

基于水绿空间共位的西北城市绿地生态设计方法研究

Research on Ecological Design Approaches for Urban Green Spaces in Northwest China Based on Water-Green Spatial Co-Location

刘 晖^{1,2*} 张晓彤¹ 杨 莹¹ 汪潮阔¹
LIU Hui^{1,2*} ZHANG Xiaotong¹ YANG Ying¹ WANG Chaokuo¹

(1.西安建筑科技大学建筑学院, 西安 710055; 2.西安建筑科技大学交叉创新研究院干旱半干旱区生态科学与工程研究院, 西安 710055)

(1. School of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi, China, 710055; 2. The Institute of Ecological Science and Engineering for Arid and Semi-arid Zones, Institute for Interdisciplinary and Innovation Research, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi, China, 710055)

文章编号: 1000-0283(2025)06-0014-10
DOI: 10.12193/j.laing.2025.06.0014.002
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2025-01-10
修回日期: 2025-03-31

摘 要

在西北地区城市化发展过程中,水资源与绿地配置矛盾突出,主要表现为“水绿错位”和“水绿错配”。现有研究多集中于水平方向的水绿共位,强调绿地蓄水功能,而关于水对生境的改善作用及植被对水的适应性,探讨相对有限,仍有进一步深化和完善的空间。将“绿”的概念在垂直方向上进行拓展,强调植被在水资源适配和生态功能实现中的多层次作用,提出平面布局与垂直结构协同的水绿共位关系理论模型及生态设计途径,并在沣西新城创新港中学开展设计实践,展现出一定的生态和经济效益,进一步验证了构建水平—垂直协同的水绿共位机制的可行性与必要性。

关键词

水绿共位; 垂直结构; 以绿适水; 城市生境单元; 绿地生态设计

Abstract

In the context of urbanization in Northwest China, the tension between the management of water resources and the allocation of green space has become increasingly evident, primarily manifesting as “water-green misalignment” and “water-green mismatch”. Current research predominantly focuses on the horizontal aspects of water-green co-location, emphasizing the water-retention function of green spaces. In contrast, investigations into how water improves habitat conditions and how vegetation adapts to water availability remain comparatively limited, leaving considerable room for further in-depth exploration and refinement. This study broadens the concept of “green” to encompass the vertical dimension, underscoring the multi-layered role of vegetation in water resource adaptation and ecological functionality. It proposes a theoretical model of “water-green co-location” along with an ecological design approach that integrates spatial layout and vertical structure. This approach was implemented in the design practice at Fengxi New City Innovation Port Middle School, showcasing certain ecological and economic benefits while further substantiating the feasibility and necessity of establishing a horizontally and vertically coordinated water-green co-location mechanism.

Keywords

water-green co-location; vertical structure; green adaptation to water; urban habitat units; green space ecological design

刘 晖

1968年生/女/辽宁沈阳人/博士/教授、博士生导师/西安建筑科技大学交叉创新研究院干旱半干旱区生态科学与工程研究院副院长/研究方向为西北脆弱生态环境景观规划设计理论与方法、中国地景文化历史与理论

张晓彤

1997年生/女/山东潍坊人/在读博士研究生/研究方向为风景园林规划与设计

杨 莹

2002年生/女/安徽合肥人/在读硕士研究生/研究方向为风景园林规划与设计

中国干旱半干旱区约为 $4.56 \times 10^6 \text{ km}^2$, 其中85%分布在西北6个省区^[1], 有限的水资源和植被覆盖是人类生存的保护屏障。西北地区相较于其他地区生态系统较为脆弱, 水资源承载能力弱, 因此其城市化发展过程中的绿地规模和品质提升与水资源条件之间的

基金项目:

国家自然科学基金项目“西北城市绿地生境多样性营造多解模式设计方法研究”(编号: 51878531); 渭南市海绵城市建设专题研究服务项目“西部黄土台源地区典型海绵设施适宜性植物选型及景观配置研究”(编号: 20230759)

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: 249600425@qq.com

“水绿矛盾”尤为突出，具体表现为“水绿错位”“水绿错配”等，引发了旱涝并存、绿增水缺等一系列生态胁迫问题，西北地区是亟需缓解“水绿矛盾”的关键区域^[2]。

首先水与绿在自然条件下具有时空分布上的天然耦合协同关系^[3]，而城市下垫面的硬化改变了城市的水文规律，打破了这一平衡，城市绿地布局只有精准结合城市产汇流规律，才能使珍贵的降水被绿地利用，但目前西北城市多数绿地的保水、持水、蓄水功能未得到充分发挥^[4]，形成了城市降水利用与绿地位置及形态之间的“水绿错位”矛盾。其次水与植物这一对生态因子具有内在的耦合机制^[5]，但由于在城市发展过程中对常规化园林种植、乔灌复层植物景观及花境植物景观的过度追求，忽略了水资源的承载能力，形成“被动用水”现象即“水绿错配”问题，导致城市绿地耗水量剧增。

近年来，在中小尺度的城市生态设计中，海绵城市及其关联的地表水文过程相关研究持续深化，现有研究主要基于SWMM、Infoworks ICM等水文模拟工具，重点解析透水铺装、绿色屋顶及生物滞留池等低影响开发设施^[6-7]对径流峰值削减率、滞时效应的影响机制^[8]。例如，禹佳宁等^[8]通过景观指数与GIS空间分析，探讨了蓝绿空间分维指数、边缘对比度与雨洪调蓄功能的关联性；李静等^[9]通过一维管网模型，模拟了不同绿地布局方案对雨水径流量和管网动态储水量的调控差异。

随着研究的推进，水绿协同已成为该领域的重要研究方向，主要强调绿地在雨水调蓄、水资源优化配置中的作用，以提高水资源利用效率。如卢奕芸等^[10]以园林博览会园区为例，通过确定径流控制目标、调蓄容积计算和动态模拟分析，优化雨洪管理能力，

