

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2025.11.011

李妍均, 王颖, 李倩, 等. 基于 PLUS 模型的龙溪河流域土地利用变化的多情景模拟 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(11): 136-151.

基于 PLUS 模型的龙溪河流域土地利用变化的多情景模拟

李妍均¹, 王颖², 李倩³, 邵景安^{3,4},
杨熙⁵, 姚雪燕⁶, 邹蜜¹, 王梧栋¹

1. 重庆地质矿产研究院, 重庆 401120; 2. 重庆市规划和自然资源局, 重庆 401147;
3. 重庆师范大学 地理与旅游学院, 重庆 401331;
4. 三峡库区地表过程与生态修复重庆市重点实验室, 重庆 401331;
5. 重庆市长寿区规划和自然资源局, 重庆 长寿 401228; 6. 重庆市土地储备整治中心, 重庆 401121

摘要: 生态文明建设和乡村振兴背景下, 丘陵山区土地利用呈地势平缓区愈发集约、地势起伏较大区愈发粗放的状态。使用空间信息、社会经济、空间规划等数据, 基于经济社会发展、土地利用需求等设置自然发展情景、耕地保护情景、生态保护情景和旱改水发展情景, 构建 PLUS 模型, 以龙溪河流域为研究区, 对研究区 2030 年土地利用格局进行多情景模拟。结果表明: ① 利用构建的 PLUS 模型对研究区 2020 年土地利用格局进行模拟, 检验 Kappa 系数为 0.958, 模拟结果和实际值较接近, 表明使用 PLUS 模型以及选取的 10 个驱动因子和参数, 能较为准确地模拟研究区土地利用空间格局; ② 相较于自然发展情景, 耕地保护情景下旱地和水田分别增加 92.82 hm² 和 202.05 hm², 生态保护情景下林地增加 131.97 hm², 旱改水发展情景下水田增加 164.94 hm²。耕地保护情景下建设用地增加量最小, 旱地、水田减少量最小, 林地减少量仅比生态保护情景多; ③ 研究区未来土地利用格局调整推荐耕地保护情景下的模拟结果, 即旱地、水田、林地分别减少 1 856.17、815.20、288.47 hm², 建设用地增加 3 020.38 hm²; ④ PLUS 模型在龙溪河流域土地利用变化的多情景模拟中展现出较强的适用性, 能为流域国土空间格局优化提供科学依据。

关键词: 土地利用变化; 多情景模拟; PLUS 模型; 龙溪河流域

中图分类号: P343.1; F301 **文献标识码:** A

文章编号: 1673-9868(2025)11-0136-16

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Multi-Scenario Simulation of Land Use Change in Longxi River Basin Based on PLUS Model

LI Yanjun¹, WANG Ying², LI Qian³, SHAO Jing'an^{3,4},
YANG Xi⁵, YAO Xueyan⁶, ZOU Mi¹, WANG Wudong¹

收稿日期: 2025-02-10

基金项目: 重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2022NSCQ-MSX1409); 重庆市社会科学规划一般项目(2023GZ06)。

作者简介: 李妍均, 硕士, 正高级工程师, 主要从事土地资源管理及国土空间规划研究。

通信作者: 邵景安, 博士, 研究员。

1. Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing, 401120, China;
2. Chongqing Planning and Natural Resources Bureau, Chongqing 401147, China;
3. School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China;
4. Chongqing Key Laboratory of Surface Process and Ecological Restoration in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 401331, China;
5. Planning and Natural Resources Bureau of Changshou District, Changshou Chongqing 401228, China;
6. Chongqing Land Reserve and Renovation Center, Chongqing 401121, China

Abstract: Under the background of ecological civilization construction and rural revitalization, land use in hilly and mountainous areas shows increasing intensification in relatively flat terrain zones, and more extensive management in areas with greater topographical variation. The study uses spatial information data, socio-economic data, and spatial planning data to set up natural development scenarios, farmland protection scenarios, ecological conservation scenarios, and dry-to-wetland development scenarios based on socio-economic development and land use needs. A PLUS model is constructed to simulate the land use pattern of the study area in 2030 under multiple scenarios. The results show that: ① The constructed PLUS model was used to simulate the land use pattern of the study area in 2020, and the Kappa coefficient was 0.958. The simulated results were close to actual values, suggesting that the PLUS model and the selected 10 driving factors and parameters can accurately simulate the spatial pattern of land use in the study area. ② Compared to the natural development scenario, under the farmland protection scenario, dry land and paddy fields increased by 92.82 hm² and 202.05 hm², respectively. Under the ecological conservation scenario, forest land increased by 131.97 hm², and under the dry-to-wetland development scenario, paddy fields increased by 164.94 hm². Under the farmland protection scenario, the increase of construction land was the smallest, and the decrease of dry land and paddy fields was the smallest. The decrease of forest land was only slightly higher than that of under the ecological conservation scenario. ③ The simulation results under the farmland protection scenario is recommended for future adjustment of the study area's land use pattern, which involves reducing dry land, paddy fields and forest land by 1 856.17, 815.20, 288.47 hm², respectively, while increasing construction land by 3 020.38 hm². The PLUS model shows strong applicability in the multi-scenario simulation of land use change in Longxi River Basin, and can provide scientific basis for the optimization of territorial space pattern in the basin.

Key words: land use change; multi-scenario simulation; PLUS model; Longxi River basin

土地利用是最基本的人类活动之一,它在很大程度上影响着社会经济进步的进程和生态环境保护的成效^[1-3]。尤其是自 2000 年以来,土地利用进入了一个剧烈转型的阶段。在快速城镇化、退耕还林还草、土地使用制度改革、耕地保护等多重政策的叠加驱动下,城乡之间的拉—推效应更加明显^[4-5]。基于比较优势理论,在地形起伏较大的山区,机械替代人力的难度较大^[6-7],从事农业生产的机会成本较高,大量农业劳动力从事收益更高的非农产业,农业土地利用愈发粗放,而相对平缓的丘陵、平坝区因地形优势和土地流转市场发育,要素资源整合较好^[8],农业土地利用方式则走向集约。然而,现有关于区域土地利用转型的研究更多关注土地利用转换及其影响因素^[9-12],基于以往的土地利用转型考虑未来社会经济发展与生态环境保护的情景模拟则相对较少。而且,针对多重政策驱动下的土地利用变化,现有普遍使用的土地利用变化模型均存在一定的局限性,如 CA-Markov 模型^[13-14]、CLUE-S 模型^[15-17]等在面对复杂时空维度、强烈土地利用需求时的模拟结果与实际情况出入较大。PLUS 模型是一种综合元胞自动机 CA 模型和斑块生成模拟策略的模拟框架(斑块级土地利用模拟模型)^[18],它依托对土地利用扩张分析的规则挖掘,识别影响土地利用变化的动力因素(拥有较强的因素自动归一化能力,能很好地处理各因素间的空间自相关与多重共线关系),精准模拟斑块的时空演化过程和非线性关系,且能准确地厘清不同政策背景下土地利用变化的生态

服务影响^[19-20]。目前, 该模型已广泛应用于碳储量多情景模拟、生态系统服务预测、“三生”空间格局构建、土地利用动力分析等^[21-26]方面, 表现出较好的适用性。然而, 关于 PLUS 模型运用于流域土地利用变化的模拟尚未开展深入研究与探索。流域常跨多个行政单元, 其土地利用受多重影响因素的驱动, 表现出较强的复杂性、多样性和难预测性。为提升流域斑块级土地利用变化的非线性模拟精度, 降低驱动因素的共线性及空间自相关性的影响, 本研究基于流域土地扩张分析策略规则框架, 考虑驱动因子选取、变化情景设置、模拟参数设置、模拟精度验证等, 开展不同政策背景和不同土地利用需求下的流域土地利用变化多情景模拟。

龙溪河流域位于四川盆地的东部丘陵区, 地势平缓, 土地利用类型丰富, 在区域生态、经济和社会发展中占据独特地位, 是川东平行岭谷区的典型代表, 具有重要的研究价值。该流域作为长江上游的生态屏障, 其生态系统服务功能对区域生态平衡和人类生产生活具有重要意义。2000 年以来的国家多重政策在该流域的作用成效较为显著, 如城镇化进程加快、农业土地利用集约度升高、土地利用变化程度复杂化等, 进而对居民的生活质量和社会福祉、生态系统服务功能产生较为突出的影响。然而, 如何在保障生态和耕地保护的前提下, 整合多重要素资源, 开展流域国土空间格局优化, 实现区域社会经济的可持续发展和居民福祉提升, 是亟待解决的问题。为此, 本研究基于国土空间总体规划、耕地“非农化”“非粮化”管制等政策文件, 将龙溪河流域土地利用设置 4 个情景, 利用 PLUS 模型模拟了 2030 年不同情景下的土地利用变化趋势, 以为流域国土空间格局的优化提供科学的决策依据。

