资源型缺水城市绿地灌溉需水量预测*

——以天津中心城区绿地为例

韩舒先 王冰玉 史 琰

浙江农林大学风景园林与建筑学院 杭州 31130

摘要：为探究资源型缺水严重地区的绿地灌溉需水量，对未来绿地规划、水资源管理和保障城市供水安全提供科学指导，文章以绿化用水量与城市水供给之间矛盾特别突出的天津为例，通过气候学方法评估天津绿地灌溉需水量，结合情景模拟方法分析气候变化和绿地植物比例对灌溉需水量的影响。结果表明：天津绿地 5—7 月需水量最大，约占全年总需水量的 46%，4、5 月份需水量与降水量差额较大，需要靠人工灌溉补充水分来满足其需要；天津建成区绿地年灌溉需水量逐年增加，2020 年绿地灌溉需水量为 8 000.6 万 m^3，预测 2030 年绿地灌溉需水量为 15 400.5 万 m^3，大约是 2020 年绿地灌溉需水量的 2 倍，将加剧天津的水资源压力；天津典型绿地类型中，公园绿地灌溉需水量最大，且乔灌型绿地耗水明显比纯草型绿地耗水少。因此，面对城市水资源短缺的形势，在城市绿地景观配置设计中应尽量减少纯草坪景观的推广应用，在实际绿地灌溉之前应对不同植物配置模式下的绿地灌溉用水量作出预设。

关键词：园林灌溉；智慧管理；可持续景观；天津

DOI：10.12169/zgcsly.2022.11.17.0003

Prediction of Irrigation Water Demandby Green Spaces in Resource-based Water Scarce Cities: A Case Study of Green Spaces in the City Core of Tianjin

Han Shuxian Wang Bingyu Shi Yan

(School of Landscape Architecture, Zhejiang Agriculture & Forestry University, Hangzhou 311300, China)

Abstract: In order to estimate the green spaces' demand for irrigation water in resources-based water scarce city and provide science-based guidance on future planning for green spaces, water resources management and water security in urban areas, the paper takes Tianjin, a city much challenged by particularly prominent contradictions between the water demand of green spaces and the water supply, as the case study, to evaluate the irrigation water demand of green spaces using climatological methods and analyze the impact of climate change and the proportion of plants in green spaces on irrigation water demand using the scenario simulation method. The results show that the green spaces in Tianjin pose the largest demand for water from May to July, accounting for 46% of the annual water demand, and the difference between water demand and precipitation in April and May is large, which needs the artificial water replenishment. The annual water demand of green spaces in the built-up areas of Tianjin has been increasing year by year. The water demand in 2020 is 806, 000 m^3, and it is predicted that the water

收稿日期：2022-11-17

* 基金项目：浙江省自然科学基金一般项目（LY19C160007）

第一作者：韩舒先（1997- ），女，硕士生，研究方向为园林与景观设计。E-mail：1976557800@qq.com

通信作者：史琰（1981- ），女，副教授，研究方向为植物景观理论、生态规划设计理论与应用。E-mail：shiyan@zafu.edu.cn

demand in 2030 will be almost doubled to 1.55 million m^3, which will aggravate the water pressure in Tianjin. Among the typical types of green spaces in Tianjin, park green spaces have the largest demand for irrigation water, and arbor-shrub dominated green spaces have obviously less demand for water than turf dominated green spaces. Hence, to address the water shortage in cities, the turf landscape should be avoided in the landscape configuration design for urban green spaces, and the irrigation water demand of green spaces under different plant configuration models should be estimated before the irrigation.

