文章编号:1001—7380(2024)06—0022—06

上海市金山区土壤理化性质及重金属污染分析

钱 军[1], 杨瑞卿[2]

(1. 上海市金山区园林管理所,上海 200540; 2. 上海市绿化管理指导站,上海 200020)

摘要:为了探究上海市金山区典型工业区和非工业区土壤理化性质及重金属污染情况,选取具有代表性的城区绿地(N0)和工业区林地(N1)2处土壤进行采样,测定不同土层的土壤物理性质及表层土壤化学性质及重金属含量,并对表层土壤重金属的累积状况和污染来源进行分析与评价。结果显示,城区绿地和工业区林地土壤分别属中性土壤和酸性土壤。N1组表层土壤容重略低于N0组,表层其余各物理特性指标均略高于N0组表层土壤。2区土壤有机碳和全磷含量具有显著性差异($P<0.05$)。此外,2区域表层土壤锌(Zn)、铅(Pb)及镍(Ni)元素含量均超过上海市土壤重金属背景值。研究表明,城区绿地和工业区林地土壤物理性能表现不佳,有机质及养分较匮乏,且已存在土壤重金属累积的状况,具有潜在的土壤生态污染风险。未来应及时采取有效措施加强污染监测与防控,并根据2区域土壤特性有针对性地进行改良和养护,进一步提高土壤综合质量。

关键词:城区绿地;工业区林地;土壤理化性质;重金属;土壤质量评价;污染风险评估

中图分类号:S151.9;S153;X132 **文献标志码**:A **doi**:10.3969/j.issn.1001-7380.2024.06.004

Analysis of soil physico-chemical properties and heavy metal pollution in industrial and urban areas of Jinshan District, Shanghai

Qian Jun[1], Yang Ruiqing[2]

(1. Garden Administration Office of Jinshan District of Shanghai, Shanghai 200540, China;
2. Shanghai Municipal Landscape Management and Guidance Station, Shanghai 200020, China)

Abstract: In order to investigate the physico-chemical properties and heavy metal content of soils in typical industrial and non-industrial areas in Jinshan District, Shanghai, two areas of urban green space (N0) and industrial forest land (N1) were selected for soil sampling. The physical properties of the soils in different soil layers as well as the chemical properties and heavy metal contents of the surface soils were measured, and the pollution sources of heavy metals in the surface soil was analyzed and evaluated. The results showed that the urban green space soil and the industrial forest land soil were neutral and acidic, respectively. For surface soil, the bulk density in N1 was slightly lower than that in N0, and the other physical property indexes were slightly higher than those in N0. The organic carbon and total phosphorus contents of the two areas were significantly different ($P<0.05$). In addition, the soil surface Zn, Pb and Ni contents of in the two areas exceeded Shanghai soil background values. In conclusion, urban and industrial areas soil had poor physical properties, organic matter and nutrients, and heavy metals accumulated led to potential ecological pollution risks in soil. In the future, effective measures should be taken in a timely manner to strengthen pollution monitoring, prevention and control, and to conserve the soil in Jinshan District according to the soil characteristics, so as to further improve the whole quality of the soil.

Key words: Urban Green space; Industrial forest land; Soil physico-chemical property; Heavy metal; Soil quality evaluation; Pollution risk assessment

随着城市化和工业化快速发展,土壤环境污染已经成为重要的生态问题之一[1]。近年来关于土

收稿日期:2024-08-12;**修回日期**:2024-09-03

基金项目:"十三五"国家重点研发计划课题"人工林类型与结构对物质循环过程的影响"(2016YFD0600202)

