

DOI: 10.5846/stxb201812042643

成超男, 胡杨, 冯尧, 赵鸣. 基于 CA-Markov 模型的城市生态分区构建研究——以晋中主城区为例. 生态学报, 2020, 40(4): 1455-1462.

Cheng C N, Hu Y, Feng Y, Zhao M. Construction of urban ecological zones based on CA-Markov model: A case study of the main urban area of Jinzhong. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(4): 1455-1462.

## 基于 CA-Markov 模型的城市生态分区构建研究 ——以晋中主城区为例

成超男, 胡 杨, 冯 尧, 赵 鸣\*

北京林业大学园林学院, 北京 100083

**摘要:** 正确看待城市建设发展与生态安全的权衡与协同关系, 合理划定城市生态空间的用途管控等级, 是推进生态文明建设和生态环境保护的重要途径之一。以山西省晋中主城区为例, 从生物多样性保护、自然灾害预警和人为活动干扰 3 方面出发, 判定其城市环境的生态敏感度, 采用 CA-Markov 模型分析和模拟土地类型的演变趋势, 合理划分城市生态分区。在此基础上, 综合现有城市总体规划, 针对各分区提出相应管控措施与建议, 以期优化晋中主城区的生态空间布局和保障其生态安全提供参考。

**关键词:** 生态安全; 生态适宜性评价; CA-Markov 模型; 生态分区; 晋中主城区

### Construction of urban ecological zones based on CA-Markov model: A case study of the main urban area of Jinzhong

CHENG Chaonan, HU Yang, FENG Yao, ZHAO Ming\*

School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

**Abstract:** Correctly considering the trade-off and synergy between urban construction development and ecological security, and rationally demarcating the use level of urban ecological space is fundamental to promote ecological environmental protection and civilization construction. This study analyzed the main urban area of Jinzhong in Shanxi Province. It evaluated the sensitivity of the ecological environment in study area regarding biodiversity conservation, natural disaster warning, and human disturbance. A CA-Markov model was used to simulate the evolution trend of the land to propose the ecological division of the study area. On this basis, combined with the existing urban planning, corresponding control measures and suggestions were proposed for each district, to provide a reference for optimizing the ecological space planning and ensuring its ecological security.

**Key Words:** ecological security; ecological suitability zoning; CA-Markov model; ecological zones; main urban area of Jinzhong

根据土地利用管理的发展目标, 不同土地类型的相互转换会带来生态、生活和生产目标之间的权衡与协同<sup>[1]</sup>, 与满足城市发展所需的建设用地和支持粮食安全的耕地相比, 生态用地是提供生态系统服务和维持区域生态安全的重要土地资源<sup>[2,3]</sup>。近 40 年的城市化发展, 不合理的土地利用活动破坏了维持区域生态系统健康安全的生态空间, 导致水土流失、湿地破坏、土地污染和生物多样性损失等一系列生态环境问题<sup>[4]</sup>。随

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0506903)

收稿日期: 2018-12-04; 网络出版日期: 2019-11-20

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zm0940@126.com

着我国生态文明建设的推进,以生态优先、保护优先和自然恢复为主的策略正逐步落实,科学布局生态、生活和生产空间已成为我国国土空间规划的重要内容,其中地区尺度的生态分区规划具有一定前瞻性,是明确地区生态保护与建设重点,制定地区科学发展的重要手段之一<sup>[5]</sup>。因此,合理甄别城市生态用地和科学布局城市生态空间,既是提升地区生态安全和生态服务的关键性基础工作,也是当前空间规划系统构建不可忽视的重要环节。

目前,有关城市生态分区规划的研究主要以生态环境适宜性评价和生态系统服务的相关理论方法为主,从静态空间视角出发,涉及生态足迹、“源-汇”理论和多因子叠加等方法对某一区域或城市的生态功能合理区划<sup>[5-11]</sup>。而针对较小尺度的地区和动态发展视角的研究相对较少,地区尺度下的土地类型动态演变是城市生态分区规划具有预见性和前瞻性的科学表征,对保障城市生态安全和发展建设有序进行具有重要的现实意义。

## 1 研究区概况

晋中位于山西省中部,面积 16391 km<sup>2</sup>,东北与阳泉市相连,南与长治市、临汾市相交,西南与吕梁市接壤,北与省会太原市毗邻。主城区(榆次区)是晋中的政治、经济、交通中心,面积 1328 km<sup>2</sup>,素有“省城门户”之称。地理坐标为 111°23′—114°28′E,36°39′—38°06′N(图 1)。晋中地势东高西低,山地、丘陵、平川呈阶梯状分布,东部山地岭高坡广,林木丰茂,大部分地区海拔在 700—1700 m 之间。晋中属温带大陆性季风气候,季节变化明显,降水主要集中在夏季,形成雨热同季的气候。

