

密级_____



桂林电子科技大学
GUILIN UNIVERSITY OF ELECTRONIC TECHNOLOGY

硕士学位论文

(全日制专业学位硕士)

题目 广西高时空分辨率降水与地表水体遥感变化监测

(英文) Remote sensing of precipitation and surface water with high temporal and spatial resolution in Guangxi

研究生学号: 20022303176

研究生姓名: 赵宁

指导教师姓名、职称: 邱玉宝 研究员

申请学位类别: 电子信息硕士

领域: 通信工程 (含宽带网络、移动通信等)

论文答辩日期: 2023年5月26日

摘要

全球气候变化和人类活动的影响使得水资源的时空分布不均,极端干旱和洪涝灾害也越来越频繁地发生。这些现象导致不同地区面临着更加紧迫和严峻的水资源短缺、旱涝灾害和水生态危机等问题。这些问题不仅对当地的经济、社会和生态环境产生深远的影响,而且对全球的可持续发展也具有重要的影响。广西地处亚热带地区,气候湿润,降水量大,水资源丰富,由于人类活动和气候变化等因素的影响,广西地区的水资源与环境问题日益突出。高时空分辨率遥感监测对于准确获取地表水资源的动态信息、把握其空间分布状态以及分析降水与地表水体的相关性关系具有重要研究意义。

本文对广西地区开展降水与地表水体的高时空分辨率遥感监测及分析,为了获取更高精度的卫星降水数据,利用 GPM 卫星降水数据,结合 MODIS 增强植被指数、地表温度、地表增散发数据、DEM 高程数据为环境变量,构建地理加权回归模型,开展了降水数据的月度降尺度研究。同时,使用哨兵一号雷达数据和哨兵二号光学数据,基于已有的雷达与光学影像相结合的水体提取方法,结合局部阈值法和更精细的河流数据进行优化,并利用 ESA 土地覆盖数据,高精度地提取了广西地表水体。最后,对广西地区的降水和地表水体的时空变化特征进行了定量分析,探讨了地表水体变化与降水之间的相关性关系,并通过广西主要河流划分为不同的流域,开展了不同流域的时空变化情况及关联性分析。研究结果表明:

(1) 基于 GPM 卫星降水数据通过地理加权回归模型,对 2001-2020 年广西及东盟区域进行月度降尺度,并利用 2001-2020 年 2679 个地面观测站点数据对降尺度数据集进行验证,相关系数、均方根误差和偏差分别为 0.792、74.610mm、-0.122%。该降尺度方法能够有效反映 1 km 分辨率下的降水时空分布及其差异性,可广泛应用于水资源、农业、生态环境、灾害模拟等研究领域。

(2) 基于哨兵卫星数据进行 2020 年广西地表水体提取,并采用局部阈值法和高精度河流数据针对大范围山区提取不精细、可泛化性低等缺点,对已有基于成像几何拓扑关系的高频次水体提取方法进行优化,进行大范围、系统化和精细化的水体信息提取。优化结果与 2020 ESA 土地覆盖数据进行对比验证,利用广西 2020 年最大水面积作为辅助数据随机生成 4000 个验证样本,验证结果表明,整体精度良好(OA=90.97%, Kappa=0.8196),水体的用户精度为 82.1%,制图精度为 99.81%,漏分误差为 0.19%,错分误差为 17.9%。可实现广西地表水体每 12 天的遥感监测。

(3) 根据 2001-2020 年广西降水数据的长时间序列时空变化分析结果显示,广西的年均降水量存在一定的波动性,并且总体上呈上升趋势。此外,广西的年均降水量空间分布主要表现为南部较高、北部较低、东部较多和西部较少的趋势。

(4) 根据 2020 年广西每 12 天时间分辨率地表水体动态监测结果显示,2020 年

广西地表水体面积变化较大,呈现出季节性变化,其中夏季和秋季的地表水体面积相对较大,而冬季和春季的地表水体面积相对较小。但其空间分布不均匀,地表水体集中分布在中部和西南部的海岸线附近,而北部和西北部地区山体居多,地表水体较少。根据流域分析结果,大多数流域的水体面积呈增长趋势,其中人类活动较多的流域和西部低海拔流域增长明显,而山区较多的流域增长比较缓慢。根据淹没频率空间分布图显示,在大型湖泊和河流的中心淹没频率较高,岸滩、河边及城区淹没频率较低。

(5) 通过广西地表水体面积变化与降水变化曲线结果显示,广西地表水体面积与降水量存在明显相关性,降水量越大,地表水体面积也会相应增加。然而,由于广西地形地貌复杂,形成和分布地表水体受到多个因素的影响,降水量是影响地表水体面积变化的其中一个因素,还受到地表水体自身特性、地形和土壤等因素的影响。

关键词: 降水; 地表水体; 高时空分辨率; 遥感监测; 广西;

Abstract

Global climate change and human activities cause uneven distribution of water resources in time and space, and extreme droughts and floods occur frequently. As a result, different regions are faced with problems such as water shortage, drought and flood disaster and water ecological crisis. These problems have a profound impact on the economy, society and the ecological environment, but also have an important impact on sustainable development. Guangxi is located in the subtropical region, the precipitation is large, the water resources are rich, the water resources and environmental problems are increasingly prominent. It is of great significance to obtain the dynamic information of surface water resources through remote sensing monitoring, grasp its spatial distribution and analyze the correlation between precipitation and surface water.

This paper carried out high-temporal-spatial-resolution remote sensing monitoring and analysis of precipitation and surface water in Guangxi, using GPM satellite precipitation data, combined with MODIS enhanced vegetation index, surface temperature, surface augmentation data, and DEM elevation data as environmental variables to construct a geographically weighted regression. A monthly downscaling study of precipitation data was carried out. At the same time, based on Sentinel-1 radar data and Sentinel-2 optical data, referring to the existing water body extraction method combining radar and optical images, and optimizing it by combining local threshold method and finer river data, and using ESA land cover Data, surface water bodies in Guangxi were extracted with high precision. Finally, the quantitative analysis of the temporal and spatial variation characteristics of precipitation and surface water in Guangxi is carried out, and the relationship between the variation of surface water and precipitation is discussed. Changes. Research indicates:

(1) Monthly downscaling of GPM satellite precipitation data was performed based on a geographically weighted regression model, and the downscaling data set was verified by the data of 2679 ground observation stations from 2001 to 2020. The correlation coefficient, root mean square error and deviation were 0.792 , 74.610mm, -0.122%. The data can effectively reflect the temporal and spatial distribution of precipitation and its differences at a resolution of 1 km, and can be widely used in research fields such as water resources, agriculture, ecological environment, and disaster simulation.

(2) Based on multi-source remote sensing data, surface water bodies in Guangxi were extracted, compared with 2020 ESA land cover data, and 4,000 verification samples were

randomly generated using the largest water area in Guangxi in 2020 as auxiliary data. The verification results show that the overall accuracy is good (OA=90.97%, Kappa=0.8196), the user accuracy of the water body is 82.1%, the mapping accuracy is 99.81%, the error of omission is 0.19%, and the error of misclassification is 17.9%.

(3) According to the analysis results of long-term temporal and spatial changes of precipitation data in Guangxi from 2001 to 2020, the average annual precipitation in Guangxi has certain fluctuations, and generally shows an upward trend. The average annual precipitation in Guangxi is 1727.85 mm, of which the highest value was 2031.86 mm in 2015, and the lowest value was 1380.57 mm in 2011. In addition, the spatial distribution of average annual precipitation in Guangxi mainly shows a trend of higher in the south, lower in the north, more in the east and less in the west. From south to north, the average annual precipitation gradually decreases; from east to west, the average annual precipitation also gradually decreases.

(4) According to the dynamic monitoring results of surface water bodies in Guangxi every 12 days in 2020, the area of surface water bodies in Guangxi has changed greatly in 2020, showing seasonal changes. And the surface water body area in spring is relatively small. However, its spatial distribution is uneven, and the surface water bodies are concentrated near the coastline in the central and southwestern regions, while the northern and northwestern regions have more mountains and less surface water bodies. According to the analysis results of watersheds, the water body area of most watersheds showed an increasing trend, among which the watershed IV with more human activities and the western low-altitude watershed I increased significantly, while the watersheds with more mountainous areas increased slowly. According to the spatial distribution map of inundation frequency, the inundation frequency is higher in the center of large lakes and rivers, while the inundation frequency in banks, riversides and urban areas is lower.

(5) There is an obvious correlation between the surface water area and precipitation in Guangxi. The greater the precipitation, the surface water area will increase correspondingly. However, due to the complex topography and geomorphology in Guangxi, the formation and distribution of surface water bodies are affected by many factors. Precipitation is one of the factors affecting the change of surface water area, and it is also affected by the characteristics of surface water, terrain and soil.

Keywords: Guangxi; precipitation; surface water body; high temporal and spatial resolution; remote sensing monitoring

目 录

第一章 绪论.....	1
§1.1 研究背景与意义.....	1
§1.2 国内外研究现状.....	1
§1.2.1 基于卫星遥感的降水数据降尺度研究现状	1
§1.2.2 基于遥感数据的水体提取研究现状.....	3
§1.2.3 降水与地表水体相关性分析研究现状	4
§1.3 研究内容.....	5
§1.4 论文组织结构及技术路线	6
第二章 研究区概况与数据预处理	8
§2.1 研究区概况.....	8
§2.2 研究数据.....	9
§2.2.1 哨兵卫星数据	9
§2.2.2 河流矢量数据	11
§2.2.3 土地覆盖数据	12
§2.2.4 GPM 降水数据	12
§2.2.5 MODIS 环境变量数据.....	13
§2.2.6 地形海拔数据	13
§2.3 哨兵数据预处理.....	13
§2.3.1 哨兵一号数据预处理	13
§2.3.2 哨兵二号数据预处理.....	14
第三章 基于 GWR 模型降尺度降水数据研究	15
§3.1 卫星降水数据的降尺度方法	15
§3.1.1 GWR 地理加权回归模型	15
§3.1.2 核函数选择.....	16
§3.1.3 比例指数法.....	16
§3.2 卫星降水数据的降尺度过程	17
§3.2.1 降尺度输入数据.....	17
§3.2.2 降水数据预处理.....	17
§3.2.3 降尺度过程.....	18
§3.3 卫星降水数据的精度评估	20
§3.3.1 评估方法.....	20
§3.3.2 评估结果.....	21
§3.4 广西及各市年均降水时空变化特征分析	24
§3.4.1 年均降水时间变化分析.....	24

§3.4.2 年均降水空间变化分析.....	25
第四章 地表水体遥感提取	27
§4.1 水体提取方法.....	27
§4.1.1 雷达影像水体提取方法.....	27
§4.1.2 光学影像水体提取方法.....	28
§4.1.3 雷达与光学影像相结合水体提取方法	28
§4.2 水体提取精度评价方法	32
§4.3 水体提取结果与精度验证	33
§4.3.1 定性比较.....	33
§4.3.2 定量评估.....	34
第五章 广西地区地表水体面积与降水数据时序分析	37
§5.1 地表水体面积时空变化分析	37
§5.2 不同流域地表水体面积时空变化分析	38
§5.3 地表水体与降水的相关性变化特征分析	44
第六章 结论与展望	46
§6.1 结论.....	46
§6.2 主要创新点.....	47
§6.3 讨论与展望.....	48
参考文献.....	49

第一章 绪论

§ 1.1 研究背景与意义

水资源是重要的自然资源和生态基础。及时、准确地获取地表水的动态信息和分析,对于水资源可持续管理与保护、水旱灾害快速评估与预防等具有重要的价值^[1]。全球气候变化日益明显,导致水资源短缺、水污染、水环境危机等问题在全球范围内不断出现^[2, 3]。广西地处亚热带地区,气候湿润,雨量充足,但降水分布不均,雨季和旱季的交替容易引发洪涝和干旱等自然灾害。对广西地表水体和降水进行研究和监测,可及时掌握地表水体动态信息,了解地表水的空间分布情况,对水资源管理与生态旅游等具有重要的现实意义。同时,也可以提高对自然灾害的预警和防范能力,为广西地区的可持续发展提供更加可靠的数据支持。

目前,广西地区的水资源监测存在一些问题。首先,监测站点分布不均,特别是在地形复杂的山区及偏远地区,无法布设气象站点,并且已有的卫星降水数据空间分辨率低,对于多山地区和局地降水的监测不够精确,对水资源的描述和刻画不够精细,并没有一套高时空分辨的降水数据。其次,当前广西地表水体的提取方法也不够精细,时间分辨率低,不能够及时准确的掌握地表水体变化情况。

高时空分辨率遥感技术是一种获取海量、准确、经济的地理信息的手段,尤其在水环境监测与评估方面有着广泛应用,为地表水体的快速准确提取以及动态监测提供了不可缺少的技术支持。通过遥感技术,可实现对广西地区水体的高精度、高时空分辨率的监测。本文利用地理加权回归模型,对 GPM 卫星降水数据进行降尺度处理,空间分辨率可达到 1km。同时采用哨兵一号和哨兵二号遥感影像,并结合雷达与光学遥感优势,针对地形复杂,多云多雨的山区,地表水体提取频次低、细小水体识别度差、可泛性低等不足,对广西地表水体精细提取,可实现每 12 天的动态变化监测对广西地区开展降水与地表水体的监测和分析,高精度高时空分辨率的降水与地表水体数据,不仅可以为水资源的合理利用提供科学依据,还可以为防洪减灾、生态环境保护 and 经济发展等方面提供决策支持。

§ 1.2 国内外研究现状

§ 1.2.1 基于卫星遥感的降水数据降尺度研究现状

粗糙分辨率的降水数据无法满足旱涝灾害分析和水资源评价的需求。传统的观测

方法存在不均匀分布的问题,容易造成降水资料在空间上的不连续,具有明显的局限性^[4]。卫星降水数据具有高时空分辨率、连续性和全球覆盖等优势。然而,其数据精度存在一定程度的误差和不确定性,需要进行降尺度处理来提高数据精度和适应局部应用需求,以提高区域降水空间分布的认识、加强水文模拟和水资源管理。

为了获取高时空分辨率的降水资料,国内外研究人员开发了很多算法,统计方法是目前卫星降水数据降尺度的主要方法之一,其基本思想是通过建立降水观测站点和卫星降水数据之间的统计关系来实现降尺度。一般线性回归模型采用经典统计学理论中的最小二乘法,有完善的统计推断方法,但由于降水与地表特征之间存在空间非平稳性和尺度依赖,忽略了数据的局部特性^[5]。朱姜韬^[6]利用中国气象局提供的降水数据和 NCEP/NCAR 再分析资料,构建了西北地区东部降水短期预测的统计降尺度模型,认为统计降尺度模型总体能够较好预测西北地区东部的降水,可为西北地区降水的短期气候预测提供新的思路。杜懿^[7]基于统计降尺度对 CanESM2 全球气候模式输出的气温和降水进行了统计降尺度处理。该方法具有简单易行、可操作性强等优势,但也存在着受站点分布影响大、对降水场变化敏感等缺点。

近年来还出现了一些新的方法,如最小二乘支持向量机、随机森林等。董甲平^[8]构建了一种基于卷积神经网络的降水降尺度模型结果表明该模型具有良好的收敛性,在流域范围的降尺度应用方面具有良好的潜力。李新同^[9]基于优化后的 LSTM 深度学习模型;引入植被、坡向、坡度等多个降水主导因子,对 GPM 逐日降水产品进行降尺度,结果表明基于深度学习的降尺度模型无论在日尺度、月尺度都有较高的精度,且在时间和空间具有一定的普适性。张焱^[10]利用 CWRP (Climate-Weather Research and Forecasting model) 对国家气候中心 BCC_CSM1.1m 业务预测模式短期气候预测结果进行中国区域降尺度。随机森林模型和人工神经网络模型是基于降水和预测变量之间的关系在空间上保持不变的假设,并没有考虑到空间异质性。

地理加权回归模型不仅强调了空间局部特征,还能反映降水的空间异质性^[11]。以往研究表明,降水分布的变化与蒸散发、云量、风速和地表温度等因素密切相关,为山区降水变化趋势描述提供了必要的依据^[12,13]。张寒博^[5]通过构建地理加权回归模型 (GWR),结合数字高程模型、增强型植被指数、归一化植被指数、坡向,降尺度数据在保证数据精度的前提下,空间分辨率有较大提升(由 0.25°提升至 1 km)。柏荷^[14],采用地理加权回归 (GWR) 模型、混合地理加权回归 (MGWR) 模型 2 种降尺度方法,结合归一化植被指数、数字高程模型、坡度、地表温度和风速多种反映降水量空间分布特征的影响因子,得到了黄河流域 1 km 空间分辨率的降尺度降水数据。因此,本文将引入地理加权回归模型开展卫星降水数据的降尺度研究

§ 1.2.2 基于遥感数据的水体提取研究现状

遥感技术监测具有空间覆盖范围广、重返频次多的特点,在获取地表水体动态变化方面得到了广泛应用。传统方法主要采用光学遥感和雷达遥感对地表水体进行提取[15]。

基于光学影像开展水体提取主要分为阈值法、分类器法和自动化法^[16]。其中,段秋亚^[17]采用归一化差分水体指数(NDWI)阈值法、支持向量机(SVM)和面向对象等方法对鄱阳湖区的 GF-1 影像进行了水体信息提取实验,并发现 SVM 法的提取精度最高,面向对象法次之,NDWI 阈值法相对最低。杜敬^[18]则利用深度学习算法结合归一化差分水体指数和湿度分量,构建了空谱联合估计模型,对湿地进行了提取。邓开元^[19]基于不同的地物具有不同的光谱反射特性,利用光学遥感水体提取的原理,提出一种归一化多波段水体指数 NDMBWI,证明了该指数能抑制云及其云下阴影。但光学影像受云层干扰严重,数据质量较少,能使用的数据量较少,时间分辨率低等缺点。

合成孔径雷达发射的电磁波信号可以穿透云层,不受云雨天气的干扰,一定程度上弥补了光学影像的不足,但其包含波段较少,研究中主要根据水体的后向散射系数、纹理特征以及轮廓等进行判别,在多山地区存在山体阴影的影响^[20]。冯崎基于 SAR 图像的阈值分割法,提出一种基于 Otsu 算法的 SAR 图像水体提取新方法。该方法首先基于双极化数据构建自然指数函数,优化原始 Sentinel-1 数据图像像元直方图分布,再结合 Otsu 算法对图像进行水体提取,最后基于 DEM 数据去除误提取的山体阴影^[21]。韦嫦通过阈值分割法、随机森林算法提取湿地水体,实现湿地水域面积的动态变化监测^[22]。柴宝惠基于机器学习和图像形态学对上海地区地表水体进行提取,结果表明,该方法能够充分挖掘地图中的颜色和形态结构信息,以半自动方式彩色近代地图中的地表水体信息提取出来^[23]。虽然雷达影像能够不受云的干扰,但运用单一的雷达数据进行提取,会有山体阴影或其他地物的影像。

结合光学影像与雷达数据的优势,开展多源遥感数据的联合使用,有助于实现水体的动态精准提取。黄敏敏^[24]建立了 Sentinel-1 雷达和光学图像融合模型,将 Sentinel-1 影像和融合后的产品作为分类特征,结合 Sentinel-2 光学影像,从不同角度传递并加强原始地物散射信息。史宜梦^[25]基于 Google Earth Engine 云平台及其提供的 Landsat8、Sentinel-1/2 影像数据,利用改进的归一化水体指数(Modified Normalized Difference Water Index)与天津法(Otsu)对 Landsat8、Sentinel-2 影像进行水体提取,利用 Canny 边缘检测与天津法相结合的自适应阈值法对 Sentinel-1 影像进行水体提取。

当前国内外研究主要集中在全球、国家和区域等尺度的水体提取,对水体的时间刻画主要为年或月尺度^[26,27];对水体的空间刻画能力在 30 m 以上,无法满足对细小水体的精准识别,极大限制了地表水体数据的信息服务能力^[28,29];同时方法的适用性

较差,无法满足复杂气候与地形条件影响地区(如,多云雨山区)的应用,亟需发展相关技术与产品,以服务区域水资源管理与保护、水旱灾害预防与快速评估。本文将结合哨兵一号与哨兵二号,实现广西山区高频次精细动态水体信息提取。

§ 1.2.3 降水与地表水体相关性分析研究现状

全球气候变暖和人类活动的影响,导致了地球水循环的变化,水资源管理成为越来越重要的议题,降水与地表水体的相关性分析是研究水文过程和水资源管理的关键问题之一,受到越来越多的关注^[30]。许多国内外的研究表明,降水和地表水体之间存在着密切的相关性,但具体的相关性因地域、气候等因素而异。

黄河流域、长江流域、珠江流域等多个流域的研究表明,降水是地表水体的重要来源之一,降水量的大小直接影响着地表水体的水量和水质。例如,吴宇凡通过对1985年以来粤港澳大湾区地表水体时空演变特征与驱动因素的研究,发现自然因子对大湾区地表水体时空分异的解释力高于社会经济因子。其中,年降水量和植被覆盖率对地表水体时空分异的解释力分别达到了40%和34%。此外,这两个因子还呈现出双因子增强的交互关系^[31]。一些研究也表明,气候变化对降水和地表水体的相关性产生了影响。例如,赵梓琨开展了1986—2021年黄河流域地表水体面积的时空变化特征研究,结果表明降水量的增加是导致流域水体面积增加的主要原因,其贡献率达到了55%。此外,植被恢复和兴建水利工程等对流域水体面积也起到了促进作用。但是,人类取水活动的加剧则对流域水体面积产生了减少的影响^[32]。严夏青^[33]基于谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE)平台利用陆地卫星(Landsat)和哨兵一号(Sentinel-1)数据使用最大类间方差法提取了长江干流(上海入海口至宜宾段)水体面积,发现了降水是影响长江干流水体面积变化的主要因子,降水量直接影响到长江干流地表水体的空间分布以及两类水体的相互转化,降水量偏少的年份季节性水体转化为永久性水体,降水量偏多的年份永久性水体转化为季节性水体。长江干流年气温均值与地表水体面积呈负相关,间接影响长江干流水体面积变化。另外,人类活动也对长江干流水体面积变化产生一定的影响。梁超利用GEE平台的数据调用和计算优势,处理了21788幅Landsat图像场景,提取了2000年-2017年黄河流域的最大水体、季节性水体和永久性水体,采用相关分析方法来分析黄河流域水体面积变化与降水和黄河流域主要湖泊水库面积变化因子的影响程度^[34]。

