

雒慧霞,李杰,李广,等.甘南黄河水源补给区生态系统服务价值时空演变[J].环境科学与技术,2024,47(9):210-224. Luo Huixia, Li Jie, Li Guang, et al. Spatiotemporal evolution of ecosystem service value in the Yellow River water recharge area in Gannan[J]. Environmental Science & Technology, 2024, 47(9):210-224.

甘南黄河水源补给区生态系统服务价值时空演变

雒慧霞¹, 李杰², 李广^{2*}, 郭继富¹

(1. 甘肃农业大学信息科学技术学院,甘肃 兰州 730070;
2. 甘肃农业大学林学院,甘肃 兰州 730070)

摘要:甘南黄河水源补给区是黄河上游重要的生态屏障,稳定的生态系统服务供给对黄河流域高质量发展至关重要。该文基于2000—2020年土地利用变化,结合植被净初级生产力(NPP)数据和社会经济因素修正当量因子,核算研究区5个时期生态系统服务价值(ESV),通过空间自相关、重心模型等方法,探究甘南黄河水源补给区2000—2020年ESV时空演变特征及空间异质性。结果表明:(1)2000—2020年甘南黄河水源补给区土地利用/覆被变化(LUCC)类型以草地、林地、耕地为主,其中草地、林地、建设用地和水域面积增加,耕地面积较大幅度的减少,以19%的变化率减少了448.57 km²。(2)2000—2020年甘南黄河水源补给区平均ESV为408.785 1×10⁸元,以调节服务为主,其中水文调节、气候调节约占总ESV的48.69%,草地和林地对ESV贡献程度最大,是生态系统服务总价值的关键土地类型;水域面积的持续增加促进产水服务ESV上升,累计增幅达3.401 3%。(3)地均ESV呈较强的空间正相关,空间集聚性呈波动型变化趋势,林地的空间分布对ESV的空间格局有重要影响,ESV较高的区域与林地密集地区重叠,而ESV较低的区域则以建设用地、耕地为主。研究结果揭示了LUCC变化背景下甘南黄河水源补给区ESV的时空格局演变,可为该地区空间规划、经济发展和生态环境保护与管理提供依据,助力流域高质量发展。

关键词:生态系统服务价值; 土地利用变化; 植被净初级生产力; 时空演变

中图分类号:X171.1 文献标志码:A doi:10.19672/j.cnki.1003-6504.0715.24.338 文章编号:1003-6504(2024)09-0210-15

Spatiotemporal Evolution of Ecosystem Service Value in the Yellow River Water Recharge Area in Gannan

LUO Huixia¹, LI Jie², LI Guang^{2*}, GUO Jifu¹

(1. College of Information Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;
2. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The Yellow River water recharge area in Gannan is an important ecological barrier in the upper reaches of the Yellow River. The stable provision of ecosystem services is essential for the sustainable development of the Yellow River Basin. Based on land-use changes from 2000 to 2020, the equivalence factor is corrected by combining net primary productivity (NPP) data and socio-economic factors, the ecosystem services value (ESV) of the study area is calculated for five periods. Through methods such as spatial autocorrelation and centroid model, this study investigates the spatiotemporal evolution characteristics and spatial heterogeneity of ESV from 2000 to 2020. The results show that from 2000 to 2020, the land use/cover change (LUCC) types in the Yellow River water recharge area of Gannan were mainly grassland, woodland and cultivated land. The areas of grassland, woodland, construction land, and waters have increased, while cultivated land has decreased by 448.57 km² at a rate of change of 19%. From 2000 to 2020, the average ESV was 408.785 1×10⁸ yuan. The main focus was on regulation services, with hydrological regulation and climate regulation accounting for about 48.69% of the total ESV. Grassland and woodland made the greatest contribution to ESV and are key land types for the total value of ecosystem services. The size of the water area continued to increase, affecting the rise in ESV for water production services, with a cumulative increase of 3.401 3%. Land-averaged ESV showed a strong positive spatial correlation, and spatial clustering was generally stable. The spatial distribution of woodland had an important influence on the spatial pattern of ESV, with areas of

《环境科学与技术》编辑部:(网址)<http://fjks.chinajournal.net.cn>(电话)027-87643502(电子信箱)hjkxyjs@vip.126.com

收稿日期:2024-05-12;修回 2024-07-14

基金项目:国家自然科学基金项目(32360438,42361060);甘肃省拔尖领军人才项目(GSBJLJ-2023-09);甘肃省重点研究发展计划(22YF7FA116);甘肃省高等学校产业支撑项目(2022CYZC-41);甘肃省财政专项(GSCZZ 20160909)

作者简介:雒慧霞(1990-),女,硕士,研究方向为计算机应用及环境生态,(电子信箱)luohx@gau.edu.cn;*通讯作者,男,教授,博士生导师,研究方向为水土保持与荒漠化防治,(电子信箱)lig@gau.edu.cn。

higher ESV overlapping with areas of concentrated woodland, while areas of lower ESV were dominated by construction and cultivated land. The research results reveal the spatiotemporal pattern evolution of ESV in the Yellow River water recharge area of Gannan under the background of LUCC changes. The results can provide a basis for spatial planning, economic development, ecological environmental protection and management in the region, contributing to the high-quality development of the basin.

Key words: ecosystem service value; land use change; net primary productivity; spatiotemporal evolution

生态系统服务(ecological services, ES)是指生态系统的结构、功能和过程为人类社会和经济发展等提供具有重要价值且多样化的功能,包括供给、调节、支持、文化服务等多项作用^[1-3]。生态系统服务价值(ecosystem services value, ESV)是联系生态系统与环境和人类提供的各种效益以直观经济价值形式展示出来的关键桥梁^[4,5]。土地利用/覆盖变化(land use/cover change, LUCC)影响生态系统服务的稳定性^[6],所以合理利用土地类型和有效配置直接关系社会经济与生态环境的可持续发展^[7]。然而,城市扩张、可持续发展理念^[8]及不合理土地利用方式^[9,10]等人类活动导致生态系统失衡,且生态系统的构成、功能和空间也发生显著变化^[11,12],削弱了人类生活质量与整体福祉^[13];LUCC同时也反映了人类活动与生态系统的耦合关系。

基于土地利用变化,采用纳入LUCC的等效因子法来评估ESV。该方法可以无缝地集成到国家经济核算系统中,并在发展决策和环境监管过程中受到高度重视^[14]。2020年后,ESV的空间异质性与时空演变为学者们重点关注的问题。许诺瑾等^[15]研究黄河上游四川段生态系统服务价值评价时,发现各土地利用类型中,对生态系统总价值贡献最为显著的地类是草地;李佳鸣等^[16]研究发现,高ESV改善区仅集中于大兴安岭等高生态价值区;杨舒媛等^[17]引入冷热点分析和地形位分析方法,发现修正后的当量因子法更适用于核算沂河流域的ESV;姜晗等^[18]在研究江苏省生态系统服务价值评估及时空演变特征时,发现湿地面积的保持不仅影响生态系统服务总价值变化,也是维系水文调节服务价值和保障区域生态安全的关键因素;胥亚韵等^[19]研究发现,草地和林地是ESV的主要贡献者,对维持黄河干流沿线生态系统的稳定性至关重要;郝旭然等^[20]研究甘南黄河水源补给区土地利用及其生态服务价值时空分析研究发现,草地提供的生态系统服务价值最大,且不同类型服务中,调节功能价值最大;王奕淇等^[21]对黄河流域生态系统服务价值时空演化及影响因素分析时,发现社会因素对黄河流域ESV解释作用最强,且调节服务对流域的ESV贡献最大;庞彩艳等^[22]借助InVEST模型、相关性分析以及空

间自相关分析等方法得出,黄河上游各项生态系统服务均呈现波动型变化,且存在显著的空间异质性与尺度效应。研究者已在不同生态系统土地利用格局变化、ESV评估等方面开展了大量探索,但以下三方面还有待进一步探究:第一,因ESV受自然因素及社会经济因素等的影响,在ESV评估中对当地经济水平和生态供给能力的本土化考虑不足;第二,城镇化导致建设用地的不断扩张,而此前研究中对建设用地的ESV当量均计为0,但是建设用地具有气候调节、土壤保持等生态服务功能,不应被忽视;第三,现有文献^[20,23,24]多围绕对甘南黄河水源补给区部分区域以及土地利用类型变化影响ESV进行评估研究,但对整个甘南黄河水源补给区内的洮河土地利用变化与ESV时空交互演变、集聚及分布特征等方面的研究还很少。

甘南黄河水源补给区内的洮河是黄河上游的最大支流,也是国家重要的生态安全屏障以及青藏高原绿色屏障的关键地区,具有涵养水源、保持水土和生态多样性维护等重要生态功能,在维系黄河流域水资源及生态平衡方面具有重要的作用^[25,26]。此研究区域还拥有广袤的草原和丰富的湿地资源,是黄河流域生态系统的重要组成部分,同时对净化水源和气候调节具有重要的作用。随着社会经济发展、人类生产生活对研究区土地利用格局的改变,影响了生态系统服务的分布结构及服务功能,进而对其自然、人文生态变化产生了深远影响^[27]。因此,深入研究该区域土地利用变化及生态系统服务功能价值,对流域内未来生态环境保护及效益提高具有重要意义。

郭亚红等^[28]通过修正ESV当量因子研究和田地区生态系统服务价值,在评估模型中引入植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)数据与社会经济因素等来衡量ESV。而NPP是环境过程的生态结果之一,也是衡量生态系统生产力的重要指标^[29];近年来“海绵城市”和“空中绿岛”等城市生态项目的建设使城市中存在一定的生态系统服务^[30]。鉴于此,本研究以LUCC为基础,考虑当地NPP数据、社会经济因素数据以及建设用地的ESV,从而提高评估准确

性,直观呈现ESV变化趋势。本文主要研究目标如下:(1)识别土地利用的演变过程;(2)核算2000—2020年ESV的分析变化趋势和空间分布特征,判别各类土地利用对ESV的贡献情况;(3)探讨研究区域产水服务的价值变化。研究结果可为甘南黄河水源补给区未来土地利用规划、生态系统管理政策制定等提供理论参考。

