

西安市主城区景观格局演变对地表径流的影响

吴江华¹, 刘康¹, 张红娟², 李颖辉¹

(1.西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710127;

2.河南大学 黄河文明与可持续发展研究中心暨黄河文明省部共建协同创新中心, 河南 开封 475004)

摘要: [目的] 探究景观格局演变和地表径流变化的时空相关性, 为有效缓解城市内涝, 保障城市生态安全提供理论支撑。[方法] 以 2000—2019 年遥感影像为数据集, 提取西安市主城区景观格局空间分布图, 结合实际土地利用数据进行修正。利用 SCS 模型、景观格局指数、ArcGIS 和皮尔逊相关性分析方法, 研究西安市主城区景观格局动态变化与地表径流变化间的关系。[结果] ①2000—2019 年研究区景观格局呈现出高连通高聚集, 斑块形状规则化, 均质稳定化, 景观蔓延度下降等的发展趋势。同期, 研究区地表径流深度逐年增加, 但径流深度增加量随时间动态变化呈下降趋势, 其中 2000—2005, 2005—2010, 2010—2015, 2015—2019 年分别增加了 4.99, 4.95, 3.55 和 3.33 mm, 说明景观格局对地表径流量的滞留作用逐渐增大。②景观格局指数变化率与地表径流量年增长率呈显著相关性。其中建设用地等人工景观指数变化率和地表径流量年增长率呈显著正相关, 相反绿地、耕地、水域等自然景观指数变化率与地表径流量年增长率呈负相关关系。③借助城市生态廊道及生态节点构建内涝防治生态系统, 并对城市不透水面高度集中的地区进行拆分, 增设城市绿色基础设施, 构建源头减排的内涝防治景观格局。[结论] 景观格局演变对地表径流变化具有显著影响, 景观格局优化能有效促进城市良性水循环, 减缓内涝的发生。

关键词: 景观格局; 地表径流; SCS 模型; 城市内涝; 西安市主城区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)04-0083-10

中图分类号: P343.9, TU984

文献参数: 吴江华, 刘康, 张红娟, 等. 西安市主城区景观格局演变对地表径流的影响[J]. 水土保持通报, 2021, 41(4): 83-92. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.04.012; Wu Jianghua, Liu Kang, Zhang Hongjuan, et al. Impacts landscape pattern changes on surface runoff in the main urban area of Xi'an City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(4): 83-92.

Impacts of Landscape Pattern Changes on Surface Runoff in Main Urban Area of Xi'an City

Wu Jianghua¹, Liu Kang¹, Zhang Hongjuan², Li Yinghui¹

(1.College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710127, China;

2.Key Research Institute of Yellow River Civilization and Sustainable Development & Yellow River Civilization by Provincial and Ministerial Co-construction of Collaborative Innovation Center, He'nan University, Kaifeng, He'nan 475004, China)

Abstract: [Objective] The spatial correlation between the evolution of landscape pattern and surface runoff was explored, in order to propose a landscape pattern optimization strategy that could effectively alleviate urban waterlogging and provide suggestions for urban ecological safety. [Methods] Based on the remote sensing data sets from 2000 to 2019, the spatial distribution map of landscape patterns in the main urban area of Xi'an City was extracted, and validated with actual land use data. The methods of SCS model, landscape pattern index, ArcGIS and Pearson correlation analysis were employed to analyze the landscape pattern changes and its impacts on surface runoff. [Results] ① From 2000 to 2019, the landscape pattern showed a developing trend of high connectivity and high aggregation, regular patch shape, homogenization and stabilization, and the patch spread decreased. At the same period, the surface runoff depth increased year by year, however,

收稿日期: 2021-04-12

修回日期: 2021-04-28

资助项目: 陕西省秦岭生态环境保护科研项目“陕西省秦岭生态环境保护总体规划”(208011900044)

第一作者: 吴江华(1997—), 女(汉族), 陕西省宝鸡市人, 硕士研究生, 研究方向为生态规划与城市景观。Email: wujh12120407@163.com。

通讯作者: 刘康(1963—), 男(汉族), 陕西省西安市人, 教授, 博士生导师, 主要从事区域生态评价与生态规划、生态保护方面的研究。Email: liuk63@126.com。

the increase of runoff depth showed a downward trend with the time. In 2000—2005, 2005—2010, 2010—2015, 2015—2019, the increment of runoff depth was 4.99, 4.95, 3.55, and 3.33 mm respectively, indicating that retention effect of landscape pattern on surface runoff increased gradually. ② The correlation between the change rate of landscape pattern index and the annual growth rate of surface runoff was significant, and the artificial landscape index such as urban construction land had a significant positive correlation with the annual growth rate of surface runoff. On the contrary, there was a negative correlation of the annual growth rate of surface runoff and the change rate of natural landscape index such as cultivated land and water area. ③ With the help of urban ecological corridors and ecological nodes, the waterlogging prevention and control ecosystem was constructed, and the areas with high concentration of urban impervious surface were split, the urban green infrastructure was added, and the waterlogging prevention and control landscape pattern of source emission reduction was constructed. [Conclusion] Landscape pattern changes had a significant impact on the change of surface runoff, and the optimization of landscape pattern can effectively promote the urban benign water cycle and slow down the occurrence of waterlogging.

Keywords: landscape pattern; surface runoff; SCS model; urban waterlogging; main urban area of Xi'an City

近年来,受极端气候、气象以及人类活动等因素的影响,城市内涝问题频发,“城市看海”不仅出现在降雨充沛地区,我国干旱少雨地区也逐渐进入“逢雨必涝”的新常态阶段^[1]。城市内涝,指持续性的强降雨导致城市地表径流增加,水流无法快速排出而造成城市内严重积水现象^[2]。与此同时,快速城市化改变着城市的地表形态和景观格局^[3-4],使城市呈现出“高度破碎化”的景观格局特征^[5]。城市景观格局是以人工景观及其周围自然生态系统相互作用形成的空间布局模式^[6-8]。景观格局演变是城市地表径流量变化的主要因素之一^[9],不同景观格局所对应的地表覆盖径流系数不同,所产生的地表径流量也不同。已有研究^[10]表明,景观格局通过影响地表径流的产汇流过程作用于城市内涝发生的频率和强度。城市内涝已然成为阻碍城市可持续发展与城市生态安全的现实障碍与治理难题。探究景观格局动态变化和径流量变化的关系是消减源头径流缓解城市内涝的关键,同时借助景观节点、廊道、斑块和基底形成点、线、面相组合的景观布局模式,依托各类景观的入渗、滞留、吸收、蓄存等功能,能够有效促进城市良性水循环,减缓内涝的发生^[11-13]。目前,国内外学者更多关注土地利用变化对地表水文循环产生的影响。Calder^[14]从区域尺度上探究土地利用变化和城市水循环的关系,研究发现土地利用变化是驱动全球环境变化的重要原因同时影响着城市地表水循环过程。Corbett等^[15]研究城市不透水面与地表径流量存在显著正相关关系。Fohrer等^[16]以阿勒河为研究对象,研究表明土地利用变化是该流域地表径流发生变化的重要影响因素之一。葛怡等^[17]重建上海市区近

