

杭州市临安区 4 种绿地内细颗粒物中重金属污染特征

张天然¹, 郑文革², 章银柯³, 黄芳¹, 李晓璐¹, 袁楚阳¹, 于慧¹, 晏海¹, 邵锋¹

(1. 浙江农林大学 风景园林与建筑学院, 浙江 杭州 311300; 2. 北京市水土保持工作站, 北京 100036; 3. 杭州植物园, 浙江 杭州 310012)

摘要: 【目的】分析城市绿地内细颗粒物(PM_{2.5})中重金属质量浓度的时空变化规律及其影响因素, 可为科学规划城市绿地、改善人居环境质量提供依据。【方法】在杭州市临安区选取居住绿地、商业绿地、广场绿地和公共绿地等 4 种类型绿地作为研究对象, 采用智能中流量 TSP 采样器采集空气中的 PM_{2.5}, 通过电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)检测样品中重金属的组成及质量浓度, 分析其来源。【结果】4 种绿地内重金属总质量浓度平均值为冬季 [(950.13±90.15) ng·m⁻³] 大于春季 [(843.55±80.70) ng·m⁻³], 春、冬季重金属总质量浓度平均值从大到小依次为商业绿地 [(1 023.18±94.10) ng·m⁻³]、居住绿地 [(942.20±89.20) ng·m⁻³]、广场绿地 [(861.85±84.05) ng·m⁻³]、公共绿地 [(760.18±80.48) ng·m⁻³]。绿地内的重金属主要来自复合源(自然源、道路扬尘、汽车尾气和工业污染)、以燃煤为主的工业源和交通源等。【结论】合理增加绿地面积, 可有效减轻城市重金属污染, 在商业绿地周边控制车流量、推广新能源汽车能显著降低重金属质量浓度。图 6 表 2 参 41

关键词: 城市绿地; 细颗粒物(PM_{2.5}); 重金属; 时空变化; 污染源

中图分类号: X511 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2021)04-0737-09

Pollution characteristics of heavy metals in PM_{2.5} in four kinds of green space in Lin'an District of Hangzhou City

ZHANG Tianran¹, ZHENG Wenge², ZHANG Yinke³, HUANG Fang¹, LI Xiaolu¹,
YUAN Chuyang¹, YU Hui¹, YAN Hai¹, SHAO Feng¹

(1. College of Landscape Architecture, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. Beijing General Working Station of Soil and Water Conservation, Beijing 100036, China; 3. Hangzhou Botanical Garden, Hangzhou 310012, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] This study aims to analyze the spatio-temporal variation of heavy metal concentration in PM_{2.5} in urban green space and probe into its influencing factors, so as to provide reference for scientific planning of urban green space and improvement of the quality of human settlement environment. [Method] Four kinds of green space in Lin'an District of Hangzhou were taken as the research objects, including residential green space, commercial green space, square green space and public green space. The intelligent medium volume TSP sampler was used to collect the airborne PM_{2.5}. The component and mass concentration of heavy metals in the samples were detected by the inductively coupled plasma mass spectrometer (ICP-MS), and their sources were analyzed. [Result] The average concentrations of heavy metals in four kinds of green space were higher in winter [(950.13±90.15) ng·m⁻³] than those in spring [(843.55±80.70) ng·m⁻³]. The average concentrations of heavy metals ranging from large to small in these two seasons were commercial green space

收稿日期: 2020-08-31; 修回日期: 2021-04-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51508515); 浙江省大学生科技创新活动计划资助项目(2018R412044)

作者简介: 张天然 (ORCID: 0000-0002-1883-7373), 从事园林植物应用与园林生态研究。E-mail: 1029553057@qq.com。通信作者: 邵锋 (ORCID: 0000-0001-9874-9500), 副教授, 博士, 从事园林植物应用与园林生态研究。E-mail: shaofeng@zafu.edu.cn

[(1 023.18±94.10) ng·m⁻³], residential green space [(942.20±89.20) ng·m⁻³], square green space [(861.85±84.05) ng·m⁻³] and public green space [(760.18±80.48) ng·m⁻³]. The heavy metals in green space mainly came from complex pollution sources (natural sources, road dust, vehicle exhaust and industrial pollution), coal-based industrial sources and traffic sources, etc. [Conclusion] Reasonable increase of green space area can effectively reduce the heavy metal pollution in cities. Controlling traffic flow around commercial green space and promoting new energy vehicles can significantly lower the heavy metal concentration. [Ch, 6 fig. 2 tab. 41 ref.]

Key words: urban green space; PM_{2.5}; heavy metals; spatio-temporal variation; pollution sources

随着城镇化进程加快,以细颗粒物(PM_{2.5})为首的大气颗粒物污染越来越严重。大气环境的质量评价和污染防治已成为大气污染研究领域的主要方向之一^[1-2]。PM_{2.5}会通过呼吸进入肺部,其粒径小^[3]、比表面积大^[4],同时携带大量重金属元素和其他有毒物质^[5-7]。长期生活在严重污染的大气环境下,人们患心血管、呼吸系统等疾病的风险明显增加^[8-9],身体健康受到严重危害^[10]。研究表明:铬、钴、镍和砷等易引发细胞癌变^[11];过量的锌则会引发贫血和食欲下降^[12];镉容易造成细胞癌变和骨质疏松^[13];铅对儿童和妊娠妇女的影响极大^[14]。绿地在生态系统中具有自净功能,在调节生态平衡、改善环境质量和保护人体健康等方面发挥着积极作用^[15]。目前,有关城市绿地与大气颗粒物关系的研究集中在2个方面:一是植物枝干和叶片的滞尘效应^[16]。如李超群等^[17]研究表明:5种地被植物叶片的滞尘量与叶表面微观结构有关,被毛或边缘有齿的叶片滞尘效果较好。二是植物群落对大气颗粒物的消减作用^[18]。如刘宇等^[19]发现:江苏省宿迁市不同植物群落类型绿地内PM_{2.5}浓度由大到小依次为草坪、篱草、大阔叶乔草、乔灌木、针叶乔草和小阔叶乔草。近年来,有学者采用ArcGIS对大气中重金属元素含量进行空间分析,发现铜、锌和镉的空间分布特征较为相似,高值出现在车流量大的区域^[20]。于瑞莲等^[21]分析了福建省泉州市不同功能区大气降尘中重金属含量,发现重金属的生态危害程度从大到小依次为工业区、商业区、交通区、居民区、农业区。以上研究大多集中在城市功能区,而公园绿地、附属绿地等城市绿地内的重金属分布及污染研究鲜有报道。本研究选取杭州市临安区4种城市绿地作为研究对象,分析绿地内PM_{2.5}中重金属的时空变化规律及其影响因素,探究重金属来源,为城市绿地的科学规划和大气污染防治提供参考。

