

目次

我国地下水硝酸盐污染及源解析研究进展 ..... 涂春霖, 陈庆松, 尹林虎, 李强, 和成忠, 刘振南 (3129)

北京市地下水中高危害污染物筛选 ..... 杨蕾, 徐莹, 余诗航, 李潇斐, 李剑 (3142)

融合多源时空数据的地下水硫酸盐预测模型 ..... 李如跃, 曾妍妍, 周金龙, 孙英, 闫志云 (3153)

北京市城市河流中抗生素的污染特征及多层次生态风险评估 ..... 赵晓帅, 郑其冰, 马瑞, 张恒, 陈苗, 郭昌胜 (3165)

典型城市不同河流沉积物中抗生素抗性基因的时空分布特征:以石家庄为例  
..... 赵波, 宋圆梦, 卢梦淇, 白寅虎, 陈昊达, 高赛, 王琳静, 张璐璐, 崔建升 (3176)

长江流域地表水中镉生态风险的区域差异分析  
..... 丁仁, 廖梓童, 陆颖, 巫寅虎, 陈卓, 高梓楠, 徐红卫, 陆松柳, 惠二清, 魏东斌, 洪洪普 (3186)

安徽涡河流域水化学与同位素特征及水体转化关系 ..... 许金昭, 刘桂建, 司雯, 刘锐佳, 王冠宇 (3196)

基于注意力机制优化的BiLSTM珠江口水质预测模型 ..... 陈湛峰, 李晚芳 (3205)

基于流域单元的环巢湖综合景观对河流水质的影响 ..... 王杰, 刘安安, 张俊武, 陈青松, 杨慧文 (3214)

休耕对抚仙湖周边农田土壤剖面和浅层地下水中氮累积的影响 ..... 叶远行, 陈安强, 李林, 闵金恒, 王炽, 闫辉, 张丹 (3225)

改性生物质材料对地表水中残余草甘膦异丙胺盐的吸附 ..... 周玥, 李艳, 王晓东, 王慧, 薛冰纯 (3234)

污水处理过程中典型PPCPs的污染特征及降解转化研究进展 ..... 贺德春, 郑密密, 黄伟, 柳玉荣, 胡嘉梧, 刘姜艳, 潘杰 (3247)

关中原城市群土地利用变化对碳储量的影响 ..... 边蕊, 赵安周, 刘宪锋, 徐瑞皓, 李子洋 (3260)

基于InVEST-PLUS模型的淮北市碳储量时空演变及预测 ..... 于芝琳, 赵明松, 高迎凤, 王涛, 赵治东, 王世航 (3270)

基于PLUS-InVEST模型的江西省生态系统碳储量时空演变与预测  
1990~2020年阿克苏河流域土地利用碳排放时空轨迹与影响因素 ..... 韩方红, 高凡, 何兵, 曹燕, 姚小晨 (3297)

未来气候情景下甘南草地土壤有机碳密度的时空预测与分析 ..... 李钊, 张美玲, 张锐祺, 田景, 王晨 (3308)

长江经济带生态系统服务权衡与协同及其驱动因素 ..... 何刘洁, 郑博福, 万炜, 谢泽阳, 宋旭, 朱锦奇, 刘忠 (3318)

近20年兰西城市群生态系统服务价值对土地利用转型的时空响应  
..... 梁朕月, 曹春, 李锦超, 唐千惠, 吴育焱, 肖潇, 饶玉良, 王继伟, 杨丽琴 (3329)

中国生态环境质量与人类活动耦合机制及其影响因子 ..... 赵体侠, 王丽园, 孙梓欣, 张哲, 董庆栋, 朱文博 (3341)

重要生态功能区干旱时空演变特征及对关键资源的影响:以黄河流域为例 ..... 卢荡, 魏伟, 王继平, 闫彭, 刘婷, 周俊菊, 顾斌斌 (3352)

黄河中游不同地貌分区景观格局脆弱性及其驱动力 ..... 何梦真, 张乐涛, 魏仪媛, 郑泽豪, 王清源 (3363)

基于可解释机器学习的青藏高原草地物候变化多因素影响分析 ..... 刘慧文, 刘欢, 胡鹏, 彭辉, 王硕 (3375)

“双碳”目标下城市形态对碳排放的影响:以长江经济带为例 ..... 冯新惠, 李艳, 王诗逸, 余迺, 杨佳钰, 吴能君 (3389)

成渝城市群紧凑度与碳排放强度时空演变及协调发展 ..... 李志英, 朱晓珊, 李志强, 李婉云 (3402)

西安高新区多情景碳达峰预测及减排路径分析 ..... 姜旭朋, 张强, 赵文婷, 原晓红, 樊亭亭, 郑烈龙, 刘跃廷 (3412)

基于机器学习的交通碳排放预测模型构建与分析 ..... 刘慧甜, 胡大为 (3421)

中国交通运输碳排放强度时空交互特征及跃迁机制 ..... 李健, 刘舒琪, 王晓祺 (3433)

碳中和植物降污固碳及其机制研究进展 ..... 陈芸, 周启星, 陶宗鑫, 郑彤, 吴康迎, 张嘉乐, 欧阳少虎 (3446)

废旧三元锂离子电池回收利用碳足迹 ..... 宋晓聪, 杜帅, 谢明辉, 邓陈宁, 郭静, 沈鹏, 赵慈, 陈忱 (3459)

农业环境中抗生素风险评估的研究进展 ..... 杨珍珍, 李红娜, 李娜 (3468)

基于最优尺度地理探测的长三角有机污染物时空分布驱动因素分析 ..... 何金珂, 周亚男, 陈跃红, 庄超, 李润光 (3480)

城-郊区域土壤铅(Pb)累积过程时空模拟:以中部某大城市为例 ..... 宋啸凡, 侯鹰, 董一帆, 杨勇, 高镇, 陈卫平 (3493)

基于APCS-MLR模型的开封市公交站周边灰尘重金属源解析及健康风险评估  
..... 段海静, 申浩欣, 彭超月, 任翀, 王艳锋, 刘德新, 王玉龙, 郭瑞超, 马建华 (3502)

宁夏供港蔬菜田土壤重金属分布特征及生态风险评价 ..... 姬丽, 马琨, 谢铁娜, 陈林, 李虹, 贾彪 (3512)

4种改良剂对紫色土Cd生物有效性及土壤酶活性的影响 ..... 丁馨茹, 徐曼, 严宁珍, 王子芳, 李志琦, 黄容, 王洋, 代文才, 高明 (3523)

生物炭负载氨氮对土壤碳排放、酶活性及微生物群落的影响 ..... 杨如意, 董艳红, 肖鑫, 徐艳丽, 况帅, 宋文静, 董建新, 郑学博 (3533)

刺梨果渣生物炭对白菜产量及品质和土壤性质的影响 ..... 樊洪, 谢珊, 龙天雨, 杨丽, 段淳, 刘元生, 宋理洪, 洪祖拥 (3543)

生物炭对西瓜连作土壤真菌群落结构和功能类群的影响 ..... 常芳娟, 张贵云, 张丽萍, 吕贝贝, 刘珍, 范巧兰, 姚众 (3553)

不同改良物料对盐碱土壤真菌群落结构的影响 ..... 白小龙, 张恩, 武晋民, 马东海, 张邦彦, 张朝辉, 田丰, 赵卉, 王彬 (3562)

生物炭和秸秆还田对咸水滴灌棉田土壤微生物群落特征及功能差异的影响 ..... 郭晓雯, 向贵琴, 张发朝, 江山, 闵伟 (3571)

不同比例硫酸铵替代尿素对玉米根际土壤环境及微生物群落的影响 ..... 张延慧, 刘宇, 韩莹, 董馨宇, 郭探文, 闫秋艳, 闫双堆 (3584)

不同形态氮添加对多年生高寒栽培草地土壤理化性质和微生物群落结构的影响  
..... 童永尚, 张春平, 董全民, 杨增增, 张小芳, 霍丽安, 曹铨, 张正社, 俞翥, 杨晓霞 (3595)

宁夏黄土陵区农田土壤细菌海拔分布特征 ..... 吴霞, 蔡进军, 王长军, 李维倩, 陈刚, 白阳阳 (3605)

大通河流域土壤细菌及氮循环功能菌群沿海拔的空间分布 ..... 王竹, 刘扬, 王芳 (3614)

不同水文情景下白洋淀水体好氧反硝化菌群对水质因子的动态响应  
..... 孟佳靖, 张甜娜, 陈哲, 周石磊, 底怡玲, 武辰彬, 王晨光, 张家丰, 崔建升 (3627)

粉煤灰添加对城市多源有机废弃物联合堆肥效能及堆体细菌群落的影响  
..... 邹嘉成, 杜国彬, 苏凯文, 于彩虹, 刘迎超, 王晨晨, 徐德卓 (3638)

镉胁迫下外源壳聚糖对小麦幼苗生理特性、抗氧化能力及镉吸收的影响  
..... 张静静, 焦秋娟, 徐正阳, 范丽娜, 姜瑛, 宋佳, 化党领, 李鸽子, 林迪, 柳海涛 (3649)

水体微塑料丰度与氮代谢功能微生物及基因响应关系 ..... 王志超, 马钰, 李雅馨月, 李晨曦, 高静涵, 李卫平 (3661)

聚苯乙烯微塑料对污水中胞外耐药基因的影响及其机制 ..... 周帅, 黄啊潮, 黄泽枫, 李伦福, 杨锋娟, 陈安琪, 修斐晨, 高媛媛 (3671)

聚乙烯微塑料对土壤养分和酶活性的影响 ..... 梁榕, 何娇, 孙飞虎, 张瑞芳, 王鑫鑫 (3679)

低密度聚乙烯微塑料对土壤中含氧多环芳烃自然衰减的影响 ..... 汤佳豪, 鲍文秀, 张阔, 李瑜婷, 古鹏, 吴济舟, 卢媛 (3688)

不同环境介质轮胎微塑料老化及小粒径微粒释放特征 ..... 张泰硕, 商静静, 刘海勇, 王顺燕, 刘鹏 (3700)

光老化对不同粒径聚苯乙烯微塑料吸附Cu(II)的影响 ..... 刘文娟, 郭玉峰, 邓文博 (3708)

秸秆添加对长期施肥旱地土壤N<sub>2</sub>O和CO<sub>2</sub>排放的影响 ..... 涂昊泽, 林彬, 王军, 胡荣桂, 肖恒斌, 邹磊 (3716)

有机肥部分替代化肥对桃园N<sub>2</sub>O和NO排放的影响 ..... 徐品上, 郭姝敏, 郑皓晨, 王金阳, 邹建文 (3725)

基于SEM模型的热环境时空特征及影响因素分析:以西安都市圈为例 ..... 张颖, 王旭红, 冯子豪, 苑嘉欣, 余孟千禧 (3734)

西安市大气污染物时空演化特征及对人体健康评价 ..... 徐传奇, 白杨, 唐远薇, 张欣宇, 王志瑞, 呼婧婧, 杨锦涛 (3746)

川南城市群冬季大气细颗粒物中金属元素特征及其来源解析 ..... 张天力, 黄小娟, 张军科, 韩琳, 陈璐璐, 张小玲 (3756)

