

DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2013.03.010

# 深圳市不透水表面扩展对径流量的影响

刘珍环<sup>1,2</sup>, 曾祥坤<sup>3</sup>

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 农业部农业信息技术重点实验室, 北京 100081;  
3. 深圳市蕾奥城市规划设计咨询有限公司, 广东 深圳 518040)

**摘要:**以深圳市为研究区,综合遥感技术和L-THIA模型,改进模拟所需的地表覆被参数,模拟不透水表面扩展对城区径流量的影响。结果表明:深圳市不透水表面百分比在15 a间扩展非常快,从1990年的26.5%扩展至2005年的49.3%,扩大了1.9倍;导致2005年日径流量比1990年在小雨情景时增长了136.2%,中雨时增长了83.7%,大雨时增长了59.5%,暴雨时增长了40.8%;导致2005年比起1990年,丰水年的年径流量增加了43.35%,枯水年的年径流量增加了54.85%。小雨情景中受不透水表面扩展的影响大于暴雨情景,枯水年受不透水表面扩展的影响大于丰水年。从空间分布上看,径流深大的地区不透水程度高,径流深值较大区域为城市核心区,需要注意防洪和排涝。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,模拟结果可为城市洪涝灾害规划等提供依据。

**关键词:**不透水表面;SCS降雨曲线;径流量模拟;深圳市

中图分类号:P333 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2013)03-0044-07

## Impact of impervious surface expansion on urban runoff in Shenzhen City

LIU Zhenhuan<sup>1,2</sup>, ZENG Xiangkun<sup>3</sup>

(1. *Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;*  
2. *Key Laboratory of Agri-Informatics, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China;*  
3. *Lay-Out Planning Consultants Ltd., Shenzhen 518040, China*)

**Abstract:** The remote sensing technology and the L-THIA model were used to simulate the impact of impervious surface expansion on urban runoff in Shenzhen City. The results show that the impervious surface in Shenzhen City expanded rapidly from 1990 to 2005. It expanded by 1.9 times, from 26.5% in 1990 to 49.3% in 2005. This led to daily runoff increases of 136.2% in the low rainfall scenario, 83.7% in the moderate rainfall scenario, 59.5% in the high rainfall scenario, and only 40.8% in the storm scenario, and caused annual runoff increases of 43.35% and 54.85% in wet and dry years, respectively, in 2005 than in 1990. The impervious surface expansion had a more significant impact on the low rainfall scenario than on the high rainfall scenario, and on dry years than on wet years. In regard to spatial distribution, evident imperviousness was found in the regions with a larger depth of runoff. These regions are the core of the city, and we need to focus on flood control and drainage in these regions. The L-THIA model used for simulation of runoff change caused by impervious surface expansion in rapidly urbanized cities and ungaged regions can produce reasonable results, which can provide a basis for strategic decisions in controlling urban water logging and flood hazards.

**Key words:** impervious surface; SCS rainfall-runoff curve; runoff simulation; Shenzhen City

基金项目:国家自然科学基金(41101170)

作者简介:刘珍环(1982—),男,博士,主要从事景观生态与土地利用研究。E-mail:zhenhuanliu@gmail.com

土地利用/覆被变化对水文的影响是全球环境变化下水文循环研究的热点。IHP、WCRP、IGBP、GWSP 等研究计划都密切关注环境变化下的水循环过程<sup>[1]</sup>。城市化对流域水文影响的范围及程度是城市水文研究的难点<sup>[2]</sup>。城市土地利用中将自然地表转化为不透水表面,由城市地区的屋顶、道路和铺砌地砖等组成的不透水表面,减少了透水性地面<sup>[3-4]</sup>,改变了下垫面形式,从而影响区域的水热交换,对区域的降水再分配产生决定性影响<sup>[5-6]</sup>。模拟城市不透水表面扩展对城区径流量的影响程度,对城区防洪设计、减少洪涝灾害有较重要的意义。

SCS 降雨曲线是当前国内外广泛用来模拟降雨径流形成过程的主要方程,因其参数简单、使用范围广、模拟准确度高,成为 SWAT<sup>[7-8]</sup>、L-THIA<sup>[9]</sup>、AGNPS<sup>[10]</sup> 模型等的首选。我国从 20 世纪 90 年代开始引进 SCS 曲线模拟无水文监测地区<sup>[11]</sup> 和城市地区<sup>[12-14]</sup> 的径流量。应用 SCS 降雨曲线模拟城市地区径流量时,需要考虑参数修正<sup>[3,15-16]</sup>。对不透水表面面积的变化导致城市径流量的变化尚未有研究报道,是值得深入的研究热点<sup>[17]</sup>。

