

DOI: 10.5846/stxb201910142135

朱立安, 曾清苹, 柳勇, 柯欢, 程炯, 张会化, 李俊杰. 佛山城市典型森林群落土壤重金属分布、流通及枯落物富集特征. 生态学报, 2020, 40(13): 4659-4669.

Zhu L A, Zeng Q P, Liu Y, Ke H, Cheng J, Zhang H H, Li J J. Heavy metals distribution and circulation in soils and their enrichment characteristics by litter in urban typical forest communities in Foshan, China. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(13): 4659-4669.

佛山城市典型森林群落土壤重金属分布、流通及枯落物富集特征

朱立安¹, 曾清苹¹, 柳勇¹, 柯欢², 程炯^{1,*}, 张会化¹, 李俊杰¹

1 广东省科学院, 广东省生态环境技术研究所, 华南土壤污染控制与修复国家地方联合工程研究中心, 广东省农业环境综合治理重点实验室, 广州 510650

2 佛山市林业科学研究所, 佛山 528222

摘要: 富集重金属的枯落物分解可能提高重金属暴露率, 增加人体接触健康风险。为了解南方城市土壤重金属在森林生态系统中的分布及流转情况, 通过调查研究了佛山市 8 个典型森林群落土壤及枯落物重金属含量, 分析了各森林群落枯落物对不同重金属的富集效应及重金属随枯落物回归土壤流通量。结果表明: 1) 城市森林各土壤重金属含量在不同典型群落间差异显著 ($P < 0.05$), 差异最大为 Pb、Cr、Zn、As、Cu、Ni 次之, Hg、Cd 最小; 土层深度 (0—20, 20—40, 40—60 cm) 对重金属含量影响显著 ($P < 0.05$), 差异最大为 Cd、Hg, 其次为 As、Cu, 最小为 Zn、Ni、Pb、Cr。整体上, Cd、Hg、As、Pb、Zn 在 0—20 cm 最高, 表层富集特征明显, Cr 和 Ni 在 40—60 cm 最高。2) 8 个森林群落中阴香—白楸—醉香含笑群落 (CMMC) 枯落物对 8 种重金属的综合富集系数 (TBCF, 66.76) 最高, 其中以 Cd 的富集效果最突出, 富集系数为 44.45, 且对 Pb、Cu、Zn 也相对富集; 最低的为薰莨锥—香椿—樟树群落 (CTCC), 综合富集系数 (TBCF) 为 8.09, 仅对 Cd、Cr、Cu 相对富集, 对其余重金属富集效应不明显。3) 相关分析显示, 群落重金属枯落物流通量与 0—60 cm 土壤重金属平均含量 (Cr 和 Ni 除外) 无显著相关性。本研究对城市森林建设管理及筛选重金属富集植物及群落具有较强理论及实践意义。

关键词: 城市森林土壤; 重金属; 枯落物; 流通量; 富集效应

Heavy metals distribution and circulation in soils and their enrichment characteristics by litter in urban typical forest communities in Foshan, China

ZHU Li'an¹, ZENG Qingping¹, LIU Yong¹, KE Huan², CHENG Jiong^{1,*}, ZHANG Huihua¹, LI Junjie¹

1 National-Regional Joint Engineering Research Center for Soil Pollution Control and Remediation in South China, Guangdong Key Laboratory of Integrated Agro-environmental Pollution Control and Management, Guangdong Institute of Eco-environmental Science & Technology, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China

2 Foshan Institute of Forestry Science, Foshan 528222, China

Abstract: Decomposition of heavy metal-enriched litter may increase the exposure risk levels of toxic metals in some urban forest communities, resulting in the human health risk of exposure to these elements. In the present study, the concentrations of 8 heavy metals (Cd, Hg, As, Pb, Cr, Cu, Ni, and Zn) in soil and litter samples from 8 urban typical forest communities in Foshan, an industrial developed city of Guangdong Province, China was investigated, in order to understand the distribution and circulation of soil heavy metals in urban forest ecosystems in Southern China. Meanwhile,

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41271517, 41771232); 国家重点研发项目 (2017YFC0505402); 广东省科学院项目 (2019GDASYL—0104014); 佛山市森林生态监测项目 (0809—1541FSC3AA38)

收稿日期: 2019-10-14; 修订日期: 2020-05-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 85951452@qq.com

the enrichment effects of different heavy metals by litter and the return fluxes of these heavy metals from litter to the soils were analyzed. Results showed as follows: 1) The urban typical forest communities varied significantly with the different heavy metals in soils ($P < 0.05$), showing the largest concentration differences for Pb, Cr, and Zn, followed by As, Cu, and Ni, while Hg and Cd being the smallest. In addition, the soil depth (0—20 cm, 20—40 cm, and 40—60 cm) had a significant effect on the concentrations of 8 heavy metals in soils ($P < 0.05$), with the largest differences seen in the concentrations of Cd and Hg, followed by As and Cu, and the smallest differences observed in the concentrations of Zn, Ni, Pb and Cr. In most cases, Cd, Hg, As, Pb, Cu, and Zn had the highest concentrations in soils at a 0—20 cm depth, showing the obvious characteristics of surface enrichment, while Cr and Ni showed the highest values in soils at a 40—60 cm depth. 2) Among 8 kinds of plant communities, the highest comprehensive enrichment coefficient, also referred to as total bioconcentration factor (TBCF; 66.76) for different heavy metals by litter, was achieved in *Cinnamomum burmannii* (C. G. et Th. Nees) Bl.—*Mallotus paniculatus* (Lam.) Muell. Arg.—*Michelia macclurei* Dandy (CMMC) community. With the enrichment coefficient of 44.45 for Cd, its enrichment effect was most evident in the CMMC community, while those for Pb, Cu and Zn were relatively enriched. On the contrary, the lowest TBCF (8.09) for different heavy metals by litter was found in *Castanopsis fissa* (Champ. ex Benth.) Rehd. et Wils.—*Toona sinensis* (A. Juss.) Roem.—*Cinnamomum camphora* (L.) Presl (CTCC) community. The enrichment effects, only for Cd, Cr, and Cu, were still evident in the CTCC community, but for other heavy metals, were not at all obvious. 3) The results from the bivariate correlation analysis revealed that no significant correlation was found between the return flux of heavy metals from litter to soil and the concentration of heavy metals in soil (except for Cr and Ni). This study has strong theoretical and practical significance for the construction and management of urban forest parks, and also for the screening and selection of heavy metal-enriched plants.

