

长期不同施肥对钙质紫色水稻土重金属累积及有效性的影响

刘灿, 秦鱼生, 赵秀兰

引用本文:

刘灿, 秦鱼生, 赵秀兰. 长期不同施肥对钙质紫色水稻土重金属累积及有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(7): 1494–1502.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0012>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长期施肥对土壤重金属积累和有效性的影响

王腾飞, 谭长银, 曹雪莹, 欧阳达, 聂军, 王伯仁, 何其辉, 梁玉峰

农业环境科学学报. 2017, 36(2): 257–263 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0986>

有机肥中重金属对菜田土壤微生物群落代谢的影响

林辉, 孙万春, 王飞, 王斌, 翁颖, 马军伟, 符建荣

农业环境科学学报. 2016, 35(11): 2123–2130 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0674>

长期定位施肥下设施土壤重金属积累及生态风险的研究

沃惜慧, 杨丽娟, 曹庭悦, 李军

农业环境科学学报. 2019, 38(10): 2319–2327 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0293>

有机及无机肥料修复重金属污染水稻土效果差异研究

吴文成, 陈显斌, 刘晓文, 宋清梅, 李云标, 蔡信德

农业环境科学学报. 2015(10): 1928–1935 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.10.013>

畜禽粪便有机肥中重金属在不同农田土壤中生物有效性动态变化

张云青, 张涛, 李洋, 苏德纯

农业环境科学学报. 2015, 34(1): 87–96 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.01.013>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘 灿, 秦鱼生, 赵秀兰. 长期不同施肥对钙质紫色水稻土重金属累积及有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(7): 1494–1502.

LIU Can, QIN Yu-sheng, ZHAO Xiu-lan. Long-term effect of fertilization on accumulation and availability of heavy metal in a calcareous paddy soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(7): 1494–1502.



开放科学 OSID

长期不同施肥对钙质紫色水稻土重金属累积及有效性的影响

刘 灿^{1,2}, 秦鱼生³, 赵秀兰^{1,2*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 2. 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400716; 3. 四川省农业科学院土壤肥料研究所, 成都 610066)

摘 要:为探讨长期不同施肥对石灰性紫色水稻土重金属累积及有效性的影响,以四川省农业科学院土壤肥料研究所长期定位试验为依托,研究了8种不同施肥条件下[不施肥(CK)、氮肥(N)、氮磷肥(NP)、氮磷钾肥(NPK)、有机肥(M)、有机肥+氮肥(M+N)、有机肥+氮磷肥(M+NP)和有机肥+氮磷钾肥(M+NPK)]土壤理化性质、重金属全量及有效量的变化。结果表明:长期施用氮磷、氮磷钾肥会降低土壤pH、CEC含量,提高土壤有机质、碱解氮及速效磷含量,改善土壤肥力,且与有机肥配施效果更优。长期施用化肥,土壤Fe、Mn、Cu、Zn、Pb和Cd含量变化不明显,有机肥及其与化肥配施后土壤Fe、Mn、Pb含量变化也不明显,Cd略有增加,Cu、Zn含量显著提高,但均低于我国农用地土壤环境质量风险筛选值(GB 15618—2018)。化肥对Cu、Zn、Pb和Cd的有效量影响不明显,磷肥可显著提高有效Fe含量,降低有效Mn含量,而有机肥提高Cu、Pb、Cd有效量,对其有活化效应。相关分析结果表明,土壤重金属有效量与理化性质、元素总量间的相关性因元素的不同而异。研究表明,长期施用化肥及有机肥不会造成石灰性紫色水稻土重金属含量超标的风险。

关键词:长期定位施肥;石灰性紫色土;重金属;有效性

中图分类号:S155.25; X503.231 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2020)07-1494-09 **doi:**10.11654/jaes.2020-0012

Long-term effect of fertilization on accumulation and availability of heavy metal in a calcareous paddy soil

LIU Can^{1,2}, QIN Yu-sheng³, ZHAO Xiu-lan^{1,2*}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400716, China; 3. Soil and Fertilizer Research Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China)

Abstract: To investigate the effects of organic and chemical fertilizers on the accumulation and availability of heavy metals in calcareous paddy soil, soil samples were collected from a long-term experimental field established by the Soil and Fertilizer Research Institute of the Sichuan Academy of Agricultural Sciences in 1982. Eight treatments were included: (1) unfertilized control (CK); (2) chemical nitrogen fertilizer (N); (3) N plus chemical phosphorus fertilizer (NP); (4) NP plus chemical potassium fertilizer (NPK); (5) organic fertilizer (M); (6) M plus N (MN); (7) M plus NP (MNP); and (8) M plus NPK (MNPK). Results showed that long-term application of NP and NPK decreased the values of pH and cation exchange capacity (CEC), but increased the soil organic matter content (SOM), alkali hydrolyzed nitrogen (AN), and available phosphorus (AP), and therefore, improved soil fertility. These effects were more profound in the NP and NPK treatments containing organic fertilizer. Chemical fertilizers did not change the total Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, and Cd content in soils. Organic fertilizer along with chemical fertilizer significantly increased the Cu and Zn content but did not affect that of other metals. However,

收稿日期: 2020-01-04 录用日期: 2020-03-13

作者简介: 刘 灿(1993—),女,四川达州人,硕士研究生,主要研究方向为土壤污染修复。E-mail: 1448658634@qq.com

*通信作者: 赵秀兰 E-mail: zxl@swu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800600); 国家自然科学基金项目(41471272)

Project supported: National Key R&D Program of China (2018YFD0800600); The National Natural Science Foundation of China (41471272)

all these metals were under the limit prescribed by the Chinese soil environmental quality of agricultural land (GB 15618—2018). Amending the chemical fertilizers did not influence the availability of heavy metals except for treatments with chemical P fertilizer, which significantly increased available Fe, but decreased available Mn in soils. However, treatments with organic fertilizer increased soil available Cu, Pb, and Cd significantly. Correlation analysis showed that the relationships between the availability of heavy metals and the properties in the soil varied with elements. The results reported here indicate that long-term application of chemical fertilizers and organic fertilizers does not cause the risk of excessive heavy metal accumulation in calcareous purple paddy soil.