总体而言,降水是地表水体时空变化的主要驱动力之一。同时,降水和地表水体之间的相关性是一个复杂的问题,需要综合考虑地域、气候、地形等多种因素。不同类型的地表水体对降水的响应也存在差异,需要进一步深入研究,这方面的研究为水资源的有效利用和保护提供科学依据。

§ 1.3 研究内容

本文以广西壮族自治区为研究区域,利用多源遥感数据对广西降水和地表水体进行高时空分辨率遥感监测和分析。本文主要内容如下:

(1) 卫星降水数据降尺度模型研究

基于地理加权回归模型,结合与降水相关性较强的环境变量(包括 MOD13A3 增强植被指数、MOD11C3 地表温度、MOD16A3 地表蒸散发和 ASTER GDEM 数据),对 10 km 空间分辨率的 GPM 卫星降水数据进行降尺度。通过比较高斯核函数、指数核函数、双重平方核函数、立方距离核函数和窗函数五种核函数,我们最终选取精度较好的指数核函数来计算权重矩阵。然后,我们通过权重矩阵得到每个环境变量的回归参数,并将其代入地理加权回归模型中,得到 1km 分辨率的年度降水数据。最后,我们采用比例指数法得到了 2001-2020 年广西及东盟区域月度降水降尺度数据,并将降尺度后的结果与原始 GPM 数据分别与气象站数据进行对比验证。结果表明,降尺度后的数据保持了原始降水数据的精度,且降尺度后的空间分辨率得到了提高,能够更细致地反映降水空间分布。具体来说,降尺度后的数据与原始降水数据和气象站数据的皮尔逊相关系数相等($CC=0.890$),均与显著相关;拟合优度($R^2=0.792$)、均方根误差($RMSE=74.610mm$)和偏差($BIAS=-0.122%$)略有提升。

(2) 水体提取方法的研究

基于哨兵一号雷达数据和哨兵二号光学数据,利用矢栅结合的方式,将雷达影像和光学影像进行优势互补融合,实现了对广西水体信息的大范围、系统化和精细化提取。首先,对哨兵一号雷达数据通过计算 SDWI 水体指数,针对不同地形地貌,对覆盖全广西的 13 景雷达影像采用局部阈值法进行初步提取;同时,对哨兵二号光学数据采用单波段阈值法和局部阈值法进行初步提取。其次,通过利用河流矢量数据将 SAR 与光学影像水体初步提取结果分为河流数据和湖库数据两部分。河流部分不存在山体阴影等其他干扰,无需参与叠加运算,以高时间分辨率的哨兵一号为准,最后与湖库数据进行合并。湖库部分通过叠加运算,求出哨兵一号与哨兵二号影像的交集,通过判断两者占相交部分的比例,当占相交部分比例较大时,判断为水体进行保留,当占相交比例较小时,判断为阴影或其他干扰进行剔除。最后,利用欧空局(ESA) 10 m 土地覆盖数据的林地、草地和建筑覆盖类型数据与水体结果进行叠加分析,剔除小斑块阴影,得到 2020 年 31 期广西每 12 天地表水体数据。通过与 Google Earth 影像和 2020 年 ESA 土地覆盖数据进行定性和定量的对比验证,结果表明该方法与实际相符,能够很好地描绘大小水体的轮廓。整体精度良好($OA=90.97%$, $Kappa=0.8196$),水体的用户精度为 82.1%,制图精度为 99.81%,漏分误差为 0.19%,错分误差为 17.9%。

(3) 高精度河流数据集的制作

目前的全球河流数据集会有未识别的河流,存在部分中断的河流等问题,不能详细描述广西的河流。本文通过对比已有的河流数据产品,最终选取 2010 欧亚大陆河流系统矢量数据集和 2020 ESA 土地分类数据,采用相交、按位置选取、融合、更新、手工选取、膨胀和收缩等方法,制作了该研究区所在流域的河流数据集。通过目视解译分别与 Hydro RIVERS 数据集、Google Earth 对比,河流走势和位置比较贴合,可以满足实际的应用需求。验证结果表明,该数据集能够准确地描绘河流的空间分布,填补了 2010 河流数据缺少的支流,且能够减少河流断流、缺失现象。

(4) 降水与地表水体的时空变化分析

结合广西 1km 分辨率月度降水降尺度数据与广西每 12 天地表水体面积进行时空特征分析,分析其相关性与变化规律,探讨了降水对广西地表水时空变化的驱动力影响。此外,通过对广西按流域进行时空监测,更加细致地分析流域地表水体与降水之间的时空变化规律。

§ 1.4 论文组织结构及技术路线

基于本文研究内容,全文共分为六章。

第一章,绪论。阐述了广西地表水体与降水监测的背景及意义,并分别介绍了卫星降水数据降尺度研究、地表水体提取及降水与地表水体相关性分析的国内外现状,并介绍了对本文的章节安排及技术路线。

第二章,研究区概况与数据预处理。介绍了广西壮族自治区的地理、气候等概况。并对卫星降水数据降尺度和地表水体提取所用到的遥感数据、辅助数据及哨兵卫星数据的预处理进行了介绍。

第三章,基于 GWR 模型降尺度降水数据研究。介绍了 GWR 模型、核函数的选择,降尺度过程及精度评估,最后对广西及各市年均降水开展时空变化特征分析。

第四章,地表水体遥感提取。介绍了基于哨兵一号与哨兵二号卫星影像相结合的水体提取方法,水体提取过程及对该方法进行了精度评估。并介绍了为进一步优化该方法,引入了局部阈值法和精细河流水体的融合方法,使水体提取结果更加准确和可靠。

第五章,广西地区地表水体面积与降水数据时序分析。分别对广西地表水体面积时空变化进行分析,不同流域地表水体面积进行时空变化分析,以及地表水体面积与降水的相关性分析。

第六章,结论与展望。总结了本文的工作及其研究的价值,讨论了本文的不足和需要改进的地方。

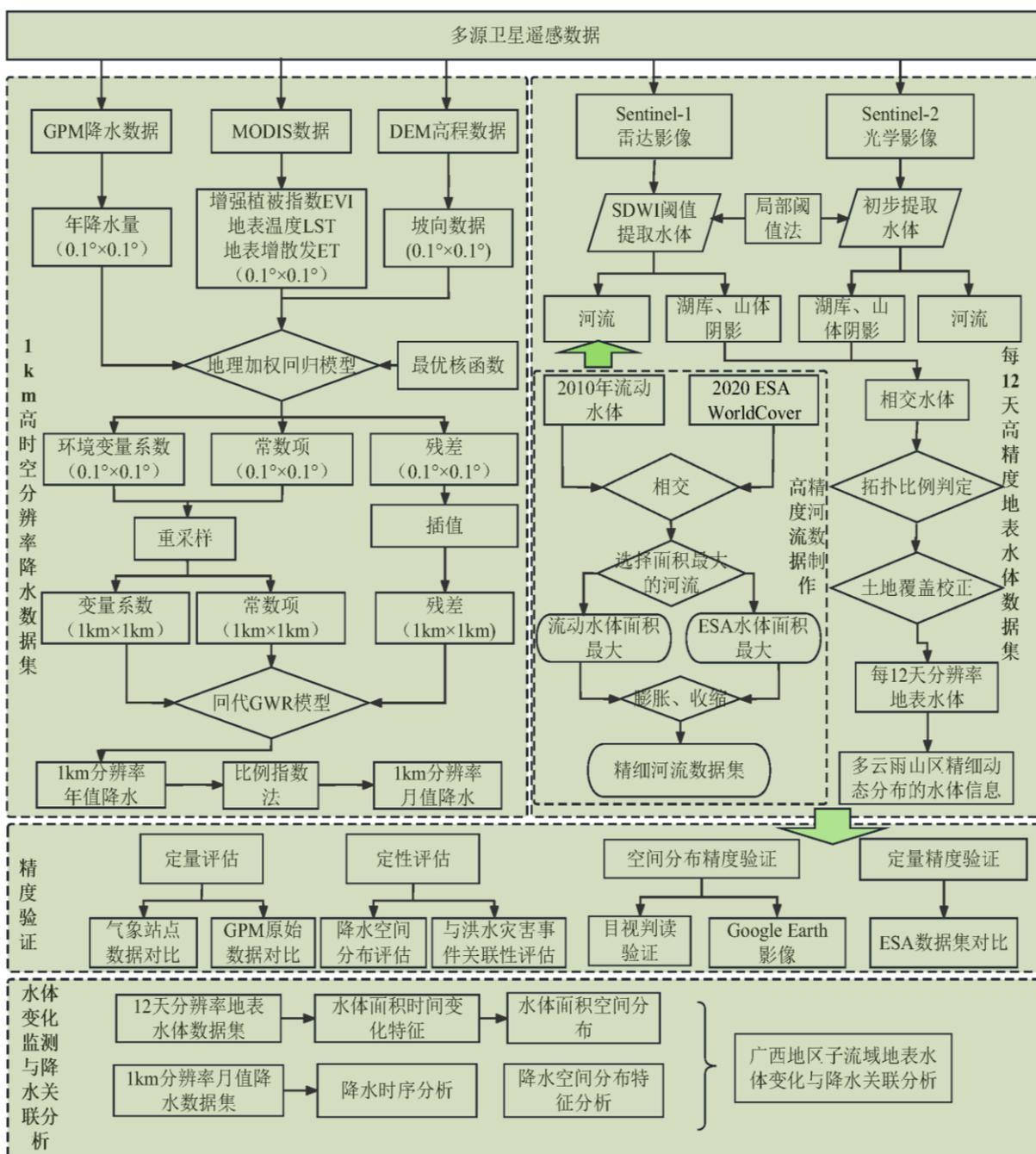


图 1 论文技术路线

第二章 研究区概况与数据预处理

§ 2.1 研究区概况

广西壮族自治区位于东经 104° 28'-112° 04'，北纬 20° 54'-26° 23'之间，东与广东，西与云南相连，南临北部湾并与海南隔海相望，东北接湖南，西北靠贵州，行政区域土地面积 23.76 万平方千米。广西地貌类型多样，主要山地、丘陵、台地、平原等，山岭连绵、岭谷相间，四周多被山地、高原环绕，中部和南部多丘陵平地，呈盆地状，有“广西盆地”之称。

地处北回归线横贯中部，南临热带海洋，北接南岭山地，西延云贵高原，属亚热带季风气候区。气候温暖，雨水丰沛，光照充足。广西全区年平均气温 17.5~23.5℃，平均年降水量 1653 毫米，其中百色、河池以及崇左大部，三江、柳城、忻城、隆安、武鸣等地降水量在 1500 毫米以下，其余地区年降水量在 1500 毫米以上，最少的田林降水量仅为 841.2 毫米，最多的防城港市降水量为 3387.5 毫米。广西壮族自治区河系发达，水资源丰富。据统计 2014 年地表水资源量大约 1978.06 亿立方米，地下水资源约 402.97 亿立方米^[35]。流域面积 23.67 万平方千米，常年径流量约 1978.10 亿立方米；2020 年末，广西共有大型水库 60 座，水资源总量 2169 亿立方米。开展广西高时空分辨率地表水体遥感监测与降水分析，有助于精确把握广西地表水体的空间分布状况及其变化规律，为广西旅游业发展，防洪减灾，水资源管理提供了一定的科学依据。

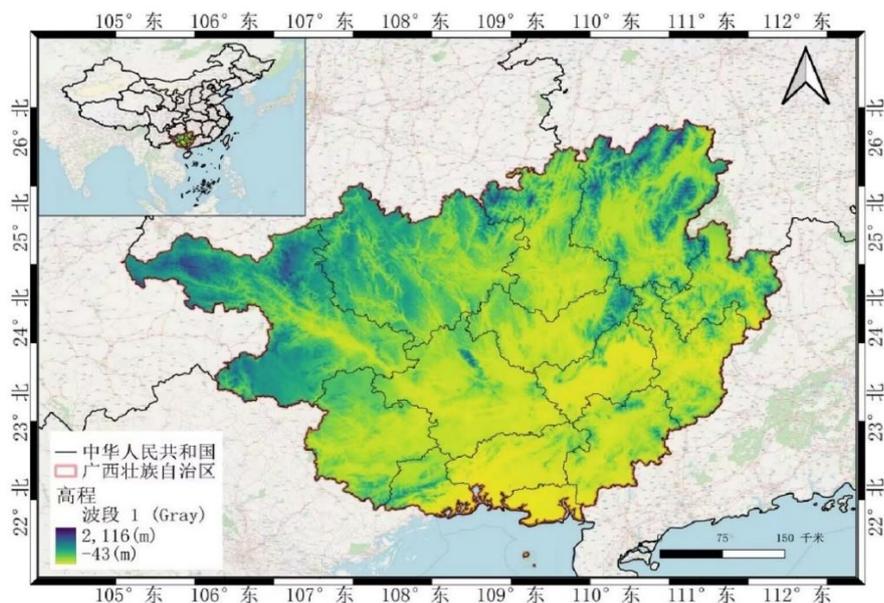


图 2-1 研究区位置示意图

§ 2.2 研究数据

研究数据包括地表水体提取和降水降尺度所用的相关数据,地表水体提取通过利用哨兵一号雷达影像,结合哨兵二号光学影像,通过河流矢量数据和 ESA 土地分类数据,利用矢栅结合的方法消除山体阴影、林地、草地和建筑等干扰,从而到达每 12 天高时空分辨地表水体提取。降水数据的降尺度通过结合中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 增强植被指数 (EVI)、地表蒸散发 (ET)、地表温度 (LST)、先进星载热发射和反射辐射仪 (ASTER) 海拔 (ELV) 等解释变量,构建地理加权回归 (GWR) 模型,对 GPM 降水数据进行降尺度,从而生成 1km 分辨率月度降水数据。以下是研究所用遥感数据的详细介绍。

§ 2.2.1 哨兵卫星数据

哨兵卫星是欧空局哥白尼计划发射的多颗对地观测卫星组,用于监测海洋、陆地、土地利用与土地覆盖状况及其变化,实现环境与安全的实时动态监测^[36]。本研究利用哨兵一号和哨兵二号卫星数据。

哨兵 1 号 (Sentinel-1) 卫星^[37]是雷达卫星,由 A、B 两颗卫星组成,分别于 2014 年 4 月 3 日及 2016 年 4 月 25 日发射,每颗卫星重访周期为 12 天,A、B 星互补,重访周期可达 6 天,搭载 C 波段合成孔径雷达,空间分辨率为 10m。

Sentinel-1 卫星拥有四种成像模式^[38]。本文使用干涉宽幅成像模式的地距影像 (Ground Range Detected, GRD) 产品,极化方式为 VV 和 VH 两种,哨兵一影像从 2020 年 1 月 1 日到 2021 年 1 月 5 日共 31 期,覆盖全广西需 13 景,共 403 景,每期数据时间分布如表 2-1 所示,数据来源于欧空局哥白尼数据中心 (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/>)。哨兵一号数据空间位置分布如图 2-2 所示。

表 2-1 sentinel-1 31 期数据时间分布

期数	日期	期数	日期	期数	日期
1	01.01-01.11	11	04.30-05.10	21	08.28-09.07
2	01.13-01.23	12	05.12-05.22	22	09.12-09.19
3	01.25-02.04	13	05.24-06.03	23	09.21-10.01
4	02.06-02.16	14	06.05-06.15	24	10.03-10.13
5	02.18-02.28	15	06.17-06.27	25	10.15-10.25
6	03.01-03.11	16	06.29-07.09	26	10.27-11.06
7	03.13-03.23	17	07.11-07.21	27	11.08-11.18
8	03.25-04.04	18	07.23-08.02	28	11.20-11.30
9	04.06-04.16	19	08.04-08.14	29	12.02-12.12
10	04.18-04.28	20	08.16-08.26	30	12.14-12.24
31	12.26-01.05				

哨兵 2 号^[39] (Sentinel-2) 卫星由 A 和 B 两颗卫星组成, Sentinel-2A 发射于 2015 年 6 月 23 日, Sentinel-2B 发射于 2017 年 3 月 7 日, 单颗卫星的重访周期为 10 天, 两个卫星互补, 重访周期为 5 天^[40]。哨兵二号卫星搭载多光谱仪, 包括可见光、近红外和短波红外波段^[41], 共 13 个光谱带, 其中蓝、绿、红和近红外波段空间分辨率为 10m。数据来源于欧空局网站 (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/>)。本研究使用的 Sentinel-2 多光谱数据是 L1C 级产品数据, 选取研究区中的无云影像, 由于广西云量较多, 共选取上半年和下半年两期影像进行水体提取, 共 86 景 Sentinel-2 L1C 影像, 哨兵二号数据时间分布如表 2-2 所示, 图 2-2 为每期 43 景哨兵二号数据空间位置分布。用于结合哨兵一号数据剔除山体阴影。

表 2-2 哨兵二号数据时间分布

序号	幅号	日期	幅号	日期	幅号	日期
1	T48QWL	20200309	T48QYM	20201111	T48RXP	20200319
		20201114		20200415		20201119
2	T48QWM	20201119	T48QZJ	20200420	T48RYN	20200319
		20200309		20201106		20201111
3	T48QXK	20200309	T48QZK	20200415	T48RYP	20200319
		20201114		20201111		20201119
4	T48QXL	20201119	T48QZL	20200314	T48RZN	20201111
		20200309		20201111		20200322
5	T48QXM	20200309	T48QZM	20200315	T49QBD	20201111
		20201119		20201111		20200515
6	T48QYJ	20201022	T48RVN	20200327	T49QBE	20201111
		20200131		20201112		20200327
7	T48QYK	20200415	T48RWN	20201119	T49QBF	20201111
		20201111		20200309		20200314
8	T48QYL	20201111	T48RXN	20201119	T49QBG	20200505
		20200309		20200309		20201111
9	T49RCH	20201111	T49RBH	20201111	T49QCD	20201113
		20200221		20200312		20200308
10	T49RCJ	20201111	T49RBJ	20200321	T49QCE	20200222
		20200322		20201111		20201113
11	T49RDH	20200217	T49QCG	20200308	T49QCF	20200308
		20201113		20201113		20201113
12	T49RDJ	20200407	T49QDE	20200222	T49QEF	20201113
		20201113		20201113		20200222
13	T49RDK	20200312	T49QDF	20200227	T49QEG	20201113
		20201113		20201113		20200222
14	T49REH	20200217	T49QDG	20200412	T49REJ	20200317
		20201113		20201113		20201119
15	T49REK	20201113	20200217			

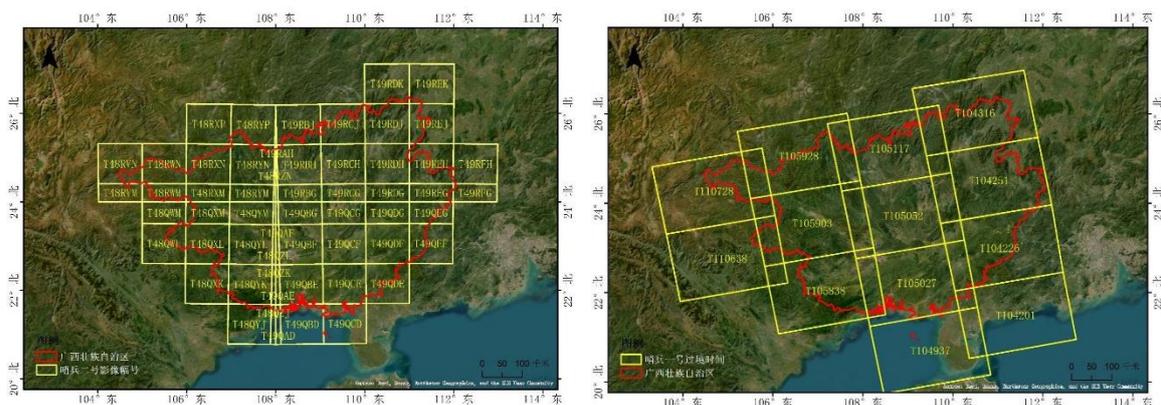


图 2-2 Sentinel-1 与 Sentinel-2 数据位置分布

§ 2.2.2 河流矢量数据

中国西南喀斯特地貌区域及东盟十国河流面域矢量数据集, 该河流数据基于欧亚大陆河流矢量数据集^[42], 结合 2020 年 10m ESA WorldCover 产品, 通过相交、计算相交部分面积、按位置选取得到重叠区域最为详细的河流数据, 再通过融合、合并、手工删除湖泊等方法, 制作了较为精细的广西、云南、贵州及东盟十国所在流域的河流面域数据集。用于作为剔除河流的基础数据。

