

我国主要麦区土壤有效铁锰铜锌丰缺状况评价及影响因素*

褚宏欣¹, 党海燕¹, 王涛¹, 孙蕊卿¹, 侯赛宾¹, 黄倩楠^{1,4}, 李小涵¹, 王朝辉^{1,2†}, 黄婷苗^{3†}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院/农业农村部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学/旱区作物逆境生物学国家重点实验室, 陕西杨凌 712100; 3. 山西农业大学农学院/黄土高原特色作物优质高效生产省部共建协同创新中心, 山西太谷 030801; 4. 伊犁州农业科学研究所, 新疆伊宁 835000)

摘要: 明确我国主要麦区土壤有效铁锰铜锌含量分布和影响因素, 对了解麦田土壤微量元素供应能力、指导小麦丰产与优质生产至关重要。于 2016—2021 年连续 6 年, 在我国 17 个小麦主产省/市采集 1 314 份耕层土壤样品, 参考中国土壤有效微量元素分级标准, 评价了我国麦田土壤有效铁锰铜锌丰缺状况, 并采用随机森林方法定量分析了主要土壤化学性质对铁锰铜锌有效性的贡献。结果表明, 我国主要麦区土壤有效铁含量介于 1.8~612 mg·kg⁻¹, 平均为 49.1 mg·kg⁻¹, 8.9% 的样本未达到缺铁临界值 4.5 mg·kg⁻¹, 且主要集中在北方、西北麦区的山西、陕西、甘肃等地, 西南和长江中下游麦区有效铁较高。土壤有效锰介于 0.1~176 mg·kg⁻¹, 平均为 22.1 mg·kg⁻¹, 低于缺锰临界值 5 mg·kg⁻¹ 的样本占 6.9%, 缺锰土壤分布在西北、北方麦区的山西、陕西、甘肃、内蒙古等地, 西南、长江中下游麦区土壤有效锰含量较高。土壤有效铜介于 0.1~10.8 mg·kg⁻¹, 平均为 1.9 mg·kg⁻¹, 仅 1.8% 样本未达到缺铜临界值 0.5 mg·kg⁻¹。土壤有效锌介于 0.1~26.0 mg·kg⁻¹, 平均为 1.4 mg·kg⁻¹, 14.3% 的样本低于缺锌临界值 0.5 mg·kg⁻¹, 主要分布在西北和北方麦区的山西、陕西、甘肃、内蒙古等省份, 云南、贵州等西南麦区的有效锌较高。土壤基本化学性质中, pH 对有效铁、有效锰含量影响最大, 有效铁是铜有效性的重要因素, 影响有效锌的主要因素是有效磷和有效铜。我国麦田土壤有效铁锰铜锌含量存在较大的区域变异, 铁、锰、锌不足主要发生在北方石灰性土壤, 南方麦田供应充足, 几乎所有麦田土壤有效铜可满足作物铜需求。

关键词: 麦田; 有效铁; 有效锰; 有效铜; 有效锌; 影响因素
中图分类号: S158.9 **文献标志码:** A

Evaluations and Influencing Factors of Soil Available Fe, Mn, Cu and Zn Concentrations in Major Wheat Production Regions of China

CHU Hongxin¹, DANG Haiyan¹, WANG Tao¹, SUN Ruiqing¹, HOU Saibin¹, HUANG Qiannan^{1,4}, LI Xiaohan¹, WANG Zhaohui^{1,2†}, HUANG Tingmiao^{3†}

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University / Key Laboratory of Plant Nutrition and Agro-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. State Key Laboratory of Crop Stress Biology in Arid Areas, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. College of Agriculture, Shanxi Agricultural University / Ministerial and Provincial Co-Innovation Centre for Endemic Crops Production with High-quality and Efficiency in Loess Plateau, Taigu, Shanxi 030801, China; 4. Yili Institute of Agricultural Science, Yining, Xinjiang 835000, China)

*国家现代农业产业技术体系建设专项项目 (CARS-3)、国家重点研发计划项目 (2021YFD1900700) 和山西省高等学校科技创新项目 (2021L167) 共同资助 Supported by the Modern Agricultural Research System of China (No. CARS-3), the National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFD1900700), and the Scientific and Technological Innovation Programs of Higher Education Institutions in Shanxi, China (No. 2021L167)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: w-zhaohui@263.net; huangtingmiao@126.com

作者简介: 褚宏欣 (1997—), 男, 山东菏泽人, 硕士, 研究方向为植物营养调控。E-mail:1447993659@qq.com

收稿日期: 2022-05-07; 收到修改稿日期: 2022-12-16; 网络首发日期 (www.cnki.net):

Abstract: 【Objective】 It is of great importance to clarify the current regional distributions and influencing factors of soil available iron (Fe), manganese (Mn), copper (Cu) and zinc (Zn) concentrations. This will improve understanding of the soil micronutrient supply abilities and guarantee high-yield and high-quality wheat in major wheat production regions of China. 【Method】 During 2016 to 2021, a successive 6-year *in situ* farm survey was conducted in combination with the collection of topsoil (0-20 cm) samples from 1 314 randomly selected farmland fields in 17 major wheat production provinces and regions in China. The soil-available Fe, Mn, Cu and Zn concentrations were determined to evaluate their abundance and deficiency status based on China's classification criteria for soil-available micronutrients. Also, it was quantified the contribution of main soil chemical properties on Fe, Mn, Cu and Zn availabilities by random forest analysis. 【Result】 Results showed that the soil available Fe ranged from 1.8 to 611.9 mg·kg⁻¹, with an average of 49.1 mg·kg⁻¹, and 8.9% of samples had lower soil available Fe than the Fe deficiency threshold of 4.5 mg·kg⁻¹. Soils with relatively low available Fe were usually observed in the provinces of Shanxi, Shaanxi and Gansu in northern and northwestern wheat production regions, while high-Fe soils were found in southwestern and middle and lower Yangtze River wheat regions. Also, soil available Mn ranged from 0.1 to 176.2 mg·kg⁻¹, with an average of 22.1 mg·kg⁻¹, and 6.9% of samples exhibited lower soil available Mn than the Mn-deficient threshold of 5.0 mg·kg⁻¹. Mn-deficient soils were mainly distributed in Shanxi, Shaanxi, Gansu provinces and Inner Mongolia Autonomous Region in northern and northwestern wheat growing regions, while soils with high and very high available Mn often occurred in southwestern and middle and lower Yangtze River wheat regions. Soil available Cu ranged from 0.1 to 10.8 mg·kg⁻¹, with an average of 1.9 mg·kg⁻¹, and only 1.8% of samples had lower available Cu than the Cu-deficient critical value of 0.5 mg·kg⁻¹. Soil available Zn ranged from 0.1 mg·kg⁻¹ to 26.0 mg·kg⁻¹, with an average of 1.4 mg·kg⁻¹, and 14.3% of samples' available Zn was lower than the Zn deficiency threshold of 0.5 mg·kg⁻¹. Zn-deficient soils were mainly found in Shanxi, Shaanxi, Gansu provinces and Inner Mongolia Autonomous Region of northern and northwestern wheat production regions, and higher Zn concentrations were mainly observed in soils of Yunnan and Guizhou provinces of southwestern wheat regions. Among the investigated soil chemical properties, the pH was the most important influencing factor to available Fe and Mn, and available Fe contributed to the highest Cu availability, and available phosphorus, followed by Cu, was found to be the leading factor for soil available Zn in major wheat production regions of China. 【Conclusion】 There were large regional variations in the soil-available Fe, Mn, Cu, and Zn concentrations in China's wheat fields. Deficiencies of soil available Fe, Mn and Zn were serious problems on calcareous soils in the northern part, and higher supplies of these micro-elements occurred in the southern part, while almost all of the wheat fields were not identified as Cu-deficient soil in China.

