

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2017042406

李鹏辉, 邹晓燕, 楼婕, 等. 不同季节垃圾填埋场周围重金属污染特征及评价 [J]. 环境化学, 2018, 37(1): 41-50.

LI Penghui, ZOU Xiaoyan, LOU Jie, et al. Pollution characteristics and evaluation of heavy metals around landfill in different seasons [J]. Environmental Chemistry, 2018, 37(1): 41-50.

不同季节垃圾填埋场周围重金属污染特征及评价*

李鹏辉^{1,2} 邹晓燕¹ 楼 婕³ 于珍凤^{1,2} 李金磊^{1,2} 张洪武^{1**}

(1. 中国科学院城市环境研究所, 厦门, 361021; 2. 中国科学院大学, 北京, 100049;

3. 厦门大学环境与生态学院, 厦门, 361102)

摘 要 采集漳州市某生活垃圾填埋场周围冬夏两季的地表水(包括渗滤液)、土壤以及植物样品, 分析 9 种重金属总量的季节性变化. 结果表明, 冬季地表水中 Zn 和 As, 土壤和植物中的 Cd 和 As 的含量均大于夏季, 而夏季波动性强于冬季; 夏季渗滤液中总 Hg 的含量明显高于冬季, 其余变化不明显. 地表水重金属含量均低于地表水环境质量 V 类标准限值, 渗滤液中所有重金属含量均低于污水排放二级标准限值. 土壤中重金属 Cd、As 和 Pb 的污染最重, 已达到重度污染, 冬季的污染明显高于夏季. 冬季植物富集能力强于夏季, 细叶芒对 Cd 的富集能力较强, 可作为重金属污染修复的先锋植物.

关键词 垃圾填埋场, 季节, 重金属污染, 评价, 植物富集.

Pollution characteristics and evaluation of heavy metals around landfill in different seasons

LI Penghui^{1,2} ZOU Xiaoyan¹ LOU Jie³ YU Zhenfeng^{1,2}
LI Jinlei^{1,2} ZHANG Hongwu^{1**}

(1. Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen, 361021, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China;

3. College of the Environment & Ecology, Xiamen University, Xiamen, 361102, China)

Abstract: The concentrations of 9 heavy metals in the surface water (including leachate), soil and plant samples around a landfill located in Zhangzhou City were analyzed to investigate the variation of the total amount of heavy metals with seasons. Results showed that the total concentrations of Cd, As in the soil and plant and Zn, As in the surface water were higher in winter than in summer, while the variation in summer was stronger than that in winter. The content of total Hg in leachate in summer was significantly higher than that in winter, while the other heavy metals changed little. The contents of all heavy metals in the surface water and leachate samples were lower than the Fifth class of National Surface Water Environmental Quality Standard and the second class of Wastewater Discharge Standard, respectively. The pollution of Cd, As and Pb in soil was more severe than other heavy metals and reached the degree of serious pollution, especially in winter which was obviously heavier than in summer. The ability of plant enrichment in winter was stronger compared with that in summer, and the *Miscanthus sinensis* cv could be used as the pioneer plant for heavy metal pollution

2017 年 4 月 25 日收稿(Received: April 25, 2017).

* 环保公益性行业科研专项(201509054)资助.

Supported by the Special Fund for Environmental Protection-scientific Research in the Public(201509054).

** 通讯联系人, Tel: 0592-61090773, E-mail: hwzhang@iue.ac.cn

Corresponding author, Tel: 0592-61090773, E-mail: hwzhang@iue.ac.cn

due to its stronger accumulation ability to Cd in the future.

Keywords: landfill, seasons, heavy metals pollution, evaluation, plant enrichment.

随着中国城市化的飞速发展,生活垃圾的产量日益剧增,垃圾处理已经成为一个棘手的问题。目前,我国城市生活垃圾的处理方式主要有填埋、焚烧和堆肥^[1-2]。填埋法仍是我国城市生活垃圾的主要处理方式,占总处理量的95%以上^[3-5]。随着科学技术的不断发展,生活用品中的重金属含量逐渐增加,同时,一些电子垃圾(电池、废旧荧光灯管、温度计等)也随生活垃圾进入填埋场^[6-8],从而引起垃圾中重金属含量的增加。

生活垃圾填埋场多数属于简易填埋场,不能完全达到卫生填埋场的技术标准,垃圾中的重金属容易释放,从而对周围的土壤以及植被产生污染^[9-10]。有研究表明^[11],某垃圾填埋场周围土壤中重金属Cu、Pb和Zn的污染较重。王春铭等^[12]研究发现,封场后的增城生活垃圾填埋场周围植物受到重金属Zn的毒害作用。渗滤液作为垃圾填埋场的必然副产物,含有较多的有害物质^[13],对周围环境存在严重的危害。有研究表明^[14],江川建子山垃圾卫生填埋场渗滤液中Hg超标40倍,通海县杨广垃圾卫生填埋场渗滤液中Cr超标57.3倍。垃圾渗滤液排入河流或渗入地下,对周围水体产生严重的影响^[15]。众所周知,重金属一旦进入环境中,就很难被彻底消除,并且通过食物链进入人体,对人类的健康构成严重的威胁^[16]。垃圾填埋场对周围水体具有严重的危害^[17]。徐州市生活垃圾填埋场周围地下水中重金属Mn、Fe、Zn、Ba的含量均超过地表水Ⅲ类标准限值^[18]。

目前,虽然国内外学者对生活垃圾填埋场周围地表水、土壤、植物等重金属污染状况有了一定的研究^[19-21],但是垃圾填埋场周围重金属的季节性变化尚缺乏研究。本文通过对重金属季节性变化的研究,试图寻求其变化规律以及主要的影响因素,为以后的环保工作提供参考。

