

引用格式: 赵雯淑, 沈玉叶, 於海波, 等. 城市绿地土壤无机碳固存和损失的影响因素[J]. 浙江农林大学学报, 2026, 43(1): 1-11. ZHAO Wenshu, SHEN Yuye, YU Haibo, *et al.* Influencing factors of soil inorganic carbon sequestration and loss in urban greenspaces[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2026, 43(1): 1-11.

城市绿地土壤无机碳固存和损失的影响因素

赵雯淑^{1,2}, 沈玉叶^{1,2}, 於海波^{1,2}, 刘 伟^{1,2}, 蔡延江^{1,2}

(1. 浙江农林大学 森林食物资源挖掘与利用全国重点实验室, 浙江 杭州 311300; 2. 浙江农林大学 环境与资源学院/碳中和学院, 浙江 杭州 311300)

摘要: 土壤无机碳 (SIC) 是土壤碳库的重要组成部分, 其固存和损失对全球碳循环和气候变化具有深远影响。中国城市化率正不断上升, 城市生态系统成为最受关注的生态系统之一。城市绿地作为城市生态系统的重要组成部分, 其土壤碳循环与气候变化和生态系统服务功能密切相关, 对城市化的响应和反馈必然会成为科学界研究的焦点和重点。然而, 目前对城市绿地土壤无机碳循环的认知仍相对匮乏。本文讨论了城市生态系统中的人为活动 (城市化进程中土地管理和建设活动等) 可能对土壤无机碳产生的影响, 系统概述了: ①城市化背景下城市绿地土壤无机碳的固存、损失及其影响因素。②土壤物理性质、氮输入、土壤 pH 和盐分变化对城市绿地土壤无机碳溶解—沉淀平衡的驱动作用。③土壤动物活动和微生物群落变化对城市绿地土壤无机碳形成过程的影响。未来需深入探究城市化背景下土壤无机碳动态变化的驱动机制, 不仅能够进一步弥补城市绿地土壤无机碳方面的研究不足, 还有助于为城市生态系统碳循环理论完善和生态系统功能优化提供科学支撑。表 1 参 83

关键词: 城市化; 城市绿地; 土壤无机碳; 碳循环

中图分类号: S153.6 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2026)01-0001-11

Influencing factors of soil inorganic carbon sequestration and loss in urban greenspaces

ZHAO Wenshu^{1,2}, SHEN Yuye^{1,2}, YU Haibo^{1,2}, LIU Wei^{1,2}, CAI Yanjiang^{1,2}

(1. State Key Laboratory for Development and Utilization of Forest Food Resources, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. College of Environment and Resources/College of Carbon Neutrality, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

Abstract: Soil inorganic carbon (SIC) is a key component of the soil carbon pool, and its sequestration and loss have profound impacts on the global carbon cycling and climate change. With accelerating urbanization in China, urban ecosystems have become a focal point of ecological research. Urban green spaces, as integral components of urban ecosystems, are closely linked to soil carbon dynamics, climate regulation, and ecosystem services, and their response and feedback to urbanization will inevitably be the focus and priority of study. However, the understanding of SIC cycling in urban green spaces remains limited. This paper examined the potential impacts of human activities such as land management and construction on SIC in urban ecosystems. It systematically overviewed the following aspects: (1) sequestration, loss and influencing factors of SIC in urban green spaces under urbanization; (2) the driving effects of changes in soil physical properties, nitrogen inputs, pH, and salinity on the carbonate dissolution–precipitation balance of SIC in urban green spaces; (3) the impact

收稿日期: 2025-04-07; 修回日期: 2025-09-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (42277286, 42177199)

作者简介: 赵雯淑 (ORCID: 0009-0000-7014-2504), 从事城市绿地土壤碳循环研究。E-mail: zws15379456656@163.com。通信作者: 蔡延江 (ORCID: 0000-0002-5376-7884), 教授, 博士, 从事土壤碳氮循环及其环境效应研究。E-mail: yjcai@zafu.edu.cn

of soil fauna and microbial communities on SIC formation process. Future research should focus on the driving mechanism of SIC dynamics under urbanization, so as to make up for the research deficiencies in inorganic carbon in urban green spaces and provide theoretical support for improving carbon cycling theory and optimizing ecosystem functions in urban ecosystems. [Ch, 1 tab. 83 ref.]

Key words: urbanization; urban green space; soil inorganic carbon; carbon cycling

土壤碳库由土壤有机碳 (SOC) 和土壤无机碳 (SIC) 组成。依据在土壤中的存在形态, 土壤无机碳可分为气态的二氧化碳 (CO_2)、液态的碳酸根离子 (CO_3^{2-}) 溶液和固态的碳酸盐 (如 CaCO_3)。土壤无机碳主要以固态碳酸盐的形式存在于土壤中^[1], 前两者相对较少。土壤中的固态碳酸盐按照其来源可分为原生碳酸盐和次生碳酸盐^[2]。原生碳酸盐 (又称继承性碳酸盐) 是指源于成土母质或母岩且未与环境发生交换作用的碳酸盐, 次生碳酸盐 (又称自生碳酸盐) 则是指原生碳酸盐与二氧化碳经一系列的化学反应溶解再沉淀形成的产物, 或者是通过大气二氧化碳和钙离子 (Ca^{2+})、镁离子 (Mg^{2+}) 及其他盐离子在土壤中的沉淀作用所形成的碳酸盐^[3]。在次生碳酸盐的形成过程中, 大气中的二氧化碳被固存^[4], 对缓解温室效应具有重大意义^[5-6]。

相较于土壤有机碳, 土壤无机碳的周转时间可长达数千年, 因此, 土壤无机碳传统上被认为是一个相对稳定的碳库^[7]。然而, 最近的证据表明: 由于过去几十年中发生的干扰日益增多, 土壤无机碳的周转速度明显加快^[8-9]。尽管如此, 土壤无机碳经常被排除在碳核算之外, 其规模、分布和影响因素等也不甚明确^[10]。土壤无机碳不仅具有巨大的储量, 而且对环境变化高度敏感, 在剧烈气候变化和人为干扰强烈的背景下, 明确其在土壤碳循环中的作用已变得日益迫切^[11]。

以“soil inorganic carbon”为关键词在 Web of Science 数据库中检索发现: 2015 年 1 月至 2025 年 5 月共发表 3 915 篇相关论文, 年均发文量约 391.5 篇。其中, 2023 年发文量达到峰值 (584 篇), 同比增长率高达 30.07%, 表明该研究领域正处于快速发展阶段。研究热度的持续上升反映了学者们对土壤无机碳在碳循环及全球变暖背景下重要性的持续关注。从理论深化到实践需求, 土壤无机碳研究都具有重要的科学价值和现实意义。鉴于土壤无机碳在碳循环中的重要作用与当前研究热度的持续上升, 加强土壤无机碳在典型生态系统中的研究显得尤为关键。