Key words: Wheat fields; Available Fe; Available Mn; Available Cu; Available Zn; Influencing factor

铁锰铜锌等微量元素是生物体内酶、维生素和激素的重要组分,对动植物正常生长发育有重要作用^[1]。麦田中,土壤有效微量元素含量是评价小麦微量元素营养品质进而预测区域人群营养健康的关键指标之一。据统计,2021年我国小麦种植面积共2 357万hm²^[2],不同小麦种植区因气候、土壤母质和长期栽培、水肥等田间管理不同,导致区域间土壤铁锰铜锌差异较大。因此,查明我国主要麦区现阶段土壤有效铁锰铜锌现状及影响因素,对指导合理施用微量元素肥料,实现土壤养分均衡,保证小麦稳产优质具有重要意义。

世界范围内,近1/2土壤存在不同程度的微量元素供应不足问题。2018年出版的《世界土壤资源状况》^[3]中,全球土壤铁锰铜锌缺乏面积的比例分别为5%、10%、14%、49%。亚洲地区,由于多年集约化种植,土壤微量元素缺乏更为严重,我国土壤有效铁锰铜锌缺乏比例分别为5%、21%、6%和51%;印度分别为12%、5%、4%和49%^[4]。据刘铮等^[5]20世纪80年代的研究,我国土壤有效锰锌缺乏多发生于北方的河北、陕西、山西、内蒙古等石灰性土壤,缺铜土壤主要分布在陕西、四川等地。余存祖等^[6]于1991年研究发现,黄土区土壤有效铁锰铜锌缺乏的比例分别为11%、48%、21%和56%。杨定国等^[7]发现,四川盆地土壤有效锰铜锌缺乏的比例分别为24%、2%和7%,有效铁基本不缺乏。赵申申等^[8]对青海省黄土丘陵区研究发现,土壤有效铁锌较丰富,有效铜处于中等水平,而有效锰极其缺乏。谢振翅等^[9]对湖北3 346份田块的分析发现,土壤有效锌缺乏比例占50%,有效铁锰铜缺乏比例较小。贺家媛等^[10]对河南1 165份田块研究发现,土壤有效锌不足的比例近50%。以上关于不同区域土壤微量元素有效性的研究多集中于21世纪之前,近20多年来,作物产量不断提高,化肥投入从持续增加到“零增长”、甚至“负增长”逐渐过渡,必然直接或间接影响土壤有效铁锰铜锌供应,但现阶段,我国不同麦区土壤有效铁锰铜锌丰缺状况及关键的影响因素尚不清楚。

本研究依托国家小麦产业技术体系,连续6年在17个小麦主产省/市进行实地调研和取样分析,以期明确我国麦田土壤有效铁锰铜锌丰缺状况及区域分布,查明关键的土壤影响因素,为小麦微量元素养分管理提供参考和决策依据。

1 材料与方 法

1.1 采样区域分布

2016—2021年, 依托国家小麦产业技术体系分布在我国不同麦区的50个综合试验站, 在当地示范县选择代表性农户麦田进行调研, 并采集共1314份耕层土壤样品。采样点的分布见结果部分的图1, 包括北部(河北、山西、内蒙古)、东北(黑龙江)、黄淮(河南、山东、江苏北部、安徽北部)、西北(陕西、甘肃、宁夏)、西南(云南、贵州、四川、重庆)、长江中下游(湖北、安徽南部、江苏南部)和新疆麦区^[11]。田间栽培和施肥管理为当地农户常规方式, 其中, 仅2.5%麦田施用了微量元素肥料, 10.5%施用了有机肥。各麦区样本量和土壤基本理化性状见表1。

表1 不同麦区土壤样本量和0~20 cm 土层土壤基本理化性质
Table 1 Soil sample size and the basic physicochemical properties at the top of 20 cm soil in different wheat production regions of China

麦区 Wheat region	样本量 Sample size	pH			有机质 Organic matter/(g·kg ⁻¹)			全氮 Total N/(g·kg ⁻¹)			铵态氮 Ammonium N/(mg·kg ⁻¹)		
		均值 Mean	范围 Range	中值 Median	均值 Mean	范围 Range	中值 Median	均值 Mean	范围 Range	中值 Median	均值 Mean	范围 Range	中值 Median
NEWR	59	6.4	5.1~7.3	6.4	42	26~111	35	2.1	1.3~6.4	1.7	5.4	1.7~8.4	5.2
NWR	195	8.3	6.3~9.4	8.4	20	3.3~72	19	1.1	0.3~3.7	1.1	3.6	0~20	3.2
NWWR	167	8.4	7.4~9.0	8.4	15	2.1~34	15	0.9	0.4~2.5	0.9	2.7	0~24	2.2
HWR	570	7.4	4.2~9.1	8	21	6.0~48	20	1.2	0.4~2.8	1.2	6.2	0~136	3.8
YRWR	159	6.5	4.5~8.6	6.4	26	9.3~52	26	1.5	0.6~3.0	1.4	9.7	0.5~79	6.8
XJWR	41	8.5	7.3~9.0	8.6	24	9.2~101	19	1.2	0.5~3.2	1.1	3.1	0.2~6.1	3
SWWR	123	7.2	5.0~8.5	7.5	25	4.5~68	22	1.4	0.5~3.2	1.3	5.7	0.2~36	4.5

