

DOI: 10.20103/j.stxb.202306131259

李代超, 钟淑璇, 虞虎. 景观功能评估研究进展. 生态学报, 2024, 44(16): 7401-7415.

Li D C, Zhong S X, Yu H. Landscape functional assessment research progress and insights. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(16): 7401-7415.

景观功能评估研究进展

李代超¹, 钟淑璇¹, 虞 虎^{1,2,*}

1 福州大学, 数字中国研究院(福建)/空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室, 福州 350002

2 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

摘要:景观是由不同土地单元镶嵌而成的异质区域,通过提供粮食安全、物种维持、生计机会、文化娱乐等功能为提高人类福祉做出重要贡献。景观功能评估作为支撑可持续发展的关键工具,旨在评价区域可持续发展潜力进而指导相关决策。为明确景观功能评估的内涵、理清整体性景观功能评估的研究框架,依据研究重点将景观功能评估分为感知、生态、特性及绩效四维度,综合评述各维度的评估内涵、评估方法并提出展望。结果表明:①感知维度初步实现从主观判断向数据驱动的转变,但由于受设备、专业技术等制约,数据获取相对困难,质量评估、效果评估或偏好研究相较传统研究发展缓慢;②生态维度涉及范畴已基本建立各自的研究框架、研究方法,但还需建立更精准的评估框架才能为挖掘生态系统演变的时空动态特征、关键驱动因子提供技术支撑;③特性维度能够帮助景观规划者、决策者增加对景观现状、形成及其未来的认知,核心问题为“在考虑人文、历史、审美、生态价值的基础上实现景观分类”;④绩效维度注重景观的可持续发展,正处于研究初期尚欠缺对景观规划管理策略与效益结果之间关联性的探讨。研究认为,景观功能评估呈现出多维度交叉、结合多种理论及方法的发展趋势,整体上对景观的社会历史文化特征关注较少,欠缺多维度交叉的景观功能评估研究框架。未来应从景观特征挖掘、景观功能图谱制作、景观功能评估、景观绩效评估四个方面予以加强,构建面向多尺度、多目标的整体性景观功能评估方法体系,以改善整体性景观功能评估方案制定方面的不足。

关键词:景观功能评估;评估维度;展望

Landscape functional assessment research progress and insights

LI Daichao¹, ZHONG Shuxuan¹, YU Hu^{1,2,*}

1 The Academy of Digital China/Key Laboratory of Spatial Data Mining & Information Sharing of Ministry of Education, Fuzhou university, Fuzhou 350002, China

2 Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, Chinese Academy of Science, Beijing 100101, China

Abstract: Landscape is a heterogeneous area composed of different land units, which makes important contributions to improving human well-being by providing functions such as food security, species maintenance, livelihood opportunities, cultural and recreational activities. Landscape function assessment, as a pivotal tool facilitating sustainable development, aims to assess the potential for sustainable development in a given region and provide guidance for related decision-making. In order to elucidate the connotation of landscape function assessment and establish a clear research framework for comprehensive landscape function assessment, this paper categorizes the assessment into four dimensions: perception, ecology, characteristics, and performance based on the research focus. Furthermore, it provides a comprehensive review of each dimension's connotation, assessment methods, while also presenting future prospects. The findings suggest that: ①The preliminary implementation of perceptual dimensions has successfully shifted from subjective judgment to data-driven

基金项目:推进以国家公园为主体的自然保护地体系建设研究(23AZD062);第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0401)

收稿日期:2023-06-13; **网络出版日期:**2024-06-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yuhu@igsrr.ac.cn

approaches. However, due to constraints such as limited availability of devices and lack of professional expertise, data acquisition remains relatively challenging. As a result, there hasn't been significant progress in quality assessment, performance evaluation or preference research when compared to traditional studies; ②In terms of ecological dimensions, the respective research frameworks and methods have been established to a certain extent. However, it is still necessary to establish a more precise evaluation framework in order to provide technical support for exploring the spatiotemporal dynamic characteristics and key driving factors of ecosystem evolution; ③The core issue of the feature dimension focuses on is "achieving landscape classification based on considering humanistic, historical, aesthetic, and ecological values", which presents a problem of diverse theoretical systems. The widely accepted and commonly used theoretical systems have not yet formed standards or regulations; ④The performance dimension emphasizes the sustainable development of landscapes, and is currently in the early stages of research with a lack of exploration on the correlation between landscape planning management strategies and their resulting benefits. In general, the assessment of landscape functionality demonstrates a trend towards multidimensional intersections and the integration of various theories and methods. However, there remains a relative neglect of the social, historical, and cultural aspects of landscapes, as well as a dearth of research frameworks for comprehensive landscape functional assessment. In the future, efforts should be made to strengthen landscape feature exploration, landscape functional map creation, landscape functional assessment, and landscape performance evaluation, to establish a comprehensive landscape functional assessment methodology that is multi-scale and multi-objective. This will help address the shortcomings in developing comprehensive landscape functional assessment plans.

Key Words: landscape function assessment; assessment dimensions; prospect

生态系统是维持生态平衡、保护自然资源、维持生物多样性的基本单元,景观作为多种生态系统构成的异质镶嵌体^[1],是反映人类对自然生态系统影响方式与程度的重要载体,起着协调人类活动与生态环境影响的重要作用。中国的经济社会发展正在从生产向生态-消费的阶段转变,人们对于景观提供的非物质产品(文化传统、情感体验、知识教育等)的需求越来越高,且景观作为生态系统服务转化的重要媒介对于生态产品或价值发挥尤为重要,但是如何评估景观功能并确定景观生态利用的适应性区域,仍然缺少明确的方法论体系。

景观功能评估主要从景观生态功能^[2-3]、景观美学价值发挥^[4-7]、景观资源利用^[8]三个方面展开。首先在景观生态功能方面,研究基于景观生态学理论将自然资源价值与人类社会需求相结合,尝试通过景观生态功能评估,在保护生物多样性、维持生态系统平衡的基础上寻找生态、经济效益最大化的景观空间格局,研究范畴涉及景观格局分析^[9-10]、景观生态过程分析^[11-13]、生物多样性保护^[14]、生态系统服务及权衡^[15-17]等,这些概念常交织出现。其次在景观美学价值发挥方面,着重考虑如何在城市规划、景观设计和旅游产品中合理利用景观美学元素提升公众的游憩体验,研究范畴以视觉感知为主,基本形成专家范式、心理物理范式、认知范式和经验范式的四种研究范式^[18],但由于美学价值评估常受到个体观点和主观感受的影响,评估尚缺乏统一的标准、指标及定量数据的支撑^[4]。第三在景观资源利用方面,常从环境水平、利用条件、规模范围等方面建立景观资源利用评估模型,但评估方法以专家打分为主,存在片面性^[8, 19]。虽然在不同学科领域中都对景观功能评估提出了初步尝试,但是由于数据的可获取性、感知的抽象性等问题,多数研究更侧重景观的生物多样性、土地利用格局等自然环境特征,而较少探究景观的社会历史文化特征,以及对人类行为和社会福祉的影响,这一研究视角的差异限制了对景观功能全面性的理解,从而导致研究领域欠缺全面而系统的景观功能评估准则及方法。

鉴于此,本文尝试梳理分析景观功能评估的研究进展,依据研究发展脉络的侧重点将其分为感知、生态、特性及绩效四个维度进行阐述,综合评述国内外不同维度的评估方法或评估模型,并从景观特征挖掘、景观功能图谱制作、景观功能评估、景观绩效评估四个方面提出对未来研究的展望。

1 研究发展历程

景观功能评估侧重点与经济技术发展背景密切相关,整体上看,景观功能评估经历了从以视觉感知为主的研究范式,到强调生态价值侧重景观特征的多视角评估,再到注重景观生态保护及长期效益的发展历程,呈现出多尺度、多视角、参与化的发展趋势,越来越多地涉及到可持续发展、生态系统服务权衡^[13]以及生态文明建设的概念,依据研究侧重点将其划分为3个阶段(表1)。

