

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.01.006; CSTR:32311.14.rswc.2026.01.006.

张小平, 李昊瑞, 王江天, 等. 气候与土地利用变化对不同植被带生态功能耦合协调关系的影响:以青藏高原生态屏障区为例[J]. 水土保持研究, 2026, 33(1):216-224.

Zhang Xiaoping, Li Haorui, Wang Jiangtian, et al. Impact of climate and land use changes on coupling coordination relationship of ecological functions in different vegetation zones: a case study of Qinghai-Xizang Plateau Ecological Shelter[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2026, 33(1):216-224.

气候与土地利用变化对不同植被带生态功能 耦合协调关系的影响

——以青藏高原生态屏障区为例

张小平¹, 李昊瑞^{1,2}, 王江天¹, 王良杰²

(1. 青海省水利水电勘测规划设计研究院有限公司 水保生态环境院, 西宁 810000;

2. 南京林业大学 林草学院、水土保持学院, 南京 210037)

摘要: [目的] 明晰不同植被带生态功能时空特征及耦合协调关系,厘清气候与土地利用变化对其的影响,为区域生态系统管理提供新的科学依据。[方法] 以青藏高原生态屏障区为例,利用InVEST、RUSLE和CASA模型分别评估了不同植被带内产水量、土壤保持与固碳,基于耦合协调度模型分析了不同植被带生态功能耦合协调关系的时空变化,并采用地理探测器模型探讨了气候与土地利用变化对不同植被带内生态功能耦合协调关系的影响强度。[结果] (1) 研究期间,高寒草原带、高寒草甸带和温带荒漠带内产水量、土壤保持与固碳均先增后减;高寒森林带和亚热带针叶林带内土壤保持和固碳先增后减,产水量先减后增;高寒荒漠带内产水量和土壤保持先增后减,固碳持续增加。(2) 亚热带针叶林带内生态功能耦合协调度最高,其均值在2000年、2010年和2020年分别为0.402,0.411,0.420;温带荒漠带内生态功能耦合协调度最低,其均值分别为0.068,0.117,0.109。(3) 气候变化主导了研究区整体的生态功能耦合协调关系时空变化,但植被覆盖度作为揭示土地利用变化的指标在局部地区也不容忽视,其在高寒草原带内对生态功能耦合协调关系变化影响最大,影响强度为0.204。[结论] 针对不同植被带生态功能耦合协调关系的变化,既要推进区域生态系统协同管理,又要实施分区差异化生态保护与修复,提高生态系统的整体性和连通性,构建高质量的生态安全屏障。

关键词: 生态功能; 耦合协调; 气候与土地利用变化; 青藏高原生态屏障区

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)01-0216-09

Impact of climate and land use changes on coupling coordination relationship of ecological functions in different vegetation zones

—a case study of Qinghai-Xizang Plateau Ecological Shelter

Zhang Xiaoping¹, Li Haorui^{1,2}, Wang Jiangtian¹, Wang Liangjie²

(1. Water Conservation and Ecological Environment Laboratory of Qinghai Water Conservancy & Hydropower Survey Planning and Design Institute Co., Ltd., Xining 810000, China; 2. College of Forestry and Grassland, College of Soil and Water Conservation, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: [Objective] This study aims to clarify the spatiotemporal characteristics and coupling coordination relationships of ecological functions (EFs) in different vegetation zones, reveal the impact of climate and land use changes on them, and provide a new scientific basis for regional ecosystem management. [Methods] Taking the Qinghai-Xizang Plateau Ecological Shelter (QPES) as a case study, the InVEST, RUSLE, and CASA models were used to assess water yield (WY), soil conservation (SC), and carbon sequestration (CS) in different

收稿日期: 2025-03-04

修回日期: 2025-04-08

接受日期: 2025-04-20

资助项目: 国家重点研发计划(2018YFC0507304); 国家自然科学基金(41601209)

第一作者: 张小平(1979—), 男, 甘肃庆阳人, 副高级工程师, 主要从事水土流失监测研究。E-mail: 286797431@qq.com

通信作者: 王良杰(1982—), 男, 浙江温州人, 教授, 博士, 主要从事生态遥感研究。E-mail: liang-jiewang@njfu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonice.org>

vegetation zones. Based on the coupling coordination degree (CCD) model, the spatiotemporal variations in the coupling coordination relationships of EFs across different vegetation zones were analyzed. Furthermore, the geodetector model was applied to examine the impact intensity of climate and land use changes on the coupling coordination relationships of EFs in different vegetation zones. [Results] (1) During the study period, WY, SC, and CS first increased and then decreased in the alpine steppe, alpine meadow, and temperate desert zones. SC and CS first increased and then decreased in the alpine forest and subtropical coniferous forest zones, while WY first decreased and then increased. WY and SC first increased and then decreased, while CS continued to increase in the alpine desert zone. (2) The highest CCD of EFs was observed in the subtropical coniferous forest zone, with mean values of 0.402, 0.411, and 0.420 in 2000, 2010, and 2020, respectively. In contrast, the lowest CCD of EFs was found in the temperate desert zone, with mean values of 0.068, 0.117, and 0.109, respectively. (3) Climate change dominated the spatiotemporal variations in the overall coupling coordination relationships of EFs in the study area. However, fractional vegetation cover, as an indicator of land use changes, should not be overlooked in local regions. Its impact on variations in coupling coordination relationships of EFs was the greatest in the alpine steppe zone, with an intensity of 0.204. [Conclusion] To address the variations in the coupling coordination relationships of EFs across vegetation zones, it is necessary to promote coordinated management of regional ecosystems and implement zonal, differentiated ecological protection and restoration measures to improve ecosystem integrity and connectivity, ultimately constructing high-quality ecological security shelters.

