DOI: 10.5846/stxb202201070052

张琳, 宋创业, 袁伟影, 贾元, 桑佳文, 吴冬秀. 基于地面调查的植被生态质量综合评估指标体系构建. 生态学报, 2023, 43(1): 128-139.

Zhang L, Song C Y, Yuan W Y, Jia Y, Sang J W, Wu D X. Construction of comprehensive evaluation index system of vegetation ecological quality based on field survey. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(1): 128-139.

基于地面调查的植被生态质量综合评估指标体系构建

张 琳¹, 宋创业¹, 袁伟影¹, 贾 元^{1,2}, 桑佳文^{1,2}, 吴冬秀^{1,*}

1 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 植被是陆地生态系统的主体, 是保障生态质量的基础, 也是基于自然的生态系统增汇、实现“碳中和”的重要利器。植被是生态质量评价的核心要素, 但目前的生态质量评价研究中所用到的植被指标多是通过遥感反演或者气象指数模型计算得到的, 而基于典型生态系统尺度地面调查的植被观测数据更直接、更准确, 数据也很丰富, 却很少用于生态质量评价, 也缺乏系统的评价指标体系。通过文献研究、专家研讨和问卷调查, 并借鉴群落退化演替和生态系统长期监测研究的理论基础, 构建基于地面调查的植被生态质量综合评估指标体系。该指标体系整体分为三级, 一级综合指数由群落结构指数、物质生产指数、生物多样性指数、群落发展或者演替趋势 4 个二级分项指标构成, 二级分项指标由 12—14 个三级指标组成, 不同植被类型各有其特征指标。该体系将完善我国多尺度陆地生态系统的生态质量评价指标体系, 为新时期国家生态质量评价提供科学建议, 为我国生态文明建设提供技术支撑。

关键词: 植被生态质量; 生态质量评价; 指标体系; 野外台站

Construction of comprehensive evaluation index system of vegetation ecological quality based on field survey

ZHANG Lin¹, SONG Chuangye¹, YUAN Weiyong¹, JIA Yuan^{1,2}, SANG Jiawen^{1,2}, WU Dongxiu^{1,*}

1 State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Vegetation is the main component of terrestrial ecosystem, the core element of ecological quality evaluation, the basis ensuring ecological quality, and an important tool to increase carbon sink for nature-based solutions and realize “carbon neutralization”. Most of the current indices used for ecological quality evaluation are achieved through approaches of remote sensing retrieval or meteorological index model. The vegetation quality index based on long-term monitoring in the field are more authentic but rarely used in ecological quality evaluation. Therefore, this study constructed a comprehensive evaluation index system of vegetation ecological quality at site scale based on literature research, expert consultation, questionnaire survey, and theories of plant community succession and ecosystem long-term monitoring. This index system is formed by indicators of three levels. The first level index is composed of four second level indicators: vegetation structure index, vegetation production index, biodiversity index, and vegetation development or succession trend. The third level indicators include 12—14 indicators based on field survey. Different vegetation types have a few specific indexes. We expected that this research could improve the vegetation ecological quality index system of multi-scale terrestrial ecosystem in China, and provide scientific support for national ecological quality evaluation in the new era.

基金项目: 科技基础资源调查专项 (2021FY10070503); 中国科学院野外台站联盟项目 (KFJ-SW-YW037-01); 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA26020102); 国家重点研发计划项目 (2017YFC0503801)

收稿日期: 2022-01-07; **网络出版日期:** 2022-08-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wudx@ibcas.ac.cn

Key Words: vegetation ecological quality; ecological quality evaluation; index system; field station

随着社会经济的高速发展,人口不断增加,人类对自然生态系统的干扰不断加剧,已经极其显著地改变了地球生态系统^[1-2]。我国生态系统质量总体上也不容乐观,存在一定区域结构性退化,如单一乔木型森林偏多,湿地连通性降低,过牧导致草原退化,生物多样性降低等^[3-7]。因此,对生态系统质量进行科学评估,进而采取有效措施提升生态系统质量及其稳定性成为我国生态文明建设的迫切任务^[8]。国内外学者在不同尺度,围绕生态环境、健康、质量等评估方面做了很多的研究。美国、英国、澳大利亚和欧洲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、国家政策法案制定相结合^[9-13]。在我国,1960年任继周等依据放牧草地的植被等特征,对生态系统结构与功能进行退化定性分级评估^[14]。后来在水体、流域、城市等与人类活动密切相关的生态系统质量评估方面取得了很好的进展^[3-5, 15-18]。不同的应用目标和不同时空尺度的生态学应用评估,形成了复杂的测度和评估的指标体系,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^[19-21]。于贵瑞等系统梳理了生态系统质量的科学概念及其评估方法,指出从生态系统构成要素出发,制定针对生态系统构成要素的质量评价标准和指标,是探索典型生态系统质量状态及演变的有效途径之一^[19]。

植被作为生态系统重要的构成要素,它联结着大气、水分和土壤等自然过程,对生态系统结构和功能产生重要的影响,是影响生态质量最核心的要素和最重要指示器^[3, 18],也是改善生态系统质量、增加碳汇、减缓气候变化的最佳途径^[20]。因此,植被生态质量是生态系统质量和实现“双碳”目标最核心的保障。在生态系统质量评估中采用的植被生长状况及其生长活力的因子较多,例如植被归一化指数(NDVI)、植被覆盖度、叶面积指数、净第一性生产力、生物量等^[3, 5, 16]。然而,很多植被指标是通过遥感反演或者气象指数模型计算得到的,植被地面观测数据更直接、更准确,数据也很丰富,却很少用于生态质量评价,也缺乏系统的评价指标体系。基于地面调查的实测数据更为真实,随着国家野外台站网络多年的基础数据积累,以及大量的基础调查项目数据积累,可以为植被生态质量评估提供很好的数据源支撑。因此,本文拟比较不同指标体系间共性与差异性,通过文献研究、专家研讨和问卷调查,并借鉴国内外相关研究和理论基础,建立一套基于地面调查的植被生态质量综合评估指标体系,服务于典型生态系统尺度质量综合评估,为我国生态系统保护和可持续性利用提供科学依据。

1 植被生态质量评估指标体系的研究现状

植被生态质量的评估可以分为定性和定量评价两种,定性评价一般为单个指标的大小或优劣程度来反应生态质量好坏^[22-24];而定量评价则采取公式或模型所建立的指标体系进行计算,根据计算结果对生态质量进行分级评价^[3-6]。生态质量评估指标研究进展可以分为以下3个阶段:最初的单个指示物种指标,后续发展为植被结构或功能的个别关键指标,目前采用多层次多个指标综合评价方法的越来越多。

