

典型复垦工业场地土壤垂直剖面重金属 污染特征及潜在生态风险

徐志豪¹, 吴健², 王敏², 黄宇驰², 鄢忠纯², 吴建强², 黄沈发²

(1. 东华大学 环境科学与工程学院, 上海 201620; 2. 上海市环境科学研究院, 上海 200233)

摘要: [目的] 揭示典型复垦工业场地中重金属元素污染特征及潜在生态风险, 为此类工业复垦场地管理和治理提供科学依据。[方法] 分析上海市 33 块典型复垦工业场地表层、中层和深层土壤中 8 项重金属(砷、镉、铬、铜、镍、铅、锌、汞)的含量, 采用内梅罗指数法和潜在生态风险指数法对复垦工业场地土壤重金属污染进行生态风险评价。[结果] ① 复垦工业场地土壤中重金属整体风险可控, 17 个点位重金属含量超过风险筛选值, 其中以表层土壤中 Cu 和 Zn 污染最为突出, 最大超标倍数分别为 3.24, 3.73 倍。下层土壤中重金属平均含量均低于上海市土壤背景值, 部分点位存在一定的重金属累积; ② 复垦工业场地表层、中层和深层土壤重金属内梅罗综合污染指数分别为 1.21, 0.78, 0.73, 分别处于轻度污染、尚清洁和尚清洁水平, 其中表层 Cd 和 Zn 污染最为突出; ③ 除表层土壤 Hg(中度)和 Cd(中度)外, 其余重金属元素均存在轻微生态风险, 表层土壤潜在生态风险指数(RI)为 107.22, 总体潜在生态风险接近中等水平, 中层及深层土壤处于轻微潜在生态风险水平。[结论] 复垦工业场地土壤重金属存在一定程度的累积性污染, 其中 Cu, Cd, Hg 和 Zn 污染较为突出, 考虑到毒性响应因素, 则 Hg 和 Cd 更应引起关注。

关键词: 复垦工业场地; 土壤垂直剖面; 重金属; 内梅罗; 潜在生态风险

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)02-0043-05

中图分类号: X53, X826

文献参数: 徐志豪, 吴健, 王敏, 等. 典型复垦工业场地土壤垂直剖面重金属污染特征及潜在生态风险[J]. 水土保持通报, 2019, 39(2): 43-47. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2019.02.007; Xu Zhihao, Wu Jian, Wang Min, et al. Characteristics and potential ecological risk of heavy metal in vertical soil profiles of typical reclaimed industrial sites[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(2): 43-47.

Characteristics and Potential Ecological Risk of Heavy Metal in Vertical Soil Profiles of Typical Reclaimed Industrial Sites

Xu Zhihao¹, Wu Jian², Wang Min², Huang Yuchi²,

Yan Zhongchun², Wu Jianqiang², Huang Shenfa²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China)

Abstract: [Objective] The pollution characteristics and potential ecological risk of heavy metals in reclaimed industrial sites were investigated in order to provide scientific basis for the management and remediation of similar reclaimed industrial sites. [Methods] Eight heavy metals (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn and Hg) were quantitatively analyzed in the surface, subsurface and deep soil of thirty-three typical reclaimed industrial sites in Shanghai City. The potential ecological risk and pollution degree of heavy metals in the sites were evaluated by using Nemerow index and potential ecological risk index. [Results] ① The risk of 8 heavy metals was acceptable overall. The contents of heavy metals in 17 points were higher than the screening value, while the pollution of Cu and Zn in surface soil was the most prominent. The average contents of 8 heavy metals in subsurface and deep soils were lower than the background value of Shanghai City, with certain accumulation

收稿日期: 2018-08-29

修回日期: 2018-09-25

资助项目: 上海市环境保护局重大科研项目“上海市农田土壤生态风险评估与防控研究”(沪环科[2016]第7号), “上海城市土壤污染风险甄别及监测预警技术研究与应用”(沪环科[2018]第3号); 上海市科学技术委员会科研计划项目“工业污染场地典型污染物污染治理和健康风险评估技术研究”(17DZ1202200)

第一作者: 徐志豪(1993—), 男(汉族), 上海市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤风险评估。E-mail: xuzh_waljp@foxmail.com。

