

# 徐州市土地利用变化对径流的影响

薛丽芳, 于红学, 郑青青, 江燕

(中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** [目的] 研究 1983—2013 年徐州市土地利用变化对径流的影响, 为该市水资源利用与保护和土地利用结构调整服务。[方法] 基于 Landsat TM/ETM<sup>+</sup> 影像提取徐州市土地利用变化信息, 采用验证后的 SCS(soil conservation service)水文模型模拟了不同降水条件和下垫面状态下径流量的时空特征。[结果] (1) 丰、平、枯降水条件下, 年均径流深分别增加 46, 42 和 38 mm; (2) 径流深变化范围为 299~800 mm; (3) 林地与建设用地之间转换导致径流系数的变化超过 0.3, 其余在 0.1~0.3 之间; (4) 不同土壤湿润程度条件下, 径流增幅大小表现为: AMC I > AMC II > AMC III。[结论] 建设用地的增加是近期径流增大的主要因素; 2003 年建设用地比超过 20%, 为土地利用变化影响径流突变的一个阈值; 径流深的高值区为水体、建设用地、耕地以及煤矿区, 低值区为林、草地; 林地转为建设用地导致最大的径流增加值。

**关键词:** 土地利用变化; 径流; SCS 模型; 徐州市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)02-0027-06

中图分类号: P343.9

## Effects of Land Use Change on Runoff in Xuzhou City

XUE Lifang, YU Hongxue, ZHENG Qingqing, JIANG Yan

(The School of Resource and Geo-Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

**Abstract:** [Objective] To study the influence of land use change on the runoff in Xuzhou City from 1983 to 2013, and provide reference for water resources utilization and protection and land use structure adjustment in the city. [Methods] Using the data of land use change derived from Landsat TM/ETM<sup>+</sup>, the spatiotemporal characteristics of runoff were simulated using soil conservation service hydrological model(SCS). [Results] (1) In the years with abundant, normal and scarce rainfalls, the annual runoff depth was found increased by 46, 42, and 38 mm, respectively; (2) The runoff depth ranged from 299 mm to 800 mm. (3) The runoff coefficient was found with the most significant variation as high as 0.3, when forest was transformed to construction lands, other transformation ranged from 0.1 to 0.3; (4) The averaged increases of runoff on different soil moisture conditions ranked as: AMC I > AMC II > AMC III. [Conclusion] The increase of construction land was the major factor that resulted in the increase of the runoff in recent years. The percentage of construction land reached the threshold value of 20% in 2003, which corresponded to the runoff inflection point. Water-covered land, construction land, farmland, and coal mining land were the types with high depth value of runoff, whereas, forest and grass land has the low runoff depth. The transformation from forest to construction land caused the most significant increase of runoff coefficient.

**Keywords:** land use change; runoff; SCS model; Xuzhou City

城市化过程中不透水地面的增加,使得下垫面的蒸散能力、滞水性和渗透性等均发生明显变化,影响流域的产流过程。研究<sup>[1-5]</sup>表明,不透水面积比与径流深和洪峰流量呈明显的正相关关系,使得集水区降水损失水量减少,天然调蓄能力减弱,径流系数显著提高;另一方面,城市地表汇流呈现坡道和管道相结合的特点,使集汇流速度明显增大,城市及其下游

的洪水过程线变陡,洪现时间提前,城市地表径流量大大增加。城市土地利用/覆被(LUCC)的径流过程响应成为城市水文和城市生态研究的热点。目前国内的研究区域主要集中在“快速或高度城市化地区”<sup>[6-12]</sup>。而土地利用变化对径流的影响具有明显的区域特点,将不同地区研究成果归纳总结出规律性的结论是今后研究的主要方向。作为全国重要的水陆

收稿日期:2014-07-05

修回日期:2014-09-13

资助项目:国家自然科学基金项目“面向流域的城市化水文效应与城市可持续发展”(41201166); 国家国际科技合作专项(2012DFG22140); 江苏高校优势学科建设工程项目

