

# 气候变化对雨水控制设施年径流总量控制率的影响

张质明<sup>1,2</sup>, 潘润泽<sup>1,2</sup>, 李俊奇<sup>2</sup>, 王文亮<sup>2</sup>, 胡蓓蓓<sup>1,2</sup>, 黄诗月<sup>1</sup>

(1. 北京建筑大学 北京应对气候变化研究和人才培养基地, 北京 100044; 2. 北京建筑大学  
城市雨水系统与水环境省部共建教育部重点实验室, 北京 100044)

**摘要:** 气候变化对降雨产生的影响会干扰海绵城市建设中雨水控制设施的效果。为了定量评估气候变化对年径流总量控制率的影响, 识别我国雨水控制设施气候变化敏感区域, 在统计分析全国 186 个气象站 1980 年—2012 年日降雨序列的基础上, 对比各气象站在不同时段 0~200 mm 设计降雨量所对应年径流总量控制率的变化; 以年径流总量控制率的标准差作为评价依据, 讨论我国各区域气候变化敏感性的空间分布。结果表明: 气候变化对我国大部分地区的年径流总量控制率所造成的标准差大致在 0~0.06 之间, 气候变化敏感性的峰值出现在设计降雨量为 25~40 mm 范围; 敏感区域主要集中在我国东部, 其中京津冀地区、山东省和海南省大部分地区的敏感性较高。对于气候变化敏感的区域, 雨水源头控制设施的年径流总量控制率或因气候变化而无法达到预期值, 因此应尽量增加设施规模; 而对于气候变化不敏感的区域, 气候变化对年径流总量控制率影响不大, 因此根据时长较短的降雨序列即可准确确定其年径流总量控制率所对应的设计降雨量。

**关键词:** 气候变化; 海绵城市; 年径流总量控制率; 降雨; 敏感性

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)11-0126-06

## Impact of Climate Change on Volume Capture Ratio of Annual Rainfall of Stormwater Facilities

ZHANG Zhi-ming<sup>1,2</sup>, PAN Run-ze<sup>1,2</sup>, LI Jun-qi<sup>2</sup>, WANG Wen-liang<sup>2</sup>,  
HU Bei-bei<sup>1,2</sup>, HUANG Shi-yue<sup>1</sup>

(1. Beijing Climate Change Response Research and Education Center, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

**Abstract:** The effects of climate change on rainfall will interfere with the effects of rainwater capture facilities in sponge city construction. In order to quantitatively assess the impact of climate change on the volume capture ratio of annual rainfall of stormwater facilities, and to identify the climatically sensitive regions in China, variations of the design 0~200 mm rainfall during different periods and the corresponding volume capture ratio of annual rainfall were compared based on statistical analysis of the daily rainfall sequence of 186 meteorological stations from 1980 to 2012. The standard deviation of the volume capture ratio of annual rainfall was then used as the evaluation criteria for studying the spatial distribution of cli-

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(8154044); 国家自然科学基金资助项目(51708015); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2013ZX07304-003)

通信作者: 李俊奇 E-mail: jqli6711@vip.163.com

matic sensitivity in China. The results showed that the impact of climate change on the standard deviation of the volume capture ratio of annual rainfall in most regions roughly varied from 0 to 0.06, and the sensitivity peak value of climate change appeared at design rainfall of 25–40 mm. The sensitive areas were mainly distributed in the eastern part of China, which was especially higher in Beijing–Hebei–Tianjin region, Shandong Province and most of Hainan Province. For areas sensitive to climate change, the volume capture ratio of annual rainfall of the source control facilities might not achieve the desired results due to climate changes. Therefore, the scale of the facilities should be expanded as much as possible. For area insensitive to climate change, the influence of climate change on the volume capture ratio of annual rainfall was negligible. Therefore, the corresponding design rainfall depth could be accurately determined according to shorter precipitation sequences.