1 材料与方法

1.1 区域概况

龙溪河流域(29°38′—30°53′N, 106°49′—108°05′E)发源于重庆市梁平区明达镇, 自东北向西南进入长寿区, 流域面积约 3 112 km², 是长江北岸一级支流(图 1)。地貌以低山丘陵为主, 海拔为 103~1 120 m。丘陵地带地势起伏较小, 多由低矮的山丘和缓坡组成, 是山地和平原间的过渡地带。平原部分则地势平坦, 土壤肥沃, 是主要的农业区。气候属中亚热带湿润季风气候区, 年均气温 16.8 °C, 年均降水量 1 192.4 mm。土壤主要有水稻土、黄壤、石灰土和黄褐土。截至 2020 年底, 流域人口约 206.7 万人。流域水土流失面积约占流域面积的 40%, 且以水力侵蚀中的面蚀和沟蚀为主。流域干流年均水质达 III 类考核标准。

1.2 数据来源与处理

主要包括空间信息数据、社会经济数据、空间规划数据(表 1)。将所有栅格和矢量数据统一坐标系为: CGCS2000_3_Degree_GK_CM_108E, 以减少图形偏差。

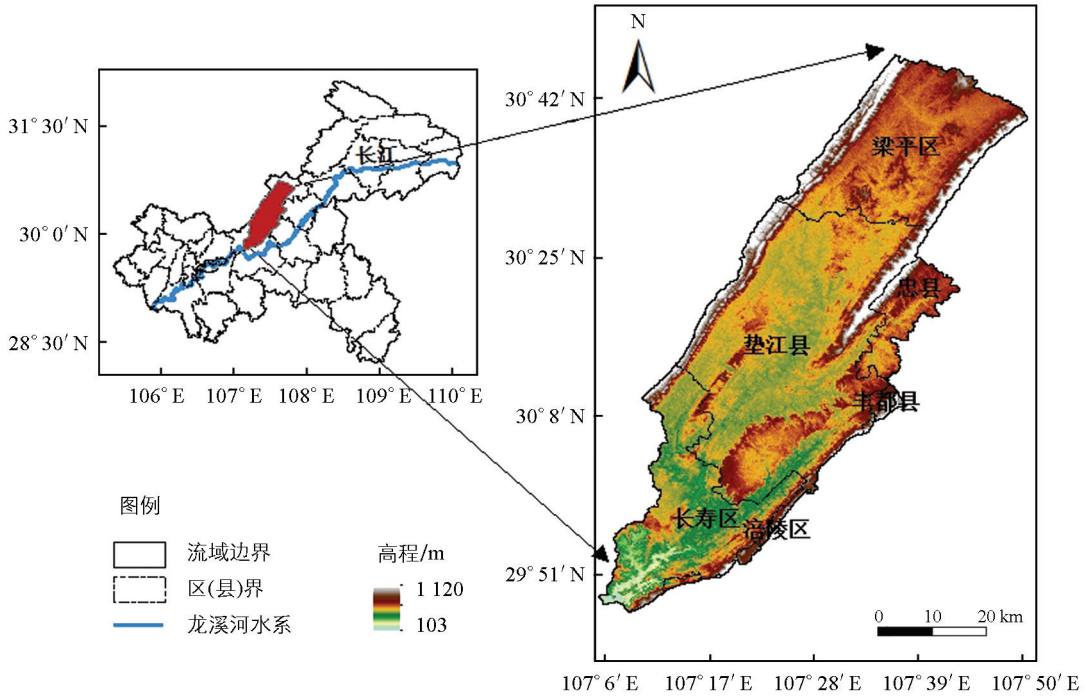
DEM 数据。利用 ArcGIS 10.2 中 Spatial Analyst Tools 工具中的提取分析功能, 以龙溪河流域边界为基准, 通过掩膜提取工具从重庆市 DEM 图中提取出龙溪河流域的 DEM 图。利用 Spatial Analyst Tools 工具中的表面分析和邻域分析功能, 从龙溪河流域 DEM 数据中提取坡度、坡向、高程变异系数、地表粗糙度和地形起伏度等空间数据。

土地利用类型数据。包含 2000、2005、2010、2015、2020 年的土地利用数据, 土地利用类型分为旱地、水田、林地、草地、水域和建设用地 6 类。

土壤类型数据。以龙溪河流域边界为基准, 利用 ArcGIS 10.2 对重庆市土壤类型空间分布图进行掩膜裁剪, 提取龙溪河流域土壤类型数据。参照中国科学院的土壤类型分类标准, 将龙溪河流域土壤类型分为水稻土、紫色土、中性紫色土、黄壤、石灰岩等 10 类。

气象数据。收集 2000—2020 年龙溪河流域周边气象站点数据, 采用克里金插值法对离散气象数据进行空间插值。利用栅格计算器计算流域年均气温和年均降水量。

社会经济数据。人口密度和 GDP 数据来源于中国科学院资源环境科学数据平台, 利用 ArcGIS 10.2 对其进行掩膜裁剪, 提取龙溪河流域人口分布和 GDP 数据; 利用 ArcGIS 10.2 空间分析工具, 采用欧式距离



审图号: GS(2024)0650 号

图 1 研究区位置与 DEM 图

法, 获得点、线、面状的距离数据。

空间规划数据。以龙溪河流域边界数据为基准, 利用 Date Management Tools 模块中的 Raster Processing 命令对重庆市“三区三线”数据进行裁剪, 提取龙溪河流域对应数据。

表 1 数据类型及来源

数据类型	数据名称	数据形式	分辨率	数据来源
空间信息数据	土地利用类型数据	栅格	30 m×30 m	A
	高程	栅格	30 m×30 m	A
	植被覆盖度指数	栅格	1 000 m×1 000 m	B
	土壤类型	矢量	/	B
	年均气温	栅格	1 000 m×1 000 m	B
	年均降水量	栅格	1 000 m×1 000 m	B
社会经济数据	重庆市行政区划边界	矢量	/	B
	居民点	矢量	/	C
	主要交通道路	矢量	/	C
	乡镇中心	矢量	/	C
	人口密度	栅格	1 000 m×1 000 m	B
	GDP	栅格	1 000 m×1 000 m	B
空间规划数据	永久基本农田	矢量	/	C
	生态保护区	矢量	/	C

注: 数据来源中, A 为地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>); B 为中国科学院资源环境科学数据平台(<https://www.resdc.cn/>); C 为重庆市规划和自然资源局。

1.3 模拟方法

1.3.1 土地利用变化驱动因子选取

自然因素是影响土地利用变化的主要因素, 其与社会经济因素交互作用后, 因子解释力得到增强。自然因子影响土地利用变化发生的概率, 如高程越高、坡度越大, 立地条件越差, 土地受扰动的程度越低, 土地利用发生变化的概率越小。土壤和水热条件越好, 土地利用发生变化的概率越大。社会经济因子才是驱动土地利用变化根本动力, 经济发展水平越高、人口密度越大、到河网或道路(居民点)的距离越近, 土地利用的驱动力越强, 土地利用发生变化的概率越高。基于龙溪河流域自然地理条件与社会经济状况的实际, 考虑距离对人为活动的影响, 研究选取 5 项自然环境因子(高程、坡度、土壤类型、年均气温、年均降水量)和 5 项社会经济因子(人口密度、人均 GDP、到河网距离、到居民点距离、到主要交通道路距离)。在 ArcGIS 10.2 软件中, 将 10 个驱动因子统一处理为 30 m×30 m 的栅格数据, 对到主要交通道路、居民点和河网的距离, 利用 ArcGIS 10.2 中的欧氏距离工具进行分析, 其中到居民点距离不是主要影响因素, 因此图中没有展示(图 2)。

1.3.2 变化情景设置

依据龙溪河流域土地利用变化规律, 考虑政策对流域土地利用变化的影响, 研究设定 4 种可能的土地利用变化情景: 自然发展情景、耕地保护情景、生态保护情景和旱改水发展情景。

