

基于土地利用变化的青海省生态系统健康 时空演变及情景模拟

马泽钰¹, 邢延军¹, 王勇为¹, 翟军华¹, 李鹏^{2,3}, 王博⁴

(1. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710100; 2. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 3. 西安理工大学 旱区生态水文与灾害防治国家林业和草原局重点实验室, 陕西 西安 710048; 4. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 陕西 西安 710100)

摘要: [目的] 分析青海省不同土地利用情景下生态系统健康的时空变化规律, 并定量评估在不同自然和人为干扰条件下土地利用变化对青海省生态系统健康的具体影响, 为该省生态保护和高质量发展提供理论支撑。[方法] 基于 VORS 和 GMMOP-PLUS 模型研究青海省 2005—2020 年生态系统健康演变格局, 并模拟 4 种发展情景下土地利用变化对生态系统健康的影响程度。[结果] ① 青海省生态系统健康空间上呈现出西北低、西南次之、东部高的分布格局, 2005—2020 年生态系统健康指数从 0.292 下降至 0.252, 尤其在东南部和柴达木盆地等区域, 生态健康显著下降。耕地和建设用地的快速扩张破坏了生态系统结构, 进而导致生态健康水平下降。② 基于 GMMOP-PLUS 模型设定不同自然和社会政策条件, 模拟了 2030 年 4 种发展情景下[自然发展(ND)、生态保护(EP)、城镇发展(UD)和综合发展(CD)]的土地利用变化特征, 建设用地均有不同程度增加, 其中 UD 和 CD 情景中建设用地增幅为 $3.72 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 空间上集中在以西安市城区为中心向四周扩张, 且共和县、德令哈市和格尔木市均有不同程度增加。EP 情景下生态用地得到有效保护, 林地和湿地面积比例最大达 7.54%。③ 4 种情景模拟中 EP 情景下的生态系统健康指数最高(0.256), 表明生态保护措施的有效实施, 保障林地、湿地等生态用地能显著提升斑块及景观连通性, 从而改善生态系统健康, 提升生态系统服务功能。[结论] 空间集约化利用是提升生态健康的关键策略, 尤其是在城镇化较快的地区。具体措施包括合理规划建设用地, 限制土地扩张, 提升生态用地的连通性, 同时加强生态保护和修复, 以促进生态系统的健康恢复和长期稳定。

关键词: 生态系统健康; 土地利用模拟; VORS 模型; InVEST 模型; 青海省

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2025)03-0165-14

中图分类号: S181, X171.1

文献参数: 马泽钰, 邢延军, 王勇为, 等. 基于土地利用变化的青海省生态系统健康时空演变及情景模拟[J]. 水土保持通报, 2025, 45(3): 165-178. Ma Zeyu, Xing Yanjun, Wang Yongwei, et al. Spatial and temporal evolution of ecosystem health and scenarios modeling in Qinghai Province based on land use change [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(3): 165-178. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.03.028; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.03.028.

Spatial and temporal evolution of ecosystem health and scenarios modeling in Qinghai Province based on land use change

Ma Zeyu¹, Xing Yanjun¹, Wang Yongwei¹, Li Peng¹, Wang Bo^{2,3}, Zhai Junhua⁴

(1. Northwest Survey and Design Research Institute of China Electric Construction Group, Xi'an, Shaanxi 710100, China; 2. State Key Laboratory of Ecohydrology in Northwest Arid Zones Jointly Built by the Ministry and the Provincial Government, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 3. State Key Laboratory of Ecohydrology and Disaster Prevention and Control of the State Forestry and grassland Administration of Arid Zones, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 4. Xi'an mineral Resources Investigation Centre of the China Geological Survey, Xi'an, Shaanxi 710100, China)

收稿日期: 2024-08-19

修回日期: 2025-02-11

采用日期: 2025-02-13

资助项目: 陕西省 2023 年重点研发计划项目“陕西典型地貌单元植被—土壤—水体固碳能力评估与监测关键技术研究”(2023-ZDLSF-65); 中国地质调查局地质调查项目“秦岭—黄土高原过渡带自然资源要素相互作用与生态退化调查、监测与评价”(DD20220882)

第一作者: 马泽钰(1999—), 女(汉族), 陕西省西安市人, 硕士, 助理工程师, 主要从事生态系统服务评估及生态安全格局构建方面的研究。Email: ccmazeyu@163.com。

通信作者: 李鹏(1974—), 男(汉族), 山东省烟台市人, 博士, 教授, 主要从事流域泥沙与水土保持生态修复等方面的研究。Email: lipeng74@163.com。

Abstract: [Objective] Spatiotemporal changes in ecosystem health under different land-use scenarios in Qinghai Province were analyzed, and the specific impacts of land-use change on ecosystem health under different natural and anthropogenic disturbances were quantitatively assessed to provide theoretical support for ecological protection and high-quality development in the province. [Methods] Based on the VORS and GMMOP-PLUS models, the evolutionary pattern of ecosystem health in Qinghai Province from 2005 to 2020 was investigated, and the extent of the impacts of land-use changes on ecosystem health under four development scenarios were simulated. [Results] ① The spatial distribution of ecosystem health in Qinghai Province showed a pattern of low values in the northwest, moderate values in the southwest, and high values in the east. From 2005 to 2020, the ecosystem health index decreased from 0.292 to 0.252, with significant declines in the southeastern regions and Qaidam Basin. Rapid expansion of cultivated and construction land has led to the destruction of ecosystem structures, thereby affecting ecological health. ② Using the GMMOP-PLUS model, land use changes under four development scenarios for 2030 were simulated: Natural Development (ND), Ecological Protection (EP), Urban Development (UD), and Comprehensive Development (CD). Construction land increased to varying degrees in all scenarios, with the largest increases observed for UD and CD scenarios ($3.72 \times 10^4 \text{ hm}^2$), concentrated around Xining City and expanding to Gonghe County, Delingha City, and Golmud City. Under the EP scenario, the ecological land was effectively protected, with the proportion of forest and wetland areas reaching a maximum of 7.54%. ③ Among the four scenarios, the EP scenario showed the highest ecosystem health index (0.256), indicating that the effective implementation of ecological protection measures, such as safeguarding forest and wetland areas, significantly improved patch and landscape connectivity, thereby enhancing ecosystem health and service functions. [Conclusion] Spatially intensive utilization is a key strategy for improving ecological health, particularly in regions experiencing rapid urbanization. Specific measures include the rational planning of construction land, restricting land expansion, enhancing the connectivity of ecological land, and strengthening ecological protection and restoration to promote the recovery and long-term stability of ecosystems.

Keywords: ecosystem health; land use modeling; VORS model; InVEST model; Qinghai Province

生态系统健康^[1]指生态系统在面对外界干扰时其内部各要素维持稳定、有序的状态,并展现自我修复与适应的能力。近年来高强度的经济活动导致景观破碎化、河湖湿地萎缩与生物多样性锐减等生态问题频发,威胁生态系统长期健康稳定,影响生态系统结构和供给能力与可持续发展^[2]。土地利用/覆被变化(LUCC)是导致全球环境变化的重要影响因素之一^[3],也是引发生态系统健康变化的重要组成部分^[4]。随着人类改变土地利用和自然环境的的行为日益增强,导致生态系统所承受的压力及其遭受的负面影响变得愈发显著且持久,因此深入探究土地利用格局演变与生态系统健康协调发展具有重要意义。

生态系统健康评价的研究仍处于不断发展的阶段,评价方法可分为指示物种法和指标体系法^[5]。指示物种法虽定量精度高,但采样工作繁重,因其筛选标准及其指示作用缺乏统一固定规范^[6],主要依靠研究者的专业知识和经验^[7]。指标体系法从生态系统的特征及其服务功能出发构建多维度指标体系进行定量评价,涉及环境学、生物学或生态经济学等

多个领域^[8],且考虑了土地利用、景观格局等自然地理因素和社会经济因素,旨在全面反映生态系统的结构、功能及动态过程^[9]。VORS(活力—组织力—恢复力—生态服务)模型能全面准确地反映生态系统结构、过程和功能,获得了学术界广泛认可与采纳^[10]。众多学者^[11]在不同尺度的研究表明土地利用和景观格局的动态变化是导致生态系统健康变化的主要影响因素之一,但土地利用是自然系统和人类活动共同作用的结果,如何模拟并量化土地利用变化对生态系统健康的影响仍需深入研究。目前土地利用预测包括数量结构与空间分布两个维度,对于数量结构的预测,尽管Markov链^[12]、多目标规划^[13]、灰色预测等^[14]方法被广泛应用,但这些传统数学方法在模拟土地利用演变中复杂的非线性关系时显得力有未逮^[15]。为了克服这一挑战,GMMOP模型应运而生,它通过结合多目标线性规划和灰色预测模型,能有效解决目标函数与约束条件中的不确定性和数量结构预测中多目标冲突的问题,从而更为准确地反映土地利用动态过程中的演变特征^[16]。在空间分布预测方面,PLUS模型集成多类型随机种子