1 数据与方法

1.1 研究区域

甘南黄河水源补给区($33^{\circ}97' \sim 35^{\circ}95'N$, $101^{\circ}61' \sim 104^{\circ}33'E$)区域面积为 $3.3 \times 10^4 km^2$ (图1),大部分地区海拔在3 000~4 000 m之间。研究区域涉及甘肃和青海共16个县(市),其中甘肃14个,包括甘南州的碌曲县、临潭县、卓尼县、夏河县、合作市,临夏州的临夏市、临夏县、和政县、广河县、东乡族自治县、康乐县,定西市的岷县、渭源县和临洮县;青海2个,包括河南蒙古族自治县和同仁县。甘南黄河水源补给区位于青藏高原东缘,区域内天然草原、沼泽湿地、森林等生态系统分布广泛,为黄河水质提供了保障,同时发挥着调节气候、保护水源、维持生态平衡的重要作用。除最北部年降水量近400 mm外,大部分地区湿润多雨,降水量丰沛,90%以上的地区年降水量都在600 mm以上,自产水资源总量达47.2亿m³,为黄河流域提供了丰富的水资源。但因地形、地貌落差较大,上下游在年降水量和气温方面存在明显差异^[24,31,32]。

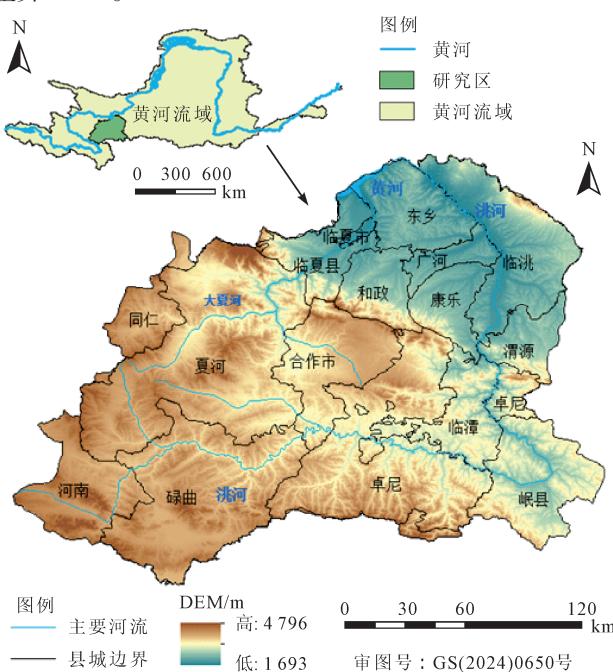


图1 甘南黄河水源补给区区位图
Fig.1 The location map of the Yellow River water recharge area in Gannan

1.2 数据来源

本研究使用的数据包含LUCC数据、NPP数据、社会经济统计数据(粮食产量、播种面积、人均GDP和人口密度空间分布)等。甘南黄河水源补给区的LUCC数据源自国家自然资源部(<https://www.mnr.gov.cn/>),其分辨率为30 m×30 m;NPP数据、社会经济统计数据分别取自NASA(National Aeronautics and Space Administration)的MODIS17A3数据集、《甘肃发展年鉴》;行政边界地理信息数据源自国家基础地理信息中心(<https://www.ngcc.cn/>)。参考研究区现状、土地资源及利用属性,将LUCC数据在ArcGIS10.8中重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地和湿地等7种土地类型,将生态系统服务细分为食物生产、原料生产、水资源供给、气体调节、气候调节、净化环境、水文调节、土壤保持、维持养分循环、生物多样性和美学景观等11类^[33,34]。

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用变化

土地利用变化率是指研究区内不同时段各类土地利用状态的变化程度。计算公式为:

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

式中,K为T时段内某种土地利用变化率;U_a和U_b分别表示某种土地利用类型在研究初期、末期的面积;T为时间范围,a。

1.3.2 土地利用转移矩阵

基于研究区土地利用面积,运用ArcGIS软件获取转移矩阵,从而揭示土地利用的时空演变规律^[35]。计算公式为:

$$Y_{ij} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,i,j分别为研究初期、末期的土地利用类型;Y_{ij}为不同土地利用类型面积;n为土地利用类型数量。

1.3.3 ESV评估

本研究通过使用改进的等效因子法来评估生态系统的经济价值,该方法根据NPP和社会经济因子对ESV当量进行了修正,最终核算出研究区5个时期的ESV。

(1)当量因子经济价值计算。甘南黄河水源补给区一个标准等效因子的经济价值,等于研究区1 hm²农田生产的粮食经济价值的1/7^[5],计算公式为:

$$E_a = (P \times Q_n) \times \frac{1}{7} \quad (3)$$

式中,E_a为标准化等效因子的经济价值,元/hm²;P为2000—2020年甘肃省平均粮食收购价格;Q_n为第n年粮食单产量。

为消除作物类别及物价波动对经济价值变化的影响,本文中以2000—2020年平均粮食收购价格为基准,计算出甘南黄河水源补给区1个标准等效因子经济价值为987.78元/hm²。

(2)ESV当量修正。现有研究大多是基于谢高地^[33]提出的“中国生态系统单位面积服务价值当量表”,根据研究区的实际情况,为避免产生将区域ESV的时空变化转化为纯粹地类面积变化,有必要针对ESV当量进行修正,即通过NPP数据和社会经济因素修正系数对当量因子进行修正^[36,37],具体修正公式为:

$$E_{ij}=R_n \times C \quad (4)$$

$$C=D_i \times W_i \times N_i \quad (5)$$

$$D_i=\frac{GDP'}{GDP''} \quad (6)$$

$$W_i=\frac{2}{1+e^{-r}} \quad (7)$$

$$r=\frac{1}{E_n}-2.5 \quad (8)$$

$$E_n=E_{n_f} \times F+E_{n_r} \times Z \quad (9)$$

$$N_i=\frac{NPP'}{NPP''} \quad (10)$$

式中, E_{ij} 为修正后ESV当量因子; C 为修正系数; D_i 、 W_i 为社会经济调节系数(ESV支付能力及意愿); N_i 为生物量调节系数;GDP'、GDP''表示研究区和全国人均GDP;NPP'、NPP''表示研究区和中国NPP; r 由恩格尔系数 E_n 来表示; E_{n_f} 、 E_{n_r} 分别为城市和农村恩格尔系数。 F 、 Z 分别为城镇、农村人口比例。

为了凸显土地利用变化对ESV的影响,本研究使用2000—2020年指标平均值的修正系数对ESV当量进行修正^[38],从而得出研究区ESV当量因子服务价值 E_{ij} 为1 154.79元/hm²。根据表1,计算得出研究区生态系统服务价值系数^[4,39](表2)。

表1 甘南黄河水源补给区生态系统服务价值当量表
Table 1 Ecological service value equivalent scale of the Yellow River water recharge area in Gannan

生态系统分类	供给服务			调节服务				支持服务		文化服务(美学景观)
	食物生产	原料生产	水资源供给	气体调节	气候调节	净化环境	水文调节	土壤保持	维持养分循环	
耕地	0.85	0.40	0.02	0.67	0.36	0.10	0.27	1.03	0.12	0.13
林地	0.29	0.66	0.34	2.17	6.50	1.93	4.74	2.65	0.20	2.41
草地	0.10	0.14	0.08	0.51	1.34	0.44	0.98	0.62	0.05	0.56
水域	0.50	0.23	8.29	0.77	2.29	5.55	102.24	0.93	0.07	2.55
建设用地	0.01	0.01	0.00	0.28	0.70	0.00	0.02	0.40	0.00	0.00
未利用地	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.10	0.03	0.02	0.00	0.02
湿地	0.51	0.50	2.59	1.90	3.60	3.60	24.23	2.31	0.18	7.87
										4.73

表2 甘南黄河水源补给区生态系统服务价值系数
Table 2 The value coefficient of ecosystem services in the Yellow River water recharge area in Gannan

一级类型	二级类型	生态系统服务价值系数/(元·km ⁻² ·a ⁻¹)						
		耕地	林地	草地	水域	湿地	建设用地	未利用地
供给服务	食物生产	981.57	334.89	115.48	577.40	588.94	11.55	0.00
	原料生产	461.92	762.16	161.67	265.60	577.40	11.55	0.00
	水资源供给	23.10	392.63	92.38	9 573.21	2 990.91	0.00	0.00
调节服务	气体调节	773.71	2 505.89	588.94	889.19	2 194.10	323.34	23.10
	气候调节	415.72	7 506.14	1 547.42	2 644.47	4 157.24	808.35	0.00
	净化环境	115.48	2 228.74	508.11	6 409.08	4 157.24	0.00	115.48
	水文调节	311.79	5 473.70	1 131.69	118 065.73	27 980.56	23.10	34.64
支持服务	土壤保持	1 189.43	3 060.19	715.97	1 073.95	2 667.56	461.92	23.10
	维持养分循环	138.57	230.96	57.74	80.84	207.86	0.00	0.00
	生物多样性	150.12	2 783.04	646.68	2 944.71	9 088.20	0.00	23.10
文化服务	美学景观	69.29	1 224.08	288.70	2 182.55	5 462.16	0.00	11.55

(3)ESV核算。根据甘南黄河水源补给区土地利用数据,评估生态系统服务总价值和各单项ESV,计算公式为:

$$ESV=\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n A_j V_{ij} \quad (i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n) \quad (11)$$

$$\text{ESV}_f = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n A_j V_{fj} \\ (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n) \quad (12)$$

式中, ESV_f 为第 f 项服务价值; A_j 为第 j 种土地利用类型面积, hm^2 ; V_{ij} 表示第 j 类土地利用类型 i 类服务的价值系数, 元/ hm^2 ; V_{fj} 表示第 j 类土地利用类型第 f 项服务价值系数。

