

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0619

郭广慧 陈同斌 杨军 等. 2014. 中国城市污泥重金属区域分布特征及变化趋势[J]. 环境科学学报, 34(10): 2455-2461

Guo G H , Chen T B , Yang J , et al. 2014. Regional distribution characteristics and variation of heavy metals in sewage sludge of China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 34(10): 2455-2461

中国城市污泥重金属区域分布特征及变化趋势

郭广慧¹ 陈同斌^{2,*} 杨军² 郑国砥² 高定²

1. 北京中科博联环境工程有限公司, 北京 100080

2. 中国科学院地理科学与资源研究所环境修复中心, 北京 100101

收稿日期: 2013-12-12 修回日期: 2014-02-11 录用日期: 2014-02-16

摘要: 通过整理和统计国内外文献(2006—2013年)报道的中国城市污泥重金属含量,分析了近年来中国城市污泥重金属的区域分布特征和变化趋势。结果表明,城市污泥重金属 Cu、Pb、Zn、Cd、Hg、As、Cr 和 Ni 含量分别为 182.5、65.3、729.6、2.1、1.4、11.5、97.5 和 44.9 mg·kg⁻¹,与《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002)规定的中碱性土壤污泥农用污染物控制标准限值比较,Cu、Pb、Zn、Cd、Hg、As、Cr 和 Ni 的超标率分别为 2.3%、0.5%、5.9%、5.5%、2.9%、0.0% 和 3.5%;与酸性土壤污泥农用污染物控制标准限值比较,Cu、Pb、Zn、Cd、Hg、As、Cr 和 Ni 的超标率分别为 7.1%、1.3%、10.3%、27.4%、20.0%、0.1% 和 12.1%。不同区域城市污泥重金属含量存在一定差异,城市污泥 Hg 和 As 在北方地区含量较高,而 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr 和 Ni 在南方地区含量较高。与 2006 年城市污泥重金属含量相比,本研究城市污泥重金属 Cu、Pb、Zn、Cd、Hg、As、Cr 和 Ni 含量均呈下降趋势,降幅分别为 29.0%、16.5%、40.9%、9.0%、29.8%、41.8%、5.3% 和 23.6%。

关键词: 城市污泥; 重金属; 区域特征; 中国

文章编号: 0253-2468(2014)10-2455-07 中图分类号: X703 文献标识码: A

Regional distribution characteristics and variation of heavy metals in sewage sludge of China

GUO Guanghui¹, CHEN Tongbin^{2,*}, YANG Jun², ZHENG Guodi², GAO Ding²

1. Beijing GreenTech Environmental Engineering Company, Beijing 100080

2. Center for Environmental Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

Received 12 December 2013; received in revised form 11 February 2014; accepted 16 February 2014

Abstract: To identify the concentrations, variation trend and regional distribution characteristics of heavy metals in sewage sludge over China, literatures published from 2006 to 2013 about heavy metal concentrations in sewage sludge were reviewed. The results indicated that the concentrations of Cu, Pb, Zn, Cd, Hg, As, Cr and Ni were 182.5, 65.3, 729.6, 2.1, 1.4, 11.5, 97.5 and 44.9 mg·kg⁻¹, respectively. About 2.3%, 5.9%, 5.5%, 2.9% and 3.5% of the samples exceeded the limits set by “discharge standard of pollutants for municipal wastewater treatment plant” of China (GB18918—2002) for Cu, Zn, Cd, Hg, and Ni in alkaline soils, while the concentrations of Pb, Cr and As were considerably below the limits. Compared with the limits for Cu, Pb, Zn, Cd, Hg, As, Cr and Ni in acid soils, the non-attainment rate were 7.1%, 1.3%, 10.3%, 27.4%, 20.0%, 0.1% and 12.1%, respectively. There were some differences of heavy metal concentrations in sewage sludge from different regions: the concentrations of Hg and As were higher in northern China, while higher concentrations of Cd, Cu, Pb, Zn, Cd, Cr and Ni were found in southern China. Compared with the results of heavy metals in sewage sludge taken from 2006, there were a significant decrease in the concentrations of heavy metals in this study, and the concentrations of Cu, Pb, Zn, Cd, Hg, As, Cr and Ni decreased by 29.0%, 16.5%, 40.9%, 9.0%, 29.8%, 41.8%, 5.3%, and 23.6%, respectively.