深圳市是我国快速城市化的典型地区之一,经历了近 30 a 的大规模建设,地表覆被变化迅速,水文径流受到巨大影响。目前已有研究该地区径流的影响<sup>[18-20]</sup>,但这些研究都以土地利用/覆被分类数据为基础,参数的合理性还有待深入探讨<sup>[21]</sup>。一直以来,不透水表面百分比数据的获取是制约该参数应用于城市水文模拟研究的主要障碍<sup>[22]</sup>。本研究应用遥感技术获取城市像元尺度的不透水表面百分比数据,旨在为城市化地区的水文研究提供新视角,也为城市发展面临的洪涝灾害等问题的解决提供科学决策依据。

## 1 研究区概况及数据源

### 1.1 概况

深圳市位于广东省中南部沿海,东临大亚湾,西濒珠江口,北与东莞市和惠州市接壤,南与香港特别行政区仅一河之隔。陆地范围为东经 113°45'44" ~ 114°37'21",北纬 22°26'59" ~ 22°51'49"。30 a 来,深圳市从一个昔日人口只有 33 万、GDP 为 2.7 亿元的边陲小镇发展为 2008 年全市人口 876.83 万、GDP 为 7 806.54 亿的集工业、贸易、旅游、金融于一体的初具规模的现代化城市。深圳市共有大小河流 310 余条,其中流域面积大于 10 km<sup>2</sup> 的有 69 条,流域面积大于 100 km<sup>2</sup> 的有 5 条,即深圳河、茅洲河、龙岗河、观澜河和坪山河。深圳市境内的河流主要以海岸山脉和羊台山为主要分水岭,分成南、西、北 3 个水系。南部诸河注入深圳湾、大鹏湾、大亚湾,称海

湾水系;西部诸河注入珠江口伶仃洋,称珠江口水系;北部诸河注入东江的一、二级支流,称东江水系。多数河流直接入海,形成小流域。笔者选择深圳河、大沙河、西乡河、茅洲河、观澜河、龙岗河、坪山河 7 个河流域,和石岩水库、西丽水库、深圳水库、铁岗水库 4 个水库流域,共 11 个不同城市化阶段的城市子流域作为研究对象。这 11 个流域在水系上相互独立,无直接的水力联系,流域径流量约占全深圳市径流量的 60%。

### 1.2 数据源

研究数据主要有遥感、地形、降雨、土壤以及水文监测数据(表 1~2)。其中遥感影像主要为 8 景 Landsat TM/ETM+ 影像,以轨道号 121/44 和 122/44 为代表的左右两景影像拼接覆盖全境。降雨数据为深圳雨量站的 1952—2008 年逐日、逐旬的降雨量数据。此外,从《深圳市水文年鉴》及自动观测站汇总数据,得到 1960—2008 年间 11 个站点的逐月和年降雨量数据。SCS 降雨曲线模型将 USDA 分类系统中的土壤综合为 A、B、C、D 4 种类型,分别代表不同下渗率的土壤,其含义见美国土壤调查委员会的标准<sup>[8]</sup>。本研究采用 1983 年深圳自然资源调查成果中的土壤类型图为基础,对原土壤类型按照模型参数需求进行归并。鉴于土壤属性较为稳定,本研究忽略土壤类型的变化。

表 1 数据来源情况

数据类型	项目	数据说明
遥感影像	TM/ETM+影像	P/R: 121/44, 122/44 (1990-11-23; 1990-12-23; 1995-11-17; 1995-12-30; 1999-12-23; 2000-01-02; 2005-03-05; 2005-11-23) 分辨率除 2000 年为 15 m 外,其余年份均为 30 m
	航片	2007 年,分辨率 0.3 m
GIS 数据	深圳市土地利用变更调查(1996 年, 2000 年, 2006 年)	数据来源于深圳市国土资源与房屋管理局
	深圳市地形图	DEM, 10 m
降雨数据	深圳站及 11 个辅助站降雨量	1952—2008 年逐日、逐旬的降雨量数据 1960—2008 年间的逐月和年降雨量数据
土壤数据	深圳市土壤类型分布图	数据来源于 1983 年深圳市自然资源调查成果

注: P/R 代表行号/列号; 括号中 8 次时间表示获取影像的时间。

## 2 研究方法

### 2.1 不透水表面遥感

运用线性光谱分离技术获取 Landsat TM/ETM+ 在 30 m 像元内不透水表面百分比数据。影像处理过程包括几何校正、大气辐射校正、图像裁切、最小噪音分离、纯像元处理、端元收集、线性光谱分离、结果的检验与校正等<sup>[23]</sup>。不透水表面在遥感信息上表现为高反照率与低反照率组合的特征。线性光谱分

离的算法为:选取端元,确定典型地物波谱特征;端元组合为植被-高反照率-低反照率-土壤端元;对水体进行掩模处理;应用最小二乘法分解像元,公式<sup>[24]</sup>为

$$R_{i\lambda} = \sum_{k=1}^n f_{ki} C_{k\lambda} + \varepsilon_{i\lambda} \quad (1)$$

