doi: 10.11857/j.issn.1674-5124.2018080124

滨江沿海地区耕地土壤重金属污染特征及潜在生态风险

吴 为[1]，武攀峰[2]，缪 明[1]，张 琰[1]，张 敏[1]
(1. 南通市农产品检验测试中心, 江苏 南通 226002; 2. 南通市环境监测中心站, 江苏 南通 226006)

摘 要: 该文基于 855 个采样点位重金属实测数据, 综合采用单因子、内梅罗污染指数法和 Hakanson 潜在生态危害指数法 (RI) 两种方法, 全面评估南通市耕地土壤重金属的污染状况, 分析其主要污染来源。结果表明: 除如皋和海安的 Hg 元素外, Cr、Pb、Cd、As、Hg 含量均高于背景值, 分别为背景值的 1.17~1.48 倍、1.02~1.20 倍、1.28~1.69 倍、1.03~1.80 倍和 1.11~1.34 倍, 但低于国家标准, 污染等级为安全。Hakanson 潜在生态危害评价结果显示, 研究区域耕地土壤重金属污染为低生态风险程度, 其中以通州、市区、启东和海门较高, 如皋最低; 各重金属元素E_r^i值从大到小依次为 Cd>Hg>As>Pb>Cr, 两种方法评价结果间存在一定的差异。区域内耕地土壤 Cd 主要来自化肥和农药非点源污染; Hg 和 As 污染主要位于滨江沿海区域, 可能与集中的化工园区和外源性 Hg、As 污染物大气传输等有关; 与此同时还应关注海安与通州两地电镀、钢丝绳和纺织染整企业对周边 Cr 的污染。

关键词: 耕地土壤; 重金属; 潜在生态风险; 污染源
中图分类号: X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674–5124(2019)02–0078–05

Pollution characteristics and potential ecological risk of heavy metals in cultivated soils of riverside and coastal area

WU Wei[1], WU Panfeng[2], MIAO Ming[1], ZHANG Yan[1], ZHANG Min[1]
(1. Nantong Agricultural Product Test Center, Nantong 226002, China;
2. Nantong Environment Monitoring Center, Nantong 226006, China)

Abstract: The heavy metal pollution in cultivated soil in Nantong was comprehensively evaluated and the main pollution sources were analyzed based on the measured data of heavy metals at 855 sampling points through single factor, Nemerow pollution index and Hakanson potential ecological risk method (RI). According to the results, except for Hg in cultivated soils of Rugao and Hai'an, Cr, Pb, Cd, As, Hg are all higher than the background value, respectively in 1.17-1.48 times, 1.02-1.20 times, 1.28-1.69 times, 1.03-1.80 times and 1.11-1.34 times. However, they are lower than the national standards, and their pollution level is in the safe zone. According to results Hakanson potential ecological risk method (RI), the heavy metal pollution of the cultivated soil in research areas is at a low-risk level, and in those areas, the risk level of risks in

收稿日期: 2018-08-29; **收到修改稿日期:** 2018-10-11
基金项目: 江苏省环境监测科研基金项目 (1708); 江苏省留学奖学金项目 (JS-2016-018)
作者简介: 吴 为 (1980-), 女, 江苏如皋市人, 高级农艺师, 硕士, 主要从事农业环境及农产品检测研究。
通信作者: 武攀峰(1979-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事环境监测与研究工作, wuda81@163.com。

Tongzhou, Shiqu, Qidong and Haimen are high and relatively low in Rugao. The contents of these heavy metals are ranked as Cd>Hg>As>Pb>Cr. It shows that there are some differences between the evaluation results of the above two methods. Cd pollution of cultivated soils is mainly from non-point source pollution of chemical fertilizer and pesticides; the pollution of Hg and As mainly occur in riverside areas and coastal areas, mainly caused by the atmospheric transmission of exogenous Hg and As pollution and the centralized pollution of the chemical industrial park. Meanwhile, attention should also be paid to the Cr pollution in the surrounding environment from electroplating, wire rope and textile dyeing companies.

