

DOI: 10.5846/stxb202005241318

邓冉, 邵怀勇, 黄宝荣, 张丛林, 周中仁, 樊杰. 青藏高原生态系统完整性远程评价与国家公园群建设时序研究. 生态学报, 2021, 41(3): 847-860.

Deng R, Shao H Y, Huang B R, Zhang C L, Zhou Z R, Fan J. Remote assessment on ecosystem integrity of the Qinghai-Tibet Plateau and research on National Parks Group construction sequence. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(3): 847-860.

青藏高原生态系统完整性远程评价与国家公园群建设时序研究

邓 冉¹, 邵怀勇¹, 黄宝荣², 张丛林², 周中仁³, 樊 杰^{2,*}

1 成都理工大学地球科学学院, 成都 610059

2 中国科学院科技战略咨询研究院, 北京 100190

3 北京市农林科学院农业信息与经济研究所, 北京 100097

摘要: 青藏高原是我国重要生态安全屏障, 保有大量重要的受人类活动干扰较小的自然生态系统。但近年来受社会经济发展和气候变化的影响, 高原生态系统面临退化风险。为了更好地守护地球第三极, 第二次青藏科考提出建立青藏高原国家公园群的科学构想。为了全面掌握人类胁迫和气候变化背景下, 青藏高原生态系统完整性维持情况, 并识别生态系统完整性维持较好的区域, 为青藏高原国家公园群的规划布局提供支撑, 研究基于对生态系统完整性内涵的理解以及青藏高原生态系统特征, 借鉴加拿大国家公园生态系统完整性评估框架, 构建了“格局-质量-功能-问题-压力”生态系统完整性远程评估框架, 对青藏高原生态系统完整性进行了综合评估并分析了其空间格局特征。结果显示: 青藏高原整体维持了较好的生态系统完整性, 分别有 3.52%、7.51% 和 70.71% 的区域生态系统完整性等级为优、良和中, 但受人类胁迫影响, 部分区域生态系统完整受到破坏, 分别有 18.17% 和 0.10% 的区域生态系统完整性等级为较差和极差。从空间上看, 青藏高原东部地区生态系统完整性整体高于西部地区。从生态系统完整性保护的角度看, 青藏高原可用于建设国家公园的备选区数量多、分布广, 且呈现大面积连片分布的格局。目前正在开展的三江源、祁连山、大熊猫、普达措等国家公园体制试点区均具有较高的生态系统完整性。为了加快推动生态系统完整性高的区域保护, 根据青藏高原国家公园潜在建设区的生态系统完整性指数结果, 建议优先启动雅鲁藏布大峡谷、色林错-普若岗日、独龙江三江并流、若尔盖、贡嘎山、稻城亚丁等国家公园建设, 待条件成熟后, 再逐步启动其他具有景观、文化价值的国家公园建设。

关键词: 青藏高原; 生态系统完整性; 遥感; 评价; 国家公园群

Remote assessment on ecosystem integrity of the Qinghai-Tibet Plateau and research on National Parks Group construction sequence

DENG Ran¹, SHAO Huaiyong¹, HUANG Baorong², ZHANG Conglin², ZHOU Zhongren³, FAN Jie^{2,*}

1 College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

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

3 Beijing Academy of Agriculture and Forestry Science, Beijing 100097, China

Abstract: As an important ecological security barrier in China, the Qinghai-Tibet Plateau maintains a large number of important natural ecosystems that are less disturbed by human activities. However, due to the impact of socio-economic development and climate change in recent years, the Qinghai-Tibet Plateau ecosystem is facing the risk of degradation. In order to better protect the Qinghai-Tibet Plateau-the third pole of the earth, the secondly comprehensive scientific

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究 (2019QZKK0401); 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类) (XDA20020303)

收稿日期: 2020-05-24; **修订日期:** 2021-01-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fanjie@casid.cn

investigation of the Qinghai-Tibet Plateau proposed the scientific concept of establishing the Qinghai-Tibet Plateau National Park Group. In order to fully understand the ecosystem integrity status of the Qinghai-Tibet Plateau under the background of human stress and climate change, basing on the understanding of the ecosystem integrity connotation and the ecosystem characteristic of Qinghai-Tibet Plateau, and referring to the ecosystem integrity assessment framework of the Canadian national park, this study builds an indicator system for remote assessment of ecosystem integrity based on the “pattern-quality-function-problem-pressure” framework, and makes a comprehensive assessment of ecosystem integrity of the Qinghai-Tibet Plateau, and then analyzes its characteristics of spatial pattern. The results show that the Qinghai-Tibet Plateau maintains a fair ecosystem integrity. Ecosystem integrity in 3.52% of the region is at excellent level, 7.51% of the region is at good level, 70.71% of the region is at fair level, 18.17% of the region is at poor level, and only 0.10% of the region is at terrible level. From a spatial pattern perspective, the overall ecosystem integrity of the eastern part of the Qinghai-Tibet Plateau is higher than that of the western part. From the perspective of ecosystem integrity protection, there are a large number and wide distribution of areas in the Qinghai-Tibet Plateau suitable for building national parks, and it appears in the pattern of large area and continuous distribution. The current pilot areas of national park system in the Qinghai-Tibet Plateau such as Three-River Source, Qilian Mountain, Giant Panda, and Pudacuo all have high ecosystem integrity. To accelerate the protection of areas with high ecosystem integrity, according to the ecosystem integrity index of the potential construction areas of the Qinghai-Tibet Plateau National Park Cluster, it is recommended to give priority to the construction of the Yarlung Zangbo Grand Canyon National Park, Selincu-Puruogangri National Park, Three Parallel Rivers National Park, Ruogai National Park, Gongga Mountain National Park and Daocheng Yading National Park; and waiting for the condition is mature, then gradually starting up the construction of the other national parks with landscape and cultural value.

Key Words: Qinghai-Tibet Plateau; ecosystem integrity; remote sensing; assessment; National Park Cluster

生态系统完整性是指生态系统在特定地理区域内的最优状态,在这种状态下,生态系统具备区域自然环境应包含的全部本土生物多样性和生态学过程,其生态系统结构、功能和过程不受人类威胁和损害,生态系统处在自然变化范围之内并保持良性循环,且本地物种处在能够持续繁衍的种群水平上^[1-3]。生态系统完整性评价主要是对生态系统的结构、功能以及过程完整性的评价,通过评价诊断当前生态系统能否维持平衡、健康的状态。评估结果能够为生态系统管理、生物多样性保护和自然保护地规划提供支撑。如,加拿大将生态系统完整性作为国家公园遴选的重要依据。《建立国家公园体制总体方案》也指出,我国建立国家公园的主要目的是保护自然生态系统的原真性、完整性。在未来国家公园规划布局中也应将生态系统完整性作为重要依据之一。

