

不同广藿香产区土壤中重金属污染特征及风险评价

丁隆真¹, 廖长丹¹, 王超¹, 叶力瑛², 胡清³

[1.南方科技大学 环境科学与工程学院, 广东 深圳 518055;

2.南方科技大学 商学院, 广东 深圳 518055; 3.南方科技大学 工程技术创新中心(北京), 北京 100083]

摘要: [目的] 探明广东和广西两省区不同产区的广藿香种植土壤中重金属污染特征及其风险, 为广藿香的安全品质评价及其种植土壤的重金属污染防控提供科学依据。[方法] 协同采集两广代表性产区的广藿香植株及其根区土壤样品, 测定铜、汞、砷、铅、镉、铬、镍和锌共 8 种重金属的全量和有效态含量。运用单因子污染指数法和 Nemerow 污染指数法, 对比评价两广广藿香种植土壤中重金属的污染特征及风险等级。结合广藿香植株的重金属富集系数和广藿香植株中重金属含量与土壤中重金属含量间的相关性, 阐明土壤中重金属污染对广藿香安全品质的影响。[结果] ①两广产区广藿香种植土壤的重金属污染均已达警戒线, 且广西产区的广藿香种植土壤中重金属污染程度比广东产区的更高。广藿香种植土壤中镉的污染覆盖产地最广, 平均单因子污染指数最大(0.95), 需引起重视。②两广地区的广藿香植株中重金属含量均低于《中国药典》的限量值, 总体情况安全。③广藿香对砷、汞、铜和铅的吸收能力弱, 但易累积镉, 且不受产地差异影响。广藿香茎比广藿香叶更容易富集镉。[结论] 控制镉有效态含量是广藿香产区土壤中重金属污染防控的重点。

关键词: 广藿香; 土壤; 重金属; 风险评价; 相关性分析

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)06-0089-09

中图分类号: X53, S31

文献参数: 丁隆真, 廖长丹, 王超, 等. 不同广藿香产区土壤中重金属污染特征及风险评价[J]. 水土保持通报, 2021, 41(6): 89-97. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.06.013; Ding Longzhen, Liao Zhangdan, Wang Chao, et al. Pollution characteristics and risk assessments of heavy metals in soils of different *Pogostemon cablin* production areas [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(6): 89-97.

Pollution Characteristics and Risk Assessments of Heavy Metals in Soils of Different *Pogostemon Cablin* Production Areas

Ding Longzhen¹, Liao Changdan¹, Wang Chao¹, Ye Liying², Hu Qing³

[1.School of Environmental Science and Engineering, Southern University of

Science and Technology, Shenzhen, Guangdong 518055, China; 2.College of Business,

Southern University of Science and Technology, Shenzhen, Guangdong 518055, China; 3.Sustech

Engineering Innovation Center (Beijing), Southern University of Science and Technology, Beijing 100083, China]

Abstract: [Objective] The pollution characteristics and risk assessments of heavy metals in soils of different *Pogostemon cablin* production areas in Guangdong Province and Guangxi Zhuang Autonomous Region were analyzed, in order to provide scientific basis for the prevention and control of heavy metal pollution. [Methods] The *Pogostemon cablin* and corresponding root zone soil in representative production areas were collected to analyze both of the total and available content of heavy metals, including Cu, Hg, As, Pb, Cd, Cr, Ni and Zn. The pollution characteristics and risk assessments of heavy metals in Guangdong and Guangxi were compared by methods of single-factor pollution risk index and Nemerow-factor pollution risk index. The enrichment coefficient of heavy metals together with the correlation of heavy metals in soil and *Pogostemon cablin* were investigated to expound the effects of soil heavy metals pollution on the safety of *Pogostemon cablin*.

收稿日期: 2021-06-06

修回日期: 2021-07-21

资助项目: 国家重点研发计划项目“基于土壤特征的道地药材品质形成机制及产地溯源研究”(2020YFC1712700)。

第一作者: 丁隆真(1992—), 男(汉族), 江苏省淮安市人, 博士, 主要从事环境水—土污染防控研究工作。Email: dinglz@sustech.edu.cn。

通讯作者: 胡清(1964—), 女(汉族), 北京市人, 博士, 教授, 主要从事环境大数据、污染水土绿色可持续修复、环境政策等研究。Email: huq@sustech.edu.cn。

[Results] ① The risk of heavy metal pollution in the soils of *Pogostemon cablin* in both Guangdong and Guangxi have reached the warning level, while the heavy metal pollution in the soils of *Pogostemon cablin* in Guangxi is even higher than Guangdong. The Cd pollution of *Pogostemon cablin* soil is most widespread with the highest value (0.95) of the average single-factor risk index, which needs more attention. ② The overall situation is safe since the content of every heavy metal in *Pogostemon cablin* is lower than the corresponding limit value in the *Chinese pharmacopoeia*. ③ *Pogostemon cablin* has a weak ability to absorb As, Hg, Cu and Pb, but its stem tends to accumulate Cd which is not affected by soil differences. The accumulation of Cd in leaf is more evident compared with stem. [Conclusion] The prevention and control of heavy metal pollution in the soils of *Pogostemon cablin* production areas should focus on the control of available content of Cd.

Keywords: *Pogostemon cablin*; soil; heavy metal; risk assessment; correlation analysis

中药材重金属污染问题不仅影响中药材的安全入药,也是制约中药材走出国门、走向国际市场的主要障碍之一^[1]。土壤中重金属可以通过植物生长过程中的吸收—转移—累积作用进入植物中,是草本类中药材重金属污染的主要来源之一^[2]。农用地土壤重金属污染具有累积性、长期性、不可逆性和隐蔽性,极易受到采矿、施肥等人为活动的影响^[3]。多数研究集中在农用地土壤重金属污染特征分析、生态健康风险评估、来源解析与阻控技术等方面^[4-5]。近年来,关于土壤中重金属含量与农作物中重金属含量间的相互作用研究受到越来越多的关注^[5]。研究^[5]表明,与土壤重金属全量相比,重金属有效态含量与农作物中重金属含量的相关性更加显著。与主要粮食作物和蔬菜相比,草本中药材的重金属富集特性研究相对不足。而随着《关于促进中药传承创新发展的实施意见》等战略方针的实施,我国对中药材适宜种植区域的发掘需求更,对中药材生态种植的管理要求也更加严格,因此关于中药材与道地产区土壤重金属含量相关性的研究十分重要。

广藿香药材是唇形科刺蕊草属植物广藿香(*Pogostemon cablin*)的干燥地上部分,是“十大南药”之一^[6]。广藿香性微温、味辛,具有芳香化浊、开胃止呕,发表解暑的功效^[7]。现代药理研究^[8-10]表明,广藿香还具有抗病毒微生物(病毒、细菌和真菌等)、抗炎、抗氧化、调节免疫、保护胃肠屏障等药理活性。在抗击 COVID-19 疫情期间,以广藿香为主要成分的各种中成药、预防方和恢复方为抗疫贡献了重要力量,极大鼓舞了中医药的自信^[11]。目前,COVID-19仍在全球肆虐,市场对于广藿香药材的需求日益增加,探明广藿香及其种植产区土壤中重金属污染特征和污染风险对于保障广藿香安全入药十分必要。药用广藿香主产于广东和广西等岭南热带亚热带地区,其道地产区为广东肇庆市及西江流域的适宜种植区^[12]。海南也种有广藿香,但多用于提油而