# 宁夏供港蔬菜田土壤重金属分布特征及生态风险评价

姬丽<sup>1</sup>, 马琨<sup>2</sup>, 谢铁娜<sup>3</sup>, 陈林<sup>2</sup>, 李虹<sup>4</sup>, 贾彪<sup>1\*</sup>

(1. 宁夏大学农学院, 银川 750021; 2. 宁夏大学生态环境学院, 银川 750021; 3. 宁夏大学科学技术研究院, 银川 750021; 4. 宁夏回族自治区农业环境保护监测站, 银川 750002)

**摘要:** 农田土壤重金属污染会影响蔬菜作物的生长发育及产量, 同时也会影响蔬菜的品质与口感, 长期以来通过食物链传递和富集, 最终对人体健康造成一定危害. 因此为探明宁夏多年多茬种植供港蔬菜后其土壤重金属分布特征, 预测其生态风险, 分析其污染形成原因, 于2019~2021年连续3a采集了477个宁夏供港蔬菜田表层土壤样本, 分析As、Cd、Cr、Hg、Pb、Cu、Zn和Ni这8种重金属含量和分布特征, 采用单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法、地累积指数法和潜在生态风险指数法对宁夏供港蔬菜田土壤重金属污染状况进行评价, 利用Pearson相关分析和主成分分析法解析了宁夏供港蔬菜田重金属来源. 结果表明, 宁夏供港蔬菜田土壤中As、Cd、Cr、Hg、Cu和Zn含量均值高于宁夏土壤背景值, 但8种重金属含量均低于国内农用地土壤风险筛选值; 在空间分布上, As、Cr和Ni在研究区西北部、中部以及南部出现连片高值区, Pb、Zn、Cd、Hg和Cu在研究区西北部与南部出现高值响应; 单因子指数法和内梅罗综合污染指数法表明, 宁夏供港蔬菜田土壤整体处于清洁水平; 地累积指数法结果显示研究区污染以Hg和Cd污染为主, 污染区域主要集中在研究区西北部和南部; 潜在生态风险指数显示Hg和Cd为主要风险元素, 其中Hg以中等、较强和很强生态风险为主, 分别占比44.65%、44.65%和1.26%, Cd以中等、较强为主, 占比65.83%和3.56%; 综合Pearson相关分析和主成分分析表明, 8种重金属污染来源可划分为3类, I为自然源: Cu、Zn、Pb、As、Ni和Cr; II为农业源: Cd; III为工业源和农业源: Hg. 综合来看, 供港蔬菜田土壤重金属均无超标现象, 土壤环境条件良好, 宁夏供港蔬菜生产整体处于安全水平. 研究结果可为宁夏供港菜田土壤安全利用和供港蔬菜安全生产、合理施肥、农艺运筹以及种植结构调整等提供帮助.

**关键词:** 宁夏; 供港蔬菜; 土壤重金属; 空间分布; 生态风险评价; 来源解析

中图分类号: X53; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)06-3512-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202307048

## Evaluation of Heavy Metal Distribution Characteristics and Ecological Risk of Soil of Vegetable Land for Hong Kong in Ningxia

Ji Li<sup>1</sup>, Ma Kun<sup>2</sup>, Xie Tie-na<sup>3</sup>, Chen Lin<sup>2</sup>, Li Hong<sup>4</sup>, Jia Biao<sup>1\*</sup>

(1. College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. College of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 3. Institute of Science and Technology, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 4. Agricultural Environmental Protection Monitoring Station, Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750002, China)

**Abstract:** Heavy metal pollution in farmland soil can affect the growth, development, and yield of vegetable crops, as well as the quality and taste of vegetables, and can be continuously transmitted and enriched through the food chain, which ultimately poses a certain hazard to human health in the long term. Therefore, in order to investigate the distribution characteristics of soil heavy metals after years of multi-crop planting of vegetables supplied to Hong Kong, predict their ecological risks, and analyze the causes of pollution formation, 477 surface soil samples of vegetable fields supplied to Hong Kong in Ningxia were collected for three consecutive years from 2019 to 2021, and the contents and distribution characteristics of eight heavy metals, namely, As, Cd, Cr, Hg, Pb, Cu, Zn, and Ni were analyzed. The soil heavy metal pollution status of vegetable fields supplied to Hong Kong in Ningxia was evaluated using the single-factor pollution index method, Nemerov's comprehensive pollution index method, land accumulation index method, and potential ecological risk index method, and the sources of heavy metals in vegetable fields supplied to Hong Kong in Ningxia were analyzed using the Pearson's correlation analysis and the principal component analysis method. The results showed that the mean values of As, Cd, Cr, Hg, Cu, and Zn in the soils of Ningxia's vegetable fields were higher than the background values of Ningxia soils, but the contents of all eight heavy metals were lower than the risk screening values of domestic agricultural soils; in terms of spatial distribution, As, Cr, and Ni showed contiguous high values in the northwestern, central, and southern parts of the study area, whereas Pb, Zn, Cd, Hg, and Cu showed high values in the northwestern and southern parts of the study area. The single-factor index method and the Nemerov's comprehensive pollution index method showed that the soil of Ningxia's vegetable farmland for Hong Kong was at the clean level as a whole. The results of the ground accumulation index method showed that the pollution in the study area was mainly Hg and Cd pollution, and the pollution areas were mainly concentrated in the northwest and south of the study area. The potential ecological risk index showed that Hg and Cd were the main risk elements, among which Hg was dominated by moderate, strong, and very strong ecological risks, accounting for 44.65%, 44.65%, and 1.26%, respectively, and Cd was dominated by moderate and strong risks, accounting for 65.83% and 3.56%. The comprehensive Pearson correlation analysis and principal component analysis showed that the pollution sources of eight heavy metals could be divided into three categories, namely, natural sources: Cu, Zn, Pb, As, Ni, and Cr; agricultural sources: Cd; and industrial and agricultural sources: Hg. From a comprehensive point of view, the heavy metals of the soil in the fields of vegetables supplied to Hong Kong had not exceeded the standard, and the environmental

收稿日期: 2023-07-05; 修订日期: 2023-09-05

基金项目: 宁夏自然科学基金项目(2023AAC03075); 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2021BEG03014); 宁夏回族自治区农业资源环境监测与保护项目(2130135)

作者简介: 姬丽(1999~), 女, 硕士, 主要研究方向为农业生态学, E-mail: jil19990216@163.com

\* 通信作者, E-mail: jiaobao2008@163.com

conditions of the soil were good, such that the production of vegetables supplied to Hong Kong by Ningxia was at a safe level overall. The results of the study can provide a theoretical basis for the safe utilization of soil in vegetable fields and the green production of vegetables supplied to Hong Kong in Ningxia, which were aimed to provide help for the safe production of vegetable fields supplied to Hong Kong, the rational application of fertilizers, agronomic planning, and the adjustment of planting structure.

**Key words:** Ningxia; vegetables for Hong Kong; soil heavy metals; spatial distribution; ecological risk evaluation; source analysis

农田重金属是土壤环境中危害较大的一种污染物,具有潜伏周期长、毒性危害大、生物降解难和累积效果明显等特点<sup>[1,2]</sup>,长期积累会导致农田土壤和农业生态环境恶化<sup>[3]</sup>,并通过粮油菜等农产品直接进入食物链,威胁人类健康<sup>[4]</sup>.有研究表明,农田中土壤重金属可以通过食物链进行传递和富集,最终到达人体,长期以来食用此类土壤中生产的农产品会引发如结膜炎、肺癌、高血压、贫血和心脏病<sup>[4,5]</sup>等诸多病症的发生.据2014年《全国土壤污染状况调查公报》显示,全国有19.4%的耕地土壤重金属超过了其背景值<sup>[5]</sup>,每年有 $1.2 \times 10^7$  t粮食重金属含量超标<sup>[4]</sup>,其中As、Cd、Cr、Hg、Pb、Cu、Zn和Ni这8种重金属都存在一定的含量超标风险<sup>[6,7]</sup>.因此,明确农田土壤重金属分布特征和污染现状,对于区域粮油菜安全生产和保护人类健康至关重要.

宁夏作为中国西北地区重要的商品粮基地和特色冷凉蔬菜建设基地<sup>[8]</sup>,其土壤环境质量直接影响粮食蔬菜的安全生产<sup>[9-11]</sup>.近年来,供港蔬菜作为一项特色优势产业在宁夏广泛种植,且一年多茬,长期高水肥管理致使农田土壤重金属大量累积,供港蔬菜田土壤重金属超标风险增强.同时,宁夏作为黄河上游地区,农田土壤重金属含量超标会直接导致地下水和黄河水质污染加重<sup>[12,13]</sup>.目前已有学者对宁夏土壤重金属污染情况做了相关分析<sup>[8,14-16]</sup>,但迄今针对宁夏供港蔬菜田土壤重金属污染和生态风险研究鲜有报道,宁夏供港蔬菜田土壤环境污染状况及其生态风险不清.基于此,本文以宁夏省477个供港蔬菜田表层土壤为研究对象,分析As、Cd、Cr、Hg、Pb、Cu、Zn和Ni这8种重金属元素含量和空间分布特征,采用单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法、地累积指数法和潜在生态风险指数法对宁夏供港蔬菜田土壤重金属的污染状况和生态风险进行评价,并利用Pearson相关分析和主成分分析对监测区重金属污染来源进行解析,旨在为宁夏供港蔬菜田污染防治、供港蔬菜安全生产以及黄河流域生态先行区建设提供数据支撑.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

宁夏( $104^{\circ}17' \sim 107^{\circ}39'E$ ,  $35^{\circ}14' \sim 39^{\circ}23'N$ ,图1)位于中国西部的黄河上游地区,全区总面积6.64

$\times 10^4$  km<sup>2</sup>,平均海拔在1 000 m以上,属于温带大陆性气候,年日照时数2 194~3 082 h,年平均气温5~9℃,年平均降水量约200~680 mm<sup>[17]</sup>.宁夏地处黄河水系上游,灌溉历史悠久,是中国西北重要的粮食产区.宁夏土壤类型多样,大部分地区土质疏松且土层深厚,气候凉爽,昼夜温差大且降水适中,是全国优质高档绿色蔬菜和冷凉高产蔬菜产区之一.

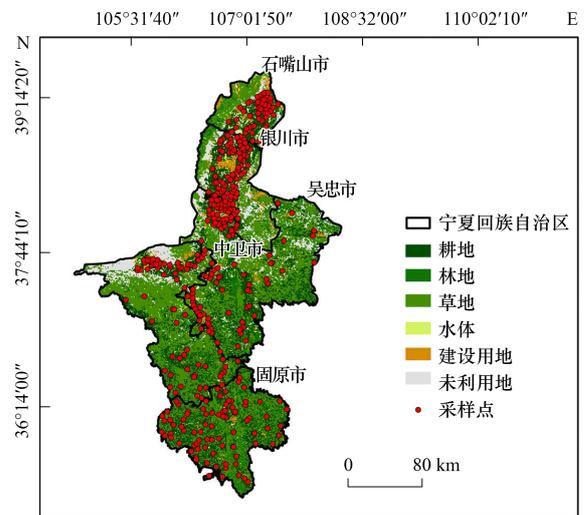


图1 采样点分布示意

Fig. 1 Sampling sites distribution

### 1.2 土壤样品采集

于2019~2021年采用五点法采集宁夏全区供港蔬菜田表层土壤(0~20 cm)样品共477个,其中2019年采集159个,2020年采集155个,2021年采集163个.土壤样品采集借助GPS定位系统测定采样点地理坐标,按照2 m×2 m网格法布设点位,实地采样时根据当地地形、周边环境等实际情况优化和增加采样点位.用四分法将土壤样品均匀混合后装袋密封保存,自然风干后去除杂物,其中一部分粉碎并研磨后过1 mm和0.25 mm筛用于测定土壤pH、土壤有机质和土壤阳离子交换量,另一部分粉碎研磨后过100目尼龙筛用于土壤重金属含量测定分析.