实现绿地对地表径流的有效调蓄；周伟奇等^[11]在研究中提出，绿色基础设施可以通过其拦截、渗透、蒸发等能力应对城市内涝问题；Li等^[12]针对广西某体育中心工程，分析多种不同位置和尺寸海绵设施的调蓄性能；Prudencio等^[13]在研究中探讨城市绿地如何通过渗透、滞留和蒸散来促进雨水管理，强调将绿地纳入城市水资源管理战略；Xu等^[14]将景观安全格局理论应用于绿色雨水基础设施的生态规划，通过分析和模拟城市水文过程将绿色雨水基础设施整合到城市规划中；周聪惠^[15]通过汇水分区与绿地布局的空间耦合，探索了通过蓝绿空间一体化缓解城市内涝的技术路径。此类研究多集中于对平面布局的推敲，即水平方向的水绿共位，以绿地蓄水为主要目标，且多以面积类指标对绿地设计进行上位控制。

尽管水平方向上的水绿共位研究取得了较大进展，但垂直结构上的水绿协同机制仍未被充分探讨。绿地滞蓄水能力不仅取决于绿地面积、植被结构、植物种类、土壤特性等也是重要的影响因素^[16]，如植被结构通过影响雨水截留对绿地滞蓄水能力产生影响^[17]，乔、灌、草复合植物群落的滞蓄水能力明显较强。此外，植被结构和植物选型也是影响绿地生态需水量的重要因素，合理的植被结构和植被选型可以有效提升雨水管理能力及雨水利用效率。

综上，目前的研究多集中于水平方向的水绿共位，而关于水对生境的改善作用及植被对水的适应性，探讨相对有限，对植物在水文循环中的作用机制及二者关联性考虑不足，且缺乏构建水绿共生关系的系统性理论框架与技术路径。本研究结合海绵城市及植物生态需水等相关理论，探讨如何建立各要素之间在平面布局及垂直结构上的共位关系，

构建适用于城市有效空间尺度的水绿空间共位机制并提出相应的生态设计途径。

1 水绿关系中的相关概念界定

1.1 “水”的概念界定

水绿共位关系中的“水”，指在城市化区域内，通过不同路径流动的水资源，包括降水、径流水、补给水、非常规水源等。降水是土壤水分的重要来源之一，对土壤有直接的补给作用，降水量决定土壤水分的分布特征，进一步影响植物的生长情况和稳定性^[18]。径流水，是指大气降水到达陆地后，除去被蒸发的部分，其他存在于地表或地下沿高低差由高向低流动的水体。补给水通常指的是因城市用水需求增加，需要从外部水源补充的水，这些外部水源可能包括地下水、地表水（如河流、湖泊）或经过处理的再生水（如中水）。非常规水源的定义是区别于传统意义上的地表水和地下水，主要指那些原本不能直接利用，但经过适当的处理后可以被利用^[19]或再生利用的水资源。这些水源能够在一定程度上替代常规水资源，满足城市的各种用水需求。这些水体通过渗透作用，将水分补给到土壤中，从而增加土壤的含水量并支持植物生长。同时，土壤水分作为控制一系列水文和生态过程的关键因子，也会通过蒸发、植物蒸腾等作用返回到大气中，构成地表水循环的一部分^[20]。

1.2 “绿”的概念界定

水绿共位关系中的“绿”，不仅指城市中被植被覆盖的绿地，还进一步涵盖了绿地植被结构、植被的滞蓄水能力、土壤的持水性能以及植物的需水特性等综合因素。这种立体化的理解强调了植被在水资源适配和生态

功能实现中的多层次作用。绿地植被结构指覆盖在城市或特定区域内的绿色植物群落的组成、分布、排列及其相互关系的总和^[21]。植被滞蓄水能力在维护生态平衡和水文循环中起着重要作用。一般指植被通过其根系结构、植物蒸腾作用、植物覆盖层、腐殖质含量以及对土壤结构的影响等多种方式,对水分进行吸收、储存和调节的能力。土壤的持水性是衡量土壤吸持水分能力的重要指标,通常包括最大持水量、最小持水量、毛管持水量、田间持水量等,受土壤质地、结构、容重,以及有机质含量主要因素影响。植物生态需水量主要指植物为维持正常生长发育及生态环境平衡所需的水分,一般包括植被蒸散发需水量、植被生长需水量和维持植被生长的土壤水量^[22]。

1.3 水绿关系的概念界定

水绿共位是指城市生境单元内的地表径流与绿地之间在布局、规模、植物配置等方面耦合后形成的互补互促的协同关系^[23],构建“水”与“绿”在水平布局和垂直结构上的共位综合体,促进水资源的高效利用及适水(耐旱)植物群落的繁茂生长^[24]。

在“水绿共位”策略中,首先应根据城市地带性自然植被特征选取适宜的种植设计类型,同时结合城市绿地生态设计类型及分区对绿地功能进行精准定位。其次,通过确定城市生境单元的水文循环特征,调整绿地的布局和规模,优化汇集,下渗和排放路径,并同步匹配绿地的滞蓄水能力,汇集降水及地表水。最后,核心在于对绿地的生态需水特征进行评估,尽可能使绿地的生态需水量与滞蓄水能力在量上达到动态平衡,避免因需水量远超场地水量而导致资源浪费或生态失衡。

2 西北地区城市水绿空间共位机制构建

2.1 生态本底与地带性植被类型

基于城市自然植被类型选取适宜的种植类型是开展西北地区城市绿地生态设计的前提条件,根据先前的相关研究及实践经验,西北地区62个主要城市的生态本底及自然植被类型可以划分为暖温带北部落叶栎林、暖温带南部落叶栎林、高寒灌丛和高寒草甸等15种类型,并可以归纳为生态乔木林、生态灌木林、草地及草甸三种推荐种植类型^[25]。在推进水绿共位建设前,首先要根据城市地带性自然植被特征选取适宜的种植设计类型(表1)。

2.2 平面布局上的水绿共位

平面布局上的水绿共位核心在于规划科学合理的平面布局,将汇水分区与绿地布局紧密结合,并协调径流量与绿地规模的关系,以实现生态效益的最大化,主要包括汇水分区与绿地布局相对应、产流量与绿地规模相

匹配两部分内容。

在明确地块边界、场地竖向设计、雨水管网和路网布局的基础上,合理划定汇水分区。在进行绿地布局时,尽量从源头接收水源,缩短汇水路径,并充分考虑不同布局方式对产流量的影响。湿地、湿塘等集中布局方式,可以显著提升雨水滞留能力,缓解城市内涝风险,主要适用于需要大规模生态修复、洪涝管理的区域。较为小而分散的绿地布局方式可以在局部提高雨水渗透效率,且能够灵活嵌入各类城市空间,为高密度城区的雨水管理提供灵活的解决方案。结合城市功能需求、土地资源情况及生态条件合理搭配不同的布局方式,并根据汇水单元的产流量与单位面积绿地的滞蓄水量对绿地规模进行科学匹配,确保资源的高效利用。