生态系统完整性评价以生物完整性评价(Biologic Integrity Assessment, BIA)为基础,通过统计学的方法,采用包含生态系统关键生物物种、物理和功能属性等指标来评估生态系统的完整性。目前常用的方法主要有3种:生物完整性指数评估框架(Biotic Integrity Index, BII)评估框架(Index of Biotic Integrity, IBI)、生态系统完整性评估框架(Ecosystem Integrity Assessment Framework, EIAF)评估框架和三级渐进评估框架(Three Level Approach, TLA)评估框架^[3]。IBI评估框架是通过选择对生态变化较为敏感的物种群落为指示物种,通过研究该物种的种类丰富度、组成、数量、营养组织、生殖行为、健康状况等反映生态系统完整性;EIAF评估框架通过记录生物和非生物的退化过程来反应生态系统是否完整,利用生态系统完整性指标计分矩阵来反映评价结果,每个指标(如生态系统景观、植被、理化性质、自然干扰机制等)通过计算测量值和参考值得到^[3-5];TLA三级评估框架包括远程型评价、快速型评价和密集型评价,是美国国家环境保护局根据其国家公园和野生动物保护区的实际生态情况研发,用来评价和监测其生态系统完整性的方法,每种评价方式可以单独进行,也可以层层递进,组合使用,尤其对于复杂的陆地生态系统^[5],目前常用的指标主要有土地覆被、景观格局、初级净生产力、道路密度、

指标物种指数、地面实测数据等生态指标和压力指标。TLA 三级评估框架中,远程型评价属于成本比较低廉且适用于大部分自然生态系统一种评价方式,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,近年来被广泛运用于流域、国家公园和野生动物保护区的生态系统完整性评价。如,美国鱼类和野生动物管理局开发了一套遥感指标,并将其与湿地指标结合评估流域自然栖息地生态系统完整性趋势,识别需要优先考虑生态恢复的潜在区域^[6]。加拿大国家公园局通过遥感技术,选择景观格局、演替衰退和初级净生产力三种生态指标监测国家公园的生态系统完整性^[7]。Fraser 等^[8]采用遥感影像数据,通过分析研究区内土地覆被变化和生态系统完整性现状,为加拿大国家公园建立监测系统提供了科学依据。

青藏高原是我国重要生态安全屏障,保有大量重要的受人类活动干扰较小的自然生态系统和荒野,孕育着丰富的生物多样性,在维持我国乃至亚洲生态安全中发挥了重要作用。但随着快速城镇化、农牧业和旅游业的快速发展、以及交通等基础设施的建设,高原生态系统完整性和生态安全屏障功能受到一定威胁。同时,气候变化导致的亚洲水塔失衡^[9],也有可能危及青藏高原生态系统完整性。为了更好地守护地球第三极,第二次青藏高原科学考察,提出由 6 个旗舰国家公园为引领、2 个跨国国家公园和 9 个国家公园共同构成的地球青藏高原国家公园群草案^[10-11]。在此背景下,开展青藏高原生态系统完整性评估,不仅能为人类活动胁迫和气候变化下青藏高原生态系统完整性保护提供科学支撑,而且能为第三极国家公园群的规划布局 and 各个国家公园建设时序的确定提供科学支撑。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

青藏高原位于亚洲中部,是众多大江大河发源地,其幅员辽阔($73^{\circ}18'52''$ — $104^{\circ}46'59''$ E, $26^{\circ}00'12''$ — $39^{\circ}46'50''$ N),位于我国境内的青藏高原区域(见图 1, 本文青藏高原空间范围引自来源于中科院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=139>)),总面积约 259.8 万 km^2 ,区域海拔一般在 3000—5000 m 之间,平均海拔 4000 m,地势东高西低,边缘起伏不平,但内部起伏较为平缓。青藏高原多为高原气

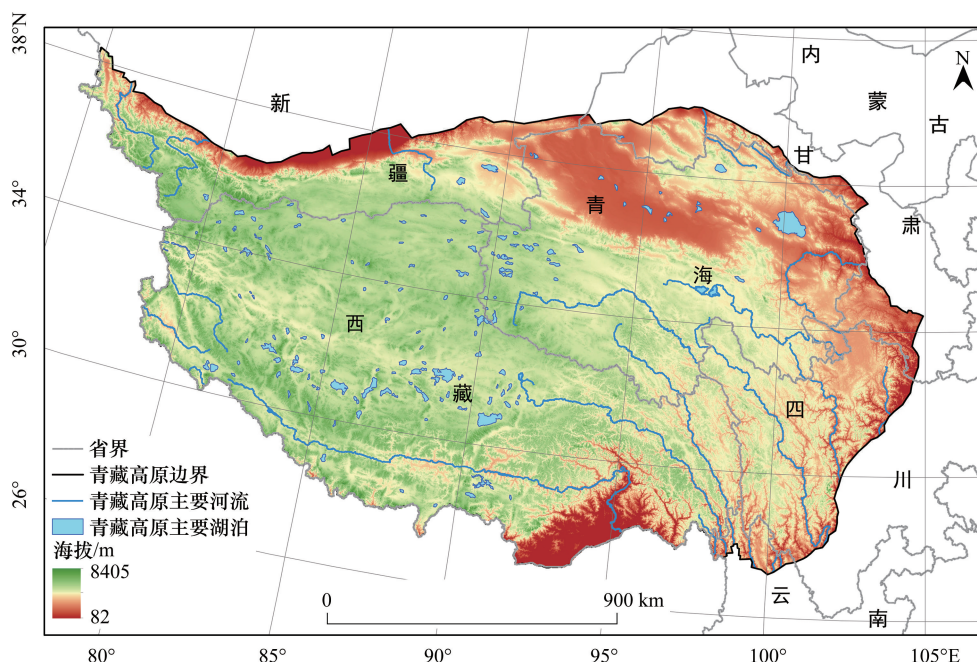


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

候,气温低、积温少,气温和降水的空间分布极不均匀,植被类型丰富且覆盖度高,动植物资源丰富且具有独特性,自然生态良好。但同时区域生态系统完整性也面临退化的风险,如气候变化导致冰川融化、雪线上升、亚洲水塔失衡^[9,12];土地退化与土壤侵蚀加剧^[13-14],导致生物多样性降低,水源涵养、水土保持及生物多样性保护的功能被削弱;而随着城市化进程加快,部分自然生态系统逐渐向半自然生态系统、人工生态系统过渡,自然生态空间被压缩^[15]。

1.2 研究方法

青藏高原地域辽阔,通过高强度野外调查获取数据难度大、历时长、成本高,因此,很难采用对地面调查数据要求比较高的 IBI、EIAF 和 TLA 密集型评估框架评估其生态系统完整性。基于此,本研究借鉴 TLA 远程评估框架,采用远程型评价方法,充分利用遥感、地理信息和社会经济统计数据,评估青藏高原生态系统完整性。

1.2.1 生态系统完整性评价指标体系

现有研究中,各位学者对于生态系统完整性内涵的理解,大致可从以下三个角度出发:一是以生态系统组成要素的完整性为切入点,从生态系统的组分、结构、功能和进程完整性等角度研究生态系统完整性,认为在某一特定的地理单元内,当生态系统包含所有本地物种及其完整的生态学进程,结构和功能没有受到人类活动的威胁与破坏,生态系统能持续繁衍生息,生境始终保持着最优状态时,生态系统具有良好的完整性。二是以生态系统的系统特性为切入点,从生态系统自然性、抵抗力和恢复力、可持续性等方面进行研究,其认为具有高度完整性的生态系统能够抵抗环境变化和压力,能在扰动后恢复其原始状态或轨迹,并能持续维持生态系统及其所有组成部分和生态过程,继续提供其能够提供的所有物质和生态服务。三是以景观生态学为切入点,从景观结构和景观稳定性两方面选取景观格局指数对生态系统完整性进行研究,其根据景观生态学结构与功能相匹配的原理,认为景观结构的变化必定引起功能的变动,在外界条件干扰下,景观生态系统具有一定抵抗与恢复的功能(即景观稳定性),可以维持和修复生态系统完整性。

