

DOI: 10.5846/stxb201903150488

何念鹏, 徐丽, 何洪林. 生态系统质量评估方法——理想参照系和关键指标. 生态学报, 2020, 40(6): 1877-1886.

He N P, Xu L, He H L. The methods of evaluation ecosystem quality: Ideal reference and key parameters. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(6): 1877-1886.

生态系统质量评估方法 ——理想参照系和关键指标

何念鹏^{1,2}, 徐 丽¹, 何洪林^{1,2,*}

1 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101

2 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

摘要:良好的生态系统质量是社会可持续发展的重要基础,也是国家生态文明建设的重要目标之一。目前,我国在生态系统质量评估体系建设方面取得了很好的进展,但由于缺乏科学的评估标准和统一的指标体系,不同区域间评估结果的可比性差或同一区域不同时期评估结果难以比较,难以开展区域和国家尺度的集成研究,同时也难以满足快速评估关键区域或国家尺度生态系统质量的需求。为了有效克服上述困难与挑战,迫切需要构建一套科学的、经济可行的、简单快速的、且适用于区域或国家尺度的生态系统质量评估体系。以国内生态系统质量评估现状为基础,通过梳理现有的评估体系,提出了“理想参照系”的概念体系,旨在进一步完善评估体系的基本框架;同时,较详细地阐述了理想参照系中阈值的确定方法。此外,从科学、直观、快速、经济可行等角度出发,建议重新思考生态系统质量评估的关键指标(如生产力、土壤有机质、植物多样性和景观破碎度)。新构建的“理想参照系+关键指标”的新型生态系统质量评估体系,理论上可满足新时期区域或国家生态系统质量快速评估的需求,但许多技术细节仍待于进一步完善;由于新评估体系能量化生态系统质量的恢复潜力与发展阶段,它可为更合理配置资源、提高保护成效等提供科学依据。

关键词:生态系统; 生态系统质量; 生态系统服务; 理想参照系; 评估; 指标; 恢复; 潜力

The methods of evaluation ecosystem quality: Ideal reference and key parameters

HE Nianpeng^{1,2}, XU Li¹, HE Honglin^{1,2,*}

1 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Excellent ecosystem quality is fundamental for sustainable development of regions or nations, which is also one of the most important goals for the construction of ecological civilization in China. Currently, we have made progress in establishing methods for evaluating ecosystem quality. However, owing to the lack of scientific evaluation standards and a unified system of selected indicator, these evaluated results in different periods could be compared only for specific region and could not be compared among different regions. In addition, it is difficult to conduct integrated research or to quickly assess ecosystem quality at regional and national scales. Therefore, to effectively overcome these challenges, it is necessary to rethink and establish a new evaluation system which can help the rapid evaluation of ecosystem quality with the advantages of being scientific, economic, and feasible. Based on the current status of ecosystem quality assessment, we proposed that a new concept of ideal reference should be incorporated into the evaluation systems, aiming to further improve

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0500202, 2017YFA0604803); 美丽中国生态文明建设科技工程专项(XDA23080401); 国家自然科学基金项目(31800368, 31988102)

收稿日期:2019-03-15; **网络出版日期:**2019-12-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hehl@igsnrr.ac.cn

the frame of evaluation system. Meanwhile, we have developed a method of determining the threshold in the ideal frame of reference in detail. Furthermore, to strike a balance between being scientific, fast, economically feasible, and perceivable, we recommended the selection of some key ecological parameters used in the new evaluation framework, such as primary productivity, soil organic matter, plant diversity, and landscape fragmentation. The new framework for measuring ecosystem quality incorporating “ideal reference and key parameters” can meet the requirements of rapid evaluation for ecosystem quality well both at regional and national scales. Therefore, the results of their evaluation can provide better guidelines for rational distribution of resources, and enhance the protection effect, because the new frame can help identify the restoration potential and restoration effects.

Key Words: ecosystem; ecosystem quality; ecosystem service; ideal reference; evaluation; parameter; restoration; potential

随着中国社会经济的飞速发展,人类对自然生态系统开发或干扰不断加剧,如急速增长的资源开发强度、快速的城市化进程和剧烈的土地覆被/利用变化等,给生态环境带来巨大的压力并使环境问题日益凸显^[1-3]。为了更好地解决日益恶化的生态环境与人们对良好生态环境需求间的矛盾,党中央在十八大中正式将生态文明建设纳入了中国特色社会主义建设的总体布局,把“美丽中国”作为其建设目标之一;随后,在十九大报告中又提出“绿水青山就是金山银山”的理念,旨在引导人们改善环境和保护生态,切实推进国家生态文明建设。生态系统不仅是物质和能源的供给者,也是污染物的吸纳者^[4];因此,生态系统质量的优劣不仅影响人类居住环境和物质生活水平,同时也影响国家生态安全和社会可持续发展。因此,在我国步入生态文明建设的新时期,迫切需要及时获取区域或国家尺度的生态系统质量现状、变化趋势和生态恢复潜力的信息,并通过科学、快速、准确的评估来更好地服务于生态系统管理、决策制定和公众宣传等。