非药用。已有相关研究^[13-14]集中在海南和广东等产区广藿香与其种植土壤的重金属污染特征和生态风险,但未进行两者之间的相关性研究,更未考虑重金属全量与有效态的区别。为弥补相关空缺,本研究在广东省和广西壮族自治区广泛采集药用广藿香与其根区土壤的“1对1”样品组,共计16个主产区和326个样品组,对比分析了两广广藿香主产区土壤重金属污染特征及风险等级,结合广藿香茎、叶中重金属的污染特征、富集系数以及其含量与土壤中重金属全量、有效态含量的关联性,阐明土壤重金属污染对广藿香品质安全的影响,以期能够为两广地区广藿香品质安全及其产地土壤重金属防控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

在广藿香的收获季节,参考《农用地土壤样品采集流转制备和保存技术规定》和《农产品样品采集流转制备和保存技术规定》,在广东和广西省分别选择了11个和5个代表性广藿香产区进行样品采集,采样时间为2020年9—11月,具体采样信息详见表1。依据充分的走访调研和第4次中药材资源普查的结果,本文所选的代表性产区是广藿香种植面积相对较大的地区,可以代表两广地区广藿香的主要生长环境及状态。每个代表性产区的采样点数量依据当地的广藿香种植面积确定,广藿香种植面积越大,采样点越多。为科学获得广藿香的重金属富集特征,本研究严格采用“1对1”的方式进行采样,即一个广藿香样品严格对应着其根区土壤样品。广藿香地上部分采集后直接装入洁净的带孔聚乙烯塑料袋,并做好标记。小心去掉表层约1cm覆土后,使用竹制或者不锈钢铲子刨出完整的广藿香根(约20cm深),采用抖土法收集广藿香根区土,装入洁净的聚乙烯塑料袋中,做好标记并带回实验室。在洁净的工作台上,对广藿香进行茎、叶分离处理,之后用纯水洗净并置于通风处用吸水纸吸去残余水分,105℃杀青20min,

70 °C 烘干至恒重、粉碎、四分法缩分后研磨过 0.85 mm 孔径的尼龙筛保存备用。土壤样品风干后

剔除根等杂物,用木棒碾碎,四分法缩分后研磨分别过 2.00 和 0.15 mm 孔径的尼龙筛保存备用。

表 1 广藿香采样产区基本情况

采样地区	样品数量(组)	东 经	北 纬	采样时间
广东肇庆四会市	23	109.905817°	20.613319°	202009
广东肇庆高要区	10	109.958038°	20.576432°	202010
广东肇庆德庆县	13	110.021376°	21.250042°	202010
广东阳江阳春市	73	116.763070°	23.613012°	202011
广东阳江阳西市	7	112.353306°	22.361932°	202011
广东茂名高州市	65	108.901921°	24.822828°	202011
广东茂名电白市	8	108.994680°	25.072304°	202011
广东湛江雷州市	12	108.565837°	24.827753°	202011
广东湛江遂溪县	8	106.448650°	23.017054°	202011
广东潮州湘桥区	9	106.257122°	23.380471°	202009
广东江门恩平区	9	109.600387°	22.734179°	202009
广西河池罗城仫佬族自治县	27	109.653990°	22.814656°	202011
广西百色靖西市	39	109.739115°	22.914559°	202011
广西钦州灵山县	9	109.131006°	22.113551°	202011
广西钦州钦北区	7	108.823970°	22.305992°	202011
广西南宁宾阳县	7	108.962487°	23.250680°	202011

1.2 分析指标与方法

土壤样品的 pH 值、电导率、阳离子交换量和有机质含量的分析参照《全国土壤污染状况详查土壤样品分析测试方法技术规定》。土壤重金属铜(Cu)、镉(Cd)、铅(Pb)、锌(Zn)、铬(Cr)和镍(Ni) 全量测定采用 HNO₃-HF-H₂O₂ 微波消解前处理,土壤重金属砷(As)和汞(Hg) 全量测定采用王水消解前处理。土壤重金属有效态采用 0.1 mol/L 的 HCl 提取^[15]。广藿香茎和叶中重金属全量测定采用 HNO₃-H₂O₂ 微波消解前处理。利用电感耦合等离子体质谱测定消解液或提取液中的 Cu, Cd, Pb, Zn, Cr 和 Ni 含量,利用原子荧光光谱法测定消解液/提取液中的 As 和 Hg 含量。为保证试验分析的准确性,在样品处理的同时加入平行样、空白样和环境标准参考样品(土壤环境标准参考样品 GSS-5 和植物环境标准样 GSV-1) 进行质量控制。各元素含量的相对标准偏差 < 5.0%, 回收率在 90.2% ~ 108.6% 之间,符合元素分析质量控制标准。

1.3 评价方法

本文通过同步采集和分析广藿香药用部分(地上部)及对应根区土壤样品的重金属的方法,以期更好地评价广藿香种植产区土壤中重金属的污染风险及其对广藿香品质安全的影响。对于广藿香药用部分,本文参照《中国药典(2020 版)》,对其中规定的 Cu, Hg, As, Pb 和 Cd 共 5 种重金属的污染情况进行分

析,采用超标率进行描述。若超标率 > 5.0%, 则确认存在超标污染情况。对于广藿香种植土壤,本文以《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(GB15618-2018)》中的风险筛选值为参比值进行评价,分别采用单因子污染指数法和 Nemerow 综合污染指数法对土壤中的 Cu, Hg, As, Pb, Cd, Cr, Ni 和 Zn 共 8 种重金属污染进行评价^[16]。本文采用植物重金属富集系数(enrichment coefficient, EC) 评价广藿香种植土壤中重金属向广藿香植株内迁移的难易程度^[17]。由于广藿香的入药部位包括茎和叶,因此本文分别计算了广藿香茎和叶的重金属富集系数。

1.4 数据处理

本研究采用 Excel 2016 和 SPSS 21.0 统计软件进行数据处理和分析。箱式图使用 Origin 8.5 绘制。

2 结果与讨论

2.1 不同广藿香产地土壤重金属污染特征及风险评价

广东和广西两省区广藿香代表性产区土壤中 8 种重金属的超标率分析结果如图 1 所示。由图 1 可知,广东省广藿香种植土壤未出现 Hg 的重金属污染,但 Cu, As, Pb, Cd, Cr, Zn 和 Ni 的超标率分别为 8.44%, 3.38%, 2.53%, 8.44%, 7.59%, 0.42% 和 8.44%。广西省广藿香种植土壤未出现 Hg 和 Pb 的重金属污染,但 Cu, As, Cd, Cr, Zn 和 Ni 的超标率分别为 10.11%, 7.87%, 22.47%, 20.23%, 10.11% 和

