

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2014.02.010

忻州市市区大气颗粒物中的元素组成特征

刘凤娴 彭林* 牟玲 胡冬梅 史美鲜 杨花

(太原理工大学环境科学与工程学院, 太原, 030024)

摘要 采集忻州市市区冬季和夏季总悬浮颗粒物(TSP)和可吸入颗粒物(PM₁₀)样品,测定其中Na、Mg、Al、Si、K、Ca、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb等18种元素含量,并对元素的浓度水平、时空分布特征和重金属的潜在生态风险以及元素的主要来源进行了研究.结果表明,忻州市TSP和PM₁₀中18种元素平均浓度分别为47662.2 ng·m⁻³和17546.4 ng·m⁻³,重金属的生态危害在TSP中由高到低依次为Cd > Cu > Co > Pb > As > Cr > Zn > Ni > Mn,在PM₁₀中为Cd > Cu > Pb > Co > Zn > Cr > As > Ni > Mn,且PM₁₀比TSP具有更强的生态危害性.富集因子和主因子分析法表明,忻州市PM₁₀中元素的主要排放源包括:煤烟尘和工业粉尘、土壤风沙尘、建筑水泥尘和汽车尾气,贡献率分别为56.30%、23.88%、19.78%.

关键词 大气颗粒物, 元素, 潜在生态风险, 富集因子, 主因子分析.

Characteristic of elements in atmospheric particulate matters in air of Xinzhou City

LIU Fengxian PENG Lin* MU Ling HU Dongmei SHI Meixian YANG Hua

(College of Environmental Sciences and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, 030024, China)

Abstract: Total suspended particle (TSP) and particulate matter (PM₁₀) samples were collected in Xinzhou during winter and summer and eighteen elements including Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd and Pb were measured. The concentration, spatial and temporal distribution characteristics, potential ecological risk of heavy metals and the main source of these elements are studied. The result indicated that the concentration of 18 elements in TSP was 47662.2 ng·m⁻³ and in PM₁₀ was 17546.4 ng·m⁻³. An order of potential ecological risk index of heavy metals in TSP was Cd > Cu > Co > Pb > As > Cr > Zn > Ni > Mn and in PM₁₀ was Cd > Cu > Pb > Co > Zn > Cr > As > Ni > Mn and the potential ecological risk index of PM₁₀ was higher than TSP. The main sources of elements in PM₁₀ in Xinzhou were divided into three categories including coal burning and industrial dust (56.30%), soil dust (23.88%) and the construction cement dust and vehicle emission (19.80%).

Keywords: atmospheric particulate matter, element, potential ecological risk, enrichment factor, principal component analysis.

随着工业化和城市化进程的快速发展,我国大中型城市雾霾天气逐年增多^[1-2].研究表明,雾霾天气下大气颗粒物浓度显著增加,对视觉、空气质量以及人体健康造成很大的影响^[3].大气颗粒物已成为影响我国城市空气质量的首要污染物^[4].颗粒物中携带的重金属、硫酸盐、有机物、病毒等可直接深入呼吸道和肺部,且大约75%—90%的重金属分布在PM₁₀中,颗粒物粒径越小,重金属含量越高^[5].探讨大气颗粒物中元素组成及来源已成为目前研究的热点.杨勇杰^[6]等对北京市大气颗粒物中PM₁₀和PM_{2.5}质量浓度及其化学组分的特征进行分析,结果表明北京市气溶胶中对人体有害的Cu、Zn、As和Pb的浓

2013年6月7日收稿.

* 通讯联系人, E-mail: penglin6611@163.com

度处于较高水平,而这些元素主要来自人为源的贡献.赵金平等^[7]对广州市灰霾期间大气颗粒物中无机元素的质量浓度进行了研究,研究发现来源于人为活动的 Zn、Pb、As 和 Cu 在灰霾期更容易富集.董海燕^[8]等对天津市环境空气中 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 进行了采样研究,发现微量元素 Zn、Pb 在 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 中含量较高,Cr、V、Ni、As 等则在细粒子中有明显分布.大气颗粒物中的重金属对人体健康和生态系统具有很强的危害作用^[9].但目前关于重金属的研究主要集中在 Cd、Cu、Pb、Zn 这 4 种元素的浓度水平和主要来源上^[10],而关于重金属对人体潜在危害性的研究很少.

忻州市位于山西省北中部,是以轻工业为主,同时发展煤、电、铝等重工业的综合性工业基地.本文选择忻州市大气颗粒物中 18 种元素为研究对象,探究其主要来源,并分析了 Cd、Cu、Pb、Co、Zn、Cr、As、Ni、Mn 对人体的潜在危害性,为忻州市大气颗粒物污染防治及重金属对人体健康影响评价提供科学依据.

