

# 哈尔滨市不透水面时空变化对融雪径流的影响

高侯晗, 刘 硕, 于 益, 张美琦, 罗 爻

(哈尔滨师范大学 地理科学学院, 黑龙江 哈尔滨 150025)

**摘要:**指出了北方高纬度城市春季融雪径流的集中产生对城市水生态环境具有冲击性的影响, 而城市不透水面的面积、分布规律和空间特性又是影响融雪径流产汇流的主要因素。为研究北方高纬城市春季融雪径流向地表水体径流量排放, 通过 SWMM 模型进行不同土地利用背景下融雪径流时空变化模拟及分析, 选取 1999~2017 年 6 个年份的 Landsat5TM 和 Landsat8OLI 影像数据, 对哈尔滨 6 个主城区进行了土地利用类型监督分类。以 1999~2017 年研究区不透水率变化为驱动因素, 对各汇水区不透水率变化下融雪径流的产汇流过程进行了模拟, 结果表明: 1999~2017 年城市不透水面面积增加了 266.49 km<sup>2</sup>, 绿地减少 363.52 km<sup>2</sup>, 水体面积增加 97.2 km<sup>2</sup>。6 个年份的不透水面占比分别为 13.37%、18.28%、20.06%、22%、23.47% 和 25.09%。在 26 个汇水区中, 各汇水区的不透水面呈空间不均衡性增长, 其中 S3 不透水面积增长最多为 29.8 km<sup>2</sup>; S15 的不透水率变化最大, 1999~2017 年研究区融雪径流量分别为 40623.33 m<sup>3</sup>、56494.1 m<sup>3</sup>、62681.4 m<sup>3</sup>、68898.95 m<sup>3</sup>、73770.75 m<sup>3</sup> 和 79107.76 m<sup>3</sup>, 地表径流逐年增加。对各汇水区不透水面增长与融雪径流量的相关性进行了分析, 结果表明: 哈尔滨市不透水面面积变化与融雪径流量呈正相关, 且相关系数极高, 春季融雪径流量的明显增加主要是与城市不透水面的扩张, 城市土地与耕地、未利用地结构的变化相关。

**关键词:**城市不透水面, SWMM 模型, 土地利用分类, 融雪径流产汇流

中图分类号: S715

文献标识码: A

文章编号: 1674-9944(2021)08-0198-03

DOI: 10.16663/j.cnki.lskj.2021.08.068

## 1 引言

不透水面的增长与城市发展战略目标、城市总体规划等驱动因素密切相关<sup>[1~3]</sup>, 城市化进程不断加速使融雪径流携带污染控制汇入地表水体, 对地表水环境质量也产生影响<sup>[4~6]</sup>。随着流域不透水性增加, 降雨径流量和峰值不断增大, 对地表径流量影响显著<sup>[7]</sup>。SWMM 模型适用于传统模型难以解决的城市排水管道与不同类型下垫面情况带来的复杂问题<sup>[8,9]</sup>。

哈尔滨市进入融雪期时, 降雪频繁且融雪时间集中, 整个冬季的积雪在 1~2 个月内全部融化, 除部分蒸发外皆形成融雪径流<sup>[10,11]</sup>。因此, 了解城市冬季融雪径流的流量变化过程及向水体的输出量, 有助于正确预测及处理径流有害影响, 提高水资源利用效率<sup>[12]</sup>。本文通过遥感影像与水文模型的变化模拟分析, 可以有效地实现不透水面变化对融雪径流的响应, 适用于北方城市融雪径流的模拟研究, 为城市规划与融雪径流的控制提供参考。

## 2 研究区概况

哈尔滨市位于黑龙江省西南部, 冬季漫长寒冷, 年平均气温约 3.4 °C, 总面积 53100 km<sup>2</sup>, 年降水量 500 mm。秋冬季节降水波动幅度最大, 夏季最小。本文所选研究区范围为哈尔滨市中心城区范围内的 6 个行政区, 研究区位置见图 1。

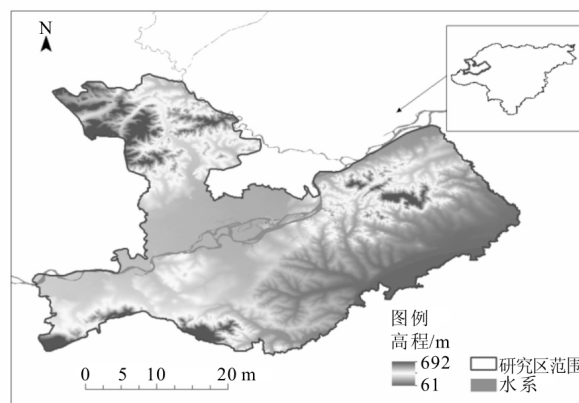


图 1 研究区位

## 3 数据与方法

### 3.1 数据来源

选取 1999、2001、2004、2008、2013、2017 年 6 个年份的 Landsat5TM、Landsat8OLI 影像, 遥感影像数据和 GDEM30M 分辨率数字高程数据由地理空间数据云下载。DEM 数字高程数据用于绘制汇水区、提取坡度和宽度等参数。气象数据为哈尔滨机场气象站 2017 年 11 月 1 日至 2018 年 4 月 30 日的降雪及温度数据。

