

doi:10.12029/gc20220705002

## 宁夏卫宁平原土壤锌地球化学特征与富锌小麦种植区预测

刘志坚<sup>1,3</sup>, 张琇<sup>2</sup>, 董元华<sup>3</sup>, 卿成实<sup>4</sup>, 程霞<sup>1</sup>, 赵万伏<sup>1</sup>, 李晓慧<sup>1</sup>, 桑立<sup>1</sup>, 海龙<sup>1</sup>

(1.宁夏回族自治区国土资源调查监测院, 银川, 750002; 2.北方民族大学生物科学与工程学院, 银川 750021; 3.中国科学院南京土壤研究所土壤环境与污染修复重点实验室, 南京, 210008; 4. 中国地质调查局成都地质调查中心, 成都 610081)

**摘要:**【研究目的】大部分粮食作物锌含量较低, 人体难以从正常的膳食结构中获取足够的锌元素。通过开展土地质量地球化学调查, 探寻种植富锌作物的适宜区域, 是基于自然途径使作物达到富锌标准的最优方案。【研究方法】本研究以宁夏卫宁平原农业用地为研究区, 基于土地质量地球化学调查所获取的农用地表层土壤、小麦籽实及其根系土中元素地球化学数据, 研究了表层土壤、小麦籽实 Zn 地球化学特征, 探究了小麦籽实富集 Zn 的影响因素; 以中国健康膳食营养结构与居民膳食营养素参考摄入量为基础, 推算出富锌小麦锌含量区间值。【研究结果】研究区表层土壤 Zn 含量范围 25.1~102.0 mg kg<sup>-1</sup>, 背景值 61.4 mg kg<sup>-1</sup>; 研究区小麦籽实 Zn 含量范围 13.34~37.78 mg kg<sup>-1</sup>, 平均值 24.72mg kg<sup>-1</sup>, 生物富集系数(BCF)平均值 0.41; 富锌小麦 Zn 含量取值范围为 26.5~50.0 mg kg<sup>-1</sup>, 研究区小麦籽实的富锌比例为 36.7%; 基于神经网络模型预测出卫宁平原适宜种植富锌小麦的农用地面积为 242.86km<sup>2</sup>。【结论】研究区表层土壤 Zn 空间分布较为均匀且主要受到成土母质控制; 小麦籽实富集 Zn 的能力为中等, 土壤 Zn、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>O、SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与小麦籽实 Zn 具有显著相关关系; 神经网络模型能构建出可靠的预测模型, 可以作为基于地球化学调查数据探寻有益微量元素富集作物种植适宜区的方法。

**关键词:** 农用地; 土壤; 锌(Zn); 预测模型; 地球化学调查工程; 卫宁平原; 宁夏

**创新点:** 基于中国健康膳食营养结构与居民膳食营养素参考摄入量, 推算出富锌小麦 Zn 含量区间值; 运用神经网络模型构建了小麦籽实 Zn 含量预测模型, 通过预测小麦籽实 Zn 含量, 划分出适宜种植富锌小麦的区域。

## Geochemical characteristics of Zinc in soil and prediction of Zn-rich wheat cultivating areas in Weining Plain, Northwest China

LIU Zhijian<sup>1,3</sup>, ZHANG Xiu<sup>2</sup>, DONG Yuanhua<sup>3</sup>, QING Chengshi<sup>4</sup>, CHENG Xia<sup>1</sup>, ZHAO Wanfu<sup>1</sup>, LI Xiaohui<sup>1</sup>, SANG Li<sup>1</sup>, HAI Long<sup>1</sup>

(1. Ningxia Survey and Monitor Institute of Land and Resources, Yin Chuan 750002, China; 2. School of Biological Science and Engineering, North Minzu University, Yin Chuan 750021, China; 3. Key Laboratory of Soil Environment and Contamination Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nan Jing 210008, China; 4. Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu 610081, China)

**Abstract:** [Objective] Most of the food crops are low in zinc and it is difficult for humans to obtain sufficient zinc through the normal diet. Land quality geochemical survey, as Nature-based solutions, is the best scheme to find the suitable region for cultivating zinc-rich crops. [Methods] This study takes agricultural land in Wei Ning Plain of Ningxia as the research region, geochemical data of surface soils, wheat seeds and rhizosphere soils of agricultural lands were obtained through land quality geochemical survey, the geochemical characteristics of zinc in surface

**基金项目:** 宁夏自然科学基金项目 (2021AAC03424); 宁夏财政计划项目 (宁夏国土监项[2021]002 号)。

**作者简介:** 刘志坚, 男, 1987 年生, 高级工程师, 硕士, 研究方向为环境地质。E-mail: [Pannotia@qq.com](mailto:Pannotia@qq.com)

soil and wheat seed were studied, and the influencing factors of zinc enrichment in wheat seed were explored. The interval value of zinc content in zinc-rich wheat was calculated based on the nutritional structure of healthy diet in China and the reference intake of dietary nutrients in residents. **[Results]** In the research region, the range of zinc content in surface soils was 25.1 mg kg<sup>-1</sup> to 102.0 mg kg<sup>-1</sup>, and the background value of surface soil was 61.4 mg kg<sup>-1</sup>. The range of zinc content in wheat seeds was 13.34 mg kg<sup>-1</sup> to 37.78 mg kg<sup>-1</sup>, the average content was 24.72 mg kg<sup>-1</sup>, and the average bio-enrichment coefficient was 0.41. The range of zinc content in Zn-enriched wheat was 26.5 to 50.0 mg kg<sup>-1</sup>, and the proportion of zinc enriched wheat seeds in the research region was 36.7%. Based on the neural network model, we predicted that the region of agricultural lands, which were suitable for cultivating zinc enriched wheat in Wei Ning Plain, was 242.86km<sup>2</sup>. **[Conclusions]** The spatial distribution of zinc in the surface soil of the research region was relatively uniform and was mainly controlled by soil parent materials. The zinc enrichment ability of wheat seeds was medium. The zinc enrichment ability of wheat seeds is significantly correlated with Zn, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in rhizosphere soils. Neural network model can construct a reliable prediction model, which can be used as a method to explore suitable cultivating regions for beneficial micronutrient enrichment crops through geochemical survey data.

**Key words:** agricultural land; Soil; Zn; prediction model; geochemical survey engineering; Weining plain; Ningxia

**Highlights:** Based on the healthy nutrition structure of Chinese diet and the reference intake of dietary nutrients, the interval value of zinc content in zinc enrichment wheat seeds was calculated. A prediction model of zinc content in wheat seeds was established through neural network model.

**About the first author:** LIU Zhijian, male, born in 1987, senior engineer, Master degree, research direction is environmental geology. E-mail: Pannotia@qq.com

**Fund support:** Supported by the Natural Science Foundation of Ningxia(No.2021AAC03424) and Ningxia Financial Planning Project (Ningxia Land Supervision Project [2021]002).