2.3 垂直结构上的水绿共位

在西北地区,绿地设计需要摆脱缓解城市洪涝风险的单一视角,充分利用降水对生

表1 西北城市地带性自然植被特征及推荐种植类型
Tab. 1 Characteristics of zonal natural vegetation and recommended planting types in urban areas of northwest China

地带性自然植被类型 Zonal natural vegetation type	推荐种植类型 Recommended planting type
暖温带北部落叶栎林	生态乔木林
暖温带南部落叶栎林	
高寒灌丛、高寒草甸	
暖温带灌木、半灌木荒漠	生态灌木林
暖温带灌木、半灌木极干旱荒漠	
温带半灌木、灌木草原化荒漠	
温带半灌木、小半乔木荒漠	
温带灌木、半灌木荒漠	
温带灌木、半灌木极干旱荒漠	草地及草甸
高寒草原	
暖温带典型草原	
暖温带荒漠草原	
温性草原	
中温带草甸草原	
中温带典型草原	

境条件的改善作用。具体体现在综合考虑汇水分区产流量、绿地的滞蓄水能力、生态需水量等几个方面。

绿地的滞蓄水能力应与汇水分区的产流量相协调，以有效吸纳和调节雨水资源。绿地对于雨水的滞蓄效应主要体现在植被冠层截留和土壤持水能力两个方面。植被冠层截留是指在降水下落过程中被植被冠层吸附、拦截的这一过程。土壤作为疏松多孔的介质，其间分布大小孔隙，其吸水与存水功能决定了绿地滞蓄水的核心能力，当土壤孔隙全部填充水分后达到最大持水能力，即饱和蓄水量。

绿地的生态需水量应与汇水分区的产流量及绿地的滞蓄水能力在量上达到动态平衡，促进对水资源的高效利用及适水（耐旱）植物群落的繁茂生长。绿地的生态需水量可以理解为绿地中植物能够维持自身生存和生长需要所需的水量，主要受到植物类型、小气候因素、种植密度等因素的影响。结合区域气候条件和水资源状况，优先选择适水性植物群落，减少对人工灌溉的依赖，合理调整种植密度和植物配置，避免因需水量超出滞蓄能力而导致资源浪费或生态失衡（图1）。

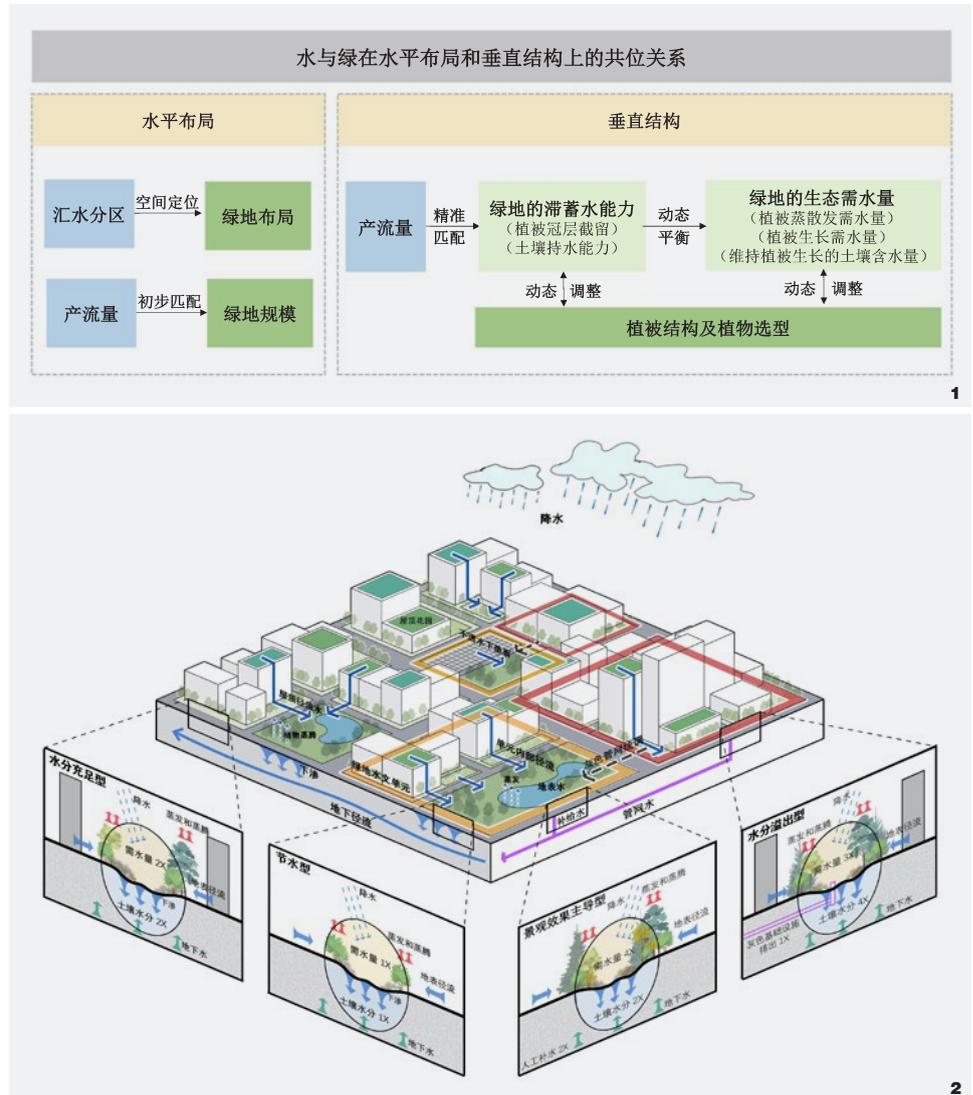


图1 水与绿在水平布局和垂直结构上的共位关系
Fig. 1 The co-location relationship between water and green in horizontal layouts and vertical structures