晋中与山西省其他资源型经济地区相似,高消耗、高污染、低产出、低效益的粗放式工业发展模式导致结构性污染突出,生态环境破坏严重。根据《晋中城市总体规划(2016—2030)》的要求,立足“晋商之都、三晋之心、生态之城”的区域发展定位,主城区(榆次区)将作为晋中转型综合改造示范区和生态文明建设示范点。

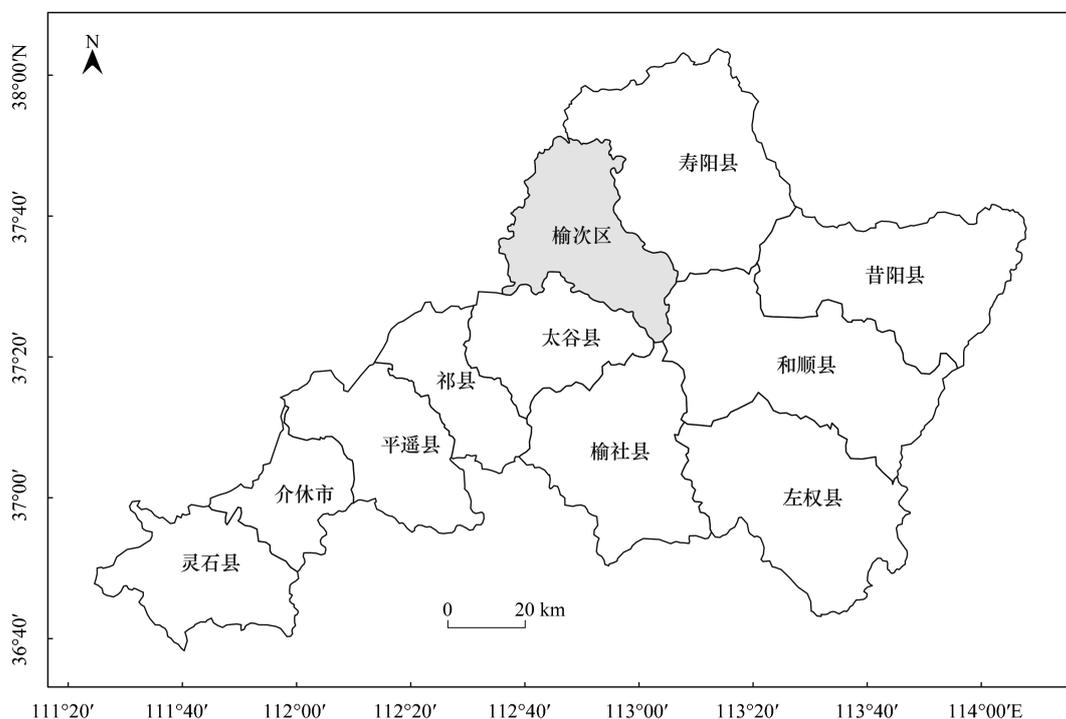


图 1 晋中主城区(榆次区)地理区位

Fig.1 Geographical location map of main urban area of Jinzhong

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源与处理

本文研究范围为晋中主城区(榆次区),遥感影像数据来源于 2002 年 10 月 Landsat5 TM 和 2016 年 6 月 Landsat8 OLI 卫星数字产品,高程信息来源于 GDEMDEM 30m 分辨率数字高程数据,土壤数据来自中国 1:100 万数字地貌数据库,人口数据来源于第六次全国人口普查,生境数据来自 INVEST 生态系统服务评估模型。

根据研究区土地利用特点,通过遥感图像处理平台 ENVI5.5 对遥感影像数据进行几何纠正、图像拉伸、边缘强化和研究区范围的裁剪,采用监督分类和目视解译相结合方式,提取有效地类空间信息 6 类:建设用地、水域、林地、耕地、草地和未分类用地。通过野外精度随机抽样调查,正确率分别为 87.26%和 84.41%,符合遥感解译的通用规范。

### 2.2 研究框架

本文以研究区环境的生态适宜性评价为依据,采用 CA-Markov 模型对土地利用类型进行动态变化模拟和演变趋势分析,综合现有城市总体规划发展目标,考虑主城区未来发展对土地建设的需求,进而划定其主城区生态分区与管控等级。具体而言:一方面,根据研究区生态特征和研究内容需要,选取生物多样性保护、自然灾害预警和人为活动干扰作为影响该主城区生态安全的主要因子<sup>[12-14]</sup>,通过层次分析法和空间叠置获得生态适宜性评价,并作为其生态分区和用途管控等级划分的主要依据;另一方面,采用 CA-Markov 模型计算 6 类土地利用类型近 14 年的类型状态转移矩阵和 Markov 转移概率矩阵,分别统计各类土地利用类型的转移面积,总结其变化特点,进而模拟研究区 2030 年的土地利用类型。综合分析生态适宜性评价、城市总体规划(2016—2030 年)、2030 年的土地利用类型的模拟结果和演变特征,将研究区划分为禁止开发区、限制开发区、适度开发区和建成区 4 个层次的生态分区(图 2)。