**Key words:** climate change; sponge city; volume capture ratio of annual rainfall; precipitation; sensitivity

全球气候变化目前已成为各方瞩目的焦点问题之一。研究表明,气候变化所导致的强降水事件在美国、中国、澳大利亚、加拿大等诸多国家均有增加<sup>[1]</sup>。根据统计结果<sup>[2]</sup>,尽管我国在1901年—2013年间平均年降水量无显著变化趋势,但1961年—2013年全国年累计暴雨日数呈显著的增加趋势;同时,1956年—2013年的降雨数据显示,全国平均年暴雨量、平均年暴雨日数和年暴雨强度也均呈增加趋势<sup>[3]</sup>。可见,我国城市水文过程面临着自然和人为改变的双重风险。当前,以澳大利亚的WSUD、美国的LID、英国的SUDS、我国近年来大力开展的海绵城市建设为代表的可持续雨洪管理系统<sup>[4]</sup>大大提高了雨水的控制与利用效率,同时也增强了城市雨水系统的气候韧性,但气候变化对其效果的影响也同样不容忽视。

在海绵城市建设中,年径流总量控制率是评估排水分区对雨水控制能力的一项重要指标,基于长序列的历史降雨记录推求相应的设计降雨量,用于确定雨水控制设施规模。然而,全球尺度以及局地气候的改变,都会在不同程度上干扰降雨的原有规律,使得降雨数据呈现不稳定的特点。雨水控制设施规模的合理确定需要基于历史降雨记录,但气候变化的影响可能导致历史数据的代表性降低,一方面,极端降水事件的增加可能使得雨水系统的功能得不到有效发挥;另一方面,降水量减少,也可能使得过高的雨水控制设施设计标准形成浪费。为此,笔者在分析我国近年来降雨结构变化的基础上,评估气候变化对年径流总量控制率的影响力,识别我国雨水控制设施的气候变化敏感区域,并为不同敏

感区增强雨水控制设施的韧性提出建议。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区数据概况

数据采用国家气候中心提供的1980年—2012年全国186个气象站所监测的日降雨数据(其中个别监测站建成时间较短,缺失数据按空值处理,不计入计算过程)。气象站分布情况如图1所示。由于年径流总量控制率的计算结果是基于超过2 mm的日降雨序列得到的,因此在本研究的统计分析中,需要去除小于2 mm的降雨部分。

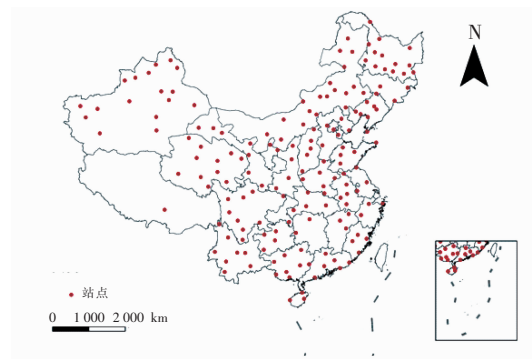


图1 气象站点的位置分布情况

Fig. 1 Location of meteorological stations

### 1.2 降雨序列的截选与分组

不同时期降雨序列的特征是自然规律与人为干扰综合作用的结果。对于一些下垫面发生显著变化的城市,由于其局地气候可能已经发生了改变,因此历史较远的降雨记录可能反而会降低设计降雨量的合理性。同时,已有研究表明,中国降雨呈现一定的变化周期,王澄海等<sup>[5]</sup>认为,中国降雨的周期性明显程度不一,目前高频周期以3~5年为主,10年

以上的周期还有 18 年和 36 年,且不同区域周期不完全相同;而钟军<sup>[6]</sup>的研究结果表明,中国的降雨周期为 6 年左右。不同研究者选用的降雨资料不同,结论上具有一定的差异,因此本研究结合两者的结论,采用折中的 5 年作为每段时间的跨度,并且考虑到本研究获取数据的时长为 30 年,只采用高频周期作为分组依据,考察不同时段内各气象站日降雨的概率分布情况。

### 1.3 气候敏感评价

降雨量分布的变化必然导致年径流总量控制率的改变。为了确定不同规模的设计降雨量在不同时段中对应的年径流总量控制率变化,考虑设计降雨量在 0~200 mm 范围内,变化步长设为 0.1 mm;为了最大程度地暴露各组之间的差异,各组采用 5 年作为时长,各组之间所包含的时段相互独立,以避免各组之间因包含相同序列而导致结果差异变小。按照该方法,分别计算全国各站点在不同设计降雨量条件下 6 个时段的年径流总量控制率。

某一设计降雨量的气候变化敏感性按照不同时段年径流总量控制率的标准差  $\sigma$  进行统计,标准差计算公式如下:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad (1)$$

