# 城市区域近地表灰尘及重金属沉降垂向季节变化

# 李晓燕 张舒婷

#### (贵州师范大学地理与环境科学学院,贵阳 550001)

摘要:随着城市高层建筑的出现,人类日常生活的垂向空间范围逐渐向上延伸,近地表灰尘及重金属沉降垂向分布的季节特 征值得关注.本研究分别在春、夏、秋、冬四季采集贵阳市某生活-文教区近地表不同空间高度平台上的灰尘样品,分析灰尘 沉降通量及灰尘中 Ca、Fe、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 含量,探讨灰尘沉降通量及元素含量随空间高度的变化,揭示区域近地 表灰尘及重金属沉降垂向分布的季节变化特征.结果表明,空间高度灰尘沉降通量季节变化总体上表现为冬季灰尘沉降通量 最大,春季次之,夏季最低;冬季灰尘沉降通量沿垂向空间高度的分布差异最大,其次是夏季,春秋两季灰尘沉降通量垂向空 间差异较小;季节变化对低层空间平台灰尘沉降通量影响大于高层空间;春季灰尘中元素含量最高,秋季灰尘重元素含量相 对较低;元素含量随时空变化最大的是 Zn,变化较小的是 Ca.冬、春季节大气逆温层可能是灰尘沉降量和 Pb、Zn 等元素含 量升高的原因之一.

关键词:重金属;灰尘;垂向;季节;城市 中图分类号:X53 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2015)06-2274-09 DOI:10.13227/j.hjkx.2015.06.048

# Seasonal Provincial Characteristics of Vertical Distribution of Dust Loadings and Heavy Metals near Surface in City

# LI Xiao-yan , ZHANG Shu-ting

(School of Geographical and Environment Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

**Abstract**: With the emergence of urban high-rise building, the vertical space of human daily life gradually extended upward. Seasonal characteristics of vertical distribution of dust loadings and heavy metals near surface are remarkable. In this study, we collected dust deposited on the windowsill at different space height (1th-8th floor) from three buildings in Guiyang city during spring, summer, autumn and winter, and analyzed the deposition fluxes of dust and elements including Ca, Fe, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn. The results showed that: the total changing trend of vertical distribution of dust loadings was that the deposition fluxes of dust in winter were the highest, followed by those in spring, and the deposition fluxes of dust in summer were the lowest. The degree of variation on dust loadings dependent on the change of elevation was the highest in winter, followed by that in summer, and was relatively lower in spring and autumn. The effect on dust loadings by seasonal changing was relatively heavier on windowsill on the lower level than on the higher level. The levels of elements were the highest in spring dust, while those in autumn were relatively lower. Among the 8 elements, the variability of Zn in dust related to space time variation was the most obvious, and that of Ca was weaker. The atmospheric inversion condition might be one of the reasons that improved the deposition fluxes of dust and the contents of Pb and Zn in dust during winter and spring.

Key words: heavy metal; dust; vertical; seasons; city

随着城市高层建筑的出现,人类日常生活的垂 向空间范围逐渐向上延伸<sup>[1]</sup>,工作或生活在不同楼 层的人群处在偏离地面的空间环境中,受到空间层 段环境质量的影响.位于不同空间高度的建筑窗台 和其它平台上的灰尘是室内环境的污染来源之一, 随着气流的运动或人为扰动,灰尘有可能随时进入 室内,增加室内灰尘及某些有害物质如重金属等的 累积,从而导致对人体更大的危害<sup>[2]</sup>.对地表灰尘 中重金属的研究,国内外已有许多报道,研究表明灰 尘中重金属累积不容忽视<sup>[3~6]</sup>,但对近地面垂直空 间高度的灰尘重金属研究还极少报道.灰尘及重金 属在环境中的累积是一个复杂的动力学过程<sup>[7]</sup>,垂 直空间平台上的灰尘主要来自空中飘尘的沉降<sup>[8]</sup>, 飘尘中既有地表扬起的细粒土壤和灰尘,也有其它 人类活动如交通、工业等排放的颗粒物,另外也不 可避免地受到人群流动的携带和搬运以及生活物质 的输入,但从理论上讲人群流动对其的影响远远小 于对地表灰尘的影响.季节变化使大气具有不同的 季节运动特征,直接影响大气中飘尘的迁移和沉 降<sup>[9,10]</sup>,对空间平台上灰尘的沉降具有可能影响.因 此,近地表灰尘及重金属沉降垂向分布的季节变化 是一个有趣而值得关注的问题.

