

三打古自然保护区生态服务功能变化及驱动因子分析

尧良杰,王成武*,汪宙峰,张莽,谢亮

(西南石油大学 地球科学与技术学院,成都 610500)

摘要 以三打古自然保护区为研究区,从自然保护区功能区划的视角,关注其土地利用及生态服务功能的时空变化,采用InVEST模型对该区域的碳储量及生物多样性维持功能进行评价和分析,并运用地理探测器分析了其时空变化的驱动因子.结果表明:(1)2000—2020年,研究区的地类变化较为明显,北部中低海拔区域草地转化为林地,偏高海拔区域林地转为草地,西北区域的局部地区出现冰川融化的趋势,形成若干个分散的湖泊.(2)2000、2010、2020年,研究区的碳存储总量分别为7.349、7.348、7.151 Tg,整体呈先稳定后下降的趋势.(3)2000—2020年,研究区的生境质量均保持较好水平,整体呈现先增加后稳定的趋势.(4)2000—2020年,研究区生态服务功能空间分异主要受高程、降雨、土壤、植被覆盖指数的影响,其中高程与植被覆盖指数的影响最为显著;各因子间的交互作用均强于单一因子的作用效果,其中协同作用最强的为高程协同植被覆盖指数类型(>0.7).研究区的生态服务功能较好,西北区域大幅增强,林地区域略微下降,靠近冰川地区的变化相对复杂.

关键词 三打古自然保护区;生态服务功能;InVEST模型;地理探测器

中图分类号 X171.1 文献标志码 A 文章编号 1672-4321(2025)04-0455-09

doi:10.20056/j.cnki.ZNMDZK.20240739

Analysis of changes in ecological service functions and driving factors in Sandagu Nature Reserve

YAO Liangjie, WANG Chengwu*, WANG Zhoufeng, ZHANG Qiao, XIE Liang

(School of Earth Science and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract Taking Sandagu Nature Reserve as a research topic, from the perspective of functional zoning of nature reserves, special attention was paid to the spatiotemporal changes of land use and ecological service functions, and the carbon storage and biodiversity maintenance function of the region was evaluated and analyzed by using the InVEST model. And the driving factors of the spatiotemporal variation were analyzed by using the geographic detector. The results showed that: (1) From 2000 to 2020, the land-use types in the studied area changed significantly, some grasslands in the middle and low altitude areas of the north were converted into woodland, and some woodlands in the high altitude areas were converted into grasslands; the glaciers melted in some areas of the northwest region and several scattered lakes were formed. (2) In 2000, 2010, and 2020, the total carbon storage in the studied area was 7.349, 7.348 and 7.151 Tg, respectively, unvaried in the first decade and then decreased. (3) From 2000 to 2020, the habitat quality in the studied area were maintained at a good level, and the overall habitat quality first increased and then stabilized. (4) From 2000 to 2020, the spatial differentiation of the ecological service functions in the studied area was mainly affected by elevation, rainfall, soil and vegetation cover index, among which elevation and vegetation cover indices had the most significant impact. The effect of the interaction between various factors was stronger than that of a single factor, and the strongest synergy occurred between the elevation and vegetation cover indices type (more than 0.7). The ecological service functions of the studied area were good, of which the northwest region was greatly enhanced, while the woodland area was decreased slightly, and the changes in the area near the glacier were relatively complex.

Keywords Sandagu Nature Reserve; ecological service functions; InVEST model; geodetector

收稿日期 2023-11-20

*通信作者 王成武(1973-),男,副教授,研究方向:生态环境承载力,E-mail:314415194@qq.com

基金项目 四川省科技计划资助项目(2023YFS0406)

近年来,世界各地极端气候事件层出不穷,生态环境形势愈发严峻.三打古自然保护区作为四川西北片区生态系统的重要组成部分和国内生物多样性保护的重要地区,具有极其重要的生态意义.保护区及周边的冰川是青藏高原东部乃至亚洲最东缘极具代表性的小型山岳冰川,其敏感地反映着四川西北地区气候环境和生态环境的变化,具有极为重要的研究价值.近年来,该地区依托冰川地质遗迹、森林草甸、雪山河流、野生动物等生态景观资源,在保护区的外围建设有旅游景区、四川达古冰川国家地质公园等,大力发展生态旅游.这在一定程度上加大了三打古自然保护区的环境压力.因此,研究三打古自然保护区的生态服务功能变化及其驱动因素,对四川西北地区的生态环境改善、生物多样性保护、气候变化适应及自然资源的开发与利用具有重要的研究价值.

生态系统服务的概念最早出现于 KING 与 HELLIWELL^[1-2]的研究.生态系统服务包括供给服务、调节服务、文化服务以及支持服务^[3],其中比较关键的生态服务功能包括碳存储、水源涵养、土壤保持、生境质量、防风固沙等5个方面.自1974年 HOLDER 和 EHRlich^[4]拓展生态系统服务功能以来,生态系统服务功能研究已发展成为生态学、生态经济学研究的一个重要分支,并在21世纪初成为极具价值的研究方向.其中, WESTMAN^[5]、EHRlich^[6]等均对生态系统服务功能的概念进行深入探讨.1998年, COSTANZA 等发表的“*The value of the world's ecosystem services and natural capital*”引起学术界极大的反响,该研究将生态系统的产品和服务统称为生态系统服务,即由自然生态系统的生境、物种、生物学状态、性质和生态过程所产生的物质和维持的良好生活环境对人类提供的直接福利^[7].1999年, DAILY 重新定义生态系统服务的概念,提出生态系统服务即自然界的生态系统及其组成物种所形成、维持和实现人类生存的所有环境条件和过程^[8].21世纪初,欧阳志云、谢高地、赵景柱等^[9-12]依托国内实例研究,提出了适合中国生态系统服务功能评价体系,推动了生态服务功能评价方法的发展.21世纪后,生态系统服务功能的应用研究逐渐变多.2002年, TONG 等^[13]运用统计学、地理信息系统(Geographic Information System, GIS)和水文模型对俄亥俄州各流域进行土地利用类型与河流

