

DOI: 10.11766/trxb202107290283

刘彦伶, 李渝, 蒋太明, 张雅蓉, 黄兴成, 朱华清, 杨叶华, 张萌, 张文安, 张艳. 长期施用磷肥和有机肥对黄壤稻田锌形态转化的影响[J]. 土壤学报, 2023, 60(1): 258–268.

LIU Yanling, LI Yu, JIANG Taiming, ZHANG Yarong, HUANG Xingcheng, ZHU Huaqing, YANG Yehua, ZHANG Meng, ZHANG Wen'an, ZHANG Yan. Effects of Long-term Application of Phosphorus and Organic Fertilizer on Transformation of Zn Forms in Yellow Paddy Soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(1): 258–268.

长期施用磷肥和有机肥对黄壤稻田锌形态转化的影响*

刘彦伶^{1, 2}, 李渝^{1, 2†}, 蒋太明^{2, 3}, 张雅蓉^{1, 2}, 黄兴成^{1, 2}, 朱华清^{1, 2},
杨叶华^{1, 2}, 张萌^{1, 2}, 张文安^{1, 2}, 张艳^{1, 2}

(1. 贵州省农业科学院土壤肥料研究所, 贵阳 550006; 2. 农业农村部贵州耕地保育与农业环境科学观测实验站, 贵阳 550006; 3. 贵州省农业科学院, 贵阳 550006)

摘要: 为探明长期不同施肥下黄壤稻田锌形态变化规律及对土壤锌有效性的影响, 以设立于 1995 年的长期定位施肥试验为对象, 对比分析不施肥 (CK)、氮钾肥配施 (NK)、氮磷钾肥配施 (NPK)、单施有机肥 (M)、1/2 有机肥替代 1/2 化学氮磷肥及全部化学钾肥 (0.5MNP)、全量有机肥化肥配施 (MNPK) 6 个处理耕层土壤有效锌及锌形态时序变化规律, 并采用相关分析和通径分析方法分析不同形态锌与有效锌的关系。结果表明, NK 处理土壤有效锌和锌活化系数随试验年限增加呈降低趋势, 其中锌活化系数线性拟合方程达显著水平, 年下降速率为 0.05 个百分点。与 NK 处理相比, 2019 年, NPK 处理土壤有效锌和锌活化系数分别提高了 44.1% 和 1.49 个百分点, 弱酸可溶态锌和可还原态锌含量分别提高了 15.9% 和 5.3%。施用有机肥处理土壤有效锌和锌活化系数随试验年限增加呈不断增加趋势, 年增长速率分别为 0.074~0.1244 mg·kg⁻¹ 和 0.032~0.063 个百分点。与 NPK 处理相比, 施用有机肥的处理 2019 年土壤有效锌和锌活化系数分别显著提高了 6.3%~22.6% 和 0.68~1.47 个百分点, 弱酸可溶态锌、可还原态锌、可氧化态锌含量分别显著提高了 33.6%~84.0%、32.5%~47.4%、25.5%~36.3%, 其占比分别提高了 0.6~1.3 个百分点、1.7~3.4 个百分点、1.2~7.3 个百分点, 残渣态锌占比降低了 3.6~12.0 个百分点。相关分析表明, 土壤有效锌与弱酸可溶态锌、可还原态锌、可氧化态锌呈极显著正相关, 与残渣态锌呈极显著负相关。通径分析结果表明, 弱酸可溶态锌对有效锌直接通径系数最大, 有显著直接正效应, 残渣态锌对有效锌有显著直接负效应, 可还原态锌和可氧化态锌通过间接影响弱酸可溶态锌对有效锌有较强间接正效应。综上, 弱酸可溶态锌是黄壤稻田有效锌的主要来源, 可还原态锌和可氧化态锌是有效锌的重要缓存库。农业生产中, 可通过合理施用有机肥促进锌向弱酸可溶态锌、可还原态锌、可氧化态锌转化, 避免其向残渣态锌累积来提高土壤锌有效性。

关键词: 黄壤稻田; 长期施肥; 有效锌; 锌形态; 通径分析

中图分类号: S158 **文献标志码:** A

* 国家自然科学基金项目 (32060302 和 31860132) 和贵州省科学技术基金项目 (黔科合基础[2018]1154) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 32060302 and 31860132), and the Science and Technology Foundation of Guizhou Province, China (No. Guizhou [2018]1154)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: liyu83110@163.com

作者简介: 刘彦伶 (1989—), 女, 贵州安顺人, 副研究员, 主要从事耕地保育及农田肥力研究。Email: lyl890615@163.com。

收稿日期: 2021-07-29; 收到修改稿日期: 2021-12-08; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2022-03-16

Effects of Long-term Application of Phosphorus and Organic Fertilizer on Transformation of Zn Forms in Yellow Paddy Soil

LIU Yanling^{1,2}, LI Yu^{1,2†}, JIANG Taiming^{2,3}, ZHANG Yarong^{1,2}, HUANG Xingcheng^{1,2}, ZHU Huaqing^{1,2}, YANG Yehua^{1,2}, ZHANG Meng^{1,2}, ZHANG Wen'an^{1,2}, ZHANG Yan^{1,2}

(1. Institute of Soil and Fertilizer, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006, China; 2. Scientific Observing and Experimental Station of Arable Land Conservation and Agriculture Environment (Guizhou), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guiyang 550006, China; 3. Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006, China)

