

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.03.032

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.

青海省生态修复关键区识别及修复分区划分

马泽钰¹, 李鹏^{1,2}, 肖列^{1,2}, 王博³, 许垚涛¹, 潘金金¹

(1.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,西安 710048;

2.西安理工大学旱区生态水文与灾害防治国家林业局重点实验室,西安 710048;

3.中国地质调查局西安矿产资源调查中心,西安 710100)

摘要: [目的] 基于“整体保护、系统修复、综合治理”的治理思路识别生态修复优先空间抑制生态退化,是区域社会—经济协调发展、筑牢生态安全屏障和推进生态文明建设的重要举措。[方法] 以青海省为研究区,通过土地利用强度、土地利用重心迁移反映城市化进程,定量评估 2005—2020 年 7 项生态系统服务、生态敏感性和生境退化度,提出基于“生态系统服务簇—生态敏感性—生境退化度”识别生态修复优先空间,将内部缺陷和外界胁迫相结合,划定 5 类生态修复优先区并提出相应修复策略。[结果] 青海省 2005—2020 年降水深度分别为 125.1, 106.9, 80.0, 135.4 mm,水源涵养深度稳定在 15 mm 左右。粮食产量由 1.42 t/hm² 提升至 2.02 t/hm²,防风固沙能力由 2.42 t/hm² 提升至 4.59 t/hm²,土壤保持能力由 85.90 t/hm² 下降至 65.30 t/hm²;青海省生态系统服务簇可划分为生态宜居和谐簇、水土耦合协调簇、生态源地保育簇、自然生态修复簇、防风固沙功能簇 5 类。基于双变量自相关识别生态恢复优先点结果可知,青海省主要关键生态恢复点和自然生态恢复点面积分别占 5.26% 和 2.55%,其中关键生态恢复点和生态宜居簇增加区域在空间上分布基本吻合。[结论] 青海省生态修复优先区集中在生态环境脆弱的西北荒漠地区、高海拔山区、水源地和河流沿岸及人类活动较频繁的河湟谷地和天峻县、兴海—玛多—曲麻莱县一带。

关键词: 青海省; InVEST; 生态系统服务功能; 生态系统服务簇; 生态修复优先区

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)03-0252-14

Identification of Key Areas for Ecological Restoration and Division of Restoration Zones in Qinghai Province

MA Zeyu¹, LI Peng^{1,2}, XIAO Lie^{1,2}, WANG Bo³, XU Yaotao¹, PAN Jinjin¹

(1. Xi'an University of Technology State Key Laboratory of Ecological Hydrology in Northwest Arid Zones, Xi'an 710048, China; 2. Xi'an University of Technology State Key Laboratory of Ecohydrology and Disaster Prevention and Control in Arid Zones of the State Forestry Administration, Xi'an 710048, China; 3. Xi'an Mineral Resources Investigation Centre of the China Geological Survey, Xi'an 710100, China)

Abstract: [Objective] Identifying priority spaces for ecological restoration and curbing ecological degradation based on the governance idea of “holistic protection, systematic restoration and comprehensive management” is an important measure for the coordinated development of regional socio-economics, the construction of a firm ecological security barrier, and the promotion of ecological civilization. [Methods] This paper took Qinghai Province as the study area, reflects the urbanization process through land use intensity and the land use center of gravity shift, quantitatively evaluates seven ecosystem services, ecological sensitivity, and habitat degradation from 2005 to 2020, and proposes to identify the priority space for ecological restoration based on the cluster of ecosystem services, ecological sensitivity, and habitat degradation. We proposed to identify ecological restoration priority spaces based on “ecosystem service cluster, ecological sensitivity and

收稿日期: 2023-11-17

修回日期: 2023-12-23

录用日期: 2024-01-18

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-04-28

资助项目: 陕西省重点研发计划项目 (2023-ZDLSF-65); 地质调查项目 (DD20220882)

第一作者: 马泽钰 (1999—), 女, 陕西西安人, 硕士研究生, 主要从事生态系统服务功能研究。E-mail: ccmazeyu@163.com

通信作者: 李鹏 (1974—), 男, 山东烟台人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事流域泥沙与水土保持生态修复研究。E-mail: lipeng74@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

habitat degradation degree”, and combined internal defects and external coercion to delineate five types of ecological restoration priority zones and propose corresponding restoration strategies. [Results] The depth of water production in Qinghai province from 2005 to 2020 were 125.1 mm, 106.9 mm, 80.0 mm and 135.4 mm respectively, and the depth of water retention was stabilized at about 15 mm. Grain output increased from 1.42 t/hm² to 2.02 t/hm², wind and sand control capacity increased from 2.42 t/hm² to 4.59 t/hm², and soil conservation capacity decreased from 85.90 t/hm² to 65.30 t/hm²; The ecosystem service clusters in Qinghai province were classified into five categories: harmony of habitat, harmony of soil and water, conservation of ecological sources, restoration of natural ecology, and functional cluster of wind and sand conservation. Based on the results of bivariate autocorrelation to identify the ecological restoration priority points, it can be seen that the key ecological restoration points and natural ecological restoration points are the main ones in Qinghai province, accounting for 5.26% and 2.55% of the area, respectively, in which the key ecological restoration points and ecological livability clusters increase the area of the spatial distribution of the basic coincides with each other. [Conclusion] The priority areas for ecological restoration in Qinghai province are concentrated in the ecologically fragile northwestern desert areas, high-altitude mountainous areas, water sources and river coasts and the river valley where human activities are more frequent, and in the area around Tianjun county and Xinghai-Mado-Qumalai county.

Keywords: Qinghai province; InVEST; ecosystem service function; ecosystem service cluster; ecological restoration priority areas

Received: 2023-11-17

Revised: 2023-12-23

Accepted: 2024-01-18

Online(www.cnki.net): 2024-04-28

生态系统指在一定的时间和空间内,生物与环境构成的统一整体,生物与环境间通过物质循环和能量流动,形成特定的营养结构和生物多样性的功能单元^[1]。生态系统是人类得以生存繁衍的自然本底与支撑条件^[2],根据生态系统不同构成及其结构特征,可将生态系统服务分为调节功能、物质供给功能、文化功能、支持功能 4 类。近年来,使用谢高地等^[3]提出的当量因子法和斯坦福大学^[4]联合研发的 InVEST 模型对不同尺度的复合生态系统功能或价值进行量化评估。

生态系统服务簇指在空间和时间上重复出现的生态系统服务集^[5],用以研究生态系统各项服务功能间相互作用关系。识别服务簇的方法包括结构方程模型^[6]、K—means 聚类分析^[7]、自组织网络分析(SOM)^[8]和主成分分析^[9]。由于不同尺度下自然资源禀赋和生态过程在时间和空间上存在异质性和不整合,导致服务簇的时空格局也是动态的、非线性的^[10]。研究其形成机制和动态演变特征对土地利用规划、生态服务功能区管理和可持续发展具有指导意义。土地利用变化(城市化)改变生态服务的供需关系,促使自然生态系统向半自然、人工生态系统转变^[11],服务簇也随之变化。因此,PUTWAIN 等^[12]提出,将生态修复作为生态学的分支进行系统研究,

目前,识别生态修复空间的研究多集中在“重要性—脆弱性”^[13]、城市绿地空间^[14]、构建生态安全格局^[15]等方面,多关注自然景观、保护区和栖息地上^[16],极少关注人类改变利用自然的过程。通过服务簇来识别生态系统变化中产生消极或积极影响的区域^[17],为区域社会经济—生态协调发展政策的制定提供建议。

以青海省 2005—2020 年 7 项生态系统服务为评估对象,通过 SOM 划定生态系统服务簇,以土地利用强度、土地利用重心迁移反映城市化进程。在“整体保护、系统修复”的原则上,将其内部缺陷和外界胁迫相结合,基于“生态系统服务簇—生态敏感性—生境退化度”将生态修复规划整合到明确地点^[18]。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

青海省(89°24′03″—103°04′10″ E, 31°36′02″—39°12′45″ N)地势上由西向东呈阶梯式下降,横跨青藏高原、内陆干旱盆地和黄土高原的 3 种地形地貌,兼具大陆季风性气候、内陆干旱气候和青藏高原气候的 3 种气候形态,地域间降水、气温、光热资源等气候条件和植被类型差异显著。西部大部分年降水量低于 400 mm,东南部可达 600 mm 以上。全年平均气温为-5.1~9.0℃,呈现出明显的北高南低的分布特征(图 1a)。植被类型从西南向东北垂向分布着高寒