机制与用地扩张分析策略,可深入剖析土地演变和景观变化的内在动因并在预测土地利用斑块级演化上展现了卓越的模拟精度和广泛的适用性^[17]。然而,如何精准地量化土地利用变化对生态系统健康的具体影响,仍然是当前研究中的难题。为此,本研究以青海省为研究对象,旨在围绕以下科学问题展开:①应用VORS模型与GMMOP-PLUS模型分析青海省不同土地利用情景下生态系统健康的时空变化规律;②定量评估在不同自然和人为干扰条件下,土地利用变化对青海省生态系统健康的具体影响。③基于上述分析,优化土地利用格局,以提升生态系统健康、推动区域可持续发展。研究结果可为青海省的生态保护和高质量发展提供理论支撑和科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

青海省位于中国西部内陆(89°35′—103°04′E, 31°9′—39°19′N),地域辽阔,平均海拔高度大于3 000 m。地貌复杂多变,该省80%以上为高原,西北部为柴达木盆地,西南部为青南高原,东部为青藏高原向黄土高原的过渡带。青海省土地利用类型空间分布复杂(图1),未利用地集中分布在柴达木盆地,植被类型多为灌木荒漠、草甸和无植被覆盖。以青南高原的昆仑山和日月山为线,东部以农耕为主,约占全省耕地面积的90%,南部从西向东土地类型

由冰川、荒漠和戈壁、草地、水域及农林用地逐渐转变,而东部地类分布分散且交错,加大了规模化和集约化利用的难度。青海省是黄河、长江和澜沧江的源头汇水区,且拥有全国最大的湿地资源,是全球影响力最大的生态调节区和气候驱动区之一^[18]。

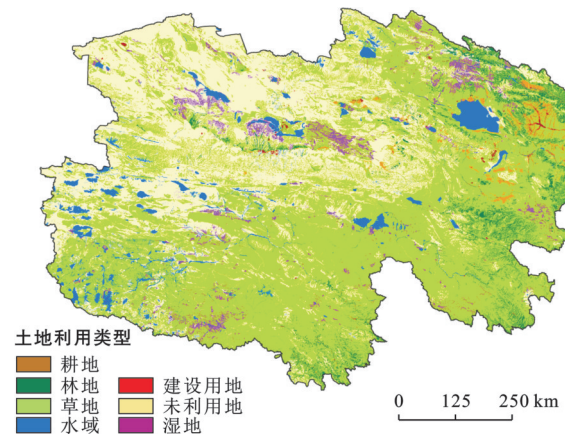


图1 青海省土地利用概况

Fig.1 Overview of land use in Qinghai Province

1.2 数据来源

本文使用的中国底图及行政边界来源于国家基础地理信息中心(<https://www.ngcc.cn/>),审图号为GS(2024)0650。对所有数据统一投影坐标系并重采样为100 m×100 m。重采样时对气温、降水等气象数据选取加权平均法,DEM、坡度和植被指数采用最大值、最小值法,土地利用数据采用中位数法以求保留栅格数据的空间特征和异质性(表1)。

表1 数据类型及来源

Table 1 Data sources and types

数据类型	基础数据	年份	来源	分辨率
气象数据	降水量、气温	2005,2010,2015,2020	国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn)	1 km
	潜在蒸散发量	2005,2010,2015,2020	国家气象科学数据共享服务网(http://www.cdc.nmic.cn/)	500 m
	风速	2005,2010,2015,2020	国家青藏高原科学数据中心(https://www.data.tpdac.ac.cn)	1 km
	雪盖因子数据集	2005,2010,2015,2020	国家青藏高原科学数据中心(https://www.data.tpdac.ac.cn)	1 km
地形数据	DEM	2020	地理空间数据云(https://www.gscloud.cn)	12.5 m
	土壤数据	2008	世界和谐土壤数据库(https://www.fao.org)	1 km
	土壤湿度	2005,2010,2015,2020	国家青藏高原科学数据中心(https://www.data.tpdac.ac.cn)	1 km
	水系数据	2020	Open Street Map(https://www.openstreetmap.org)	100 m
遥感数据	NDVI	2005,2010,2015,2020	资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)	30 m
	土地利用	2005,2010,2015,2020	资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)	30 m
社会经济数据	农产品及畜牧产品产量	2005,2010,2015,2020	《青海省统计年鉴》	
	路网数据	2020	资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)	100 m
	人口密度	2020	资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)	1 km
	GDP	2020	资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)	1 km

1.3 研究方法

1.3.1 生态系统健康 以生态系统“结构—活力—

弹性—服务”级联效应作为核心,将景观异质性、景观连通性和基于InVEST模型的生态系统服务量化

结果纳入其中,构建生态系统健康综合评估体系来反映青海省的生态系统健康状况^[19]。

$$EHI = \sqrt[4]{EV \cdot EO \cdot ER \cdot ESCI} \quad (1)$$

式中: EHI 为生态系统的健康指数; EV 为生态系统活力; EO 为生态系统组织力; ER 为生态系统弹性力; ESCI 为生态系统服务综合指数。

$$EO = (0.25SHDI + 0.10AWMPFD) + (0.25FI_1 + 0.1CONT) + (0.08FI_2 + 0.03COHESION_1 + 0.05FI_3 + 0.02COHESION_2 + 0.05FI_4 + 0.02COHESION_3 + 0.04FI_5 + 0.01COHESION_4) \quad (2)$$

式中: SHDI 为香农多样性指数; AWMPFD 为分形维数; FI₁, CONT 为整体景观破碎度和景观蔓延指数; FI₂, FI₃, FI₄, FI₅ 和 COHESION₁, COHESION₂, COHESION₃, COHESION₄ 分别为森林、水域、湿地和草地的破碎度指数和斑块凝聚度指数。

(2) 生态系统活力。生态系统活力是指生态系统的新陈代谢能力或初级生产力,是检验生态是否系统完整的关键指标之一,因归一化植被指数(NDVI)与植被生产力呈正相关且能有效监测生态环境质量,被广泛用于表征生态系统活力^[20]。

(3) 生态系统弹性力。生态系统弹性/恢复力指面对自然和人类活动干扰或胁迫时,景观斑块维持其原始结构和功能稳定性的能力,主要体现在两个方面:对外部干扰的抵抗力和恢复力^[21]。

$$ER = \lambda \cdot \mu \cdot ECO_{res} \quad (3)$$

在进行综合评价时需对各指标使用 ArcGIS 的模糊隶属度工具进行归一化处理,将各指标值统一在 0~1 范围内。

(1) 生态系统组织力。生态系统组织力可反映区域生态系统结构的稳定性和复杂性,由景观异质性和景观连通性决定^[5]。

$$\mu = \frac{H \cdot V}{c_1 \cdot c_2} \quad (4)$$

$$ECO_{res} = H \sum_{i=1}^m S_i \cdot P_i \quad (5)$$

式中: μ 为生态系统弹性强度系数; H 为景观多样性指数; V 为植被指数; c_1 为年气温变率; c_2 为年降水变率; ECO_{res} 为生态系统弹性限度; P_i 为土地类型 i 的面积百分比; S_i 为土地类型 i 的弹性分值。

(4) 生态系统服务。生态系统服务指服务于人类社会的功能,包括涵养水源、土壤保持、维持生物多样性、防风固沙和碳固持等。随着人类社会与自然生态系统作用关系逐步强化,生态系统服务供给能力已被普遍认定为评价生态系统健康状况关键性的指标。各项服务功能的计算方法详见表 2^[22]。各项服务计算结果在 Z-core 标准化后进行叠加^[22]。

表 2 各项生态系统服务功能评估方法

Table 2 Assessment methods of ecosystem service functions

生态系统服务	评估方法	计算公式
产水量	基于水量平衡原理(InVEST 模型)	$WY = \left(1 - \frac{AET_i}{P_i}\right) \times P_i$
水源涵养	在产水量计算基础上考虑地形、流速、土壤渗透性等	$W_c = \min\left(1, \frac{249}{Velocity}\right) \times \min\left(1, \frac{0.9 \times T_i}{3}\right) \times \min\left(1, \frac{K_{sat}}{300}\right) \times WY$
土壤保持	RUSLE 模型	$S_R = R \cdot K \cdot LS \times (1 - C \cdot P)$ $S_F = S_{LQ} - S_L$
防风固沙	RWEQ 修正风蚀模型	$S_{LQ} = \frac{2Z}{S_Q^2} Q_{max,Q} \times e^{-\left(\frac{z}{S_Q}\right)^2}$ $S_L = \frac{2Z}{S_F^2} Q_{max} \times e^{-\left(\frac{z}{S_F}\right)^2}$
碳储量	基于 InVEST 模型	$C_v = C_{above} + C_{below} + C_{dead}$ $C_t = C_v + C_{soil}$
生境质量	基于 InVEST 模型	$HQ = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + K^z}\right)\right]$
食物供给	正值 NDVI 对食物产量数据空间化	$FP = \frac{NDVI_i}{NDVI_{sum}} \times G_{sum}$

