

姜思源, 王德生, 匡荣凯, 等. 海绵城市建设背景下土壤渗透能力及影响因素——以潍坊市中心城区为例[J]. 净水技术, 2025, 44(9): 141–147, 195.

JIANG S Y, WANG D S, DUN R K, et al. Soil permeability and the influencing factors under the background of sponge city construction——Case of central urban area in Weifang City [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(9): 141–147, 195.

海绵城市建设背景下土壤渗透能力及影响因素——以潍坊市中心城区为例

姜思源¹, 王德生², 匡荣凯¹, 贾伟建^{2,*}, 刘宝震¹, 王永磊^{1,*}

(1. 山东建筑大学市政与环境工程学院, 山东济南 250101; 2. 潍坊市市政工程设计研究院有限公司, 山东潍坊 261000)

摘 要 【目的】海绵城市建设作为解决城市内涝和水资源短缺问题的有效措施, 已被广泛应用。以潍坊市中心城区海绵城市建设示范区为例, 文章探讨了不同土壤质地对土壤渗透性能的影响, 并提出了改善土壤渗透性的措施, 为海绵城市建设提供理论依据和实践指导。【方法】文章采用常水头渗透试验和双环入渗法测定潍坊市 15 个海绵城市示范区的土壤渗透率, 结合 98 个检测点的土壤理化性质(如土壤密度、含水率、孔隙度等)进行分析。通过对不同示范区土壤渗透性能的对比, 结合地质资料和相关文献, 分析土壤渗透率与土壤理化性质的关系。【结果】潍坊市中心城区下垫面土壤渗透率系数为 3.466×10^{-4} cm/s, 土壤渗透等级为中级, 15 个示范区的土壤渗透率系数最大值为望留片区 3.628×10^{-4} cm/s, 最小值为经济东部片区 3.357×10^{-4} cm/s, 整体呈现由南到北递减趋势。不同示范区土壤渗透率与土壤密度负相关, 与土壤含水率及孔隙度正相关, 土壤渗透性能主要受土质、土壤理化特性和地质条件的影响。渗透系数变化趋势与潍坊市中心城区地质、土壤理化性质变化规律一致, 表明下垫面土壤渗透率系数主要受到土质和土壤自身特性影响。【结论】潍坊市中心城区现状土壤渗透性能适宜开展海绵城市建设, 土壤渗透率系数可以作为一项指导海绵城市建设的指标。

关键词 海绵城市 渗透率系数 理化性质 土壤 下垫面

中图分类号: TU992 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)09-0141-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.09.018

Soil Permeability and the Influencing Factors under the Background of Sponge City Construction——Case of Central Urban Area in Weifang City

JIANG Siyuan¹, WANG Desheng², DUN Rongkai¹, JIA Weijian^{2,*}, LIU Baozhen¹, WANG Yonglei^{1,*}

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

2. Weifang Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Weifang 261000, China)

Abstract [Objective] Sponge city construction has been widely applied as an effective measure to solve urban flooding and water resource scarcity. Taking the central urban area of Weifang City as a case study, this paper explores the impact of different soil types on soil permeability and proposes measures to improve soil permeability, providing theoretical and practical guidance for sponge city construction. [Methods] Constant head permeability tests and double-ring infiltration method were used to measure soil permeability in 15 sponge city demonstration zones in Weifang. The analysis was based on 98 sampling points' soil physical and chemical properties (such as soil density, moisture content, and porosity). By comparing soil permeability across different demonstration zones and combining geological data and relevant literature, the relationship between soil permeability and its physical and chemical properties was analyzed. [Results] The soil permeability coefficient in the central urban area of Weifang was 3.466×10^{-4} cm/s, with an intermediate level of permeability. The maximum soil permeability coefficient was found in the Wangliu zone at 3.628×10^{-4} cm/s,

[收稿日期] 2024-10-30

[基金项目] 山东省重点研发计划: 宜居乡村供水安全保障及污染物协同资源化绿色低碳治理关键技术与示范专项基金(S23141Z)

[作者简介] 姜思源(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水污染控制与资源化理论与技术, E-mail: jiangsiyuan402@163.com。

[通信作者] 贾伟建(1991—), 男, 高级工程师, 研究方向为海绵城市、水环境治理, E-mail: jwj088@126.com。

王永磊(1977—), 男, 正高级工程师, 研究方向为水污染控制与资源化理论与技术, E-mail: wyl1016@sdjzu.edu.cn。

while the minimum was in the Eastern Economic Zone at 3.357×10^{-4} cm/s. The permeability coefficient generally showed a decreasing trend from south to north. Soil permeability in different demonstration zones was negatively correlated with soil density, and positively correlated with moisture content and porosity. The soil permeability was primarily influenced by soil texture, physical and chemical properties, and geological conditions. The trend of permeability coefficients aligns with the geological and physical-chemical property variations in Weifang's central urban area, indicating that soil permeability was mainly governed by soil texture and its inherent properties. [Conclusion] Existing soil permeability in Weifang's central urban area is suitable for sponge city construction.