Key Words: urban forest soil; heavy metals; litter; return flux; enrichment effect

佛山作为“粤港澳大湾区”“珠江—西江经济带”快速发展的典型工业城市,是珠江西岸先进装备制造业龙头,是华南地区最主要经济中心之一^[1]。过去几十年经济快速发展导致大量污染物进入环境生态系统,城市环境问题日益突出^[2-4]。城市森林作为城市生态系统的重要组成部分,是城市生态系统中执行“纳污吐新”负反馈机制的主要自然环境子系统之一,被称为“城市之肺”^[5-6]。土壤是为植物生长发育提供营养物质和生长空间的载体,同时对环境污染物也具有缓冲和净化功能,城市森林土壤通过土壤微粒的机械拦截与交换,土壤胶体的吸附、络合与沉淀,可储存森林生态系统中约 90% 的污染物^[7]。枯落物是植物生命周期更替过程中自然死亡或脱落的产物,是土壤与植物重要物质交换通道,对重金属有较为明显富集作用^[8],其积累和分解作为土壤与植物间重金属的重要流转通道^[9],是重金属在森林土壤生态系统中再分配的主要途径之一,同时也导致重金属从土壤系统再次进入环境循环系统。2014 年全国土壤污染调查显示森林土壤林地点位超标率为 10.0%,以 Cd、As 污染为主,近年一些研究也更多的关注了城市森林土壤重金属污染问题,并发现了城市森林中乔、灌木等对土壤重金属具有显著消减作用,且植被类型或群落不同消减效果各异^[10-12],但对城市森林土壤重金属分布特征、形成机制、土壤系统和植物系统间流转情况及枯落物的富集效应等研究报道鲜见。《国家林业局关于着力开展森林城市建设的指导意见》(林宣发[2016]126 号)指出“森林公园建设应使用有益于人体健康的乡土树种”。因此,在休憩型森林建设过程中,为减少枯落物分解过程中重金属暴露率,降低人体与环境重金属的直接接触风险,低富集植物对休憩型森林公园建设尤为重要,尤其在土壤背景值较高区域。

本文通过研究佛山市典型森林群落土壤重金属的分布、凋落物对重金属的富集特征,结合珠三角土壤重金属背景值初步了解了该区域森林土壤重金属负荷状况,揭示城市森林群落土壤重金属在土壤—植物系统的生态流通特点及与人身接触健康安全环境互动影响,对城市森林建设管理、筛选重金属富集植物和群落及其空间配置具有借鉴参考意义。

1 研究区概况

佛山市位于珠江三角洲腹地,属亚热带季风气候,又受海洋气候调节,年均气温 20—25℃。年均降雨量 1600 mm,地貌特征表现为块状山地呈棋盘状分布、河网纵横交错,低山丘陵区多发育赤红壤、红壤,少量黄壤,平原区主要为水稻土和堆叠土。地带性植被为南亚热带常绿阔叶林,城市森林面积 58388.3 hm²(2016 年),约占国土总面积的 16%(湿地、园林绿地等除外),研究区林地类型以人工林和次生林为主。

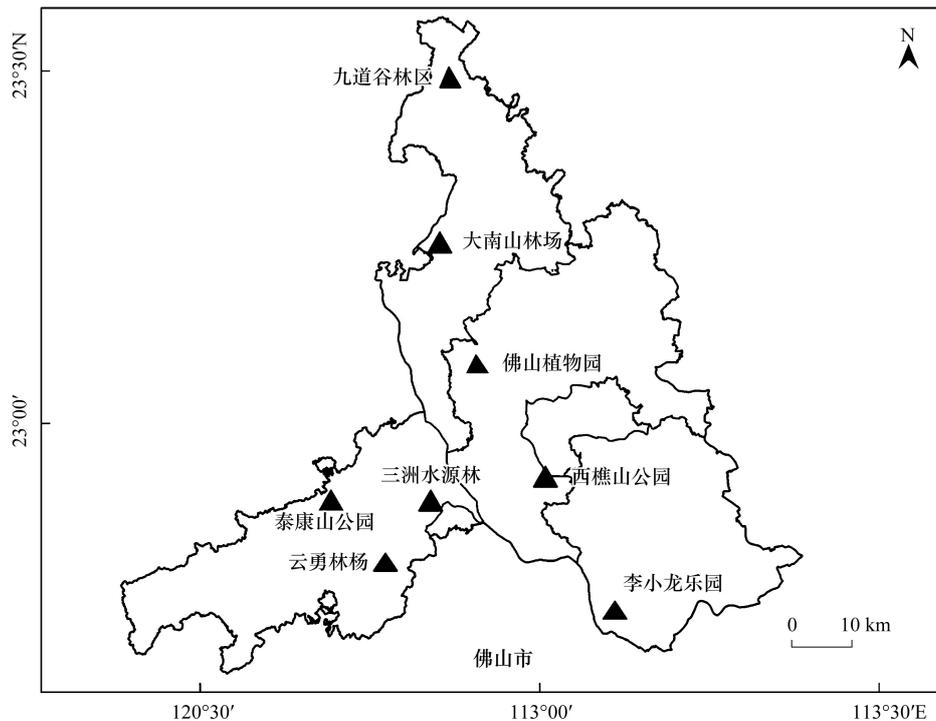


图 1 佛山市不同城市森林群落位置图

Fig.1 Location of different urban forest in Foshan

根据城市森林布局(图 1),选取包括南海区的西樵山公园、佛山植物园,高明区的云勇林场、三洲水源林、泰康山公园,三水区的大南山林场、九道谷林区,顺德区的李小龙乐园 8 个林区的典型森林群落,于各林区内远离居民点、干扰程度较小的区域设固定样地进行土壤调查及枯落物收集,森林群落情况见表 1,0—60 cm 土壤理化性质见表 2。

表 1 各研究地森林群落乔木层林分特征

Table 1 Fundamental information of each community in the tree layer in different urban forest in Foshan

地点 Sampling location	经纬度 Longitude, Latitude	经营模式 Management	森林林龄 Age/a	郁闭度 Canopy density	平均树高 Mean height /m	平均胸径 Mean DBH/cm
FSBG	112°59'E, 23°6'N	人工林	9	0.92	9.95	20.7
BLP	113°7'E, 22°42'N	次生林	9	0.93	6.35	11.88
YYFF	112°41'E, 22°45'N	人工林	11	0.9	10	12.9
SZWCF	112°49'E, 22°51'N	人工林	15	0.92	9.21	11.54
TKMP	112°41'E, 22°53'N	人工林	35	0.79	7.9	15.98
DNSFF	112°48'E, 23°22'N	人工林	8	0.77	8.17	11.34
JDGFA	112°50'E, 23°33'N	次生林	11	0.76	9.29	10.95
XQSP	112°57'E, 22°55'N	次生林	55	0.88	5.71	9.61

DBH:平均胸径, Mean diameter at breast height; FSBG:佛山植物园 Foshan botanical garden; BLP:李小龙乐园 Bruce lee paradise; YYFF:云勇林场 Yunyong forest farm; SZWCF:三洲水源林 Sanzhou water conservation forest; TKMP:康泰山公园 Taikangmoutain park; DNSFF:大南山林场 Dananshan forest farm; JDGFA:九道谷林区 Jiudaogu forest area; XQSP:西樵山公园 Xiqaoshan park

表 2 各研究地森林群落土壤理化性质特征(0—60 cm)

Table 2 Soil physical and chemical properties of each community in different urban forest in Foshan (0—60 cm)

