

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带PM_{2.5}空间异质性和驱动因素的地理探测

王丽丽, 刘笑杰, 李丁, 孙颖琦



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年3月

第43卷 第3期
Vol.43 No.3

目次

2000~2020年天津PM _{2.5} 质量浓度演变及驱动因子分析	蔡子颖,郝国,韩素芹,唐颖潇,杨旭,樊文雁,姚青,邱晓滨(1129)
天津市PM _{2.5} -O ₃ 复合污染特征及来源分析	肖致美,徐虹,高璟,蔡子颖,毕温凯,李鹏,杨宁,邓小文,戴运峰(1140)
基于随机森林模型的武汉市城区大气PM _{2.5} 来源解析	张志豪,陈楠,祝波,陶卉婷,成海容(1151)
华北南部重污染城市周边区域二次气溶胶的化学特征及来源解析	任秀龙,胡伟,吴春苗,胡偲豪,高娜娜,张崇崇,岳亮,王金喜,樊景森,牛红亚(1159)
“大气十条”实施结束川南城市群秋季霾污染过程中水溶性离子特征	吴安南,黄小娟,何仁江,李金建,叶林麟,吴涛,肖智丹,刘子锐,王跃思,张小玲,张军科(1170)
郑州市典型污染过程PM ₁₀ 中重金属浓度、来源及健康风险评估	翟诗婷,王申博,张栋,赵孝因,杨洁茹,刘洋,陈红阳,张瑞芹(1180)
长江经济带PM _{2.5} 空间异质性和驱动因素的地理探测	王丽丽,刘笑杰,李丁,孙颖琦(1190)
长三角地区PM _{2.5} 浓度对土地利用/覆盖转换的空间异质性响应	周丽霞,吴涛,蒋国俊,张建珍,濮励杰,徐飞,解雪峰(1201)
“2+26”城市春节和元宵节期间污染特征、气象影响和预报回顾分析	朱媛媛,王晓斐,汪巍,刀语,王帅,陈善荣(1212)
基于小波变换的山西省PM _{2.5} 污染特征及影响因素	张可可,胡冬梅,闫雨龙,彭林,段小琳,尹浩,王凯,邓萌杰(1226)
中国地表臭氧浓度估算及健康影响评估	赵楠,卢毅敏(1235)
湖南省臭氧污染基本特征分析及长期趋势变化主控因素识别	刘妍妍,杨雷峰,谢丹平,泽仁央宗,黄志烟,杨俊,赵鹏,韩静磊,贾文超,袁自冰(1246)
山东半岛近地面O ₃ 浓度时空变化及潜在源区解析	李乐,刘旻霞,肖仕锐,王思远,米佳乐(1256)
COVID-19疫情期间雄安新区VOCs的变化特征、臭氧生成潜势及来源解析	刘新军,王淑娟,刘程,范莉茹,付翠轻,齐堃,宿文康(1268)
淄博市城区臭氧超标期间的VOCs污染特征与来源解析	王帅,王秀艳,杨文,王雨燕,白瑾丰,程颖(1277)
淄博市夏季城区与背景点VOCs污染特征比较	秦涛,徐勃,王信梧,李丽明,杨文,王晓丽,耿春梅(1286)
四川省餐饮源挥发性有机物组分特征和清单	钱骏,韩丽,陈军辉,王斌,姜涛,徐晨曦,李英杰,王成辉,王波(1296)
餐饮源气相与颗粒相多环芳烃排放特征	李源速,吴爱华,童梦雪,栾胜基,李骞(1307)
堆肥厂不同工作区空气真菌的多样性与群落结构	于奥园,邢礼军,孙兴滨,仇天雷,王旭明,高敏(1315)
城市扬尘污染主要成因与精准治尘思路	李廷昆,冯银厂,毕晓辉,张裕芬,吴建会(1323)
黄河干流水质评价与时空变化分析	刘彦龙,郑易安(1332)
典型山地城市河流营养元素空间分布特征及影响因素分析:以重庆市清水溪为例	王超,叶秋,贾伯阳,何文战,党超军,黄焱,杜浪(1346)
三峡库区支流的河-湖两态及其对沉积物不同形态磷含量的影响	黄伟,张研,罗晓佼,张磊(1356)
派河及其支流溶解性有机质分子组成特征	詹亚,尹浩,冯景伟,冯艾荣,胡艳云,张刘,郑刘根(1365)
粤港澳大湾区典型潮间带环境多介质中Cd形态空间分布特征及其影响因素	崔新月,莫武秋,廖建波(1375)
骆马湖及主要入湖河流表层水体中抗生素的赋存特征及风险评价	龚润强,赵华璋,高占欣,胡冠九,卜元卿,张圣虎,邱慧(1384)
宁夏第三排水沟中抗生素的污染特征与生态风险评估	李富娟,高礼,李凌云,郑兰香,陶红,杨桂钦(1394)
百年以来北方湖泊沉积物PAHs的变化特征及其对人类活动的响应	龚雄虎,赵中华,丁琪琪,张路,姚书春,薛滨(1404)
长江流域河流和湖库的浮游细菌群落差异	胡愈忻,张静,黄杰,段春建,李天翠,刘威,王英才,胡圣(1414)
河套平原灌溉间隙期乌梁素海水体细菌群落结构特征	史玉娇,李文宝,张博尧,姚国旺,史小红(1424)
不同空间尺度的景观结构对袁河浮游细菌群落的影响	舒旺,王鹏,丁明军,张华,黄高翔,聂明华(1434)
鄱阳湖白鹤保护区微塑料表面微生物群落结构特征	刘淑丽,简敏菲,邹龙,胡启武(1447)
微塑料对变形杆菌生物膜生长发育的影响	陶辉,戚怡婷,于多,杨兰,顾颖,厉彦辉(1455)
乌梁素海低密度微塑料聚合物沉降规律	刘禹,史小红,张生,郝若男,孙标,赵胜男(1463)
老化前后微塑料对富里酸的吸附	宋亚丽,俞娅,郝磊,汪华,朱文芳(1472)
天津市滨海河流N、O ₃ 扩散通量及控制因子	汤梦瑶,胡晓康,王洪伟,王云仓,常素云,王松庆,钟继承(1481)
铁矿石和生物炭添加对潜流人工湿地污水处理效果和温室气体排放及微生物群落的影响	陈鑫童,郝庆菊,熊艳芳,胡剑,江长胜(1492)
降雨径流污染风险等级识别与优化方法	齐小天,张质明,赵鑫,胡文翰,刘迪(1500)
基于贝叶斯网络的给水管网消毒副产物生成因素分析	江杉杉,王臻宇,高权,杨愿愿,高方舟,胡佩,应光国(1512)
聚硫代酰胺修饰活性炭对Au(Ⅲ)的选择性吸附效果与机制	赵文金,张顺,安晓强,兰华春,刘会娟,曲久辉(1521)
F/M对活性污泥微生物生态网络的影响	张冰,孙展翔,文湘华(1529)
城乡融合区土壤元素地球化学特征与源解析:以天府新区青龙片区为例	刘书准,王德伟,施泽明,唐亮,章凤英,廖程,李晓雨,徐文斌(1535)
基于总量与形态的矿区周边土壤重金属生态风险与健康风险评估	王蕊,陈楠,张二喜(1546)
湖南锡矿山周边土壤-农作物系统镉迁移转化特征及污染评价	张龙,宋波,黄凤艳,肖乃川,顿梦杰(1558)
生物炭负载氧化石墨烯对离子型稀土土壤中重金属的阻控效应	杨士,刘祖文,龙培,毕永顺,林苑,左华伟(1567)
溶解性有机质强化棉花修复镉污染土壤	闵涛,罗彤,陈丽丽,茹思博,李俊华(1577)
铁锰氧化物-微生物负载生物炭材料对镉和砷的吸附机制	连斌,吴骥子,赵科理,叶正钱,袁峰(1584)
不同冬小麦品种镉富集转运及离子组特征差异	刘畅,徐应明,黄青青,陶雪莹,王林,孙约兵,赵立杰(1596)
镉胁迫下不同小麦品种对镉的积累特性	任超,任成仲,王浩,朱利文,李竞天,杜倩倩,李萍(1606)
嘉陵江滨岸带不同土地利用类型对土壤细菌群落多样性的影响	刘坤和,薛玉琴,竹兰萍,徐飞,朱志豪,张拓,张富斌(1620)
蚯蚓/钾锰改性生物炭对As污染红壤中细菌多样性和群落结构的影响	苏倩倩,李莲芳,朱昌雄,叶婧,刘雪,耿兵,田云龙,黄晓雅(1630)
DA-6和EDDS施用对龙葵生长、Cd吸收和土壤细菌群落结构的影响	罗洋,孙丽,刘方,任军,郭金梅,闫修民(1641)
地膜覆盖对农田土壤养分和生态酶计量学特征的影响	胡志娥,肖谋良,王双,童瑶瑶,鲁顺保,陈剑平,葛体达(1649)
增温和增雨对黄土丘陵区撂荒地土壤呼吸的影响	王兴,钟泽坤,朱玉帆,王佳懿,杨改河,任成杰,韩新辉(1657)
秸秆还田、地膜覆盖及施氮对冬小麦田N ₂ O和N ₂ 排放的影响	彭毅,李惠通,张少维,阳婷,王筱斐,周春菊,王林权(1668)
基于Meta分析的不同生产条件下秸秆还田对土壤氮挥发的影响	赵政鑫,王晓云,田雅洁,王锐,赵青,蔡焕杰(1678)
施肥对农田土壤抗生素抗性基因影响的整合分析	冉继伟,肖琼,黄敏,蔡岸冬,张文菊(1688)