收稿日期: 2014-11-18; 修订日期: 2014-12-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41161079)

作者简介: 李晓燕(1966~), 女 博士 教授,主要研究方向区域环境 质量, E-mail: lxyan421@163.com

贵阳市是我国西南地区贵州省省会城市,城区 面积小,人口密度高、高层建筑发展迅速.同时,贵 阳城区三面环山,城区地形复杂,大气污染物迁移受 地理形势和季节变化影响显著.本研究以贵阳市中 心城区某文教生活区为研究区域,分别在春、夏、 秋、冬四季采集不同空间高度平台的灰尘样品,分 析城市区域近地表灰尘沉降通量及灰尘中常量元素 Ca、Fe 和微量重金属Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 含 量 探讨灰尘及重金属元素的沉降通量随空间高度 变化的分布,揭示区域近地表灰尘及重金属沉降垂 向分布的季节变化特征,以期为更大尺度的城市近 地表灰尘及重金属沉降垂向分布研究和缓解、治理 灰尘重金属累积提供科学依据.

- 1 材料与方法
- 1.1 样品采集

分别在冬季(12月~次年3月)、春季(4~5

月)、夏季(6~8月)、秋季(9~11月)这4个季节 采集灰尘样品.采样点为贵阳市3栋高度分别为7、 8和16层的高层建筑的公共走道窗台(图1),为避 免下雨对沉降灰尘的影响,选择1~8层上方具有一 定宽度窗沿的窗台作为采样点采样区域.初次采样 时(冬季)先划定采样区域,打扫干净,记录采样面 积和开始采样时间,待初次采样结束后,清扫所有采 样区域的灰尘,装入样袋,记录采样结束时间(同时 也是下一次采样开始时间),开始下一次样品采集. 以后多次灰尘采集均在此划定范围内进行.采集灰 尘时,用塑料毛刷和塑料铲收集采样区域内的所有 灰尘,装入纸袋保存.共得到92份有效样品(质量 ≥0.5g)其中1~7层有84份灰尘样品 8层有8 份灰尘样品.所有样品带回实验室常温干燥后全部 过105μm筛,备用.

表1列出了3个采样点的周边环境特征及自身 建筑特点.



#### 图1 灰尘采样区域示意

Fig. 1 Dust sampling sites

#### 表1 采样区域环境特征

Table 1 Environmental characteristics of the sampling sites

采样点(楼层)	周边环境特征	建筑特征
样点 1(16 层)	位于住宅区 毗邻相宝山 ,车流量不大 ,距离采样区 20 m 处有生活垃圾池 ,距离采样区 300 m 处有建筑施工地	坐北朝南 房屋年龄小于10а2~3层窗台的防盗网 生锈腐蚀较严重 楼道卫生条件良好
样点 2(8层)	位于住宅区 ,车流量不大 ,距离采样区 10 m 处有生活垃 圾池( 定时会焚烧)	坐北朝南,房屋年龄15 a,墙体脱落较严重,下水道 铁管经过窗台边,铁管生锈腐蚀严重,楼道堆砌杂物 较乱,楼道卫生条件较差
样点 3(7层)	位于城乡结合部,住宅区交通区混杂,交通拥挤,人口流 动性强,距离采样区 100 m 处有垃圾中转站	坐北朝南 屋年龄大于 15 a,墙体重新粉刷过,楼道 卫生条件一般

#### 1.2 化学分析

样品采用 HNO<sub>3</sub>-HF-HClO<sub>4</sub> 混溶,纯水定容, ICP-MS(IRIS Intrepid Ⅱ)测定.分析过程中分别按 原始样品 10% 的比例插入国家土壤标准参比物质 (GSS-4) 和重复样进行质量控制.8 种元素标准样 和重复样合格率均为 100%.