## 1 引言

锌(Zn)是人体细胞内含量最多的微量元素, 是 200 多种酶和活性蛋白质的激活因子(刘婧昀等, 2019), 对维持细胞的正常生理功能有极其重要的作用, 直接参与蛋白质、核酸代谢和基因转录活动, 贯穿了人体细胞分化、增殖和凋亡过程(Sanna A et al., 2018)。机体缺乏锌元素, 会导致发育迟缓、性腺功能低下、免疫紊乱、纤维化、肿瘤等多种疾病, 多种老年人群中常见的慢性疾病如糖尿病、类风湿关节炎、阿尔兹海默症等也与缺锌有关(Cheng Xinxin et al., 2017 ; Theoharris Frangos et al., 2020 ; Leda Mezzaroba et al., 2019)。有研究表明, 我国居民普遍存在因 Zn 摄入不足而导致的隐性缺锌症(Yang Xiao-e et al., 2007)。过去的几十年, 中国居民膳食 Zn 的摄入量处于下降趋势, 部分地区男性日均 Zn 摄入量为 12.2mg, 女性为 10.3mg, 居民膳食 Zn 摄入量不足的概率从 1989 年的 32.7% 上升到 2009 年的 45.8%(张继国等, 2012)。Zn 摄入不足已经成为阻碍提升国民生活幸福指数的因素之一, 采取科学的补锌措施迫在眉睫。通过保健品实施外源性补锌, 如服用氧化锌、葡萄糖酸锌、硫酸锌、醋酸锌等化学合成产品, 不但吸收利用效率低, 而且存在一定的副作用(宁运旺等, 2009)。粮食

和蔬菜是无机锌变为有机锌的转化载体,应该成为人们安全获取 Zn 的首选方式(赵小红等, 2022)。常规栽种的禾本科农作物籽实 Zn 含量很低,不能满足人体正常所需(Cakmak et al., 2018)。而通过地球化学手段,探寻适宜生长富锌农产品的农用地,是一种支撑规模化绿色富锌农业可持续发展的最优方案。

近年来,在我国全面实施土地质量地球化学调查工程的支撑下,已经有大量研究基于“籽实-根系土”系统的地球化学数据,构建籽实有益微量元素吸收预测模型,以此指导富硒、富锌、富铜等特色土地资源开发(马旭东等, 2022; 王锐等, 2020; 王懿铮等, 2020; 赵筱媛等, 2022;),显著提升了作物通过自然途径富集有益微量元素的水平。在特色土地资源开发利用中,作物籽实中有益微量元素的富集阈值需要优先研究确定,然而部分研究仅基于居民膳食营养参考摄入量,假设了人体每天所需的有益微量元素均来源于谷类,由此推算出谷类中相应含量下限值,这忽略了正常的膳食结构中肉、蛋、奶、菜、水果等食物同样能够提供微量元素的事实,存在制定作物籽实富集有益微量元素阈值偏低的问题,这不利于特色农业有序发展。以作物籽实富集有益微量元素的阈值为标准,基于“籽实-根系土”系统的地球化学数据构建作物籽实元素含量预测模型是可行的研究思路,但是部分研究仅基于土壤中某一种微量元素含量值,预测作物籽实对应微量元素的含量值,这忽略了其它土壤理化性质也会显著影响农作物籽实吸收微量元素的事实(高宇等, 2017; 武芝亮等, 2021),存在划定富集有益微量元素作物的种植适宜区选址不准确的问题。

卫宁平原位于黄河流域上游,是西部内陆地区重要的粮食、蔬菜、饲料生产地,更享有“中国塞上硒谷”之美誉。以往在卫宁平原的特色农业发展规划中,仅局限于富硒农产品的开发,而对规模化生产富锌农作物的可行性尚未开展实质性的研究工作。本研究以卫宁平原 1:5 万土地质量地球化学调查数据为基础,研究了土壤与小麦籽实的锌元素地球化学特征;以 2022 年中国健康膳食营养结构与居民膳食营养素参考摄入量为基准,推算出富锌小麦 Zn 含量区间值;选取与小麦籽实 Zn 含量具有显著相关关系的多种土壤理化参数作为训练集,利用神经网络拟合工具(NNF)构建了小麦籽实 Zn 含量预测模型;在空间插值的基础上,预测出所有农用地小麦籽实 Zn 含量值。最终圈定了适宜种植富锌小麦的农用地分布区域。研究成果对运用土地质量地球化学调查成果数据进行预测模型构建,农作物微量元素富集标准制定,元素地球化学大数据挖掘运用,提升地质工作的社会服务能力具有重要的参考意义。

## 2 研究区概况

卫宁平原位于黄河上游的宁夏中卫市与吴忠市部分地区（东经  $105^{\circ}02' \sim 105^{\circ}58'$ ，北纬  $37^{\circ}18' \sim 37^{\circ}48'$ ），面积约  $1350\text{km}^2$ ，其中农用地面积约为  $981\text{km}^2$ （图 1），地貌以黄河冲、洪积平原为主，洪积倾斜台地次之（图 2），属于大陆性气候，降水稀少，蒸发强烈，生态环境脆弱。卫宁平原所属区域大地构造位置为柴达木-华北板块，阿拉善微陆块，腾格里早古生代增生楔（王成等，2013），区内无基岩出露，主要土地利用类型有水浇地、旱地、水田、草地、园地等，种植水稻、小麦、玉米、枸杞、蔬菜等，主要的土壤类型有灌淤土、潮土、新积土、灰钙土、盐土，成土母质主要受地貌单元控制，多为全新统河流冲洪积物与更新统洪积层，全新统风积层次之。

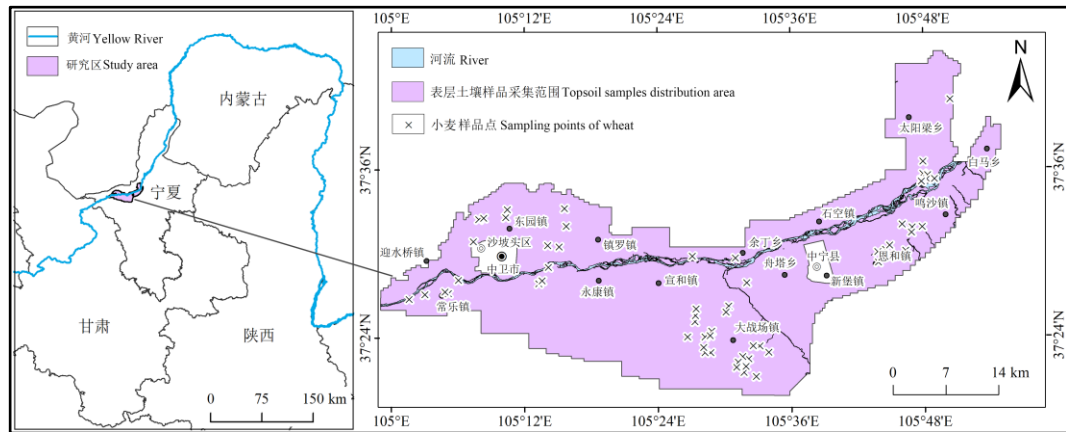


图 1 卫宁平原区域位置示意图

Fig.1 Regional location diagram of Wei Ning Plain

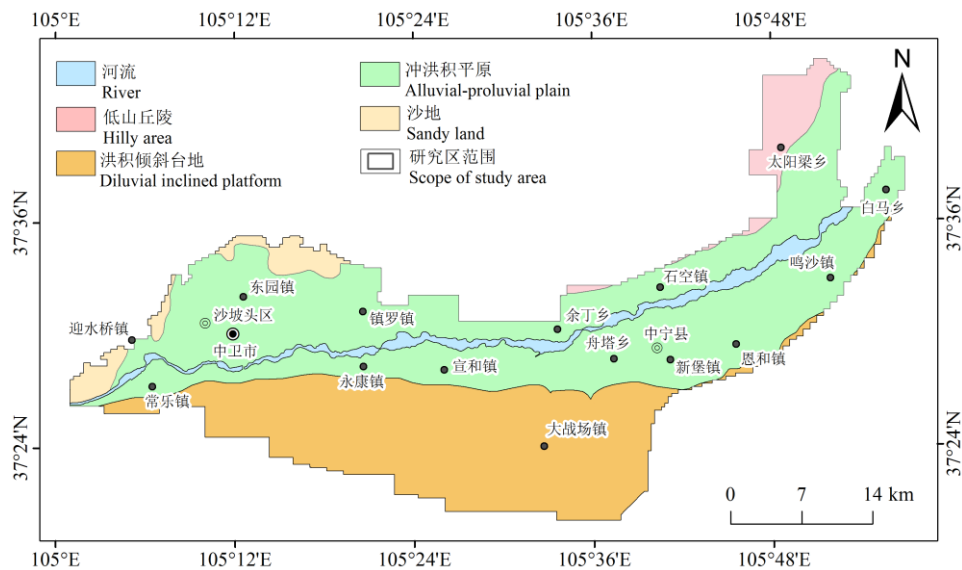


图 2 研究区地貌分区图

Fig.2 Geomorphological map of the study area

### 3 材料与方法

#### 3.1 样品采集

为了掌握土壤 Zn 地球化学特征与生态效应, 研究“土壤-小麦”系统 Zn 元素生物富集特征, 于 2021 年 10~11 月在卫宁平原共采集表层土壤样品 2830 件。农用地样品密度为每平方公里 4 件, 样点间距约 500 m, 其它用地样品密度为每平方公里 2 件, 样品间距约 700 m。每件样品均由 5 件子样品等量均匀混合而成, 各子样点间距 20 m。采样工具为非金属材质, 在剥离表层浮土后采掘地表往下 20 cm 范围内的土壤, 挑拣出样品中的石块、虫体以及残余根系等杂物, 然后将各子样品充分混合后装入清洁布袋, 送往样品流转中心进行初步加工。采回的样品首先在流转中心阴凉处进行自然风干, 然后过 20 目(孔径 0.84 mm)尼龙筛, 充分混匀后缩分称取 800g 装入清洁样瓶, 送往实验室检测。