第一作者:薛丽芳(1975—),女(汉族),山西省柳林县人,博士,副教授,主要从事数字城乡规划的研究。E-mail: xuel76@163.com。

交通枢纽和淮海经济区的核心城市,徐州市经济开发强度大、城市化进程迅速,城市用地加速扩展。2012年徐州市人均 GDP 为 76,923 元,城市总人口 250 万人,建成区面积 253 km<sup>2</sup>。同时,徐州市是华东地区重要的煤炭生产供应基地,有百余年的煤炭开采史。煤炭资源具有生命周期特点,随着煤炭资源的枯竭,徐州市由典型的矿业城市向多样化与综合化职能城市转型。城市职能转型对土地利用结构产生较大的影响,2013 年徐州市采煤塌陷地面积达到 22 km<sup>2</sup>,大面积的资源开采区和塌陷区改变了局部水循环过程。区域中心性城市和矿业城市转型对徐州土地利用过程及其水生态环境产生双重而深刻的影响。对徐州市土地利用变化的径流响应的研究,既可以充实土地利用变化径流响应研究的案例,也可为该市的水资源利用与保护以及土地利用结构调整提供一定的参考价值。

## 1 研究区概况和研究方法

### 1.1 研究区概况

徐州市位于江苏省西北部、苏鲁豫皖 4 省交界处。徐州市区面积 3 059 km<sup>2</sup>,包含鼓楼、云龙、泉山、铜山和贾汪 5 个区。地貌属鲁中南剥蚀低山丘陵的南延部分,平原洼地占 90%,气候属暖温带半湿润季风气候,年平均降水量 830~860 mm,汛期(6—9 月份)降水量占全年的 70%,水系属淮河流域,以故黄河为界形成 3 个独立的水系:北侧为沂泗运水系,南侧为濉安河水系,故黄河滩地由于河床淤高为“悬河”而单独成一个水系。1978—2013 年,徐州市区人均 GDP 增加 7.5 万元,非农人口增加 189 万人,建成区面积扩展 210 km<sup>2</sup>。城市化进程中快速的经济、人口、空间增长对水资源和水环境造成了严重的胁迫。

### 1.2 数据来源及处理

1.2.1 土地利用数据 以 1983,1993,2003,2013 年 4 期 Landsat TM/ETM<sup>+</sup> 影像提取土地利用信息,参照国家资源环境遥感宏观调查分类系统,将土地利用类型划分为耕地、林地、草地、建设用地、水体和未利用地 6 大类。采用 ENVI 软件对影像进行几何校正、辐射校正、重采样及图像滤波和增强等预处理,结合研究区的地物类型和实地考察,以监督分类中的支持向量机分类法为主对影像进行解译,得到 4 期的土地利用分类数据(图 1)。采用混淆矩阵对分类结果进行精度评价,1983,1993,2003,2013 年 4 期影像的总体精度分别为 84.9%,87.6%,89.4%,88.2%;Kappa 系数分别为 0.80,0.85,0.87,0.86。Kappa 系数均达到 0.8 以上,其精度满足土地利用遥感监测的要求。

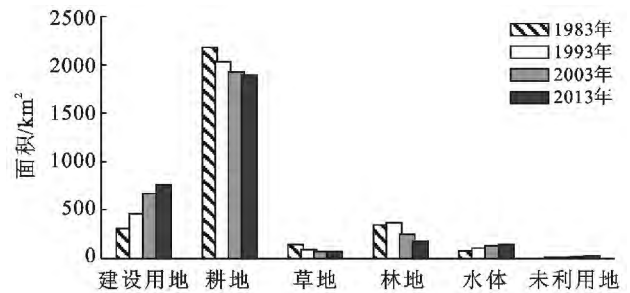


图 1 徐州市 1983—2013 年土地利用状况

徐州市土地利用结构以耕地、建设用地和林地为主,3 种用地类型比 1983,1993,2003,2013 年 4 期均占到 90% 以上。1983—2013 年占比变化增加的土地类型为建设用地、水域和未利用地;建设用地从 311.06 km<sup>2</sup> 增加到 755.51 km<sup>2</sup>,增加了 1.4 倍,水体增加了 68 km<sup>2</sup>,未利用地增加了 18.24 km<sup>2</sup>。减少的土地利用类型为耕地、林地和草地,分别减少了 286,174,71 km<sup>2</sup>。建设用地的增加无疑源于城镇化进程,结合土地利用变化的转移矩阵,其用地来源主要为耕地(438 km<sup>2</sup>)、林地(59 km<sup>2</sup>)和草地(19 km<sup>2</sup>)。水体和未利用地的增加主要源于东北贾汪和西北铜山的煤矿区内采空区和塌陷地的增加。

