

张彪, 谢高地, 薛康, 王金增, 肖玉, 张灿强. 北京城市绿地调蓄雨水径流功能及其价值评估. 生态学报 2011, 31(13): 3839-3845.
Zhang B, Xie G D, Xue K, Wang J Z, Xiao Y, Zhang C Q. Evaluation of rainwater runoff storage by urban green spaces in Beijing. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(13): 3839-3845.

北京城市绿地调蓄雨水径流功能及其价值评估

张彪^{1,*}, 谢高地¹, 薛康², 王金增², 肖玉¹, 张灿强¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 北京林业勘察设计院, 北京 100029)

摘要: 随着城市化进程的加快, 城区不透水面积急剧增加, 改变了城市自然水循环。充分认识与发挥城市绿地调蓄雨水径流的积极作用, 对于城市生态环境的改善和绿地资源的建设管理具有重要意义。以 2009 年北京城市园林绿地调查数据为基础, 采用径流系数法和影子价格法评估了绿地调蓄雨水径流的功能及其价值。结果表明: 2009 年北京城市绿地生态系统调蓄雨水径流 1.54 亿 m³, 单位面积绿地调蓄雨水径流 2494 m³/hm²; 绿地年调蓄雨水径流价值 13.44 亿元, 约合 2.18 万元/hm²; 不同区县绿地调蓄雨水功能主要受其面积影响, 朝阳区绿地调蓄雨水径流及其价值量最高, 其次为海淀区、顺义区、丰台区和通州区绿地, 而密云县、怀柔区和门头沟区绿地调蓄雨水径流能力及其价值较低。研究结果对于认识北京城市绿地的功能与价值、促进城市绿地的科学管理和建设维护具有一定的指导意义。

关键词: 城市绿地; 径流调蓄; 价值评估; 北京市

Evaluation of rainwater runoff storage by urban green spaces in Beijing

ZHANG Biao^{1,*}, XIE Gaodi¹, XUE Kang², WANG Jinzeng², XIAO Yu¹, ZHANG Canqiang¹

1 Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 Beijing Municipal Bureau of Landscape and Forestry, Beijing 100029, China

Abstract: As the world population increases, more and more people will live and work in cities. Urbanization involves replacement of vegetated surfaces by impervious surfaces; often causing an increase in the rate and volume of surface runoff of rainwater. Climate change may further increase these fluctuations and the flood risk. Beijing experiences rapid urbanization and the rapid urban extension alter natural hydrological processes. Urban green spaces have positive effects on infiltration and storage of water in the soil, resulting in run-off reduction, nutrient and pollutant removal, and improved groundwater quality. Therefore, urban green spaces in Beijing can play an important role in the water cycle, for the improvement of urban ecology and management. Although some studies found that the green areas in Beijing had positive impact on reduction of storm water runoff, only a few studies could reveal the economic or ecological benefits of rainwater storage by urban green spaces. To evaluate the benefits of rainwater storage by urban green spaces and to provide a reference point for the public and government organizations, we grouped rainwater storage into two ecosystem benefits: rainwater runoff reduction and rainwater purification. Based on inventory data of urban green spaces in Beijing (2009), the amount of rainfall runoff reduction was calculated by the rainwater runoff coefficient of different green types, the benefits of rainwater storage by green space were evaluated by the shadow price method of the unit cost for reservoir and price of reclaimed water. The results showed that, a total volume of 1.54×10^8 m³ rainwater was conserved in these urban green spaces, which almost corresponds to the annual water needs of urban ecological landscape in Beijing, and 2494 m³ of potential runoff was stored per hectare of green area. The total economic benefit was 1.34 billion Yuan, which equals three quarters of the maintenance cost of green spaces in Beijing, and the monetary value of runoff storage was 21.77 thousand

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2009CB421106)

收稿日期: 2010-12-21; 修订日期: 2011-03-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangbiao@igsrr.ac.cn

<http://www.ecologica.cn>

Yuan per hectare. We also found that the benefits could be ranked by district or county in the same way as urban green areas, but the average benefits per hectare green spaces showed variable trends, which may be related to the varying ISI (Impervious Surface Index) with regions. To reduce the high runoff during rainfall and increase rainwater harvesting as an alternative water supply one constructs drainage facilities. This implies a greater financial burden and less water resources. Beijing could benefit from improved rainwater drainage through soft ground since the alternative of building and maintaining a storm water drainage system involves a high cost. Therefore, our research will contribute to realize the role that Beijing's green spaces are playing in the regulation of rainwater, and to the construction and scientific management of urban green spaces. As our study has demonstrated, there are several lessons for policy, practice and research in order to develop new urban green spaces, enhancing the management effectiveness of existing green spaces, financial innovations to generate resources for sustainable management of green spaces, and local monitoring and local enforcement for effective governance of urban green spaces.

