

水量供需平衡视角下城市绿地布局优化研究进展

Research Progress on Optimisation of Urban Green Space Layout from the Perspective of Water Supply and Demand Balance

赵宇桑 詹雨尘*

ZHAO Yusang, ZHAN Yuchen*

摘要

在城市绿地规模与品质需求提高、水资源短缺的背景下, 基于水量供需平衡的城市绿地布局优化研究对缓解水绿矛盾具有重要意义。利用 CiteSpace 对国内外相关研究展开分析, 阐明城市绿地水量供需平衡内涵与相关研究热点, 对水量供需评价内容、方法和绿地布局优化方法进行综述。研究发现: 城市绿地供需水量平衡识别、测度及空间化的系统性研究较少; 研究内容聚焦在水量供给侧的雨水资源化利用, 水量需求侧的植物和水景需水量评估较少; 供需评估研究方法有生态模型法、参与调查法和经验统计法; 绿地布局优化模型有概念模型、数学模型和计算机空间模型。未来研究应从构建完善城市绿地水量供需平衡评价体系和研究框架, 厘清不同时间和空间尺度下绿地水量供需之间的关联和作用机制, 加大园林用水管理方面监管力度 3 个方面进一步深入。

Abstract

Under the background of increasing demand for the scale and quality of urban green space and water shortage, research on the optimisation of urban green space layout based on the balance of water supply and demand is of great significance to alleviate the water-green conflict. The study makes use of CiteSpace to analyse pertinent domestic and international researches, elucidate the meaning of water supply-demand balance in urban green spaces and associated research hot-spots, and review the content and methodologies of water supply-demand evaluation and methodologies of green space layout optimization. The study finds that: there are not as many systematic studies on how to identify, quantify and map the water balance between supply and demand in urban green spaces; Less emphasis is placed on evaluating the water demand of plants and water features and more emphasis is placed on the use of rainwater resources in the water supply side of the equation; Ecological modeling, participatory surveys and empirical statistics are some of the research methodologies used in supply and demand assessment; There are conceptual, mathematical and computer spatial models for green space layout optimization. Future studies should be further deepened in three aspects, namely, constructing and improving the assessment system and research framework for the urban green space water supply and demand balance, clarifying the correlation and mechanism between water supply and demand in green spaces at different time and spatial scales, and increasing the regulatory efforts in water management in gardens.

文章亮点

1) 利用 CiteSpace 对国内外“以水定绿”相关研究内容和方法展开综述; 2) 现有评估方法有生态模型法、参与调查法和经验统计法, 优化模型有概念模型、数学模型和计算机空间模型; 3) 未来研究应从构建完善评价体系、厘清不同时空绿地和水量供需关联机制和完善相关法律法规 3 方面深入。

关键词

水量供需平衡; 城市绿地布局; 以水定绿

Keywords

Water supply and demand balance; Urban green space layout; Greening design with water

收稿日期: 2023-12-18

修回日期: 2024-02-13

《2019 年全球风险报告》指出，近年来水危机一直高居全球风险前 5 位，全球用水量仍以每年约 1% 的速度稳定增长^[1]，各国政府正在积极应对。中国水资源短缺尤为严重，并成为制约社会经济可持续发展的关键因素。我国年均水资源短缺量高达 500 亿 m³，被联合国列为 13 个贫水国家之一^[2]，600 多座城市中，有 400 多座城市缺水，110 座城市严重缺水^[3]。改革开放以来，随着居民生活水平及需求层次提升，日益增长的城市绿地规模和品质需求与水资源短缺之间的矛盾愈发突出^[4]。2023 年，为全面贯彻党的二十大精神，实施全面节约战略，《国家发展改革委等部门关于进一步加强水资源节约集约利用的意见》明确提出，将大力推进生态景观节水工作，坚持“以水定绿”，严控景观用水，中国将实行最严格节水措施。从水量供需平衡视角进行城市绿地规划设计是缓解水绿矛盾，在有限水资源条件下提升绿地品质的关键，其系统的理论和方法亟需探索。

“以水定绿”指在水量供需平衡评估的基础上，规划绿地规模、空间布局和植物类型，使绿地发挥最大生态效益^[5]（图 1）。城市绿地的水供给包括回收利用的雨水、中水，以及地表水和市政水。雨水收集设施和节水灌溉技术可间接增加雨水资源化利用效率^[6]。水需求主要包括园林植物和水景需水量，园林植物需水量指植物维持生长和景观效果的总需水量^[7]，水景需水量指维持水景观的需水量^[8]。由于水量供需的时空异质性、植物种类和密度变化以及复杂小气候，城市绿地存在水量供需异位平衡问题。目前，相关研究内容偏重雨水资源化利用，植物及水景需水量评估研究较少。水量供给评估方法较为成熟，但由于降雨时空分布不均匀^[9]、数据精度不高，评估结果精细化程度不足。水量需求评估方法较为缺乏，植物需水量评估借鉴美国的景观物种用水分类（Water Use Classification of Landscape Species, WUCOLS）方法^[10]，没有建立适宜我国本土植物的需水量评估体系。而绿地布局优化研究视角多为雨洪调蓄、空间公

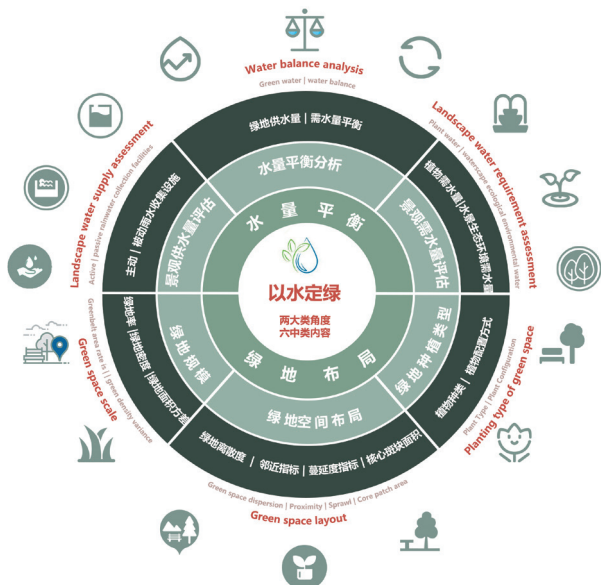


图 1 “以水定绿”概念图
Fig.1 Conceptual diagram of 'Greening Design with Water'