10.11%。很明显,两广地区的广藿香种植土壤已经存在不同污染程度的重金属超标。广西省广藿香种植土壤的重金属超标率相对更高,其中 Cd 和 Cr 的超标率相对于其他重金属更高。

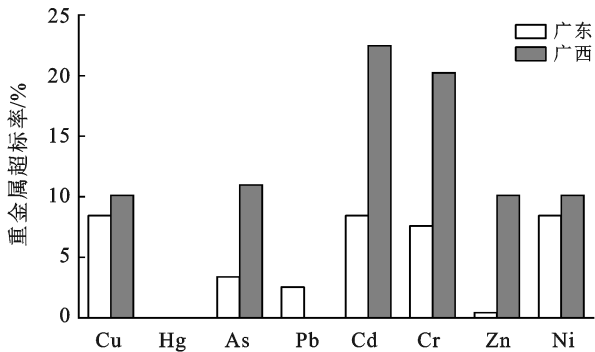


图 1 两广地区广藿香种植土壤中重金属超标率对比

各主要产区的广藿香种植土壤中的重金属含量分布结果(图 2)显示,不同产区的广藿香种植土壤中

同种重金属元素含量均存在显著差异($p < 0.05$)。其中,德庆和靖西产区的广藿香种植土壤中的 Hg 含量相对其他产区较高,但是均未超过 Hg 风险筛选值;靖西产区的广藿香种植土壤中的 Cd 含量最高,远超 Cd 的风险筛选值,超标率高达 43.59%。其他产区的 Cd 含量相对较低,但包括四会、阳春、电白、湘桥、罗城仫佬族自治县和宾阳县的广藿香种植土壤中均监测到不同程度 Cd 超标情况,超标率分别为 26.09%, 12.33%, 25.00%, 33.33%, 3.70% 和 28.57%;雷州市和遂溪市的广藿香种植土壤中 Cu 含量相对其他产区较高,超出了 Cu 的风险筛选值,其他产区均未超标;阳春市广藿香种植土壤中的 Pb 含量相对较高,超标率为 8.22%,其他产区未超标;雷州、遂溪和靖西产区的广藿香种植土壤中 Cr 和 Ni 的含量相对较高,且均出现较严重超标情况,其他产区未超标;靖西和雷州产区的广藿香种植土壤中 Zn 含量相对较高,且检测出超标情况,超标率分别为 23.08% 和 8.33%,其他产区均未超标。

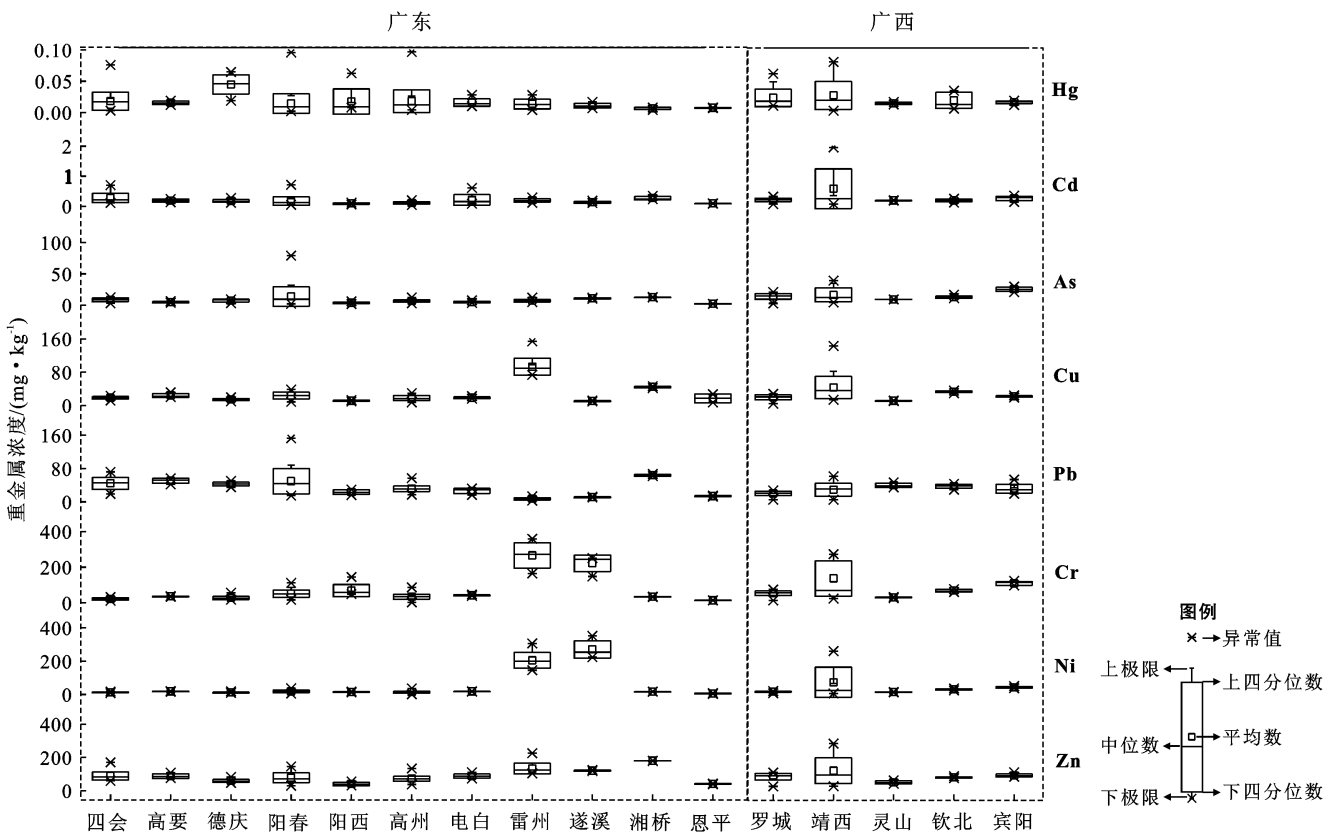


图 2 两广地区广藿香主要产区土壤中 8 种重金属含量分布

以上结果表明:①广藿香种植土壤中出现 Cd 超标的产区最多,且由于 Cd 的毒性较强,应特别注意种植过程中土壤 Cd 污染的防控^[18];②不同产区的广藿香种植土壤污染情况差异明显,个别产区的土壤污染情况很严重,且具有复合污染的特征。此外,由图

2 还看出,重金属含量波动大的产区往往是广藿香种植土壤中重金属含量相对较高的地区,也是容易出现重金属超标的地区,例如:阳春产区的广藿香种植土壤中的 As 和 Pb 含量波动相对其他产区较大,而其 As 和 Pb 的超标情况也相对严重。同时,一些地区的

