

## 城市园林绿化土壤质量特征与监测指标体系构建

### Soil Quality Characteristics of Urban Landscaping and Construction of Monitoring Index System

张维维<sup>1,2</sup> 韩继刚<sup>1\*</sup> 张琪<sup>1</sup> 赵莺莺<sup>1</sup> 何山文<sup>1</sup> 张浪<sup>1\*</sup>  
ZHANG Weiwei<sup>1,2</sup> HAN Jigang<sup>1\*</sup> ZHANG Qi<sup>1</sup> ZHAO Yingying<sup>1</sup> HE Shanwen<sup>1</sup> ZHANG Lang<sup>1\*</sup>

(1.上海市园林科学规划研究院, 城市困难立地生态园林国家林业和草原局重点实验室, 国家林业和草原局城市困难立地绿化造林国家创新联盟, 上海城市困难立地绿化工程技术研究中心, 上海 200232; 2.东北大学资源与土木工程学院, 沈阳 110819)

(1. Shanghai Academy of Landscape Architecture Science and Planning, Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Ecological Landscaping of Challenging Urban Sites, National Innovation Alliance of National Forestry and Grassland Administration on Afforestation and Landscaping of Challenging Urban Sites, Shanghai Engineering Research Center of Landscaping on Challenging Urban Sites, Shanghai, China, 200232; 2. College of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning, China, 110819)

文章编号: 1000-0283(2022)08-0133-06

DOI: 10.12193/j.laing.2022.08.0133.016

中图分类号: TU986

文献标志码: A

收稿日期: 2021-11-25

修回日期: 2022-05-19

#### 摘要

城市化快速推进给园林绿化建设带来了一系列问题, 其中, 土壤质量问题已成为当今城市园林绿化可持续发展的关键制约因素之一。而关于城市园林绿化土壤质量评价指标体系的研究尚处于起步阶段, 特别是土壤生物学指标比较缺乏。从土壤质量的概念着手, 探讨了城市园林绿化土壤质量指标体系的构建依据, 构建了一套适用于城市园林绿化土壤质量监测的指标体系。结果表明, 城市园林绿化土壤质量监测应包括土壤肥力质量、环境质量、健康质量三部分内容, 在此基础上提出具体评价指标, 共计24项, 以期客观、准确评价园林绿化土壤质量提供参考; 为绿地土壤养护、管理以及土地的持续利用提供理论依据; 为中国开展城市园林绿化土壤质量监测和相关研究工作提供方法指导。

#### 关键词

城市园林绿化; 土壤质量监测; 土壤肥力质量; 土壤环境质量; 土壤健康质量; 监测指标体系

#### Abstract

The rapid development of urbanization has brought a series of problems to the construction of landscaping. Soil quality has become one of the key factors restricting the sustainable development of urban landscaping. However, the research on the soil quality evaluation index system for urban landscaping is still in its infancy, especially the soil biological index. Based on the concepts of soil quality, the construction basis of the soil quality indicator system of urban landscape was discussed in this study. In our opinion, indicators of soil fertility quality, environmental quality, and health quality should be included in the indicator system. Then, a set of soil quality indicator systems suitable for urban landscapes was established, including 24 indicators in total. This study would provide an important reference for the objective and accurate evaluation of the landscape soil quality, provide the theoretical basis for soil conservation, management, and sustainable use of urban landscape, and provide important method guidance for the monitoring of landscape soil and related research in China.

#### Keywords

urban landscape; soil quality monitoring; soil fertility quality; soil environmental quality; soil health quality; indicator system

#### 张维维

1986年生/女/河北秦皇岛人/博士/讲师, 硕士生导师/研究方向为土壤微生物生态学

#### 韩继刚

1970年生/男/河北保定人/博士/教授/研究方向为城市绿地土壤质量监测和植物根际促生细菌资源及其应用

#### 张浪

1964年生/男/安徽合肥人/博士/教授级高级工程师, 博士生导师/上海领军人才、享受国务院特殊津贴专家/研究方向为生态园林规划设计与技术研究/本刊主编

#### 基金项目:

上海市科委科研项目“上海‘四化’生态网络空间区划及其系统构建关键技术研究与示范”(编号: 19DZ1203300); 上海市绿化和市容管理局项目“城市绿化土壤生物活性评价方法的建立和应用”(编号: G200201)

