[54] 裴厦,谢高地,张昌顺,等.热带季节雨林和次生林水源涵养服务价值变化过程研究[J].地理与地理信息科学,2015,31(1):96 -100.

[55] 沈镭,钟帅,胡纾寒.新时代中国自然资源研究的机遇与挑战[J].自然资源学报,2020,35(8):1773-1788.

[56] 沈钰仟,肖燚,欧阳志云,等.基于生态系统质量的水源涵养服务评估——以西南五省为例[J].山地学报,2020,38(06):816-828.

[57] 时少华,吴泰岳,李享,等.基于 ITCM 和 CVM 的运河公园游憩价值评估研究——以北京通州大运河森林公园为例[J].干旱区资源与环境,2022,36(01):201-208.

[58] 苏浩,吴次芳.基于“三生”功能的黑土区耕地资源价值影响因素分析——以黑龙江省克山县为例[J].中国土地科学,2020,34(09):77-85.

[59] 苏军德,蒲济林,李国霞,等.甘肃祁连山国家自然保护区生态系统效益评价研究[J].生态科学,2021,40(05):89-94.

[60] 孙庆祥,周华荣.阿尔泰山森林生态系统服务功能及其价值评估[J].干旱区地理,2020,43(05):1327-1336.

[61] 孙忠秋,高金萍,吴发云,等.基于机载激光雷达点云和随机森林算法的森林蓄积量估测[J].林业科学, 2021, 57(8):68-81.

[62] 宋马林,崔连标,周远翔.中国自然资源管理体制与制度：现状、问题及展望[J].自然资源学报,2022,37(01):1-16.

[63] 石薇,汪劲松.水资源资产负债表的编制方法[J].统计与决策,2021,37(12):24-28.

[64] 谭荣.自然资源资产价值实现、价格形成与制度创新[J].土地科学动态,2023,(1):18-23.

[65] 唐茜.重庆市森林的滞尘效应及净化大气功能[J].水土保持通报,2019,39(05):301-307.

[66] 王佳,宋珊芸,刘霞,等.结合影像光谱与地形因子的森林蓄积量估测模型[J].农业机械学报,2014,45(05):216-220.

[67] 王俊杰.基于生态足迹法的自然资源资产负债表编制研究——以江西省土地资源为例[J].当

中国知网 https://www.cnki.net

代财经,2021(12):15-27.

[68] 王月婷,张晓丽,杨慧乔,等.基于 Landsat8 卫星光谱与纹理信息的森林蓄积量估算[J].浙江农林大学学报,2015,32(03):384-391.

[69] 吴国雄,郑度,尹伟伦,等.专家笔谈: 多学科融合视角下的自然资源要素综合观测体系构建[J].资源科学, 2020, 42(10):1839-1848.

[70] 邬紫荆,曾辉.基于meta分析的中国森林生态系统服务价值评估[J].生态学报,2021,41(14):5533-5545.

[71] 夏俊涛.习水国家级自然保护区森林生态系统服务价值评估[D].贵阳:贵州师范大学,2022.

[72] 肖越,许晓东,龙江平,等.基于国产高分数据的森林蓄积量反演研究[J].林业资源管理,2021(03):101-107.

[73] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等.青藏高原生态资产的价值评估[J].自然资源学报, 2003,18(2):189-196.

[74] 谢高地,张彩霞,张雷明,等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J].自然资源学报,2015,30(8):1243 -1254.

[75] 谢哲根,韩国康,童红卫,等.序列林价及其在林木资源资产评估中的应用[J].林业科学,2016,52(06):43-53.

[76] 许庭毓,牛香,王兵.辽宁省森林生态系统服务功能空间格局[J].中国水土保持科学(中英文),2021,19(06):100-107.

[77] 徐亚莉,张明芳,李强,等.基于植被和环境因子的亚高山森林土壤水源涵养功能空间尺度上推模型构建——以岷江上游杂谷脑流域为例[J/OL].生态学报:1-14[2023-03-13].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2031.Q.20230306.1417.036.html.

[78] 严金明,王晓莉,夏方舟.重塑自然资源管理新格局:目标定位、价值导向与战略选择[J].中国土地科学,2018,32(04):1-7.

[79] 杨昔,喻建华,乔亮亮.自然资源资产价值评估初探[J].中国国土资源经济,2020,33(09):29-34+80.

[80] 殷格兰,邵景安,郭跃,等.林地资源变化对森林生态系统服务功能的影响——以南水北调核心水源地淅川县为例[J].生态学报,2017,37(20):6973-6985.

[81] 殷楠,王帅,刘焱序.生态系统服务价值评估:研究进展与展望[J].生态学杂志,2021,40(1): 233-244.

[82] 邹文涛,何友均,叶兵,等.基于 InVEST 模型的森林生态系统服务功能评估研究进展[J].世界林业研究,2020,33(04):19-24.

[83] 张天培.摸清国有自然资源资产家底[N].人民日报,2021-12-23(018).

中国知网 https://www.cnki.net

[84] 张卫民,李辰颖.森林资源资产负债表核算系统研究[J].自然资源学报,2019,34(06):1245-1258.

[85] 张心语,郭诗韵,王亚萍,等.雄安新区森林生态系统服务功能价值评估及其空间分析研究[J].河南农业大学学报,2022,56(04):661-673+684.

[86] 张祥华,秦会艳,黄颖利,等.碳中和目标下中国森林固碳量跨期分配及成本[J].应用生态学报,2022,33(09):2413-2421.

[87] 张占忠,施俊美,瞿林,等.基于单位面积价值当量因子的云南省森林生态系统服务功能价值评估[J].林业调查规划,2022,47(04):67-73.

[88] 赵亚茹,周俊菊,雷莉,等.基于 InVEST 模型的石羊河上游产水量驱动因素识别[J].生态学杂志,2019,38(12):3789-3799.

[89] 郑沛,杨林伟,韩玮,等.基于生态系统服务功能的森林社会效益价值评估——以云南省森林资源为例[J].生态经济,2020,36(05):161-170.

[90] 中华人民共和国国家环境保护局.中国生物多样性国情研究报告[M].中国环境科学出版社,1998.

[91] 朱道林,杜挺.中国耕地资源资产核算方法与结果分析[J].中国土地科学,2017,31(10):23-31+2+97.

[92] 朱道林,张晖,段文技,等.自然资源资产核算的逻辑规则与土地资源资产核算方法探讨[J].中国土地科学,2019,33(11):1-7.

中国知网 https://www.cnki.net

JIANGXI UNIVERSITY OF FINANCE AND ECONOMICS
1923
江西财经大学

中国知网 https://www.cnki.net