### 1.3 土壤样品分析测定

本研究采集宁夏2019~2021年477个供港蔬菜田表层土壤样本,其测定方法见表1.

样品分析测试由内蒙古谱尼测试技术有限公司完成.为确保实验结果的准确度和精密性,样品测试过程采用国家一级标准物质(GBW系列)进行质量

表1 土壤样品测定方法

Table 1 Soil sample determination method

测定项目	测定方法
pH	电位法(PHS-3C/NMIE-0421) <sup>[18]</sup>
有机质	滴定法(50 mL/HJ-DA1-4-A) <sup>[18]</sup>
阳离子交换量	滴定法(25 mL/HJ-DA2-4-A) <sup>[18]</sup>
As、Cr、Ni、Cu 和 Zn	火焰原子吸收分光光度法(GB/T 17137-1997、GB/T 17139-1997 和 GB/T 17138-1997)
Mn	原子吸收分光光度计(上分 AA320)
Cd 和 Pb	微波消解和电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, 安捷伦 7500)

监控, 分析过程中每批次抽取 10% 的样品进行平行样测定, 相对标准偏差控制在  $\leq 5\%$ , 实验中使用的试剂品级均为优级纯, 所用水均为超纯水。

#### 1.4 评价方法

##### 1.4.1 单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法

为掌握各重金属污染物对农田土壤环境的贡献, 突出污染最严重的重金属元素, 选择单因子污染指数法[式(1)]和内梅罗综合污染指数法[式(2)]对农田土壤环境进行综合评价, 计算公式如下:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{P_{\text{imax}}^2 + P_{\text{avc}}^2}{2}} \quad (2)$$

式中,  $P_i$  为单因子污染指数;  $C_i$  为重金属  $i$  的实测值 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ );  $S_i$  为重金属  $i$  的评价标准 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ );  $P_{\text{综}}$  为内梅罗综合污染指数;  $P_{\text{imax}}$  为单因子污染指数的最大值;  $P_{\text{avc}}$  为单因子污染指数的平均值。

引用《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018)风险筛选值<sup>[19,20]</sup>作为评价标准. 单因子污染指数与内梅罗综合污染指数等级分类标准如表 2 所示。

表3 宁夏土壤重金属背景值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Table 3 Background values of heavy metals in Ningxia soils/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 

项目	Pb	As	Zn	Ni	Cu	Hg	Cr	Cd
背景值	20.9	11.9	58.8	36.5	22.1	0.021	60	0.112

##### 1.4.3 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法由瑞典学者 Hakanson 提出<sup>[24]</sup>, 该方法能在评价土壤重金属潜在生态风险的同时考虑到重金属元素生态毒性的危害. 计算公式如下:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n (T_r^i \times C_i^i) = \left( T_r^i \times \frac{C_i}{C_n^i} \right) \quad (4)$$

式中, RI 为重金属综合潜在生态危害指数;  $C_i$  为重金属  $i$  的含量;  $C_n^i$  为重金属  $i$  的背景值含量 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 选用宁夏土壤背景值<sup>[22]</sup>;  $C_i^i$  为土壤重金属  $i$  的污染指数;  $E_r^i$  为土壤重金属  $i$  的潜在生态危害指数;  $T_r^i$  为重金属  $i$  的生物毒性响应因子。

表2 土壤重金属污染评价分级表

Table 2 Soil heavy metal pollution evaluation grading table

等级	单因子污染指数	综合污染指数	污染等级
I	$P_i \leq 0.7$	$P_{\text{综}} \leq 0.7$	安全
II	$0.7 < P_i \leq 1.0$	$0.7 < P_{\text{综}} \leq 1.0$	警戒线
III	$1.0 < P_i \leq 2.0$	$1.0 < P_{\text{综}} \leq 2.0$	轻度污染
IV	$2.0 < P_i \leq 3.0$	$2.0 < P_{\text{综}} \leq 3.0$	中度污染
V	$P_i > 3.0$	$P_{\text{综}} > 3.0$	重度污染

##### 1.4.2 地累积指数法

地累积指数法作为区分人为活动影响的重要参数<sup>[21]</sup>, 计算公式如下:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left( C_i / 1.5 B_n \right) \quad (3)$$

式中,  $I_{\text{geo}}$  为地累积指数;  $C_i$  为重金属  $i$  的实测值 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ );  $B_n$  为重金属  $i$  的背景值 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 采用宁夏土壤背景值(表 3)<sup>[22]</sup>; 1.5 为修正系数<sup>[23]</sup>。

根据地累积指数  $I_{\text{geo}}$  将污染程度划分为 7 个等级, 其中  $I_{\text{geo}} \leq 0$ , 无污染;  $0 < I_{\text{geo}} \leq 1$ , 轻度污染;  $1 < I_{\text{geo}} \leq 2$ , 偏中度污染;  $2 < I_{\text{geo}} \leq 3$ , 中度污染;  $3 < I_{\text{geo}} \leq 4$ , 偏重度污染;  $4 < I_{\text{geo}} \leq 5$ , 重度污染;  $I_{\text{geo}} > 5$ , 严重污染<sup>[4]</sup>。

其中 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb 和 Hg 生物毒性系数<sup>[25]</sup>分别为 2、5、5、1、10、30、5 和 40. 其中  $E_r^i$  和 RI 的等级划分标准<sup>[16,26]</sup>如表 4。

#### 1.5 数据处理

采用 Excel 2010 统计实验数据, 应用 SPSS 23 对

表4 重金属潜在生态危害指数分类与危害等级

Table 4 Classification and hazard class of heavy metal potential ecological hazard index

$E_r^i$	RI	潜在生态危害程度
$E_r^i \leq 40$	$RI \leq 150$	轻微风险
$40 < E_r^i \leq 80$	$150 < RI \leq 300$	中等风险
$80 < E_r^i \leq 160$	$300 < RI \leq 600$	较强风险
$160 < E_r^i \leq 320$	$600 < RI \leq 1200$	很强风险
$E_r^i > 320$	$RI > 1200$	极强风险

数据进行相关性分析和主成分分析,运用 Origin 2022 进行数据做图,采用 ArcGIS Pro 软件绘制采样点图和空间插值图。

## 2 结果与分析

### 2.1 宁夏供港蔬菜田土壤重金属含量特征

#### 2.1.1 土壤基本参数与重金属含量特征

由表 5 可知,采集的宁夏 477 个供港蔬菜田土壤 pH 值范围为 7.56~9.60,有机质平均值为  $14.13 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,阳离子交换量最大值为  $26.5 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,最小值为  $3.62 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,土壤重金属  $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Hg})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Zn})$  和  $\omega(\text{Ni})$  的均值分别为 12.60、0.18、64.40、0.03、20.18、22.76、64.65 和  $30.26 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,其中, Pb 和 Ni 含量低于宁夏土壤背景值, As、Cd、Cr、Hg、Cu 和 Zn 略高于宁夏土壤背景值,分别是宁夏土壤背景值的

1.06、1.66、1.07、1.50、1.03 和 1.10 倍,说明这 6 种重金属在土壤中有不同程度的富集。以土壤环境质量(GB 15618-2018)<sup>[19]</sup>作为标准,8 种重金属含量均低于国家农用地土壤风险筛选值,表明研究区内土壤生态质量风险低,较为安全。

变异系数可以度量概率分布的离散程度,能够体现出重金属含量的变化情况,变异系数越大,即变异程度越大<sup>[27]</sup>。变异系数划分为 3 类<sup>[27]</sup>:低变异( $\text{CV} < 0.16$ )、中变异( $0.16 \leq \text{CV} \leq 0.36$ )和高变异( $\text{CV} > 0.36$ ),表 5 中 8 种重金属变异程度为:  $\text{Hg} > \text{Cd} > \text{Cu} > \text{As} = \text{Zn} > \text{Ni} > \text{Pb} > \text{Cr}$ ,其中 Cr 和 Pb 为低变异,表明 Cr 和 Pb 在土壤中分布较均匀,受人为因素影响较小; Cd、Cu、As、Zn 和 Ni 属于中变异, Hg 属于高变异,初步认定宁夏供港蔬菜田中 Hg 元素离散程度较高,受外界干扰和人为活动影响显著。

表 5 重金属含量特征分析<sup>1)</sup>  
Table 5 Characterization of heavy metal content

项目	采样数	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数(CV)	宁夏土壤背景值	土壤风险筛选值(pH > 7.5)
As	477	4.22	18.90	12.60	2.37	0.19	11.90	25.0
Cd	477	0.07	0.47	0.18	0.05	0.31	0.11	0.6
Cr	477	36.20	87.00	64.40	8.56	0.13	60.00	250.0
Hg	477	0.00	0.13	0.03	0.02	0.54	0.02	3.4
Pb	477	12.80	33.40	20.18	3.04	0.15	20.90	170.0
Cu	477	10.10	45.10	22.76	4.71	0.21	22.10	100.0
Zn	477	30.00	112.60	64.65	12.10	0.19	58.80	300.0
Ni	477	16.10	62.20	30.26	5.01	0.17	36.50	190.0
pH	477	7.56	9.60	8.52	0.25	0.03	—	—
有机质	477	2.15	46.30	14.13	5.55	0.39	—	—
阳离子交换量	477	3.62	26.50	9.67	2.96	0.31	—	—

1) “—”表示没有相关数据;其中宁夏土壤背景值、土壤风险筛选值和 8 种重金属最小值、最大值、平均值和标准差单位均为  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,有机质单位为  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,阳离子交换量单位为  $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$

#### 2.1.2 土壤重金属空间分布特征

利用反距离插值法形成宁夏供港蔬菜田 8 种重金属空间分布情况(图 2)。As、Cr 和 Ni 元素含量的空间分布相类似,在研究区西北部、中部以及南部出现连片高值区,东部地区 As、Cr 和 Ni 含量相对较低; Pb、Zn、Cd、Hg 和 Cu 元素的空间分布较为一致,高值区主要分布在研究区西北部,且南部也有部分高值响应,研究区中部及东部地区 Pb、Zn、Cd、Hg 和 Cu 元素含量为较低区域。从空间分布特征情况来看,宁夏供港蔬菜田土壤 8 种重金属元素空间分布特征明显,在研究区西北部及南部均有高值响应,其中 As、Cr 和 Ni 的高值范围最广。

