

典型干旱区山地-绿洲-荒漠生态系统 服务价值的时空演变

——以玛纳斯河流域为例

付帅¹, 徐炳先^{2,3}, 冯英香¹, 余杰¹, 杨志力¹

(1.江西财经大学公共管理学院, 江西南昌 330013;

2.中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 3.中国科学院大学研究生院, 北京 100101)

摘要: [目的] 分析玛纳斯河流域2000—2023年山地-绿洲-荒漠生态系统服务价值(ESV)的时空演变特征以及不同地貌间的差异, 为促进流域土地利用规划优化和生态保护、地区分区管理与发展提供科学依据。[方法] 基于2000—2023年遥感数据, 提取土地利用变化信息。采用当量因子法评估流域生态系统服务价值, 并结合相关性分析, 探讨ESV时空演变特征及其与土地利用变化的关系。[结果] ①土地利用变化态势为耕地扩张(净增3 267.19 km², 总转入3 621.11 km²)和草地缩减(转出3 493.61 km²)。绿洲区以耕地扩张为主, 山地呈现自然生态用地退化特征。②流域ESV总体呈下降趋势, 23 a间累计减少2.74×10¹⁰元; 2005—2010年显著下降, 降幅为33.90%。③生态系统服务类型中, 水文调节服务价值减少最多(1.93×10¹⁰元), 而食物生产、原材料供给和维持养分循环服务价值有所增加。④空间分布上, ESV高值区集中在南部山地冰川区和玛纳斯湖区, 荒漠区为低值区; 3个地貌区的ESV表现为: 绿洲区>山区>荒漠区。[结论] 农业扩张驱动下的土地利用转型加剧了玛纳斯河流域的生态服务功能退化。建议建立地貌分区调控机制, 重点协调绿洲区食物生产与其他生态功能间的矛盾, 保证稀缺水资源的合理分配与高效利用, 促进干旱区生态系统服务的有序管理及生态与经济的协同发展。

关键词: 土地利用变化; 生态系统服务价值; 时空演变; 复合地貌系统; 玛纳斯河流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)02-0132-14

中图分类号: X171.1, X321

文献参数: 付帅, 徐炳先, 冯英香, 等. 典型干旱区山地-绿洲-荒漠生态系统服务价值的时空演变[J]. 水土保持通报, 2026, 46(2): 132-145. Fu Shuai, Xu Bingxian, Feng Yingxiang, et al. Spatiotemporal evolution of ecosystem service value in mountain-oasis-desert system of typical arid regions [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(2): 132-145.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.02.006

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.02.006

Spatiotemporal evolution of ecosystem service value in mountain-oasis-desert system of typical arid regions

—A case study at Manas River basin

Fu Shuai¹, Xu Bingxian^{2,3}, Feng Yingxiang¹, Yu Jie¹, Yang Zhili¹

(1.School of Public Administration, Jiangxi University of Finance and Economics,

Nanchang, Jiangxi 330013, China; 2.Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3.Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal evolution characteristics of mountain-oasis-desert ecosystem service value (ESV) in the Manas River basin from 2000 to 2023, as well as the differences across various landforms were analyzed in order to provide a scientific basis for optimizing land use planning and ecological protection in the

收稿日期: 2025-07-07

修回日期: 2025-11-09

采用日期: 2025-11-09

资助项目: 国家自然科学基金项目“典型干旱区绿洲人工防护林网景观格局适宜发展及生态用水合理调配研究”(42361003); 新疆干旱区水循环与水利利用实验室开放课题“典型干旱区绿洲防护林耗水尺度效应及生态用水调配研究”(XJYS0907-2023-22); 江西省教育厅科技项目(GJJ190269); 江西财经大学学科创新团队项目“大宗商品国际价格分析与预测研究”

第一作者: 付帅(1984—), 男(汉族), 江西省樟树市人, 博士, 副教授, 主要从事生态评价、生态修复和生态水文方面研究。Email: fushuai1019@126.com。

通信作者: 徐炳先(2001—), 男(汉族), 江西省景德镇市人, 博士研究生, 研究方向为土地资源管理、生态学。Email: 2681839133@qq.com。

river basin, and for formulating regional zoning management and development strategies. [Methods] Land use change information was extracted from remote sensing data spanning from 2000 to 2023. The equivalent factor method was used to assess the ESV across the river basin. Subsequently, correlation analysis was conducted to examine the spatiotemporal evolution characteristics of ESV and its relationships with land use changes. [Results] ① Land use dynamics were characterized by significant cropland expansion (net increase of 3 267.19 km², total transfer-in of 3 621.11 km²) and grassland contraction (net loss of 3 493.61 km²). Cropland expansion was predominant in the oasis zone, while the mountainous zone exhibited degradation of natural ecological land. ② The total ESV of the river basin exhibited an overall downward trend, with a cumulative loss of 2.74×10^{10} yuan over 23 years. A particularly sharp decline (33.90%) was observed from 2005 to 2010. ③ Among ESs categories, hydrological regulation value experienced the greatest reduction (1.93×10^{10} yuan), while the values of food production, raw material supply, and nutrient cycling increased. ④ Spatially, high-ESV zones were concentrated in the southern mountainous glacier region and the Manas Lake region, while desert zones were identified as low-ESV zones. The ESV across the three geomorphic zones ranked as follows: oasis zone > mountainous zone > desert zone. [Conclusion] Agricultural expansion-driven land use transition is identified as the primary factor exacerbating the degradation of ecosystem service functions in the Manas River basin. It is recommended to establish geomorphology-based zonal regulation mechanisms. Emphasis should be placed on mitigating the trade-off between food production and other ecological functions in the oasis zone, ensuring the rational allocation and efficient utilization of scarce water resources, and promoting the orderly management of ecosystem services and the coordinated development of ecology and economy in this arid region.

Keywords: land use change; ecosystem service value; spatiotemporal evolution; composite geomorphic system; Manas River basin

人类从生态系统直接或间接获得的各种惠益及福祉称为生态系统服务,按类型主要分为供给服务、调节服务、支持服务和文化服务^[1]。作为人地交互的核心介质,土地格局演变过程直观反映人类活动对环境的干预强度^[2],其利用方式与开发强度的改变将驱动生态系统结构-过程-功能的连锁响应^[3]。自全球工业化与城市化进程显著加速以来,因满足人类特定的生活与发展需求,生态系统遭受了显著的压力^[4]。大量研究表明,众多区域的生态服务能力明显减弱,甚至出现退化现象,由此引发的环境问题如资源短缺、土地荒漠化、栖息地质量下降等日益凸显,对区域生态安全及可持续发展构成严重挑战^[5]。2005年《千年生态系统评估》报告指出,全球约60%的生态系统服务功能正面临退化或已退化^[6],这种状况严重影响了人与自然的和谐发展,特别是在中国西北干旱区。因此,基于区域土地利用格局与类型的特征,探明其生态系统服务价值的时空演变特征和分异规律,对于制定科学的管理政策和生态保护规划具有重要的指导意义^[7]。

1977年,Westman^[8]首次以经济价值量化生态系统服务的演变趋势,提出了生态系统服务价值(ESV),同年Daily^[9]将其细致划分为产品供给、再生利用、稳定过程、娱乐生活和选择价值五大类11项。Costanza等^[10]在此基础上提出了评估生态价值的当

量因子并首次估算出全球生态价值总量。欧阳志云等^[11]在Daily研究的基础上,对生态系统服务的功能内涵进行了扩展,将其定义为生态系统功能与过程所形成的维持人类生存的自然环境条件与效应,并在国内率先开展了陆地生态系统服务及其生态经济价值的相关研究。与此同时,谢高地等^[12]针对Costanza提出的当量因子在本土化应用中的局限性问题,通过实地调研与专家论证,构建了一套适用于中国国情的陆地生态系统服务价值当量因子体系,该成果在国内不同尺度的ESV价值评估中得到了广泛应用。目前有关生态系统服务价值以定量分析为主,常见方法包括各类生态模型如InVEST模型、RUSLE模型、SWAT模型和CASA模型等^[13]。如汪晓珍等^[14]基于CASA, InVEST和RUSLE模型对黄土高原地区3项关键生态系统服务进行分析,发现净初级生产力(NPP)、产水量和土壤保持长期保持增长趋势且不同气候区差异显著;陈相标等^[15]利用当量因子法对石林喀斯特岩溶区ESV进行量化,结果表明区域ESV缓慢增长,空间分布格局较为稳定。在研究对象上,涵盖了耕地、草地、林地、水域等^[16-17]多种土地类型。研究尺度上,包括行政区、流域、城市群等区域^[18-19]。综上所述,目前对于ESV的定量评估体系较为成熟,相关研究成果显著,但鲜有研究综合区域地貌特点对ESV进行详细评估,并且针对

