

山西省太原市土地利用转型及其生态效应

侯 棻, 王黎华, 孟昱州, 李 甜

(山西财经大学 公共管理学院, 山西 太原 030000)

摘 要: [目的] 山西省太原市作为中部地区重点经济区和以能源、重化工为主的工业基地, 实现高质量发展需要深入了解城市转型与生态环境质量之间的关系, 土地利用转型特征及其对生态环境的影响规律, 从而为城市土地利用转型提供依据与支撑。[方法] 通过地学信息图谱, 驱动—压力—状态—影响—响应 (DPSIR) 和 InVEST 模型探究 2011—2021 年太原市土地利用转型特征, 从生态安全、生境质量、区域生态环境质量指数以及土地利用转型生境贡献率 4 个方面探究土地利用转型对生态环境的影响。[结果] ① 研究期内太原市土地利用转型主要表现为耕地、林地、草地和建设用地之间的相互转换。即草地转出面积最多, 林地和建设用地转入面积最大。② 太原市生态安全指数呈上升趋势, 由 2011 年的 0.266 1 上升至 2021 年的 0.725 5。生境质量则呈缓慢下降趋势, 由 2011 年的 0.576 8 下降至 2021 年的 0.573 5。③ 土地生态环境质量指数在 2011—2021 年期间呈小幅下降趋势, 但总体仍较稳定; 对生境质量贡献最大的是从耕地向草地的转化, 贡献率为 3.354%, 生境质量降低的主要原因是耕地向建设用地的转化, 贡献率为 8.838%。[结论] 太原市土地利用转型特征明显, 土地利用变化造成生态环境退化, 耕地与林地、草地、建设用地间的相互转化是影响生态环境质量的主要原因。

关键词: 土地利用转型; 生态环境效应; 生态安全; 生境质量; 地学信息图谱; 山西省太原市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)02-0397-11

中图分类号: X822, F301.2

文献参数: 侯棻, 王黎华, 孟昱州, 等. 山西省太原市土地利用转型及其生态效应[J]. 水土保持通报, 2025, 45(2):397-407. Hou Fen, Wang Lihua, Meng Yuzhou, et al. Land-use transition and its ecological effects of Taiyuan City, Shanxi Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(2):397-407. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.02.039; CSTR:32312.14.stbctb.2025.02.039.

Land-use transition and its ecological effects of Taiyuan City, Shanxi Province

Hou Fen, Wang Lihua, Meng Yuzhou, Li Tian

(School of Public Administration, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan, Shanxi 030000, China)

Abstract: [Objective] As a key economic zone in central China and an industrial base dominated by energy and heavy chemicals, Taiyuan City, Shanxi Province aims to achieve high-quality growth by deeply understanding the relationship between urban transformation and ecological-environmental quality as well as the characteristics of land-use transition and its impact on habitat quality. This understanding provides a basis for and support for urban land use transitions. [Methods] The geoscience information map, drive-pressure-state-influence-response (DPSIR) framework, and InVEST model were employed to explore the characteristics of land-use transition as well as the spatiotemporal changes in ecological security and habitat quality in Taiyuan City from 2011 to 2021, and their impacts on habitat quality resulting from land-use transition. [Results] ① During the study period, the main manifestation of land-use transition in Taiyuan was the mutual conversion among land for cultivation, forests, construction, and grasslands. Grasslands had the largest outflow area, whereas land for forest and construction had the largest inflow areas. ② Taiyuan City's ecological security index showed an upward trend, rising from 0.266 1 in 2011 to 0.725 5 in 2021. However, habitat quality exhibited a slow downward trend, declining from 0.576 8 in 2011 to 0.573 5 in 2021. ③ The

收稿日期: 2024-09-11

修回日期: 2024-11-25

采用日期: 2024-11-26

资助项目: 山西省哲学社会科学规划项目“山西省市域生态文明建设评价体系构建”(2021YJ052)

第一作者: 侯棻(1986—), 女(汉族), 山西省吕梁市人, 博士, 讲师, 主要从事土地生态方面的研究。Email: houktz@163.com。

index for ecological-environmental quality revealed a slight downward trend from 2011 to 2021 but remained fairly stable overall. Conversion from cultivated land to grasslands contributed the most to habitat quality, with a contribution rate of 3.354%. The primary reason for the decline in habitat quality was the conversion of land meant for cultivation to land meant for construction, with a contribution rate of 8.838%. [Conclusion] The characteristics of land-use transformation in Taiyuan City are clear. Changes in land use have degraded the ecological environment, and there are differences in ecological security and habitat quality. The mutual conversion between land for cultivation, forests, construction, and grasslands is the main factor affecting the quality of the ecological environment.

Keywords: land-use transition; eco-environmental effects; ecological security; habitat quality; geoscience information map; Taiyuan City, Shanxi Province

土地利用转型是研究土地利用/覆被变化的一种新途径,相较于单一的土地覆被视角,土地利用转型提供了一种综合视角,即结合自然与人文社会因素深入剖析区域土地利用格局随经济社会发展的不同阶段而发生动态变化的内在机理与路径。此概念最初由英国学者 A. Grainger^[1]提出,随后由中国学者龙花楼^[2]引入,引起了国内学术界针对土地利用转型的理论构建、演化机制、特征和效应等展开深入的研究探索,为理解土地利用系统的长期变迁提供了新的理论框架与实践指导^[3-5]。地学信息图谱是 20 世纪 90 年代以来由中国地理学家陈述彭院士^[6]首次提出,后由国内学者在土地利用的时间和空间动态变化上采用如土地利用程度模型^[7]、土地利用动态度模型^[8]、CLUE-S 模型^[9]和景观格局指数等^[10]进行了大量研究,但未能很好地将“空间格局”和“时间过程”复合,地学信息图谱方法正是一种时空复合分析方法^[11-12]。

目前,研究土地利用转型生态效应的指标主要有生态环境质量指数和生态贡献率,以此获得生态环境的时空变化^[13]。然而城市化进程中的土地利用转型不仅改变了土地覆盖类型,还通过改变生态系统的结构和功能,对生态环境产生了多方面的影响。生态安全是城市发展所需的生态环境处于不受或者少受破坏与威胁的状态^[14],而生境质量则是一种重要的生态系统服务,是决定生物多样性的基础条件。评估区域生态安全和生境质量可为区域生态保护发展和生物多样性保护提供决策依据^[4]。

随着中部地区的崛起,经济社会发展取得了重大成就,同时其生态绿色发展格局也亟需巩固,为推动地区高质量发展奠定良好的生态基础。土地利用转型是城市发展转型最为直观的表征指标^[15],分析土地利用形态和转型特征,以及土地利用转型对生态环境的影响,对促进中部城市高质量发展具有重大意义^[16-17]。太原市作为中部地区重要的中心城市,同时也是山西中部城市群的核心增长极,是一个以能源、