Keywords: cultivated soils; heavy metal; potential ecological risk; pollution source

0　引　言

土壤重金属不仅难降解、具有持久性, 而且能够通过粮食等作物进入食物链, 危害人类健康[1-2], 尤其是镉、铅还会导致人体内分泌紊乱, 被定义为环境激素物质[3], 一直以来是土壤研究中重点关注的一类污染因子[4-5]。随着我国经济高速发展和工业化进程加快, 土壤生态系统重金属污染日趋恶化。

国内外学者对土壤重金属污染研究主要集中在污染调查与评价、迁移转化途径、对生物体的影响、土壤修复等方面[1,6-8]。据统计, 从 2012 年到 2016 年全球土壤污染防治相关文献报道达 9 323 篇, 呈现稳步上升的趋势, 其中我国居首位, 共发表论文 2 410 篇[9]。我国国务院也出台土壤污染防治行动计划 (简称“土十条”), 将土壤污染问题列入了我国生态文明建设三大攻坚战之一, 并逐步启动耕地土壤的污染修复工作[10]。目前的土壤修复一般是以区域为单元, 在调查评价基础上的靶向性精准修复, 因此对于一个区域污染的准确调查与评价是土壤修复的先决条件。由于重金属在土壤中的分布并不均匀, 且易受污染点源影响, 如果采样点数量不足, 会造成对区域重金属污染评估的不准确, 甚至出现偏离。但以往研究采样点数稍显不足, 比如, 强承魁等[11]对徐州地区的调查中选定的 3 个主栽区中每个主栽区仅选择 8 个点位。此外, 在评价方法的选用上, 单因子污染指数法和内梅罗指数法最常用, 但这种方法仅考虑了重金属在土壤中的富集状况, 可能会低估部分低浓度、高毒性重金属的潜在环境风险, 而 Hakanson 的潜在生态危害指数则综合考虑了这些因素, 已被广泛应用于多个领域[12-15]。

近年来, 江苏省凭借其滨江沿海的独特区位优势, 经济总量一直居于全国前列。然而, 这些沿江、沿海布局的大量化工企业和园区也使得当地环境污染问题突出。为此, 本文以江苏省南通市为例, 基于大量土壤重金属实测数据, 综合采用单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法和 Hakanson 潜在生态危害指数法, 全面评估区域耕地土壤重金属 (Cr、Pb、Cd、As、Hg) 的污染状况, 分析其主要污染来源, 以期为下一步土壤修复和农业污染控制提供依据, 同时也为环境类似地区开展相关工作提供借鉴。

1　材料与方法

1.1　研究区域概况

南通地处长江下游长江三角洲地区冲积平原, 位于北纬 31°41′~32°43′、东经 120°12′~121°55′之间, 海洋性气候明显, 年平均气温 15.1℃, 全年降水量 1 040 mm 左右, 属北亚热带和暖温带季风气候, 光照充足, 雨水充沛, 四季分明, 温和宜人。全市耕地总面积 700 万亩, 土壤肥沃, 适种范围广, 盛产水稻、蚕茧、棉花、油料、小麦等作物, 是国家商品粮生产基地、全国最具优势生产优质弱筋小麦区域、全国双低油菜基地市、江苏省优质中粳稻生产基地。同时, 南通市位于沿海经济带与长江经济带 T 型结构交汇点, 经济总量仅次于南京、苏州和无锡, 列江苏省第四, 是全国有名的纺织印染、钢丝绳生产基地, 也是化工、医药等行业的集聚地。全市总面积 8 001 平方公里, 下辖如皋、海门、启东、海安、如东等 5 县 (市) 和崇川、港闸、通州、南通经济技术开发区 4 个市辖区。

1.2　调查时间、范围与点位布设

调查时间为 2013-2014 年, 调查范围包括全区 5 县 4 区, 因通州区为县 (市) 改区, 在此单独统计。采样点位结合项目区域优势作物种植面积、土壤类型、地块形状、地势和周围环境情况确定, 并记录各点位 GPS, 共采集 855 个土壤样点。