平性等方面，基于水量供需平衡分析的研究尚不多见。因此，本文对城市绿地水量供需平衡的研究热点与进展、评价内容与方法及绿地布局优化方法进行了系统梳理，并针对现有研究不足，提出研究展望。研究有助于构建城市绿地水量供需平衡评价体系，缓解城市绿地与水资源之间的矛盾，为水资源约束下的城市绿地规划设计提供借鉴。

1 基于水量供需平衡的绿地布局研究热点与趋势

首先，选取“以水定绿”“水量平衡”与“水效率景观”等相关概念为主题进行检索，以“SCI”“EI”“北大核心”“CSSCI”和“CSCD”为来源，获取中国知网（CNKI）与 Web of Science（WOS）数据库中的相关文献。CNKI 共检索得到文献 308 篇，WOS 中检索文献共计 166 篇，时间跨度为 2002—2022 年。其次，借助 CiteSpace 软件分别绘制 CNKI 和 WOS 数据库文献的关键词共现网络图与关键词突变图谱（图 2）以及关键词共现聚类时序知识图谱（图 3）。

1.1 研究热点

在 2010 年以前，国内该领域研究热点较为发散，主要涉及水资源评价体系构建和节约型园林。供给侧研究热点多为雨水资源化利用，需求侧研究集中在城市绿地生态环境需水量^[11]。2010 年之后，国内研究热点主要聚焦在海绵城市，供给侧研究主要集中在低影响开发（Low Impact Development, LID）设施的蓄水能力评估^[12]，需求侧研究逐渐关注园林植物和水景需水量评估。国外该领域研究热点在 2017 年以前，主要集中在水资源管理（Water Management）和节水模型，供给侧研究集中在 LID 蓄水量评估（Water Conservation），需求侧研究主要聚焦在园林植物需水量（Plants Water Needs）及耐旱景观（Xeriscape）^[13]。2017 年之后，国外研究热点主要聚焦在水效率景观（Water Efficient Landscape），供给侧研究在雨水资源化利用的基础上结合灰水利用，通过 3S 技术进行 LID 雨洪调蓄能力评估，需求侧研究重点关注水预算（Water Budget）。

1.2 研究趋势

通过网络模块化值（Modularity, Q 值）与同质性平均值（Silhouette, S 值）指标，对关键词共现聚类时序知识图谱进行评价^[14]，得到的结果分别为 Q（CNKI）=0.824 4，S（CNKI）=0.938 4，Q（WOS）=0.546 1，S（WOS）=0.829 6，说明图谱具有较高的可信度。图 3 表明：国内研究起步较晚，借鉴国外经验，基于节约型园林和城市绿地生态环境需水量理论，提出园林系数法^[7]。2012 年，学者提出“海绵城市”理论^[15]，聚焦于雨水利用技术和评价指标体系构建^[16]；2021 年，“以水定绿”理念的提出，旨在实现水资源供需平衡下的绿地分布和种植设计^[5]。国外相关研究起步较早，20 世纪 60 年代已有水预算的相关文献和理论^[17]；20 世纪 80 年代，加州水利部提出城市景观灌溉（Urban Landscape Irrigation）与农业节水不同，农业灌溉需水量评估方法无法直接应用于城市景观^[18]；20 世纪 90 年代，“耐

