

DOI: 10.5846/stxb201812262819

巨鑫慧, 高肖, 李伟峰, 韩立建, 毛劲乔. 京津冀城市群土地利用变化对地表径流的影响. 生态学报, 2020, 40(4): 1413-1423.

Ju X H, Gao X, Li W F, Han L J, Mao J Q. Effects of land use change on surface runoff in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(4): 1413-1423.

## 京津冀城市群土地利用变化对地表径流的影响

巨鑫慧<sup>1,2</sup>, 高肖<sup>1</sup>, 李伟峰<sup>2,\*</sup>, 韩立建<sup>2</sup>, 毛劲乔<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 河海大学水利水电学院, 南京 210098

<sup>2</sup> 中国科学院生态环境研究中心城市与区域国家重点实验室, 北京 100085

**摘要:**城市化的显著特征之一是地表景观格局被人为改变,大量硬化地表覆盖,取代了原本自然或半自然的土地覆盖类型,极大地干扰了区域水文循环过程。其中,最直接的体现是对地表径流过程的影响。城市群作为当前我国城市化的重要模式,其聚集连片的扩张模式,对区域地表径流过程的干扰尤为严重。以京津冀特大城市群为研究区域,应用长期水文影响评价模型(L-THIA),以1980、1990、2000、2010、2015年5期土地利用数据、土壤数据以及1950—2015年逐日降雨数据为输入,模拟计算了不同土地利用/覆被格局对多年平均地表径流量的影响。结果表明,(1)经过率定的L-THIA模型能够较为准确地模拟京津冀城市群地区的地表径流分布特征,模型模拟误差在±10%内;(2)1980—2015年,京津冀城市群地区不透水地表面积急剧增加,其净增长值为12690.14 km<sup>2</sup>。北京与天津等超大城市不透水地表面积增加最明显;(3)随着土地利用格局的变化,京津冀地区地表径流量呈逐年增长趋势。1980—2015年,京津冀城市群地区地表径流量的绝对增长值为17.84亿m<sup>3</sup>,增幅11.83%。其中,1990—2000年及2010—2015年期间地表径流年均增长率较大,分别为0.36%与0.46%。对地表径流贡献较大的土地利用类型为耕地和不透水地表,其5期土地利用情景下的平均产流占比分别为35.38%、22.71%;(4)城市尺度上,不同城市的标准化年均径流深(NAARD)存在较大差异。天津、石家庄的产流能力较强,承德、衡水等城市的产流能力较弱,北京市的标准化年均径流深处于中等水平。另一方面,不同城市标准化年均径流深增长规律也存在较大差异。1980—2015年,天津市的NAARD增长最多,承德市增长最少,北京市的NAARD增长处于中等水平。本文对于京津冀城市群水文过程的时空演变研究以及国土空间优化指导具有参考意义。

**关键词:**城市群;土地利用变化;地表径流;L-THIA模型

## Effects of land use change on surface runoff in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration

JU Xinhui<sup>1,2</sup>, GAO Xiao<sup>1</sup>, LI Weifeng<sup>2,\*</sup>, HAN Lijian<sup>2</sup>, MAO Jingqiao<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

**Abstract:** One of the remarkable features of urbanization is the dramatic change in the landscape pattern. A large number of impervious surfaces replaced the natural or semi-natural land cover types, which greatly interfered with the hydrological cycle in the region. The most direct manifestation is the impact on the surface runoff process. As an important mode of urbanization in China, urban agglomerations have a spreading mode of expansion, which is more serious to the regional surface runoff. In this paper, the Long-Term Hydrologic Impact Assessment model (L-THIA) was used to simulate the average annual surface runoff under different land use/cover conditions in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, by

**基金项目:**国家自然科学基金重大基金项目(41590841);国家自然科学基金面上项目(31971482)

**收稿日期:**2018-12-26; **网络出版日期:**2019-11-20

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: li.wf@rcees.ac.cn

using five periods of land use data in 1980, 1990, 2000, 2010, and 2015, the soil data and daily rainfall data from 1950 to 2015 as input. The results show that (1) by calibration, the L-THIA model can accurately simulate the surface runoff of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, and the simulation error is between  $\pm 10\%$ . (2) From 1980 to 2015, the impervious surface area of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration increased dramatically, with a net growth value of 12690.14 km<sup>2</sup>. The impervious surface area of megacities such as Beijing and Tianjin increased the most significantly. (3) From 1980 to 2015, the surface runoff in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration showed an obvious increasing trend. The surface runoff in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration increased by 1.784 billion m<sup>3</sup> and the relative growth value was 11.83%. The average annual growth rate of surface runoff was larger during 1990—2000 and 2010—2015, 0.36% and 0.46% respectively. The cultivated land and impervious surface contributed more to surface runoff in the study area. The average runoff contribution rates of these two land use types under five land use scenarios were 35.38% and 22.71% respectively. (4) From the perspective of urban scale, the Normalized average annual runoff depth values of different cities vary greatly. Tianjin and Shijiazhuang have strong runoff production capacity, Chengde and Hengshui have weak runoff production capacity, and Beijing's Normalized average annual runoff depth (NAARD) is at the medium level. In addition, there are great differences in the growth patterns of NAARD in different cities. From 1980 to 2015, Tianjin had the largest runoff growth, Chengde had the least growth, and the growth value of NAARD in Beijing was at a moderate level. This study is of great reference significance for revealing the spatio-temporal evolution of hydrological processes in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration and guiding the optimization of land space.

**Key Words:** urban agglomeration; land use change; surface runoff; L-THIA model

近年来,由于气候变化和人类活动的双重影响,地球上的水文循环过程正在发生深刻变化<sup>[1-2]</sup>。城市化作为 21 世纪人类社会经济发展的重要过程<sup>[3]</sup>,其引发的水文效应是国内外学者关注的热点。在城市发展过程中,以不透水地表覆盖为主的各种人工土地利用类型(居民住宅、道路、广场、工业及商业用地等)大量增加,显著地改变了原本自然或半自然的下垫面格局,对区域内的水文循环产生了极大的干扰<sup>[4-6]</sup>。一方面,城市区域径流系数增大,洪峰流量增加,暴雨频现;另一方面,不透水地表的增加加大了降雨的淋溶冲刷作用,导致地表污染负荷增加,非点源污染加重<sup>[7-9]</sup>。城市化导致的水资源、水环境问题已经成为制约城市经济可持续发展的重要因素<sup>[10]</sup>。因此,研究高度城市化区域土地利用/覆被变化对地表径流的影响特征与机制具有重要意义。