草原、高寒草甸、高山植被、灌丛、针叶林及阔叶林(图 1b)。青海省作为“中华水塔”和“亚洲水源”,拥有全

国首位的湿地资源,是全球影响力最大的生态调节区和气候驱动区之一^[19]。

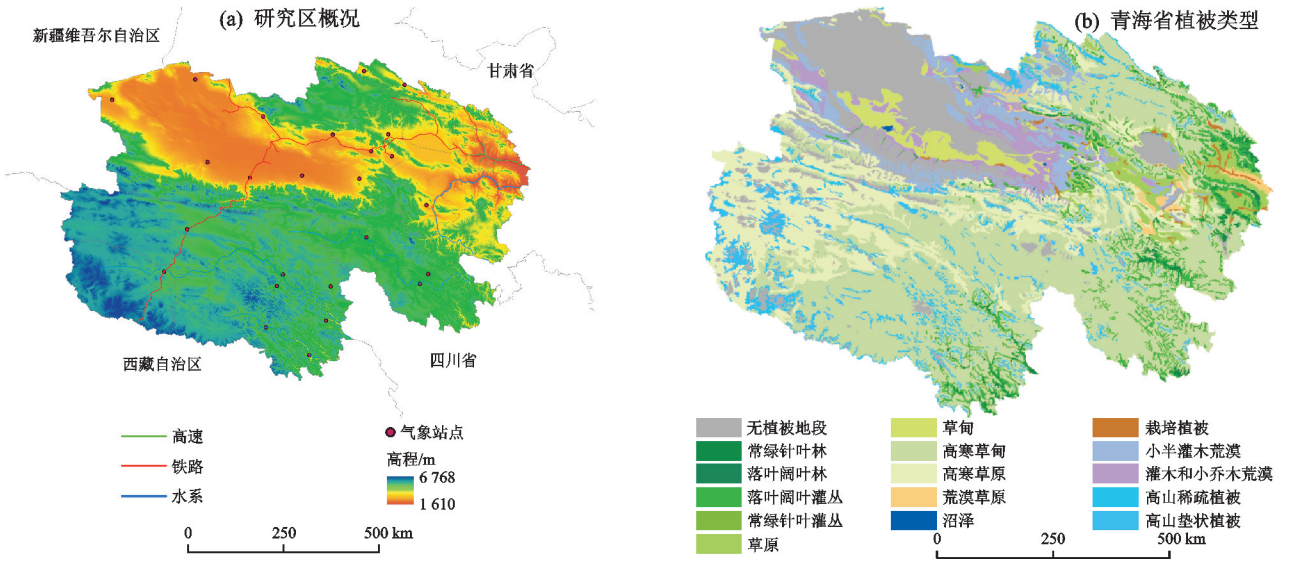


图 1 研究区概况及植被类型

Fig. 1 Overview of the study area and vegetation types

1.2 数据来源

使用的文中降水量、潜在蒸散发量、风速等数据来源具体见表 1。

表 1 数据来源

数据	来源	分辨率
降水量、潜在蒸散发量	国家地球系统科学数据中 心 (http://www.geodata.cn) 国家气象科学数据共享服 务网 (http://www.cdc.nmic.cn/)	1 km
风速	资源环境科学与数据中 心 (http://www.resdc.cn) 地理空间数据云 (https://www.gscloud.cn)	500 m
NDVI、土地利用	国家青藏高原科学数据中 心 (https://www.data.tpcd.ac.cn) 世界和谐土壤数据库 (https://www.fao.org)	30 m
DEM	国家青藏高原科学数据中 心 (https://www.data.tpcd.ac.cn)	12.5 m
雪盖因子数据集、 土壤湿度	世界和谐土壤数据库 (https://www.fao.org)	1 km
土壤数据	《青海省统计年鉴》	—
农产品、 畜牧产品产量		

1.3 研究方法

1.3.1 各项生态系统服务量化方法 基于 InVEST 和 ArcGIS 评估 2005—2020 年青海省 7 项生态系统服务,计算方法见表 2。

基于生态系统服务量化结果,对其进行标准化,计算公式为^[20]:

$$Z_i = \frac{X_i - \bar{X}}{S} \tag{1}$$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \tag{2}$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \tag{3}$$

式中: Z_i 为每个生态系统服务经过标准化后的值; X_i 为第 i 个像元的原始值; $\bar{X}$ 为每个生态系统服务量化后的平均值; n 为像元数; S 为所有像元的标准偏差。

1.3.2 生态系统服务簇的识别 采用 SOM 识别生态系统服务簇,SOM 是一种非监督式学习的神经网络方法,在使用 SOM 时,为确保 4 年划定的服务簇具有一致性和可比性,采用 100 m×100 m 的栅格尺度并对服务簇进行归一化处理,使用 R 4.2 软件中的“kohonen”软件包执行 SOM。

1.3.3 土地利用强度 土地利用强度能直接、定量反映人类活动在社会因素影响下对土地生态系统的利用和改造程度。结合相关学者^[21]研究,考虑到青海省草地面积比重大,畜牧业发展力度大,对草地的赋值进行微调。因此,对于建设用地、耕地、草地、林地、水域/湿地、未利用地的土地利用强度取值分别为 4,3,2.5,2,2,1。

$$LUI = \sum_{i=1}^n \frac{A_i \times S_i}{S_c} \tag{4}$$

式中:LUI 为土地利用强度; A_i 为第 i 级地类的强度等级指数; S_i 为第 i 种土地利用类型面积(万 hm^2); S_c 为土地总面积(万 hm^2)。

表 2 各项生态系统服务功能评估方法
Table 2 Methods for assessing the functioning of various ecosystem services

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(Water Yield)	$WY = \left(1 - \frac{AET_i}{P_i}\right) \times P_i$
	在产水量计算基础上	$WC = \text{Min}\left(1, \frac{249}{\text{Velocity}}\right) \times$
水源涵养	考虑地形、流速、 土壤渗透性等	$\text{Min}\left(1, \frac{0.9 \times TI}{3}\right) \times$ $\text{Min}\left(1, \frac{K_{\text{sat}}}{300}\right) \times WY$
土壤保持	RUSLE 模型	$SR = R \times K \times LS \times (1 - C \times P)$ $SF = S_{LQ} - S_L$
防风固沙	RWEQ 修正风蚀模型	$S_{LQ} = \frac{2Z}{S_Q^2} Q_{\text{max}_Q} \times e^{-\left(\frac{z}{S_Q}\right)^2}$ $S_L = \frac{2Z}{S_F^2} Q_{\text{max}} \times e^{-\left(\frac{z}{S_F}\right)^2}$
碳储量	基于 InVEST 模型的 Carbon Storage	$C_v = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{dend}}$ $C_t = C_v + C_{\text{soil}}$
生境质量	基于 InVEST 模型的 Habitat Quality	$HQ = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + K^z}\right)\right] PH$
食物供给	正值 NDVI 对食物 产量数据空间化	$FP = \frac{NDVI_i}{NDVI_{\text{sum}}} \times G_{\text{sum}}$

1.3.4 生态恢复点的空间优先次序 基于双变量局部莫兰指数确定生态恢复的优先地点,以 100 m × 100 m 的栅格尺度量化 2005—2020 年生态系统服务簇变化的标准值(ΔESB)和土地利用强度变化的标准值(ΔLUI)间的空间相关性。计算方法为^[20]:

$$I_{B,i} = Z_{x,i} \sum_{j=1, j \neq i}^N W_{i,j} Z_{y,j} \tag{5}$$

式中: x 为栅格 i 的 ΔLUI; y 为邻近栅格 j 的 ΔESB;

$W_{i,j}$ 为基于一阶后连续性矩阵的空间权重矩阵。

2 结果与分析

2.1 土地利用时空变化分析

2.1.1 土地利用结果特征变化 从土地利用数量结构来看,青海省土地利用结构相对简单。2005—2020 年以草地和未利用地为绝对优势地类,林地、水域为主要类型,兼有小比例的耕地、湿地和建设用地。2005—2020 年,未利用地出现大幅度萎缩,减幅达到 10.12%;耕地和草地在研究期内分别增长 4.07 万, 205.90 万 hm²;湿地和林地也有小幅度下降,研究期间分别减少 1.81 万, 8.47 万 hm²(表 3)。根据土地利用转移轨迹来看,土地利用转变类型多样,未利用地、草地为主要转出地类,草地、未利用地、水域为主要转入地类(图 2)。总体来看,青海省土地利用变化分为 2 个阶段:(1)2005—2010 年,各类用地有序扩张,统筹发展阶段。在社会经济快速发展和强化区域中心功能的共同推动下,各土地利用类型变化幅度剧烈,尤其是建设用地和草地增长强劲。未利用地转出较为单一,主要是向草地、水域大幅转变,转出面积达 27.8 万 hm²。草地的转移轨迹线更为稠密,向未利用地、湿地、耕地流出转出面积达 5.2 万 hm²,建设用地侵占各类用地,发展以积极保障和统筹协调各类用地为主;(2)2011—2020 年,优化土地利用结构,和谐发展阶段。草地和未利用地仍为主要转出地类,转变类型更为繁多,但转出面积大量缩减,分别为 8.8 万, 6.8 万 hm²。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。

