

# 滇池流域不透水表面动态模拟及其 非点源污染风险评价

许泉立<sup>1,2,3,4</sup>, 王庆<sup>1,2,3,4</sup>, 洪亮<sup>1,2,3,4</sup>, 杨昆<sup>1,2,3,4</sup>, 彭双云<sup>1,2,3,4</sup>, 张韶华<sup>1,2,3,4</sup>

(1.云南师范大学 地理学部, 昆明 650500;

2.云南师范大学 西部资源环境 GIS 技术教育部工程研究中心, 昆明 650500;

3.云南省地理空间信息技术工程技术研究中心, 昆明 650500; 4.云南省高校资源与环境遥感重点实验室, 昆明 650500)

**摘要:**利用混合模型综合模拟不透水表面的时空演化规律及其水环境效应是定量探索湖滨型城市可持续发展模式的有效途径。以滇池流域为研究区域,借助遥感与 GIS 技术探索 2000—2016 年城市化过程中不透水表面的时空演变特征及其扩张规律,并采用分区元胞自动机模型对 2021 年和 2031 年不透水表面的分布进行模拟与预测。进而在子流域和水文响应单元的尺度上计算 2000—2031 年不透水表面的覆盖率(ISC),对滇池流域历史和未来的水环境城市非点源污染风险进行评价。结果表明:(1) 滇池流域不透水表面的扩张具有以滇池湖体为中心向外辐射的显著特征,不透水表面面积增加了 286.28 km<sup>2</sup>,增长速率为 17.9 km<sup>2</sup>/年。2006—2009 年增长最快为 38.8 km<sup>2</sup>/年,其覆盖率从 2000 年的 10.16%增加到 2016 年的 20.64%;(2) 相比较不分区元胞自动机模型,分区元胞自动机模型在模拟用地变化时的精度有显著提升(Kappa 系数提高超过 16%,总体精度提高超过 26%),可以借以模拟未来不透水表面的扩张情景;(3) 子流域和水文响应单元两种尺度下的不透水表面覆盖率都逐年升高,城市非点源污染风险也逐年增大,若不加以重视,风险将会进一步增加。研究结果可为调整土地利用结构、协调城镇建设与水环境保护提供科学依据。

**关键词:**滇池流域; 不透水表面; 分区元胞自动机; 水文响应单元; 非点源污染风险

中图分类号:X2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)04-0186-07

## Dynamic Simulation of Impervious Surface Expansion and Its Risk Assessment on Non-point Source Pollution in Dianchi Lake Basin

XU Quanli<sup>1,2,3,4</sup>, WANG Qing<sup>1,2,3,4</sup>, HONG Liang<sup>1,2,3,4</sup>,

YANG Kun<sup>1,2,3,4</sup>, PENG Shuangyun<sup>1,2,3,4</sup>, ZHANG Shaohua<sup>1,2,3,4</sup>

(1.Department of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China; 2.GIS Technology

Engineering Research Centre for West-China Resources and Environment, Ministry of Education, Yunnan Normal University,

Kunming 650500, China; 3.Yunnan Geospatial Information Technology Engineering Research Center, Kunming 650500,

China; 4.University Key Laboratory of Resources and Environment Remote Sensing in Yunnan, Kunming 650500, China)

**Abstract:** The rapid urbanization of lakeside cities not only results a massive expansion of impervious surface, but also makes a significant influence on water environment. It is an effective way to quantitatively explore the sustainable development of lakeside cities to simulate the spatiotemporal evolution pattern of impervious surface and its water environment effect by using hybrid models. Therefore, taking the Dianchi Lake Basin as the study area, we used remote sensing and GIS technology to analyze the temporal-spatial expansion characteristics of impervious surface from 2000 to 2016 caused by urbanization, and simulated and predicted the distribution of impervious surface in the future of 2021 and 2031 by using the partitioned cellular automata model. Then, the coverage of the impervious surface (ISC) from 2000 to 2031 was calculated on the sub-basin scale and the hydrological response units scale, as well as their temporal-spatial characteristics were analyzed. Finally, the historical and future non-point source pollution risk of Dianchi Lake Basin water environment was evaluated based on the relationship between ISC and water quality. The results show that: (1) the expansion of the impervious surface of the Dianchi Lake Basin is characterized by outward radiation

收稿日期:2020-08-19

修回日期:2020-10-01

资助项目:国家自然科学基金(41461038,41561086,41661082,41861048)

第一作者:许泉立(1975—),男,湖北武汉人,副教授,硕士生导师,主要从事地理信息系统与智能体建模。E-mail:go2happiness@163.com

from the Dianchi Lake; the impervious surface area has increased by 286.28 km<sup>2</sup>, the annual growth rate is 17.9 km<sup>2</sup>, and the fastest annual growth rate in 2006—2009 is 38.8 km<sup>2</sup>, its coverage increased from 10.16% in 2000 to 20.64% in 2016; (2) compared to non-partitioned CA model, the partitioned CA model can significantly improve the accuracy of land use changes simulation (where Kappa increases over 16%, and total accuracy increases over 26%), which can be used to simulate the expansion of the impervious surface in the future; (3) the impervious surface coverage both in sub-basins and hydrological response unit has been increasing year by year, and the risk of urban non-point source pollution also increases year by year; if attention does no be paid to the risk, the risk will be more severe in future. These research results can provide the scientific bases for adjusting land use structure and coordinating urban construction as well as water environment protection.