多种水质指标的相关研究,进一步证实两者之间存在显著相关性.2009年, NELSON 等^[14]采用 InVEST 模型对美国俄勒冈州威拉米特河流域的生态系统服务功能进行分析,并预测其动态变化.2013年,孟彩红等^[15]通过对吉林省生态系统服务功能的评估,系统评述了 InVEST 模型对研究区生态系统服务功能的碳储存、水源、土壤、生境质量和防风固沙等5个方面的应用.2014年, WATANABE 等^[16]利用能值分析法对 Taquarizinho 流域的水循环和碳循环展开了服务价值评估.2016年,覃瑞等^[17]结合土地利用方式评价了巴东金丝猴国家级自然保护区的植物多样性.2022年,王舒等^[18]采用 GIS 技术结合生态系统服务价值核算方法,对三峡库区生态系统服务进行生态风险评估及生态分区构建.上述研究采用的方法主要包括物质量评估法、能值评估法、价值量评估法和生态模型法.其中,物质量评估法、能值评估法、价值量评估法多为定性研究方法,存在主观性强、数据获取难度大、计算繁琐等不足,而生态模型法则更注重研究的定量化、可视化等.

三打古自然保护区作为川西生态系统的重要组成部分,其与周边的森林、草地、冰川等其他生态子系统共同发挥着区域生态维持作用,承担着青藏高原东缘的生态服务功能.该保护区内动物资源丰富,生态系统倾向于森林或草原生态系统.由于三打古自然保护区所处海拔相对较高,其生物多样性对生物栖息地环境具有特殊的意义.栖息地生境质量的破坏会对物种的生存产生不同程度的威胁^[19].因此,生境质量可以直接反映生物栖息地的适宜性,在一定程度上反映区域生态系统的生物多样性状况^[20]和区域生态系统的健康状况,体现区域生物多样性保护成效^[21].本文采用 InVEST 模型计算三打古自然保护区的碳储量和生境质量,以分析评价其2000—2020年生态服务功能的时空演变,并采用地理探测器分析其空间分异的驱动因子,以期对三打古省级自然保护区的保护与利用提供参考.

1 研究方法及数据来源

1.1 研究区概况

四川三打古自然保护区始建于2000年12月29日,位于四川省阿坝藏族羌族自治州黑水县西北部(图1),区域总面积62319 hm²,地处高原气候区

域的川西区,具有山地到高原丘陵过渡的高山峡谷地貌.该区海拔在2392~5138 m之间,区内气候具有干湿季分明,气温年较差小,日较差大,冬季日照充足,夏季降水集中的显著特点.三打古自然保护区拥有丰富的动植物资源,其主要保护对象是川金丝猴,在中国生物多样性保护中占重要地位.

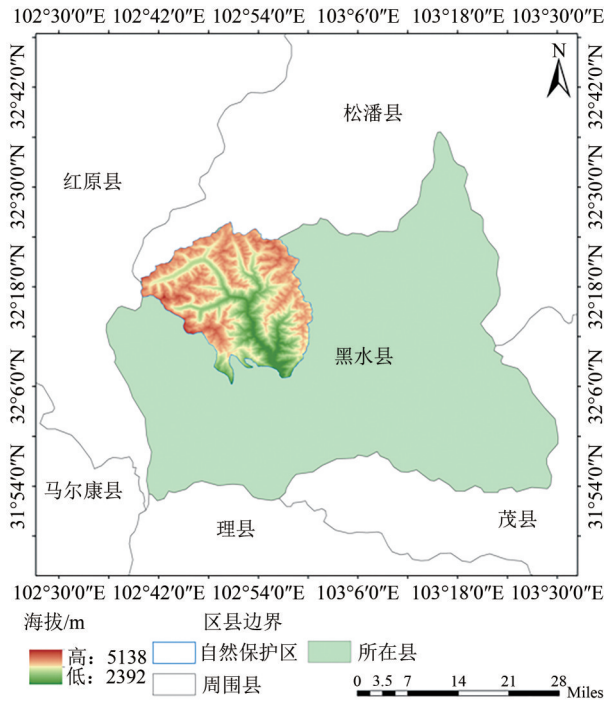


图1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical location of the study area

1.2 InVEST模型

InVEST模型是基于GIS平台,以空间数据为基础,对各种生态系统服务功能进行量化,并进行可视化的评估模型.本文以碳存储和生物多样性维持表征自然保护区的生态服务功能,故采用该模型中的碳存储子模型与生境质量子模型分析其变化情况.