\*通信作者 (Author for correspondence)

E-mail: jghan9@gmail.com; zl@shsyky.com

园林绿化是城市中唯一具有生命的基础设施,承担了调节气候、维持生物多样性、美化城市等多种生态服务功能。近30年来,随着中国经济社会的高速发展,城市园林绿化建设获得了极大的发展。城市建成区绿化覆盖率从1990年的19.20%提高到2018年的41.11%,城市建成区绿地面积达到2197万 $\text{hm}^2$ 。但是城市化快速推进也给园林绿化建设,特别是园林绿化土壤质量带来了一系列问题,主要表现为土壤结构混乱、压实严重、营养失衡、污染加剧等<sup>[2-3]</sup>。在国家日益高度重视生态文明建设并转向高质量发展和绿色发展的大背景下,土壤质量的退化除了直接影响园林植物的健康生长和绿化景观效果外,还对生态城市建设带来了更为严峻的挑战。事实上,园林绿化土壤质量问题已成为当今城市园林绿化可持续发展的关键制约因素之一。因此,只有对园林绿化土壤质量进行科学监测和评估,才能全面掌握园林绿化土壤质量状况,这也是改良和提升土壤质量的基础,而土壤质量评价指标体系的建立则是进行土壤质量监测和评价的关键。

长期以来,国内外土壤质量评价指标体系相关研究主要集中在森林、农田、草原等自然、半自然生态系统,而关于城市园林绿化土壤质量评价指标体系的研究处于起步阶段,尚缺乏系统性<sup>[4-5]</sup>。目前,绝大部分城市园林绿化土壤质量评价的研究集中在土壤的肥力特征,如土壤有机质、氮、磷、钾等大量元素的含量等方面,重点关注这些指标是否能满足地上植物的生长需求<sup>[2-3]</sup>。随着对土壤环境质量的日益重视,人们逐渐认识到城市园林绿化土壤与人类健康也休戚相关,园林绿化土壤中的污染物质可以通过扬尘或皮肤吸收等多种途径直接进入人体,危害人类健康,因此,针对城市园林绿化土壤中重金属和有

机物等污染物质的研究也逐步开展<sup>[6-7]</sup>。此外,土壤生物直接参与了土壤结构形成、养分循环、污染物质降解等多种生物化学过程,对土壤环境变化响应迅速,土壤生物学特征作为土壤质量评价指标已逐渐引起重视<sup>[8]</sup>。目前,虽然城市园林绿化土壤质量评价研究也开始涉及土壤微生物量、酶活性等土壤生物学指标,但文献报道相对较少,相关研究较为薄弱<sup>[9]</sup>。总之,城市园林绿化土壤质量研究大多只针对某一方面的土壤性质,评价指标缺乏系统性和完整性,已经不能满足中国生态城市建设和高质量发展的要求。

文章从土壤质量的概念着手,探讨了城市园林绿化土壤质量监测指标体系构建的理论基础,并基于系统性、主导性、实用性和前瞻性原则构建了包括土壤肥力质量指标、环境质量指标和健康质量指标等24项指标,适用于城市园林绿化的土壤质量监测指标体系,为客观、准确地评价园林绿化土壤质量,开展绿地土壤改良提升,提高绿地土壤管理和养护水平以及土地的可持续利用提供了科学依据。

## 1 城市园林绿化土壤质量特征

城市化过程中土地利用类型的剧烈转变和强烈的人为干扰对园林绿化土壤产生了深刻的影响。城市园林绿化土壤特征主要表现在以下三方面。

(1) 土壤物理、化学性质退化。城市园林绿化土壤物理性质退化主要体现在土壤结构被严重破坏,土壤侵入体多、成分复杂,压实严重、通气和持水孔隙降低等<sup>[2,10]</sup>。已有研究表明,在园林绿化建设过程中,由于挖掘、堆积和大量废弃物填充,导致园林绿化土壤结构混乱、土层分异不连续、土层缺失<sup>[10]</sup>。而且,在园林绿化建设初期,

