



农业资源与环境学报

CSCD 核心期刊
中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

粮食主产区旱地和水田土壤有效态铁锌硼钼的变化特征及其影响因素

杨词, 邬磊, 李建兵, 马海洋, 曲潇琳, 崔萌, 张文菊

引用本文:

杨词, 邬磊, 李建兵, 等. 粮食主产区旱地和水田土壤有效态铁锌硼钼的变化特征及其影响因素[J]. *农业资源与环境学报*, 2026, 43(1): 194–204.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2024.0717>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

广东省增城区不同耕地利用类型下赤红壤酸度变化

蔡泽江, 余强毅, 吴文斌, 文石林

农业资源与环境学报. 2021, 38(6): 980–988 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0508>

利用方式对珠江三角洲耕层土壤团聚体分布及碳氮磷化学计量特征的影响

王超, 熊凡, 卢瑛, 李博, 唐贤, 董玉清

农业资源与环境学报. 2021, 38(3): 494–501 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0262>

山东棕壤耕地地力评价及其特征分析

张颖, 赵庚星, 王卓然, 陈晓娜, 宿宝巍

农业资源与环境学报. 2018, 35(4): 359–366 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0246>

健康视角下我国亚热带水田粮食产能关键限制因子识别——以广州市从化区为例

任向宁, 王璐, 胡月明, 杨颢, 谢英凯, 韦泽棉

农业资源与环境学报. 2020, 37(6): 793–804 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0478>

典型岩溶流域不同土地利用类型土壤腐植酸与钙的关系

吴丽芳, 倪大伟, 王妍, 刘云根, 王艳霞

农业资源与环境学报. 2021, 38(2): 259–267 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0217>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

杨词, 邬磊, 李建兵, 等. 粮食主产区旱地和水田土壤有效态铁锌硼钼的变化特征及其影响因素[J]. 农业资源与环境学报, 2026, 43(1): 194–204.

YANG C, WU L, LI J B, et al. Characteristics and influence factors of soil available iron, zinc, boron and molybdenum in upland and paddy field across major grain production areas of China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2026, 43(1): 194–204.



开放科学 OSID

粮食主产区旱地和水田土壤有效态铁锌硼钼的变化特征及其影响因素

杨词¹, 邬磊^{1*}, 李建兵², 马海洋³, 曲潇琳², 崔萌², 张文菊¹

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/北方干旱半干旱耕地高效利用全国重点实验室/农业农村部耕地质量监测与评价重点实验室, 北京 100081; 2. 农业农村部耕地质量监测保护中心, 北京 100125; 3. 海南省热带作物营养重点实验室/中国热带农业科学院南亚热带作物研究所, 广东 湛江 524091)

摘要:微量元素对农作物生长的影响不容忽视,研究土壤有效态铁锌硼钼的区域变化特征及其影响因素对耕地土壤微量元素管理和合理施肥具有重要意义。基于覆盖全国的耕地质量监测网络观测的1 647组土壤微量元素和基本化学性质等相关数据,本研究比较分析了2016年和2021年全国及不同区域(东北、华北、西北和南方)旱地和水田土壤有效态铁锌硼钼含量的变化特征及其影响因素。结果表明:与旱地相比,全国水田土壤有效铁含量显著增加了3.04倍。旱地和水田土壤有效铁含量存在明显的区域变化特征,其中东北和南方地区旱地有效铁含量显著高于西北和华北地区;全国水田有效锌平均含量比旱地高17%,西北地区旱地有效锌含量最低;全国旱地有效硼平均含量是水田的1.63倍,南方地区旱地和水田有效硼含量无显著差异且显著低于其他区域;全国及各区域旱地和水田土壤有效钼含量差异不显著且不存在明显的区域变化特征。全国及各区域旱地和水田土壤有效铁、锌、硼、钼受土壤pH影响较大。全国旱地和水田有效铁和锌与pH显著负相关,有效硼与pH正相关,旱地有效钼与pH负相关。此外,有效铁、锌、硼、钼与土壤有机质(SOM)、全氮(TN)等显著正相关,且在不同区域这些因素对微量元素的影响程度存在差异。研究表明,全国粮食产区旱地有效态铁、锌平均含量显著低于水田,有效硼高于水田,但有效态钼与水田相比无明显差异,这四种微量元素的区域变化特征主要受土壤pH和有机质影响。粮食产区有效态铁、锌、硼、钼含量存在明显的区域变化特征,因此针对性施用微量元素肥料对提升区域粮食产量具有重要意义。

关键词:土地利用方式;微量元素;土壤有机质;土壤pH;影响因素

doi: 10.13254/j.jare.2024.0717

Characteristics and influence factors of soil available iron, zinc, boron and molybdenum in upland and paddy field across major grain production areas of China

YANG Ci¹, WU Lei^{1*}, LI Jianbing², MA Haiyang³, QU Xiaolin², CUI Meng², ZHANG Wenju¹

(1. Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/ State Key Laboratory of Efficient Utilization of Arid and Semi-arid Arable Land in Northern China / Key Laboratory of Arable Land Quality Monitoring and Evaluation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China; 2. Center for Monitoring and Protection of Cultivated Land Quality, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China; 3. Key Laboratory of Tropical Crops Nutrition of Hainan Province /South Subtropical Crops Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences(CATAS), Zhanjiang 524091, China)

Abstract: The impacts of trace elements on crop growth cannot be ignored. Investigating the regional characteristics of changes in soil available iron, zinc, boron and molybdenum, and their influence factors, is of great significance for soil trace element management and rational fertilization in cultivated land. Based on 1 647 sets of data on soil trace elements and basic chemical properties observed by the

收稿日期: 2024-09-09 录用日期: 2025-01-21

作者简介: 杨词, 女, 河北保定人。E-mail: 18532207308@163.com

*通信作者: 邬磊 E-mail: wulei01@caas.cn

基金项目: 科技部基础资源调查专项(2021FY100501)

national cultivated land quality monitoring network, the characteristics and influencing factors of iron, zinc, boron and molybdenum contents were analyzed in upland and paddy field across major grain production areas of China (northeast, north, northwest and south). Compared with upland, the soil available iron content in paddy field significantly increased by 3.04 folds on average across regions of China. There were significantly regional variations in soil available iron in upland and paddy field, with values in upland substantially higher in the northeast and southern regions relative to the northwest and northern regions. The soil available zinc content significantly increased by 17% on average in paddy field relative to upland across China, and the available zinc content in northwest China was the lowest. The available boron content in upland soil was 1.63 folds higher on average as compared to paddy field across China. There was no significant difference in available boron content across upland and paddy field in southern China, in which both were significantly lower than those in other regions. There was no significant difference in soil available molybdenum content in upland and paddy fields at national and regional scales. The soil available iron, zinc, boron and molybdenum were greatly affected by soil pH in upland and paddy fields at national and regional scales. Soil pH was negatively correlated with available iron and zinc, and positively correlated with available boron in upland and paddy fields across China. The upland soil available molybdenum was negatively correlated with soil pH. In addition, soil available iron, zinc, boron and molybdenum positively related to soil organic matter and total nitrogen, with their contribution varied greatly across regions. The upland soil was characteristics with significantly lower available iron and zinc, higher available boron, and absence of difference in available molybdenum, as compared to paddy field across major grain production areas of China. The regional variation in soil available iron, zinc, boron and molybdenum were mainly affected by soil pH and organic matter. The contents of soil available iron, zinc, boron and molybdenum in grain producing areas have obvious regional changes, so the targeted application of trace element fertilizer is of great significance to improve the regional grain yield.

