

环知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

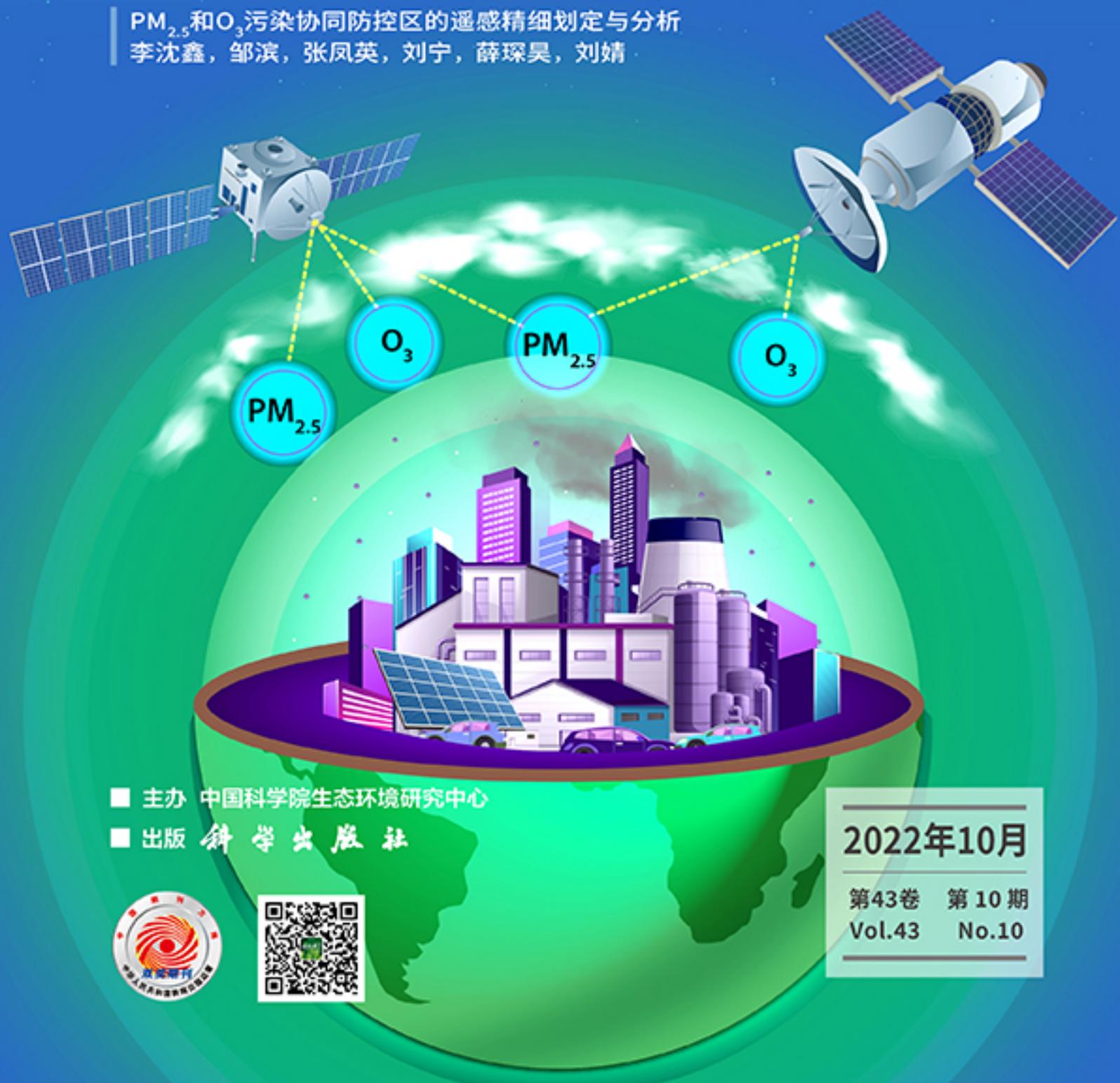
# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>污染协同防控区的遥感精细划定与分析  
李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年10月

第43卷 第10期  
Vol.43 No.10

目次

PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>污染协同防控区的遥感精细划定与分析 ..... 李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧(4293)

广州市冬季一次典型臭氧污染过程分析 ..... 裴成磊, 谢雨彤, 陈希, 张涛, 邱晓暖, 王瑜, 王在华, 李梅(4305)

佛山臭氧浓度预报方程的建立与应用 ..... 陈辰, 洪莹莹, 谭浩波, 司徒淑婷, 程银琳, 步巧利, 吴蒙, 潘巧英(4316)

乌海市高分辨率大气污染源排放清单构建及其在臭氧污染成因探究中的应用 ..... 张瑞欣, 楚波, 尚春林, 曹喜萍, 李光耀, 朱玉凡, 刘晓, 夏佳琦, 陈强(4327)

结合在线监测和自动识别系统分析东海沿岸船舶排放特征 ..... 邱浩, 刘丹彤, 吴杨周, 李思远, 丁朔, 胡康, 张家乐, 陈梅汀(4338)

机动车制动磨损颗粒物及挥发性有机物的组分特征 ..... 门正宇, 刘笃优, 郭全有, 张静, 彭剑飞, 吴琳, 毛洪钧(4348)

笼养鸡舍冬季挥发性有机物排放特征 ..... 曹甜甜, 郑云昊, 张羽, 王悦, 丛群欣, 王源昊, 董红敏(4357)

上海市生活垃圾房气溶胶中可培养细菌污染状况及种群特征 ..... 卢冰洁, 张翔, 王川, 邱俊, 李丹(4367)

浙江省2008~2018年人为源氨排放清单及分布特征 ..... 方利江, 杨一群, 叶观琼(4380)

“双碳”目标下钢铁行业控煤降碳路线图 ..... 薛英岚, 张静, 刘宇, 陈瑜, 孙健, 蒋洪强, 张伟, 曹东(4392)

空间关联网络结构特征的减排效应:基于城市群视角 ..... 郑航, 叶阿忠(4401)

中国对外直接投资的减污降碳效应及其实现机制 ..... 白梓函, 吕连宏, 赵明轩, 张楠, 罗宏(4408)

近年全国地表水水质变化特征 ..... 嵇晓燕, 侯欢欢, 王姗姗, 杨凯(4419)

湟水河流域地表水体微塑料分布、风险及影响因素 ..... 范梦苑, 黄懿梅, 张海鑫, 李好好, 黄倩(4430)

汾河流域地表水水化学同位素特征及其影响因素 ..... 赵春红, 申豪勇, 王志恒, 梁永平, 赵一, 谢浩, 唐春雷(4440)

城镇化进程中珠江三角洲高锰地下水赋存特征及成因 ..... 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 李海军(4449)

喀什噶尔河下游平原区地下水咸化特征及成因分析 ..... 鲁涵, 曾妍妍, 周金龙, 孙英(4459)

重庆市老龙洞地下河流域硝酸盐来源和生物地球化学过程的识别 ..... 王雨吻, 杨平恒, 张洁茹(4470)

蓝藻水华过程中优势种群演替模式、效应及驱动因子分析 ..... 欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李佳欣, 李玉鑫, 施军琼, 吴忠兴(4480)

珠海市磨刀门水道输水水源水库群浮游植物群落特征及其环境驱动因子 ..... 张茉莉, 王思瑞, 昌盛, 王山军, 金德才, 樊月婷, 张坤锋, 谢琼, 付青(4489)

营养物质对铜绿微囊藻生长和藻际细菌的影响 ..... 吕萍, 李慧莉, 徐勇, 郑效旭, 黄振华, 王聪, 徐圣君, 庄绪亮(4502)

老化作用对微塑料吸附四环素的影响及其机制 ..... 王林, 王姝歆, 曾祥英, 何杨, 黄雯, 郑世界, 张建强(4511)

沉积物和土壤中胶体对氯霉素吸附行为的影响 ..... 晏彩霞, 罗燕清, 聂明华, 周旋, 丁明军(4522)

历史抗生素胁迫改变磺胺甲噁唑和甲氧苄啶对活性污泥的影响:ARGs及其潜在宿主 ..... 张忠兴, 樊晓燕, 李星, 高玉玺, 赵君如(4536)

阳朔典型铅锌矿区流域土壤重金属空间分布特征及来源解析 ..... 陈盟, 潘泳兴, 黄奕翔, 王樞樵, 张睿东(4545)

白洋淀及周边土壤重金属的分布特征及生态风险评估 ..... 郑飞, 郭欣, 汤名扬, 朱冬, 董四君, 康乐, 陈兵(4556)

基于地理探测器的镇域尺度土壤重金属含量空间分异及其影响因素分析 ..... 龚仓, 王亮, 王顺祥, 张志翔, 董航, 刘玖芬, 王德伟, 严步青, 陈映(4566)

燃煤电厂重金属排放与周边土壤中重金属污染特征及健康风险 ..... 车凯, 陈崇明, 郑庆宇, 范辉, 魏明磊, 罗蓬, 郁金星(4578)

海南岛半干旱区农用地土壤重金属富集因素、健康风险及来源识别 ..... 杨剑洲, 龚晶晶, 王振亮, 高健翁, 杨建坤, 胡树起, 唐世新(4590)

九龙江口红树林表层沉积物重金属赋存形态及污染评价 ..... 张华兰, 于瑞莲, 万瑞安, 胡恭任, 黄华斌, 吴雅清(4601)

我国茶叶主产区有机肥重金属含量现状 ..... 伊晓云, 方丽, 杨向德, 马立锋, 刘美雅, 张群峰, 倪康, 石元值(4613)

甘肃省农业土壤邻苯二甲酸酯累积特征及来源分析 ..... 陈王玉, 张光全, 张杨, 李明凯, 郝佳欣, 熊有才, 李崇霄, 曹靖(4622)

三峡库区澎溪河不同高程消落带土壤磷形态及磷酸酶活性分布特征 ..... 高艺伦, 方芳, 唐子超, 张蕊, 蒋艳雪, 郭劲松(4630)

塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳组分特征及其与理化因子的相关性 ..... 李昕竹, 贡璐, 唐军虎, 罗艳, 丁肇龙, 朱海强, 张涵, 李蕊希(4639)

