北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

不同郁闭度林下施用污泥产品对菘蓝重金属富集的影响

王书婷 彭祚登 杨文彬 杨扬 杨海婷 马富亮 白家云 熊建军

Effects of sludge product application on heavy metal enrichment in *Isatis tinctoria* under different canopy densities

Wang Shuting, Peng Zuodeng, Yang Wenbin, Yang Yang, Yang Haiting, Ma Fuliang, Bai Jiayun, Xiong Jianjun

引用本文:
王书婷, 彭祚登, 杨文彬, 杨扬, 杨海婷, 马富亮, 白家云, 熊建军. 不同郁闭度林下施用污泥产品对菘蓝重金属富集的影响[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(8):139–147. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240031
Wang Shuting, Peng Zuodeng, Yang Wenbin, Yang Yang, Yang Haiting, Ma Fuliang, Bai Jiayun, Xiong Jianjun. Effects of sludge product application on heavy metal enrichment in *Isatis tinctoria* under different canopy densities[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(8):139–147. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240031

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240031

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

郁闭度对樟子松林下人工更新阔叶树种生长的影响

Effects of canopy density on the growth of broadleaved tree species under artificial regeneration of *Pinus sylvestris* forest

北京林业大学学报, 2023, 45(8): 65–73. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220275

恢复湿地土壤重金属含量变化及污染评价

Changes of soil heavy metal contents and pollution evaluation during the restoration of wetlands

北京林业大学学报, 2020, 42(3): 134–142. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190338

基于改进的像元二分模型估测郁闭度

Estimation of canopy closure based on improved dimidiate pixel model

北京林业大学学报, 2019, 41(6): 35–43. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180263

基于无人机影像的高郁闭度杉木纯林树冠参数提取

Extraction of tree crown parameters from high–density pure Chinese fir plantations based on UAV images

北京林业大学学报, 2020, 42(10): 20–26. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190386

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

Pb、Cd复合胁迫对桑树种子萌发及幼苗生长的影响

Effects of lead and cadmium combined stress on seed germination and seedling growth of mulberry

北京林业大学学报, 2020, 42(4): 32–40. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190244

DOI:10.12171/j.1000−1522.20240031

不同郁闭度林下施用污泥产品对菘蓝重金属富集的影响

王书婷[1] 彭祚登[1] 杨文彬[2] 杨 扬[1] 杨海婷[1] 马富亮[2] 白家云[2] 熊建军[2]
（1. 林木资源高效生产全国重点实验室（北京林业大学），北京 100083；2. 北京城市排水集团有限责任公司，北京 100044）

摘要:【目的】为探究林下施用污泥产品对套作菘蓝的安全性和品质的影响，在不同郁闭度林下开展了污泥对菘蓝重金属富集影响的试验。**【方法】**分别在不同郁闭度（0.3、0.6、0.8）的林下撒施 0、30 t//hm^2 污泥产品后种植菘蓝，比较分析各生长期不同处理对菘蓝药用部位养分吸收、重金属富集和有效成分含量的影响。**【结果】**(1)施用污泥产品提高了菘蓝组织中的氮、磷、钾含量，对全氮含量的改善最佳。(2)施用污泥产品增加了菘蓝组织对重金属镉、砷和锌的富集作用，降低了菘蓝叶片对汞的富集作用。(3)施用污泥产品降低了菘蓝根部有效成分的含量，但提高了重度郁闭林下菘蓝叶片中靛玉红的含量。**【结论】**按目前的标准施用 30 t/hm^2 污泥产品会导致菘蓝组织中重金属富集较高，从而影响菘蓝的药用品质。

关键词：郁闭度；污泥；菘蓝；重金属
中图分类号：S759.82 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2024)08−0139−09
引文格式：王书婷，彭祚登，杨文彬，等. 不同郁闭度林下施用污泥产品对菘蓝重金属富集的影响［J］. 北京林业大学学报，2024，46(8)：139−147. Wang Shuting, Peng Zuodeng, Yang Wenbin, et al. Effects of sludge product application on heavy metal enrichment in *Isatis tinctoria* under different canopy densities［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(8): 139−147.

Effects of sludge product application on heavy metal enrichment in *Isatis tinctoria* under different canopy densities

Wang Shuting[1] Peng Zuodeng[1] Yang Wenbin[2] Yang Yang[1] Yang Haiting[1] Ma Fuliang[2]
Bai Jiayun[2] Xiong Jianjun[2]
(1. State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Beijing City Drainage Group Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract:［**Objective**］This paper aims to investigate the safety and quality effects in *Isatis tinctoria* grown under forests after applying sludge products.［**Method**］*I. tinctoria* was planted under the forests after spreading 0 and 30 t/ha of sludge products at different canopy densities (0.3, 0.6, 0.8), respectively. The effects of different treatments on nutrient uptake, heavy metal enrichment and active ingredient content of medicinal parts of *I. tinctoria* at different growth stages were comparatively analyzed.［**Result**］(1) The nitrogen, phosphorus and potassium contents in tissues of *I. tinctoria* were increased after applying sludge products, and the best improvement was total nitrogen content. (2) The enrichments in tissues of *I. tinctoria* for the heavy metals cadmium, arsenic and zinc were increased after applying sludge products. However, the enrichment in leaves of *I. tinctoria* for mercury decreased. (3) The content of active ingredients in root of *I. tinctoria* was reduced after applying sludge products, but the content of indigofera in leaves of *I. tinctoria* grown under heavy canopy density increased.［**Conclusion**］The application of 30 t/ha sludge products at the current standard results in a high concentration of heavy metals in tissues of *I. tinctoria*, which affects the medicinal quality of *I. tinctoria*.