Abstract: 【Objective】 To investigate the variation of zinc (Zn) speciation in yellow paddy soil under different long-term fertilization and its effect on available Zn, a field experiment was designed in 1995. 【Method】 There were six treatments: the control (no fertilizer, CK), P deficiency (NK), balanced application of chemical N, P and K fertilizer (NPK), single manure (M), lower organic and inorganic fertilizer combination treatments (0.5 MNP), and higher organic and inorganic fertilizer combination treatments (MNPK). The change process of soil available Zn and the temporal variation of different forms of Zn were studied. Also, the relationship between different forms of Zn and available Zn was analyzed with correlation and path analyses. 【Result】 The results showed that the available Zn and Zn activation coefficient of soil with NK treatment decreased with the increase of experimental years. During this time, the linear fitting formula of the Zn activation coefficient reached a significant level, and the annual growth rate was -0.052 percentage points. Compared with NK treatment, the available Zn and Zn activation coefficient of soil with NPK treatment increased by 44.1% and 1.49 percentage points, respectively in 2019. Also, the contents of weak acid soluble Zn and reducible Zn increased by 15.9% and 5.3%, respectively. For treatments with organic fertilizer, the available Zn and Zn activation coefficient of soil increased linearly with the increase of experimental years, and the annual growth rate was 0.074-0.1244 mg·kg⁻¹ and 0.032-0.063 percentage points, respectively. Compared with NPK treatment in 2019, the available Zn and Zn activation coefficient of soil in the manure treatments increased significantly by 6.3%-22.6% and 0.68-1.47 percentage points, respectively. For these treatments, the contents of weak acid-soluble, reducible, and oxidizable Zn increased significantly by 33.6%-84.0%, 32.5%-47.4%, and 25.5%-36.3%, respectively. In addition, the proportions of weak acid-soluble, reducible, and oxidizable Zn increased significantly by 0.6-1.3, 1.7-3.4, and 1.2-7.3 percentage points, respectively. On the contrary, the proportion of residual Zn was observed to decrease by 3.6-12.0 percentage points. Correlation analysis showed that soil available Zn was significantly positively correlated with weak acid-soluble, reducible, and oxidizable Zn, but significantly negatively correlated with residual Zn. Path analysis results showed that the direct path coefficient of weak acid-soluble Zn was the largest and had a significant direct positive effect on available Zn, residual Zn showed a significant direct negative effect on available Zn, while reducible and oxidizable Zn indirectly affected weak acid soluble Zn and had a strong indirect positive effect on available Zn. 【Conclusion】 The weak acid-soluble Zn was the main source of available Zn in yellow paddy soil, while reducible and oxidizable Zn were the important cache database of available Zn. In agricultural production, the soil Zn efficiency could be improved by applying organic fertilizer reasonably to promote the transformation of Zn to weak acid-soluble, reducible, and oxidizable Zn, and avoid the accumulation of Zn in the residual state.

Key words: Yellow paddy soil; Long-term fertilization; Available Zn; Zn form; Path analysis

锌是植物和人体生长发育必需的微量营养素。据估计,目前全世界约有 27 亿人口正面临锌缺乏问题^[1],而土壤缺锌是造成植物缺锌和人体缺锌的重要原因^[2]。施肥是影响土壤锌含量及有效性的重要农艺措施,不同施肥方式通过改变土壤理化性质进而影响土壤锌有效性。锌的生物有效性常采用

土壤有效锌(DTPA-Zn)来表征,土壤有效锌含量与锌形态组分密切相关。Alvarez 和 Gonzalez^[3]认为交换态锌和碳酸盐结合态锌含量与锌肥生物有效性的关系最为密切;白玲玉等^[4]研究发现,水溶态锌和交换态锌的生物有效性最高,有机结合态锌则是锌总量的重要部分;刘娟花等^[5]指出交换态锌及松

结有机态锌对土壤有效锌贡献最大; 杨振兴等^[6]认为可还原态锌是影响土壤有效锌的主要来源。施肥是提高作物产量和维持养分平衡的重要措施, 通过元素间相互作用或改变土壤环境而影响土壤锌有效性^[7]。大多研究均表明施用有机肥可提高土壤有效锌含量, 提高活性态锌含量及其占比^[8-9]。施用化肥对土壤有效锌含量及锌形态转化的影响较复杂, 大多研究认为施用磷肥会因沉淀反应降低了有效锌含量及活性态锌含量, 增加无效态锌含量^[10-11], 但也有研究认为土壤有效锌含量随磷肥施用量增加呈先增加后降低的趋势^[12], 施用磷肥可增加活性态锌含量, 提高有效锌含量^[13]。部分研究认为施用氮肥会降低土壤 pH、提高土壤锌有效性^[14], 施用氮肥可提高交换态和松结有机态等有效态锌含量^[15], 也有研究认为施用氮肥对土壤有效锌及锌形态无显著影响^[16], 甚至有研究认为增施氮肥会加重土壤缺锌的程度^[17]。可见, 不同研究中有效态锌形态及施肥对锌有效性的影响结果不尽一致, 了解土壤有效锌与不同形态锌的相互关系及其施肥对土壤锌形态转化的影响对提高土壤锌有效性具有重要意义。

水稻是贵州主要粮食作物, 2018 年以来种植面积常年保持在 67 万 hm^2 左右, 约占全省粮食作物总面积的 1/4, 水稻产量 420 万 t, 占粮食总产的 2/5 以上^[18]。通过合理施肥提高土壤锌有效性对实现水稻锌营养强化具有重要意义。长期定位试验能科学准确地反映施肥对土壤质量及生态环境的影响, 是短期试验无法代替的。目前关于长期施肥对黄壤碳、氮、磷等大量元素养分转化开展了较多研究^[19-20], 但关于长期施肥对土壤微量元素的研究较缺乏, 土壤有效锌与不同锌形态相关性如何以及长期不同施肥如何影响土壤锌形态转化进而影响土壤锌有效性尚不清楚。为此, 本文以进行了 25 年的黄壤(水田)长期定位试验为平台, 开展长期施肥条件下土壤有效锌时序演变规律、不同形态锌变化特征及其与土壤有效锌相互关系研究, 旨在为黄壤区合理施肥及作物高产优质提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验概况

本研究依托于农业农村部贵州耕地保育与农业

环境科学观测实验站下设置的黄壤(水田)肥力与肥效长期定位试验。试验地位于贵州省贵阳市花溪区贵州省农业科学院内(26°29'49"N, 106°39'52"E), 地处黔中丘陵区, 属亚热带季风气候, 平均海拔 1 071 m, 年均气温 15.3℃, 年均日照时数 1 354 h 左右, 相对湿度 75.5%, 全年无霜期 270 d 左右, 年降水量 1 100~1 200 mm。试验地土壤类型为铁聚水耕人为土, 成土母质为三叠系灰岩与砂页岩风化物。基础土壤理化性质为 pH 6.75, 有机质 44.5 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全氮 1.96 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 碱解氮 158.9 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有效磷 13.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效钾 293.7 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有效锌 2.53 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