Key Words: urban green spaces; runoff storage; evaluation; Beijing

当前全球人口正在向城市聚集, 预计 2030 年世界将有 60% 人口生活在城市^[1], 对于发展中国家来说, 这种趋势更加明显^[2]。城市人口的快速增加和城市规模的不断扩张, 使得城区面积不断扩大, 经过人工改造的城市下垫面不透水面积急剧增加, 强烈改变了自然水分循环过程, 促使城市地区的生态、经济以及社会因素发生复杂变化^[3], 主要表现在城区排水压力增大, 地下水来源补给减少以及地表径流携带污染物等。降雨带来的水文和水质问题对城市水体的影响越来越大^[4]。

绿地在减少城区暴雨径流、节省市政排水设施以及净化雨水等方面具有重要作用。Bernatzky^[5] 研究发现, 在植被覆盖的城市地区, 只有 5%—15% 的降水形成地表径流, 其余降水都被植被拦截; 而没有植被的城市区域, 大约降雨中的 60% 以地表径流的形式排到城市下水道; Gill 等^[6] 在大曼彻斯特 (Greater Manchester) 模拟表明, 居民区绿地覆盖增加 10% 可减少地表径流的 4.9%, 再增加 10% 类似绿地覆盖, 可减少地表径流的 5.7%; 而 Barrett 等^[7] 发现高速公路两侧绿带可减少 85% 的悬浮物, 31%—61% 的总磷、总铅和总氮。在国外, 城市雨水管理已由单纯的注重管道末端的快速排出雨水, 转向雨水径流的综合化利用研究, 尤其是将屋顶绿化作为一种有效的雨水利用方式^[8-11]。

目前正在建设世界城市的北京, 不仅人口高度集中, 建成区面积不断扩大, 而且地下水位明显下降, 面临严重水资源紧缺和城区洪涝灾害增加的困境^[12], 充分利用雨水资源成为缓解城市缺水 and 改善环境的有效手段^[13]。张思聪等^[14] 采用绿地滞蓄雨水实验, 模拟分析了北京绿地对减少径流系数和消减暴雨径流峰值的作用; 孟光辉等^[15] 认为, 下凹式绿地 (下凹 50—100 mm) 每年仅有 2—3 次暴雨产生溢流, 绝大部分雨水径流蓄渗在绿地中, 表现出很好的蓄渗效果; 侯爱中等^[16] 在北京市奥林匹克公园, 下凹式绿地和蓄水池可以有效削减洪峰, 减小径流系数, 从而增加雨洪资源利用量。田仲等^[17] 研究表明, 城市绿地降雨量、降雨强度与径流量存在一定关系, 坡面绿地雨水径流的收集利用能力较大。不过与发达国家相比, 我国城市在雨水集蓄方面还存在较大差距, 城市雨水多停留在管道排出上。

虽然我国已有部分城市积极开展了雨洪利用的相关研究, 但是城市管理者们似乎更愿意建设排水净水设施来解决城区雨水径流问题, 究其原因与对绿地在城市雨水调蓄中的作用认识不足有关。城市雨水资源化利用有着巨大的经济效益和生态效益^[18-19], 通过价值化手段定量评价生态服务功能的价值有助于提高人们的生态保护意识, 因此定量开展城市绿地调蓄雨水径流综合评估, 有助于提高人们对城区绿地的调蓄雨水径流功能和重要性的认识, 充分利用城市雨水资源解决城市绿地灌溉水源问题, 从而促进城市绿地的科学管理和建设维护。

1 研究区概况

1.1 生态环境特点

北京市位于华北平原的西北部, 土地总面积 16807.8 km², 下辖 2 个主城区 (东城区和西城区)、4 个近郊

区(朝阳区、海淀区、丰台区与石景山区)以及 10 个远郊区县(昌平区、顺义区、通州区、大兴区、平谷区、怀柔区、密云县和延庆县)。北京属温带大陆季风性气候,多年平均降水量 638.8 mm,降水分布极不均匀,主要集中在夏季,多以暴雨形式出现,局部地区容易出现短时间洪涝灾害。近年来,快速的城市化进程使相当部分的地表为不透水表面所覆盖,如屋顶、街道、人行道、车站、停车场等。1949 年新中国成立初期,北京城区面积为 18 km²,1973—2005 年间,建成区面积以年均 32.07 km²/a 的速度扩展^[20],而 2009 年北京城区已扩大到 1349.8 km²。城市化后原来大量天然可渗地面成为不透水的硬质地表面,大量的不透水地面改变了原有水循环过程,造成地表径流系数变大(图 1),严重阻隔了地表水和地下水的传输路径。