注: P_i 为研究区年降水量; AET_i 为年蒸散量; WY 为产水量; Velocity 为流速系数; K_{sat} 为土壤饱和和导水率; T_i 为地形指数; W_c 为水源涵养量; R 为年降雨侵蚀力; K 为土壤可蚀性; LS 为坡度坡长因子; C 为植被覆盖因子; P 为管理措施因子; S_R 为土壤保持量; S_{LQ}, S_L 分别为潜在和实际风蚀量; S_Q, S_F 分别为潜在和实际关键地块长度; Z 为最大风蚀出现距离,取 50; C_v 为总碳储量; $C_{above}, C_{below}, C_{dead}, C_{soil}$ 分别为地上、地下、死亡、土壤碳密度; G_{sum} 为粮食产量; NDVI 为最大值合成法的植被数据集。

1.3.2 GMMOP-PLUS模型 GMMOP模型通过耦合灰色预测和多目标规划来预测土地利用数量结构。GM(1,1)通过灰色关联方法对未来不同土地利用类型的价值系数进行预测,进而用于构建目标函数。

(1) 目标函数构建。MOP模型设定目标函数、决策变量及约束条件,以求解不同情景下的最优土地利用数量(表3)。本研究设置4种发展情景,分别是自然发展(ND)、生态保护(EP)、城镇发展(UD)和综合发展(CD)。ND情景下,土地利用的变化基于Markov链预测,不受特定的政策或规划干预。EP, UD和CD情景则是在特定约束条件下的土地利用优化情景。约束条件^[16]为:

EP情景致力于实现生态价值最大化。

$$F_{1(x)} = \max \sum_{i=1}^7 a_k x_k \quad (6)$$

UD情景致力于实现经济价值最大化。

$$F_{2(x)} = \max \sum_{i=1}^7 b_k x_k \quad (7)$$

CD情景下致力于实现生态保护与经济发展和和谐共生,达成整体效益的最优化。

$$F_{3(x)} = \max \{F_{1(x)}, F_{2(x)}\} \quad (8)$$

式中: a_k, b_k 分别为各土地利用类型的生态价值系数和经济价值系数(万元/hm²); x_k 为土地利用类型 k 的面积(hm²)。

表3 土地利用预测约束条件
Table 3 Constraints of land use prediction

约束类型	约束因素	约束表达式	约束条件解释
总量	土地利用面积	$\sum_{k=1}^7 x_k \geq 72\,230\,000$	各情景下土地利用面积之和等于区域总面积
生态价值	用地类型面积	$\sum_{k=1}^7 a_k x_k \geq \sum_{k=1}^7 a_k w_k$	各情景下的生态价值不低于自然发展情景
经济价值	用地类型面积	$\sum_{k=1}^7 b_k x_k \geq \sum_{k=1}^7 b_k w_k$	各情景下的经济价值不低于自然发展情景
耕地红线	耕地面积	$x_1 \geq 559\,134$	耕地面积不低于《青海省国土空间规划2021—2035年》的规划值
建设用地	建设用地面积	$100\,392 \leq x_5 \leq 217\,516$	扩展倍数控制在基于2020年城镇建设用地规模的1.3倍以内,且不少于60%
未利用地	未利用地面积	$x_1 < 22\,574\,473$	优先开发未利用地
农用地	耕地、林地、草地面积	$x_1 + x_2 + x_3 \geq 44\,482\,890$	确保农业用地面积不低于现状面积
景观多样性	林地、水域、湿地面积	$x_2 + x_4 + x_7 \geq w_2 + w_4 + w_7$	确保各情景下林地、湿地和水域面积之和不低于自然发展情景
模型准确性	用地类型面积	$0.8w_k \leq x_k \leq 1.2w_k$	各类用地面积的浮动范围不超过基准面积(自然情景)的20%

注: x_k 和 $w_k(k=1,2,\dots,7)$ 分别为其他情景与自然情景下耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地和湿地的面积。

(2) 土地利用价值系数。单位面积价值当量因子法是一种需要结合生态系统的分布面积来量化生态系统服务价值(ESV)的方法。参照谢高地等^[23]提出的“单位面积生态系统服务价值当量表”,通过查询《青海省统计年鉴》统计2010—2020年小麦、杂粮、马铃薯的产量均值和播种面积,并查阅《全国农产品成本收益资料汇编》得到3种粮食作物的价格。根据“生态系统服务的经济价值等效系数是单位面积耕地产出食物经济价值的1/7^[24]”,核算出青海省标准当量因子的生态系统服务价值1 080.95元/hm²,得出生态价值系数。将2010—2020年农业、林业、畜牧业、渔业及第二、三产业单位面积产值分别作为耕地、林地、草地、水域、建设用地的经济价值系数,并通过灰色关联法预测2030年不同土地类型的价值系数(表4)。

(3) PLUS模型。从自然因素、社会经济因素以及区位交通可达性等多维度出发,选取12个在土地利用演变过程中起到不可或缺的推动作用的关键因子(图2),分别是年降水量、年平均气温、高程、坡度、植被覆盖度、人口密度、GDP、与河流距离、与高铁距

离、与国道省道距离、与高速距离和与城市道路距离,并基于每个驱动因子对每种地类的贡献度,挖掘出各类用地的发展概率。之后根据Lingo18.0求得各约束条件下不同情景的各土地利用类型数量,设定不同的土地转换限制矩阵和领域权重,在发展概率的约束下,对其进行空间分配。其中土地转换限制矩阵代表不同地类间转换的倾向性,1代表可以转化,0为不可以;领域权重可衡量不同土地类型对其邻域的影响程度,范围为0~1,根据“某一地类变化面积/总变化面积”求得。基于2010年土地利用数据,模拟2020年青海省土地利用变化,为验证模型准确性,将2020年土地利用模拟值与实际值进行对比分析,得到的kappa系数为0.946,说明结果可靠。

表4 2030年青海省各土地类型的生态与经济价值系数
Table 4 Eco-economic value coefficients of each land use type in Qinghai Province in 2030 万元/hm²

土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	湿地
生态价值系数	0.43	1.70	0.89	12.33	0.00	0.07	5.62
经济价值系数	3.24	0.08	0.17	0.03	243.14	0.00	0.00