Keywords: long-term fertilization; calcareous purple soil; heavy metals; availability

现代农业中,肥料是最重要的农业生产资料,在提高作物产量和改善作物品质方面有不可替代的支撑作用^[1]。但是肥料中含有少量人体非必需且有害的元素,如Pb、Cd等,长期施用可能导致土壤重金属累积^[2]。在远离工矿业的农区,施肥等是重金属进入农田土壤的重要途径之一^[3-4]。此外,施肥还可以改变土壤的理化性质,进而影响作物对重金属的吸收和累积,因而施肥对土壤环境质量和农产品质量安全的影响引起了社会广泛关注^[5]。

长期定位试验是研究不同施肥条件下土壤重金属累积的最有效方法^[6]。根据长期定位试验的结果,人们提出了不同的施肥建议以维持和改善农田土壤环境质量。如杨振兴等^[7]通过22 a的氮磷肥与有机肥配施试验发现,施肥使褐土出现重金属Pb累积现象,指出应控制肥料施用量。苏妹等^[8]研究表明,土壤Pb含量不受长期施用化肥的影响,Cu、Zn、Cd含量受粪肥影响,且随粪肥重金属含量的变化呈阶段性演替的规律,指出在农业生产中,既要适度增施有机肥,又要关注其潜在风险。陈芳等^[9]报道,施化肥加快了土壤重金属累积,促进了作物对重金属的吸收。柳开楼等^[10]在江西红壤上的研究发现,长期猪粪还田增加了表层土壤的Cu、Zn、Cr和As含量,但不同重金属的累积规律存在明显差异,其中Cu和As的超标风险较大,Zn和Cr的超标风险较小。由此可见,因土壤、元素及肥源的不同,不同区域关于长期施肥对土壤重金属累积及其有效性影响的研究结果存在差异,开展各区域不同施肥条件下土壤重金属累积及有效量变化具有重要意义。

紫色水稻土集中分布于川渝丘陵区,在我国水稻土资源中占据举足轻重的位置^[11]。根据pH和碳酸钙含量可将其分为酸性、中性和石灰性紫色土^[12]。关于长期施肥对土壤重金属累积和有效性的影响在中性紫色水稻土中已有研究^[13],但未见关于石灰性紫色水稻土中的报道。本文以四川省农业科学院土壤肥料研究所长期定位试验为平台,在前人对土壤磷素盈

余^[14]、培肥效果^[15]、团聚体稳定性^[16]研究的基础上,开展长期不同施肥对农田土壤理化性质、重金属全量及其有效量的影响研究,旨在为该类型农田土壤重金属污染防治提供施肥建议,为维持该区域农业生产的可持续发展提供支撑。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

长期定位试验始于1982年,位于四川省遂宁市船山区永兴镇,地理坐标为30°10′50″N,105°03′26″E。该地区属亚热带湿润季风气候,年平均降雨量927 mm,年平均气温17.2℃,无霜期达300 d,年日照时数达1 328 h。试验地土壤为侏罗纪遂宁组母质发育的钙质紫色水稻土。试验前0~20 cm表层土的基本性质为:pH 8.6,有机质15.9 g·kg⁻¹,全氮、全磷(P₂O₅)、全钾(K₂O)分别为1.09、1.35、26.90 g·kg⁻¹,碱解氮、速效磷(P₂O₅)、速效钾(K₂O)分别为66.3、3.9、130.0 mg·kg⁻¹^[14-15]。

1.2 试验设计

试验设计同参考文献[14-15],设不施肥(CK)、氮肥(N)、氮磷肥(NP)、氮磷钾肥(NPK)、有机肥(M)、有机肥+氮肥(M+N)、有机肥+氮磷肥(M+NP)和有机肥+氮磷钾肥(M+NPK),共8个处理,每个处理重复4次,完全随机排列。小区面积13.4 m²,各小区用水泥板隔开,保持水泥板高度距地面20 cm。种植制度为稻-麦轮作模式。水稻移栽前人工整地,灌水后栽秧再施基肥,小麦采用免耕种植,直接在稻茬上打窝,施基肥后播种。肥料每年分两季施入,每季施肥量分别为尿素120 kg N·hm⁻²,过磷酸钙60 kg P₂O₅·hm⁻²,氯化钾60 kg K₂O·hm⁻²,有机肥15 000 kg·hm⁻²。其中有有机肥为猪粪水,含水率70%,干物质含N、P₂O₅、K₂O分别为2.0~2.2、18~25、13~16 g·kg⁻¹。有机肥与磷肥作基肥一次施入,水稻季60%氮肥和50%钾肥作基肥,40%氮肥和50%钾肥作分蘖肥施用;小麦季30%氮肥和50%钾肥作基肥,剩余70%氮肥和50%钾肥作

拔节肥施入。其他管理措施同当地常规大田生产。

1.3 样品采集与分析

1.3.1 样品采集

水稻收获后于2018年9月采集耕层(0~20 cm)土壤样品,在每个小区按S型等间距采集5个同等质量样品,混匀,四分法保留1 kg左右。将样品中的根系、石块等挑出,在阴凉处自然风干后分别过2 mm和0.25 mm尼龙筛,供土壤理化性质、重金属全量及有效量分析使用。

1.3.2 样品分析

土壤pH、有机质(SOM)、阳离子交换量(CEC)、碱解氮(AN)、速效磷(AP)和速效钾(AK)按鲍士旦^[17]的方法测定。土壤Fe、Mn、Cu、Zn、Pb、Cd全量采用HCl-HNO₃-HClO₄消煮,有效态Fe、Mn、Cu、Zn用0.005 mol·L⁻¹ DTPA-0.1 mol·L⁻¹ TEA-0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂(pH 7.3)提取,Pb、Cd用1 mol·L⁻¹ NH₄OAc(pH 7.0)溶液提取,消煮液和提取液中的重金属浓度用原子吸收分光光度法(普析-890)测定。分析过程中设置空白样、平行样及国家标准样(GBW07428)进行质量控制。

