

• 生态建设 •

基于 PLUS-InVEST 模型的洮河流域土地利用与生境质量变化多情景模拟

柴悦¹, 许艳¹, 柴璐², 王永强¹

(1. 甘肃农业大学 管理学院, 兰州 730070; 2. 兰州理工大学 土木工程学院, 兰州 730050)

摘要:土地利用变化对生境质量演变具有重要影响,探究不同情景下土地利用变化对生境质量的影响,为区域生态保护和土地资源可持续利用提供建议。本研究采用“历史分析-情景模拟-空间评估”框架,基于洮河流域2000—2020年历史土地利用数据,对过去20年流域土地利用变化及生境质量时空演变特征进行分析的基础上,整合 PLUS-InVEST 模型与空间自相关方法,系统解析不同情景下洮河流域土地利用与生境质量的时空演变及空间集聚特征。结果表明:(1)洮河流域过去20年土地利用变化主要表现为耕地和林地的相互转换,草地动态变化频繁,水域面积显著减少,建设用地和未利用地面积有所扩张,其生境质量处于一般水平且呈现先下降后上升的变化趋势。(2)到2030年,在自然发展情景和生态保护情景中,均呈现出耕地减少、林地、水域增加的趋势;在自然发展情景和耕地保护情景下,建设用地面积扩张明显,而草地面积减少最显著;综合来看,不论在何种情景中,草地和未利用地面积均呈现出稳定的减少态势。(3)2030年不同情景下洮河流域平均生境质量指数相较于2020年均有所提高,不同情境下生境质量指数排名从高到低依次为生态保护情景>自然发展情景>耕地保护情景,在生态保护情境下高—高集聚和低—低集聚区域减少明显,低—高集聚区域明显由流域东北部向中部开始扩散。未来积极践行生态保护举措是洮河流域推进可持续发展的最优路径。

关键词: PLUS-InVEST 模型;空间自相关;土地利用变化模拟;生境质量变化;洮河流域

中图分类号:X826

文献标识码:A

文章编号:1673-5919(2025)01-0067-16

DOI: 10.13691/j.cnki.cn23-1539/f.2025.01.007

Multi-scenario Simulation of Land Use and Habitat Quality Change in Tao River Basin Using PLUS-InVEST Model

CHAI Yue¹, XU Yan¹, CHAI Lu², WANG Yongqiang¹

(1. School of Management, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: Land use change has an important impact on the evolution of habitat quality. This study explores the impact of land use change on habitat quality under different scenarios and provides suggestions for regional ecological protection and the sustainable use of land resources. The study adopts the framework of “historical analysis — scenario simulation — spatial assessment”, analyzing data from 2000 to 2020 in the past 20 years. It integrates the PLUS-InVEST model and the spatial autocorrelation method to analyze the characteristics of land use and habitat quality in different river basins. The results show that: (1) Over the past 20 years, land use changes in the

收稿日期:2025-01-02

基金项目:2023年甘肃省高校教师创新基金项目(2023B-079)

第一作者简介:柴悦(2001-),女,甘肃兰州人,硕士研究生。

通讯作者:许艳(1980-),女,河北沧州人,博士研究生,副教授,硕士生导师。研究方向:土地生态与耕地保护。

责任编辑:付佳

Taohe Basin are mainly reflected in the mutual conversion of cropland and forestland, frequent dynamic changes of grassland, a significant reduction in water area, and the expansion of construction land and unused land. The habitat quality is generally at a medium level, showing a trend of first declining and then rising. (2) By 2030, in both the natural development scenario and the ecological protection scenario, the decrease in cropland, forestland, and water area will increase. In the natural development scenario and the cropland protection scenario, the area of construction land will expand significantly while the grassland area will decrease the most. Overall, the areas of grassland and unused land will decrease steadily. (3) Compared to 2020, in 2030, the average habitat quality index in the Taohe Basin will vary across different scenarios. The ranking of the habitat quality index in the descending order is: ecological protection scenario, natural development scenario, and cropland protection scenario. In the ecological protection scenario, the high-high agglomeration and low-low agglomeration areas of the habitat quality index will decrease significantly, and the low-high agglomeration area will spread from the northeast to the central region. In the future, ecological protection measures are the best way to promote sustainable development in the Taohe Basin.

Keywords: PLUS-InVEST model; Spatial autocorrelation; Simulation of land use change; Habitat quality change; Taohe River Basin

0 引言

土地利用变化已成为全球环境变迁的重要驱动力之一,随着社会经济的发展以及城镇化进程的加速,土地利用方式变更速率进一步加快,由此带来的区域生态环境问题也日渐显现。生境质量作为反映地区生态环境状况的重要指标,能够从生态系统层次对生态环境的性质以及变化状态的结果进行鉴定^[1]。通过长期监测土地利用变化和生境质量演变,可以评估当下土地利用布局效果,为及时调整和优化土地利用布局提供参考^[2]。近年来,社会-经济-生态三位一体的协调发展模式对于优化土地利用布局提出了更高层次的要求,因此基于土地利用变化、土地利用变化模拟下的生境质量演变研究已经成为学术界研究的热点区域。

目前,围绕土地利用变化与生境质量演变的研究已取得阶段性成果^[3-4],研究多集中在历史—现在土地利用状况对生境质量的影响方面,例如赵玉^[5]等研究了新疆维吾尔自治区 2000—2020 年土地利用变化对包括生境质量在内的生态系统服务价值影响,徐云等^[6]对长江中下游地区土地利用变化驱动下的生境质量演变规律进行了探究。基于土地利用变化探究生境质量时空演变特征已经成为评估生境质量状况的经典方法而被广泛使用,该方法可以实现生境质量空间分布与动态变化的空间制图,清楚地反映土地利用变化与生境质量之间的关系。相较之下,未来不同发展情景下土地利用模拟综合考虑自然禀赋、政策干预、区域协调等因素来平衡土地利用的生态效益和经济效益,结合未来不同情景下的土地利用预测结果,可以评估不同土地利用情景下的生境质量空间分布,为区域经济-生态协调发展提供参考。目前对土地利用模拟的研究多采用多目标方法(MOP)^[7] CLUE-S^[8]模型等方法,例如唐娇娇^[9]、王萍^[10]、王端睿^[11]分别采用 CLUE-S 模型,按照固定转移概率设置转换规则,对苏州市、浙江省、东北地区不同发展情境下的土地利用需求进行了预测。但该方法存在明显的局限性:对于城市扩张不明显及已处于固定状态的地区模拟精度较差,而 PLUS 模型中的 CA-Markov 模块融合了马尔可夫链(Markov)和元胞自动机(CA)两种模型的优势^[12]。不仅利用了 CA 模型在模拟复杂系统空间变化方面的强大能力,还结合了 Markov 模型在长期预测方面的显著优势,通过结合不仅提升了土地利用类型转换预测的准确性,还能有效模拟复杂地区土地利用格局的空间演变^[13]。张斌^[14]、杨顺威^[15]等人的研究表明其具备高精度模拟以及特别适合复杂区域的土地利用变化模拟的优点。综上所述,基于土地利用变化模拟的生境质量研究已经取得了长足的进展,但仍存在以下问题:首先当前研究多采用固定转移概率,而本研究结合洮河流域实际规划文件,调整了转移概率,弥补了传统研究依赖文献参数的局限性,优化了情景设置的现实性。其次

当下研究的热点区域大多集中在人类活动频繁及经济发达区域,亦或是青藏高原^[16]、黄土高原^[17]等单一地形区,对于地形过渡区域不同发展情景下的生境质量变化研究较少。洮河流域是黄土高原和青藏高原的过渡区域,同时也是黄河上游重要的水土保持区,其作为《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》设定的生态廊道建设重点区域,具有十分重要的生态地位^[18]。

基于此,本研究立足于洮河流域2000年、2010年、2020年三期土地利用数据及相关驱动因子数据,采用土地转移矩阵、InVEST模型研究该区域过去20年间十年间隔期的土地利用变化及生境质量变化趋势。进一步基于《甘肃省国土空间规划(2021—2035年)》《青海省国土空间规划(2021—2035年)》《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》等政策导向,在2030年设定自然发展、耕地保护、生态保护三种发展情景,以探讨不同政策路径下的生态响应,对于评估和优化流域土地资源管理策略、保障区域生态安全以及实现可持续发展具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

