应用生态学报 2020年3月 第31卷 第3期 http://www.cjae.net
Chinese Journal of Applied Ecology, Mar. 2020, 31(3): 999-1007 DOI: 10.13287/j.1001-9332.202003.036

深圳市不同功能区土壤表层重金属污染及其综合生态风险评价

常文静[1] 李枝坚[1*] 周妍姿[1] 曾 辉[1,2]
([1]北京大学深圳研究生院, 广东深圳 518055; [2]北京大学城市与环境学院, 北京 100101)

摘 要 在综合考虑深圳市城市功能区分异特征的基础上,进行全市表层土壤系统采样,全面监测土壤表层8种重金属元素污染状况,分析不同重金属元素含量的统计学特征,探讨不同城市功能区对土壤表层重金属污染的影响,采用内梅罗指数和潜在生态危害指数评估不同重金属元素和不同城市功能区的生态风险水平,分别进行基于两种方法的全市重金属污染生态风险分区。结果表明: 1)深圳市土壤表层的Mn、Ni、Cr和Pb 4种元素受人为活动的影响程度较低,Cd、Zn、Cu和As 4类元素受人为活动影响较大。地表环境约束因素背景下的高强度城市化和工业化过程,是各种重金属污染区域分异和功能区分异的决定性因素。2)深圳市土壤重金属污染风险较高的重金属元素为Cd、Zn、Cu和Pb,特别是Pb污染问题尤为突出,必须加强管控工作。深圳市总体土壤表层重金属污染风险水平高于国内相关城市,需要引起足够重视。3)内梅罗指数法和潜在生态危害指数法的侧重点不同,在单一重金属元素风险判断、不同城市功能区生态风险的总体评价,以及市域土壤重金属污染生态风险分级评价方面结果差异较大,组合使用效果更好。

关键词 城市功能区; 土壤; 重金属; 生态风险; 深圳市

Heavy metal pollution and comprehensive ecological risk assessment of surface soil in different functional areas of Shenzhen, China. CHANG Wen-jing[1], LI Zhi-jian[1*], ZHOU Yan-zi[1], ZENG Hui[1,2] ([1]*Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen* 518055, *Guangdong, China*; [2]*College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing* 100101, *China*).

Abstract: To explore the impact of urban functional zones on surface soil metal pollution, we analyzed the concentrations and pollution status of eight heavy metals (*i.e.*, Mn, Ni, Cr, Pb, Cd, Zn, Cu, and As) in surface soils from various urban functional zones of Shenzhen City. Nemero index and potential ecological hazard indices were used to quantify the ecological risk levels of different heavy metals in different urban functional zones. Moreover, we spatially classified ecological risk zones for soil heavy metal pollution. Results showed that: 1) concentrations of Cd, Zn, Cu, and As in the surface soil were heavily impacted by human activities, while those of Mn, Ni, Cr, and Pb were not. High-intensity urbanization and industrialization with the constraints of physical environment were identified as the determining factors for regional and functional variation of heavy metal pollution. 2) Pb, Cd, Zn, and Cu had high pollution risks in the surface soils, with Pb having the highest risk, which necessitated further management and control of heavy metals. The overall level of heavy metal pollution risk in the surface soils of Shenzhen was higher than that of other cities in China. 3) Nemero index and potential ecological hazard indices had different emphases in terms of assessing the risk level of heavy metals. Those indices showed different performances in the risk assessment of single heavy metal, overall ecological risks in the different urban functional zones, and ecological risk classification of heavy metal pollution in the urban surface soils. We suggest that those indices should be combined to provide more holistic information about urban heavy metal pollution.

Key words: urban functional area; soil; heavy metal; ecological risk; Shenzhen.

本文由国家重点研发计划项目(2017YFC0505801)、广东省科技厅项目(2014A030313720,2015A020215002)资助 This work was supported by the National Key R&D Program of China (2017YFC0505801) and Guangdong Province Science & Technology Project (2014A030313720, 2015A020215002).
2019-06-01 Received, 2019-12-27 Accepted.
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 1801111796@pku.edu.cn

众多环境污染物中,重金属因其高毒性和持久性往往导致严重的污染问题[1],成为现代环境科学研究和环境工程实践领域普遍关注的热点问题。中国过去数十年的快速城市化和工业化过程,导致大量重金属污染物排放,给城乡人居环境的健康和安全带来严重威胁[2]。土壤作为与城市人类生活密切相关的环境要素,一直是城市各类重金属污染物排放和积累最重要的"汇"元素,是城市重金属污染研究的主战场[3-4]。相关研究很早就发现,城市土壤表层重金属污染的空间格局与人口密度特征、环境要素、交通条件、产业结构与布局、土地利用等内外部约束因素的空间分异特征密切相关[5-8]。近年来,从城市功能分区(土地利用)入手,探讨城市化地区人为活动与土壤重金属污染之间的关系,进而运用综合评估手段,分析其现实和潜在生态风险,成为该领域研究的重要技术路径[9]。

深圳市是我国对外开放以来最具代表性的快速城市化和工业化地区,其重金属污染问题也很早就引起学者们的广泛关注[10]。从现有的研究报道来看,海域、滨海湿地(红树林)、河湖沉积物以及农林用地的土壤重金属污染现状、积累过程及其生态风险问题一直是重点研究领域[11-14],但全市范围不同功能区域土壤重金属污染及其综合生态风险评估研究尚未见报道。本研究拟以此为切入点,通过系统采样监测土壤表层 8 种主要重金属类型的污染状况,并运用多种评估手段分析其生态风险,以期全面了解深圳市土壤重金属污染状况及其生态风险水平,为今后土壤重金属污染管理工作提供基础科学研究支持。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

深圳市(22°27′—22°52′ N,113°46′—114°37′ E)地处广东省南部,属典型南方滨海丘陵低山地带,东南部海拔较高,西北部较低且多为滨海平原,区域面积 1996.85 km^2,人口 1077.89 万。境内属亚热带海洋性气候,年平均气温 22.4 ℃,雨量充足,年均降雨量 1933.3 mm。土壤大多为赤红壤,沿海区域有少量滨海盐渍土平原地区,常为潮沙泥土或水稻土等。过去 40 年的快速城市化发展进程,使得深圳市的土壤受到诸多人为因素的强烈影响。全市近一半的区域被改造成为城市建成区,传统的自然和农业土壤类型和剖面结构被彻底破坏。剩余仍维持自然和农业用地区域的各类土壤,也由于现代都市农业发展、郊野游憩开发、大规模交通等基础设施建设和自然保护与植被改造等,受到不同程度人为活动的强烈影响。