1 研究方法

1.1 研究对象

杭州市临安区地处浙西中低山丘陵区,呈东西狭长形地貌,境内多高山^[22]。属季风型气候,四季分明,温暖湿润,光照充足,雨量充沛。年平均气温16.4℃,年平均日照时数1 837.9 h,年平均降水量1 613.9 mm。植被类型为亚热带常绿阔叶林,素有“大树华盖闻九州”之誉的天目山位于临安境内。近年来,随着工业、运输业的快速发展,大气污染问题愈发突出^[23-24]。

根据CJJ/T 85-2017《城市绿地分类标准》^[25],选取居住绿地、商业绿地、广场绿地和公共绿地等4种绿地作为研究对象,分别位于春天小区、衣锦商业街、五舟广场和浙江农林大学东湖校区。居住绿地、商业绿地和公共绿地植物配植均为乔木-灌木-地被3层结构,其植物种类、郁闭度、种植密度及成熟度等群落结构特征基本一致。春天小区坐落在玲珑山脚,小区四周被城市主干道围合,交通便捷,有3个出入口,绿地率为42.5%。样地位于小区的3号楼与4号楼之间,四周均由高层建筑围合,私密性高,面积约1 500 m²。乔木层植物主要有杜英 *Elaeocarpus decipiens*、乐昌含笑 *Michelia chapensis*、桂花 *Osmanthus fragrans*,灌木层植物有海桐 *Pittosporum tobira*、红花檵木 *Loropetalum chinense* var. *rubrum*,地被植物有麦冬 *Ophiopogon japonicus* 等。衣锦商业街位于临安区中心位置,是重要的商业街区之一,人流及车流量大。样地选择在紧邻浙江农林大学衣锦校区南门处的公共区域,面积约1 800 m²。乔木层植物主要为樟树 *Cinnamomum camphora*、紫楠 *Phoebe sheareri*、荷花玉兰 *Magnolia grandiflora*,灌木层有石楠 *Photinia serrulata*、莢蒾 *Viburnum dilatatum*,地被植物为麦冬。五舟广场位于临安区东北部,是重要的市民活动广场,日常人流量较大。广场以硬质铺装为主,少量点缀紫薇 *Lagerstroemia indica* 和杨

梅 *Myrica rubra*, 四周空旷, 总面积约 4 500 m²。公共绿地选择在浙江农林大学东湖校区的学院楼 4 号楼南侧, 为师生活动、交流空间, 面积约 1 600 m²。乔木层植物主要有冬青 *Ilex chinensis*、玉兰 *Magnolia denudate*、鹅掌楸 *Liriodendron chinense*, 灌木层为山茶 *Camellia japonica*, 地被植物为麦冬。

1.2 数据获取

在 4 个绿地的近中心位置, 距离地面 1.5 m 处各布置 1 台智能中流量 TSP 采样器 (KC-120H), 并安装 QMA 石英纤维滤纸同步采集空气中的 PM_{2.5}。因持续低温、降雪及梅雨季降雨等影响, 采样时间选择 2017 年 3 月、4 月 (春季) 和 2 月、12 月 (冬季), 每月分别于月初、月中和月末各 1 d 采样。每天连续采样 8.5 h (8:00–16:30)。要求试验前 1 周内无降雨、大风等情况发生, 采样当天天气晴朗、无风或微风。采样前用锡箔纸包裹滤纸, 置于马弗炉 (设定温度 450 ℃) 中灼烧 4 h, 除去滤纸上原有的有机物及杂质, 之后将滤纸静置于恒温恒湿箱 (Premium ICH, 设定温度 25 ℃、相对湿度 50%) 内 48 h。取出后使用电子天平 (SI-234, 精度 0.1 mg) 称量和记录滤纸质量, 重复称量 3 次, 取平均值作为滤纸采样前的质量。采样完成后将滤纸再次在恒温恒湿条件下处理并称重, 记录滤纸质量, 方法及步骤同采样前。滤纸前后称得差值即为该时段内采集的 PM_{2.5} 质量。将采样后的滤纸放置在特氟隆容器中, 依次加入去离子水、浓硝酸、氢氟酸和高氯酸消解。通过电感耦合等离子体质谱仪 (Elan 9000) 检测滤纸上镁、铝、钾、钙、钛、钒、铬、锰、铁、钴、镍、铜、锌、砷、镉、铋和铅等 17 种元素及各元素质量浓度。为确保试验结果的有效性, 同步检测空白滤纸上的元素, 结果表明空白滤纸上的各元素质量浓度均低于检出限值, 因此检测结果有效。