Keywords sponge city permeability coefficient physical and chemical properties soil underlying surface

海绵城市的本质是改变传统城市建设理念,实现与资源环境的协调发展^[1]。海绵城市建设自 20 世纪 70 年代起逐渐在全球范围内推广,特别是在西方国家得到了广泛应用。德国、美国等国家率先提出并实施了海绵城市理念,尤其注重可渗透性铺装和雨水回收利用系统的设计。例如,德国在多个城市大规模实施了透水性路面和绿色屋顶系统,成功减少了城市雨水排放,并提高了水资源利用率;美国则通过低影响开发(LID)理念,强调恢复和维护自然排水系统,推广雨水花园、透水性铺装等 LID 措施,有效防治城市内涝并合理管理水资源。近年来,海绵城市建设理念被引入中国,并在多个城市取得了显著成效。自 2013 年起,我国提出了海绵城市建设的战略,潍坊市于 2021 年被列为全国首批海绵城市建设示范城市。海绵城市倡导在城市建设中增加下凹式绿地、植草沟等可渗透地面,以强化雨水的滞渗与收集利用。2021 年,我国住房和城乡建设部明确要求提高硬化地面中的可渗透面积比例,推广透水性铺装,增设滞水渗水设施,并将城市可渗透地面面积设为底线指标,以确保城市排水和防涝能力。城市下垫面土壤的渗透率直接反映了土壤的导水和储水性能^[2],而土壤的粒径、含水率、孔隙率和容重等理化指标会直接或间接影响土壤渗透率。因此,在海绵城市建设规划设计之前,应对建设区域的下垫面土壤渗透能力进行整体调查研究。本文基于潍坊市中心城区的土壤实测数据,采用双环入渗法等方法,探讨土壤渗透率与土壤密度、含水率、孔隙率等因素的关系,为潍坊市海绵城市建设和 LID 设施规划提供数据和理论支撑。

1 研究材料与方法

1.1 研究区域概括

研究区域为潍坊市中心城区海绵城市建设示范区。根据《潍坊市系统化全域推进海绵城市建设示范城市实施方案》,潍坊市中心城区海绵城市建设示范

区包含白沙河片区、麻沟河片区、涨面河片区、玉清河片区、虞河中部片区、输水干渠西部及西北部片区、输水干渠北部及南部片区、寒亭张面河片区、经济区东部片区、河中部片区、白浪河中部片区、玉清街片区和望留片区共 15 个片区,总面积为 168 km²(图 1)。

1.2 土壤样品采集

根据潍坊市中心城区海绵城市建设示范区的实际情况以及不同示范区土壤类型的差异,在 15 个片区内选择了 98 个具有代表性的采样点位置,包括道路绿化带(绿色地标)、小区、公园绿地(红色地标)和河滩(蓝色地标)。采样点具体分布在图 1 中进行了标注。集中于 2023 年 5 月—8 月采集土壤样品。每个采样点采集土壤样品 2 份,一份用于测量土壤渗透率,另一份用于测量土壤容重、孔隙度等土壤理化指标。为避开表层扰动层并获取土壤主体结构的数据,将采样深度设置为 40~60 cm。由于部分采样点位于如车行道等硬化铺装下方,这可能会受到基层材料的影响。为保证数据的准确性,剔除了硬化基层显著影响渗透率的样本,并统一进行数据校正。

1.3 土壤渗透率测定仪器与检测方法

土壤渗透率检测主要使用 SK-500 型双环渗透仪开展原位试验[图 2(a)]为确保试验数据准确性,减小误差,同时采取原位检测和实验室检测相结合的方法。实验室内土壤渗透率测定使用 TS-70 型渗透仪[图 2(b)]开展内业渗透试验检测和原位试验数据。采用比重瓶法对土粒密度进行测定^[3],通过烘干法测定初始含水率^[4],通过环刀法测定孔隙度^[5]。通过达西定律^[6]利用试验测量的渗透率数值计算土壤渗透率。以考斯加可夫渗透分级^[6]对土壤渗透性能进行评价。