生态系统质量是指在特定的时间和空间范围内生态系统的总体或部分组分的质量,具体表现为生态系统的生产服务能力、抗干扰能力和对人类生存和社会发展的承载能力等3个方面^[5-6]。生态系统质量评估的核心是以数学模型为基础,通过科学的评估指标体系,量化其生态系统质量^[6]。近年来,生态系统质量评估得到世界各国的高度重视,美国、英国、加拿大和澳大利亚等分别从省或州的尺度开展了大量研究工作,并将评估结果与生态保护、国家经济建设和可持续政策相结合^[7-9]。相比较而言,我国生态系统质量评估工作起步较晚,但发展迅猛且成果丰硕。目前,已从区域(如县域、市域或省域)和国家尺度开展了大量研究工作,并评估了生态系统质量现状和变化趋势^[10-12]。研究内容包括如何优化评估模型、筛选评价指标构建评估体系和改进评估方法等多个方面^[13-15],研究对象丰富多样,包括城市、河流湖泊、自然保护区、红树林、矿区等^[16-22];研究方法包括层次分析法、主成分分析法、模糊评价法和综合指数法等^[14, 18-24]。然而,现有评估体系仍具有很强的局限性,尤其是缺乏科学的评估标准,绝大多数研究只能定量评估生态系统质量的相对变化情况^[5, 10];此外,部分研究为追求指标体系完整性而大量增加指标的类型和数量,极大地降低了评估体系的实际操作性与公众感知度。过于复杂的评价指标和评估方法,不利于不同区域间评估结果的比较或同一区域不同时期结果的比较(表1)。

鉴于此,本文在梳理当前生态系统质量评估体系现状的基础上,提出以建立理想参照系(Ideal reference)来优化和完善评估体系的新思想,从科学、直观、经济可行和快速等角度出发建议筛选关键评价指标的思路,进而建立新的“理想参照系+关键指标”的生态系统质量评估体系。同时,以现有监测技术和监测数据为基础,对理想参照系的确定方法、关键指标的选择、生态系统质量现状、恢复潜力以及相对变化评估的具体方法进行了探讨,以期为区域或国家尺度生态系统质量的精确评估和科学管理提供参考。

表 1 不同生态系统质量评估体系之间的优缺点
Table 1 Advantage and shortage of different ecosystem quality assessment systems

评估体系类型 Assessment system type	准确性 Accuracy	操作性 Operability	复杂度 Complexity	指标数量 Number of indicator	评估内容 Assessment content	结果可比性 Comparability
多个评价指标 (无理想参照系) Multiple evaluation indicators (no ideal reference)	高	一般	较复杂	多	现状、相对变化	较差
少数关键指标 (无理想参照系) Few key parameters (no ideal reference)	一般	较强	简单	较少	现状、相对变化	较好
理想参照系+少数关键指标 Ideal reference + key parameters	较高	较强	简单	较少	现状、相对变化、绝对变化、恢复潜力	较好

1 生态系统质量评估体系的研究现状

当前,生态系统质量评估体系主要是基于现状-相对变化量的评估体系,它主要是由能反映生态系统质量的组成、结构和功能等方面的指标共同构成构建评估指标体系,多角度评估生态系统质量的现状及相对变化情况^[5-6]。现有的评估体系目标明确、可操作性强,它不仅能较准确地评估某一时间点(时期)生态系统质量的相对优劣情况,同时也能评估一段时间内生态系统质量的相对变化,即根据两个时间点(时期)内同一评价指标的实际监测值的增加或减少来判断生态系统质量改善或恶化情况(图 1)。目前,此类评估体系已经广泛用于区域或国家尺度的生态系统质量评估中,如潘竞虎和董磊磊^[6]构建遥感综合评价模型,评估了疏勒河流域 2001—2010 年的生态系统质量;卢慧婷等^[21]选用 NDVI 指标评估了拉萨河流域在 1990—2015 年间生态系统质量变化及其对生态服务的影响;肖洋等^[12]以生物量、植被覆盖度为主要评价指标评估了 2000—2010 年内蒙古生态系统质量的变化情况;马莉^[22]以社会-经济-自然复合系统的生态学理论为基础,采用主成分分析法定量分析评估了 2007—2013 年赤峰市的生态系统质量变化情况;张敏等^[20]从生态系统结构、功能和胁迫 3 个方面构建评估模型,揭示了上海市 2000—2010 年生态系统质量演变趋势;欧阳志云等^[11]结合“全国生态环境十年变化(2000—2010 年)遥感调查评估”项目,综合利用地面调查数据与遥感数据,通过解析生物量密度和植被覆盖度等指数的变化,对我国生态系统质量及功能开展了评估工作。

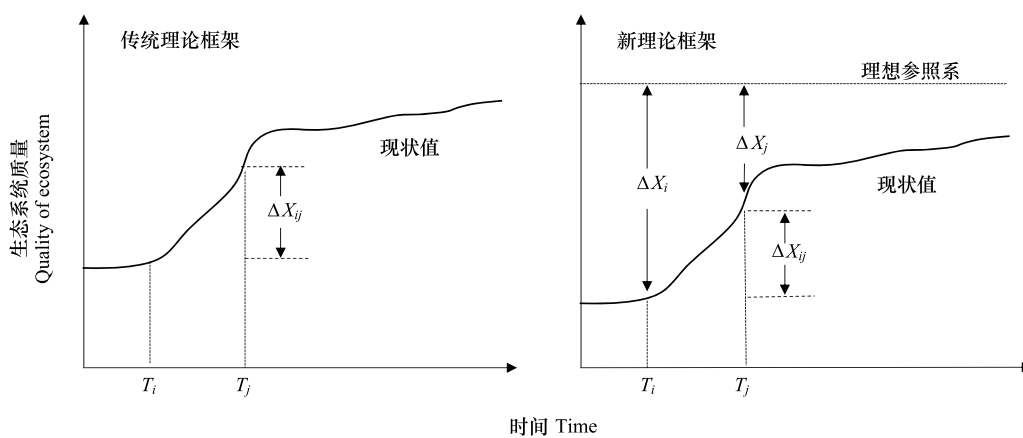


图 1 传统的和增加理想参照系的生态系统质量评估的理论框架图

Fig.1 The theoretical frames of ecosystem quality assessment between traditional model and new model with ideal reference