#### 1.3 数据处理

每层楼灰尘沉降量和每个元素含量均来自3份 数据(3 栋楼 8 层为2 份数据)的几何均值.文中其 它数据均值全是在此数据基础上的几何均值.采用 SPSS 软件对数据进行正态检验和差异性分析.用 单样本 K-S 检验方法对数据进行正态检验,若 PK-S >0.05 表示样本服从正态分布.对不服从正态分布 的数据进行对数转换后,均符合正态分布,使用服从 正态分布的数据进行差异显著性检验和元素相关性 分析,差异显著性检验P<0.05,表示两样本数据具 有显著性差异;相关性检验P<0.05,表示两元素 之间具有显著性相关关系.

灰尘沉降通量计算公式如下:

$$Q = \frac{M}{S \cdot D} \tag{1}$$

式中,Q为灰尘单位时间单位面积的沉降通量 g·(d·m<sup>2</sup>)<sup>-1</sup>; *M*为一定时间下灰尘沉降量 g; *S*为 灰尘沉降的面积 m<sup>2</sup>; *D*为灰尘沉降的时间 d.

灰尘中重金属沉降通量计算公式如下:

 $F_i = C_i \cdot Q$  (2) 式中,  $F_i$  为灰尘中 *i* 元素的沉降通量, Ca 和 Fe 元素 的单位为mg·(d·m<sup>2</sup>)<sup>-1</sup>,其它元素为µg·(d·m<sup>2</sup>)<sup>-1</sup>;  $C_i$  为灰尘中 *i* 元素的含量, Ca 和 Fe 元素的含量单位 为mg·g<sup>-1</sup> 其他元素含量单位为µg·g<sup>-1</sup>; Q 为灰尘单 位时间单位面积的沉降通量 g·(d·m<sup>2</sup>)<sup>-1</sup>.

2 结果与分析

# 2.1 灰尘沉降通量季节分布

表 2 显示,近地表灰尘沉降通量季节变化总体 上表现为冬季灰尘沉降通量最大,春季次之,夏季最 低.差异性分析显示冬季灰尘沉降通量显著高于夏 季(*P*=0.049)和秋季(*P*=0.042).

Table 2 Deposition fluxes of dust in different seasons								
楼层	灰	赤已府						
	春季	夏季	秋季	冬季	又开反			
1	9.62	5.48	6.52	16.6	0.45			
2	7.56	4.68	4.59	13.1	0.46			
3	5.72	8.35	4.04	8.55	0.28			
4	5.20	1.78	3.65	6.03	0.39			
5	5.82	2.93	3.76	2.96	0.30			
6	5.81	2.78	3.49	6.95	0.36			
7	5.04	3.10	3.34	7.30	0.36			
8	1.30	1.17	1.54	1.84	0.17			
平均	5.76	3.78	3.87	7.92				
变异度	0.38	0.57	0.34	0.58				

表2 不同季节灰尘沉降通量

比较不同空间高度(楼层)灰尘沉降通量变异 度,发现冬、夏变异度较大(0.57~0.58) 春秋变异 度较小(0.34~0.38),冬季灰尘沉降通量在1~5 层范围内随楼层的增加明显降低;春秋两季灰尘沉 降通量随高度的变化情况极为相似,都表现为1层 略高 & 层略低,其它楼层灰尘沉降通量基本一致; 夏季在第3层高度上灰尘沉降通量急剧升高,这主 要是样点1的高值导致的平均值的偏高,其它楼层 高度灰尘沉降通量变化与春、秋类似.说明冬季灰 尘沉降通量沿垂向空间高度的分布差异最大,其次 是夏季,春秋两季灰尘沉降通量垂向空间差异较小.

一定空间高度不同季节降尘通量差异(变异度)总体上随楼层的增加而降低(表2)即1层的灰尘沉降通量随季节变化分布差异最大,而在8层高度上季节变化引起的降尘通量差异极小.季节变化对低层空间平台灰尘沉降通量影响大于高层空间. 2.2 不同空间高度灰尘元素含量季节分布及差异 2.2.1 不同空间高度灰尘元素含量季节分布

