

DOI: 10.5846/stxb202004150887

张丽芳, 方创琳, 高倩. 天山北坡城市群城市景观时空扩张过程及多情景模拟. 生态学报, 2021, 41(4): 1267-1279.

Zhang L F, Fang C L, Gao Q. Spatial and temporal expansion of urban landscape and multi-scene simulation of urban agglomeration in northern slope of Tianshan Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(4): 1267-1279.

天山北坡城市群城市景观时空扩张过程及多情景模拟

张丽芳¹, 方创琳^{1,2,*}, 高倩¹

¹ 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046

² 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

摘要: 城市群是区域经济发展的重要空间载体, 探究天山北坡城市群城市景观扩张变化对边疆城市群的区域经济发展、城市规划、生态安全等具有重要意义。研究借助 GIS、Fragstats、Dyna-CLUE 等软件, 基于 1990、2000、2005、2010、2015 年空间分辨率 30 m 土地利用数据, 采用景观扩张指数 (LEI)、扩展强度指数 (UEII)、重心转移、多情景模拟等方法揭示天山北坡城市群的景观扩张模式及演变规律。主要结论为: ①从景观指数来看, 近 25 年来天山北坡城市群城市景观变化表现为破碎度增大、异质性增强、斑块形状趋于复杂; ②从扩张模式来看, 1990—2015 年, 天山北坡城市群的城市扩张模式以飞地式为主, 其次为边缘式扩张, 不同时期内扩张模式占比有所差异; ③从扩张轨迹来看, 城市群城市扩张重心总体由城市群的中心—乌鲁木齐的西侧向东、南移动; ④从多情景模拟来看, Dyna-CLUE 模型能够较好地模拟不同情景状态下的城市扩张与土地利用变化特征, 2025 年城市群扩张模式将以飞地式、边缘式为主。研究结果可为天山北坡城市群城市的未来发展和布局规划提供参考, 为国土空间的管理与调控、生态环境的布局优化等提供决策依据。

关键词: 天山北坡城市群; 景观扩张; 时空变化; Dyna-CLUE 模型; 多情景模拟

Spatial and temporal expansion of urban landscape and multi-scene simulation of urban agglomeration in northern slope of Tianshan Mountains

ZHANG Lifang¹, FANG Chuanglin^{1,2,*}, GAO Qian¹

¹ College of Resources and Environmental Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

² Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Urban agglomeration is an important spatial carrier of regional economic development. It is of great significance to explore the landscape expansion and change of urban agglomeration on the Northern Slope of Tianshan Mountains for the regional economic development, urban planning and ecological security of border urban agglomeration. By using GIS, Fragstats, Dyna-CLUE and other software platforms, and based on the spatial resolution data of 30 m land use in 1990, 2000, 2005, 2010 and 2015, the landscape expansion index (LEI), expansion intensity index (UEII), center of gravity transfer, multi-scenario simulation and other methods were used to analyze the landscape expansion pattern and evolution law of the urban agglomeration on the Northern Slope of Tianshan Mountains. The main results showed that: (1) from the perspective of the landscape index, the urban landscape fragmentation and the spatial heterogeneity increased and complicated of patch shape during the past 25 years in the urban agglomeration on the Northern Slope of Tianshan Mountains. (2) From the perspective of expansion mode, the urban expansion mode was mainly outlying type, followed by edge-expansion type during 1990—2015 in urban agglomeration on the Northern Slope of Tianshan Mountains. The proportion of expansion mode was different in different periods. (3) From the perspective of expansion trajectory, the center

基金项目: 国家自然科学基金专项项目 (41942004); 国家自然科学基金重大项目 (41590842)

收稿日期: 2020-04-15; **网络出版日期:** 2020-12-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fangcl@igsrr.ac.cn

of urban expansion in urban agglomeration generally moved from the west side of Urumqi, the center of urban agglomeration, to the east. (4) From the multi-scenario simulation, Dyna-Clue model can better reflect the characteristics of urban expansion and land use change of urban agglomeration in different scenarios. The multi-scenario simulation showed that the expansion mode of urban agglomeration would be mainly outlying type and edge-expansion type in 2025. The research results can provide reference for the future development and layout planning of urban agglomeration on the Northern Slope of Tianshan Mountains, and provide decision-making basis for the management and regulation of territorial space and the layout optimization of ecological environment.

Key Words: urban agglomeration on the North Slope of Tianshan Mountains; landscape expansion index; spatial and temporal variation; the Dyna-CLUE model; multi-scenario simulation

城市群是区域经济集聚、新型工业化、城镇化发展到一定程度的先进地域空间载体^[1-2],当前正处于全球城市化快速发展阶段,城市群之间的竞争逐渐取代了单个城市间的竞争,城市群承载了世界经济重心转移的历史使命,其地位与作用日益突出^[3]。《国家新型城镇化发展规划(2014—2020)》,将城市群作为推进国家新型城镇化的空间主体,城市群发展已引起国内外学者对城市群景观格局、城市扩张、土地配置、城市生态等方面的广泛关注。城市扩张是自然人文多因素驱动的不断改变区域空间土地利用、景观格局的过程,在这一过程中,不断扩张的城市用地与有限的国土资源之间的矛盾、快速发展的城市化与生态环境之间的矛盾逐渐显现,这种问题在发展中国家尤为明显^[4-5]。因此,构建多情景下的城市群空间动态模拟,探讨多目标策略下的城市群发展态势,是当前研究的热点和难题。

在过去几十年里,国内外学者对于城市群的研究主要体现以下四个方面:(1)在研究内容上,学者从城市发展对生态系统服务价值的影响^[6-7]、城镇化与生态耦合之间的关系^[8-10]、城市发展驱动力机制^[11]、城市化扩张对社会经济的影响等方面做了大量研究;(2)在研究方法上,主要集中在遥感技术与新模型相结合^[11-12]、回归与地理加权分析^[13]、空间相关性分析^[14]、景观指数分析法^[15]、系统动力学^[16]、CA模型、引力模型^[17]等方法,利用多模型、多学科交叉及定性、定量相合方法来研究城镇化的发展机制。可见,国内外对城市群空间格局的研究主要集中城市发展与外界因素的相互关系中,利用计量方法与处理多目标决策问题;(3)在研究尺度上,主要以中国东部中小尺度的城市为主,研究区域主要集中在京津冀、长株潭等经济发达地区的城市群,以中国的中西部欠发达典型区域为研究对象,探讨其城市景观扩张模式以及多情景模拟预测的相关研究较少^[18];(4)在研究形态方面,对城市群的研究主要集中在景观扩张速度与数量,而对城市群不同扩张模式的研究与模拟尚且较少。很多仅仅侧重对城市景观格局的集合特征的研究与描述,忽略了城市景观格局动态变化的过程信息^[19]。

20世纪90年代以来,随着数学计量方法与实验模型大量的结合运用,城市地理学进入了一个全新的时代^[20],在城市群的景观格局及未来模拟的相关研究中,较少从城市规划与管控出发,导致对土地政策的作用机制和管控效应较弱。景观指数可以刻画出城市群生态环境和经济未来发展的演变趋势,近年来,Markov模型、CA模型^[21]、人工神经网络、SD模型、CLUE模型、CLUE-S等模型在预测模拟景观变化及土地利用上广泛应用,CA模型与Markov模型的结合使预测土地需求的精度大大提高,大大降低了模型构建和参数确定的难度。Dyna-CLUE模型是在CLUE-S模型的基础上进行改进,可从城市发展的历史趋势与国家政策规划相结合,进行适当的景观及土地利用模拟与调控^[22-23]。因此,在Markov模型和CA模型相结合的基础上,结合Dyna-CLUE模型,利用各模型的优势可在模拟效果上可以得到很好的提高。