作者简介:钱 军(1968-),男,上海金山人,高级工程师。主要研究方向为观赏植物采后与逆境生理。

壤质量的研究多集中在城市用地、绿道公园和林地等方面[2-4]。城市土壤作为城市生态系统的核心构成,是绿化植物生长的介质和养分的供应者,也是城市污染废弃物的汇聚地和净化器[5-7]。土壤养分是城市土壤综合肥力质量的重要评价指标,其动态平衡的保持对于城市生态系统可持续发展具有重要意义[8-9]。城市土壤理化性质的变化是土壤生态功能变化的潜在原因,也能够直观体现城市化过程对土壤生态环境影响[10]。上海是我国最大的工业城市,金山区境内东南部有全国特大型化工企业和上海石油化工股份有限公司。工业大力推动经济发展的同时,由于疏于环境保护,也引发了一系列土壤生态问题,尤其是工业用地土壤重金属污染问题[11-13]。重金属污染一直是土壤生态领域备受关注的话题[14]。2022 年 3 月,《关于进一步加强重金属污染防控的意见》中也提出强化重金属污染物排放控制,有效防控涉重金属环境风险的具体要求。土壤重金属污染毒性高、持续时间长,且不易在生物循环和能量交换中分解,过量的地表重金属不仅会破坏土壤生态环境,严重影响土壤的理化性质和肥力质量,还可通过不同途径进入人体,对居民身体健康构成潜在威胁[15-18]。定量评估重金属累积特征及其生态污染风险并探究土壤重金属污染防治方法已成为该领域的研究热点[19-21]。基于此,加强城区和工业区土壤理化性质及重金属的研究分析,明确污染状况,并制定有针对性的防控治理措施成为当地十分紧迫的研究课题。

本文选取金山区具有代表性的城区绿地和工业区林地进行实地采样,结合 2 区域土壤理化性质及养分和重金属含量调查基础数据,就土壤肥力质量现状进行了初步探讨,并聚焦土壤重金属的污染特征,利用单因子污染指数和内梅罗指数评估土壤重金属的污染程度和潜在生态风险水平,以期为促进该区土壤环境质量的改善和提高提供数据参考。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

金山区(北纬 30°40′—30°58′,东经 121°00′—121°25′)位于长江三角洲南翼,上海西南部。该区属北亚热带季风气候,年均气温约 15.7 ℃,雨量充沛,年平均降雨量 1 156.7 mm。主要土壤类型为水稻土、滨海盐土、潮土和黄棕壤土。

1.2　土壤样品采集

城区绿地(N0)选取前京大道绿地,工业区林地(N1)选择省界林带,分别选取 3 个平行采样点进行土壤采样。通过实地调查,城区绿地和工业区林地共有植物包括香樟、桂花、广玉兰、夹竹桃、石楠。在土壤采集过程中,利用 GPS 对采样点进行定位。根据均匀布点的原则,去除表面植物和凋落物,用深层土钻分别采集距表层 0—10,10—20,20—40 cm 环刀土样,并用自封袋收集附近 0—10 cm的表层土壤,将采集的土样带回实验室后一部分置于 4 ℃冰箱存放,另一部分待自然风干后去除植物根系和石砾,研磨后分别过 2 mm 和 0.149 mm 孔径筛保存。

1.3　土壤样品测定与分析

土壤物理性质测定指标包括饱和持水量、毛管持水量、田间持水量、土壤容重、孔隙度、质量含水量及体积含水量等。各物理指标的测定和计算参照 GB/T 7835—1987 方法。土壤化学性质指标测定为 pH 值、有机碳、全氮和全磷。土壤 pH 值采用电位法(HJ 962),有机碳测定采用重铬酸钾—硫酸氧化法(HJ615—2011),土壤全氮采用凯氏定氮法(HJ717—2014),土壤全磷采用酸溶—钼锑抗比色法(NY/T88—1988)测定。土壤重金属铜(Cu)、锌(Zn)元素含量采用火焰原子吸收分光光度法(GB/T 17138),铅(Pb)和镉(Cd)元素采用石墨炉原子吸收分光光度法(GB/T 17141),镍(Ni)含量采用火焰原子吸收分光光度法(GB/T 17139),铬(Cr)含量采用火焰原子吸收分光光度法(HJ 491)。

1.4　数据处理

运用 Excel 2010 软件对所测数据进行运算和表格绘制,数据分析采用 SPSS25.0 软件。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)检验不同土层物理性质的差异,利用独立样本 T 检验分析城区绿地和工业区林地土壤化学性质及重金属含量的差异并进行 Pearson 相关性分析,图制作用 Origin 2022 软件完成。

2　结果与分析

2.1　城区绿地和工业区林地土壤物理性质

由表 1 可知,N0 组和 N1 组不同土层容重均高于上海市绿化种植土技术标准(1.35 g/kg)[22],且土壤总孔隙度均低于总孔隙度标准(50%)[23]。除土壤容重外,N1 组表层土壤各物理特性指标均略高

