

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2012.06.016

基于 VIS 模型的南京江宁新区下垫面格局分析

苏伟忠,杨桂山,陈 爽

(中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室,江苏 南京 210008)

摘要:为更好地适应城市水文安全需要及理解雨季局地内涝频发的机理,利用 Landsat TM 影像和线性光谱混合模型分析南京江宁新区下垫面格局特征。结果表明:新区不透水面和植被的面积比均超过 40.00%,比例相当、布局均衡,且下垫面组分和空间分布特征与新区开发阶段有关;新区开发阶段及主导功能导致城市用地类型的下垫面组分差异,建设用地、待建用地、绿地、水域、农林地的平均不透水面面积比依次减小,分别为 75.87%,62.12%,41.15%,34.42%,22.76%,植被面积比则依次增加,裸土和水面的面积比多数低于 10.00%;新区汇水区下垫面格局已对自然水文格局产生扰乱,主要表现为不透水面占据汇水区结合部、高低地间泄洪通道而形成内涝易发区。

关键词:南京江宁新区;下垫面格局;汇水区;用地类型;Landsat TM 影像;线性光谱混合模型

中图分类号:F301.23 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2012)06-0686-06

Land surface pattern of Jiangning New Area of Nanjing based on VIS model

SU Weizhong, YANG Guishan, CHEN Shuang

(State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: For enhancing urban hydrological security and understanding the mechanism of the developing flood hazards, we used a Landsat TM image and linear spectral mixture model to extract and analyze the land surface characteristics in the Jiangning New Area of Nanjing. The results show that the ratio of the impervious surface and the vegetation coverage ratio in the study area were higher than 40.00%, in similar proportions and with balanced distributions, and the land surface components and spatial distribution characteristics were influenced by the development of the study area. The new area's development and leading functions lead to differences in land surface components. The average impervious surface ratios of the construction land, the land under construction, the green land, the water area, and the agricultural and forestry land were 75.87%, 62.12%, 41.15%, 34.42%, and 22.76%, respectively; the vegetation coverage ratio increased; and the ratios of bare soil and water surface area were mostly lower than 10.00%. The land surface pattern of the catchment area affected the hydrological pattern of the new area, with the impervious surface not only covering the boundaries between many catchment areas but also cutting the flood channels between highlands and lowlands.

Key words: Jiangning New Area of Nanjing; land surface pattern; catchment area; land use type; Landsat TM image; linear spectral mixture model

新一轮新区开发热潮在中国掀起,尤其长三角地区地方政府付诸极大热情、超常规的新区建设,被认为是解决大城市发展的有效路径。但近年来城市新区雨季内涝频发,主要是因为新区建设阶段,急于开发土地、土地规划控制效能因经济利益而降低^[1-2]、城市土地利用水文安全考虑不足^[3-4]。城市化过程通过植被砍伐、土壤夯实、开沟排水、不透水路面和建筑物覆盖^[5-7]改变地表下垫面、产汇流时空模式和水量平衡状

况^[8-9]。国外 SCS (soil conservation service) 水文模型和 USLE (universal soil loss equation) 虽然考虑了土地利用、土地覆盖类型对地表径流的影响,但主要侧重于土地用途或遥感数据的可识别性。L-THIA (long-term hydrologic Impact assessment) 需要确定的流域各类地块的 CN 值由土地利用类型和水文土壤类型共同决定,其中土地利用类型是根据不透水面面积比进行划分的。Lo 等^[10]在研究美国亚特兰大时,将土地利用/覆盖类型分为高密度城市用地、低密度城市用地、农田/草地、森林、水体和裸地。我国史培军等^[11]、袁艺等^[12]、邓璟等^[13]、秦莉俐等^[14]利用 SCS 水文模型分析了深圳、浙东沿海等地区土地利用方式、降雨因素对降雨-径流关系及城市洪涝灾害的影响。武晟等^[15]分析了降雨强度与历时、土壤湿度与密度、不透水面面积比等因素对径流系数和产流过程的影响。程江等^[16-17]先后研究了城市土地利用变化和绿地系统对城市雨水径流总量的产生和消减效应。

