

城市不透水表面的水环境效应研究进展

刘珍环^{1,2}, 李 猷², 彭 建^{1,2}

(1. 农业部资源遥感与数字农业重点开放实验室, 北京 100081;

2. 北京大学城市与环境学院地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

摘 要:快速城市化导致的生态环境变化是当前城市生态环境研究的热点问题,而城市化的水环境效应则是其中的重要方向之一。本文通过梳理城市化过程对水环境效应的影响机制,总结和归纳城市不透水表面的水环境效应研究的核心内容与主要方法,指出当前城市化过程的水环境效应研究所面临的诸多难点,并对未来研究趋势进行展望。研究认为,城市化的显著特征之一是不透水表面的不断增加,以不透水表面指数(ISA)为表征的地表覆被参数日益受到城市土地利用/覆被变化研究的重视,成为城市化过程水环境效应研究的热点指标。不透水表面对水文效应的影响主要表现在两个方面,即短时间内增大降雨的径流量,长时间内增加洪水频率和径流总量。同时,不透水表面对水质的影响主要表现为增加水体的非点源污染负荷,目前的研究方法主要依靠城市水文水质监测及模型模拟,对水环境效应的影响机制方面尚缺乏对非点源污染负荷影响机制的深入研究,同时还需要进一步构建适用于城市地区的水文水质模型。可以预见,不透水表面指数将会是城市化过程水环境效应研究的重要参数,并将推动城市土地利用/覆被变化的水环境效应研究向参数简单化与精确化方向发展。

关 键 词:城市不透水表面;水文效应;水质效应;土地利用/覆被变化

1 引言

土地利用/覆被变化(Land use/cover change, LUCC)体现了人类活动对地表的能动作用,尤其在快速城市化地区,土地利用/覆被的快速变化甚至彻底改变了地表物质组成与结构,对城市的水环境质量产生显著影响^[1]。目前,城市土地利用/覆被变化的水环境效应主要包含两方面:①水文效应,即城市土地利用/覆被变化对径流量、径流历时及最大洪峰等水文指标的影响^[2-3];②非点源污染负荷效应,指城市不同土地利用/覆被类型的污染物输出负荷效应^[4-7]。为实现水资源高效利用与水环境有效管理,从宏观上认识和解决快速城市化过程中所面临的水资源匮乏、水质恶化及水生生态系统退化等问题^[8],城市土地利用/覆被变化水环境效应研究成为环境管理、景观生态学、土地科学等多学科共同关注的焦点。

城市化过程导致城市土地利用/覆被变化,其显著特征表现为不透水表面不断增加。不透水表面(Impervious Surface,简称IS)是城市的一种人工

地表,主要包括城市中的道路、停车场、广场及屋顶等建筑物^[9-10],能够隔离地表水下渗,切断城市地表水与地下水的水文联系,并且不透水表面的扩张被认为是区域水环境质量恶化的重要因素^[11]。各种类型的不透水表面构成城市的基质景观,主导城市的景观格局与过程,体现了城市地表覆被的典型特征,因此常用于监测城市地表覆被的变化过程^[12]。随着城市化过程中地表覆被变化的生态环境效应研究的日益深入,不透水表面指数(Impervious Surface Area,简称ISA),因其具有明确的物理意义,既可以有效表征城市地表覆被变化、度量城市化程度,又能与生态环境变化进行关联^[13],逐渐成为城市地表覆被变化监测、城市扩展模拟以及城市生态环境研究的重要参数而广泛应用^[14]。

作为LUCC环境效应的重要研究内容,城市化过程的水环境效应对于从宏观上调控城市化过程,降低城市化过程的水环境污染具有重要的理论和实践意义。鉴于不透水表面指数对于城市地表覆被变化具备良好的指示功能,本文以不透水表面表征城市化过程,梳理城市化过程对水环境效应的影

收稿日期:2010-10; 修订日期:2011-01.

