

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第6期

Vol.36 No.6

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊春季气溶胶吸湿性分析 徐彬,张泽锋,李艳伟,秦鑫,缪青,沈艳(1911)

南京北郊秋冬季相对湿度及气溶胶理化特性对大气能见度的影响 于兴娜,马佳,朱彬,王红磊,严殊祺,夏航(1919)

南京北郊冬季霾天 PM_{2.5} 水溶性离子的污染特征与消光作用研究 周瑶瑶,马嫣,郑军,崔芬萍,王荔(1926)

京津冀冬季大气混合层高度与大气污染的关系 李梦,唐贵谦,黄俊,刘子锐,安俊琳,王跃思(1935)

长江三角洲地区基于喷涂工艺的溶剂源 VOCs 排放特征 莫梓伟,牛贺,陆思华,邵敏,勾斌(1944)

贵阳酸雨中溶解态重金属质量浓度及形态分析 朱兆洲,李军,王志如(1952)

北京市火葬场大气污染物排放现状及污染特征 薛亦峰,闫静,田贺忠,熊程程,李敬东,吴晓清,王玮,朱家昕(1959)

北京市燃煤锅炉烟气中水溶性离子排放特征 胡月琪,马召辉,冯亚君,王琛,陈圆圆,何明(1966)

燃煤电厂湿烟筒降雨成因分析 欧阳丽华,庄焯,刘科伟,陈振宇,顾鹏(1975)

Mn-Ce/分子筛的脱汞特性研究 谭增强,牛国平,陈晓文,安振(1983)

办公室内颗粒物载带溴系阻燃剂的人体呼吸暴露 李岫雯,曹辉,倪宏刚(1989)

森林生物质燃烧烟尘中的有机碳和元素碳 黄柯,刘刚,周丽敏,李久海,徐慧,吴丹,洪蕾,陈惠雨,杨伟宗(1998)

北京市常见落叶树种叶片滞纳空气颗粒物功能 王兵,王晓燕,牛香,张维康,汪金松(2005)

气相中乙酸乙酯光解的光子效率:波长和催化剂的影响 方雪慧,赵洁,舒莉,高永,叶招莲(2010)

长江口邻近海域赤潮水体浮游植物光吸收特性分析 刘洋洋,沈芳,李秀珍(2019)

深圳近岸海域全氟化化合物的污染特征 刘宝林,张鸿,谢刘伟,刘国卿,王艳萍,王鑫璇,李静,董炜华(2028)

杭州西湖“香灰土”沉积物轻、重有机质组成特征及其环境意义 李静,朱广伟,朱梦圆,龚志军,许海,杨桂军(2038)

小清河表层沉积物重污染区重金属赋存形态及风险评价 黄莹,李永霞,高甫威,徐民民,孙博,王宁,杨健(2046)

调水型水库藻类对调水氮、磷浓度与水量的响应 万由鹏,尹魁浩,彭盛华(2054)

三峡库区回水区营养盐和叶绿素 a 的时空变化及其相互关系 张磊,蔚建军,付莉,周川, Douglas G. Haffner(2061)

藻华聚集的环境效应:对漂浮植物水葫芦光合作用的影响 包先明,顾东祥,吴婷婷,石祖良,刘国锋,韩士群,周庆(2070)

巢湖沉积物有效磷的原位高分辨分析研究 李超,王丹,杨金燕,王燕,丁士明(2077)

贵州施秉白云岩喀斯特区水化学和溶解无机碳稳定同位素特征 肖时珍,蓝家程,袁道先,王云,杨龙,敖向红(2085)

长沙地区不同水体稳定同位素特征及其水循环指示意义 李广,章新平,张立峰,王跃峰,邓晓军,杨柳,雷超桂(2094)

元阳梯田水源区土壤水氢氧同位素特征 张小娟,宋维峰,吴锦奎,王卓娟(2102)

植草沟控制道路径流污染效果的现场实验研究 黄俊杰,沈庆然,李田(2109)

