

doi: 10.12029/gc20220121

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(1): 324–335.

Ma Xudong, Yu Tao, Yang Zhongfang, Zhang Husheng, 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 in China*, 49(1): 324–335 (in Chinese with English abstract).

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

马旭东¹, 余涛², 杨忠芳¹, 张虎生¹, 武芝亮¹, 王珏¹, 李明辉³, 雷风华³

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京)数理学院, 北京 100083; 3. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610082)

摘要:【研究目的】锌(Zn)是一种人体所必需的微量元素。利用区域地球化学调查数据, 准确预测农作物中 Zn 含量, 从而开展富 Zn 农产品开发规划仍存在较大难度。【研究方法】本文选择四川省邻水县为研究区, 依据土地质量地球化学调查所获得的表层土壤、农作物及根系土中地球化学指标数据, 系统研究了土壤与农作物中 Zn 含量和空间分布特征, 分析了玉米、水稻吸收 Zn 的影响因素。【研究结果】邻水县表层土壤 Zn 含量范围为 25.00~142.00 mg/kg, 平均值为 81.93 mg/kg, 土壤 Zn 高值区主要分布在邻水县华蓥山碳酸盐岩和峨眉山玄武岩出露区。研究区玉米、水稻籽实平均 Zn 含量分别为 17.18 mg/kg 和 11.20 mg/kg, 富锌率分别为 44.0% 和 8.2%。利用反向传播神经网络模型分别预测出邻水县富 Zn 玉米、富 Zn 水稻种植面积为 235.34 km²、30.99 km²。【结论】影响研究区玉米、水稻籽实 Zn 生物富集主要因素有土壤 Fe₂O₃、Mn、pH、SiO₂/Al₂O₃、CaO、有机质以及营养元素 P 等; 反向传播神经网络模型能较好地模拟籽实 Zn 元素与土壤理化性质的关系, 可以应用于区域农作物 Zn 含量的计算。

关键词: 锌; 土壤; 玉米水稻; 分布特征; 影响因素; 预测; 土壤地球化学调查工程

创新点: 玉米、水稻籽实 Zn 含量不受土壤 Zn 的影响, 而受土壤中主量元素的影响; 利用神经网络模型建立了玉米和水稻 Zn 含量的预测图。

中图分类号: S153.6 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2022)01-0324-12

Geochemical characteristics of zinc in soil and prediction of zinc content in maize and rice grains in Linshui County, Sichuan Province

MA Xudong¹, YU Tao², YANG Zhongfang¹, ZHANG Husheng¹, WU Zhiliang¹, WANG Jue¹,
LI Minghui³, LEI Fenghua³

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. School of Science, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu 610082, Sichuan, China)

收稿日期: 2021-04-11; 改回日期: 2021-05-29

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20190524)资助。

作者简介: 马旭东, 男, 1996 年生, 硕士生, 主要从事环境地球化学研究; E-mail: maxudongcugb@126.com。

通讯作者: 余涛, 男, 1979 年生, 副研究员, 主要从事环境化学、生态地球化学研究; E-mail: yutao@cugb.edu.cn。

Abstract: This paper is the result of the soil geochemical survey engineering.

[Objective] Zinc (Zn) is an essential trace element for human body. Using regional geochemical survey data to accurately predict the Zn content in crops and carry out development planning for Zn-rich agricultural products is still a problem. **[Methods]** In this paper, we chose Linshui County of Sichuan Province as the study area. Basing on the investigation results obtained from the geochemical survey of land quality, content and spatial distribution characteristics of Zn in the soil and crop were studied and the factors affecting Zn element uptake by maize and rice grain were analyzed. **[Results]** The Zn content of topsoil in the study area ranged from 25.00–142.00 mg/kg with a mean value of 81.93 mg/kg. The higher content of Zn in soil were mainly distributed in exposure of carbonate rocks and Emei Shan basalt in Huaying mountain. The average content of Zn in maize and rice were 17.18 mg/kg and 11.20 mg/kg, respectively. The Zn enrichment rates were 44.0% and 8.2%, respectively. The prediction of the planting areas of Zn rich maize and Zn rich rice in Linshui County reached 235.34 km² and 30.99 km² respectively by using back-propagation neural network models. **[Conclusions]** The main factors affecting the Zn accumulation of maize and rice in the study area were Fe₂O₃, Mn, pH, SiO₂ / Al₂O₃, Cao, organic matter and nutrient element P in soil. The back-propagation neural network models could better simulate the relationship between Zn in crop grains and physicochemical properties of soil, which could be used for region specific calculation of crop Zn content.

Key words: zinc; soil; maize and rice; distribution characteristics; influencing factors; prediction; soil geochemical survey engineering

Highlights: Zn content in maize and rice grains is not only affected by soil Zn but major elements in soil; A map of predictive maize and rice Zn is proposed by neural network models.

About the first author: MA Xudong, male, born in 1996, master candidate, engaged in the research of environmental geochemistry; E-mail: maxudongcugb@126.com.

About the corresponding author: YU Tao, male, born in 1979, associate professor, engaged in in the research of environmental chemistry and ecogeochemistry; E-mail: yutao@cugb.edu.cn.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No.DD20190524).

1 引言

锌(Zn)是一种对人体有益的微量元素,在人体生长发育、生殖遗传、免疫、内分泌等生理过程中起着极其重要的作用(陈莉等,2004;胡焰等,2011;陈铮等,2012;张玲等,2013),有着“生命之花”、“智力之源”的美誉(李合华等,2002;考希宾等,2007)。研究表明,全世界约有40%人口面临缺锌健康问题(张雅风等,2018)。人体缺锌会导致免疫力下降,消化功能减退(吴露霞等,2002;黄秋婵等,2009),儿童缺锌会导致生长发育迟缓,严重者甚至会患上侏儒症(方晓等,2000;石英等,2004)。同时锌也是人体内众多蛋白酶、转录因子和其他调控蛋白的辅助因子,对维持蛋白质结构和功能起着关键作用(任孝军等,2017)。隐性缺锌症状在我国普遍存在(Yang et al., 2007)。根据王志宏等(2006)统计结果,中国居民平均每天Zn元素摄入量为11.3 mg/d,城镇居民略高于农村居民,但均低于中国营养学会推荐标准摄入量15 mg/d(宁运旺等,2009),缺锌现象普遍存在。外源补锌人体吸收率低,且有一定副

作用,根据我国居民饮食机构研究表明,成年人Zn摄入量的75%来源于粮食和蔬菜(李志龙等,2019),但目前栽培的玉米、小麦、水稻、高粱、燕麦等禾本科农作物籽实Zn含量很低,不能满足人体所需(Cakmak et al., 2017)。

土壤中Zn等微量元素的含量受成土母质、成土过程及外源输入通量等多种因素影响,而农作物对微量元素的吸收除了与土壤中微量元素的总量有关外,还与微量元素的生物有效性、土壤元素的赋存形式、土壤理化性质与化学成分、元素间交互作用等多种因素有关(林亲铁等,2013)。为此,不少学者研究构建了农作物籽实Zn、Se、Cu等微量元素吸收预测模型,大大提高了富Se、富Zn和富Cu等特色土地资源开发规划的准确性和科学性。Gu et al. (2019)研究了广西南宁市和来宾市表层土壤和农作物中Zn、Cu等元素相关关系,并用模型估算了玉米和花生籽粒中Zn、Cu元素含量;Yang et al. (2020)利用湖南省攸县791份土壤和蔬菜样品,构建了蔬菜Cd吸收模型;Chen et al. (2016)构建了长三角地区水稻、小麦和油菜中Cu、Pb、Zn等元素含量的预