当前, 全球约 4% 的陆地面积被城市化区域所覆盖, 且超过半数的人口聚居在城市中。这一比例现仍保持稳定增长态势, 年均增长率约为 0.4%^[12]。以中国为例, 1975 年城市人口占比仅为 17.4%, 至 2013 年已跃升至 53.7%, 到 2050 年这一比例将有望达到 80.0%^[13]。作为城市生态系统的重要组成部分, 城市绿地主要由自然和人工植被覆盖区域构成, 属于城市绿色基础设施的关键要素。这类区域是由自然、半自然空间及其相关环境要素组成的网络, 通过科学规划与管理, 能够提供多元化的生态系统服务功能^[14-15]。从土地利用类型来看, 这类以植被覆盖为主导的城市空间, 不仅具有生态、景观、休闲及调节环境等功能, 更是城市可持续发展的重要组成部分^[16]。因此, 作为改善和美化城市生态环境的重要载体, 城市绿地在调节城市生态环境平衡中发挥着重要作用^[17]。

研究表明: 土壤微环境改变、气候变化 (如酸雨、大气氮沉降) 和人为活动 (如城市化) 导致的土壤酸化和外源碳酸盐矿物输入等均会剧烈影响土壤无机碳的固存^[18]。值得注意的是, 尽管已有研究强调了土壤无机碳在农田、荒漠等生态系统服务功能中的作用^[19], 但当前针对城市绿地土壤无机碳的系统研究仍比较缺乏。在快速城市化背景下, 高强度人为干扰对绿地土壤碳循环过程的影响机制和生态效应仍是一个尚未系统回答的科学问题。对城市生态系统土壤无机碳循环的忽略是重要原因之一。基于此, 本文系统梳理了城市绿地土壤无机碳固存与损失及其影响因素的研究进展, 旨在为完善城市生态系统碳循环理论和优化生态系统功能提供科学支撑, 同时对于丰富城市绿地土壤碳循环理论、完善碳核算体系具有重要实践意义。

1 土壤无机碳固存与损失研究进展

1.1 土壤无机碳固存

土壤碳库储量 (0~100 cm) 大约为陆地生态系统植被碳储量的 2.5~3.0 倍, 为大气碳库的 2.0~

3.0 倍, 是陆地生态系统中最大的碳库^[20]。潘根兴^[21]根据《中国土地志》的相关数据计算得到中国土壤无机碳库 (0~100 cm) 总量为 60 Pg, 主要分布在华北和西北。最近研究显示: 全球 0~100 cm 土壤深度的土壤无机碳储量约为 700~1 000 Pg, 约占土壤碳库总量的 38%^[22]。由此可见, 土壤无机碳在全球碳固存中具有不可忽视的地位。

城市生态系统中土壤无机碳的估算存在很大的不确定性。城市化造成的土地扩张使得越来越多的自然和农业用地转变为城市绿地, 改变了土壤的原始结构和功能, 对土壤碳库及其固碳能力亦造成深刻的影响^[23]。城市绿地土壤无机碳的固存过程主要包括碳酸盐的直接输入和次生碳酸盐的形成^[24]。赵涵等^[25]研究表明: 随着城市化水平的提高, 土壤无机碳含量呈现明显的上升趋势, 且城市化进展快的城区绿地土壤具有较大的固碳潜力。与自然生态系统的土壤相比, 城市绿地土壤常会混合着大量的建筑废弃物、路面及其底层松散垃圾材料和人造材料等^[26], 这使得城市绿地表层土壤无机碳储量显著高于自然土壤。徐州城市绿地 0~100 cm 土层土壤有机碳储量为 1.51×10^8 kg, 占了总碳储量的 21%^[27]。在部分城市中, 城市绿地土壤无机碳储量甚至可以达到土壤有机碳储量的 1/3, 相对比例远高于其他自然生态系统的土壤^[28]。许乃政等^[29]对上海市城市扩展格局与土壤无机碳分布特征分析还发现: 随建城区年限的延长, 土壤无机碳积累渐趋显著。总体而言, 尽管现有研究表明城市区域土壤无机碳储量高于自然生态系统, 但全球尺度下城市绿地土壤无机碳库的准确计量仍存在诸多未知性, 未来需结合更广泛的城市土壤调查, 以明确土壤无机碳在城市碳固存中的关键作用。

1.2 土壤无机碳损失

土壤碳酸盐的溶解损失和二氧化碳的释放是次生碳酸盐通过溶解和再沉淀导致的。以碳酸钙为例, 渗透进土壤中的大气二氧化碳和有机碳矿化产生的二氧化碳可溶解于水, 形成 HCO_3^- , 然后与 Ca^{2+} 反应, 沉淀为次生碳酸盐。这一过程会消耗 2 个单位的二氧化碳, 仅释放 1 个单位的二氧化碳, 从而实现大气中二氧化碳的净封存, 并形成土壤无机碳^[30]。不过, 当消耗 1 个单位的二氧化碳时, 还会溶解 1 个单位的碳酸盐, 但当碳酸盐重新沉淀时, 会释放 1 个单位的二氧化碳。这些过程既可以固碳, 也可以释放二氧化碳。然而, 其他来源 HCO_3^- (如硅酸钙溶解、灌溉水使用) 的存在会促进次生碳酸盐的形成, 但酸性条件的存在会导致碳酸盐溶解, 随后向大气排放二氧化碳^[31]。因此, 通过碳酸盐溶解和再沉淀等过程以及外部干扰, 土壤无机碳不仅可作为碳汇, 还可作为碳源。

前人研究指出: 区域环境变化 (如酸雨和大气氮沉降) 与人类活动 (如氮肥施用) 引发的土壤酸化会造成土壤无机碳损失^[8, 18, 32]。SONG 等^[9]以 2010 年为基准, 预测了土壤无机碳库损失, 发现到 2100 年, 在共享社会经济路径 (shared socioeconomic pathways, SSPs) 不同的 2 种情景下, SSP 1-2.6 (温室气体排放较低) 和 SSP 3-7.0 (温室气体排放较高) 的土壤无机碳库消耗量分别可达 2010 年土壤无机碳库总量的 6.45%~40.05% 和 7.21%~52.37%, 平均降幅为 19.12%~19.47%。HUANG 等^[11]基于 223 593 项实地测量数据和机器学习模型发现: 与陆地生态系统氮添加相关的土壤酸化将在 2024—2054 年的 30 a 内使全球土壤无机碳 (0~30 cm) 减少高达 23.0 Gt, 在中国地区这一现象将尤为严重。土壤无机碳的损失不仅体现在碳储量减少, 更通过碳酸盐溶解过程释放二氧化碳气体。在不同地区, 源于土壤无机碳的二氧化碳占总二氧化碳排放量的 12%~38%^[33-34]。不过, 以往大多研究仅考虑土壤二氧化碳释放来自土壤有机碳的分解, 较少关注土壤无机碳作为碳源的贡献。