试验采用大区对比试验设计, 小区面积 201 m^2 , 本研究选取其中能代表不同施磷量及不同磷肥类型的 6 个施肥处理作为研究对象: 不施肥 (CK)、氮钾肥配施 (NK)、氮磷钾肥配施 (NPK)、单施有机肥 (M)、1/2 有机肥替代 1/2 化学氮磷肥及全部化学钾肥 (0.5MNP) 和全量有机肥化肥配施 (MNPK)。供试化肥为尿素 (N 46.0%)、过磷酸钙 (P_2O_5 12.0%) 和氯化钾 (K_2O 60%), 有机肥为牛廐肥, 鲜基养分多年测试平均含 N 2.7 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 P_2O_5 1.3 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 K_2O 6.0 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、Zn 21.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其全量用量根据等氮量替代全量化学氮肥用量进行计算。本研究中锌为有机肥带入, 并未施用化学锌肥, 不同处理施肥量见表 1。化学氮肥按照返青肥: 分蘖肥 40%: 60%的比例分两次追施, 有机肥及化学磷钾肥做基肥一次性施用。水稻生长期采用前期淹水、中期烤田和后期干湿交替的水分管理模式, 冬季翻耕炕田, 不种植任何农作物。试验过程中不使用除草剂和杀虫剂等化学农药, 所有处理除施肥差异外, 其他农事活动均一致。

1.3 测定项目与分析方法

黄壤长期定位试验于 1994 年开始基础设施建设和匀地, 1995 年开始试验, 至 2019 年历时 25 年, 每年于水稻收获后采集 0~20 cm 耕层土壤样品风干后保存, 遗憾的是由于历史原因 1997—2006 年土壤样品尚未保存。由于黄壤长期定位试验建于 90 年代, 小区面积较大 (201 m^2) 并未设置重复, 故而部分研究年份研究过程采用假重复进行研究, 将试验地延长边三等分, 设置 3 个调查取样重复小区。

表 1 不同施肥模式施肥量

Table 1 Nutrient application rates of different fertilization patterns

处理 Treatments	鲜牛廐肥	N/ (kg·hm ⁻²)	P ₂ O ₅ / (kg·hm ⁻²)	K ₂ O/ (kg·hm ⁻²)	Zn/ (kg·hm ⁻²)
	Cow manure/ (t·hm ⁻²)				
CK	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
NK	0.0	165.0	0.0	82.5	0.0
NPK	0.0	165.0	82.5	82.5	0.0
M	61.1	165.0	79.4	366.6	1.32
0.5MNP	30.6	165.0	81.0	183.3	0.66
MNPK	61.1	330.0	161.9	449.1	1.32

注：CK：不施肥，NK：氮钾肥配施，NPK：氮磷钾肥配施，M：单施有机肥，0.5MNP：1/2 有机肥替代 1/2 化学氮磷肥及全部化学钾肥，MNPK：全量有机肥化肥配施。下同。Note: CK: no fertilizer, NK: P deficiency, NPK: balanced application of chemical N, P, K fertilizer, M: single manure, 0.5MNP: lower organic and inorganic fertilizer combination, MNPK: higher organic and inorganic fertilizer combination. The same below.

本研究根据现有历史土样，间隔一定年份选取土壤样品分析土壤有效锌、全锌、锌形态。按照二乙三胺五乙酸（DTPA）浸提—原子吸收分光光度法测定有效锌含量（DTPA-Zn），HF-HNO₃-HClO₄ 消煮—原子吸收分光光度法测定全锌含量，具体测定方法参考《土壤农化分析》^[21]，锌形态采用修正的欧洲共同体标准物质局的三步提取法（BCR）进行测定^[22]，将土壤锌分为弱酸可溶态（weak acid soluble Zn, F1）、可还原态（reducible Zn, F2）、可氧化态（oxidizable Zn, F3）和残渣态（residual Zn, F4）四种形态，详见表 2。

1.4 数据分析

土壤锌活化系数（activation coefficient of Zn, AC）/%=土壤有效锌含量（mg·kg⁻¹）/土壤全锌含量（total Zn, T-Zn, mg·kg⁻¹）×100。

试验数据均采用 Excel 2010 软件进行计算处理，利用 SPSS 20.0 软件进行统计分析和相关分析，差异显著分析用邓肯（Duncan）新复极差法，显著性水平设定为 $\alpha=0.05$ 。

2 结 果

2.1 长期施肥对土壤有效锌和全锌的影响

长期不同施肥可显著影响土壤有效锌年际变化特征（表 3 和表 4）。2019 年 CK 处理土壤有效锌含量较试验前提高了 13.1%，NK 处理土壤有效锌较试验前降低了 2.7%，NPK 处理土壤有效锌含量较试验前提高了 44.4%，但土壤有效锌与试验年限线性拟合方程决定系数均未达显著水平；施用有机肥各处理土壤有效锌含量较试验前提高了 73.0%~99.4%，

表 2 土壤锌形态分级方法

Table 2 The sequential fractionation method for zinc in soils

锌形态 Zn fractions	浸提液 Extractants	操作条件 Operation condition
F1	0.11 mol·L ⁻¹ CH ₃ COOH	振荡 16 h Shake 16 hours
F2	0.1 mol·L ⁻¹ NH ₂ OHHCl, pH2.0	振荡 16 h Shake 16 hours
F3	A: 30% H ₂ O ₂ , pH2.0; B: 1 mol·L ⁻¹ CH ₃ COONH ₄ , pH2.0.	用 A 85℃ 水浴近干, 重复 1 次, 用 B 25℃ 浸提 16 h Extracted with A at 85℃ twice, then extracted 2 hours with B at 25℃
F4	HNO ₃ -HClO ₄ -HF	全锌 Total-Zn

注：F1：弱酸可溶态，F2：可还原态，F3：可氧化态，F4：残渣态。下同。Note: F1: Weak acid-soluble Zn, F2: Reducible Zn, F3: Oxidizable Zn, F4: Residual Zn. The same below.