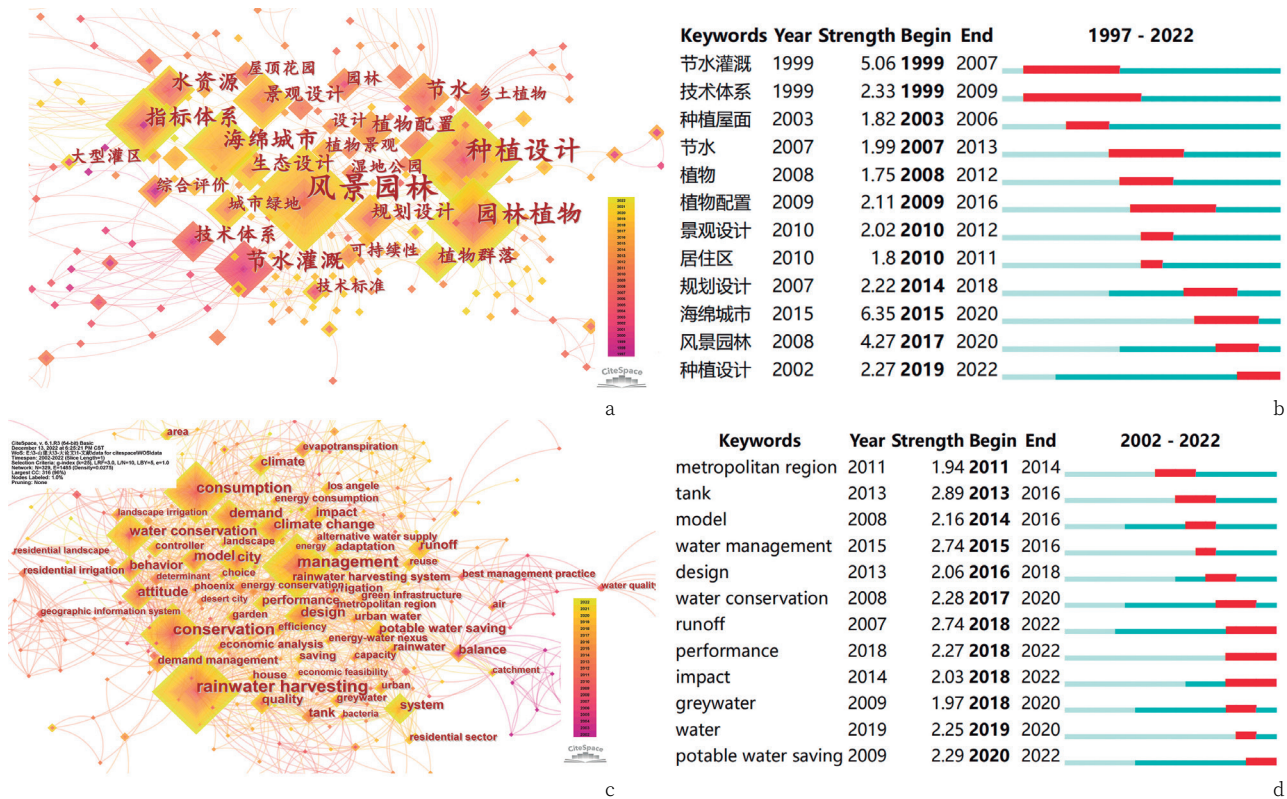


图2 关键词共现网络图与关键词突变图谱 (CNKI 与 WOS)
Fig.2 Keyword co-occurrence network map and keyword mutation mapping (CNKI and WOS)

旱景观”概念被提出，用于描述以节水为主要目标的景观美化^[19]；2008年，水效率景观被定义为在不影响景观功能或美观的前提下减少用水^[20]。

2 基于水量供需平衡的城市绿地布局优化研究内容与方法

2.1 研究内容

以城市绿地供水总量为控制指标，需水总量需通过绿地规模、空间布局及植物类型协调达到供需平衡。目前研究内容分为评价体系构建和分析决策2个方面（图4）。评价体系构建包括揭示供需平衡特征和规律，以及综合评价。分析决策包括模拟预测、优化布局，主要应用数学方法。水量供需平衡评估需收集和筛选相关数据，基础数据包括高程、绿地、遥感、植物种类测绘、降雨、土地利用和土壤等。需水量评估包括植物和水景需水量，常用的指标有水量蒸发量、水动态损失量、水景生物耗水量、渗漏水量、水体自身允许最小需水量和公共用水取水量^[8]。供水量首要考虑有效降雨量和中水量，其次是市政水和地表水。有效降雨量指灌溉季节内能被植物利用的降雨量，该指标主要用于评估LID设施。

2.2 水量供需平衡评价方法

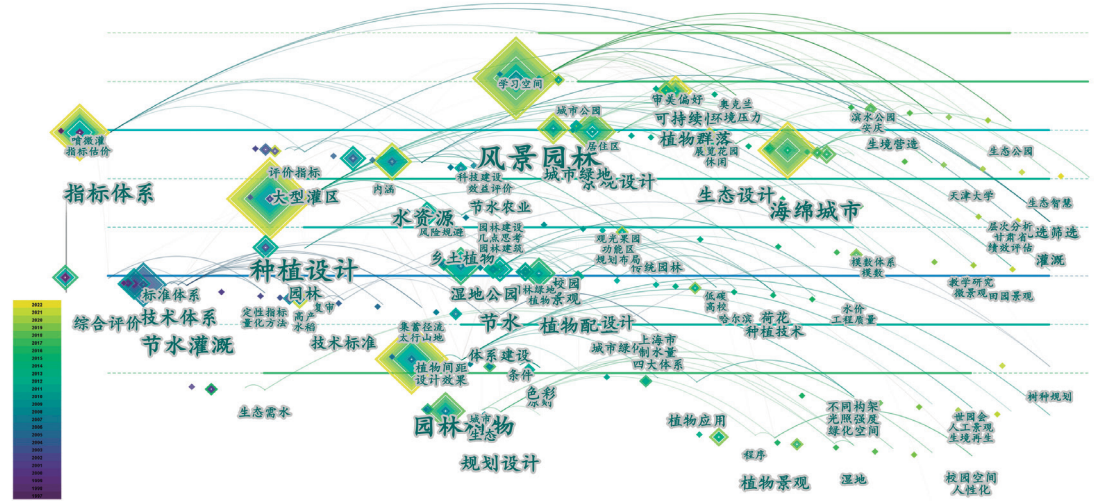
水量供需平衡评估方法主要有生态模型法、参与调查法和经验统计法3类^[5,7,21-35]（表1）。生态模型法能够模拟生态系统的行为和特点^[36]，通常包含概念模型或数学模型。

该方法数据需求大，处理过程复杂，评价结果受算法和参数影响。参与调查法能够较为真实地反映水量供需平衡的情况，对小尺度区域适用，但数据收集耗时费力。经验统计法通过参数模型和数学公式量化，操作简便且数据需求少，但展现生态功能与过程能力较弱^[37]。