表 3 2005—2020 年青海省各土地利用类型面积变化
Table 3 Changes in the area of each land-use type in Qinghai Province from 2005 to 2020

变化量	年份	耕地	林地	草地	水域	湿地	建设用地	未利用地
面积/(万 hm ²)	2005	85.91	299.56	3 854.66	288.41	170.11	12.85	2 511.50
	2010	89.69	297.93	4 070.62	308.37	167.94	16.19	2 272.26
	2015	89.20	298.17	4 068.90	311.54	166.09	20.18	2 268.93
	2020	89.98	297.75	4 060.56	338.89	161.64	16.73	2 257.45
面积占比/%	2005	1.19	4.15	53.37	3.99	2.36	0.18	34.77
	2010	1.24	4.12	56.36	4.27	2.33	0.22	31.46
	2015	1.23	4.13	56.33	4.31	2.30	0.28	31.41
	2020	1.25	4.12	56.22	4.69	2.24	0.23	31.25
变化量/ (万 hm ²)	2005—2010	−3.78	1.63	−215.96	−19.96	2.17	−3.34	239.24
	2010—2015	0.49	−0.24	1.72	−3.17	1.86	−3.99	3.33
	2015—2020	−0.78	0.42	8.34	−27.35	4.45	3.45	11.48
	2005—2020	−4.07	1.81	−205.90	−50.48	8.47	−3.88	254.05
变化率/%	2005—2010	4.40	0.54	5.60	6.92	1.28	26.00	9.53
	2010—2015	0.55	0.08	0.04	1.03	1.11	24.62	0.15
	2015—2020	0.88	0.14	0.21	8.78	2.68	17.07	0.51
	2005—2020	4.74	0.60	5.34	17.50	4.98	30.22	10.12

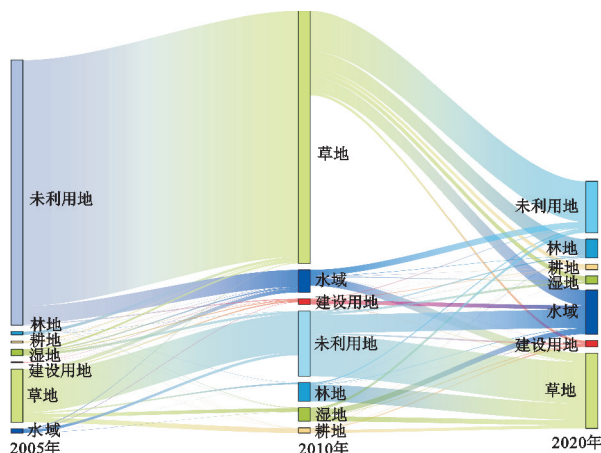


图 2 2005—2020 年青海省土地利用数量变化轨迹

Fig. 2 Trajectory of change in the quantity of land use in Qinghai Province from 2005 to 2020

2.1.2 土地利用重心转移轨迹 青海省土地利用类型空间分布复杂,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,南部从西向东土地类型由冰川、荒漠向戈壁草地、水域向农林用地逐渐转变。重心迁移模型可直观反映土地利用覆被在时间和空间 2 个层面上的变化过程,在一定程度上呈现各土地利用类型的空间分布及变化方向。通过分析重心转移的方向、距离、自然条件和社会经济,可反映出人类利用和改造活动对土地利用变化的影响。因为湿地占比较小,且与未利用地的各项生态服务有差异,因此,将水域与湿地合并分析其重心转移趋势(图 3、图 4)。根据青海省各类土地利用重心迁移的轨迹、移动方向和距离表明,2005—2020 年草地重心落在都兰县,未利用地重心由曲麻莱县迁移至格尔木市,两者整体均向西北方向偏移,其中 2005—2010 年偏移距离最大,分别为 1.96×10^4 , 7.34×10^4 m。结合青海省土地利用规划来看,为遏制生态恶化,西北柴达木盆地、农牧交错区、河湟谷地等生态脆弱区开展绿化工程,所以,植被覆盖率得到明显提升,两者重心也均向西北偏移。耕地主要分布在东部黄土高原区,紧邻城市周边或集中在低海拔的山区,重心位于海南藏族自治州的贵南县。随着生态退耕的需要,2010—2015 年重心向西偏移,而近年为保障粮食安全加强河湟谷地耕地保护,使得重心整体向东偏移。建设用地研究期间的重心均落于共和县,随着“确保以西宁为中心发展东部城镇密集区的同时,引导以格尔木为中心的柴达木城镇化地区发展”政策的落实,重心逐渐向西偏移。水域和林地研究期内中心坐标和移动范围变化幅度较小,基本处于稳定状态。

2.2 生态系统服务功能量化与时空演变

在分析青海省土地利用数量和结构的基础上,综

合考虑区域气候、土壤、地形、下垫面条件,核算 2005—2020 年各项关键生态系统服务的供给量与时空变化格局(图 5)。从实际角度出发,选取维持生态系统动态平衡和人类生存发展的防风固沙、土壤保持、生境质量、碳储量、产水量、水源涵养和食物供给 7 项关键生态服务。

青海省产水量、水源涵养总量的空间分布与年均降水量、光热条件和植被类型有直接联系,呈现西北向东南梯度增加趋势,高值区集中在降水丰富且植被蒸散量低的三江源区南部。产水量在研究期间波动较明显,2005 年、2010 年、2015 年、2020 年产水深度分别为 125.1, 106.9, 80.0, 135.4 mm。受地形条件和土壤质地的影响,生态系统能拦截滞蓄的降水较小,水源涵养的平均深度基本稳定为 15 mm。而食物供给依赖于耕地的地力等级、有机质含量和土壤肥力等因素,在空间上呈西低东高和北高南低的分布特征。随着耕作水平的提升及优良品种的选育,食物供给均值由 2005 年的 1.42 t/hm^2 稳步提升至 2020 年的 2.02 t/hm^2 ,总量达 1.46 亿 t。从行政区来看,海西蒙古族藏族自治州食物供给量最大得益于面积优势,而黄南藏族自治州均值最大说明土壤养分、水热条件和耕作管理方式最优。碳储量和生境质量的空间分布具有较高相似性,高值区集中在祁连山脉、青海湖和阿尼玛卿山周围,次高值分布在青南高原和河湟谷地,柴达木盆地最低。青海省为风水蚀交错区,西部地区降水稀少、风力强盛,植被类型以灌木荒漠、高寒草原和高山稀疏植被为主,且柴达木盆地、青南高原地表有大量松散物质,决定该区以风力侵蚀为主。近年来,在人类活动和气候变暖的作用下,冻土消融、土壤沙化等因素加剧西部地区风蚀现象的发生。“十三五”期间,青海省积极开展国土综合整治,为防止水土流失、草原退化、土地沙化进行一系列生态修复建设工程,国土绿化、封育草原、治理和改良退化草原面积分别达到 1.41×10^6 , 1.11×10^7 , $2.53 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 。青海省单位面积防风固沙量由 2005 年的 2.42 t/hm^2 提升至 2020 年的 4.59 t/hm^2 ,固沙物质总量增幅达 89.6%,高值区集中在青海省西南部的可可西里盆地、青南高原和东部阿尼玛卿山和祁连山。东部地形复杂,冰川积雪融化和降水产生的季节性径流破坏土壤团聚体,更容易引起水力侵蚀。土壤保持量从空间分布来看,黄河流域、澜沧江流域和祁连山以林草地为主,植被覆盖条件优越,生态保育效果良好,土壤保持能力强。黄土高原区多为耕地和建设用地,林草地交错分布,属次高值区。青海省整体植被覆盖度由 2005 年的 0.425 提升至 0.447 后回落至 0.364,土壤保持平均值经历 85.9, 89.0, 65.3 t/hm^2 的变化。