土壤有效锌随试验年限增加呈显著线性增长趋势,年增长速率为 $0.074 \sim 0.124 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,以 MNPK 处理增速最快,0.5MNP 处理增速较慢。各施肥处理自 2007 年以后土壤有效锌规律基本一致,表现为施用有机肥的各处理最高,NPK 处理其次,CK 处理最低。2019 年,NK 处理土壤有效锌较 CK 处理显著降低了 13.9%,NPK 处理较 NK 处理显著提高了 44.1%,施用有机肥各处理较 NPK 处理提高了 6.3%~22.6%。

2019 年各处理土壤全锌含量较试验前提高了 24.3%~58.7%。各处理土壤全锌含量随试验年限增加不断增加,年增长速率为 $0.82 \sim 1.82 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,处理间大小表现为: MNPK> CK> NK> NPK> 0.5MNP> M,但仅 CK、NK、MNPK 处理线性拟合方程达显著水平。2007 年后不同施肥处理土壤全锌含量均以 M 和 0.5MNP 处理最低,2019 年较其他处理降低了 6.5%~21.7%。

2019 年 CK 和 NK 处理土壤锌活化系数较试验前分别降低了 0.91 个百分点和 1.29 个百分点,土壤锌活化系数随试验年限增加呈显著下降趋势,年下降速率分别为 0.04 和 0.05 个百分点;NPK 处理土壤锌活化系数较试验前增加了 0.21 个百分点,但随试验年限增加土壤锌活化系数基本持平;施用有机肥各处理土壤锌活化系数较试验前增加了 0.89~1.67 个百分点,年增长速率表现为: M(0.06)>MNPK(0.05)>0.5MNP(0.03),但仅 M 处理线性拟合方程达显著水平。自 2007 年起土壤锌活化系数均以施用有机肥的各处理较高,NK 处理最低。2019 年 NPK 处理土壤锌活化系数较 NK 处理显著提高了 1.49 个百分点,施用有机肥的各处理较 NPK 处理显著提高了 0.68~1.47 个百分点。

2.2 长期施肥对土壤锌形态的影响

弱酸可溶态锌(F1)含量随着试验年限不断增加(表 5),2007 年各处理较试验前提高了

表 3 长期不同施肥下土壤有效锌、全锌及锌活化系数

Table 3 Soil available Zn, total Zn and activation coefficient of Zn under long-term different fertilization

年份 Year	有效锌 DTPA-Zn/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)						全锌 Total Zn / ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)					
	CK	NK	NPK	M	0.5MNP	MNPK	CK	NK	NPK	M	0.5MNP	MNPK
1994	2.53	2.53	2.53	2.53	2.53	2.53	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2
1996	2.1	2.52	2.79	2.63	2.38	2.92	/	/	/	/	/	/
2007	2.92b	2.25c	2.49bc	3.39ab	3.57a	3.47a	89.4ab	103.2a	108.8a	72.4b	72.4b	90.4ab
2010	3.08	2.50	3.39	3.82	3.55	5.02	/	/	/	/	/	/
2013	3.45c	2.52d	3.51c	4.86ab	4.25b	5.52a	/	/	/	/	/	/
2016	2.63e	2.22f	2.88d	4.28b	3.58c	5.68a	112.4a	105.1ab	104.1ab	88.8c	97.5bc	115.2a
2019	2.86c	2.46d	4.12b	4.78a	4.38b	5.05a	112.3a	113.6a	99.7b	93.2b	91.0b	116.2a
年份 Year	锌活化系数 Activation coefficient of Zn/%											
Year	CK	NK	NPK	M	0.5MNP	MNPK						
1994	3.46	3.46	3.46	3.46	3.46	3.46						
1996	/	/	/	/	/	/						
2007	3.26c	2.19d	2.29d	4.68a	4.93a	3.84b						
2010	/	/	/	/	/	/						
2013	/	/	/	/	/	/						
2016	2.34e	2.11f	2.76d	4.82b	3.67c	4.93a						
2019	2.55d	2.17d	3.66c	5.13a	4.81a	4.34b						

注: / 表示未检测指标;同一行不同小写字母表示相同年份不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。Note: / indicates not tested. Different lowercase letters in the same line indicate significant differences between treatments ($P<0.05$).

表 4 不同施肥处理土壤有效锌、全锌、锌活化系数随时间变化趋势

Table 4		Variation trend of soil available Zn, total Zn and activation coefficient of Zn with time under different fertilization treatments					
变化趋势 ^①	有效锌 DTPA-Zn/ (mg·kg ⁻¹)						
	CK	NK	NPK	M	0.5MNP	MNPK	
1994—2019							
年变化量 ^②	0.33	-0.07	1.12	2.25	1.85	2.52	
变幅 ^③ /%	13.1	-2.7	44.4	88.9	73	99.4	
与试验年限线							
性拟合方程 ^④	$y = 0.0273x + 2.418$	$y = -0.0054x + 2.505$	$y = 0.0345x + 2.557$	$y = 0.094x + 2.453$	$y = 0.074x + 2.436$	$y = 0.1244x + 2.588$	
R ²	0.376 2	0.153 2	0.480 8	0.898 3**	0.860 6**	0.840 4**	
变化趋势 ^①	全锌 Total Zn/ (mg·kg ⁻¹)						
	CK	NK	NPK	M	0.5MNP	MNPK	
1994—2019							
年变化量 ^②	39.09	40.44	26.55	19.98	17.79	42.99	
变幅 ^③ /%	53.41	55.24	36.28	27.3	24.31	58.74	
与试验年限线							
性拟合方程 ^④	$y = 1.675x + 71.69$	$y = 1.501x + 76.25$	$y = 1.087x + 80.16$	$y = 0.8216x + 69.57$	$y = 0.9253x + 69.63$	$y = 1.824x + 71.37$	
R ²	0.967 5**	0.912 3**	0.585 4	0.749 6	0.670 6	0.969 3**	
变化趋势 ^①	锌活化系数 Activation coefficient of Zn/%						
	CK	NK	NPK	M	0.5MNP	MNPK	
1994—2019							
年变化量 ^②	-0.91	-1.29	0.21	1.67	1.35	0.89	
变幅 ^③ /%	-26.3	-37.3	5.97	48.38	39.19	25.63	
与试验年限线							
性拟合方程 ^④	$y = -0.0436x + 3.558$	$y = -0.0522x + 3.264$	$y = -0.0012x + 3.061$	$y = 0.063x + 3.576$	$y = 0.032x + 3.7358$	$y = 0.0488x + 3.410$	
R ²	0.821 5*	0.8111*	0.000 5	0.928 3**	0.224	0.731 6	

注：*为方程决定系数达显著水平 ($P < 0.05$)；**为方程决定系数达极显著水平 ($P < 0.01$)。Note：* is the determination coefficient of the equation reached a significant level ($P < 0.05$)；** is the determination coefficient of the equation reached a extremely significant level ($P < 0.01$)。①Variation trend, ②The amount varied from 1994-2019, ③Amplitude of variation, ④Linear fitting equation with experimental years.