测模型。

构建农作物籽实微量元素吸收预测模型需要一定的表生元素地球化学理论知识、掌握数学统计建模方法、开展系统的农作物吸收微量元素影响因素研究,多数学者仅仅是依据土壤中微量元素含量进行特色土地资源开发规划建议,但农作物籽实微量元素含量与土壤微量元素含量不一定具有显著的正相关关系,致使特色土地资源规划开发和农产品种植效果不佳。因此,如何利用面积性土壤调查数据,科学预测农作物籽实微量元素含量,提出基于农作物籽实微量元素含量水平的特色土地资源开发规划是亟待解决的科学问题。

本文以四川省广安市邻水县为研究区,依据1:5万土地质量地球化学调查获得的表层土、玉米、水稻以及根系土中Zn等元素指标的含量数据,在研究了土壤与农作物Zn含量、空间分布及玉米、水稻Zn生物富集系数影响因素基础上,利用反向传播神经网络(back-propagation neural network)构建了玉米、水稻籽实Zn生物富集系数预测模型,根据研究区旱地、水田分布格局,进行富Zn玉米和富Zn水稻种植区规划。研究成果对利用面积性调查获得的地球化学数据进行建模预测、区域规划,深入挖掘调查评价大数据,提升地学研究水平和社会服务能力具有重要的示范意义。

2 研究区概况

邻水县地处广安市东部(图1),位于东经106°41′~107°18′,北纬30°01′~30°33′,物流交通便捷,是四川距重庆主城区最近的县。同时邻水县也是长江经济带上游重要节点、川渝合作最前沿。县内以中、低山及丘陵为主。由于受地层的走向与区内地质构造的影响,县内形成山地与丘陵平行相间的“三山两槽”地貌,“三山”分别为华蓥山(西山)、铜锣山(中山)、明月山(东山),三山之间为宽阔的槽谷,位于东部的称“东槽”,位于西部的为“西槽”。受成土母质类型、地形地貌等因素影响,邻水县土壤类型主要有黄壤、紫色土、石灰土、水稻土。黄壤呈带状分布于邻水县“三山”背斜的碳酸盐岩和黄色砂页岩出露区;紫色土广泛分布于邻水县西槽和东槽的丘陵地区,成土母岩为侏罗系红层,是农业种植的主要区域;石灰土分布在华蓥山与铜锣山区

碳酸盐岩分布区,土层很薄,主要为针叶林植物生长的土壤;水稻土分布广泛,但地块细碎,随母质、地形、水文特点的差异,从支沟到正冲沟均有分布。研究区内地层出露如图1所示,在西槽和东槽丘陵地区,主要分布有侏罗系粉砂质泥岩,杂色泥岩、泥质粉砂岩及长石砂岩等一套红色的陆源碎屑岩地层,为邻水县人居生活和农业生产的主要区域。在华蓥山、明月山和铜锣山主要分布有三叠系、二叠系、石炭系和志留系等老地层。

3 样品采集与分析

3.1 样品采集

在邻水县西槽和东槽南部的丘陵农耕区,按照DZ/T0295《土地质量地球化学评价规范》,以7个点/km²的采样密度采集了6499件表层土壤样品;在华蓥山、铜锣山、明月山和东槽北部地区,按照DZ/T0258《多目标区域地球化学调查规范》,以1个点/km²的密度共采集481件表层土壤样品(图1)。采样点布设应兼顾代表性和均匀性,远离村庄、垃圾堆及新近堆积土、田埂等局部异常地段。样品采集后自然阴干,所有土壤样品全部过10目尼龙筛。

在农作物收获期,分别采集了109套玉米、水稻与根系土样品(图1),由于邻水县水田与旱地镶嵌分布,地块细碎,水稻采样点与玉米采样点空间距离基本在100~500 m范围内。采集时避开病虫害和其他特殊的植株。玉米每个采样点分3个子样点,每个子样点采集1~2株玉米;水稻分5个子样点采集,每个子样点以1~2 m²为一个采样单元,每个单元内采集50~100 g水稻穗,随后将5个子样采集的稻穗等量混合成1件样品。将采集玉米籽实、水稻籽实的植株连根拔起,将作物根系上的泥土抖落在一次性塑料布上,所有分样点抖落的泥土均匀混合后,采用四分法,装入干净的布袋内,土壤太湿时,布袋外面套上塑料袋,每件样品重量大于2000 g。将采集后的玉米和水稻籽实样品放置在干净的无污染场地,进行晾晒。样品干燥后进行脱粒、称重、分装送测。玉米和水稻根系土样品加工流程同表层土壤。

3.2 分析测试

表层土壤样品测试单位为自然资源部成都矿产资源监督检测中心,农作物及根系土样测试单位

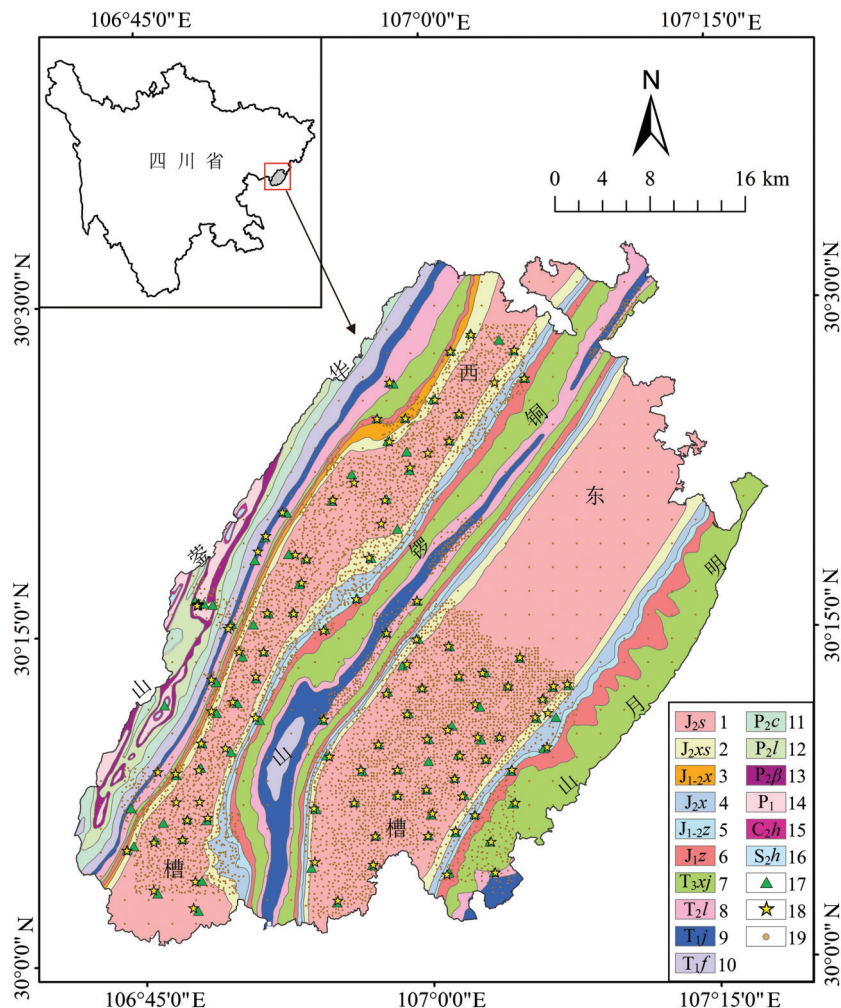


图1 研究区地理位置及采样点位图

1—上沙溪庙组;2—下沙溪庙组;3—上新田沟组;4—新田沟组;5—自流井组;6—珍珠冲组;7—须家河组;8—雷口坡组;9—嘉陵江组;10—飞仙关组;11—长兴组;12—龙潭组;13—峨眉山玄武岩组;14—下二叠统;15—黄龙组;16—龙马溪组;17—玉米采样点位;18—水稻采样点位;19—表层土采样点位

