

# The Overlying Influence of Underground Structure and Impermeable Surface of the Ground on Groundwater Recharge in Residential Area Construction

Zhengxian Zhang, Jinchao Li, Weiping Wang, Qingyang Zheng, Shisong Qu\*

Shandong Provincial Engineering Technology Research Center for Groundwater Numerical Simulation and Contamination Control, School of Resources and Environment, University of Jinan, Jinan Shandong  
Email: 1109792861@qq.com, \*stu\_quss@ujn.edu.cn

Received: Apr. 26<sup>th</sup>, 2017; accepted: May 13<sup>th</sup>, 2017; published: May 16<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

More population and less land is the main contradiction in the process of urbanization in China. Residential buildings developing upward and downward, not only made the impervious surface area increased, increasing more surface runoff, but also the underground impervious area increased, jointly cutting the connection between the rainfall infiltration and groundwater recharge and further reducing groundwater recharge and enhancing the heat island effect of the city. A case study of the construction of Jinan urban district, the concept of underground impervious rate, effect evaluating of underground impervious rate on recharge of karst groundwater, the relationship analysis between the actual impervious surface rate, impervious surface rate and runoff calculating method are proposed. The result shows the impervious area after construction is an important factor which causes 93% of the loss of surface water recharging into karst groundwater compared with before construction. Finally, the concept of construction and development of water ecological community in Jinan was proposed according to the special geographical features and the construction of the pilot project of the sponge city in Jinan.

## Keywords

Sponge City, Underground Impervious Rate, Groundwater Recharge

---

# 小区建设中地下构筑物 and 地面硬化对地下水补给的叠加影响分析与对策

张郑贤, 李锦超, 王维平, 郑晴阳, 曲士松\*

作者简介: 张郑贤(1991-), 男, 汉族, 安徽六安人, 济南大学硕士研究生。  
\*通讯作者。

文章引用: 张郑贤, 李锦超, 王维平, 郑晴阳, 曲士松. 小区建设中地下构筑物和地面硬化对地下水补给的叠加影响分析与对策[J]. 水资源研究, 2017, 6(3): 265-271. <https://doi.org/10.12677/jwrr.2017.63031>

济南大学资源与环境学院, 山东省地下水数值模拟与污染控制工程技术研究中心, 山东 济南  
Email: 1109792861@qq.com, \*stu\_quss@ujn.edu.cn

收稿日期: 2017年4月26日; 录用日期: 2017年5月13日; 发布日期: 2017年5月16日

## 摘要

人多地少是我国城市化进程中的主要矛盾, 小区建筑物向空中和地下发展是必然的结果, 不仅造成地面硬化面积增加, 地表径流增大, 同时地下硬化面积也增加, 割裂了降雨入渗与地下水之间的联系, 进一步减少了地下水补给量、也加重了城市的热岛效应。以济南市城市小区建设的具体情况为例, 提出了地下硬化率的概念, 评价了地下硬化率对岩溶水的补给影响, 分析了实际地表硬化率、计算地表硬化率与径流量的关系。结果表明: 地下硬化面积是造成城市小区地表雨水补给地下水量损失的重要因素, 岩溶水补给损失率达93%。在分析计算的基础上, 针对济南市特殊的地理特点结合海绵城市试点工程建设, 结合国内外先进生态小区建设实例, 提出了适合济南市生态小区建设与发展的方向, 为济南城市建设与改造提供依据。