### 2.2 宁夏供港蔬菜田土壤重金属生态风险评价

#### 2.2.1 土壤综合污染指数评价

依据国家土壤环境质量标准(GB 15618-2018),利用单因子污染指数和内梅罗综合污染指数对供港

蔬菜田土壤重金属污染进行生态风险评价(图 3 和图 4)。供港蔬菜田土壤中 8 种重金属  $P_i$  值大小顺序为:  $\text{As} > \text{Cd} > \text{Cr} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Ni} > \text{Pb} > \text{Hg}$ (图 3),样本中 Cr、Cu、Zn、Ni、Pb 和 Hg 的污染等级都处于安全范围之内, As 和 Cd 分别有 1.89% 和 0.21% 的样点处于警戒范围。Cr、Cu、Zn、Ni、Pb 和 Hg 的污染水平为清洁水平, As 和 Cd 污染水平为尚清洁水平。结合供港蔬菜田土壤重金属内梅罗综合污染指数空间分布,内梅罗综合污染指数高值区主要分布于研究区西北部,其余地区内梅罗综合污染指数整体较低(图 4)。此外,供港蔬菜田土壤重金属采样点的内梅罗综合污染指数均小于 0.7(图 4),污染等级为安全,污染评价水平为清洁水平,说明宁夏供港蔬菜田土壤重金属元素污染程度低,整体相对安全。

#### 2.2.2 地累积指数评价

以宁夏土壤背景值<sup>[22]</sup>,计算供港蔬菜田土壤重

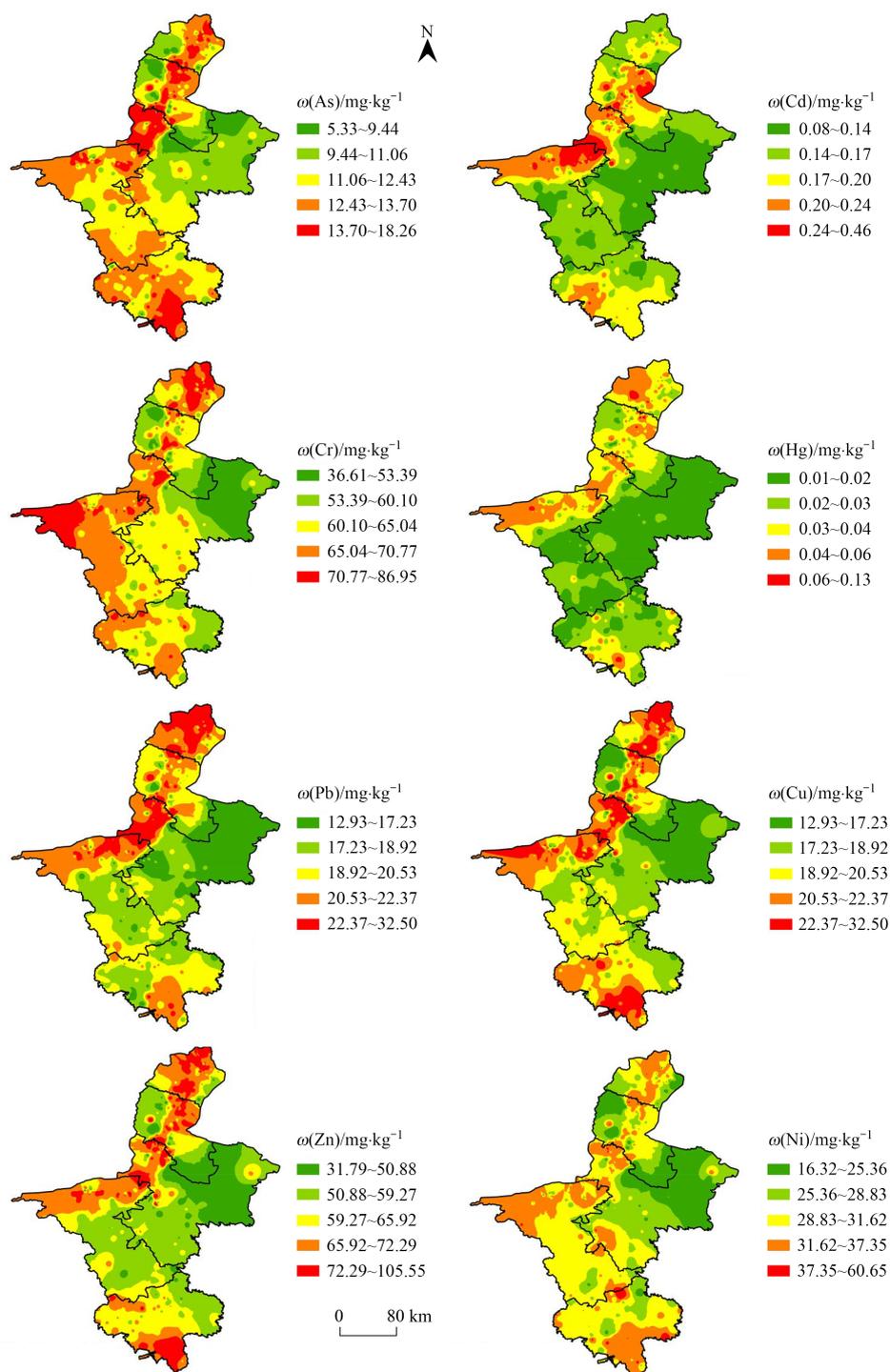


图2 农田土壤重金属空间插值分布

Fig. 2 Spatial interpolation distribution of heavy metals in agricultural soils

金属元素地累积指数(表6). 结果表明: 宁夏供港蔬菜田土壤重金属整体污染水平较轻, 除 Hg 和 Cd 之外其它重金属元素均为无污染和轻度污染等级, 其中 Hg 无污染等级占样点总数的 63.10%, 轻度污染等级占 34.59%, 偏中度污染等级占 2.10%, 中度污染等级占 0.21%; Cd 无污染等级占样点总数的 46.33%, 轻度污染等级占 52.62%, 偏中度污染等级占 1.05%; As、Cu 和 Zn 无污染等级分别占样点总数

的 98.32%、98.95% 和 97.48%, Pb 和 Ni 无污染等级均占样点总数的 99.79%, Cr 则全部为无污染等级.

结合宁夏供港蔬菜田土壤重金属地累积指数空间分布(图5), As、Cr、Cu、Zn、Ni 和 Pb 地累积指数绝大多数小于 0, 说明供港蔬菜田在一定程度上未受到这 6 种重金属元素污染, Cd 在研究区北部及部分南部地区内处于轻度污染和偏中度污染; 而 Hg 在研究区北部及部分南部地区有较大区域处于轻度

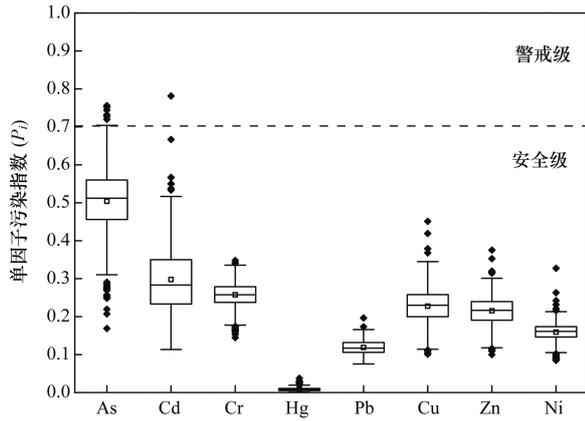


图3 土壤重金属单因子污染指数( $P_i$ )

Fig. 3 Soil heavy metal single factor pollution index( $P_i$ )

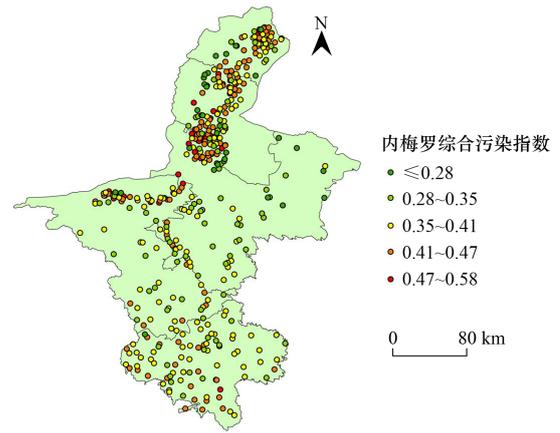


图4 研究区农田土壤内梅罗综合污染分布

Fig. 4 Distribution of integrated contamination of agricultural soils in the study area with Nemerow

污染，并在北部少量区域处于偏中度污染到中度污染。总体来看，宁夏北部与南部部分地区的重金属

污染物主要为Cd和Hg，二者地累积指数较高。

表6 土壤重金属地累积指数( $I_{geo}$ )

Table 6 Soil heavy metal land accumulation index( $I_{geo}$ )

元素	最大值	最小值	平均值	不同污染等级样点数/个(超标率/%)							
				无污染	轻度	偏中度	中度	偏重度	重度	严重	
As	0.08	-2.08	-0.53	469(98.32)	8(1.68)	0	0	0	0	0	
Cd	1.48	-1.30	0.02	221(46.33)	251(52.62)	5(1.05)	0	0	0	0	
Cr	-0.05	-1.31	-0.50	477(100)	0	0	0	0	0	0	
Hg	2.02	-3.31	-0.31	301(63.10)	165(34.59)	10(2.10)	1(0.21)	0	0	0	
Pb	0.09	-1.29	-0.65	476(99.79)	1(0.21)	0	0	0	0	0	
Cu	0.44	-1.71	-0.58	472(98.95)	5(1.05)	0	0	0	0	0	
Zn	0.35	-1.56	-0.48	465(97.48)	12(2.52)	0	0	0	0	0	
Ni	0.18	-1.77	-0.88	476(99.79)	1(0.21)	0	0	0	0	0	

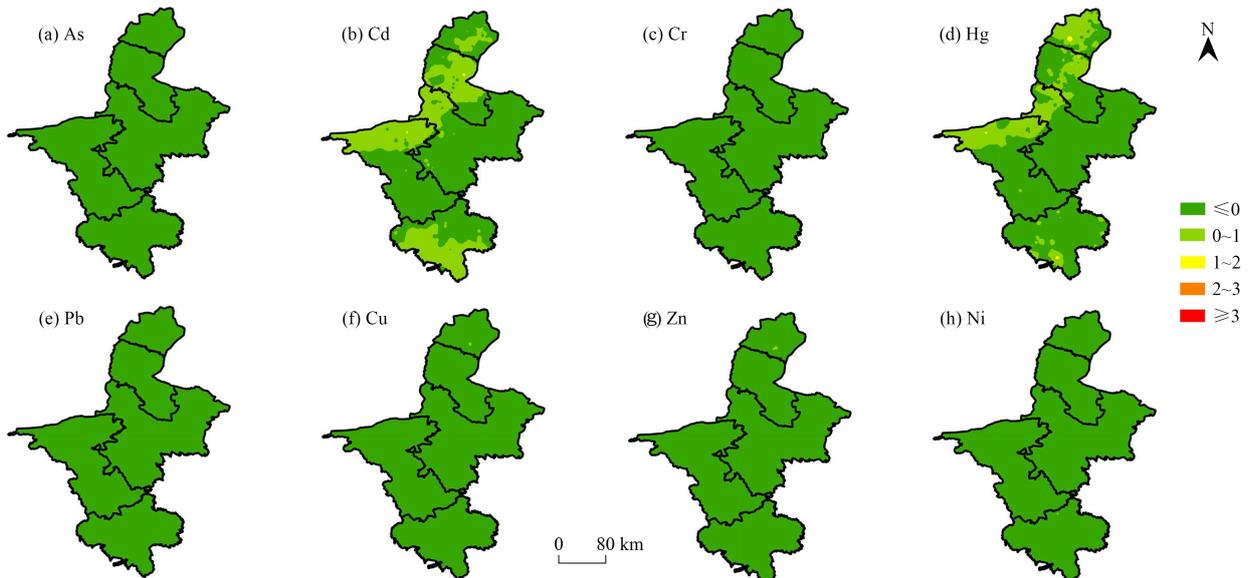


图5 研究区农土地累积指数( $I_{geo}$ )