洮河流域地处甘肃省中部,东起甘肃省定西市临洮县,西至甘肃省甘南藏族自治州玛曲县,北接甘肃省兰州市,南邻甘肃省甘南藏族自治州合作市,流域总面积约为1.6万km²,其流域面积93.72%位于甘肃省境内。洮河流域处于青藏高原的东北边缘与黄土高原的西部交接处,地势由西高东低、南高北低逐渐过渡(见图1),兼具两大高原的地理特征,西部和南部地区多为高原山地,海拔在2500~4000m,地形起伏较大,重峦叠嶂,沟壑纵横,植被以高山草甸和灌丛为主,具有典型的青藏高原特征。东部和北部地区则逐渐过渡为丘陵和平原,海拔在1500~2500m之间,地形平缓,河谷开阔,土地肥沃,土壤以黄土为主,具有典型的黄土高原特征。该流域是黄土高原上游重要的水土保持区域,也是《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》设定的生态廊道建设重点区域,在水土保持、水源涵养、固碳释氧等方面具有十分重要的生态地位,对维持过渡区域生态平衡和生态安全具有重要意义。近年来,地区开展了大量的国土空间综合整治及生态修复专项工作,土地利用变化相对频繁。

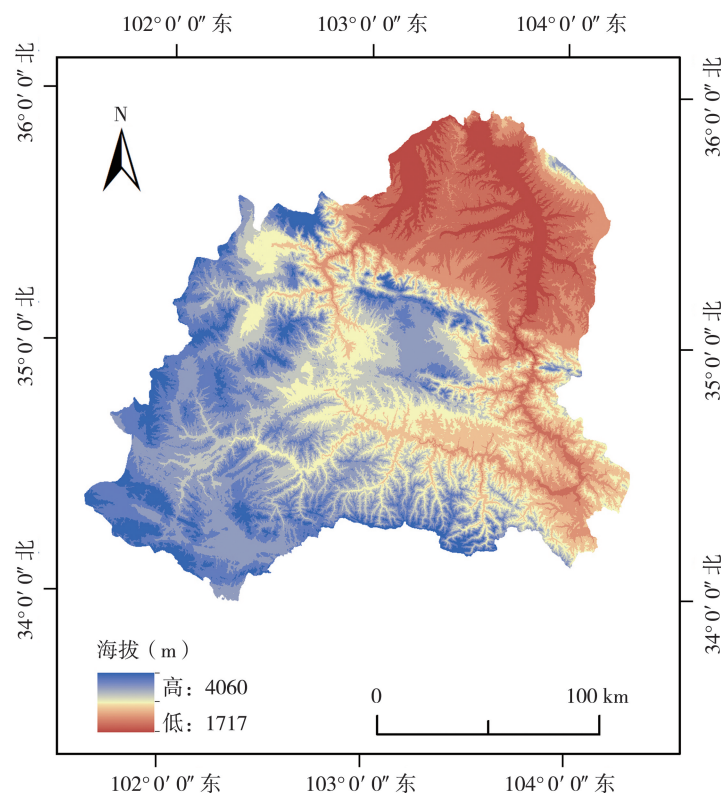


图1 研究区概况图

1.2 数据来源及处理

本研究使用的数据如表1所示,其中,土地利用数据包括洮河流域2000年、2010年、2020年3期数据,根据中国科学院土地利用覆盖分类体系,将土地利用数据在原数据的基础上重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地6类。选取土地利用空间变化的驱动数据(DEM、坡度、坡向、年均蒸发量、年均降水量、距市中心距离、距镇中心距离、距河流距离、距铁路距离、距高速公路距离、人口密度、GDP),不同情景模拟过程中使用的限制转换区域数据(国家级自然保护区边界)。最终将所有数据分辨率大小统一重采样为30 m×30 m,坐标重投影为CGCS2000 3 Degree GK Zone 35,矢量数据与栅格数据分辨率和空间范围保持一致。

表1 主要数据来源

类型	数据	空间分辨率	数据来源
基础数据	土地利用数据	30m	中国科学院资源环境数据共享中心
	DEM	30m	地理空间数据云
	坡度、坡向	30m	地理空间数据云
	年均蒸发量、降水量	1km	中国科学院资源环境数据共享中心
驱动数据	距市中心距离		
	距镇中心距离		
	距河流距离	矢量	Open street map
	距铁路距离		
	距高速公路距离		
过程数据	人口密度、GDP	1km	中国科学院资源环境数据共享中心
	年均潜在蒸散量	1km	第三版全球干旱指数和潜在蒸散数据库
	土壤	1km	世界土壤数据库
	降雨侵蚀力因子	1km	CLICIA
	土壤可蚀性因子	30m	国家青藏高原科学数据中心
限制转换区域数据	国家级自然保护区边界	矢量	中国科学院资源环境数据共享中心

1.3 研究方法

本研究采用“历史分析—情景模拟—空间评估”框架,整合PLUS-InVEST模型与空间自相关方法,系统解析洮河流域土地利用与生境质量的时空演变。PLUS模型基于多类随机斑块种子进行土地利用变化模拟,其CA-Markov模块的优势在于能够动态解析驱动因子与土地利用类型间的非线性关系,本研究通过PLUS模型的Markov链计算转移概率,结合CA模型的空间约束规则,生成洮河流域2030年不同情境下的土地利用空间分布。

1.3.1 CA-Markov 模块模拟过程及情景设定

本研究采用PLUS V1.40运行CA-Markov模块模拟洮河流域2030年土地利用格局,具体操作步骤如下:

(1)采用PLUS V1.40中的Markov模块以2000年和2020年土地利用数据为初始年份和末尾年份得到土地利用转移概率矩阵和转移面积。

(2)其次利用多标准评价模块建立土地利用变化适宜性规则图集,参考相关文献^[19]并结合研究区实际状况选择海拔、坡向、坡度、地均GDP、人口密度、距公路距离、距铁路距离、距河流距离、距市中心距离、距镇中心距离等10个自然经济变量来进行空间变量模拟(见图2),从而得到不同地类各自的空间分

布概率图。本研究根据参考类似文献^[20-21],综合考虑洮河流域现有经济基础、生态基底以及区域各市国土空间规划、社会经济发展规划、黄河流域生态环境保护要求设定三种情景:自然发展、耕地保护以及生态保护情景,并分别设置约束条件(见表2)。

①自然发展情景:在此发展情景下用地转移概率与2000—2020年保持一致,地类转化条件为无限制;

②耕地保护情景:此情景下充分考虑土地管理者侧重耕地保护背景下的土地利用需求状况,同时参考《甘肃省国土空间规划(2021—2035年)》《青海省国土空间规划(2021—2035年)》等规划文件及结合相关学术成果^[22-23],约束条件设置为:任何地类均可互相转化,禁止耕地向其他地类转化,使未利用地和草地向耕地转化的概率增加15%,下限检验值为2030年模拟耕地面积不低于2020年流域内各市规划耕地面积的总和。

③生态保护情景:遵循“保护优先、生态优先”的要求,为进一步保证生态功能的系统性和完整性,其他各类用地向林地、草地、水域转移的概率增加10%^[24],林地、草地禁止向其余地类转化,水域无法转化为建设用地;在以上任何情景下洮河国家级自然保护区包含的所有地类均为限制转换区域,禁止转为其他用地(见表2)。

