

AB-DTPA 浸提法研究上海中心城区绿地土壤有效态养分特征^①

周建强, 伍海兵, 方海兰*, 郝冠军, 梁 晶, 王若男, 朱 丽, 王贤超

(上海市园林科学规划研究院, 上海 200232)

摘 要: 采用 AB-DTPA 浸提剂联合电感耦合等离子体发射光谱法研究上海 9 个中心城区的 509 个绿地土壤的 10 种有效态养分含量。结果表明: 上海中心城区绿地土壤有效态钾、钙、镁、锰和铁含量丰富; 有效态磷、硫和钼普遍缺乏, 部分土样有效磷、硫的含量超标与大量施用有机改良材料有关; 有效态锌和铜均发生不同程度的累积, 有些土样超标。不同时空的绿地土壤有效态养分含量与成土因素和人为活动有关。随着绿地建成年限延长, 土壤有效锌和有效铜含量显著增加, 但其他养分变化不显著。就上海不同区域而言, 杨浦区、闸北区、浦东新区和徐汇区有效态养分含量相对较低; 长宁区、静安区和黄浦区有效态养分含量较高; 虹口区和杨浦区锌、铜累积程度高。公共绿地与公园土壤养分含量相当; 道路绿地的有效态钾、硫、镁显著高于前两者, 但有效态锌、铜和铁含量显著低于前两者。随着土壤剖面加深, 土壤有效态硫、镁和钼含量呈增加趋势, 而有效态磷、钾、锰、锌含量稍许降低。AB-DTPA 浸提法适用于土壤中大部分有效态养分的快速分析, 建议在全国推广应用。

关键词: 上海中心城区; 绿地土壤; AB-DTPA 浸提法; 有效态养分

中图分类号: S159.2; S151.9; X833

植物生长所需要的 16 种营养元素主要从土壤中获得。土壤养分是土壤肥力的物质基础, 绿地土壤作为园林植物生长的直接载体, 其养分含量直接决定园林植物的长势和绿地生态景观效果的发挥^[1-2]。我国关于绿地土壤养分的研究已有不少报道^[3-5], 但基本侧重于大量营养元素的土壤肥力评价^[6-7], 对中、微量营养元素很少涉及。其实, 我国城市绿地之所以不能达到设计的景观愿景, 绿地土壤各种营养元素缺乏或不平衡是重要的影响因子之一^[1,8-9]。缺少中、微量营养元素的城市绿地土壤肥力评价不能科学和全面地反映我国绿地土壤的肥力现状, 随着城市生态环境建设重要性的日渐凸显, 仅大量营养元素的绿地土壤分析显然已不能满足高品质的城市绿化景观需求^[1]。

土壤养分含量有全量和有效态两种表示方法, 其中有效态代表的是能被植物直接吸收利用的养分, 更能反映土壤的肥力和植物营养状况^[10]。传统有效态养分的测试通常采用某种专用试剂, 如 Olsen^[11]和 $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ ^[12] 分别提取土壤中有效磷和速效钾, CaCl_2 -DTPA 浸提铜、锌、镁和锰等微量营养元素^[10]。专用浸提剂虽然浸提效果较好, 但大大降低分析速

度, 不能满足现代大数据的快速获取要求。通用浸提剂的应用显得非常重要, 其中 Mehlich 3 通用浸提剂可显著提取磷, 同时能够提取钙、镁、钠、硫等, 缺点是对活性钾的提取效果不佳^[13]。而 1977 年 Soltanpour 和 Swab^[14]提出的 AB-DTPA 法则综合了多种浸提剂优势, 其原理是利用 DTPA 螯合微量元素, HCO_3^- 浸提磷, NH_4^+ 提取钾, 水溶液浸提 NO_3^- , 是一种非常有效的多元素浸提剂。AB-DTPA 浸提剂不仅适宜于碱性土壤中大部分营养元素的浸提^[15-16], 对酸性土壤也有较好的浸提效果^[17-18]。上海市地方标准《绿化用表土保护和再利用技术规范》(DB31/T 661-2012)^[19]和《园林绿化工程种植土壤质量验收规范》(DB31/T 769-2013)^[20]以及国家林业标准《绿化用表土保护技术规范》(LY/T 2445-2015)^[21]在国内首先将 AB-DTPA 浸提法作为标准方法用于表土和绿化种植土中有效态养分的检测, 并提出相应养分的控制指标。随着电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-OES)等快速分析仪器在我国逐步普及, AB-DTPA 浸提剂联合 ICP-OES 使用极大提高了分析速度^[22-23]。虽然 AB-DTPA 浸提剂的优越性已得到大家证实, 也有相关标

基金项目: 上海市绿化和市容管理局城维项目资助。

* 通讯作者(fhl_1969@126.com)

作者简介: 周建强(1989—), 男, 安徽临泉人, 学士, 助理工程师, 主要从事城市土壤分析与评价。E-mail: 137346985@qq.com

准颁布实施,但目前我国很少采用该方法研究区域内土壤的养分,全国性应用更少,极大限制了该分析方法对我国土壤与植物营养学科的贡献^[24]。

鉴于绿地土壤养分分析的重要性以及 AB-DTPA 浸提法的优点,本文以 AB-DTPA 浸提剂联合电感耦合等离子体原子发射光谱仪,对上海市中心城区绿地土壤 10 种有效态养分进行分析,以期摸清上海市中心城区绿地土壤养分的总体特征,为科学制定绿地施肥对策提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