于 N0 组表层土壤($P>0.05$)。上海市绿化种植要求非毛管孔隙度大于 5%,2 组不同土层非毛管孔隙度均达到该标准。不同土层下 2 组非毛管孔隙度与毛管孔隙度的比值在 0.15—0.18 之间,与土壤非毛管孔隙度与毛管孔隙度1∶1理想状态比值具有一定差距。相同剖面下 N1 组土壤通气度略高于 N0 组土壤通气度,但 2 组土壤均未达到上海市绿化种植土通气度标准(8%)[24]。

表 1 城区绿地和工业区林地土壤物理性质

处理	N0 土层/cm			N1 土层/cm		
	0—10	10—20	20—40	0—10	10—20	20—40
最大持水量/(g/kg)	275.56±5.82 ab	269.18±29.97 ab	249.22±8.81 b	291.98±13.60 a	278.01±30.54 ab	269.41±17.50 ab
毛管持水量/(g/kg)	234.10±4.80 ab	233.05±26.72 ab	208.92±8.24 b	246.49±11.82 a	239.24±25.68 ab	231.01±15.33 ab
最小持水量/(g/kg)	147.61±5.55 a	157.04±25.19 a	133.20±7.90 a	154.24±15.19 a	152.69±17.11 a	147.50±17.68 a
质量含水量/(g/kg)	240.62±2.50 a	251.91±24.96 a	229.02±7.56 a	248.33±11.45 a	247.84±21.12 a	247.31±22.22 a
非毛管孔隙度/%	6.21±0.25 a	5.66±0.31 a	6.40±1.02 a	6.71±0.84 a	5.94±0.78 a	5.89±1.15 a
毛管孔隙度/%	35.06±0.37a	36.53±3.06 a	33.14±0.67 a	36.36±0.96 a	36.69±3.55 a	35.39±31.32 a
总孔隙度/%	41.27±0.62 a	42.19±3.36 a	39.54±0.80 a	43.07±1.04a	42.63±4.21a	41.28±1.66 a
体积含水量/(g/L)	360.42±4.67 a	395.01±27.15 a	363.32±7.00 a	366.45±14.22 a	380.12±28.15 a	378.71±23.04 a
土壤通气度/%	5.23±0.59 ab	2.69±0.69 b	3.20±1.35 b	6.43±2.03 a	4.62±1.40 ab	3.41±1.30 b
土壤容重/(g/cm^3)	1.50±0.04 bc	1.57±0.07 ab	1.59±0.03 a	1.48±0.03 c	1.53±0.02 abc	1.53±0.04 abc

注:结果数据为平均值±标准误;平行数据后不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平上存在显著性差异

2.2 城区绿地和工业区林地土壤化学性质

2.2.1 土壤 pH 值特征 由图 1 可知,N0 组土壤 pH 值高于 N1 组 pH 值。参照《中国土壤》对土壤酸碱度的划分标准,上海城市土壤 pH 等级划分为 pH≤5.0,强酸性土壤;5.0<pH≤6.5,酸性土壤;6.5<pH≤7.5,中性土壤;7.5<pH≤8.5,碱性土壤;pH>8.5,强碱性土壤。根据该标准,城区绿地土壤 pH 值为 6.52,属中性土壤;工业区林地土壤 pH 值为 5.68,属酸性土壤。