1.4 潍坊市中心城区海绵城市建设示范区渗透率等值线图

渗透率等值线图具有更直观表现土壤渗透率同城市区域位置之间的关系,有助于海绵城市的建设,

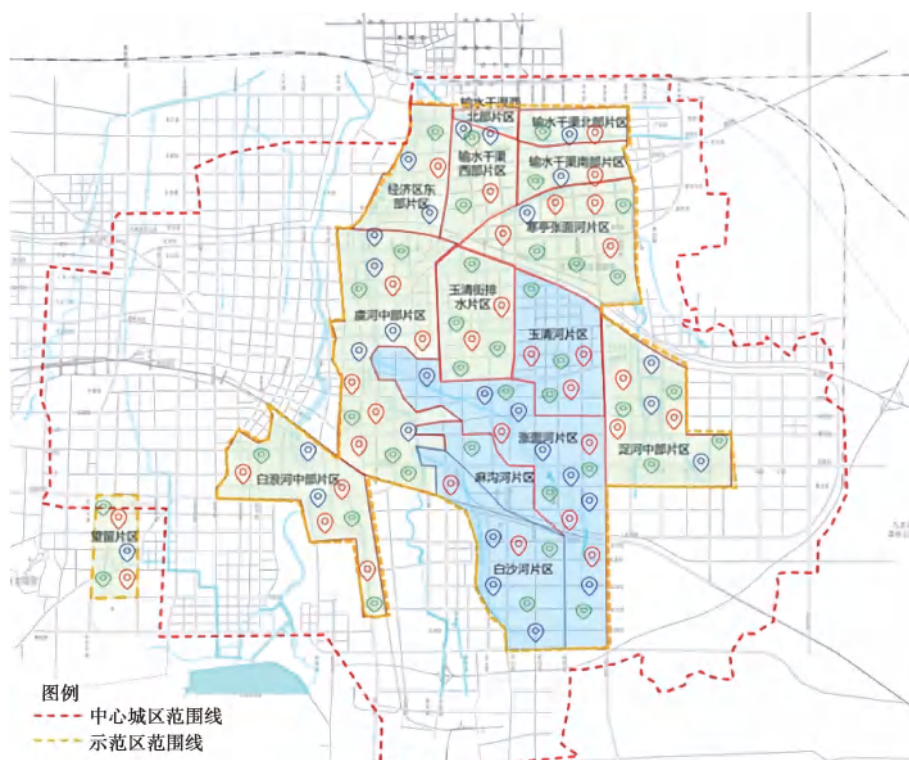
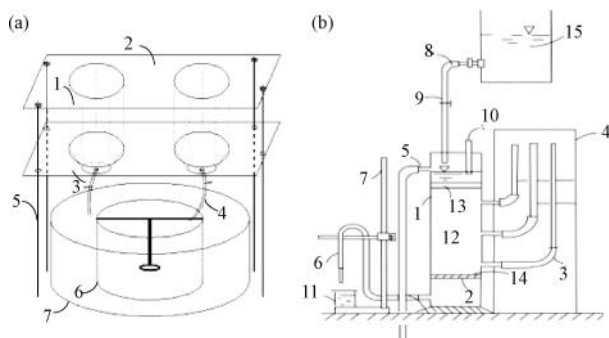


图 1 潍坊海绵城市建设示范区(15 片区)

Fig. 1 Demonstration Zone of Sponge City Construction in Weifang City (15 Zones)



注:(a)中1—供水瓶,2—水瓶插槽,3—止水夹,4—供水管,5—金属支架,6—金属内环,7—金属外环;(b)中1—金属圆筒,2—金属孔板,3—测压孔,4—测压管,5—溢水孔,6—调节管,7—滑动支架,8—供水管,9—止水夹,10—温度计,11—量杯,12—试样,13—砾石层,14—铜丝网布滤网,15—供水瓶。

图 2 (a)SK-500 型双环渗透仪;和(b)TS-70 型渗透仪

Fig. 2 (a) SK-500 Double-Ring Penetrometer; and (b) TS-70 Penetrometer

选择使用 ArcGIS 10.8 整理试验所得数据,绘制潍坊市中心城区海绵城市建设示范区渗透率等值线图及等值线热力图。

2 结果与讨论

2.1 不同示范区土壤渗透率分析

分别采用 70 型渗透仪和双环渗透仪测定了潍

坊市中心城区海绵城市建设示范区的土壤渗透率,通过达西定律计算了 98 个样品的土壤渗透率,对同一个示范区内样品的土壤渗透率求取平均值即为示范区平均渗透率。如图 3 所示,整理所得数据,并绘制潍坊海绵城市示范区的平均渗透率图。15 个示范区的平均土壤渗透率存在明显差异,其整体平均值为 $3.466 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 。其中,望留片区平均渗透系数为 $3.628 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$,为 15 个片区最高;经济东部片区平均渗透率为 $3.357 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$,为 15 个片区的最小值;15 个示范区的平均土壤渗透率维持在 $3.357 \times 10^{-4} \sim 3.628 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 。根据考斯加可夫土壤渗透性能分类,15 个示范区的平均土壤渗透等级均为中级。对 98 个检测点进行地形对比发现:整体来说,林地、草地、公园绿化地面土壤渗透率较高,居住小区、工厂用地次之,公共设施、商业用地最差,公共用地和商业用地的土壤渗透率较低,主要原因在于这些区域硬化铺装面积较大,尤其是水泥、沥青等不透水材料的广泛应用,使得降水无法有效渗透到土壤中,增加了地表径流。铺装面积比例是影响土壤渗透率的重要因素之一。在城市化进程中,铺装面积的增加导致土壤被大面积覆盖,阻碍了雨水下