湖南锡矿山周边土壤-农作物系统锑迁移转换特征及污染评价

张龙¹, 宋波^{1,2*}, 黄凤艳¹, 肖乃川¹, 顿梦杰¹

(1. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 桂林 541004; 2. 岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心, 桂林 541004)

摘要: 为了解湖南锡矿山周边土壤与农产品锑(Sb)含量特征和污染状况, 为锑矿区土壤锑污染防治和农田安全利用提供科学依据. 以湖南锡矿山为研究区, 采集周边不同区域农田土壤及相应农产品, 共计 193 对, 通过分析土壤锑含量、基本理化性质和农产品锑含量, 研究锑在土壤-农产品系统中迁移和转换特征, 并且对土壤及农产品进行安全评估. 结果表明, 矿场中心区、矿场南区、乡镇中心区、城乡交接区和矿场北区的土壤 $\omega(\text{Sb})$ 分别达到了 $(2\,348 \pm 2\,165)$ 、 $(1\,298 \pm 884.1)$ 、 (311.8 ± 526.5) 、 (302.5 ± 355.9) 和 $(215.6 \pm 183.2) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 超标倍数分别达到 65.22、36.06、8.66、8.40 和 5.99 倍. 农产品中莴笋、葱、白菜、空心菜、蒜和豌豆苗的锑富集系数在 0.01 ~ 0.1, 对锑吸收能力相对较高; 丝瓜、油麦菜、辣椒、胡萝卜、苦瓜、玉米、茄子、豇豆和芹菜的锑富集系数低于 0.01, 对锑吸收能力相对较低. 安全评估结果表明根茎类和葱蒜类蔬菜有极高的锑污染风险; 叶菜类和豆类蔬菜有较高锑污染风险; 茄果类蔬菜、瓜果类蔬菜和玉米(谷类)锑污染风险较低. 因此急需对矿区采取土壤锑污染治理措施, 同时为实现矿区农用土地安全利用, 应选择远离矿场中心区土壤锑含量较低区域的农田作为种植区, 并优先选择对锑吸收能力较弱的农产品进行种植.

关键词: 湖南锡矿山; 土壤; 农产品; 锑污染; 安全评价

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)03-1558-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.202105162

Characteristics of Antimony Migration and Transformation and Pollution Evaluation in a Soil-Crop System Around a Tin Mine in Hunan Province

ZHANG Long¹, SONG Bo^{1,2,*}, HUANG Feng-yan¹, XIAO Nai-chuan¹, DUN Meng-jie¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Water Safety Guarantee in Karst Area, Guilin 541004, China)

Abstract: This study used 193 sets of farmland soil and agricultural product samples collected from around a tin mine in Hunan Province, China, to explore the antimony (Sb) content characteristics and pollution status of soil and agricultural products and to provide a scientific basis for the prevention and control of soil antimony pollution in antimony mining areas and the safe use of farmland. We analyzed the amount of antimony in the soil, basic physical and chemical properties, and antimony content in agricultural products; studied the characteristics of antimony migration and transformation in the soil-agricultural product system; and conducted safety assessments on soil and agricultural products. The results showed that the soil $\omega(\text{Sb})$ in the central area of the mine, the southern area of the mine, the central township area, the urban-rural transfer area, and the northern area of the mine reached $(2\,348 \pm 2\,165)$, $(1\,298 \pm 884.1)$, (311.8 ± 526.5) , (302.5 ± 355.9) , and $(215.6 \pm 183.2) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and the exceeding multiples reached 65.22, 36.06, 8.66, 8.40, and 5.99 times, respectively. The antimony enrichment coefficients of lettuce, scallion, cabbage, water spinach, garlic, and pea seedlings in agricultural products were 0.01-0.1, which indicated good antimony absorption capacity. The antimony enrichment coefficients of loofah, asparagus lettuce, pepper, carrot, bitter melon, corn, eggplant, cowpea, and celery were less than 0.01, and the antimony absorption capacity was relatively poor. The safety assessment results showed that roots, allium, and garlic vegetables had a high risk of antimony pollution; leafy vegetables and legumes had a higher risk of antimony pollution; and solanaceous vegetables, melons, and fruit vegetables and corn (cereals) had a high risk of antimony pollution. Therefore, it is urgent to take soil antimony pollution control measures in the mining area. At the same time, in order to realize the safe use of agricultural land in the mining area, the farmland far away from the low antimony content of the soil in the central area of the mine should be selected as the planting area, and the agricultural products with weak antimony absorption capacity should be planted first.

Key words: tin mine in Hunan Province; soil; agricultural products; antimony pollution; security assessment

锑(Sb)及锑化物是一类具有基因毒性的有害物质,并对人体具有一定致癌作用^[1,2]. 美国环境保护署和欧盟早已将锑列为重点污染物^[3,4]. 随着人们对锑的潜在毒性的认识,土壤中锑元素的含量、污染特征和赋存形态越来越受到重视^[5,6]. 我国是世界上锑储量最大的国家,每年锑产量大约为 15 万 t, 约占世界锑总产量 80%^[7]. 因为锑矿的开采以及开采过程中管理方式不完善,加上锑的不合理使用

导致土壤、水体和空气中锑含量升高较为明显^[8~10]. 锑污染程度的上升,严重影响到人类的健康和动植物的生长,同时通过食物链严重威胁到整

收稿日期: 2021-05-16; 修订日期: 2021-08-26

基金项目: 广西科技重大专项(桂科 AA17204047); 国家重点研发计划项目(2018YFD0800600)

作者简介: 张龙(1993~),男,硕士,主要研究方向为区域环境调查与风险评估, E-mail: 1179496866@qq.com

* 通信作者, E-mail: songbo@glut.edu.cn

个生态系统的健康^[11,12]。

湖南锡矿山是世界最大的镉矿之一,当地镉矿的开采和生产活动使得周边已遭受严重的镉污染^[13,14]。何孟常等^[15]通过野外调查发现,湖南锡矿山土壤中镉主要污染源来自尾矿砂、冶炼炉渣和炼镉砷碱渣等重金属浸出污染以及含镉废水灌溉土壤和大气镉尘污染等,并且检测采集土壤 $\omega(\text{Sb})$ 为 $100.6 \sim 5\,045 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,污染区萝卜也受到了污染,萝卜根中 $\omega(\text{Sb})$ 平均值为 $5.541 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,叶片中 $\omega(\text{Sb})$ 平均值则高达 $54.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。李航彬等^[16]对湖南冷水江的锡矿山及其他矿区周边土壤调查发现土壤 $\omega(\text{Sb})$ 高达 $2\,158 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。Okkenhaug 等^[17]也对湖南省锡矿山矿区周围土壤进行调查,得出土壤 $\omega(\text{Sb})$ 为 $108 \sim 4\,029 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。因此,对镉矿区进行镉污染防治与修复,保障矿区周边居民健康生活十分重要。

本研究通过对湖南锡矿山周边农田土壤和农产品进行采样分析,发现镉在土壤-农产品系统中迁移和转换特征,并对农作物进行镉污染评价和健康风险评估。有助于更全面地了解当地土壤、农产品的镉污染状况和农产品对土壤镉的吸收积累能力,以期对锡矿山周边土壤镉污染防控和治理以及农田土地安全利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域为湖南省冷水江锡矿山,冷水江市地处湖南省中部,雪峰山北段南麓,资江中游,东与涟源市、南与新邵县、西北与新化县接壤。地理位置为北纬 $27^{\circ}30' \sim 27^{\circ}50'$,东经 $111^{\circ}18' \sim 111^{\circ}36'$ 。土地总面积

4.39 万 hm^2 ,总人口 35 万,其中农业人口 17 万,是湖南省重要的能源原材料基地。锡矿山位于冷水江市东北 15 km 处,是世界上储量最大的镉矿,其镉储量达 200 多万 t,经过 110 多年的开采,仍拥有 40 万 t 镉储量。该地区属于亚热带季风气候,年平均气温为 16.7°C ,年降水量 1 354 mm 左右,境内年均日照约 1 401.8 h。矿区总面积为 70 km^2 ,分布了一些农村居民,形成了工厂和农村交错的格局^[18]。

1.2 样品采集与处理

2019 年 4 月和 7 月,根据湖南冷水江锡矿山的地形以及矿场、居民村落和农田分布,并按照土壤与农产品点对点协同采样方式在矿区周边农田采集农产品可食用部分和表层 0 ~ 20 cm 深度的土壤,用 GPS 对每个采样点定位地理坐标,采样区域和采样点分布如图 1 所示。在矿场北区(A)、矿场中心区(B)、矿场南区(C)、乡镇中心区(D)和城乡交接区(E)这 5 个区域采集农产品和土壤各 193 件。其中矿场北区采集农产品和土壤各 16 件;矿场中心区采集农产品和土壤各 62 件;矿场南区采集农产品和土壤各 17 件;乡镇中心区采集农产品和土壤各 25 件;城乡交接区采集农产品和土壤各 73 件。采集农产品包括叶菜类蔬菜(白菜、空心菜、油麦菜和豌豆苗)、茄果类蔬菜(辣椒和茄子)、瓜果类蔬菜(丝瓜和苦瓜)、根茎类蔬菜(胡萝卜、芹菜和莴笋)、豆类蔬菜(豇豆)、葱蒜类蔬菜(葱和蒜)和谷类(玉米)。

农产品中蔬菜样品用自来水清洗干净后,用流动的超纯水冲洗 2 ~ 3 遍,玉米样品去除外苞叶用同样的方法清洗干净,待表面水分自然晾干后,称其鲜重。然后放入烘箱内 105°C 杀青 30 min 后,置于