城市为了迅速排走地表雨水,保证城市公共设施在降雨时和降雨后能尽快恢复正常功能,而必然不断完善雨水管道网,兴建大量地下排水管道与抽水泵站,加快城市雨水的排泄;另一方面,阻断了降雨对地下水的补给通道,造成地下水补给量长期小于开采量,地下水位不断下降,形成大范围的降落漏斗,威胁城市安全(图 2)。

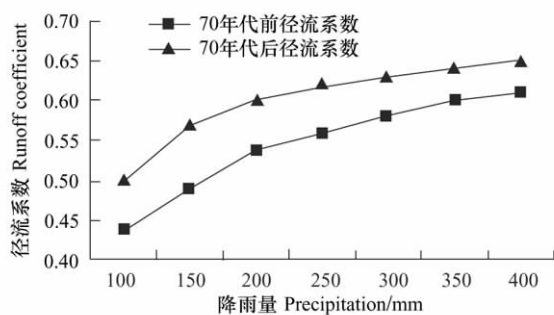


图 1 北京城区暴雨径流系数 70 年代前后变化对比^[21]

Fig. 1 The change of runoff coefficient in Beijing before and after 1970s

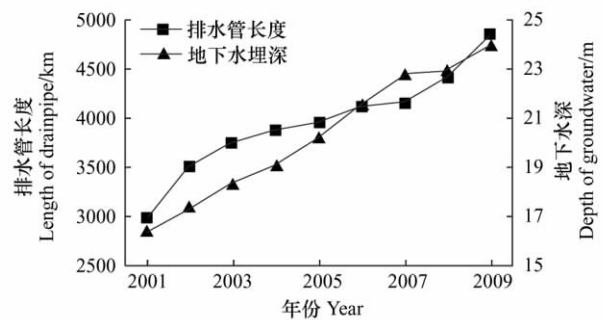


图 2 北京 2001—2009 年排水设施与地下水资源情况^[22-23]

Fig. 2 The length of rain drainage and the groundwater level from 2001 to 2009 in Beijing

1.2 绿地资源现状

2009 年北京市园林绿化局组织相关单位对规划市区范围(含海淀山后、丰台河西),以及新城、中心城镇和建制镇的规划范围(含达到城市建设标准的乡村,如新农村等)的园林绿地开展了调查。调查内容包括园林绿地的类型、面积,乔、灌、花、草等园林植物的种类、数量等。初步调查结果表明,北京市城区绿地和小城镇绿地面积 616.95 km²,其中公园绿地面积为 180.69 km²,占全部绿地的 29.3%;生产绿地面积为 12.24 km²,占全部绿地的 2.0%;防护绿地面积为 148.71 km²,占全部绿地的 24.1%;道路(河岸)绿地面积为 121.27 km²,占全部绿地的 19.7%;附属绿地面积为 154.04 km²,占全部绿地的 25.0%。绿地资源分布如图 3 所示。

2 研究方法

2.1 绿地调蓄雨水径流量计算

城市绿地调蓄雨水径流的功能主要表现为雨水径流的滞蓄和净化。其中城市绿地对雨水的滞蓄能力受土壤性质、土壤水分特性、饱和导水率、降雨特性等方面的影响。土壤渗透性是描述土壤入渗快慢的重要土壤物理特征参数,在其他条件相同情况下,土壤渗透性能越好,地表径流越少^[24]。采用各类绿地类型土壤稳渗率作为土壤渗透性参数取值依据,即以土壤渗透率最高的居住区绿地为标准,其他绿地类型土壤渗透率与居住区绿地土壤渗透率相比,得到土壤渗透性参数(表 1),因此评估绿地调蓄径流量公式可表示为:

$$W = \sum_{i=1}^n W_i \quad (1)$$

$$W_i = 10^{-3} \times \alpha_i \times (1 - \gamma_i) \times R_i \times A_i \quad (2)$$

