

DOI: 10.5846/stxb202005201292

刘晓娜, 刘春兰, 张丛林, 魏钰, 黄宝荣. 青藏高原国家公园群生态系统完整性与原真性评估框架. 生态学报, 2021, 41(3): 833-846.

Liu X N, Liu C L, Zhang C L, Wei Y, Huang B R. Ecosystem integrity and authenticity assessment framework in the Qinghai-Tibet Plateau National Park Cluster. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(3): 833-846.

青藏高原国家公园群生态系统完整性与原真性评估框架

刘晓娜¹, 刘春兰¹, 张丛林², 魏钰², 黄宝荣^{2,*}

1 北京市环境保护科学研究院, 国家城市环境污染控制工程技术研究中心, 北京 100037

2 中国科学院科技战略咨询研究院, 北京 100190

摘要: 青藏高原具有全球独特的自然生态和人文生态系统, 生态系统完整性与原真性极高, 建设国家公园群是青藏高原整体性保护重要生态系统完整性与原真性的重要手段。遵循“内涵界定-框架梳理-框架构建”的研究思路, 科学界定国家公园生态系统完整性和原真性内涵并建立概念模型, 通过梳理国家公园生态系统完整性评估的主要框架, 在对区域自然生态和社会人文系统科学考察的基础上, 分析区域生态系统完整性与原真性保护与监管需求, 从生境质量、生物群落、生态系统服务、自然条件与灾害、人类活动、人文景观 6 个方面构建青藏高原国家公园群潜在建设区生态系统完整性与原真性评估框架, 以期对未来国家公园群建设与管理提供基础支撑。针对目前国家公园管理存在的主要问题, 提出未来评估应用需充分体现国家公园复合生态系统和“群”的特征, 并建立生态系统完整性与原真性监测体系, 从而更全面的服务于青藏高原国家公园群生态系统完整性与原真性保护。

关键词: 生态系统完整性; 生态系统原真性; 概念模型; 评估框架; 国家公园群; 潜在建设区; 青藏高原

Ecosystem integrity and authenticity assessment framework in the Qinghai-Tibet Plateau National Park Cluster

LIU Xiaona¹, LIU Chunlan¹, ZHANG Conglin², WEI Yu², HUANG Baorong^{2,*}

1 Beijing Municipal Research Institute of Environment Protection, National Urban Environmental Pollution Control Engineering Research Center, Beijing 100037, China

2 Institute of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: The Qinghai-Tibet Plateau has a unique natural and human ecosystem in the world and extremely high value of the ecosystem integrity and authenticity. The construction of the Qinghai-Tibet Plateau national park cluster is an important approach to protect the integrity and authenticity of important ecosystems. This study followed the research concept of “connotation definition-framework combing-framework construction”. Based on reviewing relevant research progress, the connotation of national park ecosystem integrity and authenticity was scientifically defined. The integrity and authenticity of the national park ecosystem was the integrity of ecosystem composition and the ecological process, and the authenticity of the natural and cultural heritage, which presented a state of nature and wilderness without human disturbance. The conceptual model of national park ecosystem integrity and authenticity was the integration of physical integrity, chemical integrity, biological integrity and humanistic authenticity. The current main assessment framework of national park ecosystem integrity was listed and compared, including the Index of Biotic Integrity, the Three Level Approach, the Ecosystem

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA20020303); 国家自然科学基金项目(41901260); 北京市自然科学基金项目(5204033)

收稿日期: 2020-05-20; **修订日期:** 2021-01-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huangbaorong@casisd.cn

Integrity Assessment Framework, the Essential Ecosystem Characteristics Assessment Framework, and the Parks Canada's Framework for Assessing Ecological Integrity. The framework for assessing the ecosystem integrity and authenticity of the proposed area of the Qinghai-Tibet Plateau national park cluster was constructed on the basis of scientific investigation and analysis of the regional natural and social ecosystems and summarizing the existing ecosystem integrity assessment frameworks. Research approach for constructing assessment framework was drawn from the perspective of reflecting the diversity of ecosystem types and species resources, the particularity of natural geographical features, the fragility of the ecological environment, the importance of ecosystem services, the representativeness of human activities, and the richness of human landscapes. Habitat quality, biological communities, ecosystem services, natural conditions and disasters, human activities, humanity landscape were selected and included into the assessment framework, with the purpose of providing a basis for the future national park ecosystem integrity and authenticity protection. In view of the main problems existing in the management of national park, it is proposed that the future assessment framework should fully reflect the characteristics of the composite ecosystem and cluster feature of the national parks. Main research issues of future concern were to combine evaluation indicators and determine weights according to different types of national parks, to integrate quantitative and qualitative indicators, to meet the requirements of evaluation accuracy without excessively relying field surveys, to show the human landscape with quantitative spatial expression, and to obtain evaluation results according to different management needs. A monitoring system for the integrity and authenticity of the ecosystem should be established for comprehensively serving the ecosystem integrity and authenticity protection of the Qinghai-Tibet Plateau National Park Cluster.

Key Words: ecosystem integrity; ecosystem authenticity; conceptual model; assessment framework; National Park Cluster; the proposed area; the Qinghai-Tibet Plateau

青藏高原是一个相对完整、极其独特的生态系统,国家代表性突出,全球生态安全功能显著,在全人类社会发展和全球自然环境变化历程中,保持着自然和人文生态系统的相对原真性^[1]。在气候变化和人类活动影响下,青藏高原生态系统的结构和功能以及重要物种的种群数量和结构均发生了深刻的变化^[2],特别是近年来高强度、不合理的生产生活活动过程给区域自然-人文生态系统完整性和原真性造成较大冲击^[3-6]。国家公园承载了包括自然生态系统及其依附的珍稀物种、栖息地和特殊景观的保护价值^[7],主要目标是维持生态系统的完整性和原始状态,在此前提下提供科研环境教育和公众游憩服务^[8-9]。在第二次青藏高原科学考察研究启动之初,国家公园群的概念被提出,并在建构国家公园遴选指标体系并初步评估的基础上,确定青藏高原国家公园群初步方案。青藏高原国家公园群是依托青藏高原独特的自然和人文景观,结合高原边缘地区一系列国家公园所组成的全球集中度最高、覆盖地域最广、品质上乘、特色鲜明的公园群^[1](图1),具有重要、脆弱而又独特的自然和人文生态系统特征,以及地域辽阔、高寒缺氧的自然地理环境。建立国家公园群,有助于优化青藏高原生态安全屏障体系,协调生态脆弱区域的生态、生产和生活空间结构,减弱人类活动对区域生态系统完整性和原真性破坏,支撑青藏高原绿色高质量发展^[1, 10]。

国家公园的概念和实践均起源于美国,不同国家对国家公园的内涵界定不尽相同,但出发点基本是保护景观和发展生态旅游。世界自然联盟将国家公园定义为大面积的自然或接近自然的区域,用以保护大尺度生态过程以及这一区域的物种和生态系统特征,同时提供与其环境和文化相融的精神的、科学的、教育的、休闲的机会。我国特色的国家公园建设主要目的是保护重要自然生态系统的完整性与原真性,同时兼具科研、教育、游憩等综合功能。生态系统完整性与原真性对于我国国家公园而言是一个新的目标要求,但国外学者及以美国和加拿大为代表的许多国家在这方面已经开展了较多探索^[11]。科学界定国家公园生态系统完整性与原真性的内涵并建立评价指标体系,是实现国家公园管理目标的基础与前提,对于维持生态系统平衡、生态系统健康和生物多样性,以及保护敏感自然生态系统免受人类干扰影响具有重要意义^[12]。目前,我国国家公园在生态完整性和原真性保护上依然存在自然生境的空间整合不够、主要保护物种的栖息地覆盖不够、内部生