Keywords: sewage sludge; heavy metals; regional characteristics; China

基金项目: 北京市博士后工作经费资助项目

Supported by the Postdoctoral Fund of Beijing City

作者简介: 郭广慧(1981—)女,博士,E-mail: kellyggh@163.com; * 通讯作者(责任作者) E-mail: chentb@igsrr.ac.cn

Biography: GUO Guanghui (1981—), female, Ph. D., E-mail: kellyggh@163.com; * Corresponding author E-mail: chentb@igsrr.ac.cn

1 引言(Introduction)

随着社会经济和城市化的发展,人们环保意识的不断提高,我国污水处理行业迅速发展,而建设城市污水处理厂可有效减少废水向环境中的排放.截至到2013年6月底,全国设市城市、县累计建成城镇污水处理厂3479座,污水处理能力达到1.46亿 $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ (中华人民共和国住房和城乡建设部,2013).然而,我国污水处理厂的建设通常只注重出水水质是否达标,缺乏对污水处理厂的副产物污泥的处理和处置,这将造成部分污泥随意倾倒、任意堆放和过度土地利用,给环境带来二次污染;同时,城市污泥长期暴露于环境中,还会威胁到人体健康(Mantovi *et al.*, 2005; Dai *et al.*, 2006; Perez-murcial *et al.*, 2006).

目前,国内外城市污泥的处理处置方法主要有填埋、焚烧和土地利用.大多数发达国家的污泥处置以污泥农用和陆地填埋为主;我国城市污泥处置中填埋占63.1%,外运占14.4%,污泥农用占13.5%,露天堆放占1.8%,焚烧占1.8%(胡佳佳等,2009;李季等,2003).污泥填埋不仅需要投入较高的运输成本、管理费,而且需要占用大量的土地;而污泥焚烧、干化成本较高;露天堆放和外运运输成本高,且容易造成环境污染.因此,选择适宜的污泥处置方式,需要综合考虑当地的经济技术水平、环境条件、污泥性质、污泥产生量及相关产业发展情况.污泥土地利用可以提高土壤有机质含量,改善土壤物理性状并提供植物需要的养分,但城市污泥中重金属含量是限制其土地利用的重要因素之一.因此,本文根据国内外文献的报道,系统地分析和总结2006—2013年来我国城市污泥重金属含量区域分布特征及变化趋势,以期在城市污泥的合理处置利用提供科学依据.

2 数据收集及分析(Data collection and analyze)

2.1 数据收集

本研究系统地收集和整理了我国57个城市88座城市污水处理厂脱水污泥中重金属Cu、Pb、Zn、Cd、Hg、As、Cr和Ni的含量,数据来源于国内外公开发表的文献和硕、博士论文(2006—2013年),包括CNKI数据库和Science direct数据库等,共46篇参考文献.数据筛选原则为:①重金属测定过程有严格的质量保证和质量控制(QA/QC)程序,如平行

样、空白样和标准物质等,回收率符合测定标准;②对收集的数据进行整理,不同研究中同一污水处理厂污泥重金属含量采用算术均值表示;③如果数据服从正态分布,则采用算术均值代表其平均含量;如果数据服从对数正态分布,则采用几何平均值.本研究中区域按照常中国七大地理分区划分为东北、西北、华北、华东、华中、华南和西南.