1 样品的采集与分析

1.1 样品采集

本文按照不同的功能区,在忻州市市区选取 4 个采样点.点位 1—4 分别代表工业区、居民区、相对清洁区和商业区,点位示意图见图 1.采用 KB120 型中流量(100 L·min⁻¹)采样器,选用 90 mm 的聚己烯滤膜,在 8—12 m 高度处,同步采集 TSP 和 PM₁₀,连续采样 20 h.采样时间为 2011 年 3 月 1 日—3 月 5 日和 2011 年的 7 月 5 日—7 月 9 日,分别代表忻州市的冬季和夏季.本研究共采集 80 个样品.

1.2 样品的处理及分析测试

将采样后的滤膜剪碎放入锥形瓶中,加适量去离子水润湿,再加入分析纯的 HNO₃ 15 mL、HClO₄ 5 mL;将锥形瓶放在电炉上加热,温度控制在 100 ℃ 以下;试样与酸不断反应,当酸剩余约 3 mL 时,将锥形瓶取下冷却,加入少量去离子水,过滤残渣,定容 15 mL,待测.过滤后的残渣放回原锥形瓶中,用 2% KOH 溶液 30 mL 煮沸 0.5 h,再过滤定容于 50 mL 容量瓶,检测 Si 容量.

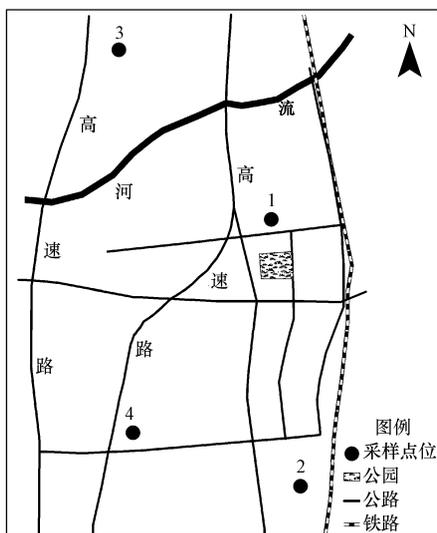


图 1 忻州市大气颗粒物采样点位分布图

Fig. 1 Distribution of particulate matters in air monitoring site in Xinzhou

对预处理好的样品使用美国热电公司 ICP-9000(N+M)型等离子体发射光谱仪分析测试 18 种元素,分别为 Na、Mg、Al、Si、K、Ca、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb.

1.3 质量控制与质量保证(QA/QC)

为了保证元素前处理和分析方法的准确性和可靠性,选择 GSD6 沉积物标准样进行相同的消解和分析,同时取空白滤膜按照以上步骤进行空白实验.结果表明目标物回收率在 85.9%—101% 之间,平行样测定相对标准偏差(RSD)均小于 7%,且空白膜中元素含量均低于检出限,不会对结果造成影响.

18 种元素 Na、Mg、Al、Si、K、Ca、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 的检出限分别为 0.02、0.02、0.025、0.015、0.06、0.003、0.003、0.003、0.004、0.0005、0.002、0.005、0.009、0.002、0.005、0.03、0.003 和 0.03 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

2 结果与讨论

2.1 颗粒物中元素分布特征

2.1.1 TSP 和 PM_{10} 中元素浓度水平

忻州市环境空气 TSP 和 PM_{10} 中元素浓度分布见图 2。TSP 中 18 种元素质量浓度之和在 43069.4—53765.1 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间,平均浓度为 47662.2 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$,各元素浓度大小依次为 $\text{Ca} > \text{Si} > \text{Al} > \text{Fe} > \text{Na} > \text{Mg} > \text{K} > \text{Zn} > \text{Ti} > \text{Mn} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Co} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{As} > \text{V} > \text{Cd}$; PM_{10} 中 18 种元素质量浓度之和在 13191.8—21494.0 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间,平均质量浓度为 17546.4 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$,18 种元素浓度排列顺序为 $\text{Si} > \text{Al} > \text{Ca} > \text{Fe} > \text{Na} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Ti} > \text{Mn} > \text{Cr} > \text{Pb} > \text{Co} > \text{Ni} > \text{As} > \text{V} > \text{Cd}$ 。TSP 和 PM_{10} 中各元素浓度排列顺序基本一致,均为地壳元素(Ca、Si、Al、Fe、Na、Mg、K)浓度大于微量元素(Zn、Cu、Ti、Mn、Cr、Pb、Co、Ni、As、V、Cd)。对比 TSP 和 PM_{10} 中元素含量发现,地壳元素在 TSP 中明显高于 PM_{10} ,而微量元素在 TSP 和 PM_{10} 中的浓度差别不明显,表明微量元素主要富集在粒径较小的颗粒物上。