基金项目:农业部资源遥感与数字农业重点开放实验室开放课题项目;国家自然科学基金项目(40801066)。

作者简介:刘珍环(1982-),男,江西泰和人,博士。主要从事景观生态与土地利用、城市化的生态环境效应研究。

E-mail: zhenhuanliu@gmail.com

通讯作者:彭建. E-mail: jianpeng@urban.pku.edu.cn

响机制,总结和归纳城市不透水表面的水环境效应研究的核心内容与主要方法,提出当前城市化过程的水环境效应研究所面临的诸多难点,并对未来的研究趋势进行展望。

2 不透水表面影响水环境的机制

2.1 不透水表面对城市水文的影响机制

城市化过程通过改变地表覆被状况,对城市水文循环产生间接影响。Backer和Braun^[15]认为城市景观影响水文特征,主要表现为水文循环过程中对竖向的蒸散发与下渗以及横向的地表径流与壤中流等水文过程的影响。其中,不透水表面作为水文循环中最重要的地表参数,对城市水文循环过程产生影响主要表现在以下3个方面:

(1) 短期水文效应。城市不透水表面变化的短期水文效应表现为对次降雨径流关系的影响。UNESCO^[16]的研究指出,城市化过程引起的水文效应中,最为突出的是下渗量减少及洪峰流量增大。袁艺等^[17]以深圳市布吉河流域为例,通过监测城市地区小流域,建立了城市不透水表面与城市水文变化之间的影响关系,应用水文模拟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分析,认为城市扩展导致的不透水表面增加是导致洪峰提前及降雨下渗量减少的主要原因。Kauffman等^[18]利用观测数据研究了美国Delaware地区的19个小流域的基流量与不透水表面的关系,认为不透水表面的增加降低了基流量。因此可以看出,由于不透水表面的阻隔作用,降水落到城市地面无法及时下渗,将迅速转化为地表径流,从而加大径流量,加快径流汇集,缩短径流历时,甚至迅速形成洪峰,形成洪水灾害^[19]。

(2) 长期水文效应。在长时间(年际)尺度上,城市化的水文效应表现为城市流域的基流量减少,总径流量增加。不透水表面地区增大了径流量及温度,增加了径流中的沉积物及污染物数量以及自然景观的破碎度^[20],因此城市化的水文效应常常关注地表覆被变化导致的洪水峰值变化、总径流量、基流流量、径流系数、雨洪过程线、洪峰大流量频率以及地表下渗水量等水文指标。Weng^[21]运用RS及GIS集成研究珠江三角洲地区城市扩展对地表径流的影响,认为城市不透水表面增长加大了珠江流域

的总径流量。郑璟等^[22]以深圳市布吉河为例,模拟了不同土地利用条件下的流域水文过程,研究了长时期城市土地利用变化对流域水文的影响,认为建设用地的增加导致了流域蒸散发量、土壤水含量和地下径流深度都有不同程度的减少,而地表径流则有大幅增加。在长期水文变化研究中,主要建立的基于不透表面为参数的降雨径流关系,通过模拟不透水表面的变化情景,进而预测在年际尺度上,不透表面变化对水文的影响程度^[23]。

(3) 影响水文循环的反馈效应。快速城市化过程中,城市不透水表面大幅增加,改变了城市地表径流的时空模式及城市地区水文循环过程^[24,25],进而改变城市小流域的水量平衡状况,形成促进局部降雨增加的正反馈效应,以及城市地区局部蒸散发减少的负反馈效应^[26]。由于大面积不透水表面的存在,改变了城市局部小气候,形成的蒸发蒸腾不同于自然过程,干扰了水文循环过程。而在城市地区不透水表面的增加,也容易形成局部高温现象,影响城市局地气候,形成热岛效应和雨岛效应,增加城市地区降水,促进蒸散发循环,加剧城市径流^[27-28]。