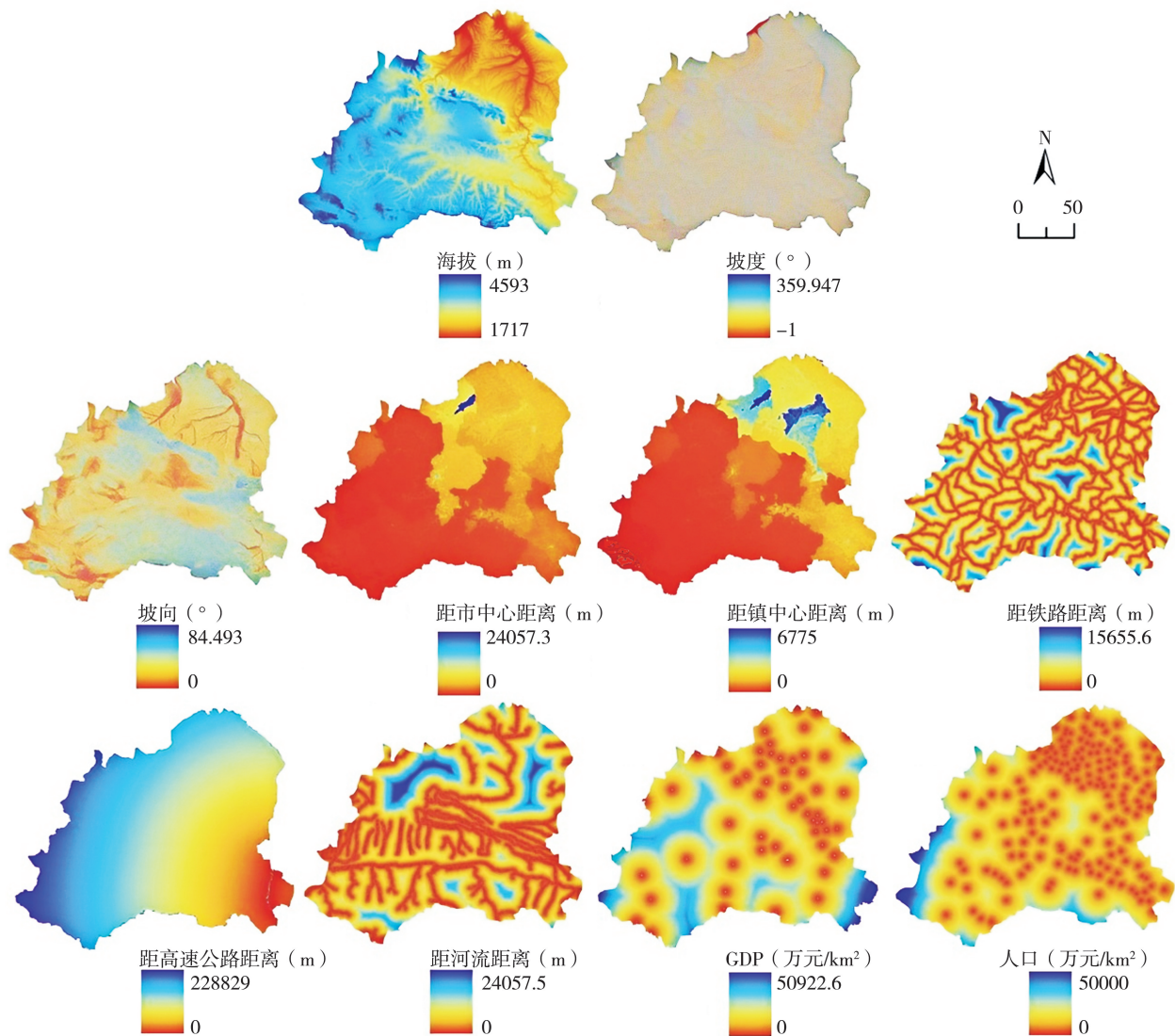


图2 洮河流域土地利用扩张模拟的空间变量

(3)使用 Collection editor 模块将所有概率图集成在一个图集中,选择 5×5 邻接滤波器作为邻域定义,邻域影响因子反映不同地类之间以及一定区域范围内不同地类之间的相互作用,其范围为[0,1],值越趋于 1,代表该类用地向周围扩张能力越强^[25]。参考相关研究成果^[26],最终确定了在不同情景下各用地类型的领域影响因子(见表 2),单元格大小设置为 1 km×1 km。

表 2 邻域因子参数

发展情景	土地利用类型					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
自然发展情景	0.5	0.7	0.3	0.4	0.8	0.9
耕地保护情景	0.8	0.5	0.3	0.2	0.6	0.7
生态保护情景	0.3	1	0.7	0.5	0.6	0.7

(4)然后以 2000 年作为预测起始年份,设定 CA 的迭代次数为 15,模拟研究区 2020 年的土地利用空间分布并采用 Kappa 系数对模拟结果进行检验。得到 Kappa 系数为 0.831,表明模拟效果较好,可使用通过验证的 CA-Markov 模块规则进行 2030 年土地利用预测。

(5)最后使用通过检验的 CA-Markov 模块进行洮河流域 2030 年土地利用模拟,以 2020 年作为初始年份,选择适宜性图集,确定迭代次数为 15,模拟得到 2030 年的土地利用空间分布图。

1.3.2 生境质量计算

本研究借助 InVEST 模型^[27]的 Habitat Quality 模块对流域生境质量进行测算,威胁源(见表 3)与敏感因子(见表 4)等参数通过参考文献^[28]确定,其中生境质量威胁源选取耕地、建设用地及未利用地 3 类,各个地类对以上 3 类威胁源的敏感度如表 3 所示,生境质量计算公式如下:

$$Q_{xj} = H_{xj} \cdot \left[1 - \left(\frac{D2_{xj}}{D2_{xj} + k2} \right) \right] \quad (1)$$

式中: Q_{xj} 是土地利用类型 j 中栅格 x 的生境质量; H_{xj} 为土地利用类型 j 中 x 的生境适宜性; k 是半饱和常数,设置为 0.05。

表 3 生境质量威胁源以及相关参数设置

土地利用类型	生境适宜度	耕地	建设用地	未利用地
耕地	0.4	0.3	0.5	0.1
林地	0.9	0.6	0.6	0.1
草地	0.8	0.5	0.65	0.2
水域	1	0.3	0.7	0.5
建设用地	0	0	0	0
未利用地	0.1	0	0.1	0

表 4 土地利用类型生境适宜性及对不同威胁源的敏感度

威胁因子	最大影响距离/km	权重	距离衰减函数
耕地	4	0.6	线性

续表4 土地利用类型生境适宜性及对不同威胁源的敏感度

威胁因子	最大影响距离/km	权重	距离衰减函数
建设用地	6	0.9	指数
未利用地	10	0.4	线性

1.3.3 空间自相关分析

本研究参考周怡宁等^[29]的研究方法,采用全局空间自相关来判断不同情境下的生境质量是否存在相关性,接着借助局部空间自相关来识别生境质量的集聚特征。计算公式如下:

全局自相关:

$$Moran'I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{i=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

局部自相关:

$$LISA_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{\sum_i \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n}} \sum_j W_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (i \neq j) \quad (3)$$

式中: n 为空间单元总数; W_{ij} 为单元*i*和*j*的连接矩阵; x_{ij} 为单元*i*和*j*的属性值; \bar{x} 为单元属性值的均值。 $LISA_i > 0$ 代表属性一致单元集聚,具体表现为高一高集聚或低—低集聚; $LISA_i < 0$ 代表属性相反单元集聚,表现为高一低集聚或低—高集聚。

2 结果与分析

2.1 2000—2020年洮河流域土地利用与生境质量时空变化特征

2.1.1 2000—2020年洮河流域土地利用时空变化特征

表5表明:2000—2020年洮河流域的主要土地利用类型为林地和草地,2020年分别占研究区总面积的23.8%、58.3%。总体来看,在过去20年间,洮河流域的土地利用变化主要表现为耕地和林地的相互转换,草地的动态变化最为频繁,水域面积显著减少,建设用地和未利用地面积有所扩张。具体来看,耕地面积共增加了132.18km²,耕地转出占比最大的为草地、林地和建设用地,分别占耕地转出总面积的9.48%、1.77%、3.20%。耕地转入的主要来源是草地(4.12%)和林地(0.67%);林地面积变化不明显,但林地与草地、耕地互相频繁转换;20年间草地面积保持着0.9%的年均增长率;草地转换较为频繁,草地转出的主要去向是耕地、林地和未利用地;水域的主要转换来源为草地和未利用地,在过去20年共增加了268.21km²;建设用地面积扩张了125.72km²,其主要来源为耕地;未利用地面积变化不显著,其主要与林地和草地互相转换。从以上转换方向中可以发现,洮河流域过去20年土地利用变化受到了“农业扩张+生态恢复+城市化进程+自然生态变化”的综合影响。

表5 2000—2020年洮河流域土地利用转移矩阵

2000年	2020年						
	耕地/km ²	林地/km ²	草地/km ²	水域/km ²	建设用地/km ²	未利用地/km ²	总计/km ²
耕地/km ²	3 607.56	74.71	402.09	13.94	135.53	5.87	4 239.7
林地/km ²	24.19	6 782.76	313.85	2.96	4.37	2.54	7 130.67
草地/km ²	157.72	361.25	16 468.19	16.1	28.47	39.81	17 071.54
水域/km ²	9.12	2.67	210	193.21	2.06	90	507.06