收稿日期: 2024−01−28 **修回日期:** 2024−04−07
基金项目: 国家发改委环境污染第三方治理项目（2017HXFWLWLXY023），北京城市排水集团委托项目（BJPS-2022-JT-NCB-SC-0037）。
第一作者: 王书婷。主要研究方向：城市森林培育。Email: 2512420495@qq.com 地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号林木资源高效生产全国重点实验室。
责任作者: 彭祚登，教授。主要研究方向：城市森林培育、林木种苗培育理论与技术。Email: zuodeng@sina.com 地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

Key words: canopy density; sewage sludge; *Isatis tinctoria*; heavy metals

我国城市污泥产量逐年递增，预计到 2025 年达 9 000 万 t [1]。高级厌氧消化制污泥产品富含有机质和氮磷钾等营养物质，同时也存在重金属和多环芳烃等污染物，这使得污泥产品的资源化利用受到限制。但污泥产品消纳处置的研究发现：适量施用污泥产品能补充林地土壤因木材产品或植物生物量持续输出导致的营养消耗，促进林木株高、胸径、生物量生长等[2−3]，提高林木对土壤中某些重金属的吸收和富集能力[4] 。因此，污泥产品的林地利用是相对焚烧、填埋等更为合适的处置途径，具有应用前景。

林下经济产业的高质量发展自 2020 年以来已成为我国林业生态建设的重要方向，林药模式在林下经济产业中占据重要地位，充分利用林下空间和土壤条件发展中药材产业，不与粮争地，契合国家林业和草原局《全国林下经济发展指南（2021—2030 年）》关于耕地“非粮化”“非农化”的要求。这使污泥产品在林地利用中面临着极大挑战，林下经济作物多为食用或药用的草本类植物，而现有污泥产品林地利用的推荐用量是基于对林地生态环境中林木生长和土壤风险评价制定的，该施用量对林下草本植物的影响尚不明确。污泥产品在农作物和草本类植物种植的应用研究发现：施用污泥产品能促进水稻（*Oryza sativa*）和大豆（*Glycine max*）等作物的固氮能力，提高作物产量[5−6]，但过量施用会导致重金属在土壤和植物中的累积效应，造成食用部位重金属超富集[7]。草本植物在受污染的土壤中普遍存在镉、汞和砷重金属的富集风险，而锌作为植物生长的必需营养元素，过量累积也会导致植物受到胁迫影响[8−9]。因此在林下施用污泥产品对于发展林下经济产业，特别是对林下中药材重金属富集的影响评价是亟待研究的问题。

菘蓝（*Isatis tinctoria*）为十字花科菘蓝属 2 年生草本植物，栽培范围广，适应性强。其根（板蓝根）、叶（大青叶）可入药，具有清热解毒、凉血消斑、利咽止痛的功效。本研究以菘蓝作为模式植物，根据北京市地方标准《污泥产品林地施用技术规范》（DB11/T 2124—2023）规定的污泥产品施用量，在不同郁闭度的林下撒施 30 t/hm^2 的高级厌氧消化制污泥产品，对施用污泥产品后种植菘蓝的效果进行评价，以期为同类污泥产品在北京市平原生态林发展林下经济的产业应用提供系统的理论参考依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

试验地位于北京市怀柔区桥梓镇前辛庄村北京林业大学林下经济示范区（116.57 °E，40.32 °N）。该地属暖温带半湿润气候，年平均气温 9 ~ 13 ℃，无霜期 170 ~ 200 d，年平均降水量 600 ~ 700 mm，土壤为沙壤土。试验时间为 2022 年 8 月 4 日至 2023 年 4 月 17 日，试验周期内该区域平均气温 9.03 ℃，最高日平均气温 16.98 ℃，最低日平均气温 1.65 ℃，累积降水量 106.84 mm。不同郁闭度的林分试验地概况如表 1。

1.2 供试材料

供试污泥产品（sewage sludge，SS）取自北京城市排水集团有限责任公司污泥资源中心庞各庄污泥处置厂，由北京城市生活污水经过热水解、高级厌氧消化、板框高干脱水等工艺处理而成。菘蓝种子购自宿迁卉艺种业有限公司，种子净度 ≥ 86%，发芽率 ≥ 93%，千粒质量 7.8 g，含水量 6.28%。

1.3 试验设计

试验于 2022 年 8 月 4 日开始，选取林相整齐、健康的人工林作为样地，进行林下除草。试验采用随机区组设计，各郁闭度下的试验地布设如图 1。设置 2 个处理，分别撒施 0（CK）和 30 t/hm^2（T）污泥产品，各处理设 3 个重复。试验小区面积为 6 m^2（长 3 m × 宽 2 m），每个郁闭度的林分下设置 6 个小区，共计 18 个小区，试验小区四周设 1 m 宽的空

表 1 试验地基本概况

Tab. 1 Basic information of experimental sites

郁闭度 Canopy density	树种 Tree species	株距 Planting space/m	行距 Raw space/m	混交比 Mixed species ratio	平均树高 Mean tree height/m	平均胸径 Mean DBH/cm	平均冠幅（东西向）Mean crown width (east-west)/m	平均冠幅（南北向）Mean crown width (north-south)/m
轻度 Slight (0.3)	国槐、金叶榆 *Sophora japonica*, *Ulmus pumila*	5	5	3∶1	7.6	13.4	2.9	2.4
中度 Moderate (0.6)	国槐 *Sophora japonica*	5	5		8.1	15.3	3.0	2.7
重度 Heavy (0.8)	杨树 *Populus* sp.	4	4		14.3	17.7	4.3	3.6

注：数据来源于National Centers for Environmental Information（NOAA网站）的北京站点（54511099999）。Note: data are cited from monitoring at the Beijing site (54511099999) of the National Centers for Environmental Information (NOAA website).

地为保护行以减少环境扰动带来的差异影响。

在 T 处理样地撒施粒径 < 2 mm 的颗粒状污泥产品后，立即旋耕至深 20 cm 的土壤中混合均匀，静置半个月，期间进行 1 次灌溉。在种植菘蓝前测得各郁闭度的对照土壤(CK)和污泥试验地土壤(T)指标数据(表 2)。

于 8 月 19 日进行播种，播种前将菘蓝种子去除杂质后，用常温水浸泡 24 h，捞出稍晾干后与少量草木灰混合。在试验小区中沿宽度处按行距 25 cm 开沟 2 cm，每个小区中开 5 条沟，将处理后的菘蓝种子均匀撒入沟内，覆土 1 cm，种子用量 30 kg/hm^2。播种后立即浇水，约 20 d 出苗完成，至翌年 4 月期间根据自然气候状况适时适量灌溉。

1.4　测定指标与方法

1.4.1　采样时间和方法

于 2022 年 10 月 27 日(营养生长期，下称 N 期)和 2023 年 4 月 17 日(开花期，下称 F 期)采集不同郁闭度林下的菘蓝样品。在各郁闭度下 CK 和 T 处理的 3 个小区中各选择不同列的菘蓝进行连排采挖，各小区采挖的位置相同，将同一处理下采集的植株混合以减少区域效应，全株取出后清洗根系和叶片杂质，随后用吸水纸擦干后分别放入塑封袋。装入冰盒带回实验室置于−80 ℃ 超低温冰箱中待测。