重化工为主的工业基地,产业单一、后续发展动力不足、生态环境遭到破坏,使得在城市转型发展过程中面临巨大压力,研究太原市土地利用转型的生态环境效应可为中部地区资源型转型城市的国土空间格局优化提供参考。因此,本文以太原市为研究区,运用地学信息图谱法^[18],DPSIR 模型^[19],InVEST 模型^[20]及空间自相关^[21]分析方法作为分析工具,系统探究 2011—2021 年太原市土地利用转型特征及时空演变规律。同时引入区域生态环境质量指数和土地利用转型生境贡献率探究土地利用转型对生态环境的影响。研究成果旨在为太原市未来生态环境保护与土地利用规划提供科学决策支持,促进区域可持续发展战略的精准实施。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

太原市位于山西省腹部,辖 10 个区县,总面积 6 909 km²。气候为暖温带大陆性季风气候,三面环山,森林覆盖率 24%左右,生态环境较为脆弱。经多年转型发展,太原市经济结构发生转变,第二产业比重从最高值 66.9%降低为 41.2%。由于多年作为能源重化工基地,太原市生态本底条件较差,区域土地自然条件存在明显差异,产业转型发展与环境保护矛盾突出。

1.2 数据来源

本文土地利用数据来自中国科学院资源环境与科学数据中心 (<https://www.resdc.cn>) 提供的太原市 2011, 2016 及 2021 年的 30 m 分辨率栅格数据。在分类体系上,参考《土地利用现状分类》国家标准 (GB/T 21010—2017) 和《中华人民共和国土地管理法》的“三大类”,将土地一级地类分为耕地、林地、草地、水域、建设用地以及未利用地 6 大基本类型。此外,本文所引用的太原市生态建设、环境保护以及社会经济方面的数据资料,源自 2011—2021 年的《太原

市统计年鉴》《中国环境统计年鉴》及《中国城市统计年鉴》等官方统计资料。

2 研究方法

2.1 土地利用转型分析

土地利用转型与经济、社会转型阶段紧密契合,体现为特定时期内区域土地利用在数量结构与空间布局上的动态演变过程^[22]。随着生态文明建设的持续推进以及中部城市在高质量发展背景下对生态环境需求的增长,承载着生产活动与生态服务双重功能的土地利用转型变化表现出明显特征。

本文基于太原市 3 期土地利用数据,参考已有研究^[12,23-25],运用地学信息图谱和涨落势图谱研究太原市 2011—2016,2016—2021 年土地利用转型特征。该方法将土地利用变化中的空间单元特性与时间序列演变特征相融合,全面、系统地揭示了太原市土地利用转型的内在规律与外在表现。

2.2 土地利用转型生态效应分析

2.2.1 生态安全评价 土地生态系统是一个由自然、经济、社会所组成的复合生态系统,影响土地生态安全的因素不仅包括地形地貌、水资源、植被、气候等自然因素,还包括人口、社会经济发展水平、土地利用水平、环境建设等社会经济因素^[19]。本文基于 DPSIR 模型,结合以往学者们^[25-26]所构建的土地生态安全评价指标体系,从经济、社会、环境状况等方面出发,根据土地生态安全评价指标选取的基本原则及研究区实际情况,利用 2011—2021 年相关数据,建立太原市土地生态评价指标。首先建立一个目标层。目标层综合反映区域土地生态安全状况。其次,建立 5 个准则层。准则层将土地生态系统划分为既相互联系又相互制约的 5 个子系统,分别为驱动力子系统(D)、压力子系统(P)、状态子系统(S)、影响子系统(I)、响应子系统(R)。选取的指标属性分为正向和负向,其中“正向”代表指标越大越优,“负向”代表指标越小越优。按照科学性、全面性、可行性、地方区域性以及动态性原则,在充分考虑太原地域特点的基础上构建了指标体系(表 1)并选取了标准(表 2)。采用熵值法确定各指标权重(w_b)。对各指标数据进行无量纲化处理,以将各指标放在同一量纲下进行比较。在此基础上进一步测算出太原市 2011—2021 年每年的土地生态安全综合指数(v_a)。 v_a 数值越大,说明研究区域土地生态安全的状况越好,反之,说明土地生态安全状况越差。指标权重和土地生态安全指数的公式分别为:

$$w_b = \frac{g_b}{\sum_{b=1}^n g_b} \quad (1)$$

式中: w_b 为第 b 项指标的权重; g_b 为第 b 项指标差异性指数; n 表示指标个数。

$$v_a = \sum_{a=1}^n (w_b \times y_{ab}) \quad (a=1,2,3 \cdots m) \quad (2)$$

式中: v_a 为土地生态安全的综合值; y_{ab} 为第 a 年第 b 个指标的标准化值; w_b 为第 b 个指标的权重值。

表 1 生态安全评价指标体系

Table 1 Ecological security evaluation index system

准则层	指标	单位	属性
驱动力 (D)	人口自然增长率	%	-
	人均 GDP	元/人	+
	GDP 增速	%	+
	城镇化率	%	+
压力 (P)	人口密度	人/km ²	-
	农用化肥施用量(折纯量)	t	-
	工业二氧化硫排放量	t	-
状态 (S)	单位 GDP 消耗量	t/10 ⁴ 元(以标准煤计)	-
	土地经济密度	10 ⁸ 元/10 ⁴ hm ²	+
	人均耕地面积	m ² /人	+
	建成区绿化覆盖率	%	+
	年降水量	mm	+
影响 (I)	农村居民人均可支配收入	元/人	+
	粮食单产	kg/hm ²	+
	单位建设用地第二、三产业增加值	10 ⁸ 元/km ²	+
	人均公园绿地面积	m ²	+
响应 (R)	农业机械总动力	kW	+
	污水处理厂集中处理率	%	+
	一般工业固体废物综合利用率	%	+
	第三产业占 GDP 比重	%	+
	当年造林面积	10 ³ hm ²	+

注: + 代表正向指标, - 代表负向指标。

表 2 太原市生态安全分级评价标准

Table 2 Ecological security grading and evaluation criteria of Taiyuan City

等级	取值范围	土地生态安全特征
恶劣(I)	[0~0.2)	生态环境恶劣,不适宜人类生存发展
差(II)	[0.2~0.4)	生态环境较差,勉强满足人类生存发展需求
中(III)	[0.4~0.6)	生态环境一般,基本满足人类生存发展需求
良(IV)	[0.6~0.8)	生态环境较好,较适宜人类生存发展
优(V)	[0.8~1]	生态环境优越,适宜人类生存发展

2.2.2 生境质量评估 运用 InVEST 模型中的生境质量模块,对土地利用覆盖状况及生境潜在威胁因子进行分析。其公式为:

$$Q_{xj} = H_j \left[1 - \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right] \quad (3)$$

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} \left(\frac{\omega_r}{\sum_{r=1}^R \omega_r} \right) r_y i_{rxy} \beta_x K_{jr} \quad (4)$$