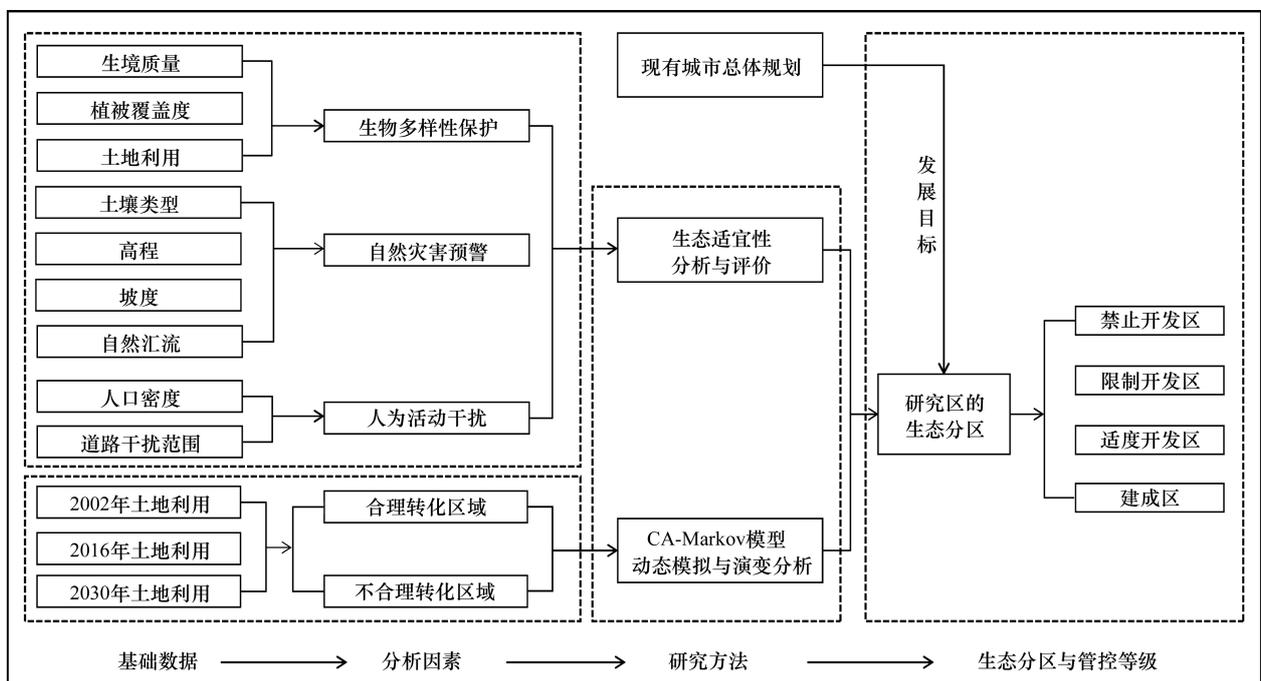


图 2 晋中主城区生态分区研究框架

Fig.2 The research framework of main urban area of Jinzhong ecological zones

### 2.3 研究方法

#### 2.3.1 生态适宜性评价

指标选取是生态适宜性评价分析的关键。在遵循整体性、客观性、可操作性和有效性等原则的基础上,从

生物多样性保护、自然灾害预警和人为活动干扰 3 方面出发,选取反映研究区生态系统服务和生态安全特征的相应指标,构建生态适宜性评价的三级指标体系<sup>[1]</sup>。其中,生物多样性保护层面包括生境质量、植被覆盖度、土地利用类型 3 个指标;自然灾害预警层面包括土壤类型、高程、坡度、自然汇流 4 个指标;人为活动干扰层面包括道路干扰范围、人口密度 2 个指标。此外,由于同一指标在不同城市或地区所反映的生态敏感度有所不同,且各指标间存在错综复杂的联系,经过十几位相关学科专家的讨论和修改,最终采用层次分析明确各指标因子的权重值(表 1),并以加权求和的空间叠加方法对研究区生态适宜性进行综合评价<sup>[15]</sup>。

表 1 生态适宜性评价指标及权重

Table 1 The indicators and weights of Ecological Suitability Evaluation

系统层 System layer	准则层 Criteria layer	指标层 Index layer	权重 Weights
生态适宜性 Ecological suitability	生物多样性保护	生境质量	0.13
		植被覆盖度	0.17
		土地利用	0.28
	自然灾害预警	土壤类型	0.09
		高程	0.06
		坡度	0.09
		自然汇流	0.04
	人为活动干扰	道路干扰范围	0.04
		人口密度	0.10