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 样品采集

采样前对漳州市某生活垃圾填埋场周围环境的调查发现,该垃圾填埋场属于山谷型,四面环山,公路由南-西-北而过,附近地表径流较少,没有很好的连通性。依据当地的实际情况,分别于2015年12月(冬季)、2016年8月(夏季),以漳州市某生活垃圾填埋场为中心,采样点如图1,同时采集垃圾填埋场5 km以外的样点作为对照,对照点为清洁无污染区域。由于垃圾填埋场周围地表水水流量较小,水深均在1 m以下,所以采集地表水一半水深处的水样1 L于聚乙烯塑料瓶中,立刻低温保存,编号W1—W5,W5为对照组;采集渗滤液收集池表层、中层以及底层的渗滤液6次,混合后作为渗滤液样品,置于聚乙烯所料瓶内,编号W6;运用蛇形采样法采集土壤表层(20 cm左右)土壤样品,混合均匀的土壤样品装于自封袋中,每个样品大约重1 kg,编号(S1—S9),S9为对照点;植物样品:采集垃圾填埋场周围多株优势植物的混合样品于自封袋中(P1—P18),植物种类见表1。

表1 植物样品类型

Table 1 The types of plant samples

植物名 Plants	拉丁学名 Latin name	属 Genus	类别 Type	编号 Number
桑树	<i>Morus alba</i> L.	桑属	落叶乔木	P1、P7、P13
桃树	<i>Amygdalus persica</i> L.	桃属	落叶小乔木	P2、P8、P15
香蕉	<i>Musa nana</i> Lour	芭蕉属	草本植物	P3、P9
竹子	<i>Bambusoideae</i>	竹属	草本植物	P6、P11、P16
细叶芒	<i>Miscanthus sinensis</i> cv	芒属	草本植物	P4、P10、P14、P17
野大豆	<i>Glycine soja</i> Sieb. et Zucc	大豆属	草本植物	P5、P9、P18

1.2 样品处理

植物样品先后用自来水和去离子水冲洗干净表面灰尘,待处理。水样采用硝酸法微波消解后测定其

重金属总量^[22];土壤样品经过冷冻干燥 3 d,研磨后过 200 目的尼龙筛,采用硝酸-氢氟酸微波消解^[23],测定重金属总量;植物样品亦冷冻干燥 3 d,硝酸微波消解^[24],测定其重金属含量.所有样品运用电感耦合等离子原子发射光谱(ICP-OES)和电感耦合等离子质谱(ICP-MS)测定 As、Cd、Cr、Cu、Zn、Mn、Ni 和 Pb 的总量,用 MERX 总汞/甲基汞二位一体分析仪进行总汞的测定.

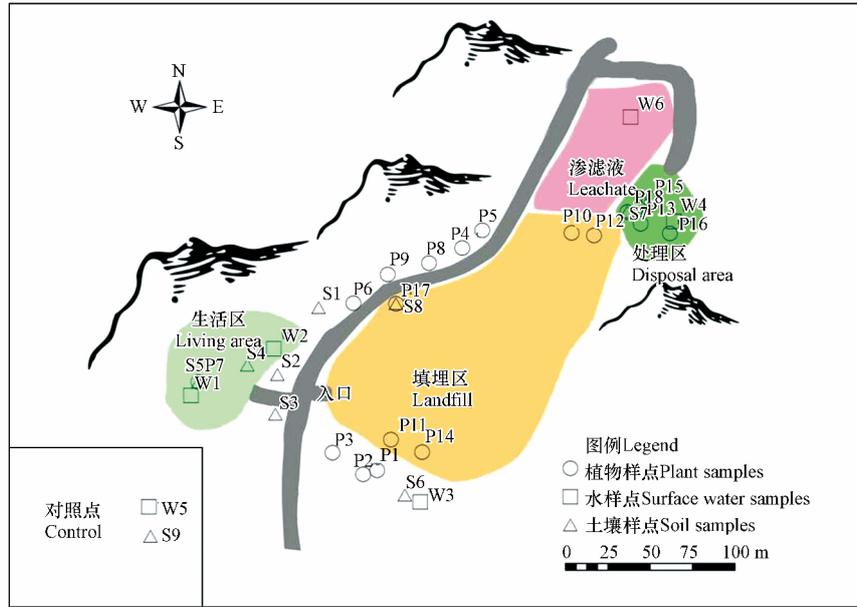


图 1 研究区采样示意图

Fig.1 The sampling sites of study area

1.3 土壤环境质量评价

(1) 单项污染指数法

单项污染指数法是对土壤中某种重金属污染程度进行评价的常用方法,计算公式为:

$$F_i = C_i / S_i$$

式中 F_i 为单项污染指数, C_i 为土壤中重金属的实测值, S_i 为土壤评价的标准,本研究采用福建省土壤背景值^[25].分级标准: $F_i \leq 1$ 未污染; $1 < F_i \leq 2$ 轻度污染; $2 < F_i \leq 3$ 中度污染; $F_i > 3$ 重度污染.

(2) 内梅罗综合污染指数法

土壤环境复杂多样,单项污染指数法只能在一定程度上反应单个元素的污染程度,并不能完全反映土壤重金属的整体污染水平,内梅罗综合污染指数法^[26]能够反应土壤重金属的综合污染水平.因此,本研究采用内梅罗综合污染指数法来评价土壤重金属的整体污染水平.计算公式为:

$$P = \sqrt{\frac{F_{i(ave)}^2 + F_{i(max)}^2}{2}}$$

其中 P 为综合污染指数, $F_{i(ave)}$ 为单项污染指数的平均值, $F_{i(max)}$ 为单项污染指数的最大值,土壤污染的程度与 P 值成正比,分级标准见表 2.