Keywords: garden irrigation; smart management; sustainable landscape; Tianjin

水资源稀缺一直是全球可持续发展的问题[1]。目前全球 25%的人口面临缺水风险，超过 14 亿人生活在缺水地区。由于污染增长、非理性灌溉和城市化，到 2030 年，可用淡水资源将减少 40%，全球 50%以上的人口将面临缺水问题[2]。而城市园林绿地灌溉养护耗水量巨大，且在城市水资源总量中占比较高[3-5]，因此了解城市绿地灌溉需水量至关重要。

目前，对城市绿地灌溉需水量的研究主要集中在灌溉用水量的影响因素、减少绿地灌溉需水量和绿地灌溉优点等方面。其中，在研究灌溉用水量影响因素时发现，居民数量、地块大小和景观实践对独立单户住宅单位需水量有影响[6]；居住环境的户外用途等住房变量、城市热岛效应影响灌溉用水量[7-8]；相比发放节水灌溉技术的公共补贴，提出并实施先进的节水政策可以减少更多的绿地用水浪费[9]；不同城市设计风格相关的草坪面积也是年需水量的重要预测指标。关于减少绿地灌溉需水量，已经证明木本植物不需要定期浇水，因此可以增加半干旱城市景观中的木本植物覆盖[10]，同时降低修剪留茬高度可显著减少草坪耗水量[11]；此外，替代灌溉系统可减少灌溉用水，但重点必须放在雨水等替代来源上和水循环利用等方面[12-15]；智能灌溉系统能准确地确定植物的用水需求并绘制最佳供水地图以最大限度减少水损失[16]。绿地灌溉也有许多突出的优点，如灌溉城市绿地进行降温是一种新兴的、有前途的热量缓解策略[17]，据估计，在全球范围内，当前灌溉的集体影响使平均气温降低了 0.21 ℃[18]；充足的灌溉有利于城市植被的健康及其生态系统服务的持续提供[19]。园林植物灌溉需水的实际应用探索也较为丰富，如对公路岩质边坡绿化[20]、高速公路绿色廊道[21]、郊野公园[22]的灌溉需水量都有探索。

目前，灌溉需水量研究采用的方法有尺度扩展法[23]、气候学法、遥感方法[24]。本研究以严重缺水的天津为例，探究城市绿地生态需水量变化规律及其影响因素。天津缺乏绿地遥感数据，因此采用气候学方法对绿地灌溉用水需求量进行预测与分析，以便对城市绿地系统生态用水配置进行指导，提高水资源利用效率，改善城市生态系统和环境质量，缓解水资源压力。

1　研究区概况

天津（38°34′—40°15′N，116°43′—118°04′E）是中国 4 个直辖市之一，位于华北平原东北部，属暖温带半湿润季风气候，作为环渤海港口城市群的核心城市和对外交往的重要通道之一，在经济和社会发展中发挥着重要作用。天津是典型的资源型缺水城市，2019 人均水资源为 51.8 m^3，远低于世界人均水资源占有量 1 000 m^3 的缺水警戒线[25]；天津未来的需水量将继续增加，预测到 2025 年，全市年需水量约为 39.96 亿 m^3[26]。此外，地下水开采所导致的水位下降和地表水污染问题，使水资源日益紧张，水资源短缺已成为制约天津发展的首要因素。伴随着天津绿地兴建及人民审美素养提升，园林绿地面积持续扩大，截至 2019 年底，天津城市绿化覆盖率达到 37.5%，城市园林绿地面积为 39 472 hm^2，园林植物的灌溉需水量随之日益增长，成为除生产生活用水之外的又一大用水项目。

2　研究方法

2.1　研究对象选择

根据天津经济发展水平、社会进步水平和数据可用性，选取中心城区的滨河绿地、道路绿地、居住区绿地、公园绿地 4 种典型绿地的灌溉用水量作为研究对象。考虑天津绿地变化情况和卫星

图，在植物生长旺盛的 6—9 月份对典型绿地进行全面调查，谷歌地球提供的城市卫星图像分辨率高达 0.6 m，这就使得在高异质性背景下以精细的分辨率直观识别绿地成为可能，并且通过谷歌地球进行视觉判读的方法成本低且操作方便[27]，本研究利用谷歌地图 2020 年的图像作为数据源识别天津典型绿地[28]。采用随机布点进行调查，其中道路绿地 94 个、滨河绿地 30 个、公园绿地 28 个、居民区绿地 66 个，共计 218 个。网格数据以 keyhole markup language（KML）格式导入谷歌地球，画 10 000 m^2 的网格，对网格进行视觉识别，获取网格内的乔木与灌木冠层的比率和裸露草皮的覆盖率等数据。