具有明显生态脆弱性的干旱区绿洲生态系统服务价值的研究亟待加强。

玛纳斯河流域地处中国西北干旱区生态敏感地带,呈现典型的“山地-绿洲-荒漠”系统(mountain-oasis-desert system, MODS)特征。该流域位于天山北坡经济带的核心区域,是中国规模最大的人工绿洲区和重要的灌溉农业区^[20]。玛纳斯河流域的水资源不仅支撑了新疆天山北坡经济带的经济社会发展,也对周边县(市)的经济繁荣起到了推动作用。但以水资源为核心的绿洲发展模式导致其生态系统较为脆弱,受人为干扰程度较大。近年来农业开发的加剧以及城市化进程的加快使得流域内生态用地大量转化为生产生活用地,整个流域的水资源已经处于超负荷运行状态,社会经济与生态环境矛盾的日益突出^[21],严重阻碍了该地区的经济发展与生态文明建设。目前,已有学者对玛纳斯河流域生态系统服务功能等开展了相关研究,但从长时间连续序列的角度对流域内多种生态系统服务价值的研究较少,且鲜有结合该地区复合地貌系统对其ESV时空分异规律的研究^[22]。因此,本文以玛纳斯河流域2000—2023年遥感影像解译得到的土地利用数据为基础,运用当量因子法对流域ESV进行测算,分析其时空演变特征以及不同地貌间的差异,为流域土地利用规划优化、生态保护、地区分区管理等提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

玛纳斯河流域(43°50′—45°58′N,84°42′—86°33′E)位于新疆天山北坡、古尔班通古特沙漠南缘(图1),流域总面积约 $3.40 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。地貌类型具有明显的垂直地带性,海拔高度由南向北逐渐降低,属于典型的山地-绿洲-荒漠景观。由于地处亚欧大陆内部,远离海洋,具有气候干燥、光照充足、热量丰富、降水量小、蒸发量大等显著的温带大陆性气候特点。年均温4.7~5.7℃,年降水量110~200 mm,年蒸发量1 500~2 000 mm^[23]。

玛纳斯绿洲作为天山北坡最大的人工绿洲,近年来已经成为新疆经济发展最为迅速的地区之一。但由于玛纳斯河流域仍然属于干旱区,生态环境较为脆弱和敏感,长期以来绿洲的扩张以及经济社会发展使得流域内土地利用发生显著变化,各类生态问题如土地沙化加速,土壤盐碱化加重以及林草等天然植被发生衰亡等愈加凸显^[24]。

1.2 数据来源与处理

土地利用数据由遥感影像分类得到,数据来源

于美国地质调查局(USGS, <https://www.usgs.gov/>),总共6期影像,其中2000,2005,2010年为Landsat ETM影像,2015,2020,2023年为Landsat OLI影像,空间分辨率均为30 m,时间为6—8月份,云量小于10%。每期的研究区遥感影像由6幅原始影像进行辐射定标、大气校正和拼接后,以2000年的数据作为基准影像,对其余年份的遥感图像进行几何校正、图像增强等处理后最终裁剪得到玛纳斯河流域2000—2023年遥感影像数据。参照中国科学院公布的土地利用分类标准,根据流域的实际情况和研究需求,使用随机森林法将研究区土地利用类型分为6类,包括耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地。结合Google Earth平台高分辨率历史影像对整体分类结果进行验证,并对错分区域进行修正,最终得到研究区土地利用数据,各年份kappa系数分别为0.782,0.789,0.784,0.768,0.779,0.788,总体精度在84.21%以上,达到研究需求。



图1 玛纳斯河流域地理位置

Fig.1 Geographical location of Manas River basin

以上结果均基于ENVI 5.3和ArcGIS 10.2软件得到。DEM数据来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>),分辨率为30 m。所有数据均统一为WGS-84坐标系。其他社会经济数据和粮食产量数据来自2000—2022年的《新疆统计年鉴》《新疆生产建设兵团统计年鉴》《石河子统计年鉴》《沙湾统计年鉴》《玛纳斯统计年鉴》以及新疆维吾尔自治区经济社会发展统计数据库。

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用动态度模型

土地利用动态度模型能够展现研究区域内特定时间段不同土地利用类型的变化幅度和速度,反映

出研究区土地利用变化特征。该模型包括单一土地利用动态度和综合土地利用动态度^[25]。

单一土地利用动态度能够反映研究区某一土地利用类型在单位时间的面积变化情况,表示某种土地利用类型的年变化率,计算公式如下:

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中: K 为研究时段内某一土地利用类型动态度(%) ; U_a 和 U_b 分别为研究初期及研究末期某一种土地利用类型的面积(hm^2) ; T 为期初与期末的间隔时间,一般以年(a)为单位。

综合土地利用动态度模型可有效反映单位时间内研究区土地资源的整体变化速度,计算公式如下:

$$LC = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta LU_{i-j}}{2 \sum_{i=1}^n LU_i} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (2)$$

式中:LC为研究时段内的综合土地利用动态度(%) ; LU_i 为研究初期第*i*类土地类型的面积(hm^2) ; ΔLU_{i-j} 为研究末期第*i*类与第*j*类土地类型彼此转移的面积之和(hm^2) ; n 为土地利用类型的总量。

1.3.2 土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵是以二维矩阵的形式反映该区域一段时间内各类用地的数量转移情况^[26]。计算公式为

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: S_{ij} 为土地面积; i, j 分别为研究期初年与研究期末各土地利用类型; n 为土地利用类型数目,在本研究中为6。

1.3.3 生态系统服务价值

本研究基于Costanza^[10]所提出的ESV估算方法和谢高地等^[12]根据中国实际情况得到的中国陆地生态系统服务价值当量表,结合玛纳斯河流域内10个市(县)近23 a粮食平均单位面积产量对系数进行修订。参考已有研究,以研究区内2000—2022年平均粮食价值的1/7来确定1个生态系统服务价值当量的价值量,由此可以得到玛纳斯河流域1个标准当量因子的经济价值量为3 108.33元/ hm^2 ,得到流域单位生态系统服务价值当量表(表1)。本研究仅考虑自然生态系统服务价值,因而建设用地的ESV为零。计算公式如下:

$$E_k = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^n \frac{m_i p_i q_i}{M} \quad (4)$$

式中: E_k 为玛纳斯河流域ESV当量因子的经济量; n 为作物种类; p_i 为作物*i*的价格(元/kg) ; q_i 为作物*i*的单产(kg/hm^2) ; m_i 为作物*i*的面积(hm^2) ; M 为作物总面积。

表 1 玛纳斯河流域各用地类型单位面积ESV系数

Table 1 ESV coefficients per unit area for different land use types in Manas River basin

单位:元/ hm^2

生态系统服务功能	耕地	林地	草地	水体	未利用地	
供给服务	食物生产	2 812.08	893.25	330.83	1 455.67	33.08
	原料生产	1 323.33	1 852.66	463.17	794.00	99.25
	水资源供给	66.17	1 025.58	264.67	13 894.99	66.17
调节服务	气体调节	2 216.58	6 583.58	1 687.25	3 142.91	363.92
	气候调节	1 191.00	19 717.65	4 433.16	7 079.83	330.83
	净化环境	330.83	5 855.74	1 455.67	10 255.82	1 025.58
	水文调节	893.25	14 159.65	3 242.16	147 319.93	694.75
支持服务	保持水土	3 407.58	8 006.16	2 051.16	3 573.00	430.08
	养分循环	397.00	595.50	165.42	264.67	33.08
	生物多样性	430.08	7 311.41	1 852.66	12 108.49	397.00
文化服务	美学景观	198.50	3 209.08	827.08	7 410.66	165.42
总计	13 266.40	69 210.26	16 773.23	207 299.96	3 639.16	

玛纳斯河流域ESV计算公式如下:

$$ESV = \sum (A_k \times VC_k) \quad (5)$$

$$ESV_k = \sum (A_k \times VC_{km}) \quad (6)$$

式中:ESV为研究区生态系统服务价值总量(元) ; A_k 为第*k*类土地利用类型的面积(hm^2) ; VC_k 为第*k*类土地利用类型对应的价值系数(元/ hm^2) ; ESV_k 为第*k*

项服务功能价值(元); VC_{km} 为地类 k 的第 m 项生态服务功能价值系数(元/hm²)。

为了更深入的研究玛纳斯河流域 ESV 的时空演变特征,利用 create fishnet 功能将研究区网格化,在综合比对 1 km×1 km, 3 km×3 km, 4 km×4 km 和 5 km×5 km 网格后,考虑到本研究的精细度及可操作性,选取 4 km×4 km 网格单元对研究区域进行划分,共得到 2 262 个评价单元。