1.4.2　指标测定方法

根系和叶片样品于 105 ℃ 下杀青 30 min 后再于 90 ℃ 烘干至恒质量，用研磨仪(MM400,德国莱驰)研磨后过 100 目筛贴标签备用。养分指标包括全氮(total nitrogen，TN)、全磷(total phosphorus，TP)和全钾(total potassium，TK)。采用 H_2O_2-H_2SO_4 消煮，全自动间断化学分析仪(Smartchem450，深圳 AMS)测定 TN 和 TP，原子吸收光谱仪(SPECTRAA，澳大利亚 VARIAN)测定 TK。重金属指标包括镉

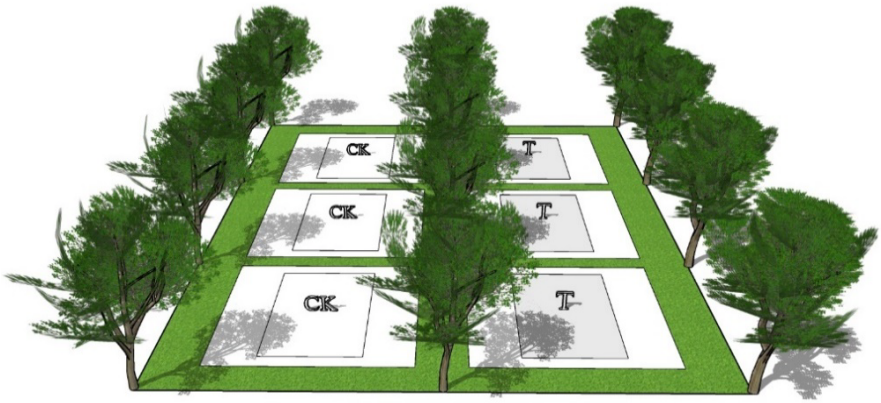


图 1　林下试验样地布设

Fig. 1　Schematic diagram of plot layout for understory test

表 2　试验地土壤及供试污泥产品基本性质

Tab. 2　Basic properties of soil and sludge products used in the experiment

项目 Item	pH		有机质 Organic matter/ (g·kg^{-1})		全氮 Total nitrogen/ (mg·kg^{-1})		全磷 Total phosphorus/ (mg·kg^{-1})		全钾 Total potassium/ (mg·kg^{-1})		镉 Cadmium/ (mg·kg^{-1})		汞 Mercury/ (mg·kg^{-1})		砷 Arsenic/ (mg·kg^{-1})		锌 Zinc/ (mg·kg^{-1})	
	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T
轻郁闭土壤 Slight canopy density soil	8.05	7.78	20.67	119.18	0.59×10^3	0.92×10^3	0.62×10^3	0.82×10^3	9.32×10^3	9.46×10^3	0.14	0.2	0.09	0.43	11.7	14.85	47.3	90.16
中郁闭土壤 Moderate canopy density soil	7.80	7.42	19.25	125.12	0.74×10^3	0.81×10^3	1.01×10^3	1.49×10^3	1.09×10^4	1.14×10^4	0.19	0.37	0.05	0.25	9.06	13.93	59.62	92.17
重郁闭土壤 Heavy canopy density soil	7.87	7.47	14.13	111.94	0.71×10^3	1.90×10^3	0.56×10^3	0.77×10^3	8.31×10^3	9.31×10^3	0.13	0.23	< DL	0.57	6.26	9.93	53.81	73.27
污泥产品 Sewage sludge product	7.72		499		2.45×10^4		3.84×10^4		1.96×10^4		< 1		10.2		11.9		626	
标准限值* Standard limit value	5.50 ~ 8.50		⩾ 180		氮磷钾养分 Nitrogen, phosphorus and potassium nutrients⩾ 2.5×10^4						< 20		< 15		< 75		< 3 000	

注：*引自标准《城镇污水处理厂污泥处置 林地用泥质》(CJ/T 362—2011)；DL为检测方法最低检出限值。CK. 对照；T. 试验土壤施用 30 t/hm^{2}污泥产品。下同。 Notes: * means the standard is quoted from *Sludge Disposal of Forest Land in Municipal Sewage Treatment Plants* (CJ/T 362−2011). DL is the lowest detection limit of detection method. CK, control; T, soil application of 30 t/ha sludge products. The same below.

(Cd)、汞(Hg)、砷(As)和锌(Zn)。采用 HNO_3-$HClO_4$ 混合酸消解，电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES，美国 optima 8X00 系列)测定。每个植物样做 3 个平行，用国家标准物质柑橘叶(GBW10020，GSB-11)进行质量控制。有效成分指标测定包括菘蓝根中的靛蓝和告依春，叶片中的靛玉红和总多糖，检测由北京中科光析化工技术研究所完成。

1.4.3 菘蓝药用部位重金属污染测试

菘蓝根和叶中的重金属污染状况采用单项污染指数法进行评价[10]，以《药用植物及制剂进出口绿色行业标准》(WM/T 2—2004)中 Cd、Hg 和 As 的限量值为标准，分别是 0.3、0.2 和 2.0 mg/kg，用《食品安全国家标准 粮食》(GB 2715—2016)中 Zn 的限量值 50 mg/kg 为标准。