其中: $n$  为该时段内日降雨序列的元素个数; $\mu$  为降雨序列的平均值; $x_i$  为降雨序列的第  $i$  个值。

一个区域在某一设计降雨量的标准差越大,代表该设计降雨量在气候变化的影响下越容易失效,也即在气候变化条件下,容易出现设计规模不足或者过大的现象。年径流总量控制率的稳定程度与气候变化的敏感性评价根据表 1 中的标准进行判断。

表 1 年径流总量控制率与气候变化敏感性的评价标准

Tab. 1 Evaluation criteria for volume capture ratio of annual rainfall and regional sensitivity to climate change

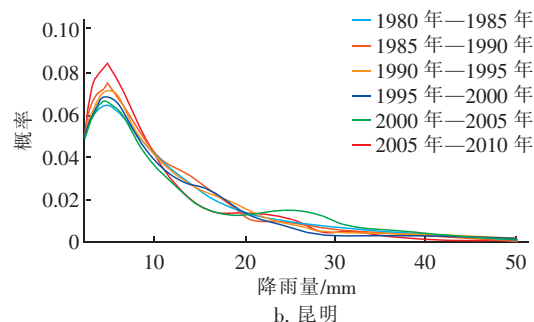
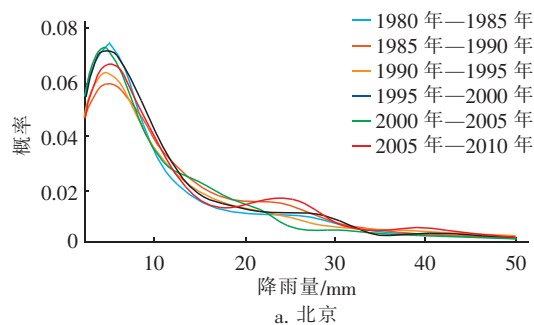
| 条 件  | 年径流总量控制率 | 雨水控制设施气候敏感性 |
|--|----------|-------------|
| $\sigma < 0.01$  | 非常稳定     | 非常不敏感       |
| $0.01 \leq \sigma < 0.02$  | 稳定       | 不敏感         |
| $0.02 \leq \sigma < 0.03$  | 较稳定      | 较不敏感        |
| $0.03 \leq \sigma < 0.04$  | 较不稳定     | 较敏感         |
| $0.04 \leq \sigma < 0.05$  | 不稳定      | 敏感          |
| $\sigma \geq 0.05$   | 非常不稳定    | 非常敏感        |
| 注: 本研究采用的评价分类标准依照我国年径流总量控制率的标准差计算结果的分布情况进行等距分割,分为 6 个部分,每个部分的区间长度为 0.01。 |          |             |

## 2 结果与讨论

### 2.1 各城市降雨结构的变化

大量研究表明,全球气候变暖已经造成降水规律的改变<sup>[7,8]</sup>。在城市中,土地利用的快速变化,干扰了原有的环流及地表能量平衡,加上气溶胶的大量排放,极易造成局地降雨的剧烈变化,形成“雨岛”或“干岛”<sup>[9,10]</sup>。目前,关于中国地区降水结构的变化已有大量研究,在整体范围上降水量变化不显著,但区域在不同时段会呈现出一定变化,如:西北地区全年降水量增加,而华北地区全年降水量减少,长江中下游地区夏、冬季的降水量增加。但这些研究都是针对总降雨量得来的结论,针对日降雨量分布变化的研究并不多,特别是针对能够产流的部分的结构分布讨论仍不足。

根据对各站 2~50 mm 降雨的统计可知,在我国部分城市的案例中,大部分都在研究时段中出现了日降雨概率分布的变化,特别是在 2~10 mm 范围内概率变化最大(见图 2),但对于大部分海绵城市,设计降雨量基本都会超过 10 mm,因此该部分降雨影响并不大。而一些城市,如北京,在 20~30 mm 处出现了另一个较大变化幅度的区域,这说明该深度范围的降雨在一段时期可能会呈现较多次数,但在其他时期并不会经常出现。当设计降雨量超过这个范围,该不确定性将不会产生影响;但当设计降雨量不足时,则可能会出现雨水外排现象。





