

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2024.05.013

贾天朝, 胡西武, 杨海娟, 等. 生境质量对气候变化与人类活动的空间响应: 以青藏高原为例[J]. 水土保持学报, 2024, 38(5): 203-211.

JIA Tianchao, HU Xiwu, YANG Haijuan, et al. Spatial response of habitat quality to climate change and human activities: Taking the Qinghai-Xizang Plateau as an example[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5): 203-211.

生境质量对气候变化与人类活动的空间响应

——以青藏高原为例

贾天朝¹, 胡西武^{1,2}, 杨海娟³, 郭玮¹

(1. 青海民族大学经济与管理学院, 西宁 810007;

2. 天津大学-青海民族大学双碳研究院, 西宁 810007; 3. 宁夏大学新华学院, 银川 750000)

摘要: [目的] 探究青藏高原生境质量的动态变化, 为保障青藏高原生态安全、保护生物多样性和筑牢生态屏障提供参考。[方法] 基于1985年、1995年、2005年、2015年和2022年5期土地利用数据, 借助InVEST模型, 定量评估1985—2022年青藏高原生境质量状况并对其时空格局进行分析, 最后利用双变量空间自相关探讨生境质量对气候变化与人类活动的空间响应。[结果] (1) 1985—2022年青藏高原生境指数增加0.052 9, 高等和较高生境面积比例共增加5.51%, 生境质量水平总体提升但仍处于较低等级。(2) 1985—2022年青藏高原48.14%的区域生境指数增加, 但生境等级总体空间分布变化不大, 各等级区由外向内呈嵌套式等级增加。(3) 1985—2022年青藏高原生境质量等级转移类型以等级不变为主, 但等级转化的剧烈程度不断增强。(4) 1985—2022年青藏高原生境质量对气候变化与人类活动存在较为显著的空间相关关系, 年平均气温对生境质量存在显著的空间负相关, 年降水量和人类活动强度对生境质量存在显著的空间正相关。[结论] 研究结果揭示青藏高原生境质量时空演变特征, 明确气候变化和人类活动对生境质量具有深刻的影响, 未来应加强底线约束和人类活动引导。

关键词: 生境质量; 生物多样性; InVEST模型; 双变量空间自相关; 青藏高原

中图分类号: X176

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)05-0203-09

Spatial Response of Habitat Quality to Climate Change and Human Activities

——Taking the Qinghai-Xizang Plateau as An Example

JIA Tianchao¹, HU Xiwu^{1,2}, YANG Haijuan³, GUO Wei¹

(1. School of Economics and Management, Qinghai Minzu University, Xining 810007, China; 2. Institute for Carbon

Peaking and Carbon Neutrality, Tianjin University-Qinghai Minzu University, Xining 810007, China;

3. Xinhua College of Ningxia University, Yinchuan 750000, China)

Abstract: [Objective] To explore the dynamic changes in the environmental quality of the Qinghai-Xizang Plateau and provide reference for ensuring the ecological security of the Qinghai-Xizang Plateau, protecting biodiversity and building a strong ecological barrier. [Methods] Based on five periods of land use data in 1985, 1995, 2005, 2015 and 2022, with the help of the InVEST model, we quantitatively assessed the habitat quality status of the Qinghai-Xizang Plateau in 1985—2022 and analyzed its spatiotemporal pattern. Finally, we used bivariate spatial autocorrelation to explore the spatial response of habitat quality to climate change and human activities. [Results] (1) In 1985—2022, the habitat index of the Qinghai-Xizang Plateau has increased by 0.052 9, and the proportion of higher and higher habitat areas has increased by 5.51% in total, the overall habitat quality level has improved but is still at a low level. (2) In 1985—2022, the habitat quality of most areas on the Qinghai-Xizang Plateau has increased by 48.14%, but the overall spatial distribution of habitat

收稿日期: 2024-04-05

修回日期: 2024-05-13

录用日期: 2024-06-12

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-08-13

资助项目: 国家自然科学基金项目(42061033); 青海省“揭榜挂帅”重大社科项目(JB2301); 青海省省级哲学社会科学重点项目(22ZD001)

第一作者: 贾天朝(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事青藏高原生态经济与资源开发研究。E-mail: jtc2517528185@163.com

通信作者: 胡西武(1973—), 男, 博士, 教授, 主要从事生态经济与气候变化经济学研究。E-mail: 2827617701@qq.com

http://stbcb.alljournal.com.cn

levels has not changed much, and each level area has increased in nested levels from outside to inside. (3) In 1985—2022, the main types of environmental quality grade transfer in the Qinghai-Xizang Plateau have remained unchanged, but the intensity of grade transformation has continued to increase. (4) In 1985—2022, the habitat quality of the Qinghai-Xizang Plateau has a significant spatial correlation with climate change and human activities, the average annual temperature has a significant spatial negative correlation with the habitat quality, the annual precipitation and human activity intensity have a significant spatial correlation with the habitat quality, there is a significant positive spatial correlation. [Conclusion] The research results reveal the spatiotemporal evolution characteristics of the Qinghai-Xizang Plateau's habitat quality, and clarify that climate change and human activities have a profound impact on habitat quality. In the future, bottom-line constraints and human activity guidance should be strengthened.

Keywords: habitat quality; biodiversity; InVEST model; bivariate spatial autocorrelation; Qinghai-Xizang Plateau

Received: 2024-04-05

Revised: 2024-05-13

Accepted: 2024-06-12

Online(www.cnki.net): 2024-08-13

生物多样性是生物物种及其生存环境共同构成的生态复合体^[1],是人类赖以生存和发展的基础,在气候调节、维持生态系统健康和稳定性等其他方面发挥着重要作用^[2]。随着全球气候变化与人类活动等因素的干扰加剧,生物多样性发生生物量减少、生物种类下降和生物环境退化等多方面与深层次的变化^[3],对人类加强生物多样性保护提出迫切要求^[4]。中国是世界上生物多样性最丰富与受威胁程度最高的国家之一,生物多样性保护已经上升为国家的重要战略^[5]。生境质量指生态系统提供适宜个体与种群持续发展生存条件的能力,决定着生物多样性的丰富程度,可以在很大程度上反映区域生物多样性状况^[6]。因此,如何定量评估区域生境质量与了解其时空格局变化特征,并探究生境质量对气候变化与人类活动的响应,是当前我国研究的重要课题,也是加强区域生态保护与生态文明建设的重要基础^[7]。