表1 研究发展历程

Table 1 Research and development process

时间阶段 Time quantum	经济发展背景 Background of economic development	技术发展背景 Technological development background	研究侧重点 Research focus
1900—1970	西方发达国家工业经济高速发展,现代工业污染的危害日益严重,环境灾害事故频发,病患者和死亡人数迅速增加。	航空摄影、遥感技术、GIS(1963)等新技术和方法的提出为获取更精确、更全面的数据和信息提供了理论和技术支撑。	聚焦于景观视觉评估,属于对于景观资源价值有意识的认定认可阶段,研究方法以感性评价为原则。
1971—2000	全球经济的快速发展,城市化、工业化的进程加快,城市规划和土地利用等问题日益突出,保护环境和可持续发展成为人们普遍关注的话题,国家间开展广泛的合作,促进了评估方法的标准化和国际化。	计算机、遥感、地理信息系统、GPS等技术的迅速发展及普及,极大提高了数据采集、分析和呈现能力,其中GIS技术已经成为评估的重要工具。	在视觉感知的基础上,更多得涉及到了景观结构、格局、过程、生物多样性、景观特征等的概念;研究范畴不再局限于自然景观,人文景观也逐渐成为研究重点,不断向多维度评估景观迈进。
2001—2023	全球化和城市化进程的加速带来了更加复杂的城市和自然环境问题,如温室效应、自然灾害、海平面上升等,各国基于可持续发展提出了一系列环境保护和资源利用的政策和措施,共同推动评估的研究和应用。	在传统方法不断发展进步的基础上,生理心理测量技术、虚拟现实、大数据、深度学习、知识图谱等新兴技术的加入带来了更加全面、真实的评估方式。	从单个项目或资源环境评估转向整体生态系统或区域综合评估,重视生态保护的长期效益、关注生态系统的恢复和生物多样性的保护;同时打破专家主导评估的局面,形成各方利益相关者共同参与、合作的评估新局面。

GIS:地理信息系统 Geographic information system;GPS:全球定位系统 Global position system

1.1 萌芽阶段(1900—1970年)

西方发达国家工业经济高速发展,工业污染的危害日益严重,环境灾害事故频发,亚健康人群数量日益增多。西方国家出于对生态环境的保护,相继颁布了一系列法令,明确提出或强调保护景观资源,如《野地法》(美国,1964)、《乡村法》(英国,1968)、《海岸管理法》(美国,1972)等。这些景观相关法令的制定及颁布实施,确立了景观将与其它有经济价值的自然资源一样,同样拥有法律地位^[18]。但该时期尚属于对于景观资源价值有意识的认定认可阶段,评估方法以感性评价为基本原则,即通过主观的观察和印象来评估景观的美感和功能性,景观资源缺乏有价值的衡量标准^[20]。这种现象激发了景观功能评估的理论发展,促使许多地理学家、生态学家、心理和行为学家等开始投身于该领域的研究。

1.2 深化阶段(1971—2000年)

经济全球化迅速蔓延,不同地区或国家的城市化、工业化的进程加快,城市规划和土地利用等问题日益突出,美国政府率先制定了“国家环境政策法案(National Environmental Policy Act, NEPA)”:要求在进行任何可能对环境产生显著影响的行动前,都必须进行环境评估^[21]。此政策的指定使景观视觉评价的技术和方法迅速发展并在环境影响评价、资源规划和城市设计等领域大量应用。且随着众多不同研究领域学者的价值,景观功能评估不再局限于景观视觉资源评估,景观拥有的生态、历史和文化价值也逐渐成为重要研究对象^[22]。特别地,英国在此时期将评估重点转向景观特征,将景观特征描述与价值评判的过程分离,认为景观价值没有优劣之分,逐渐发展出景观特征评估(Landscape Character Assessment, LCA)体系、历史景观特征识别(Historic Landscape Characterisation, HLC)体系,关注景观的差异化 and 多样性,强调景观的相对价值,注重景观在时间和空间维度上的连续性,鼓励人们积极地应对当前及将来景观的变化^[23]。

1.3 提升阶段(2001—2023 年)

随着可持续发展理念的提出和深入发展,要求在经济发展中必须采取环境保护、资源高效利用和生态系统修复等措施,景观功能评估侧重点也逐步完成从单个项目或资源环境,到整体生态系统或区域综合评估的转变,更加关注生态保护的长期效益^[24]、重视生态系统的恢复和生物多样性的保护,致力于在各方利益相关者共同参与、合作评估的基础上实现动态监测、智能评估不同发展情形对当地社区、文化遗产和整体生态系统的影响和可持续性,以确保经济发展与生态环境的协同共进。

2 重点研究内容

景观是人为活动、自然要素综合作用的结果,从单一维度、单一应用领域评估景观往往无法全面反映其本质和意义。为探寻景观功能评估的主要维度、应用领域,本文整理评估发展脉络发现不同国家在不同时期对景观的研究重点存在差异(表 2),整体上在景观视觉美学价值、景观特征、生态系统服务、可持续性方面开展研究。因此,本文围绕各国研究重点结合景观功能评估领域中与其相似或相通的概念方法论,将景观功能评估分为感知、生态、特性及绩效四维度(如感知维度在景观视觉美学的基础上纳入声景观、嗅觉景观的概念),对各维度涉及的概念及所使用的评估指数/评估方法的优缺点、适用范围对比总结。

表 2 各时期不同国家研究侧重点

Table 2 Focus of research in different countries over time

国家 National	1970—1990	1991—2000	2001—2023
荷兰 Netherlands	城市规划和设计	水资源景观管理和防洪、生态系统保护	城市可持续性、绿色基础设施、数字化技术和智能城市、文化景观和历史遗产保护
德国 Germany	景观保护	城市规划、可持续城市发展、环境影响评价	生态系统服务、气候变化适应性、可持续发展、数字化技术
澳大利亚 Australia	景观保护、文化遗产	生态系统服务、可持续性、土地管理	城市规划和发展、气候变化适应性评估、技术应用及数据分析
加拿大 Canada	自然资源管理、原住民文化和传统知识	生态系统服务、可持续性、土地管理	土地规划和发展、原住民权益、技术应用及数据分析
英国 England	景观历史价值、景观评价	景观特征、历史景观特征识别、生态系统服务、传统农村景观保护	景观特征、可持续性、社区参与
美国 America	景观视觉美学价值、风景质量	生态系统服务、可持续性评估、视觉敏感度、视觉资源管理	视觉资源、景观感知、景观绩效、社区参与、数字化技术应用

2.1 感知维度

人类对景观最直接、最快速的感知通常是一种审美感知。审美感知是主观的、个体化的,是个人经验和文化背景的体现,在一定程度上反映社会、文化和历史等因素对于美感的认识和评价。近年来,学者已将景观审美感知研究范畴拓展到视觉、听觉^[25—27]、嗅觉^[28—29]等领域,以满足公众对景观美的需求。视觉、听觉、嗅觉并非孤立存在,而是相互影响和相互渗透的^[30],当三种感知手段间和谐度较高时,容易引发共鸣现象,带来更极致的美学体验。与其余感知手段相比,视觉是人类认识、感知外部世界的主要手段^[31],目前国内外在景观视觉感知评估方面已基本形成专家范式、心理物理范式、认知范式和经验范式四种研究范式,及以基于专家知识、基于公众感知两者为主的研究方法。

2.1.1 基于专家知识的评估方法

基于专家知识的评估方法是指专家在深入了解景观视觉环境的基础上,将景观视觉环境特征转化为形式设计参数作为评估视觉感知程度的通用指标,形成一系列评估标准、流程及体系。目前该方法已趋近成熟(表 3)。

整体上看,一部分研究立足于 Wassily Kandinsky 在 1979 年提出的平面空间理论,即点、线、面是构成平面空间的基本视觉元素,从视点、视线、视域以及视觉敏感度 4 个部分对景观进行分析与评价;另一部分研究参照美国视觉管理系统(Visual Management System, VMS),将视觉景观质量(Visual Landscape Quality, VLQ)、视

觉吸收力(Visual Absorption Capability, VAC)、景观视觉敏感度(Landscape Visual Sensitivity, LVS)三者综合考虑应用至研究区^[32]。VLQ 可以理解为人们对景观的总体印象,是景观风貌和景观品质的综合反映^[35],由生动性、独特性、多样性、完整性等诸多因素共同决定。VAC 指景观在维持其总体视觉特征和质量不发生改变的前提下,容纳自然变化的能力^[36],影响 VAC 的因素主要分为两点:1) 视觉穿透力:能够看穿物体或障碍物的能力;2) 景观复杂度:景观中所包含的多样性、丰富性和变化性的程度^[18]。LVS 是指景观易被观察的程度,是景观易见性、可见性、清晰性和醒目程度等的综合反映^[37],当景观受到自然或人为干扰时,LVS 较高的区域会比较低的区域更容易产生视觉冲击^[38],目前多选取相对坡度、视觉几率、相对距离、醒目程度四参数构建 LVS 指标。

表 3 基于专家设计-视觉感知高频评估指标汇总

Table 3 Expert based design-Summary of high frequency evaluation indicators for visual perception

