

# 重庆市主城区土地利用变化对地表径流的影响

田甜<sup>1</sup>, 牟凤云<sup>1</sup>, 王俊秀<sup>1</sup>, 赵灵晰<sup>2</sup>, 陈林<sup>1</sup>, 李秋彦<sup>1</sup>

(1.重庆交通大学 建筑与城市规划学院, 重庆 400074; 2.国家信息中心 公共技术服务部, 北京 100045)

**摘要:**为了分析重庆市主城区土地利用变化对地表径流的影响,基于 SCS 水文模型遴选土地利用、降雨、土壤类别等相关数据,模拟前期土壤湿润程度正常状态(AMCII)下枯水期、平水期、丰水期地表径流,从各土地利用类型的产流能力、径流系数及景观格局等分析了土地利用变化对地表径流的影响。结果表明:(1) 2000—2015 年,重庆市主城区土地利用类型以耕、林地为主,占比持续下降,耕地主要转化为建设用地、林地及水域,建设用地面积增幅为 304.90%,2015 年达到 932.55 km<sup>2</sup>。(2) 重庆市主城区枯水期、平水期、丰水期径流深度呈上升趋势,径流深度分别为 0~14.58 mm, 12.70~93.74 mm, 62.45~184.85 mm。(3) 重庆市主城区各土地利用类型产流能力呈林地<草地<耕地<未利用土地<建设用地<水域的趋势;径流系数增加区域主要分布于“两江四山”间较平坦地区,呈南北延伸趋势;地表径流与建设用地的 PLAND, LPI, COHESION, AI 呈极显著正相关性,与 DIVISION, NP 呈极显著负相关性。说明在快速城市化进程中,可通过合理规划土地利用景观格局,优化土地利用结构及空间分布以控制地表径流。

**关键词:**重庆市主城区; 土地利用变化; SCS 模型; 地表径流

**中图分类号:** P333.5; F301.24

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2021)04-0128-08

## Impact of Land Use Change on Surface Runoff in the Main Urban Area of Chongqing

TIAN Tian<sup>1</sup>, MOU Fengyun<sup>1</sup>, WANG Junxiu<sup>1</sup>, ZHAO Lingxi<sup>2</sup>, CHEN Lin<sup>1</sup>, LI Qiuyan<sup>1</sup>

(1.School of Architecture and Urban Planning, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2.China Mobile Communications Group Department of State Information Center, Public Technology Service, Beijing 100045, China)

**Abstract:** In order to analyze the influence of land use change on surface runoff in the main urban area of Chongqing, based on the SCS hydrology model, the related data such as land use, rainfall, and soil type were selected to simulate the surface runoff during dry, normal, and wet periods under normal soil moisture (AMC II) in the early stage. The impact of land use change on surface runoff was analyzed according to the runoff yield capacity, runoff coefficient, and landscape pattern of various land use types. The results showed that: (1) from 2000 to 2015, the land use types in the main urban area of Chongqing City were mainly cultivated land and forestland, and the proportion of these types continued to decline; the cultivated land was mainly transformed into construction land, forestland, and water area, and the construction land area increased by 304.90% and reached 932.55 km<sup>2</sup> in 2015; (2) the runoff depths in the main urban area of Chongqing City were increasing during the dry, normal, and wet period in which the runoff depths were 0~14.58 mm, 12.70~93.74 mm, 62.45~184.85 mm, respectively; (3) the runoff generation capacity of various land use types in the main urban area of Chongqing City increased in the order: woodland<grassland<cultivated land<unused land<construction land<water area; the areas with increased runoff coefficient mainly distributed in the relatively flat areas between the ‘two rivers and four mountains’, showing a north-south extension trend; surface runoff had a very significant positive correlation with PLAND, LPI, COHESION, AI of construction land, and a very significant negative correlation with DIVISION and NP, indica-

收稿日期: 2020-08-07

修回日期: 2020-09-03

资助项目: 国家重点研发计划项目(2019YFB2102502, 2019YFB2102503); 重庆市自然科学基金(cstc2019jcyj-msxmX0626)

第一作者: 田甜(1995—), 男(土家族), 贵州铜仁人, 硕士研究生, 主要从事土地利用变化及水文模型研究。E-mail: 1036700922@qq.com

通信作者: 牟凤云(1979—), 女, 山东高密人, 教授, 博士, 主要从事 3S 技术集成与应用研究。E-mail: mfydsd@cqjtu.edu.cn

ting that in the process of rapid urbanization, land use landscape pattern could be rationally planned, and land use structure and spatial distribution could be optimized to control surface runoff.