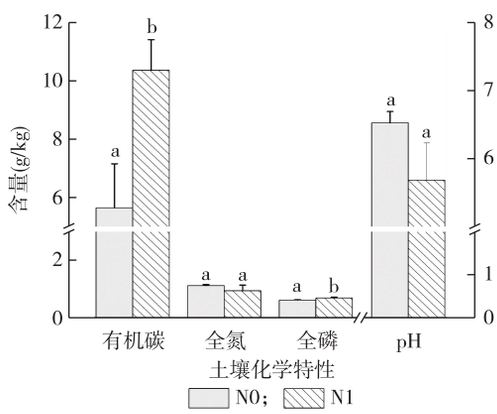

图 1 城区绿地与工业区林地表层土壤化学性质

2.2.2 土壤养分含量特征 参照第二次全国土壤普查及上海市《绿化种植土壤》(CJ/T340—2016)等标准[22](见表 2)对土壤分级初步判断,城区绿地有机碳含量为 5.64 g/kg,等级为 6 级,土壤肥力单项指标评价为很低;全磷和全氮含量分别为 0.62,1.13 g/kg,均为 3 级,单项指标评价为中上。工业区林地有机碳含量和全氮含量分别是 10.35,0.95 g/kg,均为 4 级,单项指标评价中下;全磷含量 0.7 g/kg,所属等级为 3 级,单项指标评价为中上。此外,与 N1 组相比,N0 组有机碳含量减少了 45.51%,全氮增加了 18.95%,全磷减少了 11.43%,且 2 组有机碳和全磷含量均具有显著性差异($P<0.05$)。

表 2 土壤养分分级标准

等级	有机碳/(g/kg)	全氮/(g/kg)	全磷/(g/kg)	评价
1 级	>40	>2	>1	很高
2 级	30—40	1.5—2	0.8—1	高
3 级	20—30	1—1.5	0.6—0.8	中上
4 级	10—20	0.75—1	0.4—0.6	中下
5 级	6—10	0.5—0.75	0.2—0.4	低
6 级	<6	<0.5	<0.2	很低

2.2.3 土壤重金属含量特征 与工业区林地相比,城区绿地表层土壤 Cu,Zn,Pb,Cd 含量较低,其中,N0 组土壤 Zn 含量比 N1 组减少了 36.62%,Cd 含量减少了 25.00%,Pb 含量减少了 13.07%,N0 组 Ni,Cr 含量则高于 N1 组(见表 3)。N0 和 N1 组土壤重金属 Cu,Zn,Pb,Ni,Cr,Cd 含量均未超过国家土壤环境质量二级标准。以上海市土壤重金属背景值为参考,N0 和 N1 组 Zn,Pb,Ni 元素含量均超过背

景值。整体来看,各重金属元素超标率由高到低依次为 Zn,Ni,Pb,尤其以 N1 组 Zn 含量显著,是对应背景值的 1.90 倍。相关性分析结果显示,土壤 pH 和 Pb 显著负相关,全磷和 Cd 呈显著正相关,全氮和 Ni,Cr 呈极显著正相关,Ni 和 Cr 呈极显著正相关,表明 Ni 和 Cr 可能存在同源性(见表 4)。

表 3　上海市土壤重金属特征

类别		N0	N1	土壤环境质量二级标准		上海市土壤背景值
pH		6.52	5.68	(5.5,6.5]	(6.5,7.5]	-
重金属元素/(mg/kg)	Cu	17.07±1.27	17.10±2.14	50	100	28.59
	Zn	103.60±9.92	163.47±65.48	200	250	86.10
	Pb	25.67±1.72	29.53±3.05	90	120	25.47
	Ni	36.87±0.57	34.60±2.76	70	100	31.90
	Cr	73.40±0.61	71.00±4.84	150	200	75
	Cd	0.09±0.02	0.12±0.02	0.30	0.30	0.13

表 4　土壤化学性质和重金属元素间的相关性

指标	pH	有机碳	全磷	全氮	Cu	Zn	Pb	Ni	Cr	Cd
pH	1	-0.645	-0.759	0.053	-0.411	-0.530	-0.868*	0.009	-0.210	-0.679
有机碳		1	0.763	-0.697	-0.263	0.477	0.574	-0.704	-0.544	0.444
全磷			1	-0.586	0.325	0.269	0.530	-0.438	-0.257	0.846*
全氮				1	0.454	-0.105	0.108	0.961**	0.924**	-0.217
Cu					1	-0.227	0.302	0.663	0.743	0.682
Zn						1	0.690	-0.238	-0.146	0.151
Pb							1	0.107	0.283	0.603
Ni								1	0.975**	-0.004
Cr									1	0.145
Cd										1

注:** 表示在 0.01 水平上显著,* 表示 0.05 水平上显著

2.2.4　土壤重金属污染评价　土壤重金属污染评价方法采用国内外通用的单因子指数法和内梅罗综合指数法[25]。单因子指数法利用重金属环境实测值与标准值的比值来评价环境质量,是目前常见的重金属污染评价方法[26-27]。内梅罗综合指数法是应用最广泛的综合评价土壤重金属污染的方法,能够全面综合地反映土壤污染程度[28]。