可见,模拟产汇流过程的水文模型常需要输入土地利用类型参数,但土地利用分类体系难以精确区分城镇用地类型之间的透水性差异^[18],而下垫面的透水性及格局直接影响产汇流格局及过程曲线。Ridd^[19]提出的广义城市地表下垫面组分模型(vegetation-impervious surface-soil,简称 VIS 模型),认为城市地表下垫面由植被、不透水表面与土壤 3 种组分构成。通过获取地表不同下垫面组分的构成,可以更好地分析城镇用地内部的水量分布和交换过程^[20]。笔者基于 2009 年南京江宁新区的 Landsat TM 数据,分析其下垫面组分结构特征与空间差异,为水文模型和地表水量调节功能评估模拟提供精确的输入参数。

1 研究区与方法

1.1 研究区

南京江宁新区(以下简称新区)面积为 69.00 km²,北临南京主城,机场高速、宁溧路、将军大道、宁丹路等干道使新区与主城无缝对接,目前已是南京地区建设发展最快、产业竞争力最强的开发区(图 1)。研究区西部和西北部为牛首—祖堂山、将军山。1994 年、2000 年、2009 年新区建设用地面积分别为 2.22 km²、5.50 km²、25.19 km²;2000 年以来城市空间增长了近 4 倍^[4],而近几年研究区雨季内涝局地频发。因此,笔者以新区为研究对象,分析其土地利用类型和自然水文单元的下垫面格局特征,并将其与南京市区、南京老城区(明城墙以内)的下垫面格局特征进行比较。

1.2 方法与数据

1.2.1 下垫面组分提取方法

采用研究区 2009 年 7 月 5 日 Landsat TM 影像(无云、质量好),利用线性光谱混合模型通过最小噪音分量变换、纯净像元指数计算、终端地类收集、线性光谱模型分解、精度评价等步骤,在遥感图像处理软件 ENVI 4.7 下,基于绿光波段和中红外波段提取修正的归一化水体指数(MNDWI)^[21],进行水体掩膜,基于最小噪音分离的前 3 个波段选取高反照、低反照、植被和土壤 4 种端元进行混合光谱分解。

1.2.2 下垫面空间特征分析

基于 Landsat TM 影像,结合城市规划建设用地现状图提取二级城市用地类型,包括道路(T)、工业用地(M)、一般居住用地(R1)、低层居住(别墅)用地(R2)、公共设施(商服、医疗卫生、机关及教育科研)用地(U)、待建用地(I)、农田(A)、经济林(G1)、绿地(G2)、水源涵养林(G3)、水域(W)11 类用地。通过对 11 类用地类型进一步合并,可得 5 类一级用地类型,即由 T、M、R1、R2、U 组成的建设用地,待建用地,水域 W,绿地 G2,以及由 G1、G3、A 组成的农林地。利用 ArcGIS 水文模块,基于 30 m 分辨率 DEM 提取水系和小流域,综合实际河网及水利片区确定汇水区。根据所得数据分析市区、老城区、新区的下垫面特征差异,以及新区不同用地类型和汇水区下垫面特征。