Fe/Cu 催化还原降解饮用水中溴氯乙腈的性能研究 丁春生,马海龙,傅洋洋,赵世督,李东兵(2116)

三维花状结构 α-FeOOH 协同 H₂O₂ 可见光催化降解双氯芬酸钠 许俊鸽,李云琴,黄华山,苑宝玲,崔浩杰,付明来(2122)

UV/H₂O₂ 降解羟苯甲酮反应动力学及影响因素 冯欣欣,杜尔登,郭迎庆,李华杰,刘翔,周方(2129)

钼掺杂 TiO₂ 光催化降解全氟辛酸 刘晴,喻泽斌,张睿涵,李明洁,陈颖,王莉,匡瑜,张搏,朱有慧(2138)

低频无极灯降解偶氮染料酸性橙 7 吴朋,吴军,高士祥,孙成,蒋正方(2147)

纳米 Fe₃O₄/CeO₂-H₂O₂ 非均相类 Fenton 体系对 3,4-二氯三氟甲苯的降解 孙正男,杨琦,纪冬丽,郑琳(2154)

流变相法制备包覆型 CMC-Fe⁰ 及降解水中 TCE 的研究 樊文井,成岳,余淑贞,范小丰(2161)

Pd-Fe/石墨烯多功能催化阴极降解 4-氯酚机制研究 祁文智,王凡,王辉,施钦,逢磊,卞兆勇(2168)

锰氧化物改性硅藻土对苯胺的去除动力学与机制 肖少丹,刘露,姜理英,陈建孟(2175)

铅-十六烷基三甲基氯化铵改性活性炭对水中硝酸盐和磷酸盐的吸附特性 郑雯婧,林建伟,詹艳慧,王虹(2185)

聚(丙烯酸酰胺-二乙烯基苯)对水溶液中刚果红的吸附 张奕奕,廖运文,高和军,王忠志,帅超(2195)

大型再生水厂不同污水处理工艺的能耗比较与节能途径 杨敏,李亚明,魏源送,吕鑑,郁达伟,刘吉宝,樊耀波(2203)

污泥水热液化水相产物中氮元素变化规律的研究 孙衍卿,孙震,张景来(2210)

不同接种污泥 ABR 厌氧氨氧化的启动特征 张海芹,王翻翻,李月寒,陈重军,沈耀良(2216)

基于微波-过氧化氢-碱预处理的污泥水解影响因素 贾瑞来,魏源送,刘吉宝(2222)

蠡河底泥中反硝化复合菌群富集及菌群结构研究 雍佳君,成小英(2232)

不同类型及不同浓度抗生素条件下活性污泥丝状菌种群多样性分析 王润芳,王琴,张红,齐嵘(2239)

石油降解菌的分离鉴定及 4 株芽胞杆菌种间效应 王佳楠,石妍云,郑力燕,王喆,蔡章,刘杰(2245)

Shewanella oneidensis MR-1 对针铁矿的还原与汞的生物甲基化 司友斌,孙林,王卉(2252)

根表铁氧化物胶膜对水稻吸收镉的影响 马微,鲍艳宇(2259)

不同耕作措施对旱作夏玉米田土壤呼吸及根呼吸的影响 禄兴丽,廖允成(2266)

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(2274)

中山市农业区域土壤-农产品中邻苯二甲酸酯(PAEs)污染特征 李彬,吴山,梁金明,梁文立,陈桂贤,李拥军,杨国义(2283)

经口摄入土壤多溴联苯醚生物可给性变化及影响因素的体外消化模拟 张云惠,刘伟健,程芳芳,熊冠男,杨笑寒,王歆,陶澍,邢宝山,刘文新(2292)

生物炭输入对土壤本底有机碳矿化的影响 陈威,胡学玉,陆海楠(2300)

改良剂对广西环江强酸铅锌污染土壤的修复作用 曾炜铨,宋波,袁立竹,黄宇妃,伏凤艳(2306)