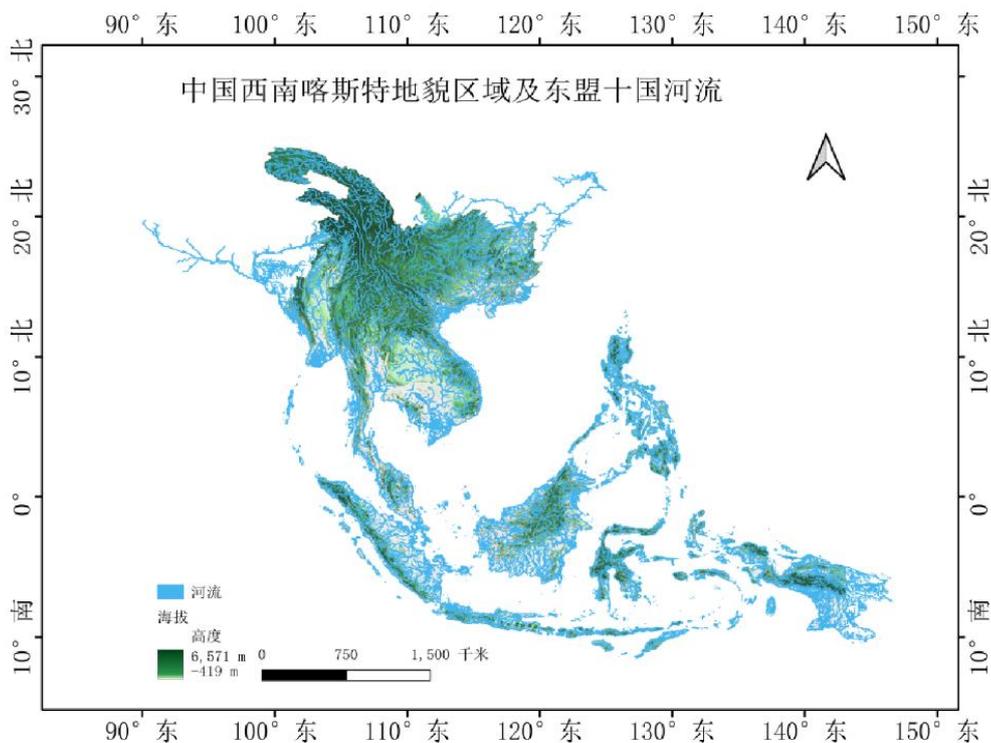


图 2-3 高精度河流矢量数据

§ 2.2.3 土地覆盖数据

World Cover 数据集是欧空局联合全球多家科研机构，共同制的 2020 年全球 10 米土地覆盖产品，该数据产品分辨率为 10 米，是基于 Sentinel-1 雷达影像和 Sentinel-2 光学影像进行制作。土地覆盖数据是使用决策树分类方法产生，产品的总体准确度为 75%。该数据集一共分类十一类，本文选取的类别是水体（URL:<https://esa-worldcover.org/en>）。该数据作为辅助数据对建筑物、草地、林地进行掩膜，在本文中也用做制作河流的辅助数据。

表 2-3 ESA 土地分类类别

编码		土地类别
10	Tree cover	林地
20	Shrubland	灌木
30	Grassland	草地
40	Cropland	耕地
50	Built-up	建筑
60	Bare/sparse vegetation	裸地/稀疏植被区
70	Snow and Ice	雪和冰
80	Permanent water bodies	开阔水域
90	Herbaceous wetland	草本湿地
95	Mangroves	红树林
100	Moss and lichen	苔藓

§ 2.2.4 GPM 降水数据

全球卫星降水计划^[43] (Global Precipitation Measurement, 简称 GPM) 是一项国际卫星任务，由 NASA 和 JAXA 合作开展，利用多传感器多卫星多算法结合卫星网络和雨量计反演得到更高精度的降水数据^[44]，其能够提供全球范围基于微波的 3h 以内以及基于微波红外的半小时的雨雪数据产品，范围延伸至南北极圈。

GPM 的数据产品主要分为: Level-1, Level-2 和 Level-3。包括半小时降水、日降水以及月平均降水数据^[45]。本文使用的降水数据为 GPM Level-3 IMERG 产品的 Final Run 月值数据，空间分辨率 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ ，时间分辨率是半小时，格式为 Net-CDF，数据记录的是每个月的平均每小时降水量 (mm/h)，Final Run 产品结合来自 GPM 中所有无源微波仪器的数据提供降雨估计。该算法旨在精细时间和空间尺度上对所有卫星微波降水估计值以及微波校准红外 (IR) 卫星估计值、降水量规分析以及可能的其他降水估计量进行相互校准、合并和插值利用全球降水气候中心的月平均站点资料进行误差订正^[46]，数据来源于 NASA 官方网站(<https://disc.gsfc.nasa.gov/>)。

§ 2.2.5 MODIS 环境变量数据

MODIS 传感器的全称为中分辨率成像光谱仪 (moderate-resolution imaging spectroradiometer), 主要搭载在 Terra 和 Aqua 星上^[47]。MODIS 的多波段数据可以提供反映陆地表面状况、大气中水汽、地表温度、大气温度和云顶高度等特征的信息。这些数据可以用于对地表、生物圈、固态地球、大气和海洋进行长期全球观测。MODIS 共有 36 个离散光谱波段, 覆盖从可见光到热红外的全光谱范围, 能够提供高分辨率的遥感图像数据^[48-50]。本文使用全球 500m 分辨率植被指数月值产品(MOD13A3), 全球 1km 分辨率地表温度月值产品(MOD11C3)和全球 500m 分辨率地表蒸散发年值产品(MOD16A3), 均来源于 (<https://modis.gsfc.nasa.gov/>)

§ 2.2.6 地形海拔数据

ASTER GDEM 数据由日本 METI 和美国 NASA 联合研制。ASTER GDEM 数据产品基于“先进星载热发射和反辐射计(ASTER)”数据计算生成, 是目前唯一覆盖全球陆地表面的高分辨率高程影像数据^[50, 51](<https://www.gscloud.cn/>)。该数据作为降水数据降尺度的环境变量。

§ 2.3 哨兵数据预处理

§ 2.3.1 哨兵一号数据预处理

哨兵一号数据预处理使用开源软件 SNAP8.0, 主要包括以下步骤: 轨道校正, 辐射定标, 辐射校正, 滤波, 地形校正、分贝化、镶嵌和裁剪^[52]。

轨道校正需要使用元数据文件中存储的哨兵轨道信息, 通过精密轨道数据更新卫星轨道信息。辐射定标将雷达接收到的信号归一化到统一标准下。地形辐射校正使用 Small 提出的地形平坦法^[53]。滤波采用 Refined Lee 方法, 该算法可显著降低水面起伏导致的亮斑, 并有效抑制噪声^[54]。由于雷达是侧视成像, 地形起伏会对雷达影像造成严重的几何畸变, 出现叠掩, 阴影和透视收缩等现象^[55], 因此需要进行地形校正。分贝化, 将后向散射系数值转换为对数值, 目的是为了避开后向散射值太小。最后将覆盖全广西的 13 景哨兵一号影像进行无缝镶嵌, 随后再将拼接好的影像按照 hydro basin 流域矢量范围进行裁剪, 裁剪成 8 个 lev05 级流域, Sentinel-1 影像进行预处理后, 共获得了 31 期广西遥感影像。

§ 2.3.2 哨兵二号数据预处理

使用 Sentinel-2 数据为 L1C 级产品数据，首先对数据进行预处理，主要包括辐射定标、大气校正、重采样、波段合成、镶嵌和裁剪。

通过辐射定标将传感器上记录的 DN 值（无量纲）转换成有实际物理意义的大气顶层辐射亮度或反射率^[56]，以此来减少传感器本身产生的误差。大气校正是为了减少因大气散射、大气吸收和大气反射而造成的偏差，这种偏差是由于大气中存在气溶胶、大气分子和云颗粒等成分对遥感的吸收和散射^[57]，导致获取的影像中包含了非目标地物等信息。Sentinel-2 数据经过大气校正后需进行重采样至 10m，将不同波段的分辨率（10m、20m、60m）进行统一。通过波段合成将三个波段合并为一个多波段影像，方便后续的处理。最后对广西两期共 86 景 Sentinel-2 影像进行无缝镶嵌，并根据研究区矢量范围数据进行裁剪，得到覆盖广西的 Sentinel-2 遥感影像。

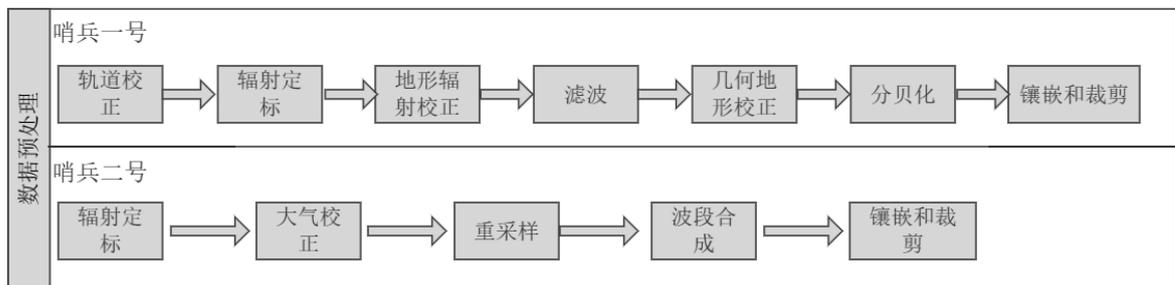


图 2-4 哨兵数据预处理

第三章 基于 GWR 模型降尺度降水数据研究

目前,获取降水数据的方式分为三种:第一种是通过布设地面气象站点,第二种是通过地面降雨雷达获取,第三种通过遥感卫星数据来获取降水数据。但地面气象站点与地面雷达数量有限,特别是在山区较多的广西,分布不均,具有明显的局限性,所以获取连续的降水数据较为困难,所以获取大范围的降水数据较为困难且精度较差。随着遥感卫星的不断发展,借助卫星的实时监测能力可以轻松的获得大范围的降水数据。

§ 3.1 卫星降水数据的降尺度方法

§ 3.1.1 GWR 地理加权回归模型

GWR 模型描述了地理空间变量之间的关系,充分考虑了回归参数在不同地理位置上的差异性,将空间权重引入运算,用来估算研究区内任意位置因变量与解释变量的回归参数,以此建立回归模型^[58,59]。GWR 模型的这种特性恰好可以充分描述降水随地理环境要素空间变化存在明显空间分异性的特征,模型的数学公式为:

$$Y_i = \beta_0(x_i, y_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(x_i, y_i) X_{ik} + \varepsilon(x_i, y_i) \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3-1)$$

其中, Y_i 是第 i 个点的降水量, X_{ik} 是第 i 点的第 k 个环境变量值, p 是环境变量的个数, $\beta_k(x_i, y_i)$ 是相对应的地理加权回归系数, $\beta_0(x_i, y_i)$ 是常数项, $\varepsilon(x_i, y_i)$ 是残差, i 代表样本点,该样本点对应于本研究中变量的网格单元。

回归参数通过使用以下矩阵求解:

$$\beta(x_i, y_i) = (X^T w(x_i, y_i) X)^{-1} X^T w(x_i, y_i) Y \quad (3-2)$$

其中, $w(x_i, y_i)$ 是权重矩阵, X 是包含常数向量的环境变量矩阵, Y 是降水量,求解 GWR 方程首先需要估计权重矩阵,这在评估模型精度中至关重要。

§ 3.1.2 核函数选择

权重矩阵可由不同的核函数确定，本研究采用通用的高斯核函数、指数核函数、双重平方核函数、立方距离核函数、窗函数 5 种核函数，以优化选取验证精度良好的指数核函数^[60]，模拟结果（表 4）。通过对比 2013 年模拟结果与原始数据的相关系数（CC）、均方根误差（RMSE）、偏差（BIAS），指数核函数表现最好，所以最终选取指数核函数作为 GWR 模型的核函数。

表 3-1 2013 年 GPM 卫星降水数据在五种不同核函数下模拟结果评估与误差统计

序号	核函数	表达式	相关系数	均方根误差 (mm)	偏差 (%)
1	高斯核函数	$w_{ij} = \exp(-\frac{1}{2}(d_{ij}/bw)^2)$	0.991	126.504	6.109
2	指数核函数	$w_{ij} = \exp(-d_{ij}/bw)$	0.999	37.943	0.550
3	双重平方核函数	$w_{ij} = \begin{cases} [1-(d_{ij}/bw)^2]^2 & d_{ij} < bw \\ 0 & d_{ij} \geq bw \end{cases}$	0.954	280.773	30.093
4	立方距离核函数	$w_{ij} = \begin{cases} [1-(d_{ij}/bw)^3]^3 & d_{ij} < bw \\ 0 & d_{ij} \geq bw \end{cases}$	0.962	257.404	25.292
5	窗函数	$w_{ij} = \begin{cases} 1 & d_{ij} < bw \\ 0 & d_{ij} \geq bw \end{cases}$	0.920	367.614	51.587

§ 3.1.3 比例指数法

月尺度降水数据是通过计算各月降水占相应年降水的比例指数^[61]，然后将各月 10km 分辨率的比例指数通过反距离插值得到 1km 分辨率的比例指数，最后将降尺度的年降水数据按照比例指数分配到各月，从而实现从 1km 分辨率的年降尺度数据中分离出对应各月降水。具体公式如下：

$$Fraction_i = OrgGPM_i / \sum_{i=1}^{12} OrgGPM_i \quad (3-3)$$

其中 $Fraction_i$ 表示为第 i 月 ($i=1, 2, \dots, 12$) 的比例指数, $OrgGPM_i$ 表示降尺度前第 i 月的 GPM 月值数据, 分母表示相应年份的年累计降水量。

§ 3.2 卫星降水数据的降尺度过程

§ 3.2.1 降尺度输入数据

降尺度采用的降水数据为 GPM Level-3 IMERG 产品的 Final Run 月值数据, 空间分辨率为 0.1° (~ 10 km)。地形海拔数据来源于地理空间数据云的 ASTER GDEM 数据, 该数据集空间分辨率为 30 米。增强植被指数、地表温度和地表蒸散发数据均来源于 MODIS 数据。全球气象站点数据月尺度数据集, 用于降水数据的精度评估。采用的数据产品及其说明如表 1 所示, 选取的研究时段为 2001-2020 年。

表 3-2 本研究所采用的降水数据及环境变量产品数据描述

序号	环境变量	数据集名称	时空分辨率	时间跨度
1	卫星降水数据(GPM)	IMERG-Final Run 月值数据	0.1° / monthly	2000-06 至今
2	增强植被指数(EVI)	MOD13A3	1 km/monthly	2000-02-01 至今
3	地表温度(LST)	MOD11C3	0.05° /monthly	2000-02-01 至今
4	地表蒸散发(ET)	MOD16A3	500 m/yearly	2001-01-01 至今
5	地形海拔(ELV)	ASTER GDEM	30 m	2009 年
6	全球气象站点月降水数据	GSOM	Monthly	1763-01 至今

§3.2.2 降水数据预处理

GPM 数据进行栅格计算, 将一年 12 期的 GPM 数据求和, 获得 GPM 年累计数据。MODIS 数据通过 MRT(MODIS 预处理工具)在 Java 环境下进行批量波段提取、拼接、投影变换、裁剪、无效值剔除等操作, 分别得到 2001-2020 年 EVI、LST 及 ET 月度数据, 并对一年 12 期的 EVI、LST、ET 数据求平均, 分别得到年均 EVI、LST、ET 数据^[5]。地形海拔数据通过 ArcGIS 软件进行坡向提取, 得到广西及东盟区域的坡向数据。

§ 3.2.3 降尺度过程

降尺度流程主要包括数据预处理、降尺度处理和精度验证。技术路线图如图 3-1 所示，具体步骤如下：

(1) 数据制备。将环境变量 (EVI、LST、ET、坡向数据) 重采样至与 GPM 降水数据相同分辨率 ($0.1^{\circ}\times 0.1^{\circ}$)。

(2) 输入模型。0.1°分辨率的 GPM 数据为因变量, EVI、ET、LST、坡向数据为解释变量, 构建 GWR 训练模型。从回归模型结果中获取常数项、解释变量系数和残差。

(3) 模型结果栅格化。将常数项、解释变量系数重采样至 1 km, 残差结果通过简单样条插值得到 1 km 分辨率的残差。

(4) 回代 GWR 模型。按照 GWR 模型公式进行回代, 参数和解释变量均采用 1 km 空间分辨率的结果, 将解释变量系数与同分辨率的解释变量相乘, 与常数项和残差相加, 得到 1 km 分辨率的降水年值降尺度数据^[62]。

(5) 计算月尺度降水数据。通过初始的 0.1°分辨率的 GPM 数据计算每个月度的降水比例指数, 并通过反距离插值得到 1 km 分辨率的比例系数, 将降尺度的降水年值数据按比例指数分配生成月尺度降水数据。

(6) 精度评估。将降尺度降水数据与气象站降水数据进行对比, 从定量和定性分别开展精度评估。

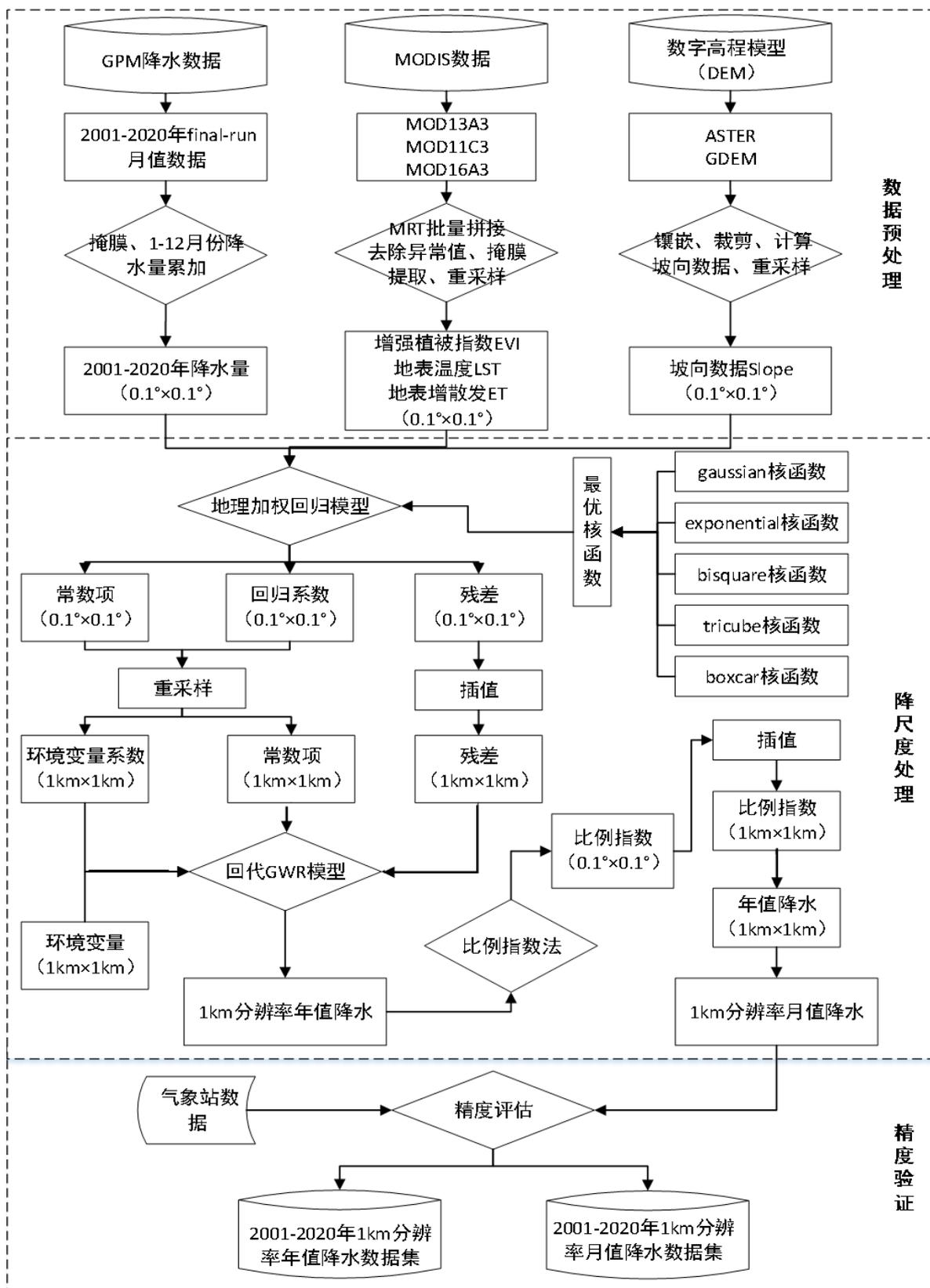


图 3-1 广西及东盟区域 1 km 分辨率降尺度降水数据集生成流程示意图

§ 3.3 卫星降水数据的精度评估

§3.3.1 评估方法

为了验证降尺度结果精度，利用地面气象站观测数据对 GPM 降尺度前、后数据分别进行精度评估。进行检验的评价指标包括皮尔逊相关系数（CC）、均方根误差（RMSE）、拟合优度（ R^2 ）和偏差（BIAS）。其计算公式如下：

皮尔逊相关系数（CC）：

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3-4)$$

均方根误差（RMSE）：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (x_i - y_i)^2} \quad (3-5)$$

拟合优度（ R^2 ）：

$$R^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (\hat{Y} - \bar{y})^2}{\sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y})^2} \quad (3-6)$$

偏差（BIAS）：

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)}{\sum_{i=1}^n y_i} \times 100\% \quad (3-7)$$

式中： n 为站点总数据条数； i 为降水数据中的第 i 条数据； x_i 为卫星产品的降水值； y_i 为地面气象站的降水值； \bar{y} 为 n 条站点数据的降水平均值； \bar{x} 为相应的卫星降水平均值； \hat{Y} 为 y_i 对于 x_i 的线性拟合值。

§ 3.3.2 评估结果

a. 定量评估

选取 2001–2020 年研究区 2679 组气象站点（图 3-2）的月降水数据作为验证数据（图 3-3，a 和 b 分别为降尺度前后 GPM 数据与实测降水数据散点图及线性拟合结果，表 3-3 为气象站点数据与 GPM 数据及 GWR 降尺度后的数据相关性检验及误差统计结果）。通过与原始降水数据对比，皮尔逊相关系数（ $CC=0.890$ ）相等，均与气象站数据显著相关，拟合优度（ $R^2=0.792$ ）、均方根误差（ $RMSE=74.610\text{ mm}$ ）和偏差（ $BIAS=-0.122\%$ ）略有提升，说明降尺度后的数据保持了原始降水数据的精度，并且降尺度后的空间分辨率得到提高，结果能够更细致地反映降水空间分布。