1.4 数据处理

统计分析采用Excel 2007和SPSS 20.0,不同处理间的差异显著性检验采用Duncan法($P<0.05$),采用Origin 8.5作图。

2 结果与讨论

2.1 长期不同施肥对土壤基本性质的影响

长期不同施肥模式下土壤基本性质见表1。8个处理土壤pH为7.81~8.16,与试验初期土壤pH 8.60

相比,降低0.44~0.79个单位,呈现明显的酸化趋势,这与Li等^[18]关于近30 a四川盆地土壤pH变化的报道一致。与CK相比,除M处理外,其他处理土壤pH降低0.06~0.34个单位。其中,N、M、M+N处理变化不显著,NP、NPK、M+NP、M+NPK处理显著降低($P<0.05$);与单独施用化肥相比,有机肥-化肥配施处理土壤pH降低幅度更大,其中M+NP与NP间差异显著。表明施氮磷、氮磷钾肥具有使土壤酸化的作用,与有机肥配合施用后酸化作用增强,结果与王媛华等^[19]的研究一致,但与柳开楼等^[10]的报道不同,他们的研究表明,长期施用猪粪具有阻控、改良红壤酸化的作用。研究表明,尿素施入土壤后,在脲酶作用下水解生成NH₄⁺,NH₄⁺或进一步硝化生成H⁺,或置换土壤胶体上吸附的H⁺,使土壤pH降低^[20],但本研究的土壤为石灰性紫色土,有较强的缓冲能力,因而N、M及M+N处理土壤pH变化不显著。NP、NPK处理土壤pH显著降低,与过磷酸钙肥料水溶液为酸性且含有一定的游离酸有关^[21],而有机肥与NP、NPK配施酸化作用增强可能与有机肥的施入促进了植物生长,从土壤中带走更多的Ca、Mg、K等盐基养分有关^[22]。

SOM是反映土壤肥力质量的重要指标。从表1看出,各处理SOM含量在16.76~21.66 g·kg⁻¹。与CK相比,施肥使SOM含量提高5.19%~29.24%,提高幅度以M+NP处理最大,N处理最小。除N、NP外,其他施肥处理SOM含量均显著提高($P<0.05$)。在不施有机肥情况下,SOM含量为NPK>NP>N>CK,NPK处理显著高于CK,这可能与氮磷钾肥配合施用使养分供给更充分、更全面,有利于提高作物生物量,增加了作物残茬的输入有关^[23]。与有机肥配施后,SOM含量表现

表1 不同施肥处理土壤理化性质

Table 1 Physicochemical properties of soils under different fertilization treatments

处理 Treatments	pH	SOM Soil organic matter/ g·kg ⁻¹	CEC Cation exchange capacity/cmol·kg ⁻¹	AN Hydrolyzable nitrogen/ mg·kg ⁻¹	AP Available phosphorus/ mg·kg ⁻¹	AK Available potassium/ mg·kg ⁻¹
CK	8.15±0.01a	16.76±0.91d	21.34±0.57a	72.42±3.06c	2.15±0.13c	121.12±0.74a
N	8.09±0.04ab	17.63±1.64cd	20.76±0.16ab	76.88±5.01bc	1.27±0.16c	106.25±5.35b
NP	8.02±0.04bc	18.04±1.36cd	19.69±0.57abc	79.46±2.33bc	25.41±2.38b	89.98±5.54d
NPK	8.00±0.10bc	19.49±1.67bc	19.23±0.50bc	75.71±4.11bc	23.20±1.43b	124.12±0.35a
M	8.16±0.03a	19.01±0.31bc	20.32±0.87abc	81.57±6.89ab	2.27±0.17c	105.99±1.75b
M+N	8.08±0.02ab	19.50±0.47bc	19.59±1.81bc	84.38±4.87ab	2.05±0.20c	95.03±3.31cd
M+NP	7.81±0.07d	21.66±0.58a	19.69±0.57abc	92.11±3.65a	32.07±3.41a	90.51±7.52d
M+NPK	7.96±0.04c	20.22±0.97ab	18.69±1.06c	85.78±8.55ab	30.04±2.94a	100.67±2.68bc

注:表中数据为平均值±标准差,同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$),下同。

Note: Values are means ± SD of four replicates and are significantly different at $P<0.05$ when followed by the different lowercase letters. The same below.

为 $M+NP>M+NPK>M+N>M$, 且各处理均高于相应的化肥处理, 与马俊永等^[24]和韦小了等^[25]的研究结果一致, 表明长期有机肥与化肥配施能提高 SOM 含量, 有利于 SOM 的积累, 提高土壤肥力^[26]。

CEC 反映土壤胶体表面负电荷的总数, 是土壤保肥、供肥缓冲性能的重要指标。各处理土壤 CEC 为 $18.69\sim 21.34\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, 土壤保肥能力中等或较强。在不施有机肥的情况下, 土壤 CEC 高低顺序为 $CK>N>NP>NPK$, 即施肥降低了土壤 CEC; 与有机肥配施后, $M+N$ 、 $M+NPK$ 处理显著低于 CK, 表明有机肥与化肥配施使 CEC 下降幅度增大, 与李委涛等^[27]报道的有机肥可显著提高 SOM 含量, 增加土壤的可变负电荷数量, 从而提高 CEC 含量的结果不同, 这可能与施肥引起的 pH 降低有关。研究表明, 土壤胶体微粒表面羟基的解离受 pH 影响, pH 降低时, 土壤胶体微粒表面负电荷减少, 导致阳离子交换量也随之降低^[28]。

土壤 AN 含量多少表征土壤供氮能力强弱, 反映当季作物可利用的氮含量。各处理 AN 含量为 $72.42\sim 92.11\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 与 CK 相比, 提高 $4.54\%\sim 27.19\%$, 其中 $M+NP$ 处理最高, N 处理最低。不含有机肥处理 (CK、N、NP、NPK) 间差异不显著, 有机肥与化肥配施处理较 CK 显著提高 ($P<0.05$), 说明化肥能提高土壤供氮能力, 而与有机肥配合施用效果更佳。