1.2 采样与分析方法

在综合考虑城市功能分异的基础上,按照大致均匀布点原则对整个深圳市进行全域采样。具体采样布点主要考虑了以下几个方面的约束性要求:

1) 按照深圳市的土地利用状况进行功能区细分,把全市土地利用类型归纳为工业用地、交通用地、商住用地、天然林地、农业用地(主要为园地)和未利用地 6 种功能区域类型。考虑到垃圾填埋、焚烧等处置场所可能导致局部地区土壤重金属污染异常,以及深圳市各水源保护区对重金属污染高度敏感的现实,在相关采样单元中特别关注了这类区域的采样工作,最终确定的功能区采样类型为 6 种主要城市用地类型加上垃圾处置场所和饮用水源地 8 种类型;

2) 按照每个采样单元内确定一种主要城市用地功能进行采样的思路,在大致均匀布点的原则下设置采样点;

3) 具体布点时还考虑了区域均衡(平均 20 km^2布设一个样点)和每种功能单元样本数量大致平衡(每种功能区 10 个样本左右)的原则要求进行布点。

最终全市共布设 98 个采样点(图 1),在以每个样点为中心的 10 m×10 m 正方形区域内,采用梅花布点法均匀采集土壤样品,剥除表面覆盖物后取 0~20 cm 表层土壤,在四角及中心分别采集 100 g 土样混合均匀,作为待测样品。在室温避光条件下风干土壤样品,用四分法取 10 g 样品,经球磨机处理后,过 200 目(孔径 0.074 mm)尼龙筛保存。

根据美国环境保护署的 3051a 方法[15]和预试验,取 0.1 g 样品加入 8 mL HNO_3、2 mL H_2O_2置于微波消解仪(Ethos1)中消解,每个样品设 3 个重复,误

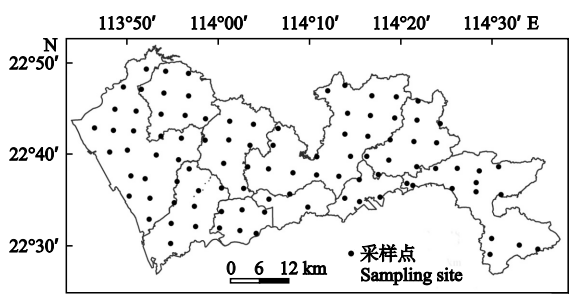


图 1 深圳市土壤表层采样点分布

Fig.1 Distribution of the soil sampling sites in Shenzhen City.

差在±5%之内。所有试剂均采用 BVⅢ级纯度并且使用超纯水，以纯试剂无样品为空白对照，以珠江三角洲土壤为参照并进行质量控制，测定值在规定范围内。内标法校正溶液中重金属离子含量，使用电感耦合等离子体质谱（ICP-MS 型号 Thermo Fisher X Series II）测定土壤样品中 Mn、Ni、Cr、Cd、As、Zn、Pb 和 Cu 8 种重金属的浓度。

1.3　数据分析

1）在采样分析的基础上，运用 Microsoft Excel 2010 软件对深圳市及各功能区土壤重金属样品监测结果进行统计分析，通过 GIS 10.3 软件中的反距离加权插值法（IDW），生成深圳市土壤重金属的空间分布图，基于像元水平进行区域生态风险综合评估及不同生态风险水平的分区统计。

2）采用内梅罗污染指数法（包括单项污染指数 P_i 和综合污染指数 P_n；P_n 根据单项污染指数最大值 P_{max} 和单向污染指数平均值 P_{ave} 求得）和潜在生态危害指数法（包括单项生态危害指数 E_i 和综合生态危害指数 RI）对深圳市土壤重金属的污染程度及危害性进行综合分析。相关指数计算过程中的土壤背景值选取广东省的土壤背景值[16]，指数计算方法及其生态风险等级判断标准参阅文献[17-20]。

3）收集国内北京、南京等 20 多个城市土壤重金属监测及生态风险评估研究案例结果，并与本研究进行对比，分析深圳市土壤重金属污染与国内相关城市之间的异同点。

2　结果与分析

2.1　表层土壤重金属的统计特征及单要素风险评估

深圳市表层土壤中重金属监测数据的统计结果见表 1。如果不区分样本所属城市功能区的差异，仅仅从不同重金属类型的区域差异角度看，深圳市域范围内土壤表层重金属总体上反映出两个方面的显著特征：

1）表层土壤中 Cd、As、Cu 和 Zn 的变异系数明显高于其余 4 种重金属元素，意味这 4 种元素含量不同样本之间的差异较大，其余 4 种元素含量不同样本之间的差异相对较小。

2）利用两种评估方法对深圳市土壤重金属污染的生态风险评估。基于内梅罗指数的评估结果显示，表层土壤中 Cd、Zn 和 Cu 属于严重污染，Pb 为中度污染，As、Mn、Ni 属于轻度污染，Cr 属于无污染，各元素污染程度排序为 Cd>Zn>Cu>Pb>As>Mn>Ni>Cr；基于潜在生态危害指数的评估结果显示，仅 Cd 属于强生态危害水平，其余均属于轻微生态危害水平，污染程度排序结果是 Cd>Cu>As>Pb>Zn>Ni>Cr>Mn。

2.2　表层土壤重金属空间分异特征

利用反距离插值法形成的深圳市土壤表层 8 种重金属污染空间分异情况如图 2 所示。各类重金属空间分异格局大致可以分成两种情形。Mn、Ni、Cr 和 As 通常有几个空间高浓度集中分布区域，与大小不一的低浓度分布区域呈镶嵌分布。Mn 高浓度区域主要分布在深圳的中南部地区，呈东西向带状分布，龙岗、宝安两个区域的北部地区均为低浓度区域；Ni 的高浓度区域主要分布在宝安区西部沿海地区和龙岗区的中东部地区，海拔较高区域的浓度较低；高浓度 Cr 污染的集中分布区域在龙岗区东部和宝安区的松岗街道境内，高浓度区域分布在比较狭小的局部区域；As 的高浓度区域几乎全部集中在龙岗区，污染程度较重的区域集中分布在坪山大工业区内，深圳西部地区几乎全部为低浓度分布区域。