Keywords: land use type; trace element; soil organic matter; soil pH; influence factor

土壤是作物生长的主要载体,其养分的供应状况直接影响作物生长过程。农作物的产量和品质不仅受到土壤大量和中量元素的影响,同时也受到微量元素供给的影响。微量元素是土壤质量的重要组成部分,各种微量元素的形态和含量在一定的程度上反映了土壤质量的好坏。土壤中的微量元素是植物体内酶、维生素和生长激素等的重要组成成分^[1-2],缺乏或过多均会对作物生长产生不良影响,甚至威胁人类健康^[3-5]。农作物的生长发育与土壤微量元素的供给状况密切相关,而微量元素的供给状况由其含量、形态和分布规律等因素决定。故明确全国不同区域农田土壤微量元素的含量及其分布特征,对提高农产品产量和品质、保障农田土壤生态环境安全具有重要意义^[6]。

土壤微量元素受土壤母质、地形和植被类型等自然因素的影响^[7],同时也受到土地利用方式、施肥和耕作制度等人为管理措施的影响^[8-9]。在研究西昌市不同母质形成的土壤微量元素量时发现,侏罗纪-白垩纪泥岩类风化物形成的土壤中含较多的锌,但第四季冲洪积风化物形成的土壤中含锌量较低^[10]。余慧敏等^[11]发现高程和坡度可通过改变土壤水热分布状况影响土壤中的养分分布,其中硼含量受到土壤类型、耕层质地的显著影响,钼含量与坡度、pH间均达到极显著相关水平。不同植被类型对土壤微量元素

也会产生影响,有研究发现表层土壤(0~15 cm)中铁含量表现为林地>草地>耕地,锌含量则表现为耕地>草地>林地^[12]。近年来,氮磷钾等大量元素肥料施用量增加,导致农田土壤养分比例失调,有效态铁、锌、硼、钼等微量元素对农作物产量的影响效果越来越明显。大量研究表明,自然环境因素和人为管理措施影响土壤微量元素的有效性和分布特征,进而影响作物的产量和品质^[13-15]。通过人为农学措施改变土壤微量元素含量及有效性被认为是一种可持续、安全和经济的方案。因此,研究农田土壤中微量元素区域分布特征及其主要影响因素,对精准配方施肥、提高作物产量、改善作物品质等具有重要的现实意义^[15]。

铁、锌、硼、钼等是作物生长不可或缺的微量元素,这类元素的丰缺状况直接影响作物的生长发育^[16]。铁和锌是植物体内多种酶的辅基,对叶绿素的合成、光合作用和呼吸作用等代谢活动至关重要。硼对植物细胞壁的形成、细胞分裂及受精过程至关重要,钼是植物体内固氮酶的重要成分,参与氮代谢过程^[17-18]。锌、铁、硼、钼肥料作为微量元素肥料的重要组成部分,通过合理施用可以有效预防作物微量元素缺乏症,促进作物健康生长。现阶段我国农田土壤有效态微量元素的区域变化特征和丰缺状况及其影响因素还不清楚,故本研究基于覆盖全国的耕地质量监

测网络的观测数据,比较分析全国及不同区域(东北、华北、西北和南方)旱地和水田土壤有效态铁、锌、硼、钼含量的变化特征及其影响因素,为全国不同区域合理施肥和提高作物产量等提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究以农田土壤有效态微量元素铁、锌、硼、钼为研究对象,所用数据均来源于农业农村部耕地质量长期定位监测网络观测的田间试验数据,包含:2016年812条监测数据,其中旱地494条,水田318条;2021年共835条监测数据,其中旱地499条监测数据,水田336条。两个年份共计1647条监测数据,且2016年和2021年的采集地点基本一致。将这些监测区域划分为东北、华北、西北和南方四个农业种植区域。其中,东北地区包括黑龙江、吉林、辽宁省和内蒙古自治区东北部区域,华北地区包括内蒙古自治区中部、河北、天津、北京、河南、山西、安徽和山东,西北地区包括内蒙古自治区西北部、甘肃省、宁夏回族自治区、青海、陕西省和新疆维吾尔自治区,南方地区包括贵州、湖北、湖南、四川和重庆等。主要土壤类型有黑土、棕壤、褐土、潮土、草甸土、水稻土等20多种,主要种植粮食作物为水稻、玉米和小麦。按照土地利用方式类型将生态系统分为旱地和水田,以水稻种植为主的系统为水田,主要包括双季稻、水稻-小麦轮作、水稻-油菜轮作等种植制度。旱地是种植旱生农作物的耕地,主要种植包括小麦、玉米、大豆等作物。监测地的施肥和田间管理措施均与当地常规种植管理模式一致。分别于2016年和2021年在全国范围内对粮食主产区的旱地和水田进行了采样,其中水田在收获前进行了晒田处理保证水田采样时没有受到淹水的影响。

1.2 数据采集与测定

本研究分别于2016年和2021年秋季作物收获后(10月底至11月初)采集耕层土壤样品。采集方法按

照全国耕地地力调查与质量评价技术规程进行,使用分样点布点方法取土,采用四分法留取1.5 kg样品放入样品袋冷藏保存并运回实验室,自然风干后过2 mm筛保存。土壤有效态铁和锌的含量采用二乙三胺五乙酸(DTPA)浸提法(NY/T 890—2004)测定;有效态硼采用甲亚胺-H比色法(NY/T 1121.8—2006)测定,有效钼采用草酸-草酸铵浸提-催化极谱法(NY/T 1121.9—2006)测定;土壤pH(土水比为1:2.5)采用pH计(pH6220)测定;土壤有机质(SOM)使用重铬酸钾滴定法测定;土壤全氮(TN)使用凯氏定氮法测定;土壤碱解氮(AN)使用碱解扩散法测定;土壤全磷(TP)使用钼蓝比色法测定;土壤有效磷(AP)使用碳酸氢钠浸-钼锑抗比色法测定;土壤全钾(TK)使用火焰光度计法测定;土壤缓效钾(SK)使用热硝酸浸提-火焰光度法测定;土壤速效钾(AK)使用醋酸铵浸提-火焰光度法测定^[20]。

1.3 土壤有效态微量元素含量分级

本研究采用农业农村部的微量元素丰缺分级标准,对耕地土壤有效态微量元素铁、锌、硼、钼分级(表1)。土壤有效态铁、锌、硼、钼的分布特征如图1和表2所示。

1.4 数据处理

使用Excel 2019软件整理实验数据,采用SPSS 27软件进行单因素和双因素方差分析以及回归分析,使用Duncan在0.05水平下进行差异显著性检验,通过Spearman相关系数检验分析主要作物产量与微量元素铁、锌、硼、钼含量相关性,并进行回归方程拟合;采用随机森林模型分析微量元素铁、锌、硼、钼的主要影响因素(由于东北、华北和西北地区水田数据较少,因此未进行相关分析);用Origin 2021制作图表。

2 结果与分析

2.1 土壤有效态铁、锌、硼、钼含量的变化特征

全国和四大粮食产区(东北、华北、西北和南方地区)旱地和水田土壤有效态铁、锌、硼、钼含量的统计

表1 土壤有效态微量元素铁、锌、硼、钼评价等级

Table 1 Evaluation grade levels of soil available microelement iron, zinc, boron and molybdenum

有效态微量元素 Available microelement	级别及质量分数 Level and content/(mg·kg ⁻¹)					临界值/(mg·kg ⁻¹) Critical value	参考文献 Reference
	极低 Lower	低 Low	中 Medium	高 High	极高 Higher		
有效铁	≤2.50	2.50~4.50	4.50~10.00	10.00~20.00	>20.00	4.50	[19]
有效锌	≤1.00	1.00~1.50	1.50~3.00	3.00~5.00	>5.00	1.50	[20]
有效硼	≤0.25	0.25~0.50	0.50~1.00	1.00~2.00	>2.00	0.50	[21]
有效钼	≤0.10	0.10~0.15	0.15~0.20	0.20~0.30	>0.30	0.15	[20-21]