表 2 土壤污染分级标准

Table 2 Classification standard of soil pollution

土壤级别 Soil level	综合污染指数 Pollution load index	污染等级 Pollution level	污染水平 Degree of pollution
1	$P \leq 0.7$	安全	清洁
2	$0.7 < P \leq 1.0$	警戒限	尚清洁
3	$1.0 < P \leq 2.0$	轻污染	土壤污染超过背景值,作物开始污染
4	$2.0 < P \leq 3.0$	中污染	土壤、作物均受到中度污染
5	$P > 3.0$	重污染	土壤、作物受污染以相当严重

1.4 植物富集

生物富集系数(Bioconcentration factors, 简称 BCF) 反映了植物对某种重金属元素的富集能力以及重金属在植物中迁移的难易程度^[27]. 本研究采用生物富集系数来评价垃圾填埋场周围的优势植物对重金属的富集能力. 生物富集系数公式为:

$$BCF = C_{\text{植物}i} / S_i$$

式中, $C_{\text{植物}i}$ 表示植物体内 i 元素的含量, S_i 表示土壤中 i 元素的含量.

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 重金属含量分析

2.1.1 夏季垃圾填埋场周围介质中重金属的浓度水平

夏季垃圾填埋场周围环境中重金属平均含量特征(表 3). 从含量上分析, 地表水中重金属平均值以 Mn、Zn 的含量较高, 以 Hg、Cd 含量最低, 所有重金属含量均低于地表水环境质量 V 类标准限值(GB 3838—2002)^[28]. 除 Cd、Zn、Pb 外, 其余重金属平均含量均高于对照组重金属含量, 其中 Mn、Ni 为对照组含量的 2 倍以上, 可能受到外源污染较重. 土壤中重金属平均含量均低于土壤环境质量标准二级标准限值(GB 15618—1995)^[29], 其中以 Mn、Pb 和 Zn 较高, Mn 与 Pb 的平均含量变化幅度较大. 植物中 Mn 的平均含量最高, 并且超过了正常植物的临界值($400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[30], 其余重金属均低于植物体内重金属的临界值, 同样以 Hg、Cd 的含量最低. 地表水、土壤以及植物均表现为重金属 Mn 的含量最高, 说明该垃圾填埋场周围可能受到 Mn 的污染.

从变异系数分析, 夏季地表水中重金属 Mn、Ni、Hg 的变异系数最高, 说明夏季垃圾填埋场周围地表水中 Mn、Ni、Hg 的分布波动性较大. 土壤中重金属含量波动性较小, 只有 Pb 的变异系数大于 1. 夏季植物中重金属含量的波动性明显强于地表水与土壤中的重金属含量的波动性, 其中以 Cd、Mn、Ni 的波动性最大, 可能与植物的种类有关系, 不同植物对重金属的吸收转化存在明显的种间差异^[31].

表 3 夏季垃圾填埋场周围环境介质中重金属含量

Table 3 The concentration of heavy metals in the surrounding environment of landfill in summer

类型(Types)		Hg	Cd	As	Ni	Pb	Cr	Cu	Zn	Mn
地表水 Surface water	最小值 Minimum	0.011	0.027	1.33	0.58	2.94	19.34	8.57	11.53	20.69
	最大 Maximum	0.124	0.079	3.18	17.58	7.23	53.24	25.96	80.15	1367
	平均值 Average	0.043	0.049	1.82	4.43	4.48	26.44	13.08	37.01	372.0
	变异系数 Coefficient of variation	1.06	0.44	0.43	1.66	0.37	0.57	0.56	0.69	1.52
对照组均值 Control		0.023	0.052	1.37	1.90	7.23	20.23	10.60	80.15	113.5
土壤 Soil	最小值 Minimum	0.037	0.088	10.04	3.83	27.06	6.82	13.64	44.74	175.9
	最大 Maximum	0.143	0.260	14.96	17.85	384.78	48.78	41.88	151.33	495.8
	平均值 Average	0.080	0.137	11.78	11.40	88.73	27.26	26.27	69.44	373.5
	变异系数 Coefficient of variation	0.52	0.38	0.14	0.47	1.26	0.46	0.37	0.47	0.31
对照组均值 Control		0.14	0.15	14.96	4.85	39.87	17.42	13.64	63.79	252.8
植物 Plant	最小值 Minimum	0.003	0.008	0.22	0.40	1.17	14.15	7.62	40.39	17.13
	最大 Maximum	0.185	2.309	1.58	7.80	13.79	20.76	16.40	75.41	10822
	平均值 Average	0.079	0.214	0.63	1.79	5.15	16.05	11.18	54.68	1371
	变异系数 Coefficient of variation	0.70	2.53	0.51	1.02	0.73	0.08	0.25	0.15	2.02
植物中重金属临界值 ^[30] Critical value of heavy metals in plants		0.3	4	10	30	50	1	100	160	400

* 注: 地表水中重金属范围、平均值的单位为 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 土壤和植物样品中重金属范围、平均值的单位为 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

2.1.2 冬季垃圾填埋场周围介质中重金属的浓度水平

冬季垃圾填埋场周围介质中重金属含量见表 4. 冬季地表水中仍以重金属 Mn、Zn 的含量较高, 其中

Mn 的平均含量为对照组的 5.47 倍,其余重金属均值与对照组差别不明显,所有重金属平均含量均低于地表水环境质量 V 类标准限值(GB 3838-2002)。除 Hg 和 Cr 外,冬季土壤中重金属平均含量均高于福建省土壤背景值,其中 Cd、As 的平均含量分别为福建省土壤背景值的 9.66 倍和 8.20 倍,是对照区域土壤重金属含量的 1.81 和 1.85 倍。与其它地区垃圾填埋场周边土壤相比^[32],该垃圾填埋场周围土壤中的重金属含量也明显偏高。植物中仍以 Mn 的平均含量最高,且植物体内不同重金属含量差异较大,可能由于植物体内重金属含量存在较明显的种间差异。

从变异系数来看,冬季垃圾填埋场周围地表水中以 Mn、Ni 为最大,土壤中 Pb 的波动性最明显,植物中以 Ni、Mn、Cd 的变异系数最大,说明冬季垃圾填埋场周围环境中重金属 Mn、Ni、Pb、Cd 的分布波动性较大,受到了一定的外源污染。相对来说,植物中重金属波动性变化最明显,可能由于除了垃圾场影响外,植物的种间差异也起到了一定的作用。