上海市位于长江三角洲的前沿,地势平坦,成土母质多为浅海相、河湖相沉积物。其中上海中心城区包括黄浦区、静安区、徐汇区、长宁区、普陀区、闸北区、虹口区、杨浦区和浦东新区 9 个区,面积 1 499.85 km²,占上海陆地总面积的 23.7%,人口 1 218.78 万人,占上海总常住人口的 50.46%,是上海城市化发展程度最高、人口密度最大的区域。截至 2014 年,该区域绿地总面积 328.38 km²,占全市绿化面积的 26.42%。

1.2 土样采集

绿地土壤样品采样主要集中于上海黄浦区、静安区、徐汇区、长宁区、普陀区、闸北区、虹口区、杨浦区 and 浦东新区 9 个中心城区的典型公园、公共绿地和交通道路绿地。以多点混合采集 0~20 cm 表层土样 443 个;其中公园和公共绿地每 10 000 m²至少采 1 个混合样,面积大于 10 000 m²适当放宽采样密度,总共采集 303 个样,道路绿地主要选择 15 条典型道路绿化带诸如外环林带、内环线绿化带以及龙东大道、杨高路等绿化带较宽的道路绿化带,约 2~5 km 确定 1 个混合采样点,总共采集 140 个土样。另外选择典型不同建成年限的 11 座公园各采集 2 个剖面点,剖面点分 3 层采样(0~20、20~40 和 40~90 cm),总共 66 个。

本研究总计采集土壤样品 509 个,采样点分布见图 1。

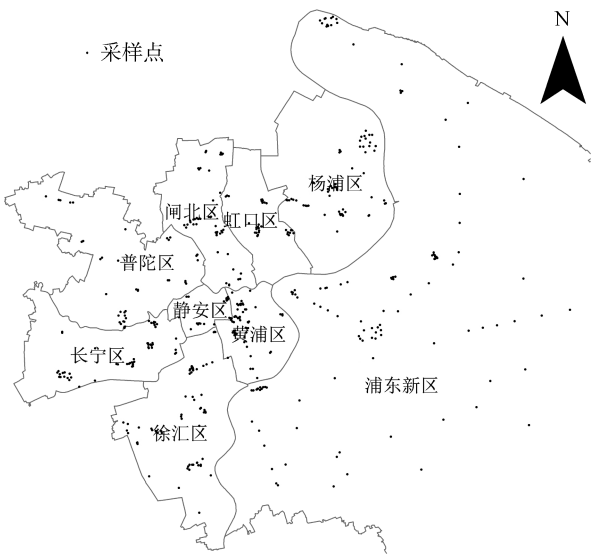


图 1 采样点分布图
Fig. 1 Sampling point distribution

1.3 分析方法

有效磷、速效钾、有效钙、有效镁、有效硫、有效钼、有效锰、有效锌、有效铜和有效铁 10 种营养元素采用上海市地方标准《园林绿化工程种植土壤质量验收规范》(DB31/T769-2013)中提出的 AB-DTPA 浸提-电感耦合等离子体原子发射光谱法测定^[19]。

1.4 数据统计及分析

使用 Excel 2007 进行数据处理及作图,使用 SPSS 17.0 进行单因素方差分析;评价标准采用《园林绿化工程种植土壤质量验收规范》(DB31/T769-2013)的技术指标^[19]。

2 结果与分析

2.1 上海中心城区绿地表层土壤有效态养分含量分布特征

上海中心城区绿地表层土壤 10 种有效态养分含量见表 1。

表 1 上海中心城区表层土壤有效态养分的含量
Table 1 Contents of available nutrients in top-soils from Shanghai central region

有效态养分	范围(mg/kg)	平均值±标准差(mg/kg)	变异系数(%)	评价指标 ^[19] (mg/kg)	合格率(%)
P	2.4~132.4	12.1±13.0	1.08	8~40	46.95
K	23.7~684.0	150.6±87.0	0.58	60~250	82.39
Ca	136.7~542.5	335.4±45.4	0.14	>300	84.88
Mg	27.6~359.5	130.0±52.4	0.40	50~250	94.81
S	5~3 500	167±332	1.99	25~500	14.00
Mo	0.01~5.13	0.09±0.36	4.02	0.05~2	27.99
Mn	0.24~73.46	3.52±4.53	1.29	0.6~15	94.13
Zn	0.51~315.33	9.09±16.26	1.79	1~10	71.56
Cu	1.05~42.47	7.61±5.62	0.74	0.3~8	67.95
Fe	1.6~155.9	44.8±18.1	0.40	4~300	93.45

2.1.1 大量营养元素 从表 1 可知,上海中心城区绿地土壤有效磷含量分布范围为 2.4 ~ 132.4 mg/kg,平均为 12.1 mg/kg。有效磷含量低于 8 mg/kg 标准下限的样品占 50.79%,满足 8 ~ 40 mg/kg 标准要求的样品仅占 46.95%,大部分土壤中的有效磷处于较低水平,土壤普遍缺磷;但可能受到施肥的影响,有 2.26% 土壤样品的有效磷超过标准上限 40 mg/kg,有个别土样有效磷含量高达 132.4 mg/kg。

上海中心城区绿地土壤有效钾的平均含量为 150.6 mg/kg,大小为 23.7 ~ 684.0 mg/kg。有效钾含量低于 60 mg/kg 标准下限的样品占 7.68%;满足 60 ~ 250 mg/kg 标准要求的样品占 82.39%;有 9.93% 的土样超过标准上限 250 mg/kg。总体而言,上海中心城区绿地土壤有效钾供应充足,这之前研究报道的用经典方法测定的上海绿地土壤速效钾含量基本一致^[25]。