通讯作者: 黄沈发(1967—), 男(汉族), 上海市人, 本科, 教授级高级工程师, 主要从事城市化过程生态环境影响研究。E-mail: huangsf@saes.sh.cn。

of heavy metals in some points; ② The Nemerow index of heavy metals in vertical soil profile was 1.21, 0.78 and 0.73 respectively, was in a light pollution or still clean level. Among which, Cd and Zn in surface soil were the most prominent; ③ The heavy metals in the reclaimed industrial sites were all at a slightly latent ecological risk level, except of Hg(medium) and Cd(medium) in surface soil. The potential ecological risk of surface soil was 107.22, which was close to a medium level, while the risks of subsurface and deep soil were mild. [Conclusion] The soil heavy metals in the sites were in an accumulative pollution to certain extent and the pollution of Cu, Cd, Hg and Zn were the most prominent. If the toxic response factors were concerned, Hg and Cd should be paid more attention.

Keywords: reclaimed industrial sites; vertical soil profile; heavy metal; Nemerow index; potential ecological risk

土壤是水体、大气及各类营养元素和化学物质的过滤器和缓冲器,也为人类提供了生存发展所需的物质基础^[1-2]。在工业化高速发展的进程中,各类污染物不断在土壤中积累,导致土壤环境质量急剧下降,其中重金属污染因其生物积累性和毒性危害而备受关注^[3-6]。上海市作为全国老工业基地之一,工业发达,随着城市化的快速推进,土地资源日趋紧张,为缓解人地矛盾,大量工业企业关停并转,尤其是近年来低效工业用地复垦还耕力度加大,亟需掌握这些工业遗留场地的污染状况,探明场地土壤重金属污染特征,以保障人居环境安全和农产品安全。目前,对复垦场地土壤重金属污染的研究主要集中于矿区周围^[7-9],而针对城市复垦工业场地的研究相对缺乏^[10]。不同于矿山复垦土地,工业场地内的地下储罐、原辅料输送管线的“跑冒滴漏”均可能会对场地深层土壤乃至地下水造成污染。而场地复垦过程对土壤环境的扰动^[11]也易使下层土壤外露,进而对外界产生潜在危害和影响。因此,本研究利用上海市近年来推进低效工业场地复垦还耕的契机,选择典型行业的 33 块复垦工业场地进行土壤分层采样检测,分析其重金属污染特征及潜在生态风险,以期为此类工业复垦场地管理和治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集、处理与测定

选择上海市 33 块典型复垦工业场地,行业类型主要涉及金属制品、机械加工、化工等。根据现场踏勘及行业污染特征,结合原企业生产工艺流程,在场地内识别其生产车间、贮存区、废物处置区等潜在污染区域,每个场地设置 3~4 个采样点,采用梅花布点法使用螺旋钻机采集各采样点表层(0~0.5 m)、中层(地下水水位以上,1~3 m)及深层(地下水水位以下,3~6 m)土壤混合样品各 500 g 左右,装入采样瓶封装^[12]。在实验室室温自然风干样品,拣出枯枝落叶、砖瓦块和垃圾等侵入体,然后将样品碾碎,全部通

过 2 mm 尼龙筛并充分混合,用玛瑙研钵进一步研磨,使之全部通过 0.149 mm 尼龙筛备用。土壤样品经盐酸—硝酸—氢氟酸—高氯酸消解后,采用 USE-PA6010C-2007 方法,利用 2100DV 等离子发射光谱仪对 As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb 和 Zn 进行检测;经硫酸—硝酸—高锰酸钾消解后,采用《GB/T17136-1997》方法,使用 NICMA-3000 测汞仪对 Hg 进行检测。测定过程中,随机选取 10% 土壤样品做平行样,与样品测试结果偏差在 20% 以内,符合质控要求。

1.2 评价方法

1.2.1 内梅罗污染指数法 内梅罗污染指数法是国内外普遍采用的土壤重金属综合评价方法之一,不仅能反映不同污染物对环境的综合污染状况,还考虑了高含量污染物对环境的影响。其计算公式为:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

$$P_N = \sqrt{\frac{P_{i\max}^2 + P_{i\text{ave}}^2}{2}} \quad (2)$$

式中: C_i ——重金属 i 的实测含量(mg/kg); S_i ——重金属 i 的评价标准(mg/kg),本文采用上海市土壤环境背景值作为评价标准^[15]; P_i ——重金属 i 的单污染指数; $P_{i\max}$, $P_{i\text{ave}}$ ——重金属单污染指数的最大值和平均值; P_N ——内梅罗综合污染指数。内梅罗综合污染指数法(P_N)评价标准为: $P_N \leq 0.7$,清洁; $0.7 < P_N \leq 1.0$,尚清洁; $1.0 < P_N \leq 2.0$,轻度污染; $2.0 < P_N \leq 3.0$,中度污染; $P_N > 3.0$,重度污染。

