

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

郑 璟^{1,2,3}, 方伟华^{1,2 *}, 史培军^{1,2}, 卓 莉⁴

(1. 北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学 民政部 - 教育部 减灾与应急管理研究院, 北京 100875; 3. 广东省气候中心, 广州 510080; 4. 中山大学 地理科学与规划学院, 广州 510275)

摘要: 以深圳市布吉河流域为例, 系统模拟了不同土地利用条件下的流域水文过程, 并分析了土地利用变化的影响。对布吉河流域土地利用进行分类的结果表明 1980—2005 年期间该流域的耕地、林地及灌草地的比例由 93.54% 减少为 34.79%, 而城镇用地由 1.65% 增至 54.25%; 在对 SWAT (Soil Water Assessment Tool) 模型在布吉河流域的应用进行验证的基础上, 分析了快速城市化过程中土地利用变化对流域水文要素可能产生的各种影响。结果表明, 土地利用条件的不同可导致流域水文过程发生极大的差异: 以 2005 年的土地利用作为输入与以 1980 年的土地利用作为输入相比, 流域蒸散发量、土壤水含量和地下径流深度分别减少了 42.09、28.10 和 279.74 mm, 而地表径流则平均增加了 431.97 mm; 土地利用变化还导致各水文要素的空间和年际分布特征发生改变。

关 键 词: 土地利用变化; 城市化; 流域水文过程; SWAT 模型

中图分类号: P343.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000 - 3037 (2009) 09 - 1560 - 13

城市化是最为典型的土地利用变化过程之一, 在城市化进程中, 随着经济的发展和人口的增长, 城镇周围的其它土地利用类型都逐渐转变为城镇用地, 这些变化将明显地影响区域的水循环过程, 导致蒸散发与下渗减少、地下水位降低、汇流时间缩短以及洪峰流量增加等等^[1-3]。由于城市化进程中土地利用变化的影响, 城市区域的水循环机理, 包括降雨 - 径流过程与河道过程, 都将发生改变, 呈现出与自然状态下迥然不同的差异。因此, 对城市化进程中土地利用变化引起的水文响应进行研究, 对于城市地区的水资源管理及水灾防御等具有重要的意义。

改革开放以来, 我国很多地区都经历了快速的城市化过程, 尤其在珠江三角洲、长江三角洲以及京津唐等区域, 城市化的速度和规模都十分惊人。深圳即是一个典型的例子, 自 1980 年经济特区成立以来, 深圳市经历了快速的城市化进程, 由一个小渔村发展成为一个具有上千万人口的大都市。快速的城市化在促进区域经济发展的同时, 也造成了众多的区域生态环境问题, 如洪涝灾害加剧、水体污染严重以及水资源短缺等。这些问题引起了广泛的关注, 已有的研究从城市水灾治理、水体污染、水资源管理等角度探讨快速城市化的影响,

收稿日期: 2009-04-28; 修订日期: 2009-06-22。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40535024, 40601002, 40601010); 科技部国家“十一五”科技支撑计划项目 (2006BAD20B03)。

第一作者简介: 郑璟 (1982-), 男, 山西晋城人, 硕士, 主要研究土地利用变化及其影响。

*通信作者, E-mail: fang@ires.cn

并提出了相应的对策和建议^[4-5]。目前国内在定量分析快速城市化对流域水文过程影响方面的研究还较少:袁艺等曾以深圳布吉河流域为例应用水文模型对快速城市化过程中土地利用变化对暴雨洪水过程的影响进行了模拟研究^[6],但针对快速城市化过程中土地利用变化对长期流域水文过程影响的定量分析研究还较为欠缺。

流域水文模型,尤其是分布式水文模型,是研究土地利用变化水文效应最为有效的工具之一。SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型是美国农业部下属农业研究局开发的长时段流域环境模拟模型。该模型具有很强的物理机制,能够模拟气候变化、土地利用变化以及管理措施等对流域水文过程、水质等的影响,在北美和欧洲得到了广泛而成功的应用^[7-10],近年来在国内也得到了较多的推广^[11-14]。

本文选择经历了典型快速城市化过程的深圳市布吉河流域为研究区,在测量与分析该流域土地利用变化的基础上,应用 SWAT模型对布吉河流域快速城市化过程中土地利用变化对流域水文过程的影响进行模拟研究。具体研究目标为:基于遥感与 GIS技术对布吉河流域 1980—2005年期间的土地利用变化进行测量与分析;在对 SWAT分布式水文模型进行验证的基础上,应用该模型对不同土地利用条件下的流域水文过程进行模拟;基于上述模拟结果,分析和探讨土地利用变化对流域水文过程,尤其是流域水平衡的影响。

1 背景及数据

1.1 研究区概况

布吉河位于深圳市中部,是深圳河的主要支流,全长 18 km,流域总面积约为 63 km²。布吉河流域下游位于深圳中心区,在深圳特区成立初期便开始经历快速的城市化,1980年城镇用地占该流域总面积的比例不足 2%,至 2005年,城镇用地面积所占比例已超过 50%。快速城市化对布吉河流域的水文过程造成了显著的影响:根据 Li的研究,布吉河流域在快速城市化过程中,降雨汇流时间平均缩短了 25%,洪峰流量相应地平均增加了 22%^[15]。袁艺的研究结果表明,快速城市化过程中土地利用/覆盖变化导致该流域的径流系数增大,汇流时间缩短,洪峰流量增大^[16]。

1.2 土地利用数据

在前期的工作中,已经基于 Landsat TM及 ETM+影像分类得到了深圳地区 1980、1988、1994和 2000年 4期土地利用图^[16],在此基础上,本文选取 2005年同一季相的 TM影像,采用相同的土地利用分类体系和分类方法,辅以高分辨率遥感影像解译、野外实地测量等手段,将深圳地区的土地利用分为高密度城镇用地、中低密度城镇用地、耕地、园地、林地、灌草地、水体、湿地和未利用地等 9种类型,最终提取得到了布吉河流域不同城市化阶段较高精度的土地利用图。分类结果及土地利用变化分析详见第 3节。

