

贵阳市不同空间高度灰尘和重金属沉降通量

张舒婷,李晓燕*,陈思民 (贵州师范大学地理与环境科学学院,贵州 贵阳 550001)

摘要: 采集贵阳市不同空间高度灰尘样品,分析灰尘及其中常量元素 Ca 和 Fe、微量有害重金属 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的沉降通量随空间高度的变化,通过引进灰尘沉降量,结合灰尘中微量有害重金属含量,采用单因子指数法和内梅罗综合指数法评价不同空间高度灰尘重金属导致的环境风险.结果表明:灰尘沉降通量随着楼层增高而减小;不同楼层灰尘元素含量变化差异不大,Fe、Cd、Cu、Ni、Pb 元素含量在不同空间高度上随楼层增高而增大,而 Cr 和 Zn 元素是随着楼层增高而减小;8 种元素沉降通量分布总体趋势是随楼层的升高,沉降通量降低,尤以 Ca、Cr 和 Zn 表现最为明显;引进灰尘沉降量评价灰尘重金属导致的环境风险显示 1~3 层和 7 层环境风险较高,4~6 层灰尘重金属导致的环境风险较低,Cd、Cu、Pb 和 Zn 是主要风险元素.

关键词: 灰尘; 沉降通量; 重金属; 空间高度; 城市

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2015)06-1630-08

Vertical characteristics of deposition fluxes of dust and heavy metals of Guiyang City. ZHANG Shu-ting, LI Xiao-yan, CHEN Si-min (School of Geographical and Environment Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China). *China Environmental Science*, 2015,35(6): 1630~1637

Abstract: Dust was an important pathway of human heavy metal exposure. With the emergence of urban high-rise building, the vertical space of human daily life gradually extended upward. Dust and its heavy metal located on the windowsill and other platform at different height of the building was remarkable. In this study, dust deposition on the windowsill at different height (1th-8th floor) from three buildings in Guiyang city was collected and the deposition fluxes of dust and elements including Ca, Fe, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn was analyzed. Further, the environmental risk due to heavy metals based on loadings per day was assessed by the single-factor contaminant index and Nemerow multi-factor index method. The results showed that: the deposition fluxes of dust decreased with the increases of the height of the ground. The content of elements showed small changes in dust at different height: the contents of Fe, Cd, Cu, Ni, and Pb increased with the height, while the contents of Cr and Zn in dust decreased with the height. In general, the element deposition fluxes decreased as the height of the ground increase, especially Ca, Cr and Zn. The risk assessment based on the deposition fluxes of heavy metals showed that the 1th-3th floor and 7th floor were in higher risk condition, while the 4th-6th floors were in lower risk condition, and Cd, Pb, Cu, and Zn were the main risk elements.

Key words: dust; deposition fluxes; heavy metal; the height of the ground; cities

城市灰尘是来源复杂的混合污染物^[1-2].大气降尘是城市灰尘中的一种,是大气中粒径大于 10 μ m,因重力、风力和降雨等外力因素,在较短时间内沉降到地面或建筑物表面等的大气颗粒物^[3-4].在一定的外动力条件(如风、人流车流)下,城市地表灰尘与大气颗粒物相互转化,形成典型的“点、线、面”型污染^[5].灰尘及重金属在环境中的累积是一个复杂的动力学过程,除了在水平方向上的运移和堆积可导致灰尘重金属的空间差异外,不同来源的灰尘在垂向空间上的运移和沉

降,如地表细粒土壤的扬起和再沉降,交通排放的污染颗粒物在大气中的运移和沉降等也能导致不同空间高度平台上灰尘及重金属的差异分布.随着城市高层建筑的出现,人类日常生活的垂向空间范围早已达到地面 100m 以上高度^[6],位于居室空间高度窗台或其他平台上的灰尘会随时进入室内,增加室内灰尘重金属的累积.

收稿日期: 2014-10-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41161079)

* 责任作者, 教授, lxyan421@163.com

国内外城市灰尘污染研究主要集中在街道灰尘^[7-8]、道路灰尘^[9-10]、区域灰尘^[11-13]、大气降尘^[14]和室内灰尘^[15-18]等方面,分别从不同功能区或特定功能区对平行空间污染变化规律进行调查分析,结果表明灰尘中重金属富集严重.但对近地面垂直空间高度灰尘中重金属元素浓度分布特征规律尚未见报道.