Keywords: ecological functions; coupling coordination; climate and land use changes; Qinghai-Xizang Plateau Ecological Shelter

植被作为陆地生态系统的重要组成部分,在维持生态平衡和支持生态功能方面发挥着关键作用^[1]。然而,在全球气候变化和人类活动的共同影响下,自然植被不断减少,其生态功能明显降低^[2]。越来越多的学者开始关注如何提高植被生态功能,以此提出了植被带的概念,即在温度、湿度等气候因子的共同作用下,形成有利于不同植被类型生长的带状区域^[3]。如何求同存异,有效管理不同植被带生态功能,是新时期生态系统管理的关键,也是推进区域高质量发展的有效途径。

不同植被带对气候和土地利用变化的响应差异较大,导致其生态功能具有明显的空间异质性。了解不同植被带对气候与土地利用变化的响应及其生态功能的时空差异,对于制定有效的生态保护和恢复政策至关重要。但现有研究大多关注区域整体或不同尺度的生态功能评估,鲜有研究报道不同植被带内生态功能的差异。Jiang等^[4]从调节、供给、支持和文化4个方面评估了青藏高原东南部12种生态功能;Li等^[5]从县域和像素两个空间尺度评估了青藏高原生态功能的时空变化。此外,一些研究还探讨了气候变化与人为活动对不同植被带内植被覆盖的影响^[6]。关于不同植被带内生态功能时空差异的研究仍然不足,需要对此进行探索,为大尺度跨植被带的生态系统管理和保护提供理论依据。

气候与土地利用变化也会影响不同植被带内生态功能耦合协调关系发生改变,并直接影响生态系

统的稳定性与可持续性,尤其是在干旱区、半干旱区和湿润区,生态功能之间复杂的相互关系决定了这些地区生态系统的功能表现与演化方向^[6]。因此,深入研究不同植被带生态功能耦合协调关系的时空变化,对于理解和应对全球变化背景下生态系统的动态演变具有重要意义。但现有研究大多探讨生态功能的权衡、非线性反馈以及从时空角度分析获得的生态系统效益的差异,缺少对生态功能耦合协调关系的直接测度,例如张能能等^[7]探讨了小兴安岭生态系统服务功能的权衡/协同效应;李桂娥等^[8]以钱塘江流域为例分析了生态系统服务功能时空演化的非线性影响因子;庞娇等^[9]量化了京津冀生态系统固碳效益时空格局的差异。因此,迫切需要探索不同植被带生态功能耦合协调关系的时空变化,以及气候与土地利用变化对其的影响强度,这对研究区生态系统的科学管理具有重要意义。

在全球气候变化持续加剧和人类活动日益频繁的双重影响下,青藏高原生态系统面临着前所未有的压力,其生态功能已出现显著变化。为了了解青藏高原生态屏障区不同区域的自然特征,明确其生态环境的利弊,有必要分析气候和土地利用变化对不同植被带生态功能耦合协调关系的影响,为科学合理地保护、利用和开发青藏高原提供理论依据。本研究分析青藏高原生态屏障区不同植被带生态功能耦合协调关系的时空变化,以及气候和土地利用

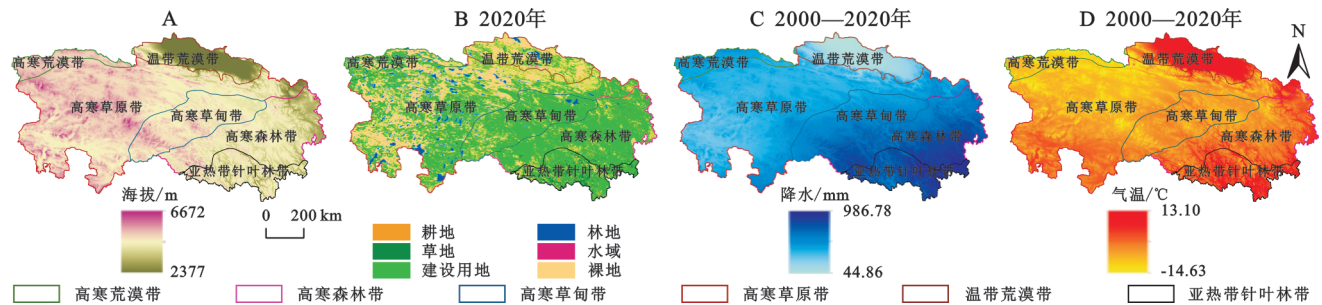
变化对这些关系的影响,旨在:(1) 评估青藏高原生态屏障区不同植被带产水量、固碳和土壤保持的时空变化;(2) 探讨不同植被带生态功能耦合协调关系的时空特征;(3) 量化气候和土地利用变化对不同植被带生态功能耦合协调关系的影响强度,以期为研究区生态保护和决策提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

青藏高原生态屏障区(82°50′—105°5′E, 29°40′—38°10′N)是我国“两屏三带”的重要组成部分,横跨

高寒草原带、高寒森林带、高寒草甸带、高寒荒漠带、温带荒漠带和亚热带针叶林带 6 个植被带,对国家生态安全具有重要影响。该地区位于中国西南部,面积约 931 530 km²,包括青海和西藏的大部分,以及新疆、四川和甘肃的部分地区。地貌以高原为主,平均海拔 3 000 m 以上(图 1);日照辐射强,年降水量约 400 mm,年平均气温-3~0℃;土地利用由西向东呈现出荒漠—草原—草甸—森林的梯度变化;土壤类型以高山漠土、高山草甸土和高山草原土为主;人口稀少,城镇化水平低,是中国人口密度最低的地区。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号GS(2019)1822号的标准地图制作,底图未做修改,下图同。

图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

1.2 数据来源

(1) 2000—2020 年青藏高原生态屏障区土地利用/覆被数据、高程数据、NDVI 数据和边界数据均来自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),空间分辨率均为 1 km×1 km。

(2) 2000—2020 年青藏高原生态屏障区气象数据(包括气温、降水、水汽压、太阳辐射、潜在蒸发量和风速)来自国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>),空间分辨率均统一为 1 km×1 km。

(3) 土壤相关数据来源于世界土壤数据库(<https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/>),包括土壤质地、土壤类型、土壤有机碳等,比例尺为 1:100 万。

1.3 生态功能评估方法

青藏高原地理环境独特,自然资源丰富,是中国水安全的战略基底。然而,近几十年来,青藏高原降水增多,水土流失加剧,出现了多种生态问题。因此,结合研究区特点,选取产水量、土壤保持和固碳作为生态功能代表进行模型评估。与其他模型相比,InVEST 模型、RUSLE 模型和 CASA 模型考虑了多种因素,被广泛应用于生态功能的评估,并在使用过程中不断更新和改进,以确保其计算的高准确性^[10-11]。

