环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第44卷 第1期
2023年1月15日

目 次

"大气十条"实施期间南京市 $PM_{2.5}$ 化学组成与来源的演变特征 …… 陈培林, 郭蓉, 王勤耕(1)
河南省北部区域霾污染过程中城市和农村点位 $PM_{2.5}$ 组分差异 …… 王申博, 王玲玲, 范相阁, 王楠, 马双良, 张瑞芹(11)
廊坊市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析 …… 朱淑贞, 佟洁, 鲍丰, 孙浩(20)
天津市采暖季不同气团来向 $PM_{2.5}$ 中重金属污染特征及健康风险评价 …… 李立伟, 邓小文, 肖致美, 元洁, 杨宁, 郭小龙, 白宇(30)
基于多属性决策方法的太原市冬季街道尘土中潜在有害元素关键来源解析 …… 邓文博, 刘文娟(38)
北京市 $PM_{2.5}$-O_3 复合污染数值响应解析 …… 刘添强(48)
长三角区域人为源活性挥发性有机物高分辨率排放清单 …… 田俊杰, 丁祥, 安静宇, 李曼, 王鑫, 黄成(58)
南京北郊工业乡村混合区秋季边界层 VOCs 垂直分布特征 …… 王泰, 朱彬, 施双双, 安俊琳, 唐贵谦, 徐家平(66)
广西柳城县 VOCs 组分特征、来源及其对臭氧生成的敏感性 …… 吴影, 莫招育, 吴琴琴, 陆嘉晖, 毛敬英, 陈雪梅, 粟少丽, 覃纹, 刘慧琳, 韦敏(75)
城市臭氧污染特征与高影响气象因子:以苏州为例 …… 何琰, 林惠娟, 曹舒娅, 宋璟璐, 孙伟, 熊宇(85)
华北平原曲周县人为源氨排放清单及分布特征 …… 康嘉慧, 孟凡磊, 刘学军, 许稳(94)
WRF 模式最优参数化方案在不同空气质量模式的应用 …… 杨景朝, 蒋兴文, 伯鑫, 王刚, 冯勇(104)
西安市春季生物气溶胶的分布特征和健康影响 …… 魏军强, 杨柳, 沈振兴, 王秀茹(118)
青岛近海不同天气下生物气溶胶中细菌浓度及存活率分布特征 …… 魏文淑, 祁建华, 常成(127)
中国沉积物多环芳烃的时空分布及驱动因子 …… 黄柱良, 蔡家伟, 王儒威(138)
长江口近岸地区抗生素抗性基因与微生物群落分布特征 …… 徐秋鸿, 刘曙光, 娄厦, Larisa Dorzhievna Radnaeva, Elena Nikitina, Makhinov Aleksei Nikolavich, Araruna José Tavares, 金宇辰, 李鑫(158)
人类活动影响下的高原湿地四环素类抗生素抗性基因赋存与微生物群落共现性 …… 秦荣, 喻庆国, 刘振亚, 王行(169)
我国东南地区饮用水源地多种农药的赋存特征及健康风险评估 …… 何姝, 董慧峪, 任南琪(180)
珠海市中部主要供水水库沉积物重金属时空分布与风险评价 …… 王恩瑞, 张坤锋, 昌盛, 张茉莉, 付青(189)
苏州水网地区河道底泥的重金属分布特征与污染风险 …… 郑敏慧, 白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 杨婷, 张冰, 金军(198)
长三角典型城郊流域生物可降解性有机质的分布及影响因素 …… 吴文雨, 马菁晟, 杨磊, 李敏, 唐剑锋(210)
过水性湖泊水质长期演变趋势及驱动因素:以骆马湖为例 …… 黄雪滢, 高鸣远, 王金东, 王明明, 陈思恩, 龚志军, 王腊春, 蔡永久(219)
渭河微塑料污染现状与风险评价 …… 山泽萱, 张妍, 张成前, 时鹏, 张鑫(231)
不同颜色聚碳酸酯塑料对附着藻类生长和群落结构的影响 …… 王梦雪, 尹思成, 王振方, 陈锦贤, 张玮, 王丽卿(243)
苦草叶表附生和水体浮游细菌群落多样性格局及其影响因素 …… 张梅婷, 刘晋仙, 苏嘉贺, 柴宝峰(252)
基于 16S rRNA 测序技术的青藏高原河流细菌群落多样性 …… 璩伟卿, 张博美, 黄雪, 任泽, 高红凯(262)
基于 eDNA 的硅藻群落时空异质性及生态健康评价 …… 姜山, 张颜, 李飞龙, 张效伟(272)
三峡库区澎溪河河段间水华程度差异及其机制 …… 罗晓佼, 张钘, 黄伟, 胡鹏飞, 谭炳圆, 张磊(282)
自然降雨下蔬菜地土壤侵蚀及氮素流失特征 …… 宁嘉丽, 黄艳荟, 李桂芳, 陈钊柱, 王坚桦(293)
绿色、蓝色和蓝-绿屋顶径流水质特征 …… 章孙逊, 张守红, 闫婧, 王恺, 杨航, 王任重远, 张文龙, 李华林(303)
基于地理探测器的山西省 2000~2020 年 NPP 时空变化特征及驱动力分析 …… 邵嘉豪, 李晶, 闫星光, 马天跃, 张瑞(312)
2000~2020 年西南地区植被 NDVI 时空变化及驱动机制探究 …… 徐勇, 戴强玉, 黄雯婷, 盘钰春, 郑志威, 郭振东(323)
青海湖周边地区表层土壤重金属含量和抗性基因丰度及相关性 …… 胡石磊, 瞿剑里, 章丽, 赵美蓉(336)
四川盆地典型农耕区土壤重金属含量、污染及其影响因素 …… 刘属灵, 吴梅, 刘志远, 刘双燕, 刘永林, 赵家宇, 刘怡(347)
宁夏引黄灌区农田土壤重金属生态风险评价及来源解析 …… 陈林, 马琨, 马建军, 王金保, 李虹, 贾彪, 倪细炉, 马进鹏, 梁翔宇(356)
铜冶炼场地周边土壤重金属污染特征与风险评价 …… 彭驰, 刘旭, 周子若, 姜智超, 郭朝晖, 肖细元(367)
西南地区典型土壤酸化特征及其与重金属形态活性的耦合关系 …… 凌云, 刘汉燚, 张小婷, 魏世强(376)
外源 Cd 在不同类型土壤中的稳定化特征 …… 王港, 佘海英, 黄化刚, 张路, 左洪菊(387)
基于有效硒的富硒土壤阈值及有效硒的影响因素 …… 王莹, 马彦斌, 王泽晶(395)
基于成土母质分区的土壤-作物系统重金属累积特征与健康风险评价 …… 陈子万, 许晶, 侯召雷, 彭敏, 杨帆, 陈杰, 徐永强, 杨树云, 李家云, 于林松(405)
贵州省旱地土壤和玉米 As 含量特征及其种植安全性评估 …… 黄凤艳, 周浪, 宋波, 庞瑞, 吴勇, 王佛鹏, 张云霞(415)
象草与苦楝/构树间作修复矿区重金属污染土壤潜力 …… 王小慧, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 王小燕(426)
1 株高耐性肠杆菌的筛选及对镉、砷同步钝化 …… 尹雪斐, 刘玉玲, 伍德, 黄薪铭, 张朴心, 铁柏清(436)
黄土丘陵区人工刺槐林土壤有机碳矿化特征及其与有机碳组分的关系 …… 朱玉帆, 刘伟超, 李佳欣, 苏玉博, 简俊楠, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娇, 韩新辉(444)
设施农业土壤磷素累积迁移转化及影响因素 …… 方兵, 陈林, 王阳, 祝亚飞, 王瑞, 宋桂芳, 刘俊, 杨斌, 张世文(452)
优化秸秆管理提高麦玉农田碳氮效率与经济效益 …… 王良, 钱欣, 高英波, 张慧, 刘开昌, 陈国庆, 李宗新(463)
缓控释肥深施对黏性土壤麦田氮素去向的影响 …… 侯朋福, 薛利祥, 袁文胜, 曹帅, 刘颖多, 薛利红, 杨林章(473)
黄河下游冲积平原轮作休耕农田土壤真菌群落结构与功能 …… 南镇武, 刘柱, 孟维伟, 代红翠, 徐杰, 王娜, 刘灵艳, 王旭清, 刘开昌(482)
红壤区退化林地表土真菌群落结构对土壤改良措施的响应 …… 管鸿智, 黄荣珍, 王金平, 朱丽琴, 邹显花, 姬绍晖, 林丽靖, 房焕英, 杨梦佳, 廖迎春(494)
半干旱-亚湿润干旱沙区樟子松根内真菌群落结构和功能时空动态特征 …… 赵珮杉, 郭米山, 高广磊, 丁国栋, 张英, 任悦(502)
基于 QMEC 分析的青藏高原不同类型冰川前缘地土壤微生物功能潜力 …… 张洁洁, Anders Priemé, 陈显轲, 周汉昌, 张沁唯, 庄绪亮, 秦翔, 庄国强, 马安周(512)
中国主粮作物生物炭产量效应的 Meta 分析 …… 于滨杭, 姬建梅, 王丽学, 刘静, 高欢, 刘丹(520)
生物炭影响抗生素在土壤中环境行为的 Meta 分析 …… 李经涵, 张建强, 夏丽琼, 郑世界, 杨红薇, 何杨(531)
不同农作物秸秆原料制备生物炭特性及重金属浸出行为 …… 李家康, 邱春生, 赵佳奇, 王晨晨, 刘楠楠, 王栋, 王少坡, 孙力平(540)
中国县域碳排放时空演变与异质性 …… 宋苑震, 曾坚, 王森, 梁晨(549)
近 20 年重庆市主城区碳排放的时空动态演进及其重心迁移 …… 向书江, 杨春梅, 谢雨琦, 王丹, 王子芳, 高明(560)
中国 1991~2018 年突发环境事件时空特征及影响因素 …… 佘光辉, 王非凡, 刘贤赵, 李文慧, 向云波(572)
季铵盐抗菌剂在环境中的迁移转化行为及其毒性效应 …… 张利兰, 覃存立, 钱瑶, 易美玲(583)