Cd、Zn、Pb 和 Cu 属于另外一种空间分布格局，整体特征为全区域均处于一个比较高的浓度水平，

表 1　深圳市土壤重金属含量的统计特征及风险评价结果

Table 1　Statistics characteristics and risk assessment results of heavy metals in soil of Shenzhen City

元素 Element	平均值 Average (mg·kg^{-1})	最大值 Maximum (mg·kg^{-1})	最小值 Minimum (mg·kg^{-1})	标准差 Standard deviation (mg·kg^{-1})	变异系数 Variation coefficient	背景值 Background value (mg·kg^{-1})	内梅罗污染指数 Nemerow pollution index	潜在生态危害指数 Potential ecological hazard index
Mn	365.54	866.84	65.53	169.18	0.46	279.00	1.31	1.31
Ni	17.03	76.40	2.96	12.51	0.73	14.40	1.18	2.31
Cr	40.39	155.60	3.03	28.21	0.70	50.50	0.80	1.59
Cd	0.59	8.17	0.02	1.39	2.35	0.06	10.60	296.78
As	12.59	256.27	1.02	27.60	2.19	8.90	1.41	14.01
Zn	211.49	3311.40	26.45	357.65	1.69	47.30	4.47	4.50
Pb	83.47	349.70	11.20	68.46	0.82	36.00	2.32	11.65
Cu	73.14	1755.71	3.28	191.73	2.62	17.00	4.30	21.63

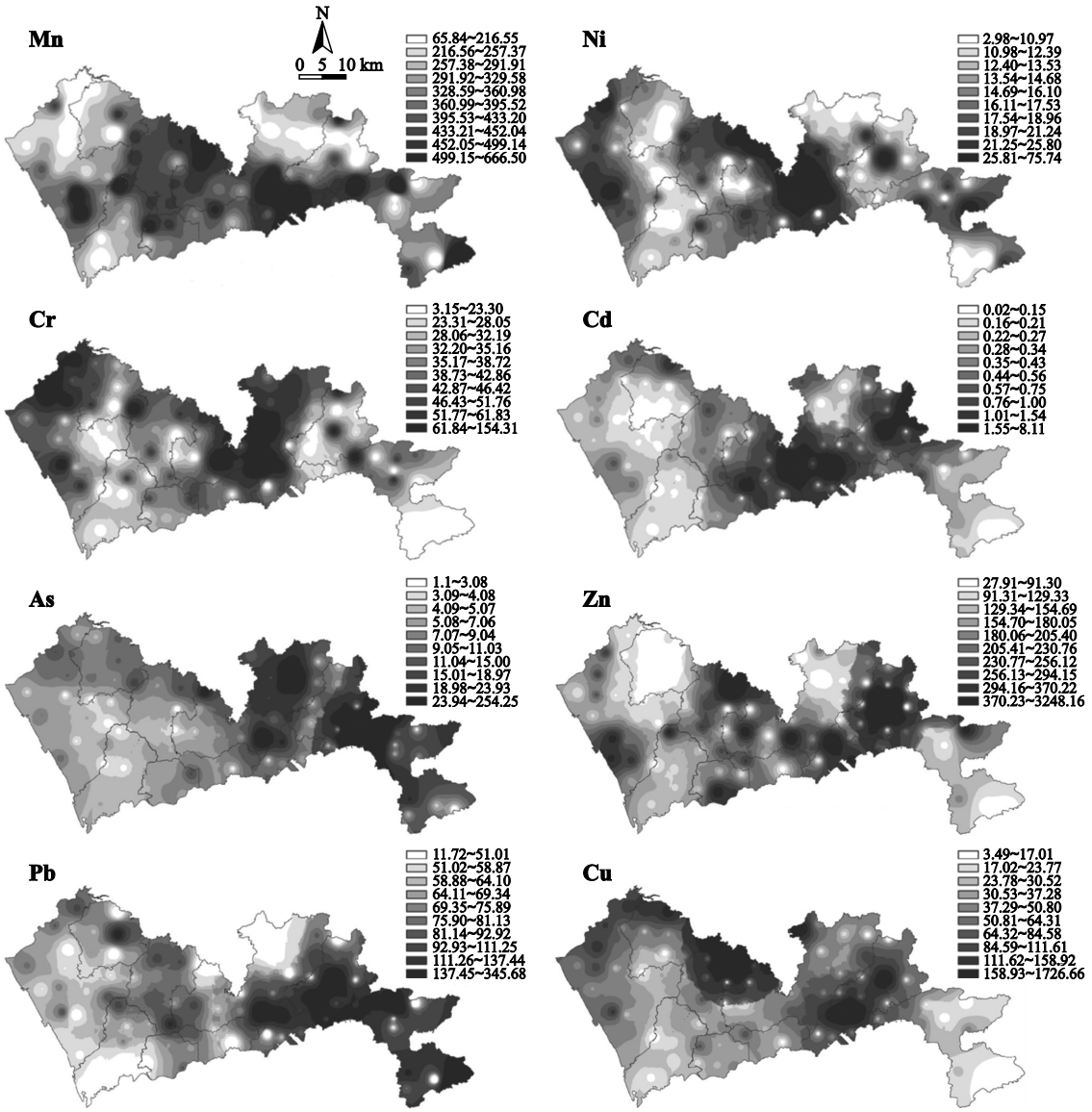


图 2 土壤重金属元素含量的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of heavy metals in soil ($mg \cdot kg^{-1}$).

