



我国主要粮食产区土壤有效态钙镁硫的变化特征 及其对作物产量的影响

王 妍¹, 邬 磊^{1*}, 李建兵², 王 军¹, 曲潇琳², 崔 萌², 郭玉明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)

摘 要: 中量元素钙、镁、硫对农业生产的作用日益突出, 研究土壤有效态钙镁硫的变化特征及其对作物产量的影响, 可为全国和区域尺度耕地土壤中量元素管理和合理施肥提供理论依据。基于覆盖全国 697 个耕地质量监测点的监测数据, 对比分析 2016 和 2021 年全国及六大粮食产区 (东北区、华北区、西北区、西南区、长江流域和华南区) 的土壤有效态钙镁硫含量的变化特征及其对主要粮食作物产量的影响。与 2016 年相比, 2021 年 697 个监测点的土壤交换性钙和交换性镁平均含量变化不显著, 有效硫平均含量显著下降了 27.3%, 全国交换性钙、交换性镁和有效硫主要与土壤 pH 和有机质 (OM) 相关。六大粮食产区土壤有效态钙镁硫含量的年际变化特征有所不同。与 2016 年相比, 2021 年东北区交换性钙和镁含量分别显著增加了 25.5% 和 52.4%, 主要与 pH 相关; 有效硫含量显著下降了 47.8%, 主要与速效钾相关。华北区交换性钙含量显著下降了 11.8%, 主要与 pH 相关。西北区交换性钙、镁和有效硫含量分别显著下降了 64.0%、54.0% 和 30.4%, 钙主要与总钾相关, 镁主要与全磷相关, 硫与土壤其他理化性质不存在显著相关。西南区有效硫含量显著下降了 30.0%, 主要与 pH 和 OM 相关。长江流域交换性镁和有效硫含量分别显著下降了 52.0% 和 15.7%, 主要与 pH 和 OM 相关。华南区 3 种有效态中量元素含量变化不显著, 三者主要与 pH 和 OM 相关。在全国尺度下, 水稻产量与土壤交换性钙和镁含量呈显著正相关, 玉米产量与交换性镁和有效硫含量呈显著正相关, 小麦产量则与 3 种中量元素不存在显著相关性; 当 $\text{pH} \leq 7.0$ 时, 小麦产量与交换性钙和镁含量呈显著正相关, 当 $\text{pH} > 7.0$ 时则不存在显著相关性; 无论土壤呈酸性还是碱性, 小麦产量均与有效硫含量不存在显著相关性。综上, 2016—2021 年的 5 年间, 我国耕地土壤交换性钙、镁含量变化不显著, 有效硫含量显著降低, 这些中量元素主要与土壤 pH 和 OM 相关。六大粮食产区中量元素含量变化特征和影响因素及其对主要粮食作物产量的影响存在较大差异, 针对性施用中量元素肥料有助于提升区域粮食产量。

关键词: 耕地土壤; 中量元素; 土壤 pH; 水稻; 玉米; 小麦

钙、镁和硫是作物生长发育过程中不可缺少的中量营养元素, 其在作物蛋白质合成、酶活化和光合作用等新陈代谢过程中发挥着重要作用^[1-3]。耕地土壤中量元素过多或缺乏均会对作物体内细胞代谢产生不良影响, 阻碍作物正常生长发育^[4-5]。水稻、玉米和小麦作为我国三大粮食作物, 其产量和品质在不同程度上受到土壤中量元素的影响^[6-8]。土壤中量元素的含量和形态受到成土母质、土壤酸碱度和有机质含量等因素的影响, 这些性质的变化

在一定程度上可以反映土壤中有效态中量元素的供应情况^[9]。

近年来, 随着人们对粮食作物产量需求量的提高, 氮、磷、钾等营养元素肥料的大量投入, 导致耕地土壤养分比例失调, 而钙、镁、硫中量元素对农作物产量的影响效果日益突出。适量施用中量元素肥料可显著增加作物生长阶段的株高、茎粗和产量, 提高作物体内糖、淀粉和蛋白质含量, 改善作物品质^[7-8, 10]。耕地土壤中的中量元素含量变化会受到常年耕作和水肥管理的影响。史吉平等^[11]分析国内外长期施肥试验地土壤中量元素含量变化发现, 长期施用氮肥和磷肥降低了土壤中交换性钙、镁的含量, 施用有机肥也减少了表层土壤中镁的含量。土壤中量元素含量还受气候条件、海拔高度、土壤质地等诸多因素影响。丁玉川等^[12]研究

收稿日期: 2023-03-30; 录用日期: 2023-06-26

基金项目: 科技部基础资源调查专项 (2021FY100501); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (Y2023LM03)。

作者简介: 王妍 (1998-), 硕士, 主要从事养分管理工作。E-mail: wangyqx@163.com。

通讯作者: 邬磊, E-mail: wulei01@caas.cn。

发现, 山西省农田土壤中的交换性钙镁含量与土壤酸碱度、碱解氮含量显著正相关, 与土壤全磷、有效磷和速效钾含量呈先增加后降低的曲线关系。刘敏^[13]对湖南省永顺县烟区 146 个土壤样品分析发现, 随着海拔高度的增加, 交换性钙逐渐降低, 而交换性镁呈增加趋势。不同土壤类型的交换性钙、镁含量存在较大差异, 红壤的交换性钙平均含量最高, 红灰土最低, 黄壤的交换性镁平均含量最高, 红灰土最低。海拔高度和土壤类型均对有效硫的影响效果不显著。但有效硫含量随有机质的增加而降低^[13]。蒙雯等^[14]研究发现, 安徽省砀山县梨园土壤中的中量元素处于中等或缺乏水平, 应重视中量元素肥料的应用。张璐等^[15]基于全国 282 个水稻土监测点研究发现, 全国水稻土交换性钙、镁整体丰富, 长三角及华南流域缺硫较为严重。靳志丽等^[16]对湖南省永州市 689 个烟区土壤样品统计分析发现, 土壤交换性钙和有效硫含量丰富, 交换性镁严重缺乏, 应注重镁肥的投入。目前, 对土壤中量元素的研究多集中在丰缺状况和分布特征上, 关于全国尺度下耕地土壤中量元素含量变化特征及其对主要粮食作物(水稻、玉米和小麦)产量的影响缺乏系统研究, 尤其是不同粮食生产区中量元素差异及关键影响因素尚不清楚。因此, 有必要开展粮食产区耕地土壤中量元素含量变化特征、影响因素及其对主要粮食作物产量的研究, 为我国粮食产区合理施肥和作物产量提升提供理论依据。