2.4 城市生境单元水绿空间共位理论模型

从水绿空间共位的角度，单个城市地块内部的雨水径流组织、利用方式可以通过规划设计进行统筹调配。城市生境单元水绿空间共位理论模型旨在探索城市生境单元中水与绿在平面布局和垂直结构上的协同关系，在城市中小尺度层面通过构建一个集汇水、蓄水、用水及补水为一体的闭合体系，实现生态与水文功能的动态平衡。模型在水平结构上，强调“以水定绿”，依据城市建设地块边界和路网布局进行水文单元划分，基于

图2 城市生境单元水绿空间共位理论模型
Fig. 2 The theoretical model of water-green spatial co-location in urban habitat units

产汇流特征优化绿地水平布局，并依据绿地周边雨水径流量的大小，匹配适宜的绿地规模。在垂直结构上，模型强调“以绿适水”，根据产流量特征选择适宜的植被结构和植物类型，同步优化土壤物理性质，以实现绿地滞蓄水能力、产流量与绿地生态需水量之间的动态平衡。在土壤水分较低的区域，优先配置简单的植被结构及低需水量植物，在土

壤水分充足的区域，则可引入复杂的植被结构以提升生态效益（图2）。

此外，对于城市用地紧张区域，当绿地滞蓄水能力不足以消纳径流量时，可以通过周边未饱和汇水分区代偿，或借助灰色基础设施及时将多余的水分排出。对于景观需求较高但土壤水分不能满足植物需水量的绿地，则需精确计算水量缺口并实施人工

补水。该模型通过“以水定绿”与“以绿适水”的双向协同,为城市中小尺度水绿空间的科学规划与可持续发展提供了系统化的解决方案。

3 城市生境单元水绿空间共位生态设计途径

3.1 设计降水量及水文分析

设计降水量的计算可以参海绵城市降雨总量控制率及其设计降水目标进行计算,根据中国气象科学数据共享服务网^[26]中国地面国际交换站气候资料数据,选取至少近30年日降水资料,扣除 ≤ 2 mm的降水事件的降水量,将降水量日值按雨量由小到大进行排序,统计小于某一降水量的降水总量(小于该降水量的按真实雨量计算出降水总量,大于该降水量的按该降水量计算出降水总量,两者累计总和)在总降水量中的比率,此比率(即年径流总量控制率)对应的降水量(日值)即为设计降水量。

分析城市的水文特征是绿地定位定量设计的前提,主要包括下垫面特征分析与径流提取、汇水单元划分及产汇流量分析三个方面。首先运用目前流域分析领域比较成熟的D8单流向算法^[27]提取城市下垫面特征与径流信息,并运用Strahler河流分级法^[28]对径流进行分级。由于城市中人工构筑物会干扰地表径流路径和汇水区的划分,因此需要综合考虑竖向、人工构筑物和排水管网、河湖水体等要素信息后完成汇水单元的划分。之后运用SWAT水文模型,计算各汇水单元的水产流量。SWAT模型基于水量平衡方程见公式(1)。

$$S_t = S_0 + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - E_i - W_i - Q_i) \quad (1)$$

式中, S_t 为土壤最终含水量,单位为mm;
 S_0 为土壤初始含水量,单位为mm; t 表示时

间,单位为d; R_i 表示第*i*天的降水量,单位为mm; Q_i 表示第*i*天的地表径流量,单位为mm; E_i 表示第*i*天的蒸散发量,单位为mm; W_i 表示第*i*天从土壤剖面进入包气带的水量,单位为mm; Q_i 表示第*i*天回归水量,单位为mm。

3.2 绿地水平布局及竖向结构生成

对水绿在水平布局和垂直结构上进行耦合统筹,以上一步骤得出的降水在城市地表的分布格局及水量为基础来对应形成绿地的空间分布与规模。汇水单元内的倾泻点是集水区累积流量集中溢出的区域,也是径流汇聚的核心节点^[2],根据汇水单元倾泻点位置为绿地选址,近消纳径流,并以汇水单元产流量与单位面积绿地滞蓄水量的比值初步匹配绿地规模。此外,水绿蓄用规模的平衡需综合考虑绿地的滞蓄水能力和绿地需水量,匹配与汇水单元待消解水量相匹配的植

物群落和结构模式,其中植被蒸散发需水量是绿地需水量的主要组成部分,因此,植被需水量计算的关键在于计算植物蒸散发需水量,可采用景观系数法(Landscape Coefficient Method, LCM)计算,该方法最早由Costello等在作物系数法的基础上提出。计算见公式(2)(3)。

$$E_1 = E_0 \times K_1 \quad (2)$$

$$K_1 = K_s \times K_d \times K_m \quad (3)$$

式中, E_1 为植被单位面积蒸散发需水量,单位为mm; E_0 为植被潜在蒸散量,单位为mm; K_1 为景观系数; K_s 为不同类型植物的种类因素,取值参考表2; K_d 为不同类型植物的密度因素,取值参考表3; K_m 为不同类型植物的小气候因素,取值参考表4。

最后,综合考虑产流量、绿地滞蓄水能力及绿地用水量,初步形成水绿调配方案,利用GIS平台,测算并择优不同气候条件下绿地布局及植物结构类型,并辅以灰色设施实

表2 不同类型植物的种类因素 K_s
Tab. 2 Species factors K_s of different types of plants

植被类型 Vegetation type	高 High	平均 Medium	低 Low
树木	0.9	0.5	0.2
灌木	0.7	0.5	0.2
地被植物	0.9	0.5	0.2
树木、灌木、地被植物混合	0.9	0.5	0.2
冷季型草	—	0.8	—
暖季型草	—	0.6	—

表3 不同类型植物的密度因素 K_d
Tab. 3 Density factors K_d of different types of plants

植被类型 Vegetation type	高 High	平均 Medium	低 Low
树木	1.3	1.0	0.5
灌木	1.1	1.0	0.5
地被植物	1.1	1.0	0.5
树木、灌木、地被植物混合	1.3	1.0	0.6
草	1.0	1.0	0.6

