

国内外城市化水文效应研究综述

赵安周^{1,2}, 朱秀芳^{1,2}, 史培军¹, 潘耀忠^{1,2}

(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.北京师范大学资源学院, 北京 100875)

摘要:城市化等人类活动导致的土地利用方式的改变是城市生态学研究的重要内容之一, 而由于城市化进程造成的城市水文效应是其重要的研究方向。本文通过介绍城市化的内涵以及城市化水文效应国内外最新研究进展, 归纳了城市化导致的城市水文效应的主要研究方向和内容, 具体包括城市化对径流、蒸散发等各种水文要素及其水质的影响, 并针对目前城市化水文效应的研究方法——流域对比实验法、水文特征参数法和流域水文模型法进行了总结, 最后指出了当前城市化水文效应研究中存在的问题和不足, 对未来的研究趋势进行了展望。

关键字:城市化; 水文效应; 进展; 方法

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2013)05-0016-07

1 城市化的内涵

城市化是 21 世纪人类社会经济发展的重要过程, 大量的人口涌进城市, 造成城市人口迅速增加是其突出的表现形式。发达国家的城市人口在 2030 年将达到 83%, 发展中国家的城市人口也将达到 56%^[1], 但是关于城市化的定义, 由于各个学科对其理解不一, 目前仍旧没有完整统一的定义。一般来说, 现代城市化的内涵是指伴随着城市人口的不断提高, 城市的建成区面积不断扩大, 地域景观发生改变, 市政设施不断完善, 最终使城市居民的生活方式、组织结构和文化氛围等发生改变^[2-3]。

2 城市化对水文水资源的影响

目前, 城市化对流域的水文水资源的影响主要表现在以下 3 个方面:

(1) 城市化带来的水资源危机。随着城市的不断发展, 城市的规模也越来越大, 城市人口迅速增加, 工业快速发展, 导致城市需水量的急剧增加, 尤其在北方缺水的城市地区, 水资源的供需矛盾更加突出, 引发城市“水荒”。城市为了解决水资源危机而超量开采地下水, 使地下水位下降, 地下水资源日趋枯竭, 进而造成地面沉降, 引发地下水漏斗区, 建筑物倾斜、倒塌、沉

陷, 地下管道破裂, 海水倒灌等恶果^[4]。

(2) 城市化对水体环境的影响。城市居民在生活中, 向外排放大量的生活污水。这些污水没有经过处理, 含有大量的有机物、有机磷、有机氮等污染物。工业生产的过程中也会产生大量的污染物, 如硫化物、氮氧化物等, 这些废弃物未经处理排放到城市的河流及其大气当中, 会造成城市严重的水体大气污染。再加上生活垃圾, 工业垃圾直接倾倒入河, 或其中污染物随降雨径流进入水体, 使城市水体污染更加严重。被污染的水域的水质变坏后, 水域的鱼虾不能生存, 危及城市生态环境, 影响城市的可持续发展。

(3) 城市化对水循环的影响。随着城市的不断扩张, 城市土地利用类型发生变化, 原本是森林草地的自然生态系统被硬质不透水地面取代, 导致其蒸散能力发生变化。一般来说, 随着森林被砍伐后会造成蒸散量的减少, 径流的增多, 其原因主要是由于森林被建筑用地取代后, 冠层的蒸腾量降低, 蒸散发的消耗量减少, 从而使产流量增加。城市的扩张还使原来土壤的疏松程度、孔隙度、透水性能等物理参数发生改变, 影响流域的产流汇流过程。

3 城市化水文水资源研究进展

最早的城市水文效应研究开始于 20 世纪 60 年

收稿日期: 2013-04-03

基金项目: 地表过程与资源生态国家重点实验室人才培养项目 (2013-RC-04)

作者简介: 赵安周 (1985-), 男, 河北邯郸人, 博士研究生, 主要从事土地覆盖变化的水文效应及其遥感应用方面的研究。E-mail: zhaoanzhou@126.com

通讯作者: 朱秀芳 (1982-), 女, 浙江天台人, 讲师, 主要从事土地利用土地覆盖变化和气候变化间的响应关系研究。E-mail: zhuxiufang@bnu.edu.cn

代,当时欧美发达国家城市迅速扩张,研究的内容主要集中在城市化对洪水峰值流动特征的改变、总径流的改变、水质的改变和水文设施的改变四个方面^[5]。目前城市水文效应的研究主要集中在土地利用/覆被变化对径流等水文要素、非点源污染负荷效应影响等方面^[6]。