式中, W 为绿地年调蓄雨水径流量(m³/a), W_i 为第 i 个图斑绿地调蓄雨水径流量(m³/a), α_i 为土壤渗透性参数, γ_i 为不同绿地斑块径流系数, R_i 为不同地区年降水量(mm), A_i 为绿地图斑面积(m²)。

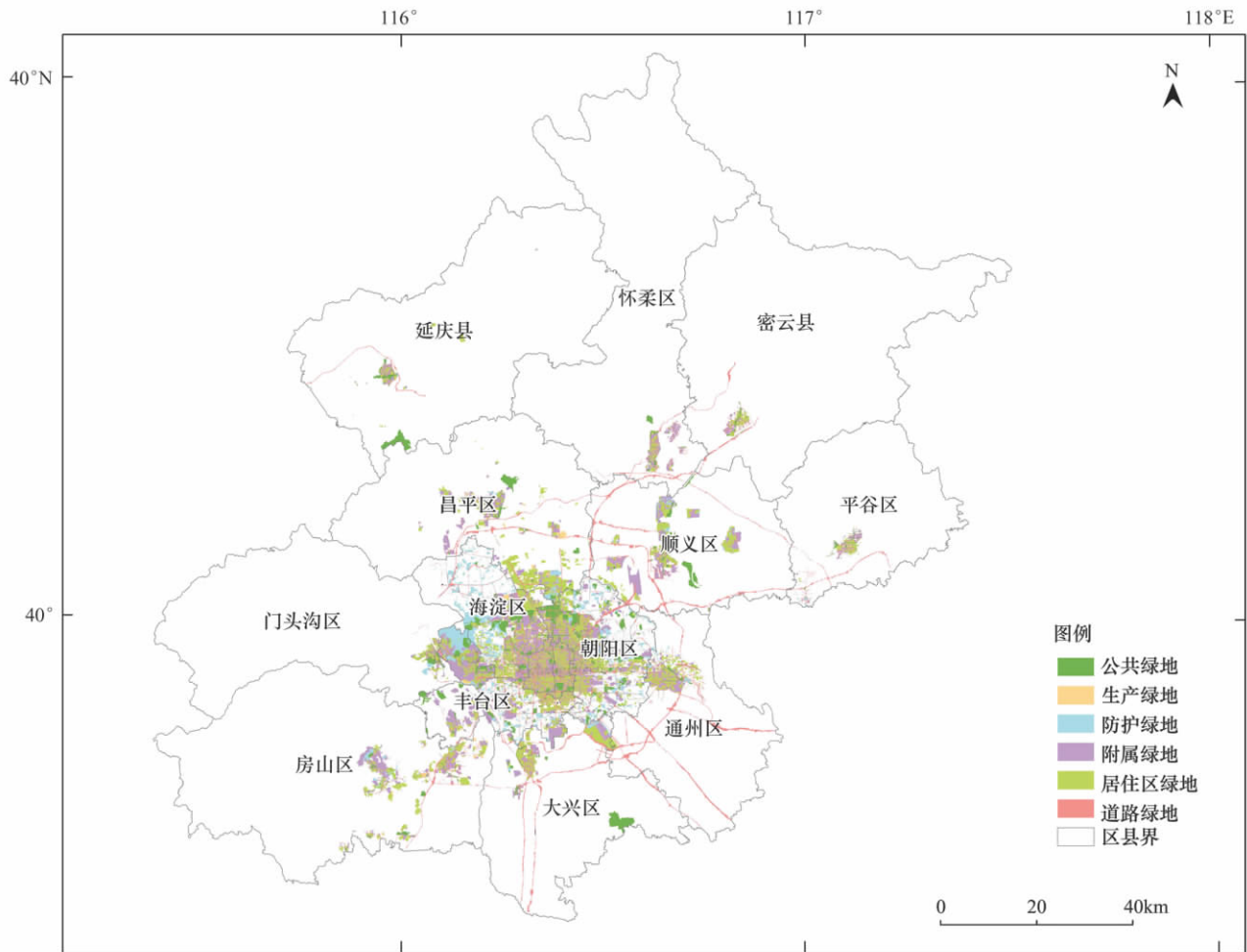


图3 北京市绿地资源空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution of green spaces in Beijing

表1 北京市不同绿地类型土壤渗透性参数

Table 1 Adjust coefficients of soil infiltration of different forestland types in Beijing