1.3.1 产水量评估 基于水量平衡原理采用 InVEST

模型评估产水量。产水量是降雨量与实际蒸发量之间的差值^[12],计算公式为:

$$Y_{xj} = \left(1 - \frac{AET_{xj}}{P_x}\right) \times P_x \quad (1)$$

式中: Y_{xj} 表示年产水量; AET_{xj} 表示年平均蒸散量; P_x 表示年平均降水量(mm)^[12]。

1.3.2 土壤保持评估 基于 RUSLE 模型评估土壤保持。土壤保持量是潜在的土壤侵蚀量与实际的土壤侵蚀量之间的差值^[13],计算公式为:

$$SC = R \times K \times LS \times (1 - C \times P) \quad (2)$$

式中:SC 表示土壤保持量(t/km²);R 代表降雨侵蚀力因子[t·h/(MJ·mm)];K 代表土壤可蚀性因子[MJ·mm/(km²·h)];L 代表坡长因子,S 代表坡度因子,无量纲;C 代表植被覆盖因子,无量纲;P 代表土壤保持措施因子,无量纲^[13]。

1.3.3 固碳 植被的净初级生产力代表植被的固碳能力。基于 CASA 模型评估固碳,是某像元接受的光合有效辐射和该像元现实光能效率间的乘积^[14],计算公式为:

$$NPP_{(x,t)} = APAR_{(x,t)} \times \epsilon_{(x,t)} \quad (3)$$

式中: $NPP_{(x,t)}$ 表示像元 x 在 t 月的净初级生产力(gC/m²); $APAR_{(x,t)}$ 表示像元 x 在 t 月吸收的光合有效辐射(MJ/m²); $\epsilon_{(x,t)}$ 表示像元 x 在 t 月的实际光能利用率(gC/MJ)^[14]。

1.4 植被覆盖度与土地利用强度计算

基于研究区土地利用现状,选择植被覆盖度(Fractional Vegetation Cover, FVC)和土地利用强度(Land Use Intensity, LUI)定量分析青藏高原生态屏障区土地利用变化。

FVC是衡量植被生长态势的重要指标,采用像元二分模型估算FVC^[15]。计算公式如下:

$$FVC = \frac{(NDVI - NDVI_{soil})}{(NDVI_{veg} - NDVI_{soil})} \quad (4)$$

式中:NDVI表示归一化植被指数;NDVI_{soil}表示裸土的归一化植被指数;NDVI_{veg}表示植被的归一化植被指数^[15]。

LUI反映了一个地区人类发展和土地利用的程度,是衡量地区土地利用深度和广度的重要指标^[16]。计算公式如下:

$$LUI = \sum_{i=1}^n J_i A_i \times 100\% \quad (5)$$

式中:LUI代表研究区域土地利用强度指数; J_i 表示第*i*类土地利用强度的分级指数; A_i 代表第*i*类土地利用强度的等级面积百分比; n 表示土地利用强度的等级。根据中国资源环境数据库中土地利用程度分级标准,结合研究区具体状况,将土地利用等级分为4级,即未利用地为1级,林地、草地和水域为2级,耕地为3级,建设用为4级^[16]。

1.5 耦合协调关系评估

耦合协调度模型是分析事物协调发展水平的模型。其中,耦合度是指两个或两个以上系统之间为实现协调发展而产生的相互作用和影响的动态关联,可以反映系统之间相互依存、相互制约的程度;协调度是指耦合互动关系中良性耦合程度的大小,可以反映协调情况^[17]。其表达式为:

$$CCD = (C \times T)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

式中:CCD代表耦合协调度; C 代表耦合度,取值范围为0~1; T 代表不同生态功能的综合评价得分,反映其协同效应。

$$C = 3 \times \left\{ \frac{F(X) \times G(Y) \times H(Z)}{[F(X) + G(Y) + H(Z)]^3} \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

式中: $F(X)$ 、 $G(Y)$ 和 $H(Z)$ 分别代表不同的生态功能,即产水量、土壤保持和固碳,并进行归一化处理。

$$T = \alpha \times F(X) + \beta \times G(Y) + \gamma \times H(Z) \quad (8)$$

式中: α 、 β 和 γ 分别代表产水量、土壤保持和固碳的权重。在本研究中,3种生态功能被视为同等重要,因此 $\alpha = \beta = \gamma = 1/3$ 。参照之前的研究^[17],本研究将耦合协调度分为7类(表1)。

表1 耦合协调度的标准

Table 1 Criteria for coupling coordination degree		
类别	耦合协调度	等级
不均衡发展	$0 \leq CCD \leq 0.2$	高度不协调
	$0.2 < CCD \leq 0.3$	中度不协调
	$0.3 < CCD \leq 0.4$	轻度不协调
过度开发	$0.4 < CCD \leq 0.5$	不协调边缘
	$0.5 < CCD \leq 0.6$	轻度协调
均衡发展	$0.6 < CCD \leq 0.8$	中度协调
	$0.8 < CCD \leq 1.0$	高度协调

1.6 影响因素分析

基于研究区土地利用现状(以草地和林地为主),选择LUI、FVC和NDVI作为反映土地利用变化的指标,选择气温和降水作为气候变化的指标。地理探测器是检验空间分异现象并发现其背后影响因素的重要统计学工具,被广泛应用于生态遥感、环境、地信等多个领域,由4种类型组成,分别是单因子探测、交互作用探测、空间分异探测和生态探测^[18]。在本研究中,我们使用单因子探测来研究气候和土地利用变化对青藏高原不同植被带生态功能耦合协调关系的影响,计算公式如下:

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (9)$$

式中: L 表示变量 Y 或因子 X 的分类或分区; N_h 和 σ_h^2 分别表示第*h*层的样本数和方差; N 和 σ^2 分别是总样本量和方差; q 是自变量的解释强度,取值范围为0~1,值越大表示影响因子的解释力越强。