Fig. 5 Soil land accumulation index ( $I_{geo}$ ) of agricultural land in the study area

### 2.2.3 潜在生态风险评价

如表7所示，宁夏供港蔬菜田单个重金属元素潜在生态风险指数( $E_r^i$ )从大到小依次为Hg、Cd、As、Cu、Ni、Pb、Cr和Zn，其中Hg有44.65%的样

点为中等生态风险，14.88%的样点为较强生态风险，1.26%的样点为很强生态风险；Cd中等生态风险样点占比65.83%，较强生态风险样点占比3.56%；其它重金属元素均为轻微生态风险。根据重金属综

合潜在生态风险指数(RI), 研究区 477 个采样点中 样点属于较强生态风险, 无很强和极强生态风险  
有 28.72% 的采样点属于中等生态风险, 0.21% 的采 样点.

表 7 潜在生态风险指数统计  
Table 7 Statistics of potential ecological risk index

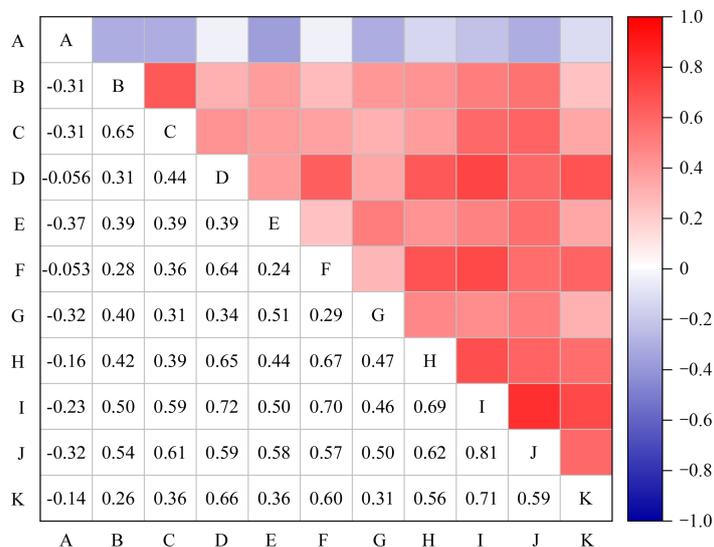
元素	样点数	最大值	最小值	平均值	不同生态风险等级样点数/个(超标率/%)				
					轻微风险	中等风险	较强风险	很强风险	极强风险
As	477	15.88	3.55	10.59	477(100)	0	0	0	0
Cd	477	125.60	18.21	47.85	146(30.61)	314(65.83)	17(3.56)	0	0
Cr	477	2.90	1.21	2.15	477(100)	0	0	0	0
Hg	477	243.81	6.06	55.24	187(39.20)	213(44.65)	71(14.88)	6(1.26)	0
Pb	477	7.99	3.06	4.83	477(100)	0	0	0	0
Cu	477	10.20	2.29	5.15	477(100)	0	0	0	0
Zn	477	1.91	0.51	1.10	477(100)	0	0	0	0
Ni	477	8.52	2.21	4.14	477(100)	0	0	0	0
RI	477	318.84	43.70	131.05	339(71.06)	137(28.72)	1(0.21)	0	0

2.3 宁夏供港蔬菜田土壤重金属污染来源解析

2.3.1 土壤重金属元素相关性分析

通过 Pearson 分析发现(图 6), 宁夏供港蔬菜田土壤 pH 与土壤有机质、土壤阳离子交换量以及 8 种重金属间均为负相关关系, 且相关性较低. 相较而言, 土壤有机质和土壤阳离子交换量与 8 种重金属间相关性较高, 且均为正相关关系. Cu 和 Zn 具有正

相关关系, 相关系数为 0.81, 说明二者之间存在较强的同源性; Cu 与 As、Cr 和 Ni 之间的相关性系数均在 0.7 以上, 为正相关关系, 表明 Cu 与这 3 种重金属可能具有相似的迁移规律或来源; 其他重金属之间均为正相关关系, 相关性系数在 0.24~0.69 之间, 相关性程度中等, 其输入源可能受外来因素影响较大.



A. 土壤 pH, B. 土壤有机质, C. 土壤阳离子交换量, D. As, E. Cd, F. Cr, G. Hg, H. Pb, I. Cu, J. Zn, K. Ni;  
色柱颜色: 红(蓝)色越深, 二者间正(负)相关性越强

图 6 农田土壤重金属 Pearson 相关分析

Fig. 6 Pearson correlation analysis of heavy metals in agricultural soils

2.3.2 土壤重金属元素主成分分析

利用主成分分析对宁夏供港蔬菜田土壤重金属来源进行解析(表 8). 对土壤 8 种重金属含量分布通过 KMO 统计量和 Bartlett 球形度检验, 结果分别为 0.895 和 0, 表明可以利用主成分分析解释供港蔬菜田土壤重金属来源的关联性. 主成分分析共提取到 3 个因子, 累计贡献率 80.83%, 可以解释供港蔬菜田

土壤重金属的污染来源途径. 第一成分(PC1)贡献率为 60.86%, 其中 Cu、Zn、Pb、As、Ni 和 Cr 这 6 种元素具有较高的载荷值, 表明供港蔬菜田土壤中这 6 种重金属元素具有相近的来源. 第二成分(PC2)贡献率为 13.04%, 其中 Cd 和 Hg 具有较高的正载荷, 此外, Hg 在第三成分(贡献率 6.93%)中也具有较高正载荷值.

表 8 供港蔬菜田土壤重金属主成分分析

Table 8 Principal component analysis of heavy metals in soils of vegetable land for Hong Kong

元素	PC1	PC2	PC3
Cu	0.913	-0.083	-0.091
Zn	0.853	0.148	-0.152
Pb	0.828	-0.062	0.275
As	0.818	-0.244	-0.071
Ni	0.782	-0.275	-0.213
Cr	0.776	-0.403	0.220
Cd	0.621	0.602	-0.376
Hg	0.596	0.593	0.456
特征值	4.819	1.043	0.555
方差贡献率/%	60.86	13.04	6.93
累积方差贡献率/%	60.86	73.90	80.83

### 3 讨论

#### 3.1 宁夏供港蔬菜田土壤重金属污染及风险评价

近年来, 供港蔬菜已成为宁夏高档绿色蔬菜种植的一大产业, 但由于一季多茬种植, 且长期大量使用农药化肥, 宁夏供港蔬菜田土壤重金属污染问题也成为农业科技工作者关注的重点议题<sup>[29]</sup>. 为了准确地掌握宁夏供港蔬菜田土壤重金属污染状况, 了解重金属污染物对农田土壤环境的贡献, 及时进行风险评价. 本研究选择了4种评价方法对宁夏供港蔬菜田土壤重金属污染状况进行分析, 但因评价方法不同<sup>[29]</sup>, 计算结果有所差异<sup>[30, 31]</sup>. 综合不同评价方法发现, 宁夏供港蔬菜田土壤Cd和Hg污染相对突出、污染风险较大(图5), 这与我国当前农田土壤重金属整体污染情况相似<sup>[32, 33]</sup>. 有研究发现, 我国贵州、湖南、陕西、广西、河北和安徽等地区均存在不同程度的Cd和Hg污染, 隐蔽性强<sup>[29, 34-38]</sup>. 研究表明, Cd和Hg污染区域主要分布于宁夏西北部和南部, 这与王幼奇等<sup>[15]</sup>研究的结果一致, 主要是宁夏得天独厚的黄河水资源与南部山区独特的冷凉气候使得供港蔬菜在宁夏每年可种植4茬, 这种高强度的灌溉制度以及化肥农药的大量施用, 造成宁夏供港蔬菜田土壤重金属Cd和Hg累积.

综合4种评价方法发现, 8种重金属元素的单因子污染指数、地累积指数和潜在生态风险指数值并未遵循相同的顺序. 如: 单因子污染指数和地累积指数表明As有部分样点处于警戒范围内, 污染风险较大(图3和表6), 而潜在生态风险指数却表明As为低风险污染物(表7). 其原因主要有以下两个: 其一评价标准不同, 单因子污染指数和地累积指数分别以土壤污染风险筛选值和土壤背景值为标准, 而潜在生态风险指数则从生态毒性角度反映不同重金属元素对环境的潜在生态危害<sup>[31]</sup>, 因此结果差异较

大. 其二则是与重金属元素的生态毒性系数有关<sup>[39, 40]</sup>. 通过表6和表7分析表明, Cd和Hg的地累积指数和生态风险指数位居8种重金属元素榜首. 因此, 无论是含量、污染程度还是生态毒性, Cd和Hg都是宁夏供港蔬菜田土壤的主要污染物, 须加强土壤重金属监测和防控, 确保宁夏供港蔬菜田土壤环境健康良好和供港蔬菜安全生产.

#### 3.2 宁夏供港蔬菜田土壤重金属来源解析

准确识别农田土壤重金属来源对指导重金属污染防治和保障蔬菜生产安全具有重要意义<sup>[41]</sup>. 通过Pearson分析发现, 宁夏供港蔬菜田土壤有机质与8种重金属元素之间呈正相关关系(图6), 是因为土壤有机质对重金属具有较强的络合能力, 二者生成的络合物容易被土壤固定, 不易释放<sup>[42]</sup>. 同时阳离子交换量受土壤中有机质含量的影响较大, 二者存在正相关关系<sup>[43]</sup>, 这表明在土壤有机质增加的同时, 土壤对重金属元素的吸附能力也随之增强(图6). 范庆锋等<sup>[43]</sup>研究表明, 有机肥的施用能增强土壤的有机作用, 形成更多有机或有机无机复合胶体, 增加胶体表面阳离子吸附位点, 进而提高阳离子交换量<sup>[44]</sup>, 增加土壤对重金属的吸附作用<sup>[44]</sup>. 土壤pH与重金属的相关系数较小, 这表明pH对土壤中重金属的累积效应影响较小, 这与柴磊等<sup>[28]</sup>研究的结果一致.