不存在极低浓度分布区域,同时每种金属元素也存在多个高浓度分布区。Cd 的高浓度区主要沿着布吉、横岗、盐田、坪山一线,宝安区和大鹏半岛一带浓度相对较低;Zn 的高浓度区域主要在坪山中心区和观澜街道北部,中西部地区西乡至横岗一线还分布有几个次中心区,大鹏半岛和宝安区北部为低浓度分布区;Pb 的重污染区域主要在龙岗区南部呈弧形 4 个中心分布格局,整个深圳西部地区浓度相对较低;Cu 重点污染区域主要在观澜街道北部、坪山中心城区和盐田区北部,其余地区浓度较低。

2.3 不同城市功能区土壤污染特征

不同城市功能区土壤样本各类重金属元素监测数据的统计结果见图 3。Mn 在各类功能区域的浓度差异不大,商住用地、林地和未利用地浓度相对较低;Ni、As 和 Pb 浓度水平最高的用地类别均为垃圾处置场所,特别是 As 和 Pb 两类重金属元素,垃圾处置场所土壤浓度水平显著高于其余用地类别,Ni 在工业用地和交通用地等特定城市功能区的浓度水平亦较高;Cr、Cd 和 Zn 浓度最高的功能区类别均为工业用地,但 Cd 和 Zn 工业用地浓度水平显著高于其他用地类别,而 Cr 在垃圾处置场所及交通和商住用地功能区内的浓度亦较高;Cu 的情况比较复杂,虽然交通用地的浓度水平最高,但在工业用地、商住用地和农业用地功能区内,亦呈现出与交通用地相差不大的浓度水平。总体而言,重金属污染随用地功能的变化情况大致分成两种类型:一种是单一城

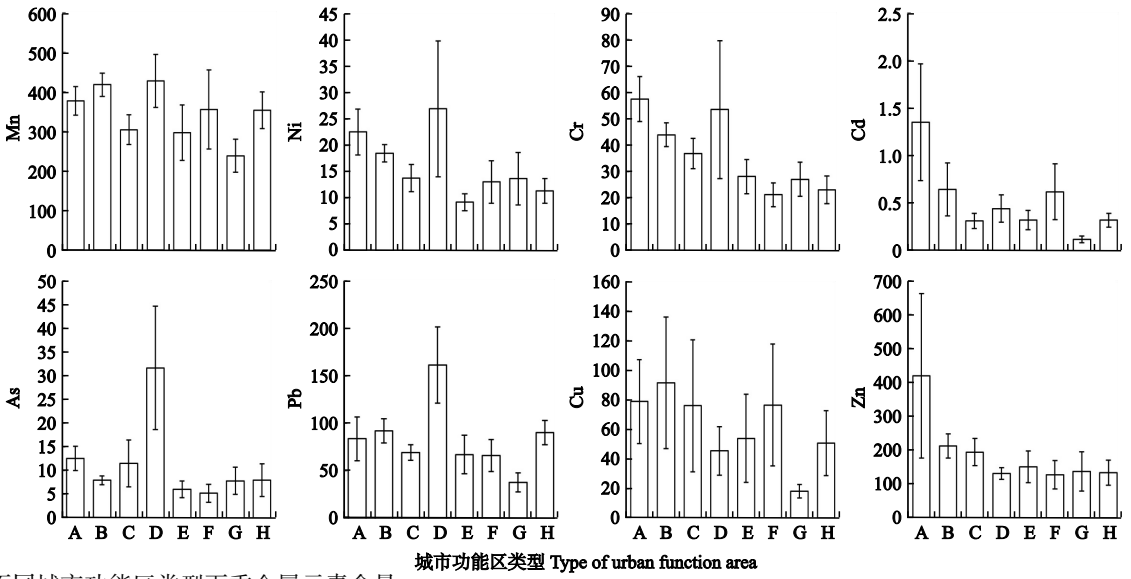


图 3　不同城市功能区类型下重金属元素含量

Fig.3　Heavy metals contents in soil of different types of urban function areas (mg · kg^{-1}).

A：工业用地 Industrial land；B：交通用地 Transportation land；C：商住用地：Commercial and residential land；D：垃圾场区 Dump area；E：自然林地 Natural forest land；F：农业用地 Agricultural land；G：未利用地 Unused land；H：饮用水源区 Drinking water source area. 下同 The same below.

市功能区类型浓度水平显著高于其他类型的分布格局，如 Cd 和 Zn（工业用地）以及 As、Pb（垃圾处置场所）；其余 4 种元素属于 3~4 种城市功能区类型浓度水平均较高的分布格局。

2.4　土壤重金属的污染生态风险综合评价

本研究采用两种方法针对不同城市功能区（用地类型）进行了其生态风险综合评价（表 2）。从不同金属元素对各功能区综合污染指数的贡献看，除未利用地 Zn 为最大贡献者外，其余功能区类型贡献最大的金属元素均为 Cd。不同城市功能区中，除未利用地为中度污染外，其余城市功能区均处于重度污染状态，各用地类型污染程度排序为工业用地>交通用地>农业用地>垃圾处置场所>饮用水源地>自然林地>居民用地>未利用地。根据潜在生态风险危害指数计算结果，对所有功能区类型的综合生态危害指数贡献最大的元素均为 Cd。不同功能区类型中，未利用地属于轻微生态危害区域，饮用水源地、自然林地和商住用地属于中等生态危害区域，垃圾处置场所、农业用地和大部分交通用地属于强生态危害区域，而工业用地和少量交通用地属于极强生态危害区域。功能区综合污染水平排序结果为工业用地>交通用地>农业用地>垃圾处置场所>商住用地>饮用水源区>自然林地>未利用地。

为进一步弄清深圳市土壤重金属污染区域分异的细节差异，本研究统计了两种方法各类生态风险等级区域的结构特征，并在此基础上进行对比分析（表 3）。基于内梅罗指数方法的不同污染风险等级区域结构统计结果显示，各重金属元素的区域分异

表 2　深圳市土壤重金属污染生态风险综合分析结果

Table 2　Comprehensive analysis results of ecological risk of heavy metal pollution in Shenzhen soil

功能区类型 Functional area type	个数 Number	内梅罗污染指数 Nemerow pollution index			潜在生态危害指数 Potential ecological hazard index		
		单项污染指数平均值 P_{ave}	单项污染指数最高值 P_{max}	综合污染指数 P_n	单项污染指数平均值 P_{ave}	单项污染指数最高值 P_{max}	综合生态危害指数 RI
A	13	5.48	22.52(Cd)	16.39	92.53	675.68(Cd)	740.25
B	39	3.47	10.78(Cd)	8.01	47.78	323.33(Cd)	382.28
C	15	2.47	5.22(Cd)	3.38	26.28	156.69(Cd)	210.2
D	5	3.17	7.40(Cd)	5.69	37.96	222.13(Cd)	303.67
E	8	2.07	5.36(Cd)	4.06	24.95	160.87(Cd)	199.57
F	5	2.82	10.35(Cd)	7.59	44.32	310.40(Cd)	354.57
G	7	1.28	2.89(Zn)	2.24	10.83	60.41(Cd)	86.61
H	6	2.14	5.38(Cd)	4.09	25.54	161.28(Cd)	204.31

A：工业用地 Industrial land；B：交通用地 Transportation land；C：商住用地：Commercial and residential land；D：垃圾场区 Dump area；E：自然林地 Natural forest land；F：农业用地 Agricultural land；G：未利用地 Unused land；H：饮用水源区 Drinking water source area.