自然发展情景: 土地利用变化主要由流域自然环境特点和社会经济发展状况所决定。本研究认为未来土地利用变化过程仍按历史演化趋势演进, 展现出自然发展状态。

耕地保护情景: 防止耕地“非农化”和“非粮化”, 切实改进耕地占补平衡方式。本研究考虑加强地势平缓区耕地的保护利用, 而陡坡区耕地则强调利用方式的多样性。

生态保护情景: 严守生态保护红线, 严禁建设占用生态保护用地和毁林开荒, 加大生态修复力度, 强化水源涵养与水土保持, 禁止生态用地转换为耕地。

旱改水发展情景: 聚焦占优补优, 占水田补水田。本研究考虑地形坡度、交通区位、灌溉条件、产业发展等因素, 实施旱地垦造水田整治工程, 提高耕地设施配套程度与耕地质量。

1.3.3 驱动因子排序

将 2010 年和 2020 年土地利用数据输入 PLUS 模型的“Extract Land Expansion”模块中, 将地类未发生变化的栅格单元 value 值设为 0, 发生变化的记为原地类代码, 再将用地扩张数据和驱动因子数据输入 LEAS 模块, 生成土地利用发展概率。本研究将随机森林数量设置为 20, 采样率为 0.01, 采样方式为随机采样, 特征个数为 10, 线程为 15(图 3)。

从图 4 可以看出, 影响旱地扩张的主要因素为坡度、年均气温和高程。坡度影响土壤侵蚀和地表水分的流动, 坡度越陡越不利于水分的保持。气温影响水分蒸发, 影响土壤水分含量。高程影响降水分布与农业生产布局。水田扩张受坡度和高程的影响, 相比旱地, 其年均降水量的贡献有所增加。年均气温、高程和坡度对林地的扩张影响较大, 一定程度上决定林地的生长条件、分布和变化趋势。影响草地扩张的主要因素为人口密度、到河网距离和到主要交通道路距离, 它们关联人类活动对土地类型的改变, 影响水资源可得性和交通便利性。水域扩张的主要因素为土壤类型、坡度和年均气温, 它们对水体的化学成分、水量和水循环产生重要影响。影响建设用地扩张的主要因素为人口密度。随着人口密度的增加, 对住房、基础设施和经济活动的需求也会相应增长, 进而导致建设用地需要进一步扩张。

1.3.4 模拟参数设置

1) 限制转换区设置。自然水体(河流、湖泊、水库等)自然状态下具有相对稳定性, 不易发生改变, 即水体的改变需要较大的投入。本研究利用 ArcGIS 10.2, 将历史土地利用数据重分类, 把水域设置为 0, 表示不可转换, 其他地类设置为 1, 表示可转换。

2) 邻域效应。反映周围环境对特定土地利用类型的影响, 其强弱和方向决定变化的概率和方向。将

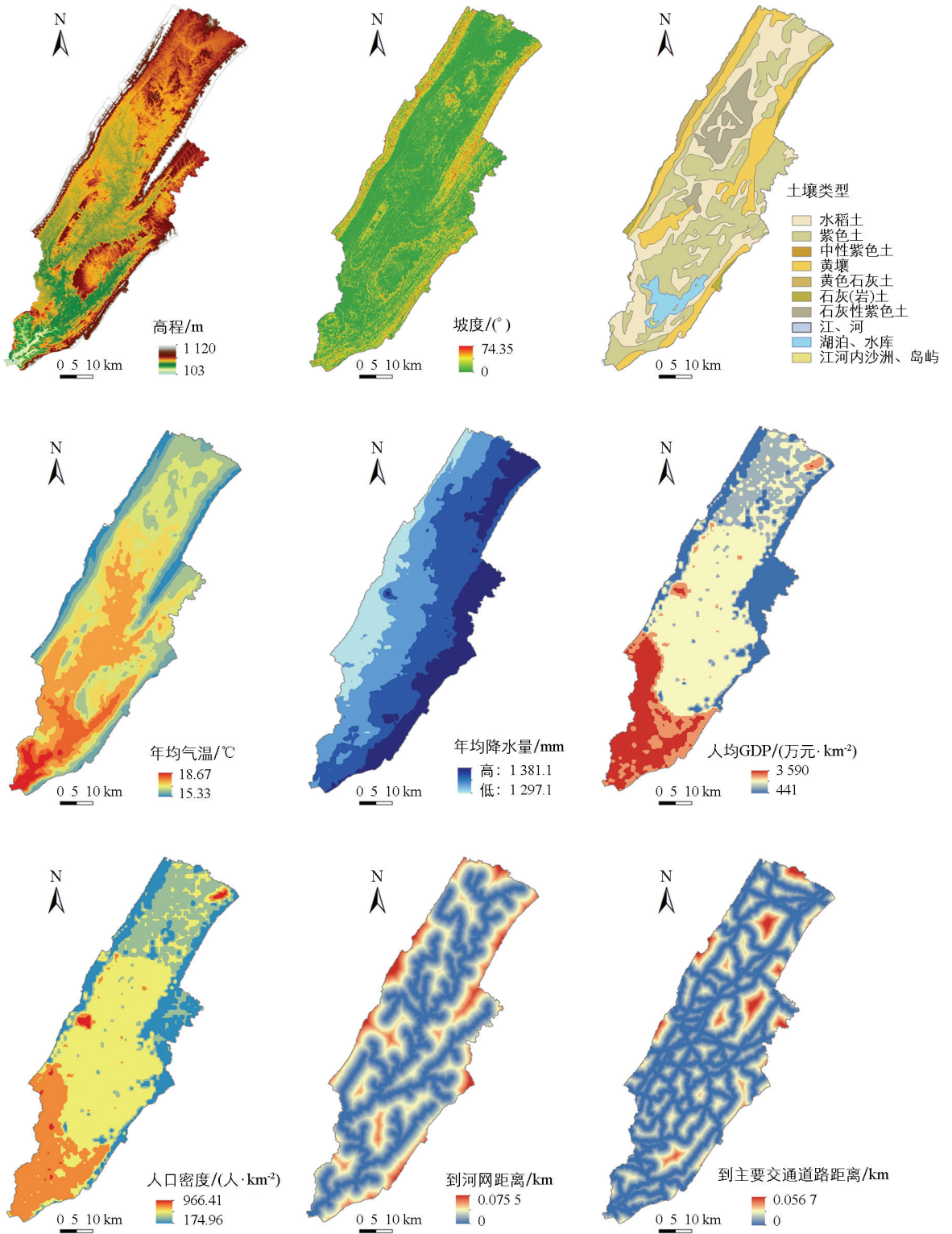


图 2 主要土地利用驱动因子

30 m×30 m 栅格数据的邻域设置为 3。PLUS 模型中递减阈值的衰减系数用于控制产生新斑块的难易，其值为 0~1。衰减系数越大，越难以转换。本研究将衰减系数设置为 0.9，以更好地模拟变化的实际情况^[26]。扩张系数用于调整模型生成新的土地利用斑块的能力，其值为 0~1。数值越小，表示越难生成新的斑块，本研究将扩张系数设置为 0.1。