中国是全球城市群未来发展和研究的中心,有关城市群景观格局与情景模拟、预测的研究方兴未艾,目前已成为中国城市群研究的重要方向之一^[24]。随着国家级城市群规划的陆续出台,各种预测模型的不断丰富,西部培育型城市群相关研究也逐步进入研究视野。探究边疆型城市群的空间格局演化规律,对提升区域要素集聚与承载能力,优化城市群功能布局等具有重要的实践价值。天山北坡城市群位于中国西北边陲地区,地

处中国—中亚西亚经济走廊、中俄蒙经济走廊和中巴经济走廊辐射带动的交汇地带,是丝绸之路经济带上重要的战略支撑点、我国向西开放的重要桥梁和纽带,在国家全方位开放格局和现代化建设中具有举足轻重的战略地位^[25]。同时,天山北坡城市群作为新疆经济最发达、城市最密集、政策与资源最优惠的地区,是新疆今天和未来新型城镇化的主体区和经济发展核心区,在全疆有着举足轻重的影响。目前对天山城市群的相关研究较少,主要集中在城市群经济与空间联系度^[26-27]、城市群的单要素特性^[28]、城市群空间结构形态^[29]、城市群景观遥感监测等方面^[30],迄今为止,还未有关于天山北坡城市群扩张模式的研究。鉴于此,本文以长时间序列的遥感数据产品为基础,采用景观扩张指数、扩张强度、重心转移模型,深入定量分析 1990—2015 年的城市群城市扩张的时空演变规律,引入 Dyna-CLUE 模型构建 2025 年多情景模拟,从而探究未来的城市扩张时空发展趋势,为天山北坡城市群的城市化有序建设与国土空间布局规划提供决策依据。

1 区域概况与数据来源

1.1 研究区概况

天山北坡城市群地处亚欧大陆腹地,是中国西北内陆干旱区的新兴城市群,同时也是“一带一路”经济带发展建设的核心城市群,在兴疆固边中发挥着不可替代的重要作用。如图 1 所示,地理位置介于 $83^{\circ}24'—91^{\circ}54'E$ 、 $41^{\circ}11'—46^{\circ}12'N$ 之间,海拔 $-160—5138\text{ m}$,位于中国地形第二阶梯的西缘,准噶尔盆地的腹部。北接阿勒泰地区与塔城地区的托里县、和布克赛尔蒙古自治县;西临博尔塔拉蒙古自治州的阿拉山口市、精河县;东与哈密市的巴里坤哈萨克自治县、伊州区相接;南临伊犁哈萨克自治州的尼勒克县与巴音郭楞蒙古自治州的和静县、和硕县、尉犁县、若羌县。城市群空间范围主要包括乌鲁木齐市、克拉玛依市、石河子市、吐鲁番市等 3 个地级市、6 个县级市、12 个市辖区、9 个县等区域,城市群规划面积 21.54 万平方公里,约占新疆的七分之一。2016 年 GDP 总值 5981.27 亿元,占新疆的比重达到 62% 以上,依照城市群的发展态势,天山北坡城

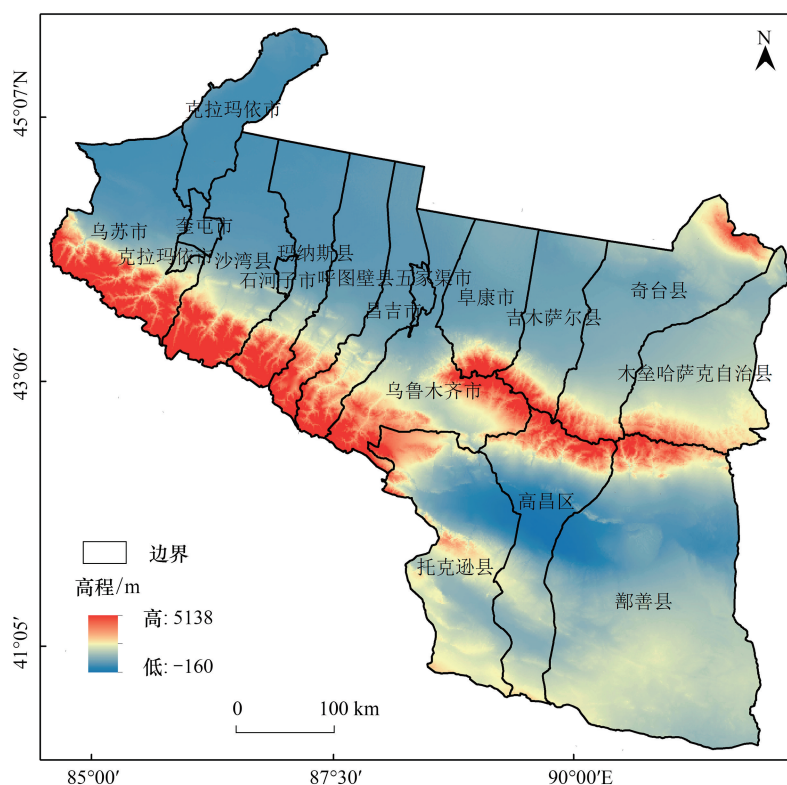


图 1 天山北坡城市群地理位置

Fig.1 Spatial scope of urban agglomeration on the northern slope of Tianshan Mountains

市群将是新疆今后发展新型城镇化的主体区和经济发展核心区^[31]。

1.2 数据来源

研究所使用的主要数据包括:①LUCC 数据(30 m 分辨率)来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)提供的(1990 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年)5 期土地利用数据/土地覆盖解译数据。根据研究需要,将土地利用数据分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地 6 类;② DEM、年降水量、土壤侵蚀度、NDVI、人均 GDP、人口密度、道路密度等数据,其数据均来源于中国科学院资源环境科学数据中心,数据获取后经 GIS 软件掩膜裁剪、重采样为投影 500 m×500 m 分辨率,便于 Dyna-CLUE 模型的数据模拟;③ 其他数据包括研究区行政边界矢量数据及社会经济统计资料。

2 研究方法

2.1 景观格局指数法

城市扩张在人为及自然的多种因素交互作用的影响下,不仅会改变土地利用及景观格局,同时又影响着内部景观生态过程^[32]。为探究天山北坡城市群 1990—2015 年城市扩张的景观空间现象,对景观空间格局的特征指数①斑块数量(NP, Number of Patches);②最大斑块指数(LPI, Largest Patch Index);③斑块密度(PD, Patch Density);④景观形状指标(LSI, Landscape Shape Index);⑤聚合指数(AI, Aggregation Index);⑥分离度指数(DIVISION, Landscape Division Index)6 个指标进行了分析,从宏观角度刻画出城市扩张过程中的景观状况及景观格局的破碎化、异质性和连通性等各个方面。指数计算在 Fragstats 软件中完成,通过对景观格局进行研究,可以有效地揭示城市扩张下的景观变异特征。

2.2 城市景观扩张指数法

景观扩张指数大小可反映城市化进程中空间结构变化情况。为此,利用刘小平等人提出的城市土地景观扩张指数(LEI, Landscape expansion index,^[33]),定量的识别城市土地的增长模式和分析景观变化过程,指出飞地式、填充式、边缘式的 3 种城市扩张模式。该指数公式如下:

$$LEI = 100 \times \frac{A_o}{A_o + A_v} \quad (1)$$

式中,LEI 为新斑块的景观扩张指数; A_o 为扩张斑块缓冲区与旧斑块的重叠面积; A_v 为扩张斑块缓冲区面积与 A_o 的差值。LEI 范围为[0, 100],当 LEI = 0 时,扩张模式为飞地式;当 LEI 为(0, 50)时,扩张模式为边缘式;当 LEI 为[50, 100)时,则为填充式扩张^[34]。

