

东北某市严重雾霾期PM_{2.5}、PM₁₀中元素特征和富集因子分析贾琳琳¹, 陈彦希², 崔 晨², 王 琨²

(1.黑龙江省环境保护科学研究院, 黑龙江 哈尔滨 150056;

2.哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要: 为了掌握雾霾期大气PM_{2.5}和PM₁₀中无机元素污染特征, 于2013年10月20~31日期间采集了东北某市发生严重雾霾时大气PM_{2.5}和PM₁₀样品, 分析了颗粒物样品中21种无机元素(K、Ca、Na、Mg、Mn、Pb、Cd等)的浓度。结果表明: 大气PM_{2.5}和PM₁₀浓度普遍超标, 超标率分别达88.89%、66.67%; 大气PM_{2.5}和PM₁₀中元素质量浓度主要是由Na、S、Ca、K、Fe、Al、Si、As、Mg 9种元素贡献; 元素的富集状况分析表明, Na、Zn、Ca、Cr、Ni、Cu、Mn、Cd、Pb和As在非雾霾期和雾霾期富集程度较高, 污染较严重, 受人为污染源影响较大; 以不同元素做参比, 所得各元素富集系数不同。

关键词: PM_{2.5}; PM₁₀; 无机元素; 富集因子**中图分类号:** X513**文献标志码:** AAnalysis of Element Characteristics and Enrichment Factors of PM_{2.5} and PM₁₀ during Severe Haze Period in a City Located in Northeast ChinaJia Linlin¹, Chen Yanxi², Cui Chen², Wang Kun²

(1.Heilongjiang Provincial Academy of Environmental Sciences, Harbin 150056, China;

2.School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: To investigate the pollution characteristics of inorganic elements contained in PM_{2.5} and PM₁₀ when severe haze occurred, PM_{2.5} and PM₁₀ samples were collected in a city located in Northeast China under severe haze days during October 20 to 31, 2013. Concentration of 21 elements contained in the PM_{2.5} and PM₁₀ samples was analyzed including K, Ca, Na, Mg, Mn, Pb, Cd, etc.. The results showed that the concentration of PM_{2.5} and PM₁₀ generally exceeded the standards, with exceeding rate of 88.89% and 66.67% respectively. Na, S, Ca, K, Fe, Al, Si, As and Mg were the main elements contained in PM_{2.5} and PM₁₀. Analysis of the enrichment factors of the elements indicated that the enrichment of Na, Zn, Ca, Cr, Ni, Cu, Mn, Cd, Pb and As were comparatively higher during haze and non-haze periods, causing more serious pollution with anthropogenic pollution source as the main influencing factor. In addition, different elements were compared and the enrichment coefficients of each element obtained were different.

Keywords: PM_{2.5}; PM₁₀; Inorganic Element; Enrichment Factor**CLC number:** X513

近年来, 我国雾霾现象日趋严重, 已成为一种天气灾害。雾霾天气下易形成大气颗粒物二次污染, 大气颗粒物是大气环境重要组成部分, 对空气质量和暴露人群的健康^[1]、大气能见度^[2]、云、降水^[3]、酸沉降^[4]、大气辐射、全球气候变化^[5]

及平、对流层大气化学过程^[6]均产生重要的影响。

目前, 国内外学者对大气颗粒物中无机元素浓度、粒径特征等均有研究报道。有学者对北京等中低纬度城市大气颗粒物研究^[7-9], 侧重于对大气颗粒物中重金属元素来源、污染状况、迁移

收稿日期: 2014-07-04**基金项目:** 哈尔滨市科技攻关项目(2013AA4AS045)资助**作者简介:** 贾琳琳(1988-), 女, 硕士。研究方向: 大气污染防治。E-mail:linlinjia888@sina.com

转化和分布、生态效应与生物毒性^[10]，而对我国东北寒地地区城市大气颗粒物中重金属等无机元素研究较少；有些研究主要涉及大气颗粒物TSP和PM₁₀^[11]，并未考虑大气细颗粒物PM_{2.5}理化性质。