1.3 样品采样与处理

样品采集按照 NY/T 395-2012《农田土壤环境质量监测技术规范》相关要求，用对角线布点法、梅花形布点法、棋盘式布点法和蛇形布点法采样。采集 0~20 cm 深度表层土壤，将多点土样混合用四分法取土壤样 2.5 kg。将采集的土壤样品捡除异物，置室内阴凉处自然风干，再将风干土拣去石块、玻璃、植物的根茎等杂物。全部研磨过 20 目筛，再取部分过 100 目筛。

1.4 测定项目与方法

过 20 目土样测 pH 值；过 100 目土样测 Hg、As、Pb、Cd、Cr 5 种重金属元素。pH 值采用玻璃电极法测定 (梅特勒 S2K)，Hg、As 采用原子荧光法测定 (北京吉天 9230 型)，Pb、Cd 采用石墨炉原子吸收分光光度法测定 (安捷伦 AA240DUO)，Cr 采用火焰原子吸收分光光度法测定 (安捷伦 AA240DUO)。

所用试剂均为优级纯。

1.5 评价方法

1.5.1 单因子和综合指数法

采用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法进行现状评价，相关公式详见 HJ/T166-2004《土壤环境监测技术规范》[16]，分级标准如表 1 所示。

表 1 土壤重金属污染分级标准

等级	单因子污染指数分级标准		内梅罗污染指数分级标准	
	污染指数	污染等级	污染指数	污染等级
1	PI≤1	清洁	$P_{综}$≤0.7	安全
2	1<PI≤2	轻度污染	0.7<$P_{综}$≤1	警戒级
3	2<PI≤3	中度污染	1<$P_{综}$≤2	轻度污染
4	PI>3	重度污染	2<$P_{综}$≤3	中度污染
5			$P_{综}$>3	重度污染

1.5.2 生态风险评价法

采用 Hakanson 潜在生态危害指数法 (RI)[14, 17]，其公式为：

$$\mathrm{RI}=\sum E_{\mathrm{r}}^{i}=\sum T_{\mathrm{r}}^{i}\times C_{\mathrm{r}}^{i}=\sum T_{\mathrm{r}}^{i}\times\left(C_{\mathrm{s}}^{i}/C_{\mathrm{n}}^{i}\right) \quad (1)$$

式中：E_{r}^{i}——重金属元素 i 的潜在生态风险系数；

C_{r}^{i}——重金属 i 的污染因子；

T_{r}^{i}——重金属 i 的毒性响应因子，Cr、Pb、Cd、As 和 Hg 的毒性响应因子(T_{r}^{i})分别为 2.0、5.0、30、10 和 40；

C_{s}^{i}——重金属 i 的实测含量；

C_{n}^{i}——重金属 i 的参比值；

RI——潜在生态风险指数。

RI 分级标准与生态风险程度如表 2 所示。

表 2 潜在生态风险指数分级标准

生态危害	轻微 (A)	中等 (B)	强 (C)	很强 (D)	极强 (E)
E_{r}^{i}	<40	40~80	80~160	160~320	>320
RI	<150	150~300	300~ 600	≥600	

2 结果与讨论

2.1 耕地土壤重金属含量分析

研究区域耕地表层土壤中重金属含量测定结果见表 3。可见，5 种重金属元素的含量均低于 GB15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》中 6.5<pH≤7.5 对应的标准值，背景值反应了未受或者很少受人类活动影响条件下土壤所固有的元素含量水平，高出背景值即为重金属的累积部分。除如皋和海安地区 Hg 元素外，其余地区所测 Cr、Pb、Cd、As、Hg 5 种重金属均高于南通土壤元素背景值，分别为 1.17~1.48 倍、1.02~1.20 倍、1.28~1.69 倍、1.03~1.80 倍和 1.11~1.34 倍。由此可见研究区域耕地土壤在表层出现了不同程度的重金属富集。虞敏达等[7]研究发现，长江下游某农业活动研究区域，13 处农田土壤中 Cr、Pb、Cd、As 和 Hg 平均含量高于江苏省土壤元素背景值 1.02 倍、1.15 倍、2.57 倍、1.21 倍和 1.05 倍。江苏省徐州地区小麦田土壤中 Cr 和 Cd 含量高于中国土壤元素背景值的 1.20 倍[11]。尚二萍等[8]对全国五大粮食主产区 3006 个耕地样点的土壤重金属污染调查显示，Cd、Hg 为主要污染物，超标率为 17.39% 和 2.56%。同时远远低于部分污灌区和采选矿区，比如广西都安县耕地土壤重金属 Cr、Pb、Cd、As 超标率分别为 19.6%、0.79%、70.6%、42.9%[17]。可见，南通市耕地土壤重金属整体属于轻度富集水平，Cd 是全国、江苏、南通市的主要污染元素。