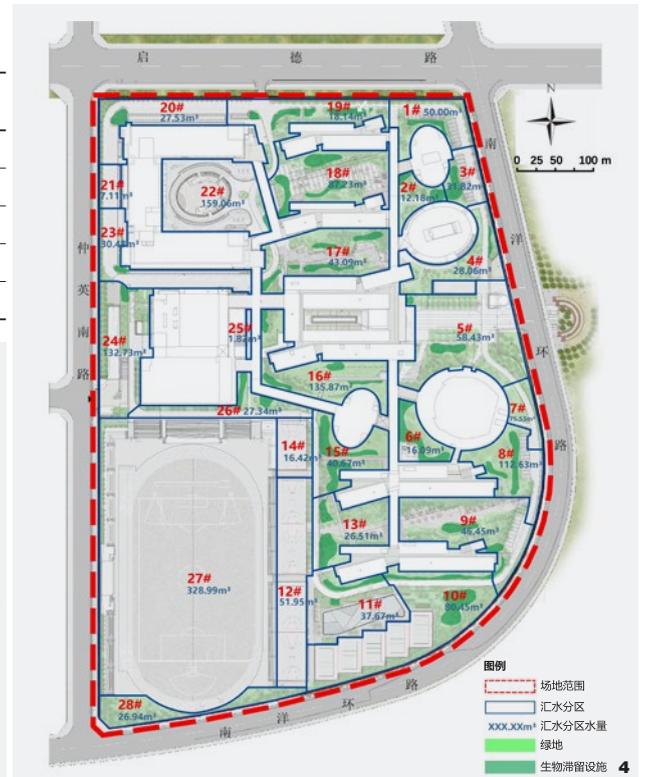
表4 不同类型植物的小气候因素 K_m
Tab. 4 Microclimate factors K_m of different types of plants

植被类型 Vegetation type	高 High	平均 Medium	低 Low
树木	1.4	1.0	0.5
灌木	1.3	1.0	0.5
地被植物	1.2	1.0	0.5
树木、灌木、地被植物混合	1.4	1.0	0.5
草	1.2	1.0	0.8



图3 统调策略生成流程
Fig. 3 Unified scheduling strategy generation process

图4 汇水分区及绿地平面布局
Fig. 4 Watershed partitions and green space horizontal layout



现代偿性的水文功能，建立雨水径流管理和利用与植物群落生长需求达成密切耦合关联的城市“生境单元”。

3.3 绿地统调与水绿灰协同

综合考虑城市的产汇流量、绿地滞蓄能力、绿地需水量及其空间分布特征，从而实现产汇流与绿地平面布局及竖向结构上的耦合关系。水绿耦合度是均衡雨量导向下绿地布局调控过程的重要指标之一^[2]，甄别统调问题区域、类型及规模，据此分析生成各地段的统调策略，并基于后期维护角度提出低耗水和零耗水的城市生境单元类型。此外，考虑城市绿地系统与灰色基础设施在降水消纳、调配及调蓄过程中的互补与协同作用，

应当结合、利用城市既有灰色系统，充分发挥灰色系统在雨洪转移、分配的功能优势，协同绿地系统做功（图3）。

4 基于水绿共位原理的设计实践

4.1 研究对象概况

研究以沔西新城创新港中学为实践对象，该中学位于陕西省西咸新区沔西新城中部，面积10.03 hm^2 。场地周边交通便利，东部为211国道，南临连霍高速。该区域年平均气温约为13~14℃，年降水量在500~600 mm，降水多集中在夏季，冬季降水较少。沔西新城地处关中平原城市群的核心区域，具有重要的科技战略和生态战略地位，创新港中学所在的区域正是沔西新城的核心地带，周边汇

聚了高新技术产业、科研机构以及优质教育资源，区位优势显著。场地西临创新港，东临沙河古桥风景区，北邻新渭沙湿地，风景优美。

4.2 汇水分区及绿地平面生成

依据场地现状竖向特征，将场地划分为28个汇水分区，并统计各汇水分区的下垫面类型，将道路的径流系数设为0.8，塑胶场地设为0.8，透水铺装设为0.5，屋顶设为1.0，按照项目所在区位的年径流总量控制率的85%，即21.22 $mm^{[29]}$ ，作为本研究的设计降雨量，计算各汇水分区水量，结合景观功能需求初步生成绿地平面布局（图4，表5）。

表5 各汇水分区特征
Tab. 5 Characteristics of each watershed partition

分区编号 No.	道路面积 /m ² Road area	塑胶场地面积 /m ² Plastic field area	透水铺装面积 /m ² Permeable pavement area	屋面总面积 /m ² Total roof area	绿地面积 /m ² Green space area	汇水分区水量 /m ³ Water volume of watershed partition
1 #	947.00	—	406.10	797.80	597.90	50.00
2 #	—	—	57.30	—	545.40	12.18
3 #	238.50	—	256.40	855.00	325.60	31.82
4 #	241.80	—	335.60	—	961.00	28.06
5 #	340.10	—	1 882.50	—	1 540.20	58.43
6 #	—	—	229.30	—	643.70	16.09
7 #	834.80	—	39.60	2 451.60	420.20	75.53
8 #	485.30	—	291.20	3 586.00	1 187.90	112.63
9 #	164.90	—	1 070.00	—	1 522.00	46.45
10 #	280.60	1 920.30	268.90	—	1 896.00	80.45
11 #	218.50	1 275.00	359.40	—	400.70	37.67
12 #	264.00	2 489.20	109.20	—	191.00	51.95
13 #	—	—	451.30	—	1 023.80	26.51
14 #	153.80	619.00	106.00	—	102.70	16.42
15 #	—	—	300.20	785.40	980.90	40.67
16 #	1 472.00	—	280.90	3 586.00	1 499.10	135.87
17 #	115.40	—	619.50	—	1 628.60	43.09
18 #	—	—	1 055.90	2 369.80	1 213.10	87.23
19 #	812.20	—	183.50	—	113.40	18.14
20 #	1 007.80	—	337.70	—	322.10	27.53
21 #	287.90	—	57.80	—	75.80	7.11
22 #	2 573.90	—	151.30	5 075.30	285.70	159.06
23 #	1 307.70	—	258.20	—	261.30	30.48
24 #	548.30	—	230.00	4 543.20	1 158.30	132.73
25 #	—	—	73.20	—	49.40	1.82
26 #	756.80	—	250.50	—	557.60	27.34
27 #	10 934.00	3 888.10	3 518.40	—	1 886.90	328.99
28 #	—	—	—	—	1 269.50	26.94