### 3.2 数据处理

收稿日期: 2021-01-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 41501033)

作者简介: 高侯晗(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为水环境流域管理。

通讯作者: 刘 硕(1978—), 女, 副教授, 研究方向为流域水环境管理。

### 3.2.1 不透水面的提取

先对各年份卫星影像采用监督分类中的向量机分类方法,将研究区分为绿地、居民地、水体三类,根据结果进行目视判读,将分类错误处进行修改。

### 3.2.2 汇水区的概化

运用 GDEMDEM30M 分辨率数字高程数据和哈尔滨河流排水管线分布情况划分汇水区,利用 ArcHydro 数据模型进行洼地填充、确定水流方向和计算汇流累积量,将汇流累积量定义河网结构,利用得出的河网数据和水流方向提取河流弧段。使用 CatchmentPolygon-Processing 工具得到矢量化的汇水区、河流线和汇水出水口。每个区域排水口设定为最近排水系统节点、河道或排水口。由于本文研究区面积较大,故仅依据主要流域地势及主管道分布进行概化最终将研究区划定出 26 个子汇水区,19 段排水管,19 个排水节点,6 个排水口。

### 3.3 融雪径流量的计算

融雪径流量计算选用暴雨洪水管理模型,根据 2017 年冬季降雪变化构建融雪模型,分为产汇流两部分,将降雪过程以时间序列的形式输入至模型,模拟 2017 年 11 月 1 日至 2018 年 4 月 30 日连续降雪时间序列下的冬季融雪过程。模型参数率定与验证参照以往 SWMM 模拟经验,用以下公式进行综合评估,Nash—Sutcliffe 效率系数越接近 1 说明可信度越高,系数大于 0.7 时,表示与实际吻合程度较好。

$$\eta = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\text{实测值} - \text{模拟值})^2}{\sum_{i=1}^n (\text{实测值} - \text{实测平均值})^2} \quad (1)$$

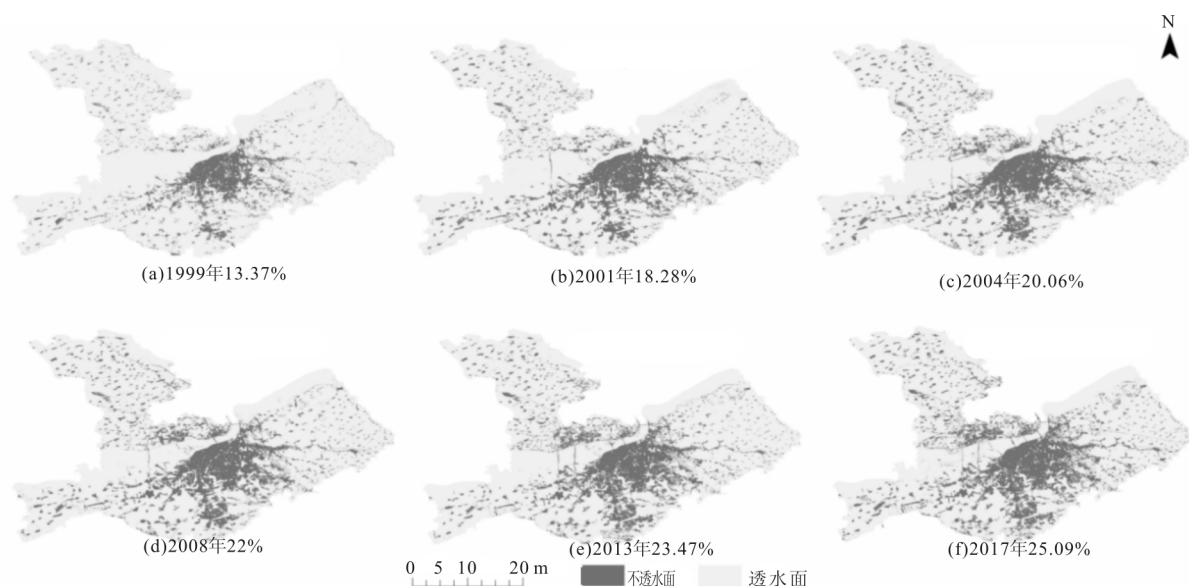


图2 研究区不透水面变化

## 4.2 融雪径流时空变化规律分析

### 4.2.1 年际径流量变化

哈尔滨 2017 年降雪量为 48.6 mm,研究区面积 2273.3934 km<sup>2</sup>,利用 SWMM 分别模拟了 1999、2001、2004、2008、2013、2017 年 6 个年份的春季融雪径流,其中 6 个模型所设置的参数中,除不透透率改变,降雪量、