绿地类型 Forestland type	土壤渗透率/(mm/min) ^[25] Rate of soil infiltration	土壤渗透性参数 Adjust coefficient
公共绿地 Public green space	8.25	0.82
道路绿地 Roadside green space	3.95	0.39
居住区绿地 Residential green space	10.09	1
附属绿地 Affiliated green space	8.23	0.82
防护绿地 Defensive forestry	7.38	0.73
生产绿地 Productive green space	8.7	0.86

2.2 绿地调蓄雨水径流价值计算

快速城市化可使排水河道防洪负担成倍增加,而绿地可有效阻挡降水、延迟降雨在地表积聚时间,减少地表径流量和推迟洪峰形成时间,从而减少暴雨冲毁房屋建筑、排水设施等其他市政基础设施造成的损失和维修费用。因此,城市绿地相当于绿色水库,能够有效减少地表径流外排量,增加降雨向土壤水的转化量,有效补给地下水。在绿地滞蓄雨洪时,部分悬浮物随雨水进入土壤中滞留下来,从而对雨水能起到一定程度的净化作用。侯立柱等^[26]研究表明:天然降水、绿地径流和屋面径流水质较好,基本能达到地表水五类水水质标准,绿地径流水质虽属五类标准,但与三类标准相比,仅有氨氮超标。城市蓄集雨水可以用于浇灌绿地、洗车、

<http://www.ecologica.cn>

冲刷、景观和回灌地下等。根据北京市中水水质标准, 绿地净化后的径流水质与中水大体相同, 因此绿地滞蓄雨水与净化水质的价值可以采用水库造价和中水价格分别作为相应的影子价格, 其计算公式如下所示:

$$V_i = \sum_{i=1}^n W_i \times (P_1 + P_2) \quad (3)$$

$$V = \sum_{i=1}^n V_i \quad (4)$$

式中, V 为绿地调蓄雨水径流价值(元/a), V_i 为第 i 个绿地图斑的调蓄雨水径流价值(元/a), W_i 为第 i 个图斑绿地调蓄雨水径流量(m^3/a), P_1 表示北京地区水库的造价, P_2 为北京市中水价格(元/ m^3)。

3 结果分析

国内外大量研究成果与应用实践表明, 城市绿地对于减少径流系数和削减暴雨径流峰值具有明显作用。根据北京市水资源公报数据, 2009 年北京市降水量 448 mm, 其中平谷区降水量最大, 为 562 mm; 延庆县最小, 为 351 mm。北京地区绿地径流系数为 0.1, 硬化地表径流系数为 0.8^[27]。根据公式(1—2) 计算得到, 2009 年北京城市绿地生态系统调蓄雨水径流 1.54 亿 m^3 , 约合单位面积绿地调蓄雨水径流 2494 m^3/hm^2 。据研究^[28], 我国城市森林单位面积涵养水源能力为 3000 m^3/hm^2 , 考虑到北京地区植被蒸发散量较大, 加上林草结构植被本身要比森林结构涵养水源能力差些, 也间接说明该结果基本可信。

城区绿地调蓄雨水径流的生态经济效益主要体现在 3 个方面: (1) 绿地拦蓄雨水可增加城市水资源供给途径, 缓解城市水资源紧缺局面, 减少城市绿地灌溉次数, 节约灌溉水量, 提高水资源利用率; (2) 绿地拦蓄雨水可减少降雨排放量及城市路面积水, 减轻城市排水压力, 减少因向市政管网排放雨水带来的维护费用; (3) 绿地拦蓄雨水过程中可吸收截留部分污染物, 减少因雨水污染而带来的河流水体环境污染的治理费用; 同时雨水下渗可抬高地下水位, 抑制或减缓地下水漏斗区扩展蔓延, 改善城区水文地质环境。根据北京地区水库造价^[29] 为 7.73 元/ m^3 , 以及中水价格^[30] 为 1 元/ m^3 , 绿地年调蓄雨水径流价值 13.44 亿元, 约合 2.18 万元/ hm^2 。

北京市绿地资源主要集中分布在朝阳、海淀和顺义区, 绿地面积占到北京市绿地的 45.7%。其中朝阳区绿地年调蓄雨水径流 $31.33 \times 10^6 \text{m}^3$, 提供雨水调蓄总价值为 2.74 亿元, 其次为海淀区和顺义区, 其雨水径流调蓄量分别为 $26.41 \times 10^6 \text{m}^3$ 和 $18.39 \times 10^6 \text{m}^3$, 相应的调蓄雨水径流总价值为 2.31 亿元和 1.61 亿元。其余区县绿地提供的雨水径流调蓄功能量与价值如图 4 所示。不过从单位面积绿地调蓄雨水径流能力来看, 西城区和东城区绿地较高, 其次为朝阳区、丰台区、石景山区和顺义区绿地, 延庆县和怀柔区的城市绿地调蓄雨水能力并不高。

