

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2019.02.002

海绵城市建设对区域地下水资源的补给效应

杜新强^{1,2}, 贾思达¹, 方敏¹, 冶雪艳^{1,2}

(1. 吉林大学新能源与环境学院, 吉林 长春 130021; 2. 吉林大学地下水资源与环境教育部重点实验室, 吉林 长春 130021)

摘要:为探究海绵城市建设对区域地下水资源的补给效应,以某海绵城市建设实验区为例,采用 Visual MODFlow 软件分别对海绵城市不同建设方案条件下的地下水水位动态进行模拟预测。结果表明:城市建设增大了地表不透水面积,使地下水补给量减少,导致区域地下水水位普遍下降,且下降幅度受下垫面变化特征的影响;海绵城市建设对地下水资源的补给作用与低影响开发工程设施的类型有关,也与其规模有关,仅当海绵城市建设达到一定规模之后才能对区域地下水资源产生较为明显的补给效应。

关键词:海绵城市;地下水;补给效应;城市雨洪水;低影响开发

中图分类号:TV211.1⁺² **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2019)02-0013-05

Recharge effect of sponge city construction on regional groundwater resources// DU Xinqiang^{1,2}, JIA Sida¹, FANG Min¹, YE Xueyan^{1,2} (1. College of New Energy and Environment, Jilin University, Changchun 130021, China; 2. Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130021, China)

Abstract: In order to study the recharge effect of sponge city construction on regional groundwater resources, taking an experimental sponge city construction area as an example, the groundwater level dynamics of sponge city under different construction schemes were simulated and predicted by using Visual MODFlow software. The results show that urban construction enlarges the impervious surface area and reduces the groundwater recharge, which leads to the general decline of regional groundwater level, and the extent of decline is affected by the characteristics of underlying surface changes. The recharge effect of sponge city construction on groundwater resources is related to the type and scale of low impact development engineering facilities. Only when the construction of sponge city reaches a certain scale can the recharge effect on regional groundwater resources be more obvious.

Key words: sponge city; groundwater; recharge effect; urban stormwater; low impact development

我国作为世界最大的发展中国家,改革开放以来城市化发展迅速。城市化的不断发展使不透水下垫面面积日益增加,雨水下渗能力降低,流域中原有雨水滞留能力锐减,改变了降水-径流特征^[1],使径流系数增大^[2]、市政排水系统负荷加重^[3],从而导致城市雨洪内涝灾害频发。在城市雨洪管理方面,国际上先后出现了最佳管理措施(best management practices, BMPs)、低影响开发(low impact development, LID)、可持续城市排水系统(sustainable urban drainage system, SUDS)、绿色基础设施(green infrastructure, GI)^[4]等一系列理念与技术措施。我国住房和城乡建设部于2014年10月

颁布了《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》(以下简称《指南》),启动了海绵城市规划与建设的序幕。2015年10月,国务院办公厅印发了《关于推进海绵城市建设的指导意见》,将海绵城市建设上升至国家战略的高度^[5]。至2018年,我国已开展了两个批次、共计30个城市的国家级海绵城市建设试点^[6]。

雨水渗透的实现是海绵城市建设的核心工作内容之一^[7-11]。LID设施中的透水砖铺装、下沉式绿地、生物滞留设施、渗透塘、渗井、干式植草沟和渗管(渠)等均具有较强的补充地下水的功能。宋子龙^[12]论证了潜水含水层是典型的地下“海绵体”,其

基金项目:国家自然科学基金(41472213,41672231)