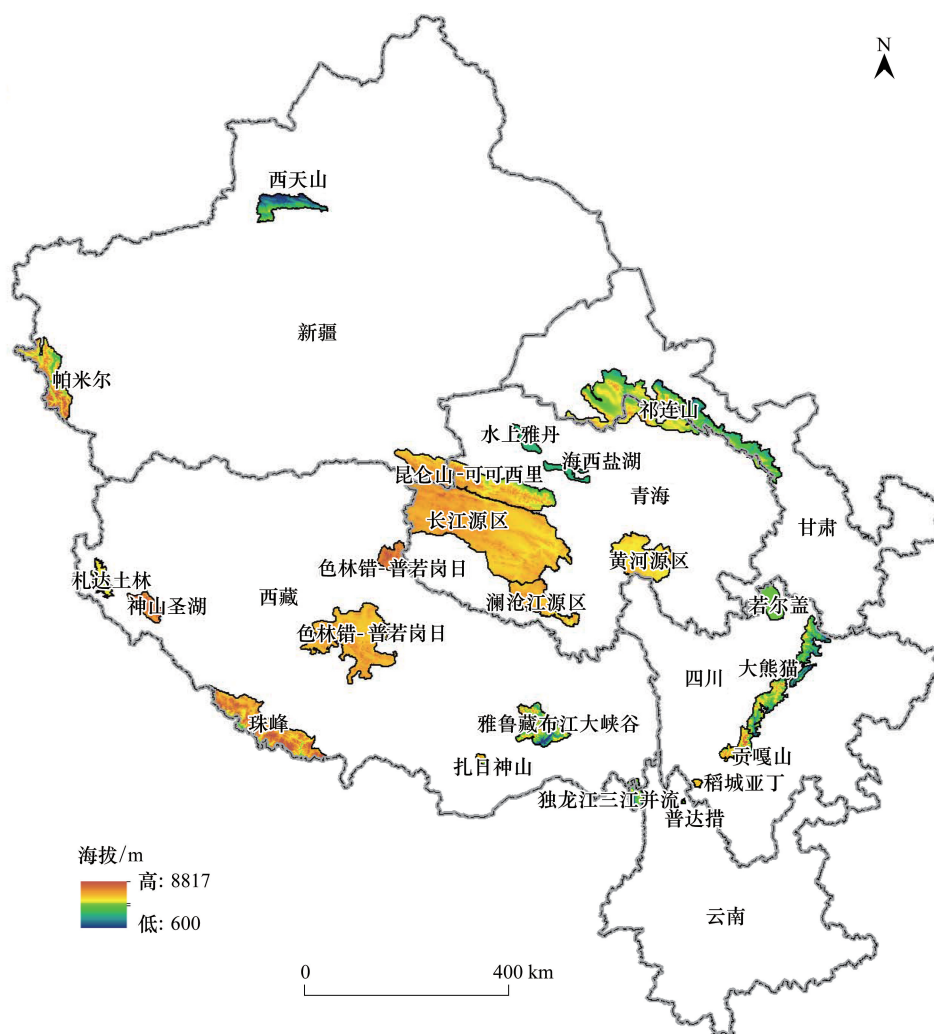


图1 青藏高原国家公园群潜在建设区空间分布

Fig.1 Spatial distribution of the proposed area of the Qinghai-Tibet Plateau national park cluster

境斑块之间连通性不佳、过度的人类活动干扰生态过程等问题^[13], 主要问题还在于没有严格把控国家公园的遴选标准。尽管世界各国尚无严格统一的国家公园遴选和准入标准, 而实际上世界自然联盟、美国、加拿大、俄罗斯等国家或组织设立国家公园的参考指标多为自然生态资源重要性、自然景观、文化遗产等方面的原则性条件, 并将生态系统完整性作为国家公园的重要遴选标准^[14]。青藏高原国家公园群生态系统完整性与原真性评估框架构建, 遵循“内涵界定-框架梳理-框架构建”的研究思路(图2), 通过综述国内外相关研究进展, 科学界定国家公园生态系统完整性和原真性内涵, 梳理目前国家公园生态完整性评估的主要框架, 包括基本生态系统特征评估框架(Essential Ecosystem Characteristics Assessment Framework, EECs)、生物完整性指数评估框架(Index of Biotic Integrity, IBI)、三层次评估框架(Three Level Approach, TLA)、生态系统完整性评估框架(Ecosystem Integrity Assessment Framework, EIAF)和加拿大国家公园生态系统完整性评估框架(Parks Canada's Framework for Assessing Ecological Integrity, PCFAEI)。在充分了解自然和人文生态资源禀赋的基础上, 重点考虑该区域生态系统类型和物种资源的多样性、自然地理特征的特殊性、生态环境的脆弱性、生态系统服务功能的重要性、人类活动的代表性、人文景观的丰富性等特征, 建立青藏高原国家公园群生态系统完整性和原真性评估框架, 以为未来国家公园生态系统完整性与原真性保护、管理与监测评估提供科学基础。

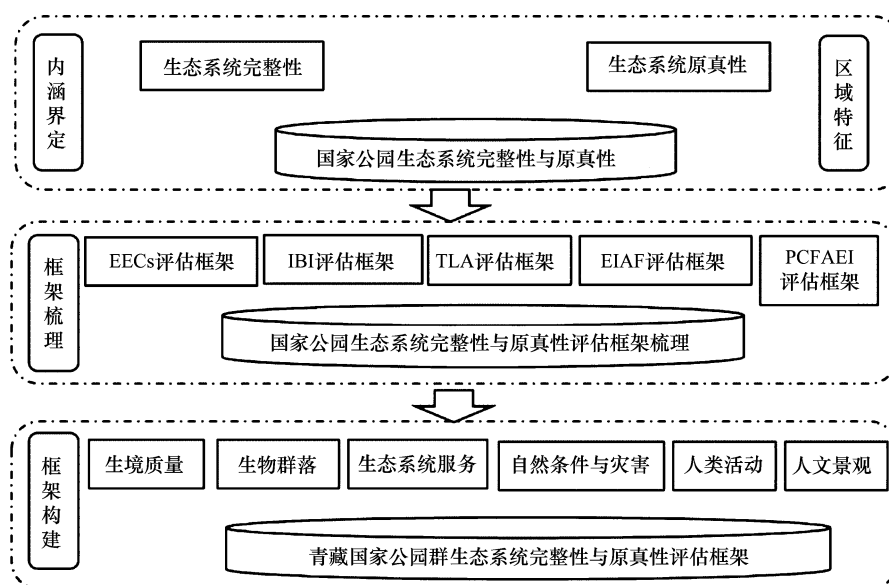


图2 技术路线图

Fig.2 Research framework map

1 科学内涵界定

生态系统完整性最早是指保护生物群落完整性、稳定性和美感等^[15],后来研究者普遍认为是支持和保持一个平衡的、综合的、适宜的生物系统的能力,而这个生物系统与所处自然生境一样,具有物种构成、多样性和功能组织的特点。现有研究主要从两个角度来理解生态系统完整性,一是从生态系统组成要素的完整性来阐述,认为它是生态系统在特定地理区域的最优化状态下,具备区域自然生境所应包含的全部本土生物多样性和生态学进程,其结构和功能没有受到人类活动胁迫的损害,本地物种处在能够持续繁衍的种群水平^[16-17];另一个是从生态系统的系统特性来阐述,认为生态系统健康、抵抗力及恢复力以及自组织能力是主要体现方面^[18],包含了生态系统健康、生物多样性、稳定性、可持续性、自然性和野生性以及美誉度,是物理的、化学的和生物的完整性的总和^[19-20]。加拿大国家公园生态完整性小组(Panel on the Ecological Integrity of Canada's National Parks)指出国家公园生态系统完整性是指种类组成、本地种以及生物群落的丰度、变化速率和支持过程在它所处的自然区域是典型的,它的结构和功能没有遭到人为引起的胁迫,生态系统的生物多样性和支持过程保持完好^[21]。生态系统完整性评价是资源管理和生态环境保护中的一个重要概念,常用来评价国家公园、自然保护区、森林公园、湿地、流域等敏感自然生态系统维持自然状况程度和受人类活动干扰程度的大小,目前主要有指示物种法、状态和压力指标法、结构-功能-组成指标法^[19-20]。其中,指示物种法主要集中在对水生生态系统的评价上,早期主要采用鱼类和底栖无脊椎动物作为指示指标,近年来主要采用植被、动物、鸟类和两栖动物开展对陆生生态系统和半陆生生态系统的评价。状态指标一般用来直接测量一些重要的生物特征或者最终状态,反映了对环境扰动的生物响应,需选不同类群的指标来评价;压力指标对于建立生物预期目标以及诊断遭受破坏的生物状况的可能原因具有重要意义,如土地利用、人口密度等。结构-功能-组成指标从生态系统的结构、功能和演替过程等角度来衡量生态系统的完整性,如种群/物种、生态系统/群落等^[19]。