在冬小麦收获期采集小麦籽实及其根系土样品, 采样点均匀分布于当季小麦集中种植区。采集对象选择长势良好的植株, 每个样地内分 5 个分样点采集, 在每个分样点中心 1m<sup>2</sup> 的方格内采集 200g 麦穗, 并将 5 个分样点的麦穗等量混合成 1 件样品。在采集小麦籽实样品的同时, 将对应的植株连根拔起, 并把作物根部携带的土壤抖落在塑料袋中, 最后将所有分样点抖落的土壤等量混匀后装入干净的布袋内, 每件样品重量大于 1000g。小麦籽实样品直接送实验室进行加工, 根系土样品粗加工流程同表层土壤。本次共采集 60 组小麦籽实及其根系土样品。

#### 3.2 样品分析

在实验室对土壤样品进行自然风干, 采用四分法缩分后, 分取一部分样品用于 pH 分析; 分取一部分样品进行行星磨机研磨, 过 100 目筛(孔径 0.15 mm)用于元素分析。样品分析测试执行《多目标区域地球化学调查规范(1:250000)》(DZ/T 0258-2014), 样品分析项目及其分析方法、检出限见表 1。在分析测试过程中, 每 500 件样品插入 12 个土壤国家一级标准物质(GBW07407、GBW07447、GBW07449、GBW07451、GBW07452、GBW07453、GBW07455、GBW07431~GBW07435)控制分析测试准确度, 在与其他样品同等分析条件下对标准物质进行 12 次分析检验, 分别计算每个标准物质元素平均值与标准值之间的对数偏差; 精密度控制采用 4 个兼顾大部分元素高、中、低含量的土壤一级标准物质进行监控, 每 45 件分析样品中, 以密码样品插入 4 件国家一级标准物质, 计算每种元素的 4 件标准物质单次测定值与标准值之间的相对标准偏差。样品检测在湖北省地质实验测试中心完成, 通过准确度和精密度控制样品分析测试质量, 标准物质测量值与标准值对数差要求小于或等于 0.12, 准确度合格率达到 98%; 密码样检验数据计算相对双差要求小于或等于 25%单元素一

次重复性检验合格率达到 96%。

在实验室用蒸馏水冲洗小麦籽实样品直至流水澄清后，置于 45℃烘箱中烘干。用小型面粉机脱壳粉碎，去处细麸皮后将小麦粉直接保存在塑料的密封袋内作为待测样品。小麦样品分析时共插入 4 件同类型标准物质，与样品同时分析，计算单个样品单次测定值与标准物质推荐值的对数偏差 ( $\Delta \lg C$ ) 来确定分析准确度；精密度采用重复分析方法控制，由不同人员在不同时间对每件样品进行 100% 的重复分析，计算两次分析结果的相对标准偏差 (RSD%)。

土壤样品及小麦籽实样品的元素分析方法的检出限、准确度、精密度等质量指标均达到或优于《多目标区域地球化学调查规范 (1:250000)》(DZ/T 0258-2014) 要求。

表 1 土壤样品分析项目及其测试方法和检出限

Table 1 Analysis items and its testing method and detection limits of samples

样品类型	元素或指标	分析方法	分析方法检出限	准确度	精密度(%)
土壤	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	XRF	0.05	0.01	3.82
	CaO (%)		0.02	0.02	3.97
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)		0.02	0.01	3.55
	K <sub>2</sub> O (%)		0.03	0.01	3.17
	SiO <sub>2</sub> (%)		0.05	<0.01	2.86
	有机质 (%)	VOL	0.034	<0.01	6.19
	Zn (%)	ICP-MS	1	<0.01	3.29
	pH	ISE	0.1	0.01	3.51
小麦籽实	Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	ICP-MS	1	0.01	10.53

### 3.3 数据处理方法

基于 VBA，按照算术平均值加、减 3 倍标准偏差进行异常数据迭代剔除，对剩余样品数据求取算术平均值求得“背景值”，在此基础上进行其他地球化学参数统计；采用 SPSS 软件进行基本统计分析 with 元素间的相关性分析；基于 MATLAB 软件，将小麦籽实及其根系土样品作为训练样本，并构建“以土壤理化参数为因子，预测小麦籽实锌含量”的预测模型；利用 ArcGIS10.7 软件绘制土壤锌地球化学图与富锌小麦种植适宜区规划建议图。

## 4 结果与分析

### 4.1 土壤 Zn 地化学特征

剔除异常数据后剩余样本数量为 2820 件，统计 Zn 地球化学参数。结果表明：研究区表层土壤 pH 范围为 7.72~9.64，土壤 Zn 含量范围 25.1~102.0 mg kg<sup>-1</sup>，背景值 61.4 mg kg<sup>-1</sup>，为略高于黄河流域背景值 59 mg kg<sup>-1</sup> (奚小环等, 2021)，但低于全国背景值 67 mg kg<sup>-1</sup> (侯青叶等, 2020)，总体上富集程度为中，变异系数为 0.23，反映出空间分布较均匀。将研究

区土壤 Zn 地球化学图（图 3）与地貌图（图 2）进行比对后可知，土壤 Zn 的空间分布特征主要受成土母质控制，高值区分布于黄河冲、洪积平原，低值区分布于低山丘陵及洪积倾斜台地。不同地貌单元表层土壤 Zn 含量范围：洪积平原 35.6~105.0 mg kg<sup>-1</sup>（平均值 69.8 mg kg<sup>-1</sup>）、洪积倾斜台地 33.0~74.3 mg kg<sup>-1</sup>（平均值 51.1 mg kg<sup>-1</sup>）、沙地 26.6~83.4 mg kg<sup>-1</sup>（平均值 49.8 mg kg<sup>-1</sup>）、低山丘陵 25.1~70.3 mg kg<sup>-1</sup>（平均值 44.9 mg kg<sup>-1</sup>），平均值分别为研究区背景值的 1.14、0.83、0.81、0.73 倍。洪积倾斜台地、沙地、低山丘陵，均位于卫宁平原的边缘，这些区域无富含 Zn 地质体或含闪锌矿的硫化物矿床出露，并且属于构造抬升区，风化剥蚀作用强烈，Zn 很容易迁移至地势较低的平原区。而且，研究区 SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 由低到高依次为：冲洪积平原（5.0）、洪积倾斜台地（6.5）、低山丘陵（7.3）。SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 能够反应土壤砂质与粘土成分的关系，土壤 SiO<sub>2</sub> 含量越高，土壤砂质成分越多，粘土矿物与有机质成分越少，对 Zn 的吸附性越小；相反，土壤 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量越高，说明土壤脱硅富铝程度高，吸附性更强的粘土矿物及有机质成分越多(Makab et al., 2009, 杨琼等, 2021)。冲、洪积平原作为典型的沉积区，相对于剥蚀区更容易获得 Zn 源补充，而且土壤中粘土及有机质含量相对较高，也能更大程度的富集 Zn（刘英俊等，1984）。