采用单因子污染指数(P_i)对土壤中单一重金属污染程度进行评价[29],见表达式:

$$P_i = C_i/S_i$$

式中,P_i为土壤中重金属元素 i 的环境质量指数;C_i为重金属元素i的实测含量(mg/kg);S_i为重金属 i 的评价标准值(mg/kg)。单因子污染指数评价的分级标准为:$P_i \leq 0.7$ 未污染(Ⅰ级);$0.7<P_i \leq 1$ 轻度污染(Ⅱ级);$1<P_i \leq 2$ 中度污染(Ⅲ级);$2<P_i \leq 3$ 重度污染(Ⅳ级);$P_i>3$ 严重污染(Ⅴ级)。

本研究中污染物的评价标准参照上海市土壤背景值,城区绿地各重金属的单项污染指数平均值由高到低为:Zn(1.203)>Ni(1.156)>Pb(1.008)>Cr(0.979)>Cd(0.692)>Cu(0.597);工业区林地各重金属的单项污染指数平均值由高到低为:Zn(1.899)>Pb(1.159)>Ni(1.085)>Cr(0.947)>Cd(0.923)>Cu(0.598)。从被监测区域分布情况看,城区绿地和工业区林地土壤均未受 Cu 的污染,2 区域均受到 Zn,Ni,Pb 中度污染。

内梅罗指数法基于考虑各重金属元素的平均值和单个重金属的极大值以反映土壤重金属综合污染程度[28,30],见表达式:

$$INI = \sqrt{\frac{(\mathrm{Max}P_i)^2 + (\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} P_i)^2}{2}}$$

式中,INI 为土壤中重金属元素的综合污染指数;n 为参与评价的重金属的种类总数。根据 INI

值变幅,结合污染物积累状况,土壤质量分级为:$INI \leqslant 0.7$ 为清洁程度;$0.7 < INI \leqslant 1$ 为尚清洁程度;$1 < INI \leqslant 2$ 为轻度污染程度;$2 < INI \leqslant 3$ 为中度污染程度;$INI \geqslant 3$ 为重度污染程度。经计算,城区绿地土壤重金属的综合污染指数为0.763,属未污染;工业区林地土壤重金属的综合污染指数为1.098,属轻度污染。

3 讨论

土壤物理性质是评价土壤结构特征和衡量土壤通气状况以及持水能力的重要指标[31]。本研究中,城区绿地(N0组)和工业区林地(N1组)土壤均存在土壤容重大、持水量和孔隙度小,土壤通气性能较差等问题。其中,N0组不同土层土壤容重均高于N1组土壤容重,这可能与城区绿地人为踩踏过多导致土壤紧实度增加有关[32]。土壤化学性质可以有效评价土壤酸碱性和肥力状况[33]。根据第二次全国土壤普查相关标准,整体上看2区域有机质和养分较缺乏。与工业区林地相比,绿地土壤有机碳含量偏低的原因可能是人类活动频繁导致了有机质的流失和分解加速[34]。土壤pH是土壤化学性质的综合反映,直接影响土壤中养分的存在形态[34]。本文中N0组土壤为中性而N1组土壤为酸性,这是由于城区绿地土壤有机碳含量较工业区林地有机碳含量低,土壤容重大造成土壤水分含量减小,有机质分解缓慢,有机酸减少,导致土壤pH增加[35-36]。另一方面,工业区林地土壤非毛管孔隙度的增加也影响着该区域土壤pH的降低。此外,土壤pH的高低还与城市绿地养护中常用中性或酸性改良材料有关[7,36]。