从各元素含量绝对值比较,可知,不同空间高度 上灰尘中各元素含量季节分布大致分为3种情况 (图2):第一,Ca、Pb、Zn在春冬两季灰尘中的含量 总体上高于夏、秋两季,夏秋季5层高度上灰尘Zn 含量异常高,是由于样点2的异常高值所致;第二, Fe、Cd、Ni在春季灰尘中的含量明显高于其它季 节,且都在高层空间表现明显,Fe在低层空间夏季 次尘中含量也相对较高,春、夏季含量明显高于秋、 冬两季,Ni在6层高度灰尘中冬季含量较高;第三, Cu、Cr在低层空间夏季含量较高,高层空间变化较 为复杂,季节分布规律不明显.Fe、Ni、Pb、和Zn在 不同高度灰尘中的含量最低值均出现在秋季,Ca的 最低值出现在夏季,Cd和Cu含量总体上出现在冬 季,而Cr含量最低值季节分布不明显.

2.2.2 不同季节元素含量在空间高度上的分异

各楼层高度 8 种元素含量变异度(表 3) 总体表 现为春季最高,其次是秋季,夏、冬季较低,其中 Ca、Fe、Cd、Cu、Ni 和 Pb 这 6 种元素都显示春季 元素含量空间变异度最大,说明春季导致元素含量 在不同空间高度的分异最明显.春、夏、秋、冬四季 元素含量空间变异度最大的分别是 Cd、Zn、Zn 和 Cu,说明对 8 种元素来说,春季 Cd 在不同空间高度 的含量分异最明显,冬季 Cu 在不同空间高度的含 量分异最明显,而夏、秋两季元素不同空间高度含 量分异最明显的均为 Zn;变异度最小的元素春季 为 Cr,其它三季均为 Ca,说明 Ca 在不同空间高度的



图 2 不同空间高度灰尘元素含量季节分布特征 Fig. 2 Distribution of the concentration of elements in dust at different height

含量分异最小,其次是 Cr. 整体来看,春季导致各元 素含量在不同空间高度的分异最明显,而重金属含 量随时空变化最大的是 Zn,最小的是 Cr,常量元素 Ca 在 8 种研究元素中随时空的变化最小.说明 Zn 元素受人类活动影响较大,Cr 元素受人类活动影响 较小. 2.2.3 不同空间高度元素含量分异季节特征

计算每层高度上春、夏、秋、冬四季元素含量 的变异度 作图 3.

8 种元素在春、夏、秋、冬四季的含量差异随 空间高度的变化表现出 3 种趋势. 第一,Ca、Cr 和 Ni在四季灰尘中含量差异总体上随空间高度变化

表3 不同季节各元素在空间高度灰尘中含量变异度

Table 3 Variability of elements in dust related to height variation during different seasons

项目	Ca	Fe	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	均值	最低元素	最高元素
春	0.161	0.344	0.394	0.107	0.300	0.245	0.300	0.266	0.265	Cr	Cd
夏	0.111	0.269	0.170	0.250	0.166	0. 181	0.256	0.456	0.232	Ca	Zn
秋	0.146	0.321	0.257	0.268	0.201	0.190	0.164	0.421	0.244	Ca	Zn
冬	0.051	0.189	0. 191	0.187	0.296	0. 197	0.258	0.229	0.236	Ca	Cu
均值	0.117	0. 281	0.253	0.203	0.241	0.203	0.245	0.343	0.238		
Min	冬	冬	夏	春	夏	夏	秋	冬			
Max	春	春	春	秋	春	春	春	夏			

不大; 第二,Fe、Cd 和 Pb 在四季灰尘中含量差异随 空间高度的升高呈现明显的上升趋势,只是 Cd 在 第5 层高度上含量变异度有一个低值; 第三,Cu 和 Zn 四季含量变异度在空间高度上的变化较为复杂, Cu 含量差异在1~6 层呈现明显的随高度升高,差 异明显降低的趋势,但在7~8 层高度上含量差异又 急剧上升,Zn 含量差异除5、7 层较高外,其它空间 高度上的含量差异变化不大. 总体上 Cd、Pb 和 Zn 在灰尘中四季的含量差异受空间高度的变化影响 较大.



Fig. 3 Variability of elements in dust related to season variation at different height

# 2.3 元素沉降通量季节特征

图 4 显示灰尘中 8 种元素沉降通量四季分布特 征总体上是:随着楼层上升,元素沉降通量下降,总 体上1 层最高 8 层最低,但各元素沉降通量在 5 层 高度上都有一个低值,接近 8 层的水平.