1.3.4 生态系统服务价值贡献值

土地利用转换带来的生态系统服务价值贡献值能够定量分析生态系统中不同土地利用变化导致的生态系统服务价值的变化,其计算公式如下^[27]:

$$ESV_f = \frac{(ESV_b - ESV_a) \times CA}{TA} \quad (7)$$

式中: ESV_f 表示某种土地利用类型转换的生态系统

服务价值贡献值; ESV_a 和 ESV_b 分别表示某种土地利用类型研究初期和末期的生态系统服务价值; CA 为土地利用转换面积; TA 为区域总面积。

2 结果与分析

2.1 2000—2023 玛纳斯河流域土地利用变化特征

由表 2 可知,2000—2023 年,流域内未利用地占比最大,均在 42% 以上,面积约为 1.40×10^4 km²,其次为草地(30%)和耕地(19%)。研究期内草地面积显著缩减,耕地呈稳定增长态势,林地与水域呈现先减后稳的波动变化,建设用地则从 322.92 km² 增至 554.23 km²,年均增长率为 3.2%。流域土地利用格局具有典型干旱区特征,未利用地与草地(荒漠及稀疏植被)占主导,耕地占比突出(新疆重要绿洲农耕区),林地、水域等生态用地占比较低。

表 2 2000—2023 年玛纳斯河流域各期地类面积及其占比

Table 2 Areas and its proportions of different land use types in Manas River basin (2000—2023)

土地利用类型	2000年		2005年		2010年		2015年		2020年		2023年	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
耕地	4 527.68	13.28	4 938.33	14.49	7 323.31	21.48	7 417.57	21.76	7 801.05	22.88	7 794.87	22.87
林地	1 220.29	3.58	1 195.10	3.51	500.54	1.47	500.76	1.47	458.09	1.34	458.13	1.34
草地	11 306.80	33.17	10 934.93	32.08	10 028.03	29.42	9 948.81	29.19	9 575.89	28.09	9 570.18	28.07
水域	2 241.34	6.58	2 225.46	6.53	989.19	2.90	993.52	2.91	1 101.21	3.23	1 103.57	3.24
建设用地	322.92	0.95	347.18	1.02	442.35	1.30	504.37	1.48	541.22	1.59	554.23	1.63
未利用地	14 469.04	42.45	14 446.89	42.38	14 804.89	43.43	14 723.24	43.19	14 610.86	42.86	14 607.38	42.85

从玛纳斯河流域 2000—2023 年土地利用类型的空间分布来看(图 2),其具有明显的地域分界特征,流域自南向北呈山地-绿洲-荒漠梯度分布。未利用地集中于北部荒漠及南部山地,耕地集聚于中部绿洲且持续扩张,水域集中分布于南部山区冰川及北部玛纳斯湖,建设用地沿玛纳斯河绿洲东南部

扩展。研究期间,社会经济发展驱动草地和未利用地垦殖转化,耕地与建设用地持续增长。值得注意的是,2010 年发生突变,耕地面积激增 48.24%,而林地、水域分别锐减 58.12% 和 55.56%,这与区域气候变化导致的冰川消融及农业开发强度提升密切相关。

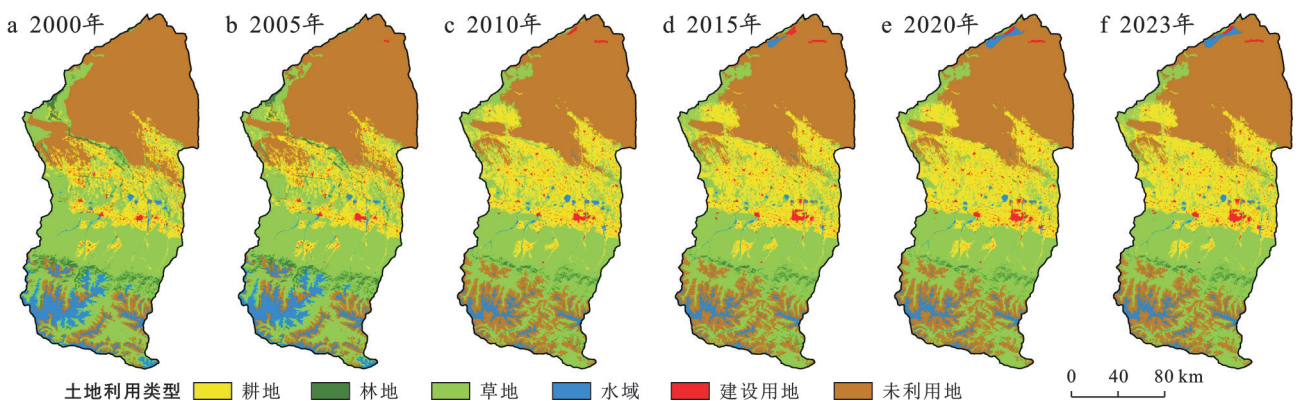


图 2 玛纳斯河流域 2000—2023 年土地利用类型空间分布

Fig.2 Spatial distribution of land use types in Manas River basin (2000—2023)

2000—2023年,玛纳斯河流域耕地和建设用地图显著增加,土地利用动态度分别为3.14%和3.11%,且各时间段的动态度基本为正值;未利用地小幅增加,总体变化不大;林地、水域和草地呈现减少趋势且林地和水域减少幅度更大,动态度达到-2.72%和-2.21%(表3)。从综合土地利用动态度来看,2005—2010年发生较大幅度的土地利用变化,综合土地利

用动态度为2.29%,远超其他时间段;耕地和建设用地大幅度增长,其动态度分别为9.66%和5.48%,为全时间段最高;林地和水域大量减少,动态度分别为-11.62%和-11.11%,同样为全时间段最高。此外,结合表1可以看出,林地及水域等地类虽然在2015年前均为减少趋势,但2015年之后减少趋势明显放缓,并且近年来呈现逐渐增加的趋势。

表3 玛纳斯河流域2000—2023年土地利用动态度
Table 3 Land use dynamics in Manas River basin (2000—2023)

项目	单一土地利用动态度					2000—2023年
	2000—2005年	2005—2010年	2010—2015年	2015—2020年	2020—2023年	
耕地	1.81	9.66	0.26	1.03	-0.03	3.14
林地	-0.41	-11.62	0.01	-1.70	0.00	-2.72
草地	-0.66	-1.66	-0.16	-0.75	-0.02	-0.67
水域	-0.14	-11.11	0.09	2.17	0.07	-2.21
建设用地	1.50	5.48	2.80	1.46	0.80	3.11
未利用地	-0.03	0.50	-0.11	-0.15	-0.01	0.04
综合土地利用动态度	0.19	2.29	0.14	0.32	0.15	0.55

注:表中0为数值保留两位小数后结果,因原始值过小所致。

由图3可知,玛纳斯河流域23 a间总转移面积8 698.63 km²,占研究区总面积的25.52%,地类更迭明显。其中,耕地转入最多,达到3 621.11 km²,其次是未利用地,为2 402.84 km²,林地转入最少,仅为176.78 km²;草地转出最多,为3 493.61 km²,其次为未利用地,为2 264.59 km²,建设用地转出最少,为127.08 km²。表4表明,耕地主要由草地和未利用地

转入,分别占总转入的59.09%和29.80%,且草地和未利用地的最大转出类型均为耕地。未利用地主要来源于草地以及水域的退化,但其转入与转出之差较小,因此23 a间变化较小。此外,对于同样呈增长趋势的建设用地而言,其主要来源为耕地和草地,二者占总转入的77.16%,但由于其本身所占流域面积较小,因而变化较小。

表4 玛纳斯河流域2000—2023年土地利用转移矩阵
Table 4 Land use transition matrix in Manas River basin (2000—2023)

单位:km²

项目	2023年						
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	
2000年	耕地	4 173.02	13.09	147.73	6.90	175.77	10.85
	林地	280.68	281.29	586.02	13.53	10.74	47.80
	草地	2 139.82	152.10	7 811.03	93.42	100.73	1 007.54
	水域	6.53	0.25	174.20	720.52	3.04	1 336.22
	建设用地	114.94	0.12	11.38	0.21	195.83	0.43
	未利用地	1 079.15	11.23	837.34	268.80	68.08	12 202.00

2.2 玛纳斯河流域生态系统服务价值时空特征

2.2.1 玛纳斯河流域生态系统服务价值时序变化特征

2000—2023年玛纳斯河流域生态系统服务价值总体呈减少趋势(表5),从2000年的851.46亿元减少到2023年的577.57亿元,下降32.15%,其中2005—2010年降幅为33.90%,呈现急剧下降特征。除耕地与未利用地外,其他地类ESV均呈现明显的下降

趋势,其中水域减少最为严重,从2000年的464.63亿元缩减至2023年的228.77亿元,减少了50.76%;耕地ESV显著上升,从2000年的60.07亿元增加到2023年的103.41亿元,增加了72.15%;未利用地ESV呈波动变化,总量相对稳定。