本研究依托农业农村部(原农业部)1988 年开始陆续建立的耕地质量长期定位试验(697 个监测点, 设置未施肥和当地农户惯用肥料处理, 分布于粮食主产区), 监测耕地土壤中量元素、主要土壤理化性质和作物产量。与短期试验相比, 耕地质量长期定位监测可更好地反映田间管理措施对耕地土壤中量元素的长期影响。本研究基于该长期定位监测试验数据资料, 阐明主要粮食产区耕地土壤中量元素含量变化和影响因素及其对水稻、玉米、小麦三大粮食作物产量的影响, 为全国和区域合理施用中量元素肥料和田间管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究以耕地土壤有效态中量元素为研究对象, 所用数据均来源于“农业农村部耕地质量长期

定位监测”工作监测的 2016 和 2021 年田间试验数据(697 个监测点)。这些监测点分布在我国 6 个主要农业种植区域, 其中, 东北区(黑龙江省、吉林省、辽宁省、内蒙古自治区)79 个监测点、华北区(河北省、天津市、北京市、河南省、山西省、安徽省、山东省)146 个监测点、西北区(甘肃省、宁夏回族自治区、青海省、陕西省、新疆维吾尔自治区)99 个监测点、西南区(贵州省、湖北省、湖南省、四川省、重庆市)97 个监测点、长江流域(安徽省、福建省、广东省、江苏省、江西省、浙江省)227 个监测点和华南区(广西壮族自治区、广东省、云南省、海南省)49 个监测点。这些监测点包括黑土、棕壤、褐土、潮土、草甸土、水稻土等 20 多种土壤类型, 主要种植水稻、玉米和小麦三大粮食作物, 监测点的施肥和田间管理措施均与当地常规种植管理模式一致。

1.2 数据采集与测定

各监测站点在秋季作物收获后(10 月底至 11 月初)采集耕层(0 ~ 20 cm)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 样品装进样品袋, 自然风干后过 2 mm 筛保存。使用乙酸铵浸提, 原子吸收分光光度法测定土壤交换性钙、镁; 采用磷酸盐浸提, 硫酸钡比浊法测定有效硫; 采用 pH 计(pH6220)测定土壤 pH(水土比为 1 : 2.5); 使用重铬酸钾滴定法测定土壤有机质(SOM); 使用凯氏定氮法测定土壤全氮(TN); 使用钼蓝比色法测定土壤全磷(TP); 使用火焰光度法测定土壤全钾(TK); 使用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定土壤有效磷(AP); 使用醋酸铵浸提-火焰光度法测定土壤速效钾(AK)^[17]。

1.3 土壤有效态中量元素含量分级

土壤有效态中量元素分级标准目前尚未统一, 本文根据农业农村部的中量元素丰缺分级标准对土壤有效态中量营养元素分级(表 1)。

表 1 耕地土壤有效态中量元素评价等级

级别	质量分数 (mg/kg)		
	交换性钙	交换性镁	有效硫
低	≤ 300	≤ 50	≤ 10
较低	300 ~ 500	50 ~ 100	10 ~ 20
中等	500 ~ 800	100 ~ 200	20 ~ 30
较高	800 ~ 1500	200 ~ 300	30 ~ 40
高	> 1500	> 300	> 40

1.4 数据处理

使用 Excel 2019 整理试验数据, 采用 SPSS 20.0 进行单因素方差分析和逐步回归分析, 用 Duncan 在 0.05 水平下进行差异显著性检验, 使用 Spearman 相关系数检验分析作物产量和中量元素含量间相关性, 采用线性回归方程进行拟合; 运用 R 语言程序包 “corplot” 进行中量元素含量与土壤基本理化性质的相关分析; 用 Origin 2021 制作数据图表。

2 结果与分析

2.1 我国主要粮食产区土壤中量元素的变化特征

全国及六大粮食产区土壤交换性钙、镁和有效硫含量的年际变化如图 1 和表 2 所示。2016 年全国耕地土壤交换性钙平均含量为 2294.7 mg/kg, 与 2021 年 (2153.2 mg/kg) 相比无显著性差异。六大粮食产区的土壤交换性钙含量差异显著, 且随时间呈现不同的变化规律。2016 年, 西北区土

交换性钙含量 (平均值为 4978.4 mg/kg) 显著高于其余地区, 其次为东北区 (2257.3 mg/kg)、华北区 (2597.3 mg/kg) 和西南区 (2695.1 mg/kg), 华南区最低 (1114.6 mg/kg)。2021 年, 东北区交换性钙含量最高 (2826.7 mg/kg), 其次为西南区 (2699.5 mg/kg), 华南区最低 (964.2 mg/kg)。与 2016 年相比, 2021 年东北区交换性钙含量显著增加了 25.2%, 华北区和西北区分别显著下降了 11.8% 和 64.0%, 其余产区变化不明显 (图 1, 表 2)。依据农业农村部的中量元素评价标准 (表 1), 2016 和 2021 年全国、东北区、华北区、西南区、长江流域土壤交换性钙含量均以高等级为主, 占比 52.1% ~ 88.9%; 西北区 2016 年交换性钙以高等级为主, 占比 88.9%, 2021 年以较高等级为主, 占比 46.7%; 华南区 2016 和 2021 年均以较高等级为主, 占比均超过 31.0%。六大粮食产区土壤交换性钙含量虽有不同程度的变化, 但各区域都比较丰富 (表 2)。