大量机械的应用往往造成普遍的机械压实,致使土壤板结现象明显。此外,强烈的人为扰动、践踏等因素,也是造成园林绿化土壤压实和板结的重要原因。城市园林绿化土壤物理性质退化,除影响地上植物生长外,还会增加污染物下渗的风险<sup>[10]</sup>。

城市园林绿化土壤化学性质退化主要体现在土壤pH值偏高,土壤养分失衡<sup>[2-3]</sup>。大部分城市园林绿化土壤为碱性甚至强碱性,除受到成土条件影响外,也可能与建设过程中石灰和水泥等碱性物质的混入有关。另外,城市园林绿化土壤的有机质和养分含量普遍较低,特别是速效养分含量<sup>[2-3]</sup>。原因可能是,城市中大部分枯枝落叶被及时清理,导致土壤养分循环无法正常进行,土壤有机质和养分不能及时补充。绿地养护过程中,不重视有机肥的施用,也有可能是园林绿化土壤有机质和养分含量较低的原因之一。但是不同城市养分限制因子不同,如上海市园林绿化土壤肥力的主要限制因子是磷,而北京市则速效钾含量较为缺乏<sup>[3,11]</sup>。不过,也有一些研究表明,由于污水灌溉等原因,部分园林绿化土壤出现了氮、磷等养分富集的现象<sup>[12]</sup>。

(2) 污染严重。复杂且强烈的人为干扰导致城市园林绿化土壤受污染的机会加大。目前,城市园林绿化土壤普遍受到不同程度的重金属和有机物污染,并且呈加重趋势,污染严重是城市园林绿化土壤的一个重要特征<sup>[6-7]</sup>。城市园林绿化土壤重金属污染源主要包括工业生产、交通运输、建筑和生活垃圾以及原土壤母质输入。与有机污染物不同,重金属不能被生物降解,迁移较为困难,很容易在土壤中积累<sup>[13]</sup>。现有研究表明,大部分城市园林绿化土壤中铜、锌、铅等多种重金属含量均显著高于土壤背景值,出现了重

金属积累、不同程度污染的现象<sup>[14-15]</sup>，有些土壤的锌、铅含量甚至达到3 000 mg/kg<sup>[13]</sup>。重金属对土壤环境的污染主要表现在对土壤生物、地上植物产生毒害作用，影响土壤生物化学过程<sup>[13]</sup>，甚至个别城市表层土壤重金属含量已对城市居民构成了潜在的健康风险<sup>[16]</sup>。多环芳烃是城市园林绿化土壤中普遍存在的一类有机污染物，主要来源于人类活动，如工业生产、尾气排放、燃料燃烧等<sup>[6]</sup>。在北京、天津等城市的研究结果表明，中心城区园林绿化土壤的多环芳烃含量普遍较高<sup>[6,17]</sup>。

(3) 土壤微生物功能衰退。与土壤物理、化学性质相比，城市园林绿化土壤生物学特征的研究起步较晚，文献报道相对较少。一般认为，城市的快速发展会导致市区园林绿化土壤中微生物数量、多样性显著低于郊区，生物群落组成发生显著改变<sup>[9,18]</sup>。而导致城市园林绿化土壤微生物学特征显著改变的原因可能与土壤中重金属、有机污染物等污染物质对微生物产生直接的毒害作用有关<sup>[9,19]</sup>。土壤微生物数量及组成的改变必然导致其活性、功能随之发生变化，进而直接影响园林绿化土壤的养分循环、污染物质缓冲和净化等多种生态功能的发挥。

## 2 土壤质量监测指标与指标体系

### 2.1 土壤质量概念和内涵

土壤质量的概念最早由Mausel<sup>[20]</sup>提出，随后众多学者从不同角度对土壤质量进行了描述。而目前被普遍接受的定义是：在生态系统范围内，土壤维持生物的生产能力、保护环境质量以及促进动植物健康的能力<sup>[21]</sup>。具体来讲，土壤质量应包括三个维度，即土壤肥力质量、土壤环境质量、土壤健康质量<sup>[22]</sup>。其中，土壤肥力质量是指土壤提供生命必须