土壤指标 Soil indicator	FSBG	BLP	YYFF	SZWCF	TKMP	DBSFF	JDGFA	XQSP
pH	4.89	4.21	4.20	4.05	4.01	4.39	4.07	4.06
SOC/(g/kg)	16.59	10.04	32.13	16.75	15.19	12.82	15.79	12.02
TN/(g/kg)	0.87	0.55	1.61	0.88	0.83	0.68	0.82	0.64
TP/(g/kg)	0.46	0.21	0.33	0.29	0.25	0.27	0.19	0.35
TK/(g/kg)	6.19	14.69	13.57	15.38	16.58	9.61	13.85	2.31
HN/(mg/kg)	59.94	47.70	108.96	69.21	60.63	55.96	54.77	60.82
AP/(mg/kg)	31.79	5.42	4.47	4.64	4.03	5.64	4.23	4.05
AK/(mg/kg)	76.07	24.31	55.53	55.03	30.49	24.40	27.43	29.65
SWC/(g/kg)	200.98	231.74	321.11	217.75	288.01	235.89	215.80	325.38
SBD/(g/cm ³)	1.61	1.48	1.26	1.45	1.29	1.41	1.31	1.01
(> 2 mm)/%	3.44	7.51	0.63	9.80	0.34	0.63	3.22	15.93
(2—0.05 mm)/%	56.23	41.27	38.10	26.77	12.15	27.57	37.82	33.35
(0.05—0.002 mm)/%	13.18	25.69	16.05	28.77	48.74	43.08	25.06	24.61
(<0.002 mm)/%	27.14	25.53	45.22	34.65	38.77	28.72	33.89	26.11

SOC:土壤有机质 Soil organic matter; TN:全氮 Total nitrogen; TP:全磷 Total phosphorus; TK:全钾 Total kalium; HN:水解氮 Hydrolyzable nitrogen; AP:有效磷 Available phosphorus; AK:速效钾 Available kalium; SWC:土壤含水量 Soil water content; SBD:土壤容重 Soil bulk density.

2 研究方法

2.1 群落调查与土壤样品采集

2016年11月于各林区内分别设置4个20 m×20 m标准样地进行群落调查、土样采集及枯落物收集。

群落调查:①对样地内所有胸径≥2cm的乔木进行调查;②在标准样地内按“X”型设置5个5 m×5 m小样地对灌木进行调查。调查项目:乔木高、胸径、冠幅,灌木高、冠幅。

土样采集:沿标准样地对角线设置3个5 m×5 m取样区,于取样区内随机选取3个取样点,分别采集0—20、20—40、40—60 cm土样,同一取样区同一土层样品取混合样。在实验室除去动植物残体,过5 mm筛,110℃烘干后存于干燥器内用于测定理化性质及重金属含量。

枯落物收集:用木桩将0.7 m×0.7 m正方形收集框固定于草本层之上,每个取样区设置6个收集框,共48个,周期为一年,半年收集一次,为消除枯落物分解造成的重金属含量影响,在取样过程中按枝、叶、皮组成比例拾取未分解部分。带回实验室进行干燥、称重。

2.2 分析测定方法

枯落物先用自来水冲洗,再用蒸馏水、去离子水分别冲洗3次,装入信封内杀青30 min(105℃)后烘干(70℃)至恒重,粉碎过0.5 mm筛后塑封,干燥保存备用。植物样品与土壤样品均采用HCL—HNO₃^[13]法(体积比3:1)消解,分析过程样品质量控制采用标准样品和空白样品,所有重金属回收率均大于95%。

土壤理化性质采用鲍士旦^[14]测定方法。重金属元素Cr、Cu、Zn、Ni含量用原子吸收光度法测定(GB/T17141—1997);重金属As、Hg含量用原子荧光法测定(GB22105—2008),重金属Cd、Pb含量用石墨炉原子吸收分光光度法测定(GB/T17141—1997)。枯落物生物量根据国家林业局《森林生态系统服务功能评估规范》(LY/T1721—2008)进行计算,根据各群落枯枝落叶组成称取相应枝叶比进行重金属含量测定。

2.3 数据处理

本文选用重要值(Importance Value, *IV*)^[15-16]来测度城市8个典型森林群落主要优势种群,公式(1);BCF表示富集系数(bioconcentration factor)^[17],TBCF为8种重金属富集系数之和,公式(2);枯落物重金属通量 f_i ,公式(3):

$$IV_j = \frac{RA_j + RF_j + RP_j}{3} \quad (1)$$

$$TBCF = \sum_{i=1}^8 BCF_i \quad BCF_i = \frac{L_i}{S_i} \quad (2)$$

$$f_i = L_i \times a_i \quad (3)$$

式中, IV_j 为群落优势种群重要值, RA_j 为相对密度、 RF_j 为相对频度和 RP_j 为相对显著度, L_i 和 S_i 为某一群落枯落物重金属含量 (mg/kg) 及其相应 0—60 cm 土壤重金属平均含量 (mg/kg), a_i 表示年枯落物量, $j=1, 2, \dots, 8$ 个群落; $i=1, 2, \dots, 8$ 种重金属。

珠江三角洲土壤重金属含量背景值和建设用地土壤污染风险管控值见表 3。

表 3 土壤重金属环境背景值及污染风险管控值一览表/(mg/kg)

Table 3 Environmental background values of soil heavy metals and pollution risk control standards

项目 Items	Cd	Hg	As	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
珠江三角洲土壤背景值 Background value of the Pearl River Delta Area	0.11	0.13	25	60	77	32	28	97
①土壤污染风险筛选值 Risk screening value (pH≤5.5)	65	38	60	800	—	18000	900	—
②土壤污染风险管制值 Risk intervent value (pH≤5.5)	172	82	140	2500	—	36000	2000	—

背景值摘自《土壤重金属风险评价筛选值 珠江三角洲 (DB44/T 1414—2014)》; ①和②《建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB36600—2018)。

论文所用数据均为算术平均值, 数据处理和统计分析采用 SPSS 18.0、Office Excel 2007 软件, 图形处理采用 Office Visio 2010、OriginPro 2015、ArcMap 10.2.2 软件, 采用单因素方差分析法 (One-Way ANOVA) 比较不同数据组间的差异 ($P<0.05$)。

3 结果与分析

3.1 佛山城市典型森林群落土壤重金属含量分布特征

3.1.1 不同群落土壤重金属含量差异性分析

0—60 cm 土壤 Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Zn、Ni 含量变异系数在不同群落间差异较大, 范围介于 29.33%—85.65%, 变幅以 Pb、Zn 最大, Cd、As 次之, Hg、Cr、Cu、Ni 最小。各群落间重金属含量差异显著 ($P<0.05$), 差异最大为 Pb、Cr、Zn, 其次 As、Cu、Ni, 最小为 Hg、Cd, 且 FSBG (Cd), BLP (Pb), SZWCF (Cu、Ni), TKMP (Cr), XQSP (Hg、As、Zn) 均显著高于其他林区群落, 平均含量高出 1.51%—90.75%, 与珠江三角洲土壤背景值 (表 3) 相比均表现出不同程度升高, 升高范围 1.20%—127.67% (图 2)。