关于生态系统的原真性内涵界定较为鲜见。原真性概念来源于文化遗产保护领域,原真性与完整性是遗产保护的两个核心原则^[22-24]。部分学者在恢复生态学中提出“自然原真性”与“历史原真性”两个概念^[25],前者是指生态系统健康状况,但不考虑生态系统是否精确地反映出它的历史结构和组成;后者是指生态恢复需要让恢复后的生态系统与一个历史参考状态相匹配^[26]。也有学者认为生态系统原真性应包括文化景观的原

真性,主要体现在景观保留情况、景观修复情况、历史文化、历史事件、所依托的自然山水、与环境的交融等方面^[27-29]。大多数学者认为生态系统的原真性是指保存原生态的自然区域,未经受过明显的人为干扰,拥有大面积高质量荒野,生态系统和生态过程处于高质量的自然状态^[30-33]。目前关于生态系统原真性评估的研究较少,已有的研究大多将原真性评估与荒野度评价结合起来,主要是采用荒野度指数法、荒野度和自然度指标法、人类足迹指数法等^[30-32]。荒野度由荒野未受人类控制和未受人类设施干扰进行评价,主要选择距离居民点和道路的遥远度、生物物理自然度以及外观自然度等指标进行权重叠加进行评价^[30,32],与人类足迹指数正好相反,人类足迹指数越小,表明自然生态越接近最自然原始状态,原真性程度越高^[31]。

综上所述,本研究认为国家公园生态系统完整性与原真性是指国家公园内生态系统的组成(物理组成、化学组成、生物组成)、生态学进程(生态系统功能)完整性与自然文化遗产的原真性,呈现出未受人类干扰的自然状态与原野状态,自然生态系统与人文景观高度契合的一种原真状态,即物理完整性、化学完整性、生物完整性与人文景观原真性的综合(图3)。生态系统的完整性与原真性是一个整体的概念,二者既各有特点又相互影响,其中完整性强调生态系统结构、过程和功能的不缺失性,原真性强调生态系统处于未受人类干扰的原始状态。

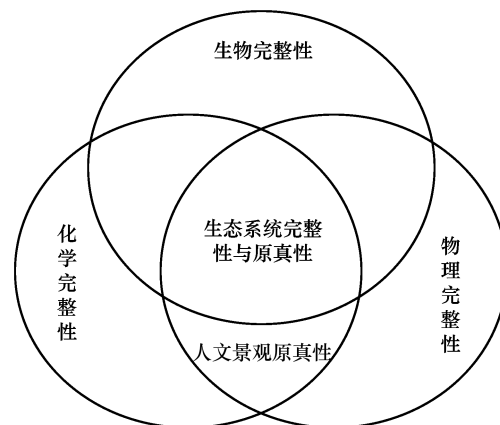


图3 国家公园生态系统完整性与原真性概念模型

Fig.3 Conceptual model of ecosystem integrity and authenticity of national park

2 生态系统完整性与原真性评估体系经验梳理

自1872年设立世界上第一个国家公园以来,经过近150年的研究和发展,国家公园已经成为一项具有世界性和全人类性的自然文化保护运动,并逐渐上升到国家象征物的地位。美国是国家公园理念的起源国,在1972年的“清洁水行动”中提出了生态系统完整性的理念并将其写入法律条文,加拿大是第一个设立专门管理国家公园政府机构的国家。以美国和加拿大为代表的北美国家公园在生态系统完整性保护方面的理念与我国提出的《建立国家公园体制总体方案》高度吻合,均将生态系统完整性作为国家公园管理目标,并已开展了大量国家公园生态系统完整性评价研究^[34-35]。由于生态系统原真性的内涵和评价在国家公园监测与评估中仍属较新领域,且部分原真性评价指标在完整性评价中已有所体现,因此目前的评价体系仍以生态系统完整性评价为主导。现有的国家公园生态系统完整性评估框架主要有IBI^[36]、TLA^[37-38]、EIAF^[39]、EECs^[40]和PCFAEI,评价指标主要从景观条件、生物条件、理化性质、生态过程、水文地貌、自然干扰6个方面选择^[11],涉及到物理、化学、生物等多个领域。

IBI评估框架最早是以鱼类作为指示生物构建的评估体系,广泛应用于河流、湖泊、沼泽、水库等湿地的生态健康评价^[41-42]。由生态系统健康直接影响到生态系统的结构、功能以及过程的完整性,IBI评价体系被运用于国家公园生态系统完整性的评价,并且成为北美国家公园生态系统完整性评估常用的方法之一^[36]。该框架基于高强度的野外调查和室内实验分析,虽然花费大、耗时长以及生物鉴定专业性要求较高,但评价结果准确可靠,主要用于大尺度水生生态系统完整性评价,要求采样范围覆盖整个流域,而国家公园边界与流域边界往往并不吻合,因此需对国家公园外流域范围进行采样以提高评价准确性^[11]。

TLA评估框架广泛应用于国家公园和野生动物保护区生态系统完整性评价,在评价独立且较为复杂的生态系统完整性时具有极大的灵活性,分为远程型、快速型和密集型3个评价级别,每个级别均中独立完成^[11, 43-44]。远程型评价属于成本比较低廉且适用于所有自然生态系统一种评价方式,通常用于实地考察难度较大的保护地中,主要通过地理信息系统和遥感数据来获取生态系统类型空间分布信息并评估大尺度区域

的生态系统完整性^[44-45],适用于青藏高原国家公园群潜在建设区生态系统完整性初评。快速型评价主要基于实地考察来获取定量或半定量评价指标,能够很好的识别区域中的脆弱生态系统和敏感区,是生态系统完整性主推的评价方法^[11]。密集型评价对指标精度要求极高,需要通过实地取样获取定量化指标,相较其他方法成本最高,但由于其准确性较高适用于监测生态系统动态变化情况^[46]。

EECs 评估框架的总体思路是体现时间和空间尺度特征、具有组织层级结构、可反映不同生态系统类型特征,它提供了评估管理决策有效性的重要思路和方法,服务于提升生态系统完整性评估与管理水平。EECs 评估框架自上而下由生态完整性的社会目标所驱动,自下而上由生态系统基本特征的详细科学测量所驱动^[40](表 1)。EECs 评估框架提供了反映生态系统完整性基本特征指标,相较其他评估框架,评估指标范围更全面,更强调于生态系统的生物、物理、化学组分的完整性。

EIAF 是以 TLA 评估框架为导向建立的指标体系,是目前最为成熟的国家公园生态系统完整性评价方法之一,广泛应用于国家公园和野生动植物保护区的生态系统完整性监测和评价。EIAF 评估框架吸取了 IBI 和 TLA 评估框架的优点,在指标选取方面不仅考虑了影响当前生态系统完整性的指标,还考虑了影响未来生态系统完整性的指标^[11],利用生态系统完整性指标计分矩阵优化了生态系统完整性评价计分统计法,相比其他评估框架更为灵活,可通过调整指标组合实现对不同生态系统的完整性评估。

表 1 基于生态系统基本特征的生态完整性评估框架 (EECs)
Table 1 Ecosystem integrity assessment system based on Essential Ecosystem Characteristics