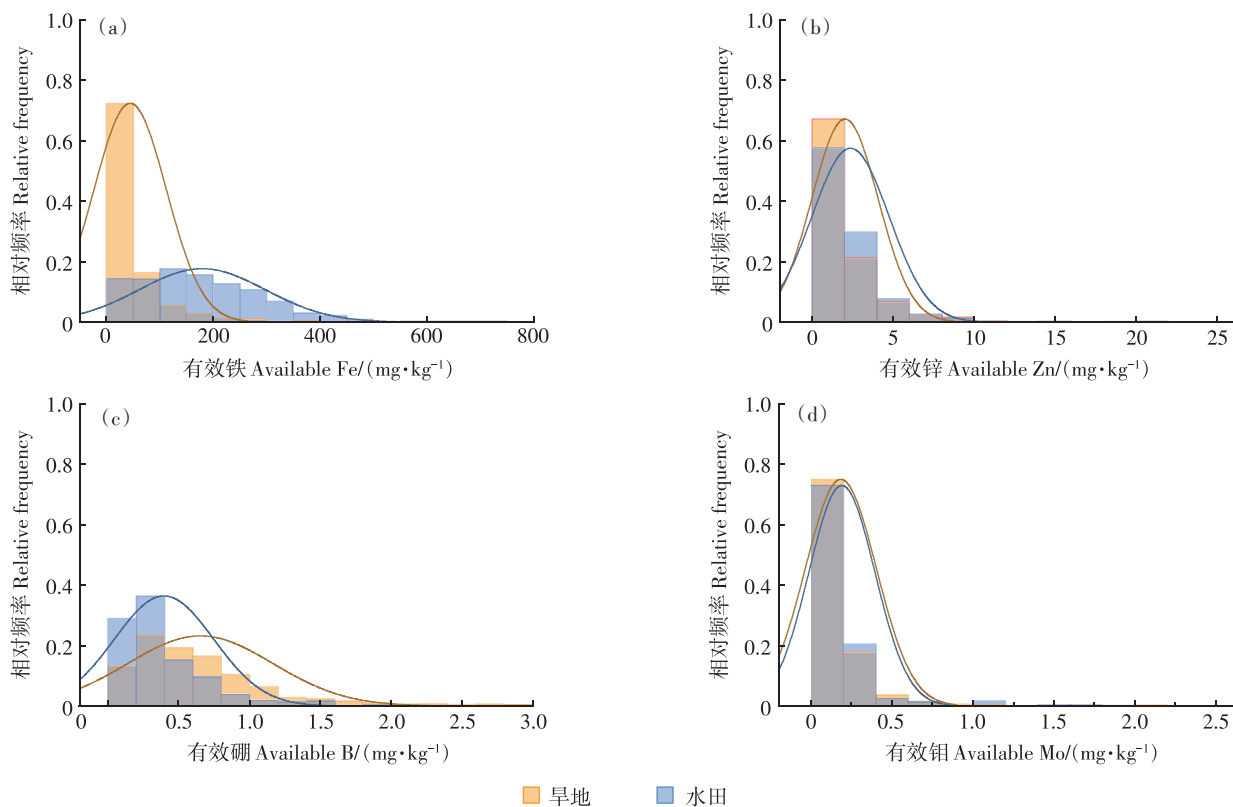


图1 土壤有效态铁(a)、锌(b)、硼(c)、钼(d)相对频率分布直方图

Figure 1 Histogram of relative frequency distribution of soil available iron (a), zinc (b), boron (c) and molybdenum (d) in soil

分析结果如表2所示。其中,变异系数反映了土壤微量元素含量的空间变异程度,变异系数 $\leq 10\%$ 时属于弱变异,10%~100%为中等变异, $>100\%$ 时属于强变异。全国旱地和水田有效铁含量的变化范围分别为0.10~784.00 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和4.20~748.00 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为44.40 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和179.34 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,变异系数为152%和66%,标准差为67.66 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和118.21 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。全国旱地有效铁含量属于强变异,水田属于中等变异,说明有效铁含量具有很高的空间异质性。不同区域旱地有效铁含量的变异系数均高于水田,其中华北地区旱地有效铁的变异系数最高为156%,等级占比以中等为主,其他地区旱地和水田有效铁等级占比均以高和极高为主。全国旱地和水田有效锌含量范围分别为0.00~18.87 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和0.13~24.40 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为2.03 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和2.37 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,变异系数均为101%,标准差为2.05 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和2.39 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。全国旱地和水田有效锌属于强变异。东北旱地、南方旱地和水田的有效锌均以中等级为主,华北和西北旱地的有效锌含量以低等级为主,占比均超过35%。全国尺度下旱地和水田有效硼含量的变化范围分别为0.02~3.24 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和0.00~2.81 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为0.65 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

和0.40 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,标准差为0.51 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和0.35 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,变异系数为79%和89%,均属于中等变异。旱地是水田的1.63倍,东北和华北地区旱地有效硼含量以中等级为主。全国旱地和水田有效钼含量的变化范围分别为0.00~2.53 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和0.01~1.68 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为0.18 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和0.19 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,标准差为0.22 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和0.20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,变异系数为119%和107%,均属于强变异。华北和西北旱地、南方地区水田和旱地有效钼含量以低、较低等级为主,东北地区旱地以中低等级为主。

全国旱地和水田土壤有效态微量元素铁、锌、硼、钼含量呈现明显的区域变化特征(图2)。与旱地相比,全国水田土壤有效铁含量显著增加了3.04倍,其中南方地区水田有效铁平均含量比旱地高105.08 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。全国水田有效锌含量比旱地高17%,其中东北地区水田有效锌含量最低,为1.32 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,南方旱地水田无明显差异。全国旱地有效硼平均含量比水田高63%,但南方旱地水田有效硼含量无显著差异且显著低于其他区域。全国旱地和水田有效钼平均含量无显著差异,华北地区旱地有效钼平均含量显著低于东北和南方地区。

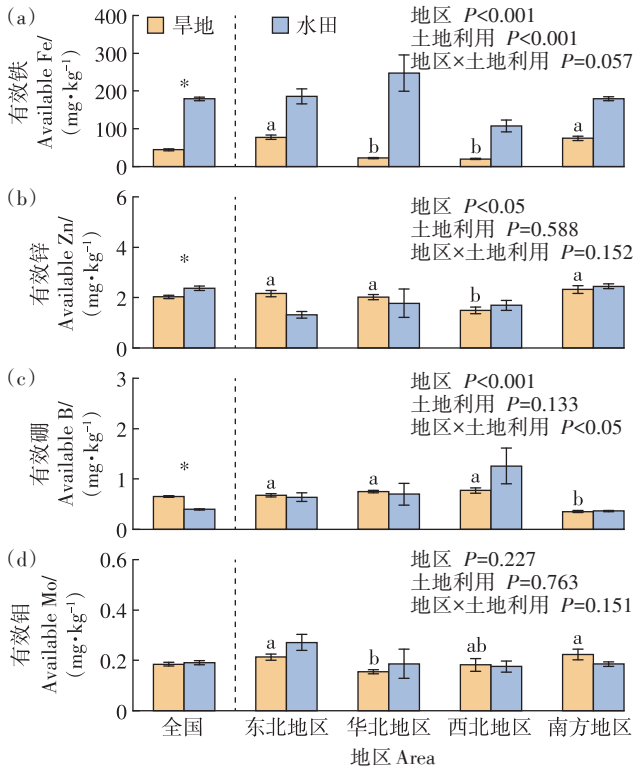
表2 旱地和水田有效态铁、锌、硼、钼测定值的统计学特征及等级占比

Table 2 Statistical characteristics and grade proportions of soil available iron, zinc, boron and molybdenum in upland and paddy fields