2 结果与分析

2.1 气候与土地利用变化分析

气候变化方面,2000—2020年研究区降水逐年波动增加,其峰值出现在2016年,为712.63 mm;气温也呈逐年递增趋势,其峰值出现在2019年,为0.60℃。从空间分布来看,研究区降水、气温时空分布不均,降水主要集中在研究区东南部,北部降水稀少;与之相反,高值主要集中在研究区北部,低温广泛分布于研究区西北部和中部。

土地利用变化方面,2000—2020年研究区未利用地面积增加最多,增加了82 009 km²;草地面积锐减,减少了112 726 km²。从土地利用空间分布来看,草地是分布最广,约占总面积的60%;其次是未利用地和林地,分别集中分布在研究区北部和东南部;建设用地面积最少,仅占总面积的0.06%。从土地利用强度空间分布来看,LUI的高值主要分布在高寒草原带、高寒草甸带、高寒荒漠带和高寒森林带,低值集

中在温带荒漠带和亚热带针叶林带。从植被空间分布来看,FVC的高值集中在高寒草甸带、高寒森林带

和亚热带针叶林带,低值分布在高寒草原带、高寒荒漠带和温带荒漠带(图2)。

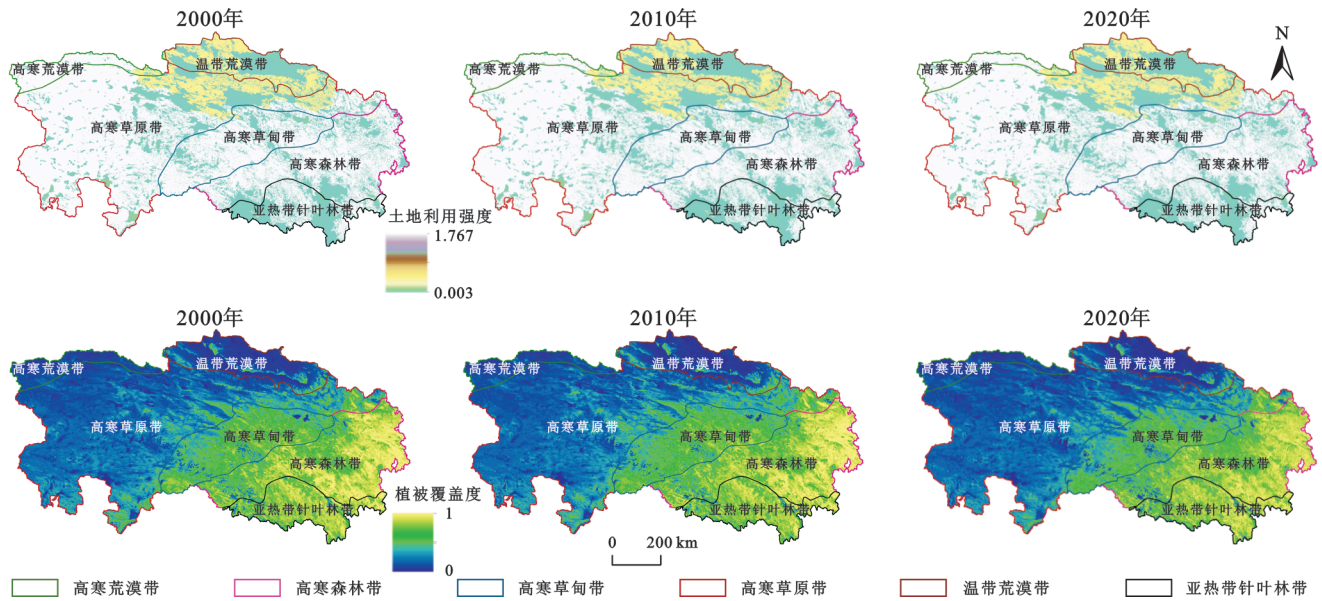


图2 研究区土地利用变化

Fig. 2 Land use changes in the study area

2.2 生态功能时空变化分析

青藏高原生态屏障区生态功能表现出明显的空间异质性,其低值主要分布在研究区西北部,高值集中在研究区东南部(图3)。不同植被带生态功能差异较大,高寒草原带、高寒草甸带和温带荒漠带的3种生态功能均先增后减,高寒森林带和亚热带针叶林带的土壤保持和固碳先增后减,产水量先减后增,高寒荒漠带的产水量和土壤保持先增后减,而固碳持续增加。亚热带针叶林带生态功能均值最高,其产水量均值在2000年为340.40 mm,2010年降至118.93 mm,2020年增至286.36 mm;土壤保持均值在2000年为8 821.67 t/km²,2010年增至8 899.38 t/km²,2020年降至8 562.98 t/km²;固碳均值在2000年为263.76 gC/m²,2010年升至288.96 gC/m²,2020年降至256.45 gC/m²。温带荒漠带产水量均值最低,其均值在2000年为10.53 mm,2010年增至26.83 mm,2020年降至21.94 mm。高寒荒漠带土壤保持和固碳均值最低,其中土壤保持均值在2000年为334.25 t/km²,2010年增至368.91 t/km²,2020年降至361.16 t/km²;固碳均值在2000年为13.33 gC/m²,2010年升至15.94 gC/m²,2020年持续增至17.01 gC/m²。

2.3 不同植被带生态功能耦合协调关系分析

不同植被带生态功能的耦合协调关系在空间上存在明显的异质性(图4),其耦合协调度高值主要分布在高寒草甸带、高寒森林带和亚热带针叶林带;而低值主要分布在高寒草原带、高寒荒漠带和温带荒漠带。因此,耦合协调关系表明,均衡发展区主要分布在高寒草

甸带、高寒森林带和亚热带针叶林带,而过度开发和失衡发展区主要分布在高寒草原带、高寒荒漠带和温带荒漠带,尤其是温带荒漠带,其失衡发展区域面积占了总面积的近一半。在高寒草原带、高寒草甸带、高寒荒漠带和温带荒漠带,产水量—土壤保持—固碳的耦合协调度均值先增后减;高寒森林带和亚热带针叶林带内产水量—土壤保持—固碳的耦合协调度均值持续增加。亚热带针叶林带的产水量—土壤保持—固碳的耦合协调度均值最高,其在2000年、2010年和2020年分别为0.402,0.411,0.420;温带荒漠带的产水量—土壤保持—固碳的耦合协调度均值最低,其在2000年、2010年和2020年分别为0.068,0.117,0.109。