目前,经济全球化使国家间综合竞争的地理层级由城市层级向城市群层级过渡<sup>[11]</sup>。随着我国经济的快速发展,以特大城市为核心的都市圈和城市群的发展已成为推动区域经济发展的重要战略<sup>[12]</sup>。相比于单个城市,城市群对区域地表径流过程扰动更加强烈,这种集中连片的城市发展模式对区域生态环境会产生明显的叠加或累积影响效应。京津冀城市群作为我国三大城市群之一,在我国新型城镇化战略布局中处于重要地位<sup>[12]</sup>。但与此同时,京津冀地区也是我国人类活动对水文循环过程干扰强度极大的区域。研究京津冀地区高强度人类活动对地表径流的影响机制有助于优化城市布局、促进水资源合理配置,从而有助于京津冀地区的协同发展。

目前,国内外学者多采用模型模拟的方法分析土地利用/覆被变化对地表径流的影响<sup>[13-16]</sup>。按照模型结构分类,水文模型可分为黑箱模型、概念模型和物理模型<sup>[17]</sup>。在多种模型中,分布式水文模型能够客观的反映降雨和下垫面条件对流域径流的影响,因此被广泛应用于地表径流的模拟研究中<sup>[18]</sup>,如 SWAT 模型、SCS-CN 模型、L-THIA 模型等。其中,L-THIA 模型主要适用于较大时空尺度上水文情势特征的模拟,如土地利用/覆被变化下的长期水文影响评价等<sup>[19-21]</sup>。此外,该模型结构简单,所需数据较易获取,较复杂的水文模型所需设置参数少,并且能够很好的与地理信息系统结合,对于缺乏资料和数据的地区有较好的适用性。如 Jingqiu Chen 等,利用 L-THIA 模型对美国地区典型年的平均年径流深和年径流总量进行评价,结果表明该方

法能够有效评价城市化对地表径流的影响<sup>[22]</sup>;张明月等在 L-THIA 模型内部增加流域划分模块,考虑多站点的日降雨量的输入,模拟太湖流域不同土地利用情景下地表径流的变化过程<sup>[23]</sup>;刘珍环等利用 L-THIA 模型模拟了深圳市不透水面扩张对城区地表径流的影响,结果表明该模型对模拟快速城市化、无水文监测资料地区的径流量变化有良好效果<sup>[24]</sup>。因此,本文选用 L-THIA 模型进行京津冀城市群的地表径流模拟研究。

综上所述,本研究以我国最重要的城市群之一——京津冀城市群为例,利用研究区 1950—2015 年的逐日降雨数据、土壤数据及 1980、1990、2000、2010、2015 年 5 期土地利用数据,采用 L-THIA 模型,模拟计算在相同降雨情景下土地利用/覆被变化对京津冀城市群地表径流的影响,并在此基础上分析不同土地利用类型与地表径流的响应关系,以及不同城市地表径流的变化规律与差异。本研究有助于全面了解京津冀城市群扩张对地表径流的影响。

## 1 研究区概况

京津冀城市群地处环渤海核心地带,地势西北高、东南低,区位优势明显<sup>[25]</sup>。京津冀地区在地域上覆盖北京市、天津市两个直辖市及河北省的石家庄、唐山、秦皇岛等 11 个地级市(图 1)。截至 2014 年,京津冀城市群土地面积占全国的 2.3%,总人口占全国的 8.1%,生产总值为 6.65 万亿元,占全国生产总值的 10.5%,北京和天津等中心城市的城镇化率分别高达 86.4% 和 82.3%,高于全国平均水平 54.8%<sup>[25]</sup>。从水资源量来看,京津冀城市群地处我国水资源最为短缺的海河流域,2014 年,其水资源总量为 203.69 亿 m<sup>3</sup>,仅占全国的 0.75%;人均水资源量为 182 m<sup>3</sup>,仅为全国平均水平的 9.14%<sup>[26]</sup>。长期以来,由于水资源的过度开发,京津冀地区出现了一系列的生态环境问题,如河道断流、湿地萎缩、地下水位下降、水体污染严重、地下水漏斗成片等<sup>[27-28]</sup>。水资源问题现已成为制约京津冀地区社会经济发展的重要因素<sup>[29-30]</sup>。



图 1 京津冀城市群地理位置

Fig.1 Location of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration

## 2 研究方法与数据

### 2.1 研究方法

#### 2.1.1 L-THIA 模型原理

L-THIA(Long-Term Hydrologic Impact Assessment)模型是由美国普渡大学开发的可用于流域径流及非点源负荷模拟的水文模型。模型运行基于 GIS 平台,相较于其他水文模型,所需数据较易获取,操作简单<sup>[9]</sup>。L-THIA 模型的核心方法是 SCS-CN 曲线方法,该方法通过 CN 值及逐日降雨量模拟特定流域的径流量<sup>[31-33]</sup>。其中,CN 值是一个无量纲的参数,基于土地利用类型、水文土壤分组和水文状况(前期土壤湿润状况,AMC)综合反映下垫面状况。模型的计算公式如下:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S}, I_a < P$$

$$Q = 0, I_a \geq P$$

$$I_a = 0.2S$$

$$S = \frac{1000}{CN} - 10$$

(1)

(2)

(3)

式中,  $Q$  为直接地表径流量, mm;  $P$  为逐日降水量, mm;  $I_a$  为初损值, mm;  $S$  为最大田间持水量, mm。

### 2.1.2 标准化年均径流深

为了消除城市面积对地表径流量的影响, 直接比较不同城市地表径流的变化规律, 本研究引入了标准化年均径流深 (Normalized Average Annual Runoff depth, NAARD), 计算公式如下:

$$\text{NAARD}_{\text{市}} = \frac{RV_{\text{市}}}{A_{\text{市}}} \times 1000 \quad (4)$$

式中,  $\text{NAARD}_{\text{市}}$  表示特定城市的标准化年均径流深, mm;  $RV_{\text{市}}$  为特定城市的年均产流量,  $\text{m}^3$ ;  $A_{\text{市}}$  为特定城市的行政面积,  $\text{m}^2$ 。

## 2.2 研究数据

考虑到模拟结果的合理性和准确性, 本文以海河流域和京津冀城市群叠加区域为模拟边界。模型所需数据包括土地利用类型数据、水文土壤数据和气象数据。

### 2.2.1 土地利用类型数据

京津冀城市群土地利用类型划分为 6 类: 水体、裸地、林地、不透水地表、草地、耕地。本研究基于 Landsat (MSS、TM3 与 TM5, 30 米空间分辨率) 遥感影像, 利用面向对象与回溯相结合的方法提取研究区土地利用/覆被信息, 数据的获取时间为 1980、1990、2000、2010 及 2015 年 6—10 月份气象条件较好 (无云或少云天气) 的白天。