1.3 分析方法

富集因子 (enrichment factor, F_E) 是用以定量评价污染程度与污染来源的重要指标, 以满足一定条件的元素作为参考元素, 以样品中污染元素质量分数与参考元素质量分数的比值与背景区中两者质量分数的比率^[26]来表示。公式为:

$$F_E = \frac{(C_i/C_R)_{\text{样品}}}{(C_i/C_R)_{\text{背景}}}$$

其中: C_i 和 C_R 分别表示污染元素 i 和参考元素 R 的质量浓度。铝是常用的参考元素, 杭州市锰、锌、钡、铬、铅、镍、铜、钴、砷和镉的土壤背景值分别为 346.00、62.10、62.00、49.70、22.40、20.90、15.00、11.60、7.50 和 0.06 mg·kg⁻¹。当富集因子值小于 10, 表明元素是非富集的, 主要为自然污染; 当富集因子值大于 10, 表明元素已富集, 主要为人为污染。

主成分分析是通过正交变换将一组可能存在相关性的变量转换为一组线性不相关的变量, 转换后的这组变量叫主成分^[27]。大气污染物来源广泛, 通常多种污染源会存在一定的相关性, 找出有一定相关性的污染物重新组合成一个新成分, 在此基础上用 Spearman 相关系数分析污染源的相关性, 可以进一步明确污染物的来源。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 统计和整理数据、SPSS 22.0 进行 Spearman 相关性分析、Origin 8.0 作图。

2 结果与分析

2.1 绿地内 PM_{2.5} 质量浓度变化

由图 1 可知: 4 种绿地内 PM_{2.5} 质量浓度冬季平均值为 (102.68±9.43) μg·m⁻³, 春季为 (48.34±5.13) μg·m⁻³。2 个季节 PM_{2.5} 质量浓度均超过 GB 3095–2012《环境空气质量标准》^[28] 规定的二级质量浓度限值 (35 μg·m⁻³) 和欧洲空气质量准则^[29] 规定的的质量浓度日均值 (25 μg·m⁻³)。在空间上, 位于城市道路旁边的商业绿地, 春、冬季 PM_{2.5} 质量浓度平均值最

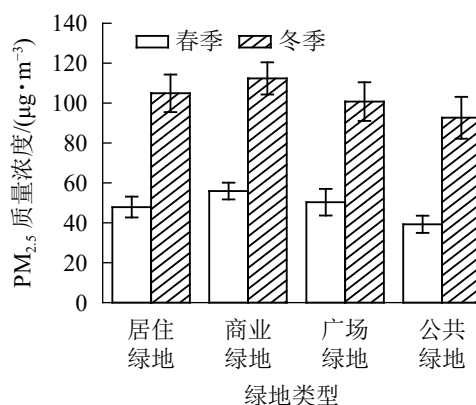


图 1 不同绿地内 PM_{2.5} 质量浓度季变化

Figure 1 Seasonal variation of PM_{2.5} concentrations in different green spaces

高, 为 $(84.12 \pm 6.15) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 居住绿地 $[(76.41 \pm 7.30) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 和广场绿地 $[(75.55 \pm 8.20) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 次之, 公共绿地 $[(65.98 \pm 7.40) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 最低。

2.2 绿地内 $\text{PM}_{2.5}$ 中重金属质量浓度变化

春、冬季不同绿地内 $\text{PM}_{2.5}$ 中铬、锰、铜、锌、砷和铅等 6 种重金属平均质量浓度占所测元素总质量浓度的 17.95%, 而钒、钴、镍和镉等 4 种重金属仅占 0.56%。10 种重金属平均质量浓度为 $(2.83 \pm 0.52) \sim (429.69 \pm 22.59) \text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 其中: 锌和铅较高, 分别为 (429.69 ± 22.59) 和 $(278.23 \pm 18.29) \text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 分别占元素总质量浓度的 8.65% 和 5.60%; 钒和钴较低, 仅为 (6.22 ± 0.59) 和 $(2.83 \pm 0.52) \text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 分别占元素总质量浓度的 0.13% 和 0.06%(图 2 和图 3)。

由图 4 可知: 4 种绿地内重金属总质量浓度平均值不同, 冬季为 $(950.13 \pm 90.15) \text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 春季为 $(843.55 \pm 80.70) \text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 。春季不同重金属质量浓度为 $(2.10 \pm 0.60) \sim (459.30 \pm 43.00) \text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 商业绿地内锌和铅较高, 分别为 (459.30 ± 43.00) 和 $(259.70 \pm 23.00) \text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 公共绿地内钴最低, 仅为 $(2.10 \pm 0.60) \text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$; 冬季不同重金属质量浓度为 $(2.85 \pm 0.80) \sim (458.98 \pm 40.00) \text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 与春季相似, 商业绿地内锌 $[(458.98 \pm 40.00) \text{ng} \cdot \text{m}^{-3}]$ 和铅 $[(361.30 \pm 35.00) \text{ng} \cdot \text{m}^{-3}]$ 较高, 公共绿地内钴 $[(2.85 \pm 0.80) \text{ng} \cdot \text{m}^{-3}]$ 最低。4 种绿地内, 钒、锰、钴、镍、铜、砷、镉和铅的质量浓度均表现为冬季大于春季, 与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的季节变化趋势一致, 锰、铜、砷和铅季节差异显著 ($P < 0.05$), 钒、钴、镍和镉的季节差异不显著 ($P > 0.05$)。此外, 铬和锌的质量浓度季节差异亦不显著 ($P > 0.05$)。