对于城市景观扩张过程,以平均斑块扩张指数(MEI, Mean Shape expansion Index)来定义:

$$MEI = \sum_{i=1}^N \frac{LEI_i}{N} \quad (2)$$

式中, LEI_i 为新增建设用地的景观扩张指数; N 为新增斑块总的数量; MEI 的值越大其景观扩张规模越紧凑。

以面积加权平均斑块扩张指数(AWLEI, Area Weighted Mean Expansion Index)来考虑单个新斑块在整个斑块扩张类型中的地位,公式如下:

$$AWLEI = LEI_i \times \left(\frac{a_i}{A} \right) \quad (3)$$

式中, LEI_i 为新斑块的景观扩张指数; a_i 是新斑块的面积; A 是研究区新斑块的总面积。

2.3 城市扩张强度与轨迹

城市扩展强度指数(UEII, Urban Expansion Intensity Index)表示在一定空间单元、一定阶段内城市用地面积的变化程度,计算城市扩展强度指数可研究城市群城市的发展速度和状态^[35]。其计算公式为:

$$UEII_i = \frac{U_i^{t_2} - U_i^{t_1}}{U_i^{t_1} \times \Delta t} \quad (4)$$

式中, $UEII_i$ 表示城市扩展强度; $U_i^{t_1}$ 、 $U_i^{t_2}$ 分别为天山北坡城市群 i 在研究时段 t_1 、 t_2 时的城市面积; Δt 为时间跨度。

重心转移模型是描述地理对象在空间上的重要指标, 常用来描述人口流动、经济转移、城市演变过程^[36]。通过空间重心模型分析, 可以掌握城市群的城市扩张强度的转移轨迹与方向, 其重心坐标计算公式如下:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n G_i x_i}{\sum_{i=1}^n G_i}, \quad Y = \frac{\sum_{i=1}^n G_i y_i}{\sum_{i=1}^n G_i} \quad (5)$$

式中, X 和 Y 分别表示城市扩张强度重心坐标的经度和纬度; G_i 为空间单元 i 的城市扩展强度; x_i 、 y_i 为空间单元 i 扩展强度中心的经纬度坐标。

2.4 基于 Dyna-CLUE 模型的多情景模拟

Dyna-CLUE 模型是由荷兰 P. H. Verburg 教授的“土地利用变化和影响”研究团队在 CLUE、CLUE-S 模型的基础上改进而成的^[37]。Dyna-CLUE 模型主要包括非空间分析模块与空间分析模块两部分, 其中, 非空间分析模块主要利用 MATLAB 与 IDRISI 下的 CA-Markov 模块依靠对驱动因子的分析, 以预测到目标年份的不同地类的数量^[38]。空间分配模块主要是在土地需求的基础上, 叠加驱动力因子, 对各个地类进行迭代分配, 从而实现空间模拟分配各个年份的土地利用。为保证模型的高效运行, 本文通过实验, 选择大小为 500 m 的栅格数据进行研究。具体主要包括以下几个步骤:

(1) 因子选取。依据研究区尺度特征与区域特征, 综合考虑数据时空的一致性、可量化性、可获取性、影响程度最大化, 分别选取自然、社会共计 10 个驱动力因子(X_1 人口密度、 X_2 海拔、 X_3 年降水量、 X_4 NDVI、 X_5 土壤侵蚀度、 X_6 坡度、 X_7 到铁路距离、 X_8 人均 GDP、 X_9 道路密度、 X_{10} 距河流距离)与 2015 年土地利用数据进行 Logistic 二元回归分析, 以探究土地利用变化和驱动因子之间的量化关系, 回归结果($\exp(\beta)$) 如表 1 所示。

表 1 Logistic 回归结果

Table 1 The Logistic Regression results

代码 Code	耕地 Cultivated land		林地 Forest land		草地 Grass land		水域 Water area		建设用地 Construction land		未利用地 Unused land	
	Beta 系数	Exp(β)	Beta 系数	Exp(β)	Beta 系数	Exp(β)	Beta 系数	Exp(β)	Beta 系数	Exp(β)	Beta 系数	Exp(β)
X1	0.001	1.001	—	1.001	0	0.999	—	—	-0.002	0.998	-0.001	0.999
X2	0	1	0.001	1	0.001	1.001	—	—	—	—	—	—
X3	0	1	0	1	0	1	0.001	1.001	0	1	0	1
X4	1.403	4.068	-2.156	4.068	-0.341	0.711	-1.889	0.151	—	—	-1.443	0.236
X5	0.039	1.04	—	1.04	0.02	1.02	—	—	—	—	-0.175	0.84
X6	-0.039	0.962	-0.021	0.962	-0.015	0.985	-0.025	0.975	-0.033	0.967	0.073	1.076
X7	-0.001	0.999	—	0.999	0	1	—	—	—	—	0.001	1.001
X8	0	1	—	1	0	1	—	—	—	—	—	—
X9	-21.704	0	-21.8638	0	29.552	6828176185367.337	—	—	23.793	21542522992.917	—	—
X10	-0.003	0.997	—	0.997	0.001	1.001	0.001	1.001	—	—	0.002	1.002
常量 Constant	1.724	5.606	-5.016	5.606	-2.791	0.061	-5.926	0.003	-4.41	0.012	-2.376	0.093
ROC 值	0.795	0.792	0.709	0.744	0.755	0.849						

—表示未通过显著性检验; Beta 系数为 Logistic 回归方程诊断的回归系数, $\exp(\beta)$ 为 Beta 系数以 e 为底的幂指数, 表示事件的发生比率; ROC 值为拟合优度; 其中, 人口密度 X_1 、海拔 X_2 、年降水量 X_3 、NDVI X_4 、土壤侵蚀度 X_5 、坡度 X_6 、到铁路距离 X_7 、人均 GDP X_8 、道路密度 X_9 、距河流距离 X_{10}

(2) ROC 拟合度评价。为验证 Logistic 回归方程的解释能力, 回归结果采用 ROC 曲线拟合度验证评价, 若 ROC 值 >0.5 , 表明回归结果较好^[39]。ROC 检验结果(如表 1 所示), 各种土地利用类型的拟和度均 >0.7 , 说明所选驱动因子对天山北坡城市群土地利用的解释能力较强, 可用于模拟与预测天山北坡城市群未来城市变化。

(3) 弹性规则设定。土地利用弹性主要受土地利用类型变化可逆性的影响, 一般用 0 到 1 之间的数值来

表示,当这个值越接近 1 时,其转移的可能性就越大。通过对模型的调试和对其他类似地区的研究结果进行对比,分别设定不同情境下耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地的转换系数(表 2)。

(4)土地需求模块及验证。土地需求主要利用 CA-Markov 模型模拟预测,该模块借助 MATLAB 与 IDRISI 软件完成。研究在 2005—2010 年的基础上预测 2015 年的土地利用情况,并利用 2015 年的现状数据与预测模拟的 2015 年进行 Kappa 系数验证,模拟 Kappa 指数为 0.9524,模拟的精度较高,模型可进行 2025 年土地利用数据预测。

(5)情景参数设置。根据天山北坡城市群的特殊性及其在丝绸之路经济带的重要作用,分别构建了“自然发展情景”、“生态保护情景”、“快速发展情景”3 种情景方案(表 2),用以模拟 2025 年天山北坡城市群的土地利用。情景设定过程中,参考了《天山北坡城市群发展规划(2018—2035)》,以确保情景模拟最大程度的满足规划需求。本文是以 2015 年为基础对 2025 年进行空间优化配置,循环 11 次。

表 2 天山北坡城市群不同情景下的参数设置

Table 2 Parameter setting under different scenarios of urban agglomeration on the northern slope of Tianshan Mountains

情景类型 Scenario type	情景描述 Scene description		耕地 Cultivated land	林地 Forest land	草地 Grass land	水域 Water area	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land
自然发展 Natural development	土地利用变化基于 2005—2015 年转移概率矩阵,借助 Markov 模型预测获取 2025 年的自然发展情景下的土地利用情况	弹性系数	0.8	0.5	0.8	0.5	0.8	1
		土地需求/hm ²	2694200	160600	5172900	97600	555800	10617425
生态优化 Ecological optimization	参考“天然林保护工程”和“基本农田保护”政策,根据历史发展预案进行调整获取	弹性系数	0.7	0.2	0.3	0.5	0.75	1
		土地需求/hm ²	2694200	360600	6172900	165750	455800	9449275
快速发展 develop rapidly	根据天山北坡城市群发展规划制定城市规划发展预案(2018—2035)	弹性系数	0.9	0.6	0.8	0.6	0.95	1
		土地需求/hm ²	2994200	360600	4153246	165750	700000	9924729