1.2.2 潜在生态风险指数法 潜在生态风险指数法^[16]侧重于多元素间的协同作用,并综合考虑了重金属的生态效应和毒理学效应,是综合反映重金属对生态环境潜在影响的指标,因此得到了较为广泛的应用。

$$C_j = \frac{C_i}{C_n} \quad (3)$$

$$E_r^i = T_r^i \cdot C_j \quad (4)$$

$$RI = \sum E_r^i \quad (5)$$

式中: C_i ——重金属 i 的实测含量; C_n ——重金属 i

的背景值; C_f^i ——重金属 i 的污染系数; T_r^i ——重金属 i 的毒性响应系数; E_r^i ——重金属 i 的潜在生态风险系数; RI——潜在生态风险指数。各重金属毒性系数由大到小依次为: $Hg(40) > Cd(30) > As(10) > Cu = Ni = Pb(5) > Cr(2) > Zn(1)$ 。Hakanson 将 PCB 及 As, Cd, Cr, Cu, Pb, Zn 和 Hg 共 8 项污染物的毒性系数之和(133)以一定比例放大后得到潜在生态风险指数一级阈值(150), 随后各级逐级扩大 2 倍。基于上述分级方法, 结合本研究实际监测指标, 对潜在生态风险指数分级标准进行了调整(表 1)。

表 1 修正后的潜在生态风险指数分级标准

潜在生态风险系数 E_r^i	潜在生态风险指数 RI	风险等级
$0 \leq E_r^i < 40$	$0 \leq RI < 110$	轻微
$40 \leq E_r^i < 80$	$110 \leq RI < 220$	中等
$80 \leq E_r^i < 160$	$220 \leq RI < 440$	较强
$160 \leq E_r^i < 320$	$RI \geq 440$	很强
$E_r^i \geq 320$		极强

2 结果与讨论

2.1 土壤剖面重金属含量分布特征

如表 2 所示, 8 项重金属在复垦工业场地各点位土壤垂直剖面样品中有不同程度检出。表层土壤中, 重金属 Cd, Cu, Pb 和 Zn 平均含量均高于上海市土壤背景值, 分别为背景值的 1.4, 1.2, 1.1 和 1.3 倍, 接近于上海市农田、绿地土壤^[13, 17-21] 重金属平均含量, 但低于上海市工业区土壤重金属含量^[3, 22-23]。下层(中层和深层)土壤中重金属平均含量均低于上海市土壤背景值, 部分点位存在一定的重金属累积。各层土壤中重金属含量检出含量总体表现为: 表层 > 中层 > 深层, 其中表层和下层土壤中 Cr, Cu, Ni 和 As 含量无显著性差异 ($p > 0.05$); 表层和下层土壤中 Zn, Hg 以及各层土壤间 Cd, Pb 含量差异显著, 表明场地土壤已受到明显 Zn, Hg, Cd, Pb 污染, 其中 Zn, Hg 污染主要在表层富集 ($p < 0.05$)。