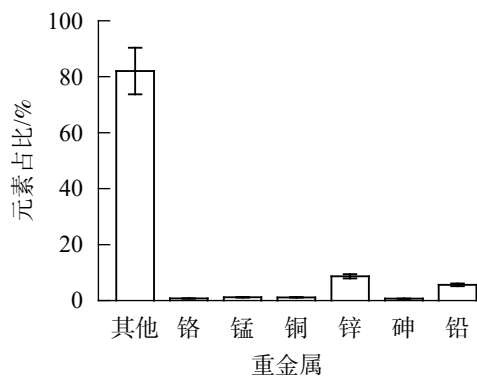


图 2 $\text{PM}_{2.5}$ 中元素质量浓度占比

Figure 2 Proportion of element concentrations in $\text{PM}_{2.5}$

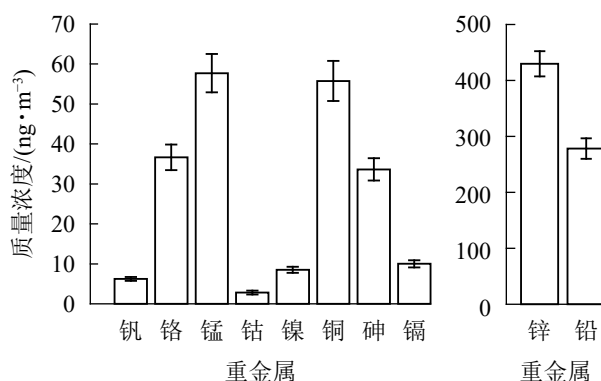


图 3 $\text{PM}_{2.5}$ 中重金属平均质量浓度

Figure 3 Mean value of heavy metal concentrations in $\text{PM}_{2.5}$

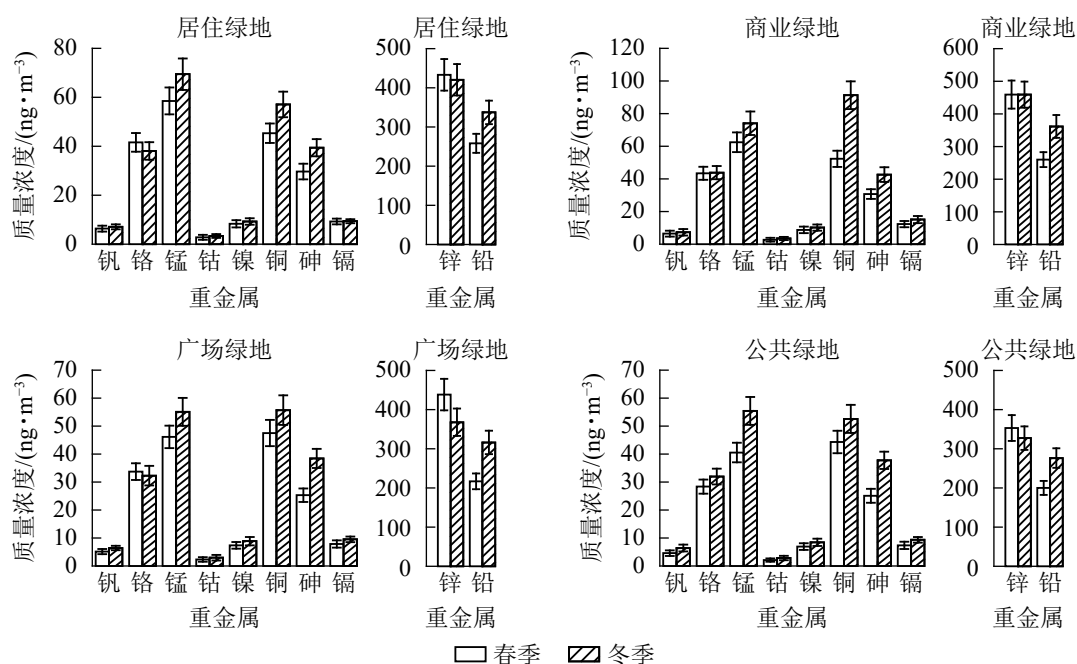


图 4 春、冬季绿地内 $\text{PM}_{2.5}$ 中重金属质量浓度

Figure 4 Heavy metal concentrations in $\text{PM}_{2.5}$ in green spaces in spring and winter

在空间上,春、冬季重金属总质量浓度平均值从大到小依次为商业绿地 $[(1\,023.18 \pm 94.10) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}]$ 、居住绿地 $[(942.20 \pm 89.20) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}]$ 、广场绿地 $[(861.85 \pm 84.05) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}]$ 、公共绿地 $[(760.18 \pm 80.48) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}]$ 。10 种重金属质量浓度最高值均出现在商业绿地内,最低值均在公共绿地内,其中:锌最高,为 $(459.14 \pm 38.00) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$;钴最低,仅为 $(2.48 \pm 0.60) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 。另外,居住绿地和广场绿地内锌质量浓度均最高,分别为 (426.94 ± 40.00) 和 $(403.00 \pm 38.00) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$;钴均最低,分别为 (3.07 ± 0.80) 和 $(2.65 \pm 0.65) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$;重金属质量浓度从大到小依次均为锌、铅、锰、铬、砷、镉、镍、钒、钴(除铜以外,图 5)。

2.3 绿地内 $\text{PM}_{2.5}$ 中重金属来源

富集因子值反映了重金属元素在大气颗粒物中的富集程度,可分析自然来源和人为来源对大气污染的相对贡献^[26]。如图 6 所示:春、冬季绿地内重金属元素的富集因子平均值从大到小依次为镉、铅、锌、砷、铜、铬、镍、钴、锰、钒。由于天气条件和污染排放源不同,钒、锰、钴、镍、铜、砷、镉和铅的富集因子值均呈现为冬季大于春季。钒、锰和钴的富集因子值小于 10,表明这 3 种元素来自自然污染;铬、镍、铜、锌、砷、镉和铅大于 10,表明这 7 种元素来自人为污染。

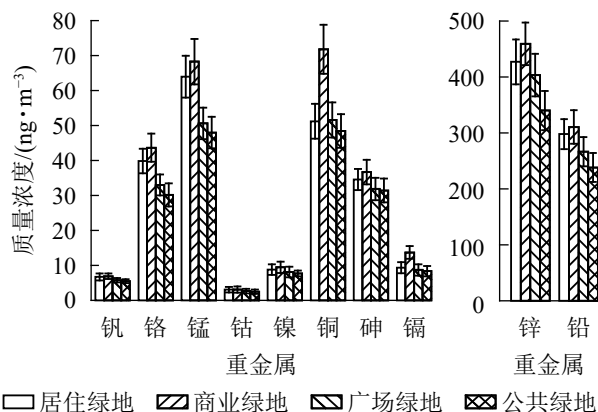


图 5 不同绿地内 $\text{PM}_{2.5}$ 中重金属质量浓度

Figure 5 Heavy metal concentrations in $\text{PM}_{2.5}$ in different green spaces