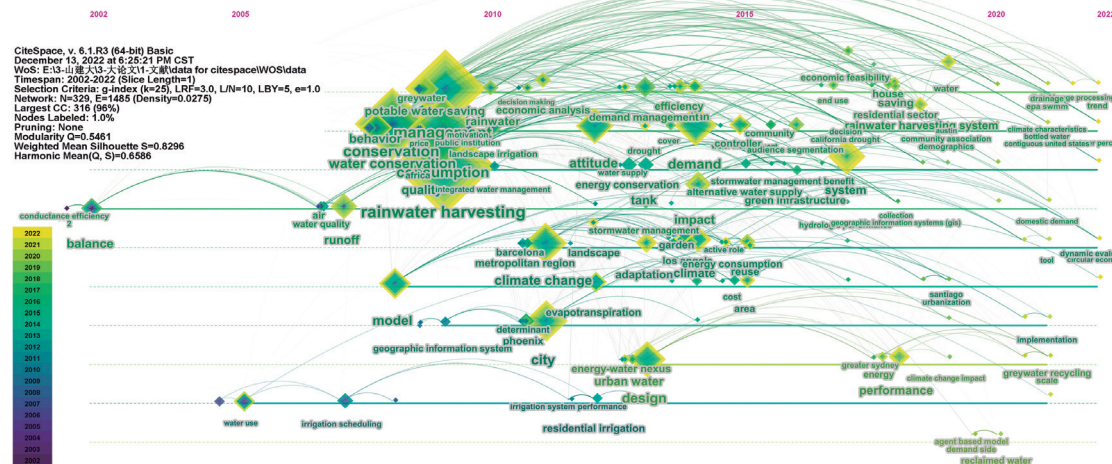
2.2.1 景观供水量评估方法

景观供水量评估主要包括有效降雨量和中水回用量评估：1) 有效降雨量评估方法包括生态模型法和经验统计法2类。生态模型法包括I-Tree Eco、SWMM、IHACRES和HEC-HMS模型。I-Tree Eco模型用于评估乔木冠层的雨水截留量，精度高。但目前主要关注固碳和净化空气，较少涉及降雨产流效果^[28]；IHACRES模型参数少，适合日径流模拟，但在水文响应和地形特征结合方面存在局限性^[24]；HEC-HMS模型适用于水文资料少的地区，可模拟短时暴雨的降雨径流过程，但缺少水动力模块，且数字高程模型(DEM)数据影响模拟精度^[23]；SWMM模型兼顾水量和水质模拟，软件开源免费，能较好模拟降雨过程，但其是一维模型，无法进行地表二维水体水力计算^[21]。此外，经验统计法计算较为简便，工程人员容易掌握，但精度不如模型法。如部分学者使用平衡方程^[38]、加权平均法^[39]计算场地集水量。2) 中水回用量评估方法包括经验统计法和参与调查法2类。经验统计法基于建筑生活污水，通过定额、折减系数和人口数计算中水水量^[5]。参与调查法则依据上位规划计算中水回用量。2种方法能较为真实地反映中水回用量的情况。

CiteSpace, v. 5.1.R3 (64-bit) Basic
 December 9, 2022 at 4:56:30 PM CST
 CSSCI: E:13-山推大13-大论文11-文献data for citespacedata
 Timespan: 1997-2022 (Slice Length=1)
 Selection Criteria: g-index (p=25), LRF=3.0, L/N=10, LBY=5, em=1.0
 Network: N=414, E=614 (Density=0.0072)
 Largest CC: 258 (62%)
 Nodes Labeled: 1.0%
 Pruning: Pathfinder
 Modularity Q=0.8244
 Weighted Mean Silhouette S=0.9384
 Harmonic Mean(Q, S)=0.8777



- #0 风景园林
- #1 海绵城市
- #2 指标体系
- #3 种植设计
- #4 节水
- #5 节水灌溉
- #6 园林植物
- #7 规划设计



- #0 rain water harve...
- #1 water conservati...
- #2 water supply
- #3 potable water co...
- #4 los angeles
- #5 outdoor water us...
- #6 residential land...
- #7 energy-water nex...
- #8 water use
- #9 decentralized wa...

图3 CNKI与WOS关键词共现聚类时序知识图谱
 Fig.3 CNKI and WOS keyword co-occurrence clustering temporal knowledge map

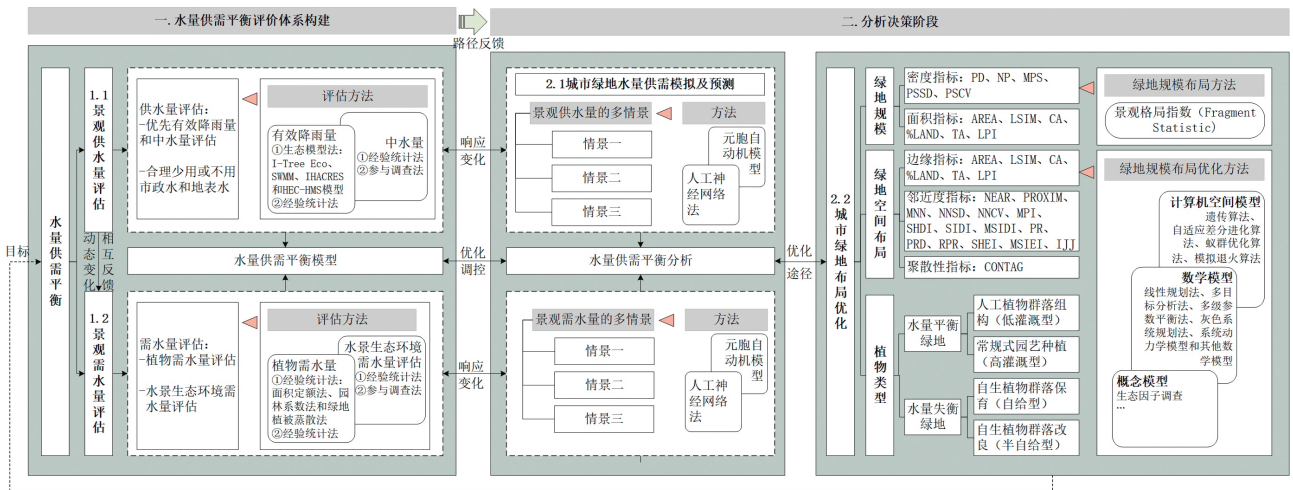


图4 基于水量供需平衡的城市绿地布局优化研究框架
 Fig.4 Research framework of urban green space layout optimization based on water supply and demand balance