**Keywords:** Dianchi Basin; impervious surface; partitioned cellular automata; hydrological response unit; non-point source pollution risk

不透水表面(Impervious Surface, IS)是城市空间扩张中形成的最重要地表类型,主要是指城市道路、建筑物屋顶、广场等地表水下渗较困难的人造地表<sup>[1-2]</sup>。不透水表面会引起许多生态过程的变化,如地表径流的增加<sup>[3]</sup>、土壤侵蚀加剧<sup>[4]</sup>和非点源污染加重等<sup>[5]</sup>,是造成水环境恶化的主要因素之一<sup>[6]</sup>。有研究表明,不透水表面已成为研究城市景观特征及其生态环境效应的关键性要素,不透水表面覆盖率(Impervious Surface Cover, ISC)与水环境质量之间存在量化的阈值关系<sup>[7-9]</sup>,基于不透水表面评价城市化带来的水环境效应是本领域的研究热点。滇池流域是云南省经济最发达、人口最密集以及城市化进程最快的区域,这使得流域范围内不透水表面不断扩张,相应的入湖污染物增加迅速,水质恶化趋势明显<sup>[10]</sup>,城市扩张而导致的非点源污染已成为滇池水体的主要污染源<sup>[11-12]</sup>。鉴于此,党中央、国务院将滇池的治理连续纳入国家“三河三湖”治理规划,云南省委、省政府把滇池的治理工作放在了云南省九大高原湖泊治理的第一位,昆明市政府也于2018年印发了《滇池保护治理三年攻坚行动实施方案(2018—2020年)》,加大力度对滇池的水体作进一步的治理和维护。因此,如何优化流域土地利用结构,使城镇建设与水环境保护协调发展,是昆明市这样的高原湖滨型城市实现可持续发展必须解决的重要问题。

要揭示城市化对水环境质量的影响,首先需要知道城市扩张的时空特征及其趋势。而城市扩张是典型的地理过程复杂系统,通常需要借助城市扩张模型来帮助人们理解其扩张过程与结果。元胞自动机模型(Cellular Automata, CA)是一种“自下而上”在时间、空间上都离散的动态模型,具有模拟复杂系统时空演化过程的能力,且容易理解和编程实现,所以该模型在近几十年来被国内外学者广泛应用于城市扩张模拟与趋势预测中<sup>[13-15]</sup>。目前大多数元胞自动机模型在模拟城市动态扩张时,采用了统一的用地转换

规则来进行模拟,但是城市扩张是一种典型的具有空间异质性特征的土地利用演化过程,传统CA忽略了空间异质性对模型的影响,使模型容易出现过模拟或欠模拟现象,模拟结果与实际结果出现较大偏差<sup>[16]</sup>。解决空间异质性对元胞自动机模型影响的一种有效途径是建立元胞空间分区机制,其思想是:依据用地变化的空间异质性特征对元胞空间进行划分,使每一个分区内的元胞在刻画用地变化特征上具有更相似的属性,从而可以使每个分区的转换规则能够更准确地表达该区用地变化的驱动机制,进而提高元胞自动机模型模拟的精度<sup>[17]</sup>。可见,如何根据不透水表面扩张特点完成元胞空间的合理分区是提升城市扩张元胞自动机模型的关键。

另一方面,国内外针对于不透水表面覆盖率与水环境之间的关系已有大量研究<sup>[18-19]</sup>,主要利用水文水质模型对区域内的不透水表面与水环境进行了模拟。常用模型有SWMM(Storm Water Management Model), SWAT (Soil and Water Assessment Tool)和L-THIA(Long-Term Hydrologic Impact Assessment Model)模型。国内董欣等<sup>[20]</sup>利用SWMM模型在城市不透水区对地表径流的参数进行了识别与验证,渠勇建等<sup>[21]</sup>利用SWAT模型对衢江流域径流进行了模拟,秦莉俐等<sup>[22]</sup>利用L-THIA模型分析了城镇化对径流的长期影响。国外,Barco等<sup>[23]</sup>利用SWMM模型对南加利福尼亚一大型城市的非点源污染进行了模拟, Baker等<sup>[24]</sup>利用SWAT模型定量评估了流域土地利用变化对水资源的影响, Engel等<sup>[25]</sup>利用L-THIA模拟了城市化对湖泊水位的影响。尽管不透水表面与水环境效应的研究取得了诸多进展,但是由于大多水文水质模型的输入条件涉及水文、气象、下垫面等参数,校准和计算较为复杂,在数据不全、参数设置不恰当的时候,其模拟结果具有很大的不确定性<sup>[26]</sup>。

