

沱水流域中上游径流对不透水面扩张的响应

蒋昌波^{1,2}, 钟量¹, 隆院男^{1,2}, 刘婕³

(1. 长沙理工大学 水利工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114; 3. 长沙水文水资源勘测局, 湖南 长沙 410001)

摘要: 为研究径流对不透水面扩张的响应,通过建立沱水流域中上游 HSPF 模型,构建研究区 2000–2015 年不透水面扩张情景,探究该区域径流对不透水面扩张的响应。结果表明:HSPF 模型月流量模拟精度较高,在本研究区有良好的适用性;在 2000–2015 年研究区不透水面扩张情景下,研究区不透水面扩张会引起年径流深小幅增长,不透水面扩张对枯水期径流深的影响大于对汛期径流深的影响,且不透水面扩张对枯水年径流深的影响最大,平水年次之,丰水年最小;相较于整个研究区,主城区与研究区不透水面扩张对径流深的影响在趋势上是一致的,但是主城区的影响程度比研究区大。

关键词: 不透水面; 径流; HSPF 模型; 沱水流域

中图分类号:P343.9

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2019)05-0032-08

Response of runoff to impervious surface expansion in the upper and middle reach of the Weishui River Basin

JIANG Changbo^{1,2}, ZHONG Liang¹, LONG Yuannan^{1,2}, Liu Jie³

(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Key Laboratory of Water – Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha

410114, China; 3. Hydrology and Water Resources Bureau of Changsha, Changsha 410001, China)

Abstract: In order to study the response of impervious surface expansion on runoff, this paper establishes the HSPF model in the upper and middle reach of the Weishui River Basin, and constructs impervious surface expansion scenario from 2000 to 2015. The results showed that the HSPF model has high precision on monthly runoff simulation, and is feasible in the studying area. The impervious surface expansion of the studying area will cause a small increase in annual runoff. The impact of impervious surface expansion on runoff during dry season is greater than that on runoff during flood season, and the impervious surface expansion has the greatest impact on the annual runoff depth of dry years, followed by the flat water years and the smallest in wet years. The runoff response of the impervious surface expansion in the main urban area is consistent with the trend of the whole study area, but its response is more severe than that of the whole study area.

Key words: impervious surface; runoff; hydrological simulation program-fortran (HSPF) model; Weishui River Basin

1 研究背景

不透水面是指经过人为改造的、具有阻止水下渗特性的非天然地表面,如屋顶、道路、停车场等^[1]。随着城镇化高速发展,引起了不透水面的持续扩张^[2-3]。流域不透水面的大幅扩张改变了下垫

面物理特征,导致流域降雨径流过程的变化^[4-6],表现在同等降雨强度下,汇流时间缩短,径流强度增加,从而导致内涝和洪水等极端水文事件发生频率增高^[7-10]。

国内外学者对不透水面扩张及城市化与径流响应进行了大量研究,主要集中在不透水面扩张及城市化

收稿日期:2019-03-13; 修回日期:2019-05-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51839002、51809020)

作者简介:蒋昌波(1970-),男,陕西石泉人,博士,教授,主要从事河流、海岸动力过程及其模拟技术研究。

通讯作者:隆院男(1985-),男,湖南长沙人,博士,讲师,主要从事水资源与水环境方面的研究。

对径流量及基流的影响等方面。Brun 等^[11]基于 HSPF 模型研究美国 Gwynns Falls 流域上游城市化的径流响应,得到当不透水面百分比由 13% 增长到 18% 时,基流下降 20%;当不透水率超过 20% 时,基流系数变化剧烈。Choi 等^[12]构建 Milwaukee River 流域未来土地利用情景,并采用 HSPF 模型研究城市扩张对径流的影响,认为当城市面积增幅较小时,不会引起明显的径流变化。Du 等^[13]基于 HEC-HMS 模型研究深圳龙华流域城市不透水面位置对洪峰流量的影响,结果表明在上下游增加相同不透水面情况下,上游不透水面扩张引起的洪峰流量比下游不透水面扩张引起的洪峰流量大 14 倍,并且不同子流域新增的不透面对洪峰流量的影响不同。刘珍环等^[14]基于 L-THIA 模型对深圳市不透水面扩张的径流响应进行研究,结果表明当不透水面百分比由 26.5% 扩张至 49.3% 时,不同日降雨强度和典型水文年的径流量显著增加。司巧灵等^[15]基于 HEC-HMS 模型对城市化流域洪水进行模拟,研究结果表明不透水面积极明显增加会导致雨量下渗减少,产流量增加,同时使得坡面汇流和河道汇流时间缩短,进而导致洪峰流量增加,峰现时间提前。目前在不透水面扩张及城市化的径流响应研究中,大多从土地利用变化的角度开展研究,其模拟结果易受不同土地利用类型相互转化的影响。为消除不透水面扩张以外的其他土地利用相互转化对径流的影响,本文以洮水流域中上游为研究区,通过构建研究区 2000-2015 年不透水面扩张情景,采用 HSPF 模型来探讨研究区及其主城区不透水面扩张对径流的影响规律,为研究区域水资源开发提供决策参考。