表 2 复垦工业场地土壤重金属含量统计

监测因子	采样深度	土壤重金属含量								
		最大值	最小值	平均值	中位值	标准差	检出限	背景值	农用地筛选值	农用地管制值
As	表层	53.80	1.68	6.54	5.39	6.03				
	中层	23.32	1.56	5.78	5.10	3.23	1.00	9.1	20	100
	深层	19.00	ND	5.16	4.19	3.76				
Cd	表层	0.92	0.06	0.18	0.12	0.16				
	中层	1.43	0.01	0.11	0.09	0.15	0.01	0.13	0.6	4.0
	深层	0.18	0.04	0.08	0.07	0.02				
Cr	表层	261.53	11.84	48.11	36.14	39.12				
	中层	135.27	18.62	40.70	38.20	18.23	0.40	75	250	1 300
	深层	80.40	17.63	36.04	30.90	15.04				
Cu	表层	423.68	8.05	33.57	19.26	51.54				
	中层	91.33	7.18	20.12	17.04	11.88	0.10	28.6	100	—
	深层	76.14	5.80	17.30	12.26	11.15				
Ni	表层	82.77	13.41	26.83	25.15	9.20				
	中层	48.99	14.24	26.83	25.37	7.95	1.00	31.9	190	—
	深层	55.20	13.85	25.07	21.16	9.29				
Pb	表层	391.97	7.26	27.86	15.84	49.36				
	中层	50.52	6.27	15.68	13.42	7.41	1.00	25.5	170	1 000
	深层	36.62	4.72	13.38	11.10	6.77				
Zn	表层	1420	33.74	111.95	72.20	147.68				
	中层	273.89	23.60	68.11	63.70	34.03	0.10	86.1	300	—
	深层	226.20	26.16	60.63	50.70	32.69				
Hg	表层	0.660	0.012	0.102	0.066	0.10				
	中层	0.288	0.012	0.053	0.033	0.05	0.001	0.1	1.0	6.0
	深层	0.525	0.009	0.041	0.026	0.07				

注: 样本数 $n=100$; ND 表示未检出。

对比《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)(GB15618-2018)》,8项重金属平均含量均低于风险筛选值。如图1所示,17个点位土壤重金属As,Cd,Cr,Cu,Pb和Zn含量介于筛选值和管制值之间,其中以Cu和Zn超标较为严重,最大检出含量分别为风险筛选值的4.24,4.73倍。各重金属点位超筛选值比例 $\leq 5\%$,超筛选值样品主要位于土壤表层,各有1个点位中层土壤检出As和Cd含量高于筛选值,占比为1%。

2.2 土壤重金属污染评价

根据公式(1)–(2),计算典型复垦工业场地土壤垂直剖面重金属单因子指数 P_i 和综合污染指数 P_N ,结果分别如表3和图2所示。从单因子指数 P_i 来看,复垦工业场地表层土壤Cd,Cu,Pb,Zn和Hg总体处于轻度污染水平,个别点位Cd,Cu,Zn和Hg达到中度污染水平,占比分别为6%,8%,8%和7%,其

中Cd污染程度最大,8个点位达到重度污染水平;下层土壤中各重金属 P_i 值有不同程度降低, P_i 平均值均位于警戒线以下,呈尚清洁水平。从综合污染指数 P_N 来看,表层土壤总体处于轻度污染水平,个别点位污染水平较高,中度和重度污染比例分别为16%和12%,中层和深层土壤重度污染比例分别为1%和2%。

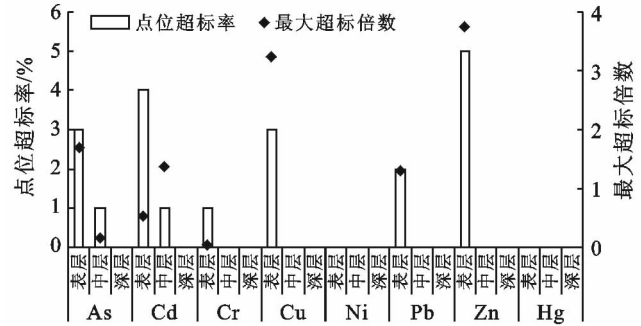


图1 土壤剖面重金属点位超标情况

表3 内梅罗综合污染指数评价结果

剖面	单因子指数 P_i 平均值								综合污染指数 P_N
	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg	
表层	0.72	1.37	0.64	1.17	0.84	1.09	1.30	1.02	1.21
中层	0.64	0.87	0.54	0.70	0.84	0.61	0.79	0.53	0.78
深层	0.66	0.58	0.51	0.61	0.84	0.53	0.71	0.38	0.73

