

城市绿地土壤质量研究现状及趋势文献计量分析

史南君¹,吕亚辉^{2,3*},艾程¹,寿晓毅¹,娄凯¹,李冠军^{4,5}

(1. 宁波市园林绿化中心,浙江 宁波 315211;2. 广东省科学院生态环境与土壤研究所/广东省农业环境综合治理重点实验室,广东 广州 510650;
3. 华南土壤污染控制与修复国家地方联合工程研究中心,广东 广州 510650;4. 北京林业大学生态与自然保护学院,北京 100083;
5. 宁波大学植物病毒学研究所/省部共建农产品质量安全危害因子与风险防控国家重点实验室,浙江 宁波 315211)

摘要:该文检索了 web of science 核心数据库 1993 年至 2021 年关于城市绿地土壤质量相关的研究论文 233 篇,运用 CiteSpace 和 VOSviewer 软件对研究文献的逐年发表数量、学科分布、核心作者、研究机构与国家地区进行了可视化分析,绘制可视化图谱。结果显示:1993 年至 2021 年城市绿地土壤质量研究的发文数量不断增加,中国总发文量占世界第一,但研究创新性仍需进一步加强;核心作者组内联系紧密,中国科学院是发文数量最多的研究机构。城市绿地土壤质量研究已经形成了多元化的研究视角,涉及生态环境学、城市研究、植物科学、林业、工程、水资源、农业等 38 个学科,归为 5 个主题聚类,主题研究的各个聚类间存在交叉重叠。城市绿地土壤质量研究目前处于快速发展阶段,研究热点集中在绿地类型、生物多样性、重金属污染、养分元素循环等。城市绿地土壤质量的未来研究建议从绿地土壤质量诊断与评估、绿地土壤减障提质提升技术和城市绿地土壤质量提升综合模式构建 3 方面开展,以保障城市人居环境健康。

关键词:城市绿地;土壤质量;文献计量;可视化;分析

中图分类号:TU 985.12;X825;X833;Z68;Z88 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1001-7380.2023.01.008

Bibliometric analysis of hot spots and trends of research on soil quality of urban green space

Shi Nanjun¹, Lyu Yahui^{2,3*}, Ai Cheng¹, Shou Xiaoyi¹, Lou Kai¹, Li Guanjun^{4,5}

(1. Ningbo Landscaping Center, Ningbo 3152112, China;
2. Guangdong Key Laboratory of Integrated Agro-environmental Pollution Control and Management, Institute of Eco-environmental and Soil Sciences, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China;
3. National-Regional Joint Engineering Research Center for Soil Pollution Control and Remediation in South China, Guangzhou 510650, China; 4. School of Ecology and Nature Reserves, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
5. State Key Laboratory for Managing Biotic and Chemical Threats to the Quality and Safety of Agro-products, Institute of Plant Virology, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: To reveal comprehensively and scientifically the research status and development trend in the field of urban green space soil quality, and provide reliable basis for the future research. CiteSpace and VOSviewer visualization and quantitative method were used to analyze the relative published papers collected from Web of Science (WoS) core collection of science citation index expanded database. The number of papers, subjects distribution, core authors and core countries, keywords were further analyzed, and the hotspots discussed as well. The results showed the number of papers has increased steadily

收稿日期:2022-11-06;修回日期:2022-11-30

基金项目:宁波市园林中心创新项目“宁波市城市绿地土壤质量调查评估研究项目”(DRZB-2022-003);宁波市重大科技任务攻关“宁波市陆地生态系统碳储量、周转通量及情景预测”(2022Z159)

作者简介:史南君(1972-),男,浙江嵊县人,高级工程师,大学本科毕业。主要研究方向为城市园林研究。E-mail:516910941@qq.com; Tel:13605889925

* **通信作者:**吕亚辉(1989-),男,山西吕梁人,工程师,硕士。主要研究方向为城市土壤学。E-mail:lyyahui@163.com; Tel:15960171626

since 1993, China had the largest number of publications in the world, but the innovation still needed to be improved, the core authors were closely connected within the group, and as the research institute, the Chinese Academy of Sciences opened the largest number of papers. The relative study involved 38 subjects, such as environmental sciences& ecology, urban studies, plant sciences, forestry, engineering, water resources, agriculture, which could be classified into 5 cluster, overlapping among the main studies. At present, the research in this respective was at a rapid development stage, focusing on greenbelt type, biodiversity, heavy metal pollution, nutrient cycling and other research contents. In the future, the diagnosis and assessment of green soil quality, the technology of green soil barrier reduction and quality improvement, and constructing a comprehensive model for improvement, should be put stress on in order to ensure the health of urban living environment.

Key words: Urban green space; Soil quality; Bibliometrics; Visualization; Analysis

城市绿地是指以自然植被和人为植被为主要存在形态的城市用地,主要包括公园绿地、街道绿地、附属绿地和住宅绿地等多种类型。绿地土壤是典型的人为土壤,人类活动是其形成和发育的关键驱动因素,普遍存在着营养贫瘠、pH 高、通气性差、污染严重等问题^[1],与自然土壤的物理、化学和生物性质及养分循环过程呈现不同特征^[2-3]。

近年来,城市绿地土壤研究领域十分活跃,研究形式和内容多样化,为城市绿地土壤质量深入研究提供了坚实的理论基础。研究表明,绿地类型可以改变土壤理化性质、有机残留物分解、污染物降解和微生物群落结构,揭示了绿地类型在改良城市土壤环境、改善城市土壤质量及修复城市生态系统中起到重要作用^[4-5],同时,土壤质量评价研究也在众多学者的推动下得到进一步完善^[6]。此外,Gong 等^[7]学者研究表明,城市绿地可以抵消人为排放到大气中的 CO₂,绿地总量显著影响其固碳能力,对缓解城市热岛效应及全球气候变暖起着重要作用。随着城市绿地研究的持续深入,其文献数量不断增加,形成了互相交织的复杂网络系统。

为厘清城市绿地土壤质量研究的发展历史、研究现状和研究热点的演进趋势,以及规避传统阅读综述过程中主观因素的局限和影响,本研究采样文献计量方法,从科研产出视角对其综合分析。文献计量学是一种基于数学和统计学的定量分析方法,通过对前人研究的追溯,了解其演变特征和知识结构,预测不同学科领域的发展趋势,该结果对研究人员评估学科研究热点和未来发展方向具有指导意义,并且常用来评估某一领域内研究成果的相对重要程度^[8]。CiteSpace 和 VOSviewer 软件是一款应用广泛的科学文献分析软件,它将某研究领域的主要方向、热点和前言以可视化的方式呈现,其可视化图形结果被称为科学知识图谱,已被广泛应用在