表1 公开发表的文献分类表

Table 1 Classification table of literatures published

文献类型	刊名或出处	数量/篇
期刊	环境科学学报	5
	农业环境科学学报	5
	中国给水排水	4
	环境科学	2
	中山大学学报	1
	中国环境科学	1
	生态学杂志	1
	中国海洋大学学报	1
	环境化学	1
	Environment Monitor and Assessment	1
	Journal of Hazardous Materials	3
	Chemosphere	2
	Pedosphere	1
小计		28
硕士学位论文	中国农业科学院	1
	华中科技大学	1
	南京农业大学	1
	北京林业大学	1
	河北农业大学	1
	新疆大学	1
	河南大学	1
	湖南大学	1
	河海大学	1
	山东大学	1
	安徽理工大学	1
	山西大学	1
	西南农业大学	1
浙江大学	1	
小计		14
博士论文	浙江大学	2
	华东师范大学	1
	西北农林科技大学	1
小计		4
总计		46

2.2 统计分析

数据的正态分布检验采用Origin 8.0中

Kolmogorov-Smirnov 法 (K-S 法) 数据统计分析采用 SPSS11.5 完成 绘图使用 Sigma plot 10.5 完成.

3 结果与讨论 (Results and discussion)

3.1 中国城市污泥重金属含量特征

近年来 中国城市污泥重金属含量统计结果见表 2. 从表 2 中可看出 城市污泥重金属 Cu、Pb、Zn、Cd、Hg、As、Cr 和 Ni 含量经对数转化后呈正态分布 ($p_{k-s} > 0.05$) 几何均值能更好地代表中国城市污泥重金属含量. 城市污泥重金属 Cu、Pb、Zn、Cd、Hg、

As、Cr 和 Ni 含量几何均值分别为 182.5、65.3、729.6、2.1、1.4、11.5、97.5 和 44.9 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 重金属 Cu、Pb、Zn、Cd、Hg、As、Cr 和 Ni 含量的变化范围分别为 55.7 ~ 2867.4、9.3 ~ 370.0、42.1 ~ 3568.3、0.4 ~ 39.9、0.1 ~ 15.8、0.9 ~ 61.8、10.6 ~ 639.0 和 13.1 ~ 495.3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 由此可见 城市污泥重金属的变化范围较大 数据离散程度较大, 变异系数较大, 其中 Cu、Hg、Cd 和 Ni 的变异系数较大, 达到 100% 以上; Pb、Zn、As 和 Cr 的变异系数在 50% ~ 100% 之间.

表 2 中国城市污泥重金属含量特征 (2006—2013 年)

Table 2 Concentrations of heavy metals in sewage sludge of China (2006—2013)

重金属	N	含量范围/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	污泥重金属含量/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)						变异 系数	国家标准		国家标准	
			算术			几何				($\text{pH}\geq 6.5$) /	超标率	($\text{pH}< 6.5$) /	超标率
			M	SD	p_{k-s}	GM	GSD	p_{k-s}		($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)		
Cu	84	55.7 ~ 2867.4	283.5	417.8	0.00	182.5	2.2	0.05	147.4%	1500	2.3%	800	7.1%
Pb	78	9.3 ~ 370.0	78.0	54.8	0.00	65.3	1.8	0.59	70.2%	1000	0	300	1.3%
Zn	84	42.1 ~ 3568.3	925.7	739.5	0.00	729.6	2.0	0.77	79.9%	3000	5.9%	2000	10.3%
Cd	73	0.4 ~ 39.9	5.8	7.1	0.00	2.1	1.8	0.43	122.9%	20	5.5%	5	27.4%
Hg	35	0.1 ~ 15.8	2.8	3.8	0.00	1.4	2.4	0.35	105.6%	15	2.9%	5	20.0%
As	42	0.9 ~ 61.8	15.7	11.7	0.04	11.5	2.5	0.26	74.7%	75	0	75	0
Cr	64	10.6 ~ 639.0	136.9	126.9	0.01	97.5	2.3	0.39	92.7%	1000	0	600	1.6%
Ni	58	13.1 ~ 495.3	63.6	79.2	0.00	44.9	2.1	0.56	124.5%	200	3.5%	100	12.1%

注: M 为算术平均值, SD 为算术标准差, GM 为几何平均值, GSD 为几何标准差.