一级指标 Primary indicators	二级指标 Secondary indicators
生境质量 Habitat quality	景观异质性;空间范围;景观和群落多样性;景观连通性和破碎化;生境结构多样性
生物群落 Biological communities	生物多样性;群落组成;营养结构;重要物种;外来物种;入侵或有毒物种;受威胁或濒危物种
生态过程 Ecological process	初级和次级生产力;生物地球化学循环;分解质;能量流;演替;空间动力学(扩散、迁移)
水质 Water quality	生物性质;物理性质;化学性质
水文系统 Hydrological system	水文周期;地表水和地下水;储水量;供水量;河道复杂性和其他结构特征;沉积物传输
扰动状态 Disturbed state	火灾频率和强度;洪水频率和强度;干旱频率和强度;极端事件频率和强度;疾病或病虫害爆发;人为干扰;其他外部因素(例如海平面上升、气候变化、迁徙物种栖息地丧失)
土壤质量 Soil quality	生物性质;物理性质;化学性质;沉降;土壤侵蚀;土壤和沉积物的累积

加拿大国家公园管理局(Parks Canada Agency)高度重视国家公园的生态系统完整性,2008 年全面实施“生态完整性监测”项目,在参考 EIAF 和 EECs 评估框架的基础上,建立了加拿大国家公园生态系统完整性评估框架(PCFAEI)(表 2),从保护生物多样性(说明物种生存能力)、保护生态系统过程(评估生态系统的功能)、适应并减轻压力和威胁(监测并减少负面影响)3 个部分来评价生态系统完整性^[16]。考虑到国家公园地域广阔且往往位于偏远地区,加拿大国家公园管理局建立了生态系统完整性遥感监测体系,包括净初级生产力、生态系统的演替与退化、本地物种的空间分布以及相邻更大的公园生态系统的状况^[47-48]。

加拿大拥有森林、草原、冻原、沼泽等多种陆地生态系统类型,在国家公园报告中指出不同生态系统生态完整性需要构建不同的评估指标^[49](表 3),根据评估结果将国家公园生态完整性划分为好、中、差 3 个等级和变好、不变、变差 3 种变化趋势,掌握基本情况并分析变化驱动因素为国家公园的动态管理与措施制定提供重要参考^[50]。

3 生态系统完整性与原真性评估体系构建

3.1 基本概述

青藏高原国家公园群潜在建设区生态系统完整性与原真性评价指标涉及多学科、多领域,指标的选取需从当前实际出发,对比过去并能预测未来,具备生态学意义并与重要的生态系统结构、功能以及过程密切相关的指标^[51, 11]。基于对现有生态系统完整性评估框架的梳理,结合考虑到青藏高原生态系统发育的特性,国

家公园群生态系统完整性与原真性指标的选取着重考虑下述几个特点^[52-53]:

表 2 加拿大国家公园生态完整性评估指标体系

Table 2 The evaluation index system of ecological integrity of Parks Canada

组成 Component	一级指标 Primary indicators	二级指标 Secondary indicators
生物多样性;区域特征 Biodiversity; regional characteristics	物种丰富度	物种丰富度的变化、外来物种的数量和范围
	种群动态	指示物种的死亡率/出生率、指示物种的迁入/迁出、指示物种的种群生存能力
	营养结构	各类种群规模类别分布、捕食等级
生态系统功能;生态弹性、进化潜力 Ecosystem functions; ecological resilience and evolutionary potential	演替/退化	干扰频率和规模(火灾、病虫害、洪水)、植被年龄等级分布
	生产力	遥感监测或立地实测
	分解能力	实测
	营养持留	Ca 和 N 实测
压力因素;未受破坏的生态系统 Stressors; an undamaged ecosystem	人类土地利用模式	土地利用强度、道路密度、人口密度
	栖息地破碎化	斑块大小、斑块间距离、森林内部异质性
	污染物	污水、石化等有毒物质的长距离运输
	气候	气象数据、极端天气的频率
	其他	公园具体其他问题

表 3 加拿大国家公园不同生态系统生态完整性评估指标体系

Table 3 The evaluation index system of ecological integrity of different ecosystem in the Parks Canada

生态系统类型 Ecosystem type	生物多样性 Biodiversity	生态系统功能 Ecosystem functions	压力因素 Stressors
冰川和冰原 Glaciers and Icefields	努纳塔克——野生动物、植物、昆虫等 需要更多的专业知识来确定是否需要其他措施	面积 融化速率	污染物 气候变化
森林 Forests	驼鹿 森林植被 北美野兔 灰熊	连通性 干扰度/演替 初级生产力 森林结构	开发利用 外来物种入侵 人类影响 捕猎 气候变化
苔原/冻土 Tundra	白大角羊 狼群/狼獾/食物动物 植被演替 灰熊 山羊 地松鼠	初级生产力 连通性	公园旅游 气温和降水 捕猎
水域 Freshwater	湖泊、河流	湖泊:水质、水位、冻/融、永久冻土 河流:水文、水质、冻/融、水温	捕鱼、气候变化、 污染物
湿地 Wetlands	物种多样性、植被/栖息地类型、湿地类型	水文、湿地变化、永久冻土、水质	气候变化 开发利用

(1) 现势性:能够代表生态系统的现状特征,在生态系统里具有一定意义,并且与一些重要的环境过程和生态系统概念密切相关;

(2) 预期性:对生态环境变化的响应能提供早期的预警;

(3) 典型性:着重考虑草地、森林、荒漠、湿地和冰川生态系统及其动态变化;

(4) 可比性:能评估生态系统动态变化和区域差异;

(5) 可量化:尽可能获得有生态模型研究基础、定量关系明确的指标;

(6) 空间性:能覆盖全部或部分区域,并具有空间分异的特点;

(7)可获取性:在当前的社会经济及科学发展水平下可以获取,并能够有效地节省成本;考虑到特殊的地理环境特征,尽量使用现代化技术如大数据、在线监测、RS、GIS 等技术获取的指标。

此外,评估框架中的基本指标主要是参考已有评估框架中共有的指标类型,反映生态系统完整性的基本特征;特殊性指标主要是在考虑上述 7 个原则的基础上,结合区域自身的自然-人文生态系统特征进行筛选。

3.2 指标体系构建

青藏高原国家公园群潜在建设区生态系统类型多样,包括森林、灌丛、草地、湿地、农田、城镇、荒漠和冰雪 8 种生态系统。生态系统类型以高寒高原为主,面积比例达到 57.9%,其次是荒漠生态系统为 21.3%,湿地为第三大生态系统类型,森林和灌丛生态系统面积比例和为 9.7%,农田、城镇等生态系统类型面积比例总和不足 1%(图 4)。青藏高原草地生态环境敏感而脆弱,高寒草地生态系统的变化对整个青藏高原生物多样性维持乃至生态系统服务具有重大影响^[54]。近年来随着气候变化、过度放牧、旅游发展等,草地生态系统退化严重,植物种群发生变化,生物多样性下降,优良牧草数量减少,有毒、有害草种群数量增加,草地植物变矮、变劣、变稀等问题不断显现^[55-56]。荒漠生态系统主要分布在水上雅丹、海西盐湖等国家公园潜在建设区内,在防风固沙、水文调控、土壤保持及生物多样性保育等方面提供着重要的生态服务,同时在固碳和生物地球化学循环方面也发挥着不可替代的作用^[57];受气候变化,以及挖药、樵采等不合理的人类活动影响,出现荒漠植被破坏严重、生物资源遭受破坏、生物多样性急剧减少^[58]。森林生态系统面积比例为 5.3%,主要分布于青藏高原东南部以高山峡谷为主体的区域,其中雅鲁藏布大峡谷具有世界最完整的山地生态系统垂直带谱,是世界上山地生物多样性最丰富的地区之一^[59]。青藏高原被誉为“亚洲水塔”,对众多江河的水源涵养、河流水文调节发挥着重要作用^[60]。在近 50 年快速升温的背景下,“亚洲水塔”表现为冰川加速退缩、湖泊显著扩张、冰川径流增加、水循环加强等整体失衡的特征^[61]。青藏高原国家公园群潜在建设区中冰雪、湿地等的面积比例达到 10.4%,主要集中分布在青海的三江源、西藏那曲以及西部边境等区域的国家公园,未来“亚洲水塔”变化对国家公园建设的影响不可忽视。