计算机科学、生物医药、金融统计以及生态环境等领域的文献分析过程中^[9-10]。因此,本研究以 1993 年至 2021 年的 Web of Science 核心数据库为文献源,对城市绿地土壤质量研究领域的相关文献进行计量分析,提炼相关文献并绘制知识图谱,结合引文可视化工具,采用合作网络分析、关键词共现分析等,绘制知识图谱进行直观清晰的展示,以期全方位地探究城市绿地土壤质量知识领域的研究现状、变化规律和动态演进趋势,为学科发展和未来研究拓展提供参考和依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

本文以 Web of Science 核心合集数据库,文献检索的主题词设置为 TS = (a) “urban green space” OR “urban green land” OR “urban greenbelt” OR “urban green spaces” OR “city green land” OR “urban green lands” OR “urban green area” OR “city greenbelt” 和 TS = (b) “soil quality” OR “soil quantity” OR “soil properties” OR “quality and carrying capacity of soil” OR “soil fertility quality” OR “soil’ s quality” OR “soil quality indicators” OR “soil health soil organic health” OR “soil”,对全部年份、文献类型为 article 以及语种为英文的文献进行检索,并对检索结果去重、整理、删除不相关条目,最终获得英文文献 233 篇。将筛选后的文献以“Refworks”的格式下载保存,作为分析数据样本。

1.2 研究方法

本研究采用科学知识图谱和文献计量学的方法,利用 CiteSpace 和 VOSviewer 软件实现文献分析和制图。CiteSpace 是陈超美博士开发以用来挖掘和可视科研文献数据的应用软件,本文借助信息可视化软件 CiteSpace (V. 5. 7. R2) 进行分析,在软件

中分别选择 Author (作者)、Institution (机构)、Keyword (关键词) 等选项,使用关键路径算法对城市绿地研究进行聚类分析。节点强度默认 Cosine (余弦函数) 和 Withinslices (时间切片内) 等进行图谱分析。使用 Excel 和 Origin 2021 对发文量、机构以及关键词等进行数据的统计分析与作图。

2 结果与分析

2.1 发文量

论文发文量年度统计分析能够揭示当前该领域的发展状况,预测其研究前景与发展趋势^[11]。根据检索分析在 1993 年出现城市绿地土壤质量研究领域的第 1 篇文献,为该领域研究开始的起点,图 1 展现了不同年限发文数量总体分布情况,从文献总量来看,年际间发文量虽有小的波动,但总体呈递增趋势,说明研究城市绿地土壤质量的学者越来越多,此研究领域越来越受到研究者的重视。在城市绿地土壤质量研究领域中中共发文 233 篇,据发文量的多少将城市土壤质量研究发展分为 3 个时期:1993—2008 年为研究的起始时期,这一研究阶段处于研究的开始,从事该领域研究的学者较少,发文量最低($n < 5$ 篇);2009—2017 年为研究波动期,这一时期年度发文量较上一时期增加,许多学者开始关注这一领域,由于缺乏持续研究,造成该时期发文量($5 < n < 15$)虽有较大增长,但存在一定的波动;2018 年至 2021 年,为文章的增长期,且呈现激增的趋势,年发文量均在 22 篇以上,其中 2021 年发表论文 46 篇,占总发文的 19.74%,被引频次高达 1 002 次。总体看来,关于城市绿地土壤质量的研究总量

较少,但已有的学术成果推动了学者对城市绿地土壤质量的研究工作,使该领域获得更多学者关注。

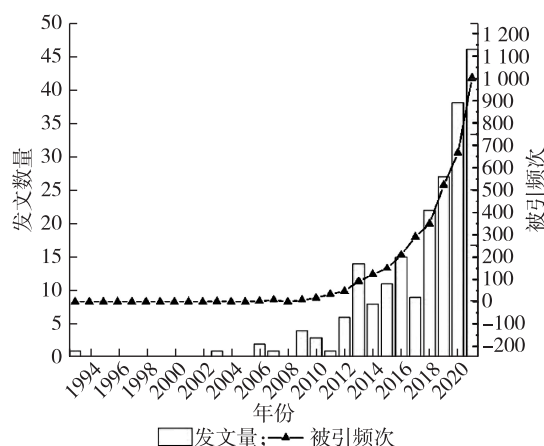


图1 城市绿地土壤质量/健康的年度发文数量及被引频次

2.2 国家及国际合作

通过对研究波动期(200—2017 年)和增长期(2018—2021 年)分析得到,中国是该时期总发文量第 1 的国家,发文量为 75 篇,占总发文量的 32.19%,总被引频次为 815 次(见图 2a),说明中国学者参与该领域的研究较多,且受到国内外同行的关注和认可。美国总发文数量位于第 2 位,但总被引频次和平均被引频次皆为最高(见图 2b),说明美国论文的创新性及影响力最高。美国、德国、澳大利亚和意大利年均发文量呈现波动状态,中国在 2009—2017 年在城市绿地土壤质量在国际期刊发文较少,自 2018 年起发文量快速增长,2019 年起中国年均发文量稳居第 1。

