



短期使用污泥产品对汞在土壤国槐树体迁移和积累的影响

陈玲 朱坤 彭祚登 熊建军 李淑文

Effects of short-term application of sludge products on migration and accumulation of mercury in soil-*Styphnolobium japonicum* system

Chen Ling, Zhu Kun, Peng Zuodeng, Xiong Jianjun, Li Shuwen

引用本文:

陈玲, 朱坤, 彭祚登, 熊建军, 李淑文. 短期使用污泥产品对汞在土壤国槐树体迁移和积累的影响[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(9):87–96. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230251

Chen Ling, Zhu Kun, Peng Zuodeng, Xiong Jianjun, Li Shuwen. Effects of short-term application of sludge products on migration and accumulation of mercury in soil-*Styphnolobium japonicum* system[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2024, 46(9):87–96. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230251

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230251>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

北京市区国槐表型差异及综合评价研究

Phenotypic difference and comprehensive evaluation of *Sophora japonica* in Beijing urban area

北京林业大学学报, 2022, 44(6): 23–33. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210013>

添加城市排水污泥对竹柳和欧美107杨嫩枝扦插苗生长及养分积累的影响

Effects of urban sewage sludge additive on growth and nutrient accumulation in *Salix americana* and *Populus × euramericana* cv. ‘74/76’ softwood cuttings

北京林业大学学报, 2020, 42(10): 84–95. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200093>

古樟端粒基因*CcTBP1*和*CcPOT1*的克隆、亚细胞定位及表达分析

Cloning, subcellular localization and expression analysis of telomere genes *CcTBP1* and *CcPOT1* in ancient *Cinnamomum camphora*

北京林业大学学报, 2022, 44(12): 1–11. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210179>

基于LIM的城市园林树木碳储量基线情景模拟研究

Research on LIM-based simulation of carbon stock baseline scenario in urban trees: taking the green space of a university in Beijing as an example

北京林业大学学报, 2022, 44(12): 111–120. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220002>

长期多形态氮添加对温带人工辽东栎林土壤N₂O排放的影响

Effects of long-term polymorphic nitrogen addition on soil N₂O emission in temperate artificial *Quercus liaotungensis* forests

北京林业大学学报, 2022, 44(6): 63–73. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220136>

林下植被和凋落物对我国寒温带天然林土壤CO₂通量的短期影响

Short-term effects of understory vegetation and litter on soil CO₂ flux of natural forests in cold temperate zone of China

北京林业大学学报, 2021, 43(3): 55–65. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200249>

DOI:10.12171/j.1000-1522.20230251

短期使用污泥产品对汞在土壤-国槐树体 迁移和积累的影响

陈 玲¹ 朱 坤¹ 彭祚登¹ 熊建军² 李淑文³

(1. 北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100044;
3. 北京市大兴区果林研究所, 北京 100162)

摘要:【目的】研究城镇生活污水污泥产品中重金属汞(Hg)在土壤-国槐树体中的迁移和积累, 探讨国槐幼苗对 Hg 胁迫的响应机制, 明确污泥产品在国槐幼苗抚育方面的应用潜力。【方法】以国槐幼苗为研究对象, 通过盆栽试验, 设置 3 个污泥使用量梯度(0、2、4 kg/m²)和 4 个取样时间(40、80、120、160 d), 将处理分为移栽国槐组和纯土壤组, 探究土壤 Hg 含量的动态变化, 进一步研究 Hg 在国槐根系和叶片的富集迁移规律、亚细胞分布特点及赋存形态。【结果】(1)随污泥产品使用时间增加, 土壤 Hg 含量显著降低, 在种植国槐植株土壤中添加污泥产品, 短期内土壤 Hg 含量显著低于纯土壤。(2)污泥产品用量、取样时间及其交互作用均对国槐根和叶中的 Hg 含量有显著影响。污泥施用 40 和 160 d 国槐根系和叶片对 Hg 的吸收显著高于未施污泥组, 使用污泥产品前期会促进 Hg 在根、叶间的转移, 后期抑制。污泥产品的低施用量可以显著增加国槐生物量从而提高对 Hg 的积累量。(3)在国槐根、叶中, Hg 主要分布在细胞壁和可溶性组分中, 两者总占比超过 90%。(4)国槐根系和叶片中 Hg 的残渣态占比最大, 分别占比 57.2%~59.7% 和 52.6%~69.0%。【结论】国槐可以应对低施用量污泥产品带来的 Hg 胁迫, 主要途径为细胞壁固定、液泡区隔化以及将 Hg 转化为低活性形态贮存。

关键词: 污泥; 国槐; 汞; 亚细胞分布; 化学形态

中图分类号: S792.26 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2024)09-0087-10

引文格式: 陈玲, 朱坤, 彭祚登, 等. 短期使用污泥产品对汞在土壤-国槐树体迁移和积累的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(9): 87-96. Chen Ling, Zhu Kun, Peng Zuodeng, et al. Effects of short-term application of sludge products on migration and accumulation of mercury in soil-*Styphnolobium japonicum* system[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(9): 87-96.

Effects of short-term application of sludge products on migration and accumulation of mercury in soil-*Styphnolobium japonicum* system

Chen Ling¹ Zhu Kun¹ Peng Zuodeng¹ Xiong Jianjun² Li Shuwen³

(1. Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education,
Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Beijing City Drainage Refco Group Ltd, Beijing 100044, China;
3. Daxing District Fruit and Forestry Research Institute, Beijing 100162, China)

Abstract: [Objective] This paper aims to investigate the migration and accumulation of heavy metal mercury (Hg) in the soil-*Styphnolobium japonicum* system from sludge products in urban life, so as to explore the response mechanism of *S. japonicum* seedlings to Hg stress, and to clarify the application potential of sludge products in cultivation of *S. japonicum* seedlings. [Method] The study focused on *S. japonicum* seedlings, employing a pot experiment to establish three gradients of sludge application rates (0, 2, and 4 kg/m²) and four sampling times (40, 80, 120, and 160 d). The treatments were divided into a

收稿日期: 2023-09-28 修回日期: 2023-12-27

基金项目: 国家发改委环境污染第三方治理项目(2017HXFWLXY023)。

第一作者: 陈玲。主要研究方向: 污泥林地应用。Email: 15923361833@163.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学林学院。

责任作者: 彭祚登, 博士, 教授。主要研究方向: 森林培育。Email: zuodeng@sina.com 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

transplanted *S. japonicum* group and a pure soil group to explore the dynamic changes in soil Hg content. The study further investigated the enrichment and migration patterns of Hg in the roots and leaves of *S. japonicum*, as well as the characteristics of subcellular distribution and the forms of existence. [Result] (1) With the increase in the duration of sludge product application, the soil Hg content significantly decreased. In the soil planted with *S. japonicum*, the addition of sludge products resulted in significantly lower Hg content compared with pure soil in short term. (2) The amount of sludge product, sampling time, and their interaction all significantly affected the Hg content in the roots and leaves of *S. japonicum*. At 40 and 160 d, the application of sludge products significantly promoted the absorption of Hg by roots and leaves of *S. japonicum*. The use of sludge products in early stage can promote the transfer of Hg between roots and leaves, while in the later stage, it inhibited it. A low application rate of sludge products can significantly increase the biomass of *S. japonicum*, thereby increasing the accumulation of Hg. (3) In the roots and leaves of *S. japonicum*, Hg was mainly distributed in cell wall and soluble fractions, with a combined proportion exceeding 90%. (4) The residual form of Hg in roots and leaves of *S. japonicum* accounted for the largest proportion, with a range of 57.2% to 59.7% and 52.6% to 69.0%, respectively. [Conclusion] *S. japonicum* can cope with the Hg stress brought by low application rates of sludge products, mainly through the pathways of cell wall fixation, vacuolar compartmentalization, and the transformation of Hg into a low-activity form for storage.