养分和生产生物物质的能力，更侧重于对土壤化学和部分物理特性的描述；土壤环境质量是指土壤容纳、降解各种环境污染物质的能力；土壤健康质量是指土壤影响或促进植物、动物和人类健康的能力，更加强调土壤的生命力和动态属性<sup>[22]</sup>。上述土壤质量的定义同样适于城市园林绿化土壤，只是相对于自然、半自然生态系统土壤而言，城市园林绿化土壤生态功能更突出。因此，在对园林绿化土壤质量进行评价时需涵盖土壤肥力质量、土壤环境质量及土壤健康质量三方面特征，尤其要重视土壤的环境质量和健康质量。

## 2.2 土壤质量监测指标

### 2.2.1 土壤肥力质量指标

土壤肥力质量指标包括物理指标、化学指标两类，主要反映土壤是否能够保障地上植物生长需求。土壤物理性质主要通过土壤气体交换、水分保持和养分供应等方式影响地上植物生长。最常用于土壤质量评价的物理指标包括土壤质地、密度和土壤蓄水能力三项<sup>[23]</sup>。其中，土壤质地对土壤阳离子交换、有机质固持等多种功能有显著影响，在各种类型土壤质量评价中，土壤质地均作为必测指标<sup>[4,23]</sup>。土壤密度是最直接反映土壤紧实度的指标，土壤过松或过紧均不利于土壤的通气 and 保水、保肥。土壤蓄水能力是多种物理性质综合作用的结果，如土壤密度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度等<sup>[24]</sup>。

在土壤质量评价中，土壤化学指标最为常用，如土壤pH值、电导率、有机质、有效态氮、磷、钾等。其中，土壤pH值和有机质是土壤质量评价中应用最多的化学指标<sup>[23]</sup>。pH值是土壤化学性质中最为综合和重要的特征，pH值的大小可影响土壤养分的有效性、

毒害元素的活性、矿物的风化等等。有机质为地上植物提供营养，其含量的高低可以反映土壤保肥、供肥能力。此外，有机质在土壤结构改善、团聚体形成、生物活性提升方面也具有重要作用。因此，土壤有机质通常被认为是表征土壤肥力质量最重要的指标，被广泛应用于各种类型土壤质量评价的研究中。土壤电导率是测定土壤水溶性盐的指标，反映土壤电化学性质，可作为土壤肥力质量的基础指标<sup>[23]</sup>。氮、磷、钾是植物生长所必需的大量营养元素，其速效养分含量的高低可反映近期内土壤氮、磷、钾供应状况和养分的释放速率，常常是地上植物生长发育的限制性因子。

### 2.2.2 土壤环境质量指标

土壤环境质量指标主要包括重金属和有机污染物两大类。其中，重金属污染已成为土壤污染风险评估中的重要内容。重金属指标主要包括铜、铅、镉、铬、汞、镍、锌、砷8个重金属的全量和有效态，其中镉、汞、铅、砷对人体健康危害较大<sup>[13]</sup>。与全量重金属相比，有效态重金属易于迁移和转化，是造成土壤生态危害的主要形态<sup>[25]</sup>。有机污染物主要为多环芳烃、石油烃、有机磷和有机氯。其中，多环芳烃可致生物体癌变、畸形以及基因突变，对人类健康有严重危害，许多国家和国际组织均将多环芳烃作为优先控制的环境污染物<sup>[26]</sup>。

### 2.2.3 土壤健康质量指标

土壤健康质量评价主要依靠土壤生物学指标，其核心内涵是土壤有生命的属性和动态的属性<sup>[22]</sup>。其中，土壤微生物是土壤多种生态过程的关键驱动因子，在土壤养分元素循环、污染物质转化和降解等方面均起着重