50 a 土地利用结构变化特征,得出土地利用变化是城市地表径流量增大的驱动因素。王振海等^[18]总结土地利用变化对径流量影响的研究方法及研究进展,分析探讨未来的研究趋势。此外,还有学者就景观格局优化降低地表径流展开研究。俞孔坚等^[19]以北京雁栖湖为例,对生态发展示范区的景观格局、基础设施等进行布局优化,构建海绵系统实现研究区的雨洪管理和生态防洪。徐霞等^[20]以昆山阳澄湖为例,从水生态安全格局、水系景观生态网络等方面提出海绵城市建设途径,实现区域水生态系统的良性循环。目前,有关景观格局对地表径流的影响已被较多学者研究证实,且较多关注流域范围,而对城市区域景观格局演变与地表径流的关系研究较少。同时有关景观格局演变所引起地表径流量增加,导致城市局部地区积涝内涝的研究需要进一步探讨。因此,本文基于2000—2019年影像数据,提取出西安市主城区景观格局空间分布图,利用SCS模型、景观格局指数、GIS和皮尔逊相关性分析方法探究景观格局演变和地表径流的关系并提出景观格局优化策略,旨在降低该区域地表径流量,有效消减城市内涝。

1 研究区概况

西安市位于渭河流域中部关中盆地,东经 $107^{\circ}4'$ — $109^{\circ}49'$ 和北纬 $33^{\circ}42'$ — $34^{\circ}45'$ 之间。全市属暖温带半湿润季风气候,年平均气温 $13.3\sim 13.7^{\circ}\text{C}$,年平均降水量介于 $522.4\sim 719.5\text{ mm}$,降水量分布不均,且多集中在汛期6—9月。本文以西安市主城区为研究区域(图1),包括新城区、碑林区、莲湖区、灞桥区、未央区以及雁塔区,面积约 817.18 km^2 。

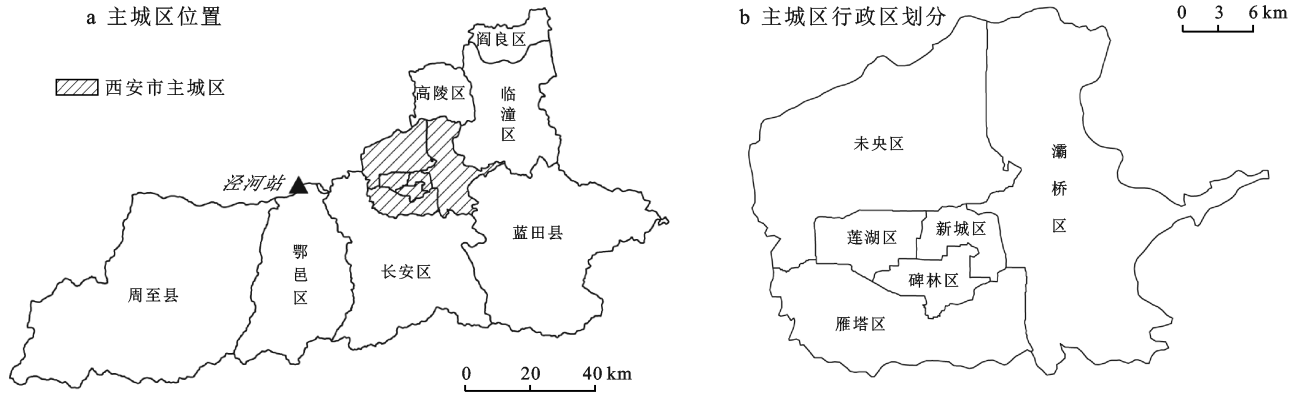


图 1 西安市主城区区域位置及行政区划分

2 研究数据及方法

2.1 数据来源

本研究采用中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/>) 提供的 Landsat TM 数据和土地利用数据 (30 m × 30 m), 共包括 2000, 2005, 2010, 2015 和 2019 年 5 期影像和 1 : 10 万土地利用数据。依照研究内容和实地探索, 对影像进行监督分类, 将研究区划分为耕地、建设用地、绿地、湿地、水域、未利用土地共 6 大类型, 考虑应用模型中湿地和水域 CN 值的差异, 故分属两类。研究区湿地特指陆地和水域的交汇处, 水位接近或处于地表面, 或有浅层积水, 且处于自然状态的湿地。结合实际土地利用数据对研究区用地划分结果进行修正。降水量数据来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>), 共获取 2000—2019 年的年、月降水量数据, 考虑西北地区降水基数不大, 降水量集中在汛期, 且城市内涝多出现在汛期, 因此本文以西安市主城区汛期近 10 a 平均降雨量 332.56 mm 为最大输出 (为便于计算, 计为 330 mm), 分析景观格局演变对地表径流的影响。土壤数据来源于陕西省第二次土壤普查数据集, 并根据 SCS 模型土壤分类标准进行重新归类。

2.2 研究方法

2.2.1 SCS 产流模型方法 SCS 模型是由原美国农业部水土保持局 (USDA-SCS) 研制的小流域设计洪水模型^[21-22]。该模型基于研究区前期土壤、降水量、土地利用以及暴雨过程对缺乏气象、水文等资料的区域进行模拟。SCS 模型能较好的模拟下垫面状况与地表径流的关系, 与本文需要探究的景观格局与地表径流相关性研究提供较好的量化依据。

SCS 模型运行基本原理如下:

$$\begin{cases} Q = \frac{(P-0.2S)^2}{P+0.8S} & (P \geq 0.2S) \\ Q = 0 & (P < 0.2S) \end{cases} \quad (1)$$

式中: Q 为径流深 (mm); P 为一次性降水总量 (mm); S 为潜在最大滞水量 (mm)。由于 S 变化范围较大, 通常将 S 取 0~100 之间理论值, 并引入无量纲参数 CN, 使二者实际应用中更接近线性变化^[22]。

S 与 CN 值的关系表达为:

$$S = 25\ 400 / CN - 254 \quad (2)$$

CN 由土壤属性、覆盖类型以及地表水文特征决定, 同时取决于前期的土壤湿润状况。在 SCS 模型中, 根据前 5 d 的总雨量将土壤湿润程度划分为干 (AMC I)、正常 (AMC II) 以及湿润 (AMC III) 3 种级别。西安市主城区土壤类型及分类情况详见表 1。