表 1 水量供需平衡评估方法对比

Tab.1 Comparison of methods for assessing the balance between water supply and demand

方法分类	具体评价方法	适用范围	应用状况	优点	缺点	参考文献
生态模型法	★ SWMM	区域、流域、城市、社区	◎	开源免费，操作简便，计算结果认可度高	无法进行地表二维水体水力计算	[21]
	◆ MODIS EVI/NDVI	区域、流域、城市、社区	◎	免费接收和使用、光谱、时间分辨率高，较好地估算年蒸散发	工作量大，高植被覆盖区反演精度不足	[22]
	★ HEC - HMS	流域、区域、城市	◎	适用于资料少地区，计算简单，时间尺度精确，适合模拟短时暴雨的降雨径流过程	缺少水动力模块，DEM 数据对模拟精度有较大影响	[23]
	★ IHACRES	流域、区域、城市	◎	雨水收集方面的水文分析很有优势，参数少，可用于日径流模拟	对水文响应的代表性不足、与适当的地形特征结合能力有限	[24]
	◆ PT-JPL	区域、流域、城市	△	结构相对简单，能准确估算潜在蒸散发量，解决地面阻抗数据获取难题	未考虑植被动态变化的影响	[25]
	■ WetSpass	区域、流域、城市	△	预测地表径流，推算地下水补给和实际蒸散量	未考虑植被动态变化的影响	[26]
	■ 示踪剂辅助 Green Ampt	区域、城市	△	较好地评估大尺度、复杂城市景观水量供需	水量需求值偏高	[27]
	★ I-Tree Eco	社区	△	可模拟短历时和长历时降雨事件，精确到单株树尺度	较少涉及降雨产流效果	[28]
参与调查法	★ 问卷调查法	城市、社区	◎	小尺度区域水量供给侧研究应用较多	不具有普适性	[29]
	◆ 园林系数法	城市、社区	◎	使用较为普遍	理论简略，参数缺乏论证	[7]
经验统计法	■ 新型水平衡法	城市、社区	◎	较好地评估多年绿地灌溉效率	成本较高	[27]
	★ 建筑物中水原水量公式法	城市、社区	◎	较为真实地反映中水回用量情况	不具有普适性	[30]
	◆ 面积定额法	城市、社区	◎	适用于基础条件较好的地区与植被类型	植被类型少，局限于林地、草地和灌丛种	[5]
	★ 容积法	城市、社区	◎	较为简便，容易掌握	精度不如模型法	[31]
	◆ WUCOLS	城市、社区	△	评估混合植被需水量，应用成熟	方法具有经验性	[32]
	◆ IPOS	区域、流域、城市、社区	△	适用于单一植物栽培的草坪场地	混合植被的地区不适用，且评估结果偏低	[33]
	◆ PF	城市、社区	△	更为科学	PF 未知的植物物种，要进行估算和实验调整	[33]
	◆ SWB	城市、社区	△	提供准确数据	成本高，需 1 年以上时间和高级技术人员，大面积应用时误差大	[34]
◆ LIMP	城市、社区	△	科学校准景观蒸散发组分，有助于评估斜坡和地表对小气候的影响	在具有多种小气候、混合种植的地区评估效果不佳	[35]	

注：★为景观供水量评估方法；◆为景观需水量评估方法；■水量供需平衡分析方法；◎国内外应用广泛；△国外应用广泛，国内很少用。

2.2.2 景观需水量评估方法

国内植物需水量评估多聚焦在农作物，园林植物需水量评估研究较少。多数学者常用的经验统计法包括面积定额法、园林系数法和绿地植被蒸散法。如刘晖等^[5]通过面积定额法，对植物面积与其单位面积生态需水定额的乘积求和得到植物需水量，但研究植物类型较为局限。邱振存等^[7]利用园林系数法估算园林植物需水量，但研究参数笼统且缺少论证。绿地植被蒸散法选取城市绿化覆盖率、人均绿地定额指标进行数学公式量化^[40]。然而，绿地的适宜数量仅从人口来决定，可能造成一定的偏差。王衍祯^[8]提出园林水景需水量的各部分水量计算指标和计算方法，但研究具有一定经验性。

国外研究起步较早，多数学者常用的经验统计法包括 WUCOLS、植物因子法 (Plant Factor, PF)、遥感方法

(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)、景观灌溉管理方案 (Landscape Irrigation Management Program, LIMP)、灌溉公共开放空间 (Irrigated Public Open Space, IPOS) 和土壤水分平衡 (Soil Water Balance, SWB)^[33-34]。WUCOLS 由加州水资源管理局发起，专家评估各类植物需水量，建立包含 6 个气候区的 3 546 个园林植物需水量数据库^[32]，但具有一定的主观性。因此，LIMP 将系数分离成可测量的因素，使其更为科学。由于作物系数不足以定义园林植物的灌溉要求，PF 的概念被提出^[41]。IPOS 由南澳大利亚政府制定，用于公共开放空间的规划和蒸散速率计算植物需水量^[33]。上述方法评估的景观需水量值从高到低为 LIMP>SWB>MODIS>WUCOLS>PF>IPOS。其中，PF 和

WUCOLS 与实际灌溉记录最接近, SWB 与 MODIS 一致性高。但 LIMP、MODIS 和 SWB 偏高, IPOS 偏低。此外, 还有部分学者通过参与调查法, 根据历史数据估计灌溉需求^[29], 但结果受研究区域影响, 不具有普适性。