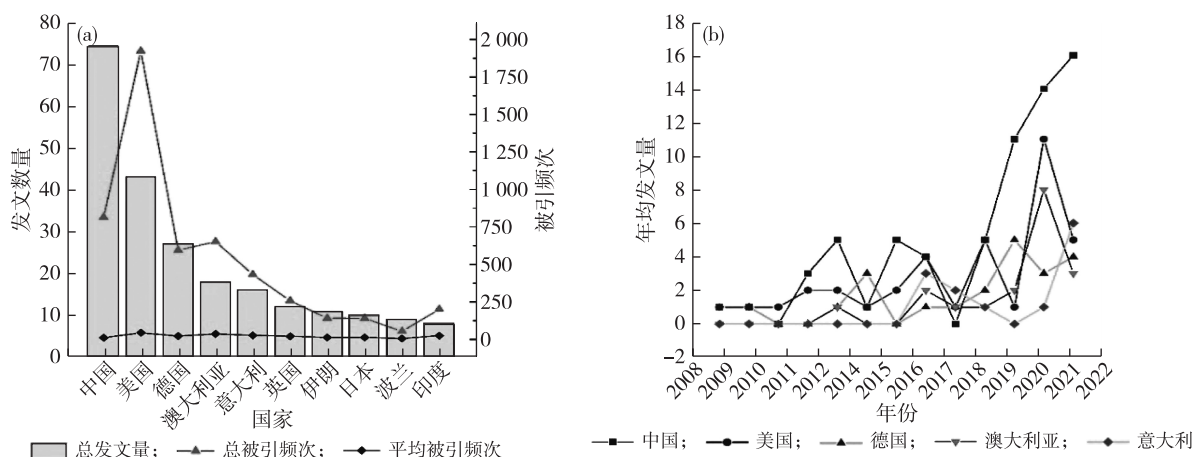


图2 2009—2021 年,排名前 10 的国家间发文数量与被引频次(a)和排名前 5 的国家年均发文量动态变化(b) 比较

利用 CiteSpace 对世界各国关于城市绿地土壤质量研究领域发文国家间的合作网络关系、发文梳理及其文章影响力进行了可视化分析,发文国家间的合作联系由连线表示,文献发文量由节点大小表示,括号内的数字表示中介中心性。中介中心性是衡量节点在网络中重要性的指标,表示对应国家在其研究领域的国际影响力。从图 3 可以看出,美国、德国和澳大利亚联系强度高,与其他国家合作紧密。从中介中心看,澳大利亚和伊朗在城市绿地土壤质量研究领域的中介中心性最大(0.23),在研究中起着关键作用,对此研究领域的影响较大。中国虽然发文量最多,但其中介中心值较小,表明其成果影响力较小,研究创新性不足(见图 3)。

2.3 发文机构

绘制机构合作图谱的目的是更好地理解城市绿地土壤学科发展的研究机构之间的关系,为评价机构的学术影响力提供新的视角^[12]。利用 VOSviewer 对城市绿地土壤质量研究领域各发文机构之间的合作关系进行网络化分析,研究机构发文量由圆圈的大小

表示,各机构之间的联系由连线表示。对发文研究机构间的合作进行网络分析可知,中国科学院的总联系强度参数(TSL)最高(51),其他研究机构合作密切,合作单位主要有上海市园林科学规划研究院、北京师范大学、北京林业大学等(见图 4)。在科研机构的国际合作中,阿德莱德大学和河南农业大学、中国科学院和柏林工业大学等合作紧密。

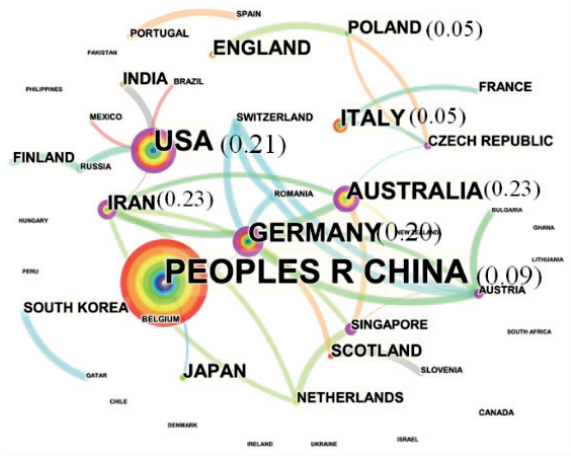


图 3 城市绿地土壤质量研究的国家间合作

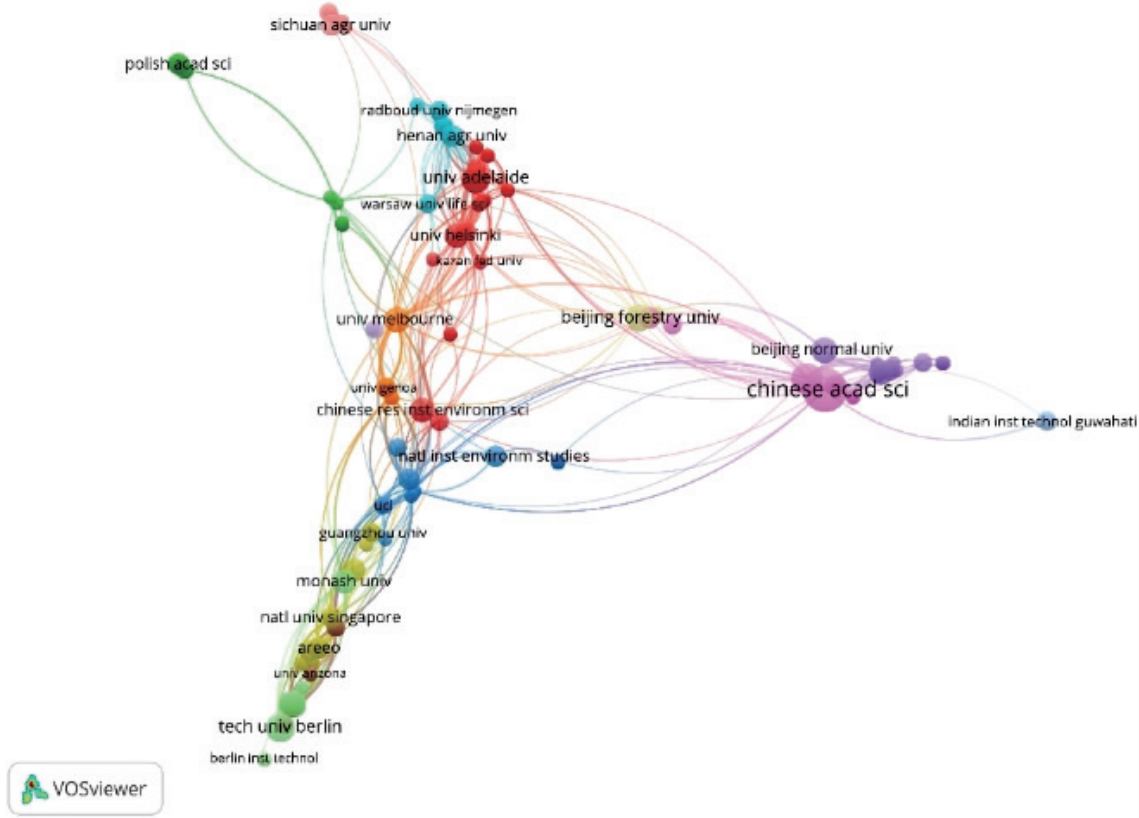


图 4 城市绿地土壤质量研究的机构间合作关系

利用 VOSviewer 统计发现,研究城市绿地土壤质量的机构共 386 个,合作发表文章 2 篇及以上($n \geq 2$)的机构共 75 个,占发文机构总数的 20.38%,说明机构间合作需要进一步加强。从表 1 可以看出,发文量排名前 5 的研究机构依次是中国科学院、柏林工业大学、阿德莱德大学、北京林业大学、北京师范大学、美国农业部、柏林洪堡大学,其中中国科学院的发文量最多,说明中国在此研究领域比较活跃。中国科学院的主要研究内容是不同类型城市绿地对地表水循环的影响和绿地土壤重金属污染