2.1.2 中量营养元素 从表 1 可知,上海中心城区绿地土壤有效钙平均含量为 335.4 mg/kg,分布范围为 136.7 ~ 542.5 mg/kg。有 84.88% 土样有效钙含量 > 300 mg/kg,可知上海中心城区绿地的土壤有效钙处于较优水平,能够满足植物生长的需要。

上海中心城区绿地土壤有效镁平均含量为 130.0 mg/kg,分布范围为 27.6 ~ 359.5 mg/kg。有效镁含量满足 50 ~ 250 mg/kg 标准要求的土样占 94.81%,还有 5.19% 的土样有效镁含量超过标准上限 250 mg/kg;没有土样有效镁含量低于标准下限 50 mg/kg。由此可知,上海中心城区绿地的土壤有效镁含量丰富,能够满足植物生长的需要。

硫是植物生长的第四大营养元素。从表 1 可知,上海中心城区绿地土壤有效硫平均含量为 167 mg/kg,分布范围为 5 ~ 3 500 mg/kg。79.46% 的土壤有效硫低于 25 mg/kg 的标准下限,只有 14.00% 的土样满足 25 ~ 200 mg/kg 的标准要求;可知上海中心城区绿地的土壤普遍缺硫。但也有 6.54% 的土样有效硫超过 200 mg/kg 的标准上限,个别样品高达 3 500 mg/kg,是最低含量的 700 倍。

2.1.3 微量营养元素 从表 1 还可知,上海中心城区绿地土壤有效钼平均含量为 0.09 mg/kg,分布范围为 0.01 ~ 5.13 mg/kg。其中有 71.56% 的土样有效钼低于 0.05 mg/kg 的标准下限;仅有 27.99% 的土样满足 0.05 ~ 2 mg/kg 的标准要求;还有 2 个样品(占 0.45%)的有效钼含量分别为 5.03 mg/kg 和 5.13 mg/kg,超过标准上限 2 mg/kg。

从表 1 可知,上海中心城区绿地土壤有效锰平均含量为 3.52 mg/kg,分布范围为 0.24 ~ 73.46 mg/kg。

94.13% 的土壤有效锰满足 0.6 ~ 18 mg/kg 的标准要求;但有 4.30% 土样有效锰含量低于 0.6 mg/kg 标准下限,有 1.6% 土样有效锰高于 8 mg/kg 的标准上限,其中最大值高达 73.46 mg/kg,为最小值的 300 倍。

锌虽然是重金属,同时也是植物生长所需的微量营养元素之一,但需求量很少,上海市地标《园林绿化工程种植土壤质量验收规范》设置的技术指标为 1 ~ 10 mg/kg^[19]。从表 1 可知,上海中心城区绿地土壤有效锌平均含量为 9.09 mg/kg,分布范围为 0.51 ~ 315.33 mg/kg。有 0.68% 土样有效锌含量低于标准下限 1 mg/kg,说明极少部分绿地土壤缺锌;有 71.56% 的土壤有效锌含量满足 1 ~ 10 mg/kg 的标准要求;但有 27.76% 的土样有效锌的含量超标。若按照上海市地标《园林绿化工程种植土壤质量验收规范》设置的锌 3 个污染等级^[19]:轻度超标(10 ~ 25 mg/kg)、中度超标(25 ~ 40 mg/kg)和重度超标(>40 mg/kg);那么上海中心城区绿地土壤锌达到轻、中和重度超标的分别为 24.60%、2.48% 和 0.68%,其中最高值达 315.3 mg/kg,为重度超标限制值的近 8 倍。

同样,铜是重金属,也是植物生长所必需的微量营养元素之一,需求量也很少,上海市地标《园林绿化工程种植土壤质量验收规范》设置的技术指标为 0.3 ~ 8 mg/kg^[19]。从表 1 可知,上海中心城区绿地土壤有效铜平均含量为 7.61 mg/kg,分布范围为 1.05 ~ 42.47 mg/kg。没有土样缺铜;有 67.95% 土样的有效铜满足 0.3 ~ 8 mg/kg 的标准要求;但有 32.05% 土样有效铜超标。若按照上海市地标《园林绿化工程种植土壤质量验收规范》设置的铜 3 个污染等级^[19]:轻度超标(8 ~ 15 mg/kg)、中度超标(15 ~ 30 mg/kg)和重度超标(>30 mg/kg);那么上海中心城区绿地土壤铜达到轻、中和重度超标的分别为 23.93%、7.00% 和 1.12%。

从表 1 可知,上海中心城区绿地土壤有效铁平均含量为 44.8 mg/kg,分布范围为 1.6 ~ 155.9 mg/kg。有 93.45% 的土样有效铁满足 4 ~ 300 mg/kg 的标准要求;没有土样有效铁含量超标的;但有 6.55% 的土样有效铁含量低于 4 mg/kg 的标准要求。其中测定的有效铁含量虽高,但上海园林植物仍然易缺铁,可能是上海本底土壤的高 pH 降低了铁的活性所致^[7,26]。

2.2 上海中心城区不同时空绿地土壤有效态养分的分布特征

2.2.1 不同建成年限绿地土壤有效态养分含量 由表 2 可以看出:上海中心城区不同建成年限的绿地土壤有效态磷、钙、硫和钼均无显著差异;有效态钾、镁、锰和铁除个别建成年限长的绿地土壤含量略高

表 2 上海中心城区不同建成年限绿地土壤有效态养分含量(mg/kg)
Table 2 Contents of available nutrients in different-built years of greenbelt from Shanghai central region