从评估体系的指标数量来看,现有的生态系统质量评估体系可概括为两类,一类为基于多个评价指标的

评估体系,另一类为基于几个关键评价指标的评估体系,前者多用于评估空间范围较小且监测信息较完善区域的生态系统质量^[16-17],后者多用于评估大区域如市域、流域或国家等多个尺度范围^[5-6,11,21](表1)。虽然二者都能评估生态系统质量的现状及一定时期内的变化情况,但它们仍然存在以下两个方面的问题:1)缺乏科学的评估标准。已有的评估体系缺乏统一的评估标准,即缺乏各个指标对应的评价参考值,绝大多数研究仅根据评价指标对应监测值的大小来定量判定生态系统质量的现状和相对变化情况,如评估某一区域生态系统生产力时,只能根据监测值估算某一时刻的生产力和某一段时间内生产力的增减变化量^[6],却难以量化其与该区域最优状态下的生产力(即理想值或最优值)之间的差距,进而难以量化生态系统的恢复潜力;因此,所能提供给公众和管理部门的信息相对有限,一定程度制约着管理者实施更直接有效的保护措施;2)评价指标复杂多样,缺乏统一的指标体系。目前,还缺乏生态系统质量制定统一的评价指标体系,多数研究在构建评估体系时都是以监测指标的获取难易程度作为筛选指标的重要标准,因而导致同一区域内和不同区域间的评价指标复杂多样,不同评估结果间的可比性较差。例如张敏等^[20]、马莉^[22]、朱坚等^[23]分别评估了赤峰市、上海市和宁波市的生态系统质量情况,虽然他们都是从市域尺度开展相关评估研究,但由于构建的评价模型、筛选的评价指标各不相同,评估结果之间很难进行比较。因此,为了切实推进新时期生态文明建设的建设步伐,提高生态系统质量管理成效,需要克服上述两个问题;并以科学性、可操作性、可比较性、准确性、快捷敏感性等为原则筛选评价指标和明确各参数的评估标准,完善已有的生态系统质量评估体系,更真实地揭示其质量的现状、变化情况及恢复潜力。

2 发展基于理想参照系的生态系统质量评估体系

在开展生态系统质量评估中,如果能量化关键评估指标在未受或少受人为活动干扰下的数值,即确定理想状态下的阈值(类似于我国《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)和《水环境质量标准》(GB 3838—2002)等在全球功能区的标准限值),并把它作为长期的评估标准,就可以科学地量化生态系统的现状与理想状态或最优状态之间的差距(图1右图中的 ΔX_i 和 ΔX_j),即确定其恢复潜力,同时也可以计算其相对理想或最优状态的绝对变化和相对变化(图1)。然而,受限于生态系统理想状态的认识以及缺乏相关评价指标的历史监测数据,早期的研究都忽略了理想参照系,而更多的关注生态系统质量的现状及相对变化情况(图1右图中的 ΔX_{ij})。但近些年,随着我国自然保护区、国家公园、生态系统野外台站(如中国生态系统研究网络(Chinese Ecosystem Research Network, CERN)、国家生态系统观测研究网络(National Ecosystem Observation and Research Network of China, CNERN)和中国森林生态系统定位研究网络(Chinese Forest Ecosystem Research Network, CFERN))等建设和发展以及相关生态保护项目的启动,逐步积累了大量的实地观测数据,这些数据为发展理想参照系、确定科学的评估标准、改进和完善生态系统质量评估体系奠定了坚实的数据基础。建立基于理想参照系的评估体系,其核心问题是如何界定理想参照系以及如何确定各评价指标的阈值;下面着重介绍理想参照系的定义以及阈值的初步确定方法。在此特别申明:本文重在构建新的评估理念和体系,而有关理想参照系、关键指标和具体的评估方法不是重点,它们需要针对特定的目标进行专门的研究与论证。

2.1 理想参照系的定义

理想参照系是指在适宜环境、未受或极少人为活动干扰的条件下,由反映生态系统质量的一系列关键指标的具体数值所构成的参照系统,也可称为原真参照系;其中,关键指标主要包括能直接或间接反映生态系统组成、结构和功能等基本指标(图1)。

2.2 理想参照系及其阈值的确定方法

中国地域广阔,从南到北跨越多个温度带,且从东到西水资源分布也差异显著,考虑到气候、地域环境等差异,可先结合气候、地形地貌等要素将中国划分成若干个生态区^[25],然后分别确定各生态区内不同类型生态系统的理想参照系以及各个关键指标的阈值。对于某一生态区内的某一类生态系统(如森林、草地、湿地和荒漠等生态系统),其理想参照系中的关键评估指标的阈值确定方法可分为两类:1)基于待评估生态系统

所处生态区内同类型自然保护区和野外观测站的相关评价指标的监测值确定,简称为参照法;2) 基于待评估生态系统所处的生态区内其所有相同类型生态系统在一定时期内相关评估指标的一系列观测值的频度分布来确定阈值,简称为概率分布法。