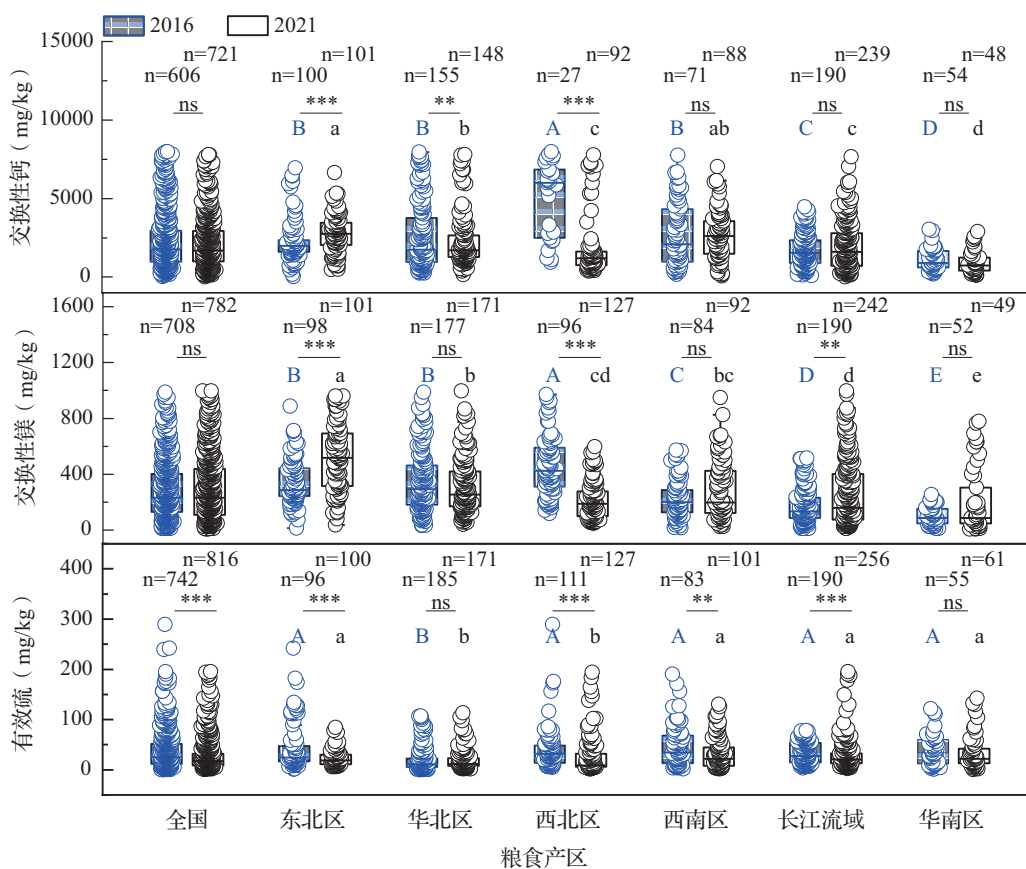


图 1 2016 和 2021 年全国及六大粮食产区土壤交换性钙、镁和有效硫含量

注: 不同大写字母表示 2016 年粮食产区间差异显著 ($P < 0.05$); 不同小写字母表示 2021 年粮食产区间差异显著 ($P < 0.05$), ns 表示无明显差异。

2016 年全国耕地土壤交换性镁平均含量为 283.3 mg/kg，与 2021 年（293.4 mg/kg）相比无显著性差异。在六大粮食产区中，2016 年西北区土壤交换性镁平均含量（454.1 mg/kg）显著高于其他区域，其次为东北区（339.3 mg/kg）和华北区（345.8 mg/kg），华南区（101.1 mg/kg）最低。2021 年东北区土壤交换性镁平均含量最高（517.1 mg/kg），其次为华北区（309.6 mg/kg），华南区（206.6 mg/kg）最低。与 2016 年相比，2021 年东北区和长江流域土壤交换性镁平均含量分别显著增高了 34.4% 和 52.0%，西北区显著降低了 54.0%，其余 3 个区域变化不显著（图 1，表 2）。2016 和 2021 年全国及大部分粮食产区土壤交换性镁含量等级以高等级为主，占比均超过 33.0%；2016 年西南区和长江流域以及 2021 年西北区的土壤交换性镁以中等级为主，占比超过 30.0%；华南区 2016 和 2021 年的土壤交换性镁均以低等级为主，占比超过 30.0%（表 2）。