Fig.1 The location and sampling map of the study area

1— Upper Shaximiao Formation; 2— Lower Shaximiao Formation; 3— Upper Xintiangou Formation; 4— Xintiangou Formation; 5— Ziliujing Formation; 6— Zhenzhuchong Formation; 7— Xujiage Formation; 8— Leikoupo Formation; 9— Jialingjiang Formation; 10— Feixianguan Formation; 11— Changxing Formation; 12— Longtan Formation; 13— Emeishan basalt Formation; 14— Lower Permian; 15— Huanglong Formation; 16— Longmaxi Formation; 17— Sampling sites of maize; 18— Sampling sites of rice; 19— Sampling sites of topsoil

为自然资源部合肥矿产资源监督检测中心。本次样品分析方法配套方案及检出限见表1。土壤分析时插入12个国家一级标准物质控制分析准确度,分别计算每种元素,每件标准物质、每次测定值与标准推荐值之间对数差($\Delta \lg C$)控制分析的准确度;农作物样品分析时插入4个标准物质,计算测定平均值与标准物质推荐值的相对误差RE%来确定分析准确度,计算测定值间的相对标准偏差RSD%来确定分析精密度。元素分析方法的检出限、报出率、准确度、精密度等质量指标均达到或优于《土地

质量地球化学评价规范》(DZ/T0295-2016)、《多目标区域地球化学调查规范》(DZ/T0253-2014)要求。

4 结果与讨论

4.1 研究区土壤Zn空间分布规律及其影响因素

按照土壤Zn含量平均值加减3倍标准差,对研究区表层土壤Zn含量异常值进行剔除,剔除后得到6916件表层土壤样。研究区土壤中锌(Zn)元素含量统计见表2,表层土壤Zn含量范围为25.00~142.00 mg/kg,中位值为84.10 mg/kg,标准差

表1 样品分析方法配套方案及检出限
Table 1 Analysis methods and detect limits for samples

样品类型	分析方法	测定元素或指标	规范检出限	分析方法检出限	
土壤	X射线荧光光谱法(XRF)	SiO ₂ /(mg/kg)	0.1	0.1	
		Al ₂ O ₃ /%	0.05	0.05	
		P/(mg/kg)	10	10	
		Zn/(mg/kg)	4	4	
	电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-AES)	Fe ₂ O ₃ /%	0.05	0.05	
		Mn/(mg/kg)	10	10	
		电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)	CaO/%	0.05	0.05
		氧化还原容量法(VOL)	有机质(OM)/%	0.1	0.02
	离子选择性电极法(ISE)	pH	0.1	0.1	
农作物	电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)	Zn/(mg/kg)	1	0.05	

表2 研究区表层土壤Zn元素含量统计(mg/kg)
Table 2 Zn concentration of topsoil sampling in the study area(mg/kg)

样品数	最大值	最小值	中位值	平均值	标准差	全国	四川	西南
6916	142.00	25.00	84.10	81.93	16.84	71	90	92

16.84mg/kg, 平均值81.93kg/mg, 高于全国土壤Zn的平均值, 但低于西南地区 and 四川省表层土壤Zn平均值(侯青叶等, 2020)。图2为研究区表层土Zn元素地球化学图, 对比研究区地质图(图1)可见, 土壤中Zn空间分布受成土母质岩性和构造格局控制, 同时土壤元素含量空间变异性很大, 土壤Zn含量高值区主要分布在华蓥山碳酸盐岩和峨眉山玄武岩出露区, 玄武岩风化形成的土壤继承了原岩Zn高含量的特征, 碳酸盐岩在淋溶和酸不溶物堆积过程中, 易发生Zn等微量元素次生富集(任天祥等, 1998; 陈武等, 2010; 郭超等, 2019; 盛亚斌等, 2020; 赵辛金等, 2020), 具有典型的地质高背景特征。除华蓥山之外, 研究区其余地区表层土壤Zn含量均较低, 尤其是在三叠系须家河组页岩、泥岩、砂岩和侏罗系粉砂质泥岩, 杂色泥岩、泥质粉砂岩及长石砂岩等出露的明月山、西槽北部、东槽南部及铜锣山西侧等地区。表层土Zn含量高低变化总体上沿东北—南西走向展布。

按照DZ/T0295《土地质量地球化学评价规范》给出的土壤Zn丰缺分级标准值, 研究区土壤养分元素Zn含量总体处于丰富水平, 全区以一等(丰富)和二等(较丰富)土地为主(表3), 面积分别为804.48 km²和773.78 km², 占研究区土地面积42.14%和40.53%, 广泛分布在华蓥山、铜锣山和东槽地区, 三

等(中等)、四等(较缺乏)和五等(缺乏)面积之和占比仅为17.33%, 集中分布在明月山, 空间上与须家河地层出露空间一致。

4.2 不同土壤类型Zn含量特征

研究区不同土壤类型Zn含量统计结果见表4, 从中可见, 石灰土中Zn平均含量最高, 达到88.13 mg/kg, 而紫色土(82.16 mg/kg)、黄壤(80.44 mg/kg)、水稻土(81.13 mg/kg)Zn含量差异不大, 略低于石灰土。由于石灰土成土母质为碳酸盐岩, 在成土过程中存在明显的次生富集现象, Zn元素含量显著高于其他类型土壤。紫色土、黄壤、水稻土为当地农业种植的主要土壤类型, 主要由砂岩、泥页岩等风化形成, 砂质成分较高, 成土母岩中Zn含量偏低, 土壤继承了成土母质Zn低含量的特征。

4.3 水稻、玉米籽实及根系土中Zn含量与富集系数

研究区玉米籽实、水稻籽实Zn元素含量与富集率见表5, 玉米籽实Zn含量最大值为31.63 mg/kg, 最小值为10.29 mg/kg, 平均含量17.18 mg/kg; 水稻籽实Zn含量最大值为16.25 mg/kg, 最小值为5.93 mg/kg, 平均含量11.20 mg/kg。由于目前国内外并无富Zn农作物的相关标准规范, 因此本文根据中国食物成分表(杨月欣等, 2018)以及农业部发布的粮食及其制品中八种元素限量(NY 861-2004), 将玉米籽实Zn含量17.00~50.00mg/kg、水稻籽实Zn含量14.60~50.00mg/kg作为富Zn玉米、水稻参考值。研究区玉米籽实Zn元素富集率为44.0%; 水稻籽实Zn富集率仅为8.3%。