3) 转换成本矩阵。该矩阵为衡量一种土地利用类型能否转化为另一种的重要指标。当允许转化时，成

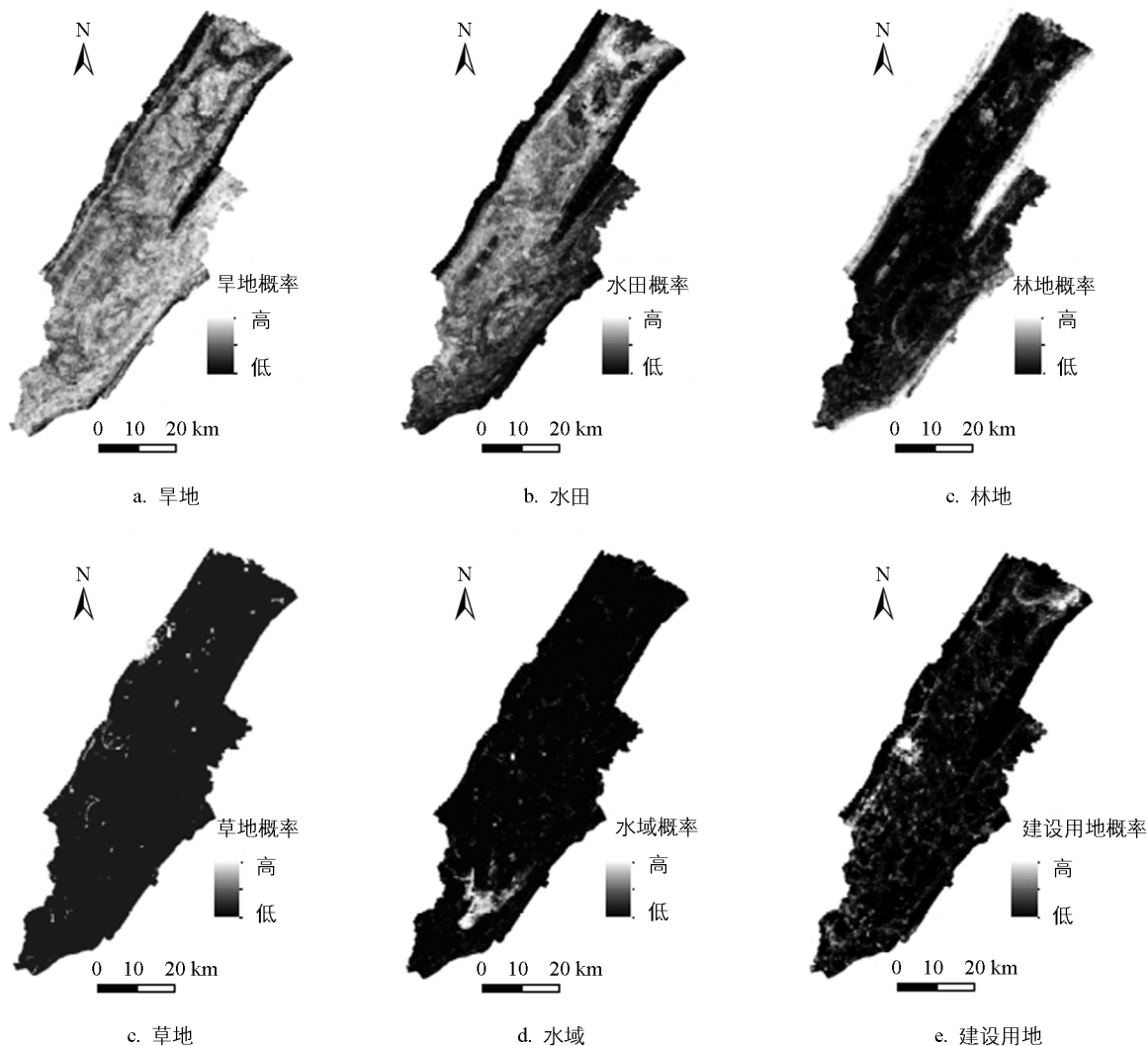


图 3 各土地利用类型发展概率

本设为 1; 不允许转化时, 成本设为 0。考虑到水域相对稳定, 建设用地转化难度较大, 本研究设定水域和建设用地为不可转化, 其他用地类型为可相互转化(表 2)。

4) 邻域权重。取值范围为 0~1。数值越大, 邻域影响越大, 即某种土地类型的扩张能力越强。根据各类用地以往变化规律确定邻域权重, 计算公式为:

$$W_i = \frac{TA_i - TA_{\min}}{TA_{\max} - TA_{\min}} \quad (1)$$

式中: W_i 为第 i 类土地类型邻域权重; TA_i 为第 i 类土地利用扩张面积 (hm^2); TA_{\min} 为各类土地利用扩张最小地类扩张面积 (hm^2); TA_{\max} 为各类土地利用扩张最大地类扩张面积 (hm^2)^[27]。

表 2 转换成本矩阵

土地利用类型	旱地	水田	林地	草地	水域	建设用地
旱地	1	1	1	1	1	1
水田	1	1	1	1	1	1
林地	1	1	1	1	1	1
草地	1	1	1	1	1	1
水域	0	0	0	0	1	0
建设用地	0	0	0	0	0	1

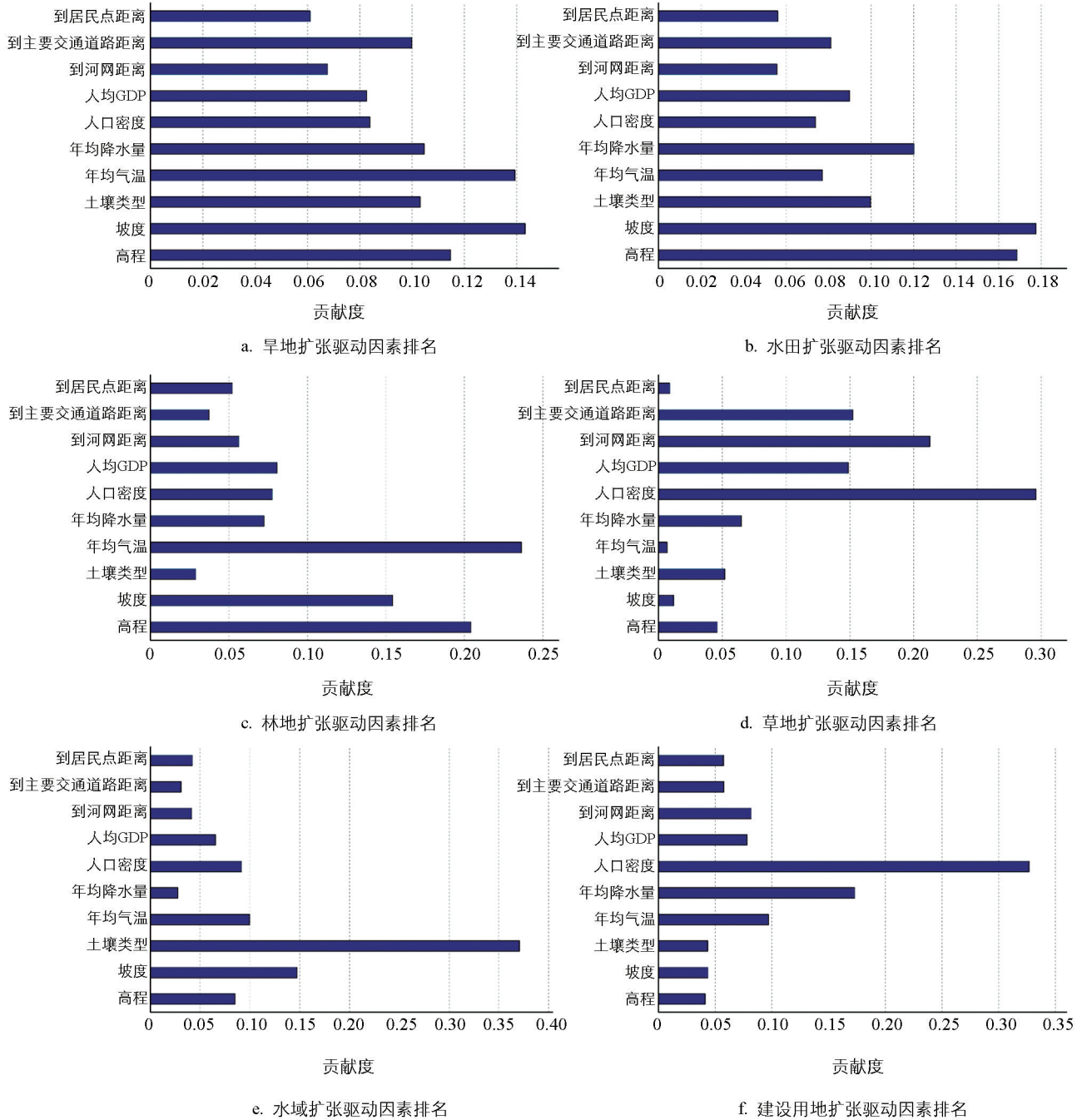


图 4 各驱动因子贡献度

根据公式(1), 研究区 2010—2020 年旱地、水田、林地、草地、水域和建设用地的领域权重分别为 0、0.47、0.53、0.51、0.50、1.00。领域权重为 0 表示该土地利用类型扩张能力极弱, 易被其他地类侵占, 参考研究区 2000—2020 年土地利用变化趋势, 将旱地的领域权重调整为 0.10(表 3)。

表 3 邻域权重

土地利用类型	旱地	水田	林地	草地	水域	建设用地
领域权重	0.10	0.47	0.53	0.51	0.50	1.00

5) 用地发展需求。利用 2000 年和 2010 年数据, 通过马尔科夫链模块对研究区 2020 年各类土地利用发展需求进行预测。将预测数据输入 CRAS 模块中预测研究区 2020 年各类土地利用类型。从表 4 可以看