2 结果与讨论

图 2 为提取的南京市下垫面组分图,笔者用均方根(RMS)误差进行精度检验。根据解混中得到的 RMS

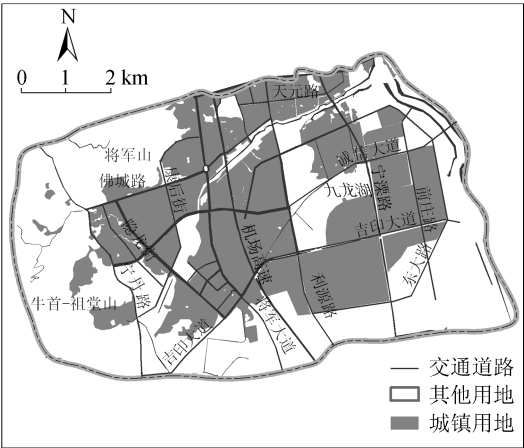


图 1 研究区地理位置及用地类型

Fig. 1 Location and land use types of study area

频率分布与空间图像,研究区域 RMS 的平均值为 0.007 08,绝大部分像元的 RMS 值都小于 0.015 00,可见本研究的误差相对较小。

高反照度影像中的高值集中于城区,建筑和道路基本以水泥、金属和玻璃等材料为主;低反照度影像中的高值区主要为以旧建筑为主的老城区以及重工业区;植被覆盖度的高值基本在绿化区和农田地区。在外环线以内的城市建筑密集区,除几个公园绿地外,植被覆盖度都较低;外环线以外植被覆盖度高值出现的频率明显增加;外环线附近是植被盖度空间分布的一个高值区。

2.1 南京市不同地域下垫面特征

图 2 及表 1 表明不同地域下垫面特征如下:

a. 老城区不透水面占主导,且分布连续、布局均衡;水面和植被相对集中,主要为围绕城墙的林地和水域,以及由东西贯穿的紫金山—石头城组成的公共绿地;裸土在植被集中区周边及交通沿线聚集分布。市区以植被为主,并且主要分布在远郊;不透水面则集中在城区和近郊;裸土和水面斑块破碎散布。新区以不透水面和植被居多,保留了原有的水面和低山丘陵林地,布局均衡;不透水面分布均匀,且与植被、水面交错分布,未形成类似老城区一样的连片分布格局。各地域水面和裸土都较少。

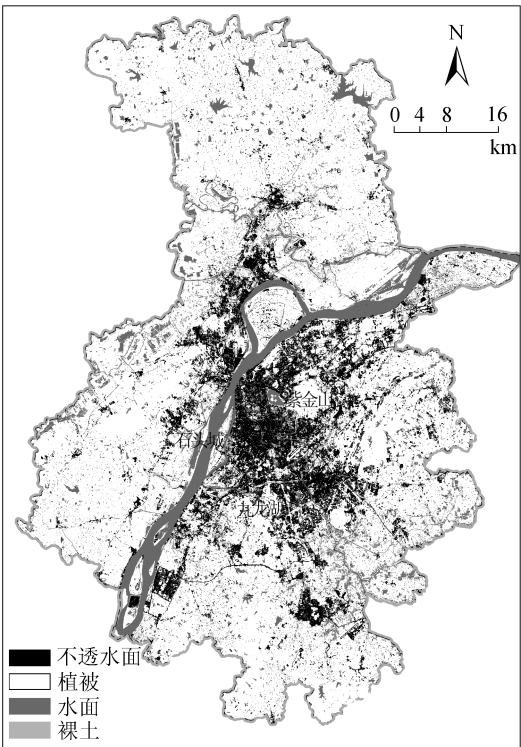


图 2 南京市下垫面组分

Fig. 2 Land surface components of Nanjing

表 1 南京市不同地域下垫面特征

Table 1 Land surface characteristics in different urban areas of Nanjing

地域 划分	不透水面			植被			裸土			水面		
	面积/ km ²	占各区 面积 比/%	斑块 密度/ (个·km ⁻²)	面积/ km ²	占各区 面积 比/%	斑块 密度/ (个·km ⁻²)	面积/ km ²	占各区 面积 比/%	斑块 密度/ (个·km ⁻²)	面积/ km ²	占各区 面积 比/%	斑块 密度/ (个·km ⁻²)
新 区	32.77	48.12	6.19	28.74	42.19	15.14	2.24	3.29	712.27	4.36	6.4	94.79
老城区	39.07	92.81	2.46	2.25	5.33	114.92	0.36	0.86	2037.11	0.42	0.99	481.7
市 区	1 128.79	23.89	14.48	2 943.37	62.29	4.03	154.16	3.26	548.25	499.07	10.56	54.89

b. 从相对值看,老城区、新区、市区的不透水面面积比和平均值依次降低,而水面、植被和裸土总体呈增加趋势,表明开发强度总体依次加强。裸土、植被和水面越破碎,即斑块面积越小,数量越多,不透水面越能大片连续分布。

c. 从下垫面参数的相关性看,4 类下垫面的面积比与斑块总面积基本成正向关系,而两者又和斑块密度成反向关系,即不管是以不透水面为主导的地域还是以植被为主导的地域,面积比例越大,斑块平均面积越大,斑块密度越小。因此,某地域的下垫面组分面积和其空间特征具有无尺度的关联性,面积属性具有主导因子作用。