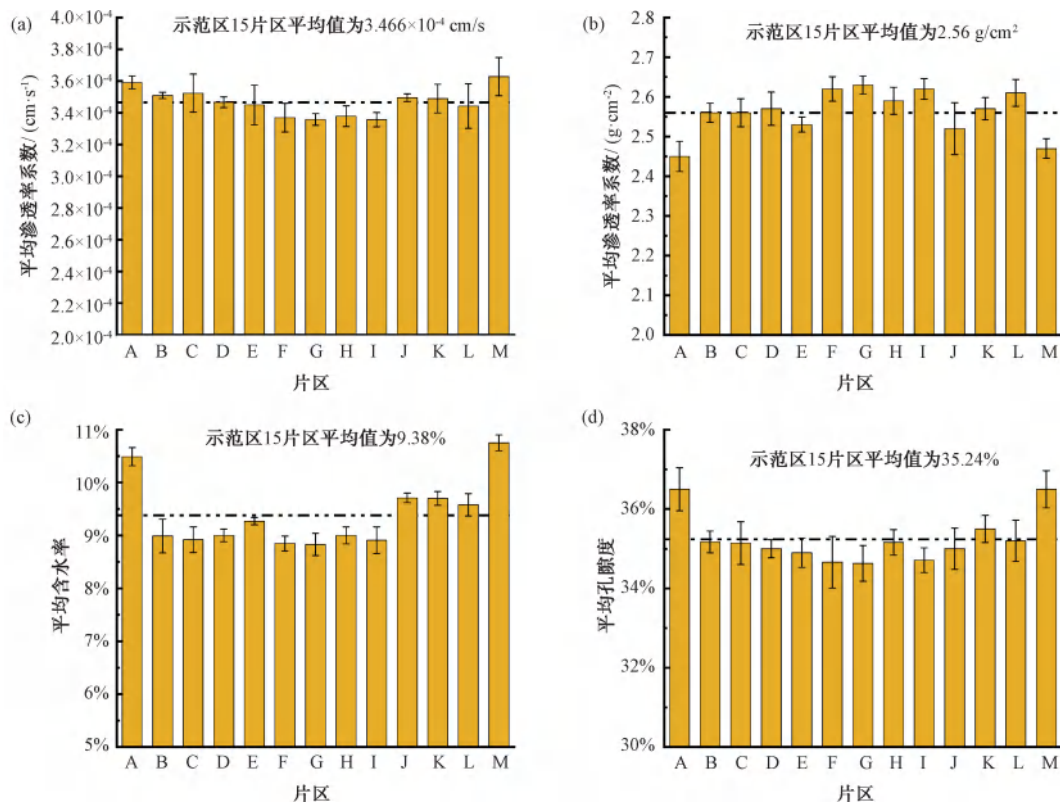


图3 潍坊海绵城市示范区(a)土壤平均渗透率;(b)土壤平均密度;(c)土壤平均含水率;(d)土壤平均孔隙度

Fig. 3 (a) Average Soil Permeability; (b) Average Soil Density; (c) Average Soil Moisture Content; (d) Average Soil Porosity of Weifang Sponge City Demonstration Zone

渗,进而降低了土壤渗透性和地下水补给能力^[7]。因此,合理控制铺装面积比例对于提升城市土壤渗透性能具有重要意义。其中,可选择性地应用透水铺装材料,如在人行道、非重载停车场及景观步道等区域采用透水混凝土或透水砖,以增强地表的渗透性能。考虑到透水混凝土在成本和承载力方面的局限性,对于公共车行道路,可采用部分透水设计,如在道路两侧设置透水带或下沉式绿地,而非全面替代传统铺装,从而在保证道路使用功能的同时提高区域整体渗透能力;嵌草砖则通过孔隙种植草坪,不仅具备良好透水性,还能改善城市绿化和生态环境。与此同时,可设置雨水花园和植被缓冲带,通过植被、水池和透水材料的结合,有效捕获和渗透雨水,提供多样生态环境,并利用植物根系吸水减缓径流流速。以上措施支持海绵城市建设,缓解热岛效应,增强城市生态韧性,改善水资源管理效果,实现可持续发展。

目前尚无明确的规范性数值和评价指标用于指导海绵城市建设中土壤渗透率的适应性评价。朱木

兰等^[8]的研究表明,在LID建设中,绿化带的土壤渗透率通常处于 $3.47 \times 10^{-4} \sim 1.00 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 。除了绿化带以外,王丽等^[9]研究指出,土壤的粒径分布和孔隙结构对于渗透性能具有显著影响,高孔隙率的土壤渗透率可以达到 $1 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 以上;而黏土成分较高的土壤渗透率可能低于 $1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 。潍坊市中心城区15个示范区中,白沙河片区平均土壤渗透率为 $3.591 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$,麻沟河片区平均土壤渗透率为 $3.509 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$,涨面河片区平均土壤渗透率为 $3.523 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$,浞河中部片区平均土壤渗透率为 $3.495 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$,白浪河中部片区平均土壤渗透率为 $3.489 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$,望留片区平均土壤渗透率为 $3.628 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 。这6个片区的平均土壤渗透率均在 $3.47 \times 10^{-4} \sim 1.00 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$,表明这些区域适宜开展LID建设,如雨水花园、下沉绿地等。根据潍坊市用地类型,这些区域以公共用地、商业用地为主,硬化铺装路面较多导致土壤渗透率降低。师晓阳等^[10]针对厦门市海绵城市建设中不同用地类型土壤渗透率研究发现,相较于农林和居住小区等用

地,公共设施用地因土壤硬化面积较大、可下渗土壤面积较少导致土壤渗透率较差。潍坊市中心城区海绵城市建设示范区土壤渗透率与厦门市研究结果相似,表明潍坊市土壤渗透率同样显著受到用地类型的影响。

2.2 土壤基本理化性质

对采集的 98 个地点土壤样品进行基本理化性质测定,主要分析测定土壤样品密度、含水率和孔隙度(图 3)。采集的 98 个地点土壤类型以黏壤土为主,平均粒径均小于 20 mm。