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \tag{1}$$

式中：C_i 为植物根或叶中某一重金属元素(i)含量的实测值，S_i 为某一重金属元素的限定标准值，P_i 为单项污染指数。

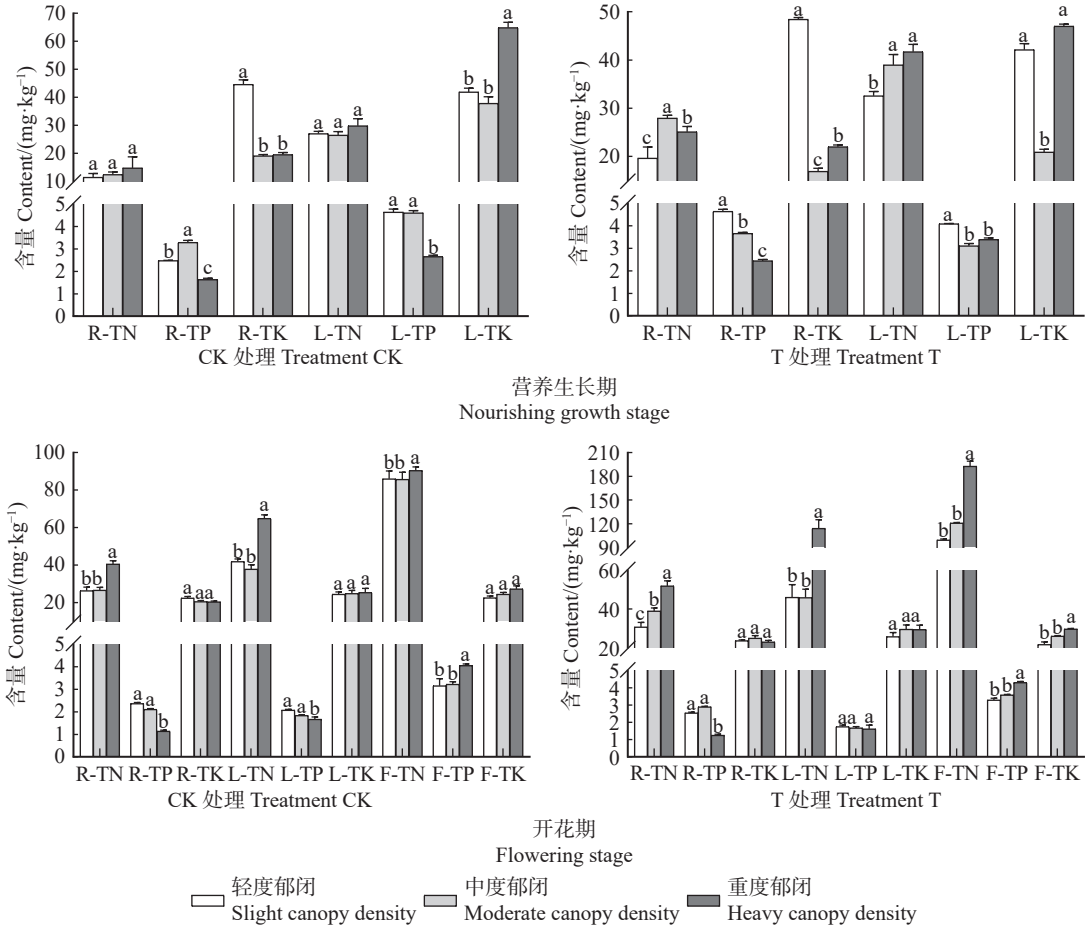
1.5 数据分析

使用 Microsoft Excel 2021 计算和整理数据，SPSS 26.0 进行相关的统计分析，采用图基检验(Tukey-Kramer)进行多重比较，显著性水平 $\alpha = 0.05$。使用 GraphPad Prism 8.0.2 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 郁闭度和施用污泥产品对菘蓝药用部位养分含量的影响

施用污泥产品和林分郁闭度对菘蓝根和叶中的养分含量总体上产生显著影响(图 2、3)。菘蓝在不同生长期的全氮和全磷主要分布在地上部分。T 处理显著提高了各郁闭度下营养生长期的根和叶中的全氮含量；在开花期显著提高了重度郁闭下的菘蓝叶片和花对全氮的富集程度，较 CK 处理分别提高了 75.63% 和 118.70%。T 处理显著提高了营养生长期各郁闭度林下根中的全磷含量，较同等郁闭度下



R.根；L.叶；F.花。TN、TP 和 TK 分别为全氮、全磷和全钾。不同小写字母表示在不同郁闭度间存在显著性差异($P < 0.05$)。CK、T 处理分别为撒施污泥 0、30 t/hm^2。下同。R, root; L, leaf; F, flower. TN, TP, and TK represent total nitrogen, total phosphorus, and total potassium, respectively. Different lowercase letters indicate significant differences between varied canopy densities ($P < 0.05$). CK and T treatments were applied with sewage sludge at rates of 0 and 30 t/ha, respectively. The same below.

图 2 郁闭度对菘蓝不同生长期器官养分含量的影响

Fig. 2 Effects of canopy density on nutrient concentration in organs of *I. tinctoria* in varied growth stages