2.2 绿地灌溉用水量计算

根据供需平衡，使用气候法计算绿地用水需求量，该方法定义为植被的总需水量减去降水的有效利用量，计算公式如下[29-30]：

$$W_{CAM} = \sum_{i=1}^{n} A_i (W_i(t) - P_{G_i}(t))$$

$$W_i = \sum_{i=1}^{n} A_i (W_{Ep_i}(t) + W_{G_i}(t) + W_{S_i}(t))$$

式（1）（2）中，t 是某个时间段，基本时间单位是月，气候数据是 2000—2020 年的平均值；W_{CAM} 是通过气候方法计算的绿地灌溉用水需求量（$m^3 \cdot yr^{-1}$）；W_i 是绿地需水量（m^3）；P_{Gi} 是植被对降雨的有效利用量（m^3）；W_{Epi}、W_{Gi} 和 W_{Si} 分别是植物蒸散、植物生长和维持土壤水分赖以生存的总需水量（m^3）；i 代表不同的植被类型，本研究只考虑了两种类型：树木/灌木和裸露草本；A_i 是绿色覆盖区域（m^2）。裸露的草与树遮荫的草的蒸腾作用不相同，因此不考虑后者。

公式（2）中各需水项可分别按以下公式进行计算[31]：

$$W_{Ep_i} = \sum_{i=1}^{n} PF_i(t) \times E\,T_0(t) \quad (3)$$

$$W_{G_i}(t) = W_{Ep_i}/99 \quad (4)$$

$$W_{S_i}(t) = h_i(t) \times P_i \times 10^{-5} \quad (5)$$

式（3）~（5）中：W_{Epi}（t）是一定时期内园林植物的需水量（m^3），为了估计 W_{Epi}（t），根据估计未计量的景观用水的指南对以前使用的方法进行了修改；在景观植物的范畴内，调节因子通常被称为植物因子（PF），而不是作物系数，在本研究中，乔灌木冠层和暴露草丛的 PF 分别为 0.50 和 0.80，PF_i 是第 i 种类型的植物因子或作物系数；ET_o 是参考蒸散量（mm），是一个假设的失水率，该值使确定不同气候地区给定植物的需水量成为可能；h_i 是不同类型植被的有效土壤深度（m），树木、灌木和草本植物的有效土壤深度分别为 1.2、0.6 和 0.3 m；ρ 是践踏人工绿色城市土壤后的土壤容重，平均值为 1.55 $g \cdot m^{-1}$；ε 是城市地区土壤田间持水系数（%），平均值为 26%。

有效降雨是城市绿地植物蒸腾和土壤蒸发对降雨和生长的截留和利用。降雨有效利用的公式如下：

$$P_{G_i}(t) = u_i \times P_i \times 10^{-5} \quad (6)$$

式（6）中：μ_i 为植物利用因子的补充降水量；P_i 为 2000—2020 年均降水量（mm）。

Google Earth 软件越来越多地用于科学研究。使用 Google Earth 地图的软件功能（即“添加多边形标尺”和“显示标尺”）获取有关树木和灌木冠层的比率以及裸露的草皮覆盖率的数据。使用气象数据计算 ET_o，从 CLIMWAT 2.0 平台（https://www.fao.org/nr/water/infores_databases_climwat.html）导出气象站数据，并使用 ET_o 计算器（https://www.fao.org/nr/water/eto.html）获得所选气象站的每日 ET_o。城市绿化用水量采用定额法计算[32]，公式如下：

$$W_{cg} = M \cdot L \quad (7)$$

式（7）中：W_{cg} 为城市绿化灌溉需水量；M 为城市绿地面积（hm^2）；L 为绿化用水定额，指单位绿地面积的灌溉用水量，取值为 200 000 $m^3 \cdot hm^{-2}$。