2.2 不透水表面对城市水质的影响机制

国外城市化过程的水环境效应研究始于20世纪70年代,从土地利用对河流水质的影响,逐步过渡到土地利用对城市地表径流污染特征、场次暴雨污染负荷以及长期土地利用变化对非点源污染负荷及水生生态系统响应等方面^[29-34]。我国城市化过程的水环境效应研究起步较晚,随着对北京、上海、武汉、杭州及深圳等大城市的非点源污染进行监测和模拟^[35-39],开始调查城区非点源污染的性质,并借鉴移植国外污染负荷的模型研究。但由于监测数据难以获取,同时缺少对长期水质效应的关注,研究成果仅限于短期的降雨径流污染机制^[40-41],而甚少涉及城市化过程的长期水环境变化响应。

在城市地区,不透水表面变化导致的水质变化主要表现为非点源污染负荷^[42],通过径流携带大量的沉积物、营养污染物、重金属污染物,加重了城市河流的非点源污染问题^[26,43-44]。非点源污染的形成不仅与物质来源有关,还与流域的土壤特征、土地覆被的类型及其空间分布特征有关,形成地表径流时还受到土壤侵蚀过程、降雨过程、地表及地下水文过程的影响^[45];而在城市地区非点源污染的形成

主要与两个因素有关,即降雨径流关系和以不透水表面为代表的地表覆被参数。城市化过程的水质效应根据径流影响,同样分为短期效应和长期效应。其中,短期效应是指城市地表快速变化下的城市次降雨径流污染形成机制,主要为氮、磷以及重金属等依附在地表的污染物随着降雨迅速进入河道,影响河流水质。魏建兵等^[41]研究了深圳市石岩水库流域的城市化对次降雨形成径流水质的影响,通过每次降雨时的水质监测数据分析,认为城市建设用地扩张给自然流域径流水质带来严重的影响;长期效应是指区域城市化过程对城市饮用水源地水质、城市非点源污染负荷的贡献及城市过境水质退化的影响机制^[46]。不同的不透水表面盖度对水质变化的作用不同,随着盖度的增长和不透水面积的增加,水质受到的非点源污染负荷愈发严重^[47]。

3 城市不透水表面水环境效应的研究方法

城市化过程导致的水文水质影响是近几十年来水文学、生态学、地理学、土壤学及环境科学等学科的研究热点。在研究方法上,早期主要关注监测、取样和模拟实验^[48],但系统地运用模型模拟城市化对水文水质的影响尚未形成理想的城市水文水质模型^[49]。国外在长期系统监测和模拟的基础上,出现了许多的水质模型,但这些模型往往是构建大流域或者流域内景观以非城市景观为主的流域,很少专门针对城市地区的水文水质模型,很多现在运用于城市地区的水文水质模型都是通过改进参数等^[50]方法从已有的土地利用类型为基础的模型上改进而来,缺乏城市地区的适用性检验。因此,城市化过程的水环境效应研究多基于长时间序列的城市不透水表面变化与水质长期监测数据进行动态分析^[51],或以不透水表面作为地表覆被参

数,通过变化情景模拟方法,探讨不透水表面对水质的影响^[52]。而我国关于水文水质的模型当前还处于借鉴国外模型的经验阶段,专门针对城市地区的水文水质监测和分析刚刚受到重视^[53],尚未有专门针对城市地区的水文水质模型。中国的城市化过程与国外相比较具有明显的差异特征^[54],因而研究针对中国城市化过程的水文水质模型具有重要意义。