1.2.2 地形、土壤数据和气象数据 DEM 数据是水文模型中子流域划分、水系生成以及汇流模拟的基础。由国际科学数据服务平台下载分辨率为 30 m 的 DEM 数据。徐州市的土壤类型主要为潮土、砂礓黑土、紫色土、水稻土、脱盐花碱土以及褐土,土壤空间分布来源于 1:100 万中国土壤数据库和《徐州市土壤志》。依据土壤的渗透率,将其归并为符合 SCS 模型土壤类型。

气象数据获取于徐州市水利局和气象局,包括徐州站、蔺家坝站、解台闸站 1963—2012 年逐日、月最高、最低气温、降水量、风速、湿度、太阳辐射量等数据。利用 3 个站点的降水量的面积加权平均值求得年降雨理论频率曲线,研究区降水频率为 10%,50% 和 90% 时的降水量分别为 1 050,803 和 635 mm。

### 1.3 研究方法

1.3.1 SCS 模型原理 SCS 模型是美国农业部水土保持局开发并研制的流域水文模型,SCS 模型由于综合考虑到流域下垫面的特点(土壤类型、土地利用类型和前期土壤含水量等),既可以计算人类活动对径流的影响,也可以建立水文模型参数和遥感信息之间的联系,因而得到广泛应用。SCS 模型的基本产流方程<sup>[13]</sup>为:

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

式中:  $P$ ——单次降水的降水总量(mm);  $Q$ ——径流量(mm);  $S$ ——流域当时的可能最大滞留量(mm)。  $S$  主要与地表覆被条件和土壤相关,因其不易求,模型引入 CN 值以确定  $S$ 。CN——反映降水前流域综合特征的无量纲参数,取值范围在 0~100 之间,与前期土壤湿润程度(AMC: AMC I—干旱, AMC II—平均, AMC III—湿润)、土壤类型和土地利用状况等方面有关,可以通过模型提供的 CN 查算表获得。CN 值与  $S$  之间的关系为:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2)$$

基于 CN 查算表和徐州地区的实际条件,确定了研究区中等前期土壤湿润度(AMC II)条件下的不同土地利用所对应的 CN 值(表 1)。

表 1 徐州市 AMC II 条件下不同土地利用的 CN 值

土地类型	不同水文土壤组			
	A	B	C	D
耕地	62	71	78	81
林地	25	55	70	77
草地	30	58	71	78
水体	100	100	100	100
建设用地	72	81	85	88
未利用地	76	85	94	94

注: A 组以砂质土为主; B 组以沙壤土为主; C 组以轻壤土为主; D 组以黏土为主。

1.3.2 模型参数验证 选择研究区内唯一具有长期水文资料的子流域房亭河流域对模型进行参数验证。该子流域介于研究区内的故黄河以北、京杭运河以南,刘集闸站以上集水面积 933 km<sup>2</sup>。基于上述数据获取方式得到房亭河流域的土壤分类图、土地利用分类图和 DEM,以 1980—2005 年流域年降水量和

1993 年的土地利用类型为输入,模拟出流域 1980—2005 年的径流量,与实测径流量进行比较(图 2)。选用线性回归系数  $R^2$  和 Nash—Suttcliffe(NS)效率系数评价模型适应性<sup>[14]</sup>。经计算,模拟值和实测值的  $R^2$  为 0.86, NS 为 0.84,表明模型在研究区具有较好的适应性。