2.3 情景模拟与分析

对绿色空间变化的两种情况分别进行情景分析。第一种情况在绿地总面积不变的情况下，增加乔灌的比例，假设到 2050 年，裸露的草皮将减少到 2020 年的一半，以评估不同乔灌、草比例下的绿地灌溉需水量的变化情况，并且根据这种变化来理解现有和未来城市绿地对环境的影响。第二种情况假设天津建成区绿地面积增长，从 2000—2020 年天津建成区绿地面积大约以每年 9.15%的速度增长，预计在这种情况下天津的绿地灌溉需水量的增长速度，以探讨随着城市扩展而扩大的绿地对灌溉用水需求的影响。

3　结果与分析

3.1　天津降水与绿地需水量分布

2000—2020 年，我国资源型缺水城市（天津、北京、石家庄、太原、呼和浩特、郑州、西安、长春、乌鲁木齐）的降水主要集中在 6—9 月，降水量约占全年总降水量的 70%（图 1），降雨的丰枯分布极为明显，形成了明显的“非雨季抗旱、雨季防洪”的不利形势，造成水资源的严重浪费。

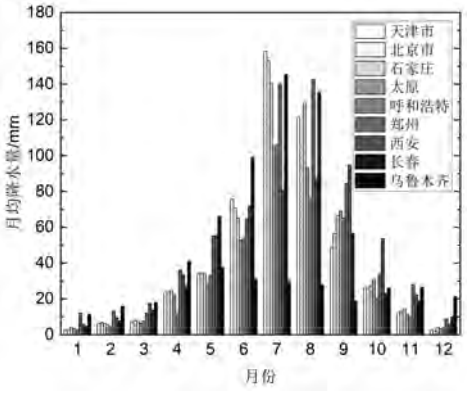


图 1　2000—2020 年资源型缺水城市平均月降水量

由图 2 可知，5—7 月天津绿地需水量最大，约占全年总需水量的 46%；4—5 月份需水量与降水量差额较大，需要靠人工补充水分满足其需要。草本需水量远远大于乔灌木需水量，乔灌木的需水量为 422 mm · hm^{-2}，草本的需水量为 675 mm · hm^{-2}，除了 7、8 月份降水量大于草本需水量，其他的月份均需要人工灌水来保证其生长。

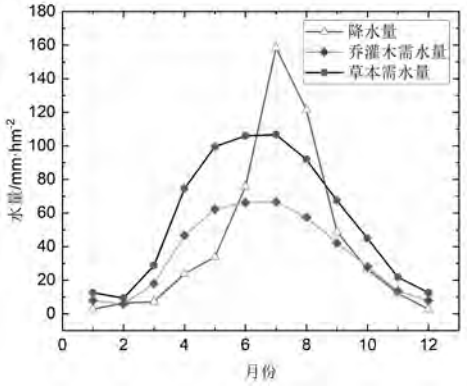


图 2　天津乔灌木和草地需水量的月变化

3.2　典型绿地灌溉需水量

在 4 种绿地类型中，公园绿地单位面积绿地灌溉需水量最大（图 3），公园绿地中草坪面积占比较大（图 4）。实际灌溉中，草坪的养护要求较高，最为耗水。草坪在复合型植物配置模式中占比越多，灌溉用水耗水量就越多，因此带有草坪的植物配置模式的单位面积灌溉用水量较高，天津大部分的灌草型绿地多分布在公园绿地中，且草坪的比例较大，因此草坪的单位面积灌溉用水量较高。乔木型绿地多出现于道路绿地，根据《2021 年天津统计年鉴》的统计结果，2020 年天津道路长度为 9 200 km，并以每年 5.33% 的速度增长，道路绿地占天津总绿地面积的 21.23%，因此灌溉需水量也在逐年增长。