2 数据来源与方法

2.1 水文气象数据

本文以宁乡(二)水文站以上控制流域为研究区,宁乡(二)水文站位于湖南省宁乡市城郊乡洮丰坝村(东经 112°34′、北纬 28°16′),洮水流域中上游及其主城区地理位置如图 1。

流量数据采用 2006-2012 年宁乡(二)水文站日流量数据,气象数据采用 1980-2012 年宁乡气象观测站日降雨量、日均气温、日最高气温、日最低气温、日均风速以及巷子口、流沙河、石坝子站日降雨量,其余气象数据(太阳辐射、云层覆盖、潜在蒸散发等)由 WDMUtl 生成。

2.2 下垫面数据

下垫面数据包括 DEM 数据、土地利用和土壤数据。DEM 数据来源于地理空间数据云平台,分辨率

为 30 m × 30 m (图 2)。土地利用数据采用中国科学院资源环境数据云平台 2000、2005、2010、2015 年 4 期土地利用数据,比例为 1:100000;根据研究区土地利用特点,对土地利用类型进行重新分类,主要分为:不透水面、耕地、林地、水域/湿地以及裸地(图 3)。土壤数据采用中国科学院资源环境数据云平台 1:1000000 土壤类型分布图,对土壤类型图进行重新分类,共分 5 类:红壤、黄壤、紫色土、石质土、水稻土(图 4)。



图1 研究区位置及子流域划分示意图

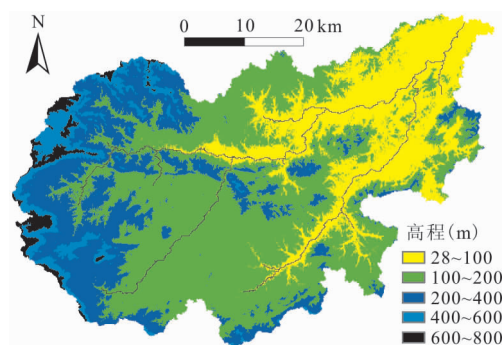


图2 研究区 DEM 图

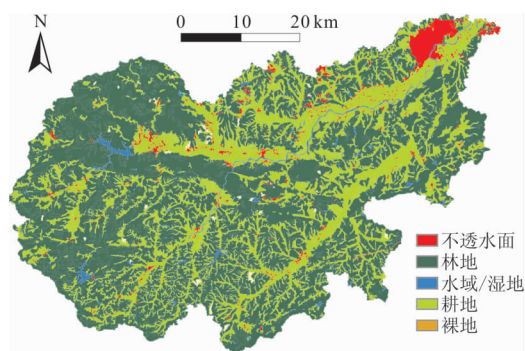


图3 研究区土地利用类型分布

2.3 研究方法

HSPF 模型于 1981 年由 Robert Cart Johanson 基于 SWM (斯坦福模型) 提出,主要基于气象和下垫面异质性划分水文响应单元,采用物理定律与经验

公式模拟水文响应单元中水体运动,使模型既具有分布式水文模型的特点,又减少了计算冗余^[16-17]。HSPF 模型中水文响应单元的水文模拟由按照水量平衡原理计算入流与出流的 5 个蓄积层完成,分别为截留蓄积层、上土壤层蓄积层、下土壤层蓄积层、浅层地下水蓄积层、深层地下水蓄积层。河段径流演算通过建立水深、体积、水表面积与出流量的函数关系来完成^[18-19]。随着 HSPF 模型的发展与完善,美国环保署于 1988 年将该模型开发成 WinHSPF 软件,并与 WDMUtl 工具、GIS 工具、GenScn 工具集成到 Basins 平台中,可快速、方便建立 HSPF 模型。其中,WinHSPF 用于参数调整与气象异质性划分,GIS 用于子流域划分、河网提取与下垫面异质性处理,WDMUtl 用于气象数据的批量输入、时间步长的转换、缺测数据的插补,GenScn 用于模拟结果分析与输出^[20]。HSPF 模型不仅能用于水文过程模拟,还能用于面源污染和点源污染演进过程的模拟,被广泛用于流域尺度的水文水环境研究^[17]。