表 3 不同分析方法的结构分析结果

Table 3 Structural statistical results of two different analytical methods

方法 Method	污染等级 Pollution level	结构比例 Structural proportion (%)							
		Mn	Ni	Cr	Cd	As	Zn	Pb	Cu
单项污染指数 Single factor pollution index	无污染 No pollution	30.6	52.0	72.5	10.2	68.4	13.3	16.3	20.4
	轻度污染 Light pollution	56.1	38.8	24.5	18.4	16.3	19.4	42.9	32.7
	中度污染 Moderate pollution	12.2	4.1	1.0	12.2	9.2	26.5	24.5	20.4
	严重污染 Heavy pollution	1.0	5.1	2.0	59.2	6.1	40.8	16.3	26.5
潜在生态危害指数 Potential ecological hazard index	轻微生态危害 Weak ecological hazard	100.0	100.0	100.0	16.3	95.9	99.0	95.0	91.8
	中等生态危害 Medium ecological hazard	0.0	0.0	0.0	18.4	2.0	1.0	5.1	5.1
	强生态危害 Strong ecological hazard	0.0	0.0	0.0	27.6	1.0	0.0	0.0	1.0
	很强生态危害 Very strong ecological hazard	0.0	0.0	0.0	22.5	1.0	0.0	0.0	1.0
	极强生态危害 Extremely strong ecological hazard	0.0	0.0	0.0	15.3	0.0	0.0	0.0	1.0

表 4 深圳市与国内 12 城市土壤重金属元素含量的比较

Table 4 Comparison of heavy metal contents in soils between Shenzhen and 12 Cities in China

项目 Item	Mn	Ni	Cr	Cd	As	Zn	Pb	Cu
12 城市平均值 Tweleve cities average	632.29	35.25	54.81	0.51	18.45	142.06	56.44	33.39
深圳市 Shenzhen city	365.54	17.03	40.39	0.59	12.59	211.49	83.47	73.14
深圳/其他城市 Shenzhen/other cities	0.57	0.48	0.74	1.16	0.68	1.49	1.48	2.19

12 个城市为太原、南京、杭州、沈阳、大连、重庆、乌鲁木齐、北京、长沙、成都、西安、昆明、大庆、南宁、珠海、香港、上海、广州、武汉、哈尔滨、天津、深圳 Twelve cities were Taiyuan, Nanjing, Hangzhou, Shenyang, Dalian, Chongqing, Wulumuqi, Beijing, Changsha, Chengdu, Xi'an, Kunming, Daqing, Nanning, Zhuhai, Hongkong, Shanghai, Guangzhou, Wuhan, Haerbin, Tianjin, and Shenzhen.

特征大致呈现出两种不同的格局,Mn、Ni、Cr 和 As 4 类金属类型呈现出明显的偏态分布,均以无污染和轻污染区域占据绝对优势,其余污染区域类型比重相对较小。其余 4 种重金属元素不同风险区域的分布结构相对较为分散,但结构差异明显。Cd 以严重污染区域占据绝对优势,其余区域类型比较均匀;Zn 以严重污染区域占据相对优势,Pb 和 Cu 的轻度污染区域比重相对较大,其余 3 类区域分布比较均匀。基于潜在生态危害指数方法的不同生态风险区域统计分析结果则显示出与上述结果的明显差异,除 Cd 外,其余金属类型均以轻度危害区域占据绝对优势。其中 Mn、Ni 和 Cr 全部属于轻微生态危害区域,As、Zn、Pb 和 Cu 有 90.0%以上区域属于轻微生态危害区域,其余风险区域类型的分布比例非常小。Cd 的情况与其他金属类型差异较大,大致呈现出以强生态危害比例相对较高(27.6%)的近似正态分布格局。

2.5 深圳市土壤重金属污染与国内其他城市的比较

为进一步分析深圳市土壤表层重金属污染的特征,本研究收集了包括北京、上海、广州等在内的 12 个国内城市土壤重金属污染监测案例[20-32],与深圳市进行了比较(表 4)。结果表明,深圳市土壤重金属污染带有强烈的地方特点,Mn、Ni、Cr 和 As 4 类重金属元素含量显著低于上述国内城市的平均水平,Cd 稍高于平均水平,Zn 和 Pb 显著高于平均水平(大致为 1.5 倍),Cu 污染最重,是平均水平的 2 倍以上。将深圳市土壤污染的整体内梅罗指数计算结果与国内有关城市[32]进行比较(图 4),可以看出,深圳市土壤整体污染状况属于严重污染状态,仅仅略微好于太原和南京,显著高于广州、上海、北京等。

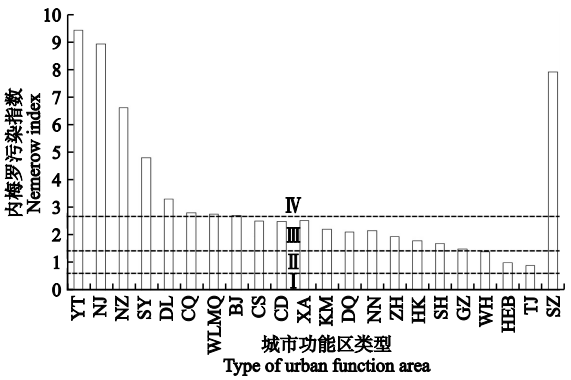


图 4 深圳市土壤污染与国内相关城市的比较

Fig.4 Heavy metals contents in soil of different cities

Ⅰ: 无污染 No pollution; Ⅱ: 轻度污染 Light pollution; Ⅲ: 中度污染 Moderate pollution; Ⅳ: 严重污染 Heavy pollution. TY: 太原 Taiyuan; NJ: 南京 Nanjing; HZ: 杭州 Hangzhou; SY: 沈阳 Shenyang; DL: 大连 Dalian; CQ: 重庆 Chongqing; WLMQ: 乌鲁木齐 Wulumuqi; BJ: 北京 Beijing; CS: 长沙 Changsha; CD: 成都 Chengdu; XA: 西安 Xi'an; KM: 昆明 Kunming; DQ: 大庆 Daqing; NN: 南宁 Nanning; ZH: 珠海 Zhuhai; HK: 香港 Hong Kong; SH: 上海 Shanghai; GZ: 广州 Guangzhou; WH: 武汉 Wuhan; HEB: 哈尔滨 Harbin; TJ: 天津 Tianjin; SZ: 深圳 Shenzhen.