1.2.1 碳存储模块

碳存储模型原理是基于土地利用数据,对各个地类的地上生物量、地下生物量、土壤和死亡有机物的碳存储量汇总,计算一个区域的生态系统的碳量总储存.通过分别统计各种地类地上碳库、地下碳库、土壤碳库和死亡有机物碳库的平均碳密度,最后平均碳密度与各土地类型的面积相乘来获得碳储存总量^[22],其公式为:

$$C_i = C_{i_above} + C_{i_below} + C_{i_soil} + C_{i_dead}, \quad (1)$$

$$C_{total} = \sum_{i=1}^n C_i \times S_i, \quad (2)$$

式(1)-(2)中: i 为第 i 类土地利用类型; C_i 为第 i 类土地利用类型碳储量, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$; C_{i_above} 表示地上生物碳储存量, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$; C_{i_below} 表示地下生物碳储存量,

$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$; C_{i_soil} 表示土壤碳储存量, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$; C_{i_dead} 表示死亡有机物碳储存量, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$; C_{total} 表示研究区的总碳储存量, Tg ; S_i 为第 i 类土地利用类型面积, hm^2 .

1.2.2 生境质量模块

InVEST模型的生境质量模块是从生境质量的角度来评估生物多样性,模型认为物种越丰富,自然环境条件越好,受威胁源影响程度越低,生境质量越高.该模型是在土地利用基础上,结合各类威胁源以及敏感程度来分析计算生境质量指数,从而评判生态系统生物多样性维持功能.

1.3 地理探测器

地理探测器是王劲峰^[23]等提出的一种用于探测地理事物间的空间分层分异性,从而分析其空间分异的驱动因子的统计学方法.地理探测器不仅可以用于探测驱动因子的空间分异,还可以探测两因子交互作用于因变量时的作用程度.因此,本文采用地理探测器中的因子探测和交互作用探测模块,分析影响三打古自然保护区生态系统碳储量以及生境质量空间分异的驱动因子作用及相互作用.

1.3.1 因子探测

因子探测旨在探测 Y 的空间分异性以及探测某因子 X 多大程度上解释了属性 Y 的空间分异,用 q 值度量,其表达式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{i=1}^I n_i \delta_i^2}{n \delta^2}, \quad (3)$$

式(3)中: q 为驱动因子 X 对 Y 的解释强度,值域为 $[0 \sim 1]$; I 为研究区内研究对象的分类数量; n_i 和 n 分别为第 i 类研究区样本数量和研究区整体样本数量; δ_i^2 和 δ^2 分别为第 i 类研究区碳储量或生境质量方差和研究区整体碳储量或生境质量方差.

1.3.2 交互探测

用于识别不同风险因子 X_s 之间的交互作用,即评估因子 X_1 和 X_2 共同作用时是否会增加或减弱对因变量 Y 的解释力,或这些因子对 Y 的影响是相互独立的.评估的方法是首先分别计算两种因子 X_1 和 X_2 对 Y 的 q 值: $q(X_1)$ 和 $q(X_2)$,并且计算它们交互时的 q 值: $q(X_1 \cap X_2)$,比较 $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$ 与 $q(X_1 \cap X_2)$ 的大小.两个因子之间的关系可分为以下几类(表1).

地形是影响生态服务功能的重要因素,不同的地貌、海拔会影响土壤环境、动植物分布等,进而对生态服务功能产生影响;气候与植被覆盖指数直接影响区域植被分布情况;不同的土壤类型决定土壤水分、土壤pH值等土壤环境,从而影响生态服务功

表1 交互探测作用关系

Tab. 1 Interaction detection relationships

判断依据	类型
$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$	非线性减弱
$\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$	单因子非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$	双因子增强
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立

能. 三打古省级自然保护区是省级风景名胜区, 承担着旅游服务功能, 故 GDP 也会在一定程度上影响生态服务功能变化. 综合以上因素, 结合数据的可获取性, 本文将高程、坡度、气温、降雨、植被覆盖指数、GDP、土壤类型作为自然保护区生态服务功能的影响因子, 以进行生态服务功能空间分异驱动因子分析.

1.4 数据来源

本文所需的土地利用数据来自国家地球科学数据中心 (<http://www.geodata.cn>), 其分辨率为 30 m. 本文参考已有文献的全国碳密度数据^[24-27], 根据 ALAM 等^[28]、陈光水等^[29]、GIARDINA 等^[30]的研究成果, 以降雨与气温作为修正因子(表 2)对全国碳密度数据进行修正, 修正公式为:

$$C_{BT} = 28 \times T + 398, \quad (4)$$

$$C_{BP} = 6.789 \times e^{0.0054P}, \quad (5)$$

$$C_{SP} = 3.3968 \times P + 3996.1, \quad (6)$$

$$K_{BT} = C_{BT1} / C_{BT2}, \quad (7)$$

表3 2000、2010、2020年自然保护区碳库碳密度数据

Tab. 3 Carbon density data of carbon pool in nature reserve in 2000, 2010 and 2020

/(t·hm⁻²)

年份	土地类型	地上生物碳密度 C_{above}	地下生物碳密度 C_{below}	土壤碳密度 C_{soil}	死亡有机物碳密度 C_{dead}
2000	林地	28.12	8.57	121.61	2.94
	草地	3.43	3.45	65.71	1.62
	水体	0.000	0.000	0.000	0.000
	冰川	0.00	0.00	0.00	0.00
2010	林地	29.67	9.05	120.29	3.11
	草地	3.62	3.64	65.32	1.71
	水体	0.038	0.629	66.000	0.000
	冰川	0.00	0.00	0.00	0.00
2020	林地	27.36	8.34	118.86	2.87
	草地	3.34	3.35	64.54	1.58
	水体	0.035	0.575	65.210	0.000
	冰川	0.00	0.00	0.00	0.00

注: 2000年研究区没有水体地类, 故将碳密度直接设置为 0.000.

