

城市不透水面扩张对地表径流量的影响

占红, 臧淑英, 吴长山, 李苗, 李斌侠

(哈尔滨师范大学 黑龙江省普通高等学校地理环境遥感监测重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150025)

摘要: 城市不透水面的扩张对地表径流量有显著影响。以哈尔滨市松花江沿岸的6个中心城区为例, 运用线性光谱分解技术和L-THIA模型, 模拟小雨、中雨、大雨和暴雨4种日降雨量情景和枯、丰水年情境下, 不同年份由于不透水面的扩张所引起的日径流量和年径流量变化。结果表明: 日径流量在小雨情境下所受不透水面的影响最为明显, 随着雨量增加, 影响显著减小; 年径流量在枯水年受不透水面扩张的影响大于丰水年。运用L-THIA模型模拟不透水面扩张导致的径流量变化, 所需参数少, 操作简单快捷, 模拟结果可为城市的排涝减灾、规划管理等提供参考。

关键词: 不透水面; L-THIA模型; 降雨量; 径流量; 哈尔滨

中图分类号: P334.92

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)06-0054-07

Impact of urban impervious surface expansion on runoff

ZHAN Hong, ZANG Shuying, WU Changshan, LI Miao, LI Binxia

(Key Laboratory of Remote Sensing Monitoring of Geographic Environment, College of Heilongjiang Province, Harbin Normal University, Harbin 150025, China)

Abstract: The expansion of urban impervious surface has a significant effect on surface runoff. Taking the six central regions along the Songhua River in Harbin as the study area, the paper used linear spectral decomposition technique and long-term hydrologic impact assessment (L-THIA) model to simulate four daily rainfall scenarios such as light rain, moderate rain, heavy rain and rainstorm. It simulated the impact of impervious surface expansion on daily and annual runoff variation. Result indicated that the daily runoff in light rainfall scenario is particularly affected by the impervious surface, with the increase of rainfall, the impact is reduced significantly; in term of annual runoff, the impervious surface expansion had more significant impact on dry years than that on wet years. The paper used L-THIA model to simulate the runoff change caused by impervious surface expansion. The method requires a small amount of parameters. The operation is simple and quick. The result can provide a basis for flood mitigation, planning and management of urban.

Key words: impervious surface; L-THIA model; rainfall; runoff; Harbin

土地利用/土地覆被变化(LUCC)是表征人类活动对地表自然生态系统影响最直接的信号,是人类社会经济活动与自然生态过程交互和链接的纽带^[1]。自21世纪以来,国家实施了一系列区域发展战略,在促进社会经济快速发展的同时,对中国土地利用动态变化也产生重要影响,在国家宏观政策的调控和带动下,固定资产投资增加和大规模的开发区兴建促进了城镇居民工矿用地的增加,大量农村

人口不断向城镇聚集,城镇化水平不断提高^[2]。城市化是最为典型的土地利用变化过程之一,由于城市化进程的影响,城市区域的水循环机制,包括降雨-径流过程与河道过程,都将发生变化,并呈现出与自然状态迥然不同的差异^[3]。城市化过程导致了城市土地利用/土地覆被的变化,其显著特征表现为不透水面的不断增加^[4]。不透水面是指诸如建筑物顶部、公路、广场、机场、停车场等的多种类型的人

收稿日期:2015-07-07; 修回日期:2015-08-05

基金项目:国家自然科学基金项目(41171322); 黑龙江省自然科学基金重点项目(ZD201308); 黑龙江省自然科学基金面上项目(D201407)

作者简介:占红(1989-),女,湖北随州人,硕士研究生,主要从事不透水面应用研究。

通讯作者:臧淑英(1963-),女,黑龙江哈尔滨人,博士后,教授,博士生导师,主要从事LUCC及3S技术应用研究。

工建筑物区域,与土壤和植被相比,渗透率较小。随着城市不透水面的大量增加,透水性地表的大量减少,天然的径流过程逐渐变化为具有城市特性的径流过程,导致城市径流的数量、持续时间及强度增加,加剧急流、洪水和内涝。