表1所列的是当前在城市地区常用的几种水文水质模拟模型。这些模型各有优缺点,因此在具体应用时需要根据城市化对水质的影响机制作出相应选择。综合而言,研究短时间内城市地区的径流污染输出影响的主要是暴雨径流污染模型,以SWMM(Storm Water Management Model,简称SWMM)为代表,研究不同时间尺度下降雨事件发生后,城市流域河道的水质指标变化过程^[55],SWMM最新版SWMM5.0由水文、水力和水质3个模块组成。由于水质模拟模型需要设置许多参数,且很多参数本身具有很大的不确定性,对模拟的结果的不确定也有很大的影响^[23,56-58],可以模拟一次或连续多次降雨的城市径流污染,需要的地表覆被参数主要是不透水表面^[59]。董欣等^[60]应用SWMM模型在城市不透水区进行了中国城市区的地表径流的参数识别与验证。

研究长时间尺度上城市化导致的水文水质效应,以长期水文影响模型L-THIA(Long-Term Hydrologic Impact Assessment Model)、SWAT(Soil and Water Assessment Tool),HSPF(Hydrologic Simulation Program-Fortran)等模型为代表。其中,L-THIA模型常用于模拟城市地区30年以上的土地利用变化的水文水质效应,最新的模型已可用不透表面指数作为城市地表覆被参数。杨柳等^[36]以武汉汉阳地区为例,针对城市非点源污染负荷问题,应用L-LHIA模型模拟了城市不同土地利用的污染负

表1 城市水文水质模型比较

Tab.1 Comparison of urban hydrological and water quality models

模型名称	研究重点	研究对象	模型优势	主要缺陷
SWAT2005	土地利用变化的长期影响	营养物负荷、非点源污染负荷估算	用于较大流域、长时间序列的连续模拟计算;城市地区的长期效应模拟	需要参数多
HSPF	径流冲刷侵蚀和沉积作用	氮、磷、农药等	对一般的污染物和有毒有机污染物均可以进行模拟,考虑了复杂的污染物平衡	需要参数多,不专门针对城市地区
L-THIA	土地利用变化的长期影响	氮、磷、有机污染物等	参数简单,可以分析较长时间序列如30年以上的土地利用变化的水文效应	污染负荷模拟属经验值,难以推广到除美国外的其他地区
SWMM	城市暴雨径流污染的程度	营养盐、固体颗粒、重金属	可以模拟连续或一次雨过程	难以模拟长时期,特别是土地利用变化影响下的污染负荷

荷。Bhaduri^[4]应用L-THIA模型模拟了美国印第安那州的印第安纳波利斯地区的1973、1984及1991年的土地利用变化情景导致的年平均径流量及非点源污染负荷(NPS),结果表明1973-1991年间,城市不透水表面18%的增加导致增长了80%的年均径流量,铅(Pb)、锌(Zn)及铜(Cu)的年均污染负荷增长50%,而农用地的流失导致营养物(氮及磷)反而下降了15%;SWAT模型则是一个综合的流域管理模型,专门有一个模块用于模拟城市水文及城市非点源污染负荷,其中有关城市地表的参数,也需要将土地利用类型转换为不透水表面盖度,进而模拟其影响,目前有关不透水表面盖度的遥感获取方法越来越受到研究的青睐,,将直接遥感方法获取的不透水表面盖度作为模型参数已受到模型应用者的关注^[61]。郑璟等^[62]利用SWAT模型模拟了深圳市的水文变化受城市用地扩展的影响程度;而HSPF模型既可以模拟长时间序列的水文水质变化,也可模拟短时间尺度上的变化过程。例如,梅立永等^[63]将HSPF模型运用于深圳市高度城市化的小流域西丽水库流域,认为非点源是造成水库水质污染的主要原因。

4 城市不透水表面的水环境效应研究展望

在过去一段时期,尽管城市不透水表面的水环境效应研究在定量分析与模拟方面取得了诸多有意义的进展,但仍有许多问题有待深入探讨:

(1) 在研究方法上,尽管利用模型对非点源负荷进行模拟在国外已有了较大进展,但相关研究在国内依然略显不足,主要体现在两个方面:一方面,已有的研究多直接采用国外的研究模型,通过改进某些参数,应用于中国的具体案例中。由于不同研究区域的差异化背景,相关模型在不同区域是否存在普遍适用性存在疑问,造成国内的研究结论在可靠性方面遭受质疑。虽然国内研究已开始重视模型对于差异化地理背景的适用性问题,但无论是模型构建还是模型应用,都需要在未来进行更深入的探索^[20];另一方面,相比国外而言,国内的研究对于长期监测的经验关系模型探索不足。由于监测年限较短,监测频度不高,尚难取得令人信服的经验模型。未来需要在高频度及高密度的监测中建立

可靠的经验模型。

(2) 城市不透水表面对非点源污染的影响机制尚未明确。尽管土地利用/覆被变化是影响非点源污染的主要因素这一观点,已被学界普遍认可,然而诸如大气沉降、降雨条件以及雨污水排放等因素也会对非点源污染产生影响。完整梳理城市不透水表面对非点源污染的影响机制,未来需要纳入上述相关影响因素进行综合分析。

城市不透水表面作为影响城市水文循环主要控制因素^[64],经历了从最初仅作为土地利用/覆被变化的定性结果到成为城市土地利用/覆被变化与水环境之间相互关联的定量参数的过程。虽然对于不透水表面指数的用于城市水文水质研究依然存在一些难点^[61],如不透水表面指数的获取方法和参数的灵敏性检验等,但研究已经开始重视基于不透水表面指数的水文水质建模。《Journal of Hydrologic Engineering》于2009年专门组织专刊,探讨不透水表面在水文模拟监测中的应用,讨论了不透水表面指数在城市流域的基流量、洪峰流量、水文模型参数评估、水质模拟中的应用及城市规划方面的应用^[45]。不透水表面指数,因其具有简便地反映城市土地/覆被变化过程的特点,逐渐成为研究城市土地利用/覆被变化与水环境效应的重要桥梁。可以预见,不透水表面指数未来将会成为城市化过程水环境效应研究的重要参数,推动城市土地利用/覆被变化的水环境效应研究向参数简单化与精确化方向发展。

参考文献

- [1] 高超,朱继业,窦贻俭,等. 基于非点源污染控制的景观格局优化方法与原则. 生态学报, 2004, 24(1): 109-116.
- [2] Sun H, Hewins D B, Latini D, et al. Change in impervious surface area, flood frequency, and water chemistry with the Delaware River Basin during the past 50 years: initial results. 2005, <http://hdl.handle.net/1860/732>.
- [3] Endreny T A, Thomas K E. Improving estimates of simulated runoff quality and quantity using road-enhanced land cover data. Journal of Hydrologic Engineering, 2009, 14(4): 346-351.
- [4] Bhaduri B, Harbor J, Engel B, et al. Assessing watershed-scale, long-term hydrologic impacts of land-use change using a GIS-NPS Model. Environmental Management, 2000, 26(6): 643-658.