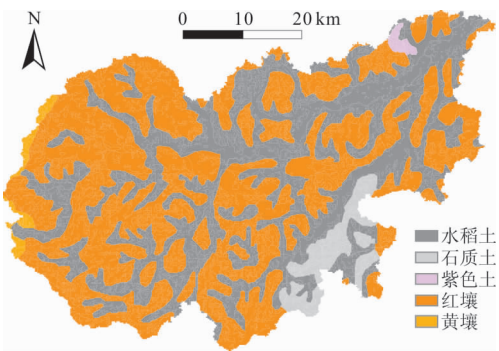


图4 研究区土壤类型分布

3 HSPF 模型的建立与校准

3.1 模型的建立

考虑流域下垫面特性、水文气象测站分布等情况,进行下垫面异质性处理(图 5)和气象异质性处理(表 1),并基于 DEM 数据将沅水流域中上游划分 23 个子流域(图 1)和 282 个水文响应单元。

表 1 子流域气象站点分配

编号	名称	属性	分配子流域编号	子流域合计数
1	宁乡	气象站	1、23	2
2	石坝子	水文站	2、3、12、18、19、22	6
3	流沙河	雨量站	5、7、11、13、14、15、16、17、20、21	10
4	巷子口	雨量站	4、6、8、9、10	5

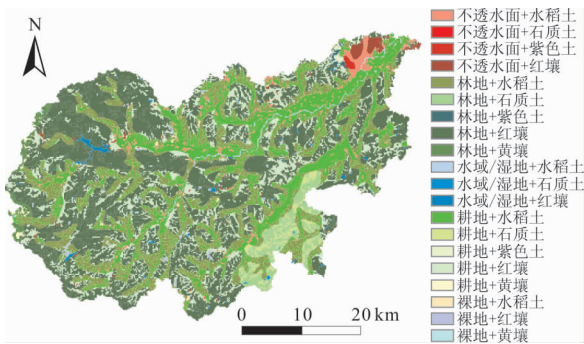


图5 研究区下垫面异质性处理

3.2 模型的适用性评价

采用宁乡水文站(二)实测月均流量数据进行模型率定与验证,率定期为 2006 – 2009 年,验证期为 2010 – 2012 年,图 6 为实测值与模拟值对比图。采用相关系数 R^2 和纳什效率系数 E_{ns} 对模型进行适用性评价,其表达式见公式(1)与公式(2)。率定期与验证期的相关系数分别为 0.92、0.97,纳什系数分别为 0.85、0.90,模拟结果表明模型在沅水流域中上游有良好的适用性。

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N [(Q_i - \bar{Q})(q_i - \bar{q})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (q_i - \bar{q})^2}} \right]^2 \quad (1)$$

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - q_i)^2}{\sum_{i=1}^N (q_i - \bar{q})^2} \quad (2)$$

式中: Q_i 为模拟流量; q_i 为实测流量; $\bar{q}$ 为实测流量平均值; i 为时间序列; N 为时间序列长度。

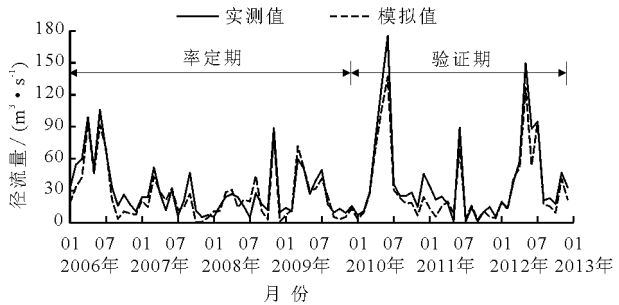


图6 2006 – 2012 年宁乡水文站(二)月均流量
实测值与模拟值对比

4 研究区不透水面扩张对径流的影响

4.1 研究区不透水面扩张情景设置

本文以 2000 年土地利用数据为基准期,将 2005、2010、2015 年的不透水面分别叠加到 2000 年的土地利用上,分析沱水流域中上游径流对不透水面扩张的响应,具体情景设置见表 2,各情景研究区不透水面扩张情况见图 7。

4.2 研究区不透水面扩张情景下的土地利用变化

表 3 为沱水流域中上游各情景下土地利用面积,由表 3 可知,林地面积最大,耕地面积次之,以上两类土地利用类型面积占研究区面积的 90% 以上,其余土地利用类型面积依次为不透水面、水域/湿地、裸地;其中,不透水面面积占比虽小,但是增长迅速,由 A0 情景的 32.79 km² 增长到 A3 情景的 79.12 km²,增幅达 141%,年均增长 9.4%。