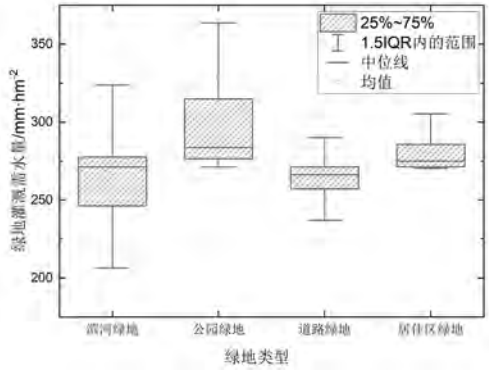


图 3　典型绿地类型绿地灌溉需水量

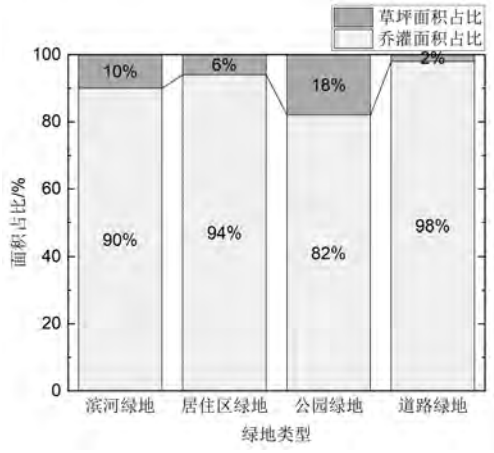


图 4　典型绿地类型乔灌、草所占比例

3.3　绿地需水量变化

天津绿地面积在逐年增加，绿地年总灌溉需水量也在增加，2020 年绿地灌溉需水量为8 000.6 万 m^3。用 SPSS 软件中的回归方程进行预测，在计算预测方程的回归后，得出总 R^2 大于 0.5，$P<0.05$，预计 2030 年天津绿地灌溉需水量为 15 400.5万 m^3，相当于 2020 年天津绿地灌溉需水量的 2 倍。

3.4 基于情景分析的未来需水量估算

第一种情况假设天津绿地面积没有额外增加，改变绿地中的乔灌草比例。目前天津树木/灌木冠层的覆盖率比裸露的草皮覆盖率高，树木/灌木冠层与裸露的草皮的比值约为 9∶1，假设到 2050 年，裸露的草皮将减少到 2020 年的一半。基于有效降雨，绿地灌溉需水量将比当前值低约 2.61%。这表明在假设绿地面积固定的情况下，绿地的灌溉需水量会随着树木/灌木冠层的增长而缓慢降低。

第二种情况假设天津建成区绿地面积增长，从 2002—2020 年建成区绿地面积大约以每年 9.15%的速度增长。根据天津绿地系统规划，预计 2035 年建成区绿化覆盖率不小于 40%，在这种情况下，绿地灌溉需水量以每年 9%的速度增长，从而加剧天津的水资源压力。

4 讨论与结论

4.1 讨论

本研究结果表明，城市绿地灌溉需水量与草坪面积、气候条件、降水强度有关。天津典型绿地之间耗水差异很大，其中公园绿地灌溉需水量最大，这一结果与李黎明[33]对北京市公园绿地、生产绿地、防护绿地居住绿地、道路绿地年均单位面积灌溉用水量研究结果一致。究其原因，公园绿地中草坪面积占比较大且草坪根系较浅，需要依靠持续灌溉满足水分蒸散需求，这使公园绿地灌溉需水量增加，说明在绿地建设初期就应注意不同植物配置模式的面积占比等情况，应将绿地的灌溉用水作为重点考虑指标，使得实际的绿地灌溉中有更高的节水率。这与 Reyes-Paecke 等[34]结果不一致，其认为居住区绿地灌溉用水量更多，这是因为在较大的绿地中，土壤压实程度较低，具有较高的保湿能力，并且因为居住区绿地具有更复杂的植物结构多样性，可能需要更高的灌溉率。出现这种异同的原因，一方面可能是因为采用的方法不同，本研究是采用气候学方法获取数据，Reyes-Paecke 的数据来自自来水公司；另一方面可能是因为本研究对象为资源型缺水城市，与 Reyes-Paecke 等分析的地中海城市气候不同，其结论可能不适用于其他地区。