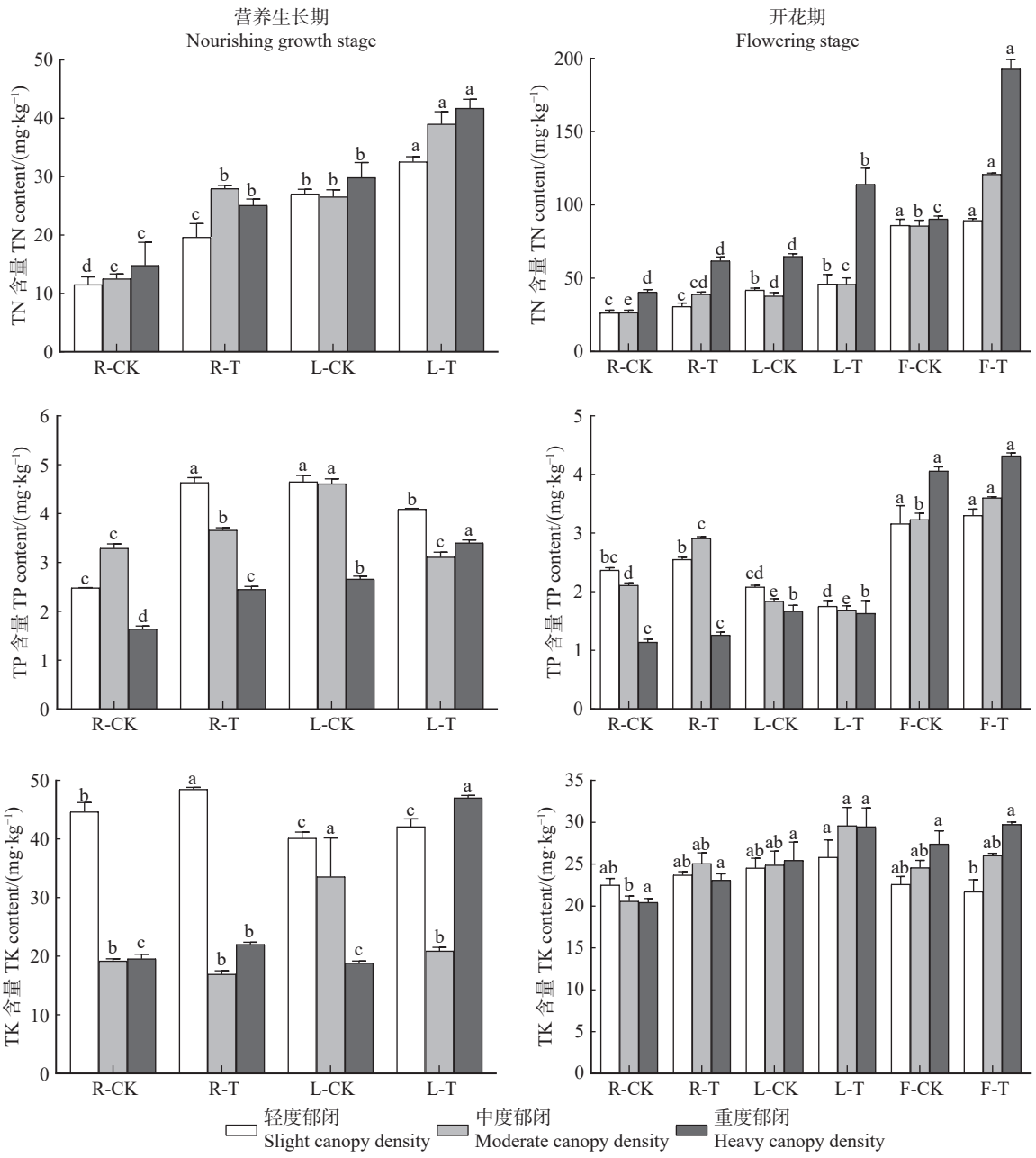


图 3　施用污泥产品对菘蓝不同生长期器官养分含量的影响

Fig. 3　Effects of sludge product application on nutrient content of different organs of *I. tinctoria* in different growth stages

的 CK 处理提高了 11.25% ~ 87.10%。郁闭度和污泥处理的交互作用对营养生长期菘蓝根系和叶片的养分含量有显著影响（$P < 0.05$）（表 3），菘蓝植株中的全钾含量在营养生长期受林分郁闭度和施用污泥处理的影响较大。

2.2　不同郁闭度下菘蓝药用部位的重金属含量分析

郁闭度和处理的交互作用对菘蓝根系的汞、砷和锌含量有显著性影响（$P < 0.05$）（表 3）。T 处理增加了各处理下菘蓝各部位对镉、砷与锌的吸收和富集作用（表 4、5），重度郁闭度林下菘蓝营养生长期的根中富集程度最大，这可能是该郁闭度下营养生长期根的养分含量低导致重金属向上迁移能力降低的结果。在不同生长期，T 处理下根中的锌含量较 CK 增加了 6.15% ~ 72.06%，叶中增加了 22.24% ~ 67.44%，这是因为锌作为必需营养元素参与菘蓝的生理活动，T 处理显著增大了菘蓝各部位对该元素的吸收利用。根部是汞的主要接受部位，施用污泥产品降低了汞在菘蓝叶片中的富集程度，各生长期 T 处理下较 CK 降低了 3.15% ~ 55.86%，可能是施用污泥产品抑制了菘蓝叶对汞的吸收，使汞更多地吸附在根系中。不同生长期的根中砷含量总体高于叶中，表明砷在菘蓝植物体中的迁移速率较慢。

在不同郁闭度下施用污泥产品后种植菘蓝，营养生长期的根和叶中汞的单项污染指数大于 1，且根中的单项污染指数更高（表 6），表明各郁闭度下的菘蓝在该生长时期，根较叶存在较为严重的汞污染；

表 3 郁闭度和污泥产品处理对林下菘蓝器官养分和重金属含量的交互影响

Tab. 3 Interaction effects between canopy density and sludge product treatment on nutrient and heavy metal concentration in *I. tinctoria* organs

部位 Position	指标 Index	营养生长期 Nourishing growth stage		开花期 Flowering stage	
		F	*P*	*F*	*P*
根系 Root	TN	5.161	0.024	27.633	< 0.001
	TP	184.566	< 0.001	101.594	< 0.001
	TK	24.593	< 0.001	6.722	0.011
	Cd	213.858	< 0.001	1.949	0.185
	Hg	90.563	< 0.001	21.687	< 0.001
	As	13.450	0.001	9.995	0.004
	Zn	10.415	0.002	5.910	0.016
	靛蓝 Indigo	10.099	0.003	21.478	0.001
	告依春 Goitrin	358.651	< 0.001	174.215	< 0.001
叶片 Leaf	TN	8.460	0.005	10.880	0.002
	TP	236.530	< 0.001	2.416	0.131
	TK	85.114	< 0.001	0.253	0.780
	Cd	11.166	0.002	8.798	0.004
	Hg	140.642	< 0.001	43.813	< 0.001
	As	2.004	0.177	11.212	0.005
	Zn	51.647	< 0.001	21.316	< 0.001
	靛玉红 Indirubin	101.899	< 0.001	27.541	< 0.001
	总多糖 Total polysaccharide	14.481	< 0.001	12.305	0.001
花 Flower	TN			202.238	< 0.001
	TP			0.884	0.438
	TK			3.855	0.051
	Cd			0.480	0.636
	Hg			214.746	< 0.001
	As			161.685	< 0.001
	Zn			18.083	< 0.001

注：Cd.镉；Hg.汞；As.砷；Zn.锌。下同。Notes: Cd, cadmium; Hg, mercury; As, arsenic; Zn, zinc. The same below.