《环境科学》征订启事(29) 《环境科学》征稿简则(57) 信息(443, 481, 530)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第44卷第1期 2023年1月
Vol.44,No.1 Jan.,2023

基于有效硒的富硒土壤阈值及有效硒的影响因素

王莹[1,2], 马彦斌[2*], 王泽晶[2]
(1. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 宁夏回族自治区基础地质调查院, 银川 750021)

摘要: 土壤中有效硒(Se)含量是影响作物硒含量的主导因素. 为合理有效在有效硒含量高、全硒含量低的土壤中圈定富 Se 土壤范围并提出天然富 Se 作物培育理论性指导,在宁夏北部石嘴山市采集表层土壤样品8 814件和根系土-作物配套样品 195 件,以有效硒为分析主线,通过对表层土壤和根系土中全 Se、有效 Se 含量和 Se 形态以及根系土配套作物硒含量的综合研究,确定适合研究区的基于有效 Se 的富 Se 土壤阈值,建立有效 Se 的多元回归模型确定影响有效 Se 的主要理化指标以期通过提高有效硒的方式提高作物富硒率. 结果表明,根系土-作物中 Se 的特征可代表表层土壤全 Se 和有效 Se 特征,根系土全 Se、有效 Se 及作物 Se 含量的协调性分析确定 0.24 mg·kg^{-1}的全 Se 含量作为富 Se 土壤界定阈值; 有效 Se 的多元回归模型显示,土壤中全 Se 和土壤肥力元素含量的增加可促进有效 Se 的富集.

关键词:硒(Se); 有效硒; 根系土-作物; 富硒土壤阈值; 影响因素; 石嘴山
中图分类号: X171.5 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2023)01-0395-10 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202202101

Threshold of Se-rich Soil Based on Available-Se and Influencing Factors of Available-Se

WANG Ying[1,2], MA Yan-bin[2*], WANG Ze-jing[2]
(1. School of Earth Science and Resources, China University of Geoscience, Beijing 100083, China; 2. Ningxia Institute of Elementary Geological Survey, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Available selenium (Se) in soil was the predominant factor affecting the content of Se in crops. In order to reasonably delineate the Se-rich soil range and propose theoretical guidance for the cultivation of natural Se-rich crops in a region where the surface soils had a high level of available-Se and a low level of total-Se, 8 814 samples in surface soil and 195 root-crop matching samples were collected in Shizuishan in northern Ningxia. On the basis of the main line of analysis of available-Se, the following research was conducted: by synthetically studying the total-Se and available-Se in surface soil and root soil, the morphology of Se in surface soil, as well as Se in crops, deep and coordinated analyses of content among total-Se, available-Se, and Se in root-crop matching samples were carried out, and the suitable threshold for Shizuishan was confirmed. A multiple regression model of available-Se was established to determine the main physical and chemical indexes affecting available-Se, which were expected to improve the Se enrichment rate of crops through the enhancement of available-Se. The results demonstrated that ω(Se) and $\omega(Se_{available})$ in the surface soil in Shizuishan were 0.26 mg·kg^{-1} and 12.85 μg·kg^{-1}, respectively, and the characteristics of Se and available-Se in root-crop matching samples could represent those in surface soil. Thus, it was recommended to use 0.24 mg·kg^{-1} as the suitable threshold of Se-rich soil. The multiple regression model of available-Se showed that the increase in total-Se and soil elements affecting soil fertility could promote the enrichment of available-Se.

Key words: selenium(Se); available-Se; root-crop; threshold of Se-rich soil; influencing factors; Shizuishan

硒(Se)是人体必需的微量元素,摄入不足或过量都会影响人体健康. Se 摄入不足导致的大骨节病和克山病在我国东北、西北和西南均有案例报道[1~7],多位学者亦已证实我国低硒带的存在[7~10]; Se 过量导致的碱中毒及脱甲病等曾在湖北恩施和陕西紫阳等地出现[5,6]. 但 Se 被人体所能承受的有益健康剂量很窄[11],被称为"健康窗口元素"[10]. 然而人体自身却无法合成 Se,只能依靠饮食等方式摄入. 谷物是人体 Se 的主要来源[12],谷物等作物吸收土壤中的无机 Se 并其转化为供人体吸收的有机 Se,从而使 Se 通过食物链对人体发挥其重要的生理功能[13],这就决定了土壤 Se 是人体 Se 的最终来源. 因此,合理有效地评价土壤供硒能力,不仅事关人体健康,而且针对不同硒含量进行土壤的分类利用具有关键指导性作用.

我国主要采用全量 Se(全 Se)评价标准划分土壤的供 Se 能力进而对其规划利用[14,15],但即使是生长在全 Se 含量高的富 Se 区或 Se 中毒区,作物中 Se 也会存在低 Se 情况,如湖北恩施[5]和夏威夷[11]; 而全 Se 含量较低的耕地中也会生长出较高比例的富 Se 作物[16],这都归因于土壤中易被作物吸收利用的有效 Se 含量不同. 作物中 Se 的积聚不仅与土壤中全 Se 含量有关,更大程度依赖于土壤中能被作物吸收利用的有效 Se[17,18]; 有效 Se 含量是决定作物 Se 含量、制约 Se 的迁移富集行为和毒性的关键[19~24],在一定程度上可以决定 Se 在人体内的缺乏和中毒程度. 然而,普遍适用的土壤有效 Se 测定方法和 Se 生物有效性评价标准的缺失,导致不

收稿日期: 2022-02-16; **修订日期**: 2022-04-21
基金项目: 宁夏自然科学基金项目(2020AAC03447); 宁夏第二批青年人才托举工程项目
作者简介: 王莹(1986~),女,博士研究生,工程师,主要研究方向为土壤硒地球化学,E-mail:wangying_win@163.com
* 通信作者,E-mail:13959486@qq.com

同有效 Se 研究结果间难以相互比较[22]；加上大部分地区地球化学调查数据多为 Se 全量数据，全 Se “一刀切”式的评价易产生误判和漏判[25]，因此基于土壤有效 Se 确定的富 Se 土壤全 Se 阈值不仅更契合当地实际也能更有效地指导种植以增加富硒作物产出率[26].

目前，以土壤有效 Se 含量评价划定 Se 环境效应的研究较少，仅谭见安等[27]以水溶态 Se 的含量划定的土壤环境 Se 效应观点较为普遍接受，水溶态 Se 被认为是土壤中最易被作物吸收的有效 Se[28]；文献[29]提出将有效 Se 和全 Se 与土壤 pH 结合进行富 Se 土壤评价. 同时，明确有效 Se 含量的影响因素对通过内源调控方式提高有效 Se 含量进而提高作物中 Se 的含量有重要的实际意义. 而有效 Se 的影响因素研究多集中在通过对土壤中有效 Se 与全 Se、土壤理化性质和土地利用方式的相关性研究进行判别[11,30]. 本文以有效 Se 为研究主线，以能代表石嘴山市表层土壤 Se 含量特征的根系土及其配套作物为研究对象，通过对根系土中全 Se 和有效 Se 的含量、Se 的形态以及作物 Se 的含量进行协调性深入分析，开展基于有效 Se 的全 Se 阈值划定，同时通过建立有效 Se 影响因素的多元回归方程确定影响有效 Se 的土壤理化指标，以期为当地富 Se 土壤划分以及指导种植天然富 Se 作物提供理论支持.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

石嘴山市位于黄河中游上段、宁夏北部，距首府银川 80 km(图 1)，研究面积达1 050 km^2，属典型的中温带大陆性干旱气候，四季分明，年蒸发量远大于年降水量；土壤表层整体呈碱性，pH 均值为 8.56，变幅为 7.65 ~ 10.39；土壤类型以灌淤土、盐土和潮土为主，土地利用方式以农用地为主.

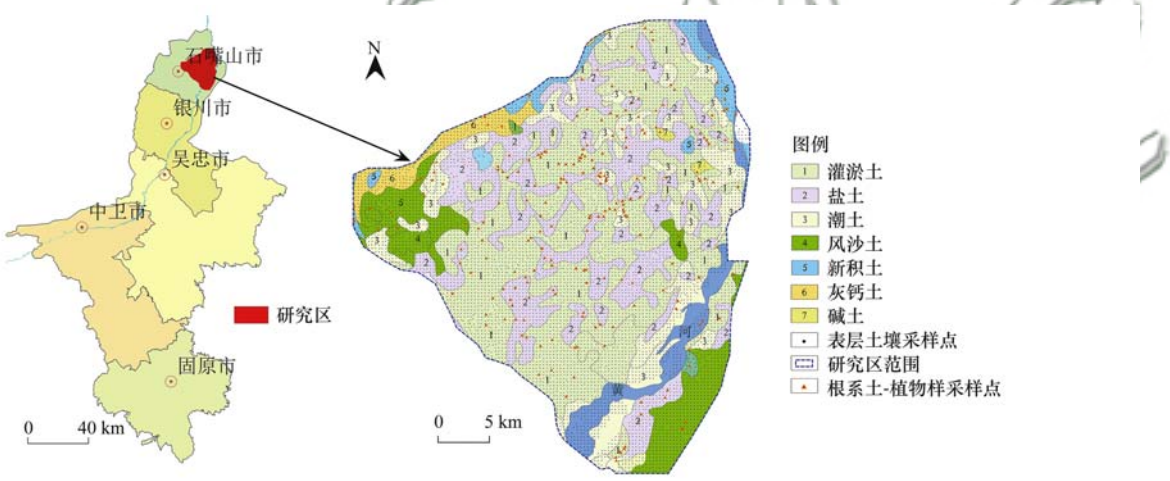


图 1 研究区位置及取样点位

Fig. 1 Location of research area and sample points

1.2 样品采集和测试

野外样品采集严格参照《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295-2016)中的技术要求执行，采用 1∶50 000比例尺，点位布设以土地利用现状图为底图，兼顾主要土壤类型和主要土地利用方式的代表性和均匀性原则，以农用地中采集为主，其余地方进行控制样采集. 样品取自 0 ~ 20 cm 深度的表层土壤，按“十字型”采样方法进行，采样密度为 9 个样·km^{-2}，每个样点由采样部位、样品重量、采样深度一致的 5 个子样点组成，最终采集样品8 814 件. 根系土-作物配套采样统筹考虑研究区农业种植结构及重点农业种植区概况，在作物收获季采集配套果实 195 套，包括大宗作物小麦和水稻各 30 件及玉米 40 件；特色农产品枸杞 15 件，其余经济作物芹菜、苜蓿和韭葱等 80 件. 取样点位见图 1.