表 1 西安市主城区土壤类型及分类情况

土壤分类	土壤质地	土壤类别	最小下渗率 / (mm · h ⁻¹)
A	砂土、厚层黄土、砂质壤土	砂砾石褐土、瘠瘠土、油土、斑斑土、青石泥石灰性褐土、立茬土、红瘠土、灰瘠土、中性粗骨土	7.26~11.43
B	壤土、粉砂质黏壤土	新积土、淹育性水稻土、黄壤土、灰黄壤土	3.81~7.26
C	黏壤土、砂砾质壤土	潜育性水稻土、潮土、脱潮土	1.27~3.81
D	砂黏土、黏土及人工硬质地面	湿潮土、盐化潮土、城市建设用地	0~1.27

注: 引用 National Engineering Handbook Section 4 并结合《陕西省第二次土壤普查数据集》划分。

假设西安市主城区前期土壤湿润程度为正常状态(AMC II),结合 SCS 模型提供的 C_{CN} 值与土壤分类、土地利用分类,确定西安市主城区在 AMCII 状态下 C_{CN} 矩阵(见表 2)。

2.2.2 景观格局指数选取 借助景观分析软件 Fragstats 4.2 以及景观格局指数的表征意义和相关研究总结,选取斑块类型水平和景观类型水平的 8 小类景观指数对研究区 2000—2019 年景观格局信息进行表征(详见表 3)。斑块类型水平指数包括斑块密度(PD)、斑块聚集度(COHESION)、斑块连接度(CONNECT)、最大斑块面积比例(LPI)、景观破碎度指数(DIVISION)共 5 项指标;景观类型水平指数选取 3 项指标,分别为

景观形状指数(LSI)、蔓延度(CONTAG)、香农多样性指数(SHDI)。

表 2 西安市主城区 SCS 模型 C_{CN} 值表(AMC II)

用地分类	CN 的土壤水文分类			
	A	B	C	D
耕地	67	78	85	89
建设用地	81	87	91	93
绿地	33	56	70	77
湿地	32	58	70	78
水域	98	98	98	98
未利用土地	72	82	88	99

表 3 研究区所选景观格局指数简介

景观格局指数选取	景观指数含义
斑块密度 PD	$PD > 0$, 单位面积上某种类型斑块的个数, 能够反映斑块的密集程度。
斑块聚集度 COHESION	反映绿地斑块的聚集程度, 值越大, 斑块分布越集中。
斑块连接度 CONNECT	反映绿地斑块的空间连接度, 值越大, 绿地板块间的空间连接度就越高
最大斑块面积比例 LPI	$0 < LPI \leq 100$, 等于某一类型的最大斑块占总体面积的比例, 能够反映斑块的集中程度和景观的优势类型。
景观破碎度指数 DIVISION	研究范围内景观类型斑块之间分布的分离度, 其值越大, 景观空间越破碎。
斑块比例 PLAND/%	$0 < LAND \leq 100$, 等于某一斑块类型的总面积占景观整体面积的百分比。其值越大, 说明此种斑块覆盖丰富。
景观形状指数 LSI	研究范围内整个景观的斑块形状与面积相等的正方形之间的偏离程度, 其值越高, 景观斑块形状越复杂。
蔓延度 CONTAG	$0 < CONTAG \leq 100$, 描述景观中不同斑块类型的团聚程度和蔓延趋势。
香农多样性指数 SHDI	$SHDI \geq 0$, 是一种基于信息理论的测量指数, 能反映景观的多样性。

2.2.3 不同景观格局与地表径流的相关性分析 借用 SPSS 26.0 软件对研究区不同时期的景观格局指数和地表径流量展开皮尔逊相关性分析, 通过相关系数揭示景观格局与地表径流的关系, 并在此基础上提出景观格局的优化策略, 为消减地表径流、缓解城市内涝提供决策。

3 研究结果及优化策略

3.1 研究区土地利用及景观格局演变分析

借助 ArcGIS 软件对西安市主城区 2000, 2005, 2010, 2015 和 2019 年数据进行叠加分析得到 4 期不同时期的土地利用转移矩阵, 并结合软件 Fragstats 4.2 计算所得的景观格局指数, 以更好的分析不同时期土地利用变化以及所对应的景观格局演变对地表径流的影响, 为优化景观格局减缓地表径流量提供参考。

通过分析不同时段土地利用转移矩阵(详见表 4), 可得到 2000—2019 年其土地利用变化规律如下: ①2000—2019 年, 耕地占有面积逐年减少, 且 2000—2005 年减幅最大, 耕地面积减少 47.25 km^2 。建设用地面积呈显著增长趋势, 2005—2010 年增幅最大, 建

设用地面积增加 62.19 km^2 , 其占有面积由 42.0% 增加至 49.6% , 建设用地面积已经接近主城区总面积的 $1/2$ 。绿地面积呈先减少后增加的趋势, 2000—2015 年, 绿地面积逐年减少, 2015—2019 年, 城市绿地面积增加了 8.83 km^2 , 增加的绿地集中分布于西安浐灞国家湿地公园以及灞河周围。2000—2019 年湿地面积呈增长趋势, 占有面积由原来的 2.6% 增长至 4.0% 。②根据西安市综合景观分布特征可得(图 2), 2000—2019 年研究区综合景观指数中斑块密度、斑块聚集度以及最大斑块面积比例呈显著增加态势, 结合土地利用转移矩阵, 主要原因是同期研究区中建设用地面积显著增加, 不透水面的增加导致地表下渗性能降低, 是地表径流产生的重要原因; 而景观破碎度和景观形状指数显著减少, 研究区内不同斑块类型的团聚程度和蔓延趋势降低、景观斑块形状复杂性下降, 表明景观格局朝单一化方向发展, 滞水能力随之降低。各景观类型的变化趋势中(图 3), 除绿地斑块密度减少外其余各类型斑块密度呈明显增加态势, 建设用地和耕地斑块密度明显增加, 2010—2015 年建设用地斑块密度增幅较大, 2015—2019 年耕地斑块密度呈显著增长; 2010—2019 年耕地的最大的斑块面积比例呈明显

减少趋势,表明耕地的景观格局破碎化程度加剧;景观形状指数反映整个景观的斑块形状与面积相等的正方形之间的偏离程度,研究区内仅耕地、绿地及湿地景观形状指数呈缓慢增加趋势,其余用地类型的景观格局指数均呈减小趋势,表明研究区内各景观斑块形状复杂性降低;2000—2010年水域连接度指数呈直线下降,2010—2019年趋于平稳,耕地斑块连接度呈增加后减少,斑块破碎化明显,而建设用地斑块连接度指数整体呈增长趋势,2005—2010年增长明显,主要是同期城市建设用地大范围扩张,面积由 343.26 km² 增