麦区 Wheat region	样本量 Sample size	硝态氮 Nitrate N/(mg·kg ⁻¹)			有效磷 Available P/(mg·kg ⁻¹)			速效钾 Available K/(mg·kg ⁻¹)		
		均值 Mean	范围 Range	中值 Median	均值 Mean	范围 Range	中值 Median	均值 Mean	范围 Range	中值 Median
NEWR	59	12	2.5~72	8.1	48	1.4~108	46.5	242	90~399	237
NWR	195	29	2.0~330	16	32	1.9~132	15.8	196	62~563	166
NWWR	167	27	1.3~738	14	26	1.4~129	19.6	206	85~829	190
HWR	570	26	0.3~681	16	36	2.6~166	29.1	195	41~849	163
YRWR	159	17	0~121	10	30	4.5~110	23.9	165	46~523	154
XJWR	41	20	1.3~146	12	40	6.7~106	31	220	25~626	189
SWWR	123	15	0~127	8.5	24	1.6~259	18.6	147	37~474	136

注: NEWR: 东北麦区; NWR: 北部麦区; NWWR: 西北麦区; HWR: 黄淮麦区; YRWR: 长江中下游麦区; XJWR: 新疆麦区; SWWR: 西南麦区。下同。Note: NEWR: Northeastern wheat region; NWR: Northern wheat region; NWWR: Northwestern wheat region; HWR: Huanghuai wheat region; YRWR: Wheat region of middle and lower Yangtze River; XJWR: Xinjiang wheat region; SWWR: Southwestern wheat region. The same as below.

1.2 样品采集与测定

小麦收获前, 在选定的田块内选取一个能代表此田块小麦长势的10 m × 5 m 采样区, 在样区内小麦行间均匀选取5个点, 采集0~20 cm 土层土壤样品, 捏碎、混匀后取约500 g, 作为1个分析样品, 风干后分别通过1 mm 和0.15 mm 尼龙网筛。

1 mm 土样用来测定pH、硝态氮、铵态氮、有效磷、速效钾和有效铁锰铜锌, 0.15 mm 的土样用来测定有机质和全氮。土壤pH用pH计测定, 水土比2.5:1。硝态氮、铵态氮用1 mol·L⁻¹的KCl浸提, 有效磷用0.5 mol·L⁻¹的NaHCO₃浸提, 均用连续流动分析仪(AA3, SEAL, 德国)测定。速效钾用1 mol·L⁻¹的NH₄OAc浸提, 火焰光度计(Sherwood M410, 英国)测定。有效铁锰铜锌用二乙烯三氨五乙酸-三乙醇胺(DTPA-TEA)浸提, 原子吸收分光光度计(PE PinAAcle500, 美国)测定。有机质用重铬酸钾外加加热法测定。全氮用浓硫酸加混合催化剂(K₂SO₄: CuSO₄=10:1)消煮, 连续流动分析仪测定^[12]。

1.3 土壤微量元素分级标准

主要参考沈善敏先生以及1985年西安微量元素肥料会议资料等前人研究结果^[13-15], 结合本次调研数据, 并以表2的具体分级标准评价我国主要麦区土壤有效微量元素丰缺状况。

表 2 我国麦田土壤有效铁锰铜锌含量分级标准

Table 2 Classification criteria of soil available Fe, Mn, Cu and Zn levels in China's wheat fields				
等级 Levels	有效铁 Available Fe/ (mg·kg ⁻¹)	有效锰 Available Mn/ (mg·kg ⁻¹)	有效铜 Available Cu/ (mg·kg ⁻¹)	有效锌 Available Zn/ (mg·kg ⁻¹)
极低 Very low	<2.5	<1.0	<0.2	<0.3
低 Low	2.5~4.5	1.0~5.0	0.2~0.5	0.3~0.5
中等 Middle	4.5~10	5~15	0.5~1.0	0.5~1.0
高 High	10~20	15~30	1.0~2.0	1.0~3.0
极高 Very high	>20	>30	>2.0	>3.0
缺乏临界值 Deficiency threshold	4.5	5.0	0.5	0.5

1.4 数据分析与制图

数据处理采用 Microsoft Excel 2016, 作图采用 Origin 2018, 使用 ArcGIS 10.0 软件地理制图, 底图来源 <https://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>, 相关性分析采用 SPSS 20.0。利用 Python 随机森林对影响麦田土壤有效微量养分的键因子重要性进行评估, 以基尼指数 (Gini index) 作为各指标贡献度高低的评价标准。

2 结果

2.1 土壤有效铁

我国主要麦区土壤有效铁平均为 49.1 mg·kg⁻¹, 中值 12.6 mg·kg⁻¹, 标准差 75.4 mg·kg⁻¹, 变异系数 0.7, 极小、极大值分别为 1.8、611.9 mg·kg⁻¹, 出现在陕西咸阳和河南信阳 (图 1a, 图 1b)。41.1% 样本的有效铁含量高于 20 mg·kg⁻¹, 介于 2.5~4.5、4.5~10 和 10~20 mg·kg⁻¹ 的样本分别占总样本量的 8.0%、32.8%、17.2%, 低于 4.5 mg·kg⁻¹ 样本占 8.9%。就区域分布而言, 长江中下游麦区较高, 平均为 130.1 mg·kg⁻¹, 其次为东北 (92.9 mg·kg⁻¹)、西南 (73.2 mg·kg⁻¹)、黄淮 (42.0 mg·kg⁻¹)、新疆 (13.0 mg·kg⁻¹) 和北部麦区 (8.9 mg·kg⁻¹), 西北麦区较低, 平均为 8.6 mg·kg⁻¹。综合 6 年结果, 缺铁样品主要分布于陕西、山西、甘肃等地; 长江中下游、西南麦区的安徽南部、江苏南部以及贵州、重庆地区有效铁含量较高。