1.3.4 ESV 空间分布

(1) 全局空间自相关分析。选用全局 Moran's I 指数对甘南黄河水源补给区地均 ESV 进行空间相关性探究^[40], 计算揭示研究区空间分布趋势。计算公式为:

$$\text{Morans' } I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (13)$$

式中, x_i, x_j 为第 i, j 个地理空间单元数值; w_{ij} 为空间权重; n 为单元数。

(2) 局部空间自相关分析。利用(local indicators of spatial autocorrelation, LISA)空间关联局部指标进一步评价研究区的位置和程度, 以显示空间异质性。在 LISA 聚类图中, 高-高区域表示 2 个变量值较高且正相关; 低-低区域表示 2 个变量值较低且正相关; 高-低和低-高区域表明 2 个变量的分布差异较大, 呈负相关^[41]。计算公式为:

$$\text{Morans' } I_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{S^2} \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (14)$$

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (15)$$

式中, x_i, x_j, w_{ij} 的含义同上, S^2 为地理空间单元方差。

1.3.5 重心迁移模型及标准差椭圆

运用重心迁移模型计算各要素的平均重心、标准距离及标准差椭圆描述空间位置时空变化趋势^[42]。计算公式为:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i X_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (16)$$

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i Y_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (17)$$

式中, \bar{X}, \bar{Y} 表示重心坐标, X_i, Y_i 为要素 i 的重心坐标; M_i 为要素 i 的耕地面积; n 为要素数量。

标准差椭圆主要由方位角 θ (分布的主方向)、长轴、短轴的标准差共同构成, 长轴越长表示空间要素分布的方向性越显著, 短轴越短表示空间要素分布的

聚合性越显著^[43,44]。

2 结果与分析

2.1 LUCC 时空格局演变

2000–2020 年, 甘南黄河水源补给区 LUCC 类型以草地、林地、耕地为主(图 2、表 3)。草地面积占比最大, 在 57.14%~57.81% 之间, 广泛分布于西南的大部分地区, 呈波动式变化趋势, 增加量达 221.46 km²; 林地主要分布于卓尼县、夏河县、合作市及临潭县, 整体呈上升的变化趋势, 由 7 923.67 km² 增加到 8 025.00 km²; 耕地主要集中在北部的临洮县、广河县、临夏市及东乡地区, 东南部的临潭县、岷县分布也较为广泛, 由于城市的快速扩张, 耕地面积较大幅度的减少, 整体呈减小的变化趋势, 减少量达 448.57 km²; 湿地主要分布在碌曲县、河南县、卓尼县与临潭县交界地区, 从 2000 年的 633.22 km² 变化到 616.57 km², 变化量较小; 建设用地主要集中于洮河河谷、临夏市及周边区域, 因城镇的快速发展, 耕地面积的减少, 导致建设用地持续增加, 整体呈增长趋势, 增长率达 7.30%; 而水域主要集中在西南一带, 作为甘南黄河水源补给区, 水域分布合理, 整体也呈上升趋势, 增长率为 3.73%(图 2)。

2.2 土地利用类型转移特征

通过对甘南黄河水源补给区 LUCC 数据研究, 绘制转移桑基图, 探索区域内 LUCC 在不同时期的变化过程(图 3)。由表 4 可知, 2000–2020 年, 土地利用类型发生了显著变化, 耕地面积的变化幅度最为显著, 总转出最多为 596.31 km², 占比达 47%; 其次是草地、林地, 2 种类型净转入面积分别为 594.50 km²、281.62 km², 占比为 47%、22%; 由于城市化的快速发展, 建设用地在不断扩张, 导致耕地面积转移较快, 建设用地转入面积远大于转出面积, 净转入面积为 171.59 km², 占比达 13%; 而水域的净转入面积为 40.18 km², 表明湿地及草地向水域转移导致水域面积增加了 40.18 km²。

其中, 2000–2005 年, 草地净转入面积为 237.18 km², 占整个时间段内总转入面积的 58.3%, 主要是耕地面积的快速减少, 使草地及建设用地面积涨幅明显, 是符合国家退耕还林还草、生态环境保护政策的。2010–2015 年, 随着对耕地保护的重视程度提升, 耕地面积转移速率下降。2015–2020 年, 建设用地的净转出面积增大, 处于 4 个研究时期的最高点, 为 87.2 km², 也就是耕地向建设用地转移的面积减少。研究时段内, 湿地、未利用地转入面积均小于转出面积, 波动幅度较小, 利用率远不及其他土地利用类型(表 4)。

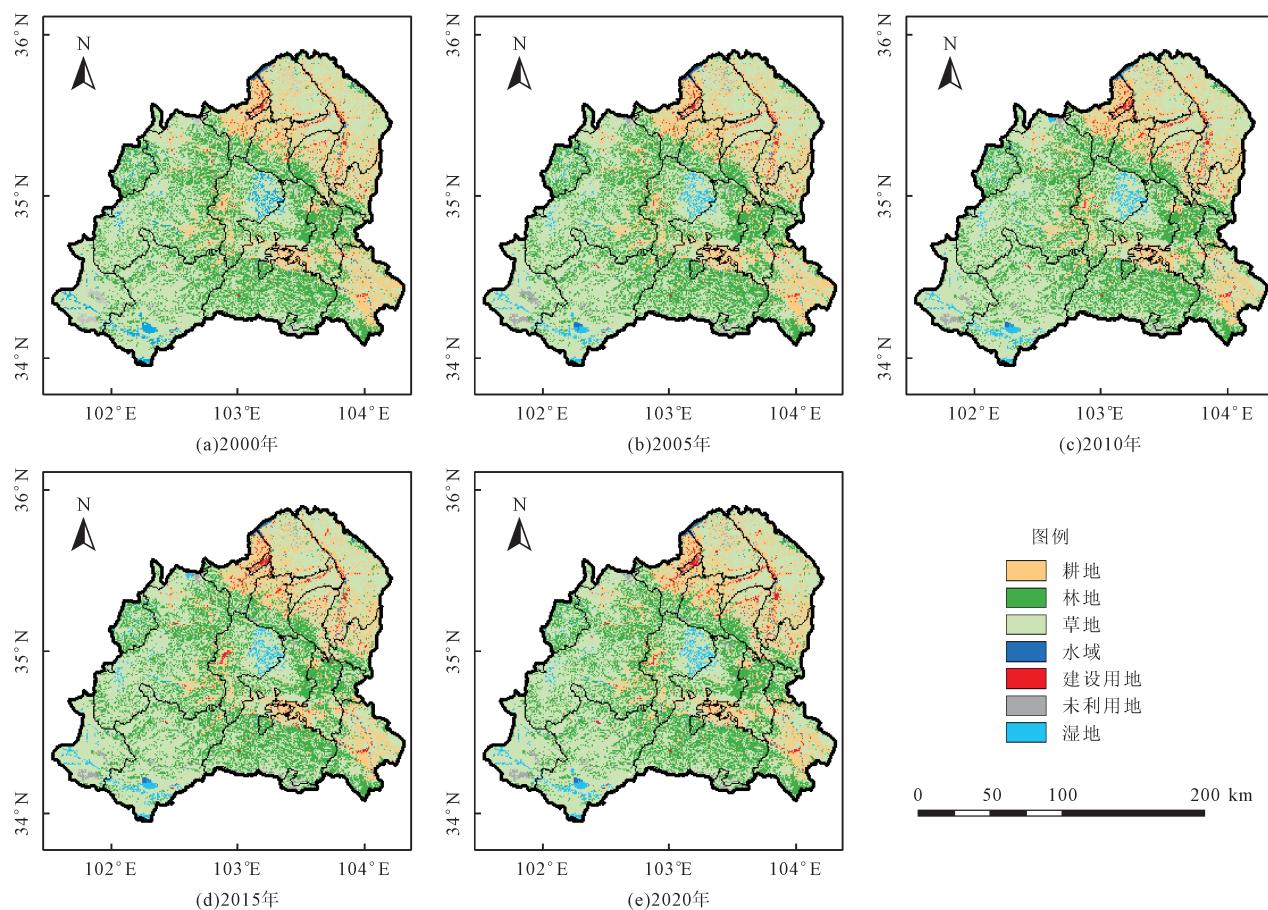


图2 2000-2020年甘南黄河水源补给区土地利用空间分布

Fig.2 Spatial distribution of land use in the Yellow River water recharge area in Gannan from 2000 to 2020

表3 2000-2020年土地利用类型变化
Table 3 Land use type change from 2000 to 2020

年份	指标	土地利用类型						
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	湿地
2000	面积/km ²	4 710.21	7 923.67	18 947.74	159.61	375.80	410.96	633.22
	比例/%	14.20	23.89	57.14	0.48	1.13	1.24	1.91
2005	面积/km ²	4 524.79	7 954.12	19 090.51	169.58	393.59	410.96	617.64
	比例/%	13.64	23.99	57.57	0.51	1.19	1.24	1.86
2010	面积/km ²	4 364.94	8 008.82	19 079.22	177.05	475.46	386.47	669.24
	比例/%	13.16	24.15	57.53	0.53	1.43	1.17	2.02
2015	面积/km ²	4 310.32	8 004.89	19 071.82	194.66	531.83	387.86	659.82
	比例/%	13.00	24.14	57.51	0.59	1.60	1.17	1.99
2020	面积/km ²	4 261.64	8 025.00	19 169.20	189.41	512.98	386.23	616.57
	比例/%	12.85	24.20	57.81	0.57	1.55	1.16	1.86
2000-2005	变化量/km ²	-185.42	30.45	142.77	9.97	17.79	0.00	-15.58
	动态度/%	-0.79	0.08	0.15	1.25	0.95	0.00	-0.49
2005-2010	变化量/km ²	-159.85	54.70	-11.29	7.47	81.87	-24.49	51.60
	动态度/%	-0.71	0.14	-0.01	0.88	4.16	-1.19	1.67
2010-2015	变化量/km ²	-54.62	-3.93	-7.40	17.61	56.37	1.39	-9.42
	动态度/%	-0.25	-0.01	-0.01	1.99	2.37	0.07	-0.28
2015-2020	变化量/km ²	-48.68	20.11	97.38	-5.25	-18.85	-1.64	-43.24
	动态度/%	-0.23	0.05	0.10	-0.54	-0.71	-0.08	-1.31
2000-2020	变化量/km ²	-448.57	101.33	221.46	29.81	137.18	-24.73	-16.64
	动态度/%	-1.90	0.26	0.23	3.73	7.30	-1.20	-0.53

