

济南市城市绿地生态需水量估算

石宁¹, 张智安², 颜秉军¹, 孟丽¹ (1. 山东省龙口市国土资源局, 山东龙口 265701; 2. 山东省遥感技术应用中心, 山东济南 250013)

摘要 从水资源配置角度对济南市城市绿地生态需水量进行了估算研究与分析, 揭示了2012年济南市以乔、灌、草3种植被类型为代表的城市绿地生态需水量的年内总需求量及时空分布特征。结果表明, 综合考虑植物蒸发需水量、生长需水量、土壤需水量及有效利用降水量4个方面, 估算出济南市绿地生态系统生态需水量约247 527.67 m³; 受市内区域自然状况差异影响, 市辖区及章丘市绿地生态需水量较大, 商河县最小; 城市绿地生态需水量具有明显季节性变化特征, 春夏季需水量较大, 冬季最少。

关键词 城市绿地生态需水量; 时空变化特征; 济南市

中图分类号 S181; K903 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2017)12-0034-03

Estimation of Ecological Water Requirement of Urban Green Space in Jinan City

SHI Ning¹, ZHANG Zhi-an², YAN Bing-jun¹ et al (1. Land and Resources Bureau of Longkou City, Longkou, Shandong 265701; 2. Shandong Provincial Remote Sensing Technical Application Centre, Jinan, Shandong 250013)

Abstract Based on the water resources allocation, the ecological water requirement of urban green space in Jinan City was estimated and analyzed. The total annual requirement and temporal and spatial distribution characteristics of urban green land ecological water requirement represented by the three vegetation types of forest, shrub and grass in 2012 were revealed. The results showed that the ecological water demand of green land ecosystem in Jinan City was estimated to be about 247 527.67 m³, taking into account the four aspects of plant evapotranspiration water requirement, growth water requirement, soil water requirement and effective utilization of precipitation. Due to the difference of the natural conditions in the city, the ecological water demand of municipal district and Zhangqiu green land was relatively large, and Shanghe was the smallest. The ecological water demand of urban green space has obvious seasonal variation characteristics, and the water demand was larger in spring and summer and least in winter.

Key words Urban green land ecological water demand; Temporal and spatial variation characteristic; Jinan City

城市绿地深刻影响着城市生态系统的生态效益与综合实力, 在改善局部气候、提高空气质量、减弱噪音、美化城市景观及满足人们休闲娱乐需求等方面发挥着不可忽视的作用^[1]。学者对城市生态需水内涵的理解存在差别, 尚未形成统一概念^[2-3], 从而使得研究内容具有多样化的特点。城市生态环境需水研究多集中在单独以某一城市^[4]、湿地^[5-6]、流域^[7]、河流^[8]及植被^[9]等为对象的总生态需水量或最小生态需水量计算, 对城市绿地系统生态需水研究较少, 且研究区域多以干旱半干旱地区及北京市为例, 具有较大研究空间。近年来, 随着城市的发展, 城镇居民对绿地需求的增加, 济南市城市绿化覆盖面积与绿地覆盖率由2000年的4 356 hm²和36.80%增长至2014年的15 233 hm²和39.94%^[10-13], 绿地的面积与质量得以不断提高。与此同时, 为保障植物的正常生长, 城市绿地所需灌溉用水量也相应增多, 加剧了城市水资源短缺问题。据2013年济南市水资源公报显示, 全市水资源总量为208 608.28万m³, 以年末总人口为699.88万为依据, 计算得到区域的人均水资源占有量仅为298.4 m³, 约为全国人均水资源占有量的14.21%, 直接影响和制约该市社会经济的进一步发展。因此, 如何合理提高城市绿地灌溉用水效率, 减少水资源浪费成为缓解济南市水危机及促进该市持续发展急需解决的关键问题。

受植物生长特性及土壤蒸发强度季节性变化的影响, 在不同时间阶段, 城市绿地生态系统所需灌溉用水量存在差别。而植被种类的不同也会导致城市绿地生态需水量的差别。此外, 城市内部地区间的差异也会对城市绿地生态需水

量的空间分布状态产生影响。笔者在综合考虑植被种类、土壤需水量及两者节律性变化的基础上, 分区域对济南市绿地生态系统生态需水量进行估算, 明确其时空分布特征, 旨在为确定城市绿地灌溉用水量提供参考。