贵阳市位于我国西南地区,是贵州省省会城市.中心城区面积 220km²,具有人口密度高、建筑密集、交通拥堵等多数大城市具有的通病.同时,贵阳城区三面环山,发展空间小,城区地形复杂,与其他大城市相比又显得狭小和拥挤.本研究通过对不同空间高度平台灰尘的采集,分析灰尘沉降通量及灰尘中常量元素 Ca 和 Fe 及微量重金属元素 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的沉降通量随空间高度的变化,引入灰尘沉降量,结合灰尘中微量重金属含量,评价不同空间高度灰尘重金属累积现状及导致的环境风险,揭示城市灰尘沉降通量及重金属含量的垂直空间变化特征,辨析受垂直高度变化影响最大的元素及主要风险元素,以期为缓解和治理灰尘重金属累积或污染提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

为避免下雨对沉降灰尘沉降的干扰,选择贵阳市 3 栋 1~8 层具有一定宽度窗沿的窗台作为采样区域.每个采样点共采样 4 次.在第 1 次采样时先划定采样区域,打扫干净,记下开始采样时间,待 1 次采样结束后,清扫所有采样区域的灰尘,装入样袋,记下采样结束时间(同时也是第 2 次采样开始时间),并开始第 2 次样品采集.以此程序分别在冬季(12 月~次年 3 月)、春季(4 月~5 月)、夏季(6~8 月)、秋季(9~11 月),利用塑料毛刷和塑料铲在划定的采样面积上将所有灰尘收集,装入纸袋保存.所有样品带回实验室过 40 目尼龙筛,去除杂质,称重后,剔除质量小于 0.1g 的样品,最后得到 108 份有效灰尘样品.所有样品常温干燥后全部过 105μm 筛,备用.

1.2 化学分析

样品采用 HNO₃-HClO₄ 混溶,0.5% HNO₃ 定容,ICP-MS 测定(Thermo XSERIES2)Ca、Fe、Cr、

Cd、Cu、Ni、Pb、Zn 的含量.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)和平行样进行质量控制.分析结果表明 8 种元素标准样和重复样合格率均为 100%,因此分析数据来源可靠.

1.3 数据处理

将每个样点 4 次(个别 3 次)采样分析数据平均,作为该样点数据.所有数据分析均是以此数据为原始数据的分析.文中所涉及不同楼层的样本数据均值均采用几何均值表征.采用 SPSS 软件对数据进行正态检验和差异性分析.对不服从正态分布的数据进行数据转换,直至数据服从正态分布.在保证数据服从正态分布的前提下,对数据进行差异显著性检验,差异显著性检验 $P < 0.05$,表示两样本数据具有显著性差异.使用 SigmaPlot 软件作图.

灰尘沉降通量计算公式如下:

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

式中: Q 为灰尘单位时间单位面积的沉降通量, $g/(d \cdot m^2)$; 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 .

灰尘中重金属沉降通量计算公式如下:

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

式中: F_i 为灰尘中 i 元素的沉降通量, Ca 和 Fe 元素沉降通量单位为 $\mu g/(d \cdot m^2)$,其余元素通量为 $\mu g/(d \cdot m^2)$; C_i 为灰尘中 i 元素的含量,其中 Ca 和 Fe 含量单位为 mg/g ,其余元素为 $\mu g/g$; Q 为灰尘单位时间单位面积的沉降通量, $g/(d \cdot m^2)$.

基于重金属沉降量的单项累积系数按照下式计算:

$$P_i = \frac{C_i \cdot M_j}{B_i \cdot M_{\text{平}}} \quad (3)$$

式中: P_i 为元素累积系数; C_i 为元素测定含量; B_i 为对应元素土壤背景值; M_j 为对应楼层灰尘沉降量; $M_{\text{平}}$ 为 1~8 层灰尘沉降量的几何均值; i 表示 Cr、Cd、Cu、Ni、Pb、Zn 6 种元素; j 表示楼层.其中 $P_i \leq 1$ 表示无明显累积, $1 < P_i \leq 2$ 表示处于轻微累积, $2 < P_i \leq 3$ 表示处于轻度累积, $3 < P_i \leq 5$ 表示处于中度累积, $P_i > 5$ 表示处于重度累积^[19].

综合累积系数采用内梅罗指数(Nemero

index)评价:

$$P_N = \sqrt{\frac{P_{i\text{平均}}^2 + P_{i\text{最大}}^2}{2}} \quad (4)$$

式中: $P_{i\text{平均}}$ 和 $P_{i\text{最大}}$ 分别是同一楼层的平均单项累积系数和最大单项累积系数。 $1 < P_N \leq 2$, $2 < P_N \leq 3$ 和 $P_N > 3$ 分别表示不同空间高度灰尘重金属处于低风险、中度风险和重度风险状态。