(1) 参照法

参照法主要是利用自然保护区和野外观测台站的相关监测数据作为确定生态系统理想参照系中重要评估指标阈值的基础数据。由于理想参照系主要是在未受或少受人为活动干扰的状态下由相关评价指标构成,而我国的自然保护区基本都是代表性强的自然生态系统、珍稀濒危野生动植物物种的天然集中分布区,截止 2017 年底,我国已建立各类型、不同级别自然保护区 2750 个,约占全国陆地面积的 15.32%^[26];此外 CERN 和 CFERN 等生态系统野外观测台站也主要位于少受人为活动干扰的区域,这些自然保护区和野外观测站基本覆盖了中国各生态系统类型,并广泛分布于各大生态区内。由于自然保护区和野外台站的生态系统质量基本处于最优状态,因此可根据相同地理气候区域中同一类型生态系统的关键参数具有相似性的原理,选择同一生态区内人类活动干扰少,主要受气候变化影响的自然保护区和野外台站在一定时期内的相关指标的监测值作为阈值确定的基础数据。对于这些基础数据,可以直接取在一定时期内的相关关键指标的监测值均值作为相关指标的阈值;也可以采用网格随机取样法来确定各指标的阈值,即将待评估生态系统所处的生态区划分成一个个大小相同的网格,再将少受人为活动干扰的、基本属性为自然保护区或野外观测站的网格挑选出来,采用随机采样的方法,从中抽取一定数量的相同生态系统类型的网格,以这些网格实际监测值的均值作为理想参照系的阈值。若条件许可,也可在现有的保护区、观测台站等样地的基础上,专门设立基准样地(Standard plot),根据基准样地相关关键指标的监测数值确定其阈值。参照法获取的阈值具有很强的区域代表性,基本能真实反映理想状态下的生态系统质量,方法简单、可操作性强,但需要保护区以及野外监测台站有长期连续的监测数据,此外网格随机采样取均值法对监测点的空间分布以及网格大小的依赖性较强,如果监测点分布不均匀或网络过大可能会引起较大误差。

(2) 概率分布法

概率分布法是根据待评估生态系统所处的生态区域内所有相同类型的生态系统一定时间范围下的一系列关键指标观测值的概率分布图来确定理想参照系的阈值。评价指标可分为成本型指标和效益型指标两大类,其中成本型指标是指属性值越小越好的指标,如生态系统脆弱性指数、人类干扰强度指数、土地利用强度指数、景观破碎度指数等;效益型指标是指属性值越大越好的指标,如生态系统生产力指数、植被覆盖度指数、生物多样性指数等^[27-28]。在具体实施过程中,对于成本型指标,以图 2a%(如 a 可取值 1 或 5)对应的观测值 X_i 作为该项指标的理想阈值;对于效益型指标,则以图 2(100-a)%对应的观测值 X_j 作为该项指标的理想阈值。概率分布法操作简单,可行性较强,估算的阈值能一定程度的反映生态系统质量评估指标在理想状态下的监测值,但该方法对监测数据量和数据质量要求都非常高;当观测数据较少或数据质量较差时,可能获取的理想阈值与真实阈值会存在很大的差异。

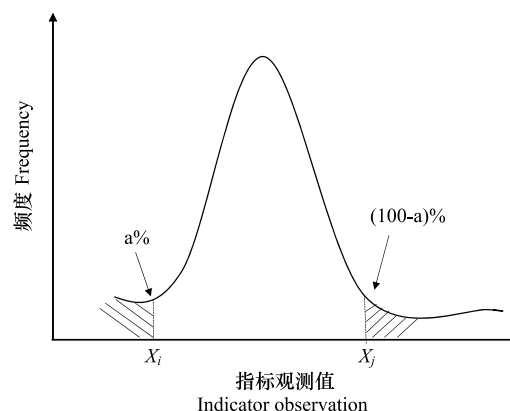


图 2 概率分布法确定理想参照系及其阈值的示意图

Fig. 2 The sketch map through the distribution of observed values to establish ideal reference

3 关键评价指标的选择

在开展生态系统质量评价工作时,应从反映其组成、结构和功能等方面来选择评价指标。理想情况下,评

价指标越多,覆盖面就越广,也越能真实地反映生态系统质量;但在实际操作过程中,受经济、可行性等因素的影响,全覆盖的评价指标体系是不现实的,特别是在区域或国家尺度,我们只能从中筛选出若干个科学性、代表性和可操作性强,可信度高的关键指标来构建评估体系。因此,如何科学地选择关键评估指标就至关重要。理论上,关键评估指标需满足以下五个要求:1)简单直观,即能直接反映生态系统质量的优劣,或能被公众直接感知;2)能被量化,评估指标对应的监测指标应是一些相对简单的生物或环境特征参数;3)经济可行,即现有的观测技术和手段能够获取相关参数;4)可通过参照法、概率分布法或其他方法获得其阈值;5)关键评价指标构成的评估体系能定期为政府决策、科学研究和公众认知等提供相关评估报告的基础信息。本文从区域或国家尺度构建生态系统质量评估方法体系出发,着重介绍了其中几个能有效反映生态系统质量状态的关键评价指标进行评述(生产力、土壤肥力、生物多样性和景观破碎度),希望起到抛砖引玉的作用。在实际评估中,研究人员应根据研究区实际情况或主导因素来完善指标体系,筛选和确定关键指标,并确定各关键指标对应的具体亚级指标和参数。

3.1 生产力

生产力是自然生态系统最基础的服务功能,是最简单直观的评价指标。一般情况下生产力高的生态系统,其质量也高;因此,在区域或国家尺度生态系统质量评估中生产力是最常用的评价指标^[5]。反映生态系统生产力指标包括总初级生产力(Gross Primary Productivity, GPP)、净初级生产力(Net primary productivity, NPP)、地上生物量和植被指数等,其中 NPP 能直接反映自然生态系统生产能力;随着地面调查工作的深入和遥感观测技术的发展,可获取较连续、系统的监测数据,NPP 常作为评估生态系统质量的重要指标^[29-30]。

3.2 土壤肥力

土壤肥力质量是指土壤提供植物养分和产生生物物质的能力,是衡量土壤质量的重要方面^[31]。有研究显示,土壤肥力直接影响植物群落的组成和生理活力,决定着生态系统的结构、功能和生产力水平;增加土壤肥力可促进植物生长,提高生态系统生物量和生产力^[32-33],因此土壤肥力可作为评估生态系统质量优劣的关键指标之一。反映土壤肥力的指标丰富多样,包括 pH、土壤养分(土壤有机质、全氮、全磷、全钾等)、土壤质地、土壤微生物等物理、化学和生物学指标^[34-37]。在实际操作过程中,可根据评估对象的不同(如不同类型的生态系统)筛选、确定土壤肥力的亚级指标和参数。