蒙脱石-OR-SH 复合体材料对土壤镉的钝化及机制 曾燕君,周志军,赵秋香(2314)

焦岗湖湿地土地利用格局演变及区域可持续性评价 杨阳,蔡怡敏,白艳莹,陈卫平,杨秀超(2320)

《环境科学》征订启事(1965) 《环境科学》征稿简则(2115) 信息(1925, 2076, 2084, 2146)

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.hjxx.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^[1], 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^[2]. 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^[3-6], 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^[7], 垂直空间平台上的灰尘主要来自空中飘尘的沉降^[8],

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^[9,10], 对空间平台上灰尘的沉降有可能影响. 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 ≥ 0.5 g),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 $105\ \mu\text{m}$ 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20m处有生活垃圾池,距离采样区300m处有建筑工地	坐北朝南,房屋年龄小于10a,2~3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10m处有生活垃圾池(定时会焚烧)	坐北朝南,房屋年龄15a,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100m处有垃圾中转站	坐北朝南,屋年龄大于15a,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_3 -HF- HClO_4 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.

灰尘沉降量计算公式如下:

$$Q = \frac{M}{S \cdot D} \quad (1)$$

式中, Q 为灰尘单位时间单位面积的沉降通量 $g \cdot (d \cdot m^2)^{-1}$; M 为一定时间下灰尘沉降量, g ; S 为灰尘沉降的面积, m^2 ; D 为灰尘沉降的时间, d .

灰尘中重金属沉降量计算公式如下:

$$F_i = C_i \cdot Q \quad (2)$$

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 $mg \cdot (d \cdot m^2)^{-1}$,其它元素为 $\mu g \cdot (d \cdot m^2)^{-1}$; C_i 为灰尘中 i 元素的含量, Ca 和 Fe 元素的含量单位为 $mg \cdot g^{-1}$,其他元素含量单位为 $\mu g \cdot g^{-1}$; Q 为灰尘单位时间单位面积的沉降通量, $g \cdot (d \cdot m^2)^{-1}$.

2 结果与分析

2.1 灰尘沉降量季节分布

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

表 2 不同季节灰尘沉降通量

Table 2 Deposition fluxes of dust in different seasons

楼层	灰尘沉降通量/ $g \cdot (d \cdot m^2)^{-1}$				变异度
	春季	夏季	秋季	冬季	
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	

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,8 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 在低层空间夏季灰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