**Keywords:** main urban area of Chongqing City; land use change; SCS model; surface runoff

土地利用变化是人类利用自然环境的显著特征,也是经济社会发展的重要驱动力之一,主要原因在于土地利用变化对自然环境系统会造成剧烈的影响,地表径流形成过程就是其中之一。地表径流的产生具有复杂性,不仅受到降雨量、土地利用方式的影响,同时还受其他自然要素时空分布综合作用。短期来看对地表径流产生影响的要素就是土地利用的改变<sup>[1]</sup>,它会直接改变地表水资源数量及时空分布,因此探究土地利用变化对地表径流的影响机制,可为合理规划土地利用、水资源管理等提供重要依据。

20 世纪 50 年代,美国农业部水土保持局成功开发适用于中小尺度空间<sup>[2]</sup>的 SCS 水文模型<sup>[3]</sup>。国内外学者以此为支撑对地表径流受土地利用变化的影响展开大量分析研究,成果显著。主要围绕地表径流模拟<sup>[4-6]</sup>、模型参数改进<sup>[7-8]</sup>、SCS 与其他模型集成等<sup>[9]</sup>方面。在地表径流模拟方面,Shrimali 等<sup>[4]</sup>以苏克纳湖流域为研究对象,基于 SCS 水文模型采用遥感和地理信息系统技术计算模拟地表径流;史培军等<sup>[5]</sup>以深圳市为研究对象,研究地表径流对土地利用变化的响应,结果表明城市化使地表径流量大幅增加;牟风云等<sup>[6]</sup>基于 SCS 水文模型模拟不同降雨情景下巫山县径流空间分布特征,并对巫山县公路洪灾进行风险评价。在模型参数改进方面,Mishra 等<sup>[7]</sup>探讨蒸散量对初损估计值的影响,改进模型并对大尺度研究区降雨径流进行模拟;张卫等<sup>[8]</sup>利用降雨径流实测数据反演 CN 值,并建立了 CN 值与降雨量的回归模型。在与其他模型集成方面,俞彦等<sup>[9]</sup>对比分析 SCS 模型和新安江模型反推的临界雨量并与真实值比较,并判断二者的模拟精度。

综上,目前基于 SCS 水文模型对土地利用变化与地表径流关系的研究主要集中在中小流域,对城市的研究较少,近年来,随着城市化进程加快,各土地利用类型相互转化愈发显著,地表径流也随之发生剧烈变化。截至 2015 年底,重庆市主城区平均城镇化率达到 90.10%,其中巴南区最低为 78.28%,渝中区最高达 100%,城镇化率的不断提高与人口向发达地区聚集和土地利用类型转化密切相关;本文利用 SCS 水文模型模拟重庆市主城区枯水期、平水期、丰水期地表径流,为重庆市主城区土地利用结构调整、水资源利用及洪涝灾害防治提供理论依据。

# 1 研究区概况

重庆市(图 1)位于中国西南部,青藏高原与长江中下游地区的过渡带,四川盆地东南部,与湖北、陕西、四川、贵州、湖南 5 省接壤,重庆市由主城片区、渝西片区、渝东北片区及渝东南片区 4 大片区组成;主城片区位于重庆市中西部,位于东经 106°12′—106°11′,北纬 29°70′—30°70′,辖区面积 5 472.68 km<sup>2</sup>,约占重庆市总面积的 6.6%,主城区划分为 9 个行政区,分别为渝中区、江北区、沙坪坝区、渝北区、九龙坡区、大渡口区、北碚区、南岸区及巴南区;属亚热带季风性湿润气候,年平均气温 16~18℃,大部分地区年平均降雨量为 1 000~1 350 mm,降雨主要集中在 7—8 月,11 月—次年 3 月份降雨相对较少,且降雨时段主要集中于夜间到凌晨。

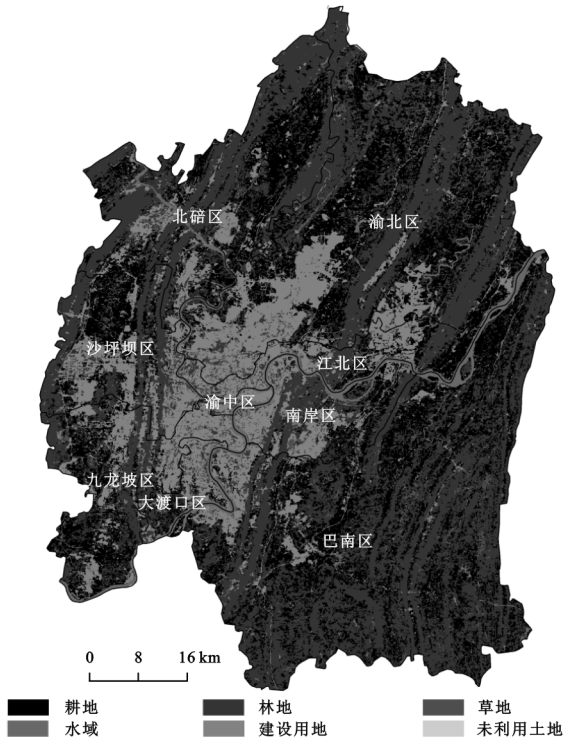


图 1 研究区概况

# 2 数据来源与研究方法

## 2.1 数据来源

本研究的数据主要包括重庆市主城区土地利用数据、土壤类别数据、重庆市主城区地面累年值月值数据集及行政区划图。其中重庆市主城区行政区划图和土地利用数据来源为资源环境数据云平台