城市不透水面扩张对区域降雨径流的影响研究已引起国内外众多学者的广泛关注。田迪等^[5]以美国切斯比克湾地区 150 个小流域和划分的 3 个自然地理区为研究区,选取 17 个河流流量指标与 4 种土地利用类型和不透水地表做了相关分析,结果表明:随着不透水地表面积增加,洪峰流量、雨季、汛期和年流量增加,流量变化加剧。刘珍环等^[6]以深圳市为研究区,综合遥感技术和长期水文影响评价(The Long-Term Hydrologic Impact Assessment, L-THIA)模型,模拟不透水面扩张对城区径流量的影响,结果表明应用 L-THIA 模型模拟快速城市化、无水文监测资料地区的不透水表面扩展导致的径流量变化,可取得良好效果。邵巍等^[7]在流域尺度上研究城区的现状和未来扩展过程中对应的不透水率及其与降雨-径流关系,研究结果表明不透水率与径流系数在不同降雨情况下都成正相关的线性关系, R^2 达到 0.9 以上。李彩丽^[8]通过分析秦淮河流域 1986-2006 年不透水面变化引起的水文效应发现,大约在 2003 年开始由于不透水面的增加导致秦淮河流域的径流深增加了 25.97%。Dams J 等^[9]以比利时的 Kleine Nete 流域为研究区,研究发现在 1986-2003 年间由于不透水面的扩张年径流量增加了 9.5%。Schueler^[10]通过对 40 个径流监测站的数据进行分析发现一英亩停车场的总径流量是一

英亩未被开发的草地的 16 倍。

本研究选择哈尔滨市松花江沿岸的 9 个子流域作为研究对象,应用 L-THIA 模型,模拟不同降雨情境下,不透水面的扩张对径流量的影响,为哈尔滨市防洪排涝提供依据。

1 研究区概况及数据源

1.1 区域概况

研究区包括了道里、南岗、香坊、平房和道外的大部分区域以及松北区东南部的一小部分区域,面积为 896.67 km²;三级以上河流松花江、五级河流阿什河和蜚克图河流经本研究区,一年中降水主要集中在 6-9 月,占全年降水量的 70% 以上,水资源特点是自产水偏少,过境水较丰,时空分布不均^[11]。

1.2 数据来源

1.2.1 遥感数据 研究区遥感影像和数字高程模型(DEM)由美国地质调查局网(<http://glovis.usgs.gov/>)提供,空间分辨率为 30 m,其中遥感影像为 2004 年 9 月 21 日、2005 年 9 月 8 日、2007 年 8 月 29 日和 2010 年 9 月 22 日共 4 景 Landsat 5 TM 和 2013 年 9 月 30 日的 1 景 Landsat 8 OLI,轨道号 118/28,影像无云,数据质量好。

1.2.2 流域划分 利用流域水环境模拟工具 BASINS 4.1 软件能够将流域划分为具有水文联系的子流域的水文处理功能,导入研究区的河网水系图和 DEM 数据进行处理,并根据 L-THIA 模型的适用特点,选取了其中的 9 个子流域作为本次研究的对象,并依次对其编号,见图 1。