## 关键词

海绵城市, 地下硬化率, 地下水补给

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

城市化是人类进步必然要经过的过程, 是区域社会经济发展到一定阶段的必然产物, 然而城市化的快速发展也带来诸多负面影响, 中国本身就是人多地少, 二者压力很大, 城市化过程与西方国家相比, 建筑物密度不仅大且建筑物的高度也大, 与过去城市化相比, 一是城区建设用地有限, 过去楼层 4~5 层, 现在 20~30 层, 单位面积的人口剧增。二是由于近十年居民拥有小汽车的数量越来越多, 过去小区没有停车场, 现在城市开发必须设计停车场, 地面不够, 只有向地下发展, 地下一层不够建两层, 地下占地面积几乎占用了除楼座基础之外的建设用地。三是基础开挖的形式不同了, 过去建楼, 基础只有在楼座下面开挖, 其他空地可以作为绿化、道路和广场; 现在建楼地下车库与楼座基础一起, 地面上作为建设用地进行大开挖, 浇筑钢筋混凝土。因此城市化导致的水文循环的改变引起了各类水问题。建筑物与小区的开发, 特别是地下建筑物的建设, 使得小区地下下垫面条件发生很大变化, 彻底破坏了原有自然地貌的水文循环。由于绿地、道路等大部分是建在 1.5~1.8 m 的覆土之上, 其底部均为车库顶部钢筋混凝土硬化区, 即使这样, 小区地表占地绿化率仅在 30%~35%。如遇降雨, 占 65%~70% 的硬化面积必然会形成大量的地表径流, 甚至会造成道路行洪; 其次仅有 30%~35% 的绿化面积, 降雨入渗量仅仅补充 1.5~1.8 m 深的土壤水, 供植物蒸腾和覆土蒸发量, 由于地下硬化面积阻断了水分下渗的路径, 无法补充到地下水, 多余的渗透水在车库顶部由排水系统排到集水井中, 最后进入到城市雨水管网系统见图 1。与过去小区建设相比, 整个区域的水文循环遭到了更严重破坏, 从而导致了目前城市主要面临的四大水问题: 城市水资源短缺、城市洪水灾害、热岛效应和水环境污染[1]。因此摸清目前小区建设对地下水的影响, 采取相应的补救措施, 对我国可持续的城市化进程具有重要的意义。

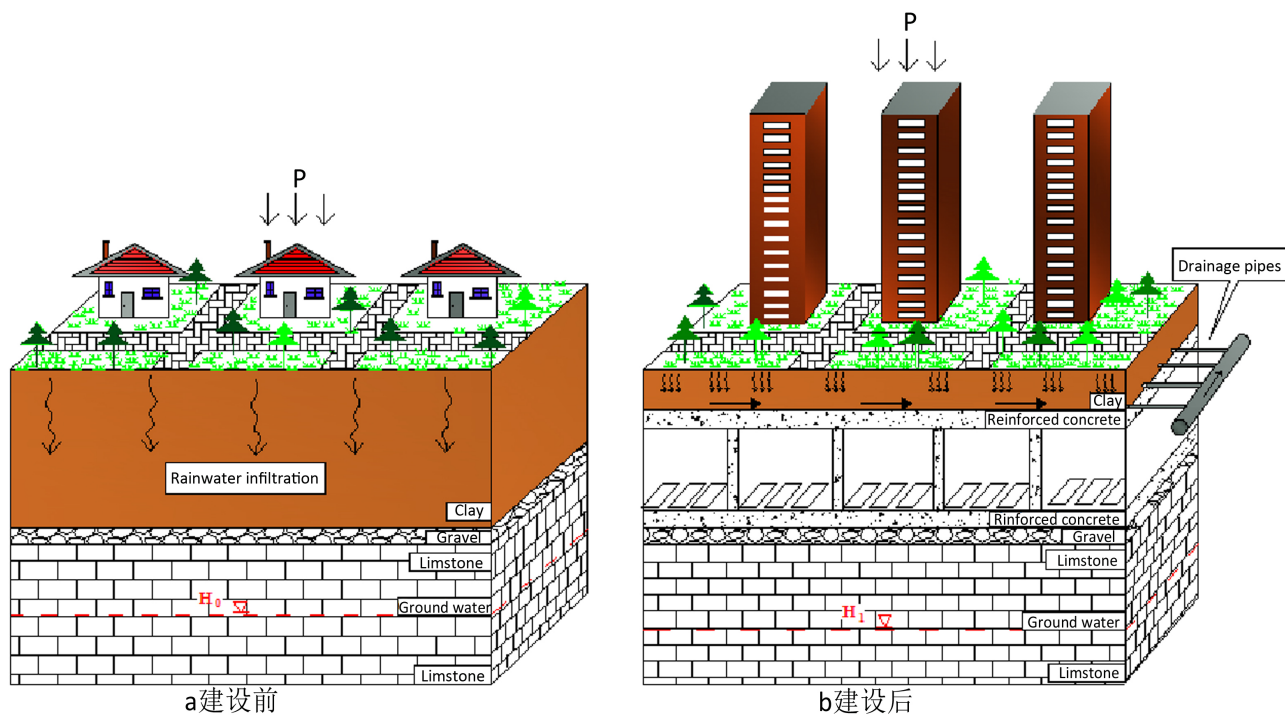


Figure 1. Schematic diagram of groundwater recharge before and after construction