土壤样品测试分析均由湖北省地质试验测试中心完成，严格执行《多目标区域地球化学调查规范(1∶250 000)》(DZ/T 0258-2014)，并采用国家一级标准物质(GBW 系列)控制测试结果的准确度和精确度. 作物样品测试分析由宁夏出入境检验检疫局完成，严格执行《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》(GB 5009.268-2016). 其中有效 Se、速效钾和有效硼分别采用沸水、乙酸铵溶液和沸水浸提后使用相关方法测定，且有效 Se 测定仅包含水溶态 Se，土壤及作物样品分析方法及检出限见表 1.

Se 的形态测定由湖北省地质试验测试中心完成，严格执行《生态地球化学评价样品分析技术要求(试行)》(DD 2005-03)、选用一个国家形态一级标准物质(GBW 07442)控制测试结果的准确度和精确度. 使用 AFS 法进行七步浸提，依次得到水溶

表 1　元素分析方法及检出限

Table 1　Element analysis methods and detection limits

样品	指标	测定方法	检出限
土壤	ω(Se)/mg·kg^{-1}	原子荧光光谱法	0.01
	ω($Se_{有效}$)/μg·kg^{-1}	原子荧光光谱法	0.5
	ω(有机质)/%	容量法	0.02
	ω(N)/mg·kg^{-1}	容量法	15
	ω($K_{速效}$)/mg·kg^{-1}	电感耦合等离子体原子发射光谱法	1.00
	ω($B_{有效}$)/mg·kg^{-1}	电感耦合等离子体质谱法	0.005
作物	ω($Se_{作物}$)/mg·kg^{-1}	原子荧光光谱法	0.005

态、离子交换态、碳酸盐结合态、腐殖酸结合态、铁锰结合态、强有机结合态和残渣态 Se 的含量,检出限见表 2.

1.3　数据处理和分析

采用 IBM SPSS Statistics 23 进行各项指标的描述性统计、Perason 相关性分析和多元回归建模. 为保证数据和分析结果尽可能反映实际情况,利用 IBM SPSS Statistics 软件对影响样本正态分布的极高(低)值进行剔除后,经正态分布图和P-P图检验数据总体基本满足正态分布即可.

表 2　土壤 Se 形态检出限/mg·kg^{-1}

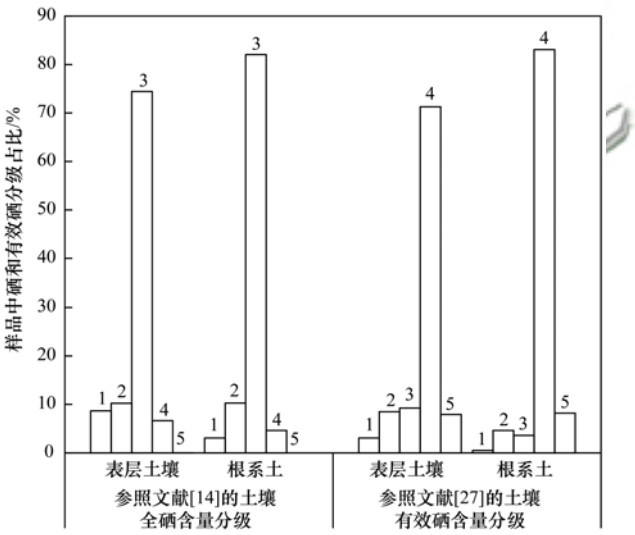
Table 2　Detection limits of fraction in soil Se/mg·kg^{-1}

项目	水溶态	离子交换态	碳酸盐结合态	腐殖酸结合态	铁锰结合态	强有机结合态	残渣态
DD 2005-03 检出限	0.005	0.01	0.005	0.005	0.01	0.005	0.01
实际检出限	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.01

2　结果与分析

2.1　土壤中全 Se 和有效 Se 的特征

研究区表层土壤样和根系土样全 Se 和有效 Se(水溶态 Se)的含量统计结果见表3,全 Se 含量均值高于银川盆地 Se 背景值(0.15 mg·kg^{-1})[31],有效 Se 含量均值高于中国土壤水溶态 Se 均值(10 μg·kg^{-1})[32]. 将根系土中全 Se 和有效 Se 含量与研究区表层土壤全 Se 和有效 Se 含量均值进行单样本 T 检验,根系土全 Se 和有效 Se 含量与研究区全 Se 和有效 Se 含量均值无显著性差异($P>0.05$). 参照文献[14,27]对表层土壤样和根系土样中有效 Se 和全 Se 含量进行分级(表 4 和图 2),并综合表层土壤 Se 和有效 Se 含量空间分布认为(图 3):根系土中 Se 和有效 Se 的含量及频数分布特征均与研究区特征相同,根系土全 Se 和有效 Se 含量特征可代表研究区全 Se 和有效 Se 含量特征;研究区呈典型的有效 Se 高全 Se 量低的特征,全 Se 含量高值区与有效 Se 含量高值区空间分布不一致,按有效Se和全Se含量划分的富 Se 土壤不一致;沟口-简泉农场-燕子墩一带和黄渠桥镇有效 Se 和全 Se 含量均较高.



1. 缺硒; 2. 低硒或少硒; 3. 中等硒或足硒; 4. 高硒或富硒; 5. 硒过剩

图 2　表层土壤和根系土中全 Se 和有效 Se 分级占比

Fig. 2　Proportion of classification of Se and available-Se content in surface and root soil

表 3　研究区表层土壤和根系土 Se 和有效 Se 含量对比[1)]

Table 3　Comparison of the content between Se and available-Se in surface soil and root soil

项目	表层土壤			根系土		
	均值	标准差	变幅	均值	标准差	变幅
ω(Se)/mg·kg^{-1}	0.26*	0.22	0.018 ~ 17.277	0.26	0.09	0.009 ~ 0.72
ω($Se_{有效}$)/μg·kg^{-1}	12.85*	7.63	0.58 ~ 248.39	13.37	4.63	2.4 ~ 29.3
样品数	8 814			195		

1) * 为剔除极值后的算术平均值

2.2　土壤中 Se 的形态特征

不同形态 Se 表现出不同的迁移吸附特征使得 Se 生物有效性不同,从而影响作物中 Se 的含量[22]. 土壤中 Se 的溶解性和迁移能力在水溶态、离子交换态、碳酸盐结合态、腐殖酸结合态、铁锰结合态、强有机结合态和残渣态中依次降低, Se 生物有效性

表 4 研究区表层土壤和根系土中 Se 和有效 Se 含量分级

Table 4 Classification of the content between Se and available-Se in surface and root soil[1)]

含义	分类标准[14] ω(Se)/mg·kg^{-1}	表层土壤样品数量/个	根系土样品数量/个	含义	分类标准[27] ω($Se_{有效}$)/μg·kg^{-1}	表层土壤样品数量/个	根系土样品数量/个
缺 Se	<0.125	764	6	缺 Se	<3	271	1
低 Se 或少 Se	0.125 ~ 0.175	902	20	低 Se 或少 Se	3 ~ 6	748	9
中等 Se 或足 Se	0.175 ~ 0.4	6 561	160	中等 Se 或足 Se	6 ~ 8	814	7
高 Se 或富 Se	0.4 ~ 3	586	9	高 Se 或富 Se	8 ~ 20	6 283	162
Se 过剩	>3	1	0	Se 过剩	>20	698	16

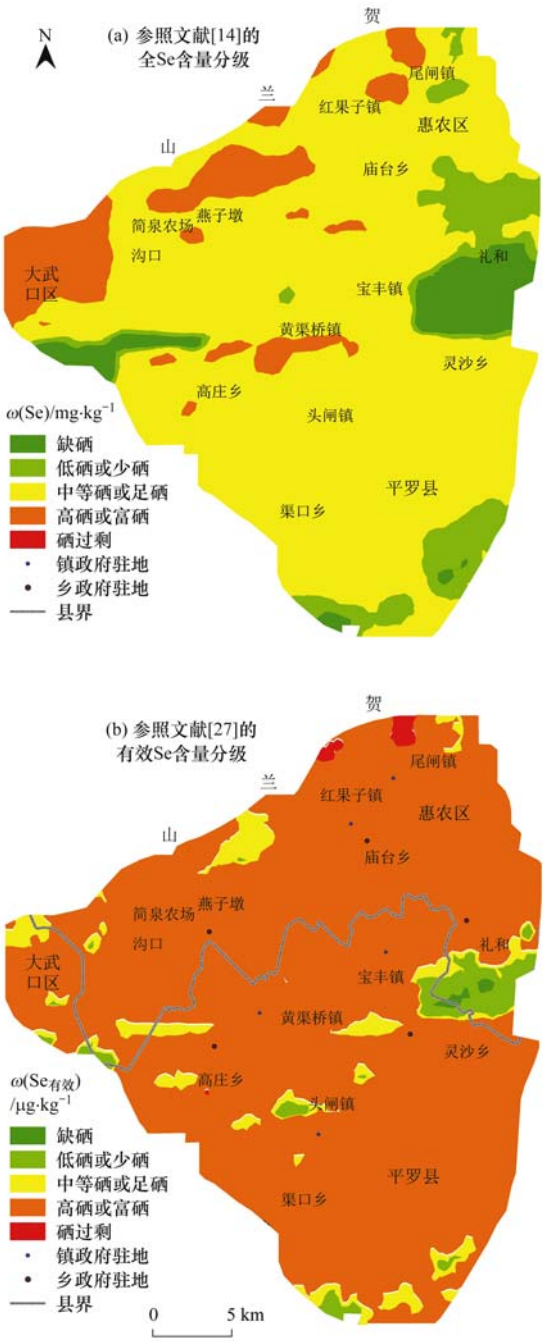


图 3 表层土壤样中全 Se 和有效 Se 含量的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of the content between Se and available-Se in surface soil samples

层土壤中 Se 以残渣态、强有机结合态和腐殖酸结合态为主,占全 Se 的 84.3%,可供作物吸收的水溶态和离子交换态 Se 的平均含量占 10.74%. 对 15 件样品中水溶态 Se 占比与研究区有效 Se 占比均值(5.42%)做单样本 T 检验,得到 $P = 0.993 > 0.05$,表明研究区随机抽取的样本中水溶态 Se 含量与研究区有效 Se 均值无差别,进一步证明该研究中有效 Se 仅仅指水溶态 Se,未包含其他可被植物吸收 Se,因此研究区实际有效 Se 含量远比测试结果大. 因此,从 Se 的形态上进一步确定研究区属于有效 Se 高、全 Se 低的地区.