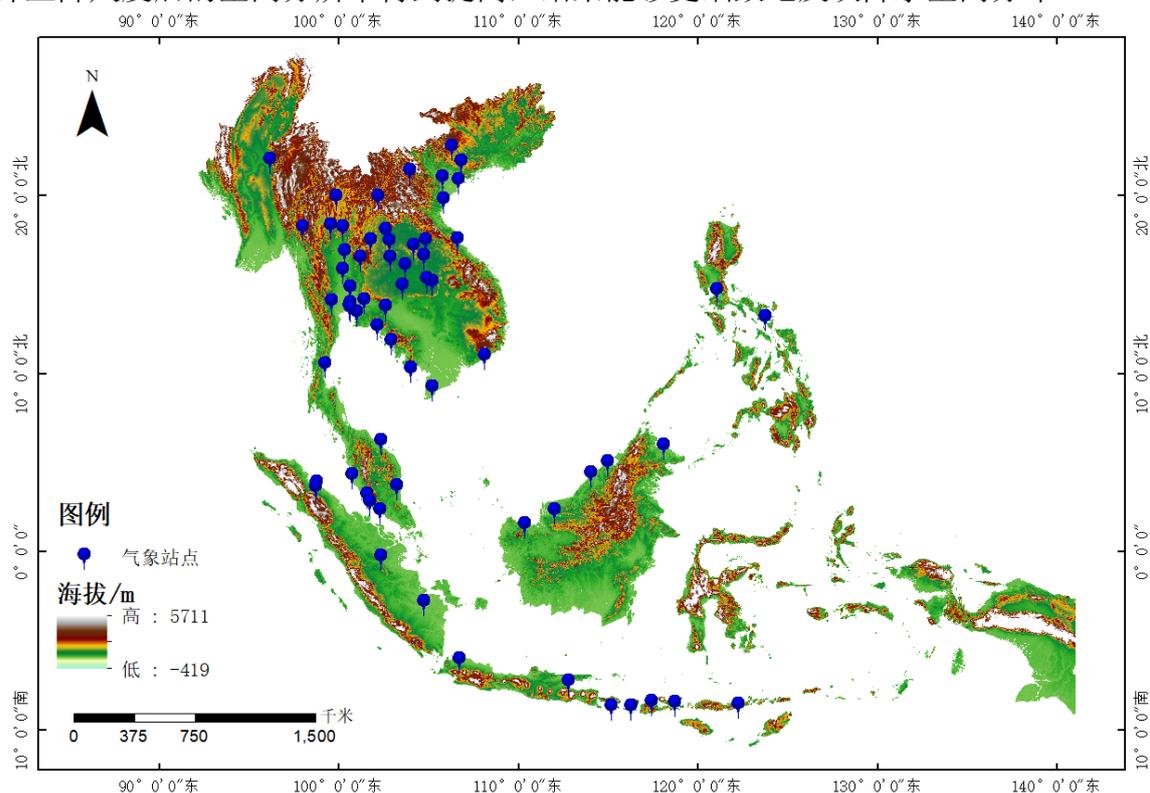


图 3-2 研究区海拔及气象站点分布图

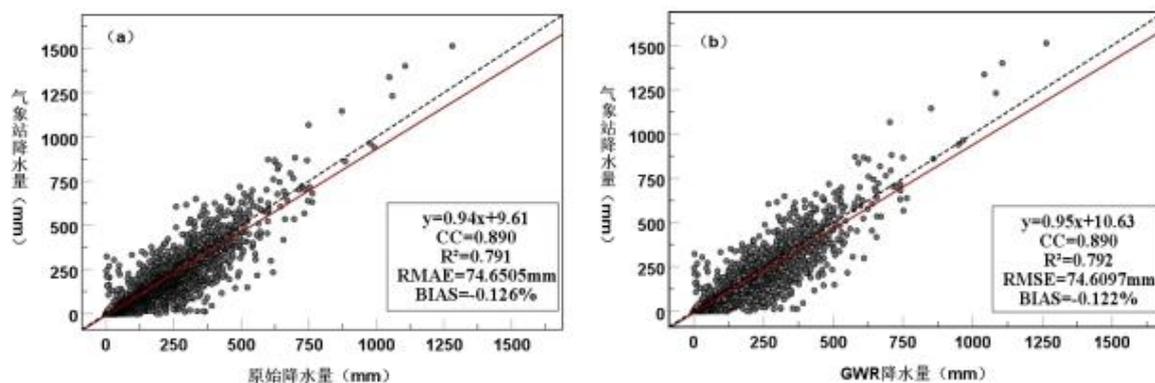


图 3-3 降尺度前 (a)、降尺度后 (b) GPM 数据与实测降水数据散点图

表 3-3 气象站数据与 GPM 原始数据、GPM 降尺度后的数据相关性检验及误差统计

	CC	R ²	RMSE(mm)	BIAS(%)
降尺度降水量	0.890**	0.792	74.610	-0.122
原始降水量	0.890**	0.791	74.651	-0.126

**，在 0.01 级别（双尾），相关性显著。

b. 定性评估

为了验证降尺度后数据集在降水空间分布上的精度，选取漓江流域作为验证区域，漓江^[63]起源于兴安、灵川两县交界的猫儿山，海拔 2141.5m，流经桂林市区和阳朔县，最后到达平乐县城附近与恭城河交汇。漓江全长 214km，流域面积为 12285km²^[64]。年均降水量为 1853.7mm，平均流量为 132.6m³/s。流域属中低山和丘陵地形，地势北高南低，在一系列开阔的山间盆地及峡谷之间形成了漓江谷地。

结果如图 3-4 所示，2020 年漓江流域降尺度数据降水空间分布（图 3-4a）及 2020 年漓江流域原始数据降水空间分布（图 3-4b）表明，两者降水空间分布相似，由南向北递增再递减，在漓江谷地降水量最高，这种分布趋势与漓江流域降水的实际情况相符，并且在空间分辨率上有显著提高，更能细致的反映降水空间分布。从 2001-2020 年漓江流域月值降水变化箱线图（图 3-4c）来看，4 月至 7 月为漓江流域的丰水期，10 月到次年 2 月为少水期，其变化规律符合漓江流域降水特征，说明该降水数据集与原始降水在时间和空间分布上保持一致，并且空间分辨率得到了提升。

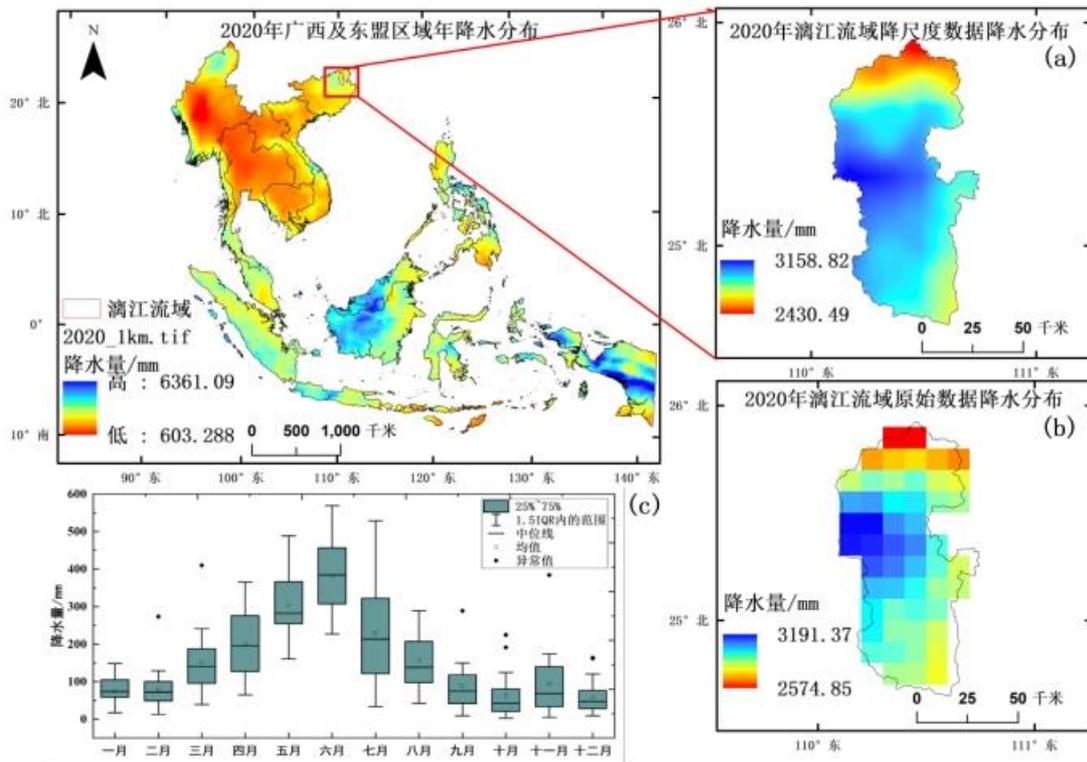


图 3-4 漓江流域 2020 年降水空间分布及 2001-2020 年月度降水变化图（其中 a 为漓江流域降尺度数据降水空间分布；b 为原始数据降水空间分布；c 为月值降水变化箱线图）

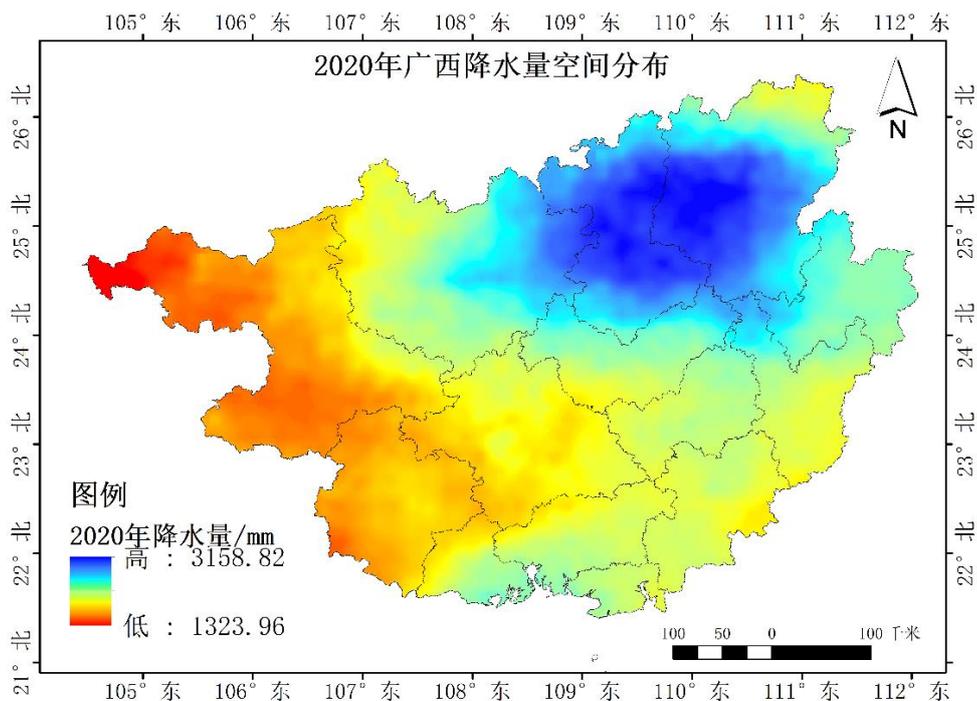


图 3-5 2020 年广西降水空间分布图

以往研究表明，在暴雨洪水事件中，降雨量是主要致灾因子^[65]，对洪水灾害有着决定性的影响。为了分析洪水灾害与降水强度之间的关系，通过统计 EM-DAT 数据库 2001–2020 年广西及东盟洪水灾害次数的数据，与降水量进行对比。对比结果表明，研究区年累计降水量与洪水灾害每年发生次数显著相关，相关系数 $R^2=0.631$ ，从图 3-6 可以看出 2008 年和 2020 年，洪水灾害次数分别达到 20 年中的次最大和最大值，相应的年累计降水量也高于其他年份。这一结果表明：数据在洪涝及其他降水相关灾害（如降雨型滑坡^[66]）中具有潜在应用价值，反映了数据集的可靠性和实用性，体现了本数据集的价值。

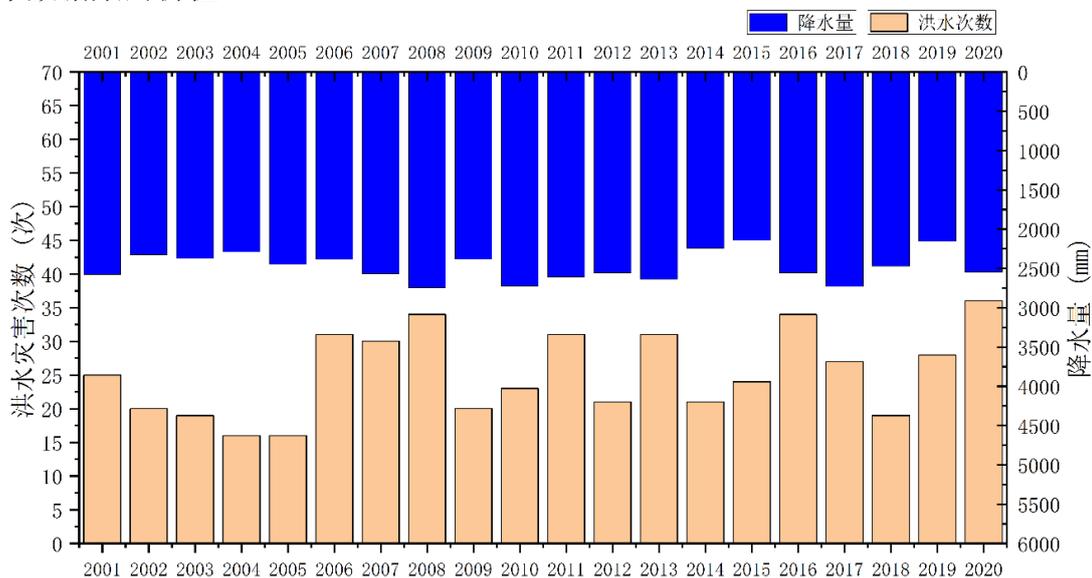


图 3-6 2001–2020 年广西及东盟区域年均降水量与每年洪水灾害次数柱状图

§ 3.4 广西及各市年均降水时空变化特征分析

本文采用了地形海拔、归一化植被指数、地表蒸散量和地表温度等环境变量，结合地理加权模型，对 GPM 卫星降水数据进行降尺度，得到了广西 1km 分辨率月尺度高时空分辨率的降水数据。通过对广西降水数据进行计算和统计，本文分析了 2001 年至 2020 年的年均降水时间变化和年均降水空间变化两个方面。

§ 3.4.1 年均降水时间变化分析

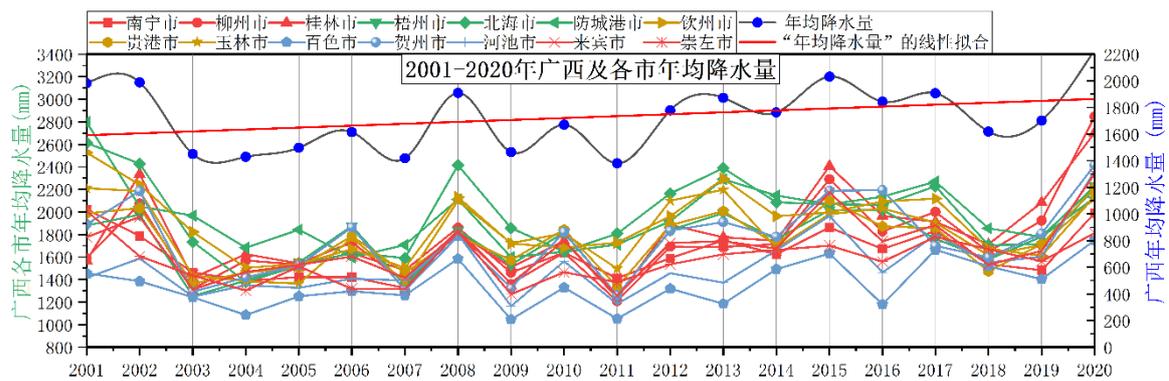


图 3-7 广西各市 2001-2020 年年均降水的年际变化特征曲线图

图 3-7 为广西 2001-2020 年年均降水变化曲线，可知，整体上广西 20 年年均降水量呈现波动且上升的趋势，其中 20 年平均降水量为 1727.85 毫米，2015 年降水最多，达到 2031.86 毫米，而 2011 年降水最少，仅有 1380.57 毫米。具体来看，广西年年均降水量在 2001 年至 2002 年期间基本保持稳定，2002 年至 2003 年下降幅度较大，2003 至 2007 年变化比较平稳，呈现稳定上升趋势。2008 年年均降水急剧上升，2009 年至 2015 年呈现波动上升至最大值。2016 年至 2017 年少量上升，均在平均值以上。2017 年至 2020 年，降水量呈现先减后增的趋势。从市域时间变化特征来看，与整体变化趋势保持一致，其中位于广西南部的北海市降水量最多，百色市降水量最少。

总之，广西的年均降水量呈现出逐年递增的趋势，但具体年份的降水量存在一定的波动性，对于广西年年均降水变化的原因，主要与气候变化、人类活动等因素有关。随着全球气候变暖，广西的降水量和降水分布也会发生变化。此外，广西的生态环境遭受破坏、城市化进程加快等人类活动也对降水量产生了一定的影响。在实际工作中，需要密切关注气候变化和人类活动等对降水量的影响，制定科学合理的水资源管理和保护措施。

§ 3.4.2 年均降水空间变化分析

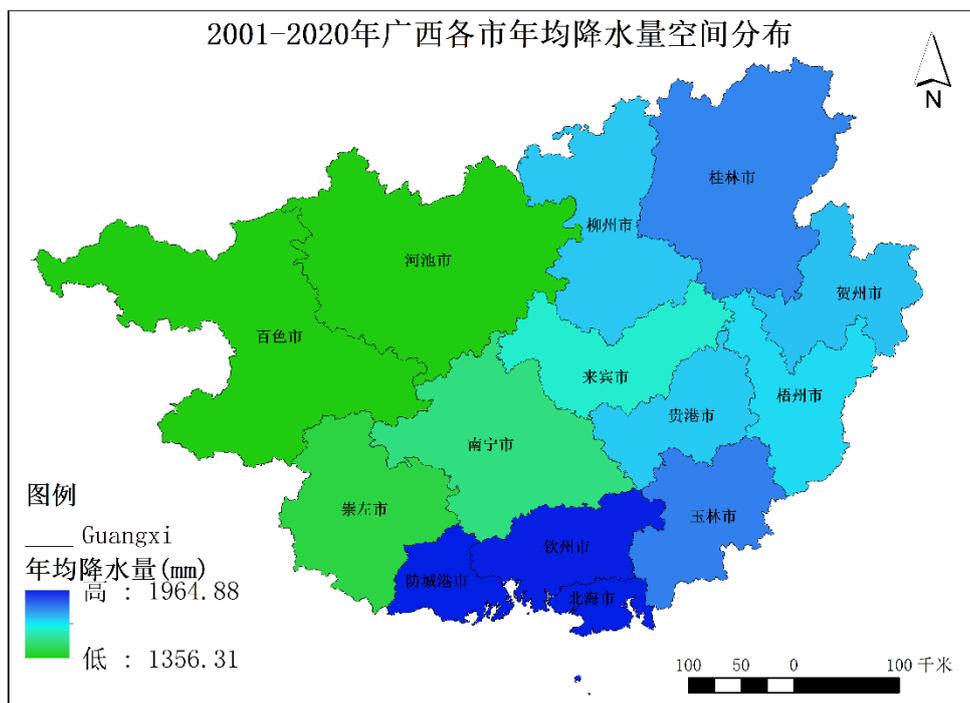


图 3-8 广西各市 2001-2020 年 20 年均降水的空间分布

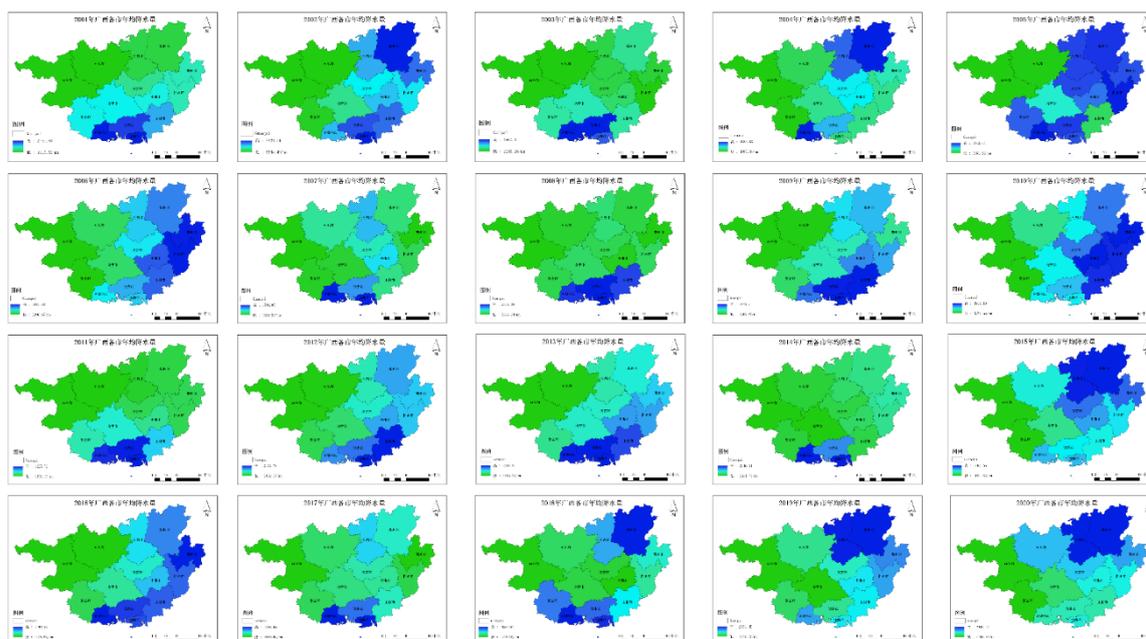


图 3-9 广西各市 2001-2020 年年均降水的年际空间分布

图 3-8 和图 3-9 分别为广西各市 2001 至 2020 年 20 年均降水的空间分布及广西各市 2001 至 2020 年年均降水的年际空间分布, 2001 年至 2020 年广西的年降水量从南向北逐渐减少, 南北降水分布不均匀, 年均降水量为 481mm, 年均降雨量最大值