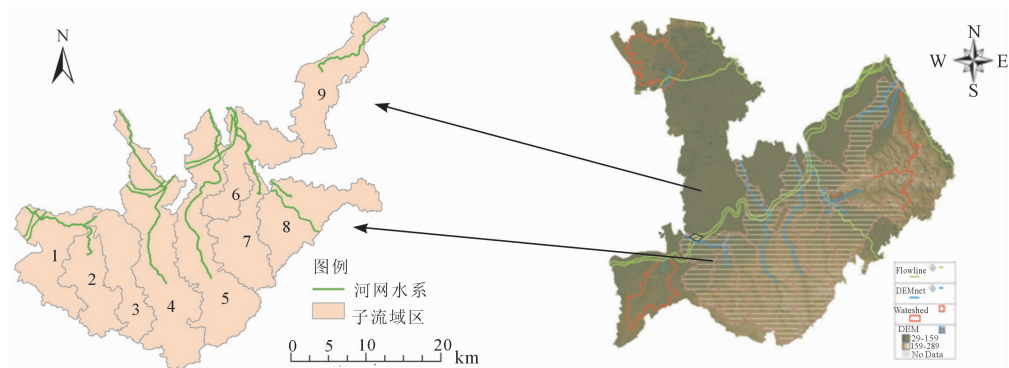


图 1 研究区图

1.2.3 降雨量数据 由中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>)提供,下载了哈尔滨气象站(区站号为 50953)1950 年 1 月至 2014 年 8 月的降雨量数据,根据研究需要整理出哈尔滨市近

十年的逐日降雨量数据。

1.2.4 水文土壤组数据 以黑龙江省 1:100 万的土壤栅格数据为基础,叠加本次的研究区范围,提取出土壤类型分布数据,并且根据 L-THIA 模型特有

的土壤分类体系,将研究区土壤类型归类合并,得到满足模型输入要求的 B、D 两种土壤类型,见图 2。

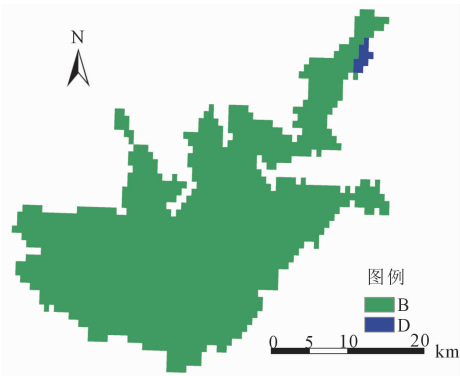


图 2 土壤分类图

2 研究方法

2.1 不透水面的提取

运用线性光谱分解技术获取不透水面在每个像元内的面百分比。

预处理包括:先将影像进行几何校正,因已有研究表明使用影像端元大气校正对端元丰度影像的获取没有明确影响^[12],故本研究只对影像做辐射定标处理,而未做大气校正,而后用研究区的矢量边界对影像进行裁剪,得到研究区范围内的遥感影像。

线性光谱分解过程:端元选择,根据研究区影像

的特点,选取植被、裸土、高反照率和低反照率 4 类地物作为端元组合,其中高反照率地物代表不透水面,低反照率地物代表水体,对于一些影像中不透水面既有高反照率地物又有低反照率地物的情形,则先进行水体掩膜,不透水面为高低反照率地物之和;进行线性光谱分解;去负值、去空值等处理。

分类后处理:由于沙土的光谱特征与水泥不透水面十分接近,所以经常在所提取的不透水面信息中形成噪音^[13],导致提取的不透水面比例略高于实际水平,故需将噪音剔除,利用 ENVI 中 SVM 将不透水面与裸土有所混淆的像元分为不透水与非不透水两类,在 ArcGIS 中用重分类将所分的不透水赋值为 1,非不透水赋值为 0,再用栅格计算将重分类结果与归一化处理的结果相乘,得到最终的不透水面影像。

精度验证:在研究区随机选取 200 个样点,以每一个样点所对应的像元为中心选择一个 3 * 3 像元的样区,统计每一个样区的不透水面盖度值。同时在 Google earth 影像上找出相对应的采样区域,通过目视解译统计每一个样区内不透水面的面积。最终选取了 130 个样区经行误差分析,得到均方根误差 $RMSE = 0.252730$; 平均绝对误差 $MAE = 0.146107$; 系统误差 $SE = -0.000168$,显然,光谱分解结果精度较好,可进行下一步研究。研究区不透水面的年际变化见图 3。