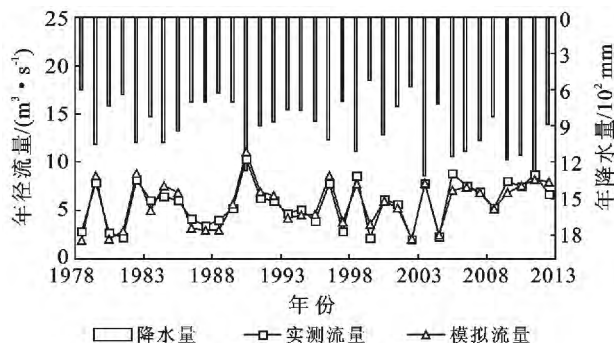


图 2 房亭河流域的径流模拟值与实测值

## 2 结果与分析

### 2.1 土地利用变化对年平均径流的影响

选取降水频率为 10%、50%和 90%时的降水量,模拟流域在 AMC II 条件下 4 期土地利用情景的径流变化(表 2)。结果表明:(1)同一时期,随着雨量的增大,径流量和径流系数呈增大趋势,表明降水性质在一定程度上决定着降水—径流关系。(2)不同降水条件下,由建设用地增加主导的土地利用变化使得径流深和径流系数呈增加趋势。1983—2013 年,降水为丰、平、枯水期的径流增加量分别 46, 42 和 38 mm,变化率分别为 5.15%, 6.42%和 7.69%,径流系数分别增加 4%, 6%和 6%。(3)不同降水条件下,土地利用类型变化使径流变化的绝对量和相对量呈相反的趋势,绝对变化量表现为:丰水年 > 平水年 > 枯水年,相对变化量表现为:枯水年 > 平水年 > 丰水年。即随着雨量的增大,径流的绝对量增大,而土地利用变化导致径流增幅的相对量呈减少趋势。

表 2 徐州市区设计年降雨量的年径流深模拟结果(AMC II 条件下)

降雨频率	年降雨量/mm	1983 年		1993 年		2003 年		2013 年	
		Q/mm	C	Q/mm	C	Q/mm	C	Q/mm	C
10%	1 050	893	0.85	898	0.86	916	0.87	939	0.89
50%	803	654	0.81	659	0.82	675	0.84	696	0.87
90%	635	494	0.78	499	0.79	513	0.81	532	0.84

注: Q 为年径流深, C 为年径流系数。下同。

进一步分析 10 a 尺度的径流变化,以平水年为例,1983—1993 年径流深增加了 5 mm, 1993—2003

年为 16 mm, 2003—2013 年为 21 mm。与土地利用类型的阶段变化综合分析可知,各种用地类型绝对变

化量的最大值并非发生于径流变化最大的 2003—2013 年期间,如 1993—2003 年建设用地增加 214 km<sup>2</sup>,林地减少 130 km<sup>2</sup>,而耕地和草地在 1983—1993 年减少量最多,分别为 150 和 49 km<sup>2</sup>。表明整体的土地利用类型变化与各种类型之间的转化对径流的影响并非简单的线性相关,而是具有累积扩大和耦合剂涨效应。2003 年建设用地的比例达到 21.9%,1993—2003 年径流深的增加值是 1983—1993 年的 3.2 倍。2013 年建设用地的比例为 24.7%,2003—2013 年径流深的增加值是 1993—2003 年的 1.3 倍。2003 年后建设用地面积及其对径流影响的相对量均呈减小趋势,可见,20% 的建设用地比是研究区径流突变的阈值,这与 Ng, Marsalek 和 Brun, Band<sup>[15-16]</sup> 等人提出的不透水面积比率 20% 是径流迅速增加的阈值的观点相吻合。

此外,研究区总体的径流系数都比较高,最小值为 1983 年 90% 降水条件下的 0.78。究其原因一方面与研究区属于城市区域,建设用地所占比例高(1983 年建设用地比例已达 10.16%),产流量大;此外,高强度的土地开发利用程度和较高的耕地比例也是原因之一。与建设用地相比,耕地的高产流能力往往被忽视。而相关研究<sup>[17-18]</sup> 证明,耕地由于极大地破坏了土壤结构,促使土壤压实和结皮,入渗速率和土

壤蓄水含量降低,使得年径流量和洪峰流量增加。

### 2.2 径流的空间分布特征

在降水频率 50%、AMC II 条件下模拟了研究区 1983,1993,2003,2013 年 4 期土地利用状况下年平均径流深(图 3)。随着时间的推移,各个时期径流深高值区和低值区的相对中心位置没有明显变化,但空间范围和面积发生了变化,径流深的高值区不断增加而低值区不断减少。