土地利用类型数据的提取过程如下: 首先, 采用面向对象的分类方法, 对 2010 年遥感数据进行分类; 其次, 以 2010 年分类结果为参照基准, 对其他年份 (1980、1990、2000 与 2015 年) 土地利用/覆被变化特征进行分析, 对于未变化的地区, 其土地利用/覆被类型与 2010 年分类结果一致, 而对于变化地区的土地利用/覆被则进行分类提取; 最后, 采用分层随机采样方法对分类结果进行检验, 具体选择北京、天津、唐山、承德、石家庄与邢台等 6 个城市, 每个城市根据不同土地利用/覆被类型组成特征共计随机选取 300 个样点, 结合航片与 SPOT 等高分遥感数据, 进行目视判读比较, 最终获得整体分类精度为 87% 的土地利用类型数据<sup>[34]</sup>。

### 2.2.2 水文土壤数据

本研究所需土壤数据来自于中国土壤数据库, 以中国 1:100 万的土壤栅格数据为基础, 叠加研究区范围, 得到研究区土壤类型分布数据图。L-THIA 模型依据美国农业部水土保持局 (USDA) 的土壤分类, 按照渗透性高低, 将土壤数据分为 A、B、C、D 4 类 (表 1)<sup>[35]</sup>。本研究参照此分类标准对京津冀地区的土壤数据进行分类。鉴于整个研究时段 (1980—2015 年) 土壤质地及其理化性质相对稳定, 不会发生本质变化, 因此整个研究期采用相同的土壤水文分组。

表 1 京津冀地区土壤水文类型

Table 1 Hydrologic soil types of Beijing-Tianjin-Hebei city agglomeration

| 土壤类型<br>Soil type | 特点<br>Characteristic | 土壤类型<br>Soil type | 最小下渗率/(mm/h)<br>Minimum infiltration rate |
|-------------------|----------------------|-------------------|-------------------------------------------|
| A                 | 渗透能力高、产生低径流的土壤       | 沙、砂质壤土、壤质砂土       | 7.26—11.43                                |
| B                 | 渗透能力较高、产流能力较低的土壤     | 粉砂壤土、壤土           | 3.83—7.26                                 |
| C                 | 渗透能力中等、产生中等径流的土壤     | 砂质黏壤土             | 1.27—3.83                                 |
| D                 | 渗透能力低、产生高径流的土壤       | 粉质黏壤土、黏壤土、黏土      | 0—1.27                                    |

### 2.2.3 水文气象数据

本研究所需的水文气象站点信息、降水数据及实测径流量数据来自于中国气象数据库、海河流域水文年鉴及河北省水资源公报 (图 1)。采用大同、北京、石家庄 35 个气象站点 1950—2015 年的逐日降雨数据, 并对降雨数据进行整理和格式转换, 以满足模型要求。同时, 在径流模拟计算过程中统计水文站的实测径流数据进行模型参数验证, 确保构建的模型适用于研究区域。

### 2.3 模型参数校正

基于 SCS-CN 方法的 L-THIA 模型是根据美国地区气象、土壤及土地利用数据测算实现的。因此,在应用模型进行径流量模拟时需要将模型参数进行校正。一般地说,在降雨一定的条件下,产流量较大的土地利用类型、土壤类型、前期土壤湿润程度,其 CN 值较大,反之亦然<sup>[14]</sup>。

考虑到京津冀城市群 93% 的区域位于海河流域境内,本研究以海河流域为边界,对模型参数进行校正。本研究参考美国水土保持局出版的 CN 值查算表以及其他学者的相关研究,根据海河流域土壤特性和土地利用/覆被特性,通过试算建立研究区在正常土壤湿润程度下的 CN 值表(表 2)<sup>[36-37]</sup>。

表 2 海河流域不同土地利用/覆被类型 CN 值

Table 2 CN values of different land use/cover types in Haihe basin

| 土地利用/覆被类型<br>Land use type | 水文土壤组 Hydrological soil group |    |    |    |
|----------------------------|-------------------------------|----|----|----|
|                            | A                             | B  | C  | D  |
| 水体 Water                   | 98                            | 98 | 98 | 98 |
| 裸地 Barren land             | 77                            | 86 | 91 | 94 |
| 林地 Forest                  | 48                            | 68 | 79 | 85 |
| 不透水地表 Impervious land      | 89                            | 92 | 94 | 96 |
| 草地 Grassland               | 52                            | 74 | 81 | 86 |
| 耕地 Cultivated land         | 64                            | 75 | 82 | 86 |

### 2.4 模型有效性验证

本研究选取海河流域内部滦县站、王快水库和西大洋水库 3 个水文站点 2001—2014 年共 14 年的实测径流数据进行模型有效性验证。3 个站点的流域控制面积分别为 44100 km<sup>2</sup>、3770 km<sup>2</sup>、4420 km<sup>2</sup>(数据来源于河北省水资源公报)。分别以 2000 年土地利用数据和 2001—2007 年逐日降雨数据、2010 年土地利用数据和 2008—2014 年的逐日降雨数据为输入,模拟计算海河流域 2001—2014 的多年平均地表径流量,模拟结果见表 3。将模拟结果与实测数据进行比较,两者误差在±10%之间,在误差允许范围之内。因此,以上确定的 CN 值适用于海河流域径流模拟,可用 L-THIA 模型进行后续研究。

表 3 L-THIA 模型模拟结果评价

Table 3 Evaluation of simulation results of L-THIA model

| 水文站<br>Hydrometric station | 模拟值 Value of simulation/10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup><br>2001—2014 | 实测值 Measured value/10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup><br>2001—2014 | 相对误差/%<br>Relative error |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------------------------|
| 滦县 Luanxian                | 19.03                                                               | 19.33                                                          | -1.53                    |
| 王快水库 Wangkuia reservoir    | 2.86                                                                | 2.71                                                           | 5.61                     |
| 西大洋水库 Xidayang reservoir   | 1.92                                                                | 1.95                                                           | -1.35                    |

### 2.5 模型模拟过程

本研究利用海河流域境内 35 个气象站点 1950—2015 年的逐日降雨数据、土壤数据以及 1980、1990、2000、2010、2015 年 5 期土地利用数据模拟计算京津冀城市群多年平均地表径流量。模拟流程如下:首先,模型以气象站点位置、土壤数据及不同土地利用数据作为输入,计算每个栅格的 CN 值,并建立泰森多边形;其次,以逐日降雨数据驱动模型,模型将降雨数据按照泰森多边形分配到栅格,并以公式(1)—(3)进行径流量计算;最后,对模型模拟结果进行统计,得到不同土地利用/覆被情景下的多年平均地表径流量。