目前,生境质量的评估方法主要包括实地调查法^[8]、遥感监测法^[9]、指标评估法^[10]和模型评估法^[11]。实地调查法主要局限于小区域尺度当前阶段生物多样性的取样调查,且无法评估区域内生物多样性的时空演化特征^[8];遥感监测法主要侧重于土地覆盖、植被生产力和植被物候等生物多样性某一方面的监测,一般需要与指标评估法结合使用^[9]。指标评估法主要通过构建生物多样性综合评估指标体系进行定量评价,存在着指标设计主观性和数据获取难度较大的缺点^[10]。相比其他方法,模型评估法数据获取较为便捷,可操作更强,并能应用于不同研究尺度的区域生物多样性时空演化研究,因此应用较为广泛^[11]。其中,由美国斯坦福大学、世界自然基金会和大自然保护协会共同开发的 InVEST 模型(integrated valuation of environmental services

and tradeoffs)由于操作简单、参数较少和运行较快等优点^[12],被学者们广泛使用。该模型中生境质量模块(habitat quality model)可以结合生物多样性威胁数据与土地利用变化数据快速评估区域生境质量^[6]。目前,学者们基于 InVEST 模型已经对国家^[13]、省域^[14]、市域^[15]和县域^[16]等行政区划与流域^[17]和湖泊^[18]等自然边界的多尺度研究区域进行定量评价,多侧重于生境质量的时空格局特征、影响因素和未来预测等方面分析,缺乏生境质量对气候变化和人类活动的空间响应研究。

青藏高原作为“世界屋脊”和“地球第三极”,是亚洲乃至北半球气候变化的“感应器”和“敏感区”,同时也是中国乃至亚洲重要的生态安全屏障战略高地^[19]。独特的自然环境格局和多样的生态系统类型,使青藏高原成为现代许多物种的分化中心,成为全球生物多样性保护热点地区之一^[20]。傅伯杰等^[21]、朴世龙等^[22]研究发现,在过去几十年间,气候变化与人类活动是导致青藏高原生态系统发生变化的主要原因。2023 年《中华人民共和国青藏高原生态保护法》^[23]颁布与实施,强调要加强青藏高原生物多样性、气候变化等方面的研究工作,掌握青藏高原生态本底及其变化。因此,亟须探讨解决 3 个问题:一是青藏高原生境质量发展现状如何?二是近几十年青藏高原生境质量呈现什么样的时空发展格局?三是青藏高原生境质量对气候变化与人类活动产生了怎样的具体响应?

本文以青藏高原为研究区,选取 1985 年、1995 年、2005 年、2015 年和 2022 年 5 期土地利用数据,借助 InVEST 模型,定量评估 1985—2022 年青藏高原生境质量状况并对其时空格局进行分析,最后利用双变量空间自相关探讨生境质量对气候变化与人类活

动的响应,以期为保护青藏高原生物多样性及筑牢国家生态安全屏障提供定量和客观的研究依据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

青藏高原(73°19′—104°47′E,26°00′—39°47′N)位于中国西南部,是世界上平均海拔最高(约为4 000 m)、最年轻的高原,是地球上最独特的地质-地理-生态单元之一^[21]。区域内地形地貌复杂,湖泊、冰川和河流广布,被誉为“亚洲水塔”^[19]。青藏高原特殊的环境和地貌孕育独特的生物多样性,相关已有成果^[24]表明,青藏高原有维管植物 14 634 种,是中国维管植物最丰富和最重要的地区,记录有脊椎动物 1 763 种,约占中国陆生脊椎动物和淡水鱼类的40.5%。

1.2 数据来源与处理

1985—2022 年各期土地利用数据来源于武汉大学 YANG 等^[25]发布的全国 CLCD 土地利用数据集(分辨率为 30 m),根据《GB/T 21010—2017,土地利用现状分类》^[26],结合本文研究目的,将土地利用数据划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 种土地利用类型。气象数据包括气温和降水数据,来源于国家青藏高原科学数据中心提供的 1901—2022 年中国 1 km 分辨率逐月平均气温和降水量数据集。本文结合青藏高原实际,基于 ArcGIS10.8 软件中的渔网工具将研究区划分为 10 km×10 km 的格网,以此作为最小分析单元和数据载体。

1.3 研究方法

1.3.1 InVEST 模型 基于 InVEST 模型中生境质量模块(habitat quality)分别计算青藏高原 1985 年、1995 年、2005 年、2015 年和 2022 年生境质量指数(简称生境指数)。生境指数取值范围为[0,1],计算公式为:

$$Q_{xj} = H_{xj} [1 - D_{xj}^z / (D_{xj}^z + k^z)] \quad (1)$$

式中: Q_{xj} 为土地利用类型 j 中栅格 x 的生境指数; H_{xj} 为土地利用类型 j 中栅格 x 的生境适宜度; D_{xj} 为土地利用类型 j 中栅格 x 的生境退化度; k 为半饱和参数,根据 InVEST 用户手册设置为 0.05; z 为模型默认常数。

生境质量模块(habitat quality)运行需进行胁迫因子相关参数(类型、权重、最大影响距离和衰退类型)和土地利用相关参数(生境适宜度和对胁迫因子敏感度)的设置。本文根据 InVEST 用户手册及青藏高原区域内相关已有研究^[6,12,27-28]成果,确定青藏高原胁迫因子参数表(表 1)及青藏高原不同土地利用类型生境适宜度及其对胁迫因子的敏感度(表 2)。

表 1 青藏高原 InVEST 胁迫因子参数

Table 1 InVEST stress factor parameters on the Qinghai-Xizang Plateau

胁迫因子	最大影响距离/km	权重	衰退类型
耕地	6	0.7	线性
建设用地	8	1.0	指数
未利用地	4	0.4	指数

表 2 青藏高原不同土地利用类型生境适宜度及其对胁迫因子的敏感度

Table 2 Habitat suitability of different land use types on the Qinghai-Xizang Plateau and their sensitivity to stress factors

土地利用类型	生境适宜度	胁迫因子敏感度		
		耕地	建设用地	未利用地
耕地	0.4	0.2	0.5	0.4
林地	1.0	0.8	0.9	0.6
草地	0.8	0.6	0.6	0.6
水域	0.9	0.7	0.8	0.4
建设用地	0	0.1	0	0.1
未利用地	0.1	0.3	0.3	0