为 910.288mm，最低值为 142.224mm。2001 年至 2020 年广西年均降水量从东向西依次减少，广西的年均降水量空间变化特征主要表现为南高北低、东多西少的趋势。从南到北，广西的年均降水量逐渐减少。从东到西，广西的年均降水量也呈现出递减的趋势。东部沿海地区的年均降水量相对较高，主要受到季风气候和海洋影响，年均降水量一般在 1400 毫米以上。

各市年均降水量存在时空变化差异，中部和北部内陆地区的年均降水量相对较低，主要受到地形和气候因素的影响，年均降水量一般在 1100 毫米以下，北部地区包括崇左、钦州等市，年均降水量一般在 900 毫米左右。降水时间分布比较均匀，但是夏季降水稍多一些。中部地区包括桂林、梧州等市，年均降水量在 1000-1400 毫米之间。降雨主要集中在夏季和秋季，且产生暴雨的可能性较大。

而广西西部山区的年均降水量相对较高，主要受到地形和地理位置的影响，年均降水量一般在 1500 毫米以上。西南地区包括贺州、玉林等市，年均降水量在 1200-1600 毫米之间。降雨主要集中在夏季和秋季，而且也存在明显的东西分布差异，以凭祥市为界，凭祥市以东地区的降雨量更高。

南部沿海地区的年均降水量相对较高，主要受到夏季和秋季的台风和暴雨影响，年均降水量一般在 1400 毫米以上。东南沿海地区包括南宁、防城港、北海等市，年均降水量在 1500-2000 毫米之间。降雨主要集中在夏季，每年 6-9 月是降雨最多的季节。其中，南宁市的降雨量最高，年均降水量达到 1800 毫米以上。

总体来说，广西各市的年均降水量随着地理位置的不同而存在明显的区域差异，同时也受季节和气候变化等因素的影响。广西的年均降水量空间变化特征主要表现为南高北低、东多西少的趋势。这一特征对于广西的水资源管理和保护具有重要的意义。

第四章 地表水体遥感提取

传统的遥感影像水体提取方法存在一定局限性,难以应用在复杂气候与地形条件的山区,可泛化性较低,对水旱灾害发展的空间态势和影响范围无法快速有效地精准判决。为准确掌握广西壮族自治区地表水体空间分布状态及变化规律,实现对水旱灾害更有效地遥感动态监测,本文结合哨兵一号雷达影像与哨兵二号光学影像,将雷达影像与光学影像优势互补,通过矢栅结合的方式对地表水提取进行大范围、系统化和精细化的水体信息提取,制作了高时空分辨率广西地表水体数据集,实现对广西每 12 天地表水体的动态监测,为后续地表水体动态监测与降水分析提供了重要数据支撑,进一步服务于广西水资源管理。

§ 4.1 水体提取方法

本文通过哨兵一号雷达影像与哨兵二号光学影像,利用已有基于成像几何拓扑关系的高频次水体提取方法,结合局部阈值法和高精度河流数据融合方法对水体提取方法进行优化,该提取方法依据光学与雷达影像成像原理的不同,光学影像为中心投影,雷达影像为侧视投影,所以同一山峰在光学影像和雷达影像中产生的山体阴影的位置存在差异,利用这一特性对误提为水体的山体阴影进行剔除,实现对广西地表水体的精确提取^[67]。

§ 4.1.1 雷达影像水体提取方法

目前主要的洪涝水体提取方法包括阈值法,机器学习方法(监督分类和非监督分类),深度学习方法。阈值法是一种高效的水体分割方法,但是精度低于机器学习和深度学习方法,本文采用了一种基于 SAR 影像的水体指数 Sentinel-1 Dual-Polarized Water Index SDWI)分割方法^[68,69],具体计算公式 4-1 所示。由于不同影像成像环境不同,因此水体分割阈值也有所区别。本研究使用的阈值在 -0.1 到-0.42 之间,根据不同幅影像进行微调。

SDWI 双极化水体指数是利用 VV 和 VH 极化,通过波段计算来扩大水体与其他地物之间的差别。选取一个阈值为分界点,SDWI 大于该阈值的像元划分为水体,SDWI 小于该阈值的像元则划分为非水体。然后通过密度分割,得到二值化的 SDWI 影像,以便提取水体^[67]。SDWI 表达式如下:

$$SDWI = \ln(10 \times VV \times VH) - 8 \quad (4-1)$$

式中，SDWI 为水体提取指数，VV 和 VH 分别代表 VV 和 VH 波段。

阈值法分为全局阈值和局部阈值法，全局阈值法适用于小范围的研究区，在地形复杂，区域较大的广西，使用全局阈值法大部分水体能被分割出来，但是部分区域还是存在分割不准确的现象。主要表现在：1) 部分河流和水田阈值设置较高，难以提取出完整轮廓 2) 部分山体阴影的后向散射系数与水体相似^[69]，容易误分成水体。3) 全区域整体上存在一些细小斑点，其中大部分是水体，小部分区域是耕地，山体阴影等噪声。通过全局阈值法很难将整个区域的水体准确提取出来。因此还需要更为精细的水体提取方法。SDWI 阈值的选取依据双峰阈值法，根据 13 景影像峰谷的平均值来确定最终的阈值，如表 4-1 所示。

表 4-1 Sentinel-1 13 景影像阈值列表

	影像过境时间	阈值		影像过境时间	阈值
1	T104136	-0.42	8	T105002	-0.1
2	T104201	-0.1	9	T105027	-0.26
3	T104226	-0.18	10	T105052	-0.3
4	T104251	-0.26	11	T105813	-0.2
5	T110638	-0.35	12	T105838	-0.3
6	T110703	-0.26	13	T105903	-0.33
7	T104937	-0.33			

§ 4.1.2 光学影像水体提取方法

水体在 Sentinel-2 影像的真彩色合成影像、假彩色合成影像和 4 个 10 米分辨率波段（B8、B4、B3 和 B2，分别代表近红外波段、红波段、绿波段和蓝波段）的光谱表现特征，对水体进行了对比。在不同波段下，水体的反射率表现出较大的差异。在近红外波段下，水体的反射率最低，几乎吸收了所有的电磁波能量，水体和其他地物的可区分度最高。

本文采用单波段阈值法利用近红外波段进行水体提取。并结合局部双峰阈值法，确定最优阈值，对经过预处理的 Sentinel-2 影像进行水体提取。

§ 4.1.3 雷达与光学影像相结合水体提取方法

合成孔径雷达（SAR）影像采用侧视成像方式，受成像机制影响，微波照射地表时，多云雨山区流域的峰丛地貌会出现透视收缩、叠掩和阴影^[70]等现象，场景中地形起伏较大的山峰背面由于雷达照射不到而没有回波信号，在 SAR 图像中表现为山体

阴影，阴影区域亮度低，与水体的后向散射强度相近，基于阈值法提取水体时无法将山体阴影区分出来，增加水体提取难度。光学影像受云量影响较大，在云雨天气较多，云层较厚地区使用局限性较大。该方法以 SAR 影像时间序列数据为基础进行水体初步提取，结合光学遥感影像以及其他先验知识辅助数据，擦除林地、草地、建筑等干扰，实现对广西水体的精细动态提取。

技术路线主要包括以下五个部分：

(1) 水体的初步提取。对雷达和光学数据进行预处理，雷达数据用 SDWI 水体指数法，光学影像数据使用波段阈值结合局部阈值法，得到初步水体提取结果。

(2) 剔除河流

目前的河流数据集存在断流，或者对细小河流刻画不详细等缺点，本研究基于全球河湖矢量数据集，同时从 ESA 土地覆盖数据中提取出永久水体类型，结合两者的优势，并经过后期相交、按属性选择、人工删除等方法制作了更为精细的河流矢量数据。河流数据的生成分为两部分，分别是相交部分和不相交部分。具体过程如下：

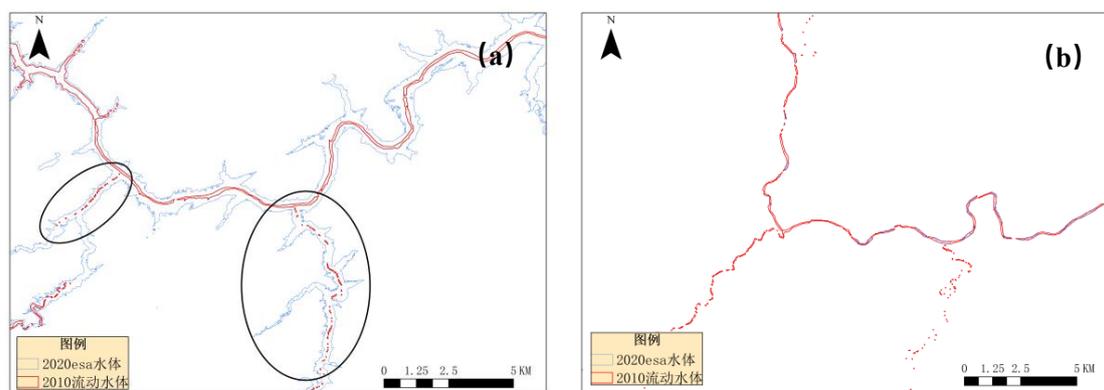
相交部分即相交的河流，对相交部分分别求面积，通过连接属性表选择面积较大的数据，得到相交部分的河流数据；

不相交部分包括流动水体数据比 ESA 水体数据多出的河流、ESA 水体数据比流动水体数据多出的河流和湖泊部分，湖泊部分通过对照 Google Earth 进行手动删除。

将相交部分面积最大的河流、流动水体数据比 ESA 水体数据多出的河流、ESA 水体数据比流动水体数据多出的河流三部分进行合并，得到两者互补且更为完整的河流数据。

最后将河流产品通过缓冲区工具进行膨胀再收缩，可实现连接断续的河流。

河流生成过程示意图如下：



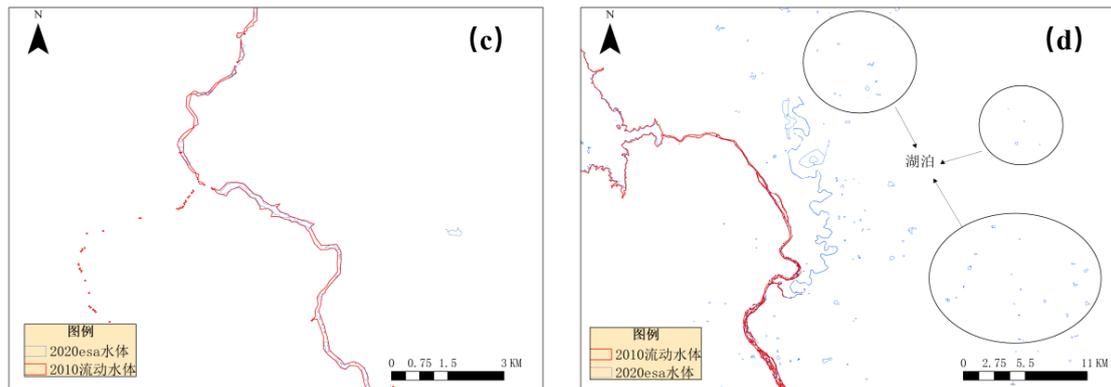


图 4-1 河流生成示意图（a、b 为相交部分；c、d 为不相交部分）

为了得到最完整的河流数据，相交部分选取面积较大的数据，不相交部分的 esa 水体包括河流和湖泊，需要通过对比 Google earth，手工删除，然后将两者合并，最大限度的保证该区域曾经有水。最后借助缓冲区工具进行向外膨胀后，再向内收缩，可填补部分断流部分，使河流数据更加完整。

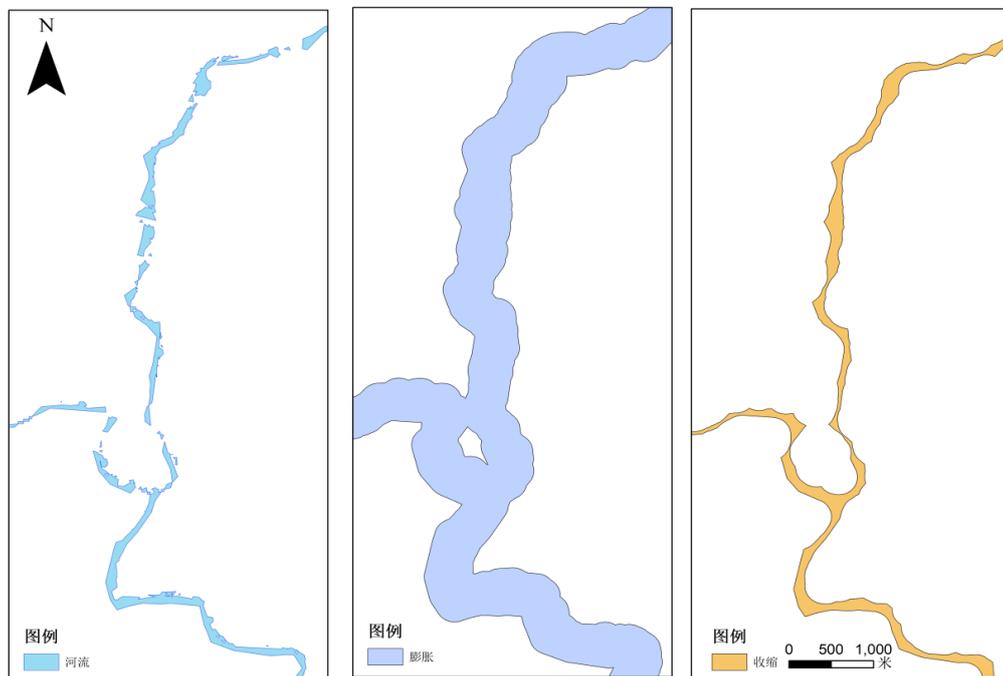


图 4-2 膨胀、收缩结果示意图

(3) 地形阴影的去除。通过叠加分析，可以获得哨兵一号和哨兵二号湖库数据的交集，并计算它们分别占原始哨兵一号和哨兵二号初步水体结果的比例。如果相交部分占初步水体面积较大，则判断其为水体；反之，如果相交部分占初步水体面积较小，则判断其为非水体。 $percent_s1$ 表示交集水体占哨兵一号初步水体结果的比例， $percent_s2$ 表示交集水体占哨兵二号初步水体结果的比例。通过反复实验对比，当某个湖库水体的 $percent_s1 > 37\%$ 、 $percent_s2 > 40\%$ 时认为其为水体，保留，反之，认为其为阴影，进行剔除^[67]。

(4) 剔除建筑与林草阴影。利用欧空局 (ESA) 10 m 土地覆盖数据的林地、草地和建筑覆盖类型数据与水体结果进行叠加分析, 剔除小斑块阴影。将 SAR 河流数据和湖库数据进行拼接得到精细水体信息, SAR 影像具有高时空分辨率, 通过本技术可反映区域动态精细水体信息。

(5) 最后, 将 Sentinel-1 的河流数据和湖库数据进行拼接得到广西逐 12 天时间序列的水体图。

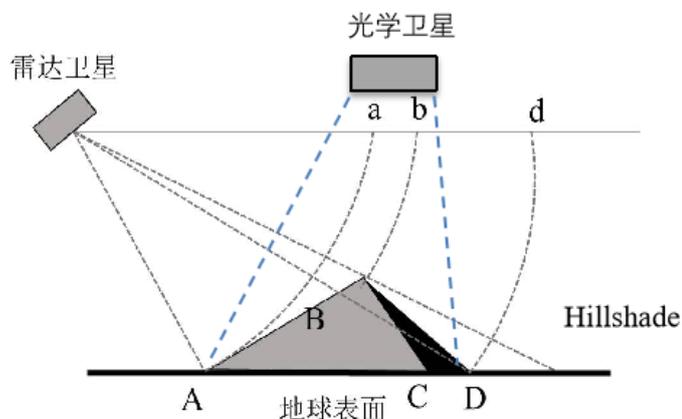


图 4-3 雷达与光学影像山体阴影示意图

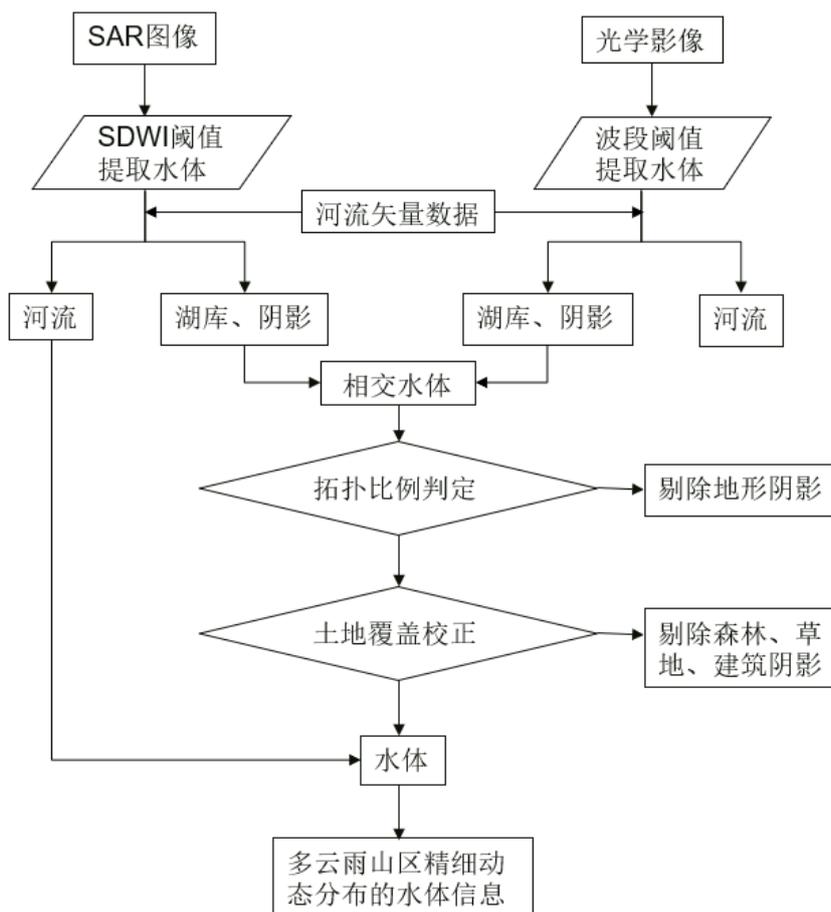


图 4-4 水体提取技术路线图

§ 4.2 水体提取精度评价方法

为了评估广西地表水体结果的准确性,本文采用两种方式对地表水体提取的质量进行精度评估:一是定性比较,即通过目视解译对提取结果进行细节上的评估,将提取结果叠加到 google Earth 影像人工识别进行结果比较;二是定量评估,即通过随机抽样计算精度评估指标对整体精度进行的评估,采用总体精度、Kappa 系数、用户精度、制图精度、错分误差和漏分误差^[71]对水体提取结果进行定量描述。

(1) 总体精度 (Overall Accuracy, OA)

总体精度是指正确样本的总个数占所有样本个数的比例,是对整体正确率的评估。计算公式如下:

$$OA = \sum_{k=1}^n \frac{X_{kk}}{N} \quad (4-2)$$

(2) Kappa 系数 (Kappa Coefficient)

Kappa 系数是指通过混淆矩阵对总体精度和期望精度进行估计得出的一个衡量指标。计算公式如下:

$$Kappa = \frac{N \sum_{i=1}^n X_{ii} - \sum_{i=1}^n (X_{i+} X_{+j})}{N^2 - \sum_{i=1}^n (X_{i+} X_{+j})} \quad (4-3)$$

(3) 用户精度 (User Accuracy)

用户精度指正确划分为该类的样本数量占总样本中划分为该类样本数量的比例。计算公式如下:

$$UA = \frac{X_{kk}}{X_{i+}} \quad (4-4)$$

(4) 制图精度 (Producer Accuracy)

制图精度是指正确分为某类的样本数量与该类的实际参考总样本数之比。其计算公式如下:

$$PA = \frac{X_{kk}}{X_{+j}} \quad (4-5)$$

(5) 错分误差 (Commission error)

错分误差是指被分类为错误类别的样本数,与用户精度相加为 1。其计算公式如下:

$$CE = 1 - UA \quad (4-6)$$

(6) 漏分误差 (Omission error)