广藿香种植土壤中存在多种重金属含量波动同时较大的情况。例如,靖西产区和雷州产区。土壤重金属含量波动大说明了人为活动(包括:施肥和施农药等农业活动)对广藿香种植土壤重金属含量影响明显,是可能的重要重金属污染源^[19]。与两广地区的重金属元素背景值相比,广藿香种植土壤中重金属含量相对较高,人为活动是广藿香种植土壤中重金属的主要来源。

2.2 不同产区的广藿香种植土壤重金属污染风险评价

采用单因子污染指数法和 Nemerow 综合污染指数法对广藿香产地重金属污染风险进行评价,结果详见表 2。单因子污染指数表明,广东省湛江市雷州地区的广藿香种植土壤属于 Cu 和 Cr 的轻微污染和 Ni 的轻度污染;湛江遂溪的广藿香种植土壤属于 Cu, Cr 的轻微污染和 Ni 中度污染;广西百色靖西的广藿香种植土壤属于 Cd 和 Ni 的轻微污染;南宁宾阳的广藿香种植土壤属于 As 中度污染。平均单因子污染指数表明,广东地区广藿香种植土壤中的 Ni 污染情况相对严重,而广西的 Cd 平均污染指数达到 0.95,污染情况更为严重。Nemerow 综合污染指数表明,广西百色靖西和南宁宾阳的广藿香种植土壤有轻度重金属污染、广东潮州湘桥的广藿香种植土壤中重金属污染处于警戒值、湛江雷州和遂溪的广藿香种植土壤重金

属污染状态已达中度污染程度。就整体情况而言,两广地区的广藿香种植土壤重金属污染均已达警戒线,应引起重视。

2.3 广藿香产区土壤重金属的相关性

广藿香主要产区土壤各指标间相关性分析结果(表 3)表明,土壤不同重金属含量间存在显著的相关性,具体表现为 Cu, Hg, Cr, Zn 和 Ni 这 5 种重金属之间均存在极显著正相关关系($p < 0.01$); As 与 Pb, Cd, Cr 和 Zn 呈显著正相关($p < 0.05$); Cd 与 Cu, Hg 和 As 呈极显著正相关; Pb 与 Cd, As 和 Zn 呈极显著正相关,但与 Cu, Cr, Ni 呈极显著负相关。以上结果表明:①个别广藿香产区土壤中出现的 Cu, Cd, Cr, Zn 和 Ni 污染可能具有相同的来源,这与前文中多元重金属复合污染产区多次出现的结果一致。Cu, Cd, Cr, Zn 和 Ni 均是铅锌矿开采中易见的重金属^[20],而广东和广西均是锌铅矿及有色金属矿产极其丰富地区,矿产资源开发优势显著且历史悠久,因此混合重金属污染很可能通过铅锌矿山的酸性采矿废水进入土壤中^[4, 20]。另外,广藿香种植过程不合理的化肥、畜禽类粪便有机肥和农药的随意使用也可能导致多元重金属污染^[21];②Pb 的来源可能与 Cd 和 As 相同,但与 Cu, Cr 和 Ni 不同,这与前文中仅发现阳春的广藿香种植土壤存在 Pb 污染的结果一致。

表 2 研究区土壤重金属单因子污染指数(P_i)和 Nemerow 综合污染指数(P_N)

产区	平均单因子污染指数 P_i								P_N	污染程度
	Cu	Hg	As	Pb	Cd	Cr	Zn	Ni		
肇庆四会	0.37	0.02	0.34	0.64	0.89	0.15	0.44	0.17	0.69	安全
肇庆高要	0.47	0.01	0.20	0.77	0.58	0.24	0.44	0.26	0.61	安全
肇庆德庆	0.28	0.06	0.29	0.61	0.59	0.19	0.29	0.17	0.48	安全
阳江阳春	0.47	0.02	0.54	0.70	0.56	0.34	0.39	0.27	0.58	安全
阳江阳西	0.23	0.03	0.14	0.34	0.30	0.46	0.20	0.22	0.37	安全
茂名高州	0.37	0.03	0.26	0.45	0.36	0.23	0.36	0.20	0.38	安全
茂名电白	0.37	0.03	0.20	0.38	0.70	0.28	0.44	0.26	0.55	安全
湛江雷州	1.88	0.04	0.28	0.10	0.65	1.77	0.67	2.93	2.20	中度污染
湛江遂溪	1.70	0.04	0.43	0.16	0.45	1.48	0.60	3.87	2.84	中度污染
潮州湘桥	0.89	0.02	0.50	0.91	0.91	0.23	0.90	0.24	0.76	警戒线
江门恩平	0.34	0.08	0.08	0.20	0.30	0.09	0.21	0.09	0.27	安全
罗城仫佬族自治县	0.4	0.03	0.56	0.29	0.71	0.35	0.42	0.23	0.57	安全
百色靖西	0.89	0.05	0.64	0.41	1.93	0.93	0.60	1.12	1.49	轻度污染
钦州灵山	0.22	0.02	0.36	0.57	0.63	0.20	0.26	0.20	0.50	安全
钦州钦北	0.66	0.03	0.51	0.54	0.64	0.46	0.40	0.44	0.57	安全
南宁宾阳	0.43	0.01	2.28	0.45	0.85	0.73	0.46	0.62	1.69	轻度污染
广东产地均值	0.67	0.03	0.30	0.48	0.57	0.50	0.45	0.79	0.88	警戒线
广西产地均值	0.52	0.03	0.87	0.45	0.95	0.53	0.43	0.52	0.96	警戒线
产地评价	0.62	0.03	0.48	0.47	0.69	0.51	0.44	0.71	0.91	警戒线

此外,土壤有机质、pH 值和阳离子交换量与重金属元素间也存在强相关性。具体表现为,有机质与 Cu、Cd 和 Zn 含量呈极显著正相关,与 Hg、Pb 和 Cr 含量呈显著正相关;pH 值与 As、Pb 和 Zn 呈极显著正相关,与 Hg 呈显著负相关;阳离子交换量与 Cu、As、Cd、Cr、Zn 和 Ni 等 6 种重金属均呈极显著正相关,且与 Pb

呈显著正相关。土壤有机质含量和阳离子交换量是影响土壤吸附重金属能力的关键指标,一般情况下土壤阳离子交换量越高,重金属有效态越低^[22],植物对重金属吸收越弱,施肥过程会对土壤有机质含量和阳离子交换量产生巨大影响^[23]。因此,在广藿香的生长过程中需要特别注意把控施肥时间和施肥量。