元素 Element	区域 Region	土地利用 Land use	样品量 Sample number	范围 Interval range/ (mg·kg ⁻¹)	平均值 Average value/ (mg·kg ⁻¹)	中值 Mid-value/ (mg·kg ⁻¹)	标准差 Standard error/ (mg·kg ⁻¹)	变异系数 Coefficient of variation/ %	分布类型 Distribution pattern	等级占比 Proportion of grade level/%				
										低 Lower	较低 Low	中等 Medium	较高 High	高 Higher
有效铁	全国	旱地	991	0.10 ~ 784.00	44.40	17.80	67.66	152.38	非正态	1.62	3.94	24.92	22.70	46.82
		水田	651	4.20 ~ 748.00	179.34	162.00	118.21	65.92	非正态	0.00	0.15	0.46	1.08	98.31
	东北区	旱地	199	3.00 ~ 749.40	77.68	57.10	86.94	111.92	非正态	0.00	1.51	10.55	18.09	69.85
		水田	37	11.40 ~ 440.00	185.99	191.00	118.67	63.81	正态	0.00	0.00	0.00	2.70	97.30
	华北区	旱地	427	1.20 ~ 271.20	22.52	10.20	35.10	155.84	非正态	1.87	6.09	40.98	26.70	24.36
		水田	4	167.00 ~ 384.00	247.50	219.50	95.38	38.54	正态	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
	西北区	旱地	152	0.10 ~ 152.00	20.17	12.55	20.64	102.30	非正态	3.29	3.95	27.63	34.87	30.26
		水田	9	49.20 ~ 180.00	107.79	115.00	47.47	44.04	正态	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
	南方区	旱地	213	0.70 ~ 784.00	74.46	48.30	90.59	121.65	非正态	1.41	1.88	4.22	10.33	82.16
		水田	601	4.20 ~ 748.00	179.54	161.10	118.77	66.15	非正态	0.00	0.17	0.50	1.00	98.33
有效锌	全国	旱地	983	0.00 ~ 18.87	2.03	1.40	2.05	100.93	非正态	34.28	20.86	27.77	10.07	7.02
		水田	649	0.13 ~ 24.40	2.37	1.75	2.39	100.73	非正态	21.73	20.03	35.75	14.79	7.70
	东北区	旱地	195	0.06 ~ 9.79	2.16	1.64	1.77	82.01	非正态	25.64	20.51	33.85	12.31	7.69
		水田	37	0.13 ~ 4.00	1.32	1.10	0.80	60.60	非正态	40.54	29.73	24.32	5.41	0.00
	华北区	旱地	425	0.00 ~ 18.87	2.02	1.27	2.14	106.08	非正态	37.18	20.47	25.18	9.88	7.29
		水田	4	0.79 ~ 3.41	1.78	1.46	1.14	64.02	正态	25.00	25.00	25.00	25.00	0.00
	西北区	旱地	151	0.06 ~ 12.10	1.50	0.99	1.67	111.54	非正态	50.33	17.22	24.50	5.30	2.65
		水田	9	0.97 ~ 2.65	1.69	1.70	0.60	35.57	正态	22.22	11.11	66.67	0.00	0.00
	南方区	旱地	212	0.10 ~ 16.60	2.33	1.55	2.28	98.03	非正态	25.00	24.53	29.72	11.79	8.96
		水田	599	0.22 ~ 24.40	2.45	1.80	2.46	100.35	非正态	20.53	19.53	36.06	15.53	8.35
有效硼	全国	旱地	979	0.02 ~ 3.24	0.65	0.54	0.51	78.51	非正态	20.94	25.33	36.98	13.69	3.06
		水田	643	0.00 ~ 2.81	0.40	0.30	0.35	88.58	非正态	39.97	36.24	18.51	4.66	0.62
	东北区	旱地	196	0.02 ~ 2.56	0.68	0.60	0.42	61.56	非正态	10.71	26.53	48.47	12.76	1.53
		水田	36	0.04 ~ 2.47	0.64	0.57	0.51	79.00	非正态	16.66	27.78	41.67	11.11	2.78
	华北区	旱地	426	0.03 ~ 3.24	0.75	0.64	0.52	69.15	非正态	11.27	22.07	46.24	16.43	3.99
		水田	4	0.24 ~ 1.29	0.70	0.64	0.44	62.24	正态	25.00	0.00	50.00	25.00	0.00
	西北区	旱地	147	0.07 ~ 3.11	0.77	0.55	0.68	88.27	非正态	26.53	19.73	25.85	21.09	6.80
		水田	9	0.27 ~ 2.81	1.26	0.75	1.07	84.78	非正态	0.00	44.45	11.11	11.11	33.33
	南方区	旱地	210	0.02 ~ 1.68	0.35	0.29	0.29	80.46	非正态	46.19	34.76	15.24	3.81	0.00
		水田	594	0.00 ~ 1.89	0.37	0.29	0.29	79.86	非正态	42.09	36.87	17.00	4.04	0.00
有效钼	全国	旱地	950	0.00 ~ 2.53	0.18	0.13	0.22	119.09	非正态	34.74	27.90	15.89	9.26	12.21
		水田	528	0.01 ~ 1.68	0.19	0.14	0.20	106.89	非正态	30.87	28.22	16.29	13.82	10.80
	东北区	旱地	197	0.00 ~ 1.00	0.21	0.17	0.17	79.89	非正态	29.95	14.72	22.84	13.20	19.29
		水田	36	0.08 ~ 0.89	0.27	0.23	0.19	70.33	非正态	27.78	5.55	8.33	30.56	27.78
	华北区	旱地	428	0.00 ~ 1.80	0.15	0.12	0.17	108.96	非正态	37.62	32.94	14.72	7.94	6.78
		水田	3	0.11 ~ 0.30	0.19	0.15	0.10	53.66	正态	0.00	66.67	0.00	33.33	0.00
	西北区	旱地	136	0.03 ~ 2.14	0.18	0.12	0.30	163.58	非正态	36.03	41.91	8.09	5.15	8.82
		水田	9	0.05 ~ 0.28	0.18	0.18	0.07	37.90	正态	11.11	11.11	44.45	33.33	0.00
	南方区	旱地	189	0.01 ~ 2.53	0.22	0.14	0.28	126.82	非正态	32.28	20.10	16.93	11.11	19.58
		水田	480	0.01 ~ 1.68	0.19	0.13	0.21	111.34	非正态	31.67	30.00	16.46	12.08	9.79

2.2 土壤有效态铁、锌、硼、钼含量变化的主要影响因素
全国主要粮食产区旱地和水田土壤有效态微量

元素铁、锌、硼、钼与土壤基础化学性质的相关性分析结果如图3所示。在全国尺度上,旱地土壤有效铁含



不同小写字母表示同一土壤利用方式下不同粮食产区差异显著 ($P < 0.05$); 华北和西北地区水田样本量少, 不具有代表性, 不考虑统计性检验分析

图2 旱地和水田土壤铁、锌、硼、钼含量的变化特征

Figure 2 Characteristics of soil available iron, zinc, boron and molybdenum in upland and paddy fields

量与SOM、TN、AN和AP呈显著正相关, 与pH和SK呈显著负相关; 水田土壤有效铁含量与SOM和TN呈显著正相关, 与pH、SK和AK呈显著负相关。在全国尺度上, 旱地土壤有效锌含量与pH呈显著负相关关系, 与SOM、TN、AN、TP和AP呈显著正相关; 水田有效锌含量与pH、TK、SK和AK呈显著负相关, 与SOM、TN、TP和AP呈显著正相关。在全国尺度上, 旱地土壤有效硼含量与SOM和TN呈显著正相关, 与pH、TK和SK呈显著负相关; 水田土壤有效硼含量与AN呈显著负相关, 与TP显著正相关。在全国尺度上, 旱地土壤有效钼含量与SOM和TN呈显著正相关, 与pH、TK和SK呈显著负相关; 水田土壤有效钼含量与AN呈显著负相关, 与TP呈显著正相关。