土壤 AP 含量为 $1.27\sim 32.07\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 以 N 处理 AP 含量最低, $M+NP$ 处理 AP 含量最高, 总体上, 配施有机肥能促进磷素有效性提高。不同施肥处理土壤 AP 含量存在较大差异, 表现为 3 个档次: 不施化学磷肥 (CK、N、M、 $M+N$) 处理 AP 含量为低档; 施用化学磷肥未配施有机肥处理 (NP、NPK) AP 含量为中档, 较 CK 增加了 10 倍左右, 因为水溶性磷肥施入土壤后, 一部分被土壤吸附或存在于土壤溶液中, 保持着有效状态^[29]; 化学磷肥和有机肥配施处理 ($M+NP$ 、 $M+NPK$) AP 含量为高档, 较 CK 增加 14 倍左右, 因为有机肥增

施可增加 SOM 含量, 而 SOM 在转化过程中产生有机酸等物质, 可减少石灰性紫色土中大量 CaCO_3 对有效磷酸盐的固定, 并促进无机磷的溶解^[30]。表明有机肥单独提升土壤 AP 含量的能力较弱, 化学磷肥的施用是补充缺乏磷素的关键, 有机肥与化肥配施效果更优, 与高菊生等^[31]研究结果一致。

土壤 AK 含量为 $89.98\sim 124.12\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与 CK 相比, 除 NPK 处理外, 其余施肥处理 AK 含量显著降低, 与魏猛等^[32]施肥提高土壤 AK 含量的结果不一致, 可能因为施氮、氮磷肥提高了作物生物量及产量, 增大了作物对钾的吸收而又缺乏及时的钾素补给引起。化学钾肥能够在一定程度维持土壤的 AK 养分含量, 缓解钾素的缺乏, 较其他处理更能维持土壤较高的有效钾水平。

2.2 长期不同施肥对土壤重金属全量的影响

各施肥处理土壤 Fe、Mn 含量分别为 $23.54\sim 24.57\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.62\sim 0.68\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, Cu、Zn、Pb 和 Cd 含量分别为 $18.26\sim 21.16$ 、 $78.76\sim 89.93$ 、 $28.62\sim 31.23\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.219\sim 0.247\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (表 2), 远低于《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准 (试行)》(GB 15618—2018) 的风险筛选值: Cu $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (其他, $\text{pH}>7.5$)、Zn $300\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($\text{pH}>7.5$)、Pb $170\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (其他, $\text{pH}>7.5$) 和 Cd $0.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (其他, $\text{pH}>7.5$), 重金属污染风险很低。

不同处理模式下, 土壤 Fe 含量以 CK 最高, NPK 最低, 施肥使土壤 Fe 含量降低, 但各处理间差异不显著。土壤 Mn 含量以 N 和 $M+N$ 最高, $M+NPK$ 最低, 施肥对土壤 Mn 含量无明显影响, 可能与土壤中 Fe、Mn 元素含量较高, 基数大有关, 使得施肥对土壤 Fe、Mn 含量的干扰小到可以忽略。

施肥条件下土壤 Cu 含量以 M 处理最高, N 处理最低, 化肥处理 (N、NP、NPK) 间无显著差异; 与 CK 相比, 仅 M、 $M+N$ 、 $M+NPK$ 处理显著提高 ($P<0.05$), 表

表 2 不同施肥处理土壤重金属含量

Table 2 The contents of heavy metals in soil under different fertilization treatments

处理 Treatments	Fe/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	Mn/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	Cu/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Zn/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Pb/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Cd/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
CK	$24.57\pm 1.44\text{a}$	$0.67\pm 0.05\text{a}$	$18.91\pm 0.35\text{cd}$	$78.76\pm 4.30\text{c}$	$30.03\pm 1.33\text{ab}$	$0.229\pm 0.020\text{ab}$
N	$24.48\pm 0.46\text{a}$	$0.68\pm 0.03\text{a}$	$18.26\pm 0.92\text{d}$	$82.21\pm 2.03\text{bc}$	$29.35\pm 1.18\text{ab}$	$0.231\pm 0.008\text{ab}$
NP	$24.33\pm 0.47\text{a}$	$0.64\pm 0.03\text{a}$	$18.66\pm 0.28\text{d}$	$80.72\pm 1.58\text{bc}$	$28.62\pm 0.69\text{b}$	$0.223\pm 0.004\text{ab}$
NPK	$23.54\pm 0.79\text{a}$	$0.64\pm 0.03\text{a}$	$19.21\pm 0.24\text{cd}$	$82.72\pm 0.96\text{bc}$	$28.90\pm 0.76\text{b}$	$0.219\pm 0.004\text{b}$
M	$23.87\pm 0.96\text{a}$	$0.67\pm 0.06\text{a}$	$21.16\pm 0.52\text{a}$	$82.54\pm 3.04\text{bc}$	$29.36\pm 1.25\text{ab}$	$0.234\pm 0.006\text{ab}$
$M+N$	$24.44\pm 0.43\text{a}$	$0.68\pm 0.01\text{a}$	$21.01\pm 1.03\text{a}$	$85.81\pm 3.09\text{ab}$	$30.41\pm 1.25\text{ab}$	$0.247\pm 0.012\text{a}$
$M+NP$	$24.50\pm 0.78\text{a}$	$0.64\pm 0.02\text{a}$	$19.81\pm 0.38\text{bc}$	$85.68\pm 1.97\text{ab}$	$29.44\pm 0.18\text{ab}$	$0.239\pm 0.007\text{ab}$
$M+NPK$	$24.44\pm 0.46\text{a}$	$0.62\pm 0.02\text{a}$	$20.46\pm 0.62\text{ab}$	$89.93\pm 3.08\text{a}$	$31.23\pm 0.57\text{a}$	$0.230\pm 0.014\text{ab}$

明,单施化肥不会影响土壤Cu的累积,但与有机肥配施后显著提高了土壤Cu含量。土壤Zn含量以M+NPK最高,M+NP、M+N次之,且显著高于CK,其余施肥处理均有提高,但变化不显著;与不施有机肥处理相比,各化肥与有机肥配施处理的Zn含量也均有提高,其中M+NPK和NPK间差异显著($P<0.05$)。表明有机肥是导致土壤Cu、Zn含量升高的主要因素。