3 讨　论

3.1 深圳市土壤表层重金属污染状况及其生态风险分析

总结深圳市土壤表层重金属污染的生态风险评价结果可以看出，Cd、Cu、Zn 和 Pb 是深圳市重金属污染的主要元素（表 1），与国内相关城市研究结果的对比分析也同样证明了这一结论（表 4）。深圳市是我国对外开放不到 40 年时间里迅速崛起的一个特大城市，其土壤重金属污染状况的发展情形，是我国城市土壤重金属污染的一个典型样本。作为我国对外开放的窗口城市以及最重要的创新型城市，其土壤表层重金属污染状况处于严重污染水平，意味着其污染管理工作和相关的生态修复工作必须受到足够重视。特别是 Cd 污染的管控应置于特别优先的地位。

深圳市目前处于全境城市化和工业化发展进程中，社会经济总量在国内城市中占据第三位，但国土面积只有不到 2000 km^2。高密度的社会经济活动和人口，意味着土壤重金属污染问题对城市居民的健康和人居环境的安全威胁极大。不同程度城市功能区的重金属污染监测结果显示，除垃圾处置场所外，Cd、Zn 和 Cu 等污染物在工业用地、交通用地和商住用地等高密度人为活动场所的污染水平均比较高，表明有相当多城市居民的生产和生活行为可能受到上述重金属污染的潜在影响。一些重金属元素如 Mn、Ni 和 Cr 等在全域尺度上整体处于轻微污染或风险水平，但在工业区等人为活动密集场所浓度水平较高，也需要引起足够的关注。

3.2 深圳市土壤表层重金属污染的成因分析

分析相关研究结果发现，地表环境约束因素背景下的高强度城市化和工业化过程，是深圳市土壤各种重金属污染的决定性因素。Mn、Ni、Cr 和 Pb 4 种受地表环境因素影响较大的元素，在深圳市的土壤表层浓度分布变异系数较小，说明人为活动对这 4 类重金属土壤污染状况的影响程度整体较低，重污染区域空间分异的局部性特征非常突出；其余 4 类的变异系数均较大，意味着其功能区分异特征受到深圳市城市化及工业化过程的强烈影响[33]。从不同重金属类型的区域分异特征看，大部分高浓度污染区域和高风险水平区域集中分布在坪山区中心区、宝安区观澜街道办、西乡沿海地区和沙井、松岗两个街道，而这些区域均为深圳市制造业集中分布区，表明工业生产过程中的污染排放是影响深圳市土壤表层重金属污染的一个关键性因素。

不同城市功能区土壤重金属污染状况的分异特征反映了城市化过程中人为活动对重金属污染的影响。除 Mn 外，其余重金属污染的功能区分异特征都不同程度地反映出这一特点。垃圾处置场所一般通过污染物直接排放和垃圾渗滤液排放成为大部分重金属污染集中分布地[34]，一些在市域整体层面没有显示出明显生态风险水平的重金属类型（如 Pb），在垃圾处置场所也有较高的积累，这显然是因为大量含 Pb 废物在垃圾场集中所产生的衍生性问题[35]；高密度人为活动相关区域，如工业用地、交通用地、商住用地的重金属污染水平普遍较高。

关键重金属污染类型也反映出受人为活动影响的特点。Cd、Zn 和 Cu 属于典型的城市重金属元素，Pb 则是一种重要的工业原材料，这 4 类重金属污染主要来自于人为来源[36]，通常在城市土壤中污染水平较高[37]。这些重金属元素在深圳市被广泛应用于汽车、电子、机械、化工、建材等多种行业的生产过程[37-39]，同时通过相关产品消费、交通污染排放和废物处理等，给几乎所有城市功能区带来地表土壤污染[40-41]。深圳市过去 20 余年的城市化过程中，传统自然和农业用地大量转化为城市建设或高强度都市农业用地，导致 Cd、Zn、Cu 和 Pb 全域污染水平均较高，每种都存在一些生态风险极大的局部区域。

3.3 不同重金属污染生态风险评价方法的对比

本研究使用两种不同的生态风险评估方法，对深圳市的金属污染程度的判断具有显著差异，主要表现在 3 个方面：1）对单一元素的生态风险水平判断以及多个元素的排序有差别；2）对特定功能区的风险水平判断和不同功能区的排序有差别；3）内梅罗指数对不同城市功能区风险水平判断整体较高，不同风险水平分级结构也较为均匀，潜在生态危害指数对功能区生态风险水平判断的差异较大，不同风险水平分级结构也不甚均匀。

这是因为内梅罗指数法作为一种化学评价方法，着力突出了每个样点浓度最大污染物对环境的影响。潜在生态危害指数法则重点凸显高毒性污染物（如 Cd）的生态环境风险。两种评价方法的出发点不同，评价结果也必定不同。内梅罗指数以区域土壤背景值作为客观判定依据，重点考察重金属污染状况与背景之间的差异。生态风险指数则在此基础上，通过引入生态毒理系数，差异化不同重金属元素含量对生态系统的潜在影响。从这一角度看，两者组合使用可以提供关于重金属生态风险更加全面

的信息。两种方法之间并不存在优劣之分,具体如何使用取决于研究者的具体目的。

4 结 论

深圳市土壤表层的 Mn、Ni、Cr 和 Pb 受人为活动的影响程度较低,Cd、Zn、Cu 和 As 受人为活动影响较大。地表环境约束因素背景下的高强度城市化和工业化过程,是各种重金属污染区域分异的决定性因素。

深圳市土壤重金属污染风险较高的 Cd、Zn、Cu 和 Pb,特别是 Cd 污染问题必须引起足够重视。城市总体土壤重金属污染风险水平高于国内绝大多数省会以上城市,相关污染管控工作已刻不容缓。