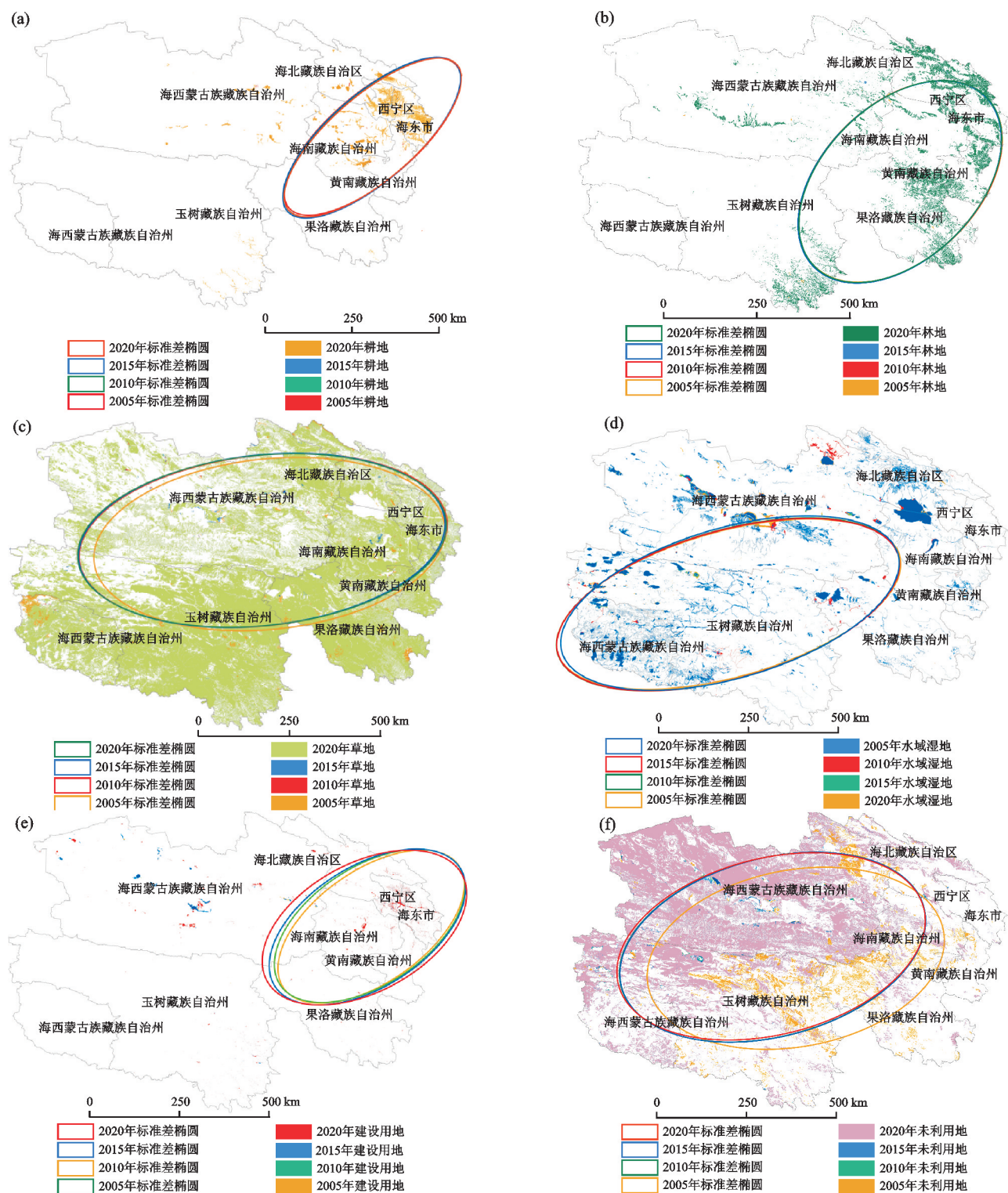


图 3 2005—2020 年青海省土地利用空间移动方向

Fig. 3 Direction of spatial movement of land use in Qinghai Province from 2005 to 2020

2.3 生态系统服务簇及其动态演变

在 100 m×100 m 的栅格尺度下将青海省 7 项生态系统服务进行自组织网络分析,最终划定 5 种生态系统服务簇,2005—2020 年同一服务簇的空间聚集性和不同服务簇间的空间异质性见图 6。

(1)生态宜居和谐簇

生态宜居和谐簇主要分布在以西宁为引领的重

要城市群和以玛沁县、玉树县为中心的高原绿色城镇簇群及人文旅游城镇。该区土地利用类型以耕地和建设用地区为主,是全省高效种植发展区,属于高强度人类活动开发区。但也配置一定比例的林草地,因此,FP、HQ、CS 处于协同发展状态。该区基础设施完善,交通便利,山水相依,具有高原生态及民族文化特色风貌,居民幸福感高。

(2) 水土耦合协调簇

水土耦合协调簇面积占比较少,且受气候因子影响波动较大,植被类型主要为高寒草甸、高山植被和灌丛,水土耦合协调度较高,供给服务(*FP*)和调节服务(*WY*、*WC*、*SR*)具有较好的协同作用。且临近生态源地,生态源地在林分尺度上的树种建群模式可作为借鉴推广。通过加大保育力度,加强草原生态修复,将该区作为潜在生态源地建设。

(3) 生态源地保育簇

生态源地保育簇内除防风固沙外的 6 类生态系统服务供需预算均处于盈余状态,防风固沙功能最低。该区植被类型多为针叶林、阔叶林及灌丛,具备调节小气候,固土固碳保水功能,兼顾粮食生产。该类服务簇分布于祁连山、阿尼玛卿山和水源地附近,空间位置未有明显变化。该区水热条件优越,蕴藏丰富林草资源,且未经人类大力开发利用,是重要的水源保护区和物种栖息地,具有不可替代的生态价值。应实施严格的保护制度,严禁放牧与砍伐,创造复合多元的生态栖息地生境以促进生态系统服务协同供应。

(4) 自然生态修复簇

自然生态修复簇在所有服务簇类型中面积占比最多,分布于西北柴达木盆地。该区土壤类型主要为盐碱土、干旱土和初育土,土壤养分含量低,植被类型多为灌木荒漠和稀疏草甸。簇中各项服务供给能力均为负值(图 7),生态环境质量较差,但随着生态修复工程开展,在研究区所占比例有所下降。可人为植树造林、封沙育林,种植枸杞、藜麦、沙枣、白刺、沙棘

等抗旱植物,达到“节水、固沙、增绿”的效果。同时,该区矿产资源富集,可作为城镇发展后背地来重点扶持,发展建成全国区域循环经济发展示范区。

(5) 防风固沙功能簇

防风固沙功能簇集中于青海西部的青南高原,部分分布在柴达木盆地,受地形和气候影响,靠近沙源,受高原季风影响极易发生风蚀。该区主要植被类型为高山植被和高寒草原,年降水量为 300 mm 左右,基本满足牧草生长需求。草原植被低矮,能有效降低地表风速和风沙流动,地表形成结皮,有减少土壤被吹蚀和促进成土的作用。牧草根系也能固结土壤,因此,该区具有极高的防风固沙功能,得分高达 1.98(图 7)。但因自然气候恶劣,使供给能力和调节能力较低,与其他 6 项服务间呈显著的权衡关系。

2005—2020 年,共有 21.87% 的服务簇在数量、类型、空间上发生转变(图 8),其时空演变以持续型、转变防风固沙型、转变生态宜居型为主。其中,自然生态修复簇面积减少 674.2 万 hm^2 ,防风固沙功能簇面积增加 745.7 万 hm^2 ,生态修复转防风固沙功能占 86.4%,集中在青南高原西部。是青海省“十三五”期间大力开展防沙治沙、退牧还草、荒漠化治理等一系列生态修复工程取得的重大成果,完成国土绿化 $1.41 \times 10^6 \text{ hm}^2$,使得草地重心向西北方向偏移,防风固沙功能簇向东南偏移。生态宜居型面积增加 61.85 万 hm^2 ,自然修复转生态宜居面积为 184.86 万 hm^2 ,与积极建设天峻—海晏土地利用亚区、柴达木城镇化政策息息相关,空间上多围绕青藏铁(公)路分布。