本文参考 InVEST 模型用户手册, 根据模型所需, 结合自然保护区环境特点设置了威胁类型属性表与敏感程度表(表 4、表 5), 以便采用 InVEST 模型计算分析. 表中, 敏感程度值越接近 1, 则代表越受

$$K_{BP} = C_{BP1} / C_{BP2}, \quad (8)$$

$$K_B = K_{BT} \cdot K_{BP}, \quad (9)$$

$$K_S = C_{SP1} / C_{SP2}, \quad (10)$$

式(4)-(10)中: C_{BT} 为根据年均温得到的生物量碳密度(包括死亡有机物碳密度), $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$; T 为年均气温, $^{\circ}\text{C}$; C_{BP} 为根据年降水量得到的生物量碳密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$; C_{SP} 为根据年降水量得到的土壤碳密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$; P 为年降水量, mm ; K_{BT} 为根据年均温得到的生物量碳密度修正系数; K_{BP} 为根据年降水量得到生物量碳密度修正系数; K_B 为生物量碳密度综合修正系数; K_S 为土壤碳密度降水因子修正系数; C_{1} 和 C_{2} 分别为自然保护区和全国碳密度数据.

表2 降雨因子数据(来自于气候公报调研)

Tab. 2 Temperature rainfall factor data (from climate bulletin research)

因子	年份	研究区	全国
平均气温/ $^{\circ}\text{C}$	2000	6.4	9.65
	2010	7.5	9.5
	2020	6.7	10.25
平均降雨/ mm	2000	665.508	600
	2010	737.951	681
	2020	729.4	695

由全国碳密度数值 C_{above} 、 C_{below} 、 C_{dead} 分别与公式(4)-(10)所得的生物量碳密度综合修正系数 K_B 相乘, C_{soil} 与土壤碳密度修正系数 K_S 相乘, 得到校正后自然保护区碳密度值(表 3).

此威胁源影响; 生境质量越接近 1, 则代表该地类的生态环境越好.

结合数据可获得性, 本研究 DEM 数据来源于地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn/>), 坡度数据

表 4 自然保护区威胁类型属性表

Tab. 4 Threat type attribute table in nature reserve

威胁	最大影响距离	权重	衰退形式	存储路径
冰川	6	1	线型	bcwx2020.tif

表 5 自然保护区地类敏感程度表

Tab. 5 ground class sensitivity table in nature reserve

地类编号	名称	生境质量	冰川敏感度
20	林地	1.0	0.8
30	草地	0.6	0.3
60	水体	0.5	0.4
100	冰川	0.0	0.0

经 ArcGIS 提取得到,分辨率为 1 km;气温、降雨、植被覆盖指数均来源于国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn/>),分辨率为 1 km;GDP 数据来自中国科学院资源环境数据中心 (<http://www.resdc.cn/>),分辨率为 1 km;土壤数据来自世界土壤数据库 (<https://www.fao.org/>),分辨率为 1 km.

2 结果与分析

2.1 自然保护区土地利用变化分析

结合土地利用空间分布及变化(图 2、表 6)可知:研究区的主要地类为林地和草地,各地类的面积变化较为明显,且土地利用类型存在明显的空间异质性.林地约占自然保护区面积的 50%,为实验区的主要地类;草地则维持在自然保护区面积的约 48%,大部分草地都位于自然保护区的核心区,少部分草地(冰川附近)位于缓冲区和实验区;湖泊呈零散分布状,冰川则集中分布于地势较高的西北部地区.2000—2010 年间,自然保护区的地类变化相对

明显,集中在研究区北部及靠近冰川一带,而 2010—2020 年间的地类变化不太明显.

从土地面积的变化情况看,2000—2020 年间,研究区的各个地类均发生了不同程度的变化.其中,2000—2010 年间,林地面积有较小幅度下降,减少约 380 hm²;草地面积有较小幅度上涨,增加约 286 hm²;湖泊从 0 hm²增加至 112 hm²左右;冰川出现小幅度融化,面积减少约 19 hm².2010—2020 年间,林地面积继续呈现下降趋势,减少约 62 hm²;草地面积继续呈现增加趋势,增加约 75 hm²;而冰川面积继续呈现下降趋势,面积减少约 25 hm²;湖泊面积有很小幅度的上涨.

2.2 自然保护区碳存储功能分析

2.2.1 碳存储功能变化分析

结合研究区内碳密度分布(图 3)及 3 个时间截面(2000、2010、2020 年)的碳储量变化(表 7、图 4)可知,研究区内的碳密度有明显变化,且变化存在明显的空间分异,其碳储量在整个时期内呈现为 2000—2010 年间维持不变,2010—2020 年间出现下降的趋势.碳密度的高值区域主要位于林地等植被覆盖较高的地区,低值区域主要位于冰川等固碳能力较弱的地区.2000—2010 年间,研究区的碳密度在西北部的核心区以及部分实验区和缓冲区出现了增长,东北部核心区以及靠近冰川的地区出现了减少.2010—2020 年间,研究区的碳密度出现大面积下降,下降区域多为林地.2000—2020 年,三打古自然保护区的碳储量总体减少了 0.198 Tg.从土地利用类型来看,林地与草地为自然保护区碳储量的主体地类,其中林地占自然保护区碳储量总体的 69%左右,草地占 30%左右.