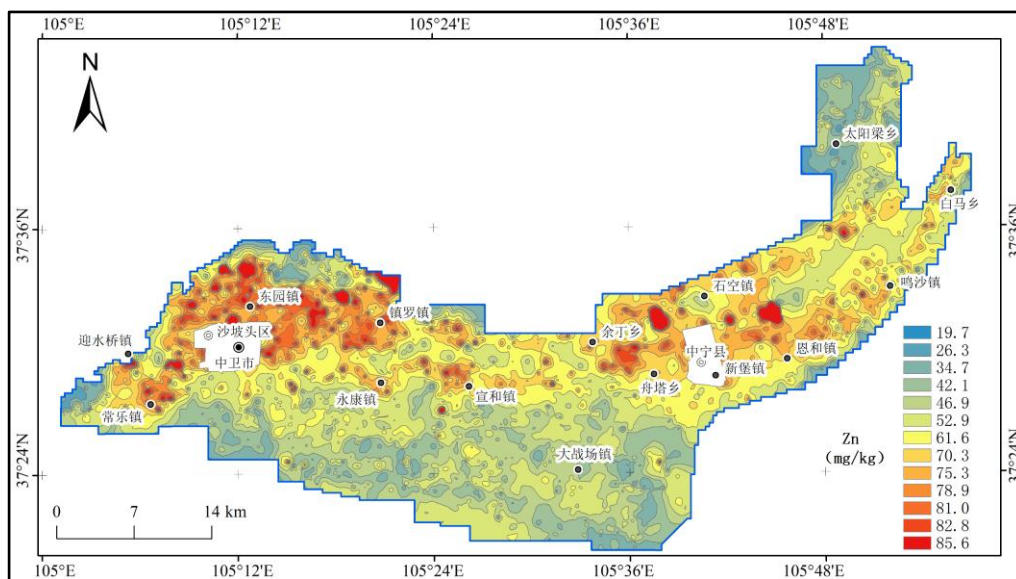


图 3 研究区表层土壤 Zn 地球化学图

Fig.3 Geochemical map of Zn in surface soils of the study area

按照《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T0295) 给出的标准，进行土壤 Zn 养分等级划分并统计面积，研究区农业用地土壤 Zn 养分等级达到一等（丰富）的面积为 17.1km<sup>2</sup>、二等（较丰富）面积为 236.5 km<sup>2</sup>、三等（中等）面积为 178.4 km<sup>2</sup>、四等（较缺乏）面积为 320.4 km<sup>2</sup>、五等（缺乏）228.6 km<sup>2</sup>，分别占研究区农业用地总面积的 1.74%、24.11%、18.19%、32.66%、23.30%，总体上土壤 Zn 养分以“缺乏”为主。研究区土壤 Zn 含量均处于“清洁”状

态，未出现高于土壤污染“风险筛选值”的样地。

#### 4.2“小麦-根系土”系统 Zn 富集特征

采集的小麦籽实及其根系土样品主要分布在黄河冲、洪积平原与洪积倾斜台地，样品 Zn 含量见表 2。结果表明，研究区根系土 Zn 含量特征与研究区背景值基本一致，小麦籽实 Zn 含量明显低于对应的土壤 Zn 含量；位于黄河冲、洪积平原的小麦籽实及其对应根系土的平均 Zn 含量均显著高于洪积倾斜台地。

生物富集系数 (BCF) 是植物体中某元素的含量值与其对应根系土中该元素含量值的比值，用于表征植物体对土壤元素的吸收能力，值越大代表吸收能力越强 (窦韦强等, 2021)。研究区小麦籽实 BCF 范围为 0.25~0.53，平均值为 0.41，两个地貌单元中小麦籽实的平均 BCF 相差并不大，表明小麦籽实对土壤 Zn 的富集能力为中等 (孙厚云等, 2021)。进一步分析小麦籽实 Zn 与根系土 Zn 之间的相关性 (图 4)，二者存在显著的线性相关关系，表明小麦籽实 Zn 主要来源于土壤。

表 2 研究区小麦籽实及其根系土 Zn 含量

Table 2 Zn content of wheat seeds and their rhizosphere soils						
样品分布区域	样品量	类别	含量范围	平均值	标准偏差	变异系数 (%)
黄河冲洪积平原	38 (件)	小麦籽实(mg kg <sup>-1</sup> )	13.34~37.78	27.15	6.04	22.26
		根系土(mg kg <sup>-1</sup> )	43.38~92.43	67.80	10.74	15.84
		富集系数 (BCF)	0.28~0.51	0.40	0.06	15.56
洪积倾斜台地	22 (件)	小麦籽实(mg kg <sup>-1</sup> )	16.77~26.25	21.41	2.81	13.11
		根系土(mg kg <sup>-1</sup> )	36.34~56.31	49.76	5.15	10.34
		富集系数 (BCF)	0.34~0.53	0.43	0.05	12.08
研究区	60 (件)	小麦籽实(mg kg <sup>-1</sup> )	13.34~37.78	24.72	5.68	22.98
		根系土(mg kg <sup>-1</sup> )	36.34~92.43	60.17	12.55	20.86
		富集系数 (BCF)	0.28~0.53	0.41	0.06	14.63

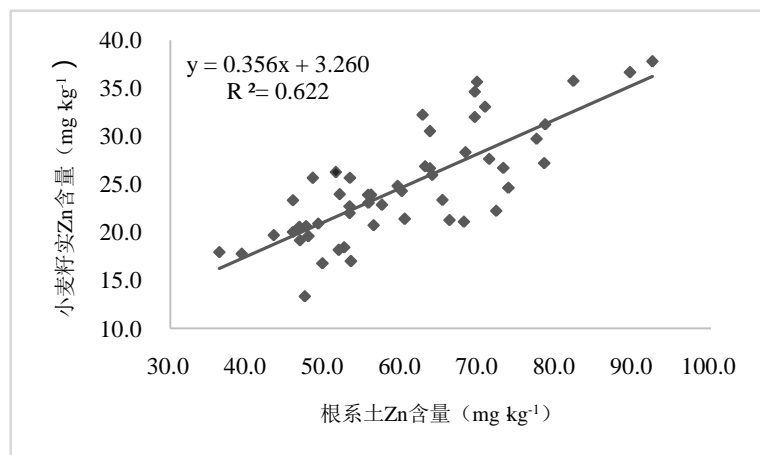


图 4 小麦籽实 Zn 与根系土 Zn 含量散点图

Fig.4 Scatter plots of Zn content in wheat seed and rhizosphere soil



有研究表明,土壤的理化性质也会影响到作物对土壤微量元素的吸收能力,土壤酸碱程度、粘土矿物及铁锰氧化物的吸附作用、有机质的络合作用、养分元素的协同吸收作用等,在不同情况下对作物吸收土壤微量元素的能力都有这不同的效应(唐沫岚等,2020;肖高强,2020)。为探寻那些对小麦籽实吸收土壤Zn能力有主要影响作用的其他土壤理化因子,利用SPSS软件分析小麦籽实Zn与根系土中理化指标的相关性,结果如表3所示。小麦籽实Zn含量与SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>呈显著负相关,与根系土pH为弱负相关,与根系土CaO、有机质呈正相关,并且与Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>O为显著正相关。SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>越低,代表土壤富含能够吸附Zn的粘土矿物,而氧化铁同样容易附Zn,随着粘土矿物及铁的氧化物的增加,使土壤更容易富集Zn,有利于小麦的吸收富集;土壤有机质含量增高,不但能够吸附微量元素,使其在土壤中富集,而且能向土壤溶液提供低分子量的有机物,与微量元素形成螯合物后,可提高Zn的生物有效性(马宏宏等,2020);pH值升高可导致土壤溶液中氢氧离子和多价阳离子的离子积增大,容易生成含Zn的碳酸盐、氢氧化物沉淀(陈清霞等,2021),降低Zn有效性,抑制小麦对Zn的吸收;植物在吸收Ca和K的同时,Zn可以通过Ca和K的通道进入植物体内(宋垠先,2011)。

