

中国稻田土壤有效态中量和微量元素含量分布特征

张璐^{1,2}, 蔡泽江^{1,2}, 王慧颖³, 于子坤³, 韩天富¹, 柳开楼^{1,4}, 刘立生^{1,2},
黄晶^{1,2}, 文石林^{1,2}, 张会民^{1,2*}

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081; 2. 中国农业科学院衡阳红壤实验站/祁阳农田生态系统国家野外试验站, 祁阳 426182; 3. 农业农村部耕地质量监测保护中心, 北京 100125; 4. 江西省红壤研究所/国家红壤改良工程技术研究中心, 南昌 330046)

摘要: 基于全国 282 个水稻土监测点, 分析土壤有效态中、微量元素含量及区域特征 (东北、长三角、长江中游、西南、华南), 结合丰缺标准, 揭示中、微量元素丰缺程度。结果表明: 东北水稻土交换性镁和有效硼含量高于其他地区, 有效锌含量最低; 长三角有效锰含量最高、有效硫含量最低; 长江中游有效铜含量最高, 有效态铁、锰和钼含量最低; 西南交换性钙含量高于其他地区, 有效铜含量则低于其他地区; 华南有效态铁、钼含量均高于其他地区, 而交换性钙、镁含量低于其他地区。中国水稻土交换性钙、镁及有效铁、锰、铜含量整体丰富; 长三角和华南缺硫水稻土比例分别为 42.2% 和 41.8%; 东北、长三角、长江中游、西南和华南缺锌水稻土比例分别为 75.0%、52.3%、31.9%、53.2% 和 10.4%, 缺硼分别为 38.5%、65.2%、92.2%、88.6% 和 78.3%, 缺钼 28.6%、60.4%、82.6%、42.0% 和 33.4%。可见, 东北和长三角水稻土以缺锌为主; 长江中游以缺硼、钼为主; 西南以缺硼为主; 华南以缺硼为主。研究可为全国和区域尺度水稻土中微量元素的管理和合理施用提供依据。

关键词: 水稻土; 中量和微量元素; 区域分布; 丰缺; 中国

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.16.008

中图分类号: S816.72

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-16-0062-09

张璐, 蔡泽江, 王慧颖, 等. 中国稻田土壤有效态中量和微量元素含量分布特征[J]. 农业工程学报, 2020, 36(16): 62-70. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.16.008 http://www.tcsae.org

Zhang Lu, Cai Zejiang, Wang Huiying, et al. Distribution characteristics of effective medium and micronutrient element contents in paddy soils of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(16): 62-70. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.16.008 http://www.tcsae.org

0 引言

土壤的中 (钙、镁、硫)、微 (铁、锰、铜、锌、硼、钼) 量营养元素是植物体内酶、维生素和生长激素等的重要组成部分^[1-2], 缺乏或过多均会对植物生长和动物生活产生不良影响, 甚至威胁到人类健康^[3-5]。水稻是中国第二大粮食作物, 水稻土中、微量营养元素缺乏或过量均会影响水稻生长^[6-7]。土壤有效态的中、微量营养元素含量是母质、土壤类型、土壤酸度以及气候条件等因素综合作用的结果, 在一定条件下反映了土壤供应中、微量养分的水平^[6]。中国幅员辽阔, 区域间土壤属性和气候特点差异明显, 探明不同区域水稻土中、微量营养元素分布特征及丰缺程度, 对合理施用中微量元素肥料、实现土壤养分均衡、保证水稻优质稳产具有极其重要的意义^[8]。

近年来, 随着农作物产量的提高, 复种指数的增加和高产品种的推广, 氮、磷等大量营养元素肥料施用量的增多, 引起农田养分比例失调, 而中、微量营养元素的增产效果越来越明显。周卫军等^[9]通过对湖南省 8 种主要母质发育的 65 个水稻土样品分析得知, 土壤有效铁、锰达丰富级别, 有效铜、锌、硼处于缺素状态, 需要补充。王昌全等^[10]通过对西昌市 317 个水田和旱地土壤样品分析指出, 土壤有效铁含量丰富, 有效锰、铜、锌分布不均, 施肥时应注意区域特点。向万胜等^[11]通过对湘北丘岗区 120 个红壤和水稻土样品分析表明, 土壤大面积缺锌和硼, 部分缺铜和钼, 有效锰含量丰富。杨绍聪等^[12]通过对玉溪市 1 081 个水田和 494 个旱地土壤样品分析指出, 水田和旱地土壤有效硼均处于缺乏状态, 有效钼处于中低水平, 有效铁、锰、铜、锌含量丰富。张自立等^[13]通过分析安徽省 1 000 余个旱地和水田土壤样品发现, 有效铁、锰、铜平均含量较高不缺乏, pH 值<7 的红壤及 pH 值≥7 的大部分土壤缺锌严重, 70% 以上的土壤有效硼、钼处于缺乏状态。另外, 还有很多学者对旱地土壤中、微量元素含量和丰缺状况进行过研究^[14-16]。然而, 前人对中、微量营养元素的研究多集中在单一点位, 且多集中在旱地, 关于大区域尺度上土壤有效态中、微量营养元素含量分布特征, 特别是经

收稿日期: 2020-03-25 修订日期: 2020-07-10

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFD0300901); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项 (1610132020024, 161032019035); 公益性行业专项 (201503122)

作者简介: 张璐, 助理研究员, 主要从事土壤培肥与改良研究。

Email: zhanglu01@caas.cn

*通信作者: 张会民, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤 (磷钾) 养分循环、土壤培肥与改良方面的研究。Email: zhanghuimin@caas.cn

过 20 多年各种施肥措施的改变与提升，现阶段中国水稻土有效态中、微量营养元素的区域特征及丰缺状况还不清楚。

农业农村部在 1988—2016 年期间布置了不同施肥（不施肥和当地农民习惯施肥处理）田间定位监测试验平台，该平台涵盖了我国水稻主要种植区域。各监测点反映了现阶段农民田间管理的实际情况，相较于短期试验能更好地反映施肥等农业管理措施对水稻土有效态中、微量元素影响的长期效应。本研究基于此平台数据，从全国尺度上研究现阶段中国典型稻区有效态中、微量营养元素含量区域特征。同时，在综合各地评价标准的基础上，确定适用于全国尺度稻田有效态中、微量元素的分级评价标准，这是对先前标准的更新和重要补充，进一步增强了代表性和时效性；依据此标准，能够揭示中国稻田土壤有效态中微量元素的丰缺程度，为全国和区域尺度水稻土中微量元素的合理施用和管理提供参考和决策依据。

表 1 水稻土监测点布局及数据采集情况
Table 1 Monitoring site layout and data collection of paddy soils