1 资料与方法

1.1 研究内容 考虑到济南市水资源的短缺状况, 从水资源配置的角度出发定义绿地生态需水量, 即计算出在保障绿地植物健康生长的前提下, 除降雨外需要人工补给的水资源量, 它既包括维持植物生存生长、蒸发需水量, 又包括植物所处的土壤需水量。该研究的城市绿地范围主要包括公共绿地、道路绿化带、生产防护绿地、景区绿地等。在综合考虑济南市绿地状况及其涵盖的主要植被类型的基础上, 以方便研究计算为原则, 通过分别计算乔木、灌木和草坪三大类植被需水量来估算济南市绿地需水量。

1.2 计算方法 目前计算城市绿地需水量主要有3种方法: ①面积定额法^[14], 即通过植被面积×植被生态环境用水定额进行计算, 其中植被生态用水定额主要根据水量平衡原理由河川径流资料推测得出; ②潜水蒸发法^[15], 即通过植被面积×植被系数×植被所处某一地下水埋深时的潜水蒸发量进行计算; ③基于改进后的彭曼公式算法^[16], 即直接通过计算植被的蒸散发耗水量与植被面积乘积来确定。笔者根据水量平衡原理, 将潜水蒸发法与改进后的彭曼公式算法2种方法融合, 对济南市绿地生态需水量进行估算。具体计算公式如下^[17]:

$$W_G(t) = \sum_{i=1}^n [W_{Ei}(t) + W_{Si}(t) + W_{Pi}(t) - P_{Gi}(t)]$$

式中, $W_G(t)$ 为某时段为满足植物正常生命活动所需人工补给用水量(m³), 即基于水资源配置角度的城市绿地需水量;

$W_{Ei}(t)$ 为植物蒸发需水量 (m^3); $W_{Si}(t)$ 为植物生长需水量 (m^3); $W_{Pi}(t)$ 为维持植物生长的土壤需水量 (m^3); $P_{Gi}(t)$ 为可有效利用的降水量 (m^3); i 为乔木、灌木和草本 3 种植物类型; t 为时间。

上式中各项需水量公式具体计算方式如下^[18-20]:

$$W_{Ei}(t) = A_{Gi} \times ET_0(t) \times K_c$$

$$W_{Si}(t) = W_{Ei}(t) / 99$$

$$W_{Pi}(t) = A_{Gi} \times h_i \times \rho_i \times \theta$$

式中, A_{Gi} 为需计算的绿地面积 (hm^2); $ET_0(t)$ 为植物的潜在蒸散量 (mm); K_c 为植被蒸散系数; $ET_0(t)$ 与 K_c 的乘积代表植物的实际蒸散量; $W_{Ei}(t)$ 与 $W_{Si}(t)$ 根据植被自身的含水量与植被蒸散量的比例大约为 1:99 的原理计算; h_i 为土壤深度 (m); ρ_i 为土壤容重 (g/m^3); θ 为土壤含水系数 (土壤实际含水量与田间持水量之比)。

可有效利用的降水量 $P_{Gi}(t)$ 为被植物截留、蒸腾和生长及土壤蒸发所利用的降雨量。其公式如下^[21]:

$$P_{Gi}(t) = \alpha \times P(t) \times A_{Gi}$$

式中, α 为降雨有效利用系数, 我国目前采用以下经验系数: 次降雨小于 50 mm 时, α 取 1.00; 次降雨为 50 ~ 150 mm 时, α 取 0.80 ~ 0.75; 次降雨大于 150 mm 时, α 取 0.70^[22]。根据济南市具体情况, α 最终选择取值为 0.70。 P 为降雨量 (mm)。

1.3 参数选择 计算时使用的植物潜在蒸散量采用黄会平等^[23] 计算得到的济南市多年平均 ET_0 值以及淮河流域年内各季节平均 ET_0 值; 由于目前缺乏对济南市不同群落植被系数的详细研究, 笔者参考北京市乔、灌、草植被系数^[24] 进行

计算, 其取值分别为 0.921、0.923、0.863; 植被面积为济南市林业局整合得到的 2012 年数据; 乔木、灌木和草本植物的有效土层厚度采用崔晓阳等^[25] 的研究结果, 其取值分别为 1.2、0.6 和 0.3 m。济南市绿地土壤容重采用刘毓等^[26] 的调查研究结果, 取其平均值 1.35 g/m^3 ; 田间持水量采用程维新等^[27] 的研究结果, 即黄淮海及附近地区城市平均为 26%; 土壤实际含水量由济南市气象网的土壤墒情值及山东土壤墒情信息整合获得; 各市年降水量经查阅济南市统计年鉴获得。