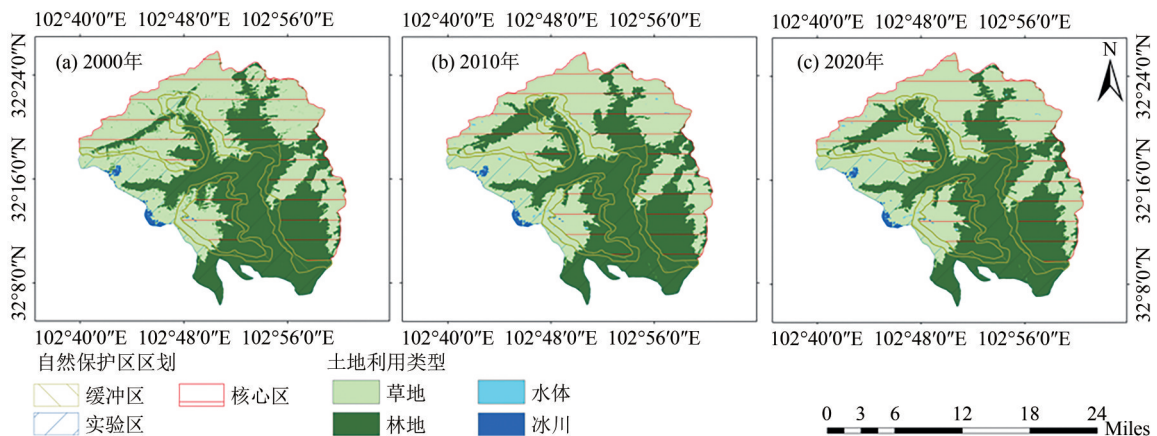


图 2 2000、2010、2020 年研究区土地利用分类

Fig. 2 Classification of land use in the study area in 2000, 2010 and 2020

表6 2000、2010、2020年研究区土地利用统计表
Tab. 6 Land use statistics table in the study area in 2000, 2010 and 2020

年份	土地类型	林地	草地	水体	冰川
2000	面积/hm ²	31626.90	30318.19	0.00	373.91
	比例/%	50.75	48.65	0.00	0.60
2010	面积/hm ²	31246.75	30604.86	112.17	355.22
	比例/%	50.14	49.11	0.18	0.57
2020	面积/hm ²	31184.43	30679.64	124.64	330.29
	比例/%	50.04	49.23	0.20	0.53
变化/%	2000—2010年	-0.61	0.46	0.18	-0.03
	2010—2020年	-0.10	0.12	0.02	-0.04
	2000—2020年	-0.71	0.58	0.20	-0.07

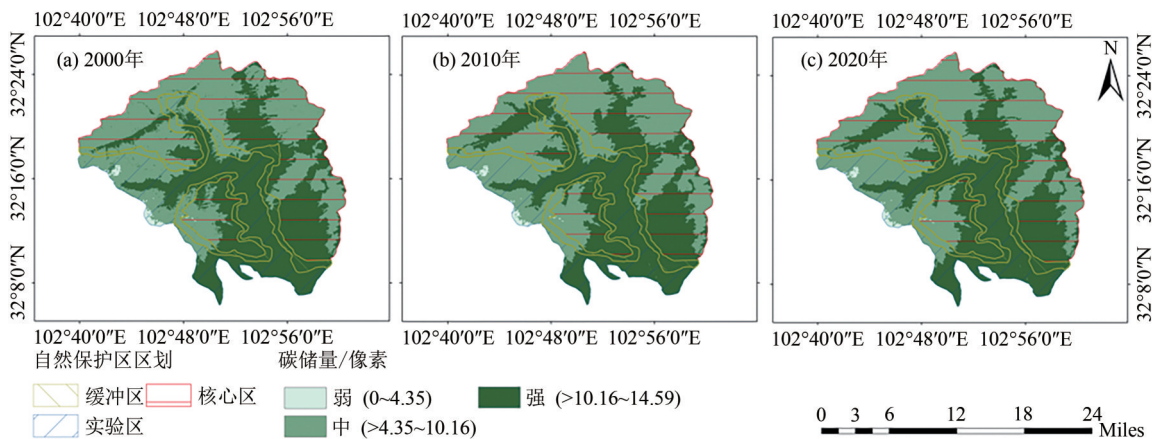


图3 2000、2010、2020年研究区碳密度分布

Fig. 3 Carbon density distribution in the study area in 2000, 2010 and 2020

表7 2000、2010、2020年自然保护区地类碳储量变化

Tab. 7 Changes in carbon stocks of nature reserve in 2000, 2010 and 2020

年份	不同类型土地的碳储量/Tg				总量/Tg
	林地	草地	水体	冰川	
2000	5.100	2.249	0.000	0.000	7.349
	(69.40%)	(30.60%)	(0.00%)	(0.00%)	
2010	5.065	2.275	0.008	0.000	7.348
	(68.94%)	(30.95%)	(0.11%)	(0.00%)	
2020	4.909	2.234	0.008	0.000	7.151
	(68.65%)	(31.24%)	(0.11%)	(0.00%)	

注:括号中表示不同类型土地的碳储量占比(%)。

2.2.2 碳存储功能空间分异影响因子分析

由表8可知:影响因子两两交互作用关系大多为双因子增强,仅少数因子间表现为非线性增强关系,这说明任一因子与其他因子交互均可增强对碳存储空间分异的影响力.相比较而言,高程与植被覆盖指数对碳存储空间分异的影响力最为显著(超过0.6),说明高程与植被覆盖指数是影响碳存储功能空间分异的主导因素;而GDP对碳存储空间分异的影响力很小,低至0.06左右,说明GDP不是影响碳存储功能空间分异的主要因素.同时,高程协同植被覆盖指数类型对自然保护区生态系统碳存储

空间分异解释力最大,达到0.777左右,进一步证明自然保护区的碳储量很大程度受高程和植被覆盖程度影响.整体看,在驱动因子的两两协同作用下,各因子对自然保护区碳存储空间分异的影响更大,不是简单的叠加关系.