式中： Q_{xj} 是土地利用类型为 j 时栅格 x 的生境质量； H_j 是土地利用类型 j 的生境适宜性； k 为半饱和常数，通常取最大生境退化度的一半，设为 0.5； z 为归一化常量，一般取 2.5； D_{xj} 为土地利用类型 j 中 x 栅格的生境退化度； r 是威胁因子个数； Y_r 是 r 威胁栅格图中的一组威胁栅格图； ω_r 是威胁因子权重，取值范围 0 到 1； r_y 是栅格 y 的胁迫值； i_{rxy} 是威胁栅格 y 的胁迫值对栅格 x 的威胁水平； β_x 是栅格 x 的可达性水平，取值范围 0 到 1； K_{jr} 是土地利用类型 j 对威胁因子 r 的敏感度，取值范围 0 到 1。

结合太原市实际情况并参考相关文献^[4,26] 确定模型影响距离、生境适宜性和威胁源敏感度。运行生境质量模块后得到 2011、2016、2021 年太原市生境质量分布图，为能更好展示太原市生境质量时空变化，运用自然断点法将 3 期生境质量分为 4 个等级，最终对不同等级生境质量的变化情况进行统计分析，同时运用空间自相关分析方法分析太原市生境质量的集聚情况。

2.2.3 区域生态环境质量指数 区域生态环境质量指数作为一项关键指标，能够有效量化评估该区域内生态环境整体状况的优劣。其表达式为：

$$EV_i = \frac{\sum_{i=1}^n A_{ti} R_i}{TA_i} \quad (5)$$

式中： EV_i 为 t 时期的生态环境质量指数； A_{ti} 为 t 时期第 i 类土地面积； R_i 为第 i 类土地利用类型的生态环境质量指数； TA_i 为研究区总面积； n 为土地利

用类型数量。

2.2.4 土地利用转型生境贡献率 本文运用生境贡献率分析研究区域土地利用转型过程中，对生境质量变化产生影响的主导要素。生境贡献率公式基于生态贡献率公式^[27]，其表达式为：

$$C_{it} = \frac{(HQC_{it} LA_{it}) / TA}{\left(\sum_{i=1}^n HQC_{it} LA_{it} \right) / TA} \times 100\% \quad (6)$$

式中： C_{it} 为 t 时间段内 i 种土地利用类型生境贡献率； HQC_{it} 为 t 时间段内 i 种土地利用类型区内生境质量变化平均值； LA_{it} 为 t 时间段内 i 种变化类型面积； TA 为区域总面积； n 为土地利用变化类型数量。

3 结果与分析

3.1 土地利用转型分析

3.1.1 土地利用数量结构变化 2011—2016 年太原市最主要的土地利用类型为草地，研究期内草地面积占比最小值为 38.59%，最高达 44.21%（表 3）。其次为林地，太原市三面环山，东西部均为生态屏障区，还有一条汾河生态水脉提供水源补给，林地面积占比 3 a 平均达 25.46%。耕地面积持续增加，草地面积减少，建设用地面积增长幅度最大，为 1.02%。2016—2021 年，草地面积减少幅度最大，建设用地面积增速变缓，耕地面积小幅增加，增加幅度为 0.9%。11 a 间，草地面积减少 5.62%，林地面积增加 2.78%，建设用地和耕地均呈增长趋势，分别为 1.15% 和 1.64%。

表 3 2011—2021 年太原市不同土地利用类型面积所占比例及其变化

Table 3 Area proportion and changes of different land use types in Taiyuan City from 2011 to 2021

%

土地利用类型	面积比例			面积比例变化		
	2011 年	2016 年	2021 年	2011—2016 年	2016—2021 年	2011—2021 年
草地	44.21	42.59	38.59	-1.62	-4.00	-5.62
耕地	22.25	22.50	23.40	0.25	0.90	1.15
建设用地	8.57	9.59	10.21	1.02	0.62	1.64
林地	24.43	24.75	27.21	0.32	2.46	2.78
水域	0.01	0.03	0.03	0.02	-0.01	0.01
未利用地	0.53	0.54	0.56	0.01	0.01	0.02

3.1.2 土地利用变化图谱分析

(1) 2011—2016 年土地利用转型图谱分析。2011—2016 年太原市共计识别出 36 种具有空间异质性的图谱单元，其中有 30 种图谱单元（总面积为 119.26 km²）体现出时间异质性特征。将图谱单元按照面积大小进行排序（表 4），发现前 10 类图谱单元占总图谱单元面积的 95.23%。最明显的是耕地和草地

之间的相互转换（“草地→耕地”“耕地→草地”图谱单元），占总图谱单元面积的 34.58%，广泛分布于娄烦县、古交市和阳曲县；其次，较为明显的是“耕地→建设用地”图谱单元，占总图谱单元面积的 15.66%，集中分布在迎泽区、小店区、万柏林区和晋源区；再次是“林地→耕地”图谱单元，占总图谱单元面积的 12.88%，主要分布在尖草坪区和万柏林区。

从总体上看,2011—2016 年太原市的土地利用变化以耕地和草地、建设用地、林地之间的相互转换为主,耕地面积的增加和减少是该时期太原市主要的土地利用转型类型。研究期内草地发生显著转变,其中大部分转变为耕地、林地和建设用地,累计转变比例为 29.88%。同时,也有耕地和林地向草地的转入,转入面积分别为 19.85,11.23 km²,累计转入比例为 26.06%。此外,建设用地的累计转入比例为 19.79%,主要来源于耕地。从中透视出本阶段太原市城镇化和经济社会发展水平处于转型增长期,退耕还林还草政策实施向好,同时也有部分林地转入耕地,耕地总量动态平衡水平有待提升。

(2) 2016—2021 年土地利用转型图谱分析。2016—2021 年,太原市有 30 个具有时空异质性的图谱单元,总面积为 304.55 km²,与上一时期相比增加了 185.29 km²。按照面积大小对这些图谱单元进行排序,发现前 10 类图谱单元占据了图谱单元总面积的 94.67%(表 5),并且这些图谱单元的空间分布范围也进一步扩大。其中,“耕地→建设用地”这一图谱单元最为显著,占据了总图谱单元面积的 20.32%,广泛分布在太原市的 6 个城区,特别是小店区;其次是草地与耕地之间的相互转换,占据了图谱单元的 32.01%,其中“草地→耕地”图谱单元比“耕地→草地”图谱单元大 0.57%,主要分布在阳曲县和古交市;再次是林地与草地之间的相互转换,占据了总图谱单元的 19.20%。

表 4 2011—2016 年太原市主要土地利用转型图谱单元排序
Table 4 Unit ranking of main land use transformation map in Taiyuan City from 2011 to 2016

排名	土地利用变化类型	面积/km ²	变化比率/%
1	草地→耕地	21.39	17.94
2	耕地→草地	19.85	16.65
3	耕地→建设用地	18.68	15.66
4	林地→耕地	15.36	12.88
5	草地→林地	11.63	9.75
6	林地→草地	11.23	9.41
7	耕地→林地	6.88	5.77
8	建设用地→耕地	3.62	3.04
9	草地→建设用地	2.61	2.19
10	林地→建设用地	2.31	1.94