径流深的高值区(CN 的高值区)即产流量较大的区域是水体、建设用地区和耕地。建设用地主要分布于城市中心区(云龙、鼓楼、泉山区),以及贾汪和铜山的各级行政单元政治经济集中区,由于其不透水性而使得产流能力大大加强。水体一部分为自然河流湖泊,集中于研究区北部的南四湖区和故黄河沿线的湖泊、水库,另一部分为人为活动所致,集中于贾汪和铜山的采煤塌陷地。如由徐州市区最大的采煤塌陷地——贾汪区权台矿和旗山矿采煤塌陷区改造而形成的潘安湖总面积达 11 km<sup>2</sup>。水体因其自然属性而有高的产流能力。径流深低值区(CN 的低值区)是林地、草地等具有自然生态服务功能的区域,集中于植被覆盖较好的低山丘陵地区,如大洞山(361 m)、泉山(238 m)和吕梁山(206 m),以及为改善城市环境而增加和改造的各类城市公园、绿地。

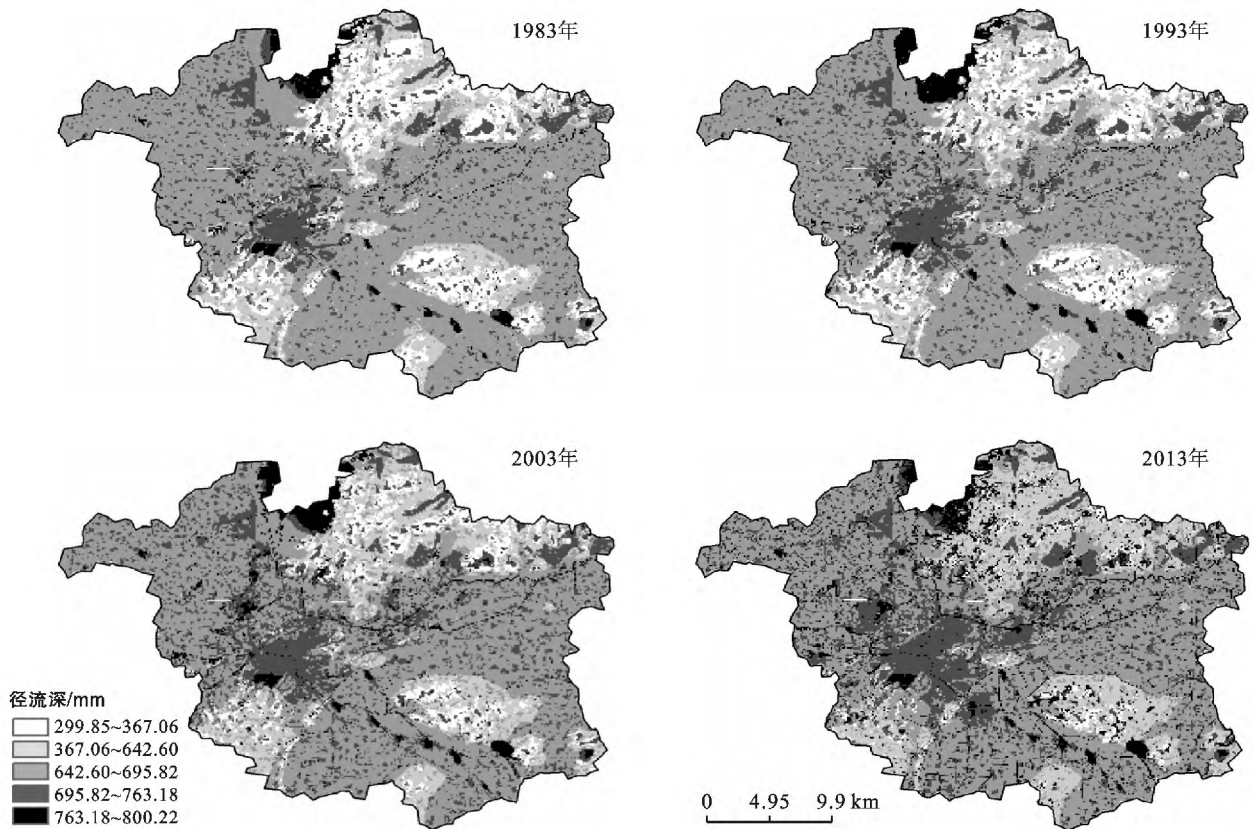


图 3 研究区前期土壤湿润程度为平均状况时的径流深

### 2.3 不同土地利用类型的水文敏感性

土地利用变化对径流的影响并非简单的线性相关,那么各种用地类型之间的相互转化对产流量的贡献有何差异?本研究在 10 a 时间尺度下分析不同土地利用类型的相互转换对径流的影响,以进一步区分不同土地利用类型对水文效应的敏感性。表 3 为降水频率为 50% 条件下 1983—1993 年,1993—2003 年,2003—2013 年土地利用类型转换所导致的径流系数变化矩阵。从表 3 可以看出:(1)各个时间段内,林地向建设用地转换产生的径流系数增加值都最大,增幅在 0.3 以上;其次为林地向耕地、草地向建设用地、草地向耕地的转换,径流系数的增幅在 0.18~0.3 之间。(2)与径流系数增加的用地转换类型相反,建设用地向林地转换使得径流系数的减少值也是最大,减幅均 $\geq 0.3$ ;其次为耕地向林地、建设用地向

草地的转换,减幅在 0.2~0.3 之间;再次为耕地向草地的转换,减幅在 0.1~0.2 之间。(3)建设用地向耕地、草地向林地转换会使得径流系数增加,反之径流系数减少,但变化的幅度比较小,在 0.05 左右。表明建设用地与耕地,林地与草地具有相似的产流功能。

林地和草地作为生态用地具有维持区域水生态平衡的功能。林地通常会减少流域的径流量,而种草和绿化同样具有减少年径流量、拦蓄洪水的作用,天然林地和草地被农业用地和建设用地取代将使得基流减少、地表产流增加。可见林、草地具有正的水文敏感性,而建设用地和耕地具有负的水文敏感性。在国内目前大规模的城市化进程中,如何应用土地利用类型水文敏感性的特点,通过规划干预,构建科学的城市用地空间结构,缓解土地利用产生的负向水效应,重建与自然平衡的城市规划与发展理念,值得深入研究。