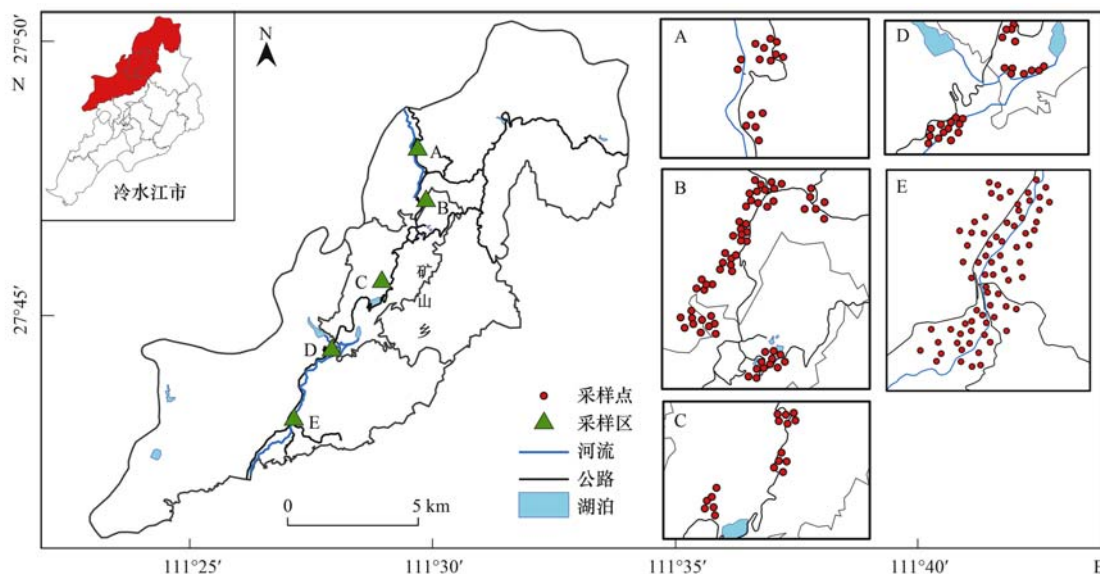


图1 研究区土壤-农场品采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of soil-farm product sampling sites in the study area

80℃烘箱中烘至恒重,称其干重.再将蔬菜和玉米干样品用不锈钢打磨机粉碎后装入牛皮信封中编号待分析.土壤样品自然风干后,除去石块和植物体残渣再用研钵充分磨碎,分别过 0.841 mm 和 0.149 mm 尼龙筛网,再将样品装进牛皮信封袋保存,编号待分析.

1.3 样品测定与分析

土壤样品采用王水(1:1稀释)水浴消解,农产品采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 法(EPA3050B)消解,并用原子荧光光谱法(AFS-700)测定锑含量^[19,20];土壤有效态锑采用 DTPA 浸提法并用原子荧光光谱法(AFS-700)测定;土壤 pH 采用水土比为 2.5:1 电位法测定.

分析过程中加入 GBW07405(GSS-5)土壤成分分析标准物质、GBW10020(GSB-11)柑橘叶分析标准物质和空白进行质量控制,分析样品的重复数为 10%~15%.标准物质 GBW07405(GSS-5)中锑的回收率为 93.26%~107.1%,标准物质 GBW10020(GSB-11)中锑的回收率为 85.26%~96.35%.分析所用试剂为优级纯,所用的水均为超纯水(亚沸水).

1.4 评价方法

农产品锑污染评价采用单因子污染指数法,具体计算公式如下:

$$P_i = C_i/S_i \quad (1)$$

式中, P_i 为单因子污染指数; C_i 为农产品污染物的实测含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; S_i 为食品中重金属污染物限量标准, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 当 $P_i \leq 1$ 时,表示农产品未受到污染;当 $P_i > 1$ 时,表示农产品受到污染.

重金属人体健康风险评价法采用美国环保署(EPA)发布的一种重金属对人群健康风险法

(THQ)^[21].具体计算公式如下:

$$\text{THQ} = \frac{C \times \text{EF} \times \text{ED} \times \text{IR}}{\text{RfD} \times \text{BW} \times \text{AT}} \quad (2)$$

式中, C 为农作物重金属含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; EF 为重金属的暴露频率,取 $365 \text{ d}\cdot\text{a}^{-1}$; ED 为暴露年限,取 76.5 a; IR 为农作物日均消耗量; BW 为体重,成人参考值为 60 kg,儿童参考值为 32 kg; AT 为平均暴露时间($\text{ED} \times 365 \text{ d}$); RfD 为重金属暴露参考剂量 $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$, 锑参考剂量为 $4 \times 10^{-4} \text{ mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$. 若 $\text{THQ} \leq 1$ 时,说明无明显健康风险;若 $\text{THQ} > 1$ 时,则存在污染物健康风险;当 $\text{THQ} > 10$ 时,表明重金属污染物存在慢性毒性效应^[22~24].

1.5 数据处理

生物富集系数(BCF)可以反映农作物从土壤中吸收富集重金属的能力^[25].本文用农产品可食部位重金属含量与土壤中重金属含量比值表示,其计算公式为:

$$\text{BCF} = C_{\text{可食部分}}/C_{\text{土壤}} \quad (3)$$

式中, $C_{\text{可食部分}}$ 为农产品可食用部分重金属含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; $C_{\text{土壤}}$ 为土壤中重金属含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

本实验数据使用 Excel 2016 整理,使用 SPSS 23.0 进行统计分析,图形绘制使用 ArcGIS 10.7 和 Origin 9.0 完成.

2 结果与分析

2.1 研究区土壤锑含量特征

对研究区不同区域采集的土壤样点统计分析,绘制锑含量等级分布,如图 2 所示.高锑含量土壤点位主要分布在矿场中心区,该区域有 13% 样点土壤 $\omega(\text{Sb}) > 5000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 29% 样点土壤 $\omega(\text{Sb})$ 为

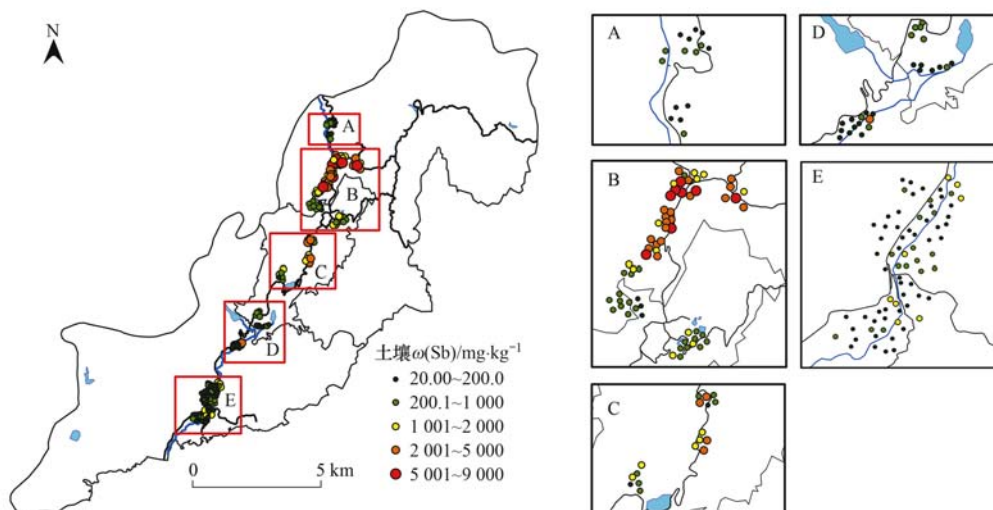


图 2 研究区土壤锑分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of soil antimony in the study area

2 000 ~ 5 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 19% 样点土壤 $\omega(\text{Sb})$ 为 1 000 ~ 2 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 其次是矿场南区, 该区域有 24% 样点土壤 $\omega(\text{Sb})$ 为 2 000 ~ 5 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 29% 样点土壤 $\omega(\text{Sb})$ 为 1 000 ~ 2 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 乡镇中心区有 4% 样点土壤 $\omega(\text{Sb})$ 为 2 000 ~ 5 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 64% 样点土壤 $\omega(\text{Sb})$ 为 200 ~ 1 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其余样点土壤 $\omega(\text{Sb}) < 200 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 城乡交接区有 11% 样点土壤 $\omega(\text{Sb})$ 为 1 000 ~ 2 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 67% 样点土壤 $\omega(\text{Sb})$ 为 200 ~ 1 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其余样点土壤 $\omega(\text{Sb}) < 200 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 矿场北区样点土壤 $\omega(\text{Sb})$ 均小于 1 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中有 40% 样点土壤 $\omega(\text{Sb})$ 为 200 ~ 1 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 60% 样点土壤 $\omega(\text{Sb}) < 200 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 整体上看, 矿场中心区土壤锑含量较高, 以其为中心, 沿南、北方向, 土壤锑含量呈现逐步下降趋势.

对锑矿区周边不同区域农田土壤样品进行描述性统计分析结果见表 1. 从中可知, 研究区土壤整体呈中性, 土壤 $\omega(\text{Sb})$ 平均值为 1 041 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是湖南土壤锑背景值(2.98 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[26] 的 349.3 倍. 目前国内尚无农用地土壤锑相关标准, 根据世界卫生组织(WHO)规定的农田土壤锑最大允许含量为 36 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[27], 研究区土壤 $\omega(\text{Sb})$ 是其 28.92 倍. 从不同区域土壤锑含量来看, 各区域土壤 $\omega(\text{Sb})$ 从大到小排列顺序为: 矿场中心区 > 矿场南区 > 乡镇中心区 > 城乡交接区 > 矿场北区, 土壤 $\omega(\text{Sb})$ 依次为 (2 348 $\pm$ 2 165)、(1 298 $\pm$ 884.1)、(311.8 $\pm$ 526.5)、(302.5 $\pm$ 355.9) 和 (215.6 $\pm$ 183.2)

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均远超过世界卫生组织规定的农田土壤锑的最大允许含量, 超标倍数分别达到了 65.22、36.06、8.66、8.40 和 5.99 倍, 表明各区域农田土壤明显受到锑污染.