黄土丘陵区柠条人工林不同深度土壤呼吸速率对土壤湿度的响应 ..... 孙亚荣, 王亚娟, 赵敏, 薛文艳, 梁思琦, 刘乐, 刘超, 陈云明(4648)

基于Meta-analysis的生物炭对土壤硝态氮淋失和磷酸盐固持影响 ..... 姜志翔, 崔爽, 张鑫, 郝敏, 孙德茂(4658)

低分子有机酸强化植物修复重金属污染土壤的作用与机制 ..... 方治国, 谢俊婷, 杨青, 卢焯桢, 黄海, 朱芸烟, 尹思敏, 吴鑫涛, 都韶婷(4669)

无机钝化剂对镉污染酸性水稻土的修复效果及其机制 ..... 张剑, 孔繁艺, 卢升高(4679)

改良铅锌矿渣对栎树幼苗铅锌富集与耐性机制 ..... 谢天志, 陈永华, 苏荣葵, 刘慧, 姚海松(4687)

CaO<sub>2</sub>/FA复合材料富集磷效能及其回收物对土壤改良作用 ..... 岳薇, 李大鹏, 吴玲予, 王璐, 汤尧禹, 朱企, 黄勇(4697)

早稻秸秆还田和减钾对晚稻产量和土壤肥力的影响 ..... 黄巧义, 黄建凤, 黄旭, 吴永沛, 李苹, 付弘婷, 唐拴虎, 刘一峰, 徐培智(4706)

秸秆连续还田配施化肥对稻-油轮作土壤碳库及作物产量的影响 ..... 蔡影, 付思伟, 张博睿, 胡宏祥, 刘文雯, 俞金涛, 贾临东, 刘运峰(4716)

化肥减量配施秸秆对双季稻田固氮微生物群落的影响 ..... 陈凯鹏, 韦菊烟, 陈丹, 王聪, 沈健林, 李勇, 吴金水(4725)

化肥减量与有机物料添加对华北潮土微生物氮循环功能基因丰度和氮转化遗传潜力的影响 ..... 李胜君, 胡荷, 李刚, 王蕊, 赵建宁, 张贵龙, 修伟明(4735)

长期覆膜条件下农田土壤微生物群落的响应特征 ..... 胡志娥, 肖谋良, 丁济娜, 季剑虹, 陈剑平, 葛体达, 鲁顺保(4745)

长期秸秆还田对潮土真菌群落、酶活性和小麦产量的影响 ..... 马垒, 李燕, 魏建林, 李子双, 周晓琳, 郑福丽, 吴小宾, 王利, 刘兆辉, 谭德水(4755)

土壤改良剂对再生水滴灌根际土壤菌群多样性及病原菌和抗生素抗性基因丰度的影响 ..... 崔丙健, 崔二革, 刘春成, 胡超, 樊向阳, 李中阳, 高峰(4765)

氮素对苜蓿植物修复垃圾堆场镉-多环芳烃复合污染土壤及土壤细菌群落结构的影响 ..... 李怡佳, 马俊伟, 李玉倩, 肖琛, 沈心怡, 牛云, 陈家军(4779)

抗生素降解剂对猪粪堆肥腐熟和细菌群落演替的影响 ..... 李玮琳, 张昕, 马军伟, 孙万春, 成琪璐, 林辉(4789)

《环境科学》征订启事(4337) 《环境科学》征稿简则(4407) 信息(4521, 4705, 4800)

# 我国茶叶主产区有机肥重金属含量现状

伊晓云, 方丽, 杨向德, 马立锋, 刘美雅, 张群峰, 倪康\*, 石元值\*

(中国农业科学院茶叶研究所, 杭州 310008)

**摘要:** 调查分析我国茶叶主产区有机肥重金属含量可以为有机肥的安全使用提供指导, 从而保障茶园土壤和茶叶质量安全。对 2017~2019 年期间收集的茶园施用的有机肥样品中的重金属含量进行了分析, 并对不同种类有机肥的施用风险进行了测算。结果表明, 我国茶叶主产区有机肥中  $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Hg})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Zn})$  和  $\omega(\text{Ni})$  的平均含量分别为 4.60、0.22、27.1、0.78、27.9、58.3、250.1 和 16.3  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。依据 NY/T 525-2021 中的评价标准, 采集的有机肥样品中 As、Hg、Pb、Cd 和 Cr 超标率分别为 6.19%、1.33%、4.42%、4.42% 和 1.33%。从不同地区看, 陕西、江苏、安徽、福建和广西的有机肥合格率 100%, 山东、浙江、湖北、四川、云南和广东的有机肥合格率在 80%~90%, 而江西茶园施用的有机肥合格率仅 54.5%。从不同来源看, 有机肥合格率在菜籽饼肥、大豆饼肥和猪粪肥中为 100%, 羊粪肥 95.8%、牛粪肥 91.7%、鸡粪肥 90.7%、其它动物类有机肥 87.2%、动植物混合源类有机肥 82.4%、其它植物类有机肥 65.2%、其它类有机肥 63.6%。根据推荐施用量估算, 施用猪粪肥、牛粪肥、鸡粪肥和羊粪肥的土壤重金属累积速率将远超施用菜籽饼肥和大豆饼肥, 动物源有机肥是植物源有机肥平均累积速率的 7~30 倍。因此, 茶园上施用有机肥, 建议选用菜籽饼肥和大豆饼肥, 另一方面, 对风险较高地区应加强监测, 以降低土壤和茶叶重金属累积风险。

**关键词:** 有机肥; 重金属; 超标率; 合格率; 累积风险

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)10-4613-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.202107120

## Status of Heavy Metal in Organic Fertilizers in Main Tea Growing Regions of China

YI Xiao-yun, FANG Li, YANG Xiang-de, MA Li-feng, LIU Mei-ya, ZHANG Qun-feng, NI Kang\*, SHI Yuan-zhi\*

(Tea Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310008, China)

**Abstract:** To provide guidance for the safe use of organic fertilizers and improve soil quality and tea safety, it is necessary to conduct systematic analyses of the heavy metal content of organic fertilizers applied in the main tea producing areas of China. In this study, we analyzed the heavy metal contents in organic fertilizer samples collected from 2017 to 2019. The risks of collected organic fertilizers from different areas and sources were calculated. The results showed that the average concentrations of  $\omega(\text{As})$ ,  $\omega(\text{Hg})$ ,  $\omega(\text{Pb})$ ,  $\omega(\text{Cd})$ ,  $\omega(\text{Cr})$ ,  $\omega(\text{Cu})$ ,  $\omega(\text{Zn})$ , and  $\omega(\text{Ni})$  in the collected organic fertilizers were 4.60, 0.22, 27.1, 0.78, 27.9, 58.3, 250.1, and 16.3  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , respectively. According to the assessment standard in NY/T 525-2021, the over-limit rates of As, Hg, Pb, Cd, and Cr were 6.19%, 1.33%, 4.42%, 4.42%, and 1.33%, respectively. With respect to the area, the qualified rates were 100% in Shaanxi, Jiangsu, Anhui, Fujian, and Guangxi; 80%-90% in Shandong, Zhejiang, Hubei, Sichuan, Yunnan, and Guangdong; and only 54.5% in Jiangxi. The qualified rates of sources were 100% in rapeseed cake, soybean cake, and pig manure; 95.8% in sheep manure; 91.7% in cow manure; 90.7% in chicken manure; 87.2% in manure of other animals; 82.4% in the mixture of plant and animal sources; 65.2% in other plant sources; and 63.6% in other sources. According to the recommended application rate, the accumulation rate of heavy metals in soil with pig manure, cow manure, chicken manure, and sheep manure would be much higher than that with rapeseed cake and soybean cake. The average accumulation rate of organic fertilizer from animal sources was 7-30 times higher than that from plant sources. Therefore, it is recommended to use rapeseed cake or soybean cake fertilizer in tea plantation and to increase the supervision of heavy metal accumulation in soil and tea in those high-risk areas.

**Key words:** organic fertilizer; heavy metal; over limit rate; qualified rate; cumulative risk

茶叶是我国的重要经济作物, 我国茶叶种植面积逐年增加, 2019 年我国茶园面积积达  $3.10 \times 10^6$   $\text{hm}^2$ , 茶叶产量达  $2.78 \times 10^7$  t, 是全球第一大茶叶生产国<sup>[1]</sup>。施肥是提高茶叶产量和品质的重要措施<sup>[2-4]</sup>, 然而在茶叶生产过程中由于对产量的片面追求而导致我国茶园化肥过量施用问题突出<sup>[5-7]</sup>。调查显示我国 30% 的茶园存在化肥过量施用问题, 而施用有机肥的茶园不足 50%, 有机肥养分投入比例仅 15%<sup>[8]</sup>。科学试验证明有机肥的施用不仅可以提高茶叶产量和品质<sup>[9,10]</sup>, 还可以改善茶园土壤质量<sup>[11,12]</sup>, 同时还能实现化肥减量的目标<sup>[13]</sup>, 应该倡导有机肥在茶叶生产上的应用。文献[14]的发布以促进茶园有机肥施用, 随着茶园有机肥替代化肥行

动的推进, 茶农对茶园有机肥的使用积极性有望提升。

重金属是影响茶叶质量安全的重要因素, 尽管现有文献表明茶园有机肥替代尚未导致茶园土壤重金属含量超标<sup>[15]</sup>, 但重金属污染存在隐蔽性和长期性的特点, 因此在促进茶园有机肥施用过程中, 茶园有机肥重金属安全风险应引起充分重视。有研究表明有机肥中的重金属会通过施肥向土壤和作物转

收稿日期: 2021-07-14; 修订日期: 2022-02-22

基金项目: 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系项目 (CARS-19); 中国农业科学院科技创新工程协同创新任务 (CAAS-XTCX2016015); 国家重点研发计划项目 (2016YFD0200900)

作者简介: 伊晓云 (1983~), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为茶园有机肥安全施用技术, E-mail: yixiaoyun@tricaas.com

\* 通信作者, E-mail: nikang@tricaas.com; shiyz@tricaas.com

移<sup>[16]</sup>,长期施用有机肥会导致土壤和作物中重金属超标风险提升<sup>[17-19]</sup>,因此监控有机肥中的重金属含量是有机肥安全施用的保障.同时,不同种类有机肥由于其来源不同重金属含量存在较大差异<sup>[20]</sup>,不同种类有机肥施用后在土壤中的累积存在差异<sup>[21]</sup>,因此有必要测算不同种类有机肥施用后土壤重金属累积差异,从而为选择最佳的有机肥提供依据.