青藏高原具有海拔高、气温低、降水少、生态系统结构简单、抗干扰能力弱和易受全球环境变化影响的特点,主要脆弱生态环境问题包括冻融侵蚀、水力侵蚀、土地沙漠化、盐渍化、水资源匮乏、生物多样性减少等^[4,62-63]。青藏高原国家公园群潜在建设区生态环境脆弱敏感,但在调节气候、涵养水源、防风固沙、生物多样性维护等方面发挥重要作用^[64]。此外,生境质量的能量流指标主要体现生态系统功能与生态系统的演替与退化过程,反映当前生态系统的状态或趋势,表征生态系统活力与生物多样性水平,包括净初级生产力、植被覆盖度、生物量等指标,主要是通过卫星遥感监测与反演,从大尺度上评价生态系统的健康状况与完整性特征^[65]。因此,针对不同的生态系统类型的特征、主要生态环境问题和主导生态系统服务类型,结合 5 种国家公园生态系统完整性评估框架相应的指标,以及青藏高原的自然生态系统的特殊性,筛选反映青藏高原国家公园群潜在建设区的生境质量指标。

青藏高原是全球生物多样性最丰富的地区之一和珍稀野生动物的天然栖息地和高原物种基因库。青藏高原国家公园群潜在建设区中绝大多数与生物多样性保护优先区以及国家级自然保护区相重叠,是青藏高原特有与珍稀濒危的动植物的分布区。生物群落指标中指示物种和本地物种的选择,要充分考虑青藏高原国家公园群潜在建设区生物物种的代表性和特有性。在陆地生态系统中,可采用植被、哺乳动物、鸟类等来反映生态系统完整性。近几年来青藏高原黑颈鹤、藏羚羊、普氏原羚、野牦牛、马鹿、滇金丝猴等的个体数量正在稳步增加^[66],而珍稀濒危物种种群的恢复与扩大是生物多样性保护成效的明显标志,其中顶级肉食动物的存在及变化情况是生态系统是否健康或完整的重要标志^[67]。在水生生态系统中,青藏高原裸鲤已经形成适应高原寒冷干旱生境的生存特征^[68],是判断“水-鱼-鸟”生态系统质量的指示物种,其数量及其变化对生态系统完整性有良好的指示作用^[69]。黑颈鹤在色林错-普若岗日和雅鲁藏布大峡谷国家公园潜在建设区中均可作为湿地生态系统健康与否的重要的指示物种^[66]。

人类活动扰动改变了生态系统的稳定状态,加剧了高原局部的和短期的变化,成为青藏高原生态退化的

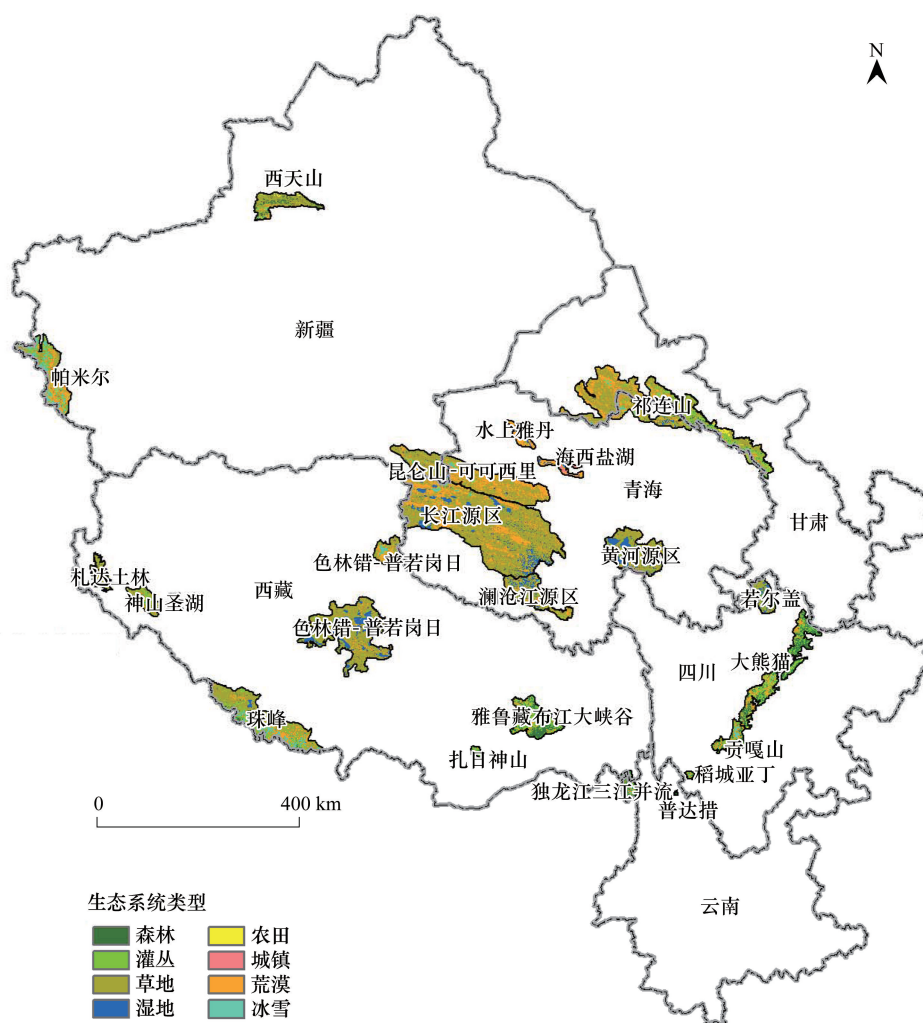


图4 青藏高原国家公园群潜在建设区生态系统空间分布

Fig.4 Spatial distribution of ecosystems in the proposed area of the Qinghai-Tibet Plateau national park cluster

主要原因^[70]。超载过牧是人类活动中引起草地退化的首要原因,矿产资源开采和生物、旅游资源开发等也给草原生态带来严重的破坏,使得局部地区出现草地退化、湿地消失、土地沙化等现象^[71]。人类活动干扰主要选择影响生态系统完整性与原真性的主要压力源。根据2017—2020年第二次青藏高原科学考察国家公园分队实地考察,青藏高原国家公园群潜在建设区主要人为干扰为放牧、旅游开发、路网建设、矿产开采、生活垃圾和污水排放等。因此,选择道路密度(反映自然生境破碎化程度)、土地利用强度(反映生态系统的人为干扰强度)、自然资源利用强度(草地载畜量、水资源利用强度、水电开发强度、矿产资源开采强度等)、旅游强度(游客进入频度和旅游区宾馆床位总数、自驾车进入频度)、垃圾产生与处理(垃圾无害化处理率)、捕猎(非法捕猎发生的次数与涉及动物数量)、生态环境污染与破坏(土壤压实与车痕、各种生态环境破坏事件发生的频次与强度)指标反映人类活动干扰情况。

青藏高原国家公园群潜在建设区自然景观和文化遗产丰富,是不同于其他国家高度聚焦自然生态系统完整性的特殊特征。青藏高原孕育了稀有的人文景观资源,生动有趣的各种社会民俗,古老的信仰习惯以及涵盖舞蹈、音乐、绘画、曲艺等多种形式的艺术活动,此外还有大量的历史文物遗迹,如象雄王国遗址、古老而神圣的宗教文化^[72]。札达土林不仅具有世界上最典型、分布面积最大的第三系地层风化形成的土林自然景观,又有最为著名的古格王国都城遗址,具有极高的自然和人文遗产保护价值。“神山圣湖”长期以来是西藏阿

里地区旅游形象的代表,主要原因在于冈仁波齐和玛旁雍错在多个教派中都拥有极高的宗教地位,宗教文化信仰和宗教建筑艺术等人文遗产价值极大。色林错-普若岗日国家公园潜在建设区典型的高寒高原特征及典型的高原人地关系决定了该区域人文生态在青藏高原上的代表性,不仅最具西藏象雄文化代表性,也在高寒区游牧文化方面具有代表性。因此,文化景观指标的选取需从景观审美与文化遗产两个角度^[22, 28],充分考虑本地的文化遗产资源现状以及与自然景观的匹配程度。景观审美主要从建筑特色(建筑色彩、建筑结构、建筑材料)^[73]、景观环境原真性(所依托的自然山水、与环境的融汇)^[27]两个方面来评价。文化遗产主要从遗产的分布范围、保护级别以及保护强度三个指标来评价,其中文化遗产的保护强度是指单位遗产地面积内开展某一项目的投资额度^[74]。