因此,根据生态系统完整性内涵,生态系统完整性可以从生态系统的结构、过程、功能的完整性,生态系统稳定性和能抵御外界较小的压力等几个方面理解。而基于这一理解,借鉴加拿大国家公园生态系统完整性评估框架,搭建生态系统“格局-质量-功能-问题-压力”评估框架,并根据青藏高原生态系统特征,以综合性、代表性、实用性、可获取性和可度量性为原则,筛选指标,建立青藏高原生态系统完整性评价指标体系(表 1),并通过专家咨询法确定指标权重(表 2)。

1.2.2 评价指标标准化

生态系统完整性评价指标各异,单位不一,不能直接进行比较与计算,因此,需要将各指标进行归一化处理。本文采用最大最小值法实现评价指标的归一化。评价指标分为正向指标和负向指标,其中,正向指标是指对生态系统完整性具有积极促进作用的,其值越大,生态系统完整性越高;负向指标则是对生态系统完整性具有消极影响作用的指标,其值越小,生态系统完整性越高。因此两类指标的归一化方式分别为:

正向指标归一化公式

$$X' = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

负向指标归一化公式

$$X' = 1 - \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2)$$

式中, X' 为归一化后无量纲数值, X 为原始数值, $X_{\min}$ 为原始数值最小值, $X_{\max}$ 为原始数值最大值。

考虑青藏高原面积广阔,受气候、海拔等因素影响,区域之间生态系统类型存在较大差距,造成评估指标体系中反映生态系统质量的指标“地上生物量”在不同区域间不具有可比性,比如森林生态系统地上生物量普遍高于草地生态系统,不能据此判断森林生态系统质量好于草地生态系统。为了解决这一问题,研究中将地上生物量指标按照青藏高原十三个生态区分别进行归一化,每个生态区内植被类型基本一致,每个栅格单

元的生物量归一化值,是该单元生物量值与所在生态区顶级生态系统群落生物量的相对值,能够反映该栅格单元在所在生态区的生态系统质量水平,从而实现不同生态区不同类型生态系统间的质量比较。

表 1 青藏高原生态系统完整性远程评价指标体系

Table 1 Indicator system for remote evaluation of ecological integrity of the Tibetan Plateau			
一级指标 Primary indicators	二级指标 Secondary indicators	选择依据 Indicator selection basis	参考文献 References
生态系统格局 Ecosystem pattern	景观分离度指数	景观分离度指数主要描述某一景观中不同斑块数分离程度,分离度越高,斑块之间连通性越差,能够反映生态系统景观格局特征和结构的完整性	[16]
生态系统质量 Ecosystem quality	地上生物量	地上生物量是评估生态系统质量、健康状况的重要指标,能够反映生态系统过程的完整性	[17]
	植被覆盖度	植被覆盖度是评估生态系统质量和健康状况的另一重要指标,能够反映生态系统过程的完整性	[18-19]
生态系统功能 Ecosystem function	生物多样性维持功能	生物多样性是维持生态系统服务功能的基础,生物多样性越丰富,生态系统服务功能供给能力越强;生物多样性维持功能是生物多样性的替代指标	[20-22]
生态问题 Ecological problem	土壤侵蚀强度	土壤侵蚀强度能够反映生态系统受到的人类活动和气候变化干扰程度,同时,土壤侵蚀会导致土壤质量下降,生态系统相应的动物植物及以土壤为载体的微生物多样性的减少和植被生产力的降低,从而破坏生态系统结构和功能完整性	[23-24]
生态压力 Ecological press	人口密度	青藏高原生态环境非常脆弱,人类活动所造成的影响力会比其他地区影响力更大,能从各方面影响生态系统的结构和功能完整性	
	路网密度	路网密度的增加会造成野生动物生境的破碎化,同时道路修建过程也会对生态系统造成较大扰动	[25-26]
	畜牧量	放牧对生态所造成的压力较大,过度放牧会导致草地沙化等生态问题,严重影响着生态系统的结构和功能完整性	[27-28]
	夜间灯光指数	夜间灯光指数能够反映人类活动强度和范围,能够反映高原自然生态系统向半自然生态系统、人工生态系统过渡的程度;夜间灯光指数的增加,往往对应的是荒野和暗夜星空的减少	[29-30]

表 2 青藏高原生态系统完整性遥感评价指标权重值

Table 2 Weight of indicator system of the ecosystem integrity assessment of Qinghai-Tibet Plateau				
一级指标 Primary indicators	权重值 Weight	二级指标 Secondary indicators	权重值 Weight	指标方向 Indicator direction
生态系统格局 Ecosystem pattern	0.1	景观分离度指数	0.1	负向
生态系统质量 Ecosystem quality	0.2	地上生物量	0.1	正向
		植被覆盖度	0.1	正向
生态系统功能 Ecosystem function	0.1	生物多样性维持功能	0.1	正向
生态问题 Ecological problem	0.1	土壤侵蚀强度	0.1	负向
生态压力 Ecological press	0.5	人口密度	0.1	负向
		路网密度	0.15	负向
		畜牧量	0.15	负向
		夜间灯光指数	0.1	负向

同时,青藏高原一些生态系统的完整性如永久冰雪冰川、湖泊、河流不能通过指标体系中的地上生物量、植被覆盖度等指标直接衡量,目前这些生态系统受到人类活动干扰较小,在缺乏详细的地面调查数据的支撑下,作为替代方案,研究将这些生态系统的完整性直接赋值为 1。

1.2.3 生态系统完整性指数及分级标准

生态系统完整性指数是对生态系统完整性评价结果的直观展示,是在对单个评价指标的量化、分析与评价的基础上,考虑其对生态系统内部与外部环境之间的相互联系与作用,通过将各评价指标对生态系统完整

性的重要程度、影响程度进行量化,并综合分值的形式表达出生态系统完整性状况。本文将采用综合指数法对青藏高原生态系统完整性进行综合评价,计算生态系统完整性指数。

$$EI = \sum_{i=1}^n \omega_i A_i$$

(3)

式中, EI 是指生态系统完整性评价指数, n 为指标个数, ω_i 为第 i 个指标的权重值, A_i 为第 i 个指标归一化值, EI 越大,表明生态系统完整性越好。

同时,为了进一步分析生态系统完整性组成的两大部分生态系统自身的状态和生态系统压力情况,分别用景观分离度指数、地上生物量、植被覆盖度、生物多样性维持功能、土壤侵蚀强度五个指标构建生态系统状态指数;用人口密度、路网密度、畜牧量、夜间灯光指数四个指标构建生态系统压力指数。指数计算过程中,将相应的指标权重按比例扩展,使指数计算所用到的所有指标的总权重为 1。同时考虑到表达习惯,生态系统压力指数计算时,各压力指标按正向指标进行标准化,使生态系统压力指数计算结果越大,反映生态系统所成熟的压力越大。

为了分析不同区域生态系统完整性相对水平,参照国外国家公园生态系统完整性评价等级^[31],结合各指标划分标准和相互关系,参考自然断点法分级原理,构建青藏高原生态系统完整性评价等级标准(表 3)。