要作用，能系统、全面地表征土壤生态系统功能，是目前应用较多的土壤生物学指标。近期，欧美等发达国家开展的一系列土壤质量监测评估项目，均已将土壤微生物多样性、生物量等土壤微生物学指标列为土壤质量评价的关键指标<sup>[27-28]</sup>。微生物生物量碳、微生物生物量氮可代表土壤中微生物的总量，能敏感地反映土壤过程的变化<sup>[29]</sup>。微生物（细菌、真菌、古菌）多样性可以反映土壤胁迫对微生物群落的影响，表征土壤生态系统的稳定性<sup>[29]</sup>。通常来讲，较高的微生物多样性可以提高生态系统的稳定性和抗性，降低害虫和疾病的发生和损害。另外，微生物多样性降低也会对土壤生态系统功能的发挥造成负面影响<sup>[30]</sup>。土壤酶主要由土壤微生物产生，直接参与土壤有机物质的分解以及养分元素的循环，可用于反映土壤微生物活性的高低，是目前应用最为广泛的土壤生物学指标，其中脱氢酶、脲酶、磷酸酶等酶活性在土壤质量评价中的应用最为广泛<sup>[31]</sup>。脱氢酶属于氧化还原酶，通常认为该酶只存在于生物体内，其活性可以反映土壤微生物的瞬时代谢活性<sup>[32]</sup>。脲酶可将有机氮分解为可被植物吸收的氮，其活性能够反映土壤氮素的状态。磷酸酶通过促进磷酸酯类或磷酸酐的水解，影响土壤有机磷的分解，可用于评价土壤磷素周转能力。

### 3 城市园林绿化土壤监测指标体系

#### 3.1 园林绿化土壤指标选取原则

可用于土壤质量评价的指标众多，在选取园林绿化土壤质量监测指标时应遵循以下4个原则。

(1) 系统性原则。为保证土壤质量评价结果的真实性、合理性和科学性，土壤质量监测指标应全面、综合地反映土壤质量的各

方面特征，即土壤肥力质量、环境质量和健康质量特征均应有所体现，最终构建的土壤质量监测指标体系应层次分明、全面系统<sup>[21]</sup>。

(2) 主导性原则。影响土壤质量的因素很多，而且因素之间具有重叠影响，在指标选取时，应优先选取对土壤质量起主导作用的指标，同时要避免指标之间多重共线性的问题。

(3) 实用性原则。在进行指标选取时，应充分考虑样品采集、指标测定的难度、经济成本、可靠性和可重复性等因素；与理论研究不同，在实际应用中，最好选择易测易得，数据便于统计、分析和交流的指标。

(4) 前瞻性原则。评价指标既要反映园林绿化土壤质量的现状，也要通过对各项指标的深入分析，预测土壤质量未来发展趋势，指导土壤养护、改良和修复。

#### 3.2 城市园林绿化土壤质量监测指标体系

根据城市园林绿化土壤质量监测指标体系构建的依据，参考自然、半自然生态系统土壤质量评价指标体系，结合城市园林绿化特点，评价城市园林绿化土壤质量需要的指标体系应该包括土壤肥力质量指标、土壤环境质量指标、土壤健康质量指标三大类，共计24个具体指标（表1）。

本文构建的指标体系中，土壤肥力质量指标包括3项物理指标和6项化学指标。其中，土壤质地、pH值、有机质和电导率4项指标在现行的园林绿化土壤质量评价标准中，均被列为主控指标<sup>[33-36]</sup>。同时，考虑到城市园林绿化土壤密度增大、孔隙度降低是园林植物长势不佳的主要原因之一<sup>[2]</sup>，对城市园林绿化土壤质量进行评估时还需对土壤密度、非毛管孔隙度进行测定。氮、磷、钾是植物生长所必需的大量营养元素，已有研

究显示，不同城市以及城市内部不同绿地类型之间园林绿化土壤速效氮、磷、钾等养分元素含量空间异质性较大，这就要求在对园林绿化土壤质量评估时需对这类速效养分进行全面评价，这是后续进行有针对性的施肥、养护的基础和前提<sup>[3]</sup>。