6.3%~293.8%，2019 年各处理 F1 为试验前的 7.1 倍~15.1 倍；可还原态锌 (F2) 含量除施用有机肥的处理 2019 年较试验前提高了 29.3%~43.9%外，其他处理与试验前基本持平；可氧化态锌 (F3) 含量随试验年限增加不断增加，2007 年各处理较试验前提高了 18.4%~44.8%，2019 年各处理为试验前的 9.6 倍~13.1 倍；残渣态锌 (F4) 含量表现为 M 和 0.5MNP 处理随试验年限增加基本维持不变，其他处理在 2007 年较试验前提高了 24.9%~56.3%，2019 年与 2007 年相当。不同施肥处理各形态锌含

量在 2007 年和 2019 年规律基本一致。NK 处理较 CK 处理显著降低了弱酸可溶态锌含量，2019 年降幅为 15.7%；NPK 处理较 NK 处理弱酸可溶态锌和可还原态锌含量有小幅提升，2019 年增幅分别为 15.9%和 5.3%；施用有机肥各处理弱酸可溶态锌、可还原态锌、可氧化态锌含量较 NPK 处理显著增加，2019 年增幅分别为 33.6%~84.0%、32.5%~47.4%、25.5%~36.3%；M 和 0.5MNP 处理残渣态锌含量显著低于其他各处理，2019 年降幅为 20.1%~33.7%。

表 5 长期不同施肥下土壤各形态锌含量

Table 5 Contents of various forms of Zn in soil under long-term different fertilization

试验年份 Year	处理 Treatments	弱酸可溶态	可还原态	可氧化态	残渣态
		Weak acid-soluble Zn (F1) / (mg·kg ⁻¹)	Reducible Zn (F2) / (mg·kg ⁻¹)	Oxidizable Zn (F3) / (mg·kg ⁻¹)	Residual Zn (F4) / (mg·kg ⁻¹)
1994	试验前 Pre-test	0.16	6.68	1.63	64.1
	CK	0.36 d	6.04c	1.93b	81.0bc
	NK	0.17e	6.33bc	1.93b	94.7b
2007	NPK	0.19e	6.38b	2.05b	100.2a
	M	0.51c	6.44ab	2.00b	63.5c
	0.5MNP	0.63a	6.60ab	2.30a	62.8c
	MNPK	0.59b	6.74a	2.36a	80.7bc
	CK	1.34c**	6.40b	17.9bc**	86.7a
2019	NK	1.13d**	6.19b	15.6c**	90.7a
	NPK	1.31c**	6.52b	15.7c**	76.2b
	M	2.41a**	9.25a**	21.4a**	60.1c
	0.5MNP	1.75b**	8.64a**	19.7ab**	60.9c
	MNPK	2.32a**	9.61a**	19.7ab**	84.5a

注：同一列不同小写字母表示相同年份不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)，数字后*号表示同一处理 2019 年与 2007 年间差异显著 ($* P < 0.05$; $** P < 0.01$)。Note; Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$), the * sign after the number indicates the difference between 2019 and 2007 for the same treatment ($* P < 0.05$; $** P < 0.01$).

2.3 长期施肥对不同形态锌组成的影响

试验前 (1994 年) 弱酸可溶态锌 (F1)、可还原态锌 (F2)、可氧化态锌 (F3)、残渣态锌 (F4) 占全锌比例分别为 0.2%、9.1%、2.2%、87.6%; 2007 年各处理不同形态锌占全锌比例分别为 0.2%~0.9%、6.0%~9.1%、1.9%~3.2%、86.8%~91.9%; 2019 年各处理不同形态锌占全锌比例分别为 1.0%~2.6%、5.4%~10.0%、13.8%~23.1%、64.4%~79.8% (图 1)。可见, 随试验年限增加, F1 和 F3 占比呈不断增加趋势, F4 在连续施肥 25 年后占比明显降低。NK 处理各组分占比与 CK 处理差异不显著; NPK 处理 2019 年 F1、F2、F3 占比分别较 NK 处理显著提高了 0.3 个百分点、1.1 个百分点、2.0 个百分点, F4 占比无显著变化; 施用有机肥的处理 2007 年和 2019 年 F1、F2、F3 占比均高于 NPK 处理, F4 则显著低于 NPK 处理。2019 年, 与 NPK 处理相比, 施用有机肥的处理 F1、F2、F3 占比分别增加了 0.6~1.3 个百分点、1.7~3.4 个百分点、1.2~7.3 个百分点, F4 降低了 3.6~12.0 个百分点。

2.4 锌形态与有效锌之间的关系

相关分析表明, 土壤有效锌与弱酸可溶态锌、可还原态锌、可氧化态锌呈极显著正相关, 与残渣态锌呈极显著负相关, 其中与可还原态锌和弱酸可溶态锌相关系数较高 (表 6)。通径分析表明, 弱酸可溶态锌、可氧化态锌、残渣态锌对土壤有效锌的直接影 响达显著水平, 其中弱酸可溶态锌直接通径系数最大为 1.090。弱酸可溶态锌对土壤有效锌含量具有正向直接影响, 可还原态锌主要通过间接影响弱酸可溶态锌来影响土壤有效锌含量。可氧化态锌和残渣态锌对土壤有效锌含量具有负向直接影响, 但可氧化态锌通过间接影响弱酸可溶态锌, 对土壤有效锌有较大的正向间接效应, 因此, 其与有效锌之间的显著正相关是由间接效应造成的。为了验证通径分析结果, 再进行逐步回归分析, 结果表明, 不同锌形态对土壤有效锌的逐步回归方程为: $y = 3.839 + 1.650x_1 - 0.077x_3 - 0.017x_4$, 弱酸可溶态锌、可氧化态锌、残渣态锌对土壤有效锌含量有显著直接影响, 与通径分析结果一致。