与我国《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918—2002) (国家环境保护局, 2002) 规定的污泥农用污染物控制标准限值相比(表 2) 城市污泥几何均值均未超过污泥农用时中碱性土壤 ($\text{pH}\geq 6.5$) 的控制标准限值及酸性土壤 ($\text{pH}< 6.5$) 的控制标准限值. 与中碱性土壤 ($\text{pH}\geq 6.5$) 的控制标准限值相比 城市污泥中除 Pb、As 和 Cr 没有超标外, 其他重金属 Cu、Zn、Cd、Hg 和 Ni 均有超标现象, 超标率分别为 2.3%、5.9%、5.5%、2.9% 和 3.5% 超标率最高的重金属为 Cd, 其次是 Zn、Ni 和 Hg, 超标率最小的为 Cu. 与酸性土壤 ($\text{pH}< 6.5$) 的控制标准限值相比, 城市污泥 As 未超标, Cd 的超标率最高, 为 27.4%, 其次是 Hg、Ni、Zn、Cu 和 Cr, 超标率分别为 20.0%、12.1%、10.3%、7.1% 和 1.6%, Pb 的超标率最小, 为 1.3%. 因此, 在碱性土地利用中应该优先关注 Cd、Ni 和 Hg, 在酸性土地利用中除关注 Cd、Ni 和 Hg 外, 还应该注意 Cr 的问题. Cu 和 Zn 作为人体有益元素, 在新修订的《食品中污染物限量》(GB2762—2012) (中华人民共和国卫生部, 2012) 中已取消了 Cu 和 Zn 的限值; 再者, 我国城市污泥

Cu 和 Zn 含量较国外含量低 (陈同斌等, 2003), 因此 污泥土地利用过程中 Cu 和 Zn 的风险相对较低.

3.2 中国城市污泥重金属区域分布特征

城市污泥的组成与污水的来源、处理工艺、居民的生活水平和饮食结构有关. 同时, 不同区域城市污泥重金属含量存在一定差异(表 3). 从表 3 可以看出, 不同区域城市污泥 Cu 含量大小依次为: 华南>华东>华中>华北>西北>西南>东北; Pb 含量大小依次为: 华中>华东>西北>华南>西南>华北>东北; Zn 含量大小依次为: 华东>华南>华北>西南>东北>西南>华中; Cd 含量大小依次为: 华南>西南>华中>华东>西北>华北>东北; Hg 含量大小依次为: 华北>东北>华中>西南>华南>华东; As 含量大小依次为: 华南>东北>华北>华东>华中>西南; Cr 含量大小依次为: 华东>华中>西南>东北>华南>华北; Ni 含量大小依次为: 华中>华南>华东>华北>西南>东北>西北. 从整体来看, Hg 含量从北到南呈递减趋势, 主要原因与北方地区燃煤取暖有关; 华东地区城市污泥 Zn 和 Cr 含量最高; 华中地区城市污泥中

Pb 和 Ni 含量最高; Cd 含量最高的地区出现在华南地区, 其次是西南和华中地区; 华南地区 As 含量最高, 其他区域则呈现由北向南降低的趋势; 东北地区 Cu、Pb 和 Cd 含量最低. 由此可看出, 城市污泥重金属 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr 和 Ni 在南方地区较北方地

区含量高, 这可能与这些地区工业密集程度高、有色金属矿区分布集中及人类活动开发程度高等有关; 而 As 和 Hg 含量则在北方地区含量较高, 这可能与北方地区燃煤取暖有关.

表 3 不同地区城市污泥重金属含量

Table 3 Concentrations of heavy metals in sewage sludge in different regions of China