表 3 青藏高原生态系统完整性评价标准

Table 3 Standard of the ecosystem integrity evaluation of Qinghai-Tibet Plateau

生态系统完整性等级 Ecosystem integrity level	生态系统完整性指数 Ecosystem integrity index	生态系统完整性状况 Ecosystem integrity condition
优秀 Excellent	>0.9	生态系统的结构、组成、功能都在自然扰动范围内变化,生态系统格局良好,生态系统质量较高,生态系统服务功能较强,不存在或存在较轻的生态问题,微度人为干扰压力
良好 Good	0.8—0.9	生态系统的结构、组成、功能都在自然扰动范围内变化,生态系统完整且稳定,生态系统质量高,生态系统服务功能稳定,存在轻度的生态问题、较少的人为干扰压力
中等 Fair	0.7—0.8	生态系统的结构、组成、功能在自然扰动范围内变化,生态系统格局一般,景观连通性较好,但生态系统质量一般,存在一定程度的生态问题、人为干扰压力
较差 Poor	0—0.7	生态系统的结构、组成、功能的变化超出自然扰动范围,生态系统格局一般,破碎化程度高,生态系统质量较低,植被覆盖度低,生态系统服务功能受损严重,存在严重的生态问题,人为干扰压力大
极差 Terrible	0	生态系统的结构、组成、功能的变化严重超出自然扰动范围内,生态系统质量较低,生态系统功能丧失,存在严重的生态问题,人为干扰压力大,生态过程难以逆转

2 研究数据

由于青藏高原幅员辽阔,生态系统多样,本文将基于 RS 和 GIS 数据,选取 1 km×1 km 的栅格单元为评价单元,评价每个栅格单元的生态系统完整性状态,在此基础上分析青藏高原生态系统完整性格局。评估所需数据包括基础地理数据、生态数据和社会经济数据。

2.1 基础地理数据

气象数据:来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),包括降水量、气温、太阳辐射等。

植被区划数据:来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)。

生态分区数据:来源于中国生态系统评估与生态安全数据库(<http://www.ecosystem.csdb.cn/index.jsp>)。

中国行政区划数据:来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),包括省市县三级数据。

土壤数据:来源于土壤数据来源于寒区旱区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn/>),空间分辨率 1:100 万。

高程数据:来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),空间分辨率 1 km。

2.2 生态数据

景观分离度数据:数据时间 2015 年,空间分辨率 1 km,使用土地利用现状数据,通过 fragstats 4.2 中移动窗口法计算获取。其中,土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),空间分辨率 1 km。

土壤侵蚀数据:数据时间 2015 年,空间分辨率 1 km,根据 RUSLE 土壤侵蚀模型,综合土壤数据、多年年均和月均降雨量数据、植被覆盖度数据、土地利用数据和高程数据计算得到。

生物量数据:数据时间 2015 年,空间分辨率 1 km,由中国科学院科技服务网络计划(STS 计划)“全国生态环境变化(2010—2015)调查评估”项目提供。

NPP 数据:空间分辨率 1 km,通过朱文泉改进的 CASA 模型^[32],与植被类型、降水、气温和太阳辐射计算得到。

植被覆盖度数据:数据时间 2015 年,空间分辨率 1 km。提取于归一化植被指数(NDVI),通过最大值合成法得到年度 NDVI 数据,采用像元二分法得到植被覆盖度。

生物多样性维护能力数据:空间分辨率 1 km,根据生态红线划定指南要求,通过年均 NPP、高程、年均降水和年均气温数据计算得到。

2.3 社会经济数据

夜间灯光遥感数据:2015 年均数据,空间分辨率 0.05°,来源于美国国家海洋和大气管理局(<https://www.noaa.gov/>),是美国 NPP 对地观测卫星搭载的 VIIRS(Visible infrared Imaging Radiometer)可见光红外成像辐射仪获取的数据,经投影转换、重采样等步骤转化为 1 km 的栅格数据。

畜牧量数据:来源于各省(自治区)2015 年统计年鉴和社会发展统计公报,文本数据,通过与草地分布进行空间化处理后得到 1 km 的栅格数据。

人口密度数据:2015 年度数据,分辨率 1 km,来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),中国科学院地理科学与资源研究所的徐新良制作的中国人人口空间分布公里网格数据集。

道路数据:2015 年末数据,来源于 OSM(openstreetmap)矢量数据(<https://www.openstreetmap.org/>),通过进行线密度分析得到路网密度数据,空间分辨率 1 km。

3 结果与分析

3.1 生态系统状态指数格局

评估结果显示,青藏高原 77.13%的区域生态系统状态指数介于 0.4—0.6,18.08%的区域介于 0.6—0.8,3.52%的区域状态指数介于 0.8—1,仅有 1.28%的区域介于 0—0.4,总体而言,大部分区域生态系统状态维持适中的状态。从空间上看(图 2),青藏高原东部地区生态系统状态明显好于西部地区。以生态区进行分析,则祁连山森林与高寒草原生态区南部、江河源区-甘南高寒草甸草原生态区、秦巴山地落叶与常绿阔叶林生态区、藏东-川西寒温性针叶林生态区、藏东南热带雨林季雨林生态区生态系统状态整体良好,而藏南山地高寒荒漠草原生态区、藏北高原高寒荒漠草原生态区、帕米尔-昆仑山-阿尔金山高寒荒漠草原生态区、塔里木盆地-东疆荒漠生态区、阿里山地温性干旱荒漠生态区、柴达木盆地荒漠生态区整体处于差与适中的状态。

叠加高程、土地利用现状、降水、气温等图层进行分析可知,状态要素受高程和气候条件影响较大,从而导致植被覆盖度出现分异。在海拔较低、气候条件良好的区域,其植被覆盖以林地、高覆被草地为主,且以林地优势地类,生态系统稳定性较强;此外良好的植被条件为生物提供了较好的栖息繁育生长环境,生物多样性维护能力较强,生物量也较高,生态系统恢复力稳定性强。而随着海拔的攀升,地形起伏增大、气候条件趋于复杂,生物生长环境趋于恶劣,植被覆盖度、生物量逐渐降低,生物多样性维护能力减弱。