可见,城市的开发和增长是下垫面特征差异的重要原因。随着开发强度增加,不透水面面积比及其分布连通性增加,植被、水面的面积比例降低而且破碎化更明显。开发晚期的地貌和水域格局基本决定了植被和水面的最终格局;新区下垫面组分兼具市区和老城区的特征。

2.2 新区各用地类型的下垫面组成特征

居住、工业、公共设施等城市用地类型是满足城市基本需求的空间功能单元,用地类型的下垫面组成特征是地表产水估算和模拟的关键参数。表 2 给出了新区不同用地类型的下垫面组成。从表 2 可以看出,新区各用地类型下垫面组分体现了用地主导功能决定其下垫面组分及结构的一般规律。不透水面积比,建设用地>待建用地>绿地>水域>农林地,其中涵养林最低;植被面积比,农林地>绿地>待建用地>水域>建设用地,植被和不透水面的面积比大体呈反向关系;各用地类型的水面、裸土面积比一般都低于 10.00%。

陈爽等^[22]提取了 2005 年南京老城区下垫面组分,对于不透水面面积比,绿地最低(15.00%),公共设施最高(90.00%),居住与道路广场接近 72.50%,而工业较低(57.50%),平均建设用地不透水面积比约为 69.00%。将文献^[22]的结果与本文结果进行对比发现:(a)新区比老城区绿地 G2 的不透水面面积比大。新区和老城区绿地界定不同,前者主要指环九龙湖大片的人工草地,内设诸多娱乐广场和停车场,而后者绿地零碎,绿化覆盖好。(b)公共设施用地 U 不透水面面积比,新区比老城区低很多。新区公共设施用地主要为处于开发初级阶段的高校和医院用地,建筑容积率低而植被面积比较高;老城区处于建设完善阶段,公共设施用地含有成片的完善商业区,水泥路面和建筑密集。(c)新区工业用地 M 不透水面面积比比老城大。老城区从 20 世纪 90 年代末开始逐渐将工业用地置换到城市郊区,未置换的工业用地绿化水平高;新区工业用地尚处在建设阶段,以建筑和待建工地为主,绿化水平尚差。(d)新区和老城区的居住用地 R1 和 R2、道路 T、待建用地 I 的不透水面面积比相当。老城区待建用地一般为原有建筑群落拆迁后翻盖;而新区主要建立在原有的自然基质之上。

可见,城市增长引起的下垫面差异不仅反映在新区与老城区,也在新区的不同增长阶段区有体现。新区根据开发阶段和开发强度可分为建设完善区(1994—2003 年)、建完初期区(2004—2008 年)、在建区(2008 年以后)。在建区基于原有的自然基质建设,植被、水面较高,不透水面面积比比老城区小很多;建完初期区在新区占主导,以房屋建筑和道路、广场建设为主,绿化跟进不足;完善区为少数居住和工业用地,其绿化水平高,不透水面面积比低。

2.3 新区汇水区的下垫面组成特征

九龙湖汇水区以九龙湖体为中心,周边不透水面连片,湖体接纳四周产水,北口入牛首河,东处入秦淮河,与牛首河和沿秦淮片区相互联系。该汇水区地势低洼,尤其东北部殷巷镇区居住用地连片,排水设施更新不足,雨季内涝时有发生。汇水区东南角东南大学校区植被覆盖良好,内涝较少发生。总体而言,以湖体为中心形成的低洼汇水区水容量大,但湖体出水口的高密度用地区需提升排水能力,以防排水不畅及涝灾发生。