表 4 冬季垃圾填埋场周围环境介质中重金属含量

Table 4 The concentration of heavy metals in the surrounding environment of landfill in winter

类型 Types		Hg	Cd	As	Ni	Pb	Cr	Cu	Zn	Mn
地表水 Surface water	最小值 Minimum	0.022	0.112	2.34	0.77	7.19	12.58	23.43	194.8	42.64
	最大值 Maximum	0.035	0.261	5.92	5.50	9.84	15.91	38.09	335.6	1429
	平均值 Average	0.026	0.166	4.08	1.99	8.07	14.01	27.54	269.8	385.4
	变异系数 Coefficient of variation	0.21	0.39	0.34	1.01	0.14	0.09	0.22	0.21	1.55
对照组均值 Control		0.022	0.13	3.30	1.97	8.51	14.43	23.70	194.8	70.40
土壤 Soil	最小值 Minimum	0.030	0.087	11.60	4.09	68.56	5.14	19.20	63.88	338.0
	最大值 Maximum	0.096	1.043	64.59	45.16	735.9	73.29	45.67	224.2	1211
	平均值 Average	0.061	0.522	47.38	15.78	161.3	31.02	31.19	113.9	644.8
	变异系数 Coefficient of variation	0.39	0.56	0.42	0.78	1.34	0.65	0.30	0.42	0.49
对照组均值 Control		0.077	0.29	25.55	9.35	73.71	21.73	19.20	119.2	543.7
植物 Plant	最小值 Minimum	0.024	0.069	2.30	0.12	3.47	6.59	19.87	145.1	38.66
	最大值 Maximum	0.185	11.98	46.06	35.53	37.57	28.48	151.1	455.8	8693
	平均值 Average	0.087	2.216	16.34	3.82	11.54	16.95	64.79	300.8	1285
	变异系数 Coefficient of variation	0.66	1.12	0.65	2.03	0.66	0.37	0.56	0.25	1.86
植物中重金属临界值 ^[30] Critical value of heavy metals in plants		0.3	4	10	30	50	1	100	160	400

* 注: 地表水中重金属范围、平均值的单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 土壤和植物样品中重金属范围、平均值的单位为 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

2.1.3 冬夏季重金属含量比较

冬夏季相比较而言,重金属平均含量的总体变化趋势一致,表现为不同环境介质(地表水、植物、渗滤液和植物)中 Mn 含量最高, Cd 和 Hg 含量最低。就波动性而言,夏季地表水、植物中重金属的波动性明显强于冬季,原因可能是夏季高温多雨,天气变化明显,导致重金属在不同环境介质中迁移转化能力较强,引起了夏季地表水和植物中重金属含量的波动性较大,而土壤中重金属含量的波动性没有明显的变化。

而单个重金属含量的变化存在一定的差异。冬季地表水中重金属 Zn、As、Cd 的含量均为夏季含量的两倍以上,与李鸣^[33]等研究鄱阳湖周围水体中重金属季节性变化恰好相反,可能是由于垃圾填埋场的影响占主要地位,而其余重金属变化不明显。冬季土壤中重金属含量除 Hg 外,均高于夏季的含量,其中 As(4.02 倍)和 Cd(3.82 倍)为最高,与李兴菊^[34]等研究的土壤中重金属季节性变化相一致。冬季植物体内重金属浓度普遍高于夏季(Mn 除外),以 As 和 Cd 为最高,分别为夏季的 26.1 倍和 10.4 倍。刘庆阳^[35]等的研究表明,冬季植物中重金属 Pb、Cd 和 Hg 的浓度明显高于夏季。该研究区域周围介质中重金属含量变化最明显的元素为 Cd 和 As,可能由于该地区这两种重金属污染较重,受天气变化影响较明显。

2.1.4 渗滤液中重金属总量的季节性变化

冬夏两季渗滤液中不同的重金属的含量存在明显的不同(图 2)。两个季节渗滤液中重金属含量均表现为 Mn、Zn 最高, Hg 和 Cd 最低;但是,重金属 Hg、Cd、Cr、As、Ni、Pb 均低于第一类污染物最高允许排

放浓度^[36](GB 8978—1996), Mn、Cu、Zn 均低于第二类污染物最高允许排放浓度二级标准限值. 本研究中冬夏两季渗滤液中重金属含量均低于李丹^[37]等研究的垃圾渗滤液中重金属的含量. 一方面可能是因为该垃圾填埋场以城市生活垃圾为主, 工业固体废弃物较少; 另一方面也可能是由于重金属离子与环境中的有机质、土壤胶体等发生化学反应或被吸附, 或转化为难迁移的沉淀或者络合物, 迁移能力下降, 难以进入渗滤液^[38]. 冬季渗滤液中大部分重金属含量高于夏季, 其中冬季 Mn、Zn、As 的含量均为夏季的 2 倍以上, Cd 变化不大, 而 Pb 和 Hg 低于夏季的含量, 夏季渗滤液中 Hg 的含量为冬季的 12.5 倍, 说明 Hg 受季节变化影响最明显, Mn、Zn 次之, 其余重金属受季节变化影响较小. 可能由于 Hg 挥发性强, 垃圾填埋场附近的 Hg 主要以气态汞形态存在于大气中, 夏季高温多雨, 大气中的 Hg 通过干湿沉降作用, 沉降在地表, 而渗滤液中有机物含量极高^[39], 可以有效地将无机汞转化为有机汞, 从而引起夏季渗滤液中 Hg 含量明显高于冬季.