当前商品有机肥质量状况虽然引起了人们的关注<sup>[22-24]</sup>,但有机肥重金属含量的报道大多数集中在对某一区域使用的有机肥的调查<sup>[25-32]</sup>,茶园有机肥重金属含量现状尚未见报道,茶园有机肥替代化肥行动实施还存在基础数据薄弱的短板,为此国家茶叶产业技术体系从2017年开始启动了全国茶叶主产区有机肥质量安全现状调查工作.本文对2017~2019年期间采集的茶园有机肥重金属含量现状进行了分析,并对不同种类有机肥施用风险进行了评价,以期对茶叶生产中有机肥的使用提供技术指导,从而保障茶园土壤和茶叶生产绿色健康发展.

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集方法

有机肥样品于2017~2019年期间在全国茶叶主产区收集,共收集有机肥样本226个,来自14个主要产茶省市,其中陕西3个、山东21个、江苏17个、安徽15个、浙江38个、福建12个、江西11个、湖北29个、湖南7个、贵州8个、四川41个、云南6个、广东11个和广西7个.样品收集来源包括茶农、茶场当年使用的有机肥和茶叶主产区农资公司中销售的有机肥.采集的有机肥按照生产原料分为植物源有机肥、动物源有机肥、动植物混合源有机肥以及其它有机肥.其中植物源有机肥3种,包括菜籽饼肥(18个)、大豆饼肥(5个)和其它植物源有机肥(23个,主要成分为中药渣、食品及饮料加工产生的有机废弃物等).动物源有机肥5种,包括鸡粪肥(43个)、牛粪肥(24个)、羊粪肥(24个)、猪粪肥(22个)和其它动物源有机肥(39个,主要成分为蚕粪、鸽粪、兔粪、蚯蚓粪以及各类动物混合粪便等).生产原料中含有一种或多种植物原料并含有一种或多种畜禽粪便的有机肥归为动植物混合源有机肥(17个),含有腐殖酸和菌种等的有机肥归为其它有机肥(11个).

### 1.2 样品分析方法

有机肥样品经105℃烘干至恒重,粉碎过0.25 mm筛后待用.样品中总的As、Hg、Pb、Cd、Cr、Cu、Zn和Ni含量的测定参照文献<sup>[33]</sup>的方法,采用微波消解和电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)

测定.每个样品测定3个平行,取其算术平均值作为测定结果,同时做空白对照.

### 1.3 有机肥重金属评价标准

有机肥重金属评价标准参照文献<sup>[34]</sup>的方法.有机肥重金属超标率指超过该标准中各重金属限量指标的样品个数占总数的比例.有机肥重金属合格率指有机肥中As、Hg、Pb、Cd和Cr均不超标的样品个数占总数的比例.

### 1.4 数据分析

本研究分别计算了施用菜籽饼肥、大豆饼肥、鸡粪肥、牛粪肥、羊粪肥和猪粪肥这6种有机肥后土壤重金属元素累积速率和各类有机肥最大施用年限,以测算不同种类有机肥施用风险,计算方法参照穆虹宇等<sup>[24]</sup>的研究方法.

计算公式如下:

$$R = MC / (h \times \rho \times 10000 \times 1000) \quad (1)$$

式中, $R$ 为土壤重金属元素累积速率 $[\mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{a})^{-1}]$ ;  $M$ 为不同种类有机肥年施用量,参照文献<sup>[35]</sup>,2种植物源有机肥施用量设定为 $2250 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ,4种动物源有机肥施用量设定为 $3750 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ;  $C$ 为不同种类有机肥重金属元素含量 $(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$ ,取不同种类有机肥各元素含量的均值;  $h$ 为耕层深度(m),按照茶园有机肥常规施用深度设定为0.30 m;  $\rho$ 为土壤容重 $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ ,设定为 $1.05 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ; 10000为土壤面积 $10000 \text{ m}^2$ ; 1000为换算系数.

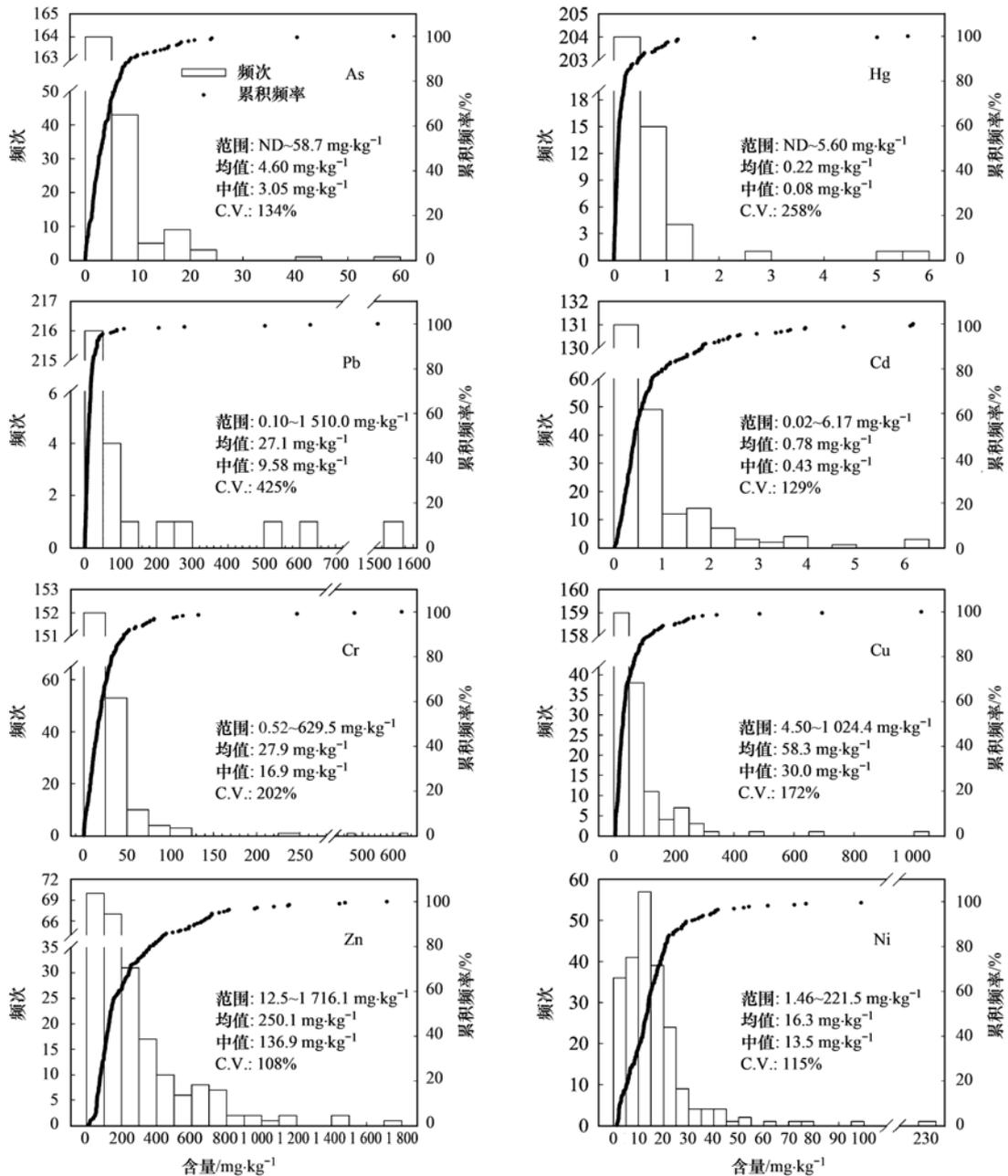
$$T_{\max} = (C_{\text{sv}} - C_{\text{bv}}) / R \times 1000 \quad (2)$$

式中, $T_{\max}$ 为不同种类有机肥最大施用年限(a);  $C_{\text{sv}}$ 为农用地土壤污染风险筛选值 $(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$ ,参照文献<sup>[36]</sup>;  $C_{\text{bv}}$ 为土壤背景值,其中土壤Cd、Cr、Cu、Pb和Zn含量取张小敏等<sup>[37]</sup>调查的涉及本研究取样的14个省的均值,As、Hg和Ni含量取宋伟等<sup>[38]</sup>统计的我国耕地主要土壤重金属元素含量的均值;  $R$ 为土壤各重金属元素累积速率 $[\mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{a})^{-1}]$ ; 1000为换算系数.

## 2 结果与分析

### 2.1 有机肥重金属含量整体情况

茶叶主产区有机肥重金属含量统计分析结果显示(图1),除As和Hg外,Pb、Cd、Cr、Cu、Zn和Ni在调查的226份有机肥中均有检出,各元素含量均呈偏态分布,大部分样品的含量均较低.由于少量样品含量偏离较大,各元素含量的平均值均比中值高,As、Hg、Pb、Cd、Cr、Cu、Zn和Ni含量的平均值分别是中值的1.51、2.90、2.83、1.82、1.65、1.94、1.83和1.21倍.