续表5 2000—2020年洮河流域土地利用转移矩阵

2000年	2020年						
	耕地/km ²	林地/km ²	草地/km ²	水域/km ²	建设用地/km ²	未利用地/km ²	总计/km ²
建设用地/km ²	34.74	1.77	8.2	0.67	289.35	0.14	460.59
未利用地/km ²	1.92	2.33	64.46	11.97	0.81	788.39	869.88
总计/km ²	3 835.25	7 225.49	17 265.52	238.85	334.87	837.59	30 153.72

从空间分布来看(见图3),2000—2020年洮河流域土地利用空间分布地势受西高东低的影响,耕地主要以片状形式集中分布在东部和中部地势较低的河谷地区;林地和草地集中分布在流域中部和西部;水域呈放射状自东向西汇入洮河;建设用地以线状形式分布在东北部和东南部河流沿岸;未利用地零散分布在流域的西南部和中部海拔4 000m以上地区。选取4个不同土地利用动态热点典型区(见图3)来描述过去20年洮河流域土地利用空间变化:1区(东北部耕地—建设用地过渡带)、2区(中部林地—草地交错区)、3区(南部水域扩张区)、4区(西部高海拔未利用地)。从土地利用分布来看,1区土地利用类型以耕地和建设用地为主,2区主要土地利用类型为耕地、水域,3区主要土地利用类型为水域和草地,4区土地利用方式则以未利用地为主;在过去20年间,不同区域的土地利用变化呈现出不同趋势,1区耕地面积呈现减少趋势,建设用地和水域面积有所增加;2区土地利用变化的主要趋势为耕地、水域面积的减少和草地面积的增加;3区建设用地和水域面积增加的同时草地和耕地等生态用地面积有所下降;4区土地利用结构较为稳定,变化趋势不明显;总体来看,在2000—2020年,洮河流域东部土地利用变化表现建设用地的扩张和耕地面积的减少,南部水域面积增加明显,西部土地利用变化较为稳定。

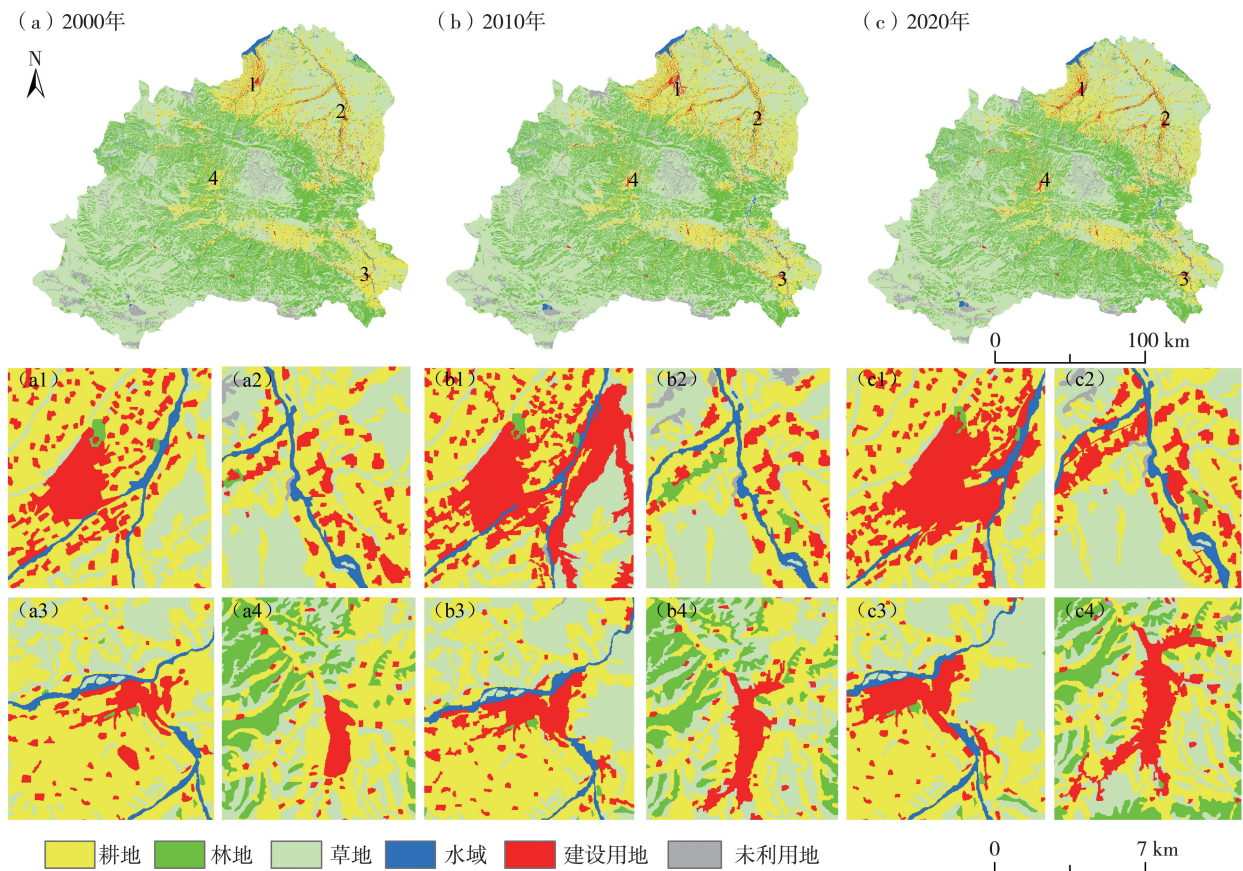


图3 洮河流域2000—2020年土地利用空间分布图

2.1.2 2000—2020年洮河流域生境质量时空变化特征

过去20年间洮河流域生境质量存在轻微变化(见表6),流域整体生境质量处于一般水平且呈现先下降后上升的变化趋势,2000年、2010年、2020年生境质量平均值分别为0.468、0.440、0.488。不同地类的生境质量排名从高到低依次为:林地>草地>水域>耕地>未利用地>建设用地,从各个地类的生境质量变化趋势来看,耕地生境质量指数从2000年的0.389下降到2020年的0.378,表明农业集约化导致流域内耕地生物多样性减少,耕地的生态功能逐渐减弱;林地、草地、水域、未利用地等生态用地生境质量指数均实现了不同程度的提高,分别提高了0.01、0.004、0.039、0.063,在退耕还林还草、水资源保护和湿地恢复等生态保护措施的干涉下,流域内林地、草地和水域的面积在2000年略有减少后,在2010年则有所增加,同时林地、草地、水域、未利用地等生态用地的生态功能在逐渐改善;建设用地生境质量指数从2000年的0.019提高到2020年的0.034,尽管有所提高,但总体生境质量仍然较低,同时建设用地面积扩张的趋势在未来会对生态环境造成较大压力。

表6 2000—2020年洮河流域各地类面积及生境质量平均值

土地利用类型	2000年		2010年		2020年	
	面积/km ²	生境质量	面积/km ²	生境质量	面积/km ²	生境质量
耕地	4 238.00	0.389	3 927.06	0.374	3 834.54	0.378
林地	7 136.76	0.918	7 217.66	0.920	7 228.25	0.928
草地	17 069.80	0.682	17 183.95	0.687	17 266.15	0.686
水域	216.59	0.590	242.18	0.613	238.82	0.629
建设用地	338.45	0.019	428.33	0.026	461.68	0.034
未利用地	871.05	0.210	871.25	0.019	838.35	0.273

在空间布局上(见图4),2000—2020年洮河流域生境质量整体表现为西高东低,体现了与海拔及植被覆盖度之间的紧密联系。生境质量的高值区集中主要分布在流域的西部和南部的卓尼县、迭部县、玛曲县、夏河县等地区,此区域位于甘南高原,植被类型以中、低覆盖度草地为主,人类活动对于土地利用变化的影响微弱,因而生境质量较高;中等生境质量区域分布在流域的中部和东北部耕地和建设用地过渡区域;低生境质量区域主要分布在流域东北部、东南部城市化程度较高的地区,该区域土地利用类型以建设用地和耕地为主,加之人类活动强度较高,因此生境质量较低。从空间变化来看,流域中西部大部分区域的生境质量一直保持较高水平,表明该区域的生态环境相对稳定;流域中部和南部耕地—草地过渡区域的生境质量有所波动,但总体上有所提高,在流域东南部耕地向草地的转移带动了区域生境质量的上升;流域东北部生境质量呈现出持续下降的变化趋势,该区域是洮河流域生产、生活的高度集中区,因此近年来耕地和草地被建设用地侵占是生境质量降低的主要原因。