区域	元素	N	算术均值/ (mg·kg ⁻¹)	标准差/ (mg·kg ⁻¹)	几何均值/ (mg·kg ⁻¹)	几何标准差/ (mg·kg ⁻¹)	超标率	
							pH≥6.5	pH<6.5
华东地区	Cu	23	472.3	690.0	267.5	2.6	13.0%	13.0%
	Pb	23	90.6	74.6	73.4	1.9	0	4.3%
	Zn	23	1529.8	1027.6	1190.6	2.2	17.4%	30.4%
	Cd	23	5.9	9.2	3.1	2.9	8.7%	21.7%
	Hg	4	1.3	0.5	1.2	1.6	0	0
	As	10	18.6	16.6	12.8	2.9	0	0
	Cr	18	199.3	163.4	138.0	2.6	0	5.6%
	Ni	17	93.3	131.1	53.1	2.7	11.8%	23.5%
华南地区	Cu	9	376.9	341.7	271.5	2.6	0	22.2%
	Pb	9	79.9	39.8	67.5	1.9	0	0
	Zn	9	780.5	289.5	737.6	1.4	0	0
	Cd	6	8.2	8.8	5.1	2.9	0	0
	Hg	3	1.6	0.2	1.6	1.1	0	0
	As	4	25.8	6.1	25.3	1.3	0	0
	Cr	8	121.3	109.1	84.0	2.6	0	0
	Ni	6	61.6	19.1	58.2	1.5	0	0
华中地区	Cu	5	332.7	311.9	221.9	2.8	0	0
	Pb	6	81.0	17.9	79.4	1.3	0	0
	Zn	5	405.2	43.7	403.3	1.1	0	100.0%
	Cd	8	7.1	6.1	3.3	5.1	0	62.5%
	Hg	3	1.9	0.1	1.9	1.1	0	0
	As	3	10.	2.5	9.9	1.3	0	0
	Cr	4	134.5	37.6	130.9	1.3	0	0
	Ni	3	159.7	26.1	158.2	1.2	0	66.7%
华北地区	Cu	11	202.6	129.5	179.0	1.6	0	0
	Pb	11	60.5	20.8	57.3	1.4	0	0
	Zn	11	721.2	287.1	655.8	1.6	0	0
	Cd	7	2.4	0.9	2.2	1.6	0	0
	Hg	7	10.5	2.7	10.3	1.3	9.1%	100.0%
	As	7	14.9	3.0	14.6	1.2	0	0
	Cr	11	68.1	53.4	55.4	1.9	0	0
	Ni	11	53.9	42.4	44.1	1.9	0	9.1%
西北地区	Cu	4	193.6	159.6	158.2	1.9	0	0
	Pb	4	101.9	109.2	72.1	2.4	0	0
	Zn	4	551.7	373.7	475.6	1.8	0	0
	Cd	4	3.7	4.0	2.5	2.8	0	25.0%
	Hg	0	—	—	—	—	0	0
	As	0	—	—	—	—	0	0
	Cr	1	186.5	—	—	—	0	0
	Ni	5	37.7	43.1	26.1	2.4	0	0
西南地区	Cu	21	136.5	63.5	124.8	1.5	0	0
	Pb	21	74.6	43.1	64.6	1.7	0	0
	Zn	21	796.8	600.8	639.1	2.2	4.8%	4.8%

续表3

区域	元素	N	算术均值/ (mg·kg ⁻¹)	标准差/ (mg·kg ⁻¹)	几何均值/ (mg·kg ⁻¹)	几何标准差/ (mg·kg ⁻¹)	超标率	
							pH≥6.5	pH<6.5
	Cd	21	6.6	6.7	4.5	2.3	14.3%	28.6%
	Hg	15	1.9	0.8	1.7	1.7	0	0
	As	15	12.4	12.5	7.4	2.9	0	0
	Cr	11	139.4	149.7	102.1	2.1	0	0
	Ni	11	45.2	17.4	42.1	1.5	0	0
东北地区	Cu	11	184.2	280.4	120.2	2.1	0	9.1%
	Pb	4	39.3	23.0	31.9	2.3	0	0
	Zn	11	604.8	240.1	569.1	1.4	0	0
	Cd	4	2.3	1.8	1.6	2.8	0	0
	Hg	3	2.6	1.1	2.4	1.6	0	0
	As	3	16.7	3.5	16.4	1.2	0	0
	Cr	11	108.4	91.8	87.6	1.9	0	0
	Ni	7	31.5	5.3	31.1	1.2	0	0

与我国《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918—2002)(国家环境保护局,2002)规定的中碱性土壤污泥农用污染物控制标准限值(pH≥6.5)相比,华南、华中、西北和东北地区城市污泥各种重金属均未超标,华北地区城市污泥Hg超标率为9.1%,西南地区Zn和Cd分别超标4.8%和14.3%,华东地区Cu、Zn、Cd和Ni的超标率分别为13.0%、17.4%、8.7%和11.8%。与酸性土壤污泥农用污染物控制标准限值(pH<6.5)相比,华东地区除Hg和As未超标外,其他重金属均有超标,Cu、Pb、Zn、Cd、Cr和Ni分别超标13.0%、4.3%、30.4%、21.7%、5.6%和23.5%,华南地区Cu的超标率为22.2%,华中地区Cd和Ni分别超标62.5%和66.7%,华北地区Hg和Ni的超标率分别为100.0%和9.1%,西北地区Cd的超标率为25.0%,西南