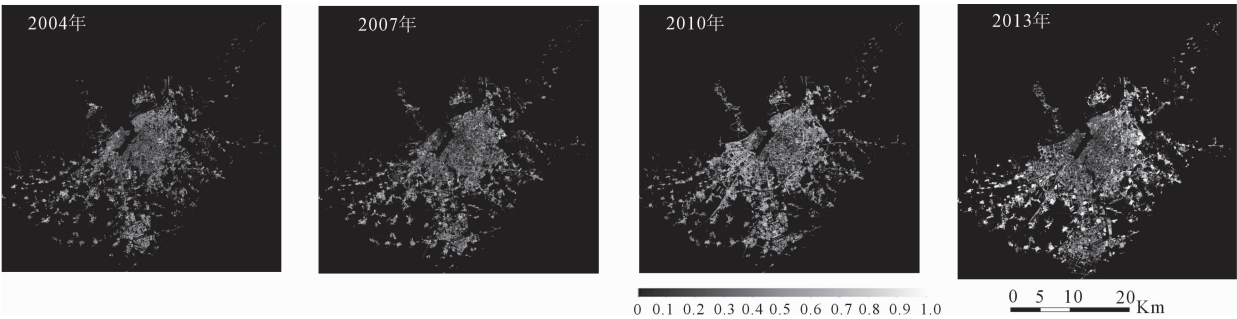


图 3 不透水面的年际变化图

2.2 降雨径流关系的模拟

L - THIA 模型是基于美国水土保持局 (Soil Conservation Service, SCS) 的产流参数 CN (Curve Number)^[14] 发展而来,运算的核心是经验数据建立起来的 CN 值, CN 为无量纲参数,是一个综合反映土地利用类型、土壤类型和土壤前期湿润程度等因素的参数^[15],计算公式^[16]为:

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

$$I_a = 0.2S \quad (2)$$

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (3)$$

式中: Q 为径流量,mm; P 为降雨量,mm; I_a 为径流产生之前的降雨损失; S 为可能最大滞留量,mm。

CN 值是反映降雨前流域下垫面特征的一个综合指标,并且能定量的表现下垫面条件的变化对流域径流量的影响。城区内流域地表径流除了受降雨量影响以外,城市不透水表面百分比也是影响径流量的重要因素,根据美国普度大学研制的 L - THIA

不透水模型的计算公式,可直接将城市不透水面的百分比转化成 CN 值,该计算公式为^[17]:

$$CN_{n\%} = CN_{0\%} + n\% \times (98 - CN_{0\%})$$

式中: $CN_{n\%}$ 为所求的 CN 值; $CN_{0\%}$ 为不透水面百分

比为 0 时的 CN 值,其中 B 类型土壤的 $CN_{0\%}$ 为 69.0, D 类型土壤的 $CN_{0\%}$ 为 84.0^[18]; $n\%$ 为每个子集水区不透水面的百分比。根据计算公式得到每个子流域的 CN 值,见图 4。

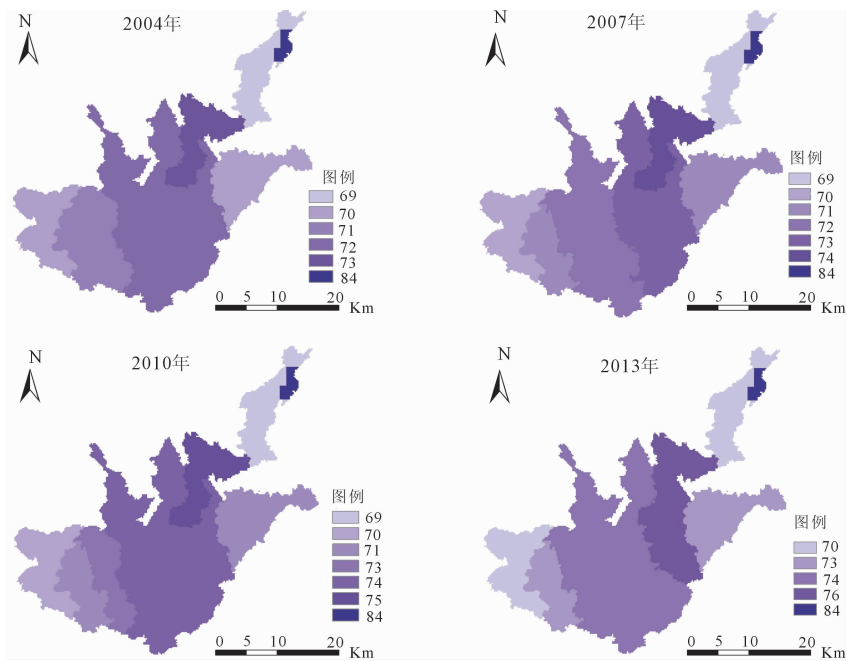


图 4 CN 值的年际变化图

为定量比较不透水面的扩张对径流量的影响,用日径流量变化和年径流量变化两种情况来进行分析:

(1)日径流量比较,根据哈尔滨市降雨量的特点,选择日降雨量 8、15、35 和 60 mm 分别代表小雨、中雨、大雨和暴雨的降雨量雨情,并且保证前期土壤湿润状况一致,将这些数据依次输入模型,比较 4 个年份(2004、2007、2010 和 2013 年)由于不透水面的扩张而导致的日径流量变化;

(2)年径流量比较,对比哈尔滨市近 10 年降雨量状况,选取 2006 年的年降雨量(487.9 mm)和 2012 年的年降雨量(740.8 mm)分别代表枯水年和丰水年的年降雨量,依次输入模型,比较 4 个年份由于不透水面的扩张而导致的年径流量变化。

关于验证模型模拟的精度问题,需用研究区实测数据对模拟结果进行误差分析,由于该研究区是通过 BASINS 4.1 软件根据 DEM 和水系划分出来的,并未按照行政区划和水文监测站的布点来划分,故缺乏详细的径流量监测数据,仅以已有的数据 2005 年的松花江流域哈尔滨-佳木斯段的 4、6 及 7 月的月径流深数据与该研究区模拟的相同年月的月径流深数据进行精度验证,本文选用相对误差 Re 作为评价标准,计算公式为:

$$Re = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{si} - Q_{oi})}{\sum_{i=1}^n Q_{oi}} \tag{4}$$

式中: Re 为相对误差; Q_{si} 为模拟值; Q_{oi} 为实测值; n 为数据的个数。

得到相对误差 Re 为 -15.66%,误差在 20% 以内,可见用 L - THIA 模型模拟的径流量符合实际情况,可做进一步的研究;此外,由于本研究主要是为了表明不透水面与径流量的直接关系,故未像传统方法那样将不透水面作为其中的某一种土地利用类型输入到模型中。

3 结果分析

3.1 流域不透水面的年际变化

哈尔滨市松花江段沿岸 9 个子流域的不透水面在 10 年间扩张迅速,由 2004 年的 7.65% 增加到 2013 年的 15.01%,扩大了 1.96 倍。各子流域间不透水面的百分比差异也相当显著,例如,通过 10 年的发展,子流域 1 和 9 的不透水面百分比始终处于 5% 以下,而子流域 6 和 7 在 2013 年时分别达到了 23.11% 和 24.95%,虽然子流域 9 不透水率较低,

但从 2013 与 2004 年相比增加的百分比来看,却是整个研究区内增长幅度最大的,其次是子流域 8,由 2004 年的 4.31% 增长到 2013 年的 12.30%,增长了 185.02%,显然子流域 1 的增长幅度最为缓慢,增加的百分比仅为 31.59%(表 1)。以上这些差异与各子流域所处的地理位置有关,子流域 6 和 7 地处香

坊区和道外区的中心城区,其中,香坊区是哈尔滨市的开埠地和最早的市政区之一,道外区是哈尔滨市形成、发展较早的老城区,故这些区域的不透水面百分比比较高;而子流域 1 和 9 处于城区边缘,区域内分布着大片农田,以农业生产为主,故不透水面百分比较低。