本研究利用随机森林模型进一步分析了四大粮食产区土壤有效铁、锌、硼、钼的主要影响因素(图4)。东北地区旱地土壤有效铁、硼和钼均受pH的影响最大; 有效锌主要受AP的影响, 同时还受TP、pH和TK的影响; 土壤化学性质(pH、SOM和养分)分别解释了东北地区旱地土壤有效态铁、锌、硼和钼变异的61%、27%、24%和15%。华北地区旱地有效铁和硼受pH的影响最大, 对有效锌影响最大的因素为AP, 显著影响有效钼的因素为AN、TP、TK和pH。土壤化学性质分别解释了华北地区旱地土壤有效态铁、

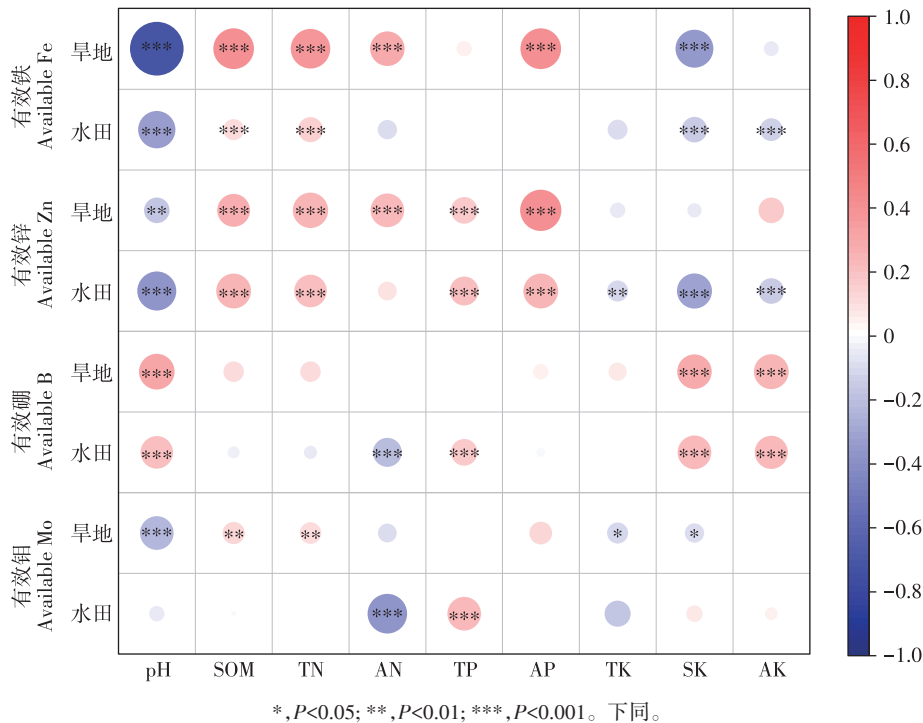
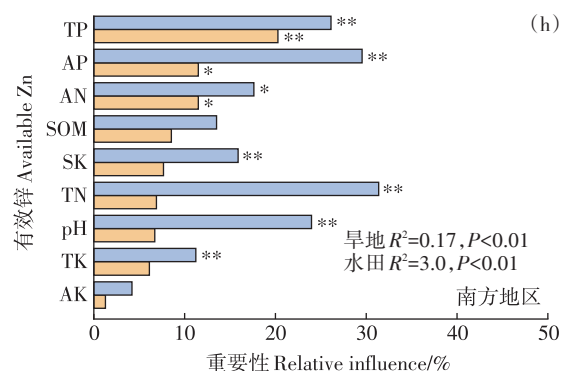
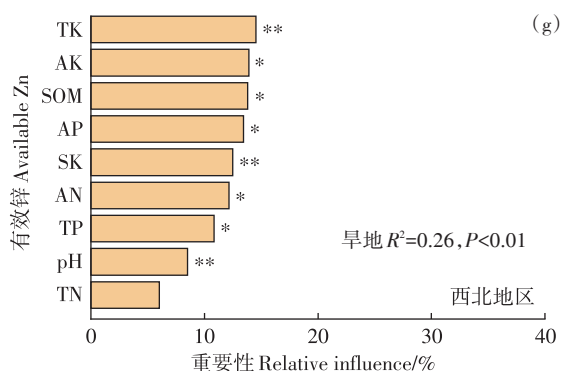
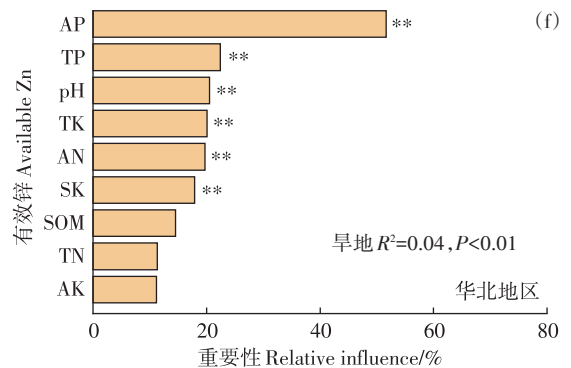
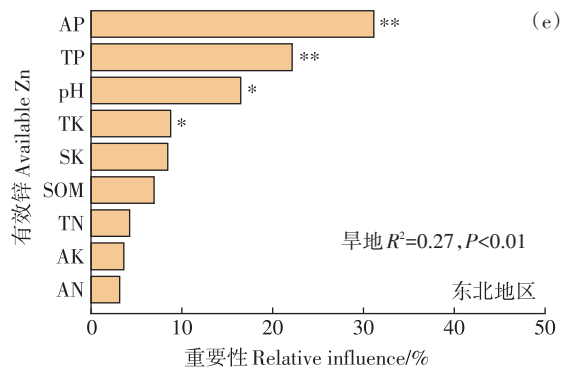
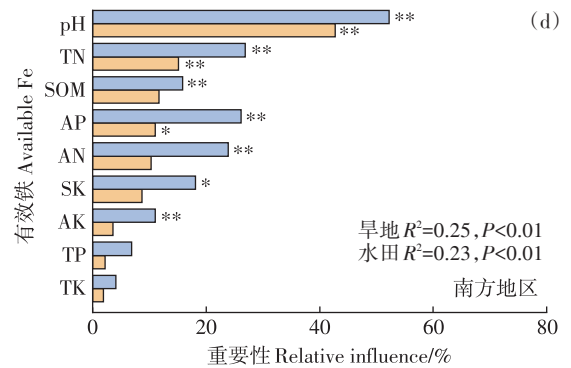
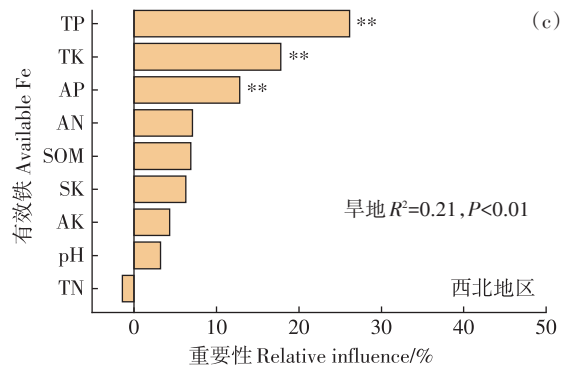
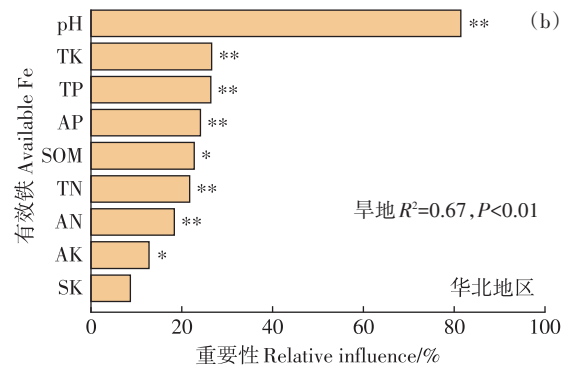
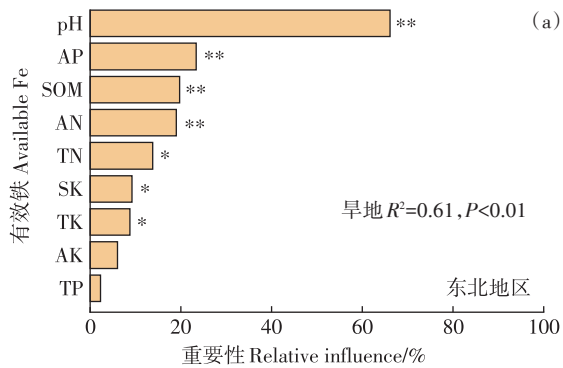