沿秦淮片区的 QA1 区除自身产水外,暴雨期还接纳九龙湖片区的部分出水,仅沿秦淮河地带植被覆盖良好,其余地区不透水面密布;QA2 区仅接九龙湖南部东南大学区不透水面分布,其余地区农地植被茂盛,接纳自身产水而直流入秦淮河。总体而言,沿秦淮河片区的产水直排入河,水量调蓄能力强。

牛首河片区地势自西向东降低,从其上游到中下游汇水区植被递减,而不透水面递增(表 3)。NA2 将军山西麓和 NA3 祖堂山东坡分布着高档居住区、村落及墓地,居住区和佛城路不仅替代了汇水区关键蓄水面,也分割了排泄山上来水的自然通道;沿佛城路的截洪沟和地下管网常因超载而使雨水倒灌到沿线各居住区和工业区,雨季积水近年来较为严重。中下游 NB1 接纳 NA1 和 NA3 片区来水,而 NB2 接纳 NA2 来水。NB1 尚处于开发初期,农田、人工林地和开发园区交错,工业用地集约度低,排水网建设水平高。而 NB2 不透水

表 2 新区不同用地类型下垫面组成

Table 2 Land surface components of different land use types in study area

用地类型	二级用地类型	占各二级用地类型面积比/%			
		不透水面	植被	裸土	水面
农林地	G3	11.96	84.91	2.18	0.95
	G1	25.06	67.81	6.13	1.00
	A	31.26	60.22	3.46	3.07
水域	W	34.42	26.27	2.76	36.55
绿地	G2	41.15	44.13	3.46	8.25
待建用地	I	62.12	30.32	4.48	3.07
	U	73.66	17.61	5.19	3.54
	R1	75.13	17.28	5.23	2.36
建设用地	R2	75.43	18.38	4.61	1.59
	M	75.98	18.05	2.81	3.16
	T	79.16	15.25	3.23	3.36

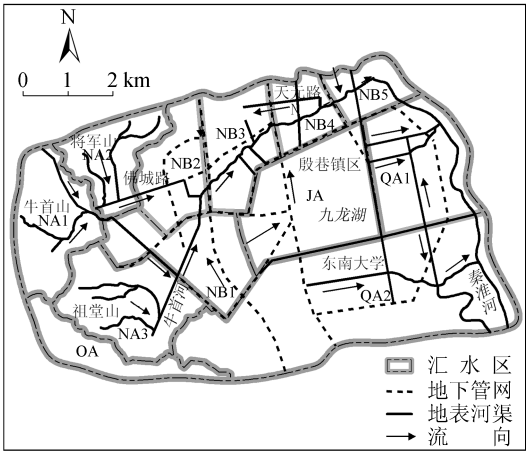


图 3 南京江宁新区汇水区及排水渠

Fig. 3 Catchment areas and drainage channels in study area

面密集、连片,除上游来水还蓄纳由将军山流下的雨水,造成沿将军大道和佛城路截洪沟和地下管网压力更大。NB3,NB4 和 NB5 不透水面面积比较大,开发强度大但建设完善。总之,每个汇水区的泄洪通道以及汇水区之间的结合地带构成关键水文安全格局,而沿将军大道、佛城路以及 NB2 与 NB1 交接区的密集不透水面和路网对汇水区进行了分割,导致其成为雨季内涝易发区。近些年这些地区的内涝频发事件印证了这一结论。

产流量与下垫面类型直接相关,下垫面类型、格局的变化影响研究区的产流量,显然新区与老城区的产流量相比还不大。

但从时间变化来看,新区的产流量还将继续增加。由于城市水文站设置的缺乏,研究区的水文数据和管网数据还难以在短时间内得到解决。

因此,在缺乏水文和排水数据的前提下,定量提出下垫面格局的优化方案具有一定难度。但是,从优化途径来看,适应水文安全的城市空间增长实际就是要求增长格局与水文格局之间的协调。一方面,需要优化不同用地类型的下垫面组分和结构,提升用水的水量调蓄能力,减少径流量;另一方面,用地布局的原则是尽量选择高地,避开流域结合部,并保障汇水区泄洪通道顺畅和充足的排水能力。