治理^[13],明确了城市绿地具有调节地表径流和土壤修复的作用^[14-15];美国农业部发文数量虽排名第 5,但总被引和平均被引频次均最高,分别为 578 和 115.16,其研究内容主要为量化城市绿色基础设施中的生物地球化学过程^[16],以及城市绿地植物、微生物响应极端气候的适应机制^[17-18]。因此,城市绿地土壤质量研究的各机构应加强合作,寻求资源优势互补和知识融合的途径,在城市绿地土壤质量研究过程中不断发展并寻求新的创新点。

表 1 发文数量前 5 的科研机构及其信息

| 机构 | 总发文量 | 总被引频次 | 平均被引频次 | H 指数 | 所属国家 |
|---|------|-------|--------|------|-----------|
| Chinese Academy of Sciences | 22 | 340 | 15.45 | 10 | China |
| Technical University of Berlin | 8 | 89 | 11.13 | 5 | Germany |
| University of Adelaide | 7 | 164 | 23.57 | 7 | Australia |
| Beijing Forestry University | 6 | 42 | 7 | 4 | China |
| Beijing Normal University | 5 | 105 | 21 | 5 | China |
| United States Department of Agriculture | 5 | 578 | 115.16 | 3 | USA |
| Humboldt University of Berlin | 5 | 73 | 14.6 | 3 | Germany |

2.4 作者及其合作

如表 2 所示,通过 VOSviewer 软件分析及数据处理显示共有 944 名学者参与了城市绿地土壤质量这一领域的研究,发文数量前 5 的作者依次为阿德莱德大学的 Breed M F 和 Weinstein P,其发文量分

别为 6 篇和 5 篇,总被引次数分别为 156 和 148;其次是 Chen Weiping 和 Nouri H,其发文量各是 4 篇,总被引次数分别为 116 和 134,Mills J G、Li Jing 和 Hinkelmann R,其发文量均是 3 篇,总被引次数分别为 125,14 和 6。

表 2 发文数量在前 5 的作者及其他信息

| 作者 | 所属机构 | 所属国家 | 发文量 | 总被引频次 | 平均被引频次 | H 指数 |
|---------------------|--------------------------------|-----------|-----|-------|--------|------|
| Breed Martin F | University of Adelaide | Australia | 6 | 156 | 26 | 6 |
| Weinstein Philip | University of Adelaide | Australia | 5 | 148 | 29.6 | 5 |
| Chen Weiping | Chinese Academy of Sciences | China | 4 | 116 | 29 | 4 |
| Nouri Hamideh | University of South Australia, | Australia | 4 | 134 | 33.5 | 4 |
| Mills Jacob G | University of Adelaide | Australia | 3 | 125 | 41.67 | 3 |
| Li Jing | Beijing Forestry Univ | China | 3 | 14 | 4.67 | 3 |
| Hinkelmann Reinhard | Tech Univ Berlin | Germany | 3 | 6 | 2 | 1 |

通过检索研究方向的核心作者可以获得较为全面的文献情报。核心作者是推动学术创新与学科发展的重要力量,通过对其发文量进行分析,可以把握学科的研究现状及发展方向。普莱斯理论的相关公式为 $N = 0.749(N_{\max})^{1/2}$,其中 N_{\max} 为发文量最多的作者, N 为核心作者最少需要的发文量。在此次分析中,经计算在此领域发表 2 篇及以上($N = 1.83$)文章的研究者可以被认为是核心作者。经 VOSviewer 分析,本研究领域的核心作者共有 100 位。将发文作者间的合作网络进行了可视化处理(如图 5)。图中圆圈大小反映发文数量,距离远近表示合作关系的紧密程度。从图 5 可以看出,Breed

M F 与 Weinstein P、Weyrich L S、Mills J G 等作者合作密切,其合作方向是城市绿地影响人类与环境微生物的互作关系^[19],明确增加城市绿地可以提高城市土壤微生物群的多样性^[20-21]。Chen Weiping 与 Jiao Wentao、Ouyang Zhiyun 等作者有较多合作,其合作的研究方向是城市绿地中的重金属污染,如多环芳烃(PAHs)在土壤中的积累^[15],评估再生水灌溉对绿地土壤质量的长期影响^[22]。Nouri H 与 Borujeni S C、Alaghmand S 等作者合作较为紧密,其合作的方向是利用近端传感和遥感方法监测和预测土壤盐分^[23],遥感能够估算城市绿色空间的植被蒸散中的价值^[24]。Li Jing 与 Li Suyun、Sun

Xiangyang 等作者存在合作,其合作研究方向主要是城市绿地土壤有机质、全氮、土壤水分和 pH 值对细菌群落结构的影响。综上所述,当今学者重点关注城市绿地与人类健康关系,绿地类型的生态服务功能及对土壤理化性质、重金属污染和微生物群落结构和城市水循环的影响^[25-26]。

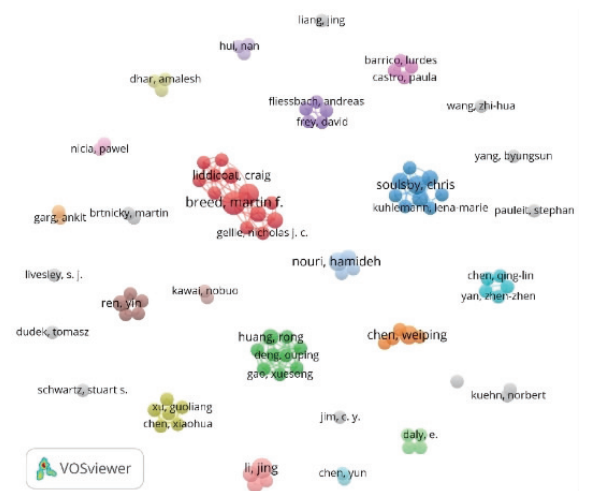


图 5 城市绿地土壤质量研究的作者间合作关系

2.5 研究领域

城市绿地土壤质量研究涉及 38 个学科。从表 3 可以看出,论文发表量前 10 的学科分别是环境科学(Environmental Sciences& Ecology)、城市研究(Urban Studies)、植物科学(Plant Sciences)、林业(Forestry)、工程(Engineering)、水资源(Water Resources)、农业(Agriculture)、其他主题科学技术(Science Technology Other Topics)、地质学(Geology)、公共环境职业健康(Public Environmental Occupational Health)、生物多样性保护(Biodiversity Conservation)。其中生态环境科学领域发文数量第 1, 占有所有领域中的 65.79%;城市研究领域发文量第 2, 占比 12.72%,这 2 个领域内容具有较强的实用性,因此未来这 2 个领域依然是城市绿地土壤质量研究的重要学科领域。