2 结果

2.1 城市不同空间高度灰尘沉降通量分布特征

3 栋建筑不同楼层的四季灰尘沉降通量的几何均值见图 1。从图 1 可看出,不同楼层之间灰尘沉降通量差异明显,不同空间高度灰尘沉降通量变化的总体趋势是:随着楼层的增高,灰尘沉降通量明显下降,虽然由于个别建筑的影响,6、7 层的灰尘沉降量略有升高,进一步差异分析表明,1 层灰尘沉降通量显著高于 2 层($P=0.08$)和 3 层($P=0.028$),而 8 层显著低于 2 层($P=0.011$)和 3 层($P=0.035$)。

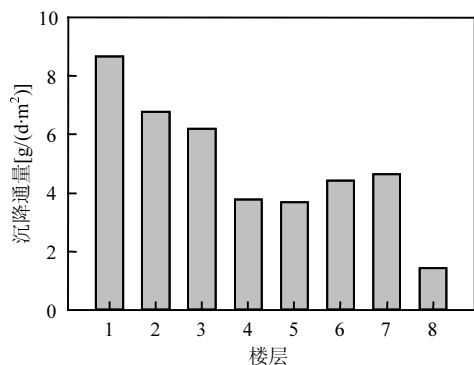


图 1 不同高度灰尘沉降通量分布

Fig.1 Distribution of deposition fluxes of dust at different height

2.2 不同空间高度灰尘重金属水平

从图 2 可看出,不同楼层灰尘元素含量的大小排序为:Ca > Fe > Zn > Cu > Cr > Pb > Ni > Cd,与贵州省土壤元素背景值排序顺序 Ca > Fe > Zn > Cr > Ni > Pb > Cu > Cd 相比,Cu 和 Pb 元素受人类活动影响明显。

此外,图 2 显示,不同楼层灰尘中元素含量差异最小的是 Ca,变异度仅为 9%,其次是 Cd 和 Cr,变异度分别为 14%和 15%,楼层间元素含量变异

度较大的为 Zn、Pb 和 Fe,变异度分别为 27%、23%和 24%。不同元素在不同楼层高度灰尘间的含量分布有以下特点:Ca 在不同楼层高度含量分布最为均一;Cr 和 Zn 的总体分布趋势是随着楼层高度的增加,元素含量逐渐降低,低值区均出现在 6~7 层;Fe、Cd、Cu、Ni 和 Pb 的总体分布是随着楼层高度的增加,元素含量逐渐升高,1 层元素含量均为最低(Ni 稍有偏差,1 层含量稍高于 6 层),但都在 4~7 层有一个次低值区,不同元素低值区出现的楼层各不相同,Fe、Cd、Cu、Ni 和 Pb 含量次低值区出现的楼层分别为 6 层、4~5 层、5~7 层、5~7 层和 4~6 层。进一步差异性分析显示,7 层 Pb 显著高于 1 层($P=0.05$)、2 层($P=0.047$)和 4 层($P=0.023$); 总体而言,不同楼层灰尘重金属含量变化差异不大,各重金属含量的楼层变异度均 $\leq 27\%$,灰尘中 Fe、Cd、Cu、Ni、Pb 元素含量不同空间高度分布规律整体上随着楼层增高而增大,而 Cr 和 Zn 元素是随着楼层增高而减小。

2.3 不同空间高度灰尘重金属沉降通量水平

从图 3 可看出,不同楼层灰尘元素沉降通量的大小排序为:Ca > Fe > Zn > Cu > Cr > Pb > Ni > Cd。8 种元素沉降通量变化的总体趋势是:随楼层的升高,沉降通量降低,尤其是 Ca、Cr 和 Zn 表现最为明显;Ca 在不同楼层之间的沉降通量变化范围为:0.230~1.66mg/(d·m²),变异度为 53%,Ca 沉降通量在不同楼层之间变化的总体趋势与灰尘沉降通量的变化规律相似;Cr 沉降通量最大值为 1233 $\mu\text{g}/(\text{d}\cdot\text{m}^2)$,最小值为 160 $\mu\text{g}/(\text{d}\cdot\text{m}^2)$,变异度为 58%;Zn 在楼层间沉降通量的变化范围为 1043~6683 $\mu\text{g}/(\text{d}\cdot\text{m}^2)$,变异度为 57%,进一步沉降通量差异性分析显示,1 层显著高于 4 层($P=0.046$)、5 层($P=0.02$)和 8 层($P=0.029$),2 层显著高于 5 层($P=0.011$)。Fe、Cd、Cu、Ni 和 Pb 虽然总体上沉降通量也是随着楼层增加而降低,但都表现为在 6~7 层沉降通量有较明显的上升趋势。Fe 的沉降通量范围为 0.057~0.291[mg/(d·m²)],Cd、Cu、Ni 和 Pb 的沉降通量范围[$\mu\text{g}/(\text{d}\cdot\text{m}^2)$]为 2.29~11.1、879~231、96.2~399、197~812;Fe、Cd、Cu、Ni 和 Pb 的变异度分别为 38%、39%、37%、39%、40%,此 5 种元素的变异度非常接近且都明显小于

Ca、Cr 和 Zn,说明 Ca、Cr 和 Zn 在不同高度的 沉降通量差异高于 Fe、Cd、Cu、Ni 和 Pb.