关于气候条件以及降水强度，在统计中发现资源型缺水城市灌溉需水量在 4—8 月较高，这与欧玉民和许萍[3]结果一致，他们认为四季灌溉需水量整体呈现春夏较高、秋冬较低的趋势，这是因为春夏气候湿润，降水较多，降水能够补充蒸散作用带走的水分损失，但是往往还没有下渗就流失掉了，没有被充分利用。资源型缺水城市年降雨量少、蒸发量大，其径流收集与植物灌溉需水无法做到完全匹配，启示我们可以用绿地收集径流并利用其进行植物灌溉，提高雨水收集设施的利用率[35]，利于实现快速、高效的节水灌溉。

本次调研的样本总量虽已达到要求，但因绿地面积过大，平均样本数量较少，只能抽取一部分样地进行研究，因此存在一定误差。本研究还缺少具体植物群落、种类的典型搭配以及灌溉需水量测算。今后的研究可进一步扩大范围，对整个天津进行绿地灌溉用水量数据的收集整理，以便了解园林绿地灌溉用水的变化情况。

4.2 结论

预计天津 2030 年天津绿地灌溉需水量是 2020 年绿地灌溉需水量的 2 倍。天津典型绿地类型中，公园绿地灌溉需水量最大，因此，面对城市水资源短缺的形势，在城市绿地景观配置设计中应尽量减少纯草坪景观的推广应用。资源型缺水城市降水主要集中在 6—9 月，5—7 月天津绿地灌溉需求最大，因此，应在实际的绿地灌溉之前对不同植物配置模式下的绿地的灌溉用水量作出预设。

参考文献

[1]DAS J,RAHMAN A T M S,MANDAL T,et al.Exploring driving forces of large-scale unsustainable groundwater development for irrigation in lower Ganga River Basin in India[J].Environment,Development and Sustainability,2021,23(5):7289-7309.

[2]ASPRILLA ECHEVERRÍA J M.Plan B water assessment:Efficiency and circularity for agricultural and municipal adaptation to water scarcity[J].Groundwater for Sustainable Development,2021,14:100602.

[3]欧玉民,许萍.城市绿化节水灌溉技术比较研究[J].节水灌溉,2021(2):16-23.

[4]陈天,李阳力.生态脆弱性视角下城市水环境导向的城市设计策略[J].中国园林,2018,34(12):17-22.

[5]袁溯阳,张鲲,王霞,等.基于可持续景观设计的园林植物需水量评估:以美国加州庭院景观为例[J].中国园林,2021,37

(1):127-132.

[6]WENTZ E A,GOBER P.Determinants of small-area water consumption for the city of Phoenix, Arizona [J]. Water Resources Management,2007,21(11):1849-1863.

[7]DOMENE E,SAURÍ D.Urbanisation and water consumption: influencing factors in the metropolitan region of Barcelona[J]. Urban Studies,2006,43(9):1605-1623.

[8]GUHATHAKURTA S,GOBER P.The impact of the Phoenix urban heat island on residential water use[J]. Journal of the American Planning Association,2007,73(3):317-329.

[9]MARSTON L T,LAMSAL G,ANCONA Z H,et al.Reducing water scarcity by improving water productivity in the United States[J]. Environmental Research Letters,2020,15(9):094033.

[10]LOWRY J H,RAMSEY R D,KJELGREN R K.Predicting urban forest growth and its impact on residential landscape water demand in a semiarid urban environment[J].Urban Forestry & Urban Greening,2011,10(3):193-204.

[11]李淑芹,雷廷武,詹卫华,等.修剪留茬高度对北京地区草坪草耗水量的影响[J].农业工程学报,2006,22(11):74-78.

[12]ALADENOLA O O,ADEBOYE O B.Assessing the potential for rainwater harvesting[J].Water Resources Management,2010,24(10):2129-2137.

[13]CHANAN A,WOODS P.Introducing total water cycle management in Sydney:a Kogarah Council initiative[J].Desalination,2006,187(1/2/3):11-16.

[14]CHE-ANI A I,SHAARI N,SAIRI A,et al.Rainwater harvesting as an alternative water supply in the future[J].European journal of scientific research,2009,34(1):132-140.