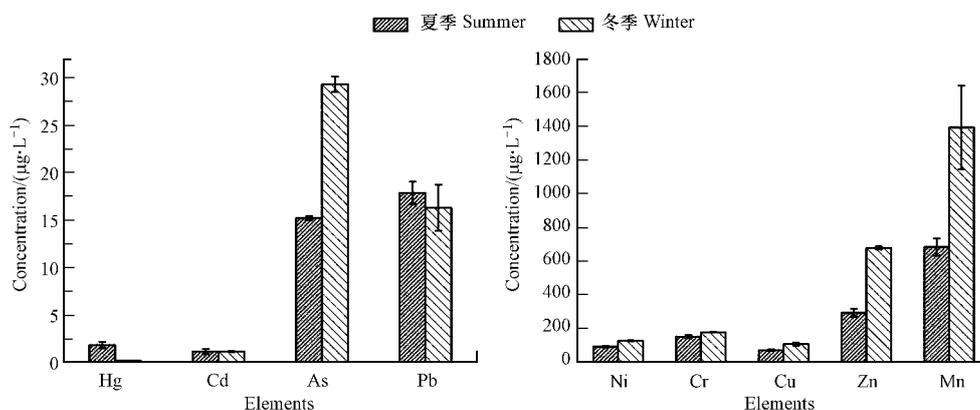


图 2 冬夏两季渗滤液中重金属的浓度

Fig.2 The concentration of heavy metals in leachate in winter and summer

2.2 土壤重金属环境质量评价

2.2.1 单项污染指数法

根据实测土壤重金属浓度、福建省土壤背景值以及单项污染指数计算公式得到冬夏两个季节土壤重金属的单项污染指数(图 3). 除重金属 Hg 外, 冬季土壤重金属的单项污染指数均大于夏季, 以 Cd、As、Pb 的变化最为明显, 与土壤中重金属含量的变化相一致. 可能是由于冬季温度低, 降雨量少, 微生物活性较低, 从而引起重金属迁移转化能力降低. 同时, Cd、As、Pb 也是该地区污染最重的重金属元素, 冬季都达到了重度污染的水平, 其余重金属的污染程度为轻度至中度污染水平. 说明该垃圾填埋场周围土壤受到了重金属的不同程度污染, 其中 Cd、As 和 Pb 污染最为严重. 而对照组的 Cd、As、Pb 也受到了不同程度的污染, 甚至有达到重度污染的情况, 这也与贾丽敏等^[40]研究的漳州市土壤污染情况相一致, 即漳州市土壤在一定程度上受到重金属 Cd、Pb、As 的污染, 但是垃圾填埋场周围土壤中重金属的污染程度比对照组的污染严重. 说明垃圾填埋场在一定程度上加重了土壤中重金属的污染程度.

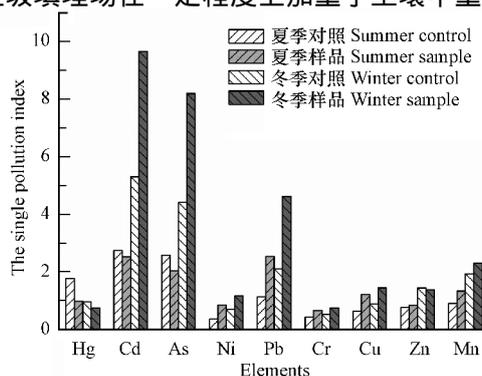


图 3 冬夏两季土壤重金属的单项污染指数

Fig.3 The single pollution index of heavy metals in soil in winter and summer

2.2.2 内梅罗综合污染指数法

土壤重金属内梅罗综合污染指数分布情况见图 4。夏季对照点 S9 的土壤综合污染指数已经达到了 2.14, 属于中污染, 仅有 S1 和 S6 采样点的土壤重金属综合指数大于 3, 属于重度污染, 而其余采样点综合污染指数均在 1—2 之间, 属于轻度污染。冬季所有采样点的土壤重金属综合污染指数均明显高于夏季, 除了 S7、S8 为中污染, 其余采样点均达到了重度污染, 与王圣伟^[41]的研究结果相一致。可能由于夏季高温多雨, 土壤水分含量较高, 微生物活动旺盛, 淋溶作用强烈, 有效的促进了土壤中重金属的迁移转化, 从而导致冬季污染比夏季污染严重。

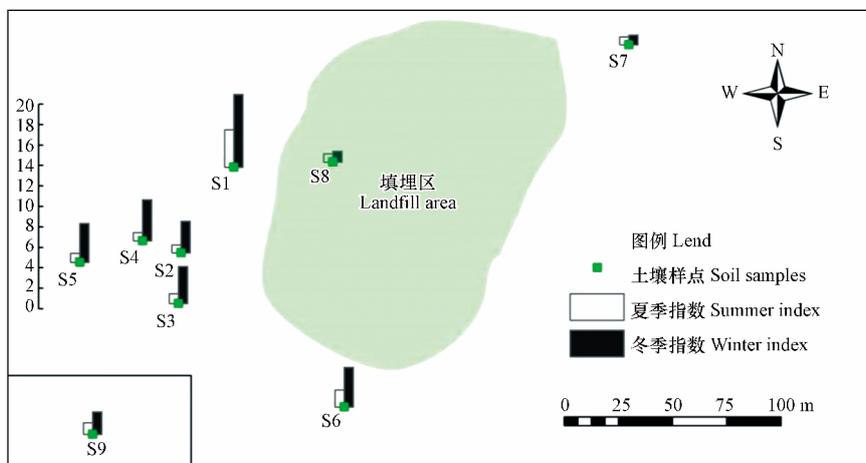


图 4 土壤重金属内梅罗综合污染指数分布图

Fig.4 Distribution of the pollution load index of heavy metals in soil

2.3 植物富集能力季节性差异

垃圾填埋场周围植物对不同重金属富集系数(表 5)。大部分植物的富集系数表现为: 冬季>夏季, 说明冬季植物的富集能力强于夏季。一方面可能是因为夏季植物处于生长期, 而冬季植物经过长时间的吸收积累, 体内重金属的含量明显高于夏季; 另一方面冬季土壤中重金属含量也高于夏季, 吸收量也可能增加。由于该地区土壤中污染最重的重金属元素为 Cd、Pb 以及 As, 因此, 本研究主要分析了植物对这 3 种重金属元素的富集能力。所研究植物对重金属 Pb 和 As 的富集系数均小于 0.5, 说明这些植物对 Pb 和 As 的富集能力较弱。除桃叶外, 其余植物对 Cd 都表现出一定的富集能力, 冬季植物对 Cd 的富集能力明显高于夏季的, 并且富集系数均大于 1。这几种植物对 Cd 富集能力由强到弱的顺序为: 细叶芒、桑叶、香蕉叶、野大豆、竹叶, 但均小于超富集植物的标准(BCF>100)^[42]。