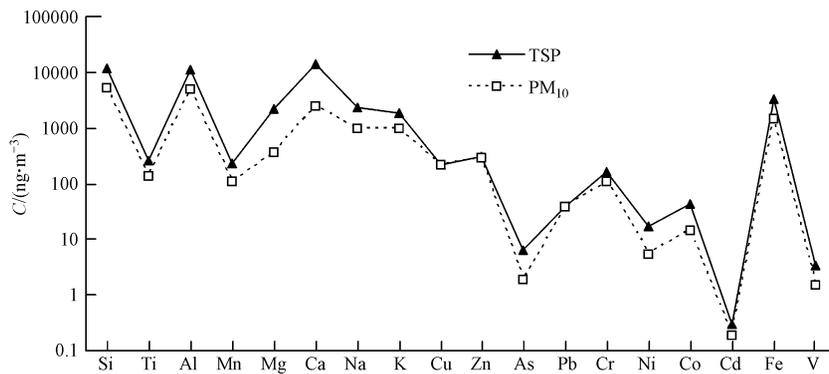


图 2 忻州市环境空气 TSP 和 PM_{10} 中 18 种元素浓度比较

Fig. 2 Comparison of the concentration of 18 elements in TSP and PM_{10} in Xinzhou

忻州市 PM_{10} 中元素浓度与潞城市^[11]、晋城市^[12]、沈阳^[13]、北京^[6]和天津^[8]的比较见表 1。忻州市、晋城市和潞城市 PM_{10} 中各元素浓度趋势一致,其中,潞城和晋城元素浓度相当,忻州市 PM_{10} 中各元素浓度均偏低,表明该地区与晋城和潞城相比元素污染较轻。与沈阳、天津和北京相比,除 Cu 和 Co 外,其他元素浓度均较低。

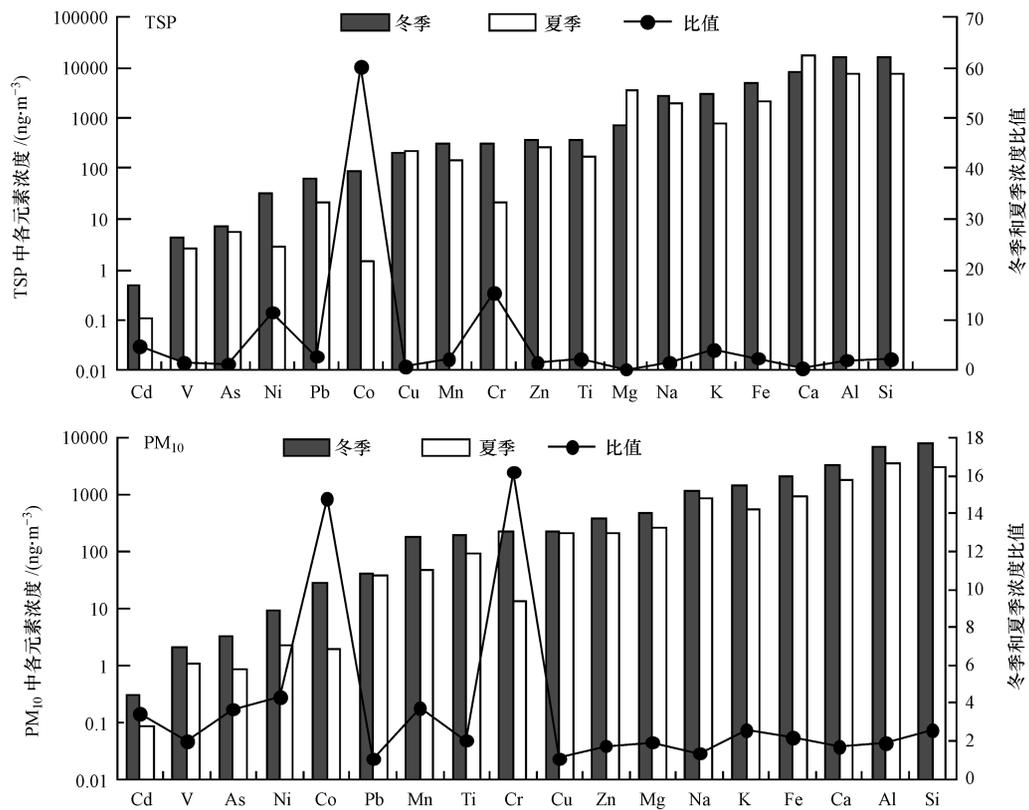
忻州市 PM_{10} 中 Cu 和 Co 的浓度较高,可能与该城市的燃煤与工业企业有关。其中,Cu 浓度超过了环境水平目标值的生态指标 200 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$,未超过环境水平目标值的健康指标 500 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$,Co 浓度未超过环境水平目标值的生态指标 100 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

