

## 【21世纪应用生态学科前沿报告会专栏】

生态预报: 生态学的一个前沿领域<sup>\*</sup>曾德慧<sup>\*\*</sup> 姜凤岐 范志平 姬兰柱 (中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016)

**【摘要】** 生态预报对于资源、环境的决策和管理将起着越来越重要的作用。计算机科学和定量分析的进步、生态学理论的发展以及新技术的应用增加了人类预测生态系统变化的能力。本文介绍了有关生态预报的内涵、相关研究进展及案例, 提出生态预报是生态学的一个重要前沿领域, 也将是今后生态学研究的一个重要努力方向。

**关键词** 生态预报 决策 全球环境变化 生态学前沿

文章编号 1001-9332(2002)12-1699-04 中图分类号 Q149 文献标识码 A

**Ecological forecasting. A frontier in ecology.** ZENG Dehui, JIANG Fengqi, FAN Zhiping and JI Lanzhu (*Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2002, 13(12): 1699~1702.

An evolving science of ecological forecasting is beginning to emerge, and could have an increasingly important role in policy-making and management of natural resources and environment. The progress in computer science, quantitative analysis and ecological theory, together with the application of new high technology, will increase our ability to forecast ecosystem change. The authors introduced the connotation of ecological forecasting, relevant research advances and some typical examples. Ecological forecasting is an important frontier in ecology, and also, would be an important direction for future ecological study.

**Key words** Ecological forecasting, Decision-making, Global environmental change, Frontier in ecology.

## 1 引言

美国科学促进会(The American Association for the Advancement of Science, 简称 AAAS)距今已举办了 150 多次年会, 旨在使不同领域的科学家集聚在一起, 交流思想, 拓宽研究领域。毫不夸张地说, 年会上探讨的问题基本上是前瞻性的、具有特别重要意义的问题。因此, 每次年会都受到世界各国科学界的瞩目。2000 年 AAAS 年会的主题是“不确定千年里的科学”(Science in an Uncertain Millennium), 其中生态预报(Ecological Forecasting)是该年年会四个重要主题之一。近两年来包括美国科学基金会在内的许多部门、机构先后组织或资助了有关生态预报的研究。2001 年 Tilman 等<sup>[25]</sup>、Clark 等<sup>[1]</sup>分别在《Science》上撰文, 预报了由农业驱动的全球环境变化, 探索了对未来几十年预报的潜在成果, 提出了开展生态预报研究的重要性和紧迫性。本文介绍了有关生态预报的内涵以及相关研究进展, 论述了生态预报在生态学中的科学地位, 以及对于资源、环境的决策和管理的重要意义。

## 2 生态预报的内涵

预报指期望、推测或预告某些未来的事件和形势, 通常是作为推理研究和分析可得到的有关资料的结果。目前天气预报已成为人们日常生活、生产活动中息息相关、不可或缺的事情。天气预报通常是根据相关的气象观测, 指明或提示一定时期内将要发生或接着而来的天气变化特征。从字面上

看, “预报”似乎有“预测并公告”之意。但在英文中, 预报指“forecast”, 与它同义的名词有“prediction”、“prognosis”等, 其本意就是“对未来事件或状态的预言、估计或预报”。因此, “预报”与“预测”没有本质上的区别。

虽然我们无需去寻找第一篇出现生态预报(ecological forecasting 或 ecological forecast)概念或名称的文献, 但在这里我们还是要首先提及国际著名生态学家、联合国教科文组织“人与生物圈计划”(MAB)的创立者和领导者 di Castri。他和他的同事 Hadley<sup>[3, 4, 5]</sup>在 20 世纪 80 年代连续发表了 3 篇题为“增强生态学的可靠性”的文章, 认为生态学研究在 80 年代处于困境中, 并指出生态学研究存在的 3 个主要弱点: 缺乏科学的严格性、薄弱的预见能力和缺少现代技术装备。我国学者沈善敏<sup>[23]</sup>在《应用生态学报》创刊号“应用生态学的现状与发展”一文中也敏锐地感觉到这一问题; 裴铁璠等<sup>[20]</sup>在其新出版的《生态动力学》书中专门论述了有关生态动力预报问题。进入 21 世纪, 计算能力和统计方法的进步以及新数据的获取增加了我们预报生态系统变化的能力。