2.6 热点与前沿

关键词是论文研究内容的高度概括,是用于表达文献核心内容的描述性词语^[27],基于关键词共现分析,可以充分了解某一领域内不同研究热点分布和趋势分析,关键词出现频次是热点变化途径识别的关键要素^[12]。运用 VOS viewer 软件对城市绿地土壤质量研究的关键词进行分析,得到英文关键词

共现图谱(如图 6),图中 1 个节点(圆)代表 1 个关键词,节点大小可以反映关键词的频次和领域关注度。结果如图 6 所示,对城市绿地土壤质量研究的关键词进行分析和归纳发现,关键词中出现频次最高的为生态系统服务(ecosystem services)(37 次)。根据计算,出现频次大于 5(N=4.56)的核心词汇共有 86 个。

表 3 城市绿地土壤质量研究排名前 10 的学科类别

| 序号 | 学科类别 | 中心性 | 记录数 |
|----|--|------|-----|
| 1 | Environmental Sciences& Ecology | 0.34 | 150 |
| 2 | Urban Studies | 0.48 | 29 |
| 3 | Plant Sciences | 0 | 27 |
| 4 | Forestry | 0.4 | 26 |
| 5 | Engineering | 0.55 | 25 |
| 5 | Water Resources | 0.03 | 25 |
| 6 | Agriculture | 0.2 | 23 |
| 7 | Science Technology Other Topics | 0.04 | 21 |
| 8 | Geology | 0.24 | 16 |
| 9 | Public Environmental Occupational Health | 0.04 | 13 |
| 10 | Biodiversity Conservation | 0.21 | 12 |

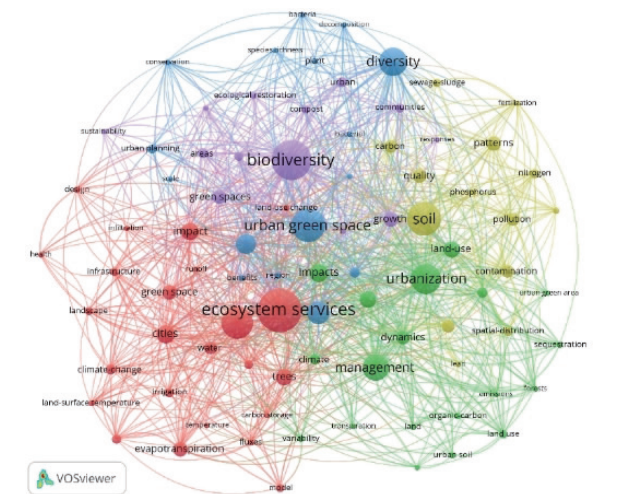


图 6 城市绿地土壤质量研究的关键词网络图

关键词聚类分析是在共现分析的基础上,利用聚类的统计学方法,把共现网络关系简化为数目相对较少聚类过程^[28]。从聚类分析看,城市绿地土壤质量的研究可以大致归纳为 5 类,红色聚类组的核心词汇是生态系统服务(ecosystem services)、植被(vegetation)、蒸散(evapotranspiration)、景观(landscape)、影响(impact)等。该聚类组内的研究内容是以城市绿地不同类型植被、蒸散及景观为研究内容,来评价城市绿地生态系统服务功能,土壤碳储存、水质和径流调节是当前评估城市绿地生态系统

服务的土壤指标^[29],同时城市复杂的空间异质性和土地利用历史(土地利用遗留效应)也是现在研究的一个重要方向。

绿色聚类组的核心词汇是城市化(urbanization)、管理(management)、森林(forest)、水(water)、土地利用(land use)以及动态特征(dynamics)等,该聚类组内的研究内容是城市化进程下土地利用方式、森林和水资源等动态变化。全球气候变化(长时间的温暖和干旱时期)严重影响着城市水资源储量与分布,城市绿地植被遭受干旱胁迫风险增加^[30]。有研究利用同位素示踪剂技术,定量分析了不同类型城市绿地(草地、灌木和乔木)生态水文过程,森林的水分损失略高于草地,草地土壤蒸发损失率较高,但森林较高的截留和蒸腾作用导致土壤水周转速度变慢,灌木蒸发量损失低,对长期干旱的抵抗力最强^[31]。与大面积集群分布的绿地相比,分散的绿地分布和径流下游设置绿地在减少地表径流方面更有效^[32]。

蓝色聚类组的核心词汇是城市绿地(urban green space)、城市规划(urban planning)、多样性(diversity)、物种丰富度(species richness)、保护(conservation)等,该聚类组内的研究以城市绿地规划、物种丰富度和生物多样性保护等为主要内容。研究表明,家庭花园作为城市绿地的重要组成部分,对城市绿地生态系统服务具有重大贡献^[33],城市绿地面积增加扩大了生物的生存空间,生物多样性水平得到提高,增加绿地总量是保护城市生物多样性的的重要途径^[34]。

黄色聚类组的核心词汇是土壤(soil)、污染(pollution)、碳(carbon)、质量(quality)、磷(phosphorus)、氮(nitrogen)、施肥(fertilization)、污水-污泥(sewage sludge)等,该聚类组内的研究内容是城市绿地土壤污染和生物化学元素地球循环。有研究指出,城市公园中的植物-土壤相互作用与天然林中的植物-土壤相互作用相似,土壤生物化学元素含量受功能植物群、城市公园年龄和土壤深度影响,常绿树下的土壤 pH 值最低,有机质、总碳和总氮通常最高。土壤 pH 值保持不变,有机质、总碳和总氮的浓度随深度加大而下降^[35]。公园绿地的重金属(Cu, Zn, Pb, Cd, As)积累大于道路绿地,多环芳烃(PAHs)积累低于道路绿地,上述结果的产生是由有机材料的使用、交通和工业排放所造成^[36]。城市废水灌溉城市绿地后,棕榈树表层土壤中氮、