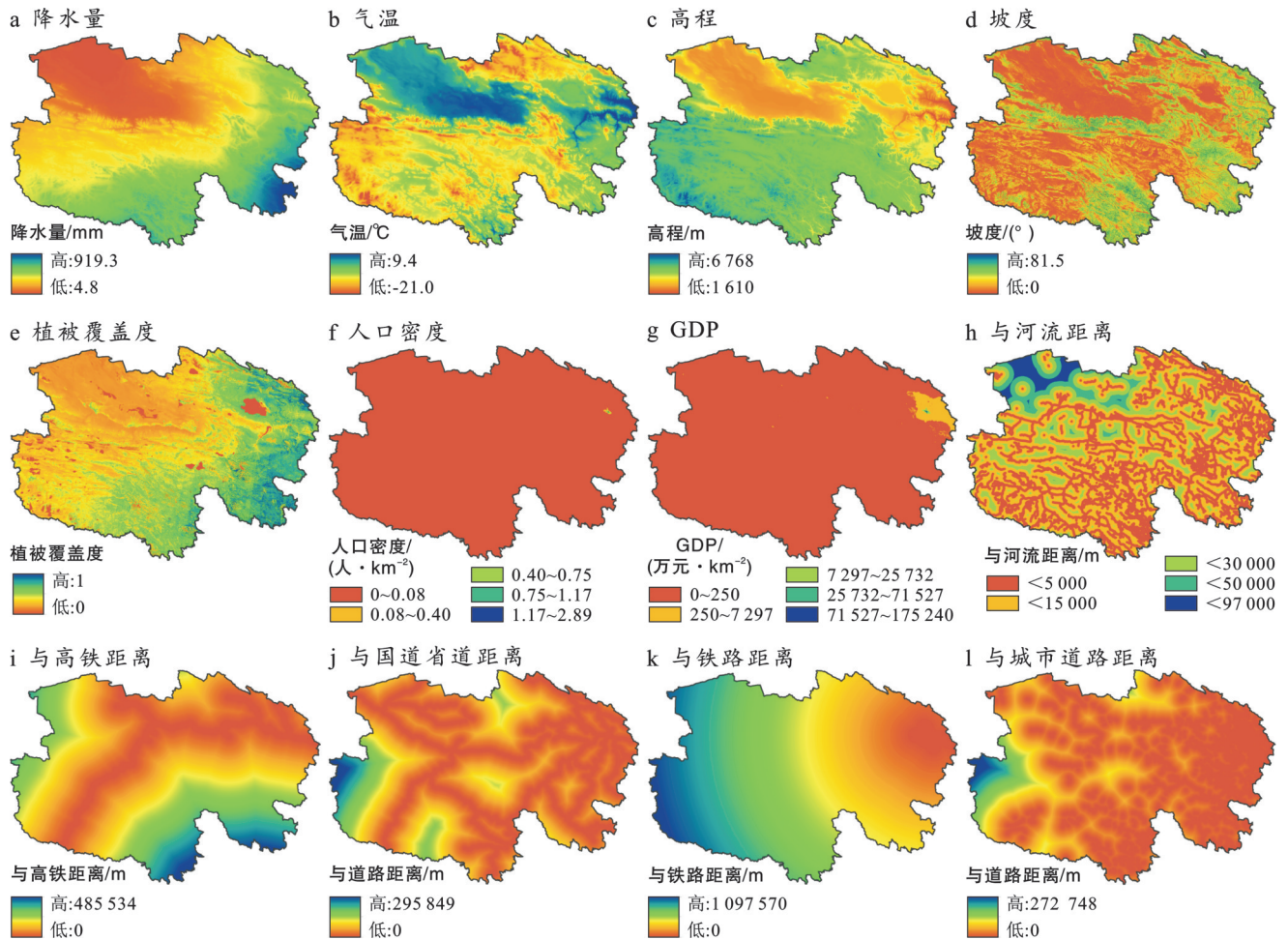


图 2 青海省土地利用演变驱动因素

Fig.2 Driving factors of land use change in Qinghai Province

2 结果与分析

2.1 生态系统健康综合评估

青海省生态系统组织力空间分布为河湟谷地及祁连山区最低、柴达木盆地次之,三江源保护区最高(图 3a)。从时间变化来看,青海省组织力均值由 2005 年的 0.807 下降至 2010 年的 0.792 后增长至 2020 年的 0.797,下降区域集中在都兰县、德令哈市和格尔木市,主要受以格尔木市为中心建设柴达木城镇区政策的影响。生态系统活力均值经历 0.425~0.447~0.364 的变化趋势,空间分布以较低值、中值区为主,历年面积比例在 60% 以上,总体植被覆盖度不高。生态系统弹性力呈不断下降的趋势,均值由 2005 年的 0.150 下降至 2020 年的 0.124,说明青海省面临的外部干扰加剧且自我恢复能力下降。从空间分布可知,弹性力高值区集中在祁连山区、青海湖周边及囊谦县,该区植被覆盖度高,林地、水域比例大,且降水、气温的波动性较低。次高值区为河湟谷地及周边地区,由于土地利用类型交错变化,景观多样

性高,且植被覆盖程度居中(图 3i)。生态系统弹性力小于 0.1 的区域面积均占全省 50% 以上且在逐年上升,集中分布在柴达木盆地、玛多县、称多县、达日县。生态系统服务综合指数由 2005 年的 0.181 上升至 2015 年的 0.203 后下降至 2020 年的 0.166,其中上升区集中在茫崖市、治多县和格尔木市,这些区域通过划定沙化封禁保护区和成立国家沙漠公园,实施草地、湿地等生态保护工程,荒漠化面积进一步缩小。

根据青海省生态系统健康指数,将其划分为 5 个级别:差(0~0.15)、较差(0.15~0.25)、一般(0.25~0.35)、较优(0.35~0.50)、优(0.50~1)。从空间分布来看,以较差、一般和较优这 3 个等级为主。其中,差的区域主要集中在茫崖市和自治州直辖,分布范围较为稳定;较差的区域分布在柴达木盆地及外围的德令哈市、乌兰县、都兰县和格尔木市,且分布范围呈扩大态势。一般等级的区域集中在青南高原和河湟谷地周围,比例从 26% 增长至 30%。生态系统健康状况较优和优的区域,主要分布在祁连山区、阿尼

玛卿山和澜沧江流域(图4)。从时间上来看生态系统健康均值呈下降趋势,由2005年的0.292下降至2020年的0.252,同期生态系统活力和生态系统弹性力指数下降幅度分别达到14.35%,17.33%,对生态系统健康状况的降低起到了明显的推动作用(表5)。生态系统组织力由土地利用结构决定,在研究期间青海省整体景观斑块破碎度有所下降,但对于重要生态功能斑块的维护力度不足,林地、湿地的面积减少且斑块数量上升,导致连通性低。生态系统活力2005—2010年增长,主要得益于青南高原的退牧还

草、退耕还林、荒漠化治理等一系列生态保护修复工程;而在2010—2020年降低,则是因为黄河流域、长江流域和澜沧江流域植被覆盖度均有不同程度退化,尤其是祁连山区和河流沿岸。生态系统服务除了与土地利用和植被覆盖相关外,受气象因素影响较大,具有年际波动性,但整体呈下降趋势。总体而言,青海省生态系统健康在柴达木盆地及青南高原西部因生态修复工程生态健康有明显提升,但整个东部和南部生态健康都呈略微下降趋势,其中湟源县、尖扎县、称多县和玛多县为明显下降区。

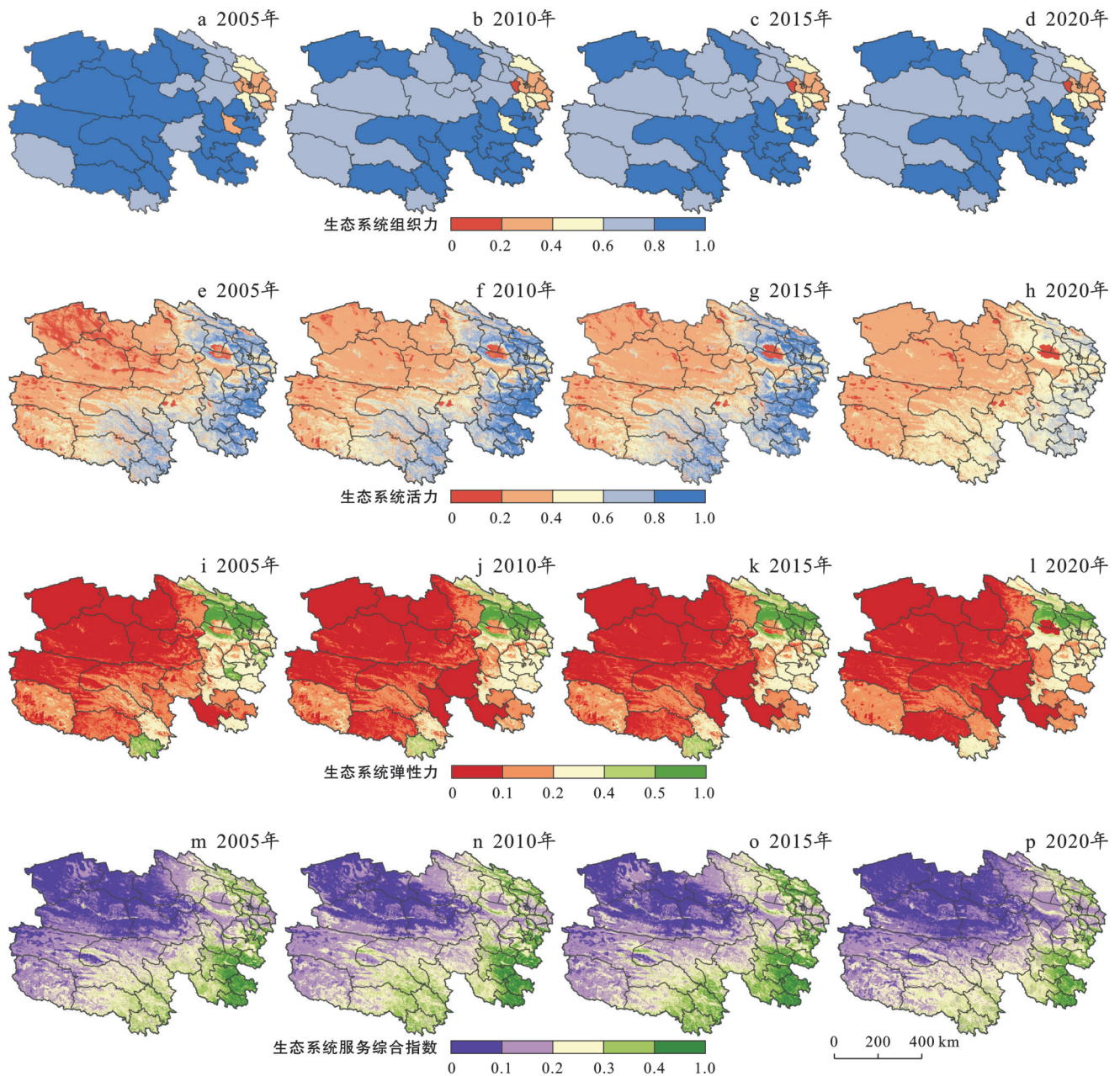


图3 青海省2005—2020年组织力、活力、弹性力、生态服务综合指数时空变化
 Fig.3 Temporal and spatial changes of comprehensive index of organization, vitality, elasticity and ecosystem service in Qinghai Province from 2005 to 2020