1.3.2 人类活动强度 本文采用人类活动强度(human activity intensity, HAI)来表征 1985—2022 年青藏高原人类活动状况。人类活动强度模型由徐勇等^[29]提出,该模型基于土地利用数据,以建设用地当量为基本单位,区域内建设用地当量总和与区域总面积的比值即为人类活动强度。具体公式为:

$$HAI = \frac{S_{CLE}}{S} \times 100\% \quad (2)$$

$$S_{CLE} = \sum_{i=1}^n (SL_i \times CI_i) \quad (3)$$

式中:HAI 为人类活动强度; S_{CLE} 为区域内建设用地当量面积; S 为区域总面积; SL_i 为第 i 种土地利用类型面积; CI_i 为第 i 种土地利用类型的建设用地当量折算系数,本文系数的确定参考杨华等^[30]构建的青藏高原不同土地利用类型的建设用地当量折算系数表,耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地折算系数分别为 0.200,0,0.133,0,1.000,0.067; n 为土地利用类型数量。

1.3.3 双变量空间自相关 双变量空间自相关可以用来探索某种要素的空间分布特征及 2 种要素之间的相关程度,主要包括双变量全局自相关和双变量局部自相关分析^[31]。本文基于 GeoDa 空间分析软件对青藏高原生境质量与气候变化和人类活动分别进行双变量空间自相关分析。其中,双变量全局自相关可以分别从整体上探索青藏高原生境质量与气候变化和人类活动的空间分布集聚情况,并对其结果有效性进行检验。双变量局部自相关可以分别从青

藏高原内部探索生境质量与气候变化和人类活动空间分布的相关性与差异性。相关计算公式见参考文献[31]。

2 结果与分析

2.1 青藏高原生境质量时间变化特征

基于 InVEST 模型对青藏高原 1985—2022 年生境质量进行评估,并对相关参数进行统计(表 3)。从生境质量平均值来看,青藏高原 1985 年、1995 年、2005 年、2015 年和 2022 年生境质量平均值分别为 0.278 7、0.323 3、0.329 3、0.341 4 和 0.331 6,生境质量总体上升 0.052 9。其中,青藏高原生境质量在 1985—2015 呈逐渐上升趋势,生境指数增加 0.062 7。1985—1995 年青藏高原生境指数增加最多,该阶段生境指数增加量占增加总量的 71.13%。从生境质量标准差来看,青藏高原生境质量标准差总体由 1985 年的 0.279 1 上升至 2022 年的 0.294 1,表明区域内生境质量差异性加大。其中,生境质量差异性增加最大的阶段为 1985—1995 年,该阶段生境质量标准差增加 0.017 9,占标准差增加总量的 119.33%。同时可以说明,1995 年以来,青藏高原生境质量差异性总体上是减少的。

为了更好探究青藏高原生境质量的变化情况,根据已有研究^[14]将生境质量划分为 5 级:低等生境(0~0.2)、较低生境(0.2~0.4)、中等生境(0.4~0.6)、较高生境(0.6~0.8)和高等生境(0.8~1.0)。利用 ArcGis10.8 软件将青藏高原生境质量等级进行空间可视化(图 1),并对其各等级面积进行统计(表 3)。1985—2022 年,青藏高原各生境等级平均面积比例排序为低等生境(54.51%)>较高生境(14.11%)>较低生境(12.08%)>高等生境(11.60%)>中等生境(7.70%)。青藏高原低等生境面积均位于 50%以上,较高与高等生境面积之和均位于 20%以上,说明青藏高原生境质量两极化现象长期稳定存在。从各等级面积变化来看,除低等生境面积整体上下降之外(面积下降 208 702.26 km²,面积比例下降 8.22%),

其余各生境等级面积整体上均有所增加。其中,面积整体上增加较多的为高等和较高生境,二者面积比例共增加 5.51%,增加面积之和占总增加面积的 67.03%,说明青藏高原生境质量显著提高。从各等级面积变化趋势来看,较低、中等和较高生境面积均呈逐年增加趋势,低等生境面积在经历 1985—2015 年逐年减少后开始呈增加趋势(面积比例增加 0.80%),高等生境面积则在 1985—2015 年逐年增加后呈减少趋势(面积比例减少 2.13%)。

表 3 1985—2022 年青藏高原生境质量参数统计

Table 3 Statistics of environmental quality parameters of the Qinghai-Xizang Plateau from 1985 to 2022

年份	参数	等级				
		低等	较低	中等	较高	高等
1985	面积比例/%	60.62	11.52	6.95	12.52	8.39
	平均值	0.278 7				
	标准差	0.279 1				
1995	面积比例/%	54.56	11.56	7.36	13.99	12.53
	平均值	0.323 3				
	标准差	0.297 0				
2005	面积比例/%	53.39	12.16	7.73	14.13	12.59
	平均值	0.329 3				
	标准差	0.297 0				
2015	面积比例/%	51.60	12.37	8.07	14.67	13.30
	平均值	0.341 4				
	标准差	0.299 7				
2022	面积比例/%	52.40	12.79	8.39	15.25	11.17
	平均值	0.331 6				
	标准差	0.294 1				

总体而言,1985—2022 年青藏高原生境指数整体上处于增加状态,但仍处于较低生境等级。虽然较高、高等生境面积整体上显著增加,低等生境面积显著下降,但研究区内低等生境仍然居于主体地位,并且 2015 年以来出现低等生境面积增加、高等生境面积减少的不利发展态势,亟须加以遏制。

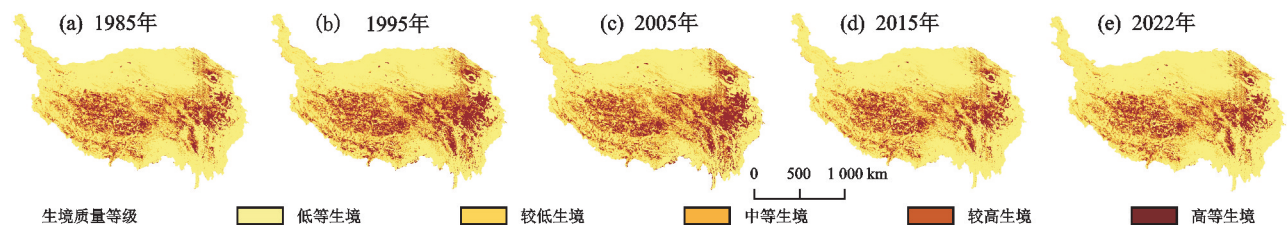


图 1 1985—2022 年青藏高原生境质量等级空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of environmental quality grades on the Qinghai-Xizang Plateau from 1985 to 2022