两种评估方法在单一重金属元素风险判断、不同城市功能区生态风险评价以及市域土壤重金属污染生态风险分级方面均呈现出较大差异,组合使用效果更好,目的性是具体评估过程方法选择的重点考虑因素。

参考文献

[1] Burges A, Epelde L, Garbisu C. Impact of repeated single-metal and multimetal pollution events on soil quality. *Chemosphere*, 2015, **120**: 8-15

[2] 陈秀端. 中国城市土壤重金属空间分布于污染研究. 应用生态学报, 2011, **34**(2): 60-65 [Chen X-D. Spatial distribution and pollution of heavy metals in urban soils of China. *Environment Science and Technology*, 2011, **34**(12): 60-65]

[3] 王莹, 陈玉成, 李章平. 中国城市土壤重金属的污染格局分析. 环境化学, 2012, **31**(6): 763-770 [Wang Y, Chen Y-C, Li Z-P. Pollution patterns analysis of heavy metal in urban soils of China. *Environment Chemistry*, 2012, **31**(6): 763-770]

[4] Luo XS, Yu S, Zhu YG, *et al*. Trace metal contamination in urban soils of China. *Science of the Total Environment*, 2012, **421-422**: 17-30

[5] Bilos C, Colombo JC, Skorupka CN, *et al*. Sources, distribution and variability of airborne trace metals in La Plata City area, Argentina. *Environmental Pollution*, 2001, **111**: 149-158

[6] Madrid L, DíAz-Barrientos E, Madrid F. Distribution of heavy metal contents of urban soils in parks of Seville. *Chemosphere*, 2002, **49**: 1301-1308

[7] Manish K Hiroaki F, Futoshi K. Tracing source and distribution of heavy metals in road dust, soil and soakaway sediment through speciation and isotopic fingerprinting. *Geoderma*, 2013, **211-212**: 8-17

[8] Rodrigues SM, Cruz N, Coelho C, *et al*. Risk assessment for Cd, Cu, Pb and Zn in urban soils: Chemical availability as the central concept. *Environmental Pollution*, 2013, **183**: 234-242

[9] 刘梦梅, 王利军, 王丽, 等. 西安市不同功能区土壤重金属含量及生态健康风险评价. 土壤通报, 2018, **49**(1): 167-175 [Liu M-M, Wang L-J, Wang L, *et al*. Soil heavy metal content and ecological health risk assessment in different functional areas of Xi'an City. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, **49**(1): 167-175]

[10] 郑文教, 林鹏. 深圳福田白骨壤群落 Cr、Ni、Mn 的累积及分布. 应用生态学报, 1996, **7**(2): 139-144 [Zheng W-J, Lin P. Accumulation and distribution of Gr, Ni and Mn in bone soil community in Futian, Shenzhen. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1996, **7**(2): 139-144]

[11] 程珊珊, 沈小雪, 柴民伟, 等. 深圳湾红树林湿地不同生境类型沉积物的重金属分布特征及其生态风险评价. 北京大学学报:自然科学版, 2018, **54**(2): 415-425 [Cheng S-S, Shen X-X, Cai M-W, *et al*. Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of different habitats in Shenzhen Bay mangrove wetland. *Journal of Peking University: Natural Science*, 2018, **54**(2): 415-425]

[12] 时运红, 李明远, 李波, 等. 深圳湾沉积物重金属污染时空分布特征. 海洋环境科学, 2017, **36**(2), 186-208 [Shi Y-H, Li M-Y, Li B, *et al*. Spatial and temporal distribution characteristics of heavy metal pollution in sediments of Shenzhen Bay. *Marine Environmental Science*, 2017, **36**(2): 186-208]

[13] 刘永伟, 毛小玲, 孙莉英, 等. 深圳市工业污染源重金属排放特征分析. 北京大学学报:自然科学版, 2010, **46**(2): 279-285 [Liu Y-W, Mao X-L, Sun L-Y, *et al*. Characteristics of heavy metals discharge from Industrial pollution sources in Shenzhen. *Journal of Peking University: Natural Science*, 2010, **46**(2): 279-285]

[14] 郑茂坤, 谢婧, 王仰麟, 等. 深圳市农林土壤重金属累积现状及风险评价研究. 生态毒理学报, 2009, **4**(5): 726-733 [Zheng M-K, Xie J, Wang Y-L, *et al*. Accumulation status and risk assessment of heavy metals in agroforestry soils of Shenzhen City. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2009, **4**(5): 726-733]

[15] US EPA. Method 3051A (SW-846): Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Oils. Revision 1. Washington, DC: US EPA, 2007

[16] 国家环境监测中心. 中国土壤元素背景值. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 330-382 [National Environmental Monitoring Centre. Background Values of Soil Elements in China. Beijing: China Environmental Science Press, 1990: 330-382]

[17] 王政权. 地统计学在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999 [Wang Z-Q. Application of Geostatistics in Ecology. Beijing: Science Press, 1999]

[18] Zhang Y, Chu C, Li T, *et al*. A water quality management strategy for regionally protected water through health risk assessment and spatial distribution of heavy metal pollution in 3 marine reserves. *Science of the Total Environment*, 2017, **599-600**: 721-731

[19] Elias MS, Ibrahim S, Samuding K, *et al*. The sources and ecological risk assessment of elemental pollution in sediment of Linggi estuary, Malaysia. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, **137**: 646-655

[20] 王玉军, 吴同亮, 周东美, 等. 农田土壤重金属污染评价研究进展. 2017, **36**(12): 2365-2378 [Wang Y-J, Wu T-L, Zhou D-M, *et al*. Advances in heavy metal pollution assessment of farmland soil. *Journal of Agricultural Environmental Science*, 2017, **36**(12): 2365-2378]