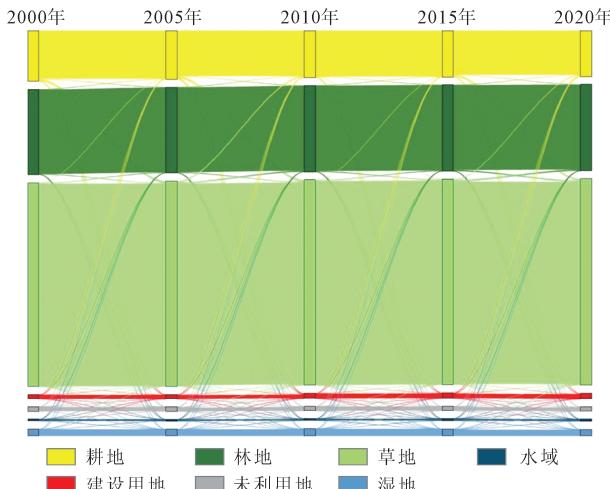


图3 2000-2020年甘南黄河水源补给区不同土地利用类型流转图
Fig.3 Transfer flows of different land use types in the Yellow River water recharge area in Gannan from 2000 to 2020

表4 甘南黄河水源补给区2000-2020年土地利用转移矩阵
Table 4 Land use transfer matrix of the Yellow River water recharge area in Gannan from 2000 to 2020 (km²)

土地利用类型	2020年							转出总量	
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	湿地		
2000年	耕地	-	67.82	373.21	9.97	137.99	5.45	1.88	596.31
	林地	15.24	-	157.12	1.78	4.06	1.52	0.52	180.24
	草地	97.45	210.05	-	11.70	26.82	13.27	14.02	373.32
	水域	2.48	0.69	2.69	-	0.45	0.06	4.01	10.38
	建设用地	27.25	1.18	5.46	0.40	-	0.05	0.07	34.41
	未利用地	0.82	0.70	42.69	0.00	0.69	-	0.01	44.91
	湿地	4.52	1.18	13.34	16.32	1.58	0.05	-	36.98
转入总量		147.75	281.62	594.50	40.18	171.59	20.39	20.51	-

表5 2000-2020年不同土地类型ESV变化
Table 5 Variations in ecosystem service values (ESV) across different land types from 2000 to 2020

年份	指标	土地利用类型							合计
		耕地	林地	草地	水域	湿地	建设用地	未利用地	
2000	生态系统服务价值ESV/(×10 ⁸ 元)	21.811 6	209.996 5	110.934 9	23.096 1	38.038 8	0.616 2	0.094 9	404.589 1
2005	生态系统服务价值ESV/(×10 ⁸ 元)	20.953 0	210.803 4	111.770 8	24.539 2	37.102 9	0.645 4	0.094 9	405.909 7
2010	生态系统服务价值ESV/(×10 ⁸ 元)	20.212 8	212.253 2	111.704 7	25.620 4	40.202 7	0.779 7	0.089 3	410.862 8
2015	生态系统服务价值ESV/(×10 ⁸ 元)	19.959 8	212.149 0	111.661 4	28.169 3	39.636 5	0.872 1	0.089 6	412.537 7
2020	生态系统服务价值ESV/(×10 ⁸ 元)	19.734 4	212.681 9	112.231 5	27.409 2	37.039 0	0.841 2	0.089 2	410.026 4
2000-2005	变化量/(×10 ⁸ 元)	-0.858 6	0.807 0	0.835 9	1.443 1	-0.935 9	0.029 2	0.000 0	1.320 6
	变化率/%	-3.936 6	0.384 3	0.753 5	6.248 4	-2.460 4	4.734 5	-0.000 7	0.326 4
2005-2010	变化量/(×10 ⁸ 元)	-0.740 2	1.449 8	-0.066 1	1.081 2	3.099 8	0.134 3	-0.005 7	4.953 1
	变化率/%	-3.532 8	0.687 8	-0.059 2	4.406 1	8.354 6	20.801 3	-5.958 6	1.220 2
2010-2015	变化量/(×10 ⁸ 元)	-0.252 9	-0.104 3	-0.043 3	2.548 8	-0.566 2	0.092 4	0.000 3	1.674 9
	变化率/%	-1.251 4	-0.049 1	-0.038 8	9.948 5	-1.408 3	11.856 8	0.360 3	0.407 7
2015-2020	变化量/(×10 ⁸ 元)	-0.225 4	0.533 0	0.570 1	-0.760 1	-2.597 6	-0.030 9	-0.000 4	-2.511 3
	变化率/%	-1.129 4	0.251 2	0.510 6	-2.698 2	-6.553 4	-3.545 1	-0.422 1	-0.608 7
2000-2020	变化量/(×10 ⁸ 元)	-2.077 2	2.685 4	1.296 6	4.313 2	-0.999 8	0.225 0	-0.005 7	5.437 4
	变化率/%	-9.523 4	1.278 8	1.168 3	18.674 9	-2.628 4	36.504 8	-6.018 7	1.343 9

了63.3%、61.1%。2005-2010年,耕地面积继续减少,林地面积增加,ESV总量增加了4.953 1×10⁸元,是整个研究时期内ESV增加最多的时间段。2015-2020年,草地、林地面积增加,耕地、湿地面积持续减少,导致2020年的ESV总量同比2015年下降了2.511 3×10⁸

2.3 ESV时空格局演变

2.3.1 生态系统服务总价值变化分析

由表5可知,2000-2020年,甘南黄河水源补给区ESV总量平均为408.785 1×10⁸元,ESV呈先上升后下降的趋势,由2000年的404.589 1×10⁸元上升到2020年的410.026 4×10⁸元,以1.343 9%的年均变化率上升了5.437 3×10⁸元。不同土地利用类型提供的ESV大小顺序为林地>草地>湿地>水域>耕地>建设用地>未利用地。其中耕地面积的减少直接导致供给服务价值的减少,ESV呈减少趋势;草地和林地的ESV占ESV总量的79.07%,ESV整体均呈上升趋势(表5),是甘南黄河水源补给区生态系统的重要组成部分。

2000-2005年,草地、林地面积增加,耕地面积减少,草地、林地ESV增加量为总ESV增加量分别贡献

元(表5)。

2.3.2 单项ESV变化特征分析

2000-2020年,甘南黄河水源补给区单项ESV的变化顺序为水文调节>气候调节>土壤保持>生物多样性>气体调节>净化环境>美学景观>原材料生产>食物

生产>水资源供给>维持养分循环(表6)。其中水文调节、气候调节约占总ESV的48.69%,提供了最重要的生态功能,因林地、草地面积占比分别达24.07%、57.51%,且具有较强的调节功能;耕地面积减少引起

了食物生产、原料生产等ESV持续下降,下降率分别为3.742 6%、0.806 5%;水资源供给的ESV总体呈增加趋势,这是因为水域面积的持续增加影响ESV上升,累计增幅为3.401 3%。

表6 2000—2020年单项服务ESV变化
Table 6 Variations in the estimated single-item service value (ESV) from 2000 to 2020

年份	指标	生态系统服务类型					
		食物生产	原料生产	水资源供给	气体调节	气候调节	净化环境
2000	生态系统服务价值ESV/(×10 ⁸ 元)	9.934 5	11.690 5	8.392 1	36.321 6	94.112 7	31.534 1
2005	生态系统服务价值ESV/(×10 ⁸ 元)	9.775 9	11.645 0	8.461 9	36.319 0	94.461 0	31.652 2
2010	生态系统服务价值ESV/(×10 ⁸ 元)	9.671 7	11.643 7	8.704 5	36.471 5	95.088 2	32.009 5
2015	生态系统服务价值ESV/(×10 ⁸ 元)	9.621 2	11.614 2	8.841 4	36.428 3	95.077 5	32.064 6
2020	生态系统服务价值ESV/(×10 ⁸ 元)	9.562 6	11.596 2	8.677 6	36.392 7	95.150 0	31.939 6
2000—2005	变化量/(×10 ⁸ 元)	-0.158 5	-0.045 5	0.069 7	-0.002 6	0.348 4	0.118 1
	变化率/%	-1.595 8	-0.389 2	0.831 0	-0.007 3	0.370 2	0.374 6
2005—2010	变化量/(×10 ⁸ 元)	-0.104 2	-0.001 2	0.242 6	0.152 5	0.627 2	0.357 3
	变化率/%	-1.066 3	-0.010 7	2.867 1	0.420 0	0.663 9	1.128 8
2010—2015	变化量/(×10 ⁸ 元)	-0.050 5	-0.029 5	0.136 9	-0.043 2	-0.010 7	0.055 0
	变化率/%	-0.522 3	-0.253 7	1.573 2	-0.118 5	-0.011 3	0.171 9
2015—2020	变化量/(×10 ⁸ 元)	-0.058 5	-0.018 0	-0.163 8	-0.035 6	0.072 5	-0.124 9
	变化率/%	-0.608 2	-0.154 9	-1.853 1	-0.097 7	0.076 3	-0.389 6
2000—2020	变化量/(×10 ⁸ 元)	-0.371 8	-0.094 3	0.285 4	0.071 0	1.037 3	0.405 5
	变化率/%	-3.742 6	-0.806 5	3.401 3	0.195 6	1.102 2	1.286 0