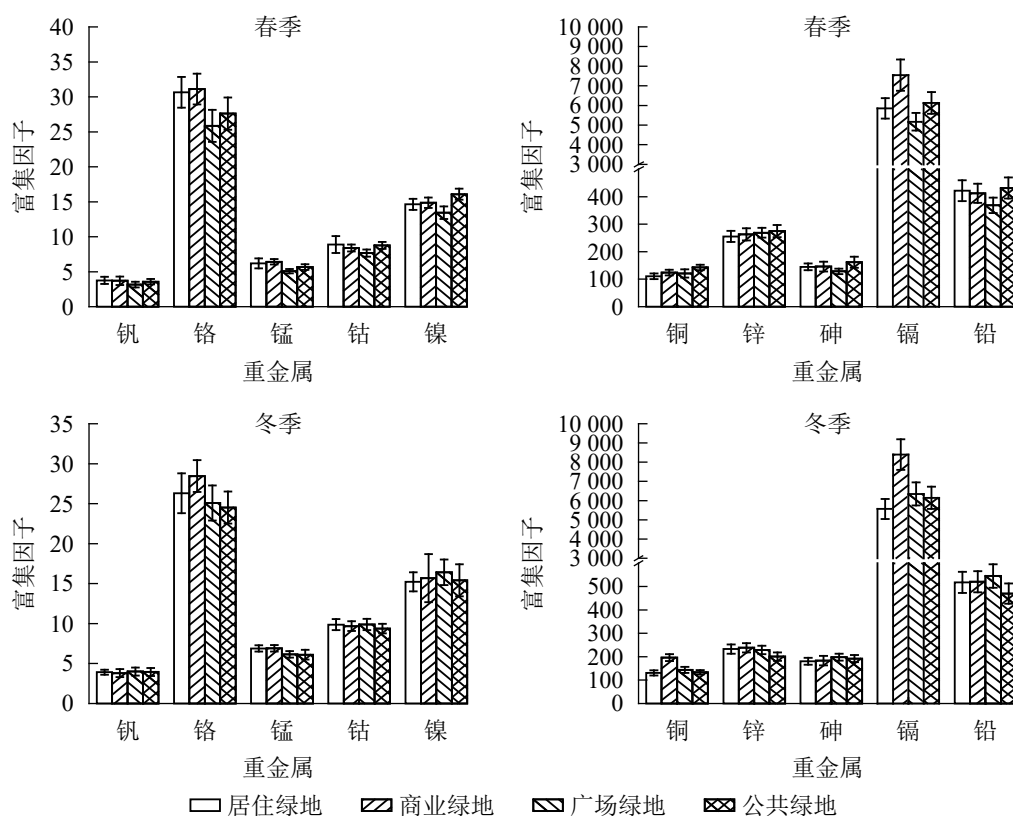


图 6 不同绿地内 $\text{PM}_{2.5}$ 中重金属元素的富集因子

Figure 6 Enrichment factors of heavy metals in $\text{PM}_{2.5}$ in different green spaces

采用主成分分析法进一步明确绿地内 $\text{PM}_{2.5}$ 中重金属的来源,结果见表 1 和表 2。由表 1 可知:主成分 1 的贡献率达 63.43%,载荷较高的为铬、锰、铜和锌。研究认为:铬是钢铁冶炼的标志性元素^[30],锰为地壳源,铜和锌主要来自机动车尾气排放和轮胎磨损^[6,31]。绿地内铬的富集因子值为 24.51~31.10,且与锰、铜和锌呈极显著相关 ($P < 0.01$, 表 2)。主成分 1 是自然源、道路扬尘、机动车尾气和工业排放组成的复合源。主成分 2 的贡献率为 13.17%,载荷较高的为钒、砷、镉和铅。钒的富集因子值小于

表1 PM_{2.5}中重金属元素在前3个主成分中的因子荷载Table 1 Factor loading of heavy metals in PM_{2.5} in the first three principal components

元素	旋转后主成分因子荷载			元素	旋转后主成分因子荷载		
	主成分1	主成分2	主成分3		主成分1	主成分2	主成分3
钒	0.193	0.821	0.142	锌	0.873	0.267	0.804
铬	0.915	0.197	0.110	砷	0.478	0.669	0.322
锰	0.711	0.503	0.305	镉	0.271	0.762	-0.507
钴	0.581	0.507	0.512	铅	0.445	0.732	0.414
镍	0.272	0.130	0.896	贡献率/%	63.430	13.170	8.300
铜	0.798	0.327	0.294	累积贡献率/%	63.430	76.600	84.900

表2 绿地内 PM_{2.5} 中重金属元素的相关性分析Table 2 Correlation analysis of heavy metals in PM_{2.5} in green spaces

	钒	铬	锰	钴	镍	铜	锌	砷	镉	铅
钒	1									
铬	0.400**	1								
锰	0.593**	0.795**	1							
钴	0.601**	0.718**	0.769**	1						
镍	0.328*	0.366*	0.507**	0.647**	1					
铜	0.434**	0.758**	0.795**	0.700**	0.546**	1				
锌	0.481**	0.791**	0.726**	0.706**	0.379**	0.777**	1			
砷	0.515**	0.602**	0.780**	0.751**	0.431**	0.699**	0.550**	1		
镉	0.551**	0.326*	0.390**	0.278	0.206	0.350*	0.391**	0.455**	1	
铅	0.625**	0.562**	0.812**	0.841**	0.533**	0.736**	0.594**	0.907**	0.463**	1