出, 2020 年预测的结果与实际数据较接近, 这表明利用 PLUS 模型中的马尔科夫模型预测目标年份的土地利用栅格需求是相对可靠的。

表 4 模拟和实际 2020 年土地利用需求对比 (栅格数量)

个

土地利用类型	旱地	水田	林地	草地	水域	建设用地
实际 2020 年	1 847 451	907 797	576 522	1 831	31 989	87 324
模拟 2020 年	1 876 632	912 004	575 754	1 291	31 997	55 235

1.3.5 模型精度验证

利用 Kappa 系数评价 PLUS 模型土地利用模拟结果的精度, 计算公式为:

$$k_{\text{Kappa}} = \frac{p_o - p_e}{1 - p_e} \quad (2)$$

式中: p_o 为模拟与实际土地利用一致栅格数量占总体栅格数量比例; P_e 为随机条件下期望的正确率; 1 代表理想情况下模拟正确的栅格比例。Kappa 系数为 $-1 \sim 1$ 。

从图 5 可以看出, 研究区 2020 年土地利用模拟结果和实际值较接近, 两者一致性较高, Kappa 系数为 0.958, 说明该模型能用于研究区未来土地利用变化模拟。使用 PLUS 模型及选取的 10 个驱动因子和参数, 能较准确地模拟研究区土地利用的未来空间分布。

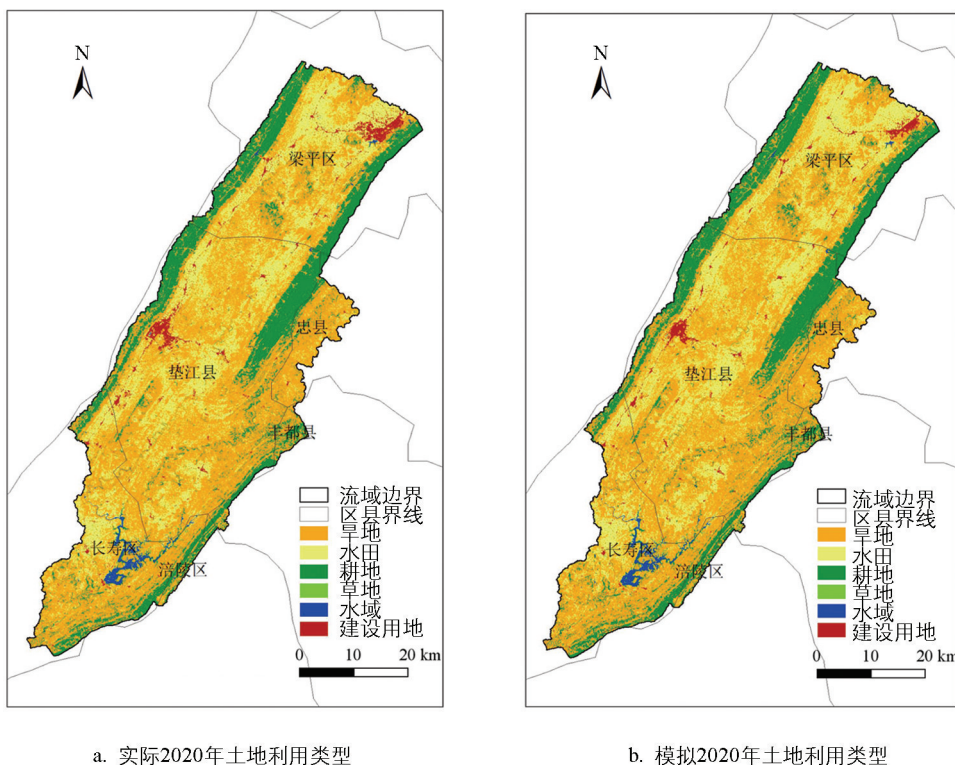


图 5 研究区 2020 年土地利用模拟结果和实际值

2 结果与分析

2.1 自然发展情景

假设研究区 2020—2030 年间土地利用变化规律与 2010—2020 年保持一致, 基于 2000、2010、2020 年土地利用现状资料, 利用 PLUS 模型中的 Markov Chain 模块, 对研究区自然发展情景下 2030 年土地利用

变化趋势进行模拟(表 5 和图 6a)。

表 5 自然发展情景下 2030 年用地需求预测(栅格数量)

个

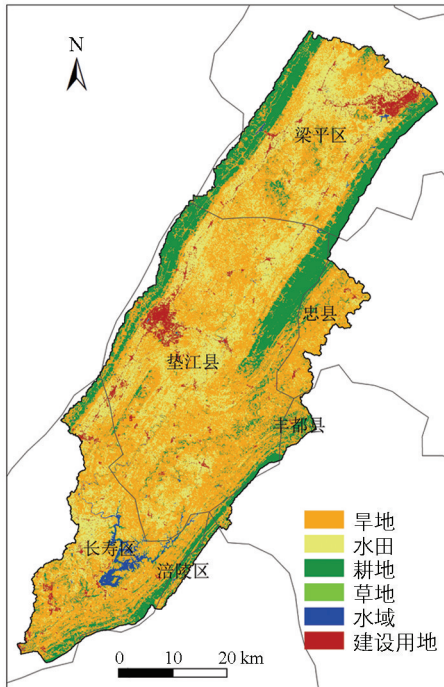
需求预测	旱地	水田	林地	草地	水域	建设用地
2010 年	1 895 954	911 000	573 596	1 363	31 956	39 044
2020 年	1 847 450	907 797	576 522	1 831	31 989	87 324
2030 年自然发展情景	1 800 318	904 409	579 263	2 292	32 019	134 612

从表 6 可以看出,自然发展情景下建设用地快速扩张,其面积增加 3 313.11 hm^2 ,增长率达 42.16%,而旱地和水田减少面积最多,分别为 1 948.99、1017.26 hm^2 。

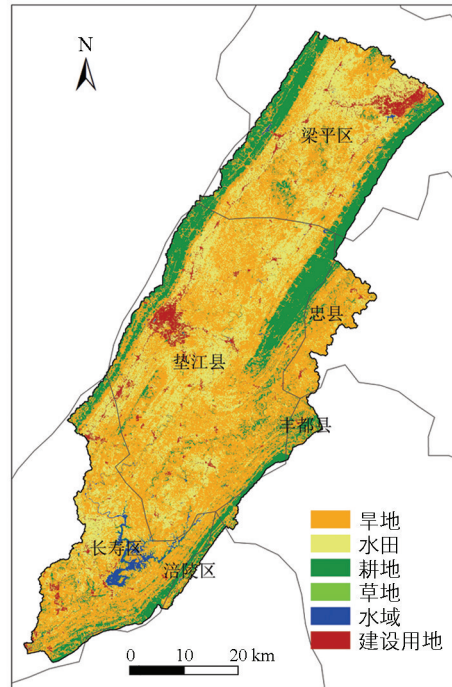
表 6 自然发展情景下 2030 年土地利用类型转移矩阵

 hm^2

2020 年/2030 年	旱地	水田	林地	草地	水域	建设用地	总计
旱地	154 928.54	5 740.39	2 173.04	27.29	8.96	3 346.39	166 224.61
水田	6 740.32	74 330.29	20.66	0.41	24.59	576.55	81 692.83
林地	2 443.05	26.46	49 295.62	0.80	48.23	1.91	51 816.07
草地	74.20	1.44	1.93	71.20	0.10	15.66	164.53
水域	6.98	32.63	35.68	0.01	2 803.46	0.20	2 878.95
建设用地	82.52	544.35	0.15	0.56	0.02	7 230.69	7 858.29
总计	164 275.62	80 675.57	51 527.07	100.27	2 885.36	11 171.40	310 635.29



a. 自然发展情景



b. 耕地保护情景

图 6 自然发展情景、耕地保护情景下 2030 年土地利用类型分布

自然发展情景下 2030 年桂溪、黄沙和云台的旱地面积减少较多,分别为 724.43、244.92、225.81 hm^2 ,分别占旱地总减少面积的 36.75%、12.42%、11.45%;水田面积减少主要集中于云集、长寿湖和新立,分别为 113.76、100.49、77.80 hm^2 ,分别占水田总减少面积的 11.13%、9.84%、7.62%;林地面积减少以长寿湖、裴兴和云集为主,分别为 41.95、34.77、26.94 hm^2 ,分别占林地总减少面积的 12.99%、10.76%、