3.1 城市化对水文要素的影响

在城市化的进程中,其最主要的改变就是城市地区不透水面积的增加,这种变化使降水的下渗量、截留量、蒸发量、基流和地下水位减少,从而影响流域的径流、蒸散、基流等水文指标。

在国外,Corbett^[7]等(1999)认为不透水性地面的增加与径流量存在线性关系,不透水地面控制着水的流速和泥沙含量。Seth Rose等^[8](2001)通过对美国乔治亚州的高度城市化流域、城市化不明显的流域和没有城市化的流域进行比较分析发现:城市化流域的峰流产生量要比其他非城市化地区和城市化不明显流域高30%以上,城市化明显流域的暴雨径流更加频繁,城市化流域的基流衰退常量比非城市化流域低35%~40%。Kalin等^[9](2006)通过研究发现,当一片林地的60%转换为商业用地和低密度的住宅用地时,流域的基流会减少31%。Wenming Nie等^[10](2011)以圣佩德罗河为例,定量分析了每种土地覆盖变化对水文过程的影响,结果发现,城市化进程对基流、下渗和蒸发量的减少贡献最大,而增加径流和蒸发量、减少下渗量对圣佩德罗河流域的水资源有消极的影响。J.-Y. Park等^[11](2011)以韩国的一个山区流域为例,分析了未来土地利用和气候变化对蒸散量、表面径流、地下水补给和河川径流的影响,预见随着未来气温的升高,森林面积的减少和城镇面积的增加,对流域的水文效应尤其是河流和表面径流存在本质的影响,认为在忠州市流域水资源规划中,应该利用土地利用变化和气候变化对水文效应的积极影响,减少消极影响。

在国内,李娜等^[12](2009)对西苕溪流域的径流进行模拟,发现城市扩张导致的不透水地面的增加是改变区域水文效应主要因素之一。许有鹏等^[13](2009)以长江三角洲地区的南苕溪流域为例,以GIS和RS为支撑,研究了城市发展对城市水循环和水文过程的影响,认为城市化的快速发展会导致流域径流深度、径流系数增加,河网密度减小,河流水质恶化等问题。刘颖^[14](2010)以淮河二级支流贾鲁河郑州段为例,对郑州市城市扩张引发的水文效应进行了模拟,分析了1990~2000年该流域的降雨径流的变化,并对郑州市

城市化进程对水文的影响进行了预测,针对郑州市新区的建设,提出科学的建议。郑璟等^[15](2010)利用SWAT模型模拟了不同土地利用条件下深圳市布吉河流域的水文过程,认为2005年的土地利用较1980年的土地利用相比,该流域的蒸散发量、土壤含水量和地下径流量分别减少了42.09mm、28.10mm和279.74mm,地表径流量增加了431.97mm,城市化进程造成的土地利用的变化对地表径流、蒸散发、土壤含水量和地下径流的年际波动影响较大。

3.2 城市化对水质的影响

城市在发展过程中会伴随着用水量不断增加,一般认为当径流量利用率超过20%时就会对水环境产生很大影响,超过50%时则会产生严重影响^[16]。

在国外,Richard D. Klein^[17](1979)定量分析了马里兰州皮埃蒙特省城市的扩张与河流水质之间的关系,发现当流域的不透水地面增加到12%时,河流水质恶化,但是直到不透水地面增加到30%,河流水质不会继续恶化。Al-Kharabsheh^[18](1999)对约旦的Wadi Kufanja流域的研究表明:严重污染的泉水位于定居人口多的区域,夏天的时候,水中的化学物质和生物成分将会增加。Wilson C O等^[19](2011)以德斯普兰斯河流域为例,预测了未来城市土地利用变化和气候变化对该流域表面水质的影响,并对未来十年的总悬浮颗粒和磷的浓度进行了估算,模拟的结果表明,夏季的时候,2020年磷的浓度将会比2010年高,预计到2030年将会有一个衰退;中等密度的居住区的发展会减少流域内总悬浮颗粒物的聚集,而商业区和工业区的发展将会使流域内磷的含量进一步增加。Jun Tu^[20](2013)以美国乔治亚州北部的流域为例,采用空间统计技术和地理加权回归的方法,对土地利用的四种类型(城镇用地、林地、耕地和湿地)与影响水质的参数(电导率、溶解氧、溶解营养盐、溶解有机碳)之间的关系进行了定量研究,认为城市化的进程对电导率、溶解营养盐等水质参数影响显著。

在国内,许多学者也对城市化进程造成的水质变化进行了大量研究,Wenwei Ren等^[21](2003)对上海市土地利用变化和水质之间的关系进行了初步探讨,认为快速的城市化导致水体质量的恶化,工业用地的大量增加是导致水体恶化的最主要原因。于开宁等^[22](2003)提出城市化对地下水的影响有正负两方面的效应,通过对石家庄城市化水平和地下水污染的定量分析表明,城市化改善了地下水水质,但是却加剧了地下水