施肥使土壤Pb含量变化不明显。土壤Pb含量除M+NPK处理显著高于NP和NPK外,其余处理间无显著差异,表明长期施用化肥、有机肥或有机无机配施对该土壤Pb含量无明显影响。土壤Cd含量除M+N处理显著高于NPK处理外,其余处理间差异不显著。无论是否施用有机肥,均以氮肥(M+N、N)处理最高,氮磷钾肥(M+NPK、NPK)处理最低,但不同处理间的差异不显著。与未施有机肥相比,配施处理土壤Cd含量提高2.18%~7.17%。说明施用化肥不会引起土壤Cd累积,配施有机肥使土壤Cd略有累积,但未达到超标水平。

目前,国内外现有长期定位试验结果表明,施用化肥不会导致土壤各种重金属含量明显累积,但有机肥对土壤重金属含量影响却有一定的差异。王腾飞等^[33]和 Rao等^[34]研究表明,长期施用猪粪或厩肥的土壤Cd显著累积;王改玲等^[35]报道,长期氮磷+有机肥配施、氮磷化肥+秸秆覆盖、氮磷有机肥+秸秆覆盖能增加土壤Cu、Zn、As、Pb含量,降低土壤Hg含量,对土壤Cd、Cr、Ni影响不显著。Gruter等^[36]在瑞士的两个长期定位试验结果显示,施用源于厩肥或绿色废弃物的堆肥会显著提高土壤中Zn和Cd的含量。这可能与有机肥源中的重金属含量差异有关。徐明岗等^[5]认为,有机肥的质量对土壤重金属的累积起重要作用。本研究中,长期施用有机肥的土壤Fe、Mn、Pb含量变化不明显,Cd略有增加,Cu、Zn含量显著提高,可能与试验施用猪粪水中含较高浓度的Cu、Zn,较低

浓度的Cd和Pb有关。现代畜牧业生产中,为促进生猪生长、提高饲料利用率和抑制有害菌,养殖户常使用含Cu、Zn等金属元素的饲料添加剂,致使猪粪水中这两种元素浓度较高,引起土壤Cu、Zn累积^[37]。汤逸帆等^[38]也证实,随着猪粪沼肥施用年限的增加,滨海稻麦轮作两季土壤Cu、Zn含量显著提高。本研究中,虽然长期施用有机肥导致了土壤Cu、Zn累积,但并未出现Cu、Zn超标问题,对土壤环境质量安全并未构成威胁。

2.3 长期不同施肥对土壤重金属有效量的影响

表3为长期不同施肥模式下土壤重金属的有效量。土壤有效Fe、Mn、Cu、Zn、Pb、Cd含量分别为16.04~50.02、14.36~17.74、2.18~3.23、1.55~1.63、1.27~1.53 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和0.157~0.183 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,占总量的比例——“活化率”^[39]分别为0.07%~0.20%、2.32%~2.63%、11.68%~16.31%、1.80%~2.00%、4.33%~5.20%、71.64%~77.90%。

土壤有效Fe含量表现出与AP相似的结果。不含化学磷肥处理(CK、N、M、M+N)有效Fe含量较低,且各处理间差异不显著;含化学磷肥未配施有机肥处理(NP、NPK)有效Fe含量增加较大,较CK增加2倍多;化学磷肥和有机肥配施处理(M+NP、M+NPK)有效Fe含量增长最大,较CK增加3倍左右。与本研究结果类似,杨丽娟等^[40]研究施肥对菜地微量元素有效性影响中发现,施氮磷肥使Fe有效性提高,不同的是本研究中化学磷肥对有效Fe含量的提高起决定性作用,其原因有待进一步研究。与有效Fe不同,长期化肥处理使土壤有效Mn含量降低,其中施磷肥处理(NP、NPK、M+NP、M+NPK)较CK显著降低,说明化学磷肥对土壤Mn元素起固化作用。

施肥对有效Cu含量的影响因肥料种类的不同而异。含有机肥处理(M、M+N、M+NP、M+NPK)Cu含量较CK显著增加,化肥处理(N、NP、NPK)与CK差异不

表3 不同施肥处理土壤重金属有效量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 3 Contents of available heavy metals in soil under different fertilization treatments ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

处理 Treatments	Fe	Mn	Cu	Zn	Pb	Cd
CK	16.13±1.65d	17.57±1.83a	2.35±0.18c	1.60±0.20a	1.37±0.04abc	0.168±0.003b
N	17.17±1.91d	17.74±1.28a	2.32±0.19c	1.56±0.17a	1.27±0.09c	0.180±0.004a
NP	38.93±2.23c	15.22±1.81bc	2.18±0.13c	1.55±0.18a	1.33±0.08bc	0.170±0.003b
NPK	37.86±2.97c	14.88±0.70bc	2.37±0.20c	1.57±0.13a	1.27±0.03c	0.157±0.008c
M	16.04±1.52d	17.32±0.95a	2.77±0.48b	1.55±0.08a	1.46±0.13ab	0.179±0.002a
M+N	18.53±1.92d	16.13±0.95ab	3.01±0.42ab	1.60±0.06a	1.43±0.09ab	0.182±0.008a
M+NP	50.02±2.95a	15.61±0.60bc	3.23±0.11a	1.63±0.05a	1.53±0.17a	0.183±0.002a
M+NPK	43.97±4.21b	14.36±0.35c	3.02±0.02ab	1.62±0.07a	1.42±0.07abc	0.179±0.002a

显著。与相应化肥处理相比,配施有机肥土壤有效Cu含量明显提高,其中N和M+N处理、NP和M+NP处理、NPK和M+NPK处理间的差异均达显著水平,说明长期施用有机肥有利于土壤Cu活化。各施肥处理间有效Zn含量无显著差异,表明长期施用化肥或有机肥配施化肥对土壤有效Zn含量影响不大。

与CK相比,长期化肥处理使土壤有效Pb含量降低,其中N和NPK处理降低幅度最大,而化肥与有机肥配施提高有效Pb含量。与单施化肥相比,配施有机肥后有效Pb含量增加,其中N和M+N处理、NP和M+NP处理间差异达显著水平,说明施用有机肥也有利于土壤Pb的活化。与CK相比,施N处理有效Cd含量显著提高,NPK处理显著降低,NP处理变化不明显;配施有机肥后土壤有效Cd含量均显著高于CK,也高于相应的单施化肥处理,其中NP和M+NP处理、NPK和M+NPK处理间差异达显著水平,但有机肥与化肥配施不同处理间的差异不显著,说明有机肥同样能活化土壤Cd。