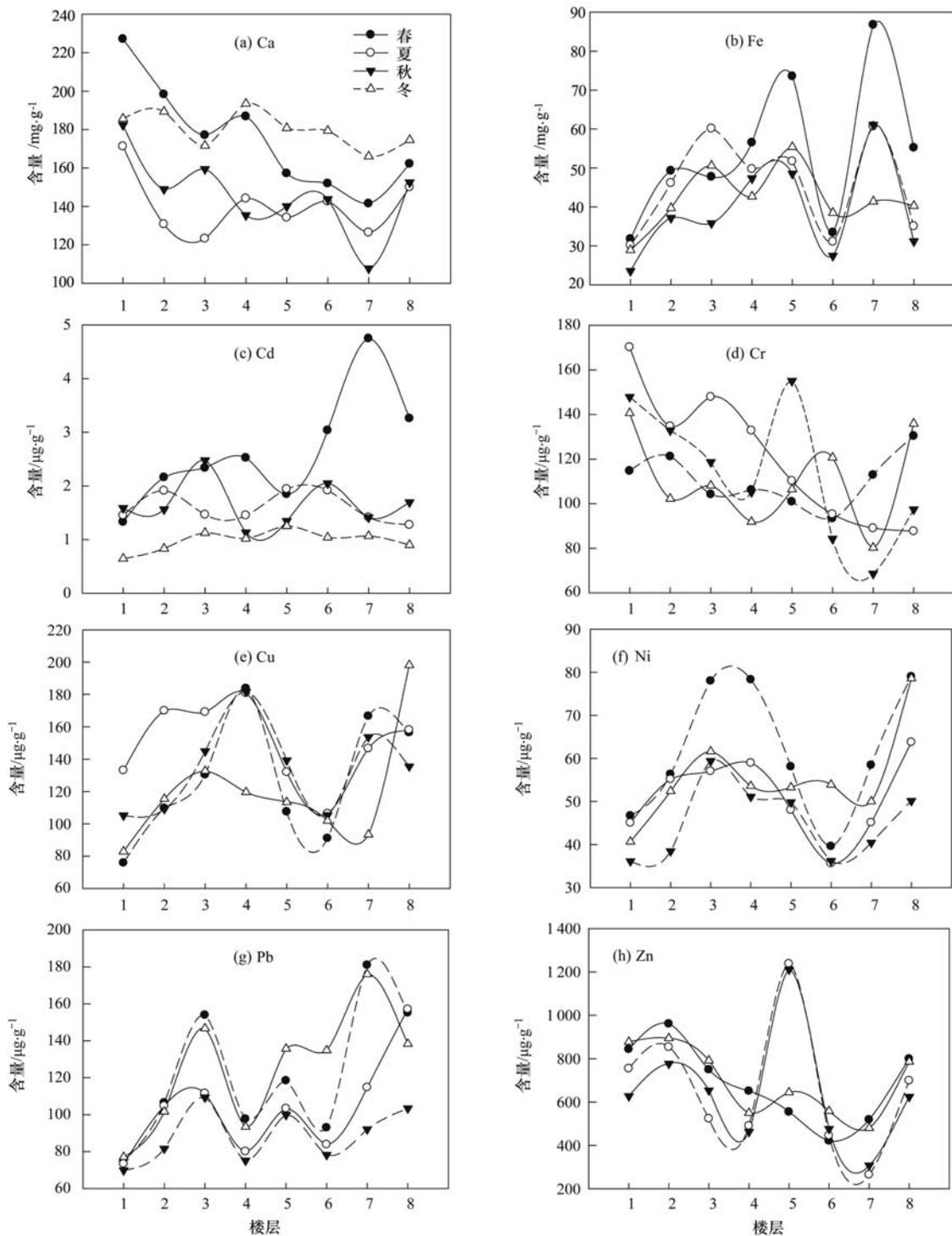


图2 不同空间高度灰尘元素含量季节分布特征

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.

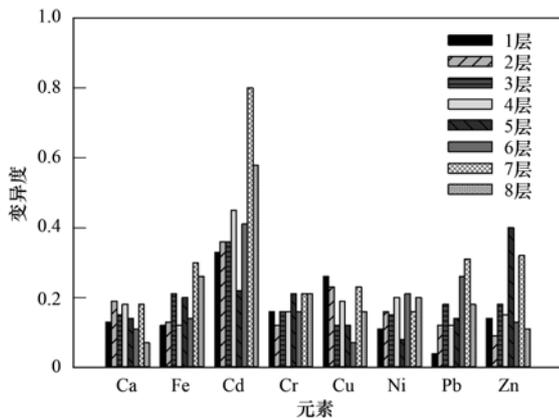


图 3 空间高度上元素四季含量变异度

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^[11]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^[12]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^[13].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^[10].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^[14].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^[15]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