式中: $R_{i\lambda}$ 为第*i*个像元在 $\lambda$ 波段的反射率; $f_{ki}$ 为第*k*个基本组分在第*i*个像元中所占的面积比例; $C_{k\lambda}$ 为第*k*个基本组分在 $\lambda$ 波段的反射率; $\varepsilon_{i\lambda}$ 为残差值。相关解译及检验结果参见文献<sup>[25]</sup>。

## 2.2 降雨径流关系模型

径流模拟采用 SCS 降雨曲线模型。SCS 降雨曲线模型是美国水土保持局在 1972 年提出的一种用曲线值(CN)计算径流量的方法,它可以模拟较长时间尺度下城市地区不透水表面百分比的变化对径流及水环境污染的影响程度<sup>[26-27]</sup>。计算公式为

$$Q_s = \frac{(R_d - I_a)^2}{(R_d - I_a + S)} \quad (2)$$

$$S = \left( \frac{25400}{CN} \right) - 254 \quad (3)$$

当  $I_a = 0.2S$ , 且  $R_d > I_a$  时,

$$Q_s = \frac{(R_d - 0.2S)^2}{(R_d + 0.8S)} \quad (4)$$

式中: $Q_s$ 为日径流深,mm; $R_d$ 为日降雨深,mm; $S$ 为最大持留系数; $I_a$ 为包括地表存储、拦截及渗透的初损雨量。

CN 值是一个无量纲参数,是 SCS 降雨曲线模型的主要参数,用于描述降雨-径流关系,可将前期土壤湿润程度(AMC)、坡度、土壤类型和不透水表面百分比等因素综合起来。但在长期影响的模拟中,常常忽略前三者变化带来的影响,因为这种变化对一次降雨过程影响较大,但对年际的影响较小。CN 值把流域下垫面条件量化,用量化的指标来定

量反应下垫面条件对产汇流过程的影响。

城市不透水表面百分比是影响地表径流的主要因素,根据 SCS 降雨曲线对应于地表土壤水文组合条件,将城市不透水表面百分比按照覆盖度值区间分为 21 个等级。卜心国等<sup>[28]</sup>的研究表明,深圳市的建设用地大都集中于坡度在 5% 以下的地区,因此城市地区需用城市 CN 计算公式进行修正<sup>[29]</sup>:

$$CN_{ISA} = CN_{ISA0} + I_{ISA}(98 - CN_{ISA0}) \quad (5)$$

式中: $CN_{ISA}$ 为不透水表面像元的 CN 值; $CN_{ISA0}$ 为不透水表面百分比为 0 时的 CN 值; $I_{ISA}$ 为像元的不透水表面百分比。

将不透水表面覆盖度等级转化为 CN 值。SCS 降雨曲线的 CN 值是在美国的经验值,适用于美国大多数条件下的自然河流及坡度小于 5% 的地区,而深圳市的大部分流域坡度大于 5%,因此需要对其进行坡度修正。采用以下公式修正<sup>[30]</sup>:

$$CN_{2s} = \frac{(CN_3 - CN_2)}{3} [1 - 2\exp(-13.86S_1)] + CN_2 \quad (6)$$

$$CN_3 = CN_2 \exp[0.00673(100 - CN_2)] \quad (7)$$

式中: $CN_{2s}$ 为修正后的曲线值; $CN_3$ 为前期降雨湿润度较大时的曲线值; $CN_2$ 为前期降雨湿润度平均时对应的曲线值; $S_1$ 为坡度值。

修正后可得到深圳市的不透水表面 CN 值的空间分布<sup>[31-32]</sup>,见图 1。模拟软件为 Matlab7.0 及长期水文影响径流模型 L-THIA。

将模拟结果用两种方法进行比较分析:①以不同降雨量雨情代表模型降雨输入量,4 种雨情分别为小雨(降雨量为 6 mm)、中雨(降雨量为 20 mm)、大雨(降雨量为 45 mm)和暴雨(降雨量为 100 mm),比较 4 个年份(指 1990 年、1995 年、2000 年和 2005