研究区玉米与水稻根系土Zn含量见表5, 玉米根系土Zn范围36.90~183.80 mg/kg, 平均值91.70

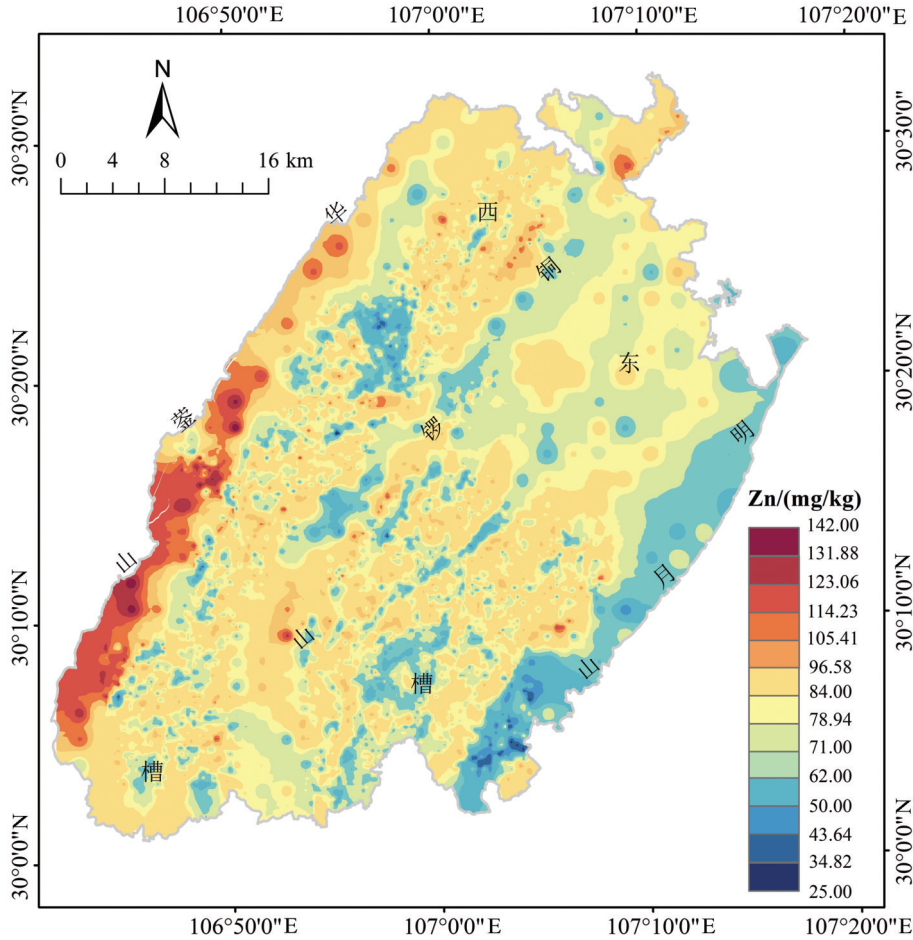


图2 研究区表层土壤Zn地球化学图
Fig.2 Geochemical map of Zn in topsoil of the study area

表3 研究区表层土壤Zn地球化学等级及其分布面积比例
Table 3 Geochemical grades of topsoil Zn and their distribution area ratios in the study area

	一等	二等	三等	四等	五等
Zn 标准/(mg/kg)	>84	71~84	62~71	50~62	≤50
面积/km ²	804.48	773.78	190.06	112.94	27.97
占比/%	42.14	40.53	9.95	5.92	1.46

mg/kg; 水稻根系土 Zn 含量范围 34.20~234.90 mg/kg, 平均值 89.92 mg/kg, 总体来说, 玉米根系土 Zn

含量略高于水稻根系土, 且变化范围较小。

4.4 农作物吸收 Zn 影响因素

元素生物富集系数是指在生物体内的含量与该元素在环境 (以土壤为主) 中含量的比值 (廖启林等, 2013), 是一个无量纲数据 (方如康, 2003)。生物富集系数越大, 其对土壤中元素的富集能力就越强 (沈体忠等, 2014)。计算公式如下:

$$BCF_i = C_{i \text{ 作物籽实}} / C_{i \text{ 根系土}} \quad (1)$$

式中, BCF_i (bioconcentration factor) 是元素 i 的

表4 研究区不同土壤类型理化指标平均含量
Table 4 Average contents of physicochemical properties of different soil types in the study area

土壤类型	pH	Zn/(mg/kg)	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ /%	Mn/(mg/kg)	P/(mg/kg)	CaO/%	OM/%
黄壤(n=1363)	5.43	80.44	4.63	5.14	513.40	512.27	1.48	2.03
石灰土(n=381)	7.34	88.13	4.52	6.41	679.79	647.99	2.19	3.00
水稻土(n=1407)	5.15	81.13	4.45	5.10	468.06	484.86	0.74	1.78
紫色土(n=3765)	5.29	82.16	4.40	5.16	523.58	499.65	0.84	1.64

表5 水稻、玉米籽实与根系土 Zn 含量(mg/kg)与富集率
Table 5 Zn concentration and enrichment ratios of rice, maize grains with their rhizosphere soil (mg/kg)

种类	样品数	最大值	最小值	平均值	标准差	富集率
玉米	109	31.63	10.29	17.18	3.51	44.0%
		183.80	36.90	91.70	24.00	
水稻	109	16.25	5.93	11.20	2.14	8.3%
		234.90	34.20	89.92	26.50	

注:富集率=(富 Zn 样本数/总样本数)×100%。

生物富集系数; $C_{i\text{作物籽实}}$ 是作物籽实中*i*元素的含量; $C_{i\text{根系土}}$ 是根系土中*i*元素的含量。研究区玉米 Zn 生物富集系数最大值为 0.52,最小值 0.07,平均值为 0.20;水稻 Zn 生物富集系数最大值为 0.34,最小值 0.04,平均值为 0.14,玉米 Zn 生物富集系数平均值要略大于水稻,表明玉米对土壤 Zn 的吸收要强于水稻(图3)。

影响农作物吸收 Zn 等微量元素的因素非常复杂,既与农作物种类、品种和农事活动有关,又与土壤中微量元素赋存状态与土壤理化性质密切相关。由图4可以看出,玉米、水稻籽实中 Zn 含量与根系土中 Zn 含量相关性较差,这表明玉米、水稻籽实中 Zn 含量水平并不简单地依赖于土壤 Zn 含量,还取决于土壤 Zn 生物有效态含量(商和平等,2015)以及其他因素。

利用 SPSS 软件分析了研究区玉米、水稻 Zn 富集系数与土壤理化指标的相关系数,结果如表6所示。 pH 与玉米、水稻 Zn 生物富集系数呈负相关关系,但相关性并不强。 pH 会影响元素及其化合物在土壤固相-液相间的赋存形式(Chang et al., 2009),

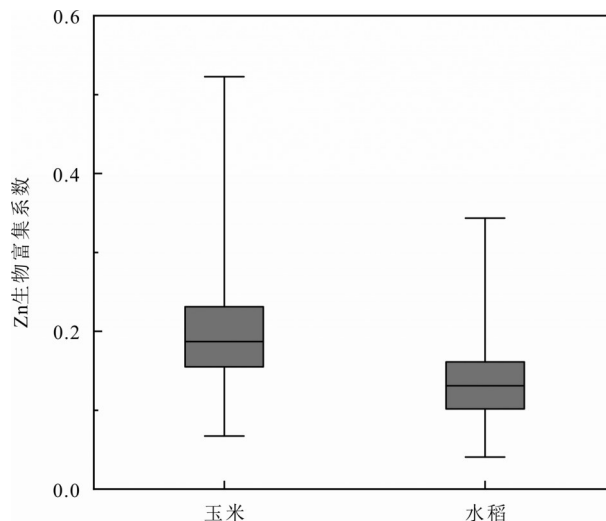


图3 农作物 Zn 富集系数箱线图

Fig.3 Boxplot of Zn bioconcentration factors in maize(left) and rice (right) grains

更重要的是会影响元素及其化合物的吸附与解吸附作用,从而对元素的生物活性产生影响(Zeng et al., 2011)。CaO 是土壤有效的缓冲剂,土壤 CaO 的增加能提高土壤 pH (Ruehlmann et al., 2021),促进重金属生成碳酸盐、氢氧化物沉淀,降低土壤 Zn、Cd 等重金属的有效性,从而抑制作物对它们的吸收。Fe、Mn 在表生环境下易形成铁、锰氧化物矿物(颜代蓉等,2006),Zn、Cd 等重金属会进入到铁、锰氧化物矿物晶格中(唐建生等,2011),从而降低了重金属元素的生物活性。此外,Fe、Mn 氢氧化物胶体对 Zn^{2+} 吸附也有显著的影响。王凯丽等(2011)实验发现,土壤加入胶体后,会明显抑制土壤对 Zn^{2+} 的吸附,胶体对 Zn^{2+} 吸附性强于土壤;许端平等(2015)随