综合Pearson分析和主成分分析结果, 将宁夏全区范围内测定的477个供港蔬菜田8种重金属元素来源划分为3类, 第一类: Cu、Zn、Pb、As、Ni和Cr这6种重金属元素, 主要来源为自然源. 前人研究表明, As、Ni和Cr与成土母质、成土过程和地质活动显著相关<sup>[45-47]</sup>, 此结论很好地解释了本研究中As、Ni和Cr的空间分布特征(图2). 2种分析表明, Cu、Zn、Pb、As、Ni和Cr这6种重金属元素在第一成分(PC1)中均有较高的载荷值, 且相关性较高, 说明这6种重金属具有相似的迁移规律和来源. 此外, Cu、Zn、Pb、As、Ni和Cr的含量平均值均低于或略高于宁夏土壤元素背景值(表3), 且空间变异较小, 这反映了这6种重金属元素在土壤中保持了原始自然状态, 未受到过多人为因素的影响, 主要受成土母质控制<sup>[38]</sup>. 第二类: Cd, 主要来源为农业源. 根据主成分分析结果, Cd在PC2中具有最高的因子载荷(0.602). 有研究表明, Cd作为农业活动的标志元素, 普遍存在于化肥和农药中<sup>[48]</sup>, 而宁夏引黄灌区是供港蔬菜主要的种植基地, 农药化肥的施用也会增加土壤Cd的累积, 这很好地解释了Cd在宁夏西北部出现高值响应的原因. 此外, 杀虫剂的使用和排水沟污水灌溉均会增加Cd在土壤中的富

集<sup>[49]</sup>. 研究区南部农田中水浇地比例较小, 多数为旱地梯田, 因此排除部分农田水质污染因素, 而大量的化肥、农药、地膜等参与了农田生产过程, 形成Cd的累积性污染<sup>[16]</sup>. 由此可见, 该成分主要反映的是农业造成的污染. 第三类: Hg, 主要来源为工业源和农业源. 主成分分析表明Hg在PC2有较高的正载荷值, 说明Hg与Cd有同一来源. 此外, Hg在PC3中也具有较高的载荷值, 且Hg的变异系数最大(0.54), 表明受到的人为干扰最强. 陈航等<sup>[50]</sup>研究表明, 大气沉降和农业中化肥的使用是农田土壤Hg污染的主要来源. 研究区西北部分布有较多的工业企业, Hg通过燃煤发电、石油生产和废弃物燃烧等方式经过大气干湿沉降进入农田<sup>[8]</sup>. Giersz等<sup>[51]</sup>研究发现, Hg是化肥农药的重要成分, 农田中化肥农药的不合理施用也是Hg污染加重的主要原因, 因此研究区西北部和南部部分地区农田土壤中Hg含量高. 因而推测Hg由工业和农业混合来源共同作用产生.

#### 4 结论

(1) 宁夏供港菜田土壤重金属除Pb和Ni外, As、Cd、Cr、Hg、Cu和Zn含量平均值均高于宁夏土壤背景值, 但8种重金属均低于我国农用地土壤风险筛选值.

(2) 宁夏供港菜田土壤重金属空间分布特征明显, 除As、Cr和Ni在研究区西北部、中部以及南部出现连片高值外, Pb、Zn、Cd、Hg和Cu的高值区域主要集中在研究区西北部和南部部分地区.

(3) 单因子指数法与内梅罗综合污染指数法表明宁夏供港菜田土壤整体处于清洁水平; 地累积指数显示土壤中的主要污染物为Cd和Hg, 污染区域主要集中在研究区西北部和南部; Cd和Hg分别有69.39%和60.79%的采样点潜在生态风险程度达到中等及以上, 其余6种重金属为轻微生态风险.

(4) 各监测点土壤有机质和阳离子交换量与8种重金属间呈显著正相关关系; 而pH与土壤有机质、土壤阳离子交换量以及8种重金属间呈负相关关系. 综合Pearson相关分析和主成分分析结果, Cu、Zn、Pb、As、Ni和Cr主要来自于自然源; Cd主要来自于农业源; Hg主要来自于工业和农业混合源.

#### 参考文献:

[1] 杨振宇, 廖超林, 邹炎, 等. 湘东北典型河源区土壤重金属分布特征、来源解析及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2023, **44**(9): 5288-5298.  
Yang Z Y, Liao C L, Zou Y, *et al.* Distribution characteristics, source analysis and potential ecological risk assessment of soil heavy metals in typical river source areas of northeastern Hunan province[J]. Environmental Science, 2023, **44**(9): 5288-5298.

[2] 王兴明, 张瑞良, 王运敏, 等. 淮南某煤矿邻近农田土壤中重

金属的生态风险研究[J]. 生态环境学报, 2016, **25**(5): 877-884.

Wang X M, Zhang R L, Wang Y M, *et al.* Eco-toxicity effect of heavy metals in cropland soils collected from the vicinity of a coal mine in Huainan[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, **25**(5): 877-884.

[3] 孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 等. 石家庄市栾城区农田土壤重金属分布特征及作物风险评价[J]. 环境科学, 2022, **43**(9): 4779-4790.

Meng X F, Guo J M, Yang J X, *et al.* Distribution characteristics and risk assessment of heavy metal pollution in farmland soils and crops in Luancheng, Shijiazhuang city[J]. Environmental Science, 2022, **43**(9): 4779-4790.

[4] 张淑珂, 孙国新, 姜杰. 白城市黑土区农田土壤重金属来源解析及积累评价[J]. 环境科学学报, 2023, **43**(5): 409-420.

Zhang S K, Sun G X, Jiang J. Analysis of heavy metal sources and evaluation of accumulation in agricultural soils in the black soil area of Baicheng City[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023, **43**(5): 409-420.

[5] 王玉, 辛存林, 于爽, 等. 南方丘陵区土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2022, **43**(9): 4756-4766.

Wang Y, Xin C L, Yu S, *et al.* Evaluation of heavy metal content, sources, and potential ecological risks in soils of southern hilly areas[J]. Environmental Science, 2022, **43**(9): 4756-4766.

[6] 张述敏, 刘翠玲, 杨桂玲, 等. 浙江省蔬菜生产系统重金属污染生态健康风险[J]. 环境科学, 2023, **44**(7): 4151-4161.

Zhang S M, Liu C L, Yang G L, *et al.* Ecological risk and health risk of heavy metal pollution in vegetable production system of Zhejiang Province [J]. Environmental Science, 2023, **44**(7): 4151-4161.

[7] 周艳, 陈楠, 邓绍坡, 等. 西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2884-2892.

Zhou Y, Chen Q, Deng S P, *et al.* Principal component analysis and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils around a Pb-Zn mine in southwestern China [J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2884-2892.

[8] 陈林, 马琨, 马建军, 等. 宁夏引黄灌区农田土壤重金属生态风险评价及来源解析[J]. 环境科学, 2023, **44**(1): 356-366.

Chen L, Ma K, Ma J J, *et al.* Risk assessment and sources of heavy metals in farmland soils of yellow river irrigation area of Ningxia[J]. Environmental Science, 2023, **44**(1): 356-366.

[9] 祁浩, 庄坚, 庄重, 等. 不同种类蔬菜重金属富集特征及健康风险[J]. 环境科学, 2023, **44**(6): 3600-3608.

Qi H, Zhuang J, Zhuang Z, *et al.* Enrichment characteristics of heavy metals and health risk in different vegetables [J]. Environmental Science, 2023, **44**(6): 3600-3608.

[10] Li X Y, Li Z G, Lin C J, *et al.* Health risks of heavy metal exposure through vegetable consumption near a large-scale Pb/Zn smelter in central China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, **161**: 99-110.

[11] 宋波, 张云霞, 庞瑞, 等. 广西西江流域农田土壤重金属含量特征及来源解析[J]. 环境科学, 2018, **39**(9): 4317-4326.

Song B, Zhang Y X, Pang R, *et al.* Analysis of characteristics and sources of heavy metals in farmland soils in the Xijiang River draining of Guangxi [J]. Environmental Science, 2018, **39**(9): 4317-4326.

[12] 翟勇全, 马琨, 贾彪, 等. 不同降水年型滴灌玉米土壤硝态氮分布、淋失量及氮素吸收利用特征[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, **31**(5): 765-775.