表 2 2016 和 2021 年全国及六大粮食产区土壤交换性钙、镁和有效硫含量及等级占比

元素	区域	年份	平均值 (mg/kg)	变异系数 (%)	等级占比 (%)				
					低	较低	中等	较高	高
交换性钙	全国	2016	2297.4	79.4	2.6	5.0	9.9	23.4	59.1
		2021	2153.2	72.1	2.8	4.7	10.5	25.2	56.7
	东北区	2016	2257.3	58.6	2.0	1.0	3.0	12.0	82.0
		2021	2826.7	41.8	0.0	0.0	5.0	7.9	87.1
	华北区	2016	2597.3	82.9	1.9	5.2	9.7	27.7	55.5
		2021	2290.3	71.1	0.7	0.7	2.0	33.8	62.8
	西北区	2016	4978.4	48.2	0.0	0.0	0.0	11.1	88.9
		2021	1792.3	103.0	0.0	5.4	19.6	46.7	28.3
	西南区	2016	2695.1	74.8	2.8	7.0	9.9	19.7	60.6
		2021	2699.5	55.3	4.5	1.1	3.4	15.9	75.0
	长江流域	2016	1724.6	60.4	2.6	5.8	13.2	26.3	52.1
		2021	1977.3	74.3	3.3	8.8	15.1	20.5	52.3
	华南区	2016	1114.6	59.5	7.4	9.3	8.5	37.0	27.8
		2021	964.2	73.3	14.6	12.5	22.9	31.3	18.8
交换性镁	全国	2016	283.3	70.9	6.4	11.7	23.7	21.9	36.3
		2021	293.4	76.3	7.2	15.3	23.1	14.7	39.6
	东北区	2016	339.3	45.6	1.0	1.0	11.2	42.9	43.9
		2021	517.1	46.4	1.0	1.0	4.0	15.8	78.2
	华北区	2016	345.8	61.9	1.7	6.8	22.6	19.8	49.2
		2021	309.6	60.7	0.6	5.8	29.8	21.6	42.1
	西北区	2016	454.1	44.6	0.0	0.0	11.5	12.5	76.0
		2021	209.0	62.0	0.8	23.6	31.5	23.6	20.5
	西南区	2016	220.5	60.4	6.0	10.7	33.3	27.4	22.6
		2021	284.7	72.0	5.4	15.2	30.4	6.5	42.4
	长江流域	2016	166.9	70.2	10.5	24.7	33.2	18.9	12.6
		2021	253.7	88.0	13.6	21.5	20.7	10.7	33.5
	华南区	2016	101.1	65.7	30.8	26.9	28.8	13.5	0.0
		2021	206.6	114.0	30.6	26.5	16.3	0.0	26.5
有效硫	全国	2016	36.6	98.5	20.8	20.9	14.0	12.1	32.2
		2021	26.6	108.0	29.9	25.0	16.8	9.9	18.4
	东北区	2016	43.3	104.0	7.3	27.1	26.0	11.5	28.1
		2021	22.6	69.7	18.0	38.0	20.0	12.0	12.0
	华北区	2016	20.1	118.0	45.4	24.3	9.7	7.6	13.0
		2021	19.7	99.7	39.8	29.2	11.1	6.4	13.5
	西北区	2016	39.2	98.9	12.6	18.9	13.5	23.4	31.5
		2021	27.3	139.0	52.8	11.0	8.7	7.1	20.5
	西南区	2016	45.6	87.6	24.1	6.0	13.3	9.6	47.0
		2021	31.9	98.2	34.7	12.9	14.9	8.9	28.7
	长江流域	2016	33.8	62.2	10.5	25.8	15.3	13.2	35.3
		2021	28.5	101.0	16.8	30.1	22.7	13.7	16.8
	华南区	2016	39.0	75.3	16.4	16.4	10.9	10.9	45.5
		2021	34.3	98.7	21.3	19.7	23.0	8.2	27.9

2021 年全国有效硫平均含量为 26.6 mg/kg, 与 2016 年 (36.6 mg/kg) 相比显著下降了 27.3%。六大粮食产区中, 2016 年华北区有效硫平均含量 (20.1 mg/kg) 显著低于其他 5 个区域, 这 5 个区域间不存在显著差异。2021 年华北区 (19.7 mg/kg) 和西北区 (27.3 mg/kg) 有效硫平均含量显著低于其余 4 个产区, 且 4 个产区间不存在显著差异。与 2016 年相比, 除华北区和华南区含量变化不显著外, 其余 4 个粮食产区 2021 年有效硫含量显著下降了 15.7% ~ 47.8% (图 1, 表 2)。2016 年全国、东北区、西北区、西南区、长江流域和华南区有效硫均以高等级为主, 占比 28.1% ~ 47.0%, 华北区以低等级为主, 占比 45.4%。2021 年全国、东北区、华北区、西北区、西南区和长江流域有效硫以较低和低等级为主, 占比均超过 29.0%, 华南区仍以高等级为主, 占比为 27.9% (表 2)。全国及大部分粮食主产区土壤有效硫较为缺乏。

2.2 我国主要粮食产区土壤中量元素的影响因素分析

全国及六大粮食产区土壤中量元素含量的影响因素分析如图 2 所示。在全国尺度上, 土壤交换性钙含量与 pH、TP、TK 和 AK 呈显著正相关, 与 AP 呈显著负相关。不同粮食产区土壤交换性钙的影响因素差异较大。东北区交换性钙含量与 pH 和 AK 呈显著正相关, 与 TK 和 AP 呈显著负相关; 华北区交换性钙与 pH、TP、TK 和 AK 呈显著正相关; 西北区交换性钙与 TK 呈显著正相关, 与 AP 呈显著负相关; 西南区交换性钙与 pH 和 TK 呈显著正相关, 与 AP 呈显著负相关; 长江流域交换性钙与 pH、TP 和 AK 呈显著正相关, 与 AP 呈显著

负相关; 华南区影响交换性钙含量的主要因素是 pH、OM 和 TN, 均呈显著正相关。在这些影响因素中, pH 对土壤交换性钙含量的影响最大, 土壤交换性钙含量随 pH 的升高而增加。

全国耕地土壤交换性镁含量与 pH 和 AK 呈显著正相关, 与 OM 和 TN 呈显著负相关。在六大粮食产区土壤交换性镁含量的主要影响因素差异较大。六大粮食产区交换性镁含量均与 AK 呈显著正相关, 东北区交换性镁还与 TP 呈显著负相关; 华北区与 OM 和 TN 呈显著正相关; 西北区与 TP 呈显著负相关; 西南区与 TP 呈显著正相关; 长江流域与 pH 呈显著正相关; 华南区土壤交换性镁含量随 pH 和 TP 的增加而增加 (图 2)。其中, pH 在长江流域和华南区对土壤交换性镁含量影响较大, 在北方地区影响不显著。