加至 405.45 km²;建设用地、湿地即水域的斑块聚集度指数呈增加趋势,其中建设用地斑块聚集度增幅最大,而耕地和绿地的斑块聚集度呈减少趋势,综合而言研究区景观的聚集程度不断升高;建设用地景观破碎度指数呈明显减少趋势,表明研究区建设用地破碎化程度降低,连接性较好,其余用地类型景观破碎度指数呈明显的先减小后增加的趋势,增幅较大。③结合景观指数变化特征可得,研究区景观格局呈现连通性增加、聚集度升高、斑块形状规则化、均质稳定化以及景观蔓延度下降等的发展趋势。

表4 研究区 2000—2019年土地利用转移矩阵

km²

项目	2005年							合计
	土地利用类型	耕地	建设用地	绿地	湿地	水域	未利用土地	
2000年	耕地	328.006 6	0.246 3	0.469 5	0.189 8	0.014 4	—	328.926 7 ^a
	建设用地	40.246 3	291.213 5	11.674 3	0.116 3	0.013 8	—	343.264 3 ^a
	绿地	6.251 1	0.084 9	99.998 4	0.062 0	0.217 8	—	106.614 1 ^a
	湿地	0.839 9	0.019 9	2.076 0	19.548 5	0.658 9	—	23.143 2 ^a
	水域	0.831 3	0.138 1	1.072 7	0.178 3	12.941 5	—	15.161 8 ^a
	未利用土地	—	—	—	—	—	0.072 2	0.072 2 ^a
	合计	376.175 2	291.702 7	115.291 0	20.094 9	13.846 3	0.072 2	
2005年	2010年							
	耕地	264.393 4	4.606 1	13.273 6	5.668 8	2.223 1	—	290.165 1 ^b
	建设用地	57.683 4	337.949 9	9.434 3	0.373 1	0.011 9	—	405.452 5 ^b
	绿地	4.005 2	0.318 6	82.294 7	3.387 4	0.441 6	—	90.447 5 ^b
	湿地	2.730 1	0.389 7	1.479 4	13.096 0	10.195 2	—	27.890 4 ^b
	水域	0.114 5	—	0.132 1	0.618 0	2.289 8	—	3.154 4 ^b
	未利用土地	—	—	—	—	—	0.072 2	0.072 2 ^b
合计	328.926 7	343.264 3	106.614 1	23.143 2	15.161 8	0.072 2		
2010年	2015年							
	耕地	250.028 2	0.000 6	0.001 3	0.453 2	0.002 7	—	250.486 0 ^c
	建设用地	38.855 7	405.194 3	4.401 9	0.175 7	0.020 6	—	448.648 2 ^c
	绿地	0.320 4	0.000 0	85.456 8	0.156 4	0.015 5	—	85.949 1 ^c
	湿地	0.888 4	0.257 6	0.492 0	26.988 4	0.067 9	—	28.694 3 ^c
	水域	0.072 4	0.000 0	0.095 5	0.116 8	3.047 6	—	3.332 3 ^c
	未利用土地	—	—	—	—	—	0.072 2	0.072 2 ^c
合计	290.165 1	405.452 5	90.447 5	27.890 4	3.154 4	0.072 2		
2015年	2019年							
	耕地	155.854 6	0.072 1	72.705 0	0.155 4	0.096 7	0.003 6	228.887 4 ^d
	建设用地	33.989 1	420.450 2	1.723 2	0.244 5	0.523 6	0.068 6	456.999 3 ^d
	绿地	58.533 0	25.951 1	9.130 0	0.466 0	0.703 2	—	94.783 2 ^d
	湿地	0.759 3	1.612 5	0.920 0	27.670 6	1.751 7	—	32.714 2 ^d
	水域	1.350 0	0.562 3	1.470 8	0.157 9	0.257 1	—	3.798 1 ^d
	未利用土地	—	—	—	—	—	—	0.000 0 ^d
合计	250.486 0	448.648 2	85.949 1	28.694 3	3.332 3	0.072 2		

注:a,b,c,d分别代表2005,2010,2015和2019年数据。

3.2 西安市主城区地表径流深度模拟结果及参数验证

借用地理信息系统软件和已得出的西安市主城区 SCS 模型 C_{CN} 值表,以西安市主城区汛期近 10 a 平均降雨量 332.56 mm 为最大输出值进行运算,分别得到

2000, 2005, 2010, 2015 和 2019 年地表径流深度分别为 219.36, 224.35, 229.30, 232.85 和 236.18 mm, 并依此生成 2000—2005, 2005—2010, 2010—2015, 2015—2019 年 4 个时期地表径流深度变化图(图 4)。由图 4 可以看出, 西安市主城区地表径流深度逐渐增大, 随着城市建设用地等城市不透水面积的增加, 地表径流深度呈现明显的增长趋势。景观格局变化对地表径流产

生不同程度的影响, 且存在明显的空间异质性。结合土地利用及景观格局演变数据可得, 2010—2015 年和 2015—2019 年, 耕地向建设用地转化率分别为 13.4% 和 13.5%, 绿地向建设用地转化率分别为 4.9% 和 2.0%, 湿地向建设用地转化率为 0.6% 和 0.8%, 地表径流深度增加分别为 3.55 mm 和 3.33 mm, 表明绿地向建设用地转化对地表径流量的影响更大。