年份	指标	生态系统服务类型					总计
		水文调节	土壤保持	维持养分循环	生物多样性	美学景观	
2000	生态系统服务价值ESV/(×10 ⁸ 元)	102.868 2	45.460 1	3.721 3	41.246 5	19.307 5	404.589 1
2005	生态系统服务价值ESV/(×10 ⁸ 元)	103.880 6	45.412 3	3.708 5	41.283 5	19.309 8	405.909 7
2010	生态系统服务价值ESV/(×10 ⁸ 元)	106.444 4	45.564 4	3.709 6	41.894 9	19.660 4	410.862 8
2015	生态系统服务价值ESV/(×10 ⁸ 元)	108.214 7	45.502 0	3.700 2	41.837 2	19.636 6	412.537 7
2020	生态系统服务价值ESV/(×10 ⁸ 元)	106.589 3	45.445 6	3.694 3	41.540 3	19.438 3	410.026 4
2000—2005	变化量/(×10 ⁸ 元)	1.012 4	-0.047 8	-0.012 9	0.037 0	0.002 3	1.320 6
	变化率/%	0.984 1	-0.105 1	-0.345 3	0.089 7	0.012 0	0.326 4
2005—2010	变化量/(×10 ⁸ 元)	2.563 9	0.152 1	0.001 2	0.611 3	0.350 5	4.953 1
	变化率/%	2.468 1	0.335 0	0.031 3	1.480 9	1.815 2	1.220 2
2010—2015	变化量/(×10 ⁸ 元)	1.770 3	-0.062 5	-0.009 4	-0.057 7	-0.023 8	1.674 9
	变化率/%	1.663 1	-0.137 1	-0.254 5	-0.137 7	-0.120 8	0.407 7
2015—2020	变化量/(×10 ⁸ 元)	-1.625 4	-0.056 4	-0.005 9	-0.296 9	-0.198 3	-2.511 3
	变化率/%	-1.502 0	-0.123 9	-0.159 2	-0.709 5	-1.009 9	-0.608 7
2000—2020	变化量/(×10 ⁸ 元)	3.721 1	-0.014 5	-0.027 0	0.293 8	0.130 7	5.437 4
	变化率/%	3.617 3	-0.031 9	-0.726 1	0.712 3	0.677 2	1.343 9

甘南黄河水源补给区各单项ESV大多呈波动式变化趋势。其中,食物生产功能减少最多,ESV下降了 0.3718×10^8 元;其他服务功能变化幅度相对稳定。草地和林地面积的增加使得水文调节、净化环境以及美学景观等ESV有较大提升,累计增幅分别为3.617 3%、1.286 0%和0.677 2%。综上,在生态系统服务功能中,草地和林地对ESV贡献程度最大,是生态

系统服务总价值的关键土地类型。

2.4 空间集聚变化

2.4.1 全局空间自相关

甘南黄河水源补给区不同研究时期全局Moran's I指数分别为0.651 4、0.672 4、0.645 3、0.649 5和0.653 1,地均ESV总体稳定,呈较强的空间正相关。2000—2020年,空间集聚性先升后降再上升,呈波动型变化

趋势。其中,2005年空间集聚性达到最高(表7),2005—2010年,空间集聚性下降明显,空间正相关性也在不断减弱。由于耕地面积的急剧下降,湿地和建设

用地面积的明显增加,导致空间集聚现象减弱。2010—2020年,空间集聚恢复上升趋势,但不明显,空间正相关性也趋于稳定。

表7 甘南黄河水源补给区全局空间自相关统计值
Table 7 Global spatial autocorrelation measures of the Yellow River water recharge area in Gannan

指标	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年
全局 Moran's <i>I</i>	0.651 4	0.672 4	0.645 3	0.649 5	0.653 1
期望值	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
Z得分	235.019 4	242.651 8	238.886 6	239.587 0	237.018 7
P检验	0.001 0	0.001 0	0.001 0	0.001 0	0.001 0

2.4.2 地均ESV局部空间自相关

基于全局空间自相关结果,进一步探究地均ESV在局部空间的集聚程度,通过计算局部 Moran's *I*指数,绘制LISA集聚图(图4)。主要分为高-高、低-低、不显著3种集聚类型。高-高集聚区主要分布在临潭县、卓尼县南/北部,其他区域均有零星分布;

低-低集聚区主要分布在临夏县至渭源县以北区域;不显著集聚区主要集中在夏河县、碌曲县的中南部广大区域。2000—2020年,临夏县、卓尼县的高-高集聚区域有所减少,临潭县的高-高集聚区域增多,有向东扩张的趋势。2015—2020年,碌曲县的低-低集聚区域有所扩张。

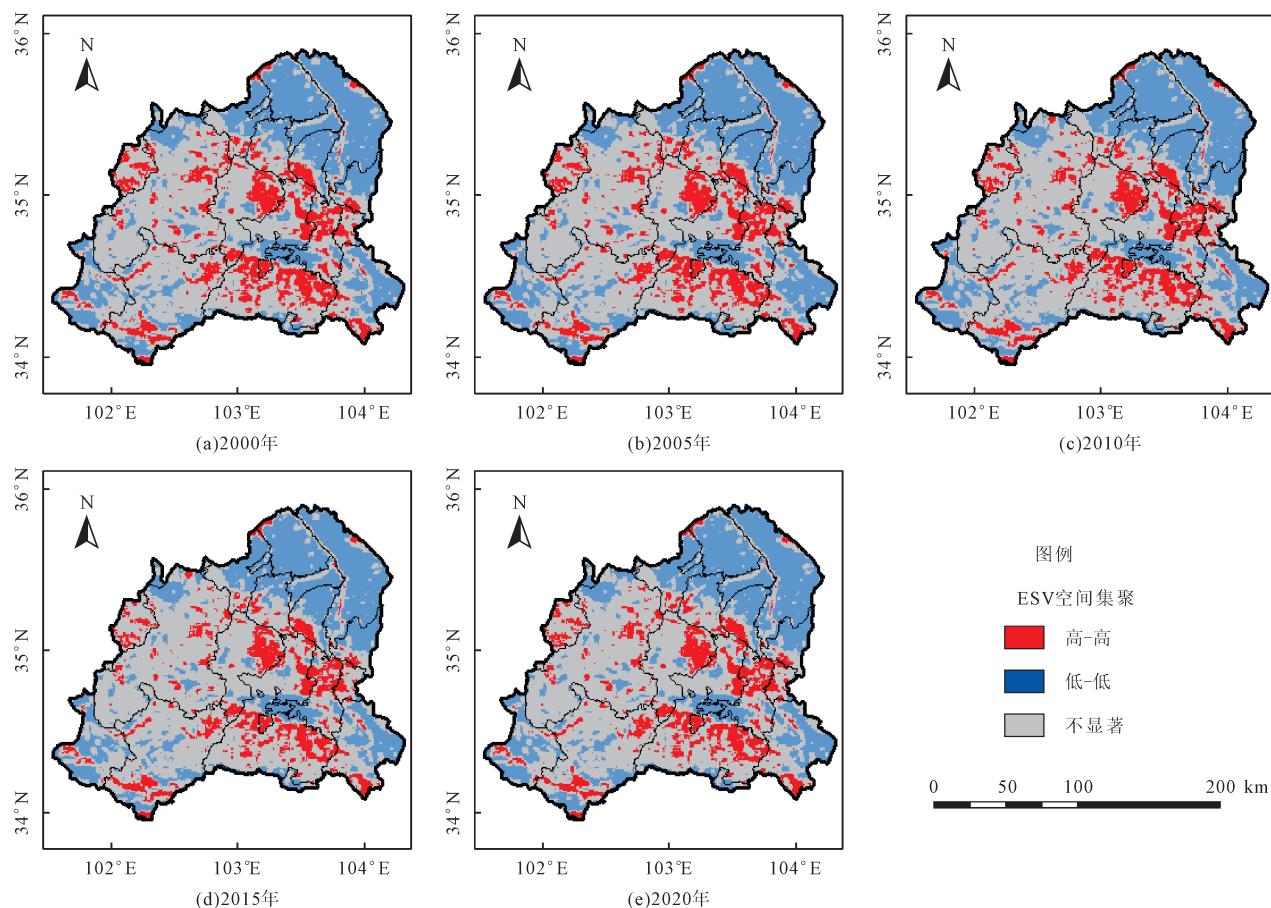


图4 甘南黄河水源补给区ESV的LISA集群时空变化

Fig.4 Spatiotemporal change in the LISA cluster of the ESV in the Yellow River water recharge area in Gannan

2.5 分布特征演化

2.5.1 ESV重心迁移

通过重心迁移模型计算出2000—2020年间甘南

黄河水源补给区重心的迁移方向及距离(图5)。由图5可知,甘南黄河水源补给区ESV重心朝东南方向移动了13.16 km,从合作境内向东南迁移至卓尼境内,

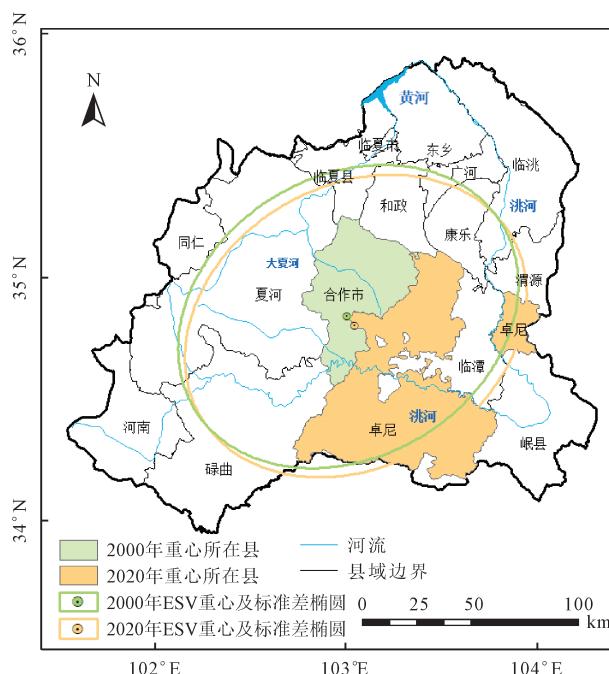


图5 2000-2020年甘南黄河水源补给区重心迁移
Fig.5 Center of mass migration in the Yellow River water recharge area in Gannan from 2000 to 2020