表 5 冬夏两个季节植物的富集系数

Table 5 The bioconcentration factors of plants in winter and summer

	桑叶 <i>Morus alba</i> L.		桃叶 <i>Amygdalus persica</i> L.		香蕉 <i>Musa nana</i> Lour.		细叶芒 <i>Miscanthus</i> <i>sinensis</i> cv.		野大豆 <i>Glycine soja</i> Sieb. et Zucc.		竹叶 <i>Bambusoideae</i>	
	S	W	S	W	S	W	S	W	S	W	S	W
Hg	0.94	2.74	0.66	0.97	2.09	0.80	0.67	6.11	1.63	0.94	1.42	0.30
Cd	0.13	3.25	0.22	0.70	0.05	2.59	0.07	3.73	0.87	2.35	0.37	1.42
As	0.03	0.28	0.06	0.18	0.02	0.29	0.05	0.40	0.04	0.30	0.05	0.20
Ni	0.06	0.07	0.06	0.28	0.51	0.09	0.04	0.03	0.16	0.37	0.06	0.13
Pb	0.03	0.12	0.12	0.04	0.02	0.11	0.07	0.22	0.01	0.01	0.10	0.10
Cr	0.38	0.57	0.66	0.68	0.50	0.23	0.51	0.18	2.28	3.34	0.44	0.76
Cu	0.44	4.27	0.19	0.75	0.38	1.73	0.21	2.41	0.58	1.21	0.39	0.72
Zn	1.01	3.62	0.74	2.85	0.67	3.92	0.66	4.27	0.39	1.48	1.01	3.83
Mn	0.21	0.22	1.06	0.10	22.65	3.39	0.13	0.08	0.99	0.13	0.75	1.91

注: S、W 分别表示夏季和冬季(S, Summer; W, Winter)。

不同植物对不同重金属 As、Cd、Pb 表现出不同的富集能力,可能由多种因素共同决定.邱喜阳^[43]发现 Cd 是一种迁移性强的元素,在土壤中主要以水溶态、可交换态、碳酸盐结合态和 Fe-Mn 氧化物结合态存在,而 Pb 和 As 主要以残渣态存在,迁移能力较弱.肖正^[44]研究也发现重金属在垃圾填埋场土壤中主要以残渣态存在,迁移能力较弱,不容易被植物吸收利用,生物有效性低.另一方面,植物的种间差异也有贡献.植物的种间差异、重金属在环境中的存在形态、迁移能力以及生物有效性等因素共同影响了植物对重金属的富集能力.

3 结论(Conclusion)

(1) 垃圾填埋场周围地表水、土壤以及植物中重金属均受到垃圾填埋活动不同程度的影响,含量均表现为 Mn 最高, Hg 最低.

(2) 冬季地表水 Zn、As 含量明显高于夏季,其余重金属含量变化不明显,所分析重金属含量的波动性均表现为夏季大于冬季,冬夏两季重金属含量均低于地表水环境质量 V 级标准限值.渗滤液中重金属含量均低于污水排放二级标准限值,夏季 Hg 的含量为冬季的 12.5 倍,其余重金属含量变化不明显.

(3) 冬季土壤中 As 和 Cd 变化最明显,均高于夏季含量,两季均表现为 Pb 的波动性最大;综合污染指数结果显示,冬季的污染明显高于夏季.

(4) 植物中重金属冬夏两季的季节性变化最明显,均表现为冬季高于夏季,As、Cd 为最高,而夏季的波动性均高于冬季.植物富集分析结果表明:冬季植物富集能力强于夏季,桃叶的富集能力较弱,细叶芒、桑叶、香蕉叶、野大豆、竹叶对 Cd 的富集能力较强.

参考文献 (References)

- [1] JIANG Y , KANG M , LIU Z , et al. Urban garbage disposal and management in China [J]. *Journal of Environmental Sciences* , 2003 , 15 (4) : 531-540.
- [2] 王树文,文学娜,秦龙. 中国城市生活垃圾公众参与管理与政府管制互动模型构建 [J]. *中国人口资源与环境* , 2014 , 24 (4) : 142-148.
WANG S W , WEN X N , QIN L. Construction of public participation in management and government regulation interactive model of urban living garbage [J]. *China Population Resources and Environment* , 2014 , 24 (4) : 142-148 (in Chinese) .
- [3] 陈晓东. 生活垃圾处理方案优选及实例分析 [D]. 北京: 中国科学院大学 (工程管理与信息技术学院) , 2015.
CHEN X D. The comparison and selection of MSW disposal technology and the instance analysis [D]. Beijing: College of Engineering and Information Technology , University of Chinese Academy of Sciences , 2015 (in Chinese) .
- [4] 史谦,张学敏. 中国城市生活垃圾处理方法现状分析研究 [J]. *环境科学与管理* , 2013 , 38 (9) : 41-44.
SHI Q , ZHANG X M. Analysis on disposal methods of municipal solid waste in China [J]. *Environmental Science and Management* , 2013 , 38 (9) : 41-44 (in Chinese) .
- [5] BINNEMANS K , JONES P T , BLANPAIN B , et al. Recycling of rare earths: A critical review [J]. *Journal of Cleaner Production* , 2013 , 51 : 1-22.
- [6] PANT D , JOSHI D , UPRETI M K , et al. Chemical and biological extraction of metals present in e-waste: A hybrid technology [J]. *Waste Management* , 2012 , 32 (5) : 979-990.
- [7] SONG Q , LI J. Environmental effects of heavy metals derived from the e-waste recycling activities in China: A systematic review [J]. *Waste Management* , 2014 , 34 (12) : 2587-2594.
- [8] 李丽,刘玉强,王琪,等. 生活垃圾填埋场污染控制标准研究 [J]. *环境科学研究* , 2008 , 21 (6) : 1-8.
LI L , LIU Y Q , WANG Q , et al. Research on the pollution control standard for the landfill site of municipal solid [J]. *Waste Research of Environmental Sciences* , 2008 , 21 (6) : 1-8 (in Chinese) .
- [9] RAMAKRISHNAN A , BLANEY L , KAO J , et al. Emerging contaminants in landfill leachate and their sustainable management [J]. *Environmental Earth Sciences* , 2015 , 73 (3) : 1357-1368.
- [10] 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.
- [11] 张亚会. 填埋场周边土壤的重金属污染特性研究及评价 [D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
ZHANG Y H. Research and evaluate on the heavy metals pollution characteristic of the landfill soil [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University , 2015 (in Chinese) .
- [12] 王春铭,高云华,张登伟,等. 广州增城市垃圾填埋场封场土壤及植物重金属调查与评价 [J]. *农业环境科学学报* , 2013 , 32 (4) :