地区Zn和Cd分别超标4.8%和28.6%。

3.3 城市污泥重金属来源

城市污泥重金属含量主要受污水来源、污水组成、污水处理工艺及污泥处理技术等多种因素的影响,也与城市地理位置、城市性质和工业布局等有关。据报道,污水处理过程中有70%~90%的重金属通过吸附或沉淀转移到污泥中(李季等,2003)。利用主成分分析可以辨析城市污泥中重金属的富集和来源。主成分分析是在一组变量中找出方差和协方差矩阵的特征量,将多个变量通过降维转化为少数几个综合变量的统计分析方法(Aelion *et al.*, 2008)。通过主成分分析选取3个主成分(表4),这3个主成分对各变量方差的贡献率分别是28.9%、22.3%和13.8%,其所含信息占总体信息的64.8%,足以解释原始信息。

表4 主成分分析结果

Table 4 Results of principle component analysis

因子	提取出的公因子方差贡献			提取出的公因子经旋转后的方差贡献		
	特征根	贡献率	累积贡献率	特征根	贡献率	累积贡献率
1	2.6	32.7%	32.7%	2.3	28.9%	28.9%
2	1.5	18.5%	51.2%	1.8	22.1%	51.0%
3	1.1	13.7%	68.8%	1.1	13.8%	64.8%

从表5可看出:第一主成分主要是由Cu、Pb、Zn和Hg组成的信息量,这些元素在第一主成分上有较高的载荷,说明第一主成分反映的是Cu、Pb、Zn和Hg的富集信息;第二主成分主要反映了Cd、Cr和Ni的富集信息;第三主成分主要反映了As的富集信息。

第一成分Pb和Zn主要来源于自来水管道的,主要原因是我国的给水管道的使用的是镀锌管道和

PVC管路(含铅盐稳定剂);另外,Pb、Cu和Zn还可能来源于汽车清洗废水,也与汽车尾气排放或汽车

表5 提取主成分负荷量

Table 5 Loading of the first three principal components

重金属	原始矩阵载荷			转化后矩阵载荷		
	因子1	因子2	因子3	因子1	因子2	因子3
Cu	0.8	-0.2	-0.2	0.8	0.3	-0.2
Pb	0.3	-0.7	0.1	0.7	-0.4	0.1
Zn	0.7	-0.4	0.1	0.8	0.03	0.1

重金属	原始矩阵载荷			转化后矩阵载荷		
	因子 1	因子 2	因子 3	因子 1	因子 2	因子 3
Cd	0.6	0.4	-0.4	0.3	0.7	-0.3
Hg	0.7	-0.1	0.01	0.6	0.3	0.05
As	0.1	0.2	0.9	0.1	0.1	0.9
Cr	0.6	0.4	0.2	0.3	0.6	0.2
Ni	0.3	0.7	0.1	-0.1	0.7	0.1

零部件释放污染物形成的城市径流有关;城市污水处理厂 Hg 则更多地来源于牙科材料废水 (Sörme *et al.*, 2002), 另外, 污水中的 Hg 可能还来源于电子、氯碱和塑料等行业. 第二主成分 Cd、Cr 和 Ni 主要源于工业废水, 城市污水处理厂有部分会接纳工业废水, 从而导致城市污泥中重金属含量较高, 如 Cd、Cr 和 Ni 通常在电池、电子、印染和电镀等工业部门广泛应用; 另外, 有报道发现, Ni 可能与饮用水和污水厂使用的化学试剂有关 (Sörme *et al.*, 2002). 第三主成分 As 主要来自一些特殊的行业, 如 As 源于含砷木材防腐剂(铬化砷酸铜)及含 As 洗涤剂. 据统计, 2012 年我国生产约 2.5×10^4 t 三氧化二砷, 其中, 大部分用来生产木材防腐剂 (US EPA 2012). 普通家用清洁剂 As 含量为 3.6×10^{-2} mg·kg⁻¹, 洁厕剂等清洁剂中 As 含量高达 1.8

mg·kg⁻¹ (柴明青等, 2012).