指标体系 Indicator system	类别 Category	指标 Index
景观视觉资源评价(参照 VMS 系统) Landscape visual resource evaluation(cf. VMS) ^[18, 32]	视觉景观质量	自然度、典型度、利用度、生动性(坡度、可见湖面个数、水景优势)、独特性(珍稀生物)、多样性(景观丰富度、植被多样性)、完整性(景观破碎程度、景观蔓延程度)、空间性(空间开阔度、层次性)
景观视觉评价指数(平面空间理论) Landscape visual evaluation index (Plane space theory) ^[33-34]	视觉吸收力	坡度、坡向、地形起伏、植被丰富度、植被格局、土壤稳定性
	景观敏感度	相对距离、相对坡度、出现几率、醒目程度
	基本视觉元素	视点(可见度、连续度)、视线(清晰度、舒适度)、视域(视域面积、多样性)
	景观视觉敏感度	相对距离、相对坡度、出现几率、醒目度

VMS:视觉管理系统 Visual management system

由于视觉感知程度的差异,确定指标的相对重要性是视觉感知评估指标体系被认可的关键,目前常用方法可以分为三类:主观判断、客观数据分析、主客观结合分析。主观判断主要使用专家判断的德尔菲法,客观数据分析常使用熵权 TOPSIS 法,主客观结合分析中层次分析法运用最为广泛,常结合模糊数学理论解决带有模糊性的复杂决策问题。为正确、科学评估各指标间的相关性、重要性,汇总常用的权重确定法的优缺点如表 4 所示。

表 4 指标体系权重确定方法汇总

Table 4 Summary of index system weight determination methods

名称 Name	方法概述 Method overview	优缺点 Merit and demerit
AHP ^[39-41]	将复杂的决策问题分解为多个层次,使其转化为一系列相对简单的决策子问题进行定量分析。	能够分析多个因素的相对重要性,并提供可操作性的决策建议;但忽略了指标之间的模糊性和不确定性,依赖于主观判断和专家意见,容易出现偏见和误差。
FAHP ^[42]	在 AHP 的基础上,结合了模糊数学理论,降低信息的重叠率,适用于解决带有模糊性的多指标、多层次的决策问题。	可以处理模糊信息,考虑不同因素的相对重要性,但对判断矩阵的构建有一定要求,需要专家的参与,计算复杂度较高。
FCE ^[43]	基于模糊数学理论的多指标决策方法,适用于处理评价对象具有模糊性和不确定性的情况。	能够处理模糊和不确定性信息,对决策结果的影响较小;但计算复杂度较高。
熵权 TOPSIS 法 Entropy weight TOPSIS method ^[44]	集成了熵权法和多目标决策 TOPSIS 分析,通过计算各指标的熵值及权重向量实现权重分配。	能克服主观因素对指标赋权的影响,反映指标权重随时间的变化情况,推算过程严谨、精确;但对于指标间存在相关性的问题处理较为困难。
DM ^[45]	一种专家咨询和意见调查技术,通过对专家意见的反复征询和集成来达成一致意见或判断,通常应用于需要进行决策的复杂问题中。	充分利用专家的知识 and 经验,减少人为因素对决策的影响;且保护专家隐私,避免了群体心理和人际关系的影响;但可能导致专家意见的一致性,降低了讨论和辩论的可能性,也可能忽视一些不同的观点和意见。

AHP:层次分析法 Analytic hierarchy process;FAHP:模糊层次分析法 Fuzzy analytic hierarchy process;FCE:模糊综合评价法 Fuzzy comprehensive evaluation method;TOPSIS:最优方案排序法 Technique for order preference by similarity to an ideal solution;DM:德尔菲法 Delphi method

2.1.2 基于公众感知的评估方法

基于公众感知的评估方法通过分析观察者对于某一景观视觉环境或景观视觉感知程度的评价,获取公众对景观视觉感知程度的整体态度和看法(表5)。

表5 基于公众感知-视觉感知评估方法汇总

Table 5 Based on public perception-Summary of visual perception evaluation methods

名称 Name	方法概述 Method overview	优缺点 Merit and demerit	应用范围 Applied range
SBE ^[46]	通过问卷调查,使用多维度对景区的自然环境、服务设施、游览体验等方面进行评价。	应用广泛,可操作性强,节约成本,能够全面评估景区体验,但同时存在主观性较强,敏感水平低的缺陷。	小尺度区域综合景观
SD ^[47-48]	选取能够综合表达景观要素的多对形容词,要求被试对象观看录像、听取语音等,对形容词进行倾向化赋分。	可靠性高、灵活性强、易懂,缺点是易受评价者个体差异影响,只提供表面态度评价、无法测量实际行为影响。	小尺度区域综合景观
BIB-LCJ ^[49-50]	以评判者的个人经历与美学作为评判标准,与单一的SBE法相比,该方法不仅可以对大量的景观样本进行综合评估,而且可以对不同的景观样本进行全面的对比。	具有较高的可信度,能够更真实地反映出人们的审美喜好,其结论清晰、直观。	小中尺度区域综合景观
CVM ^[51]	一种测量公共产品和服务价值的方法。它是通过向被调查者提出一系列假设情况和问题,来评估其愿意为该公共产品或服务支付的最高价格。	可以估计非市场商品的价值,缺点是依赖于受访者的主观意愿和记忆,可能存在信息偏差和不确定性。	小尺度区域综合景观
VR ^[52]	通过头戴式显示器和感知设备,创造出完全沉浸式的虚拟环境,用户可以体验逼真的视听感受,以更真实地感知景观。	提供沉浸式的虚拟体验,但设备需求高,使用时间限制以及局限于虚拟环境。	小尺度区域综合景观
内容分析法 Content analysis methodology ^[53]	以社交媒体上发布的游记文本或带有地理标签的照片为数据源,采用文本挖掘、机器学习及地理空间建模等手段综合分析。	数据获取便捷快速,敏感性、灵活性较强,但数据准确性需要严加辨别。	大中小尺度区域综合景观
生理心理指标法 Psychophysiological indices ^[54-55]	通过生理测试技术(如脑电图、心电图、功能核磁共振成像)来测定人对于特定区域景观的反应和评价,从而克服语言表达对风景评价结果可能带来的误差。	能够获得准确、客观的生理数据,较为全面地了解景观对人的影响,但是该技术操作复杂,测试成本较高,同时测试结果受个体差异等因素的影响。	小尺度区域综合景观
眼动实验 Eye movement experiment ^[56]	通过检测人眼在观察特定刺激物(如图像、文字、视频等)时的运动轨迹和停留时间,揭示人的注意力和认知过程,评价内容包括:注视点、跳跃率、停留时间。	能够客观记录用户在使用过程中的视觉注意力和心理反应;但需要专业设备和技术支持,成本较高,不能直接反映用户体验。	小尺度区域综合景观

SBE:美景度评价 Scenic beauty estimation procedure;SD:语义差异法 Semantic differential;BIB-LCJ:平衡不完全区组比较评判法 Balanced Incomplete block-latin square comparative judgment method;CVM:条件价值法 Contingent valuation method;VR:虚拟现实技术 Virtual reality

以往,基于公众感知的评估方法将问卷、照片及幻灯片等传统媒体作为评估的基本工具,形成了诸如美景度评价(Scenic Beauty Estimation procedure, SBE)、语义差异法(Semantic Differential, SD)、平衡不完全区组比较评判法(BIB-LCJ法)等具有成熟理论基础的评估方法,但由于传统媒体难以克服时空限制,在描绘多维景观、减少主观性影响方面可信度常受到质疑。目前科技的进步正日益克服这一限制,如社交媒体数据^[53]使公众感知数据获取更加便捷,为实现大尺度、区域性的动态化景观视觉感知评估研究提供了数据支撑;虚拟现实(Virtual Reality, VR)^[52]技术为增强公众对景观的感知和理解提供了技术支持;脑成像、神经生理学、眼动追踪^[56]等相关研究通过深入地理解人类大脑的运作方式,为获取并分析精细化的公众景观感知数据提供理论支持。

2.2 生态维度

当前生态维度的评估视角呈现出两种发展趋势,一方面从单一景观生态学视角评估景观,另一方面从生态系统服务视角或将其与景观生态学相耦合进行评估^[57-58],认为生态系统服务能在为评估明确评价终点、保护对象的同时有效关联景观空间格局及生态过程^[1]。两种趋势都是在景观生态学、生态系统服务的理论基

础上发展起来的,因此本文选取景观生态学、生态系统服务两个视角展开生态维度评估方法分析。

2.2.1 景观生态功能评估

景观生态功能评估以景观生态学为理论依托,关注景观的空间结构、相互作用、协调功能以及动态变化,通过景观格局分析评估特定生态功能,涉及生态风险评估^[59-60]、生态系统稳定性评估^[61]、生态系统健康评估^[62]等方面,已在区域^[63-64]、流域^[65-67]、矿区^[68]等生态脆弱敏感区或人类高强度活动区域^[69]得到广泛应用,各领域常用的评估指标/方法如表 6 所示。