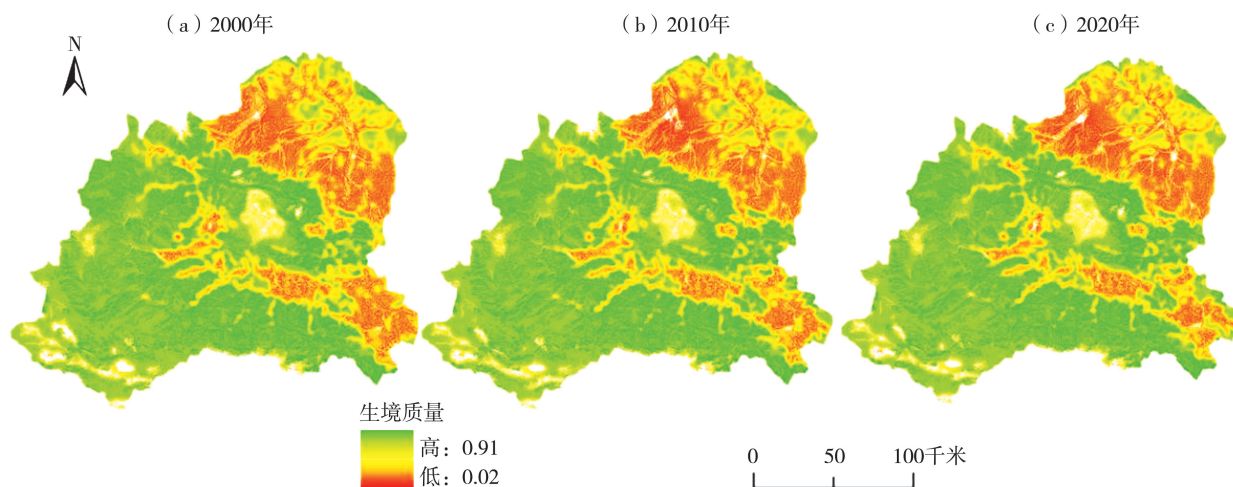


图4 2000—2020年洮河流域生境质量空间分布图

2.2 2030年不同情景下洮河流域土地利用变化及生境质量预测结果分析

2.2.1 2020—2030年不同情景下土地利用时空变化特征

利用CA模型模拟洮河流域2020年土地利用格局,并将其结果与该年份实际的土地利用格局进行比较,采用Kappa系数进行精度检验,结果为0.856,模拟精度较高,说明预测结果与实际情况较为吻合。预测结果表明(见表7),自然发展情景下,2030年洮河流域农业、畜牧业用地及后备土地面积大幅减少,耕地、草地、未利用地面积的变化率分别为-19.08%、-26.30%、-32.86%,生态用地面积和建设用地面积呈现稳定增长趋势,林地、水域、建设用地面积分别增加了387.23km²、443.21km²、414.86km²;在耕地保护情景下,相较于2020年,耕地面积变化不大,林地和草地面积减少最明显,分别减少了1143.71km²、5401.43km²,水域和建设用地面积分别减少99.46km²、273.39km²,建设用地面积则增加了509.87km²;在生态保护情景下,耕地和草地面积减少最明显,分别减少了922.25km²、3899.96km²,林地、水域面积呈现增长趋势,分别由2020年的9074.39km²、340.76km²增加到9491.35km²、719km²,建设用地和未利用地分别减少了146.98km²、373.39km²。在自然发展情景和生态保护情景中,均呈现出耕地减少、林地、水域增加的变化趋势;在自然发展情景和耕地保护情景下,建设用地面积扩张明显,草地面积减少最显著。综合来看,不论在何种情景中,草地和未利用地面积均呈现出稳定的减少态势,建设用地面积均呈现出扩张态势。

表7 2020年及2030年不同情景土地利用类型面积与变化

土地利用类型	2020年	自然发展情景		耕地保护情景		生态保护情景	
	面积/km ²	面积/km ²	变化/km ²	面积/km ²	变化/km ²	面积/km ²	变化/km ²
耕地	4713.09	3957.79	-755.30	4708.95	-4.14	3790.84	-922.25
林地	9074.39	9461.62	387.23	7930.68	-1143.71	9491.35	416.96
草地	22227.55	17599.45	-4628.10	16826.12	-5401.43	18327.59	-3899.96
水域	340.76	755.62	414.86	241.30	-99.46	719.00	378.24
建设用地	523.04	966.25	443.21	1032.91	509.87	376.06	-146.98
未利用地	1248.39	939.64	-308.75	975.00	-273.39	875.00	-373.39

图5表明,在设定的3种情境下2030年洮河流域的土地利用总体格局与2020年一致,其分布格局为:耕地成片状集中分布在北部及东南部河流沿岸人口密集区;林地和草地等生态用地以片状形式集中分布在流域中部海拔较高区域;建设用地以点状分布在流域东北及东南部河流沿岸地区,主要为流域内各县域和县城重点镇;水域呈线状自西南向东北贯穿全境,未利用地则零星分布在流域西部高海拔区域。在自然发展情景下,流域东南部呈现出耕地、草地面积减少同时建设用地面积扩张的变化趋势,其余地区土地利用格局变化并不显著;在耕地保护情景下,进一步突出了对农业用地的保护,流域东北部耕地增加趋势明显,在流域南部和东北部建设用地扩张挤占了水域的空间;在生态保护情景下,流域东南部发生了耕地和草地面积减少,林地、建设用地、水域等生态用地增加的变化趋势,流域东北部建设用地斑块面积变化不大,但斑块密度有所降低,流域西南部水域和建设用地面积减少,未利用地面积增加。在以上三种情景下,洮河流域2030年不同情景下的土地利用分布和变化均显示出对自然保护和可持续发展的重视,林地和草地的主导地位、建设用地的控制、水域的稳定性以及未利用地的减少,这些不同情景下土地利用变化的共性均体现出了其作为生态过渡地带对于生态环境的重视。同时各情景下土地利用的具体变化也反映了不同政策和管理措施的影响。