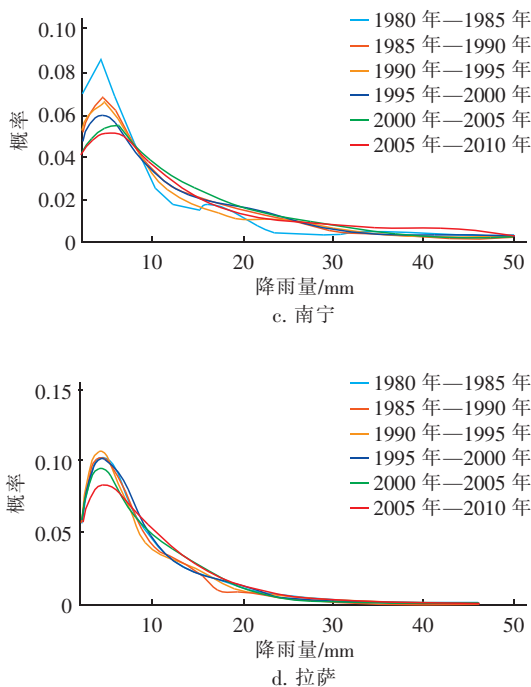


图2 4个代表性城市的日降雨概率分布

Fig. 2 Daily precipitation probability distribution of four representative cities

## 2.2 降雨变化对年径流总量控制率的影响

根据对各气象站的数据计算结果(见图3),大部分地区的气候变化对年径流总量控制率造成的标准差在0~0.06之间;随着设计降雨量的增大,雨水控制设施的气候变化敏感性先增加后减少。

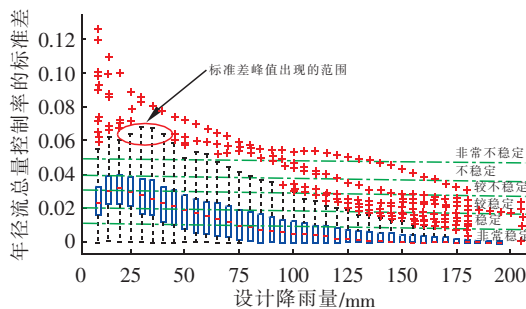


图3 设计降雨量对应年径流总量控制率的标准差

Fig. 3 Standard deviation of design rainfall depths corresponding to volume capture ratio of annual rainfall

在增加阶段,随着雨水控制设施规模的增加,雨水能够得到控制的部分越来越多,但各个时段范围之间的降雨状况略有差异(组间差),因此各组之间的差异会相应增加;而当设施规模达到一定值后,雨水控制设施应对气候变化的能力显著增强,各时段之间所反映的降雨变化所产生的影响明显减弱,

各组之间的差异又会逐渐减小,最终趋于零。

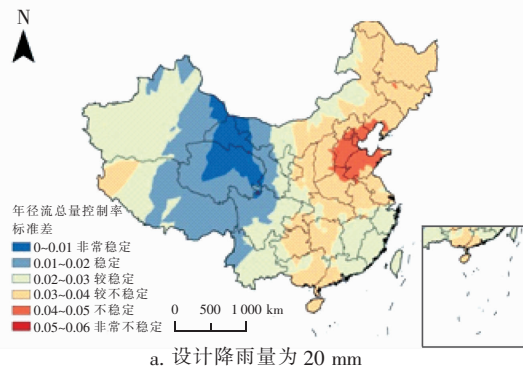
由图3可知,除红色加号表示的个别异常站点外,气候变化敏感性的峰值出现在一些站点设计降雨量为25~40 mm的区间;而绝大部分站点的气候变化达到稳定,则需要100 mm以上的设计降雨量,这远远超出了我国当前诸多海绵城市所选择的设计降雨量范围<sup>[11]</sup>,说明要保证我国雨水控制系统的效果,必须协调好中间和末端设施。

因此,鉴于气候变化的原因,较为敏感的城市对海绵城市建设效果的考核不应在短时间内下定论,应将考核周期相应延长,或考虑增加宽容范围。并且,当区域在相同年径流总量控制率条件下,其设计降雨量随时间变化具有持续而明显的增减趋势,则说明区域的气候特征可能发生了显著变化,因此在选择雨水控制设施规模时,不一定选取长期降雨监测资料直接计算设计降雨量,而应该更重视气候的变化特点,考虑将恰当的降雨监测时段作为参考。

对于气候敏感性衰减较快的区域,说明雨水控制设施规模的提升可以迅速降低气候变化的敏感性,也即该区域能够以较低的成本换取区域气候韧性的大幅度提升,因此可以考虑适当增加雨水控制设施规模;而对于气候敏感性衰减较慢的区域,雨水控制设施规模的提升虽然从理论上能够提升雨水收集能力,但是由于气候变化的原因,雨水控制设施的“失效”情况仍会比较显著,则应更多地考虑设施的成本与可行性。