2.1.2 元素浓度时空分布特征

忻州市冬季和夏季 TSP 和 PM_{10} 中 18 种元素浓度及各元素冬季和夏季浓度比值见图 3。由图 3 可见,同一种元素的质量浓度在冬季和夏季不同。TSP 中 Mg 和 Ca 在夏季浓度较高,可能是由于该季节施工造成的污染较重;Cu、As、Zn、Na、V、Al、Si、Ti、Mn、Fe、Pb 在冬季和夏季浓度相当;K、Cd、Ni、Cr、Co 在冬季远大于夏季,浓度比值分别为 4.0、4.8、11.6、15.3、60.4,这可能与冬季燃煤量的增加有关。 PM_{10} 中 18 种元素浓度均为冬季大于夏季,其中,Cd、As、Mn、Ni、Co 和 Cr 在冬季和夏季的比值较高,分别为 3.4、3.7、3.7、4.3、14.8、16.2。

表 1 忻州市环境空气 PM₁₀ 中元素浓度与其他城市的比较 (ng·m⁻³)Table 1 Comparison Xinzhou with the other cities on the concentration of 18 elements in PM₁₀ (ng·m⁻³)

元素	忻州		晋城 ^[12]	潞城 ^[11]	沈阳 ^[13]	天津 ^[8]	北京 ^[6]
	均值	偏差					
Si	5246.8	517.3	11055.1	10959			
Ti	141.4	13.83	787	474.3			
Al	5060.7	853.7	9722	9273.9		1295	
Mn	111.4	15.9	229.8	68.6	254.3	119.4	103.3
Mg	365.3	87.0	2640.5	1102.9		931.1	1579.0
Ca	2484.8	774.2	7239.5	8226.9		4901	7031.7
Na	1009.4	75.9	2529.5	2254.1		1159.0	
K	982.2	176.7	2981.3	1710.5		3305	
Cu	213.7	36.1	551.6	82.7	174.9	154.9	78.7
Zn	292.0	40.8	770	280.3	510.3	623.8	442.7
As	2.0	0.5	80.3	22.2		39.2	66.0
Pb	38.9	9.36	327.8	62.9	241.5	302.3	241.6
Cr	110.0	3.2	151.3	288.6	76.1	167.7	
Ni	5.5	0.5	13.4	47.8	16.3	76.4	
Co	14.4	4.1		7.4		1.9	
Cd	0.2	0.03		0.5		5.7	
Fe	1460.0	156.5	5068.9	3024.1		4033	3168.0
V	1.5	0.2	15.9	3.5		12.4	

图 3 忻州市 TSP 和 PM₁₀ 18 种元素在冬季和夏季的比较Fig. 3 Concentration of 18 elements in TSP and PM₁₀ during winter and summer in Xinzhou

忻州市不同采样点环境空气 TSP 和 PM₁₀ 中元素浓度分布见表 2. 不同功能区 TSP 和 PM₁₀ 中元素浓度存在较明显的空间分布特征. 采样点 4 TSP 和 PM₁₀ 中 Mg、Ca、K、Fe 浓度均明显高于其他采样点, 其中, Mg、K、Fe 在地壳中含量较多, 而 Ca 是建筑水泥尘的标识元素, 该点位较高浓度的 Mg、Ca、K、Fe 可能与该区施工较多, 建筑水泥尘和扬尘污染较重有关; 采样点 3 Pb 的浓度远高于其他采样点, 研究表明 Pb

主要来源于燃煤烟气^[14],同时该区为相对清洁区,无商业和工业活动,另外,在 TSP 和 PM₁₀ 中 Pb 的浓度水平均表现为冬季大于夏季(图 3),故判断冬季 Pb 的增高可能由于居民取暖过程煤的燃烧;采样点 1 TSP 和 PM₁₀ 中 Co 的浓度分别为采样点 3(相对清洁区)的 2.3 和 4.6 倍,其浓度水平在冬季明显高于夏季,且该点位于工业区,故 Co 的浓度较高可能源于工业粉尘和冬季燃煤的影响。

表 2 不同采样点环境空气 TSP 和 PM₁₀ 中元素浓度比较(ng·m⁻³)

Table 2 Comparison of elemental concentration in TSP and PM₁₀ in four different monitoring sites(ng·m⁻³)