3.3 生物多样性

生物多样性包括遗传多样性、物种多样性、生态系统多样性和景观多样性四个层次。通常情况下,丰富多样的生物种类、复杂的组织结构可以确保生态系统中各关键功能生态位的正常运行,特别是维持生态系统的冗余,增强其抗干扰能力,从而保持整个生态系统结构和功能的相对稳定。大量研究也发现生物多样性的高低与生态系统质量密切相关,生物多样性越高的区域,其对应的生态系统质量也就越好,因此,生物多样性是评估生态系统质量好坏的关键指标之一^[38]。动植物种类、斑块类型及各类型大小等是反映生物多样性的重要评估指标,其中植物对生态系统环境的变化较为敏感,又是生境的重要组分;随着遥感识别技术的发展以及植物物种高光谱特征数据的大量积累,为快速估算植物物种多样性提供了技术和数据支撑^[39-41],因此可选用其作为评估区域或国家尺度生态系统质量的关键参数之一^[42]。

3.4 景观破碎度

景观破碎度是描述景观格局特征的重要参数之一,能非常直观的表征连续变化的景观格局被分割而导致的破碎化程度,以及反映外界干扰对生态系统结构、功能和过程的影响^[43-45]。随着地面监测工作的深入,以及 RS 和 GIS 等监测技术的发展,景观破碎度指数所需基本监测数据的可获取性和准确性都在不断增强,被越来越多的运用于区域尺度生态质量评估中,如土地利用/覆被格局变化及其对生态过程影响的评估、森林景观动态下的生态环境变化评估和生境破碎化对物种多样性的影响评估等^[46-48]。因此,建议把景观破碎度指数作为关键指标纳入生态系统质量评估体系中。特别地,由于景观破碎度指数对研究尺度以及基础数据的空间分辨率具有很强的依赖性,在实际操作中应根据研究区域的大小选择合适的空间分辨率,一般地,为了便于

研究结果之间的比较以及数据的集成分析,在较大区域或国家尺度上的空间分辨率建议为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$,而对于小区域尺度,可适当提高空间分辨率。

4 基于理想参照系和关键评估指标的生态系统质量评估方法体系

4.1 新评估体系的优点

同传统的评估方法体系相比,基于理想参照系和关键评价指标的生态系统质量新评估方法体系具有如下几方面的优点:1) 该体系涉及到的评价指标科学、简单、可操作性强,并且现有的观测技术(如地面监测和遥感影像等)能保障获取较大时空尺度的基础数据。2) 评估指标十分直观,多数能够被公众直接认知。3) 该评估体系能直接量化生态系统质量的恢复潜力(生态系统质量现状与理想状态间差距,即 AB 之间的差距 ΔX_i 和 CD 之间的差距 ΔX_j),可帮助管理部门树立明确的改善和保护目标。由于不同的生态系统质量情况所需的管理成本是不同的,因此我们可将管理措施分成不同的等级(图 3),并根据图 3 中相对恢复潜力 ΔX_i 或 ΔX_j 数值的大小确定其应该实施的管理措施等级,进而调整具体的管理策略,合理分配经费,从而实现人力和物力资源的优化配置,提高管护成效。4) 新评估体系可以实现相同生态区域内同一类型生态系统之间的空间对比分析,同时也可以实现不同生态区之间的比较。对于相同生态区域内同一类型生态系统,由于各关键评估指标使用的理想参照系阈值相同,因此可以直接比较各评估指标的大小;而对于不同生态区,虽然各关键评价指标的阈值不同,但可以根据各指标与阈值之间的绝对差距(ΔX_i 或 ΔX_j)或相对差距的大小来进行比较。5) 新的评估体系有助于促进国家和各区域规范化建设和管理,特别是监测数据和管理规范化。关键评估指标的确定能帮助各地方监测部门明确监测目标,并采用统一规范化的测定方法和数据质量控制标准,从而提高监测数据质量。

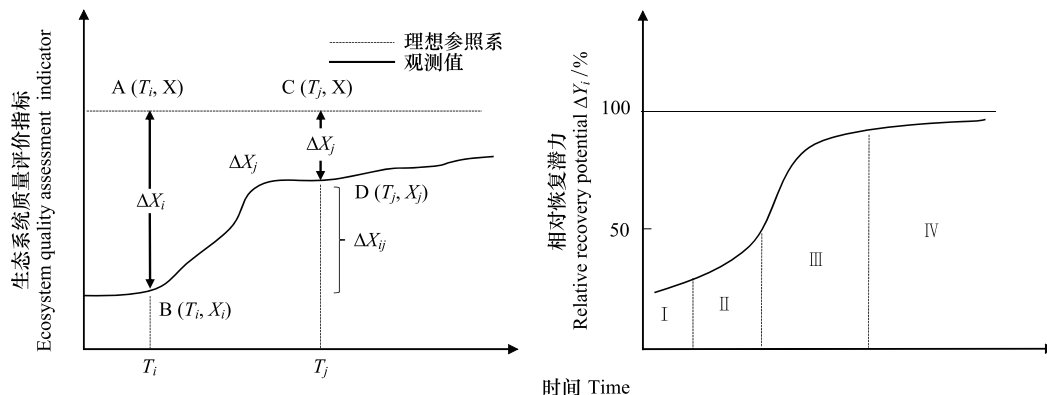


图3 新生态系统质量评价体系(理想参照系+关键指标)在生态系统管理中的潜在运用

Fig.3 The application of new ecosystem quality assessment system (ideal reference system + key indicators) in ecosystem management