Clark 等<sup>[1]</sup>将生态预报定义为: 预测生态系统状态、生态系统服务和自然资源的一种过程; 生态预报充分考虑了各种不确定性, 并且依赖于气候、土地利用、人口、技术及经济活动等各种明确的方案。美国环境与自然资源委员会生态系统

<sup>\*</sup>中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-406)和中国科学院沈阳应用生态研究所知识创新工程重大项目(SCXZD0102-01)资助。

<sup>\*\*</sup> 通讯联系人。

2002-09-03 收稿, 2002-10-29 接受。

分会<sup>[2]</sup> (Committee on Environment and Natural Resources, Subcommittee on Ecological Systems) 共同主席 Clutter 和 Scavia 领导的小组将生态预报定义为: 预测生物的、化学的、物理的以及人类活动引起的变化对生态系统及其组成的影响; 并强调这样的预测并不保证什么将发生, 相反, 它是从科学上估计什么可能发生. 上述两个定义没有本质的区别. 从上述生态预报的定义看, 生态预报是一门非常综合的科学. 类似“生态预报”的术语还有“生态风险评价”(ecological risk assessment)<sup>[11, 18, 26]</sup>、“生态环境预警”(early warning on eco-environment)<sup>[9]</sup>、“生态安全预警”(early warning on ecological security)<sup>[27]</sup>, 等等. 我们认为, 这些概念的内涵可以包括到生态预报中. 另外, 很显然, 天气预报与生态预报紧密相关, 前者是后者的基础之一.

生态预报的空间范围可以是小样地, 也可是区域到大陆乃至整个地球; 时间范围可延伸到未来 50 年. 预报的信息容量与预报的不确定性呈反比, 置信区间宽意味着信息容量少. 一个预报方案可以设定为“在可能的未来的边界条件范围内的变化(例如温室气体排放方案). 对决策者而言, 方案仅仅提供了一种可能性的方向, 而并非是确定性的”. 方案可以是预报的基础, 也就意味着应用生态预报的工具可以制定具体的行动计划或对策<sup>[1]</sup>.

生态预报回答“什么将会发生, 如果……”(what if). 这些问题是以设定各种变化为前提的. 短期预报, 如预测有害海藻爆发, 类似于天气预报和飓风预报. 很多短期事件具有瞬间即逝或长期的生态影响. 例如, 灾难性的害虫或野火发生能使生态系统迅速地改变; 由洪水引发的养分流入淡水或海岸生态系统能使这些生态系统的生产力发生长期的变化或转变成新的生态系统状态. 大尺度、长期的生态系统变化的预测特别重要, 因为对生态系统一些严重的、持久的影响来自慢性的原因, 在短时间内它们是微小的、不易察觉的. 预报大尺度、长期的生态系统变化更类似于宏观经济的预报. 宏观经济预报除了计算模拟外, 还需要专家的判断、分析和评价<sup>[1]</sup>.

### 3 生态预报在生态学中的地位

传统生态学主要研究生物与环境的相互关系. 按研究的性质, 它可简单地分为基础生态学和应用生态学; 按研究对象, 又可区分为陆地生态系统研究和水生生态系统研究. 生态学成为一个活跃的科学领域开始于 20 世纪初. 生态学自诞生以来经过 100 多年的发展和壮大, 逐渐从它的起源学科——生物学分离, 越来越成为一门独立的综合学科<sup>[19]</sup>. Golley<sup>[8]</sup> 认为, 生态学的发展经历了 3 次理论上的重大突破: 1) 1935 年 Tansley 提出生态系统的概念, 20 世纪 40 年代末至 70 年代初, 生态学研究主要集中在生态系统; 2) 1980 年国际景观生态学大会的召开, 标志着现代生态学的出现, 等级理论将时间和空间尺度联系起来; 3) 人类生态学分支的诞生. 它是在生态系统和景观的概念基础上发展起来的. 更多的研究者愿意将人看做是生态系统或景观的组成部分, 使生态学

成为联接自然科学和社会科学的桥梁. Odum<sup>[19]</sup> 在最近出版的《生态学: 科学与社会的桥梁》一书中对生态学定义为: 研究生物、自然环境和人类社会的综合学科; 并认为这门学科已经成熟, 可以看作环境领域的一门基础科学.