Key words: sewage sludge; *Styphnolobium japonicum*; Hg; subcellular distribution; chemical form

随着我国社会经济和城市化的快速发展,工业用水量和居民生活用水量不断增加,城市污水处理量大幅上升,导致我国污水处理厂数量及污泥产量逐年(1978—2019年)上涨^[1],预计2025年我国污泥产量将突破9 000万t^[2]。全国城市污泥中汞(Hg)污染达到重度以上水平的省份超过60%,其中华北地区污泥Hg含量最高^[3]。2019年中国污泥载Hg总量约为30 t,特别是北京市的污水Hg排放份额最大(2019年为12.32 t),占全国总量的40%^[4]。城镇生活污水污泥产品营养成分(氮、磷和有机质)丰富、含水率较高且有害物质较低,是一类可利用性较高的二次资源^[5]。研究发现污泥产品可替代商业化肥用于改良土壤、提高作物品质与产量^[6]、促进林草生长^[7],达到降低养护成本的目的。但污泥产品含有重金属、病原菌、持久性有机污染物等有害成分^[8]。其中重金属含量高、变异性大,是污泥后续土地利用的最大限制^[2]。

目前,厌氧消化-土地利用是我国污泥处理的主流技术路线^[9],也是北京市中心城区主要的污泥处置途径^[5]。厌氧消化-土地利用作为一种低碳甚至负碳排放的污泥处理方式在碳中和背景下具有广阔的应用前景,能同时满足碳减排和污染控制要求^[10-11]。相比污泥农用,污泥林用不仅为污泥处置提供新的途径,也能在一定程度上避开食物链,有效降低重金属对人类的危害^[12]。在实际应用中,污泥中重金属会在表土中积累,也可能沿着垂直剖面沥滤,导致土壤污染向周围环境扩散^[13]。Hg作为一种生理毒性极强

的重金属污染物,具有持久性、易迁移性、高生物富集性等特性^[14],能以气态单质汞(Hg⁰)的形式存在于大气、水体、土壤中,且植物叶片既可以吸附空气中的Hg还可向大气释放Hg^[15]。因此,在污泥林地利用监测植物生长的同时,更要对其产生的重金属安全问题进行监测,从而使污泥林地利用具有最大合理性和最小危害性。

国槐(*Styphnolobium japonicum*)是北京地区典型绿化落叶树种,具有较高的观赏价值、较强的适应能力和遮荫效果,广泛应用于园林绿化。近年来,关于国槐重金属的研究多集中在叶面滞尘^[16-17]、重金属吸收富集能力^[18-19]、不同器官重金属形态分析^[20]及抗性生理特征^[21],但很少有学者将Hg作为重点来探究其在土壤-国槐树体中的迁移和积累。为此,本研究通过盆栽试验探究使用污泥产品后Hg在国槐各器官中的富集积累能力和迁移特征,同时结合Hg在国槐根系和叶片中的亚细胞分布特点和形态占比,从器官和细胞两个层次展开分析,综合探讨国槐幼苗在受到Hg胁迫时的应对策略。在此基础上探讨城镇生活污水产品在国槐幼林抚育中推广利用的适用条件,以期今后污泥产品在国槐幼林以及其他木本植物中的应用提供理论参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况与试验材料

试验地位于北京市园林绿化科学研究院黄垆基地(39°58'N, 116°33'E)。属暖温带半湿润大陆性季

风气候, 四季分明, 年平均气温 11.6 ℃, 年平均降水量 556.4 mm。土壤类型主要为砂壤土, 有机质含量较低。

供试污泥产品取自北京城市排水集团有限责任公司庞各庄污泥处置分厂, 采用厌氧消化方式处理

污泥产品。供试土壤取自黄垓基地表层土壤(0 ~ 20 cm)。土壤和污泥重金属含量均符合污泥林用规定限值(表 1)。供试苗木为长势一致的 2 年生国槐幼苗, 地径(2.04 ± 0.18) cm, 苗高(1.79 ± 0.19) m。盆栽用盆规格为高 28 cm、口径 30 cm、底径 20 cm。

表 1 污泥产品和土壤中的重金属含量
Tab. 1 Contents of heavy metals in sludge products and soil

项目 Item	Cd	Cr	Pb	Hg	Cu	Zn	As	Ni
城镇生活污水产品 Urban domestic sludge products	0.79	72.65	15.55	5.57	208.50	535.00	12.25	34.75
苗圃土壤 Nursery soil	0.30	67.67	17.63	0.40	15.67	89.77	15.58	25.33

1.2 试验设计

以 2 年生国槐幼苗为研究对象, 采用盆栽试验, 于 2021 年 3 月中旬进行移栽, 每盆 1 株苗并缓苗至 4 月底。设置纯土壤组(CK)和国槐组(S), 每组 3 个处理, 分别添加 0、2、4 kg/m²(按盆口径折算后分别为 0.00、141.37、282.74 g/盆)污泥。纯土壤组分别用 CK₀、CK₁、CK₂ 表示, 每处理各 3 盆; 国槐组分别用 S₀、S₁、S₂ 表示, 每处理各 12 盆。添加污泥产品时, 采取均匀混施的方法, 使其充分与表层土壤结合, 各处理在添加污泥产品后的两天内浇一次水。花盆放置于林中空地, 各处理每盆间隔 1 m。试验期间, 根据实际气温和土壤情况, 各处理统一浇水, 其后续管护措施均一致。

1.3 样品采集与指标测定

1.3.1 采样时间及方法

缓苗结束后, 从 5 月开始每隔 40 d 采集一次各处理的植物样品(叶片、根系)和土壤样品, 共采集 4 次(即间隔 40、80、120 和 160 d)。最后一次采集时整株采集, 将其分为根、干、枝、叶 4 部分并立即称质量, 每次采集均立即装入冰盒带回实验室, 并对植物样品表面杂质进行清洗、晾干。植物叶片和根系一部分加液氮后用研磨仪磨成粉状, 存于超低温冰箱(-20 ℃)备用, 另一部分和植物其他器官样品分开装入信封进行编号置于烘箱中, 于 105 ℃ 下杀青 30 min, 70 ℃ 下烘至恒质量并称量各部分, 最后用粉碎机粉碎过 100 目尼龙筛后装入自封袋备用。土壤样品取盆栽 0 ~ 10 cm 表层土壤, 去除表面根系、石块等杂质后, 于室温进行自然风干, 之后过筛放入自封袋备用。