盐的污染。刘引鸽等^[23](2005)采用 ROSS 评价指数的方法对宝鸡市地表水质监测资料进行了分析,认为城市化导致地表水质恶化。郎海鸥等^[24](2007)通过分析西安市城市化进程指标与水质监测指标的关系后,认为城市化进程是造成地表水水质污染的重要原因。尼瓦尔·买买提等^[25](2007)以喀什的吐曼河流域为例,应用 3S 技术和地表水污染综合指数法,分析了其城市化进程对城市水质的影响,结果表明城市化进程所导致的大气总悬浮颗粒的增加是导致水质污染的主要原因。Junying Wang 等^[26](2008)以上海市的城镇、郊区和农村为例,采用综合污染指数的方法研究了 1982~2005 年期间表面水质的变化,结果表明在市区和郊区由于环境政策和管理的加强,2005 年表面水质状况较 1982 年得到改善,但是在乡村地区表面水质变得更加恶劣,经济发展与表面水质呈现倒 U 型曲线的关系。董雅洁等^[27](2008)应用 SPSS 软件分析了珠江广州段的主要污染物检测指标同人口、工业之间的关系,表明人口增长、工业产值的增加对水质有负面影响。刘贤赵等^[28](2008)采用 GIS 的手段分析了烟台沿海区县城市化与地表水质的关系,认为城市建设用地比率和人口密度是影响城市水质的首要因素。叶许春等^[29](2009)以昆明市为例,采用 TM 影像与地下水水质监测资料对其城市化进程对孔隙水水质的影响进行了研究,认为城市化进程对地下水环境有着正负两方面的影响。吴晶晶等^[30](2011)通过分析上海市奉贤区的三期土地利用的数据发现,其建设用地、工业用地的增加与城市水质的正相关关系显著。城市化所导致的土地利用的变化是影响水质的重要原因。焦树林等^[31](2012)采用模糊数学方法对贵阳市南明河流的水质进行了综合评价分析,认为城市的发展对河流的水质安全具有显著的影响。郝敬锋等^[32](2012)通过构建城市化影响指数,对南京市城市化与湿地水质的相互关系进行了研究,认为城市化水平越高,其湿地的水质越差。

3.3 城市化对水体非点源污染的影响

非点源污染是指溶解性或固体废弃物等污染物在暴雨和径流的作用下,从非特定地点进入到河流、湖泊、水库等水体中而引发的水体污染^[33]。最早有关城市化对水质的影响研究始于 20 世纪 70 年代的美国、英国、荷兰等发达国家^[34]。城市化对非点源污染的影响主要体现在使非点源污染的“源”、“过程”和“汇”发生了变化^[35]。由于城市用地面积扩张,众多小河流被填没淤堵而消失,从而削弱了河流天然的蓄水排涝和纳污自

净能力,加上道路、停车场、商业用地等的不断增多,使城市不透水面积增大,改变了城市径流的速率和方向,进而使排入河流的污染负荷逐渐加大,河网水质不断恶化。J. Vaze 等^[36](2002)收集了墨尔本城市路面上 36d 的污染物特征,通过分析发现暴雨之后的晴天,道路表面污染物数量会急剧增加,但是之后几天道路面污染物的累计速度开始下降。国内许多学者都对城市非点源污染的进展进行了综述,例如张海荣等^[37](2011)从研究方法、国内外研究现状、城市非点源污染的管理和控制等方面对城市非点源污染进行了综述,指出城市非点源研究目前存在模型参数过多,模型过于复杂,对其转换机理的研究深度不够等问题,并对未来的发展进行了展望。孙恩呈等^[38](2012)对国内外非点源污染的研究进行了综述,认为国内应该在地表径流污染负荷和数学模型、非点源污染如何管理、地表径流污染控制装置及其如何收集利用地表径流等几方面加强研究。