8.34%；草地面积减少主要集中在回龙、桂溪和三溪，减少面积分别为 16.79、7.56、5.55 hm^2 。自然情景下不同区域水域面积变化差异较明显，但总体呈上升趋势，其中长寿湖水域面积增长最大，达 11.12 hm^2 。桂溪、云台和黄沙的建设用地扩张显著，分别增加 789.18、276.64、255.44 hm^2 ，分别占总扩张面积的 23.82%、8.35%、7.71%。

自然发展情景下，产生上述结果的原因在于城镇化进程进一步加速，大量农村人口逐渐向城镇集中，从而驱使建设用地的快速扩张，导致大量耕地(旱地和水田)、林草地和水域向建设用地转换，尤其是立地条件较好的区域。而且，在乡村振兴过程中，农村特色主导产业发展对建设用地的需求加剧，这也是导致研究区建设用地快速增长的主要原因之一。建设用地增加、旱地减少均主要发生在城镇建设用地迅速扩张区。水田减少、林草地减少主要发生在农业特色主导产业发展基础较为突出的区域。但是，自然发展情景仅是以往演化趋势延续的假设，是缺少政策作用下的理想演化状态，偏离政策作用后的实际情况，为此，研究区自然发展情景下的土地利用预测必须引入政策约束因素予以修正。

2.2 耕地保护情景

耕地保护情景中，基于粮食安全和基本农田保护政策考量，优先保护耕地，限制基本农田向其他土地利用类型转变。在考虑自然发展情景基础上，为限制耕地向非农用途的转换，参考龙溪河流域近年来耕地向非农建设用地转换的速率，将旱地和水田向建设用地的转移概率减少 20%，得到 2030 年耕地保护情景下的模拟结果(表 7 和图 6b)。

表 7 耕地保护情景下 2030 年用地需求预测(栅格数量)

需求预测	旱地	水田	林地	草地	水域	建设用地
2010 年	1 895 954	911 000	573 596	1 363	31 956	39 044
2020 年	1 847 450	907 797	576 522	1 831	31 989	87 324
2030 年耕地保护情景	1 807 559	906 552	579 288	2 293	32 020	125 201

从表 8 可以看出，耕地保护情景下建设用地扩张速度减缓，比自然发展情景减少 292.73 hm^2 。旱地、水田和林地均呈不同程度地减少，其中旱地和水田减少最多，分别为 1856.17、815.20 hm^2 ，但旱地和水田面积相较于自然发展情景有明显增加，分别增加 92.82、202.05 hm^2 ，其中旱地增加主要集中在云台、海棠和桂溪，分别为 102.42、94.66、79.39 hm^2 ，水田增加主要集中于新立、云集，分别为 26.89、21.30 hm^2 。

表 8 耕地保护情景下 2030 年土地利用类型转移矩阵

2020 年/2030 年	旱地	水田	林地	草地	水域	建设用地	总计
旱地	155 256.99	5 701.49	2 175.06	13.98	9.05	3 068.20	166 224.77
水田	6 520.90	74 571.21	20.39	0.08	24.69	555.51	81 692.77
林地	2 444.80	26.43	49 294.02	0.73	48.13	1.70	51 815.80
草地	62.12	1.33	2.03	82.17	0.09	16.78	164.53
水域	6.71	32.75	35.65	0.01	2 803.64	0.20	2 878.95
建设用地	77.08	544.35	0.18	0.38	0.02	7 236.28	7 858.29
总计	164 368.60	80 877.56	51 527.33	97.34	2 885.61	10 878.67	310 635.12

耕地保护情景下 2030 年桂溪、黄沙和邻封旱地面积显著减少，分别为 645.04、268.41、236.90 hm^2 ，分别占旱地总减少面积的 34.34%、14.29%、12.61%；水田减少面积主要集中于云集、长寿湖和桂溪，分别为 92.46、88.88、65.43 hm^2 ，分别占水田总减少面积的 11.28%、10.84%、7.98%；林地减少面积主要集中在长寿湖、裴兴和云集，分别为 41.81、34.44、27.07 hm^2 ，分别占林地总减少面积的 12.95%、

10.67%、8.39%；水域面积总体呈上升趋势，其中长寿湖水域面积增长最多，达 11.25 hm²，其次为龙溪河流域，增长 4.59 hm²；桂溪、邻封和黄沙建设用地扩张较显著，分别为 701.05、318.38、279.12 hm²，分别占建设用地总扩张面积的 23.22%、10.55%、9.25%。

耕地保护情境下，研究区建设用地扩张速度较自然发展情景明显放缓，尽管旱地和水田面积仍在减少，但减少的速度得到有效控制。目前，区域经济正处于由传统增长模式向高质量发展转变，建设对土地的需求逐渐降低，此外，占优补优、占水田补水田政策的实施，使建设占用耕地的面积不仅显著减少，且占用耕地的质量也较以往有所降低，从而促使土地利用结构进一步优化。当然，促使耕地减少的主要原因仍是城镇建设用地扩张及农村现代农业产业发展。基本农田保护红线的划定是限制耕地向其他地类转换的主要因素之一，在做好耕地保护的同时应根据不同区域的资源环境条件，尽可能优化土地利用结构，适当增加农村产业发展用地，为乡村振兴过程中城乡要素资源的流动提供用地保障。

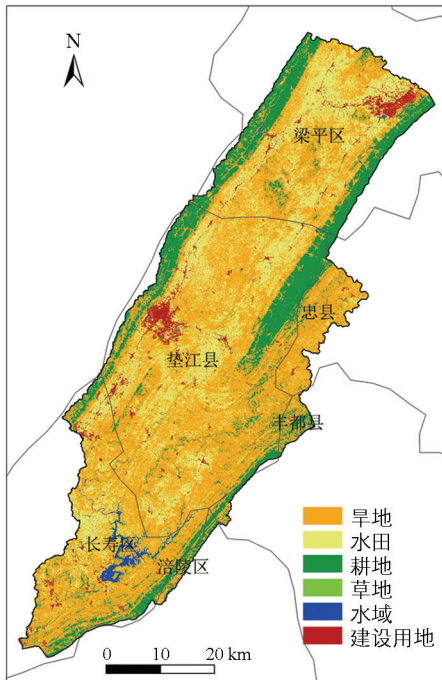
2.3 生态保护情景

生态保护情景中，限制生态保护红线内的土地类型向其他用途转换。在优先考虑自然发展情景的基础上，为加快生态恢复和保护，考虑到耕地因撂荒向林草地转换的速度，将旱地和水田向林草地的转移概率增加 20%，且因立地条件限制和现有政策文件对林草地和水域保护的要求，目前建设占用林草地的可能性和概率均不高，故将林草地和水域向建设用地转移的概率减少 30%，得到 2030 年生态保护情景下的模拟结果(表 9 和图 7a)。

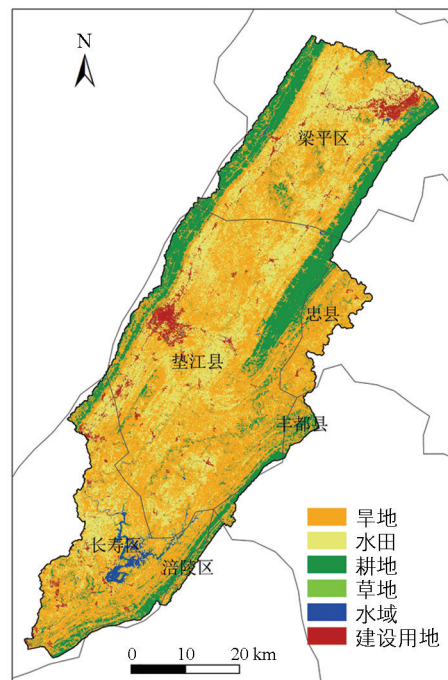
表 9 生态保护情景下 2030 年用地需求预测(栅格数量)

个

需求预测	旱地	水田	林地	草地	水域	建设用地
2010 年	1 895 954	911 000	573 596	1 363	31 956	39 044
2020 年	1 847 450	907 797	576 522	1 831	31 989	87 324
2030 年生态保护情景	1 799 050	904 343	580 614	2 347	32 021	134 538



a. 生态保护情景



b. 早改水发展情景

图 7 生态保护情景、早改水发展情景下 2030 年土地利用类型分布

从表 10 可以看出，受生态保护红线约束，对比 2030 年自然发展情景，生态保护情景下林地面积增加

131.97 hm², 主要集中在竹山、屏锦和回龙, 分别为 35.56、33.97、13.72 hm²; 草地面积增加 4.35 hm²; 水域面积增加 6.78 hm²; 建设用地增长面积减少 206.61 hm²; 旱地和水田均呈减少趋势, 其减幅分别为 1 869.93、1 026.40 hm²。