东北某省会城市在2013年10月发生严重雾霾天气，10月21日城市某监测点PM_{2.5}和PM₁₀在早8:00分别达到864、1 024 μg/m³^[12]，给城市交通和市民生活带来严重危害和影响。文章着重研究东北寒冷城市秋冬季、雾霾发生期大气PM_{2.5}和PM₁₀中As、Hg和Cr等21种无机元素污染和富集特征，以期分析探讨寒冷城市雾霾发生期大气颗粒物污染特征及原因，为治理当地大气颗粒物污染提供依据。

1 采样及分析方法

1.1 大气颗粒物PM_{2.5}、PM₁₀采集方法

研究对象为中国寒冷地区东北某省会城市，该市位于亚欧大陆东部的中高纬度，北纬44° 04′ ~ 46° 40′，东经125° 42′ ~ 130° 10′之间，气候属于中温带大陆性季风气候^[13]。采暖期长、燃煤量大，采暖期间大气逆温、静风等气象条件频繁。

本研究于2013年10月18~31日期间采集大气颗粒物PM_{2.5}和PM₁₀，采样点设置于居民、商业和教育比较集中位置，距地面14 m处。采集时间为24 h，采样流量为100 L/min；采样仪器选用武汉天虹TH-150C型中流量颗粒物采样器，采样滤膜选用美国PALL公司生产的石英纤维滤膜。采样前后将采样膜放入恒温恒湿箱中平衡48 h，用十万分之一天平称量。为确保样品质量，在采样过程中同步采集空白样品。

1.2 检测分析方法

采用电感耦合等离子体发射光谱（ICP-AES）和电感耦合等离子体质谱分析法（ICP-MS）对颗粒物样品中Na、S、Si、Ti、K、Zn、Al、Ba、Ca、Fe、Mg、V、Cr、Ni、Cu、Mn、As、Cd、Hg、Pb、Sr 21种无机元素测定。样品利用GB/T 14506.30—2010参考方法用加热板消解法进行前处理。

1.3 富集因子法

富集因子法^[14]广泛用于鉴别土壤源之外的其他源对大气颗粒物中某一元素的贡献程度，其计算公式为：

$$Ef = \frac{Cn / Cref(sample)}{Bn / Bref(background)}$$

式中：Ef—富集因子；Cn—颗粒物中元素的测量浓度；Cref—选定的参比元素的测量浓度；Bn—参比系统中测量元素；Bref—参比系统中参比元素的浓度。

目前，对富集因子数值反应富集程度的判定规则有多重看法^[15-16]。通常认为，某元素富集因子小于10，则相对地表土来源没有富集，主要是由土壤或岩石风化的尘埃被风吹入大气；富集因子增大到10~10⁴范围时，则该元素被富集，可能与人类活动有关。根据富集因子大小，可将元素的污染程度分为5个级别，见表1。

表1 元素富集因子分级表					
EF值	< 2	2~5	5~20	20~40	> 40
级别	1级	2级	3级	4级	5级
富集程度	无/轻微	中度	显著	强烈	极强

2 结果及分析

2.1 大气PM_{2.5}和PM₁₀质量浓度特征

2013年10月18~31日期间（其中于20~22日发生严重雾霾），对东北某省会城市大气颗粒物PM_{2.5}和PM₁₀的分析检测结果见图1。

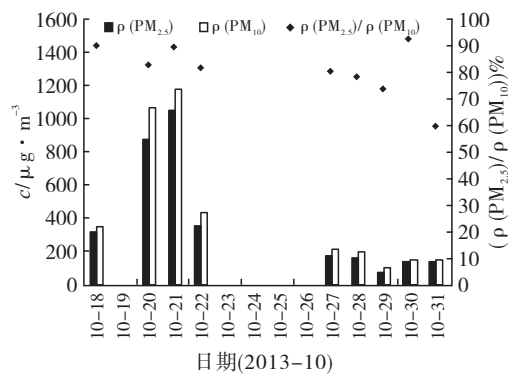


图1 大气PM_{2.5}和PM₁₀及二者比值变化

由图1可见，采样期间 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ （PM_{2.5}代表PM_{2.5}浓度，下同）（除10月29日为67 μg/m³）均高于《环境空气质量标准》（GB3095—2012）24 h