区域 Area	省份 Province	采集数据数量 Sample size								
		交换性钙 Exchangeable Ca	交换性镁 Exchangeable Mg	有效硫 Available S	有效铁 Available Fe	有效锰 Available Mn	有效铜 Available Cu	有效锌 Available Zi	有效硼 Available B	有效钼 Available Mo
东北 Northeast	黑龙江	4	3	3	4	3	3	4	4	4
	吉林	4	5	5	4	4	5	5	5	5
	辽宁	5	4	5	7	7	7	7	4	5
长三角 Yangtze River Delta	江苏	8	8	11	32	31	30	30	30	19
	安徽	29	29	29	29	29	29	29	29	29
	上海	2	2	2	2	2	1	2	2	2
	浙江	3	3	3	5	5	4	4	5	3
长江中游 Middle of the Yangtze River	湖北	16	17	17	17	16	16	17	17	12
	江西	38	39	39	39	39	38	39	37	0
	湖南	31	36	36	36	36	36	35	36	34
西南 Southwest of China	四川	22	22	22	23	23	21	22	23	23
	重庆	6	7	7	7	7	7	7	7	7
	贵州	1	2	2	2	2	2	1	2	1
	云南	2	3	3	3	3	2	2	3	0
华南 South of China	福建	11	11	11	11	11	11	11	11	0
	广西	5	11	11	11	11	11	11	11	0
	广东	30	28	31	32	32	31	27	32	0
	海南	15	15	14	15	14	15	9	15	15
合计 Total		232	245	251	279	275	269	262	273	159

1.2 数据采集与测试分析

各监测点位中土壤样品采集的方法是按照全国耕地地力调查与质量评价技术规程进行，为了尽可能地避免施肥对于样品的影响，统一在秋季作物收获之后 11 月中旬进行取样。采用常规方法测定土壤有效态中、微量元素含量^[18]。

1.3 水稻土有效态中、微量元素含量分级

土壤中、微量营养元素分级指标尚没有统一、严格的标准，一方面是由于不同的土壤、不同的农作物，其同一测定值所反映的丰缺的实际情况会有明显不同；另一方面是由于土壤中、微量营养元素在土壤中的存在形态多种多样，且随土壤条件的改变而改变。本文参照前期相关研究^[10,15,19-20]，并结合当前国内外已有研究结果和现阶段实际情况^[21]，制定水稻土有效态中、微量营养元

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究所用数据均来源于“农业农村部耕地土壤质量监测”工作开展期间所收集的 2016 年水稻田间试验数据。全国 282 个水稻土监测点的布局及数据采集情况见表 1，其中每个省份数据来源于不同的市（县）。土壤类型均为水稻土，采样深度为耕层 0~20 cm。本研究综合考虑了水稻种植区域（东北、长三角、长江中游、西南、华南）、种植制度（一年一熟、一年两熟、一年三熟）、作物类型（单季稻、双季稻、水稻-其他作物）、施肥类型（化肥单施、化肥+有机肥）、土壤质地（黏土、壤土、砂土）等，在各区域均有较好的代表性。各监测点种植制度、耕作、栽培等管理方式以及施肥等均按当地常规种植管理模式，且试验小区面积均在 334 m² 以上，属于大区试验，监测点均具有代表性。各监测点详情可参考本课题组已发表的文献^[17]。

素评价指标（表 2 和表 3）。

表 2 水稻土有效态中量营养元素评价
Table 2 Evaluation of available medium nutrient elements in paddy soils

级别 Levels	质量分数 Content/(mg·kg ⁻¹)		
	交换性钙 Exchangeable Ca	交换性镁 Exchangeable Mg	有效硫 Available S
缺乏 Lack	<400	<50	<16
中等 Medium	400~1000	50~120	16~25
丰富 Rich	>1000	>120	>25
临界值 Critical value	400	50	16
参考文献 References	[19]	[19]	[19]

表 3 水稻土有效态微量元素评价指标

Table 3 Evaluation indexes of available micronutrient elements in paddy soils

级别 Levels	质量分数 Content/(mg·kg ⁻¹)					
	有效铁 Available Fe	有效锰 Available Mn	有效铜 Available Cu	有效锌 Available Zn	有效硼 Available B	有效钼 Available Mo
极低 Extremely low	≤2.50	≤5.00	≤1.00	≤1.00	≤0.25	≤0.10
低 Low	>2.50~4.50	>5.00~10.00	>1.00~2.00	>1.00~1.50	>0.25~0.50	>0.10~0.15
中等 Medium	>4.50~10.00	>10.00~20.00	>2.00~4.00	>1.50~3.00	>0.50~1.00	>0.15~0.20
高 High	>10.00~20.00	>20.00~30.00	>4.00~6.00	>3.00~5.00	>1.00~2.00	>0.20~0.30
极高 Extremely high	>20.00	>30.00	>6.00	>5.00	>2.00	>0.30
临界值 Critical value	4.5	10	2	1.5	0.5	0.15
参考文献 References	[10]	[10]	[20]	[20]	[15]	[15,20]

1.4 数据处理

运用 Excel 2016 进行试验数据整理, 土壤 pH 值与不同中、微量营养元素之间的关系采用线性回归方程进行拟合; 运用 SPSS 19.0 单因素分析 Duncan 法对土壤中、微量营养元素数据进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 稻区土壤中量营养元素区域变化

中国东北、长三角、长江中游、西南和华南地区水稻土交换性钙含量如表 4 所示。西南地区水稻土平均交换性钙含量最高, 其次为东北、长三角、长江中游地区, 以华南地区交换性钙含量最低。参考水稻土有效态中量营养元素评价标准 (表 2), 东北和长江中游地区水稻土交换性钙含量均处于中等和丰富水平, 无缺乏, 其中丰富水平占比分别是中等水平的 5.5 和 7.2 倍; 长三角和西南地区土壤交换性钙以丰富水平为主, 其次中等, 再次缺乏, 其中丰富水平占比分别是中等水平的 2.1 和 3.7 倍; 华南地区土壤交换性钙以中等水平为主, 其次丰富, 再次缺乏, 其中中等水平占比分别是丰富和缺乏水平的 1.4 和 5.4 倍。可见, 中国水稻土交换性钙含量整体处于中等和丰富水平, 其中东北、长三角、长江中游和西南地区以丰富水平为主, 华南地区以中等水平为主。

中国水稻土交换性镁含量总体呈现自北向南、自西向东降低的变化趋势 (表 4)。东北地区交换性镁含量最高, 平均值较其他地区高 41.83%~345.88% ($P<0.05$)。参考水稻土有效态中量营养元素评价标准 (表 2), 东北地区水稻土交换性镁含量均处于丰富水平; 长三角、长江中游和西南地区水稻土交换性镁均以丰富水平为主, 其次中等, 再次缺乏, 其中丰富水平占比分别是中等水平的 3.1、1.5 和 5.4 倍; 华南地区水稻土交换性镁则以中等水平为主, 其次缺乏和丰富水平, 其中中等水平占比分别是丰富和缺乏水平的 1.9 和 1.7 倍。可见, 中国水稻土交换性镁含量大部分地区处于中等和丰富水平, 其中东北、长三角、长江中游和西南地区均以丰富水平为主, 而华南地区以缺乏和中等水平为主。