作者简介:杜新强(1977—),男,教授,博士,主要从事地下水资源评价与管理研究。E-mail:duxq@jlu.edu.cn

“海绵效应”受含水层厚度、下渗率、排泄条件、地表植被覆盖率、人工开采、侧向补给以及潜水与深部地下水的连通状况等因素制约;戎贵文等^[13]提出了雨水收集与涵养地下水的屋面雨水源头调控技术;唐克旺^[14]指出海绵城市建设重点是透水路面、地下水调蓄及下沉绿地建设等,是城市水循环的垂向分量。王兴超^[15]基于海绵城市的内涵和要求,分析了地下水应用于海绵城市建设中的优势及地下水调蓄、净化、水循环路径等基本原理,论证了地下水系统应用于海绵城市建设的可行性。黄津辉等^[16]介绍了加拿大城市流域雨洪规划管理的发展和多伦多市雨洪管理的政策、原则和标准,并与《指南》进行了对比分析,对《指南》中存在的问题和《指南》的先进性进行了讨论,为中国的雨洪管理提供了新的思路和参考。更多的研究主要还是从LID工程设计的角度,关注如何让城市雨水能够快速入渗^[17-22]。虽然也有海绵城市建设后地下水漏斗区面积减小等实例^[23],但总体而言,人们对城市雨水入渗后的水流去向和水质变化问题基本没有关注,更缺少海绵城市建设对地下水补给作用的定量化实例研究成果。本文以黄河中下游某海绵城市建设实验区为例,采用地下水数值模拟方法,分析不同海绵城市建设方案对地下水资源的补给效应。

1 研究区概况

研究区位于我国中东部、黄河中下游某海绵城市建设实验区,地理位置优越,交通发达,面积约91 km²。研究区属于温暖半干旱气候,具有明显的大陆季风气候特征,四季分明,多年平均降水量为631.76 mm,多年平均蒸发量为1769.8 mm,年平均气温为14.25℃。研究区范围如图1所示。

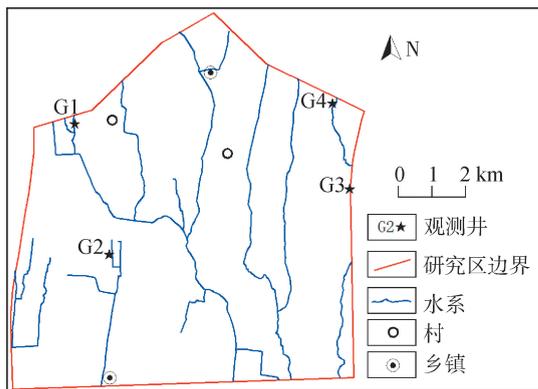


图1 研究区范围示意图

研究区广泛分布第四纪松散堆积物,含水层主要由第四系全新统、上更新统及中更新统冲积物组成,岩性以细砂、粉细砂为主,地下水类型为潜水-微承压水。

地下水补给的主要途径有降水入渗补给、灌溉回渗补给以及侧向径流补给,区内多条季节性河流对地下水也有一定的补给作用。区内的地形西部较高,向东、北、南方向降低,地下水向南、东南方向流动。浅层地下水的排泄主要有人工开采排泄、向深部越流以及径流排泄等形式。

目前,研究区内农业、工业和生活用水总供水规模为6435万m³/a,其中来自地表水2601万m³/a,来自地下水3834万m³/a(含区外地下水)。研究区农业灌溉和生活用水多以地下水为主,地下水供水规模为683万m³/a(根据区域开采模数计算)。

2 研究区地下水数值模型

2.1 水文地质概念模型

地下水数值模拟计算平面范围与研究区范围一致,总面积为91 km²,根据地层特征,划分为两个模型层,上层为潜水含水层,厚度为80~100 m,下层为承压含水层,厚度为220 m左右。研究区边界内外都有一定的水量交换,概化为第二类边界。含水层上边界为潜水面边界,地下水在垂向上可接受大气降水入渗补给、灌溉入渗补给等,在潜水埋藏较浅处可产生地下水蒸发排泄,其中大气降水入渗系数为0.21,灌溉入渗系数为0.10;将研究区内季节性河流概化为河流边界(第三类边界);承压水含水层的底板为模型的下边界,处理为隔水边界。地下水运动特征概化为符合达西定律的三维非稳定流。

2.2 数学模型的建立及解法

在水文地质概念模型的基础上,建立潜水-承压水三维非稳定地下水流数值模型:

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (x, y, z) \in \Omega \right.$$

$$\left. \begin{aligned} & h(x, y, z, t) \Big|_{t=0} = h_0(x, y, z) \quad (x, y, z) \in \Omega \quad (1) \\ & K \frac{\partial h}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = q_1(x, y, z, t) \quad (x, y, z) \in \Gamma_2 \\ & \left[K \frac{\partial h}{\partial n} \Big|_{\Gamma_3} = \frac{k_1}{M_1} (h_n - h) \quad (x, y, z) \in \Gamma_3 \right. \end{aligned}$$

式中: Ω 为渗流区域; h 为含水层水位标高,m; t 为时间,d; K 为含水层渗透系数,m/d; S_s 为含水层弹性贮水率,m⁻¹; μ 为潜水含水层给水度; W 为含水层的源汇项,m/d; Γ_2 、 Γ_3 分别为渗流区的第二类 and 第三类边界; $q_1(x, y, z, t)$ 为含水层第二类边界单位面积流量,m³/(m²·d); K_1 为河流低渗透底积层的渗透系数,m/d; M_1 为河流低渗透底积层的厚度,m; h_n 为第三类边界地下水水位,m。

采用 Visual MODFlow 软件对上述地下水流数值模型求解,选取 2014 年 7 月 5 日至 2015 年 1 月 5 日为模型识别期;2015 年 2 月 5 日至 6 月 5 日为模型验证期,1 月为一个时段。通过运行模型,识别水文地质参数,进行地下水长期观测孔动态历时曲线拟合识别(图 2)。识别前的潜水含水层渗透系数为 0.8 m/d,给水度为 0.05;承压水含水层渗透系数为 0.8 m/d,弹性贮水率为 $1 \times 10^{-5} m^{-1}$;识别后的潜水含水层渗透系数为 0.6 m/d,给水度为 0.05;承压水含水层渗透系数为 0.3 m/d,弹性贮水率为 $1 \times 10^{-5} m^{-1}$;识别期内拟合误差小于 0.5 m 的观测井占总观测井的 75% (最大拟合误差为 0.9 m);验证期拟合误差小于 0.5 m 的观测井占总观测井的 67% (最大拟合误差为 0.6 m),拟合结果较好(图 3),说明所建地下水流数值模型及所确定的水文地质参数合理,能够反映研究区水文地质条件以及地下水动力的基本规律,可用于后续与地下水动态相关的预测分析。

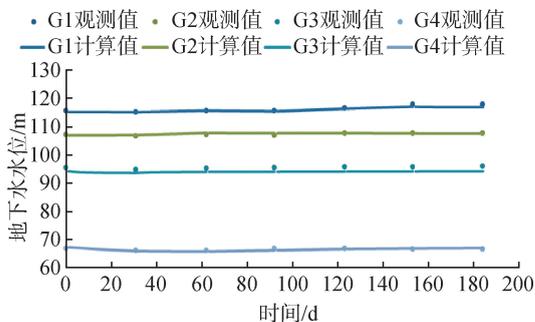


图 2 识别期地下水水位观测值和计算值对比

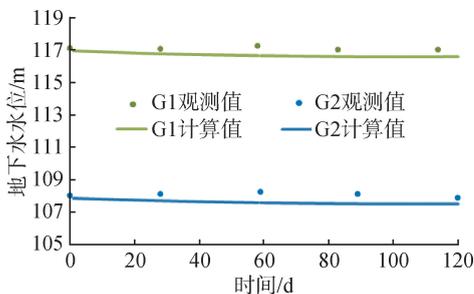


图 3 验证期地下水水位观测值和计算值对比

3 不同建设方案的地下水数值模拟

3.1 LID 设计类型及比例

根据研究区用地规划及不同用地的建筑物密度与绿化率,可将研究区的土地利用类型划分为 I、II、III、IV 4 类。I 类(居住用地区、商业区、工业区、医疗卫生区、行政办公区)具有建筑物密集、不透水面积较大的特征;II 类(教育科研区)具有建筑物丰富、绿化程度较好的特征;III 类(公共设施区)具有建筑物和道路广场密度较大的特征;IV 类(生