平均二级浓度标准限值 ($75 \mu\text{g}/\text{m}^3$)，而严重雾霾期 (10月20~22日) 大气颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 严重超标，最高值达 $1\,043 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，研究期间超标率为88.89%； $\rho(\text{PM}_{10})$ 在采样期间均超过24 h平均浓度标准限值 ($150 \mu\text{g}/\text{m}^3$)，在严重雾霾期21日达最高，为 $1\,171 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，研究期间超标率为66.67%。颗粒物质量浓度超标与研究期间气象因素有关，严重雾霾发生期城市处于暖空气影响下升温，且风力较小，大气层结比较稳定，垂直方向和水平方向均不利于污染源产生的污染物扩散。而 $\rho(\text{PM}_{2.5})/\rho(\text{PM}_{10})$ 在59.3%~92.2%之间，平均值为80.63%，说明采样期间细颗粒物污染较为严重，环境危害大。

2.2 大气 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 中无机元素浓度水平

研究城市在2013年10月大气 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 中无机元素浓度水平见图2。Na、S、Si、Ti、K、Zn、Al、Ba、Ca、Fe、Mg、V、Cr、Ni、Cu、Mn、As、Cd、Hg、Pb、Sr等21个元素浓度在大气 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 有相同的变化趋势。

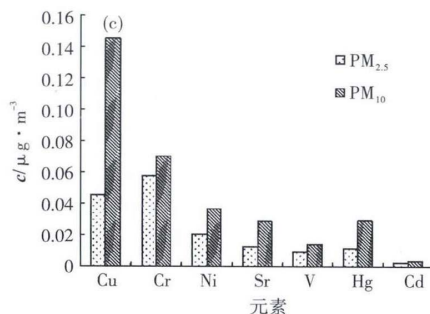
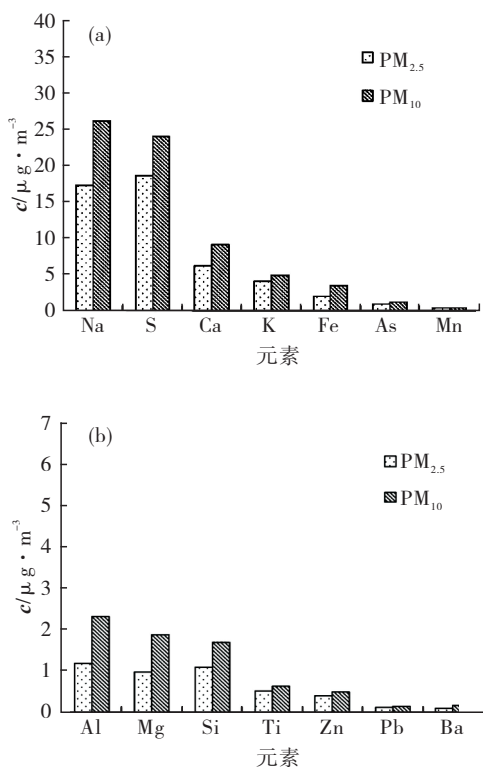


图2 大气 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 中无机元素变化特征

由图2可知：研究城市 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 中21种元素浓度变化，其中Al、Si、Ca、Fe、Mn、Ti是典型的地壳元素，且一般认为Al、Fe、Mn为自然输入，北方污染地区Fe、Mn、Cr被认为是钢铁行业的标识元素。Al的危害性小，为颗粒物中次要有害物质，在 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 中浓度为 1.17 和 $2.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ；Ca也是建筑和建材工地排放较多的元素，是颗粒物中主要元素， $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 中Ca浓度分别为 6.19 和 $9.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ；Fe来自钢铁行业，为颗粒物中次要致害污染物，在 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 中浓度为 1.98 和 $3.37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ；Mn可引起呼吸道损伤，为颗粒物中次要致害物质，在 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 中浓度为 0.32 和 $0.40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，均超过环境水平目标值的生态指标 $0.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ；Cr主要来源为耐火材料焙烧以及钢铁冶炼废气，为颗粒物中的主要有害污染物， $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 中Cr浓度分别为 0.058 和 $0.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，未超过环境水平目标值的生态指标 $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