镁、锌和锰的浓度以及废水灌溉草表层土壤中锰、铜和锰的浓度均具有较高的富集,土壤污染指数调查结果表明,研究区因污水灌溉造成的土壤污染状况为低至中等^[37]。另外,也有研究证实土壤微生物在控制生态系统功能和提供生态系统服务方面发挥着关键作用^[38]。

紫色聚类组的核心词汇是生物多样性(biodiversity)、生态修复(ecological restoration)、生长(growth)、可持续(sustainability)、城市生态(urban ecology)、挑战(challenges),该组聚类内研究城市绿地生物多样性、生态修复和生物生长与城市生态可持续发展之间的关系,寻求缓解全球气候变化带来的城市绿地生态环境问题的途径。研究表明,城市绿地与空气微生物存在相互关系,土壤厚度、土壤类型、坡度和种群密度以及植物物种对潜在细菌和真菌病原体的组成和丰度有巨大贡献,植物物种具有降低空气传播病原体的特性^[39-40]。来自城市绿地的堆肥可生物降解污染物有助于植物生长和抑制植物病原真菌,可以用作绿地土壤改良剂,进而改善整体环境质量^[41]。

研究热点变化图是从时间序列上展现研究热点变化的视图,用于表达主题词的演化过程并了解领域的发展现状和趋势,是动态的、发展的、科学的^[42]。图 7 展示了城市绿地土壤质量研究的变化趋势及相互之间的影响。在研究热点变化图中横轴为时间,十字架图形代表此关键词在此年份新出现,十字架图形依据关键词首次出现的时间放置在相应的时区内。十字架图形是这一阶段的研究热点,图中十字架图形越大表示其代表的关键词出现的频次越高,关注此内容的研究者也越多;另外通过各时区十字架图形的连线关系,可以看出不同时间段研究的演变关系。由图 7 可以看出,早期城市绿地土壤质量的研究重点主要集中在城市化(urbanization)、土地利用(land use)、重金属污染(heavy metal)等方面,近年来逐渐偏向生态系统服务(ecosystem service)、碳(carbon)、微生物群落结构(microbial community)、蒸散(evapotranspiration)、生态修复(ecological restoration)等研究方向,涉及到城市规划、土壤、植物和微生物等多个研究方向。总之,研究内容从城市化下绿地管理方式与土壤肥力关系研究,逐渐转变为绿地生物化学循环过程、生态系统服务功能及对全球气候变化的响应与适应机制,与关键词热点一致。

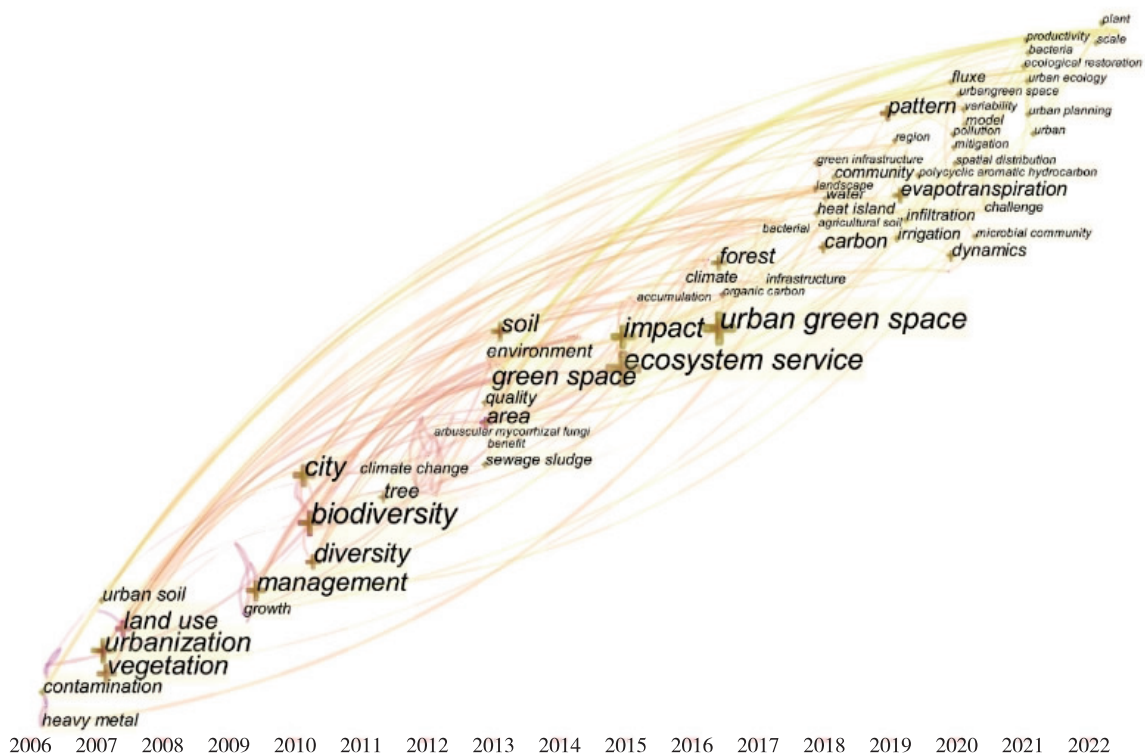


图 7 研究热点在 2006—2022 年间的变化

3 讨论与结论

关于城市绿地土壤质量的研究与其他研究方向相比关注度较低,主要表现在全球发文量较少,但近年来,城市绿地土壤质量这一领域研究发文量逐渐增多。自 1993 年起关于城市绿地土壤质量研究经历了起始期(1993—2008)、波动期(2009—2017)和增长期(2018—2021),前期发展较慢、后期总体呈现上升态势,城市绿地土壤质量越来越受到学者的关注,发文量逐年增加。利用文献计量法对城市绿地土壤质量的研究进行分析,结果表明虽然中国发文量较多但发文的原创性和影响力有待提升,与其他国家相比,中国在城市绿地土壤质量方面的研究在近 3 a 来迅速发展,尤其是在 2018 年以后年均发文量一直居于世界首位,且中国科学院是世界上发文数量第 1 的研究机构,远超其他的研究机构,原因是中国近几十年快速城市化建设产生了严重的环境问题,人口增长、工业发展等城市化进程对环境造成的影响可通过对城市绿地土壤质量的研究揭示,进而引起国内学者的重点关注,相对应的研究成果也随之增加。此外,本研究表明,美国在城市绿地土壤研究中文献被引率最高,“刚刚