全国耕地土壤有效硫含量与 pH 和 AP 呈显著负相关, 与 OM、TN 和 TP 呈显著正相关。六大粮食产区土壤有效硫含量的主要影响因素存在差异。东北区有效硫含量与 AK 呈显著负相关; 华北区有效硫与 pH、TP、TK 和 AK 呈显著正相关; 西北区有效硫含量与测定指标无显著相关关系; 西南区有效硫与 pH 呈显著负相关, 与 OM 呈显著正相关; 长江流域有效硫与 pH 呈显著负相关, 与 OM 和 TN 呈显著正相关; 华南区有效硫随 TP 和 AK 的增加而增加, 随 pH 和 AP 的增加而降低。

2.3 土壤中量元素与主要粮食作物产量的关系

土壤中量元素对全国三大粮食作物产量的影响分析如图 3 所示。全国尺度下, 水稻产量与土壤交换性钙、镁呈显著正相关, 与有效硫不存在显著相关性; 玉米产量与交换性钙不存在显著相关性, 与交换性镁

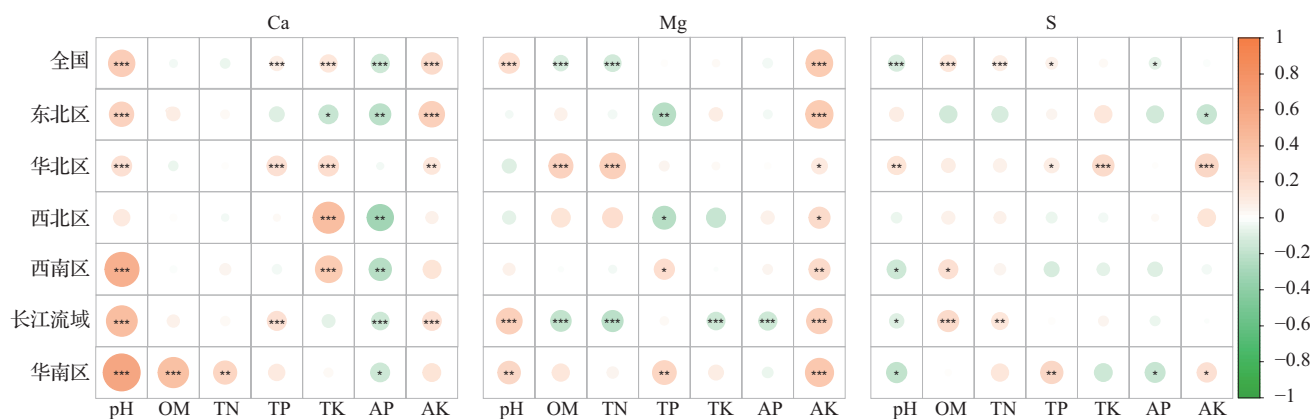


图 2 全国及六大粮食产区土壤中量元素与理化性质的相关分析

注: * 号表示不同区域尺度上土壤理化性质对粮食产量的影响, * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$; *** 表示 $P < 0.001$ 。

和有效硫呈显著正相关；小麦产量则与 3 种中量元素均不存在显著相关性。以 pH=7.0 为界限对不同酸碱度土壤下小麦产量与土壤中量元素含量进行相关分析，其结果如图 4 所示。当 $\text{pH} \leq 7.0$ 时，小麦产量

与土壤交换性钙、镁含量呈显著正相关；当 $\text{pH} > 7.0$ 时，小麦产量与土壤交换性钙、镁不存在显著相关性 ($P=0.051$)；无论土壤为酸性环境还是碱性环境，小麦产量均与土壤有效硫不存在显著相关性。