## 3 结果与分析

### 3.1 京津冀城市群土地利用/覆被变化特征分析

1980—2015 年京津冀地区土地利用/覆被变化特征分析结果表明(图 2、表 4、表 5):(1)从土地利用类型

构成看,1980—2015 年京津冀地区土地利用类型以耕地和林地为主,其多年平均占比分别为 47.10%、32.84%;草地、不透水地表与水体所占比重依次减小;裸地面积最小,占比低于 0.4%。(2)从土地利用变化趋势看,1980—2015 年不透水地表、林地、草地及裸地的面积增加,水体及耕地面积减小。其中,耕地与不透水地表变幅较大,其余土地利用类型变幅较小。如 1980—2015 年,耕地面积由 109371.78 km<sup>2</sup>减少至 94303.11 km<sup>2</sup>,在整个研究区的面积占比减少 6.99%;不透水地表面积由 11675.17 km<sup>2</sup>增加至 24365.31 km<sup>2</sup>,面积占比增加 5.89%。(3)从土地利用类型转换方式看,各土地利用类型转化程度不同。其中,耕地、不透水地表和水体的转移变化最为剧烈,主要表现为耕地向林地、不透水地表、草地的转变及水体向不透水地表的转变,1980—2015 年其净转化值分别 1515.98 km<sup>2</sup>、10992.45 km<sup>2</sup>、1979.83 km<sup>2</sup>、826.59 km<sup>2</sup>。(4)从不同城市土地利用特征看,京津冀城市群 13 个城市均以耕地和林地等非人工表面为主要用地类型,但不同城市的人工表面(不透水地表)面积占比有较大差异(图 3)。天津、北京、廊坊等城市的不透水地表面积占比较大,2015 年分别为 26.86%、18.72%与 19.15%,而承德、张家口的不透水地表面积占比较小,2015 年分别为 1.95%与 4.11%。此外,从不透水地表的变化特征看,1980—2015 年不同城市不透水地表的增幅不同,不透水地表的增幅主要发生在北京、天津、石家庄、保定、唐山、邯郸等城市,这些城市的净增长值均超过了 1000 km<sup>2</sup>。

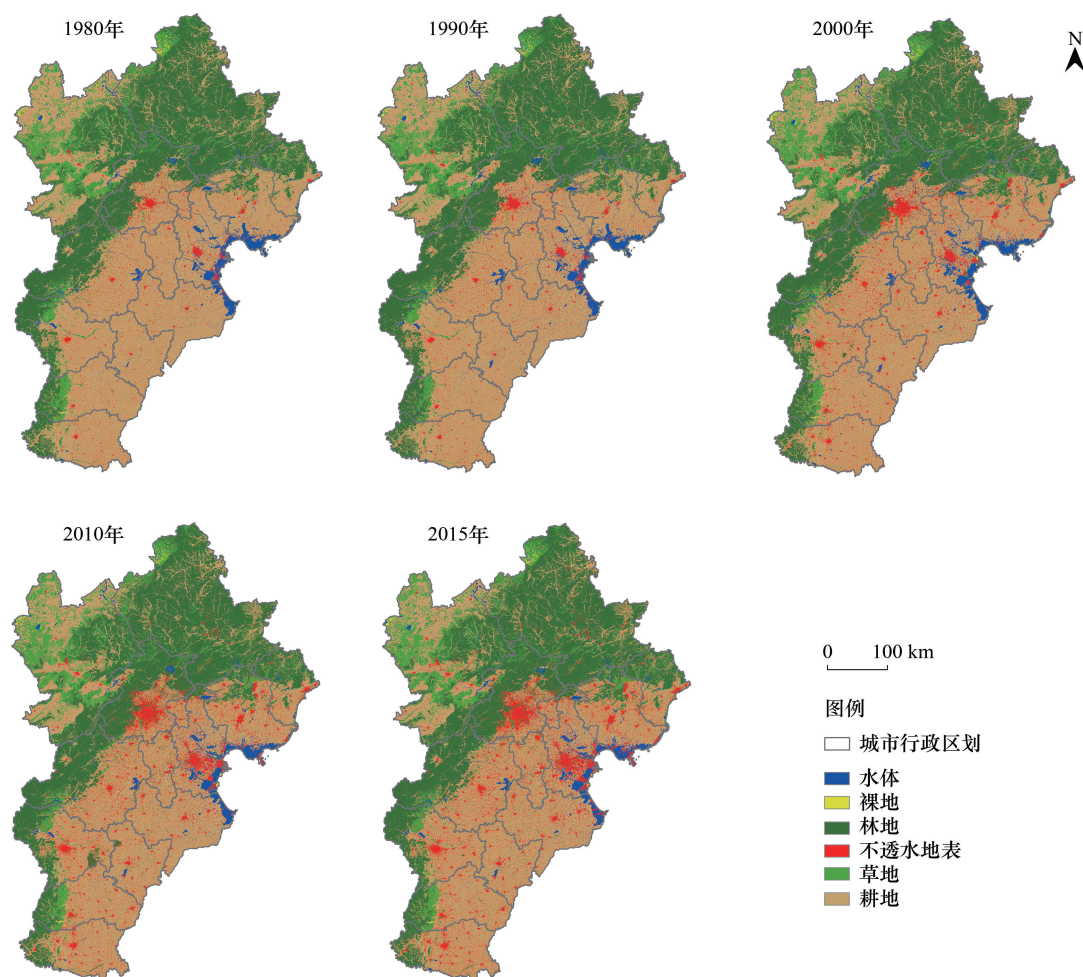


图 2 京津冀城市群地区不同时期土地利用/覆被分布特征

Fig.2 Land use/cover distribution of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration in different periods

### 3.2 土地利用/覆被变化对地表径流的影响

L-THIA 模型的模拟结果表明,随着土地利用/覆被的变化,研究区地表径流量呈逐年增长的趋势(表 6)。

1980—2015 年,京津冀城市群多年平均径流量由 150.75 亿  $\text{m}^3$  增长至 168.59 亿  $\text{m}^3$ , 净增长值为 17.84 亿  $\text{m}^3$ , 增幅 11.83%。不同时段京津冀地区地表径流增长率不同, 总体来看, 1990—2000 年及 2010—2015 年地表径流增长率较大, 这两个时段地表径流量的年均增长率分别为 0.36%、0.46%。

表 4 京津冀城市群地区土地利用/覆被构成/%

Table 4 Land use/cover composition of Beijing-Tianjin-Hebei City Group

| 土地利用/覆被类型<br>Land use/cover type | 年份 Years |       |       |       |       |
|----------------------------------|----------|-------|-------|-------|-------|
|                                  | 1980     | 1990  | 2000  | 2010  | 2015  |
| 水体 Water                         | 2.90     | 3.40  | 3.08  | 2.79  | 2.74  |
| 裸地 Barren land                   | 0.31     | 0.22  | 0.29  | 0.33  | 0.32  |
| 林地 Forest                        | 32.42    | 33.11 | 32.56 | 33.16 | 32.92 |
| 不透水地表 Impervious land            | 5.41     | 6.00  | 8.27  | 10.02 | 11.30 |
| 草地 Grassland                     | 8.27     | 7.68  | 8.72  | 9.24  | 9.03  |
| 耕地 Cultivated land               | 50.69    | 49.58 | 47.07 | 44.46 | 43.70 |