(www.resdc.cn),土地利用数据共 4 期,时间节点为 2000 年、2005 年、2010 年及 2015 年,分辨率为 30 m;土壤类别数据来源为国家土壤信息服务平台(www.soilinfo.cn/map/index.aspx),分辨率为 1 km;重庆市主城区地面累年值月值数据集来源为国家气象科学数据中心(www.data.cma.cn),数据包括重庆市主城区辖区内 4 个国家级地面站点,记录了 1981—2010 年累年 12 个月 20—20 时降雨量均值。

## 2.2 研究方法

2.2.1 土地利用转移矩阵 研究区某时段内各土地利用类型之间的转换分析通常可以基于土地利用转移矩阵<sup>[10]</sup>来展开,它既可以反映研究末期各土地利用类型的转换方向及来源,又可以反映出转换的数量特征,从而反映出研究时段内研究区的土地利用变化特征。其表达式为:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $n$  为土地利用类型总数; $i, j$  分别为研究初期与末期的土地利用类型( $i, j=1, 2, \cdots, n$ ); $S_{ij}$  为研究时段内由  $i$  地类转换为  $j$  地类的面积。

2.2.2 SCS 水文模型 SCS 水文模型<sup>[11]</sup>结构并不复杂,但具有较高的模拟精度,我国学者应用该模型进行了很多研究工作<sup>[12-15]</sup>。SCS 水文模型的产流计算公式为:

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

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (3)$$

式中: $S, P, Q$  依次为滞留系数、降雨量与径流深度,单位都为 mm,产流系数 CN 不具有量纲特性,取值范围为 0~100,综合表示研究区水文特征,由土地利用类型、土壤性质及降雨前土壤湿润程度等因素共同决定,反映研究区降雨量与地表径流之间的关系。

由公式(3)可知,滞留系数  $S$  由产流系数 CN 确定,产流系数由土壤性质、土地利用类型及降雨量前土壤湿润程度所确定;根据土壤渗透性和导水性差异,可将土壤分为 4 类(表 1)。重庆市主城区土壤类别主要有水稻土、棕壤和石灰土等,结合主城区土壤实际情况和 SCS 水文模型土壤分类标准<sup>[16]</sup>,主城区土壤被划分为 B、C、D 三大类。

本文以前期土壤湿润程度为正常状态(AMC II)

的基础上展开研究,产流系数 CN 综合体现地表各土地利用类型与土壤类别组合的产流属性,其大小反映了地表的产流能力强弱。通常情况下土壤类别状态稳定,CN 值主要受土壤湿润程度和土地利用变化的影响;根据 CN 值查算表<sup>[17]</sup>,借鉴国内有关学者的研究成果<sup>[18]</sup>,并结合主城区土地利用和土壤类别数据,确定 CN 值矩阵,具体可参见表 2。

表 1 SCS 模型水文土壤组的划分标准

土壤分类	土壤性质	最小渗透率/(mm·h <sup>-1</sup> )
A	厚沙层,厚层黄土,团粒化粉砂土	7.26~11.43
B	薄层黄土,砂壤土	3.81~7.26
C	黏壤土,薄层砂壤土,有机质含量低土壤,黏质含量高土壤	1.27~3.81
D	吸水后显著膨胀的土壤,塑性黏土,某些盐渍土	0~1.27

表 2 重庆市主城区在 AMC II 状态下的 CN 值

土地利用类型	土壤类别		
	B	C	D
耕地	71	78	81
林地	55	70	77
草地	65	72	80
水域	98	98	98
建设用地	85	90	92
未利用土地	80	85	91

## 3 结果与分析

### 3.1 土地利用变化特征

基于重庆市主城区 2000—2015 年 4 期土地利用数据,应用 ArcGIS 软件进行统计分析,可得出 2000—2015 年重庆市主城区土地利用结构图(图 2)及转移矩阵(表 3)。

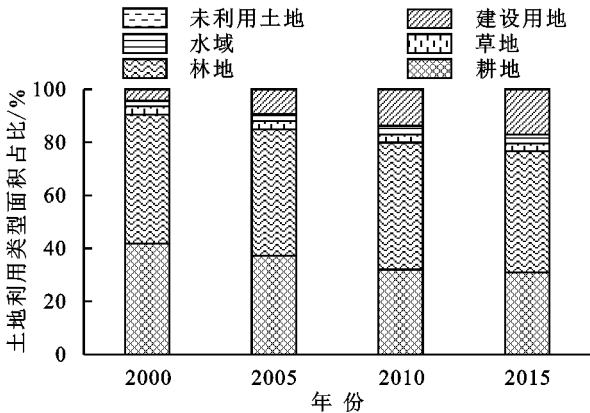


图 2 2000—2015 年重庆市主城区土地利用

从土地利用结构分析可知,2000—2015 年,重庆市主城区耕、林地占比较高,二者面积之和呈减少趋势,从 4 954.76 km<sup>2</sup> 减少到 4 194.83 km<sup>2</sup>,占比从 90.54% 降低到 76.65%;次之为建设用地,2000—2015