3 结果分析

3.1 景观基本特征分析

景观水平的景观格局指数可以明确反映整个区域的景观特征。1990—2015 年,随着天山北坡城市群的土地利用的改变,城市建设用地景观特征变化显著。如图 2 所示,1990—2015 年天山北坡城市群最大斑块指数(LPI)由 14.89 下降到 13.90。相反,斑块数量(NP)由 1744 上升至 3608 个,斑块密度(PD)由 0.97 上升到 1.499,景观形状指数(LSI)增长幅度最大,由 49.89 上升至 72.59,分离度指数(DIVISION)由 0.96 上升至 0.97,聚集度指数(AI)由 96.20 上升值 96.59。这两组不同变化趋势表明,天山北坡城市群的城市景观特性趋于破碎化,最大斑块指数的下降表明了城镇景观小斑块增加,景观形状指标的增长表明了城市景观趋于复杂。

从 NP 和 PD 来看,1990—2015 年天北北坡城市群建设用地景观 PD 指数呈现不断增长趋势,说明了城市景观斑块数量增长的同时,斑块密度增加,可见斑块数增多,景观密度越大,景观的破碎程度增大;从 LSI 和 LPI 指数来看,1990—2015 年 LSI 指数越小,表明了城市景观斑块形状越趋向于正方形,斑块形状更加趋向于规则,LPI 指数表示为最大斑块面积指数,最大斑块指数在 1990—2015 年间整体呈现下降的趋势,在 2000 年有一个高峰值,达到 16.59,此后呈现出不断降低的趋势,说明了城市最大斑块面积指数变低,城市建设用地呈现出破碎化的发展状态;从 DIVISION 和 AI 指数来看,说明斑块间的聚集程度略微减弱,景观破碎程度增大。可见,近 25 年来天山北坡城市群城市用地呈景观破碎度增大、景观异质性增强、斑块形状趋于复杂的趋势。

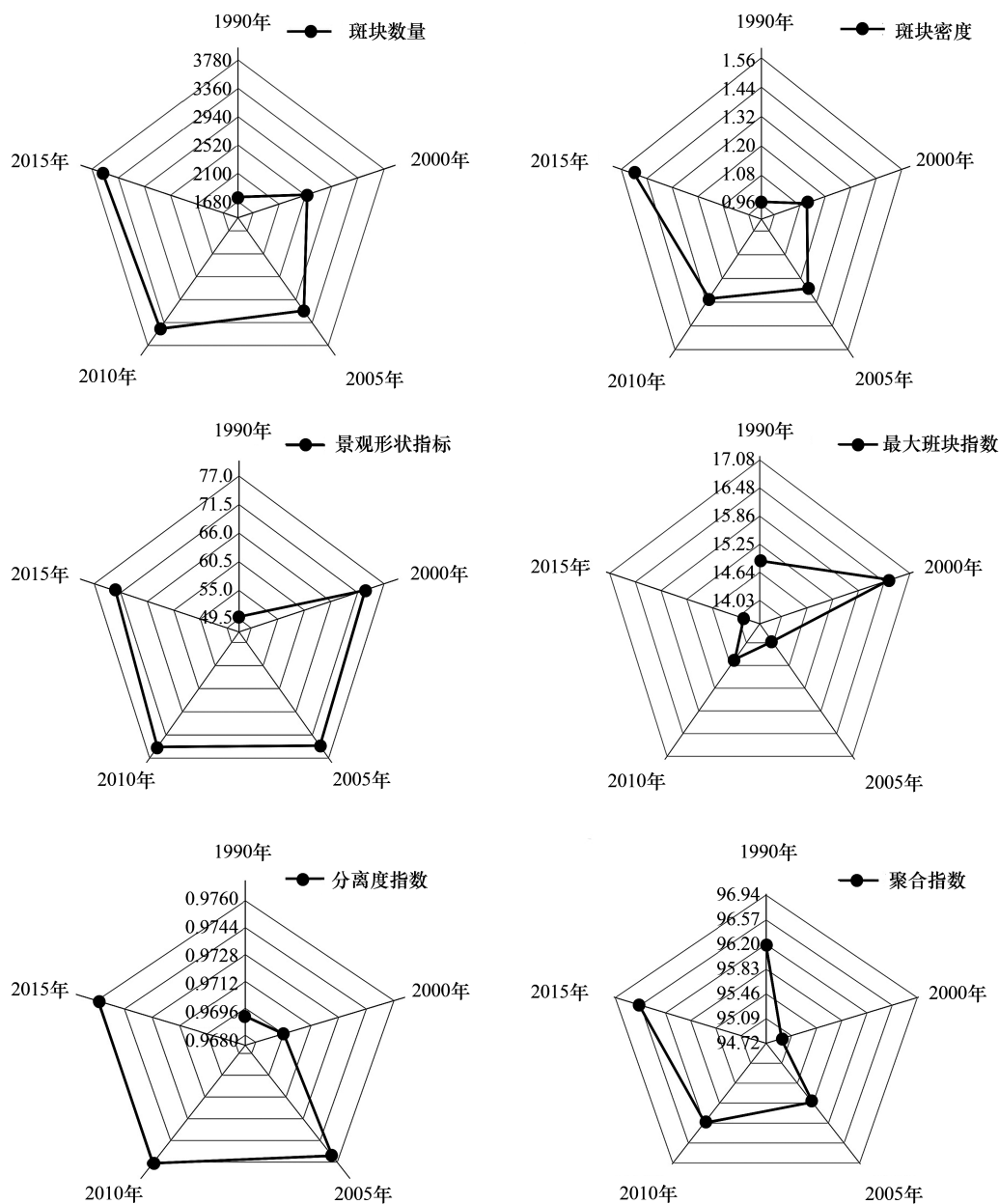


图2 1990—2015年天山北坡城市群景观指数变化

Fig. 2 Landscape index changes of urban agglomeration on the northern slope of Tianshan Mountains from 1990 to 2015

3.2 城市群扩张模式时空分析

景观扩张指数的计算通过 GIS 软件空间分析工具实现。首先,提取天山北坡城市群 1990—2000 年、2000—2005 年、2005—2010 年、2010—2015 年 4 个时间段的的城市景观扩张斑块,生成新增加城市景观斑块的缓冲区,然后,利用生成的缓冲区与原有的城市斑块进行相交处理,求出每个缓冲区内原有城市用地的面积,最后根据公式(1)计算新增城市用地的景观扩张指数。图 3、图 4 为天山北坡城市群 4 个时期的不同城市扩张模式分布图。

分别统计天山北坡城市群 3 种城市扩张模式在 1990—2000 年、2000—2005 年、2005—2010 年、2010—2015 年 4 个时期所占的面积比例(图 5)。结果表明:天山北坡城市群城市的飞地式、边缘式扩张在 1990—2000 年、2000—2005 年、2010—2015 年 3 个时期处于主导地位,而在 2005—2010 年期间,扩张主要以填充式、

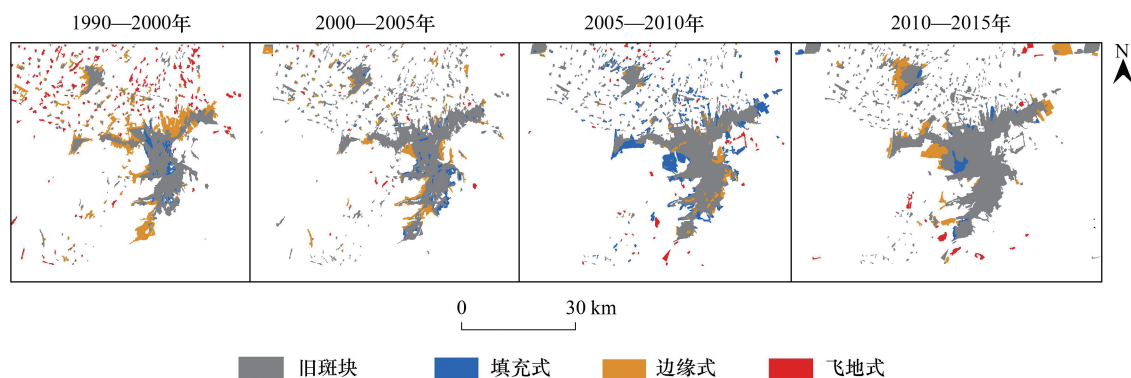


图3 1990—2015年天山北坡城市群城市扩张(局部)