表 1 各年份研究区 9 个子流域的不透水面百分比 %

子流域	各年份不透水面百分比				与 2004 年相比各年份不透水面增加的百分比		
	2004	2007	2010	2013	2007	2010	2013
1	3.45	2.94	3.92	4.54	-14.85	13.80	31.59
2	5.68	7.58	8.46	14.02	33.46	48.94	146.77
3	6.82	8.74	12.74	16.47	28.11	86.68	141.47
4	10.43	10.89	17.85	18.24	4.32	71.08	74.84
5	11.97	12.82	16.21	18.91	7.12	35.43	58.01
6	14.00	15.78	19.89	23.11	12.73	42.03	65.03
7	11.49	14.55	18.88	24.95	26.57	64.29	117.10
8	4.31	5.57	6.37	12.30	29.08	47.71	185.02
9	0.73	0.96	1.61	2.57	32.46	121.67	252.85
平均值	7.65	8.87	11.77	15.01	17.67	59.07	119.19

3.2 不透水面扩张对日径流量的影响

为定量比较不透水面的扩张对日径流量的影响,根据哈尔滨市日降雨量特点,模拟 4 种降雨量情景下由于不透水面的年际扩张而导致的日径流量变化。结果表明:不透水面的扩张对日径流量有显著影响,并且在小雨情境下这一影响表现的尤为突出,2007 年不透水面扩张造成的径流量与 2004 年相比增加了 10.45%,2010 与 2004 年相比增加了 74.63%,到 2013 年时,增加的比例达到了 158.21%;随着日降雨量增大,不透水面对日径流量的影响逐渐减小,在大雨情景下,2013 年不透水面扩张造成的径流量与 2004 年相比增加了 12.93%,

而在暴雨情景时,这一比例下降为 7.57%(表 2)。该变化表明:不透水面的扩张对小雨情景时的日径流量影响明显大于中雨、大雨和暴雨情景时的日径流量。显然,降雨量是影响径流量的主观因素,在小雨情景时,由于雨量少,雨速慢,降雨降落或流经透水性地表时,经过植被截留、地面填洼、土壤下渗和叶面蒸腾等作用后,径流量会大幅减小^[19];而在暴雨情景下,由于雨量大,雨速快,降雨即使降落或流经透水性地表,其削弱作用也不如小雨时强烈,故在小雨情景时,下垫面条件对径流量的影响明显,模拟的结果也与这一实际状况相符。

表 2 各年份不同降雨情境下不透水面的扩张对日径流量的影响

降雨量 情景	各年份 9 个子流域日径流量/万 m ³				与 2004 年相比各年份日径流量增加的百分比/%		
	2004	2007	2010	2013	2007	2010	2013
小雨	0.67	0.74	1.17	1.73	10.45	74.63	158.21
中雨	77.98	85.24	97.44	109.02	9.32	24.96	39.81
大雨	907.12	935.40	992.27	1022.58	3.12	9.39	12.93
暴雨	2514.20	2561.46	2634.09	2704.56	1.88	4.77	7.57

3.3 不透水面扩张对年径流量的影响

为定量比较不透水面的扩张对年径流量的影响,分析哈尔滨市近 10 年的年降雨量数据发现:2006 年的年降雨量为 487.9 mm,可代表典型的枯水年情景;2012 年的年降雨量为 740.8 mm,可代表

典型的丰水年情景。并以这两年的实际日降雨量作为模型的输入量,比较在这两种情景下,不透水面的年际变化对年径流量的影响。结果表明:在枯水情景下,2007 年的年径流量比 2004 年的年径流量增加了 19.52%,2010 比 2004 年增加了 57.87%,2013

比 2004 年增加了 93. 19% ;在丰水情景下,2007 比 2004 年增加了 4. 55% ,2010 比 2004 年增加了 11. 92% ,2013 比 2004 年增加了 18. 97% (表 3)。显然,不透水面扩张对年径流量产生了重要影响,且从增长的幅度来看,枯水年不透水面扩张对年径流

量的影响明显大于丰水年;此外,由各年份与 2004 年相比年径流量增加的百分比可以看出,年径流量在 2007 - 2010 年间增长迅速,在 2010 - 2013 年间增长略有减缓。

表 3 各年份不同降雨情境下不透水面扩张对年径流量的影响

降雨量 情景	各年份 9 个子流域年径流量/万 m ³				与 2004 年相比各年份年径流量增加的百分比/%		
	2004	2007	2010	2013	2007	2010	2013
枯水情景	81. 62	97. 55	128. 85	157. 68	19. 52	57. 87	93. 19
丰水情景	2842. 10	2971. 53	3180. 75	3381. 38	4. 55	11. 92	18. 97