表 5 青海省 2005—2020 年生态系统健康各指标平均值

Table 5 Average values of ecosystem health indicators in Qinghai Province from 2005 to 2020

年份	生态系统组织	生态系统活力	生态系统弹性	生态系统服务	生态系统健康
2005	0.807	0.425	0.150	0.181	0.292
2010	0.792	0.447	0.137	0.202	0.287
2015	0.793	0.444	0.137	0.203	0.286
2020	0.797	0.364	0.124	0.166	0.252
2005—2010 年变化率/%	-1.86	5.18	-8.67	11.60	-1.71
2005—2020 年变化率/%	-1.24	-14.35	-17.33	-8.29	-13.70

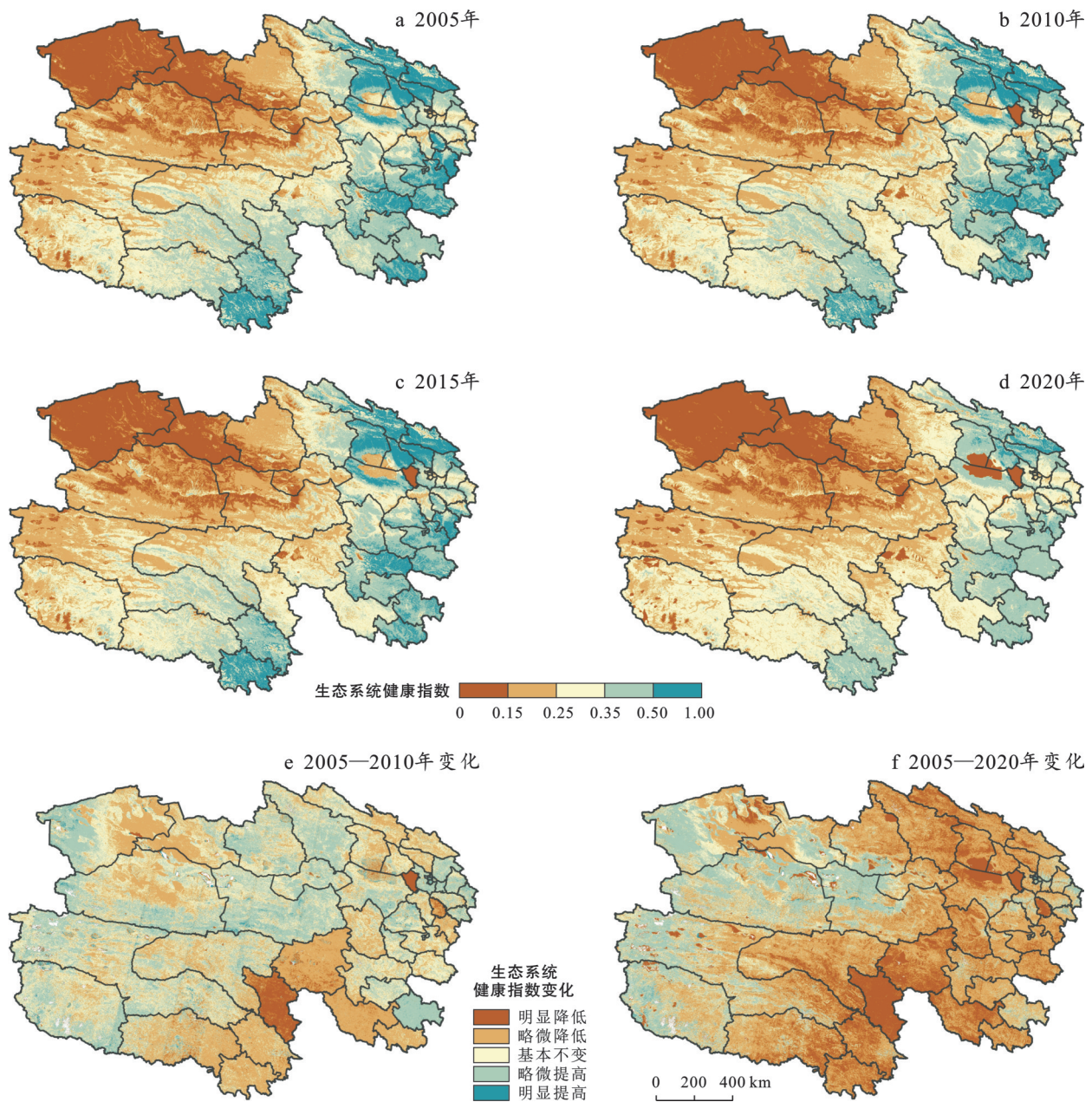


图 4 青海省 2005—2020 年生态系统健康指数时空变化

Fig.4 Temporal and spatial changes of ecosystem health index in Qinghai Province from 2005 to 2020

2.2 多情景下土地利用变化

在不同发展情景下,各土地利用数量通过Lingo 18.0

计算得出(表 6)。将不同情景的土地利用数量、发展概率以及邻域权重输入 PLUS 模型,进而获得不同情

景下土地利用的空间分布(图5)。自然发展情景下,不施加任何关于生态效益、经济效益或规划政策的限制性条件,允许青海省各地类自由转变,严格按照Markov链预测的土地利用数量结果模拟其空间分布。在自然发展(ND)情景中,所有参与转换的地类面积总计 $5.66 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 。其中,耕地、水域、建设用地面积均有不同程度的增加,草地和未利用地面积分别减少了 $9.11 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 和 $1.41 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 。具体来看,共和县有 2184 hm^2 的草地转变为建设用地,格尔木市有 905 hm^2 的未利用地转变为建设用地,同时有 $2.08 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 的未利用地转变为水域。生态保护情景旨在满足约束条件的基础上,实现生态效益最大化,同时限制林地、水域和湿地向建设用地和未利用地转出。在生态保护(EP)情景下,参与转换的地类面积共计 $2.96 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。林地、草地和水域面积分别增加了 $5.93 \times 10^5 \text{ hm}^2$, $2.94 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 和 $1.02 \times 10^6 \text{ hm}^2$,而耕地和未利用地面积分别减少 $1.77 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 和 $4.63 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。其中,未利用地转草地的面积达 $8.29 \times 10^5 \text{ hm}^2$,主要集中在柴达木盆地;耕地转出面积为 $7.19 \times 10^4 \text{ hm}^2$,其中94.33%转为草地,主要集中在民和县、乐都区和化隆县(图5b)。城镇发展情

景以满足约束条件下实现经济效益最大化为目标,限制耕地和建设用地向其他用地类型转出,但允许耕地和建设用地相互转化。在城镇发展(UD)情景中,参与转换的地类面积总计 $5.88 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。建设用地面积增加 $3.72 \times 10^4 \text{ hm}^2$,在空间上主要集中在以西宁市城区为中心向四周扩张的区域,共和县、德令哈市和格尔木市也有不同程度的增加(图5c),这些新增建设用地主要由耕地和草地转换而来,比例分别为24%和52%;耕地面积增加 $1.84 \times 10^5 \text{ hm}^2$,主要分布于民和县和乐都区;草地面积增加 $4.18 \times 10^6 \text{ hm}^2$,主要是柴达木盆地的未利用地转化而来。综合发展情景致力于实现生态效益和经济效益同时最大化,在限制耕地和建设用地转出的同时,限制林地、水域和湿地向未利用地和建设用地转出。在综合发展(CD)情景下,参与转换的地类面积为 $2.35 \times 10^6 \text{ hm}^2$,除未利用地外,其他地类均有不同程度的增加。林地主要由草地转入,集中在黄河和澜沧江沿岸;草地增加 $2.54 \times 10^6 \text{ hm}^2$,主要来源于茫崖市、德令哈市、格尔木市和都兰县的未利用地转化(图5d);耕地和建设用地增加的数量和空间分布与UD情景相同。

表6 青海省2030年不同情景下土地利用面积及邻域权重

Table 6 Land use area and domain weights for different scenarios in Qinghai Province in 2030

发展情景	项目	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	湿地
自然情景 (ND)	2020年							
	面积/ 10^5 hm^2	9.00	29.77	406.06	33.89	1.67	225.74	16.16
	面积/ 10^5 hm^2	9.03	29.76	405.15	36.73	1.70	224.34	15.60
	面积变化/ 10^4 hm^2	0.32	-0.18	-9.11	28.41	0.31	-14.08	-5.67
生态保护 (EP)	领域权重	0.005	0.003	0.157	0.488	0.005	0.242	0.100
	面积/ 10^5 hm^2	7.22	35.71	435.40	44.076	1.70	179.47	18.72
	面积变化/ 10^4 hm^2	-17.74	59.33	293.46	101.87	0.31	-462.75	25.52
城镇发展 (UD)	领域权重	0.018	0.062	0.305	0.106	0.000	0.482	0.027
	面积/ 10^5 hm^2	10.84	35.08	447.87	34.53	2.05	179.47	12.48
	面积变化/ 10^4 hm^2	18.38	53.06	418.10	6.37	3.72	-462.75	-36.86
综合发展 (CD)	领域权重	0.018	0.053	0.418	0.006	0.004	0.463	0.037
	面积/ 10^5 hm^2	10.84	35.71	431.45	44.08	2.05	179.47	18.72
	面积变化/ 10^4 hm^2	18.38	59.33	253.93	101.87	3.72	-462.75	25.52
	领域权重	0.020	0.064	0.274	0.110	0.004	0.500	0.028