- [5] 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. *Physical Geography*, 2001, 22(2): 135-153.
- [6] Kim Y, Engel B A, Lim K J, et al. Runoff impacts of land-use change in Indian River Lagoon watershed. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2002, 7(3): 245-251.
- [7] 杨柳, 马克明, 郭青海, 等. 城市化对水体非点源污染的影响. *环境科学*, 2004, 25(6): 32-39.
- [8] USEPA. National water quality inventory, report to congress executive summary. Washington DC:USEPA, 1995.
- [9] Espy W H, Morgan C W, Masch F D. A study of some effects of urbanization on storm runoff from a small watershed. Report 23. Austin: Texas Water Development Board, 1966.
- [10] Stankowski S J. Population density as an indirect indicator of urban and suburban land-surface modifications. U. S. Geological Survey Professional Paper 800-B. Washington, DC: U.S. Geological Survey, 1972: 25-40.
- [11] Walsh C J. Urban impacts on the ecology of receiving waters: a framework for assessment, conservation and restoration. *Hydrobiologia*, 2000, 431(2): 107-114.
- [12] Weng Q. Remote Sensing of Impervious Surfaces. London: CRC Press Taylor & Francis, 2008.
- [13] Arnold C L, Gibbons C J. Impervious surface coverage: the emergence of a key environmental indicator. *Journal of the American Planning Association*, 1996, 62(2): 243-258.
- [14] Xian G, Homer C. Updating the 2001 National Land Cover Database Impervious Surface Products to 2006 using Landsat Imagery Change Detection Methods. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(8): 1676-1686.
- [15] Becker A, Braun P. Disaggregation, aggregation and spatial scaling in hydrological modeling. *Journal of Hydrology*, 1999, 217(3-4): 239-252.
- [16] UNESCO. Hydrological effects of urbanization. *Studies and Reports in Hydrology* 18, Paris, France, 1974.
- [17] 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. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2001, 37(1): 131-1361.
- [18] Kauffman G J, Belden A C, Vonck K J, et al. Link between impervious cover and base flow in the White Clay Creek Wild and Scenic Watershed in Delaware. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2009, 14(4): 324-335.
- [19] Shuster W D, Bonta J, Thurston H, et al. Impacts of impervious surface on watershed hydrology: A review. *Urban Water Journal*, 2005, 2(4): 263-275.
- [20] Carter R W. Magnitude and frequency of floods in suburban areas. U.S. Geological Survey Paper 424-B, B9-B11, Washington, DC: U.S. Geological Survey, 1961.
- [21] Weng Q. Modeling urban growth effects on surface runoff with the integration of remote sensing and GIS. *Environmental management*, 2001, 28(6): 737-748.
- [22] 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. *自然资源学报*, 2009, 24(9): 1561-1572.
- [23] Beihley R E, Kargar M, He Y. Effects of impervious area estimation methods on simulated peak discharge. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2009, 14(4): 388-398.
- [24] Bhaduri B. A Geographic Information System-based Model of the Long-Term Impact of Land Use Change on Non-point Source Pollution at Watershed Scale [D]. Purdue University, 1998.
- [25] Jennings D B, Jarnagin S T. Changes in anthropogenic impervious surfaces, precipitation and daily streamflow discharge: A historical perspective in a mid-Atlantic subwatershed. *Landscape Ecology*, 2002, 17(5): 471-489.
- [26] 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. *自然资源学报*, 2007, 22(2): 211-224.
- [27] 张小飞, 王仰麟, 吴健生, 等. 城市地域地表温度—植被盖度定量关系分析: 以深圳市为例, 2006, 25(3): 369-377.
- [28] 谢苗苗, 王仰麟, 李贵才. 基于亚像元分解的不透水表面与植被盖度空间分异测度. *资源科学*, 2009, 31(2): 257-264.
- [29] Sprague L A, Harned D A, Hall D W, et al. Response of stream chemistry during base flow to gradients of urbanization in selected locations across the conterminous United States, 2002-04: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2007-5083, 2007:133.
- [30] Sprague L A, Zuellig R E, Dupree J A. Effects of urbanization on stream ecosystems in the South Platte River Basin, Colorado and Wyoming, chap. A of Effects of urbanization on stream ecosystems in six metropolitan areas of the United States: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2006-5101-A, 2006: 139.
- [31] Gregory M B, Calhoun D L. Physical, chemical, and biological responses of streams to increasing watershed urbanization in the Piedmont Ecoregion of Georgia and Alabama, Chapter B of Effects of urbanization on stream ecosystems in six metropolitan areas of the United States: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2006-5101-B, 2007, 104 p., available online only at <http://pubs.usgs.gov/sir/2006/5101B/>;