- 714-720.
- WANG C M , GAO Y H , ZHANG D W , et al. Investigation and assessment of heavy metals in soil and plants from a sealed landfill in Zengcheng , Guangzhou , China [J]. *Journal of Agro-Environment Science* , 2013 , 32(4) : 714-720(in Chinese) .
- [13] 楼紫阳,李鸿江,赵由才,等. 渗滤液难降解物质物化性质研究[J]. *环境化学*, 2011, 30(1) : 293-299.
- LOU Z Y , LI H J , ZHAO Y C , et al. Physical-chemical characteristics of refractory matters in landfill leachate [J]. *Environmental Chemistry* , 2011 , 30(1) : 293-299(in Chinese) .
- [14] 龚慧仙. 玉溪市部分城市生活垃圾卫生填埋场重金属污染状况调查[J]. *环境科学导刊*, 2010, 29(6) : 85-87.
- GONG H X. Investigation on heavy metal pollution in domestic refuse sanitary landfills of Yuxi [J]. *Environmental Science Survey* , 2010 , 29(6) : 85-87(in Chinese) .
- [15] VOLESKY B , HOLAN Z R. Biosorption of heavy metals [J]. *Biotechnology Progress* , 1995 , 11(3) : 235-250.
- [16] LIU C , CUI J , JIANG G , et al. Soil heavy metal pollution assessment near the largest landfill of China [J]. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal* , 2013 , 22(4) : 390-403.
- [17] GHOSH P , THAKUR I S , KAUSHIK A. Bioassays for toxicological risk assessment of landfill leachate: A review [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety* , 2017 , 141: 259-270.
- [18] 王敏,曹恩伟,朱耿莹,等. 徐州市生活垃圾填埋场地下水典型金属污染物研究[J]. *环境监控与预警*, 2016, 8(1) : 51-55.
- WANG M , CAO E W , ZHU X Y , et al. Research on typical metal pollutants in groundwater near municipal solid waste landfills in Xuzhou [J]. *Environmental Monitoring and Forewarning* , 2016 , 8(1) : 51-55(in Chinese) .
- [19] GRISEY E , LAFFRAY X , CONTOZ O , et al. The bioaccumulation performance of reeds and cattails in a constructed treatment wetland for removal of heavy metals in landfill leachate treatment (Etuefont , France) [J]. *Water , Air , & Soil Pollution* , 2012 , 223(4) : 1723-1741.
- [20] KODA E , KOŁANKA T , OSIŃSKI P. Investigation of soil contamination level beneath the metallurgical waste landfill for the purpose of future reclamation works [J]. *Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW. Land Reclamation* , 2013 , 45(1) : 5-16.
- [21] SALEM Z B , CAPELLI N , LAFFRAY X , et al. Seasonal variation of heavy metals in water , sediment and roach tissues in a landfill draining system pond (Etuefont , France) [J]. *Ecological Engineering* , 2014 , 69: 25-37.
- [22] 郭鹏然,潘佳钊,雷永乾,等. 微波等离子体原子发射光谱新技术同时测定环境水样中多种元素[J]. *分析化学*, 2015, 43(5) : 748-753.
- GUO P R , PAN J C , LEI Y Q , et al. Simultaneous determination of multiple elements in environmental water samples by microwave plasma atomic emission spectrometry [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry* , 2015 , 43(5) : 748-753(in Chinese) .
- [23] 龙加洪,谭菊,吴银菊,等. 土壤重金属含量测定不同消解方法比较研究[J]. *中国环境监测*, 2013, 29(1) : 123-126.
- LONG J H , TAN J , WU Y J , et al. A comparative study on the detection of heavy metal in soil with different digestion methods [J]. *Environmental Monitoring in China*. 2013 , 29(1) : 123-126(in Chinese) .
- [24] 丁建森,李建,周玲. 微波消解石墨炉原子吸收光谱法测定茶叶中铅[J]. *理化检验: 化学分册*, 2001, 37(12) : 570-572.
- DING J S , LI J , ZHOU L. GF-AAS determination of lead in tea-digestion of sample in microwave oven [J]. *Physical Testing and Chemical Analysis Part B: Chemical Analysis* , 2001 , 37(12) : 570-570 (in Chinese) .
- [25] 陈振金,陈春秀,刘用清,等. 福建省土壤环境背景值研究[J]. *环境科学*, 1992, 13(4) : 70-75.
- CHEN Z J , CHEN C X , LIU Y Q , et al. Study on soil environmental background values in Fujian Province [J]. *Environmental Science* , 1992 , 13(4) : 70-75(in Chinese) .
- [26] HAQ A U , BATES T E , SOON Y K. Comparison of extractants for plant-available zinc , cadmium , nickel , and copper in contaminated soils [J]. *Soil Science Society of America Journal* , 1980 , 44(4) : 772-777.
- [27] YANQUN Z , YUAN L , SCHVARTZ C , et al. Accumulation of Pb , Cd , Cu and Zn in plants and hyperaccumulator choice in Lanping lead-zinc mine area , China [J]. *Environment International* , 2004 , 30(4) : 567-576.
- [28] 国家环境保护局. 地表水环境质量标准(GB 3838-2002) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Surface water environmental quality standards (GB 3838-2002) [S]. Beijing: China Standard Press , 2002(in Chinese) .
- [29] 国家环境保护局. 土壤环境质量标准(GB 15618-95) [S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Environment quality standard for soil(GB 15618-95) [S]. Beijing: China Standard Press , 1995(in Chinese) .
- [30] 唐世荣. 污染环境植物修复的原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- TANG S R. Principle and method of phytoremediation in polluted environment [M]. Beijing: Science Press , 2006(in Chinese) .
- [31] 姜必亮,蓝崇钰,王伯赫. 垃圾填埋场渗滤液灌溉后重金属的生态效应[J]. *中国环境科学*, 2001, 21(1) : 18-23.
- JIANG B L , LAN C Y , WANG B S. Heavy metals ecological effects of irrigation with landfill site leachate [J]. *China Environmental Science* , 2001 , 21(1) : 18-23(in Chinese) .
- [32] 李永霞,黄莹,王宁,等. 山东省某城市近郊生活垃圾堆场重金属污染特征与健康风险评价[J]. *环境化学*, 2014, 33(9) : 1476-1483.
- LI Y X , HUANG Y , WANG N , et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals for an open dumping site in inner