表 2 研究区不透水面扩张情景设置

情景	情景描述	备注
A0	2000 年土地利用	
A1	2005 年不透水面叠加 2000 年土地利用	仅考虑不透水面扩张引起的土地利用变化
A2	2010 年不透水面叠加 2000 年土地利用	
A3	2015 年不透水面叠加 2000 年土地利用	

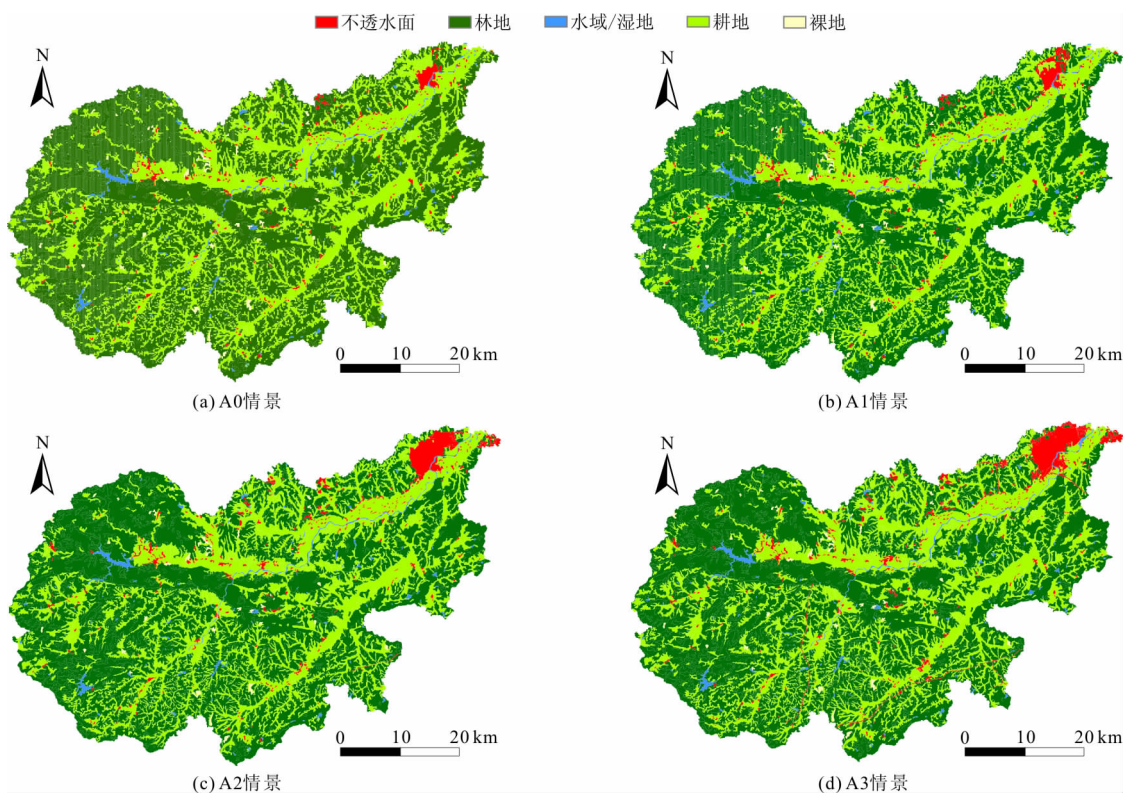


图 7 研究区不透水面扩张情景

表 3 研究区不透水面扩张情景土地利用面积统计表

土地利用类型	A0 情景/ km ²	占总面积 比例/%	A1 情景/ km ²	占总面积 比例/%	A2 情景/ km ²	占总面积 比例/%	A3 情景/ km ²	占总面积 比例/%
耕 地	779.44	34.7	775.58	34.5	765.71	34.1	755.12	33.6
裸 地	8.99	0.4	8.99	0.4	8.87	0.4	8.87	0.4
森 林	1397.16	62.3	1394.51	62.1	1383.72	61.6	1375.36	61.3
不透水面	32.79	1.4	39.3	1.8	60.17	2.7	79.12	3.5
水域/湿地	27.58	1.2	27.58	1.2	27.49	1.2	27.49	1.2
合计	2245.96	100	2245.96	100	2245.96	100	2245.96	100

4.3 研究区不透水面扩张对年径流的影响

表 4 和图 8 给出了研究区不同情景下年均径流深的变化规律,在 A0、A1、A2、A3 情景下,研究区年均径流深分别为 549.2、550.6、554.9、558.9 mm,研究区 A1、A2、A3 情景较 A0 情景年均径流深分别增长 0.25%、1.03%、1.76%。综上所述,2000–2015 年汾水流域中上游不透水面扩张会引起年径流小幅增长。