1.3 地形数据处理及河网、子流域确定

DEM数据是流域水文模型中流域划分、水系生成以及汇流模拟与河道推演的基础。本文基于 1:10 000地形等高线数据应用 GIS软件进行空间高程插值,得到空间分辨率为 15 m 的 DEM数据,然后在 SWAT模型中将布吉河流域划分为 31个子流域。

1.4 土壤数据处理及属性数据库构建

布吉河流域的土壤空间分布基于深圳市土壤类型图数字化而成,并通过查询《广东土种志》获得了各土壤类型所对应的土壤容重、机械组成等土壤属性数据。对于土种志中缺少的水饱和导率、可利用水含量等数据,基于土壤机械组成数据利用土壤水分特性软件

(Soil Water Characteristics)进行了估算。

1.5 气象数据处理

SWAT模型中需要的气象数据包括三部分:一是研究区内各气象站点在研究时段内各气象要素(最高气温、最低气温、降雨量、平均风速、相对湿度、太阳辐射量)的日资料;二是上述各气象要素的多年月统计特征;三是各气象要素观测站点的地理位置列表。本文以深圳气象站 1952—2005年的气象日资料为基础,计算得到了上述各项气象参数。

2 研究方法

2.1 模型方法选择与结果表达

SWAT模型采用模块化设计,对不同水文过程的模拟提供了多种模拟方法,在研究时需要根据研究目的、数据条件等选择不同的方法。本研究选择了SCS模型来计算地表径流,蒸散发模型选用了具有较强物理机制的Penman-Monteith方法,而河道演算则选用了计算简单、所需资料少、且在一般河道的洪水演算中效果较好的马斯京根法。其中,对于SCS模型中关键参数CN值的设置,本文根据SWAT模型用户手册所提供的CN值查算表,并参考SCS模型在深圳地区已有的应用^[16],综合考虑深圳地区的实际条件,确定了布吉河流域中等前期土壤湿度(AMC II)条件下的不同土地利用所对应的CN值(表1)。

表 1 布吉河流域中等前期土壤湿度条件下不同土地利用的 CN 值

Table 1 Curve Numbers for different land use types in the Buji watershed

土地利用类型	不同土壤水文分组对应 CN 值			
	A	B	C	D
高密度城镇用地	90	93	94	95
中低密度城镇用地	80	83	87	90
耕地	67	78	85	89
园地	40	62	76	82
林地	25	55	70	77
灌草地	36	60	74	80
水域	98	98	98	98
湿地	94	96	97	98
未利用地	72	82	87	89

SWAT模型中的基本计算单元为水文响应单元(HRU, Hydrological Response Unit),即子流域内具有相同土地利用/覆盖、土壤类型以及管理措施的水文单元。模型在运行时对每个水文响应单元的水文过程单独进行计算,之后将运行结果在子流域出口进行汇总。水文响应单元概念的引入使得SWAT模型更多地考虑了流域内土地利用、土壤类型等的空间异质性,对水循环过程的模拟更具有物理意义,模拟的精度也得以提高。SWAT模型允许用户通过设置土地利用和土壤面积比例阈值将子流域中的次要土地利用类型和土壤类型忽略掉,从而提高计算效率。但当比例阈值大于零时,模型对空间异质性的考虑不全面,而且由于此时水文响应单元的空间位置无法确定,SWAT模型在对模拟结果进行图形表达时只能以子流域为单元,不能够充分表达模拟结果的空间异质性。为了改进这一不足,本文在模拟中将土地利用和土壤类型的比例阈值均设置为0%,并通过对土地利用图和土壤类型分布图进

行叠加分析得到了水文响应单元的空间分布,在对 SWAT模型模拟结果进行分析时,通过将每个水文响应单元的模拟结果与其空间位置一一对应,得到了基于水文响应单元的模拟结果空间分布图,详细结果见第 3 节。

2.2 模型适用性验证

由于布吉河流域缺乏符合规范要求的较长系列的流量实测资料,难以对模拟结果进行常规的校正及验证,本文参考《深圳市防洪(潮)规划报告》一书中的相关研究结果^[17]对模拟结果进行了检验。在该报告中,深圳市水利规划设计院根据深圳各主要流域多年平均径流深、径流变差系数 C_v 、偏态系数 C_s 等,计算得出了深圳市包括布吉河在内的各主要河流河口断面不同保证率下的天然年径流量,并根据龙岗河下陂站 1959—1968 年径流观测资料计算得到了深圳地区设计年径流在典型年(1962、1966、1967、1968 年)的年内分配比例。

本文利用 SWAT模型模拟了布吉河流域 1959—1969 年期间的水文过程,其中,气象条件以深圳气象站实际气象观测资料为输入,1980 年以前深圳地区以农业经济为主,城市化率不足 2%,土地利用变化非常小,因此本文中以 1980 年的土地利用作为上世纪 60 年代土地利用的替代。将模型模拟的结果与根据布吉河河口断面不同保证率年径流总量及年内分配比例计算得到的布吉河流域出口典型年内各月份的天然径流量进行比较(图 1),进而对 SWAT模型的有效性进行了验证。本文选取了决定系数和 Nash-Sutcliffe 模型有效性指数两个指标来对模型模拟结果评价。计算得出的决定系数 R^2 为 0.871 1, Nash-Sutcliffe 有效性指数为 0.864 3,表明 SWAT模型在布吉河流域具有较高的适用性。