碳同位素技术在碳循环研究的应用为量化土壤无机碳溶解对土壤二氧化碳释放的贡献提供了有效的技术手段。自然界中碳同位素有 3 种, 分别是 ^{12}C 、 ^{13}C 、 ^{14}C 。GÖCKE 等^[35]使用 ^{13}C 和 ^{14}C 示踪法分别计算了次生碳酸盐重结晶的速率。结果显示: ^{14}C 标记法在测定时灵敏度更高, 估算更为准确, 但 ^{14}C 具有放射性, 标记材料受到高度监管, 仅限于室内实验。 ^{12}C 和 ^{13}C 是碳的 2 种稳定性同位素, 98.89% 的碳以 ^{12}C 形式存在, ^{13}C 在不同的物质中存在差异^[36]。鉴于此, 可以通过 $\delta(^{13}\text{C})$ 自然丰度法或标记法来追踪碳的来源与去向^[37]。GALLAGHER 等^[38]发现: 方解石这类碳酸盐矿物的溶解和形成会显著影响土壤释放二氧化碳的 $\delta(^{13}\text{C})$ 。黄奇波等^[39]通过测定不同类型土壤剖面中碳酸盐含量及其 $\delta(^{13}\text{C})$ 同位素组成特征, 同时结合大气二氧化碳浓度及其同位素比值变化规律, 建立了碳酸盐转化过程的定量分析方法。此外, 土壤有机碳也可在土壤无机碳转化过程中发挥关键驱动作用, 土壤微生物呼吸释放二氧化碳与次生碳酸

盐间自始至终存在着 $\delta(^{13}\text{C})$ 的分馏互换^[40], 土壤无机碳的 $\delta(^{13}\text{C})$ 偏正, 土壤有机碳的 $\delta(^{13}\text{C})$ 偏负, 利用土壤有机碳和土壤无机碳中 $\delta(^{13}\text{C})$ 的差异, 可以区分土壤释放二氧化碳的来源, 但不同碳源之间 $\delta(^{13}\text{C})$ 的差异必须 $\geq 5\%$ ^[41-43]。当土壤二氧化碳排放源自土壤有机碳与土壤无机碳的混合作用时, 源于土壤无机碳的二氧化碳对二氧化碳排放总量的贡献 (f_{SIC}) 可用两元混合模型估算, 计算如下:

假定源自土壤无机碳和土壤有机碳的二氧化碳释放是独立的, 二氧化碳排放总量 [$V(\text{总 CO}_2)$] 是土壤有机碳呼吸产生的二氧化碳 [$V(\text{SOC_CO}_2)$] 和土壤无机碳产生的二氧化碳 [$V(\text{SIC_CO}_2)$] 的混合物:

$$V(\text{总CO}_2) = V(\text{SOC_CO}_2) + V(\text{SIC_CO}_2)。(1)$$

利用两元混合模型估算 $V(\text{SIC_CO}_2)$ 对二氧化碳排放总量的贡献:

$$\delta(^{13}\text{C_CO}_2) = f_{\text{SIC}} \times \delta(^{13}\text{C_SIC}) + (1 - f_{\text{SIC}}) \times \delta(^{13}\text{C_SOC})。(2)$$

方程可改写为:

$$f_{\text{SIC}} = [\delta(^{13}\text{C_CO}_2) - \delta(^{13}\text{C_SOC})] / [\delta(^{13}\text{C_SIC}) - \delta(^{13}\text{C_SOC})]。(3)$$

式 (5)~(7) 中: $\delta(^{13}\text{C_CO}_2)$ 是土壤排放二氧化碳总量的 $\delta(^{13}\text{C})$, $\delta(^{13}\text{C_SOC})$ 是土壤有机碳的 $\delta(^{13}\text{C})$, $\delta(^{13}\text{C_SIC})$ 是土壤无机碳的 $\delta(^{13}\text{C})$ 。因此, 基于 $\delta(^{13}\text{C})$ 的两元混合模型为量化城市生态系统中土壤无机碳对二氧化碳排放的贡献提供了理论支持。

此外, 尽管土壤无机碳相关研究的最新进展已有报道 (表 1), 但值得注意的是, 目前仍缺乏针对城市绿地土壤无机碳的研究。

表 1 土壤无机碳相关研究的最新进展

Table 1 Latest research findings on soil inorganic carbon

年份	研究方法	主要发现/观点	不足与争议	文献来源
2025	地球化学调查、碳储量模型估算	黄土高原土壤无机碳主导碳库(占比>50%), 空间分布与地貌(山地/黄土)强相关	未解释土壤无机碳高值区形成机制; 未考虑近年来人为干扰	[44]
2025	土柱淋溶模拟	滨海湿地土壤无机碳淋溶呈“峰形”动态, 受pH调控	未区分生物(植物根系)与非生物(矿物溶解)作用的贡献	[45]
2025	Meta分析	土壤无机碳的损失主要发生在表层土壤, 增加主要发生在深层土壤	深层数据不足, 多措施交互作用缺乏, 碳汇潜力或被高估	[46]
2024	剖面数据统计, 空间异质性分析	黄土高原与华北平原土壤无机碳与土壤有机碳关系相反, 受农田管理(施肥酸化)和侵蚀驱动	未量化具体管理措施(如施肥量)对土壤无机碳的直接影响; 侵蚀过程数据依赖历史推测	[47]
2024	长期定位试验(16 a)	有机肥增加土壤无机碳21%, 秸秆减少土壤无机碳28%; pH和水分是关键驱动因子	未追踪碳去向(如二氧化碳释放)	[48]
2024	汇总了223 593个基于实地测量的土壤无机碳数据点, 估算全球土壤无机碳的储量和分布	全球土壤在0~2 m内储存了约(2 305±636)亿t的土壤有机碳, 超过全球植被碳储量的5倍	机器学习模型可能未能充分考虑所有影响土壤无机碳动态的生物地球化学过程, 或者对某些变量的非线性关系和交互作用的处理不够精确	[11]
2024	通过野外湿度条件和控制湿度实验评估土壤无机碳衍生的二氧化碳排放的温度敏感性	随着干旱程度增加, 土壤无机碳溶解的温度敏感性显著增加, 在干旱地区, 表层土壤无机碳衍生的二氧化碳排放约占总二氧化碳排放的7.2%	实验主要评估短期温度和湿度变化对土壤无机碳的影响, 长期变化趋势仍需进一步研究	[49]
2023	Meta分析	土壤无机碳在所有土地利用变化类型中都有所增加, 土壤无机碳的变化受土壤pH和年平均温度的影响	研究主要聚焦干旱和半干旱地区, 缺乏其他区域土壤无机碳变化的研究数据	[50]

2 城市绿地土壤无机碳的影响因素

2.1 土壤物理性质

土壤物理性质是影响植物生长发育的重要因素, 不同的土壤物理性质会造成土壤水、气、热的差

异,影响土壤自身状况^[51]。因长期人为活动的扰动,城市绿地土壤物理性质易发生改变。城市生态系统中的土壤来源复杂且土层不连续,常见表土被移除或底层土掩埋的情况,且掺入大量生土,造成土层破碎的现象普遍存在;同时土壤中混杂建筑垃圾、砾石、煤渣等杂质,导致土壤结构破坏、物理性质恶化,严重改变了原有的微生态环境^[24]。对于城市生态系统而言,上述人为因素可能均会影响土壤自身性质,进而导致城市绿地中土壤无机碳的变化。

2.1.1 土壤容重 通常情况下,人为干扰强度较高的中心城区土壤容重普遍高于郊区。此外,有研究发现:城市公园草地土壤容重高于乔木植被下的土壤容重,且两者均与公园建成年代呈显著正相关^[52]。建成年代越久容重越大,更大的容重会显著降低土壤孔隙度,减少土壤中的二氧化碳和水分入渗能力,不利于碳酸盐的形成和土壤无机碳的固存^[25]。