表3 Zn生物富集系数与土壤理化指标相关系数

**Table 3 Correlation analysis of BCF with soil physicochemical properties**

	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	有机质	根系土 Zn	pH
小麦籽实 Zn	-0.77**	0.41*	0.73**	0.67**	0.38	0.79**	-0.25

目前,国内外尚未发布富锌农作物的标准。本文以《粮食(含谷物、豆类、薯类)及制品中铅、铬、镉、汞、硒、砷、铜、锌等八种元素限量》(NY861-2004)中规定的谷物Zn含量限量值作为富锌小麦Zn含量的上限值(50 mg kg<sup>-1</sup>)。富锌小麦Zn含量下限值的确定,是根据中国居民平衡膳食宝塔(2022)给出的每日健康膳食结构以及中国居民膳食营养素参考摄入量第3部分:微量元素(WS/T 578.3-2017)给出的成年人每日Zn推荐摄入量RNI

(12.5mg/d)而计算得出。具体计算过程如表4所示。首先,在全网搜集有关报道普通奶及其制品、动物性食物、蔬菜、水果、水等食物中Zn含量数据的文章(李宁等,2011;张汉青等,2020;赵慧贤等,2008),求取平均值作为这些食物Zn含量值。经推算,除谷类外其它普通食物(奶、动物性食品、蔬菜、水果)每日Zn供应量为7.19mg/d。然后,用RNI(12.5mg/d)减去其它食物的每日Zn供应量,得到富锌谷类最低的每日Zn供应量Y。最后,用富锌谷类最低的每日Zn供应量(Y)与谷类的日推荐食用量做比值,即为富锌谷类Zn含量的下限值(X),推算结果为21.24mg kg<sup>-1</sup>。由于送检样品是从大田中直接采集,在样品加工处理过程中的研磨、去皮等都会造成Zn损失,一般情况下去除的麸皮重量占籽实总重的15%—25%(包成龙等,2014;史建芳等,2012)。按照损失后剩余量为80%推算,确定富锌谷类最终的Zn含量

下限值应该为 $26.5 \text{ mg kg}^{-1}$ ，这样才能保证餐桌上的谷类食物Zn含量能够达到富Zn标准。研究区富锌小麦样品共22件，富集率达到36.7%。

表4 居民平衡膳食结构Zn供应量及富锌谷类锌含量下限值

Table 4 The supply of Zinc in residents balanced dietary and the lower limit of zinc content in zinc-rich crops

食物	推荐食用量 $\text{g d}^{-1}$		Zn 含量 $\text{mg kg}^{-1}$	Zn 摄入量 $\text{mg d}^{-1}$
	推荐范围	本文取值		
奶	300-500	400	4.50	1.80
动物性食物	120-200	160	25.80	4.13
蔬菜	300-500	400	2.21	0.88
水果	200-350	225	1.68	0.38
谷类	200-300	250	X	Y
除富锌谷类外其它普通食物（奶、动物性食品、蔬菜、水果）每日 Zn 供应量				7.19 ( $\text{mg d}^{-1}$ )
成年人每日 Zn 推荐摄入量(RNI)				12.5 ( $\text{mg d}^{-1}$ )
富锌谷类每日 Zn 最低供应量(Y)				5.31 ( $\text{mg d}^{-1}$ )
$X = 5.31 \text{ mg d}^{-1} / 250 \text{ g d}^{-1} = 21.24 \text{ mg kg}^{-1}$				

### 4.3 小麦 Zn 含量预测模型及富锌农作物种植适宜区划定

人工神经网络具有强大的非线性及并行处理能力，在各个学科领域的应用日益广泛，它能够识别和学习输入数据集与输出数据集之间的相关模式，经过训练后可以构建合适的预测模型（严亚萍等，2022）。传统统计学方法难以处理地学领域多元数据非线性、非平稳性以及数据多源性及不确定性的问题，而人工神经网络具有完全自动地从学习到抽象的知识表达，并把原始数据浓缩成某种学习知识的能力，能有效解决地学数据处理中常见的难题（陈能汪等，2021；张野等，2018）。本文选取与小麦籽实 Zn 相关性强的土壤理化参数： $\text{Zn}$ 、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  作为小麦籽实 Zn 含量预测模型的自变量，以研究区 60 组小麦籽实及其根系土样品数据为基础，随机挑选 70% 的数据建立训练集，15% 的数据建立验证集，15% 的数据建立测试集，基于 MATLAB2021a NNF 模块，采用 Levenberg-Marquardt 算法进行神经网络训练，最终预测模型在隐含层神经元为 6 个时拟合效果最好。小麦籽实 Zn 含量预测与实测值的拟合方程的 R 值为 0.89，且方程斜率均接近 1。从拟合效果来看（图 5），大部分样品点能够落在了拟合线附近，表明该模型能够较好地预测研究区小麦籽实 Zn 含量，但也有少数点偏离拟合线，这说明，总体上该模型至少在研究区内，一定程度可进行有效预测。但那些预测值与实际值仍然有较大偏差的样品点，也反映出所有的预测模型都会存在影响因素控制存在局限性的短板。影响作物籽实富集某种微量元素的能力不完全限于某几个土壤理化参数，而是由作物的品种、人工干扰程度、大气降尘补充以及其他未控制到的土壤理化参数等多种因素共同所决定的（赵多勇等，2012；商和平等，2015；苏达等，2020），如需使预测值与实际值偏差更小，仍需不断改进。

以表层土壤样品中  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、Zn 含量数据为基础，基于 ArcGIS10.7 软件，采用反距离权重法对研究区所有农业用地图斑进行空间插值、赋值，将每个图斑的  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、Zn 的插值数据代入小麦籽实 Zn 含量神经网络预测模型，得出每一个图斑上小麦籽实的预测含量值。按照本研究推算出的小麦籽实富 Zn 标准，划定富 Zn 小麦种植适宜区(图6)。结果表明，研究区内适宜种植富 Zn 小麦的农业用地面积为  $242.86\text{km}^2$ ，均分布于冲、洪积平原。从实测的 60 件小麦籽实样品的分布可以看出，有 17 件(占比 77.3%) 富锌小麦落入种植适宜区，仅有 5 件(22.7%)富锌小麦未落入适宜区；有 33 件(占比 86.8%) 非富锌小麦落入不适宜区，而仅有 5 件(占比 13.2%) 非富锌小麦未落入不适宜区。由此也能印证预测模型的可靠程度比较高。