1.1 指示物种指标

采用优势种、指示物种和环境敏感物种等的变化来描述植物群落的健康或质量的状况^[22]。有研究认为优势种数量减少是生态系统受到扰动的标志之一,其分布面积可以评价植被生态质量^[23];在草地群落退化研究方面,退化指示植物种相对数量是退化分级的重要指标,一些退化指示物种经常作为退化标志^[24, 25];在森林生态系统质量评价中,采用优势植物、敏感植物、特有植物等作为指示类群^[26-28];在水生生态系统质量评价中最常用的指示类群有藻类等浮游植物^[29]。指示物种法虽然应用较多,但是也存在很多对指示物种筛选标准不一致的质疑^[30],也有研究指出指示物种的变化与整个群落或生态系统的功能、性质的变化相关性很小^[31]。

1.2 结构或功能关键指标

依据单个或几个可以表征植物群落某一方面结构或者功能的指标来表征植被生态质量。最常见的是用

植被覆盖度、归一化植被指数、生物量等植被参数对植被质量或保护成效进行快速评估^[32-33]。肖洋等基于生物量和植被覆盖度对内蒙古植被生态质量状况进行分析,用各植被地带内顶极群落作为参照,评估气候、人类活动与植被生态质量现状的相关关系^[18]。丁肇慰等分别采用相对生物量密度评估长江流域的森林、灌丛生态质量,采用相对植被覆盖度评估区域内草地生态质量^[16]。钱拴等利用净初级生产力和覆盖度 2 个植被参数共同构建植被生态质量指数模型,利用年际对比和多年变化趋势评价模型,对全国植被生态质量的时空变化进行评价研究^[3]。植被结构或功能关键指标可以很快速的评价植被生态质量,尤其是在区域和全国尺度的生态质量评价中的应用较多,但大部分研究采用的都是基于遥感数据的评估指标,而遥感数据或模型计算手段得到的森林覆盖度、生物量、生产力都普遍偏高^[28],也存在着与指示物种法类似的缺点,即无法全面反应植被生态质量,如覆盖度高,但物种多样性低或毒草比例高,则生态系统质量不一定高;结构单一的森林与多样性高的森林,即使生产力相当,其生态质量也必然不同。

1.3 综合指标体系

随着研究发展,综合指标体系被越来越多的采用,在植被结构和功能特征核心指标基础上,综合生物多样性、外部干扰和社会经济等多方面因素,构建多个层级、多个指标的更全面的综合评价指标体系。刘纪远等基于联合国新千年全球生态系统评估概念框架,从结构、功能方面构建了由 4 大类 15 个一级指标、75 个二级指标组成的三江源区草地生态系统评估指标体系,其中植物群落结构特征指标、植被生产力与生物量指标,以及草地退化指标等是重要的一级指标^[34]。罗海江等从植被生产能力(NDVI 估算)、植被生产能力稳定性(NDVI 变异系数)、外部干扰(人口压力)三个方面构建综合生态系统的的功能指数^[6]。周亚萍等认为生态质量可以从多样性、自然度等方面通过各指标加权值综合评价,尤其是生物多样性是生态质量的最重要指标^[35]。生态环境部 2015 年颁布的《生态环境状况评价技术规范》中区分环境指标与生态指标,其中生物丰度指数、植被覆盖指数是生态指标的重要内容,环境突发事件和污染等开发干扰是环境指标的重要内容,通过综合指数反映区域生态质量整体状态^[36]。此外,国家重点生态功能区区域生态环境质量考核评价指标体系中,针对生物多样性保护功能区,将生物丰度指数作为特征指数,针对防风固沙和水土保持功能区将植被覆盖指数、林地/草地/湿地覆盖率等作为特征指标^[37]。2021 年 10 月生态环境部为了强化生态保护监管,组织编制了《区域生态质量评价办法(试行)》,该综合评价指标体系将生物多样性纳入综合指标,包括生态格局、生态功能、生物多样性和生态胁迫 4 个一级指标,11 个二级指标和 18 个三级指标^[38]。综合指标体系从多方面多层次进行系统、全面、完整的评估,然而指标体系都较为复杂,指标的量化和数据可获得性往往受限,很难实现快速评估的需要。

综上所述,无论是指示物种、结构和功能关键指标还是综合指标体系(表 1),都是从不同方面反映生态系统中植被质量特征,但由于植被所处生态系统的复杂性和时空变异性,以及评价目的不同、方法的可操作性和数据的可获得性等影响,使得不同指标体系之间的一致性^[19-21]较差,然而为了满足植被生态质量快速评估的需要,必须建立一套具有可比性、可获取性和定量性指标体系。何念鹏等提出以国家公园、自然保护区和野外台站积累的实地观测数据作为理想参照系,精选关键评估指标构成综合评价指数,从而实现对生态质量的快速评估,这为快速评估植被生态质量的指标体系构建提供了很好的思路^[21]。

2 植被生态质量概念与综合评估指标体系构建框架

生态系统质量一般认为是指一定时空范围内生态要素、结构和功能的综合特征,具体表现为生态系统的状况、生产能力、结构和功能的稳定性、抗干扰和恢复能力^[8,19,21]。植被生态质量是生态系统质量的重要构成要素之一,其科学内涵可以理解为在典型生态系统中,植被结构和功能的综合特征,具体表现为植被的结构状况、物质生产能力、生物多样性、抗干扰和恢复能力。

根据植被生态质量概念,借鉴于贵瑞等建立的典型生态系统尺度的生态质量评价理论^[19],从不同植被的结构组成、物质生产、生物多样性、发展和演替潜势 4 个方面构建植被生态质量综合评估指标体系。以地带

性演替顶极或近顶极群落为理想参照系,对特定植被的生态质量进行多维度综合评估^[19, 21]。

表 1 植被生态质量评估指标体系不同发展阶段的对比

Table 1 Comparison of different development stages for vegetation ecological quality assessment index systems

评估指标体系类型 Assessment system type	指标 Indicators	优点 Advantages	缺点 Disadvantages	参考文献 References
指示物种指标体系 Indicator species index system	优势种、退化指示种、特有种等数量、分布面积	简单、快速	指示物种筛选标准质疑,无法代表整个群落	[22—31]
结构或功能关键指标 Key index system of structure or function	植被覆盖度、生产力、生物量、叶面积指数等	区域或全国尺度遥感数据易获取,单个或多个指标组合快速评估	无法全面反应植被结构和功能,尤其是多样性	[3, 16, 18, 32—33, 39]
综合指标体系 Comprehensive index system	多方面多层次指标体系,一般从结构、功能、干扰胁迫、社会经济等方面构建综合评估指数	系统、全面、完整的进行评估,多针对生态系统,植被是重要方面	指标体系复杂,数据多样,数据可获得性较差,无法快速应用	[6, 28, 34—38, 40]