图 1. 建设前后降雨入渗补给地下水水位示意图

## 2. 研究区基本概况及研究现状

济南以泉水闻名,然而城市的发展直接影响到泉水的补给。根据统计资料,济南市年平均降雨量为 659 mm,济南市城区面积已由解放初期的 26 km<sup>2</sup>,增加到 2014 年的 485.3 km<sup>2</sup>,大量新增的地面硬化面积及地下工程建设进一步加大了地表径流量并且减少了岩溶水的补给量。城市化的进程中,其最主要的改变就是城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、蒸散发、基流等水文指标。在国外, Kalin 等[2] (2006)通过研究发现,当一片林地的 60%被开发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[3] (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影响最大,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不利的影响。在国内,李娜等[4] (2009)对西苕河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。郑璟等[5] (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 42.09 mm、28.10 mm 和 279.74 mm,地表径流量增加了 431.97 mm,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。

综上所述,到目前为止,城市化过程中地表硬化面积增加对水文循环的影响,前人做了大量的研究,但是对于地下硬化面积增加在垂直方向产生的负面影响如何定量分析和采取相应的措施的研究少有报道。

## 3. 建筑与小区硬化率及补偿措施对水文循环的影响

为了保泉供水,济南市水土保持管理条例规定(2005 年)规定在地下水强渗漏带、岩溶地下水直接补给区开发建设项目硬化率不能超过 30%,该条款过去对济南市保护南部山区岩溶水涵养区,起到了一定的作用。但是近十年以来,随着南部山区土地价格的升高,出现了大量的房地产开发项目,不仅硬化率没有控制,绿化率反

而在 30% 左右。为了减轻建设对岩溶地区水文循环的破坏, 针对建设项目水土保持方案, 本文提出了实际地表硬化率、计算地表硬化率和地下硬化率, 目的不仅是评价地表硬化率, 而且通过采取有效的雨水蓄、滞、渗、净、用、排等措施, 减缓和补偿由于硬化造成的地表径流增加, 即评价计算地表硬化率。除此, 更重要的是评价真正起作用的地下硬化率。本文以某建筑小区为例进行了分析。该小区位于济南市南部山区, 位于济南地下水的直接补给区, 年平均降雨量 659 mm, 场区内存在裸露的灰岩, 有土层覆盖的区域土层较薄, 溶蚀裂隙普遍发育, 地下岩溶裂隙亦发育较好且连通性强, 大气降水经灰岩裸露区入渗, 地表径流通过裂隙岩能够快速渗入地下, 入渗后顺地层向北补给地下水。地下水类型为第四系季节性孔隙潜水及岩溶裂隙水, 场地内地下水埋深受季节影响较大, 地下水埋深在 30 m 左右, 在雨季可能沿基岩表面的碎石土层中形成孔隙潜水或者赋存于裂隙岩溶中形成岩溶裂隙水。该小区规划用地面积 23,800 m<sup>2</sup>, 可规划化建设用地 20,779 m<sup>2</sup>, 地上容积率 1.1, 地下容积率 0.5。总建筑面积 33,245 m<sup>2</sup>, 其中地上建筑面积 22,856 m<sup>2</sup> (包括住宅、沿街商业), 地下建筑面积 10,389 m<sup>2</sup> (包括地下车库即设备用房面积); 建筑物占地面积 6649 m<sup>2</sup>, 道路广场面积 8935 m<sup>2</sup>, 绿化面积 5195 m<sup>2</sup>, 绿化率 25%。地下硬化面积 1.05 hm<sup>2</sup>, 地下车库至地表覆土约 1.2~1.5 m。

### (一) 建设前

#### (1) 地表径流量

地表径流量的计算公式如下:

$$W = \alpha \times P \times F \quad (1)$$

式中:  $W$  为地表径流量,  $\alpha$  为径流系数,  $P$  为年平均降雨量,  $F$  为可规划化建设用地面积

本项目可规划化建设用地 2.0779 hm<sup>2</sup>, 在未建设之前本地区的径流系数为 0.15 [6]。地表径流量为:

$$0.15 \times 20779 \text{ m}^2 \times 659 \text{ mm} = 2054 \text{ m}^3$$

#### (2) 地下岩溶水的补给量

地下岩溶水的补给量计算公式如下:

$$Q = \beta \times P \times F \quad (2)$$

式中:  $Q$  为降雨入渗补给地下水水量,  $\beta$  为降雨入渗补给系数,  $P$  为年平均降雨量,  $F$  为补给区面积

本项目可规划化建设用地 2.0779 hm<sup>2</sup>, 未建设前该区岩溶水直接补给区降雨入渗补给系数为 0.29 [7]。年平均大气降水补给地下水水量为:

$$0.29 \times 20779 \text{ m}^2 \times 659 \text{ mm} = 3971 \text{ m}^3$$

### (二) 建设后

#### (1) 地表硬化率和径流量

硬化率的计算公式如下:

$$P = A_1 / A_2 \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $P$  为硬化率,  $A_1$  为小区硬化场地或硬化道路的占地面积,  $A_2$  为小区可规划化建设用地面积

实际地表硬化率是指房屋、道路和广场等硬化面积占小区总建设面积的比例。本项目可规划化建设用地 2.0779 hm<sup>2</sup>, 其中建筑工程区硬化总面积为 0.67 hm<sup>2</sup>, 道路广场区硬化总面积为 0.89 hm<sup>2</sup>, 因此本项目不透水面积合计 1.56 hm<sup>2</sup>, 硬化率为 75%。

硬化后径流系数为 0.85 [6], 未采用任何补偿措施条件下建设后地表径流量:

$$W = \alpha_1 \times P \times F_1 + \alpha_2 \times P \times F_2 \quad (4)$$

式中:  $W$  为地表径流量,  $\alpha_1$  为绿化区径流系数,  $\alpha_2$  为硬化区径流系数,  $P$  为年平均降雨量,  $F_1$  为绿化面积,  $F_2$  为硬化面积。

$$0.15 \times 5195 \text{ m}^2 \times 659 \text{ mm} + 0.85 \times (6649 \text{ m}^2 + 8935 \text{ m}^2) \times 659 \text{ mm} = 9242.90 \text{ m}^3$$

## (2) 地下硬化率及岩溶水降雨入渗补给量

地下硬化率是指地下工程例如车库、储藏间或人防工程开挖面积占总建设面积的比例。地下建筑硬化率：本项目可规划建设用地为  $2.0779 \text{ hm}^2$ ，其中地下建筑占地面积为  $1.05 \text{ hm}^2$ ，则地下硬化率为 51%。

建设后绿化率为 25%，地下硬化率 51%，根据初步设计资料，可知绿化面积与地下车库面积重叠的面积占可规划建设用地 18%，也就是绿化面积中的 18%，降雨入渗不能补充岩溶地下水，只能变成土壤水或者作为多余雨水径流被排泄。只有 7% 的绿化面积接受降雨入渗补给地下水，补给量为：

$$0.29 \times 20779 \text{ m}^2 \times 0.07 \times 659 \text{ mm} = 278 \text{ m}^3$$

因此，建设后降雨入渗补给地下水量较建设前减少了 93%。

从垂向来讲，地下硬化率过大，在雨季将会阻碍降雨和地表水的入渗，切断了地表与地下水的水力联系即直接补给；地下硬化面积上的覆土深度较浅，减少了土壤的储水量，为了满足地表植物蒸散发量，只有增加灌溉水量。从横向来讲，地下硬化基础工程过深，将会影响地下径流，改变地下径流的流场，破坏地下生态系统。

## (三) 采取雨水利用措施之后对地表径流补偿分析

即折算地表硬化率，通过采取蓄水、渗透、回灌等措施将硬化而产生的雨水径流量又重新补给到土壤或地下水或利用，间接减少了部分硬化面积，经计算后占总建设面积的比例。

$$F_{\text{下渗}} = F_{\text{硬化}} \times (1 - \alpha) \text{ 或 } F_{\text{下渗}} = F_{\text{硬化}} \times \gamma \quad (5)$$

式中： $F_{\text{下渗}}$  为折算后的下渗面积， $F_{\text{硬化}}$  为硬化面积， $\alpha$  为径流系数， $\gamma$  为建筑物屋面雨水有效利用率