表 3 广藿香产区不同土壤指标之间的相关性

项目	Cu	Hg	As	Pb	Cd	Cr	Zn	Ni	SOM	pH	CEC
Cu	1										
Hg	0.154**	1									
As	0.092	0.086	1								
Pb	-0.189**	0.008	0.392**	1							
Cd	0.191**	0.397**	0.441**	0.164**	1						
Cr	0.853**	0.273**	0.249**	-0.248**	0.429**	1					
Zn	0.550**	0.245**	0.352**	0.189**	0.696**	0.523**	1				
Ni	0.892**	0.150**	0.011	-0.355**	0.099	0.855**	0.346**	1			
SOM	0.223**	0.132*	-0.024	0.112*	0.202**	0.114*	0.293**	0.108	1		
pH	0.024	-0.132*	0.195**	0.215**	0.108	-0.001	0.244**	-0.060	-0.070	1	
CEC	0.358**	0.072	0.254**	0.130*	0.220**	0.254**	0.437**	0.187**	0.224**	0.458**	1

注:SOM 指土壤有机质;CEC 指土壤阳离子交换量;**表示在 0.01 水平上极显著相关;*表示在 0.05 水平上显著相关。下同。

2.4 不同产地的广藿香重金属污染特征

种重金属(Cu, Hg, As, Pd, Cd)的含量情况详见表

两广广藿香主要代表产区的广藿香茎和叶中 5 4—5。

表 4 不同产区的广藿香茎中 5 种重金属含量

产区	Cu/(mg·kg ⁻¹)		Hg/(μg·kg ⁻¹)		As/(mg·kg ⁻¹)		Pb/(mg·kg ⁻¹)		Cd/(mg·kg ⁻¹)	
	X±SD	C _v /%	X±SD	C _v /%	X±SD	C _v /%	X±SD	C _v /%	X±SD	C _v /%
肇庆四会	11.06±5.12	46.26	1.00±1.43	142.45	0.23±0.07	33.16	1.92±1.84	95.45	0.47±0.29	62.35
肇庆高要	16.23±1.54	9.50	1.89±1.24	65.33	0.17±0.03	16.89	1.81±0.31	17.28	0.29±0.16	53.81
肇庆德庆	14.80±2.57	17.37	3.15±1.77	56.38	0.20±0.07	36.71	2.52±1.12	44.53	0.39±0.22	56.80
阳江阳春	12.52±3.17	25.33	1.59±1.53	95.94	0.26±0.19	73.83	1.61±1.11	69.10	0.20±0.15	75.06
阳江阳西	9.74±2.49	25.59	0.81±1.35	166.19	0.24±0.10	42.30	1.25±0.55	43.96	0.11±0.04	35.96
茂名高州	9.14±2.18	23.83	1.26±1.66	131.98	0.11±0.06	54.80	0.85±0.30	35.69	0.05±0.03	56.70
茂名电白	9.96±4.45	44.65	0.40±0.36	91.95	0.20±0.08	39.98	0.89±0.40	45.43	0.21±0.13	63.82
湛江雷州	13.95±3.59	25.72	0.93±1.15	123.56	0.20±0.09	43.51	0.53±0.14	25.70	0.16±0.07	47.17
湛江遂溪	10.91±0.89	8.12	1.02±0.50	48.54	0.30±0.16	53.44	0.78±0.31	40.54	0.22±0.23	108.57
潮州湘桥	14.67±3.39	23.07	0.73±0.36	49.44	0.14±0.04	29.82	0.70±0.01	1.57	0.60±0.19	31.56
江门恩平	7.43±0.74	9.92	0.74±0.04	5.08	0.26±0.04	16.34	0.18±0.03	17.18	0.37±0.42	113.33
罗城仫佬族自治县	13.77±3.97	28.82	1.97±2.07	105.14	0.28±0.12	43.34	0.79±0.33	41.75	0.43±0.31	72.94
百色靖西	14.03±5.02	35.80	2.11±3.66	173.16	0.23±0.10	41.44	0.74±0.43	59.06	0.40±0.22	54.23
钦州灵山	10.14±0.50	4.89	0.27±0.06	23.29	0.08±0.01	7.43	0.52±0.05	9.10	0.14±0.01	10.78
钦州钦北	17.67±2.32	13.16	1.63±1.13	69.28	0.20±0.07	32.58	1.44±0.92	64.16	0.18±0.09	49.77
南宁宾阳	11.12±0.87	7.78	4.02±2.35	58.48	0.72±0.20	27.24	1.27±0.45	35.44	0.15±0.05	31.94
广东产地	11.44±3.71	32.46	1.03±2.15	208.23	0.20±0.14	68.39	1.29±1.06	82.22	0.22±0.22	99.65
广西产地	13.65±4.43	32.43	1.10±2.59	236.35	0.28±0.26	89.81	0.83±0.49	59.74	0.34±0.25	72.43

注:X 表示平均值;SD 表示标准偏差;C_v/%表示变异系数。下同。

就整体而言,广藿香植株(茎和叶)中 5 种重金属含量的平均值均未超过《中国药典(2020版)》的限量标准,总体情况安全。就重金属的超标率情况而言,

仅广西产区的广藿香茎和叶存在轻微超标外,超标率分别为 6.74%和 7.87%,其余产区的广藿香植株中重金属超标情况均处于安全可控水平(即超标率

<5.0%)。就重金属含量而言,广西产区的广藿香植株中的 Cu, Hg, As 和 Cd 这 4 种重金属的含量相对于广东产区的较高,而 Pb 含量则相对较低。这一结果与两广广藿香种植土壤中对应的重金属污染情况一致(图 1),表明土壤重金属污染的确是广藿香植株中重金属的重要来源之一。

此外,研究发现不同代表产区的广藿香植株中重金属含量的变异系数大多处于 10%~100% 的范围,是中等强度变异水平,这表明其空间变异相对显著,也说明其重金属污染情况易受外界活动的影响^[19],而

这些外界活动的影响很可能是作用在广藿香种植土壤中,然后体现在广藿香植株中的。研究还发现,广藿香茎中 Cd 的平均含量显著高于广藿香叶,而 Hg 的平均含量显著低于广藿香叶($p < 0.05$)。与历史上相同产区的调查数据相比,广东肇庆和阳春等地的重金属含量水平有所升高^[13]。这也从侧面说明了广藿香植株中的重金属来源受到人为活动的巨大影响,并且这种影响有致使广藿香重金属超标的倾向。因此,在广藿香的种植管理过程中,要科学适量地使用含有重金属的农药和化肥等^[24]。