表 3 各阶段土地利用类型转换的径流系数变化

阶段	土地利用类型	建设用地	耕地	草地	林地
1983—1993 年	建设用地	0	-0.057	-0.215	-0.325
	耕地	0.054	0	-0.147	-0.257
	草地	0.198	0.188	0	0.054
	林地	0.319	0.296	-0.058	0
1993—2003 年	建设用地	0	-0.058	-0.216	-0.325
	耕地	0.056	0	-0.123	-0.247
	草地	0.234	0.213	0	0.058
	林地	0.301	0.287	-0.056	0
2003—2013 年	建设用地	0	-0.046	-0.275	-0.300
	耕地	0.057	0	-0.190	-0.208
	草地	0.252	0.214	0	0.054
	林地	0.303	0.268	-0.059	0

### 2.4 不同前期土壤湿润程度下的径流变化

前期土壤湿润程度是影响降水—径流关系的又一个重要因素。通常,对一特定流域,植物截留、填洼可以近似视为一个常数。而下渗量在土壤类型类、土地

利用方式已确定的情况下,主要取决于前期土壤湿润程度(AMC I—干旱,AMC II—平均,AMC III—湿润)。表 4 为 1983—2013 年 50% 降水频率条件、不同前期土壤湿润程度、不同土地利用输入下的径流模拟状况。

表 4 不同前期土壤湿润程度下的径流深变化

项目	1983 年		1993 年		2003 年		2013 年		径流系数变化		
	Q/mm	C	Q/mm	C	Q/mm	C	Q/mm	C	1983—1993 年	1993—2003 年	2003—2013 年
AMC I	523	0.65	532	0.66	555	0.69	586	0.73	+0.03	+0.03	+0.04
AMC II	654	0.81	659	0.82	675	0.84	696	0.87	+0.01	+0.02	+0.03
AMC III	729	0.907	732	0.91	740	0.92	752	0.94	+0.004	+0.01	+0.02

由表 4 可知:(1)不同土壤前期土壤湿润程度,同一土地利用类型时径流的产出量表现为:AMC I < AMC II < AMC III。(2)随着建设用地的增加,不同土壤湿润程度时的径流都表现出增长趋势,但是增加

幅度不同,增幅由大到小表现为:AMC I > AMC II > AMC III。10 a 时间尺度下,AMC I 条件下径流系数的增加值均从 1% 增加到 3%,4%;AMC II 时径流系数的增加值从 1% 增加到 2%,3%;AMC III 时径流系