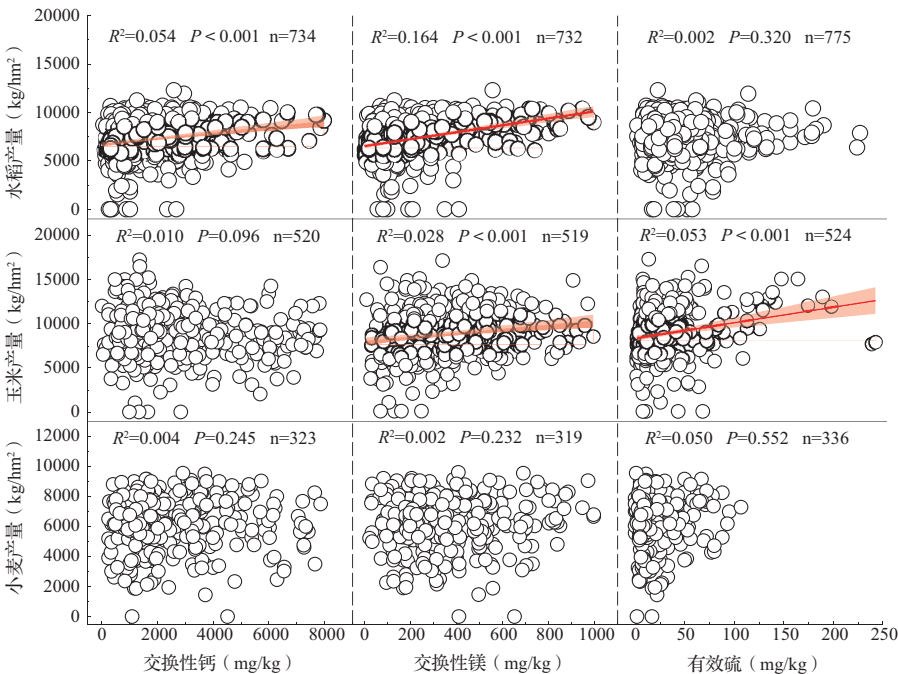


图 3 全国尺度下三大粮食作物产量与土壤中量元素的相关分析

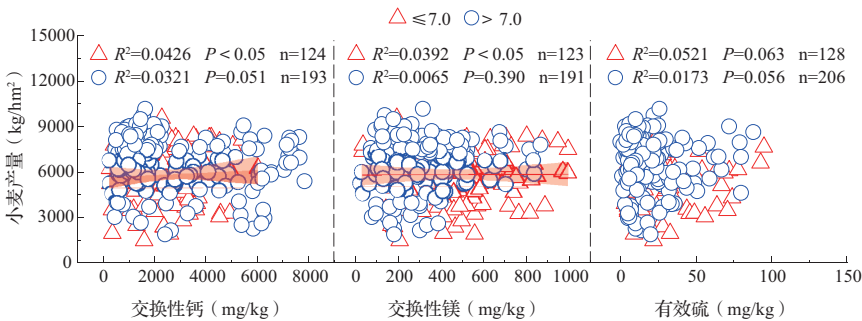


图 4 全国尺度内不同 pH 范围下小麦产量与土壤中量元素含量的相关分析

3 讨论

3.1 我国主要粮食产区土壤中量元素含量变化特征

本研究结果表明，2016—2021 年，全国耕地土壤交换性钙、镁平均含量变化不显著，含量等级占比变化不大，均以高等级为主，全国土壤交换性钙、镁含量总体上较为丰富，华南和长江流域等部分酸性土壤交换性钙、镁较为缺乏。与 2016 年相比，2021 年全国耕地土壤有效硫平均含量显著下降了 27.3%，含量等级占比变化较大，低等级增加了

9.9%，高等级减少了 13.8%。这主要是由于近几年全球 SO_2 排放减少，以沉降形式输入土壤中的硫减少^[18]，以及低硫或无硫肥料的使用和高产品种植物种植等因素引起了土壤硫耗竭^[19]。全国尺度下，交换性钙、镁和有效硫含量受土壤 pH、有机质和其他养分元素的影响。随土壤 pH 的增加，土壤交换性钙、镁含量增加^[12, 20]，这是因为酸性环境中存在大量的 H^+ ，容易将土壤胶体上吸附的钙、镁交换出来，导致钙、镁流失，而在碱性环境中交换性钙、镁可以更好地被土壤胶体吸附^[21]。氮、磷元素



对有效态中量元素的影响存在差异可能是土壤内部不同元素间存在较为复杂的协同或者拮抗作用造成的^[22-23]。在农业生产中,需考虑 pH 对中量元素的影响,调控土壤有机质和其他养分含量使中量元素含量水平位于适宜状态,以保障作物健康生长。

与 2016 年相比,2021 年六大粮食产区土壤中量元素含量存在较大差异,东北区交换性钙和镁平均含量分别显著增加了 25.5% 和 52.4%,有效硫含量显著减少了 47.8%,高等级占比下降,低等级增加;华北区交换性钙显著下降,土壤钙资源总体丰富;西北区 3 种中量元素含量均显著下降,表现为中量元素缺乏状态;西南区有效硫含量显著下降了 30.0%,低等级含量占比增加,土壤缺乏硫;长江流域交换性镁和有效硫含量分别显著下降了 52.0% 和 15.7%,低等级含量占比增加,大部分土壤均表现为缺乏状态;华南区 3 种中量元素含量变化不显著,土壤中量元素资源不丰富。这主要是不同区域的气候条件和成土母质对土壤中量元素含量造成的影响^[15, 24],部分地区土壤较为肥沃,有机质含量高,可增强土壤对钙、镁的吸附作用,从而增加其土壤交换性钙、镁含量^[25];而部分地区由于长期大量施用不含中量元素的化肥,以及水旱轮作等耕作措施,引起了土壤中量元素的耗竭和流失^[26-27]。由此可见,施用中量元素肥料时需针对不同区域土壤资源的丰富程度有针对性地进行补充,保证中量元素资源适量,不影响作物正常生长。本研究发现,不同粮食产区土壤中量元素与土壤理化性质存在较大差异。如 pH 与大部分区域的交换性钙和有效硫含量相关,土壤有机质与华南区交换性钙相关,但与交换性镁和有效硫不存在相关性。谭军等^[20]研究发现,云南省文山市土壤中量元素与土壤 pH 呈显著正相关,而与有机质不相关。由此可见,在不同区域施用中量元素肥料时,要综合考虑中量元素的主要影响因素,以保证中量元素在土壤中能够较好保存,不易流失,提高中量元素肥料的利用效率,减少环境损失。

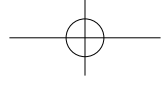
3.2 我国耕地土壤中量元素与主要粮食作物产量的关系

与大量元素氮、磷、钾相比,土壤中量元素钙、镁、硫对作物产量影响的重视程度较低。中量元素在作物产量和品质方面起着不可替代的作用,钙能降低稻米的直链淀粉含量和垩白度,增加其胶稠度,增强小麦和玉米的光合作用,增加穗粒数,

进而提高作物的外观及内在品质^[6, 28-29];镁能加强光合作用,提高作物的蛋白质含量和穗粒数并调控粮食的食味品质^[30-31];硫能加强作物光合作用,促进养分吸收,提高蛋白质含量和穗粒数,降低直链淀粉含量,从而提升作物产量和品质^[32-33]。本项研究结果表明,全国尺度下,增加土壤交换性钙、镁含量显著提升水稻产量,交换性镁和有效硫显著影响玉米产量,小麦产量则不受中量元素含量的影响。但在酸性环境中,小麦产量随土壤交换性钙、镁含量的增加而提升,而在碱性环境中小麦产量不受土壤交换性钙、镁含量的影响。这是因为土壤 pH 对交换性钙、镁含量有显著影响,土壤中钙、镁容易被酸性环境中的 H^+ 从胶体上交换出来,导致大量流失,成为限制小麦产量的重要因素。而在碱性环境中,土壤负电荷较多,土壤胶体吸附钙、镁阳离子的结合位点多,利于其在土壤中的保存,提高土壤交换性钙、镁含量,可满足小麦生长需求,因此,二者不再是小麦产量的关键限制因素^[21]。水稻产量随土壤交换性钙、镁含量的增加而增加,这是因为我国南方是水稻主产区,位于热带和亚热带,土壤酸性强,加上强烈的风化和淋溶作用,导致了钙、镁等盐基离子的大量流失^[34],使其成为水稻产量的关键限制因素。可适当施用碱性物质和土壤改良剂等调节土壤 pH,增加土壤中交换性钙、镁的含量^[35],提高作物产量。由于我国在施肥管理过程中硫肥施用量不足,导致各地区出现缺硫现象,大量氮、磷、钾肥的投入虽然提高了作物产量,但也造成了土壤硫的耗竭,进而影响作物对硫元素的吸收利用^[36]。针对玉米,适量施用硫肥不仅能有效提高产量,还能在一定程度上缓解硫的耗竭,维持土壤硫平衡^[37]。近几年,中量元素对作物产量和品质的影响逐渐受到重视,在农业生产中,种植不同粮食作物时,需考虑适量补充中量元素肥料,保证作物获得较高产量和品质。如在酸性土壤环境中,补充钙、镁肥可显著提高小麦产量。