2.2 耕地土壤重金属污染现状评价

研究区域土壤重金属污染现状评价以 GB15618—2018 中 6.5<pH≤7.5 水田标准值作为评价依据，计算了 855 个采样点表层样品的单因子污染指数和内梅罗综合污染指数，结果见表 4。可知，研究区域耕地土壤中 5 种重金属单因子污染指数均

表 3　研究区域耕地土壤重金属含量[1)]

mg/kg

地区	Cr		Pb		Cd		As		Hg	
	$\bar{X}$	SD	$\bar{X}$	SD	$\bar{X}$	SD	$\bar{X}$	SD	$\bar{X}$	SD
市区 (n=28)	67.2	6.00	24.7	6.43	0.20	0.58	8.29	2.80	0.09	0.05
海安 (n=98)	69.6	12.3	23.1	4.49	0.21	0.10	6.29	1.1	0.07	0.03
海门 (n=103)	76.0	8.53	25.0	4.12	0.20	0.09	8.42	2.04	0.08	0.03
启东 (n=122)	78.6	7.43	24.2	3.99	0.19	0.05	9.86	2.74	0.08	0.04
如东 (n=251)	67.6	9.26	21.3	3.88	0.18	0.07	6.44	2.16	0.10	0.10
如皋 (n=138)	62.4	8.87	21.3	6.34	0.17	0.07	5.63	2.16	0.06	0.04
通州 (n=115)	68.5	14.5	22.4	5.50	0.22	0.05	9.87	2.7	0.10	0.07
背景值[18]	53.1		20.9		0.13		5.47		0.074	
标准值	300		140		0.6		25		0.6	

注: 1) n 为采样点数。

表 4　土壤重金属污染评价指数

地区	PI					$P_{综}$
	Cr	Pb	Cd	As	Hg	
市区	0.22	0.18	0.34	0.33	0.16	0.30
海安	0.23	0.16	0.35	0.25	0.12	0.29
海门	0.25	0.18	0.34	0.34	0.14	0.30
启东	0.26	0.17	0.32	0.39	0.14	0.33
如东	0.28	0.15	0.30	0.26	0.16	0.27
如皋	0.21	0.15	0.28	0.22	0.11	0.24
通州	0.23	0.15	0.36	0.39	0.17	0.33

表 5　研究区域耕地表层土壤生态指数

地区	E_r^i					RI
	Cr	Pb	Cd	As	Hg	
市区	0.45(A)	0.88(A)	10.1(A)	3.28(A)	6.21(A)	20.92(A)
海安	0.46(A)	0.82(A)	10.5(A)	2.51(A)	4.84(A)	19.13(A)
海门	0.51(A)	0.89(A)	10.1(A)	3.35(A)	5.50(A)	20.35(A)
启东	0.52(A)	0.86(A)	9.57(A)	3.94(A)	5.49(A)	20.38(A)
如东	0.45(A)	0.76(A)	9.10(A)	2.56(A)	6.34(A)	19.21(A)
如皋	0.41(A)	0.76(A)	8.27(A)	2.24(A)	4.30(A)	15.98(A)
通州	0.46(A)	0.80(A)	10.3(A)	3.93(A)	6.63(A)	22.12(A)

值由高到低分别为 Cd>As>Cr>Pb>Hg, 均小于 1, 对应污染等级为清洁; 7 个地区内梅罗污染指数从高到低依次为通州、启东>海门、市区>海安>如东>如皋, 但均小于 0.7, 污染等级为安全, 说明研究区域耕地土壤目前重金属污染情况较轻, 未达到警戒水平。