土壤环境质量指标包括重金属和有机污染物两大类。重金属指标主要包括总铜、铅、镉、铬、汞、镍、锌、砷8项。在现行的园林绿化土壤质量评价标准中，行业标准《绿化种植土壤》（CJ/T 340-2016）和北京地标《园林绿化种植土壤技术要求》（DB11/T 864 2020）中均涉及上述8种全量重金属的测定<sup>[33-34]</sup>。而上海地标《园林绿化工程种植土壤质量验收规范DB31/T 769-2013》则规定需对上述8种重金属的有效态进行测定<sup>[35]</sup>。虽然与全量重金属相比，有效态重金属易于迁移和转化是造成土壤生态危害的主要形态，但是土壤环境质量的两个国标《土壤环境质量建设用土壤污染风险管控标准（试行）》（GB 36600-2018）、《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB 15618-2018）中均对全量重金属的污染限值进行了规定<sup>[37-38]</sup>，为了不同数据间比较、分析与融合，本文建议在园林绿化土壤质量评估中应首先针对8种全量重金属进行评价。在现行的园林绿化土壤质量评价标准中，均未对土壤多环芳烃等有机污染物含量进行规定。参考国标《土壤环境质量建设用土壤污染风险管控标准（试行）》（GB 36600-2018）<sup>[37]</sup>，本文建议在园林绿化土壤质量评估中应对苯并[a]蒽、苯并[a]芘、苯并[a]荧蒽、苯并[a]芘、茚、二苯并[a,h]蒽、茚并[1,2,3-c,d]芘、萘等8种多环芳烃进行监测。

尽管关于土壤健康质量指标如何科学评价尚需进一步探讨，并且现行的园林绿化土壤质量评价标准均未涉及土壤生物学指

表1 城市园林绿化土壤质量监测指标体系与指标测定方法

Tab.1 Soil quality evaluation index system for urban landscaping and determination method of the index

指标分类 Index classification	指标 Index	测定方法 Determination method	方法来源 Method source
土壤肥力质量指标	质地	容重计法	
	密度	环刀法	LY/T 1215
	非毛管孔隙度		
	pH值	电位法	LY/T 1239
	EC值	电导法	LY/T 1251
	有机质	重铬酸钾氧化-外加加热法	NY/T 1121.6
	有效氮	碱解-扩散法	LY/T 1228
	有效磷	AB-DTPA浸提/ICPMS	DB31/T 661
	有效钾		
	土壤环境质量指标	总铜	火焰原子吸收分光光度法
总铅		石墨炉原子吸收分光光度法	GB/T 17141
总镉			
总铬		电感耦合等离子体质谱法	HJ 803
总汞		冷原子吸收分光光度法	GB/T 17136
总镍		电感耦合等离子体质谱法	HJ 803
总锌			
总砷		原子荧光法	GB/T 22105.2
多环芳烃		气相色谱-质谱法	HJ 805
土壤健康质量指标		微生物生物量碳	熏蒸提取法
	细菌群落多样性	高通量测序	参考文献[19]
	脱氢酶	比色法	参考文献[39]
	脲酶		
	碱性磷酸酶		
	外切葡聚糖酶		

标, 但基于指标选取原则中系统性和前瞻性原则, 将土壤健康质量指标纳入园林绿化土壤质量监测指标体系是十分必要的。本文构建的指标体系涵盖土壤微生物生物量、多样性和活性三个方面的特征。其中, 微生物生物量碳和酶活性等5项指标测定方法较为成熟, 在林业、农业土壤质量评价中已经有一定程度的应用。而采用Illumina高通量测序技术测定土壤微生物多样性主要用于科学研究领域, 在大规模土壤质量监测中尚未广泛应用。考虑到土壤微生物多样性在维持土壤生

态系统功能中的重要作用, 以及在土壤健康质量评价中具有的巨大潜力, 构建的指标体系中包括了土壤细菌群落多样性这项指标。

### 3 结论与讨论

虽然土壤是植物健康生长的直接载体, 但是园林绿化行业中“重植物、轻土壤”的现象长期存在。这一方面是由于人们对土壤质量重要性的认识还远远不够, 另一方面也反映了在土壤质量监测评价方面还存在技术短板。因此, 建立科学、全面的城市园林绿