元素	采样点 1		采样点 2		采样点 3		采样点 4	
	TSP	PM ₁₀						
Si	11038.7 ± 3749.4	5169.7 ± 1741.0	11236.5 ± 5222.0	6260.5 ± 2672.3	11737.3 ± 7729.0	4012.3 ± 1462.9	12403.7 ± 1706.2	5498.7 ± 2630.4
Ti	373.1 ± 145.8	146.4 ± 91.4	174.8 ± 93.2	155.5 ± 69.0	225.1 ± 173.4	106.4 ± 45	333.7 ± 95.4	155.3 ± 98.9
Al	10113 ± 3581.4	4438.7 ± 1161.6	11480.8 ± 4848.4	6317.1 ± 2889.5	10453.2 ± 4271	3527.1 ± 939	13073.8 ± 2626.8	5906.4 ± 2978.3
Mn	243.5 ± 186.2	116.9 ± 62.5	192.9 ± 142.6	114.1 ± 100.5	278.6 ± 224.1	71.0 ± 36.8	191.8 ± 128.3	141.3 ± 138.3
Mg	2232.7 ± 606.8	220.6 ± 64.8	2134.1 ± 642	397.3 ± 321.3	2172.4 ± 646.2	290.3 ± 118.8	2414.5 ± 348.7	547.4 ± 265
Ca	11873.8 ± 3982.4	2383.1 ± 1528.2	14319.2 ± 6301.7	1800.8 ± 913.1	12238.9 ± 3077.1	1367.1 ± 721.8	16201.4 ± 4624.9	4428.4 ± 2998.9
Na	2120.9 ± 573.4	897.3 ± 244.5	2759.9 ± 1731.7	1046.4 ± 414.1	2097.8 ± 1020.6	931.5 ± 363.4	2235.1 ± 270.3	1161.7 ± 565.4
K	1634.5 ± 1271.4	675.8 ± 255.6	1853.1 ± 861.6	1143.0 ± 616.0	1926.3 ± 1531.5	913.3 ± 436.3	2132.6 ± 1125	1307.1 ± 703.5
Cu	225.4 ± 104.7	101.1 ± 88.7	310.5 ± 144.2	195.3 ± 44.3	184.7 ± 72.9	161.1 ± 48.3	309.2 ± 107.8	259.4 ± 74.7
Zn	282.4 ± 172.9	247.0 ± 162.5	393.7 ± 228.0	348.9 ± 233.0	405.4 ± 242.4	338.3 ± 213.4	226.5 ± 119.8	201.4 ± 145.7
As	4.5 ± 3.5	3.2 ± 1.6	7.2 ± 4.4	2.1 ± 0.9	5.3 ± 2.4	1.3 ± 1.1	8.0 ± 3.1	1.5 ± 1.1
Pb	28.1 ± 17.3	23.8 ± 21.9	44.7 ± 36.1	44.1 ± 37.1	60.1 ± 37.5	57.3 ± 35.6	33.0 ± 17.4	26.7 ± 21.7
Cr	128.1 ± 95.9	115.8 ± 45.9	187.4 ± 83.2	102.3 ± 50.5	163.1 ± 82.1	110.8 ± 87.6	180.0 ± 25.2	111.8 ± 58.0
Ni	5.2 ± 1.8	3.8 ± 2.2	22.4 ± 29.8	6.8 ± 5.5	18.6 ± 11.0	5.1 ± 1.9	22.5 ± 9.9	4.6 ± 2.6
Co	70.9 ± 49.6	18.8 ± 7.4	34.2 ± 22.4	17.3 ± 12.3	30.4 ± 14.5	4.1 ± 2.1	39.7 ± 11.0	17.0 ± 23.2
Cd	0.2 ± 0.1	0.2 ± 0.1	0.3 ± 0.2	0.2 ± 0.1	0.3 ± 0.1	0.1 ± 0.1	0.5 ± 0.2	0.2 ± 0.1
Fe	2856.1 ± 264.9	1233.9 ± 394.0	3056.0 ± 207.8	1634.4 ± 184.6	3552.7 ± 191.5	1293.3 ± 342.2	4005.0 ± 151.3	1673.6 ± 291.2
V	3.3 ± 1.2	1.3 ± 0.2	3.2 ± 1.7	1.9 ± 0.7	3.2 ± 1.7	1.2 ± 0.4	4.0 ± 0.9	1.7 ± 1.0

2.1.3 颗粒物中重金属的潜在生态风险特征分析

潜在生态风险分析是指应用潜在生态危害指数(RI)对重金属进行评价分析.该方法的基础条件为元素丰度响应,即沉积物中金属的生态危害具有加和性,而 RI 随沉积物中金属污染程度增加而增加,评价指标如下:

$$C_f^i = \frac{C^i}{C_n^i} \quad (1)$$

$$E_r^i = T_r^i \cdot C_f^i \quad (2)$$

$$RI = \sum_i^m E_r^i = \sum_i^m T_r^i \cdot C_f^i = \sum_i^m T_r^i \cdot \frac{C^i}{C_n^i} \quad (3)$$

式中, C_f^i 为第*i*种重金属的污染系数; C^i 为样品中第*i*种重金属含量的实测值,mg·kg⁻¹; C_n^i 为第*i*种重金属的背景值,mg·kg⁻¹; E_r^i 为第*i*种重金属的潜在生态风险系数; T_r^i 为第*i*种重金属的毒性系数,反映其毒性水平和生物对其污染的敏感性;RI为多种重金属的潜在生态风险指数^[15-16].潜在生态风险评价指标的分级见表 3.