2016—2021 年,太原市主要土地利用转型模式与前期相似,但所占比例差异显著。具体体现在耕地累计转入比率的显著变化,较之 2011—2016 年,本时期耕地累计转入比率增加了 16.71%;耕地累计转出比率则增加了 1.58%,耕地总量动态平衡实施力度有

所加强。耕地向建设用地、草地、林地净转出分别为 61.89,47.87,16.83 km²,累计转出比例 41.57%;反向转入分别为 19.49,49.61,17.57 km²,累计转入比率 28.46%,耕地净转出比例为 13.11%,较之上一时期增加 8.89%。从中透视出 2016—2021 年太原市耕地与建设用地矛盾更为突出,这与太原市经济发展与城镇化发展水平同步,该时期耕地总量动态平衡水平较之上一时期有所提升。

表 5 太原市 2016—2021 年主要土地利用转型图谱单元排序
Table 5 Unit ranking of main land use transformation map in Taiyuan City from 2016 to 2021

排序	土地利用变化类型	面积/km ²	变化比率/%
1	耕地→建设用地	61.89	20.32
2	草地→耕地	49.61	16.29
3	耕地→草地	47.87	15.72
4	林地→草地	29.69	9.75
5	草地→林地	28.78	9.45
6	建设用地→耕地	19.49	6.40
7	林地→耕地	17.57	5.77
8	耕地→林地	16.83	5.53
9	林地→建设用地	8.97	2.95
10	草地→建设用地	7.61	2.50

综合来看,太原市 2011—2021 年土地利用结构发生了显著变化,主要表现为草地、林地与耕地之间的相互转换,以及耕地与建设用地的相互转换。研究期内,太原市林草地的变化频率最高,一方面,太原市气候、土质等因素导致林地与草地之间的相互转换量大,同时建设用地占用林草地以及补充耕地的双重压力,导致区域林草地流失问题严重;另一方面,在国家退耕还林还草政策的推动下,林草地面积得到补充,但补充面积远小于其流失面积。在耕地与建设用地的相互转换中,建设用地占用的耕地面积要远大于其转换为耕地的面积,与 2011—2016 年相比,2016—2021 年建设用地占用耕地面积为上一时期的 3.31 倍。与此同时,在建设用地与耕地的相互转换中,建设用地扩张导致的耕地流失面积是建设用地补充耕地面积的 4.4 倍。结合太原市社会经济发展情况,由于太原城市群建设列入国家“十二五”规划,以及城镇化建设,尤其是新城建设的推进,加之“十三五”时期太原市大力推动城中村改造、开发区拓展,耕地与建设用地之间的矛盾愈发尖锐。

3.1.3 土地利用变化模式 为揭示区域整体变化规律,对太原市 2011—2021 年的土地利用变化模式进行分类(图 1)。4 种变化型中,前期变化型和后期变

化型较为明显并呈现显著集聚状态,且后期变化型分布面积明显大于前期变化型面积,即2011—2016年发生变化的土地利用类型面积小于2016—2021年发生变化的土地利用类型面积。前期变化型集聚在尖草坪区、万柏林区和小店区,后期变化型集聚在阳曲县、尖草坪区、杏花岭区、万柏林区、迎泽区、晋源区、小店区和清徐县。

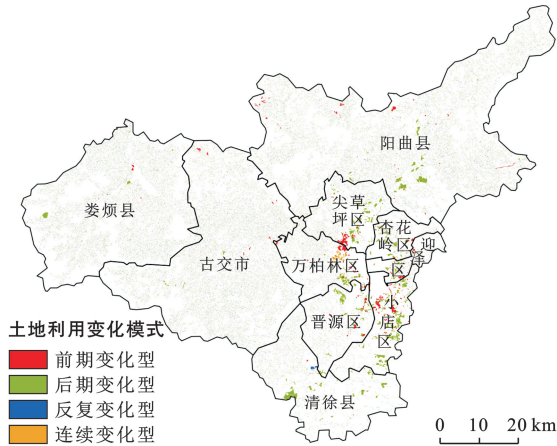


图1 太原市2011—2021年土地利用变化模式图谱

Fig.1 Land use change map and change model of Taiyuan City from 2011 to 2021

3.1.4 土地利用涨落势图谱分析 利用涨势图谱分析法,分别构建太原市2011—2016及2016—2021年两个时间序列阶段的涨势图谱,进而对各区县的土地利用数量结构转型差异进行了详尽的统计分析(图2)。

2011—2016年太原市土地利用状况呈现出显著稳定性与局部变动性并存的特点。显著稳定性具体表现在:这一时期,土地利用类型未发生变化的区域

为6783.07 km²,比例高达98.27%。而相比之下,发生变化的区域面积为119.26 km²,占总面积的1.73%。局部变动性具体体现在:尽管变化区域面积比例较小,但土地利用结构变化却颇为复杂。其中,新增耕地的增长趋势最为明显,其面积达到了40.84 km²,为总面积的34.25%,凸显了耕地资源在该时段内的积极增长态势。其次是新增草地,所占比例为27.45%。此外,新增建设用地和新增林地分别占20.10%和16.45%,反映了城市扩张与生态恢复并进的趋势。相比之下,新增水域和新增未利用地的面积则相对较小,表明这些类型的土地利用变化在该时段内较为有限。从空间分布来看,新增耕地在尖草坪区和万柏林区呈现集中分布,新增建设用地在迎泽区和小店区呈现集中分布状态,而这两个区域也正是太原市的中心区域。2016—2021年太原市土地利用未变区域面积为6596.12 km²,变化区域面积为304.55 km²,变化区域面积占太原市总面积的4.41%。该时期土地利用变化结构与上一时期相似,新增耕地的面积仍然最大,为88.14 km²,占变化区域总面积的28.94%;其次仍然是新增草地、新增建设用地、新增林地,面积分别为82.86,79.57,49.56 km²,分别占变化区域的27.21%,26.13%,16.27%;新增水域和新增城乡建设用地的面积最小。通过对太原市两个时间序列土地利用涨势特征的分析,发现其具有较高相似性,但后一时期新增建设用地面积的增量明显高于前一时期,而新增耕地面积增量则明显小于前一时期,这与区域经济增长分异与城镇化趋势存在一定关联。