2.2.3 景观水量供需平衡分析方法

国内外水量供需平衡相关研究多聚焦在大尺度区域^[42], 常用的方法有生态模型法和经验统计法。生态模型法包括 WetSpass、Green Ampt 等模型。有学者通过 WetSpass 模型评估土地利用变化对区域尺度上水平衡的影响^[43]; 也有学者使用示踪剂辅助 Green Ampt 模型在复杂城市景观中进行水量平衡评估^[27]。其中, WetSpass 模型能够预测季节和年度时间步长的平均地表径流, 得到地下水补给和实际蒸散量, 但未考虑园林植物的生长状态对水量供需变化的影响; 示踪剂辅助 Green Ampt 模型能较好地评估大尺度、复杂城市景观水量供需, 但测出水量需求值偏高。在经验统计法方面, 有学者基于供水系统和农业灌溉系统的水平衡, 提出一种用于评估城市绿地用水效率的新型水平衡 (Water Balance) 方法, 可以较好地评估多年绿地灌溉效率^[44], 如需更高精度, 需要在现场安装气象站并监测土壤湿度, 成本较高。

2.3 基于水量供需平衡的城市绿地布局优化研究方法

2.3.1 城市绿地水量供需模拟及预测方法

城市绿地水量供需模拟及预测的研究引入各种数学模型对景观过程进行模拟, 从而定量地揭示水量供需随时间变化的规律, 进一步对其未来发展趋势做出预测。比较常见的数学模型包含人工神经网络法、元胞自动机模型。如 Haojie Cheng 等^[45] 在区域尺度上, 通过 LIMP、Hargreaves 方法结合深度学习评估当前和未来不同气候情景下的植物需水量, 利用 NRCS-CN 方法评估有效降雨量, 以确定不同气候情景下城市绿地的灌溉需求。但研究假设未来城市的绿地面积和位置不变, 没有考虑绿地规模、空间布局和植物生长状态变化的影响, 对城市绿地布局优化实践应用意义不高。Qing Zhong 等^[22] 在城市尺度上, 通过高分辨率激光雷达数据和正射影像识别集水区和绿地, 通过径流系数法评估有效降雨量, WUCOLS 法评估植物需水量, 基于动态程序进行 10 年的水量供需评估。研究表明雨水回收灌溉城市绿地潜力巨大, 图森市每年可节省 102 亿升市政用水, 相当于节省 1 380 万美元。景观供需水量的多情景设置有 2 类: 1) 不同水文年份分为枯水年、平水年和丰水年; 2) 温室气体浓度情景有 RCP4.5 和 RCP8.5。

2.3.2 绿地布局优化方法

城市绿地规模和空间布局优化方法包括概念模型、数学模型和计算机空间模型 3 类。概念模型指基于生态因子调查研究, 分析绿地布局与功能关系的一般规律, 以现有理论对绿地空间布局进行调整^[46]。如刘慧民等^[47] 通过公式法计算植物需水量和有效降雨量, 基于地形地貌因子分析定位绿地的空间布局, 但计算较为粗略。数学模型包含线性规划法、多目标分析法、多级参数平衡法、灰色系统规划法、系统动

力学模型和其他数学模型。如孙红等^[48] 通过尺度扩展法、公式法对水量供给侧进行评估, 利用灰色马尔科夫链模型与熵值法预测北京市绿地的供水量, 但研究使用的水量供需平衡分析方法精度不高。计算机空间模型是通过计算机将数学模型与空间位置结合起来, 编码计算机程序对生态过程进行空间模拟, 利用优化算法对城市绿地布局进行优化。如部分学者通过元胞自动机模型、遗传算法等进行绿地布局优化^[49], 但目前基于水量供需平衡分析进行绿地布局优化的相关算法应用较少。

3 展望

虽然“以水定绿”研究已经取得较大进展, 但整体而言, 在理论体系、方法机理和法律法规等方面仍有诸多不足。特别是国内相关研究尚未形成体系, 难以满足国务院办公厅关于科学绿化的应用需求。针对现有研究不足, 对未来“以水定绿”研究进行以下 3 个方面的展望。

3.1 城市绿地水量供需平衡评价体系和研究框架

当前相关研究多集中于城区、社区等中小尺度^[32], 因尺度、机制和气候等问题而无法直接应用于相似区域, 缺乏多尺度的研究范式。未来“以水定绿”评价体系和研究框架的构建, 需要厘清不同时间和空间尺度下绿地水量供需之间的关联和作用机制。对于时间尺度而言, 通过搜集分析当地历史降雨数据, 研究城市绿地雨水蓄存与蒸散发在不同水文年份之间的差异, 为预测未来城市绿地水量供需状况建立数据库。对于空间尺度而言, 应构建区域、流域、城市和社区等多尺度绿地水量供需平衡评价体系, 量化评估并分析多尺度水量供需平衡关系。对于作用机制而言, 应结合数学模型和计算机空间模型对水量供需过程进行模拟, 预测未来水资源承载力, 综合考虑、评估不同城市生态区域的水资源承载力, 并以此为依据进行城市绿地规划布局。

3.2 模型与方法

在研究方法上, 景观水量供给评估方法已相对成熟, 但其结果的精细化程度尚待提高。景观需水量评估方法主要借鉴国外经验统计法, 我国相关研究仍处于初始阶段。绿地布局优化方法通常采用概念模型和数学模型, 基于水量供需平衡的绿地空间布局相关算法尚未形成, 与实践应用的衔接存在困难。未来研究应加强集供需评价于一体的生态模型研发。在景观供水量评估方面, 依据不同尺度和当地水文资料情况, 选择合适的评估方法。采用高分辨率遥感数据与数值模拟等手段, 依据研究区域特征对相关参数进行修正, 并规范数据处理过程, 提高景观水量供给评估的精确性。在景观需水量评估方面, 以国内相关研究为基础, 测定我国 11 个园林植物种植气候区统一的参考作物腾发量 (ET₀), 可以采用联合国粮农组织的软件 ET₀ calculator 或 Penman-Monteith 模型进行计算。依托互联网与大数据技术, 联合园林植物爱好者、政府和高校, 对我国常见园林植物进行评级测定, 确定 PF, 加强园林植物需水量数据库建设^[32]。