土壤密度是影响渗透性能的关键因素之一,其中输水干渠北、南部片区土壤密度最高(2.63 g/cm^3),而其渗透率为 15 个片区中最低($3.357 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$);相反,白沙河片区土壤密度最低(2.45 g/cm^3),渗透率相对较高($3.591 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$)。这一结果与周韩等^[11]研究一致,研究发现土壤密度每增加 0.1 g/cm^3 ,渗透率平均下降 15%~20%。密度影响渗透性能的机制在于高密度土壤中颗粒间孔隙减少,水流通道受阻,同时也导致孔隙连通性降低。孟晨等^[12]通过研究证实,土壤密度与孔隙连通性呈显著负相关,这解释了密度-渗透率负相关关系。

土壤含水率作为土壤水分状况的直接指标,对渗透性能具有显著调控作用,测定结果显示,15 个示范区的含水率呈现明显的空间差异,其中望留片区最高(10.75%),输水干渠北、南部片区最低(8.83%),平均值为 9.38%。相关分析表明,含水率与渗透率存在显著正相关关系。含水率影响渗透性能的机制可从微观尺度解释:适宜的含水率形成连续水膜,提高孔隙间水力连通性;另外,含水率增加降低土壤颗粒间的摩擦力和凝聚力,稳定孔隙结构;包括刘威等^[13]研究也发现,适度含水环境促进土壤微生物活动,增强生物孔道形成,进一步提升渗透能力。值得注意的是,通过分段回归分析证实,含水率与渗透性能呈现“倒 U 型”关系:在 8%~12% 呈正相关,超过 15% 则因孔隙饱和而降低渗透能力。这一发现对海绵城市设施设计具有重要指导意义,特别是在调节下沉式绿地和雨水花园的最佳含水状态方面。

土壤孔隙系统作为海绵城市“渗、滞、蓄、净、用、排”功能的物理基础,是决定下垫面水文性能的关键指标。研究^[14]表明,土壤孔隙度不仅影响水分入渗速率,还控制着雨水在土体中的运移路径、停留

时间和有效利用程度,是实现海绵城市理念的重要保障。潍坊市 15 个示范区的孔隙度测定显示出明显的空间差异:望留片区和白沙河片区最高(36.50%),输水干渠北、南部片区最低(34.63%),全区平均值为 35.24%。统计分析表明,孔隙度与渗透率呈显著正相关。然而,深入研究发现,孔隙对渗透能力的影响不仅取决于总量,更受孔隙结构特征调控。唐心等^[15]通过研究证实,大孔隙($>0.5 \text{ mm}$)的连通性对渗透率的贡献是微孔隙的 4~6 倍。这解释了为什么望留片区虽然总孔隙度仅比输水干渠片区高 1.87%,但渗透率差异却达 7.5%。值得注意的是,城市化过程显著改变了土壤孔隙结构。对比分析表明,商业区和公共设施用地的大孔隙比例(平均 12.7%)显著低于公园绿地(28.5%),导致即使总孔隙度相近,其渗透能力也明显不同。这可能是因为城市建设活动尤其是地表压实,可使大孔隙比例减少相对总孔隙度变化较高。

综合分析表明,潍坊市中心城区海绵城市建设示范区的土壤密度与土壤渗透率之间存在负相关关系。具体而言,白沙河片区和望留片区的土壤渗透率高于其他 13 个片区,且其平均土壤密度低于其他片区。同时,土壤渗透率与土壤含水率及孔隙率呈正相关,其中白沙河片区和望留片区的土壤含水率与孔隙率在 15 个片区中均高于其他片区。通过对 15 个片区土壤理化性质和土壤渗透率 2 次测定结果的综合评估发现,除个别特殊情况外,各片区的土壤理化性质和渗透率测定结果表现出较强的一致性。因此,土壤理化性质或土壤渗透率均可单独作为评价土壤渗透能力的有效指标。结合潍坊市地质调查资料,示范区土壤主要以砂壤土和黏壤土为主,但局部地区因黄土层分布导致渗透性能差异显著。针对不同土壤质地的特点,为提升其渗透能力并优化海绵城市 LID 设施的设计效果,提出以下具体建议:砂壤土区域,通过增加有机质含量(如施用腐熟堆肥或绿肥),提升土壤的持水性和水分管理能力,从而增强其对降雨的缓冲能力;黏壤土区域,采用添加粗粒材料(如砂砾或碎石)以及改良剂(如石膏或生物炭)的方法,改善土壤结构,增强渗透性能,同时降低土壤的密实度;黄土层分布区域,鉴于黄土层较高的密实度和较低的渗透性,建议在设施设计中充分考虑其分布特征,采取局部开挖并回填渗透性较好的材料,或结合深层松土技术,以确保 LID 设施

的长期有效性。

2.3 潍坊市中心城区海绵城市建设示范区土壤渗透能力的综合分析

通过试验所得数据,利用 ArcGIS 绘制潍坊市中心城区海绵城市建设示范区等值线图及等值线热力图。由图 4 可知,潍坊市中心城区海绵城市建设示范区土壤渗透率由南到北呈现递减趋势。根据国家地球系统科学数据中心的地质数据,潍坊市中心城区由南到北地质分布相对一致,主要由河流冲积层、黄土层和沉积物构成。河流冲积层通常由砂、砾、卵石等颗粒物质组成,渗透率系数较高。而黄土层主要由细粒黄土组成,其渗透率相对较低。沉积物主要由砾石、砂、黏土、灰泥组成,通常情况下,沉积物的渗透率系数介于两者之间。