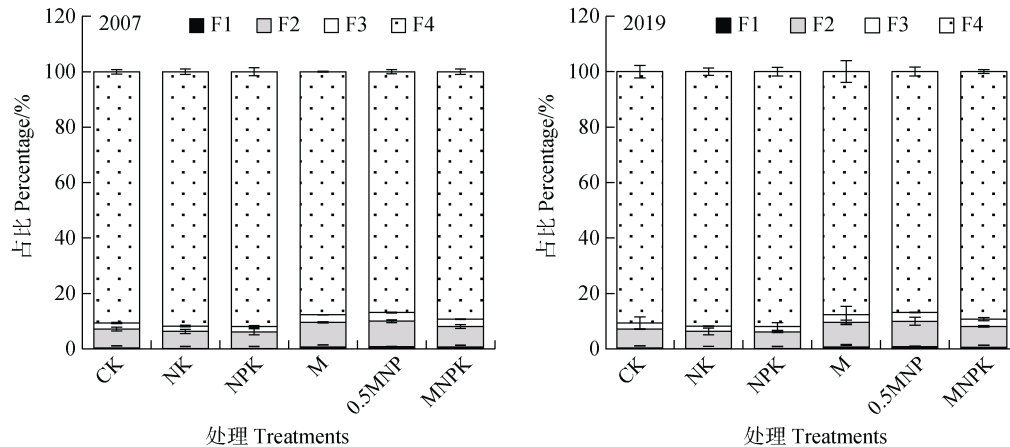


图 1 长期不同施肥下土壤锌形态占全锌比例

Fig. 1 Proportion of soil Zn forms to total Zn under long-term different fertilization

表 6 土壤中各形态锌与有效锌之间的相关系数和通径系数

Table 6 Correlation coefficient and path coefficient between different forms of Zn and available Zn in soil

锌形态 Zn fractions	相关系数 Correlation coefficient	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient				总计 Total
			F1 (x_1)	F2 (x_2)	F3 (x_3)	F4 (x_4)	
F1	0.821**	1.090**	—	0.094	-0.467	0.104	-0.269
F2	0.851**	0.116	0.887	—	-0.301	0.149	0.735
F3	0.550**	-0.525*	0.970	0.066	—	0.038	1.075
F4	-0.669**	-0.292**	-0.387	-0.059	0.069	—	-0.377

注：*为相关性或直接影响达显著水平 ($P < 0.05$)；**为相关性或直接影响达极显著水平 ($P < 0.01$)。Note: * is significant correlation or direct influence ($P < 0.05$) ; ** is extremely significant correlation or direct influence ($P < 0.01$) .

3 讨论

土壤各形态锌是影响有效锌含量的重要因素，褐土^[6]和棕壤^[23]上相关分析和通径分析结果表明，可还原态锌与有效锌相关系数最大，是土壤有效锌的直接来源。本研究与上述研究结果一致，土壤有效锌与弱酸可溶态锌、可还原态锌、可氧化态锌均呈极显著正相关，与残渣态锌呈极显著负相关，其中与可还原态锌的相关系数最大（表 6）。通径分析表明弱酸可溶态锌是有效锌的直接来源，可还原态锌和可氧化态锌是有效锌的缓存库（表 6），可通过转化为弱酸可溶态锌提高土壤锌有效性，残渣态锌的形成可降低有效锌含量。因此，促进锌素向弱酸可溶态锌、可还原态锌及可氧化态锌转化，可提高土壤中有有效锌的含量及其有效性。

3.1 施用氮磷肥对土壤锌有效性的影响

本研究中偏施氮钾肥处理土壤有效锌和锌活化系数均低于不施肥处理（表 3），其原因可能是施用氮肥增加了地上部生物量，增加了作物对锌的吸收，进而降低了土壤有效锌含量，加重了土壤缺锌程度，与黄德明等^[24]研究一致。在氮钾肥基础上施用磷肥显著提高了土壤有效锌含量和锌活化系数（表 3），施用化学磷肥可小幅提高土壤锌有效性。其原因可能是施用磷肥促进了作物根系的生长发育，增加了作物的根系活力，提高了土壤微生物的活性，使土壤中难溶态锌向有效态锌转化，从而增加锌的生物有效性^[25]。另一方面，施用一定量磷肥可降低土壤对锌的吸附能力^[26]，促进锌解吸，增加土壤锌有效性。这与本研究中施用磷肥可提高土壤弱酸可溶态锌和可还原态锌等活性较高锌形态含量结果（表 5）相吻合，与王美等^[27]在红壤上的研究结果相似。

3.2 施用有机肥对土壤锌有效性的影响

本研究中长期施用有机肥处理土壤有效锌含量和锌活化系数显著高于施用化肥处理,土壤有效锌及锌活化系数随试验年限增加呈显著增加趋势(表4),与郭晋^[28]在褐土上研究一致。其原因是有机肥自身含有锌,其自身释放的锌可提升土壤锌有效性^[29]。另一方面,施用有机肥改变了土壤养分及环境^[30],促进土壤锌向活性较高的形态转化,本研究中施用有机肥的处理显著提高了土壤弱酸可溶态锌、可还原态锌及可氧化态锌含量及其占全锌的比例,降低了残渣态锌占全锌的比例(表5,图1),进而提高了土壤锌有效性。此外,M与0.5MNP处理土壤残渣态锌含量与试验前持平,土壤全锌增加的锌主要分配在活性较高的弱酸可溶态锌、可还原态锌及可氧化态锌中(表5),说明合理施用有机肥可促进作物生长,增加作物锌吸收,促进锌向有效态转化和移动,避免其向无效态转化和累积^[31]。

3.3 土壤锌有效性的施肥调控

与前人结果^[32-33]一致,黄壤稻田上水稻植株磷锌之间也呈现一定拮抗作用,施用磷肥可降低水稻秸秆和籽粒锌含量,以高量施磷的MNPK处理降幅最大,水稻茎叶和籽粒锌含量主要受磷肥施用量影响^[34]。而本研究中施用化学磷肥和有机肥均可不同程度提高土壤锌有效性(表3),说明施用磷肥降低了作物对锌的吸收,使土壤中残留的有效锌增加。黄婷苗等^[35]研究表明,土壤有效锌水平、施磷量、土壤有效磷水平是调控黄淮麦区小麦籽粒锌含量差异的重要原因,在缺锌土壤上应首先解决土壤缺锌问题,在不缺锌土壤上应适当减少磷肥施用和降低土壤有效磷水平以提高小麦锌含量。由于本研究中各处理土壤有效锌含量均高于 $2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤有效锌处于高水平,从而导致土施锌肥(即施用有机肥)对植株和籽粒锌含量的提升较小。与大多研究结果^[36]一致,课题组取长期定位试验土壤进行叶面喷施锌肥盆栽试验,结果表明叶面喷施锌肥可显著提高水稻籽粒锌含量。可见,农业生产中应避免长期过量施用磷肥,并可结合叶面喷施锌肥提高稻米锌含量。在有效磷缺乏的土壤中,可通过合理施肥促进锌向有效态转化,提高土壤锌有效性,促进作物对土壤锌的吸收^[37]。常规施磷量下,合理配施有机肥可提高作物产量^[38],同时还可增加弱酸可溶态锌、可还原态锌和可氧化态锌含量及其占全锌比例,