2.3　耕地土壤重金属潜在生态分险评价

Hakanson 潜在生态风险评价法由于考虑到了各元素间的毒性水平差异, 能够更好地反应重金属生态污染状况。根据公式, 其参比值既可以选择标准值, 也可以选择背景值, 但考虑到与污染指数法的可比性, 本研究选定 GB15618-2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》中 6.5<pH≤7.5 水田标准值作为参比值。表 5 列出研究区域 5 种重金属元素污染潜在生态风险指数和级别结果。

由表 5 可知, 研究区域土壤重金属污染的潜在生态分险级别为 A 级(低生态风险), 各元素的潜在生态风险等级从大到小依次为 Cd>Hg>As>Pb>Cr; 从 RI 值判定的多种金属潜在生态风险地区分布来看, 通州最大, 依次为市区、启东、海门、如东、海安、如皋。这与污染指数法结果有所差异, 主要与部分重金属增加了毒性权重有关, 通过结合含量测定结果分析 (表 3), 说明综合考虑重金属毒性响应有助于获得较为准确的评价结果。由 RI 排序结果分析, 位列前四的通州、市区、启东和海门都是南通市经济最为发达的县 (市) 区, 为全国最早一批的百强县, 工业发达和人口密度等应是其主要影响因素。相反, 如皋地区最低, 其作为全国有名的长寿之乡, 百岁老人众多, 相对较好的环境质量可能也是其中一个重要因素。

从单因素角度分析可知, 5 种重金属中 Cd 的含量虽然最低, 但潜在生态危害程度却最强, 且在 7 个地区间表现一致, 如果在此土壤中生长农作物

可能会有生物积累和富集[19]，与众多研究结果一致[4, 7-8, 15]。因此，本研究区应重点关注镉污染，作为下一步土壤修复和环境治理的重点目标[15]。经分析，此污染应与该地区耕地长期使用磷肥等无机肥料有关，农药和化肥使用是农田土壤 Cd 的重要来源，7 个地区甚至全国多地都具有同样的污染特征，更加证实了该重金属元素的污染最可能来自农业面源污染，而非点源[20-21]。其次是 Hg，其在通州、如东、市区、海门和启东生态危害程度较高，指数大于 5.4，明显高于其他两个地区。As 列第 3，其在启东、通州、海门和市区生态危害程度较高，指数大于 3.0，说明其来源极为相似[7]。Hg 为燃煤烟气排放的特征性元素，As 主要来源于化工、冶炼和燃煤过程中排放的废水、废气和废渣[5, 8]，这几个地区有一个共同点，即滨江临海，是当前南通市化工园区的主要集中地，因此这些地区受当地工业污染源影响较大。此外，外源性 Hg、As 污染物大气传输也不能排除。Cr 和 Pb 生态危害程度则普遍较低，E_r 值小于 1。通州和海安两个地区 Cr 污染受工业点源影响突出，海安地区电镀工业发达，通州以钢丝绳和纺织染整为支柱产业，此类工业废水、废气中 Cr 是重要的特征环境因子，因此，可能与部分点位位于这些企业附近有关。表 3 中通州、海安 SD 值分别为 14.5 和 12.3，明显较高，说明数据间离散程度高，可以证明这一点。

2.4 耕地土壤重金属的相关性分析

相关分析能够较好地判别土壤重金属污染来源[13, 20]，表 6 列出了各重金属检测结果间的 Pearson 相关系数。可见，Cd、Hg 与 As 两两之间均呈现极显著正相关 (P<0.01)，相关系数变化范围为 0.103~0.313。其次，Cr 除与 Hg 无相关性外，与 Pb、As 和 Cd 两者之间也呈现极显著正相关 (P<0.01)，相关系数变化范围为 0.146~0.367。由此说明它们来源极为相似[4]。