2.4 土壤理化性质及其重金属含量与有效量的相关性分析

肥料施入土壤后,可通过改变土壤理化性质,影响重金属的沉淀-溶解、吸附-解吸平衡,从而改变重

金属的有效性。为弄清长期施肥影响重金属有效性的机制,分析了Fe、Mn、Cu、Zn、Pb、Cd有效量与其全量及理化性质间的相关性。由表4可知,土壤有效Fe与pH、全Mn呈极显著负相关,与AP呈极显著正相关;有效Mn与CEC、全Mn呈极显著正相关,与AP、有效Fe呈极显著负相关;有效Cu与SOM、AN、全Cu、全Zn呈显著或极显著正相关;有效Zn与有效Cu呈显著正相关;有效Pb与AN、全Cu、有效Cu呈显著或极显著正相关;有效Cd与所测性质的相关性均不显著。

目前,关于土壤重金属有效性的影响因素,关注较多的是重金属全量、pH、SOM和CEC。有研究报道,土壤中Cu、Zn和Cd全量与其有效态含量呈极显著正相关关系,全量Pb与有效Pb呈显著负相关而与有效Cu和Zn相关性不显著^[41]。随着土壤pH的升高,土壤表面的可变负电荷增加,土壤胶体吸附重金属离子的能力增强,同时有利于重金属沉淀,从而降低重金属有效态含量^[42]。随着CEC的升高,土壤表面携带的负电荷也增多,可交换金属阳离子的数量增多,土壤对金属离子的吸附作用增强,对重金属起到固定的效果;CEC降低的结果则相反。如崔旭等^[43]在对轻度酸性污染土壤稳定化研究中发现,土壤CaCl₂-Cd含量随着pH增加而下降,土壤中CEC越高,其重

表4 重金属有效量与理化性质、重金属含量间的相关关系

Table 4 The correlation between the contents of available heavy metals and physicochemical properties and their total contents in soil

指标 Index	有效Fe DTPA-Fe	有效Mn DTPA-Mn	有效Cu DTPA-Cu	有效Zn DTPA-Zn	有效Pb NH ₄ OAc-Pb	有效Cd NH ₄ OAc-Cd
pH	-0.923**	0.683	-0.504	-0.595	-0.350	-0.062
SOM	0.700	-0.615	0.833*	0.572	0.638	0.289
CEC	-0.666	0.921**	-0.385	-0.224	-0.091	0.066
AN	0.570	-0.426	0.887**	0.577	0.802*	0.624
AP	0.994**	-0.869**	0.268	0.390	0.190	-0.199
AK	-0.367	0.264	-0.468	-0.187	-0.523	-0.619
全Fe	-0.039	0.219	0.226	0.506	0.295	0.572
全Mn	-0.861**	0.850**	-0.106	-0.223	-0.037	0.291
全Cu	-0.058	-0.156	0.759*	0.280	0.707*	0.473
全Zn	0.495	-0.600	0.795*	0.599	0.460	0.503
全Pb	-0.039	-0.141	0.581	0.680	0.381	0.494
全Cd	-0.118	0.097	0.633	0.459	0.611	0.640
有效Fe	1	-0.850**	0.326	0.440	0.230	-0.152
有效Mn		1	-0.274	-0.330	-0.073	0.271
有效Cu			1	0.732*	0.864**	0.642
有效Zn				1	0.592	0.299
有效Pb					1	0.614

注:* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关;** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

Note: * significant correlation at level 0.05 (bilateral); ** significant correlation at level 0.01 (bilateral).

金属有效性越低。SOM“活化”^[44]、“钝化”^[45]重金属的研究皆有报道,一般认为,有机质对重金属活性的影响与其组分和含量有关,小分子有机酸与重金属生成溶解度较高的有机络合物时有利于活化重金属;而大分子有机酸与重金属形成溶解度较低的有机螯合物时会钝化重金属^[46],有机质对重金属有效性的影响由两者共同决定。本研究中,土壤有效Mn、Cu与其全量呈显著正相关,有效Fe与pH呈显著负相关,有效Cu与SOM呈显著正相关,有效Fe与AP间及有效Pb与AN间呈显著正相关关系,说明因施肥引起的土壤性质的改变对重金属有效性的影响随元素的不同而异,有效氮和有效磷对重金属的有效性也有一定的影响^[6]。

3 结论

(1)长期施肥会降低土壤pH、CEC含量,提高土壤有机质、碱解氮、速效磷含量,改善土壤肥力,且配施有机肥效果更优。

(2)长期施用化肥后土壤Fe、Mn、Cu、Zn、Pb、Cd含量无明显变化,并未造成明显累积。有机肥及其与化肥配施后土壤Fe、Mn、Pb含量变化也不明显,Cd略有增加,Cu、Zn含量显著提高。尽管如此,本长期定位试验施用的有机肥对土壤环境仍是安全的。

(3)化肥,特别是磷肥可显著提高有效Fe含量,降低土壤有效Mn含量,对Cu、Zn、Pb有效量的影响较小,有机肥显著提高Cu、Pb、Cd有效量,对其有活化作用。

(4)重金属有效量与土壤理化性质、元素总量间的相关性因元素的不同而异,长期施肥条件下土壤重金属有效性及其与理化性质变化的关系需进一步研究。

参考文献:

- [1] Yang S, Li F, Malhi S S, et al. Long-term fertilization effects on crop yield and nitrate nitrogen accumulation in soil in northwestern China [J]. *Agronomy Journal*, 2004, 96(4): 1039-1049.
- [2] Upreti D, Hejman M, Széková J, et al. Concentration of trace elements in arable soil after long-term application of organic and inorganic fertilizers [J]. *Nutrient Cycle Agroecosystem*, 2009, 85(3): 241-252.
- [3] 卢鑫, 胡文友, 黄标, 等. 基于UNMIX模型的矿区周边农田土壤重金属源解析[J]. *环境科学*, 2018, 39(3): 1421-1429.
LU Xin, HU Wen-you, HUANG Biao, et al. Source apportionment of heavy metals in farmland soils around mining area based on UNMIX model[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(3): 1421-1429.
- [4] Huang Y, Deng M, Wu S, et al. A modified receptor model for source apportionment of heavy metal pollution in soil[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 354: 161-169.
- [5] 徐明岗, 武海雯, 刘景. 长期不同施肥下我国3种典型土壤重金属的累积特征[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(12): 2319-2324.
XU Ming-gang, WU Hai-wen, LIU Jing. Evolution of heavy metal contents of three soils under long-term fertilizations[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(12): 2319-2324.
- [6] 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.
WANG Mei, LI Shu-tian, MA Yi-bing, 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.
- [7] 杨振兴, 周怀平, 解文艳, 等. 长期施肥对土壤及玉米籽粒中Pb、As含量的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(23): 4827-4836.
YANG Zhen-xing, ZHOU Huai-ping, XIE Wen-yan, et al. Effect of long-term fertilization on Pb, As contents of soil and maize grain[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23): 4827-4836.
- [8] 苏姝, 王颖, 刘景, 等. 长期施肥下黑土重金属的演变特征[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(23): 4837-4845.
SU Shu, WANG Ying, LIU Jing, et al. Evolution characteristics of heavy metals in the black soil under long-term fertilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23): 4837-4845.
- [9] 陈芳, 董元华, 安琼, 等. 长期肥料定位试验条件下土壤中重金属的含量变化[J]. *土壤*, 2005, 37(3): 308-311.
CHEN Fang, DONG Yuan-hua, AN Qiong, et al. Variation of soil heavy metal contents in a long-term fertilization experiment[J]. *Soils*, 2005, 37(3): 308-311.
- [10] 柳开楼, 李大明, 黄庆海, 等. 红壤稻田长期施用猪粪的生态效益及承载力评估[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(2): 303-313.
LIU Kai-lou, LI Da-ming, HUANG Qing-hai, et al. Ecological benefits and environmental carrying capacities of red paddy field subjected to long-term pig manure amendments[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(2): 303-313.
- [11] 王彦, 张进忠, 王振华, 等. 四川盆地丘陵区农田土壤对磷的吸附与解吸特征[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(10): 2068-2074.
WANG Yan, ZHANG Jin-zhong, WANG Zhen-hua, et al. Adsorption and desorption characteristics of phosphorus on cropland soil in the hilly area of Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(10): 2068-2074.
- [12] 丁武泉, 包兵, 李航, 等. 三峡库区消落区紫色土对重金属的吸附特征[J]. *生态与农村环境学报*, 2007, 23(1): 40-42, 62.
DING Wu-quan, BAO Bing, LI Hang, et al. Heavy metal adsorption characteristics of purple soil in water-level-fluctuating zone of the Three-Gorge reservoir region[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2007, 23(1): 40-42, 62.
- [13] 王珂, 徐春丽, 张宇亭, 等. 长期不同施肥下紫色土-作物体系镉累积及安全性评估[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(18): 3542-3550.
WANG Ke, XU Chun-li, ZHANG Yu-ting, et al. Cd accumulation and safety assessment of soil-crop system induced by long-term dif-

- ferent fertilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(18):3542-3550.
- [14] 樊红柱, 陈庆瑞, 郭 松, 等. 长期不同施肥紫色水稻土磷的盈亏及有效性[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 154-162.
FAN Hong-zhu, CHEN Qing-rui, GUO Song, et al. Phosphorus balance and availability in a purple paddy soil under long-term different fertilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(1): 154-162.
- [15] 樊红柱, 陈 琨, 陈庆瑞, 等. 长期定位施肥31年后紫色水稻土碳、氮含量及储量变化[J]. 西南农业学报, 2018, 31(7): 1425-1431.
FAN Hong-zhu, CHEN Kun, CHEN Qing-rui, et al. Changes of carbon and nitrogen in purple paddy soil after 31-year of fertilization[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 31(7):1425-1431.
- [16] 樊红柱, 秦鱼生, 陈庆瑞, 等. 长期施肥紫色水稻土团聚体稳定性及其固碳特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6):1473-1480.
FAN Hong-zhu, QIN Yu-sheng, CHEN Qing-rui, et al. Distribution and stability of aggregates and carbon sequestration in purple paddy soil under long-term fertilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(6):1473-1480.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 三版. 北京:中国农业出版社, 2000.
BAO Shi-dan. Soil agrochemical analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [18] 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. doi: 10.1016/j.scitotenv. 2019. 134320.
- [19] 王媛华, 段增强, 汤 英, 等. 不同施肥处理对碱性设施土壤酸化的影响[J]. 土壤, 2016, 48(2): 349-354.
WANG Yuan-hua, DUAN Zeng-qiang, TANG Ying, et al. Effects of different fertilizations on acidification of a greenhouse alkaline soil[J]. *Soils*, 2016, 48(2): 349-354.
- [20] 赵 晶, 冯文强, 秦鱼生, 等. 不同氮磷钾肥对土壤pH和镉有效性的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(5): 953-961.
ZHAO Jing, FENG Wen-qiang, QIN Yu-sheng, et al. Effects of application of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on soil pH and cadmium availability[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(5): 953-961.
- [21] 陈青云, 胡承孝, 谭启玲, 等. 不同磷源对土壤镉有效性的影响[J]. 环境科学学报, 2011, 31(10): 2254-2259.
CHEN Qing-yun, HU Cheng-xiao, TAN Qi-ling, et al. Effect of different phosphate sources on availability of cadmium in soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(10): 2254-2259.
- [22] 徐仁扣. 土壤酸化及其调控研究进展[J]. 土壤, 2015, 47(2): 238-244.
XU Ren-kou. Research progresses in soil acidification and its control [J]. *Soils*, 2015, 47(2): 238-244.
- [23] 黄 晶, 高菊生, 张杨珠, 等. 长期不同施肥下水稻产量及土壤有机质和氮素养分的变化特征[J]. 应用生态学报, 2013, 24(7):1889-1894.
HUANG Jing, GAO Ju-sheng, ZHANG Yang-zhu, et al. Change characteristics of rice yield and soil organic matter and nitrogen contents under various long-term fertilization regimes[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(7):1889-1894.
- [24] 马俊永, 李科江, 曹彩云, 等. 有机-无机肥长期配施对潮土土壤肥力和作物产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(2):236-241.
MA Jun-yong, LI Ke-jiang, CAO Cai-yun, et al. Effect of long-term located organic-inorganic fertilizer application on fluvo-aquic soil fertility and crop yield[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2007, 13(2):236-241.
- [25] 韦小了, 牟 力, 付天岭, 等. 不同钝化剂组合对水稻各部位吸收积累Cd及产量的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(4): 883-894.
WEI Xiao-liao, MOU Li, FU Tian-ling, et al. Effects of passivator on Cd absorption and accumulation and yield of rice as affected by its combination[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(4): 883-894.
- [26] 刘明钟, 张爱君, 魏 猛, 等. 长期施肥对潮土有机碳含量及小麦产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(24): 88-91.
LIU Ming-zhong, ZHANG Ai-jun, WEI Meng, et al. Effects of long-term fertilization on soil organic carbon content and wheat yield in fluvo-aquic soil[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(24): 88-91.
- [27] 李委涛, 刘 明, 李朋发, 等. 近40年余江县高产水稻土有机碳及养分含量的演变特征[J/OL]. 土壤学报. (2019-08-20)[2019-12-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20190820.1608.004.html>.
- [28] 沈 月, 依艳丽, 张大庚, 等. 耕地棕壤酸碱缓冲性能及酸化速率研究[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 95-100.
SHEN Yue, YI Yan-li, ZHANG Da-geng, et al. Research on pH buffer capacity and acidification rate of arable brown soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(1): 95-100.
- [29] 黄 晶, 张杨珠, 徐明岗, 等. 长期施肥下红壤性水稻土有效磷的演变特征及对磷平衡的响应[J]. 中国农业科学, 2016, 49(6):1132-1141.
HUANG Jing, ZHANG Yang-zhu, XU Ming-gang, et al. Evolution characteristics of soil available phosphorus and its response to soil phosphorus balance in paddy soil derived from red earth under long-term fertilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(6):1132-1141.
- [30] 唐继伟, 徐久凯, 温延臣, 等. 长期单施有机肥和化肥对土壤养分和小麦产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(11): 1827-1834.
TANG Ji-wei, XU Jiu-kai, WEN Yan-chen, et al. Effects of organic fertilizer and inorganic fertilizer on the wheat yields and soil nutrients under long-term fertilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(11): 1827-1834.
- [31] 高菊生, 黄 晶, 董春华, 等. 长期有机无机肥配施对水稻产量及土壤有效养分影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(2): 314-324.