表 10 生态保护情景下 2030 年土地利用类型转移矩阵

hm²

2020 年/2030 年	旱地	水田	林地	草地	水域	建设用地	总计
旱地	155 018.95	5 736.74	2 285.17	25.61	9.12	3 148.79	166 224.39
水田	6 751.42	74 326.62	22.64	0.65	24.52	566.77	81 692.62
林地	2 425.87	26.48	49 312.94	0.73	48.12	1.59	51 815.73
草地	68.54	1.30	2.18	77.13	0.07	15.38	164.62
水域	6.68	32.53	35.64	0.01	2 803.89	0.20	2 878.95
建设用地	83.00	542.54	0.12	0.57	0.02	7 232.04	7 858.29
总计	164 354.47	80 666.22	51 658.70	104.71	2 885.73	10 964.79	310 634.61

生态保护情景下 2030 年桂溪、黄沙和云台旱地面积显著减少, 分别为 714.61、237.93、212.23 hm², 分别占旱地总减少面积的 37.76%、12.57%、11.21%; 水田面积减少主要在云集、长寿湖和新立, 分别为 110.57、100.82、77.73 hm², 分别占水田总减少面积的 10.72%、9.78%、7.54%; 林地面积减少以长寿湖、裴兴和杠家为主, 分别为 37.24、35.13、26.13 hm², 分别占林地总减少面积的 19.42%、18.32%、13.63%; 草地面积减少主要集中在回龙、桂溪和三溪, 分别为 18.11、6.93、5.55 hm²; 水域面积增长最多的是长寿湖, 达 11.70 hm²。建设用地扩张最多的是桂溪、云台和黄沙, 分别为 774.73、260.44、250.11 hm², 分别占总扩张面积的 24.95%、8.39%、8.05%。

生态保护红线是限制生态用地向其他地类转换的关键因素之一, 但是为满足城镇建设和乡村产业发展需要, 建设用地扩张仍是导致旱地、水田、林草地等减少的主要原因。即便在生态保护情境下, 仍要协调生态保护、耕地保护与经济发展之间的关系, 做到“三线”动态协调共生。对立地条件相对较差的区域, 林草地分布较多, 应尽量减少其向建设用地转换, 而对地势相对平缓的优质耕地集中分布区, 应减少非农建设占用耕地。低丘缓坡区则是应成为非农建设占用耕地的区域, 但应做好生态承载力评估, 降低大面积开发对生态完整性的影响。

2.4 旱改水发展情景

旱改水发展情景下, 响应占优补优, 占水田补水田, 增加水田面积, 优先考虑在自然发展情景基础上, 基于立地条件和农户意愿, 将旱地向水田的转移概率增加 20%, 水田向旱地转移的概率减少 30%, 得到 2030 年旱改水发展情景下的模拟结果(表 11 和图 7b)。

表 11 旱改水发展情景下 2030 年用地需求预测(栅格数量)

个

需求预测	旱地	水田	林地	草地	水域	建设用地
2010 年	1 895 954	911 000	573 596	1 363	31 956	39 044
2020 年	1 847 450	907 797	576 522	1 831	31 989	87 324
2030 年旱改水发展情景	1 806 688	897 868	579 286	2 293	32 020	134 759

从表 12 可以看出, 旱改水发展情景下, 水田比自然发展情景增加 164.94 hm², 主要集中在新立、云集和花桥, 分别为 19.21、17.70、16.64 hm²。旱地面积比自然发展情景减少 121.83 hm²。林地面积减少 282.95 hm², 草地面积减少 69.56 hm², 水域面积增加 6.44 hm², 三者变化趋势与自然发展情景差异不大。建设用地面积同自然发展情景基本一致。

表 12 旱改水发展情景下 2030 年土地利用类型转移矩阵

hm²

2020 年/2030 年	旱地	水田	林地	草地	水域	建设用地	总计
旱地	154 996.37	5 715.43	2 176.31	22.39	8.94	3 305.45	166 224.89
水田	6 553.78	74 520.74	20.34	0.29	24.55	573.06	81 692.75
林地	2 440.29	26.37	49 298.66	0.70	48.16	1.78	51 815.96
草地	74.47	1.25	1.93	71.11	0.09	15.69	164.53
水域	6.73	32.73	35.65	0.01	2 803.64	0.20	2 878.95
建设用地	82.14	543.99	0.13	0.49	0.02	7 231.52	7 858.29
总计	164 153.78	80 840.51	51 533.01	94.98	2 885.39	11 127.71	310 635.38

旱改水发展情景下 2030 年桂溪、黄沙和云台旱地面积显著减少,分别为 715.07、244.53、227.19 hm²,分别占旱地总减少面积的 34.16%、11.68%、10.85%;水田减少面积主要在云集、长寿湖和桂溪,分别为 96.06、90.38、66.95 hm²,分别占水田总减少面积的 11.21%、10.55%、7.81%;林地面积减少以长寿湖、裴兴和云集为主,分别为 42.40、35.41、27.01 hm²,分别占林地总减少面积的 13.37%、11.16%、8.52%;草地面积减少主要集中在回龙、桂溪和三溪,分别为 18.57、7.53、5.55 hm²;水域面积增加最大的是长寿湖,达 11.15 hm²。桂溪、云台和黄沙的建设用地面积扩张明显,分别为 778.19、275.05、255.51 hm²,分别占总扩张面积的 23.81%、8.42%、7.82%。

研究区地势平缓,水田分布广泛,旱地与水田相嵌时有发生,且水资源丰沛,水利设施配套较齐全,做好耕地内部的优化调整,既能提高耕地质量,完善农田配套设施,又能提升耕地产能。为进一步提高耕地产能,满足占水田补水田的平衡要求,考虑立地条件和农户意愿,在研究区开展旱地改水田是极其合适的,不仅减轻占优补优的压力,更能提高水田田块的连片程度,为现代农业发展提供本底条件。但在旱改水实施过程中一定要考虑水源条件、设施配套条件、农户意愿、田块连片度等因素,不能一概而论。

3 讨论与结论

3.1 讨论

考虑龙溪河流域的自然地理条件与社会经济状况,本研究选择了对流域斑块级土地利用作用较大的 5 项自然环境因子(高程、坡度、土壤类型、年均气温、年均降水量)和 5 项社会经济因子(人口密度、人均 GDP、到河网距离、到居民点距离、到主要交通道路距离)。PLUS 模型模拟结果发现,Kappa 系数为 0.958,模拟值与实际值一致性程度较高,表明因素选择合理且因素间的组合较好。这说明在开展流域土地利用变化模拟时,并不是因素选择得越多越好,选择最合适的关键影响因素才是最合理且符合实际的。

对于土地利用的情景设置,本研究重点考虑政策对龙溪河流域土地利用的作用,特别是与土地利用密切相关、对土地利用作用强度大的耕地保护、生态文明建设、经济高质量发展等方面,研究设置自然发展、耕地保护、生态保护和旱改水发展 4 大情景。PLUS 模型模拟结果发现,不同情景间龙溪河流域主要土地利用类型差距较大,但并未出现数量级的差异。4 种情景的横向对比发现,自然发展情景下旱地、水田、林地分别减少 1 948.99、1 017.26、289.00 hm²,建设用地增加 3 313.10 hm²;耕地保护情景下旱地、水田、林地分别减少 1 856.17、815.20、288.47 hm²,建设用地增加 3 020.38 hm²;生态保护情景下旱地、水田、林地分别减少 1 869.93、1 026.40、157.03 hm²,建设用地增加 3 106.49 hm²;旱改水发展情景下旱地、水田、林地分别减少 2 071.11、852.24、282.95 hm²,建设用地增加 3 269.41 hm²。综上,耕地保护情景下旱地和水田分别增加 92.82 hm² 和 202.05 hm²,生态保护情景下林地分别增加 131.97 hm²,旱改水发展情景下水田增加 164.94 hm²。这说明模拟结果是非常适度的,符合政策的作用规律,即政策对流域土地利用的影响较大,但不会改变利于土地利用的根本格局,不会影响流域高质量发展。