2.2 土壤有效锰

我国麦区土壤有效锰平均为 22.1 mg·kg⁻¹, 中值 12.3 mg·kg⁻¹, 标准差 24.7 mg·kg⁻¹, 变异系数 0.9, 调研样品中极大、极小值分别为 176、0.1 mg·kg⁻¹, 出现在河南安阳和安徽宿州 (图 1c, 图 1d)。21.6% 样本的有效锰含量高于 30 mg·kg⁻¹, 介于 1~5、5~15、15~30 mg·kg⁻¹ 的样本分别占总样本量的 6.9%、51.8%、19.4%, 低于 1 mg·kg⁻¹ 样本占 0.2%。就区域分布而言, 长江中下游麦区最高, 平均为 42.0 mg·kg⁻¹, 其次为东北 (29.0 mg·kg⁻¹)、西南 (24.5 mg·kg⁻¹)、黄淮 (24.4 mg·kg⁻¹)、北部 (10.2 mg·kg⁻¹) 和新疆麦区 (9.6 mg·kg⁻¹), 西北麦区最低, 平均为 8.0 mg·kg⁻¹。综合 6 年结果, 低于缺锰临界值 5.0 mg·kg⁻¹ 的样品占 6.9%, 主要分布在陕西、山西、甘肃、内蒙古等地; 南方的长江中下游、西南麦区的部分地区有效锰极高。

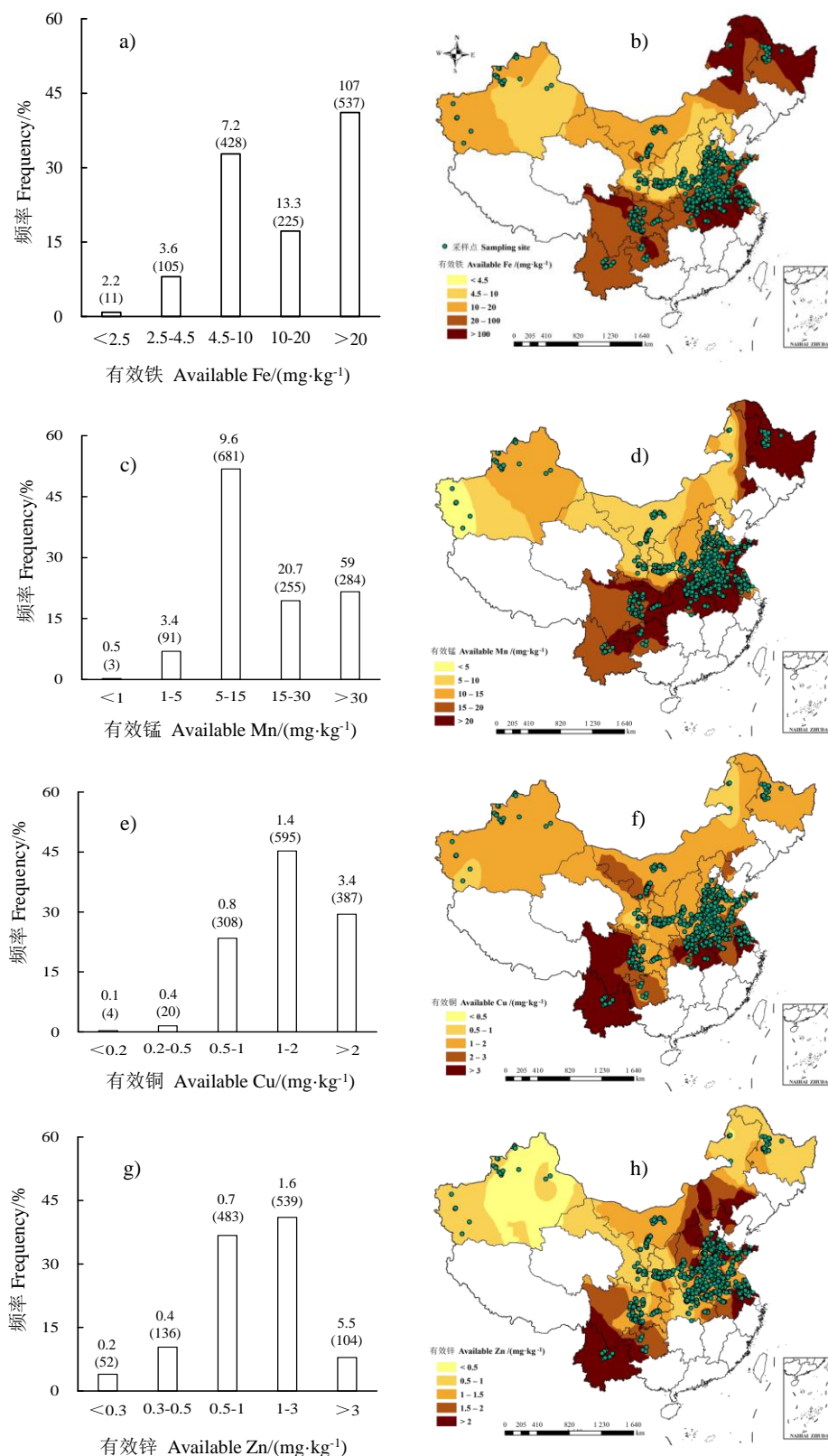
2.3 土壤有效铜

我国小麦主产区土壤有效铜平均为 1.9 mg·kg⁻¹, 中值 1.5 mg·kg⁻¹, 标准差 1.3 mg·kg⁻¹, 变异系数 1.4, 调研样品中的极大、极小值分别为 10.8、0.1 mg·kg⁻¹, 出现在云南楚雄和内蒙古呼伦贝尔 (图 1e, 图 1f)。29.5% 的样品铜含量高于 2 mg·kg⁻¹, 介于 0.2~0.5、0.5~1.0、1.0~2.0 mg·kg⁻¹ 分别占总样本量的 1.5%、23.4%、45.3%, 低于 0.2 mg·kg⁻¹ 样本占 0.3%。就区域分布而言, 长江中下游麦区最高, 平均为 3.3 mg·kg⁻¹, 其次为西南 (2.6 mg·kg⁻¹)、黄淮 (1.8 mg·kg⁻¹)、东北 (1.6 mg·kg⁻¹)、新疆 (1.4 mg·kg⁻¹) 和北部麦区 (1.3 mg·kg⁻¹), 西北麦区最低 (1.2 mg·kg⁻¹)。总体而言, 低于缺铜临界值 0.5 mg·kg⁻¹ 的样品占 1.8%, 主要分布于陕西、甘肃等地。

2.4 土壤有效锌

我国主要麦区土壤有效锌平均为 1.4 mg·kg⁻¹, 中值 1.0 mg·kg⁻¹, 标准差 1.6 mg·kg⁻¹, 变异系数 0.9, 调研中极大、极小值分别为 26 和 0.1 mg·kg⁻¹, 出现在河南新乡和河北邢台 (图 1g, 图 1h)。7.9% 样本有效锌含量高于 3 mg·kg⁻¹, 介于 0.3~0.5、0.5~1.0、1.0~3.0 mg·kg⁻¹ 分别占总样本量的 10.4%、36.8%、41.0%, 低于 0.3 mg·kg⁻¹ 样本占 4.0%。就区域分布而言, 长江中下游麦区