态用地)植被覆盖率高,不透水率低,本次海绵城市 LID 设计工作暂时不考虑此区域。

拟在研究区设置的主要 LID 设施类型为绿色屋顶、渗透铺装和雨水花园,其中绿色屋顶主要设置于建筑用地,渗透铺装主要设置于道路广场,雨水花园设置于生态用地。各 LID 设施的设置比例为理论上可在相应区域上设置的最大比例,各用地类型的用地构成比例及 LID 设施类型的最大拟设比例如表 1 所示。

表 1 典型区用地构成及 LID 的设计类型和比例

典型区	用地类型	用地比例/%	LID 面积设计比例/%	LID 设置类型
A	建筑用地	50 ~ 60	55	绿色屋顶
	道路广场	10 ~ 18	15	渗透铺装
	公共绿地	<30	10	雨水花园
B	建筑用地	25 ~ 50	35	绿色屋顶
	道路广场	15 ~ 20	17	渗透铺装
	公共绿地	35 ~ 40	15	雨水花园
C	建筑用地	20 ~ 50	35	绿色屋顶
	道路广场	15 ~ 40	25	渗透铺装
	公共绿地	>20	10	雨水花园

3.2 模拟预测方案

保持地下水现状开采强度 ($7.5 \text{ 万 m}^3/\text{a}$) 以及开采位置不变,根据研究区不同建设规划条件拟定 4 个模拟预测方案,模拟未来区域地下水水位动态变化趋势:方案 1,按规划建设前的不透水区面积比例(10%);方案 2,按规划建设后的不透水区面积比例(45% ~ 65%);方案 3,在 I、II、III 用地类型中选择典型区 A、B、C 设置 LID 设施,即在局部地区建设海绵城市(图 4),为了更好地展示各典型区地下水水位动态,在相应区域内增加虚拟的地下水水位观察井 Ga、Gb 和 Gc;方案 4,按方案 3 的 LID 类型和面积设计原则,将海绵城市建设分布在全部区域。

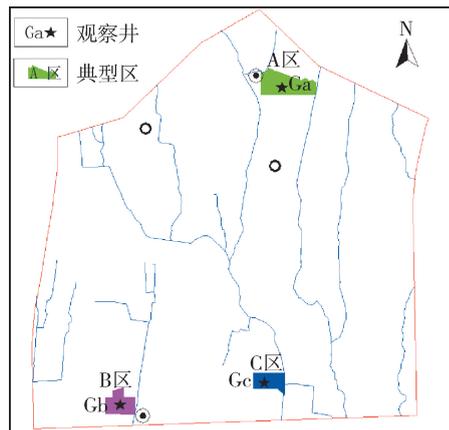


图 4 局部 LID 设施布局区域

模型预报区内含水层的补给量有大气降水入渗量和侧向径流补给量,排泄量主要有工人工开采量、侧

向径流排泄量和蒸发排泄量,其中,大气降水补给量采用多年平均降水量,蒸发量也采用多年平均蒸发量,LID设施的建设增强了雨水的渗透能力,使大气降水入渗系数增大。

3.3 模拟结果与分析

3.3.1 规划建设对区域地下水的的影响

方案1条件下,地下水入渗补给量为18.9万 m^3/a ,其中降雨入渗量为16.4万 m^3 ,占87.0%。方案1模拟结果显示,在多年平均降水量和蒸发量条件下,浅层地下水流场形态没有明显变化,但受多年平均降水量大于现状年降水量的影响,地下水水位较现状年略有抬升。方案2条件下,地下水入渗补给量为11.6万 m^3/a ,其中降雨入渗量为6.7万 m^3/a ,占58.1%。方案2模拟结果显示,在多年平均降水量和蒸发量条件下,浅层地下水流场形态没有明显变化。尽管多年平均降水量大于现状年降水量,但由于规划建设导致不透水下垫面增加、地下水补给量减少,导致区域地下水水位普遍下降,下降幅度0.5~5m不等(图5)。但不同地段地下水水位下降幅度有所不同,部分地段地下水水位能够保持相对稳定(如G1号井),部分地段地下水水位下降明显(如G2号井),主要受该地段及其附近不透水下垫面变化比例的影响(图6)。