右图中 I、II、III 和 IV 是根据相对恢复潜力制定的不同的恢复管理方案

4.2 基于新评估体系的生态系统现状及变化趋势评估

利用新评估体系开展具体评估工作时,首要步骤是量化评估体系中各关键评价指标在理想状态下的阈值;其中生产力、土壤肥力和生物多样性指标的阈值按本文的方法和概率分布法来确定;而对于景观破碎度指标,其理想状态下的阈值,则可以根据不同生态区内的各类型自然保护区、国家公园或行政示范区等来计算对应的破碎度指数值来确定。

4.2.1 生态系统质量的现状评估

以图 3 中 T_i 时期为例,可根据评价指标的实际观测值与阈值之间的绝对差距 ΔX_i 和相对差距 ΔY_i 评定质量的优劣,亦是量化其相对理想状态下的恢复潜力。其中绝对差距 ΔX_i 的计算方法如公式(1):

$$\Delta X_i = |X - X_i| \quad (1)$$

相对差距 ΔY_i 又可称为相对恢复潜力, 计算 ΔY_i 时, 对于效益型指标 (观测值越大表示质量越好, 如生产力、土壤肥力和生物多样性), ΔY_i 的计算公式见 (2); 而对于成本型指标 (观测值越小表示质量越好, 如景观破碎度), ΔY_i 的计算方法见公式 (3):

$$\Delta Y_i = \frac{(X - X_i)}{X} \times 100\% \quad (2)$$

$$\Delta Y_i = \frac{(\frac{1}{X} - \frac{1}{X_i})}{\frac{1}{X}} \times 100\% = \frac{(X_i - X)}{X_i} \times 100\% \quad (3)$$

式中, X 和 X_i 分别为 T_i 时刻生态系统质量评价指标 (生产力、土壤肥力、生物多样性和景观破碎度) 对应的理想参照系阈值和实际观测值。由于成本型指标的观测值大于理想参照系的阈值, 因此便于后续计算综合指数和不同研究结果之间的比较, 我们对其数值进行取倒数处理, 可将 ΔY_i 的数值控制在 $[0, 100]$ 。

对于 ΔX_i 和 ΔY_i 而言, 其值越大, 说明观测值与理想参照系阈值之间的差异越大, 即评价指标所反映的生态系统质量越差; 相反, 取值越小, 则表示生态系统质量越好。然后利用各指标的相对差距计算生态系统质量综合指数 Q_{Eco} , 计算公式如下:

$$Q_{\text{Eco}} = \sum_{m=1}^4 w_m \times \Delta Y_m \quad (4)$$

式中, w_m 和 ΔY_m 分别表示 i 时期评价指标 m 的权重系数和相对差距, 其值可由专家咨询法或熵值法等确定^[49-51]。根据生态系统质量指数 Q_{Eco} 的数值大小, 采用分等级法确定其所属等级, 其中等级数量以及各等级的上下限取值可通过专家论证确定, 具体操作方法可参考《生态环境状况评价技术规范》(HJ192—2015)。

4.2.2 生态系统质量的变化评估

对于不同的时期, 即从 T_i 时期到 T_j 时期生态系统质量评价指标实际观测值的绝对变化 ΔX_{ij} 的计算公式如下:

$$\Delta X_{ij} = X_j - X_i \quad (5)$$

式中, X_i 和 X_j 分别为 T_i 和 T_j 时期生态系统质量评价指标的实际观测值。对于效益型指标 (生产力、土壤肥力和生物多样性), 若 ΔX_{ij} 为正值, 说明评价指标所反映的生态系统质量变好, 若 ΔX_{ij} 为负值, 说明评价指标所反映的生态系统质量变差。成本型指标 (景观破碎度) 则正好相反, 若 ΔX_{ij} 为正值, 说明评价指标所反映的生态系统质量变差, 若 ΔX_{ij} 为负值, 说明评价指标所反映的生态系统质量变好。

计算两时期的相对变化 ΔY_{ij} 时, 效益型指标 ΔY_{ij} 的计算公式见 (6), 成本型指标 ΔY_{ij} 的计算公式见 (7):

$$\Delta Y_i = \frac{\Delta X_{ij}}{X} \times 100\% = \frac{X_j - X_i}{X} \times 100\% \quad (6)$$

$$\Delta Y_i = \frac{(\frac{1}{X_j} - \frac{1}{X_i})}{\frac{1}{X}} \times 100\% = \frac{X * (X_i - X_j)}{X_i X_j} \times 100\% \quad (7)$$

其中, ΔY_{ij} 的取值范围为 $[-100, 100]$, 为正值时, 说明评价指标所反映的生态系统质量变好, 若为负值, 则说明评价指标所反映的生态系统质量变差。然后根据各指标的相对变化计算生态系统质量相对理想状态的综合变化指数 $Q_{\text{Eco-C}}$, 计算公式如下:

$$Q_{\text{Eco-C}} = \sum_{n=1}^4 w_n \times \Delta Y_n \quad (8)$$

式中, w_n 和 ΔY_n 分别表示从 T_i 时期到 T_j 时期评价指标 n 的权重系数和相对变化得分, 其中各指标的权重 w_n 可由专家咨询法或熵值法等确定, 而其相对变化得分 ΔY_n 可通过专家咨询法获得, 即专家根据评价指标 n 的基

本意义和对应相对变化值的大小来判定其具体得分。最终计算获得的综合变化指数 $Q_{\text{Eco-C}}$ 可参照《生态环境状况评价技术规范》(HJ192—2015) 中分等级的思想确定其变化程度或波动程度。