2.2 青藏高原生境质量空间变化特征

从 1985—2022 年青藏高原生境质量等级空间分布(图 1)来看,总体空间分布变化不大,各生境等级区

呈嵌套式分布格局,由外向内生境等级逐渐增加。具体来看,低等生境区面积最大,分布最广,集中分布于青藏高原最外围大片区域,主要为昆仑山脉、可可西里

山、柴达木盆地和湟水谷地等区域;较低和中等生境区缺少大面积斑块,在研究区内呈零星状分布;较高生境区虽然也缺少大面积斑块,但分布较为集中,主要位于青藏高原中部大片区域及东北部的祁连山国家公园;高等生境区拥有较多大面积斑块且分布较为集中,主要位于青海湖、黄河源园区、色林错—普若岗日国家公园和雅鲁藏布江大峡谷周边区域。

为更清楚反映青藏高原 1985—2022 年生境质量空间变化情况,本文借用 ArcGis10.8 软件的栅格计算器工具计算生境指数变化值,并将生境质量空间分布变化分为 3 类(图 2):增加(变化值 >0)、不变(变化值 $=0$)和减少(变化值 <0)。

1985—2022 年,青藏高原 48.14% 的区域处于生境指数增加区,其分布位置大致与青藏高原国家公园群^[32]相对应,包括青藏高原东北部的祁连山国家公

园、中部的三江源国家公园、西部的冈仁波齐国家公园、西南部的珠穆朗玛国家公园、南部的雅鲁藏布大峡谷国家公园及东部和东南部的部分国家公园。其次为生境减少和不变区,占比分别为 29.50% 和 22.36%,减少区域主要分布于藏北高原,不变区域主要分布于青藏高原北部与东北部的塔里木盆地和昆仑山脉等地区。其中,生境指数增加区域面积最多的为 1985—1995 年,占青藏高原总面积的 44.23%;生境不变区域面积最多的为 2005—2015 年,占 36.89%;生境指数减少区域面积最多的为 2015—2022 年,占 28.79%。总体来看,2015 年以前青藏高原生境指数变化区域面积排在第 1 位的为增加或不变区域,2015 年以后减少区域面积已经位于第 1 位,表明 1985—2022 年青藏高原大部分区域生境质量有所提升,但近年来面临较大的区域退化风险,需要加以关注。

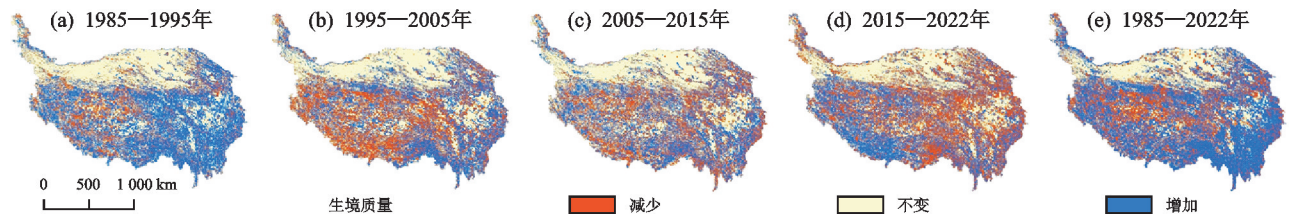


图 2 1985—2022 年青藏高原生境质量空间变化类型

Fig. 2 Spatial change types of Qinghai-Xizang Plateau environmental quality from 1985 to 2022

2.3 青藏高原生境质量等级转移矩阵

为进一步了解青藏高原生境质量等级转移情况,对 1985—2022 年青藏高原各个研究期内土地利用类型之间的转入和转出情况进行统计分析(图 3)。整体来看,1985—2022 年青藏高原大部分区域生境质量等级没有发生转化,占比 67.14%;21.65% 的区域生境质量等级升高,主要是低等生境向较低生境的转化,占比 5.44%,主要分布于青藏高原东北的祁连山国家公园及中西部大片区域;11.21% 的区域生境质量等级降低,主要是较低生境向低等生境的转化,占比 2.82%,除青藏高原北部区域外呈零星分布。

从各阶段转移情况来看,1985—1995 年、1995—2005 年、2005—2015 年和 2015—2022 年各阶段中生境质量等级始终以不变区为主,各阶段等级发生转化的面积占比分别为 23.88%,23.64%,21.35% 和 25.37%,说明

1985—2022 年青藏高原生境质量等级转化的剧烈程度增强。在生境质量等级发生变化区域面积增加中,生境等级提高区面积占比由 1985—1995 阶段的 17.88% 下降到 2015—2022 阶段的 11.11%,而生境等级下降区面积占比则增加 8.26%,并在 2015—2022 阶段面积占比超过生境等级提高区,说明当前青藏高原生境质量等级出现退化趋势。其中,生境等级退化主要表现为较低生境向低等生境的转化,2015—2022 阶段面积占比为 3.13%,退化程度增加最明显的为高等生境向较高生境的转化,2015—2022 阶段较 1985—1995 阶段增加 1.97%。

总体而言,1985—2022 年青藏高原生境质量等级转移类型以等级不变为主,等级转化的剧烈程度增强。生境质量等级下降区面积占比超过提高区,出现生境等级退化趋势,主要表现为较低生境向低等生境的转化。

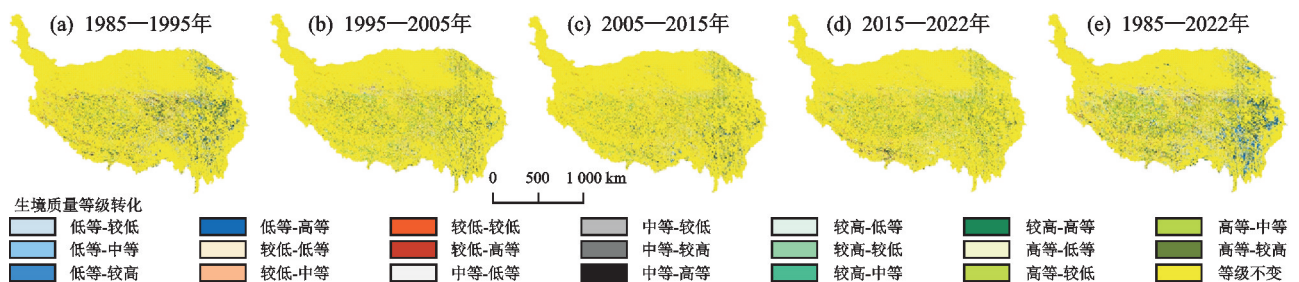


图 3 1985—2022 年青藏高原生境质量等级转移格局

Fig. 3 The transition pattern of environmental quality levels on the Qinghai-Xizang Plateau from 1985 to 2022