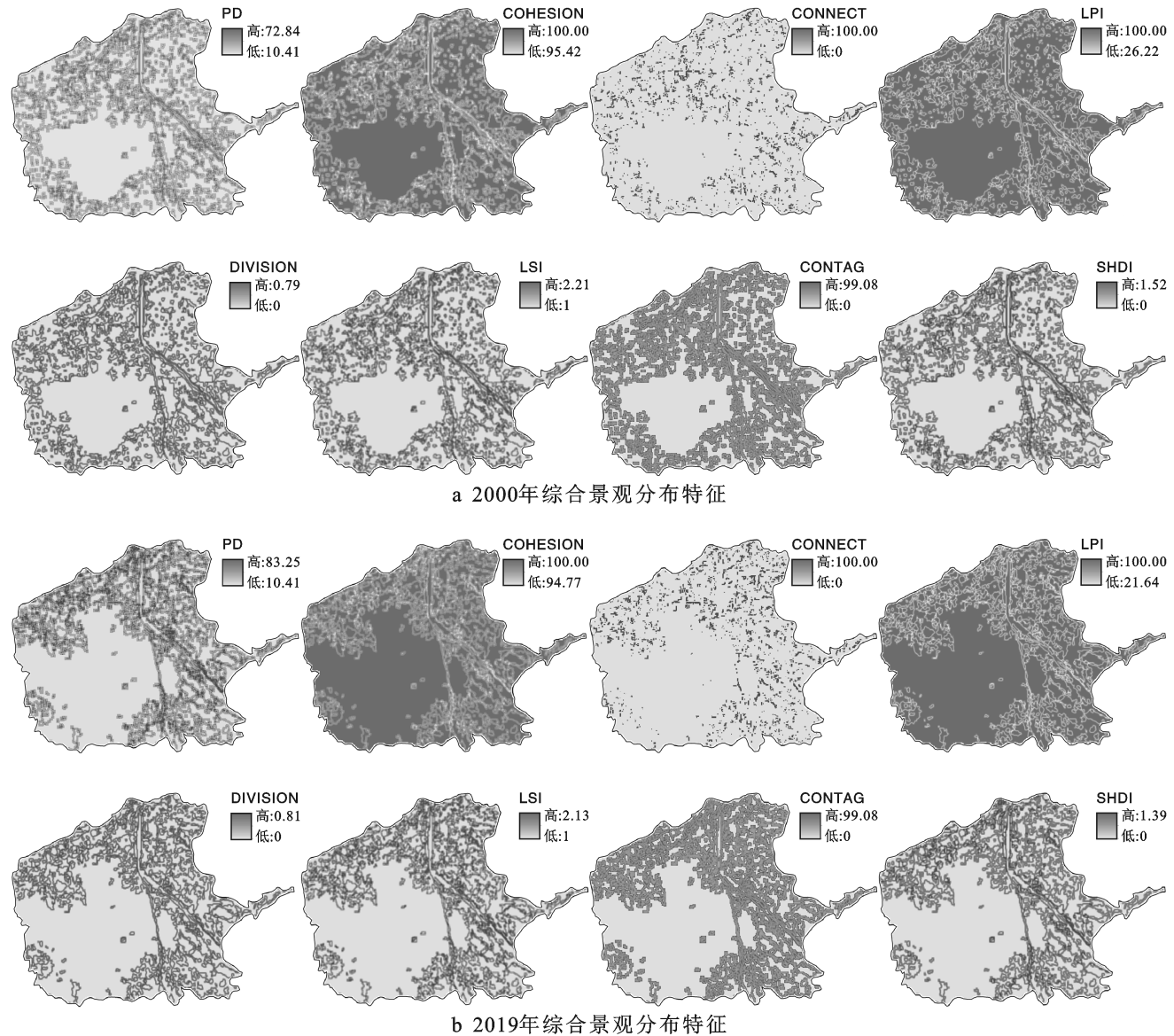


图 2 西安市主城区 2000 和 2019 年综合景观变化特征(图中各指标符号的含义见表 3)

为确保 SCS 模型模拟地表径流结果的有效性, 选取研究区内唯一具有长期水文资源的河流流域对模型参数进行验证^[23]。应用 SCS 模型模拟降雨径流时, 相对误差小于 15% 时合格, 反之不合格^[24]。该河流域经西安市灞桥区、未央区, 在未央、灞桥区之间汇入渭河, 为西安灞河流域。流域现有马渡王等水文站进行径流监测, 马渡王水文站以上集水面积达

1 601 km²。模型参数验证基于 2001—2009 年灞河实测径流量与获取的同期土壤分类图、土地利用图、年降水量等数据输入模型模拟的径流量进行比较(图 5), 并选用线性回归系数 R^2 和纳西效率系数 NS 评价模型的适用性。经计算得, 模拟值和实测值的 R^2 为 0.926, NS 为 0.836, 表明模型在研究区具有较好的适用性。