利用落势图谱分析方法生成太原市2011—2016和2016—2021年两个时序单元的落势图谱,并对土地利用数量结构转型差异进行统计分析(图3)。

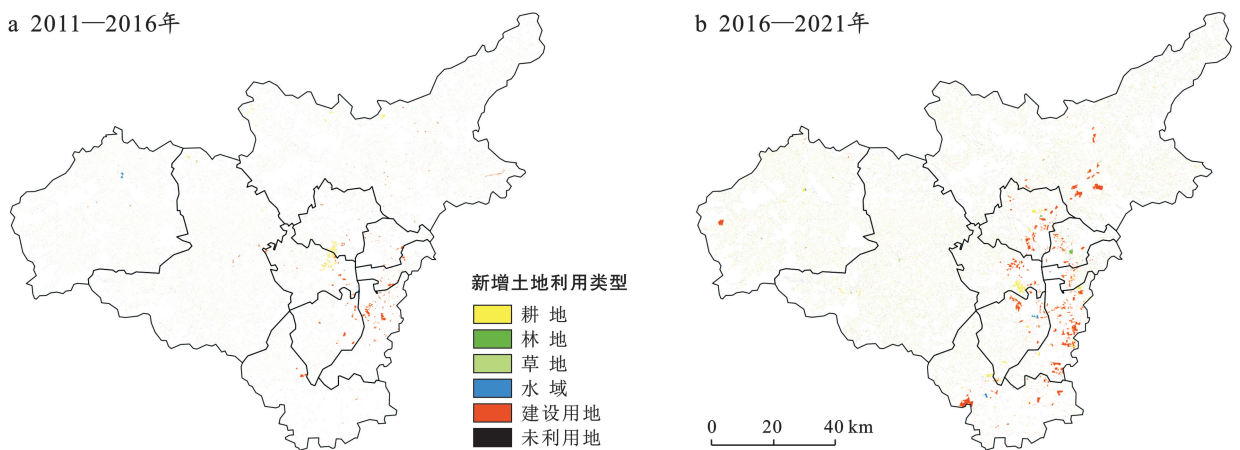


图2 太原市各时序单元土地利用涨势图谱

Fig.2 Map of land use growth in each sequential unit of Taiyuan City

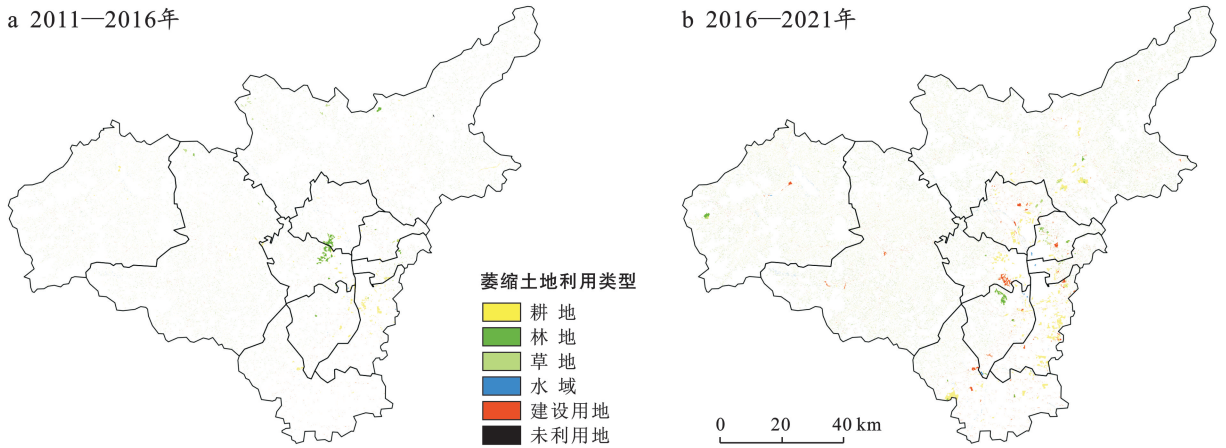


图 3 太原市各时序单元土地利用落势图谱

Fig.3 Land use decline map of each time series unit in Taiyuan City

2011—2016 年太原市耕地萎缩(减少)面积最大,为 46.87 km²,占总萎缩面积的 39.31%;其次是建设用地、草地、水域萎缩面积,分别占总萎缩面积的 30.15%,24.35%,5.07%;林地和未利用地的萎缩面积较小,占总萎缩面积的比例均小于 1%。从空间上来看,6 类萎缩用地广泛分布在太原各区县,同时也有部分地类呈现集聚状态,萎缩耕地集中分布在小店区,萎缩林地集中分布在尖草坪区和万柏林区。

2016—2021 年太原市各地类萎缩面积及其结构都与上一时期保持较高相似性。耕地萎缩面积和建设用地萎缩面积较上一时期都有明显增加,这一特征在六城区尤为显著,这与该区域的经济发展和城镇化进程的迅速推进紧密相关。城镇化的快速发展导致了大量建设用地的需求难以满足,进而造成了这些地区耕地被过量占用以进行建设。

3.2 土地利用转型生态效应分析

3.2.1 生态安全评价 2011—2021 年太原市土地生态综合安全指数呈上升趋势(表 6)。由 2011 年的 0.27 上升至 2021 年的 0.73。2011—2021 年,太原市土地生态综合安全指数有两个上升阶段,分别是 2011—2015,2017—2021 年。①第一阶段:人均 GDP 提高、自然环境改善和产业结构调整共同促进了该阶段土地生态安全水平的提高。2015 年较 2011 年相比第二产业比重有所下降,产业结构开始向第三产业倾斜,导致这时期的工业二氧化硫排放量和 GDP 能耗下降。②第二阶段:土地安全从临界安全水平提高到较安全水平,该阶段土地生态综合安全指数上升趋势较第一阶段上升趋势较快。在此阶段太原市政府大力开展一体化治山、管水、治气、治城等管理工作,不断完善近郊约 6.67×10⁴ hm² 环绕城市的森林绿色生态系统,并加快构建西北部远郊的约 6.67×10⁴ hm² 绿色屏障。

表 6 2011—2021 年太原市生态安全综合评价价值

Table 6 Comprehensive evaluation values of ecological security in Taiyuan City from 2011 to 2021 year

年份	综合评价价值
2011	0.27
2012	0.30
2013	0.36
2014	0.40
2015	0.44
2016	0.43
2017	0.45
2018	0.57
2019	0.57
2020	0.61
2021	0.73

3.2.2 生境质量评估 通过评估研究区的生境质量(表 7),根据指数分布情况使用自然间断点法将其分为 4 级:低(0~0.41)、中(0.41~0.63)、较高(0.63~0.82)和高(0.82~1)。由图 4 可见,11 a 间研究区内生境质量分布基本保持一致,主要表现为六城区生境质量等级较低,这与太原市的经济布局呈正相关关系;而高和较高等级生境质量则交叉错落分布在娄烦县、古交市和阳曲县,由中心向四周逐渐递增,这主要是由于 3 个县(市)的城区布局。此外,太原市生境质量退化空间分异明显(图 5),生境质量退化度最高的地区为迎泽区、杏花岭区、尖草坪区、万柏林区和晋源区。2010—2015 年,太原市转型与增长阶段,经济开始从传统重工业向服务业和高新技术产业转型,由于上述 4 个城区的人口和地理优势,建设用地需求上升,侵占了草地等生态用地,造成区域生境质量退化。2016—2020 年高质量发展时期,战略性新兴产业和高新技术制造业成为经济新动能,区域内建设用地仍