数的增加值从 0.04% 增加到 1%, 2%。即土壤湿润程度越干, 土地利用变化对径流的影响也越大; 土壤湿润时, 会弱化土地利用类对径流的影响。

### 3 结论

(1) 1983—2013 年, 降水为丰、平、枯水期的径流分别增加 46, 42 和 38 mm。随着雨量的增大, 径流的绝对量增大, 而土地利用变化导致径流增幅的相对量呈减少趋势。1993—2003 年径流深的增加值是 1983—1993 年的 3.2 倍, 2003 年建设用地比超过 20%, 成为径流突变的阈值。

(2) 径流深的变化范围为 299~800 mm, 产流量较大的区域是水体、建设用地区、耕地以及煤矿区, 产流量较小的是林地、草地等区域。

(3) 林地与建设用地之间转换导致径流系数的变化幅度最大, 超过 0.3。其次为林地向耕地、草地向建设用地、草地向耕地的转换。

(4) 不同土壤湿润程度下径流增加的幅度表现为:  $AMC I > AMC II > AMC III$ 。土壤湿润程度越干, 土地利用变化对径流的影响也越大; 土壤湿润时, 会弱化土地利用类对径流的影响。

总之, 降水和土地利用、土壤类型、前期土壤湿润程度等流域下垫面因素综合影响着影响区域降水—径流关系。降水的丰枯在一定程度上决定着径流的多少。而城市化进程中建设用地的增加是近年来径流增加的主要原因。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Camorani G, Castellarin A, Brath A. Effects of land-use changes on the hydrologic response of reclamation systems[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2005, 30(8): 561-574.
- [2] 徐光来, 许有鹏, 徐宏亮. 城市化水文效应研究进展[J]. *自然资源学报*, 2010, 25(12): 2171-2178.
- [3] 张建云. 城市化与城市水文学面临的问题[J]. *水利水运工程学报*, 2012(1): 1-4.
- [4] 颜文涛, 周勤, 叶林. 城市土地使用规划与水环境效应: 研究综述[J]. *重庆师范大学学报: 自然科学版*, 2014, 31(3): 35-41.
- [5] 赵安周, 朱秀芳, 史培军, 等. 国内外城市化水文效应研究综述[J]. *水文*, 2013, 33(5): 16-22.
- [6] 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.
- [7] 袁建新, 王寿兵, 王祥荣, 等. 基于土地利用/覆盖变化的珠江三角洲快速城市化地区洪灾风险驱动力分析: 以佛山市为例[J]. *复旦大学学报: 自然科学版*, 2011, 50(2): 238-244.
- [8] 高晓薇, 刘家宏. 深圳河流域城市化对河流水文过程的影响[J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2012, 48(1): 153-159.
- [9] 许有鹏, 丁瑾佳, 陈莹. 长江三角洲地区城市化的水文效应研究[J]. *水利水运工程学报*, 2009(4): 67-73.
- [10] 程江, 杨凯, 刘兰岚, 等. 上海中心城区土地利用变化对区域降雨径流的影响研究[J]. *自然资源学报*, 2010, 25(6): 914-925.
- [11] 李倩. 秦淮河流域城市化空间格局变化及其水文效应[D]. 江苏南京: 南京大学, 2012.
- [12] 刘玉明, 张静, 武鹏飞, 等. 北京市妫水河流域人类活动的水文响应[J]. *生态学报*, 2012, 32(23): 7549-7557.
- [13] 袁作新. 流域水文模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- [14] 曹隽隽, 周勇, 吴宜进, 等. 江汉平原土地利用演变对区域径流量影响[J]. *长江流域资源与环境*, 2013, 22(5): 610-617.
- [15] Brun S E, Band L E. Simulating runoff behavior in an urbanizing watershed[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2000, 24(1): 5-22.
- [16] Ng H Y F, Marsalek J. Simulation of the effects of urbanization on basin streamflow [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1989, 25(5): 117-124.
- [17] Sullivan A, Ternan J L, Williams A G. Land use change and hydrological response in the Camel catchment, Cornwall[J]. *Applied Geography*, 2004, 24(2): 119-137.
- [18] Moussa R, Voltz M, Andrieux P. Effects of the spatial organization of agricultural management on the hydrological behaviour of a farmed catchment during flood events[J]. *Hydrological Processes*, 2002, 16(2): 393-412.