1.3.2 总 Hg 含量测定

称取植物样品 1 g(精确至 0.000 1 g), 采用 HNO₃-HClO₄(体积比 5:1)混酸湿法消解。土壤样品称取 0.2 g(精确至 0.000 1 g), 采用 HCl-HNO₃(体积

比 3:1)王水微波消解。消解液中 Hg 用 1260-7900 电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, 美国 Agilent 公司)测定。

1.3.3 国槐亚细胞 Hg 分布及 Hg 化学形态

参照 Weigel 等^[22]和周芙蓉等^[23]的方法, 分离国槐细胞壁(Fa)、细胞核为主(Fb)、线粒体和叶绿体(Fc)、核蛋白成分和可溶性组分(Fd)等亚细胞组织中 Hg 含量。参照 Lu 等^[24]的方法, 获得乙醇(浓度 80%)提取态(ethanol extractable fraction, F_E)、水提取态(fresh water extractable fraction, F_w)、氯化钠提取态(sodium chloride extractable fraction, F_{NaCl})、醋酸提取态(acetic acid extractable fraction, F_{HAc})、盐酸提取态(hydrochloric acid extractable fraction, F_{HCl})和残渣态(residual extractable fraction, F_R)中的 Hg。植物亚细胞分离和形态分析步骤中得到的上清液和残渣用少量去离子水水洗入锥形瓶中, 在电炉上蒸至近干, 冷却后加入 20 ~ 30 mL HNO₃-HClO₄ 混酸消煮至澄清, 用去离子水定容后用 ICP-MS 测定, 每处理重复 3 次。

1.4 数据处理及分析

Hg 在国槐中的富集、迁移和积累分别采用重金属富集系数(bioconcentration factor, B_{CF})、转运系数(translocation factor, T)和积累量(accumulation, A)进行表征^[25-26]。

$$B_{CF} = C_i / C_S$$

$$T_{R-L} = C_L / C_R$$

$$A_i = B_i \times C_i$$

式中: C_i 表示国槐器官 i 中 Hg 含量; C_S 表示土壤中 Hg 含量; T_{R-L} 表示根到叶的转运系数; C_L 表示国槐叶片中 Hg 含量; C_R 表示国槐根中 Hg 含量; A_i 表示国槐器官 i 中 Hg 积累量; B_i 表示国槐器官 i 生物量。

数据采用 Excel 2019 进行整理分析, SPSS 23.0 进行双因素方差分析和 Duncan's 多重比较 ($P < 0.05$), Origin 2017 进行作图。图表中数据为平均值 $\pm$ 标准差。

2 结果与分析

2.1 短期使用污泥产品对土壤 Hg 的影响

土壤 Hg 含量随着取样时间的增加整体表现为逐渐下降的趋势(图 1)。在使用污泥产品 40、80 d 时, S_2 处理土壤 Hg 含量显著高于 S_0 和 S_1 , CK_2 、 CK_1 显著高于 CK_0 ($P < 0.05$), 且 CK_1 显著高于 S_1 , CK_2 显著高于 S_2 ($P < 0.05$)。纯土壤中添加污泥产品后 Hg 含量更高, 表明取样前期是否种植国槐对土壤中的 Hg 含量有显著影响。在 120 d, CK_1 显著高于 S_1 ($P < 0.05$), CK_2 与 S_2 间无显著差异; 在 160 d, CK_1 与 S_1 间, CK_2 与 S_2 间无显著差异, 但 CK_0 显著

高于 S_0 ($P < 0.05$), 表明使用污泥产品后期是否种植国槐对土壤中的 Hg 含量无显著影响。

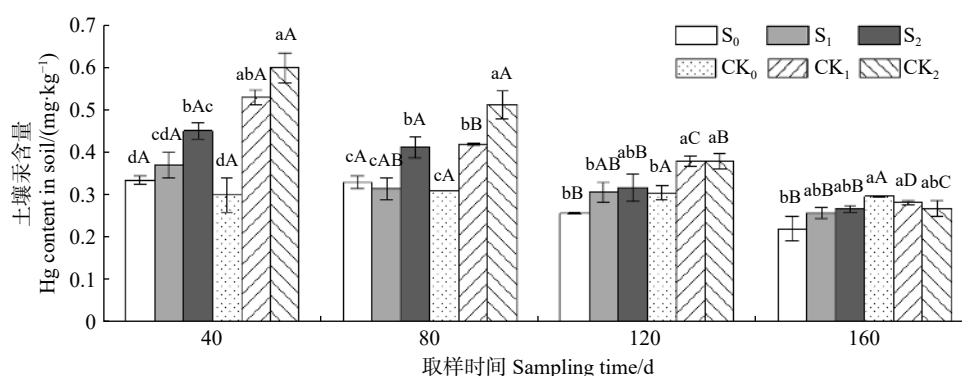
2.2 短期使用污泥产品对国槐吸收 Hg 的影响

2.2.1 国槐器官组织中 Hg 含量的动态变化

在整个取样期间(除 40 d 外), 国槐对 Hg 的富集含量大小表现为叶 $>$ 根, 表明国槐叶片对 Hg 的富集能力强于根部(图 2)。

不同处理、取样时间及其交互作用对国槐根和叶片的 Hg 含量均有极显著影响(图 2)。随着取样时间的增加, 国槐根的 Hg 含量呈显著增加趋势 ($P < 0.05$), S_1 和 S_2 均表现为 160 d $>$ 120 d $>$ 40 d $>$ 80 d, S_0 为 160 d $>$ 40 d $>$ 120 d $>$ 80 d。根中 Hg 含量在 160 d 时达到最高值, 其中 S_2 中 Hg 含量是 S_0 的 2.0 倍; 不同取样时间根中 Hg 含量大小排序均为 $S_2 > S_1 > S_0$ 。