5 结语与展望

生态系统质量评估是国家或区域尺度生态系统管理和决策制定的重要依据,其方法学或评估体系的改进和发展一直是研究的热点和核心。为了满足新时期国家生态文明建设的需求,本文以现有评估体系为基础,提出发展基于“理想参照系和关键指标”新的生态系统质量评估体系。新体系可满足区域或国家尺度的生态系统质量快速评估需求;同时可量化生态系统质量的恢复潜力,有助于管理者明确管理和保护目标,合理的配置人力和物力,提高生态系统质量的保护成效;更为重要的,该指标体系也有助于不同研究结果之间的比较分析,便于未来国家自然保护地(自然保护区、国家公园、国家森林公园等)的规范化管理。新体系中选择的评价指标十分直观,并能与地面调查、地理信息系统和遥感技术确定,实现快速评估的目的。更为重要的是,其评估结果简单直观,能被公众快速认知或认同。当然,本文只是从理念或理论上构建了新评估体系的基本框架和潜在应用情景,体系中涉及关键评价指标、关键指标对应的亚级指标和参数、各指标阈值的确定方法等仍然需要结合不同地区广泛的案例研究进一步优化和完善。

参考文献 (References):

- [1] Copeland B R, Taylor M S. Trade, growth, and the environment. *Journal of Economic Literature*, 2004, 42(1): 7-71.
- [2] Khaledian Y, Kiani F, Ebrahimi S, Brevik E C, Aitkenhead-Peterson J. Assessment and monitoring of soil degradation during land use change using multivariate analysis. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(1): 128-141.
- [3] 陈秀端. 高强度能源开发区经济增长与环境污染、资源消耗的耦合关系研究. *生态经济*, 2017, 33(7): 103-108.
- [4] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [5] 陈强, 陈云浩, 王萌杰, 蒋卫国, 侯鹏, 李营. 2001—2010 年洞庭湖生态系统质量遥感综合评价与变化分析. *生态学报*, 2015, 35(13): 4347-4356.
- [6] 潘竞虎, 董磊磊. 2001—2010 年疏勒河流域生态系统质量综合评价. *应用生态学报*, 2016, 27(9): 2907-2915.
- [7] Jones K B, Riitters K H, Wickham J D, Tankersley R D, O'Neill R V, Chaloud D J, Smith E R, Neale A C. An Ecological Assessment of the United States Mid-atlantic Region: a Landscape Atlas. Washington, DC: Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, 1997.
- [8] Borja A, Bricker S B, Dauer D M, Demetriades N T, Ferreira J G, Forbes A T, Hutchings P, Jia X P, Kenchington R, Marques J C, Zhu C B. Overview of integrative tools and methods in assessing ecological integrity in estuarine and coastal systems worldwide. *Marine Pollution Bulletin*, 2008, 56(9): 1519-1537.
- [9] Watson B, Steve A. The UK National Ecosystem Assessment: synthesis of the key findings. Cambridge, UK: UNEP-WCMC, 2011.
- [10] 黄麟, 曹巍, 吴丹, 巩国丽, 赵国松. 2000—2010 年我国重点生态功能区生态系统变化状况. *应用生态学报*, 2015, 26(9): 2758-2766.
- [11] 欧阳志云, 王桥, 郑华, 张峰, 侯鹏. 全国生态环境十年变化(2000—2010 年) 遥感调查评估. *中国科学院院刊*, 2014, 28(4): 462-466.
- [12] 肖洋, 欧阳志云, 王莉雁, 饶恩明, 江凌, 张路. 内蒙古生态系统质量空间特征及其驱动力. *生态学报*, 2016, 36(19): 6019-6030.
- [13] 于海跃, 喻锋, 符蓉. 生态系统评价方法研究. *国土资源情报*, 2013, (12): 42-45.
- [14] 司俐丽. AHP 法在城市生态系统质量评价中的应用. *环境科学研究*, 1992, 5(5): 29-33.
- [15] 王贺年, 张曼胤, 崔丽娟, 郭子良, 王大安. 基于 DPSIR 模型的衡水湖湿地生态环境质量评价. *湿地科学*, 2019, 17(2): 193-198.
- [16] 胡华浪, 李伟方, 孙冠楠. 矿区生态系统质量和生态完整性评价. *中国农业资源与区划*, 2016, 37(4): 203-208.
- [17] 王斌, 曹喆, 张震. 北大港湿地自然保护区生态环境质量评价. *环境科学与管理*, 2008, 33(2): 181-184.
- [18] 黄备, 邵君波, 孟伟杰, 周斌. 利用 PSR 模型的椒江河口生态系统环境质量评价. *湿地科学*, 2016, 14(6): 825-831.
- [19] 孙永光, 赵冬至, 高阳, 苏岫, 卫宝泉, 张丰收, 高树刚. 海岸带红树林生态系统质量评价指标诊断、内涵及构建. *海洋环境科学*, 2013, 32(6): 962-969.
- [20] 张敏, 王敏, 白杨, 黄沈发. 上海市生态系统质量评价及其演变特征分析研究. *环境污染与防治*, 2015, 37(1): 46-51.
- [21] 卢慧婷, 黄琼中, 朱捷缘, 郑天晨, 严岩, 吴钢. 拉萨河流域生态系统类型和质量变化及其对生态系统服务的影响. *生态学报*, 2018, 38(24): 8911-8918.