表 6 景观生态功能评估指标/方法汇总

Table 6 Summary of indicators/methods for assessing landscape ecological functions

应用领域 Application area	名称 Name	方法概述 Method overview	优缺点 Merit and demerit
生态风险评估 Ecological risk assessment ^[60-61, 70-71]	风险源-汇法	将景观类型分为促进生态过程发展的“源”和延缓生态过程发展的“汇”,在设定的评价目标单元中计算生态风险。遵循的风险表征方式为 $R=P \times D$ (R 为生态风险值, P 为风险概率, D 为生态价值或潜在生态损失)。	风险源-汇法立足于具体生态灾害过程,对风险的多源胁迫过程考虑不足,存在综合性较低、评价结果易受影响的不足,较适合评价一定区域内具有明确胁迫因子的特定生态风险。
	景观生态风险综合指数	在对景观格局分析的基础上,根据“损失与概率累乘”的理论使用各类景观指数(如:景观破碎度指数、景观分离度指数、景观优势度指数、景观干扰度指数)构建景观生态风险综合指数,刻画风险时空异质性。	较适用于区域、流域等大尺度的景观生态风险评估,对大量实测数据依赖性较低,但缺乏对相关生态过程的动态关注,且风险概率的表征方式缺乏生态内涵。
生态系统稳定性 Ecosystem stability ^[62, 72-73]	单一指标法	常通过追踪生态系统生产力或生物量在特定期限内的动态变化,揭示生态系统在该时段内的稳定性特征,进而定量评估生态系统稳定性的驱动因素(例如:生物多样性、气候变化、人为活动等)对生态系统稳定性的影响。	具有简洁性和直观性,易于理解和解,但存在无法全面反映生态系统的复杂性和多样性的不足。
	指标体系法	通过对生态系统稳定性概念、理论的剖析,构建相对完整的评价指标体系(如从植物群落指标、物质生产功能、湿地固碳功能、气候变化四角度构建体系)。	具有多维度和综合性,能更全面地揭示生态系统稳定性的特征。
生态系统健康 Ecosystem health ^[63, 74-75]	生物指标法	生物指标是生态系统中特定生物种群或群落的特征,通过监测生物多样性、污染敏感性、生态位、指示物种等指标,可以获取相关生态系统健康状况的信息。如蚂蚁群落可为森林生态系统健康的快速评价物种,鱼类可为评价河口生态系统健康的快速评价指标。	具有简洁性、综合性及直观性,但应用中可能存在对设备需求高、解释生物指标变化的因果关系困难、单一指标难以完全反映生态系统复杂性等不足。
	指标体系法	生态系统的健康体现在其活跃性、稳定性、可恢复性及持续性,目前应用较多的指标模型有 SFPHD 模型、VORS 模型、PSR 模型、DPSEEA 模型。	从结构、功能、过程到生态服务功能,强调活跃性、稳定性、可恢复性及持续性,能综合考虑生态系统健康的多个方面,提供全面多角度的评估。

SFPHD:结构-功能-过程-发展 Structure-function-process-development; VORS:活力-组织力-恢复力-生态系统服务功能 Vigour-organization-resilience-ecosystem service; PSR:压力-状态-响应 Pressure-state-response; DPSEEA:驱动力-压力-状态-暴露-影响-响应 Driving force-pressure-state-exposure-effect-action

为满足更大尺度维持生态系统平衡、协调人与自然关系的需求,构建区域乃至全国的生态安全格局已刻不容缓。生态安全格局是指为维护生态系统的稳定和功能完整性而划定的区域性格局,是景观生态风险评估的起点及终点^[76],核心思想为“识别并诊断生态修复关键节点、廊道等要素,实施针对性保护”。目前识别区域生态修复关键节点的方法有最小累乘阻力模型(Minimum Cumulative Resistance, MCR)^[76-77]、电路理论模型^[78]、蚁群算法^[79]等,其中 MCR 模型使用最为频繁,不但考虑了景观之间的水平联系,还能够模拟异质景观单元对生态流的干扰识别出最低成本路径,基本形成“源地-阻力面-廊道-节点”的研究框架^[77],但实施过程

中对源地识别、阻力面构建参数、提取潜在生态廊道节点尚缺乏统一标准^[76]。

2.2.2 景观尺度的生态系统服务评估

生态系统服务是指人类从自然生态系统中获得的各种物质和非物质的利益^[80],相较于景观生态学,生态系统服务概念更多考虑生态系统与人类发展之间的相互作用。景观尺度的生态系统服务评估已成为生态功能区划、生态系统管理、生态补偿等政策实施的紧迫课题,评估方法可以分为两大类:①直接评估,即基于市场理论(如市场价值法、替代成本法、影子工程法等方法)对生态系统服务实物量(如水源涵养、土壤保持、防风固沙等)进行数量和价值评估^[81]。直接评估易受到区域生态系统功能特征、经济发展状况的影响,有利于捕捉到特定区域生态系统服务价值的变化规律,但存在生态系统服务实物量的核算方式多样、生态产品对应的市场价格缺乏统一标准等不足^[82]。②间接评估,即通过转化物质和能量流动来估算生态系统服务价值,多使用当量因子法^[83]及模型法。当量因子法基于基础当量表(不同土地利用类型单位面积提供的各类生态系统服务年均产值)耦合生态系统面积量化生态系统服务^[83],对数据需求相对较低,算法简洁直接,多用于长时序生态系统服务评估;模型法即使用生态过程模型来模拟不同条件下生态系统中物质和能量的流动,进而估计生态系统服务的价值(常用模型见表7),实际应用中模型极具实用性、直观性,但不同模型在不同的应用领域都有其优势及局限性^[3],应根据需要选择更适合的模型。

表7 生态系统服务功能评估模型汇总

Table 7 Summary of ecosystem service assessment models

名称 Name	方法概述 Method overview	优缺点 Merit and demerit	应用范围 Applied range
InVEST ^[84-85]	通过模拟不同土地覆盖情景下生态系统服务(土地利用变化、海岸防护、水文服务、碳储存、水质等)质量和价值的变化,以权衡人类活动的利益和影响。	具有易用性、透明性和灵活性等优点,但也存在对数据质量要求较高、空间分辨率有限等不足。	局部、区域至全球尺度均可
ARIES ^[86]	模型结合了人工智能和语义建模,利用生态空间数据、算法分析生态系统服务的交互作用和权衡情况,能够处理大规模、复杂、异质的生态系统数据。	能够更准确地分析生态系统服务的交互关系和权衡情况,使用需要准确的数据支持,也要求决策者有一定的专业知识储备。	
MIMES	模型在关注不同尺度上生态系统服务的变化和相互关系的基础上考虑时间动态性,能够更好地捕捉生态系统的复杂性和动态性。	适用于多尺度评估,更好地考虑了生态系统服务的空间变化,但整合多尺度数据和方法增加了模型的复杂性,需要更多专业知识来操作和解释。	
SoIVES ^[87]	模型基于社会学和经济学理论,强项为量化生态系统服务功能的社会价值(美学价值、文娱活动和休闲活动等),且可将结果表达为非货币化的指数。	考虑社会价值,强调与社区和利益相关者的合作,具有广泛的应用价值,但需要大量的社会数据支持,数据收集难度较高。	

InVEST:生态系统服务综合评估及权衡模型 Integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs;ARIES:生态系统服务的人工智能模型 Artificial intelligence for ecosystem services;MIMES:环境系统管理跨学科研究模型 Model of interdisciplinary research in management of environmental systems;SoIVES:生态系统服务社会价值模型 Social values for ecosystem services

特别地,景观服务正逐渐成为生态系统服务理论中的重要组成部分,强调景观格局与各服务功能的耦合以及服务供给与需求间的空间关系,常用方法为参与式制图(Participatory Mapping, PM)^[88-89],即通过公众和利益相关者的广泛参与共同创作和解释地图^[90],但是常缺乏对其理论基础及评估方法的研判。

2.3 特性维度

2.3.1 景观特征评估

景观特征被定义为持续发生在特定类型景观中的明确的并受到承认的要素形式^[91],包括自然要素(山脉、河流、湖泊、森林、草原、沙漠等自然地貌和地形要素)和人工要素(包括建筑物、道路、广场、公园、花园等人工结构和绿化设施),依据自然要素和人文要素景观可被分成不同类型或单元,而每一个类型或单元都有其独特、一致及可识别的特征。充分挖掘景观特征辅以科学合理的组织和布局,有利于挖掘地域文化内涵,打