### 2.3.2 CA-Markov 模型土地类型动态模拟与演变

CA-Markov 模型综合 CA 模型复杂空间系统的动态演化能力和 Markov 模型时间动态的预测优势,将 Markov 模型所建立的土地利用类型转移概率矩阵作为 CA 模型元胞数量的转化规则,进而从空间和数量上对土地利用进行时空模拟,能够有效提升转换概率的准确性,使模拟结果的土地利用空间格局更为合理<sup>[16]</sup>。本文利用 CA-Markov 模型对晋中主城区的土地类型变化进行动态模拟与演变分析,对预测研究区土地利用活动的变化趋势,划定生态分区和实施生态空间规划具有积极引导作用。

使用 CA-Markov 模型针对研究区的土地利用类型变化进行模拟和预测,具体步骤包括:

①建立基本单元网格。将两期土地利用数据栅格化,通过基本单元网格的统计,计算土地利用类型在单元网格的面积变化率,进而反映某一类型数量在一定时间段内的变化速度。动态度计算公式为<sup>[17]</sup>:

$$IR = \frac{S_{ib} - S_{ia}}{S} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中, $IR$  表示研究区在该时间段内单一土地利用类型的变化速率即动态度, $S_{ia}$  为  $ia$  土地利用类型在研究时间段起点的面积, $S_{ib}$  为  $ib$  土地利用类型在研究时间段终点的面积, $T$  为时间间隔年份。

②构建转移矩阵模型。转移矩阵用于描述研究区土地利用的具体结构和方向,通过空间叠加分析,使用 Statistics 功能便可具体、细致地计算各种土地利用类型之间相互转化面积<sup>[18]</sup>。使用 Markov 模型将 2002 年和 2016 年两期研究区土地利用现状类型进行空间叠加,获取 2002—2016 年转移面积矩阵和土地利用类型转移概率矩阵,将运算结果转换为适应性图集(MCE)。在 CA 模型中采用  $5 \times 5$  邻近滤波器,循环周期为 14,以预测研究区 2030 年的土地利用状况。

③结果准确性检验。根据 CA-Markov 复合模型所预测的研究区 2030 年土地利用状况,经过检验可知,Kappa 系数为 0.85,模拟结果符合数据使用要求。

## 3 结果与分析

### 3.1 生态适宜性评价与 CA-Markov 模型模拟结果

根据研究区生态特点和研究内容,从生物多样性保护、自然灾害预警和人为活动干扰 3 方面出发,选取 9

项评价指标以多因子叠加方法获得晋中主城区的生态适宜性评价结果(图 3)。为进一步落实生态分区的底线思想,在城市规划建设用地与水域、天然河流和林地等自然恢复能力较差的高敏感区域发生矛盾时,理应严格遵守生态优先、保护优先和自然恢复为主;在人类活动频繁或自然状况已遭到较大破坏的低敏感区域时,如城市浅山或建成区边缘地带,则应以合理的生态修复和适当的开发建设为主。