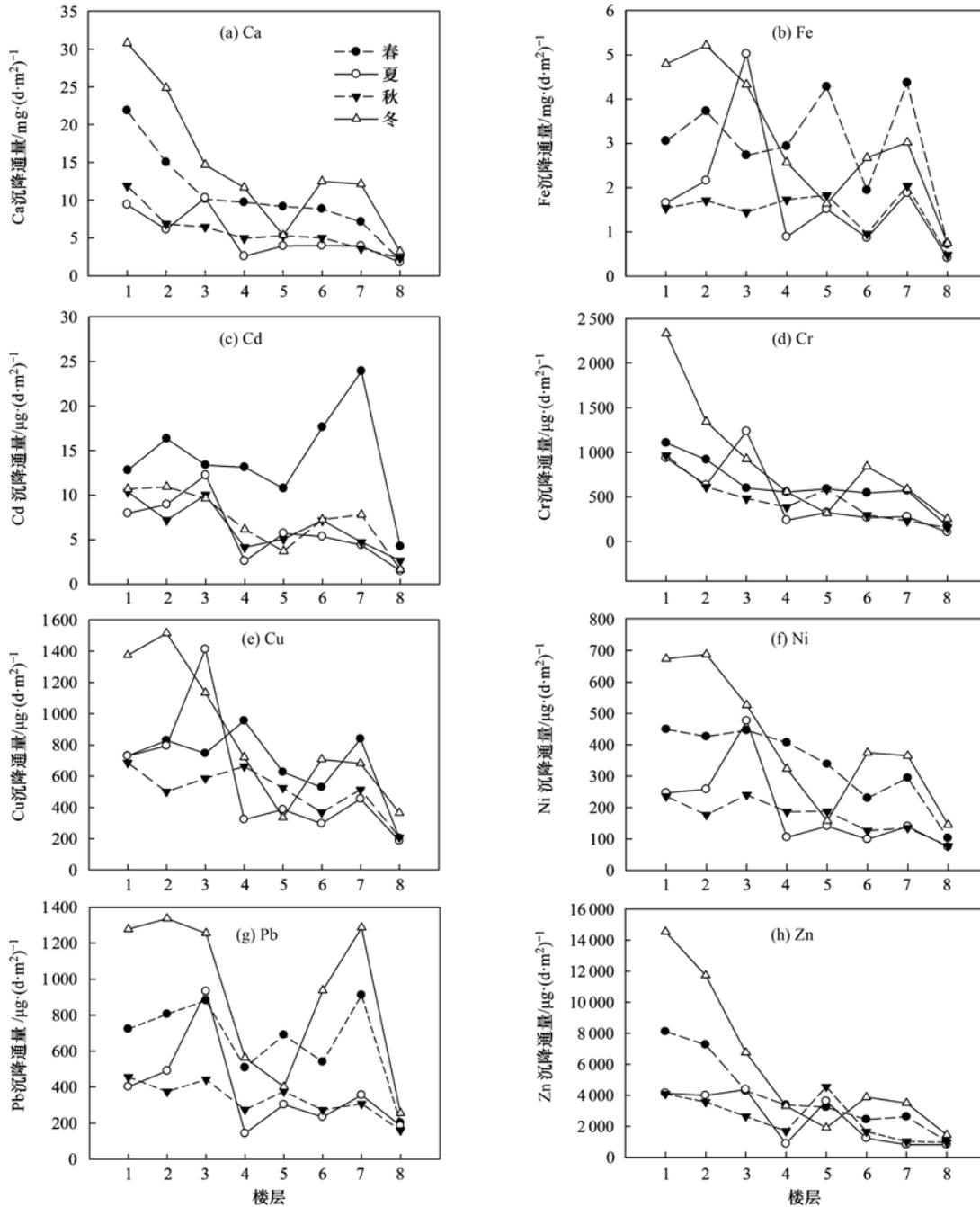


图4 不同空间高度灰尘中元素沉降通量季节分布特征

Fig. 4 Distribution of deposition fluxes of elements at different height in different seasons

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^[16]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^[17],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^[18].曾光善等^[14]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^[19]。

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^[20]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^[21]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.

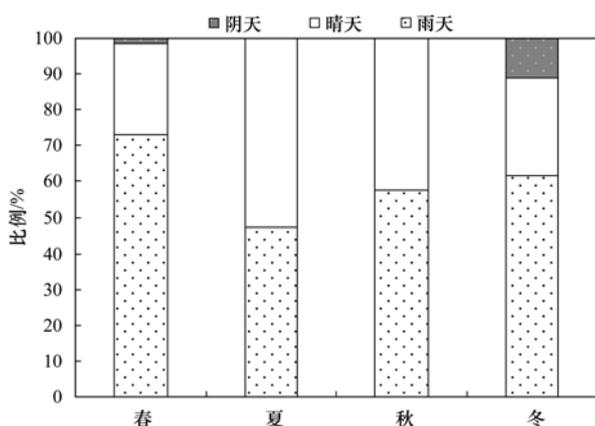


图 5 四季天气比例

Fig. 5 Weather distribution in the four seasons

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^[22],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^[23]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^[24]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于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^[25]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^[26].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^[27]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.