2 结果与分析

2.1 年需水总量 由表 1 可知, 2012 年济南市绿地生态系统土壤及植物总需水量为 304 230.55 m^3 , 其中土壤需水量为 131 639.02 m^3 , 占需水总量的 43.27%, 这部分水量作为城市绿地生态系统的储备水资源, 可为生长在该土地上的植被生长与发育提供必要的土壤水分环境, 保障其正常生物活动; 总需水量中植物需水量约为 172 591.53 m^3 , 占绿地系统生态需水总量的 56.73%, 主要消耗于植物的蒸散发和生理代谢过程, 这一部分水量需要通过天然或人工方式进行补给。天然补给的水量主要来源于自然降水, 2012 年济南市全市降水量为 560.60 mm, 绿地系统可利用的有效降水量为 56 702.88 m^3 , 可满足植物需水量的 18.64%, 需人工灌溉补给的水资源量为 247 527.67 m^3 。随着城市污水处理技术的发展及灌溉方式的改进, 工业废水及生活污水经处理实现回收利用后可应用于绿地生态系统的灌溉, 有助于实现水资源的有效利用, 满足绿地生态需水量的部分要求, 在一定程度上有利于缓解济南市用水压力。

表 1 2012 年 3 种植被类型的需水量及有效利用降水量

Table 1 Water demand and effective utilization of precipitation of three vegetation types in 2012

植被类型 Vegetation type	蒸发需水量 Evaporation water demand	生长需水 Growth water demand	土壤需水量 Soil water demand	有效利用降水量 Effective utilization of precipitation
乔木 Forest	104 066.92	1 051.18	112 283.39	33 657.86
灌木 Shrub	505.11	5.10	271.90	163.01
草坪 Grass	66 293.58	669.63	19 083.73	22 882.01
合计 Total	170 865.61	1 725.92	131 639.02	56 702.88

2.2 空间需水总量 受区域面积规模、绿地覆盖率、降水量等自然因素的影响, 县与县、县与市之间的绿地生态需水量也存在显著差异。在空间分布上, 济南市绿地生态需水量呈现南部地区明显多于北部地区的特征。其中, 商河县绿地生态需水量最少, 仅为 12 086.65 m^3 (图 1)。而济南市降水量的空间特征与之相反, 呈现北部地区多于南部地区的特征 (图 2)。具体来说, 济南市各地区降水量从大到小依次为商河县、济阳县、章丘市、市辖区、平阴县。就济南市各区域具体情况而言, 市辖区及章丘 2 市区域范围广, 植被覆盖率高, 自然补给量少, 绿地生态需水量较大。平阴、济阳 2 县可有效利用的降水量虽低, 但绿地面积仅占济南全市的 13.42%, 生态需水量不高。商河县植物需水量少, 仅为 9 392.35 m^3 , 当年降水丰富, 可有效利用的降水量达到 5 688.25 m^3 , 绿地生态需水量不及济南市其他地区。近年来, 济南市致力于创

建生态园林城市, 城市绿地数量不断增加, 与之相应的绿地生态用水需求量加大, 各地区生态需水量也不断增多, 这将进一步加剧济南市用水紧张问题。

2.3 季节性需水总量 植被需水的季节性变化规律及降水量和蒸发量的年内变化决定了生态需水量的季节变化。济南市降水量年内分布不均, 各季节的降水量从大到小依次为夏季、秋季、春季、秋季, 致使其绿地生态需水量表现出季节差异。依据计算结果, 济南市在春、夏、秋、冬季植物需水量分别为 42 761.41、53 857.88、29 673.59、16 153.44 m^3 ; 土壤需水量分别为 127 713.15、134 174.82、130 753.94、133 908.75 m^3 ; 有效利用降水量分别为 2 734.33、12 993.99、3 152.41、903.58 m^3 (表 2)。因此, 基于水资源配置角度的城市绿地需水量分别为 167 740.22、175 038.72、157 275.11、149 158.61 m^3 。可见, 夏季植物需水总量较多, 降雨的有效利用程度也大, 但由于温