以上分析表明,如何在水环境数据获取困难和不足的情况下科学评价城市扩张的水环境效应是尚待解

决的重要问题,而不透水表面与水质退化的阈值关系为解决该问题找到了可行的思路。不透水表面与水质退化的阈值关系是基于统计学方法对不透水表面覆盖率和水质变量进行建模,进而得出两者之间的经验方程。比如,杨昆等<sup>[8-9]</sup>利用流域土地利用变化分组研究了滇池流域不透水表面与非点源污染关系,发现了滇池流域水质退化的不透水表面覆盖率阈值;刘珍环等<sup>[27]</sup>利用景观分组方法研究了城市不透水表面与河流水质退化的关系;Tenley<sup>[28]</sup>利用线性回归模型研究了不透水表面覆盖率与河流中 pH 值的阈值关系;Wang 等<sup>[29]</sup>利用分段回归模型研究了不透水表面占比与河流水质的关系。这种关系为研究者从宏观视角揭示城市化的水环境效应提供了理论依据和可行方法。

基于以上研究背景,本文提出了一种基于双约束分区机制的城市扩张元胞自动机模型以及基于不透水表面覆盖率与水质阈值关系的城市非点源污染风险评价方法来揭示城市化发展趋势及其水环境效应。该方法的核心思想是利用双约束空间聚类方法划分元胞空间,进而构建城市扩张模型模拟不透水表面演变趋势,以不透水表面覆盖率与非点源污染程度之间的阈值关系为依据,通过计算不同尺度的水文响应单元下的不透水表面覆盖率来推算流域的非点源污染风险,以满足城市化水环境效应的宏观评估需求。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况与数据

滇池流域地处云贵高原中部、昆明市南部,流域面积约为 2 755 km<sup>2</sup>,为典型的高原湖滨型地带,是整个云南省经济最活跃的区域(见图 1)。研究区海拔高度 1 860~2 809 m,总体地势北高南低,呈南北向狭长的山间盆地地形;气候温润,干湿两季明显,全年年均气温为 15℃、年均日照超过 2 200 h、年均降水量约为 1 050 mm;植被类型丰富,覆盖度高,人类活动足迹明显,土地利用变化频繁,是研究人地关系交互过程、结果和环境效应的典型区域。研究所用的数据有 Landsat TM/OLI 影像数据,分别从地理空间数据云网站下载了 2000 年、2006 年、2009 年、2013 年、2016 年 5 期数据,选择的理由是兼顾遥感数据质量(云量等)和数据特征(是否邻近年末时间、是否能反映研究区城市化发展的关键阶段等);DEM 数据,从地理空间数据云网站获取,用于计算流域内的地形信息;国内生产总值(Gross Domestic Product, GDP)、人口数据来源于云南省统计年鉴;道路、水系基础数据来源于 OpenStreetMap 网站,土壤数据来源于“黑河计划数据管理中心”(http://westdc.westgis.ac.cn)。

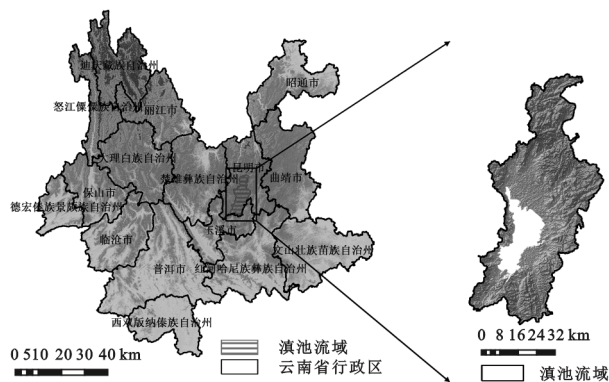


图 1 研究区地势与地理位置

### 1.2 研究方法

1.2.1 基于遥感影像的不透水表面信息提取与时空变化分析 利用 CART(Classification And Regression Tree)分类回归树完成研究区不透水表面的遥感信息提取。CART 分类回归树<sup>[30]</sup>是 Breiman 等于 1984 年提出的决策树构建算法,其基本原理是通过对由测试变量和目标变量构成的训练数据集的循环分析而形成二叉树形式的决策树结构。主要采用土地利用动态度以及土地转移矩阵方法分析研究区不透水表面扩张的时空变化特征,土地利用动态度可以反映单位内土地利用变化的剧烈程度,土地转移矩阵可以描述用地类型间的相互转化<sup>[31-32]</sup>。