表 5 京津冀城市群 1980—2015 年土地利用变化转移矩阵

Table 5 Land use change transfer matrix of Beijing-Tianjin-Hebei City Group from 1980 to 2015

| 土地利用/覆被类型<br>Land use/cover type     | 水体/ $\text{km}^2$<br>Water | 裸地/ $\text{km}^2$<br>Barren land | 林地/ $\text{km}^2$<br>Forest | 不透水地表/ $\text{km}^2$<br>Impervious land | 草地/ $\text{km}^2$<br>Grassland | 耕地/ $\text{km}^2$<br>Cultivated land | 总计<br>Total/ $\text{km}^2$<br>(1980) |
|--------------------------------------|----------------------------|----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 水体 Water/ $\text{km}^2$              | 4049.14                    | 78.73                            | 90.28                       | 991.47                                  | 152.01                         | 878.23                               | 6239.87                              |
| 裸地 Barren land/ $\text{km}^2$        | 48.45                      | 308.93                           | 75.40                       | 34.98                                   | 102.21                         | 94.34                                | 664.31                               |
| 林地 Forest/ $\text{km}^2$             | 96.71                      | 66.70                            | 64680.41                    | 675.90                                  | 2065.76                        | 2362.21                              | 69947.69                             |
| 不透水地表 Impervious land/ $\text{km}^2$ | 164.88                     | 14.72                            | 148.69                      | 9794.87                                 | 131.97                         | 1420.04                              | 11675.17                             |
| 草地 Grassland/ $\text{km}^2$          | 80.99                      | 85.08                            | 2162.78                     | 455.60                                  | 13774.75                       | 1278.61                              | 17837.82                             |
| 耕地 Cultivated land/ $\text{km}^2$    | 1432.75                    | 120.23                           | 3878.19                     | 12412.50                                | 3258.44                        | 88269.68                             | 109371.78                            |
| 总计 Total/ $\text{km}^2$ (2015)       | 5872.91                    | 674.40                           | 71035.76                    | 24365.31                                | 19485.14                       | 94303.11                             | 215736.63                            |

表 6 京津冀城市群多年平均径流量

Table 6 Average annual runoff of Beijing-Tianjin-Hebei City Group

| 年份 Years                                                                                       | 1980   | 1990   | 2000   | 2010   | 2015   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 京津冀城市群多年平均径流量/ $10^8 \text{ m}^3$<br>Annual average runoff of Beijing-Tianjin-Hebei City Group | 150.75 | 155.83 | 161.37 | 164.82 | 168.59 |
| 径流量年均变化率/%<br>Annual rate of runoff change                                                     |        | 0.34   | 0.36   | 0.21   | 0.46   |

不同土地利用类型的产流特征分析结果表明(表 7):(1)不同土地利用类型产流能力不同,按照产流能力强弱排序:水体>不透水地表>裸地>耕地>草地>林地。如 2015 年,不透水地表和耕地的面积占比分别为 11.3%、43.70%,但产流量为 50.22 亿  $\text{m}^3$ 、52.14 亿  $\text{m}^3$ ,不透水地表以不到耕地 1/3 的面积产生约为耕地 96% 的径流量。(2)各土地利用类型产流量与其面积的变化趋势基本一致。如 1980 年至 2015 年,不透水地表面积由 5.41% 增长至 11.3% (表 4),相应的产流量由 24.27 亿  $\text{m}^3$  增长至 50.22 亿  $\text{m}^3$ 。(3)从贡献量的大小看,京津冀城市群对地表径流贡献较大的土地利用类型为耕地和不透水地表。耕地和不透水地表的多年平均产流占比分别为 35.38%、22.71%。同时,随着土地利用格局的变化,不透水地表对地表径流的贡献率逐年上升。

### 3.3 不同城市地表径流的变化特征与规律

城市尺度上,1980—2015 年不同土地利用/覆被格局下地表径流模拟结果表明(图 4),京津冀地区地表径流深空间分布不均匀,较大径流深主要出现在北京、天津、保定、石家庄、邢台、邯郸与唐山等城市。此外,不

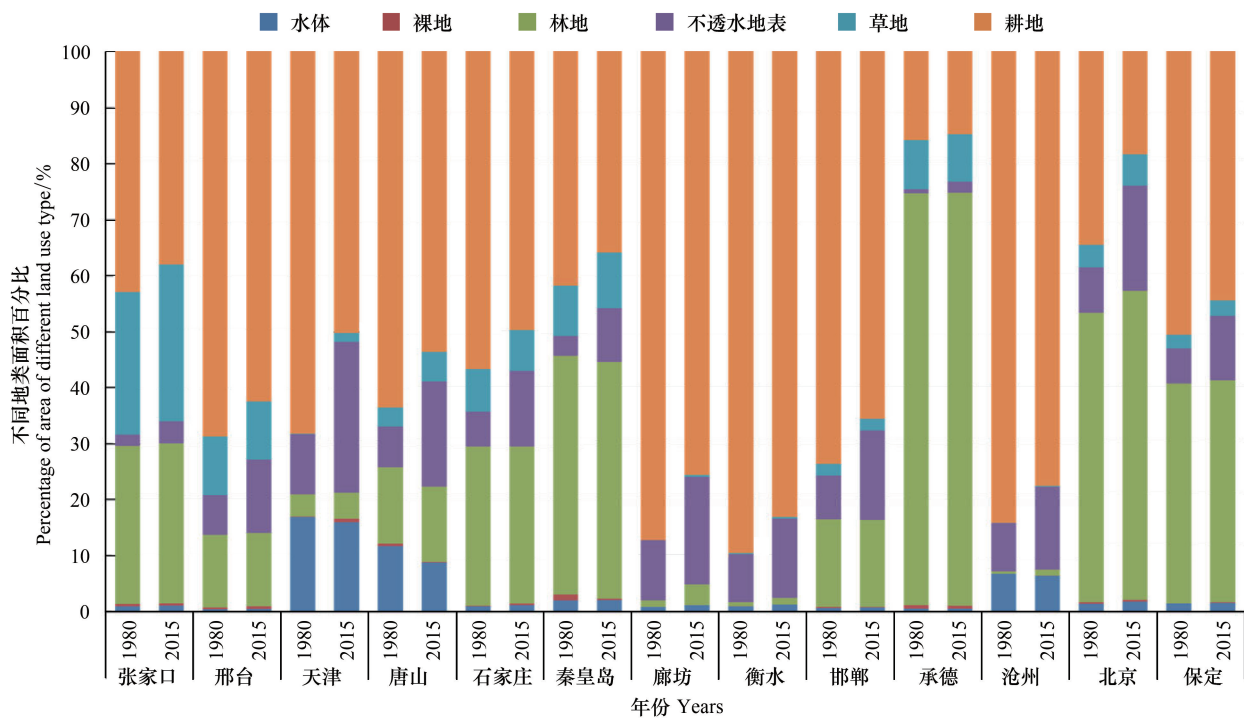


图3 京津冀城市群地区不同城市土地覆盖/利用组成

Fig.3 The composition of land use/cover types of Beijing-Tianjin-Hebei City Group in different cities