3 结束语

1) 南通市耕地土壤重金属整体属于轻度富集水平，潜在生态风险评价级别为低生态风险；2) Cd 应为南通市所有区域优先控制重金属元素指标，也是下一步进行土壤修复的重点关注对象，并且在今后的农业生产过程中需加强对磷肥的使用量管理，试行测土施肥，避免过量使用；3) As 和 Hg 潜在生态风险评价级别位列其次，主要为通州、海门、市区、启东和如东等 5 个地区的控制指标，而沿江沿海布局的化工企业和园区是其主要污染来源，应重大加强对这些化工园区的环境治理工作；4) 此外还要注意对海安、通州两地电镀、钢丝绳和纺织染整企业周边 Cr 污染的控制。

表 6 研究区域耕地表层土壤重金属的 Pearson 相关系数1)

元素	Cr	Pb	Cd	As	Hg
Cr	1				
Pb	0.301**	1			
Cd	0.146**	0.291**	1		
As	0.367**	0.278**	0.313**	1	
Hg	–0.016	0.200**	0.160**	0.103**	1

注：1)**表示在 0.01 水平上显著相关。

参考文献

[1] ZHANG J, LI H, ZHOU Y, et al. Bioavailability and soil-to-crop transfer of heavy metals in farmland soils: A case study in the Pearl River Delta, South China[J]. Environmental Pollution, 2018, 235: 710-719.

[2] CHARY N S, KAMALA C T, RAJ D S. Assessing risk of heavy metals from consuming food grown on sewage irrigated soils and food chain transfer[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2008, 69(3): 513-524.

[3] 颜流水, 付结友, 罗旭彪. 环境内分泌干扰物与 DNA 相互作用的光谱研究[J]. 环境化学, 2008, 27(3): 375-377.

[4] Zhang P, Qin C, Hong X, et al. Risk assessment and source analysis of soil heavy metal pollution from lower reaches of Yellow River irrigation in China[J].Science of The Total Environment, 2018, 633: 1136-1147.

[5] 王晳玮, 王秋红, 於丽华. 土壤重金属污染及对生物体影响的研究进展[J]. 中国农学通报, 2017, 33(19): 86-92.

[6] LIU L W, LI W, SONG W P, et al. Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability[J]. Science of The Total Environment, 2018, 633: 206-219.

[7] 虞敏达, 张慧, 何小松, 等. 典型农业活动区土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. 环境工程学报, 2016, 10(3): 1500-1507.

[8] 尚二萍, 许尔琪, 张红旗, 等. 中国粮食主产区耕地土壤重金属时空变化与污染源分析[J]. 环境科学, 2018, 4(24): 1-20.

[9] 土壤污染防治研究发展态势报告 (上)[R/OL].[2018-08-29]http://www.cenews.com.cn/zfzj_3479/dsj/dsjtrxf/201803/t20180314_868169.html.

[10] 国务院. 国务院关于印发土壤污染防治行动计划的通知:国发 [2016]31 号 [A/OL].(2016-05-28)[2018-08-29]http://www.gov.cn/zhengce/2016-05/31/content_5078448.htm.

(下转第 110 页)

4 结束语

ZrO_2 基 NO_x 传感器的工作温度对泵电流信号有影响，主泵泵电流 I_{p0} 与温度 $T^{0.75}$ 成良好的正线性关系，与理论关系式相符合；辅助泵中扩散通道结构较复杂，使得曲线斜率呈增大趋势；测量泵中活化电极含有 Pt、Rh 元素，高温下 Rh 有氧化增重现象，同时考虑基体二氧化锆高温导电性能，使得曲线斜率呈先增大后减小趋势。因此，ZrO_2 基 NO_x 传感器的工作温度不宜过高，也不宜过低，从本实验中可以看出比较合理的工作温度范围为 1003.15~1063.15K。

参考文献

[1] 徐景, 龚雪飞, 张帆, 等. 基于氮氧传感器的 NO_x 气体测量仪设计[J]. 传感器与微系统, 2015, 34(3): 90-93.

[2] 赵海燕, 王岭, 陈嘉庚, 等. 汽车尾气用 NO_x 传感器[J]. 传感器与微系统, 2007, 26(1): 8-10.