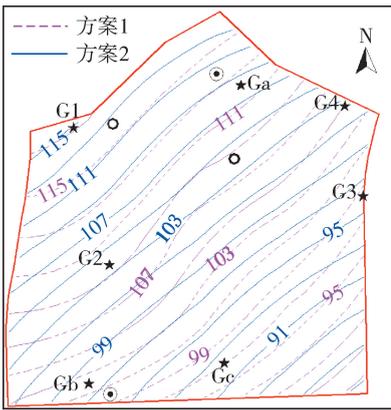


图5 方案1和方案2流场模拟结果对比(单位:m)

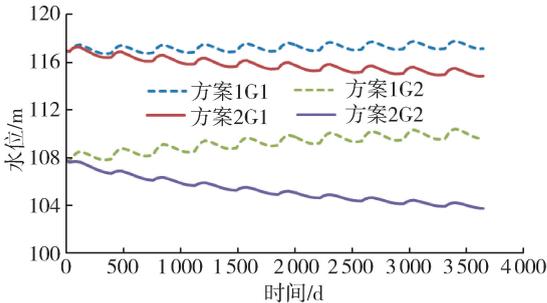


图6 方案1和方案2观测井水位对比

3.3.2 局部海绵城市建设对区域地下水的的影响

方案3条件下,地下水入渗补给量为11.6万 m^3/a ,其中降雨入渗量为6.8万 m^3/a ,占58.7%,降雨入

渗量比方案2增加0.6%。从图7可见,局部小范围的添加LID设施对区域地下水流场基本没有影响。从局部区域地下水水位动态变化规律分析,设置LID设施条件下地下水水位有所升高,但A、B、C区地下水水位升幅不一致(分别对应Ga、Gb和Gc观测井),变幅在0~0.4m之间(图8),主要受LID设施设置前后该区段下垫面不透水率的变化以及区域地下水流场的影响。

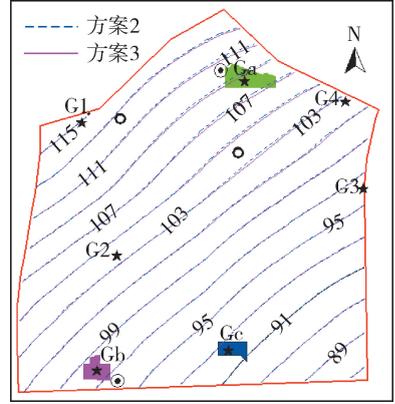


图7 方案2和方案3流场模拟结果对比(单位:m)

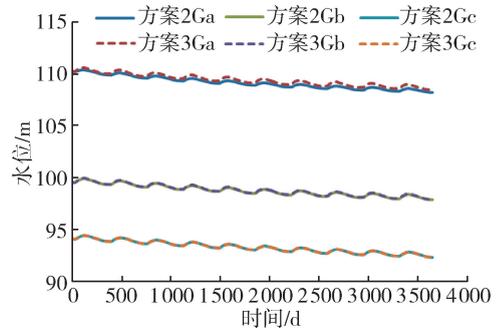


图8 方案2和方案3观测井水位对比

3.3.3 全区建设海绵城市对区域地下水的的影响

方案4条件下,地下水入渗补给量为36.4万 m^3/a ,其中降雨入渗量为35.9万 m^3/a ,占98.6%。对比方案4和方案2条件下典型地下水水位观测井地下水动态变化趋势和流场模拟结果(图9和图10)可见,全区规划海绵城市LID设施,对区域地下水资源