基于对国家公园生态系统完整性和原真性内涵的理解,在借鉴 PCFAEI、EIAF、TLA、IBI、EECs 评估框架基础上,结合研究区域自然生态和社会人文系统特征,从生境质量、生物群落、生态系统服务、自然条件与灾害、人类活动、人文景观 6 个方面构建青藏高原国家公园群潜在建设区生态系统完整性与原真性评估框架(表 4)。此外,不同类型的国家公园可根据保护对象的不同,在评价指标选择上各有侧重。以生态系统为主要保护对象的,根据生态系统类型适当增加相应的评价指标;以物种为主要保护对象的,适当增加对保护物种、食物链和栖息地的评价指标。如主要保护对象涉及多个方面,可考虑在相关方面分别增加评价指标。此外,青藏高原国家公园群作为一个整体,这与单个国家公园具有明显差异,在开展生态系统完整性与原真性评估时,需充分考虑“群”的概念,在评价指标选择更多的考虑不同国家公园间的连通性、系统性、整体性,在指标权重设定上有所侧重,从单个国家公园对“群”整体的贡献、各自的独特性以及相互作用形成的整体性的角度。

4 问题与讨论

青藏高原国家公园群具有全球独特的自然生态和人文生态系统,整体性保护重要生态系统完整性与原真性是建设国家公园群的主要目标。本研究在界定国家公园的生态系统完整性与原真性内涵基础上,借鉴已有的国家公园生态系统完整性和原真性评估框架和指标体系,在对国家公园潜在建设区自然生态和社会人文系统综合科学考察的基础上,从生境质量、生物群落、生态系统服务、自然条件与灾害、人类活动、人文景观 6 个方面构建了青藏高原国家公园群潜在建设区生态系统完整性与原真性评估指标体系,以期未来国家公园群生态系统完整性与原真性评估、监测和管理提供支撑。

由于国家公园涉及的生态系统本身的复杂性,加之生态系统完整性和原真性内涵的不断丰富,使得国家公园生态完整性和原真性体系无论是在理论上还是方法上都需要进一步研究。生态系统原真性与完整性本是相互统一的整体概念,完整性较之原真性在生态学中得到更为广泛讨论。现有的评估框架更多考虑生态系统完整性,对生态系统原真性考虑不足,未来应进一步加强生态系统完整性与原真性一体化评估框架的研究。国家公园生态系统完整性与原真性评价可以把原始的、未受人类干扰的或者少受人类干扰的生态系统作为参考标准,通过测量生态系统偏离这个标准的程度来判断其变化情况^[52],一般设定原始状态(没有人文活动的状态)和自然状态(如在一个区域生态系统中最接近自然生境的状态)两种基准。目前发展环境下未受到人类干扰的生态系统很少,因而往往以偏离参照系的程度来衡量^[75]。确定合理的参考状态是关键,干扰程度最小系统法和极少干扰系统法是参考状态确定的常用方法^[76]。青藏高原国家公园群潜在建设区人为干扰相对较少,因此在选定参考模型进行评估时主要以历史调查数据和文献数据确定物理完整性参数和大部分化学、生物完整性参数的期望值,再结合国家标准和统计方法综合确定其他参数的期望值。

本研究将国家公园视为“生物-物理-化学-人文”复合生态系统,将人文景观因子纳入评估框架,不同于其他国家国家公园聚焦自然生态系统,从“原真性”来源与自然生态系统结合角度,强调人文景观与自然景观的契合度与贡献度。本研究仅构建了青藏高原国家公园群潜在建设区生态系统完整性与原真性评估框架,而在未来开展具体评估应用时,如何根据不同国家公园类型组合评价指标及确定权重,如何将量化指标与定性

表 4 青藏高原国家公园群潜在建设区生态系统完整性与原真性评估框架

Table 4 Assessment framework of ecosystem integrity and authenticity in the proposed area of the Qinghai-Tibet Plateau national park cluster

指标类型 Indicator type	一级指标 Primary indicators	二级指标 Secondary indicators	选择依据 Selection basis
生境质量 Habitat quality	类型、分布、结构、演替	自然或半自然生态系统的类型及结构,景观连通性和破碎化,景观多样性指数,森林/冰川/湿地/永久冻土的面积变化量	重点参考 EECs 评估框架,从生态系统的结构、稳定性和多样性程度来反映生态系统完整性与原真性,并重点体现出冰川、永久冻土、森林、草地、湿地等区域特色的景观特征
	营养结构	森林/草地垂直地带性类型及面积,森林/草地质量等级与分布	重点参考 EECs 与 PCFAEI 评估框架,从生态系统营养结构等级反映生态系统完整性与原真性
	能量流	植被净初级生产力,植被覆盖度,地上生物量	重点参考 TLA 评估框架和体现生态系统功能与生态系统的演替与退化过程
生物群落 Biological communities	野生动植物	野生物种/原生物种种群数量,建群种与优势种的类型与数量,种群数量结构,物种丰富度,物种分布范围,原生物种覆盖度,特有物种/珍稀濒危物种/重点保护物种的数量及空间分布、习性或食性、栖息地历史演化	重点参考 EIAF 评估框架和 PCFAEI 评估框架,从生物组成角度反映生态系统的完整性与原真性
	种群动态测定	指示物种的出生率和死亡率(特有植被、动物),捕食等级,顶级捕食者的数量与分布	
	外来物种入侵	种类数,外来物种入侵度	
生态系统服务 Ecosystem services	涵养水源	涵养水源量	考虑高原生态系统重要的生态系统服务类型。
	防风固沙	防风固沙量	
	水土保持	水土流失量	
	碳固定	碳固定量	
自然条件与灾害 Natural conditions and disasters	气候变化强度	极端天气发生频次及强度,冰川融化速率,林线高度变化量,雪线高度变化量	重点参考 PCFAEI 评估框架和 EECs 评估框架,其中气候变化是影响生态系统完整性与原真性的主要影响因素,而土壤质量和水质是生态系统物理和化学完整性的重要体现
	土壤质量	土壤类型,土壤侵蚀的类型、分布与侵蚀强度,土地沙化程度,土地盐碱化程度	
	水环境质量	水环境质量指数、pH 值、化学需氧量、总氮、总磷	
	自然灾害	地质灾害、火灾、生物灾害等发生的频次与强度	
人类活动 Human activity	频率、强度	人口密度,道路密度,土地利用强度,自然资源利用强度,旅游强度,放牧强度,垃圾产生与处理率,生态环境污染与破坏频率	重点参考 PCFAEI 评估框架、EIAF 评估框架以及 EECs 评估框架,反映影响生态系统完整性与原真性的主要压力源
	人文景观 Humanity landscape	景观审美	生态系统完整性与原真性评价中的定性评价,反映人文遗产与自然生态系统的融合性
		文化遗产	

指标相融合,如何满足评价精度要求又不过度依赖实地调查结果,如何将人文景观因子更好的量化空间化表达,如何根据不同管理需求获取评价结果并应用于国家公园的常态化管理,均成为主要的研究焦点。青藏高原国家公园群不同于单个国家公园,在开展综合生态系统完整性与原真性评价时,需要突出“群”的整体性,在反映单个国家公园独特性的同时也要体现其对“群”的贡献性。此外,国家公园生态系统完整性与原真性的评估,依赖于评估指标的获取精度和强度,需要系统的监测数据作为基础,是切实能应用于日常管理的重要技术手段。《建立国家公园体制总体方案》中明确要求“完善监测指标体系和技术体系,定期对国家公园开展监测”。目前,我国已经建立了较为完备的青藏高原的生态环境变化监测体系,包括中国生态系统研究网络、高寒区地表过程与环境监测研究网络,以及环境质量、自然资源、农业、林业、水利、气象等专业观测网络,现已基本形成了天地空一体化的监测体系。而在国家公园群内生态环境监测体系尚未建立,已有研究地