够绿”的城市绿地策略,可以平衡城市绿地与公共健康、环境正义 3 者的关系^[43],证实了城市生物地球化学研究对于改善绿地设计和满足当地环境保护目标是非常必要的^[44]。美国是城市化水平高的发达国家,与其他国家或地区相比,城市绿地建设更为完善,特别是疫情背景下,使得该国学者更加注重绿地与人类健康的关系,并同时依托先进的实验设备进行城市生物化学循环过程研究。

对发文作者进行分析发现城市绿地质量研究领域的学者聚组内联系密切,聚组间联系较少。对研究领域进行分析可以看出城市绿地土壤质量研究涉及的学科较多,包括生态环境学、城市研究、植物科学、林业等 38 个学科,表现出研究内容和形式多元化,有利于促进学科内容间的交叉融合,为产生新研究课题提供了大量的研究积累。目前学者在城市绿地土壤质量的研究呈现在多个方面,根据关键词可分为 5 个聚类,5 个聚类既相对独立又互有联系(见图 6),研究对象包括生态系统服务、城市绿地空间、城市化、土壤和生物多样性。其中,城市化进程下土地利用方式研究由重点关注土壤肥力转向生态系统功能服务评价^[29],研究主体以绿地植被为中心,同时兼顾近地面大气、土壤组分及其与

人类健康的关系,由土壤污染治理偏向量化地球化学元素循环过程、土壤微生物对全球气候变化的响应与适应机制^[30]。目前城市绿地土壤的研究在管理方式、植被类型和土壤污染等方面已有较多报道,但城市绿地土壤固碳机制的研究尚且较少,特别是在全球气候变化的背景下,绿地土壤碳输入与输出之间的关系,微生物在绿地植物碳库和土壤碳库周转过程中的作用机制等亟需进一步研究^[45]。

4 研究展望

综上所述,根据现有的热点与不足,城市绿地土壤研究的未来发展方向应聚焦于绿地土壤健康、绿地土壤增质技术、保障城市人居环境健康,建议开展以下3方面的研究(见图8):

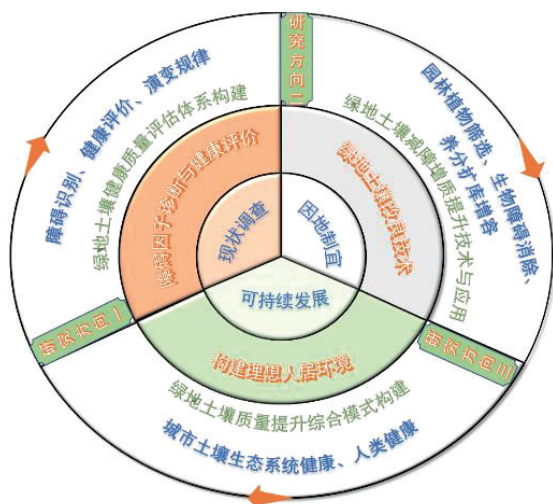


图8 城市绿地土壤健康与功能提升的未来研究方向与思路

(1)构建绿地土壤质量健康评估体系。城市绿地土壤显著区别于自然土壤,应充分了解城市绿地类型、土壤养分状况、污染物种类(微塑料、重金属、病原生物)及与人类健康的关系等情况,构建土壤健康评价指标体系,明确不同类型绿地土壤的主要障碍与风险因子;明确土壤健康的时空演变规律、关键制约因子与调控措施,构建城市绿地土壤环境质量健康评估指标体系。

(2)城市绿地土壤减障增质提升关键技术。针对城市绿地土壤质量退化、物理化学结构性稳定性差等问题,改进绿地管理办法和园林植物筛选,绿地土壤养分扩库扩容和养分活化技术,绿地土壤生物肥力定向培育技术等生物障碍消减关键技术;研发多功能绿地土壤结构改良剂、微生物功能菌剂、新型多功能调理剂等产品。

(3)城市绿地土壤质量提升综合模式构建。针对不同地区的气候、土壤、园林植物和管理方式等特点,集成具有区域特色的绿地土壤质量提升综合技术,构建障碍消减—土壤改良—绿色生态协同增效的“三位一体”综合增质提升技术模式,实现城市绿地土壤健康以及人居环境健康。

参考文献:

- [1] 骆玉珍,张维维,李雅颖,等.上海市公园绿地土壤肥力特征分析与综合评价[J].中国土壤与肥料, 2019(6): 86-93.
- [2] AMUNDSON R, BERHE A A, HOPMANS J W, et al. Soil and human security in the 21st century [J]. Science, 2015, 348 (6235): 647-647.
- [3] ZHAO F J. Soil and human health: Editorial [J]. European Journal of Soil Science, 2018, 69(1): 158-158.
- [4] BARDGETT R D, PUTTEN W. Belowground biodiversity and ecosystem functioning[J]. Nature, 2014, 515(7528): 505-511.
- [5] KIMPE C, MOREL J L. Urban Soil Management: A Growing Concern[J]. Soil Science, 2000, 165(1): 31-40.
- [6] TRESCH S, MORETTI M, BAYON R C L, et al. Urban soil quality assessment-a comprehensive case study dataset of urban garden soils[J]. Frontiers in Environmental Science, 2018, 6: 136.
- [7] GONG Y, LUO X. Experimental study on the carbon sequestration benefit in urban residential green space based on urban ecological carrying capacity[J]. Sustainability, 2022, 14: 7780.
- [8] 吴健,王敏,靳志辉,等.土壤环境中多环芳烃研究的回顾与展望-基于Web of Science大数据的文献计量分析[J].土壤学报, 2016, 53(5): 1085-1096.
- [9] 史海蛟,丁莉莉,杨珺涵,等.基于CiteSpace研究中医药治疗冠心病合并高血压可视化分析[J].辽宁中医药大学学报, 2022, 24(12): 63-67.
- [10] 吕俊杰. CiteSpace应用现状研究[J].现代信息科技, 2022, 6(7): 105-111.
- [11] 李贺,袁翠敏,李亚峰.基于文献计量的大数据研究综述[J].情报科学, 2014, 32(6): 8.
- [12] 陈悦,陈超美,刘则渊,等. CiteSpace知识图谱的方法论功能[J].科学学研究, 2015, 33(2): 242-253.
- [13] YAO L, CHENA L D, WEI W, et al. Potential reduction in urban runoff by green spaces in Beijing: A scenario analysis[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2015, 14(2): 300-308.
- [14] CHI P, OUYANG Z, WANG M, et al. Vegetative cover and PAHs accumulation in soils of urban green space[J]. Environmental Pollution, 2012, 161(1): 36-42.
- [15] REN W, GENG Y, MA Z, et al. Reconsidering brownfield redevelopment strategy in China's old industrial zone: a health risk assessment of heavy metal contamination[J]. Environmental Science & Pollution Research, 2015, 22(4): 2765-2775.
- [16] PATAKI D E, CARREIRO M M, CHERRIER J, et al. Coupling biogeochemical cycles in urban environments: ecosystem services, green solutions, and misconceptions[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2011, 9(1): 27-36.
- [17] PACE R, FINO F D, RAHMAN M A, et al. A single tree model