最高, 平均为 $1.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其次为西南 ($1.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、黄淮 ($1.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、北部 ($1.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、东北 ($0.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和西北麦区 ($0.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 新疆麦区最低 ($0.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。综合 6 年结果, 低于缺锌临界值 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的样品占 14.3%, 分布在新疆、东北等地。



注: 左图中括号内数字为样本数, 其上方数字为微量元素含量平均值。右图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2020)4630 的标准地图制作, 底图无修改。Note: In the left figure, values within the brackets are the sample size, and those without the brackets are the averaged micronutrient concentration of the corresponding

category. The figures on the right were drawn according to the standard map (No. GS(2020)4630) downloaded from the Standard Map Service website of the Ministry of Natural Resources. The base map was not modified.

图 1 我国主要麦区土壤有效铁锰铜锌含量频率 (a, c, e, g) 和区域分布图 (b, d, f, h) (2016—2021 年)
Fig. 1 Frequencies (a, c, e, g) and regional distributions (b, d, f, h) of soil available Fe, Mn, Cu and Zn concentrations in major wheat production regions of China, sampled from 2016 to 2021

2.5 土壤有效铁锰铜锌与基本化学性状的关系

相关分析 (表 3) 表明, 土壤有效铁与有机质、全氮、铵态氮、有效磷、有效锰、有效铜呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.381、0.397、0.343、0.186、0.555、0.513, 而与 pH、硝态氮、速效钾显著负相关, 相关系数分别为-0.734、-0.056、-0.062; 有效锰与有机质、全氮、铵态氮、有效磷、有效铜呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.217、0.246、0.460、0.179 和 0.311, 与 pH、硝态氮显著负相关, 相关系数分别为-0.726、-0.056; 有效铜与有机质、全氮、铵态氮、有效磷、有效锌呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.371、0.383、0.204、0.216 和 0.257, 与 pH、硝态氮显著负相关, 相关系数分别为-0.355、-0.058; 有效锌与有机质、全氮、有效磷呈显著正相关, 相关系数分别为 0.114、0.108 和 0.251。总体而言, 土壤 pH 与有效锌无关, 与有效铁锰铜均呈显著负相关; 有机质、全氮、有效磷与有效铁锰铜均呈极显著正相关; 硝态氮与有效铁锰铜呈显著负相关, 但相关系数较低, 与有效锌无关; 铵态氮与有效铁锰铜呈极显著正相关; 速效钾仅与有效铁呈显著负相关, 与锰铜关系不显著; 有效铁锰铜之间均呈极显著正相关; 有效锌仅与有效铜呈显著正相关, 与铁锰关系不显著。

表 3 全国主要麦区土壤有效铁锰铜锌与基本化学性状的相关系数
Table 3 Pearson correlation coefficients among available Fe, Mn, Cu, Zn and the basic chemical properties of soils sampled from major wheat production regions of China

	pH	OM	TN	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	AP	AK	AFe	AMn	ACu	AZn
AFe	-0.734**	0.381**	0.397**	-0.056*	0.343**	0.186**	-0.062*	1.000	0.555**	0.513**	-0.015
AMn	-0.726**	0.217**	0.246**	-0.056*	0.460**	0.179**	0.018	0.555**	1.000	0.311**	-0.015
ACu	-0.355**	0.371**	0.383**	-0.058*	0.204**	0.216**	0.017	0.513**	0.311**	1.000	0.257**
AZn	0.011	0.114**	0.108**	0.049	0.019	0.251**	0.048	0.050	-0.015	0.257**	1.000

注: *和**分别表示相关性达 5% 和 1% 显著水平。OM: 有机质; TN: 全氮; NO₃⁻-N: 硝态氮; NH₄⁺-N: 铵态氮; AP: 有效磷; AK: 速效钾; AFe: 有效铁; AMn: 有效锰; ACu: 有效铜; AZn: 有效锌。下同。Note: ** and * represent the significance of the correlations at $P < 0.01$ and $P < 0.05$ levels, respectively. OM: Organic matter; TN: Total N; NO₃⁻-N: Nitrate N; NH₄⁺-N: Ammonium N; AP: Available P; AK: Available K; AFe: Available Fe; AMn: Available Mn; ACu: Available Cu; AZn: Available Zn. The same as below.

2.6 主要土壤化学性质对铁锰铜锌有效性的贡献

利用随机森林建模对土壤基本化学性状的重要性进行排序 (图 2) 发现, 对于土壤有效铁, pH 的影响最大, 这与两者呈极显著正相关且相关系数最高 (表 3) 相一致, 其余重要性由高到低依次为有效铜、有效锰、全氮、有效磷、有机质、有效锌、硝态氮、铵态氮、速效钾。对于土壤有效锰, pH 的影响也最大, 超过 50%, 且 pH 与有效锰的相关系数绝对值最高 (表 3), 其余依次为铵态氮、有效铁、硝态氮、速效钾、有效铜、有机质、有效磷、有效锌、全氮, 而相关性分析中, 全氮与有效锰呈显著正相关 (表 3)。对于土壤有效铜, 有效铁影响最大, 这与两者的相关系数最高 (表 3) 相吻合, 其次为有效锌、有机质、pH、有效锰、全氮、有效磷、速效钾、铵态氮、硝态氮, 有效氮磷钾的影响较小, 同时, 相关分析中, 它们之间的相关系数也较低 (表 3)。对于土壤有效锌, 所有土壤化学性状的贡献率均不足 20%, 由高到低依次为有效磷、有效铜、有效铁、有机质、pH、有效锰、速效钾、铵态氮、硝态氮、全氮。