4 结论与讨论

以哈尔滨市松花江沿岸的 6 个中心城区的 DEM 数据和河网水系数据为基础,利用 BASINS 4. 1 软件划分子流域,统计子流域的不透水面百分比,根据 L - THIA 不透水模型的计算公式,计算出产流系数,输入 L - THIA 模型中,得到由于不透水面增加而导致径流量的变化,并将结果分两种情形分析:

(1)对日径流量的影响:分小雨、中雨、大雨和暴雨 4 种降雨情景,将各年份模拟的日径流量分别与 2004 年模拟的日径流量进行比较,得到小雨时,2007 比 2004 年增加 10. 45% ,2010 比 2004 年增加 74. 63% ,2013 比 2004 年增加 158. 21% ,随着降雨量增加,不透水面扩张对日径流量的影响降低,在暴雨时,这一比例依次下降为 1. 88%、4. 77% 和 7. 57%。分析得出:在能引起地表径流量的前提下,降雨量越小,不透水面扩张对地表日径流量的影响越大。

(2)对年径流量的影响:分枯水和丰水两种情景,将各年模拟的年径流量与 2004 年模拟的年径流量经行对比分析,得出在枯、丰两种情境下各年份径流量与 2004 年相比增加的百分比,从这些比例可以看出,不透水面扩张对年径流量产生重要影响,且枯水年不透水面扩张对年径流量的影响明显大于丰水年。

综上所述,下垫面条件是影响地表径流量的重要因素,不透水面作为下垫面的一种类型,其扩张无论是对日径流量还是对年径流量都能产生深远影响,导致径流量不同程度的增加。

随着城镇化的发展,越来越多的自然地表变成不透水面,而大多数城市的排水系统并不能与快速城市化的速度相适应,导致雨季出现内涝的现象。本文旨在通过以上分析,为合理规划城市发展,完善排水系统提供依据。然而,由于本研究注重不透水

面的扩张对径流量的影响,故根据各子流域的平均不透水面百分比来划分产流系数,划分的依据也是美国的经验公式,运用到该地区需要有详细的实测数据对经验公式的参数进行调整,因此,今后需加强城市地区的长期水文监测,优化模型的参数。此外,由于本研究要突出不透水面的贡献,故并未像以往方法那样根据研究区的土地利用类型来划分产流系数,但地表覆被参数与产流系数的关系,仍是当前国内外研究城市地区水文效应学者们所关心的热门话题^[20],所以下一步的研究,要注重二者的结合,既要考虑到其它的土地利用类型,也要彰显出不透水面的显著影响。

参考文献:

[1] Mooney H A, Duraipapp A, Larigauderie A. Evolution of natural and social science interactions in global change research programs[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences,2013,110(Suppl 1): 3665 - 3672.

[2] 刘纪远,匡文慧,张增祥,等. 20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J]. 地理学报, 2014,69(1): 3 - 14.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 田 迪,李叙勇,Donald E W 等. 土地利用及不透水地表对河流流量的影响[J]. 自然资源学报,2011,26(6): 1012 - 1020.

[6] 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,2013,29(3): 44 - 50.

[7] 邵 崑,潘文斌. 城市不透水面与降雨径流关系研究[J]. 亚热带资源与环境学报,2012,7(4): 20 - 27.