有效态养分	新建公园	1990s—2005	1970s—1980s	1940s—1950s	历史名园
P	20.2 ± 19.1 a	11.0 ± 22.2 a	3.4 ± 0.0 a	12.1 ± 12.1 a	16.6 ± 24.2 a
K	135.5 ± 78.4 a	130.7 ± 47.2 a	116.4 ± 8.0 ab	85.0 ± 40.6 b	133.5 ± 78.4 a
Ca	331.0 ± 68.0 a	335.2 ± 37.2 a	322.2 ± 1.4 a	305.1 ± 77.1 a	328.1 ± 34.7 a
Mg	136.1 ± 45.2 a	105.7 ± 29.4 b	145.4 ± 21.2 a	119.0 ± 59.2 a	123.2 ± 57.2 a
S	59 ± 39 a	39 ± 912 a	—	15 ± 8 a	66 ± 154 a
Mo	0.22 ± 0.42 a	0.27 ± 0.93 a	0.04 ± 0.00 a	0.09 ± 0.08 a	0.23 ± 0.95 a
Mn	2.24 ± 1.34 Bb	4.92 ± 4.62 Aa	5.57 ± 0.63 Aa	3.3 ± 2.44 ABab	3.72 ± 2.46 ABab
Zn	6.52 ± 6.14 Bb	5.97 ± 3.26 Bb	3.90 ± 0.55 Bb	28.51 ± 74.42 Aa	12.73 ± 8.92 ABab
Cu	4.14 ± 2.23 Bc	6.83 ± 3.81 Bb	3.40 ± 0.17 Bc	7.13 ± 3.28 Bb	10.74 ± 5.75 Aa
Fe	48.26 ± 20.12 ABab	47.60 ± 13.10 ABab	33.52 ± 1.27 Bb	38.01 ± 16.06 Bb	53.94 ± 20.94 Aa

注：表中同行不同大、小写字母表示不同建成年限绿地土壤养分含量差异在 $P<0.01$ 和 $P<0.05$ 水平显著。

外，总体差异不显著；与上海市地标《园林绿化工程种植土壤质量验收规范》设置的锌、铜分级指标相比^[19]，土壤有效铜和有效锌含量均随着绿地建成年限延长存在不同程度的累积，其中绿地建成年限较长的 20 世纪 40—50 年代的公园和历史名园的有效锌和有效铜含量存在不同程度超标，并与其他建成年限较短的绿地存在极显著($P<0.01$)或显著差异($P<0.05$)。

2.2.2 不同行政区域绿地土壤有效态养分含量 由表 3 可以看出：除有效硫外，不同行政区绿地土壤有效态养分含量差异显著($P<0.05$)。以长宁区和静安区

养分含量最高。其中静安区的有效磷含量最高，并与其他区存在极显著差异($P<0.01$)；长宁区的有效硫、有效钾和有效钼含量最高，其次为静安区；长宁区有效镁含量排在第 2，仅低于浦东新区。相对而言，杨浦区、闸北区、浦东新区、徐汇区有效磷和有效硫等养分含量均较低，说明这几个区的绿地土壤养分相对贫瘠。

有效锌含量以虹口区含量最高，显著高于黄浦区 and 静安区($P<0.05$)，与其他行政区域呈极显著差异($P<0.01$)，分别有 42.81%、19.98% 和 2.91% 土样达

表 3 上海中心城区不同行政区域绿地土壤有效态养分含量(mg/kg)
Table 3 Contents of available nutrients in different administrative regions from Shanghai central region

行政区	P	K	Ca	Mg	S
黄浦区	15.5 ± 17.4 Bbc	149.7 ± 67.2 Aa	323.8 ± 27.7 Bbc	97.7 ± 23.8 Bb	15 ± 9 a
静安区	34.6 ± 20.0 Aa	139.0 ± 87.3 Aab	305.4 ± 70.0 BCc	106.8 ± 31.1 ABb	58 ± 58 a
徐汇区	6.9 ± 4.6 Bc	131.7 ± 62.2 Aab	330.0 ± 33.5 Bbc	119.3 ± 42.8 ABb	18 ± 11 a
长宁区	15.9 ± 27.9 Bb	154.2 ± 80.9 Aa	334.4 ± 41.4 ABb	134.8 ± 56.4 Aa	62 ± 153 a
普陀区	11.7 ± 9.6 Bbc	78.7 ± 29.9 Bc	293.8 ± 58.2 Cc	101.4 ± 52.8 Bb	27 ± 16 a
闸北区	10.8 ± 10.6 Bbc	119.9 ± 45.7 Ab	331.8 ± 57.6 ABbc	116.5 ± 46.0 ABb	12 ± 6 a
虹口区	11.0 ± 6.5 Bbc	119.6 ± 52.6 Ab	359.3 ± 44.1 Aa	101.7 ± 43.4 Bb	17 ± 14 a
杨浦区	6.8 ± 4.3 Bc	126.3 ± 39.6 Aab	347.8 ± 21.4 ABab	117.7 ± 49.5 ABb	13 ± 9 a
浦东新区	9.4 ± 7.1 Bc	126.3 ± 52.5 Aab	336.3 ± 35.4 ABb	139.7 ± 40.4 Aa	11 ± 5 a
行政区	Mo	Mn	Zn	Cu	Fe
黄浦区	0.03 ± 0.01 Bb	2.40 ± 1.88 Bb	12.67 ± 14.08 ABb	9.33 ± 7.59 Bb	52.3 ± 20.1 ABab
静安区	0.44 ± 0.56 ABa	2.87 ± 1.43 ABb	8.75 ± 7.07 ABb	4.48 ± 2.64 BCc	42.9 ± 20.6 Bbc
徐汇区	0.03 ± 0.02 Bb	4.64 ± 5.88 Aa	7.69 ± 4.27 Bb	7.59 ± 5.10 BCbc	37.5 ± 13.3 Bc
长宁区	0.54 ± 1.14 Aa	2.23 ± 2.00 bB	8.58 ± 7.14 Bb	8.58 ± 7.51 Bbc	40.5 ± 12.9 Bbc
普陀区	0.13 ± 0.16 Bb	2.25 ± 1.41 bB	6.56 ± 4.54 Bb	4.48 ± 2.99 Cc	36.0 ± 12.5 Bc
闸北区	0.06 ± 0.06 Bb	4.70 ± 2.77 Aa	7.43 ± 4.93 Bb	6.77 ± 3.72 BCbc	45.6 ± 17.7 Bb
虹口区	0.05 ± 0.03 Bb	3.97 ± 1.66 ABab	23.55 ± 55.64 Aa	11.59 ± 7.21 ABab	51.4 ± 23.1 ABa
杨浦区	0.04 ± 0.01 Bb	3.70 ± 1.13 ABab	8.44 ± 4.79 Bb	13.67 ± 8.45 Aa	58.0 ± 12.3 Aa
浦东新区	0.05 ± 0.05 Bb	1.91 ± 1.27 Bb	6.22 ± 3.18 Bb	6.52 ± 2.56 BCc	53.7 ± 18.4 ABa