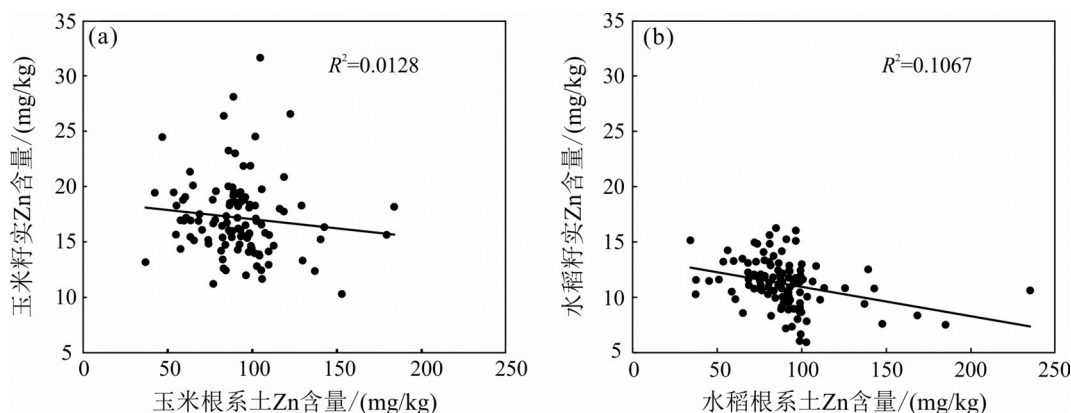


图4 玉米(a)和水稻(b)籽实与根系土 Zn 含量散点图

Fig.4 Scatter plots of Zn content in maize (a) and rice(b) grains with their rhizosphere soil

表6 Zn生物富集系数与土壤理化指标相关系数
Table 6 Correlation analysis of BCF_{Zn} with soil physicochemical properties

农作物种类	pH	Fe ₂ O ₃	Mn	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	P	CaO	OM
玉米 (n=109)	-0.287**	-0.785**	-0.677**	0.620**	-0.403**	-0.371**	-0.244**
水稻 (n=109)	-0.204*	-0.743**	-0.460**	0.702**	-0.543**	-0.518**	-0.445**

注:**在 0.01 水平(双侧)上显著相关,*在 0.05 水平(双侧)上显著相关,除 pH、SiO₂/Al₂O₃、BCF_{Zn}外,其余数据经对数化处理。

着pH增加,土壤胶体对Zn²⁺的吸附明显增加。SiO₂/Al₂O₃代表了土壤脱硅富铝成度,土壤SiO₂含量越高,土壤砂质成分越多(廖金凤,1997),黏土矿物与有机质成分越少,对Zn的吸附性越小(李鱼等,2009;邱志腾等,2020)。值得注意的是,P作为一种营养元素,与玉米、水稻Zn生物富集系数呈现了较高的负相关关系。杨志敏等(1999)认为P、Zn之间存在一定的拮抗作用;Singh(1976)研究发现高浓度P会显著降低水稻籽实Zn含量及其生物有效性;Zhang et al.(2012),苏达等(2020)在研究磷肥对小麦籽实吸收Zn时发现,施磷肥使籽粒Zn含量降低17%~56%。因此,在农田土壤施肥时,应考虑磷锌交互作用(方秀等,2018),控制磷肥、锌肥用量。

4.5 农作物Zn富集系数预测模型及富Zn农作物种植建议

近年来,随着人工神经网络的研究逐渐深入,其在生物、化学、模拟等领域有了广泛应用,表现出了良好的智能特性(毛健等,2011)。传统数学分析方法难以处理地学领域数据的多源性及不确定性,而人工神经网络具有较强的学习能力和优越的总体处理能力,能有效解决地学数据处理中常见的难

题(王良玉等,2021)。本文选用反向传播神经网络模型来进行研究区玉米、水稻Zn生物富集系数预测,选取相关性较显著的Fe₂O₃、Mn、SiO₂/Al₂O₃作为玉米Zn生物富集系数预测模型的自变量,Fe₂O₃、SiO₂/Al₂O₃、P作为水稻Zn生物富集系数预测模型的自变量。对研究区所采集的109套玉米、109套水稻样品,分别随机选取约80%数据建立训练集,其余数据作为测试集,利用R语言neuralnet包进行神经网络的训练。隐含层神经元数量直接关系到模型的预测能力(付宗营等,2020),玉米Zn富集系数神经网络预测模型在隐含层神经元为12个时拟合效果最好,水稻Zn富集系数神经网络预测模型在隐含层神经元为6个时拟合效果最好。利用测试集数据对预测进行检验,结果(图5)显示,玉米Zn生物富集系数预测与实测值R²为0.76,水稻Zn生物富集系数预测与实测值R²为0.68,且方程斜率均接近1,表明所建的模型能够较好地预测玉米、水稻籽实Zn生物富集系数。

结合土地质量地球化学调查获得的表层土壤Zn、Fe₂O₃、Mn、SiO₂/Al₂O₃、P元素含量数据,利用土地质量地球化学调查与评价数据管理与维护(应

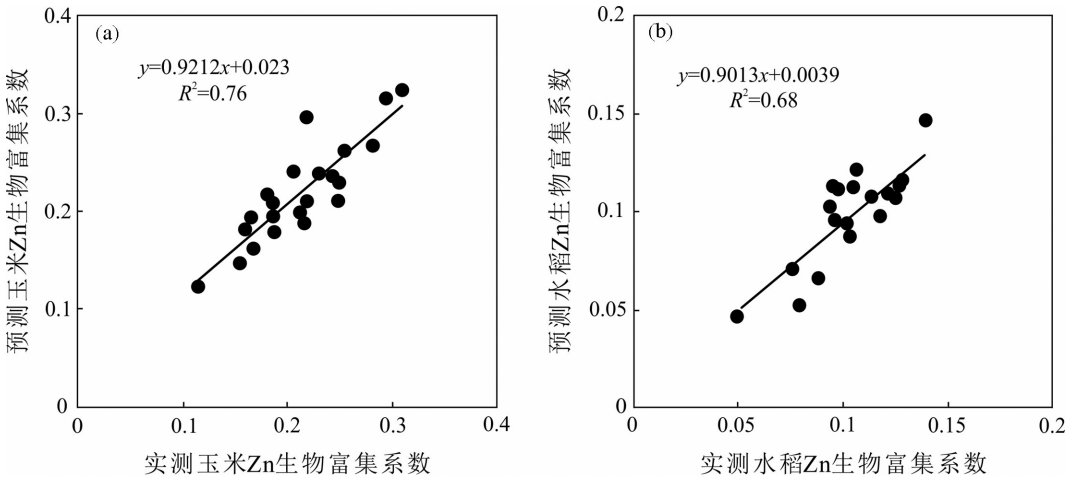


图5 玉米(a)与水稻(b)籽实实测与预测Zn富集系数散点图
Fig.5 Scatter plots of measured and predicted BAF of Zn for maize(a) and rice(b)

用)子系统软件,采用距离加权反比插值法进行图斑插值、赋值,将图斑土壤 Fe_2O_3 、 Mn 、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 P 值代入所建立的玉米、水稻 Zn 富集系数神经网络预测模型,得出研究区玉米、水稻 Zn 生物富集系数,再结合图斑中土壤 Zn 含量,从而预测出研究区玉米、水稻籽实 Zn 含量。根据研究区旱地、水田分布格局,按照玉米、水稻富 Zn 参考值,来划定富 Zn 农作物种植区(图6)。结果表明,研究区内富 Zn 玉米种植耕地面积为 235.34 km^2 ,西槽、东槽农耕区均有分布。富 Zn 水稻耕地种植面积仅为 30.99 km^2 ,主要分布在东槽南侧农耕区。