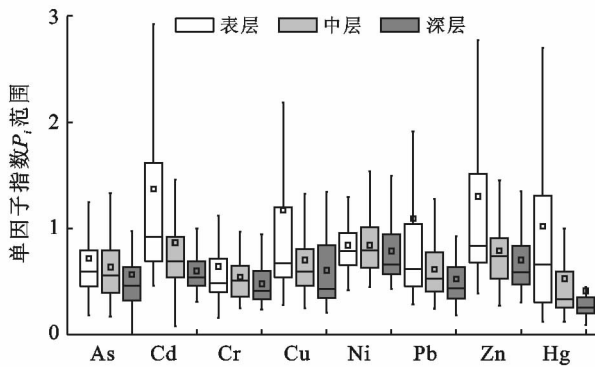


图2 土壤重金属单因子指数分布

对比相关研究,天津大港工业区表层土壤 P_N 值达到4.0以上,污染严重,其中以Cd污染最为突出^[23-24];内蒙古某复垦矿区土壤 P_N 值为2.72,各重金属 P_i 值均大于1,其中Hg的 P_i 值为3.48,处于重度污染水平^[25];重庆某制药企业退役场地表层及下层土壤 P_N 值分别为2.79,1.53,其中Pb和Cu的 P_i 值居首,分别达到了3.6,2.6^[12]。本研究表层、中层和深层土壤 P_N 值分别为1.21,0.78,0.73,低于上述研究结果。此外,与上述研究有所不同的是,Cd和Zn是本研究的主要污染因子,对研究区表层土壤 P_N

值的贡献率较高,这可能与场地行业类型的差异有关。本研究中,Cd和Zn高含量值主要分布于金属制品及机械加工,这些企业对重金属的用量较大^[26-27],尤其是Cd和Zn因其良好的理化特性,常作为其生产、加工工艺的主要原辅材料,因此污染较为严重。

2.3 土壤重金属潜在生态风险

根据公式(3)–(5),计算了复垦工业场地土壤垂直剖面重金属单项潜在生态风险系数 E_i^p 和潜在生态风险指数RI,结果如表4和图3所示。对比点位土壤重金属潜在生态风险指数RI,大部分点位土壤处于轻微风险水平,表层、中层和深层土壤轻微风险占比分别为66%,92%和96%,无点位存在很强或极强风险。从单项潜在生态风险系数 E_i^p 来看,表层土壤Cd和Hg总体存在中等水平生态风险,个别点位生态风险很强,占比分别为4%和2%;下层土壤中,各重金属总体生态风险轻微,个别点位中层土壤Cd和深层土壤Hg风险极强或很强,占比分别为1%和2%。由此表明,重金属污染风险主要集中于场地土壤表层,下层土壤潜在生态风险较小。复垦工业场地各层土壤中,重金属Cd和Hg对RI的贡献率较高,与许多研究结果相符^[12,28-29]。对比相关研究,上海电镀、化工等典型污染行业表层土壤RI值介于几十至数

万不等^[3],山西省某工业区土壤 RI 值为 278.18^[30],重庆某医药化工企业退役场地表层及下层土壤 RI 值分

别为 139.0,91.4^[12],本研究区表层和下层土壤潜在生态风险相对较低。

表 4 潜在生态风险指数评价结果

剖面	单项潜在生态风险系数 E_i 平均值								潜在生态风险指数 RI
	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg	
表层	7.19	41.12	1.28	5.87	4.21	5.46	1.30	40.79	107.22
中层	6.35	25.97	1.09	3.52	4.21	3.07	0.79	21.07	66.06
深层	6.64	17.42	1.01	3.07	4.20	2.67	0.71	15.32	51.03

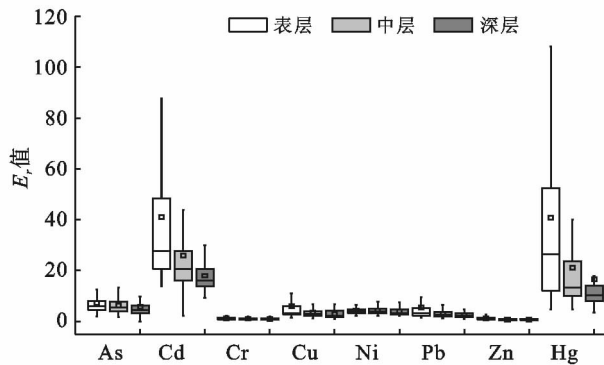


图 3 土壤重金属潜在生态风险系数分布

3 结论

复垦工业场地土壤重金属整体风险可控,各项重金属平均含量低于农用地风险筛选值,部分点位表层 Cu, Cd, Hg 和 Zn 污染问题突出,存在一定程度的污染富集和潜在生态风险,考虑到毒性响应因素,则 Hg 和 Cd 更应引起关注。根据场地土壤条件及重金属污染特征,可通过低富集型作物种植等农艺调控和替代种植等措施达到农业安全生产需求^[31-32]。

[参 考 文 献]

[1] Glanz J. Saving our soil: solutions for sustaining earth's vital resource [M]. Boulder, Colo, USA: Johnson Books, 1995.