2.3 自然保护区生境质量分析

2.3.1 生境质量变化分析

结合研究区内土地利用(图2)与生境质量指数分布(图5)可知,研究区内不同地类的生境质量在威胁源的影响下产生了不同程度的变化.高值区域主要为林地、湖泊以及草地等,低值区域主要为冰川以及受冰川影响的部分草地和林地等.在威胁源的影响下,靠近冰川的区域生境质量指数都大幅度降低.其中,林地受冰川影响比草地和湖泊所受影响严重.

由研究区内生境质量指数变化情况(图6)可知,2000—2010年,研究区的生境质量指数变化较为明显,2010—2020年的生境质量指数变化不大.2000—2010年间,西北部的核心区以及部分实验区和缓冲区的生境质量指数出现明显增长,东北

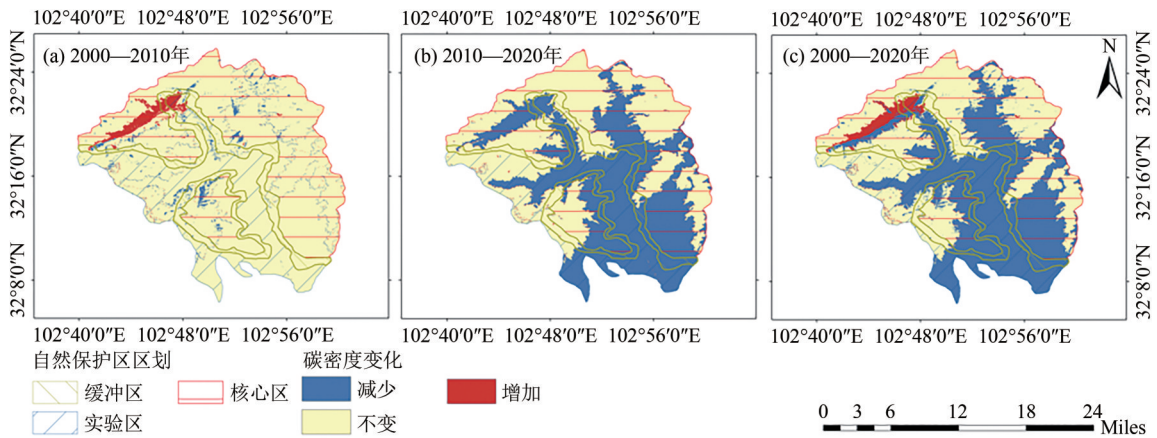


图 4 2000、2010、2020 年研究区碳密度变化

Fig. 4 Changes in carbon density in the study area in 2000, 2010 and 2020

表 8 碳存储功能交互探测

Tab. 8 Interactive detection of Carbon storage function

类型	高程	坡度	气温	降雨	植被覆盖指数	生产总值	土壤类型
高程	0.673896						
坡度	0.710089	0.293559					
气温	0.697759	0.389803	0.140460				
降雨	0.714838	0.622974	0.638617	0.552637			
植被覆盖指数	0.776851	0.704465	0.693685	0.701601	0.656155		
生产总值	0.686647	0.328712	0.25488	0.585738	0.690892	0.063186	
土壤类型	0.702577	0.561397	0.554659	0.621272	0.717227	0.524424	0.503467

注: 双因子增强 非线性增强

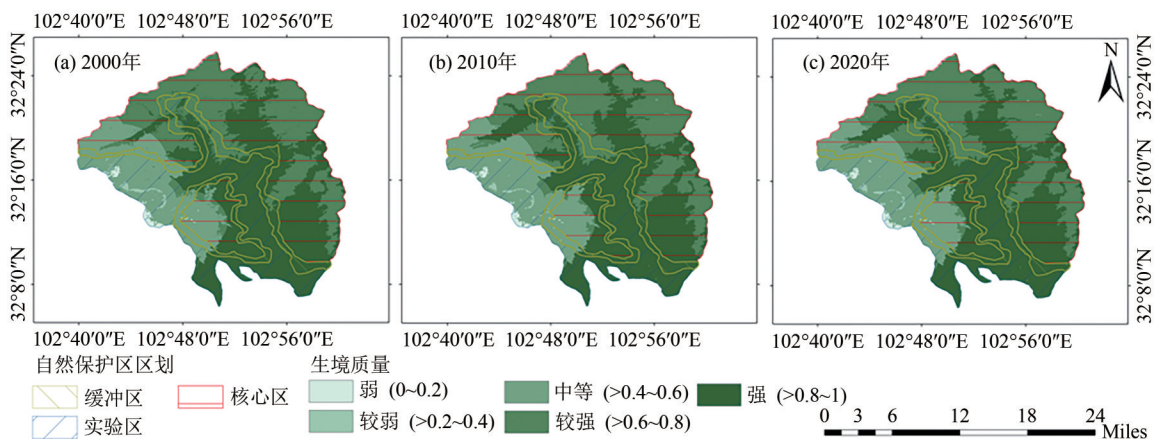


图 5 2000、2010、2020 年研究区生境质量指数分布

Fig. 5 Distribution of the habitat mass index in the study area in 2000, 2010 and 2020

部核心区出现了明显地降低;靠近冰川区域即出现了增长也出现减少.2010—2020 年间,研究区未出现较明显的生境质量指数变化.总体来看,研究区生境质量基本呈现先增强后稳定的趋势,林地生境质量最好,冰川及其附近区域生境质量相对较差.