注：表中同列不同大、小写字母表示不同行政区土壤养分含量差异在 $P<0.01$ 和 $P<0.05$ 水平显著。

到轻度、中度和重度超标；黄浦区有效锌分别有 25.12%、9.34% 和 3.04% 土样达到轻度、中度和重度超标；杨浦区有效锌有 31.12% 土样有效锌达到轻度超标。有效铜以杨浦区含量最高，和除虹口区外的其他区存在极显著差异($P<0.01$)，分别有 37.82%、24.26% 和 6.92%土样达到轻度、重度和重度超标；虹口区次之，分别有 42.45%、20.35% 和 2.90% 土样达到轻度、重度和重度超标。

相对而言，普陀区虽然养分含量略低，但是所有区中锌、铜累积程度最低的，仅有一个土样有效铜达到轻度超标，有效锌仅有 14.65% 和 2.95% 土样达到轻度和中度超标，没有出现重度超标。

2.2.3 不同绿地类型土壤有效态养分含量 从表 4 可以看出，3 种绿地类型土壤中有有效磷和有效钼均无显著差异，有效钼总体偏低。道路绿地的有效态钾、镁和硫的含量显著地高于公园绿地和公共绿地($P<0.01$)，但后两者无显著差异；公园绿地的有效钙含量显著低于公共绿地和道路绿地($P<0.01$)，公共绿地和道路绿地之间无显著差异，这可能与公共绿地和道路绿地中有大量的砖块、水泥制成的硬质设施，其中的钙在雨水冲洗下向土壤中进一步释放导致钙含量升高；公共绿地的有效锰极显著高于公园绿地和道路绿地($P<0.01$)，均值约是另两种绿地类型的 2 倍，而公园绿地和道路绿地之间无显著差异；道路绿地的有效态锌、铜和铁均低于另两种绿地类型，其中有效铁呈极显著差异($P<0.01$)，而道路绿地有效态铜极显著低于公园绿地($P<0.01$)。

表 4 上海中心城区不同类型绿地土壤有效态养分含量 (mg/kg)

有效态养分	公园绿地	公共绿地	道路绿地
P	12.2 ± 15.3 a	10.8 ± 6.6 a	12.1 ± 8.8 a
K	127.8 ± 61.9 Bb	140.5 ± 84.8 Bb	196.9 ± 108.1 Aa
Ca	330.2 ± 47.6 Bb	345.8 ± 21.8 Aa	342.9 ± 43.8 Aa
Mg	118.7 ± 48.2 Bb	111.5 ± 27.6 Bb	156.1 ± 55.1 Aa
S	33 ± 62 Bb	11 ± 6 Bb	345 ± 543 Aa
Mo	0.12 ± 0.46 a	0.07 ± 0.10 a	0.04 ± 0.04 a
Mn	3.18 ± 2.92 Bb	6.69 ± 5.94 Aa	3.44 ± 6.13 Bb
Zn	9.69 ± 20.07 a	9.14 ± 10.79 a	7.92 ± 5.56 a
Cu	8.25 ± 6.22 Aa	7.36 ± 7.15 ABab	6.44 ± 3.35 Bb
Fe	46.5 ± 18.0 Aa	48.9 ± 20.6 Aa	40.4 ± 16.8 Bb

注：表中同行不同大、小写字母表示不同类型绿地土壤间土壤养分含量差异在 $P<0.01$ 和 $P<0.05$ 水平显著。

2.2.4 不同土层绿地土壤有效态养分含量 由表 5 可以看出：土壤有效态磷、钾、锰、锌含量均随土

壤剖面深度增加呈减小的趋势，但没有达到显著差异。3 个层次的钙含量比较接近，没有明显的规律。有效镁含量随土壤深度增加而显著升高($P<0.05$)，可能镁是植物生长的必需营养元素，而上海本底土壤镁含量丰富，但常规绿地养护很少用镁肥，表层土壤中镁被吸收后呈现出上低下高的现象。硫在不同土层中变化不显著，以底层含硫量最高，也可能硫是植物生长的第四大营养元素，表层土壤硫被植物吸收后导致土层硫含量降低。不管在哪个土层，土壤有效钼含量均较低，进一步说明上海中心城区土壤普遍缺钼。不同土层中铜和铁含量没有明显的规律，表层土壤有效铁含量略高，也可能与上层土壤有植物根系活动提高铁的活性有关。