3 结 论

a. 新区整体平均不透水面面积比低于老城区,但比市区高 24.23%,植被面积比比市区低 20.10%,增加了流域地表产水量。

b. 新区用地类型下垫面结构中的不透水面面积比较高,而植被面积比较低,用地单元产流增加而调蓄功能下降。新区不透水面面积比建设用地(75.87%)>待建用地(62.12%)>绿地(41.15%)>水域(34.42%)>农林地(22.76%),尤其工业、待建用地和绿地的不透水面比甚至大于老城区。

c. 新区连片的不透水面占据汇水区结合部,道路切割了高低地间泄洪通道,佛城路和将军大道沿线形成内涝易发区。新区开发要适应水文安全需要,用地增长需优化用地下垫面结构以减少径流,用地布局宜高而避开汇水结合处以适应自然水文格局。

参考文献:

[1] 李秀彬. 对加速城镇化时期土地利用变化核心学术问题的认识[J]. 中国人口·资源与环境,2009,19(5):1-5. (LI Xiubin. Research priorities for land use change in the accelerated phase of urbanization[J]. China Population Resources and Environment, 2009, 19(5):1-5. (in Chinese))

[2] 许有鹏,尹义星,陈莹. 长江三角洲地区气候变化背景下城市化发展与水文安全问题[J]. 中国水利,2009(9):42-45. (XU Youpeng, YIN Yixing, CHEN Ying. City development and safety in Yangtze River Delta under the background of climate change [J]. China Water Resources, 2009(9):42-45. (in Chinese))

[3] 陈爽,姚士谋,吴剑平. 南京城市用地增长管理机制与效能[J]. 地理学报,2009,64(4):487-497. (CHEN Shuang, YAO Shimou, WU Jianping. Policy instrument of urban growth management and its effectiveness in Nanjing [J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(4):487-497. (in Chinese))

[4] 苏伟忠,杨桂山,董雅文,等. 长江三角洲资源环境约束与调控研究[J]. 现代城市研究,2009(10):19-23. (SU Weizhong, YANG Guishan, DONG Yawen, et al. Resources and environmental constraints and control of Yangtze River Delta regional development [J]. Modern Urban Research, 2009(10):19-23. (in Chinese))

[5] JONES J A, SWANSON F J, WEMPLE B C, et al. Effects of roads on hydrology, geomorphology, and disturbance patches in stream networks [J]. Conservation Biology, 2000,14(1):76-85.

表3 新区各汇水区下垫面组成

Table 3 Land surface components of catchment areas in study area

一级片区	二级片区	占各二级片区的面积比/%			
		裸土及其他	不透水面	水体	植被
牛首河上游	NA1	1.30	15.61	1.45	81.64
	NA2	2.08	36.75	1.94	59.23
	NA3	2.50	38.40	1.83	57.28
牛首河 中下游	NB1	4.07	59.90	3.30	32.73
	NB2	4.57	67.91	1.91	25.61
	NB3	5.90	68.72	7.58	17.80
	NB4	3.51	73.16	10.17	13.16
	NB5	3.48	60.77	11.89	23.86
九龙湖流域	JA	4.40	57.50	12.95	25.14
秦淮河流域	QA1	4.05	56.32	11.05	28.57
	QA1	3.82	39.03	7.22	49.93
外流域	OA1	0.85	30.94	1.77	66.45

[6] STEFAN K, JORG J, AXEL B. Modeling the impacts of land-use and drainage density on the water balance of a lowland-floodplain landscape in northeast Germany [J]. *Ecological modeling*, 2007, 200: 475-492.

[7] CHIN A. Urban transformation of river landscapes in a global context [J]. *Geomorphology*, 2006, 79(3/4): 460-487.