从ESV所占比例大小来看,水域最大,其次为草地,二者虽然均逐渐减少但占比仍然较大;耕地在早期占比较小,仅有7.05%,但逐年稳定增长,近年稳

定在 17.90% 左右;林地与未利用地变化相反,林地的 ESV 占比从 2000 年的 9.92% 减少到 2023 年的

5.49%,而未利用地从 2000 年的 6.18% 逐渐增长到 2023 年的 9.20%。

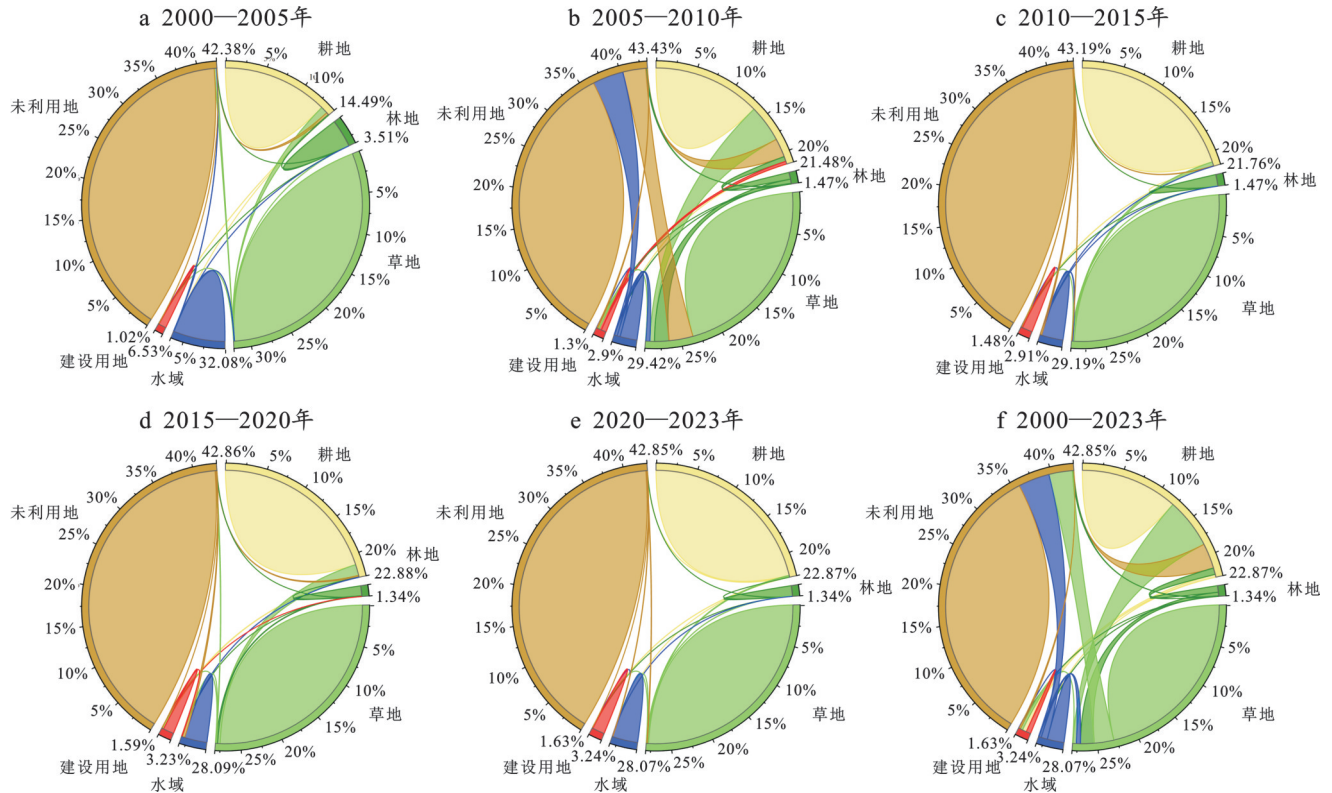


图 3 玛纳斯河流域 2000—2023 年土地利用转移弦图

Fig.3 Chord diagrams of land use transition in Manas River basin (2000—2023)

表 5 玛纳斯河流域 2000—2023 年各用地类型生态系统服务价值

Table 5 Ecosystem service values of land use types in Manas River basin (2000—2023)

土地类型	生态系统服务价值/10 ⁸ 元						生态系统服务价值占比/%					
	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年	2023年	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年	2023年
耕地	60.07	65.51	97.15	98.40	103.49	103.41	7.05	7.75	17.38	17.59	17.93	17.90
林地	84.46	82.71	34.64	34.66	31.70	31.71	9.92	9.78	6.20	6.19	5.49	5.49
草地	189.65	183.41	168.20	166.87	160.62	160.52	22.27	21.69	30.09	29.83	27.82	27.79
水域	464.63	461.34	205.06	205.96	228.28	228.77	54.57	54.56	36.69	36.81	39.55	39.61
未利用地	52.66	52.57	53.88	53.58	53.17	53.16	6.18	6.22	9.64	9.58	9.21	9.20
总计	851.46	845.55	558.94	559.47	577.27	577.57	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

从服务类型看,流域内食物生产和原材料供给服务明显增加,其余服务(除维持养分循环外)均为下降趋势(图 4)。

2005 年以前,水文调节服务价值占比最大,均在 46% 以上,其次为气候调节服务,占比约 11%;净化环境、土壤保持以及生物多样性服务价值均较大,占比均在 5% 左右。2005—2010 年,供给服务中的水资源供给服务、所有调节服务、支持服务中的土壤保持和生物多样性服务以及文化服务均明显减少,其中水文调节服务价值减少最多,为 192.53 亿元;水资源供给服务降幅最大,达到 49.41%;对于其他呈增长趋

势的服务类型而言,食物生产服务增长最多,为 4.00 亿元,涨幅为 17.94%。2010 年之后,各生态系统服务类型价值趋于稳定,且在 2005—2015 年出现明显减少的服务类型价值逐渐表现为增长趋势,食物生产和原材料供给服务价值也逐渐稳定,这也是研究区总 ESV 在 2010—2023 年缓慢增长的主要原因。此外,维持养分循环服务价值最小,占比在 1.00% 左右,且 23 a 间无明显变化,较为稳定。

2.2.2 玛纳斯河流域生态系统服务价值空间分布特征

根据流域整体 ESV,利用自然断点法将其划分

为低值区(0~0.15 亿元)、较低值区(0.15~0.40 亿元)、中值区(0.40~0.86 亿元)、较高值区(0.86~1.61 亿元)以及高值区(1.61~3.35 亿元)5 个等级。图 5 表明,流域内 ESV 空间分异较为明显,较低值区占比最大,均在 48% 以上,且在研究区分布最为广泛,主要集中在区域中部和南部部分地区;较高值区占比最小,均在 2% 左右,主要集中在高值区附近,作为高值区向中值区过渡的缓冲带;低值区分布较为集中,主要在区域北部,少部分零星散布在南部山区,与荒漠以及山区裸地等显著相关;中值区具有明显的带状分布特征,主要集中在区域中南部绿洲与山地的交会地带,少部分聚集在较高值区附近;高值区占比较少,在 2010 年达到最低值,仅为 1.37%,主要集中在区域西南部的高海拔地区和北部玛纳斯湖区,极少一部分零散分布在区域中部,主要与水库和河流有关。从年际间对比来看,中值区逐渐减少且缓慢与南部高值区和较高值区分离,向流域中部转移,尤其是在 2005—2010 年中值区的空间分布发生显著变

化,从条带状和块状变为向中部延伸的状态;高值区表现为先减少而后趋于稳定,减少的部分集中在南部冰川区,2005—2010 年减少最为显著。此外,在 2010 年之后,流域北部绿洲区域也逐渐出现部分高值区,主要与玛纳斯湖以及水库建设完善有关。

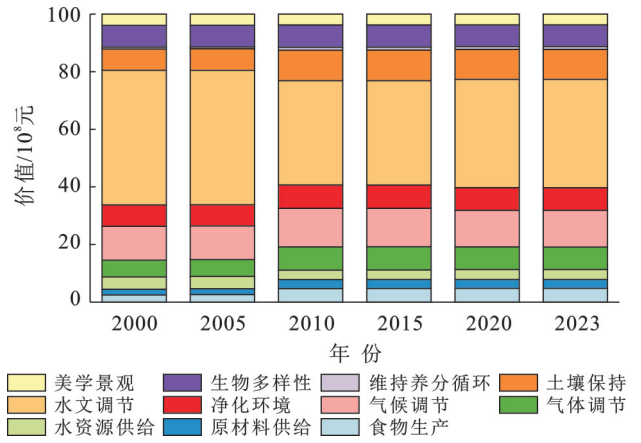


图 4 玛纳斯河流域 2000—2023 年各生态系统服务类型价值
Fig.4 Values of different ecosystem service types in Manas River basin (2000—2023)