4 城市化水文效应的研究方法

目前对于城市化水文效应的研究方法主要包括流域试验对比法、水文特征参数法和流域水文模拟法。

4.1 流域试验对比法

在水文效应研究的早期,大多数研究者采用流域试验对比法对流域水文过程进行模拟。该方法主要是建立试验流域,将未经过城市化影响的与试验区条件相似或者相同的流域作为参考流域,同试验区同时间段的水文要素进行对比,两者输出的差值即为城市化所造成的水文效应。这种方法又可以具体细分为平行流域对比分析法、单独流域法、控制流域法等多种方法。平行流域对比分析法是指选择除了植被之外水文条件相同或相似的几个流域,对水文要素进行比较分析^[39]。单独流域法是指对同一流域试验后的径流等水文参数与实验前相比较研究。控制流域法是指对条件相似的流域采用相同的方法进行平行水文观测,一段时间以后,将其中一个流域作为控制流域,其他流域作为实验流域,对比试验流域与控制流域的水文要素的变化,分析土地利用变化的水文效应^[40]。但是该方法由于所选取的试验区域较小,很难对大尺度流域的水文效应进行模拟,同时该方法只能得到一些经验的模型公式,这些公式模型只对该流域或者与该流域有着相同或相似条件的地区适用,缺乏具有普遍意义的理论模式。

4.2 水文特征参数法

所谓特征参数法是针对一个流域,选择较长的时

间段来反映城市化水文效用的特征参数,剔除其他因素的影响,从特征参数的变化趋势上评估城市化进程中的水文效应^[41]。径流系数、年径流变差系数、径流年内分配不均匀系数和洪水过程线等水文指标都可以用来反映由于城市化造成的流域土地利用类型的改变而引发的水文特征的改变。径流系数是指任意时间段内径流深度与同时间段内降水深度的比值,主要是流域下垫面因素对降水—径流关系的影响。城市化所导致的土地利用变化从较长时间尺度上来看,表现在流域水量平衡的蒸发分量上,因此用径流系数可以很好地反映城市化所导致的水文效应^[42]。傅伯杰^[43](1999)、王礼先^[44](2001)等许多学者利用该水文参数来评估由于土地利用变化所导致的水文效应。年径流系数是指年径流的标准差与径流的比值,反映历年的径流量与多年平均径流量的相对离散程度的大小^[45]。径流年内分配不均匀系数反映了径流分配的不均匀性;洪水过程线可以直接用来反映城市化导致土地利用变化对洪水的影响。

水文特征参数法在定量表达城市化等人类活动造

成的水文效应时操作相对简单,物理意义明确,可以很好地应用于下垫面均匀、降雨量和土地利用差异不大的流域,但是该方法仅是简单的数理统计模型,对水文效应的物理机制表达不清楚。同时由于城市化进程所造成的土地利用改变影响的水文过程十分复杂,仅仅从特征变量考虑,剔除其他影响因素的影响,很容易出现误判。

4.3 水文模型法

随着计算机技术的迅速发展,采用流域水文模型的方法来定量模拟、评估、预测城市化所造成的水文效应的影响越来越受到人们的关注。该方法满足流域水量平衡的原理,描述流域降雨径流形成的各种函数关系,构成一种物理结构或概念性结构^[46]。20世纪70年代,OnstadCA等^[47](1970)首先尝试运用水文模型来预测土地利用变化对径流的影响。目前,科研单位、政府部门已经发展了大量的流域水文模型,Singh等^[48](2002)列举了70余种流域水文模型;Elliott等^[49](2007)认为大约有40种流域水文模型是为水资源敏感的城市模拟径流而设计的。目前常用的水文模型如表1所示。

表1 常用的几种水文模型
Table1 The several commonly used hydrological model

模型名称	研发机构	研究对象	模型优势	模型缺点
HSPF	USEPA	综合模拟径流、土壤流失、污染物传输、河道水力等过程	考虑了复杂的污染物平衡,可以对一般的污染物和有毒有机污染物进行模拟	需要参数较多
MIKE SHE	DHI	径流的冲刷侵蚀作用	采用严格的水动力学瞬变偏微分方程描述水文过程,具有很好的物理基础	资料完备性和详细度要求较高
SWAT	USDA	流域尺度土地利用变化的长期影响	可以用于较大流域,连续长时间序列的模拟计算	需要参数较多
SWMM	USEPA	城市暴雨径流的污染	可以对一次或者连续的降雨过程进行模拟	难以对长时间序列进行模拟

这些模型中,有的可以模拟单次事件,有的可以模拟连续事件,每个模型都有各自的优缺点,在具体应用中需要根据城市发展对水文的影响机制做出相应的选择。例如:SWMM模型可以用来模拟城市某一单一降水事件或水质。王雯雯等^[50]利用SWMM模型对深圳市城市化前后和加入LID设施的不同情景的水文过程进行了模拟,结果表明城市化后流域洪峰量增大、洪峰时间提前、径流系数变大。SWAT模型是一个流域尺度的、日时间步长的连续时间模型,它的设计可以对无资料流域的水资源、泥沙、农业杀虫剂等方面进行预测,也可以有效的模拟长时间序列的数据。Latif Kalin等^[51](2009)发明了一种指数结合SWAT分布式水文模型来分析宾夕法尼亚东部城市化造成的径流影响。Wenming Nie等^[52](2011)采用SWAT水文模型和多元线性回归相结合的方法定量评价了圣佩德罗河流域