同城市内部的径流深极值有较大差异,如天津、保定主城区的径流深较北京主城区更大。

表7 京津冀城市群地区不同土地利用/覆被类型产流量

Table 7 Runoff volume of different land use/cover types in Beijing-Tianjin-Hebei City Group

| 年份<br>Year               | 1980                                             |              | 1990                                             |              | 2000                                             |              | 2010                                             |              | 2015                                             |              |
|--------------------------|--------------------------------------------------|--------------|--------------------------------------------------|--------------|--------------------------------------------------|--------------|--------------------------------------------------|--------------|--------------------------------------------------|--------------|
|                          | 径流量<br>Runoff/<br>10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> | 比例<br>Rate/% | 径流量<br>Runoff/<br>10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> | 比例<br>Rate/% | 径流量<br>Runoff/<br>10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> | 比例<br>Rate/% | 径流量<br>Runoff/<br>10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> | 比例<br>Rate/% | 径流量<br>Runoff/<br>10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> | 比例<br>Rate/% |
| 水体 Water                 | 22.17                                            | 14.71        | 26.16                                            | 16.79        | 23.94                                            | 14.84        | 22.08                                            | 13.40        | 21.71                                            | 12.88        |
| 裸地 Barren land           | 0.72                                             | 0.48         | 0.48                                             | 0.31         | 0.76                                             | 0.47         | 0.79                                             | 0.48         | 0.79                                             | 0.47         |
| 林地 Forest                | 32.96                                            | 21.87        | 33.82                                            | 21.71        | 32.69                                            | 20.26        | 33.73                                            | 20.47        | 33.22                                            | 19.71        |
| 不透水地表<br>Impervious land | 24.27                                            | 16.10        | 27.00                                            | 17.33        | 37.48                                            | 23.23        | 44.68                                            | 27.11        | 50.22                                            | 29.80        |
| 草地 Grassland             | 9.26                                             | 6.14         | 8.35                                             | 5.36         | 10.40                                            | 6.45         | 10.74                                            | 6.51         | 10.47                                            | 6.21         |
| 耕地 Cultivated land       | 61.34                                            | 40.70        | 60.00                                            | 38.51        | 56.07                                            | 34.75        | 52.78                                            | 32.03        | 52.14                                            | 30.93        |

各城市标准化年均径流深(NAARD)分析结果表明,不同城市标准化年均径流深值差异较大(表8),表明不同城市的产流能力不同。综合来看,天津、保定、石家庄3个城市的标准化年均径流深值较大,承德、衡水的标准化年均径流深较低,北京市的标准化年均径流深处于中等水平。如2015年,天津、保定、石家庄的NAARD值分别为142.31 mm、121.75 mm、126.44 mm,承德、衡水的NAARD值仅为37.14 mm、52.77 mm,北京市的NAARD值为81.24 mm。

从径流深变化规律来看,1980—2015年13个城市的标准化年均径流深总体呈现增长趋势,但不同城市的增长幅度不同。其中,北京、天津、石家庄、廊坊、邯郸的增长值较高,1980—2015年分别增加了12.31 mm、25.66 mm、13.33 mm、12.36 mm、13.77 mm;承德、张家口的标准化年均径流深增加较低,分别增加了1.27 mm、2.70 mm。

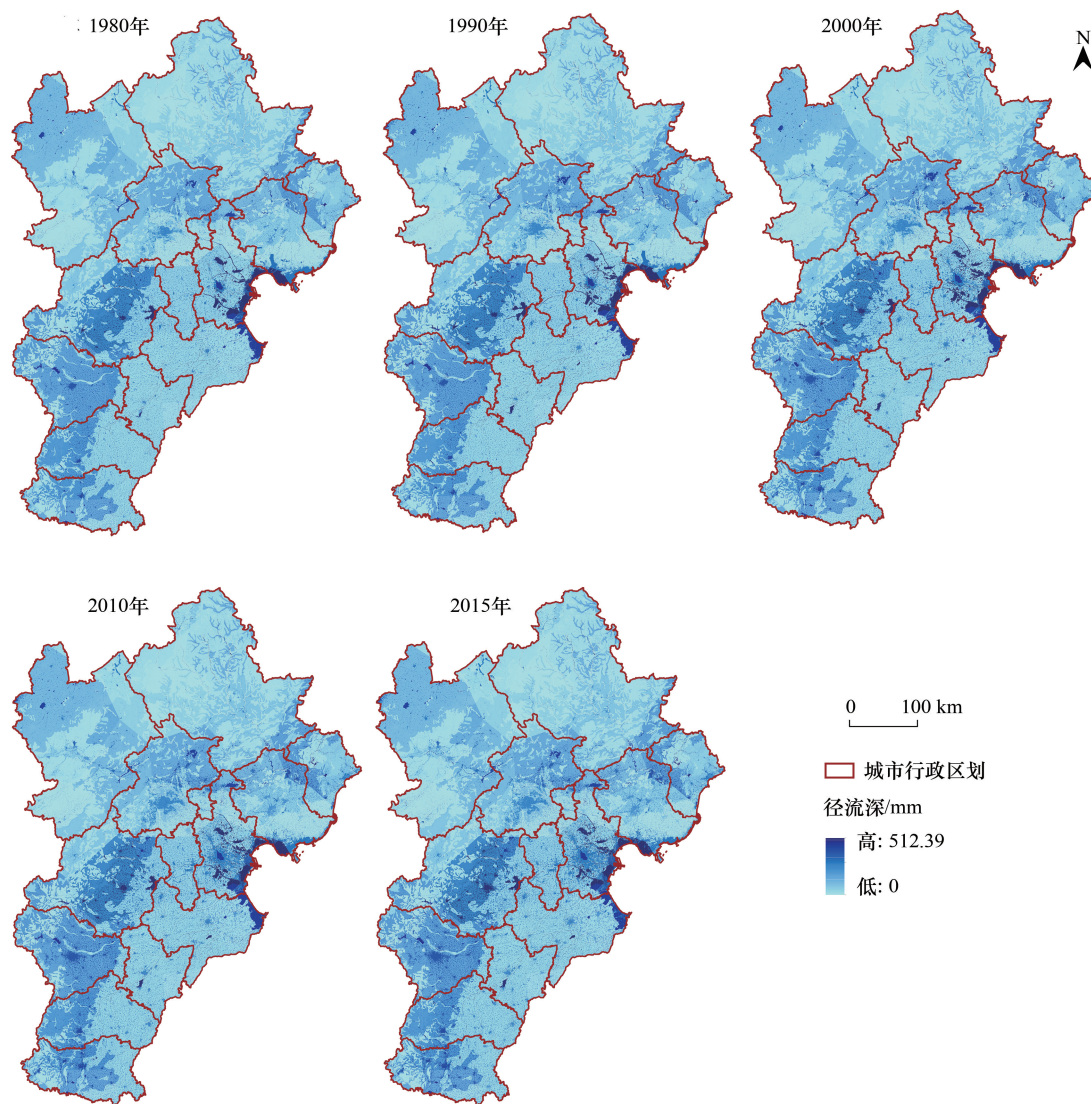


图4 京津冀城市群径流深分布图

Fig.4 Runoff depth distribution of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration in different periods