表 5 上海中心城区绿地土壤剖面有效态养分含量(mg/kg)
Table 5 Contents of available nutrients in soil profiles from Shanghai central region

有效态养分	0 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	40 ~ 90 cm
P	11.9 ± 15.5 a	8.1 ± 6.4 a	7.7 ± 6.3 a
K	134.6 ± 56.3 a	108.9 ± 47.7 a	111.7 ± 46.1 a
Ca	339.6 ± 39.0 a	345.4 ± 27.6 a	345.4 ± 26.2 a
Mg	133.9 ± 46.7 b	154.1 ± 56.3 ab	174.0 ± 56.0 a
S	29 ± 25 a	26 ± 20 a	39 ± 39 a
Mo	0.03 ± 0.02 b	0.04 ± 0.02 ab	0.05 ± 0.03 a
Mn	3.51 ± 2.49 a	2.60 ± 1.69 a	2.38 ± 1.65 a
Zn	9.48 ± 7.98 a	9.23 ± 8.12 a	8.70 ± 8.14 a
Cu	7.45 ± 3.64 a	7.81 ± 4.45 a	7.39 ± 3.73 a
Fe	47.9 ± 18.1 a	40.2 ± 15.5 a	42.6 ± 13.9 a

注：表中同行不同大、小写字母表示不同土层间土壤养分含量差异在 $P<0.01$ 和 $P<0.05$ 水平显著。

3 讨论

3.1 上海中心城区绿地土壤有效态养分含量的主要影响因子分析

上海中心城区绿地土壤有效态钾、钙、镁、锰和铁等矿质营养元素含量丰富，这与上海沉积性的成土因素直接相关^[26]。土壤有效态磷、硫和钼普遍缺乏；但也有部分土样有效磷、硫含量较高甚至超标，可能与绿地养护中施用有机改良材料相关。由于硫磺、脱硫石膏等含硫物质是有机废弃物处置过程中的重要调理剂^[27-29]，土壤施用这些含硫的有机改良材料会极大提高土壤有效硫含量；而极少部分土壤有效磷含量较高也是与土壤中加入含磷量高的有机改良材料直接相关^[30-31]。

人为活动也直接影响上海中心城区不同时空绿地土壤的有效态养分含量。上海中心城区绿地有效态锌、铜均有不同程度累积和超标，这之前研究报道

的上海绿地土壤中总锌、总铜含量容易累积超标的结论基本一致,主要受车流、施肥、油漆、铺设管道、施用农药和有机肥等人为活动影响^[32-34]。

不同行政区域经济发展水平和绿地养护投入直接影响绿地土壤肥力,就上海9个中心城区而言,长宁区、静安区和黄浦区的土壤养分速效含量较高,也是与这3个区的经济水平较好、绿地日常养护中施肥投入较多有关;而绿地养护投入相对少的杨浦区、闸北区、浦东新区和徐汇区绿地土壤速效养分含量相对较低。

虽然不同类型绿地土壤有效磷和有效钼均无显著差异;公共绿地除有效锰含量显著高于其他类型绿地,基本与公园差别不大,相对而言,道路绿地的有效钾、有效硫、有效镁显著高于另两种类型绿地,但有效锌、有效铜和有效铁含量显著低于另外两种绿地。其中道路有效锌、有效铜含量低,与之前报道的道路交通易导致锌累积的结果相反^[32],可能与道路绿地土壤中的盐分较高而抑制了铜、锌的活性有关,也可能是公园和公共绿地在养护过程中施用了铜、锌含量高的有机改良材料有关^[34]。

就不同剖面层次而言:虽然土壤有效硫、镁和钼随着深度的增加而升高;但大部分土壤养分如有效态磷、钾、锰、锌含量呈降低趋势,可能与表层土壤施有机肥、枯枝凋落物自然覆盖分解释放养分有关^[35-36]。也由此可见,通过施肥和有机覆盖等养护方式可以增加绿地土壤肥力。

3.2 AB-DTPA 浸提剂联合 ICP-OES 用于土壤有效态养分研究的意义

本研究利用上海市地方标准《园林绿化工程种植土壤质量验收规范》中提出的 AB-DTPA 浸提剂联合 ICP-OES 测定上海绿地土壤的 10 种有效态养分,并利用该标准提出的技术指标对各养分分布特征进行评价,不管是大量营养元素有效态磷和钾,还是锌、铜等微量元素,其分析结果均与之前已有研究报道的上海绿地土壤相关元素的分布特征基本一致^[7,33],进一步说明该方法及其评价指标适用于上海绿地土壤的养分分析和评价^[22]。由于植物生长所需 16 种营养元素中,除碳、氢、氧主要从空气中获得,其余的 13 种主要从土壤中获得^[1-2],而这 13 种营养元素中有 10 种可以用 AB-DTPA 浸提剂联合 ICP-OES 方法一次测定完成,极大提高了分析速度,能满足当前大数据时代快速获取数据的要求。虽然 AB-DTPA 浸提测定结果略高于我国传统用的 CaCl_2 -DTPA 方法^[10,15],但上海已在国内首次制定了 AB-DTPA 浸提法的控制指标^[19-20],本文研究结果进一步验证该方法对上海

绿地土壤质量评价的适用性。如今,随着国家林业标准《绿化用表土保护技术规范》LY/T 2445-2015)已经正式颁布实施^[21],该标准“附录 H”也在上海地方标准的基础上,提出供全国绿化同行参考用的土壤有效态养分的控制指标,为该方法在全国进一步应用提供了技术指南。