2.1.2 土壤质地 在城市化过程中,城市绿地土壤可能会经历强烈的扰动,如植被清除、表土剥离、客土填充和混合,从而改变其自然剖面,破坏原有的土层结构进而改变土壤质地^[53]。城市化还可导致土壤黏细粉粒含量的增加,黏细粉粒的增加可促进土壤无机碳的显著增加^[54]。原理是黏细粉粒的表面积大、吸附能力强,较高含量的黏细粉粒可吸附土壤溶液中更多的 CO_3^{2-} 和 Ca^{2+} 等,从而促进碳酸盐的沉淀反应,有利于土壤无机碳的形成^[55]。

2.1.3 土壤温度 多数研究认为:城市化导致城市地区显著增温,且随着全球城市化持续推进和城市人口不断增长,增温趋势还将继续,不过不同区域的温度升高程度不同。例如,在中国东南部,城市化可导致地表温度每 10 年升高 0.05 °C,升温幅度超过其他时期和地区^[56]。ADACHI 等^[57]和 ZHAN 等^[58]分别模拟了东京都市圈和京津唐地区未来城市化情景,均发现城市温度将进一步升高。值得注意的是,城市化对温度的影响具有季节差异。研究认为:城市化造成的增温幅度在春季、夏季和秋季贡献较大^[59-60],其中夏季增温最显著,而且这种增温效应还会加强。

在夏季高温条件下,土壤微生物活性增强,土壤有机碳分解过程加快,进而提升土壤呼吸强度并加速碳矿化,促使土壤中二氧化碳浓度升高。随着降水发生,大量二氧化碳溶于土壤水分形成以 HCO_3^- 为主的溶液,在土壤水分蒸发过程中,碳酸氢盐会沉积到碳酸盐中^[61]。罗上华等^[62]发现:北京城区土壤无机碳含量比郊区高 34%,且土壤无机碳含量与离城市中心距离呈负相关($P<0.05$),说明城市热岛效应对土壤无机碳积累具有促进作用。

2.1.4 土壤湿度 城市化既可能促进降水,也可能抑制降水,加之局地气候的扰动,城市化对降水的影响存在不确定性^[63]。有研究表明:城市化导致降水增加,形成城市雨岛效应^[64],这是由于城市下垫面的改变影响了土壤水分下渗的能力。地表封实增加了城市地表径流量,影响地下水自然回灌过程,改变城市的水文状况,从而成为城市内涝的重要原因。例如,LI 等^[65]根据城市化情景和无城市化情景的对比实验发现:城市化情景下,降水在城市及下风向地区出现了显著增加。LI 等^[66]的研究指出:1984—2005 年中国南方城市化对降水增加的贡献率为 87%。ZHONG 等^[67]指出:长江三角洲的热岛效应增强了夏季强降水频率。杨茗等^[68]采集了四川省乐山市不同城市化梯度的 60 份土壤样本进行分析,结果表明:城市化梯度是解释土壤持水能力差异的主导因子,城市下风区降水普遍较多。然而也有研究指出:城市化对降水起到抑制作用。SARVARI 等^[69]分析了伊朗 7 个主要城市化地区 1976—2016 年的气候数据,发现这些地区降水逐渐减少。由于土壤中水分蒸发大于降雨时,土壤中盐分向上移动,在表层积聚,会使表层碳酸盐含量增高^[17];当人工灌溉时,土壤表层含水量增大,产生淋溶作用和脱钙现象,碳酸盐向下层移动,导致下层土壤碳酸盐含量增加。

总体来看,城市化使得水热条件及其他环境因子在城区—郊区的生态界面上形成了相应的环境梯度,影响着城市绿地土壤无机碳库的稳定性^[70]。对于城市绿地土壤而言,水分运动(包括降水、灌溉及季节性蒸散等)可能是次生性碳酸盐形成和分布的主要机制,即水分促进碳酸盐溶解,产生的 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 在土体中随水淋溶迁移,到达一定位置,当水分散失时在此重新沉淀为次生碳酸盐,或者进入地下水。因此,城市化通过显著改变区域自然水热条件,进而调控土壤二氧化碳分压和碳酸盐溶解-沉淀过程,最终导致城市土壤无机碳呈现空间梯度分布,其积累机制受城市下垫面改变、水分迁移与蒸发-淋溶平衡共同驱动。

2.2 土壤化学性质

2.2.1 土壤养分元素 城市化对土壤化学特性的影响主要表现在城市土壤化学元素循环过程中,包括以下2个方面:其一,城市化会导致土壤有机碳及速效养分下降,降低土壤的养分保持能力。由于城市管理通常会对植物凋落物进行清理,致使土壤-植物系统的养分循环受阻,进而加剧土壤有机碳和养分的流失,削弱土壤抵抗干扰的能力。其二,人类活动通过大气沉降、面源污染和点源排放等途径向土壤输入碳、氮、磷、硫等营养元素,这些外源物质输入显著改变了土壤元素的生物地球化学循环特征^[71]。李小涵等^[72]通过23 a定位试验发现:长期施氮使土壤无机碳减少 $0.67 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,表明氮输入通过改变土壤化学环境促进碳酸盐溶解。由此可见,在城市绿地中,城市化也可能会通过改变养分循环来影响土壤无机碳。

2.2.2 土壤 pH 和盐分 通常情况下, pH 与土壤无机碳固存呈正相关,强碱性土壤具有较高的土壤无机碳固存量^[11]。武慧君等^[73]发现:芜湖城市森林土壤无机碳随土层加深而减少,且与 pH 呈正相关。然而,盐分与 pH 呈正相关,但两者对土壤无机碳的影响并不一致^[74]。一方面,较高的盐分和 pH 会对碳酸盐的积累产生一定的抑制作用,不利于植物根系生长,降低土壤生物的活性,减缓土壤有机碳的分解速率,进而减少土壤中二氧化碳的分压,不利于碳酸盐的形成^[75]。另一方面,土壤中盐离子增加会使得 pH 增高,导致 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 的活性增加,与盐离子结合形成碳酸盐而累积在土壤中,因此高盐分离子环境也可能会促进土壤无机碳的积累^[76]。在城市绿地中,老城区由于城市化时间长,更多含钙建筑废料风化释放至土壤中,使土壤 pH 升高, HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 的活性增加,老城区的土壤无机碳常明显高于新城区^[25]。因此,在城市绿地中的碱性环境使土壤无机碳更易固存。

2.3 土壤生物因素

2.3.1 土壤动物 在城市生态系统中,土壤动物在支持城市地表植被生长、调节城市气候及水文循环、控制污染物和病原体降解、维护人类健康福祉等方面发挥着重要功能。例如,分解者(如节肢动物)能够通过破碎凋落物增大其比表面积,加速土壤有机碳降解并改善养分周转效率,进而支持城市植被的生长需求^[77]。捕食性土壤动物(如原生动物和线虫)通过摄食作用调控微生物群落结构,促使被微生物固定的养分重新释放,增强土壤养分有效性^[78]。此外,蚯蚓和白蚁等通过构建土壤孔隙网络,显著改善水分渗透性能,有助于缓解城市化导致的地表径流压力。土壤动物还可参与有机污染物降解和病原体抑制,从而提升城市环境的生态安全性与健康水平^[79]。与此同时,土壤动物(如线虫、螨类)通过分解有机质释放二氧化碳,增加土壤溶液中 CO_3^{2-} 浓度,进而影响碳酸盐溶解-沉淀平衡。ZAMANIAN 等^[6]指出:在碱性土壤中,土壤动物呼吸作用释放的二氧化碳可能通过反应转化为 HCO_3^- ,最终促进碳酸盐的形成。因此,城市土壤动物通过分解有机质、调控微生物群落、改善土壤结构及参与碳循环等关键生态过程,在促进土壤无机碳形成等方面发挥重要作用。