表明2000-2020年研究区东南部ESV呈现上升趋势,其相对重要性提升。

2.5.2 地均ESV的空间分布特征及变化趋势

从ESV的空间分布来看,甘南黄河水源补给区ESV较高的区域与林地密集地区重叠,而ESV较低的区域则以建设用地、耕地为主(图2、图6)。ESV较低的区域主要集中在临夏县至渭源县以北、岷县及临潭县等的边境地区。ESV较高的区域主要集中在研究区域的南部和临潭县至同仁县一线。

2000-2020年整体来看,水域面积的不断扩大,使得沿洮河河谷的地均ESV显著增加(图7),对维持河流生态系统的稳定性和促进经济发展具有重要作用;上升0~10万元/km²的区间内,集聚区域主要集中在研究区的东南一带;下降超10万元/km²的区间内,集聚区域主要分布在研究区的北部地区,包括临夏市、临洮县及合作市等地区;下降0~10万元/km²的区间内,集聚区域主要分布于西南地区。

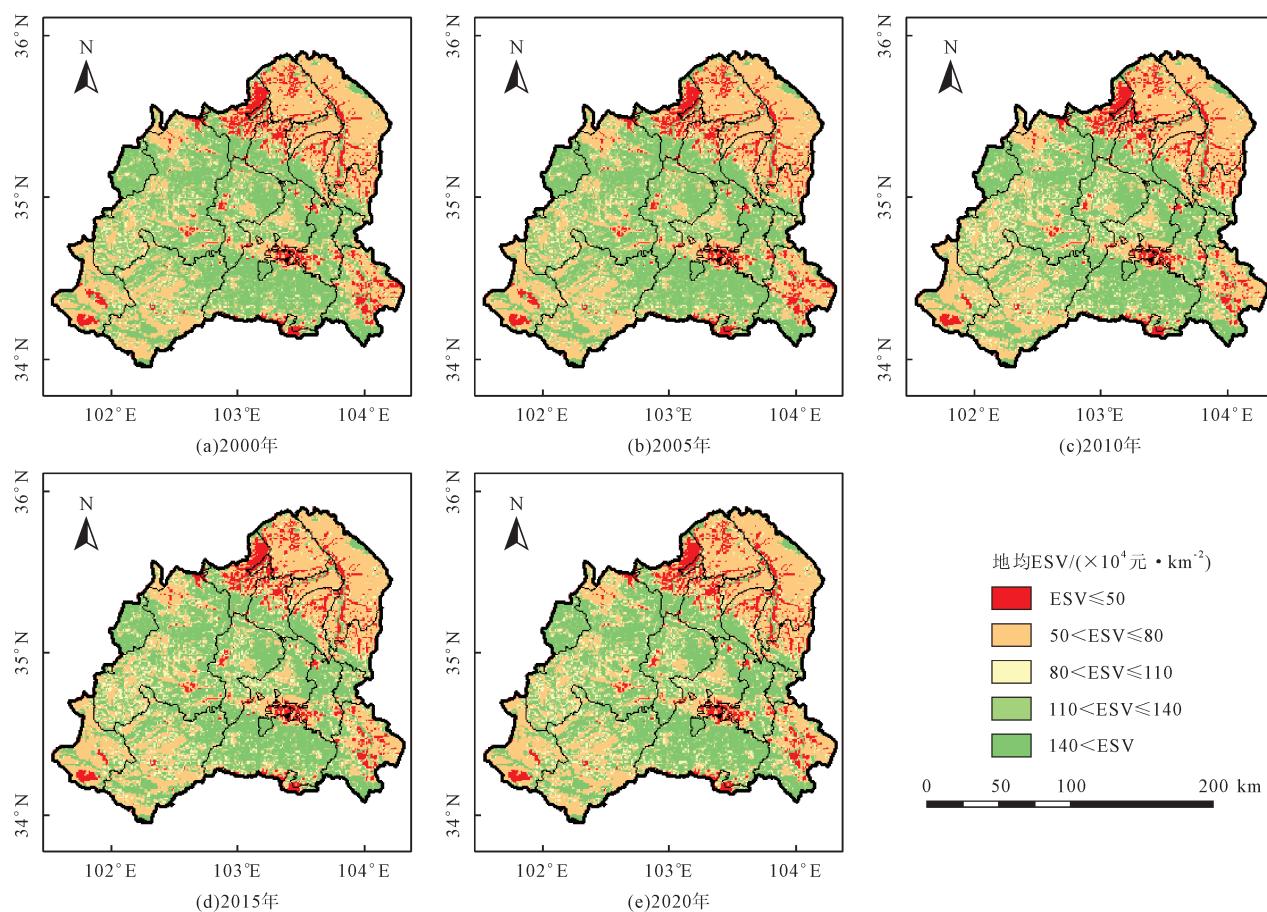


图6 甘南黄河水源补给区不同时期ESV变化量时空分布

Fig.6 Spatiotemporal distribution of ESV variations in different periods of the Yellow River water recharge area in Gannan

3 讨论

甘南黄河水源补给区是国家生态安全屏障的重

要组成部分,在生态系统中发挥着关键作用。本研究计算甘南黄河水源补给区1个标准等效因子经济价值为1 154.79元/hm²,与尹登玉等^[45]研究中计算的黄河

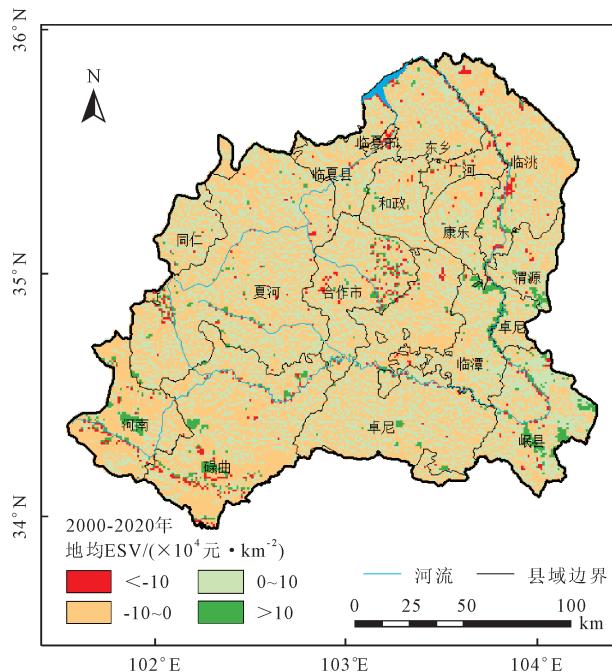


图7 甘南黄河水源补给区2000-2020年ESV空间变化

Fig.7 Spatial changes of ESV in the Yellow River water recharge area in Gannan from 2000 to 2020

流域1个标准等效因子经济价值为 $1\ 274.26$ 元/ hm^2 结果相近。张鹏岩等^[46]对黄河下游的ESV当量因子服务价值的测算结果为 $1\ 895.51$ 元/ hm^2 , 可见, 黄河上游等效因子经济价值要低于黄河下游, 这是因为黄河下游的粮食单产量相对较高, 且本文中为消除作物类别及物价波动对经济价值的影响, 是以研究区2000-2020年的粮食平均收购价格为基准的。

兰西城市群与本研究在区域上有部分重叠, 梁膑月等^[47]在研究兰西城市群土地利用转型中发现, 建设用地转入面积主要来源于耕地和草地, 耕地转出面积为 $2\ 036.85$ km 2 , 是总转出面积最多的土地利用类型; 草地是净转入面积最多的土地利用类型。陈美景等^[48]在黄河流域资源型城市土地利用转型研究中发现, 草地转入规模最大, 总转入面积达 $77\ 025$ km 2 ; 耕地主要转出为草地、建设用地和林地, 考虑调整种植业布局及土地生态安全, 将部分耕地逐步实施退耕还草还林政策。本文研究与上述学者研究结果一致。本文中耕地与建设用地之间的转化是因为该研究区域内实施了易地扶贫搬迁工程和基本农田整治工程, 易地扶贫搬迁对部分偏僻小村落实施了整体搬迁, 并对原村庄进行了复耕; 基本农田整治防止了土地碎片化, 对耕地集中区域内的建设用地进行了搬迁, 这是导致耕地与建设用地之间进行转化的主要原因^[49-51]。

在探索ESV时空关系时, 发现地均ESV呈较强的正相关性, 2000-2020年不同时期Moran's *I*指数分别为 $0.651\ 4$ 、 $0.672\ 4$ 、 $0.645\ 3$ 、 $0.649\ 5$ 和 $0.653\ 1$, 集聚

程度较高。对比发现, 吴艳霞等^[52]在研究黄河流域土地生态安全的空间相关性时, 全局空间自相关 Moran's *I*指数分别为 0.556 、 0.661 、 0.587 和 0.461 ; 毗邻的榆中县全局空间自相关 Moran's *I*指数数值为 $0.598\ 6$ 和 $0.604\ 6$ ^[53], 均与本研究结果接近, 且研究时段内 Moran's *I*指数值较平稳。

本研究的创新之处在于:一是根据最新研究, 将建设用地的生态服务价值纳入计算, 因建设用地的气候调节、土壤保持等生态服务功能对ESV有一定的贡献;二是本文采用了NPP数据和社会经济因素对研究区域ESV当量因子进行了修正, NPP是衡量生态系统生产力的重要指标, 可以反映生态系统结构和功能的变化;而经济水平又直接影响人们购买生态系统服务的意愿。在本研究中, 基于粮食产量初步计算等效要素, 结合当地NPP和经济水平, 有助于更准确地估算区域ESV^[30,54]。

本文科学评估了2000-2020年甘南黄河水源补给区ESV的时空格局演变特征, 研究结果的准确性和可信度较高。但本研究还存在一定的局限性, 应在今后的研究中加以解决。(1)本文仅从土地利用类型分析探讨了ESV的时空演变特征, 由于气候变化与社会经济发展水平等都会影响ESV^[10,55], 所以在今后研究中应考虑其中。(2)生态系统的形成是一个长期的动态过程, 受人与自然相互作用的影响, 具有发展和变化的特点。因此, 在更广泛的时间和空间尺度上进行分析可产生更深层次的发现。