本方案在通过采取以下措施降低项目的硬化率：

(1) 建筑工程区建筑物屋顶面积为  $0.67 \text{ hm}^2$ ，通过屋面雨水收集措施，大约 90% 引入蓄水池内(核除 5% 的屋面下渗量及 5% 的初期弃流)，有效利用率可达 85%，经计算：

$$F_{\text{下渗}} = 0.67 \text{ hm}^2 \times 0.9 \times 0.85 = 0.51 \text{ hm}^2$$

(2) 道路广场区道路部分主体采取透水砼路面，面积约  $0.48 \text{ hm}^2$ ，其径流系数约有 60%，下渗率为 40%，经计算：

$$F_{\text{下渗}} = 0.48 \text{ hm}^2 \times 0.40 = 0.20 \text{ hm}^2$$

可采用透水砖促渗约  $0.36 \text{ hm}^2$ ，其径流系数约有 35%，下渗率为 65%，经计算：

$$F_{\text{下渗}} = 0.36 \text{ hm}^2 \times 0.65 = 0.24 \text{ hm}^2$$

采取本方案推荐的水保措施后，整个项目区可减少不透水面积  $0.95 \text{ hm}^2$ ，硬化面积由之前实际的  $1.56 \text{ hm}^2$  减少到计算的  $0.61 \text{ hm}^2$ ，硬化率由治理之前的 75% 降低至 29%，达到要求。

采取补偿方案后地表径流量为：

$$0.15 \times 14679 \text{ m}^2 \times 659 \text{ mm} + 0.85 \times 6100 \text{ m}^2 \times 659 \text{ mm} = 4867.93 \text{ m}^3$$

较之前未采取补偿措施的径流量  $9242.90 \text{ m}^3$  减少了  $4374.97 \text{ m}^3$ ，减少率为 47%。

## (四) 建设前后下渗量的比较

本项目可规划化建设用地  $2.0779 \text{ hm}^2$ ，在未建设之前本地区的下渗率为 85% [6]。硬化后下渗率为 15% [6]。

建设前下渗量为：

$$0.85 \times 20779 \text{ m}^2 \times 659 \text{ mm} = 11639.36 \text{ m}^3$$

未采用任何补偿措施条件下建设后下渗量：



$$0.85 \times 5195 \text{ m}^2 \times 659 \text{ mm} + 0.15 \times (6649 \text{ m}^2 + 8935 \text{ m}^2) \times 659 \text{ mm} = 4450.46 \text{ m}^3$$

采用补偿措施条件下建设后下渗量:

$$0.85 \times 14679 \text{ m}^2 \times 659 \text{ mm} + 0.15 \times 6100 \text{ m}^2 \times 659 \text{ mm} = 8825.43 \text{ m}^3$$

建设前后未采取任何补偿措施的前提下小区下渗量由 11,639.36 m<sup>3</sup> 减少到 4450.46 m<sup>3</sup>。采取措施后下渗量减少到 8825.43 m<sup>3</sup>，尽管地表径流有所减少，但是没有从根本上解决由于新增的地下构筑物破坏了降雨垂向入渗补给地下水的通道，而造成的岩溶水补给量的永久丧失。

#### 4. 国外典型案例

科隆斯堡位于德国汉诺威的郊区，是一个较高建筑密度的新建底层小区，小区建成后，规划人口 15,000 人，总占地面积 207,453 m<sup>2</sup>，硬化面积 116,479 m<sup>2</sup>，占建设面积的 56%，包括屋顶面积 31%、道路等 25%，未硬化的面积 90,974 m<sup>2</sup> 占 44%。利用地面浅沟-地下渗渠建设一个近自然的人工水系统，在降水时能够促使降水下渗或被蓄滞，延长汇流时间，模拟建设前当地自然地质条件。新系统保证了形成新的地下水以及水通过现有的河道排走，该系统对地下水的生态环境和防洪贡献巨大，可以说以水为概念的科隆斯堡小区展现出城市水文和建筑小区排水的新思维。对恒斯伯格小区来说，近自然的水系统特别重要，该系统的平均年降雨入渗补给地下水量达到 194 mm，远大于汉诺威的平均值。整个小区规划了分散式雨水蓄滞区，尽可能多的雨水在私人 and 公共区域被拦蓄并且被促渗补充地下水，仅有有限的雨水被排走。这种效果利用以下几种技术措施得以实现：地表蓄渗排系统-地下渗渠-地下排水系统；闸门控制的泄洪通道；滞蓄雨水池塘；滞蓄雨水水库；雨洪水出境河道；水作为艺术性元素在公园中的应用；生活用水节水措施；学校的雨水处理利用计划。德国科隆斯堡水生态小区建设为现代城市小区建设提供了范例。但是，该生态小区与济南市城市建设模式有本质的区别，一是绿化面积比例大，二是没有大面积的地下构筑物即硬化面积。因此，地下水补给措施仍然需要创新发展。