每种土地利用类型改变对水文要素的影响,认为城市化和豆科灌木植被的入侵是当地水资源的主要影响因素。HSDF模型可以用来模拟流域内长时间连续的水文水力过程、流域非点源污染以及点源污染的演进过程^[53]。Alarcon等^[54](2009)以墨西哥北部的Mobile Bay流域为例,利用HSDF模型对其水文过程进行了模拟。

水文模型具有很强的物理机制,结构复杂,模型设计的参数很多,为研究气候变化、人类活动与水资源之间的关系提供了一种很好的桥梁,而且可以较为准确的模拟流域的水文变化。许多流域水文模型在国外已经得到了很广泛的应用,但是该方法一般都需要较多的参数,而这些参数在不同的下垫面(地形、地貌、土壤、土地利用)下是不同的,需要准确测量,因此必定要消耗大量的人力物力。如果模型的参数不准确,即使模型结构合理,其模型模拟和预测的结果也会较差,不能

反映流域的真实情况。

综上所述,几种研究城市水文效应的方法都存在一定的缺陷,流域实验法适合于较小的流域;水文特征法适合于下垫面土地利用空间差异性较小、性质比较均一的流域;水文模型法需要对流域的水文变化的物理过程有深入的了解。为了克服单一方法的缺点,目前已经有研究开始采用水文模型法与传统的统计学方法相结合^[55]、多种水文模型进行耦合^[56]、多个水文模型对一个流域进行比对研究^[57]等综合方法对城市化的水文效应进行探索。

5 存在问题

过去的一段时间内,尽管城市化水文效应的研究取得了长足的进步,但从国内外的研究进展来看还存在以下不足和难点:

(1)对于城市化水文效应的研究,水文模型法较流域试验对比法和水文特征参数法更具有优势,但是水文模型仍有以下问题需要改进:①参数的不确定问题,一般来说,水文模型法所需要的参数较多,如何准确确定模型的参数仍需要进一步研究;②流域出口的径流量数据一直是水文模型率定和验证的重要数据来源,仅仅应用流域出口等单个位置的径流资料来率定和验证整个复杂水文模型是远远不够的。

(2)城市水质污染的原因尚不确定。虽然人类活动及其土地利用/覆盖变化是导致城市水污染的重要原因已经被广大学者所认可,但是诸如大气沉降、雨水污染等因素也是造成城市水质污染的原因,未来需要将二者综合起来考虑对城市水质的影响。

(3)在定量研究气候因素和城市化导致的土地覆被的改变对城市水文的贡献率时,由于所选取的研究方法及其流域尺度的不同,其结论往往会存在一定的差异,未来应寻求更为准确的方法来区分由气候变化和城市化所导致的水文变化效应的各自贡献率。

(4)GIS和RS等新的技术手段为城市水文效应的研究提供了新的思路,极大的促进了该领域的发展,这些新的技术手段为流域水文过程模拟提供了DEM、土地利用、土壤等数据,相信随着学科之间联系的加强,城市水文效应的研究的结果也会日益准确,必将会对城市水资源管理者提供决策依据。

参考文献:

[1] Cohen, J.E. Human population: the next half century [J]. Science, 2003,302:1172-1175.