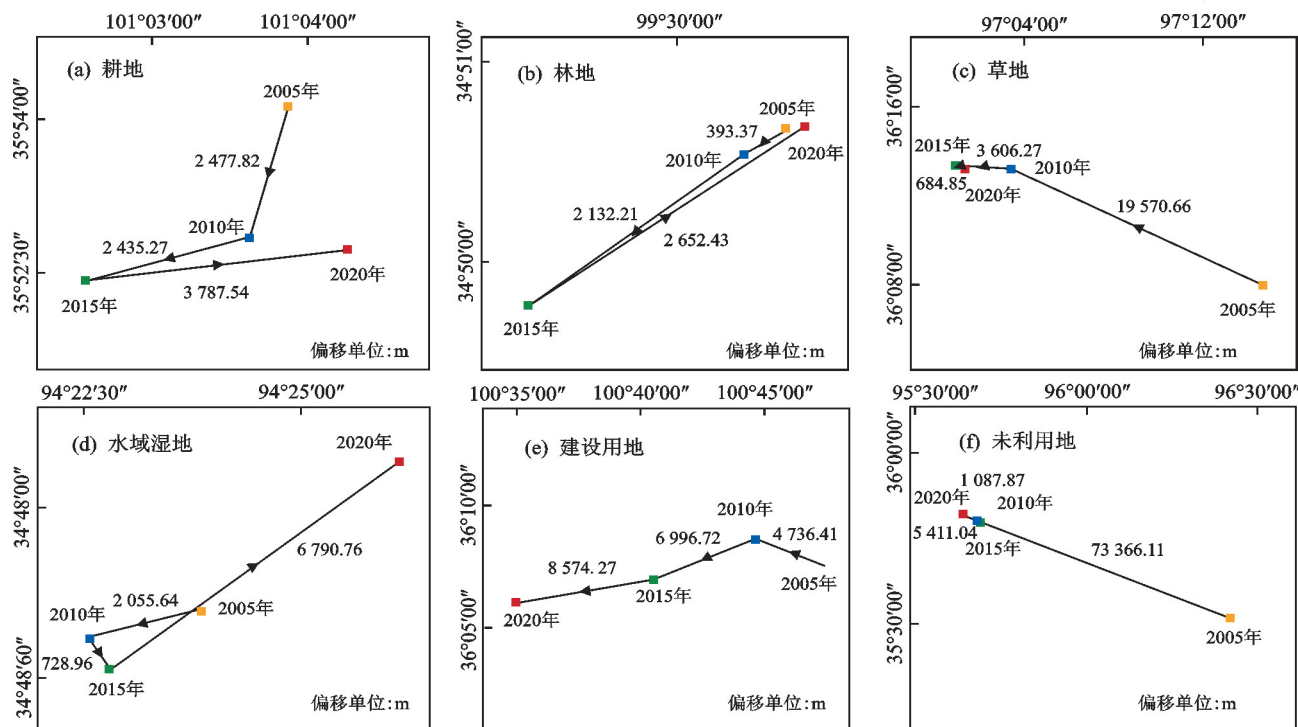


图 4 2005—2020 年青海省各土地利用重心迁移轨迹

Fig. 4 Migration trajectories of centers of gravity of land use in Qinghai Province from 2005 to 2020

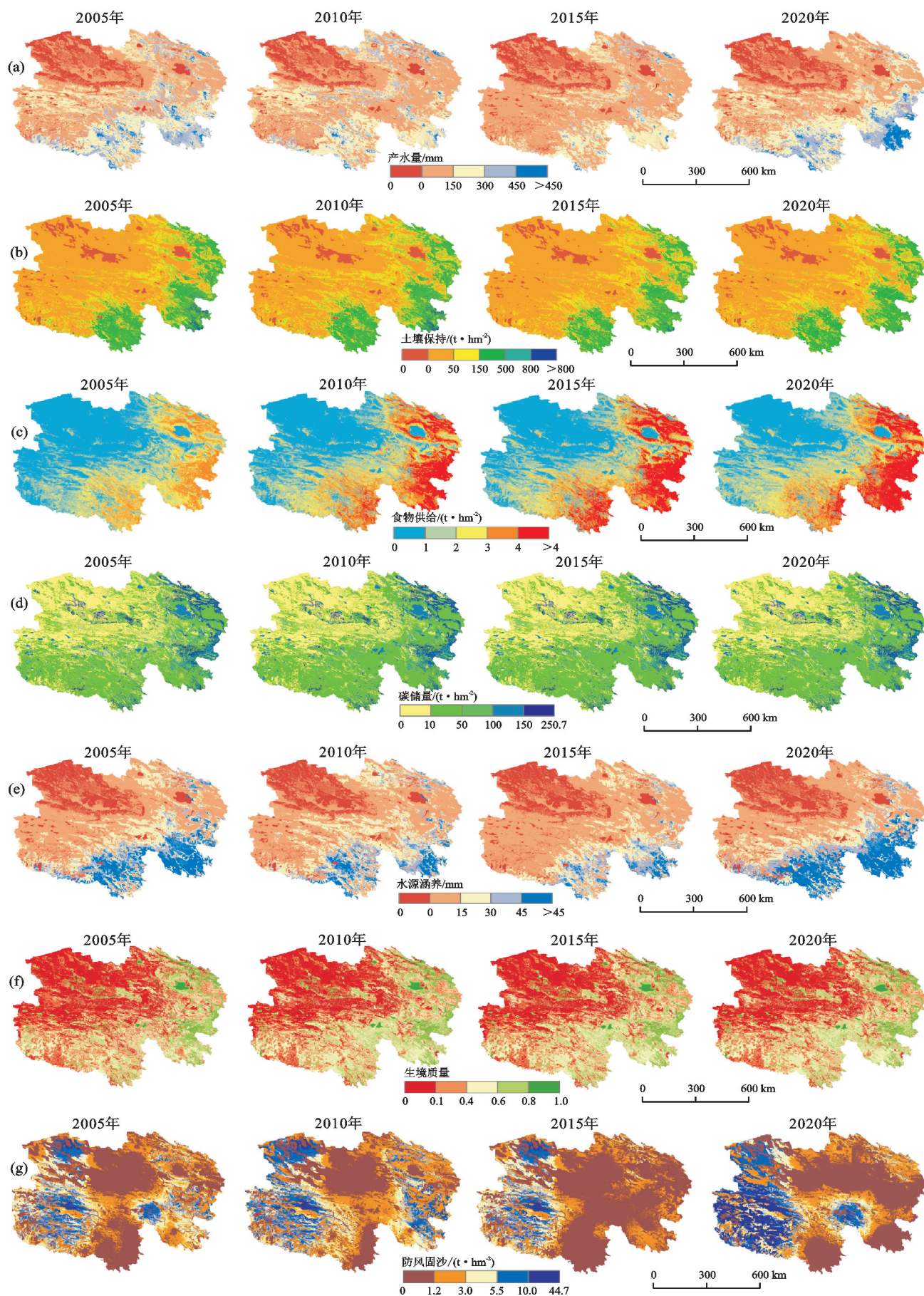


图 5 2005—2020 青海省各项生态系统服务空能时空分布

Fig. 5 Spatial and temporal distribution of ecosystem services in Qinghai Province from 2005 to 2020

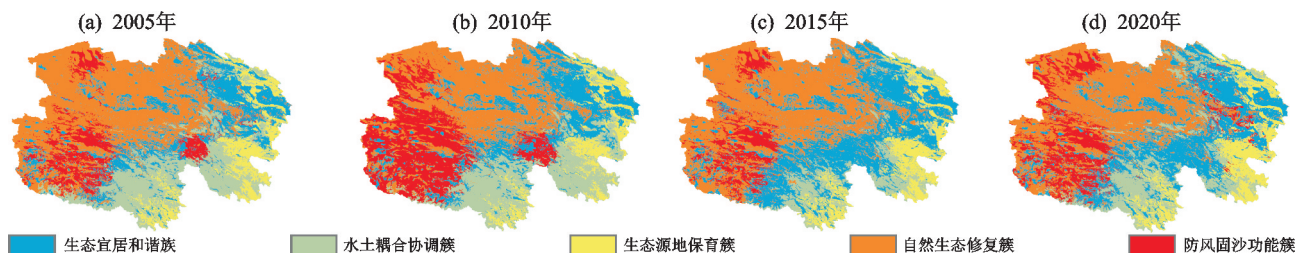


图 6 青海省生态系统服务簇空间分布

Fig. 6 Spatial distribution pattern of ecosystem service clusters in Qinghai Province

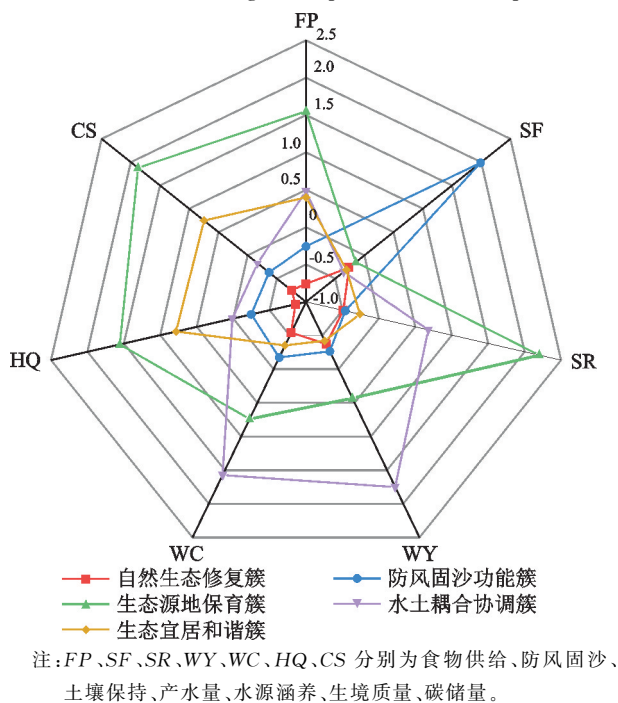


图 7 生态系统服务集群雷达图

Fig. 7 Radar diagram of ecosystem service clusters

2.4 生态恢复点的识别

生态恢复优先点按重要性可分为高一高(H—H)、高一低(H—L)、低—高(L—H)和低—低(L—L)4种类型。高一高(H—H)表示2005—2020年社会经济影响下土地利用强度变化较大的栅格,其周围的生态系统服务值(Δ ESB)变化也较大;高一低