表 5 表层土壤中各形态 Se 含量/mg·kg^{-1}

Table 5 Content of different morphological Se in surface soil/mg·kg^{-1}

项目	ω(Se)		
	均值	标准差	变幅
全量	0.234	0.06	0.09 ~ 0.32
残渣态	0.113	0.038	0.046 ~ 0.207
强有机结合态	0.053	0.02	0.011 ~ 0.084
腐殖酸结合态	0.026	0.011	0.001 ~ 0.044
水溶态	0.011	0.001	0.01 ~ 0.013
离子交换态	0.011	0.002	0.008 ~ 0.015
碳酸盐结合态	0.006	0.001	0.004 ~ 0.008
铁锰结合态	0.005	0.001	0.004 ~ 0.006

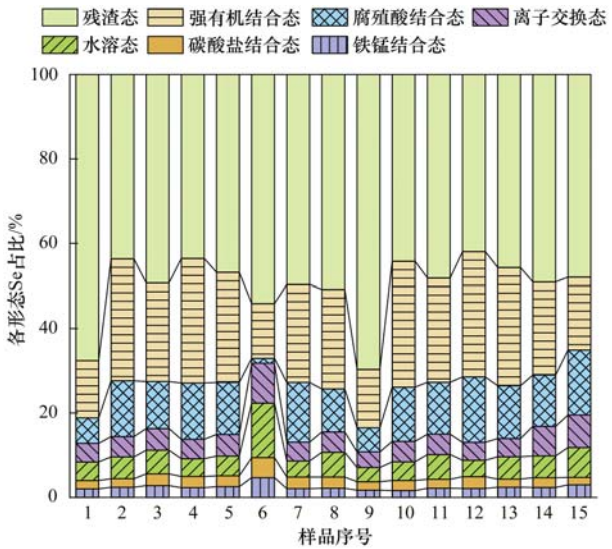


图 4 表层土壤样中各形态 Se 占比

Fig. 4 Proportion of different fractions of Se in surface soil samples

顺次降低[33]. 研究区随机采取 15 件样品进行形态分析,对各形态 Se 含量进行统计(表 5 和图 4),表

2.3 作物中 Se 的特征

土壤 Se 中水溶态、离子交换态等易被作物吸

收利用的有效 Se，在不同作物富集吸收能力、作物的不同部位和生长时间以及土壤环境等因素的综合影响下，使得不同作物中 Se 含量不同. 研究区根系土-作物中 Se 含量统计见表 6 和图 5，可以看出：在大宗作物中，小麦、水稻和玉米中 Se 含量均值依次减小，对应根系土中全 Se 含量均值按水稻、小麦和玉米依次增大，有效 Se 含量均值按小麦、水稻和玉米依次增大，这与成晓梦等[34]和王锐等[35]的研究结果相同，而与 Dinh 等[19]提出的水稻 Se 含量高于小麦和玉米不一致；经济作物中，西瓜、菜心和芥蓝中 Se 含量均低于检测限，芹菜、苜蓿和韭葱中 Se 含量相对较高，其对应根系土中韭葱全 Se 和有效 Se 含量相对较低，这与 Art 等[36]提出的韭葱具较强的聚 Se 能力一致；苜蓿根系土中全 Se 和有效 Se 含量较高，苜蓿聚 Se 能力最弱.

以 0.04 mg·kg^{-1}作为水稻、小麦、玉米的富硒农产品下限值[37]，样品富 Se 率小麦 > 水稻；而玉米中即使配套根系土中 ω(Se) 和 ω($Se_{有效}$) 分别高达 0.3 mg·kg^{-1}和 22.3 μg·kg^{-1}，玉米籽实不易吸收土壤中的 Se 使其均不富 Se[38]，种植出富 Se 玉米需要的土壤 Se 及有效 Se 含量更高，这与王惠艳等[16]、王锐等[25]和 Wang 等[38]的研究结果一致. 因此，可通过调整种植结构以小麦和韭葱等聚 Se 能力强的作物为主以增加富 Se 作物的产出量.

表 6　根系土-作物配套样中 Se 的含量[1)]

Table 6　Content of Se in root soil-crop matching samples

作物类别	ω($Se_{作物}$)/mg·kg^{-1}			ω(Se)/mg·kg^{-1}			ω($Se_{有效}$)/μg·kg^{-1}		
	均值	标准差	变幅	均值	标准差	变幅	均值	标准差	变幅
菜心	/	/	/	0.273	0.134	0.09 ~ 0.63	15.731	7.115	3.8 ~ 29.3
枸杞	0.016	0.004	0.012 6 ~ 0.023 6	0.289	0.079	0.17 ~ 0.48	15.808	5.239	7.2 ~ 26.1
韭葱	0.014	0.008	0.005 6 ~ 0.029	0.254	0.026	0.18 ~ 0.28	13.117	3.050	8.8 ~ 21.2
芥蓝	/	/	/	0.287	0.047	0.22 ~ 0.35	15.194	6.245	7.9 ~ 27.5
小麦	0.052	0.049	0.006 9 ~ 0.206	0.261	0.076	0.1 ~ 0.48	11.623	3.792	4.2 ~ 17.8
苜蓿	0.015	0.005	0.007 5 ~ 0.023 5	0.370	0.164	0.19 ~ 0.72	13.648	5.063	5.3 ~ 24.5
芹菜	0.017	0.010	0.006 2 ~ 0.04	0.264	0.028	0.22 ~ 0.34	12.920	2.249	9.9 ~ 17.1
水稻	0.028 *	0.049	0.005 9 ~ 1.76	0.182	0.047	0.1 ~ 0.28	12.714	4.368	4.5 ~ 22.1
西瓜	/	/	/	0.262	0.043	0.17 ~ 0.32	11.496	3.087	8.1 ~ 17.2
玉米	0.016	0.005	0.008 8 ~ 0.022 2	0.252	0.047	0.12 ~ 0.31	14.019	4.823	2.4 ~ 26.8

1)/表示 Se 含量未达检测限；* 为去掉极值后的算术平均值

3　讨论

3.1　富 Se 土壤阈值确定

我国幅员辽阔，跨越多个气候带，地质背景与土壤 Se 成因来源复杂多样，土壤类型及其理化性质迥异，土壤 Se 含量及其生物有效性差异极大，全国采用统一的土壤 Se 全量标准必然面临区域适用性问题[25]. 研究区属典型的有效 Se 高全 Se 低土壤，仅按 ω(全 Se) 为 0.3 mg·kg^{-1}[15]为富 Se 土壤阈值或 ω($Se_{有效}$) 在 8 ~ 20 μg·kg^{-1}[14]圈定为富 Se 土壤，均存在明显的误判和遗漏(图 6).

富 Se 土壤圈定的最终目的是生产富 Se 农产品，有效 Se 可以描述为可供农产品吸收利用的 Se，加上根系土-作物样品中根系土全 Se 和有效 Se 含量可代表研究区表层土壤中的 Se 含量特征，因此以根系土-作物中 Se 为研究对象，将农产品 Se 含量及其根系土有效 Se 和全 Se 含量统筹考虑反推出适合研究区的富 Se 土壤阈值具有较高的实用性. 以 0.04 mg·kg^{-1}作为富 Se 水稻、小麦和玉米的下限值[37]，对水稻、小麦和玉米中 Se 的含量及其根系土全 Se 和有效 Se 含量进行相关性和协同性分析[图 7(a)]，根系土全 Se 含量与有效 Se 含量呈显著的正相关(r = 0.455，P < 0.05)，有效 Se 随着全 Se 含量的增加而增加，同时作物富 Se 率增加，但作物 Se 含量与全 Se、有效 Se 含量相关性低(P > 0.05)；根系土中全 Se 和有效 Se 并不能完全控制作物 Se 的含量，但富 Se 作物中其根系土有效 Se 均较高；当 ω(全 Se) 调整为 0.24 mg·kg^{-1}时，错判和漏判的几率最小，可最大程度地将有效 Se 含量高样品和富 Se 作物样品囊括其中.

以 ω(Se) 为 0.24 mg·kg^{-1}为界限值，以 ω($Se_{作物}$) 为 0.01 mg·kg^{-1}作为富 Se 经济作物的下限值[37]对韭葱、苜蓿、芹菜和枸杞中 Se 及其根系土中 Se 和有效 Se 协同分析进行验证[图 7(b)]，同样可以得出 0.24 mg·kg^{-1}为适合研究区的富 Se 土壤划分阈值，这与文献[39]中提出的富 Se 土壤界限值 0.222 mg·kg^{-1}差距较小，更适合石嘴山地区.