1.2.2 基于双约束分区元胞自动机的不透水表面扩张模拟模型构建 本文借鉴柯新利等<sup>[16-17,33]</sup>提出的双约束准则空间聚类方法来划分元胞空间,进而构建不透水表面变化的 CA 模型,目的是使各分区在空间域上的紧凑度和非空间域上的相似度达到一种动态平衡(最优),从而提高模型的模拟精度。双约束空间聚类算法的距离定义如下:

$$D_{ij} = w_p \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} + w_a \sqrt{\sum_{k=1}^m w_k (z_{ik} - z_{jk})^2} \quad (1)$$
$$w_p + w_a = 1$$
$$\sum_{k=1}^m w_k = 1$$

式中: $D_{ij}$ 是点*i*和点*j*之间的广义欧几里得距离; $x_i, y_i, x_j, y_j$ 分别为点*i*和点*j*的空间坐标; $z_{ik}, z_{jk}$ 分别为点*i*和点*j*的第*k*个属性值; $m$ 为点群的属性数目; $w_p, w_a$ 分别为空间距离和非空间属性相似性在广义欧几里得距离中的重要性; $w_k$ 为空间数据集中各个属性的重要性。权重值确定的策略是:设定一组权重值,分析不同权重下的模型模拟精度,当模型精度达到峰值时即是最佳权重值。

另外,选择合适的转换规则挖掘算法也是构建元胞自动机的关键。目前常用的挖掘方法有:马尔可夫



模型、Logistic 回归模型、神经网络、支持向量机、遗传算法等<sup>[34-35]</sup>。神经网络可以较好地对非线性复杂现象进行分析,规避中间计算过程自动获取转换规则,避免主观因素影响,因此本文选用神经网络挖掘元胞的转换规则<sup>[36]</sup>。

1.2.3 基于不透水表面覆盖率与水质阈值关系的城市非点源污染的风险评价 不透水表面覆盖率是指单位面积内不透水表面的面积占比。不透水表面覆盖率计算的尺度不同,其结果差异较大。本文借助 ArcSWAT 模型将滇池流域划分为 100 个子流域,根据子流域划分的结果按照用地类型、土壤类型和坡度占比最终生成 3 383 个水文响应单元。在两种尺度下利用 ArcGIS 计算统计每个子流域以及每个水文响应单元的不透水表面覆盖率。最后根据文献<sup>[27-29]</sup>中不透水表面覆盖率和水质阈值的关系研究成果,结合滇池流域的实际情

况<sup>[8-9]</sup>,按照不透水表面覆盖率小于 8%,介于 8%~23%以及大于 23%的水质与不透水表面覆盖率阈值关系,将流域的城市非点源污染风险划分为低风险、中等风险、高风险 3 个级别进行风险评价。

## 2 结果与分析

### 2.1 土地利用变化特征分析

利用遥感技术获取各期影像的分类结果,分类总体精度均在 80%以上,Kappa 系数均在 0.75 以上,表明分类结果较为可靠。表 1 列出了期初和期末的各类土地利用面积,表 2 为 2000—2016 年土地利用转移矩阵。由表 1 和表 2 知,林地面积增加了 115.56 km<sup>2</sup>,建设用地和城市用地的面积分别增加了 127.4 km<sup>2</sup> 和 159.32 km<sup>2</sup>,耕地面积减少了 403.72 km<sup>2</sup>,其中耕地转为城市用地和建设用地的面积最多,分别为 131 km<sup>2</sup> 和 91 km<sup>2</sup>。

表 1 滇池流域 2000 年、2016 年各类土地类型面积								km <sup>2</sup>
年 份	不透水表面	耕地	水域	草地	林地	裸地	园地	
2000 年	278.28	860.68	353.92	221.2	972.88	2.84	65.28	
2016 年	565.00	456.96	336.92	179.64	1088.44	1.12	127.00	

表 2 滇池流域 2000—2016 年土地利用转移矩阵										km <sup>2</sup>
时间	土地利用	2000 年								
	类型	不透表水面	耕地	水体	草地	林地	裸地	园地	转入	
2016 年	不透水表面	245.3	220.6	10.2	28.9	37.8	0.5	20.3	318.2	
	耕地	1.3	412.4	4.9	6.9	21.7	0.3	6.1	41.2	
	水体	0.7	5.7	328.5	0.9	0.4	0.3	0.0	8.0	
	草地	11.8	58.5	6.1	74.7	21.7	0.8	4.2	103.1	
	林地	15.3	81.2	2.9	103.2	883.6	0.8	5.8	209.0	
	裸地	0.0	0.2	0.2	0.2	0.1	0.3	0.0	0.7	
	园地	1.6	85.3	0.9	5.6	7.9	0.0	28.8	101.4	
	转出	30.6	451.6	25.2	145.6	89.6	2.7	36.3		