3.3 园林用水管理的法规与政府的监管

发达国家对园林用水管理制定了具体的法规、标准或条例,相比之下,我国在相关领域的标准制定尚不够全面和细致。未来应加大对园林用水管理方面法律法规及监管力度的研究,推进城市雨水资源化法律法规的健全与强制性约束,加强雨水收集利用的行业标准和地方标准制定^[50]。早期可参考美国《标准水效率景观条例》(Model Water Efficient Landscape Ordinance)、《雨水管理条例》(Stormwater Management Ordinance)及《雨水管理要求和设计指南》(Stormwater Management Requirements and Design Guidelines)等法规,结合我国各区域灌溉方式、城乡景观和节水技术应用等实际情况,制定适应我国园林植物种植气候区的用水最高限额。同时,在具备利用再生水条件的地区,应强化园林用水管理,优先选用雨水及再生水等非常规水源,并逐步降低地下水及自来水使用量。

4 结语

在全球水资源日益紧张的背景下,“以水定绿”已成为可持续景观建设的重要课题。通过利用 CiteSpace 对国内外核心期刊论文进行分析发现,相关研究在“以水定绿”概念探讨、城市绿地水量供需评估量化和绿地布局优化等方面已取得重要进展。国外关于水效率景观、耐旱景观等的研究,为我国风景园林领域提供了宝贵的经验和启示。然而,国内相关研究仍处于起步阶段,在理论体系、方法机理和法律法规等方面仍存在诸多不足。未来应完善城市绿地水量供需平衡评价体系和研究框架,厘清不同时间和空间尺度下绿地水量供需之间的关联和作用机制,加强集供需评价于一体的生态模型研发,同时加大对园林用水管理相关法律法规及监管力度的研究。

注:图片均为作者自绘。

参考文献:

[1] GURUNG P, DHUNGANA S, KYAW KYAW A, et al. Hydrologic characterization of the Upper Ayeyarwaddy River Basin and the impact of climate change[J]. Journal of Water and Climate Change, 2022, 13 (7) : 2577-2596.
[2] 姜彤, 孙赫敏, 李修仓, 等. 气候变化对水文循环的影响[J]. 气象, 2020, 46 (3) : 289-300.
[3] 张春园, 赵勇. 实施污水资源化是保障国家高质量发展的需要[J]. 中国水利, 2020 (1) : 1-4.
[4] 张佳丽, 汪静如. 破解西北干旱地区城市园林建设中水资源困局的思考[J]. 中国园林, 2014, 30 (4) : 56-58.
[5] 刘晖, 许博文, 邹子辰, 等. 以水定绿: 西北地区城市绿地生态设计方法探索[J]. 中国园林, 2021, 37 (7) : 25-30.
[6] ELENA C, STEFANO F, ROBERTO D, et al. How much green roofs and rainwater harvesting systems can contribute to urban flood mitigation?[J]. Urban Water Journal, 2023, 20 (2) : 140-157.
[7] 邱振存, 管健. 园林绿化植物灌溉需水量估算[J]. 节水灌溉, 2011 (4) : 48-50.

[8] 王衍祯. 园林水景生态环境需水量的研究[J]. 地理科学, 2011, 31 (7) : 874-878.
[9] 刘业森, 刘媛媛, 李敏, 等. 降雨数据空间分辨率在城市流域洪峰变化分析中的影响[J]. 地球信息科学学报, 2022, 24 (7) : 1326-1336.
[10] 曹传生, 刘慧民, 王南. 屋顶花园雨水利用系统设计与实践[J]. 农业工程学报, 2013, 29 (9) : 76-85.
[11] 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 (3) : 389-396.
[12] 姜芊孜, 俞孔坚, 王志芳. 基于 SWMM 的陂塘系统雨洪调蓄能力及应用研究[J]. 中国给水排水, 2018, 34 (11) : 132-138.
[13] SMETANA S M, CRITTENDEN J C. Sustainable plants in urban parks: A life cycle analysis of traditional and alternative lawns in Georgia, USA[J]. Landscape and Urban Planning, 2014, 122: 140-151.
[14] 李杰, 陈超美. CiteSpace: 科技文本挖掘及可视化[M]. 北京: 首都经济贸易大学出版社, 2016: 226-231.
[15] 俞孔坚, 李迪华, 袁弘, 等. “海绵城市”理论与实践[J]. 城市规划, 2015, 39 (6) : 26-36.
[16] 董淑秋, 韩志刚. 基于“生态海绵城市”构建的雨水利用规划研究[J]. 城市发展研究, 2011, 18 (12) : 37-41.
[17] TIMLIN D, PACHEPSKY Y, WALTHALL C, et al. The use of a water budget model and yield maps to characterize water availability in a landscape[J]. Soil and Tillage Research, 2001, 58 (3-4) : 219-231.
[18] OAD R, DISPIGNO M. Water rights to return flow from urban landscape irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1997, 123 (4) : 293-299.
[19] SMITH B, PATRICK R J. Xeriscape for urban water security: A preliminary study from Saskatoon, Saskatchewan[J]. Canadian Journal of Urban Research, 2011, 20 (2) : 56-70.
[20] HILAIRE R S, ARNOLD M A, WILKERSON D C, et al. Efficient water use in residential urban landscapes[J]. HortScience, 2008, 43 (7) : 2081-2092.
[21] 房亚军, 于川洪, 金鑫, 等. 基于 SWMM-CCHE2D 单向耦合模型的山地海绵城市内涝管控效果研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54 (10) : 898-906.
[22] ZHONG Q, TONG D, CROSSON C, et al. A GIS-based approach to assessing the capacity of rainwater harvesting for addressing outdoor irrigation[J]. Landscape and Urban Planning, 2022, 223: 104416.
[23] AKTER A, AHMED S. Potentiality of rainwater harvesting for an urban community in Bangladesh[J]. J Hydrol, 2015, 528: 84-93.
[24] KIM K, YOO C. Hydrological Modeling and Evaluation of Rainwater Harvesting Facilities: Case Study on Several Rainwater Harvesting Facilities in Korea[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2009, 14 (6) : 545-561.
[25] FISHER J B, TU K P, BALDOCCHI D D. Global estimates of the land-atmosphere water flux based on monthly AVHRR and ISLSCP-II data, validated at 16 FLUXNET sites[J]. Remote Sensing of Environment: An Interdisciplinary Journal, 2008, 112 (3) : 901-919.
[26] BATELAAN O, SMEDT D F. GIS-based recharge estimation by coupling surface-subsurface water balances[J]. Journal of Hydrology, 2007, 337 (3) : 337-355.
[27] GILFALCK M, TETZLAFF D, MARX C, et al. Estimates of water partitioning in complex urban landscapes with isotope-aided ecohydrological modelling[J]. Hydrological Processes,