化土壤质量监测指标体系, 客观、准确地评价土壤质量, 跟踪以及预测土壤质量演化趋势, 才能为提升城市绿化质量奠定坚实的基础, 这对于城市生态文明建设和高质量发展也具有积极的促进作用和重要的意义。

在园林规划设计之初, 需充分评估土壤质量状况, 采用因地制宜、适地适树的原则, 根据土壤质量选择适宜的园林绿化植物进行植物群落构建及景观营造。同时, 在园林建设完成后, 也需安排专业技术团队对园林绿化土壤质量进行持续监测, 保障园林景观的长久效果和可持续发展。目前, 上海、北京等城市已经率先开展了全市范围内的园林绿化土壤质量监测工作。尤其上海市自2014年启动“上海典型绿地土壤质量监测保障体系”以来, 已经连续9年对上海市主要公园、道路等典型绿地的土壤质量开展定点、定期监测。到目前为止, 已经初步建成了由土壤肥力质量、环境质量和健康质量指标构成的监测指标评价体系, 逐步实现了对城市园林绿化土壤质量较为系统和科学的评价。

与此同时, 仍需指出的是, 城市园林绿化土壤质量及其监测是一个动态变化的过程。随着城市的发展以及新方法、新技术的出现, 本文初步构建的城市园林绿化土壤质量监测指标体系也需要不断完善以满足城市园林绿化建设和更新的需要。

### 参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2018年城乡建设统计年鉴[EB/OL]. 2020. <http://www.mohurd.gov.cn/xytj/tjzljxxytjgb/jstjnj/index.html>
- [2] 马想, 张浪, 黄绍敏, 等. 上海城市绿地土壤研究现状及问题[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(8): 61-68.