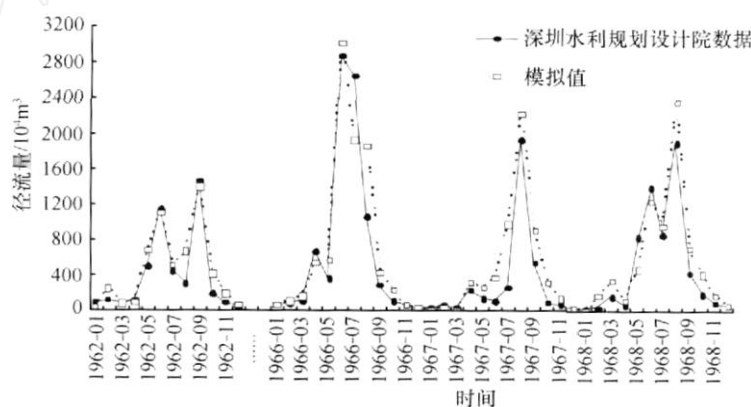


图 1 SWAT模拟结果与深圳市水利规划设计院研究成果比较

Fig. 1 Comparison of simulated monthly discharge at the outlet of the Buji watershed with data from Shenzhen Water Planning and Design Institute

2.3 模拟情景设置

为了分析研究区土地利用变化对流域水文过程的影响,本文提出这样的假设,即:如果保持气象、土壤、地形等输入条件不变而仅改变土地利用条件时,水文模型输出结果的差异仅是由于土地利用变化造成的。基于此,设立如下情景:假设研究区土地利用在 1980—2005 年期间保持不变,以相同的气象、地形及土壤条件,分别结合 1980、1988、1994、2000、2005 年的 5 期土地利用图作为输入对流域水文过程进行 5 次模拟,从而得到 5 种不同的土

地利用条件下流域水文过程中各水文要素的变化曲线。通过对这 5 种情景模拟的结果之间的纵向比较,定量分析土地利用变化对流域水文过程的影响。

之所以采用上述情景设置,而不采用模拟并比较不同城市化阶段实际流域水文过程的原因在于:首先,土地利用变化是个连续的过程,采用遥感手段仅能获得离散时间点的土地利用情况,无法反映其连续性;其次,现有的水文模型大多数不支持土地利用条件的动态变化;第三,受全球气候变化及城市化对区域气候条件的影响,研究区的气候也可能发生了变化,并对流域水文过程产生影响,但现有的数据条件下尚无法对区域气候变化的影响进行排除。

3 结果分析

3.1 布吉河流域土地利用变化分析

图 2 为布吉河流域在不同城市化阶段(1980、1988、1994、2000 和 2005 年)的土地利用图。可以看出,布吉河流域的土地利用在其快速城市化过程中发生了巨大的变化,主要表现为耕地、林地等农林用地的大量减少和城镇用地的迅速增加。

表 2 为不同城市化阶段布吉河流域各种土地利用类型面积及比例的统计结果,由该表可以看出布吉河流域土地利用变化的过程。1980 年,林地为布吉河流域最主要的土地利用类型,耕地次之;到 1988 年,林地、耕地、灌草地的比例均大幅度下降,中低密度城镇用地比例已上升至第二;至 1994 年林地和耕地持续减少,城市化初期出现的园地类型也开始减少,而城镇用地则持续增长;2000 年之后,农林用地的减少以及城镇用地的增长都开始减缓,且中低密度城镇用地开始向高密度城镇用地转变,说明布吉河流域已进入城市化后期。

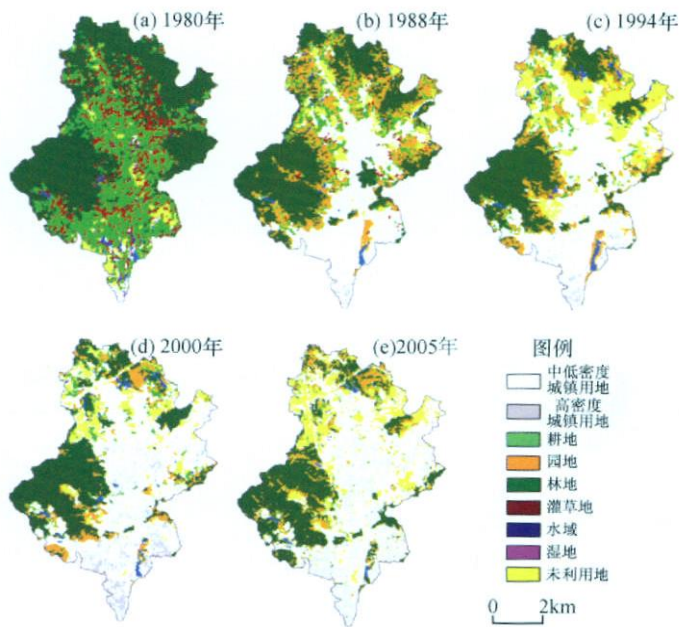


图 2 布吉河流域不同时期土地利用

Fig. 2 Land use maps of the Buji watershed

表 2 布吉河流域土地利用分类结果统计

Table 2 Statistics of land use classification result of the Buji watershed

土地利用 类型	1980年		1988年		1994年		2000年		2005年	
	面积 /km ²	比例 /%	面积 /km ²	比例 /%	面积 /km ²	比例 /%	面积 /km ²	比例 /%	面积 /km ²	比例 /%
高密度城 镇用地	0.00	0.00	0.26	0.42	1.29	2.06	4.20	6.71	8.86	14.15
中低密度 城镇用	1.03	1.65	19.49	31.15	25.29	40.41	29.56	47.24	25.09	40.10
耕地	18.93	30.25	5.51	8.81	2.85	4.56	2.10	3.35	1.05	1.67
园地	0.00	0.00	11.04	17.64	7.98	12.75	5.49	8.77	5.49	8.77
林地	31.08	49.67	21.63	34.57	16.08	25.69	15.98	25.54	15.24	24.35
灌草地	8.52	13.62	0.88	1.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
水域	0.74	1.18	0.61	0.98	0.85	1.36	0.94	1.51	0.34	0.54
湿地	0.09	0.15	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.04	0.08	0.13
未利用地	2.18	3.48	3.14	5.02	8.22	13.13	4.27	6.83	6.45	10.30
合计	62.58	100.00	62.58	100.00	62.58	100.00	62.58	100.00	62.58	100.00