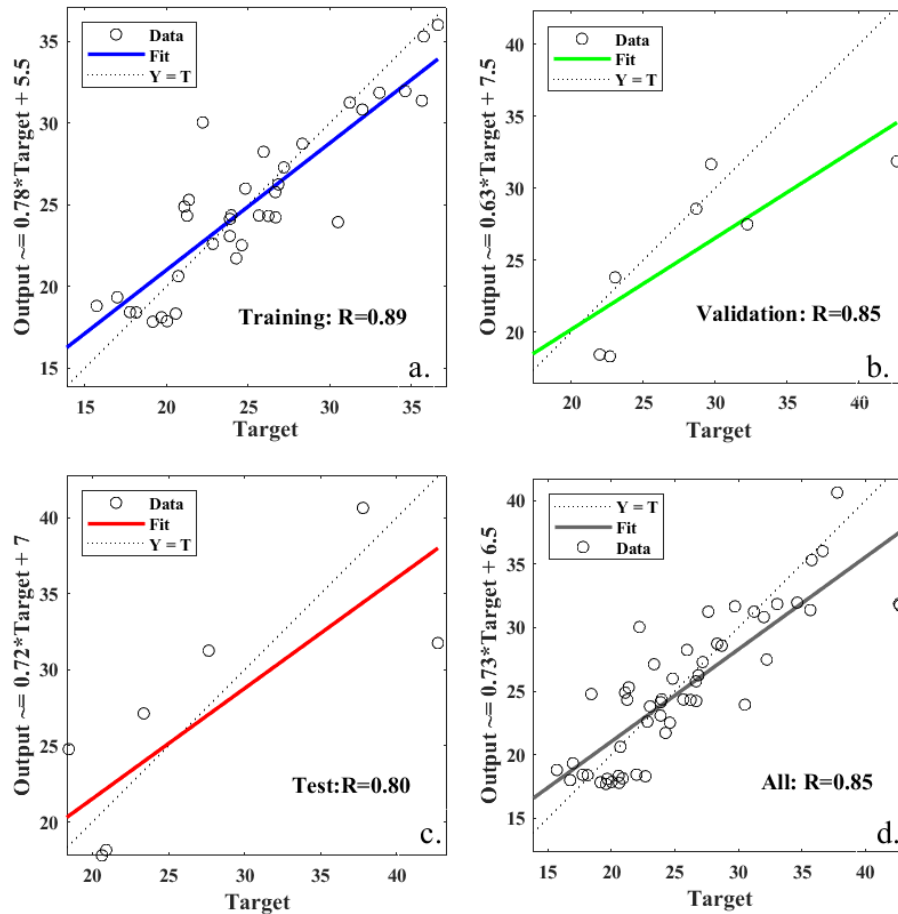


图5 神经网络预测模型拟合效果图 (a: 训练集拟合; b: 验证集拟合; c: 测试集拟合; d: 总拟合)

Fig.5 Fitting effect diagram of neural network prediction model

(a: Training set fitting, b: Validation set fitting, c: Test set fitting, d: Total fitting)

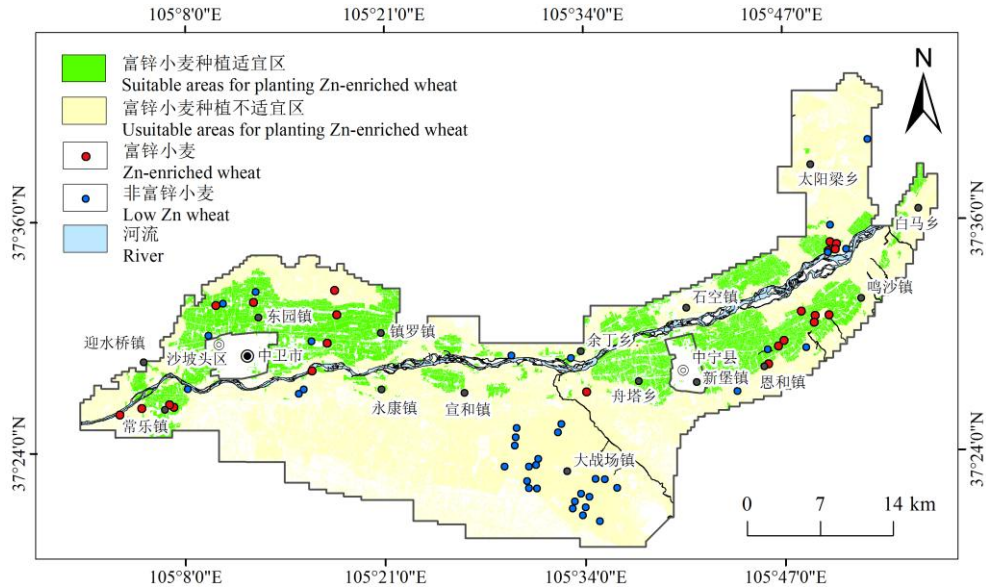


图 6 研究区富锌小麦种植适宜区范围

Fig.6 Suitable regions of Zn-rich wheat cultivating in the study area

## 5 结论

(1) 研究区农业用地土壤 Zn 含量范围  $25.1\sim 102.0\text{ mg kg}^{-1}$ ，背景值为  $61.4\text{ mg kg}^{-1}$ ，中位数为  $60.6\text{ mg kg}^{-1}$ ，背景值略高于黄河流域土壤背景值 ( $59.0\text{ mg kg}^{-1}$ )，但低于全国背景值 ( $67.0\text{ mg kg}^{-1}$ )，变异系数为 23.4，空间分布较为均匀且分布特征主要受成土母质控制。研究区土壤锌元素养分等级达到丰富及较丰富的农用地面积分别仅为  $17.1\text{ km}^2$ 、 $236.5\text{ km}^2$ ，分布占农业用地总面积的 1.74%、24.11%，土壤 Zn 养分总体较为缺乏。

(2) 研究区小麦籽实 Zn 含量范围  $13.34\sim 37.78\text{ mg kg}^{-1}$ ，平均值为  $24.72\text{ mg kg}^{-1}$ ，生物富集系数 (BCF) 范围 0.25~0.53，平均值生物富集系数为 0.41，小麦籽实对土壤 Zn 的富集能力为中等。相关分析表明，小麦籽实 Zn 主要来源于土壤，土壤中粘土矿物、有机质、铁的氧化物含量增高容易导致土壤 Zn 的富集，从而利于提升小麦籽实 Zn 含量。

(3) 基于中国居民每日健康膳食结构以及中国居民膳食微量元素参考摄入量，推算出富锌小麦 Zn 含量参考范围为  $26.5\sim 50.0\text{ mg kg}^{-1}$ ；研究区达到富锌小麦标准的样品比例为 36.7%，并且不存在 Zn 超标的小麦样品。

(4) 选取与小麦籽实 Zn 具有显著相关关系的土壤 Zn、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  含量数据作为小麦籽实 Zn 含量预测模型的自变量，利用神经网络分析工具构建小麦籽实 Zn 含量预测模型，并基于地理信息系统预测出研究区适宜种植富锌小麦的农业用地面积为  $242.86\text{ km}^2$ ，有 77.3% 的富锌小麦位于种植适宜区内，86.8% 的非富锌小麦位于不适宜区，预测模型可靠性高。

## References

- Cakmak, U.B., Kutman. 2018. Agronomic biofortification of cereals with zinc: a review. *European Journal of Soil Science*, 69, 172–180
- Chen Nengwang , Yu Yiqi , Chen Jixin , Chen Longbiao , Zhang Dongzhan . 2021. Artificial neural network models for water quality early warning: A review[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 41(12):4771-4782(in Chinese with English abstract).
- Chen Qingxia , Tu Chenglong , Lu Xiaohui , Li Longbo. 2021. Spatial heterogeneity of Zn and organic matter in dryland yellow soil of Guizhou Province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 41(10):4179-4187(in Chinese with English abstract).
- Cheng Xinxin, Wei Lixuan, Huang Xudong, Zheng Jian, Shao Mingming, Feng Ting, Li Jun, Han Yaling, Tan Wenle, Tan Wen, Lin Dongxin, Wu Chen., 2017. Solute Carrier Family 39 Member 6 Gene Promotes Aggressiveness of Esophageal Carcinoma Cells by Increasing Intracellular Levels of Zinc, Activating Phosphatidylinositol 3-Kinase Signaling, and Up-regulating Genes That Regulate Metastasis – *Science Direct*[J]. *Gastroenterology*, 152( 8):1985-1997.
- Dou Weiqiang, An Yi, Qin Li , Dong Mingming, Lin Dasong. 2021. Quantitative Relationship Between the Bioconcentration Factor of Rice Cadmium and Its Influencing Factors[J]. *Soils*, 53(4):788-793(in Chinese with English abstract).
- Frangos T, Maret W. 2020. Zinc and Cadmium in the Aetiology and Pathogenesis of Osteoarthritis and Rheumatoid Arthritis[J]. *Nutrients*., 13(1):53.
- Gao Yu, Liu Zhijian. 2017. Geochemical Characteristics of Soil Selenium in Selenium-rich Area in Changshantou, Ningxia Province, China[J]. *Earth And Environment*, 45(06):628-633(in Chinese with English abstract).
- Hou Qingye, Yang Zhongfang, Yu Tao, Xia Xueqi, Cheng Hangxin. 2020. Soil geochemical dataset of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 3-53.
- Leda Mezzaroba, Daniela Frizon Alfieri, Andrea Name Colado Sim ão, Edna Maria Vissoci Reiche. 2019. The role of zinc, copper, manganese and iron in neurodegenerative diseases[J]. *NeuroToxicology*, 74: 230-241.
- Li Ning, Zhao Huijuan. 2011. Investigation of Copper, Manganese, Zinc and Selenium Contents in Vegetables, Fruits, Grains and Fresh Meat in Jinan, Shandong[J]. *J Environ Health*, 28(07):613-615(in Chinese with English abstract).
- Liu Jingyun, Zuo Qun. 2019. Trace elements copper, zinc, selenium, iron, the change of oxidative stress and inflammation in body condition and the mechanism research progress[J]. *Chin J Sports Med*, 38(02):159-164(in Chinese).
- Liu Yingjun, Cao Liming, Li Zhaolin Wang Henian, Chu Tongqing, Zhang Jingrong. 1984. *Element geochemistry*[M]. Beijing: Science Press:309-310(in Chinese).
- Ma Honghong, Peng Min, Liu Fei, Guo Fei, Tang Shiqi, Liu Xiuquan, Zhou Yalong, Yang Ke, Li Kuo, Yang Zheng, Cheng Hangxin. 2020. Bioavailability, Translocation, and Accumulation Characteristic of Heavy
- Ma Xudong, Yu Tao, Yang Zhongfang, Zhang Shenghu, Wu Zhiliang, Wang Jue, Li Minghui, Lei Fenghua. 2022. Geochemical characteristics of zinc in soil and prediction of zinc content in maize and rice grains in Linshui County, Sichuan Province[J]. *Geology China*, 49(01):324-335(in Chinese with English abstract).
- Metals in a Soil-Crop System from a Typical Carbonate Rock Area in Guangxi, China[J]. *Environmental Science*, 41(01):449-459(in Chinese with English abstract).
- Ning Yunwang, Zhang Yongchun, Wang Jidong, Xu Xianju, Hu Yonghong. 2009. Research of zinc in soil- plant-human system and development of zinc enrichment agricultural products[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, (3):1-4 (in Chinese).