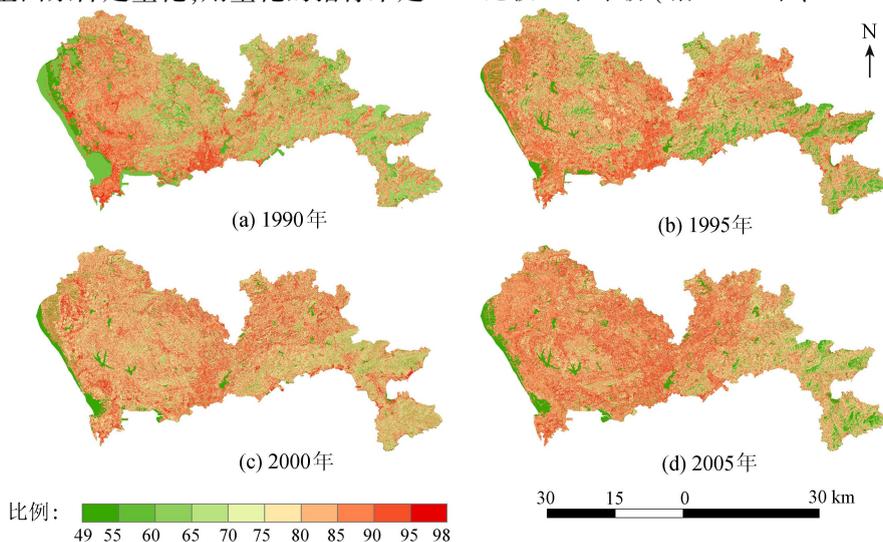


图 1 深圳市不透水表面的 CN 值空间分布

年,以下同)的不透水表面百分比对降雨形成的径流量的影响,表征的是日径流量受不透水表面百分比变化的影响程度。②以1960—2008年间的年降雨量进行枯丰年分析:选择典型的枯丰年,经分析发现,1990年和2005年分别能代表典型的枯水年和丰水年,以这2a的降雨量作为典型年的模型降雨输入量,比较4个年份不透水表面百分比对年径流量的影响程度。③在此基础上模拟4个年份的不透水表面百分比影响下的年径流深的空间分布。

### 3 结果分析

#### 3.1 模型模拟校正

由于深圳地区缺乏长期径流量监测数据,为了检验模型的模拟效果及适用性,用2007年在石岩水库流域的实测数据进行误差分析<sup>[33]</sup>。模拟结果和实测结果表明,在小雨和中雨情景下,实测径流量略有差别,小雨情景中模拟径流量比实测径流量小11.31%,中雨情景中模拟径流量比实测径流量小12.64%(表2)。整体误差介于10%~15%,该模型及参数设置能满足城市地区的径流量模拟。

表2 模型模拟结果与实测值比较

日期	降雨量/ mm	实测径 流量/m <sup>3</sup>	模拟径 流量/m <sup>3</sup>	误差 百分比/%
2007-02-22	7.9	27766.43	24626.97	11.31
2007-04-02	30.8	577323.00	504347.40	12.64

#### 3.2 流域不透水表面百分比的变化特征

深圳市11个流域的不透水表面百分比的变化在15a间扩展非常快,从1990年的26.5%扩展至2005年的49.3%,扩大了1.9倍(表3)。而不同的水库流域和城市地区流域的不透水表面百分比差异较大,例如深圳河流域的不透水表面百分比已达56.4%,而作为重要水源地的西丽水库流域则只有34.3%。几个有主干河流流经的城市地区的流域不

表3 1990—2005年深圳市流域的不透水表面百分比

流域	不透水表面 百分比/%				各年份不透水表面百分比与 1990年不透水表面百分比之比		
	1990年	1995年	2000年	2005年	1995年	2000年	2005年
西丽水库	26.9	19.7	36.4	34.3	0.7	1.4	1.3
铁岗水库	34.3	23.6	40.6	43.0	0.7	1.2	1.3
石岩水库	29.4	26.0	44.3	50.2	0.9	1.5	1.7
深圳水库	19.3	25.9	38.4	41.3	1.3	2.0	2.1
西乡河	36.9	41.4	57.1	63.4	1.1	1.5	1.7
大沙河	29.8	35.3	48.4	50.2	1.2	1.6	1.7
茅洲河	26.4	29.9	48.0	56.4	1.1	1.8	2.1
观澜河	15.2	35.5	45.8	54.3	2.3	3.0	3.6
深圳河	35.1	45.8	51.0	56.4	1.3	1.5	1.6
龙岗河	20.6	32.1	45.4	49.8	1.6	2.2	2.4
坪山河	16.6	30.2	46.1	34.7	1.8	2.8	2.1
11个流域 平均	26.5	32.4	45.9	49.3	1.2	1.7	1.9

透水表面百分比在2005年超过了50%。这种变化主要源于深圳市在近15a来的快速城市化过程迅速将透水性地表改变为不透水表面。

#### 3.3 不透水表面扩张对日径流量的影响

为定量比较不同降雨量情况下不透水表面扩展对日径流量变化的影响,选择4种降雨量情景,分别代表小雨、中雨、大雨及暴雨(表4)。结果表明,不透水表面扩展对日径流量有显著性影响;当降雨情景为小雨时,2005年的不透水表面造成的日径流量比1990年时高136.2%;中雨时,这一比例下降到83.7%;大雨时为59.5%;而暴雨时最低为40.8%。从不透水表面扩展对城市地区径流量的影响可以看出,不透水表面的扩展对小雨雨情的影响显著大于暴雨雨情,这与实际状况一致。降雨量是控制径流量的主要因素。