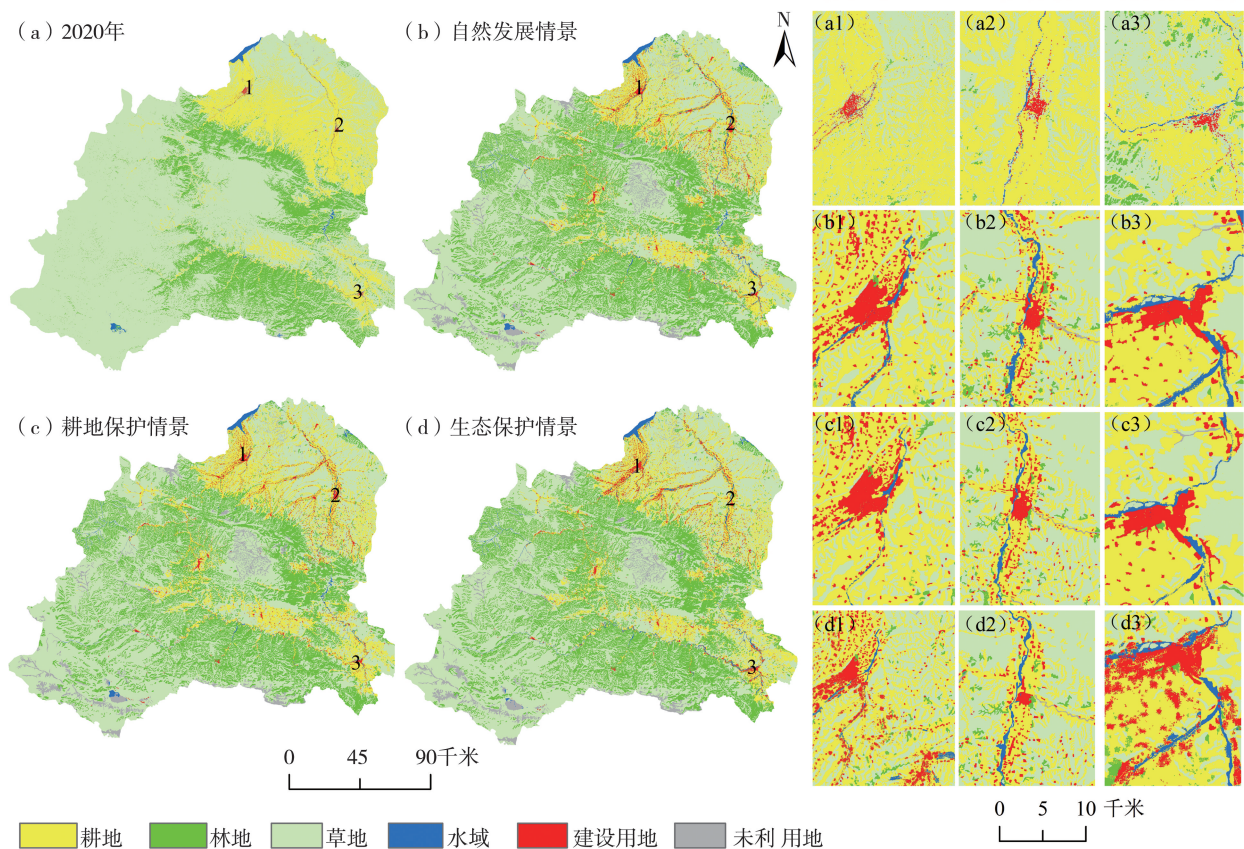


图5 洮河流域2020年及2030年不同情景下土地利用空间分布图

2.2.2 不同情景下生境质量空间变化预测结果分析

本研究利用 ArcGIS 10.8 软件中的栅格计算器对洮河流域2020年和2030年不同情景下的生境质量分布图进行两两相减操作,从而得出土地利用变化对生境质量影响的量化结果(见图6)。在分析过程中对结果中的栅格数值进行了定义和分类,数值位于区间 $(-1, -0.1)$ 的栅格被定义为生境质量下降区域;数值位于区间 $[-0.1, 0.1]$ 的栅格被定义为生境质量基本不变的区域;数值位于区间 $(0.1, 1]$ 的栅格被定义为生境质量上升区域。

从时间尺度看,2020年洮河流域平均生境质量指数为0.488,预测2030年在自然发展情景、耕地保

护情景、生态保护情景下的平均生境质量指数分别为 0.554、0.546、0.566, 总体排名为生态保护情景>自然发展情景>耕地保护情景。2020 年生境质量高于流域平均生境质量的地区主要位于甘肃省甘南藏族自治州, 集中分布在洮河流域中部以及南部区域。2030 年在自然发展情景下, 生境质量变化延续了 2000—2020 年的变化趋势, 且整体生境质量平均值提高了 0.066, 生境质量下降区域主要位于耕地和草地接触边缘, 在此区域草地缓慢被耕地侵占, 另外在流域东北部建设用地被耕地侵占区域生境质量也呈现下降态势, 生境质量上升区域则主要为未利用地向草地的扩张区域, 例如流域东部的临洮县等地区; 耕地保护情景下生境质量分布格局与 2020 年基本一致, 但区域整体生境质量相比于 2020 年明显下降, 原因在于此情景下大量草地及未利用地在未来会被耕地所侵占, 耕地的扩张是导致生境质量下降的主要原因, 下降区域主要分布在流域中东部的耕地和草地过渡区域, 下降的区域主要位于流域中东部的临夏回族自治州以及定西市的耕地和草地过渡的地带; 在生态保护情景下, 在情景设定中限制林地、草地向其他地类转移以后, 生境质量相对较高的同时也维持着稳定不变的趋势, 且分布区域比自然发展和耕地保护情景下更为均匀, 但在此情景下, 流域中部河流沿岸的生境质量开始严重下降, 表明未来在严格执行生态保护政策的同时应当控制生态用水量, 严格保护中游水资源。无论在何种情形下, 甘南藏族自治州所辖县区以及青海省的同仁市、海南蒙古族藏族自治县、泽库县等区域的生境质量始终高于流域平均生境质量, 而临夏回族自治州以及定西市部分区域生境质量均低于流域平均值, 这更多地体现出区域的地区分异以及植被覆盖等对于生境质量空间分布的影响。