5 结 论

(1)研究区土壤中 Zn 含量范围在 $25.00\sim 142.00\text{ mg/kg}$,平均值为 81.93 mg/kg ,中位值 84.10 mg/kg ,高于全国土壤 Zn 的平均值 71 mg/kg ,但低于西南地

区(92 mg/kg)和四川省(90 mg/kg)表层土壤 Zn 平均值。全区土壤养分元素 Zn 含量总体处于丰富水平,一等(丰富)土地面积为 804.48 km^2 ,二等较(丰富)土地面积为 773.78 km^2 ,分别占比 42.14% 和 40.53% 。

(2)土壤中 Zn 分布受成土母质岩性和构造格局控制,土壤 Zn 高值区主要分布在华蓥山灰岩和峨眉山玄武岩出露区,土壤 Zn 含量相对低值主要分布在明月山、西槽北部、东槽南部及铜锣山西侧等地区,总体上呈东北-南西走向。

(3)研究区玉米籽实 Zn 含量范围在 $10.29\sim 31.63\text{ mg/kg}$,平均值为 17.18 mg/kg , Zn 富集率 44% , Zn 生物富集系数平均值为 0.20 ;水稻籽实 Zn 含量范围在 $15.93\sim 16.25\text{ mg/kg}$,平均值为 11.20 mg/kg , Zn 富集率 8.3% , Zn 生物富集系数平均值为 0.14 。

(4)研究区影响玉米、水稻籽实 Zn 生物富集系

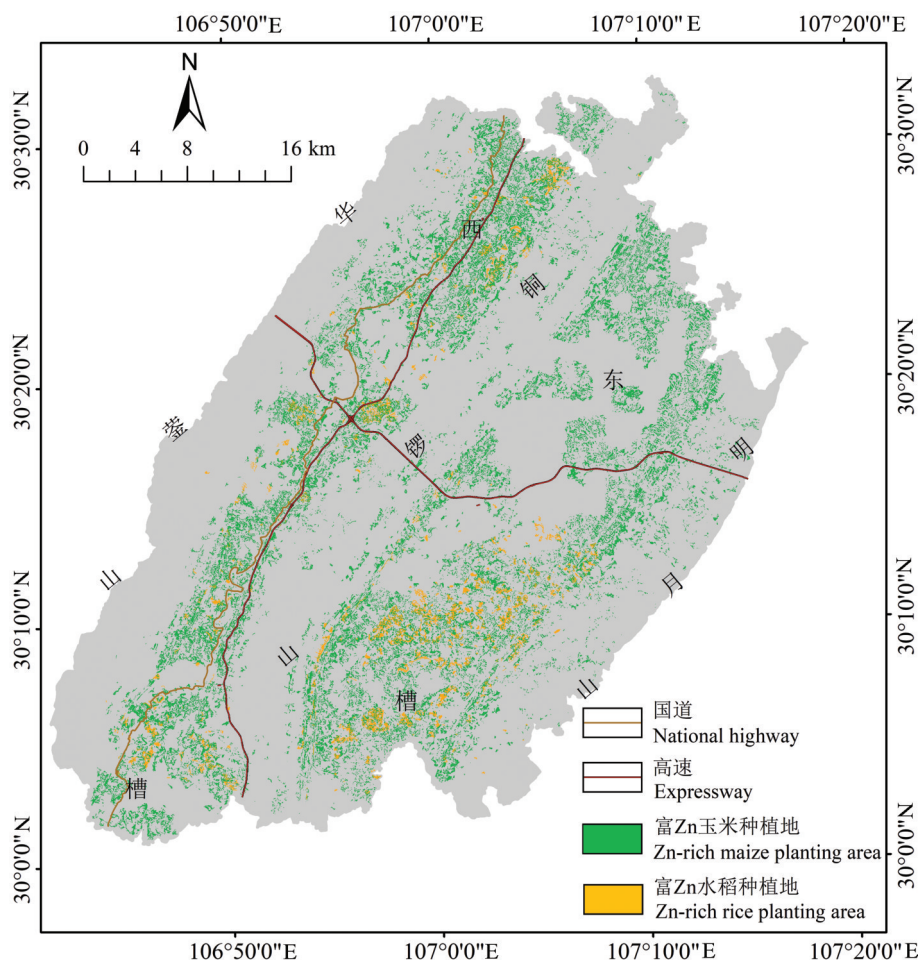


图6 研究区富 Zn 玉米、水稻种植区规划图

Fig.6 Regional plan of Zn -rich maize and rice planting in the study area

数的主要因素有土壤 Fe_2O_3 、 Mn 、 pH 、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 CaO 、 OM 、 P 等,利用BP神经网络预测出邻水县富Zn玉米种植面积为235.34 km^2 ,富Zn水稻种植面积为30.99 km^2 。

致谢: 笔者对编辑和审稿人提出的宝贵意见和建议表示由衷的感谢。

References

- Cakmak I, Kutman U B. 2017. Agronomic biofortification of cereals with zinc: A review[J]. *European Journal of Soil Science*, 69(1): 172–180.
- Chang Oh Hong, Jessie Gutierrez, Sung Wook Yun, Yong Bok Lee, Chan Yu, Pil Joo Kim. 2009. Heavy metal contamination of arable soil and corn plant in the vicinity of a zinc smelting factory and stabilization by liming [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 56 (2): 190–200.
- Chen Hongyan, Yuan Xuyin, Li Tianyuan, Hu Sun, Ji Junfeng, Wang Cheng. 2016. Characteristics of heavy metal transfer and their influencing factors in different soil– crop systems of the industrialization region, China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 126:193–201.
- Chen Li, Wen Tianlian, Peng Hui. 2004. The biological function of zinc and its clinical application[J]. *China Tissue Engineering Research*, 8(6):1056–1056 (in Chinese).
- Chen Wu, Ren Mingqiang, Lu Zhengyan, Wang Ningning. 2010. Research on the proper ty of soil geochemistry in typical karst area in Guizhou Province[J]. *China Karst*, 29(3):246–252 (in Chinese with English abstract).
- Chen Zheng, Peng Yongmei. 2012. The effect of zinc supplementation on children's cognitive development[J]. *Chinese Journal of Children's Health*, 20(5):427–430 (in Chinese).
- Fang Rukang. 2003. *Environmental Dictionary*[M]. Beijing: Science Press, 127–128 (in Chinese).
- Fang Xiao. 2000. The pathophysiological effects of zinc[J]. *Foreign Medicine (Medical Geography)*, (2):85–86 (in Chinese).
- Fang Xiu, Wang Lin, Lu Xiuping, Xu Zicheng, Xie Yan, Zhang Sen, Mu Tong, Meng Yizhuo. 2018. Effects of interaction between soil rapidly available phosphorus and available zinc on P and Zn contents and quality of tobacco leaves in mid–altitude area of red earth in Qujing[J]. *Soil*, 50(5):894–901 (in Chinese with English abstract).
- Fu Zongying, Cai Yingchun, Gao Xin, Zhou Fan, Jiang Jinghui, Zhou Yongdong. 2020. Simulation of drying strain based on artificial neural network model[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 56(6):76–82 (in Chinese with English abstract).
- Gu Qiubei, Yu Tao, Yang Zhongfang, Ji Junfeng, Hou Qingye, Wang Lei, Wei Xueji, Zhang Qizuan. 2019. Prediction and risk assessment of five heavy metals in maize and peanut: A case study