3.1.2 各典型群落土壤重金属含量随土层深度变化特征

各群落重金属随土层深度变化趋势基本一致, 即土层加深含量减少, 且各土层间差异显著 ($P<0.05$)。各林区土壤 Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Zn、Ni 土层间变异系数介于 1.40%—90.70%, 变幅最大为 Cd、Hg, 其次为 As 和 Cu、Zn、Ni、Pb、Cr 最小。除 JDGFA (Hg 和 Zn)、SZWCF (As 和 Zn)、BLP (As 和 Pb)、YYFF (Zn) 外, 其余林区群落 Cd、Hg、As、Pb、Zn 含量均在 0—20 cm 最高, 40—60 cm 最低; Cu 在 FSBG、BLP、YYFF、XQSP 表现为随土层加深而降低, 在 SZWCF、TKMP、DNSFF 和 JDGFA 变化趋势相反; 除 BLP (Cr 和 Ni)、XQSP (Cr)、TKMP (Ni) 外, 其余林区群落 Cr 和 Ni 随土层加深递增 (图 2)。

3.2 群落组成、枯落物重金属含量及通量分析

3.2.1 调查样地森林群落组成

调查共记录乔木 31 科 54 属 74 种, XQSP 乔木种类最为丰富, 13 科 19 属 27 种, 其次为 BLP (15 科 22 属

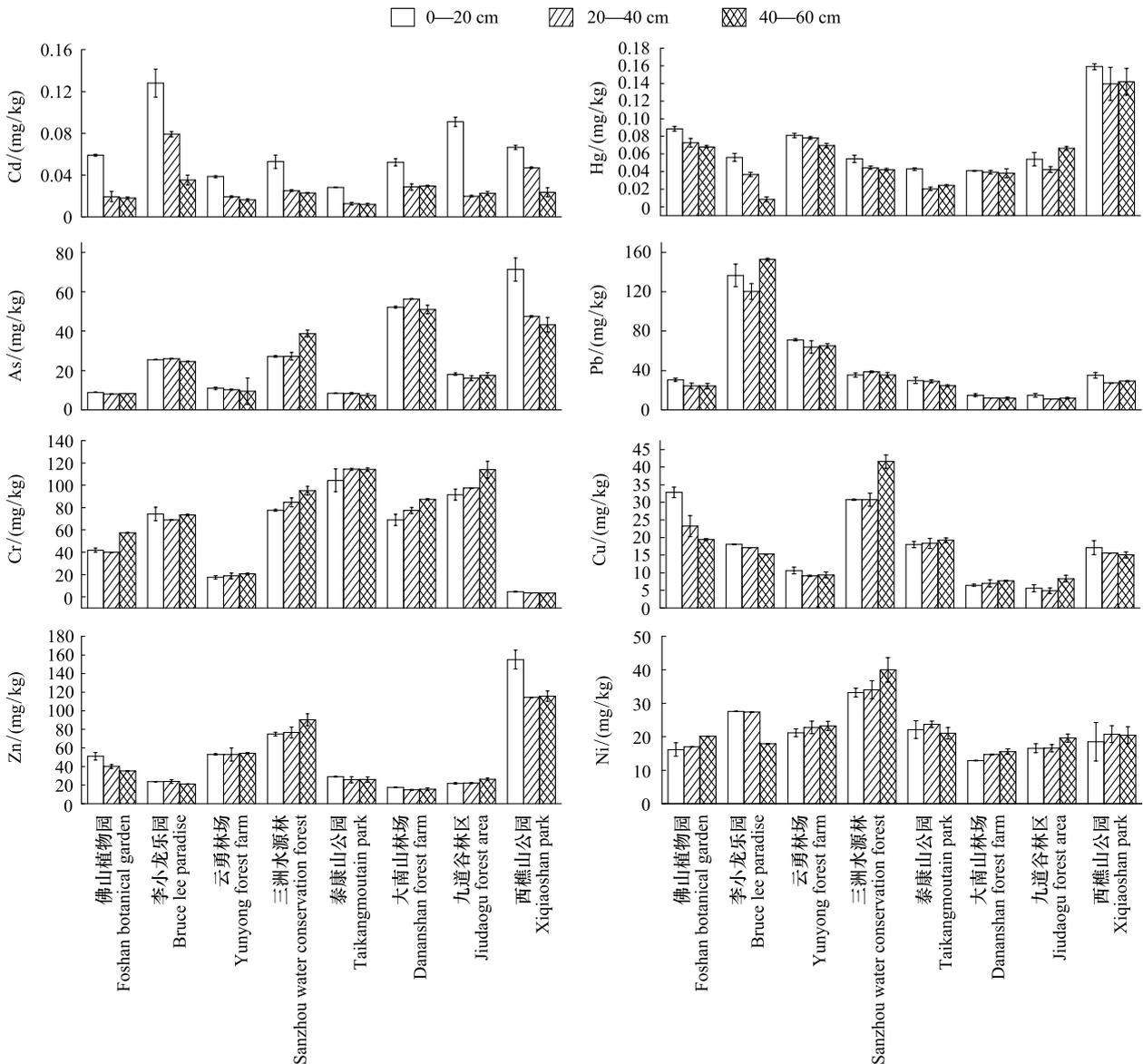


图2 佛山城市典型森林群落土壤重金属分布特征

Fig.2 Heavy metal quality score of each sampling location in the soils of urban typical forest in Foshan

23 种), FSBG、TKMP 群落结构单一, 仅 2—3 种组成。FSBG、TKMP、XQSP、SZWCF、DNSFF、YFF、BLP 和 JDGFA 乔木层优势种分别为凤凰木和小叶榄仁、马尾松、木荷—山乌桕—假柿木姜子、尾叶桉—壳菜果—华润楠、阴香—白楸—醉香含笑、鬲蒴锥—香椿—樟树、椴叶吴茱萸—潺槁木姜子—尖叶杜英、尾叶桉—木荷—马尾松, 重要值之和分别达 93.15%、94.96%、53.61%、79.89%、72.41%、74.14%、65.37%、76.13% (表 4)。8 样地记录灌木 25 科 54 属 63 种, 数量少且分布零散, 重要值均低于 1% (表 5)。

3.2.2 各群落枯落物重金属含量、流通量及其对土壤重金属含量影响分析

年枯落物量受树种类型、林龄及郁闭度等因素影响, 也会影响到枯落物重金属含量及通量 (表 6、表 7), 本试验表明植物群落不同, 枯落物重金属含量、流通量差异显著 ($P < 0.05$), 8 种重金属群落间差异最大为 Zn, 最小为 Hg。年枯落物量以尾叶桉—木荷—马尾松群落 (ESPC) (14.29 t/hm^2) 最大, 阴香—白楸—醉香含笑群落 (CMMC) (7.76 t/hm^2) 与椴叶吴茱萸—潺槁木姜子—尖叶杜英群落 (ELEC) (6.2 t/hm^2) 最少。Cd 在

表 4 佛山市 8 个城市森林群落乔木层重要值前 6 位/%

Table 4 The top 6 importance value of each community in the tree layer of 8 urban typical forests in Foshan