### 2.2 不透水表面扩张模拟与预测

对 2.1 节的结果重分类,便得到了不同时期的不透水表面信息。分别以滇池流域 2000 年、2006 年、2009 年和 2013 年四期不透水表面为模拟起始数据,基于分区元胞自动机模型依次模拟 2006 年、2009 年、2013 年、2016 年的土地利用变化,其中应用人工神经网络提取元胞自动机模型的转换规则(神经网络的训练精度在训练集数据的验证下达 80%)。模拟结果用 Kappa 系数和总体精度加以验证,一般认为两种精度大于 0.75 时,表明模拟结果与实际结果的一致性较高,模型具有较好的精度。为了检验分区元胞自动机模型在提升模拟精度上是否有效,以 2016 年为对比,分别构建不分区元胞自动机模型和分区元胞自动机模型模拟了该时期的不透水表面扩张,并进行精度对比分析以检验两种模型的差异(见图 2)。模拟结果的 Kappa 系数和总体精度见表 3,模拟精度

达到预期要求。据此以 2016 年的不透水表面数据预测 2021 年、2031 年的不透水表面覆盖情景,预测结果如图 3 所示,可以看出不透水表面面积依然在增加,但是增长速度有所放缓。

### 2.3 不透水表面扩张下的非点源污染风险评价

为更加精细地反映不透水表面所带来的水环境效应,分别计算和评价了子流域和水文响应单元两种水文空间尺度的非点源污染风险,基于 ArcSWAT 模型计算得到的子流域和水文响应单元结果见图 4。图 5 是对应图 4 中两种水文空间单元下的非点源污染风险评价结果的占比分析,图 6 是两种水文空间尺度下分析结果的空间分布。由图 5 和图 6 可知,研究区非点源污染风险等级良好的区域占比逐年减少,高风险等级区域持续增加。而在空间视角下,两种水文空间尺度下的趋势分析都表明不透水表面带来的水环境污染高风险区域以湖体为中心不断向四周持续

蔓延,并呈现沿南北方向延伸之势,即呈贡区和晋宁区北部。另外,从两种不同水文单元划分结果也能看

出,空间尺度对水污染风险评价的结果具有明显的影响,小尺度下的水环境效应分析往往也更加精准。

表 3 模拟精度分析

年份 精度	2000—2006 年	2006—2009 年	2009—2013 年	2013—2016 年	
				不分区 CA	分区 CA
总体精度	0.83	0.78	0.80	0.68	0.85
Kappa 系数	0.78	0.71	0.74	0.76	0.81

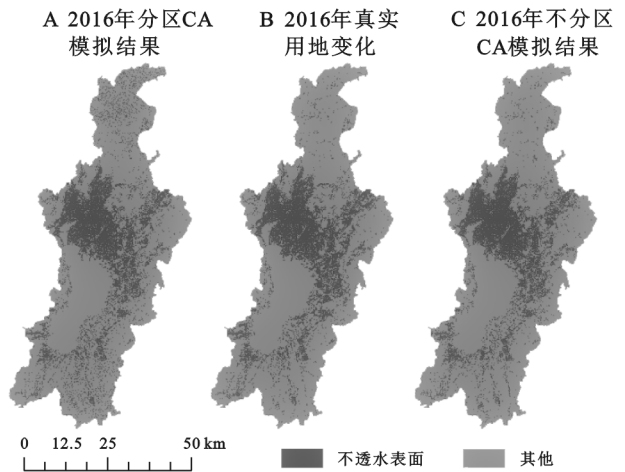


图 2 分区元胞自动机和不分区元胞自动机在用地变化中的模拟结果对比

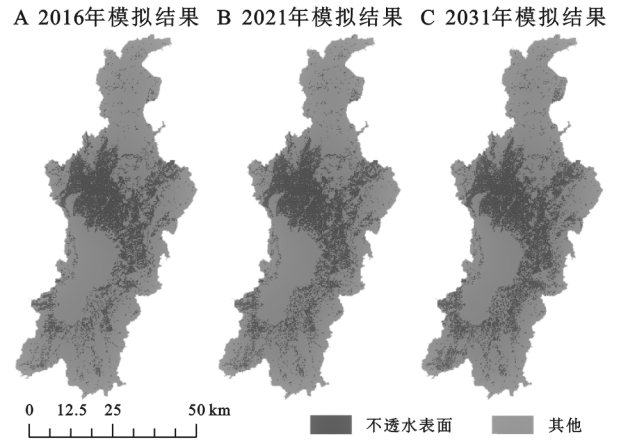


图 3 基于分区元胞自动机的不透水表面扩张趋势模拟

3 讨论

3.1 双约束分区元胞自动机的适用性分析

土地利用变化的空间异质性是普遍存在的一种地理现象,在利用元胞自动机模型模拟其变化时需要顾及这种空间异质性对模型转换规则、尺度选择等关键过程的影响<sup>[37]</sup>。文章采用的双约束元胞空间分区方法较好地解决了土地利用变化空间异质区域识别与划分的问题,并且通过模型精度验证检验了这种方法在模拟滇池流域的土地利用变化时是有效的。双约束分区方法同时顾及了元胞空间的邻接关系与属性相似性,这种思想的好处是尽可能保持了元胞空间与真实区划的相似性,同时又体现了不同元胞空间在