2.3.2 生境质量空间分异性影响因子分析

由表 9 可知:与碳存储交互探测类似,各驱动因子之间的交互作用大多为双因子增强,少数为非线

性增强.相对而言,高程与植被覆盖指数仍然为影响力最显著的因子(超过 0.6),其交互作用对自然保护区的生态系统生境质量空间分异解释力达到 0.755 左右,这说明自然保护区的生物多样性很大程度受高程和植被覆盖程度影响;而 GDP(0.048 左右)对生境质量空间分异的影响力很小,说明 GDP 不是碳存储功能空间分异的主要影响因素.不同的是,非线性增强类型均与气温有关,这说明气温与其他影响因子的协同作用远大于因子的单独作用.

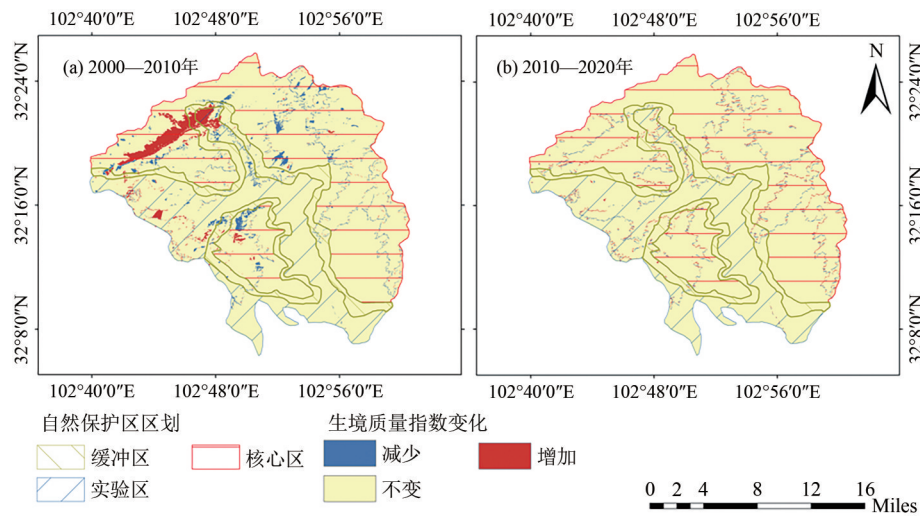


图 6 2000、2010、2020年研究区生境质量指数变化

Fig. 6 Changes in habitat quality index in the study area in 2000, 2010 and 2020

表 9 生物多样性交互探测

Tab. 9 Biodiversity interaction detection

类型	高程	坡度	气温	降雨	植被覆盖指数	生产总值	土壤类型
高程	0.611464						
坡度	0.646897	0.212652					
气温	0.649108	0.299220	0.080002				
降雨	0.655082	0.581617	0.587947	0.502243			
植被覆盖指数	0.755727	0.699194	0.697164	0.686042	0.651600		
生产总值	0.625817	0.256356	0.191326	0.534397	0.679374	0.048016	
土壤类型	0.647436	0.515658	0.524490	0.569498	0.701127	0.476086	0.459735

注: 双因子增强 非线性增强

3 讨论与结论

研究区的生态服务功能整体较好,但其空间分布变化明显.自三打古自然保护区成立以来,保护区根据陆续出台的相关保护政策,不断完善管理与保护体系,使得其生态系统得到了很好的保护.研究区内的生态服务功能的空间变化主要体现在冰川、林地面积的变化;区域内冰川与湖泊面积的变化可能与全球气候变暖导致高海拔冰川融化所致;区域内林地与草地面积的变化很大程度影响了碳储量以及生物多样性维持功能的变化;此外,2010—2020年间,研究区的碳密度出现大面积减少,其根本原因是气温以及降水量对各地类的碳密度影响.

研究区生态服务功能的空间分异是由各驱动因子共同作用所致.其中,高程和植被覆盖指数是影响生态服务功能空间分异的关键自然因素.植被覆盖指数较高且海拔在 2392~3500 m 之间的区域的生态服务功能都相对较好,这与闫晓露等^[31]的研究结果相一致.气温和降雨也对区域生态服务功能空间分异起到了积极的作用,但气温的解释力相对较

低,可能是保护区年气温差较小的特点所致.结合以上分析结果,主要得到以下结论:

(1)自然保护区的土地类型变化较为明显.北部区域林地与草地互有转化,冰川面积逐期减少,湖泊面积因高海拔冰川融化而不断增加.核心区与缓冲区的主要地类为林地、草地,实验区的地类涵盖自然保护区的各个地类.

(2)自然保护区 3 个年份的总碳储量约为 7.349、7.348、7.151 Tg,呈现先稳定后减弱的趋势.碳存储功能的增强主要集中于西北部区域,减弱主要集中于林地区域.

(3)自然保护区的生物多样性维持功能保持较高水平,呈现先增加后稳定的趋势.未受冰川影响区域的生物多样性维持功能比受冰川影响区域强.核心区的生物多样性维持服务综合水平明显强于缓冲区与实验区.