3.4 中国城市污泥重金属变化趋势

将本研究收集的重金属统计值与杨军等 (2009) 分析的数据进行比较, 从表 6 中可知: 本研究中重金属 Cu、Pb、Zn、Cd、Hg、As、Cr 和 Ni 含量均呈下降趋势, As 和 Zn 的下降幅度较大, 降幅分别为 41.8% 和 40.9%, 其次是 Hg、Cu、Ni、Pb 和 Cd, 降幅分别为 29.8%、29.0%、23.6%、16.5% 和 9.0%, Cr 的降幅最低, 下降幅度为 5.3%. 2000 年起我国禁止使用镀锌管, 且供水管路 PVC 中禁止使用含铅稳定剂, 这可能使得污泥中 Pb 和 Zn 含量降低. 另外, 在 2000 年, 我国全面禁止使用含铅汽油, 这使得汽车尾气排放的 Pb 含量降低, 从而降低了雨水冲刷进入污水处理厂的 Pb 含量.

从不同时段的超标率来看, 本研究中 Hg 的超标率高于 2006 年, 其他重金属的超标率均低于 2006 年, 说明虽然整体上城市污泥 Hg 含量呈下降趋势, 但个别污水处理厂污泥仍然存在超标现象, 需要在污泥处理处置过程中优先关注. 因此, 长期来看, 城市污泥重金属含量呈下降趋势, 但从超标率来看, 城市污泥处理处置中仍应该优先关注 Cd、Hg 和 Ni 的污染, 这与张丽丽等 (2013) 的研究结果一致.

表 6 城市污泥重金属含量变化趋势

Table 6 Comparison of heavy metal concentrations in sewage sludge between 2006 and 2013

重金属	2006 年(杨军, 2009)					本研究					变化趋势
	N	范围/ (mg·kg ⁻¹)	平均值/ (mg·kg ⁻¹)		超标率 (pH≥6.5)	N	范围/ (mg·kg ⁻¹)	平均值/ (mg·kg ⁻¹)		超标率 (pH≥6.5)	
			算数	几何				算数	几何		
Cu	98	51.0~9592	499	257	6.5%	55.7~2867.4	84	283.5	182.5	2.3%	29.0% (↘)
Pb	98	3.6~1022	112	78.2	1.0%	9.3~370.0	78	78.0	65.3	0	16.5% (↘)
Zn	98	217~30098	2089	1235	11.2%	42.1~3568.3	84	925.7	729.6	5.9%	40.9% (↘)
Cd	98	0.04~999	18.2	2.3	6.5%	0.4~39.9	73	5.8	2.1	5.5%	9.0% (↘)
Hg	98	0.04~17.5	3.18	1.9	1.0%	0.1~15.8	35	2.8	1.4	2.9%	29.8% (↘)
As	98	0.78~269	25.2	19.7	1.0%	0.9~61.8	42	15.7	11.5	0	41.8% (↘)
Cr	98	20.0~6365	259	103	3.8%	10.6~639.0	64	136.9	97.5	0	5.3% (↘)
Ni	98	16.4~6206	167	58.8	6.5%	13.1~495.3	58	63.6	44.9	3.5%	23.6% (↘)

4 结论 (Conclusions)

1) 2006—2013 年我国城市污泥重金属 Cu、Pb、Zn、Cd、Hg、As、Cr 和 Ni 的几何均值分别为 182.5、65.3、729.6、2.1、1.4、11.5、97.5 和 44.9 mg·kg⁻¹, 其含量大小依次为 Zn>Cu>Cr>Pb>Ni>As>Cd>Hg.

2) 城市污泥重金属 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr 和 Ni 在

南方地区较北方地区含量高, 这可能与这些地区工业密集程度高、有色金属矿区分布集中及人类活动开发程度高等有关; 而 As 和 Hg 则在北方地区含量较高, 这可能与北方地区燃煤取暖有关.