表 4 可知, 东北、长江中游、西南地区水稻土有效硫含量无显著差异、且显著高于其他地区, 平均值较长三角和华南地区分别高 95.93%~149.11%和 78.68%~127.18% ($P<0.05$)。参考水稻土有效态中量营养元素评价标准 (表 2), 东北地区水稻土有效硫以丰富水平占比

最高, 其次是缺乏, 中等水平占比最低, 其中丰富水平是缺乏和中等水平的 2.0 和 8.0 倍; 长三角地区土壤有效硫以缺乏为主, 其次丰富水平, 再次中等水平, 其中缺乏水平占比分别是丰富和中等水平的 1.3 和 1.7 倍; 长江中游和西南地区以丰富水平为主, 分别是缺乏和中等水平的 4.2~9.4 和 8.3~8.4 倍; 华南地区水稻土有效硫以丰富和缺乏为主, 其中丰富水平占比分别是缺乏和中等水平的 1.1 和 3.3 倍。可见, 中国水稻土有效硫含量东北、长江中游和西南地区均以丰富水平为主, 长三角以缺乏为主, 而华南地区以缺乏和丰富水平为主。

表 4 各稻区土壤有效态中量元素含量

Table 4 Content of soil available medium nutrient elements in each rice planting area

元素 Element	区域 Region	变幅 Ranges (mg·kg ⁻¹)	平均值 Average values (mg·kg ⁻¹)	变异系数 Coefficient of variation /%	各级占比 Proportion of each level/%		
					缺乏 Lack	中等 Medium	丰富 Rich
交换性钙 Exchang- eable Ca	东北	448.0~ 3 742.5	2 013.4± 950.2b	47.2	0	15.4	84.6
	长三角	260.0~ 5 280.0	1 990.2± 1 396.6b	70.2	4.8	31.0	64.2
	长江 中游	505.0~ 4 640.0	1 980.2± 950.5b	48.0	0	12.2	87.8
	西南	284.4~ 7 734.5	2 805.6± 2 259.6a	80.5	9.7	19.3	71.0
	华南	195.0~ 2 000.0	980.9± 485.1c	49.5	9.8	52.5	37.7
交换性镁 Exchang- eable Mg	东北	160.0~ 703.0	408.4± 195.3a	47.8	0	0	100
	长三角	24.0~ 792.6	287.9± 212.3b	73.7	11.9	21.4	66.7
	长江 中游	24.0~ 336.0	150.0± 71.3cd	47.6	5.5	38.0	56.5
	西南	15.7~ 533.2	206.2± 116.9c	56.7	5.9	14.7	79.4
	华南	12.0~ 252.0	91.6± 54.5d	59.5	27.7	47.7	24.6
有效硫 Available S	东北	6.5~ 182.0	64.2± 58.9a	91.8	30.8	7.7	61.5
	长三角	6.5~ 80.2	26.9± 21.2b	78.6	42.2	24.4	33.4
	长江 中游	9.4~ 132.0	52.8± 26.3a	49.9	9.8	8.7	81.5
	西南	7.9~ 190.1	67.1± 48.0a	71.6	8.8	17.6	73.6
	华南	4.1~ 77.0	29.5± 21.4b	72.5	41.8	13.4	44.8

注: 不同的小写字母表示差异显著 ($P<0.05$); 下同。

Note: Different lowercases indicate significantly different ($P<0.05$); The same below.

2.2 稻区土壤微量营养元素区域变化

中国东北、长三角、长江中游、西南和华南地区水稻土微量元素含量如表 5 所示。华南地区水稻土有效铁含量最高，平均值较其他地区高 69%~171% ($P<0.05$)，其次为长三角地区，而长江中游地区水稻土有效铁含量最低，与长三角地区相比显著降低 38% ($P<0.05$) (表 5)。参考水稻土有效态微量营养元素评价标准 (表 3)，东北、西南和华南地区水稻土有效铁含量均处于极高水平；长三角和长江中游地区有效铁以极高水平为主。可见，中国水稻土有效铁含量除个别点位处于低和中等水平外，基本处于高和极高水平，且以极高为主。

华南和长三角地区水稻土有效锰含量最高，平均值较长江中游地区高 91.40%~101.12% ($P<0.05$)，西南和东北地区土壤有效锰含量居中 (表 5)。参考水稻土有效态微量营养元素评价标准 (表 3)，东北地区有效锰含量以中等、高和极高水平水平为主，合计占比 78.6%，极低和低水平合计占比为 21.4%；长三角地区高和极高水平占比为 76.1%，分别是低和中等水平的 12.7 和 4.3 倍，无极低水平；长江中游、西南和华南地区均以中等、高和极高水平水平为主，合计占比分别为 73.6%、94.2%和 73.6%，极低和低水平合计占比分别为 26.4%、5.8%和 26.4%。表明，中国水稻土有效锰含量以中等、高和极高为主。

东北、长三角、长江中游、华南地区间水稻土有效铜含量无显著差异，平均值较西南地区高 35.60%~57.89% ($P<0.05$) (表 5)。参考水稻土有效态微量营养元素评价标准 (表 3)，东北、长三角、长江中游和西南地区有效铜含量均以中等水平为主，占比为 46.7%~54.7%，其次是高和极高水平合计占比为 12.5%~43.3%，再次为极低和低水平合计占比为 7.8%~34.4%；华南地区水稻土有效铜含量以中等水平占比最高，分别是极低、低、高和极高水平的 23.5、1.6、1.6 和 1.9 倍。表明，中国水稻土有效铜含量均以中等为主。

中国不同区域水稻土有效锌含量变化如表 5 所示，长江中游和华南地区水稻土平均有效锌含量相对较高，与东北、长三角、西南地区相比，长江中游地区显著提高 45.50%~99.87% ($P<0.05$)，华南地区显著提高 78.38%~145.05% ($P<0.05$) (表 5)。参考水稻土有效态微量营养元素评价标准 (表 3)，东北地区有效锌含量以极低和低水平为主；长江中游以中等水平为主，分别是极低、低、高和极高水平的 3.4、2.1、2.1 和 5.4 倍；华南地区水稻土有效锌含量以中等和高水平占比最高，均为 41.4%，其次为极高、极低和低水平，其中极低和低水平占比合计为 10.4%。表明，中国水稻土有效锌含量，东北以极低和低水平的缺乏为主，长江中游以低和中等水平为主，而华南以中、高水平为主。

从表 5 可看出，东北地区水稻土有效硼含量最高，平均值较其他地区高 55.21%~170.98% ($P<0.05$)，长江中游和华南地区水稻土有效硼含量最低，与长三角地区相比，分别降低 33.23%和 42.72% ($P<0.05$)。参考水稻土有效态微量营养元素评价标准 (表 3)，东北地区有效