面监测站点严重不足,特别是对于人类活动、生物多样性、气候变化、环境质量等监测能力亟待提升。因此,未来需在建立的评估框架基础上,结合区域内已有的监测体系,建立国家公园群生态系统完整性与原真性监测体系,从而更全面服务于青藏高原国家公园群生态系统完整性与原真性保护与管理。

参考文献 (References):

- [1] 樊杰, 钟林生, 黄宝荣, 虞虎, 王亚飞, 陈东, 郭锐, 刘宝印. 地球第三极国家公园群的地域功能与可行性. 科学通报, 2019, 64(27): 2938-2948.
- [2] 张宪洲, 杨永平, 朴世龙, 包维楷, 汪诗平, 王根绪, 孙航, 罗天祥, 张扬建, 石培礼, 梁尔源, 沈妙根, 王景升, 高清竹, 张德铨, 欧阳华. 青藏高原生态变化. 科学通报, 2015, 60(32): 3048-3056.
- [3] 杨春燕, 付伟, 赵俊权. 青藏高原生态旅游发展研究. 生态经济(学术版), 2012, (2): 238-240, 282-282.
- [4] 陈江, 万力, 梁四海, 金晓媚, 陈立. 青藏高原生态环境变化趋势的初步探索. 地球学报, 2007, 28(6): 555-560.
- [5] 黄麟, 曹巍, 吴丹, 巩国丽. 西藏高原生态系统服务时空格局及其变化特征. 自然资源学报, 2016, 31(4): 543-555.
- [6] 周侃, 刘汉初, 樊杰, 虞虎. 青藏高原国家公园群区域人类活动的环境胁迫强度与空间效应研究——以三江源地区为例. 生态学报, 2021, 41(1): 1-12.
- [7] Young K R. National park protection in relation to the ecological zonation of a neighboring human community: an example from northern Peru. Mountain Research and Development, 1993, 13(3): 267-280.
- [8] 陈耀华, 黄丹, 颜思琦. 论国家公园的公益性、国家主导性和科学性. 地理科学, 2014, 34(3): 257-264.
- [9] 虞虎, 钟林生. 基于国际经验的我国国家公园遴选探讨. 生态学报, 2019, 39(4): 1309-1317.
- [10] 樊杰, 钟林生, 李建平, 陈田, 黄宝荣, 虞虎, 陈东, 王亚飞, 郭锐. 建设第三极国家公园群是西藏落实主体功能区大战略、走绿色发展之路的科学抉择. 中国科学院院刊, 2017, 32(9): 932-944.
- [11] 代云川, 薛亚东, 张云毅, 李迪强. 国家公园生态系统完整性评价研究进展. 生物多样性, 2019, 27(1): 104-113.
- [12] Timko J, Satterfield T. Criteria and indicators for evaluating social equity and ecological integrity in national parks and protected areas. Natural Areas Journal, 2008, 28(3): 307-319.
- [13] 陈叙图, 魏钰. 中国国家公园生态系统完整性的问题与改进对策. 环境保护, 2019, 47(5): 55-58.
- [14] Parks Canada Agency. "Unimpaired for Future Generations"? Protecting Ecological Integrity with Canada's National Parks. Vol. II "Setting a New Direction for Canada's National Parks". Report of the Panel on the Ecological Integrity of Canada's National Parks. Ottawa: Parks Canada Agency, 2000.
- [15] Leopold A. A Sand County Almanac and Sketches Here and There. New York: Oxford University Press, 1949.
- [16] Woodley S. Monitoring and measuring ecosystem integrity in Canadian National Parks//Woodley S, Kay J, Francis G, eds. Ecological Integrity and the Management of Ecosystems. Ottawa: St. Lucie Press, 1993: 155-176.
- [17] Karr J R. Measuring biological integrity: lessons from streams//Woodley S, Kay J, Francis G, eds. Ecological Integrity and the Management of Ecosystems. Ottawa: St. Lucie Press, 1993: 83-104.
- [18] Andreasen J K, O'Neill R V, Noss R, Slosser N C. Considerations for the development of a terrestrial index of ecological integrity. Ecological Indicators, 2001, 1(1): 21-35.
- [19] 张明阳, 王克林, 何萍. 生态系统完整性评价研究进展. 热带地理, 2005, 25(1): 10-13, 18-18.
- [20] 黄宝荣, 欧阳志云, 郑华, 王效科, 苗鸿. 生态系统完整性内涵及评价方法研究综述. 应用生态学报, 2006, 17(11): 2196-2202.
- [21] Parks Canada. Ecological integrity. (2018-12-12) [2018-12-12]. <https://www.pc.gc.ca/en/nature/science/conservation/ie-ei>.
- [22] 张成渝. 国内外世界遗产原真性与完整性研究综述. 东南文化, 2010, (4): 30-37.
- [23] Alberts H C, Hazen H D. Maintaining authenticity and integrity at cultural world heritage sites. Geographical Review, 2010, 100(1): 56-73.
- [24] 李震, 李仁斌. 2005-2014 年《实施世界遗产公约操作指南》的演变与发展趋势. 西部人居环境学刊, 2015, 30(2): 49-53.
- [25] Clewell A F. Restoring for natural authenticity. Ecological Restoration, 2000, 18(4): 216-217.
- [26] 何思源, 苏杨. 原真性、完整性、连通性、协调性概念在中国国家公园建设中的体现. 环境保护, 2019, 47(Z1): 28-34.
- [27] 徐聪荣, 张朝枝. 庐山世界文化景观的原真性探讨. 经济地理, 2008, 28(6): 1045-1048.
- [28] Jones S. Experiencing authenticity at heritage sites: some implications for heritage management and conservation. Conservation and Management of Archaeological Sites, 2009, 11(2): 133-147.
- [29] 徐红罡, 万小娟, 范晓君. 从“原真性”实践反思中国遗产保护——以宏村为例. 人文地理, 2012, 26(1): 107-112.
- [30] 杨锐. 中国国家公园设立标准研究. 林业建设, 2018, (5): 103-112.
- [31] 虞虎, 钟林生, 曾瑜哲. 中国国家公园建设潜在区域识别研究. 自然资源学报, 2018, 33(10): 1766-1780.