- Sanna A, Firinu D, Zavattari P, Valera P. 2018. Zinc Status and Autoimmunity: A Systematic Review and Meta-Analysis[J]. *Nutrients*, 10(1):68.
- Shang Heping, Li Yang, Zhang Tao, Su Dechun. 2015. Form Tendency and Bio-availability Dynamics of Cu and Zn in Different Farm Soils After Application of Organic Fertilizer of Livestock and Poultry Manures[J]. *Environmental Science*, 36(1):314-324(in Chinese with English abstract).
- Shuhei MAKABE, Ken-ichi KAKUDA, Yuka SASAKI, Tadashi ANDO, Hiroshi FUJII, Ho ANDO. 2009. Relationship between mineral composition or soil texture and available silicon in alluvial paddy soils on the Shounai Plain, Japan[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 55(2): 300-308.
- Song Yinxian. 2011. Ecogeochemistry of heavy metals in sediment and soil of Changjiang river delta[D]. Nanjing: Nanjing university (in Chinese with English abstract).
- Su Da, Wu Liangquan, Søren K Rasmussen, Zhou Lujian, Pan Gang, Cheng Fangmin. 2020. Influence of phosphorus on rice grain zinc bioavailability and its relation to inositol phosphate profiles concentration[J]. *Acta agronomica sinica*, 46(2):228-237(in Chinese with English abstract).
- Sun Houyun, Wei Xiaofeng, Sun Xiaoming, Jia Fengchao, Li Duojie, Li Jian. 2021. Bioaccumulation and Translocation Characteristics of Heavy Metals in a Soil-Maize System in Reclaimed Land and Surrounding Areas of Typical Vanadium-Titanium Magnetite Tailings[J]. *Environmental Science*, 42(03):1166-1176(in Chinese with English abstract).
- Tang Molan, Fan Bolun, Yao Lingyang, An Ziyi, Bao Zhengyu. 2020. Geochemical Characteristics and Impact Factors of Selenium in Soil—Crop Systems[J]. *Guizhou Geology*, 37(04):417-424(in Chinese with English abstract).
- Threshold of Selenium-Rich Soils[J]. *Environmental Science*, 41(12):5571-5578(in Chinese with English abstract).
- Wang Cheng, Cheng Jianhua, Meng Fang, Li Tianbin. 2017. Regional geology of China-Ningxia[M]. Beijing: Geological Publishing House, 770-839.
- Wang Rui, Deng Hai, Jia Zhongmin, Yan Mingshu, Zhou Jiao, He Zhongxiang, Liang Shaobiao, Dong Jinxiu, Su Liming. 2020. Distribution Characteristics of Selenium in a Soil-Crop System and the
- Wang Yizheng, Yang Zhongfang, Liu Xu, Li Cheng, Ji Wenbin, Zhang Qizuan, Zhuo Xiaoxiong, Wang Lei. 2020. Geochemical characteristics of Copper in soil and ecological health research in Qintang district of Guigang City in Guangxi[J]. *Geology China*. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20200529.1230.002.html>
- Wu Zhiliang, Li Zhikun, Hou Qingye, Yang Zhongfang, Yu Tao, Wang Jue, Wang Chen, Ma Xudong. 2021. Geochemical Characteristics of Selenium in Soils and Crops and Its Research Significance in Linshui County, Sichuan Province[J]. *Geoscience*, 35(06):1752-1761(in Chinese with English abstract).
- Xi Xiaohuan, Hou Qingye, Yang Zhongfang, Ye Jiayu, Yu Tao, Xia Xueqi, Cheng Hangxin, Zhou Guohua, Yao Lan. 2021. Big data based studies of the variation features of Chinese soils background value versus reference value: A paper written on the occasion of Soil Geochemical Parameters of China's publication[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 28(01):308-317(in Chinese with English abstract).
- Xiao Gaoqiang, Zong Qingxia, Xiang Longzhou, Dao Yan, Xu Yongqiang. 2020. Geochemical characteristics and influencing factors of Selenium in soils and agricultural products in the Jiucheng-Jiemao area, Yingjiang County, Yunnan Province[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 44(02):412-418(in Chinese with English abstract).
- Yan Yaping, Wang Gang, Jiang Shengji, Xu Min. 2022. Research progress of artificial neural networks in the field of environment[J]. *Applied Chemical Industry*, 51(01):170-176(in Chinese with English abstract).
- Yang Qiong, Yang Zhongfang, Zhang Qizuan, Liu Xu, Zhuo Xiaoxiong, Wu Tiansheng, Wang Lei, Wei Xueji, Ji Junfeng. 2021. Ecological risk assessment of Cd and other heavy metals in soil-rice system in the karst areas with high geochemical background of Guangxi, China[J]. *Science China Earth Sciences*, 51(08):1317-1331.