3.2 土地利用变化对流域水文过程影响分析

为了揭示布吉河流域土地利用变化对水文过程的影响,本文基于模拟结果对地表径流、实际蒸散发、土壤水含量和地下径流等 4 个水文要素进行统计和分析,概括得到 3 种结果:

(1) 对各子流域单元上的输出进行计算,得到各水文要素每一年在整个流域的平均值,将分别以 5 期土地利用和 1980—2005 年实际气候条件作为输入得到的 5 次模拟结果绘制得到 5 条曲线。由于气候条件相同,各曲线之间的差异可视为土地利用变化的影响(图 3)。

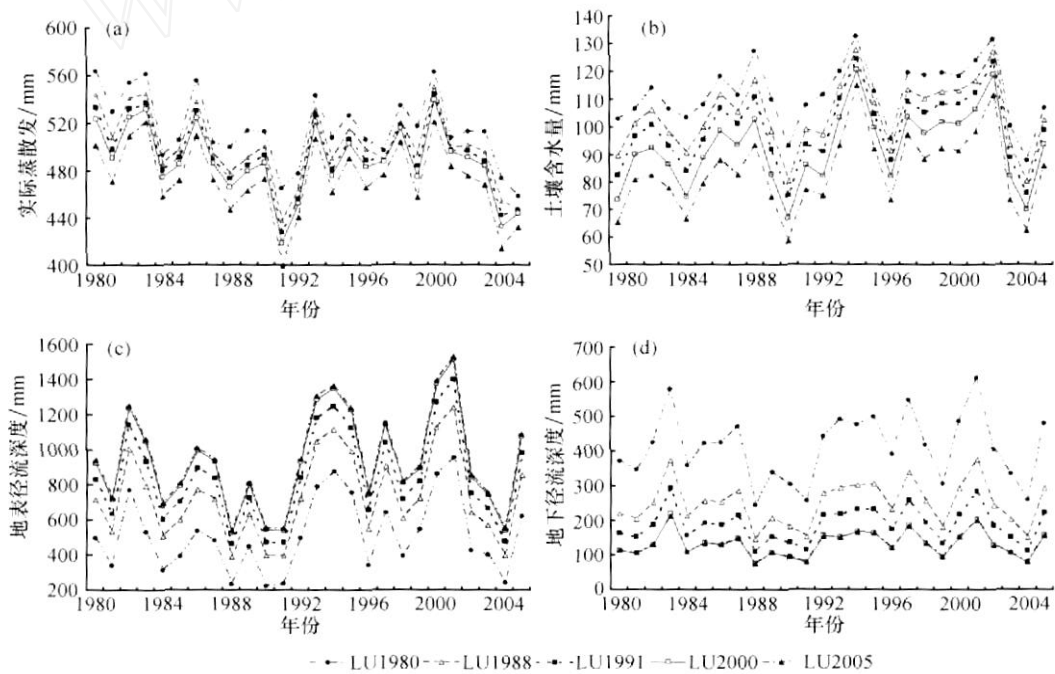


图 3 不同土地利用输入情景下布吉河流域平均蒸散发量 (a)、土壤水含量 (b)、地表径流深度 (c)及地下径流深度 (d)的年际变化对比

Fig.3 Yearly time series 1980 - 2005, evapotranspiration (a), soil water content (b), surface runoff (c) and groundwater flow (d) for different land use scenarios

(2) 对水文响应单元上的输出进行计算,根据土地利用类型统计得到不同情景下每种土地利用类型所对应的各水文要素总量的多年平均值,通过该结果可反映出不同土地利用类型的水文作用(图4)。