样地 Site	植物名称 Plant name	重要值 Important value	样地 Site	植物名称 Plant name	重要值 Important value
XQSP	木荷 <i>Schima superba</i> Gardn. et Champ.	27.35	JDGFA	尾叶桉 <i>Eucalyptus urophylla</i> S.T. Blake	46.01
	山乌柏 <i>Sapium discolor</i> (Champ. ex Benth.) Muell. Arg.	14.51		木荷 <i>Schima superba</i> Gardn. et Champ.	20.19
	假柿木姜子 <i>Litsea monopetala</i> (Roxb.) Pers.	11.75		马尾松 <i>Pinus massoniana</i> Lamb	9.93
	醉香含笑 <i>Michelia macclurei</i> Dandy	7.08		白楸 <i>Mallotus paniculatus</i> (Lam.) Muell. Arg.	6.21
	樟树 <i>Cinnamomum camphora</i> (L.) Presl	6.44		红胶木 <i>Tristania conferta</i> R. Br.	5.08
	亮叶猴耳环 <i>Pithecellobium lucidum</i> Benth.	4.61		山乌柏 <i>Sapium discolor</i> (Champ. ex Benth.) Muell. Arg.	4.11
DNSFF	阴香 <i>Cinnamomum burmannii</i> (C. G. et Th. Nees) Bl.	55.7	SZWCF	尾叶桉 <i>Eucalyptus urophylla</i> S.T. Blake	63.22
	白楸 <i>Mallotus paniculatus</i> (Lam.) Muell. Arg.	8.52		壳菜果 <i>Mytilaria laosensis</i> Lec.	8.37
	醉香含笑 <i>Michelia macclurei</i> Dandy	8.19		华润楠 <i>Machilus chinensis</i> (Champ. ex Benth.) Hemsl.	8.3
	柿树 <i>Diospyros kaki</i> Thunb.	4.71		肥荚红豆 <i>Ormosia fordiana</i> Oliver	4.53
	华润楠 <i>Machilus chinensis</i> (Champ. ex Benth.) Hemsl.	4.54		木油桐 <i>Vernicia montana</i> Lour.	3.8
	黄毛榕 <i>Ficus esquiroliana</i> Levl.	4.2		樟树 <i>Cinnamomum camphora</i> (L.) Presl	3.67
YYFF	蕙蒴锥 <i>Castanopsis fissa</i> (Champ. ex Benth.) Rehd. et Wils.	33.21	BLP	棘叶吴茱萸 <i>Euodia meliaefolia</i>	35
	香椿 <i>Toona sinensis</i> (A. Juss.) Roem.	29.88		潺槁木姜子 <i>Litsea glutinosa</i> (Lour.) C. B. Rob.	22.53
	樟树 <i>Cinnamomum camphora</i> (L.) Presl	11.05		尖叶杜英 <i>Elaeocarpus apiculatus</i> Mast.	7.84
	棘叶吴茱萸 <i>Euodia meliaefolia</i>	7.28		蕙蒴锥 <i>Castanopsis fissa</i> (Champ. ex Benth.) Rehd. et Wils.	5.38
	水锦树 <i>Wendlandia wariifolia</i> Hance	6.27		厚壳桂 <i>Cryptocarya chinensis</i> (Hance) Hemsl.	4.69
	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i> (Lamb.) Hook.	3.93		木莲 <i>Manglietia fordiana</i> Oliv.	3.97
FSBG	凤凰木 <i>Delonix regia</i> (Boj.) Raf.	74.58	TKMP	马尾松 <i>Pinus massoniana</i> Lamb	94.96
	小叶榄仁 <i>Terminalia neotaliala</i> Capuron	18.57		赤楠 <i>Syzygium buxifolium</i> Hook. et Arn.	5.04
	火焰树 <i>Spathodea campanulata</i> Beauv.	6.85			

表 5 佛山市 8 个城市森林各群落灌木层重要值前 6 位/%

Table 5 The top 6 importance value of each community in the bushes layer of 8 urban typical forests in Foshan

样地 Site	植物名称 Plant name	重要值 Important value	样地 Site	植物名称 Plant name	重要值 Important value
XQSP	大头茶 <i>Gordonia axillaris</i> (Roxb.) Dietr.	0.1	SZWCF	三椏苦 <i>Evodia lepta</i> (Spreng.) Merr.	0.11
	九节 <i>Psychotria rubra</i> (Lour.) Poir.	0.1		粗叶榕 <i>Ficus hirta</i> Vahl	0.1
	毛冬青 <i>Ilex pubescens</i> Hook. et Arn.	0.09		毛果算盘子 <i>Glochidion eriocarpum</i> Champ. ex Benth.	0.1
	变叶榕 <i>Ficus variolosa</i> Lindl. ex Benth.	0.07		假鹰爪 <i>Desmos chinensis</i> Lour.	0.09
	山苍子 <i>L.cubeba</i> Pers.	0.07		壳菜果 <i>Mytilaria laosensis</i> Lec.	0.09
	深山含笑 <i>Michelia maudiae</i> Dunn	0.07		黄牛木 <i>Cratoxylum cochinchinense</i> (Lour.) Bl.	0.06
JDGFA	三椏苦 <i>Evodia lepta</i> (Spreng.) Merr.	0.23	BLP	乌墨 <i>Syzygium cumini</i> (Linn.) Skeels	0.1
	山苍子 <i>L.cubeba</i> Pers.	0.23		桃金娘 <i>Rhodomyrtus tomentosa</i> (Ait.) Hassk.	0.08
	桃金娘 <i>Rhodomyrtus tomentosa</i> (Ait.) Hassk.	0.09		潺槁木姜子 <i>Litsea glutinosa</i> (Lour.) C. B. Rob.	0.07
	白楸 <i>Mallotus paniculatus</i> (Lam.) Müll. Arg.	0.07		石斑木 <i>Rhaphiolepis indica</i> (Linn.) Lindl.	0.07
	木荷 <i>Schima superba</i> Gardn. et Champ.	0.07		红果仔 <i>Eugenia uniflora</i> Linn.	0.06
	茶 <i>Camellia sinensis</i> (L.) O. Ktze.	0.04		黄牛木 <i>Cratoxylum cochinchinense</i> (Lour.) Bl.	0.06
DNSFF	山黄麻 <i>Trema tomentosa</i> (Roxb.) Hara	0.04	YYFF	米碎花 <i>Eurya chinensis</i> R. Br.	0.06
	野牡丹 <i>Melastoma candidum</i> D. Don	0.04		野牡丹 <i>Melastoma candidum</i> D. Don	0.06
	华润楠 <i>Machilus chinensis</i> (Champ. ex Benth.) Hemsl.	0.31		蕙蒴锥 <i>Castanopsis fissa</i> (Champ. ex Benth.) Rehd. et Wils.	0.7
	鹅掌柴 <i>Schefflera octophylla</i> (Lour.) Harms	0.29		三椏苦 <i>Evodia lepta</i> (Spreng.) Merr.	0.08
	紫玉盘 <i>Uvaria microcarpa</i> Champ. ex Benth.	0.06		野牡丹 <i>Melastoma candidum</i> D. Don	0.21
	小蜡 <i>Ligustrum sinense</i> Lour.	0.05			
TKMP	粗叶榕 <i>Ficus hirta</i> Vahl	0.04	FSBG	山茶 <i>Camellia sinensis</i> (L.) O. Ktze.	/
	桃金娘 <i>Rhodomyrtus tomentosa</i> (Ait.) Hassk.	0.89			
	野牡丹 <i>Melastoma candidum</i> D. Don	0.11			