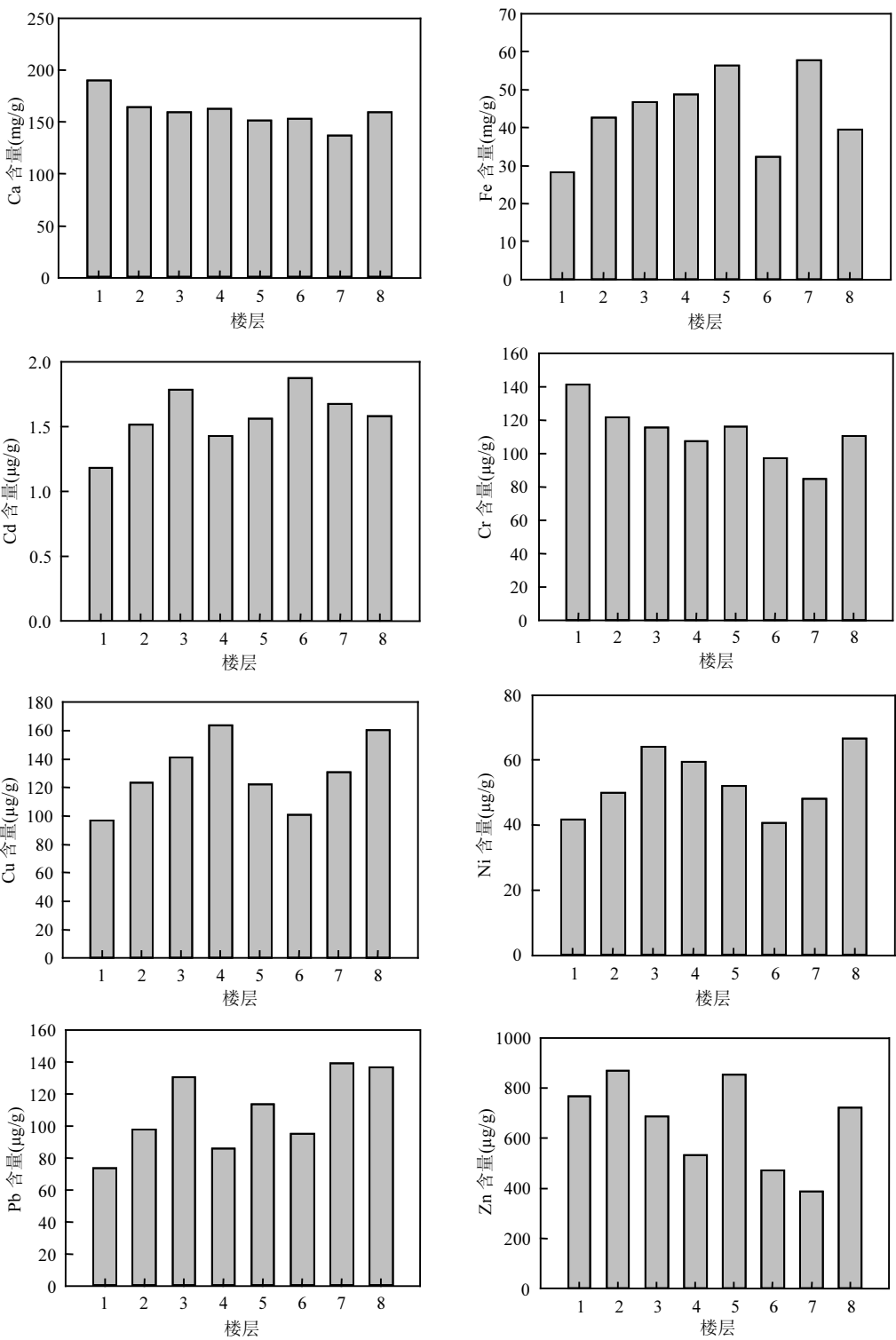


图2 不同楼层灰尘重金属含量水平

Fig.2 Concentrations of heavy metal in dust at different height

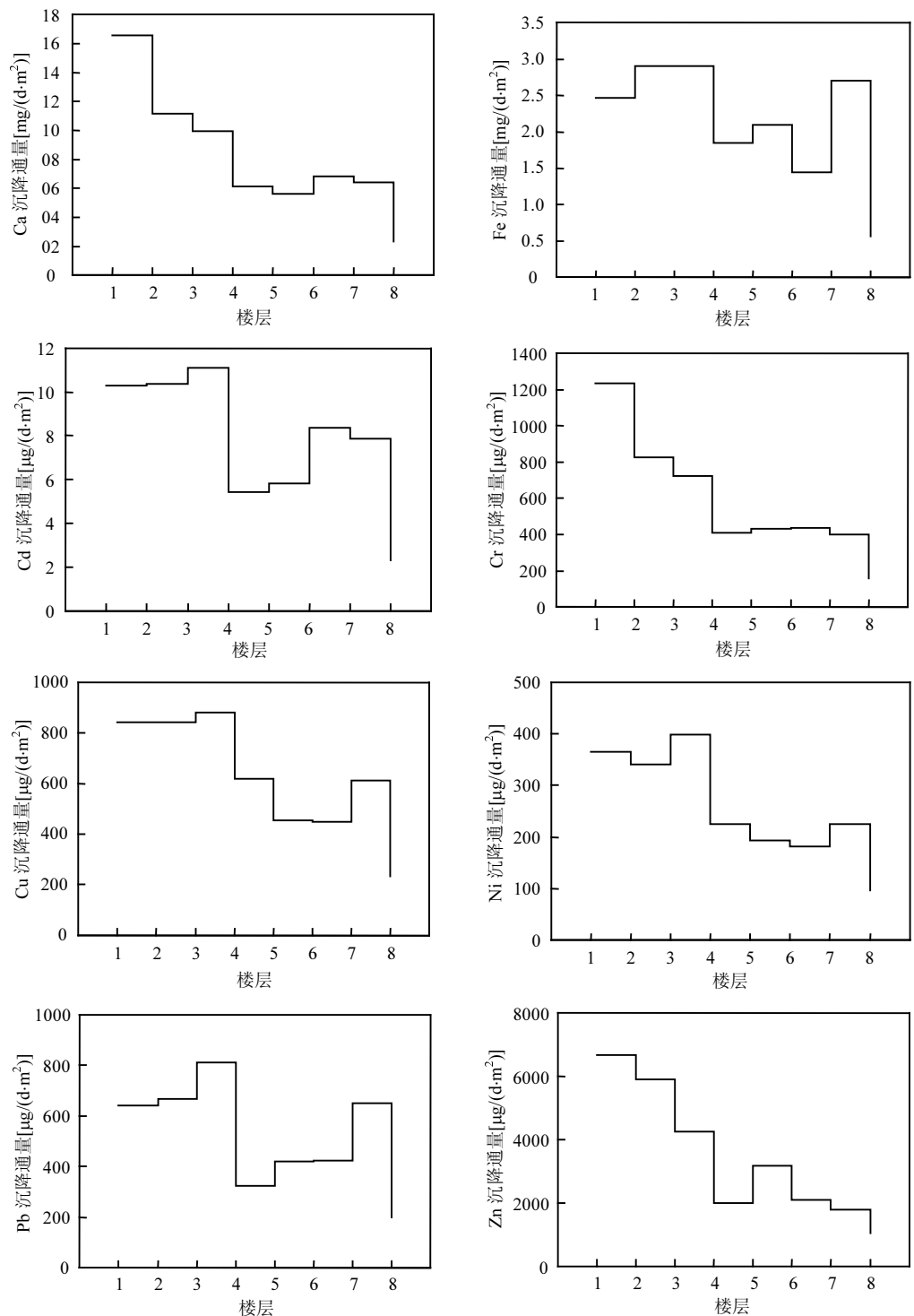


图 3 不同高度灰尘中重金属沉降通量平均值分布特征

Fig.3 Distribution of deposition fluxes of heavy metal in dust at different height

2.4 不同空间高度灰尘重金属导致的环境风险

8 种元素中,除 Ca 外,其他均为重金属,Ca、

Fe 为常量元素,其他为微量有害重金属.