研究区各区域土壤锑含量变异系数依次为: 168.8% (乡镇中心区)、117.7% (城乡交接区)、92.21% (矿场中心区)、86.22% (矿场南区) 和 84.98% (矿场北区). 各区域土壤锑含量变异系数差别较大, 可能与采样面积有关, 区域面积越小, 其空间结构性变异越弱^[21]. 此外, 各区域受人类活动等外界因素影响差异较大, 导致不同区域土壤锑含量空间分布不均. 从整体上看, 研究区土壤锑含量变异系数为 153.9%, 属于强度变异, 说明研究区锑含量空间差异较大, 表明研究区土壤锑分布受锑矿开采生产活动和人类活动影响较大.

重金属有效态决定了其生物有效性, 比土壤重金属全量更能体现对农作物的危害程度. 由于不同土壤中重金属有效态含量差异较大, 可能与土壤重金属全量和理化性质有关, 因此采用土壤重金属有效态系数(重金属有效态含量与全量的比值)来表征重金属有效性强弱^[28]. 由统计结果可以得出研究区土壤锑有效态系数为 1.45%. 各区域土壤锑有效态系数分别为: 1.88% (矿场北区)、1.46% (矿场中心区)、1.01% (矿场南区)、0.92% (乡镇中心区) 和 1.95% (城乡交接区). 研究区土壤锑有效态系数较低, 表明土壤锑有效性相对较低.

表 1 研究区土壤 pH 及锑含量特征

Table 1 Characteristics of soil pH and antimony content in the study area								
区域	样本数	pH	范围 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	平均值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	标准差 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	变异系数 /%	有效态锑 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	有效态系数 /%
矿场北区	15	6.97 $\pm$ 1.81	39.56 ~ 655.5	215.6	183.2	84.98	4.05 $\pm$ 3.58	1.88
矿场中心区	63	6.54 $\pm$ 0.71	111.3 ~ 8 671	2 348	2 165	92.21	34.19 $\pm$ 59.77	1.46
矿场南区	17	6.67 $\pm$ 0.67	138.6 ~ 4 123	1 298	884.1	86.22	13.05 $\pm$ 14.69	1.01
乡镇中心区	25	6.61 $\pm$ 0.51	69.44 ~ 2 727	311.8	526.5	168.8	2.88 $\pm$ 3.58	0.92
城乡交接区	73	6.83 $\pm$ 0.55	44.16 ~ 1 357	302.5	355.9	117.7	5.89 $\pm$ 8.55	1.95
总计	193	6.71 $\pm$ 0.65	39.56 ~ 8 671	1 041	1 603	153.9	15.07 $\pm$ 36.92	1.45

2.2 研究区农产品锑含量特征

对研究区不同区域农产品可食部分锑含量统计分析, 绘制锑含量等级分布(图 3), 可以看出不同区域农产品锑含量差异较大, 其中高锑含量农产品主要分布在矿场中心区, 部分农产品 $\omega(\text{Sb})$ 达到了 30 ~ 60 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 其次, 矿场南区农产品 $\omega(\text{Sb})$ 也较高, 部分农产品 $\omega(\text{Sb})$ 为 1 ~ 30 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 矿场北区、乡镇中心区和城乡交接区农产品 $\omega(\text{Sb})$ 相对较低, 这些区域绝大部分农产品 $\omega(\text{Sb}) < 1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

对不同品种农产品可食用部分锑含量进行统计

分析, 结果如图 4 所示, 部分农产品 $\omega(\text{Sb})$ 存在较高的异常值, 主要是农产品所生长地块的土壤锑含量和有效态锑含量相对较高, 导致农产品吸收积累较高的锑. 不同农产品中 $\omega(\text{Sb})$ 差异较大, 白菜、葱、胡萝卜、芹菜、蒜和莴笋较高, 均值分别达到了 (11.51 $\pm$ 17.84)、(22.82 $\pm$ 15.32)、(16.39 $\pm$ 17.91)、(20.58 $\pm$ 18.36)、(18.13 $\pm$ 13.82) 和 (21.51 $\pm$ 16.89) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 空心菜、豌豆苗和油麦菜次之, 均值分别为 (3.66 $\pm$ 3.14)、(8.46 $\pm$ 7.99) 和 (8.53 $\pm$ 6.25) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 豇豆、辣椒、茄子、苦

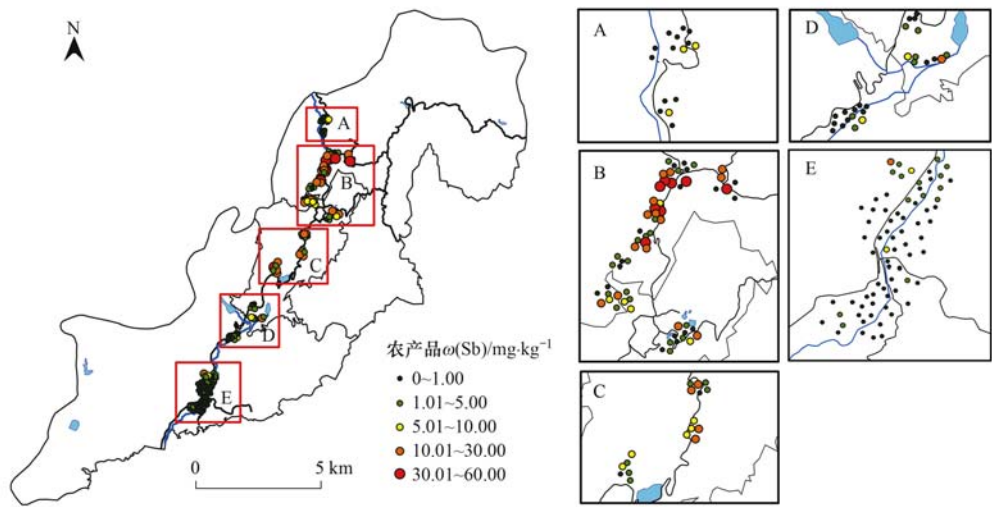
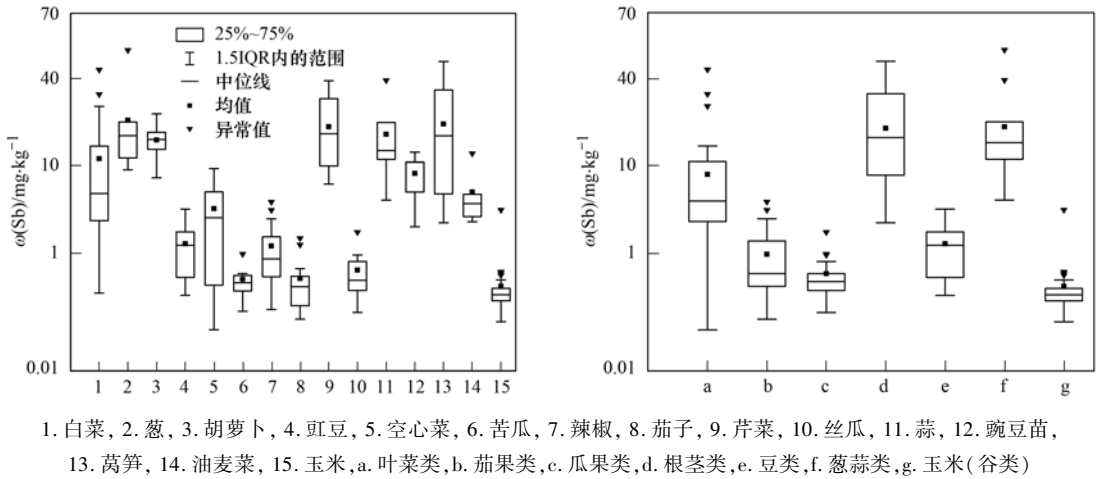


图3 研究区农产品锑分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of agricultural product antimony in the study area

瓜、丝瓜和玉米相对较低,平均值分别为(1.36 ± 1.01)、(1.27 ± 1.04)、(0.44 ± 0.47)、(0.43 ± 0.26)、(0.58 ± 0.49)和(0.33 ± 0.49) mg·kg⁻¹. 从不同类别农产品来看,叶菜类蔬菜 ω(Sb) 为 0.06 ~ 44.17 mg·kg⁻¹; 茄果类蔬菜 ω(Sb) 为 0.09 ~ 4.33 mg·kg⁻¹; 瓜果类蔬菜 ω(Sb) 为 0.12 ~ 1.9 mg·kg⁻¹; 根茎类蔬菜 ω(Sb) 为 2.49 ~ 48.07

mg·kg⁻¹; 豆类蔬菜 ω(Sb) 为 0.24 ~ 3.61 mg·kg⁻¹; 葱蒜类蔬菜 ω(Sb) 为 4.54 ~ 53.42 mg·kg⁻¹; 玉米(谷类) ω(Sb) 为 0.09 ~ 3.53 mg·kg⁻¹. 按照不同类别农产品 ω(Sb) 均值比较,大小为:葱蒜类 > 根茎类 > 叶菜类 > 豆类 > 茄果类 > 瓜果类 > 玉米(谷类),其中叶菜类、根茎类和葱蒜类 ω(Sb) 要明显高于茄果类、瓜果类、豆类和玉米(谷类).