年面积分别为 230.32,501.45,750.43,932.55 km<sup>2</sup>,面积占比分别为 4.21%,9.16%,13.71%,17.04%;草地呈波动变化,呈现出先增后减的特征,面积最终从 168.51 km<sup>2</sup>减少为 159.40 km<sup>2</sup>,占比从 3.08%降低到 2.91%;水域面积从 111.92 km<sup>2</sup>增加到 185.76 km<sup>2</sup>,占比从 2.05%升高到 3.39%。

表 32000—2015 年重庆市主城区土地利用转移矩阵

km<sup>2</sup>

年份	土地利用类型	2005 年					
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用土地
2000 年	耕地	2060.13	78.79	5.39	9.67	164.08	0.00
	林地	0.01	2557.70	0.00	24.82	110.19	0.00
	草地	0.00	1.45	168.43	0.48	0.05	0.00
	水域	0.00	0.00	0.00	113.19	0.00	0.00
	建设用地	0.00	0.01	0.00	0.11	232.80	0.00
	未利用土地	0.00	0.00	0.00	3.55	0.00	3.70
年份	土地利用类型	2010 年					
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用土地
2005 年	耕地	1769.80	91.23	0.18	12.46	186.47	0.00
	林地	0.02	2565.48	0.00	4.66	67.78	0.00
	草地	0.00	0.00	167.94	0.01	5.86	0.00
	水域	0.44	0.14	0.00	151.07	0.17	0.00
	建设用地	0.01	0.02	0.00	8.46	498.63	0.00
	未利用土地	0.00	0.00	0.00	3.69	0.00	0.01
年份	土地利用类型	2015 年					
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用土地
2010 年	耕地	1483.26	129.39	11.32	8.42	137.59	0.00
	林地	181.29	2341.69	14.69	8.32	109.71	0.00
	草地	14.88	14.51	129.29	0.84	8.55	0.00
	水域	6.32	4.96	0.59	163.63	4.59	0.12
	建设用地	23.93	40.56	5.27	6.49	682.62	0.01
	未利用土地	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00

从土地利用转换关系可知,重庆市主城区土地利用类型在 2000—2005 年转换显著,其中耕地和林地尤其突出,由于主城区城市化扩张和退耕还林的影响,耕地主要转化为林地(78.79 km<sup>2</sup>)和建设用地(164.08 km<sup>2</sup>),林地一方面被增长的建设用地侵占,转化 110.19 km<sup>2</sup>为建设用地,另一方面也受到三峡库区蓄水的影响,导致有 24.82 km<sup>2</sup>的林地转化为水域,其他土地利用类型转化面积较少。2005—2010 年主城区各土地利用类型之间的转化关系与 2000—2005 年基本相同,耕地转化为建设用地和林地的面积进一步增加,分别转化了 186.47,91.23 km<sup>2</sup>,建设用地持续增长,除耕地外还由林地和草地转化得到。2010—2015 年,主城区城市化进程进一步加快,建设用地主要由耕地(137.59 km<sup>2</sup>)和林地(109.71 km<sup>2</sup>)转化而来,建设用地相应地分别转化了 23.93,40.56 km<sup>2</sup>为耕地和林地,耕地和林地相互转化,相比之下林地多转化了 51.90 km<sup>2</sup>为耕地。

总体来看,2000—2015 年重庆市主城区土地利

用动态变化显著,具体特点体现为耕地、未利用土地面积明显减少,而水域、建设用地面积不断增长,对于草地、林地而言,则呈现出波动变化特点。主要原因有:(1) 1997 年重庆市成为我国中西部的唯一直辖市,到新千年,更是将其纳为西部大开发关键城市,导致主城区城市化进程加快,建设用地依靠侵蚀耕地和林地实现快速增长;(2) 2000 年重庆市被正式纳为退耕还林试点地区,导致大量耕地转化为林地,由于退耕还林效果具有时间滞后性,林地呈现先减少后增加的趋势;(3) 三峡大坝的修建导致库区水位上升,导致沿江的各种土地转化为水域,其中未利用土地的转化尤为明显。

### 3.2 SCS 水文模型计算

根据 SCS 水文模型的产流计算公式(2)可知,径流深度计算需要确定研究区的降雨量  $P$ 。降雨量由重庆市主城区辖区内 4 个国家级地面站点记录的 1981—2010 年累年值月值数据获取,以月降雨距平百分率 $<-20\%$ , $-20\%\sim 20\%$ , $>20\%$ 为指标<sup>[19]</sup>,降雨月型



划分为枯水期、平水期、丰水期。根据主城区 4 个地面站点的全年各月降雨数据的平均值,结合重庆市全年降雨特点,得出 1 月份属枯水期,4 月份属平水期,6 月份属丰水期,降雨量分别为 19.68,99.70,190.93 mm,本文以这 3 期降雨量来模拟主城区地表径流。