2.3 基于未来情景的生态系统健康变化

在自然发展(ND)和城镇发展(UD)情景下,景观异质性呈现增高态势,同时斑块和景观连通性降低。而在生态保护(EP)和综合发展(CD)情景下,斑块连通性得到了一定程度的提升(表7)。不同情景下生态组织力和弹性力的大小顺序为:EP>ND>CD>UD,但仅有EP情景下的生态组织力和弹性力

较2020年略微上升,其余3种情景均呈下降趋势。在UD情景下,茫崖市、天峻县和玛沁县的组织力明显降低,泽库县的弹性力也显著下降。UD情景下产水深度为139.24 mm,其余情景产水深度均在137.50 mm上下波动。水源涵养能力则以EP情景为最大,达到19.79 mm,其增加区域主要集中在祁连山区、澜沧江流域及东南部4县,其余情景的平均深度

稳定在 19.20 mm 左右。4 种情景下碳储量均值大小顺序为: EP(60.23 t/hm²) > CD(59.09 t/hm²) > UD(58.51 t/hm²) > ND(53.13 t/hm²)。为保证农业用地面积和景观多样性, EP, UD, CD 情景下会优先开发未利用地, 柴达木盆地有大量未利用地转为草地。基于上述各项生态指标, 4 种情景下的生态服务综合指数差异较为明显, ND, EP, UD, CD 情景下生态服务综合指数低和较低等级面积之和分别为 66%, 62%, 65% 和 64%。总体来说 EP 情景的提升幅度最大, 达到 3.61%, 提升区域主要集中在柴达木盆地。中等面积比例也从 23% 提升至 25%, 增加区域分布

在格尔木市和治多县。生态系统健康状况较好和好的区域集中在祁连山区、东部平原和河流沿岸; 健康状况一般的区域分布在青南高原西南部 5 县、达日县及天峻县; 健康状况差和较差的区域集中在西北柴达木盆地 6 县(图 6)。UD 情景更侧重于发展耕地、草地和建设用地, 虽然其草地面积在 4 种情景中居首位, 生态系统服务指数有所上升, 但由于集约化利用程度低, 景观异质性高, 生态健康水平最低。EP 情景的生态用地面积比例达 73.90%, 面积广阔且连通性高, 在柴达木盆地和祁连山区均有明显提升, 因此其生态健康值最高。

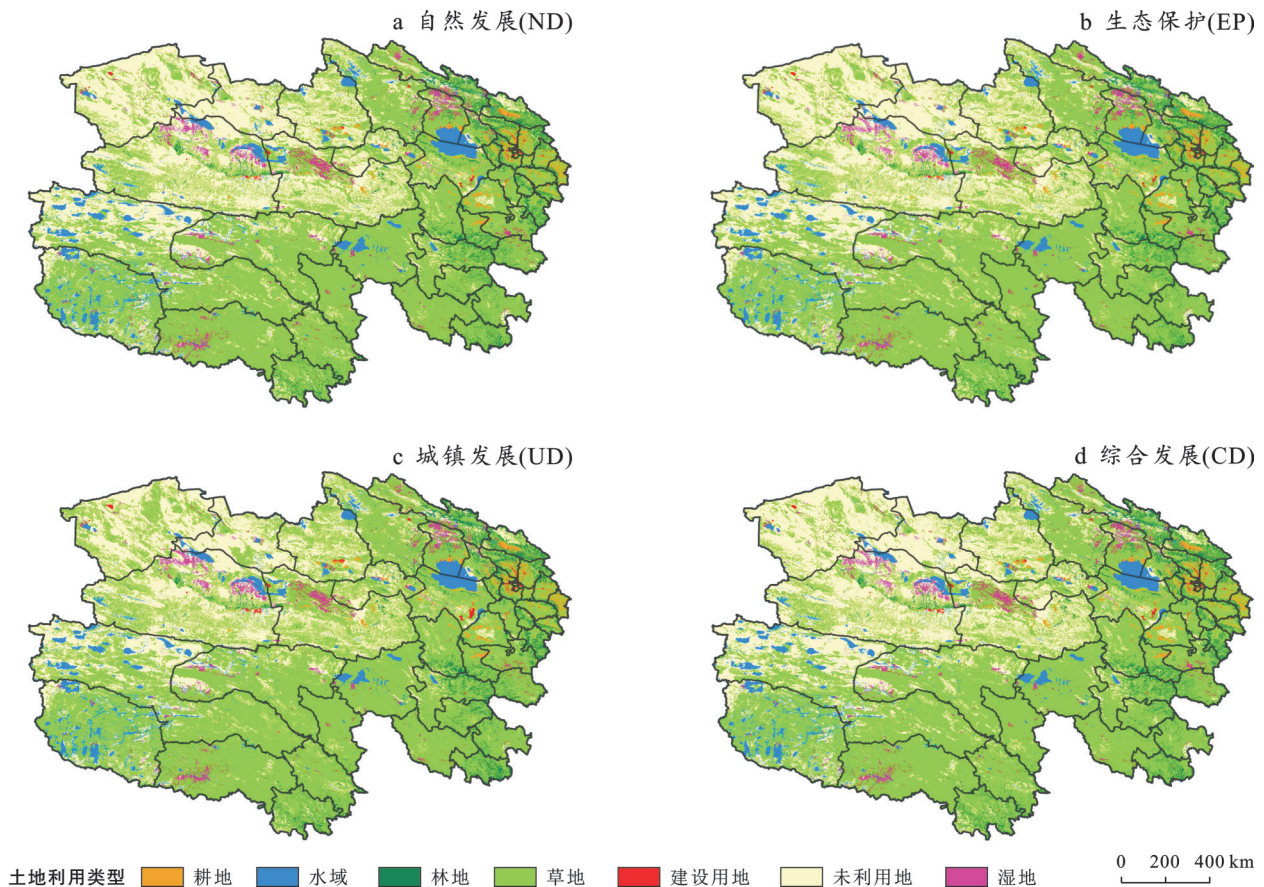


图5 青海省 2030 年 4 种情景下土地利用类型空间分布

Fig.5 Spatial distribution of land use types under four scenarios in Qinghai Province in 2030

从土地利用类型来看, 其生态健康水平表现为: 林地 > 耕地 > 草地 > 湿地 > 建设用地 > 未利用地 > 水域(表 8)。水域除产水系数和生境质量较高外, 因其不具备土壤保持、防风固沙、粮食供给和水源涵养功能, 所以整体生态健康水平较低。EP 情景下耕地生态健康水平高于其他情景, 是因为耕地数量最少且空间分布集中。研究表明^[25]耕地开垦活动导致水源涵养、土壤保持、防风固沙及固碳效益均有不同程度的减少。

3 讨论

2005—2020 年, 青海省整体斑块数和破碎度指数的下降幅度明显, 景观斑块数减少, 破碎化程度减轻, 景观要素在空间上逐渐趋于聚集。草地斑块数量减少且面积增大, 说明空间上分布更为集中, 斑块间连通性更好, 主要得益于近十几年推进的一系列关键生态恢复与建设举措。建设用地作为非优势景观中增长最大的一类, 斑块数和破碎度增幅分别为

7.44%和8.45%,呈现出持续扩展的态势。蔓延度呈先上升后下降的趋势,组织力和生物多样性呈现先下降后上升,符合青海省土地利用的发展阶段^[26]。2005—2010年处于统筹发展阶段,建设用地大量扩张,破碎度增加8.45%,侵占部分水域和草地,发展以

积极保障和统筹协调各类用地为主;2010—2020年处于优化土地利用结构阶段,发展模式由规模、数量快速扩张转变为优化结构和提高质量,各类土地平稳发展,土地利用以区域协调发展和保障生态安全为主^[27]。