- [22] 马莉. 基于社会-经济-自然复合系统理论的赤峰市生态系统质量变化研究. 环境与发展, 2016, 28(1): 31-35.
- [23] 朱坚, 翁燕波, 张彪, 谢高地, 高占国, 杜宇峰. 基于组合赋权法的宁波市城市生态系统质量评价. 中国环境监测, 2011, 27(1): 64-68.
- [24] 乔长录, 刘昭. 干旱区流域水文生态系统质量综合评价研究——以新疆自治区玛纳斯河流域为例. 水土保持通报, 2012, 32(2): 215-221.
- [25] 傅伯杰, 刘国华, 陈利顶, 马克明, 李俊然. 中国生态区划方案. 生态学报, 2001, 21(1): 1-6.
- [26] 中华人民共和国生态环境部. 2017 年全国自然保护区名录. 2019. <http://www.mee.gov.cn/stbh/zrbhdjg/201905/P020190514616282907461.pdf>.
- [27] 王书华, 毛汉英. 土地综合承载力指标体系设计及评价——中国东部沿海地区案例研究. 自然资源学报, 2001, 16(3): 248-254.
- [28] 李俊生, 纪中奎, 张波, 吴晓蕾, 黎冲, 任洁. 中国国家级自然保护区景观多样性监测与评价技术研究. 北京: 中国环境科学出版社, 2010.
- [29] 张海燕, 樊江文, 邵全琴, 张雅娴. 2000—2010 年中国退牧还草工程区生态系统宏观结构和质量及其动态变化. 草业学报, 2016, 25(4): 1-15.
- [30] 张妹婷, 翟永洪, 张志军, 唐文家, 马燕, 聂学敏, 丁玲玲. 三江源区草地生态系统质量及其动态变化. 环境科学研究, 2017, 30(1): 75-81.
- [31] 刘占锋, 傅伯杰, 刘国华, 朱永官. 土壤质量与土壤质量指标及其评价. 生态学报, 2006, 26(3): 901-913.
- [32] 杨武德, 王兆骞, 眭国平, 陈宝林, 徐锴. 土壤侵蚀对土壤肥力及土地生物生产力的影响. 应用生态学报, 1999, 10(2): 175-178.
- [33] 王长庭, 龙瑞军, 王启基, 景增春, 尚占环, 丁路明. 高寒草甸不同海拔梯度土壤有机质氮磷的分布和生产力变化及其与环境因子的关系. 草业学报, 2005, 14(4): 15-20.
- [34] 张甜, 朱玉杰, 董希斌. 小兴安岭用材林土壤肥力综合评价及评价方法比较. 东北林业大学学报, 2016, 44(12): 10-14, 98-98.
- [35] 林圣玉, 李英, 张华明, 张龙, 张勇奋, 袁芳. 鄱阳湖区坡耕地土壤肥力质量评价. 中国水土保持, 2018, (11): 60-63.
- [36] 郭鑫年, 周涛, 纪立东, 尹志荣, 梁锦秀, 孙娇, 金鑫, 马洪涛. 宁夏中部干旱带土壤肥力综合评价——以同心县为例. 中国农学通报, 2019, 35(15): 66-73.
- [37] 赵蛟, 徐梦洁, 庄舜尧, 林振清. 基于模糊综合评价法的建瓯市毛竹林地土壤肥力评价. 土壤通报, 2018, 49(6): 1428-1435.
- [38] 王长庭, 龙瑞军, 丁路明, 来德珍, 李有福. 草地生态系统中物种多样性、群落稳定性和生态系统功能的关系. 草业科学, 2005, 22(6): 1-7.
- [39] 罗宁, 阮仁宗, 王俊海. 基于机器学习与高光谱数据的湿地植被物种识别研究. 中国农学通报, 2019, 35(13): 157-164.
- [40] 董文雪, 曾源, 赵玉金, 赵旦, 郑朝菊, 衣海燕. 机载激光雷达及高光谱的森林乔木物种多样性遥感监测. 遥感学报, 2018, 22(5): 833-847.
- [41] 郭庆华, 胡天宇, 姜媛茜, 金时超, 王瑞, 关宏灿, 杨秋丽, 李玉美, 吴芳芳, 翟秋萍, 刘瑾, 苏艳军. 遥感在生物多样性研究中的应用进展. 生物多样性, 2018, 26(8): 789-806.
- [42] 池源, 石洪华, 王恩康, 郭振, 丰爱平, 麻德明. 庙岛群岛北五岛景观格局特征及其生态效应. 生态学报, 2017, 37(4): 1270-1285.
- [43] 王丽婧, 席春燕, 付青, 苏一兵. 基于景观格局的三峡库区生态脆弱性评价. 环境科学研究, 2010, 23(10): 1268-1273.
- [44] 王云才. 基于景观破碎度分析的传统地域文化景观保护模式——以浙江诸暨市直埠镇为例. 地理研究, 2011, 30(1): 10-22.
- [45] 马克明, 傅伯杰. 北京东灵山地区景观格局及破碎化评价. 植物生态学报, 2000, 24(3): 320-326.
- [46] 陈小勇. 生境片段化对植物种群遗传结构的影响及植物遗传多样性保护. 生态学报, 2000, 20(5): 884-892.
- [47] 孔繁花, 李秀珍, 尹海伟. 大兴安岭北坡林火迹地森林景观格局的变化. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2005, 29(2): 33-37.
- [48] 谢一青, 李志真, 黄儒珠, 肖祥希, 黄勇. 武夷山不同海拔光皮桦种群遗传多样性及其与生态因子的相关性. 林业科学, 2008, 44(3): 50-55.
- [49] 周华荣. 新疆生态环境质量评价指标体系研究. 中国环境科学, 2000, 20(2): 150-153.
- [50] 万本太, 徐海根, 丁晖, 刘志磊, 王捷. 生物多样性综合评价方法研究. 生物多样性, 2007, 15(1): 97-106.
- [51] 陈明星, 陆大道, 张华. 中国城市化水平的综合测度及其动力因子分析. 地理学报, 2009, 64(4): 387-398.