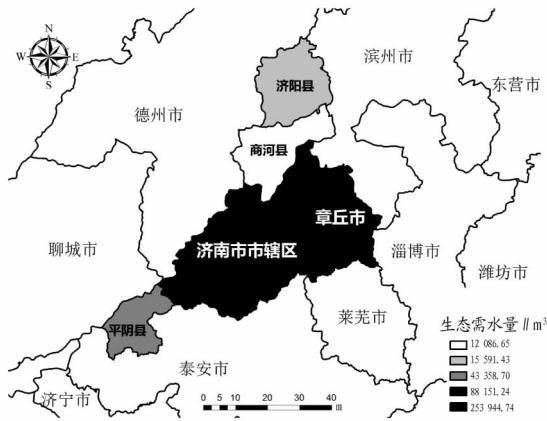


图1 济南市绿地生态需水量空间分布

Fig.1 Spatial distribution of green land ecological water requirement in Jinan City

度较高,蒸发旺盛,所需人工补给较多;秋冬季由于植物所处生长时期的关系,植物生长活性下降,需水量并不多;春季由于降水较少,植物生长旺盛,土壤较为干燥,应注意及时灌溉,满足植物生长及土壤需求。综合来看,除春季外土壤需

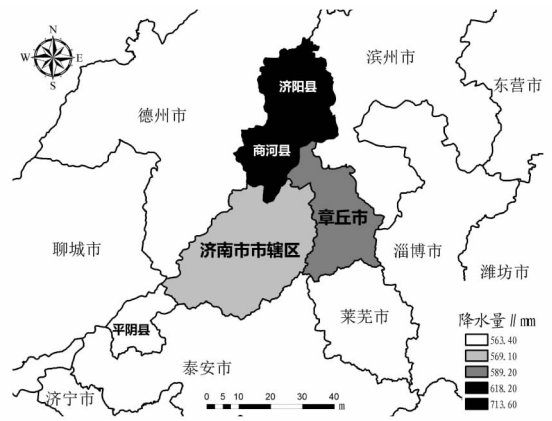


图2 济南市降水量空间分布

Fig.1 Spatial distribution of precipitation in Jinan City

水量的年内变化并不大,这主要是地下水的补给及土壤对水分的贮存作用在发挥作用。因此,在进行人工灌溉时须充分考虑城市绿地系统实际需水量,依据季节变化规律进行适时调整,减少水资源浪费状况的发生。

表2 2012年不同季节3种植被类型的需水量及有效利用降水量

Table 2 Water demand and effective utilization of precipitation at all seasons of three vegetation types in 2012

季节 Season	蒸发需水量 Evaporation of water requirement			生长需水量 Growth of water requirement			土壤需水量 Soil water requirement			有效利用降水量 Effective utilization of precipitation		
	乔木 Forest	灌木 Shrub	草坪 Grass	乔木 Forest	灌木 Shrub	草坪 Grass	乔木 Forest	灌木 Shrub	草坪 Grass	乔木 Forest	灌木 Shrub	草坪 Grass
春季 Spring	25 783.70	125.15	16 424.95	260.44	1.26	165.91	108 934.76	263.80	18 514.59	1 623.05	7.86	1 103.42
夏季 Summer	32 474.50	157.62	20 687.18	328.03	1.59	208.96	114 446.34	277.14	19 451.34	7 713.01	37.36	5 243.62
秋季 Autumn	17 892.18	86.84	11 397.83	180.73	0.88	115.13	111 528.45	270.08	18 955.41	1 871.22	9.06	1 272.13
冬季 Winter	9 739.98	47.27	6 204.64	98.38	0.48	62.67	114 219.39	276.59	19 412.77	536.35	2.60	364.63

3 结论

该研究立足于实现水资源优化配置原则,通过计算乔、灌、草3种植被类型的蒸发需水量、生长需水量、土壤需水量及有效利用降水量,估算出2012年济南市城市绿地生态需水量并分析其时空分布规律。结果表明,济南市绿地生态系统需水量为304 230.55 m³,其中植物需水量为172 591.53 m³,土壤需水量为131 639.02 m³。研究区内部由于自然条件差异,市辖区及章丘市绿地生态需水量较大,商河县最小。受自然条件特性的影响,济南市城市绿地生态需水量存在明显的季节性差异,其中春、夏季需水量最大,冬季最少。以该研究结果为参考,对比当前灌溉用水量,有利于确定济南市水资源节约潜力,实现水资源的优化配置。

参考文献

- [1] BOLUND P, HUNHAMMAR S. Analysis ecosystem services in urban areas [J]. Ecological economics, 1999, 29: 293-301.
- [2] 严登华, 王浩, 王芳, 等. 我国生态需水研究体系及关键研究命题初探 [J]. 水利学报, 2007, 38(3): 267-273.
- [3] 崔琪, 张强, 陈晓宏, 等. 生态需水理论与方法研究进展 [J]. 湖泊科学, 2010, 22(4): 465-480.
- [4] JIA H F, MA H T, WEI M J. Calculation of the minimum ecological water requirement of an urban river system and its deployment: A case study in Beijing central region [J]. Ecological modelling, 2011, 222(17): 3271-

3276.