土地利用变化特征上的相似性,这可能是该方法能提高模型精度的机理所在<sup>[16-17,33]</sup>。然而,我们也注意到,该方法在给空间和属性特征的相似性赋权重时存在一定的主观性,如何更科学地确定特征权重或寻找更好的元胞空间区划方法是下一步研究工作的重点,而利用空间异质性模型探测元胞空间的分异性进而作为分区依据可能是一种可行的方法。

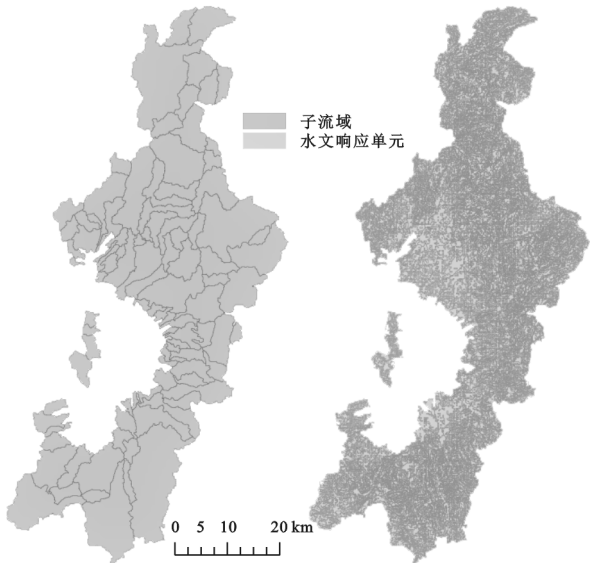


图 4 非点源污染风险评价的空间单元划分

3.2 水文单元尺度及阈值关系对风险评价的影响

水环境效应在不同的尺度上具有不同的表现,如何划分水环境响应单元是评价水环境效应的重要问题<sup>[28-29]</sup>。文章主要划分了两种尺度的水环境响应单元:子流域和水文响应单元。子流域能在较大尺度上识别水文汇集特征,而水文响应单元能在更精细的尺度上识别水文汇集特征,利用这两种尺度有利于揭示流域非点源污染风险的尺度敏感性。另外,诸多研究成果表明,不透水表面覆盖率与水质退化之间存在着较为稳定的阈值关系<sup>[8-9,27-29]</sup>,这为本文评价城市化非点源污染风险提供了直接判别依据。但是,阈值关系可能随着研究区气候、环境、政策以及尺度大小的变化而有所波动,如何更精确地估计尺度效应和数据时效特征的阈值关系是值得深入研究的问题。为此,下一步工作将重点研究不同的水文响应单元划分方法或方案,利用更丰富的水文和水质数据建立机理模型来率定阈值关系,从而提高水环境污染风险宏观评价的合理性。

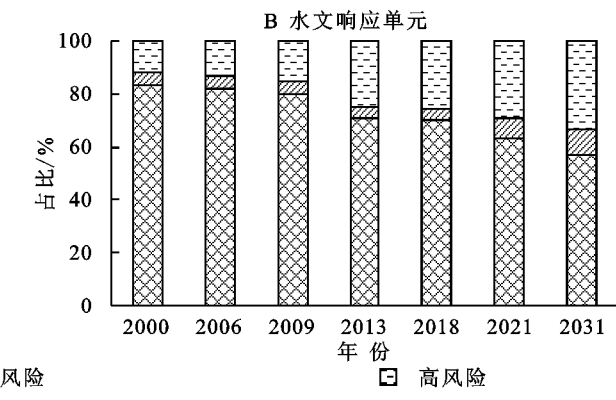
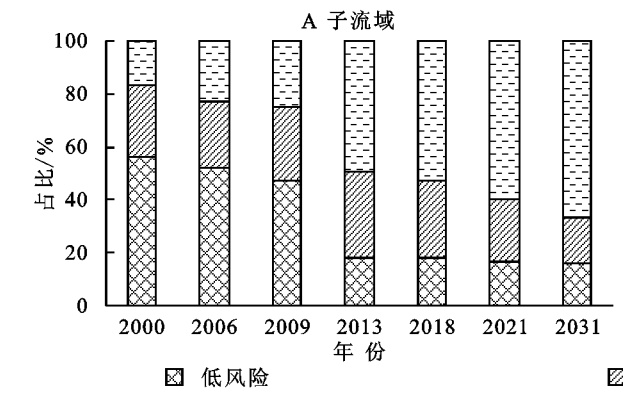