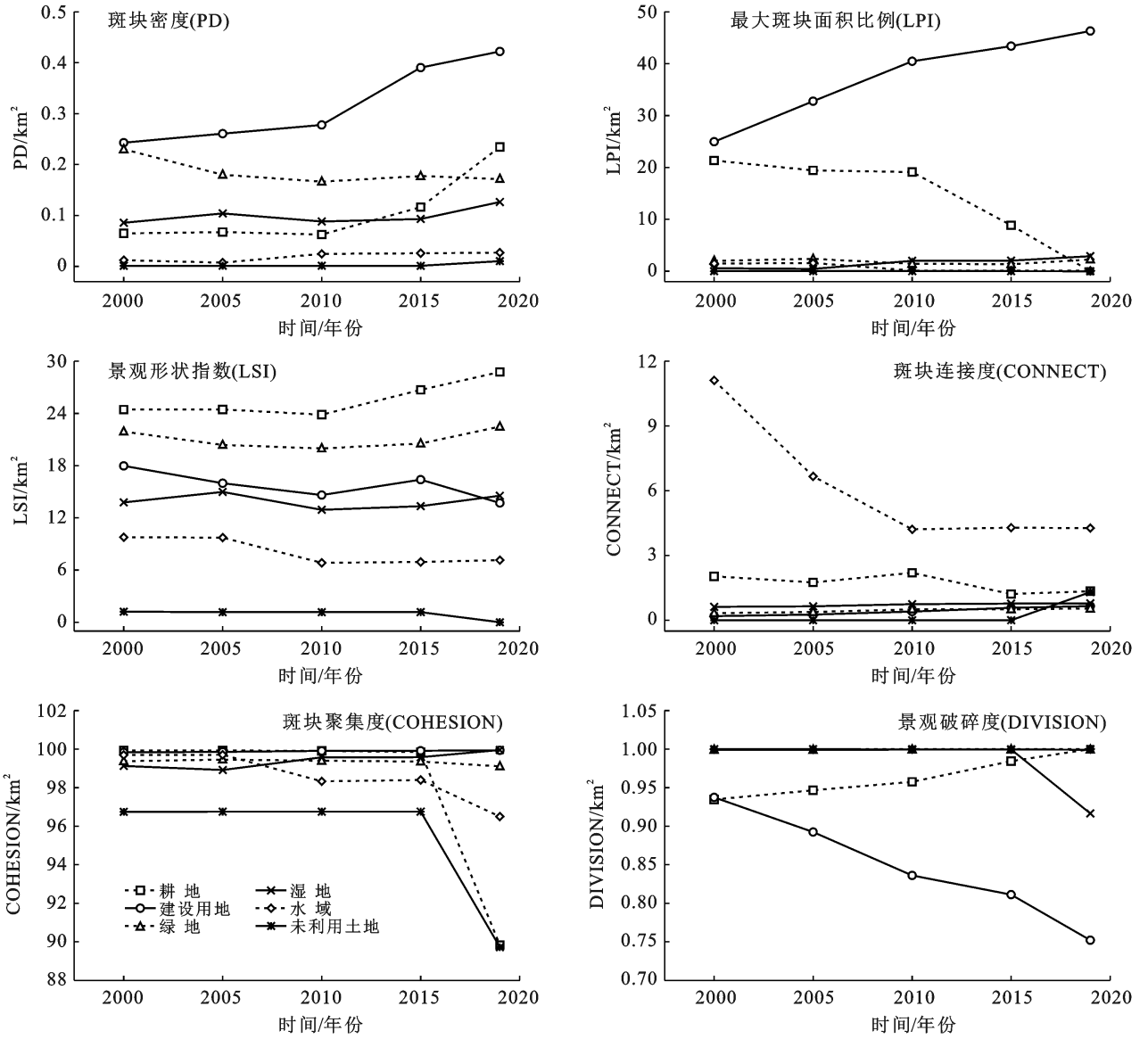


图3 研究区各景观类型格局变化趋势

3.3 景观格局与地表径流相关性分析

借助软件 SPSS 26.0, 将研究区地表径流量与综合景观指数及各景观类型指数进行双变量相关性分析, 采用皮尔逊相关分析以及双侧检验, 得到表 5—6。结合土地利用转移矩阵分析可得, 综合景观指数中最大斑块面积比例和斑块连接度指数与地表径流呈显著正相关, 即人工景观斑块越大、越集中, 容易产生地表径流; 而景观形状指数与地表径流呈现显著负相关, 即自然景观斑块形状越复杂, 地表径流产生量降低。各用地类型的景观指数中建设用地的斑块密度与地表径流量呈显著正相关, 且相关系数极显著 ($p < 0.01$), 即建设用地斑块面积对地表径流量有着极显著的影响。反之, 绿地斑块密度与地表径流量呈负相关, 建设用地斑块面积增大、绿地斑块密度降低容易汇集地表径流(图 6)。此外, 城市内涝多发生在

城市建设用地高度集中区绿地景观分配不均匀地段, 如城市立交桥下、地下过街通道等区域。耕地和水域最大斑块面积所占比例与地表径流量呈显著负相关; 而建设用地和湿地用地类型的最大斑块面积所占比例与地表径流量呈显著正相关, 表明建设用地和湿地的斑块集中程度对地表径流量的汇集具有直接正向影响, 也是城市积水产生内涝的高危地区。连接度指数中建设用地和湿地用地类型与地表径流量呈显著正相关, 建设用地与地表径流相关性极强 ($p < 0.01$), 即建设用地连接度对径流变化敏感性极强; 反之水域的连接度指数与地表径流量呈显著负相关。建设用地和湿地的斑块聚集度指数与地表径流呈显著正相关, 结合最大斑块面积所占比例指数以及斑块连接度指数可得, 建设用地和湿地斑块面积越大、越集中, 容易产生地表径流, 而水域与之相反。景观破碎度表明研

究范围内景观类型斑块之间分布的分离度,其值增大,景观空间越破碎。其中耕地的景观破碎度指数与地表径流呈显著正相关,表明耕地用地类型斑块破碎化程度增高,容易产生地表径流,耕地破碎化程度越

低,连通性好,有利于涵养水分和农业发展。绿地破碎度指数与地表径流量呈正相关,表明绿地破碎度高容易汇集地表径流,从而增加城市局部地区产生内涝的风险。

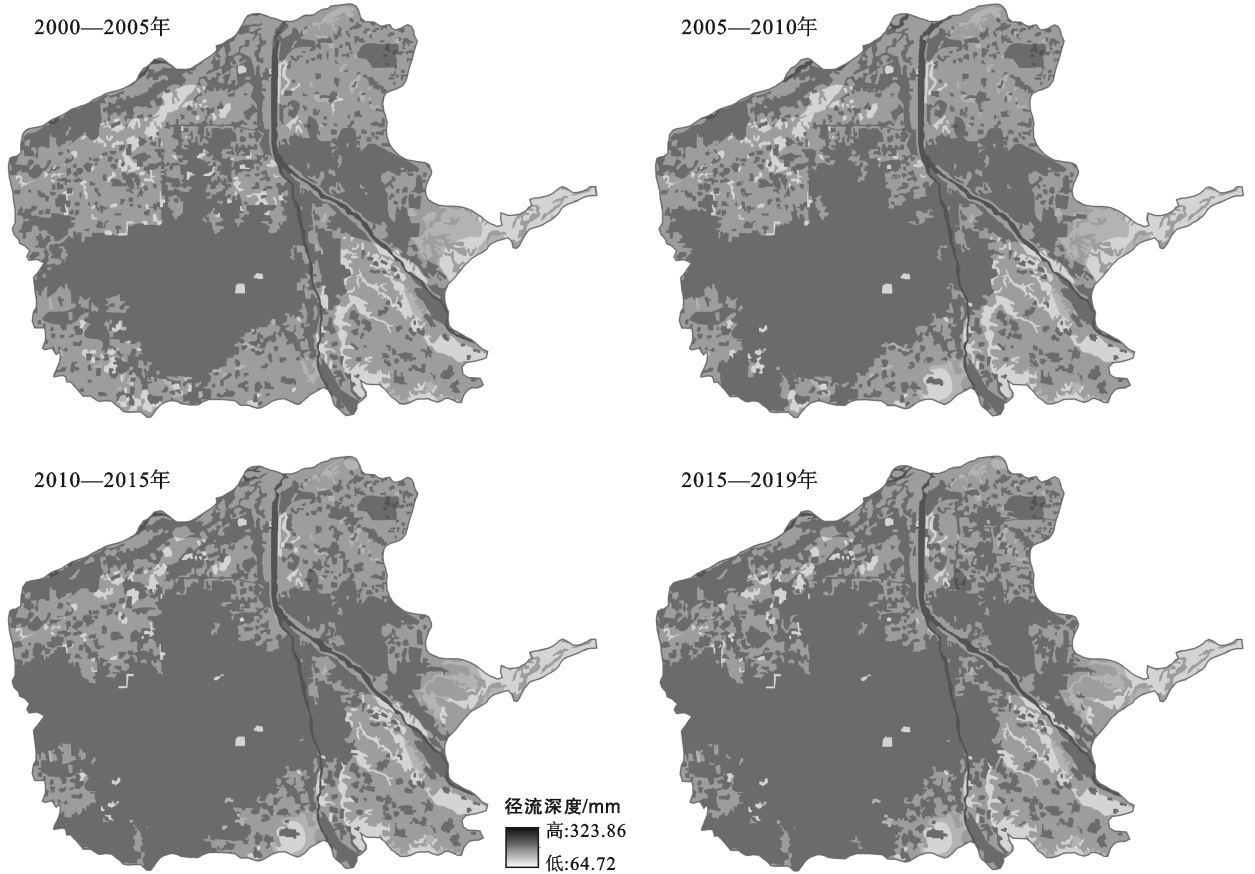


图 4 不同时期西安市主城区地表径流深度变化

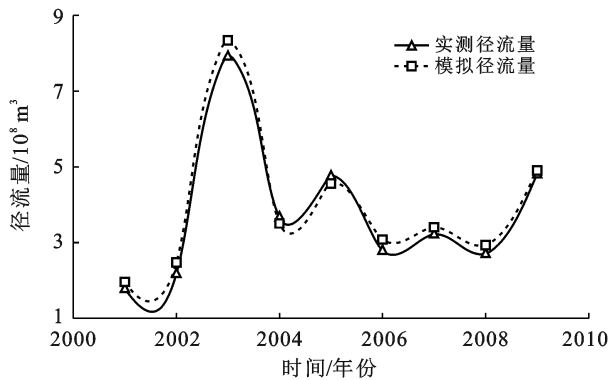


图 5 灞河流域的径流模拟值和实测值比较

表 5 与地表径流密切相关的综合景观指数

项目	LPI	LSI	CONTAG	CONNECT
Person 相关系数	0.993**	-0.987**	0.960**	0.981**
显著性(双尾)	0.001	0.002	0.009	0.003