3.2 生态系统压力指数格局

评估结果显示,青藏高原 97.28%的区域生态系统压力指数低于 0.1,2.27%的区域压力指数介于 0.1—

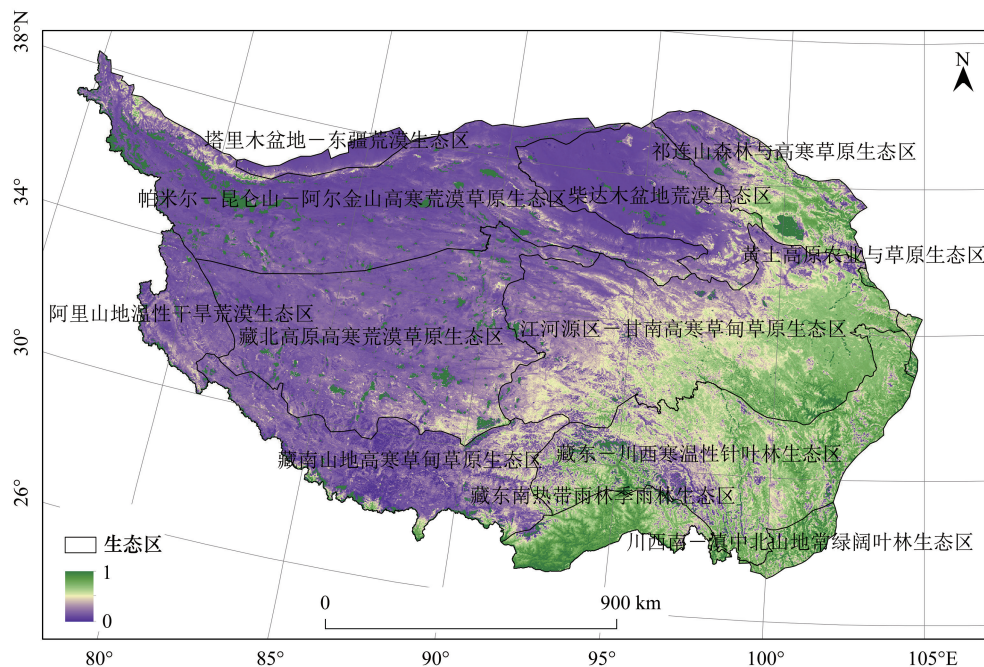


图2 青藏高原生态系统状态格局

Fig.2 Spatial pattern of ecosystem status index of the Qinghai-Tibet Plateau

0.2, 0.43%的区域压力指数介于 0.2—0.3, 0.03%的区域压力指数高于 0.3, 整体压力指数较低, 大部分区域面临的人类活动带来的压力较小。青藏高原压力指数格局分布具有较强的空间特点(图 3), 整体呈现东高西低、南高北低的格局, 压力较大的区域呈点状、团块状分布, 以人口密集的城镇、农村居民点为中心, 承受的生态压力越大, 越往外, 所面临的压力越小。

根据各压力要素的特点, 行政区和土地利用类型与压力要素有着明显的相关性, 主要分为三类。一是由人口、交通、畜牧业和城市化进程共同导致其压力较大, 如拉萨市和西宁市, 人口众多, 城市化进程相对较高, 农副产品需求量较高, 交通发达, 道路密度较高; 此外, 由于其海拔相对适中, 气候条件适中, 区域内农业生产条件良好, 土地利用类型以高、中覆被草地为主, 牧草质量较好, 为作为主要需求产业之一的畜牧业提供了良好的条件, 而大量的放牧导致区域自然生态系统压力较大, 综合社会发展、城镇化进程所导致的压力, 区域内生态系统压力整体较大。二是主要由道路密度导致其生态系统压力较大, 形成了以州府骨干为中心的道路压力较大的区域, 如位于柴达木盆地荒漠生态区, 其土地利用主要为荒漠及低覆被草地, 放牧条件较差, 以海西州格尔木市为例, 其区域内人口相对较多, 工业化相对发达(产盐), 且城镇化进程偏高, 道路网密布, 目前形成了以融公路、铁路、航空、管线、电信、电力等基础设施为一体的干线交通体系, 且被列入了全国性综合交通枢纽, 便捷的交通设施却对生态系统造成了较大的压力; 同理, 位于青藏高原东南侧的区域压力较大的区域亦是如此。三是主要由放牧导致压力较大, 如藏北高原高寒荒漠草原生态区、阿里山地温性干旱荒漠生态区所面临的压力最大, 主要为放牧所导致, 其主要原因为区域内草地分布较多, 但由于海拔较高, 气候条件差, 其草地虽然分布广泛但覆盖度较低, 多为中低覆被草地, 且草地质量一般, 区域内耕地较少, 农业生产多以牧业为主, 导致其畜牧量较高, 对生态系统造成了较大的压力, 同理, 位于青藏高原西北部的边缘区域亦是如此。

3.3 生态系统完整性指数格局

从生态系统完整性等级看(图 4), 青藏高原大部分区域维持了较好的生态系统完整性, 分别有 3.52%、7.51%和 70.71%的区域生态系统完整性等级为优、良、中, 但受人类活动胁迫和气候变化影响, 部分区域生态系统完整性受到破坏, 分别有 18.17%和 0.10%的区域生态系统完整性等级为较差和极差。从空间分布格局来看, 青藏高原东部区域生态系统完整性明显高于西部区域, 以生态分区为主进行划分, 生态系统完整性相对

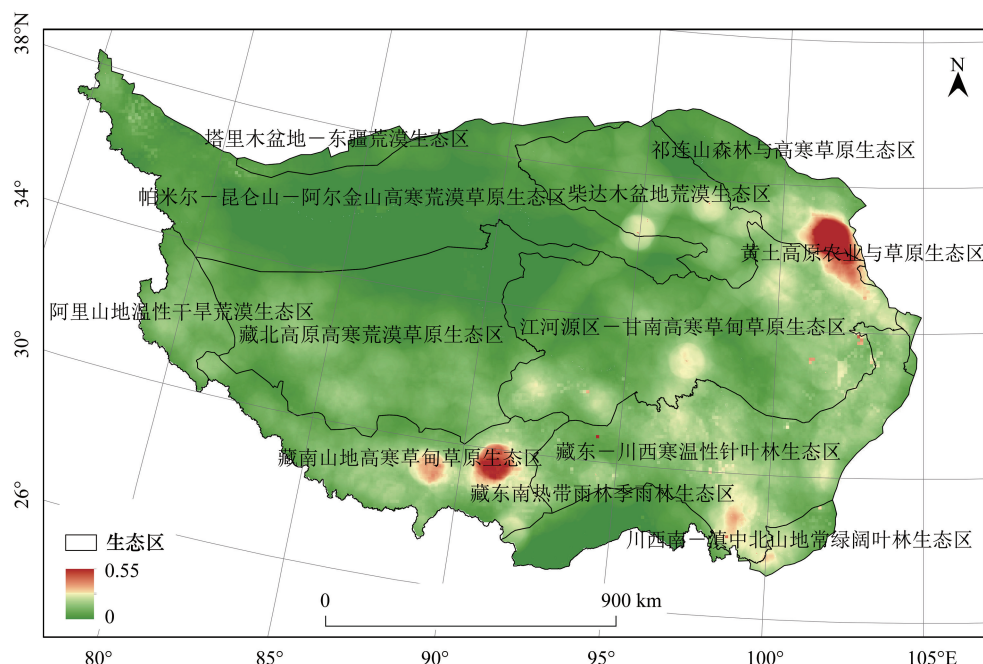


图3 生态系统压力指数空间格局

Fig.3 Spatial pattern of ecosystem stress index of the Qinghai-Tibet Plateau

较低的区域主要分布于阿里山地温性干旱荒漠生态区、藏北高原高寒荒漠草原生态区、藏南山地高寒荒漠草原生态区、柴达木盆地荒漠生态区,完整性指数相对较低的区域集中连片分布;生态系统完整性指数相对较高的区域主要分布于江河源区-甘南高寒草甸草原生态区东部、祁连山森林与高寒草原生态区中部、藏东南热带雨林季雨林生态区、川西南-滇中北山地常绿阔叶林生态区和藏东-川西寒温性针叶林生态区。