- Zhai Y Q, Ma K, Jia B, *et al.* Soil nitrate-N distribution, leaching loss and nitrogen uptake and utilization of maize under drip irrigation in different precipitation years[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, **31**(5): 765-775.
- [13] 何一凡, 肖新宗, 王佳文. 重金属污染对不同生境中微生物群落结构的影响[J]. *环境科学*, 2023, **44**(4): 2103-2112.  
He Y F, Xiao X Z, Wang J W. Effects of heavy metal pollution on the structure of microbial communities in different habitats [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(4): 2103-2112.
- [14] 周勤利, 王学东, 李志涛, 等. 宁夏贺兰县土壤重金属分布特征及其生态风险评价[J]. *农业资源与环境学报*, 2019, **36**(4): 513-521.  
Zhou Q L, Wang X D, Li Z T, *et al.* Distribution characteristics and ecological risk assessment of soil heavy metal in Helan County of Ningxia, China [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, **36**(4): 513-521.
- [15] 王幼奇, 白一茹, 王建宇. 引黄灌区不同尺度农田土壤重金属空间分布及污染评价: 以银川市兴庆区为例[J]. *环境科学*, 2014, **35**(7): 2714-2720.  
Wang Y Q, Bai Y R, Wang J Y. Distribution of soil heavy metal and pollution evaluation on the different sampling scales in farmland on yellow river irrigation area of Ningxia: a case study in Xingqing county of Yinchuan city [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(7): 2714-2720.
- [16] 安永龙, 殷秀兰, 李文娟, 等. 张家口市万全区某种植区土壤重金属污染评价与来源分析[J]. *环境科学*, 2023, **44**(6): 3544-3561.  
An Y L, Yin X L, Li W J, *et al.* Evaluation and source analysis of soil heavy metal pollution in a planting area in Wanquan District, Zhangjiakou city [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(6): 3544-3561.
- [17] 王晓东, 田伟, 张雪艳. 宁夏地区地下水金属元素分布特征及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 329-338.  
Wang X D, Tian W, Zhang X Y. Distribution characteristics and health risk assessment of metal elements for groundwater in the Ningxia region of China [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 329-338.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [19] 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].
- [20] 应蓉蓉, 张晓雨, 孔令雅, 等. 农用地土壤环境质量评价与类别划分研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2020, **36**(1): 18-25.  
Ying R R, Zhang X Y, Kong L Y, *et al.* Technical analysis of soil environmental quality evaluation and category classification of agricultural land [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, **36**(1): 18-25.
- [21] 刘瑞雪, 乔冬云, 王萍, 等. 湘潭县农田土壤重金属污染及生态风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(7): 1523-1530.  
Liu R X, Qiao D Y, Wang P, *et al.* Heavy metal pollution and potential ecological risk assessment in farmland soils located in Xiangtan county in Hunan province, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(7): 1523-1530.
- [22] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [23] 尹芳, 封凯, 尹翠景, 等. 青海典型工业区耕地土壤重金属污染及源解析[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(11): 5217-5226.  
Yin F, Feng K, Yin C J, *et al.* Evaluation and source analysis of heavy metal in cultivated soil around typical industrial district of Qinghai province [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(11): 5217-5226.
- [24] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [25] 陈明, 郑小俊, 陶美霞, 等. 桃江流域河流沉积物中重金属污染特征与风险评价[J]. *环境化学*, 2020, **39**(10): 2784-2791.  
Chen M, Zheng X J, Tao M X, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in sediment from Taojiang River Basin [J]. *Environmental Chemistry*, 2020, **39**(10): 2784-2791.
- [26] 李珊珊, 单保庆, 张洪. 滢阳河系表层沉积物重金属污染特征及其风险评价[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(8): 2277-2284.  
Li S S, Shan B Q, Zhang H. Characteristics and ecological risk assessment of heavy metal pollution in surface sediments of Fuyang River [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(8): 2277-2284.
- [27] 戴彬, 吕建树, 战金成, 等. 山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 507-515.  
Dai B, Lv J S, Zhan J C, *et al.* Assessment of sources, spatial distribution and ecological risk of heavy metals in soils in a typical industry-based city of Shandong province, Eastern China [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(2): 507-515.
- [28] 柴磊, 王新, 马良, 等. 基于PMF模型的兰州耕地土壤重金属来源解析[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(9): 3919-3929.  
Chai L, Wang X, Ma L, *et al.* Sources appointment of heavy metals in cultivated soils of Lanzhou based on PMF models [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(9): 3919-3929.
- [29] 陈瑜佳, 屈星辰, 张斌, 等. 香河县农田土壤重金属污染生态与健康风险评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(12): 5728-5741.  
Chen Y J, Qu X C, Zhang B, *et al.* Ecological and health risk assessment of heavy metal pollution in farmland soil of Xianghe county [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(12): 5728-5741.
- [30] Yu G, Chen F, Zhang H L, *et al.* Pollution and health risk assessment of heavy metals in soils of Guizhou, China [J]. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2021, **7**(1), doi: 10.1080/20964129.2020.1859948.
- [31] 茹卫东, 黄俣轩, 王元成, 等. 高新沙水库土壤重金属分布特征及环境风险[J]. *农业环境科学学报*, 2023, **42**(6): 1315-1328.  
Ru W D, Huang Y X, Wang Y C, *et al.* Distribution characteristics and potential ecological risks of heavy metals in the Gaoxinsha reservoir [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, **42**(6): 1315-1328.
- [32] 胡杰, 赵心语, 王婷婷, 等. 太原市汾河河岸带土壤重金属分布特征、评价与来源解析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(5): 2500-2509.  
Hu J, Zhao X Y, Wang T T, *et al.* Distribution characteristics, evaluation, and source analysis of heavy metals in soils of Fenhe riparian zone in Taiyuan city [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2500-2509.
- [33] 王锐, 邓海, 严明书, 等. 重庆市酉阳县南部农田土壤重金属污染评估及来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4749-4756.  
Wang R, Deng H, Yan M S, *et al.* Assessment and source analysis of heavy metal pollution in farmland soils in southern Youyang county, Chongqing [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4749-4756.
- [34] 李秀华, 赵玲, 滕应, 等. 贵州汞矿区周边农田土壤汞复合污染特征空间分布及风险评估[J]. *生态环境学报*, 2022, **31**(8): 1629-1636.

- Li X H, Zhao L, Teng Y, *et al.* Characteristics, spatial distribution and risk assessment of combined mercury and cadmium pollution in farmland soils surrounding mercury mining areas in Guizhou [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, **31**(8): 1629-1636.
- [35] 贾亚琪, 程志飞, 刘品祯, 等. 煤矿区周边农田土壤重金属积累特征及生态风险评价[J]. *土壤通报*, 2016, **47**(2): 474-479.
- Jia Y Q, Cheng Z F, Liu P Z, *et al.* Accumulation characteristics of heavy metals in agricultural soil around the mining area and ecological risk assessment [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, **47**(2): 474-479.
- [36] 黄钟莹, 易盛炜, 陈贝贝, 等. 典型锰矿区周边农田土壤-农作物重金属污染特征及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(2): 975-984.
- Huang J T, Yi S W, Chen B B, *et al.* Pollution properties and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils and crops around a typical manganese mining area [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(2): 975-984.
- [37] 林苾, 梁文静, 焦畅, 等. 陕西潼关县金矿矿区周边农田土壤重金属生态健康风险评价[J]. *中国地质*, 2021, **48**(3): 749-763.
- Lin J, Liang W J, Jiao Y, *et al.* Ecological and health risk assessment of heavy metals in farmland soil around the gold mining area in Tongguan of Shaanxi province [J]. *Geology in China*, 2021, **48**(3): 749-763.
- [38] 汤金来, 赵宽, 胡睿鑫, 等. 滁州市表层土壤重金属含量特征、源解析及污染评价[J]. *环境科学*, 2023, **44**(6): 3562-3572.
- Tang J L, Zhao K, Hu R X, *et al.* Heavy metal concentration, source, and pollution assessment in topsoil of Chuzhou city [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(6): 3562-3572.
- [39] 张富贵, 彭敏, 王惠艳, 等. 基于乡镇尺度的西南重金属高背景区土壤重金属生态风险评价[J]. *环境科学*, 2020, **41**(9): 4197-4209.
- Zhang F G, Peng M, Wang H Y, *et al.* Ecological risk assessment of heavy metals at township scale in the high background of heavy metals, southwestern, China [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 4197-4209.
- [40] 洪涛, 孔祥胜, 岳祥飞. 滇东南峰丛洼地土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2019, **40**(10): 4620-4627.
- Hong T, Kong X S, Yue X F. Concentration characteristics, source analysis, and potential ecological risk assessment of heavy metals in a peak-cluster depression area, southeast of Yunnan province [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(10): 4620-4627.
- [41] 杨剑洲, 龚晶晶, 王振亮, 等. 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[J]. *环境科学*, 2022, **43**(10): 4590-4600.
- Yang J Z, Gong J J, Wang Z L, *et al.* Enrichment factors, health risk, and source identification of heavy metals in agricultural soils in semi-arid region of Hainan Island [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(10): 4590-4600.
- [42] 韦继康, 余晓霞, 王保欣, 等. 浙江东部沿海典型地区土壤重金属赋存形态、生物有效性及其影响因素研究[J]. *环境污染与防治*, 2021, **43**(10): 1231-1237.
- Wei J K, Yu X X, Wang B X, *et al.* The speciation, bioavailability and influence factors of soil heavy metals in typical areas along the eastern coast of Zhejiang [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2021, **43**(10): 1231-1237.
- [43] 范庆锋, 虞娜, 张玉玲, 等. 设施蔬菜栽培对土壤阳离子交换性能的影响[J]. *土壤学报*, 2014, **51**(5): 1132-1137.
- Fan Q F, Yu N, Zhang Y L, *et al.* Effects of vegetable cultivation on soil cation exchange capacity in greenhouse [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, **51**(5): 1132-1137.
- [44] 李可, 谢厦, 孙彤, 等. 鸡粪有机肥对设施菜地土壤重金属和微生物群落结构的影响[J]. *生态学报*, 2021, **41**(12): 4827-4839.
- Li K, Xie S, Sun T, *et al.* Effects of organic fertilizers from chicken manure on soil heavy metals and microbial community structure in facility vegetable soil [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(12): 4827-4839.
- [45] 陈雅丽, 翁莉萍, 马杰, 等. 近十年中国土壤重金属污染源解析研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(10): 2219-2238.
- Chen Y L, Weng L P, Ma J, *et al.* Review on the last ten years of research on source identification of heavy metal pollution in soils [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(10): 2219-2238.
- [46] Zhang S J, Ye H, Zhang A J, *et al.* Pollution characteristics, sources, and health risk assessment of heavy metals in the surface soil of Lushan scenic area, Jiangxi province, China [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, **10**, doi: 10.3389/FENV.2022.891092.
- [47] 赵晓亮, 李响, 卢洪斌, 等. 东江湖表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(6): 3048-3057.
- Zhao X L, Li X, Lu H B, *et al.* Analysis of heavy metal pollution characteristics and potential ecological risks of surface sediments in Dongjiang Lake [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(6): 3048-3057.
- [48] 陈盟, 潘泳兴, 黄奕翔, 等. 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[J]. *环境科学*, 2022, **43**(10): 4545-4555.
- Chen M, Pan Y X, Huang Y X, *et al.* Spatial distribution and sources of heavy metals in soil of a typical lead-zinc mining area, Yangshuo [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(10): 4545-4555.
- [49] Wang Y Q, Yang L Y, Kong L H, *et al.* Spatial distribution, ecological risk assessment and source identification for heavy metals in surface sediments from Dongping Lake, Shandong, East China [J]. *CATENA*, 2015, **125**: 200-205.
- [50] 陈航, 王颖, 王澍. 铜山矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(5): 2719-2731.
- Chen H, Wang Y, Wang S. Source analysis and pollution assessment of heavy metals in farmland soil around Tongshan mining area [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2719-2731.
- [51] Giers J, Bartosiak M, Jankowski K. Sensitive determination of Hg together with Mn, Fe, Cu by combined photochemical vapor generation and pneumatic nebulization in the programmable temperature spray chamber and inductively coupled plasma optical emission spectrometry [J]. *Talanta*, 2017, **167**: 279-285.