[2] 刘占锋,傅伯杰,刘国华,等.土壤质量与土壤质量指标及其评价[J].生态学报,2005,26(3):901-913.

[3] 赵沁娜,徐启新,杨凯.潜在生态危害指数法在典型污染行业土壤污染评价中的应用[J].华东师范大学学报:自然科学版,2005(1):111-116.

[4] 周建军,周桔,冯仁国.我国土壤重金属污染现状及治理战略[J].中国科学院院刊,2014,29(3):315-320.

[5] 张小敏,张秀英,钟大洋,等.中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究[J].环境科学,2014,35(2):692-703.

[6] 戴彬,吕建树,战金成,等.山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价[J].环境科学,2015,36(2):507-515.

[7] 江培龙,方凤满,张杰琼,等.淮南煤矿复垦区土壤重金

属含量分布及潜在生态风险评价[J].水土保持通报,2013,33(6):161-165.

[8] 聂兴山.铝矿复垦土壤重金属含量变化及污染风险评价[J].水土保持通报,2017,37(2):321-326.

[9] 徐良骥,黄璨,章如芹,等.煤矸石充填复垦地理化特性与重金属分布特征[J].农业工程学报,2014,30(5):211-219.

[10] 吴健,王敏,张辉鹏,等.复垦工业场地土壤和周边河道沉积物重金属污染及潜在生态风险[J].环境科学,2018,39(12):5620-5627.

[11] 王莉,张和生.国内外矿区土地复垦研究进展[J].水土保持研究,2013,20(1):294-300.

[12] 郭念,江韬,魏世强,等.典型工业退役场地土壤重金属污染及风险评价[J].西南师范大学学报:自然科学版,2014,39(5):118-125.

[13] 沈根祥,谢争,钱晓雍,等.上海市蔬菜农田土壤重金属污染物累积调查分析[J].农业环境科学学报,2006,25(S1):37-40.

[14] 杨玉敏,师学义,张琛.基于内梅罗指数法的复垦村庄土壤重金属污染评价及空间分布[J].水土保持研究,2016,23(4):338-343.

[15] 王云,汪雅谷,罗海林,等.上海市土壤环境背景值[M].北京:中国环境科学出版社,1992.

[16] Lars H. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. Water Research, 1980,14(8):975-1001.

[17] 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.

[18] 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.

[19] 左倬,王金凤,由文辉.上海城市不同绿地类型土壤重金属污染研究[J].生态科学,2008,27(1):12-16.

[20] 孙超,陈振楼,毕春娟,等.上海市崇明岛农田土壤重金属的环境质量评价[J].地理学报,2009,64(5):619-628.

[21] 袁大伟,何七勇,郑宪清,等.上海松江区蔬菜田土壤重金属含量与生态风险预警评估[J].上海农业学报,2013,29(4):42-46.

[22] 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.