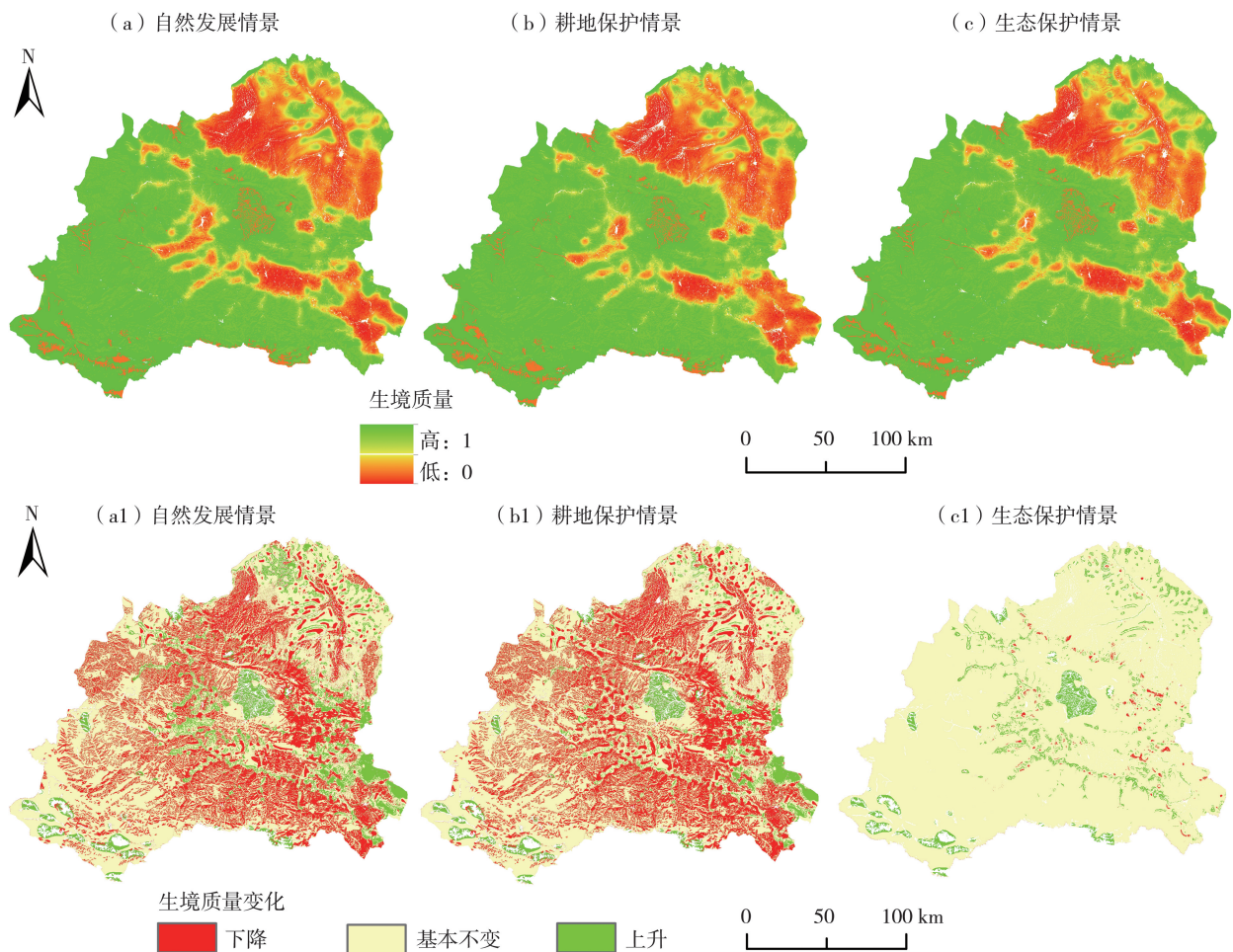


图 6 洮河流域 2030 年不同情景下生境质量空间分布图

2.3 2030年不同情境下洮河流域生境质量空间自相关分析

对洮河流域不同情景下的生境质量进行全局空间自相关分析,结果表明自然发展情景、耕地保护情景、生态保护情景下的全局莫兰指数依次为0.64、0.70、0.47,Z值和P值均通过了显著性检验($P < 0.01$),表明洮河流域不同情境下的生境质量分布均呈现非随机状态,在所有情景下,生境质量的空间自相关性都较为显著,生境质量的空间分布具有一定的规律性,集聚特征相对明显,集聚程度从高到低依次为耕地保护情景、自然发展情景、生态保护情景;同时单元高低集聚分布差异明显,进一步表明该流域生境质量空间差异较大。高一高集聚和低一低集聚为正相关型空间集聚,其代表该单元与周边单元生境质量高低变化同步,高一低集聚和低一高集聚则正好相反。由图(7)和表(8)可知在自然发展情景下以高一高集聚和高一低集聚为主,在此情景下生境质量高的区域倾向于聚集在一起,生境质量低的区域同样倾向于聚集在一起,意味着自然发展过程中,生境质量的空间分布具有一定的规律性。高一高集聚区域主要以片状集中分布在流域西部植被覆盖良好区域,斑块面积为9 903.33km²。低一低集聚区域集中在人口活动频繁的流域东北部,斑块面积为4 788.79km²。在耕地保护情景下同样以高一高集聚和高一低集聚为主,在此情景下,生境质量高的区域集聚特征更明显,高一高集聚分布区域与植被覆盖度具有一致性,高一高集聚和低一低集聚区域的斑块面积分别为14 363.68km²、3 135.84km²。在生态保护情景下高一高集聚和低一低集聚区域减少明显,高一高集聚和低一低集聚的斑块面积分别为5 228.24km²、3 938.37km²,低一高集聚区域明显有流域东北部向中部开始扩散,斑块面积为926.00km²,这些区域的显著增加表明生态保护措施能够有效改善区域生境质量,使得原本生境质量较低的区域进一步得到提升。结合以上三种情景下各自生境质量在空间上集聚的特征可发现,不同土地利用情景对生境质量的空间分布有不同的影响,自然发展情景下,生境质量的空间分布较为均匀;耕地保护情景下东北部部分区域的生境质量能够得到改善;生态保护情景下生境质量的空间将会分布更加均匀,且更多的区域能得到改善。为了提高和维持洮河流域的生境质量,在自然发展和耕地保护情景下,需要加强对东北部生境质量较低区域的保护和改善措施;在生态保护情景下,继续加强对整个流域的生态保护措施,以实现区域的可持续发展。

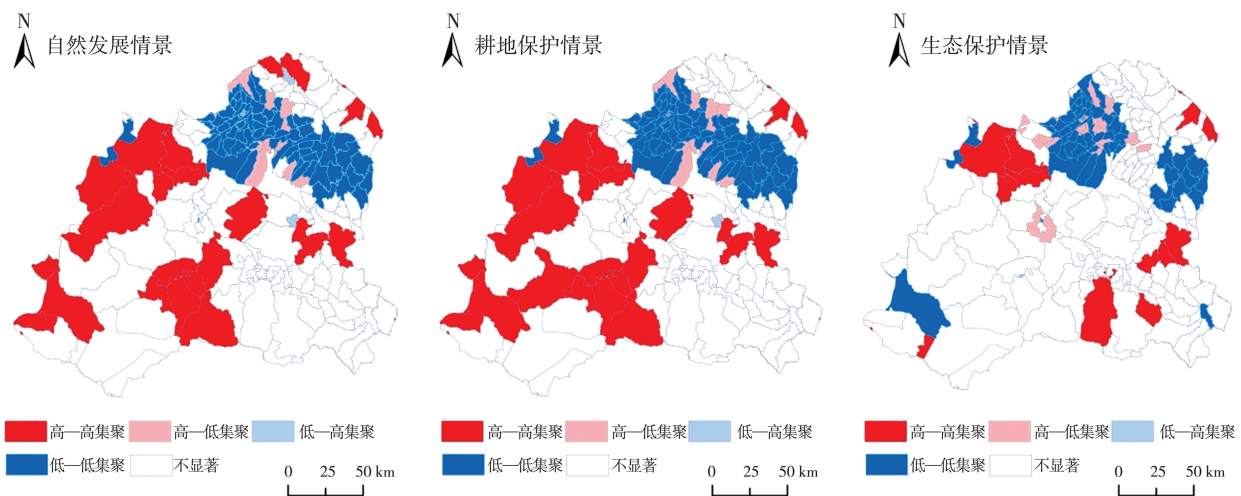


图7 2030年不同情景下洮河流域生境质量聚类分布

表8 2030年不同情景下洮河流域生境质量聚类分布及变化情况

集聚特征	自然发展情景/km ²	耕地保护情景/km ²	变化率/%	生态保护情景/km ²	变化率/%
高一高集聚	9 903.33	12 471.68	31.05%	5 228.24	-89.42%

续表 8 2030年不同情景下洮河流域生境质量聚类分布及变化情况

集聚特征	自然发展情景/km ²	耕地保护情景/km ²	变化率/%	生态保护情景/km ²	变化率/%
高一低集聚	755.10	4 362.38	82.69%	1 065.00	29.10%
低—高集聚	101.22	474.84	78.68%	926.00	89.07%
低—低集聚	4 788.79	3 135.84	-52.71%	3 938.37	-21.59%
不显著	21 041.36	14 363.68	-46.49%	25 800.46	18.45%

3 结论

①洮河流域过去 20 年土地利用变化受到了“农业扩张+生态恢复+城市化进程+自然生态变化”的综合影响,洮河流域的土地利用变化主要表现为耕地和林地的相互转换,草地动态变化频繁,水域面积显著减少,建设用地和未利用地面积有所扩张。

②过去 20 年间洮河流域生境质量存在轻微变化,流域整体生境质量处于一般水平且呈现先下降后上升的变化趋势,尽管有所提高,但总体生境质量仍然较低,同时建设用地面积有进一步扩张的趋势,这种趋势在未来会对生态环境造成较大压力。

③到 2030 年,在自然发展情景和生态保护情景中,均呈现出耕地减少、林地、水域增加的趋势。在自然发展情景和耕地保护情景下,建设用地面积扩张明显,而草地面积减少最显著。综合来看,不论在何种情景中,草地和未利用地面积均呈现出稳定的减少态势。

④2030 年不同情景下洮河流域平均生境质量指数相较于 2020 年均有所提高,不同情境下生境质量指数排名从高到低依次为生态保护情景>自然发展情景>耕地保护情景,在所有情景下,生境质量的空间自相关性都较为显著,其空间分布具有一定的规律性,在自然发展和耕地保护情境下均以高一高集聚和高—低集聚为主,在生态保护情境下高一高集聚和低—低集聚区域减少明显,低—高集聚区域明显由流域东北部向中部开始扩散。

4 讨论

本研究基于 2000 年、2010 年、2020 年三期土地利用数据对流域 2000—2020 年土地利用变化及生境质量进行分析的基础上,进一步通过 PLUS-InVEST 模型模拟预测了洮河流域 2030 年自然发展、耕地保护、生态保护三种情景下的土地利用变化以及生境质量状况,最终揭示了不同土地利用情景下生境质量的空间集聚特征。过去 20 年洮河流域土地利用变化受到了“农业扩张+生态恢复+城市化进程+自然生态变化”的综合影响,具体表现为西部青藏高原边缘以自然生态变化和生态恢复为主,东部黄土高原边缘则明显受到农业扩张和城市化进程的影响;流域东部整体生境质量处于一般水平且呈现先下降后上升的变化趋势。2030 年不同情景下洮河流域的土地利用变化具有显著差异,这种差异与情景模拟设置规则具有极强的相关性,自然发展情景下,遵循历史土地利用转换趋势,城市化扩张导致生态用地被建设用地侵占;耕地保护情景下通过设置耕地禁止转出规则,遏制了建设用地的扩张态势遏制,牛统莉^[31]等人的研究结果也表明严格执行耕地保护政策在一定程度上有利于遏制建设用地无序扩张的态势;生态保护情境下设置禁止生态用地转出规则的同时,按照《甘肃省国土空间规划(2021—2035 年)》《青海省国土空间规划(2021—2035 年)》《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》等规划用刚性约束指标保证了生态用地数量,指导当地居民避免过度对生态环境进行改造。总体来看未来流域整体生境质量会进一步提高,在任何情景下洮河流域 2030 年平均生境质量均高于 2020 年,这与李梓涵等人对青藏高原生态脆弱区以及虞涵^[32]等人对滇中城市群的研究结果一致,表明按照发展规划对地区生产、生活区域布局的正确

引导能够在未来促进区域的生态健康发展^[33]。针对以上研究结论,本文提出以下建议提高和维持洮河流域的生境质量:

①在自然发展情景下,进一步强化生态保护区建设,限制城市化扩张对该区域的侵占;加强对现有生态用地的保护和管理,防止其被建设用地侵占;实施生态修复项目,提高生境质量较低区域的生态功能。