将 1~8 层灰尘沉降量平均值乘上微量重金

属土壤背景值,所得沉降量作为参考值,根据式(3)和式(4)计算引进灰尘沉降量的不同楼层重金属累积系数及综合内梅罗指数(图 4),结果显示:灰尘元素累积风险从高到低的顺序为 $Zn > Cd > Cu > Pb > Ni > Cr$ 。单因子指数评价结果表明除个别楼层外,灰尘 Cr 和 Ni 基本处于轻累积风险;而 Cd 、 Cu 、 Pb 和 Zn 各楼层均处于中-重度累积风险,其中 Cd 在 1~7 层, Cu 在 1~4 层和 7 层, Pb 在 3、7 层, Zn 在 1~3、5、7、8 层均处于重度累积风险。8 种元素中, Cd 、 Cu 和 Zn 累积较重。1~3 层和 5、7~8 层主要风险元素均为 Cd 和 Zn ;4、6 层的 Cd 、 Cu 、 Pb 和 Zn 累积风险程度相当,没有显示特别突出的风险元素。综合 6 种元素而言,1~8 层内梅罗综合指数范围在 4.0~11.5 之间,均达到重度累积状态,其中,1~3 层灰尘重金属导致的环境风险远高于 4~6 层,尤以 4 层为最低,而 4~7 层灰尘重金属导致的环境风险呈现升高趋势,在 7 层达到极大,8 层又显著下降。整体上低楼层环境风险较高,高楼层环境风险相对较小。

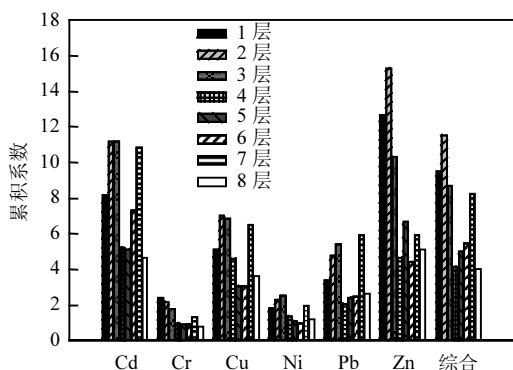


图 4 不同楼层灰尘重金属累积系数及内梅罗综合指数
Fig.4 Accumulation coefficients of heavy metals in dust and the Nemerow pollution index at different height

3 讨论

3.1 不同空间高度灰尘沉降通量变化特征

空间灰尘的累积主要来自地表源和大气沉降源。地表源包括细粒土壤、灰尘,大气沉降源则包括所有漂浮在空气中的来自交通、工业、农业、生活、等复杂多源的尘埃。从灰尘质量上来说,地表的影响高于大气沉降。孔春霞等^[20]对不同高度

气溶胶的监测结果表明,随着高度的增加,不同尺度的大气颗粒物浓度均逐渐减小。本研究显示灰尘沉降通量随着楼层增高而降低,这与离地表距离越大,受地表源灰尘影响越小的规律相符合。另外,倪刘建等^[21]研究表明沉降通量与所在位置的周边环境密切相关,高空大气环流的远程影响是其主要影响因素之一。本研究所计算的灰尘沉降通量实际上是取样周期内的灰尘保有量,因为虽然采样时选择的采样点尽量避免降雨对采样的影响,但空间平台上的灰尘不可避免地受到风搬运的影响,由于风的作用,平台上细粒级灰尘很可能被带走而重新进入飘尘。楼层越高,受风的影响越大,因此,风的作用也可能是高层灰尘沉降通量降低的原因之一^[20]。另,有研究表明,距地表 20~30m 的适当高度大气颗粒物污染程度最小^[22],这一高度正好是 7~8 层以上高度。

3.2 不同空间高度重金属含量及沉降通量变化特征

不同空间高度灰尘元素含量分析显示,常量元素 Ca 和 Fe 的分布规律并不一致。 Ca 在不同楼层灰尘中的含量变异度最小,仅为 9%,说明灰尘中 Ca 来源较为单一,笔者判断其主要来源于地表细粒土壤。而 Fe 的变异度为 24%,与重金属 Pb 、 Zn 相当,说明其来源相对复杂多样。吴志军等^[23]在模拟城市街道污染物(以 CO 为例)扩散模式的结果表明,地表污染物在气流作用下产生“爬墙效应”,污染物浓度随着楼层的增高逐渐减小,但在超过街道高度一半时又开始上升,这与本研究中 Ca 、 Cr 和 Zn 在灰尘中的含量随空间高度的变化趋势较为一致,说明 Ca 、 Cr 和 Zn 在不同空间高度灰尘中的含量主要受地表污染物的影响。而 Fe 、 Cd 、 Cu 、 Ni 和 Pb 在灰尘中的含量随楼层增高而升高,但都在 5~7 层高度上出现第二低值区,推测这 5 种元素在空间高度上的分布除了受地表源的影响外,可能更多的受到空中灰尘漂浮带的影响^[21]。本研究中灰尘中 8 种元素含量在空间高度上的变化呈现两种趋势,这应该是多种因素影响和作用的结果。本研究组曾对贵阳市室外灰尘重金属作形态分析,结果显示 Zn 、 Pb 以铁锰氧化物结合态为主,而 Cu 、 Ni 和 Cd 以碳酸盐