根据 SCS 水文模型要求,运用 ArcGIS 软件处理重庆市主城区相关数据,利用公式(2)模拟主城区 2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年的地表径流深度(图 3)。从不同降雨期分析径流深度空间演化趋势可知,枯水期主城区径流深度较低,2000—2015 年径流深度低于 14.58

mm,未产生径流的地区分别占主城区总面积的27.03%,25.96%,25.48%,23.93%,呈下降趋势,这些地区主要为主城区南北走向的山脉,西部的缙云山和中梁山、北部的龙王洞山、长江以北的铜锣山及东南部的莲花山,这些山脉的土地利用类型多为林地,径流系数较低,地表径流产生所需最小降雨量较大,在枯水期很难形成地表径流。从平水期和丰水期模拟结果可知,随着平水期、丰水期降雨量增加,主城区径流深度有明显提升,平水期和丰水期主城区径流深度分别为 12.70~93.74 mm,62.45~184.85 mm。

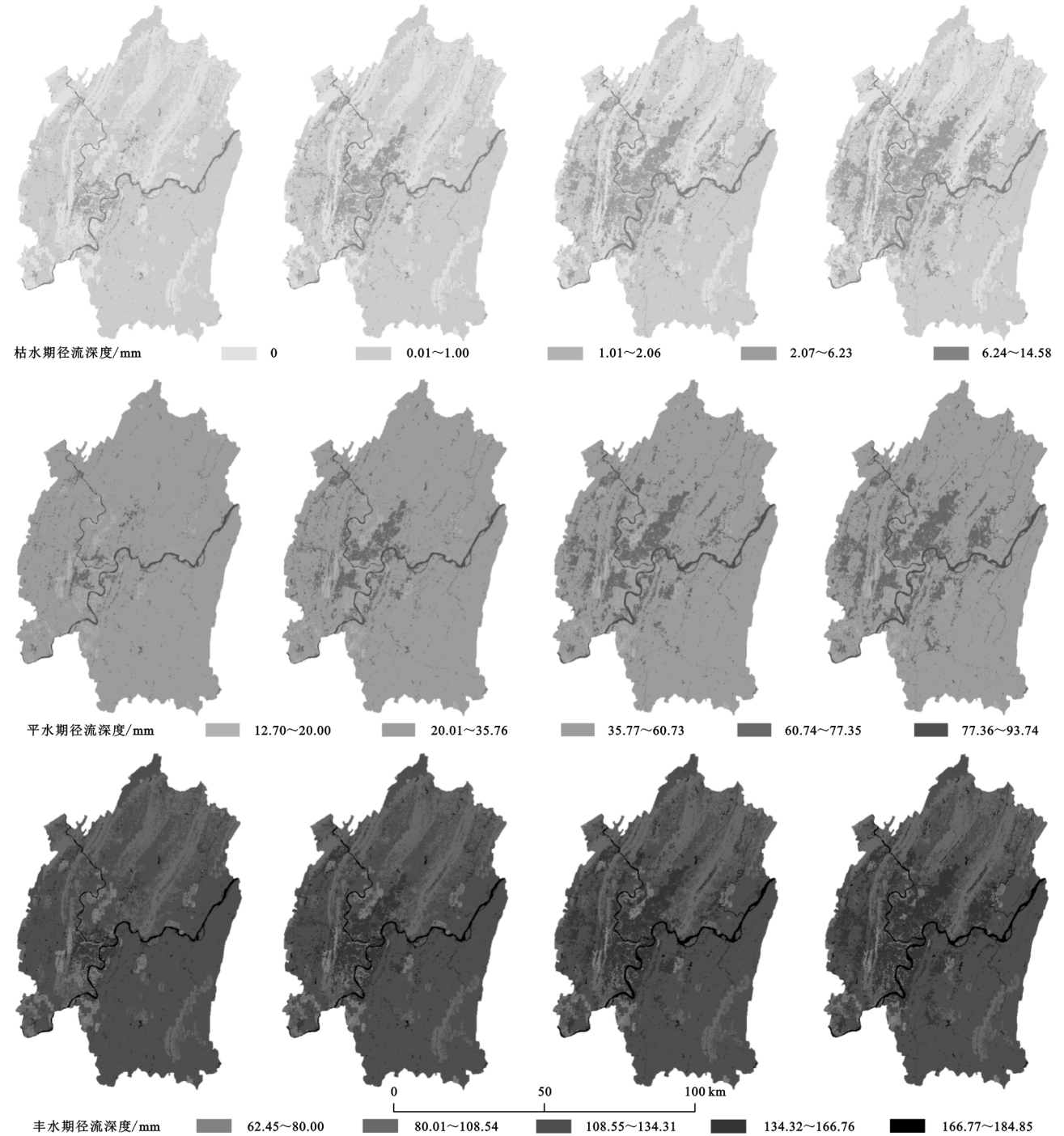


图 3 2000—2015 年重庆市主城区径流深度

从不同降雨期 2000—2015 年重庆市主城区径流量统计结果来看(表 4),主城区 2000—2015 年径流量显著增长,枯水期、平水期、丰水期径流量范围分别为(456.20~887.93)万 m<sup>3</sup>, (24 974.80~27 308.37)万 m<sup>3</sup>, (67 789.15~70 960.97)万 m<sup>3</sup>;2000—2015 年主城区在枯水期、平水期、丰水期径流量涨幅分别达到了 94.63%, 9.34%, 4.68%;同年随降雨的增加,径流量也呈增长趋势,枯水期与平水期、丰水期比较尤为明显。