将模拟后径流水位与实测水位值根据公式进行吻合程度验证,得到 Nash—Sutcliffe 效率系数值为 0.86,模型变化基本符合真实融雪产汇流过程。

## 4 结果分析

### 4.1 哈尔滨市流域不透水面时空变化规律分析

利用 EVNI 进行监督分类,结果表明,哈尔滨市主城区不透水面主要分布在南岗区的北部、道里区的东部、道外区的西部、香坊区的西北部、和平房区的北部,1999~2017 年城市不透水面面积呈递增趋势,前后两个时期的不透水面积大幅增加了 266.49 km<sup>2</sup>,绿地减少 363.52 km<sup>2</sup>,水体面积增加 97.2 km<sup>2</sup>。研究区总面积 2273.3934 km<sup>2</sup>,其中 1999、2001、2004、2008、2013、2017 年的不透水面占比分别为 13.37%、18.28%、20.06%、22%、23.47%、25.09% (图 2)。结果显示 1999~2001 的不透水面扩大速率最快。在 26 个汇水区中,每个汇水区 1999~2017 年不透水面平均增长 11.33 km<sup>2</sup>,不透水率平均增加 10.25%,S3、S4 不透水面增长面积最多,分别增长 29.8 km<sup>2</sup> 和 29 km<sup>2</sup>,S15 的不透透率变化最大,由 1999 年的 41.37% 扩张到 2017 年的 70.54%,其次是 S26,由 10.3% 扩张到 38.9%。不透透率最高的汇水区分别是 S7、S9、S10 和 S13,分别从 89.73%、88.58%、90.16%、89.52% 扩张为 94.85%、93.54%、94.16%、96.35%,而这四个区均位于繁华的市中心。

温度等参数均以 2017 年为基准年,故能准确观察出不透透率的变化对城市融雪径流量的影响。结果表明,1999、2001、2004、2008、2013、2017 年模拟的地表融雪径流量分别为 40623.33 m<sup>3</sup>、56494.1 m<sup>3</sup>、62681.4 m<sup>3</sup>、68898.95 m<sup>3</sup>、73770.75 m<sup>3</sup>、79107.76 m<sup>3</sup>,地表径流逐年增加,同 1999 年相比,2017 年径流量增加了 94%。

#### 4.2.2 各汇水区融雪径流量时空变化

由 SWMM 模拟结果得出各汇水区在融雪期间的径流量后,将径流产出量进行以下分级:0~500 m<sup>3</sup> 为 F1,500~1000 m<sup>3</sup> 为 F2,1000~1500 m<sup>3</sup> 为 F3,1500~2500 m<sup>3</sup> 为 F4,2500~3500 m<sup>3</sup> 为 F5,3500~4500 m<sup>3</sup> 为 F6,4500~5500 m<sup>3</sup> 为 F7,5500~7500 m<sup>3</sup> 为 F8,7500~9500 m<sup>3</sup> 为 F9,1999 年 26 个汇水区平均融雪径流量 1562.43 m<sup>3</sup>,其中 14 个汇水区超过平均值,S15 总体产流量均为最大,由 1999 年的 F8 转为 2017 年的 F9。S26 变化最快,变化阶段分别为 F4、F5、F6、F8。融雪径流量最小的是 S19,六次模拟中结果均为 F1,其次是 S20,结果均为 F2。2001 年平均径流量 2172.85 m<sup>3</sup>,2004、2008、2013、2017 年平均产流量分别为 2410.82 m<sup>3</sup>、2649.96 m<sup>3</sup>、2837.33 m<sup>3</sup>、3042.61 m<sup>3</sup>,并呈现出明显的增长趋势。

#### 4.3 不透水面扩张与径流量相关性分析

##### 4.3.1 各汇水区不透水面积与融雪径流量增长速率变化分析

将研究的 18 年中每隔 9 年分为一个阶段,1999~2008 为第一阶段,2008~2017 为第二阶段,分别将每个汇水区的不透水面面积增长速率与融雪径流量增长速率作比较,可知在第二阶段中增长速度最快的汇水区分分别是 S26、S15、S2 和 S17,且也是增长量最大的汇水区。同时 S26 也是第一阶段增长速率最快达到 69.5%,在第二阶段速率下降到 13%,在第一阶段不透水面积增长了 23.43 km<sup>2</sup>,第二阶段增长了 5.24 km<sup>2</sup>。S15 位于香坊区中部,主要下设 10 个乡镇街道,在第一阶段不透水面增长 22 km<sup>2</sup>,径流量增加了 3004 m<sup>3</sup>,主要由于新香坊街道、幸福镇、成高子镇的建设与扩张,在第二阶段增长变缓慢。S2 主要包含道里区的榆树镇和新发镇在第二阶段 1999~2001 年间各乡镇迅速向外扩张,往后的增量与趋势都呈现减缓趋势。