- [5] 冯夏清, 章光新. 湿地生态需水研究进展 [J]. 生态学杂志, 2008, 27(12): 2228-2234.
- [6] LI L J, LI J Y, LIANG L Q, et al. Method for calculating ecological water storage and ecological water requirement of marsh [J]. Journal of geographical sciences, 2009, 19(4): 427-436.
- [7] 张丽, 李丽娟, 梁丽乔, 等. 流域生态需水的理论及计算研究进展 [J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 307-312.
- [8] 孙涛, 徐静, 刘方方, 等. 河口生态需水研究进展 [J]. 水科学进展, 2010, 21(2): 282-288.
- [9] 王改玲, 王青桦, 石生新. 山西省永定河流域林草植被生态需水研究 [J]. 自然资源学报, 2013, 28(10): 1743-1753.
- [10] 山东省统计局. 山东统计年鉴-2001 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2001.
- [11] 济南市统计局, 国家统计局济南调查队. 2010年济南市国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL]. (2000-01-12) [2017-01-25]. <http://www.tjcn.org/tjgh/200001/1787.html>.
- [12] 山东省统计局. 山东统计年鉴-2015 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
- [13] 济南市统计局, 国家统计局济南调查队. 2015年济南市国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL]. (2015-04-28) [2017-01-25]. http://www.tjcn.org/tjgh/201504/28296_2.html.
- [14] 刘新华, 徐海量, 凌红波, 等. 塔里木河下游生态需水估算 [J]. 中国沙漠, 2013, 33(4): 1198-1205.
- [15] 张瑞君, 段争虎, 谭明亮, 等. 石羊河流域天然植被生态需水量估算及预测 [J]. 中国沙漠, 2012, 32(2): 545-550.

(下转第39页)

度的回收率数据进行统计,在满足 R 为 70.0% ~ 130.0% (保证准确度),相对标准偏差 (RSD) 小于 15.0% (保证精密度的情况下,对 16 种多环芳烃的 LOQ 进行了评估确定,基质匹

配条件下评估的 LOQ 要大大优于无基质匹配条件下的 LOQ (表 3)。

表 3 不同基质条件下 LOQ 评估

Table 3 Limit of quantitation (LOQ) evaluation under different matrixes

序号 No.	组分 Components	A		B		C	
		LOQ//ng/L	RSD//%	LOQ//ng/L	RSD//%	LOQ//ng/L	RSD//%
1	萘	100	12.8	20	13.4	20	10.3
2	萘	100	11.9	20	11.2	20	8.2
3	萘烯	80	9.8	20	10.4	20	9.9
4	芴	60	8.9	10	9.8	10	9.1
5	菲	110	13.2	20	12.1	20	8.3
6	蒽	80	10.2	10	8.5	10	6.0
7	荧蒽	40	9.8	10	9.4	10	8.6
8	芘	40	8.7	10	8.6	10	8.9
9	苯并(a)蒽	40	9.8	10	7.8	10	9.6
10	屈	40	9.5	10	8.9	10	6.9
11	苯并(b)荧蒽	40	10.2	10	9.7	10	8.7
12	苯并(k)荧蒽	40	9.1	10	8.9	10	7.9
13	苯并(a)芘	50	8.7	10	8.7	10	6.9
14	印并(1,2,3)芘	50	8.4	10	8.6	10	8.5
15	二苯并(a,h)蒽	50	8.9	20	7.9	20	6.6
16	苯并(g,h,i)芘	50	8.4	20	7.3	20	7.9

注:A. 纯溶剂标准;B. 自制纯水基质标准;C. 自来水基质标准

Note:A. Pure solvent standard;B. Pure water standard;C. Tap water standard

2.3 实际样品回收率 对来自北京、河南、天津、河北、山东的多组样品进行基体加标检测,虽然水样本身基质不同,但由于采用固相萃取和全过程基质标准校正技术,其回收率均能控制在 70.0% ~ 120.0%。