元素沉降通量季节变化的趋势是冬、春>夏、 秋,冬季最高,夏季最低.其中常量元素 Ca、和重金 属元素 Cr、Zn 表现明显,尤其是冬季1~5 层表现 最为明显;常量元素 Fe 沉降通量除冬季表现为明 显的随楼层上升,元素沉降通量下降外,其它季节各 空间高度沉降量变化没有明显统一的趋势;除 Cd 和 Pb 外 其他元素在四季的沉降通量随高度的变异 度表现为低层大于高层.

多数元素在夏季3 层高度上沉降通量与上下空 间高度相比,突然升高,这是由于这一时空节点上灰 尘沉降通量异常高所致,这也使得多数元素在夏季 沉降通量随空间高度的变异度最大,如果不考虑此 点的异常,则总体上是在冬季各元素沉降通量随空 间高度的变异度最大.

# 3 讨论

## 3.1 不同季节灰尘沉降通量差异分析

张振江等<sup>[11]</sup>对天津市大气颗粒物的研究发现 天津冬季室外空气中颗粒物含量明显高于夏季. Lee 等<sup>[12]</sup>研究发现 PM 浓度在冬季最高,在夏季最低. 本研究显示空间高度灰尘沉降通量总体上由高到低 的顺序是冬 > 春 > 秋 > 夏. 冬季灰尘沉降通量高,说 明冬季大气中颗粒物含量可能相对较高.

空气运动是影响大气颗粒物迁移的主要因素<sup>[13]</sup>.颗粒物季节分布特征可能与大气逆温层有关,逆温层厚度越大,污染颗粒物越不易向上扩散和稀释,局部颗粒物含量越高,越容易沉降下来<sup>[10]</sup>.贵阳市逆温层平均厚度分别是,冬季最大,为414 m, 夏季最小,为296 m,春季和秋季分别为378 m和 304 m<sup>[14]</sup>.逆温层厚度的差异趋势与本研究灰尘沉 降通量的季节差异完全吻合.说明大气逆温层可能 是影响空间高度灰尘沉降通量不可忽视的原因 之一.

另外,天气形势也可以影响空中颗粒物的迁移. 焦艳等<sup>[15]</sup>对上海市春季大气污染研究发现污染过 程形成于稳定天气形势下污染物的积累,结束于短 时降水和冷空气南下的共同作用.本研究在采样期 间,对不同天气进行了统计,图5表示不同天气占采 样期所有天数的百分比.显然,冬、春季阴天所占比 例明显高于夏、秋两季,说明阴天所占比例的变化 与灰尘沉降通量变化一致,即采样期阴天越多,灰尘





沉降通量可能越高; 四季采样期晴天所占比例由高 到低的顺序为夏 > 秋 > 春 > 冬,正好与灰尘沉降通 量变化趋势顺序相反,说明晴天越多,灰尘沉降通量 可能越少; 另外,韩燕等<sup>[16]</sup>报道降水可降低空气中 颗粒物的浓度.而本研究显示灰尘沉降通量高的冬、 春季雨天数比例高于沉降通量低的夏、秋季,说明 即使有雨水的冲刷,但并未改变冬、春季灰尘沉降 通量高的结果.这可能是由于降水可降低空气中颗 粒物的浓度是针对同一时段降雨前后比较而言,而 本研究时间跨度为全年4个季节,每个季节空气中 颗粒物含量的平均水平本身存在差异所致.另外,天 气形势只是影响大气颗粒物迁移行为的因素之一, 降雨只是天气形势的一种表现.而影响大气颗粒物 迁移行为的因素是大气的机械运动<sup>[17]</sup>,也就是说逆 温层可能是导致这种颗粒物沉降通量呈现季节分布 的主要原因.高温有利于颗粒物扩散,低温容易形成 逆温层<sup>[18]</sup>.曾光善等<sup>[14]</sup>统计分析出贵阳冬季出现 逆温的几率最大,其频率为67%,次之为春季,频率 为 61%;而且冬季空气最大混合层高度最小,极易 发生污染物聚集现象<sup>[19]</sup>.