当人类社会步入 21 世纪后, 环境与持续发展问题仍然没有得到解决, 新的世纪人类社会更加面临许多不确定性. 气候和化学循环的急速变化, 支撑地区经济的自然资源的枯竭, 外来种的激增, 疾病的传播, 空气、水和土壤的恶化, 对人类文明构成了史无前例的威胁. 食物、纤维和淡水的持续供应以及人类健康的维护都要依靠我们对于不确定性未来的预报和准备能力<sup>[1, 11, 21]</sup>.

经典生态学基础研究主要包括种群、生态系统、景观等不同水平的生态格局与生态过程, 而生态学的应用研究主要体现在恢复生态、生态工程、生态系统管理等方面. 基础生态学是应用生态学的主要理论基础, 应用研究也会促进理论的研究. 应当说, 生态学作为资源、环境管理的基础, 在生态预报出现之前, 其理论研究对应用技术研究的促进作用是有限的, 并带有一定的盲目性. 这也是生态学受到众多批评的原因所在<sup>[3]</sup>. 预报未来几十年的环境挑战需要改变我们对于科学的理解. 生态预报的出现, 正好弥补了生态学以前的缺陷. 因此, 生态预报将是今后生态学研究的一个重要努力方向, 并且能在资源和环境的决策和管理中发挥越来越大的作用. 计算机科学中的技术创新以及数量分析、信息和遥感技术、基因学、系统生物学和生态学理论的发展, 使几年前不可能发生的生态预报成为可能. 科学家和决策者们将依靠预报成功处理环境变化. 生态学家更加关心生态格局的预报. 当生态学家解释过去并预测未来人类对生态系统过程的长期影响时, 其做的努力一定能转变为决策的建议.

预报像病虫害、野火、干旱、洪水等灾难性事件可以帮助人们保护生态系统, 特别是那些危险中的生态系统, 因此能确保生态系统提供长期的服务及产品, 减少短期的负面影响, 将其对人类及其经济的影响降低到最低水平. 生态预报能帮助资源管理者更好地了解他们的选择及其决策的可能影响, 也能让管理者预计到他们行动的后果.

生态预报可以使人们在科学与政策之间进行信息集中交流. 围绕预测需求的集中讨论可以鉴别数据和信息, 并保证在最重要的经济、环境和政策决策的预测成功. 开发和检验生态预报可以突出不确定性和存在的弱点, 因此能帮助科学管理者制定研究、监测、模拟和评价的优先领域.

### 4 生态预报典型案例

4.1 蝗虫爆发 同预报技术比较成熟的学科相比, 生态预报尚未形成一个成熟的预报方法和体系. 但在生态学的研究历史上, 已有令人瞩目的成果<sup>[20]</sup>. 如马世骏先生在 1958 年探讨了大约 1000 年的有关东亚飞蝗 (*Locusta migratoria manilensis*) 危害和气象条件的关系, 明确了东亚飞蝗在我国大发生没有周期性, 指出干旱是大发生的原因. 随后, 马世骏等研究了 1913~1961 年东亚飞蝗种群动态, 明确了黄、淮等

大河三角洲湿草地若遇连年干旱, 土壤中蝗卵存活率增大, 是蝗虫大发生的根本原因; 而旱涝灾害与蝗虫爆发的关系则因地而异。据此, 马世骏等把我国蝗区分为 4 类, 并分区提出了蝗虫爆发的预报指标<sup>[14]</sup>, 使我国飞蝗防治工作取得重大成就<sup>[20]</sup>。

**4.2 由农业驱动的全球环境变化** 近年来, 人们集中关心全球气候变化带来的潜在环境问题, 而人类活动对环境的影响或许更重要<sup>[12]</sup>。Tilman 等<sup>[25]</sup>最近的研究表明, 由于人口的继续增长, 农业还要大力发展, 生境破坏、水消耗和农业污染的速度将急剧增加, 给全球生态系统带来巨大威胁。模型预测表明, 在未来 50 年, 或许是农业迅速扩展的最后时期, 由于人口将增长 50% 以及人们生活水平的提高, 对食物的需求将是全球环境变化的主要驱动因子。到 2050 年, 将有  $1.0 \times 10^9 \text{hm}^2$  的自然生态系统转变成农业用地。伴随农业用地的增加, 陆地、淡水和近海生态系统中的氮和磷含量将增加 2.4~2.7 倍, 杀虫剂的使用也将成倍增长。由此带来的富营养化问题和生境的破坏将引起空前的生态系统简单化、生态系统服务衰减和物种灭绝。这些变化在发展中国家将更加严重。