综合评估的尺度是一定范围的典型生态系统,评估对象是植被,指标体系分为三级,二级指标包括植被的结构组成、物质生产、生物多样性、发展和演替潜势,通过统计和模型计算得到一级指标,即植被生态质量综合指数,用综合指数来衡量植被生态质量的好与差。在每个二级指标下,筛选可反映植被特征的核心关键参量,组成三级指标。

植被生态质量综合评估在指标体系建立的基础上,针对不同层级的指标进行合理的权重分配是保障评估结果的可靠性的关键。当前应用较多的权重确定方法有主成分分析法、聚类分析法、变异系数法、专家咨询法和层次分析法^[17, 38, 40],层次分析法是目前使用最广泛、可操作性较强的方法。本文基于层次分析法确定植被生态质量综合指数 V_q 的计算公式如下:

$$V_q = \sum_{i=1}^n A_i Y_i \quad (1)$$

式中, V_q 为植被生态质量综合指数, A_i 为第 i 个二级指标的权重, Y_i 为第 i 个二级指标的评价得分值。 Y_i 评价得分由三级指标综合计算得到,具体的计算和操作方法参考理想参照系法^[19, 21],公式如下:

$$Y_i = \sum_{j=1}^k B_j X_j \quad (2)$$

式中, B_j 为第 j 个三级指标的权重, X_j 为第 j 个三级指标相对于其所在区域的地带性演替顶极或近顶极群落相应指标的相对值,计算公式如下:

$$X_j = \frac{X_{js}}{X_{jp}} \quad (3)$$

式中, X_{js} 为特定植被第 j 个三级指标的实际观测值, X_{jp} 为特定植被所在区域的地带性演替顶极或近顶极群落相应指标的观测值。

3 植被生态质量综合评估指标体系构建方法

3.1 指标体系构建原则与思路

植被生态质量综合评估指标体系构建遵循以下原则:(1)科学性,指标必须能够反映植被状况和特点,具有科学性和代表性;(2)可比性,指标是研究和长期观测中通用的或具有兼容性的,可以应用到不同区域或生态系统类型,具有可比性和一致性;(3)可操作性,指标数据必须是易获取的、数据质量可以得到保证的、经济可行的,高难指标一般不选用;(4)直观性,指标均是基于野外实际调查得到的直接指标;(5)可量化,指标可以量化表达,或可进行分级定量;(6)长期性,指标要选择具有长期意义的,关注长时间规律变化而非瞬时变化指标^[41]。

植被生态质量综合评估指标体系构建思路:基于上述植被生态质量综合评估指标体系构建框架,通过文献分析、植被逆行演替和退化特征指标分析,以及生态系统长期监测生物要素指标的分析,从植物群落的结构组成、物质生产、生物多样性、发展和演替潜势 4 个维度遴选核心三级指标。

3.2 指标体系构建方法

通过文献分析、专家研讨和问卷调查的方法,借鉴群落退化演替和生态系统长期监测研究的理论基础,构建基于地面调查的植被生态质量综合评估指标体系。首先采用文献分析进行指标的初步筛选,结合逆行演替与退化理论,以及与已经累积了大量长期监测数据的核心指标进行对比,形成指标体系的初稿,经过广泛的专家咨询和交流研讨,根据专家意见进行指标修订与完善,再通过向从事野外调查的一线监测人员收集问卷评分,对指标的实际可操作性进行咨询完善,得到植被生态质量综合评估指标体系。

(1)文献分析。通过文献分析的方法,筛选出在生态系统评价中出现频率较高的植被指标,通过中国知网(CNKI)数据库进行文献检索,关键词包括“生态系统质量”“生态系统健康”“生态质量”“生态环境质量”等,经过筛选与自然植被评估指标相关文献,提取核心文献 76 篇中植被相关指标项,进行关键指标筛选,排序前 14 位分别为:生产力/生物量、植被盖度、生物多样性(含丰富度、特有种、稀有种等)、植被/各类生态系统面积、干扰强度、优势种、指示种、景观破碎指数、林龄结构、入侵种、树高、凋落物、胸径、叶面积指数(表 2)。各个指标在文献中被采用的次数如表 1 所示,其中生产力、植被盖度采用频率均在 50%以上,生物多样性在 40%以上。

植被盖度/覆盖度、优势种/指示种、高度、景观破碎度、林龄结构等是植被结构的重要特征指标。生产力、生物量、凋落物等是反映植被物质生产的重要功能指标。生物多样性在生态质量评价中的重要性也越来越受到关注,是质量评估核心的内容。干扰和灾害等也是影响植被未来潜在演替和发展方向的重要指标。文献分析结果表明,植被生态质量评估中被采用的频率较高的指标可以分别归类到植被结构、功能、生物多样性和干扰等类型指标维度内。

(2)逆行演替、退化理论分析。植物群落逆行演替或者退化过程是生态质量的降低最直观的体现,逆行演替或退化导致群落结构简单化、不能充分利用环境、生产力逐渐下降、不能充分利用地面、抗干扰能力减弱^[24-25,28,42]。中国北方草地退化体现在植物种类组成减少、优质禾草减少、退化指示种和毒草增加、植被覆盖度低、斑块破碎化、地上生物量明显降低,因此指标从以上几个方面进行退化分级^[24-25,42]。森林植被退化过程总是朝着生物多样性降低、原有物种消失、外来物种入侵,结构发生改变,中幼龄物种相对增加,生产力和生物量减少,物质和能量流动及自我调节和抗干扰能力减弱等方向发展^[28]。可以看出,退化和逆行演替中最受关注的特征指标也是从植被结构组成、生产功能、生境变化及抗干扰能力等方面进行评价,所以抓住植被退化或逆行演替阶段的典型特征指标,也是快速判断生态质量的重要依据。