3.3 土地利用变化对地表径流的影响

SCS 模型模拟结论证实,重庆市主城区径流量持

续增长(表 4),为探究主城区各土地利用类型在不同降雨期的产流能力差异,分别对主城区各土地利用类型在枯水期、平水期、丰水期的平均径流深度(表 5)和总径流量(图 4)进行分析。

表 4 2000—2015 重庆市主城区径流量 万 m<sup>3</sup>

时期	径流量			
	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年
枯水期	456.20	631.68	785.35	887.93
平水期	24974.80	25904.48	26662.13	27308.37
丰水期	67789.15	69052.10	70058.86	70960.97

表 5 重庆市主城区各土地利用类型平均径流深度 mm

土地利用类型	2000 年			2005 年			2010 年			2015 年		
	枯水期	平水期	丰水期	枯水期	平水期	丰水期	枯水期	平水期	丰水期	枯水期	平水期	丰水期
耕地	0.64	49.23	130.29	0.65	49.47	130.67	0.66	49.57	130.83	0.65	49.57	130.82
林地	0.14	38.46	112.82	0.14	38.47	112.86	0.14	38.51	112.94	0.14	38.56	113.03
草地	0.32	42.59	119.79	0.32	42.52	119.67	0.32	42.51	119.66	0.32	42.54	119.71
水域	14.75	94.80	186.94	14.75	94.80	186.94	14.75	94.80	186.94	14.75	94.80	186.94
建设用地	4.27	70.51	159.10	4.66	72.08	161.06	4.86	72.89	162.08	4.97	73.27	162.54
未利用土地	3.82	67.45	154.86	3.56	66.14	153.16	5.46	75.67	165.63	2.06	60.56	145.59

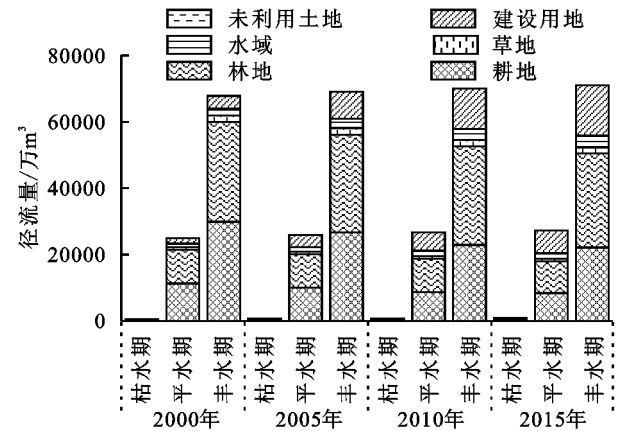


图 4 2000—2015 年重庆市主城区径流量结构

从产流能力来看,各土地利用类型的产流能力存在明显差异,从弱到强排序为:林地、草地、耕地、未利用土地、建设用地、水域。

从径流量来看,主城区枯水期地表径流量较多的土地利用类型为水域、耕地及建设用地,由于耕地面积减少,径流量逐年减少,相反建筑用地径流量随着面积增加而升高;各土地利用类型在平水期和丰水期的径流量较多的是耕地、林地及建设用地,林地虽然产流能力弱,但因其面积大,径流量变化趋势与林地面积动态变化状态基本上维持一致。

本文比较了 2000—2005 年、2005—2010 年、2010—2015 年重庆市主城区各地块的径流系数变化情况,分析主城区土地利用变化对地表径流空间演化趋势的影响,径流系数的空间变化情况可以体现研究

时段内地表径流的演化趋势。从图 5 可以看出,2000—2015 年径流系数未发生变化的区域占主城区总面积 90%以上,说明这些地块的土地利用类型保持不变。径流系数降低的区域随机零星分布,大部分是由于退耕还林导致土地利用类型发生改变,导致径流系数减小。径流系数升高的区域主要围绕渝中区呈中心辐射发散分布,2000—2015 年主城区建设用地从 230.32 km<sup>2</sup>增至 932.55 km<sup>2</sup>,导致径流系数较高的地块增加;2000—2005 年径流系数升高区域主要集中于渝北区西南部,2003 年重庆北站正式动工,导致城市向北扩张;2005—2010 年径流系数升高区域主要在北碚中部地区、渝北中部地区及沙坪坝西部地区,2004 年重庆市提出大学城“三步走”建设计划,导致沙坪坝西部地区土地利用变化加剧,建设用地聚集增加,地表径流系数升高;2010—2015 年径流系数升高区域主要为渝北区南部地区、江北区中部地区及巴南区西部,在 2010 年,国务院批准了重庆市两江新区的建设,打造其为内陆地区对外开放的桥头堡,建筑用地对其他用地的侵占明显,导致其径流系数显著升高。总体来说,2000—2015 年主城区径流系数增加区域主要分布于“两江四山”之间较平坦地区,主要呈现南北延伸趋势。

为进一步分析土地利用变化对地表径流的影响,主城区按行政区划划分为渝中区、江北区、沙坪坝区等 9 个部分,选择各区县的耕地、林地、建设用地及其平均径流深度;参考有关学者<sup>[20]</sup>的研究,由 Fragstats