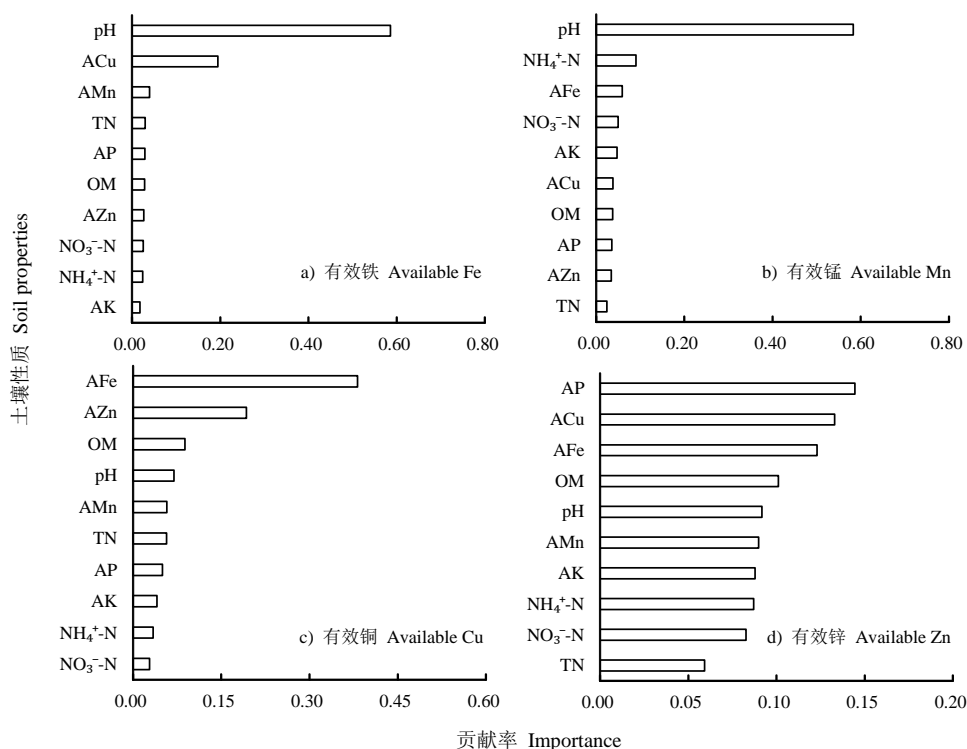


图2 土壤化学性状对麦田土壤有效铁锰铜锌的贡献率
Fig. 2 Importance of the selected chemical properties to soil available Fe, Mn, Cu and Zn in China's wheat fields

3 讨论

3.1 土壤有效铁锰铜锌含量分布

我国主要麦区土壤有效铁锰铜锌分别为 49.1、22.1、1.9 和 1.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与其他国家和地区相比，有效铁铜锌分别高于非洲尼日利亚北部的 44.8、0.6 和 0.3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，有效锰低于尼日利亚北部的 40.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ；尼日利亚三角洲地区，有效铁锰较低，分别为 24.9、12.3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，有效铜锌明显高于我国麦区，分别为 2.9 和 10.7 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。可见，同一国家的不同地域间，有效微量养分含量也存在差异。我国北方干旱、半干旱麦区广泛分布着石灰性土壤，其有效铁锰铜含量均低于西班牙石灰性土壤的 11.8、22.2、1.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，有效锌高于西班牙的 0.1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。印度干旱、半干旱区的土壤有效铁锰铜锌分别是 11.4、16、1.5、0.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，均低于该国湿润、半湿润地区的 28.8、51、2.0、0.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，这与我国南方麦区土壤铁锰铜锌高于北方干旱麦区结果类似。

本研究中，麦田土壤缺铁主要分布在北方的陕西、甘肃、宁夏、河北等石灰性土壤，西北麦区土壤缺铁比例占 36.5%，以陕西最为严重，高达 53.8%（图 1）。第二次全国土壤普查结果^[14]中，缺铁土壤主要分布于华北、西北等地的石灰性土壤，如内蒙古、山西、陕西、河南、河北，有效铁缺乏面积在 20% 以上，其中陕西缺铁土壤面积比例超过 60%，严重缺铁面积近 30%。说明，虽经过 40 余年的农业发展，西北麦区土壤有效铁缺乏问题依然严重。麦田土壤锰缺乏主要发生在陕西、甘肃、山西、内蒙古等北方石灰性土壤，北部、西北麦区锰缺乏比例分别为 9.2%、13.8%，其中陕西为 16.8%。第二次全国土壤普查结果^[14]中，有效锰缺乏主要发生在内蒙古、河北、陕西、山西等北方石灰性土壤，严重缺锰面积介于 6.1%~46% 之间。可见，自第二次土壤普查 40 余年后，特别是锰肥的施用，北方石灰性土壤有效锰含量有所增加。我国麦田有效铜低于临界值的样本仅占 1.8%，类似于第二次全国土壤普查^[14]发现的绝大多数土壤不存在缺铜现象，仅内蒙古少数地区土壤缺铜，证明我国麦田土壤有效铜含量基本保持稳定。土壤缺锌主要分布在山西、陕西、河北、内蒙古等石灰性土壤，北部、西北麦区有效锌的缺乏比例分别为 9.2%、42.9%，其中陕西占 55.1%。第二次全国土壤普查^[14]时，即 20 世纪 80 年代，相比南方酸性土壤，北方石灰性土壤缺锌程度更加严重，内蒙古、河北、陕西、山西等地区土壤有效锌缺乏的面积比例变幅在 57.8%~74.7%，远高于南方。说明 40 年来，由于肥料生产中逐渐重视补充微量元素等原因，我国麦田土壤有效锌呈增加趋势，北方、西北麦区土壤有效锌缺乏比例进一步缩减。

总而言之,自第二次全国土壤普查以来,我国主要麦区土壤有效锰锌含量呈增加趋势,有效铁铜含量基本稳定。小麦生产中,特别是北方石灰性土壤应加强土壤有效铁、有效锰、有效锌管理,确保小麦丰产优质。

3.2 影响铁锰铜锌有效性的主要土壤因素

土壤化学性质中, pH 对有效铁锰铜含量影响最大,且呈负相关关系(表 3),与伊朗报道的研究结果^[20]相似。pH 较高时,土壤中铁锰铜等离子的迁移能力下降,多数被土壤胶体吸附固定,有效态养分降低,如 pH 每升高一个单位可使 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 溶解度下降 0.1%^[21]。本研究中,我国主要麦区的土壤 pH 与有效锌不相关(表 3),大区域尺度上土壤母质是影响有效锌的主导因素^[22]。有学者^[22]研究发现,锌在中性环境中溶解度最大,在偏酸或者偏碱环境中含量逐渐降低。但也有研究指出,土壤有效锌与 pH 显著负相关,随着 pH 升高,土壤中碳酸钙表面会形成含铁氧化物的包膜,该物质对锌离子的吸附性更强,进一步加剧了土壤中有效锌的缺乏^[23]。