- of Guangxi, China[J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 70:1–8.
- Guo Chao, Wen Yubo, Yang Zhongfang, Li Wei, Guan Dongxing, Ji Junfeng. 2019. Factors controlling the bioavailability of soil cadmium in typical karst areas with high geogenic background[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 55(4):678–687 (in Chinese with English abstract).
- Hou Qingye. 2020. *Soil Geochemical Parameters in China*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 3–53 (in Chinese).
- Hu Yan, Han Guangyu, Wang Jian. 2011. Preliminary study on trace element zinc and human health[J]. *Contemporary Medicine*, 17(31): 152–153 (in Chinese).
- Huang Qiuchan, Wei Youhuan, Shi Jingfang. 2009. The physiological effects of zinc trace elements on the human health and its measures of preventing[J]. *Studies of Trace Elements and Health*, 26(1):68–70 (in Chinese with English abstract).
- Kao Xibin, Wang Zhilun, Gao Yan. 2007. Trace element zinc and human health[J]. *Chinese Journal of Endemic Disease Control*, (3): 192–194 (in Chinese).
- Li Hehua, Pan Jianping. 2002. The influence of zinc deficiency on children's intellectual development[J]. *Chinese Public Health*, 18 (2):151–152 (in Chinese).
- Li Yu, Gao Qian, Li Hongye, Wang Xiaoli, Wang Ting, Wang Yanping. 2009. Study of Cu and Zn adsorption on the clay and its main components in surficial sediments[J]. *Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition)*, 36(2):89–93 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhilong. 2019. Research on countermeasures to speed up the development and utilization of zinc– rich agricultural products in Gansu Province[J]. *Gansu Science and Technology*, 48(2):20–22 (in Chinese).
- Liao Jinfeng. 1997. Zinc in soils of Hainan Island[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, (4):255–259 (in Chinese with English abstract).
- Liao Qilin, Liu Cong, Cai Yuman, Zhu Bowan, Wang Cheng, Hua Ming, Jin Yang. 2013. A preliminary study of element bioconcentration factors within milled rice and wheatmeal in some typical areas of Jiangsu Province[J]. *Geology in China*, 40(1):331–340 (in Chinese with English abstract).
- Lin Qitie, Zhu Weihao, Chen Zhiliang, Peng Xiaochun, Zhao Shuhua. 2013. Speciation analysis and bioavailability research progress of soil heavy metals[J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 30(2):113–118 (in Chinese).
- Mao Jian, Zhao Hongdong, Yao Qianqian. 2011. Application and prospect of artificial neural network[J]. *Electronic Design Engineering*, (24):62–65 (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).
- Qiu Zhiteng, Ma Wanzhu, Zhang Minghui. 2020. Formation characteristics of soils developed from metamorphic rocks in the hilly and mountain areas of southwest Zhejiang Province [J]. Chinese Journal of Soil Science, 51(5):1009–1015 (in Chinese with English abstract).
- Ren Tianxiang, Wu Zonghua, QiangRongsheng. 1998. Methods and Techniques for Screening and Verifying Regional Geochemical Anomalies[M]. Beijing: Geological Publishing House, 9–22 (in Chinese).
- Ren Xiaojun, Liu Ruolan, Niu Huan, Li Yanchun, Tan Guoqiang, LüJ ianxin. 2007. Biological functions of zinc and the impact of high zinc levels on iron–sulfur proteins[J]. Chinese Journal of Cell Biology, 39(5):639–648 (in Chinese with English abstract).
- Ruehlmann J, Bnecke E, Meyer S. 2021. Predicting the lime demand of arable soils from pH value, soil texture and soil organic matter content[J]. Agronomy, 11(4):785.
- 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]. Environment Science, 36(1):314–324 (in Chinese with English abstract).
- Shen Tizhong, Zhu Mingxiang, Xiao Jie. 2014. Characteristics of migration and accumulation of heavy metals in soil rice system of Tianmen and its health risk assessment[J]. Soil Bulletin, 45(1):221–226 (in Chinese with English abstract).
- Sheng Yabing, Wu Tie. 2020. Mechanism of secondary enrichment of heavy metals during carbonate weathering in Xiatongshan area, Zhongtai, Zhejiang[J]. Western Prospecting Project, 32(7):135–139 (in Chinese).
- Shi Ying, Liu Songqing. 2004. The effect of zinc deficiency on children's growth and development[J]. Journal of Regional Anatomy and Operative Surgery, 13(2):91–91 (in Chinese).
- Singh Y. 1976. Phosphorus and zinc interaction in maize nutrition[J]. Indian Journal of Agricultural Sciences, 21(40): 480 – 482.
- Su Da, Wu Quanliang, Søren K Rasmussen, Zhou Lujian, Pan Gang, Cheng Fangmin. 2020. Influence of phosphorus on rice (*Oryza sativa* L.) grain zinc bioavailability and its relation to inositol phosphate profiles concentration[J]. Acta Agronomica Sinica, 46(2): 228–237 (in Chinese with English abstract).
- Tang Jiansheng. 2011. Study on Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Fe–Mn Concretion Soil in Karst Area of Central Guangxi and their Toxicities to Dryland Crops[D]. China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Wang Kaili, Xu Shaohui, Yang Yongliang, Lin Qing. 2011. Study on Zn and Cd colloid–affected adsorption in three different soils[J]. Soil, 43(2): 239–246 (in Chinese with English abstract).
- Wang Liangyu, Zhang Minglin, Zhu Hongtao, Liu Yang. 2021. Review on artificial neural networks and their applications in geoscience[J]. World Nuclear Geoscience, 38(1):15–26 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhihong, Zhai Fengying, He Yuna, Hu Yisong, Wang Huijun. 2006. The intake status and change trend of dietary zinc in Chinese residents[J]. Journal of Hygiene Research, (4):485–486 (in Chinese).
- Wu Xiaxia. 2002. The effect of zinc on human health[J]. Research on Trace Elements and Health, (4):81–82 (in Chinese).
- Xu Duanping, Cui Fangfei, Li Hanliang, Guo Chunhua, Li Xiaobo. 2015. Releasing characteristics of colloids from contaminated–soil and their effect on transportation of zinc[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 905: 2495–2502 (in Chinese with English abstract).
- Yan Dairong, Li Jianwei, Hu Mingan, Lang Yinsheng. 2006. Characteristics and genesis of supergene manganese ores in Xialei, Guangxi[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, (3): 61–67 (in Chinese with English abstract).
- Yang Xiaoe, Chen Wenrong, Fang Ying. 2007. Improving human micronutrient nutrition through biofortification in the soil – plant system: China as a case study[J]. Environmental Geochemistry & Health, 29(5):413–428.
- Yang Yang, LiYanling, Chen Weiping, Wang Meie, Wang Tianqi, Dai Yating. 2020. Dynamic interactions between soil cadmium and zinc affect cadmium phytoavailability to rice and wheat: Regional investigation and risk modeling[J]. Environmental Pollution, 267: 115613.
- Yang Zhimin, Zheng Shaojian, Hu Aitang. 1999. Advances on the study of interactions of phosphorus with zinc and cadmium in plants[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 5(4): 366–376 (in Chinese with English abstract).
- Yang Yuexin. 2018. China Food Composition Tables Standard Edition[M]. Beijing: Beijing Medical University Press, 1–33 (in Chinese).
- Zeng Fanrong, Ali Shafaqat, Zhang Haitao, Younan Ouyang, Qiu Boyin, Wu Feibo, Zhang Guoping. 2011. The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants[J]. Environmental Pollution, 159(1): 84–91.
- Zhang Ling, Hao Yanmei, Zhang Shiyu. 2013. Research progress of trace element selenium and zinc and human health[J]. China Health Nutrition, 23(5):1557–1558 (in Chinese).
- Zhang Yafeng, Huang Yaqun, Yang Pan, Chen Jingtang, Zhu Liying, Zhao Yongfeng, Guo Jinjie. 2018. Characteristics of zinc absorption and distribution after silking in the different maize inbred[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 41(2):14–20 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yueqiang, Deng Yan, Chen Riyuan, Cui Zhenling, Chen Xingping, Yost Russell, Zhang Fusuo, Zou Chunqin. 2012. The reduction in zinc concentration of wheat grain upon increased