## CONTENTS

Research Advances of Groundwater Nitrate Pollution and Source Apportionment in China .....	TU Chun-lin, CHEN Qing-song, YIN Lin-hu, <i>et al.</i> (3129)
Screening of Highly Hazardous Pollutants in Groundwater of Beijing .....	YANG Lei, XU Ying, YU Shi-hang, <i>et al.</i> (3142)
Prediction Model of Groundwater Sulphate Based on Combined Multi-source Spatio-temporal Data .....	LI Ru-yue, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (3153)
Pollution Characteristics and Multilevel Risk Assessments of Antibiotics in the Urban Rivers of Beijing, China .....	ZHAO Xiao-shuai, ZHENG Qi-bing, MA Rui, <i>et al.</i> (3165)
Spatial and Temporal Distribution of Antibiotic Resistance Genes in Different River Sediments in Typical Cities: A Case Study of Shijiazhuang .....	ZHAO Bo, SONG Yuan-meng, LU Meng-qi, <i>et al.</i> (3176)
Analysis of Regional Differences in Cadmium Ecological Risk in Surface Waters of the Yangtze River Basin .....	DING Ren, LIAO Zi-tong, LU Yun, <i>et al.</i> (3186)
Hydrochemical and Stable Isotopic Characteristics and Transformation Relationship of Water Bodies in the Guohe River Basin, Anhui Province .....	XU Jin-zhao, LIU Gui-jian, SI Wen, <i>et al.</i> (3196)
Water Quality Prediction Model for the Pearl River Estuary Based on BiLSTM Improved with Attention Mechanism .....	CHEN Zhan-feng, LI Xiao-fang (3205)
Effect of Integrated Landscape Characteristics Around Chaohu Lake on River Water Quality Based on Watershed Units .....	WANG Jie, LIU An-an, ZHANG Jun-wu, <i>et al.</i> (3214)
Effect of Fallow on Nitrogen Accumulation in Soil Profile and Shallow Groundwater in Cropland Around Fuxian Lake .....	YE Yuan-hang, CHEN An-qiang, LI Lin, <i>et al.</i> (3225)
Adsorption of Residual Pesticide Glyphosate Isopropylamine in Surface Water by Modified Biomass Materials .....	ZHOU Yue, LI Yan, WANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (3234)
Research Progress on Pollution Characteristics, Degradation, and Transformation of Typical PPCPs in the Process of Wastewater Treatment .....	HE De-chun, ZHENG Mi-mi, HUANG Wei, <i>et al.</i> (3247)
Impact of Land Use Change on Carbon Storage in Urban Agglomerations in the Guanzhong Plain .....	BIAN Rui, ZHAO An-zhou, LIU Xian-feng, <i>et al.</i> (3260)
Spatio-temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in HuaiBei City Based on InVEST-PLUS Model .....	YU Zhi-lin, ZHAO Ming-song, GAO Ying-feng, <i>et al.</i> (3270)
Temporal and Spatial Evolution and Prediction of Ecosystem Carbon Storage in Jiangxi Province Based on PLUS-InVEST Model .....	HU Ji-xi, LE Xian-wen, WANG Wei-lin, <i>et al.</i> (3284)
Exploring the Spatial and Temporal Trajectories of Land Use Carbon Emissions and Influencing Factors in the Aksu River Basin from 1990 to 2020 .....	HAN Fang-hong, GAO Fan, HE Bing, <i>et al.</i> (3297)
Spatiotemporal Simulation and Prediction of Soil Organic Carbon Density in Gannan Grassland Under Future Climate Scenarios .....	LI Zhao, ZHANG Mei-ling, ZHANG Rui-qi, <i>et al.</i> (3308)
Trade-off and Synergy of Ecosystem Services in the Yangtze River Economic Belt and Its Driving Factors .....	HE Liu-jie, ZHENG Bo-fu, WAN Wei, <i>et al.</i> (3318)
Spatiotemporal Response of Ecosystem Service Value to Land Use Change in the Lanzhou-Xining Urban Agglomeration over the Past 20 Years .....	LIANG Bin-yue, CAO Chun, LI Jin-chao, <i>et al.</i> (3329)
Coupling Mechanisms of Eco-environmental Quality and Human Activities in China and Their Influencing Factors .....	ZHAO Ti-xia, ZHU Lian-qi, WANG Li-yuan, <i>et al.</i> (3341)
Spatio-temporal Evolution of Drought and Its Impact on Key Resources in the Important Ecological Functional Area: A Case Study in the Yellow River Basin .....	LU Dang, WEI Wei, WANG Ji-ping, <i>et al.</i> (3352)
Landscape Pattern Vulnerability and Its Driving Forces in Different Geomorphological Divisions in the Middle Yellow River .....	HE Meng-zhen, ZHANG Le-tao, WEI Yi-yuan, <i>et al.</i> (3363)
Multi-factor Impact Analysis of Grassland Phenology Changes on the Qinghai-Xizang Plateau Based on Interpretable Machine Learning .....	LIU Hui-wen, LIU Huan, HU Peng, <i>et al.</i> (3375)
Impacts of Urban Form on Carbon Emissions Under the Goal of Carbon Emission Peak and Carbon Neutrality: A Case Study of the Yangtze River Economic Belt .....	FENG Xin-hui, LI Yan, WANG Shi-yi, <i>et al.</i> (3389)
Spatio-temporal Evolution and Coordinated Development of Compactness with Carbon Emission Intensity in the Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration .....	LI Zhi-ying, ZHU Xiao-shan, YANG Li, <i>et al.</i> (3402)
Multi Scenario Carbon Peak Prediction and Emission Reduction Path Analysis of Xi'an Hi-tech Zone .....	JIANG Xu-peng, ZHANG Qiang, ZHAO Wen-ting, <i>et al.</i> (3412)
Construction and Analysis of Machine Learning Based Transportation Carbon Emission Prediction Model .....	LIU Hui-tian, HU Da-wei (3421)
Spatiotemporal Interaction Characteristics and Transition Mechanism of Carbon Intensity in China's Transportation Industry .....	LI Jian, LIU Shu-qi, WANG Xiao-qi (3433)
Research Progress in Reducing Pollution and Sequestration of Carbon by Carbon Neutral Plants .....	CHEN Yun, ZHOU Qi-xing, TAO Zong-xin, <i>et al.</i> (3446)
Carbon Footprint of Spent Ternary Lithium-Ion Battery Waste Recycling .....	SONG Xiao-fang, DU Shuai, XIE Ming-hui, <i>et al.</i> (3459)
Risk Assessment of Antibiotics in Agricultural Environment .....	YANG Zhen-zhen, LI Hong-na, LI Na (3468)
Driving Factors Analysis for Spatial-Temporal Distribution of Organic Pollutants in the Yangtze River Delta Based on the Optimal-scale Geographical Detector .....	HE Jin-ke, ZHOU Ya-nan, CHEN Yue-hong, <i>et al.</i> (3480)
Spatiotemporal Simulation of Soil Pb Accumulation Process in Urban-Rural Areas: A Case Study of a Large City in Central China .....	SONG Xiao-fan, HOU Ying, DONG Yi-fan, <i>et al.</i> (3493)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Dust Around Bus Stops in Kaifeng City Based on APCS-MLR Model .....	DUAN Hai-jing, SHEN Hao-xin, PENG Chao-yue, <i>et al.</i> (3502)
Evaluation of Heavy Metal Distribution Characteristics and Ecological Risk of Soil of Vegetable Land for Hong Kong in Ningxia .....	JI Li, MA Kun, XIE Tie-na, <i>et al.</i> (3512)
Effects of Four Amendments on Cadmium Bioavailability and Enzyme Activity in Purple Soil .....	DING Xin-ru, XU Man, YAN Ning-zhen, <i>et al.</i> (3523)
Effects of Biochar-loaded Ammonia Nitrogen on Soil Carbon Emissions, Enzyme Activity, and Microbial Communities .....	YANG Ru-yi, DONG Yan-hong, XIAO Xin, <i>et al.</i> (3533)
Effects of <i>Rosa roxburghii</i> Pomace Biochar on Yield and Quality of Chinese Cabbage and Soil Properties .....	FAN Hong, XIE Shan, LONG Tian-yu, <i>et al.</i> (3543)
Effects of Biochar Application on the Structure and Function of Fungal Community in Continuous Cropping Watermelon Soil .....	CHANG Fang-juan, ZHANG Gui-yun, ZHANG Li-ping, <i>et al.</i> (3553)
Effects of Different Modified Materials on Soil Fungal Community Structure in Saline-Alkali Soil .....	BAI Xiao-long, ZHANG En, WU Jin-min, <i>et al.</i> (3562)
Effects of Biochar and Straw Return on Soil Microbial Community Characteristics and Functional Differences in Saline Water Drip Irrigation Cotton Fields .....	GUO Xiao-wen, XIANG Gui-qin, ZHANG Fa-chao, <i>et al.</i> (3571)
Effects of Different Proportions of Ammonium Sulfate Replacing Urea on Soil Nutrients and Rhizosphere Microbial Communities .....	ZHANG Yan-hui, LIU Yu, HAN Ying, <i>et al.</i> (3584)
Effects of Different Forms of Nitrogen Addition on Soil Physical and Chemical Properties and Microbial Community Structure of Perennial Alpine Cultivated Grassland .....	TONG Yong-shang, ZHANG Chun-ping, DONG Quan-min, <i>et al.</i> (3595)
Altitude Distribution Characteristics of Farmland Soil Bacteria in Loess Hilly Region of Ningxia .....	WU Xia, CAI Jin-jun, WANG Zhang-jun, <i>et al.</i> (3605)
Spatial Patterns of Soil Bacterial Communities and N-cycling Functional Groups Along an Altitude Gradient in Datong River Basin .....	WANG Zhu, LIU Yang, WANG Fang (3614)
Dynamic Response of Aerobic Denitrification Bacteria to Water Quality in Baiyangdian Lake Under Different Hydrological Scenarios .....	MENG Jia-jing, ZHANG Tian-na, CHEN Zhe, <i>et al.</i> (3627)
Effects of Fly Ash on the Efficiency and Bacterial Community Structure of Urban Multi-source Organic Solid Waste .....	ZOU Jia-cheng, DU Yan-bin, SU Kai-wen, <i>et al.</i> (3638)
Effect of Exogenous Chitosan on Physiological Properties, Antioxidant Activity, and Cadmium Uptake of Wheat ( <i>Triticum aestivum</i> L.) Seedlings Under Cadmium Stress .....	ZHANG Jing-jing, JIAO Qiu-juan, XU Zheng-yang, <i>et al.</i> (3649)
Response of Relationship Between Microplastic Abundance and Nitrogen Metabolism Function Microorganisms and Genes in Water .....	WANG Zhi-chao, MA Yu, LI Ya-xin-yue, <i>et al.</i> (3661)
Effects and Mechanisms of Polystyrene Microplastics on Extracellular Antibiotic Resistance Genes in Wastewater .....	ZHOU Shuai, HUANG A-chao, HUANG Ze-feng, <i>et al.</i> (3671)
Effects of Polyethylene Microplastics on Soil Nutrients and Enzyme Activities .....	LIANG Rong, HE Jiao, SUN Fei-hu, <i>et al.</i> (3679)
Effect of Low-density Polyethylene Microplastics on Natural Attenuation of Oxygenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil .....	TANG Jia-hao, BAO Wen-xiu, ZHANG Wen, <i>et al.</i> (3688)
Aging and Small-sized Particles Release Characteristics of Tire Microplastics in Various Environmental Media .....	ZHANG Tai-shuo, SHANG Jing-jing, LIU Hai-yong, <i>et al.</i> (3700)
Effect of Photoaging on Adsorption of Cu(II) by Polystyrene Microplastics with Different Particle Sizes .....	LIU Wen-juan, GUO Yu-feng, DENG Wen-bo (3708)
Effects of Straw Addition on N <sub>2</sub> O and CO <sub>2</sub> Emissions from Red Soil Subjected to Different Long-Term Fertilization .....	TU Hao-ze, LIN Shan, WANG Jun, <i>et al.</i> (3716)
Effect of Partial Substitution of Chemical Fertilizers with Organic Fertilizers on N <sub>2</sub> O and NO Emissions from a Peach Orchard .....	XU Pin-shang, GUO Shu-min, ZHENG Hao-chen, <i>et al.</i> (3725)
Spatiotemporal Pattern and Influencing Factors of Thermal Environment Based on SEM Model: A Case Study in Xi'an Metropolitan Area .....	ZHANG Ying, WANG Xu-hong, FENG Zi-hao, <i>et al.</i> (3734)
Air Pollutant Spatiotemporal Evolution Characteristics and Effects on Human Health in Xi'an City .....	XU Chuan-qi, BAI Yang, TANG Yuan-wei, <i>et al.</i> (3746)
Characterization of Metal Elements in Atmospheric Fine Particulate Matter and Their Sources in Winter in the Southern Sichuan Urban Agglomeration .....	ZHANG Tian-li, HUANG Xiao-juan, ZHANG Jun-ke, <i>et al.</i> (3756)