有机质是决定土壤肥力的关键因素,可改善土壤理化性质,促进微生物活性,一般有机质含量较高的地区,土壤有效微量元素含量也较高,正如本研究中,土壤有机质与有效铁锰铜锌显著正相关(表 3)。有机质中的有机酸、氨基酸等可降低土壤 pH,促使铁锰还原,增加其有效性^[24]。但国外学者研究发现,土壤有机质较低时,其与有效铜呈正相关关系,而当有机质含量提升至 5%~7%^[25]时,两者负相关。也有研究报道,土壤有机质分解过程中可释放锌,提高土壤微生物活性,进而增强土壤锌的活化作用^[26]。

土壤氮磷钾供应对小麦生长发育十分重要。本研究中,全氮、铵态氮与有效铁锰铜呈极显著正相关(表 3),与重庆、浙江等地研究结果一致,即,土壤氮含量的提高降低了 pH,从而增加土壤有效铁锰铜^[27-28]。有效磷与有效铁锰铜均呈极显著正相关关系。沈阳地区的长期定位试验表明,施用磷肥后土壤有机质含量增加,间接提高了有效铁含量^[29];华北地区的试验表明,随着施磷量增加, pH 显著降低,提高了土壤中锰的活性^[24];也有研究^[30]指出,磷肥施入土壤后,磷酸根离子的沉淀反应降低了铜锌在土壤的迁移能力。施用磷肥后,磷酸根离子和锌离子竞争土壤表面的吸附位点,随施磷量增加,磷酸根离子占据的吸附位点数量增加,导致更多的锌离子进入土壤溶液中,从而提高了土壤锌的生物有效性^[31-32]。但也有研究表明,有效磷和有效锌不相关^[33],甚至可能存在拮抗作用^[34]。

此外,土壤有效铁锰铜间关系复杂。土壤有效铁锰铜间均呈显著正相关关系(表 3),姜勇等^[35]认为铁锰属同族元素,相对原子质量和离子半径接近,在地质作用过程中具有相似的迁移和富集规律,因此麦田土壤有效铁锰分布高度一致,此外,铁锰在表生作用下,常可以成为带负电的氧化物胶体,在迁移和富集过程中,常对铜有吸附作用^[36]。土壤有效铜对有效锌的贡献仅次于有效磷,与有效锌显著正相关(表 3),与姜勇^[35]等报道的研究结果一致,主要因为铜和锌属于亲硫元素,原子质量和半径具有相似性,铜锌常以硫化物的形式存于土壤中。

4 结论

我国麦田土壤有效铁锰铜锌均存在较大区域变异,平均值分别为 49.1、22.1、1.9、1.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,标准差为 75.4、24.7、1.3、1.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,低于相应缺乏临界值 4.5、5.0、0.5、0.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的样本分别占 8.9%、6.9%、1.8%、14.3%。缺铁土壤主要分布在山西、陕西、甘肃等地,长江中下游、西南、东北麦区有效铁较高。缺锰土壤主要集中在新疆、陕西、甘肃、内蒙古地区,长江中下游、西南、东北麦区锰含量高。全国土壤几乎不存在缺铜现象,有效铜呈现西南高、东北低的趋势。陕西、山西、甘肃、新疆麦田土壤供锌能力不足,云贵地区土壤锌含量充足。土壤基本化学性质中, pH 对有效铁锰含量的影响最大,有效铁对有效铜的影响最大,有效磷、有效铜是影响有效锌的主要因素。

致谢:感谢国家现代农业产业技术体系小麦体系各试验站的科研人员在调研信息收集及样品采集过程中给予的大力支持与帮助。

参考文献 (References)

- [1] Wang Z W, Xu L M, Zhang W J. Corresponding relationship between trace elements soil and human activity intensity[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2002, 33(4): 303-305. [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.]
- [2] National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook 2021[M]. Beijing: China Statistics Press, 2021. [中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.]
- [3] Freddy N. Status of the world's soil resources [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2018. [(比)弗雷迪·纳克加勒. 世界土壤资源状况[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2018.]
- [4] Fan M X, Glany A, Das S, et al. Lack of micronutrients in Asian soils[J]. World Agriculture, 2016(12): 182-184. [樊明宪, 安