- [3] 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.
- [4] MOEBIUS-CLUNE B N, MOEBIUS-CLUNE D J, GUGINO B K, et al. Comprehensive Assessment of Soil Health. The Cornell Framework Manual. Third ed[M]. New York: Cornell University, 2016.
- [5] 杜金鸿, 张玉波, 刘方正, 等. 中国草地类自然保护区生态环境质量动态评价指标体系构建与案例[J]. 草业科学, 2017, 34(11): 2378-2387.
- [6] 张娟, 吴建芝, 刘燕. 北京市绿地土壤多环芳烃分布及健康风险评估[J]. 中国环境科学, 2017, 37(3): 1146-1153.
- [7] 王美艳, 柳洋, 朱惟琛, 等. 天津市中心城区绿地土壤重金属污染分布现状分析[J]. 环境科学与技术, 2020(43): 184-191.
- [8] PULLEMAN M, CREAMER R, HAMER U, et al. Soil Biodiversity, Biological Indicators and Soil Ecosystem Services - an Overview of European Approaches[J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2012(4): 529-538.
- [9] 杨元根, PATERSON E, CAMPBELL C. 城市土壤中重金属元素的积累及其微生物效应[J]. 环境科学, 2001(22): 44-48.
- [10] 张甘霖, 朱永官, 傅伯杰. 城市土壤质量演变及其生态环境效应[J]. 生态学报, 2003(3): 137-144.
- [11] 刘艳. 北京市崇文区绿地表层土壤质量研究与评价[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2009.
- [12] ZHANG G L, BURGHARDT W, LU Y, et al. Phosphorus-enriched Soils of Urban and Suburban Nanjing and Their Effect on Groundwater Phosphorus[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2001(164): 295-301.
- [13] 徐建明, 张甘霖, 谢正苗, 等. 土壤质量指标与评价[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [14] 史正军, 吴冲, 卢瑛. 深圳市主要公园及道路绿地土壤重金属含量状况比较研究[J]. 土壤通报, 2007(38): 133-136.
- [15] 丁爱芳, 刘存丽, 陈昌云, 等. 南京市中心城区道路绿地土壤中重金属含量及污染评价[J]. 城市环境与城市生态, 2011(24): 17-19.
- [16] 李婷婷, 方红, 罗世祺. 福州市不同绿地功能区土壤重金属污染特征及评价[J]. 亚热带资源与环境学报, 2017(12): 46-52.
- [17] 段永红, 陶澍, 王学军, 等. 天津表土中多环芳烃含量的空间分布特征与来源[J]. 土壤学报, 2005(42): 942-947.
- [18] 孙福军, 丁青坡, 韩春兰, 等. 沈阳市城市表土中微生物区系变化的初步研究[J]. 土壤通报, 2006(37): 768-771.
- [19] ZHANG W W, HAN J G, WU H B, et al. Diversity Patterns and Drivers of Soil Microbial Communities in Urban and Suburban Park Soils of Shanghai, China[J]. PeerJ, 2021(9): e11231.
- [20] MAUSEL P W. Soil Quality in Illinois: An Example of a Soils Geography Resource Analysis[J]. The Professional Geographer, 1971(23): 127-136.
- [21] DORAN J W, PARKIN T B. Quantitative Indicators of Soil Quality: A Minimum Data Set[J]. Soil Science Society of America, 1996: 25-37.
- [22] 韩继刚, 李刚, 张维维, 等. 城市绿地土壤健康质量问题与对策[J]. 应用生态学报, 2022, 33(1): 268-276.
- [23] BUNEMANN E K, BONGIORNO G, BAI Z, et al. Soil Quality - a Critical Review[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018(120): 105-125.
- [24] 杨媛媛, 李鉴北, 欧阳勋志, 等. 上犹县长防林不同森林植被类型土壤蓄水能力初探[J]. 土壤通报, 2012, 43(1): 10-14.
- [25] 王凌, 张国印, 张小龙, 等. 蔬菜土壤重金属生物有效性及有效态与全量相关性研究[J]. 华北农学报, 2011(26): 85-88.
- [26] PENG C, OUYANG Z, WANG M, et al. Vegetative Cover and PAHs Accumulation in Soils of Urban Green Space[J]. Environmental Pollution, 2012(161): 36-42.
- [27] The Nature Conservancy. Rethink Soil: a Roadmap for U.S. Soil Health[R]. 2016. <https://www.nature.org/content/dam/tnc/nature/en/documents/rethink-soil-executive-summary.pdf>
- [28] Mission Board for Soil Health and Food. Caring for Soil is Caring for Life[R]. 2020. <https://op.europa.eu/en/web/eu-law-and-publications/publicationdetail/-/publication/32d5d312-b689-11ea-bb7a-01aa75ed71a1>
- [29] 赵吉. 土壤健康的生物学监测与评价[J]. 土壤, 2006(38): 136-142.
- [30] ZHANG J L, VAN DER HEIJDEN M G A, ZHANG F S, et al. Soil Biodiversity and Crop Diversification are Vital Components of Healthy Soils and Agricultural Sustainability[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2020(2): 236-242.
- [31] 裴小龙, 韩小龙, 钱建利, 等. 自然资源综合观测视角下的土壤肥力评价指标[J]. 资源科学, 2020(42): 1953-1964.
- [32] 周礼恺. 土壤酶学[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [33] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 绿化种植土壤: CJ/T 340-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [34] 北京市市场监督管理局. 园林绿化种植土壤技术要求: DB11/T 864-2020[S/OL]. 2020. <http://yllhj.beijing.gov.cn/ztxx/gczljd/zcwj/201911/P020191124479796047504.pdf>
- [35] 上海市质量技术监督局. 园林绿化工程种植土壤质量验收规范: DB31/T 769-2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [36] 天津市城乡建设委员会. 天津市园林绿化土壤质量标准: DB/T 29-226-2014[S]. 天津: 天津市建设工程技术研究所, 2014.
- [37] 生态环境部国家市场监督管理总局. 土壤环境质量建设用土壤污染风险管控标准(试行): GB 36600-2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [38] 生态环境部国家市场监督管理总局. 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行): GB 15618-2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [39] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.