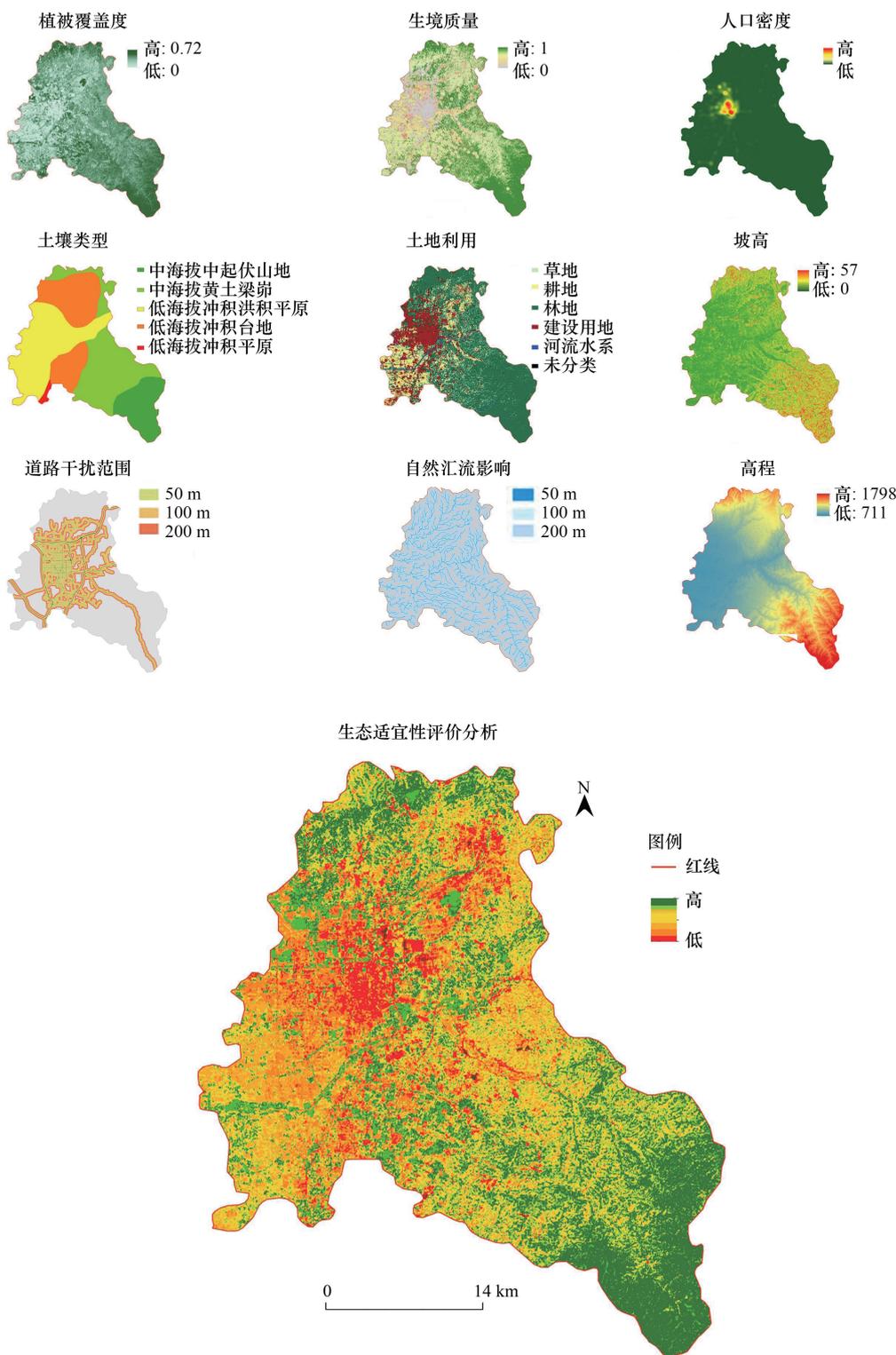


图 3 晋中主城区生态适宜性评价

Fig.3 Ecological Suitability Evaluation of main urban area of Jinzhong

根据土地利用转化和预测的结果可知(图4),研究区2002—2030年的土地利用变换呈建设用地面积持续增加,建设用地的增加面积主要来自耕地的转化,耕地和未分类用地持续减少,林地和草地的变化则存在明显时序性差异(图5)。具体而言:建设用地从2016年216.802 km<sup>2</sup>增加至2030年245.422 km<sup>2</sup>,增加面积28.62 km<sup>2</sup>,增加区域主要来自城市浅山区林地和耕地的转换;耕地从2016年152.72 km<sup>2</sup>减少至2030年127.488 km<sup>2</sup>,减少面积25.232 km<sup>2</sup>,主要分布于城市建成区边缘地带和浅山区域附近;林地从2016年755.632 km<sup>2</sup>增加至2030年748.992 km<sup>2</sup>,减少面积6.64 km<sup>2</sup>,主要分布于城市浅山区域;草地从2016年195.216 km<sup>2</sup>增加至2030年200.528 km<sup>2</sup>,增加面积5.312 km<sup>2</sup>,增加区域主要来自城市边缘地带的耕地转化;未分类用地面积,从2016年6.103 km<sup>2</sup>到2030年1.96 km<sup>2</sup>,将减少4.143 km<sup>2</sup>;河流水域面积,从2016年7.63 km<sup>2</sup>到2030年5.57 km<sup>2</sup>,将减少2.06 km<sup>2</sup>。