- phosphorus— fertilization and its mitigation by foliar zinc application[J]. *Plant and Soil*, 361(1/2): 143–152.
- Zhao Xinjin, Wu Tiansheng, Zhong Xiaoyu, Qiu Guohui, Lu Bingke, Li Jie. 2002. Comprehensive evaluation of the ecological risk of farmland soil in the typical karst area of Guangxi with heavy metal high background area[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 48(22): 252–261 (in Chinese).
- ### 附中文参考文献
- 陈莉, 温天莲, 彭惠. 2004. 锌元素的生物学作用及其临床应用[J]. *中国组织工程研究*, 8(6): 1056–1056.
- 陈武, 任明强, 芦正艳, 王宁宁. 2010. 贵州典型喀斯特区土壤地球化学特征研究[J]. *中国岩溶*, 29(3): 246–252.
- 陈铮, 彭咏梅. 2012. 补锌对儿童认知发展的影响[J]. *中国儿童保健杂志*, 20(5): 427–430.
- 方如康. 2003. *环境学词典*[M]. 北京: 科学出版社, 127–128.
- 方晓. 2000. 锌的病理生理学作用[J]. *国外医学(医学地理分册)*, 2: 85–86.
- 方秀, 王林, 卢秀萍, 许自成, 解燕, 张森, 穆童, 孟一卓. 2018. 曲靖烟区土壤磷锌互作对烟叶磷锌含量和品质的影响[J]. *土壤*, 50(5): 894–901.
- 付宗营, 蔡英春, 高鑫, 周凡, 江京辉, 周永东. 2020. 基于人工神经网络模型的木材干燥应变模拟预测[J]. *林业科学*, 56(6): 76–82.
- 郭超, 文宇博, 杨忠芳, 李伟, 管冬兴, 季峻峰. 2019. 典型岩溶地质高背景土壤镉生物有效性及其控制因素研究[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 55(4): 678–687.
- 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.
- 胡焰, 韩光宇, 王健. 2011. 微量元素锌与人体健康初探[J]. *当代医学*, 17(31): 152–153.
- 黄秋婵, 韦友欢, 石景芳. 2009. 微量元素锌对人体健康的生理效应及其防治途径[J]. *微量元素与健康研究*, 26(1): 68–70.
- 考希宾, 王治伦, 高艳. 2007. 微量元素锌和人体健康[J]. *中国地方病防治杂志*, (3): 192–194.
- 李合华, 潘建平. 2002. 锌缺乏对儿童智力发育的影响[J]. *中国公共卫生*, 18(2): 151–152.
- 李鱼, 高茜, 李鸿业, 王晓丽, 王婷, 王燕萍. 2009. 表层沉积物中粘土及其主要组分吸附Cu和Zn的行为研究[J]. *华北电力大学学报(自然科学版)*, 36(2): 89–93.
- 李志龙. 2019. 加快甘肃省富锌农产品开发利用的对策研究[J]. *甘肃科技纵横*, 48(2): 20–22.
- 廖金凤. 1997. 海南岛土壤中的锌[J]. *土壤与环境*, (4): 255–259.
- 廖启林, 刘聪, 蔡玉曼, 朱伯万, 王成, 华明, 金洋. 2013. 江苏典型地区水稻与小麦籽实中元素生物富集系数(BCF)初步研究[J]. *中国地质*, 40(1): 331–340.
- 林亲铁, 朱伟浩, 陈志良, 彭晓春, 赵述华. 2013. 土壤重金属的形态分析及生物有效性研究进展[J]. *广东工业大学学报*, 30(2): 113–118.
- 毛健, 赵红东, 姚婧婧. 2011. 人工神经网络的发展及应用[J]. *电子设计工程*, (24): 62–65.
- 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*, (3): 1–4.
- 邱志腾, 麻万诸, 章明奎. 2020. 浙西南丘陵山地变质岩发育土壤的成土特征[J]. *土壤通报*, 51(5): 1009–1015.
- 任天祥, 伍宗华, 羌荣生. 1998. 区域化探异常筛选与查证的方法技术[M]. 北京: 地质出版社, 9–22.
- 任孝军, 刘若兰, 牛欢, 李艳纯, 谭国强, 吕建新. 2017. 锌的生物学功能及高浓度锌对铁硫蛋白的影响[J]. *中国细胞生物学学报*, 39(5): 109–118.
- 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.
- 沈体忠, 朱明祥, 肖杰. 2014. 天门市土壤-水稻系统重金属迁移积累特征及其健康风险评估[J]. *土壤通报*, 45(1): 221–226.
- 盛亚斌, 邹铁. 2020. 浙江中泰下铜山地区碳酸盐岩风化过程中重金属次生富集机理[J]. *西部探矿工程*, 32(7): 135–139.
- 石英, 刘松青. 2004. 缺锌对儿童生长发育的影响[J]. *局解手术学杂志*, 13(2): 91–91.
- 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.
- 唐建生. 2011. 桂中岩溶区铁锰结核土的重金属富集特征及对旱地作物毒害研究[D]. 中国地质大学(北京).
- 王凯丽, 徐绍辉, 杨永亮, 林青. 2011. 胶体存在时不同质地土壤对锌镉的吸附试验研究[J]. *土壤*, 43(2): 239–246.
- 王良玉, 张明林, 祝洪涛, 刘洋. 2021. 人工神经网络及其在地学中的应用综述[J]. *世界核地质科学*, 38(1): 15–26.
- 王志宏, 翟凤英, 何宇纳, 胡以松, 王惠君. 2006. 中国居民膳食锌元素的摄入状况及变化趋势[J]. *卫生研究*, 35(4): 485–486.
- 吴露霞. 2002. 锌元素对人体健康的影响[J]. *微量元素与健康研究*, (4): 81–82.
- 许端平, 崔芳菲, 李翰良, 郭春华, 李晓波. 2015. 污染土壤胶体释放特征及其对锌运移的作用[J]. *环境工程学报*, 9(5): 2495–2502.
- 颜代蓉, 李建威, 胡明安, 郎银生. 2006. 广西下雷氧化锰矿床矿石特征及成因分析[J]. *地质科技情报*, (3): 61–67.
- 杨月欣. 2018. *中国食物成分表*[M]. 北京: 北京大学医学出版社, 1–33.
- 杨志敏, 郑绍建, 胡霁堂. 1999. 植物体内磷与重金属元素锌、镉交互作用的研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 5(4): 366–376.
- 张玲, 郝艳梅, 张世益. 2013. 微量元素硒锌与人体健康的研究进展[J]. *中国保健营养*, 23(5): 1557–1558.
- 张雅凤, 黄亚群, 杨攀, 陈景堂, 祝丽英, 赵永锋, 郭晋杰. 2018. 玉米不同自交系吐丝后锌吸收与分配特征[J]. *河北农业大学学报*, 41(2): 14–20.
- 赵辛金, 吴天生, 钟晓宇, 岳国辉, 卢炳科, 陈彪, 李杰. 2020. 广西典型岩溶区重金属高背景区农田土壤生态风险综合评价[J]. *江苏农业科学*, 48(22): 252–261.