Fig. 3 Urban expansion of urban agglomeration on the northern slope of Tianshan Mountains during 1990—2015 (local)

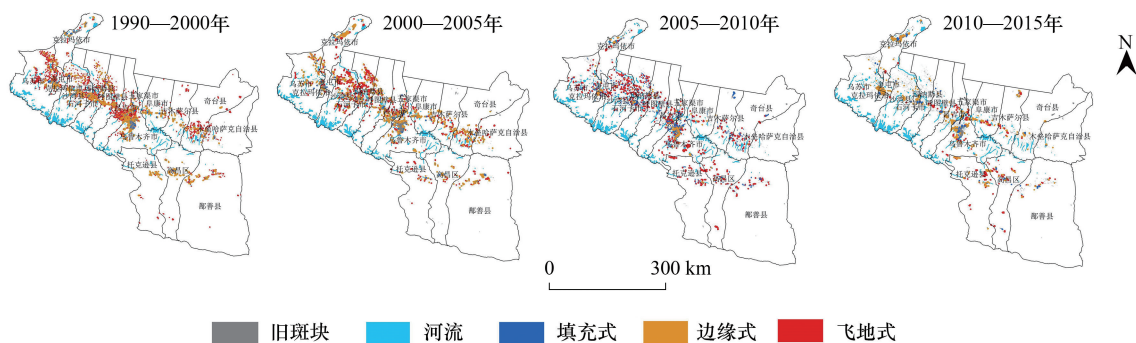


图4 1990—2015年天山北坡城市群城市扩张类型

Fig. 4 Spatial and temporal distribution of urban agglomeration on the northern slope of Tianshan Mountains during 1990—2015

飞地式为主。1990—2015年间,飞地式呈现下降的趋势,其在1990—2000年占新增城市斑块的51.61%,2000—2005年占32.81%,2005—2010年占比38.70%,2010—2015年最低,占28.81%,飞地式占比的下降表明了天山北坡城市群的城市建设用地更加规则,乱占、乱建的情况减少;边缘式占比仅次于飞地式,整体较为稳定,在1990—2015年呈现小幅度的下降趋势;填充式为占比最低的扩张模式,在1990—2015年的城市扩张变化中呈现出先增加后下降的趋势,填充式在1990—2010年新增扩张面积中从2.55%增至52.78%,2010—2015年面积占比下降至6.57%。据图5可以看出,填充式扩张在2005—2010年期间,填充式主要是在原来的具有优势的区域发展、重建,所以在一定时期出现了高峰值,天山北坡城市群的城市扩张主要在核心旧城区、交通发达的区域发展,随着飞地式的比例下降,在城市群的成长后期,填充式与边缘式会占主导地位。

从扩张模式的空间分布来看(图4),天山北坡城市群乌苏市、奇台县、昌吉市的1990—2000年城市扩张以飞地式为主,占飞地式增长总面积的30.16%;边缘式主要位于乌鲁木齐市、克拉玛依市、奎屯市;填充式扩张主要位于乌鲁木齐市。2000—2005年城市扩张以边缘式为主,空间位于克拉玛依市、乌鲁木齐市、鄯善县,占同时期边缘式增长总面积的59.54%;填充式与1990—2005年相比,仍主要位于乌鲁木齐市;飞地式分布范围较零散,主要位于沙湾县、克拉玛依市、玛纳斯县。2005—2010年以填充式为主,填充式扩张主要位于乌鲁木齐市、吉木萨尔县、玛纳斯县,占同时期填充式增长总面积的42.91%。飞地式主要位于乌鲁木齐市、托克逊县、沙湾县;边缘式主要位于乌鲁木齐市、克拉玛依市。2010—2015年以边缘式为主,飞地式主要位于托克逊县、乌鲁木齐市、高昌区,占同时期飞地式增长总面积的48.41%;边缘式主要位于克拉玛依市、乌鲁木齐市、昌吉市;填充式主要位于乌鲁木齐市、克拉玛依市、昌吉市。综上,1990—2015年间,飞地式扩张主要位于

乌苏市、奇台县、乌鲁木齐市、昌吉市、托克逊县、沙湾县、克拉玛依市、玛纳斯县、和高昌区等地;边缘式扩张主要位于乌鲁木齐市、克拉玛依市、奎屯市、鄯善县、昌吉市等地;填充式扩张主要位于乌鲁木齐市、克拉玛依市、昌吉市、吉木萨尔县、玛纳斯县等地。

通过扩张模式可以看出不同城市的发展趋势,乌鲁木齐市、克拉玛依市、昌吉市是城市扩张的主要分布区域,同时说明该区域的城市发展与经济建设比其他区域相对较快。乌鲁木齐市作为城市群的中心城市,发挥着天山北坡城市群的“领头羊”作用。近 25 年来,乌鲁木齐的城市扩张模式主要是向外增长的边缘式扩张模式,有利于强化其核心城市功能,充分发挥在新疆的经济、金融、科技创新、交通枢纽等辐射与集聚带动作用。与乌鲁木齐类似,昌吉市、阜康市、克拉玛依市、奎屯市、鄯善县、石河子市均以边缘式扩张为主,乌苏市与五家渠市虽以飞地式为主,但边缘式仅次于飞地式。

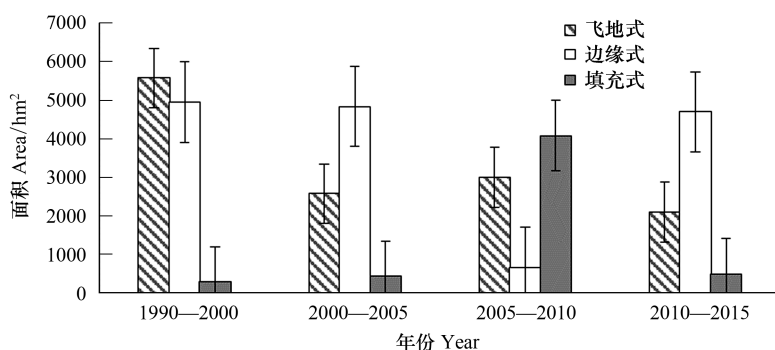


图 5 1990—2015 年天山北坡城市群城市各类扩张模式面积分布图

Fig. 5 The area distribution map of various urban expansion patterns of urban agglomeration on the northern slope of Tianshan Mountains during 1990—2015

根据公式(3)及(4),分别计算了天山北坡城市群不同时间段的平均斑块扩张指数(MEI)和面积加权平均斑块扩张指数(AWMEI)。由图 6 可知,MEI 在各个时期内的值分别为 10.53、20.17、20.10、24.23,具有明显的上升趋势。AWMEI 在 1990—2015 年期间的值分别为 9.29、15.27、17.05、15.99,呈现出先增加后减少的趋势。这表明天山北坡城市群在近 25 年间的城市空间结构趋于紧凑,城市群的核心区域正逐渐发挥着辐射作用。