表 4 郁闭度对施用污泥产品后菘蓝在营养生长期器官重金属含量的影响

Tab. 4 Effects of applying sludge products on heavy metal concentration in organs of *I. tinctoria* grown under different canopy densities during nourishing growth stage

mg/kg

重金属 Heavy metal	器官 Organ	CK处理 Treatment CK			T处理 Treatment T		
		轻度郁闭 Slight canopy density	中度郁闭 Moderate canopy density	重度郁闭 Heavy canopy density	轻度郁闭 Slight canopy density	中度郁闭 Moderate canopy density	重度郁闭 Heavy canopy density
Cd	根系 Root	< DL	< DL	< DL	229.21 ± 14.62bA	156.18 ± 11.27cA	324.55 ± 60.85aA
	叶片 Leaf	185.36 ± 14.84aB	< DL	33.70 ± 1.82bB	316.59 ± 58.29aA	277.60 ± 8.15bA	276.04 ± 32.63bA
Hg	根系 Root	1 456.61 ± 35.61bB	1 773.12 ± 100.60bA	2 911.32 ± 16.12aA	1 866.23 ± 29.12bA	1 174.38 ± 2.74cA	2 375.77 ± 27.18aB
	叶片 Leaf	722.80 ± 40.60bA	840.09 ± 94.39aA	608.88 ± 25.75cA	420.45 ± 10.09bB	370.81 ± 39.97bB	460.10 ± 54.34aB
As	根系 Root	858.20 ± 21.82bB	489.26 ± 64.11cB	2 233.69 ± 49.81aA	1 031.55 ± 58.77bA	1 015.09 ± 7.35bA	2 680.01 ± 86.08aA
	叶片 Leaf	534.72 ± 53.11cB	797.82 ± 115.76aB	636.13 ± 9.75bB	688.00 ± 8.58cA	934.82 ± 48.62bA	1 285.12 ± 580.47aA
Zn	根系 Root	26.14 ± 2.56aA	24.52 ± 0.94aB	18.79 ± 1.75bB	37.96 ± 3.00aA	37.38 ± 1.15aA	32.33 ± 4.12aA
	叶片 Leaf	43.34 ± 1.61aB	33.88 ± 0.24bB	35.43 ± 1.46bA	72.57 ± 18.05aA	55.37 ± 1.73bA	43.31 ± 2.30bA

注：同行不同小写字母表示在同一处理下不同郁闭度间存在显著性差异（$P < 0.05$），同行不同大写字母表示在同一郁闭度下施用污泥产品与否间存在显著性差异（$P < 0.05$）。下同。Notes: different lowercase letters indicate significant differences between varied canopy densities ($P < 0.05$), different capital letters in the same row indicate significant differences between applying sludge products or not at the same level of depression ($P < 0.05$). The same below.

表 5　郁闭度对施用污泥产品后菘蓝在开花期器官重金属含量的影响

Tab. 5　Effects of applying sludge products on heavy metal concentration in organs of *I. tinctoria* grown under different canopy densities during flowering stage　　mg/kg

重金属 Heavy metal	器官 Organ	CK处理 Treatment CK			T处理 Treatment T		
		轻度郁闭 Slight canopy density	中度郁闭 Moderate canopy density	重度郁闭 Heavy canopy density	轻度郁闭 Slight canopy density	中度郁闭 Moderate canopy density	重度郁闭 Heavy canopy density
Cd	根系 Root	311.81 ± 59.99bB	469.59 ± 61.05aB	481.16 ± 35.81aB	496.69 ± 46.6cA	698.33 ± 52.27bA	779.00 ± 38.21aA
	叶片 Leaf	943.93 ± 74.10aA	948.76 ± 4.39aA	904.32 ± 14.54aB	1 033.04 ± 29.88bA	1 037.19 ± 15.21bA	1 135.07 ± 5.06aA
	花 Flower	955.38 ± 40.70aA	869.59 ± 23.30bA	799.30 ± 19.13cB	983.37 ± 3.59aA	899.37 ± 54.54bA	863.75 ± 50.41bA
Hg	根系 Root	668.06 ± 6.64aA	502.16 ± 35.02bB	491.23 ± 34.31cA	436.41 ± 17.17cB	563.90 ± 71.60aA	502.68 ± 48.43bA
	叶片 Leaf	504.68 ± 59.51bA	795.70 ± 29.01aA	588.66 ± 19.33bA	274.59 ± 10.88cB	392.02 ± 37.26bB	570.14 ± 37.12aA
	花 Flower	755.93 ± 20.10bA	1 106.90 ± 30.61aA	603.77 ± 16.82bA	598.60 ± 32.86aB	579.84 ± 3.93aB	572.75 ± 8.05aA
As	根系 Root	242.21 ± 43.98aB	251.73 ± 26.71aA	267.88 ± 11.32aA	528.46 ± 85.42aA	317.60 ± 2.75bA	249.79 ± 61.44bA
	叶片 Leaf	156.89 ± 38.65aB	106.3 ± 19.79aB	87.47 ± 2.65bA	327.73 ± 57.55aA	300.66 ± 16.44aA	109.00 ± 5.44bA
	花 Flower	< DL	< DL	< DL	89.09 ± 15.21	< DL	< DL
Zn	根系 Root	22.77 ± 1.50aA	25.59 ± 4.64aB	23.03 ± 2.35aA	24.17 ± 1.27cA	41.09 ± 2.14aA	36.15 ± 7.15bA
	叶片 Leaf	27.03 ± 1.47aB	24.50 ± 1.28aA	29.40 ± 1.56aB	33.42 ± 2.34bA	29.96 ± 2.68bA	40.21 ± 1.87aA
	花 Flower	30.57 ± 2.41aA	31.01 ± 0.92aB	31.10 ± 4.29aB	34.62 ± 3.30bA	47.36 ± 3.25aA	57.65 ± 4.05aA

在开花期，根和叶中均存在镉和汞污染，未受到砷和锌的污染；随生长时间的延长，各处理下的根和叶中镉的单项污染指数大幅增加。重度郁闭下的菘蓝在不同生长期，根和叶受到的平均污染指数值较轻度和中度郁闭下更大。4 种重金属在根中的单项污染指数排序为 Hg > Cd > Zn > As；在开花期，各重金属在叶中的单项污染指数排序为 Cd > Hg > Zn > As。

2.3　不同郁闭度下菘蓝药用部位的质量分析

郁闭度和处理的交互作用对根和叶中有效成分含量有显著性影响（$P < 0.05$）（表 3）。T 处理显著降低了营养生长期不同郁闭度下根中的有效成分及叶中总多糖的含量，但提高了该生长期不同郁闭度下叶片中的靛玉红含量（表 7）。轻度郁闭下营养生长期 T 处理的根中的靛蓝含量和开花期的告依春含量最高，较不同生长期的其他郁闭度处理分别高出了 4.49% ~ 783.62% 和 63.14% ~ 173.02%；重度郁闭下 T 处理的叶中靛玉红和总多糖含量较不同生长期的其他郁闭度处理分别高出了 151.85% ~ 244.34% 和 41.21% ~ 137.11%。在不同郁闭度下 T 处理的根，在营养生长期的靛蓝含量达到药材标准[11]（靛蓝、靛玉红含量 ⩾ 50 mg/kg），开花期各郁闭度根中的告依春含量均满足《中国药典》（2020 年版）的相关限值（告依春含量 ⩾ 2 mg/g）；施用污泥产品后仅有重度郁闭下的叶中的靛玉红含量达标。