ND 表示未检出(not detected)

图1 有机肥重金属含量频次分布与累积频率

Fig. 1 Frequency distribution and cumulative frequency of heavy metal contents in organic fertilizers

如表 1 所示,依据 NY/T 525-2021 对 As、Hg、Pb、Cd 和 Cr 的限制标准,不同年份采集的有机肥合格率为 84.6%~88.3%,整体合格率为 87.6%。5 类重金属中,As 的超标率最高,2017、2018 和 2019 年 As 超标率均高于其他元素。

表 1 有机肥重金属超标率和合格率

取样年份	超标率/%					合格率/%
	As	Hg	Pb	Cd	Cr	
2017 年(n=162)	4.32	1.85	3.70	3.70	0.62	88.3
2018 年(n=13)	15.4	0	0	15.4	0	84.6
2019 年(n=51)	9.80	0	7.84	3.92	3.92	86.3
整体(n=226)	6.19	1.33	4.42	4.42	1.33	87.6

### 2.2 不同省份有机肥重金属含量差异

不同省份采集的有机肥各重金属含量情况如表 2 所示,陕西、江苏、安徽、福建和广西有机肥合格率均为 100%,山东、浙江、湖北、四川、云南和广东有机肥合格率为 80%~90%。湖南和贵州有机肥合格率未达 80%,主要是因为 As、Pb 和 Cd 超标较多。江西采集的有机肥合格率最低,仅有 54.5%,主要是 As 和 Pb 的超标率较高,ω(As)平均值达 10.1 mg·kg<sup>-1</sup>。

### 2.3 不同种类有机肥重金属含量差异

不同种类有机肥重金属含量情况如表 3 所示,

表2 不同省份有机肥重金属含量、超标率和合格率

Table 2 Content, over-limit rate, and qualified rate of organic fertilizers collected from different provinces

取样省份	项目	重金属元素										合格率/%
		As	Hg	Pb	Cd	Cr	Cu	Zn	Ni			
陕西 (n=3)	范围/mg·kg <sup>-1</sup>	2.55~8.39	0.03~0.10	10.3~24.2	0.05~0.36	17.4~26.8	6.85~23.1	18.1~91.5	6.17~21.1			
	均值/中值/mg·kg <sup>-1</sup>	4.69/3.13	0.06/0.04	16.1/13.7	0.23/0.29	21.3/19.9	16.6/19.8	64.4/83.6	13.0/11.6			
	超标率 <sup>1)/%</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
山东 (n=21)	范围/mg·kg <sup>-1</sup>	0.12~17.4	ND <sup>2)</sup> ~0.98	0.33~15.10	0.02~6.16	1.23~69.2	4.50~694	12.5~1151	2.27~32.6			
	均值/中值/mg·kg <sup>-1</sup>	3.54/2.21	0.16/0.08	113.4/7.06	0.77/0.35	22.2/20.3	66.5/36.6	230/140	14.5/13.9			
	超标率/%	4.76	0	14.3	4.76	0	0	0	0	0	0	85.7
江苏 (n=17)	范围/mg·kg <sup>-1</sup>	0.06~7.12	0.02~0.58	0.24~35.0	0.08~0.72	0.84~104	5.49~265	20.6~1446	10.3~41.7			
	均值/中值/mg·kg <sup>-1</sup>	4.16/4.27	0.14/0.11	15.8/13.5	0.32/0.27	33.5/28.9	69.8/38.8	319/220	22.1/19.0			
	超标率/%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
安徽 (n=15)	范围/mg·kg <sup>-1</sup>	0.44~8.60	0.03~0.90	1.21~38.3	0.15~1.70	2.56~52.4	5.98~1024	40.1~1158	3.08~23.9			
	均值/中值/mg·kg <sup>-1</sup>	2.93/2.51	0.14/0.08	11.2/6.95	0.53/0.41	22.4/14.8	136.0/63.4	380/395	13.8/12.5			
	超标率/%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
浙江 (n=38)	范围/mg·kg <sup>-1</sup>	ND~58.7	ND~0.78	0.10~503	0.04~6.17	0.52~474	4.51~295	50.0~1070	1.46~98.9			
	均值/中值/mg·kg <sup>-1</sup>	3.94/1.57	0.08/0.02	27.5/5.46	0.54/0.22	33.7/9.74	56.5/21.4	219/91.7	12.7/8.23			
	超标率/%	2.63	0	5.26	2.63	5.26	0	0	0	0	0	89.5
福建 (n=12)	范围/mg·kg <sup>-1</sup>	0.54~11.1	0.01~0.44	3.16~43.9	0.16~4.51	1.86~45.4	7.99~86.5	38.9~716	2.31~35.3			
	均值/中值/mg·kg <sup>-1</sup>	3.21/2.44	0.07/0.03	10.7/8.77	0.49/0.32	17.5/15.4	43.9/30.6	276/135	18.7/20.0			
	超标率/%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
江西 (n=11)	范围/mg·kg <sup>-1</sup>	2.02~20.8	0.05~0.97	7.59~109	0.22~3.64	3.72~629	15.7~265	69.4~658	5.32~76.9			
	均值/中值/mg·kg <sup>-1</sup>	10.1/7.01	0.31/0.11	32.1/17.17	1.26/0.77	92.2/52.4	64.5/33.2	200/109	38.7/40.2			
	超标率/%	45.5	0	18.2	9.09	9.09	0	0	0	0	0	54.5
湖北 (n=29)	范围/mg·kg <sup>-1</sup>	0.95~15.0	0.03~1.22	0.86~39.5	0.11~3.59	2.67~108	5.31~486	69.0~1716	3.41~23.9			
	均值/中值/mg·kg <sup>-1</sup>	4.06/2.74	0.24/0.12	10.4/8.78	0.86/0.46	22.3/18.3	70.9/31.1	312/132	12.4/13.1			
	超标率/%	3.45	0	0	6.90	0	0	0	0	0	0	89.7
湖南 (n=7)	范围/mg·kg <sup>-1</sup>	3.54~40.3	0.06~1.19	3.82~80.4	0.22~4.74	10.6~27.4	12.8~53.8	52.4~278	7.37~31.5			
	均值/中值/mg·kg <sup>-1</sup>	10.2/5.90	0.28/0.15	21.1/13.7	1.57/0.98	19.4/21.8	28.8/26.7	196/202	16.3/13.7			
	超标率/%	14.3	0	14.3	14.3	0	0	0	0	0	0	71.4
贵州 (n=8)	范围/mg·kg <sup>-1</sup>	0.18~18.2	0.004~0.51	0.50~206	0.02~3.94	1.14~132.8	5.26~94.3	21.3~430	1.49~221			
	均值/中值/mg·kg <sup>-1</sup>	6.17/3.79	0.14/0.09	37.3/8.35	0.89/0.54	35.4/18.3	39.4/37.4	184/173	42.5/16.3			
	超标率/%	12.5	0	12.5	12.5	0	0	0	0	0	0	75.0
四川 (n=41)	范围/mg·kg <sup>-1</sup>	0.15~23.9	ND~5.60	0.35~88.6	0.14~2.95	0.82~58.7	6.00~201	17.8~805	2.06~34.3			
	均值/中值/mg·kg <sup>-1</sup>	4.23/3.06	0.53/0.10	14.8/11.54	0.82/0.59	18.2/14.7	39.7/23.1	247/146	13.2/12.3			
	超标率/%	4.88	7.32	2.44	0	0	0	0	0	0	0	85.4
云南 (n=6)	范围/mg·kg <sup>-1</sup>	2.79~5.75	0.05~0.18	4.39~38.7	0.50~3.34	11.2~22.9	11.5~54.9	70.0~588	9.28~16.7			
	均值/中值/mg·kg <sup>-1</sup>	4.21/4.06	0.12/0.12	17.6/15.45	1.83/1.98	17.9/18.7	24.4/18.2	161/74.5	13.5/13.7			
	超标率/%	0	0	0	16.7	0	0	0	0	0	0	83.3
广东 (n=11)	范围/mg·kg <sup>-1</sup>	0.64~24.1	0.03~0.26	3.57~48.6	0.22~6.12	3.52~81.0	12.4~70.9	84.2~295	1.83~21.6			
	均值/中值/mg·kg <sup>-1</sup>	6.69/4.38	0.11/0.07	15.9/13.51	1.37/0.43	25.9/12.3	32.1/27.1	168/143	9.87/8.76			
	超标率/%	18.2	0	0	18.2	0	0	0	0	0	0	81.8
广西 (n=7)	范围/mg·kg <sup>-1</sup>	0.61~9.40	0.05~0.09	1.77~49.2	0.26~1.45	5.94~40.3	14.3~231.6	96.0~700	5.13~21.5			
	均值/中值/mg·kg <sup>-1</sup>	3.77/2.94	0.07/0.07	13.4/7.34	0.60/0.35	23.8/29.0	59.6/22.3	248/110	12.7/11.0			
	超标率/%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100

1) 参照文献[34], 我国仅对有机肥中的 As、Hg、Pb、Cd 和 Cr 含量进行了限量规定, 未对 Cu、Zn 和 Ni 含量进行限量规定; 2) ND 为未检出(not detected), 下同