2.3.2 土壤微生物 城市化是影响全球生物多样性的关键因素之一,土壤微生物为生物多样性的核心组成部分,在土壤中发挥着重要作用^[80]。XU 等^[81]对中国16个城市代表性公园土壤微生物特征的研究发现,土壤微生物与城市化密切相关,其中城市化驱动的土壤性质改变是导致微生物群落结构变化的关键驱动因素。WHITEHEAD 等^[82]在研究柏林不同城市化梯度下土壤真菌群落时发现:城市发展显著增加了土壤真菌群落多样性,且真菌群落组成受土壤化学性质影响显著。再者,在区域环境变化显著的城市生态系统中, pH 升高使得微生物呼吸活动增强^[83],城市绿地中微生物呼吸产生的二氧化碳可能通过反应转化为 HCO_3^- ,最终形成碳酸盐。因此,城市化可以通过影响微生物群落及其代谢过程间接影响土壤无机碳积累。

3 小结与展望

与森林、草地、农田等生态系统相比,城市绿地生态系统的土壤无机碳研究尚处于起步阶段。城市绿地作为城市生态系统的重要组成部分,其土壤无机碳固存与损失对区域碳循环具有重要贡献。城市化过程中,土地管理和建设活动等人为因素对城市绿地土壤无机碳有显著影响。城市绿地土壤无机碳的固存与损失受到多重因素的综合影响,包括土壤物理性质(如容重、质地、温度和湿度)、土壤化学性质

(如养分元素、pH 及盐分)、土壤生物因素(如土壤动物和微生物)等。然而, 目前关于城市化对土壤无机碳影响的研究仍存在不足, 如不同植被类型对土壤无机碳固存与损失的影响机制尚不明确, 且在多因素交互作用机制方面缺乏系统研究和深入探讨。此外, 城市化调控城市绿地土壤无机碳固存与损失的机制仍存在诸多不确定性。因此, 未来应开展多尺度、多因素的整合研究, 以揭示城市化对绿地土壤无机碳影响可能存在的普适性规律。

4 参考文献

- [1] 许文强, 陈曦, 罗格平, 等. 基于稳定同位素技术的土壤碳循环研究进展[J]. 干旱区地理, 2014, **37**(5): 980–987. XU Wenqiang, CHEN Xi, LUO Geping, *et al.* Progress of research on soil carbon cycle using carbon isotope approach[J]. *Arid Land Geography*, 2014, **37**(5): 980–987. DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2014.05.014.
- [2] 杨黎芳, 李贵桐. 土壤无机碳研究进展[J]. 土壤通报, 2011, **42**(4): 986–990. YANG Lifang, LI Guitong. Advances in research of soil inorganic carbon[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, **42**(4): 986–990. DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2011.04.040.
- [3] 王海荣, 杨忠芳. 土壤无机碳研究进展[J]. 安徽农业科学, 2011, **39**(35): 21735–21739. WANG Hairong, YANG Zhongfang. Research progress on soil inorganic carbon[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, **39**(35): 21735–21739. DOI: 10.13989/j.cnki.0517-6611.2011.35.171.
- [4] FENG Qi, CHENG Guodong, KUNIHICO E. Carbon storage in desertified lands: a case study from North China[J]. *GeoJournal*, 2000, **51**(3): 181–189. DOI: 10.1023/A:1017557712431.
- [5] 杨学明, 张晓平, 方华军. 农业土壤固碳对缓解全球变暖的意义[J]. 地理科学, 2003, **23**(1): 101–106. YANG Xueming, ZHANG Xiaoping, FANG Huajun. Importance of agricultural soil sequestering carbon to offsetting global warming[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2003, **23**(1): 101–106. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2003.01.018.
- [6] ZAMANIAN K, ZHOU Jianbin, KUZYAKOV Y. Soil carbonates: the unaccounted, irrecoverable carbon source[J]. *Geoderma*, 2021, **384**: 114817. DOI: 10.1016/j.geoderma.2020.114817.
- [7] SCHLESINGER W H. The formation of caliche in soils of the mojave desert, California[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1985, **49**(1): 57–66. DOI: 10.1016/0016-7037(85)90191-7.
- [8] KIM J H, JOBBÁGY E G, RICHTER D D, *et al.* Agricultural acceleration of soil carbonate weathering[J]. *Global Change Biology*, 2020, **26**(10): 5988–6002. DOI: 10.1111/gcb.15207.
- [9] SONG Xiaodong, YANG Fei, WU Huayong, *et al.* Significant loss of soil inorganic carbon at the continental scale[J]. *National Science Review*, 2021, **9**(2): nwab120. DOI: 10.1093/nsr/nwab120.
- [10] FRIEDLINGSTEIN P, JONES M W, O'SULLIVAN M, *et al.* Global carbon budget 2021[J]. *Earth System Science Data*, 2022, **14**(4): 1917–2005. DOI: 10.5194/essd-14-1917-2022.
- [11] HUANG Yuanyuan, SONG Xiaodong, WANG Yingping, *et al.* Size, distribution, and vulnerability of the global soil inorganic carbon[J]. *Science*, 2024, **384**(6692): 233–239. DOI: 10.1126/science.adi7918.
- [12] LIU Xiaoping, PEI Fengsong, WEN Youyue, *et al.* Global urban expansion offsets climate-driven increases in terrestrial net primary productivity[J]. *Nature Communications*, 2019, **10**(1): 5558. DOI: 10.1038/s41467-019-13462-1.
- [13] 王小涵, 张桂莲, 张浪, 等. 城市绿地土壤固碳研究进展[J]. 园林, 2022, **39**(1): 18–24. WANG Xiaohan, ZHANG Guilian, ZHANG Lang, *et al.* Research progress on soil carbon sequestration in urban green space[J]. *Landscape Architecture Academic Journal*, 2022, **39**(1): 18–24. DOI: 10.12193/j.laing.2022.01.0018.003.
- [14] 梁晶, 方海兰, 郝冠军, 等. 上海城市绿地不同植物群落土壤呼吸及因子分析[J]. 浙江农林大学学报, 2013, **30**(1): 22–31. LIANG Jing, FANG Hailan, HAO Guanjun, *et al.* Soil respiration for different plant communities in an urban green-belt of Shanghai[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2013, **30**(1): 22–31. DOI: 10.11833/j.issn.2095-0756.2013.01.004.
- [15] JAEGER A. *Green Infrastructure-enhancing Europe's Natural Capital*[R]. Brussel: European Union, 2013.
- [16] 王甫园, 王开泳, 陈田, 等. 城市生态空间研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2017, **36**(2): 207–218. WANG Fuyuan, WANG Kaiyong, CHEN Tian, *et al.* Progress and prospect of research on urban ecological space[J]. *Progress in Geography*, 2017, **36**(2): 207–218. DOI: 10.18306/dlkxjz.2017.02.007.
- [17] VELASCO E, ROTH M, NORFORD L, *et al.* Does urban vegetation enhance carbon sequestration?[J]. *Landscape and*