表 5 各稻区土壤有效态微量元素含量
Table 5 Contents of soil available micronutrient nutrient elements in each rice planting area

元素 Element	区域 Region	变幅 Ranges/ (mg·kg ⁻¹)	平均值 Average values /(mg·kg ⁻¹)	变异系数 Coefficient of variation /%	各级占比 Proportion of each level/%				
					极低 Extre- mely low	低 Low	中等 Med- ium	高 High	极高 Extre- mely high
有效铁 Available Fe	东北	25.3~ 375.0	161.3± 115.8bc	71.8	0	0	0	0	100
	长三角	4.2~ 471.6	169.7± 110.7b	65.3	0	1.5	0	1.5	97.0
	长江 中游	4.9~ 312.0	105.9± 79.0c	74.6	0	0	1.1	2.2	96.7
	西南	22.5~ 330.0	145.2± 77.1bc	53.1	0	0	0	0	100
	华南	29.9~ 748.0	286.9± 178.4a	62.2	0	0	0	0	100
有效锰 Available Mn	东北	1.4~71.5	27.9± 20.6ab	73.9	7.1	14.3	21.4	28.6	28.6
	长三角	6.8~ 115.0	44.4± 27.9a	62.9	0	6.0	17.9	17.9	58.2
	长江 中游	1.0~71.1	22.1± 16.3b	73.8	11.0	15.4	29.7	17.6	26.3
	西南	2.8~88.8	36.3± 27.3ab	75.3	2.9	2.9	37.1	14.3	42.8
	华南	0.3~ 196.3	42.2± 53.9a	127.7	8.8	17.6	29.4	10.3	33.9
有效铜 Available Cu	东北	0.76~ 6.47	3.68± 1.66a	45.1	6.7	13.3	46.7	20.0	13.3
	长三角	1.03~ 7.58	3.51± 1.40a	39.9	0	12.5	54.7	26.6	6.2
	长江 中游	1.00~ 8.93	4.09± 1.68a	41.0	1.1	6.7	48.9	32.2	11.1
	西南	0.88~ 5.67	2.59± 1.18b	45.4	6.3	28.1	53.1	12.5	0
	华南	0.99~ 10.00	3.92± 2.26a	57.6	1.5	22.1	35.3	22.1	19.0
有效锌 Available Zn	东北	0.13~ 4.00	1.39± 1.07b	77.0	37.5	37.5	12.5	12.5	0
	长三角	0.44~ 4.08	1.60± 0.82b	51.2	27.7	24.6	40.0	7.7	0
	长江 中游	0.44~ 6.33	2.42± 1.45a	60.0	12.1	19.8	40.7	19.8	7.6
	西南	0.42~ 3.88	1.66± 1.01b	60.5	31.3	21.9	34.3	12.5	0
	华南	0.76~ 5.20	2.97± 1.21a	40.8	5.2	5.2	41.4	41.4	6.8
有效硼 Available B	东北	0.04~ 1.81	0.67± 0.50a	74.9	30.8	7.7	46.2	15.3	0
	长三角	0.06~ 1.20	0.43± 0.26b	59.7	30.3	34.9	31.8	3.0	0
	长江 中游	0.01~ 0.80	0.29± 0.16c	56.6	43.3	48.9	7.8	0.0	0
	西南	0.10~ 0.75	0.36± 0.14bc	40.3	20.0	68.6	11.4	0.0	0
	华南	0.01~ 0.99	0.25± 0.26c	104.2	66.7	11.6	21.7	0.0	0
有效钼 Available Mo	东北	0.10~ 0.62	0.29± 0.18b	63.2	28.6	0	7.1	28.6	35.7
	长三角	0.04~ 0.24	0.14± 0.04c	29.8	20.8	39.6	32.1	7.5	0
	长江 中游	0.03~ 0.27	0.11± 0.06c	50.3	50.0	32.6	6.5	10.9	0
	西南	0.01~ 0.35	0.17± 0.08c	50.2	22.6	19.4	35.5	19.4	3.1
	华南	0.02~ 1.58	0.75± 0.55a	73.3	6.7	26.7	0.0	0.0	66.6

硼含量以中等水平占比最高,分别是极低、低和高水平的 1.5、6.0 和 3.0 倍,无极高水平,其中极低和低水平合计占比为 38.5%;长三角、长江中游、西南和华南地区均以极低和低水平占比最高,合计为 65.2%~92.2%,其次为中等水平,其中长江中游、西南和华南地区无高和极高水平,长三角地区无极高水平。表明,中国水稻土有效硼含量整体水平较低,其中长三角、长江中游、西南和华南均以缺乏为主。

华南地区水稻土有效钼含量最高,平均值较其他地区高 156.10%~557.14% ($P<0.05$),东北地区含量居中,较长三角、长江中游、西南地区显著提高 72.22%~154.10% ($P<0.05$) (表 5)。参考水稻土有效态微量营养元素评价标准(表 3),东北地区有效钼含量以极高水平占比最高,分别为极低、中等和高水平的 1.2、5.0 和 1.2 倍,无低水平;长江中游地区以极低和低水平为主,合计占比为 82.6%,是中等和高水平的 7.6~8.1 倍;西南地区水稻土有效钼含量以中等水平占比最高,分别是极低、低、高和极高水平的 1.6、1.8、1.8 和 11.1 倍,其中极低和低水平合计占比为 42.0%;华南地区水稻土有效钼含量以极高水平占比最高,分别是极低和低水平的 9.9 和 2.5 倍,无中等和高水平。表明,东北和华南地区水稻土有效钼以丰富为主,而长三角、长江中游和西南均以缺乏为主。

2.3 土壤 pH 值与中微量营养元素的相互关系

从表 6 可以看出,土壤 pH 值与中、微量营养元素之间均表现出显著或极显著的相关关系。其中,与交换性钙、镁、有效硅、硼、硫呈显著或极显著正相关关系,相关系数分别为 0.42、0.26、0.17、0.14 和 0.13;土壤 pH 值与有效锌、铁、钼、铜、锰表现出显著或极显著负相关关系,相关系数分别为 -0.40、-0.25、-0.17、-0.17 和 -0.14。

水稻土交换性钙与镁、有效硅之间相互呈极显著正相关关系,有效铁、锌、钼之间相互呈极显著正相关关系;有效硼与交换性镁、有效硫、有效锰之间分别表现出极显著正相关关系,有效铁与有效锰、有效铜与有效