2.4 生境质量对气候变化与人类活动的空间响应

基于 GeoDa 软件,采用 Queen contiguity 空间矩阵,在 10 km×10 km 格网尺度下分别对生境质量与气候变化和人类活动因子进行双变量空间自相关分析。气象数据表明,1985—2022 年青藏高原是全球气候变暖最强烈的地区之一,暖湿化特征明显。该区域年平均气温上升趋势达 0.35 °C/10 a,超过同期全球增温速率(0.16 °C/10 a)的 2 倍,快速变暖导致降水的增多,平均增加 14 mm/10 a。因此,气候变化选取年平均气温和年降水量 2 个因子。

2.4.1 生境质量与年均温空间自相关 1985 年、1995 年、2005 年、2015 年和 2022 年生境质量与年平均气温的双变量全局空间自相关 Moran's *I* 指数分别为 -0.098, -0.047, -0.038, -0.016 和 -0.021,且在 0.001 水平上显著。结果表明,1985—2022 年,生境质量与年平均气温呈显著的空间负相关,表明随

着年平均气温的升高,生境质量恶化。

从局部自相关结果(图 4)来看,1985—2022 年,低-低(低生境质量-低年平均气温)是青藏高原主要的关系类型,主要分布于昆仑山脉、冈底斯山脉和祁连山脉部分区域,这些区域海拔较高且常年被积雪覆盖,温度较低且缺乏生物活动;高-高(高生境质量-高年平均气温)分布范围最小,主要分布在青藏高原东南和南部部分区域,这些地区海拔较低,温度适宜,是生物的重要栖息地;高-低(高生境质量-低年平均气温)主要分布在祁连山国家公园、羌塘国家公园和三江源国家公园地区,这些区域温度较低但位于国家公园内,生境质量保护力度较大;低-高(低生境质量-高年平均气温)主要位于柴达木盆地、湟水谷地及青藏高原东南部的边缘低海拔地区,这些区域较青藏高原其他高海拔区域升温明显,反而加剧干旱程度,生境质量偏低。

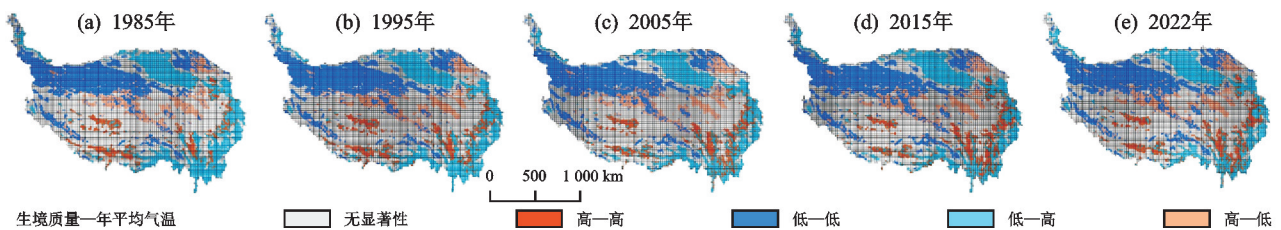


图 4 1985—2022 年青藏高原 10 km 格网尺度生境质量与年平均气温空间 LISA 聚类图

Fig. 4 Spatial LISA clustering diagram of habitat quality and annual average temperature on the Qinghai-Xizang Plateau from 1985 to 2022 at a 10 km grid scale

2.4.2 生境质量与年降水量空间自相关 1985 年、1995 年、2005 年、2015 年和 2022 年生境质量与年平均气温的双变量全局空间自相关 Moran's *I* 指数分别为 0.042, 0.030, 0.131, 0.142 和 0.258,且在 0.001 水平上显著。结果表明,1985—2022 年,生境质量与年降水量呈显著的空间正相关,表明随着年降水量的增加生境质量提高。

从局部自相关结果(图 5)来看,低-低(低生境质量-低年降水量)是青藏高原的主要类型,主要分布于青藏高原北部和西北部,大致沿昆仑山脉东西走向分布;高-低(高生境质量-低年降水量)主要分布于青藏高原中西部地区,该区域海拔处于中等位置,是青藏高原特有物种较为丰富的区域^[33];低-高(低生境质

量-高年降水量)主要分布在青藏高原东部和东南部地区,该区域处于半湿润地区,降水量的少量增加无法改变区域内生境质量状况;高-高(高生境质量-高年降水量)主要分布于青藏高原中东部地区,该区域处于半干旱与半湿润边缘地区,较高的降水量为区域生物的生长提供充足水源。

2.4.3 生境质量与人类活动强度空间自相关 1985 年、1995 年、2005 年、2015 年和 2022 年生境质量与年均温的双变量全局空间自相关 Moran's *I* 指数分别为 0.544, 0.549, 0.497, 0.463 和 0.327,且在 0.001 水平上显著。结果表明,1985—2022 年,生境质量与人类活动强度呈显著的空间正相关,表明随着人类活动强度的增加,生境质量提高。

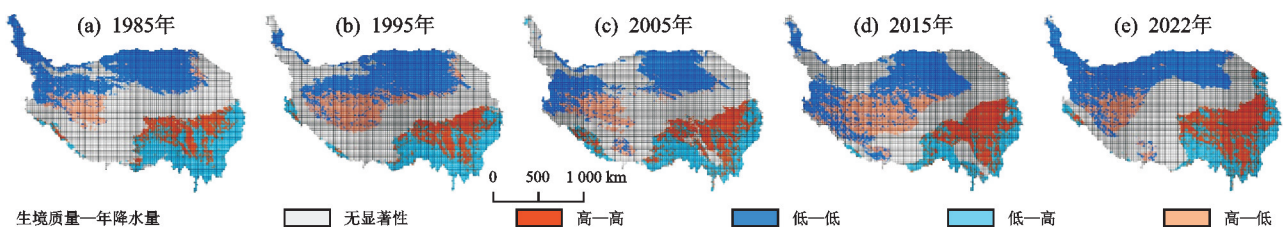


图 5 1985—2022 年青藏高原 10 km 格网尺度生境质量与年降水量空间 LISA 聚类图

Fig. 5 Spatial LISA clustering diagram of habitat quality and annual precipitation on the Qinghai-Xizang Plateau from 1985 to 2022 at a 10 km grid scale