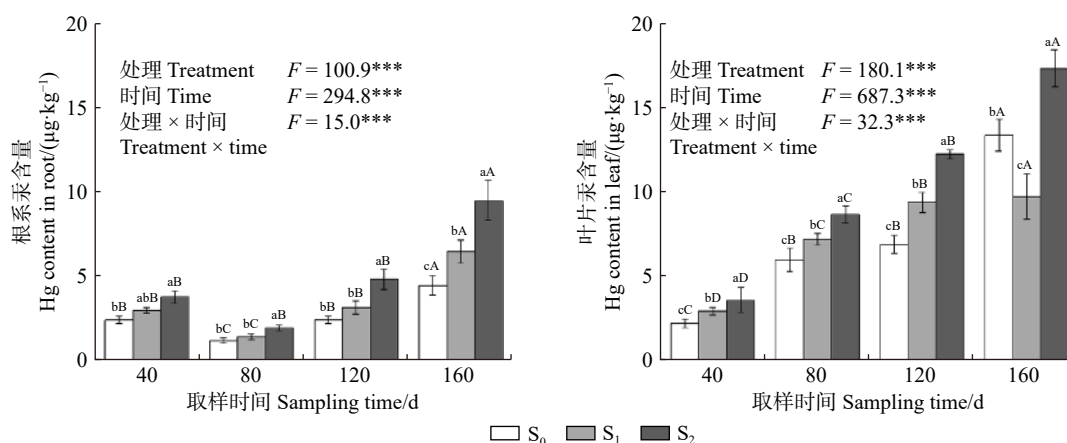
随着取样时间的增加, S_0 、 S_1 和 S_2 处理叶片的



不同大写字母表示同一处理不同取样时间之间差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示同一取样时间不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$), $S_0 \sim S_2$ 为国槐组分别添加 0、2、4 kg/m² 污泥, $CK_0 \sim CK_2$ 为纯土壤组分别添加 0、2、4 kg/m² 污泥。下同。Different capital letters indicate significant differences between varied sampling times of same treatment ($P < 0.05$), and different lowercase letters indicate significant differences between varied treatments at same sampling time ($P < 0.05$), $S_0 \sim S_2$ are *Styphnolobium japonicum* groups with 0, 2, and 4 kg/m² of sludge, and $CK_0 \sim CK_2$ are pure soil groups with 0, 2, and 4 kg/m² of sludge, respectively. The same below.

图 1 短期使用污泥产品后土壤中汞含量的动态变化

Fig. 1 Dynamic change of soil Hg content after short-term use of sludge products



表示差异极其显著 ($P < 0.001$)。 means extremely significant difference ($P < 0.001$).

图 2 短期使用污泥产品后国槐器官中汞含量的动态变化

Fig. 2 Dynamic changes of Hg contents in organs of *Styphnolobium japonicum* after short-term use of sludge products

Hg 含量呈显著增加趋势($P < 0.05$), 大小排序均表现为 $160\text{ d} > 120\text{ d} > 80\text{ d} > 40\text{ d}$ (图 2)。在 160 d 的 S_2 叶片 Hg 含量达到最高值, 是 S_0 的 1.7 倍。国槐叶片中 Hg 含量在 40、80、120 d 中大小排序均为 $S_2 > S_1 > S_0$, 160 d 为 $S_2 > S_0 > S_1$ 。

2.2.2 国槐器官对 Hg 富集和转运的动态变化

随着取样时间的增加, 各处理下国槐根系和叶片对 Hg 的富集系数呈增加趋势, 转运系数呈上升再下降趋势($P < 0.05$)(表 2)。120、160 d 时, S_2 处理下根的 Hg 富集系数显著高于 S_0 ($P < 0.05$), 与 S_1 无显著差异。在 40 d 时, S_0 处理下叶片中 Hg 的富集

系数显著低于 S_1 和 S_2 ($P < 0.05$); 在 80 d 时, 各处理下叶片 Hg 的富集系数无显著差异; 在 120 d 时, S_2 显著高于 S_0 和 S_1 ($P < 0.05$); 在 160 d 时, S_0 和 S_2 显著高于 S_1 ($P < 0.05$)。这表明污泥产品促进了 Hg 从土壤向国槐叶片的转移。在 40、120 d, 各处理下 Hg 的转运系数无显著差异; 在 80 d 时, S_1 显著高于 S_0 ($P < 0.05$); 在 160 d 时, S_0 显著高于 S_1 和 S_2 ($P < 0.05$)且大小排序为 $S_0 > S_2 > S_1$ 。

2.3 短期使用污泥产品对国槐 Hg 积累的影响

表 3 为 160 d 时国槐各器官的生物量和 Hg 含量及其积累量。可以看出, 污泥产品的不同施用量

表 2 短期使用污泥产品后国槐器官的汞富集系数及转运系数

Tab. 2 Bioconcentration factor and translocation factor of Hg in *Styphnolobium japonicum* organs after short-term use of sludge products

取样时间 Sampling time/d	处理 Treatment	富集系数 Bioconcentration factor		转运系数 Translocation factor
		根 Root	叶 Leaf	
40	S_0	$0.008 \pm 0.001aB$	$0.006 \pm 0.000bC$	$0.810 \pm 0.116aC$
	S_1	$0.009 \pm 0.001aB$	$0.008 \pm 0.001aC$	$0.931 \pm 0.085aD$
	S_2	$0.008 \pm 0.001aC$	$0.008 \pm 0.001aD$	$1.019 \pm 0.170aD$
80	S_0	$0.004 \pm 0.001aB$	$0.017 \pm 0.002aBC$	$4.546 \pm 0.237bA$
	S_1	$0.005 \pm 0.001aC$	$0.024 \pm 0.005aB$	$5.065 \pm 0.305aA$
	S_2	$0.005 \pm 0.001aC$	$0.023 \pm 0.003aC$	$4.730 \pm 0.176abA$
120	S_0	$0.010 \pm 0.001bB$	$0.027 \pm 0.002bB$	$2.817 \pm 0.326aB$
	S_1	$0.010 \pm 0.001abB$	$0.028 \pm 0.003bB$	$2.706 \pm 0.079aB$
	S_2	$0.016 \pm 0.006aB$	$0.039 \pm 0.007aB$	$2.487 \pm 0.510aB$
160	S_0	$0.022 \pm 0.008bA$	$0.066 \pm 0.020aA$	$3.020 \pm 0.195aB$
	S_1	$0.026 \pm 0.002abA$	$0.039 \pm 0.001bA$	$1.484 \pm 0.062bC$
	S_2	$0.034 \pm 0.002aA$	$0.065 \pm 0.006aA$	$1.894 \pm 0.098cC$

表 3 短期使用污泥产品对国槐不同器官生物量、重金属含量及积累量的影响

Tab. 3 Effects of short-term use of sludge products on biomass, heavy metal content and accumulation of various organs of *Styphnolobium japonicum*

项目 Item	处理 Treatment	器官 Organ				总量 Total	地上/地下 Aboveground/ underground
		根 Root	干 Trunk	枝 Branch	叶 Leaf		
汞含量 Hg content/($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	S_0	$7.58 \pm 0.83cB$	$2.15 \pm 0.22aD$	$4.78 \pm 0.58aC$	$35.63 \pm 0.88bA$	$50.14 \pm 2.17b$	$5.65 \pm 0.46a$
	S_1	$10.82 \pm 1.88bB$	$1.45 \pm 0.38bD$	$4.82 \pm 1.39aC$	$33.99 \pm 0.45bA$	$51.08 \pm 3.39a$	$3.78 \pm 0.59b$
	S_2	$14.13 \pm 1.61aB$	$2.56 \pm 0.23aC$	$2.73 \pm 0.50bC$	$44.94 \pm 1.28aA$	$64.35 \pm 3.60a$	$3.57 \pm 0.26b$
生物量 Biomass/g	S_0	$20.95 \pm 1.92bC$	$83.82 \pm 1.79aA$	$15.70 \pm 1.19aD$	$28.08 \pm 3.43cB$	$148.54 \pm 1.36b$	$6.13 \pm 0.57a$
	S_1	$68.61 \pm 1.37aB$	$102.89 \pm 11.55aA$	$18.33 \pm 7.69aC$	$90.53 \pm 15.87aA$	$280.36 \pm 24.88a$	$3.09 \pm 0.41b$
	S_2	$73.91 \pm 4.21aB$	$114.66 \pm 26.93aA$	$14.33 \pm 0.47aC$	$64.74 \pm 7.20bB$	$267.65 \pm 27.07b$	$2.62 \pm 0.18b$
汞积累量 Hg accumulation/ μg	S_0	$0.16 \pm 0.01cB$	$0.18 \pm 0.02bB$	$0.07 \pm 0.01abB$	$1.00 \pm 0.14bA$	$1.41 \pm 0.16b$	$7.96 \pm 0.80a$
	S_1	$0.74 \pm 0.12bB$	$0.15 \pm 0.05bC$	$0.08 \pm 0.03aC$	$3.08 \pm 0.58aA$	$4.06 \pm 0.58a$	$4.61 \pm 1.54b$
	S_2	$1.04 \pm 0.07aB$	$0.29 \pm 0.06aC$	$0.04 \pm 0.01bC$	$2.91 \pm 0.29aA$	$4.28 \pm 0.21a$	$3.12 \pm 0.35b$