- to consistently simulate cooling, shading, and pollution uptake of urban trees[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2021, 65(2): 277-289.
- [18] HUANG Y, YESILONIS I, SZLAVECZ K. Soil microarthropod communities of urban green spaces in Baltimore, Maryland, USA [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2020, 53(1): 126676.
- [19] SELWAY C A, MILLS J G, WEINSTEIN P, et al. Transfer of environmental microbes to the skin and respiratory tract of humans after urban green space exposure[J]. *Environment International*, 2020, 145: 106084.
- [20] MILLS J G, BISSETT A, GELLIE N J C, et al. Revegetation of urban green space rewilds soil microbiotas with implications for human health and urban design[J]. *Restoration Ecology*, 2020, 28: 322-334.
- [21] BARUCH Z, LIDDICOAT C, LAWS M, et al. Characterising the soil fungal microbiome in metropolitan green spaces across a vegetation biodiversity gradient [J]. *Fungal Ecology*, 2020, 47: 100939.
- [22] LYU S, CHEN W. Soil quality assessment of urban green space under long-term reclaimed water irrigation[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2015, 23(5): 1-11.
- [23] HAMIDEH N, SATTAR C B, SINA A, et al. Soil salinity mapping of urban greenery using remote sensing and proximal sensing techniques; the case of veale gardens within the Adelaide Parklands[J]. *Sustainability*, 2018, 10(8): 2826.
- [24] NOURI H, NAGLER P, BORUJENI S C, et al. Effect of spatial resolution of satellite images on estimating the greenness and evapotranspiration of urban green spaces[J]. *Hydrological Processes*, 2020, 34(15): 3183-3199.
- [25] ZHANG J, LI S, SUN X, et al. Sustainability of urban soil management: analysis of soil physicochemical properties and bacterial community structure under different green space types[J]. *Sustainability*, 2019, 11(5): 1395.
- [26] LIN M, LI S Y, SUN X Y, et al. Heavy metal contamination in green space soils of Beijing, China[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica. Section B, Soil and Plant Science*, 2018, 68(4): 291-300.
- [27] YING D, CHOWDHURY G G, FOO S. Bibliometric cartography of information retrieval research by using co-word analysis[J]. *Information Processing & Management*, 2001, 37(6): 817-842.
- [28] 肖鹏飞, 吴德东. 全球植物修复研究文献计量分析[J]. *生态学报*, 2021, 41(21): 8685-8695.
- [29] ZITER C, TURNER M G. Current and historical land use influence soil-based ecosystem services in an urban landscape[J]. *Ecological Applications*, 2018, 28(3): 643-654.
- [30] MILINKOVI M, LALEVIC B, JOVICIC-PETROVIC J, et al. Biopotential of compost and compost products derived from horticultural waste-effect on plant growth and plant pathogens' suppression[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018, 121: 299-306.
- [31] KUHLEMAN L M, TETZLAFF D, SMITH A, et al. Using soil water isotopes to infer the influence of contrasting urban green space on ecohydrological partitioning[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2021, 25(2): 927-943.
- [32] YANG B, LEE D. Urban green space arrangement for an optimal landscape planning strategy for runoff reduction[J]. *Land*, 2021, 10(9): 897.
- [33] BAKER F, SMITH C, CAVAN G. A combined approach to classifying land surface cover of urban domestic gardens using citizen science data and high resolution image analysis[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(4): 537.
- [34] TRENTANOVI G, CAMPAGNARO T, KOWARIK I, et al. Integrating spontaneous urban woodlands into the green infrastructure: Unexploited opportunities for urban regeneration [J]. *Land Use Policy*, 2021, 102: 105221.
- [35] SETÄLÄ H M, GAIA F, ALLEN J A, et al. Vegetation type and age drive changes in soil properties, nitrogen, and carbon sequestration in urban parks under cold climate[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2016, 4: 93.
- [36] LIANG J, WU H B, WANG X X. Distribution characteristics and health risk assessment of heavy metals and PAHs in the soils of green spaces in Shanghai, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, 191(6): 345.
- [37] PARVANAK K, KHAMISABADI A. Evaluating contamination impact of wastewater irrigation to soils in Zahedan, Iran[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2020, 42: 1-12.
- [38] HUI N, JUMPPONEN A, FRANCINI G, et al. Soil microbial communities are shaped by vegetation type and park age in cities under cold climate [J]. *Environmental Microbiology*, 2017, 19(3): 1281-1295.
- [39] HU L, ZFWA C, XRYAB D, et al. Urban greenness and plant species are key factors in shaping air microbiomes and reducing airborne pathogens [J]. *Environment International*, 2021, 153: 106539-106539.
- [40] BARUCH Z, LIDDICOAT C, CANDO-DUMANCELA C, et al. Increased plant species richness associates with greater soil bacterial diversity in urban green spaces [J]. *Environmental Research*, 2021, 196: 110425.
- [41] ZHANG J, HUANG M, PETROPOULOS E, et al. Animal manure functions as soil amendment for urban green space in the loess plateau[J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2020, 18(3): 3861-3872.
- [42] 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.
- [43] WOLCH J R, BYRNE J, NEWELL J P. Urban green space, public health, and environmental justice: The challenge of making cities 'just green enough' [J]. *Landscape & Urban Planning*, 2014, 125: 234-244.
- [44] DIANE E P, MARGARET M C, JENNIFER C, et al. Coupling biogeochemical cycles in urban environments: ecosystem services, green solutions, and misconceptions[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, 9(1): 27-36.
- [45] VASENEV V, KUZYAKOV Y. Urban soils as hot spots of anthropogenic carbon accumulation: Review of stocks, mechanisms and driving factors[J]. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(6): 1607-1622.