4.2 软件计算 PLAND(斑块所占比例)、NP(斑块数量)、LPI(最大斑块指数)、COHESION(斑块结合指数)、DIVISION(破碎度)及 AI(斑块聚集度)6 个景观格局指数,共获得 54 组数据。利用 SPSS 软件对土地利用类型景观格局指数和平均径流深度进行相关性分析。由表 6 可知,经过相关系数显著性检验,耕地、林地、建设用地景观格局指数与平均径流深度的相关系数随降雨增加呈减小趋势,建筑用地相关系数比耕地、林地较大;其中平均径流深度与耕地、林地的 PLAND, NP, LPI, COHESION, AI 呈负相关,与

DIVISION 呈正相关;平均径流深度与建设用地 PLAND, LPI, COHESION, AI 具有极显著正相关性,相关系数范围分别为:0.93~0.72,0.82~0.59,0.61~0.58,0.73~0.64,与建设用地的 NP, DIVISION 呈极显著负相关,相关系数范围分别为-0.81~-0.56,-0.71~-0.45。建设用地相较于耕地和林地对地表径流的影响更加明显,耕地和林地下渗和拦截径流能力较强,产流能力较弱,建设用地产流能力较强,在建设用地持续增长过程中,合理增加其斑块数量、斑块破碎度,减少大面积建设用地聚集,从而减少地表径流。

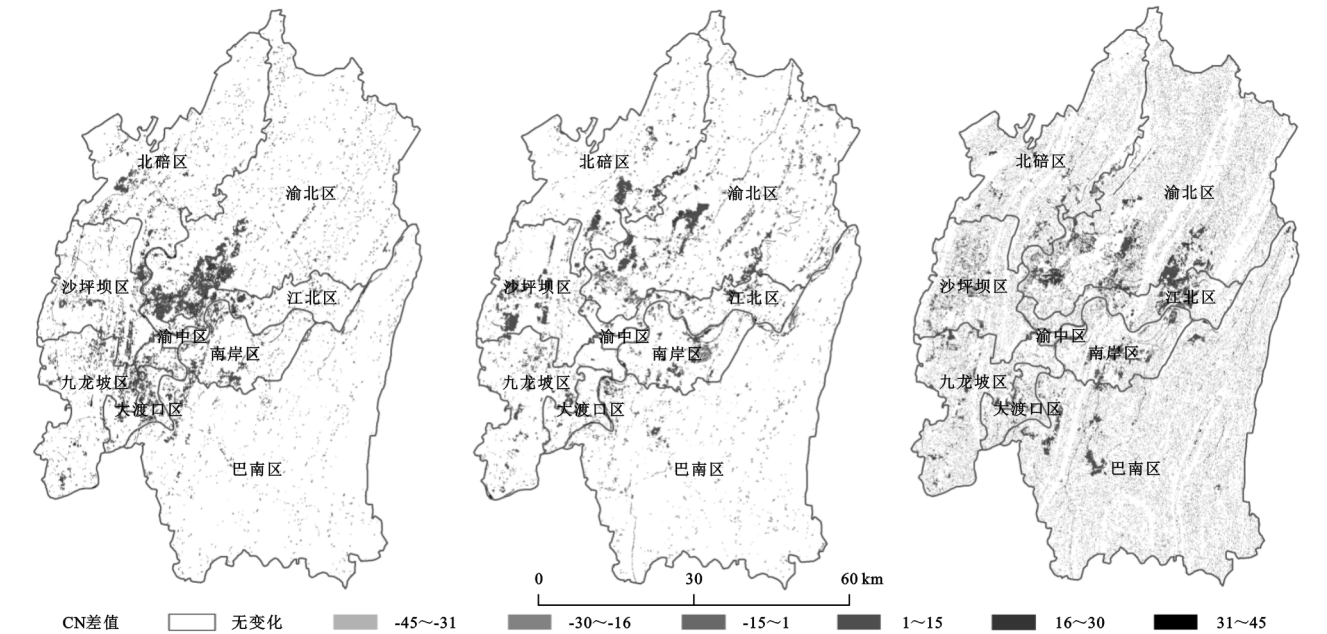


图 5 2000—2015 年重庆市主城区径流系数变化

景观格局指数		平均径流深度		
		枯水期	平水期	丰水期
PLAND	耕地	-0.79**	-0.66**	-0.55**
	林地	-0.53**	-0.51**	-0.48**
	建设用地	0.93**	0.80**	0.72**
NP	耕地	-0.58**	-0.40*	-0.32
	林地	-0.70**	-0.62**	-0.55**
	建设用地	-0.81**	-0.64**	-0.56**
LPI	耕地	-0.57**	-0.47**	-0.39*
	林地	-0.35*	-0.26	-0.22
	建设用地	0.82**	0.67**	0.59**
COHESION	耕地	-0.57**	-0.43**	-0.45**
	林地	-0.33	-0.32	-0.31
	建设用地	0.61**	0.60**	0.58**
DIVISION	耕地	0.37*	0.32	0.31
	林地	0.54**	0.39*	0.18
	建设用地	-0.71**	-0.58**	-0.45**
AI	耕地	-0.57**	-0.43**	-0.33
	林地	-0.36*	-0.34*	-0.32
	建设用地	0.73**	0.68**	0.64**