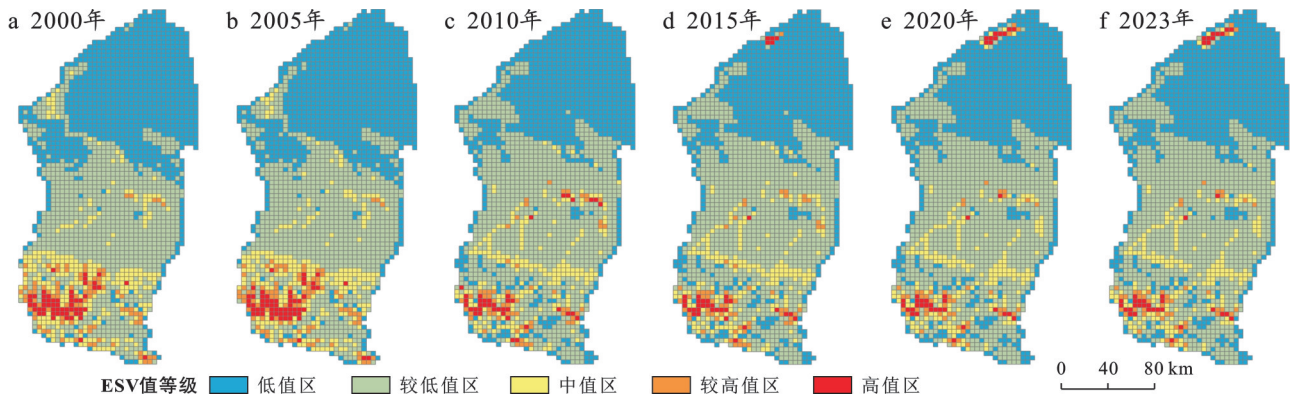


图 5 玛纳斯河流域 2000—2023 年 ESV 空间分布
Fig.5 Spatial distribution of ESV in Manas River basin (2000—2023)

玛纳斯河流域 2000—2023 年生态系统服务空间格局演变特征表明(图 6),供给服务呈现差异化发展。食物生产与原材料供给价值量持续增长,其空间分布高度依赖绿洲系统,高值区集中分布于绿洲核心区及绿洲-山地过渡带,仅少量中值区延伸至南部山地。水资源供给服务则呈现先降后稳趋势,初期低值区占主导地位,后期因绿洲水库建设及玛纳斯湖影响,中北部区域逐渐出现次高值区,但主要高值区仍集中于南部冰川区。调节服务中,气体与气候调节服务高值区呈带状分布于绿洲-山地过渡带及西北部,年际间高值区面积缩减明显。净化环境服务在南部冰川与绿洲水域形成稳定高值区,而水文调节服务则以全域低值为主,两者高值区占比均经历先降后稳过程。支持服务方面,土壤保持与养分

循环服务空间分布高度趋同,绿洲及过渡带高值区持续扩张,山地较高值区逐步缩减。生物多样性服务呈现显著梯度特征,低值区集中在北部荒漠地带,服务价值随海拔升高递增,其年际变化与调节服务相似。文化服务中美学景观服务空间分异特征与生物多样性服务类似,低值区集中分布于北部,高值区沿绿洲-山地梯度递增,时间维度上同样呈现先降后稳的演变规律。各类服务空间异质性表明,绿洲系统对流域生态系统服务供给具有核心支撑作用。

2.2.3 玛纳斯河流域生态系统服务价值对土地利用变化的响应

玛纳斯河流域土地利用类型对 ESV 的贡献分析表明(图 7),23 a 间水域累计贡献 -7.87 亿元,为最大负向驱动因子,耕地以 4.15 亿元构成核心正向贡献

源,未利用地贡献度最低(0.002亿元)。时段分异特征显示,2000—2005年耕地(正向)与草地(负向)贡献占主导地位,反映出草地开垦导致面积缩减与耕地扩张;2005—2010年出现显著转折,水域贡献值达-9.29亿元,为最大负向贡献值,同期耕地正向贡献下降至2.21亿元;2010—2015年耕地、草地的正负贡献格局重现;2015—2020年呈现耕地、草地、水域三

元均衡贡献态势,其中水域首次转为正向贡献;2020—2023年各类型贡献均趋微弱。研究期内土地利用变化强度呈现显著波动,2005—2010年贡献值总量达峰值,尤以水域面积剧减为主导驱动因子,而后贡献值量级明显减小,表明土地利用格局逐渐趋于稳定。总的来看,耕地扩张与水域萎缩构成了流域ESV变化的核心矛盾。

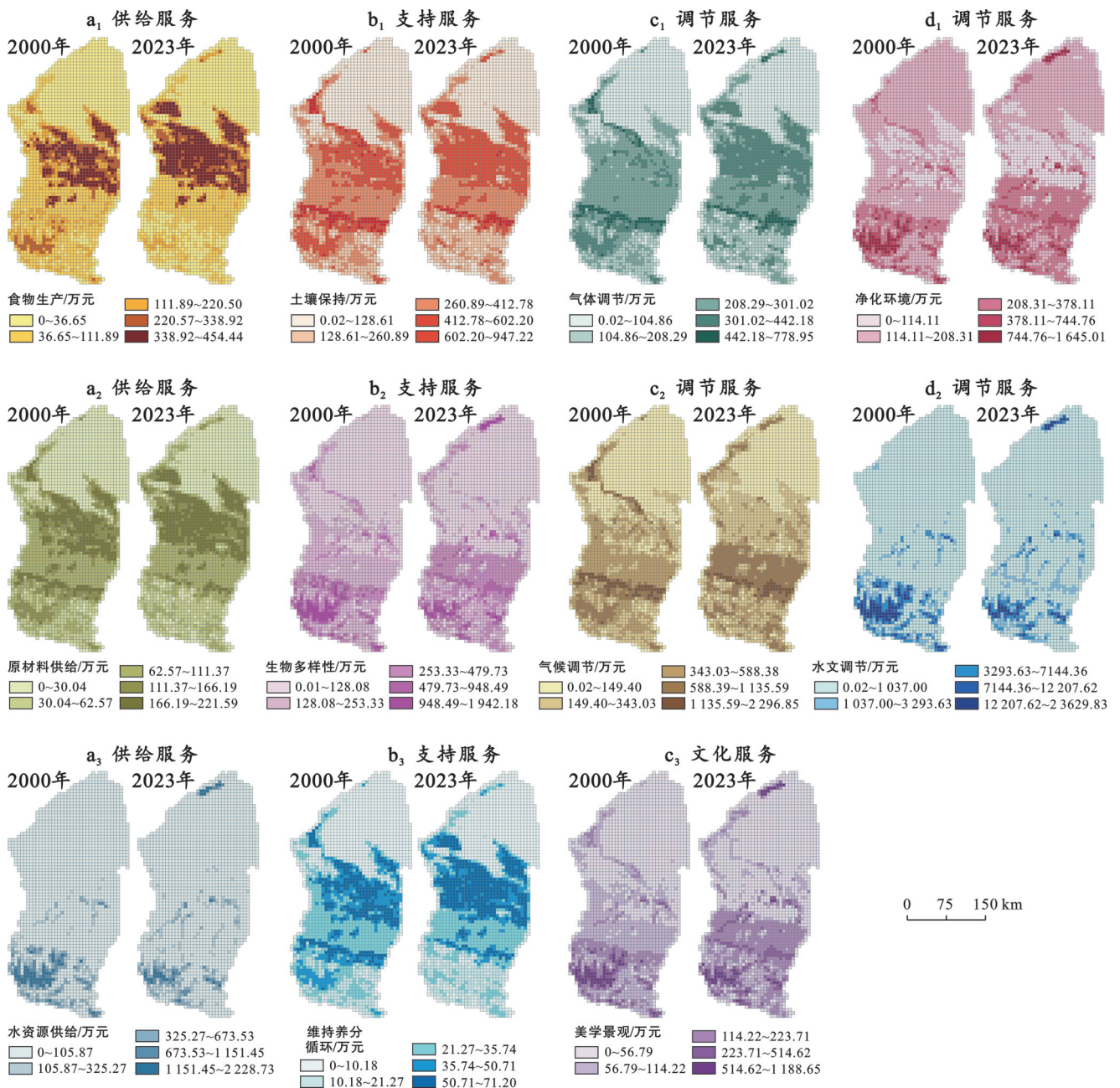


图 6 玛纳斯河流域 2000—2023 年生态系统服务空间分布

Fig.6 Spatial distribution of ecosystem services in Manas River basin (2000—2023)

2.2.4 玛纳斯河流域山地-绿洲-荒漠不同地貌区生态系统服务价值差异

玛纳斯河流域不同地貌单元ESV演变特征(图8)表明,2000—2023年全域ESV呈总体衰减趋势,但存

在显著空间异质性。荒漠区83.21%以上区域呈现ESV负增长,降幅峰值集中于西南边缘地带,2010年后北部玛纳斯湖周边出现局部改善区域且持续增加。绿洲区68.74%的区域发生ESV损失,核心衰减

区位于中部绿洲及北缘绿洲-荒漠过渡带,其中2005—2010年达到最大值后衰减强度趋缓。山地除2005—2010年冰川区出现89.53%面积衰减(峰值达-2.96亿元)外,其余时段以正值为主。至2023年,各单元ESV表现为绿洲区(258.34亿元) $>$ 山地(246.47亿元) $>$ 荒漠区(72.66亿元)。同时,绿洲区单位面积ESV产出效率显著低于山地,虽然其面积

超山地6750.27 km²,但ESV总量仅多11.87亿元,表明单纯绿洲扩张对全域ESV提升的边际效益趋弱。综合来看,耕地扩张与林地、草地面积减小及冰川萎缩共同导致2005—2010年出现大范围ESV缩减。尽管2010年后缩减强度减弱且局部修复区增加,但建设用地扩张与荒漠化加剧仍构成重大生态风险。