表 3 潜在生态风险评价指标的分级

Table 3 Classification criteria of the potential ecological risk index

E_r^i	单因子生态危害程度	RI	总的潜在生态风险程度
< 40	轻微	< 150	轻微
40—80	中	150—300	中等
80—160	较强	300—600	强
160—320	强	> 600	极强
> 320	极强		

本文对 9 种重金属 Mn、Zn、Cr、Cu、Pb、Ni、Co、As、Cd 进行潜在生态风险特征分析,其毒性系数分别为 1、1.2、5、5、5、10、30,元素背景值取中国土壤背景值,分别为 583、74.2、61、22.6、26、26.9、12.7、0.097 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [5].

忻州市大气颗粒物重金属潜在生态危害系数及生态风险指数见表 4. 对比表 3 可知,在 TSP 中,Cd 的生态危害程度为极强,Cu 的生态危害程度为强,Co 的生态危害强度为较强,Pb 的生态危害强度为中,As、Cr、Zn、Ni、Mn 5 种重金属的危害程度为轻微. 忻州市大气颗粒物中重金属生态危害的大小依次为 $\text{Cd} > \text{Cu} > \text{Co} > \text{Pb} > \text{As} > \text{Cr} > \text{Zn} > \text{Ni} > \text{Mn}$. 在 PM_{10} 中,Cd、Cu 危害程度为极强,Pb 的生态危害强度为较强,Co、Zn、Cr 的生态危害强度为中,As、Ni、Mn 3 种重金属的危害程度为轻微. 重金属的生态危害依次为 $\text{Cd} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Co} > \text{Zn} > \text{Cr} > \text{As} > \text{Ni} > \text{Mn}$. 总体来看,TSP 和 PM_{10} 的潜在生态风险指数均为极强,且 PM_{10} 与 TSP 相比明显具有较强的生态危害性,应进一步分析 PM_{10} 中重金属的主要来源.

表 4 忻州市大气颗粒物重金属潜在生态危害系数及生态风险指数

Table 4 The potential ecological risk index of heavy metals in particulate matters

颗粒物	潜在生态风险系数 E_i^p									潜在生态风险指数 RI
	Mn	Zn	Cr	Cu	Pb	Ni	Co	As	Cd	
TSP	2.29	25.23	31.66	279.17	44.69	18.38	97.78	33.06	533.97	1067.13
PM_{10}	2.27	46.86	42.96	578.55	89.02	12.09	67.70	20.76	687.34	1548.43

2.2 主要来源解析

2.2.1 富集因子分析

富集因子(Enrichment Factor, EF)法^[17]用于研究大气气溶胶粒子中元素的富集程度,判断和评价气溶胶粒子中元素的来源(自然来源或人为来源). 选择一种相对浓度稳定的元素 R 作为参比元素,参比元素有 Ti、Fe、Al 和 Si. 富集因子(EF)的定义如下:

$$EF_i = \frac{(C_i/C_r)_{\text{环境}}}{(C_i/C_r)_{\text{背景}}}$$

式中, C_i 和 C_r 分别为元素 i 和参比元素的质量浓度; C'_i 和 C'_r 是元素 i 和参比元素的背景值.

本研究用 Si(29.56%) 作为参比元素,背景值取中国土壤中各元素的背景值,Ti、Al、Mg、Ca、Na、K、Cu、V、Fe 的背景值分别为 0.38%、6.62%、0.78%、1.54%、1.02%、1.86%、22.6、82.4 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、2.94%^[18]. 忻州市环境空气 PM_{10} 中各元素的富集因子见图 4.