**4.3 HPS Hantavirus 病毒性肺部综合症** (Hantavirus pulmonary syndrome, HPS) 是一种以急性呼吸困难为特征、具有很高的死亡率的病毒性疾病。大多数人感染病毒后会出现高烧、怕冷、头痛、肌肉痛等类似流感的症状, 然后迅速转变成呼吸困难、肺炎, 最后导致死亡。HPS 依靠其寄主—鼠 (特别是 *Peromyscus maniculatus* 一种普通的鹿鼠) 的传染流行起来的。1993 年美国西南部 HPS 爆发被归于 1991~1992 年间的异常天气, 导致老鼠携带大量的 Hantavirus 病毒。而这种异常天气是通过美国地球资源卫星 (Landsat Thematic Mapper) 拍摄的图像量化后确定的。对气候变化与病原菌之间生态学关系的了解, 促进了预测人类感染 HPS 的模型开发, 并对人类面临的危害进行了预报。形成于 1993 年 (厄尔尼诺年之后的一年) 的 HPS 爆发模型准确地预报到了 1995 和 1997 非厄尔尼诺年的 HPS 爆发<sup>[1, 2]</sup>。

**4.4 有害海藻爆发** 有害海藻爆发 (Harmful algal blooms, HABs) 能使海洋鱼类死亡、渔业大量减产, 引起海洋哺乳动物死亡, 人类生病甚至死亡。美国海岸各州都有发生, 在过去 20 年累计经济损失超过 10 亿美元。现在, 可以通过卫星图像耦合现场调查数据探测海面叶绿素浓度来预测评价 HAB 发生、运移和毒性情况。这些预测将为资源管理人员、企业和公众提供帮助<sup>[3]</sup>。

**4.5 富营养化与缺氧** 过多养分输入和由此导致的海岸富营养化系列症状是最严重的海岸污染问题。这些症状包括海藻爆发、水生植物丧失、可溶性氧的耗竭 (Hypoxia, 又称缺氧)。最近, 美国国家海洋与大气管理局预测, 到 2020 年, 86 个河口富营养化症状将有加剧可能。一个重要的挑战是, N 负荷减少到多少才能使氧浓度上升到一个显著水平。预测表明, 密西西比河流域 N 负荷降低 20~40% 将使墨西哥湾海底水中氧浓度增加 15~50%。这些预测对于减少氮负荷、降

低可溶性氧的耗竭具有重要意义<sup>[2]</sup>。

**5 生态预报近期重要研究领域**

在未来人类社会面临巨大挑战: 食物和水的短缺、生物多样性的减少、全球气候变化、生物入侵、人类本身的健康<sup>[1, 7, 9~11, 13, 15~17, 21, 22, 24, 25]</sup>。美国环境与自然资源委员会生态系统分会<sup>[2]</sup>根据生态系统变化的 5 个关键原因, 建立了近期生态预报重要研究领域需求的基本框架。

**5.1 极端自然事件** 这些事件包括火、洪水、干旱、飓风、暴风、有害海藻爆发。尽管极端自然事件远非是自然资源管理者所能控制的, 但预测其发生、对生态系统的影响以及与生态系统变化的其它原因的相互作用, 对管理和反应对策的规划非常重要。这种规划能将损失减少到最少并促进生态系统的自我恢复能力。

**5.2 气候变化** 由于对气候变化的可能性及变化的幅度逐渐得到确认, 对资源管理者和决策者而言, 制定减少气候变化对物种、生态系统及生态产品和服务的需求已变得十分迫切。目前的需求包括预测气候变化与生态系统提供产品与服务 (特别是物种分布与清洁水的可利用性) 的变异性间的相互关系, 而生态系统服务的变异性同时受其它胁迫的影响。

**5.3 土地和资源利用** 土地和资源利用的变化导致生态系统的改变。预测生态系统变化的深刻内涵及其对人类社会的影响是十分必需的。目前的需求主要是预测自然生态系统和人工生态系统健康与生产力的变化情况, 特别是提供食物和纤维的农田、森林和草地系统。