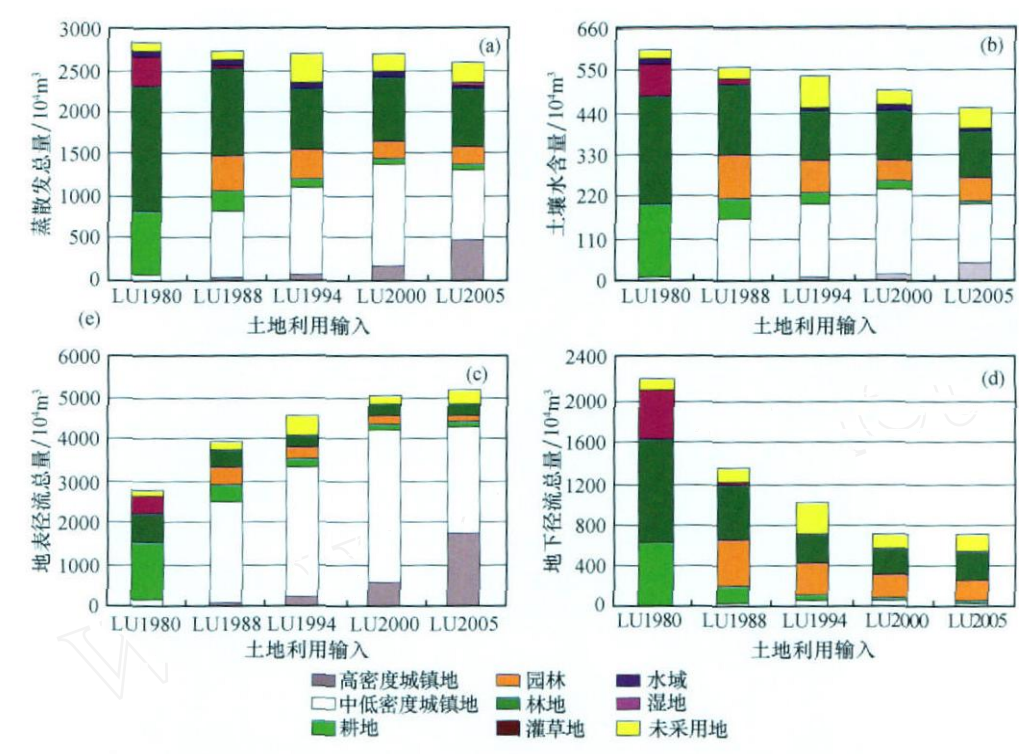


图4 不同土地利用输入情景下布吉河流域多年平均蒸发(a)、土壤水(b)、地表径流(c)及地下径流(d)总量对比

Fig.4 Comparison of total amount of evapotranspiration (a), soil water content (b), surface runoff (c) and groundwater flow (d) for different

(3) 对水文响应单元上的输出进行统计,得到每个水文响应单元在不同土地利用输入下水文要素的多年平均值,将该值与其空间位置进行对应,生成各水文要素多年平均值在水文响应单元尺度上的空间分布图,进而对比分析各水文要素在空间上的变化(图5~图8)。

由图3和表3可见,布吉河流域快速城市化过程中的土地利用变化对该流域的水文过程具有显著的影响:城市化的加剧可造成蒸发、土壤水含量、地下径流的明显下降及地表径流的显著增加。以2005年土地利用作为输入时的结果与以1980年土地利用作为输入时的结果相比,蒸发平均减少了42.09 mm,减少了8.18%;土壤水含量平均减少了28.10 mm,减少了25.49%;地下径流量平均减少了279.74 mm,平均减少幅度为68.33%;地表径流平均增加了431.97 mm,增长幅度高达93.75%,是各项要素中受影响最为显著的。

不同土地利用输入下地下水储量、土壤侧向流以及河道输移损失等水文要素均会发生变化,流域水平衡亦会发生相应的改变。因此,此处水文要素的增加量与减少量并不相等。

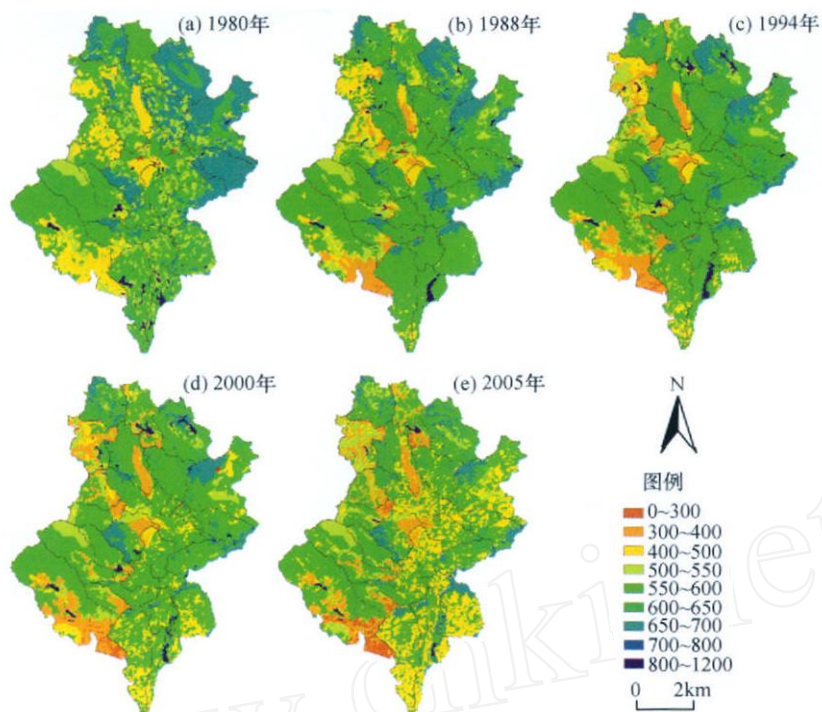


图5 不同土地利用情景下布吉河流域各 HRU 多年平均蒸散量(mm)空间分布对比

Fig. 5 Spatial distribution of HRUs' annual evapotranspiration for different land use scenarios

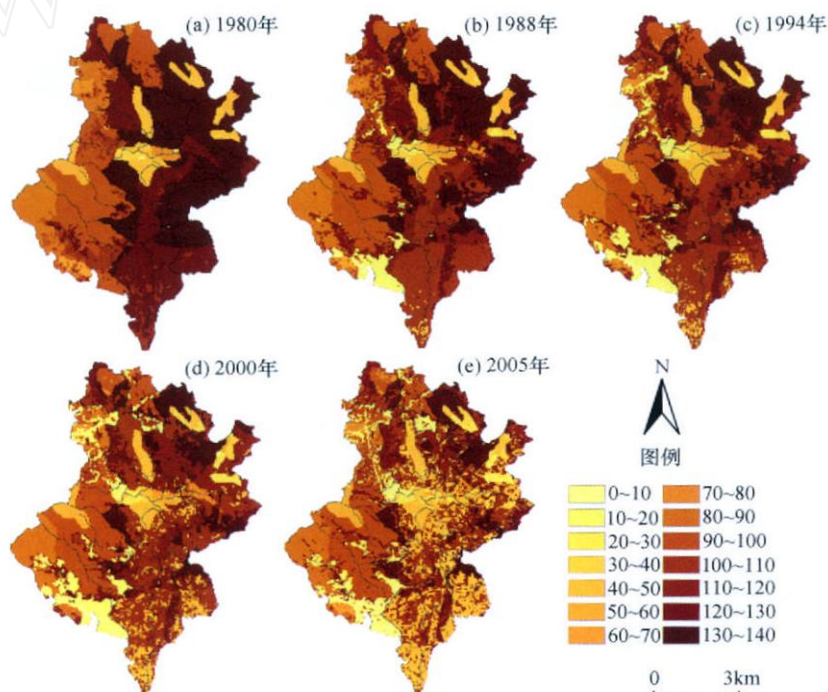


图6 不同土地利用情景下布吉河流域各 HRU 多年平均土壤水含量(mm)空间分布对比

Fig. 6 Spatial distribution of HRUs' annual soil water content for different land use scenarios