重金属含量是表征土壤生态环境的必要参数,重金属总量越高,潜在的环境危害就越大[37-38]。本研究中,N0和N1组6种土壤重金属含量虽低于国家土壤环境质量二级标准,但2组土壤Zn、Pb和Ni元素含量均超过上海市背景值,且尤其以Zn含量显著,这与万梦雪等人所得结果一致[25]。研究表明Zn和Pb是交通污染来源的示踪物质[39],从被监测区域分布情况可推断城区绿地重金属Zn和Pb污染主要源于城市交通运输及汽车尾气大量排放,工业区林地重金属Pb和Ni污染可能源于化工和金属加工行业的主要原料及危废治理排放物[30,40]。此外,Cr和Cd含量与上海市背景值相近,两者来源可能与土壤母质有关[25]。重金属元素之间的显著相关性反映出各元素来源相同或经历相同的地球化学过程[41-42]。相关分析结果显示土壤全氮与Ni和Cr之间呈极显著正相关,说明Ni和Cr可能存在同源性,但基于重金属有自然源和人为源等不同来源,元素来源分析有待进一步验证。整体来看,工业区林地土壤重金属的综合污染指数高于城区绿地土壤,这意味着工业区林地土壤表现出更高的重金属污染程度和生态风险水平。

本研究表明城区绿地和工业林地土壤理化性质有所不同,其中城区绿地土壤属中性土壤,工业区林地土壤呈酸性,且均存在土壤物理性能及肥力不佳等现象,具体表现为土壤容重大和养分较匮乏。从被监测区域情况看,Zn,Ni,Pb,Cr,Cd和Cu在2区域表层土壤中存在不同程度的累积,其中Zn,Pb,Ni含量均超过上海市土壤重金属背景值。单因子污染指数和内梅罗综合污染指数分析发现,2区域土壤均受到Zn,Ni,Pb中度污染,未受Cu污染。城区绿地土壤重金属的综合污染指数为0.763,属未污染;工业区林地土壤重金属的综合污染指数为1.098,属轻度污染。

本文对于城区绿地和工业区林地土壤环境质量的调查仍处于初级阶段,今后应扩大采样范围开展深入研究和全面探讨,并基于不同区域土壤问题有针对性地改良,增加土壤保水透气性,保证绿地植物的土壤养分需求,同时加强对工业园区的监管力度,从源头上预防土壤生态污染。

参考文献:

[1] LUO C,LIU C,WANG Y,et al.Heavy metal contamination in soils and vegetables near an e-waste processing site, south China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 186(1): 481-490.

[2] HU X F, WU H X, HU X, et al. Impact of urbanization on Shanghai's soil environmental quality[J]. Pedosphere, 2004, 14(2): 151-158.

[3] 王 钊,郭 宇,石晓龙.广州市某工业区土壤重金属污染评价[J].环境科学与技术,2020,43(S2):214-221.

[4] 史贵涛,陈振楼,许世远,等.上海市区公园土壤重金属含量及其污染评价[J].土壤通报,2006,37(3):490-494.

[5] SUN Y B,ZHOU Q X,XIE X K,et al.Spatial, sources and risk assessment of heavy metal contamination of urban soils in typical regions of Shenyang, China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010,174(1-3):455-462.

[6] 赵 靓,梁云平,陈 倩,等.中国北方某市城市绿地土壤重金属空间分布特征、污染评价及来源解析[J].环境科学,2020,41(12):5552-5561.

[7] 秦 娟,许克福.我国城市绿地土壤质量研究综述与展望[J].