表 4 四季空间高度灰尘各元素相关性(P 值)¹⁾

Table 4 Correlation between elements in dust in different seasons

季节	Ca	Fe	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	季节
春	Ca	0.000					0.046	0.045	夏
	Fe				0.002	0.000	0.004		
	Cd	0.006	0.006						
	Cr		0.041		0.000	0.000			
	Cu		0.000		0.000	0.000			
	Ni		0.000		0.001	0.000			
	Pb		0.000	0.045		0.031			
	Zn								
秋	Ca		0.000	0.000		0.004	0.020		冬
	Fe	0.000		0.000	0.032	0.024	0.000	0.000	
	Cd					0.027	0.000	0.000	
	Cr					0.001	0.000		
	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.

CONTENTS

Hygroscopic Properties of Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing in Spring	XU Bin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Relative Humidity and Aerosol Physicochemical Properties on Atmospheric Visibility in Northern Suburb of Nanjing	YU Xing-na, MA Jia, ZHU Bin, <i>et al.</i> (1919)
Pollution Characteristics and Light Extinction Effects of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter Hazy Days at North Suburban Nanjing ...	ZHOU Yao-yao, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1926)
Characteristics of Winter Atmospheric Mixing Layer Height in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Their Relationship with the Atmospheric Pollution	LI Meng, TANG Gui-qian, HUANG Jun, <i>et al.</i> (1935)
Process-based Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Paint Industry in the Yangtze River Delta, China	MO Zi-wei, NIU He, LU Si-hua, <i>et al.</i> (1944)
Concentrations and Speciation of Dissolved Heavy Metal in Rainwater in Guiyang, China	ZHU Zhao-zhou, LI Jun, WANG Zhi-ru (1952)
Situation and Characteristics of Air Pollutants Emission from Crematories in Beijing, China	XUE Yi-feng, YAN Jing, TIAN He-zhong, <i>et al.</i> (1959)
Emission Characteristics of Water-Soluble Ions in Fumes of Coal Fired Boilers in Beijing	HU Yue-qi, MA Zhao-hui, FENG Ya-jun, <i>et al.</i> (1966)
Analysis on Mechanism of Rainout Carried by Wet Stack of Thermal Power Plant	OUYANG Li-hua, ZHUANG Ye, LIU Ke-wei, <i>et al.</i> (1975)
Removal Characteristics of Elemental Mercury by Mn-Ce/molecular Sieve	TAN Zeng-qiang, NIU Guo-ping, CHEN Xiao-wen, <i>et al.</i> (1983)
Indoor Exposure to Particle-Bound BFRs via Inhalation	LI Xiu-wen, ZENG Hui, NI Hong-gang (1989)
Organic Carbon and Elemental Carbon in Forest Biomass Burning Smoke	HUANG Ke, LIU Gang, ZHOU Li-min, <i>et al.</i> (1998)
Atmospheric Particle Retaining Function of Common Deciduous Tree Species Leaves in Beijing	WANG Bing, WANG Xiao-yan, NIU Xiang, <i>et al.</i> (2005)
Photonic Efficiency of Ethyl Acetate Photolysis in Gas Phase: Dependence on Wavelength and Catalyst	FANG Xue-hui, ZHAO Jie, SHU Li, <i>et al.</i> (2010)
Phytoplankton Light Absorption Properties During the Blooms in Adjacent Waters of the Changjiang Estuary	LIU Yang-yang, SHEN Fang, LI Xiu-zhen (2019)
Pollution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Offshore Marine Area of Shenzhen	LIU Bao-lin, ZHANG Hong, XIE Liu-wei, <i>et al.</i> (2028)
Composition and Environmental Effects of LFOM and HFOM in "Incense-Ash" Sediments of West Lake, Hangzhou, China	LI Jing, ZHU Guang-wei, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (2038)
Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments from the Heavily Polluted Area of Xiaoqing River	HUANG Ying, LI Yong-xia, GAO Fu-wei, <i>et al.</i> (2046)
Response of Algae to Nitrogen and Phosphorus Concentration and Quantity of Pumping Water in Pumped Storage Reservoir	WAN You-peng, YIN Kui-hao, PENG Sheng-hua (2054)
Temporal and Spatial Variation of Nutrients and Chlorophyll a, and Their Relationship in Pengxi River Backwater Area, Three Gorges Reservoir	ZHANG Lei, WEI Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2061)
Environmental Effects of Algae Bloom Cluster: Impact on the Floating Plant Water Hyacinth Photosynthesis	BAO Xian-ming, GU Dong-xiang, WU Ting-ting, <i>et al.</i> (2070)
<i>In Situ</i> High-Resolution Analysis of Labile Phosphorus in Sediments of Lake Chaohu	LI Chao, WANG Dan, YANG Jin-yan, <i>et al.</i> (2077)
Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon Stable Isotope of Shibing Dolomite Karst Area in Guizhou Province	XIAO Shi-zhen, LAN Jia-cheng, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2085)
Stable Isotope Characteristics in Different Water Bodies in Changsha and Implications for the Water Cycle	LI Guang, ZHANG Xin-ping, ZHANG Li-feng, <i>et al.</i> (2094)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes of Soil Water in the Water Source Area of Yuanyang Terrace	ZHANG Xiao-juan, SONG Wei-feng, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2102)
Performance of Grass Swales for Controlling Pollution of Roadway Runoff in Field Experiments	HUANG Jun-jie, SHEN Qing-ran, LI Tian (2109)
Performance Study of Bromochloroacetonitrile Degradation in Drinking Water by Fe/Cu Catalytic Reduction	DING Chun-sheng, MA Hai-long, FU Yang-ping, <i>et al.</i> (2116)
Catalytic Degradation of Diclofenac Sodium over the Catalyst of 3D Flower-like α -FeOOH Synergized with H ₂ O ₂ Under Visible Light Irradiation	XU Jun-ge, LI Yun-qin, HUANG Hua-shan, <i>et al.</i> (2122)
Degradation of Organic Sunscreens 2-hydroxy-4-methoxybenzophenone by UV/H ₂ O ₂ Process: Kinetics and Factors	FENG Xin-xin, DU Er-deng, GUO Ying-qing, <i>et al.</i> (2129)
Photocatalytic Degradation of Perfluorooctanoic Acid by Pd-TiO ₂ Photocatalyst	LIU Qing, YU Ze-bin, ZHANG Rui-han, <i>et al.</i> (2138)
Efficient Photolysis of Acid Orange 7 Using Low-frequency Electrodeless Lamp	WU Peng, WU Jun, GAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (2147)
Degradation of 3,4-Dichlorobenzotrifluoride by Fe ₃ O ₄ /CeO ₂ -H ₂ O ₂ Heterogeneous Fenton-Like Systems	SUN Zheng-nan, YANG Qi, JI Dong-li, <i>et al.</i> (2154)
Preparation of Coated CMC-Fe ⁰ Using Rheological Phase Reaction Method and Research on Degradation of TCE in Water	FAN Wen-jing, CHENG Yue, YU Shu-zhen, <i>et al.</i> (2161)
Degradation Mechanism of 4-Chlorophenol on a Pd-Fe/graphene Multifunctional Catalytic Cathode	QI Wen-zhi, WANG Fan, WANG Hui, <i>et al.</i> (2168)
Removal Kinetics and Mechanism of Aniline by Manganese-oxide-modified Diatomite	XIAO Shao-dan, LIU Lu, JIANG Li-ying, <i>et al.</i> (2175)