3) 与 2006 年城市污泥重金属含量相比, 本研究中城市污泥重金属 Cu、Pb、Zn、Cd、Hg、As、Cr 和 Ni 含量均呈下降趋势, 降幅分别为 29.0%、16.5%、

40.9%、9.0%、29.8%、41.8%、5.3%和23.6% ,降幅最大的是 As ,其次是 Zn、Hg、Cu、Ni、Pb 和 Cd ,Cr 的降幅最小。但从超标率来看 2013 年 Hg 的超标率大于 2006 年 ,我国城市污泥处理处置中仍应该优先关注 Cd、Hg 和 Ni 的污染。

责任作者简介: 陈同斌(1963—) ,男,博士生导师,研究员,中国科学院地理科学与资源研究所环境修复中心主任,主要从事植物修复、固体废弃物堆肥处理、区域土壤环境质量与风险评估研究,主持“863”课题、“973”课题、国家自然科学基金项目等 40 多项,发表论文 200 篇,获得发明专利 18 项。

参考文献(References):

- Aelion C M , Davis H T , McDermott S , *et al.* 2008. Metal concentrations in rural topsoil in South Carolina: Potential for human health impact [J]. *Science of the Total Environment* , 402(2/3): 149-156
- 柴明青,许菲菲,王晓平. 2012. 洗涤剂中有害重金属的分析 [J]. *应用化工* , 41(4): 713-715
- 陈同斌,黄启飞,高定,等. 2003. 中国城市污泥的重金属含量及其变化趋势 [J]. *环境科学学报* , 23(5): 561-569
- Dai J Y , Chen L , Zhao J F , *et al.* 2006. Characteristics of sewage sludge and distribution of heavy metal in plants with amendment of sewage sludge [J]. *Journal of Environmental Sciences* , 18(6): 1094-1100
- 国家环境保护局. 2002. GB 18919—2002 城镇污水处理厂污染物排放标准 [S]. 北京: 中国标准出版社. 8
- 胡佳佳,白向玉,刘汉湖,等. 2009. 国内外城市剩余污泥处置与利用现状 [J]. *徐州工程学院学报: 自然科学版* , 24(2): 45-49
- 李季,吴为中. 2003. 国内外污水处理厂污泥产生、处理机处置分析 [A]//中国土木工程学会水工业分会排水委员会. 污泥处理处置技术与装备国际研讨会论文集 [C]. 深圳: 化工出版社. 75-78
- Mantovi P , Baldoni G , Toderi G. 2005. Reuse of liquid , dewatered , and composted sewage sludge on agricultural land: effects of long-term application on soil and crop [J]. *Water Research* , 39(2/3): 289-296
- Perez-Murcial M D , Moral R , Moreno-Caselles J , *et al.* 2006. Use of composted sewage sludge in growth media for broccoli [J]. *Bioresource Technology* , 97(1): 123-130
- Sörme L , Lagerkvist R. 2002. Sources of heavy metals in urban wastewater in Stockholm [J]. *Science of the Total Environment* , 298(1/3): 131-145
- US EPA. 2012. US Geological Survey Minerals Yearbook: Arsenic statistics and information [OL]. 2013-12-12. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/arsenic/index.html#myb>
- 杨军,郭广慧,陈同斌,等. 2009. 中国城市污泥的重金属含量及其变化趋势 [J]. *中国给水排水* , 25(13): 121-124
- 张丽丽,李花粉,苏德纯. 2013. 我国城市污水处理厂污泥中重金属分布特征及变化规律 [J]. *环境科学研究* , 26(3): 313-319
- 中华人民共和国卫生部. 2012. GB 2762—2012 食品安全国家标准 食品中污染物限量 [S]. 北京: 中国标准出版社. 1-9
- 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2013. 关于管过城镇污水处理设施 2013 年第二季度建设和运行情况的通报 [OL]. 2013-08-01. http://www.mohurd.gov.cn/zcfg/jsbwj_0/jsbwjcsjs/201309/t20130911_215019.html