表 5 不同产区的广藿香叶中 5 种重金属含量

产区	Cu(mg·kg ⁻¹)		Hg(μg·kg ⁻¹)		As(mg·kg ⁻¹)		Pb(mg·kg ⁻¹)		Cd(mg·kg ⁻¹)	
	X±SD	C _v /%	X±SD	C _v /%	X±SD	C _v /%	X±SD	C _v /%	X±SD	C _v /%
肇庆四会	13.10±2.92	22.28	3.11±2.39	76.85	0.64±0.27	42.24	1.89±1.94	102.99	0.14±0.07	48.01
肇庆高要	13.98±1.62	11.60	3.91±2.55	65.16	0.29±0.09	32.34	1.93±0.92	47.65	0.11±0.04	36.32
肇庆德庆	14.64±4.97	33.93	5.06±3.92	77.46	0.36±0.05	12.88	1.79±0.61	34.23	0.09±0.03	38.02
阳江阳春	12.15±3.39	27.90	7.03±3.95	56.21	0.44±0.43	98.00	1.27±1.10	86.77	0.07±0.04	64.42
阳江阳西	7.95±1.47	18.48	5.64±2.79	49.37	0.25±0.06	25.86	1.33±0.26	19.32	0.06±0.01	9.55
茂名高州	9.93±2.09	21.00	5.17±4.33	83.70	0.18±0.05	26.29	0.60±0.17	28.74	0.02±0.01	40.86
茂名电白	10.25±1.44	14.07	7.17±1.73	24.15	0.20±0.03	14.82	0.71±0.35	48.80	0.06±0.02	35.13
湛江雷州	12.77±2.43	18.99	6.53±4.10	62.75	0.15±0.03	16.50	0.70±0.16	22.58	0.05±0.01	27.04
湛江遂溪	8.89±2.75	30.91	7.82±2.47	31.51	0.27±0.09	32.17	0.49±0.07	14.82	0.04±0.01	32.58
潮州湘桥	13.20±1.83	13.88	5.39±2.68	49.73	0.32±0.09	28.58	0.68±0.13	18.83	0.15±0.06	41.45
江门恩平	6.65±3.73	56.11	7.11±0.45	6.34	0.87±0.31	36.39	0.24±0.06	26.83	0.07±0.06	89.99
罗城仫佬族自治县	14.63±4.36	29.84	7.14±6.15	86.05	0.36±0.27	73.10	0.85±0.31	36.90	0.12±0.09	75.61
百色靖西	14.16±4.90	34.59	10.04±7.17	71.40	0.35±0.22	62.42	0.93±0.40	43.07	0.13±0.06	44.56
钦州灵山	12.13±2.47	20.38	5.55±4.15	74.79	0.13±0.07	55.26	0.46±0.19	40.59	0.09±0.02	26.50
钦州钦北	15.85±1.89	11.94	9.92±2.89	29.12	0.25±0.05	19.31	0.73±0.26	35.97	0.07±0.03	37.79
南宁宾阳	10.24±2.09	20.42	14.24±2.86	20.09	1.20±0.68	56.67	0.97±0.23	23.72	0.08±0.01	16.00
广东产地	11.44±3.36	29.36	5.41±3.39	78.82	0.36±0.32	90.12	1.06±1.00	94.42	0.06±0.05	79.37
广西产地	13.97±4.33	31.01	9.27±5.97	82.65	0.38±0.31	82.25	0.85±0.36	42.45	0.11±0.06	58.54

2.5 广藿香对重金属的富集特性

广藿香植株和广藿香种植土壤的重金属污染特征均表现出了广西产区污染相较于广东产区更加严重的特点,这表明广藿香植株和土壤的重金属污染可能存在一定的相关性。因此,研究分析了不同产区的广藿香茎和叶部对《中国药典(2020 版)》中有明确限量规定的 5 种重金属的富集系数(EC)(表 6)。结果显示,广藿香茎对 Cu, Hg, As, Pb 和 Cd 的 EC 平均值分别为 0.60, 0.13, 0.03, 0.04, 1.43;广藿香叶对 Cu, Hg, As, Pb 和 Cd 的 EC 平均值分别为 0.61, 0.54, 0.04, 0.04, 0.45。可见广藿香茎对 Cd 有富集作用,而对 As, Pb, Cu 和 Hg 具有耐受性。采用非参数检验法分析富集系数在产地间的差异,结果显示不同产地的广藿香仅对重金属元素 Cu 和 Pb 的富集差异显著($p < 0.05$),而对其他 3 种重金属的富集无显著性差异。

广藿香对 Pb 具有强耐受性($EC < 0.1$),但是尽管如此,研究中还是检测到四会产区和阳春产区的广藿香存在不同程度的 Pb 的污染。这进一步表明广藿香中的 Pb 污染来源可能不是土壤。本研究推测其来源很可能是机动车尾气中的 Pb 沉降^[24]。不同产地广藿香对 Cd 的 EC 没有显著差异,表明不同产区的广藿香植株均对土壤中 Cd 具有累积作用。需要特别注意的是,广藿香种植土壤中 Cd 污染出现频率最高,覆盖产区面积最大,且广藿香茎对 Cd 有富集作用,因此 Cd 应作为广藿香重金属污染防控的重点。此外,不同重金属在广藿香茎和叶中 EC 的差异性分析显示, Hg 和 Cd 在广藿香茎和广藿香叶中的 EC 存在显著差异($p < 0.01$),其他重金属在茎、叶中的 EC 则无显著性差异。具体表现为,广藿香茎对 Hg 的 EC 显著小于广藿香叶,而广藿香茎对 Cd 的 EC 则显著大于广藿香叶。

表 6 不同产区的广藿香茎与叶对 5 种重金属的富集系数

产区	茎的重金属富集系数					叶的重金属富集系数				
	Cu	Hg	As	Pb	Cd	Cu	Hg	As	Pb	Cd
肇庆四会	0.60	0.07	0.03	0.04	2.21	0.72	0.26	0.08	0.05	0.61
肇庆高要	0.69	0.12	0.04	0.04	1.49	0.6	0.25	0.06	0.04	0.55
肇庆德庆	1.07	0.08	0.03	0.06	2.13	1.09	0.11	0.06	0.04	0.52
阳江阳春	0.62	0.19	0.03	0.04	1.69	0.59	0.86	0.04	0.03	0.52
阳江阳西	0.87	0.03	0.08	0.06	1.26	0.71	0.49	0.08	0.06	0.67
茂名高州	0.56	0.09	0.02	0.03	0.58	0.6	0.39	0.03	0.02	0.25
茂名电白	0.56	0.03	0.05	0.04	1.50	0.56	0.49	0.04	0.03	0.38
湛江雷州	0.15	0.07	0.03	0.09	0.86	0.14	0.56	0.02	0.11	0.25
湛江遂溪	1.03	0.09	0.03	0.07	1.83	0.84	0.73	0.03	0.04	0.29
潮州湘桥	0.33	0.14	0.01	0.01	2.37	0.3	0.85	0.02	0.01	0.6
江门恩平	0.62	0.10	0.13	0.01	4.26	0.45	0.93	0.43	0.02	0.75
罗城仫佬族自治县	0.82	0.11	0.02	0.05	2.24	0.86	0.35	0.03	0.05	0.60
百色靖西	0.39	0.18	0.02	0.03	1.34	0.4	0.54	0.03	0.04	0.47
钦州灵山	0.91	0.02	0.01	0.01	0.73	1.08	0.41	0.01	0.01	0.45
钦州钦北	0.54	0.16	0.02	0.04	1.00	0.48	0.88	0.02	0.02	0.36
南宁宾阳	0.52	0.25	0.03	0.05	0.60	0.47	0.89	0.05	0.03	0.33
平均值	0.60	0.13	0.03	0.04	1.43	0.61	0.54	0.04	0.04	0.45
标准偏差	0.37	0.20	0.03	0.03	1.41	0.36	0.49	0.03	0.03	0.34