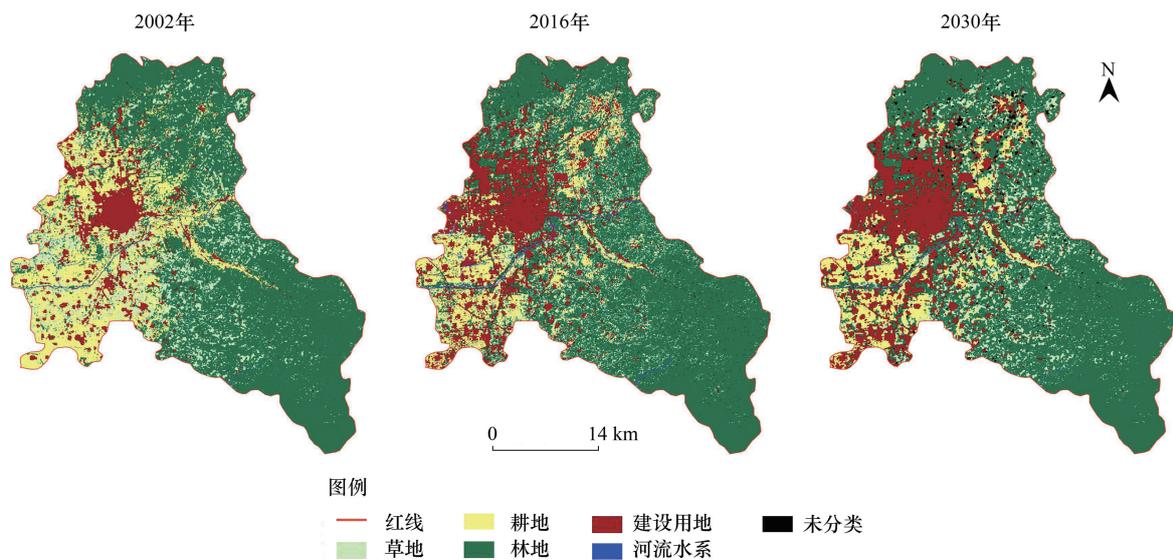


图4 2002—2030年晋中主城区土地利用转化

Fig.4 Land Use Transformation in main urban area of Jinzhong from 2002 to 2030

### 3.2 城市生态分区与用途管控等级

根据研究区的生态适宜性评价结果,2030年土地利用状况的模拟结果和动态演变分析,结合城市现有总体规划的发展目标,在满足城市建设对土地需求的基础上,适当调整现有规划、生态适宜性评价与模拟扩张相悖区域,合理分配城市生态、生产和生活空间,进一步划定晋中主城区的生态分区与管控等级(图6)。

禁止开发区面积488.704 km<sup>2</sup>,占总面积的36.8%。该区域主要由水源保护区、湿地、自然保护区、水土流失保护区和大量天然林地组成,是城市生态屏障和重要资源保证地,应严格保护,列入禁止开发区内,禁止任何开发建设活动。与此同时,这些区域的生态保护与建设方向主要集中在生态保护、提高水土保持功能、建设林业生态工程、净化水体、保护生物多样性等方面,不断完善生态屏障和生态服务功能。严格控制并减少禁止开发区内的经济活动,注重自然资源的节约,完善生态保护建设的长效机制和大力发展循环经济。

限制开发区面积407.696 km<sup>2</sup>,占总面积的30.7%。该区域位于极为重要的生态用地缓冲区,包括河流系统的生态缓冲带和生物多样性保护的核心区,区域整体生态系统脆弱,自我调节能力弱,稳定性较差,在人为活动或自然干扰下,容易发生较为严重的生态退化,被列入限制开发区。由于这些区域环境承载能力较弱,不具备大规模工业化城镇开发条件,应将提升生态产品的生产力作为首要任务,并合理引导局部或轻微强度的开发建设活动。

适度开发区面积203.184 km<sup>2</sup>,占总面积的15.3%。该区域主要包括中敏感区过渡带和地表径流主要集散区等。从自然生态系统的保护视角出发,应调整城市产业结构布局,构建生态廊道和生态产业开发区,促进