不同空间高度灰尘沉降通量变异度研究显示: 夏、冬两季变异度较大,春、秋两季变异度较小,这 可能还是与天气季节性差异有关.刘咸德等<sup>[20]</sup>对北 京地区大气颗粒物污染的风向因素研究结果表明污 染物重金属浓度随风向变化明显.贵阳市常年以东 风为主,兼有东南、东北和南风,采样的3栋楼的窗 台均朝南向,可能受到这几种风的干扰.将采样期四 季有风的天数进行了统计.春、夏、秋、冬四季有风 的天数分别为48、86、63、81d,占采样期总天数的 比例分别为76.7%、96.3%、86.3%和91.0%,夏、 冬两季有风天数比例明显高于春、秋两季.此外, Chen 等<sup>[21]</sup>研究发现空气中总悬浮颗粒物的干沉降 率与风速呈正相关.因此,风的干扰可能是不同空间 高度灰尘沉降通量变异度增大的原因之一.当然也 不可避免地会受到些许人为干扰.





# 3.2 不同季节元素含量差异分析

Ca、Pb、Zn 在春冬两季的含量总体上高于夏、 秋两季 这与灰尘沉降通量季节变化特征相似,灰尘 沉降通量季节变化主要受逆温层影响,逆温层多发生 在冬、春两季<sup>[22]</sup>,这也说明逆温层也是影响含 Ca、 Pb、Zn 的颗粒物沉降变化的主要因素之一. 逆温层 对 Ca、Pb、Zn 颗粒物沉降的影响可能大于其它元 素. 样点附近环境对灰尘元素含量也会有一定影响. 样点 2 和样点 3 所处的居民区仍有燃煤取暖的现象 存在 本研究组前期研究<sup>[23]</sup>表明燃煤中 Pb、Zn 主要 富集在煤尘中,贵阳市燃煤取暖时段一般为 12 月至 次年 4 月底,正好与本研究的春、冬采样时间吻合, 因此 样点周边居民燃煤取暖也可能是导致春、冬空 间降尘中 Pb、Zn 等元素含量较高的原因之一.

另外,本研究组<sup>[24]</sup>曾对贵阳市地表灰尘重金属 四季时空动态变化进行过研究 结果显示贵阳市地 表灰尘重金属含量春、冬季高于夏、秋季,在本研 究中 不同空间高度平面灰尘中 Ca、Pb、Zn 含量的 季节分布与地表灰尘相应元素含量季节变化相似. 另外 研究显示春季空间高度灰尘中 Fe、Ni、Cd 含 量明显高于其它季节 除了人为干扰外 也可能说明 春季有利干近地表大气中常量元素 Ca、Fe 及微量 重金属 Cd、Pb 和 Zn 颗粒物的积累和沉降. 邱媛 等<sup>[25]</sup>研究显示降雨频率高可能加剧城市建筑物、 装饰材料的腐蚀作用,从而增加降尘中铅负荷.样 点3建筑墙体隔几年会重新粉刷,有颜色的涂料也 是重金属 Cr 和 Pb 来源之一<sup>[26]</sup>.本研究对采样期 天气的记录显示春季降雨量天数最多,有风天数最 少 那么是否含这些元素的颗粒物的沉降除了受逆 温层的影响外 春季多雨少风的气候也影响了元素 颗粒物的沉降还有待进一步研究.

#### 3.3 降尘中元素含量时空变化差异

Ca、Fe 为常量元素,理论上其受人类活动影响 导致的空间变异度应低于 Pb、Zn 等城市元素.但本 研究结果显示 Fe 在不同空间高度上的含量也存在 较大差异,这可能与样点 2 的窗台边腐蚀的下水道 铁管有一定关系(表1).样点 2 夏季 3 层灰尘的 Fe 含量异常高,夏季温度相对较高,有利于旧铁管的腐 蚀,随着风的作用,腐蚀碎屑沉降到最近的平台.Ca 含量随空间高度的变化相对较小.倪刘建等<sup>[27]</sup>研究 表明大气降尘中 Ca 元素部分来源于城市建筑尘和 工业尘.