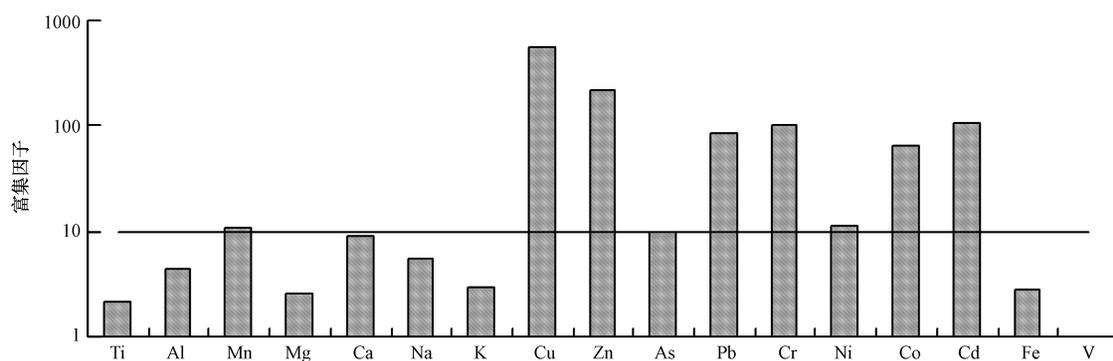


图 4 忻州市 PM_{10} 中 17 种元素的富集因子

Fig. 4 Enrichment factors of 17 elements in PM_{10} in Xinzhou

若元素的富集因子小于 10,则认为相对于地壳(或土壤)来源没有富集,主要是由土壤或岩石风化的尘埃造成;如富集因子增大到 $10-1 \times 10^4$ 范围时,则认为该元素被富集,与人类各种活动的不同贡献有关^[19]. 由图 4 可见, PM_{10} 中富集因子大于 10 的元素包括 Mn、Cu、Zn、Pb、Cr、Ni、Co、Cd,表明 PM_{10} 中这几种元素主要是人为源贡献的,是污染元素,而其他 9 种元素富集因子均小于 10,相对于地壳未富集,主要来源于自然源.

2.2.2 主因子分析

主因子分析(Principal component analysis, PCA)是用少数几个因子去描述多个指标或因素之间的联系,即将相关性较密切的几个变量归在同一类中,每一类变量就成为一个因子,从而以较少的几个因子反映大部分信息^[19].

本研究采用 SPSS 软件对忻州市大气颗粒物 PM₁₀ 中 18 种元素的浓度进行最大方差旋转因子分析,各元素与主因子的相关系数见表 5.

表 5 忻州市大气环境 PM₁₀ 中 18 种元素最大方差旋转因子分析
Table 5 Orthogonal rotation-Varimax matrix of 18 elements in PM₁₀ in Xinzhou

元素	主因子 1	主因子 2	主因子 3
Si	0.584	0.394	-0.160
Ti	0.452	0.288	0.213
Al	0.747	0.664	-0.038
Mn	0.758	0.336	0.559
Mg	0.160	0.927	0.339
Ca	0.301	0.442	0.845
Na	0.255	0.909	0.329
K	0.097	0.987	0.113
Cu	0.410	0.390	0.824
Zn	-0.186	-0.247	-0.951
As	0.692	-0.719	0.030
Pb	-0.687	0.057	-0.724
Cr	-0.207	-0.612	0.764
Ni	0.447	0.105	-0.888
Co	0.967	-0.004	0.254
Cd	0.965	0.258	0.050
Fe	0.389	0.921	0.027
V	0.665	0.725	-0.182
方差贡献率/%	56.30	23.88	19.78
累计贡献率/%	56.30	80.18	99.96

(1) 主因子 1 与元素 Co 和 Cd 的相关性很高,而 Co、Cd 富集因子远远大于 10,说明主因子 1 代表了人为因子.煤燃烧排出的烟气、有色金属冶炼排出的“三废”和某些汽油润滑油中的 Cd 是大气中 Cd 的重要来源^[5].Co 在冬季浓度明显大于夏季,可能与冬季燃煤有关,故主因子 1 代表了煤烟尘和工业粉尘,贡献率达 56.30%,为主要污染源.

(2) 主因子 2 与元素 K、Mg、Fe、Na 的相关性很高,而这些元素在地壳中存在且富集因子均小于 10,主要来源于自然源,故主因子 2 代表了土壤风沙尘,贡献率达 23.88%.

(3) 主因子 3 与元素 Ca 和 Cu 的相关性很高,其中 Ca 是建筑水泥尘的标识元素,而机动车尾气排放是环境空气中 Cu 的重要来源^[20],故主因子 3 代表了建筑水泥尘和机动车尾气,贡献率达 19.78%.

3 结论

(1) 忻州市环境空气 TSP 和 PM₁₀ 中 18 种元素浓度分别为 47662.2 ng·m⁻³ 和 17546.4 ng·m⁻³,其中,PM₁₀ 中 Cu 和 Co 的浓度较高,但 Cu 浓度未超过环境水平目标值的健康指标,Co 浓度未超过环境水平目标值的生态指标.

(2) 元素 Mg 和 Ca 在 TSP 中夏季浓度较高,可能是建筑施工产生的扬尘所致;所有元素在 PM₁₀ 中冬季浓度均高于夏季;元素 Co 在冬季与夏季的浓度水平存在明显差别,在 TSP 和 PM₁₀ 中的比值分别为 60.4 和 14.8.元素 Pb 在点位 3 呈现较高水平,主要是煤烟尘所致;元素 Co 在点位 1 浓度最高,约为最小值(清洁区)的 2.3 倍(TSP)和 4.6 倍(PM₁₀),工业活动和冬季燃煤是该点位的主要污染源.元素的时空分布存在明显差异.