生态系统完整性等级为优秀的区域零散分布于青藏高原西部,主要为湖泊、冰川或海拔高、人迹罕至的地方,由于没有人类干扰,生态系统维持了其完整性。生态系统完整性等级为良好的区域主要分布于青藏高原东部,如藏南地区、川西高原、横断山脉以及祁连山等区域。其原因为:一是区域内植被覆盖类型以林地为主,生态系统结构、功能稳定,抗干扰能力强;二是区域内地形起伏大,种养殖条件差,城市化程度低,生态系统受人类干扰较小,维持了较高的生态系统完整性。

生态系统完整性中等区域主要分布于青藏高原中部及东部区域。从自然因素的角度来看,区域内土地利用类型为针叶林地、中高覆被草地,整体植被覆盖度高,生态系统结构复杂且完整,生态系统稳定性、恢复力较强。从人为因素的角度来看,东部地区面临相对较大的人口和人类活动压力,主要表现为道路修建和过度畜牧,对自然生态造成了较大的影响,但由于自然条件相对优越,生态系统的恢复力较高,加之近年来的生态保护政策引导,区域内生态系统完整性整体维持了中等水平。对于西部地区,由于海拔较高,土地利用类型为荒漠草原或者荒漠,区域内存在大面积的无人区(如可可西里等),自然生态未受到人类干扰,处于自身扰动范围内,因此生态系统完整性维持较好,如帕米尔-昆仑山-阿尔金山高寒荒漠草原生态区、藏北高原高寒荒漠草原生态区东部等。

生态系统完整性较差的区域则主要分布于青藏高原西部地区以及东部人为活动较为密集的区域;生态系统完整性极差的区域则主要呈团状分布于青藏高原的城镇、州府骨干等人口聚集区,多为人工生态系统。其原因主要为:一是作为青藏高原少数的城镇化水平较高的省会城市或者州府骨干,其面临着较大的生态压力,城镇的扩张压缩周边的自然生态空间,破坏区域内生态结构与进程;而受限于地理位置和地形条件,城镇居民的日常生活需求对自然资源依赖性强,导致资源的过度使用,如耕地、畜牧等,加剧了区域内所面临的生态问题和生态保护压力,如藏南高寒草原草甸生态区;二是城镇的特性反映了区域内以人工生态系统为主,因此城

市生态系统结构较为单一,人为主导性强,自然恢复力差;三是部分区域内植被覆盖度较低,以中低覆被草地、荒漠为主,自然条件较差,但却存在着较大的人为干扰因素,超出其自身可扰动范围,如阿里山地温性干旱荒漠生态区、藏北高原高寒荒漠草原生态区西部等。

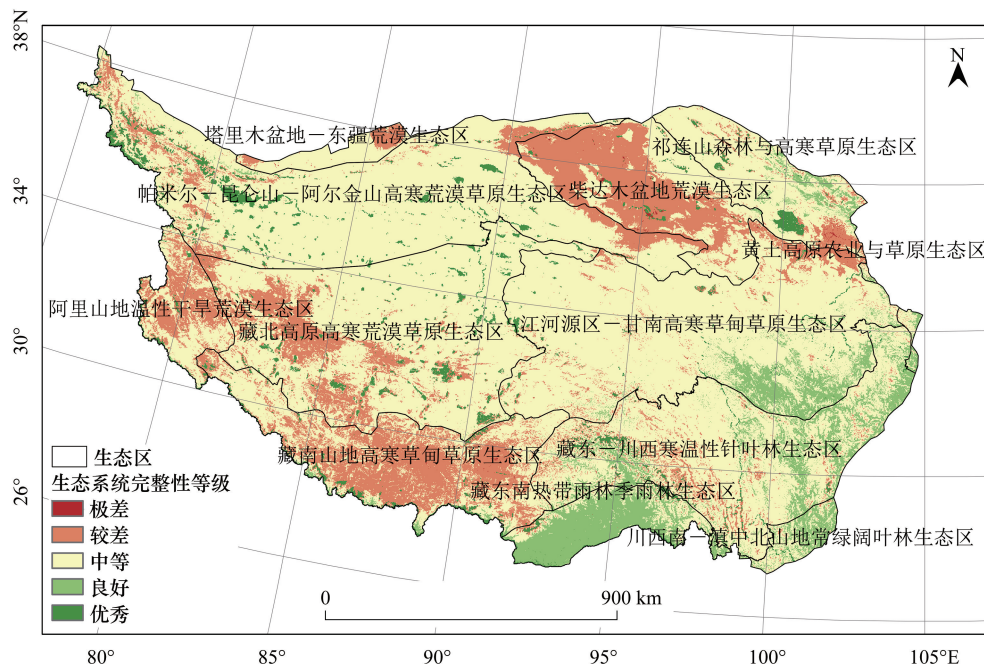


图4 青藏高原生态系统完整性分级空间格局

Fig.4 Graded spatial pattern of ecosystem integrity of the Qinghai-Tibet Plateau

3.4 基于生态系统完整性的青藏高原国家公园群建设时序

在第二次青藏高原科学考察研究初始阶段,樊杰等^[10]基于地域功能理论,论证了国家公园群的基本功能定位,从形成国家公园群的要求探索国家公园备选地的遴选条件,通过对生态地理区划提供的不同生态系统具有代表性的地域空间进行初步评价,提出了青藏高原国家公园群草案。目前,共有21个备选区,以保护具有代表性的生态系统、河流源头、自然地貌、珍稀生物为主,兼顾区域社会文化。评价结果显示(表4),青藏高原国家公园群21个国家公园潜在建设区生态系统完整性等级大多处于中等状态(此处的国家公园群潜在建设区域的统计数值主要为位于本研究中青藏高原范围内的区域),其中,独龙江三江并流、雅鲁藏布大峡谷国家公园生态系统完整性良好,札达土林、水上雅丹国家公园生态系统完整性较差。

国家公园建设的主要目的是保护生态系统完整性与原真性。已建立的国家公园体制试点区坚持把生态保护摆在第一位,实行了统一管理、整体保护和系统修复,有效促进了斑块之间的融合,增强了自然生态系统的完整性与原真性,同时也保护了生物多样性、提升了生态系统服务功能。青藏高原生态系统完整性评价结果,能够为第三极国家公园群的规划布局 and 各个国家公园建设的优先级别的确定提供支撑。仅从生态系统完整性角度看,青藏高原可用于建设国家公园备选地数量多、分布广。从加强生态系统完整性保护、优化生态安全屏障的角度看,除了目前已建立的三江源、祁连山、大熊猫、香格里拉国家公园体制试点区外,可优先启动生态系统完整性高的雅鲁藏布大峡谷、色林错-普若岗日等旗舰国家公园,以及独龙江三江并流、若尔盖、贡嘎山、稻城亚丁等一般国家公园建设(图5);待条件成熟后,再逐步启动其他具有景观、文化价值的国家公园建设。