(3)生态系统长期监测指标体系分析。中国科学院建立的生态系统研究网络(CERN)定位于生态系统结构、功能研究与优化管理,具有统一的长期生物观测指标体系。CERN 生态系统生物长期观测指标体系包括生境、物种组成与物质生产、群落动态与物候、植被类型和空间分布等指标项,共有 261 个指标,自然生态系统占到 145 个,其中可量化的指标为 89 个。植被结构类指标在森林生态系统中分为乔木层、灌木层、草本层及藤本植物等分层结构,具体包括种数、盖度、高度、胸径、密度、叶面积指数、优势种等 27 个指标;群落物质生产指标包括地上各部分、凋落物及地下根系分层的鲜重和干重等 30 个指标;群落动态主要包括森林的幼苗更新和荒漠的种子库等表征群落发展演替的参数,以及不同物候期指标 16 个;其它还有元素含量、调查区面积、人口和载畜率等 16 个指标。国家林业局制定的森林生态系统长期定位观测指标体系中,植物群落特征指标分为乔木、灌木、草本、幼树和幼苗等分层结构,具体包括林龄、种数、高度、胸径等 10 个指标,群落物质生产包括树高、胸径的年生长量及各部分生物量 16 个指标,群落养分和碳储量等 16 个指标,生物多样性包括保护植物、濒危植物、特有植物丰富度、多样性指数、古树年龄指数等 7 个指标,其它还包括人为干扰、病虫害、年轮、物候等指标^[95]。总体上,我国已经建立的、较为完善的生态系统长期观测指标体系中,关于植被要素的指标

是非常核心和系统的,涵盖植被的分层结构、盖度、高度等群落结构特征、群落物质生产、生物多样性以及人为干扰、病虫害等是长期地面调查的基础指标,为快速评估植被生态质量提供了很好的基础^[41]。

表 2 在文献中高频出现植被生态质量评价指标清单

Table 2 A list of vegetation ecological quality evaluation indicators appears frequently in the literature

指标名称 Indicator names	出现次数 Number of occurrences	参考文献 References
植被盖度/覆盖度 Vegetation coverage	43	[3],[4],[16],[17],[18],[34],[36],[37],[38],[39],[40],[42],[43],[44],[45],[46],[47],[48],[49],[50],[51],[52],[53],[54],[55],[56],[57],[58],[59],[60],[61],[62],[63],[64],[65],[66],[67],[68],[69],[70],[71],[72],[73]
生产力/生物量 Productivity/biomass	49	[1],[3],[4],[5],[6],[7],[14],[16],[18],[21],[34],[39],[40],[42],[45],[50],[51],[53],[54],[55],[56],[57],[60],[61],[62],[63],[64],[65],[66],[67],[68],[69],[70],[71],[72],[73],[74],[75],[76],[77],[78],[79],[80],[81],[82],[83],[84],[85],[86]
生物多样性 Biodiversity	34	[1],[21],[22],[23],[29],[34],[35],[36],[37],[38],[39],[48],[49],[50],[51],[53],[54],[55],[57],[58],[59],[61],[62],[65],[79],[82],[83],[84],[87],[88],[89],[90],[91],[92]
面积占比 Area proportion	20	[16],[35],[38],[39],[42],[43],[47],[48],[53],[54],[57],[58],[60],[63],[65],[70],[82],[84],[89],[91]
干扰/灾害等 Disturbance/disaster	19	[6],[34],[35],[38],[43],[50],[51],[53],[58],[59],[61],[62],[68],[74],[75],[79],[84],[85],[89]
优势种 Dominant species	13	[23],[34],[42],[49],[54],[56],[61],[65],[72],[78],[85],[89],[90]
指示种 Indicator species	13	[22],[29],[38],[42],[55],[58],[61],[62],[65],[82],[91],[93],[94]
景观破碎度 Landscape fragmentation	12	[21],[38],[52],[53],[56],[59],[60],[61],[63],[65],[91],[95]
林龄结构 Forest age structure	8	[28],[50],[51],[55],[57],[79],[82],[92]
入侵物种 Invasive species	7	[23],[38],[53],[61],[65],[84],[85]
高度 Height	6	[45],[54],[55],[78],[88],[91]
凋落物 Litter	4	[50],[55],[72],[85]
胸径 Breast-height Diameter	3	[55],[57],[88]
叶面积指数 Leaf area index	3	[66],[67],[87]

4 结果

在本研究构建的基于地面调查的植被生态质量综合评估指标体系中,第一级植被生态质量综合指数分别从群落结构指数、群落物质生产指数、生物多样性指数、群落发展或者演替趋势 4 个第二级指标项的加权得到,第三级为地面调查的基础指标,每个二级指标项下对应若干三级指标,对应不同植被类型分别为 12—14 项(表 3)。具体二级指标项和其包含的三级野外调查指标如下:

(1) 群落结构指数:分别从物种组成结构、群落水平结构、垂直结构、空间结构及年龄结构几个方面表征植被质量状况。具体的第三级指标包括:优势种演替地位、群落分层与高度、覆盖度/郁闭度、空间破碎程度、林龄(仅为森林指标)。

优势种演替地位指群落中优势种所处演替地位,是先锋种、次先锋种、过渡种、次顶极种、顶极种 5 个分组

的哪一类,先锋种则为质量低,顶极种则为质量高。

表 3 植被生态质量监测评价指标体系

Table 3 Monitoring and evaluation index system of vegetation ecological quality

一级指标 First index layer	二级指标 Second index layer	三级指标 Third index layer	对指标的解释 Interpretation of index
植被生态质量综合指数 Comprehensive index of vegetation ecological quality	群落结构指数	优势种的演替地位	判断群落中优势种在植被演替中的地位是先锋种、次先锋种、过渡种、次顶极种、顶极种 5 个分组的哪一类,先锋种则为质量低,顶级种则为质量高
		群落分层	群落分层越复杂,层次越明显,则质量高
		优势层高度	群落优势层平均高度,优势层平均高度越高则质量越高
		覆盖度/郁闭度	植被总盖度,森林为郁闭度,越大质量越高
		空间破碎程度	植被退化导致林窗或裸斑破碎化的严重程度,分 4 级(严重、中度、轻微、无)
		林龄(F*)	仅针对森林中乔木的平均林龄,分为 5 个等级(幼龄、中龄、近熟、成熟、过熟)
	群落物质生产指数	生产力	单位面积、单位时间有机物生产量
		生物量	群落有机物累积量,森林为蓄积量
		优质牧草生物量比例(G*)	仅针对草地,禾本科、豆科等优质牧草产量占比
		枯落物层厚度(F、G*)	仅针对森林和草地,地面枯落物层厚度
	生物多样性指数	物种丰富度、均匀度	物种数、香农威纳指数
		优势种比例	优势种数量占比
		退化指示种比例	退化指示种种类、分级属于轻度、中度、重度退化指示种,及其数量占比
	发展/演替潜势	树种更新种类与数量(F)	仅针对森林树种更新,幼树、幼苗种类与数量
		放牧利用强度(G)	仅针对草地,放牧利用强度分为无放牧、轻度、中度、重度放牧
		种子库种类与数量(D*)	仅针对荒漠,植物种更新种类、数量
非正常干扰强度(火烧、鼠害/病虫害、极端干旱、水灾、外来入侵物种、砍伐开矿等人类利用强度——非正常外力干扰)		外力干扰强度越强,生态质量发展潜势越低	