S、As、Cu、Zn、Pb、Ni、V是典型的燃煤或燃油污染元素，Ti、Pb和Ni是燃煤的标示物，V和Ni为燃油的标示物，Zn为城市垃圾焚烧的标识元素。As具有较大的毒性，是颗粒物中主要有害物质， $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 中As浓度分别为 0.91 和 $1.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，超过环境水平目标值的生态指标 $0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ；Cu来源于无机冶炼， $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 中Cu浓度分别为 0.046 和 $0.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，未超过环境水平目标值的生态指标 $0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ；Zn是对人体有益的元素，未超过环境水平目标值的生态指标 $4.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ；Pb来源于燃煤烟尘排放，颗粒物中Pb均超过环境水平目标值的生态指标 $0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ；Ni为颗粒物中主要致害污染物， $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 中

Ni浓度分别为0.021和0.037 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 未超过环境水平目标值的生态指标0.24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; Ti为颗粒物中主要致害物, 颗粒物中Ti均超过环境水平目标值的生态指标0.02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; V主要来源于炼钢的冶炼, PM_{2.5}和PM₁₀中V浓度分别为0.01和0.15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM₁₀中V元素超出环境水平目标值的生态指标0.11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

Na来源于海盐和地壳成分, 是颗粒物中主要元素, PM_{2.5}和PM₁₀中Na均超过环境水平目标值的生态指标1.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。K被认为与生物质燃烧有关, 少量来自海盐成分, PM_{2.5}和PM₁₀中K浓度均超过环境水平目标值的生态指标2.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

2.3 大气PM_{2.5}和PM₁₀元素富集因子分析

迄今, 参比元素选择并没有被广泛接受共同的规则, 通常选择地壳中普遍存在、人为污染小、挥发性较低、化学性质稳定的元素, 选择元素如Al、Si、Ti、Fe等。本研究选用Al、Fe两种元素作为参比, 所选元素背景值来自《中国土壤环境背景值》^[17]中黑龙江省土壤背景值, Al选取A层(表层土壤)算术平均值72 800 mg/kg, Fe取算术平均值为29 100 mg/kg。20~22日作为严重雾霾期, 其他日作为非雾霾期, 以Fe为参比元素, 大气PM_{2.5}和PM₁₀中元素富集因子见表2, 以Al为参比元素的富集因子见表3。

表2 大气PM_{2.5}和PM₁₀中元素的富集因子(Fe)

元素	PM _{2.5}		PM ₁₀		土壤背景值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
	非雾霾期	雾霾期	非雾霾期	雾霾期	
Na	15.07	10.86	15.94	11.93	14 300
Sr	1.04	0.90	1.33	1.35	192
Ti	1.82	1.46	1.21	0.88	4 400
K	2.46	3.69	1.70	1.88	19 000
Zn	80.25	66.67	53.38	55.26	70.7
Al	0.22	0.21	1.07	0.24	72 300
Ba	2.01	1.94	1.93	1.91	566
Ca	8.86	9.53	8.68	6.79	9 400
Fe	1.00	1.00	1.00	1.00	29 100
Mg	2.18	2.37	2.17	2.95	6 000
V	1.63	1.97	1.43	1.29	81.9
Cr	13.99	13.83	7.95	7.56	58.6
Ni	8.57	33.63	6.63	6.49	22.8
Cu	13.71	40.69	36.51	57.48	20
Mn	3.25	6.94	1.88	3.95	1 065
Cd	6 190.81	9 757.71	4386.50	4 275.33	0.086
Pb	187.53	164.18	181.40	99.53	24.2
As	685.0	886.22	565.37	538.69	7.3