造富有独特魅力的特色旅游产品,使其在旅游市场中脱颖而出,以打破“同质化”现象,带动地方旅游、经济的可持续发展。景观特征评估涉及景观特征描述、识别结果研判,景观特征的识别与分类作为特征描述过程的基础已成为领域中关注重点^[92],常使用 GIS 将景观的自然特征及公众感知数据耦合分析制作景观特征分类图^[93]。目前,以英国为代表的 LCA 体系对景观特征的评估描述、判断输出、修订更新都有较为成熟且完善的体系框架^[94],逐渐发展为空间规划的重要内容和景观开发管理的重要方法,被广泛运用于欧洲景观评估研究中,其中欧盟对其的普及推动巨大,多数学者认为对其体系的研究有助于发现中国景观特征评估的局限性并提供启示^[91, 94]。

2.3.2 景观性格评估

景观性格指某一景观有别于其余景观的本源性、综合性的本底特色^[95]。景观特征与景观性格虽都强调景观差异性,但景观特征强调反映景观具有的所有特点或品质,注重完整性;而景观性格不考虑审美和感知等主观因素强调景观客观的物质特征,注重景观不同特点结合产生的具体个性,能够揭示景观特征相互作用呈现出的具体性格。因此,景观性格评估应是对景观特征的进一步深化,强调景观空间特征综合作用的结果^[96]。景观性格评估内容包括景观的自然资源和人文历史资源,涉及地形地貌、土壤条件、植被类型、动植物资源丰度等因素,将影响因子多重叠加即可得到景观本质特征的综合分析结果,进而实现对区域空间景观性格的评估。将景观性格评估融入景观特征评估中,有助于深入理解各项景观特征之间的相互关系,揭示景观空间结构的深层特性,挖掘出局部/区域的地域特色^[96]。

2.4 绩效维度

2010 年美国风景园林基金会 (Landscape Architecture Foundation, LAF) 提出景观绩效系列研究计划 (Landscape Performance Series, LPS), 正式将景观绩效定义为“持续发展的景观在完成其预设目标和助力于可持续性方面的效能和效益的度量”^[97]。景观绩效伴随景观的生命周期,从规划景观初期就需明确景观绩效考核目标,以此制定景观绩效的评估指标及度量方式,并在景观实施运营的不同阶段围绕预设的景观绩效指标进行监理、评估,以考察景观是否达到预期设定的绩效考核目标,回答景观规划及管理方案的适用性问题,归纳出具有实践操作性、实用性的知识,为实现高绩效、可持续性景观提供经验证明。由此可见,景观绩效研究的核心目标在于理清景观规划及管理方案与功能效益变化的因果关系^[98-99],其研究成果能够为建设可持续性景观提供可靠、实用的理论基础。

由于景观所处的区位条件、生态环境及社会经济等要素的差异,每个景观都有与之息息相关又各不相同的限制因素,如建成目标、气候条件、规模和可用数据类型等,因此,目前景观绩效研究领域的关注点更多地落在了评价体系建立、评价指标选择上,多数研究者认为景观绩效的类别划分和评价指标不存在普适性的标准^[99-100],实证研究更关注景观独特的功能特征,并以此制定具有针对性的绩效分类方法和度量方式(表 8)。鉴于此,LAF 开展了案例研究调查计划 (Case Study Investigation, CSI), 搭建了专注于景观绩效研究的网站 (<https://www.landscapeperformance.org/>), 网站包括案例简述、效益量化工具包、快捷数据库和主题集锦四个部分,其中案例简述为景观绩效相关研究者集成了示范性的景观绩效实证研究数据库,该数据库收录了各国景观绩效代表性实证研究,并详细提供了各案例的评估指标、指标计算方式、数据来源等,可通过对比揭示景观绩效评估体系的共性及差异,以此推动景观绩效评价体系构建的研究进程。

得益于 CSI 计划的开展,景观绩效评估已形成了较为系统的理论体系、应用方法,但依旧面临着诸多挑战,比如景观缺乏预期设定的绩效目标,无法将其与景观绩效度量结果进行前后对比分析,较难探究景观规划及管理方案与功能效益变化的因果关系。因此,未来景观绩效评估研究应当以高绩效景观为导向,明确景观绩效的考核对象、绩效目标,探究景观规划及管理方案与功能效益变化的因果关系,落实研究成果切实可行地为改善景观规划及管理方案服务,以提升景观的可持续性^[98-99]。

表8 景观绩效评估指标汇总

Table 8 Summary of landscape performance evaluation indicators

指标体系 Indicator system	项目层 Project level	准则层 Standardized layer	指标 Index
景观绩效评价 (LPS, 2018 版) Landscape performance assessment (LPS, 2018 Edition)	环境层面	土地	土地效率和保护, 土壤的创造、保存和恢复, 交通, 其他
		水	雨水管理, 节水, 防洪
		栖息地	地下水补给, 生境的创造、保存和恢复, 生境质量, 人口和物种多样性
		碳、能源和空气质量	能源使用, 温度和城市热岛, 碳固存和减少, 空气质量, 其他
	经济层面	—	绿色材料和回收材料, 减少废物, 其他
景观空间综合绩效评价 Landscape space performance evaluation ^[100]	社会层面	—	房地产价值, 运营和维护储蓄, 建筑成本储蓄, 创造就业, 游客支出和收入, 税收, 刺激经济发展
	环境生态绩效	要素的连续性	要素连通度, 设施完善度
		格局的整体性	破碎化程度, 网络化程度, 人居空间集约化程度
		过程的稳定性	资源与环境系统质量, 改善小气候效益, 防灾减灾效益
		感知的安全度	自然环境安全度, 居住环境安全度
经济生产绩效	要素的生产能力	食品作物产量, 原材料产量	
	格局的多样性	生物多样性指数, 生态空间多样性指数, 资源丰度	
	过程的可持续性	物质循环与固定效益, 污水及废物处理率, 就业人数增长率, GDP 同比增长率	
	感知的满意度	经济收入满意度, 居住环境满意度, 社会关系满意度	
人文文化绩效	要素的真实性	乡土材料使用率, 历史建筑完度度, 历史场景还原度, 传统风俗保留度	
	格局的可识别性	建筑聚落典型性, 传统农业协调度	
	过程的地方性	旅游与游憩效益, 教育与科研效益, 当地居民参与度	
	感知的认同度	美景认同度, 文化意象认同度	
自然风光景观绩效评价 Natural scenic landscape performance evaluation ^[101]	生态绩效	森林生态保护	森林覆盖率, 景观多样性指数, 景观破碎度指数
		生态服务价值	土壤保育价值, 固碳释氧价值, 水源涵养价值, 净化大气价值
	环境绩效	宜居环境建设	空气环境质量, 水环境质量, 空气负氧离子浓度
	经济绩效	特色景观营建	景观风貌原真度, 林相景观丰富度
		林业经济建设	林业产业生产总值, 旅游产业生产总值占比
社会绩效	林农增收致富	地区人均可支配收入, 特色产业新增岗位数量	
	产业多元发展	森林旅游产品丰富度, 森林旅游产品结构	
	文化保护传承	科普教育场所丰富度, 特色文化传承度, 古树名木保护度	
人文景观绩效评价 Human landscape performance evaluation ^[102]	公共服务提升	—	基础设施完善度, 地区交通通达度, 公众满意度
	文化绩效	—	街巷空间格局独特性, 古镇地域历史特征, 建筑遗产原真性, 传统民俗文化保存程度, 古镇历史价值, 古镇场所感
	社会绩效	—	旅游休闲价值, 科普、教育价值, 游客满意度, 人文景观参与性, 基础设施完善度
	环境绩效	—	绿地率, 水质量, 声质量, 环境承载量
	经济绩效	—	旅游相对收入率, 旅游接待规模, 创造就业率
美学绩效	—	观赏舒适度, 风景品质, 环境协调度	

LPS: 景观绩效系列研究计划 Landscape performance series

3 结论和展望

本文较为系统地探索景观功能评估中各维度的概念、研究方法, 为界定整体性景观功能评估的核心目标、

方法以及在不同尺度和维度下的实际操作框架提供理论支撑。结果表明:①感知维度虽在现代技术的支撑下能够获取真实、客观的个体感知数据,初步实现从主观判断向数据驱动的转变,但由于受设备、专业技术等制约,数据获取相对困难,且从方法论来看,质量评估、效果评估或偏好研究相较传统研究并未有太大的改进;②生态维度涉及范畴已基本建立各自的研究框架、研究方法,正尝试将景观生态学与生态系统服务统筹考虑应用至生态环境修复、生物多样性保护、构建生态安全格局等领域,但关于驱动生态系统演变的内在因素、各类生态系统服务之间的权衡与协同关系的研究还不够充分,还需建立更精准的评估框架才能为挖掘生态系统演变的时空动态特征、关键驱动因子提供技术支撑;③特性维度是打破“同质化”现象的有效评估维度,领域核心问题为“在考虑人文、历史、审美、生态价值的基础上实现景观分类”,现有研究多参照 LCA、HLC 体系应用至市域、地方尺度;④绩效维度注重景观的可持续发展,正处于研究初期尚欠缺对景观规划管理策略与效益结果之间关联性的探讨。综上所述,景观功能评估呈现出多维度交叉、结合多种理论方法全面、客观地量化景观价值的发展趋势,但整体上缺少多维度交叉后的景观功能评估研究框架,且由于缺乏涵盖整个地区一致性的文化历史、社会经济等统计数据,欠缺对大尺度、区域性的评估案例。