[8] 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.
- [9] Dams J, Dujardin J, Reggers R, et al. Mapping impervious surface change from remote sensing for hydrological modeling[J]. *Journal of Hydrology*, 485(8):84–95.
- [10] Schueler T R. The importance of imperviousness[J]. *Watershed Protection Techniques*, 1994, 1(3):100–111.
- [11] 张佳佳. 哈尔滨市城区绿地系统格局动态研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2013.
- [12] Roberts D A, Smith M O, Adams J B. Green vegetation, no photo synthetic vegetation, and soil in AVIRIS data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1993, 44(2–3):255–269.
- [13] Wu Changshan, Murray A T. Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84(4):493–505.
- [14] USDA(United States Department of Agriculture Soil Conservation Service). Urban hydrology for small watershed [C]//. United States, Colorado: Water Resources Publications, 1986.
- [15] 李凯, 曾凡棠, 房怀阳, 等. 基于 L – THIA 模型的市桥河流域非点源氮磷负荷分析[J]. *环境科学*, 2013, 34(11):4218–4225.
- [16] Harbor J M A. Pratical method for estimating the impact of Land – use change on surface runoff, groundwater recharge and wetland hydrology[J]. *Journal of the American planning Association*, 1994, 60(1):95–108.
- [17] L – THIA IMPERVIOUS INPUT . Formula for calculating the curve number(CN) value from percent impervious cover [EB/OL]. [2014 – 12 – 25] <https://engineering.purdue.edu/mapserve/LTHIA7/lthianew/imperv/formula.htm>.
- [18] L – THIA Impervious Model. Calculating custom CN values from percent impervious cover values [EB/OL]. [2014 – 12 – 25]. <https://engineering.purdue.edu/mapserve/LTHIA7/lthianew/im-perv/calccusCN.htm>
- [19] Lowrance R, Altier L S, Newbold J D, et al. Water quality functions of riparian forest buffers in chesapeake bay watersheds[J]. *Environmental Management*, 1997, 21(5):687–712.
- [20] Mejia A I, Moglen G E. Spatial patterns of urban development from optimization of flood peaks and imperviousness – based measures[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2009, 14(4):416–424.

(上接第 53 页)

参考文献:

- [1] 任国玉, 吴虹, 陈正洪. 我国降水变化趋势的空间特征[J]. *应用气象学报*, 2000, 11(3):322–330.
- [2] 陆文秀, 刘丙军, 陈俊凡, 等. 近 50a 来珠江流域降水变化趋势分析[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(1):80–90.
- [3] 徐宗学, 张楠. 黄河流域近 50 年降水变化趋势分析[J]. *地理研究*, 2006, 25(1):27–34.
- [4] 姜彤, 苏布达, 王艳君, 等. 四十年来长江流域气温、降水与径流变化趋势[J]. *气候变化研究进展*, 2005, 1(2):65–68.
- [5] 张晓龙, 黄领梅, 沈冰. 河北省降水时空变化特征分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2014, 25(2):140–143 + 148.
- [6] 徐家良. 上海年、季降水演变的奇异谱分析[J]. *气象科学*, 1999, 19(2):129–135.
- [7] 李天杰. 上海市区城市化对降水的影响初探[J]. *水文*, 1995, 15(3):34–41.
- [8] 殷健, 梁珊珊. 城市化对上海市区域降水的影响[J]. *水文*, 2010, 30(2):66–72 + 58.
- [9] 梁萍, 丁一汇, 何金海, 等. 上海地区城市化速度与降水空间分布变化的关系研究[J]. *热带气象学报*, 2011, 27(4):475–483.
- [10] 周丽英, 杨凯. 上海降水百年变化趋势及其城郊的差异[J]. *地理学报*, 2001, 56(4):467–476.
- [11] 陆敏, 刘敏, 权瑞松, 等. 上海暴雨灾害的系统特征与脆弱性分析[J]. *华东师范大学学报:自然科学版*, 2010, 28(2):9–15.
- [12] 贺芳芳, 赵兵科. 近 30 年上海地区暴雨的气候变化特征[J]. *地球科学进展*, 2009, 24(11):1260–1267.
- [13] 房国良, 高原, 徐连军, 等. 上海市降雨变化与灾害性降雨特征分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(10):1270–1273.
- [14] 张洁祥, 张雨凤, 李琼芳, 等. 1971–2010 年上海市降水变化特征分析[J]. *水资源保护*, 2014, 30(4):47–52.
- [15] Yue S, Pilon P, Cavadias G. Power of the Mann – Kendall and spearman’s rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 259(1/4):254–271.
- [16] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社, 1999:79–71.