(H—L)表示城市强度变化大而周围 Δ ESB对其变化不太敏感的栅格;低—高(L—H)表示城市强度变化较小,但周围 Δ ESB对其变化较敏感的栅格;低—低(L—L)表示城市强度变化较小,周边环境 Δ ESB变化也小的栅格。而高一高、高一低、低—高、低—低和不显著分别代表关键生态恢复点、重要生态恢复点、人工生态恢复点、自然生态恢复点和非生态恢复点(图9)。生态恢复点可通过人工重建或自然恢复达到提高生态环境质量的目的。关键生态恢复类型空间分布与生态宜居型服务簇增加的空间分布基本一致,集中分布在天峻县和兴海—玛多—曲麻莱县一带,面积共 $3.80 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。可通过建设公园绿地、花园等,提供更多高质量的生态系统服务,同时提升人们休闲娱乐服务。重要生态恢复类型表示具有高生态恢复力和弹性力,但推动城市化进程中可能牺牲掉一部分生态服务功能,需要注意布局生态恢复项目,以提高生态服务功能。自然生态恢复类型的特点是城市化水平较低,受自然条件约束生态服务功能也处于低值区,可通过自然修复为主,辅以必要的人工修复来恢复生态系统或者是建立人为扰动少,生境质量优越的自然保护区。空间上,主要分布于在格尔木市、祁连县、达日县等,面积为 $1.84 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。人工生态恢复类型因为生态敏感度高,一般有着较低的城市化水平,可优先通过提高交通可达性来提升居民的幸福。非生态恢复类型不适合制定生态恢复规划。

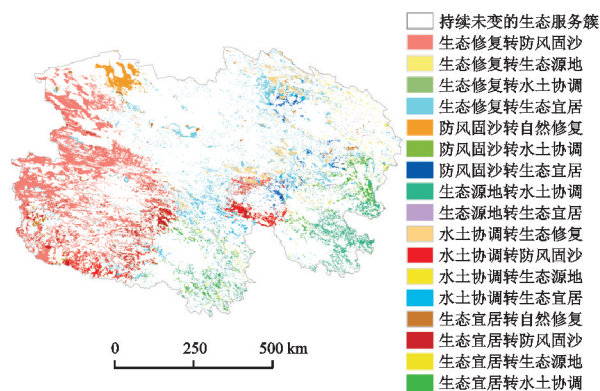
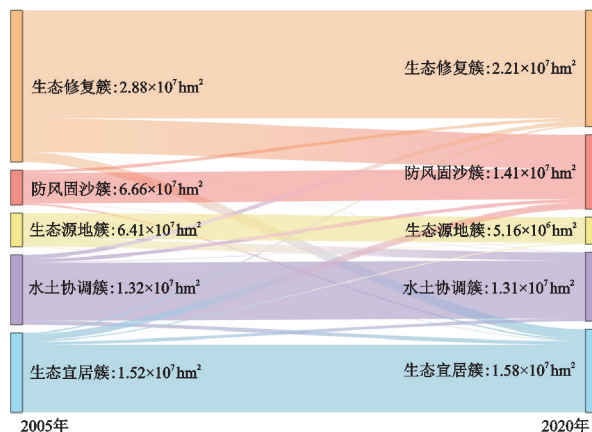


图 8 2005—2020 年间生态系统服务簇的转变情况

Fig. 8 Transformation of ecosystem service clusters between 2005 and 2020



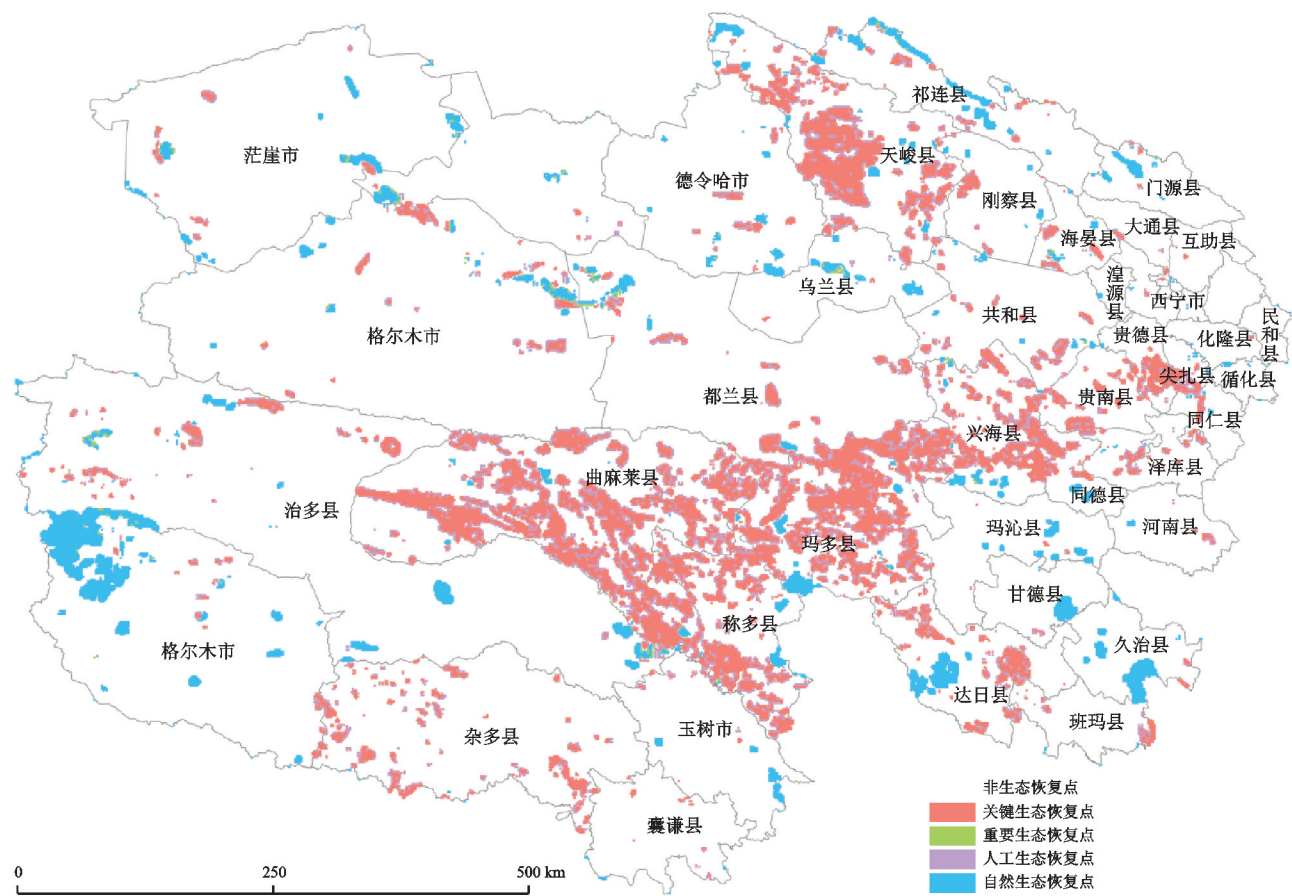


图 9 Ecological restoration site identification

2.5 生态修复优先区修复策略

选取高程、植被覆盖度、坡度、土地利用、道路距离和水系距离 6 个关键指标,通过层次分析法确定权重,对青海省生态系统敏感性进行评价(图 10)。不敏感、轻度敏感、中等敏感、高度敏感、极敏感的面积占比分别为 10.38%,22.91%,27.79%,26.68%,12.24%,敏感性较高区域分布在祁连山区、柴达木盆地和青海东南部。生境系统退化度能揭示外界威胁因子对区域生境胁迫的程度及生境质量下降的概率,青海省平均退化度指数为 0.019,高度退化区集中在柴达木盆地和河湟谷地周围。