[15]ERIKSSON E,AUFFARTH K,HENZE M,et al.Characteristics of grey wastewater[J].Urban Water,2002,4(1):85-104.

[16]GIMPEL H,GRAF-DRASCH V,HAWLITSCHEK F,et al. Designing smart and sustainable irrigation:a case study[J]. Journal of Cleaner Production,2021,315:128048.

[17]COUTTS A M,TAPPER N J,BERINGER J,et al.Watering our cities:The capacity for Water Sensitive Urban Design to support urban cooling and improve human thermal comfort in the Australian context[J].Progress in Physical Geography,2013,37(1):2-28.

[18]COOK B I,SHUKLA S P,PUMA M J,et al.Irrigation as an historical climate forcing[J].Climate Dynamics,2015,44(5):1715-1730.

[19]CHEUNG P K,LIVESLEY S J,NICE K A.Estimating the cooling potential of irrigating green spaces in 100 global cities with arid, temperate or continental climates[J]. Sustainable Cities and Society,2021,71:102974.

[20]张琼瑛,李绍才,龙凤,等.公路岩质边坡绿化灌溉需水量研究[J].节水灌溉,2013(2):10-13,16.

[21]张乾.G1 京哈高速公路绿色廊道植物灌溉需水量研究[J].福建林业科技,2017,44(4):28-32,87.

[22]王思杰,姚朋,李雄.基于植物需水量的节水型城市郊野公园植物景观规划研究:以石家庄西山郊野公园为例[J].中国城市林业,2019,17(2):70-75.

[23]车文瑞.北京城区绿地主要乔灌草年耗水量的估算[D].北京:北京林业大学,2008.

[24]邸苏闯,吴文勇,刘洪禄,等.基于遥感技术的绿地耗水估算与蒸散发反演[J].农业工程学报,2012,28(10):98-104.

[25]吕荣胜,王潇雨.天津水资源危机及其对策探讨[J].长春理工大学学报(社会科学版),2010,23(1):36-37.

[26]天津市人民政府办公厅.天津市人民政府办公厅关于印发天津市水安全保障“十四五”规划的通知[EB/OL].(2021-07-02)[2022-11-17]. https://www.tj.gov.cn/zwgk/szfwj/tjsrmzfbgt/202107/t20210702_5494322.html.

[27]JAMPANI M,AMERASINGHE P,LIEDL R,et al. Multi-functionality and land use dynamics in a peri-urban environment influenced by wastewater irrigation[J].Sustainable Cities and Society,2020,62:102305.

[28]ECKERT S,KITEME B,NJUGUNA E,et al. Agricultural expansion and intensification in the foothills of Mount Kenya:a landscape perspective[J].Remote Sensing,2017,9(8):784.

[29]徐鹤,褚俊英,刘家宏,等.城市绿地生态系统合理供水辨识分析[J].中国人口·资源与环境,2012,22(6):136-139.

[30]YU F K,HUANG X H,LIANG Q B,et al. Ecological water demand of regional vegetation:the example of the 2010 severe drought in Southwest China [J]. Plant Biosystems - an International Journal Dealing with All Aspects of Plant Biology,2015,149(1):100-110.

[31]ENDTER-WADA J,KURTZMAN J,KEENAN S P,et al. Situational waste in landscape watering:residential and business water use in an urban Utah Community[J].JAWRA Journal of the American Water Resources Association,2008,44(4):902-920.

[32]杨艺.郑州市几种类型绿地生态需水规律研究[D].郑州:河南农业大学,2008.

[33]李黎明.北京城区绿地灌溉用水量分析与评价[D].北京:北京林业大学,2020.

[34]REYES-PAECKE S,GIRONÁS J,MELO O,et al.Irrigation of green spaces and residential gardens in a Mediterranean metropolis:Gaps and opportunities for climate change adaptation[J]. Landscape and Urban Planning,2019,182:34-43.

[35]赖月,康嘉奇,谢怀南,等.半湿润地区公园绿地径流收集灌溉利用成本研究:以迁安市滨湖东路集雨型绿地为例[J].北京林业大学学报,2022,44(5):115-123.