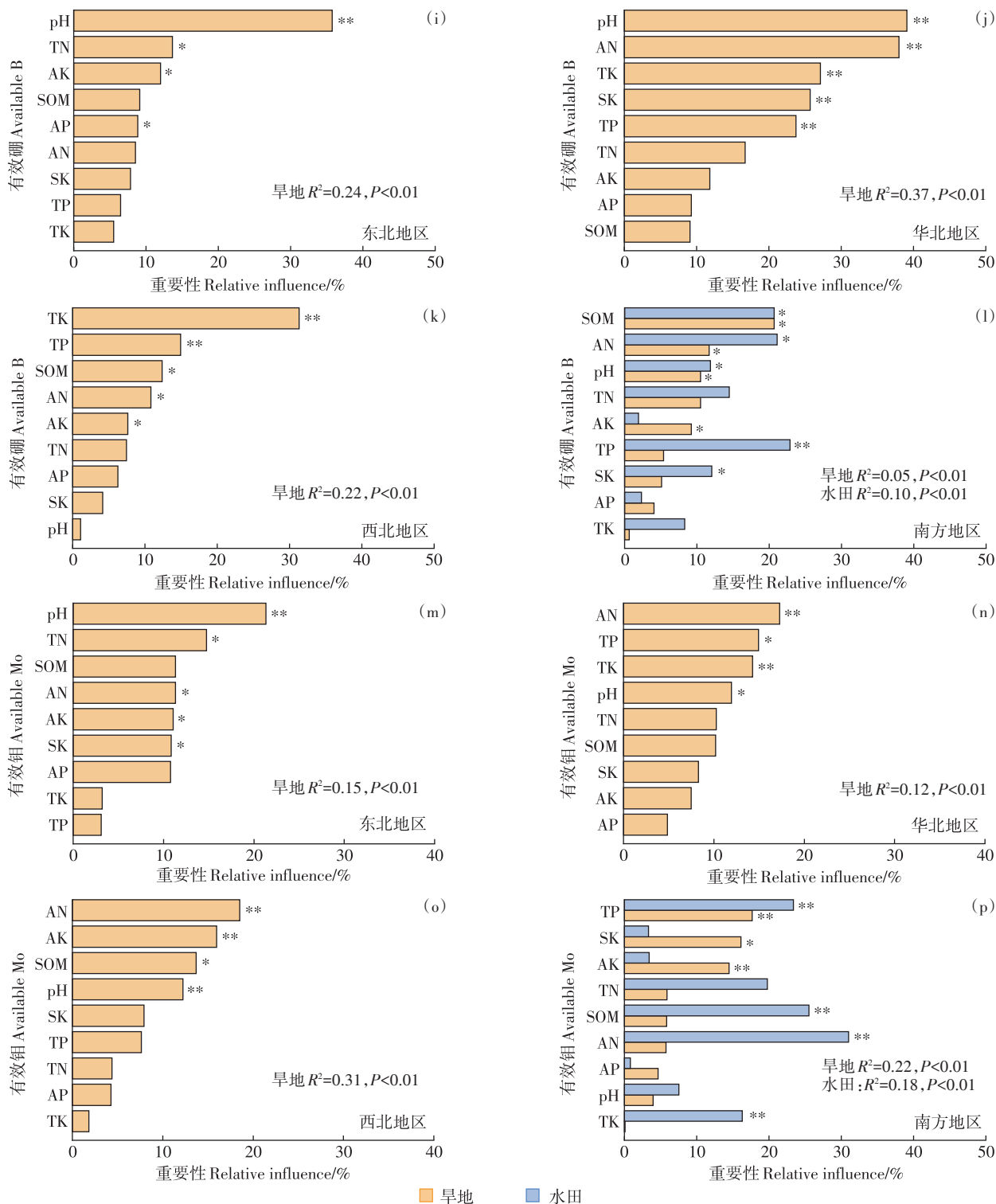
图3 旱地和水田土壤有效态铁、锌、硼、钼含量与土壤化学性质的相关性分析

Figure 3 Correlation analysis between soil available iron, zinc, boron and molybdenum and soil chemical properties in upland and paddy fields

锌、硼和钼变异的67%、40%、37%和12%。西北地区旱地土壤中对有效铁显著影响的因素依此为TP、TK和AP;对有效锌影响最大的因素是TK,其次是AK和SOM;有效硼的影响因素按重要性排序依此为TK、TP、SOM、AN和AK,对有效钼影响最大的是AN。土壤化学性质分别解释了西北地区旱地土壤有效态铁、

锌、硼和钼变异的21%、26%、22%和31%。南方旱地和水田土壤有效铁均受pH的影响最大,旱地有效锌和钼主要受TP的影响;水田有效锌和钼分别主要受TN和AN的影响最大;旱地土壤有效硼主要受AN的影响,但水田土壤有效硼则受TP的影响最大。土壤化学性质分别解释了南方地区旱地土壤有效态铁、





东北、华北和西北地区水田样本量少, 不具有代表性, 不考虑随机森林分析

图4 四大粮食产区旱地和水田土壤铁、锌、硼、钼的主要影响因素分析

Figure 4 Analysis of the main factors influencing soil available iron, zinc, boron and molybdenum in upland and paddy fields across four major grain production areas of China

锌、硼和钼变异的25%、17%、5%和22%,解释了南方水田土壤有效态铁、锌、硼和钼变异的23%、30%、

10%和18%。

东北、华北和西北地区水田样本量少,不具有代

表性,不考虑随机森林分析。

3 讨论

本研究基于农业农村部耕地质量长期定位监测网络观测的田间试验数据分析结果表明,全国旱地和水田土壤有效态微量元素铁、锌、硼、钼含量均存在明显的区域变化特征。全国尺度下,水田土壤有效铁含量显著高于旱地,这主要由于水田干湿交替引起的氧化还原电位变化易活化土壤中的铁元素,从而提高了水田有效铁含量^[20]。从区域分布情况来看,各地区旱地和水田土壤有效铁含量平均值均高于 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,且水田土壤有效铁均大于旱地土壤,这主要由于铁元素在地壳中含量丰富,即使在酸性淋溶条件下,也不会出现铁不足的现象^[21]。四个粮食产区的旱地有效铁均属于强变异,而水田均属于中等变异。这可能是因为土壤环境的影响,水稻土水耕时间长,土壤熟化程度高,干湿交替过程引起的氧化还原过程比较频繁,导致水稻土有效铁含量高且变异程度小。