注: **表示在 0.01 级别(双尾),相关性显著。*表示在 0.05 级别(双尾),相关性显著。下同。

表 6 与地表径流密切相关的各景观类型指数

景观指数	用地类型	Person 相关系数	显著性(双尾)
PD	建设用地	0.966**	0.008
	绿地	-0.882*	0.048
	耕地	-0.884*	0.046
LPI	建设用地	0.990**	0.001
	湿地	0.936*	0.019
	水域	-0.890*	0.043
CONNECT	建设用地	0.983**	0.003
	湿地	0.968**	0.007
	水域	-0.896*	0.040
COHESION	建设用地	0.986**	0.002
	湿地	0.882*	0.048
	水域	-0.905*	0.035
DIVISION	耕地	0.970**	0.006
	绿地	0.884*	0.046

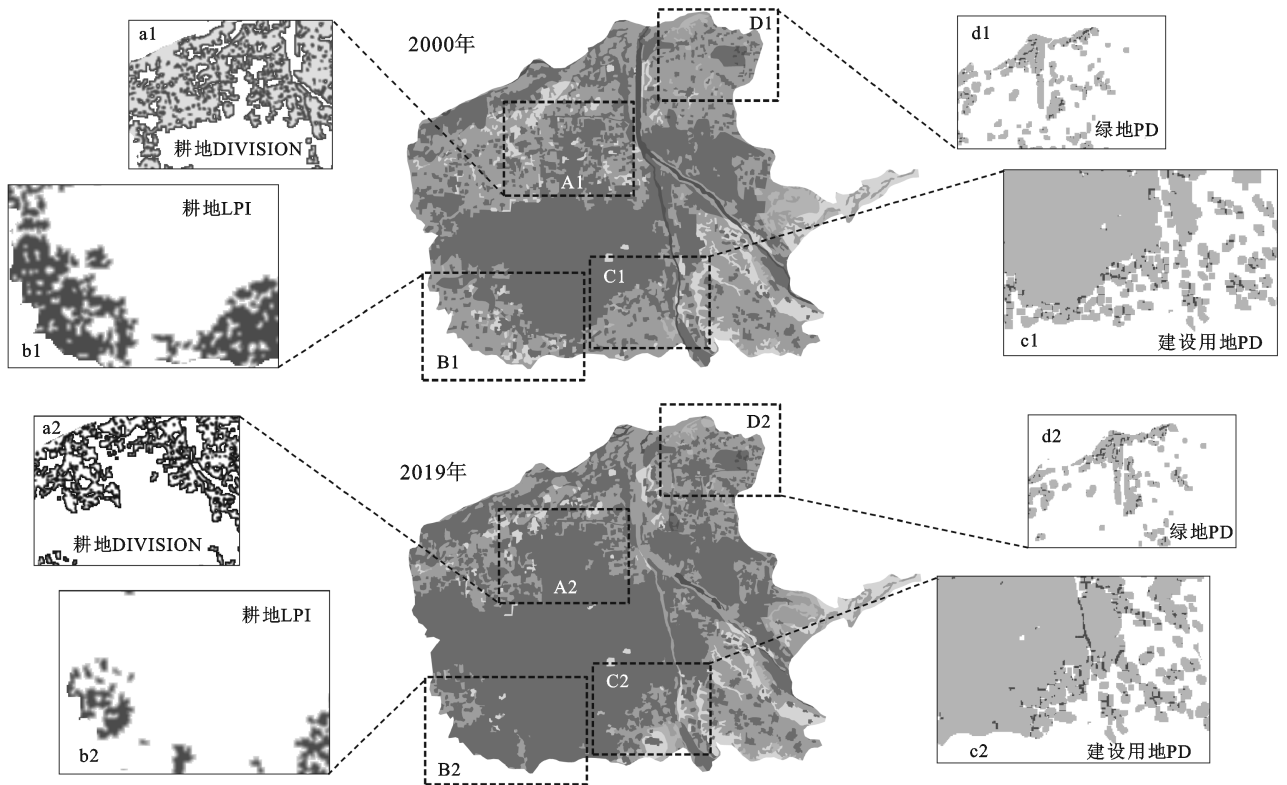


图6 研究区景观格局与地表径流相关性典型区域空间图示

3.4 景观格局优化策略

景观格局的优化,是以生态系统健康为目标,通过调整各景观类型斑块以达到合理的土地利用布局 and 科学管理,实现区域可持续发展,保障区域生态安全^[25]。研究区景观格局优化以实现城市“小雨留得住、中雨不积水、大雨不内涝”为目标,旨在削减地表径流量的同时有效缓解城市内涝。

(1) 构建以城市公园为主体、街头绿地为辅的内涝防治生态系统。借助生态廊道和生态节点构建城市的自然生态体系,调节景观组分在空间和数量的分布,降低城市地表径流的汇集使景观综合价值达到最大化,形成完整的城市内涝防治系统。加强与控制城市公园规模、提升街头绿地的数量、质量,增设城市绿地,逐步恢复和重建在城市开发建设过程中破坏的城市水系通道,以此形成立体、分散的城市内涝生态防治系统。通过对生态节点的优化,将研究区内的生态源地借助城市水系紧密联系起来,形成节点、水系廊道、源地相互连接、生态功能高效发挥的景观生态网络格局,从而有效改善研究区内景观格局破碎化与地表径流滞留汇集的现状,增强景观连通性并达到消减或延缓城市地表径流的产生,降低城市积水内涝灾害发生的风险。

(2) 拆分部分人工景观斑块,增设绿色基础设施。研究表明容易产生地表径流的区域多为人工斑块高度集中的区域,区域内自然景观受到人工斑块持

续扩张分割阻隔,城市建设用地等不透水面聚集分布也是地表径流量增加发生内涝的直接原因。长安路小寨十字路口,典型的“逢雨必堵,大雨必涝”的城市不透水面高度集中区,该区地理位置偏低,排水系统陈旧,下垫面基本为不透水地面,绿地等自然斑块严重缺少。加强绿带、绿心等城市绿色基础设施建设,增加植被类型丰富度,以现有的道路绿化带、街头绿地为基础构建地表径流源头减排景观格局,打破现有自然景观多位于人工打造的混泥土花坛中并不能实现渗、滞、蓄等作用机理,借助分散的景观斑块入渗、过滤、蒸发和积蓄的方式减少地表径流量,以此减缓暴雨时期径流速度、增强城市水系统弹性。