另外从已有研究报道来看,AB-DTPA 测定的速效磷、钾结果与传统方法比较接近,但对其他元素的测定结果显著高于我国传统的 CaCl_2 -DTPA 浸提测定的结果^[15,22-23],因此在制定 AB-DTPA 方法的土壤质量评价指标时,其评价标准应相应提高,以提高该方法对土壤质量评价的有效性。另外,本研究用 AB-DTPA 测定的结果显示上海绿地土壤的有效铁含量丰富,但实际上受本底土壤的高 pH 影响^[7,26],上海绿地中香樟、栀子花等喜酸性植物缺铁非常普遍,因此还需要结合我国不同地区土壤类型差异,进一步优化 AB-DTPA 测定结果对铁等元素的评价指标。

虽然 AB-DTPA 方法对应的土壤质量评价指标还需要进一步完善,但鉴于 AB-DTPA 浸提剂联合 ICP-OES 方法测定的简单、快速的优越性,希望借助本文在行业内提高该方法应用的认知度和认可度,并为进一步优化其评价的技术指标提供依据。

4 结论

1) 受上海沉积性成土因素和人为活动的影响,上海中心城区绿地土壤有效态钾、钙、镁、锰和铁含量丰富;有效态磷、硫和钼普遍缺乏,但部分土样有效磷和硫含量超标可能与施用有机改良材料有关;有效态锌和铜均发生不同程度的累积、有些样品超标。

2) 不同时空的绿地土壤有效态养分含量有以下变化趋势:随绿地建成年限延长,土壤有效锌和有效铜含量显著增加,但其他养分变化不显著。不同行政区土壤养分存在差异:长宁区、静安区和黄浦区有效态养分含量较高,杨浦区、闸北区、浦东新区和徐汇区的略低;以虹口区和杨浦区锌、铜累积程度最高。不同类型绿地土壤养分也不同:公共绿地与公园土壤养分含量相当,道路绿地的有效态钾、硫、镁显著高于前两者,但有效态锌、铜和铁含量显著低于前两者。在土壤剖面中,随着土层加深,土壤有效态硫、镁和钼含量呈增加趋势,而有效态磷、钾、锰、锌含量稍许降低。

3) 对影响绿地土壤养分含量的因素分析显示,在绿地中施用有机改良材料,进行枯枝落叶等有机覆盖物覆盖等形式,能有效地提高绿地中土壤养分。

4) AB-DTPA 浸提剂联合 ICP-OES 方法适用于土

壤中大部分有效态养分的快速分析,能满足当前大数据时代快速获取数据的要求。建议在对其评价指标进一步优化基础上,扩大在全国的推广应用。

参考文献:

- [1] 方海兰. 城市土壤生态功能与有机废弃物循环利用[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2014
- [2] 崔晓阳, 方怀龙. 城市绿地土壤及其管理[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001
- [3] 邓南荣, 吴志峰, 刘平, 等. 城市园林绿化用地土壤肥力诊断与综合评价——以广州市长虹苗圃为例[J]. 土壤与环境, 2000, 9(4): 287-289
- [4] 王淑敏, 胥哲明, 潘彩霞. 城市绿地土壤质量评价指标研究进展[J]. 中国园艺文摘, 2011, 27(7): 38-40
- [5] Jim C Y. Physical and chemical properties of a Hong Kong roadside soil in relation to urban tree growth[J]. Urban Ecosystems, 1998, 2: 171-181
- [6] 卢瑛, 甘海华, 史正军. 深圳城市绿地土壤肥力质量评价及管理对策[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 153-156
- [7] 项建光, 方海兰, 杨意, 等. 上海典型新建绿地的土壤质量评价[J]. 土壤, 2004, 36(4): 44-429
- [8] 王华. 浅谈城镇园林绿化管理中的施肥技术[J]. 科技创新导报, 2010(30): 122
- [9] 马晓, 陈刚, 张冬梅. 生态因子及矿质元素对红花槭叶片色素含量的影响[J]. 北方园艺, 2012, (13): 86-88
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 573-578
- [11] 张万儒. 森林土壤有效磷的测定(LY/T 1233-1999) [S]. 北京: 中国标准出版社, 1999
- [12] 张万儒. 森林土壤速效钾的测定(LY/T 1236-1999) [S]. 北京: 中国标准出版社, 1999
- [13] 吴昆明, 魏朝俊, 刘云, 等. 土壤活性组分提取剂的研制及初步试验结果[J]. 岩矿测试, 2014(3): 381-389
- [14] Soltanpour P N, Swab A P. A new soil test for simultaneous extraction of macro and micro-nutrients in alkaline soils[J]. Communications in Soils Science and Plant Analysis, 1977, 8: 195-207
- [15] 孙鸣镝, 方海兰, 郝冠军, 等. AB-DTPA, CaCl_2 -DTPA 两种方法分析土壤 8 种元素的有效态含量[J]. 土壤与作物, 2014, 3(2): 50-55
- [16] 冯两蕊. AB-DTPA 通用浸提剂测定石灰性土壤微量元素可行性研究[J]. 山西农业大学学报, 200424(4): 351-352
- [17] Zhang M K, Zhou C, Huang C Y. Relationship between extractable metals in acid soils and metals taken up by tea plants[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2006, 37(3/4): 347-361
- [18] Madurapperumaa W S, Kumaragamage D. Evaluation of ammonium bicarbonate-diethylene triamine penta acetic acid as a multnutrient extractant for acidic lowland rice soils[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2008, 39(11/12): 1 773-1 790
- [19] 方海兰, 梁晶, 沈烈英, 等. 绿化用表土保护和再利用技术规范[S]//上海市地方标准(DB31/T661-2012). 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [20] 管群飞, 方海兰, 沈烈英, 等. 园林绿化工程种植土壤质量验收规范[S]//上海市地方标准(DB31/T769-2013). 北京: 北京标准出版社, 2013
- [21] 方海兰, 梁晶, 金大成, 等. 绿化用表土保护技术规范[S]//林业行业标准(LY/T 2445-2015). 北京: 中国标准出版社, 2015
- [22] 孙鸣镝, 郝冠军, 方海兰. AB-DTPA 法对上海典型土壤元素有效态含量测定的适用性分析[J]. 上海农业学报, 2015, 1(5): 47-50
- [23] 崔建宇, 石贝贝, 宋建兰, 等. AB-DTPA 法测定土壤有效养分的相关性研究[C]//第二届全国测土配方施肥技术研讨会论文集. 北京: 中国农业大学出版社, 2007: 199-203
- [24] 李立平, 张佳宝, 邢维芹, 等. 土壤养分分析的现代化[J]. 土壤, 2004, 36(3): 243-250
- [25] 方海兰, 陈玲, 黄懿珍, 等. 上海新建绿地的土壤质量现状和对策[J]. 林业科学, 2007, 43(增刊 1): 89-94
- [26] 侯传庆. 上海土壤[M]. 上海: 上海科技出版社, 1992
- [27] 顾文杰, 张发宝, 徐培智, 等. 堆肥反应器中硫磺对牛粪好氧堆肥的保氮效果研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 224-230
- [28] 张发宝, 顾文杰, 徐培智, 等. 硫磺和硫酸亚铁对鸡粪好氧堆肥的保氮效果[J]. 环境工程学报, 2011, 5(10): 2 347-2 352
- [29] 彭喜玲, 周建强, 方海兰. 绿化植物废弃物与不同调理剂混合堆肥的效果研究[J]. 上海农业学报, 2015, 31(2): 83-88
- [30] 顾兵, 吕子文, 方海兰, 等. 绿化植物废弃物堆肥对城市绿地土壤的改良效果[J]. 土壤, 2009, 41(6): 857-861
- [31] 顾兵, 吕子文, 梁晶, 等. 绿化植物废弃物覆盖对上海城市林地土壤肥力的影响[J]. 林业科学, 2010, 46(3): 9-15
- [32] Fang H L, Dong Y, Gu B, et al. Distribution of heavy metals and arsenic in greenbelt roadside soils of Pudong New District in Shanghai[J]. Soil and Sediment Contamination an International Journal, 2009, 18(6): 702-714
- [33] 马光军, 梁晶, 方海兰. 上海市不同功能区绿地土壤中 Cu、Zn、Pb 和 Cr 的污染评价[J]. 城市生态和城市环境, 2009, 22(5): 34-37
- [34] 方海兰, 郝冠军, 彭红玲, 等. 上海世博会规划区不同土地利用方式下附属绿地的重金属分布[J]. 生态学杂志, 2008, 27(3): 439-446
- [35] 梁晶, 方海兰, 朱丽, 等. 污泥施用于城市绿地土壤后重金属的累积转化[J]. 环境科学与技术, 2013(S2): 70-73, 78
- [36] 张晓曦, 刘增文, 祝振华, 等. 侧柏与其他树种枯落叶混合分解对养分释放的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(1): 116-120

Study of Available-nutrient Properties of Greenbelt Soils in Shanghai Central Region by AB-DTPA Method

ZHOU Jianqiang, WU Haibing, FANG Hailan^{*}, HAO Guanjun, LIANG Jing,
WANG Ruonan, ZHU Li, WANG Xianchao

(Shanghai Academy of Landscape Architecture Science and Planning, Shanghai 200232, China)

Abstract: Ten kinds of available nutrients in 509 greenbelt soil samples from 9 administrative regions in Shanghai were analyzed by AB-DTPA extraction and inductively coupled plasma (ICP) atomic emission spectrometry. The results showed that the soils were rich in available potassium, calcium, magnesium, manganese and iron, but lack of available phosphorus, sulfur and molybdenum. The contents of available phosphorus and sulfur in some samples were exceeding the corresponding standard, which might be related to the application of large amounts of organic-improved materials. Both available zinc and copper were accumulated in different levels, while some soil samples exceeded the corresponding standard. The available-nutrient contents in the greenbelts in different periods and regions might be related to the soil-forming factors and human activities. The contents of available zinc and copper in soil increased significantly with the extension of year since the greenbelts were constructed, but the other nutrients had no significant difference. In terms of different administrative regions in Shanghai, the contents of available nutrients were lower in Yangpu District, Zhabei District, Pudong New Area and Xuhui District, but relatively higher in Changning District, Jing'an District and Huangpu District. Hongkou District and Yangpu District showed the highest accumulation degree in zinc and copper. The contents of soil nutrients were equal between the public green space and the park. The contents of available potassium, sulfur and magnesium in road green space were significantly higher than those in the public green space and in the park, but the contents of available zinc, copper and iron were significantly lower. With the increase of soil depth, the contents of available sulfur, magnesium and molybdenum were increased, but those of available phosphorus, potassium, manganese and zinc were slightly decreased. The AB-DTPA extraction method is suitable for rapid analysis of most available nutrients in soil and can be used widely in China.

Key words: Shanghai central region; Greenbelt soil; AB-DTPA extraction; Available nutrients