表 4 青藏高原国家公园潜在建设区域生态系统完整性

Table 4 The ecosystem integrity index of the potential construction area in Qinghai-Tibet Plateau					
潜在国家公园 Potential national park	国家公园类型 Type of national park	自然生态 Character of nature ecology	社会文化 Character of social culture	生态系统完整性指数 Ecosystem integrity index	生态系统完整性中等以上区域面积百分比/% Percentage of ecosystem integrity above the fair level of the national park
独龙江三江并流	一般国家公园	世界最长峡谷、原始而完整的亚热带山地森林生态系统	独龙族、傈僳族、怒族、白族、普米族等十多个少数民族民俗	0.82	99.15
雅鲁藏布大峡谷	旗舰国家公园	地球最深的峡谷、南迦巴瓦峰、山地热带雨林	珞巴族和门巴族聚居地	0.8	95.07
大熊猫	旗舰国家公园	大熊猫栖息地	藏、羌等少数民族聚居区	0.79	95.71
若尔盖	一般国家公园	高寒沼泽湿地生态系统、野生动物	安多藏族文化、历史宗教文化、红军长征文化	0.79	99.56
扎日神山	一般国家公园	喜马拉雅山脉南坡、错噶湖	苯教、印度教、藏传佛教、普那教四大教派公认的朝圣地之一	0.79	98.02
贡嘎山	一般国家公园	大规模低海拔海洋性冰川、冰山湖泊	藏传佛教文化、藏族、彝族等民族风情浓厚	0.78	88.40
帕米尔	跨国国家公园	荒漠生态、慕士塔格冰川	中巴走廊、古丝绸之路南道与中道、塔吉克族风情	0.78	80.19
香格里拉普达措	一般国家公园	高山针叶林区、高原湖泊湿地、滇金丝猴	藏族文化和宗教文化浓郁	0.77	100
澜沧江园区	一般国家公园	澜沧江源头	藏族民俗	0.75	99.15
祁连山	一般国家公园	温带高原针叶林、黑河、疏勒河与石羊河的发源地	河西走廊的重要通道、历史古迹众多	0.75	95.18
黄河园区	旗舰国家公园	黄河源头、江源湿地	唐蕃古道、格萨尔王史诗	0.75	96.40
稻城亚丁	一般国家公园	极高山自然生态系统、野生动植物、冰川	康巴文化区重要组成部分、丰富的各派宗教文化	0.74	81.94
色林错-普若岗日	一般国家公园	西藏第一大湖泊和中国第二大咸水湖、陆域第三大冰原	象雄文化遗迹、尼阿底遗址	0.74	87.33
珠峰	跨国国家公园	世界最高峰、山地垂直景观、大陆型冰川密布	中国与尼泊尔边境、中国高度的象征	0.74	46.51
长江园区	旗舰国家公园	长江源头、江源湿地	藏传佛教、文成公主传说	0.73	97.43
昆仑山可可西里	一般国家公园	高原高寒草甸、野生动物、世界上最新、最长的断裂带	中华第一神山，誉为“万山之祖”	0.73	92.45
海西盐湖	一般国家公园	中国最大的天然盐湖、万丈盐桥	柴达木循环经济示范区的展示窗口	0.73	30.85
神山圣湖	旗舰国家公园	冈底斯山脉和喜马拉雅雪峰孕育着南亚诸大河流	印度教和藏传佛教徒都视冈仁波齐为“神山”	0.72	65.39
扎达土林	一般国家公园	世界上分布面积最大、最典型的新近系地层风蚀形成的土林	古格王国历史遗址、藏族聚居区	0.69	9.61
水上雅丹	一般国家公园	西台吉乃尔湖上雅丹地貌景观	大柴旦盐湖矿区文化与蒙古族历史文化	0.69	48.81

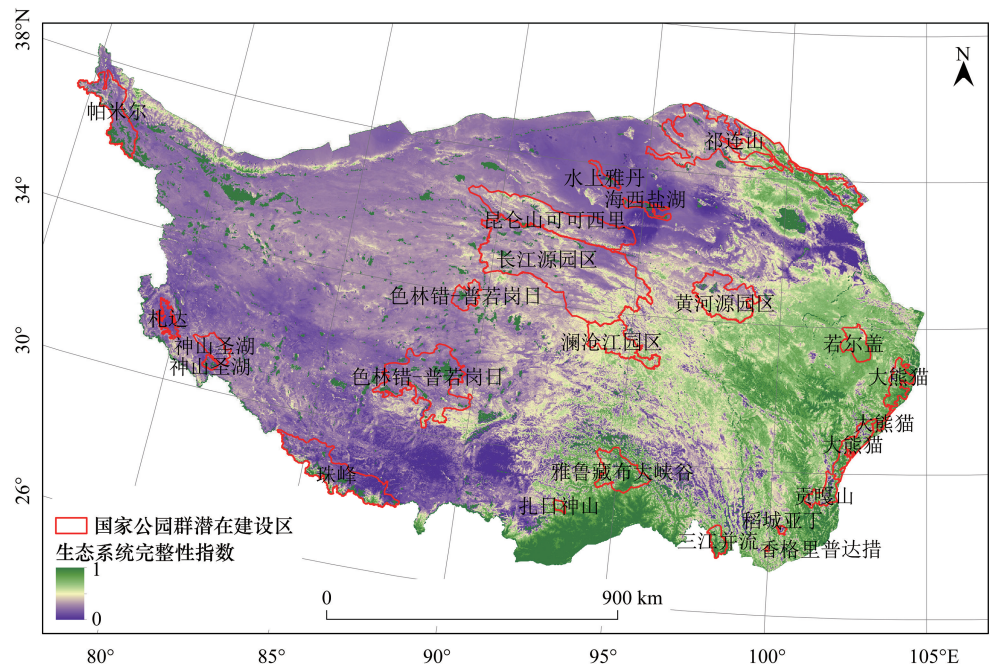


图5 青藏高原生态系统完整性及其与国家公园备选区间的关系

Fig.5 Spatial pattern of ecosystem integrity index of the Qinghai-Tibet Plateau and the relationship with the potential construction areas of national parks

4 讨论与结论

青藏高原作为一个独特的地理单元,具有相对完整、全球独特的自然和人文生态系统,生态功能显著,国家代表性突出。但近年来城镇化、旅游开发、路网等基础设施建设,使其生态系统完整性受到一定威胁。为了解青藏高原生态系统完整性维持状况,为后续的生态保护政策制定和自然保护地体系优化提供支撑,本文基于生态系统完整性内涵,构建了生态系统完整性远程评估指标体系,对青藏高原生态系统完整性进行了综合评估。

结果显示,青藏高原大部分区域生态系统完整性维持在较好或中等的水平,总体具有非常高的保护价值。生态系统完整性等级为优的区域零散分布于高原西部,主要为湖泊、冰川或海拔高、人迹罕至的地方;生态系统完整性较好的区域主要分布于青藏高原东部,如藏南地区、川西高原、横断山脉以及祁连山等区域。生态系统完整性等级为中等的区域主要分布于青藏高原中部及东部区域;生态系统完整性较差的区域则主要分布于青藏高原西部地区以及东部人为活动较为密集的区域;生态系统完整性极差的区域则主要呈团状分布于青藏高原的城镇、州府骨干等人口聚集区。

研究主要通过结合生态系统面临的生态问题和人为压力,对青藏高原生态系统状态的角度进行评估初步的评估,根据所构建的指标体系,选择根本影响因素分析其对生态系统完整性的影响,结果表明青藏高原生态系统受高程、水热条件的综合影响较大,整体表现为海拔越低、水热条件越好的区域,生态系统完整性越高。究其原因主要为:海拔较低,为大多数陆生生物的生长提供了最基本的条件,结合区域内的水热条件,生物间的适应性差异逐渐明显,逐渐分化为林地、草地、荒漠草原、荒漠等不同的土地覆被类型,为生物的生长、繁育提供了不同的生存条件。根据景观生态学中结构与功能相匹配的结论^[33],生态系统结构越复杂,其生态功能越丰富,恢复力越强。当生态系统以林地或中高覆被草地为优势地类时,其生态系统结构较为复杂,生物生长发育环境良好,具有较高的恢复力,生态系统不易受到自然因素严重破坏;而当生态系统以荒漠草原、荒漠等为优势地类时,其生态系统结构单一,生物多样性降低,恢复力差,极易受到外界因素干扰,生态系统非常脆