锌之间分别表现出极显著正相关关系。交换性钙与有效硫、交换性镁与有效锰、有效硼与有效钼之间分别表现出显著的正相关关系。

交换性钙与有效铁、钼,交换性镁与有效铁、锌,有效硅与有效铁、锌之间分别表现出极显著负相关关系。交换性钙和有效锰之间呈显著的负相关关系。

3 讨论

3.1 水稻土有效态中、微量元素含量区域分布特征

本研究结果表明,水稻土交换性镁含量呈现自北向南、自西向东逐渐降低的变化趋势,其中平均含量以东北最高,其次为长三角、西南、华南,长江中游介于西南和华南之间,且与西南和华南均无显著性差异。以上表明交换性镁含量具有明显的地带性差别,这主要是受气候条件影响所致,自北向南、自西向东,温湿度增加、淋溶增强,风化程度高,土壤中可溶性镁易流失,含镁量减少,相反,在干燥寒冷、低淋溶地区,土壤中含镁较多^[19]。水稻土平均交换性钙含量则呈现为西南最高、东北、长三角、长江中游次之、华南地区最低,可见除受气候条件影响外,土壤母质在很大程度上决定了水稻土交换性钙的含量。中国西南地区水稻土以紫泥田为主,其发育于富含碳酸钙的紫色砂泥岩风化物,碳酸钙含量高,导致水稻土交换性钙含量显著高于其他地区。尽管水稻土有效硫、铁、锰、铜含量不具有地带性差异,但区域间差异显著,其中平均有效硫含量以东北、长江中游、西南高于长三角、华南;平均有效铁含量以华南最高、东北、长三角、西南、长江中游次之,且长三角高于长江中游;平均有效锰含量以华南、长三角高于长江中游,且东北、西南与其他地区均无显著差异;平均有效铜含量以华南、东北、长三角、长江中游高于西南;这种差异可能是由成土母质、气候条件、土壤酸碱度等多种因素共同作用的结果^[10]。从表 6 也可看出,水稻土有效铁、铜、锌含量与 pH 值表现出极显著负相关关系,可见土壤 pH 值是影响微量元素有效性的主要因素之一。

表 6 土壤 pH 值与中、微量营养元素含量的相关系数

Table 6 Correlation coefficient between soil pH value and available medium or micronutrient nutrient elements

指标 Index	pH 值 pH value	交换性钙 Exchangeable Ca	交换性镁 Exchangeable Mg	有效硫 Available S	有效硅 Available Si	有效铁 Available Fe	有效锰 Available Mn	有效铜 Available Cu	有效锌 Available Zn	有效硼 Available B
交换性钙 Exchangeable Ca	0.42**									
交换性镁 Exchangeable Mg	0.26**	0.42**								
有效硫 Available S	0.13*	0.16*	0.13							
有效硅 Available Si	0.17**	0.35**	0.60**	0.01						
有效铁 Available Fe	-0.25**	-0.28**	-0.18**	-0.12	-0.48**					
有效锰 Available Mn	-0.14*	-0.16*	0.15*	0.01	-0.14	0.48**				
有效铜 Available Cu	-0.17**	0.03	0.00	0.09	-0.02	0.00	-0.10			
有效锌 Available Zn	-0.40**	-0.09	-0.25**	0.05	-0.21**	0.24**	0.09	0.36**		
有效硼 Available B	0.14*	0.06	0.25**	0.30**	0.06	0.01	0.18**	0.09	-0.04	
有效钼 Available Mo	-0.17*	-0.26**	0.00	0.12	-0.15	0.41**	0.44**	0.00	0.25**	0.18*

注: *表示相关性显著 ($P<0.05$), **表示相关性极显著 ($P<0.01$)。

Note: * and ** indicated significant correlation ($P<0.05$ and $P<0.01$).

本研究结果显示,水稻土平均有效锌含量呈现北低南高的地带性变化特征。其可能的原因有以下 2 个方面:

1) 自北向南土壤 pH 值呈降低趋势,其中 pH 值较高的东北 (pH 值 6.45)、长三角 (pH 值 6.35)、西南地区 (pH

值 6.61), 平均有效锌含量相对较低; 土壤 pH 值相对较低的长江中游 (pH 值 5.67) 和华南地区 (pH 值 5.59), 平均有效锌含量相对较高。研究表明土壤 pH 值每增加 1 个单位, 铜和锌的溶解度会下降 100 倍^[22-23]。Pardo 等^[24]研究发现土壤锌随着土壤 pH 值升高, 吸附量上升, 解吸量下降; 反之, 吸附量下降, 解吸量上升。2) 土壤中游离的碳酸钙和碳酸镁能够吸收锌, 而含硅丰富的土壤能够与锌形成 ZnSiO_3 , 本研究也表明, 土壤交换性镁和有效锌、有效硅与有效锌之间均存在极显著负相关关系 (表 6)。西南地区土壤有效锌含量相对较低, 与该地区成土母质多为碱性紫色砂页岩, 富含碳酸钙且 pH 值相对较高有关。向万胜等^[11]通过调查研究湘北丘岗地区不同母质发育的水稻土发现, 有效铜质量分数均在 1.0 mg/kg 以上, 有效锌质量分数均在 1.0 mg/kg 以下, 且有效铜和有效锌含量均以紫色砂页岩发育的水稻土最低。

中国水稻土平均有效硼含量呈现自北向南降低的地带性变化特征。土壤中硼的有效性主要受土壤酸碱度、有机质含量等影响。当土壤 pH 值在 4.7~6.7 时, 硼的有效性最高, 水溶性硼与 pH 值成正相关; 当 pH 值 >7 时, 水溶性硼的含量随 pH 值的升高有降低的趋势, 这是由于高 pH 值条件使土壤中金属氧化物与黏土矿物对硼的吸附量增加, 因此, 在石灰性土壤和碱性土壤中硼的有效性较低 (如西南地区)。本研究, 长江中游 (pH 值 5.67) 和华南地区 (pH 值 5.59) 土壤 pH 值较低可能是造成土壤有效硼含量显著降低的原因之一^[15]。有机质是硼的供给源, 有机质不仅含有较多的硼, 而且可以保证土壤中的有效硼免遭固定和淋失, 故有机质多的土壤有效硼多。研究表明, 土壤有效硼的 60%~80% 来自土壤有机质的分解, 中国东北地区有机质含量较其他地区高, 在一定程度上增加了土壤硼的有效性。此外, 南方湿润多雨, 常由于强烈的淋洗作用而导致硼的损失, 降低了有效硼的含量。中国江西南部、湖北东北部、湖南中部等长江中游地区, 分布有大面积花岗岩、片麻岩和第四纪红色黏土等含硼量或硼的可给性偏低的母质发育的土壤, 广东、福建等华南地区分布有大面积花岗岩母质发育的土壤, 所以有效硼含量较低; 长三角地区如浙江分布有大面积酸性火成岩和第四纪红色黏土母质发育的土壤, 西南地区分布有大面积的石灰岩, 所以有效硼含量也相对较低^[25-26]。