* 标字母表示针对特定生态系统的评价指标,其中 F 表示仅针对森林、G 表示仅针对草地、D 表示仅针对荒漠

群落分层、优势层高度、植被覆盖度/郁闭度分布反映植被垂直、水平结构参数,是最常被采用的参数(表 2)。

空间破碎程度:植被在整个样地范围内水平分布的破碎化程度。空间破碎程度是反向指标,是群落连通性的表征参数,例如林窗、裸斑等。

林龄:树木的平均年龄,是森林的年龄结构特征指标。一般分为 5 个等级:幼龄、中龄、近熟、成熟、过熟,干扰少的近顶极群落的林龄优于人工林和次生林。

(2) 群落物质生产指数:是所有评价中采用最多的群落功能参数,也是植物群落最有意义的独特属性。具体的三级指标主要包括生产力、生物量、优质牧草生物量比例和枯落物层厚度。生产力和生物量是最常采用的评价植被功能指标,一般情况下生物量累积越多,生态质量越高。

优质牧草生物量比例:禾本科、豆科等优质牧草生物量占比,仅作为草地生态质量特征指标。草地是生态和生产功能的集合,优质牧草生物量比例指标是表征草地生产功能质量的重要参数,比例越高代表生态质量

一般较好。

枯落物层厚度:植物生长过程中脱落的有机物层厚度,仅作为森林、草地生态质量特征指标。森林和草地的枯落物层厚度是群落中损失的部分,厚度越高说明地上输入越多,可供其它生物消耗的生物量也会越多,也是衡量群落物质生产的重要特征参数。

(3) **生物多样性指数:**是生态质量评价中非常核心的指标,也被越来越多的评价研究采用。植物群落多样性主要从群落中物种数目和个体数目分配的均匀度方面进行评估,具体三级指标主要包括:植物物种丰富度和均匀度、优势种丰富度、退化指示物种种类与数量。群落中所有物种数量和分布,一般采用生物多样性指数进行计算,数值高则群落多样性高,其稳定性和抗干扰能力更高。

优势物种丰富度高则群落更稳定,质量更好,而退化指示物种是反向指标,退化物种数量越高则群落越不稳定,整体质量越差。这与指示物种评价法类似,可以快速判断植被质量。

(4) **发展/演替趋势:**发展/演替趋势具体三级指标主要包括:森林为树种更新、荒漠为种子库、草地为放牧强度,以及火烧、鼠害/病虫害、极端干旱、水灾、外来入侵物种、砍伐开矿等非正常外力干扰强度指标。

各个生态系统通用的三级指标有 11 项,不同植被类型各自有其特征指标,森林的特征指标包括林龄、枯落物层厚度、树种更新,草地的特征指标包括优质牧草生物量比例、枯落物层厚度、放牧利用强度,荒漠的特征指标包括种子库种类与数量。

5 讨论

植被生态质量评价从最初的指示物种法^[22-31]、关键指标法^[32, 33],发展到多个层级、多个指标的更全面的综合评价指标体系^[6, 28, 34-38, 40],在不同的应用目标和不同时空尺度均有应用。目前综合评价指标体系应用最多,但是获得系统、全面、完整的评估数据也为综合评价的应用带来了很大的挑战。本研究中植被生态质量综合评价指标体系的构建采用多维度综合关键指标体系,结合了目前生态系统分级综合评估的方法^[6, 34-38, 40]和关键指标的方法^[3, 16, 18, 32-33, 39]。一方面通过从植被不同维度特征更完整、全面的反映植被质量状况,另一方面简化了复杂的评价指标体系,关注最核心的指标,适用于快速、可量化的质量评估。该指标体系的二级指标从群落结构、物质生产、生物多样性、群落发展或演替趋势 4 个维度构建,可以表征植被的结构和功能的稳定性、多样性以及抗干扰和恢复能力,从而更全面反映植被生态质量。生态系统综合评估目前较多采用的也是多层级综合指标体系,一般从结构、功能、干扰胁迫、社会经济等方面构建综合评估指数^[6, 34-38, 40]。植被退化演替特征指标也多采用分级指标体系从结构组成、生产功能、生境变化及抗干扰能力等方面进行综合评价^[28, 42]。基于生态系统长期观测的指标体系较为全面,其最核心的植被变化的指标也是从结构、功能、生物多样性、干扰等方面进行观测。目前在生态质量评估中采用的很多植被指标(覆盖度、生产力等)是通过遥感反演或者气象指数模型计算得到的,可以对植被质量进行快速评估^[16, 18, 32, 33],但是对植被质量变化和更细尺度上的刻画是缺乏的。本研究是基于地面调查的植被生态质量评估指标体系,包含了遥感或模型计算需要的地面验证的参数,如覆盖度、生产力、生物量、破碎度等,也涵盖了基于地面直接观测的植被质量指标,如生物多样性、优势种特征、林龄、优质牧草比例等,可以有效提高植被质量评估的准确性。

在群落结构评估指标筛选方面,除最常见的分层、高度、盖度等指标外,还提出了可以快速判断植被质量的指标。例如:优势种演替地位指标,借鉴了指示物种法可以快速指示植物群落的健康或质量的状况^[22],群落中优势种在植被演替中的地位则更为直观和快速,质量低的群落或演替早期往往以演替先锋种为主,且优势种很不稳定,容易随着环境变化被过渡种替代,而质量高的群落往往优势种稳定,且为地域性顶极群落代表性物种^[28]。空间破碎程度一般是区域或景观尺度的指标^[22],对于群落尺度同样适用,尤其是荒漠、草地、湿地生态系统,植被的连通性降低,斑块化严重是质量下降最明显的特征之一^[21]。林龄仅针对森林,从幼龄林、成熟林等年龄结构分级可以快速判断植被所处演替阶段或林木质量^[82, 95]。

群落物质生产指标是植被最重要的功能参数,也是植物群落最有意义的独特属性。评价指标不仅要表征

生产的量,还要表征质量。其中优质牧草生物量比例是草地生态系统的特征指标,因为草地是生态和生产功能的集合,优质牧草生物量比例指标是表征草地生产功能质量的重要参数,比例越高代表生态质量越高^[24-25,34]。枯落物层厚度是草地、森林的特征指标。枯落物层厚度是森林、草地群落中损失的部分,厚度越高说明地上输入越多,可供其它生物消耗的生物量也会越多,也是衡量群落物质生产和提供物质循环的重要质量特征参数^[41]。