CMMC(1.778 mg/kg)和凤凰木—小叶榄仁—茶树群落(DTCC)(0.770 mg/kg)枯落物中富集最多,在8个群落中流通量介于1.77—13.8 g hm⁻² a⁻¹之间;Hg、Pb、Zn、Ni累积量最多的为CMMC,在8个群落中流通量范围依次为0—0.23、57.23—293.33、390.72—1722.72、32.61—76.75 g hm⁻² a⁻¹;As和Cr在黧蒴锥—香椿—樟树群落(CTCC)枯落物中累积量最大,在8个群落中的流通量范围分别为1.18—40.92、14.14—251.68 g hm⁻² a⁻¹;DTCC枯落物中Cu含量最高,Cu在8个群落中流通量介于82.54—270.66 g hm⁻² a⁻¹之间。群落枯落物8种重金属总流通量前三位分别为CMMC、DTCC、SSLC。

根据土壤重金属含量(0—60 cm)与单位面积年重金属流通量进行相关分析,除土壤Cr、Ni与枯落物Cr、Ni呈极显著($P<0.01$)或显著($P<0.05$)负相关外,其余土壤重金属含量与枯落物重金属流通量均未达明显相关水平(表8)。

表6 不同森林群落枯落物中重金属含量/(mg/kg)

Table 6 The content of Heavy metal in different forest community litter in Foshan

植物群落 Plant community	Cd	Hg	As	Pb	Cr	Cu	Zn	Ni
DTCC	0.77	0.019	0.92	19.7	18.3	34.7	179.2	8.53
ELEC	0.29	—	0.19	9.23	2.28	14.6	63.3	5.26
CTCC	0.20	—	4.65	25.2	28.6	11.2	44.4	7.29
EMMC	0.37	0.003	0.18	8.76	3.24	14.9	74	4.99
PC	0.53	—	0.15	10.8	2.79	9.1	97.4	5.26
CMMC	1.78	0.03	3.22	37.8	10.5	27.5	222	9.89
ESPC	0.28	0.002	0.26	10.3	2.67	10.0	50.0	4.31
SSLC	0.59	0.01	0.75	21.2	18.8	20.8	92.1	7.88
平均水平 Mean	0.60	0.01	1.29	17.87	10.9	17.85	102.8	6.68
标准差 Standard deviation	0.48	0.01	1.59	9.55	9.33	8.57	59.98	1.87
变异系数 Variable coefficient	0.80	1.05	1.23	0.53	0.86	0.48	0.58	0.28

DTCC: 凤凰木-小叶榄仁-山茶群落(佛山植物园), *Delonix regia* (Boj.) Raf. - *Terminalia neotaliala* Capuron - *Camellia sinensis* (L.) O. Ktze. Communities (Foshan Botanical Garden); ELEC: 楝叶吴茱萸-潺槁木姜子-尖叶杜英群落(李小龙乐园), *Euodia meliaefolia* - *Litsea glutinosa* (Lour.) C. B. Rob. - *Elaeocarpus apiculatus* Mast. Communities (Bruce Lee Paradise); CTCC: 黧蒴锥-香椿-樟树群落(云勇林场), *Castanopsis fissa* (Champ. ex Benth.) Rehd. et Wils. - *Toona sinensis* (A. Juss.) Roem. - *Cinnamomum camphora* (L.) Presl communities (Yunyong Forest Farm); EMMC: 尾叶桉-壳菜果-华润楠群落(三洲水源林), *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake - *Mytilaria laosensis* Lec. - *Machilus chinensis* (Champ. ex Benth.) Hemsl. Communities (Sanzhou water conservation forest); PC: 马尾松群落(泰康山公园), *Pinus massoniana* Lamb communities (Taikangmountain Park); CMMC: 阴香-白楸-醉香含笑群落(大南山林场), *Cinnamomum burmannii* (C. G. et Th. Nees) Bl. - *Mallotus paniculatus* (Lam.) Muell. Arg. - *Michelia macclurei* Dandy communities (Dananshan Forest Farm); ESPC: 尾叶桉-木荷-马尾松群落(九道谷林区), *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake - *Schima superba* Gardn. et Champ. - *Pinus massoniana* Lamb communities (Jiudaogu Forest Area); SSLC: 木荷-山乌柏-假柿叶木姜子群落(西樵山公园), *Schima superba* Gardn. et Champ. - *Sapium discolor* (Champ. ex Benth.) Muell. Arg. - *Litsea monopetala* (Roxb.) Pers. Communities (Xiqiaoshan Park)

表7 不同森林群落单位面积枯落物量及重金属流通总量/(g hm⁻² a⁻¹)

Table 7 The amount of the litter and heavy metal circulation of per unit area in different forest communities in Foshan

植物群落 Plant community	枯落物量 Litter / (t hm ⁻² a ⁻¹)	Cd	Hg	As	Pb	Cr	Cu	Zn	Ni	Total
DTCC	7.80	6.01	0.15	7.18	153.66	142.74	270.66	1397.76	66.53	2044.69
ELEC	6.20	1.77	—	1.18	57.23	14.14	90.52	392.46	32.61	589.91
CTCC	8.80	1.80	—	40.92	221.76	251.68	98.56	390.72	64.15	1069.59
EMMC	8.13	2.98	0.02	1.46	71.22	26.34	121.14	601.62	40.57	865.35
PC	9.07	4.82	—	1.36	97.96	25.31	82.54	883.42	47.71	1143.12
CMMC	7.76	13.80	0.23	24.99	293.33	81.48	213.40	1722.72	76.75	2426.7
ESPC	14.29	3.99	0.03	3.72	147.19	38.15	142.90	714.50	61.59	1112.07
SSLC	9.53	5.63	0.10	7.15	202.04	179.16	198.22	877.71	75.10	1545.11
平均水平 Mean	8.95	5.10	0.07	10.99	155.55	94.88	152.24	872.61	58.13	1349.57

表 8 土壤重金属含量(0—60 cm)与枯落物重金属通量间相关性系数

Table 8 Correlation coefficients between the content of soil heavy metal (0—60 cm) and litter heavy metal flux

	枯落物 Cd Litter Cd	枯落物 Hg Litter Hg	枯落物 As Litter As	枯落物 Pb Litter Pb	枯落物 Cr Litter Cr	枯落物 Cu Litter Cu	枯落物 Zn Litter Zn	枯落物 Ni Litter Ni
土壤 Cd Soil Cd	0.015	—	—	—	—	—	—	—
土壤 Hg Soil Hg	—	0.204	—	—	—	—	—	—
土壤 As Soil As	—	—	0.033	—	—	—	—	—
土壤 Pb Soil Pb	—	—	—	-0.458	—	—	—	—
土壤 Cr Soil Cr	—	—	—	—	-0.883**	—	—	—
土壤 Cu Soil Cu	—	—	—	—	—	0.036	—	—
土壤 Zn Soil Zn	—	—	—	—	—	—	-0.202	—
土壤 Ni Soil Ni	—	—	—	—	—	—	—	-0.722*

显著水平: * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$.