- [2] Hiroshi Morikawa. Urbanization and Urban System [M]. Daming-tang Press, 1989.
- [3] Pacione M. Urban Geography: A Global Perspective[M]. Routledge, 2009.
- [4] 冉茂玉.论城市化的水文效应[J].四川师范大学学报(自然科学版), 2000 (4):436-439.(RAN Maoyu. Discussion on hydrologic effect of urbanization[J]. Journal of Sichuan Normal University (Natural Science), 2000, (4):436-439.(in Chinese))
- [5] Leopold, L.B. Hydrology for urban land planning: a guide book on the hydrologic effects of urban landuse [R]. US Geological Survey Circular, 1968:554.
- [6] 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. Progress and perspective of the research on hydrological effects of urban impervious surface on water environment[J]. Progress in Geography, 2011,30(3):275-281. (in Chinese))
- [7] Corbett D R, Chanton J, Burnett W, et al. Patterns of groundwater discharge into Florida bay[J]. Limnology and Oceanography, 1999,44 (4): 1045-1055.
- [8] Seth Rose, Norman E. Peters. Effects of urbanization on streamflow in the Atlanta area (Georgia, USA): a comparative hydrological Approach[J]. Hydrological Processes,2001,15(8):1141-1157.
- [9] Kalin, Latif,Hantush, Mohamed M. Hydrologic modeling of an eastern Pennsylvania watershed with NEXRAD and rain gauge data[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2006,11(6):555-569.
- [10] Wenming Nie,Yongping Yuan,William Kepner. Assessing impacts of landuse and landcover changes on hydrology for the upper San Pedro watershed[J]. Journal of Hydrology, 2011,407(1-4):105-114.
- [11] J. Y. Park, M. J. Park, H.K. Joh. Assessment of MIROC3.2 hires climate and clues land use change impacts on water hydrology using SWAT [J]. American Society of Agricultural and Biological Engineers ,2011, 54(5):1713-1724.
- [12] 李娜,许有鹏,郭怀成. 西苕溪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. (in Chinese))
- [13] 许有鹏,丁瑾佳,陈莹.长江三角洲地区城市化的水文效应研究[J]. 水利水运工程学报, 2009,(4):67-73.(XU Youpeng, DING Jinjia, CHEN Ying. Impacts of urbanization on hydrology in the Yangtze River delta[J]. Hydro-Science and Engineering, 2009,(4):67-73. (in Chinese))
- [14] 刘颖.贾鲁河流域郑州城市化建设水文响应研究[D].北京:清华大学, 2010.(LIU Ying. Environmental Hydrology Effects of Urbanization on Jialu River[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010. (in Chinese))
- [15] 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. (ZHENG Jing, FANG Weihua,SHI Pei-jun, 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 Re-