生物多样性指数是生态质量评价中非常核心的指标,也被越来越多的评价研究采用(表2)。在很多的大尺度的生态质量评估中多采用覆盖度、生产力^[3,16,18],很难关注到生物多样性的变化,而生物多样性往往是生态质量变化最核心的指标^[35],尤其针对生物多样性保护功能区域的生态质量评价,生物多样性指数是最重要的特征指数^[37]。植物群落多样性主要从群落中物种数目和个体数目分配的均匀度方面进行评估。群落中物种丰富度、均匀度是最基本的2个生物多样性指数,数值高则群落多样性高,群落稳定性和抗干扰能力更高^[83]。而优势种和退化指示种是群落中最具演替代表性种群,优势物种丰富度高则群落更稳定,质量更好^[49,89],而退化指示物种是反向指标,退化物种数量越高则群落越不稳定,整体质量越差^[22-28]。

发展/演替趋势的指标是综合了以往研究采用较多外界干扰或压力的评估指标^[34-38,40],以及植物群落自身演替或更新的指标,如森林的树种更新指标,荒漠的种子库指标。从外界干扰压力和植物群落自身发展潜力综合评估植被的发展/演替的趋势,外界干扰强度大,会对植被质量造成负向影响,而群落自身更新快或储存的种子库等足够多,也为未来恢复提供正向作用。

构建科学的综合指标体系是客观评价的基础,然而量化指标从而实现植被生态质量快速评估是一直困扰学术界且尚未形成广泛共识的难题^[19]。量化的评价方法实际应用往往受限于指标的阈值范围和量化评价标准的确定,不同的生态系统类型,不同的评价目标导向,或者不同生态功能分区需求,使得指标的权重量化存在很大的差异和不确定性^[1,19,40]。生物多样性所占权重在生物多样性保护功能区,其必然与防风固沙和水土保持区的权重是不同的^[37,68]。除了权重分配,参照系的选择也是非常关键的,本研究中的三级核心指标采用的理想参照系法,也在很多区域评价中采用^[16,18,22],即以本区域内相同类型的顶级或近顶级群落为理想参照系,评价相对量或与其偏离程度。也有研究评价年际变化量,以多年平均值或者历史数据作为参照系,来评估生态质量相对变化量^[3,5,38]。因此,指标的量化评价和模型优化还需要针对不同应用情景来开展更深入研究。

6 总结

本文基于植被逆行演替特征、文献分析以及生态系统长期观测指标体系,筛选植被质量评估中最核心的指标参数,构建适用于典型生态系统尺度的植被生态质量三级综合评价指标体系,分别从群落结构、物质生产、生物多样性和发展潜势4个方面进行综合指数的构建。本文主要基于野外长期调查数据建立反映生态系统植被质量状况的指标体系,因此,本研究兼顾了多层级综合评估和关键指标相结合,针对植物群落野外实地调查数据构建的综合评估体系,填补了针对中小尺度植被生态质量评估核心指标体系的空白。然而,由于植被类型的多样性和复杂性,评价指标的量化还需要更多的数据支撑,今后还有很多方面需要进一步探索和优化,例如,(1)植被生态质量各个指标的阈值范围的量化评价标准,(2)评价模型方法的对比和优化,(3)近顶级或生态功能分区作为理想参照系的标准,(4)基于样地调查的评估与遥感分析相结合,拓展到更大尺度上精确评价植被的生态质量状况。

参考文献(References):

- [1] 傅伯杰,刘世梁,马克明. 生态系统综合评价的内容与方法. 生态学报, 2001, 21(11): 1885-1892.
- [2] 赵士洞,张永民. 生态系统与人类福祉——千年生态系统评估的成就、贡献和展望. 地球科学进展, 2006, 21(9): 895-902.
- [3] 钱拴,延昊,吴门新,曹云,徐玲玲,程路. 植被综合生态质量时空变化动态监测评价模型. 生态学报, 2020, 40(18): 6573-6583.
- [4] 徐洁,谢高地,肖玉,李娜,江源,陈文辉. 国家重点生态功能区生态环境质量变化动态分析. 生态学报, 2019, 39(9): 3039-3050.