4 结论

(1)2000-2020年, 甘南黄河水源补给区LUCC类型以草地、林地、耕地为主。主要表现为耕地面积较大幅度减少, 减少量达 448.57 km 2 ; 草地、林地、建设用地和水域面积增加, 草地面积的增加量最大, 为 221.46 km 2 , 建设用地的增长率最大, 为73%。耕地向草地及建设用地转移面积较大, 湿地及草地向水域面积转移较为明显。

(2)2000-2020年, 甘南黄河水源补给区平均ESV为 $408.785\ 1 \times 10^8$ 元, 增加率为1.343%, 以调节服务为主, 其中水文调节、气候调节约占总ESV的48.69%。草地和林地提供的ESV最多, 占比达79.07%, 是甘南黄河水源补给区生态系统的重要组成部分。水域面积的持续增加影响水资源供给服务ESV上升, 累计增幅达3.4013%。各单项ESV大多呈波动式变化趋势。其中, 食物生产功能减少最多, ESV下降了 $0.371\ 8 \times 10^8$ 元。

(3)地均ESV总体稳定, 呈较强的空间正相关, 空间集聚性呈波动型变化趋势, 2005年空间集聚性达到

最高。高-高集聚区主要分布在临潭县、卓尼县南/北部、其他区域均有零星分布；低-低集聚区主要分布在临夏县至渭源县以北区域。2000–2020年,甘南黄河水源补给区ESV重心朝东南方向移动了13.16 km。林地的空间分布对ESV的空间格局有重要影响,ESV较高的区域与林地密集地区重叠,而ESV较低的区域则以建设用地、耕地为主。ESV较低的区域主要集中在临夏县至渭源县以北、岷县及临潭县等的边境地区;ESV较高的区域主要集中在研究区域的南部和临潭县至同仁县一线。

[参考文献]

- [1] Millennium Ecosystem Assessment—Ecosystems and Human Well-being: Biodiversity Synthesis[M]. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [2] 张立伟,傅伯杰. 生态系统服务制图研究进展[J]. 生态学报, 2014,34(2):316–325.
Zhang Liwei, Fu Bojie. The progress in ecosystem services mapping: a review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(2): 316–325.
- [3] Daily G C. Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems[M]. Washington, DC.: Island Press, 1997: 220–221.
- [4] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报, 2003,18(2):189–196.
Xie Gaodi, Lu Chunxia, Leng Yunfa, et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2003,18(2):189–196.
- [5] 孔祥梅,陆林,任以胜,等. 中部地区人口与生态系统服务价值时空演变特征与协调性研究[J]. 资源开发与市场, 2024, 40(2):205–216.
Kong Xiangmei, Lu Lin, Ren Yisheng, et al. Study on the spatial-temporal evolution characteristics and coordination of population and ecosystem services value in central China [J]. *Resource Development & Market*, 2024,40(2):205–216.
- [6] 魏慧,赵文武,张晓,等. 基于土地利用变化的区域生态系统服务价值评价:以山东省德州市为例[J]. 生态学报, 2017, 37(11):3830–3839.
Wei Hui, Zhao Wenwu, Zhang Xiao, et al. Regional ecosystem service value evaluation based on land use changes: a case study in Dezhou, Shandong Province, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017,37(11):3830–3839.
- [7] Chen S, Li G, Xu Z G, et al. Combined impact of socioeconomic forces and policy implications: spatial-temporal dynamics of the ecosystem services value in Yangtze River Delta, China[J]. *Sustainability*, 2019,11(9):2622.
- [8] 白羽萍,王佳斌,刘恋,等. 黑河流域生态系统服务价值预测及权衡分析:以张掖市为例[J]. 生态学报, 2022,42(13): 5187–5199.
Bai Yuping, Wang Jabin, Liu Lian, et al. Prediction and trade-off analysis of ecosystem service value in Heihe River Basin: a case study in Zhangye City[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(13):5187–5199.
- [9] 朱晓南,刘艳中,陈勇,等. 武汉市城市用地扩张对生态系统服务的时空影响[J]. 水土保持研究, 2020,27(5):288–294.
Zhu Xiaonan, Liu Yanzhong, Chen Yong, et al. Effect of urban land expansion on spatiotemporal ecosystem service in Wuhan[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(5):288–294.
- [10] 段维利,余新晓,陈丽华,等. 京津冀城市群城镇化与生态建设对生态系统服务价值的影响[J]. 水土保持研究, 2023,30 (4):404–411.
Duan Weili, Yu Xinxiao, Chen Lihua, et al. Impact of urbanization and ecological construction on the ecosystem services value in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(4): 404–411.
- [11] 刘坤,于赐刚,张艺凡,等. 青藏高原自然保护区人类活动及其影响研究现状与热点[J]. 应用与环境生物学报, 2022,28 (2):508–516.
Liu Kun, Yu Cigang, Zhang Yifan, et al. Research status and current hotspots on the human impact on natural reserves in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2022,28(2):508–516.
- [12] 方林,方斌,刘艳晓,等. 长三角地区景观生态风险与人类活动强度的响应及其时空关联[J]. 农业工程学报, 2022,38 (22):210–219.
Fang Lin, Fang Bin, Liu Yanxiao, et al. Scale response and spatiotemporal correlations between landscape ecological risk and human activity intensity in the Yangtze River Delta region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022,38(22):210–219.
- [13] 刘志涛,王少剑,方创琳. 粤港澳大湾区生态系统服务价值的时空演化及其影响机制[J]. 地理学报, 2021,76(11): 2797–2813.
Liu Zhitao, Wang Shaojian, Fang Chuanglin. Spatiotemporal evolution and influencing mechanism of ecosystem service values in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(11):2797–2813.
- [14] Chen F H, Chen S Q, Zhang X, et al. Asian dust-storm activity dominated by Chinese dynasty changes since 2000 BP [J]. *Nature Communications*, 2020,11(1):992.
- [15] 许诺瑾,丁兵兵,余新晓,等. 基于土地利用变化的黄河上游四川段生态系统服务价值评价[J]. 水土保持学报, 2024,38 (2):178–189.
Xu Nuojin, Ding Bingbing, Yu Xinxiao, et al. Ecosystem service functions in the upper reaches of the Yellow River in Sichuan based on land use change value evaluation[J]. *Jour-*

- nal of Soil and Water Conservation, 2024,38(2):178–189.
- [16] 李佳鸣,冯长春. 基于土地利用变化的生态系统服务价值及其改善效果研究:以内蒙古自治区为例[J]. 生态学报, 2019,39(13):4741–4750.
Li Jiaming, Feng Changchun. Ecosystem service values and ecological improvement based on land use change: a case study of the Inner Mongolia Autonomous Region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(13):4741–4750.
- [17] 杨舒媛,李子君. 土地利用变化背景下沂河流域生态系统服务价值时空格局演化[J]. 环境科学, 2024,45(8):4722–4732.
Yang Shuyuan, Li Zijun. Spatio-temporal pattern of ecosystem service value evolution in the Yihe River Basin in the context of land use change[J]. Environmental Science, 2024, 45(8):4722–4732.
- [18] 姜晗,吴群. 基于LUCC的江苏省生态系统服务价值评估及时空演变特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2021,30(11):2712–2725.
Jiang Han, Wu Qun. Ecological service value evaluation and temporal – spatial evolution characteristics in Jiangsu Province based on LUCC[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021,30(11):2712–2725.
- [19] 胡芝韵,肖旭峰,赵真. 黄河干流沿线生态系统服务价值动态评估[J]. 人民黄河, 2022,44(11):88–93.
Xu Zhiyun, Xiao Xufeng, Zhao Zhen. Dynamic evolution of ecosystem service values along the main stream of Yellow River Basin based on land use change[J]. Yellow River, 2022,44(11):88–93.
- [20] 郝旭然,王艳艳,蔡明娟,等. 甘南黄河水源补给区土地利用及其生态服务价值时空分异研究[J]. 草原与草坪, 2022,42(6):71–78.
Hao Xuran, Wang Yanyan, Cai Mingjuan, et al. Spatio-temporal differentiation investigation of land use and ecological service value in the water supply area of the Yellow River in Gannan[J]. Grassland and Turf, 2022,42(6):71–78.
- [21] 王奕淇,孙学莹. 黄河流域生态系统服务价值时空演化及影响因素[J]. 环境科学, 2024,45(5):2767–2779.
Wang Yiqi, Sun Xueying. Spatiotemporal evolution and influencing factors of ecosystem service value in the Yellow River Basin[J]. Environmental Science, 2024, 45(5): 2767–2779.
- [22] 庞彩艳,文琦,丁金梅,等. 黄河上游流域生态系统服务变化及其权衡协同关系[J]. 生态学报, 2024,44(12):5003–5013.
Pang Caiyan, Wen Qi, Ding Jinmei, et al. Ecosystem services and their trade-offs and synergies in the upper reaches of the Yellow River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(12):5003–5013.
- [23] 陈翔舜,魏金平. 甘南黄河重要水源补给区生态功能服务价值评价[J]. 甘肃林业科技, 2007,32(1):28–30.
Chen Xiangshun, Wei Jinping. Evaluation on service value of ecological function in important water-supply area of Yellow River in South Gansu[J]. Journal of Gansu Forestry Science and Technology, 2007,32(1):28–30.
- [24] 陈强强,杨凌,郝旭然. 甘南黄河水源补给区生态系统服务与农户生计耦合协调分析[J]. 草地学报, 2023,31(8):2471–2480.
Chen Qiangqiang, Yang Ling, Hao Xuran. Spatio-temporal analysis of coupling coordination between ecosystem service and farmers' livelihood in Gannan Yellow River water supply area[J]. Acta Agrestia Sinica, 2023,31(8):2471–2480.
- [25] 温煜华. 甘南黄河重要水源补给区生态经济耦合协调发展研究[J]. 中国农业资源与区划, 2020,41(12):35–43.
Wen Yuhua. Coupling coordinated development of ecological-economic system in the important water supply areas of the Yellow River in Gannan[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2020,41(12):35–43.
- [26] 张平江,党国锋. 基于MCR模型与蚁群算法的洮河流域生态安全格局构建[J]. 生态环境学报, 2023,32(3):481–491.
Zhang Pingjiang, Dang Guofeng. Construction of ecological security pattern of Tao River Basin based on MCR model and ant colony algorithm[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2023,32(3):481–491.
- [27] 赵雪雁,李巍. 中国地理学中的甘南研究[J]. 地理研究, 2019,38(4):743–759.
Zhao Xueyan, Li Wei. Review of Gannan research in Chinese geography[J]. Geographical Research, 2019,38(4):743–759.
- [28] 郭亚红,阿布都热合曼·哈力克,魏天宝,等. 基于土地利用变化的和田地区生态系统服务价值分析[J]. 生态学报, 2021,41(16):6363–6372.
Guo Yahong, Abdirahman Halik, Wei Tianbao, et al. The ecosystem service value evaluation of Hotan area based on land use changes[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(16): 6363–6372.
- [29] 钱方艳,兰安军,范泽孟,等. 贵州省2000–2020年NPP时空变化特征及影响因素[J]. 水土保持研究, 2023,30(5):408–416.
Qian Fangyan, Lan Anjun, Fan Zemeng, et al. Spatiotemporal variation characteristics and influencing factors of NPP in Guizhou Province from 2000 to 2020[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(5):408–416.
- [30] Yin Z L, Feng Q, Zhu R, et al. Analysis and prediction of the impact of land use/cover change on ecosystem services value in Gansu Province, China[J]. Ecological Indicators, 2023,154:110863.
- [31] 李洁,赵锐锋,谢作轮. 甘肃省区域社会—生态系统脆弱性综合评价[J]. 经济地理, 2015,35(12):168–175.
Li Jie, Zhao Ruifeng, Xie Zuolun. The comprehensive assessment of vulnerability in social –ecological system of Gansu Province[J]. Economic Geography, 2015,35(12):168–