中国水稻土平均有效钼含量表现为华南最高, 东北次之, 长三角、长江中游、西南最低。研究表明, 土壤 pH 值是影响钼有效性的主要因素之一。土壤中有有效态钼包括水溶性钼 (含量极少) 和代换态钼, 在土壤矿物和土壤胶体表面所吸附的钼 (Mo), 以 MoO_4^{2-} 离子而存在, 与黏土矿物的结合不牢固, 能被代换。在土壤 pH 值 3~6 时, MoO_4^{2-} 吸附增多; pH 值 6 以上吸附迅速减弱, 在 pH 值 8 以上几乎不再吸附, 这可能是长江中游 (pH 值 5.67) 有效钼含量低的原因之一。然而, 本研究相关分析表明, 土壤有效钼含量与 pH 值呈显著负相关, 可见除土壤 pH 值外, 在某种情况下其他因素在起主导作用。邓小

玉等^[27]研究表明, 土壤中的钼可与有机物结合, 形成有机态钼, 当有机物分解矿化时释放出钼, 同时, 有机酸等物质还能促进含钼矿物分化而释放出钼^[28]。所以, 有机质含量高的土壤, 有效钼含量也高, 这可能是东北地区土壤有效钼含量高的主要原因。本研究发现, 尽管华南地区 pH 值 5.59 低于其他地区, 但土壤有效钼含量显著高于其他地区; 相关分析表明土壤有效钼含量与有效铁含量呈极显著正相关, 而华南地区有效铁含量显著高于其他地区。其他研究^[13]则通过研究安徽省不同土类土壤证实, 当土壤 pH 值 <7 时有效钼含量与有效铁之间存在显著正相关关系, 然而其作用机理还有待进一步研究。

3.2 有效态中、微量元素丰缺程度

参照本研究水稻土中、微量营养元素有效态含量评价标准, 中国水稻土交换性钙和交换性镁含量整体表现丰富, 小部分地区表现缺乏, 其中以华南地区缺乏比例最高, 分别为 9.8% 和 27.7%, 缺乏点位种植制度均为一年两熟、作物类型主要为水稻-其他作物、施肥类型以化肥为主, 且水稻土 pH 值以低于 5.0 的强酸性为主, 可见长期水旱轮作、单施化肥加速水稻土酸化, 可能是导致部分地区交换性钙、镁缺乏的主要原因^[29-30]。中国水稻土有效硫含量东北、长江中游和西南地区均以丰富水平为主, 而长三角和华南地区缺乏比例分别占 42.2% 和 41.8%。缺硫水稻土种植制度均为一年两熟、作物类型主要为水稻-其他作物、施肥类型以单施化肥为主, 可见长期大量施用含硫少或不含硫的化肥, 不施或少施有机肥, 可能是导致缺硫的主要原因之一; 同时水旱轮作条件下氧化还原交替, 加剧了硫的损失^[31]。

中国水稻土有效铁含量整体处于高和极高水平, 且以极高为主, 表明铁不缺乏。这主要是因为铁元素在地壳中含量十分丰富, 即使在酸性淋溶条件下, 也不致出现铁不足^[10]。与铁相似, 水稻土有效锰和有效铜质量分数变化区间分别为: 0.3~196.3 和 0.76~10.0 mg/kg, 除个别点位缺乏外, 基本处于丰富水平, 表明水稻土锰和铜供应充足。本研究水稻土 pH 值多在 6.5 以下, 锰和铜的有效性高, 且多数土壤处于高和极高水平, 应避免盲目施用锰肥引起的毒害问题, 即水田土壤有效锰质量分数超过 300 mg/kg, 易造成水稻生长毒害^[21]。本研究结果显示, 中国东北、长三角、长江中游、西南和华南地区缺锌水稻土的比例分别占 75.0%、52.3%、31.9%、53.2% 和 10.4%, 可见东北、长三角和西南地区水稻土缺锌最为严重, 其次是长江中游。与 20 世纪七八十年代相似, 中国水稻土有效锌供应水平总体依然呈现为南高北低的特征, 但缺锌水稻土在区域上有增加的趋势, 缺锌问题严重, 尤其是在高 pH 值的石灰性水稻土上。刘铮等^[22]研究表明, 中国酸性、中性和石灰性水稻土有效锌质量分数分别为 3.49、2.95 和 0.35 mg/kg, 变幅分别为 0~9.90、0.20~6.50、0~1.12 mg/kg; 本研究酸性水稻土包括长江中游和华南地区, pH 值分别为 5.67 和 5.59, 有效锌平均质量分数为 2.42 和 2.97 mg/kg, 中性水稻土包括东北、长三角和西南, pH 值分别为 6.45、6.35、和 6.61, 有效锌平均质量分数

为 1.39、1.60 和 1.66 mg/kg, 较 20 世纪 90 年代均有降低的趋势。

中国东北、长三角、长江中游、西南和华南地区缺硼水稻土的比例分别占 38.5%、65.2%、92.2%、88.6%和 78.3%, 可见, 中国水稻土均存在缺硼问题, 尤以长江中游、西南和华南地区最为严重, 长三角次之, 各种植制度下水稻土均存在缺硼问题, 作物类型主要为水稻-其他作物, 施肥类型以单施化肥为主, 长期不施或少施有机肥可能是导致缺硼的原因之一。20 世纪 80 年代, 中国酸性、中性和石灰性水稻土有效硼质量分数分别为 0.18、0.30 和 0.72 mg/kg, 变幅分别为 0~0.60、0.04~0.76、0.10~1.79 mg/kg^[32]; 本研究酸性水稻土包括长江中游和华南地区有效硼平均质量分数为 0.29 和 0.25 mg/kg, 中性水稻土包括东北、长三角和西南有效硼平均质量分数为 0.67、0.43 和 0.36 mg/kg, 较 20 世纪 80 年代均有略微增加的趋势。

各区域水稻土缺钼问题以长三角和长江中游最为严重, 分别占该区域监测点位的 60.4%和 82.6%, 东北、西南和华南地区分别占 28.6%、42.0%和 33.4%。刘铮等^[33]于 20 世纪 80 年代调查研究表明, 缺硼、钼土壤主要分布在南方红壤区和北方黄土区, 由此可见, 较过去 30 余年中国水稻土缺硼、钼问题在区域上有扩大趋势。总之, 中国水稻土交换性钙、镁和有效铁、锰、铜含量各区域均以丰富为主; 有效硫缺乏地区主要分布在长三角和华南; 各区域水稻土均存在缺锌、硼和钼的问题。

4 结 论

1) 中国水稻土有效态中微量元素区域分布特征: 交换性钙含量以西南最高, 东北、长三角、长江中游次之, 华南地区最低; 交换性镁含量表现为东北最高, 长三角次之, 西南、长江中游、华南最低; 有效硫含量表现为西南、东北、长江中游高于华南、长三角; 有效铁含量呈现为华南高于长三角、东北、西南、长江中游; 有效锰含量则呈长三角、华南高于长江中游, 且东北、西南与其他地区均无显著差异; 有效铜含量呈长江中游、华南、东北、长三角无显著差异, 且均显著高于西南; 有效锌含量表现为华南、长江中游高于西南、长三角、东北; 有效硼含量为东北最高, 其次为长三角, 再次为西南, 长江中游、华南最低; 有效钼含量为华南最高, 其次为东北, 西南、长三角、长江中游最低。