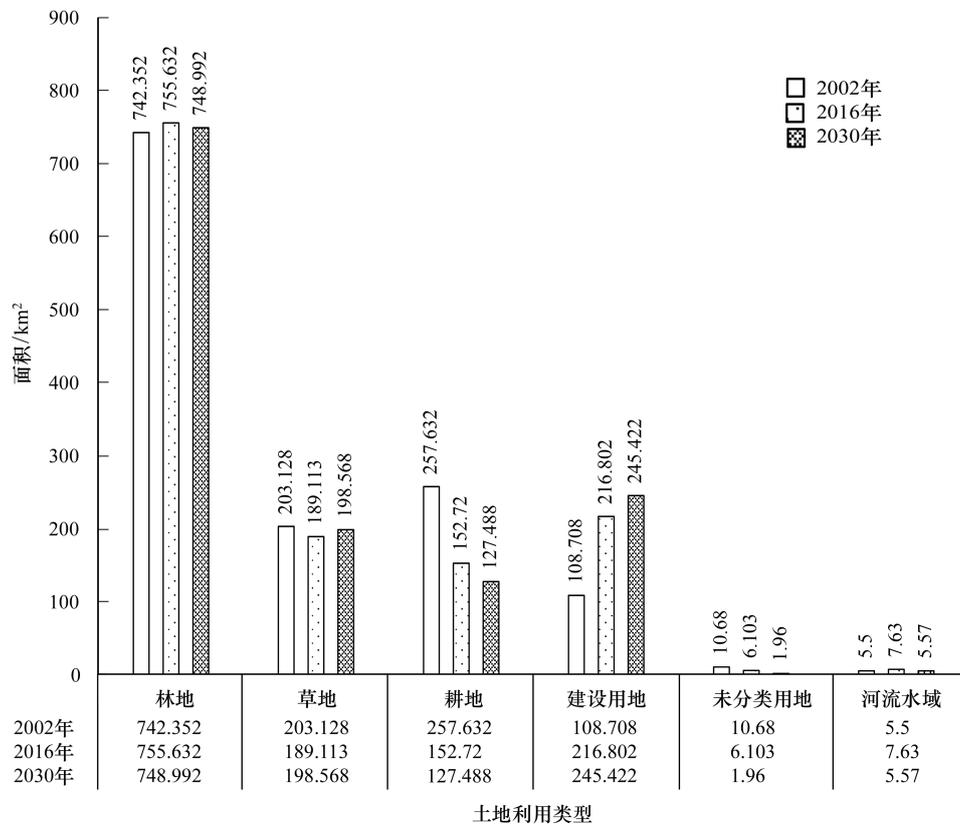


图 5 2002—2030 年晋中主城区土地利用转化统计

Fig.5 Statistical of Land Use Conversion in main urban area of Jinzhong from 2002 to 2030

环境损害小,附加值高的绿色产业格局的形成。需要注意的是,本文所识别的适宜开发区并非最终结果,还需在保证永久基本农田的基础上进一步选择。

建成区面积为 228.416 km<sup>2</sup>,仅占总面积的 17.2%,以建成区为主,是人类生产生活的主要用地范围,在建成区内应调整产业结构、合理控制人口规模、发展生态产业以及新兴产业,促进城市内部生态环境的改善。

#### 4 结论与讨论

##### 4.1 结论

本文从保障城市生态安全的底线思维出发,以优化城市生态空间格局为目标,通过生态适宜性评价合理甄别城市生态用地,借助 CA-Markov 模型总结研究区近 14 年土地利用类型的时空演变特征和模拟预测 2030 年的土地利用状况,进而综合现有城市总体规划科学布局生态空间,划定城市生态分区和用途管控等级。(1) 在生态适宜性评价中,将生物多样性保护、自然灾害预警、人为活动干扰 3 方面的 9 项指标用以评价其生态敏

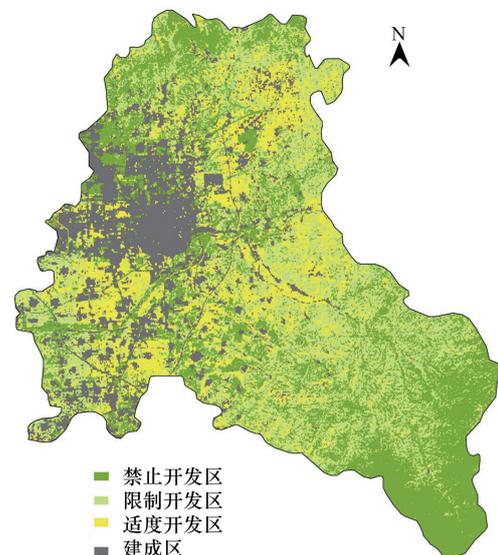


图 6 晋中主城区生态分区与管控等级

Fig.6 Ecological division and management level of main urban area of Jinzhong

感度和识别生态用地,并作为生态分区和用途管控等级划分的基础;(2)采用 CA-Markov 模型的土地利用类型演变分析和模拟预测可知,在 2002—2030 年期间,晋中主城区的土地利用时空变化显著,表现为建设用地面积持续增加,耕地和未分类用地面积持续减少,林地、水域和草地的变化存在明显时序性差异;(3)将生态适宜性评价结果、土地利用的预测结果和现有城市总体规划结合,在保证城市稳步发展的基础上,协调城市建设与生态用地、生态空间的布局关系,继而划定研究区生态分区和用途管控等级,即禁止开发区、限制开发区、适度开发区和建成区。对 4 个分区有针对性的提出相应管控措施和建议,以期达到晋中主城区在生态文明建设背景下的区域发展定位,实现由“黑”到“绿”的华丽转变。