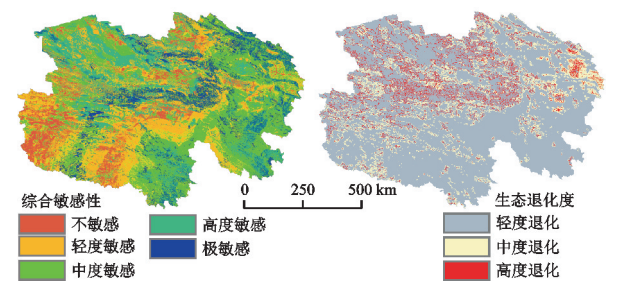


Fig. 10 Spatial distribution of ecological sensitivity and degradation in Qinghai Province

以“整体保护、系统修复、综合治理”为原则,基于“服务簇—生态敏感性—生境退化度”的识别思路,生态敏感性识别出其内部缺陷修复优先区集中在荒漠、高海拔山区、水源地。叠加生境退化度和生态系统服务簇识别出外界威胁集中在河湟谷地、天峻县、兴海—玛多—曲麻莱县一带的高强度人类活动开发区。根据其成因和位置,划定 5 类生态修复空间(图 11),并提出相应修复策略。

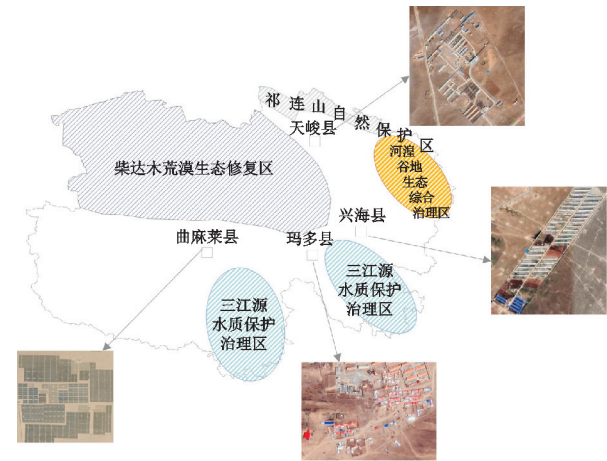


Fig. 11 Spatial distribution of ecological restoration priority areas

柴达木荒漠生态优先修复区。柴达木盆地作为全国八大沙漠之一,沙化海拔最高、沙化面积最广,受气候土壤条件限制,生态本底差,修复难度和成本高。首先,应加大沙化土地综合治理和周边生态保护与修复工程力度,遏制生态环境恶化;其次,对于存在的大量荒漠裸土地采取换土消碱办法种树种草,遏止流沙蔓延。对于半荒漠地区,广泛种植藜麦、沙枣、白刺、沙棘等抗旱作物,与滴灌喷灌技术相结合,力求充分发挥出“节水、固沙、增绿”的优势。对于绿洲农业区,则采取“小治理、大封育”,坚持宜林则林,宜灌则灌,宜草则草,保证种栽质量;最后,随着柴达木城镇化的推进,生产建设项目实施过程中需配置相应的水土保持措施,防止水土流失。

祁连山水源涵养自然保护区。祁连山区是西部重要的水源涵养功能区和生态安全屏障,也是重要的生物资源库和野生动物迁徙的廊道。为综合治理“山碎、林退、水减、田瘠、湖缩”等一系列生态问题,需加大黑河、大通河、疏勒河等重点流域生态保护力度,持续推进矿区及交通沿线生态环境恢复治理工作,对团结峰、托勒山、冷龙岭等大型冰雪山群采取封禁保护;采用自然恢复与人工修复相结合方式巩固现有修复成果,同时,还需警惕祁连山外围放牧活动的生境退化,严格划定牧区范围,在林地和牧区间设置缓冲带,阻止过渡带生态恶化;为调动居民环保积极性,可探索“生态修复+生态旅游”模式,为居民增加创收同时打造生态功能提升与旅游协调发展示范区。

河湟谷地生态环境综合治理区。河湟谷地及周边分布大量建设用地、耕地,人类高强度开发利用活动导致景观破碎度和景观异质性高,工业固体垃圾、农业废弃物、生活垃圾的大量排放带来土壤污染、水质污染和大气污染新问题。亟需改进固废处理工艺水平,构建特色循环链条,提升固体废物综合利用处置质量;加强建筑工地扬尘治理,采取施工围挡、场地硬化、裸露地覆盖、洒水降尘、车辆出场冲洗等措施,最大限度抑制城区扬尘污染;加强黄河、湟水河两岸南北山国土绿化,强化重点河流水生态保护,保障重点河湖生态流量。聚焦水、气、土污染防治,铁腕治理、综合施策,推进河湟谷地生态环境综合治理。

三江源水质保护治理区。三江源作为中华水塔,每年向下游地区输送 900 多亿 m^3 水量,需承担起丰沛兼顾、水质清洁的重任。加强源头保护和流域综合治理,全面增强保水、增水、净水等核心生态功能,严格划定水源涵养区、缓冲隔离区、污染防治区范围;落实省州县乡村 5 级江河责任人制度,以清洁小流域为单元推进水源涵养和水土保持功能提升,加强长江

源、黄河源、澜沧江源等沿线河岸带和修复带生态保护力度;加大力度推行禁牧、休牧和草畜平衡制度,恢复天然草原植被的同时防止牲畜污染水源。

关键生态恢复点。基于生态系统服务簇识别出的关键生态恢复点集中分布在天峻县、兴海—玛多—曲麻莱县一带。4 个县的崇山峻岭中都蕴藏丰富的煤炭、石棉、硫磺、云母等矿产资源,铜、铅、锌、锡、金、银、汞等超 20 种金属资源及天然碱、岩盐和食盐矿,因此,将 4 个县作为生态修复的关键点。在确保生态环境良好的前提下,适度保障区内矿产资源开发和水电发展用地,引导工业集中建设,促进区域经济发展;严格划定能源和矿产资源开发区,通过总量调控、科技进步、规模开采、深度加工等手段,将矿产资源开发对环境影响降至最低;同时,需加强工矿废弃地复垦、采矿塌陷区治理和污染防治力度,改善矿区土地生态环境。

3 讨论

3.1 结果合理性检验

根据青海省水资源公报查得 2005 年、2010 年、2015 年、2020 年降水量的年径流深分别为 120.0, 100.2, 79.8, 138.5 mm, 根据季节常数反复调试, InVEST 年降水量的径流深分别为 125.1, 106.9, 80.0, 135.4 mm。2005 年、2010 年、2015 年海南、海北州土壤保持量平均值分别为 83.97, 75.13, 60.12 t/hm^2 ^[22], 与本文结果相近。青海省 2000 年、2020 年防风固沙总量分别为 $1\ 714.05 \times 10^8$, $3\ 367.49 \times 10^8$ kg ^[23], 本研究 2005 年、2020 年防风固沙总量分别为 $1\ 755.19 \times 10^8$, $3\ 315.53 \times 10^8$ kg 。不同土地利用的碳密度参数取值参考其他学者^[24]在黄河流域上游流域相关研究,青海省 2020 年碳储量平均值为 53.01 t/hm^2 , 河湟谷地 2020 年碳储量平均值为 66.49 t/hm^2 。青海省国土空间规划提出构建“两屏两区多廊”生态保护网络,主要分布在三江源、祁连山地区,在环青海湖、柴达木盆地周边^[25],验证本研究生态修复优先区识别结果的合理性。

3.2 关于研究区未来发展的建议

生态系统服务在不同尺度下权衡协同和服务簇类型出现差异,以子流域为单元,更注重水文过程的完整性和连通性,以行政区划为单元,则侧重于经济发展和人口聚集程度。栅格尺度能表示离散和连续的地理实体,且比起子流域和行政区来讲对空间上的细微动态变化更为敏感。为结合土地利用规划和生态系统服务簇,以县级区划为单元,将青海分为防风固沙功能区、生态源地保育区、农业生产储备区、城市生态脆弱区和自然生态修复区 5 种生态功能区(图 12)。



Fig. 12 Spatial distribution of ecological restoration priority areas

以青藏铁路为线推进城镇化水平,除西宁的城镇密集区外,加强格尔木市为中心的柴达木经济产业循环区的构建,加大周边盐碱地、荒漠地和裸地的开发力度,创建高质量城镇经济群。以长江、澜沧江为轴,向西南持续推进草原湿地的保育力度,遏制柴达木盆地荒漠化和改善生态环境质量。黄河沿岸作为生态源地,在保证山清水秀,水质清洁的基础上,发挥特有的自然景观和人文生态优势,适度发展立足于文化古道、国家公园、世界遗产地的生态旅游和生态畜牧型产业。保障对河湟谷地和柴达木盆地绿洲地区的耕地安全,已有研究^[26]表明,2000—2015 年,全国范围的大量耕地开垦活动使水源涵养、土壤保持、防风固沙、固碳效益和物种栖息地分别减少 63.4%,10.2%,52.5%,29.0%,113.8%。在坚守耕地保护红线和人均粮食需求条件下,减少耕地开垦,通过提高耕作管理方式和培优育种来提高粮食产量。在推进城镇化发展过程中,也需辅以必要的生态保护和修复措施,明确城市生态恢复点优先次序对最大程度提高生态系统服务价值,尽量降低城市化后果提供思路。