**5.4 污染** 重点关注环境中潜在有害的化学物质和过量的营养元素。目前的需求包括预测空气污染、农业生产和森林采伐等活动对陆地、淡水和海洋生态系统的影响。

**5.5 入侵生物** 入侵生物是有意或无意地从其它地方引进到本地的生物, 能迅速传播, 占据本地物种的生态位, 使本地物种失去生存资源, 影响本地物种生存, 并能形成大面积优势群落, 降低物种多样性, 使依赖于当地物种多样性生存的

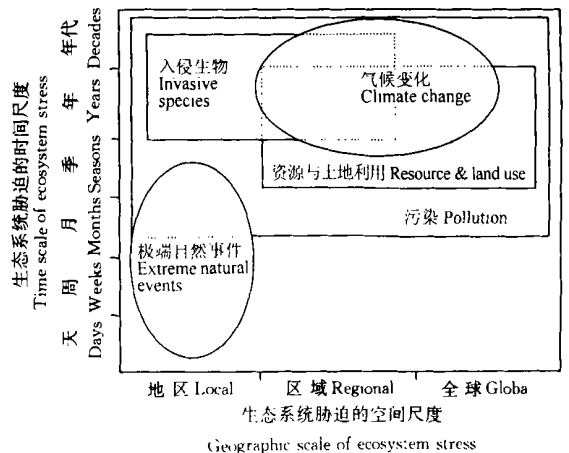


图 1 不同时空尺度下生态系统变化及其相互作用的五个关键原因 (美国环境与自然资源委员会生态系统分会, 2001)

Fig 1 Five key causes of ecological change play out interact on a wide range of time and space scales (From Committee on Environment and Natural Resources, Subcommittee on Ecological Systems, 2001).

其他物种没有适宜的栖息环境;还能影响景观的自然性和完整性;生物入侵能给当地生态系统带来灾难性影响,导致生态灾害频繁爆发,对农林业造成严重损害,还直接威胁到人类的健康。目前的需求包括预测潜在的和已经入侵物种的入侵途径、传播和生态后果。

**5.6 相互影响** 多数生态系统容易受到各种因素的交互影响而发生变化。例如,一个极端自然事件能够为新的物种侵入产生空地,而气候变化(降水和温度的改变)、土地和相关资源被利用的程度、入侵环境的化学条件(污染)等能够促进入侵物种的成功侵入。上述生态系统变化的5个主要原因经常在不同的时空尺度上交织在一起,形成相互影响(图1)。因此,构建预测这些多胁迫因素的累积效果的能力是生态学面临的巨大挑战。

## 6 结 语

近年来,随着计算机科学和定量分析的进步,生态学理论的发展以及新技术的应用,人们增加了对预报生态系统变化的信心。在2000年AAAS年会和美国生态学会2001年会上,有关生态预报的话题成为新世纪伊始美国这两次重要年会的重要内容之一。美国Duke大学著名生态学家Jim Clark教授领导了一个研究小组正在进行“生态预报中的信息与不确定性”研究。这个项目是过去10多年美国生态学会执行的最大研究计划。美国环境与自然资源委员会、商业部、海洋与大气管理局等组织和部门也正在进行有关生态预报的研究。

生态预报是一门跨学科的综合性研究。它能帮助科学管理者制定研究、监测、模拟和评价的优先领域,是资源与环境管理、决策中的重要依据。因此,生态预报将是今后生态学研究的一个重要努力方向,需要多学科、多部门的密切合作。我们有理由期望,通过科学家、管理者和决策者的参与,人类对生态系统变化的预测预报能力一定能够提高。

致谢 沈善敏先生提出宝贵意见,特此谢忱。

## 参考文献

- 1 Clark JS, Carpenter SR, Barber M, et al. 2001. Ecological forecasts: An emerging imperative. *Science*, **293**: 657 ~ 660
- 2 Committee on Environment and Natural Resources, Subcommittee on Ecological Systems. 2001. Ecological Forecasting: Agenda for the Future. Office of Science and Technology Policy, Washington, DC, pp 8
- 3 di Castri F & Hadley M. 1985. Enhancing the credibility of ecology: Can research be made more comparable and predictive? *GeoJournal*, **11**: 321 ~ 338
- 4 di Castri F & Hadley M. 1986. Enhancing the credibility of ecology: Is interdisciplinary research for land planning useful? *GeoJournal*, **13**: 299 ~ 325
- 5 di Castri F & Hadley M. 1988. Enhancing the credibility of ecology: Interacting along and across hierarchical scales. *GeoJournal*, **17**: 5 ~ 35
- 6 Fu B-J(傅伯杰). 1993. Early warning theory on regional eco-environmental issues and its application. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), **4**(4): 436 ~ 439(in Chinese)