表 4 研究区不透水面扩张情景下年均径流深

土地利用情景	不透水率/%	年均径流深/mm	增长率/%
A0	1.46	549.2	0
A1	1.75	550.6	0.25
A2	2.68	554.9	1.03
A3	3.52	558.9	1.76

注:(1)增长率指各土地利用情景年均径流深较 A0 情景年均径流深的增长率。(2)不透水率指不透水面积与研究区面积之比,下同。

4.4 研究区不透水面扩张对汛期径流的影响

本文对研究区不透水面扩张情景下的汛期(4–9 月)和枯水期(1–3 月和 10–12 月)径流深进行模拟研究,结果见表 5 和图 9。由图 9、表 5 可知,在同一研究区不透水面扩张情景下,研究区枯水期年均径流深增长率比汛期年均径流深增长率大。在汛期,研究区 A1、A2、A3 情景年均径流深较 A0 情景年均径流深分别增长 0.23%、0.95%、1.63%;在枯水期,研究区 A1、A2、A3 情景年均径流深较 A0 情景年均径流深分别增长 0.29%、1.20%、2.04%;且随着不透水面扩张,研究区枯水期与汛期年均径流深增长率差值越来越大,研究区枯水期年均径流深增长率与汛期年均径流深增长率的差值由 A1 情景的 0.06% 增长到 A3 情景的 0.41%。综上所述,2000–2015 年研究区不透水面扩张会引起汛期和枯水期径流深增大,但枯水期径流深增大快于汛期的径流深增大,即研究区不透水面扩张对枯水期径流的影响大于对汛期径流的影响。

表 5 研究区不透水面扩张情景下汛期年均径流深

土地利用情景	不透水率/%	枯水期径流深/mm	增长率/%	汛期径流深/mm	增长率/%
A0	1.46	175.2	0	374.0	0
A1	1.75	175.7	0.29	374.9	0.23
A2	2.68	177.3	1.20	377.6	0.95
A3	3.52	178.8	2.04	380.1	1.63

注:增长率指各土地利用情景年均径流深较 A0 情景年均径流深的增长率。

4.5 研究区不透水面扩张对典型水文年径流的影响

采用 P–Ⅲ 型概率曲线对研究区 1980–2012 年降水资料进行频率分析,确定降水量频率 10%、50%、90% 分别对应丰、平、枯水年,其年降水量分别为 1 798、1 415、1 104 mm,选取实测年降水量与降水量频率 10%、50%、90% 对应的降水量最接近的年份作为本文的典型水文年,即丰、平、枯水文年为 1994、2005、1986 年。研究区不透水面扩张情景典型水文年年径流深增长率见图 10 和表 6。

由图 10 可知,在典型水文年不透水面扩张情景下,研究区枯水年年径流深增长率最大,平水年年径流深增长率次之,丰水年年径流深增长率最小。由表 6 可知,在 A1 情景下,丰水年、平水年、枯水年的年径流深分别为 772.9、522.0、424.5 mm,相对 A0 情景年径流深分别增长 0.19%、0.31%、0.34%;在 A2 情景下,丰水年、平水年、枯水年的年径流深分别为 777.6、527.0、429.0 mm,相对 A0 情景年径流深分别增长 0.81%、1.27%、1.42%;在 A3 情景下,丰水年、平水年、枯水年的年径流深分别为 782.2、531.4、433.2 mm,相对 A0 情景年径流深分别增长 1.40%、2.13%、2.42%。综上所述,在 2000–2015 年研究区不透水面扩张情景下,典型年年径流深增幅总是枯水年>平水年>丰水年,即 2000–2015 研究区不透水面扩张对枯水年径流的影响最大,平水年次之,丰水年最小。

5 主城区不透水面扩张对径流的影响

汾水流经宁乡市区,其主城区划分为子流域 1 和 23(见图 1),通过对主城区不透水面数据分析,发现 2000–2015 年主城区的不透水面共新增 32.15 km²,占整个研究区不透水面新增面积的 70%,不透水率由 10.2% 增长到 42.7%(表 7),年均增长 21.1%,由此可见研究区不透水面扩张最为剧烈的区域在主城区。为了探究主城区不透水面扩张对径流的响应,本文采用 4.1 节构建的不透水面扩张情景,对主城区不透水面扩张的年径流及汛期径流响应进行分析。

5.1 主城区不透水面扩张对年径流的影响

表 8 和图 11 给出了主城区不同情景下年均径流深的变化规律。由图 11 可知,在不透水面扩张情景下,主城区年均径流深的趋势为:A0<A1<A2<A3。由表 8 可知,在 A0、A1、A2、A3 情景下,主城区年均径流深分别为 604.2、631.5、708.9、756.3 mm,主城区 A1、A2、A3 情景年均径流深较 A0 情景主城