注: 不同大写字母表示同一处理国槐各器官之间差异显著($P < 0.05$), 不同小写字母表示同一器官不同处理之间差异显著($P < 0.05$)。Notes: different capital letters indicate significant differences between varied organs of *Styphnolobium japonicum* of the same treatment ($P < 0.05$), and different lowercase letters indicate significant differences between varied treatments of the same organ ($P < 0.05$).

能显著影响国槐各器官 Hg 含量(以干样计)。

S_1 、 S_2 处理下国槐根和整株的 Hg 含量显著高于 S_0 ($P < 0.05$); 在相同处理下, 国槐叶中 Hg 含量显著高于其他器官 ($P < 0.05$), 根显著高于干和枝 ($P < 0.05$), 大小排序表现为叶 > 根 > 枝 > 干。 S_1 和 S_2 处理下根和叶的生物量显著高于 S_0 ($P < 0.05$), 地上与地下生物量比值表现为 $S_0 > S_1 > S_2$ 。表明使用污泥产品有助于国槐根和叶的生长, 尤其提高了地下生物量, 为 Hg 在植物体内的积累提供了条件。

国槐根、叶以及整株的 Hg 积累量表现为 S_1 和 S_2 显著高于 S_0 ($P < 0.05$), 干中 Hg 积累量表现为 S_2 显著高于 S_0 和 S_1 ($P < 0.05$), 枝中 Hg 积累量表现为 S_1 显著高于 S_2 ($P < 0.05$)。 S_0 地上与地下 Hg 积累量比值显著高于 S_1 、 S_2 ($P < 0.05$)。污泥产品促进了国槐整株对 Hg 的积累, 叶片是主要吸收和存储器官。

2.4 短期使用污泥产品后国槐亚细胞 Hg 分配

在不同处理和取样时间下, 国槐根系和叶片各亚细胞组分 Hg 含量比例均呈现细胞壁组分(Fa) > 核蛋白成分和可溶性组分(Fd) > 细胞核组分(Fb) > 线粒体和叶绿体成分(Fc)的分布特征(图 3)。

在国槐根系 Hg 的亚细胞分布中(图 3a), Fa 和 Fd 二者含量占总量的 95.96% ~ 100.00%。在 40、80、120 d 时, Fa 占比为 100.00%; 在 160 d 时, Fd 所占比例增加。在叶片 Hg 的亚细胞分布中(图 3b),

Fa 和 Fd 二者占总量的 87.39% ~ 100.00%。在 40 d 时, 叶中 Fa 占比为 100.00%, 在 80 d 时, Fd 占比上升, Fa 占比下降。尽管随时间变化, 根和叶 Fb 和 Fc 中 Hg 含量有所增加, 但 Fa 和 Fd 仍是国槐根系和叶片贮存 Hg 的主要位点。

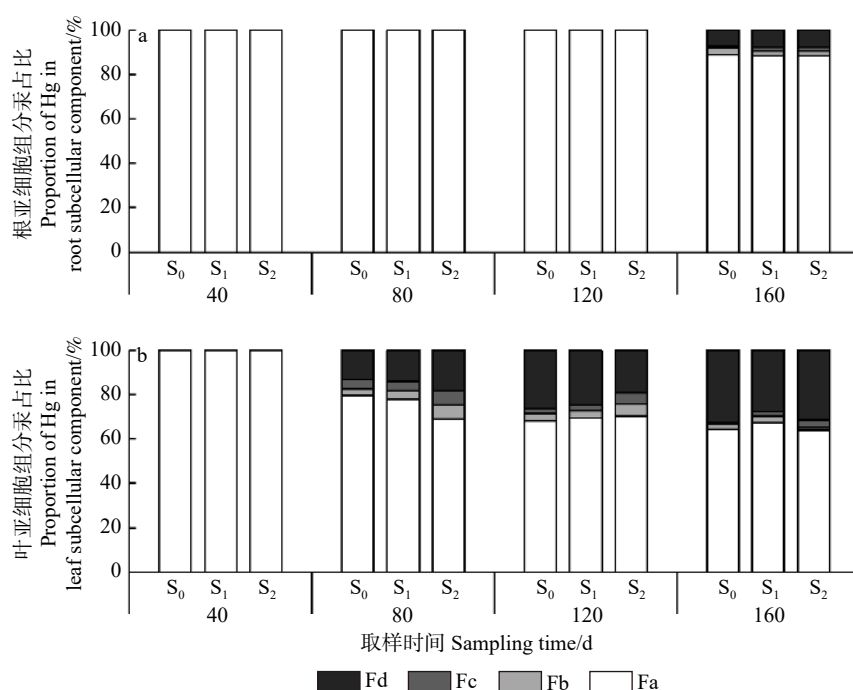
2.5 短期使用污泥产品后国槐中 Hg 形态

短期使用城镇生活污水污泥产品后, 国槐根系中残渣态(F_R)Hg 占比最大(S_0 58.8%、 S_1 57.2%、 S_2 59.7%)。 F_W 、 F_{NaCl} 、 F_{HAc} 和 F_{HCl} 形态 Hg 占比相当, 未检测到 F_E 形态的 Hg。在这几种 Hg 形态中, F_W 是活性和毒性最强的, 其占比 S_0 为 9.3%、 S_1 为 14.4%、 S_2 为 13.1%(图 4)。叶片同样以 F_R 为主(S_0 60.5%、 S_1 52.6%、 S_2 69.0%)。活性和毒性最强的 F_E 和 F_W 形态 Hg 占比较低(S_0 2.8%、 S_1 18.3%、 S_2 11.6%), 移动性和毒性相对较低的 F_{NaCl} 、 F_{HAc} 和 F_{HCl} 形态 Hg 的总占比随污泥量增加而有所降低。使用污泥产品后, 一定程度提高了 F_E 和 F_W 形态 Hg 的分配比例, 但不会影响根系和叶片中 F_R 形态 Hg 占比的主导地位。

3 讨 论

3.1 短期使用污泥产品后土壤 Hg 含量变化

在施用污泥堆肥后, 土壤 Hg 含量随时间推移整体表现为逐渐下降的趋势, 这与杨桐桐^[27]的研究结果相一致, 这可能与重金属含量释放和迁移具有一



Fa.细胞壁组分; Fb.细胞核组分; Fc.线粒体和叶绿体成分; Fd.核蛋白成分和可溶性组分。Fa, cell wall component; Fb, nucleus component; Fc, mitochondrial and chloroplast component; Fd, nucleoprotein component and soluble fraction.