2.4 气候与土地利用变化对生态功能耦合关系的影响分析

2000—2020年气候与土地利用变化对青藏高原生态屏障区不同植被带生态功能耦合协调关系的影响强度如表2所示。整体而言,气候变化是影响产水量—土壤保持—固碳耦合协调关系发生变化的最主要因素,尤其是降水对各植被带生态功能耦合协调关系变化影响最大,其在亚热带针叶林带的影响强度为0.261,在高寒森林带的影响强度为0.251,在高寒草甸带的影响强度为0.212,在高寒草原带的影响强度为0.186,在温带荒漠带的影响强度为0.134,在高寒荒漠带的影响强度为0.102。因研究区主要土地利用类型为草地和林地,植被变化也是影响该地区生态功能耦合协调关系发生变化的重要因素,尤其是对高寒草原带、亚热带针叶林带的影响较大,其中FVC在这两个

植被带内的影响强度分别为 0.204,0.177。LUI 影响不同植被带生态功能耦合协调关系变化最小的驱动

因素,其在亚热带针叶林带和高寒草原带的影响强度明显高于其他植被带,分别为 0.097,0.103。

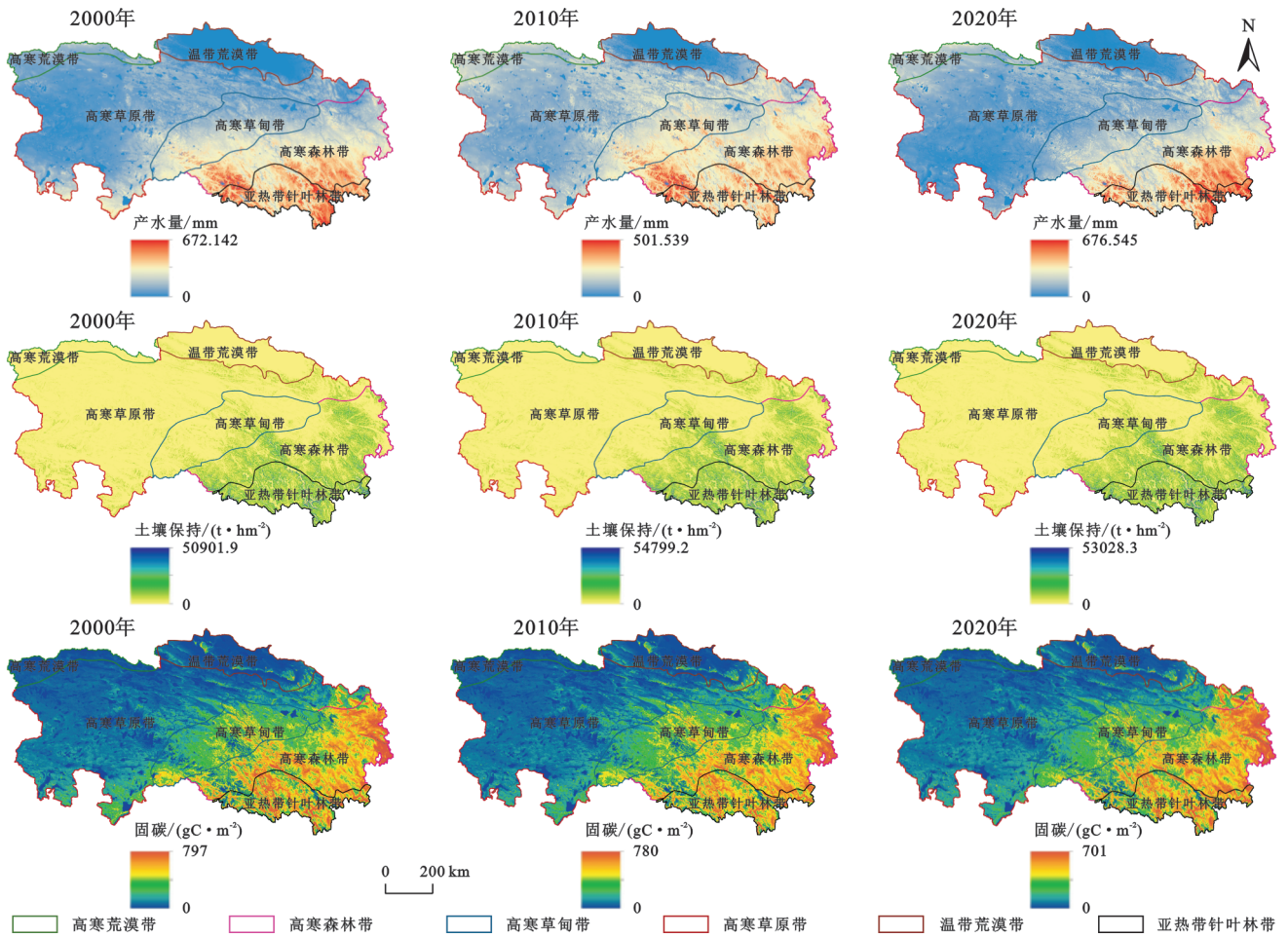


图 3 生态功能时空变化特征

Fig. 3 Spatiotemporal variation characteristics of ecological functions

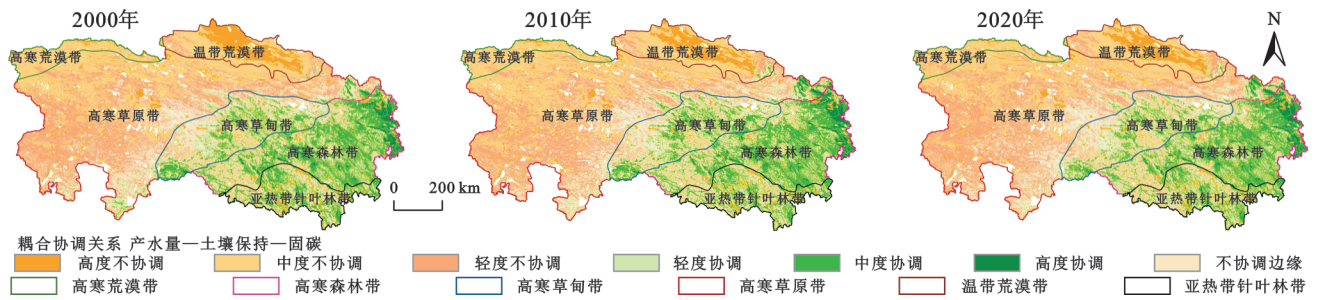


图 4 生态功能耦合协调关系时空特征

Fig. 4 Spatiotemporal characteristics of coupling coordination of ecological functions