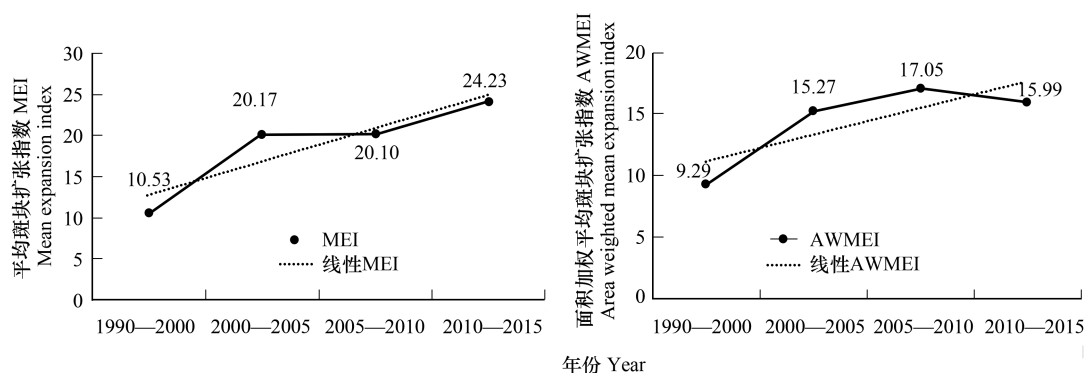


图 6 天山北坡城市群 MEI、AWMEI 指数变化

Fig. 6 The change of AWMEI and MEI index of urban agglomeration on the northern slope of Tianshan Mountains

3.3 城市扩张重心转移

3.3.1 城市扩张整体重心转移

通过分析城市扩张强度重心的时空移动轨迹,可以掌握城市空间扩张变化的过程与特点。根据公式(4)

计算出天山北坡城市群城市扩张在 1990—2000 年、2000—2005 年、2005—2010 年和 2010—2015 年的重心坐标,以空间形式展示(图 7),并计算重心的移动方向和距离。

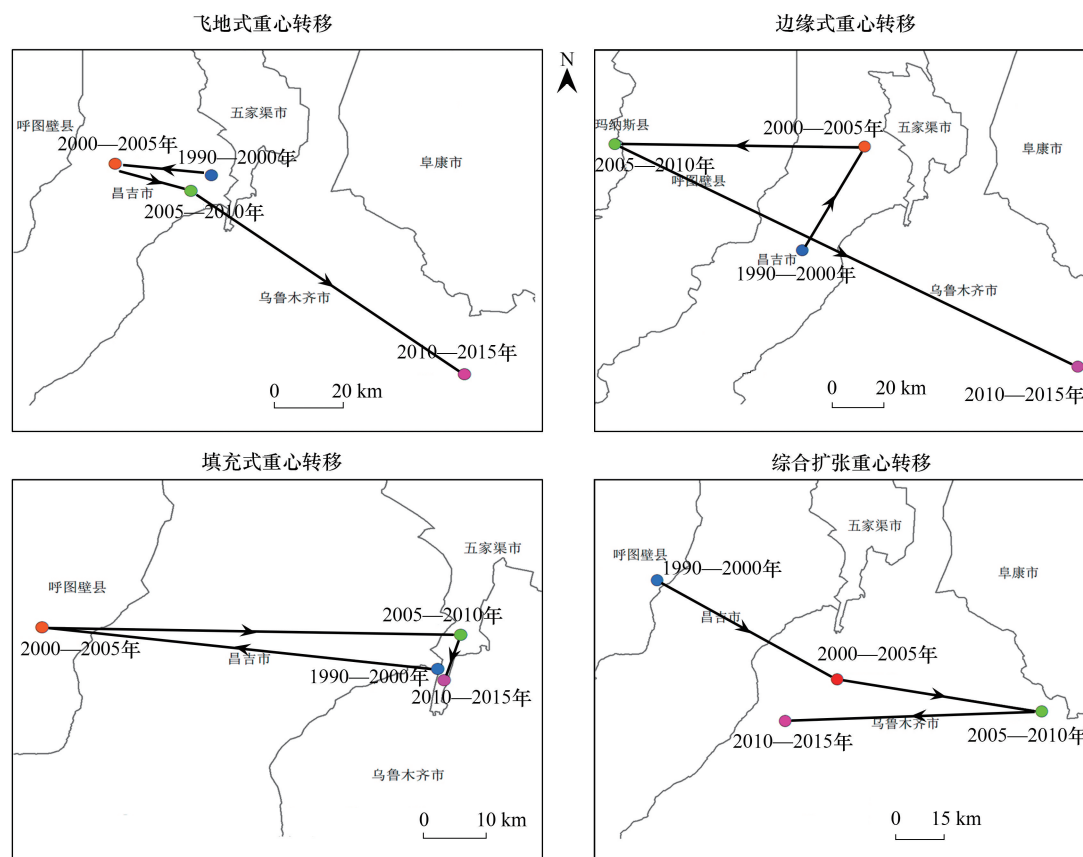


图 7 天山北坡城市群城市扩张强度重心移动方向

Fig. 7 The center of gravity coordinate migration of urban agglomeration on the northern slope of Tianshan Mountains

随着时间的发展,城市扩张重心有明显的移动。1990—2000 年间,天山北坡城市群的扩张重心位于呼图壁县。2000—2005 年间,城市扩张重心从呼图壁县向东南方向转移到了乌鲁木齐的西北部。2005—2010 年,城市扩张重心从乌鲁木齐的西北部转移到了乌鲁木齐的东部。2010—2015 年,城市扩张重心仍旧在乌鲁木齐市,移动轨迹从乌鲁木齐的东部转移到了乌鲁木齐的西部;从天山北坡城市群城市扩张重心转移距离来看(图 7),1990—2000 年城市重心位于呼图壁县,2000—2005 年城市扩张重心向东偏南方向转移 50.45 km,2005—2010 年间,城市继续向东南方向大幅度扩展,致使城市重心向东南转移,转移距离为 44.91 km,2010—2015 年间,城市重心略向东北向移动 56.29 km。由此 25 年间,可以看出天山北部城市群的城市扩张重心主要位于乌鲁木齐市及周边,城市重心总体呈现出向东、南方向移的趋势。

3.3.2 不同扩张模式下的重心转移

为更加全面的剖析不同扩张模式的重心转移轨迹,分别对飞地式、填充式、边缘式 3 种不同扩张模式的重心转移进行了研究。从不同扩张模式的重心转移过程来看(图 7),飞地式扩张模式 1990—2005 年的重心由昌吉市的东部向昌吉县的西部转移,2005—2015 年重心变化较大,城市建设在乌鲁木齐市大幅度的扩展,导致飞地扩张重心从昌吉市的东部转移至乌鲁木齐市的东部区域;边缘式扩张模式 1990—2005 年重心由昌吉市的中部向北部转移,2005—2015 年重心转移变化较大,重心由玛纳斯县的东部边缘转移到乌鲁木齐的东部;填充式扩张模式 1990—2005 年的重心转移由昌吉市、五家渠市、乌鲁木齐的交界处转移至呼图壁市,2005—2015 年重心逐渐向五家渠市的南部转移。

3.4 城市群用地扩张情景分析

基于“自然发展情景”、“生态保护情景”和“快速发展情景”3种情景的参数设定,将上述参数设置分别输入到 Dyna-CLUE 模型中,以 2015 年为基准年,模拟出天山北坡城市群 2025 年的土地利用变化空间分布,如图 8 所示。