区年均径流深分别增长 4.52%、17.33%、25.17%，而研究区 A1、A2、A3 情景年均径流深较 A0 情景年均径流深分别增长 0.25%、1.03%、1.76%。综上所述,2000–2015 年主城区不透水面扩张会引起年

径流深较大幅度的增加;相较于整个研究区,在不透水面扩张情景下,主城区年径流深增长幅度超过研究区整体的增长幅度,两者差值最小为 4.27%,最大为 23.41%。

表 6 研究区不透水面扩张情景下典型水文年年径流深

典型水文年	A0 情景径 流深/mm	A1 情景径 流深/mm	增长率/ %	A2 情景径 流深/mm	增长率/ %	A3 情景径 流深/mm	增长率/ %
丰水年	771.4	772.9	0.19	777.6	0.81	782.2	1.40
平水年	520.4	522.0	0.31	527.0	1.27	531.4	2.13
枯水年	423.0	424.5	0.34	429.0	1.42	433.2	2.42

注:增长率指相同水文年各土地利用情景年径流深较 A0 情景年径流深的增长率。

表 7 主城区不透水面扩张情景土地利用面积统计

土地利用 类型	A0 情景/ km ²	占总面积 比例/%	A1 情景/ km ²	占总面积 比例/%	A2 情景/ km ²	占总面积 比例/%	A3 情景/ km ²	占总面积 比例/%
耕地	52.24	52.8	48.45	49.0	39.89	40.3	33.56	33.9
裸地	0	0	0	0	0	0	0	0
森林	34.17	34.6	32.17	32.5	24.46	24.8	20.79	21.1
不透水面	10.14	10.2	15.93	16.1	32.29	32.6	42.29	42.7
水域/湿地	2.38	2.4	2.38	2.4	2.29	2.3	2.29	2.3
合计	98.93	100	98.93	100	98.93	100	98.93	100

表 8 主城区不透水面扩张情景下年均径流深

土地利用情景	不透水率/%	年均径流深/mm	增长率/%
A0	10.20	604.2	0
A1	16.10	631.5	4.52
A2	32.60	708.9	17.33
A3	42.70	756.3	25.17

注:增长率指各土地利用情景径流深较 A0 情景径流深的增长率。

5.2 主城区不透水面扩张对汛枯期径流的影响

由表 9、图 12 可知,主城区枯水期年均径流深增长率比汛期年均径流深增长率大;在汛期,主城区 A1、A2、A3 情景年均径流深增长率分别为 4.22%、16.23%、23.58%,在枯水期,主城区 A1、A2、A3 情景年均径流深增长率分别为 5.10%、19.48%、28.31%。