- [10] 王晋,庄舜尧,朱兆良. 不同种植年限水田与果园土壤有机氮组分变化[J]. 土壤学报,2014,51(2):286-294.
- [11] 孔樟良,季淑枫,章明奎,等. 水田长期改种蔬菜土壤化学性状变化特征[J]. 中国农学通报,2015,31(23):147-152.
- [12] 麻万诸,章明奎. 中国土系志(浙江卷)[M]. 北京:科学技术出版社,2017:1-350.
- [13] 张甘霖,龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京:科学出版社,2012:1-243.
- [14] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社,1986:14-333.
- [15] Lin Q, Brookes P C. An evaluation of the substrate-induced respiration method [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999,31(14):1969-1983.
- [16] 文倩,赵小蓉,陈焕伟,等. 半干旱地区不同土壤团聚体中微生物量碳的分布特征[J]. 中国农业科学,2004, 37(10):1504-1509.
- [17] 张金波,宋长春. 土地利用方式对土壤碳库影响的敏感性评价指标. 生态环境[J],2003,12(4):500-504.
- [18] Sparling G P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter[J]. *Australia Journal of Soil Research*, 1992, 30(2): 195-207.
- [19] 章明奎,唐红娟,常跃畅. 黄斑田(铁聚水耕人为土)返旱后土壤发生学性质的变化[C]//面向未来的土壤科学(上册):中国土壤学会第十二次全国会员代表大会暨第九届海峡两岸土壤肥科学术交流研讨会论文集. 四川 成都:电子科技大学出版社,2012.
- [20] 韩书成,濮俊杰,陈凤,等. 长江三角洲典型地区土壤性质对土地利用变化的响应:以江苏省锡山市为例[J]. 土壤学报,2007,44(4):612-619.
- [21] 徐阳春,沈其荣. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳,氮,磷的影响[J]. 土壤学报,2002,39(1):89-96.
- [22] 唐玉妹,魏朝富,颜廷梅,等. 土壤质量生物学指标研究进展[J]. 土壤,2007,39(2):157-163.
- [23] 刘善江,夏雪,陈桂梅,等. 土壤酶的研究进展[J]. 中国农学通报,2011,27(21):1-7.
- [24] 田慧,谭周进,屠乃美,等. 少免耕土壤生态学效应研究进展[J]. 耕作与栽培,2006(5):10-12.
- [25] 冉炜,沈其荣. 尿素浓度、培养时间和温度对 3 种土壤尿素水解过程的影响[J]. 南京农业大学学报,2000,23(2):43-46.
- [26] Cabrera M L, Kissel D E, Bock B R. Urea hydrolysis in soil: effects of urea concentration and soil pH[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1991, 23(12): 1121-1124.
- [27] 张华勇,尹睿,黄锦法,等. 稻麦轮作田改为菜地后生化指标的变化[J]. 土壤,2005,37(2):182-186.
- [28] 颜慧,钟文辉,李忠佩,等. 长期施肥对红壤水稻土磷脂脂肪酸特性和酶活性的影响[J]. 应用生态学报,2008, 19(1):71-75.
- [29] 万忠梅,吴景贵. 土壤酶活性影响因子研究进展[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2005,33(6):87-92.
- [30] 王丽,梁智. 新疆棉花连作对土壤酶活性的影响:以新疆生产建设兵团农一师 10 团为例[J]. 新疆农业大学学报,2008,31(6):50-53.
- [31] 梅守荣. 土壤酶活性及其测定[J]. 上海农业科技,1985(1):17-18.

(上接第 47 页)

- [23] 张倩,陈宗娟,彭昌盛,等. 大港工业区土壤重金属污染及生态风险评价[J]. 环境科学,2015,36(11):4232-4240.
- [24] 陈宗娟,张倩,张强,等. 天津东南部某区域不同土地利用方式下土壤重金属的累积特征[J]. 生态与农村环境学报,2015,31(2):166-173.
- [25] Wang Jinman, Liu Weihong, Yang Ruixuan, et al. Assessment of the potential ecological risk of heavy metals in reclaimed soils at an opencast coal mine[J]. *Disaster Advance*, 2013,6(S3):366-77.
- [26] 董璟琦,张红振,吴舜泽,等. 西部某机械加工企业酸洗场地环境调查与污染特征分析[J]. 环境工程学报,2016,10(9):5222-5230.
- [27] 范俊楠,贺小敏,陆泗进,等. 湖北省重点行业企业周边土壤重金属污染现状及潜在生态危害评价[J]. 华中农
- 业大学学报,2018,37(5):74-80.
- [28] 王莹,董霁红. 徐州矿区充填复垦地重金属污染的潜在生态风险评价[J]. 煤炭学报,2009,34(5):650-655.
- [29] Yao Duo-xi, Meng Jun, Zhang Zhi-guo. Heavy metal pollution and potential ecological risk in reclaimed soils in Huainan mining area[J]. *Journal of Coal Science and Engineering*, 2010,16(3):316-319.
- [30] 葛元英,崔旭,冯两蕊,等. 山西典型工业发展区土壤重金属潜在生态风险评价[J]. 山西农业科学,2016,44(5):635-639.
- [31] 焦位雄,杨虎德,冯丹妮,等. Cd, Hg, Pb 胁迫下不同作物可食部分重金属含量及累积特征研究[J]. 农业环境科学学报,2017,36(9):1726-1733.
- [32] 韩峰,高雪,陈海燕. 不同种类蔬菜对土壤重金属的富集差异[J]. 贵州农业科学,2014,42(6):129-132.