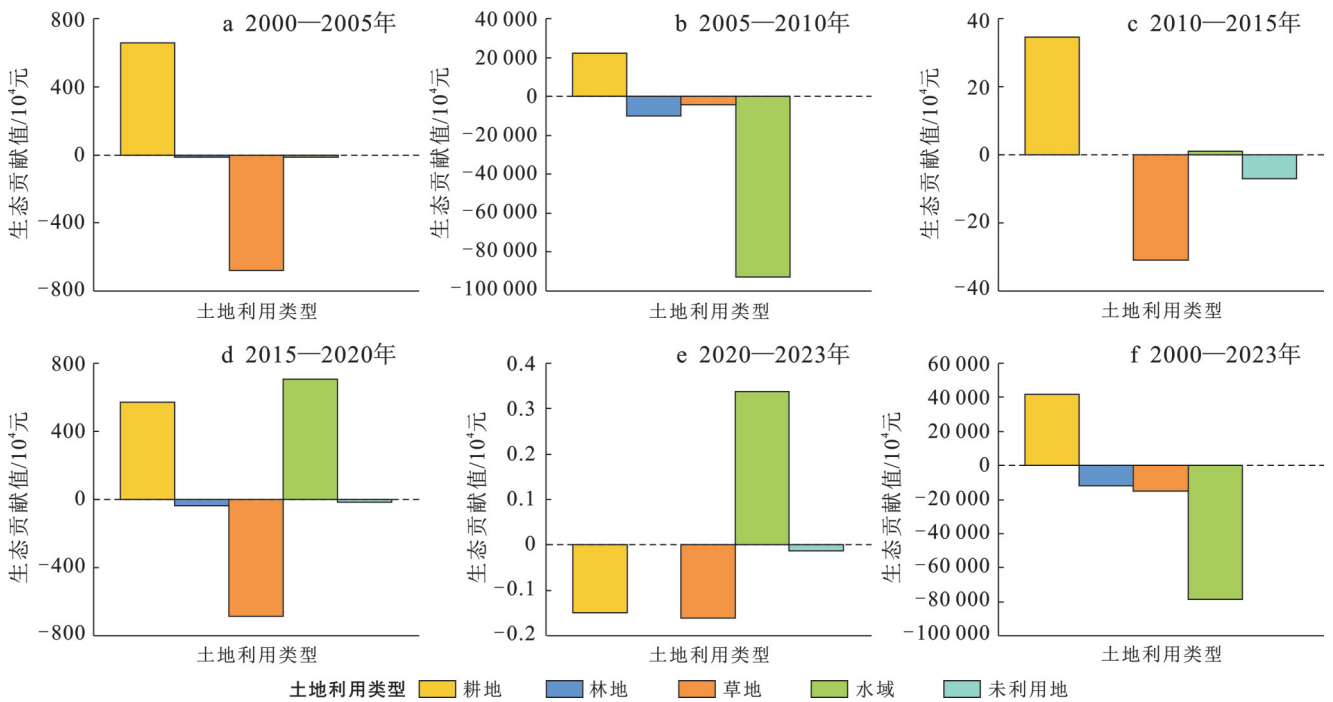


图7 玛纳斯河流域2000—2023年各地类生态贡献值

Fig.7 Ecological contribution values of different land use types in Manas River basin (2000—2023)

3 讨论

3.1 典型干旱区ESV对土地利用结构与方式的响应

干旱区生态系统服务价值(ESV)的时空演变与土地利用结构及方式的动态变化密切相关。本研究表明,研究区ESV的波动性增长主要受绿洲耕地扩张与山地冰川萎缩的双向驱动,后者导致研究区23 a来ESV呈显著下降趋势,尤其是2005—2010年,这一点在地类对ESV变化的贡献中得到印证。并且,由于水域在该地区占主导地位,耕地增多带来的ESV增长并不能填补这一减少,其对流域ESV的正向贡献值(4.15亿元)低于水域的负向贡献(-7.87亿元),因此,水域对总ESV起主要贡献作用。需要说明的是,本研究中各地类的ESV系数均参考前人研究结果,因而不可避免地存在一定主观性与偏差,可能导致水域、耕地等对地类ESV贡献值的计算结果存在误差,后续需通过更多实地调研与试验获取更准确的参数,不断优化ESV量化方法。此外,本研究

采用的当量因子法无法反映生态系统服务的空间流动,如未量化山地向绿洲的水文服务输出,可能低估了山地系统的实际生态贡献。

草地作为面积与ESV占比均为第二的地类,对于整体ESV及生态系统的稳定不可忽视。不同服务类型中,水文调节服务占比远超其他服务,这与塔里木河流域的研究结果类似,凸显了水域对于干旱区生态功能的重要性,但前者的垂直分异更显著,ESV空间梯度差要大于塔里木河^[28]。同时,作为中国新疆重要的产粮区,其食物生产与原材料供给服务经历了较大幅度的增长,但伴随而来的是其他服务的明显减少,表明研究区对耕地的大量开发已经导致了各类自然生态功能的减弱,这种影响来源于多个方面,如化肥和农药的大量使用所导致的土壤保持服务减弱以及人类高强度的活动对区域小气候和生物多样性的干扰等^[29]。并且,与黑河流域相比,玛纳斯河流域耕地扩张对ESV的负向影响更显著,黑河流域因节水技术推广,耕地扩张导致的ESV降幅仅

为玛纳斯河流域的 60%，其主要源于后者的灌溉水利用率要低于黑河流域^[30]。相比之下，玛纳斯河流域 ESV 下降更剧烈，其深层原因在于灌溉水利用率偏低，放大了水域萎缩的负向影响；绿洲农业扩张相对无序，侵占了高价值生态用地；且流域内缺乏跨地貌生态补偿机制，导致山地水源涵养价值未能有效传递。在空间上，ESV 的分布具有明显的分异性，高值区占比小且集中在流域西南部的高海拔地区和北部玛纳斯湖区，与水域等关联较强，其随时间逐渐减少的趋势也是研究区总 ESV 锐减的重要

自然因素。而在人为驱动方面，虽然已有相关政策的实行，如《关于加强耕地保护提升耕地质量完善占补平衡的实施意见》《关于印发〈兵团耕地地力保护补贴政策实施方案〉的通知》等，但社会经济发展所带来的人口扩张和资源紧缺同样加剧了 ESV 的降低。综上所述，玛纳斯河流域 ESV 的提升需要加强水域和草地等高 ESV 地类的保护，保证其生态功能的良好发挥，同时注重农业用地的集约化利用，兼顾生态保护与经济社会发展的平衡，促进区域的可持续发展。