4.3 适水种植设计方案生成

协同考虑各汇水分区水量及绿地面积, 根据植物的生态需水量匹配适宜的植被结构和植物选种, 在满足景观效果的前提下尽可能地减少汇水分区水量与绿地生态需水量的差值, 降低后期补给水量。常规种植设计方案(图5-a), 设计逻辑以景观美学、功能需求为主导, 通常采用高耗水植物构建乔灌草复层结构, 虽形成丰富的视觉效果, 但常超

出场地土壤持水能力, 导致后期依赖大量人工灌溉。融入水绿共位理论的适水种植设计方案(图5-b), 以水资源适配为核心, 对植被类型、结构、密度等要素进行调整, 并优先选用低需水量植物, 尽可能使植被需水量与汇水分区水量相匹配。水绿共位设计模式可划分为节水型、水分充足型和景观效果主导型三种类型(图6), 其中: 节水型绿地规模较小, 以低需水型灌木为主; 水分充足

型绿地规模较大, 以高需水型植物为主, 打造乔灌草复层结构; 景观效果主导型绿地规模适中, 植物种植以景观效果为主导。以分区1#为例, 该分区汇水量较少且绿地面积较大, 后期需要大量人工补水, 综合考虑该分区不属于重要景观节点, 对景观效果要求不高, 因此将需水量较高的法桐和雪松替换为刺槐、白皮松和火棘并降低种植密度, 将草坪草马尼拉草替换为需水量较低的早熟禾。

4.4 生态及经济效益评估

该绿地生态设计实践方案基于水绿共位理论, 综合考虑雨水的收集与高效利用, 结合景观需求, 对绿地进行科学合理的布局, 并制定适宜水资源条件的种植设计方案(表6)。相较于常规种植设计方案, 该方案显著降低了水资源消耗, 常规种植设计方案后期浇灌养护用水量约为 $10\,328.47\text{ m}^3/\text{a}$, 适水种植设计方案后期浇灌养护用水量约为 $6\,099.50\text{ m}^3/\text{a}$, 减少浇灌养护用水量约 $4\,228.97\text{ m}^3/\text{a}$, 省水量接近一半, 按当地非居民水价计算节约水费约2.45万元/a, 展现出较好的生态和经济效益。此外在后期设计时还可以考虑改良土壤持水性能、添加土壤覆盖物减少水分蒸发等一系列优化措施。

5 讨论

5.1 构建水平—垂直协同的水绿共位机制的必要性

在本研究的“沔西新城创新港中学”案例中可以观察到, 绝大多数绿地都需要依赖后期人工补水才能维持植被生长, 这表明传统以绿地蓄水为核心的雨洪管理模式在西北地区存在局限性。仅从蓄水角度考虑水绿关系, 不充分考虑植被的实际需水特性及水资源供需平衡, 可能会导致水资源的不合理分配甚至浪费。因此, 在进行绿地规划设计时, 不仅要从平面方向上考虑绿地的布局、规模, 还需要从垂直方向上入手, 考虑“以绿适水”。

此外, 结合前人的研究成果及本研究案例可以发现, 植被的结构和植物选型对绿地的滞蓄水能力及需水量具有

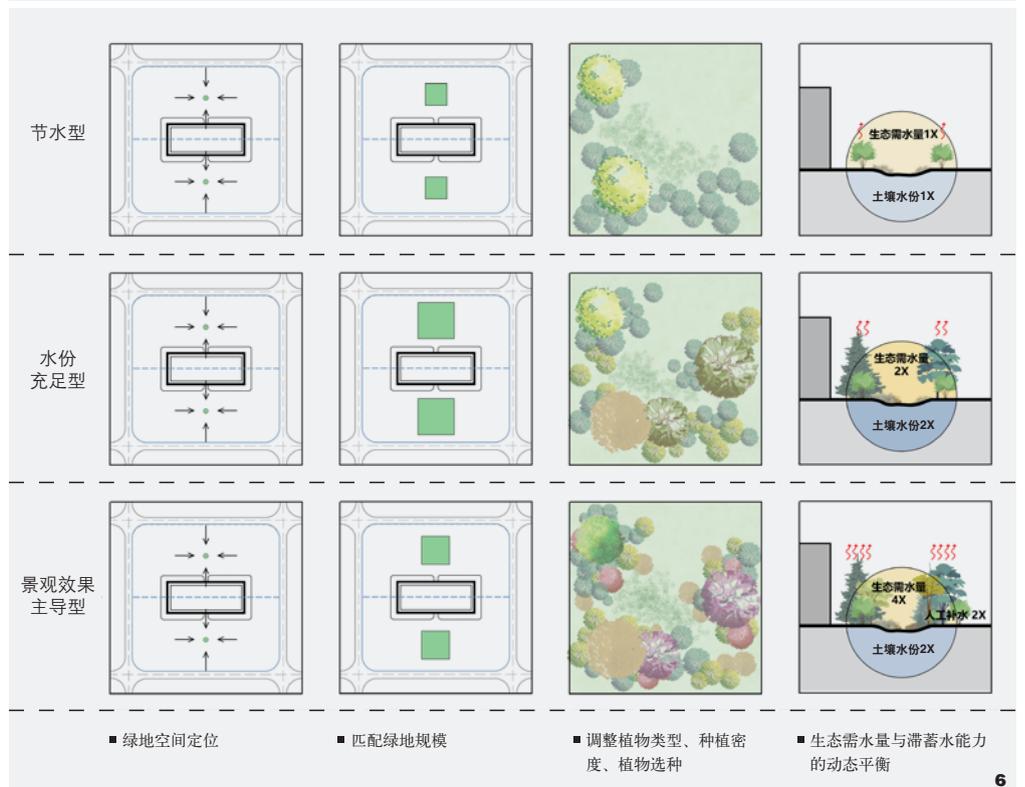
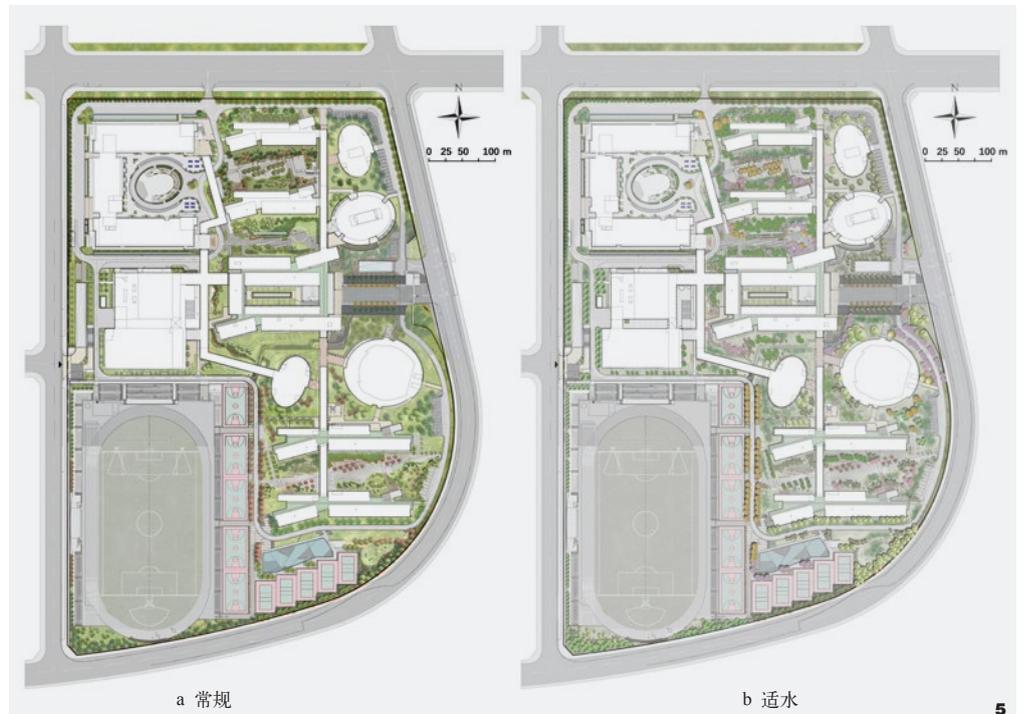