从局部自相关结果(图6)来看,高-高(高生境质量-高人类活动强度)是青藏高原最主要的类型,主要分布在青藏高原中部地区,主要是青藏高原自然生态系统本底较为脆弱,受自然灾害破坏影响也较为显著,人类活动强度较高的区域会进行相关生态防护工程的建设,反而有利于生境的保护与发展;低-低(低生境质量-低人类活动强度)主要位于青藏高原南北

边缘地区,这些区域生态环境较为恶劣,不利于人类和生物的生存;高-低(高生境质量-低人类活动强度)是分布最少的类型,主要分布在青藏高原东北部的青海湖国家公园、东南部的贡嘎山国家公园以及西南部的珠穆朗玛国家公园;低-高(低生境质量-高人类活动强度)呈零散分布,主要位于西宁、海东、拉萨和日喀则等城市分布区域。

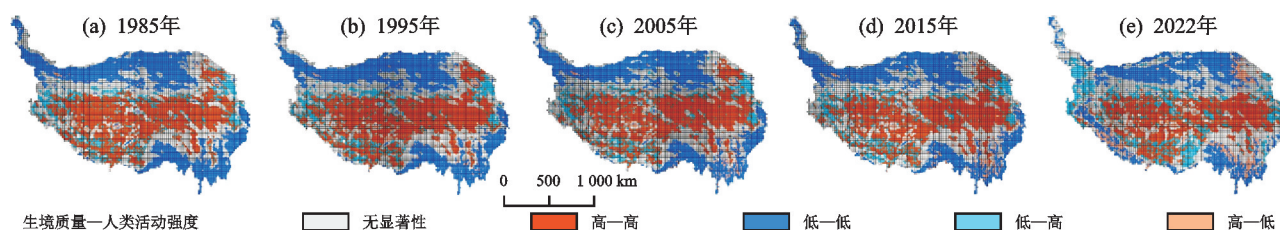


图6 1985—2022年青藏高原10 km 格网尺度生境质量与人类活动强度空间LISA聚类图

Fig. 6 Spatial LISA clustering diagram of 10 km grid scale habitat quality and human activity intensity on the Qinghai-Xizang Plateau from 1985 to 2022

3 讨论

青藏高原是我国乃至亚洲的重要生态安全屏障区,是全球生物多样性保护的热点地区,保障生态安全和保护生物多样性是青藏高原生态保护的核心任务^[21]。随着第二次青藏高原综合科学考察研究的推进及《中华人民共和国青藏高原生态保护法》的颁布与正式实施,开展青藏高原生境质量等生态系统服务评价工作成为当前青藏高原热点研究话题之一。

本文基于1985年、1995年、2005年、2015年和2022年5期土地利用数据,借助InVEST模型,定量评估1985—2022年青藏高原生境质量状况并对其时空格局进行分析发现,青藏高原生境质量整体上处于提升状态,但仍处于较低等级,当前正面临着多方面的生态风险,出现明显的退化趋势,与孙鸿烈等^[19]和傅伯杰等^[21]的研究结论一致。青藏高原生态系统较为复杂,其生境质量存在较大的空间差异,本研究发

热条件优越,但区域内生物质量水平仍较低;相反,青藏高原的中西部部分地区,水热条件都较不充足,但生物质量水平却处于较高水平。因此,必须加快构建“天空地一体化”生态监测网络,建立气候变化对高寒生态系统风险评估预测体系,把握高寒生态系统对气候变化的适应机理,完善生态风险报告和预警机制,更准确地预测未来全球变暖可能引起的青藏高原不同区域高寒生态系统结构和功能变化^[22]。本研究发现,人类活动目前与青藏高原生物多样性呈显著的空间正相关,高-高(高生境质量-高人类活动强度)是青藏高原最主要的类型,表明人类活动较高的区域生物质量越好。可能的原因是青藏高原本身生态系统脆弱,气候变化下使得其自然灾害频发,生态环境遭到破坏,而人类活动强度较高的地区通过建设自然保护区生态保护建设工程,加大对区域生态环境的保护力度,区域生境质量水平也得到提高。高雅丽^[35]2023年发布的《人类活动对青藏高原生态环境影响的科学评估》报告中指出,人类活动对高原环境既有生态建设的积极作用,也有超载放牧的负面影响,当前青藏高原人类活动强度对生态环境的影响较弱,生态建设成效较为显著。研究报告成果也证明本文关于人类活动强度对青藏高原生境质量研究结论的科学性和合理性。因此,需要进一步健全青藏高原生态保护补偿制度,完善野保员、护林员体系建设和林补草补机制,组织更多农牧民群众参与到各项生态修复工程中来,在促进群众增收的同时不断提高区域生态环境质量。

4 结论

气候变化与人类活动是影响青藏高原生境质量的关键因素已成为学术界的共识^[21-22]。由于青藏高原地形起伏大和生态系统复杂,因此,气候变化对青藏高原生境质量的影响也呈明显的区域异质性。如青藏高原的东南部部分地区,年平均气温和年降水量都较高,水

(1)从时间变化特征来看,1985—2022年青藏高原生境质量整体上处于增加状态,但仍处于较低水平。低等生境面积仍然居于主体地位,2015年以来

出现低等生境面积增加与高等生境面积减少的不利发展态势。

(2)从空间变化特征来看,1985—2022 年青藏高原 48.14%的区域生境指数增加,但生境等级总体空间分布变化不大,各等级区由外向内呈嵌套式等级增加格局。

(3)从生境等级转移来看,1985—2022 年青藏高原原生境质量等级转移类型以等级不变为主,但等级转化的剧烈程度不断增强。生境质量出现等级退化趋势,主要表现为较低生境向低等生境的转化。

(4)1985—2022 年青藏高原生境质量对气候变化与人类活动存在较为显著的空间相关关系,空间相关关系类型存在较大的分异。其中,年平均气温对生境质量存在显著的空间负相关,以低—低(低生境质量—低年平均气温)为主;年降水量和人类活动强度对生境质量存在显著的空间正相关,分别以低—低(低生境质量—低年降水量)和高—高(高生境质量—高人类活动)为主。

参考文献:

- [1] 蒋志刚,马克平.保护生物学的现状、挑战 and 对策[J].生物多样性,2009,17(2):107-116.
JIANG Z G, MA K P. Status quo, challenges and strategy in Conservation Biology[J]. Biodiversity Science, 2009,17(2):107-116.
- [2] NEWBOLD T, HUDSON L N, HILL S L L, et al. Global effects of land use on local terrestrial biodiversity[J].Nature,2015,520:45-50.
- [3] GARCÍA-VEGA D, NEWBOLD T. Assessing the effects of land use on biodiversity in the world's drylands and Mediterranean environments[J].Biodiversity and Conservation,2020,29(2):393-408.
- [4] REDDY C S, KURIAN A, SRIVASTAVA G, et al. Remote sensing enabled essential biodiversity variables for biodiversity assessment and monitoring: Technological advancement and potentials [J]. Biodiversity and Conservation,2021,30(1):1-14.
- [5] 《环境保护》编辑部.加强生物多样性保护 推动共建地球生命共同体[J].环境保护,2022,50(10):e2.
Editorial Department of Environmental Protection. Strengthen biodiversity protection and promote the joint construction of a community of life on earth[J].Environmental Protection,2022,50(10):e2.
- [6] SHARP R, DOUGLASS J, WOLNY S, et al. InVEST 3.10. 2 user's guide[Z]. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund,2020.
- [7] 杨明,周桔,曾艳,等.我国生物多样性保护的主要进展及工作建议[J].中国科学院院刊,2021,36(4):399-408.
- YANG M, ZHOU J, ZENG Y, et al. Main progress of biodiversity conservation in China and some suggestions for further work[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences,2021,36(4):399-408.
- [8] 肖能文,赵志平,李果,等.中国生物多样性保护优先区域生物多样性调查和评估方法[J].生态学报,2022,42(7):2523-2531.
XIAO N W, ZHAO Z P, LI G, et al. Biodiversity survey and assessment methods in biodiversity conservation priority areas in China[J].Acta Ecologica Sinica,2022,42(7):2523-2531.
- [9] 杨文府,刘珺,汪雯雯,等.基于多光谱遥感数据的生物多样性监测与评估[J].光谱学与光谱分析,2023,43(4):1282-1290.
YANG W F, LIU J, WANG W W, et al. Monitoring and assessing of biodiversity in China based on multi-spectral remote sensing data[J].Spectroscopy and Spectral Analysis,2023,43(4):1282-1290.
- [10] 王琦,史娜娜,韩煜,等.中国陆域生物多样性综合评估指标体系构建[J].应用生态学报,2021,32(8):2773-2782.
WANG Q, SHI N N, HAN Y, et al. Establishment of an indicator system for comprehensive assessment on terrestrial biodiversity in China[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2021,32(8):2773-2782.
- [11] 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.
ZHANG X R, ZHOU J, LI M M. Analysis on spatial and temporal changes of regional habitat quality based on the spatial pattern reconstruction of land use[J].Acta Geographica Sinica,2020,75(1):160-178.
- [12] TALLIS H T, RICKETTS T, NELSON E, et al. InVEST 1.004 beta user's guide. The natural capital project[J].2010.
- [13] 杨洁,张德罡,陈建纲.基于土地利用变化的中国生境质量时空演变分析[J].草原与草坪,2020,40(5):36-42.
YANG J, ZHANG D G, CHEN J G. Analysis on spatial-temporal variation of habitat quality in China based on land use change[J].Grassland and Turf,2020,40(5):36-42.
- [14] 吴楠,陈红枫,冯朝阳,等.基于土地覆被变化的安徽省生境质量时空演变特征[J].长江流域资源与环境,2020,29(5):1119-1127.
WU N, CHEN H F, FENG C Y, et al. Spatiotemporal evolution characteristics of habitat quality based on land cover change in Anhui Province[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2020,29(5):1119-1127.
- [15] 彭建,徐飞雄,吴见,等.典型旅游城市生境质量空间分异及其影响机理研究:以黄山市为例[J].长江流域资源与环境,2019,28(10):2397-2409.
PENG J, XU F X, WU J, et al. Spatial differentiation

- of habitat quality in typical tourist city and their influencing factors mechanisms: A case study of Huangshan city[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(10): 2397-2409.
- [16] 刘春芳,王川,刘立程.三大自然区过渡带生境质量时空差异及形成机制:以榆中县为例[J]. *地理研究*, 2018, 37(2): 419-432.
- LIU C F, WANG C, LIU L C. Spatio-temporal variation on habitat quality and its mechanism within the transitional area of the Three Natural Zones: A case study in Yuzhong County[J]. *Geographical Research*, 2018, 37(2): 419-432.
- [17] 刘佳依,许大为,徐嘉.基于 InVEST 模型的蒲河流域景观格局及生境质量时空演变分析[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(2): 258-267.
- LIU J Y, XU D W, XU J. Analysis of landscape patterns and spatio-temporal evolution of habitat quality in the PU river basin based on the InVEST model[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(2): 258-267.
- [18] 尚俊,蔡海生,龙月,等.基于 InVEST 模型的鄱阳湖区生境质量时空演化及其变迁特征分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(8): 1901-1915.
- SHANG J, CAI H S, LONG Y, et al. Temporal-spatial distribution and transition of habitat quality in Poyang Lake region based on InVEST model[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(8): 1901-1915.
- [19] 孙鸿烈,郑度,姚檀栋,等.青藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J]. *地理学报*, 2012, 67(1): 3-12.
- SUN H L, ZHENG D, YAO T D, et al. Protection and construction of the national ecological security shelter zone on Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(1): 3-12.
- [20] 郑度,张荣祖,杨勤业.试论青藏高原的自然地带[J]. *地理学报*, 1979, 34(1): 1-11.
- ZHENG D, ZHANG R Z, YANG Q Y. On the natural zonation in the Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1979, 34(1): 1-11.
- [21] 傅伯杰,欧阳志云,施鹏,等.青藏高原生态安全屏障状况与保护对策[J]. *中国科学院院刊*, 2021, 36(11): 1298-1306.
- FU B J, OUYANG Z Y, SHI P, et al. Current condition and protection strategies of Qinghai-Xizang Plateau ecological security barrier[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(11): 1298-1306.
- [22] 朴世龙,张宪洲,汪涛,等.青藏高原生态系统对气候变化的响应及其反馈[J]. *科学通报*, 2019, 64(27): 2842-2855.
- PIAO S L, ZHANG X Z, WANG T, et al. Responses and feedback of the Qinghai-Xizang Plateau's alpine ecosystem to climate change[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(27): 2842-2855.
- [23] 中华人民共和国青藏高原生态保护法[N]. *人民日报*, 2023-04-28(015).
- Qinghai-Xizang Plateau Ecological Protection Law of the People's Republic of China[N]. *People's Daily*, 2023-04-28(015).
- [24] 蒋志刚,江建平,王跃招,等.中国脊椎动物红色名录[J]. *生物多样性*, 2016, 24(5): 501-551.
- JIANG Z G, JIANG J P, WANG Y Z, et al. Red list of China's vertebrates[J]. *Biodiversity Science*, 2016, 24(5): 501-551.
- [25] YANG J, HUANG X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [26] 中华人民共和国自然资源部.土地利用现状分类 GB/T 21010—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
- Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Current land use classification: GB/T 21010—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [27] 张莹,王让会,刘春伟,等.祁连山自然保护区生境质量模拟及预测[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2024, 48(3): 135-144.
- ZHANG Y, WANG R H, LIU C W, et al. Simulation and prediction of habitat quality in Qilian Mountains Nature Reserve[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2024, 48(3): 135-144.
- [28] 潘耀,尹云鹤,侯文娟,等.基于土地利用及植被覆盖变化的黄河源区生境质量时空变化特征[J]. *生态学报*, 2022, 42(19): 7978-7988.
- PAN Y, YIN Y H, HOU W J, et al. Spatiotemporal variation of habitat quality in the Source Region of the Yellow River based on land use and vegetation cover changes[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(19): 7978-7988.
- [29] 徐勇,孙晓一,汤青.陆地表层人类活动强度:概念、方法及应用[J]. *地理学报*, 2015, 70(7): 1068-1079.
- XU Y, SUN X Y, TANG Q. Human activity intensity of land surface: Concept, method and application in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(7): 1068-1079.
- [30] 杨华,徐勇,王丽佳,等.青藏高原人类活动强度时空变化与影响因素[J]. *生态学报*, 2023, 43(10): 3995-4009.
- YANG H, XU Y, WANG L J, et al. Spatio-temporal variation of human activity intensity and its driving factors on the Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(10): 3995-4009.
- [31] 周婷,陈万旭,李江风,等.神农架林区人类活动与生境质量的空间关系[J]. *生态学报*, 2021, 41(15): 6134-6145.
- ZHOU T, CHEN W X, LI J F, et al. Spatial relationship between human activities and habitat quality in Shennongjia forest region from 1995 to 2015[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(15): 6134-6145.