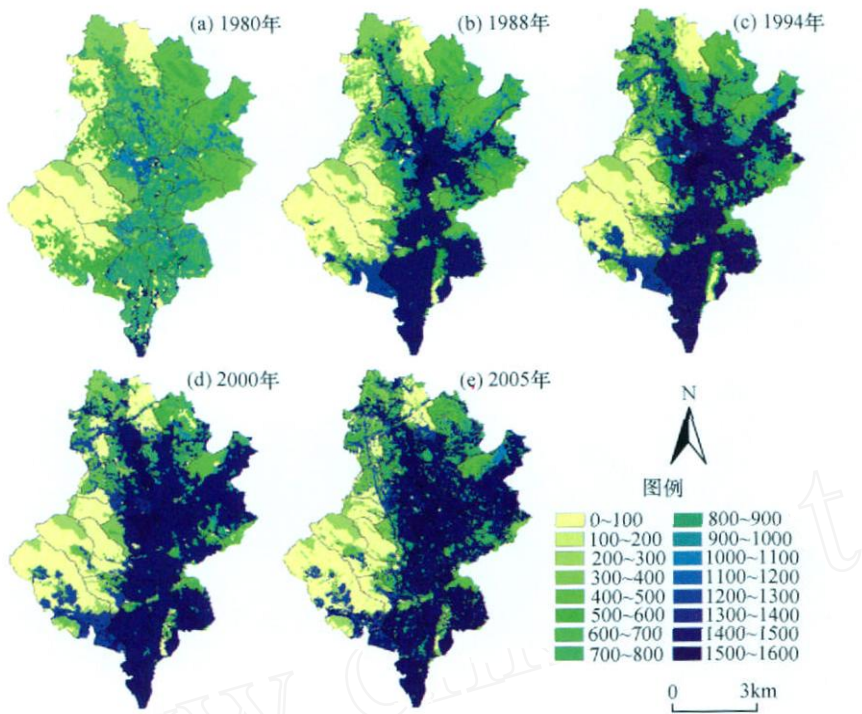


图 7 不同土地利用情景下布吉河流域各 HRU 多年平均地表径流深 (mm) 空间分布对比
Fig. 7 Spatial distribution of HRUs' annual surface runoff for different land use scenarios

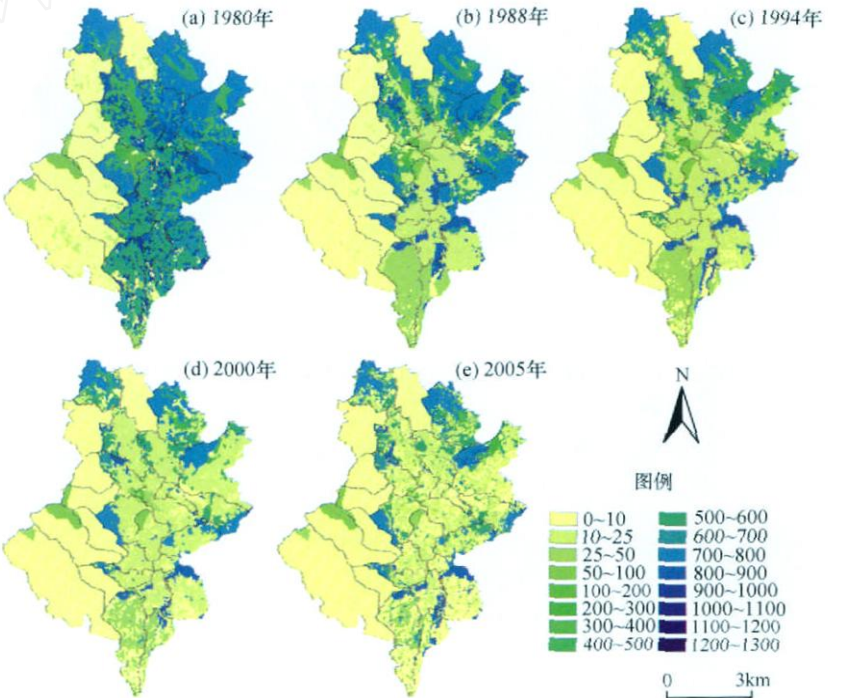


图 8 不同土地利用情景下布吉河流域各 HRU 多年平均地下径流深度 (mm) 空间分布对比
Fig. 8 Spatial distribution of HRUs' annual groundwater flow for different land use scenarios

表 3 不同土地利用情景下各水文要素模拟结果统计特征对比 (单位:mm)

Table 3 Statistics of different hydrological parameters for different land use scenarios (unit mm)

水文要素	统计特征	LU1980	LU1988	LU1994	LU2000	LU2005
蒸散发	平均值	515. 61	501. 04	494. 13	488. 78	473. 52
	标准差	29. 30	29. 86	29. 76	30. 16	30. 62
土壤水	平均值	111. 87	104. 19	99. 32	92. 41	83. 76
	标准差	11. 18	12. 41	12. 86	13. 68	13. 82
地表径流	平均值	513. 77	728. 63	842. 26	932. 62	945. 74
	标准差	213. 54	246. 04	266. 90	279. 67	280. 80
地下径流	平均值	410. 79	248. 59	186. 92	130. 75	131. 06
	标准差	98. 13	63. 72	49. 90	37. 84	35. 99