- Yang Xiao-e. , Chen Wenrong , Ying Feng 2007. Improving human micronutrient nutrition through biofortification in the soil-plant system: China as a case study [J]. Environ Geochem Health, 29: 413-428.
- Zhang Hanqing, Zhang Zhengying, Zhao Weizhang.2020.Fresh milk quality security investigation and assay for cows in large scale farm, Qinghai Province[J].Shandong animal husbandry and veterinary,41(06):57-58(in Chinese ).
- Zhang Jiguo, Zhang Bin, Wang Huijun, Du Wenwen, Su Chang, Zhai Fengying.2012.Nutrients Intake Trend Of Chinese Population In Nine Provinces From 1989 To 2009 (VII) Zinc Intake Trend Of Chinese Adults Aged 18-49 Years[J].Acta Nutrimenta Sinica, 28(09):111-113(in Chinese).
- Zhang Ye, Li Mingchao, Han Shuai.2018. Automatic identification and classification in lithology based on deep learning in rock images[J].Acta Petrologica Sinica, 34( 2) : 333-342(in Chinese with English abstract).
- Zhao Duoyong, Wei Yimin, Wei Shuai, Guo Boli, Cai Xianfeng, Wu Xiaosheng.2012.Isotope analysis of lead pollution sources in wheat kernel[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 28(08):258-262(in Chinese with English abstract).
- Zhao Huixian, Zhao Yang, Qin Shouxian, Zhao Yuxin, Huang Kehe.2008.Effect of Se-enriched yeast in hen diets on the selenium content and distribution in eggs[J].Animal Husbandry & Veterinary Medicine, (04):31-35(in Chinese).
- Zhao Xiaohon, He Hui, Jia Lei, Hou Tao.2022.Plant Fortified with Selenium and Zinc: A New Exploration on Dietary Supplements[J].Food Science and Technology, 47(05):95-101(in Chinese with English abstract).
- Zhao Xiaoyuan, Yang Zhongfang, Cheng Huiyi, Ma Xudong, Wang Jue, Li Zhikun, Wang Chen, Li Minghui, Lei Fenghua.2022.Geochemical characteristics and ecological health-related ranges of Copper in soil in Huaying Mountain-Xicao in Linshui County, Sichuan Province[J].Geophysical and Geochemical Exploration, 46(01):238-249(in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 陈能汪, 余镒琦, 陈纪新, 陈龙彪, 张东杰. 2021. 人工神经网络模型在水质预警中的应用研究进展[J]. 环境科学学报, 41(12):4771-4782.
- 陈清霞, 涂成龙, 陆晓辉, 李龙波. 2021. 贵州省旱地黄壤 Zn 和有机质的空间异质性特征[J]. 环境科学学报, 41(10):4179-4187.
- 窦韦强, 安毅, 秦莉, 董明明, 林大松. 2021. 稻米镉的生物富集系数与其影响因素的量化关系[J]. 土壤, 53(04):788-793.
- 高宇, 刘志坚. 2017. 宁夏长山头富硒区土壤硒地球化学特征研究[J]. 地球与环境, 45(06):628-633.
- 侯青叶, 杨忠芳, 余涛, 夏学齐, 成杭新. 2020. 中国土壤地球化学参数[M]. 北京: 地质出版社, 3-53.
- 李宁, 赵慧娟. 2011. 济南市区蔬菜、水果、粮食和鲜肉中铜、锰、锌、硒含量调查[J]. 环境与健康杂志, 28(07):613-615.
- 刘婧昀, 左群. 2019. 微量元素铜、锌、硒、铁在机体氧化应激与炎症状态下的变化及机制研究进展[J]. 中国运动医学杂志, 38(02):159-164.
- 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 王鹤年, 储同庆, 张景荣. 1984. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社: 309-310.
- 马宏宏, 彭敏, 刘飞, 郭飞, 唐世琪, 刘秀金, 周亚龙, 杨柯, 李括, 杨峥, 成杭新. 2020. 广西典型碳酸盐岩区农田土壤-作物系统重金属生物有效性及迁移富集特征[J]. 环境科学, 41(01):449-459.
- 马旭东, 余涛, 杨忠芳, 张虎生, 武芝亮, 王珏, 李明辉, 雷风华. 2022. 四川省邻水县土壤锌地球化学特征及玉米水稻籽实锌含量预测[J]. 中国地质, 49(01):324-335.
- 宁运旺, 张永春, 汪吉东, 许仙菊, 胡永红. 2009. 土壤-植物-人类系统中锌与富锌农产品的开发[J]. 江苏农业科学, (03):1-4.
- 商和平, 李洋, 张涛, 苏德纯. 2015. 畜禽粪便有机肥中 Cu、Zn 在不同农田土壤中的形态归趋和有效性动态

- 变化[J]. 环境科学, 36(1):314-324.
- 宋根先. 2011. 长江三角洲沉积物和土壤重金属生态地球化学研究[D]. 南京: 南京大学.
- 苏达, 吴良泉, Søren K Rasmussen, 周庐建, 潘刚, 程方民. 2020. 磷营养对水稻籽粒锌生物有效性的影响及其与植酸等磷酸肌醇谱含量的关系[J]. 作物学报, 46(2):228-237.
- 孙厚云, 卫晓锋, 孙晓明, 贾凤超, 李多杰, 李健. 2021. 钒钛磁铁矿尾矿库复垦土地及周边土壤-玉米重金属迁移富集特征[J]. 环境科学, 42(03):1166-1176.
- 唐沫岚, 范博伦, 姚凌阳, 安子怡, 鲍征宇. 2020. 土壤-作物系统中硒的地球化学特征及影响因素研究(代序2)[J]. 贵州地质, 37(04):417-424.
- 王成, 程建华, 孟方, 李天斌. 2017. 中国区域地质志-宁夏志[M]. 北京:地质出版社, 770-839.
- 王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周皎, 何忠庠, 梁绍标, 董金秀, 苏黎明. 2020. 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, 41(12):5571-5578.
- 王懿铮, 杨忠芳, 刘旭, 李程, 季文兵, 张起钻, 卓小雄, 王磊. 2020. 广西贵港市覃塘区土壤 Cu 地球化学特征与生态健康研究[J/OL]. 中国地质. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20200529.1230.002.html>
- 武芝亮, 李致坤, 侯青叶, 杨忠芳, 余涛, 王珏, 王琛, 马旭东. 2021. 四川省邻水县土壤及作物硒地球化学特征及其研究意义[J]. 现代地质, 35(06):1752-1761.
- 奚小环, 侯青叶, 杨忠芳, 叶家瑜, 余涛, 夏学齐, 成杭新, 周国华, 姚岚. 2021. 大数据科学从信息化、模式化到智能化: 现代地球化学应用研究的新范式[J]. 物探与化探, 28(01):308-317.
- 肖高强, 宗庆霞, 向龙洲, 刀艳, 徐永强. 2020. 云南省盈江县旧城一姐冒地区土壤和农产品硒地球化学特征及影响因素[J]. 物探与化探, 44(02):412-418.
- 严亚萍, 王刚, 姜盛基, 徐敏. 2022. 人工智能在环境领域中的研究进展[J]. 应用化工, 51(01):170-176.
- 杨琼, 杨忠芳, 张起钻, 刘旭, 卓小雄, 吴天生, 王磊, 韦雪姬, 季峻峰. 2021. 中国广西岩溶地质高背景区土壤-水稻系统 Cd 等重金属生态风险评价[J]. 中国科学:地球科学, 51(08):1317-1331.
- 张汉青, 张正英, 赵维章. 2020. 青海奶牛规模养殖场鲜奶质量安全抽样调查与分析[J]. 山东畜牧兽医, 41(06):57-58.
- 张继国, 张兵, 王惠君, 杜文雯, 苏畅, 翟凤英. 2012. 1991-2009 年中国 9 省(自治区)中老年人膳食锌的摄入状况及变化趋势[J]. 营养学报, 28(09):707-709+718.
- 张野, 李明超, 韩帅. 2018. 基于岩石图像深度学习的岩性自动识别与分类方法[J]. 岩石学报, 34(02):333-342.
- 赵多勇, 魏益民, 魏帅, 郭波莉, 蔡先峰, 吴小胜. 2012. 小麦籽粒铅污染来源的同位素解析研究[J]. 农业工程学报, 28(08):258-262.
- 赵慧贤, 赵洋, 秦守贤, 赵玉鑫, 黄克和. 2008. 蛋鸡日粮中添加富硒酵母对鸡蛋中硒含量及分布的影响[J]. 畜牧与兽医, (04):31-35.
- 赵小红, 何慧, 贾蕾, 侯焘. 2022. 植物生物强化硒与锌: 膳食补充剂的新探索[J]. 食品科技, 47(05):95-101.
- 赵筱媛, 杨忠芳, 程惠怡, 马旭东, 王珏, 李志坤, 王琛, 李明辉, 雷风华. 2022. 四川邻水县华蓥山一西槽土壤 Cu 地球化学特征与生态健康[J]. 物探与化探, 46(01):238-249.