促进锌向活性较强的方向移动,减少残渣态锌的累积,提高土壤锌生物有效性。

4 结 论

长期缺磷降低了土壤有效锌含量及锌活化系数,长期施用化学磷肥可小幅提升土壤有效锌含量和锌活化系数。长期施用有机肥可大幅提高黄壤稻田有效锌含量和锌活化系数,提高弱酸可溶态锌、可还原态锌、可氧化态锌含量及其占全锌比例,降低残渣态锌占比。土壤各形态锌与有效锌之间具有较好的相关性,弱酸可溶态锌是有效锌的直接来源,可还原态锌和可氧化态锌是有效锌的缓存库,残渣态锌含量增加可降低土壤有效锌含量。

参考文献 (References)

- [1] Li M, Wang S, Tian X, et al. Zn distribution and bioavailability in whole grain and grain fractions of winter wheat as affected by applications of soil N and foliar Zn combined with N or P [J]. *Journal of Cereal Science*, 2015, 61: 26—32.
- [2] Liu Q, Wang Z M, Pan F, et al. Effect evaluation on method of zinc biofortification for rice in paddy field [J]. *Soils*, 2019, 51 (1): 32—38. [刘琦, 王张民, 潘斐, 等. 大田条件下水稻锌营养强化方法探究及效果评估 [J]. *土壤*, 2019, 51 (1): 32—38.]
- [3] Alvarez J M, Gonzalez D. Zinc transformations in neutral soil and zinc efficiency in maize fertilization [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2006, 54 (25): 9488—9495.
- [4] Bai L Y, Chen S B, Hua L, et al. The complexation characteristics of humic acid with Cd and Zn [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2000, 14 (1): 44—48. [白玲玉, 陈世宝, 华璐, 等. 腐植酸与 Cd、Zn 的络合特性研究 [J]. *核农学报*, 2000, 14 (1): 44—48.]
- [5] Liu J H, Guo C H, Chen Y L, et al. Effects of types and application methods of zinc fertilizer on forms and availability of zinc in soil [J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2017, 45 (4): 149—156. [刘娟花, 国春慧, 陈艳龙, 等. 锌肥种类和施用方式对土壤锌形态及有效性的影响 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 45 (4): 149—156.]
- [6] Yang Z X, Zhou H P, Xie W Y, et al. Spatio-temporal variation of zinc speciation and its effect on available zinc in cinnamon soil under long-term fertilization [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2021, 36 (2): 162—168. [杨振兴, 周怀平, 解文艳, 等. 长期施肥下褐土锌形态时空变化及对有效性的影响 [J]. *华北农学报*, 2021,

- 36 (2): 162—168.]
- [7] Xia W J, Zhang L F, Liu Z B, et al. Effects of long-term application of chemical fertilizers and organic fertilizers on heavy metals and their availability in reddish paddy soil [J]. *Environmental Science*, 2021, 42 (5): 2469—2479. [夏文建, 张丽芳, 刘增兵, 等. 长期施用化肥和有机肥对稻田土壤重金属及其有效性的影响[J]. *环境科学*, 2021, 42 (5): 2469—2479.]
- [8] Panwar S, Dwivedi A K, Dwivedi B S, et al. Distribution of zinc pools as influenced by long-term application of fertilizers and manure in a vertisol [J]. *International Journal of Chemical Studies*, 2017, 5 (6): 1931—1934.
- [9] Yang M, He L L, Rao Z X, et al. Effects of long-term fertilization on accumulation and availability of Cd, Zn and Cu in paddy soil [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2021, 42 (2): 302—310. [杨敏, 何璐璐, 饶中秀, 等. 长期施肥对稻田土壤镉锌铜积累及其有效性的影响[J]. *农业现代化研究*, 2021, 42 (2): 302—310.]
- [10] Wang Q Y, Zhang J B, Zhao B Z, et al. Influence of different long-term fertilization practices on accumulation and availability of micronutrients in typical loamy fluvo-aquic soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49 (6): 1104—1113. [王擎运, 张佳宝, 赵炳梓, 等. 不同施肥方式对典型壤质潮土中微量元素积累及其有效性的影响[J]. *土壤学报*, 2012, 49 (6): 1104—1113.]
- [11] Longeren J F, Grove T S, Robson A D, et al. Phosphorus toxicity as a factor in zinc-phosphorus interaction in plants [J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1979, 43 (5): 966—972.
- [12] Mai W X, Tian X H, Lu X C. A study on zinc-phosphorus interaction of wheat plants at different growth stages [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2011 (5): 205—213. [买文选, 田霄鸿, 陆欣春. 小麦不同生育期磷-锌关系研究[J]. *华北农学报*, 2011, 26 (5): 205—213.]
- [13] Liu F, Liu Z Z, Liu S L, et al. Effect of combined application of P and Zn fertilizers on P and Zn availability and their absorption and distribution by wheat in calcareous soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43 (4): 929—933. [刘芳, 刘忠珍, 刘世亮, 等. 磷锌配施对石灰性土壤磷锌有效性及小麦对其吸收分配的影响[J]. *土壤通报*, 2012, 43 (4): 929—933.]
- [14] Pardo M T, Guadalix M E. Zinc sorption-desorption by two anepts: effect of pH and support medium [J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47 (2): 257—263.
- [15] Nie Z J, Zhao P, Qin S Y, et al. Effects of combined application of nitrogen and zinc on the availability and fraction of zinc in root-soil interface of winter wheat [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2018, 24 (5): 1185—1193. [聂兆君, 赵鹏, 秦世玉, 等. 氮锌配施对冬小麦根土界面锌有效性及形态分级的影响[J]. *植物营养与肥科学报*, 2018, 24 (5): 1185—1193.]
- [16] Lu X C, Tian X H, Yang X W, et al. Effects of combined application of nitrogen and zinc on zinc fractions and fertilizer efficiency in calcareous soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47 (6): 1202—1213. [陆欣春, 田霄鸿, 杨习文, 等. 氮锌配施对石灰性土壤锌形态及肥效的影响[J]. *土壤学报*, 2010, 47 (6): 1202—1213.]
- [17] Ding S N, Xue G, Liu G B, et al. Effects of long-term fertilization on soil microelements of farmland in hilly region of the Loess Plateau [J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2017, 45 (1): 124—130. [丁少男, 薛蕙, 刘国彬, 等. 长期施肥对黄土丘陵区农田土壤微量元素有效含量的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 45 (1): 124—130.]
- [18] Guizhou provincial bureau of statistics. *Guizhou statistical yearbook-2020* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020. [贵州省统计局. *贵州统计年鉴-2020* [M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.]
- [19] Liu Y L, Li Y, Zhang Y, et al. Characteristics of microbial biomass phosphorus in yellow soil under long-term application of phosphorus and organic fertilizer [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54 (6): 1188—1198. [刘彦伶, 李渝, 张艳, 等. 长期施用磷肥和有机肥黄壤微生物量磷特征[J]. *中国农业科学*, 2021, 54 (6): 1188—1198.]
- [20] Zhang Y R, Li Y, Liu Y L, et al. Effect of long-term fertilization on carbon and nitrogen activity in yellow soil in central Guizhou [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 33 (2): 325—333. [张雅蓉, 李渝, 刘彦伶, 等. 长期施肥对黔中黄壤碳氮活性的影响[J]. *西南农业学报*, 2020, 33 (2): 325—333.]
- [21] Bao S D. *Analysis for soil and agrochemistry* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. *土壤农化分析* [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [22] Yang B F. *Remediation of heavy metal contaminated agricultural soil by chemical leaching* [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. [杨冰凡. *白银市城郊重金属污染农田土壤的化学淋洗修复研究* [D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.]
- [23] Han X R, Yuan C, Wang Y, et al. Effects of long-term located fertilization on the forms transformation and spatial distribution of Cu and Zn in soils [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25 (5): 141—143, 167. [韩晓日, 袁程, 王月, 等. 长期定位施肥对土壤铜、锌形态转化及其空间分布的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, 25 (5): 141—143, 167.]
- [24] Huang D M, Xu Q M, Li Y X, et al. Influence of soil N and P excess on the availability of Zn, Mn, Fe, Cu and their content in plant [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2007, 13 (5): 966—970. [黄德明, 徐秋明, 李亚星, 等. 土壤氮、磷营养过剩对微量元素锌、