对比国外研究进展,中国景观功能评估相关研究以景观生态功能、生态系统服务、视觉感知评估为主,对于景观资源属性、价值认知、景观绩效研究方面有待加强,尤其是中国的景观更多的融入了人文要素,在整体性景观功能评估的方案制定、措施建议仍存在较大缺口。鉴于此,本文提出构建“特征-功能-绩效”的综合性评估框架(图 1),以填补中国在整体性评估方案制定方面的不足,其主要包含以下四个层面:

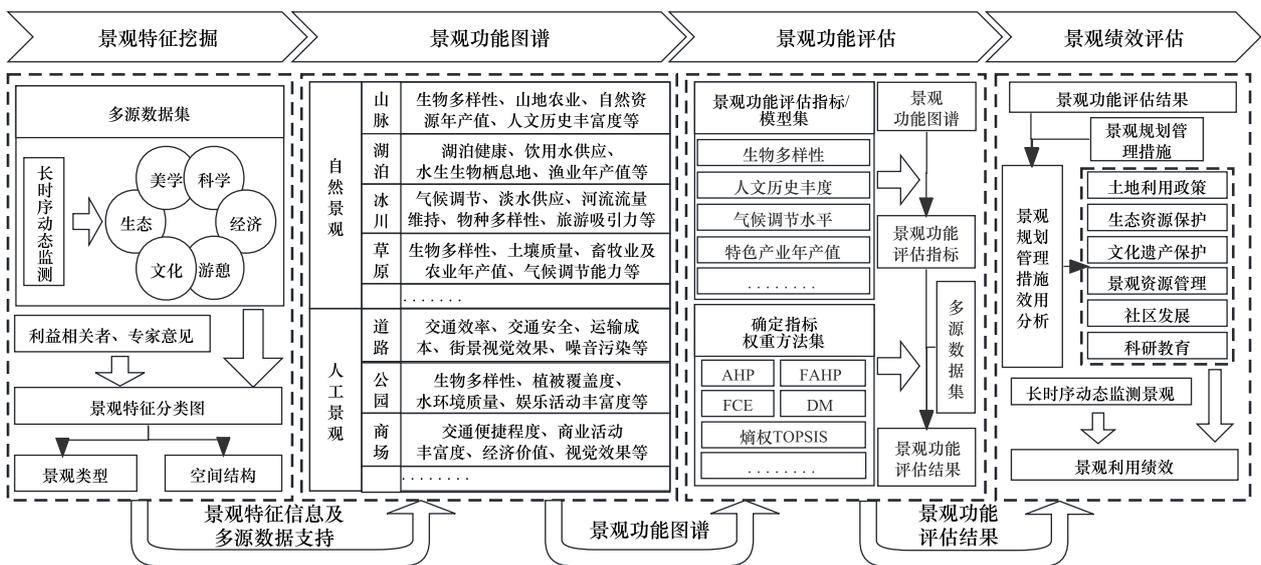


图 1 “特征-功能-绩效”评估框架
Fig.1 Assessment framework of “features-function-performance”

(1) 景观特征挖掘层面,以建设高绩效景观、提升景观可持续性为导向,从景观生态资源分类与认知的视角,结合利益相关者及专家对景观规划及管理方面的建议及经验,考虑景观在生态、美学、科学、经济、游憩、文化等多方面内涵,明确景观的价值所在及预期效益,并围绕其建立涵盖自然环境、社会经济、人文感知等方面的多源数据集。再在此基础上运用不同尺度的景观分析方法提取区域景观特征(如山脉、湖泊、草原、冰川、人工地物等),揭示区域景观生态要素类型以及空间分布格局等特征。

(2) 景观功能图谱制作层面,景观功能图谱旨在直观展示每类景观特征的功能价值所在,应在深度理解景观内涵、功能价值所在的基础上,以发挥景观生态系统服务为导向,建立由要素解析、结构解构、景观综合为一体的系统识别方法,研判各景观特征提供的主要功能与价值,搭建切实适用于区域景观发展的景观功能图谱,为开展景观功能评估明确考核内容。

(3) 景观功能评价层面, 强化景观功能在生态、社会、经济、美学等多个方面的评估模型方法建设, 集成精确至某一指标的评估方法库, 自下向上地揭示不同尺度、不同构成的景观功能评估技术方法。以此围绕不同生态要素构成开展景观功能的精准量化及功能叠加的效用分析, 明确不同生态要素构成对各种景观功能的贡献程度, 揭示景观生态功能类别、当量的共性和差异。

(4) 景观绩效评估层面, 应当以提高景观实践效用为目的, 开展基于景观功能度量结果的景观规划、管理措施的效用分析, 可将景观功能度量结果与景观规划初期预设的效益进行前后对比, 结合景观规划方案、管理面临的实际问题及应对方案等, 揭示影响景观功能效益的作用机制及深层次的因果关系, 归纳出具有实践操作性、实用性的知识, 帮助景观规划者、管理者和决策者做出最切实的判断、评估和决策, 为实现高性能、可持续性景观提供经验证明。同时, 景观功能评估应伴随景观的生命周期, 基于景观规划初期设定的目标、预期效益开展长时序、动态化的景观监测、评估工作, 以此建立链接效益度量结果与景观规划与管理需求的动态更新知识库, 落实景观绩效研究成果切实可行得为建设高性能、可持续景观服务。

参考文献 (References):

- [1] 曹祺文, 张曦文, 马洪坤, 吴健生. 景观生态风险研究进展及基于生态系统服务的评价框架: ESRISK. 地理学报, 2018, 73(5): 843-855.
- [2] Hölting L, Beckmann M, Volk M, Cord A F. Multifunctionality assessments—More than assessing multiple ecosystem functions and services? A quantitative literature review. *Ecological Indicators*, 2019, 103: 226-235.
- [3] Bagstad K J, Semmens D J, Waage S, Winthrop R. A comparative assessment of decision-support tools for ecosystem services quantification and valuation. *Ecosystem Services*, 2013, 5: 27-39.
- [4] Kang N, Liu C. Towards landscape visual quality evaluation: Methodologies, technologies, and recommendations. *Ecological Indicators*, 2022, 142: 109174.
- [5] Tan X H, Li X H, Peng Y L. Aesthetic evaluation of plant landscape based on principal factor analysis and sbe in wetland park: a case study of jinlong lake wetland park (china). *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 2021, 29(1): 40-47.
- [6] Tribot A S, Deter J, Mouquet N. Integrating the aesthetic value of landscapes and biological diversity. *Proceedings Biological Sciences*, 2018, 285(1886): 20180971.
- [7] Schirpke U, Timmermann F, Tappeiner U, Tasser E. Cultural ecosystem services of mountain regions: modelling the aesthetic value. *Ecological Indicators*, 2016, Oct(69): 78-90.
- [8] 段汉明, 张刚. 自然景观的综合评价与保护、开发和利用——以翠华山山崩景观国家地质公园为例. 中国地质学会旅游地质与地质公园研究分会第 21 届年会暨陕西翠华山国家地质公园旅游发展研讨会论文集. 西安: 西北大学城市与环境学院, 2006: 14.
- [9] Dorner B, Lertzman K, Fall J. Landscape pattern in topographically complex landscapes: issues and techniques for analysis. *Landscape Ecology*, 2002, 17(8): 729-743.
- [10] Tang J M, Di L P, Rahman M S, Yu Z Q. Spatial-temporal landscape pattern change under rapid urbanization. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2019, 13(2): 024503.
- [11] Zhang M, Wang X J, Liu Y. Modeling and analysis of ecological urban landscape pattern evolution based on multisource remote sensing data. *Complexity*, 2021, 2021: 8158158.
- [12] Li P X, Liu C G, Sun W. Quantifying changes of landscape connectivity based on ecological process simulation in a rapidly urbanized city: Nanjing, China. *Environmental Earth Sciences*, 2021, 80(18): 644.
- [13] Chen L D, Sun R H, Lu Y H. A conceptual model for a process-oriented landscape pattern analysis. *Science China Earth Sciences*, 2019, 62(12): 2050-2057.
- [14] Jaishanker R, Vishnu M, Sajeev C R, Sooraj N P, Athira K, Sarojkumar V, Lijimol D, Subin J M, Anjaly U, Dadhwal V K. Biodiversity clock and conservation triangle: Integrative platform for biodiversity monitoring, evaluation, and preemptive conservation intervention. *Environmental and Sustainability Indicators*, 2021, 11: 100137.
- [15] Zheng H, Wang L J, Wu T. Coordinating ecosystem service trade-offs to achieve win-win outcomes: a review of the approaches. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, 82: 103-112.
- [16] Liu H, Zheng L, Wu J, Liao Y H. Past and future ecosystem service trade-offs in Poyang Lake Basin under different land use policy scenarios. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13(2): 46.
- [17] Jia G L, Dong Y L, Zhang S Y, He X Y, Zheng H F, Guo Y J, Shen G Q, Chen W. Spatiotemporal changes of ecosystem service trade-offs under