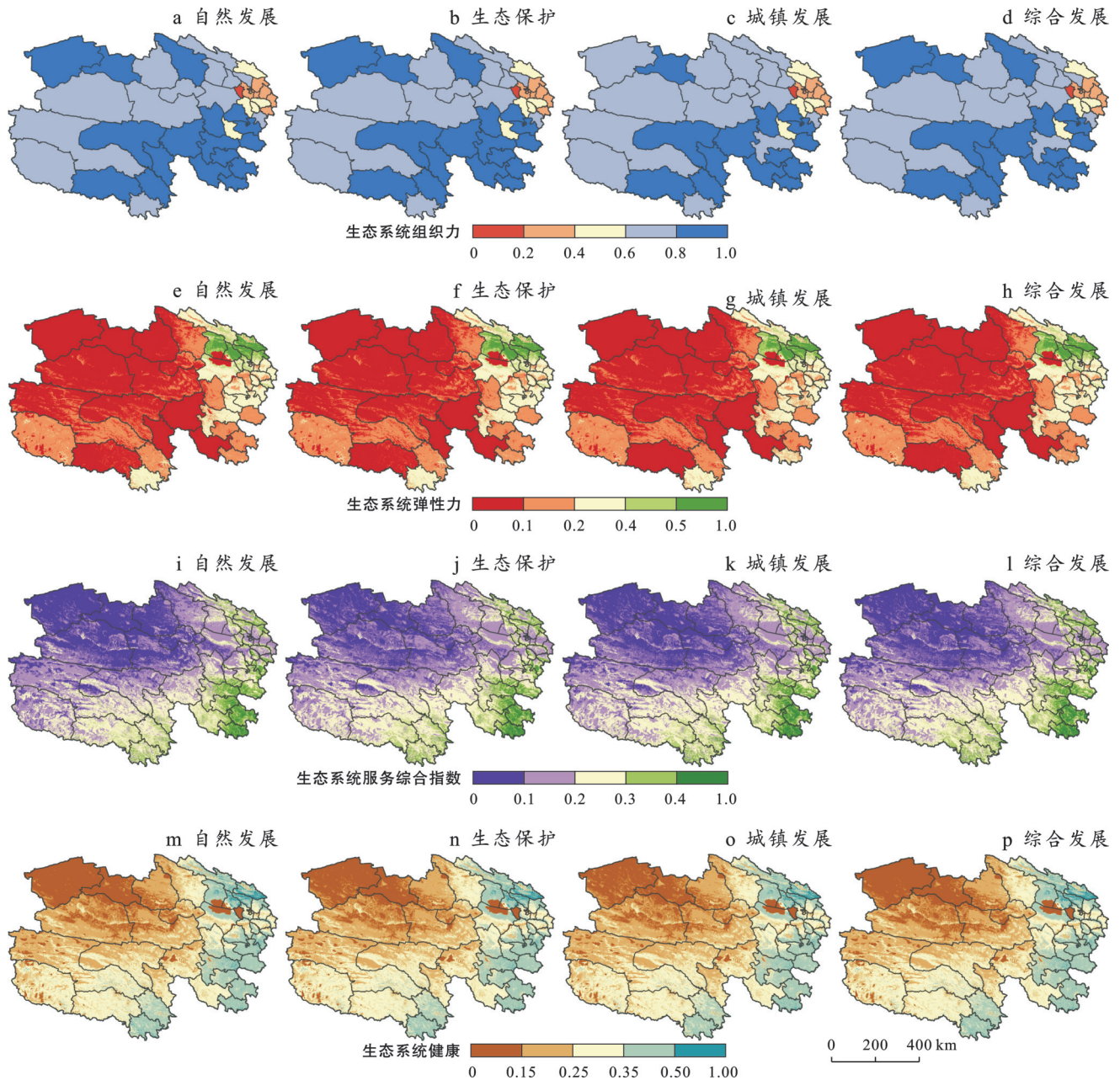


图6 青海省2030年4种情景下生态健康指数及其空间分布

Fig.6 Ecological health index and spatial distribution under four scenarios in Qinghai Province in 2030

青海省生态系统健康明显下降区域可分为两类:①人类活动干扰高、土地利用开发强度大的区域^[11],如河湟谷地。该区作为青海省特色农牧业产业基地,是聚集人口和经济的重要地区,建设用地、耕地、林草地等各类土地利用交错变化,使该区景观呈现高度破碎化和异质性,加剧了生态不稳定性,生

态系统恢复能力弱。②北部祁连山区和东南部河流沿岸,特定的气候和地理环境,导致生态系统具有敏感性和脆弱性^[28],更易放大人类活动带来的负面影响。柴达木盆地和青南高原西部的植被覆盖水平与生态系统健康指数提升的区域,主要得益于当地生态保护措施的实施,尤其是水土保持和草地生

态恢复项目的推进。在不同情景下的模拟结果表明,生态保护情景(EP)下的生态系统健康指数(0.256)最高,其次是综合发展情景(CD)(0.253)。这一结果进一步验证了生态保护措施在改善生态系统健康方面的关键作用。相比之下,城镇发展情景(UD)和自然发展情景(ND)下的健康指数较低,尤其是UD情景中的建设用地扩展速度过快,导致生态用地减少,从而对生态系统健康产生负面影响。这表明,在未来的土地利用规划中,如何平衡城市化与生态保护之间的关系,将是实现可持续发展的关键。

表7 青海省2020年及2030年4种情景下各指标均值
Table 7 Mean values of indicators under four scenarios in 2020 and 2030 in Qinghai Province

指数	2020年	2030年			
		自然发展	生态保护	城镇发展	综合发展
景观异质性	0.345	0.346	0.345	0.348	0.345
景观连通性	7.034	7.017	7.029	6.898	7.009
斑块连通性	7.575	7.573	7.578	7.551	7.578
生态系统组织力	0.797	0.794	0.796	0.767	0.793
生态系统弹性力	0.124	0.124	0.125	0.120	0.122
生态服务综合指数	0.166	0.166	0.172	0.169	0.170
生态系统健康指数	0.252	0.252	0.256	0.250	0.253

表8 青海省2030年4种情景下土地利用类型的平均生态系统健康指数

Table 8 Average ecosystem health index under four scenarios for land use types in Qinghai Province in 2030

土地利用类型	平均生态系统健康指数			
	自然发展情景	生态保护情景	城镇发展情景	综合发展情景
耕地	0.307	0.311	0.301	0.307
林地	0.433	0.436	0.428	0.436
草地	0.293	0.298	0.285	0.297
水域	0.102	0.104	0.104	0.105
建设用地	0.208	0.211	0.208	0.205
未利用地	0.173	0.177	0.168	0.166
湿地	0.282	0.289	0.273	0.277

基于本研究结果提出以下政策建议:①应严格控制耕地和建设用地的开发边界,避免无序扩张,以保障生态用地的有效保护。②建议加强青海省生态保护区的建设和生态修复项目,特别是在柴达木盆地和青南高原西部,这些地区的生态恢复可显著改善区域的生态健康状况。③未来的研究可以进一步细化土地利用情景,结合气候变化等因素,为生态保护和可持续发展提供更具针对性的科学依据。

4 结论

(1) 时空变化特征。2005—2020年青海省生态系统健康呈下降态势,空间分布呈现西北低、西南次之、东部高的格局,生态系统健康指数从0.292降至0.252,东南部和柴达木盆地等区域生态健康下降显著。耕地与建设用地的快速扩张破坏生态系统结构,是生态系统健康水平下降的重要原因。

(2) 情景模拟结果。在自然发展(ND)、生态保护(EP)、城镇发展(UD)和综合发展(CD)4种情景中,生态保护情景下生态系统健康指数最高(0.256),表明有效实施生态保护措施,保障生态用地,能显著提升斑块及景观连通性,改善生态系统健康,增强生态系统服务功能。

(3) 土地利用影响。土地利用类型变化,特别是耕地和建设用地的扩张,是导致生态系统健康下降的关键因素。在生态脆弱区,过度开发与无序的土地利用变化加剧生态系统退化。因此,控制耕地和建设用地开发边界,推动未利用地向生态用地转化,是提升生态健康的关键举措。

(4) 发展策略要点。不同发展情景下,空间集约化利用和生态空间优化方案能有效改善生态系统健康,尤其适用于城镇化较快地区。具体措施包括合理规划建设用地,限制土地扩张,提升生态用地连通性,加强生态保护与修复,促进生态系统健康恢复与长期稳定。

参考文献(References)

- [1] Rapport D J, Thorpe C, Regier H A. Ecosystem medicine [J]. *Bulletin of the Ecological*, 1979, 60:180-182.
- [2] 曾晨,程轶皎,吕天宇.基于生态系统健康的国土空间生态修复分区:以长江中游城市群为例[J].*自然资源学报*, 2022, 37(12):3118-3135.
Zeng Chen, Cheng Yijiao, Lyu Tianyu. Research on land-space ecological restoration zoning based on ecosystem health: A case study of the urban agglomeration in the middle reaches along the Yangtze River [J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(12):3118-3135.
- [3] Gao Jie, Tang Xuguang, Lin Shiqiu, et al. The influence of land use change on key ecosystem services and their relationships in a mountain region from past to future (1995—2050) [J]. *Forests*, 2021, 12(5):616.
- [4] 于浩,刘娟.不同情景下乌鲁木齐河流域土地利用动态模拟研究[J].*国土与自然资源研究*, 2024(3):15-18.
Yu Hao, Liu Juan. Dynamic simulation of land use in Urumqi River basin under different scenarios [J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2024(3):15-18.
- [5] 郭珊珊.黄河流域生态系统健康与城镇化耦合协调研究