空间高度灰尘中 8 种元素含量变异度总体表现 为春、秋高,夏、冬低,这与灰尘沉降通量变化规律 相反. 说明虽然夏、冬不同空间高度灰尘沉降通量 差异大 但灰尘中元素含量相对稳定 不同空间高度 灰尘中元素来源较为单一;而春、秋两季,特别是 春季 灰尘沉降通量差异小 但灰尘中元素含量在不 同空间高度波动大.灰尘元素含量变异度与元素来 源复杂程度有一定关系. 将各元素含量数据作偏相 关分析(表4) 结果显示4 个季节 Cr-Cu-Ni 均互为 相关,说明降尘中这3种元素的来源较为一致,而且 季节差异不明显,因而其时空变异度相对较小(表 3). Ca、Fe 为常量元素 除春季外 夏、秋、冬三季 的 Ca、Fe 均具有相关性,而春季 Ca、Fe 没有表现 出明显的相关性,说明春季灰尘中元素受人为干扰 和外界侵入的几率大于其它3个季节,来源相对复 杂 或者大气本身不同空间高度颗粒物中元素含量 也存在差异,因而,导致春季灰尘中元素含量在不同 空间高度变异度最大.四季各元素含量多与 Ca、Fe 相关,冬季各元素之间除 Cr-Cu-Ni 均互为相关外, Cd-Ni-Pb 也互为相关,其相关性范围大于其它季 节,说明冬季降尘中各元素来源互为交叉,其偶然输 入几率较小,因而冬季各元素时空变异度最小.另 外,春季和冬季 Zn 含量数据与其它元素没有任何相 关性,夏、秋季 Cd 含量与其它元素也没有相关性, Zn、Cd 在灰尘中四季的含量差异受空间高度变化 的影响较大(图3),说明降尘中 Zn 和 Cd 来源最为 独特和复杂,或受影响因素较多,两元素偶然输入的 几率较大.

Table 4     Correlation between elements in dust in different seasons										
季节		Ca	Fe	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	季节
春	Са		0.000					0.046	0.045	
	Fe			_		0.002	0.000	0.004		
	Cd	0.006	0.006		_					
	Cr		0.041			0.000	0.000			百
	Cu		0.000		0.000		0.000			×.
	Ni		0.000		0.001	0.000		_		
	Pb		0.000	0.045		0.031			_	
	Zn									
	Ca		0.000	0.000			0.004	0.020		
	Fe	0.000		0.000	0.032	0.024	0.000	0.000		
秋	$\operatorname{Cd}$					0.027	0.000	0.000		
	Cr					0.001	0.000			冬
	Cu		0.000		0.000		0.000			
	Ni	0.018	0.000		0.000	0.000		0.000		
	Pb	0.002	0.002		0.012	0.025	0.006		_	
	Zn	0.027	0.035							

1) P < 0.05 表示具有相关性

#### 4 结论

(1)空间高度灰尘沉降通量季节变化总体表现 为冬季灰尘沉降通量最大,春季次之,夏季最低.冬 季灰尘沉降通量沿垂向空间高度的分布差异最大, 其次是夏季,春秋两季灰尘沉降通量垂向空间差异 较小.季节变化对低层空间平台灰尘沉降通量影响 大于高层空间.

(2) 春季灰尘中元素含量最高,秋季灰尘重元 素含量相对较低. 春季导致元素含量在不同空间高 度的分异最明显;元素含量随时空变化最大的是 Zn 其次是 Cd ,变化较小的是 Ca. Cd、Pb 和 Zn 在 灰尘中含量的季节差异受空间高度变化的影响 较大.

(3)空间高度灰尘中8种元素沉降通量季节变化的趋势是冬、春>夏、秋,冬季最高,夏季最低, 其中冬季各元素沉降通量随空间高度的变异度最大.

(4) 冬、春季节大气逆温层和样点周边小环境可能是灰尘沉降通量和重金属元素含量升高的主要原因之一.