图3 国槐根系(a)和叶片(b)亚细胞中 Hg 的分布

Fig. 3 Distribution of Hg in root (a) and leaf (b) subcellular components of *Styphnolobium japonicum*

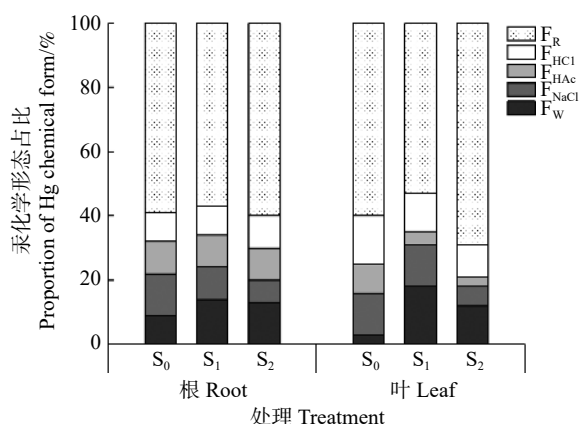


图4 国槐根系和叶片中Hg的化学形态分布
 Fig. 4 Chemical form distribution of Hg in roots and leaves of *Styphnolobium japonicum*

定的滞后性有关。取样前期土壤Hg含量的变化主要是由于污泥产品中富含有机质和植物所需多种微量元素,有机质的增加特别是腐殖酸与Hg具有矿物质结合、络合反应等吸附作用,从而使Hg在土壤中被固定下来。取样前期国槐正处展叶初期,植物生长需要大量养分,根系吸收能力较强,在吸收养分的同时也富集了大量的Hg。纯土壤中添加污泥产品后,会改善土壤中微生物的数量和相关酶的活性^[28],土壤中的Hg可通过微生物还原作用等转化为单质Hg,而单质Hg是土壤向大气释放Hg的主要形态^[29]。但有研究表明,Hg在150~200℃时才开始从污泥释放到空气中。因此,污泥土地应用过程中排放到空气中的Hg可忽略不计^[4]。取样后期国槐已成熟,植物体内生长代谢、化学转化等过程逐渐减少,基本不再从土壤中吸收营养,植物体内吸收Hg含量也基本稳定。

3.2 短期使用污泥产品后国槐各部位Hg富集响应

本研究中,国槐叶片对Hg的吸收富集能力强于根部,但也有一些植物如白骨壤(*Avicennia marina*)和海桑(*Sonneratia caseolaris*)^[30],其对Hg的富集含量大小表现为根>叶,这可能与个体差异及环境异质性有关。植物通过叶片进行大气Hg的吸收,叶片中99%以上的Hg均来自于大气,大气Hg的叶面吸收主要通过气孔途径发生^[31]。香樟树(*Cinnamomum camphora*)叶片的Hg含量会随着生长周期不断累积^[32],这与本研究结果相似,国槐叶片Hg含量在取样后期明显高于取样前期。取样后期属于国槐的生长旺盛期和落叶期,污泥施用所带来的植物生物量的增加使叶片富集更多Hg。根部

Hg含量与叶片Hg含量变化相一致。Hg在植物体内的移动性和生物可利用性均较低,植物体内的阻隔机制如根部凯氏带限制根部Hg向上传输^[33]。另外,污泥产品含多种重金属元素,不同元素之间存在着协同或拮抗作用,可能会影响植物根系对Hg的吸收^[34]。

取样后期国槐S₂处理下根中Hg的富集系数显著高于S₀,这可能与取样后期国槐根的生物量增加有关,尤其是细根生物量,因为细根是根部Hg的主要吸收途径^[35]。此外,国槐对Hg的转移系数呈现出先上升后下降的趋势,这与钱晓莉^[36]的研究结果相一致,这可能与土壤中生物可利用态Hg有关。植物在生长过程中会产生大量根系分泌物,能将基质中铝、铁、铜、铅和汞等活化^[37]。取样前期,根部生物量较小,细根数量也较少,产生的根系分泌物活化Hg的能力有限,仅有少部分被转化为生物可利用态Hg,从而被转运至地上部。取样后期,虽然土壤Hg含量释放较多,但国槐根部生物量明显增加,细根数量较多,被活化的Hg也较多,超过了国槐转运Hg的能力,因此Hg被选择性地富集在根部,转移系数降低。不同器官Hg含量与积累量大小排序有所差异,根系对土壤Hg的吸收只有少量向地上部迁移,树皮中的Hg很少传输到树干中^[38]。树干Hg含量获取的纵向和径向传输途径均有所限制,导致国槐树干Hg含量最低,但由于国槐树干的生物量较高,树干中所保存的Hg含量要高于树枝,因此树干仍是森林生态系统中的重要汞库^[39]。

3.3 短期使用污泥产品后Hg在国槐亚细胞上分布策略

国槐根系和叶片亚细胞中Hg随时间的分布变化表明叶片Fd对于Hg胁迫的敏感程度要高于根系,而根系Fd对于Hg胁迫的耐受程度要好于叶片。细胞壁是保护原生质体免受金属离子毒害的第一道屏障,其表面带负电荷^[40],细胞壁中果胶、纤维素、半纤维素等物质和羟基、氨基、羧基等基团会与Hg²⁺络合使其处在膜外,这些成分和官能团的存在可限制金属离子穿过细胞膜的运输。当细胞壁结合的Hg²⁺达到饱和时,部分Hg在细胞膜载体蛋白或其他物质作用下跨质膜进入原生质体,原生质体中的Hg一部分在转运蛋白作用下跨液泡膜进入液泡,液泡膜中的ABC转运蛋白能转运重金属螯合物至液泡中,并区隔开,从而提高植物对重金属的耐性^[41]。还有少部分进入细胞器,可能会对国槐的生理活动产生影响。

3.4 短期使用污泥产品后国槐体内Hg形态变化

国槐根系和叶片中的Hg均以残渣态为主,这主

要与北京市表土和城市污泥产品中 Hg 的赋存形态有关。北京市表层土壤中只有很小比例的 Hg 以活性化学形式存在,生物利用度低^[42],而城市污泥产品中的 Hg 也主要以稳定的残渣态形式存在,活性 Hg 含量较少^[43]。同时,由国槐根系和叶片残渣态 Hg 占比在 S_2 处理下大于 S_1 、 S_0 可知,施用污泥产品也可能促使国槐根系和叶片 Hg 的 F_E 和 F_W 向活性更低的 F_R 转化,从而降低 Hg 的活性与迁移性。