漏分误差是指属于某类别的样本点，但没有被分到相应类别的样本个数，与制图精度相加为 1。其计算公式如下：

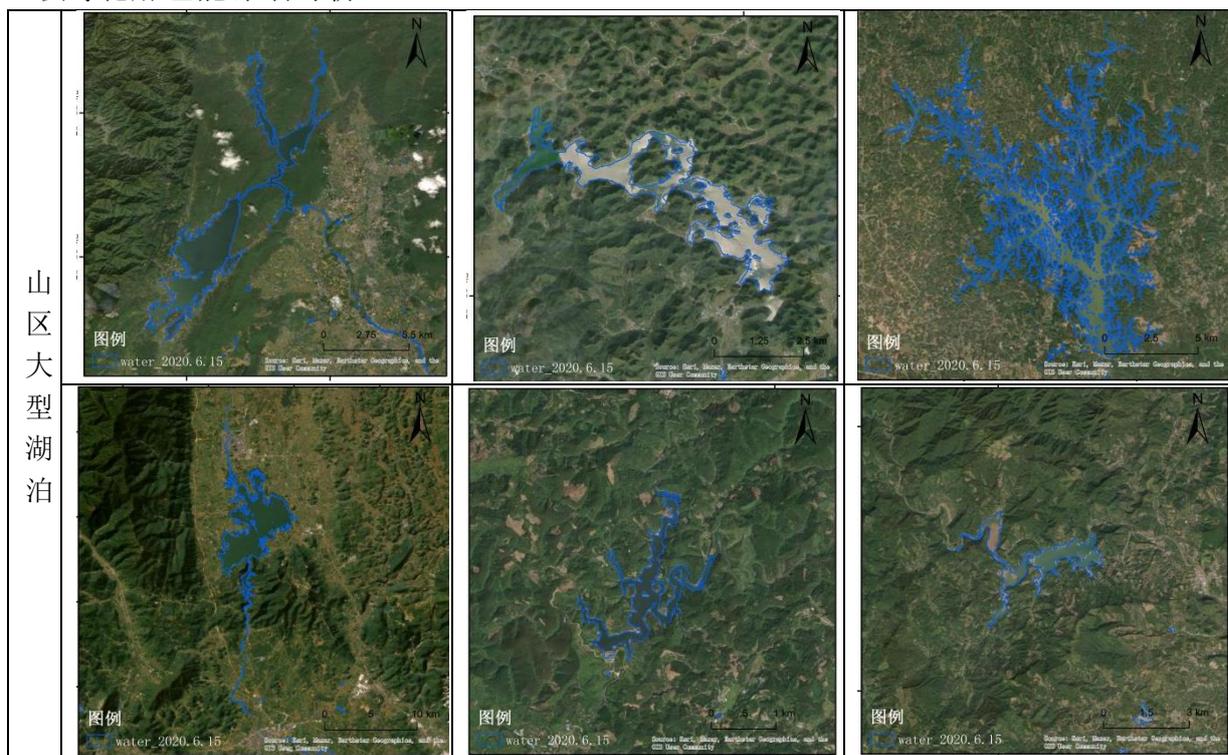
$$OE = 1 - PA \quad (4-7)$$

公式 4-2 至 4-7 中， N 表示样本的总数量， n 为分类的总数， X_{kk} 为第 k 行第 k 列所对应的数值。 X_{i+} 表示第 i 列的和， X_{j+} 表示第 j 行的和。

§ 4.3 水体提取结果与精度验证

§ 4.3.1 定性比较

为了验证水体提取结果与实际水体是否吻合，对地表水体提取结果随机选取山区、平原、河流等区域，对照 Google earth 通过人工目视判读进行验证，通过查看图 4-5，验证结果表明，该方法能够很好的描绘大小水体的轮廓，通过目视解译，结果比较贴合实际。在山区能够有效消除山体阴影、草地、树木等干扰，实现对山区细小水体的精细提取。在平原和城区可能会存在误提，其原因是由于人类活动因素的不确定性，比如农田灌溉、水田以及养殖塘等环境，岸边会存在滩涂，后向散射系数与水体近似，在雷达影像中难以区分，会导致把滩涂误提为水，以及生活用水的排放，也是一个不确定性因素。对河流的提取也比较贴合实际，断流情况较少，对于河流上的桥梁、水坝等轮廓也能详细勾勒。



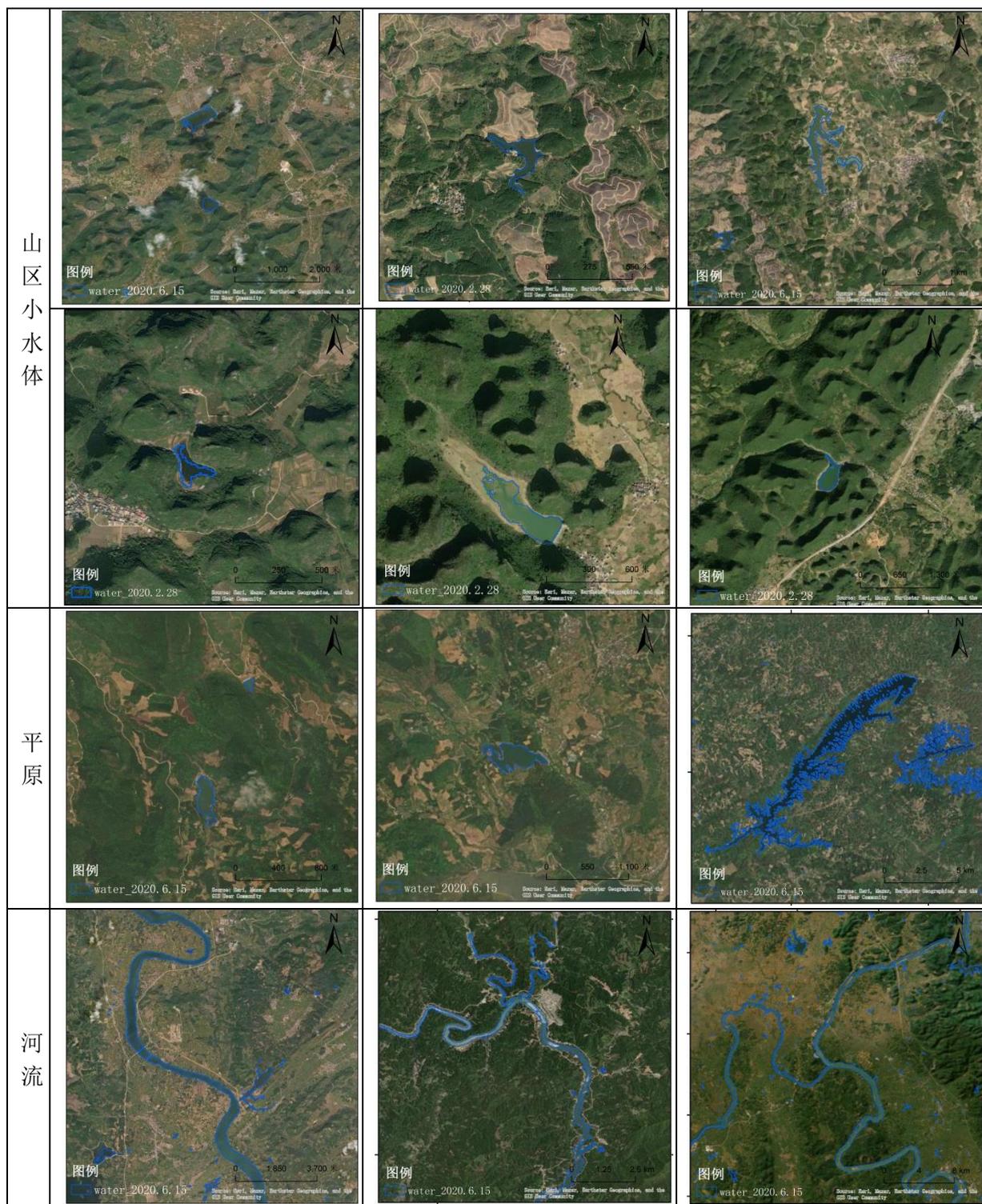


图 4-5 提取结果与 Google earth 对比图（蓝色标注为本方法提取结果，而 Google Earth 为底图）

§ 4.3.2 定量评估

利用广西地表水体最大水图作为辅助数据随机生成 4000 个验证样本的位置，为

为了避免验证样本大部分分布在陆地区域，水体与陆地进行分开取样。在广西地表水体最大水图中取 2000 个水体样本点；通过广西地表水体最大水面积图对广西所在区域矢量进行掩膜，再对掩膜后的陆地部分随机取 2000 个非水体样本，将 4000 个样本点对照 2020 年 ESA 土地分类中的水体一类进行评估，通过计算 Kappa 系数、总体精度、用户精度、制图精度、错分误差和漏分误差，以此评估水体提取的结果。

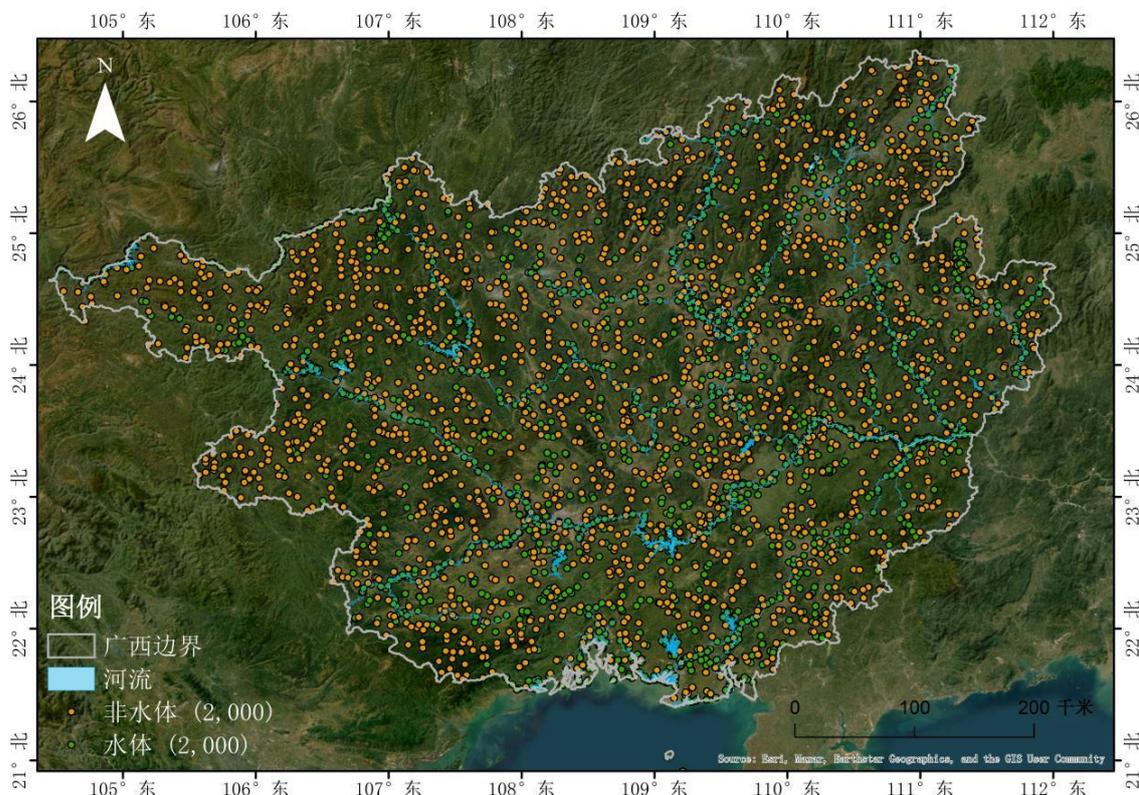


图 4-6 样本点空间分布

表 4-2 地表水体精度评估结果

检验结果						
	水体	非水体	用户精度	制图精度	错分误差	漏分误差
水体 (2000)	1642	358	82.1%	99.81%	17.9%	0.19%
非水体 (2000)	3	1997	99.85%	83.84%	0.15%	16.16%
总体精度= 90.97%			Kappa 系数=0.8196			

通过广西地表水体数据集与 2020 ESA 土地覆盖数据对比进行评估，结果表明，整体精度良好 ($OA=90.97\%$, $Kappa=0.8196$)，水体的用户精度 $OA=82.1\%$ ，制图精度 $PA=99.81\%$ ，漏分误差 $OE=0.19\%$ ，错分误差 $CE=17.9\%$ ，验证结果的总体精度为 90.97%，该结果表示与 ESA 数据有 90.97% 的重叠度，并不表示真实精度结果。通过对照 Google earth 查看，水体错分主要包括两个方面的原因，一是由于 2020 ESA 土地分类数据代表的是永久性水体，不能表征每 12 天的水体；二是由于算法问题导致的错提，该部分主要分布在湖泊的岸滩区域，因为湖边滩涂中含有水分，后向散射系

数与水体相近，不容易区分。所以，2000 个水体样本点评估结果的 358 个非水体中，有一部分是间歇性水体，并不是永久性水体，进一步说明了该数据集能反映每 12 天的地表水体的变化。非水体的制图精度为 83.84%，错分误差为 0.15%，漏分误差为 16.16%，用户精度为 99.85%表明对陆地部分错分的概率较小，也就是对水体漏提的概率较小。

第五章 广西地区地表水体面积与降水数据时序分析

§ 5.1 地表水体面积时空变化分析

本文采用了高分辨率遥感影像数据哨兵一号和哨兵二号数据,采用阈值分割法对广西地区的地表水体进行了分析。

为了分析广西地表水体每 12 天时间间隔湖泊个数及水体面积的变化规律,分别对地表湖泊个数(不包括河流),湖泊面积(不包括河流)和所有地表水体面积(包括河流)做了统计,统计结果如图 5-1 所示。



图 5-1 2020 年广西地表湖泊个数与水体面积统计结果图

由图 5-1 可知,2020 年广西地表水体面积整体呈现上升的趋势,直方图代表 2020 年广西地表湖泊的个数(不包括河流),2020 年 31 期广西地表水体平均每期 37009 个湖泊,从 2020 年 1 月 1 日到 2021 年 1 月 5 日整体呈现先降后增的趋势,在 2020 年 3 月 13 日到 3 月 23 日一期湖泊数量最少值为 32232 个,2020 年 1 月 1 日到 1 月 11 日一期湖泊数量最多值为 45767 个。折线图代表地表水体面积,其中橙色代表地表湖泊面积(不包括河流),绿色代表所有地表水体面积(包括河流),地表水体面积变化趋势与湖泊数量变化趋势吻合,都是呈现先降后增的趋势,2020 年 31 期平均湖泊面积每期为 704.52 km^2 ,平均地表水体面积每期为 2917.97 km^2 ,2020 年 2 月 18 日到 2 月 28 日一期湖泊面积达到最小值为 543.82 km^2 ,2020 年 1 月 25 日到 2 月 4 日一期地表水体面积达到最小值为 2665.58 km^2 ,2020 年 1 月 1 日到 1 月 11 日湖泊面积与地表水体面积均达到最大值,分别为 832.44 km^2 和 3342.07 km^2 。

从统计结果上看 2020 年 1 月底到 3 月底为广西的少水期,4 月初到 6 月中旬为广西的平稳期,湖泊个数及水体面积较少水期有所上升保持稳定,6 月底到 11 月初为广西的不稳定期,湖泊个数及水体面积呈现上下波动不稳定的趋势,11 月中旬到

次年1月初为广西的丰水期，湖泊个数及水体面积达到全年最高且整体上升。湖泊个数与湖泊面积、地表水体面积变化趋势保持一致，湖泊个数与湖泊面积随地表水体面积增大而增大，减小而减小。2020年1月1日到1月11日一期湖泊个数，湖泊面积与地表水体面积均达到最大，通过查看历史新闻，2020年1月，广西出现大范围强对流天气过程，多地出现冰雹和大风天气，部分地区出现暴雨，局地大暴雨，与该事件有很大的影响。

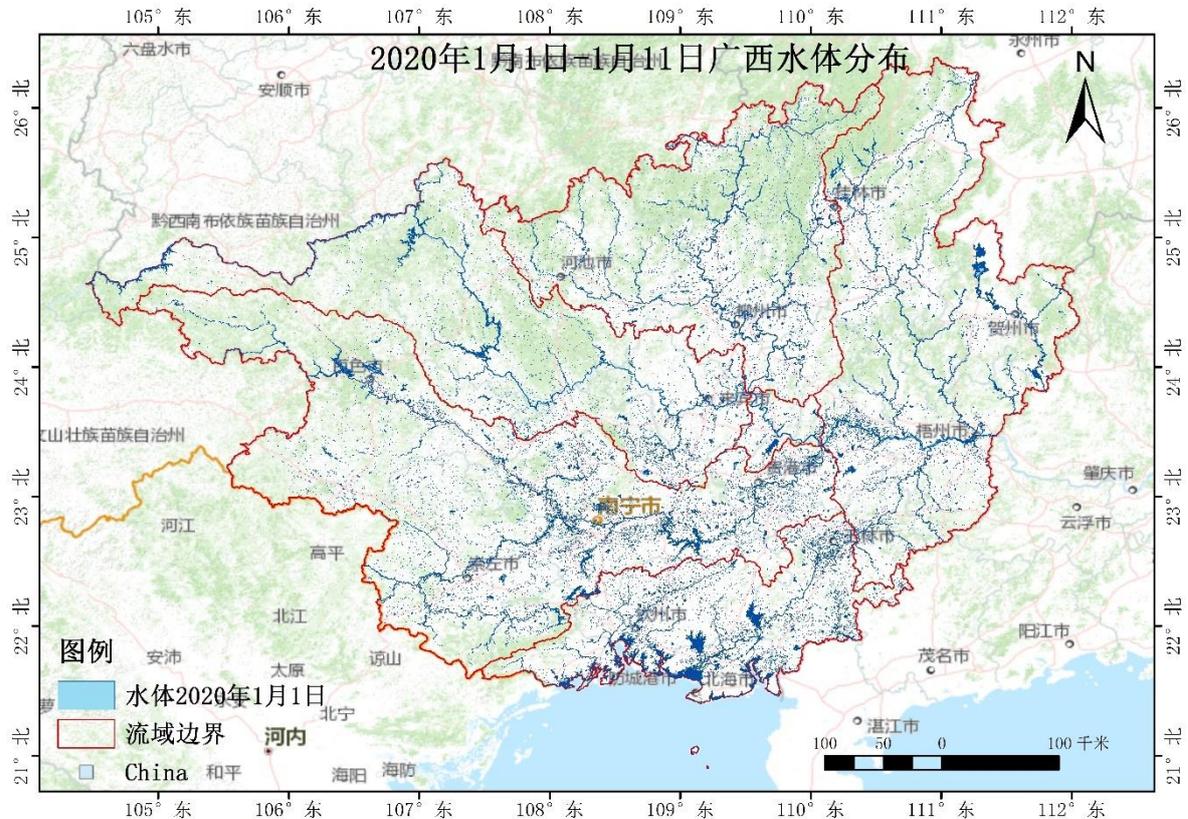


图 5-2 广西地表水体空间分布

为详细了解 2020 年广西地表水体空间分布格局，选取 2020 年 1 月 1 日到 1 月 11 日一期为例进行空间分布展示，通过计算和统计水体面积，广西整体水体分布呈现不均匀的趋势，广西地区的水体分布与地形、气候等因素密切相关。西南部地区山地较多，河流众多，水体分布较为广泛；北部地区地形较为平坦，河流较少，水体分布较为稀少。此外，广西地区气候温暖湿润，有利于水体的形成和生长。研究结果显示，广西地区的水体主要分布在中部和西南部的海岸线附近，而北部和西北部地区地形跌宕起伏，山体居多，地表水体较少。

§ 5.2 不同流域地表水体面积时空变化分析

按照广西主要的河流（柳江、红水河、郁江、黔江、浔江、南流江）将广西分为六个流域，如图 5-3 所示，31 期监测结果表明，广西地表水体分布主要集中在南部和东

部区域（流域V和III），二者水体面积占比达到全流域水体面积的一半以上。整个流域和干流子流域水体分布季节性特征明显，呈现夏季多、冬季少的特点，容易引发旱涝灾害；大多数子流域水体面积呈现增长趋势，其中人类活动较多的流域IV和西部低海拔流域 I 增长明显，除人为修建水库等影响外，需考虑自然水体增长可能带来的洪涝问题。

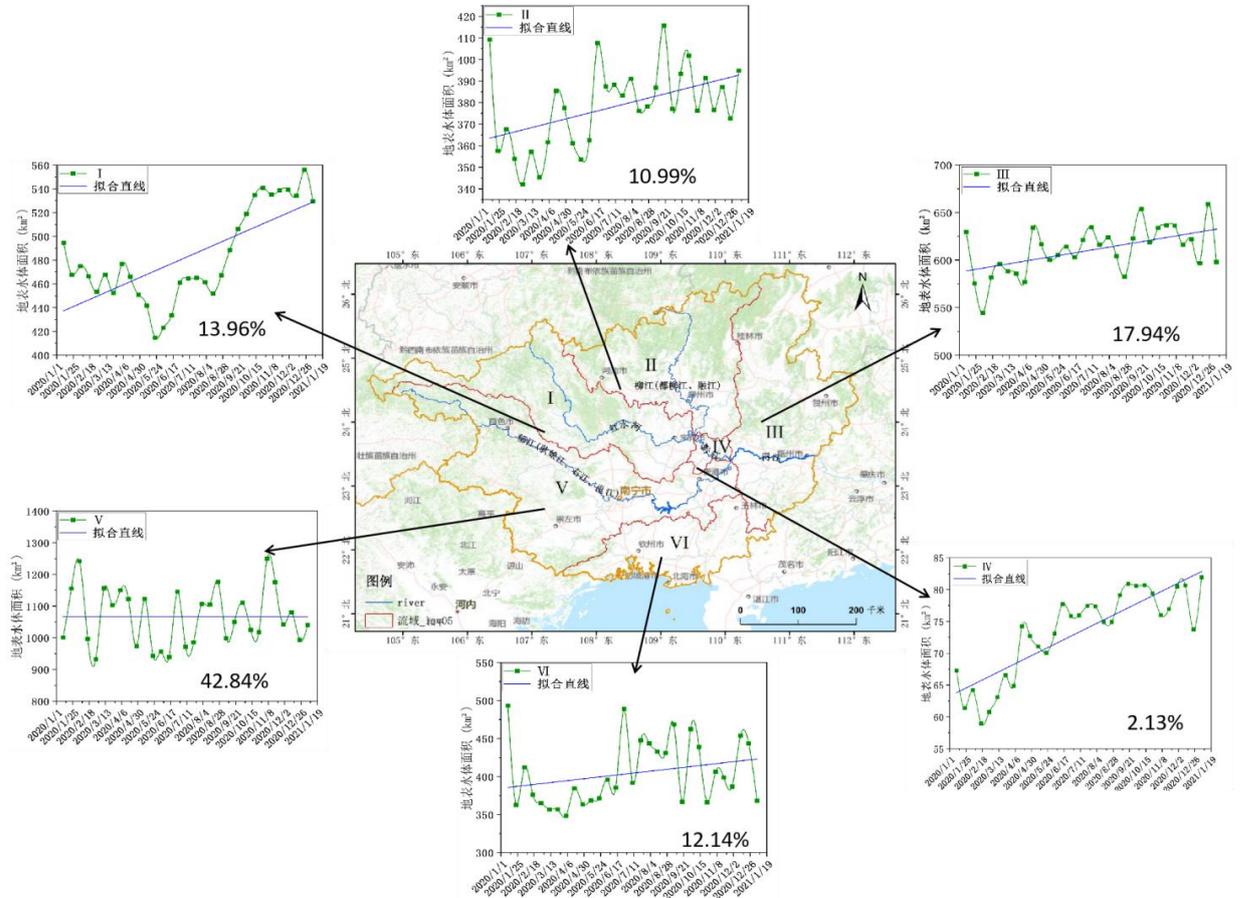


图 5-3 广西按河流分区示意图及各流域地表水体变化曲线

表 5-1 按流域统计地表水体分布与占比情况

流域	流域面积 (km ²)	占全区域面积的比例 (%)	平均水体面积 (km ²)	占全区域水体面积的比例 (%)	每平方千米水体面积 (km ²)
I	44547.1	18.77	14877.31	13.96	0.33
II	42163.9	17.76	11720.76	11.00	0.28
III	53753.9	22.65	19127.48	17.94	0.36
IV	2930.34	1.23	2272.67	2.13	0.78
V	69474.6	29.27	45662.44	42.84	0.66
VI	24495.7	10.32	12939.05	12.14	0.53
全区域	237365.54	100	106599.71	100.00	0.45