3.2　有效 Se 含量的影响因素

明确有效 Se 含量的影响因素是采取针对性农艺措施进行生物强化进而提高农产品富 Se 率的重要基础. 对根系土中有效 Se 进行多元回归分析，拟合方式为：以有效 Se 为因变量，土壤理化指标作为自变量，在 195 件根系土样品中，采用系统随机抽样法抽出 15 件作为多元回归方程误差检验，其余

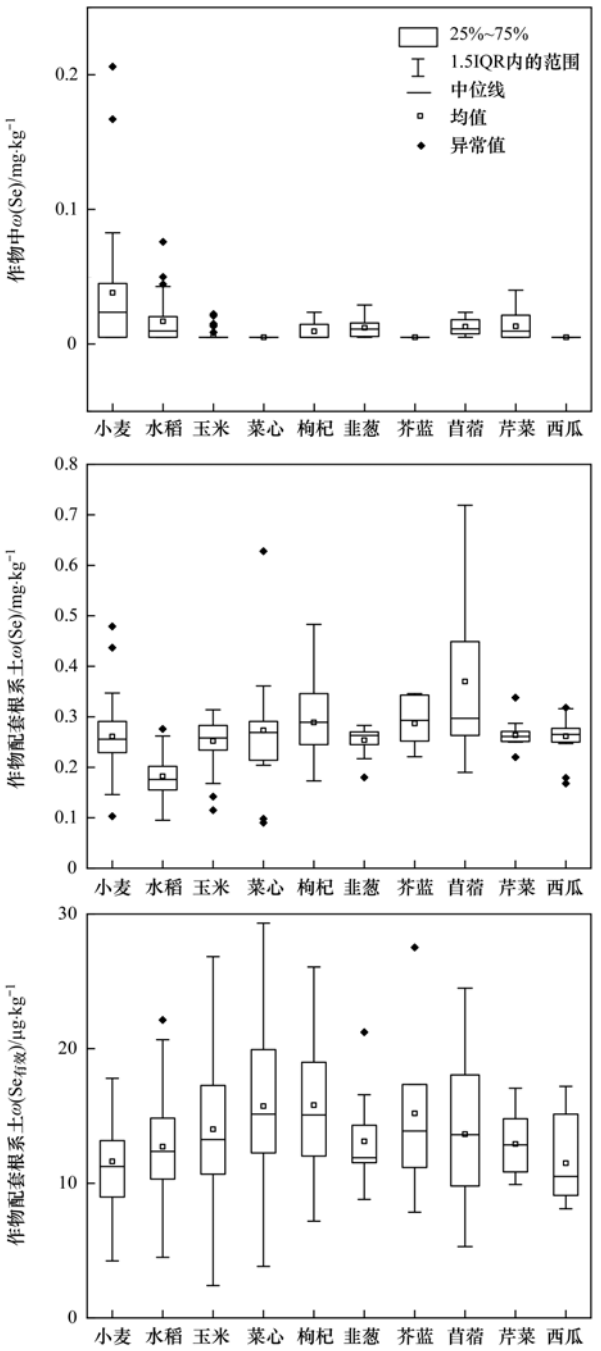


图 5 根系土-作物配套样中 Se 的含量

Fig. 5 Content of Se in root-crop matching samples

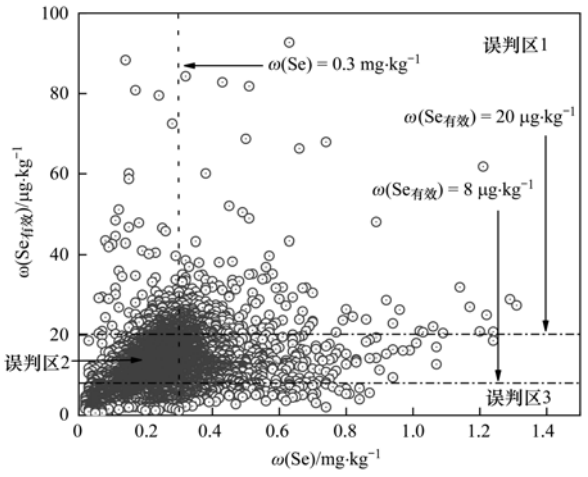
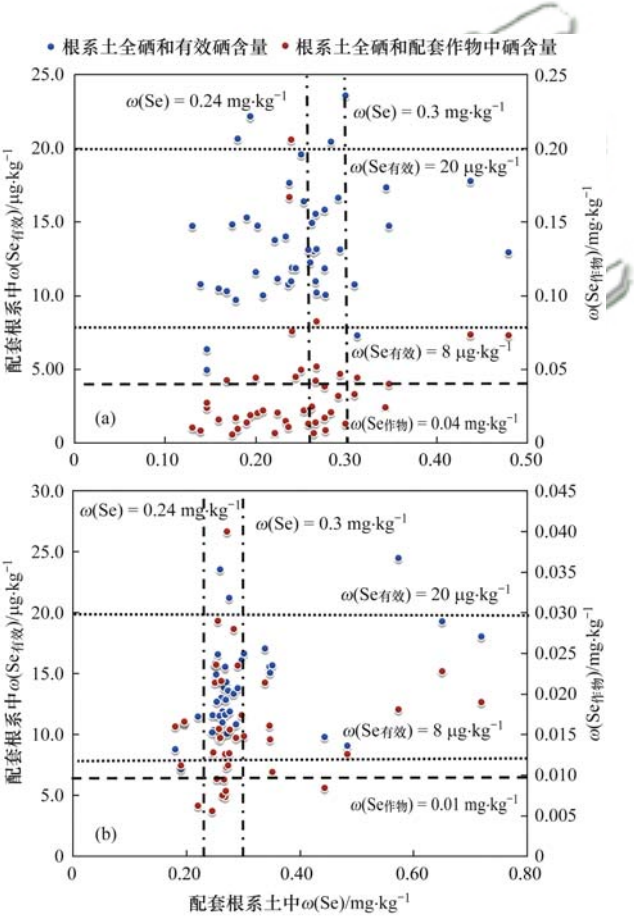


图 6 表层土壤样中全 Se 和有效 Se 含量的协调分析(n =8 814)

Fig. 6 Concordance analysis of the content between total-Se and available-Se in surface soil samples(n = 8 814)



(a)水稻、小麦和玉米(n =100),
(b)韭葱、苜蓿、芹菜和枸杞(n =60)

图 7 根系土全 Se、有效 Se 和配套作物 Se 含量协调分析

Fig. 7 Concordance analysis of the content among total-Se, available-Se, and Se in root-crop matching samples

180 件样本使用不同建模方式进行多元线性回归模型建立. 模型 1 和 2 中自变量根据根系土中有效 Se 与 N、有机质等 36 项指标相关性分析结果(表 7 和表 8),结合影响有效 Se 的常见因素,选取与有效 Se 相关性较显著的有效硼(B)、氮(N)和有机质等 14 个变量分别进行步进法和后退法建模;模型 3 和模型 4(表 7)以 36 项理化指标为自变量,直接进行步进法、后退法建模,模型中自变量的不同建模方式由 SPSS 软件自动得出. 从表 7 中看到:各回归模型整体 F 检验 P <0.05,各方程中自变量和因变量存在回归关系,自变量对因变量有效 Se 有显著性影响,4 个回归模型均具有统计学意义;模型 2 和模型 4 中,多个自变量 VIF > 10,说明 2 和 4 中多个自变量存在严重的多重共线性问题,各变量间相互影响程度较大,模型无法模拟数据全貌. 将未参与拟合的 15 个根系土样品的

测试数据分别代入方程 1 和 3 进行检验，得到有效 Se 的模型值，并与实测值进行对比（图 8），可以看出：2 个方程模型值与实测值整体趋势较为一致，可以较好地解释有效 Se 的变化，但模型 1 预测值与实测值差距较小，且仅用 4 个变量可描述有效 Se 的 54.3% 的变化，因此促进研究区有效 Se 富集的主要因素为：有效 B、全 Se、N 和速效钾（K），且影响程度依次减小. 因此，研究区表层土壤中有效硒不仅与土壤全 Se 有关，还与评价土壤肥力的 N、K 和 B 有关.

表 7　不同建模方法下有效 Se 影响因素的多元线性回归拟合方程

Table 7　Multiple linear regression equations of influence factors of available-Se by different modeling approaches

模型	建模方法	拟合方程	拟合优度检验（R^2）	F	P
1	相关性 + 步进法	$Se_{有效}=1.827+1.622B_{有效}+13.446Se+0.003N+0.006K_{速效}$	0.543	51.895	0
2	相关性 + 后退法	$Se_{有效}=1.447B_{有效}+0.006K_{速效}+20.038Se+0.462Cu-7.806TFe_2O_3+0.304Cr$	0.574	33.149	0
3	步进法	$Se_{有效}=0.883B_{有效}+36.933Se+2.58Cu_{有效}+0.012N-0.016Li+3.639pH+7.489Na_2O+0.006K_{速效}-0.21Mn_{有效}-1.888$ 有机质 $-0.005F-43.261$	0.726	33.149	0
4	后退法	$Se_{有效}=0.012N+37.243Se+0.005K_{速效}+0.782B_{有效}-1.692$ 有机质 $-2.468Al_2O_3+8.267K_2O-0.06Mn-0.003P-0.004S+7.406TFe_2O_3+1.769CaO+1.295Cu_{有效}+0.029P_{有效}-0.016N_{碱解}+1.294$ 全盐量	0.774	30.675	0

表 8　有效 Se 与土壤理化性质的相关性（$n=180$）[1)]

Table 8　Correlations among available Se, physical and chemical properties of soil ($n=180$)

项目	$Se_{有效}$	项目	$Se_{有效}$	项目	$Se_{有效}$	项目	$Se_{有效}$
$B_{有效}$	0.558**	Cd	0.394**	Mn	0.351**	Hg	0.304**
N	0.541**	Al_2O_3	0.393**	Pb	0.346**	As	0.296**
有机质	0.522**	Cr	0.389**	$Mn_{有效}$	0.346**	全盐量	0.284**
$K_{速效}$	0.468**	Ni	0.386**	S	0.343**	P	0.268**
Se	0.455**	TFe_2O_3	0.378**	$P_{有效}$	0.342**	F	0.255**
Cu	0.438**	I	0.377**	$Cu_{有效}$	0.340**	$Mo_{有效}$	0.226**
Zn	0.430**	B	0.376**	CEC	0.320**	$Zn_{有效}$	0.180*
MgO	0.413**	Li	0.376**	Mo	0.315**	Na_2O	0.170*
K_2O	0.409**	Co	0.368**	CaO	0.312**	$Fe_{有效}$	0.152*