- 175.
- [32] 胡兴林. 甘肃省主要河流径流时空分布规律及演变趋势分析[J]. 地球科学进展, 2000, 15(5):516–521.
Hu Xinglin. Analysis of time–space distribution regulation and evolution tendency of runoff of main rivers in Gansu Province[J]. Advances in Earth Science, 2000, 15(5): 516–521.
- [33] 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.
- [34] 梁贊亮, 李杰, 陆燕花, 等. 基于LUCC的甘肃省农牧交错带生态系统服务价值评估及时空演变特征研究[J]. 草业学报, 2023, 32(5):13–26.
Liang Yunliang, Li Jie, Lu Yanhua, et al. Ecosystem service value evaluation and temporal–spatial evolution characteristics in an agro–pastoral ecotone of Gansu Province based on LUCC[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(5):13–26.
- [35] 张建国, 李晶晶, 殷宝库, 等. 基于转移矩阵的准格尔旗土地利用变化分析[J]. 水土保持通报, 2018, 38(1):131–134.
Zhang Jianguo, Li Jingjing, Yin Baoku, et al. Evaluation of land use change of Jungar Banner based on land use transfer matrix[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(1):131–134.
- [36] 陈东军, 钟林生. 生态系统服务价值评估与实现机制研究综述[J]. 中国农业资源与区划, 2023, 44(1):84–94.
Chen Dongjun, Zhong Linsheng. Review of the value evaluation and realization mechanism of ecosystem services[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2023, 44(1):84–94.
- [37] Liang L W, Chen M X, Luo X Y, et al. Changes pattern in the population and Economic gravity centers since the Reform and Opening-up in China: the widening gaps between the South and North[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 310:127379.
- [38] 王瑞祥, 叶青, 郭晓佳. 福州都市圈生态系统服务价值时空演变及生态–经济协调发展[J]. 地球科学与环境学报, 2024, 46(2):211–228.
Wang Ruixiang, Ye Qing, Guo Xiaojia. Spatio–temporal evolution of ecosystem service value and the eco–economic harmonious development in Fuzhou metropolitan area, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2024, 46(2):211–228.
- [39] 吴琳娜, 杨胜天, 刘晓燕, 等. 1976年以来北洛河流域土地利用变化对人类活动程度的响应[J]. 地理学报, 2014, 69(1): 54–63.
Wu Linna, Yang Shengtian, Liu Xiaoyan, et al. Response analysis of land use change to the degree of human activities in Beiluo River Basin since 1976[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(1):54–63.
- [40] 卫新东, 宋林韩, 王筛妮, 等. 黄河西岸陕西各县市耕地质量时空变化特征及其分异规律[J]. 水土保持研究, 2021, 28(2):326–334.
Wei Xindong, Song Linhan, Wang Shaini, et al. Spatial and temporal changes and its variation of cultivated land quality of counties and cities in Shaanxi on the west bank of the Yellow River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(2):326–334.
- [41] Li M R, Abuduwaili J, Liu W, et al. Application of geographical detector and geographically weighted regression for assessing landscape ecological risk in the Irtysh River Basin, Central Asia[J]. Ecological Indicators, 2024, 158: 111540.
- [42] 张艺腾, 娄方瑞, 赵国庆, 等. 山东半岛南部中国对虾资源时空变异特征[J]. 烟台大学学报: 自然科学与工程版, 2023, 36(3):299–306.
Zhang Yiteng, Lou Fangrui, Zhao Guoqing, et al. Spatial and temporal variability of *Fenneropenaeus chinensis* resources in south of Shandong Peninsula[J]. Journal of Yan-tai University: Natural Science and Engineering Edition, 2023, 36(3):299–306.
- [43] 朱磊, 杨爱民, 夏鑫鑫, 等. 基于空间自相关的1975–2015年玛纳斯河流域耕地时空特征变化分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(6):887–899.
Zhu Lei, Yang Aimin, Xia Xinjin, et al. Spatial distribution pattern and change characteristics analysis of cultivated land in the Manas River Basin from 1975 to 2015[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2020, 28(6):887–899.
- [44] 金淑婷, 李博, 杨永春, 等. 地学视角下的中国县级行政区空间格局演变[J]. 经济地理, 2015, 35(1):29–37.
Jin Shuting, Li Bo, Yang Yongchun, et al. The spatial pattern evolution of the county administrative region in China based on the perspective of geograph[J]. Economic Geography, 2015, 35(1):29–37.
- [45] 尹登玉, 于昊辰, 卢彦琦, 等. 2000–2020年黄河流域国土空间格局演变及生态响应[J]. 农业工程学报, 2023, 39(4): 217–228.
Yin Dengyu, Yu Haochen, Lu Yanqi, et al. Spatial pattern evolution of territorial space and its effects on ecological response in the Yellow River Basin during 2000–2020[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(4):217–228.
- [46] 张鹏岩, 耿文亮, 杨丹, 等. 黄河下游地区土地利用和生态系统服务价值的时空演变[J]. 农业工程学报, 2020, 36(11): 277–288.
Zhang Pengyan, Geng Wenliang, Yang Dan, et al. Spatial–temporal evolution of land use and ecosystem service value

- in the lower reaches of the Yellow River Region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020,36(11):277–288.
- [47] 梁膑月,曹春,李锦超,等.近20年兰西城市群生态系统服务价值对土地利用转型的时空响应[J].环境科学,2024,45(6):3329–3340.
Liang Binyue, Cao Chun, Li Jinchao, et al. Spatiotemporal response of ecosystem service value to land use change in the Lanzhou–Xining urban agglomeration over the past 20 years[J]. Environmental Science, 2024,45(6):3329–3340.
- [48] 陈美景,王庆日,白中科,等.黄河流域资源型城市土地利用转型及其对生态系统服务价值的影响[J].生态学报,2023,43(22):9459–9470.
Chen Meijing, Wang Qingri, Bai Zhongke, et al. Land use transition of resource-based cities in the Yellow River Basin and its impact on ecosystem services[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(22):9459–9470.
- [49] 董运来,王艳华.民族地区易地扶贫搬迁存在的问题与对策:基于甘肃临夏州、甘南州的数据[J].沈阳师范大学学报:社会科学版,2019,43(4):74–79.
Dong Yunlai, Wang Yanhua. Problems and countermeasures of poverty alleviation and relocation in ethnic minority areas: based on investigation data of Linxia and Gannan in Gansu Province[J]. Journal of Shenyang Normal University: Social Science Edition, 2019,43(4):74–79.
- [50] 覃炼,张坤.基于农村宅基地整治的基本农田整理新方式的探讨[J].农村经济与科技,2013,24(7):121–122.
Qin Lian, Zhang Kun. Exploration of a new approach to basic farmland preparation based on rural homestead improvement[J]. Rural Economy and Science–Technology, 2013,24(7):121–122.
- [51] 吉雄娟,程文仕,赵文婷.基于生态敏感性差异的农田整治投入优先序研究[J].资源与产业,2023,25(2):101–110.
Ji Xiongjuan, Cheng Wenshi, Zhao Wenting. Inputs priority of farmlands harness based on ecological sensitivity variance [J]. Resources & Industries, 2023,25(2):101–110.
- [52] 吴艳霞,邱乐.黄河流域土地生态安全时空演化分析及预测[J].水土保持研究,2024,31(4):258–265.
Wu Yanxia, Qiu Le. Analysis and prediction of temporal and spatial evolution of land ecological security in Yellow River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(4):258–265.
- [53] 屈雯,陈英,谢保鹏,等.榆中县土地利用转型与生态系统服务价值的时空演变研究[J].生态科学,2022,41(5):197–207.
Qu Wen, Chen Ying, Xie Baopeng, et al. Spatio-temporal dynamics of land use transition and ecosystem service value in Yuzhong County[J]. Ecological Science, 2022,41(5):197–207.
- [54] He C J, Shao H Y, Xian W. Spatiotemporal variation and driving forces analysis of eco-system service values: a case study of Sichuan Province, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(14): 8595.
- [55] 王淳一,赵明月,赵运成,等.气候变化对农业生态系统服务的影响及适应对策[J].生态学杂志,2023,42(5):1214–1224.
Wang Chunyi, Zhao Mingyue, Zhao Yuncheng, et al. A review of the impacts of climate change on agro–ecosystem services and adaptation measures[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023,42(5):1214–1224.