表4 不同降雨量情景下的不透水表面扩展导致的日径流量变化

降雨量 情景	11个流域日径流量/万m <sup>3</sup>				与1990年相比各年份日径 流量增加的百分比/%		
	1990年	1995年	2000年	2005年	1995年	2000年	2005年
小雨	306	523	682	723	70.9	122.9	136.3
中雨	3501	5113	6606	6430	46.0	88.7	83.7
大雨	13754	18161	22361	21934	32.0	62.6	59.5
暴雨	56841	68762	80379	80021	21.0	41.4	40.8

#### 3.4 不透水表面扩张对年径流量的影响

运用典型年情景下的降雨量情况对年径流量的响应变化进行比较,以确定不透水表面增长对年径流量的影响。对历史降雨量数据进行分析,1990年降雨量为1396.9mm,属典型的枯水年;2005年降雨量为2143.6mm,属典型的丰水年。可用这2a的实际日降雨量为降雨情景,以1990—2005年的流域不透水表面百分比为下垫面数据,比较流域的年径流量受不透水表面百分比变化的影响。

深圳市年径流总量受不透水表面面积变化过程影响显著(表5)。枯水年中,1995年的年径流量比1990年增加26.24%,2000年比1990年增加56.34%,而2005年比1990年增加54.85%。丰水年与枯水年情景类似,年径流总量1995年比1990年增加21.50%,2000年比1990年增加44.71%,而2005年比1990年增加43.35%。年径流量以1990—2000年间增长迅速,2000—2005年略有减

表5 枯丰年情景下不透水表面扩展对年径流量的影响

枯丰年 情景	11个流域年径流量/万m <sup>3</sup>				与1990年相比 各年份日径流量 增加的百分比/%		
	1990年	1995年	2000年	2005年	1995年	2000年	2005年
枯水情景	32581.80	41130.85	50937.50	50452.79	26.2	56.3	54.9
丰水情景	73847.56	89724.37	106862.81	105861.09	21.5	44.7	43.4

速。虽然丰水年的不透水表面扩展对径流的影响与枯水年类似,但主要差异表现为增长的幅度显著小于枯水年,不透水表面扩展对年径流量的影响,枯水年显著大于丰水年。

### 3.5 模拟年径流量的空间分布

运用当年日降雨量及不透水表面空间分布,模拟4个年份的年径流深的空间分布。模拟结果(表6)表明,深圳市1990年像元尺度(30 m×30 m)平均径流深为313.96 mm,西乡河径流深均值最大为374.61 mm,观澜河径流深均值最小为230.27 mm;1995年的流域像元平均径流深是1990年的3~4倍,11个流域的径流深均值为982.55 mm,最大径流深为深圳河的1124.99 mm,最小径流深为深圳水库的896.58 mm;2000年的流域像元平均径流深为1317.31 mm,最大径流深为西乡河的1421.41 mm,最小径流深为西丽水库的1200.87 mm,径流深最大、最小值之间的差小于1995年径流深最大、最小值之间的差;2005年11个流域像元年径流深的均值为937.16 mm,最大径流深为深圳河的1006.74 mm,最小径流深为西丽水库的805.66 mm。从空间分布上看,径流深大的地区不透水程度高,径流深小的地区透水程度高,径流深的空间分布与不透水表面指数的空间分布具有很好的一致性。径流深值较大区域为城市核心区,需要注意防洪和排涝。

表6 深圳市11个流域的平均年径流深 mm

流域	平均年径流深			
	1990年	1995年	2000年	2005年
大沙河	341.00	1042.45	1333.74	968.72
观澜河	230.27	987.43	1309.93	986.64
龙岗河	263.07	995.79	1362.23	975.64
茅洲河	315.50	961.46	1322.32	964.92
坪山河	230.75	984.37	1323.27	831.21
石岩水库	354.01	934.72	1303.37	959.90
深圳河	367.55	1124.99	1389.92	1006.74
深圳水库	268.19	896.58	1281.92	926.42
铁岗水库	373.21	909.57	1241.39	895.94
西丽水库	335.04	872.22	1200.87	805.66
西乡河	374.61	1098.49	1421.41	986.97
11个流域平均	313.96	982.55	1317.31	937.16

## 4 结论与讨论

### 4.1 主要结论

在快速城市化地区,不透水表面百分比是影响城市径流速度及数量的重要地表参数。在运用遥感技术获取不透水表面空间分布数据的基础上,运用SCS降雨曲线方程模拟不透水表面百分比变化对城市径流量的影响,主要结论如下。