生态科学,2018,37(1): 200-210.
[8] 裴　蓓.上海市杨浦区城市道路绿地土壤肥力分级及评价[J].上海农业学报,2020,36(3):41-46.
[9] 司志国,彭志宏,俞元春,等.徐州城市绿地土壤肥力质量评价[J].南京林业大学学报(自然科学版),2013, 37(3):60-64.
[10] 马　想,张　浪,黄绍敏,等.上海城市绿地土壤肥力变化分析[J].中国园林,2020,36(5):104-109.
[11] 谢小进,康建成,李卫江,等.上海市不同工业类型土壤重金属含量差异性分析[J].生态环境学报,2009,18(5):1777-1782.
[12] 邵学新,黄　标,孙维侠,等.长江三角洲典型地区工业企业的分布对土壤重金属污染的影响[J].土壤学报,2006,43(3):397-404.
[13] 柳云龙,章立佳,韩晓非,等.上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价[J].环境科学, 2012,33(2):599-605.
[14] 张　义,周心劝,曾晓敏,等.长江经济带工业区土壤重金属污染特征与评价[J].环境科学,2022,43(4):2062-2070.
[15] 施婉君,靳治国,周　培.上海市土壤重金属污染研究进展[J].上海环境科学, 2009,28 (2): 72-75.
[16] 郭　晗,孙英君,王绪璐,等.县域城市土壤重金属空间分布特征及来源解析[J].环境科学学报,2022,42(1):287-297.
[17] 汪　峰,黄言欢,李如忠.等.有色金属矿业城市典型村镇土壤重金属污染评价及来源解析[J].环境科学,2022,43(9):4800-4809.
[18] 沈　城,刘馥雯,吴　健,等.再开发利用工业场地土壤重金属含量分布及生态风险[J].环境科学,2020,41(11):5125-5132.
[19] 王晓雨,刘恩峰,杨祥梦,等.城市土壤和地表灰尘重金属污染研究进展与展望[J].环境科学,2024,45(5):2926-2938.
[20] 方凤满,林跃胜,王海东,等.城市地表灰尘中重金属的来源、暴露特征及其环境效应[J].生态学报,2011,31(23):316-325.
[21] 刘　杰,陈秀玲,范逸飞,等.中国城市公园灰尘的重金属空间分布特征及其影响因素[J].环境化学,2022, 41(2):450-459.
[22] 方海兰,徐　忠,张　浪,等.绿化种植土壤:CJ/T 340—2016[S].北京:中国标准出版社, 2016.
[23] 伍海兵.上海中心城区典型绿地土壤物理性质特征研究[J].土壤, 2018, 50(1): 155-161.
[24] 张　琪,方海兰,杨　意,等.上海市浦东公路绿地土壤肥力质量评价 [J].华中农业大学学报, 2007,26(4):491-495.
[25] 万梦雪,焦文涛,胡文友,等.城市工业区土壤重金属累积特征与来源解析——以上海市闵行区典型工业区为例[J].环境化学, 2023,42(6):1886-1898.
[26] 刘　申,刘凤枝,李晓华,等.天津公园土壤重金属污染评价及其空间分析[J].生态环境学报, 2010,19(5):1097-1102.
[27] 孟　飞,刘　敏,崔　健.上海农田土壤重金属含量的空间分析[[J].土壤学报,2008,45(4):725-728.
[28] NEMEROW N.Stream, lake, estuary, and ocean pollution [M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc,1985.
[29] 曾伟斌,顾高铨,万小铭,等.多功能区工业园土壤和地表灰尘重金属污染及生态风险差异分析[J].环境科学,2021,42(3):1105-1113.
[30] 陈　展,吴育林,张　刚.上海市某大型再开发场地土壤重金属污染特征、评价及来源分析[J].水土保持通报,2021,41(1):227-236.
[31] 查同刚.土壤理化分析[M].北京:中国林业出版社, 2017.
[32] 伍海兵,张青青,梁　晶.城市绿地土壤肥力质量综合评价方法初探[J].土壤通报,2020,51(4):795-800.
[33] 郝瑞军,方海兰,沈烈英,等.上海中心城区公园土壤的肥力特征分析[J].中国土壤与肥料,2011(5):20-26.
[34] 马　想,伍海兵,梁　晶.上海城市绿地土壤 pH 分布特征及影响因素[J].上海农业学报,2023,39(2):56-63.
[35] 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(S1): 89-94.
[36] 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.
[37] 古一帆,何　明,李进玲,等.上海奉贤区土壤理化性质与重金属含量的关系[J].上海交通大学学报(农业科学版),2009,27(6):601-605,623.
[38] 林　啸,刘　敏,侯立军,等.上海城市土壤和地表灰尘重金属污染现状及评价[J].中国环境科学,2007,27(5): 613-618.
[39] 阮玉龙,李向东,黎廷宇,等.喀斯特地区农田土壤重金属污染及其对人体健康的危害[J].地球与环境,2015,43(1):92-97.
[40] 滕吉艳.上海城市中心区不同类型绿地土壤重金属污染特征[J].土壤通报,2021,52(4):927-933.
[41] ZAHARESCU D G,HOODA P S,SOLER A P,et,al.Trace metals and their source in the catchment of the high altitude Lake Respomuso,Central Pyrenees [J].Science of the Total Environment, 2009,407(11):3546-3553.
[42] 李寅寅,何池全.上海某化工区土壤重金属污染情况的调查与评价[J].上海大学学报(自然科学版),2016,22(2):151-158.