表 3 不同种类有机肥中重金属含量、超标率和合格率

有机肥种类	项目	重金属元素										合格率/%	
		As	Hg	Pb	Cd	Cr	Cu	Zn	Ni				
植物源	范围/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	ND~0.83	ND~0.05	0.1~7.96	0.05~0.42	0.52~5.65	4.51~29.9	55.0~197	1.46~14.3				
	均值/中值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.18/0.13	0.01/0.005	0.95/0.35	0.13/0.09	1.70/1.09	6.97/5.34	69.1/59.3	3.32/2.22				100
	超标率/%	0	0	0	0	0							
大豆饼肥( $n=5$ )	范围/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.06~1.40	ND~0.09	0.18~1.94	0.02~0.12	0.58~4.75	4.93~14.7	50~115	2.27~8.24				
	均值/中值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.61/0.27	0.03/0.02	1.15/1.61	0.06/0.06	2.35/1.88	10.4/9.27	74.7/73.4	4.71/3.77				100
	超标率/%	0	0	0	0	0							
其它有机肥( $n=23$ )	范围/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.69~23.9	0.02~5.60	1.68~630	0.17~6.16	7.34~629	7.99~265	38.9~658	5.79~72.3				
	均值/中值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	7.39/3.51	0.46/0.08	44.9/11.8	1.05/0.55	58.7/20.8	50.4/25.2	152/107	21.6/12.6				65.2
	超标率/%	26.1	4.35	8.70	13.0	4.35							
鸡粪肥( $n=43$ )	范围/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	1.03~40.3	0~1.19	2.83~206	0.17~4.74	8.24~247	13~204	80.5~974	8.43~221				
	均值/中值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	5.57/4.41	0.23/0.10	17.9/11.4	0.85/0.58	32.5/23.4	51.9/38.8	346/278	24.0/17.7				90.7
	超标率/%	4.65	0	4.65	4.65	2.33							
牛粪肥( $n=24$ )	范围/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.33~9.83	0.01~0.55	0.88~503	0.11~2.95	1.81~474	11.4~113	49.6~671	1.83~98.9				
	均值/中值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	3.16/1.67	0.11/0.07	35.5/8.89	1.03/0.73	34.8/11	29.5/19.4	172/127	13.4/8.68				91.7
	超标率/%	0	0	8.33	0	4.17							
羊粪肥( $n=24$ )	范围/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.33~24.1	ND~0.46	2.76~48.6	0.04~6.12	1.86~69.2	11.5~151	52.4~703	2.31~25				
	均值/中值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	4.5/3.8	0.09/0.05	13.2/9.59	0.89/0.45	20.2/18.3	30.9/24.6	136/104	12.3/12.0				95.8
	超标率/%	4.17	0	0	4.17	0							
猪粪肥( $n=22$ )	范围/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.55~4.63	ND~0.27	0.86~49.2	0.15~2.26	2.67~52.4	5.31~1024	69.0~1716	3.41~27.2				
	均值/中值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	2.25/2.26	0.07/0.05	9.36/6.97	0.51/0.35	21.2/16.5	193/101	533/410	13.9/14.2				100
	超标率/%	0	0	0	0	0							
其它有机肥( $n=39$ )	范围/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.95~58.7	0.03~1.20	1.93~278	0.02~6.17	4.67~115	5.26~342	18.1~107	2.39~76.9				
	均值/中值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	6.97/3.7	0.16/0.09	24.3/15.9	0.84/0.41	28.5/20.5	69.0/49.8	267/183	20.2/14.9				87.2
	超标率/%	10.3	0	5.13	5.13	0							
动植物混合源类有机肥( $n=17$ )	范围/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.44~8.56	0.01~1.22	1.21~1510	0.21~3.59	2.56~81.0	5.98~201	40.1~677	2.71~27.2				
	均值/中值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	3.75/2.48	0.34/0.18	101/13.9	1.07/0.54	22.8/18.4	48.8/41.8	198/131	12.7/11.6				82.4
	超标率/%	0	0	5.88	11.8	0							
其它类有机肥( $n=11$ )	范围/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	1.39~15.8	0.07~5.01	2.13~89.2	0.06~1.40	5.77~46.8	4.50~163	12.5~1477	4.70~28.9				
	均值/中值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	5.02/4.63	0.92/0.30	23.2/19.5	0.5/0.36	22.0/19.0	35.4/15.6	333/102	14.1/14.1				63.6
	超标率/%	9.09	18.2	9.09	0	0							

其中菜籽饼肥和大豆饼肥合格率均为 100%, As、Hg、Pb、Cd、Cr、Cu、Zn 和 Ni 含量均较低. 猪粪肥的合格率也为 100%, 但 Cu 和 Zn 含量较高. 羊粪肥、牛粪肥和鸡粪肥的合格率在 90% 以上, 羊粪肥主要是 As 和 Cd 超标, 牛粪肥主要是 Pb 和 Cr 超标, 鸡粪肥除 Hg 外其余 4 个元素均有样品超标, 鸡粪肥的 Zn 和 Ni 含量也较高. 其它动物源有机肥和动植物混合源有机肥的合格率在 85% 左右, 主要是 Cd、As 和 Pb 超标. 其它植物源有机肥和其它类有机肥合格率仅有 65% 左右, 其中其它植物源有机肥 5 个元素均有样品超标, 其它类有机肥 Zn 含量较高.

表 4 施用不同种类有机肥后土壤重金属累积速率/ $\mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{a})^{-1}$

Table 4 Accumulation rate of heavy metal in soil due to different kinds of organic fertilizers/ $\mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{a})^{-1}$

有机肥种类	累积速率								
	As	Hg	Pb	Cd	Cr	Cu	Zn	Ni	
植物源	菜籽饼肥	0.13	0.01	0.68	0.09	1.22	4.98	49.3	2.37
	大豆饼肥	0.43	0.02	0.82	0.04	1.68	7.41	53.4	3.36
	均值	0.28	0.02	0.75	0.07	1.45	6.19	51.3	2.87
动物源	鸡粪肥	6.63	0.27	21.3	1.02	38.6	61.8	412	28.6
	牛粪肥	3.76	0.13	42.3	1.22	41.4	35.1	205	15.9
	羊粪肥	5.36	0.11	15.7	1.07	24.1	36.8	162	14.7
	猪粪肥	2.67	0.08	11.1	0.61	25.2	230	635	16.5
	均值	4.61	0.15	22.6	0.98	32.3	90.9	353	18.9

以目前土壤各重金属元素背景值<sup>[38]</sup>为土壤重金属基础含量, 测算了连续施用同一种类有机肥后土壤重金属含量不超过农用地土壤污染风险筛选值<sup>[39]</sup>时的有机肥最大施用年限, 结果显示动物源有机肥的最大施用年限均比植物源有机肥的最大施用

## 2.4 施用不同种类有机肥土壤重金属累积速率和累积风险

土壤重金属累积速率因施用不同种类有机肥而异, 8 个重金属元素土壤累积速率均表现为动物源有机肥较植物源有机肥高, 动物源有机肥各重金属平均累积速率是植物源有机肥平均累积速率的 7 ~ 30 倍(表 4). 4 种动物源有机肥中, 施用鸡粪肥时土壤 As、Hg 和 Ni 的累积速率最高, 施用牛粪肥时土壤 Pb、Cd 和 Cr 的累积速率最高, 施用猪粪肥时土壤 Cu 和 Zn 的累积速率最高, 其中施用猪粪肥时土壤 Cu 累积速率是牛粪和羊粪的 6 倍以上(表 4).

年限少, 其中施用猪粪肥 105 a 即存在土壤 Cu 超标的风险, 施用牛粪肥 115 a 即存在土壤 Cd 超标的风险, 施用羊粪肥 132 a 即存在土壤 Cd 超标的风险, 施用鸡粪肥 138 a 即存在土壤 Cd 超标的风险(表 5).

表 5 不同种类有机肥最大施用年限/a

Table 5 The  $T_{\text{max}}$  values under the input of different kinds of organic fertilizers/a

有机肥种类	最大施用年限								
	As	Hg	Pb	Cd	Cr	Cu	Zn	Ni	
植物源	菜籽饼肥	231 518	182 981	58 881	1 510	69 517	4 867	2 519	12 347
	大豆饼肥	70 207	46 395	48 780	3 283	50 310	3 269	2 329	8 708
动物源	鸡粪肥	4 602	4 206	1 876	138	2 189	392	302	1 026
	牛粪肥	8 117	8 943	946	115	2 043	690	607	1 841
	羊粪肥	5 692	10 352	2 543	132	3 516	658	768	1 997
	猪粪肥	11 417	13 419	3 589	231	3 357	105	196	1 770

## 3 讨论

### 3.1 有机肥重金属含量变化

我国自 2011 年修订有机肥料标准(NY 525)时增加了重金属(总 As、总 Hg、总 Pb、总 Cd 和总 Cr)限量标准后, 在 2012 年和 2021 年修订的版本中均沿用了这 5 个参数及其限量值. 与标准制定前的 2009 年调查结果相比<sup>[22]</sup>, 标准制定后的 2014 年有机肥 As 超标率明显降低(由 13.6% 降低为 2.38%)<sup>[23]</sup>, 但 Cr 超标率有所增加(由 4.24% 升高为 12.7%)<sup>[23]</sup>. 本次调查的有机肥 As、Hg、Pb、Cd

和 Cr 超标率分别为 6.19%、1.33%、4.42%、4.42% 和 1.33%(表 1), As 超标率较 2014 年有所回升<sup>[23]</sup>, Cr 超标率较 2014 年有所下降<sup>[23]</sup>, Hg、Pb 和 Cd 的超标率与 2009 年<sup>[22]</sup> 和 2014 年<sup>[23]</sup> 的调查结果基本接近.

与德国和欧盟生态标准相比, 我国对 Cd、Hg、As 和 Cr 的标准要求较低, 对 Pb 的要求比德国和欧盟严格 2 ~ 3 倍<sup>[39]</sup>. 在我国现行标准下, 本次调查有机肥 Cd 的超标率较之前的调查结果并未有增加<sup>[22, 23]</sup>, 但  $\omega(\text{Cd})$  在 1 ~ 3  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间的样品比例由 2009 年<sup>[22]</sup> 的 6.62% 提高到 15.9%(图 1). 如参

照德国和欧盟有机肥 Cd 标准( $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下)<sup>[39]</sup>,  $\omega(\text{Cd})$  在  $1 \sim 3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间的样品均属于不合格样品. 本次调查的有机肥中 Hg 含量也表现出一样特点, 即  $\omega(\text{Hg})$  在  $1 \sim 2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的样品也由 2009 年<sup>[22]</sup> 的 0 增加到 3.10% (图 1), 如按照德国和欧盟有机肥 Hg 标准( $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下)<sup>[39]</sup> 这些有机肥也不合格. 尽管按照我国现行的有机肥重金属标准这些样品并未超标, 但这部分样品数量有所增加的问题应引起重视.

当前我国尚未对有机肥中的 Cu、Zn 和 Ni 含量实施限制标准, 但参照欧盟和德国堆肥的限制标准 [ $\omega(\text{Cu})$  为  $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\omega(\text{Zn})$  为  $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $\omega(\text{Ni})$  为  $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]<sup>[39]</sup>, 本次调查的茶园有机肥 Cu 和 Zn 超标率分别有 12.8% 和 25.7%, 且含量超过标准 2 倍的样品比例分别达到了 6.19% 和 11.1%, 只有 Ni 超标率相对较低(为 3.08%, 图 1). 有研究表明, 长期施用有机肥会导致作物和土壤中的 Cu 和 Zn 含量超标<sup>[40~42]</sup>, 并有向土壤深层迁移现象出现<sup>[43]</sup>, 因此有必要加强对有机肥中 Cu、Ni 和 Zn 含量的关注, 探讨增加有机肥料标准中 Cu、Ni 和 Zn 限量标准的必要性.