(4)自然保护区生态服务功能空间分异性是由各驱动因子共同作用所致.高程、降雨、土壤、植被覆盖指数的影响较为显著;其他因素对自然保护区生态服务功能空间分异性仍然存在一定影响.

综上所述,中低海拔地区将为三打古省级自然

保护区的生态服务功能建设重点.未来,建议加大中低海拔林区的培育力度,提升其实验区对生态旅游的容纳和承载,加强保护培育研究区东北部的缓冲区、核心区以及冰川外围现有的林地、草地区域,促进林地、草地的生态修复,强化其生态服务功能.

参 考 文 献

- [1] KING R T. Wild life and man [J]. NY Conservationist, 1966, 20(6): 8-11.
- [2] HELLIWELL D R. Valuation of wildlife resources [J]. Regional Studies, 1969, 3(1): 41-47.
- [3] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being [M]. Washington DC: Island Press, 2005.
- [4] HOLDREN J P, EHRLICH P R. Human population and the global environment [J]. American Scientist, 1974, 62(3): 282-292.
- [5] WESTMAN W E. How much are nature's services worth [J]. Science, 1977, 197(4307): 960-964.
- [6] Ehrlich P, Extinction Ehrlich A. The causes and consequences of the disappearance of species [J]. The Quarterly Review of Biology, 1982, 57(3): 343.
- [7] COSTANZA R, D'ARGE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997, 387: 253-260.
- [8] DAILY G C. Nature's services: societal dependence on natural ecosystems [M]. Washington DC: Island Press, 1997.
- [9] 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价 [J]. 应用生态学报, 1999, 10(5): 635-640.
- [10] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究 [J]. 生态学报, 1999, 19(5): 607-613.
- [11] 谢高地, 张钰铨, 鲁春霞, 等. 中国自然草地生态系统服务价值 [J]. 自然资源学报, 2001, 16(1): 47-53.
- [12] 赵景柱, 肖寒, 吴刚. 生态系统服务的物质量与价值量评价方法的比较分析 [J]. 应用生态学报, 2000, 11(2): 290-292.
- [13] TONG S T Y, CHEN W L. Modeling the relationship between land use and surface water quality [J]. Journal of Environmental Management, 2002, 66(4): 377-393.
- [14] NELSON E, MENDOZA G, REGETZ J, et al. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales [J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2009, 7(1): 4-11.
- [15] 孟彩红, 王媛, 庄雨适, 等. 基于 InVEST 模型的吉林省生态系统服务评估研究 [J]. 绿色科技, 2021, 23(24): 130-133, 142.
- [16] WATANABE M D B, ORTEGA E. Dynamic energy accounting of water and carbon ecosystem services: A model to simulate the impacts of land-use change [J]. Ecological Modelling, 2014, 271: 113-131.
- [17] 覃瑞, 史雪瑶, 冯博艺, 等. 巴东金丝猴国家级自然保护区不同土地利用方式下的植物多样性 [J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2016, 35(4): 24-28, 33.
- [18] 王舒, 张骞, 王子芳, 等. 基于 GIS 的三峡库区生态风险评估及生态分区构建 [J]. 生态学报, 2022, 42(11): 4654-4664.
- [19] SWIHART R K, FENG Z, SLADE N A, et al. Effects of habitat destruction and resource supplementation in a predator-prey metapopulation model [J]. Journal of Theoretical Biology, 2001, 210(3): 287-303.
- [20] 谢余初, 巩杰, 张素欣, 等. 基于遥感和 InVEST 模型的白龙江流域景观生物多样性时空格局研究 [J]. 地理科学, 2018, 38(6): 979-986.
- [21] 张学儒, 周杰, 李梦梅. 基于土地利用格局重建的区域生境质量时空变化分析 [J]. 地理学报, 2020, 75(1): 160-178.
- [22] 王成武, 罗俊杰, 唐鸿湖. 基于 InVEST 模型的太行山沿线地区生态系统碳储量时空分异驱动力分析 [J]. 生态环境学报, 2023, 32(2): 215-225.
- [23] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望 [J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [24] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析 [J]. 土壤学报, 2004, 41(1): 35-43.
- [25] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳储量 [J]. 中国科学(D辑), 2003(1): 72-80.
- [26] 朱超, 赵淑清, 周德成. 1997—2006 年中国城市建成区有机碳储量的估算 [J]. 应用生态学报, 2012, 23(5): 1195-1202.
- [27] 黄玫, 季劲钧, 曹明奎, 等. 中国区域植被地上与地下生物量模拟 [J]. 生态学报, 2006, 26(12): 4156-4163.
- [28] ALAM S A, STARR M, CLARK B J F. Tree biomass and soil organic carbon densities across the Sudanese woodland savannah: A regional carbon sequestration study [J]. Journal of Arid Environments, 2013, 89: 67-76.
- [29] 陈光水, 杨玉盛, 刘乐中, 等. 森林地下碳分配 (TBCA) 研究进展 [J]. 亚热带资源与环境学报, 2007, 2(1): 34-42.
- [30] GIARDINA C P, RYAN M G. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature [J]. Nature, 2000, 404(6780): 858-861.
- [31] 闫晓露, 李欣媛, 刘澄浩, 等. 生态系统服务簇空间演变轨迹及其社会-生态驱动的地理探测——以大连市为例 [J]. 生态学报, 2022, 42(14): 5734-5747.

(责编&校对 刘钊)