深圳市11个流域的不透水表面百分比在15 a

间扩展非常快,从1990年的26.5%扩展至2005年的49.3%,扩大了1.9倍。不同雨情的模拟情景表明,日径流量受不透水表面百分比变化的影响为,降雨量越小,流域城市化对日径流量的影响越大。当降雨情景为小雨时,以2005年不透水表面百分比为下垫面模拟的日径流量比1990年时高136.3%,中雨时比例下降到83.7%,大雨时为59.5%,而暴雨时最低为40.8%。典型降雨年情景模拟结果表明,不透水表面扩展对年降雨量的影响表现为,枯水年受不透水表面扩展的影响大于丰水年。在丰水年,1995年的年径流量比1990年增加26.2%,2000年比1990年增加56.3%,而2005年比1990年增加54.9%。在枯水年,年径流总量1995年比1990年增加21.5%,2000年比1990年增加44.7%,而2005年比1990年增加43.4%。

模拟年径流深空间分布的情况表明,不透水表面能够非常有效地模拟类似深圳市这种快速城市化、无水文监测资料地区的不透水表面扩展导致径流量变化情况。在防洪防涝管理和设计雨水管网时,要重点考虑径流较深的地区。

### 4.2 问题讨论

城市地区的径流量估算是实施排水管网规划和防洪防涝管理的重要依据之一,然而迄今为止尚未有较好的城市水文模型能够有效模拟城市径流过程。笔者选择多年应用的SCS降雨曲线模型,该模型为经验方程模型,在应用上有局限,特别是在无水文监测的城市地区,往往因验证困难而受质疑,但因所需输入的参数少,数据获取方便,依然受到青睐。本研究中,通过遥感数据源获取模型所需的地表覆盖参数,改进了已往需要靠经验转换土地利用类型与降雨曲线经验值之间的关系来获取参数的方法,取得较好效果。从模型的验证结果看,模型能够模拟快速城市化过程导致的地表覆被迅速改变的影响,增强模拟结果的空间异质性,但地表覆被参数与CN值的关系,还需要进一步研究,这是当前国内外模拟城市地区水文变化所关注的热点问题<sup>[32]</sup>。

本研究中只关注了城市不透水表面扩展对流域径流量的长期影响,没有涉及降雨径流过程中其他的影响因素,如透水性土地覆被的影响,降雨历时与过程的影响等,也没有比较流域的年内径流分布的变化。城市化的水文效应更强调对洪峰大小与产生时间、历时等指标的影响,而这是本研究未涉及的重要内容,有待今后深入探讨。关于透水性土地覆被的影响效果,目前也和不透水表面扩展的影响一样充满争议<sup>[33]</sup>,需要有长期观测数据的支撑,因此,今后需加强城市地区的长期水文变化监测,获取城市水文

模型的核心参数,以便为城市地区水文变化的响应分析提供准确的模拟模型。

## 参考文献:

[ 1 ] 李丽娟,姜德娟,李九一,等. 土地利用/覆被变化的水文效应研究进展[J]. 自然资源学报,2007,22(2):211-224. (LI Lijuan,JIANG Dejuan,LI Jiuyi,et al. Advances in hydrological response to land use/land cover change [J]. Journal of Natural Resources,2007,22(2):211-224. (in Chinese))

[ 2 ] 程江. 上海中心城区土地利用/土地覆被变化的环境水文效应研究[D]. 上海:华东师范大学,2007.

[ 3 ] 贺宝根,陈春根,周乃晟. 城市化地区径流系数及其应用[J]. 上海环境科学,2003,22(7):472-475. (HE Baogen,CHEN Chungeng,ZHOU Naisheng. Urbanized area runoff coefficient and its application [J]. Shanghai Environmental Science, 2003, 22 (7): 472-475. (in Chinese))

[ 4 ] PANDIT A,ASCE M,HECK H H,et al. Estimations of soil conservation service curve numbers for concrete and asphalt [J]. Journal of Hydrologic Engineering,2009,14(4):335-345.

[ 5 ] 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. (LIU Zhenhuan,LI You,PENG Jian. Research progress and perspective on water quality and hydrological effects of urban impervious surface [J]. Progress in Geography, 2011,30(3):275-281. (in Chinese))

[ 6 ] CHABAEVA A,CIVCO D L,HURD J D. Assessment of impervious surface estimation techniques [J]. Journal of Hydrologic Engineering,2009,14(4):377-387.

[ 7 ] 张银辉. SWAT模型及其应用研究进展[J]. 地理科学进展,2005,24(5):121-130. (ZHANG Yin-hui. Development of study on model SWAT and its application [J]. Progress in Geography,2005,24(5):121-130. (in Chinese))

[ 8 ] NEITSCH S L,ARNOLD J G,KINIRY J R,et al. Soil and water assessment tool theoretical documentation: version (2000) [R]. Texas: Texas Water Resources Institute, 2002.