由表2可见, Fe为参比元素计算富集因子, 18种元素富集系数在PM_{2.5}和PM₁₀中富集情况不同, 说明进入秋季采暖期、发生严重雾霾期元素富集系数相对比较复杂。

PM_{2.5}和PM₁₀中Sr、Ti、K、Al、Ba、Ca、Mg、V、Mn 9种元素的富集系数在雾霾期和非雾霾期均小于10, 表明此类元素在采暖期初期、严

重雾霾发生期的富集程度不高, 基本来自本地区或邻近地区的土壤。Ca、K、Mn等元素浓度较高, 说明土壤沙尘对颗粒物具有较高的贡献。

Na、Zn、Cr、Cu、Cd、Pb和As 7种元素的富集因子在PM_{2.5}中非雾霾期和雾霾期均大于10。PM₁₀中除Cr元素小于10, 其他元素富集系数与PM_{2.5}有相同趋势。说明这些元素显著富集于颗粒

物中,而Cr明显富集于细颗粒物中,这些元素来源于人为污染源,受土壤风沙尘影响小。 $PM_{2.5}$ 中Cu、Ni、Cd、As 4种元素雾霾期富集现象明显高于非雾霾期,Zn元素在非雾霾期富集极强。而 PM_{10} 中Cu、Ni、Cd、As 4种元素则在非雾霾期富集现象明显。

表3 大气 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中元素的富集因子(AI)

元素	$PM_{2.5}$		PM_{10}	
	非雾霾期	雾霾期	非雾霾期	雾霾期
Na	67.97	52.79	52.34	49.16
Sr	4.72	4.39	4.38	5.55
Ti	8.32	7.19	4.02	3.67
K	11.11	17.96	5.59	7.73
Zn	361.79	323.96	175.39	227.75
Al	1	1	1	1
Ba	8.76	10.62	6.32	7.88
Ca	39.95	44.36	28.48	27.98
Fe	4.54	4.89	3.30	4.15
Mg	9.84	11.51	7.13	12.18
V	7.35	9.61	4.70	5.33
Cr	62.73	66.83	25.92	30.95
Ni	38.68	163.83	110.74	26.79
Cu	61.73	197.46	119.67	236.58
Mn	14.70	33.80	6.19	16.33
Cd	27 403.49	46 554.82	41 136.49	17 298.04
Pb	845.63	797.94	599.84	413.19
As	3194.77	4333.93	1867.59	2 234.04

由表3可见: Sr、Ti、Fe 和 V 元素在 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中,雾霾期和非雾霾期均小于10,表明此类元素基本来自本地区或邻近地区的土壤。

Na、Zn、Ca、Cr、Ni、Cu、Mn、Cd、Pb 和 As 元素在 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中富集系数大于10,说明这些元素均明显富集于颗粒物中,受人为污染源影响,受本地土壤源污染小;而Mg和K两种元素只在雾霾期富集系数大于10,说明建筑尘和生物质燃烧等人为污染源在严重雾霾发生期对颗粒物元素富集影响大,且K元素在 $PM_{2.5}$ 中富集系数大于10,在 $PM_{2.5}$ 中富集系数小于10,说明K元素明显富集于细颗粒物中。

由表2和表3对比可知: 参比元素不同,各元素富集因子在 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中富集系数有明显变化,因此富集因子分析中,应依据研究对象中各元素的受污染情况,尽量选择人类活动影响较小

的元素作为参比元素,建议选择Al元素作为富集因子法参比元素。

3 结论

(1) 大气 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度普遍超标, $PM_{2.5}$ 超标率达88.89%, PM_{10} 超标率达66.67%,这与城市气象条件有关; $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度比在59.3%~92.2%之间,细颗粒物污染较为严重,环境危害大。

(2) 大气 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中元素质量浓度主要是由Na、S、Ca、K、Fe、Al、Si、As、Mg 9种元素贡献, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中贡献率分别达97%和97.21%。K、Na、As、Mn、Pb、Ni、Ti等是颗粒物中主要超标元素,故研究城市秋冬季采暖期燃煤和机动车燃油等污染源为大气控制重点。