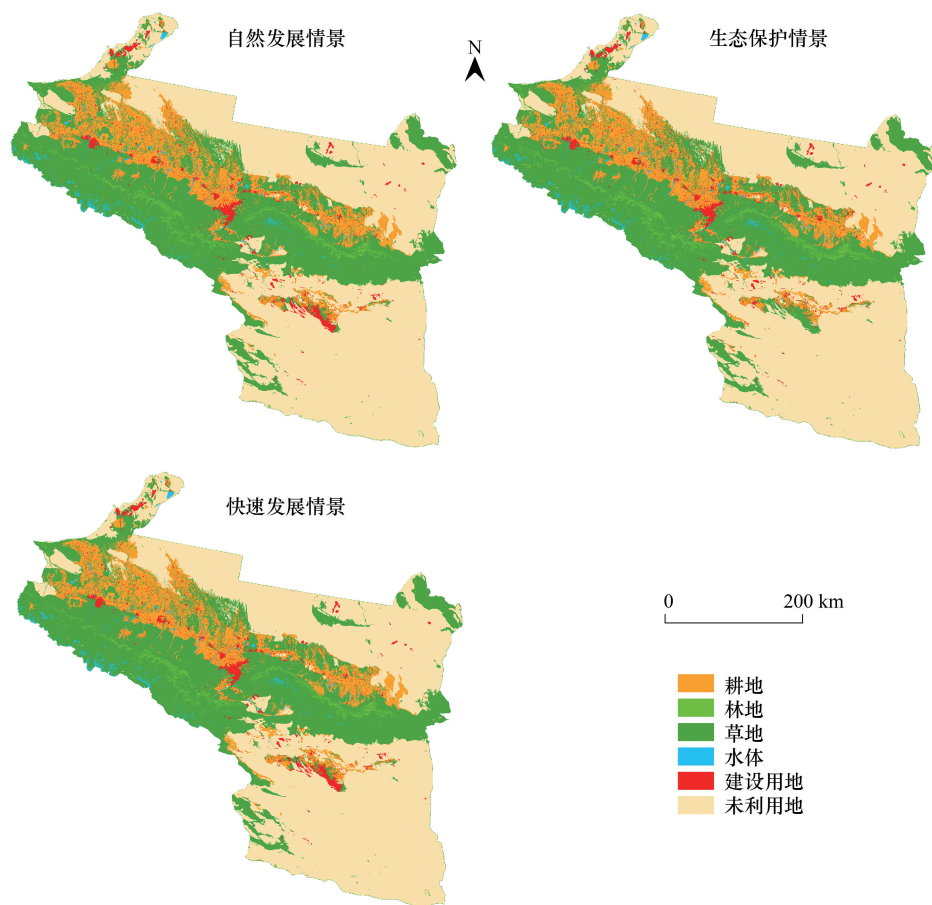


图 8 天山北坡城市群不同情景的模拟结果

Fig. 8 Simulation results of different scenarios of urban agglomeration on the northern slope of Tianshan Mountains

(1) 自然发展情景。“自然发展情景”是根据天山北坡城市群 2005—2015 年的土地利用转移矩阵,利用数学概率方法推断 2015—2025 年的土地利用空间的分布情况。在“自然发展情景”下,2025 年土地利用以耕地、草地为主,耕地、建设用地、草地与未利用地之间的大量转换是“自然发展情景”下土地转换的主要方式。“自然发展情景”中,城市扩张模式以飞地式扩张为主,由草地、未利用地转换而来,分布在城市群的东南部吐鲁番地区西北部乌苏市、克拉玛依市。较 2015 年相比,“自然发展情景”下的建设用地增长了 142114.7 hm^2 ,“自然发展情景”依据前期的土地转移矩阵,利用数学的方法模拟出来的结果,没有其他政策、经济等条件的约束,该情景下的建设用地增长占三类情景模拟结果的最大值,。

(2) 生态保护情景。“生态保护情景”主要目的是保护天山北坡城市群的生态用地,该情景主要设置林地、草地作为生态保护区,也就是情景发展的限制区域。在该情景模式下,耕地是较“自然发展情景”、“快速发展情景”增长最少的地类;林地较在其他发展情景锐减的情况下,在“生态保护情景”保持稳定状态;未利用地在该情景中减少最为明显,在建设用地保持稳定增长的状态下,说明生态保护情境下的生态环境会有明显的改善。“生态保护情景”中,城市扩张模式以飞地式、边缘式扩张为主,边缘式扩张的城市用地主要分布在乌鲁木齐市等城市的边缘,主要由耕地、草地转换而来。飞地式扩张在城市群空间上呈现出均匀分布,主要由

草地、未利用地转换而来。较 2015 年相比,生态保护情境下建设用地增长了 63197.10 hm^2 ,占三类情景模拟建设用地增长的最低值。

(3) 快速发展情景。“快速发展情景”的预测是根据天山北坡城市群发展规划制定城市规划发展预案(2018—2035)对建设用地、耕地、林地所制定的规划指标进行。如图 8 所示,“快速发展情景”与“自然发展情景”的土地利用空间分布相似,在《天山北坡城市群发展规划(2018—2035)》指定的发展预案下,“快速发展模式”的建设用地增长主要集中在城市群的东南部的高昌区、托马逊县、鄯善县。城市扩张模式以飞地式扩张为主,主要分布在城市群的东南部等城市的边缘,由草地、未利用地转换而来。较 2015 年相比,“快速发展情景”下建设用地增长了 76939.74 hm^2 ,仅次于“自然发展情景”的城市建设用地面积。

综上,在对未来天山北坡城市群城市空间结构的优化中,应综合考虑自然发展、生态保护、快速发展的需要,认识各个情景之间的优缺点,协调各情景之间的矛盾,以达到城市群空间土地利用的最优。

4 结论与讨论

本文利用天山北坡城市群 1990—2015 年 5 期 30 m 分辨率的土地利用数据,对中国西北干旱区典型城市群的扩张模式时空演变进行研究,从城市景观指数、景观扩张指数、城市扩张重心转移轨迹进行了分析,并借助 Dyna-CLUE 模型模拟城市群 2025 年的城市景观扩张演化轨迹,以加深人们对城市景观扩张变化过程的理解与认识。结论如下:

(1) 1990—2015 年,受城市建设与人类活动的影响,天山北坡城市群的城市景观斑块数量、斑块密度、景观形状指标、分离度均呈增长趋势,最大斑块指数不断下降,城市群内部呈现出城市景观异质性、破碎化与复杂化的趋势。以上表明,城市扩张与景观格局的关系密切。

(2) 天山北坡城市群城市景观扩张模式主要是以飞地式扩张为主,以边缘式扩张为辅。乌鲁木齐市、克拉玛依市、昌吉市是三种扩张模式分布的主要区域。同时,面积加权斑块扩张指数呈现不断上升的趋势,城市群的结构形态布局趋于紧密,城市扩张强度重心转移轨迹呈现出向东南方向转移的态势。

(3) 多情景下的模拟预测表明,运用 Dyna-CLUE 模型模拟城市群内未来景观空间变化具有可行性,未来飞地式与边缘式扩张是城市扩张的主要模式。依据“快速发展情景”与“自然发展情景”的发展趋势,建设用地增长较快,建设用地主要由未利用地、草地、耕地转换而来。根据“自然发展情景”的发展趋势,未来草地面积会大量减少,生态环境会趋向脆弱。因此,在城市群的未来发展中要综合分析三种情景模式的发展规律,在生态环境保护的基础上高质量的发展。依据 2019 年 5 月 8 日国家发改委批复实施的《天山北坡城市群发展规划(2018—2035)》要求,在城市扩张的同时,构建城市群绿洲生态安全屏障,加大生态环境保护力度,维护生态环境安全,筑牢天山北坡城市群建设的生态安全屏障。

天山北坡城市群与京津冀、中原、长三角等城市群略有差异,它的地理位置决定了自身的特殊性,既有自己的短板,也有自己显著的发展优势,城市群内部城市间的结构与职能不明显,核心城市的辐射能力没有完全产生优势,研究上不能完全照搬京津冀、中原、长三角等城市群的传统评价指标来对它进行评价。本研究从城市景观的视角出发,参考了研究区相关规划资料,利用景观扩张指数法来刻画了天山北坡城市群的近 25 年来的扩张模式的时空变化特征,城市群内不同区域的扩张模式有所差异。引入重心转移模型剖析天山北坡城市群城市扩张的移动轨迹,从时间、空间两个角度综合分析了城市群的扩张情况。运用 Dyna-CLUE 模型对城市群进行了多情景模拟,在“自然发展情景”、“生态保护情景”、“快速发展情景”3 种情景设定下,对城市群未来 10 年间的土地利用、城市扩张演变进行了剖析,以为城市群未来发展提供新的发展思路与参考。基于本文的研究来看,未来城市群发展应该综合考虑“自然发展情景”、“生态保护情景”、“快速发展情景”3 种情境下的城市扩张与土地利用状况,协调好城市扩张与土地利用之间的矛盾,在生态环境保护、资源承载力加强的前提下,重点提升核心城市的辐射能力,同时,加强各个城市间、区域间的分工与联系,利用自身的禀赋与优势,打造一个具有边疆特色、可持续发展的天山北坡城市群。