- the influence of forest conservation project in Northeast China. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2022, 10: 978145.
- [18] 裴亦书. 基于 GIS 技术的景观视觉质量评价研究——以四川省九寨沟为例[D]. 上海: 上海师范大学, 2013.
- [19] 谷睿. 广西喀斯特天坑风景资源评价及开发研究——以全州石脚盆天坑群为例[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2021.
- [20] 俞孔坚. 景观: 文化, 生态与感知. 北京: 科学出版社, 1998.
- [21] 宋欣. 跨界环境影响评价制度研究. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2011.
- [22] 徐琳琳, 虞虎. 国外国家公园景观评价与保护利用研究进展及对中国的启示. *资源科学*, 2022, 44 (7): 1520-1532.
- [23] 汪伦, 张斌. 景观特征评估——LCA 体系与 HLC 体系比较研究与启示. *风景园林*, 2018, 25 (5): 87-92.
- [24] Shahzad K, Kollmann R, Maier S, Narodoslowsky M. SPionWEB-ecological process evaluation with the sustainable process index (SPI). *Computer Aided Chemical Engineering*, 2014, 33: 487-492.
- [25] Gan Y H, Luo T, Breitung W, Kang J, Zhang T H. Multi-sensory landscape assessment: the contribution of acoustic perception to landscape evaluation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2014, 136(6): 3200.
- [26] Chesnokova O, Purves R S. From image descriptions to perceived sounds and sources in landscape: Analyzing aural experience through text. *Applied Geography*, 2018, 93: 103-111.
- [27] Shao Y H, Hao Y Y, Yin Y T, Meng Y, Xue Z Y. Improving soundscape comfort in urban green spaces based on aural-visual interaction attributes of landscape experience. *Forests*, 2022, 13(8): 1262.
- [28] Zhao J W, Huang Y D, Wu H, Lin B Y. Olfactory effect on landscape preference. *Environmental Engineering and Management Journal*, 2018, 17 (6): 1483-1489.
- [29] Finnerty P B, McArthur C, Banks P, Price C, Shrader A M. The olfactory landscape concept: a key source of past, present, and future information driving animal movement and decision-making. *BioScience*, 2022, 72(8): 745-752.
- [30] Schroeder H W, Anderson L M. Perception of personal safety in urban recreation sites. *Journal of Leisure Research*, 1984, 16(2): 178-194.
- [31] Ozcelik E, Karakus T, Kursun E, Cagiltay K. An eye-tracking study of how color coding affects multimedia learning. *Computers & Education*, 2009, 53(2): 445-453.
- [32] 李羽佳. ASG 综合法景观视觉质量评价研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
- [33] 谭人华, 王艳慧, 关鸿亮. 基于 GIS 与模糊层次分析法的景观视觉资源综合评价. *地球信息科学学报*, 2019, 21 (5): 663-674.
- [34] 齐津达, 傅伟聪, 李炜, 林双毅, 董建文. 基于 GIS 与 SBE 法的旗山国家森林公园景观视觉评价. *西北林学院学报*, 2015, 30 (2): 245-250.
- [35] 李欣, 李渊, 任亚鹏, 拉斯克·安妮. 融合主观评价与眼动分析的城市空间视觉质量研究. *建筑学报*, 2020, (S2): 190-196.
- [36] Amir S, Gidalizon E. Expert-based method for the evaluation of visual absorption capacity of the landscape. *Journal of Environmental Management*, 1990, 30(3): 251-263.
- [37] 俞孔坚. 景观保护规划的景观敏感度依据及案例研究. *城市规划*, 1991, (2): 46-49, 64.
- [38] 肖笃宁. 景观生态学理论、方法及应用. 北京: 中国林业出版社, 1991.
- [39] Suh J H, Yang H S. A study on framing techniques of landscape assessment using the analytic hierarchy process—the assessment on the landscape control points. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture*, 2004, 32 (4): 94-104.
- [40] 李晓斌, 潘一楠, 史承勇, 郭言. 基于 AHP-FCE 模型评价的历史村落景观保护与建设研究. *西北林学院学报*, 2022, 37 (4): 257-265.
- [41] 王碧云, 修新田, 兰思仁. 基于 AHP-模糊综合评价法的森林公园文化价值评价. *林业经济*, 2017, 39 (11): 35-39.
- [42] 兰继斌, 徐扬, 霍良安, 刘家忠. 模糊层次分析法权重研究. *系统工程理论与实践*, 2006, 26(9): 107-112.
- [43] 吴怡之, 丁永生, 许红安. AHP-FCE Based Physical Exercise Risk Evaluation Model. *东华大学学报(英文版)*, 2007, 24 (5): 667-671.
- [44] 冷仙, 曾源, 周键, 杨飞龄, 武瑞东. 基于熵权 TOPSIS 法的西南自然保护区景观保护成效评价. *生态学报*, 2023, 43 (3): 1040-1053.
- [45] 周震宇, 陈瑜, 李梁平, 黄平芳. 基于 SWOT-PEST 和 AHP 法的国有林场旅游景观评价研究. *中南林业科技大学学报(社会科学版)*, 2021, 15 (5): 105-111.
- [46] Daniel T C, Anderson L M, Schroeder H W, Wheeler L III. Mapping the scenic beauty of forest landscapes. *Leisure Sciences*, 1977, 1(1): 35-52.
- [47] Herzog T R. A cognitive analysis of preference for field-and-forest environments. *Landscape Research*, 1984, 9(1): 10-16.
- [48] 雷翻宇. 基于 SD 法的园林植物景观评价研究——以广西财经学院相思湖校区为例. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2020, 51 (5): 858-862.
- [49] 俞孔坚. 自然风景质量评价研究——BIB-LCJ 审美评判测量法. *北京林业大学学报*, 1988, 10 (2): 1-11.
- [50] 袁晨曦. 基于 BIB-LCJ 法的南丰县居住小区景观评价研究与设计[D]. 南昌: 江西财经大学, 2022.
- [51] 刘尧, 张玉钧, 张功, 陈瑾研. 基于 AHP 和 CVM 法的生态系统美学价值研究——以青海北山国家森林公园为例. *林业经济*, 2017, 39 (7): 95-102.