[ 9 ] 李娜,许有鹏,郭怀成. 西苕河流域城市化对径流长期影响分析研究[J]. 北京大学学报:自然科学版,2009,45(4):668-676. (LI Na,XU Youpeng,GUO Huaicheng. Long term impacts of urbanization on surface runoff in the Xitiao River watershed, Eastern China [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis,2009,45(4):668-676. )

[10] 孙金华,朱乾德,颜志俊,等. AGNPS系列模型研究与应用综述[J]. 水科学进展,2009,20(6):876-884. (SUN Jinhua,ZHU Qiande,YAN Zhijun et al. A review of research and application of AGNPS model [J]. Advances in Water Science,2009,20(6):876-884. (in Chinese))

[11] 王艳君,吕宏军,施雅风,等. 城市化流域的土地利用变化对水文过程的影响:以秦淮河流域为例[J]. 自然资源学报,2009,24(1):30-36. (WANG Yanjun, LV Hongjun,SHI Yafeng,et al. Impacts of land use changes on hydrological processes in an urbanized basin: a case study in the Qinhuai River Basin [J]. Journal of Natural Resources,2009,24(1):30-36. (in Chinese))

[12] 秦莉俐,陈云霞,许有鹏. 城镇化对径流的长期影响研究 [J]. 南京大学学报:自然科学版,2005,41(3):279-285. (QIN Lili,CHEN Yunxia,XU Youpeng. A research of long-term impact on runoff in urbanized areas [J]. Journal of Nanjing University: Natural Sciences,2005,41(3):279-285. (in Chinese)).

[13] 葛怡,史培军,周俊华,等. 土地利用变化驱动下的上海市水灾灾情模拟[J]. 自然灾害学报,2003,12(3):25-30. (GE Yi,SHI Peijun,ZHOU Junhua,et al. Simulation of flood disaster scenario under driving action of land use change in urban of Shanghai [J]. Journal of Natural Disasters,2003,12(3):25-30. (in Chinese))

[14] 杨柳,马克明,郭青海,等. 城市化对水体非点源污染的影响[J]. 环境科学,2004,25(6):32-39. (YANG Liu, MA Keming, GUO Qinghai, et al. Impacts of the urbanization on water non-point source pollution [J]. Environmental Science, 2004, 25 (6): 32-39. (in Chinese))

[15] 王白陆. SCS产流模型的改进[J]. 人民黄河,2005,27(5):24-26. (WANG Bailu. SCS runoff model improvement [J]. Yellow River,2005,27(5):24-26. (in Chinese))

[16] 贺宝根,周乃晟,高效江,等. 农田非点源污染研究中的降雨径流关系:SCS法的修正[J]. 环境科学研究,2001,14(3):49-51. (HE Baogen,ZHOU Naisheng,GAO Xiaojiang,et al. Runoff relationship in farmland nonpoint source pollution research: amending coefficient of SCS hydrologic method [J]. Research of Environmental Science,2001,14(3):49-51. (in Chinese))

[17] MOGLEN. Hydrology and impervious area [J]. Journal of Hydrologic Engineering,2009,14(4):303-304.

[18] 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):1041-1050. (SHI Peijun,YUAN Yi,CHEN Jin. The effect of land use on runoff in Shenzhen City of China [J]. Acta Ecologica Sinica,2001,21(7):1041-1050. (in Chinese)).

[19] 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):1561-1572. (ZHENG Jing,FANG Weihua,SHI Peijun,et al. Modeling the impacts of land use change on hydrological processes in fast urbanizing region: a case study of the Buji Watershed in Shenzhen City,China [J]. Journal of Natural Resource,2009,24(9):1561-1572. (in Chinese))

[20] WENG Q. Modeling urban growth effects on surface runoff with the integration of remote sensing and GIS [J].