基于地质勘查资料和渗透率空间分布特征,针对潍坊市中心城区海绵城市建设示范区进行了地质-渗透性能关联分析。结果表明,研究区土壤渗透率的空间分异与地质构造单元呈现相关性,可划分为 3 个特征区域:南部高渗透区(平均值为 3.61×10^{-4} cm/s)主要位于潍河河谷平原和丘陵过渡带,地质剖面数据显示该区域黄土覆盖层薄(平均厚度 < 2.5 m),同时该区域沉积物以中粗砂(45.6%)和砾石

(22.3%)为主,黏粒含量低(12.8%)。范非凡等^[16]研究证实,这种砂砾质沉积构造形成了大量连通性良好的孔隙网络,有效孔隙度高达 28.3%,孔隙连通性指数为 0.72,使水分能迅速下渗并达到深层。土壤孔隙率数据显示,南部地区土壤中 > 0.5 mm 的大孔隙比例(31.7%)显著高于北部地区(18.4%),这是南部区域渗透性能优越的微观基础^[17]。中部过渡区(平均值为 3.49×10^{-4} cm/s)为潍坊市中心城区,地质构造呈现河湖交互相沉积特征,剖面上表现为“冲积层-湖相沉积-黄土层”的夹层结构,平均土层厚度为 4.2 m。粒度分析显示,该区域沉积物粒径分布均匀,形成了中等渗透性能的土壤基质。值得注意的是,该区域虽然黄土层较厚(1.8~2.5 m),但由于城市长期发展过程中的人工扰动和地下设施建设,形成了垂直优势通道,部分补偿了黄土层对渗透的阻滞作用,北部低渗透区(平均值为 3.38×10^{-4} cm/s)主要为河谷平原,地质勘探表明,该区域黄土覆盖层厚(平均值为 3.6 m),且具有明显的成层性,黏土矿物含量高(平均值为 28.7%)。这类黏土矿物具有显著的膨胀性和吸水性研究表明,当含水率变化时,土壤体积变化可达 5%~8%,导致孔隙结构不稳定^[18]。同时,北部黄土中的黏粒呈片状排列,

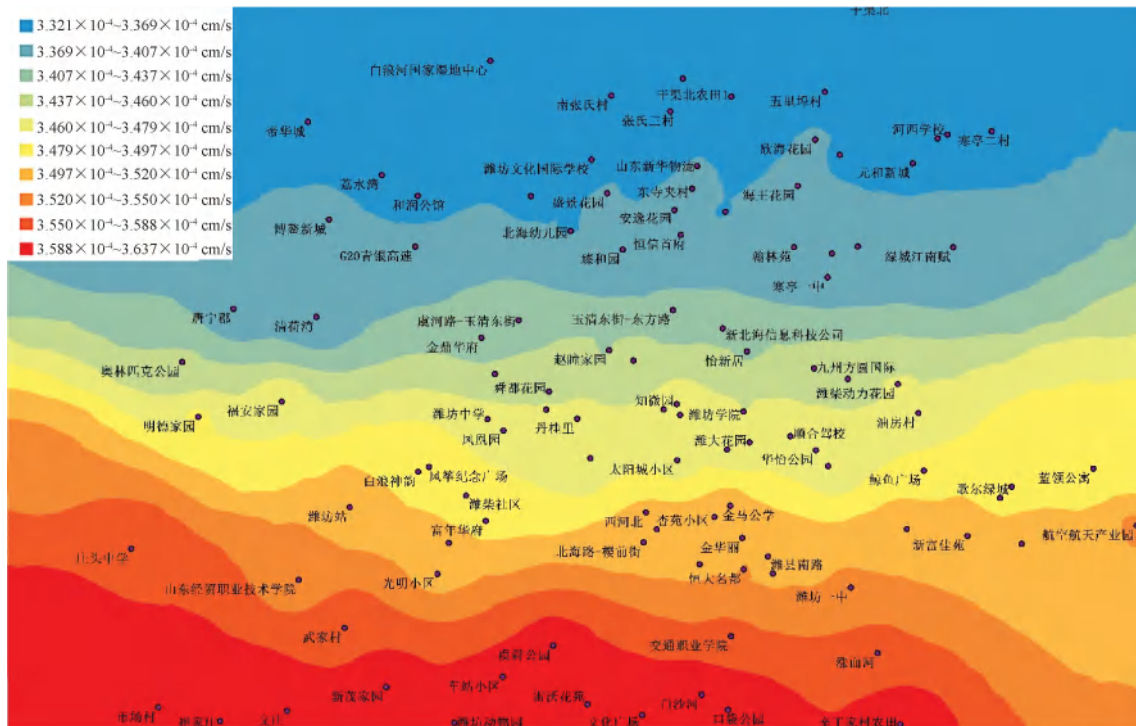


图 4 潍坊市中心城区海绵城市建设示范区渗透率系数等值线热力图

Fig. 4 Isotherm Map of Permeability Coefficient of Sponge City Construction Demonstration Zone in Weifang City

形成低渗透性微观结构,有效孔隙连通率仅为22.4%,显著低于南部地区(41.6%)。综上所述,潍坊市中心城区海绵城市建设示范区土壤渗透与地质变化呈现一定相关性,地质条件是影响土壤渗透率的重要因素。