- [32] Moring J B. Effects of urbanization on the chemical, physical, and biological characteristics of small Blackland Prairie streams in and near the Dallas-Fort Worth metropolitan area, Texas: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2006 - 5101 - C, 2009: 31.
- [33] Waite I R, Steven S, Carpenter K D, et al. Effects of urbanization on stream ecosystems in the Willamette River basin and surrounding area, Oregon and Washington: U. S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2006-5101-D, 2008: 62.
- [34] Ahearn D S, Sheibley R W, Dahlgren R A, et al. Land use and land cover influence on water quality in the last free-flowing river draining the western Sierra Nevada, California. *Journal of Hydrology*, 2005, 313(3-4): 234-247.
- [35] 王晓燕, 王晓峰, 汪清平, 等. 北京密云水库小流域非点源污染负荷估算. *地理科学*, 2004, 24(2): 227-231
- [36] 杨柳, 马克明, 郭青海, 等. 汉阳非点源污染控制区划. *环境科学*, 2006, 27(1): 31-36.
- [37] Yin Z, Walcott S, Kaplan B, et al. An analysis of the relationship between spatial patterns of water quality and urban development in Shanghai, China. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2005, 29(2):197-221.
- [38] 周海丽, 史培军, 徐小黎. 深圳城市化过程与水环境质量变化研究. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2003, 39(2): 273-279.
- [39] Ren W, Yang Z, Meligran J. Urbanization, land use, and water quality in Shanghai 1947-1996. *Environment International*, 2003, 29(5): 649- 659.
- [40] 黄金良, 杜鹏飞, 欧志丹, 等. 澳门城市小流域地表径流污染特征分析. *环境科学*, 2006, 27(9): 1753-1759.
- [41] 魏建兵, 曾辉, 秦华鹏, 等. 深圳石岩水库流域土地利用空间分异的水环境效应. *中国环境科学*, 2008, 28(10): 938-943.
- [42] 郭旭东, 陈利顶, 傅伯杰. 土地利用/土地覆被变化对区域生态环境的影响. *环境科学进展*, 1999, 7(6): 66-75.
- [43] Leopold L B. *Hydrology for Urban Land Planning: A Guidebook on the Effects of Urban Land Use*. USGS Circular 554, 1968.
- [44] Moglen. Hydrology and Impervious area. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2009, 14(4): 303-304.
- [45] 陈利顶, 傅伯杰, 徐建英, 等. 基于“源-汇”生态过程的景观格局识别方法. *生态学报*, 2003, 23(11): 2406-2413.
- [46] 郝芳华, 李春晖, 赵彦伟, 等. *流域水质模型与模拟*. 北京: 北京师范大学出版社, 2008.
- [47] 宫莹, 阮晓红, 胡晓东. 我国城市地表水环境非点源污染的研究进展. *中国给水排水*, 2003, 19(3): 21-23.
- [48] 于兴修, 杨桂山, 王瑶. 土地利用/覆被变化的环境效应研究进展与动向. *地理科学*, 2004, 24(5): 627-633.
- [49] Glick R H. Impacts of impervious cover and other factors on storm-water quality in Austin, Tex. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2009, 14(4): 316-323.
- [50] 贺宝根, 陈春根, 周乃晟. 城市化地区径流系数及其应用. *上海环境科学*, 2003, 22(7): 472-475.
- [51] 官宝红, 李君, 曾爱斌, 等. 杭州市城市土地利用对河流水质的影响. *资源科学*, 2008, 30(6): 857-863.
- [52] Mejía A I, Moglen G E. Spatial patterns of urban development from optimization of flood peaks and imperviousness-based measures. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2009, 14(4): 416-424.
- [53] 金卫斌, 李百炼. 流域尺度的景观-水质模型研究进展. *科技导报*, 2008, 26(7): 72-77.
- [54] 李双成, 赵志强, 王仰麟. 中国城市化过程及其资源与生态环境效应机制. *地理科学进展*, 2009, 28(1):63-70.
- [55] Rossman L A. *Storm water management model user's manual (Version 5.0)*, USEPA, EPA/600/R-05/040, 2009: 1-276.
- [56] Schoonover J, Lockaby B G, Pan S. Changes in chemical and physical properties of stream water across an urban-rural gradient in western Georgia. *Urban Ecosystems*, 2005, 8(1): 107-124.
- [57] 赵冬泉, 陈吉宁, 王浩正, 等. 城市降雨径流污染模拟的水质参数局部灵敏度分析. *环境科学学报*, 2009, 29(6): 1170-1177.
- [58] Brabec E A. Imperviousness and land-use policy: toward an effective approach to watershed planning. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2009, 14(4): 425-435.
- [59] Brabec E A, Schulte S, Richards P L. Impervious surfaces and water quality: a review of current literature and its implications for watershed planning. *Journal of Planning Literature*, 2002, 16(4): 499-514.
- [60] 董欣, 杜鹏飞, 李志一, 等. SWMM模型在城市不透水区地表径流模拟中的参数识别与验证. *环境科学*, 2008, 29(6): 1495-1501.
- [61] Schueler T R, Fraley-McNeal L, Cappiella K. Is impervious cover still important? Review of Recent Research. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2009, 14(4): 309-315.
- [62] 郑璟, 袁艺, 冯文利, 等. 土地利用变化对地表径流深度影响的模拟研究: 以深圳地区为例. *自然灾害学报*, 2005, 14(6): 77-82.
- [63] 梅立永, 赵智杰, 黄钱, 等. 小流域非点源污染模拟与仿真研究: 以HSPF模型在西丽水库流域应用为例. *农业环境科学学报*, 2007, 26(1): 64-70.
- [64] Pappas E A, Smith D R, Huang C, et al. Impervious surface impacts to runoff and sediment discharge under laboratory rainfall simulation. *Catena*, 2008, 72(1): 146-152.