2.6 土壤重金属含量及其有效性对广藿香品质安全的影响

广藿香主要产区土壤中 5 种重金属的全量和有效态含量详见表 7。与全量相比,有效态重金属含量较小,但变异程度更大,主要是因为有效态不仅受到总量的影响,还受到土壤理化性质、有机质含量、pH 值、阳离子交换量^[25-26]、土壤矿物组成^[27]以及作物根际效应等^[28]复杂因素的影响。表 8 显示,土壤中 Hg 元素全量和广藿香茎中含量呈显著正相关,As 元素全量与广藿香茎中含量呈极显著正相关,而 Cu, Pb 和 Cd 元素全量不显著。对于广藿香叶,仅 Cd 元素全量与叶中 Cd 含量呈显著正相关,Cu, Hg, As 和 Pb 元素全量均不显著。而对于土壤中重金属有效态而言,Cu, As, Pb 和 Cd 元素有效态与广藿香茎中含量呈极显著正相关;同时,Cu, Hg, As, Pb 和 Cd 元素有效态与广藿香叶中含量呈极显著正相关。显然,土壤重金属有效态含量与广藿香植株中含量具有更好的相关性,这与岑如香等人的研究结果一致^[21]。与全量相比,土壤重金属有效态含量在阐述产区土壤环境与广藿香品质安全的关联时效果更好。综上所述,为保障广藿香的品质安全,建议制定相关施肥制度(包括施肥时期与施肥量)和保护措施,避免农药滥用、采矿作业、交通污染等带来的外源重金属污染输入。此外,应特别关注广藿香种植区域 Cd 的污染情况,加强施肥过程对土壤 Cd 有效态含量的影响研究,开发重金属有效态阻控技术,从而确保广藿香的品质安全。

表 7 广藿香产区土壤重金属全量和有效态含量

项目	重金属元素	平均值	标准差	变异系数/%
全量	Cu/(mg·kg ⁻¹)	26.37	20.41	77.42
	Hg/(mg·kg ⁻¹)	0.02	0.02	89.76
	As/(mg·kg ⁻¹)	11.02	9.93	90.10
	Pb/(mg·kg ⁻¹)	35.24	20.98	59.54
	Cd/(mg·kg ⁻¹)	0.23	0.29	129.20
有效态	Cu/(mg·kg ⁻¹)	3.64	3.78	103.80
	Hg/(μg·kg ⁻¹)	0.20	0.23	111.07
	As/(mg·kg ⁻¹)	0.18	0.16	86.15
	Pb/(mg·kg ⁻¹)	7.02	5.22	74.29
	Cd/(mg·kg ⁻¹)	0.09	0.11	126.19

表 8 广藿香产区土壤重金属全量、有效态含量与广藿香重金属含量相关性分析

项目	相关系数	Cu	Hg	As	Pb	Cd
广藿香茎	R _T	0.47	0.56*	0.68**	0.47	0.45
	R _A	0.91**	0.27	0.87**	0.98**	0.71**
广藿香叶	R _T	0.35	-0.05	0.46	0.48	0.63*
	R _A	0.82**	0.64**	0.68**	0.77**	0.79**

注:R_T表示重金属全量与广藿香中含量的相关系数;R_A表示重金属有效态与广藿香中含量的相关系数。

3 结论

(1) 广藿香主要产区的种植土壤中存在一定程度的重金属污染,其中 Cd 污染出现频率最高,平均单因子污染指数最大,达到 0.95。人为活动是重要的重金属污染来源。内梅罗综合污染指数结果表明两广

产区的广藿香种植土壤中重金属污染均已达警戒线,且广西产区的土壤重金属综合污染指数更高,需要加强监控防止恶化。

(2) 两广地区的广藿香植株中重金属含量均低于《中国药典》的限量水平,总体情况安全,但广西产区的广藿香植株中存在轻微程度的Cu含量超标。广藿香植株中重金属含量与其种植土壤中重金属有效态含量显著相关。广藿香茎易累积Cd,且不受产地差异影响,同时广藿香种植土壤中Cd污染出现频率最高。因此从药材的品质安全性考虑,应特别注意广藿香种植地土壤中Cd有效态含量的控制。

(3) 广藿香植株及其对应根区土壤样品中重金属的协同采样与分析的方法与单一的土壤重金属采样分析法相比,能够更好地评估土壤中重金属对广藿香品质安全的影响,更准确的把握广藿香种植土壤重金属防控的重点。

[参 考 文 献]

[1] 左甜甜,张磊,王莹,等.中药材及饮片中重金属及有害元素限量制定的探讨[J].药物分析杂志,2020,40(4):688-693.

[2] 左甜甜,张磊,石上梅,等.10种根和根茎类中药材中重金属及有害元素的风险评估及最大限量理论值[J].药物分析杂志,2020,40(10):1870-1876.

[3] 杨启良.植物修复重金属污染土壤的研究现状及其水肥调控技术展望[J].生态环境学报,2015,24(6):1075-1084.

[4] 霍彦慧,王美娥,谢天,等.典型矿冶区周边农业用地农产品安全风险及影响因素[J/OL].环境科学,2121,42(11):5526-5534.

[5] Chen Yanfang, Liu Dexin, Ma Jianhua, et al. Assessing the influence of immobilization remediation of heavy metal contaminated farmland on the physical properties of soil [J]. Science of the Total Environment, 2021, 781:146773.

[6] 张英,周光雄.广藿香的本草考证研究[J].中药材,2015,38(9):1986-1989.

[7] Zeng Jianrong, Li Chenmei, Liu Jianzhong, et al. Ecological assessment of current and future *Pogostemon cablin* Benth. potential planting regions in China based on maxEnt and ArcGIS models [J]. Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants, 2021, 24: 100308.

[8] Chen Junren, Xie Xiaofang, Li Mengting, et al. Pharmacological activities and mechanisms of action of *Pogostemon cablin* Benth: A review [J]. Chinese Medicine, 2021,16(1):1-20.

[9] Wan Feng, Peng Fu, Xiong Liang, et al. In vitro and in

vivo antibacterial activity of patchouli alcohol from *Pogostemon cablin* [J]. Chinese Journal of Integrative Medicine, 2016,27(2):125-130.

[10] 周旭凯,田玉红,董菲,等.广藿香的挥发性成分及其抗氧化性能研究[J].天然产物研究与开发,2020,32(10):1709-1716.

[11] 刘金伟,王晓仙,胡丽霞,等.基于数据挖掘的新型冠状病毒感染肺炎中药治疗处方分析与监护[J].时珍国医国药,2020,31(3):704-706.