但是, 本研究选择的驱动因素和情景设置是否能用于类似其他流域的土地利用变化多情景模拟, 仍需要进一步论证。因为不同流域的自然地理条件与社会经济状况有一定的差异, 流域土地利用现状存在差异, 未来土地利用的演化趋势受自然因素的影响与社会经济的驱动也有很大不同, 基于 PLUS 模型的土地利用多情景模拟结果与实际情况间的符合程度会存在一定的差异。未来将进一步探索 PLUS 模型在其他流域的适用程度。

3.2 结论

1) 使用构建的 PLUS 模型, 对研究区 2020 年土地利用格局进行模拟, 经检验, PLUS 模型 Kappa 系数为 0.958, 模拟结果和实际值较接近, 两者一致性较高。使用 PLUS 模型以及选取的 10 项驱动因子和参数, 能较为准确地模拟研究区土地利用空间格局。

2) 自然发展情景下, 流域土地利用演化仍按照以往的方式和速度进行, 旱地、水田、林地分别减少 1 948.99、1 017.26、289.00 hm^2 , 建设用地增加 3 313.10 hm^2 ; 耕地保护情景下, 考虑到建设占用优质耕地的面积会减少, 但并不以损害经济发展为代价, 旱地、水田、林地分别减少 1 856.17、815.20、288.47 hm^2 , 建设用地增加 3 020.38 hm^2 ; 生态保护情景下, 基于陡坡耕地撂荒和对水域严格保护的实践, 受林草地面积增加、耕地面积减少的驱动, 旱地、水田、林地分别减少 1 869.93、1 026.40、157.03 hm^2 , 建设用地增加 3 106.49 hm^2 ; 旱改水发展情景下, 根据占优补优和耕地地力提升的需要, 耕地内部利用方式的调整将成为未来土地利用变化方式之一, 旱地、水田、林地分别减少 2 071.11、852.24、282.95 hm^2 , 建设用地增加 3 269.41 hm^2 。

3) 与自然发展情景比较, 耕地保护情景下旱地和水田分别增加 92.82 hm^2 和 202.05 hm^2 , 生态保护情景下林地增加 131.97 hm^2 , 旱改水发展情景下水田增加 164.94 hm^2 。耕地保护情景下建设用地增加量最小, 旱地、水田减少量最小, 林地减少量仅较生态保护情景多。考虑到耕地保护、经济发展和生态维持的协同需要, 既要满足经济发展的需求, 又不能造成耕地和林草地的大幅减少, 做到“一要吃饭, 二要建设, 三要保护”, 研究区未来土地利用格局调整推荐耕地保护情景下的模拟结果。

4) PLUS 模型较好地剔除了流域土地利用驱动因素间的多重共线性与空间自相关问题, 将不同政策作用下的非线性土地需求定量化, 显著提高了模拟结果与实际情况的接近程度, 适合用于流域土地利用变化的多情景模拟, 能为流域国土空间格局优化提供科学依据。

参考文献:

- [1] LONG H L, QU Y, TU S S, et al. Development of Land Use Transitions Research in China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2020, 30(7): 1195-1214.
- [2] 乔伟峰, 李琛, 戴凌玲, 等. 乡村地域多功能演化与土地利用转型耦合研究进展与展望 [J]. *地理研究*, 2024, 43(6): 1556-1571.
- [3] 丁孝媛, 叶长盛, 胡海平, 等. 环鄱阳湖城市群土地利用功能转型及其驱动机制 [J]. *农业工程学报*, 2024, 40(7): 298-308.
- [4] QU Y B, JIANG G H, LI Z T, et al. Understanding Rural Land Use Transition and Regional Consolidation Implications in China [J]. *Land Use Policy*, 2019, 82: 742-753.
- [5] 钱有飞. 城市转型下产业结构和土地利用结构的耦合关系及用地结构优化方案研究 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2024, 46(8): 86-94.
- [6] DRUMMOND M A, GRIFFITH G E, AUCH R F, et al. Understanding Recurrent Land Use Processes and Long-Term Transitions in the Dynamic South-Central United States, C. 1800 to 2006 [J]. *Land Use Policy*, 2017, 68: 345-354.
- [7] ZOU Y, MENG J J, ZHU L K, et al. Characterizing Land Use Transition in China by Accounting for the Conflicts Underlying Land Use Structure and Function [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 349: 119311.

- [8] 周贵鹏, 龙花楼. 土地利用转型机理与国土空间格局优化——基于土地利用效益空间函数视角的分析 [J]. 自然资源学报, 2023, 38(10): 2447-2463.
- [9] WANG S Q, ZHENG X Q. Dominant Transition Probability: Combining CA-Markov Model to Simulate Land Use Change [J]. Environment, Development and Sustainability, 2023, 25(7): 6829-6847.
- [10] QU Y B, ZHAN L Y, WEI C C, et al. Interactive Transition of Cultivated Land and Construction Land during China's Urbanization: A Coordinated Analytical Framework of Explicit and Implicit Forms [J]. Land Use Policy, 2024, 138: 107049.
- [11] WANG B Y, TIAN J F, WANG S J. Process and Mechanism of Transition in Regional Land Use Function Guided by Policy: A Case Study from Northeast China [J]. Ecological Indicators, 2022, 144: 109527.
- [12] 谭林, 陈岚. 乡村空间重构与土地利用转型耦合机制及路径分析 [J]. 自然资源学报, 2022, 37(7): 1829-1847.
- [13] 李振今, 王志勇, 刘晓彤, 等. 互花米草治理对黄河三角洲湿地利用及景观格局的影响——利用随机森林和改进的 CA-Markov 模型 [J]. 生态学报, 2024, 44(18): 8366-8382.
- [14] 黎云云, 畅建霞, 王义民, 等. 基于 CA-Markov 模型的黄河流域土地利用模拟预测研究 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(12): 107-116.
- [15] 赵旭, 汤峰, 张蓬涛, 等. 基于 CLUE-S 模型的县域生产-生活-生态空间冲突动态模拟及特征分析 [J]. 生态学报, 2019, 39(16): 5897-5908.
- [16] NASIAKOU S, VRAHNAKIS M, CHOUVARDAS D, et al. Land Use Changes for Investments in Silvoarable Agriculture Projected by the CLUE-S Spatio-Temporal Model [J]. Land, 2022, 11(5): 598.
- [17] KIZIRIDIS D A, MASTROGIANNI A, PLENIU M, et al. Improving the Predictive Performance of CLUE-S by Extending Demand to Land Transitions: The Trans-CLUE-S Model [J]. Ecological Modelling, 2023, 478: 110307.
- [18] LIANG X, GUAN Q F, CLARKE K C, et al. Understanding the Drivers of Sustainable Land Expansion Using a Patch-Generating Land Use Simulation (PLUS) Model: A Case Study in Wuhan, China [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2021, 85: 101569.
- [19] 徐海斌, 肖长江, 刘雅雯, 等. 基于 PLUS 模型的徐州市土地利用布局弹性空间模拟 [J]. 资源科学, 2024, 46(1): 175-186.
- [20] 胡俊聪, 何华贵, 陈朝霞, 等. 基于 PLUS 模型的土地利用多情景模拟与时空特征分析 [J]. 测绘通报, 2023(10): 28-33.
- [21] 牟凤云, 黄淇, 王俊秀, 等. 重庆市轨交客流与土地利用混合度耦合协调关系研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(9): 162-170.
- [22] WANG Z Y, LI X, MAO Y T, et al. Dynamic Simulation of Land Use Change and Assessment of Carbon Storage Based on Climate Change Scenarios at the City Level: A Case Study of Bortala, China [J]. Ecological Indicators, 2022, 134: 108499.
- [23] WANG R Y, ZHAO J S, CHEN G P, et al. Coupling PLUS-InVEST Model for Ecosystem Service Research in Yunnan Province, China [J]. Sustainability, 2023, 15(1): 271.
- [24] WANG J B, WU Y F, GOU A P. Habitat Quality Evolution Characteristics and Multi-Scenario Prediction in Shenzhen Based on PLUS and InVEST Models [J]. Frontiers in Environmental Science, 2023, 11: 1146347.
- [25] 张运平, 林建平, 黄艺敏, 等. 基于 PLUS 空间决策模型的城镇与农业空间协调布局优化 [J]. 农业工程学报, 2023, 39(20): 233-243.
- [26] 刘家欣, 杨庆媛, 苏康传, 等. 耕地利用隐性形态耦合协调及驱动力研究——以重庆市为例 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(4): 41-57.
- [27] 葛全胜, 赵名茶, 郑景云. 20 世纪中国土地利用变化研究 [J]. 地理学报, 2000(6): 698-706.