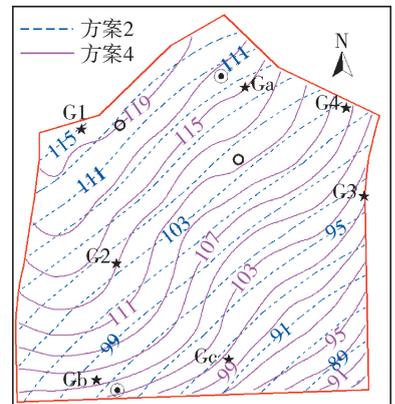


图9 方案2和方案4流场模拟结果对比(单位:m)

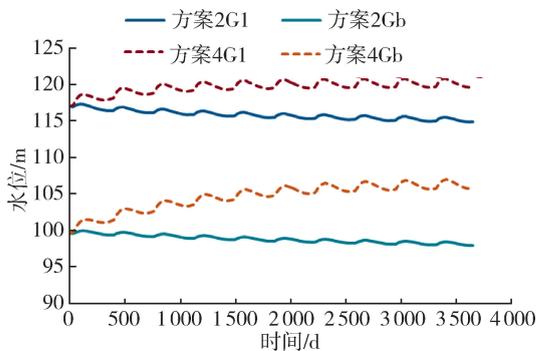


图 10 方案 2 和方案 4 观测井水位对比

有明显影响,相较于无海绵城市建设的规划方案(方案 2),地下水水位有明显升高(4~9 m)。

4 结论

a. 城市建设增大了地表不透水面积,使地下水补给量减少,导致区域地下水水位普遍下降。但不同地段地下水水位改变幅度有所不同,主要受该地段及其附近不透水下垫面变化比例的影响。

b. 典型区域建设海绵城市对区域地下水流场影响不大,但对海绵城市所在局部地区的地下水有一定的补给作用。

c. 仅当海绵城市建设达到一定规模的情况下,才能对区域地下水资源产生明显的补给效应。

参考文献:

[1] 刘慧娟,卫伟,王金满,等. 城市典型下垫面产流过程模拟实验[J]. 资源科学, 2015, 37(11): 2219-2227. (LIU Huijuan, WEI Wei, WANG Jinman, et al. Experimental study on typical city underlyings runoff process [J]. Resources Science, 2015, 37(11): 2219-2227. (in Chinese))

[2] 夏军,石卫,王强,等. 海绵城市建设中若干水文学问题的研讨[J]. 水资源保护, 2017, 33(1): 1-8. (XIA Jun, SHI Wei, WANG Qiang, et al. Discussion of several hydrological issues regarding sponge city construction[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(1): 1-8. (in Chinese))

[3] 杜建康,李卫群,陈波,等. 雨水调蓄塘在防治城市内涝中的应用[J]. 给水排水, 2012, 48(10): 39-43. (DU Jiankang, LI Weiqun, CHEN Bo, et al. Application of rainwater storage pond in the prevention and control of urban waterlogging[J]. Water & Wastewater Engineering, 2012, 48(10): 39-43. (in Chinese))

[4] FLETCHER T D, SHUSTER W, HUNT W F, et al. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more: the evolution and application of terminology surrounding urban drainage [J]. Urban Water Journal, 2015, 12(7): 525-542.

[5] 张剑,赵军,武龙. 半干旱地区海绵城市建设研究[J]. 阴山学刊(自然科学版), 2018, 32(1): 72-75. (ZHANG

Jian, ZHAO Jun, WU Long. The research of the sponge city construction in the semi-arid [J]. Yinshan Academic Journal (Natural Science Edition), 2018, 32(1): 1-4. (in Chinese))

[6] 张建云,王银堂,胡庆芳,等. 海绵城市建设有关问题讨论[J]. 水科学进展, 2016, 27(6): 793-799. (ZHANG Jianyun, WANG Yintang, HU Qingfang, et al. Discussion and views on some issues of the sponge city construction in China [J]. Advances in Water Science, 2016, 27(6): 793-799. (in Chinese))