#### 参考文献:

- [1] 马志强,王跃思,孙扬,等.北京大气中常规污染物的垂直 分布特征[J].环境科学研究,2007,20(5):1-6.
- [2] Hwang H M, Park E K, Young T M, et al. Occurrence of endocrine-disrupting chemicals in indoor dust [J]. Science of the Total Environment, 2008, 404: 26–35.
- [3] Apeagyei E , Bank M S , Spengler J D. Distribution of heavy metals in road dust along an urban-rural gradient in Massachusetts
  [J]. Atmospheric Environment , 2011 , 45: 2310–2323.
- [4] 李晓燕,刘艳青. 我国城市不同功能区地表灰尘重金属分布 及来源[J]. 环境科学,2013,34(9): 3648-3653.
- [5] 章明奎.浙江省城市汽车站地表灰尘中重金属含量及其来源研究[J].环境科学学报,2010,30(11):2294-2304.
- [6] 郑小康,李春晖,黄国和,等.保定城区地表灰尘污染物分 布特征及健康风险评价[J].环境科学学报,2009,29(10): 2195-2202.
- [7] 常静,刘敏,李先华,等.上海城市地表灰尘重金属污染累积过程与影响因素[J].环境科学,2008,29(12):3483-3488.
- [8] 杨丽萍,陈发虎.兰州市大气降尘污染物来源研究[J].环 境科学学报,2002,22(4):499-502.
- [9] 黄鹤,孙玫玲,刘爱霞,等.天津城市大气污染物浓度垂直 分布特征[J].环境科学学报,2009,29(12):2478-2483.
- [10] 戴树桂.环境化学[M].北京:高等教育出版社,1997.54-57.

- [11] 张振江,赵若杰,曹文文,等.天津市可吸入颗粒物及元素 室内外相关性[J].中国环境科学,2013,33(2):357-364.
- [12] Lee E , Chan C K , Paatero P. Application of positive matrix factorization in source apportionment of particulate pollutants in Hong Kong [J]. Atmospheric Environment , 1999 , 33: 3201– 3212.
- [13] 林肇信. 大气污染控制工程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015.
- [14] 曾光善,严罗保.贵阳低空逆温层统计分析[J].贵州气象, 1994,18(6):36-38.
- [15] 焦艳,陶俊,傅刚,等. 2011 年春季上海市一次典型污染过 程及气溶胶的垂直分布特征[J].中国粉体技术,2013,19 (1):1-6.
- [16] 韩燕,徐虹,毕晓辉,等. 降水对颗粒物的冲刷作用及其对 雨水化学的影响[J]. 中国环境科学,2013,33(2):193-200.
- [17] Wang J L , Zhang Y H , Shao M , et al. Chemical composition and quantitative relationship between meteorological condition and fine particles in Beijing [J]. Journal of Environmental Sciences , 2004 , 16(5): 860–864.
- [18] 刘大锰,马永胜,高少鹏,等.北京市区春季燃烧源大气颗 粒物的污染水平和影响因素[J].现代地质,2005,19(4): 627-633.
- [19] 于云江,杨林,李良忠,等.兰州市大气 PM10 中重金属和多

环芳烃的健康风险评价[J].环境科学学报,2013,33(11): 2920-2927.

- [20] 刘咸德,李军,赵越,等.北京地区大气颗粒物污染的风向 因素研究[J].中国环境科学,2010,30(1):1-6.
- [21] Chen L F , Peng S L , Liu J G , et al. Dry deposition velocity of total suspended particles and meteorological influence in four locations in Guangzhou , China [J]. Journal of Environmental Sciences , 2012 , 24(4): 632-639.
- [22] 杨水秀.贵阳市大气降尘中某些金属元素分布状况初探 [J].环保科技,2002,8(1):13-16.
- [23] 杨梅,李晓燕.贵阳市冬季地表灰尘重金属含量动态变化及 原因探析[J].环境科学学报,2014,34(8):2070-2076.
- [24] 张舒婷,李晓燕,陈朋.城市不同功能区地表灰尘重金属时 空动态变化[J].安全与环境学报,2015,15(2):307-312.
- [25] 邱媛,管东生.经济快速发展区域的城市植被叶面降尘粒径 和重金属特征[J].环境科学学报,2007,27(12):2080-2087.
- [26] Murakami M , Nakajima F , Furumai H , et al. Identification of particles containing chromium and lead in road dust and soakaway sediment by electron probe microanalyser [J]. Chemosphere , 2007 , 67: 2000–2010.
- [27] 倪刘建,张甘霖,阮心玲,等.南京市不同功能区大气降尘的沉降通量及污染特征[J].中国环境科学,2007,27(1): 2-6.