4 结 论

本研究表明随时间增加,施用污泥的土壤 Hg 含量显著降低;污泥产品可促进国槐生物量增加,同时也促进根系和叶片对 Hg 的吸收;国槐根系和叶片中的 Hg 主要分布在细胞壁中,多以残渣态存在。国槐可通过细胞壁固定、液泡区隔化以及将活性 Hg 转化为残渣态 Hg 从而降低重金属毒害。可以考虑 2 kg/m^2 的低污泥使用量在国槐幼林中的推广应用,为污泥产品在木本植物中的应用提供理论参考和实践依据。

参 考 文 献

- [1] Wei L L, Zhu F Y, Li Q Y, et al. Development, current state and future trends of sludge management in China: based on exploratory data and CO₂-equivalent emissions analysis[J/OL]. *Environment International*, 2020, 144: 106093[2024-02-21]. <https://10.1016/j.envint.2020.106093>.
- [2] Guo Y Q, Guo Y L, Gong H, et al. Variations of heavy metals, nutrients, POPs and particle size distribution during "sludge anaerobic digestion-solar drying-land utilization process": case study in China[J/OL]. *Science of the Total Environment*, 2021, 801: 149609[2024-02-23]. 10.1016/j.scitotenv.2021.149609.
- [3] 王宁,刘清伟,赵音,等.中国城市污泥中汞含量的时空分布特征[J].*环境科学*, 2018, 39(5): 2296-2305.
Wang N, Liu Q W, Zhi Y, et al. Spatial and temporal variation of mercury in municipal sewage sludge in China[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(5): 2296-2305.
- [4] Liu J, Lin L, Wang K Y, et al. Concentrations and species of mercury in municipal sludge of selected chinese cities and potential mercury emissions from sludge treatment and disposal[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 895075.
- [5] 张毅,许泽胜,陈佳蕊,等.北京市政污泥产排特征及处置利用发展历程的研究[J].*应用化工*, 2023, 52(4): 1-7.
Zhang Y, Xu Z S, Chen J R, et al. Study on production and discharge characteristics and the development course of disposal and utilization of municipal sludge in Beijing[J]. *Applied Chemical Industry*, 2023, 52(4): 1-7.
- [6] 徐富锦,常会庆.污泥堆肥替代氮肥对石灰性褐土肥力、小麦产量和品质的影响[J].*生态与农村环境学报*, 2022, 38(11): 1482-1490.
Xu F J, Chang H Q. Effects of sludge composting to replace nitrogen fertilizer on cinnamon soil fertility, yield and quality of wheat[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38(11): 1482-1490.
- [7] 马博强.污泥堆肥用于林木及草坪草种植时重金属的迁移与分布研究[D].北京:北京林业大学,2013.
Ma B Q. Study on heavy metal transportation and distribution of composted sewage sludge applicated in forest and lawn grass planting[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013.
- [8] Zhang B, Zhou X X, Ren X P C, et al. Recent research on municipal sludge as soil fertilizer in China: a review[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2023, 234(2): 1-14.
- [9] Yang G, Zhang G M, Wang H C. Current state of sludge production, management, treatment and disposal in China[J]. *Water Research*, 2015, 78: 60-73.
- [10] Zhou H, Wei L L, Wang D S, et al. Environmental impacts and optimizing strategies of municipal sludge treatment and disposal routes in China based on life cycle analysis[J]. *Environment International*, 2022, 166: 107378.
- [11] 戴晓虎,张辰,章林伟,等.碳中和背景下污泥处理处置与资源化发展方向思考[J].*给水排水*, 2021, 47(3): 1-5.
Dai X H, Zhang C, Zhang L W, et al. Thoughts on the development direction of sludge treatment and resource recovery under the background of carbon neutrality[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, 47(3): 1-5.
- [12] 彭远航,冯嘉仪,龙凤玲,等.三种园林植物幼苗生长节律对城市污泥的响应[J/OL].*生态学杂志*, 2023: 1-11[2024-02-11]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20230330.1825.008.html>.
Peng Y H, Feng J Y, Long F L, et al. Growth rhythm response of three landscape plant species to municipal sewage sludge[J/OL]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023: 1-11[2024-02-11]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20230330.1825.008.html>.
- [13] Liu H T, Wang Y W, Huang W D, et al. Response of wine grape growth, development and the transfer of copper, lead, and cadmium in soil-fruit system to sludge compost amendment[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(23): 24230-24236.
- [14] 刘晓贞,麻冰涓,崔莹,等.城市污水厂中汞的形态分布特征研究[J].*环境科学与技术*, 2016, 39(9): 125-130.
Liu X Z, Ma B J, Cui Y, et al. Distribution characteristics of mercury in the sewage treatment plant[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 39(9): 125-130.
- [15] 牛振川,张晓山,陈进生,等.植被在大气汞收支中作用的研究进展与展望[J].*生态毒理学报*, 2014, 9(5): 843-849.
Niu Z C, Zhang X S, Chen J S, et al. The role of vegetation in atmospheric mercury budgets: progresses and perspectives[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2014, 9(5): 843-849.
- [16] 郑瑶瑶.不同地区常见树种叶片滞尘和吸滞重金属效果分析[D].贵阳:贵州师范大学,2020.
Zheng Y Y. Analysis of dust retention and stagnation of heavy metals of leaves in common tree species in different region[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2020.