表 6　施用污泥产品对不同郁闭度林下菘蓝药用部位重金属的污染评价

Tab. 6　Evaluation of heavy metal pollution in medicinal parts of *I. tinctoria* planted under different canopy densities by applying sludge products

郁闭度 Canopy density	污染指数 Pollution index	营养生长期 Nourishing growth stage		开花期 Flowering stage	
		根 Root	叶 Leaf	根 Root	叶 Leaf
轻度郁闭 Slight canopy density	P_{cd}	0.764	1.055	1.656	3.443
	P_{Hg}	9.431	2.102	2.182	1.373
	P_{As}	0.516	0.344	0.264	0.164
	P_{Zn}	0.759	0.651	0.483	0.468
中度郁闭 Moderate canopy density	P_{cd}	0.521	0.925	2.328	3.457
	P_{Hg}	5.872	1.854	2.820	1.960
	P_{As}	0.508	0.467	0.159	0.150
	P_{Zn}	0.748	0.907	0.822	0.599
重度郁闭 Heavy canopy density	P_{cd}	1.082	0.920	2.513	3.784
	P_{Hg}	11.879	2.301	2.597	2.851
	P_{As}	0.540	0.643	0.125	0.055
	P_{Zn}	0.647	0.866	0.723	0.804

表 7 施用污泥产品对不同郁闭度下菘蓝药用部位有效成分含量的影响

Tab. 7 Effects of sludge product application on content of effective components in medicinal parts of *I. tinctoria* planted under different canopy densities

生长期 Growth stage	处理 Treatment	郁闭度 Canopy density	根 Root		叶 Leaf	
			靛蓝 Indigo/(mg·kg^{-1})	告依春 Goitrin/(mg·g^{-1})	靛玉红 Indirubin/(mg·kg^{-1})	总多糖 Total polysaccharide/%
营养生长期 Nourishing growth stage (N)	CK	轻度 Slight	1 329.55 ± 154.61a	2.25 ± 0.22c	21.59 ± 0.52b	33.06 ± 1.49a
		中度 Moderate	126.58 ± 55.19c	6.11 ± 0.25a	15.45 ± 0.36b	28.64 ± 0.44a
		重度 Heavy	659.12 ± 45.49b	4.07 ± 0.35b	34.5 ± 0.22a	24.75 ± 0.95b
	T	轻度 Slight	143.50 ± 20.83a	1.85 ± 0.48b	31.85 ± 0.56b	31.83 ± 0.37a
		中度 Moderate	16.24 ± 11.41b	1.06 ± 0.16b	23.37 ± 1.18c	21.78 ± 1.15b
		重度 Heavy	137.34 ± 32.41a	2.58 ± 0.17a	59.84 ± 0.22a	18.26 ± 1.15b
开花期 Flowering stage (F)	CK	轻度 Slight	32.25 ± 3.97a	29.8 ± 2.11a	34.88 ± 1.74b	22.07 ± 0.43a
		中度 Moderate	47.45 ± 6.68a	10.13 ± 1.24c	74.06 ± 1.68a	21.98 ± 4.73a
		重度 Heavy	38.98 ± 2.94a	17.15 ± 1.68b	47.84 ± 1.84b	27.74 ± 0.67a
	T	轻度 Slight	22.65 ± 11.4b	12.04 ± 1.05a	31.57 ± 1.86b	21.04 ± 1.14a
		中度 Moderate	10.34 ± 5.01b	4.41 ± 1.13c	23.09 ± 2.08b	12.53 ± 0.71b
		重度 Heavy	48.89 ± 3.05a	7.38 ± 0.98b	79.51 ± 6.27a	29.71 ± 0.86a

注：同列不同小写字母表示在同一处理下不同郁闭度间存在显著性差异（$P < 0.05$）。Note: different lowercase letters indicate significant differences between varied canopy densities ($P < 0.05$).

3 结论与讨论

在不同郁闭度林下施用污泥产品后会增加菘蓝各部位对重金属的富集作用，镉和锌在菘蓝叶中的富集能力最大，而汞主要富集在根上。植物对重金属的富集特点除受自身遗传特性和代谢活动影响外，还受到林下土壤、植被和树种的影响[12]。菘蓝根部在不同生长期均受到较为严重的汞污染，开花期的菘蓝叶片中还存在镉污染。这除了与本研究中菘蓝与林地土壤环境中的重金属接触时间长短有关外，还可能与土壤中的重金属迁移特性和菘蓝在不同生长期的生物量有关。高生物量可以提高植物对重金属的耐受程度和富集能力，且镉在植物组织中具有较大的迁移能力[13]，这使得开花期的菘蓝叶中存在除汞之外的又一重金属污染。本研究发现，重度郁闭下的菘蓝根和叶片在不同时期受到的平均污染指数均高于其他郁闭度，这表明光照条件的限制可能通过影响菘蓝的生长代谢进而增大菘蓝对重金属的富集作用。在本研究中值得关注的是，在不同郁闭度的 CK 和施用污泥处理中，营养生长期的菘蓝根中汞的含量相近，且均高于其他重金属元素和叶片中的含量，这说明菘蓝根中的汞污染可能不完全来源于污泥产品的施用，甚至于，污泥处理可能会减少汞在菘蓝叶片中的积累。相关研究表明，在林地土壤中施用污泥产品，在提高土壤重金属含量的同时也改变其存在形态，将可交换态的汞转化为残渣态，会对土壤中的汞元素起到钝化作用，进而缓解了植物对汞的有效生物利用和富集作用[14]。