图5 种植设计方案
Fig. 5 Planting design plan

图6 不同种植设计目标下的水绿共位设计模式图
Fig. 6 Design patterns of water-green co-location under different planting design goals

表6 绿地常规种植设计方案及适水种植设计方案补给水量对比
Tab. 6 Comparison of water supply between conventional green space planting design and water-adaptive planting design

种植设计目标 Planting design objective	汇水分区 编号 No.	汇水分区水量 / (m ³ /a) Water volume of watershed partition	常规种植设计方案补给水量 / (m ³ /a) Water supply for the conventional planting design	适水种植设计方案补给水量 / (m ³ /a) Water supply for the water-adaptive planting design	适水种植改造后省水量 / (m ³ /a) Water saving after water-adaptive planting transformation
节水型	1 #	50.00	846.19	146.89	699.30
	2 #	12.18	298.77	158.31	140.46
	3 #	31.82	112.21	76.36	35.85
	4 #	28.06	451.83	313.91	137.92
	6 #	16.09	342.05	181.33	160.72
	7 #	75.53	172.30	56.23	116.07
	8 #	112.63	537.78	297.23	240.55
	10 #	80.45	916.67	495.46	421.21
	11 #	37.67	161.24	134.07	27.17
	15 #	40.67	469.41	257.28	212.13
	16 #	135.87	802.82	597.99	204.83
	19 #	18.14	31.80	26.89	4.91
	20 #	27.53	105.46	68.41	37.05
	23 #	30.48	92.81	48.89	43.92
	24 #	132.73	445.68	219.10	226.58
	26 #	27.34	226.99	140.39	86.60
	27 #	328.99	598.42	244.15	354.27
	28 #	26.94	567.07	437.29	129.78
水分充足型	12 #	51.95	43.43	14.70	28.73
	14 #	16.42	22.04	19.42	2.62
	21 #	7.11	27.61	15.47	12.14
	22 #	159.06	0.00	0.00	0.00
	25 #	1.82	16.34	0.00	16.34
景观效果主导型	5 #	58.43	441.20	377.61	63.59
	9 #	46.45	806.34	595.39	210.95
	13 #	26.51	567.26	311.64	255.62
	17 #	43.09	715.74	493.22	222.52
	18 #	87.23	509.01	371.87	137.14

显著影响, 科学合理的适水种植设计不仅能够优化水资源配置, 还能大幅降低后期养护成本。由于平面布局往往受限于场地用地性质、建筑布局等客观因素, 难以进行大幅度调整, 因此, 同步统筹水平—垂直两个维度的水绿共位机制至关重要, 可在有限的水资源条件下提升绿地的生态稳定性, 减少人工补水需求。

5.2 未来的挑战与突破方向

目前有关植物需水量的调查缺少大量一手数据, 一手数据是研究者通过实地调查、采样或传感器设备直接获取的数据, 为生态研究提供了最可靠的基础, 在生态研究和和管理决策中具有不可替代的重要作用。然而获取一手数据的过程中也面临需要投入大量人力、物力等诸多难点。因此, 目前多数学者

常用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等方法对植物的需水量进行估算^[30]。因此在未来的研究中应该重视关于植被需水量数据的采集。

在进行城市规划设计的初期阶段, 植物需水量和土壤保水能力作为“以绿适水”的关键因子常常被忽略, 未能作为设计的前置条件进行充分系统考虑, 由于缺乏对蓄水

设施规模、植物需水量以及土壤保水性能的精确评估和合理规划, 绿地汇集的水量与植物需水量之间产生了较大缺口。这不仅制约了绿地中植物的健康生长和景观效果的呈现, 还显著提高了后续整体生态效益与资源利用效率。

此外, 城市管理部门在植物灌溉的管理上存在诸多难点, 包括无法精准判断何时需要灌溉、灌溉时间应持续多久, 以及不同地区相同植物的耗水量差异缺乏明确标准。这种粗放式的管理方式不仅降低了水资源的利用效率, 还可能对城市生态环境造成不利影响, 亟需更精细化的分区维护和科学管理。

5.3 科技助力水绿问题的解决

通过3S技术, 可以高效获取大范围的土壤湿度、植被覆盖度和气象数据, 为大范围生态需水量的评估提供支持。同时, 改进的计算方法, 如改进的Penman-Monteith (PM) 法、水量平衡法和潜水蒸发法, 结合大数据和人工智能技术, 使生态需水量预测更加精准和动态化。此外, 水资源的智慧管理可以优化资源配置与调度, 提高水资源利用效率, 实时监测土壤湿度、植物生理状态以及气象条件, 从而精准控制灌溉时间、频率和水量。