3 结论

(1)潍坊市中心城区15个海绵城市建设示范区下垫面土壤渗透率为 $3.357 \times 10^{-4} \sim 3.628 \times 10^{-4}$ cm/s,平均值为 3.466×10^{-4} cm/s,总体渗透性能属中等水平。分析98个检测点数据发现,土壤渗透率显著受到土地利用类型的影响,其中林地、草地及公园绿地的土壤渗透率最高,居住小区、工厂用地次之,而公共设施及商业用地的土壤渗透性能最低。这主要与各区域硬化铺装面积及透水设施建设程度有关。综合各示范区的土壤渗透数据,建议以农林及居住区为主的6个片区更适合开展雨水花园、下沉绿地等LID建设;而对硬化路面占比较高的区域,需采取增加透水铺装材料应用、改善土壤理化特性以及增设雨水花园等措施,以提高区域土壤渗透能力,有效改善城市水文环境,增强城市韧性,支持海绵城市建设。

(2)通过对土壤理化性质与渗透率的关联性分析,发现潍坊市中心城区海绵城市建设示范区土壤渗透率受土壤密度、含水率及孔隙率的显著影响。具体表现如下:土壤渗透率与土壤密度呈负相关关系,即土壤密度越高,其颗粒之间的孔隙越少,导致渗透能力降低;而土壤渗透率与土壤含水率、孔隙率呈正相关关系,含水率适宜的土壤能够形成连续水膜,提高孔隙间连通性,提升渗透性能。土壤密度、含水率及孔隙率可作为独立评价土壤渗透能力的有效指标,为后续潍坊市中心城区海绵城市土壤改良措施提供了具体的理论依据。

(3)潍坊市中心城区土壤渗透率的空间分布特征受到地质条件的影响。从区域分布来看,南部地区由于河流冲积层和沉积物的广泛存在,颗粒组成以砂砾质为主,孔隙连通性较好,表现出较高的土壤渗透率;中部地区地势较平坦,土壤层结构稳定,沉积物粒径分布均匀,渗透性能处于适中水平;而北部地区黄土层厚度较大,黏粒含量较高,孔隙连通性较差,导致渗透性能明显降低。因此,地质条件的空间差异对土壤渗透性能产生重要影响,应在未来海绵

城市规划设计和土壤改良实践中加以充分考虑,并根据区域差异采取相应的针对性措施。

参考文献

- [1] 刘发欣,程文,刘昕,等.海绵城市建设中低影响开发的应用及研究进展[J].净水技术,2022,41(9):18-25,34.
LIU F X, CHENG W, LIU X, et al. Research progress and application of low impact development in sponge city construction [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(9): 18-25, 34.
- [2] 汤钟,张亮,俞露,等.韧性城市理念下的区域雨洪控制系统构建探索及实践[J].净水技术,2020,39(1):136-143.
TANG Z, ZHANG L, YU L, et al. Exploration and practice of regional rain and flood control system under the concept of resilient cities [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(1): 136-143.
- [3] 曾兴,李裕恒,黄宽心,等.吸湿对土粒比重测定的影响研究[J].应用力学学报,2022,39(6):1125-1134.
ZENG X, LI Y H, HUANG K X, et al. Influence of hygroscopicity on the determination of soil specific gravity [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2022, 39(6): 1125-1134.
- [4] 窦金熙,郭玉明,王盛,等.土壤含水率测定方法研究[J].山西农业科学,2017,45(3):482-485.
DOU J X, GUO Y M, WANG S, et al. Study on determination methods of moisture content in soil [J]. Shanxi Agricultural Sciences, 2017, 45(3): 482-485.
- [5] 汪攀峰,丁启朔,丁为民,等.一种土壤孔隙率(比)的测定方法[J].实验技术与管理,2009,26(7):50-51.
WANG P F, DING Q S, DING W M, et al. A measurement method of soil porosity [J]. Experimental Technology and Management, 2009, 26(7): 50-51.
- [6] 吴海蛟,胡振华,李飞,等.掺入不同组分碎石后土石混合物入渗模拟研究[J].中国水土保持科学,2014,12(3):17-22.
WU H J, HU Z H, LI F, et al. Simulation of infiltration of soil after mixed with different components of gravels [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2014, 12(3): 17-22.
- [7] 宋剑英,王建龙,任希岩,等.透水铺装渗透性能计算方法探讨[J].中国给水排水,2022,38(2):34-40.
SONG J Y, WANG J L, REN X Y, et al. Discussion on the permeability calculation method of permeable pavement [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(2): 34-40.
- [8] 朱木兰,廖杰,陈国元,等.针对LID型道路绿化带土壤渗透性能的改良[J].水资源保护,2013,29(3):25-28,33.
ZHU M L, LIAO J, CHEN G Y, et al. Soil permeability improvement for LID-type road greenbelt [J]. Water Resources Protection, 2013, 29(3): 25-28, 33.