- Urban Planning*, 2016, **148**: 99–107. DOI: [10.1016/j.landurbplan.2015.12.003](https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.12.003).
- [18] MIKHAILOVA E A, POST C J. Effects of land use on soil inorganic carbon stocks in the Russian Chernozem[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2006, **35**(4): 1384–1388. DOI: [10.2134/jeq2005.0151](https://doi.org/10.2134/jeq2005.0151).
- [19] GROSHANS G R, MIKHAILOVA E A, POST C J, *et al.* Accounting for soil inorganic carbon in the ecosystem services framework for United Nations sustainable development goals[J]. *Geoderma*, 2018, **324**: 37–46. DOI: [10.1016/j.geoderma.2018.02.009](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.02.009).
- [20] POST W M, EMANUEL W R, ZINKE P J, *et al.* Soil carbon pools and world life zones[J]. *Nature*, 1982, **298**(5870): 156–159. DOI: [10.1038/298156a0](https://doi.org/10.1038/298156a0).
- [21] 潘根兴. 中国土壤有机碳和无机碳库量研究[J]. 科技通报, 1999, **15**(5): 330–332. PAN Genxing. Study on carbon reservoir in soils of China[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 1999, **15**(5): 330–332. DOI: [10.13774/j.cnki.kjtb.1999.05.002](https://doi.org/10.13774/j.cnki.kjtb.1999.05.002).
- [22] SHARIFIFAR A, MINASNY B, ARROUAYS D, *et al.* Soil inorganic carbon, the other and equally important soil carbon pool: distribution, controlling factors, and the impact of climate change[J]. *Advances in Agronomy*, 2023, **178**: 165–231. DOI: [10.1016/bs.agron.2022.11.005](https://doi.org/10.1016/bs.agron.2022.11.005).
- [23] EDMONDSON J L, DAVIES Z G, McCORMACK S A, *et al.* Land-cover effects on soil organic carbon stocks in a European city[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **472**: 444–453. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2013.11.025](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.025).
- [24] 张永红, 刘飞, 钟松. 土壤无机碳研究进展[J]. 湖北农业科学, 2021, **60**(10): 5–9, 14. ZHANG Yonghong, LIU Fei, ZHONG Song. Research progress on soil inorganic carbon [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2021, **60**(10): 5–9, 14. DOI: [10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2021.10.001](https://doi.org/10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2021.10.001).
- [25] 赵涵, 吴绍华, 徐晓晔, 等. 城市土壤无机碳空间分布特征及其与城市化历史的关系[J]. 土壤学报, 2017, **54**(6): 1540–1546. ZHAO Han, WU Shaohua, XU Xiaoye, *et al.* Spatial distribution of soil inorganic carbon in urban soil and its relationship with urbanization history of the city[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, **54**(6): 1540–1546. DOI: [10.11766/trxb201703300075](https://doi.org/10.11766/trxb201703300075).
- [26] GEORGE K, ZISKA L H, BUNCE J A, *et al.* Elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature across an urban-rural transect[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(35): 7654–7665. DOI: [10.1016/j.atmosenv.2007.08.018](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.08.018).
- [27] 司志国. 徐州市城市绿地土壤碳储量及质量评价[D]. 南京: 南京林业大学, 2013. SI Zhiguo. *Soil Carbon Storage and Quality Evaluation of Urban Green Space in Xuzhou City*[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2013.
- [28] CANEDOLI C, FERRÈ C, ABU EL KHAIR D, *et al.* Soil organic carbon stock in different urban land uses: high stock evidence in urban parks[J]. *Urban Ecosystems*, 2020, **23**(1): 159–171. DOI: [10.1007/s11252-019-00901-6](https://doi.org/10.1007/s11252-019-00901-6).
- [29] 许乃政, 张桃林, 王兴祥, 等. 长江三角洲地区土壤有机碳库研究[J]. 长江流域资源与环境, 2010, **19**(7): 790–796. XU Naizheng, ZHANG Taolin, WANG Xingxiang, *et al.* Statistical calculation of soil carbon storages in the Yangtze Delta region[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, **19**(7): 790–796.
- [30] LI Jiao, AWASTHI M K, ZHU Qiong, *et al.* Modified soil physicochemical properties promoted sequestration of organic and inorganic carbon synergistically during revegetation in desertified land[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, **9**(6): 106331. DOI: [10.1016/j.jece.2021.106331](https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106331).
- [31] TAN Wenfeng, ZHANG Rui, CAO Hua, *et al.* Soil inorganic carbon stock under different soil types and land uses on the Loess Plateau region of China[J]. *CATENA*, 2014, **121**: 22–30. DOI: [10.1016/j.catena.2014.04.014](https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.04.014).
- [32] RAZA S, KUZYAKOV Y, ZHOU Jianbin. Facts to acidification-induced carbonate losses from Chinese croplands[J]. *Global Change Biology*, 2021, **27**(5): e7–e10. DOI: [10.1111/gcb.15478](https://doi.org/10.1111/gcb.15478).
- [33] OH N H, RAYMOND P A. Contribution of agricultural liming to riverine bicarbonate export and CO₂ sequestration in the Ohio River basin[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, **20**(3): GB3012. DOI: [10.1029/2005GB002565](https://doi.org/10.1029/2005GB002565).
- [34] WEST T O, McBRIDE A C. The contribution of agricultural lime to carbon dioxide emissions in the United States: dissolution, transport, and net emissions[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, **108**(2): 145–154. DOI: [10.1016/j.agee.2005.01.002](https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.01.002).
- [35] GÖCKE M, PUSTOVOYTOV K, KUZYAKOV Y. Pedogenic carbonate formation: recrystallization versus migration—process rates and periods assessed by ¹⁴C labeling[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, **26**(1): GB1018. DOI: [10.1029/2010GB003871](https://doi.org/10.1029/2010GB003871).