- sources, 2009,24(9):1560–1572. (in Chinese))
- [16] 姜文来.21 世纪中国水资源安全战略研究[J].中国水利,2000,(8):41–44.(JIANG Wenlai. Research on water resources safety strategy of China in the 21st century [J]. China Water Resources, 2000,(8): 41–44. (in Chinese))
- [17] Richard D. Klein. Urbanization and stream quality impairment[J]. Water Resources Bulletin, 1979, 15(4): 948–962.
- [18] Atef A. Al-Kharabsheh. Influence of urbanization on water quality at Wadi Kufranja basin (Jordan)[J]. Journal of Arid Environments, 1999,43(1):79–89.
- [19] Wilson C O, Weng Q. Simulating the impacts of future land use and climate changes on surface water quality in the Des Plaines River watershed, Chicago Metropolitan Statistical Area, Illinois[J]. Science of the Total Environment, 2011, 409(20): 4387–4405.
- [20] Jun Tu. Spatial Variations in the relationships between land use and water quality across an urbanization gradient[J]. Environmental Management, 2013,51(1):1–17.
- [21] Wenwei Ren.,Yang Zhong,John Meligrana, et al. Urbanization, land use, and water quality in Shanghai 1947–1996 [J]. Environment International, 2003, 29(5):649–659.
- [22] 于开宁,万力,都沁军.城市化影响地下水水质的正负效应[J].中国地质大学学报, 2003,28(3):333–336.(YU Kaining,WAN Li, DU Qinjun. Positive and negative effects of urbanization on groundwater quality[J]. Journal of China University of Geosciences, 2003,28 (3): 333–336. (in Chinese))
- [23] 刘引鸽, 宋军林. 城市化对地表水质的影响研究—以宝鸡市为例[J]. 水文, 2005,25(2):20–23.(LIU Yingge, SONG Junlin. The influence of urbanization on surface water quality—case of Baoji City in Shannxi Province[J]. Journal of China Hydrology, 2005,25(2):20–23. (in Chinese))
- [24] 郎海鸥,周杰.西安市地表水水质变化与城市化过程的关系[J]. 干旱区研究, 2007,24 (4):460–465.(LANG Haiou, ZHOU Jie. Study on the relationship between the change of surface water quality and the urbanization process in Xi'an City [J]. Arid Zone Research, 2007,24(4):460–465. (in Chinese))
- [25] 尼瓦尔·买买提,麦麦提吐尔逊·艾则孜,海米提·依米提.干旱区城市化对城市内河水质的影响研究—以吐曼河为例[J].水土保持研究, 2007,14 (3):188–191.(Anwar Mohammed, Mamattursun Eziz, Hamid·Yimit. Study on the influence of urbanization on water quality of urban river of arid zone—in the case of Tuman River [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007,14(3):188–191. (in Chinese))
- [26] Junying Wang, Liangjun Da, Kun Song et al. Temporal variations of surface water quality in urban, suburban and rural areas during rapid urbanization in Shanghai, China[J]. Environmental Pollution, 2008, 152(2):387–393.
- [27] 董雅洁,梅亚东.城市化对广州地表水质的影响[J].中国农村水利水电, 2008,(2):48–50.(DONG Yajie, MEI Yadong. The influence of urbanization on the surface water quality in Guangzhou [J]. China Rural Water and Hydropower, 2008,(2):48–50. (in Chinese))
- [28] 刘贤赵,王巍,王学山,等. 基于缓冲区分析的城市化与地表水质关系研究—以烟台沿海区县为例[J]. 测绘科学, 2008,33(1):163–166. (LIU Xianzhao,WANG Wei,WANG Xueshan, et al. A study on the relationship between urbanization and surface water quality based on GIS technique—a case study of coastal counties in Yantai[J]. Science of Surveying and Mapping, 2008,33(1):163–166. (in Chinese))
- [29] 叶许春,张奇,宋学良,等.昆明盆地城市化的孔隙水水质响应[J].自然资源学报, 2009,24 (4):640–648.(YE Xuchun, ZHANG Qi, SONG Xueliang, et al. Pore water quality response to urbanization in Kunming basin[J]. Journal of Natural Resources, 2009,24(4):640–648. (in Chinese))
- [30] 吴晶晶, 蔡永立. 快速城市化地区土地利用变化及其对水质的影响—以上海市奉贤区为例 [J]. 安徽农业科学,2011,39 (26):16208–16211. (WU Jingjing, CAI Yongli. Land use change and its impact on water quality in the rapidly urbanized area[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011,39(26):16208–16211. (in Chinese))
- [31] 焦树林,张婷,易旭敏.喀斯特高原城市化对贵阳城区河流水质安全状态的影响分析 [J]. 云南地理环境研究, 2012,24 (1):1–6.(JIAO Shulin, ZHANG Ting,YI Xumin. The impact assessment on the urbanization to the water quality security of the urban river in KARST Plateau, Guiyang City area [J]. Yunnan Geographic Environment Research, 2012,24(1):1–6. (in Chinese))
- [32] 郝敬锋,刘红玉,胡和兵,等.南京市湿地水质对城市化影响强度的响应研究 [J]. 环境科学, 2012, 33 (7): 2259–2264. (HAO Jingfeng, LIU Hongyu,,HU Hebing, et al. Responses of wetland water quality to influence the strengthness of urbanization in Nanjing, China [J]. Environmental Science, 2012, 33(7): 2259–2264. (in Chinese))
- [33] 贺维生,傅伯杰,陈利顶.非点源污染的管理及控制[J].环境科学, 1998,19(5): 87–91. (HE Chansheng,FU Bojie, CHEN Liding. Non-point source pollution control and management [J]. Environmental Science, 1998, 19(5): 87–91. (in Chinese))
- [34] Browne F X. Nonpoint sources[J]. WPCF, 1978,50(6):1665–1674.
- [35] 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 waters non-point source pollution[J]. Environmental Science, 2004,25(6):32–39. (in Chinese))
- [36] J. Vaze Francis. H.S. Chiew. Experimental study of pollutant accumulation on an urban road surface[J]. Urban Water, 2002,4:379 – 389.
- [37] 张海荣,马静,城市非点源污染研究进展[J].北方环境, 2011,23(3): 95–98.(ZHANG Hairong, Ma Jing. Advances of research on urban non-point source pollution[J]. Northern Environment, 2011,23 (3):95–98. (in Chinese))
- [38] 孙恩呈,周国明,张慧.国内外城市非点源污染研究进展[J].天津化工, 2012,26 (1):10–13.(SONG Encheng, ZHOU Guoming, ZAHNG Hui. Review in non-point source pollution at home and abroad[J].Tianjin Chemical Industry, 2012,26(1):10–13. (in Chinese))
- [39] 穆兴民,王文龙,徐学选.黄土高原沟壑区水土保持对小流域地表径流的影响 [J]. 水利学报, 1999,(2): 71–75.(MU Xingmin, WANG Wenlong, XU Xuexuan. The influence of the soil and water conservation on the surface runoff in the watersheds in the gully plateau region of Loess Plateau[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999,(2):71–75. (in Chinese))