2) 中国水稻土有效态中、微量元素丰缺程度: 通过对中国典型稻区土壤有效态中微量元素含量调查分析表明, 各区域监测点水稻土交换性钙、镁和有效铁、锰、铜含量均以丰富为主。有效硫缺乏点位主要分布在长三角和华南地区。各区域监测点水稻土均具有缺锌、硼和钼的问题, 其中东北地区以缺锌比例最高, 其次是长三角、西南地区, 再次是长江中游, 以华南地区缺锌比例最低; 长江中游、西南地区缺硼比例最高, 其次是华南和长三角地区, 东北地区缺硼比例最低; 长江中游缺钼比例最高, 其次为长三角地区, 再次为西南、华南和东北地区。

[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: 137-144.
- [2] Thornton Iain. Geochemistry and the mineral nutrition of agricultural livestock and wildlife[J]. *Applied Geochemistry*, 2002, 17: 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 Zuwei, Xu Limiao, Zhang Wenju. Corresponding relationship between trace elements in soil and human activity intensity[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33(4): 303-305. (in Chinese with English abstract)
- [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 Fangjie, Wang Hongzhi, Wang Luyao, 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 Edition*, 2019, 53(1): 137-146. (in Chinese with English abstract)
- [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): 199-206.
Shi Shuqin, Chen Youqi, Li Zhengguo, et al. Spatial interpolation of soil properties based on soil types and trace micro-elements[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(12): 199-206. (in Chinese with English abstract)
- [6] 乔依娜, 刘洪斌. 农田土壤有效态微量元素空间预测方法及影响因子定量分析[J]. *土壤*, 2019, 51(2): 399-405.
Qiao Yina, Liu Hongbin. Spatial prediction of soil available microelement contents and quantitative analysis of influential factors in farmland[J]. *Soils*, 2019, 51(2), 399-405. (in Chinese with English abstract)
- [7] 金灵娜, 姜雯, 赵明, 等. 锌肥对旱稻苗期锌吸收分配和干物质积累的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2006(3): 40-43.
Jin Lingna, Jiang Wen, Zhao Ming, et al. Effects of Zn on plant growth and Zn distribution at seedling stage in aerobic rice[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2006(3): 40-43. (in Chinese with English abstract)
- [8] Kabata-Pendias Alina. Soil-plant transfer of trace elements: An environmental issue[J]. *Geoderma*, 2004, 122: 143-149.
- [9] 周卫军, 肖志鹏, 尹力初, 等. 湖南省几种主要母质发育的水稻土有效态微量元素含量及评价[J]. *中国土壤与肥料*, 2008(5): 76-79.
Zhou Weijun, Xiao Zhipeng, Yin Lichu. Content and evaluation of available microelements in paddy soils derived from several main type parent material in Hunan Province[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2008(5): 76-79. (in Chinese with English abstract)
- [10] 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 Changquan, Li Bing, Gong Bin, et al. Study on the bioavailability and impact factors of Fe, Mn, Cu, and Zn in the soil of Xichang city[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(2): 447-451. (in Chinese with English abstract)
- [11] 向万胜, 李卫红. 湘北丘岗地区红壤和水稻土微量元素的

- 有效性研究[J]. 土壤通报, 2001, 32(1): 44-46.
- Xiang Wansheng, Li Weihong. Micro-nutrient availability of red soil and paddy field in North Hunan province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2001, 32(1): 44-46. (in Chinese with English abstract)
- [12] 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.
- [13] 张自立, 罗孝荣. 安徽省土壤有效性微量元素分布研究 VI. 有效铜、铁的含量与分布[J]. 安徽农学院学报, 1990, 17(4): 275-279.
- Zhang Zili, Luo Xiaorong. Content and distribution of available copper and iron in soil of Anhui province[J]. Journal of Anhui Agricultural College, 1990, 17(4): 275-279. (in Chinese with English abstract)
- [14] 陈超, 杨丰, 刘洪来, 等. 贵州喀斯特地区草地开垦对土壤微量元素的影响与评价[J]. 农业工程学报, 2013, 29(7): 230-237.
- Chen Chao, Yang Feng, Liu Honglai, et al. Effects and evaluation of soil trace elements after grassland converted into cropland in Guizhou karst area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(7): 230-237. (in Chinese with English abstract)
- [15] 王德宣, 富德义. 吉林省西部地区土壤微量元素有效性评价[J]. 土壤, 2002, 34(2): 86-89, 93.
- [16] 刘洪来, 杨丰, 黄顶, 等. 农牧交错带草地开垦对土壤有效态微量元素的影响及评价[J]. 农业工程学报, 2012, 28(7): 155-160.
- Liu Honglai, Yang Feng, Huang Ding, et al. Effect and evaluation of soil trace elements after grassland converted into cropland in agro-pasture ecotone of northern China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(7): 155-160. (in Chinese with English abstract)
- [17] 韩天富, 马常宝, 黄晶, 等. 基于 Meta 分析中国水稻产量对施肥的响应特征[J]. 中国农业科学, 2019, 52(11): 1918-1929.
- Han Tianfu, Ma Changbao, Huang Jing, et al. Variation in rice yield response to fertilization in China: Meta-analysis[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(11): 1918-1929. (in Chinese with English abstract)
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 67-238, 449-452.
- [19] 曹榕彬. 耕地土壤中微量元素含量空间分布及施肥对策[J]. 土壤通报, 2018, 49(3): 646-652.
- Cao Rongbin. Spatial distribution and fertilization of medium and trace elements in cultivated land[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49(3): 646-652. (in Chinese with English abstract)
- [20] 秦建成, 罗云云, 魏朝富, 等. 基于 ArcGIS 的彭水县烟区土壤有效态微量元素丰缺评价[J]. 土壤学报, 2006, 43(6): 892-897.
- Qin Jiancheng, Luo Yunyun, Wei Chaofu, et al. ArcGIS-based abundance evaluation of available microelements in tobacco soil in Pengshui county[J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(6): 892-897. (in Chinese with English abstract)
- [21] 胡霭堂. 植物营养学(下册)(第二版)[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003. 102-150.
- [22] 刘铮. 我国土壤中锌含量的分布规律[J]. 中国农业科学, 1994, 27(1): 30-37.
- Liu Zheng. Regularities of content and distribution of zinc in soils of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1994, 27(1): 30-37. (in Chinese with English abstract)
- [23] 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 Ziteng, Geng Yuanbo, Liang Tao. 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. (in Chinese with English abstract)
- [24] Pardo M T, Guadalix M E. Zinc sorption-desorption by two adepts: Effect of pH and support medium[J]. European Journal of Soil Science, 1996, 47(2): 257-263.
- [25] 严明书, 黄剑, 何忠庠, 等. 地质背景对土壤微量元素的影响以渝北地区为例[J]. 物探与化探, 2018, 42(1): 199-205, 219.
- Yan Mingshu, Huang Jian, He Zhongxiang, et al. The influence of geological background on trace elements of soil: A case study of Yubei area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(1): 199-205, 219. (in Chinese with English abstract)
- [26] 刘铮, 朱其清, 唐丽华. 我国缺硼土壤的类型和分布[J]. 土壤学报, 1980, 17(3): 228-239.
- Liu Zheng, Zhu Qiqing, Tang Lihua. Boron-deficient soils and their distribution in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 1980, 17(3): 228-239. (in Chinese with English abstract)
- [27] 邓小玉, 谢振翅. 湖北省土壤钼的含量分布及应用效果[J]. 土壤与肥料, 1994(5): 18-22.
- [28] 穆桂珍, 罗杰, 蔡立梅, 等. 广东揭西县土壤微量元素与有机质和 pH 的关系分析[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(10): 208-215.
- Mu Guizhen, Luo Jie, Cai Limei, et al. Relationship between soil trace elements with organic matter and pH in Jiexi County, Guangdong province[J]. Journal of China Agricultural Resources and Regional Planning, 2019, 40(10): 208-215. (in Chinese with English abstract)
- [29] Guo Jingheng, Liu Xuejun, Zhang Yuhua, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [30] Li Qiquan, Li Aiwen, Yu Xuelian, et al. Soil acidification of the soil profile across Chengdu Plain of China from the 1980s to 2010s[J]. Science of the Total Environment, 2020. 698, 134320.
- [31] 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 Huimin, Zhu Qing, Fu Congying, 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 Fertilizer, 2020, 26(1): 172-184. (in Chinese with English abstract)
- [32] 刘铮, 朱其清, 唐丽华. 土壤中硼的含量和分布的规律性[J]. 土壤学报, 1989, 26(4): 353-361.
- Liu Zheng, Zhu Qiqing, Tang Lihua. Regularities of content and distribution of boron in soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 1989, 26(4): 353-361. (in Chinese with English abstract)
- [33] 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.
- Liu Zheng, Zhu Qiqing, Tang Lihua, et al. Geographical distribution of trace elements-deficient soils in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 1982, 19(3): 209-223. (in Chinese with English abstract)