[3] 黄海琴, 谢光远, 王杏, 等. ZrO_2 基电化学 NO_x 传感器非活化电极浆料的研究[J]. 武汉科技大学学报, 2012, 35(1): 41-43.

[4] ZHUIYKOV S, MIURA N. High-temperature NO_x sensors using zirconia solid electrolyte and zinc-family oxide sensing electrode[J]. Solid StateIonics, 2002, 152-153(EXI-EX10): 801-807.

[5] MIURA N, RAISEN T, LU G. Highly selective CO sensor using stabilized and a couple of oxide electrodes[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 1998, 47(1-3): 84-91.

[6] REILLY S A O, DAUNERT S, BACHAS L G. Nitrogen oxide gas sensor based on a nitrite-selective electrode[J]. Sens and Actuators B, 1991: 12-15.

[7] 罗志安, 肖建中, 夏风, 等. 平板式二氧化锆氧传感器的研究进展[J]. 传感器技术, 2004, 23(8): 4-8.

[8] 王务林, 冯长根, 赵航, 等. 一种汽车用氧传感器的研制[J]. 机械工程学报, 2003, 35(10): 152-155.

[9] 唐玲, 李乐. 电极极化及其对 NO_x 传感器剩余氧气浓度的影响[J]. 安庆师范学院学报, 2007, 13(4): 37-41.

[10] HORISAKA S, LEE S J. NO_x sensor: US 2009/0242401 A1[P]. 2009-10-01.

[11] BAIER G, SCHULE V, VOGEL A. Non-Nernstian zirconia sensors for combustion control[J]. Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process, 1993(57): 51-56.

[12] FUJITA H, SHINDO H. Gas sensor, NO_x sensor and method of manufacturing gas sensor: US 2009/0242400 A1[P]. 2009-10-01.

[13] NAKASONE O, SASAKI Y. Method of correcting output of NO_x sensor: US 2008/0237064 A1[P]. 2008-10-02.

[14] 赵芃. 宽域氧传感器结构与性能相关性研究[D]. 武汉: 武汉科技大学 2017.

[15] 邓琴琴, 杨旭东. 温度对多孔建材中 VOC 扩散系数的影响研究[J]. 建筑科学, 2011, 27(6): 68-69.

(编辑:徐柳)

(上接第 82 页)

[11] 强承魁, 秦越华, 丁永辉, 等. 徐州地区麦田土壤和小麦籽实重金属污染特征分析[J]. 生态环境学报, 2016, 25(6): 1032-1038.

[12] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution-control. A sedimentologica approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.

[13] EFFENDI H, KAWAROE M, MURSALIN, et al. Ecological Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Sediment of Mahakam Delta, East Kalimantan[J]. Procedia Environmental Sciences, 2016, 33: 574-582.

[14] 贾英, 方明, 吴友军, 等. 上海河流沉积物重金属的污染特征与潜在生态风险[J]. 中国环境科学, 2013, 33(1): 147-153.

[15] 雷沛, 张洪, 单保庆. 丹江口水库典型库湾及支流沉积物重金属污染分析及生态风险评价[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(1): 110-117.

[16] 国家环境保护总局. 土壤环境监测技术规范:HJ/T166-2004[S].北京: 中国环境科学出版社, 2004.

[17] 吴洋, 杨军, 周小勇, 等. 广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价[J]. 环境科学, 2015, 36(8): 2964-2971.

[18] 安华强, 张炳奎. 南通市农业土壤和粮食中金属元素背景值的调查[J]. 环境科学与技术, 1989(2): 27-31.

[19] 阿吉古丽·马木提, 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 艾尼瓦尔·买买提. 新疆焉耆县耕地土壤重金属的空间分布及来源解析[J]. 环境监测管理与技术, 2018, 30(3): 12-16.

[20] 王美, 李书田. 肥料重金属含量状况及施肥对土壤和作物重金属富集的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(2): 466-480.

[21] 师荣光, 郑向群, 龚琼, 等. 农产品产地土壤重金属外源污染来源解析及防控策略研究[J]. 环境监测管理与技术, 2017, 29(4): 9-13.

(编辑:李刚)