(下转第195页)

- 水质总硬度监测结果分析[J]. 实用预防医学, 2021, 28(2): 185-189.
- WEI R R, TANG Z Z, HUANG J P, et al. Surveillance results of total hardness of municipal water supply in Guangxi, 2017-2019 [J]. Practical Preventive Medicine, 2021, 28(2): 185-189.
- [19] YU T, ZHANG Y A, WU F C, et al. The six-decade change in water chemistry of large freshwater Lake Taihu, China [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(16): 9093-9101.
- [20] 冯泽波, 史正涛, 苏斌, 等. 滇池主要入湖河流化学特征及其环境意义[J]. 水生态学杂志, 2019, 40(3): 18-24.
- FENG Z B, SHI Z T, SU B, et al. Water chemistry in the primary tributaries of Dianchi Lake and effect on the water environment of Dianchi Lake [J]. Journal of Hydroecology, 2019, 40(3): 18-24.
- [21] 赵瑞一, 张乾柱, 李玉秀, 等. 不同类型水生植物对水化学性质影响差异研究[J]. 人民长江, 2019, 50(11): 64-68.
- ZHAO R Y, ZHANG Q Z, LI Y X, et al. Different effects of diverse aquatic plants on hydrochemistry [J]. Yangtze River, 2019, 50(11): 64-68.
- [22] 王奇岗, 肖琼, 赵海娟, 等. 水生植物对岩溶区河水地球化学昼夜变化的影响——以漓江为例[J]. 中国岩溶, 2018, 37(4): 501-514.
- WANG Q G, XIAO Q, ZHAO H J, et al. Influence of aquatic photosynthesis on diel variations of hydrochemistry in karst river: A case study of the Lijiang River [J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(4): 501-514.
-
- (上接第 147 页)
- [9] 王丽, 刘霞, 张光灿, 等. 鲁中山区采取不同生态修复措施时的土壤粒径分形与孔隙结构特征[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(2): 73-80.
- WANG L, LIU X, ZHANG G C, et al. Fractal features of soil particles size distribution and physical property under different measures of ecological restoration on rocky mountainous area in the middle of Shandong Province [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007, 5(2): 73-80.
- [10] 师晓阳, 刘淑坡, 李飞, 等. 海绵城市不同用地类型土壤渗透能力——以厦门市海沧马銮湾试点区为例[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2019, 47(6): 836-841.
- SHI X Y, LIU S P, LI F, et al. Study on soil properties and permeability of different land types in sponge city: Take Maluan Bay of Haicang pilot zone in Xiamen City as an example [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2019, 47(6): 836-841.
- [11] 周韩, 罗璟, 杨沛璋, 等. 基于土壤质地分类的土壤渗透性影响因素研究[J]. 人民长江, 2023, 54(8): 153-159.
- ZHOU H, LUO J, YANG P Z, et al. Influence factors of soil permeability based on soil texture classification [J]. Yangtze River, 2023, 54(8): 153-159.
- [12] 孟晨, 牛健植, 骆紫藤, 等. 华北土石山区森林土壤大孔隙对土壤理化性质及根系的响应[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3): 94-100.
- MENG C, NIU J Z, LUO Z T, et al. Response of soil macropore to soil phychemical properties and root in forest in rocky mountain area of north China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(3): 94-100.
- [13] 刘威, 赵园园, 陈小龙, 等. 土壤含水率对豫中植烟土壤微生物群落多样性及氮循环功能基因丰度的影响[J]. 中国农业科技导报, 2024, 26(1): 214-225.
- LIU W, ZHAO Y Y, CHEN X L, et al. Effects of soil moisture content on microbial community diversity and abundance of nitrogen cycling genes in central Henan tobacco-growing soil [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2024, 26(1): 214-225.
- [14] 孙丹焱, 郑涛, 徐竟成, 等. 城市绿地土壤渗透性改良对雨水径流污染的削减效果及去除规律[J]. 环境工程学报, 2019, 13(2): 372-380.
- SUN D Y, ZHENG T, XU J C, et al. Effect of soil permeability improvement of urban green space on the reduction effect and removal rule of stormwater runoff pollution [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(2): 372-380.
- [15] 唐心, 李国平, 胡家朋, 等. 福建省南平市不同土地利用类型土壤渗透系数及影响因素[J]. 武夷学院学报, 2023, 42(6): 31-36.
- TANG X, LI G P, HU J P, et al. Soil permeability coefficient and influencing factors under different land use types in Nanping City, Fujian Province [J]. Journal of Wuyi University, 2023, 42(6): 31-36.
- [16] 范非凡, 李晓勤, 程远盛. 土壤固有频率与孔隙度、含水率的关系研究[J]. 农机化研究, 2021, 43(1): 169-175.
- FAN F F, LI X Q, CHENG Y S. Effects of soil porosity and water content on natural frequency of cultivated soil [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(1): 169-175.
- [17] 王思思, 王榕, 苏毅, 等. 北京城区绿地土壤渗透性能及其对降雨产流的影响分析[J]. 环境工程, 2020, 38(4): 83-88.
- WANG S S, WANG R, SU Y, et al. Analysis of Beijing green space soil permeability model and its impact on rainfall-runoff [J]. Environmental Engineering, 2020, 38(4): 83-88.
- [18] 任利东, 黄明斌, 樊军. 不同类型层状土壤持水能力的研究[J]. 农业工程学报, 2013(19): 105-111.
- REN L D, HUANG M B, FAN J. Study on water retention capacity for drained soils with different textural layering [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013(19): 105-111.