- [40] Bari, M.A., Smettem, K.R. & Sivapalan, M. Understanding changes in annual runoff following landuse changes: a systematic data-based approach[J]. *Hydrological Processes*, 2005, 19(13): 2463–2479.
- [41] 张蕾娜, 李秀彬. 用水文特征参数变化表征人类活动的水文效应初探—以云州水库流域为例 [J]. *资源科学*, 2004, 26 (2): 62–67. (ZHANG Leina, LI Xiubin. Assessing hydrological effects of human activities by hydrological characteristic parameters: a case study in the Yunzhou reservoir basin [J]. *Resources Science*, 2004, 26(2): 62–67. (in Chinese))
- [42] Conway, D. Understanding the hydrological impacts of land-cover and land-use change[J]. *IHDP Update*, 2001, (1): 5–6.
- [43] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 黄士丘陵. 小流域土地利用变化对生态环境的影响—以延安市羊圈沟流域为例 [J]. *地理学报*, 1999, 54(3): 241–246. (FU Bojie CHEN Liding MA Keming. The effect of land use change on the regional environment in the Yangjuangou catchment in the Loess Plateau of China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54(3): 241–246. (in Chinese))
- [44] 王礼先, 张志强. 干旱地区森林对流域径流的影响[J]. *自然资源学报*, 2001, 16(5): 439–444. (WANG Lixian, ZHANG Zhiqiang. Impacts of forest vegetation on watershed runoff in dryland areas[J]. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5): 439–444. (in Chinese))
- [45] 黄锡荃. 水文学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993. (HUANG Xiquan. *Hydrology*[M]. Beijing: Higher Education Press, 1993. (in Chinese))
- [46] 袁作新. 流域水文模型 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1988. (YUAN Zuoxin. *Hydrologic Model of Basin*[M]. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press, 1988. (in Chinese))
- [47] Onstad CA, Jamieson DG. Modeling the effects of landuse modifications on runoff[J]. *Water Resource Research*, 1970, 6(5): 1287–1295.
- [48] Singh, V.P., Woolhiser, D.A. Mathematical modeling of watershed hydrology[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2002, 7 (4): 270–292.
- [49] Elliott A H, Trowsdale S A. A review of models for low impact urban stormwater drainage[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2007, 22(3): 394–405.
- [50] 王雯雯, 赵智杰, 秦华鹏. 基于 SWMM 的低冲击开发模式水文效应模拟评估 [J]. *北京大学学报 (自然科学版)*, 2012, 48 (2): 303–309. (WANG Wenwen, ZHAO Zhijie, QIN Huapeng. Hydrological effect assessment of low impact development for urbanized area based on SWMM [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2012, 48(2): 303–309. (in Chinese))
- [51] Latif Kalin, Mohamed, M. Hantush. An auxiliary method to reduce potential adverse impacts of projected land developments: subwatershed prioritization[J]. *Environmental Management*, 2009, 43(2): 311–325.
- [52] Wenming Nie, Yongping Yuan, William Kepner et al. Assessing impacts of landuse and landcover changes on hydrology for the upper San Pedro watershed [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 407 (1–4): 105–114.
- [53] Leavesley GH, Lichty RW, Troutman BM. Precipitation-runoff modeling system—user's manual [R]. Washington DC: USGS Water Resources Investigative Report No. 83–4238, U. S. Geological Survey, 1983.
- [54] Alarcon V J, WcaAnally W, Diaz-Ramirez J, et al. A hydrological model of the mobile river watershed, southeastern USA [J]. *Computational Methods in Science and Engineering*, 2009, 1148(1): 641–645.
- [55] Jens Kristian Lrup, Jens Christian Refsgaard, Dominic Mazvimavi. Assessing the effect of land use change on catchment runoff by combined use of statistical tests and hydrological modelling: case studies from Zimbabwe [J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 205, (3–4): 147–163.
- [56] Chen B. Using an Integrated Linkage Method to Predict Hydrological Responses of a Mixed Land Use Watershed [D]. Doctoral Thesis, 2003.
- [57] Mark S Johnson, William F Coon, Vishal K Mehta, et al. Application of two hydrologic models with different runoff mechanisms to a hill slope dominated watershed in the northeastern US: a comparison of HSPF and SMR [J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 284(1–4): 57–76.

Review on Hydrological Response to Urbanization at Home and Abroad

ZHAO Anzhou^{1,2}, ZHU Xiufang^{1,2}, SHI Peijun¹, PAN Yaozhong^{1,2}

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

2. College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The change of land utilization type caused by human activities such as the urbanization is one of major content in urban ecology study. Urban hydrology effect created by the urbanization process just belongs to its significant study fields. According to the introduction to urbanization essence and new research progress of urbanization hydrological effects in China and other countries, this paper firstly summarized the main study direction and content of urban hydrology effect, specifically including utilization's impact on various hydrologic features and water quality, secondly made conclusions on study methods of urbanization hydrological effects which are the method of basin contrast experiment, the method of hydrology characteristic parameter and watershed hydrological model, and thirdly clearly showed problems and shortages in study of urbanization hydrological effects, and finally speculated on the future study trends.

Key words: urbanization; hydrologic effect; progress; method