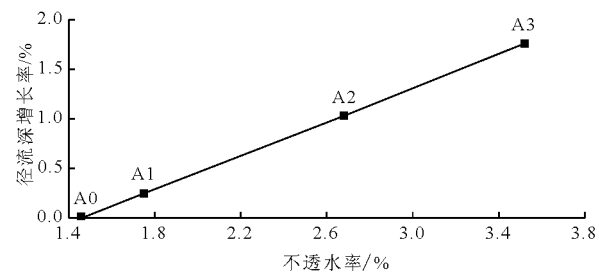


图 8 研究区不透水面扩张情景年均径流深增长率

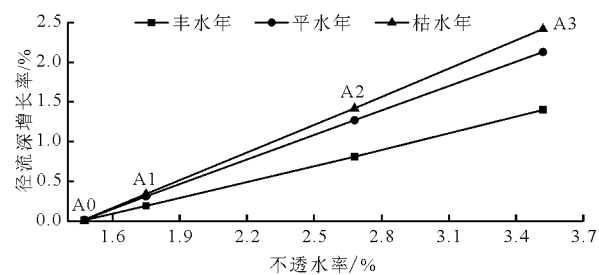


图 10 研究区不透水面扩张情景典型水文年年径流深增长率

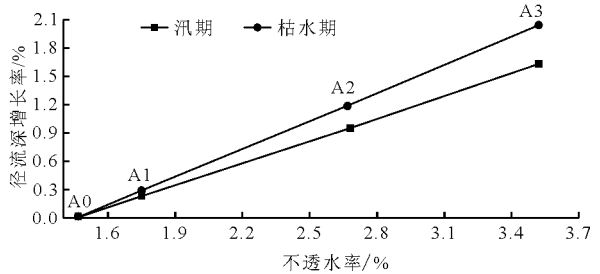


图 9 研究区不透水面扩张情景汛枯期年均径流深增长率

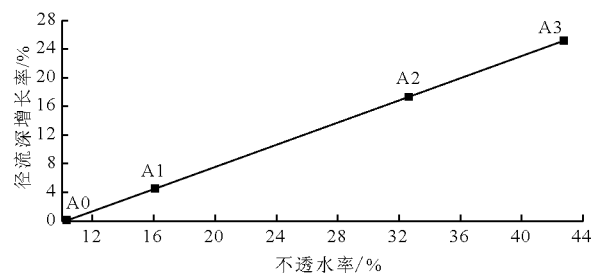


图 11 主城区不透水面扩张情景年均径流深增长率

由表 10 可知,在研究区不透水面扩张情景下,研究区不透水率由 1.46% 增长到 3.52%,主城区不透水率由 10.52% 增长到 42.75%;在枯水期,主城区径流深增长率与研究区径流深增长率差值分别为 4.81%、18.28%、26.27%;在汛期,主城区径流深增长率与研究区径流深增长率差值分别为 3.99%、15.28%、21.95%。综上所述,主城区不透水面的扩张会引起汛枯期径流深的增加,这与研究区汛枯期的径流响应是一致的,但是,在同一研究区不透水面扩张情景下,主城区不透水面扩张引起的汛枯期径

流增加幅度明显大于研究区的增加幅度。

表 9 主城区不透水面扩张情景汛枯期年均径流深

土地利 用情景	主城区不 透水率/%	枯水期径 流深/mm	增长率/ %	汛期径 流深/mm	增长率/ %
A0	10.20	203.8	0	400.4	0
A1	16.10	214.2	5.1	417.3	4.22
A2	32.60	243.5	19.48	465.4	16.23
A3	42.70	261.5	28.31	494.8	23.58

注:增长率指各土地利用情景径流深较 A0 情景径流深的增长率。

表 10 不透水面扩张情景下研究区与主城区汛枯期年均径流深增长率对比

%

土地利用 情景	研究区 不透水率	主城区 不透水率	枯水期径流深增长率		枯水期径流 深增长率差值	汛期径流深增长率		汛枯期径流深 增长率差值
			研究区	主城区		研究区	主城区	
A0	1.46	10.20	0	0	0	0	0	0
A1	1.75	16.10	0.29	5.10	4.81	0.23	4.22	3.99
A2	2.68	32.60	1.20	19.48	18.28	0.95	16.23	15.28
A3	3.52	42.70	2.04	28.31	26.27	1.63	23.58	21.95

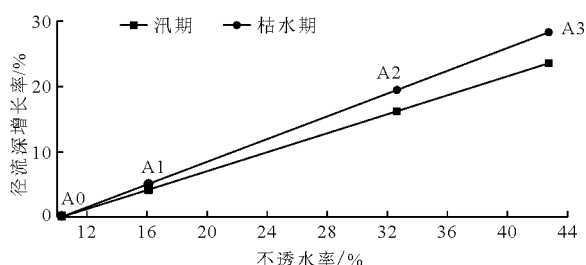


图 12 主城区不透水面扩张情景汛枯期年均径流深增长率

6 结 论

本文以汾水流域中上游为研究区,利用气象、水文及下垫面数据建立了 HSPF 模型;通过构建 2000–2015 年不透水面扩张情景,探讨研究区及其主城区不透水面扩张对径流的影响,主要结论如下:

(1)2000–2015 年研究区不透水面由 32.79 km² 增长到 79.12 km²,增幅达 141%,年均增长 9.4%,不透水率由 1.46% 增长到 3.52%;2000–2015 年主城区不透水面由 10.14 km² 增长到 42.29 km²,年均增长 21.1%,不透水率由 10.2% 增长到 42.7%,主城区新增不透水面面积占研究区新增不透水面面积的 70%。

(2)采用宁乡(二)水文站月均流量实测数据对 HSPF 模型进行率定与验证,率定期与验证期相关系数 R^2 分别为 0.92、0.97,纳什系数 E_{ns} 分别为 0.85、0.90,表明 HSPF 模型在汾水流域中上游有良

好的适用性。

(3)2000–2015 年研究区不透水面扩张会引起年径流深的小幅增长,在汛枯期,会导致汛枯期径流深均出现增长,但是,随着不透水面的扩张,枯水期径流深增长率与汛期径流深增长率的差值为正且有扩大趋势,即 2000–2015 年研究区不透水面扩张对枯水期径流深的影响大于对汛期径流深的影响。在典型水文年,同一研究区不透水面扩张情景下,2000–2015 年研究区不透水面扩张对枯水年径流深的影响最大,平水年次之,丰水年最小。在 2000–2015 年不透水面扩张情景下,主城区与研究区不透水面扩张对径流深的影响在趋势上是一致的,但是在影响程度上,主城区大于研究区。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 李彩丽.秦淮河流域不透水面提取及其水文效应研究[D].南京:南京大学,2011.
- [3] 秦莉俐,陈云霞,许有鹏.城镇化对径流的长期影响[J].南京大学学报(自然科学版),2005,41(3):279–285.
- [4] SUNDE M, HE H S, HUBBART J A, et al. Forecasting streamflow response to increased imperviousness in an urbanizing Midwestern watershed using a coupled modeling approach[J]. Applied Geography, 2016,72:14–25.
- [5] 郑璟,方伟华,史培军,等.快速城市化地区土地利用变化