#### 4.2 讨论

城市化水平较高的地区或城市在制定相关空间规划时,大多以强调生态空间在自然系统的独特性和脆弱性为首要任务。相反,经济发展中低水平的发展中国家,其自然栖息地在城市化快速建设过程中往往受到高强度人为建设活动的干扰,造成生态系统脆弱,稳定性较差,生态用地趋于破碎等问题。只有坚持生态底线思维以权衡生态保护与经济发展,才能够实现城市可持续的双赢解决方案<sup>[19]</sup>。随着我国生态文明建设的推进和规划体系的改革,实现国土空间“多规合一”,统一实施国土空间用途管控,是加快自然资源监管体制和城市生态文明体制改革的重要一环,是推进人与自然和谐共生,加快形成绿色生产、绿色生活和绿色发展的重要抓手<sup>[20]</sup>。因此,如何协调土地利用规划与城市规划之间的关系,科学布局生产空间、生活空间、生态空间,落实“三区三线”;如何确定最佳农业用地规模、生态建设规模、城市用地规模及农村用地规模的规划有待更多的学者探讨。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Xie H L, Yao G R, Liu G Y. Spatial evaluation of the ecological importance based on GIS for environmental management: a case study in Xingguo County of China. *Ecological Indicators*, 2015, 51: 3-12.
- [ 2 ] Rouget M, Cowling R M, Pressey R L, Richardson D M. Identifying spatial components of ecological and evolutionary processes for regional conservation planning in the Cape Floristic Region, South Africa. *Diversity and Distributions*, 2003, 9(3): 191-210.
- [ 3 ] Xie H L, Liu Z F, Wang P, Liu G Y, Lu F C. Exploring the mechanisms of ecological land change based on the spatial autoregressive model: a case study of the Poyang lake eco-economic zone, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2014, 11(1): 583-599.
- [ 4 ] Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenco J, Melillo J M. Human domination of Earth's ecosystems. *Science*, 1997, 277(5325): 494-499.
- [ 5 ] 贾良清. 安徽省生态系统评价与生态功能区划研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2004.
- [ 6 ] 杨庆媛, 王兆林, 鲁春阳, 买晓森. 生态足迹研究方法在土地资源可持续利用评价中应用——以重庆市为例. *西南大学学报: 自然科学版*, 2007, 29(8): 134-138.
- [ 7 ] 张云路, 李雄, 田野. 基于景观生态学“源-汇”理论的市域尺度生态功能分区——以内蒙古通辽市为例. *生态学报*, 2018, 38(1): 65-72.
- [ 8 ] 高俊刚, 吴雪, 张镫铿, 刘林山, 王兆锋, 姚治君. 基于等级层次分析法的金沙江下游地区生态功能分区. *生态学报*, 2016, 36(1): 134-147.
- [ 9 ] 王琳, 朱天明, 杨桂山, 苏伟忠. 基于 GIS 空间分析的县域建设功能空间分区研究——以江苏省昆山市为例. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(7): 725-731.
- [ 10 ] 欧定华. 城市近郊区景观生态安全格局构建研究——以成都市龙泉驿区为例[D]. 雅安: 四川农业大学, 2016.
- [ 11 ] 成超男, 胡凯富, 关海莉, 赵鸣. 基于景观生态安全格局的北京市通州新区生态园林绿地系统空间结构研究. *中国城市林业*, 2017(4): 41-45.
- [ 12 ] Allan I, Peterson J. Spatial modelling in decision support for land-use planning: a demonstration from the Lal Lal catchment, Victoria, Australia. *Geographical Research*, 2002, 40(1): 84-92.
- [ 13 ] 俞孔坚, 乔青, 李迪华, 袁弘, 王思思. 基于景观安全格局分析的生态用地研究——以北京市东三乡为例. *应用生态学报*, 2009, 20(08): 1932-1939.
- [ 14 ] Zagas T D, Raptis D I, Zagas D T. Identifying and mapping the protective forests of southeast Mt. Olympus as a tool for sustainable ecological and silvicultural planning, in a multi-purpose forest management framework. *Ecological Engineering*, 2011, 37(2): 286-293.
- [ 15 ] 奚星伍, 陶雨薇. 基于生态适宜性评价的皖北县域生态功能区划研究——以颍上县为例. *安徽建筑大学学报*, 2017, 25(3): 70-74.
- [ 16 ] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 王仰麟. 景观生态学原理及应用(第二版). 北京: 科学出版社, 2011.
- [ 17 ] 任志远, 张艳芳. 土地利用变化与生态安全评价. 北京: 科学出版社, 2003.
- [ 18 ] 张远景. 哈尔滨中心城区生态网络分析及其景观生态格局优化研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015.
- [ 19 ] Peng J, Yang Y, Liu Y X, Hu Y N, Du Y Y, Meersmans J, Qiu S J. Linking ecosystem services and circuit theory to identify ecological security patterns. *Science of the Total Environment*, 2018, 644: 781-790.
- [ 20 ] 林坚, 文爱平. 林坚: 重构中国特色空间规划体系. *北京规划建设*, 2018, (4): 184-187.