1）** 表示在 0.01 级别（双尾），相关性显著；* 表示在 0.05 级别（双尾），相关性显著

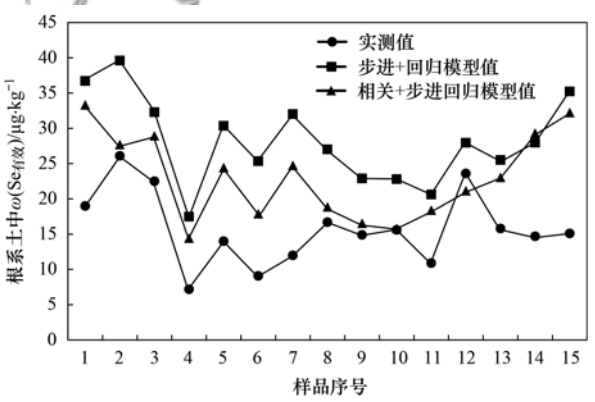


图 8　不同拟合模型中有效 Se 预测值和实测值对比

Fig. 8　Comparison of predicted and measured values of available Se in different fitting models

土壤中全 Se 是有效 Se 的主要来源并对有效 Se 起调控作用，不同方式和不同类型外源 Se 配施的调控方式已成为提高土壤中有效 Se 及作物 Se 含量的主要且有效的生物强化方式，相比土壤施 Se，叶面喷 Se 已被证实可显著提高小麦、水稻等作物中 Se 的含量[40~44]；供 N 水平提高能够促进小麦和青稞等作物中 Se 的吸收和聚集，二者呈现出较好的协同作用[45~47]；田间试验证实，在增加有机 Se 肥施用量下，Se 和 B 配施能显著或极显著提高中上部位烟叶 Se 含量[48]；K 肥与 Se 肥配合施用，对水稻、马铃薯等作物中 Se 的富集有正交互效应[49,50]. 因此，影响土壤有效 Se 含量的不只是全量 Se，还有影响土壤肥力的 N、K、B 及其易被作物吸收的有效态，有效 Se 与土壤肥力元素互为协同作用. 值得注意的是，研究区土壤 pH 与有效硒相关性较低，并非控制有效硒的主要因素，这与 Liu 等[51]提出的 pH 是土壤有效硒的主控因素且有效硒随着 pH 的升高而增大的观点有所不同，这可能与研究区土壤 pH 为单一碱性土壤有关[52]，pH 与有效硒的关系需要进一步按碱性强弱进行分类分析. 因此，富 Se 作物的培育不仅要充分了解土壤中全 Se 和有效 Se 含量，还需深入分析与土壤肥力元素的关系，据此进行作物的配施试验才能有针对性地采取农艺措施进行生物强化进而通过食物链改善人体 Se 营养状况[53,54].

4　结论

（1）石嘴山地区表层土壤 ω(Se) 和 $\omega(Se_{有效})$ 分

别为(0.26 ± 0.22) mg·kg^{-1} 和(12.85 ± 7.63) μg·kg^{-1},根系土 ω(Se)和 ω($Se_{有效}$)分别为(0.26 ± 0.09) mg·kg^{-1}和(13.37 ± 4.63) μg·kg^{-1},属于典型的全 Se 含量低有效 Se 含量高地区,且空间分布并不一致.因根系土-作物中 Se 和有效 Se 可代表石嘴山地区表层土壤 Se 含量特征,根据根系土-作物配套样中根系土全 Se、有效 Se 和作物 Se 含量的协调性分析,确定石嘴山地区富 Se 土壤阈值为 0.24 mg·kg^{-1},在沟口-简泉农场-燕子墩一带和黄渠桥镇扩大小麦、韭葱等聚 Se 能力强的作物种植面积可能会增加富 Se 作物的产出.

(2)富 Se 作物的产出是土壤全 Se、有效 Se、作物聚 Se 能力和土壤肥力指标等综合作用的结果.土壤中有效 Se 含量主要受有效 B、全 Se、全 N 和速效 K 等土壤肥力元素控制且影响程度依次降低,土壤肥力元素和有效 Se 互为协同作用,其含量的增加可促进有效 Se 含量的增加,后续可通过对耕作土壤进行 Se、N、K 和 B 的配施试验,确定提高有效 Se 的具体配施方式进而达到提高作物富硒率的目的.

参考文献:

[1] 王婧, 李海蓉, 杨林生. 青藏高原大骨节病流行区环境、食物及人群硒水平研究[J]. 地理科学进展, 2020, **39**(10): 1677-1686.
Wang J, Li H R, Yang L S. Selenium levels in the environment, food, and human hair in Kashin-Beck disease endemic areas of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Progress in Geography, 2020, **39**(10): 1677-1686.

[2] 杨妍萍, 刘晓端, 刘久臣, 等. 川西高原地区岩石中硒的地球化学特征和影响因素[J]. 岩矿测试, 2020, **39**(1): 115-126.
Yang Y P, Liu X D, Liu J C, *et al*. Geochemical characteristics of selenium in rocks from the western Sichuan Plateau[J]. Rock and Mineral Analysis, 2020, **39**(1): 115-126.

[3] Yang C M, Yao H, Wu Y J, *et al*. Status and risks of selenium deficiency in a traditional selenium-deficient area in Northeast China[J]. Science of the Total Environment, 2021, **762**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144103.

[4] Wang J, Li H R, Yang L S, *et al*. Distribution and translocation of selenium from soil to highland barley in the Tibetan Plateau Kashin-Beck disease area[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2017, **39**(1): 221-229.

[5] Yuan L X, Yin X B, Zhu Y Y, *et al*. Selenium in plants and soils, and selenosis in Enshi, China: implications for selenium biofortification [A]. In: Yuan X B, Yin L X (Eds.). Phytoremediation and Biofortification[M]. Dordrecht: Springer, 2012. 7-31.

[6] Du Y J, Luo K L, Ni R X, *et al*. Selenium and hazardous elements distribution in plant-soil-water system and human health risk assessment of Lower Cambrian, Southern Shaanxi, China [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2018, **40**(5): 2049-2069.

[7] Dinh Q T, Cui Z W, Huang J, *et al*. Selenium distribution in the Chinese environment and its relationship with human health: a review[J]. Environment International, 2018, **112**: 294-309.

[8] 王子健. 中国低硒带生态环境中硒的环境行为研究进展[J]. 环境化学, 1993, **12**(3): 237-243.
Wang Z J. Some biogeochemical aspects of selenium in Chinese low-selenium belt[J]. Environmental Chemistry, 1993, **12**(3): 237-243.

[9] 孙国新, 李媛, 李刚, 等. 我国土壤低硒带的气候成因研究[J]. 生物技术进展, 2017, **7**(5): 387-394.
Sun G X, Li Y, Li G, *et al*. Climatic causes of the selenium-deficient soil belt in China[J]. Current Biotechnology, 2017, **7**(5): 387-394.

[10] 王学求, 柳青青, 刘汉粮, 等. 关键元素与生命健康: 中国耕地缺硒吗?[J]. 地学前缘, 2021, **28**(3): 412-423.
Wang X Q, Liu Q Q, Liu H L, *et al*. Key elements and human health: is China's arable land selenium-deficient? [J]. Earth Science Frontiers, 2021, **28**(3): 412-423.

[11] Xiao K C, Lu L F, Tang J J, *et al*. Parent material modulates land use effects on soil selenium bioavailability in a selenium-enriched region of Southwest China[J]. Geoderma, 2020, **376**, doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114554.

[12] Sun G X, Liu X, Williams P N, *et al*. Distribution and translocation of selenium from soil to grain and its speciation in paddy rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(17): 6706-6711.

[13] Rayman M P, Infante G H, Sargent M. Food-chain selenium and human health: spotlight on speciation[J]. British Journal of Nutrition, 2008, **100**(2): 238-253.

[14] 谭见安. 中华人民共和国地方病与环境图集[M]. 北京: 科学出版社, 1989.

[15] DD 2019-10, 天然富硒土地划定与标识(试行)[S].

[16] 王惠艳, 曾道明, 郭志娟, 等. 天然富硒土地划定的富硒阈值[J]. 环境科学, 2021, **42**(1): 333-342.
Wang H Y, Zeng D M, Guo Z J, *et al*. Selenium threshold for the delimitation of natural selenium-enriched land [J]. Environmental Science, 2021, **42**(1): 333-342.

[17] Wang M K, Cui Z W, Xue M Y, *et al*. Assessing the uptake of selenium from naturally enriched soils by maize (*Zea mays* L.) using diffusive gradients in thin-films technique (DGT) and traditional extractions[J]. Science of the Total Environment, 2019, **689**: 1-9.

[18] Wang D, Xue M Y, Wang Y K, *et al*. Effects of straw amendment on selenium aging in soils: mechanism and influential factors[J]. Science of the Total Environment, 2019, **657**: 871-881.

[19] Dinh Q T, Wang M K, Tran T A T, *et al*. Bioavailability of selenium in soil-plant system and a regulatory approach[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2019, **49**(6): 443-517.

[20] Tolu J, Le Hécho I, Bueno M, *et al*. Selenium speciation analysis at trace level in soils[J]. Analytica Chimica Acta, 2011, **684**(1-2): 126-133.

[21] Sharma V K, Mcdonald T J, Sohn M, *et al*. Biogeochemistry of selenium. A review[J]. Environmental Chemistry Letters, 2015, **13**(1): 49-58.

[22] 周菲, 彭琴, 王敏, 等. 土壤-植物体系中硒生物有效性评价研究进展[J]. 科学通报, 2022, **67**(6): 461-472.
Zhou F, Peng Q, Wang M, *et al*. Advances in the evaluation of selenium bioavailability in soil-plant system[J]. Chinese Science Bulletin, 2022, **67**(6): 461-472.

[23] Yang H, Yang X F, Ning Z P, *et al*. The beneficial and hazardous effects of selenium on the health of the soil-plant-human system: an overview[J]. Journal of Hazardous Materials,

2022, **422**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126876.

[24] Favorito J E, Grossl P R, Davis T Z, *et al*. Soil-plant-animal relationships and geochemistry of selenium in the western phosphate resource area (United States): a review [J]. Chemosphere, 2021, **266**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128959.

[25] 王锐, 邓海, 贾中民, 等. 硒在土壤-农作物系统中的分布特征及富硒土壤阈值[J]. 环境科学, 2020, **41**(12): 5571-5578.
Wang R, Deng H, Jia Z M, *et al*. Distribution characteristics of selenium in a soil-crop system and the threshold of selenium-rich soils[J]. Environmental Science, 2020, **41**(12): 5571-5578.