1. 白菜, 2. 葱, 3. 胡萝卜, 4. 豇豆, 5. 空心菜, 6. 苦瓜, 7. 辣椒, 8. 茄子, 9. 芹菜, 10. 丝瓜, 11. 蒜, 12. 豌豆苗, 13. 莴笋, 14. 油麦菜, 15. 玉米, a. 叶菜类, b. 茄果类, c. 瓜果类, d. 根茎类, e. 豆类, f. 葱蒜类, g. 玉米(谷类)

图4 研究区农产品锑含量

Fig. 4 Antimony content of agricultural products in the study area

将各类别农产品锑含量与土壤锑全量、土壤锑有效态和 pH 做相关性分析,结果如表 2 所示. 叶菜类蔬菜锑含量与土壤锑全量、土壤锑有效态均呈显著正相关,与土壤 pH 相关性不显著;根茎类蔬菜锑含量与土壤中锑全量和土壤锑有效态呈显著正相关,与土壤 pH 相关性不显著;葱蒜类蔬菜锑含量与土壤锑全量呈显著正相关,但与有效态锑和土壤 pH 相关性不显著. 瓜果类、茄果类、豆类蔬菜和玉米(谷类)蔬菜锑含量与土壤锑全量、有效态锑和 pH 相关性均不显著.

表2 不同类别农产品锑与土壤不同指标相关性分析¹⁾

	Table 2 Correlation analysis between antimony of different types of agricultural products and different indexes of soil		
	土壤锑全量	土壤锑有效态	pH
叶菜类	0.662 **	0.649 **	-0.143
根茎类	0.612 **	0.493 *	0.108
瓜果类	-0.055	-0.191	0.283
茄果类	0.155	0.027	-0.078
葱蒜类	0.707 *	0.291	-0.410
豆类	0.258	-0.078	-0.136
玉米(谷类)	-0.098	-0.102	-0.089

1) * 表示在 0.05 水平下显著相关, ** 表示在 0.01 水平下显著相关

2.3 研究区农产品锑富集能力

农产品的锑富集系数如图 5 所示,整体上看,研究区农产品的锑富集系数较低且差异较大,其范围为0.000 1~0.289.各农产品中莴笋、豌豆苗、白菜、空心菜、葱和蒜的锑富集系数相对较高,均值分别为 0.035、0.022、0.019、0.016、

0.029 和 0.018.其余农产品锑富集系数均低于 0.01,玉米的锑富集系数最低,均值仅有 0.002.从不同农产品类别来看,叶菜类蔬菜、根茎类蔬菜、葱蒜类蔬菜的锑富集系数相对较高;茄果类蔬菜、瓜果类蔬菜、豆类蔬菜和玉米(谷类)的锑富集系数相对较低.

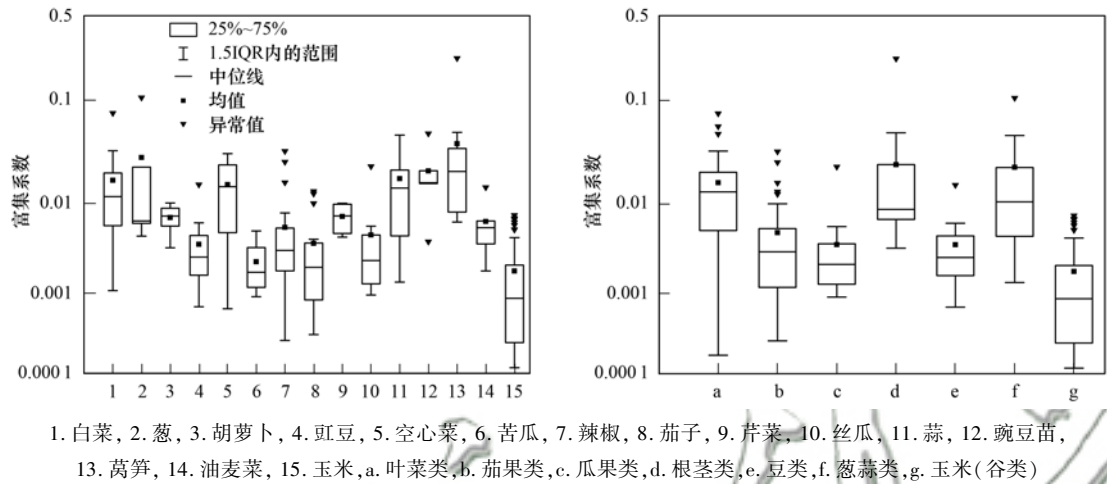


图5 研究区农产品的锑富集系数
Fig. 5 Antimony enrichment coefficient of agricultural products in the study area

采用系统聚类分析方法对不同农产品的锑富集能力进行比较,结果如图 6 示.可以将农产品分为 3 类,莴笋和葱归为第一类,锑富集系数在农产品中相对较高,对锑的吸收能力相对较好;其次对锑有较好的吸收积累能力的农产品有白菜、空心菜、蒜和豌豆苗归为第二类;茄子、豇豆、辣椒、丝瓜、苦瓜、玉米、芹菜、油麦菜和胡萝卜的锑富集系数低于 0.01,对锑的吸收积累能力相对较弱,归为第三类.

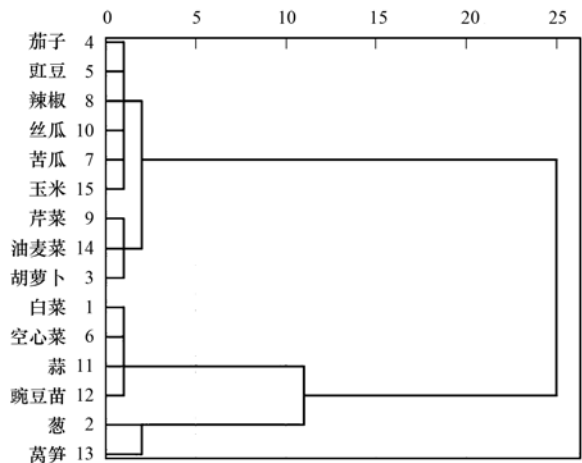


图6 研究区农产品锑积累特性聚类分析
Fig. 6 Cluster analysis of antimony accumulation characteristics of agricultural products in the study area

2.4 研究区农产品锑污染评价及健康风险评估

目前,国内没有农产品锑的限量标准,因此按照中国香港公众健康与市政报务条例(PHM-SO)标准

中食品锑的限量值 $1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为评价标准^[29],采用单项污染指数对研究区不同类别农产品进行锑污染评价,结果见表 3.从中可知,根茎类蔬菜、葱蒜类蔬菜和叶菜类蔬菜样品超标率较高,分别达到了 100%、100%和 88.9%;其次是豆类蔬菜和茄果类蔬菜,超标率分别为 62.50%和 34.78%;瓜果类蔬菜和玉米(谷类)超标率较低,分别为 5.26%和 2.17%.从单项污染指数来看,农产品中根茎类蔬菜和葱蒜类蔬菜的单项污染指数均值分别高达 20.04 和 20.48,有极高的锑污染风险;其次有较高锑污染风险的农产品是叶菜类蔬菜和豆类蔬菜;茄果类蔬菜、瓜果类蔬菜和玉米(谷类)的单向污染指数均小于 1,表明未受到污染,但是研究区土壤锑含量偏高,这 3 类农产品仍存在锑污染风险.

表 3 不同类别农产品锑污染指数			
Table 3 Antimony pollution index of different types of agricultural products			
农产品类别	单项污染指数		超标率/%
	范围	均值	
叶菜类	0.06~44.17	7.86	88.89
茄果类	0.10~4.33	0.98	34.78
瓜果类	0.12~1.91	0.52	5.26
根茎类	2.49~48.09	20.04	100.00
葱蒜类	4.53~53.42	20.48	100.00
豆类	0.24~3.61	1.35	62.50
玉米(谷类)	0.09~3.53	0.33	2.17

将研究区农产品分为蔬菜和谷类,对其进行健康风险评估.文献[30]指出湖南地区农村人均玉米

食入量为 $0.0009 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$, 蔬菜日食入量为 $0.175 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$, 本研究以湖南农村人均玉米和蔬菜日食入量为参考依据, 玉米锑含量以本次采集玉米样品锑含量均值计, 蔬菜锑含量以本次采集各种蔬菜样品锑含量均值计, 统计结果如表 4 所示. 世界卫生组织 (WHO) 规定, 锑的人体每日允许摄入量 (ADI) 为 $8.6 \times 10^{-4} \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 每人每天可以忍受的锑摄入量 (TDI) 为 $6 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [31]. 则成人 (体重按 60 kg 计) 每日允许锑摄入量为 $0.052 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$, 每天可以忍受的锑摄入量为 $0.36 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$; 儿童 (体重按 32 kg 计) 每日允许锑摄入量为 $0.028 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$, 每天可以忍受的锑摄入量为 $0.19 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$. 单考虑从研究区蔬菜中摄入的锑含量, 就远超过成人和儿童每日允许锑摄入量 and 人体可以忍受的锑摄入量. 从玉米中摄入的锑含量较低, 因为玉米本身锑含量相对较低, 并且当地对玉米每日食入量较少. 蔬菜中锑对成人和儿童的 THQ 值分别达到了 47.96 和 89.99, 存在极强的健康风险; 玉米中锑对成人和儿童的 THQ 值较低, 分别为 1.25×10^{-2} 和 2.34×10^{-2} , 均小于 1, 表明玉米中锑对人群没有明显健康风险.