- [52] 陈梓茹, 傅伟聪, 朱志鹏, 董建文. 全景呈现技术在景观视觉评价中应用的优劣势分析. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, 53(4): 584-593.
- [53] Oteros-Rozas E, Martín-López B, Fagerholm N, Bieling C, Plieninger T. Using social media photos to explore the relation between cultural ecosystem services and landscape features across five European sites. *Ecological Indicators*, 2018, 94: 74-86.
- [54] Chang C Y. Psychophysiological responses to different landscape settings and a comparison of cultural differences. *Acta Horticulturae*, 2004, 639: 57-65.
- [55] Roe J J, Aspinall P A, Mavros P, Coyne R. Engaging the brain: the impact of natural versus urban scenes using novel EEG methods in an experimental setting. *Environmental Sciences*, 2013, 1: 93-104.
- [56] 赵莹, 林家惠, 刘逸. 基于眼动实验的旅游地景观视觉评价研究——以珠海市唐家古镇为例. 人文地理, 2020, 35(5): 130-140.
- [57] Zhao J, Li J, Zuo L, Liu G, Su X. Interaction dynamics of multiple ecosystem services and abrupt changes of landscape patterns linked with watershed ecosystem regime shifts. *Ecological Indicators*, 2023, 150: 110263.
- [58] Zhang S H, Zhong Q L, Cheng D L, Xu C B, Chang Y N, Lin Y Y, Li B Y. Coupling coordination analysis and prediction of landscape ecological risks and ecosystem services in the Min River Basin. *Land*, 2022, 11(2): 222.
- [59] Ran P L, Hu S G, Frazier A E, Qu S J, Yu D, Tong L Y. Exploring changes in landscape ecological risk in the Yangtze River Economic Belt from a spatiotemporal perspective. *Ecological Indicators*, 2022, 137: 108744.
- [60] Wang X, Sun Y, Liu Q, Zhang L. Construction and optimization of ecological network based on landscape ecological risk assessment: A case study in Jinan. *Land*, 2023, 12(4): 743.
- [61] Chen X D, Yang Z P, Han F. Tourist landscape vulnerability assessment in mountainous world natural heritage sites: the case of Karajun-Kurdening, Xinjiang, China. *Ecological Indicators*, 2023, 148: 110038.
- [62] 李魁明, 王晓燕, 姚罗兰. 京津冀地区生态系统健康时空演变及其影响因素. 环境科学, 2024, 45(1): 218-227.
- [63] 尉芳, 刘京, 夏利恒, 龙小翠, 徐仲炜. 基于 LUCC 的陕西渭北旱塬区景观生态风险评价. 中国环境科学, 2022, 42(4): 1963-1974.
- [64] 张秦英, 雷泽鑫, 曹磊. 铁路建设对黄土高原景观生态格局的干扰研究. 铁道工程学报, 2021, 38(11): 97-103.
- [65] 滑永春, 陈家豪, 孙小添, 裴志永. 内蒙古段黄河流域景观生态风险分析. 自然资源遥感, 2023, 35(2): 220-229.
- [66] 黄木易, 仲勇, 冯少茹, 张嘉晖. 1970s 以来巢湖流域水环境保护区景观生态脆弱性时空特征及驱动解析. 湖泊科学, 2020, 32(4): 977-988.
- [67] 杜文涛, 李新萍, 宋佳伟, 孟成真, 王智泉. 黄河流域景观生态风险分析及预测. 水土保持通报, 2022, 42(5): 105-113.
- [68] 周俊哲, 陈勇, 周皓, 曾向阳, 徐阳, 刘艳中, 冯博, 王巧稚. 矿业城市景观生态安全研究——一种双层复杂网络分析方法. 中国环境科学, 2021, 41(12): 5817-5826.
- [69] 王玲, 汪森. 成渝城市群景观生态风险演变分析. 长江流域资源与环境, 2023, 32(3): 626-637.
- [70] 王锦宇, 关颖慧, 吴秀芹. 喀斯特断陷盆地景观生态风险演变及其地形分异. 生态学报, 2023, 43(19): 8167-8180.
- [71] 翟培秀, 李飞雪, 邱小倩, 申婷. 长三角地区景观生态风险时空演变评估. 水土保持研究, 2023, 30(4): 245-255.
- [72] 张蒙, 殷培红, 杨生光, 和夏冰. 生态系统稳定性的生态学理论与评估方法. 环境生态学, 2023, 5(2): 1-4, 31.
- [73] 王欠鑫, 曹巍, 黄麟. 青藏高原生态系统功能稳定性演化特征及分区. 地理学报, 2023, 78(5): 1104-1118.
- [74] 宁立新, 梁晓瑶, 程昌秀. 京津冀地区生态系统健康评估及时空变化. 生态科学, 2021, 40(6): 1-12.
- [75] 李佳豪, 罗洁, 徐勇, 张楠, 窦世卿, 靖娟利. 基于 VOR 模型的广西 2014 与 2019 年生态健康时空变化特征研究. 无线电工程, 2021, 51(10): 1134-1141.
- [76] 杨帅琦, 何文, 王金叶, 李何英, 姚月锋. 基于 MCR 模型的漓江流域生态安全格局构建. 中国环境科学, 2023, 43(4): 1824-1833.
- [77] 陈德权, 兰泽英, 李玮麒. 基于最小累积阻力模型的广东省陆域生态安全格局构建. 生态与农村环境学报, 2019, 35(7): 826-835.
- [78] Jin L J, Xu Q L, Yi J H, Zhong X C. Integrating CVOR-GWLR-Circuit model into construction of ecological security pattern in Yunnan Province, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(54): 81520-81545.
- [79] Zhao X Q, Yue Q F, Pei J C, Pu J W, Huang P, Wang Q. Ecological security pattern construction in Karst area based on ant algorithm. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(13): 6863.
- [80] 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: 253-260.
- [81] 李丽, 王心源, 骆磊, 冀欣阳, 赵燕, 赵颜创, Nabil Bachagha. 生态系统服务价值评估方法综述. 生态学杂志, 2018, 37(4): 1233-1245.
- [82] 史雪威, 陈绪慧, 蔡明勇, 张新胜, 申振, 邵文飞, 申文明, 李静, 肖桐. 宁夏全区及生态保护红线生态系统服务价值变化评估. 地球信息科学学报, 2023, 25(5): 999-1011.
- [83] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254.

- [84] 林彤, 杨木壮, 吴大放, 刘锋, 杨金海, 王颖佳. 基于 InVEST-PLUS 模型的碳储量空间关联性及其预测——以广东省为例. *中国环境科学*, 2022, 42 (10): 4827-4839.
- [85] 张凯琪, 陈建军, 侯建坤, 周国清, 尤号田, 韩小文. 耦合 InVEST 与 GeoSOS-FLUS 模型的桂林市碳储量可持续发展研究. *中国环境科学*, 2022, 42(6): 2799-2809.
- [86] Villa F V, Bagstad K, Johson G, Voigt B. Scientific instruments for climate change adaptation: estimating and optimizing the efficiency of ecosystem service provision. *Economía Agraria y Recursos Naturales*, 2011, 11(1): 83-98.
- [87] Sherrouse B C, Clement J M, Semmens D J. A GIS application for assessing, mapping, and quantifying the social values of ecosystem services. *Applied Geography*, 2011, 31(2): 748-760.
- [88] Fagerholm N, Käyhkö N, Ndumbaro F, Khamis M. Community stakeholders' knowledge in landscape assessments-Mapping indicators for landscape services. *Ecological Indicators*, 2012, 18: 421-433.
- [89] 朱亚茹, 高峻, 邴振华, 张中浩, 付晶. 基于参与式制图方法的景观服务评估与空间结构研究. *地球信息科学学报*, 2020, 22 (5): 1106-1119.
- [90] Palacio Buendía A V, Pérez-Albert Y, Serrano Giné D. Mapping landscape perception: an assessment with public participation geographic information systems and spatial analysis techniques. *Land*, 2021, 10(6): 632.
- [91] 鲍梓婷, 周剑云. 香港景观特征评估(LCA)的实践与经验. *中国园林*, 2015, 31 (09): 100-104.
- [92] Zhuang Q D, Hussein M K, Ariffin N F M, Yunus M Y M. Landscape character: a knowledge mapping analysis using CiteSpace. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2022, 19(10): 10477-10492.
- [93] 梁发超, 刘黎明. 景观分类的研究进展与发展趋势. *应用生态学报*, 2011, 22 (6): 1632-1638.
- [94] 陶彦利, 奚雪松, 祝明建. 欧洲景观特征评估(LCA)方法及其对中国的启示. *中国园林*, 2018, 34 (8): 107-112.
- [95] Philip H L. *Tomorrow by Design: A Regional Design Process for Sustainability* (Wiley Series in Sustainable Design). New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [96] 王云才, 陈照方, 成玉宁. 新时期乡村景观特征与景观性格的表征体系构建. *风景园林*, 2021, 28(7): 107-113.
- [97] 戴代新, 李明翰. 美国景观绩效评价研究进展. *风景园林*, 2015(1): 25-31.
- [98] 杨阳, 林广思. 面向循证设计的景观绩效评估研究: 发展、内涵与重点. *景观设计学*, 2020, 8(2): 74-83.
- [99] 福斯特·恩杜比斯, 希瑟·惠伊洛, 芭芭拉·多伊奇, 段诗乐, 张雪葳. 景观绩效: 过去、现状及未来. *风景园林*, 2015(1): 40-51.
- [100] 王云才, 申佳可, 象伟宁. 基于生态系统服务的景观空间绩效评价体系. *风景园林*, 2017, 24(1): 35-44.
- [101] 陶一舟, 李朝晖, 严少君. 安吉天荒坪森林特色小镇景观绩效评价. *浙江农林大学学报*, 2023, 40(4): 883-891.
- [102] 曾丽, 唐莉英. 基于层次-熵权法的川滇黔交汇地区盐文化古镇景观绩效评价研究. *设计艺术研究*, 2021, 11 (4): 143-147, 151.