### 3.2 不同种类有机肥重金属含量差异和施用风险比较

本次调查结果显示, 不同原料生产的有机肥其重金属含量存在较大差异(表 3). 魏益华等<sup>[44]</sup> 和刘兰英等<sup>[45]</sup> 的研究表明动物性有机肥其重金属含量比植物性有机肥高, 而赵文等<sup>[28]</sup> 和沈月等<sup>[30]</sup> 的调查显示植物源的有机肥重金属超标率并不比动物源有机肥的低. 本研究将植物源有机肥进行了细分后发现以菜籽饼和大豆饼为原料生产的有机肥 8 个重金属的含量整体均较低, 而以食品及饮料加工有机废弃物和其它植物成分为来源制作的其它植物类有机肥 As、Hg、Pb、Cd 和 Cr 均超标, 合格率低于动物源有机肥(表 3). 由于有机肥料中的这些常见重金属元素来源复杂, 要保证有机肥料产品质量安全, 首先需要了解其中重金属元素的可能来源. 已有研究表明<sup>[26,46~48]</sup>, 动物源有机肥料中的重金属通常可能通过饲料添加剂的方式进入有机肥原料畜禽粪中从而对有机肥料产生污染, 这可能是导致动物源有机肥重金属超标率较菜籽饼肥和大豆饼肥高的主要原因. 本研究结果表明植物源有机肥, 如以食品及饮料加工有机废弃物和其它植物成分为来源制作的有机肥也可能通过食品及饮料加工过程或者通过其他途径使重金属进入有机肥, 从而降低有机肥产品合格率.

有机肥中的重金属会经施肥向土壤和作物转

移<sup>[16,49]</sup>, 不同施肥措施下土壤对重金属的最高承载年限是有限的<sup>[50,51]</sup>, 由于不同种类有机肥施用后各类重金属在土壤中的累积速率存在差异<sup>[24]</sup>, 导致有机肥施用安全年限因有机肥种类而异<sup>[44,52]</sup>. 本研究结果显示, 茶园不同种类有机肥施用后土壤重金属的累积速率存在较大差异(表 4), 不同种类有机肥的最大施用年限差异可达 60 倍以上(表 5). 有研究表明肥料中的重金属是茶叶重金属的主要来源之一<sup>[53]</sup>, 为降低土壤和茶叶重金属风险, 茶园施用有机肥应首选菜籽饼肥和大豆饼肥.

## 4 结论

(1) 我国茶叶主产区有机肥 As、Hg、Pb、Cd 和 Cr 超标率为 1.33%~6.19%, 其中 As 的超标率最高. 有机肥整体合格率为 87.6%, 陕西、江苏、安徽、福建和广西省采集的有机肥 100% 合格, 江西采集的有机肥合格率仅有 54.5%. 不同种类有机肥合格率大小为: 菜籽饼肥、大豆饼肥和猪粪肥 > 羊粪肥 > 牛粪肥 > 鸡粪肥 > 其它动物类有机肥 > 动植物混合源类有机肥 > 其它植物类有机肥 > 其它类有机肥.

(2) 施用动物源有机肥土壤重金属累积速率远超施用植物源有机肥的累积速率. 从重金属风险考虑, 茶园施用有机肥应首选菜籽饼肥和大豆饼肥. 选用鸡粪肥、牛粪肥和羊粪肥时, 应注重土壤中 Cd 风险监控. 施用猪粪肥时, 除加强土壤中 Cd 的风险监控外, 还应加强 Cu 的风险监控.

### 参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [2] Ruan J, Haerdter R, Gerendás J. Impact of nitrogen supply on carbon/nitrogen allocation: A case study on amino acids and catechins in green tea [*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze] plants[J]. *Plant Biology*, 2010, **12**(5): 724-734.
- [3] Lin Z H, Qi Y P, Chen R B, et al. Effects of phosphorus supply on the quality of green tea[J]. *Food Chemistry*, 2012, **130**(4): 908-914.
- [4] Ruan J Y, Ma L F, Shi Y Z. Potassium management in tea plantations: Its uptake by field plants, status in soils, and efficacy on yields and quality of teas in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2013, **176**(3): 450-459.
- [5] 潘晓东, 李品, 冯兆忠, 等. 2000~2015 年中国地级市化肥使用量的时空变化特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(10): 4733-4742.
- [6] Pan X D, Li P, Feng Z Z, et al. Spatial and temporal variations in fertilizer use across prefecture-level cities in China from 2000 to 2015[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(10): 4733-4742.
- [7] 张厅, 刘晓, 唐晓波, 等. 四川茶园施肥现状与措施分析[J]. *四川农业科技*, 2021, (9): 39-40.
- [8] 钱晓华, 廖万友, 胡荣根, 等. 安徽省茶园施肥现状与对策分析[J]. *茶业通报*, 2015, **37**(3): 108-113.

- [ 8 ] 倪康, 廖万有, 伊晓云, 等. 我国茶园施肥现状与减施潜力分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, **25**(3): 421-432.  
Ni K, Liao W Y, Yi X Y, *et al.* Fertilization status and reduction potential in tea gardens of China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, **25**(3): 421-432.
- [ 9 ] 董尚胜, 骆耀平, 吴俊杰, 等. 遮荫、有机肥对夏茶叶片内醇系香气生成的影响[J]. 茶叶科学, 2000, **20**(2): 133-136.  
Dong S S, Luo Y P, Wu J J, *et al.* Effect of shading and organic fertilizer on the alcoholic aroma production in summer tea leaves [J]. Journal of Tea Science, 2000, **20**(2): 133-136.
- [ 10 ] 颜明娟, 林琼, 吴一群, 等. 不同施氮措施对茶叶品质及茶园土壤环境的影响[J]. 生态环境学报, 2014, **23**(3): 452-456.  
Yan M J, Lin Q, Wu Y Q, *et al.* Effects of different nitrogen fertilization treatments on soil condition of tea garden and tea quality [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, **23**(3): 452-456.
- [ 11 ] 任全, 单武雄, 肖润林, 等. 不同施肥措施对红壤丘陵茶园土壤酶活性及呼吸强度的影响[J]. 农业现代化研究, 2007, **28**(4): 498-500.  
Ren Q, Shan W X, Xiao R L, *et al.* Impact of fertilizers on soil enzyme activity and intensity of breathing of tea plantation in red-soil hilly region [J]. Research of Agricultural Modernization, 2007, **28**(4): 498-500.
- [ 12 ] 李萍萍, 林永锋, 胡永光. 有机肥与化肥配施对茶叶生长和土壤养分的影响[J]. 农业机械学报, 2015, **46**(2): 64-69.  
Li P P, Lin Y F, Hu Y G. Effects of compound application of organic and chemical fertilizers on growth, quality of tea plants and soil nutrient [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, **46**(2): 64-69.
- [ 13 ] 安思羽, 李艳霞, 张雪莲, 等. 我国果菜茶中畜禽粪便有机肥替代化肥潜力[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(8): 1712-1722.  
An S Y, Li Y X, Zhang X L, *et al.* Potential of animal manure in replacing chemical fertilizers for fruit, vegetable, and tea production in China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(8): 1712-1722.
- [ 14 ] 农业农村部公报. 农业部关于印发《开展果菜茶有机肥替代化肥行动方案》的通知[EB/OL]. [http://www.moa.gov.cn/nybg/2017/derq/201712/t20171227\\_6130977.htm](http://www.moa.gov.cn/nybg/2017/derq/201712/t20171227_6130977.htm), 2017-02-20.
- [ 15 ] 吕健飞, 王建华, 俞巧钢, 等. 基于有机替代的茶园土壤肥力和环境质量分析[J]. 浙江农业科学, 2021, **62**(9): 1716-1720.
- [ 16 ] Yu X, Chen G Z, Zhang X X, *et al.* Migration and accumulation of heavy metals in a chicken manure-compost-soil-apple system [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2021, **30**(4): 3877-3883.
- [ 17 ] Zhao Y C, Yan Z B, Qin J H, *et al.* Effects of long-term cattle manure application on soil properties and soil heavy metals in corn seed production in Northwest China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, **21**(12): 7586-7595.
- [ 18 ] Qaswar M, Liu Y R, Huang J, *et al.* Soil nutrients and heavy metal availability under long-term combined application of swine manure and synthetic fertilizers in acidic paddy soil [J]. Journal of Soils and Sediments, 2020, **20**(4): 2093-2106.
- [ 19 ] Hussain B, Li J M, Ma Y B, *et al.* A field evidence of Cd, Zn and Cu accumulation in soil and rice grains after long-term (27 Years) application of swine and green manures in a paddy soil [J]. Sustainability, 2021, **13**(4), doi: 10.3390/su13042404.
- [ 20 ] 刘荣乐, 李书田, 王秀斌, 等. 我国商品有机肥料和有机废弃物中重金属的含量状况与分析[J]. 农业环境科学学报, 2005, **24**(2): 392-397.  
Liu R L, Li S T, Wang X B, *et al.* Contents of heavy metal in commercial organic fertilizers and organic wastes [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2005, **24**(2): 392-397.
- [ 21 ] Qian X Y, Shen G X, Wang Z Q, *et al.* Application of dairy manure as fertilizer in dry land in East China: field monitoring and model estimation of heavy metal accumulation in surface soil [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, **27**(29): 36913-36919.
- [ 22 ] 程旭艳, 王定美, 乔玉辉, 等. 中国商品有机肥重金属分析[J]. 环境污染与防治, 2012, **34**(2): 72-76.  
Cheng X Y, Wang D M, Qiao Y H, *et al.* Analyze on the heavy metals content in China commodity organic fertilizer [J]. Environmental Pollution and Control, 2012, **34**(2): 72-76.
- [ 23 ] 黄绍文, 唐继伟, 李春花. 我国商品有机肥和有机废弃物中重金属、养分和盐分状况[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, **23**(1): 162-173.  
Huang S W, Tang J W, Li C H. Status of heavy metals, nutrients, and total salts in commercial organic fertilizers and organic wastes in China [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, **23**(1): 162-173.
- [ 24 ] 穆虹宇, 庄重, 李彦明, 等. 我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(2): 986-996.  
Mu H Y, Zhuang Z, Li Y M, *et al.* Heavy metal contents in animal manure in China and the related soil accumulation risks [J]. Environmental Science, 2020, **41**(2): 986-996.
- [ 25 ] 梁金凤, 齐庆振, 贾小红, 等. 京郊有机肥料的质量状况分析[J]. 中国土壤与肥料, 2009, (6): 79-83.  
Liang J F, Ji Q Z, Jia X H, *et al.* Investigation of quality in organic fertilizers in Beijing Suburb [J]. Soil and Fertilizers Sciences in China, 2009, (6): 79-83.
- [ 26 ] 王飞, 赵立欣, 沈玉君, 等. 华北地区畜禽粪便有机肥中重金属含量及溯源分析[J]. 农业工程学报, 2013, **29**(19): 202-208.  
Wang F, Zhao L X, Shen Y J, *et al.* Analysis of heavy metal contents and source tracing in organic fertilizer from livestock manure in North China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, **29**(19): 202-208.
- [ 27 ] 周博, 朱振国, 周建斌, 等. 杨凌地区不同畜禽有机肥养分及重金属含量研究[J]. 土壤通报, 2013, **44**(3): 714-718.  
Zhou B, Zhu Z G, Zhou J B, *et al.* Contents of nutrients and heavy metals in the different livestock and poultry manure [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, **44**(3): 714-718.
- [ 28 ] 赵文, 潘运舟, 兰天, 等. 海南商品有机肥中重金属和抗生素含量状况与分析[J]. 环境化学, 2017, **36**(2): 408-419.  
Zhao W, Pan Y Z, Lan T, *et al.* Analysis of heavy metals and antibiotics content in Hainan commercial organic fertilizers [J]. Environmental Chemistry, 2017, **36**(2): 408-419.
- [ 29 ] 李发, 徐应明, 王林, 等. 黄淮海地区鸡粪有机肥重金属含量特征及环境风险[J]. 环境科学, 2018, **39**(9): 4375-4384.  
Li F, Xu Y M, Wang L, *et al.* Characteristics of heavy metals in chicken manure organic fertilizers in the Huang-Huai-Hai region and related environmental risk assessment [J]. Environmental Science, 2018, **39**(9): 4375-4384.
- [ 30 ] 沈月, 麻万诸, 邓勋飞, 等. 浙江省商品有机肥中主要质量指标含量的时空变异[J]. 浙江农业学报, 2019, **31**(12): 2073-2083.