[7] 仇保兴. 海绵城市(LID)的内涵、途径与展望[J]. 建设科技, 2015(1): 11-18. (QIU baoxing. The connotation, approach and prospect of sponge city (LID) [J]. Construction Science and Technology, 2015(1): 11-18. (in Chinese))

[8] 刘玲,王良学,栾新杰. 济南市海绵城市建设与兴隆流域治理措施研究[J]. 水利规划与设计, 2017(8): 40-42. (LIU Ling, WANG Xueliang, LUAN Xinjie. Study on the construction of sponge city in Jinan City and the control measures of Xinglong Basin [J]. Water Resources Planning and Design, 2017(8): 40-42. (in Chinese))

[9] 李阳,刘颖华,刘滋菁,等. 基于LID理念的透水路面生态效益研究进展[J]. 中国给水排水, 2017, 33(2): 37-41. (LI Yang, LIU Yinghua, LIU Zijing, et al. Progress in research on ecological benefits of permeable pavement based on LID concept [J]. China Water and Wastewater, 2017, 33(2): 37-41. (in Chinese))

[10] 常青,刘晓文,孙艺. “海绵城市”绿地规划设计三要素研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(1): 139-150. (CHANG Qing, LIU Xiaowen, SUN Yi. Research progress on the three elements of “sponge city” green space planning and design [J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(1): 139-150. (in Chinese))

[11] 李丽. 基于海绵城市理念的城市规划与设计[J]. 建筑知识, 2017, 37(16): 22-23. (LI Li. Urban planning and design scheme based on sponge city concept [J]. Architectural Knowledge, 2017, 37(16): 22-23. (in Chinese))

[12] 宋子龙. 城市硬化背景下潜水含水层的海绵效应和净化作用[J]. 湖北理工学院学报, 2016, 32(2): 9-12. (SONG Zilong. Sponge effect and purification function of phreatic aquifer under background of urban hardening [J]. Journal of Hubei Polytechnic University, 2016, 32(2): 9-12. (in Chinese))

[13] 戎贵文,沈齐婷,戴会超,等. 基于海绵城市理念的屋面雨水源头调控技术探讨[J]. 水利学报, 2017, 48(8): 1002-1008. (RONG Guiwen, SHEN Qiting, DAI Huichao, et al. The technical discussion on the source of roof rainwater based on the concept of sponge city [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(8): 1002-1008. (in Chinese))

(下转第 24 页)

- 化学特征及水质变化原因[J]. 南水北调与水利科技, 2014(5): 155-159. (LU Haiyan, YANG Fan, XIN Baodong, et al. Hydrochemical characteristics and deterioration reasons of Karst groundwater in Daxing covered karst area of Beijing[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014(5): 155-159. (in Chinese))
- [16] 左锐, 马丁山, 刘丽, 等. 傍河水源地氨氮分布特征及其影响因素分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2015, 51(6): 626-630. (ZUO Rui, MA Dingshan, LIU Li, et al. Distribution of ammonia nitrogen in riverside water source field and identification of influencing factors[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2015, 51(6): 626-630. (in Chinese))
- [17] 贾文飞, 杨洋, 赵阳, 等. 潮白河地下水调蓄区水岩作用过程模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(1): 143-148. (JIA Wenfei, YANG Yang, ZHAO Yang, et al. Construction of water-rock process in groundwater regulation area of Chaobai River[J]. South-to-North Water Diversion and Water Conservancy, 2016, 14(1): 143-148. (in Chinese))
- [18] 郑凡东, 刘立才, 杨牧骑, 等. 南水北调水源北京西郊回灌的水岩相互作用模拟[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(6): 22-28. (ZHENG Fandong, LIU Licai, YANG Muqi, et al. Simulation of water-rock interaction in the injection of water from the South-to-North Diversion Project to the aquifer in the western suburb of Beijing[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2012, 39(6): 22-28. (in Chinese))
- [19] 李霄, 柴璐, 王红岩, 等. 辽西地下水化学影响指标的水岩作用分析[J]. 生态学杂志, 2016, 35(10): 2804-2813. (LI Xiao, CHAI Lu, WANG Hongyan, et al. Water-rock effect analysis on the impact factors of groundwater chemistry of Huludao City, West Liaoning Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(10): 2804-2813. (in Chinese))
- (收稿日期: 2018-06-25 编辑: 王芳)