- [36] 孟延. 施用氮肥对石灰性土壤碳释放与累积的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015. MENG Yan. *Effects of Applying Nitrogen Fertilizer on Carbon Emission and Accumulation in Calcareous Soil*[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015.
- [37] STADDON P L. Carbon isotopes in functional soil ecology[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2004, **19**(3): 148–154. DOI: 10.1016/j.tree.2003.12.003.
- [38] GALLAGHER T M, BREECKER D O. The obscuring effects of calcite dissolution and formation on quantifying soil respiration[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2020, **34**(12): e2020GB006584. DOI: 10.1029/2020GB006584.
- [39] 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 等. 半干旱岩溶区土壤次生碳酸盐比例及对岩溶碳汇计算的影响[J]. 中国岩溶, 2016, **35**(2): 164–172. HUANG Qibo, QIN Xiaoqun, LIU Pengyu, *et al.* Proportion of pedogenic carbonates and the impact on carbon sink calculation in karst area with semiarid environment[J]. *Carsologica Sinica*, 2016, **35**(2): 164–172. DOI: 10.11932/karst20160205.
- [40] 石小霞, 赵诣, 张琳, 等. 华北平原不同农田管理措施对于土壤碳库的影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(1): 301–308. SHI Xiaoxia, ZHAO Yi, ZHANG Lin, *et al.* Effects of different agricultural practices on soil carbon pool in North China Plain[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 301–308. DOI: 10.13227/j.hjlx.201605212.
- [41] CHEVALLIER T, Cournac L, Hamdi S, *et al.* Temperature dependence of CO₂ emissions rates and isotopic signature from a calcareous soil[J]. *Journal of Arid Environments*, 2016, **135**: 132–139. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2016.08.002.
- [42] RAMNARINE R, WAGNER-RIDDLE C, DUNFIELD K E, *et al.* Contributions of carbonates to soil CO₂ emissions[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2012, **92**(4): 599–607. DOI: 10.4141/cjss2011-025.
- [43] 于伟家. 施用氮肥对石灰性土壤碳释放及其来源研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018. YU Weijia. *Effects of Application of Nitrogen Fertilizer on Carbon Emissions and Their Sources from Calcareous Soils*[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018.
- [44] 段星星, 刘小龙, 韩宝华, 等. 黄土高原地区土壤有机碳和无机碳储量及含量特征[J]. 物探与化探, 2025, **49**(1): 239–247. DUAN Xingxing, LIU Xiaolong, HAN Baohua, *et al.* Stocks and content of organic and inorganic carbon in soil of the Loess Plateau region[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2025, **49**(1): 239–247. DOI: 10.11720/wtyht.2025.3603.
- [45] 于纪民, 王筱彤, 王艺霖, 等. 滨海湿地土壤溶解性无机碳淋溶动态及机理研究[J]. 环境科学学报, 2025, **45**(3): 361–372. YU Jimin, WANG Xiaotong, WANG Yilin, *et al.* The leaching dynamics of soil dissolved inorganic carbon in coastal wetlands and its underlying mechanism[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2025, **45**(3): 361–372. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2024.0457.
- [46] LIAO Yang, DENG Lei, HUANG Yuanyuan, *et al.* Inorganic carbon should be considered for carbon sequestration in agricultural soils[J]. *Global Change Biology*, 2025, **31**(4): e70160. DOI: 10.1111/gcb.70160.
- [47] 墨美玲, 王秀君, 徐明岗, 等. 黄土母质典型农田土壤无机碳与有机碳的关系及影响因素[J]. 土壤, 2025, **57**(1): 35–46. MO Meiling, WANG Xiujun, XU Minggang, *et al.* Relationship of soil inorganic and organic carbon and main regulating factors in typical loess farmlands[J]. *Soils*, 2025, **57**(1): 35–46. DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2025.01.005.
- [48] 曾婷婷, 王路明, 杨康, 等. 长期外源有机物料添加对土壤无机碳库的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, **32**(12): 2034–2044. ZENG Tingting, WANG Luming, YANG Kang, *et al.* Effects of long-term addition of exogenous organic materials on soil inorganic carbon pool[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2024, **32**(12): 2034–2044. DOI: 10.12357/cjea.20240295.
- [49] LI Jinquan, PEI Junmin, FANG Changming, *et al.* Drought may exacerbate dryland soil inorganic carbon loss under warming climate conditions[J]. *Nature Communications*, 2024, **15**(1): 617. DOI: 10.1038/s41467-024-44895-y.
- [50] AN Hui, WU Xiuzhi, ZHANG Yarou, *et al.* Effects of land-use change on soil inorganic carbon: a meta-analysis[J]. *Geoderma*, 2019, **353**: 273–282. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.07.008.
- [51] 邹明珠, 王艳春, 刘燕. 北京城市绿地土壤研究现状及问题[J]. 中国土壤与肥料, 2012(3): 1–6. ZOU Mingzhu, WANG Yanchun, LIU Yan. The present status and problems of the research on Beijing urban green space soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2012(3): 1–6. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6257.2012.03.001.
- [52] 谢天, 侯鹰, 陈卫平, 等. 城市化对土壤生态环境的影响研究进展[J]. 生态学报, 2019, **39**(4): 1154–1164. XIE Tian, HOU Ying, CHEN Weiping, *et al.* Impact of urbanization on the soil ecological environment: a review [J]. *Acta Ecologica*

- Sinica*, 2019, **39**(4): 1154–1164. DOI: 10.5846/stxb201809131973.
- [53] SHEN Yuye, FANG Yunying, VANCOV T, *et al.* Surface soil organic carbon accumulation in urban parks increases with urbanization intensity: a case study for Hangzhou, China[J]. *Plant and Soil*, 2025, **513**: 673–690. DOI: 10.1007/s11104-025-07207-x.
- [54] LIU Enyuan, LIU Zhen, SUN Zhigang, *et al.* Soil inorganic carbon stocks increase non-synergistically with soil organic carbon after ecological restoration practices in drylands[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, **348**: 119070. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.119070.
- [55] ZHANG Huan, YIN Aijing, YANG Xiaohui, *et al.* Changes in surface soil organic/inorganic carbon concentrations and their driving forces in reclaimed coastal tidal flats[J]. *Geoderma*, 2019, **352**: 150–159. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.06.003.
- [56] ZHOU Liming, DICKINSON R E, TIAN Yuhong, *et al.* Evidence for a significant urbanization effect on climate in China [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, **101**(26): 9540–9544. DOI: 10.1073/pnas.0400357101.
- [57] ADACHI S A, KIMURA F, KUSAKA H, *et al.* Comparison of the impact of global climate changes and urbanization on summertime future climate in the Tokyo metropolitan area[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2012, **51**(8): 1441–1454. DOI: 10.1175/JAMC-D-11-0137.1.
- [58] ZHAN Jinyan, HUANG Juan, ZHAO Tao, *et al.* Modeling the impacts of urbanization on regional climate change: a case study in the Beijing-Tianjin-Tangshan metropolitan area[J]. *Advances in Meteorology*, 2013, **2013**(1): 849479. DOI: 10.1155/2013/849479.
- [59] BIAN Tao, REN Guoyu, YUE Yanxia. Effect of urbanization on land-surface temperature at an urban climate station in North China[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2017, **165**(3): 553–567. DOI: 10.1007/s10546-017-0282-x.
- [60] CHEN Liang, FRAUENFELD O W. Impacts of urbanization on future climate in China[J]. *Climate Dynamics*, 2016, **47**(1): 345–357. DOI: 10.1007/s00382-015-2840-6.
- [61] 潘根兴. 中国干旱性地区土壤发生性碳酸盐及其在陆地系统碳转移上的意义[J]. 南京农业大学学报, 1999, **22**(1): 51–57. PAN Genxing. Pedogenic carbonates in aridic soils of China and the significance in terrestrial carbon transfer[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1999, **22**(1): 51–57. DOI: 10.7685/j.issn.1000-2030.1999.01.012.
- [62] 罗上华, 毛齐正, 马克明, 等. 北京城市绿地表层土壤碳氮分布特征[J]. 生态学报, 2014, **34**(20): 6011–6019. LUO Shanghua, MAO Qizheng, MA Keming, *et al.* Spatial distribution of soil carbon and nitrogen in urban greenspace of Beijing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(20): 6011–6019. DOI: 10.5846/stxb201301220132.
- [63] 胡庆芳, 张建云, 王银堂, 等. 城市化对降水影响的研究综述[J]. 水科学进展, 2018, **29**(1): 138–150. HU Qingfang, ZHANG Jianyun, WANG Yintang, *et al.* A review of urbanization impact on precipitation[J]. *Advances in Water Science*, 2018, **29**(1): 138–150. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2018.01.016.
- [64] KOESER A, HAUER R, NORRIS K, *et al.* Factors influencing long-term street tree survival in Milwaukee, WI, USA[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2013, **12**(4): 562–568. DOI: 10.1016/j.ufug.2013.05.006.
- [65] LI Xianxiang, KOH T Y, PANDA J, *et al.* Impact of urbanization patterns on the local climate of a tropical city, Singapore: an ensemble study[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, **121**(9): 4386–4403. DOI: 10.1002/2015JD024452.
- [66] LI Qinglan, CHEN Ji. Regional climate variations in South China related to global climate change and local urbanization[M]//ZHANG Changkuan, TANG Hongwu. *Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009: 60–65. DOI: 10.1007/978-3-540-89465-0.
- [67] ZHONG Shi, QIAN Yun, ZHAO Chun, *et al.* Urbanization-induced urban heat island and aerosol effects on climate extremes in the Yangtze River Delta region of China[J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2017, **17**(8): 5439–5457. DOI: 10.5194/acp-17-5439-2017.
- [68] 杨茗, 阿术金伍, 冯鹏, 等. 城市化对乐山市土壤持水能力的影响[J]. 南方农业, 2025, **19**(1): 62–66. YANG Ming, Ashujinwu, FENG Peng, *et al.* The impact of urbanization on the water retention capacity of soils in Leshan City[J]. *South China Agriculture*, 2025, **19**(1): 62–66. DOI: 10.19415/j.cnki.1673-890x.2025.01.014.
- [69] SARVARI H. A survey of relationship between urbanization and climate change for major cities in Iran[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019, **12**(4): 131. DOI: 10.1007/s12517-019-4313-4.