3.3 群落枯落物对土壤重金属富集效应

不同群落枯落物对重金属富集效应差异显著,重金属种类不同富集效应各异(表 9)。对 Cd 的富集效应中,CMMC、ELEC 和 PC 富集系数最大,分别为 44.45、14.20、13.28,DTCC 和 CTCC 富集系数最小,仅为 7.7 和 3.40;对 Hg、As、Ni 富集不明显;CMMC 对 Pb 富集能力最强,富集系数达 2.83,其余群落不明显;对 Cr 的富集效应中,SSLC 与 CTCC 的富集能力最强,富集系数分别为 4.61、1.58;CMMC、ESPC 与 SSLC 对 Cu 的富集最强,富集系数分别为 4.10、1.90、1.27;CMMC 和 DTCC 对 Zn 的富集最明显,富集系数分别为 13.71、3.94。对重金属富集系数和(TBCF)最大的依次为 CMMC、ELEC、PC,最小的分别为 DTCC、ESPC、CTCC。

表 9 不同植物群落枯落物对重金属富集系数

Table 9 Bioconcentration factors (BCF) of Heavy metal in different forest community litter in Foshan

植物群落 Plant community	Cd	Hg	As	Pb	Cr	Cu	Zn	Ni	TBCF
CMMC	44.45	0.75	0.06	2.83	0.14	4.1	13.71	0.72	66.76
ELEC	14.3	—	0.01	0.07	0.03	0.83	2.68	0.19	18.11
PC	13.28	—	0.02	0.37	0.03	0.5	3.56	0.23	17.97
SSLC	9.85	0.07	0.01	0.68	4.61	1.27	0.68	0.4	17.57
EMMC	12.23	0.1	0.02	0.27	0.04	0.49	3.62	0.38	17.16
DTCC	7.7	0.24	0.11	0.72	0.45	1.24	3.94	0.52	14.9
ESPC	9.3	0.04	0.02	0.79	0.03	1.9	2.28	0.26	14.61
CTCC	3.4	—	0.44	0.37	1.58	1.14	0.84	0.33	8.09
平均水平 Mean	14.31	0.15	0.09	0.76	0.86	1.43	3.91	0.38	21.90

4 讨论

城市森林土壤重金属与人类活动关系密切,且重金属种类不同,含量差异明显^[18],佛山城市森林土壤中以 Cr 平均含量最高,Pb 和 Ni 次之,Cd 和 Hg 含量最低。8 种森林群落土壤重金属(0—60 cm)分布特征结果表明:重金属在大部分林分土壤中的平均含量低于珠三角土壤背景值,显著低于《土壤环境质量建设用地区域土壤污染风险管控标准(试行)》(GB36600—2018)第二类用地(G),Cr、Cu、Ni 变异系数最小,分布均匀,3 种元素可能主要受地质因素影响较大,主要来源于土壤母质^[19]。Pb、Zn 变异系数最大,BLP 与 YYFF(Pb),XQSP(Zn)等均不同程度超过其背景值,可能该区域土壤受外来源重金属影响,公园、林场与自然林不同,存在较多的林分管理,且 3 林区位于城市中心,工业集中,人口密度大,交通拥挤^[20-22],这些林区土壤重金属 Pb、Zn 可能来自农药^[23]或杀虫剂的使用,汽车轮胎摩擦或含铅汽油的燃烧等^[24]通过干湿降尘沉降在林区土壤。研究表明,佛山城市森林土壤重金属 Cd、Hg、As、Pb、Cu、Zn 在 0—20 cm 含量较高,具有较高的表层富集特征,Cr、

Ni 在 40—60 cm 含量较高,可能是进入土壤中的 Cr 和 Ni 可移动态较多,随土壤侵蚀和淋溶作用而迁移^[25]或受地质作用^[19]影响较大。

枯落物重金属含量及重金属通量体现了植物对土壤重金属的富集和转运能力^[26-28],而土壤重金属含量受多方面影响,如地质背景、大气沉降、造林方式、坡度、金属废弃物、枯落物输入等均会增加土壤表层重金属^[9,13,17,29],本研究结果显示群落枯落物重金属流通量与土壤重金属 Cd、Hg、As、Pb、Cu、Zn 含量没有明显相关性,可能受到外源因素影响^[19-21]较大,与 Cr、Ni 含量呈极显著($P<0.01$)或显著($P<0.05$)负相关,可能受成土过程^[19]及其迁移能力等因素对其在土壤中累积效应相关,一些研究表明,由于林地土壤重金属随土壤侵蚀和淋溶作用强烈而迁移较大,较大林龄森林土壤重金属因淋溶作用往往高于因土壤侵蚀迁移量,且土壤酸度和有机质络合等也会对迁移效率产生影响^[30-32]。

森林群落由各类植物构成,植物种类、林龄、郁闭度等不同其所形成的内部结构、环境,林下枯落物组成及数量不同^[33-34],对土壤重金属富集效率也有所差异。枯落物富集及通量可表征植物流转重金属能力的强弱,通常富集系数大于 1 被认为植物群落对某种重金属在植物体内相对富集^[35]。群落植物组成不同富集能力各异,本研究结果显示 8 个典型森林群落对 Cd、Cu、Zn 富集能力较强,尤以对 Cd 富集效应突出^[36](富集系数 3.4—44.45),而对 Hg、As、Ni 的富集作用则不明显。各群落中 Cd 富集效应与综合富集能力最高均为阴香—白栎—醉香含笑群落,系数分别达 66.76、44.5,这与陈玉娟等^[11]对广州市区森林群落重金属含量研究结论一致。阴香树群落对重金属富集能力强于其他森林群落,可以作为一种重金属富集能力较强的修复植物进一步研究。同时对富集能力较低的群落如黧蒴锥—香椿—樟树群落可用于 Cd、Ni 和 Cu 等元素含量较高区域森林公园建设,可有效降低土壤重金属所带来的环境人身接触健康接触风险。

5 结论

(1) 佛山市城市森林各土壤重金属含量在不同典型群落间差异显著($P<0.05$),差异最大为 Pb、Cr、Zn, As、Cu、Ni 次之, Hg、Cd 最小;土层深度对重金属含量影响显著($P<0.05$),差异最大为 Cd、Hg,其次为 As、Cu,最小为 Zn、Ni、Pb、Cr。整体上, Cd、Hg、As、Pb、Zn 在 0—20 cm 最高, Cr 和 Ni 在 40—60 cm 最高。

(2) 8 种植物群落中阴香—白栎—醉香含笑群落对 8 种金属的综合富集系数(TBCF, 66.76)最高,对 Cd 的富集效果最突出,富集系数为 44.45,且对 Pb、Cu、Zn 也相对富集。综合富集系数(TBCF, 8.09)最低的为黧蒴锥—香椿—樟树群落,仅对 Cd、Cr、Cu 相对富集,对其余重金属富集效应不明显。

(3) 相关性分析表明群落枯落物重金属流通量与土壤重金属 Cd、Hg、As、Pb、Cu、Zn 含量没有明显相关性,与 Cr、Ni 含量呈极显著($P<0.01$)或显著($P<0.05$)负相关。

参考文献(References):