Progress and Perspective of the Research on Hydrological Effects of Urban Impervious Surface on Water Environment

LIU Zhenhuan^{1,2}, LI You¹, PENG Jian^{1,2}

(1. Key Laboratory of Resources Remote Sensing & Digital Agriculture, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China;

2. College of Urban and Environmental Science, Laboratory for Earth Surface Processes, Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The environmental change impacted by rapid urbanization is a hot topic to global environmental change. In this area, research on water environmental effects of urbanization focuses on water quality, water quantity change and hydrological process and feedback disturbance. This paper reviews the mechanism between water environment change and urbanization, and summarizes the research issues we have face in this area, the methods we need, and how water environmental change responds to urban impervious surface. We also discuss the problems in the research of water environmental effects of urban impervious surface. Obviously, urbanization often directly changes natural land cover to impervious surface, but how to link urban land cover change with hydrological process and water quality is still a critical problem. The index of impervious surface area (ISA) was used to characterize land cover in urban area, and was a hot landscape indicator used to combine water environmental effects and urbanization processes. This paper indicates that the impacts of impervious surface on urban hydrology are mainly in two aspects. One is that it can increase the ratio of runoff and the amount of precipitation in a rainfall process in a short period, and the other is that it also can subsequently increase the higher runoff peaks and total volume of runoff in receiving waters and decrease the lag times in a long period. Changing natural land cover to impervious surface cover can obviously increase non-point pollution loadings and degrade water quality. In many urban areas, we depend on urban hydrological and water quality monitoring to link the relationship, and use urban hydrological and water quality model to simulate the impacts. However, the mechanism of impervious surface impact on urban water environment is still not clear. To solve this critical problem needs to know the impacting mechanism of non-point pollution loadings and to develop hydrological and water quality model suitable for urban areas. Overall, ISA is relatively simple for land planner and water quality administrator to use. This research indicates that ISA will be an important indicator to study water environmental effects of urbanization, and can also improve the modelling methods.

Key words: impervious surface cover, water quality effect, hydrological effect, land use/cover change

本文引用格式:

刘珍环, 李猷, 彭建. 城市不透水表面的水环境效应研究进展. 地理科学进展, 2011, 30(3): 275-281.