3 讨论

3.1 生态功能的时空变化

青藏高原生态屏障区生态功能表现出明显的空间异质性,即高值集中在高寒森林带和亚热带针叶林带,低值分布在高寒荒漠带、温带荒漠带和高寒草原带,这与前人的研究结果保持一致^[19-21]。降水是影响产水量空间分布的主要因素,其与产水量在空间上具有较强的一致性,即南高北低。高寒森林带和

亚热带针叶林带内主要土地利用类型为林地,森林根系可通过固结土壤和抑制降水引起的土壤流失来增加土壤保持^[22]。此外,森林作为陆地生态系统的重要组成部分,生物量高,可作为大型碳库,导致高寒森林带和亚热带针叶林带的固碳高于其他植被带^[23]。2000—2020年研究区高寒草原带、高寒草甸带和温带荒漠带内产水量、土壤保持与固碳均先增后减;高寒森林带和亚热带针叶林带的土壤保持和固碳先增后减,产水量先减后增;高寒荒漠带的产水

量和土壤保持先增后减,而固碳持续增加。气候变化是影响不同植被带生态功能明显差异的主要原因。研究期间,青藏高原生态屏障区降水量呈年际波动变化^[24],部分地区降水量减少,如青藏高原南部、川藏地区及怒江河谷地区;部分地区降水量增加,如青藏高原东南部及中部。此外,人类活动也是影响不同植被带生态功能差异的重要原因。生态工程的实施,如退牧还草、防风固沙、森林保护与建设、自然保护区建设等不同程度地影响了区域不同植被带生态功能的差异^[25]。人口和城镇面积的增加、区域城市化水平的不同提高使不同植被带生态功能出现明显差异^[26]。因此,根据各植被带的生态功能差异,国家和政府需制定更有针对性的保护政策;建立健全生态监测网络,对不同植被带的生态环境进行长期、连续的监测,及时掌握生态系统状况及变化趋势;根据“谁受益、谁补偿”的原则,建立生态保护补偿机制,对于因生态保护而利益受损的地区或群体,给予相应的经济补偿或政策扶持,以激励其积极参与生态保护工作。

表 2 气候与土地利用变化对不同植被带对生态功能耦合关系的影响

Table 2 Impact of climate and land use changes on coupling relationships of ecological functions in different vegetation zones

植被带	气温	降水	NDVI	FVC	LUI
温带荒漠带	0.114**	0.134**	0.101**	0.094**	0.041**
高寒荒漠带	0.088**	0.102**	0.067**	0.070**	0.038**
亚热带针叶林带	0.214**	0.261**	0.201**	0.177**	0.097**
高寒草甸带	0.146**	0.212**	0.157**	0.162**	0.062**
高寒森林带	0.208**	0.251**	0.188**	0.152**	0.045**
高寒草原带	0.125**	0.186**	0.165**	0.204**	0.103**

注:**表示在 0.01 水平上显著相关。

3.2 气候与土地利用变化对生态功能耦合协调关系的影响

耦合协调度作为衡量系统各组成之间相互依存程度和协调程度的指标,表示系统内各要素之间相互作用、影响和关联的紧密程度,以及系统内各要素协同配合、共同作用的协调程度^[17]。本研究内,不同植被带生态功能的耦合协调关系在空间上存在明显的异质性,具体表现在耦合协调度高值分布在高寒草甸带、高寒森林带和亚热带针叶林带,低值分布在高寒草原带、高寒荒漠带和温带荒漠带。草甸是一种以多年生中生草本植物为主的植被类型,通常发育在适中的水分条件下,其植物种类繁多,草层高而茂密,根系发达,能够有效保持水土,防止水土流失^[27]。森林作为地球的重要组成部分,其生态作用远高于其他植被

类型,包括涵养水源、保持水土、增加固碳等多个方面^[23]。因此,高寒草甸带、高寒森林带和亚热带针叶林带的生态功能耦合协调度更高,研究区均衡发展区域也位于这 3 个植被带内。而草原生态系统环境较为恶劣,土壤贫瘠,常是由风化的岩石和沙土组成,缺乏水源和树木的保护,容易受到风沙侵袭和水土流失^[28]。另外,荒漠生态系统分布在干旱地区,年降水量稀少,且蒸发量远大于降水量,导致极端干旱的环境。在这种环境下,植被种类单调、植被分布稀疏,甚至有大片的裸露土地,生物产量极低,能量流动与物质循环缓慢^[29]。因此,高寒草原带、高寒荒漠带和温带荒漠带的生态功能耦合协调度呈现低值,研究区不均衡发展区和过度开发区位于这 3 个植被带。

本研究结果表明,从整体和长期视角来看,气候变化对青藏高原生态屏障区生态功能耦合协调关系的影响更为主导。随着全球气候变暖,青藏高原冰川加速消融、冻土退化、裸露地面与地表水面积增大,这些变化使得地表对太阳辐射的吸收增强,致使部分地区干旱频率增加,草地出现退化^[24]。作为影响青藏高原生态屏障区生态功能耦合协调关系变化的最主要因素,降水可通过多个方面对生态功能产生显著影响,其直接影响包括增加径流量以及降雨强度与历时,间接影响包括改变土壤含水量、植被截留、蒸发与下渗等,降水的时空分布直接或间接决定了多种生态功能的时空分布^[24-26]。从局部和短期视角来看,土地利用变化也是影响区域生态功能耦合协调关系变化的关键因素。作为表征地表植被覆盖的重要参数,FVC 可以直观地反映一个地区的植被生长状况。传统游牧向定居放牧转变^[25],公路、铁路、城镇建设侵占林草地,河谷地带耕地面积扩大等人为扰动致使研究区高寒草原带、高寒草甸带等植被带内草地面积锐减,加剧了 FVC 在这些植被带内的影响强度。本研究内,LUI 是影响各植被带生态功能耦合协调关系变化最弱的驱动因子。这可能与研究区内人口稀少、城镇化水平低、土地利用程度不高有关^[26]。因此,针对不同植被带生态功能耦合协调关系的变化,既要推动区域生态系统协同治理,又要分区实施差异化生态保护与修复,以提高生态系统的整体性和连通性,构建优质生态安全屏障。