表 4 研究区农产品锑健康风险

Table 4 Antimony health risks of agricultural products in the study area

农产品	锑摄入量/ $\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$	成人 THQ 值	儿童 THQ 值
蔬菜	1.15	47.96	89.99
玉米 (谷类)	2.99×10^{-4}	1.25×10^{-2}	2.34×10^{-2}

3 讨论

本研究结果表明, 湖南锡矿山周边土农田土壤 $\omega(\text{Sb})$ 为 $39.56 \sim 8671 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均值达到 $1041 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 是湖南土壤锑背景值 349.3 倍. 表明锑矿的开采生产活动, 导致周边农田土壤积累较多的锑. 从锑分布特征来看, 高锑含量土壤主要分布在矿场中心区, 以矿场中心区中心, 沿南北方向, 土壤锑含量呈现逐步下降趋势. 各区域土壤锑含量从大到小排序为: 矿场中心区 > 矿场南区 > 乡镇中心区 > 城乡交接区 > 矿场北区, 由于锑矿的冶炼活动产生大量废渣和粉尘, 导致矿场中心区土壤锑含量高于其他区域, 另外, 锡矿山常年北风较多, 含锑扬尘更容易被刮向矿场南部, 再加上矿场南部矿业活动和人为活动比较频繁, 导致矿场南区土壤锑含量较高. 以世界卫生组织 (WHO) 规定的农田土壤中锑的最大允许含量 $36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为参考标准, 矿场中心区、矿场南区、乡镇中心区、城乡交接区和矿场北区的土壤锑含量超标倍数分别达到 65.22、36.06、8.66、8.40 和 5.99 倍, 说明锡矿山周边农田土壤受到严重锑污染. 根据中国香港公众健康与市政报务条例

(PHM-SO) 标准中食品锑的限量值 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为评价标准, 采用单因子污染指数对各类别蔬菜进行污染评价, 结果表明研究区农产品中根茎类蔬菜和葱蒜类蔬菜有极高的锑污染风险, 叶菜类蔬菜和豆类蔬菜存在较高的锑污染风险, 茄果类蔬菜、瓜果类蔬菜和玉米 (谷类) 的锑污染指数小于 1, 但是矿区周边农田土壤锑含量处于较高水平, 所以这些农产品依然存在一定锑污染风险. 将研究区农产品分为蔬菜和谷类, 对其进行风险评估, 结果表明成人和儿童食用锡矿区周边蔬菜存在极强的健康风险, 而食用玉米 (谷类) 无明显健康风险. 研究区农产品存在不同的锑污染风险, 研究区居民食用当地农产品存在健康风险.

研究区不同区域农产品锑含量差异较大, 锑含量较高农产品主要分布在矿场中心区和矿场南区, 与不同研究区土壤锑含量分布基本保持一致. 农产品中葱蒜类蔬菜、根茎类蔬菜和叶菜类蔬菜锑含量要明显高于豆类蔬菜、瓜果类蔬菜、茄果类蔬菜和玉米 (谷类) 锑含量. 其中叶菜类蔬菜锑含量较高可能是由于叶菜类蔬菜叶片有较强的蒸腾作用, 同时, 叶菜类蔬菜与空气接触面积大, 加上锡矿区空气中锑尘沉降较为严重, 导致叶片容易附着颗粒污染物, 使得其更容易吸收富集锑 [32]. 从不同品种农产品来看, 白菜、葱、胡萝卜、芹菜、蒜和莴笋的 $\omega(\text{Sb})$ 分别达到了 11.51、22.82、16.39、20.58、18.13 和 $21.51 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 空心菜、豌豆苗和油麦菜 $\omega(\text{Sb})$ 次之, 均值分别为 3.66、8.46 和 $8.53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 超出一般植物中锑的正常含量 ($0.02 \sim 2.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) [14]. 而豇豆、辣椒、茄子、苦瓜、丝瓜和玉米 $\omega(\text{Sb})$ 相对较低, 分别为 1.36、1.27、0.44、0.43、0.58 和 $0.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 不同农产品锑含量差异较大, 可能与土壤锑含量、有效态锑、土壤其他性质和农产品自身特征有密切关系. 将各类别农产品锑含量与土壤锑全量、有效态锑和土壤 pH 做相关性分析, 结果表明农产品中叶菜类蔬菜和根茎类蔬菜锑含量受土壤锑全量和有效态锑含量影响较大, 与其他因素相关性不明显. 葱蒜类蔬菜、豆类蔬菜、瓜果类蔬菜、茄果类蔬菜和玉米 (谷类) 锑含量与这几类因素相关性均不明显. 导致农产品锑含量较高很有可能与大气锑沉降和其他因素有关, 有待于测定更多相关指标, 进一步研究分析, 有望找出影响农作物积累锑的主要因素, 为农产品安全种植提供可靠的调控措施.

由于整个研究区土壤锑含量空间分布差异较大, 并且农产品锑含量差异较大, 为了更好反映农产品对土壤中锑的吸收能力, 计算农产品的锑富集系

数并分析得出所有农产品的锑富集系数均低于 0.1, 对锑的吸收积累能力较弱。但是研究区农田土壤锑含量较高, 会导致部分种类农产品仍会吸收积累较多锑, 因此种植农产品时, 可以考虑选择对锑吸收积累能力相对更弱的农产品进行种植。

本研究结果表明, 湖南锡矿山周边农田土壤和农产品均受到不同程度的锑污染, 已经对当地居民构成健康风险, 因此急需对锡矿山农田土壤采取适当治理措施。此外, 本研究对湖南锡矿山周边土壤-农作物系统中锑的转化迁移特征进行了初步的研究分析, 研究区农产品的锑富集系数较低, 对锑的吸收积累能力较弱, 但是土壤锑含量偏高, 导致部分种类农产品锑含量较高。因此, 为了降低农产品锑污染风险, 种植农产品时, 应该选择远离矿场中心区土壤锑含量较低的农田进行种植, 同时优先考虑选择对锑富集能力较弱的丝瓜、油麦菜、辣椒、胡萝卜、苦瓜、玉米、茄子、豇豆和芹菜进行合理种植。

4 结论

(1) 研究区土壤 $\omega(\text{Sb})$ 平均值为 $(1\,041 \pm 1\,603) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 以世界卫生组织 (WHO) 规定的农田土壤中锑允许含量 $36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为参考标准, 超标倍数为 28.92 倍; 矿场中心区、矿场南区、乡镇中心区、城乡交接区和矿场北区的土壤锑含量超标倍数分别达到 65.22、36.06、8.66、8.40 和 5.99 倍。

(2) 农产品中叶菜类蔬菜、根茎类蔬菜、葱蒜类蔬菜对锑的吸收能力高于茄果类蔬菜、瓜果类蔬菜、豆类蔬菜和玉米(谷类)。莴笋和葱对锑的吸收能力相对较高; 其次对锑吸收能力较好的农产品是白菜、空心菜、蒜和豌豆苗; 丝瓜、油麦菜、辣椒、胡萝卜、苦瓜、玉米、茄子、豇豆和芹菜对锑的富集能力相对较弱。

(3) 研究区内根茎类蔬菜和葱蒜类蔬菜有极高的锑污染风险; 其次叶菜类蔬菜和豆类蔬菜存在较高的锑污染风险; 茄果类蔬菜、瓜果类蔬菜和玉米(谷类)的锑污染风险较低。

(4) 健康风险评价结果表明农产品中蔬菜对成人和儿童存在极强锑健康风险, 玉米对成人与儿童不存在明显锑健康风险。

(5) 为实现锡矿山矿区周边农田土地安全利用, 应选择远离矿场中心区土壤锑含量较低的农田作为农产品种植区, 同时优先考虑选择对锑吸收能力较弱的丝瓜、油麦菜、辣椒、胡萝卜、苦瓜、玉米、茄子、豇豆和芹菜等农产品进行种植。

参考文献:

[1] Huang H, Shu S C, Shih J H, *et al.* Antimony trichloride

induces DNA damage and apoptosis in mammalian cells [J]. *Toxicology*, 1998, **129**(2-3): 113-123.