参考文献 (References):

- [1] Fang C L, Yu D L. Urban agglomeration: an evolving concept of an emerging phenomenon. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 162: 126-136.
- [2] 方创琳. 天山北坡城市群可持续发展战略思路与空间布局. *干旱区地理*, 2019, 42(1): 1-11.
- [3] Fang C L. Important progress and future direction of studies on China's urban agglomerations. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, 25(8): 1003-1024.
- [4] Dadashpoor H, Azizi P, Moghadasi M. Land use change, urbanization, and change in landscape pattern in a metropolitan area. *Science of the Total Environment*, 2019, 655: 707-719.
- [5] Salvati L, Zamboni I, Chelli F M, Serra P. Do spatial patterns of urbanization and land consumption reflect different socioeconomic contexts in Europe? *Science of the Total Environment*, 2018, 625: 722-730.
- [6] Zank B, Bagstad K J, Voigt B, Villa F. Modeling the effects of urban expansion on natural capital stocks and ecosystem service flows: a case study in the Puget Sound, Washington, USA. *Landscape and Urban Planning*, 2016, 149: 31-42.
- [7] 孙泽祥, 刘志锋, 何春阳, 郭建国. 中国北方干燥地城市扩展过程对生态系统服务的影响——以呼和浩特-包头-鄂尔多斯城市群地区为例. *自然资源学报*, 2017, 32(10): 1691-1704.
- [8] 方创琳, 周成虎, 顾朝林, 陈利顶, 李双成. 特大城市群地区城镇化与生态环境交互耦合效应解析的理论框架及技术路径. *地理学报*, 2016, 71(4): 531-550.
- [9] Lausch A, Blaschke T, Haase D, Herzog F, Syrbe R U, Tischendorf L, Walz U. Understanding and quantifying landscape structure: a review on relevant process characteristics, data models and landscape metrics. *Ecological Modelling*, 2015, 295: 31-41.
- [10] 任宇飞, 方创琳, 李广东, 孙思奥, 鲍超, 刘若文. 城镇化与生态环境近远程耦合关系研究进展. *地理学报*, 2020, 75(3): 589-606.
- [11] 高倩, 方创琳, 张小雷, 刘海猛, 任宇飞. 丝绸之路经济带核心区新疆城镇建设用地的时空演变特征及影响机理. *生态学报*, 2019, 39(4): 1263-1277.
- [12] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 徐新良, 秦元伟, 宁佳, 周万村, 张树文, 李仁东, 颜长珍, 吴世新, 史学正, 江南, 于东升, 潘贤章, 迟文峰. 20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局. *地理学报*, 2014, 69(1): 3-14.
- [13] 罗奎, 方创琳, 马海涛. 中国城市化与非农就业增长的空间格局及关系类型. *地理科学进展*, 2014, 33(4): 457-466.
- [14] 王建康, 谷国锋, 姚丽, 陈园园. 中国新型城镇化的空间格局演变及影响因素分析——基于 285 个地级市的面板数据. *地理科学*, 2016, 36(1): 63-71.
- [15] 梁发超, 刘诗苑, 刘黎明. 近 30 年厦门城市建设用地景观格局演变过程及驱动机制分析. *经济地理*, 2015, 35(11): 159-165.
- [16] Zheng X Q, Zhao L, Xiang W N, Li N, Lv L N, Yang X. A coupled model for simulating spatio-temporal dynamics of land-use change: a case study in Changqing, Jinan, China. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 106(1): 51-61.
- [17] 关伟, 周忻桐. 辽中南城市群空间相互作用的时空演变. *经济地理*, 2014, 34(9): 48-55.
- [18] 刘海龙, 石塔基. 绿洲型城市空间扩展的模拟及多情景预测——以酒泉、嘉峪关市为例. *自然资源学报*, 2017, 32(12): 2075-2088.
- [19] 刘小平, 黎夏, 陈逸敏, 秦雁, 李少英, 陈明辉. 景观扩张指数及其在城市扩展分析中的应用. *地理学报*, 2009, 64(12): 1430-1438.
- [20] 夏畅, 王海军, 张安琪, 邓羽. 耦合管控效应的城市空间多情景模拟与政策分析. *人文地理*, 2017, 32(3): 68-76.
- [21] Tobler W R. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography*, 1970, 46(S1): 234-240.
- [22] Verburg P H, Overmars K P. Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-CLUE model. *Landscape Ecology*, 2009, 24(9): 1167-1181.
- [23] 叶高斌, 苏伟忠, 孙小祥. 基于 Dyna-CLUE 模型的太湖流域建设用地空间扩张模拟. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(4): 725-734.
- [24] Fang C L. The basic law of the formation and expansion in urban agglomerations. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(10): 1699-1712.
- [25] 方创琳, 宋吉涛, 蔺雪芹. 中国城市群可持续发展理论与实践. *中国科技论坛*, 2010, (7): 135-135.
- [26] 高超, 雷军. 新疆天山北坡城市群经济联系分析. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(6): 24-30.
- [27] 申立敬, 程广斌. 丝绸之路经济带城市群空间联系特征比较研究——以我国西北地区城市群为例. *人文地理*, 2016, 31(5): 126-132.
- [28] 艳燕, 张弛, 匡文慧, 罗格平, 陈春波. 天山北坡城市群非渗透面下的土壤有机碳特征. *地理科学进展*, 2015, 34(6): 781-789.
- [29] 张豫芳, 杨德刚, 张小雷, 邓红涛. 天山北坡城市群地域空间结构时空特征研究. *中国沙漠*, 2008, 28(4): 795-801.
- [30] 程维明, 周成虎, 汤奇成, 姚永慧, 张百平. 天山北坡前山带景观分布特征的遥感研究. *地理学报*, 2001, 68(5): 541-548.
- [31] 方创琳, 高倩, 张小雷, 程卫国. 城市群扩展的时空演化特征及对生态环境的影响——以天山北坡城市群为例. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49(9): 1413-1424.
- [32] 万义良, 金瑞, 唐建波, 金美含. 东莞市城镇扩张景观格局变化特征. *经济地理*, 2019, 39(3): 84-92.
- [33] Liu X P, Li X, Chen Y M, Tan Z Z, Li S Y, Ai B. A new landscape index for quantifying urban expansion using multi-temporal remotely sensed data. *Landscape Ecology*, 2010, 25(5): 671-682.
- [34] 赵燕如, 邹自力, 张晓平, 危小建. 基于 LEI 和 MSPA 的南昌市城市扩张类型与生态景观类型变化关联分析. *自然资源学报*, 2019, 34(4): 732-744.
- [35] 王海军, 张彬, 刘耀林, 刘艳芳, 徐姗, 邓羽, 赵雲泰, 陈宇琛, 洪松. 基于重心-GTWR 模型的京津冀城市群城镇扩展格局与驱动力多维解析. *地理学报*, 2018, 73(6): 1076-1092.
- [36] 匡文慧, 张树文, 张养贞, 盛艳. 1900 年以来长春市土地利用空间扩张机理分析. *地理学报*, 2005, 60(5): 841-850.
- [37] 张永民, 赵士洞, Verburg P H. CLUE-S 模型及其在奈曼旗土地利用时空动态变化模拟中的应用. *自然资源学报*, 2003, 18(3): 310-318.
- [38] 邓华, 邵景安, 王金亮, 高明, 魏朝富. 多因素耦合下三峡库区土地利用未来情景模拟. *地理学报*, 2016, 71(11): 1979-1997.
- [39] Pontius R G. Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2000, 66(8): 1011-1016.