根据对六个流域 2020 年 31 期的平均水体面积、占全流域水体面积比例以及平均每平方千米水体面积的统计,结果如表 5-1 所示。可以发现,流域IV的面积、水体面积以及占全区域水面积比例均为最小,然而每平方千米水面积却是最大的。这一结果表明,虽然流域IV的水体面积占比较小,但是每平方千米土地上的水体却占比较大,约为 78%。通过查看 Google Earth,我们发现该流域位于广西中南部,流经黔江,并且拥有一个大型水库——达开水库,这进一步解释了水体面积占比较大的原因。相比之下,流域V的水体面积和占全区域水面积比例最大,约有 66%的土地被水体覆盖。总体来看,流域IV、V、VI的水体面积占比均大于流域I、II、III,表明广西地表水体的分布呈现南部多于北部的趋势。

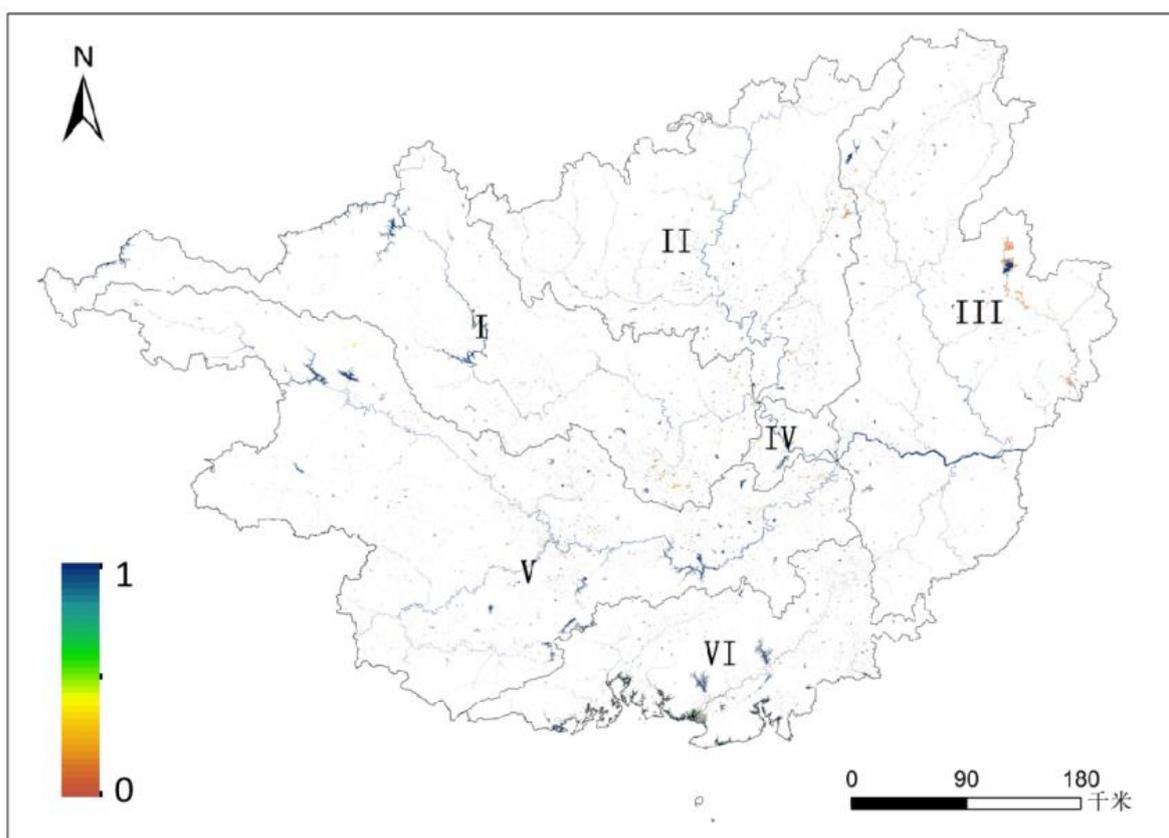


图 5-4 2020 年广西地表水体 31 期出现频率空间分布图

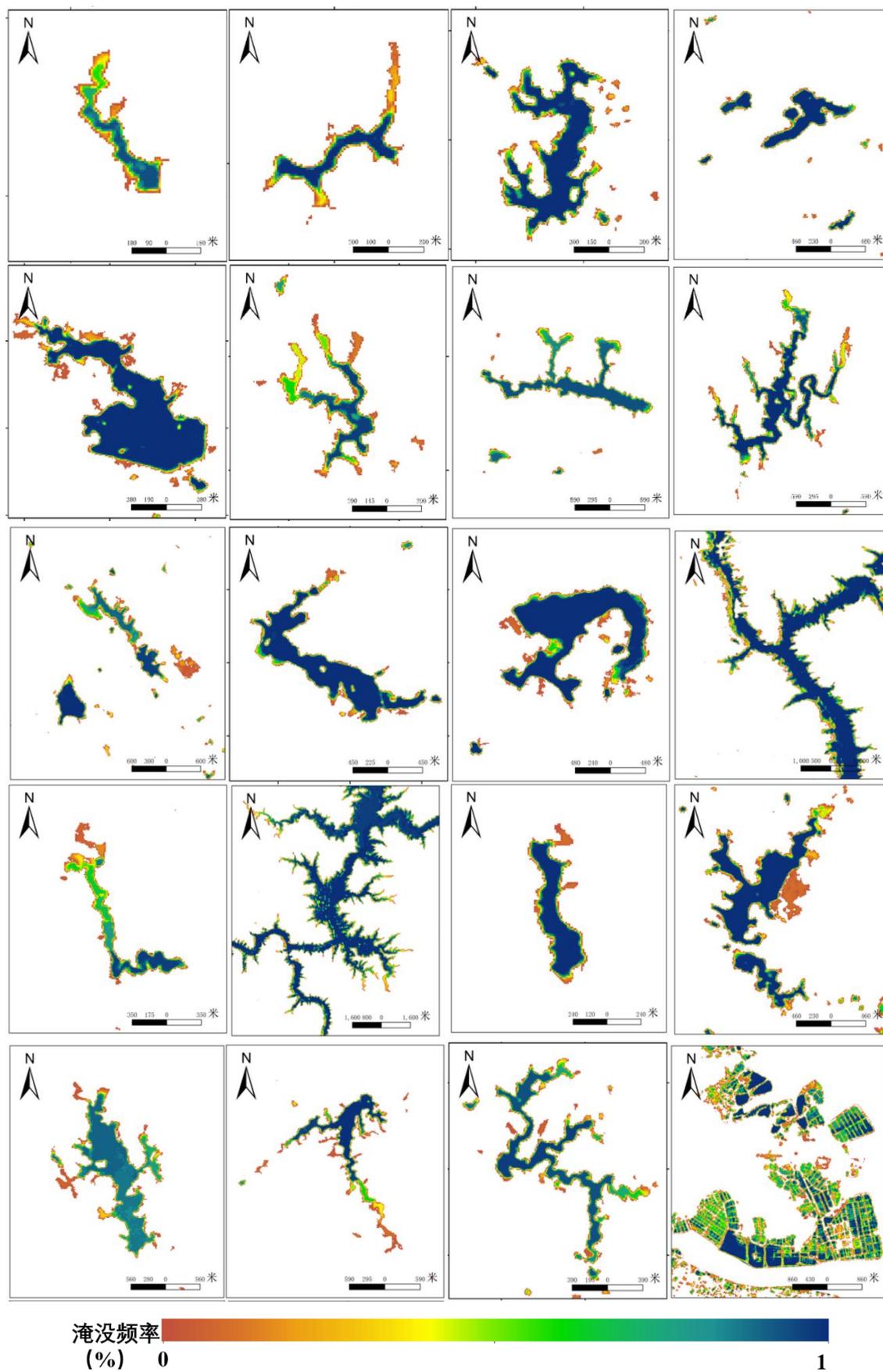


图 5-5 2020 年广西地表水体 31 期淹没频率局部放大图

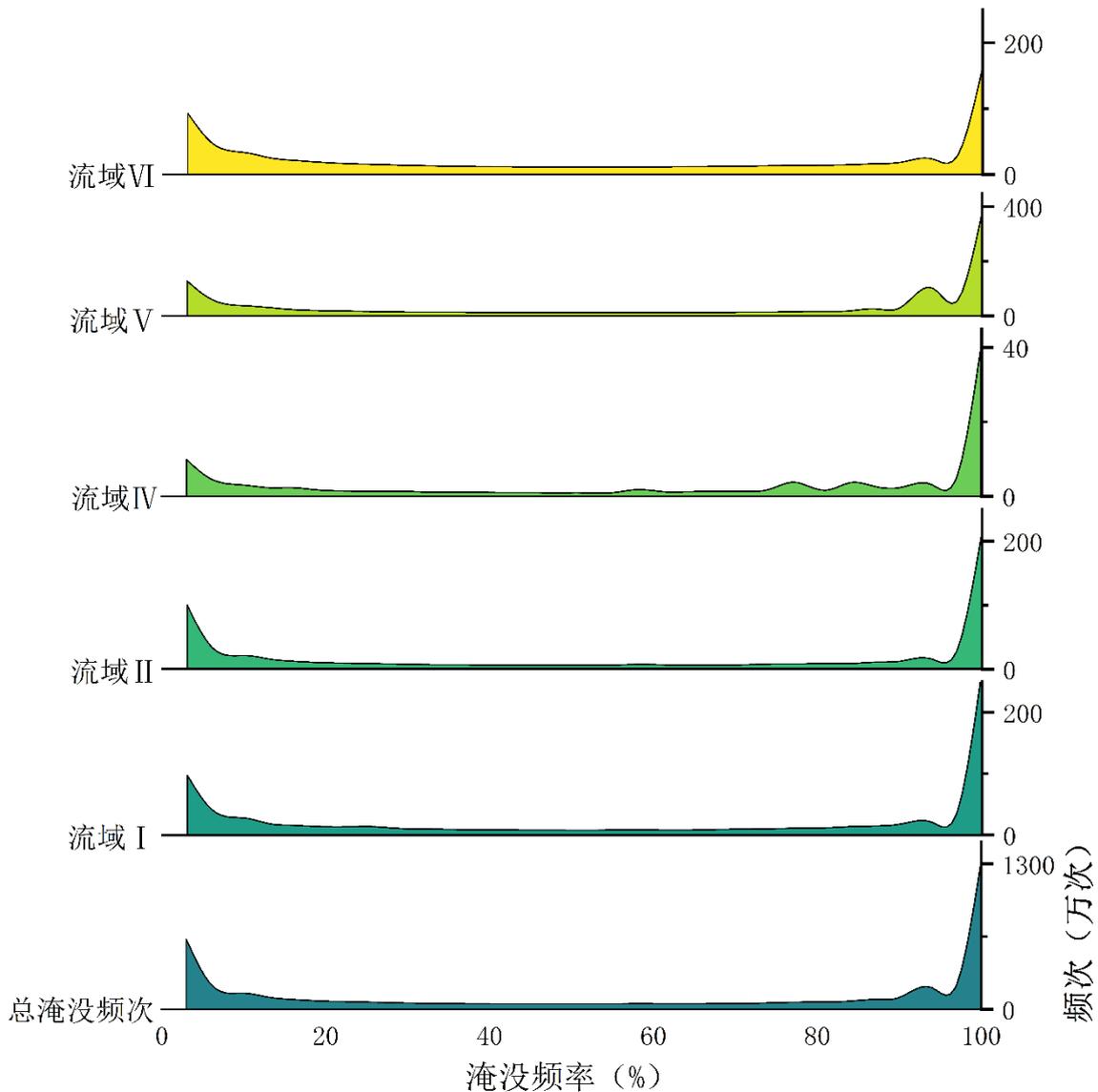


图 5-6 不同流域淹没次数面积图

为了更好地呈现广西 2020 年水面覆盖的空间演变信息，我们采用了 31 期 Sentinel-1 影像地表水体提取结果。将水体赋值为 1，非水体赋值为 0，并将每期的提取结果进行叠加，最后除以 31 期，从而得到广西 2020 年的地表水体淹没频率图，如图 5-4，图 5-5，为了了解淹没频率的具体细节，分别对六个流域进行了局部展示。为了更全面地掌握每个流域的淹没情况，图 5-6 对不同的淹没频率，2020 年总淹没次数及六个流域淹没频次进行了统计。

由图 5-4、图 5-5、图 5-6 可知，广西 2020 年的淹没频率总体呈现小于 20% 和大于 90% 的频数分布较多，而在 20% 到 80% 之间频数分布相对平稳。对于每个流域，其频数分布与整体分布趋势相似，频数比较大的分布在 20% 及大于 90% 区间，在区间 20% 到 80% 之间频数分布较为稳定。此外，频率空间分布图显示，在大型湖泊、水库及河流区域的频率较大，大约在 90% 到 100% 之间，主要是因为这些区域属于永久性

水体，常年有水，或者有地表径流水补给。而河流、湖泊、水库的岸滩以及耕地、城市中的小水体淹没频率较低，出现该现象有三部分的原因，一是因为水位的波动，在岸滩处水位波动较大，受降水、地表径流影响严重，这些地区地形海拔较低，较为平坦，容易成为洪涝灾害的影响地区，在水域的边界区域容易出现洪涝。二是因为生活用水、农田灌溉、工业排放等临时性用水导致的水位波动。三是可能是由于提取误差导致的。因此，通过地表淹没频率分析，可以精准掌握水体动态变化规律，为防洪预案提供科学依据，使得防洪措施更加针对性和有效性。同时，可以为水利工程安全评估和设计提供参考数据，并为城市规划提供淹没风险评估和防洪规划方案设计依据。

广西是我国南部沿海省份之一，其地形多样，包含了岩溶、丘陵、平原、盆地、山地和海岸等多种地貌类型。同时，广西地区多山多水，地处亚热带和热带交界，气候温暖湿润，降水充沛，广西地表水体分布之所以呈现南部多于北部的趋势。

首先，地形因素是导致广西地表水体分布南多北少的主要原因之一。广西地区地形复杂，南部地区山地较多，河流众多，水体分布较为广泛；北部地区地形较为平坦，河流较少，水体分布较为稀少。南部地区的山地和丘陵等地貌，形成了许多河流和湖泊，这些水体在地势低洼的地方积蓄形成了许多水库和洼地，增加了水体的分布面积。而北部地区的平原地貌，地势较为平坦，且水系相对较少，因此水体分布相对较少。

其次，气候条件也是导致广西地表水体分布南多北少的重要原因之一。广西地处亚热带和热带交界，气候温暖湿润，降水充沛，这种气候条件非常有利于水体的形成和生长。南部地区的气候条件更加湿润，年平均降水量较大，因此水体分布更为广泛。而北部地区气候条件相对较为干燥，降水量较少，因此水体分布相对较少。

最后，人类活动也对广西地表水体分布产生了一定的影响。广西地区人口密度较高，经济发展较为发达，大量的人类活动如工业污水、农业化肥、城市污水等，对地表水体造成了一定的污染和破坏，导致一些地区水体减少或消失。这种人为活动对南部地区的水体影响更加明显，因为南部地区人口密集、工业污染严重，所以南部地区的水体受到的影响更大，水体分布相对较少。

综上所述，广西地表水体分布南多北少的原因是多方面的，包括地形、气候和人类活动等因素的影响。在未来的水资源管理和环境保护中，需要采取有效的措施保护广西的水资源，促进广西地表水体分布的平衡和发展。

§ 5.3 地表水体与降水的相关性变化特征分析

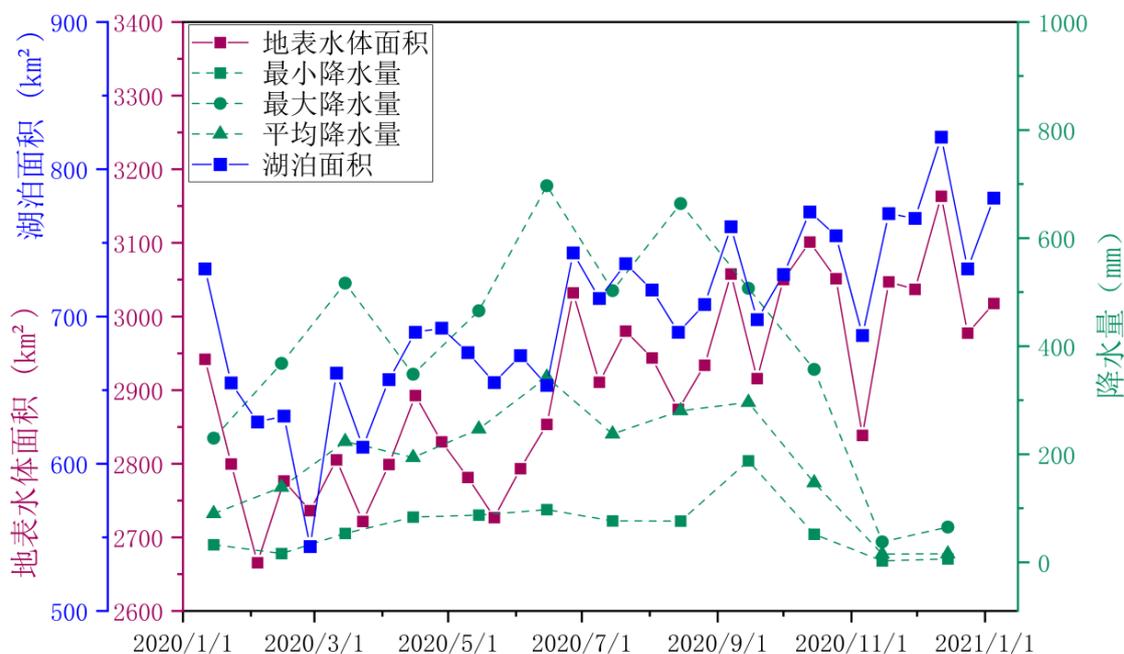


图 5-7 地表水体面积与降水量变化曲线

根据图 5-7 分析, 2020 年广西的降水和地表水体变化情况有着密切的关联。2020 年广西的降水量总体偏多, 且呈现出明显的季节性变化。其中, 7 月至 9 月为降水高峰期, 降水量明显偏多; 而 1 月、2 月、11 月、12 月至则为降水低谷期, 降水量相对较少。在地表水体方面, 2020 年广西地表水体总体呈现出增加的趋势。从图中可以看出, 在 2020 年 3 月、4 月、7 月、9 月地表水体面积随着降水量增加而增加, 5 月、8 月、10 月、11 月地表水体面积随着降水量减少而减少, 而 1 月、2 月、12 月关系表现不是很明显, 可能是因为在该时间段降水不是主导因素, 地表水面积的增加有其他的地下水, 或者水库的补给。

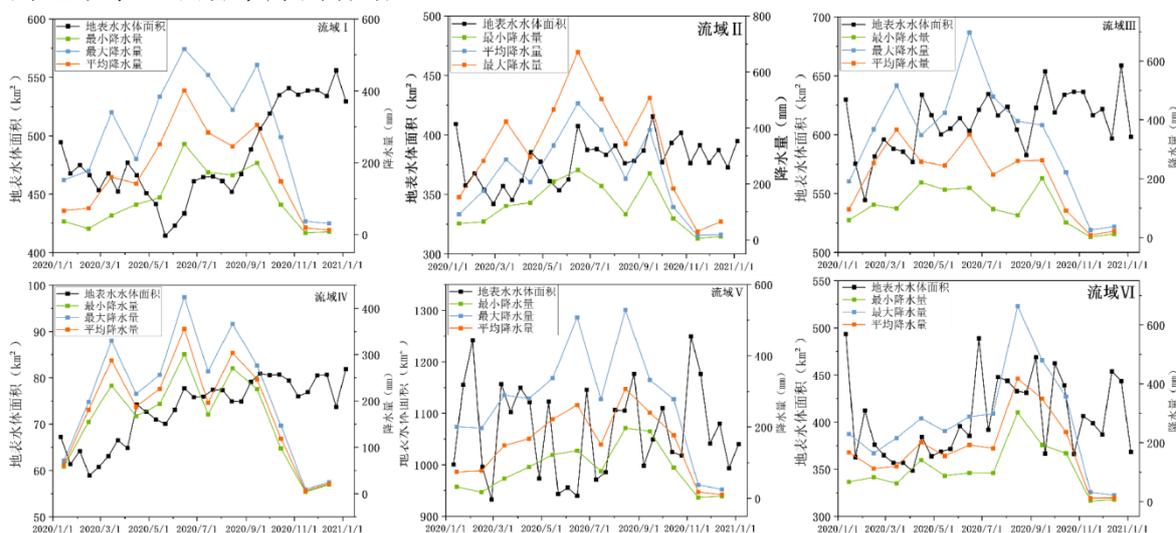


图 5-8 不同流域地表水体与降水变化曲线

图 5-8 为不同流域地表水体面积与最小降水量、最大降水量以及平均降水量之间的变化曲线, 根据结果显示, 2020 年广西地表水体面积在每个流域上呈现出增加的趋势, 其中, 流域 I 和流域 IV 增加幅度较大, 流域 II、流域 III 相对平稳上升, 流域 V、流域 VI 波动较大。该现象是由于流域 I、流域 IV 位于广西主要河流流域、水库和湖泊区域, 地表水体面积增加幅度较大, 而流域 V 及流域 VI 位于城市区域和农田等人类活动频繁和沿海区域, 地表水体面积增加幅度相对较小。