- [1] 邵立国, 乔标, 张舰. 正视粤港澳大湾区工业发展突出问题. 中国工业和信息化, 2019, (6): 12-16.
- [2] Escobedo F J, Wagner J E, Nowak D J, De la Maza C L, Rodriguez M, Crane D E. Analyzing the cost effectiveness of Santiago, Chile's policy of using urban forests to improve air quality. *Journal of Environmental Management*, 2008, 86(1): 148-157.
- [3] Zhao F J, Ma Y B, Zhu Y G, Tang Z, McGrath S P. Soil contamination in China: current status and mitigation strategies. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(2): 750-759.
- [4] Singh A, Prasad S M. Remediation of heavy metal contaminated ecosystem: an overview on technology advancement. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2015, 12(1): 353-366.
- [5] 方晰, 唐志娟, 田大伦, 项文化, 孙伟军. 长沙城市森林土壤 7 种重金属含量特征及其潜在生态风险. *生态学报*, 2012, 32(23): 7595-7606.
- [6] 李晓婷, 刘佳, 姜莎莎, 贾宝全. 北京城区医院绿地林木树冠覆盖与城市森林结构分析. *生态学报*, 2019, 39(22): 8392-8403.
- [7] 张继舟, 吕品, 王立民, 于志民. 大兴安岭森林土壤重金属含量空间变异与污染评价. *生态学杂志*, 2015, 34(3): 810-819.
- [8] 韦秀文, 姚斌, 刘慧文, 白莉萍, 周玲莉. 重金属及有机物污染土壤的树木修复研究进展. *林业科学*, 2011, 47(5): 124-130.
- [9] 李强, 周道玮, 陈笑莹. 地上枯落物的累积、分解及其在陆地生态系统中的作用. *生态学报*, 2014, 34(14): 3807-3819.

- [10] 杨盼盼, 于法展, 曾晨, 周颖. 苏北山丘区森林群落枯枝落叶层的生态功能分析. 水土保持研究, 2011, 18(5): 152-155, 160-160.
- [11] 陈玉娟, 管东生. 广州城市公园若干森林群落重金属的贮存与分布. 中山大学学报: 自然科学版, 1998, 37(S2): 166-170.
- [12] 陈步峰, 吴敏, 潘勇军, 肖以华, 张娜, 徐猛. 广州城市林带森林群落的生物化学吸储效应. 东北林业大学学报, 2010, 28(3): 66-68.
- [13] Codling E E, Chaney R L, Green C E. Accumulation of lead and arsenic by carrots grown on lead-arsenate contaminated orchard soils. *Journal of Plant Nutrition*, 2015, 38(4): 509-525.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [15] 郝建锋, 王德艺, 李艳, 姚小兰, 张逸博, 詹美春, 齐锦秋. 人为干扰对川西金凤山楠木次生林群落结构和物种多样性的影响. 生态学报, 2014, 34(23): 6930-6942.
- [16] 乔文静, 戴银月, 张伟, 付淑月, 杨改河, 韩新辉, 陈正兴, 高德新, 冯永忠. 黄土丘陵区撂荒恢复过程中植物群落组成与土壤养分及酶活性变化的关系. 环境科学, 2018, 39(12): 5687-5698.
- [17] 李俊凯, 张丹, 周培, 刘群录. 南京市铅锌矿采矿场土壤重金属污染评价及优势植物重金属富集特征. 环境科学, 2018, 39(8): 3845-3853.
- [18] Bilos C, Colombo J C, Skorupka C N, Rodriguez Presa M J. Sources, distribution and variability of airborne trace metals in La Plata City area, Argentina. *Environmental Pollution*, 2001, 111(1): 149-158.
- [19] 刘晓辉, 吕宪国, 刘惠清. 沟谷地不同植被下土壤重金属纵向分异研究. 环境科学, 2007, 28(12): 2766-2770.
- [20] 楚纯洁, 朱玉涛. 城市土壤重金属污染研究现状及问题. 环境研究与监测, 2008, 21(3): 7-11.
- [21] 陈立新, 赵淑苹, 段文标. 哈尔滨市不同绿地功能区土壤重金属污染及评价. 林业科学, 2007, 43(S1): 65-71.
- [22] 方晰, 金文芬, 李开志, 吴茜, 张兴钰, 覃立厚, 武志超. 长沙市韶山路沿线不同绿地土壤重金属含量及其潜在生态风险. 水土保持学报, 2010, 24(3): 64-70.
- [23] Filzek P D B, Spurgeon D J, Broll G, Svendsen C, Hankard P K, Kammenga J E, Donker M H, Weeks J M. Pedological characterisation of sites along a transect from a primary cadmium/lead/zinc smelting works. *Ecotoxicology*, 2004, 13(8): 725-737.
- [24] 李涛, 李灿阳, 俞丹娜, 张加勇, 郑荣泉. 交通要道重金属污染对农田土壤动物群落结构及空间分布的影响. 生态学报, 2010, 30(18): 5001-5011.
- [25] 周凌峰, 孟耀斌, 逯超, 伍甘霖, 张东妮, 蒋飞红. 流域尺度重金属行为模拟及其对不同气象因子的响应特征研究. 农业环境科学学报, 2019, 38(5): 1112-1120.
- [26] 葛晓颖, 欧阳竹, 杨林生, 李发东. 环渤海地区土壤重金属富集状况及来源分析. 环境科学学报, 2019, 39(6): 1979-1988.
- [27] 陈益泰, 施翔, 王树凤, 李江川, 孙宇剑. 铅锌尾矿区 15 种植物的生长及对重金属的吸收积累. 林业科学, 2012, 48(12): 22-30.
- [28] 李晓刚, 康希睿, 蔡泽宇, 张涵丹, 张建锋, 何贵平, 陈光才. 木麻黄对土壤重金属的生长响应及积累特征. 生态学报, 2019, 38(7): 2094-2101.
- [29] 高瑞忠, 张阿龙, 张生, 贾德彬, 杜丹丹, 秦子元, 王喜喜. 西北内陆盐湖盆地土壤重金属 Cr、Hg、As 空间分布特征及潜在生态风险评价. 生态学报, 2019, 39(7): 2532-2544.
- [30] 方颖. 城市森林绿地系统的生态环境功能研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2006.
- [31] 张金池, 严逸伦, 曾锋. 重金属对森林生态系统效应的研究进展. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2001, 25(5): 52-56.
- [32] 王海涛, 王庆九, 崔志强, 孙哲, 孙成. 南通城郊土壤重金属背景值和元素间相关性分析. 安徽农业科学, 2011, 39(23): 14062-14064.
- [33] 林勇, 艾训儒, 姚兰, 黄伟, 陈斯. 木林子自然保护区不同群落类型主要优势种群的生态位研究. 自然资源学报, 2017, 32(2): 223-234.
- [34] 王鑫, 罗雪萍, 字洪标, 杨文高, 胡雷, 王长庭. 青海森林凋落物生态化学计量特征及其影响因子. 草业学报, 2019, 28(8): 1-14.
- [35] 孙雪娇, 常顺利, 张毓涛, 宋成程, 韩燕梁, 芦建江, 李翔. 矿区道路两侧雪岭云杉叶片重金属富集效应. 生态学报, 2018, 38(9): 3155-3164.
- [36] 张银龙, 陈平, 王月菡, 张金池. 城市森林群落枯落物层中重金属的含量与储量. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2005, 29(6): 19-22.