- [70] 魏宗强. 城市封闭土壤有机碳变化及其影响因素[D]. 南京: 南京大学, 2013. WEI Zongqiang. *Urban Soil Organic Carbon Changes under Impervious Surfaces and the Influencing Factors*[D]. Nanjing: Nanjing University, 2013.
- [71] 卢瑛, 龚子同, 张甘霖. 南京城市土壤的特性及其分类的初步研究[J]. 土壤, 2001, **33**(1): 47–51. LU Ying, GONG Zitong, ZHANG Ganlin. Preliminary study on characteristics and classification of urban soil in Nanjing[J]. *Soils*, 2001, **33**(1): 47–51. DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2001.01.010.
- [72] 李小涵, 李富翠, 刘金山, 等. 长期施氮引起的黄土高原旱地土壤不同形态碳变化[J]. 中国农业科学, 2014, **47**(14): 2795–2803. LI Xiaohan, LI Fucui, LIU Jinshan, *et al.* Changes of different carbon fractions caused by long-term N fertilization in dryland soil of the Loess Plateau[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, **47**(14): 2795–2803. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2014.14.010.
- [73] 武慧君, 姚有如, 苗雨青, 等. 芜湖市城市森林土壤理化性质及碳库研究[J]. 土壤通报, 2018, **49**(5): 1015–1023. WU Huijun, YAO Youru, MIAO Yuqing, *et al.* Soil carbon pool and physic-chemical properties in urban forest of Wuhu[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, **49**(5): 1015–1023. DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2018.05.02.
- [74] 王丽娜, 张玉龙, 范庆锋, 等. 淋洗状态下保护地土壤 pH 与盐分含量及其组成关系的研究[J]. 节水灌溉, 2009(6): 8–11, 15. WANG Li'na, ZHANG Yulong, FAN Qingfeng, *et al.* Study on relationship between pH value of protected field soil and its salinity content and composition under leach condition[J]. *Water Saving Irrigation*, 2009(6): 8–11, 15. DOI: 10.3969/j.issn.1007-4929.2009.06.003.
- [75] 颜安, 王泽, 蒋平安, 等. 土壤盐分对干旱区盐渍土壤碳垂直分布的影响[J]. 干旱区研究, 2017, **34**(4): 770–774. YAN An, WANG Ze, JIANG Ping'an, *et al.* Effects of soil salinity on vertical distribution of soil carbon in saline soil in arid area[J]. *Arid Zone Research*, 2017, **34**(4): 770–774. DOI: 10.13866/j.azr.2017.04.08.
- [76] 雒琼, 王玉刚, 邓彩云, 等. 不同农业土地利用年限干旱区土壤剖面碳存储动态变化[J]. 农业工程学报, 2017, **33**(19): 287–294. LUO Qiong, WANG Yugang, DENG Caiyun, *et al.* Dynamics of soil carbon storage under different land use years in arid agriculture[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, **33**(19): 287–294. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.19.037.
- [77] FROUZ J. Effects of soil macro- and mesofauna on litter decomposition and soil organic matter stabilization[J]. *Geoderma*, 2018, **332**: 161–172. DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.08.039.
- [78] ANDRIUZZI W S, PULLEMAN M M, SCHMIDT O, *et al.* Anecic earthworms (*Lumbricus terrestris*) alleviate negative effects of extreme rainfall events on soil and plants in field mesocosms[J]. *Plant and Soil*, 2015, **397**(1): 103–113. DOI: 10.1007/s11104-015-2604-4.
- [79] BACH E M, RAMIREZ K S, FRASER T D, *et al.* Soil biodiversity integrates solutions for a sustainable future[J]. *Sustainability*, 2020, **12**(7): 2662. DOI: 10.3390/su12072662.
- [80] KURAMAE E E, YERGEAU E, WONG L C, *et al.* Soil characteristics more strongly influence soil bacterial communities than land-use type[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2012, **79**(1): 12–24. DOI: 10.1111/j.1574-6941.2011.01192.x.
- [81] XU Huijuan, LI Shun, SU Jianqiang, *et al.* Does urbanization shape bacterial community composition in urban park soils? A case study in 16 representative Chinese cities based on the pyrosequencing method[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2014, **87**(1): 182–192. DOI: 10.1111/1574-6941.12215.
- [82] WHITEHEAD J, ROY J, HEMPEL S, *et al.* Soil microbial communities shift along an urban gradient in Berlin, Germany[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, **13**: 972052. DOI: 10.3389/fmicb.2022.972052.
- [83] 张涛, 李永夫, 姜培坤, 等. 土地利用变化影响土壤碳库特征与土壤呼吸研究综述[J]. 浙江农林大学学报, 2013, **30**(3): 428–437. ZHANG Tao, LI Yongfu, JIANG Peikun, *et al.* Research progresses in the effect of land-use change on soil carbon pools and soil respiration[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2013, **30**(3): 428–437. DOI: 10.11833/j.issn.2095-0756.2013.03.021.