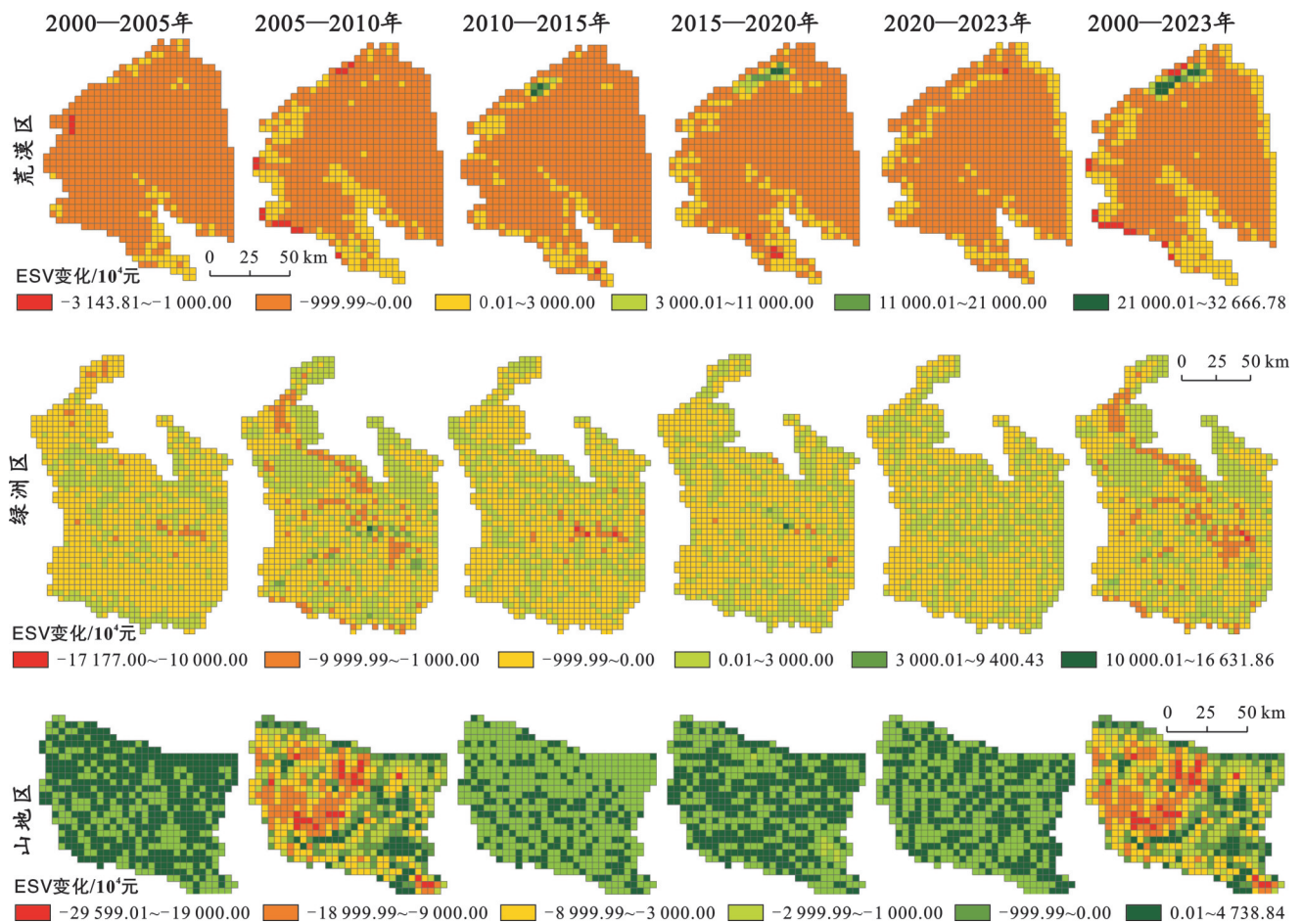


图 8 玛纳斯河流域不同地貌区 ESV 变化分布

Fig.8 Distribution of ESV changes across different geomorphic zones in Manas River basin

3.2 不同地貌区 ESV 的时空分异特征

玛纳斯河流域 ESV 时空分异受自然禀赋与人类活动双重驱动，呈现显著区域差异，南部山地作为流域水源涵养核心区，ESV 主要依赖冰川、林地和草地的水文调节与生物多样性功能。研究期内，冰川面积缩减导致水文调节服务价值大幅下降，与全球变暖背景下高海拔冰川消融趋势一致。尽管后期通过植被保护工程实现局部修复，但林地面积仍然呈现缩减态势(表 2)。中部绿洲区是人类活动最强烈的

区域，以食物生产和原材料供给服务增长为主导特征，但自然生态用地的持续破碎化也导致水文调节、净化环境等服务价值显著降低^[24]。在空间上，绿洲核心区 ESV 呈“孤岛状”分布，边缘过渡带因土地集约化程度低，ESV 衰减明显，2005—2010 年核心区衰减区面积占比 68.74%(图 8)。此外，绿洲区单位面积 ESV(331.34 元/hm²)显著低于山地(583.21 元/hm²)，反映出农业扩张的生态效益边际递减效应。同时，由于不同地貌间生态系统服务存在客观流动，因而

可能会低估其实际贡献,如山地作为水源涵养核心区,向绿洲区流动的水资源所承载的生态价值未被计入,这不仅可能低估山地的实际生态贡献,也未能充分体现“山地-绿洲”系统间“人-地-水”的耦合关联,后续需优化研究方法以完整刻画这种跨地貌区的生态服务传递过程。北部荒漠区因生态系统结构单一,ESV以低值为主,主要依赖稀疏草地的防风固沙和维持养分循环功能。2010年后,玛纳斯河流域生态补水工程促使局部水域ESV回升,但全域仍有83.21%区域呈负增长(图8)。此外,多尺度分析不同地貌区ESV的时空分异特征,能够更加充分地探讨尺度效应对各地貌区ESV评估结果的影响,例如在子流域尺度下,荒漠区与绿洲区的ESV交互作用可能更为显著,因此,后续可结合不同空间尺度开展研究,以更精准地指导不同地貌区的生态保护与治理实践。

综合来看,玛纳斯河流域的地貌分异导致ESV功能定位差异,山地是生态本底维持区,承担着干旱区水源涵养和水资源供给等重要的生态功能;绿洲是生产、生态权衡区,其承担着该地区几乎全部的生产生活功能;荒漠是脆弱生态防护区,潜在生态风险较高。这种特殊的空间异质性要求治理策略需匹配区域功能,山地应侧重冰川和林地的保护,需划定冰川生态红线。如禁止海拔3 500 m以下采矿等,建立“冰川消融-径流变化”监测系统,实时观测冰川动态;绿洲区要强化耕地集约利用与生态补偿,推行“耕地-生态用地”占补平衡等措施,全面加强节水灌溉技术等;荒漠区则推进防风固沙工程,在保护好现有荒漠植被的前提下,通过人工绿化等方式进一步提高荒漠系统的抗风险能力,防止荒漠化加剧。同时,对3个地貌区之间的过渡带进行全面管控,稳定“山地-绿洲-荒漠”这一复合系统的土地利用和生态格局,促进各子系统之间物质与能量的良性交流,减缓某一子系统对相邻系统的不良影响,实现复合系统可持续发展。

4 结论

(1) 土地利用结构显著改变。2000—2023年,玛纳斯河流域耕地扩张3 267.19 km²,草地锐减1 736.62 km²。地类转移呈现耕地和建设用地净转入、林地草地及水域净转出的特征,前者集中在绿洲区,后者主要分布于山地。

(2) ESV动态变化与空间分布关系密切,主导服务衰减驱使总量下降。流域ESV总量呈“先快速衰减后缓慢恢复”的动态演变规律,2005—2010年为关键衰减期(降幅33.90%),23 a间累计减少273.89亿元。水文调节服务在ESV中占比最大且减少最多,

各生态系统服务价值强度始终保持以水文调节、气候调节等为主的梯度特征。在空间上,ESV呈现“荒漠带低值集聚、冰川与湖泊周边高值凸显”的分布规律。

(3) 不同地类的变化对ESV影响存在差异。水域萎缩对ESV负向贡献最大,达-7.87亿元;耕地扩张正向贡献最大,为4.15亿元,二者均在2005—2010年达到贡献峰值,其余地类影响较小。

(4) 不同地貌ESV变化差异显著。3个地貌区ESV表现为:绿洲区>山地>荒漠区,研究期内均以减少为主,其中绿洲区中部(人为开发集中区)与山地冰川区(高ESV地类集中区)为ESV衰减的重点区域。

参考文献(References)

- [1] 牛丽楠,邵全琴,宁佳,等.西部地区生态状况变化及生态系统服务权衡与协同[J].地理学报,2022,77(1):182-195. Niu Linan, Shao Quanqin, Ning Jia, et al. Ecological changes and the tradeoff and synergy of ecosystem services in western China [J]. Acta Geographica Sinica, 2022,77(1):182-195.
- [2] 刘桂林,张落成,张倩.长三角地区土地利用时空变化对生态系统服务价值的影响[J].生态学报,2014,34(12):3311-3319. Liu Guilin, Zhang Luocheng, Zhang Qian. Spatial and temporal dynamics of land use and its influence on ecosystem service value in Yangtze River delta [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014,34(12):3311-3319.
- [3] 傅伯杰,张立伟.土地利用变化与生态系统服务:概念、方法与进展[J].地理科学进展,2014,33(4):441-446. Fu Bojie, Zhang Liwei. Land-use change and ecosystem services: Concepts, methods and progress [J]. Progress in Geography, 2014,33(4):441-446.
- [4] Xiao Hui, McDonald-Madden E, Sabbadin R, et al. The value of understanding feedbacks from ecosystem functions to species for managing ecosystems [J]. Nature Communications, 2019,10:3901.
- [5] Xu Xibao, Yang Guishan, Tan Yan, et al. Ecosystem services trade-offs and determinants in China's Yangtze River economic belt from 2000 to 2015 [J]. Science of the Total Environment, 2018,634:1601-1614.
- [6] Assessment M E. Ecosystems and human well-being: Synthesis [M]. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [7] 杨光宗,吕凯,李峰.基于网格尺度的南昌市土地利用变化及生态系统服务价值时空相关性分析[J].中国土地科学,2022,36(8):121-130. Yang Guangzong, Lü Kai, Li Feng. Spatial and temporal correlation analysis of land use change and ecosystem service value in Nanchang City based on grid scale [J]. China Land Science, 2022,36(8):121-130.