[8] AYED G M, MOHAMMAD A A. The impact of vegetative cover type on runoff and soil erosion under different land uses[J]. *CATENA*, 2010, 81(2): 97-103.

[9] ADELIA N N, ANTONIO C, CELESTE O A C. Impacts of land use and cover type on runoff and soil erosion in a marginal area of Portugal[J]. *Applied Geography*, 2011, 31(2): 687-699.

[10] LO C P, YANG X J. Drivers of land-use/land-cover changes and dynamic modeling for the Atlanta, Georgia. Metropolitan Area [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2002, 68 (10): 1073-1082.

[11] 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): 1041-1049. (SHI Peijun, YUAN Yi, CHEN Jin. The effect of land use on runoff in Shenzhen City of China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 21(7): 1041-1049. (in Chinese))

[12] 袁艺,史培军,刘颖慧,等. 土地利用变化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 Peijun, LIU Yinghui, et al. Impact of land use change on urban flood disaster[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2003, 12 (3): 6-13. (in Chinese))

[13] 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):1560-1570. (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 Resources*, 2009,24(9):1560-1570. (in Chinese))

[14] 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))

[15] 武晟,汪志荣,张建丰,等. 不同下垫面径流系数与雨强及历时关系的实验研究[J]. *中国农业大学学报*,2006,11 (5): 55-59. (WU Sheng, WANG Zhirong, ZHANG Jianfeng, et al. Experimental study on relationship among runoff coefficients of different underlying surfaces, rainfall intensity and duration[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2006, 11 (5): 55-59. (in Chinese))

[16] 程江,杨凯,徐启新. 高度城市化区域汇水域尺度 LUCC 的降雨径流调蓄效应:以上海城市绿地系统为例[J]. *生态学报*, 2008,28(7):2972-2980. (CHENG Jiang, YANG Kai, XU Qixin. Rainfall-runoff storage-infiltration effect of LUCC in highly urbanized region on a catchment's scale: Shanghai urban green space system as an example[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 28(7): 2972-2980. (in Chinese))

[17] 程江,杨凯,刘兰岚,等. 上海中心城区土地利用变化对区域降雨径流的影响研究[J]. *自然资源学报*,2010, 25(6):914-925. (CHENG Jiang, YANG Kai, LIU Lanlan,et al. Impact of 60 years land use change on rainfall-runoff in central Shanghai [J]. *Journal of Natural Resources*,2010, 25(6):914-925. (in Chinese))

[18] 蔡涛,李琼芳,宋秀民,等. 基于空间信息平台的土地利用方式变化径流响应模拟. *河海大学学报:自然科学版*, 2009, 37 (5): 563-567. (CAI Tao, LI Qiongfang, SONG Xiumin, et al. Influence of land use change on runoff response simulation based on spatial information platform[J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2009, 37 (5): 563-567. (in Chinese))

[19] RIDD M K. Exploring a VIS (vegetation-impervious surface-soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: comparative anatomy for cities [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1995, 16 (12):2165-2185.

[20] 肖荣波,欧阳志云,蔡云楠,等. 基于亚像元估测的城市硬化地表景观格局分析[J]. *生态学报*, 2007, 27 (8): 3189-3197. (XIAO Rongbo, OU-YANG Zhiyun, CAI Yunnan, et al. Urban landscape pattern study based on sub-pixel estimation of impervious surface [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2007,27 (8): 3189-3197. (in Chinese))

[21] 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. (XU Hanqiu. Quantitative analysis on the relationship of urban impervious surface with other components of the urban ecosystem[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 29(5): 2456-2462. (in Chinese))

[22] 陈爽,张秀英,彭立华. 基于高分辨卫星影像的城市用地不透水率分析[J]. *资源科学*,2006,28(2): 41-46. (CHEN Shuang, ZHANG Xiuying, PENG Lihua. Impervious surface coverage in urban land use based on high resolution satellite images [J]. *Resources Science*, 2006,28(2): 41-46. (in Chinese))