- [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] 罗海江, 方修琦, 白海玲, 王文杰, 熊文成, 申文明. 基于 VEGETATION 数据的区域生态系统质量评价之二——生产能力指数评价. 中国环境监测, 2008, 24(5): 61-64.
- [7] 潘庆民, 薛建国, 陶金, 徐明月, 张文浩. 中国北方草原退化现状与恢复技术. 科学通报, 2018, 63(17): 1642-1650.
- [8] 王绍强, 王军邦, 张雷明, 肖治术, 王锋, 孙楠, 李岱青, 陈斌, 陈敬华, 李悦, 王小博, 王苗苗. 国家重点研发项目: 中国陆地生态系统生态质量综合监测技术与规范研究(英文). 资源与生态学报, 2019, 10(2): 105-111.
- [9] Bardgett R D, McAlister E. The measurement of soil fungal: bacterial biomass ratios as an indicator of ecosystem self-regulation in temperate meadow grasslands. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 29(3): 282-290.
- [10] Watson R T. The science-policy interface: the role of scientific assessments-UK National Ecosystem Assessment. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2012, 468(2147): 3265-3281.
- [11] Alexander S A, Palmer C J. Forest health monitoring in the United States: first four years. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1999, 55(2): 267-277.
- [12] 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.
- [13] 刘桂环, 董贵华, 马良. 英国国家生态系统评估及对我国的启示. 环境与可持续发展, 2014, 39(6): 91-95.
- [14] 任继周, 侯扶江. 中国西部草地资源及其发展战略//刘长缨. 西部资源环境科学研究中心年报(1994—1996). 兰州: 兰州大学出版社, 1998: 75-85.
- [15] 周静, 万荣荣. 湿地生态系统健康评价方法研究进展. 生态科学, 2018, 37(6): 209-216.
- [16] 丁肇慰, 肖能文, 高晓奇, 郑华, 肖燧, 孔令桥, 欧阳志云, 李若男. 长江流域 2000—2015 年生态系统质量及服务变化特征. 环境科学研究, 2020, 33(5): 1308-1314.
- [17] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用. 生态学报, 2013, 33(24): 7853-7862.
- [18] 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.
- [19] 于贵瑞, 王永生, 杨萌. 生态系统质量及其状态演变的生态学理论和评估方法之探索. 应用生态学报, 2022, 33(4): 865-877.
- [20] Chausson A, Turner B, Seddon D, Chabaneix N, Girardin C A J, Kapos V, Key I, Roe D, Smith A, Woroniecki S, Seddon N. Mapping the effectiveness of nature-based solutions for climate change adaptation. *Global Change Biology*, 2020, 26(11): 6134-6155.
- [21] 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.
- [22] 孔红梅, 赵景柱, 姬兰柱, 陆兆华, 邓红兵, 马克明, 张萍. 生态系统健康评价方法初探. 应用生态学报, 2002, 13(4): 486-490.
- [23] 罗跃初, 周忠轩, 孙轶, 邓红兵, 张萍, 吴钢. 流域生态系统健康评价方法. 生态学报, 2003, 23(8): 1606-1614.
- [24] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 19377—2003 天然草地退化、沙化、盐渍化的分级指标. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [25] 内蒙古自治区市场监督管理局. 内蒙古自治区地方标准 DB15/T 1772—2019 草甸草原放牧退化定量评估方法.
- [26] 薛沛沛, 王兵, 牛香, 李峰卿. 森林生态系统健康评估方法的现状与前景. 中国水土保持科学, 2012, 10(5): 109-115.
- [27] 陆庆轩, 何兴元, 魏玉良, 李素梅. 生物指示物法评价沈阳市森林生态系统健康的研究. 中国森林病虫, 2006, 25(1): 13-15.
- [28] 徐欢, 李美丽, 梁海斌, 李宗善, 伍星. 退化森林生态系统评价指标体系研究进展. 生态学报, 2018, 38(24): 9034-9042.
- [29] 马克明, 孔红梅, 关文彬, 傅伯杰. 生态系统健康评价: 方法与方向. 生态学报, 2001, 21(12): 2106-2116.
- [30] Hilty J, Merenlender A. Faunal indicator taxa selection for monitoring ecosystem health. *Biological Conservation*, 2000, 92(2): 185-197.
- [31] Boulton A J. An overview of river health assessment: philosophies, practice, problems and prognosis. *Freshwater Biology*, 1999, 41(2): 469-479.
- [32] Young J E, Sánchez-Azofeifa G A, Hannon S J, Chapman R. Trends in land cover change and isolation of protected areas at the interface of the southern boreal mixedwood and aspen parkland in Alberta, Canada. *Forest Ecology and Management*, 2006, 230(1/3): 151-161.
- [33] Tang Z Y, Fang J Y, Sun J Y, Gaston K J. Effectiveness of protected areas in maintaining plant production. *PLoS One*, 2011, 6(4): e19116.
- [34] 刘纪远, 邵全琴, 樊江文. 三江源区草地生态系统综合评估指标体系. 地理研究, 2009, 28(2): 273-283.
- [35] 周亚萍, 安树青. 生态质量与生态系统服务功能. 生态科学, 2001, 20(1/2): 85-90.
- [36] 何立环, 刘海江, 李宝林, 王业耀. 国家重点生态功能区县域生态环境质量考核评价指标体系设计与应用实践. 环境保护, 2014, 42(12): 42-45.
- [37] 中华人民共和国环境保护部. HJ 192—2015 生态环境状况评价技术规范. 北京: 中国环境科学出版社, 2015.
- [38] 生态环境部. 关于印发《区域生态质量评价办法(试行)》的通知. https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk03/202111/t20211124_961564.html.
- [39] 乌日娜, 丛巍巍, 李永华, 李思瑶, 王冬芳, 贾志清, 王锋. 荒漠生态质量科学框架: 概念、指标、监测及评估(英文). 资源与生态学报,