基于耦合协调度模型分析不同植被带生态功能耦合协调关系并探索气候与土地利用变化对不同植被带耦合协调关系变化的影响可为区域的生态系统管理和土地规划提供科学依据。研究所评估生态功能均与已发表成果进行了对比验证^[19-21],相对误差较小,模型模拟效果良好,确保了结果的可靠性,对未来

青藏高原生态屏障区的分区管理具有实际意义。研究中还分析了不同植被带生态功能耦合协调关系的时空变化,识别了不同耦合协调关系发生变化的主要驱动因素,弥补了青藏高原主要生态功能耦合协调关系发生变化原因上的空缺,为优化研究区生态系统格局,实施分区管理提供了有效参考。尽管InVEST模型已广泛应用于生态功能的评估中,在模型评估中仍有一定不确定性^[12];由于相关气候数据获取不易,本研究仅选择气温和降水作为气候因子,在后续的研究中还需考虑更多的气候因素,如蒸散发、风速、太阳辐射等。此外,本研究只在3个时间节点选取3种生态功能进行评估,在后续的研究中可选择更多的生态功能类型在长时间序列上进行分析。

4 结论

(1) 青藏高原生态屏障区生态功能表现出明显的空间异质性,其高值主要集中在亚热带针叶林带,低值广泛分布在温带荒漠带、高寒荒漠带和高寒草原带。

(2) 耦合协调关系表明,青藏高原生态屏障区内均衡发展区主要位于高寒草甸带、高寒森林带和亚热带针叶林带,而过度开发和不均衡发展区主要位于高寒草原带、高寒荒漠带和温带荒漠带。

(3) 整体而言,气候变化主导青藏高原生态屏障区生态功能耦合协调关系发生变化;局地而言,土地利用变化正在成为影响不同植被带内生态功能耦合协调关系变化的关键因子。需统筹应对气候变化与管控土地利用变化,以提高区域和整体的生态服务功能。

参考文献(References):

- [1] 戴晓爱,马佳欣,唐艺菱,等. 甘肃省植被时空动态变化及其归因分析[J]. 生态环境学报, 2024, 33(8): 1163-1173.
Dai X A, Ma J X, Tang Y L, et al. Spatio-temporal dynamics and attribution analysis of vegetation in Gansu Province [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2024, 33(8): 1163-1173.
- [2] 张韬略,姜亮亮,刘冰,等. 中国植被对气候变化的敏感性定量分析[J]. 生态学报, 2025, 45(5): 2412-2423.
Zhang T L, Jiang L L, Liu B, et al. Quantitative analysis of vegetation sensitivity to climate change in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(5): 2412-2423.
- [3] 刘新明. 祁连山康乐区不同植被带土壤微生物数量及酶活性变化特征[J]. 防护林科技, 2023(3): 37-39, 68.
Liu X M. Variation Characteristics of soil microbial quantity and enzyme activity in different vegetation zones in Kangle District of Qilian Mountains [J]. Protection Forest Science and Technology, 2023(3): 37-39, 68.
- [4] Jiang X W, Dong C. Fine evaluation of ecological service functions in alpine and deep valley regions: a case study of the southeast Tibetan Plateau [J]. Ecological Indicators, 2024, 163: 112047.
- [5] Li H R, Ma S, Zhang M, et al. Determinants of ecological functional zones in the Qinghai-Tibet Plateau ecological shelter at different scales in 2000 and 2015: from the perspective of ecosystem service bundles [J]. Ecological Indicators, 2023, 154: 110743.
- [6] Xu Y, Dai Q Y, Zou B, et al. Tracing climatic and human disturbance in diverse vegetation zones in China: over 20 years of NDVI observations [J]. Ecological Indicators, 2023, 156: 111170.
- [7] 张能能,刘兆刚. 基于InVEST模型的小兴安岭生态系统服务功能权衡/协同效应[J]. 环境科学, 2025, 46(7): 4628-4640.
Zhang N N, Liu Z G. Trade-offs/synergies of ecosystem services in the Xiaoxing'an mountains based on the InVEST Model [J]. Environmental Science, 2025, 46(7): 4628-4640.
- [8] 李桂娥,李杰,赵冲,等. 生态系统服务时空演化的非线性影响因子:以钱塘江流域为例[J]. 中国环境科学, 2022, 42(12): 5941-5952.
Li G E, Li J, Zhao C, et al. Spatiotemporal dynamics of ecosystem services and their nonlinear influencing factors: a case study in the Qiantang River Basin [J]. China Environmental Science, 2022, 42(12): 5941-5952.
- [9] 庞娇,单婧,闫愉悦,等. 京津冀生态系统固碳效益时空格局及驱动因素定量分离[J]. 环境科学, 2025, 46(3): 1666-1678.
Pang J, Shan J, Yan Y Y, et al. Quantitative separation of spatiotemporal patterns and driving factors of carbon sequestration benefits in the Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Environmental Science, 2025, 46(3): 1666-1678.
- [10] 朱殿珍,初磊,马帅,等. 青藏高原生态屏障区生态系统服务权衡与协同关系[J]. 水土保持研究, 2021, 28(4): 308-315.
Zhu D Z, Chu L, Ma S, et al. Tradeoff and synergistic relationship among ecosystem services [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(4): 308-315.
- [11] 陈心盟,王晓峰,冯晓明,等. 青藏高原生态系统服务权衡与协同关系[J]. 地理研究, 2021, 40(1): 18-34.
Chen X M, Wang X F, Feng X M, et al. Ecosystem service trade-off and synergy on Qinghai-Tibet Plateau [J]. Geographical Research, 2021, 40(1): 18-34.
- [12] Ma S, Wang L J, Wang H Y, et al. Multiple ecological effects and their drivers of ecological restoration programmes in the Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. Land Degradation & Development, 2023, 34(5): 1415-1429.
- [13] 秦伟,朱清科,刘中奇,等. 基于GIS和RS的退耕还林工程土壤保育价值评估:以陕西吴起县四面窑沟流域为例[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(2): 54-62.
Qin W, Zhu Q K, Liu Z Q, et al. Assessment on soil conservation value of the returning farmland to forestland and grassland project based on GIS and RS: taking the Simianyaogou Watershed of Wuqi, Shaanxi as the