4 结论与讨论

北京市雨水分布极不均匀, 80% 以上降雨量集中在 6—9 月, 而城市公共绿地具有空间开阔、占地面积大等特点, 可以接收滞留大量的雨水资源。因此, 充分发挥城区绿地滞蓄暴雨功能, 是有效利用降雨、增加入渗、减小暴雨径流和河道防洪负担并改善水生态环境的重要措施, 是今后城市化发展过程中充分利用水资源、减轻城市防洪负担的有效途径。而且在雨水下渗的同时, 也能充分利用土壤的净化能力, 对城区地表径流导致的面源污染控制具有重要意义。

本研究以 2009 年北京城市园林绿地调查数据为基础, 采用径流系数法计算得到北京城市绿地生态系统调蓄净污 1.54 亿 m^3 , 与 2006 年北京生态景观用水量(1.61 亿 m^3) 大体相当^[30], 说明绿地对雨水径流的调蓄作用不可忽视。同时, 采用影子价格法, 计算得到北京市绿地年调蓄雨水径流价值 13.44 亿元, 其中绿地暴雨缓排价值 11.9 亿元, 如果按照二类养护标准计算(6 元/($\text{m}^2 \cdot \text{a}$)), 北京绿地年养护成本 17.83 亿元, 考虑到绿地同时具有其他重要生态服务价值, 也说明了加强城市绿地建设的生态重要性。此外, 从不同地区来看, 绿地调蓄雨水径流功能主要受其面积影响, 朝阳区绿地调蓄雨水径流及其价值量最高, 其次为海淀区、顺义区、丰台区和通州区绿地, 而密云县、怀柔区和门头沟区绿地调蓄雨水径流功能及其价值较低。但是从其单位面积绿地调蓄雨水功能而言, 东城区和西城区较高, 其次为城郊区, 密云县和怀柔区等边远区县绿地调蓄雨

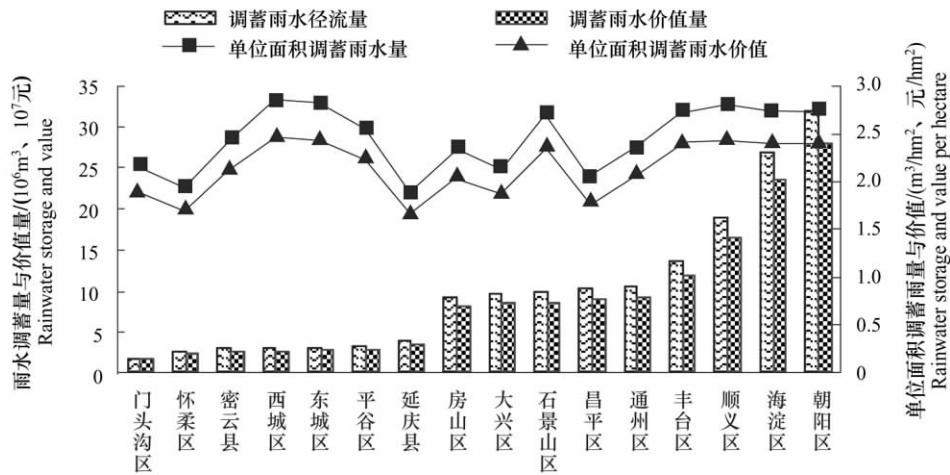


图4 北京市不同区县绿地调蓄雨水径流的功能及价值

Fig. 4 The benefit of rainwater storage by urban green space in different county of Beijing

水能力较低,其原因可能与其城区内硬化地表分布有关^[32]。

不过,绿地对雨水的滞蓄能力以及对污染物的控制作用,涉及土壤性质、土壤水分以及降雨特性等多方面的影响,决定了定量评估绿地调蓄净污功能及其价值的复杂性和难度。本研究在评价分析北京市绿地缓排暴雨和净化水质过程中,没有考虑不同地形特征、土壤深度和区域蒸散量等因子的影响,也没有涉及到不同绿地对具体污染物的截留固定作用,这是下一步需要重点研究和解决的问题。尽管本研究所引用的参数来源于定点实验数据,但还不能完全反映北京市不同区域绿地缓排暴雨及控制污染的真实情况,因此,准确评价绿地调蓄净污功能及其价值有待深入工作。