4 结论

(1) 与 2016 年相比,2021 年全国交换性钙、镁平均含量(分别为 2153.2 和 293.4 mg/kg)变化不显著,等级变化不大,土壤中交换性钙、镁总体丰富;有效硫平均含量(26.6 mg/kg)显著下降,高等级占比下降,低等级增加。交换性钙主要与 pH 和



TK 相关, 交换性镁和有效硫主要与 pH 和 OM 相关。

(2) 与 2016 年相比, 2021 年东北区交换性钙、镁含量显著增加, 主要与 pH 和 TP 相关, 有效硫显著下降, 高等级占比下降, 低等级增加, 主要与 AK 相关; 华北区交换性钙显著下降, 以高等级占比为主, 主要与 pH 和 TP 相关; 西北区 3 种中量元素显著下降, 整体较为缺乏, 主要与 TK 和 AP 相关; 西南区有效硫显著下降, 低等级占比增加, 主要与 pH 和 OM 相关; 长江流域交换性镁和有效硫显著下降, 低等级占比增加, 主要与 pH 和 OM 相关; 华南区中量元素变化不显著, 整体较为缺乏, 主要与 pH 和 OM 相关。

(3) 不同粮食产区中量元素对作物产量的影响不同。水稻产量与交换性钙、镁呈显著正相关; 玉米产量与土壤交换性镁和有效硫呈显著正相关; 当 $\text{pH} \leq 7.0$ 时, 小麦产量与交换性钙、镁呈显著正相关, 当 $\text{pH} > 7.0$ 时则不受中量元素的影响。

参考文献:

- [1] 曹恭, 梁鸣早. 钙——平衡栽培体系中植物必需的中量元素[J]. 土壤肥料, 2003 (2): 48-49.
- [2] 林敏霞, 张晓东, 邱美欢, 等. 植物镁素生理功能及镁素营养诊断和施用[J]. 热带农业科学, 2016, 36 (3): 39-43.
- [3] 高中超, 张喜林, 马星竹. 植物体内硫素的生理功能及作用研究进展[J]. 黑龙江农业科学, 2009 (5): 153-155, 159.
- [4] Cakmak I, Kirkby E A. Role of magnesium in carbon partitioning and alleviating photo oxidative damage[J]. Plant Physiology, 2008, 133: 692-704.
- [5] Sander M L, Andren O. Ash from cereal and rape straw used for heat production: Liming effect and contents of plant nutrients and heavy metals[J]. Water Air and Soil Pollution, 1997, 93 (1-4): 93-108.
- [6] 宋晓, 刘铁群, 李绍伟, 等. 中量元素 Ca、Mg 对小麦产量的影响[J]. 陕西农业科学, 2013, 59 (6): 13-14.
- [7] 聂录, 林玉萍, 张少波. 镁肥对水稻产量和品质的影响[J]. 现代化农业, 2017 (6): 17-18.
- [8] 李飞. 中量元素硫在玉米上的肥效试验[J]. 安徽农学通报, 2015, 21 (16): 27-28.
- [9] 张正林. 影响土壤中微量元素含量及有效性的因素[J]. 农业科技通讯, 1995 (11): 23.
- [10] 葛百一, 李国华, 刘庆虎, 等. 甜玉米应用新型中量元素肥料肥效试验[J]. 热带农业工程, 2018, 42 (4): 6-8.
- [11] 史吉平, 张夫道, 林葆. 长期定位施肥对土壤中、微量营养元素的影响[J]. 土壤肥料, 1999 (1): 3-6.
- [12] 丁玉川, 焦晓燕, 聂督, 等. 山西农田土壤交换性镁含量、分布特征及其与土壤化学性质的关系[J]. 自然资源学报, 2012, 27 (2): 311-321.
- [13] 刘敏. 永顺县植烟土壤钙、镁、硫分布特征及其影响因素研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2015.
- [14] 蒙雯, 黄哈达, 韩效钊, 等. 砀山县梨园土壤大中量元素养分状况分析[J]. 肥料与健康, 2021, 48 (5): 19-23.
- [15] 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.
- [16] 靳志丽, 张双双, 蒋尊龙, 等. 永州植烟土壤中量元素分布特征与聚类分析[J]. 作物研究, 2020, 34 (2): 148-152.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 67-238, 449-452.
- [18] Dong Y, Silbermann M, Speiser A, et al. Sulfur availability regulates plant growth via glucose-TOR signaling[J]. Nature Communications, 2017, 8: 1174.
- [19] Wyngaard N, Cabrera M L. Measuring and estimating sulfur mineralization potential in soils amended with poultry litter or inorganic fertilizer[J]. Biol Fertil Soils, 2015, 51: 545-552.
- [20] 谭军, 周冀衡, 古琦, 等. 文山植烟土壤交换性钙镁分布特征及影响因素分析[J]. 烟草科技, 2017, 50 (9): 15-22.
- [21] 孙羲. 中国农业百科全书·农业化学卷[M]. 北京: 农业出版社, 1996: 315-317.
- [22] 石翔, 夏志林, 管世栓, 等. 遵义市部分烟区烤烟中、微量元素含量及其空间分布[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23 (3): 765-773.
- [23] 唐梦迎, 丁建丽, 夏楠, 等. 干旱区典型绿洲土壤有机质含量分布特征及其影响因素[J]. 土壤学报, 2017, 54 (3): 759-766.
- [24] 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.
- [25] Kalbitz K, Wennrich R. Mobilization of heavy metals and arsenic in polluted wetland soils and its dependence on dissolved organic matter[J]. Science of The Total Environment, 1998, 209 (1): 27-39.
- [26] Li Q Q, Li A W, Yu X L, 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.
- [27] 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.
- [28] 刘立军, 常二华, 范苗苗, 等. 结实期钾、钙对水稻根系分泌物与稻米品质的影响[J]. 作物学报, 2011, 37 (4): 661-669.
- [29] 秦喜彤. 钙调控对春玉米产量和氮肥利用效率的影响[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [30] 曾志, 廖强辉, 吴银苑, 等. 镁肥对水稻农艺性状及产量的影响[J]. 现代农业科技, 2012 (20): 28-29.
- [31] 李霞, 蒋文春, 刁钰婵, 等. 中量元素肥对玉米生理指标和产量性状的影响[J]. 湖北农业科学, 2008 (4): 412-414.
- [32] 魏玉光. 硫肥对水稻产量和品质的影响[J]. 现代化农业, 2013, 402 (1): 14-16.
- [33] 孙秀山, 成波, 郑亚萍, 等. S、Zn 对小麦花生产量及品质的影响研究[J]. 莱阳农学院学报, 2000 (1): 20-22.