Adsorption Characteristics of Nitrate and Phosphate from Aqueous Solution on Zirconium-Hexadecyltrimethylammonium Chloride Modified Activated Carbon	ZHENG Wen-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2185)
Removal Congo Red from Aqueous Solution Using Poly (AM-co-DVB)	ZHANG Luan-luan, LIAO Yun-wen, GAO He-jun, <i>et al.</i> (2195)
Energy Consumption Comparison and Energy Saving Approaches for Different Wastewater Treatment Processes in a Large-scale Reclaimed Water Plant	YANG Min, LI Ya-ming, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (2203)
Transformation Regularity of Nitrogen in Aqueous Product Derived from Hydrothermal Liquefaction of Sewage Sludge in Subcritical Water	SUN Yan-qing, SUN Zhen, ZHANG Jing-lai (2210)
Start-up Performance of ANAMMOX Enrichment with Different Inoculated Sludge in Anaerobic Baffled Reactor	ZHANG Hai-qin, WANG Fan-fan, LI Yue-han, <i>et al.</i> (2216)
Influencing Factors for Hydrolysis of Sewage Sludge Pretreated by Microwave-H ₂ O ₂ -OH Process	JIA Rui-lai, WEI Yuan-song, LIU Ji-bao (2222)
Enrichment and Characterization of a Denitrifying Bacteria Consortium from Lihe River's Sediment	YONG Jia-jun, CHENG Xiao-ying (2232)
Investigation for Filamentous Bacteria Community Diversity in Activated Sludge Under Various Kinds and Concentration Conditions of Antibiotics	WANG Run-fang, WANG Qin, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (2239)
Isolation and Identification of Petroleum Degradation Bacteria and Interspecific Interactions Among Four <i>Bacillus</i> Strains	WANG Jia-nan, SHI Yan-yun, ZHENG Li-yan, <i>et al.</i> (2245)
Effects of Dissimilatory Reduction of Goethite on Mercury Methylation by <i>Shewanella oneidensis</i> MR-1	SI You-bin, SUN Lin, WANG Hui (2252)
Effect of Root Iron Plaque on Norfloxacin Uptake by Rice	MA Wei, BAO Yan-yu (2259)
Effects of Tillage on Soil Respiration and Root Respiration Under Rain-Fed Summer Corn Field	LU Xing-li, LIAO Yun-cheng (2266)
Seasonal Provincial Characteristics of Vertical Distribution of Dust Loadings and Heavy Metals near Surface in City	LI Xiao-yan, ZHANG Shu-ting (2274)
Characteristics of Phthalic Acid Esters in Agricultural Soils and Products in Areas of Zhongshan City, South China	LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (2283)
Variations and Influencing Factors of Oral Bioaccessibility of Polybrominated Diphenyl Ethers in Soils Using an <i>In-vitro</i> Gastrointestinal Model	ZHANG Yun-hui, LIU Wei-jian, CHENG Fang-fang, <i>et al.</i> (2292)
Impacts of Biochar Input on Mineralization of Native Soil Organic Carbon	CHEN Wei, HU Xue-yu, LU Hai-nan (2300)
Effects of Remedies on the Remediation of Typical Pb and Zn-contaminated soil in Huanjiang, Guangxi	ZENG Wei-quan, SONG Bo, YUAN Li-zhu, <i>et al.</i> (2306)
Mechanism Study of the Smeectite-OR-SH Compound for Reducing Cadmium Uptake by Plants in Contaminated Soils	ZENG Yan-jun, ZHOU Zhi-jun, ZHAO Qiu-xiang (2314)
Land Use Pattern Change and Regional Sustainability Evaluation of Wetland in Jiaogang Lake	YANG Yang, CAI Yi-min, BAI Yan-ying, <i>et al.</i> (2320)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年6月15日 第36卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 6 Jun. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人