[26] 周国华. 富硒土地资源研究进展与评价方法[J]. 岩矿测试, 2020, **39**(3): 319-336.
Zhou G H. Research progress of selenium-enriched land resources and evaluation methods [J]. Rock and Mineral Analysis, 2020, **39**(3): 319-336.

[27] 谭见安, 李日邦, 侯少范, 等. 环境硒与健康[M]. 北京: 人民卫生出版社, 1989.

[28] Gustafsson J P, Johnsson L. The association between selenium and humic substances in forested ecosystems—laboratory evidence [J]. Applied Organometallic Chemistry, 1994, **8**(2): 141-147.

[29] DB3308/T 18-2018, 富硒土壤评价标准[S].

[30] 谢薇, 杨耀栋, 侯佳渝, 等. 天津市蓟州区土壤硒的有效性及影响因素[J]. 环境化学, 2019, **38**(10): 2306-2316.
Xie W, Yang Y D, Hou J Y, *et al*. Bioavailability of selenium and its influencing factors in soil of Jizhou district, Tianjin[J]. Environmental Chemistry, 2019, **38**(10): 2306-2316.

[31] 李天斌. 宁夏回族自治区银川盆地多目标区域地球化学调查报告(比例尺: 1:250000)[R]. 银川: 宁夏回族自治区国土资源调查监测院, 2012.

[32] 武少兴, 龚子同, 黄标. 我国土壤中的溶态硒含量及其与土壤理化性质的关系[J]. 中国环境科学, 1997, **17**(6): 522-525.
Wu S X, Gong Z T, Huang B. Water-soluble selenium in main soil types of China and in relation to some soil properties[J]. China Environmental Science, 1997, **17**(6): 522-525.

[33] 周殷竹, 刘义, 王彪, 等. 青海省囊谦县农耕区土壤硒的富集因素[J]. 地质通报, 2020, **39**(12): 1952-1959.
Zhou Y Z, Liu Y, Wang B, *et al*. Influence factors of soil selenium in cultivated area of Nangqian County, Qinghai Province [J]. Geological Bulletin of China, 2020, **39**(12): 1952-1959.

[34] 成晓梦, 马荣荣, 彭敏, 等. 中国大宗农作物及根系土中硒的含量特征与富硒土壤标准建议[J]. 物探与化探, 2019, **43**(6): 1367-1372.
Cheng X M, Ma R R, Peng M, *et al*. Characteristics of selenium in crops and roots in China and recommendations for selenium-enriched soil standards [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, **43**(6): 1367-1372.

[35] 王锐, 邓海, 严明书, 等. 基于回归方程的硒元素生物有效性研究[J]. 土壤通报, 2020, **51**(5): 1049-1055.
Wang R, Deng H, Yan M S, *et al*. Bioavailability of selenium based on regression equation [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, **51**(5): 1049-1055.

[36] Art B, Öz E, Can S Z, *et al*. Bioaccessibility and bioavailability of selenium species in Se-enriched leeks (*Allium Porrum*) cultivated by hydroponically[J]. Food Chemistry, 2022, **372**, doi: 10.1016/j.foodchem.2021.131314.

[37] DB64/T 1221-2016, 宁夏富硒农产品标准(水稻、玉米、小麦与枸杞干果)[S].

[38] Wang S S, Liang D L, Wang D, *et al*. Selenium fractionation and speciation in agriculture soils and accumulation in corn (*Zea mays* L.) under field conditions in Shaanxi Province, China[J]. Science of the Total Environment, 2012, **427-428**: 159-164.

[39] DB64/T 1220-2016, 宁夏富硒土壤标准[S].

[40] 黄婷苗, 于荣, 王朝辉, 等. 不同硒形态和施硒方式对小麦硒吸收利用的影响及残效[J]. 作物学报, 2022, **48**(6): 1516-1525.
Huang T M, Yu R, Wang Z H, *et al*. Effects of different forms and application methods of selenium fertilizers on wheat selenium uptake and utilization and its residual availability[J]. Acta Agronomica Sinica, 2022, **48**(6): 1516-1525.

[41] 程丹, 张红, 郭子雨, 等. 硒处理对土壤理化性质及杭白菊品质的影响[J]. 土壤学报, 2020, **57**(6): 1449-1457.
Cheng D, Zhang H, Guo Z Y, *et al*. Effect of selenium application on soil physical and chemical properties and quality of *Chrysanthemum morifolium* cv Hangbai [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, **57**(6): 1449-1457.

[42] 张城铭, 周鑫斌. 不同施硒方式对水稻硒利用效率的影响[J]. 土壤学报, 2019, **56**(1): 186-194.
Zhang C M, Zhou X B. Effects of different selenium application methods on se utilization efficiency of rice[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, **56**(1): 186-194.

[43] Fayaz A. Effect of selenite and selenate application (soil or foliar) on transport, transformation, and distribution of selenium in soil and their bioavailability in wheat (*Triticum aestivum* L.) [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018.

[44] 彭琴, 李哲, 梁东丽, 等. 不同作物对外源硒动态吸收、转运的差异及其机制[J]. 环境科学, 2017, **38**(4): 1667-1674.
Peng Q, Li Z, Liang D L, *et al*. Dynamic differences of uptake and translocation of exogenous selenium by different crops and its mechanism[J]. Environmental Science, 2017, **38**(4): 1667-1674.

[45] 刘俏, 林勇, 胡小飞, 等. 氮磷肥对茶树锌硒等中微量元素吸收与分配的影响[J]. 生态学报, 2021, **41**(2): 637-644.
Liu Q, Lin Y, Hu X F, *et al*. Influences of nitrogen and phosphorus fertilizers on the absorption and accumulation of zinc, selenium, and other trace elements in tea plants [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, **41**(2): 637-644.

[46] 宋晓珂, 李宗仁, 王金贵. 施氮对青稞硒吸收、转运和分配的影响[J]. 土壤通报, 2019, **50**(5): 1196-1202.
Song X K, Li Z R, Wang J G. Effects of nitrogen application on selenium uptake, translocation, and distribution in naked barley [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, **50**(5): 1196-1202.

[47] 陈玉鹏, 彭琴, 梁东丽, 等. 施氮对小麦硒(Ⅵ)吸收、转运和分配的影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(2): 825-831.
Chen Y P, Peng Q, Liang D L, *et al*. Effects of nitrogen application on selenium uptake, translocation and distribution in winter wheat[J]. Environmental Science, 2017, **38**(2): 825-831.

[48] 王政, 敖金成, 陈廷慧, 等. 硒、硼配施对烟叶品质及硒含量的影响[J]. 河南农业科学, 2018, **47**(3): 38-43.
Wang Z, Ao J C, Chen T H, *et al*. Effects of Se and B combining application on quality of flue-cured tobacco leaves and Se content[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2018, **47**(3): 38-43.

[49] 周建利, 王孟, 吴东梅, 等. 硒肥与氮磷钾肥配施对营养生长期水稻生长及硒吸收的影响[J]. 南方农业学报, 2016, **47**(12): 2041-2046.

Zhou J L, Wang M, Wu D M, *et al*. Effects of combined application of selenium, nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on growth and selenium absorption in rice at vegetative period[J]. Journal of Southern Agriculture, 2016, **47**(12): 2041-2046.

[50] 邢海峰, 高炳德, 樊明寿. 钾肥、覆膜对马铃薯硒素吸收分配及硒肥吸收率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2012, (6): 57-61.
Xing H F, Gao B D, Fan M S. Effect of potassium fertilizer and film-covered on absorption rate of selenium fertilizer and the selenium absorption and distribution of potato[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2012, (6): 57-61.

[51] Liu N N, Wang M, Zhou F, *et al*. Selenium bioavailability in soil-wheat system and its dominant influential factors: a field study in Shaanxi Province, China[J]. Science of the Total Environment, 2021, **770**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144664.

[52] 王莹, 刘海燕, 王泽晶, 等. 宁夏石嘴山市农用地土壤硒的富集因素[J]. 环境科学, 2022, **43**(8): 4179-4189.
Wang Y, Liu H Y, Wang Z J, *et al*. Enrichment factors of soil-Se in the farmland in Shizuishan City, Ningxia[J]. Environmental Science, 2022, **43**(8): 4179-4189.

[53] 梁东丽, 彭琴, 崔泽玮, 等. 土壤中硒的形态转化及其对有效性的影响研究进展[J]. 生物技术进展, 2017, **7**(5): 374-380.
Liang D L, Peng Q, Cui Z W, *et al*. Progress on selenium bioavailibility and influential factors in soil[J]. Current Biotechnology, 2017, **7**(5): 374-380.