- 德鲁·格林, 苏米特拉·达斯, 等. 亚洲土壤中微量元素营养元素的缺乏[J]. 世界农业, 2016(12): 182-184.]
- [5] Liu Z, Zhu Q Q, Tang L H, et al. Geographical distribution of trace elements deficient soils in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 1982, 19(3): 209-223. [刘铮, 朱其清, 唐丽华, 等. 我国缺乏微量元素的土壤及其区域分布[J]. 土壤学报, 1982, 19(3): 209-223.]
- [6] Yu C Z, Peng L, Liu Y H, et al. Content and distribution of trace elements and fertilizer efficiency in soils of loessal region[J]. Acta Pedologica Sinica, 1991, 28(3): 317-326. [余存祖, 彭琳, 刘耀宏, 等. 黄土区土壤微量元素含量分布与施肥效应[J]. 土壤学报, 1991, 28(3): 317-326.]
- [7] Yang D G, Cheng Y A, Wen Y M, et al. Investigations on the content, distribution and availability of trace elements in the soils of Sichuan Basin[J]. Acta Pedologica Sinica, 1985, 22(2): 157-166. [杨定国, 成延鳌, 温琰茂, 等. 四川盆地土壤中微量元素的含量分布及其有效性的研究[J]. 土壤学报, 1985, 22(2): 157-166.]
- [8] Zhao C C, Wang Y, Gao R M. Soil trace element abundance in different forest types at the Loess hilly region of Qinghai Province [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(3): 130-135. [赵串串, 王媛, 高瑞梅. 青海省黄土丘陵区主要林分土壤微量元素丰缺状况研究[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(3): 130-135.]
- [9] Xie Z C, Ma C H, Hu D J, et al. Studies on content and distribution of micronutrients in soils of Hubei Province[J]. Acta Pedologica Sinica, 1990, 27(4): 411-419. [谢振翅, 马朝红, 胡定金, 等. 湖北省土壤微量元素含量分布研究[J]. 土壤学报, 1990, 27(4): 411-419.]
- [10] He J Y, Zheng W L, Deng L Z. Distribution and fertilizer efficiency of the trace elements in soils of Henan[J]. Acta Pedologica Sinica, 1986, 23(2): 132-141. [贺家媛, 郑文麒, 邓留珍. 河南省土壤微量元素含量分布及在农业上的应用[J]. 土壤学报, 1986, 23(2): 132-141.]
- [11] Chu H X, Mu W Y, Dang H Y, et al. Evaluation on concentration and nutrition of micro-elements in wheat grains in major wheat production regions of China [J]. Acta Agronomica Sinica, 2022, 48(11): 2853-2865. [褚宏欣, 牟文燕, 党海燕, 等. 我国主要麦区小麦籽粒微量元素含量及营养评价[J]. 作物学报, 2022, 48(11): 2853-2865.]
- [12] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [13] 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. [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.]
- [14] Shen S M. Soil fertility in China [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998. [沈善敏. 中国土壤肥力[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.]
- [15] Yu C Z, Peng L, Peng X L, et al. Evaluation of available-Mn (DTPA-Mn) in loessal soils and discussion of its critical level[J]. Acta Pedologica Sinica, 1984, 21(3): 277-283. [余存祖, 彭琳, 彭祥林, 等. 土壤有效锰(DTPA-Mn)的应用评价与临界值的探讨[J]. 土壤学报, 1984, 21(3): 277-283.]
- [16] Biwe E R. Status and distribution of available micronutrients along a toposequence at Gubi Bauchi North Eastern Nigeria[J]. International Research Journal of Agricultural Science & Soil Science, 2012, 2(10): 436-439.
- [17] Egbuchua C. Extractable micronutrients status and their relationship with some Inland valley soil properties in Delta State, Nigeria[J]. Journal of Agriculture & Food Sciences, 2011, 9(1): 44-54.
- [18] de Santiago A, Quintero J M, Delgado A. Long-term effects of tillage on the availability of iron, copper, manganese, and zinc in a Spanish Vertisol[J]. Soil and Tillage Research, 2008, 98(2): 200-207.
- [19] Katyal J C, Vlek P. Micronutrient problems in tropical Asia[J]. Fertilizer Research, 1985, 7(1/2/3): 69-94.
- [20] Nourzadeh M, Hashemy S M, Rodriguez Martin J A, et al. Using fuzzy clustering algorithms to describe the distribution of trace elements in arable calcareous soils in northwest Iran[J]. Archives of Agronomy & Soil Science, 2013, 59(3): 435-448.
- [21] Kashem M A, Singh B R. Metal availability in contaminated soils: I. Effects of flooding and organic matter on changes in Eh, pH and solubility of Cd, Ni and Zn [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2001, 61(3): 247-255.
- [22] Luo S, Zhang D M, Lu D B, et al. Evaluation of trace elements abundance and deficiency in cultivated soil and its influencing factors in Bijie City of Wumeng Mountain [J]. Geological Bulletin of China, 2021, 40(9): 1570-1583. [骆珊, 张德明, 卢定彪, 等. 乌蒙山区毕节市耕地土壤微量元素丰缺评价及其影响因素[J]. 地质通报, 2021, 40(9): 1570-1583.]
- [23] Alloway B J. Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2009, 31(5): 537-548.
- [24] Wang S Z. Availability and chemical characteristics of trace elements in soils under long-term fertilization[D]. Beijing: Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, 2016. [王书转. 长期施肥条件下土壤微量元素化学特性及有效性研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2016.]
- [25] Katyal J C, Agarwala S C. Micronutrient research in India[J]. Fertilizer News, 1982, 27(2): 66-86.
- [26] Tan J, Liu X Y, Li Q, et al. Distribution of available zinc in tobacco-planting soils in Wenshan and its influential factors[J]. Soils, 2017, 49(4): 719-724. [谭军, 刘晓颖, 李强, 等. 文山植烟土壤有效锌含量及其影响因素研究[J]. 土壤, 2017, 49(4): 719-724.]
- [27] 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, 158. [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, 158.]
- [28] Qiao Y N. Prediction of available Fe, Mn, Cu, Zn contents in farmland soil of Jiangjin district and its influencing factors [D]. Chongqing: Southwest University, 2015. [乔依娜. 江津区农田土壤有效态铁、锰、铜、锌的含量预测及其影响因素研究[D]. 重庆: 西南大学, 2015.]
- [29] Liu H J, Chen H N, Wang J M, et al. Effects of long-term fertilization on iron fraction and availability in brown soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(1): 36-43. [刘侯俊, 陈红娜, 王俊梅, 等. 长期施肥对棕壤铁形态及其有效性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 36-43.]
- [30] Gao X, Flaten D N, Tenuta M, et al. Soil solution dynamics and plant uptake of cadmium and zinc by durum wheat following phosphate fertilization[J]. Plant and Soil, 2011, 338(1): 423-434.
- [31] Cui H Y, Wang M D, Jie X L, et al. Effect of phosphorus, zinc and cadmium interaction on their availability in calcareous cinnamon soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(1): 97-103. [崔海燕, 王明娣, 介晓磊, 等. 石灰性褐土中磷锌镉相互作用对其有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(1): 97-103.]
- [32] Liu F, Liu Z Z, Liu S L, et al. The mechanism of phosphorus and zinc interaction and the effects of phosphorus on zinc adsorption & desorption in Chao soil[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(11): 1770-1776. [刘芳, 刘忠珍,

- 刘世亮, 等. 潮土中磷锌交互作用机制探讨及磷对锌吸附-解吸的影响[J]. 生态环境学报, 2011, 20(11): 1770-1776.]
- [33] Zhao R F, Zou C Q, Zhang F S. Effects of long-term P fertilization on P and Zn availability in winter wheat rhizosphere and their nutrition[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(3): 368-372. [赵荣芳, 邹春琴, 张福锁. 长期施用磷肥对冬小麦根际磷、锌有效性及其作物磷锌营养的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(3): 368-372.]
- [34] Lindsay W L. Zinc in soils and plant nutrition[J]. Advances in Agronomy, 1972, 24(2): 147-186.
- [35] Jiang Y, Zhang Y G, Liang W J, et al. Correlations of exchangeable Ca, Mg, Fe, Mn, Cu and Zn in cultivated soils[J]. Ecology and Environment, 2003, 12(2): 160-163. [姜勇, 张玉革, 梁文举, 等. 耕地土壤中交换态钙镁铁锰铜锌相关关系研究[J]. 生态环境, 2003, 12(2): 160-163.]
- [36] Zhang S X, Yi Y L, Liu X Y. Study on correlation between some metal element contents in soils of Caohekou area, Liaoning Province and their affecting factors[J]. Acta Pedologica Sinica, 1999, 36(2): 253-260. [张淑香, 依艳丽, 刘孝义. 草河口地区土壤中重金属等元素含量的相互关系及其影响因素[J]. 土壤学报, 1999, 36(2): 253-260.]

(责任编辑: 陈荣府)