施用污泥产品促进了菘蓝组织对养分的吸收，增大了菘蓝组织对重金属的富集作用，也可能影响到菘蓝药用部位中有效成分的合成。本研究发现，污泥处理能显著提高重度郁闭度下菘蓝组织中氮含量和活性成分含量（所选菘蓝的活性成分均是含氮化合物[11]）。这表明植物对元素的吸收是互相影响的，一些重金属元素可以参与并促进氮的新陈代谢和有关活性物质合成，反过来高氮含量也会促进植物对重金属的吸收[15]。在植物生长发育的过程中，适宜养分积累的条件可能不利于活性成分代谢合成的进行，因此在郁闭度较低的环境中施用污泥产品，菘蓝倾向于积累营养生长物质而减少活性物质的合成，而在郁闭度较高的环境中，即使光照条件降低会限制菘蓝的生长，但污泥产品增加的养分和重金属含量能在一定程度上激活菘蓝应对不利环境的抵御功能，发挥组织中相关抗氧化酶和活性氧的作用[16]，直接或间接地促进叶中活性物质的合成。本研究中该处理下的根中活性物质受到抑制，极大程度是由于植物受到重金属胁迫的程度超过自身的耐受范围，导致根部代谢活动的减弱。

参 考 文 献

[1] 戴晓虎, 侯立安, 章林伟, 等. 我国城镇污泥安全处置与资源化研究 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(5): 145−153.
Dai X H, Hou L A, Zhang L W, et al. Research on safe disposal and resource utilization of municipal sludge in China[J]. Chinese Engineering Science, 2022, 24(5): 145−153.

[2] 丁超群, 白莉萍, 齐洪涛. 堆肥污泥施用于杨树后土壤理化性质及土壤污染风险 [J]. 环境工程学报, 2022, 16(7): 2381−2387.

Ding C Q, Bai L P, Qi H T. Physico-chemical properties and environmental pollutions in soil amended with composted sewage sludge to poplar[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(7): 2381−2387.

[3] Torbati S, Atashbar K B, Khataee A. Bioconcentration of heavy metals by three plant species growing in Golmarz Wetland, in northwestern Iran: the plants antioxidant responses to metal pollutions[J]. Environmental Technology & Innovation, 2021, 24: 101804.

[4] 陈玲, 彭祚登, 贾清棋, 等. 短期使用城镇生活污泥产品后镉在国槐中的迁移和富集 [J]. 东北林业大学学报, 2023, 51(4): 32−40.
Chen L, Peng Z D, Jia Q Q, et al. Transfer and enrichment of Cd in *Sophora* after short-term application of urban domestic sludge products[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2023, 51(4): 32−40.

[5] 许晓玲, 呼世斌, 刘晋波, 等. 施用污泥堆肥对土壤中重金属累积和大豆产量的影响 [J]. 环境工程, 2018, 36(3): 108−111.
Xu X L, Hu S B, Liu J B, et al. Effect of sewage sludge compost on soybean: heavy metal accumulation and yield[J]. Environmental Engineering, 2018, 36(3): 108−111.

[6] 刘红江, 盛婧, 郭智, 等. 施用河道污泥对水稻和土壤重金属含量及水稻氮素利用的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(2): 163−172.
Liu H J, Sheng J, Guo Z, et al. Effects of dredged sludge application on heavy metal content and nitrogen use efficiency in rice-soil system[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(2): 163−172.

[7] 唐胶, 彭祚登, 贾清棋, 等. 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 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(10): 84−95.
Tang J, Peng Z D, Jia Q Q, et al. Effects of urban sewage sludge additive on growth and nutrient accumulation in *Salix americana* and *Populus* × *euramericana* cv. '74/76' softwood cuttings[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(10): 84−95.

[8] 张慧莉. 我国中药材中重金属污染现状分析及对策研究 [J]. 山东化工, 2018, 47(1): 56−57.
Zhang H L. Analysis and countermeasure of heavy metal pollution in Chinese medicinal materials[J]. Shandong Chemical Industry, 2018, 47(1): 56−57.

[9] 赵连华, 杨银慧, 胡一晨, 等. 我国中药材中重金属污染现状分析及对策研究 [J]. 中草药, 2014, 45(9): 1199−1206.
Zhao L H, Yang Y H, Hu Y C, et al. Current situation analysis and countermeasures on contamination of heavy metal in traditional Chinese medicinal materials in China[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2014, 45(9): 1199−1206.

[10] 耿丽平, 高宁大, 赵全利, 等. 河北板蓝根产地土壤-植物中镉铅汞砷含量特征及其污染评价 [J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(10): 1535−1544.
Geng L P, Gao N D, Zhao Q L, et al. Assessment of Cd, Pb, Hg and As contamination in soils and plants in *Isatis indigotica* cultivated regions in Hebei Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(10): 1535−1544.

[11] 孙翠萍. 南板蓝根品质评价研究 [D]. 成都: 成都中医药大学, 2012.
Sun C P. Study on quality evaluation of radix *isatidis* australis [D]. Chengdu: Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, 2012.

[12] Feng Y, Lei W, Gu R, et al. Differential effects of ammonium and nitrate on growth performance of *Glechoma longituba* under heterogeneous Cd stress[J]. Phyton, 2020, 89(3): 667−679.

[13] 苑正赛, 乔艳辉, 王丽, 等. 镉胁迫对黑杨派无性系生物量及镉离子含量的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(12): 38−46.
Yuan Z S, Qiao Y H, Wang L, et al. Effects of cadmium stress on biomass and cadmium ion content of Sect. *Aigeiros* clones[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(12): 38−46.

[14] 张亚静, 汪涛, 郭巧生, 等. 野菊对 Cd 元素吸收特性及其对药材品质的影响 [J]. 中国中药杂志, 2019, 44(4): 641−647.
Zhang Y J, Wang T, Guo Q S, et al. Effect of *Chrysanthemum indicum* on absorption characteristics of Cd and its effect on quality of medicinal materials[J]. China Journal of Chinese Materia Medicine, 2019, 44(4): 641−647.

[15] Jin Y, Zhang Q, Zhang L M, et al. Distinct responses of frond and root to increasing nutrient availability in a floating clonal plant[J/OL] . PLoS One, 2021, 16 (10): e0258253[2023−10−21]. https://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0258253.

[16] Chu Y, Yu F, Dong M. Clonal plasticity in response to reciprocal patchiness of light and nutrients in the stoloniferous herb *Glechoma longituba* L.[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2006, 48(4): 400−408.

（责任编辑　孟　瑶
责任编委　徐程扬）