- (4):95-103.
- GU M L, YE C S, LI X, et al. Scenario simulation of land use change in Jiangxi Province based on SD model [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2022, 38 (4):95-103.
- [27] 林伊琳,赵俊三,陈国平,等.基于 MCR-FLUS-Markov 模型的区域国土空间格局优化[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(4):159-170.
- LIN Y L, ZHAO J S, CHEN G P, et al. Optimization of regional territory space pattern based on MCR-FLUS-Markov model[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52 (4): 159-170.
- [28] LI Y M, YANG X, WU B W, et al. Spatio-temporal evolution and prediction of carbon storage in Kunming based on PLUS and InVEST models[J]. *PeerJ*, 2023, 11:e15285.
- [29] CAMACHO OLMEDO M T, PONTIUS R G, PAEGELOW M, et al. Comparison of simulation models in terms of quantity and allocation of land change[J]. *Environmental Modelling and Software*, 2015, 69:214-221.
- [30] 姜彤,苏布达,王艳君,等.共享社会经济路径(SSPs)人口和经济格点化数据集[J]. *气候变化研究进展*, 2022, 18(3):381-383.
- JIANG T, SU B D, WANG Y J, et al. Gridded datasets for population and economy under Shared Socioeconomic Pathways for 2020—2100[J]. *Climate Change Research*, 2022, 18(3):381-383.
- [31] LUO G P, YIN C Y, CHEN X, et al. Combining system dynamic model and CLUE-S model to improve land use scenario analyses at regional scale: A case study of Sangong watershed in Xinjiang, China[J]. *Ecological Complexity*, 2010, 7(2):198-207.
- [32] 云南省水利厅.云南省水资源公报(2010 年)[EB/OL]. [2015-01-24] (2024-05-25). <https://www.docin.com/p-1038083962.html>.
Yunnan Provincial Water Resources Department. Yunnan Provincial water resources bulletin (2010) [EB/OL]. [2015-01-24] (2024-05-25). <https://www.docin.com/p-1038083962.html>.
- [33] 云南省水利厅.云南省水资源公报(2020 年)[EB/OL]. [2021-11-19] (2024-05-25). <http://wcb.yn.gov.cn/html/shuiziyuangongbao/?time=2020>.
Yunnan Provincial Water Resources Department. Yunnan Provincial water resources bulletin (2020) [EB/OL]. [2021-11-19] (2024-05-25). <http://wcb.yn.gov.cn/html/shuiziyuangongbao/?time=2020>.
- [34] 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.
- WANG J F, XU C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1):116-134.
- [35] 乔亚军,张慧,韩晓盈,等.基于地理空间角度的黑龙江省水源涵养功能变化的驱动因素分析[J]. *生态学报*, 2023, 43(7):2711-2721.
- QIAO Y J, ZHANG H, HAN X Y, et al. Exploring drivers of water conservation function variation in Heilongjiang Province from a geospatial perspective[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(7):2711-2721.
- (上接第 211 页)
- [32] 樊杰,钟林生,黄宝荣,等.地球第三极国家公园群的地域功能与可行性[J]. *科学通报*, 2019, 64(27):2938-2948.
- FAN J, ZHONG L S, HUANG B R, et al. Territorial function and feasibility of the Earth's Third Pole national park cluster[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(27):2938-2948.
- [33] 于海彬,张懿锂,刘林山,等.青藏高原特有种子植物区系特征及多样性分布格局[J]. *生物多样性*, 2018, 26 (2):130-137.
- YU H B, ZHANG Y L, LIU L S, et al. Floristic characteristics and diversity patterns of seed plants endemic to the Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Biodiversity Science*, 2018, 26(2):130-137.
- [34] 胡西武,贾天朝.基于生态敏感性与景观连通性的三江源国家公园生态安全格局构建与优化[J]. *长江流域资源与环境*, 2023, 32(8):1724-1735.
- HU X W, JIA T C. Construction and optimization of ecological security pattern in Three-River-Source National Park based on ecological sensitivity and landscape connectivity[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023, 32(08):1724-1735.
- [35] 高雅丽.报告显示人类活动对青藏高原环境影响有限[N]. *中国科学报*, 2023-06-02(1).
- GAO Y L. Report shows that human activities have limited impact on the environment of the Qinghai-Tibet Plateau[N]. *Chinese Journal of Science*, 2023-06-02(1).