图5 城市非点源污染风险占比

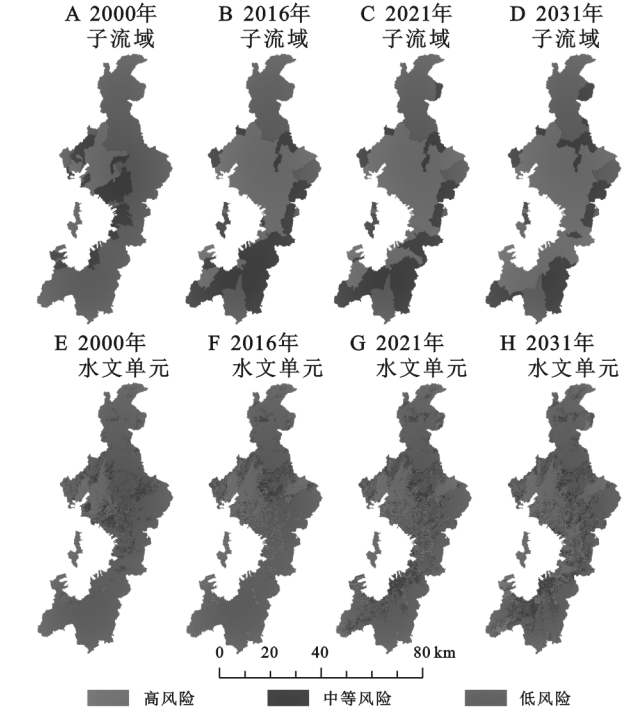


图6 城市非点源污染风险评价及其分布

## 4 结论

为了探索滇池流域城市化及其对非点源污染的影响,本文从不透水表面与水环境阈值关系视角研究了流域城市化扩张及其水环境效应,形成了如下结论:

- (1) 滇池流域的城市扩张具有以滇池湖体为中心向外辐射的显著特征,不透水表面面积逐年上升,在2006—2009时间段增长最快,增长率为33.2%。城市用地大多集中在滇池周边,以滇池的北方向西山区、五华区最为集中。耕地在大规模减少,城市用地增加,主要集中在官渡区、呈贡区、盘龙区。昆明市的西山区、官渡区、呈贡区是用地变化最快的区域。地势高的北部区域的变化相对地势较低的滇池周边区域要慢。
- (2) 基于双约束空间聚类的分区元胞自动机显著提升了用地变化过程模型的模拟精度(Kappa系数最大提高超过了16%,总体精度最大程度超过了26%)。所构建的分区元胞自动机模型的模拟精度均

达到理想效果,可用于模拟研究区未来的不透水表面扩张趋势。

(3) 利用不透水表面与水质阈值关系来宏观评价城市化带来的流域非点源污染风险是可行的。该方法不需要复杂的水环境数据作为基础,并且容易定量实现,一定程度上克服了传统水文水质模型在评估水环境效应时对数据和参数的依赖性。同时发现,子流域和水文响应单元两种尺度下的不透水表面覆盖率都表明滇池流域的非点源污染风险从2000年以来逐年增加,且主要集中在滇池周围的区域。在水文响应单元上做出的风险评价相较于在子流域的评价更加精细和真实。

### 参考文献:

- [1] Schueler T. The importance of imperviousness[J]. Watershed Protection Techniques, 1994, 1(3):100-111. DOI:10.9774/GLEAF.978-1-909493-38-4\_2.
- [2] Weng Q. Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 117(2):34-49. DOI:10.1016/j.rse.2011.02.030.
- [3] 吴桂平.不同尺度转换方式对土地利用格局模拟的影响效应研究[J].水土保持研究, 2010, 17(5):75-79.
- [4] Zhang S, Fan W, Li Y, et al. The influence of changes in land use and landscape patterns on soil erosion in a watershed[J]. Science of the Total Environment, 2017, 574:34-45. DOI:10.1016/j.scitotenv.2016.09.024.
- [5] 毕直磊,张妍,张鑫,等.土地利用和农业管理对丹江流域非点源氮污染的影响[J].水土保持学报, 2020, 34(3):135-141.
- [6] Walsh C. Urban impacts on the ecology of receiving waters: A framework for assessment, conservation and restoration[J]. Hydrobiologia, 2000, 431(2):107-114. DOI:10.1023/A:1004029715627.
- [7] 刘珍环,李猷,彭建.城市不透水表面的水环境效应研究进展[J].地理科学进展, 2011, 30(3):275-281.
- [8] Brabec E, Schulte S, Richards P L. Impervious Surfaces and water quality: A review of current literature and its implications for watershed planning[J]. Journal of Planning