居高不下,生境质量仍面临威胁。

利用 GIS 软件对研究区的生境质量进行全局和局部空间自相关分析。2011,2016,2021 年太原市生境质量全局 Moran's I 指数 p 值为 0.00,均 <0.01 ,即生境质量在空间上存在显著集聚现象。通过 LISA 指数(局部空间自相关)的计算,将研究区的生境质量划分为 3 类:不显著、高一高集聚(即生境质量较高等级区域相互邻近)和低—低集聚(即生境质量较差区域相互邻近)。由图 6 可见,高一高集聚分布在古交市、娄烦县、阳曲县为主的云中山和系舟山自然保护区,该区域海拔较高且地形复杂,生物和植被类型较丰富,受人类活动影响相对较小,生境质量出现高一高集聚,未来在太原市国土空间总体规划(2021—

2035 年)的指引下,将继续进行“山水林田湖草沙”统筹保护,保育修复东山、西山生态屏障区。低—低集聚分布在城市化水平较高的六城区、清徐县和阳曲县,城市化进程加速与人口密度持续增长,使得人地关系趋于紧张,引发了一系列生态环境压力,进而导致该区域出现了生态环境质量的低—低集聚现象。

表 7 2011,2016 及 2021 年太原市生境质量均值
Table 7 Average habitat quality of Taiyuan City in 2011, 2016 and 2021

年份	生境质量均值
2011	0.576 8
2016	0.575 2
2021	0.573 5

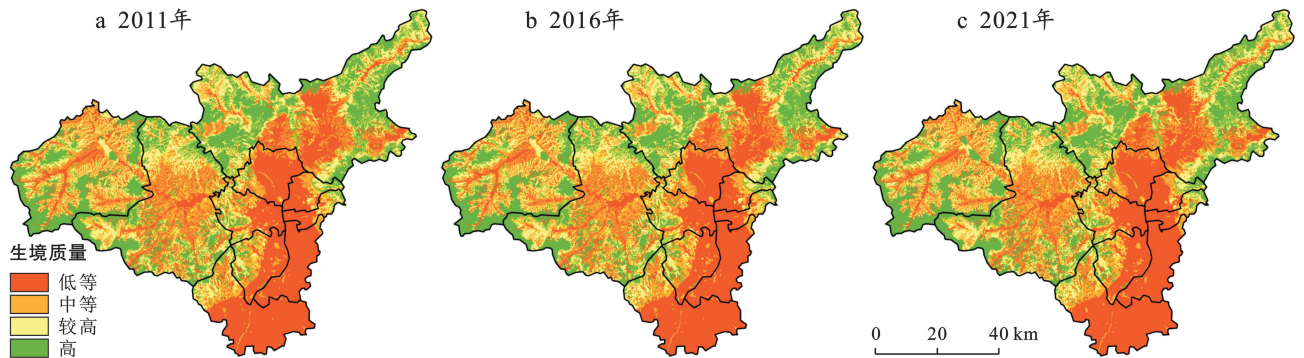


图 4 2011—2021 年太原市生境质量分布

Fig.4 Habitat quality distribution in Taiyuan City from 2011 to 2021

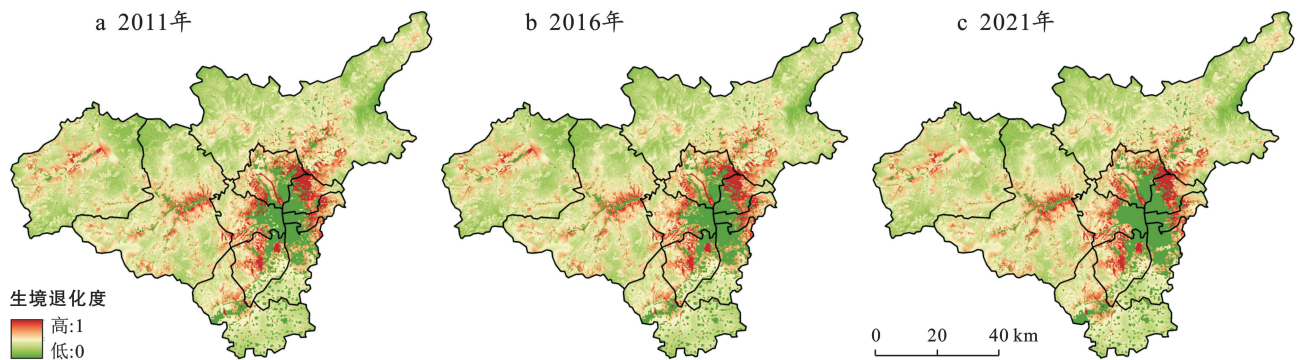


图 5 2011—2021 年太原市生境退化度分布

Fig.5 Distribution of habitat degradation degree in Taiyuan City from 2011 to 2021

3.2.3 区域生态环境质量指数 基于式(3)计算得出太原市 2011,2016,2021 年的土地生态环境质量指数(表 8),分别为 0.548 2,0.547 1,0.545 7,呈小幅下降

趋势,但总体仍较稳定。具体到各地类,2011—2021 年除水域和建设用地外,其他地类的生态环境质量指数均呈下降趋势。

表 8 太原市各土地利用类型生态环境质量指数
Table 8 Habitat quality index of land use type in Taiyuan City

年份	各土地类型的生态环境质量指数						区域生态环境质量指数
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	
2011	0.075 7	0.268 1	0.181 1	0.005 7	0.017 5	0.000 0	0.548 2
2016	0.075 4	0.267 1	0.180 8	0.005 8	0.018 0	0.000 0	0.547 1
2021	0.073 9	0.266 3	0.180 4	0.005 8	0.019 3	0.000 0	0.545 7