- 锰、铁、铜有效性及植株中含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(5): 966—970.]
- [25] Wang B L, Xie Z M. Effects of phosphorus application on translocation of lead, zinc and cadmium in the soil-plant system [J]. Environmental Science, 2008, 29(11): 3225—3229. [王碧玲, 谢正苗. 磷对铅、锌和镉在土壤固相-液相-植物系统中迁移转化的影响[J]. 环境科学, 2008, 29(11): 3225—3229.]
- [26] 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.]
- [27] Wang M, Li S T, Ma Y B, et al. Influence of different long-term fertilization practices on fractionations and bioavailability of Cu, Zn, and Cd in soils [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(8): 1500—1510. [王美, 李书田, 马义兵, 等. 长期不同施肥措施对土壤铜、锌、镉形态及生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(8): 1500—1510.]
- [28] Guo J. Spatiotemporal distribution of available micronutrients in cinnamon soil under long-term fertilization [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2020. [郭晋. 长期施肥褐土有效态微量元素时空分布特征[D]. 太原: 山西大学, 2020.]
- [29] Hao J L, Bu Y S, Jia Z R, et al. Effects of different organic materials and exogenous Zn on Zn distribution in soil [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2015, 32(3): 263—268. [郝佳丽, 卜玉山, 贾峥嵘, 等. 不同有机物料与外源锌对土壤锌形态及生物有效性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(3): 263—268.]
- [30] Smith S R. A critical review of the bioavailability and impacts of heavy metals in municipal solid waste composts compared to sewage sludge [J]. Environment International, 2009, 35(1): 142—156.
- [31] Wang F X. Effects of long-term fertilization on transformation and bioavailability of zinc in black soil [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2010. [王凤仙. 长期施肥对黑土锌形态转化及其生物有效性的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2010.]
- [32] Chen S B, Zhu Y G, Yang J C, et al. Mechanism of the effect of phosphorus on bioavailability of heavy metals in soil-plant systems [J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2003, 4(8): 1—7. [陈世宝, 朱永官, 杨俊诚, 等. 土壤-植物系统中磷对重金属生物有效性的影响机制[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4(8): 1—7.]
- [33] Suo Y Y, Zhang X, Si X Z, et al. Effects of combined application of phosphorus and zinc on phosphorus and zinc absorption and distribution in peanuts at different growth stages [J]. Soils, 2020, 52(1): 61—67. [索炎炎, 张翔, 司贤宗, 等. 磷锌配施对花生不同生育期磷锌吸收与分配的影响. 土壤, 2020, 52(1): 61—67.]
- [34] Liu Y L, Li Y, Bai Y J, et al. Effects of long-term P application on absorption, accumulation and translocation of zinc in rice crop [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2021(3): 75—83. [刘彦伶, 李渝, 白怡婧, 等. 长期施磷对水稻锌吸收、积累和转运的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(3): 75—83.]
- [35] Huang T M, Wang Z H, Huang Q N, et al. Causes and regulation of variation of zinc concentration in wheat grains produced in huanghuai wheat production region of China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(6): 1496—1506. [黄婷苗, 王朝辉, 黄倩楠, 等. 黄淮海区小麦籽粒锌含量差异原因与调控[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1496—1506.]
- [36] Ye T H, Zhang G, Li X K. Research advance of zinc nutrition and efficient application of zinc fertilizer in rice [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2019(6): 1—6. [叶廷红, 张赓, 李小坤. 水稻锌营养及锌肥高效施用研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2019(6): 1—6.]
- [37] Lu X C, Tian X H, Zhao A Q, et al. Effect of Zn supplementation on Zn concentration of wheat grain and Zn fractions in potentially Zn-deficient soil [J]. Cereal Research Communications, 2012, 40(3): 385—395.
- [38] Liu Y L, Li Y, Bai Y J, et al. Effect of long-term fertilization patterns on dry matter and phosphorus accumulation and translocation in rice [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2019, 25(7): 1146—1156. [刘彦伶, 李渝, 白怡婧, 等. 长期不同施肥对水稻干物质和磷素积累与转运的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(7): 1146—1156.]

(责任编辑: 陈荣府)