References:

- [1] Bolund P, Hunhammar S. Ecosystem services in urban areas. *Ecological Economics*, 1999, 29(2): 293-302.
- [2] Montgomery M R. The urban transformation of the developing world. *Science*, 2008, 319(5864): 761-764.
- [3] DeFries R, Pandey D. Urbanization, the energy ladder and forest transitions in India's emerging economy. *Land Use Policy*, 2010, 27(2): 130-138.
- [4] Tsihrintzis V A, Hamid R. Modeling and management of urban stormwater runoff quality: a review. *Water Resources Management*, 1997, 11(2): 137-164.
- [5] Bernatzky A. The effects of trees on the urban climate//Trees in the 21st Century. Berkhamster: Academic Publishers, 1983: 59-76.
- [6] Gill S E, Handley J F, Ennos A R, Pauleit S. Adapting cities for climate change: the role of the green infrastructure. *Built Environment*, 2007, 33(1): 115-133.
- [7] Barret M E, Walsh P M, Malina J F, Charbeneau R J. Performance of vegetative controls for treating highway runoff. *Journal of Environmental Engineering*, 1998, 124(11): 1121-1128.
- [8] Mentens J, Raes D, Hermy M. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century?. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 77: 217-226.
- [9] Osmundson T. Roof Gardens: History, Design, and Construction. New York: W W Norton & Company Ltd, 1999.
- [10] Wong N H, Tay S F, Wong R, Ong C L, Sia A. Life cycle cost analysis of rooftop gardens in Singapore. *Building Environment*, 2003, 38(3): 499-509.
- [11] Dunnett N, Kingsbury N. Planting Green Roofs and Living Walls. Portland: Timber Press, 2004.
- [12] Wang H Z, Li X F. Calculation method for stormwater infiltration facilities in urban area of Beijing city. *China Water & Wastewater*, 2001, 17(11): 37-39.
- [13] Zuo J B, Liu C M, Zheng H X, Chen Y S. Counter measures and characteristics of Beijing urban rainwater utilization. *Resources Science*, 2008, 30(7): 990-998.
- [14] Zhang S C, Hui S B, Xie S C, Lü X B. The research of rainwater utilization in Beijing. *Beijing Water Resources*, 2003(4): 20-22.
- [15] Ye S G, Liu H, Meng G H. Analysis of rain storage and infiltration in sunken-lawn under the condition of designed storm. *Journal of China Agricultural University*, 2001, 6(6): 53-58.

- [16] Hou A Z, Tang L H, Zhang S C. Impacts of sunken lawn and storage pond on urban flood. *Beijing Water*, 2007, (2): 42-44.
- [17] Tian Z, Su D R, Guan D Y. Research on the utilization of rainwater runoff of city park green space. *Chinese Garden*, 2008, 24(11): 61-65.
- [18] Lu X G, Pang Q J, Deng A L, Wang W F. Potential, benefit analysis and utilization mode of urban rainwater resources. *Journal of Economics of Water Resources*, 2010, 28(1): 1-4, 75.
- [19] Song J X, Li H E, Li Q. Urban rainfall resources utilization and its effects on eco-environment. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, 22(2): 32-35.
- [20] Mou F Y, Zhang Z X, Chi Y W, Liu B, Zhou Q B, Wang C Y, Tan W B. Dynamic monitoring of built-up area in Beijing during 1973-2005 based on multi-original remote sensed images. *Journal of Remote Sensing*, 2007, 11(2): 257-268.
- [21] Liu Z Y. Analysis of characteristics and cause of urban storm runoff change and discussion on some issues. *Journal of China Hydrology*, 2009, 29(3): 55-58.
- [22] Beijing Statistical Bureau. *Beijing Statistical Yearbook 2010*. Beijing: China Statistics Press: 35-36.
- [23] Beijing Municipal Water Conservancy Bureau. *Water Resources Bulletin (2003-2009)*. [Access date] <http://www.bjwater.gov.cn/tabid/207/Default.aspx>.
- [24] Yu X X, Zhang Z Q, Chen L H, Xie B Y, Wang L X. *Forest Ecological Hydrology*. Beijing: China Forestry Publishing House, 2004: 32-35.
- [25] Ma X M. *Studies on soil and atmosphere environment in different green land in Beijing*. Beijing: Beijing Forestry University, 2007.
- [26] Hou L Z, Ding Y Y, Feng S Y, Zhang S H, Chen J G, Liao R H. Comparison of water quality of rainwater runoff from different underlying surface in Beijing City. *China Water and Wastewater*, 2006, 22(23): 35-38.
- [27] Yin S F. Discussions on some questions or urban storm issues of rainwater and flood utilization in Beijing City. *Beijing Water*, 2009, (S1): 77-79.
- [28] Wu Y, Su Z X. Present state of Chinese city greens areas and estimation of its value in ecology and economy. *Journal of Sichuan Teachers College: Natural Science*, 2002, 23(2): 184-188.
- [29] Zhang B, Li W H, Xie G D, Xiao Y. Water conservation of forest ecosystem in Beijing and its value. *Ecological Economics*, 2010, 69(7): 1416-1426.
- [30] Liu J, Chu M. Analysis of reclaimed water recycle problem in Beijing City. *Ecological Economy*, 2007, (7): 138-140.
- [31] Wei B Y, Wang J. Supply and demand analysis of water resources in Beijing. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2009, 7(2): 1672-1683.
- [32] Xiao R B, Ouyang Z Y, Cai Y A, Li W F. Urban landscape pattern study based on sub-pixel estimation of impervious surface. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(8): 3189-3197.