[54] 刘娜娜. 陕西塿土和广西红壤硒有效性差异及其主控因子初探[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 44 No. 1

Jan. 15, 2023

CONTENTS

Evolution of $PM_{2.5}$ Chemical Composition and Sources in Nanjing During the Implementation of the APPCAP ····· CHEN Pei-lin, GUO Rong, WANG Qin-geng (1)

Differences in $PM_{2.5}$ Components Between Urban and Rural Sites During Heavy Haze Event in Northern Henan Province ····· WANG Shen-bo, WANG Ling-ling, FAN Xiang-ge, *et al.* (11)

Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particles in Langfang in Autumn and Winter ····· ZHU Shu-zhen, TONG Jie, BAO Feng, *et al.* (20)

Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in $PM_{2.5}$ of Different Air Masses During Heating Season in Tianjin ····· LI Li-wei, DENG Xiao-wen, XIAO Zhi-mei, *et al.* (30)

Analysis of Critical Source of Potentially Harmful Elements in Urban Road Dust During Winter in Taiyuan Based on Multiple Attribute Decision Making Method ····· DENG Wen-bo, LIU Wen-juan (38)

Numerical Response Analysis of $PM_{2.5}$-O_3 Compound Pollution in Beijing ····· LIU Tian-qiang (48)

High-resolution Emission Inventory of Reactive Volatile Organic Compounds from Anthropogenic Sources in the Yangtze River Delta Region ····· TIAN Jun-jie, DING Xiang, AN Jing-yu, *et al.* (58)

Vertical Distribution Characteristics of Boundary Layer Volatile Organic Compounds in Autumn in the Mixed Industrial and Rural Areas over the Northern Suburb of Nanjing ····· WANG Tai, ZHU Bin, SHI Shuang-shuang, *et al.* (66)

Characterization of Ambient Volatile Organic Compounds, Source Apportionment, and the Ozone-NO_x-VOC Sensitivities in Liucheng County, Guangxi ····· WU Ying, MO Zhao-yu, WU Qin-qin, *et al.* (75)

Characteristics of Ozone Pollution and High-impact Meteorological Factors in Urban Cities: A Case of Suzhou ····· HE Yan, LIN Hui-juan, CAO Shu-ya, *et al.* (85)

Emission Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia in Quzhou County, North China Plain ····· KANG Jia-hui, MENG Fan-lei, LIU Xue-jun, *et al.* (94)

Application of WRF Optimal Parameterization Scheme for Different Air Quality Models ····· YANG Jing-chao, JIANG Xing-wen, BO Xin, *et al.* (104)

Distribution Characteristics and Health Effects of Bioaerosols in Spring over Xi'an City ····· WEI Jun-qiang, YANG Liu, SHEN Zhen-xing, *et al.* (118)

Distribution of Bacterial Concentration and Viability in Atmospheric Bioaerosols Under Different Weather Conditions in the Coastal Region of Qingdao ····· WEI Wen-shu, QI Jian-hua, CHANG Cheng (127)

Spatiotemporal Distribution and Driving Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Inland Sediments of China ····· HUANG Zhu-liang, CAI Jia-wei, WANG Ru-wei (138)

Distributions of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in the Nearshore Area of the Yangtze River Estuary ····· XU Qiu-hong, LIU Shu-guang, LOU Sha, *et al.* (158)

Co-occurrence of Tetracycline Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Plateau Wetlands Under the Influence of Human Activities ····· QIN Rong, YU Qing-guo, LIU Zhen-ya, *et al.* (169)

Occurrence and Health Risk Assessment of Multiple Pesticides in Drinking Water Sources of Southeast China ····· HE Shu, DONG Hui-yu, REN Nan-qi (180)

Spatiotemporal Distribution and Pollution Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Main Water Supply Reservoirs in Central Zhuhai City ····· WANG En-rui, ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, *et al.* (189)

Distribution Characteristics and Pollution Risk of Heavy Metals in River Sediment of Suzhou Water Network Area, China ····· ZHENG Min-hui, BAI Dong-rui, ZHANG Tao, *et al.* (198)

Distribution of Biodegradable Dissolved Organic Matter and Its Affecting Factors in a Typical Peri-urban Watershed in Yangtze River Delta ····· WU Wen-yu, MA Jing-sheng, YANG Lei, *et al.* (210)

Long-term Succession Patterns and Driving Factors of Water Quality in a Flood-pulse System Lake: A Case Study of Lake Luoma, Jiangsu Province ····· HUANG Xue-ying, GAO Ming-yuan, WANG Jin-dong, *et al.* (219)

Microplastic Pollution Status and Ecological Risk Evaluation in Weihe River ····· SHAN Ze-xuan, ZHANG Yan, ZHANG Cheng-qian, *et al.* (231)

Effects of Different Colored Polycarbonate Plastics on Growth and Community Structure of Periphytic Algae ····· WANG Meng-xue, YIN Si-cheng, WANG Zhen-fang, *et al.* (243)

Diversity Patterns and Influencing Factors of Epibiotic in *Vallisneria natans* and Planktonic Bacteria Communities ····· ZHANG Mei-ting, LIU Jin-xian, SU Jia-he, *et al.* (252)

Bacterial Community and Diversity of River Ecosystems on the Qinghai-Tibet Plateau Based on 16S rRNA Gene Sequencing ····· QU Wei-qing, ZHANG Bo-mei, HUANG Xue, *et al.* (262)

Spatial and Temporal Heterogeneity and Ecological Health Evaluation of Diatom Community Based on eDNA ····· JIANG Shan, ZHANG Yan, LI Fei-long, *et al.* (272)

Severity Differences and Mechanisms of Algal Blooms Among Sections in Pengxi River of the Three Gorges Reservoir ····· LUO Xiao-jiao, ZHANG Xing, HUANG Wei, *et al.* (282)

Characteristics of Soil Erosion and Nitrogen Loss in Vegetable Field Under Natural Rainfall ····· NING Jia-li, HUANG Yan-hui, LI Gui-fang, *et al.* (293)

Effects of Green, Blue, and Blue-green Roofs on Runoff Quality ····· ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, *et al.* (303)

Analysis of Spatiotemporal Variation Characteristics and Driving Forces of NPP in Shanxi Province from 2000 to 2020 Based on Geodetector ····· SHAO Jia-hao, LI Jing, YAN Xing-guang, *et al.* (312)

Spatio-temporal Variation in Vegetation Cover and Its Driving Mechanism Exploration in Southwest China from 2000 to 2020 ····· XU Yong, DAI Qiang-yu, HUANG Wen-ting, *et al.* (323)

Heavy Metal Content and Resistance Gene Abundance and Related Properties in the Surface Soil around Qinghai Lake ····· HU Shi-lei, QU Jian-li, ZHANG Li, *et al.* (336)

Soil Heavy Metal Content, Pollution, and Influencing Factors in Typical Farming Area of Sichuan Basin ····· LIU Shu-ling, WU Mei, LIU Zhi-yuan, *et al.* (347)

Risk Assessment and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils of Yellow River Irrigation Area of Ningxia ····· CHEN Lin, MA Kun, MA Jian-jun, *et al.* (356)

Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Soil Around Copper Smelting Sites ····· PENG Chi, LIU Xu, ZHOU Zi-ruo, *et al.* (367)

Characteristics of Typical Soil Acidification and Effects of Heavy Metal Speciation and Availability in Southwest China ····· LING Yun, LIU Han-yi, ZHANG Xiao-ting, *et al.* (376)

Stabilization Characteristics of Exogenous Cd in Different Types of Soil ····· WANG Gang, YU Hai-ying, HUANG Hua-gang, *et al.* (387)

Threshold of Se-rich Soil Based on Available-Se and Influencing Factors of Available-Se ····· WANG Ying, MA Yan-bin, WANG Ze-jing (395)

Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop System Based on Soil Parent Material Zoning ····· CHEN Zi-wan, XU Jing, HOU Zhao-lei, *et al.* (405)

Characteristics and Planting Safety Assessment of As Content in Dryland Soil and Maize in Guizhou Province ····· HUANG Feng-yan, ZHOU Lang, SONG Bo, *et al.* (415)

Potential of Intercropping *Pennisetum purpureum* Schum with *Melia azedarach* L. and *Broussonetia papyrifera* for Phytoremediation of Heavy-metal Contaminated Soil around Mining Areas ····· WANG Xiao-hui, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, *et al.* (426)

Inactivation of Cd and As by an *Enterobacter* Isolated from Cd and As Contaminated Farmland Soil ····· YIN Xue-fei, LIU Yu-ling, WU De, *et al.* (436)

Mineralization Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Relationship with Organic Carbon Components in Artificial *Robinia pseudoacacia* Forest in Loess Hilly Region ····· ZHU Yu-fan, LIU Wei-chao, LI Jia-xin, *et al.* (444)

Accumulation, Migration, and Transformation of Soil Phosphorus in Facility Agriculture and Its Influencing Factors ····· FANG Bing, CHEN Lin, WANG Yang, *et al.* (452)

Optimizing Straw Management to Enhance Carbon and Nitrogen Efficiency and Economic Benefit of Wheat-Maize Double Cropping System ····· WANG Liang, QIAN Xin, GAO Ying-bo, *et al.* (463)

Effect of Deep Fertilization with Slow/Controlled Release Fertilizer on N Fate in Clayey Soil Wheat Field ····· HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YUAN Wen-sheng, *et al.* (473)

Structure and Function of Soil Fungal Community in Rotation Fallow Farmland in Alluvial Plain of Lower Yellow River ····· NAN Zhen-wu, LIU Zhu, MENG Wei-wei, *et al.* (482)

Response of Topsoil Fungal Community Structure to Soil Improvement Measures in Degraded Forest of Red Soil Region ····· GUAN Hong-zhi, HUANG Rong-zhen, WANG Jin-ping, *et al.* (494)

Temporal and Spatial Variations in Root-associated Fungi Associated with *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in the Semi-arid and Dry Sub-humid Desertified Regions of Northern China ····· ZHAO Pei-shan, GUO Mi-shan, GAO Guang-lei, *et al.* (502)

QMEC-based Analysis of the Soil Microbial Functional Potentials across Different Tibetan Plateau Glacier Forelands ····· ZHANG Jie-jie, Anders Priemé, CHEN Xian-ke, *et al.* (512)

Meta Analysis on Yield Effect of Biochar for Staple Crops in China ····· YU Bin-hang, JI Jian-mei, WANG Li-xue, *et al.* (520)

Effects of Biochar on Antibiotic Environmental Behaviors in Soil: A Meta-analysis ····· LI Jing-han, ZHANG Jian-qiang, XIA Li-qiong, *et al.* (531)

Properties of Biochars Prepared from Different Crop Straws and Leaching Behavior of Heavy Metals ····· LI Jia-kang, QIU Chun-sheng, ZHAO Jia-qi, *et al.* (540)

Spatial-temporal Evolution and Heterogeneity of Carbon Emissions at County-level in China ····· SONG Yuan-zhen, ZENG Jian, WANG Sen, *et al.* (549)

Spatiotemporal Dynamic Evolution and Gravity Center Migration of Carbon Emissions in the Main Urban Area of Chongqing over the Past 20 Years ····· XIANG Shu-jiang, YANG Chun-mei, XIE Yu-qi, *et al.* (560)

Spatiotemporal Characteristics and Influencing Factors of Environment Emergency Incident in China from 1991 to 2018 ····· YU Guang-hui, WANG Fei-fan, LIU Xian-zhao, *et al.* (572)

Migration, Transformation, and Toxicity of Quaternary Ammonium Antimicrobial Agents in the Environment ····· ZHANG Li-lan, QIN Cun-li, QIAN Yao, *et al.* (583)