4 结论

(1)青海省土地利用发展分为 2 个时期,2005—2010 年为各类用地有序扩张,统筹发展阶段;2011—2020 年为优化土地利用结构,和谐发展阶段。草地、未利用地数量变化最剧烈,重心均向西北方向偏移,

而建设用地重心则向西偏移。

(2)产水量受气候因素影响不稳定,2005—2020 年,产水深度分别为 125.1,106.9,80.0,135.4 mm,水源涵养深度基本稳定为 15 mm,粮食供给能力由 1.42 t/hm² 稳步提升至 2.02 t/hm²。随生态修复工程开展,青海省防风固沙能力由 2.42 t/hm² 提升至 4.59 t/hm²。生境质量基本稳定在 0.39,青海省整体植被覆盖度由 2005 年的 0.425 提升至 0.447 后回落至 0.364,土壤保持能力经历 85.9,89.0,65.3 t/hm² 的变化。

(3)以 100 m×100 m 的栅格尺度将青海省 7 项生态系统服务进行自组织网络分析,划分为生态宜居和谐簇、水土耦合协调簇、生态源地保育簇、自然生态修复簇、防风固沙功能簇 5 类特征迥异的服务簇。2005—2020 年,自然生态修复簇面积减少 674.2 万 hm²,防风固沙功能簇面积增加 745.7 万 hm²,生态宜居簇面积增加 61.85 万 hm²。

(4)基于双变量自相关识别生态恢复优先点结果可知,青海省主要为关键生态恢复点和自然生态恢复点,面积分别占 5.26%,2.55%。其中,关键生态恢复点和生态宜居簇增加区域在空间上分布基本吻合。青海省生态修复优先区集中在生态环境脆弱的西北荒漠地区、高海拔山区、水源地和河流沿岸及人类活动较频繁的河湟谷地和天峻县、兴海—玛多—曲麻莱县一带。

参考文献:

- [1] 燕守广,李辉,李海东,等.基于土地利用与景观格局的生态保护红线生态系统健康评价方法:以南京市为例[J].自然资源学报,2020,35(5):1109-1118.
YAN S G, LI H, LI H D, et al. Ecosystem health assessment method of eco-redline based on land use and landscape pattern in Nanjing[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(5): 1109-1118.
- [2] 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 W L, ZHANG A L, LIU M B. 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.
- [3] 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 G D, ZHANG C X, ZHANG L M, 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.
- [4] PIYATHILAKE I D U H, UDAYAKUMARA E P N, RANAWEERA L V, et al. Modeling predictive assessment of carbon storage using InVEST model in Uva province, Sri Lanka[J]. Modeling Earth Systems and Environment, 2022, 8(2): 2213-2223.
- [5] RAUDSEPP-HEARNE C, PETERSON G D, BENNETT E M. Ecosystem service bundles for analyzing tradeoffs in diverse landscapes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(11): 5242-5247.
- [6] HONG Y Y, DING Q, ZHOU T, et al. Ecosystem service bundle index construction, spatiotemporal dynamic display, and driving force analysis[J]. Ecosystem Health and Sustainability, 2020, 6(1): e15.
- [7] QUINTAS-SORIANO C, GARCÍA-LLORENTE M, NORSTRÖM A, et al. Integrating supply and demand in ecosystem service bundles characterization across Mediterranean transformed landscapes[J]. Landscape Ecology, 2019, 34(7): 1619-1633.
- [8] DITTRICH A, SEPPELT R, VÁCLAVÍK T, et al. Integrating ecosystem service bundles and socioenvironmental conditions: A national scale analysis from Germany[J]. Ecosystem Services, 2017, 28: 273-282.
- [9] 祁宁,赵君,杨延征,等.基于服务簇的东北地区生态系统服务权衡与协同[J].生态学报, 2020, 40(9): 2827-2837.
QI N, ZHAO J, YANG Y Z, et al. Quantifying ecosystem service trade-offs and synergies in Northeast China based on ecosystem service bundles[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(9): 2827-2837.
- [10] 张碧天,闵庆文,焦雯珺,等.生态系统服务权衡研究进展[J].生态学报, 2021, 41(14): 5517-5532.
ZHANG B T, MIN Q W, JIAO W J, et al. Research progress and perspective on ecosystem services trade-offs[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(14): 5517-5532.
- [11] LAPOINTE M, GURNEY G G, CUMMING G S. Urbanization affects how people perceive and benefit from ecosystem service bundles in coastal communities of the Global South[J]. Ecosystems and People, 2021, 17(1): 57-68.
- [12] PUTWAIN P D, CAIRNS J. The recovery process in damaged ecosystems[J]. The Journal of Ecology, 1981, 69(3): e1062.
- [13] 李恒凯,李淑芳,郑春燕,等.基于生态系统服务功能的东江流域关键性生态空间识别[J].农业工程学报, 2022, 38(3): 257-266, 323.
LI H K, LI S F, ZHENG C Y, et al. Identification of the critical ecological spaces in the Dongjiang River Basin based on ecosystem service function[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(3): 257-266, 323.
- [14] 窦寒梅,赵锐锋,陈喜东,等.西北干旱区国土空间生态修复优先区识别:以黑河流域张掖市为例[J/OL].应用生态学报, 1-12 [2024-03-05]. <https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202402.025>.
DOU H M, ZHAO R F, CHEN X D, et al. Identification of priority areas for territorial space ecological restoration in arid area of Northwest China: A case study of Zhangye City in Heihe River basin[J/OL]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1-12 [2024-03-05]. <https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202402.025>.
- [15] 向爱盟,岳启发,赵筱青,等.国土空间生态修复关键区识别及修复分区:以西南喀斯特山区开远市为例[J].中国环境科学, 2023, 43(12): 6571-6582.
XIANG A M, YUE Q F, ZHAO X Q, et al. Identification and restoration zoning of key areas for ecological restoration of territorial space in southwestern Karst

- mountainous areas: A case study of Kaiyuan City in karst mountainous area of Southwest China[J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(12): 6571-6582.
- [16] STRASSBURG B B N, IRIBARREM A, BEYER H L, et al. Global priority areas for ecosystem restoration[J]. *Nature*, 2020, 586: 724-729.
- [17] SAIDI N, SPRAY C. Ecosystem services bundles: Challenges and opportunities for implementation and further research[J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(11): e113001.
- [18] LIU Z H, HUANG Q D, ZHOU Y, et al. Spatial identification of restored priority areas based on ecosystem service bundles and urbanization effects in a megalopolis area[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 308: e114627.
- [19] FAN Y P, FANG C L. Evolution process and obstacle factors of ecological security in Western China, a case study of Qinghai province [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 117: e106659.
- [20] ANSELIN L, REY S J. Modern spatial econometrics in practice: A guide to GeoDa, GeoDa Space and PySAL [M]. Chicago, IL: GeoDa Press LLC, 2014.
- [21] 郭珊珊. 黄河流域生态系统健康与城镇化耦合协调研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2022.
- GUO S S. Research on the coupling and coordination of ecosystem health and urbanization in the Yellow River Basin[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2022.
- [22] 范晓敏. 青海海南、海北州生态系统服务时空格局、权衡与协同关系研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2023.
- FAN Y M. The spatial-temporal patterns, trade-offs and synergies of ecosystem services in Hainan and Haibei, Qinghai province[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2023.
- [23] 赖锋, 乔占明, 熊增连. 青海省风蚀量及防风固沙量时空特征分析[J]. *测绘科学*, 2023, 48(1): 148-156.
- LAI F, QIAO Z M, XIONG Z L. Spatiotemporal characteristics of wind erosion and wind prevention and sand fixation in Qinghai province[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2023, 48(1): 148-156.
- [24] 范昕. 黄河上游生态脆弱区土地利用/覆被变化及生态系统服务权衡与协同研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2022.
- FAN X. Land use/cover change and the tradeoff and synergy of ecosystem services in ecologically fragile regions of upper Yellow River: A case study in Hehuang Valley[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2022.
- [25] 赵万梅. 关于优化全省国土空间开发保护格局的研究[J]. *青海国土经略*, 2020(6): 18-22.
- ZHAO W M. Research on optimizing the spatial development and protection pattern of the province's land[J]. *Management and Strategy of Qinghai Land and Resources*, 2020(6): 18-22.
- [26] KONG L Q, WU T, XIAO Y, et al. Natural capital investments in China undermined by reclamation for cropland[J]. *Nature Ecology and Evolution*, 2023, 7: 1771-1777.