- 2019, 10(2): 196-201.
- [40] 张海燕, 樊江文, 邵全琴, 张雅娟. 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.
- [41] 吴冬秀, 张琳, 宋创业, 张淑敏. 陆地生态系统生物观测指标与规范. 北京: 中国环境出版集团, 2019.
- [42] 李博. 中国北方草地退化及其防治对策. 中国农业科学, 1997, 30(6): 1-9.
- [43] 孙东琪, 张京祥, 朱传耿, 胡毅, 周亮. 中国生态环境质量变化态势及其空间分异分析. 地理学报, 2012, 67(12): 1599-1610.
- [44] 蒋超亮, 吴玲, 刘丹, 王绍明. 干旱荒漠区生态环境质量遥感动态监测——以古尔班通古特沙漠为例. 应用生态学报, 2019, 30(3): 877-883.
- [45] 朱军强. 国家退牧还草工程出台新政策. 中国产业, 2011, (10): 18-19.
- [46] 周紫燕, 汪小钦, 丁哲, 陈芸芝, 汪传建. 新疆生态质量变化趋势遥感分析. 生态学报, 2020, 40(9): 2907-2919.
- [47] 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.
- [48] 国家发展改革委. 国家发展改革委关于印发《美丽中国建设评估指标体系及实施方案》的通知的附件. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zc/fb/tz/202003/t20200306_1222531_ext.html.
- [49] 马世震, 陈桂彭, 彭敏, 周国英. 青藏铁路沿线高寒草原生态质量评价指标体系初探. 干旱区研究, 2005, 22(2): 231-235.
- [50] 李金良, 郑小贤. 北京地区水源涵养林健康评价指标体系的探讨. 林业资源管理, 2004, (1): 31-34.
- [51] 鲁绍伟, 刘凤芹, 余新晓, 樊金栓, 张振明, 陈峻崎, 赵广亮. 北京市八达岭林场森林生态系统健康性评价. 水土保持学报, 2006, 20(3): 79-82, 105-105.
- [52] 王文杰, 潘英姿, 李雪. 区域生态质量评价指标选择基础框架及其实现. 中国环境监测, 2001, 17(5): 17-21.
- [53] 辛利娟, 王伟, 靳勇超, 刁兆岩, 李俊生. 全国草地类自然保护区的成效评估指标. 草业科学, 2014, 31(1): 75-82.
- [54] 崔保山, 杨志峰. 湿地生态系统健康评价指标体系 II. 方法与案例. 生态学报, 2002, 22(8): 1231-1239.
- [55] 牛赞, 刘贤德, 张学龙, 王顺利, 雷军. 祁连山水源涵养功能的生态监测指标与评估指标. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(11): 120-124.
- [56] 徐大伟, 陈宝瑞, 辛晓平. 气候变化对草原影响的评估指标及方法研究进展. 草业科学, 2014, 31(11): 2183-2190.
- [57] 赵其国, 黄国勤, 马艳芹. 中国生态环境状况与生态文明建设. 生态学报, 2016, 36(19): 6328-6335.
- [58] 张小玉. 北京市密云区湿地资源及生态质量评价. 湿地科学与管理, 2020, 16(2): 32-34.
- [59] 何莉莉. 辽宁省生态公益林生态质量评价标准. 辽宁林业科技, 2016, (4): 29-31, 42-42.
- [60] 于成龙. 湿地生态质量气象评价——以扎龙湿地为例. 东北林业大学学报, 2019, 47(5): 88-93, 104-104.
- [61] 杜金鸿, 张玉波, 刘方正, 陈冰, 李俊生, 王伟. 中国草地类自然保护区生态环境质量动态评价指标体系构建与案例. 草业科学, 2017, 34(11): 2378-2387.
- [62] 叶亚平, 刘鲁君. 中国省域生态环境质量评价指标体系研究. 环境科学研究, 2000, 13(3): 33-36.
- [63] 王静, 周伟奇, 许开鹏, 颜景理, 李伟峰, 韩立建. 京津冀地区的生态质量定量评价. 应用生态学报, 2017, 28(8): 2667-2676.
- [64] 周传猛, 蒲小鹏, 陈垣, 花立民. 天然草地生态系统健康评价体系构建及定量评估——以甘肃省甘南藏族自治州草原为例. 甘肃农业大学学报, 2014, 49(6): 114-118, 124-124.
- [65] 辛利娟, 靳勇超, 朱彦鹏, 罗建武, 王亮, 陈冰, 王伟. 中国荒漠类自然保护区保护成效评估指标及其应用. 中国沙漠, 2015, 35(6): 1693-1699.
- [66] 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.
- [67] 吴宜进, 赵行双, 奚悦, 刘慧, 李畅. 基于 MODIS 的 2006-2016 年西藏生态质量综合评价及其时空变化. 地理学报, 2019, 74(7): 1438-1449.
- [68] 吴蓉蓉, 史惠兰, 王维, 李江鹏, 姚卫康, 李希来. 青海河南高寒草地生态系统健康评价. 安徽大学学报: 自然科学版, 2018, 42(3): 98-108.
- [69] 王焕, 侯鹏, 蒋金豹, 肖如林, 翟俊, 孙晨曦, 王永财, 王雪峰, 靳川平, 闻瑞红. 基于“格局-质量-功能”的生态系统综合评估方法研究与实践. 环境生态学, 2019, 1(7): 32-37.
- [70] 董天, 肖洋, 张路, 肖焱, 郑华, 欧阳志云. 鄂尔多斯市生态系统格局和质量变化及驱动力. 生态学报, 2019, 39(2): 660-671.
- [71] 曹巍, 黄麟, 肖桐, 吴丹. 人类活动对中国国家级自然保护区生态系统的影响. 生态学报, 2019, 39(4): 1338-1350.
- [72] 单贵莲, 徐柱, 宁发. 草地生态系统健康评价的研究进展与发展趋势. 中国草地学报, 2008, 30(2): 98-103, 115-115.
- [73] 宋创业, 胡慧霞, 黄欢, 任红旭, 黄翀. 黄河三角洲人工恢复芦苇湿地生态系统健康评价. 生态学报, 2016, 36(9): 2705-2714.
- [74] 罗海江, 方修琦, 白海玲, 王文杰, 熊文成, 申文明. 基于 VEGETATION 数据的区域生态系统质量评价之一——指标体系选择. 中国环境监测, 2008, 24(2): 45-49.

- [75] 罗海江,汪文鹏,白海玲. 基于 VEGETATION 数据区域生态系统质量评价之三——服务功能稳定度指数评价. 中国环境监测, 2010, 26(2): 37-41.
- [76] 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.
- [77] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 34815—2017 植被生态质量气象评价指数. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [78] 王立新,刘钟龄,刘华民,王炜,梁存柱,乔江,中越信和. 内蒙古典型草原生态系统健康评价. 生态学报, 2008, 28(2): 544-550.
- [79] 肖风劲,欧阳华,孙江华,张志诚. 森林生态系统健康评价指标与方法. 林业资源管理, 2004, (1): 27-30.
- [80] 梁变变,石培基,王伟,唐笑,周文霞,敬焯. 基于 RS 和 GIS 的干旱区内陆河流域生态系统质量综合评价——以石羊河流域为例. 应用生态学报, 2017, 28(1): 199-209.
- [81] Kay F R, Sobhy H M, Whitford W G. Soil microarthropods as indicators of exposure to environmental stress in Chihuahuan Desert rangelands. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 28(2): 121-128.
- [82] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 38582—2020 森林生态系统服务功能评估规范. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [83] Tilman D, Wedin D, Knops J. Productivity and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystems. *Nature*, 1996, 379(6567): 718-720.
- [84] 中华人民共和国生态环境部. 2017 年中国生态环境状况公报. http://www.gov.cn/guoqing/2019-04/09/content_5380689.htm.
- [85] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 21439—2008 草原健康状况评价. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [86] 甘娟,葛继稳,刘奕伶,王自业,吴先,丁少华. 三峡大老岭自然保护区森林生态系统 10 年(2000—2010 年)质量变化. 植物科学学报, 2015, 33(6): 766-774.
- [87] Sykes J M, Lane A M J. *The United Kingdom Environmental Change Network: Protocols for Standard Measurements at Terrestrial Site*. London: Stationery Office, 1996.
- [88] 宋立奕,艾畅,谭成江,王煜. 茂兰国家级自然保护区生态质量评价. 林业经济, 2016, 38(12): 91-94.
- [89] Grime J P. Benefits of plant diversity to ecosystems: immediate, filter and founder effects. *Journal of Ecology*, 1998, 86(6): 902-910.
- [90] 陈永林,孙永光,谢炳庚,康婧,李晓青. 不同景观格局的红树林湿地生态系统质量比较研究——以广西北部湾地区为例. 生态环境学报, 2015, 24(6): 965-971.
- [91] 王树森. 华北土石山区基于森林植被演替规律的森林健康的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2005.
- [92] 陈善荣,董贵华,于洋,刘海江,温倩倩,陆泗进,罗海江. 面向生态监管的国家生态质量监测网络构建框架. 中国环境监测, 2020, 36(5): 1-7.
- [93] 陆庆轩,何兴元,魏玉良,张正义. 沈阳城市森林生态系统健康评价研究. 沈阳农业大学学报, 2005, 36(5): 580-584.
- [94] 高艺宁,赵萌莉,王宏亮,熊梅,赵天启. 景观生态视角下草地生态质量的空间差异及其影响因素——以内蒙古四子王旗为例. 生态学报, 2019, 39(14): 5288-5300.
- [95] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 35377—2017 森林生态系统长期定位观测指标体系. 北京: 中国标准出版社, 2017.