- [34] 谢会雅, 陈舜尧, 张阳, 等. 中国南方土壤酸化原因及土壤酸性改良技术研究进展 [J]. 湖南农业科学, 2021 (2): 104–107.
- [35] 文星, 李明德, 吴海勇, 等. 土壤改良剂对酸性水稻土 pH 值、交换性钙镁及有效磷的影响 [J]. 农业现代化研究, 2014, 35 (5): 618–623.
- [36] 王丽, 吴忠东, 沈新磊. 土壤硫肥研究进展 [J]. 河南农业, 2019 (13): 20.
- [37] 迟凤琴. 不同硫肥品种和用量对玉米产量和黑土有效硫的影响 [J]. 土壤肥料, 2002 (4): 38–40.

Soil available calcium, magnesium and sulfur and their effects on crop yields across major grain production areas of China

WANG Yan¹, WU Lei^{1*}, LI Jian-bing², WANG Jun¹, QU Xiao-lin², CUI Meng², GUO Yu-ming², ZHANG Wen-ju¹
(1. Institute of 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 Cultivated Land Quality Monitoring and Evaluation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081; 2. Center for Monitoring and Protection of Cultivated Land Quality, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125)

Abstract: The contribution of medium elements, including calcium, magnesium and sulfur, to agricultural productivity was of great importance. The objectives of the present study were to investigate the characteristics of soil exchangeable calcium, exchangeable magnesium, available sulfur and their effects on main crop yields at national and regional scales, so as to provide theoretical basis for the management of medium elements and rational fertilization in cultivated land at national and regional scales. Based on the data from 697 cultivated land quality monitoring sites across China, this research compared and analyzed the characteristics of soil available calcium, magnesium and sulfur and their effects on crop yields at national and six major grain production region scales (the Northeast, North, Northwest, Southwest of China, Yangtze River Basin and the South of China) in 2016 and 2021. Compared to 2016, the average contents of soil exchangeable calcium and exchangeable magnesium did not change significantly, and soil available sulfur content decreased by 27.3% on average at national scale in 2021. Exchangeable calcium, exchangeable magnesium and available sulfur were mainly related to soil pH and organic matter (OM). The interannual variation characteristics of soil exchangeable calcium, exchangeable magnesium and available sulfur in six major grain production region scales were different. In Northeast China, the contents of soil exchangeable calcium and exchangeable magnesium increased by 25.5% and 52.4% on average, respectively, which was mainly related to pH. Soil available sulfur content decreased by 47.8%, mainly related to available potassium. In North China, soil exchangeable calcium content decreased by 11.8%, which was mainly related to pH. In Northwest China, the contents of exchangeable calcium, exchangeable magnesium and available sulfur decreased by 64.0%, 54.0% and 30.4%, respectively. Calcium was mainly related to total potassium, magnesium was mainly related to total phosphorus, while there was no significant correlation between sulfur and soil chemical properties. In Southwest China, soil available sulfur content decreased by 30.0%, mainly related to pH and organic matter. In the Yangtze River Basin, the contents of exchangeable magnesium and available sulfur decreased by 52.0% and 15.7%, respectively, mainly related to pH and organic matter. The contents of three available medium elements did not change significantly in the south of China, and they were mainly related to pH and organic matter. At national scale, the rice yield was positively correlated with soil exchangeable calcium and exchangeable magnesium contents; corn yield was positively correlated with soil exchangeable magnesium and available sulfur contents; there was no significant correlation between wheat yield and three medium elements contents. Wheat yield was positively correlated with soil exchangeable calcium and exchangeable magnesium contents at $\text{pH} \leq 7.0$. When $\text{pH} > 7.0$, there was no significant correlation between wheat yield and soil exchangeable calcium and exchangeable magnesium contents. The wheat yield was not related to soil available sulfur content whether the soil was acidic or alkaline. In summary, the contents of soil exchangeable calcium and exchangeable magnesium did not change significantly, and the available sulfur content decreased significantly across China during the year from 2016 to 2021. The contents of these medium elements were mainly related to soil pH and organic matter. There were significant differences in the variation and influencing factors of soil medium elements, and their impact on main crop yields across six major grain production areas. Optimized medium element fertilization could help improve crop yield at regional scale.

Key words: cultivated land; medium elements; soil pH; rice; corn; wheat