(3) 完善城市景观管理体系,建立健全城市内涝的景观管理及监督体制。我国景观管理现处于发展初级阶段,相关政策及法律的缺失致使城市景观在城市化进程中只是“昙花一现”。顺应国土空间规划变革,完善景观规划建设管理体系,加强防治城市内涝的景观管理及监督体制,尊重自然本底,维系景观格局的动态演变及发展,减少发生内涝的概率,实现区域可持续发展,维持区域生态安全。

4 结论

(1) 西安市主城区 2000—2019 年景观格局呈现出高连通高聚集、斑块形状规则化、均质稳定化、景观

蔓延度下降等的发展趋势,结合同期地表径流深度模拟结果与分析,研究区地表径流深度逐年增加,但径流深度增加量随时间动态变化呈下降趋势,其中 2000—2005,2005—2010,2010—2015,2015—2019 年分别增加 4.99,4.95,3.55 和 3.33 mm,说明景观格局对地表径流量的滞留作用逐渐增大。

(2) 景观格局指数变化率与地表径流量年增长率呈显著相关性,其中建设用地等人工景观指数和地表径流量年增长率呈显著正相关,相反绿地、耕地、水域等自然景观指数与地表径流量年增长率呈负相关关系。土地利用及景观格局演变数据表明绿地向建设用地转化对地表径流量的影响更大。结合研究区内涝易发地段以及景观格局与地表径流相关性分析结果可得,绿地斑块密度、绿地破碎度、建设用地斑块密度、建设用地最大斑块面积比例、建设用地斑块聚集度以及建设用地连通度是城市内涝问题频发的重要影响因素。

(3) 借助城市的生态廊道及生态节点构建内涝防治生态系统,并对城市不透水面等高度集中的地区进行拆分,增设城市绿色基础设施,以实现源头减排的内涝防治景观,在此基础上完善城市景观管理及监督体制,保障城市景观格局长期有效的减缓地表径流量,保障区域生态安全。

此外,本文仍存在一些不足之处。文中采用的 SCS 模型参数是针对美国情况所确定的,模型的参数 CN 值、土壤类型的确定是通过查表以及其他研究者所用模型确定的参数进行修正,因此模型中参数的确定有待进一步精确。另外,本文采用的遥感影像数据不够精细,对于地物的识别存在一些偏差,考虑影响景观格局的要素较多,因此在以后的研究中解译精度需要进一步提高。

[参 考 文 献]

[1] 姜仁贵,王小杰,解建仓,等.城市内涝应急预案管理研究与应用[J].灾害学,2018,33(2):146-150.

[2] 李旭,张辉,赵万民.统筹兼顾,因势利导:历史治水经验对城市“内涝”的启示[J].城市发展研究,2012,19(4):113-117.

[3] 李伟峰,欧阳志云,王如松,等.城市生态系统景观格局特征及形成机制[J].生态学杂志,2005,24(4):428-432.

[4] Alberti M. The effects of urban patterns on ecosystem function [J]. International Regional Science Review, 2005,28(2):168-192.

[5] 仇江啸,王效科,逯非,等.城市景观破碎化格局与城市化及社会经济发展水平的关系:以北京城区为例[J].生态学报,2012,32(9):2659-2669.

[6] Benedict M, Macmahon E T. Green infrastructure:

Smart conservation for the 21st century [J]. Renewable Resources Journal, 2002,20(3):12-17.

[7] 张媛,吴雪飞.绿色基础设施视角下的非建设用地规划策略[J].中国园林,2013,29(10):40-45.

[8] 盛洪涛,汪云.非集中建设区规划及实施模式探索[J].城市规划学刊,2012(3):30-36.

[9] 傅伯杰.景观生态学原理及应用[M].北京:科学出版社,2001.

[10] 张建云,宋晓猛,王国庆,等.变化环境下城市水文学的发展与挑战(I):城市水文效应[J].水科学进展,2014,25(4):594-605.

[11] 裴丹.绿色基础设施构建方法研究述评[J].城市规划,2012,36(5):84-90.

[12] Turner M G. Spatial and temporal analysis of landscape patterns [J]. Landscape Ecology, 1990,4(1):21-30.

[13] 刘娟娟,李保峰,南茜·若,等.构建城市生命支撑系统:西雅图城市绿色基础设施案例研究[J].中国园林,2012,28(3):116-120.

[14] Calder I R. Hydrologic Effects of Land-use Change [M]. US: McGraw-Hill Inc, 1992.

[15] Corbett D R, Chanton J, Burnett W, et al. Patterns of groundwater discharge into Florida Bay [J]. Limnology and Oceanography, 1999,44(4):1045-1055.

[16] Fohrer N, Mller D, Steiner N. An interdisciplinary modelling approach to evaluate the effects of land use change-ScienceDirect [J]. Physics & Chemistry of the Earth, 2002,27(9/10):655-662.

[17] 葛怡,史培军,周俊华,等.土地利用变化驱动下的上海市区水灾灾情模拟[J].自然灾害学报,2003,12(3):25-30.

[18] 王振海,李传哲,于福亮,等.土地利用/覆被变化对径流量影响研究进展[J].南水北调与水利科技,2014,12(1):88-93.

[19] 俞孔坚,袁伟,李青,等.“海绵城市”实践:北京雁栖湖生态发展示范区控规及景观规划[J].北京规划建设,2015(1):26-31.

[20] 徐霞,曾敏,樊卢丽.基于海绵城市理念下区域水生态系统保护和修复研究:以昆山市阳澄湖东部地区为例[J].智能城市,2016,2(3):51-52.

[21] 李润奎,朱阿兴,陈腊娇,等. SCS-CN 模型中土壤参数的作用机制研究[J].自然资源学报,2013,28(10):1778-1787.

[22] Maidment D R. Handbook of Hydrology [M]. New York: Mcgraw Hill, 1993.

[23] 薛丽芳,于红学,郑青青,等.徐州市土地利用变化对径流的影响[J].水土保持通报,2015,35(2):27-32.

[24] 徐刘凯,王全金,向速林.应用 SCS 模型模拟清丰水流域产汇流量[J].华东交通大学学报,2011,28(4):84-88.

[25] 彭建,吕丹娜,董建权,等.过程耦合与空间集成:国土空间生态修复的景观生态学认知[J].自然资源学报,2020,35(1):3-13.