- Shen Y, Ma W Z, Deng X F, *et al.* Spatio-temporal characteristics of ingredients contents of organic fertilizers in Zhejiang[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2019, **31**(12): 2073-2083.
- [31] 孙玉桃, 黄凤球, 杨茜, 等. 湖南省商品有机肥料质量与重金属污染程度分析[J]. *中国土壤与肥料*, 2020, (3): 176-181.
- Sun Y T, Huang F Q, Yang Q, *et al.* Analysis of commercial organic fertilizer quality and degree of heavy metal contamination of soil by adding commercial organic fertilizer in Hunan province [J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2020, (3): 176-181.
- [32] 叶雪珠, 肖文丹, 赵首萍, 等. 浙江省商品有机肥中重金属含量变化趋势及风险管控对策[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, **26**(5): 954-965.
- Ye X Z, Xiao W D, Zhao S P, *et al.* Variations of heavy metal contents and the risk management of commercial organic fertilizers in Zhejiang province [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, **26**(5): 954-965.
- [33] GB/T 24875-2010, 畜禽粪便中铅、镉、铬、汞的测定 电感耦合等离子体质谱法[S].
- [34] NY/T 525-2021, 有机肥料[S].
- [35] T/CTSS 8-2020, 茶园有机肥施用技术规程[S].
- [36] GB 15618-2018, 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].
- [37] 张小敏, 张秀英, 钟太洋, 等. 中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(2): 692-703.
- Zhang X M, Zhang X Y, Zhong T Y, *et al.* Spatial distribution and accumulation of heavy metal in arable land soil of China[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(2): 692-703.
- [38] 宋伟, 陈百明, 刘琳. 中国耕地土壤重金属污染概况[J]. *水土保持研究*, 2013, **20**(2): 293-298.
- Song W, Chen B M, Liu L. Soil heavy metal pollution of cultivated land in China [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, **20**(2): 293-298.
- [39] 沈玉君, 李冉, 孟海波, 等. 国内外堆肥标准分析及对中国的借鉴启示[J]. *农业工程学报*, 2019, **35**(12): 265-271.
- Shen Y J, Li R, Meng H B, *et al.* Analysis of composting standards at home and abroad and its enlightenment to China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, **35**(12): 265-271.
- [40] Zhang F S, Li Y X, Yang M, *et al.* Copper residue in animal manures and the potential pollution risk in northeast China[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2011, **2**(1): 93-98.
- [41] 茹淑华, 徐万强, 侯利敏, 等. 连续施用有机肥后重金属在土壤-作物系统中的积累与迁移特征[J]. *生态环境学报*, 2019, **28**(10): 2070-2078.
- Ru S H, Xu W Q, Hou L M, *et al.* Effects of continuous application of organic fertilizer on the accumulation and migration of heavy metals in soil-crop systems [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, **28**(10): 2070-2078.
- [42] Brock E H, Ketterings Q M, McBride M B. Copper and zinc accumulation in poultry and dairy manure-amended fields[J]. *Soil Science*, 2006, **171**(5): 388-399.
- [43] 何梦媛, 董同喜, 茹淑华, 等. 畜禽粪便有机肥中重金属在土壤剖面中积累迁移特征及生物有效性差异[J]. *环境科学*, 2017, **38**(4): 1576-1586.
- He M Y, Dong T X, Ru S H, *et al.* Accumulation and migration characteristics in soil profiles and bioavailability of heavy metals from livestock manure [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(4): 1576-1586.
- [44] 魏益华, 邱素艳, 张金艳, 等. 农业废弃物中重金属含量特征及农用风险评估[J]. *农业工程学报*, 2019, **35**(14): 212-220.
- Wei Y H, Qiu S Y, Zhang J Y, *et al.* Characteristic of heavy metal contents in agricultural wastes and agricultural risk assessment [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, **35**(14): 212-220.
- [45] 刘兰英, 何肖云, 黄薇, 等. 福建省有机肥中养分和重金属含量特征[J]. *福建农业学报*, 2020, **35**(6): 640-648.
- Liu L Y, He X Y, Huang W, *et al.* Nutrient and heavy metal contents in organic fertilizers produced in Fujian [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2020, **35**(6): 640-648.
- [46] 陈林华, 倪吾钟, 李雪莲, 等. 常用肥料重金属含量的调查分析[J]. *浙江理工大学学报*, 2009, **26**(2): 223-227.
- Chen L H, Ni W Z, Li X L, *et al.* Investigation of heavy metal concentrations in commercial fertilizers commonly-used [J]. *Journal of Zhejiang Sci-Tech University*, 2009, **26**(2): 223-227.
- [47] 杨阳, 刘月敏, 王晗阳, 等. 河南省有机肥重金属含量特征及溯源分析[J]. *天津城建大学学报*, 2021, **27**(2): 130-136.
- Yang Y, Liu Y M, Wang H Y, *et al.* Analysis of characteristics and source identification of heavy metals in organic fertilizers in Henan province [J]. *Journal of Tianjin Chengjian University*, 2021, **27**(2): 130-136.
- [48] 潘寻, 韩哲, 贾伟伟. 山东省规模化猪场猪粪及配合饲料中重金属含量研究[J]. *农业环境科学学报*, 2013, **32**(1): 160-165.
- Pan X, Han Z, Ben W W. Heavy metal contents in pig manure and pig feeds from intensive pig farms in Shandong province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, **32**(1): 160-165.
- [49] Li J, Xu Y, Wang L Q, *et al.* Heavy metal occurrence and risk assessment in dairy feeds and manures from the typical intensive dairy farms in China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(7): 6348-6358.
- [50] 王成贤, 石德智, 沈超峰, 等. 畜禽粪便污染负荷及风险评估--以杭州市为例[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(11): 2562-2569.
- Wang C X, Shi D Z, Shen C F, *et al.* Pollution load and risk assessment of livestock manure: A case study in Hangzhou [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(11): 2562-2569.
- [51] 任玉琴, 黄娟, 饶凤琴, 等. 浙江省重点地区猪粪中重金属含量及安全施用评估[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, **24**(3): 703-711.
- Wang Y Q, Huang J, Rao F Q, *et al.* Heavy metal contents in swine feces from key areas of Zhejiang Province and their risk evaluation for soil application[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, **24**(3): 703-711.
- [52] 王美, 李书田. 肥料重金属含量状况及施肥对土壤和作物重金属富集的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, **20**(2): 466-480.
- Wang M, Li S T. Heavy metals in fertilizers and effect of the fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, **20**(2): 466-480.
- [53] 袁自春, 杨普, 彭邦发, 等. 中国茶叶品质危害因素分析及对策研究进展[J]. *食品科学*, 2013, **34**(5): 297-302.
- Yuan Z C, Yang P, Peng B F, *et al.* Research progress on hazards analysis of Chinese tea quality and countermeasures [J]. *Food Science*, 2013, **34**(5): 297-302.