2022, 36 (3) : e14532.

[28] 常彬, 王思思. 基于 i-Tree Eco 模型的城市林冠雨水截留和径流削减效益研究——以北京建筑大学西城校区为例 [J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35 (2) : 136-142.

[29] STEFFEN J, JENSEN M, POMEROY A C, et al. Water Supply and Stormwater Management Benefits of Residential Rainwater Harvesting in U.S. Cities[J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 2013, 49 (4) : 810-824.

[30] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑中水设计标准: GB 50336—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.

[31] 王震, 吴晗. 基于容积法的年径流总量控制率精细化计算研究 [J]. 给水排水, 2022, 58 (S1) : 85-88.

[32] 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.

[33] NOURI H, BEECHAM S, HASSANLI A M, et al. Water requirements of urban landscape plants: A comparison of three factor-based approaches[J]. Ecological Engineering, 2013, 57: 276-284.

[34] NOURI H, GLENN E P, BEECHAM S, et al. Comparing Three Approaches of Evapotranspiration Estimation in Mixed Urban Vegetation: Field-Based, Remote Sensing-Based and Observational-Based Methods[J]. Remote Sensing, 2016, 8 (6) : 492.

[35] SNYDER R L, PEDRAS C, MONTAZAR A, et al. Advances in ET-based landscape irrigation management[J]. Agricultural Water Management, 2015, 147: 187-197.

[36] 生农, 辛琨, 廖宝文. 红树林湿地生态功能及其价值研究文献学分析 [J]. 湿地科学与管理, 2021, 17 (1) : 47-50.

[37] 姜芊孜, 李金煜, 梁雪原, 等. 基于文献计量的绿色基础设施水生态系统服务供需评价研究进展 [J]. 生态学报, 2023, 43 (4) : 1738-1747.

[38] CATARINA L, MATOS C S, VITOR S. A scale-adaptive method for urban rainwater harvesting simulation[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2020, 27 (5) : 4557-4570.

[39] 李强. 以怡馨花园绿地雨水收集再利用工程的研究论城市节约型园林绿地建设 [J]. 中国园林, 2008, 24 (9) : 83-88.

[40] 杨志峰, 崔保山, 刘静玲, 等. 生态环境需水量理论、方法与实践 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.

[41] KJELGREN R, RUPP L, KILGREN D. Water conservation in urban landscapes[J]. HortScience, 2000, 35 (6) : 1037-1040.

[42] NANNAWO A S, LOHANI T K, ESHETE A A. Exemplifying the effects using WetSpa model depicting the landscape modifications on long-term surface and subsurface hydrological water balance in Bilate Basin, Ethiopia[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021: 1-20.

[43] ZHANG Y, LIU S, CHENG F, et al. WetSpa-based study of the effects of urbanization on the water balance components at regional and quadrat scales in Beijing, China[J]. Water, 2017, 10 (1) : 5.

[44] MONTEIRO L, CRISTINA R, COVAS D. Water and energy efficiency assessment in urban green spaces[J]. Energies, 2021, 14 (17) : 5490.

[45] CHENG H, PARK C Y, CHO M, et al. Water requirement of Urban Green Infrastructure under climate change[J]. Science of The Total Environment, 2023, 893: 164887.

[46] 韩文权, 常禹, 胡远满, 等. 景观格局优化研究进展 [J]. 生态

学杂志, 2005 (12) : 1487-1492.

[47] 刘慧民, 宫思羽, 邹铁安, 等. 基于 GIS 技术规划城市节水型绿地系统的研究 [J]. 农业工程学报, 2019, 35 (6) : 279-287.

[48] 孙红, 米锋, 田明华, 等. 北京市城市绿化用水的供需风险评估 [J]. 水土保持通报, 2014, 34 (5) : 153-157.

[49] HUANG J J, XIAO M, LI Y, et al. The optimization of Low Impact Development placement considering life cycle cost using Genetic Algorithm[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 309: 114700.

[50] 周晋军, 庞亚莉, 王昊, 等. 我国城市雨水资源化发展研究综述 [J]. 水利水电技术 (中英文), 2023, 54 (5) : 61-74.

作者简介:

赵宇桑 / 1998 年生 / 女 / 山西晋中人 / 在读硕士研究生 / 山东建筑大学建筑城规学院 (济南 250101) / 专业方向为城市雨洪管理、绿色基础设施与生态系统服务等

(* 通信作者) 詹雨尘 / 1998 年生 / 男 / 安徽六安人 / 在读硕士研究生 / 山东建筑大学建筑城规学院 (济南 250101) / 专业方向为区域景观、风景园林规划与设计 / E-mail: yuchen19980603@163.com