- 7 Fu B-J(傅伯杰), Liu S-L(刘世梁). 2002. Problems and trends of long-term ecological research. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), **13**(4): 476 ~ 480(in Chinese)
- 8 Golley FB. 2001. Conversaciones con Ramón: Big questions for the millennium. *Sci Marina* **65**(supp. 2): 73 ~ 84
- 9 Grime JP, Brown VK, Thompson K, et al. 2000. The response of two contrasting limestone grasslands to simulated climate change. *Science*, **289**: 762 ~ 765
- 10 Hughes L. 2000. Biological consequences of global warming: Is the signal already apparent? *Trends Ecol Evolu*, **15**: 56 ~ 61
- 11 Kolar CS and Lodge DM. 2002. Ecological predictions and risk assessment for alien fishes in North America. *Science*, **298**: 1233 ~ 1236
- 12 Laurance WF. 2001. Future shock: forecasting a grim fate for the Earth. *Trends Ecol Evolu*, **16**: 531 ~ 533
- 13 Loreau M, Naeem S, Inchausti P, et al. 2001. Biodiversity and ecosystem functioning: Current knowledge and future challenges. *Science*, **294**: 804 ~ 808
- 14 Ma S-J(马世骏). 1965. Insect Dynamics and Meteorology. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- 15 National Academy of Sciences. 2000. Grand Challenges in Environmental Sciences: Special Report of the National Academy of Sciences. Washington, DC: National Academy Press, pp 88
- 16 National Aeronautics and Space Administration. 2000. Exploring Our Home Planet-The Earth Science Enterprise Strategic Plan. NASA Headquarters, Washington, DC.
- 17 National Invasive Species Council. 2001. Meeting the Invasive Species Challenge: The National Invasive Species Management Plan. Washington, DC, pp 80
- 18 Norton SB, Rodier DJ, Gentile JH, et al. 1992. A framework for ecological risk assessment at the EPA. *Environ Toxic Chem*, **11**: 1663 ~ 1672
- 19 Odum EP. 1997. Ecology: A Bridge Between Science and Society. Sunderland, MA, USA: Sinauer Associates, Inc.
- 20 Pei T-F(裴铁璠), Yu X-M(于系民), Jin C-J(金昌杰) eds. 2001. Ecological Dynamics. Beijing: Science Press (in Chinese)
- 21 Powell K. 2002. Fish invasions forecast: New tool predicts ecological takeovers. <http://www.nature.com/nsu/021104/021104-14.html>
- 22 Schindler DW. 2001. The cumulative effects of climate warming and other human stresses on Canadian freshwaters in the new millennium. *Can J Fish Aquat Sci*, **58**: 18 ~ 29
- 23 Shen S-M(沈善敏). 1990. Current situation of applied ecology and its development. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), **1**(1): 2 ~ 9 (in Chinese)
- 24 Smith JA, Wickland DE, Crawford M K, et al. 2001. Advancing our biological and ecological predictive capabilities. In: Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2001, IEEE 2001 International, Vol. 1, 154 ~ 156
- 25 Tilman D, Fargione J, Wolff B, et al. 2001. Forecasting agriculturally-driven global environmental change. *Science* **292**: 281 ~ 284
- 26 Travis CC, Morris JM. 1992. The emergence of ecological risk assessment. *Risk Anal*, **12**(2): 167 ~ 168
- 27 Xiao D-N(肖笃宁), Chen W-B(陈文波), Guo F-L(郭福良). 2002. On the basic concepts and contents of ecological security. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), **13**(3): 354 ~ 358(in Chinese)

作者简介 曾德慧,男,1965年11月生,博士,研究员,主要从事防护林生态与经营、生态系统健康管理、荒漠化防治等研究,发表论文50余篇, E-mail: dehuizeng@yahoo.com.cn