- 对流域水文过程影响的模拟研究——以深圳市布吉河流域为例[J]. 自然资源学报, 2009, 24(9): 1560–1572.
- [6] 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.
- [7] 权瑞松, 刘敏, 侯立军, 等. 土地利用动态变化对地表径流的影响——以上海浦东新区为例[J]. 灾害学, 2009, 24(1): 44–49.
- [8] SURIYA S, MUDGAL B V. Impact of urbanization on flooding: The Thirusoolam sub watershed – A case study [J]. Journal of Hydrology, 2012, 412–413: 210–219.
- [9] ARNOLD C L, GIBBONS C J. Impervious surface coverage: The emergence of a key environmental indicator[J]. Journal of the American Planning Association, 1996, 62(2): 243–258.
- [10] VERBEIREN B, VAN D V T, CANTERS F, et al. Assessing urbanisation effects on rainfall – runoff using a remote sensing supported modelling strategy [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2013, 21: 92–102.
- [11] BRUN S E, BAND L E. Simulating runoff behavior in an urbanizing watershed [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2000, 24(1): 5–22.
- [12] CHOI W, PAN F, WU C. Impacts of climate change and urban growth on the streamflow of the Milwaukee River (Wisconsin, USA) [J]. Regional Environmental Change, 2017, 17(3): 889–899.
- [13] DU Shiqiang, SHI Peijun, VAN ROMPAEY A, et al. Quantifying the impact of impervious surface location on flood peak discharge in urban areas [J]. Natural Hazards, 2015, 76(3): 1457–1471.
- [14] 刘珍环, 曾祥坤. 深圳市不透水表面扩展对径流量的影响[J]. 水资源保护, 2013, 3(29): 44–50.
- [15] 司巧灵, 杨传国, 顾荣直, 等. HEC-HMS 模型在城市化流域洪水模拟中的应用[J]. 人民长江, 2018, 49(4): 17–22.
- [16] DIAZ-RAMIREZ J N, MCANALLY W H, MARTIN J L. Analysis of hydrological processes applying the HSPF model in selected watersheds in Alabama, Mississippi, and Puerto Rico [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2011, 27(6): 937–954.
- [17] 董延军, 陈文龙, 杨芳, 等. HSPF 流域模型原理与模拟应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2014.
- [18] 韩莉, 刘素芳, 黄民生, 等. 基于 HSPF 模型的流域水文水质模拟研究进展[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2015, 3(2): 40–47+57.
- [19] 董延军, 邓家泉, 李杰, 等. 基于 HSPF 的东江分布式水文模型构建[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(9): 57–63.
- [20] 李兆富, 刘红玉, 李燕. HSPF 水文水质模型应用研究综述[J]. 环境科学, 2012, 33(7): 2217–2222.
- ~~~~~
- (上接第31页)
- [13] LIU Junzhi, ZHU Aling, DUAN Zheng. Evaluation of TRMM 3B42 precipitation product using rain gauge data in meichuan watershed, Poyang Lake Basin, China [J]. 资源与生态学报(英文版), 2012, 3(4): 359–366.
- [14] 熊秋芬, 黄玫, 熊敏谔, 等. 基于国家气象观测站逐日降水格点数据的交叉检验误差分析[J]. 高原气象, 2011, 30(6): 1615–1625.
- [15] 孔云峰, 全文伟. 降雨量地面观测数据空间探索与插值方法探讨[J]. 地理研究, 2008, 27(5): 1097–1108.
- [16] 刘涛, 孟凡龙, 胡宝军. 基于 BP 神经网络的尼尔基水库短期洪水预报研究[J]. 黑龙江水利科技, 2012, 40(10): 13–16.
- [17] 梁国华, 习树峰, 王本德. 基于 BP 神经网络的旬降雨径流相关预报模型[J]. 水力发电, 2009, 35(8): 10–12+39.
- [18] 卢迪. 耦合中长期径流预报信息的水库调度方式研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [19] 白云天, 孟祥国, 孙万光. 尼尔基水库非枯季节中期入库径流预报研究[J]. 东北水利水电, 2018, 36(10): 27–29.