- example[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2009, 7(2):54-62.
- [14] 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[J]. *植物生态学报*, 2007, 31(3):413-424.
Zhu W Q, Pan Y Z, Zhang J S. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(3):413-424.
- [15] 王琳, 李娜, 文广超, 等. 黄河流域河南段植被覆盖度变化及其驱动力[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(6):393-399.
Wang L, Li N, Wen G C, et al. Vegetation coverage changes and driving forces in He'nan section of Yellow River Basin[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(6):393-399.
- [16] 张莹莹, 蔡晓斌, 杨超, 等. 1974—2017年洪湖湿地自然保护区景观格局演变及驱动力分析[J]. *湖泊科学*, 2019, 31(1):171-182.
Zhang Y Y, Cai X B, Yang C, et al. Driving force analysis of landscape pattern changes in Honghu Wetland Nature Reserve in recent 40 years[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(1):171-182.
- [17] 赵武生, 石培基. 基于 InVEST 模型的复合生态系统耦合协调关系研究: 以兰西城市群为例[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(4):1883-1894.
Zhao W S, Shi P J. The coupling and coordination of complex ecosystem based on the InVEST model: a case study in the Lanzhou-Xining urban agglomeration[J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(4):1883-1894.
- [18] 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.
- [19] 尹礼唱, 王晓峰, 王怡. 国家生态屏障区 1-km 分辨率产水数据集(2000—2015)[J]. *全球变化数据学报(中英文)*, 2020, 4(4):332-337, 332-337.
Yin L C, Wang X F, Wang Y. 1-km resolution dataset of water yield in the national ecological barrier zone (2000—2015)[J]. *Journal of Global Change Data & Discovery*, 2020, 4(4):332-337, 332-337.
- [20] 王怡, 王晓峰, 尹礼唱. 国家生态屏障区 1-km 分辨率土壤保持数据集(2000—2015)[J]. *全球变化数据学报(中英文)*, 2020, 4(3):241-247, 241-247.
Wang Y, Wang X F, Yin L C. Soil conservation dataset covering national ecological barrier zone at 1-km Resolution(2000—2015)[J]. *Journal of Global Change Data & Discovery*, 2020, 4(3):241-247, 241-247.
- [21] 王晓峰, 王怡, 尹礼唱. 国家生态屏障区 1-km 分辨率植被净初级生产力数据集(2000—2015)[J]. *全球变化数据学报(中英文)*, 2020, 4(2):125-130, 125-130.
Wang X F, Wang Y, Yin L C. 1-km grid NPP dataset covering ecological barrier zone of China(2000—2015)[J]. *Journal of Global Change Data & Discovery*, 2020, 4(2):125-130, 125-130.
- [22] 刘淑丽, 李扬, 郭晋平. 森林对水源地保护与生态修复的影响研究综述[J]. *环境生态学*, 2019, 1(2):29-34.
Liu S L, Li Y, Guo J P. A review of study on the effect of forest on water source protection and ecological restoration[J]. *Environmental Ecology*, 2019, 1(2):29-34.
- [23] 孙滨峰, 赵红, 逯非, 等. 东北森林带森林生态系统固碳服务空间特征及其影响因素[J]. *生态学报*, 2018, 38(14):4975-4983.
Sun B F, Zhao H, Lu F, et al. Spatial and temporal patterns of carbon sequestration in the Northeastern Forest Regions and its impact factors analysis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(14):4975-4983.
- [24] 周天财, 孙建, 于欢. 1980—2013 年青藏高原气候时空变化特征研究[J]. *成都信息工程大学学报*, 2017, 32(5):524-531.
Zhou T C, Sun J, Yu H. Spatial and temporal patterns of climate in the Tibetan Plateau (1980—2013)[J]. *Journal of Chengdu University of Information Technology*, 2017, 32(5):524-531.
- [25] 王晓轩, 耿天学. 退牧还草政策经济影响分析[J]. *合作经济与科技*, 2020(14):26-27.
Wang X X, Geng T X. Analysis on the economic impact of the policy of returning grazing land to grassland[J]. *Co-Operative Economy & Science*, 2020(14):26-27.
- [26] 李月皓, 王晓峰, 楚冰洋, 等. 青藏高原生态屏障生态系统时空演变及驱动机制[J]. *生态学报*, 2022, 42(21):8581-8593.
Li Y H, Wang X F, Chu B Y, et al. Spatiotemporal ecosystem evolution and driving mechanism in the Qinghai-Tibet Plateau ecological barrier area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(21):8581-8593.
- [27] 谭湘蛟, 董逵才, 张华, 等. 积雪增加对青藏高原高寒草甸土壤磷有效性的影响[J]. *草业学报*, 2024, 33(7):205-214.
Tan X J, Dong K C, Zhang H, et al. Effects of snow addition on soil phosphorus availability in an alpine meadow of the Tibetan Plateau[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(7):205-214.
- [28] 陈焯, 董世魁, 常智慧. 基于文献计量分析的草原生态补偿研究进展[J]. *生态学报*, 2025, 45(5):2516-2528.
Chen Y, Dong S K, Chang Z H. Research progress of grassland ecological compensation based on bibliometric analysis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(5):2516-2528.
- [29] 崔桂鹏, 肖春蕾, 雷加强, 等. 大国治理: 中国荒漠化防治的战略选择与未来愿景[J]. *中国科学院院刊*, 2023, 38(7):943-955.
Cui G P, Xiao C L, Lei J Q, et al. China's governance: strategy choice and future vision for combating desertification[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2023, 38(7):943-955.