结合态和残渣态为主,5种元素中,Zn的碳酸盐结合态比例最低(结果尚未发表).另外,戴塔根等^[24]研究显示,空气颗粒物PM₁₀中Cu、Pb、Cd等元素质量浓度随粒径增加而减少,在<1.1μm颗粒中浓度最高,而Zn、Cr质量浓度在1.1~2.0μm粒径范围内有一峰值.这些研究都说明Zn、Cr在灰尘中的赋存状态和大气颗粒物中的粒级效应与其它元素不同,笔者推断这些性质的分化可能是导致灰尘中重金属含量在空间高度上的变化呈现两种趋势的原因之一,当然具体是哪些因素的影响,以及影响过程和机理还有待进一步的研究.

重金属沉降通量受两方面的影响,第一,灰尘沉降通量;第二,灰尘中重金属含量.前文结果显示灰尘沉降通量随空间楼层增加而降低,而Cr、Zn在灰尘中的含量也随楼层升高而降低,Ca变化不明显,两者随楼层变化方向基本一致,因而Ca、Cr和Zn沉降通量表现出明显的随空间楼层的增高而降低的趋势.其它5种元素Fe、Cd、Cu、Ni和Pb在灰尘中的含量的总体变化趋势是随楼层高度的增加含量逐渐升高,这与灰尘沉降通量随空间高度的变化趋势正好相反,但因灰尘沉降通量随空间高度增加而降低的程度高于灰尘中Fe、Cd、Cu、Ni和Pb含量随空间高度降低的程度,因而,这5种元素的沉降通量变化总体趋势仍然是随空间高度的增加而降低,只是不如Ca、Cr和Zn表现得明显.这也说明对重金属沉降通量的影响,灰尘沉降通量起了决定性作用.

3.3 不同楼层灰尘重金属导致的环境风险及主要风险元素

对灰尘重金属导致的环境污染风险评价并没有专门的模型,一般借助土壤重金属风险评价模型,其中内梅罗综合指数评价法是应用较多的一类方法^[25].内梅罗指数,综合考虑所有污染项目,特别兼顾了污染最严重的因子,在加权过程中避免了权系数中主观因素的影响,能更直观地定性描述灰尘重金属污染的总体水平.以往对灰尘重金属环境风险的评估是基于灰尘中重金属含量大小进行的,没有考虑灰尘量的多少.但对于环境中的受体,除污染物浓度是主要风险因素外,污染物的质量也是不可忽视的影响因素.灰尘是人

类暴露于重金属的重要媒介之一^[26].本文通过引进灰尘沉降量,结合灰尘中重金属含量进行的风险评估,能较全面的说明环境中重金属导致的污染风险.评价结果显示总体上低层灰尘重金属的环境风险大于高层,但在7层高度上存在高风险值,4~6层灰尘重金属环境风险最低.这种不同空间高度灰尘重金属导致的环境风险的差异是灰尘重金属含量和灰尘沉降量共同作用的结果.1~2层的灰尘Cd、Cu、Ni和Pb含量并不高,但因其较高的灰尘沉降量决定了其处于环境高风险水平;4~6层灰尘中各重金属含量都不高,其灰尘沉降量也较低,因而评级结果显示风险最低;而7层灰尘Cd和Pb含量相对较高,灰尘沉降量相比上下楼层又有上升趋势,因而评价结果也显示具有较高风险;8层极低的灰尘沉降量决定了它的风险处于较低水平.另外评价结果还显示各楼层风险元素主要为Cd和Zn,其次是Cu和Pb.这些正是Miguel等^[27]提出的城市元素.

4 结论

4.1 不同空间高度灰尘沉降通量总体分布趋势是:随着楼层的增高,灰尘沉降通量下降.

4.2 不同楼层灰尘中Fe、Cd、Cu、Ni、Pb元素含量在不同空间高度上随楼层增高而增大,而Cr和Zn元素随着楼层增高而减小,但总体上差异不大.

4.3 不同空间高度灰尘元素沉降通量总体上随着楼层的增高而下降,尤以Ca、Cr和Zn元素表现最为明显.

4.4 引进灰尘沉降量评价灰尘重金属导致的环境风险显示1~3层和7层环境风险较高,4~6层灰尘重金属导致的环境风险较低,Cd、Cu、Pb和Zn是主要风险元素.不同空间高度灰尘重金属导致的环境风险的差异是灰尘重金属含量和灰尘沉降量共同作用的结果.