注:\*\*表示  $p<0.01$ , \*表示  $p<0.05$ 。

## 4 结 论

- (1) 2000—2015 年,重庆市主城区的土地利用结构整体上相对稳定,主要以林地和耕地为主;未利用土地与耕地面积持续减少,建设用地、水域则呈现持续增长之势,其中建设用地面积由 230.32 km<sup>2</sup> 增加到 932.55 km<sup>2</sup>,增幅达 304.90%,林地面积呈先减后增的变化趋势,草地则与之相反;重庆市主城区土地利用变化主要受到城市化、退耕还林及三峡大坝蓄水等影响,主要表现为耕地转换为建设用地、林地及水域。
- (2) 2000—2015 年重庆市主城区枯水期、平水期、丰水期径流深度、径流量均呈逐年上升趋势,径流深度范围分别为 0~14.58 mm,12.70~93.74 mm,62.45~184.85 mm,径流量增幅分别为 94.63%,9.34%,4.68%,同年随降雨量的增加,径流量显著增加,由于林地径流系数较小,导致枯水期与平水期、丰水期径流量差距较大。
- (3) 重庆市主城区各土地利用类型产流能力从



弱到强分别为:林地、草地、耕地、未利用土地、建设用地、水域;2000—2015年主城区径流系数未发生变化的区域占总面积90%以上,径流系数降低的区域随机零星分布;径流系数增加区域主要分布于“两江四山”间较平坦地区,呈现南北延伸趋势;建设用地相较于耕地和林地对地表径流的影响更加明显,在城市化进程中可以通过增加建设用地斑块数量和破碎度、减少聚集度,合理增加绿地,进而减少城市地表径流量。

本文仅模拟了土壤湿润程度正常状态(AMCII)下的地表径流,没有全面考虑前期土壤湿润对地表径流的影响;在接下来的研究中可以在不同土壤湿润程度状态下,综合探讨土地利用变化对地表径流的影响机理。

#### 参考文献:

- [1] 徐苏,张永勇,窦明,等.长江流域土地利用时空变化特征及其径流效应[J].地理科学进展,2017,36(4):426-436.
- [2] Maidment D R. Handbook of Hydrology[M]. New York: Mcgrawhill Book Company, 1992.
- [3] 刘家福,蒋卫国,占文凤,等. SCS模型及其研究进展[J].水土保持研究,2010,17(2):120-124.
- [4] Shrimali S S, Aggarwal S P, Samra J S. Prioritizing erosion-prone areas in hills using remote sensing and GIS: a case study of the Sukhna Lake catchment, Northern India[J]. International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation,2001,3(1):54-60.
- [5] 史培军,袁艺,陈晋.深圳市土地利用变化对流域径流的影响[J].生态学报,2001,21(7):1041-1049.
- [6] 牟凤云,龙秋月,余情,等.基于SCS模型的巫山县降雨径流多情景模拟[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2020,39(2):118-125.
- [7] Mishra S K, Jain M K, Bhunya P K, et al. Field Applicability of the SCS-CN-Based Mishra-Singh General Model and its Variants[J]. Water Resources Management,2005,19(1):37-62.
- [8] 张卫,张展羽,杨洁,等. SCS模型在红壤土坡地降雨径流量估算中的应用[J].水土保持通报,2014,34(5):124-127.
- [9] 俞彦,张行南,张鹏,等.基于SCS模型和新安江模型的雨量预警指标综合动态阈值对比[J].水资源保护,2020,36(3):28-33.
- [10] 吕婷婷,李林森,朱世峰,等.近30a来白洋淀土地利用变化规律及驱动力分析[J].水利水电技术,2020,51(3):37-44.
- [11] SCS. National Engineering Handbook: section 4 Hydrology[Z]. Washington DC, USA: Soil Conservation Service, US Department of Agriculture, 1956.
- [12] 李亦然,张兴刚,程甜甜,等.SCS模型在鲁中南低山丘陵区径流估算中的优化及应用评价[J].中国水土保持科学,2019,17(2):112-120.
- [13] 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.
- [14] 权瑞松.基于情景模拟的上海土地利用变化预测及其水文效应[J].自然资源学报,2018,33(9):1552-1562.
- [15] 邓睿,张治意,陈亚,等.嘉陵江流域下游地表径流对土地利用变化的响应[J].水土保持研究,2019,26(3):141-147.
- [16] USDA. SCS National Engineering Handbook[M]. Washington DC, USA: Government Print Office, 1972.
- [17] 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.
- [18] 胡晓静,吴敬东,张耀方,等.北京山区SCS模型参数研究[J].中国给水排水,2018,34(3):125-128.
- [19] 曹言,柴素盈,王杰,等.昆明市主城区土地利用变化对地表径流的影响[J].水电能源科学,2018,36(8):22-25.
- [20] 要志鑫.不透水面与地表径流时空相关性研究[D].北京:中国地质大学,2019.