- [8] Westman W E. How much are nature's services worth?: Measuring the social benefits of ecosystem functioning is both controversial and illuminating [J]. *Science*, 1977, 197(4307):960-964.
- [9] Daily E B G C. Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems [M]. Washington Dc: Island Press, 1997.
- [10] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Ecological Economics*, 1998, 25(1):3-15.
- [11] 欧阳志云,王如松,赵景柱.生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J].*应用生态学报*, 1999, 10(5):635-640. Ouyang Zhiyun, Wang Rusong, Zhao Jingzhu. Ecosystem services and their economic valuation [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(5):635-640.
- [12] 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.
- [13] Tian Yichao, Wang Shijie, Bai Xiaoyong, et al. Trade-offs among ecosystem services in a typical Karst watershed, SW China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 566/567:1297-1308.
- [14] 汪晓珍,吴建召,吴晋侠,等.2000—2015年黄土高原生态系统水源涵养、土壤保持和NPP服务的时空分布与权衡/协同关系[J].*水土保持学报*, 2021, 35(4):114-121. Wang Xiaozhen, Wu Jianzhao, Wu Puxia, et al. Spatial and temporal distribution and trade-off of water conservation, soil conservation and NPP services in the ecosystems of the Loess Plateau from 2000 to 2015 [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(4):114-121.
- [15] 陈相标,丁文荣.石林喀斯特岩溶区生态系统服务时空演变及权衡协同关系[J].*水土保持研究*, 2023, 30(2):285-293. Chen Xiangbiao, Ding Wenrong. Spatial-temporal evolution and trade-off synergy relationships of ecosystem services in Karst area of Shilin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(2):285-293.
- [16] 李士美,谢高地,张彩霞,等.森林生态系统服务流量过程研究:以江西省千烟洲人工林为例[J].*资源科学*, 2010, 32(5):831-837. Li Shimei, Xie Gaodi, Zhang Caixia, et al. Flow processes of forest ecosystem services: A case study on qianyanzhou plantation, Jiangxi Province [J]. *Resources Science*, 2010, 32(5):831-837.
- [17] 周凡,周冬梅,金银丽,等.疏勒河流域生态系统服务供需空间匹配特征[J].*干旱区地理*, 2023, 46(3):471-480. Zhou Fan, Zhou Dongmei, Jin Yinli, et al. Spatial matching characteristics of supply and demand of ecosystem services in the Shule River basin [J]. *Arid Land Geography*, 2023, 46(3):471-480.
- [18] 李兆碧,陶宇,欧维新,等.基于水量与水质的太湖流域水生态服务供需关系及多情景评估[J].*生态学报*, 2023, 43(5):2088-2100. Li Zhaobi, Tao Yu, Ou Weixin, et al. Supply and demand relationship and multi-scenario assessment of water ecological services related water quantity and quality in Taihu Lake basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(5):2088-2100.
- [19] 赵祖伦,罗军华,李威,等.喀斯特山地城市群生态系统服务价值演变及影响因素[J].*水土保持研究*, 2024, 31(5):410-420. Zhao Zulun, Luo Junhua, Li Wei, et al. Evolution of ecosystem service value and influencing factors in Karst mountainous urban agglomeration [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(5):410-420.
- [20] 康紫薇,张正勇,位宏,等.基于土地利用变化的玛纳斯河流域景观生态风险评价[J].*生态学报*, 2020, 40(18):6472-6485. Kang Ziwei, Zhang Zhengyong, Wei Hong, et al. Landscape ecological risk assessment in Manas River basin based on land use change [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(18):6472-6485.
- [21] Du Yongjun, He Xinlin, Li Xiaolong, et al. Changes in landscape pattern and ecological service value as land use evolves in the Manas River basin [J]. *Open Geosciences*, 2022, 14(1):1092-1112.
- [22] 殷丽雪,徐晓龙,胡保安,等.玛纳斯河流域生态系统服务及其权衡关系的驱动因素[J].*农业资源与环境学报*, 2024, 41(5):1157-1170. Yin Lixue, Xu Xiaolong, Hu Baoan, et al. The driving factors of ecosystem services and their tradeoffs in the Manas River basin of Xinjiang, China [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2024, 41(5):1157-1170.
- [23] 何颖,马松梅,张林,等.玛纳斯河流域NPP时空变化及其生物多样性维护功能重要性评价[J].*生态学报*, 2023, 43(11):4664-4673. He Ying, Ma Songmei, Zhang Lin, et al. Spatio-temporal change of net primary productivity and the evaluation of the importance of biodiversity maintenance functions in Manas River basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(11):4664-4673.
- [24] Li Xiaolong, He Xinlin, Yang Guang, et al. Land use/cover and landscape pattern changes in Manas River

- basin based on remote sensing [J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2020, 13(5):141-152.
- [25] 陕永杰,原卫利,苗圆,等.山西省大同市2000—2019年生态系统服务价值时空变化[J].*水土保持通报*, 2021,41(6):310-317.
Shan Yongjie, Yuan Weili, Miao Yuan, et al. Spatio-temporal variation of ecosystem service value in Datong City of Shanxi Province during 2000—2019 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021,41(6):310-317.
- [26] 夏鸿华,杨林山,冯起,等.河西走廊杂木河流域水文过程对气候和土地利用变化的响应[J].*冰川冻土*, 2024, 46(3):967-979.
Xia Honghua, Yang Linshan, Feng Qi, et al. Response of hydrological processes in Zamu River basin, Hexi Corridor to climate and land use changes [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2024,46(3):967-979.
- [27] 姚礼堂,张学斌,周亮,等.“山地-绿洲-荒漠”复合系统土地利用变化的生态系统服务权衡与协同效应:以张掖市为例[J].*生态学报*, 2022,42(20):8138-8151.
Yao Litang, Zhang Xuebin, Zhou Liang, et al. Ecosystem service tradeoffs and synergies effects of land use change in mountain-oasis-desert complex system: A case study of Zhangye City [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(20):8138-8151.
- [28] 张帅,汪洋,安沙舟.典型内陆盆地生态系统服务价值对土地利用变化的响应[J].*新疆农业科学*, 2021, 58(4):766-777.
Zhang Shuai, Wang Yang, An Shazhou. Analysis on the characteristics of temporal and response of ecosystem service value of typical inland basin to land use change [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2021, 58(4):766-777.
- [29] 廖钟淇,范业婷,王君楠,等.长三角耕地生态系统服务功能时空演变及其驱动机制[J].*环境科学*, 2025, 46(6):3681-3692.
Liao Zhongqi, Fan Yeting, Wang Junxiao, et al. Spatiotemporal evolution of cultivated land ecosystem service functions in the Yangtze River delta and its driving mechanism [J]. *Environmental Science*, 2025, 46(6):3681-3692.
- [30] 杨鑫,海新权,杨玉婷.基于Meta分析的张掖黑河湿地生态系统服务价值评估[J].*生态与农村环境学报*, 2023,39(1):60-68.
Yang Xin, Hai Xinquan, Yang Yuting. Meta-analysis-based assessment of ecosystem service value of Heihe wetland in Zhangye [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2023,39(1):60-68.
- (上接第120页)
- [23] Bassett T J, Grman E, Brudvig L A. Seed sowing shifts native-exotic richness relationships in favor of natives during restoration [J]. *Ecosphere*, 2024, 15(3): e4783.
- [24] 周睿,宋梅玲,王玉琴,等.不同放牧方式下防除黄帚橐吾对高寒草地植物群落的影响[J].*草地学报*, 2022,30(7):1819-1828.
Zhou Rui, Song Meiling, Wang Yuqin, et al. Effects of *Ligularia virgaurea* control on plant community of grassland under different grazing modes [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022,30(7):1819-1828.
- [25] 原媛,母艳梅,邓钰洁,等.植被覆盖度和物候变化对典型黑沙蒿灌丛生态系统总初级生产力的影响[J].*植物生态学报*, 2022,46(2):162-175.
Yuan Yuan, Mu Yanmei, Deng Yujie, et al. Effects of land cover and phenology changes on the gross primary productivity in an *Artemisia ordosica* shrubland [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2022,46(2):162-175.
- [26] Sigcha F, Pallavicini Y, Camino M J, et al. Effects of short-term grazing exclusion on vegetation and soil in early succession of a subhumid Mediterranean reclaimed coal mine [J]. *Plant and Soil*, 2018,426(1):197-209.
- [27] Loydi A. Effects of grazing exclusion on vegetation and seed bank composition in a mesic mountain grassland in Argentina [J]. *Plant Ecology & Diversity*, 2019, 12(2):127-138.
- [28] 苏樑,杜虎,王华,等.喀斯特峰丛洼地不同植被恢复阶段优势种根系构型特征[J].*西北植物学报*, 2018, 38(1):150-157.
Su Liang, Du Hu, Wang Hua, et al. Root architecture of the dominant species in various vegetation restoration processes in karst peak-cluster depression [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2018, 38(1): 150-157.
- [29] 罗顺华,刘新宇,孟宝平,等.祁连山国家公园高寒草地功能群多样性与生产力研究[J].*草业学报*, 2025, 34(6):14-26.
Luo Shunhua, Liu Xinyu, Meng Baoping, et al. A study of functional group diversity and productivity of alpine grassland in Qilian Mountain National Park [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2025,34(6):14-26.
- [30] 周宸宇,杨晓渊,邵新庆,等.不同退化程度高寒草甸植物物种多样性与生态系统多功能性关系[J].*草地学报*, 2022,30(12):3410-3422.
Zhou Chenyu, Yang Xiaoyuan, Shao Xinqing, et al. Relationship between plant species diversity and ecosystem multifunctionality in alpine meadow with different degradation degrees [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(12):3410-3422.