说明：**表示在0.01水平(双侧)上极显著相关；*表示在0.05水平(双侧)上显著相关

10, 表明其为自然源, 镉与电镀镀种和工艺有很大关系^[32], 砷和铅为燃煤排放。同时, 铅是机动车尾气排放的标志性元素^[33]。随着中国全面进入无铅化汽油时代, 机动车尾气排放已不再是铅的主要来源^[34], 因此, 砷和铅主要来自燃煤污染, 工业排放对主成分2的贡献较大。主成分3的贡献率为8.30%, 载荷较高的为镍和锌, 镍和锌主要来自机动车尾气和燃油^[35], 所以主成分3为交通污染源。综上所述, 绿地内钒为自然源; 铬、锰、铜和锌为自然源、道路扬尘、机动车尾气和工业排放的复合源; 砷、镉和铅来自工业源; 镍和锌为交通源。

3 讨论

4种绿地内重金属总质量浓度平均值与PM_{2.5}质量浓度的季节变化趋势一致, 均表现为冬季大于春季。临安地区冬季寒冷, 近地层大气稳定, 远距离输送的污染物不易扩散, 加之植物进入休眠期, 滞尘能力下降, 因此冬季大气污染较重。春季, 随着天气回暖, 植物生长迅速, 对颗粒物的滞留和吸附能力增强, 这对改善空气质量起到积极作用。研究^[36]表明: PM_{2.5}质量浓度日变化呈现“早晚高、中午低”的现象, 峰值出现在8:00和18:00。绿地内钒、锰、钴、镍、铜、砷、镉和铅的质量浓度均为冬季大于春季, 铬和锌的季节差异不显著。雷文凯等^[37]研究表明: 保定市PM_{2.5}及其重金属质量浓度为秋冬季大于春夏季, 这与本研究结果一致。在空间上, 由于机动车尾气排放和其他人为活动的影响, 春、冬季重金属总质量浓度平均值从大到小为商业绿地 [(1 023.18±94.10) ng·m⁻³]、居住绿地 [(942.20±89.20) ng·m⁻³]、广场绿地 [(861.85±84.05) ng·m⁻³]、公共绿地 [(760.18±80.48) ng·m⁻³]。不同功能区内重金属质量浓度差异较大, 生态危害程度从大到小为商业区、居民区、农业区^[21]。本研究中10种重金属质量浓度最高值均出现在商业绿地内, 与其所处的地理位置有很大关系。商业绿地周边人流、车流量大, 早晚高峰明显, 道路车辆的增加, 导致排放的大气颗粒物浓度升高, 其次是早晚温度低、空气湿度大, 不利于大气的输

送和扩散^[36]。田春辉等^[38]研究也证实：商业区内的钛、钒、镍和钡污染较其他区域严重。本研究表明：绿地内的重金属主要来自复合源（自然源、道路扬尘、汽车尾气和工业污染）、以燃煤为主的工业源和交通源等。杨怀金等^[35]研究发现：成都西南郊区 PM_{2.5} 中重金属主要来自交通源、工业尘源和生物质燃烧源，而杭州西湖景区 PM_{2.5} 中重金属主要来自人为污染，其中，机动车尾气和交通的二次扬尘贡献率较高^[39]。周雪明等^[40]研究得出：北京大气中少量重金属污染为外地排放的一次污染在传输过程中形成的二次污染，说明重金属受气象因素的影响较大，并且具有不稳定性。绿地内镉质量浓度较低，而富集因子最高，表明这种元素存在强烈的人为富集，和人为排放有很大关系，这与 TIAN 等^[41]的观点相似。城市绿地能有效滞留和吸附大气颗粒物。合理增加绿地面积，可有效减轻城市重金属污染，同时，减少工业污染排放，在商业绿地周边控制车流量、推广新能源汽车也能显著降低重金属质量浓度。今后应增加绿地类型和数量开展研究，为改善城市空气质量提供更科学的依据。