弱,生态系统完整性容易被破坏。

青藏高原面积广阔,地形条件复杂,存在较多人迹罕至的区域,为初步评价生态系统完整性情况,本研究采用了遥感、地理信息系统相结合的方式进行了远程性评价,但其中仍存在一定局限性,需要后续科考中予以解决。一是部分指标数据处理方法有待进一步提升。如生物多样性是生态系统完整性评估的核心指标,但由于缺乏具体的物种及其分布数据,研究选择生物多样性维持功能作为替代指标,按照《生态红线划定指南》中 NPP 评估法进行评估,难免与实际的生物多样性分布格局存在差异,对评估结果造成一定影响,因此在进一步的研究中,需要对此进行改进。二是生态系统完整性远程评价多针对于陆地自然生态系统,用到地上生物量、植被覆盖度、NPP 等生态指标和参数,但研究区域有大量的湖泊、河流、永久冰川积雪,这些生态系统的完整性难以通过上述生态指标评估,受数据制约,缺乏可替代的评估方法;研究中考虑到青藏高原湖泊、河流、永久冰川积雪受人类干扰较小,基本维持在自然状态,而且具有极其重要的水源涵养和水文调蓄功能,因此,评估中直接将这类生态系统的完整性赋值为 1;但实际上,在一些人口密集区,这类生态系统也或多或少受到人类活动的干扰,该部分缺乏实际量化分析。三是研究方法有待进一步改进。研究通过遥感、地理信息的方式从宏观的角度对生态系统完整性进行初步评价;而限于数据可获取性,实地验证数据较为缺乏,未从微观角度对小区域生态系统完整性进行论证。但随着第二次青藏科考工作的推进,一些野外调查数据将日渐完备,后续研究中,可以借鉴 TLA 评估框架中的快速评估方法,建立遥感指标和地面调查指标相结合的评估方法,从而得到更贴近实际的结果。

参考文献 (References):

- [1] 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*. St. Ottawa, Canada: Lucie Press, 1993.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Liechti P, Dzialowski A. Final Assessment of the Ecological Integrity of Wolf Creek (Leavenworth County, Kansas). Lawrence, Kansas: Central Plains Center for Bioassessment (CPCB) and Kansas Biological Survey, 2003.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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//2006 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing. Denver, CO, USA: IEEE, 2006: 686-689.
- [8] 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.
- [9] 姚檀栋. 青藏高原水-生态-人类活动考察研究揭示“亚洲水塔”的失衡及其各种潜在风险. *科学通报*, 2019, 64(27): 2761-2762.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 王宁练, 姚檀栋, 徐柏青, 陈安安, 王伟财. 全球变暖背景下青藏高原及周边地区冰川变化的时空格局与趋势及影响. *中国科学院院刊*, 2019, 34(11): 1220-1232.
- [13] 张惠远. 青藏高原区域生态环境面临的问题与保护进展. *环境保护*, 2011, (17): 20-22.
- [14] 郝爱华, 薛炯, 彭飞, 尤全刚, 廖杰, 段翰晨, 黄翠华, 董斯扬. 青藏高原典型草地植被退化与土壤退化研究. *生态学报*, 2020, 40(3): 964-975.
- [15] 张德铨, 刘林山, 王兆锋, 摆万奇, 丁明军, 王秀红, 阎建忠, 许尔琪, 吴雪, 张炳华, 刘琼欢, 赵志龙, 刘峰贵, 郑度. 青藏高原土地利用与覆被变化的时空特征. *科学通报*, 2019, 64(27): 2865-2875.

- [16] 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.
- [17] 罗天祥, 李文华, 冷允法, 岳燕珍. 青藏高原自然植被总生物量的估算与净初级生产量的潜在分布. *地理研究*, 1998, 17(4): 337-345.
- [18] Tucker C J, Slayback D A, Pinzon J E, Los S O, Myneni R B, Taylor M G. Higher northern latitude normalized difference vegetation index and growing season trends from 1982 to 1999. *International Journal of Biometeorology*, 2001, 45(4): 184-190.
- [19] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, Asrar G, Nemani R R. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 1997, 386(6626): 698-702.
- [20] Hector A, Bagchi R. Biodiversity and ecosystem multifunctionality. *Nature*, 2007, 448(7150): 188-190.
- [21] 张中华, 周华坤, 赵新全, 姚步青, 马真, 董全民, 张振华, 王文颖, 杨元武. 青藏高原高寒草地生物多样性与生态系统功能的关系. *生物多样性*, 2018, 26(2): 111-129.
- [22] Hooper D U, Adair E C, Cardinale B J, Byrnes J E K, Hungate B A, Matulich K L, Gonzalez A, Duffy J E, Gamfeldt L, O'Connor M I. A global synthesis reveals biodiversity loss as a major driver of ecosystem change. *Nature*, 2012, 486(7401): 105-108.
- [23] 史志华, 王玲, 刘前进, 张含玉, 黄萱, 方怒放. 土壤侵蚀: 从综合治理到生态调控. *中国科学院院刊*, 2018, 33(2): 198-205.
- [24] 魏翔, 李占斌. 土壤侵蚀对生态系统的影响. *水土保持研究*, 2006, 13(1): 245-247, 264.
- [25] Saunders S C, Mislivets M R, Chen J Q, Cleland D T. Effects of roads on landscape structure within nested ecological units of the Northern Great Lakes Region, USA. *Biological Conservation*, 2002, 103(2): 209-225.
- [26] Forman R T T, Alexander L E. Roads and their major ecological effects. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1998, 29: 207-231.
- [27] 向明学, 郭应杰, 古桑群宗, 张晓庆, 潘影, 武俊喜, 拉多. 不同放牧强度对拉萨河谷温性草原植物群落和物种多样性的影响. *草地学报*, 2019, 27(3): 668-674.
- [28] 高露, 张圣微, 朱仲元, 徐冉, 张鹏. 放牧对干旱半干旱草原植物群落结构和生态功能的影响. *水土保持研究*, 2019, 26(6): 205-211.
- [29] 陈颖彪, 郑子豪, 吴志峰, 千庆兰. 夜间灯光遥感数据应用综述和展望. *地理科学进展*, 2019, 38(2): 205-223.
- [30] 董晨炜, 曹宇, 谭永忠. 基于夜间灯光数据的环杭州湾城市扩张及植被变化. *应用生态学报*, 2017, 28(1): 231-238.
- [31] Schroeder M A, Gorrell J, Haegen M V, Anthony J, Duff A, Foisy J, Gibilisco C, Cosentino B. Ecological Integrity Monitoring of Wildlife Areas in Washington State: Pilot Study Report for the 2011-2013 Biennium. Olympia, Washington: Washington Department of Fish and Wildlife, 2013.
- [32] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 413-424.
- [33] 李鑫, 田卫. 基于景观格局指数的生态完整性动态评价. *中国科学院研究生院学报*. 2012, 29(6): 780-785.