- [32] 曹越, 龙瀛, 杨锐. 中国大陆国土尺度荒野地识别与空间分布研究. 中国园林, 2017, 33(6): 26-33.
- [33] Dudley N. Authenticity in Nature: Making Choices about the Naturalness of Ecosystems. London: Earthscan Publications, 2011.
- [34] Ladin Z S, Higgins C D, Schmit J P, Sanders G, Johnson M J, Weed A S, Marshall M R, Campbell J P, Comiskey J A, Shriver W G. Using regional bird community dynamics to evaluate ecological integrity within national parks. *Ecosphere*, 2016, 7(9): e01464.
- [35] 苏杨, 胡艺馨, 何思源. 加拿大国家公园体制对中国国家公园体制建设的启示. 环境保护, 2017, 45(20): 60-64.
- [36] Baron E A F. Evaluating a Benthic Index of Biotic Integrity (B-IBI) to Measure Ecological Integrity in Pacific Rim National Park Reserve of Canada [D]. Kingston: Queen's University, 2003: 1-79.
- [37] United States Environmental Protection Agency Assessment and Watershed Protection Division. Elements of a state water monitoring and assessment program. Washington, D.C.: USEP, 2003. <http://www.epa.gov/owow/monitoring/repguid.html>
- [38] Tiner R W. Remotely-sensed indicators for monitoring the general condition of "natural habitat" in watersheds: an application for Delaware's Nanticoke River watershed. *Ecological Indicators*, 2004, 4(4): 227-243.
- [39] Schroeder M A, Crawford R C, Rocchio F J, Pierce D J, Haegen M V. Ecological Integrity Assessments: Monitoring and Evaluation of Wildlife Areas in Washington. Olympia, Washington: Washington Department of Fish and Wildlife, 2011.
- [40] Harwell M A, Myers V, Young T, Bartuska A, Gassman N, Gentile J H, Harwell C C, Appelbaum S, Barko J, Causey B, Johnson C, McLean A, Smola R, Templet P, Tosini S. A framework for an ecosystem integrity report card: examples from South Florida show how an ecosystem report card links societal values and scientific information. *BioScience*, 1999, 49(7): 543-556.
- [41] Karr J R, Dudley D R. Ecological perspective on water quality goals. *Environmental Management*, 1981, 5(1): 55-68.
- [42] Karr J R. Assessment of biotic integrity using fish communities. *Fisheries*, 1981, 6(6): 21-27.
- [43] Brooks R P, Wardrop D H, Bishop J A. Assessing wetland condition on a watershed basis in the Mid - Atlantic region using synoptic land-cover maps. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2004, 94(1/3): 9-22.
- [44] Faber-Langendoen D, Lemly J, Nichols W, Rocchio J, Walz K, Smyth R. Development and evaluation of naturereserve's multi-metric ecological integrity assessment method for wetland ecosystems. *Ecological Indicators*, 2019, 104(SEP.): 764-775.
- [45] Mack J J. Landscape as a predictor of wetland condition: an evaluation of the Landscape Development Index (LDI) with a large reference wetland dataset from Ohio. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, 120(1/3): 221-241.
- [46] Rocchio F J, Crawford R C. Monitoring Desired Ecological Conditions on Washington State Wildlife Areas using an Ecological Integrity Assessment Framework. Olympia: Washington Department of Natural Resources, 2009.
- [47] Fraser R H, Olthof I, Pouliot D. Monitoring land cover change and ecological integrity in Canada's national parks. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(7): 1397-1409.
- [48] Olthof I, Pouliot D, Fraser R, Clouston A, Wang S, Chen W, Oraziotti J, Poitevin J, McLennan D, Kerr J, Sawada M. Using satellite remote sensing to assess and monitor ecosystem integrity and climate change in canadas national parks//IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing. Denver: IEEE, 2006.
- [49] Henry D, Landry A, Elliot T, Gorecki L, Gates M, Chow C. Kluane National Park and Reserve of Canada: state of the park report. Ottawa: Parks Canada Agency, 2008.
- [50] Parks Canada Agency. Grasslands National Park of Canada: state of the park report 2007. Ottawa: Parks Canada Agency, 2007.
- [51] Franklin J F, Spies T A, Van Pelt R, Carey A B, Thornburgh D A, Berg D R, Lindenmayer D, Harmon M E, Keeton W S, Shaw D C, Bible K, Chen J Q. Disturbances and structural development of natural forest ecosystems with silvicultural implications, using Douglas - fir forests as an example. *Forest Ecology and Management*, 2002, 155(1/3): 399-423.
- [52] 燕乃玲, 赵秀华. 长江源区生态系统完整性测量与评价. 生态学杂志, 2007, 26(5): 723-727.
- [53] 齐新. 长白山地区生态完整性遥感评价研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2010.
- [54] 刘安榕, 杨腾, 徐炜, 上官子健, 王金洲, 刘慧颖, 时玉, 褚海燕, 贺金生. 青藏高原高寒草地地下生物多样性: 进展、问题与展望. 生物多样性, 2018, 26(9): 972-987.
- [55] Schönbach P, Wan H W, Gierus M, Bai Y F, Müller K, Lin L J, Susenbeth A, Taube F. Grassland responses to grazing: effects of grazing intensity and management system in an Inner Mongolian steppe ecosystem. *Plant and Soil*, 2011, 340(1/2): 103-115.
- [56] 戴睿, 刘志红, 娄梦筠, 梁津, 于明洋. 藏北那曲地区草地退化时空特征分析. 草地学报, 2013, 21(1): 37-41, 99-99.
- [57] 程磊磊, 郭浩, 卢琦. 荒漠生态系统服务价值评估研究进展. 中国沙漠, 2013, 33(1): 281-287.
- [58] 陈军纪, 王蕾, 刘彬, 杨更强, 曹秋梅, 陈艳锋, 尹林克. 极旱荒漠生态系统健康评价——以安西国家级自然保护区为例. 干旱区资源与环境, 2015, 29(12): 98-103.
- [59] 邓立斌, 陈端吕, 邓丽群. 西藏雅鲁藏布大峡谷国家级自然保护区生态评价. 林业科学, 2011, 47(5): 1-6.
- [60] 刘军会, 高吉喜, 聂亿黄. 青藏高原生态系统服务价值的遥感测算及其动态变化. 地理与地理信息科学, 2009, 25(3): 81-84.

- [61] 姚檀栋, 邬光剑, 徐柏青, 王伟财, 高晶, 安宝晟. “亚洲水塔”变化与影响. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1203-1209.
- [62] Parson E A, Corell R W, Barron E J, Burkett V, Janetos A, Joyce L, Karl T R, MacCracken M C, Melillo J, Morgan M G, Schimel D S, Wilbanks T. Understanding climatic impacts, vulnerabilities, and adaptation in the United States: building a capacity for assessment. *Climatic Change*, 2003, 57(1/2): 9-42.
- [63] 郭兵, 孔维华, 姜琳, 范业稳. 青藏高原高寒生态区生态系统脆弱性时空变化及驱动机制分析. *生态科学*, 2018, 37(3): 96-106.
- [64] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度; 李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 189-196.
- [65] 刘琼玉, 程全国, 魏建兵, 顾广贺. 大兴安岭地区生态系统完整性动态评价. *应用生态学报*, 2019, 30(9): 3119-3125.
- [66] 张德铨, 胡忠俊, 祁威, 吴雪, 摆万奇, 李兰晖, 丁明军, 刘林山, 王兆锋. 基于 NPP 数据和样区对比法的青藏高原自然保护区保护成效分析. *地理学报*, 2015, 70(7): 1027-1040.
- [67] Ripple W J, Estes J A, Beschta R L, Wilmers C C, Ritchie E G, Hebblewhite M, Berger J, Elmhagen B, Letnic M, Nelson M P, Schmitz O J, Smith D W, Wallach A D, Wirsing A J. Status and ecological effects of the world's largest carnivores. *Science*, 2014, 343(6167): 1241-1244.
- [68] 陈毅峰, 何德奎, 段中华. 色林错裸鲤的年轮特征. *动物学报*, 2002, 48(3): 384-392.
- [69] 张开, 丁柏峰. 青海湖裸鲤资源与流域内人类活动关系分析. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(11): 60-66.
- [70] Li X Y, Ma Y J, Xu H Y, Wang J H, Zhang D S. Impact of land use and land cover change on environmental degradation in lake Qinghai watershed, northeast Qinghai-Tibet Plateau. *Land Degradation & Development*, 2009, 20(1): 69-83.
- [71] 于伯华, 吕昌河. 青藏高原高寒区生态脆弱性评价. *地理研究*, 2011, 30(12): 2289-2295.
- [72] 邓光奇. 藏族传统文化与西藏旅游发展的探索——以那曲地区社会调查为例. *西南民族大学学报: 人文社会科学版*, 2013, 34(8): 144-147.
- [73] 张戈, 马超. 基于真实性评价的村镇文化分权化监管机制研究. *安徽农业科学*, 2014, 42(16): 5114-5118.
- [74] 侯妙乐, 刘晓琴, 陈军, 李松年. 基于地理空间信息的文化遗产可持续发展指标建设. *地理信息世界*, 2019, 26(2): 1-6.
- [75] Davies S P, Jackson S J. The biological condition gradient: a descriptive model for interpreting change in aquatic ecosystems. *Ecological Applications*, 2006, 16(4): 1251-1266.
- [76] Smokorowski K E, Metcalfe R A, Finucan S D, Jones N, Marty J, Power M, Pyrcie R S, Steele R. Ecosystem level assessment of environmentally based flow restrictions for maintaining ecosystem integrity: a comparison of a modified peaking versus unaltered river. *Ecohydrology*, 2011, 4(6): 791-806.