参考文献:

- [12] 汪慧贞, 李宪法. 北京城区雨水入渗设施的计算方法. *中国给水排水*, 2001, 17(11): 37-39.
- [13] 左建兵, 刘昌明, 郑红星, 陈远生. 北京市城区雨水利用及对策. *资源科学*, 2008, 30(7): 990-998.
- [14] 张思聪, 惠士博, 谢森传, 吕贤璐. 北京市雨水利用. *北京水利*, 2003, (4): 20-22.
- [15] 叶水根, 刘红, 孟光辉. 设计暴雨条件下凹式绿地的雨水蓄渗效果. *中国农业大学学报*, 2001, 6(6): 53-58.
- [16] 侯爱中, 唐莉华, 张思聪. 凹式绿地和蓄水池对城市型洪水的影响. *北京水务*, 2007, (2): 42-44.
- [17] 田仲, 苏德荣, 管德义. 城市公园绿地雨水径流利用研究. *中国园林*, 2008, 24(11): 61-65.
- [18] 鹿新高, 庞清江, 邓爱丽, 王伟锋. 城市雨水资源化潜力及效益分析与利用模式探讨. *水利经济*, 2010, 28(1): 1-4, 75.
- [19] 宋进喜, 李怀恩, 李琦. 城市雨水资源化及其生态环境效应. *生态学杂志*, 2003, 22(2): 32-35.
- [20] 牟凤云, 张增祥, 迟耀斌, 刘斌, 周全斌, 王长有, 谭文彬. 基于多源遥感数据的北京市 1973-2005 年间城市建成区的动态监测与驱动力分析. *遥感学报*, 2007, 11(2): 257-268.
- [21] 刘志雨. 城市暴雨径流变化成因分析及有关问题探讨. *水文*, 2009, 29(3): 55-58.
- [22] 北京市统计局. *北京市统计年鉴 2010*. 北京: 中国统计出版社, 2010: 35-36.
- [23] 北京市水文局. *北京市水资源公报 2009*. [Access date] <http://www.bjwater.gov.cn/tabid/207/Default.aspx>.
- [24] 余新晓, 张志强, 陈丽华, 谢宝元, 王礼先. *森林生态水文*. 北京: 中国林业出版社, 2004: 32-35.
- [25] 马秀梅. *北京城市不同绿地类型土壤及大气环境研究*. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [26] 侯立柱, 丁跃元, 冯绍元, 张书函, 陈建刚, 廖日红. 北京城区不同下垫面的雨水径流水质比较. *中国给水排水*, 2006, 22(23): 35-38.
- [27] 殷社芳. 北京城市雨洪利用若干问题的探讨. *北京水务*, 2009, (S1): 77-79.
- [28] 吴勇, 苏智先. 中国城市绿地现状及其生态经济价值评价. *西华师范大学学报: 自然科学版*, 2002, 23(2): 184-188.
- [30] 刘捷, 储媚. 北京市中水回用问题浅析. *生态经济*, 2007, (7): 138-140.
- [31] 魏保义, 王军. 北京市水资源供需分析. *南水北调与水利科技*, 2009, 7(2): 1672-1683.
- [32] 肖荣波, 欧阳志云, 蔡云楠, 李伟峰. 基于亚像元估测的城市硬化地表景观格局分析. *生态学报*, 2007, 27(8): 3189-3197.