- [17] 杨娜, 包海, 刘智远, 等. 秋季呼和浩特市主要绿化树种叶面滞尘重金属含量分布特征 [J]. 内蒙古师范大学学报 (自然科学汉文版), 2022, 51(6): 622–629.
- Yang N, Bao H, Liu Z Y, et al. Distribution of heavy metal content in leaf dust of landscape trees at autumn in Hohhot[J]. Journal of Inner Mongolia Normal University (Natural Science Edition), 2022, 51(6): 622–629.
- [18] 姚聪颖. 北京城镇排水污泥制有机肥林地利用的重金属污染风险评价研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- Yao C Y. The risk assessment of heavy metal pollution in forest land utilization of organic fertilizer from sewage sludge in Beijing[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [19] 程佳雪. 北京 40 种园林树木重金属吸收能力评价与筛选 [D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- Cheng J X. Evaluation and selection of heavy metal absorption capacity of 40 garden trees in Beijing[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [20] 赵策, 邱尔发, 马俊丽, 等. 行道树国槐不同形态重金属富集效能研究 [J]. 林业科学研究, 2019, 32(3): 142–151.
- Zhao C, Qiu E F, Ma J L, et al. Study on enrichment efficiency of heavy metals in different formations in roadside trees of *Sophora japonica* L.[J]. Forest Research, 2019, 32(3): 142–151.
- [21] 葛坤, 王培军, 邵海林, 等. 城市典型绿化树种叶片重金属积累及抗性生理特征 [J]. 山西农业大学学报 (自然科学版), 2022, 42(4): 96–104.
- Ge K, Wang P J, Shao H L, et al. Physiological characteristics of heavy metal accumulation and resistance in leaves of typical urban greening tree species[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2022, 42(4): 96–104.
- [22] Weigel H J, Jäger H J. Subcellular distribution and chemical form of cadmium in bean plants[J]. *Plant Physiology*, 1980, 65(3): 480–482.
- [23] 周芙蓉, 王进鑫, 张青, 等. 侧柏和国槐叶片中铅的化学形态与分布研究 [J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(11): 2121–2127.
- Zhou F R, Wang J X, Zhang Q, et al. Chemical forms and distribution of Pb in the leaves of *Platycladus orientalis* and *Sophora japonica*[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(11): 2121–2127.
- [24] Lu H P, Li Z A, Wu J T, et al. Influences of calcium silicate on chemical forms and subcellular distribution of cadmium in *Amaranthus hypochondriacus* L.[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 40583.
- [25] 乔永, 周金星, 王小平. Pb、Cd 复合胁迫对桑树种子萌发及幼苗生长的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(4): 32–40.
- Qiao Y, Zhou J X, Wang X P. Effects of lead and cadmium combined stress on seed germination and seedling growth of mulberry[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(4): 32–40.
- [26] 王婧, 莫其锋, 储双双, 等. 污泥堆肥对园林植物合果芋 (*Syngonium podophyllum*) 生长及重金属吸收累积的影响 [J]. 生态学报, 2018, 37(6): 1752–1758.
- Wang J, Mo Q F, Chu S S, et al. Effects of sewage sludge compost on the growth and heavy metal accumulation in landscape plant *Syngonium podophyllum*[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(6): 1752–1758.
- [27] 杨桐桐. 污泥堆肥用于沙荒地土壤改良效能与污染物在环境介质中的变化规律研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- Yang T T. Application of composted municipal sludge: study on the desert land soil improvement efficiency and the variation regulation of pollutants in ambient medium[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.
- [28] 董晓芸, 柯凯恩, 胡自航, 等. 施用不同污泥堆肥对土壤理化性质及微生物活性的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2021, 49(6): 70–75.
- Dong X Y, Ke K E, Hu Z H, et al. Effect of different sludge composting on soil physical and chemical properties and microbial activity[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2021, 49(6): 70–75.
- [29] 陈春羽, 王定勇. 水溶性有机质对土壤及底泥中汞吸附行为的影响 [J]. 环境科学学报, 2009, 29(2): 312–317.
- Chen C Y, Wang D Y. Effect of dissolved organic matter on adsorption of mercury by soils and sediment[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(2): 312–317.
- [30] 贺蓓, 李瑞利, 柴民伟, 等. 深圳湾红树林沉积物-植物体系汞的分布规律和形态分配特征 [J]. 生态环境学报, 2015, 24(3): 469–475.
- He B, Li R L, Chai M W, et al. Distribution and speciation of mercury (Hg) in Futian mangrove wetland, Shenzhen Bay[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(3): 469–475.
- [31] 康虎虎, 刘晓宏, 张馨予, 等. 树木年轮汞记录: 进展、问题和展望 [J]. 应用生态学报, 2021, 32(10): 3733–3742.
- Kang H H, Liu X H, Zhang X Y, et al. Mercury in tree rings: advances, problems and prospects[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(10): 3733–3742.
- [32] 刘婷, 郑祥民, 刘飞, 等. 上海市香樟树叶总汞含量时空分布及影响因素 [J]. 环境化学, 2017, 36(3): 486–495.
- Liu T, Zheng X M, Liu F, et al. Seasonal and spatial distribution of mercury contents in *Camphora* leaves and its influencing factors in Shanghai[J]. *Environmental Chemistry*, 2017, 36(3): 486–495.
- [33] 陶惠, 陈颖, 刘艳伟, 等. 贵州万山汞矿区植物中汞的累积特征 [J]. 环境化学, 2022, 41(12): 4047–4056.
- Tao H, Chen Y, Liu Y W, et al. Bioaccumulation of mercury in plants collected from Wanshan mercury mining areas in Guizhou Province[J]. *Environmental Chemistry*, 2022, 41(12): 4047–4056.
- [34] 陈雪. 土壤中重金属的植物有效性研究综述 [J]. 广东化工, 2022, 49(9): 86–88.
- Chen X. Research on the phytoavailability of heavy metals in the soils: a review[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2022, 49(9): 86–88.
- [35] Wang J J, Guo Y Y, Guo D L, et al. Fine root mercury heterogeneity: metabolism of lower-order roots as an effective route for mercury removal[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(2): 769–777.

- [36] 钱晓莉. 典型汞矿区耐性植物及汞富集机制研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2018.
- Qian X L. Tolerant plants and their accumulation mechanism of mercury in typical mercury mining areas[D]. Guiyang: Guizhou University, 2018.
- [37] Dessureault-Rompré J, Nowack B, Schulin R, et al. Metal solubility and speciation in the rhizosphere of *Lupinus albus* cluster roots[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(19): 7146–7151.
- [38] 萨如拉, 王章玮, 徐泽华, 等. 小兴安岭天然林不同林分汞含量分布特征与生物质汞库估算 [J]. 环境科学学报, 2021, 41(11): 4703–4709.
- Sarula, Wang Z W, Xu Z H, et al. Distribution characteristics of mercury concentration and estimation biomass mercury pools in different natural forests of Xiaoxing'an Mountain[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(11): 4703–4709.
- [39] Yang Y, Yanai R D, Driscoll C T, et al. Concentrations and content of mercury in bark, wood, and leaves in hardwoods and conifers in four forested sites in the northeastern USA[J]. *PLoS One*, 2018, 13(4): e0196293.
- [40] 闫雷, 朱园辰, 陈辰, 等. 镉在黄瓜幼苗中的化学形态及亚细胞分布 [J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(8): 1864–1871.
- Yan L, Zhu Y C, Chen C, et al. Subcellular distribution and chemical forms of cadmium in cucumber seedlings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(8): 1864–1871.
- [41] 曹冠华, 柏旭, 陈迪, 等. ABC 转运蛋白结构特点及在植物和真菌重金属耐性中的作用与机制 [J]. 农业生物技术学报, 2016, 24(10): 1617–1628.
- Cao G H, Bai X, Chen D, et al. Structure characteristics of ABC transporter protein and the function and mechanism on enhancing resistance of plants and fungi to heavy metals[J]. *Journal of Agricultural Biotechnology*, 2016, 24(10): 1617–1628.
- [42] 李花, 刘军, 毛玉芬, 等. 城市污泥及其堆肥中汞的形态分析 [J]. 河南农业, 2014(10): 50–53.
- Li H, Liu J, Mao Y F, et al. Speciation analysis of mercury in municipal sludge and its compost[J]. *Agriculture of Henan*, 2014(10): 50–53.
- [43] 刘俊华, 王文华, 彭安. 土壤中汞生物有效性的研究 [J]. 农业环境保护, 2000, 19(4): 216–220.
- Liu J H, Wang W H, Peng A. Bioavailability of mercury in soil[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2000, 19(4): 216–220.

(责任编辑 孟 瑶
责任编委 孙向阳)