土地利用变化不仅会改变各水文要素的绝对量,还会改变这些要素的年际变化特征:蒸散发、土壤水含量和地表径流的年际波动增大,而地下径流的年际波动则变小。从各水文要素标准差的变化来看,受土地利用变化影响最明显的要素为地下径流,其余依次为地表径流、土壤水和蒸散发。

由图 4可看出不同土地利用输入情景下布吉河流域各水文要素多年平均总量所发生的变化:

以 2005年土地利用作为输入时的结果与以 1980年土地利用作为输入相比,蒸散发总量减少了 $330.24 \times 10^4 \text{ m}^3$,减少幅度为 10.30%。受土壤水分供给条件的限制,不同土地利用类型实际蒸散发量的差别不如潜在蒸散发量大,但城镇用地的实际蒸散发量仍比农林用地偏少 10% ~ 30%,因此城镇用地的扩张必然导致流域实际蒸散发总量的下降。

土壤水总量在不同土地利用输入下有明显的减少,以 2005年土地利用作为输入时的结果与以 1980年土地利用作为输入相比减少了 $148.04 \times 10^4 \text{ m}^3$,减少了 24.48%。土壤水的减少主要是由农林用地面积被城镇用地占用而大幅减少造成的,不透水面积的增加极大地减少了地表入渗,使得土壤失去了水分补给的主要来源,从而造成土壤水含量的下降。

地表径流总量的增加十分明显,以 2005年土地利用作为输入时的结果与以 1980年土地利用作为输入相比增加了 $2\,403.25 \times 10^4 \text{ m}^3$,增加了 86.32%。从地表径流总量的组成来看,城镇用地类型所对应的地表径流显著增加,耕地、林地等农林用地类型所对应的地表径流则明显减少:以 2005年土地利用作为输入时,城镇用地类型所对应的地表径流仅占流域总径流量的 5.34%,而以 1980年土地利用作为输入时,这一比例则达到了 83.55%。此外,城镇用地的径流系数大也是地表径流总量增加的原因之一。

地下径流总量的减少也相当明显,以 2005年土地利用作为输入时的结果与以 1980年土地利用作为输入相比减少了 $1\,505.60 \times 10^4 \text{ m}^3$,减少幅度为 67.77%。地下径流总量减少也与城镇用地的扩张有关,在城镇用地增加导致土壤水不断减少的情况下,从土壤剖面渗漏至地下水层的水分也会大量减少,并最终导致地下径流的减少。

对比不同土地利用输入条件下各水文要素多年平均值的空间分布(图 5~图 8)可看出,布吉河流域的蒸散发、土壤水和地下径流均呈减少趋势,而地表径流则明显增加。各要素在空间上的变化与城镇用地的扩张显著相关:在城镇用地集中的区域,地表径流增加和地下径流的减少十分明显,而土地利用未发生较大变化的地区这些要素的变化则不甚明显;以

1980年土地利用作为输入时,土壤水的空间分布主要取决于土壤类型的空间分布,土地利用的影响并不明显,而随着快速城市化过程中剧烈的土地利用变化,土壤水在总量逐渐减少的同时,空间异质性明显增大,土地利用的影响愈来愈明显,城镇用地下土壤水的减少尤为显著。

4 结论与讨论

在对深圳布吉河流域土地利用变化进行测量与分析的基础上,本文利用 SWAT 分布式水文模型对布吉河流域的水文过程进行了模拟和验证,并通过情景模拟分析了快速城市化进程中土地利用变化对流域水文过程的可能影响。论文得出的主要结论如下:

(1) 布吉河流域的土地利用在 1980至 2005年间的快速城市化过程中发生了巨大的变化:耕地、林地以及灌草地的比例由 93.54%减少到 34.79%,而城镇用地由 1.65%增加到 54.25%;

(2) 土地利用变化对布吉河流域的水文过程具有显著的影响:以城市化之后的土地利用(2005年)作为输入与以城市化之前的土地利用(1980年)作为输入相比,布吉河流域的蒸散发量平均减少了 42.09 mm (- 8.18%),土壤水含量平均减少了 28.10 mm (- 25.49%),地下径流量平均减少了 279.74 mm (- 68.33%),地表径流平均增加了 431.97 mm (93.75%);土地利用变化不仅会造成各水文要素绝对量的变化,也会改变这些要素的年际变化特征:地表径流、蒸散发、土壤含水量的年际波动增大,而地下径流的年际波动则变小;

(3) 城镇用地的迅速增加和农林用地的锐减是影响流域水文过程的主要原因。各水文要素的空间分布变化与城镇用地的扩张显著相关也验证了这一结论。

土地利用变化对流域水文过程造成的显著影响,必然会进一步影响到流域的自然生态系统以及社会经济系统,理解其影响机制对于协调和解决土地利用与水资源管理及水灾防御等之间的矛盾有着重要的意义。相对于国外,我国大部分地区所经历的城市化进程要迅速得多,其影响也要显著得多,因此,对相关方面问题的关注和研究也更加迫切和重要。尽管由于缺乏实测水文数据导致模型校验方面存在一些不足,但我们认为本文的方法和结论对于城市化过程中土地利用变化的水文效应及相关一些问题的理解和解决仍具有一定的意义。在今后的工作中,还需要进一步研究城市化引起的区域气候变化对流域水文过程的影响、城市化过程中生产生活用水、水利工程建设及城市下水管网铺设等人类活动对流域水文过程的影响等问题,从而获得对城市化影响流域水文过程这一问题的全面理解。

参考文献 (References):