此外,各城市标准化年均径流深在不同时期的变化特征差异较大。如北京、天津、石家庄、邢台等城市在1990—2000年NAARD年均增长值最大,分别为0.52 mm、1.39 mm、0.70 mm及0.48 mm;而唐山、承德、张家口、保定等城市的NAARD年均增值较大值则出现在2010—2015年,分别为0.44 mm、0.13 mm、0.35 mm、0.58 mm,秦皇岛在2000—2010年NAARD年均增长值最大。但总体来看,13个城市在1990—2000年、2010—2015年两个时间段的年均增长值较大,各城市NAARD年均增长率有相似规律。

#### 4 结论与讨论

本研究旨在分析我国特大城市群快速的土地利用/覆被变化情况与地表径流的响应关系。基于多年平均的水文气象条件,分析京津冀地区历史土地利用/覆被格局变化对径流的影响与变化规律,主要结论如下:

(1)本研究应用L-THIA模型,基于逐日降雨数据、土壤数据,以及不同土地利用/覆被数据,模拟京津冀地区地表径流量的时空分布特征。经检验,模型模拟误差在 $\pm 10\%$ 内,表明所构建的L-THIA模型适用于京津冀地区的地表径流模拟。

(2) 1980—2015 年,京津冀城市群不透水地表面积剧烈增加,其净增长值为 12690.14 km<sup>2</sup>,面积占比增加 5.89%。经济较发达的北京、天津、唐山、保定、石家庄等城市不透水地表面积占比较大,其增长值也相对较大。

表 8 不同城市标准化年均径流深

Table 8 Normalized average annual runoff depth in different cities

| 城市<br>City | 面积/km <sup>2</sup><br>Area | 标准化年均径流深 Normalized average annual runoff depth |         |         |         |         | 1980—2015<br>NAARD 变化量 |
|------------|----------------------------|-------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|------------------------|
|            |                            | 1980/mm                                         | 1990/mm | 2000/mm | 2010/mm | 2015/mm |                        |
| 北京         | 16405.80                   | 68.93                                           | 72.99   | 78.14   | 80.51   | 81.24   | 12.31                  |
| 天津         | 11686.40                   | 116.65                                          | 122.68  | 136.56  | 141.70  | 142.31  | 25.66                  |
| 唐山         | 13589.50                   | 77.23                                           | 78.17   | 79.47   | 81.87   | 84.05   | 6.83                   |
| 秦皇岛        | 7770.78                    | 65.75                                           | 66.63   | 68.83   | 72.83   | 74.29   | 8.54                   |
| 承德         | 39491.50                   | 35.87                                           | 36.02   | 36.40   | 36.48   | 37.14   | 1.27                   |
| 张家口        | 36793.90                   | 51.76                                           | 52.65   | 52.57   | 52.72   | 54.46   | 2.70                   |
| 保定         | 22194.00                   | 111.28                                          | 115.07  | 117.30  | 118.85  | 121.75  | 10.48                  |
| 石家庄        | 14070.80                   | 113.11                                          | 114.92  | 121.92  | 124.57  | 126.44  | 13.33                  |
| 廊坊         | 6415.29                    | 50.62                                           | 53.46   | 55.82   | 59.76   | 62.98   | 12.36                  |
| 沧州         | 14071.90                   | 64.24                                           | 66.26   | 68.18   | 70.31   | 72.17   | 7.93                   |
| 衡水         | 8838.63                    | 43.74                                           | 47.29   | 47.42   | 50.69   | 52.77   | 9.03                   |
| 邢台         | 12438.70                   | 83.63                                           | 84.17   | 88.99   | 92.04   | 93.47   | 9.84                   |
| 邯郸         | 12063.90                   | 82.35                                           | 83.64   | 88.39   | 91.77   | 96.13   | 13.77                  |

NAARD, 标准化年均径流深 Normalized Average Annual Runoff depth

(3) 随着土地利用/覆被格局的变化,京津冀地区地表径流量呈逐渐增长趋势。1980—2015 年京津冀城市群地表径流量增加了 17.84 亿 m<sup>3</sup>,增幅 11.83%。对地表径流贡献较大的土地利用类型为耕地和不透水地表,并且随着不透水地表面面积的逐渐增加,其贡献率逐年增加。

(4) 从城市尺度来看,京津冀各城市的标准化年均径流深 (NAARD) 有较大差异。天津市 NAARD 值最大,承德市最小,北京市处于中等水平。不同城市标准化年均径流深增长规律也存在较大差异。但大多数城市在 1990—2000 年、2010—2015 年径流深增长较快,这与京津冀地区的城市化进程有关。

研究结果表明,随着土地利用/覆被的变化,京津冀地区地表径流呈明显的增长趋势,这可能会导致城市洪涝灾害风险增加,造成生态环境的破坏。合理规划京津冀城市群土地利用结构、控制地表径流的动态平衡、完善调控机制是减少洪涝灾害的重要手段。此外,从各城市 NAARD 变化规律可以看出,土地覆被并不是影响城市地表径流的唯一因素,土壤类型、蒸散发与气象等因素也会对径流深产生重要影响。如相比保定、石家庄,廊坊市的不透水地表、耕地等产流能力较高的土地利用类型占比较大,但是廊坊市的标准化年均径流深却比保定和石家庄偏低近 60 mm。城市标准化年均径流深反映了不同城市产流能力的强弱,可以作为有效指标指示城市土地利用/覆被变化对区域地表径流量的影响。

此外,本文仍存在一些不足之处。如在进行模型率定时,本研究选取了海河流域 3 个子流域进行参数验证,但海河流域范围较广,下垫面特征在空间上存在较大的差异,模型率定范围的选择会使模拟的结果存在一定误差。另外,本文仅根据过去的土地利用数据模拟了地表径流的变化,在后续研究中可设置不同的气候和土地利用变化方案,探讨未来情景下京津冀地区水文要素的变化规律。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Hao X M, Chen Y N, Xu C C, Li W H. Impacts of climate change and human activities on the surface runoff in the Tarim River basin over the last fifty years. *Water Resources Management*, 2008, 22(9): 1159-1171.
- [ 2 ] 张建云, 宋晓猛, 王国庆, 贺瑞敏, 王小军. 变化环境下城市水文学的发展与挑战——I. 城市水文效应. *水科学进展*, 2014, 25(4):

594-605.