参考文献:

- [1] 常 静,刘 敏,侯立军,等.城市地表灰尘的概念、污染特征与环境效应 [J]. 应用生态学报, 2007,18(5):1153-1158.
- [2] 杜佩轩,田 晖,韩永明.城市灰尘概念、研究内容与方法 [J].

- 陕西地质, 2004,22(1):73-79.
- [3] 赵兴敏,赵蓝坡,花修艺.长春市大气降尘中重金属的分布特征和来源分析 [J]. 城市环境与城市生态, 2009,22(4):30-32.
- [4] 于瑞莲,胡恭任,袁 星,等.大气降尘中重金属污染源解析研究进展 [J]. 地球与环境, 2009,37(1):73-79.
- [5] 杜佩轩,马智明,韩永明,等.城市灰尘污染及治理 [J]. 城市问题, 2004(2):46-49.
- [6] 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.
- [7] 李晓燕.季节变化对贵阳市不同功能区地表灰尘重金属的影响 [J]. 环境科学, 2013,34(6):2407-2415.
- [8] 刘春华,岑 况.北京市街道灰尘的化学成分及其可能来源 [J]. 环境科学学报, 2007,27(7):1181-1188.
- [9] 邵 莉,肖化云.公路两侧大气颗粒物中的重金属污染特征及其影响因素 [J]. 环境化学, 2012,31(3):315-323.
- [10] 向 丽,李迎霞,史江红,等.北京城区道路灰尘重金属和多环芳烃污染状况探析 [J]. 环境科学, 2010,31(1):159-167.
- [11] 常玉玉,卢新卫,陈 颢,等.西安市小学及幼儿园灰尘重金属含量及健康风险评价 [J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2013(4):100-104.
- [12] 李小飞,陈志彪,张永贺,等.福州市公交枢纽站地表灰尘重金属含量、来源及其健康风险评价 [J]. 环境科学研究, 2013, 26(8):906-912.
- [13] 杨孝智,陈 扬,徐殿斗,等.北京地铁站灰尘中重金属污染特征及健康风险评价 [J]. 中国环境科学, 2011,31(6):944-950.
- [14] 杨忠平,卢文喜,刘新荣,等.长春市城市近地表灰尘重金属污染来源解析 [J]. 干旱区资源与环境, 2010,(12):155-160.
- [15] 李晓燕,谢馨洁.我国西南三市家庭灰尘重金属水平及差异 [J]. 中国环境科学, 2013,33(2):365-371.
- [16] Tong S T, Lam K C. Home sweet home ? A case study of household dust contamination in Hong Kong [J]. Science of the Total Environment, 2000,256(2):115-123.
- [17] Meyer I, Heinrich J, Lippold U. Factors affecting lead, cadmium, and arsenic levels in house dust in a smelter town in eastern Germany [J]. Environmental Research, 1999,81(1):32-44.
- [18] Al-Rajhi M, Seaward M, Al-Aamer A. Metal levels in indoor and outdoor dust in Riyadh, Saudi Arabia [J]. Environmental International, 1996,22(3):315-324.
- [19] 杨 畅,马宏伟,田立新,等.葫芦岛市典型区土壤重金属污染特征及评价 [J]. 中国环境管理干部学院学报, 2010,20(2):71-73.
- [20] 孔春霞,郭胜利,汤莉莉.南京市生活区夏秋季节大气颗粒物垂直分布特征 [J]. 环境科学与管理, 2009,34(11):35-38.
- [21] 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.
- [22] 吴 铎,魏海涛,赵瑞瑞,等.兰州市室内大气降尘环境磁学特征及其随高度变化研究 [J]. 环境科学, 2014,35(1):79-84.
- [23] 吴志军,黄 震,谢 拯,等.城市街道峡谷机动车污染物扩散的模拟研究 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2002,32(2):28-32.
- [24] 戴塔根,罗莹华,梁 凯.重金属在不同粒径 PM_{10} 中的含量与形态 [J]. 地球科学与环境学报, 2006,28(4):87-91.
- [25] 崔邢涛,李随民.石家庄市近地表灰尘重金属污染及环境质量评价 [J]. 安全与环境学报, 2013,13(6):138-142.
- [26] Zheng N, Liu J, Wang Q, et al. Heavy metals exposure of children from stairway and sidewalk dust in the smelting district, northeast of China [J]. Atmospheric Environment, 2010,44(27):3239-3245.
- [27] Miguel E d, Llamas J F, Chacón E, et al. Origin and patterns of distribution of trace elements in street dust: Unleaded petrol and urban lead [J]. Atmospheric Environment, 1997,31(17):2733-2740.

作者简介: 张舒婷(1990-),女,广东乐昌人,贵州师范大学硕士研究生,主要从事区域环境质量影响评价方面研究.发表论文 2 篇.