## 2.3 气候敏感区域分布

王文亮等<sup>[11]</sup>在计算我国年径流总量的最佳控制率时,采用了“增加速率与平均增加速率相等”的方式,以同时考虑控制效果与成本,大部分城市最优控制率集中在20~40 mm设计降雨量,因此本研究仅展示设计降雨量为20、30、40、50 mm这4种条件下我国的气候敏感区域分布情况,如图4所示。



a. 设计降雨量为20 mm

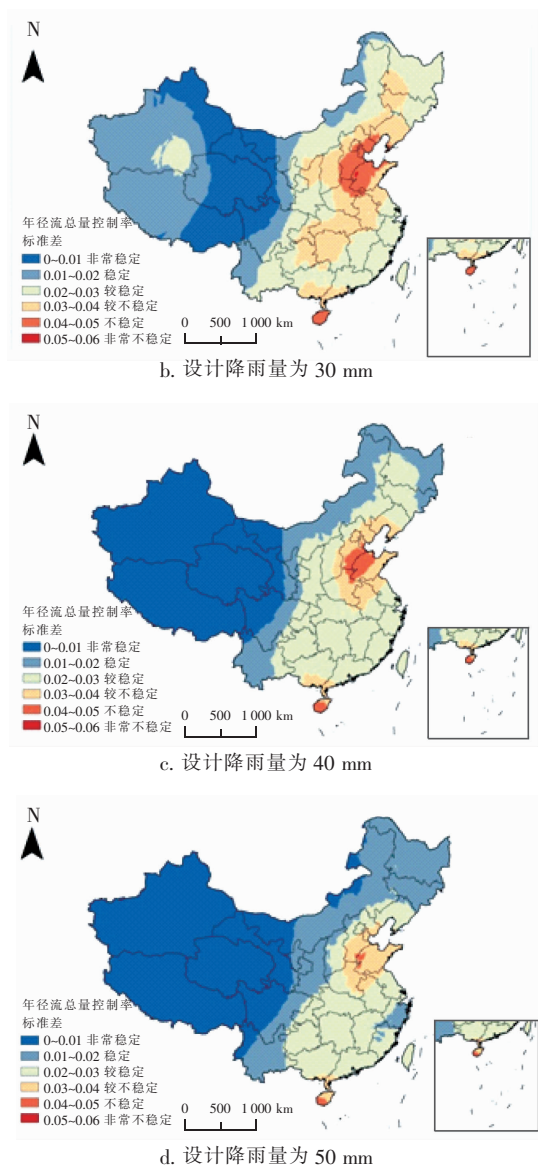


图4 不同设计降雨量下我国气候敏感区域的分布情况

Fig.4 Spatial distribution of climate sensitive areas in China under different design rainfall depths

从图4可以看出,气候敏感区域主要分布在我国东部,其中京津冀地区、山东省和海南省大部分地区的敏感性较高。随着设计降雨量的增加,不稳定的区域逐步缩小;东北地区控制率变化最为明显,年径流总量控制率在设计降雨量为30 mm时达到稳定(控制率变化范围为2%~3%);华中地区其次,年径流总量控制率在设计降雨量为40 mm时达到稳定。当设计降雨量为50 mm时,京津冀、山东、海南等区域的年径流总量控制率变化虽有减小,但仍然无法达到稳定,说明气候变化对这些区域的年径流总量控制率影响很大,因此在确定设计降雨量

时,应尽量考虑气候变化的因素,做好对未来降雨变化规律的预测,并尽可能采用“无悔”的方式<sup>[12]</sup>来适当增加未来城市的雨水系统规模,增加的规模可参考日降雨量概率分布情况的不确定性。其他地区尽管降雨条件不一致,但在不同设计降雨量条件下,年径流总量控制率均比较稳定,因此采用较少的年数即可准确地确定合理的设计降雨量。

### 3 结论

① 气候变化对我国大部分地区的年径流总量控制率所造成的标准差大致在0~0.06之间,气候变化敏感性的峰值出现在设计降雨量为25~40 mm的范围。

② 我国城市雨水控制与利用设施的气候变化敏感区域主要集中在东部,按照敏感性从大到小排序为:京津冀地区、山东省和海南省大部分地区>东北地区>华中地区>其他地区。

③ 对于气候变化敏感的区域,雨水控制设施的年径流总量控制率或因气候变化而无法达到预期值,因此应尽量增加雨水控制设施的规模;而对于气候变化不敏感的区域,气候变化对年径流总量控制率影响不大,因此根据时长较短的降雨序列即可准确确定其年径流总量控制率所对应的设计降雨量。