- [ 3 ] 赵安周, 朱秀芳, 史培军, 潘耀忠. 国内外城市化水文效应研究综述. 水文, 2013, 33(5): 16-22.
- [ 4 ] 占红. 城市不透水面的扩张对地表径流量的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2016.
- [ 5 ] Warburton M L, Schulze R E, Jewitt G P. W. Hydrological impacts of land use change in three diverse South African catchments. Journal of Hydrology, 2012, 414-415: 118-135.
- [ 6 ] 韩丽. 流域土地利用变化及水文效应研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [ 7 ] 王潞, 杨国范, 林茂森. 土地利用变化对牯牛河流域径流的影响. 人民长江, 2017, 48(8): 32-37.
- [ 8 ] Dong Y, Liu Y, Chen J N. Will urban expansion lead to an increase in future water pollution loads? -a preliminary investigation of the Haihe River Basin in northeastern China. Environmental Science and Pollution Research, 2014, 21(11): 7024-7034.
- [ 9 ] 白凤姣, 李天宏. 基于 GIS 和 L-THIA 模型的深圳市观澜河流域非点源污染负荷变化分析. 环境科学, 2012, 33(8): 2667-2673.
- [ 10 ] 史晓亮, 李颖, 严登华, 赵凯. 流域土地利用/覆被变化对水文过程的影响研究进展. 水土保持研究, 2013, 20(4): 301-308.
- [ 11 ] 赫胜彬, 王华伟. 京津冀城市群空间结构研究. 经济问题探索, 2015, (6): 105-111.
- [ 12 ] 王振坡, 翟婧彤, 张颖, 游斌. 京津冀城市群城市规模分布特征研究. 上海经济研究, 2015, (7): 79-88.
- [ 13 ] 吕乐婷, 张杰, 江源, 郑德凤, 王晓蕊. 土地利用变化对东江流域产流过程影响的定量评估. 水资源保护, 2018, 34(3): 45-51.
- [ 14 ] 史培军, 袁艺, 陈晋. 深圳市土地利用变化对流域径流的影响. 生态学报, 2001, 21(7): 1041-1049.
- [ 15 ] Yin J, He F, Xiong Y J, Qiu G Y. Effects of land use/land cover and climate changes on surface runoff in a semi-humid and semi-arid transition zone in Northwest China. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21(1): 183-196.
- [ 16 ] Yang W T, Long D, Bai P. Impacts of future land cover and climate changes on runoff in the mostly afforested river basin in North China. Journal of hydrology, 2019, 570: 201-219.
- [ 17 ] 陈仁升, 康尔泗, 杨建平, 张济世. 水文模型研究综述. 中国沙漠, 2003, 23(3): 221-229.
- [ 18 ] 芮孝芳. 流域水文模型研究中的若干问题. 水科学进展, 1997, 8(1): 94-98.
- [ 19 ] 秦莉俐, 陈云霞, 许有鹏. 城镇化对径流的长期影响研究. 南京大学学报: 自然科学, 2005, 41(3): 279-285.
- [ 20 ] 李凯, 曾凡棠, 房怀阳, 林澍. 基于 L-THIA 模型的市桥河流域非点源氮磷负荷分析. 环境科学, 2013, 34(11): 4218-4225.
- [ 21 ] Tang Z, Engel B A, Pijanowski B C, Lim K J. Forecasting land use change and its environmental impact at a watershed scale. Journal of Environmental Management, 2005, 76(1): 35-45.
- [ 22 ] Chen J Q, Theller L, Gitau M W, Engel B A, Harbor J M. Harbor. Urbanization impacts on surface runoff of the contiguous United States. Journal of Environmental Management, 2017, 187: 470-481.
- [ 23 ] 张明月, 彭定志, 林荷娟, 邱玲花. 太湖流域土地利用变化对径流的影响研究. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2014, 50(5): 467-471.
- [ 24 ] 刘珍环, 曾祥坤. 深圳市不透水表面扩展对径流量的影响. 水资源保护, 2013, 29(3): 44-50.
- [ 25 ] 刘菁华, 李伟峰, 周伟奇, 韩立建, 钱雨果, 郑晓欣. 京津冀城市群景观格局变化机制与预测. 生态学报, 2017, 37(16): 5324-5333.
- [ 26 ] 鲍超, 贺东梅. 京津冀城市群水资源开发利用的时空特征与政策启示. 地理科学进展, 2017, 36(1): 58-67.
- [ 27 ] 李孟颖, 陈介山. 京津冀地区面向人居环境之水安全格局初探. 安全与环境学报, 2015, 15(3): 347-355.
- [ 28 ] 顾朝林, 辛章平. 国外城市群水资源开发模式及其对我国的启示. 城市问题, 2014, (10): 36-42.
- [ 29 ] 杨浩. 京津冀城市群土地利用/覆被时空格局变化. 江苏农业科学, 2018, 46(10): 276-280.
- [ 30 ] 封志明, 刘登伟. 京津冀地区水资源供需平衡及其水资源承载力. 自然资源学报, 2006, 21(5): 689-699.
- [ 31 ] 杨柳, 吴忠诚, 韩瑜, 吴秋燕, 汪祖茂, 杨玉格. 基于 L-THIA 模型的温榆河流域非点源污染负荷变化分析. 安全与环境学报, 2015, 15(1): 208-213.
- [ 32 ] Shadeed S, Almasri M. Application of GIS-based SCS-CN method in West Bank catchments, Palestine. Water Science and Engineering, 2010, 3(1): 1-13.
- [ 33 ] Li C L, Liu M, Hu Y M, Shi T, Qu X Q, Walter M T. Effects of urbanization on direct runoff characteristics in urban functional zones. Science of the Total Environment, 2018, 643: 301-311.
- [ 34 ] 欧阳志云, 王桥, 郑华, 张峰, 侯鹏. 全国生态环境十年变化(2000—2010 年)遥感调查评估. 中国科学院院刊, 2014, 29(4): 462-466.
- [ 35 ] 曹言, 柴素盈, 王杰, 戚娜. 昆明市主城区土地利用变化对地表径流的影响. 水电能源科学, 2018, 36(8): 22-25, 38.
- [ 36 ] 董文涛, 程先富, 张群, 赵阳, 韩平. SCS-CN 模型在巢湖流域地表产流估算中的应用. 水土保持通报, 2012, 32(3): 174-177, 187.
- [ 37 ] 杜黎明, 郭培闪. 城镇化对降雨-径流关系的影响研究. 现代测绘, 2015, 38(5): 35-37.