[21] Zheng YM, Chen TB, He JZ. Multivariate geostatistical analysis of heavy metals in topsoils from Beijing, China. *Journal of Soils and Sediments*, 2007, **8**: 51-58
[22] 郭平, 谢忠雷, 李军, 等. 长春市土壤重金属污染特征及其潜在生态风险评价. 地理科学, 2005, **25**(1): 108-112 [Guo P, Xie Z-L, Li J, *et al*. Characteristics of heavy metal pollution in soil and its potential ecological risk assessment in Changchun City. *Geographical Science*, 2005, **25**(1): 108-112]
[23] 陈海珍, 龚春生, 李文立, 等. 广州市不同功能区土壤重金属污染特征及评价. 环境与健康杂志, 2010, **27**(8): 700-703 [Chen H-Z, Gong C-S, Li W-L, *et al*. Characteristics and assessment of heavy metal pollution in soils of different functional areas in Guangzhou. *Journal of Environment and Health*, 2010, **27**(8): 700-703]
[24] 谢小进. 上海地区土壤重金属分布特征及其成因分析. 博士论文. 上海: 上海师范大学, 2010 [Xie X-J. Spatial Distribution Characteristics and Causes of Heavy Metals in Soils of Shanghai. PhD Thesis. Shanghai: Shanghai Normal University, 2010]
[25] 卢瑛, 龚子同, 张甘霖, 等. 南京城市土壤重金属含量及其影响因素. 应用生态学报, 2004, **15**(1): 123-126 [Lu Y, Gong Z-T, Zhang G-L, *et al*. Heavy metal content in urban soil of Nanjing and its influencing factors. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, **15**(1): 123-126]
[26] 方晰, 唐志娟, 田大伦, 等. 长沙城市森林土壤 7 种重金属含量特征及其潜在生态风险. 生态学报, 2012, **32**(23): 7595-7606 [Fang X, Tang Z-J, Tian D-L, *et al*. Characteristics of seven heavy metals in urban forest soil of Changsha and their potential ecological risks. *Journal of Ecology*, 2012, **32**(23): 7595-7606]
[27] 侯乐, 张涤非, 张玉龙. 沈阳地区农田土壤重金属空间分布特征及现状评价. 辽宁林业科技, 2011(3): 5-8 [Hou L, Zhang D-F, Zhang Y-L. Spatial distribution characteristics and current situation evaluation of heavy metals in farmland soil in Shenyang. *Liaoning Forestry Science and Technology*, 2011(3): 5-8]
[28] 张春荣. 青岛市区土壤重金属生态地球化学特征研究. 博士论文. 济南: 山东科技大学, 2011 [Zhang C-R. Study on Eco-geochemical Characteristics of Heavy Metals in Soils of Qingdao City. PhD Thesis. Ji'nan: Shandong University of Science and Technology, 2011]
[29] 刘哲民. 宝鸡土壤重金属污染及其防治. 干旱区资源与环境, 2005, **19**(2): 101-104 [Liu Z-M. Heavy metal pollution in Baoji soil and its control. *Journal of Arid Areas Resources and Enivironment*, 2005, **19**(2): 101-104]
[30] 王美青. 杭州市城市和近郊土壤特性及重金属污染的研究. 博士论文. 杭州: 浙江大学, 2002 [Wang M-Q. Study on Soil Characteristics and Heavy Metal Pollution in Urban and Suburban Areas of Hangzhou City. PhD Thesis. Hangzhou: Zhejiang University, 2002]
[31] Li XD, Lee SL, Wong SC, *et al*. The study of metal contamination in urban soils of Hong Kong using a GIS-based approach. *Environmental Pollution*, 2004, **129**: 113-124
[32] 王济, 张浩, 曾希柏, 等. 贵阳市城区路侧土壤重金属分布特征及污染评价. 环境科学研究, 2009, **22**(8): 950-955 [Wang J, Zhang H, Zeng X-B, *et al*. Distribution characteristics and pollution assessment of heavy metals in roadside soil of Guiyang City. *Research of Environment Sciences*, 2009, **22**(8): 950-955]
[33] 王莹, 陈玉成, 李章平. 中国城市土壤重金属的污染格局分析. 环境化学, 2012, **31**(6): 763-770 [Wang Y, Chen Y-C, Li Z-P. Analysis of heavy metal pollution patterns in urban soils of China. *Journal of Environment Chemistry*, 2012, **31**(6): 763-770]
[34] Yuan GL, Sun TH, Han P, *et al*. Source identification and ecological risk assessment of heavy metals in topsoil using environmental geochemical mapping: Typical urban renewal area in Beijing, China. *Geochemical Exploration*, 2014, **136**: 40-47
[35] Saran R, Baul T, Srinivas P, *et al*. Simultaneous determination of trace heavy-metals in waste by atomic-absorption spectrometry after preconcentration by solvent-extraction. *Analytical Letters*, 1992, **25**: 1545-1557
[36] Amato F, Cassee FR, Denier van der Gon HA, *et al*. Urban air quality: The challenge of traffic non-exhaust emissions. *Hazardous Materia*ls, 2014, **275**: 31-36
[37] 卢瑛, 龚子同, 张甘霖, 等. 南京城市土壤重金属含量及其影响因素. 应用生态学报, 2004, **15**(1): 123-126 [Lu Y, Gong Z-T, Zhang G-L, *et al*. Heavy metal content in urban soil of Nanjing and its Influencing factors. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, **15**(1): 123-126]
[38] Lee SL, Li X, Shi W, *et al*. Metal contamination in urban, suburban, and country park soils of Hong Kong: A study based on GIS and multivariate statistics. *Science of the Total Environment*, 2006, **356**: 45-61
[39] Jamal Q, Durani P, Khan K, *et al*. Heavy Metals Accumulation and Their Toxic Effects: Review. *Journal of Biology*, 2013, **1**: 27-36
[40] Mokrzycki E, Uliasz-Bocheńczyk A, Sarna M. Use of alternative fuels in the polish cement industry. *Applied Energy*, 2003, **74**: 101-111
[41] Markus JA, Mcbratney AB. Corrigendum: An urban soil study: Heavy metals in Glebe, Australia. *Soil Research*, 1996, **34**: 453-465

作者简介　常文静, 女, 1982 年生, 硕士研究生. 主要从事环境生态学研究. E-mail: changwj@ pkusz.edu.cn

责任编辑　肖　红
开放科学(资源服务)标识码(OSID):



常文静, 李枝坚, 曾辉, 等. 深圳市不同功能区土壤表层重金属污染及其综合生态风险评价. 应用生态学报, 2020, **31**(3): 999-1007
Chang W-J, Li Z-J, Zeng H, *et al*. Heavy metal pollution and comprehensive ecological risk assessment of surface soil in different functional areas of Shenzhen, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(3): 999-1007