全国水田土壤有效锌含量显著高于旱地,各个地区有效锌含量大多属于中等级别,但南方地区的有效锌含量明显高于其他三个地区,这可能是由于土壤有效锌含量受土壤类型及土地利用方式的影响。在不同的土类中,水稻土的有效锌含量较高,而在土地利用方式中,水田的土壤有效锌含量最高,可能是由于水田的管理措施等促进了锌的有效化过程^[22]。此外,土壤有效锌含量还与土壤pH有关,南方多为酸性土壤而北方多为石灰性土壤,石灰性土壤的碳酸盐含量和pH均较高,对锌的吸附固定作用导致土壤锌活性较低,使北方地区缺锌状况变得更加严重^[23]。土壤有效锌变异程度在华北、西北旱地和南方水田地区均属于强变异,东北地区则为中等变异,这可能是由于土壤类型、气候条件和耕作管理方式等多种因素的影响^[24]。东北土壤主要以黑土为主,对养分的保持能力较强,气候条件相对稳定,季节性变化明显,整体上有利于土壤养分的保持。

本研究中旱地和水田土壤有效态硼含量呈现明显的区域变化特征。南方旱地和水田土壤有效硼含量均在低级别范围内,比较缺乏;其他地区旱地和水田土壤有效硼含量属于中等级别,含量较丰富,其中大部分水田主要分布在南方地区,旱地主要分布在东北、西北和华北地区,这可能是因为南方土壤pH较北方低,容易淋洗损失,土壤pH和其他营养元素对有效硼含量有显著影响,因而可以通过调节土壤pH和改

变土壤营养元素含量来影响土壤有效硼的含量^[25]。四个粮食主产区的有效硼均为中等变异,分布比较均匀,这可能是因为有效硼含量随pH升高而升高的趋势,而这种趋势在全国范围内具有一定的普遍性,大多数地区的土壤条件受到类似因素的影响,导致土壤有效硼含量的变异系数相对接近^[26]。

全国旱地和水田土壤有效钼含量没有明显差异,普遍较低且区域变化特征不明显。土壤有效钼含量受到多种因素的影响,包括成土母质、水旱种植方式、管理措施以及种植作物等,这些因素对土壤有效钼含量的影响程度受土壤种类影响,但总体上,旱地和水田土壤在这方面的差异较小。土壤pH对有效态铁、锌、硼、钼有显著影响。为了优化这些微量元素在土壤中的有效性,研究人员需要根据作物的养分需求和土壤的具体性质来优化施肥管理措施,提高肥料利用率。土壤有机质也是影响有效态微量元素含量分布的重要因素之一,有机质含量升高促进微量元素的活化作用^[27-28],进而有效态微量元素含量也会相应升高。

随着氮、磷、钾等元素的施加,土壤酸化程度增强^[29],土壤有效铁、锌、硼、钼的含量会受到影响。TN和AN是有效铁、锌、硼、钼的主要影响因素,氮肥施用会降低土壤pH值,土壤酸化会导致土壤中有效铁、锌含量增加。水田土壤有效硼、钼与AN显著负相关,可能是由于本研究区域中水田土壤多在南方,降雨量多,硼、钼容易淋失^[30]。磷与土壤有效铁、锌、硼、钼显著正相关,可能是由于土壤中AP的含量增加会促进土壤中有效态微量元素的溶解和释放,从而提高土壤中有效铁、锌、硼、钼的含量,这对植物的生长和发育具有重要意义。磷可能通过土壤pH的变化、磷肥的固定作用、微生物活性以及作物根系分泌物的作用影响土壤中微量元素的有效性,从而表现出正相关的关系。此外,不同作物所需要的元素剂量不同,对土壤微量元素含量产生影响也不同。例如对铁高度敏感的作物花生、大豆等;对锌高度敏感的作物玉米、水稻、大豆等;对缺硼高度敏感的作物甜菜、油菜、茼蒿、花椰菜等,但小麦、玉米等对硼敏感度小;甜菜、油菜等作物对钼的需求较高,缺钼会导致生长受阻;而小麦、玉米、大豆等作物对钼的需求较小。

水田大多分布在南方,而南方的稻田土壤富含有机质,能够促进微生物对微量元素铁、锌、硼、钼的转化。同时,南方高温多雨气候湿润,脱硅富铝化使土壤酸性增强,导致土壤中的铁、锌等金属微量元素的

有效性增强。土壤质地也会影响有效态微量元素含量分布,研究发现土壤有效态微量元素在壤土、砂壤土、黏土、黏壤土及砂土中含量差异显著,壤土和砂壤土的有效态微量元素含量相对较高^[31]。同时作物产量对微量元素含量也产生影响,通过研究全国粮食产区小麦、玉米和水稻产量与土壤有效态铁、锌、硼、钼的关系发现,小麦和水稻产量与有效态铁、锌、硼存在显著关系,玉米产量与这四种微量元素均存在显著关系。微量元素与土壤微生物群落的结构和功能也存在显著的相关性,有研究发现随着微量元素浓度的增加,微生物群落的结构和功能会受到影响,进而影响到植物对微量营养素吸收利用及微量元素的有效性^[32]。因此,针对不同区域及不同土壤现状合理施加肥料对提高土壤铁、锌、硼、钼的有效性、改善土壤质量和提高作物产量十分重要。

4 结论

(1)与旱地相比,水田土壤有效铁和有效锌含量显著增加;旱地土壤有效硼显著高于水田,有效钼没有显著差异。南方和东北地区有效铁、有效锌和有效钼含量高于西北和华北地区,有效硼则是西北和华北地区高于东北和南方地区,其中南方最低。

(2)四大粮食产区水田和旱地土壤有效态铁、锌、硼、钼受土壤pH和有机质的影响较大。有效铁、锌主要受pH、有机质和全氮的影响,旱地有效硼、钼主要受pH、有机质和缓效钾的影响,水田有效硼、钼主要受pH、碱解氮和全磷的影响。

综上,粮食产区有效态铁、锌、硼、钼含量存在明显的区域变化特征,全国粮食产区旱地有效态铁、锌、硼、钼的区域变化特征受土壤pH和有机质等因素的影响。因此针对性施用微量元素肥料对提升区域粮食产量具有重要意义。

参考文献:

[1] GE Y, MURRAY P, HENDERSHOT W H. Trace metal speciation and bioavailability in urban soils[J]. *Environmental Pollution*, 2000, 107(1):137-144.

[2] THORNTON I. Geochemistry and the mineral nutrition of agricultural livestock and wildlife[J]. *Applied Geochemistry*, 2002, 17(8):1017-1028.

[3] 王祖伟,徐利森,张文具.土壤微量元素与人类活动强度的对应关系[J].土壤通报,2002,33(4):303-305. WANG Z W, XU L M, ZHANG W J. Corresponding relationship between trace elements in soil and human activity intensity[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33(4):303-305.

[4] 潘方杰,王宏志,王璐瑶,等.湖北省土壤微量元素县域分异特征及其与健康相关性[J].华中师范大学学报(自然科学版),2019,53(1):137-146. PAN F J, WANG H Z, WANG L Y, et al. Spatial differentiation characteristics of soil trace elements on the county scale and its relationship with health in Hubei Province[J]. *Journal of Central China Normal University (Natural Sciences)*, 2019, 53(1):137-146.

[5] 石淑芹,陈佑启,李正国,等.基于土壤类型和微量元素辅助信息的土壤属性空间模拟[J].农业工程学报,2010,26(12):199-205. SHI S Q, CHEN Y Q, LI Z G, et al. Spatial interpolation of soil properties based on soil types and trace micro-elements[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(12):199-205.

[6] 钟秀倩,钟俊辉.微量元素与人体健康[J].现代预防医学,2007,34(1):61-63. ZHONG X Q, ZHONG J H. Trace elements and human health[J]. *Modern Preventive Medicine*, 2007, 34(1):61-63.

[7] 孟霖,宋文静,王程栋,等.贵州中部山区植烟土壤微量元素分布特征[J].中国烟草科学,2015,36(3):57-62. MENG L, SONG W J, WANG C D, et al. The distribution of microelement contents of tobacco-growing fields in the central region of Guizhou Province[J]. *Chinese Tobacco Science*, 2015, 36(3):57-62.