(3) 忻州市市区环境空气 TSP 中重金属生态危害的大小依次为 $Cd > Cu > Co > Pb > As > Cr > Zn > Ni > Mn$; 在 PM_{10} 中为 $Cd > Cu > Pb > Co > Zn > Cr > As > Ni > Mn$. TSP 和 PM_{10} 的潜在生态风险指数均为极强, 且 PM_{10} 与 TSP 相比具有更强的生态危害性.

(4) 富集因子分析表明, 忻州市环境空气 PM_{10} 中 Mn、Cu、Zn、Pb、Cr、Ni、Co、Cd 与人类的各种活动有关. 主因子分析进一步表明 PM_{10} 中元素的主要排放源包括: 煤烟尘和工业粉尘、土壤风沙尘、建筑水泥尘和汽车尾气, 贡献率分别为 56.30%、23.88%、19.78%, 因此应进一步加强有关这 3 类源的控制, 以有效降低大气颗粒物对环境空气的污染.

参 考 文 献

- [1] 杨卫芬, 银燕, 魏玉香, 等. 霾天气下南京 $PM_{2.5}$ 中重金属元素污染特征及来源分析[J]. 中国环境科学, 2010, 30(1): 12-17
- [2] 董尧青, 银燕, 钱凌, 等. 南京地区霾天气特征分析[J]. 中国环境科学, 2007, 27(5): 584-588
- [3] 高健, 张岳, 王淑兰, 等. 北京 2011 年 10 月连续灰霾过程的特征与成因初探[J]. 环境科学研究, 2012, 25(11): 1201-1207
- [4] 杨仪方, 钱枫, 谢婷, 等. 北京市春季大气颗粒物污染特性研究[J]. 环境污染与防治, 2009, 31(7): 44-47, 51
- [5] 孙龙仁, 郑春霞, 王文全, 等. 乌鲁木齐大气 PM_{10} 中重金属元素的浓度和富集特征[J]. 新疆农业科学, 2009, 46(3): 582-588
- [6] 杨勇杰, 王跃思, 温天雪, 等. 北京市大气颗粒物中 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 质量浓度及其化学组分的特征分析[J]. 环境化学, 2008, 27(1): 117-118
- [7] 赵金平, 谭吉华, 毕新慧, 等. 广州市灰霾期间大气颗粒物中无机元素的质量浓度[J]. 环境化学, 2008, 27(3): 322-326
- [8] 董海燕, 谷金霞, 姜维, 等. 天津市颗粒物中元素化学特征及来源[J]. 环境监测管理与技术, 2012, 24(1): 25-28
- [9] 朱伟, 边博卜, 阮爱东. 镇江城市道路沉积物中重金属污染的来源分析[J]. 环境科学, 2007, 28(7): 1584-1589
- [10] 韦炳干, 姜逢清, 李雪梅, 等. 城市不同功能区道路沙尘重金属污染地球化学特征与评价[J]. 环境化学, 2009, 28(5): 721-727
- [11] 牟林, 彭林, 任照芳, 等. 滁州市大气 PM_{10} 中化学元素分布特征[J]. 环境工程学报, 2011, 5(3): 619-622
- [12] 胡冬梅, 张鹏九, 彭林, 等. 晋城市区空气中 PM_{10} 的化学组成特征[J]. 环境化学, 2012, 31(3): 390-391
- [13] 余涛, 程新斌, 杨忠芳, 等. 辽宁省典型地区大气颗粒物重金属元素分布特征及对土地质量影响研究[J]. 地学前缘, 2008, 15(5): 146-153
- [14] 杨勇杰, 王跃思, 温天雪, 等. 鼎湖山 $PM_{2.5}$ 中化学元素的组成及浓度特征和来源[J]. 环境科学, 2009, 30(4): 988-992
- [15] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2): 112-115
- [16] 林海鹏, 武晓燕, 战景明, 等. 兰州市某城区冬夏季大气颗粒物及重金属的污染特征[J]. 中国环境科学, 2012, 32(5): 810-815
- [17] 陈怀满, 郑春荣, 周东美, 等. 土壤中化学物质的行为与环境质量[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 9-10, 46-47
- [18] 樊曙光, 樊韬, 严培君, 等. 银川市 $PM_{2.5}$ 重金属元素的环境污染特征分析[J]. 中国沙漠, 2006, 26(2): 291-294
- [19] 邹本东, 徐子优, 华蕾, 等. 因子分析法解析北京市大气颗粒物 PM_{10} 的来源[J]. 中国环境监测, 2007, 23(2): 79-85
- [20] Duan Jingchun, Tan Jihua. Atmospheric heavy metals and arsenic in China: Situation, sources and control polities [J]. Atmospheric Environment, 2013, 74: 93-101