- Environmental Management, 2001, 28(6): 737-748.
- [21] 袁艺, 史培军. 土地利用对流域降雨径流关系的影响: SCS 模型在深圳地区的应用[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2001, 37(1): 131-1361. (YUAN Yi, SHI Peijun. Effect of land use on the rainfall-runoff relationship in a basin: SCS model applied in Shenzhen City [J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2001, 37(1): 131-1361. (in Chinese))
- [22] 任玉芬, 王效科, 韩冰, 等. 城市不同下垫面的降雨径流污染[J]. 生态学报, 2005, 25(12): 3225-3230. (REN Yufen, WANG Xiaoke, HAN Bing, et al. Chemical analysis on stormwater-runoff pollution of different underlying urban surfaces [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(12): 3225-3230. (in Chinese))
- [23] WU C, MURRAY A T. Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis [J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 84: 493-505.
- [24] WENG Q, LU D. A sub-pixel analysis of urbanization effect on land surface temperature and its interplay with impervious surface and vegetation coverage in Indianapolis, United States [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2008, 10: 68-83.
- [25] 刘珍环, 王仰麟, 彭建, 等. 基于不透水表面指数的城市地表覆被格局特征: 以深圳市为例[J]. 地理学报, 2011, 66(7): 961-971. (LIU Zhenhuan, WANG Yanglin, PENG Jian, et al. Using ISA to analyze the spatial pattern of urban land cover change: a case study in Shenzhen [J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(7): 961-971. (in Chinese))
- [26] GROVE M, HARBOR J, ENGEL B, et al. Impacts of urbanization on surface hydrology, Little Eagle Creek, Indiana, and analysis of L-THIA model sensitivity to data resolution [J]. Physical Geography, 2001, 22: 135-153.
- [27] KIM Y, ENGEL B A, LIM K J, et al. Runoff impacts of land-use change in Indian River Lagoon watershed [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2002, 7(3): 245-251.
- [28] 卜心国, 王仰麟, 吴健生, 等. 深圳快速城市化中地形对景观垂直格局的影响[J]. 地理学报, 2008, 63(1): 75-82. (BU Xinguo, WANG Yanglin, WU Jiansheng, et al. The effect of landform on landscape pattern vertical differentiation in rapidly urbanized Shenzhen City [J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(1): 75-82. (in Chinese))
- [29] U S Department of Agriculture (USDA). Natural resources conservation service, national engineering handbook, part 630 [EB/OL]. [2007-11-30] [http://www.wsi.nrcs.usda.gov/products/W2Q/H&H/tech\\_refs\\_eng\\_Hbk/chap.html](http://www.wsi.nrcs.usda.gov/products/W2Q/H&H/tech_refs_eng_Hbk/chap.html).
- [30] WILLIAMS J R. The EPIC model, 909-1000 [C]// Computer models of watershed hydrology. Highlands Ranch: Water Resources Publications, 1995.
- [31] 魏建兵. 水源保护区人为活动的水环境效应研究: 以深圳市石岩水库流域为例[D]. 北京: 北京大学, 2008.
- [32] 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.
- [33] LAW N L, CAPIELLA K, NOVOTNEY M E. The need for improved pervious land cover characterization in urban watersheds [J]. Journal of Hydrological Engineering, 2009, 14(4): 305-308.

(收稿日期: 2012-07-23 编辑: 彭桃英)

(上接第 43 页)

- [5] 崔德才, 胡锋. 骆马湖生态修复[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(17): 8131-8133. (CUI Decai, HU Feng. Ecological restoration of Luoma Lake [J]. Journal of Anhui Agriculture Sciences, 2009, 37(17): 8131-8133. (in Chinese))
- [6] 范成新, 张路, 杨龙元, 等. 湖泊沉积物氮磷内源负荷模拟[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(4): 370-378. (FAN Chengxin, ZHANG Lu, YANG Longyuan, et al. Simulation of internal loadings of nitrogen and phosphorus in a lake [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2002, 33(4): 370-378. (in Chinese))
- [7] 杨士建. 骆马湖富营养化发生机制与防治途径初探[J]. 中国环境监测, 2004, 20(3): 59-62. (YANG Shijian. Approaches to mechanisms and control of eutrophication of the Luoma Lake [J]. Environmental Monitoring in China, 2004, 20(3): 59-62. (in Chinese))
- [8] 潘元潮, 严维辉, 赵沐子, 等. 骆马湖底栖生物调查报告 [C]//江苏省水产学会. 江苏省水产学术年会暨学术研讨会论文集. 南京: 江苏省水产学会, 2009.
- [9] 纪小敏, 马倩, 董家根, 等. 江苏省入骆马湖污染物总量分析[J]. 江苏水利, 2010(10): 44-46. (JI Xiaomin, MA Qian, DONG Jiagen, et al. Analysis of pollutant quantity discharged to Luoma Lake of Jiangsu Province [J]. Jiangsu Water Resources, 2010(10): 44-46. (in Chinese))
- [10] 黄文钰, 许朋柱, 范成新. 围网养殖对骆马湖水体富营养化的影响[J]. 农村生态环境, 2002, 18(1): 22-25. (HUANG Wenyu, XU Pengzhu, FAN Chengxin. Effect of cage aquaculture on eutrophication in Luoma Lake [J]. Rural Eco-Environment, 2002, 18(1): 22-25. (in Chinese))
- [11] 第一次全国污染源普查资料编纂委员会. 污染源普查产排污系数手册 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [12] 黄文钰, 许朋柱. 骆马湖营养盐收支[J]. 湖泊科学, 2001, 13(3): 240-246. (HUANG Wenyu, XU Pengzhu. Nutrient balance in Luomahu Lake [J]. Journal of Lake Sciences, 2001, 13(3): 240-246. (in Chinese))

(收稿日期: 2013-01-15 编辑: 徐娟)