Distribution characteristics of effective medium and micronutrient element contents in paddy soils of China

Zhang Lu^{1,2}, Cai Zejiang^{1,2}, Wang Huiying³, Yu Zikun³, Han Tianfu¹, Liu Kailou^{1,4}, Liu Lisheng^{1,2}, Huang Jing^{1,2}, Wen Shilin^{1,2}, Zhang Huimin^{1,2*}

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Beijing 100081, China; 2. Hengyang Red Soil Experimental Station, Chinese Academy of Agricultural Sciences /National Observation and Research Station of Farmland Ecosystem in Qiyang, Qiyang 426182, China; 3. Center of Cultivated Land Quality Monitoring and Protection, Ministry of Agricultural and Rural Affairs, Beijing 100125, China; 4. Jiangxi Institute of Red Soil/National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Nanchang 330046, China)

Abstract: The objective of this study was to investigate the spatial variability and the degree of abundance and deficiency of medium and micronutrient element contents in typical paddy soils of China, and to develop the best fertilization management for improving rice yields. Based on 289 monitoring points of paddy soils distributed across the northeast, Yangtze River delta, the middle of the Yangtze River, the southwest and south of China, soil samples collected in 2016 were determined for the contents of available medium and micronutrient elements (calcium, magnesium, sulfur, iron, manganese, copper, zinc, boron and molybdenum) in paddy soils. The spatial variability of these elements across the five regions was assessed. Combined with the critical values for limiting rice growth due to deficiency of available medium and micronutrient elements, the abundance and deficiency degree of available medium and micronutrient elements in the paddy soils were evaluated. The results showed that the contents of exchangeable magnesium and available boron in the northeast of China were much higher than those in the other regions, while the contents of available zinc in paddy soils were the lowest among the five regions. The highest average content of available manganese and the lowest average content of available sulfur in the paddy soils were both found in Yangtze River delta. The highest average content of available copper but the lowest average content of available iron, manganese and molybdenum among paddy soils was observed in middle of the Yangtze River. As compared with the other areas, the exchangeable calcium content of the paddy soils in the southwest of China was significantly higher ($P<0.05$), while the available copper content was significantly lower ($P<0.05$). Compared with the other areas, the contents of available iron and molybdenum in the south of China were significantly higher ($P<0.05$), while the contents of exchangeable calcium and magnesium were significantly lower ($P<0.05$). Critical values for evaluation of these elements were summarized based on practices and previous studies. The critical values for exchangeable calcium, exchangeable magnesium and available sulfur were 400, 50 and 16 mg/kg, respectively. The critical values for available iron, manganese, copper, zinc, boron and molybdenum were 4.5, 10, 2, 1.5, 0.5 and 0.15 mg/kg, respectively. The soils would be lack of the corresponding element if the contents of these elements were below the critical values and thereby the rice growth may be limited. Based on the critical values, the exchangeable calcium and magnesium contents in paddy soils of the five regions were rich in China. The contents of available sulfur in paddy soils were abundance for rice growth in the northeast, the middle of the Yangtze River, and the southwest of China, while 42.2% and 41.8% of monitoring points in Yangtze River delta and south of China were lack of available sulfur. The contents of available iron, manganese and copper were abundance in all the paddy soils. The proportions of monitoring points with lower contents of available zinc than its critical value were 75.0%, 52.3%, 31.9%, 53.2% and 10.4% in the northeast, Yangtze river delta, the middle of the Yangtze River, the southwest, and south of China, respectively. The proportions of monitoring points with lower contents of available boron than its critical value were 38.5%, 65.2%, 92.2%, 88.6% and 78.3% in the northeast, Yangtze river delta, the middle of the Yangtze River, the southwest, and south of China, respectively. The proportions of monitoring points with lower contents of available molybdenum than its critical value were 28.6%, 60.4%, 82.6%, 42.0% and 33.4% in the northeast, Yangtze river delta, the middle of the Yangtze River, the southwest, and south of China, respectively. It indicated that the contents of calcium, magnesium, iron, manganese and copper in the paddy soils of typical areas in China were abundance for rice growth. Sulfur fertilizer was needed in some areas of Yangtze River delta and southwest of China. The available zinc, boron and molybdenum in most of paddy soils were deficiency, and additional micronutrient element fertilizers were needed for rice growth, especially for zinc in the northeast, zinc, boron and molybdenum in Yangtze River delta, boron and molybdenum in middle of the Yangtze River, boron in southwest, and boron in south of China. And the medium and micronutrient element fertilizers should be included as part of fertilization management in practice for improving rice yields.

Keywords: paddy soils; medium and micronutrient elements; regional distribution; abundance and deficiency; China