②在耕地保护情景下,在解决新增耕地数量问题时,重点考虑通过居民点复垦的形式来实现,而非通过挤占草地或者大规模开发未利用地。这样既能增加耕地面积,又能减少对生态环境的破坏,实现耕地保护与生境质量提升的双赢。

③在生态保护情景下,严格执行生态用地保护政策,确保生态用地不被侵占;因地制宜制定针对性的生态保护和修复措施;加强对居民的生态保护宣传教育,提高居民的生态保护意识,引导居民合理利用土地,避免过度开发和破坏生态环境。

本研究对洮河流域 2000—2020 年土地利用及生境质量变化进行分析的基础上,进一步基于 CA-Markov 模块进行 2030 年土地利用模拟预测,并采用 InVEST 模型探究了洮河流域生境质量的时空演化特征,最后对不同情境下的生境质量空间集聚特征进行了分析。本研究能够为对区域土地资源合理开发利用与生态保护提供数据支撑的同时仍然存在不足:一是只测算了生境质量的演化特征,在未来有望选择更多的生态系统服务进行全面测算。二是只设定了自然发展、耕地保护、生态保护三种发展情景,洮河流域森林资源丰富,是重要的碳库,承担着黄河上游重要的碳中和功能,因此在未来设置模拟情景时应当考虑碳平衡情景。三是生境质量有其自身的复杂性和系统性,与大气、地学等要素密切相关,本研究只选择了土地利用变化作为研究生境质量演化的影响因素,缺乏演化特征内在驱动的全面分析。

参考文献:

- [1] 张子涵,王瑾杰,丁建丽,等.基于 PLUS 模型的艾比湖流域景观生态风险分析及预测[J/OL].干旱区地理,1-15 [2025-02-14].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1103.X.20250109.1210.002.html>.
- [2] 徐梦菲,孙一帆,汪霞.郑州市土地利用/覆被变化与生境质量的时空演变及情景预测[J].水土保持通报,2024,44(2): 364-377.
- [3] 王洋,冯卓亚,许丽,等.塔里木河流域生境质量与土地利用变化响应及驱动力[J].干旱区研究,2024,41(12): 2 132-2 142.
- [4] 文少强,胡宝清,谢薇薇,等.基于 PLUS-InVEST 模型的平陆运河经济带土地利用情景模拟及生境质量变化[J/OL].环境科学,1-18[2025-04-24].<https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202407166>.
- [5] 赵玉,张永福,卜祥,等.2000—2020 年新疆土地利用变化及其对生态系统服务价值的影响[J].天津师范大学学报(自然科学版),2023,43(6): 53-60.
- [6] 徐云,高明坤,张增信.基于 InVEST 模型的长江中下游地区生境质量变化研究[J].水土保持研究,2024,31(5): 355-364.
- [7] 胡波洋,张蓬涛,白宁,等.基于 CLUE-S 和 GMOP 模型的青龙满族自治县土地利用情景模拟[J].中国农业资源与区划,2020,41(7): 173-182.
- [8] 汉龙,马天骏,钱凤魁,等.基于 CLUE-S 模型县域土地利用情景模拟与碳排放效应分析[J].农业工程学报,2022,38(9): 288-296.
- [9] 唐娇娇,余成,张委伟,等.基于 CLUE-S 和 InVEST 模型的苏州市生境质量评估及预测[J].环境工程技术学报,2023,13(1): 377-385.
- [10] 王萍,林乐乐,彭杨靖,等.基于 CLUE-S 模型的浙江省土地利用结构变化趋势分析[J].生态科学,2024,43(3): 196-206.
- [11] 王端睿,毛德华,王宗明,等.东北地区土地覆被格局变化模拟:基于 CLUE-S 和 Markov-CA 模型的对比分析[J].地理科学,2024,44(2): 329-339.
- [12] 丁岳,王柳柱,桂峰,等.基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的环杭州湾生态系统碳储量[J].环境科学,2023,44(6):

- 3 343-3 352.
- [13] Xu S , Wang K , Wang F . Monitoring changes and multi-scenario simulations of land use and ecosystem service values in coastal cities: A case study of Qingdao, China[J]. Environmental monitoring and assessment, 2025, 197(2): 173.
- [14] 张斌, 韩震. 基于 MCE-CA-Markov 和 InVEST 模型的海岸带生境质量时空演变及预测[J]. 海洋湖沼通报(中英文), 2024, 46(6): 70-79.
- [15] 杨顺威. 基于 CA-Markov 模型的焦作市土地利用变化分析及预测[J]. 中南农业科技, 2024, 45(12): 116-123.
- [16] 李梓涵, 于慧, 巩飞, 等. 基于 PLUS-InVEST 模型的生态脆弱区生境质量时空演变分析[J]. 湖北农业科学, 2024, 63(2): 254-260.
- [17] 周璐红, 曹瑞超. 黄土高原生境质量时空演变及其驱动因素[J]. 水土保持通报, 2022, 42(6): 343-350.
- [18] 田美荣, 冯朝阳, 王世曦, 等. 近 70 年来黄河流域生态修复历程及系统性修复思考[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(5): 1 787-1 797.
- [19] 任胤铭, 刘小平, 许晓聪, 等. 基于 FLUS-InVEST 模型的京津冀多情景土地利用变化模拟及其对生态系统服务功能的影响[J]. 生态学报, 2023, 43(11): 4 473-4 487.
- [20] 刘小玉, 李士杰, 何海洋, 等. 基于 InVEST 和 PLUS 模型下的土地利用变化及生境质量演变分析: 以汉中盆地为例[J]. 西北地质, 2024, 57(4): 271-284.
- [21] 谢向东, 林孝松, 王莹, 等. 基于 PLUS 模型的重庆市南川区土地利用多情景模拟[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(6): 86-92.
- [22] Sathara T K , Kusaka H . Impact of high-resolution land use data on numerical simulations of Colombo's thermal environment during heatwaves[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2025, 156(2): 106.
- [23] Xu S , Wang K , Wang F . Monitoring changes and multi-scenario simulations of land use and ecosystem service values in coastal cities: A case study of Qingdao, China[J]. Environmental monitoring and assessment, 2025, 197(2): 173.
- [24] 黄学煜, 修丽娜, 陆志翔. 陇东黄土高原生态系统服务权衡效应及其驱动因素[J/OL]. 干旱区地理, 1-14[2025-01-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1103.X.20240705.1546.001.html>.
- [25] 王孟超, 潘洪义, 高成, 等. 基于政策导向的岷江流域土地利用模拟及生态系统服务价值评估[J]. 长江流域资源与环境, 2024, 33(2): 322-335.
- [26] Xinshu M , Cunlin X , Ning C , et al. Land use/cover change and ecological network in Gansu Province, China during 2000-2020 and their simulations in 2050[J]. Journal of Arid Land, 2025, 17(1): 43-57.
- [27] 刘康, 张寒, 张道军, 等. 黄土高原生态系统碳储量情景模拟与驱动因素: 基于 PLUS - InVEST-Geodector 模型的研究[J]. 中国环境科学, 2025, 45(4): 2 159-2 170.
- [28] Yang P , Sun K , Zhu Y , et al. Wetland and habitat dynamics in the evolving landscape of the Middle Yangtze River Basin [J]. Journal of Geographical Sciences, 2025, 35(1): 88-111.
- [29] 钟洋, 李嘉奇, 孙铭悦, 等. 城乡融合区乡村地域系统的空间结构识别与优化路径分析: 以湖南省长沙县为例[J]. 自然资源学报, 2023, 38(8): 2 076-2 096.
- [30] 周怡宁, 关颖慧, 林一诚, 等. 基于 InVEST 模型的小滦河流域产水及水源涵养功能时空变化[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2024, 22(5): 72-82.
- [31] 牛统莉, 熊立华, 陈杰, 等. 基于 PLUS 模型的长江流域土地利用变化模拟与多情景预测[J]. 武汉大学学报(工学版), 2024, 57(2): 129-141.
- [32] 虞涵, 吴映梅, 李琛, 等. 滇中高原山地城市群土地利用及生境质量的时空演变与多情景模拟[J]. 应用生态学报, 2024, 35(10): 2 842-2 852.
- [33] 张帅, 韩玲, 曹红业. 基于 InVEST 模型的渭河流域生境质量评估[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2024, 60(2): 159-166.