- Literature: Incorporating the Cpl Bibliographies, 2002, 16 (4):499-514. DOI:10.1177/088541202400903563.
- [9] 杨昆,潘梅娥,杨荣,等.滇池流域不透水表面的水环境影响分析及其治理措施[J].环境工程学报,2016,10 (10):5407-5412.
- [10] 李中杰,郑一新,张大为.滇池流域近20年社会经济发展对水环境的影响[J].湖泊科学,2012,24(6):875-882.
- [11] 徐晓梅,吴雪,何佳,等.滇池流域水污染特征(1988—2014年)及防治对策[J].湖泊科学,2016,28(3):476-484.
- [12] 罗毅,赵艺淞,杨昆,等.城镇化过程中滇池流域不透水表面扩张特征及其水环境效应[J].农业工程学报,2018,34(6):224-232.
- [13] 黎夏,刘小平.基于案例推理的元胞自动机及大区域城市演变模拟[J].地理学报,2007,62(10):1097-1109.
- [14] 吴大千,王仁卿,高甦,等.黄河三角洲农业用地动态变化模拟与情景分析[J].农业工程学报,2010,26(4):285-290.
- [15] Liu X, Liang X, Li X, et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects[J]. Landscape & Urban Planning, 2017,168:94-116.
- [16] 柯新利,边馥苓.基于空间数据挖掘的分区异步元胞自动机模型研究[J].中国图象图形学报,2010,15(6):921-930.
- [17] 柯新利,邓祥征,刘成武.基于分区异步元胞自动机模型的耕地利用布局优化:以武汉城市圈为例[J].地理科学进展,2010,29(11):1442-1450.
- [18] 荣洁,曾春芬,王腊春.太湖流域LUCC对水文过程的影响[J].湖泊科学,2014,26(2):305-312.
- [19] Du J, Qian L, Rui H, et al. Assessing the effects of urbanization on annual runoff and flood events using an integrated hydrological modeling system for Qinhua River basin, China[J]. Journal of Hydrology, 2012,464/465:127-139. DOI:10.1016/j.jhydrol.2012.06.057.
- [20] 董欣,杜鹏飞,李志一,等. SWMM 模型在城市不透水区地表径流模拟中的参数识别与验证[J].环境科学,2008,29(6):1459-1501.
- [21] 渠勇建,成向荣,虞木奎,等.基于SWAT模型的衢江流域土地利用变化径流模拟研究[J].水土保持研究,2019,26(1):130-134.
- [22] 秦莉俐,陈云霞,许有鹏.城镇化对径流的长期影响研究[J].南京大学学报:自然科学版,2005,41(3):279-285.
- [23] Barco J, Wong K, Stenstrom M. Automatic Calibration of the U. S. EPA SWMM Model for a Large Urban Catchment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008,134 (4):466-474. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:4(466).
- [24] Baker T, Miller S. Using the Soil and Water Assessment Tool(SWAT)to assess land use impact on water resources in an East African watershed[J]. Journal of Hydrology, 2013,486(8):100-111. DOI:10.1016/j.jhydrol.2013.01.041.
- [25] Engel B, Ahiablame L, Leroy J. Modeling the impacts of urbanization on lake water level using L-THIA[J]. Urban Climate, 2015,14(4):578-585. DOI:10.1016/j.uclim.2015.10.001.
- [26] 王龙,黄跃飞,王光谦.城市非点源污染模型研究进展[J].环境科学,2010,31(10):2532-2540.
- [27] 刘珍环,李正国,杨鹏,等.城市景观组分影响水质退化的阈值研究[J].生态学报,2013,33(2):586-594.
- [28] Conway T M. Impervious surface as an indicator of pH and specific conductance in the urbanizing coastal zone of New Jersey, USA[J]. Journal of Environmental Management, 2007,85(2):308-316.
- [29] Wang A, Zhang S, Peng Y, et al. Impact of rapid urbanization on the threshold effect in the relationship between impervious surfaces and water quality in shanghai, China[J]. Environmental Pollution, 2020,267:115569. doi:10.1016/j.envpol.2020.115569.
- [30] 马宇龙,林志奎.基于面向对象和CART决策树方法的遥感影像湿地变化检测研究:以龙祥岛地区为例[J].福建师范大学学报:自然科学版,2017,33(6):69-80.
- [31] 乔伟峰,盛业华,方斌,等.基于转移矩阵的高度城市化区域土地利用演变信息挖掘:以江苏省苏州市为例[J].地理研究,2013,32(8):1497-1507.
- [32] 何丹,周璟,高伟,等.基于CA-Markov模型的滇池流域土地利用变化动态模拟研究[J].北京大学学报:自然科学版,2014,50(6):1095-1105.
- [33] Ke X, Qi L, Zeng C. A partitioned and asynchronous cellular automata model for urban growth simulation[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2016,30(4):637-659. DOI:10.1080/13658816.2015.1084510.
- [34] Rienow A, Goetzke R. Supporting SLEUTH-Enhancing a cellular automaton with support vector machines for urban growth modeling[J]. Computers Environment & Urban Systems, 2015,49(1):66-81. DOI:10.1016/j.compenvurbsys.2014.05.001.
- [35] Shu B, Baker M, Zhang H, et al. Modeling urban expansion by using variable weights logistic cellular automata: A case study of Nanjing, China[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2017,31(7):1314-1333. DOI:10.1080/13658816.2017.1283505.
- [36] 黎夏,叶嘉安.基于神经网络的元胞自动机及模拟复杂土地利用系统[J].地理研究,2005,24(1):19-27.
- [37] Li X, Liu Y, Liu X, et al. Knowledge transfer and adaptation for land-use simulation with a logistic cellular automaton[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2013,27(10):1829-1848. doi:10.1080/13658816.2013.825264.