6 结论

本研究面向西北地区城市化发展过程中“水绿错位”“水绿错配”的现实问题, 将“绿”的概念在垂直方向上拓展为绿地植被结构、土壤的持水性能、植被的滞蓄水能力以及植物的需水特性等综合因素, 贯彻节水优先的理念, 把水资源作为最大刚性约束和实施路径, 对绿地进行整体规划布局设计及植物配置。在平面布局与垂直结构上同步构建了水绿空间共位机制, 并提出了城市生境

单元水绿空间共位生态设计途径。

“水绿共位”理念主张水资源保护与绿色生态发展协同共生, 在发展经济的同时注重水资源的可持续利用和生态环境的承载能力。其实践有助于改善生态环境, 并进一步推动经济、社会和环境的协调发展, 满足人民对优美生态环境的需要。

注: 文中图表均由作者绘制。

参考文献

- [1] 张强, 胡隐樵, 曹晓彦, 等. 论西北干旱气候的若干问题[J]. 中国沙漠, 2000(04): 13-18.
- [2] 郑国楠. “以水定绿”的内涵、实践探索和实施路径[J]. 中国水利, 2024(09): 45-50.
- [3] 左翔, 许博文, 刘晖. 基于蓝绿协同度评价的绿地格局优化研究[J]. 园林, 2022, 39(05): 30-36.
- [4] 刘晖, 刘永, 许博文, 等. 干旱半干旱区城市水绿时空耦合下绿地“蓄用协同”技术研究[J]. 中国园林, 2022, 38(02): 6-11.
- [5] 许博文, 刘晖, 曹翔. 低碳视角下西北地区城市绿地的适水种植设计途径[J]. 中国城市林业, 2023, 21(04): 51-58.
- [6] 于燕, 戈晓宇. 基于SWMM模拟的首钢西十地块低影响开发系统雨洪调控效果研究[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(12): 97-109.
- [7] 刘永, 刘晖. 中小尺度下绿地格局的径流控制分析[J]. 中国城市林业, 2022, 20(05): 69-76.
- [8] 禹佳宁, 周燕, 王雪原, 等. 城市蓝绿景观格局对雨洪调蓄功能的影响[J]. 风景园林, 2021, 28(09): 63-67.
- [9] 李静, 黄经南, 刘学军, 等. 城市绿地空间分布对雨水径流量的影响[J]. 中国城市林业, 2021, 19(01): 72-77.
- [10] 卢奕芸, 戈晓宇. 基于水安全目标的城市绿地水体设计方法研究——以第二届河北省园林博览会(秦皇岛)园区为例[J]. 风景园林, 2020, 27(11): 64-69.
- [11] 周伟奇, 朱家嵩. 城市内涝与基于自然的解决方案研究综述[J]. 生态学报, 2022, 42(13): 5137-5151.
- [12] LI Q, WANG F, YU Y, et al. Comprehensive Performance Evaluation of LID Practices for the Sponge City Construction: A Case Study in Guangxi, China[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 231: 10-20.
- [13] PRUDENCIO L, NULL S E. Stormwater Management and Ecosystem Services: A Review[J]. Environmental Research Letters, 2018, 13(2018): 033002.

- [14] XU H, CHEN L, ZHAO B, et al. Green Stormwater Infrastructure Eco-Planning and Development on the Regional Scale: A Case Study of Shanghai Lingang New City, East China[J]. Frontiers of Earth Science, 2016, 10(2): 366-377.
- [15] 周聪慧. 复合职能导向下城区蓝绿空间一体调控方法——以东营市河口城区为例[J]. 中国园林, 2019, 35(11): 30-35.
- [16] 阿娜尔, 黄甘霖. 城市绿色空间的雨洪调蓄效益研究进展[J]. 中国城市林业, 2024, 22(01): 70-76.
- [17] 程晓波. 园林植物的树冠截留雨水效果研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2019, 50(04): 542-545.
- [18] 李新乐, 吴波, 张建平, 等. 白刺沙包浅层土壤水分动态及其对不同降雨量的响应[J]. 生态学报, 2019, 39(15): 5701-5708.
- [19] 张海涛, 王保良, 仇亚琴. 我国非常规水源利用结构及空间分布研究[J]. 中国水利, 2023(07): 19-23.
- [20] ZHANG K, WANG Q, CHAO L, et al. Ground Observation-based Analysis of Soil Moisture Spatiotemporal Variability Across a Humid to Semi-Humid Transitional Zone in China[J]. Journal of Hydrology, 2019, 574: 903-914.
- [21] 张焜, 邱玲, 张祥, 等. 不同植被结构绿地夏季气候特征及其对人体舒适度的影响[C]// 风景园林与小气候——中国第二届风景园林与小气候国际研讨会论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
- [22] 彭飞, 何新林, 刘兵, 等. 干旱区荒漠植被生态需水量计算方法研究[J]. 节水灌溉, 2017(12): 90-93.
- [23] 杨新国, 宋乃平, 陈林. 旱区植被建设与生境旱化的生态学因果关系[J]. 应用生态学报, 2023, 34(06): 1713-1720.
- [24] 王新源, 程小云, 王富, 等. 科学绿化中“以水定绿”的生态学诠释[J]. 甘肃林业科技, 2023, 48(03): 47-51.
- [25] 许博文, 刘晖, 王晶燃. 基于生境及其植被特征的西北干旱半干旱区城市绿地生态设计途径[J]. 风景园林, 2024, 31(06): 12-18.
- [26] 中国气象科学数据[EB/OL]. [2024-12-02]. Available from: <https://data.cma.cn/>
- [27] JENSON S, DOMINGUE J. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information-System Analysis[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1988, 54: 1593-1600.
- [28] STRAHLER A. Hypsometric (Area-Altitude) Analysis of Erosional Topography[J]. GSA Bulletin, 1952, 63(11): 1117-1142.
- [29] 任勇翔, 刘强, 王希, 等. 西安城区海绵城市建设设计降雨量与不透水地面分布研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2018, 50(01): 100-104.
- [30] 赵宇桑, 詹雨生. 水量供需平衡视角下城市绿地布局优化研究进展[J]. 广东园林, 2024, 46(01): 61-68.