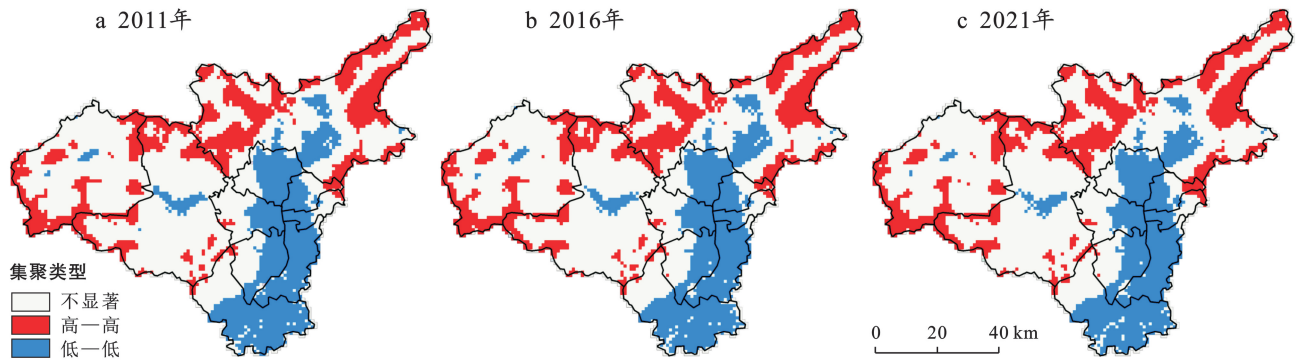


图 6 太原市 2011—2021 年生境质量的 LISA 指数

Fig.6 LISA Index of habitat quality in Taiyuan City from 2011 to 2021

3.2.4 土地利用转型生境贡献率 研究期内,太原市生境质量因土地利用转型而显著变化,既有退化也有提升,具体变化由不同土地利用类型的转变导致,图 7 给出了主要变化类型及其贡献率。2011—2021 年生境质量基本保持稳定,11 a 间对生境质量贡献最大的是由耕地向草地的转化,贡献率为 3.354%,其次为耕地向林地、建设用地向耕地的转化,贡献率分别为 2.032%,2.015%;生境质量降低的主要原因是耕地向建设用地的转化,贡献率为 8.838%,其次为草地向耕地的转化,贡献率为 3.66%,后续生态环境保护应该注意耕地和草地的退化。

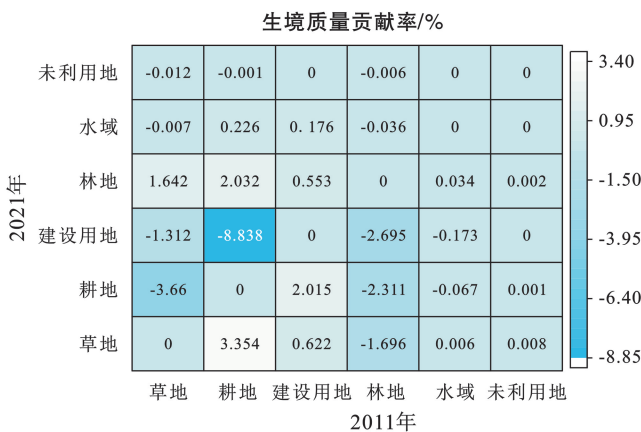


图 7 2011—2021 年太原市土地利用转型生境质量贡献率热力图

Fig.7 Heat map of habitat quality contribution rate of land use transition in Taiyuan City from 2011 to 2021

4 结论

本文通过对 2011—2021 年太原市土地利用转型图谱特征和土地利用转型的生态效应进行分析,得出以下主要结论。

(1) 2011—2021 年,太原市土地利用转型图谱特征明显,以耕地、建设用地、林地与草地之间的相互转换为主。具体表现为:2011—2016 年,草地面积小幅减少,建设用地面积持续增加,耕地持续向草地和建

设用地转化,占总面积 32.31%;2016—2021 年,草地面积大幅减少,林地面积小幅增加,建设用地面积增长趋势放缓,草地和建设用地向耕地转化,占总面积的 22.69%。

(2) 研究期内,太原市土地利用转型的生态效应在生态安全和生境质量方面有细微差异。从生态安全方面分析,2011—2021 年,太原市生态安全指数稳步提升。2011—2016 年太原市生态安全水平由差等转为中等,2016—2021 年由中等转为良。从生境质量方面分析,太原市生境质量呈稳定趋势,且存在显著的空间相关性。生境质量与经济发展水平呈高度负相关,6 个城区生境质量呈低—低集聚。反之,高一高集聚区集中在生态保育区。研究数据表明,耕地与林地、草地、建设用地间的相互转化是太原市生境质量降低或提升的主要原因。2011—2016 年属于生境质量退化时期,区域生境质量的下降主要归因于林地与草地面积的缩减;2016—2021 年生境质量提升时期,建设用地的适度调整与耕地的有效恢复,促使了大量土地向林地和草地转化,这一转变不仅增加了生态空间的面积,而且提升了区域生境质量与多样性,成为推动生态环境向好的主导力量。

5 讨论

本文从生态安全评价、生境质量评估、生态环境质量指数与土地利用转型生境贡献率 4 个方面分析了土地利用转型的生态效应,是对过往研究用生态环境质量指数和土地利用转型的生态贡献率表征土地利用转型生态环境效应^[27-28]的改进,为综合反映该问题提供了一种新的研究视角。同时,扩展了从单一维度如生境质量^[4]来表征生态环境质量的研究,在深入探讨土地利用转型对城市生态环境的影响方面具有一定的借鉴意义。此外,本研究将土地利用变化信息图谱方法与土地利用转型生态效应分析方法结合,能

够联动表现生态环境对土地利用变化的响应,实现土地利用变化格局和结果的耦合,可以为中部地区能源重化工城市土地利用转型及生态文明建设提供参考。同时,研究发现上述4个方面中土地利用转型与区域生态安全状况、生态环境质量指数及土地利用转型生境贡献率联系更为紧密,生境质量评估则在空间上和程度上并未表现出较为明显的变化,未来可进一步探索土地利用转型生态效应的其他研究视角。

参考文献(References)