##### 4.3.2 不透水面扩张与融雪径流量相关性分析

使用 6 个年份中哈尔滨市 26 个汇水区的不透水面面积和融雪径流量,通过 Pearson 相关系数检验各汇水区内二者的相关性,此方法用以反映变量之间相关关系密切程度的统计指标,相关系数越接近于 1,相关度越强。各个研究年份的相关系数分别为 0.989、0.99、0.985、0.985、0.982 和 0.982,相关系数均大于 0.98,且 p 值均通过 0.01 显著性检验,二者在本文研究区内均表现为显著正相关。

## 5 结论与讨论

(1)从 1999~2017 年,哈尔滨市区的土地利用类型发生了明显的变化,城市用地从 1999 年的 13.37% 大幅增加到 2017 年的 25.59%,总体呈现由中心向外扩

张的趋势,这可能是由于人口、经济、社会压力造成了对额外建筑地、居民地所产成的高需求,土地覆被乡镇城市转变。

(2)根据 2017 年的实测水文数据,运用 SWMM 模型进行了模拟,其中不透透率是影响融雪径流最敏感的参数,该模型能较好地反映研究区春季融雪产汇流过程。1999 年和 2017 年的年径流量分别为 40623.33 m<sup>3</sup> 和 79107.76 m<sup>3</sup>,将模拟结果分为 9 个等级,26 个汇水区完全呈现上升趋势,其中 S26 增长速度最快,S15 总体融雪径流量均最大。

(3)本研究中哈尔滨市不透水面面积与融雪径流量呈正相关,且相关系数极高,本次研究哈尔滨市春季融雪径流量的明显增加主要是因为城市不透水面的扩张,城市土地与耕地、未利用地结构的变化,二者在 1999~2008 年间增长均十分迅速,在 2008~2017 年增长趋势变缓。

#### 参考文献:

- [1]徐涵秋.城市不透水面与相关城市生态要素关系的定量分析[J].生态学报,2009,29(5):2456~2462.
- [2]翟浩然,唐新明,王光辉,等.中国超大城市不透水面扩张对对流层 NO<sub>2</sub> 柱浓度的影响[J].环境科学学报,2019,39(3):797~808.
- [3]程国栋,赵传燕,王瑶.内陆河流域森林生态系统生态水文过程研究[J].地球科学进展,2011,26(11):1125~1130.
- [4]吴亚刚,陈莹,陈望,等.西安市某文教区典型下垫面径流污染特征[J].中国环境科学,2018,38(8):3104~3112.
- [5]Fulong Chen, Jintao Zheng, Shaofei Li, et al. Effects of the Land Use and Check Dams on Flood in Upper Catchment of Fuping Hydrological Station by Hydrological Modeling[J]. Water Resources, 2018, 45(4):508~522.
- [6]Chen Lei, Zhi Xiaosha, Shen Zhenyao, et al. Comparison between snowmelt-runoff and rainfall-runoff nonpoint source pollution in a typical urban catchment in Beijing, China[J]. Environmental science and pollution research international, 2017.
- [7]班玉龙,孔繁花,尹海伟,等.土地利用格局对 SWMM 模型汇流模式选择及相应产流特征的影响[J].生态学报,2016,36(14):4317~4326.
- [8]Xiaoli Yang, Liliang Ren, Yi Liu, et al. Hydrological response to land use and land cover changes in a sub-watershed of West Liaohe River Basin, China[J]. Journal of Arid Land, 2014, 6(6):678~689.
- [9]初亚奇,曾坚,石羽,等.基于暴雨径流管理模型的海绵城市景观格局优化模拟[J].应用生态学报,2018,29(12):4089~4096.
- [10]孙夕涵,刘硕,万鲁河,等.哈尔滨主城区不同下垫面融雪径流污染特性[J].环境科学,2016,37(7):2556~2562.
- [11]车丽娜,刘硕,韩金凤,等.哈尔滨市融雪径流中重金属污染空间分布及源解析[J].环境科学学报,2019,39(5):1572~1580.
- [12]朱宾宾,满秀玲,俞正祥,等.大兴安岭北部森林小流域融雪径流特征[J].南京林业大学学报(自然科学版),2016,40(6):69~75.