2020 年广西的降水量和地表水体变化显著相关, 降水量的增加会对地表水体的分布和面积产生一定的影响。从降水变化分布来看, 广西的降水量呈现出由南向北递减的趋势。南部沿海地区的降水量相对较高, 北部内陆地区的降水量相对较低。此外, 广西西部山区的降水量也相对较高。而在时间上, 广西的降水量呈现出季节性变化, 其中夏季和秋季的降水量相对较多, 而冬季和春季的降水量相对较少。从地表水体变化方面来看, 广西的地表水体呈现出由东南向西北递减的趋势。南部沿海地区和西部山区的地表水体面积相对较大, 而北部内陆地区的地表水体面积相对较小。此外, 广西的地表水体面积也呈现出季节性变化, 其中夏季和秋季的地表水体面积相对较大, 而冬季和春季的地表水体面积相对较小。

总之, 广西地表水体面积与降水之间存在一定的关系。广西属于亚热带季风气候区, 冬季比较干燥, 夏季则雨量较多, 且地形复杂, 河网发达, 降水对地表水体面积具有重要影响。一般来说, 降水量越大, 地表水体的面积也相应增加。当然, 降水量和地表水体面积之间的关系不是简单的线性关系, 还受到地表水体自身特性、地形和土壤等因素的影响。例如, 地表水体的蒸发量、渗透率等指标也会影响其面积大小; 地势高低和地质构造的差异也可能导致同样降水量下不同地区地表水体面积的差异。在实际应用中, 需要综合考虑多种因素, 才能更准确地分析广西地表水体面积与降水之间的关系。在实际中, 对于水资源管理和水环境保护等方面的工作, 需要针对不同区域的特点, 结合降水量和地表水体变化情况进行综合分析和研究, 制定科学合理的水资源管理和保护措施, 以实现水资源的高效利用和生态环境的保护。

第六章 结论与展望

§ 6.1 结论

本文结合多源遥感数据对广西降水与地表水体高时空分辨率遥感监测及分析,首先基于地理加权回归模型,结合增强植被指数、地表温度、地表蒸散发和地形海拔数据,对 10 km 空间分辨率的 GPM 卫星降水数据进行降尺度,通过对比高斯核函数、指数核函数、双重平方核函数、立方距离核函数、窗函数五种核函数,最终选取精度良好的指数核函数计算权重矩阵,通过权重矩阵得到每个环境变量的回归参数,再通过回代地理加权回归模型,得到 1km 分辨率年度降水数据,最后通过比例指数法得到 2001-2020 年广西及东盟区域月度降水降尺度数据。

其次基于哨兵一号雷达数据和哨兵二号光学数据,依据二者成像原理的不同,将雷达影像与光学影像优势互补融合,对广西进行大范围和精细化的水体信息提取。首先对哨兵一号雷达数据通过计算 SDWI 水体指数,针对不同地形地貌,对覆盖广西的 31 景雷达影像采用局部阈值法进行初步提取;同时对哨兵二号光学数据通过单波段阈值法和局部阈值法进行初步提取,其次利用高精度河流矢量数据将 SAR 与光学影像水体初步提取结果分为河流数据和湖库数据两部分。通过叠加分析,求出 SAR 和光学影像湖库数据的交集,并计算其分别占原来 SAR 和光学影像初步水体结果的比例,当所占比例较大时认为其为水体,当所占比例较小时认为其为阴影,确定比例阈值剔除山体阴影部分;利用欧空局(ESA) 10m 土地覆盖数据的林地、草地和建筑覆盖类型数据与水体结果进行叠加分析,剔除小斑块阴影。

最后通过计算统计广西地表水体与降水情况,按照广西的主要河流(柳江、红水河、郁江、黔江、浔江、南流江)分为六个流域分别进行动态监测及时空分析。主要结论如下:

(1) 面向地形地势复杂广西地区,通过地理加权回归模型对 GPM 降水数据进行降尺度,结果能够针对解决了因地面气象站点数量与空间分布不足导致降水空间监测存在困难的问题,可以更细致地反映降水的空间分布格局与特征,具有时空分辨率高、精度高、时间序列长等特点,弥补了广西地区高分辨率降水数据集的缺失。

(2) 基于哨兵一号与哨兵二号数据地表水体提取,针对当前地表水体提取频次低、细小水体识别度差,难以应用于复杂气候与地形条件地区等问题,将雷达影像与光学影像的成像集合优势互补,结果经过对比验证,可实现对广西每 12 天地表水体动态监测,从而准确掌握水体空间分布状态及其时间变化规律,对广西地表水情及水旱灾害更有效的遥感监测。

(3) 通过对广西 2001-2020 年降水长时间序列进行时空特征分析, 从时间序列上看, 广西的年均降水量呈现出一定的波动性, 整体上年均降水量处于上升的趋势, 20 年平均降水量为 1727.85mm, 最高值是 2015 年的 2031.86mm, 最低值是 2011 年的 1380.57mm。广西的年均降水量空间变化特征主要表现为南高北低、东多西少的趋势。从南到北, 广西的年均降水量逐渐减少。从东到西, 广西的年均降水量也呈现出递减的趋势。

(4) 通过对广西 2020 年每 12 天地表水体进行时空特征分析, 从整体上看, 2020 年广西地表水体面积跌宕起伏, 呈现上升的趋势, 空间上呈现不均匀的分布格局, 主要分布在中部和西南部的海岸线附近, 而北部和西北部地区地形复杂, 山体居多, 地表水体较少。从流域进行分析结果看, 地表水体分布主要集中在南部和东部区域 (流域 V 和 III)。整个流域水体分布季节性特征明显, 呈现夏季多、冬季少的特点, 容易引发旱涝灾害; 大多数子流域水体面积呈现增长趋势, 其中人类活动较多的流域 IV 和西部低海拔流域 I 增长明显, 山区较多的流域增长比较缓慢。

(5) 广西地表水体面积与降水呈正相关关系, 即降水量越大, 地表水体面积也越大。这是因为降水是地表水体的主要来源之一, 多雨月份的降水量足以满足地表水体的水量需求, 因此地表水体面积相对较大。相反, 少雨月份的降水量较小, 地表水体的水量供应不足, 导致地表水体面积相对较小。然而, 在广西地区, 由于地形地貌复杂, 地表水体的形成和分布受到多种因素的影响, 包括降水、蒸发、地质构造、土地利用等。因此, 降水量并不是决定广西地表水体面积的唯一因素。

§ 6.2 主要创新点

本研究具有创新性和贡献性的研究内容主要包含以下三个方面:

第一, 构建了 2001-2020 年广西及东盟区域 1km 分辨率降水降尺度数据集。利用基于 GWR 模型的降尺度方法, 并选择适用于南方山区的最优核函数, 该方法在精度保持不变的基础上, 并将降水数据的空间分辨率提高到 1km。

第二, 结合局部阈值法和高精度河流数据的融合方法, 针对大范围山区水体提取不精细, 可泛性较低等缺点, 对已有的矢栅结合的水体提取方法进行优化, 有效地实现了对广西大范围地区每 12 天时间分辨率地表水体动态监测, 并制作了 2020 年广西每 12 天时间分辨率地表水体数据集, 该方法可应用于南方多山多雨地区地表水体的高频次动态监测。

第三, 应用多源卫星遥感数据对广西地表水体与降水之间的关联性进行探索, 具有时空分辨率高、时间序列长等优势, 可准确掌握地表水体与降水的空间分布、时间变化规律以及相关性分析。

§ 6.3 讨论与展望

本研究利用地理加权回归模型, 结合环境变量, 对 GPM 卫星降水数据进行降尺度, 得到 1km 分辨率月度降水数据; 同时基于光学与雷达影像成像原理的不同, 结合哨兵一号雷达数据和哨兵二号光学数据, 得到每 12 天分辨率地表水体数据。尽管对广西地表水体面积和降水进行了时空变化特征分析, 同时也对流域进行了分析, 以探究广西地表水体面积变化和降水之间的相关性, 并得出了一些结论。然而, 在其他影响地表水体面积变化的因素方面, 还存在一些不足之处, 需要进一步深入研究:

(1) 广西 1km 分辨率月度降尺度降水数据, 虽然在空间分辨率上得到了提高, 且能够满足降水变化及与地表水体空间上的相关性分析, 但在时间尺度上还需要提升, 高时间分辨率的降水数据使得相关性分析更具科学性。

(2) 由于哨兵二号光学影像容易受到云的影响, 不能获取与哨兵一号同时期的影像, 会导致一些淹没频次较低的细小水体没有被识别出来, 从而影响了水体提取的精度, 后续可结合时间分辨率更高, 质量更好的光学影像进行提取。

(3) 对地表水体初步提取时, 需要根据频谱图进行密度分割, 分割的阈值是目视选取双峰的峰谷值, 阈值选取太大会增加后向散射系数与水体相近的道路、山体阴影等干扰, 阈值太小会导致湖泊轮廓不完整, 河流断流等现象, 后续可结合自适应阈值法进行提取

参考文献

- [1] 陈思雨, 李继清, 谢宇韬等. 基于 Sentinel-1 SAR 遥感影像的漓江流域径流反演 [J]. 人民珠江, 2020, 41(05): 116-22.
- [2] 彭焕华, 张静, 梁继等. 东洞庭湖水面面积变化监测及其与水位的关系 [J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(12): 2770-80.
- [3] 赵书慧. 基于 MODIS 卫星数据的水面积提取方法研究 [D]; 山东师范大学, 2018.
- [4] Cui Y, Chen X, Gao J, et al. Global water cycle and remote sensing big data: overview, challenge, and opportunities [J]. Big Earth Data, 2018, 2(3): 282-97.
- [5] 张寒博, 徐勇, 窦世卿等. 基于 GWR 模型的长江流域 TRMM 数据降尺度 [J]. 水土保持研究, 2021, 28(03): 149-55+62.
- [6] 朱姜韬, 杨庆怡, 李旭等. 中国西北地区夏季降水及其东部降尺度预测模型 [J]. 高原气象, 1-11.
- [7] 杜懿. 基于统计降尺度的东江流域未来气候预估 [J]. 人民珠江, 1-15.
- [8] 董甲平, 冶运涛, 顾晶晶等. 基于卷积神经网络的遥感降水降尺度特性分析——以滦河流域为例 [J]. 水力发电学报, 1-14.
- [9] 李新同, 史岚, 陈多妍. 基于深度学习的闽浙赣 GPM 降水产品降尺度方法 [J]. 自然资源遥感, 1-9.
- [10] 张焱, 梁信忠, 汪方等. CWRF 降尺度提高 BCC_CSM1.1m 对中国夏季降水跨季度动力预测能力 [J]. 大气科学学报, 1-20.
- [11] Xu S, Wu C, Wang L, et al. A new satellite-based monthly precipitation downscaling algorithm with non-stationary relationship between precipitation and land surface characteristics [J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 162(119-40).
- [12] 王飞宇, 占车生, 胡实等. 典型山地蒸散发时空变化模拟研究 [J]. 资源科学, 2017, 39(02): 276-87.
- [13] 胡实, 韩建, 占车生等. 基于地理加权回归模型的典型山地卫星反演降水产品降尺度研究 [J]. 山地学报, 2019, 37(03): 451-61.
- [14] 柏荷, 明义森, 刘启航等. 基于 MGWR 模型的黄河流域 GPM 卫星降水数据降尺度研究 干旱区地理 [J]. 1-14.
- [15] 苏龙飞, 李振轩, 高飞等. 遥感影像水体提取研究综述 [J]. 国土资源遥感, 2021, 33(01): 9-19.
- [16] Frazier P, Page K P E, Sensing R. Water body detection and delineation with Landsat TM data [J]. 2000, 66(1461-7).

- [17] 段秋亚, 孟令奎, 樊志伟等. GF-1 卫星影像水体信息提取方法的适用性研究 [J]. 国土资源遥感, 2015, 27(04): 79-84.
- [18] 杜敬. 基于深度学习的湖泊湿地信息提取及时空演变特征研究 [D]; 东华理工大学, 2017.
- [19] 邓开元, 任超. 多光谱光学遥感影像水体提取模型 [J]. 测绘学报, 2021, 50(10): 1370-9.
- [20] 李景刚, 黄诗峰, 李纪人. ENVISAT 卫星先进合成孔径雷达数据水体提取研究——改进的最大类间方差阈值法 [J]. 自然灾害学报, 2010, 19(03): 139-45.
- [21] 冯崎, 王琦, 黄海兰等. 基于 Sentinel-1 双极化数据改进水体提取的 Otsu 算法 [J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(04): 1003-11.
- [22] 韦嫦, 付波霖, 覃娇玲等. 基于多时相 Sentinel-1A 的沼泽湿地水面时空动态变化监测 [J]. 自然资源遥感, 2022, 34(02): 251-60.
- [23] 柴宝惠. 基于机器学习和图像形态学的彩色近代地图数字化——以近代上海地区地表水体信息提取为例 [J]. 历史地理研究, 2022, 42(02): 117-33+58-59.
- [24] 黄敏敏. 基于 Seminel-1/2 数据的寿光市洪涝灾害监测与预测研究 [D]; 南京信息工程大学, 2022.
- [25] 史宜梦. 基于多源遥感数据的黄河源区河流水体提取与径流量反演研究 [D]; 河北工程大学, 2021.
- [26] Isikdogan F, Bovik A, Passalacqua P. RivaMap: An automated river analysis and mapping engine [J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 202(
- [27] Yao F, Wang J, Wang C, et al. Constructing long-term high-frequency time series of global lake and reservoir areas using Landsat imagery [J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 232(111210).
- [28] Klein I, Dietz A J, Gessner U, et al. Evaluation of seasonal water body extents in Central Asia over the past 27 years derived from medium-resolution remote sensing data [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2014, 26(335-49).
- [29] Pekel J-F, Cottam A, Gorelick N, et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes [J]. Nature, 2016, 540(7633): 418-22.
- [30] 汤玲英. 基于面向对象方法的 Sentinel 数据在水体提取中的应用 [D]; 湖南师范大学, 2018.
- [31] 吴宇凡, 王江波, 苟爱萍. 1985 年以来粤港澳大湾区地表水体时空演变特征与驱动因素 [J]. 热带地理, 2023, 43(03): 395-407.
- [32] 赵梓琨, 田园盛, 翁学先等. 1986—2021 年黄河流域地表水体面积的时空变化特征 [J]. 应用生态学报, 2023, 34(03): 761-9.
- [33] 严夏青. 基于多源遥感数据长江干流水体面积时空变化特征的研究 [D]; 南京信息工程大学, 2022.
- [34] 梁超. 近 18 年来黄河流域地表水体时空变化与降水影响分析 [D]; 河南大学, 2020.
- [35] 张慧杰. 农户公益林生态补偿接受意愿的影响因素研究 [D]; 北京林业大学, 2018.
- [36] 除多, 才旺顿珠, 拉旺顿珠等. Sentinel-2 监测西藏冰崩灾害 [J]. 遥感技术与应用, 2022,

- 37(06): 1289-301.
- [37] 杨魁, 杨建兵, 江冰茹. Sentinel-1 卫星综述 [J]. 城市勘测, 2015, (02): 24-7.
- [38] 张伟, 石汉青, 姜祝辉等. 合成孔径雷达风场反演变分方案评估 [J]. 地球物理学报, 2021, 64(07): 2436-46.
- [39] 吴善玉, 鲍艳松, 李叶飞等. 基于神经网络算法的 Sentinel-1 和 Sentinel-2 遥感数据联合反演土壤湿度研究 [J]. 大气科学学报, 2021, 44(04): 636-44.
- [40] 于澎峰. 时序 Sentinel-2 遥感数据土地覆盖分类方法研究 [D]; 河南理工大学, 2020.
- [41] 李健锋, 刘思琪, 李劲彬等. 耦合 SVM 和 Cloud-Score 算法的 Sentinel-2 影像云检测模型研究 [J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(03): 713-20.
- [42] Wenshan L, Yubao Q, Pengfei X, et al. Vector dataset for river systems originating in Eurasia to the Arctic Ocean [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 502(1): 012035.
- [43] 唐国强, 万玮, 曾子悦等. 全球降水测量(GPM)计划及其最新进展综述 [J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(04): 607-15.
- [44] 谢小伟, 幸茂仁, 汪璐璐等. 利用 GRACE/GRACE-FO 重力卫星探测黄河流域水储量能力及极端气候发生的可能性 [J]. 大地测量与地球动力学, 2022, 42(12): 1269-75.
- [45] 慎璐璐. 黄河流域多源卫星降水产品精度评估 [D]; 西北农林科技大学, 2022.
- [46] 史岚, 何其全, 杨娇等. 闽浙赣地区 GPM IMERG 降水产品降尺度建模与比较分析 [J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(10): 1642-52.
- [47] 黎彦皓. 基于 Landsat 和 MODIS 数据融合的撂荒耕地识别 [D]; 成都理工大学, 2020.
- [48] 孟翔飞, 魏虹, 谢小红等. 基于 MODIS 数据的云南地表温度空间分布特征 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2010, 32(12): 154-7.
- [49] 熊俊楠, 李伟, 刘志奇等. 基于多源数据的西藏东南部历史干旱监测与分析 [J]. 干旱区地理, 2019, 42(04): 735-44.
- [50] 刘永畅. 中国地表城市热岛足迹主要特征及其主要影响因素研究 [D]; 兰州大学, 2018.
- [51] 陈财. 复杂下垫面背景下淮河流域冬小麦干旱研究 [D]; 宁波大学, 2020.
- [52] 张雨田, 许晓东, 石军南等. 联合 Sentinel-1 和 Sentinel-2 数据反演森林蓄积量 [J]. 四川林业科技, 2022, 43(02): 71-80.
- [53] Small D. Flattening Gamma: Radiometric Terrain Correction for SAR Imagery [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(8): 3081-93.
- [54] 徐颖, 周焰. SAR 图像相干斑抑制研究进展 [J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(20): 210-6.
- [55] 王哲, 赵超英, 刘晓杰等. 西藏易贡滑坡演化光学遥感分析与 InSAR 形变监测 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(10): 1569-78.
- [56] Feyisa G L, Meilby H, Fensholt R, et al. Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery [J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 140(23-35).

- [57] Jin S, Liu Y, Fagherazzi S, et al. River body extraction from sentinel-2A/B MSI images based on an adaptive multi-scale region growth method [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 255(112297).
- [58] 曾昭昭, 王晓峰, 任亮. 基于 GWR 模型的陕西秦巴山区 TRMM 降水数据降尺度研究 [J]. *干旱区地理*, 2017, 40(01): 26-36.
- [59] 嵇涛, 刘睿, 杨华等. 多源遥感数据的降水空间降尺度研究——以川渝地区为例 [J]. *地球信息科学学报*, 2015, 17(01): 108-117.
- [60] 赵宁, 邱玉宝, 贾国强等. 2001–2020 年中国广西及东盟区域 1 km 分辨率降尺度月度降水数据集 [J]. *中国科学数据(中英文网络版)*, 1-16.
- [61] 温伯清, 刘戎, 庞国伟等. GPM 卫星降水数据的降尺度研究——以陕西省为例 [J]. *干旱区地理*, 2021, 44(03): 786-95.
- [62] 熊俊楠, 李伟, 刘志奇等. 基于 GWR 模型的青藏高原地区 TRMM 数据降尺度研究 [J]. *国土资源遥感*, 2019, 31(04): 88-95.
- [63] 杨道华. 漓江全流域战略规划研究的初步设计 [J]. *广西科学院学报*, 1994, 01): 8-12.
- [64] 黄丹, 郭纯青, 习丽丽等. 漓江流域旱涝拐点研究 [J]. *桂林理工大学学报*, 2015, 35(01): 53-9.
- [65] 汤彬, 王宗明, 胡文婷等. 2021 年河南省一次罕见暴雨过程的降水特征及成因 [J]. *大气科学*, 2023, 47(02): 517-33.
- [66] Jia G, Tang Q, Xu X. Evaluating the performances of satellite-based rainfall data for global rainfall-induced landslide warnings [J]. *Landslides*, 2020, 17(2): 283-99.
- [67] 覃巧婷. 基于 Sentinel-1 和 Sentinel-2 的漓江流域地表水体动态变化监测研究 [D]; 桂林理工大学, 2022.
- [68] 蔡丹丰, 胡求光, 魏昕伊. 基于 Sentinel-1 影像的浙江省沿海养殖池塘提取与管理 农业机械学报 [J]. 2023, 54(02): 169-80+88.
- [69] 陈景珏. 融合 1D-CNN 和注意力机制的 SAR 影像地表水体信息提取 [J]. *测绘*, 2022, 45(02): 56-61.
- [70] 栾玉洁, 郭金运, 高永刚等. 基于 Sentinel-1B SAR 数据的 2018 年寿光洪水遥感监测及灾害分析 [J]. *自然灾害学报*, 2021, 30(02): 168-75.
- [71] 聂欣然, 刘荣, 聂爱球等. 近 30 年南昌城区湖泊面积变化图谱和动态监测 [J]. *测绘与空间地理信息*, 2018, 41(08): 117-22.