#### 5. 应对措施

济南城市建设应抓住建设水生态文明城市与海绵城市试点工程的契机，根据位于岩溶水直接补给区的地形地貌和水文地质特征，结合国外先进理念与济南市实际情况，以规划为引导，区域与小区相结合，采取有效的补偿措施，将城市建设对水文循环要素的负面影响降低到最小。

在小区尺度上，采取蓄、滞、渗、净、用、排等措施，将由于地表硬化产生的雨水径流尽可能地消化在区域内，既减小了小区外的防洪压力又增大了小区的雨水蓄滞能力，不仅改善了小区景观，也为延缓热岛效应提供了有利条件。针对地下硬化面积隔断了地表与岩溶地下水联系的问题，有条件的小区可在绿化区与硬化面积不重合的地方建设渗井等高效地下水补给工程[8]。

在区域尺度上把握山体石灰岩裸露和沟谷平原覆盖渗透性大的特征，在小区与小区之间建立缓冲带即补偿区，沟通地表水与地下水之间的联系，利用地势低洼的区域以及该区土壤渗透系数大的特点，加大园林池塘景观建设等多样性的措施，尽可能滞洪促渗，使得小区地表硬化面积上产生的地表径流而没有利用的部分补给到地下水；在地势较高的区域尽可能地采取措施延长雨水径流形成的时间，以达到降低洪峰、化害为利的目的。

#### 基金项目

山东省水利厅、山东省财政厅《水生态文明试点科技支撑计划》(SSTWMZCLH-SD06)、(JNQY-SZY-GC-2016-001)。

#### 参考文献 (References)

- [1] 王维平, 曲士松, 叶新强, 等. 用于裂隙岩溶含水层回灌的屋面雨水径流水质特性研究[J]. 水利学报, 2011, 42(4): 477-482.

- WANG Weiping, QU Shisong, YE Xinqiang, et al. Quality characteristics of roof rainwater for fractured karst aquifer recharge. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(4): 477-482. (in Chinese)
- [2] KALIN, L., HANTUSH, M. M. Hydrologic modeling of an eastern Pennsylvania watershed with NEXRAD and rain gauge data. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 11(6): 555-569. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1084-0699\(2006\)11:6\(555\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1084-0699(2006)11:6(555))
- [3] NIE, W., YUAN, Y., KEPNER, W., et al. Assessing impacts of Landuse and Landcover changes on hydrology for the upper San Pedro watershed. *Journal of Hydrology*, 2011, 407(1-4): 105-114. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.07.012>
- [4] 李娜, 许有鹏, 郭怀成. 西苕河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 and GUO Huaicheng. Based on the long-term runoff analysis and research of the influence of Xitiao River City. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2009, 45(4): 668-676. (in Chinese)
- [5] 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 Peijun, et al. Simulation study on the effects of land use change on hydrological processes in a fast urbanization area—A case study of Buji River Basin in Shenzhen. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(9): 1560-1572. (in Chinese)
- [6] 《建筑与小区雨水利用工程技术规范》编制组. 建筑与小区雨水利用工程技术规范实施指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.  
“Technical Specifications for Rainwater Utilization in Buildings and Residential Areas” Compilation Group. Guidance on the implementation of technical specifications for rainwater utilization engineering in buildings and communities. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese)
- [7] 蔡五田, 高宗军, 王庆兵, 等. 济南市岩溶水系统水力联系研究[M]. 北京: 地质出版社, 2013: 96-97.  
CAI Wutian, GAO Zongjun, WANG Qingbing, et al. Study on hydraulic connection of Karst Water System in Jinan City. Beijing: Geological Publishing House, 2013: 96-97. (in Chinese)
- [8] 王维平, 孙小滨, 曲士松. 济南市有效利用城市雨水回灌岩溶地下水探讨[J]. 水利水电技术, 2009, 40(3): 20-26.  
WANG Weiping, SUN Xiaobin and QU Shisong. Discussion on effective utilization of urban rainwater recharge of Karst Groundwater in Jinan City. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2009, 40(3): 20-26. (in Chinese)