[8] 顾思博,周金龙,曾妍妍,等.新疆民丰县农田土壤微量营养元素含量及分布[J].干旱区研究,2020,37(1):142-149. GU S B, ZHOU J L, ZENG Y Y, et al. Content and distribution of trace elements in farmland soil in Minfeng County, Xinjiang[J]. *Arid Zone Research*, 2020, 37(1):142-149.

[9] 郭军玲,吴士文,金辉,等.农田土壤微量元素含量的空间变异特征和影响因素[J].水土保持学报,2010,24(1):145-149. GUO J L, WU S W, JIN H, et al. Spatial variability and controlling factors of microelements contents in farmland soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(1):145-149.

[10] 张腾蛟,刘洪,欧阳渊,等.中高山区土壤成土母质理化特征及主控因素初探:以西昌市为例[J].沉积与特提斯地质,2020,40(1):106-114. ZHANG T J, LIU H, OUYANG Y, et al. A preliminary discussion on the physical and chemical characteristics and main controlling factors of soil and parent material in the middle and high mountain area: take Xichang as an example[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2020, 40(1):106-114.

[11] 余慧敏,朱青,傅聪颖,等.江西鄱阳湖平原区农田土壤微量元素空间分异特征及其影响因素[J].植物营养与肥料学报,2020,26(1):172-184. YU H M, ZHU Q, FU C Y, et al. Spatial variability characteristics and impacting factors of soil trace elements in Poyang Lake Plain, Jiangxi of China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(1):172-184.

[12] 王兴灵,张怡颖,谷丰,等.华北土石山区土地利用类型对土壤有效态微量元素的影响[J].草业科学,2020,37(7):1272-1280. WANG X L, ZHANG Y Y, GU F, et al. Effects of land use type on soil available trace elements in the rocky mountain area of north China[J]. *Pratacultural Science*, 2020, 37(7):1272-1280.

[13] 张泽浦,王学军.土壤微量元素含量空间分布的条件模拟[J].土壤学报,1998,35(3):423-429. ZHANG Z P, WANG X J. Conditional simulation for spatial distribution of trace elements in soils[J]. *Acta*

- Pedologica Sinica*, 1998, 35(3):423-429.
- [14] 孟菁, 孙喜军, 吕爽, 等. 西安市耕地土壤有效态微量元素的空间变异特征[J]. 中国农学通报, 2019, 35(23):58-65. MENG J, SUN X J, LV S, et al. Spatial variability of soil available microelements of cultivated land in Xi'an[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(23):58-65.
- [15] 江叶枫, 钟珊, 饶磊, 等. 江西省耕地土壤有效态微量元素含量空间变异特征及其影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(5):1159-1169. JIANG Y F, ZHONG S, RAO L, et al. Spatial variability of soil available microelement contents of cultivated land in Jiangxi Province and their influencing factors[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(5):1159-1169.
- [16] 杨绍聪, 吕艳玲, 杨庆华, 等. 玉溪市耕作土壤有效态微量元素含量状况[J]. 土壤, 2001, 33(2):102-105. YANG S C, LÜ Y L, YANG Q H, et al. Available micronutrient contents in farming soils of Yuxi City[J]. *Soils*, 2001, 33(2):102-105.
- [17] SHERMAN A R. Zinc, copper, and iron nutriture and immunity[J]. *The Journal of Nutrition*, 1992, 122(3 Suppl):604-609.
- [18] WELCH R M, SHUMAN L. Micronutrient nutrition of plants[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 1995, 14(1):49-82.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社, 2000. BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing:China Agriculture Press, 2000.
- [20] 田汝响, 和苗苗, 郑夏萍. 稻田土壤中Fe-N循环耦合体系研究进展[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2022, 21(1):72-81. TIAN R X, HE M M, ZHENG X P. The research on the coupling system of Fe-N cycling in paddy soils: a review[J]. *Journal of Hangzhou Normal University(Natural Science Edition)*, 2022, 21(1):72-81.
- [21] 王昌全, 李冰, 龚斌, 等. 西昌市土壤Fe、Mn、Cu、Zn有效性评价及其影响因素分析[J]. 土壤通报, 2010, 41(2):447-451. WANG C Q, LI B, GONG B, et al. Study on the bioavailability and impact factors of Fe, Mn, Cu and Zn in the soils of Xichang City[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(2):447-451.
- [22] 王子腾, 耿元波, 梁涛. 中国农田土壤的有效锌含量及影响因素分析[J]. 中国土壤与肥料, 2019(6):55-63. WANG Z T, GENG Y B, LIANG T. Temporal and spatial difference and influencing factors analysis of soil available Zn of farmland in China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019(6):55-63.
- [23] 郝明德, 魏孝荣, 党廷辉. 旱地小麦长期施用锌肥的增产作用及土壤效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(3):377-380. HAO M D, WEI X R, DANG T H. Effect of long-term applying zinc fertilizer on wheat yield and content of zinc in dryland[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2003, 9(3):377-380.
- [24] 赵建, 师华定, 吴啸, 等. 遵义市土壤锌空间分布特征研究[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(3):298-303. ZHAO J, SHI H D, WU X, et al. Study on spatial distribution of zinc in soils in Zunyi City, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(3):298-303.
- [25] 毛伟, 李文西, 苏胜, 等. 扬州市耕地土壤有效硼含量的时空变异特征及驱动因子分析[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(4):829-839. MAO W, LI W X, SU S, et al. Spatiotemporal variability and driving factors of soil available boron content in Yangzhou City, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(4):829-839.
- [26] 黎娟, 邓小华, 王建波, 等. 喀斯特地区植烟土壤有效硼含量分布及其影响因素:以湘西州烟区为例[J]. 土壤, 2013, 45(6):1055-1061. LI J, DENG X H, WANG J B, et al. Distribution of available boron contents of tobacco-growing soil and its influencing factors in Karst region: a case of tobacco-growing areas in Xiangxi[J]. *Soils*, 2013, 45(6):1055-1061.
- [27] 邓小玉, 谢振翅. 湖北省土壤钼的含量分布及应用效果[J]. 土壤肥料, 1994(5):18-22. DENG X Y, XIE Z C. Distribution and application effect of soil molybdenum in Hubei Province[J]. *Soils and Fertilizers*, 1994(5):18-22.
- [28] 张浩, 张新, 李启权, 等. 宜宾地区土壤有效态微量元素空间变异特征及影响因素[J]. 土壤通报, 2017, 48(3):575-582. ZHANG H, ZHANG X, LI Q Q, et al. Spatial variability of soil available microelement and its influencing factors in Yibin[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(3):575-582.
- [29] 张淑香, 王小彬, 金柯, 等. 干旱条件下氮、磷水平对土壤锌、铜、锰、铁有效性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(4):391-396. ZHANG S X, WANG X B, JIN K, et al. Effect of different N and P levels on availability of zinc, copper, manganese and iron under arid conditions[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2001, 7(4):391-396.
- [30] 陈燕华. 泉州市耕地土壤有效硼含量丰缺状况评价与影响因素分析[J]. 福建农业科技, 2023, 54(4):69-74. CHEN Y H. Evaluation on the abundance and deficiency of available boron content in cultivated soil in Quanzhou City and analysis on its influencing factors[J]. *Fujian Agricultural Science and Technology*, 2023, 54(4):69-74.
- [31] 王雪梅, 柴仲平, 毛东雷. 不同质地耕层土壤有效态微量元素含量特征[J]. 水土保持通报, 2015, 35(2):189-192. WANG X M, CHAI Z P, MAO D L. Characteristics of topsoil available trace elements with different textures[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(2):189-192.
- [32] DAI Z M, GUO X, LIN J H, et al. Metallic micronutrients are associated with the structure and function of the soil microbiome[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1):8456.