(上接第 17 页)

- [14] 唐克旺. 海绵城市建设存在的误区[J]. 水资源保护, 2016, 32(4): 160. (TANG Kewang. The misunderstanding of sponge city construction [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(4): 160. (in Chinese))
- [15] 王兴超. 地下水库在海绵城市建设中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(1): 83-87. (WANG Xingchao. Application of underground reservoirs in construction of sponge cities[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(1): 83-87. (in Chinese))
- [16] 黄津辉, 段亭亭. 中国海绵城市开发与加拿大综合雨洪管理对比研究: 以多伦多为例[J]. 水资源保护, 2017, 33(5): 5-12. (HUANG Jinhui, DUAN Tingting. Comparative study on sponge city development in China and integrated stormwater management in Canada: a case study of Toronto[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(5): 5-12. (in Chinese))
- [17] 张书涵. 基于城市雨洪资源综合利用的“海绵城市”建设[J]. 建设科技, 2015(1): 26-28. (ZHANG Shuhan. The construction of “sponge city” based on the comprehensive utilization of urban rain and flood resources [J]. Construction Science and Technology, 2015(1): 26-28. (in Chinese))
- [18] 俞孔坚. “海绵城市”解读[J]. 江苏建设, 2016(2): 13-23. (YU Kongjian. The Interpretation of “sponge city” [J]. Jiangsu Planning & Construction, 2016(2): 13-23. (in Chinese))
- [19] 刘昌明, 张永勇, 王中根, 等. 维护良性水循环的城镇化 LID 模式: 海绵城市规划方法与技术初步探讨[J]. 自然资源学报, 2016, 31(5): 719-731. (LIU Changmin, ZHANG Yongyong, WANG Zhonggen, et al. The LID pattern for maintaining virtuous water cycle in urbanized area: a preliminary study of planning and techniques for sponge city [J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(5): 719-731. (in Chinese))
- [20] 贾海峰, 姚海蓉, 唐颖, 等. 城市降雨径流控制 LID BMPs 规划方法及案例[J]. 水科学进展, 2014, 25(2): 260-267. (JIA Haifeng, YAO Hairong, TANG Ying, et al. LID-BMPs planning for urban runoff control and case study [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(2): 260-267. (in Chinese))
- [21] 王婷, 刁秀媚, 刘俊, 等. 基于 SWMM 的老城区 LID 布设比例优化研究[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(4): 29-43. (WANG Ting, DIAO Xiumei, LIU Jun, et al. Optimization of LID layout proportions in old city area based on SWMM [J]. South-to-North Water Transfer and Water Science and Technology, 2017, 15(4): 29-43. (in Chinese))
- [22] 湛忠宇, 陈星, 田传冲. 临海市海绵城市建设实施方案编制实践与思考[J]. 水资源保护, 2016, 32(2): 5-8. (ZHAN Zhongyu, CHEN Xing, TIAN Chuanchong. Practice and thoughts about implementation plan for sponge city construction in Linhai City [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(2): 5-8. (in Chinese))
- [23] 姜月, 殷殷, 冯爽. 沈阳市海绵城市建设经验探讨[J]. 中国市政工程, 2016, 186(4): 32-36. (JIANG Yue, YIN Yin, FENG Shuang. Discussion on construction experience of sponge city in Shenyang [J]. China Municipal Engineering, 2016, 186(4): 32-36. (in Chinese))
- (收稿日期: 2018-04-12 编辑: 熊水斌)