- [D]. 江苏 徐州:中国矿业大学,2022.
- Guo Shanshan. Research on the coupling and coordination of ecosystem health and urbanization in the Yellow River basin [D]. Xuzhou, Jiangsu: China University of Mining and Technology, 2022.
- [6] 王敏,谭娟,沙晨燕,等.生态系统健康评价及指示物种评价法研究进展[J].中国人口·资源与环境,2012,22(S1):69-72.
- Wang Min, Tan Juan, Sha Chenyan, et al. Advances in assessment of ecosystem health and indicator species method [J]. China Population, Resources and Environment, 2012,22(S1):69-72.
- [7] Ma K M, Kong H M, Guan W B, et al. Ecosystem health assessment: Methods and directions [J]. Acta Ecologica Sinica, 2001,21(12):2106-2116.
- [8] 徐烨,杨帆,颜昌宙.基于景观格局分析的雄安城市湿地生态健康评价[J].生态学报,2020,40(20):7132-7142.
- Xu Ye, Yang Fan, Yan Changzhou. Ecological health assessment of urban wetland in Xiongan based on landscape pattern [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(20):7132-7142.
- [9] 王文丽,张安录,刘蒙罢.长江经济带城市土地利用效率与生态系统健康耦合时空格局分析[J].水土保持研究,2022,29(6):352-362.
- Wang Wenli, Zhang Anlu, Liu Mengba. Analysis on the spatial-temporal pattern of coupling between urban land use efficiency and ecosystem health in the Yangtze River economic belt [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(6):352-362.
- [10] 袁贞贞,王秋红,王勇,等.多情景模拟下重庆市土地利用变化对生态系统健康的影响[J].生态学报,2023,43(20):8279-8291.
- Yuan Zhenzhen, Wang QiuHong, Wang Yong, et al. Impacts of land use change on ecosystem health in Chongqing under multi-scenario simulation [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(20):8279-8291.
- [11] 李凤,周文佐,邵周玲,等.2000—2018年西秦岭景观格局变化及生态系统健康评价[J].生态学报,2023,43(4):1338-1352.
- Li Feng, Zhou Wenzuo, Shao Zhouling, et al. Landscape pattern changes and ecosystem health assessment in the western Qinling Mountains from 2000 to 2018 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(4):1338-1352.
- [12] 陈清飞,陈安强,叶远行,等.滇池流域土地利用变化对地下水水质的影响[J].中国环境科学,2023,43(1):301-310.
- Chen Qingfei, Chen Anqiang, Ye Yuanhang, et al. Effects of land use change on groundwater quality in the Dianchi Lake basin [J]. China Environmental Science, 2023,43(1):301-310.
- [13] 全江涛,杨永芳,周嘉昕.河南省土地资源承载力时空演变分析与预测[J].水土保持研究,2020,27(2):315-322.
- Quan Jiangtao, Yang Yongfang, Zhou Jiaxin. Analysis and prediction of spatial and temporal evolution of land resource carrying capacity in Henan Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020,27(2):315-322.
- [14] 钱凤魁,王贺兴,项子璇.基于潜在土地利用冲突识别的主城区周边耕地保护[J].农业工程学报,2021,37(19):267-275.
- Qian Fengkui, Wang Hexing, Xiang Zixuan. Cultivated land protection in the periphery of the main urban areas based on potential land use conflict identification [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021,37(19):267-275.
- [15] 胡波洋,张蓬涛,白宁,等.基于CLUE-S和GMOP模型的青龙满族自治县土地利用情景模拟[J].中国农业资源与区划,2020,41(7):173-182.
- Hu Boyang, Zhang Pengtao, Bai Ning, et al. Land use scenario simulation in Qinglong Manchu Autonomous County based on CLUE-S and GMOP model [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2020,41(7):173-182.
- [16] 许静,刘慧.甘肃省生态系统服务权衡协同关系评估与预测[J].中国环境科学,2024,44(4):1863-1874.
- Xu Jing, Liu Hui. Assessment and prediction of ecosystem services trade-offs and synergies relationships in Gansu Province [J]. China Environmental Science, 2024,44(4):1863-1874.
- [17] 王子尧,黄楚梨,李惊,等.耦合InVEST-HFI-PLUS模型的生态分区规划与动态评估:以博尔塔拉蒙古自治州为例[J].生态学报,2022,42(14):5789-5798.
- Wang Ziyao, Huang Chuli, Li Liang, et al. Ecological zoning planning and dynamic evaluation coupled with InVEST-HFI-PLUS model: A case study in Bortala Mongolian Autonomous Prefecture [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(14):5789-5798.
- [18] Fan Yupeng, Fang Chuanglin. Evolution process and obstacle factors of ecological security in western China: A case study of Qinghai Province [J]. Ecological Indicators, 2020,117:106659.
- [19] Peng Jian, Liu Yanxu, Li Tianyi, et al. Regional ecosystem health response to rural land use change: A case study in Lijiang City, China [J]. Ecological Indicators, 2017,72:399-410.
- [20] Wang Xue, Tan Kun, Chen Baozhang, et al. Assessing the spatiotemporal variation and impact factors of net primary productivity in China [J]. Scientific Reports, 2017,7:44415.
- [21] 张超雅,李鹏,龚倪冰,等.云贵高原生态系统弹性力评

- 价分析[J].水土保持学报,2023,37(2):120-126.
Zhang Chaoya, Li Peng, Gong Nibing, et al. Evaluation of ecosystem resilience in Yunnan-Guizhou Plateau, China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(2):120-126.
- [22] 马泽钰,李鹏,肖列,等.青海省生态修复关键区识别及修复分区划分[J].水土保持学报,2024,38(3):252-265.
Ma Zeyu, Li Peng, Xiao Lie, et al. Identification of key areas for ecological restoration and division of restoration zones in Qinghai Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(3):252-265.
- [23] 谢高地,张彩霞,张雷明,等.基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J].自然资源学报,2015,30(8):1243-1254.
Xie Gaodi, Zhang Caixia, Zhang Leiming, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area [J]. Journal of Natural Resources, 2015,30(8):1243-1254.
- [24] 张百婷,李宗省,冯起,等.基于土地利用变化的祁连山地区生态系统服务价值演化分析[J].生态学报,2024,44(10):4187-4202.
Zhang Baiting, Li Zongxing, Feng Qi, et al. Evolution of ecosystem service values in Qilian Mountains based on land-use change from 1990 to 2020 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(10):4187-4202.
- [25] Kong Lingqiao, Wu Tong, Xiao Yi, et al. Natural capital investments in China undermined by reclamation for cropland [J]. Nature Ecology & Evolution, 2023, 7(11):1771-1777.
- [26] 胡西武,何福杰.1990—2020年青海省“三生”空间格局演化及影响因素研究[J].人民黄河,2023,45(12):108-112.
Hu Xiwu, He Fujie. Research on the evolution and influencing factors of the “production-living-ecological” space pattern in Qinghai Province from 1990 to 2020 [J]. Yellow River, 2023,45(12):108-112.
- [27] 李广英,李红颖,王凌青,等.青海省土地利用变化及其社会经济驱动因素分析[J].草业科学,2022,39(12):2604-2616.
Li Guangying, Li Hongying, Wang Lingqing, et al. Analysis of land use change and its socio-economic driving factors in Qinghai Province [J]. Pratacultural Science, 2022,39(12):2604-2616.
- [28] 李忠良,何光鑫,李勋.高寒气候区生长季NDVI与昼夜不对称增温的Copula分析[J].大气科学学报,2024,47(3):407-424.
Li Zhongliang, He Guangxin, Li Xun. Copula analysis of NDVI and diurnal-nocturnal asymmetric warming during the growing season in typical plateau climatic region [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2024,47(3):407-424.

(上接第164页)

- [25] 黄进,杨会,张金池.桐庐生态公益林主要林分类型土壤抗蚀性研究[J].水土保持学报,2010,24(1):49-52.
Huang Jin, Yang Hui, Zhang Jinchi. Study on soil anti-erodibility of main forest types in Tonglu's ecological non-commercial forest [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010,24(1):49-52.
- [26] 陈舒艳.统计学:Stata应用与分析[M].北京:机械工业出版社,2020.
Chen Shuyan. Statistics With Stata [M]. Beijing: China Machine Press, 2020.
- [27] 黄润龙.数据统计与分析技术:SPSS软件实用教程[M].北京:高等教育出版社,2004.
Huang Runlong. Data Statistics and Analysis Technology: A Practical course of SPSS Software [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004.
- [28] 于俊峰,孙丽娜,王震洪.不同土地利用类型对紫色土抗蚀性影响研究[J].广东农业科学,2012,39(24):62-64.
Yu Junfeng, Sun Lina, Wang Zhenhong. Soil anti-erodibility of different land utilization types about purple soil in Xishui County of Guizhou Province [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2012,39(24):62-64.