## CONTENTS

Regionalization and Analysis of PM <sub>2.5</sub> and O <sub>3</sub> Synergetic Prevention and Control Areas Based on Remote Sensing Data .....	LI Shen-xin, ZOU Bin, ZHANG Feng-ying, <i>et al.</i> (4293)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in Guangzhou in Winter .....	PEI Cheng-lei, XIE Yu-tong, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4305)
Establishment and Application of Foshan Ozone Concentration Forecast Equation .....	CHEN Chen, HONG Ying-ying, TAN Hao-bo, <i>et al.</i> (4316)
Establishment of High-Resolution Emissions Inventory in Wuhan and Its Application in Exploring the Causes of Ozone Pollution .....	ZHANG Rui-xin, CHU Bo, SHANG Chun-lin, <i>et al.</i> (4327)
Investigating the Pollutants of Marine Shipping Emissions Along the East China Sea by Combining in-situ Measurements and Automatic Identification System .....	..... QIU Hao, LIU Dan-tong, WU Yang-zhou, <i>et al.</i> (4338)
Chemical Component of Particulate Matters and VOCs Characteristics During Vehicle Brake Processes .....	MEN Zheng-yu, LIU Du-you, GUO Quan-you, <i>et al.</i> (4348)
Characterization of VOCs Emissions from Caged Broiler House in Winter .....	CAO Tian-tian, ZHENG Yun-hao, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (4357)
Concentrations and Community Structures of Culturable Bacteria in Aerosols of Household Garbage Stations in Shanghai .....	LU Bing-jie, ZHANG Xiang, WANG Chuan, <i>et al.</i> (4367)
Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emissions in Zhejiang Province from 2008 to 2018 .....	FANG Li-jiang, YANG Yi-qun, YE Guan-qiong (4380)
Roadmap of Coal Control and Carbon Reduction in the Steel Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target .....	XUE Ying-lan, ZHANG Jing, LIU Yu, <i>et al.</i> (4392)
Carbon Emission Reduction Effect of Spatial Correlation Network Structure Characteristics: From the Perspective of Urban Agglomeration .....	ZHENG Hang, YE A-zhong (4401)
Pollution and Carbon Reduction Effect of OFDI in China and Its Mechanism .....	BAI Zi-han, LÜ Lian-hong, ZHAO Ming-xuan, <i>et al.</i> (4408)
Variation Characteristics of Surface Water Quality in China in Recent Years .....	JI Xiao-yan, HOU Huan-huan, WANG Shan-shan, <i>et al.</i> (4419)
Distribution, Risk, and Influencing Factors of Microplastics in Surface Water of Huangshui River Basin .....	FAN Meng-yuan, HUANG Yi-mei, ZHANG Hai-xin, <i>et al.</i> (4430)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Surface Water of the Fenhe River Basin and Influence Factors .....	ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, WANG Zhi-heng, <i>et al.</i> (4440)
Characteristics and Causes of High-manganese Groundwater in Pearl River Delta During Urbanization .....	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (4449)
Characteristics and Causes of Groundwater Salinization in the Plain Area of the Lower Kashgar River .....	LU Han, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (4459)
Sources and Biogeochemical Processes of Nitrate in the Laolongdong Karst Underground River Basin, Chongqing .....	WANG Yu-yang, YANG Ping-heng, ZHANG Jie-ru (4470)
Succession Pattern and Consequences of the Dominant Species During Cyanobacterial Bloom and Its Influencing Factors .....	OUYANG Tian, ZHAO Lu, JI Lu-lu, <i>et al.</i> (4480)
Structural Characteristics of Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Group of Drinking Water Reservoirs by Water Transmission from Modaomen Waterway in Zhuhai .....	ZHANG Mo-li, WANG En-rui, CHANG Sheng, <i>et al.</i> (4489)
Effects of Nutrients on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i> and Bacteria in the Phycosphere .....	LÜ Ping, LI Hui-li, XU Yong, <i>et al.</i> (4502)
Effect of Aging on Adsorption of Tetracycline by Microplastics and the Mechanisms .....	WANG Lin, WANG Shu-xin, ZENG Xiang-ying, <i>et al.</i> (4511)
Effect of Colloids in Sediment and Soil on Their Sorption Behavior of Chloramphenicol .....	YAN Cai-xia, LUO Yan-qing, NIE Ming-hua, <i>et al.</i> (4522)
Historical Antibiotic Stress Changed the Effects of Sulfamethoxazole and Trimethoprim on Activated Sludge; ARGs and Potential Hosts .....	..... ZHANG Zhong-xing, FAN Xiao-yan, LI Xing, <i>et al.</i> (4536)
Spatial Distribution and Sources of Heavy Metals in Soil of a Typical Lead-Zinc Mining Area, Yangshuo .....	CHEN Meng, PAN Yong-xing, HUANG Yi-xiang, <i>et al.</i> (4545)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Baiyangdian Lake .....	ZHENG Fei, GUO Xin, TANG Ming-yang, <i>et al.</i> (4556)
Spatial Differentiation and Influencing Factor Analysis of Soil Heavy Metal Content at Town Level Based on Geographic Detector .....	GONG Cang, WANG Liang, WANG Shun-xiang, <i>et al.</i> (4566)
Heavy Metal Emissions from Coal-fired Power Plants and Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risks in Surrounding Soils .....	..... CHE Kai, CHEN Chong-ming, ZHENG Qing-yu, <i>et al.</i> (4578)
Enrichment Factors, Health Risk, and Source Identification of Heavy Metals in Agricultural Soils in Semi-arid Region of Hainan Island .....	..... YANG Jian-zhou, GONG Jing-jing, WANG Zhen-liang, <i>et al.</i> (4590)
Speciation and Pollution Assessment of Heavy Metals in Mangrove Surface Sediments in Jiulong River Estuary .....	ZHANG Hua-lan, YU Rui-lian, WAN Rui-an, <i>et al.</i> (4601)
Status of Heavy Metal in Organic Fertilizers in Main Tea Growing Regions of China .....	YI Xiao-yun, FANG Li, YANG Xiang-de, <i>et al.</i> (4613)
Accumulation Characteristics and Sources of PAEs in Agricultural Soils in Gansu Province .....	CHEN Yu-yu, ZHANG Guang-quan, ZHANG Yang, <i>et al.</i> (4622)
Distribution Characteristics of Soil Phosphorus Forms and Phosphatase Activity at Different Altitudes in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone in Pengxi River, Three Gorges Reservoir .....	..... GAO Yi-lun, FANG Fang, TANG Zi-chao, <i>et al.</i> (4630)
Characteristics of Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Other Soil Physical and Chemical Factors in Cotton Fields with Different Continuous Cropping Years in the Oasis on the Northern Edge of Tarim Basin .....	LI Xin-zhu, GONG Lu, TANG Jun-hu, <i>et al.</i> (4639)
Response of Soil Respiration Rates to Soil Temperature and Moisture at Different Soil Depths of <i>Caragana korshinskii</i> Plantation in the Loess-Hilly Region .....	..... SUN Ya-rong, WANG Ya-juan, ZHAO Min, <i>et al.</i> (4648)
Influence of Biochar Application on Soil Nitrate Leaching and Phosphate Retention: A Synthetic Meta-analysis .....	JIANG Zhi-xiang, CUI Shuang, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4658)
Role and Mechanism of Low Molecular-Weight-Organic Acids in Enhanced Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soil .....	FANG Zhi-guo, XIE Jun-ting, YANG Qing, <i>et al.</i> (4669)
Remediation Effect and Mechanism of Inorganic Passivators on Cadmium Contaminated Acidic Paddy Soil .....	ZHANG Jian, KONG Fan-yi, LU Sheng-gao (4679)
Mechanism of Lead-zinc Enrichment and Resistance of Spent Mushroom Compost to Lead-Zinc Slag in <i>Koeleruteria paniculata</i> .....	XIE Tian-zhi, CHEN Yong-hua, SU Rong-kui, <i>et al.</i> (4687)
Phosphorus Enrichment Efficiency of CaO <sub>2</sub> @FA Composites and the Effect of Its Recovered Material on Soil Improvement .....	YUE Wei, LI Da-peng, WU Ling-yu, <i>et al.</i> (4697)
Effects of Early Rice Straw Returning with Reducing Potassium Fertilizer on Late Rice Yield and Soil Fertility .....	HUANG Qiao-yi, HUANG Jian-feng, HUANG Xu, <i>et al.</i> (4706)
Effects of Continuous Straw Returning with Chemical Fertilizer on the Carbon Pool and Crop Yield of Rice-Rape Rotation Soils .....	CAI Ying, FU Si-wei, ZHANG Bo-rui, <i>et al.</i> (4716)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Combined with Straw Application on Diazotrophic Communities in a Double Rice Cropping System .....	..... CHEN Kai-peng, WEI Ju-xian, CHEN Dan, <i>et al.</i> (4725)
Impacts of Co-application of Chemical Fertilizer Reduction and Organic Material Amendment on Fluvo-aquic Soil Microbial N-cycling Functional Gene Abundances and N-converting Genetic Potentials in Northern China .....	LI Sheng-jun, HU He, LI Gang, <i>et al.</i> (4735)
Response Characteristics of Soil Microbial Community Under Long-term Film Mulching .....	HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, DING Ji-na, <i>et al.</i> (4745)
Effects of Long-term Straw Returning on Fungal Community, Enzyme Activity and Wheat Yield in Fluvo-aquic Soil .....	MA Lei, LI Yan, WEI Jian-lin, <i>et al.</i> (4755)
Effects of Soil Amendments on the Bacterial Diversity and Abundances of Pathogens and Antibiotic Resistance Genes in Rhizosphere Soil Under Drip Irrigation with Reclaimed Water .....	..... CUI Bing-jian, CUI Er-ping, LIU Chun-cheng, <i>et al.</i> (4765)
Effect of Nitrogen on the Phytoremediation of Cd-PAHs Co-contaminated Dumpsite Soil by Alfalfa ( <i>Medicago sativa</i> L.) and on the Soil Bacterial Community Structure .....	..... LI Yi-jia, MA Jun-wei, LI Yu-qian, <i>et al.</i> (4779)
Effect of Antibiotic-Degrading Bacteria on Maturity and Bacterial Community Succession During Pig Manure Composting .....	LI Wei-lin, ZHANG Xin, MA Jun-wei, <i>et al.</i> (4789)