- [2] Herath I, Vithanage M, Bundschuh J. Antimony as a global dilemma: geochemistry, mobility, fate and transport [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **223**: 545-559.
- [3] Fu Z Y, Wu F C, Mo C L, *et al.* Comparison of arsenic and antimony biogeochemical behavior in water, soil and tailings from Xikuangshan, China [J]. *Science of the total Environment*, 2016, **539**: 97-104.
- [4] Xiao E Z, Krumins V, Xiao T F, *et al.* Depth-resolved microbial community analyses in two contrasting soil cores contaminated by antimony and arsenic [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **221**: 244-245.
- [5] 薛亮. 锑矿区植物重金属积累特征及其耐锑机理研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.
- Xue L. Research on characteristic of heavy metal accumulation and antimony tolerant mechanism of plants in antimony mine area [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2013.
- [6] 宁增平, 肖青相, 蓝小龙, 等. 都柳江水系沉积物锑等重金属空间分布特征及生态风险 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(7): 2784-2792.
- Ning Z P, Xiao Q X, Lan X L, *et al.* Spatial distribution characteristics and potential ecological risk of antimony and selected heavy metals in sediments of Duliujiang river [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(7): 2784-2792.
- [7] 刘碧君, 吴丰昌, 邓秋静, 等. 锡矿山矿区和贵阳市人发中锑、砷和汞的污染特征 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(3): 907-912.
- Liu B J, Wu F C, Deng Q J, *et al.* Pollution characteristics of antimony, arsenic and mercury in human hair at Xikuangshan antimony mining area and Guiyang city, China [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(3): 907-912.
- [8] Zhao L J, Zhang F S, Wang K S, *et al.* Chemical properties of heavy metals in typical hospital waste incinerator ashes in China [J]. *Waste Management*, 2009, **29**(3): 1114-1121.
- [9] Wei C Y, Deng Q J, Wu F C, *et al.* Arsenic, antimony, and bismuth uptake and accumulation by plants in an old antimony mine, China [J]. *Biological Trace Element Research*, 2011, **144**(1-3): 1150-1158.
- [10] 张菊梅, 刘灵飞, 龙健, 等. 土壤锑污染及其修复技术研究进展 [J]. *环境科学与技术*, 2019, **42**(4): 61-70.
- Zhang J M, Liu L F, Long J, *et al.* Research progress on soil antimony pollution and its remediation technology [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **42**(4): 61-70.
- [11] Wu F C, Fu Z Y, Liu B J, *et al.* Health risk associated with dietary co-exposure to high levels of antimony and arsenic in the world's largest antimony mine area [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**(18): 3344-3351.
- [12] 任杰, 刘晓文, 李杰, 等. 我国锑的暴露现状及其环境化学行为分析 [J]. *环境化学*, 2020, **39**(12): 3436-3449.
- Ren J, Liu X W, Li J, *et al.* Analysis of exposure status quo and environmental chemical behaviors of antimony in China [J]. *Environmental Chemistry*, 2020, **39**(12): 3436-3449.
- [13] Fu Z Y, Wu F C, Amarasinghwardena D, *et al.* Antimony, arsenic and mercury in the aquatic environment and fish in a large antimony mining area in Hunan, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(16): 3403-3410.
- [14] 库文珍, 赵运林, 雷存喜, 等. 锑矿区土壤重金属污染及优势植物对重金属的富集特征 [J]. *环境工程学报*, 2012, **6**(10): 3774-3780.
- Ku W Z, Zhao Y L, Lei C X, *et al.* Heavy metal pollution in

- soils and characteristics of heavy metal accumulation of dominant plants in antimony mining area [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, **6**(10): 3774-3780.
- [15] 何孟常, 季海冰, 赵承易, 等. 锑矿区土壤和植物中重金属污染初探[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2002, **38**(3): 417-420.
- He M C, Ji H B, Zhao C Y, *et al.* Preliminary study of heavy metal pollution in soil and plant near antimony mine area[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2002, **38**(3): 417-420.
- [16] 李航彬, 杨志辉, 袁平夫, 等. 湘中锑矿区土壤重金属锑的污染特征[J]. 环境科学与技术, 2011, **34**(1): 70-74, 127.
- Li H B, Yang Z H, Yuan P F, *et al.* Characteristics of antimony pollution in soils at mining areas in central Hunan province[J]. Environmental Science & Technology, 2011, **34**(1): 70-74, 127.
- [17] Okkenhaug G, Amst tter K, Lassen Bue H, *et al.* Antimony (Sb) contaminated shooting range soil: Sb mobility and immobilization by soil amendments[J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(12): 6431-6439.
- [18] 余玮, 揭雨成, 邢虎成, 等. 湖南冷水江锑矿区苎麻对重金属的吸收和富集特性[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(1): 91-96.
- She W, Jie Y C, Xing H C, *et al.* Uptake and accumulation of heavy metal by ramie (*Boehmeria nivea*) growing on antimony mining area in lengshuijiang city of Hunan province[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, **29**(1): 91-96.
- [19] 王国峰, 王静元, 苏兵雷, 等. 水浴加热/浸泡法—AFS法测定土壤中锑的含量[J]. 广东化工, 2020, **47**(4): 176-177, 175.
- Wang G F, Wang J Y, Su B L, *et al.* The method of determining the content of antimony in soil by the water bath heating/soaking-AFS[J]. Guangdong Chemical Industry, 2020, **47**(4): 176-177, 175.
- [20] 王晓丽, 韦朝阳, 冯人伟, 等. 白玉凤尾蕨与印度芥菜对不同形态锑的富集与转化特征[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(3): 720-727.
- Wang X L, Wei C Y, Feng R W, *et al.* The accumulation and transformation of antimony characteristics in *Pteris cretica* and *Brassica juncea* [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(3): 720-727.
- [21] 李洋, 张乃明, 魏复盛. 滇东镉高背景区菜地土壤健康风险评估与基准[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(10): 4522-4530.
- Li Y, Zhang N M, Wei F S. A benchmark study on soil health risks of vegetable fields in a high-cadmium background area in eastern Yunnan [J]. China Environmental Science, 2020, **40**(10): 4522-4530.
- [22] 涂春艳, 陈婷婷, 廖长君, 等. 矿区农田蔬菜重金属污染评价和富集特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, **39**(8): 1713-1722.
- Tu C Y, Chen T T, Liao C J, *et al.* Pollution assessment and enrichment characteristics of heavy metals in farmland vegetables near a mining area[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, **39**(8): 1713-1722.
- [23] 王锐, 邓海, 贾中民, 等. 典型喀斯特地区土壤-作物系统镉的富集特征与污染评价[J]. 环境科学, 2021, **42**(2): 941-951.
- Wang R, Deng H, Jia Z M, *et al.* Characteristics of cadmium enrichment and pollution evaluation of a soil-crop system in a typical Karst area [J]. Environmental Science, 2021, **42**(2): 941-951.
- [24] 余志, 陈凤, 张军方, 等. 锌冶炼区菜地土壤和蔬菜重金属污染状况及风险评价[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(5): 2086-2094.
- Yu Z, Chen F, Zhang J F, *et al.* Contamination and risk of heavy metals in soils and vegetables from zinc smelting area[J]. China Environmental Science, 2019, **39**(5): 2086-2094.
- [25] 李杰, 朱立新, 康志强. 南宁市郊周边农田土壤-农作物系统重金属元素迁移特征及其影响因素[J]. 中国岩溶, 2018, **37**(1): 43-52.
- Li J, Zhu L X, Kang Z Q. Characteristics of transfer and their influencing factors of heavy metals in soil-crop system of peri-urban agricultural soils of Nanning, South China [J]. Carsologica Sinica, 2018, **37**(1): 43-52.
- [26] 殷志遥, 和君强, 刘代欢, 等. 我国土壤锑污染特征研究进展及其富集植物的应用前景初探[J]. 农业资源与环境学报, 2018, **35**(3): 199-207.
- Yin Z Y, He J Q, Liu D H, *et al.* Research progress on characteristics of soil antimony pollution in china and the preliminary exploration about application prospect of antimony accumulator plants [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2018, **35**(3): 199-207.
- [27] 雷梅, 岳庆玲, 陈同斌, 等. 湖南柿竹园矿区土壤重金属含量及植物吸收特征[J]. 生态学报, 2005, **25**(5): 1146-1151.
- Lei M, Yue Q L, Chen T B, *et al.* Heavy metal concentrations in soils and plants around Shizhuyuan mining area of Hunan province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, **25**(5): 1146-1151.
- [28] 杨军, 陈同斌, 郑袁明, 等. 北京市凉水河灌区小麦重金属含量的动态变化及健康风险分析——兼论土壤重金属有效性测定指标的可靠性[J]. 环境科学学报, 2005, **25**(12): 89-96.
- Yang J, Chen T B, Zheng Y M, *et al.* Dynamic of heavy metals in wheat grains collected from the Liangfeng irrigated area, Beijing and a discussion of availability and human health risks [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, **25**(12): 89-96.
- [29] 谭湘武, 肖胜蓝, 马金辉, 等. 湖南地区新鲜草莓中总锑含量分析及污染评价[J]. 中国果菜, 2016, **36**(11): 21-25.
- Tan X W, Xiao S L, Ma J H, *et al.* Content analysis of total antimony and pollution evaluation of fresh strawberries in Hunan province [J]. China Fruit & Vegetable, 2016, **36**(11): 21-25.
- [30] 林敏, 金东辉, 周益众. 1982~2002年湖南省居民食物消费及膳食结构的变化[J]. 卫生研究, 2007, **36**(5): 630-631.
- [31] 戈兆凤, 韦朝阳. 锑环境健康效应的研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2011, **28**(7): 649-653.
- Ge Z F, Wei C Y. Environmental health effect of antimony: a review of recent researches [J]. Journal of Environment and Health, 2011, **28**(7): 649-653.
- [32] 陈志良, 黄玲, 周存宇, 等. 广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价[J]. 环境科学, 2017, **38**(1): 389-398.
- Chen Z L, Huang L, Zhou C Y, *et al.* Characteristics and evaluation of heavy metal pollution in vegetables in Guangzhou [J]. Environmental Science, 2017, **38**(1): 389-398.