[12] 黄璐琦,郭兰平,詹志来.道地药材标准汇编[M].北京:科学技术出版社,2020-01.

[13] 黄伟展,胡贞贞,卢昌华,等.广藿香重金属污染及潜在生态风险评价[J].热带作物学报,2019,40(5):191-197.

[14] 吴友根,郭巧生,郑焕强.广藿香种植土壤和药材中有机氯农药及重金属残留分析[J].中国中药杂志,2008(13):1528-1532.

[15] 袁润杰,于高伟,邱晓蕾,等.区域土壤重金属空间差异及对蔬菜品质安全影响的分析:以南京八卦洲、江心洲为例[J].农业环境科学学报,2015,34(8):1498-1507.

[16] 吴先亮,黄先飞,全文选,等.黔西煤矿区周边土壤重金属形态特征、污染评价及富集植物筛选[J].水土保持通报,2018,38(5):313-321.

[17] 齐耀东,张志鹏,张昭,等.关黄柏产区土壤重金属污染及药材安全性评价[J].中国中药杂志,2016(3):383-389.

[18] 钟心,钟建,黄占斌.氮磷肥施用对保水剂钝化土壤重金属铅镉效果的影响[J].水土保持通报,2019,39(2):88-93.

[19] 陈展,吴育林,张刚.上海市某大型再开发场地土壤重金属污染特征、评价及来源分析[J].水土保持通报,2021,41(1):227-236.

[20] 李荣西,毛景文,赵帮胜,等.烃类流体在MVT型铅锌矿成矿中角色与作用:研究进展与展望[J].地球科学进展,2021,36(4):335-345.

[21] 岑如香,张旺,韦小了,等.黔产薏苡仁及其产地土壤重金属污染的特征[J].水土保持通报,2021,41(1):103-111.

[22] Chen Hanbo, Yang Xing, Wang Hailong, et al. Animal carcass-and wood-derived biochars improved nutrient bioavailability, enzyme activity, and plant growth in metal-phthalic acid ester co-contaminated soils: A trial for reclamation and improvement of degraded soils [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 261:110246.

[23] 张亚琴,邓秋林,文秋姝,等.浅谈科学施肥在中药材生态种植中的作用与措施[J].中国中药杂志 2020,45(20):4846-4852.

- [12] 王闪.城市下凹式绿地和草地对降雨径流磷污染控制效果研究[D].北京:北京林业大学,2015.
- [13] 秦媛.西安市绿地氮磷流失对水体污染及防治措施研究[D].陕西 西安:长安大学,2018.
- [14] 马笑,王晨光,郝珊,等.聚丙烯酰胺和椰糠配合对绿地土壤换填介质渗、蓄、净的效果[J].地球环境学报,2020,11(1):112-118.
- [15] 刘晓军.日光温室土壤硝态氮累积淋溶特性及其影响因素研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2008.
- [16] 王志强,谢文霞,柴娜,等.牡蛎壳作生物滞留填料对城市地表径流污染物去除效果研究[J].水土保持学报,2019,33(2):128-133,139.
- [17] 赵洪宇,李玉环,宋强,等.煤矸石动态循环淋溶液的特性[J].环境工程学报,2017,11(2):1171-1177.
- [18] Long Guangqiang, Jiang Yujia, Sun Bo. Seasonal and inter-annual variation of leaching of dissolved organic carbon and nitrogen under long-term manure application in an acidic clay soil in subtropical China [J]. Soil & Tillage Research, 2015,146(B):270-278.
- [19] 刘彬彬,高明,王侃,等.不同生物质灰渣填充密度下处理生活污水的效果研究[J].水土保持学报,2015,29(6):296-300.
- [20] 黄容,高明,廖燕妮.不同生物质灰渣对磷的吸附解吸动力学特征[J].水土保持学报,2014,28(1):156-160.
- [21] Yan Jingming, Bäverman C, Luis Moreno, et al. The long-term acid neutralizing capacity of steel slag-science direct [J]. Studies in Environmental Science, 1997,71:631-640.
- [22] 赵瑞松.典型 LID 设施填料优化设计研究[D].陕西 西安:西安理工大学,2019.
- [23] 陈莎,陈晓宏.城市雨水径流污染及 LID 控制效果模拟[J].水资源保护,2018,34(5):13-19.
- [24] Kumari K, Moldrup P, Paradelo M, et al. Effects of biochar on air and water permeability and colloid and phosphorus leaching in soils from a natural calcium carbonate gradient [J]. Journal of Environmental Quality, 2014,43(2):647-657.
- [25] 韩丽杰,郑红,马鸿文,等.利用¹³X 沸石分子筛净化含 NH₄⁺-N 废水的试验研究[J].环境工程学报,2008,4(11):1469-1474.
- [26] 李晶.城市雨水径流污染控制理论与技术研究[D].天津:天津大学,2012.
- [27] Gong Yangwei, Yin Dingku, Li Qijun, et al. Performance assessment of extensive green roof runoff flow and quality control capacity based on pilot experiments [J]. Science of the Total Environment, 2019, 687 (15): 505-515.
- [28] 梁坤,樊玉清.黄河口湿地典型盐碱植被群落土壤氮素的季节动态及根际效应[J].环境化学,2019,38(10):2327-2335.
- [29] 赵春晓.不同材料对河套灌区土壤氮磷钾素淋溶特征分布的影响[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2017.
- [30] Gong Yangwei, Zhang Xianwei, Li Qijun, et al. Factors affecting the ability of extensive green roofs to reduce nutrient pollutants in rainfall runoff [J]. Science of the Total Environment, 2020,732:139248.
- [31] Dusza Y, Barot S, Kraepiel Y, et al. Multifunctionality is affected by interactions between green roof plant species, substrate depth, and substrate type [J]. Ecology & Evolution, 2017,7(3):2357-2369.
- [32] 成龙,吴卿,龚克娜,等.双基基层绿化屋面的雨水水文水质特征分析[J].环境工程学报,2016,10(11):6153-6158.

(上接第 97 页)

- [24] 陈雅丽,翁莉萍,马杰,等.近十年中国土壤重金属污染源解析研究进展[J].农业环境科学学报,2019,290(10):7-26.
- [25] 欧阳蒲月,李亚萍,梁永枢,等.石牌广藿香种植模式初探[J].中药材,2020,43(5):1072-1075.
- [26] 张智慧,杜平,何赢,等.基于农产品安全的土壤重金属有效态含量限值推定方法[J].环境科学,2019,40(9):4262-4269.
- [27] Amnai A, Radola D, Choulet F, et al. Impact of ancient iron smelting wastes on current soils; Legacy contamination, environmental availability and fractionation of metals [J]. Science of the Total Environment, 2021,776:145929.
- [28] Tibbett M, Green I, Rate A, et al. The transfer of trace metals in the soil-plant-arthropod system [J]. Science of the Total Environment, 2021, 779 (2): 146260.