### 参考文献:

- [1] Groisman P Y, Karl T R, Easterling D R, et al. Changes in the probability of heavy precipitation: important indicators of climate change[J]. Climatic Change, 1999, 42(1): 243-283.
- [2] 周广胜, 何奇瑾. 城市内涝防治需充分预估气候变化的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(16): 4961-4964.  
Zhou Guangsheng, He Qijin. Impact of climate change should be fully predicted in urban waterlogging control[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(16): 4961-4964 (in Chinese).
- [3] 任国玉, 任玉玉, 战云健, 等. 中国大陆降水时空变异规律——II. 现代变化趋势[J]. 水科学进展, 2015, 26(4): 451-465.  
Ren Guoyu, Ren Yuyu, Zhan Yunjian, et al. Spatial and temporal patterns of precipitation variability over mainland China: II. Recent trends[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(4): 451-465 (in Chinese).
- [4] 杨青娟, 朱钢. 雨水管网和城市绿地的协同优化设计研究[J]. 中国给水排水, 2014, 30(7): 94-98.  
Yang Qingjuan, Zhu Gang. Collaborative optimization

- design of urban green space and stormwater system[J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(7): 94 - 98 (in Chinese).
- [5] 王澄海,李健,李小兰,等. 近50a中国降水变化的准周期性特征及未来的变化趋势[J]. 干旱区研究, 2012, 29(1): 1 - 10.  
Wang Chenghai, Li Jian, Li Xiaolan, *et al.* Analysis on quasi-periodic characteristics of precipitation in recent 50 years and trend in next 20 years in China[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(1): 1 - 10 (in Chinese).
- [6] 钟军. 中国降水的时空和概率分布特征[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.  
Zhong Jun. Temporal-spatial and Probability of Distribution of Precipitation in China[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2013 (in Chinese).
- [7] Almazroui M, Islam M N, Saeed F, *et al.* Assessing the robustness and uncertainties of projected changes in temperature and precipitation in AR5 Global Climate Models over the Arabian Peninsula[J]. Atmospheric Research, 2017, 194: 202 - 213.
- [8] Shen Q, Cong Z, Lei H. Evaluating the impact of climate and underlying surface change on runoff within the Budyko framework: A study across 224 catchments in China[J]. J Hydrol, 2017, 554: 251 - 262.
- [9] 高学杰,张冬峰,陈仲新,等. 中国当代土地利用对区域气候影响的数值模拟[J]. 中国科学:地球科学, 2007, 37(3): 397 - 404.  
Gao Xuejie, Zhang Dongfeng, Chen Zhongxin, *et al.* Numerical simulation of the impact of land use on regional climate in contemporary China[J]. SCIENTIA SINICA Terrae, 2007, 37(3): 397 - 404 (in Chinese).
- [10] 刘振,潘益农,张润森,等. 环太湖地区土地利用变化的局地气候效应[J]. 气象科学, 2013, 33(6): 619 - 626.  
Liu Zhen, Pan Yinong, Zhang Runsen, *et al.* Local climate response to land use change in Taihu lake area[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2013, 33(6): 619 - 626 (in Chinese).
- [11] 王文亮,李俊奇,车伍,等. 雨水径流总量控制目标确定与落地的若干问题探讨[J]. 给水排水, 2016, 42(10): 61 - 69.  
Wang Wenliang, Li Junqi, Che Wu, *et al.* Discussion on the determination and landing of rainwater runoff control targets[J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 42(10): 61 - 69 (in Chinese).
- [12] 夏军,石卫,雒新萍,等. 气候变化下水资源脆弱性的适应性管理新认识[J]. 水科学进展, 2015, 26(2): 279 - 286.  
Xia Jun, Shi Wei, Luo Xinping, *et al.* Revisions on water resources vulnerability and adaption measures under climate change[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(2): 279 - 286 (in Chinese).



作者简介:张质明(1984 - ), 男, 北京人, 博士, 讲师, 研究方向为气候变化影响与水环境模拟。

E-mail: zhangzhiming@bucea.edu.cn

收稿日期: 2017 - 11 - 26