- [1] Goudie A. The Human Impact on the Natural Environment (3rd ed) [M]. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 1990.
- [2] Hollis G E. The effects of urbanization on floods of different recurrence interval [J]. *Water Resources Research*, 1975, 11: 431-435.
- [3] Kibler D F. Urban Storm Water Hydrology [M]. Washington D C: American Geophysical Union, 1982.
- [4] 程晓陶,冯智瑶. 城市化与现代社会中的水害演变:从日本经历看今日深圳 [J]. 自然灾害学报, 1994, 3 (2): 41-48. [CHENG Xiao-tao, FENG Zhi-yao. Urbanization and changes of flood disaster in modern society. *Journal of Natural Disasters*, 1994, 3 (2): 41-48.]
- [5] 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 Ke-ming, GUO Qing-hai, *et al* Impacts of the urbanization on waters non-point source pollution *Environmental Science*, 2004, 25(6): 32-39.]
- [6] 袁艺, 史培军, 刘颖慧, 等. 土地利用对城市洪涝灾害的影响 [J]. 自然灾害学报, 2003, 12(3): 6-13. [YUAN Yi, SHI Pei-jun, LIU Ying-hui, *et al* Impact of land use change on urban flood disaster *Journal of Natural Disasters*, 2003, 12(3): 6-13.]
- [7] Arnold J G, Allen PM. Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds [J]. *Journal of Hydrology*, 1996, 176: 57-77.
- [8] Lenhart T, Fohrer N, Frede H G Effects of land use changes on the nutrient balance in meso-scale catchments [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2003, 28: 1301-1309.
- [9] Tripathi M P, Panda R K, Raghuwansi N S Development of effective management plan for critical subwatersheds using SWAT model [J]. *Hydrological Processes*, 2005, 19: 809-826.
- [10] Conan C, Marsily G, Bidoglio G A long-term hydrological modeling of the upper Guadiana river basin (Spain) [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2003, 28: 193-200.
- [11] Chen Junfeng, Li Xiubin, Zhang Ming Simulating the impacts of climate variation and land-cover changes on basin hydrology: A case study of the Suomo basin [J]. *Science in China D Earth Sciences*, 2005, 48(9): 1501-1509.
- [12] 杨桂莲, 郝芳华, 刘昌明, 等. 基于 SWAT模型的基流估算及评价: 以洛河流域为例 [J]. 地理科学进展, 2003, 22(5): 463-471. [YANG Gui-lian, HAO Fang-hua, LIU Chang-ming, *et al* The study on baseflow estimation and assessment in SWAT: Luohe Basin as an example *Progress in Geography*, 2003, 22(5): 463-471.]
- [13] 张东, 张万昌, 朱利, 等. SWAT分布式流域水文物理模型的改进及应用研究 [J]. 地理科学, 2005, 25(4): 434-440. [ZHANG Dong, ZHANG Wan-chang, ZHU Li, *et al* Improvement and application of SWAT: A physically based, distributed hydrological model *Scientia Geographica Sinica*, 2005, 25(4): 434-440.]
- [14] Hao Fanghua, Zhang Xuesong, Yang Zhifeng A distributed non-point source pollution model: Calibration and validation in the Yellow River Basin [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2004, 16(4): 646-650.
- [15] Li C Preliminary study of the effects of urbanization on flood and tide and environmental characteristics of Shenzhen River Catchment [C] Proceedings of Southeast Asia Regional Workshop on Urban Hydrology Shanghai: Hehai University Press, 1997. 40-45.
- [16] 袁艺. 深圳地区土地利用变化及其生态响应机制研究 [D]. 北京: 北京师范大学, 2003. [YUAN Yi The Study on Land Use Change and its Ecological Response Mechanism in Shenzhen Beijing: Beijing Normal University, 2003.]
- [17] 深圳市水利规划设计院. 深圳市防洪(潮)规划报告: 附件二: 水文分析计算报告 [R]. 深圳, 2004. [Shenzhen Water Planning and Design Institute Report on flood/surge prevention plan in Shenzhen: Appendix B: Report on hydrological analysis and calculation Shenzhen, 2004.]

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

ZHENG Jing^{1,2,3}, FANG Wei-hua^{1,2}, SHI Pei-jun^{1,2}, ZHUO Li⁴

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Civil Affairs and Ministry of Education of China, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Guangdong Climate Centre, Guangzhou 510080, China; 4. School of

Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Urbanization is one of the most significant forms of land use change. It has profound impacts on regional hydrological processes. The city of Shenzhen, China has been undergoing urbanization process at an unprecedented speed since its establishment as a Special Economic Zone in 1980. This study examined the impacts of land use change on hydrological processes in the Buji watershed located in the center area of the Shenzhen city by integrating Remote Sensing science, GIS technology and hydrological model. Land use change of the watershed was firstly measured and analyzed based on classification of Landsat images of 1980, 1988, 1994, 2000 and 2005. Secondly, the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model was calibrated and validated for the study area. Following that, five scenarios were created by taking one of the above five land use patterns to present the land use status throughout the 26 years from 1980 to 2005. The actual daily weather records, soil and DEM were also used as model inputs. The results show that there had been a dramatic land use change in the Buji watershed from 1980 to 2005. Percentage of agricultural land uses (cropland, forest, shrub and lawn) dropped from 93.54% to 34.79%, while urban land uses increased from 1.65% to 54.25%. Besides, land use changes in the urbanization process greatly affected catchment hydrological processes. Annual evapotranspiration, soil water content and groundwater flow decreased for 42.09mm, 28.10mm and 279.74mm respectively, while surface runoff increased for 431.97mm. Inter-annual fluctuation characteristics of these parameters also changed significantly. Increase of urban land uses and decrease of agricultural land uses were found to be the two major factors for hydrological processes changes, according to the statistics of major hydrological components and the spatial pattern of the hydrological parameters.

Key words: land use change; urbanization; hydrological processes; SWAT model; China