4 参考文献

- [1] LIANG Xuan, ZOU Tao, GUO Bin, *et al.* Assessing Beijing's PM_{2.5} pollution: severity, weather impact, APEC and winter heating [J]. *Proc Royal Soc A*, 2015, **471**.
- [2] 赵晨曦, 王云琦, 王玉杰, 等. 北京地区冬春 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 污染水平时空分布及其与气象条件的关系[J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 418–427.
ZHAO Chenxi, WANG Yunqi, WANG Yujie, *et al.* Temporal and spatial distribution of PM_{2.5} and PM₁₀ pollution status and the correlation of particulate matters and meteorological factors during winter and spring in Beijing [J]. *Chin J Environ Sci*, 2014, **35**(2): 418–427.
- [3] 魏复盛, 滕恩江, 吴国平, 等. 我国 4 个大城市空气 PM_{2.5}、PM₁₀ 污染及其化学组成[J]. 中国环境监测, 2001, **17**(7): 1–6.
WEI Fusheng, TENG Enjiang, WU Guoping, *et al.* Concentrations and elemental components of PM_{2.5}, PM₁₀ in ambient air in four large Chinese cities [J]. *Environ Monit China*, 2001, **17**(7): 1–6.
- [4] 杨洪斌, 邹旭东, 汪宏宇, 等. 大气环境中 PM_{2.5} 的研究进展与展望[J]. 气象与环境学报, 2012, **28**(3): 77–82.
YANG Hongbin, ZOU Xudong, WANG Hongyu, *et al.* Study progress on PM_{2.5} in atmospheric environment [J]. *J Meteorol Environ*, 2012, **28**(3): 77–82.
- [5] LÜ Senlin, ZHANG Rui, YAO Zhenkun, *et al.* Size distribution of chemical elements and their source apportionment in ambient coarse, fine, and ultrafine particles in Shanghai urban summer atmosphere [J]. *J Environ Sci*, 2012, **24**(5): 882–890.
- [6] HU Xin, ZHANG Yun, DING Zhuhong, *et al.* Bioaccessibility and health risk of arsenic and heavy metals (Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn and Mn) in TSP and PM_{2.5} in Nanjing, China [J]. *Atmos Environ*, 2012, **57**: 146–152.
- [7] LIU Pingping, REN Huarui, XU Hongmei, *et al.* Assessment of heavy metal characteristics and health risks associated with PM_{2.5} in Xi'an, the largest city in northwestern China [J]. *Air Qual Atmos Health*, 2018, **11**(9): 1037–1047.
- [8] 齐爱, 张亚娟, 杨惠芳. 大气 PM_{2.5} 对心血管系统影响及其作用机制研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2016, **33**(5): 465–469.
QI Ai, ZHANG Yajuan, YANG Huifang. Adverse effects of atmospheric PM_{2.5} on cardiovascular system and mechanism: a review of recent studies [J]. *J Environ Health*, 2016, **33**(5): 465–469.
- [9] PANWAR P, PRABHU V, SONI A, *et al.* Sources and health risks of atmospheric particulate matter at Bhagwanpur, an industrial site along the Himalayan foothills [J]. *SN Appl Sci*, 2020, **2**: 632. doi: [10.1007/s42452-020-2420-1](https://doi.org/10.1007/s42452-020-2420-1).
- [10] KHANNA I, KHARE M, GARGAVA P. Health risks associated with heavy metals in fine particulate matter: a case study in Delhi city, India [J]. *J Geosci Environ Prot*, 2015, **3**(2): 72–77.
- [11] 陶俊, 张仁健, 段菁春, 等. 北京城区 PM_{2.5} 中致癌重金属季节变化特征及其来源分析[J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 411–417.
TAO Jun, ZHANG Renjian, DUAN Jingchun, *et al.* Seasonal variation of carcinogenic heavy metals in PM_{2.5} and source analysis in Beijing [J]. *Environ Sci*, 2014, **35**(2): 411–417.
- [12] 滕德智, 何作顺. 锌镉毒性研究进展[J]. 微量元素与健康研究, 2012, **29**(1): 51–53.

- TENG Dezhi, HE Zuoshun. Progress on toxicity studies of zinc and cadmium [J]. *Stud Trace Elem Health*, 2012, **29**(1): 51 – 53.
- [13] 董婷, 李天昕, 赵秀阁, 等. 某焦化厂周边大气 PM_{10} 重金属来源及健康风险评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(4): 1238 – 1244.
- DONG Ting, LI Tianxin, ZHAO Xiuge, *et al.* Source and health risk assessment of heavy metals in ambient air PM_{10} from one coking plant [J]. *Environ Sci*, 2014, **35**(4): 1238 – 1244.
- [14] NEEDLEMAN H L. The future challenge of lead toxicity [J]. *Environ Health Perspect*, 1990, **89**: 85 – 89.
- [15] 彭镇华. 中国城市森林[M]. 北京: 中国林业出版社, 2014.
- [16] 柴一新, 祝宁, 韩焕金. 城市绿化树种的滞尘效应: 以哈尔滨市为例[J]. 应用生态学报, 2000, **13**(9): 1121 – 1126.
- CHAI Yixin, ZHU Ning, HAN Huanjin. Dust removal effect of urban tree species in Harbin [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2000, **13**(9): 1121 – 1126.
- [17] 李超群, 钟梦莹, 武瑞鑫, 等. 常见地被植物叶片特征及滞尘效应研究[J]. 生态环境学报, 2015, **24**(12): 2050 – 2055.
- LI Chaoqun, ZHONG Mengying, WU Ruixin, *et al.* Study on leaf characteristics and dust-capturing capability of common ground cover plants [J]. *Ecol Environ Sci*, 2015, **24**(12): 2050 – 2055.
- [18] 罗曼. 不同群落结构绿地对大气污染物的消减作用研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.
- LUO Man. *Study on Air Pollutants Removal Effects of Green Space with Different Community Structures*[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013.
- [19] 刘宇, 黄旭, 偶春, 等. 夏季不同结构绿地空气 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与气象因子关系[J]. 西北林学院学报, 2015, **30**(5): 241 – 245.
- LIU Yu, HUANG Xu, OU Chun, *et al.* Relationships between $\text{PM}_{2.5}$ concentrations in different greenbelts and climate factors in summer [J]. *J Northwest For Univ*, 2015, **30**(5): 241 – 245.
- [20] 耿雅妮, 梁青芳, 杨宁宇, 等. 宝鸡市城区灰尘重金属空间分布、来源及健康风险[J]. 地球与环境, 2019, **47**(5): 696 – 706.
- GENG Yani, LIANG Qingfang, YANG Ningning, *et al.* Distribution, sources and health risk assessment of heavy metals in dusts of the urban area of the Baoji city [J]. *Earth Environ*, 2019, **47**(5): 696 – 706.
- [21] 于瑞莲, 胡恭任, 戚红璐, 等. 泉州市不同功能区大气降尘重金属污染及生态风险评价[J]. 环境化学, 2010, **29**(6): 1086 – 1090.
- YU Ruilian, HU Gongren, QI Honglu, *et al.* Pollution and ecological risk assessment of heavy metals in the dustfall from different functional areas of Quanzhou City [J]. *Environ Chem*, 2010, **29**(6): 1086 – 1090.
- [22] 邱栩文. 临安市环境保护“十一五”规划研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- QIU Xuwen. *Research on Eleventh Five Years Environmental Planning of Lin'an*[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [23] 杭州市统计局. 2017 杭州统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [24] 王维, 侯平, 严淑娟, 等. 杭州临安一次严重大气污染过程的气温与污染物特征[J]. 浙江农林大学学报, 2018, **35**(6): 997 – 1006.
- WANG Wei, HOU Ping, YAN Shuxian, *et al.* Atmospheric temperature and pollutants on heavy pollution days in Lin'an, Hangzhou [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2018, **35**(6): 997 – 1006.
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市绿地分类标准: CJJ/T 85–2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [26] 张秀芝, 鲍征宇, 唐俊红. 富集因子在环境地球化学重金属污染评价中的应用[J]. 地质科技情报, 2006, **25**(1): 65 – 72.
- ZHANG Xiuzhi, BAO Zhengyu, TANG Junhong. Application of the enrichment factor in evaluating of heavy metals contamination in the environmental geochemistry [J]. *Geol Sci Technol Inf*, 2006, **25**(1): 65 – 72.
- [27] GHOSH S, RABHA R, CHOWDHURY M, *et al.* Source and chemical species characterization of PM_{10} and human health risk assessment of semi-urban, urban and industrial areas of West Bengal, India [J]. *Chemosphere*, 2018, **207**: 626 – 636.
- [28] 中华人民共和国环境保护部. 环境空气质量标准: GB 3095–2012[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [29] World Health Organization. *Air Quality Guidelines for Europe*[M]. Copenhagen: WHO Library Cataloguing in Publication Data, 2000.
- [30] LÜ Weiwei, WANG Yanxin, QUEROL X, *et al.* Geochemical and statistical analysis of trace metals in atmospheric