- suburbs in Shandong Province [J]. *Environmental Chemistry*, 2014, 33(9): 1476-1483 (in Chinese).
- [33] 李鸣. 鄱阳湖重金属污染特征研究及环境容量估算 [D]. 南昌: 南昌大学, 2010.
LI M. Heavy metal pollution characteristics and environmental capacity estimate of Poyang Lake [D]. Nanchang: Nanchang University, 2010 (in Chinese).
- [34] 李兴菊. 土壤重金属赋存形态的季节变化及其对 DOM 变化的响应 [D]. 重庆: 西南大学, 2007.
LI X J. Seasonal variations of heavy metal species in soil and their response to variations of DOM [D]. Chongqing: Southwest University, 2007 (in Chinese).
- [35] 刘庆阳, 刘艳菊, 张婷婷, 等. 北京市三环沿线油松叶片重金属的累积特征、季节变化和来源解析 [J]. *科学技术与工程*, 2014, 14(5): 297-300.
LIU Q Y, LIU Y J, ZHANG T T, et al. Accumulation, seasonal variations and source apportionments of heavy metal in pinus tabulaeformis needles of Beijing [J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(5): 297-300 (in Chinese).
- [36] 国家环境保护局. 污水综合排放标准 (GB8978-1996) [S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Integrated wastewater discharge standard (GB8978-1996) [S]. Beijing: China Standard Press, 1996 (in Chinese).
- [37] 李丹, 何小松, 席北斗, 等. 生活垃圾堆肥渗滤液污染物组成与演化规律研究 [J]. *环境科学*, 2013, 34(7): 2918-2924.
LI D, HE X S, XI B D, et al. Composition and transformation of leachates during municipal solid waste composting [J]. *Environmental Science*, 2013, 34(7): 2918-2924 (in Chinese).
- [38] 马杰, 李海明, 顾晓明, 等. 垃圾污染场地浅层地下水中铁锰时空变异的胶体效应 [J]. *环境科学*, 2011, 32(3): 908-912.
MA J, LI H M, GU X M, et al. Colloid effects on temporal-spatial variability of iron and manganese in shallow groundwater of garbage contaminated sites [J]. *Environmental Science*, 2011, 32(3): 908-912 (in Chinese).
- [39] 熊建英, 郑正. 垃圾填埋场渗滤液溶解性有机质特性及其去除技术综述 [J]. *环境化学*, 2015, 34(1): 44-53.
XIONG J Y, ZHENG Z. Characteristics of the dissolved organic matter in landfill leachate and their removal technology: A review [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 34(1): 44-53 (in Chinese).
- [40] 贾丽敏, 陈秀玲, 吕敏. 漳州市不同绿地功能区土壤重金属污染特征及评价 [J]. *城市环境与城市生态*, 2013, 26(3): 7-11.
JIA L M, CHEN X L, LV M. Heavy metal contamination of soils and its evaluation in different greenbelt regions of Zhangzhou City [J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2013, 26(3): 7-11 (in Chinese).
- [41] 王圣伟, 冯娟, 刘刚, 等. 农田土壤重金属季节性变化周期研究 [J]. *农业机械学报*, 2013, 44(9): 56-61.
WANG S W, FENG J, LIU G, et al. Periodic analysis of seasonal variation in soil heavy metals [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(9): 56-61 (in Chinese).
- [42] RASKIN I, SMITH R D, SALT D E. Phytoremediation of metals: Using plants to remove pollutants from the environment [J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 1997, 8(2): 221-226.
- [43] 邱喜阳, 马淞江, 史红文, 等. 重金属在土壤中的形态分布及其在空心菜中的富集研究 [J]. *湖南科技大学学报(自然科学版)*, 2008, 23(2): 125-128.
QIU X Y, MA S J, SHI H W, et al. Forms of heavy metals in soil and their bioconcentration in swamp cabbage [J]. *Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2008, 23(2): 125-128 (in Chinese).
- [44] 肖正, 何品晶, 邵立明, 等. 填埋场内重金属总量及其形态分布对迁移性的影响 [J]. *环境化学*, 2005, 24(3): 265-269.
XIAO Z, HE P J, SHAO L M, et al. Effect of the total amount and speciation of heavy metals on its mobility in municipal solid waste landfill [J]. *Environmental Chemistry*, 2005, 24(3): 265-269 (in Chinese).