3 结论与讨论

该研究采用 C_{18} 固相萃取小柱进行富集,利用基质标准溶液进行校正,样品回收率较好,样品回收率在 81.0% ~ 111.0%,最低方法定量限达到 10 ng/L,达到农药残留检测的要求,具有较高的推广价值。由于在样品的检测过程中不可能得到与样品基质完全相同的基质标准,因此特殊样品可能存在适用性差的情况,这有待于进一步研究。

参考文献

- [1] 郑天凌,骆苑蓉,曹晓星,等. 高分子量多环芳烃——苯并[a]芘的生物降解研究进展[J]. 应用与环境生物学报,2006,12(6):884-890.
- [2] 金银龙,鄂学礼,陈亚妍,等. 生活饮用水标准检验方法 有机物指标:GB/T 5750.8—2006[S]. 北京:中国标准出版社,2007.
- [3] 金银龙,鄂学礼,陈亚妍,等. 生活饮用水标准检验方法 农药指标:GB/T 5750.9—2006[M]. 北京:中国标准出版社,2007.
- [4] COVACI A, SCHEPENS P. Simplified method for determination of organo-

chlorine pollutants in human serum by solid-phase disk extraction and gas chromatography[J]. Chemosphere,2001,43(4/5/6/7):439-447.

- [5] 许泓,林安清,古珑,等. 果蔬中 107 种残留农药的气相色谱-质谱检测方法[J]. 分析测试学报,2004,23(3):34-38.
- [6] SCHENCK F J, LEHOTAY S J. Does further clean-up reduce the matrix enhancement effect in gas chromatographic analysis of pesticide residues in food? [J]. Journal of chromatography A,2000,868(1):51-61.
- [7] HAJŠLOVÁ J, ZROSTLÍKOVÁ J. Matrix effects in (ultra) trace analysis of pesticide residues in food and biotic matrices[J]. Journal of chromatography A,2003,1000(1):181-197.
- [8] 黄宝勇,潘灿平,张微,等. 应用分析保护剂补偿基质效应与气相色谱-质谱快速检测果蔬中农药多残留[J]. 分析测试学报,2006,25(3):11-16.
- [9] ANASTASSIADES M, MASTOVSKÁ K, LEHOTAY S J. Evaluation of analyte protectants to improve gas chromatographic analysis of pesticides[J]. Journal of chromatography A,2003,1015(1/2):163-184.
- [10] PETROVIC M, BARCELÓ D. The stability of non-ionic surfactants and linear alkylbenzene sulfonates in a water matrix and on solid-phase extraction cartridges[J]. Fresenius J Anal Chem,2000,368(7):676-683.
- [11] 张卓旻,上官良敏,刘薇,等. 固相萃取-气相色谱-质谱联用法测定人尿中 11 种蛋白同化激素[J]. 理化检验(化学分册),2008,44(9):810-814.

(上接第 36 页)

- [16] 汤洁,余孝云,林年丰,等. 生态环境需水的理论和方法研究进展[J]. 地理科学,2005,25(3):367-373.
- [17] 杨志峰,尹民,崔保山. 城市生态环境需水量研究——理论与方法[J]. 生态学报,2005,25(3):389-396.
- [18] 姜德娟,王会肖,李丽娟. 生态环境需水量分类及计算方法综述[J]. 地理科学进展,2003,22(4):369-378.
- [19] 严智勇,尹民. 黄河流域城市生态需水时空特征分析[J]. 安全与环境工程,2007,14(2):35-39.
- [20] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements[R]. Rome:FAO,2000.
- [21] 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.

- [22] 孙红,刘智丹,彭强,等. 北京城市绿化水资源合理利用研究:基于理论供水与实际供水量的视角[J]. 资源开发与市场,2014,30(6):687-690,768.
- [23] 黄会平,曹明明,宋进喜,等. 1957-2012 年中国参考作物蒸散量时空变化及其影响因子分析[J]. 自然资源学报,2015,30(2):315-326.
- [24] 杨立成. 北京城市绿地复合系统植物耗水规律及灌溉模型研究[D]. 北京:北京林业大学,2012:66.
- [25] 崔晓阳,方怀龙. 城市绿地土壤及其管理[M]. 北京:中国林业出版社,2001:150-164.
- [26] 刘毓,吕娟,占习林,等. 济南市城市绿地土壤肥力质量综合评价及管理对策[J]. 园林科技,2014(1):18-22.
- [27] 程维新,胡朝炳,张兴权. 农田蒸发与作物耗水量研究[M]. 北京:气象出版社,1994:27.