- particulates in Wuhan, central China [J]. *Environ Geol*, 2006, **51**(1): 121 – 132.
- [31] DUONG T T T, LEE B K. Determining contamination level of heavy metals in road dust from busy traffic areas with different characteristics [J]. *J Environ Manage*, 2011, **92**: 554 – 562.
- [32] 赵珍丽, 赵委托, 黄庭, 等. 电镀厂周边大气 PM₁₀ 中重金属季节性分布特征及生态风险评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(1): 18 – 26.
- ZHAO Zhenli, ZHAO Weituo, HUANG Ting, *et al.* Seasonal characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in PM₁₀ around electroplating plants [J]. *Environ Sci*, 2018, **39**(1): 18 – 26.
- [33] 谭吉华, 段菁春. 中国大气颗粒物重金属污染、来源及控制建议[J]. 中国科学院研究生院学报, 2013, **30**(2): 145 – 155.
- TAN Jihua, DUAN Jingchun. Heavy metals in aerosol in China: pollution, sources, and control strategies [J]. *J Grad Univ Chin Acad Sci*, 2013, **30**(2): 145 – 155.
- [34] 朱玉琴, 司云航, 朱忆宁, 等. 我国车用汽油标准现状及发展趋势[J]. 天然气化工, 2014, **39**(6): 77 – 81.
- ZHU Yuqin, SI Yunhang, ZHU Yining, *et al.* Current situation and development trend of motor gasoline standards in China [J]. *Nat Gas Chem Ind*, 2014, **39**(6): 77 – 81.
- [35] 杨怀金, 杨德容, 叶芝祥, 等. 成都西南郊区春季 PM_{2.5} 中元素特征及重金属潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2016, **37**(12): 4490 – 4503.
- YANG Huaijin, YANG Derong, YE Zhixiang, *et al.* Characteristics of elements and potential ecological risk assessment of heavy metals in PM_{2.5} at the southwest suburb of Chengdu in spring [J]. *Environ Sci*, 2016, **37**(12): 4490 – 4503.
- [36] 刘浩栋, 陈亚静, 李清殿, 等. 城市道路林对细颗粒物 (PM_{2.5}) 的阻滞作用解析[J]. 浙江农林大学学报, 2020, **37**(3): 397 – 406.
- LIU Haodong, CHEN Yajing, LI Qingdian, *et al.* Analysis of blocking effects of urban roadside forests on PM_{2.5} [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2020, **37**(3): 397 – 406.
- [37] 雷文凯, 李杏茹, 张兰, 等. 保定地区 PM_{2.5} 中重金属元素的污染特征及健康风险评价[J]. 环境科学, 2021, **42**(1): 38 – 44.
- LEI Wenkai, LI Xingru, ZHANG Lan, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in PM_{2.5} collected in Baoding [J]. *Environ Sci*, 2021, **42**(1): 38 – 44.
- [38] 田春辉, 杨若杼, 古丽扎尔·依力哈木, 等. 南京市大气降尘重金属污染水平及风险评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(7): 3118 – 3125.
- TIAN Chunhui, YANG Ruozhu, Gulizhaer Yilihamu, *et al.* Pollution levels and risk assessment of heavy metals from atmospheric deposition in Nanjing [J]. *Environ Sci*, 2018, **39**(7): 3118 – 3125.
- [39] 沈建东, 周玉强, 王蕴赞, 等. 杭州西湖景区 PM_{2.5} 中重金属来源及健康风险评价[J]. 环境污染与防治, 2020, **42**(2): 199 – 203.
- SHEN Jiandong, ZHOU Yuqiang, WANG Yunyun, *et al.* Sources and health risk assessment of heavy metals in PM_{2.5} of West Lake scenic area in Hangzhou [J]. *Environ Poll Control*, 2020, **42**(2): 199 – 203.
- [40] 周雪明, 郑乃嘉, 李英红, 等. 2011-2012 北京大气 PM_{2.5} 中重金属的污染特征与来源分析[J]. 环境科学, 2017, **38**(10): 4054 – 4060.
- ZHOU Xueming, ZHENG Naijia, LI Yinghong, *et al.* Chemical characteristics and sources of heavy metals in fine particles in Beijing in 2011-2012 [J]. *Environ Sci*, 2017, **38**(10): 4054 – 4060.
- [41] TIAN Hezhong, CHENG Ke, WANG Yan, *et al.* Temporal and spatial variation characteristics of atmospheric emissions of Cd, Cr, and Pb from coal in China [J]. *Atmos Environ*, 2012, **50**: 157 – 163.