(3) Na、Zn、Ca、Cr、Ni、Cu、Mn、Cd、Pb 和 As在非雾霾期和雾霾期富集系数均大于10,说明这些元素主要来源于人为污染; Sr、Ti、Fe 和 V 等元素富集因子小于10,说明这些元素主要来自土壤风沙尘等自然污染源,同时也受到人为污染源排放的影响。

(4) 以不同元素做参比,所得各元素富集系数不同,有的元素的污染级别发生显著变化,在富集因子计算,应根据研究城市的具体污染情况,选择人类活动影响小的元素作为参比,建议Al元素为参比。

参考文献

- [1] Sousa S I V, Pires J C M, Martins E M, et al. Short-term effects of air pollution on respiratory morbidity at Rio de Janeiro —Part II: Health assessment[J]. Environment International, 2012, 43:1-5.
- [2] 白志鹏, 董海燕, 蔡斌彬,等.灰霾与能见度研究进展[J].过程工程学报, 2006,6(2): 36-41.
- [3] Ramanathan V, Feng Y. Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(1):37-50.
- [4] 花日茂, 李湘琼.我国酸雨的研究进展[J].安徽农业大学学报, 1998,25(2): 206-210.
- [5] Sullivan R C, Guazzotti S A, Sodeman D A, et al. Direct observations of the atmospheric processing of Asian mineral dust[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2007, 7(5):1213-1236.
- [6] 朱 坦,冯银厂.大气颗粒物来源解析原理、技术及应用[M].北京: 科学出版社, 2012:71-73.

(下转第89页)

这可能与罗布泊属于极端干旱地区、自然环境比较恶劣、受到地区环境的影响大有关,使得罗布泊“大耳朵”盐湖区沉积物自然矿化富集严重。而运城盐湖区位于山西省西南部运城盆地中心,自然环境条件较好、土壤质量相对较好、加上受当地环境的影响,使得该地区重金属Cd含量相对较低。从重金属Pb分布情况来看,罗布泊“大耳朵”地区重金属Pb的含量要比运城盐湖要低,原因可能是Pb的污染主要来自人为活动,运城盐湖周边人为活动相比罗布泊地区较多,导致Pb含量相对较高。

与余秀娟等^[11]研究的巢湖沉积物中重金属Cd、Pb、Cu、Ni含量相比,罗布泊“大耳朵”地区表层沉积物中Cd的含量比巢湖沉积物中Cd含量略高;而重金属Pb、Cu、Ni在巢湖沉积物中的含量略高于罗布泊“大耳朵”地区沉积物中,这与巢湖表层沉积物长期受到人类活动造成的工业废水、生活污水的排放及交通运输等有关^[12],但罗布泊受到这些因素的影响较小,大多是自然矿化富集等原因造成的重金属积累。

4 结论

通过对罗布泊“大耳朵”地区重金属Pb、Cu、Ni、Mn总量的空间分布及垂直分布特征的分析,以及对沉积物中重金属Pb、Cu、Ni、Mn总量与有机质之间相关性的系统分析。得出以下结论:

(1) 罗布泊“大耳朵”地区从湖心到湖岸各重金属在盐壳层的分布趋势为: Cd(湖心)>Cd(湖中)>Cd(湖岸); Pb(湖岸)>Pb(湖

心)>Pb(湖中); Cu(湖岸)>Cu(湖中)>Cu(湖心); Ni(湖岸)>Ni(湖中)>Ni(湖心); Mn(湖心)>Mn(湖岸)>Mn(湖中)。

(2) 重金属Cd和Pb的含量在表层盐壳含量均高于底层沉积物中的含量,并随深度的增加而减少并趋于稳定;而Cu、Ni和Mn的含量随着深度的增加变化规律不明显。

(3) 沉积物中重金属Cd、Pb的总量与有机质之间均显著正相关($P<0.01$), Ni、Cu、Mn的总量与有机质之间均显著负相关($P<0.01$)。

参考文献

- [1]倪利晓,耿宏,马艳艳,等.太湖北部湖区水体与沉积物中Cd污染现状分析[J].环境科技,2013,26(02):50-54.
- [2]张天,姜月,倪玮怡,等.上海崇明现代农业园区土壤与花椰菜中Cd、Cr含量分析[J].地理教学,2013(04):58-61.
- [3]李海光.污染场地周边农田土壤重金属含量的空间变异特征及其污染源识别研究[D].浙江:浙江大学,2012.
- [4]郑春霞,武红旗,朱新萍,等.新疆乌鲁木齐市城郊典型农田土壤镉污染及空间变异特征分析[J].光谱学与光谱分析,2012,32(02):537-540.
- [5]牛永琦,陈兰生.土壤有机质测定方法的进展[J].干旱环境监测,1998,12(02):97-100+128.
- [6]胡鑫,安登第,迪丽努尔·马力克,等.ICP-MS法测定罗布泊湖盆沉积物中微量元素含量[J].光谱学与光谱分析,2012,32(06):1674-1676.
- [7]李娜,袁世斌,董微.新疆罗布泊土壤微量元素含量研究[J].广东微量元素科学,2009,16(03):39-43.
- [8]Liang Shu-xuan, Wang Xin, Zheng Xuan. Pollution Characteristics and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Water and Sediment of Baiyangdian Lake[C]//Asia Pacific Conference on Environmental Science and Technology, Advances in Biomedical Engineering, 2012, 6:43-47.
- [9]江玲,王玮,郭延峰,等.运城盐湖区土壤重金属含量分布及分析[J].农业技术与装备,2012,23(13):34-36+38.
- [10]周霁,乔红进,王曰鑫.运城盐湖区土壤重金属元素含量及分布[J].山西农业大学学报:自然科学版,2009,29(01):73-76+93.
- [11]余秀娟.巢湖沉积物重金属质量基准的研究[D].安徽:安徽师范大学,2012.
- [12]吴光红,朱兆洲,刘二保,等.天津城市排污河道沉积物中重金属含量及分布特征[J].环境科学,2008,29(2):413-420.
- [13]中国哈尔滨.走进哈尔滨—哈尔滨市志总述[EB/OL].http://www.harbin.gov.cn/index.htm.
- [14]柯昌华,金文刚,钟秦.环境空气中大气颗粒物源解析的研究进展[J].重庆环境科学,2002,24(3):55-59.
- [15]Chan Y C, Simpson R W, McTainsh G H, et al. Characterisation of chemical species in PM_{2.5} and PM₁₀ aerosols in Brisbane, Australia[J]. Atmospheric Environment, 1997, 31(22):3773-3785.
- [16]魏复盛,藤恩江,吴国平,等.我国4大城市空气PM_{2.5}、PM₁₀污染及其化学组成[J].中国环境监测,2001,17(7):1-6.
- [17]中国环境监测总站.中国土壤元素背景值[M].北京:中国环境科学出版社,1990.
- [7]姬亚芹,朱坦,冯银厂,等.天津市PM₁₀中元素的浓度特征和富集特征研究[J].环境科学与技术,2006,29(7):49-51.
- [8]牛红亚,邵龙义,刘君霞,等.北京灰霾天气PM₁₀中微量元素的分布特征[J].中国环境监测,2011,27(1):72-76.
- [9]杨晴,张凯,柴发合,等.长株潭城市群秋季大气颗粒物及重金属元素污染特征[J].环境科学研究,2013,26(6):590-597.
- [10]姚青,韩素芹,蔡子颖.天津采暖期大气PM_{2.5}中重金属元素污染及其生态风险评价[J].中国环境科学,2013,33(9):1596-1600.
- [11]袁春欢,王琨,师传兴,等.哈尔滨市空气中PM₁₀的元素组成特征分析[J].环境保护科学,2009,35(1):1-3.
- [12]哈尔滨环保网.空气质量实时发布平台[EB/OL].http://www.hrbhj.gov.cn/