- [1] Grainger A. National land use morphology: Patterns and possibilities [J]. *Geography*, 1995, 80(3): 235-246.
- [2] 龙花楼. 土地利用转型的解释[J]. *中国土地科学*, 2022, 36(4): 1-7.
Long Hualou. Explanation of land use transitions [J]. *China Land Science*, 2022, 36(4): 1-7.
- [3] 杨皓然, 吴群. 碳排放视角下的江苏省土地利用转型生态效率研究: 基于混合方向性距离函数[J]. *自然资源学报*, 2017, 32(10): 1718-1730.
Yang Haoran, Wu Qun. Study on the eco-efficiency of land use transformation in Jiangsu Province from the perspective of carbon emission: Based on the mixed directional distance function [J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(10): 1718-1730.
- [4] 滕雅丽, 谢苗苗, 王回苗, 等. 资源型城市土地利用转型及其对生境质量的影响: 以乌海市为例[J]. *生态学报*, 2022, 42(19): 7941-7951.
Teng Yali, Xie Miaomiao, Wang Huihui, et al. Land use transition in resource-based cities and its impact on habitat quality: A case of Wuhai City [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(19): 7941-7951.
- [5] 曲艺, 龙花楼, 曹林森. 城镇化背景下土地利用转型的环境与经济效应耦合研究框架构建[J]. *地理科学进展*, 2024, 43(4): 799-809.
Qu Yi, Long Hualou, Cao Linsen. Construction of a research framework for coupling environmental and economic effects of land use transition under urbanization [J]. *Progress in Geography*, 2024, 43(4): 799-809.
- [6] 陈燕, 齐清文, 杨桂山. 地学信息图谱的基础理论探讨[J]. *地理科学*, 2006, 26(3): 306-310.
Chen Yan, Qi Qingwen, Yang Guishan. Basic theories of geo-info-TUPU [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 26(3): 306-310.
- [7] 西藏自治区土地管理局. 西藏自治区土地利用[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
Xizang Autonomous Region Land Management Bureau. Land use in Tibet Autonomous Region [M]. Beijing: Science Press, 1992.
- [8] 刘纪远. 中国资源环境遥感宏观调查与动态研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1996: 158-188.
Liu Jiuyan. China's remote sensing macro investigation and dynamic research of resources and environment [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1996: 158-188.
- [9] Verburg P H, Soepboer W, Veldkamp A, et al. Modeling the spatial dynamics of regional land use: The CLUE-S model [J]. *Environmental Management*, 2002, 30(3): 391-405.
- [10] O'Neill R, Krummel J, Gardner R, et al. Indices of landscape pattern [J]. *Landscape Ecology*, 1988, 1: 153-162.
- [11] 于元赫, 李子君, 林锦阔, 等. 沂河流域土地利用时空变化图谱特征分析[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(5): 975-988.
Yu Yuanhe, Li Zijun, Lin Jinkuo, et al. TUPU characteristics of spatiotemporal variation for land use in the Yihe River basin [J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(5): 975-988.
- [12] 张文慧, 吕晓, 史洋洋, 等. 黄河流域土地利用转型图谱特征[J]. *中国土地科学*, 2020, 34(8): 80-88.
Zhang Wenhui, Lyu Xiao, Shi Yangyang, et al. Graphic characteristics of land use transition in the Yellow River basin [J]. *China Land Science*, 2020, 34(8): 80-88.
- [13] 黄晶, 薛东前, 董朝阳, 等. 干旱绿洲农业区土地利用转型生态环境效应及分异机制: 基于三生空间主导功能判别视角[J]. *地理科学进展*, 2022, 41(11): 2044-2060.
Huang Jing, Xue Dongqian, Dong Chaoyang, et al. Eco-environmental effects and spatial differentiation mechanism of land use transition in agricultural areas of arid oasis: A perspective based on the dominant function of production-living-ecological spaces [J]. *Progress in Geography*, 2022, 41(11): 2044-2060.
- [14] 左伟, 王桥, 王文杰, 等. 区域生态安全评价指标与标准研究[J]. *地理学与国土研究*, 2002, 18(1): 67-71.
Zuo Wei, Wang Qiao, Wang Wenjie, et al. Study on regional ecological security assessment index and standard [J]. *Geography and Territorial Research*, 2002, 18(1): 67-71.
- [15] 瞿诗进, 胡守庚, 李全峰. 中国城市建设用地转型阶段及其空间格局[J]. *地理学报*, 2020, 75(7): 1539-1553.
Qu Shijin, Hu Shougeng, Li Quanfeng. Stages and spatial patterns of urban built-up land transition in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(7): 1539-1553.
- [16] Long Hualou, Liu Yongqiang, Hou Xuegang, et al. Effects of land use transitions due to rapid urbanization on ecosystem services: Implications for urban planning

- in the new developing area of China [J]. *Habitat International*, 2014, 44: 536-544.
- [17] Long Hualou, Qu Yi, Tu Shuangshuang, et al. Development of land use transitions research in China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2020, 30 (7): 1195-1214.
- [18] 于海鹏, 杨翔惟, 黎家作, 等. 基于地学信息图谱的土地利用时空演变分析[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2022, 20(4): 109-117.
Yu Haipeng, Yang Xiangwei, Li Jiazuo, et al. Analysis on spatial and temporal change of land use based on geo-information Tupu [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2022, 20(4): 109-117.
- [19] 吴艳霞, 魏志斌, 王爱琼. 基于 DPSIR 模型的黄河流域生态安全评价及影响因素研究[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(6): 322-331.
Wu Yanxia, Wei Zhibin, Wang Aiqiong. Ecological safety evaluation and influencing factors of Yellow River basin based on DPSIR model [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(6): 322-331.
- [20] 温煜华. 2011—2021 年甘肃省生态环境质量综合评价及时空演变特征分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2024, 38(6): 110-119.
Wen Yuhua. Assessment and spatial-temporal evolution of ecological environment in Gansu Province from 2011 to 2021 [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2024, 38(6): 110-119.
- [21] 李美莲, 许进龙, 张河雄, 等. “双碳”目标下广西石漠化片区耕地绿色利用效率时空分异研究[J]. *水土保持研究*, 2024, 31(6): 365-374.
Li Meilian, Xu Jinlong, Zhang Hexiong, et al. Study on the temporal and spatial differentiation of the green utilization efficiency of cultivated land in rocky desertification area of Guangxi under ‘dual carbon’ goals [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(6): 365-374.
- [22] 张学儒, 周杰, 李梦梅. 基于土地利用格局重建的区域生境质量时空变化分析[J]. *地理学报*, 2020, 75(1): 160-178.
Zhang Xueru, Zhou Jie, Li Mengmei. Analysis on spatial and temporal changes of regional habitat quality based on the spatial pattern reconstruction of land use [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(1): 160-178.
- [23] 龙花楼, 陈坤秋. 基于土地系统科学的土地利用转型与城乡融合发展[J]. *地理学报*, 2021, 76(2): 295-309.
Long Hualou, Chen Kunqiu. Urban-rural integrated development and land use transitions: A perspective of land system science [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(2): 295-309.
- [24] Lu Xiao, Shi Yangyang, Chen Changling, et al. Monitoring cropland transition and its impact on ecosystem services value in developed regions of China: A case study of Jiangsu Province [J]. *Land Use Policy*, 2017, 69: 25-40.
- [25] 陆汝成, 黄贤金, 左天惠, 等. 经济快速增长区土地利用信息图谱构建: 以江苏省环太湖地区为例[J]. *资源科学*, 2009, 31(7): 1133-1141.
Lu Rucheng, Huang Xianjin, Zuo Tianhui, et al. Construction of land use information tupu in the rapidly developing regions: A case study of the surrounding regions of Taihu Lake in Jiangsu Province [J]. *Resources Science*, 2009, 31(7): 1133-1141.
- [26] 崔馨月, 方雷, 王祥荣, 等. 基于 DPSIR 模型的长三角城市群生态安全评价研究[J]. *生态学报*, 2021, 41(1): 302-319.
Cui Xinyue, Fang Lei, Wang Xiangrong, et al. Urban eco-security assessment in the urban agglomerations based on DPSIR model: A case study of Yangtze River delta, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(1): 302-319.
- [27] 杨清可, 段学军, 王磊, 等. 基于“三生空间”的土地利用转型与生态环境效应: 以长江三角洲核心区为例[J]. *地理科学*, 2018, 38(1): 97-106.
Yang Qingke, Duan Xuejun, Wang Lei, et al. Land use transformation based on ecological-production-living spaces and associated eco-environment effects: A case study in the Yangtze River delta [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(1): 97-106.
- [28] 畅田颖, 张仲伍, 乔旭宁, 等. 黄河流域 2000—2020 年“三生”空间土地利用转型及其生态环境效应[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(4): 268-275.
Chang Tianying, Zhang Zhongwu, Qiao Xuning, et al. Land use transformation and its eco-environment effects of ecological-production-living spaces in Yellow River basin [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(4): 268-275.