CONTENTS

Analysis of Change and Driving Factors of PM _{2.5} Mass Concentration in Tianjin from 2000 to 2020	CAI Zi-ying, HAO Jian, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (1129)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, GAO Jing-yun, <i>et al.</i> (1140)
Source Analysis of Ambient PM _{2.5} in Wuhan City Based on Random Forest Model	ZHANG Zhi-hao, CHEN Nan, ZHU Bo, <i>et al.</i> (1151)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Aerosols in the Surrounding District of a Heavily Polluted City in the Southern Part of North China	REN Xiu-long, HU Wei, WU Chun-miao, <i>et al.</i> (1159)
Characteristics of Water-soluble Ions in an Autumn Haze Process in the Southern Sichuan Urban Agglomeration After the Implementation of China's Air Pollution Prevention and Control Action Plan	WU An-nan, HUANG Xiao-juan, HE Ren-jiang, <i>et al.</i> (1170)
Concentration, Source, and Health Risk Assessment of PM ₁ Heavy Metals in Typical Pollution Processes in Zhengzhou	ZHAI Shi-ting, WANG Shen-bo, ZHANG Dong, <i>et al.</i> (1180)
Geographical Detection of Spatial Heterogeneity and Drivers of PM _{2.5} in the Yangtze River Economic Belt	WANG Li-li, LIU Xiao-jie, LI Ding, <i>et al.</i> (1190)
Spatial Heterogeneity of PM _{2.5} Concentration in Response to Land Use/Cover Conversion in the Yangtze River Delta Region	ZHOU Li-xia, WU Tao, JIANG Guo-jun, <i>et al.</i> (1201)
Analysis of Pollution Characteristics, Meteorological Impact, and Forecast Retrospective During the Spring Festival and the Lantern Festival in "2+26" Cities	ZHU Yuan-yuan, WANG Xiao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (1212)
Pollution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} in Shanxi Province Based on Wavelet Transform	ZHANG Ke-ke, HU Dong-mei, YAN Yu-long, <i>et al.</i> (1226)
Estimation of Surface Ozone Concentration and Health Impact Assessment in China	ZHAO Nan, LU Yi-min (1235)
Analysis of Ozone Pollution Spatio-temporal Evolution Characteristics and Identification of Its Long-term Variation Driving Factor over Hunan Province	LIU Yan-yan, YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, <i>et al.</i> (1246)
Temporal and Spatial Variation in O ₃ Concentration Near the Surface of Shandong Peninsula and Analysis of Potential Source Areas	LI Le, LIU Min-xia, XIAO Shi-ni, <i>et al.</i> (1256)
Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of VOCs During the COVID-19 Epidemic in Xiong'an	LIU Xin-jun, WANG Shu-juan, LIU Cheng, <i>et al.</i> (1268)
Characteristics and Source Analysis of VOCs Pollution During the Period of Ozone Exceeding the Standard in Zibo City	WANG Shuai, WANG Xiu-yan, YANG Wen, <i>et al.</i> (1277)
Comparison of VOCs Pollution Characteristics Between an Urban Site and a Background Site in Summer in Zibo	QIN Tao, XU Bo, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (1286)
Emission Characteristics and Inventory of Volatile Organic Compounds from Cooking in Sichuan Province	QIAN Jun, HAN Li, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (1296)
Emission Characteristics of Gas-and Particle-Phase Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Cooking	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1307)
Diversity and Community Structure of Airborne Fungi in Different Working Areas of Composting Plants	YU Ao-yuan, XING Li-jun, SUN Xing-bin, <i>et al.</i> (1315)
Main Problems and Refined Solutions of Urban Fugitive Dust Pollution in China	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (1323)
Water Quality Assessment and Spatial-temporal Variation Analysis in Yellow River Basin	LIU Yan-long, ZHENG Yi-an (1332)
Spatial Distribution and Influential Factors of Nutrients in Rivers of a Typical Mountainous City: A Case Study of the Qingshuixi River in Chongqing	WANG Chao, YE Qiu, JIA Bo-yang, <i>et al.</i> (1346)
River-Lake States in the Tributary of the Three Gorges Reservoir Area and Their Effects on the Phosphorus Content of Different Forms in the Sediment	HUANG Wei, ZHANG Xing, LUO Xiao-jiao, <i>et al.</i> (1356)
Molecular Signatures of Dissolved Organic Matter in the Paihe River and Its Tributaries	ZHAN Ya, YIN Hao, FENG Jing-wei, <i>et al.</i> (1365)
Multiphase Spatial Distribution Characteristics of Cd Morphology in Typical Intertidal Zones in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and Its Influencing Factors	CUI Xin-yue, MO Wu-qiu, LIAO Jian-bo (1375)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in the Surface Water of Luoma Lake and Its Main Inflow Rivers	GONG Run-qiang, ZHAO Hua-jin, GAO Zhan-qi, <i>et al.</i> (1384)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i> (1394)
Historical Changes and Responses to Human Activities of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lake Sediments from Northern China During the Past 100 Years	GONG Xiong-hu, ZHAO Zhong-hua, DING Qi-qi, <i>et al.</i> (1404)
Characteristics of Bacterioplankton Community Between River and Lake/Reservoir in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, ZHANG Jing, HUANG Jie, <i>et al.</i> (1414)
Characteristics of Bacterial Community Structure in Wuliangs Lake During an Irrigation Interval in Hetao Plain	SHI Yu-jiao, LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i> (1424)
Effects of Landscape Structures on Bacterioplankton Communities at Multi-spatial Scales in the Yuanhe River	SHU Wang, WANG Peng, DING Ming-jun, <i>et al.</i> (1434)
Microbial Community Structure on Microplastic Surface in the <i>Grus leucogeranus</i> Reserve of Poyang Lake	LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZOU Long, <i>et al.</i> (1447)
Influence of Microplastics on the Development of <i>Proteus</i> Biofilm	TAO Hui, QI Yi-ting, YU Duo, <i>et al.</i> (1455)
Deposition Law of Low-Density Microplastics Aggregation in Wuliangs Lake	LIU Yu, SHI Xiao-hong, ZHANG Sheng, <i>et al.</i> (1463)
Adsorption of Fulvic Acid on Virgin and Aging Microplastics	SONG Ya-li, YU Ya, ZHENG Lei, <i>et al.</i> (1472)
Diffusive Fluxes and Controls of N ₂ O from Coastal Rivers in Tianjin City	TANG Meng-yao, HU Xiao-kang, WANG Hong-wei, <i>et al.</i> (1481)
Effects of Hematite and Biochar Addition on Wastewater Treatment Efficiency, Greenhouse Gas Emission, and Microbial Community in Subsurface Flow Constructed Wetland	CHEN Xin-tong, HAO Qing-ju, XIONG Yan-fang, <i>et al.</i> (1492)
Identification and Optimization Method of Rainfall-Runoff Pollution Risk Level	QI Xiao-tian, ZHANG Zhi-ming, ZHAO Xin, <i>et al.</i> (1500)
Factor Analysis of Disinfection Byproduct Formation in Drinking Water Distribution Systems Through the Bayesian Network	JIANG Shan-shan, WANG Zhen-yu, GAO Quan, <i>et al.</i> (1512)
Selective Adsorption of Au(Ⅲ) by Activated Carbon Supported Polythioamides and Adsorption Mechanism	ZHAO Wen-jin, ZHANG Shun, AN Xiao-qi, <i>et al.</i> (1521)
Impacts of F/M Ratio on Microbial Networks in Activated Sludge	ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, WEN Xiang-hua (1529)
Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Soil Elements in an Urban-rural Integration Area: A Case Study in the Qinglong Area of Tianfu New District	LIU Shu-huai, WANG De-wei, SHI Ze-ming, <i>et al.</i> (1535)
Ecological and Health Risk Assessments Based on the Total Amount and Speciation of Heavy Metals in Soils Around Mining Areas	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi (1546)
Characteristics of Antimony Migration and Transformation and Pollution Evaluation in a Soil-Crop System Around a Tin Mine in Hunan Province	ZHANG Long, SONG Bo, HUANG Feng-yan, <i>et al.</i> (1558)
Effect of Controlling Heavy Metals in Soil of Rare Earth Mining Area by Biochar Supported Graphene Oxide	YANG Shi, LIU Zu-wen, LONG Bei, <i>et al.</i> (1567)
Enhanced Remediation of Cd Contaminated Soil by Cotton with DOM	MIN Tao, LUO Tong, CHEN Li-li, <i>et al.</i> (1577)
Novel Insight into the Adsorption Mechanism of Fe-Mn Oxide-Microbe Combined Biochar for Cd(Ⅱ) and As(Ⅲ)	LIAN Bin, WU Ji-zi, ZHAO Ke-li, <i>et al.</i> (1584)
Variations in Cadmium Accumulation and Transport and Ionic Traits Among Different Winter Wheat Varieties	LIU Chang, XU Ying-ming, HUANG Qing-qing, <i>et al.</i> (1596)
Cadmium Accumulation Characteristics of Different Heat Varieties Under Cadmium Stress	REN Chao, REN Yu-zhong, WANG Hao, <i>et al.</i> (1606)
Effect of Different Land Use Types on the Diversity of Soil Bacterial Community in the Coastal Zone of Jialing River	LIU Kun-he, XUE Yu-qin, ZHU Lan-ping, <i>et al.</i> (1620)
Effects of Earthworms/Biochar on Bacterial Diversity and Community in As-contaminated Red Soil	SU Qian-qian, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (1630)
Effects of DA-6 and EDDS on Growth and Cd Uptake by <i>Solanum nigrum</i> L. and on the Soil Bacterial Community Structure	LUO Yang, SUN Li, LIU Fang, <i>et al.</i> (1641)
Effects of Plastic Mulch Film on Soil Nutrients and Ecological Enzyme Stoichiometry in Farmland	HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, WANG Shuang, <i>et al.</i> (1649)
Effects of Warming and Increased Precipitation on Soil Respiration of Abandoned Grassland in the Loess-Hilly Regions	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i> (1657)
Effect of Film Mulching, Straw Retention, and Nitrogen Fertilization on the N ₂ O and N ₂ Emission in a Winter Wheat Field	PENG Yi, LI Hui-tong, ZHANG Shao-wei, <i>et al.</i> (1668)
Effects of Straw Returning on Soil Ammonia Volatilization Under Different Production Conditions Based on Meta-analysis	ZHAO Zheng-xin, WANG Xiao-yun, TIAN Ya-jie, <i>et al.</i> (1678)
Impacts of Fertilization on Soil Antibiotic Resistance Genes Across Croplands: A Meta-Analysis	RAN Ji-wei, XIAO Qiong, HUANG Min, <i>et al.</i> (1688)