- GAO Ju-sheng, HUANG Jing, DONG Chun-hua, et al. Effects of long-term combined application of organic and chemical fertilizers on rice yield and soil available nutrients[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(2): 314-324.
- [32] 魏 猛, 张爱君, 诸葛玉平, 等. 长期不同施肥对黄潮土区冬小麦产量及土壤养分的影响[J]. *植物营养与肥科学报*, 2017, 23(2): 304-312.
- WEI Meng, ZHANG Ai-jun, ZHUGE Yu-ping, et al. Effect of different long-term fertilization on winter wheat yield and soil nutrient contents in yellow fluvo-aquic soil area[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(2): 304-312.
- [33] 王腾飞, 谭长银, 曹雪莹, 等. 长期施肥对土壤重金属积累和有效性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(2): 257-263.
- WANG Teng-fei, TAN Chang-yin, CAO Xue-ying, et al. Effects of long-term fertilization on the accumulation and availability of heavy metals in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(2): 257-263.
- [34] Rao Z X, Huang D Y, Wu J S, et al. Distribution and availability of cadmium in profile and aggregates of a paddy soil with 30-year fertilization and its impact on Cd accumulation in rice plant[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 239: 198-204.
- [35] 王改玲, 李立科, 郝明德, 等. 长期定位施肥对土壤重金属含量的影响及环境评价[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(3): 60-63, 70.
- WANG Gai-ling, LI Li-ke, HAO Ming-de, et al. Effects of long-term fertilization on heavy-metal contents of soil and environmental quality evaluation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(3): 60-63, 70.
- [36] Gruter R, Costerousse B, Mayer J, et al. Long-term organic matter application reduces cadmium but not zinc concentrations in wheat[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 669: 608-620.
- [37] 郝秀珍, 周东美. 畜禽粪中重金属环境行为研究进展[J]. *土壤*, 2007, 39(4): 509-513.
- HAO Xiu-zhen, ZHOU Dong-mei. A review: environmental behaviors of heavy metals in livestock and poultry manures[J]. *Soils*, 2007, 39(4): 509-513.
- [38] 汤逸帆, 汪玲玉, 吴 旦, 等. 农田施用沼液的重金属污染评价及承载力估算: 以江苏滨海稻麦轮作田为例[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(4): 1687-1695.
- TANG Yi-fan, WANG Ling-yu, WU Dan, et al. Assessment of heavy metal pollution and bearing capacity estimation of continuous biogas slurry application on cropland: A case study of the coastal rice-wheat rotated farmland in Jiangsu, China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 39(4): 1687-1695.
- [39] 周建利, 郭晓方, 吴启堂, 等. 活化土壤重金属天然植物螯合剂的筛选[J]. *生态学报*, 2010, 30(5): 1390-1396.
- ZHOU Jian-li, GUO Xiao-fang, WU Qi-tang, et al. Selection of appropriate natural botanic chelators for mobilization of heavy metals in soils[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(5): 1390-1396.
- [40] 杨丽娟, 李天来, 付时丰, 等. 长期施肥对菜田土壤微量元素有效性的影响[J]. *植物营养与肥科学报*, 2006, 12(4): 549-553.
- YANG Li-juan, LI Tian-lai, FU Shi-feng, et al. Effects of long-term fertilization on availability of micro-elements in vegetable soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2006, 12(4): 549-553.
- [41] 李双异, 刘 赫, 汪景宽. 长期定位施肥对棕壤重金属全量及其有效性影响[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(6): 1125-1129.
- LI Shuang-yi, LIU He, WANG Jing-kuan. Effects of long-term located fertilization on heavy metals and their availability in brown earth [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(6): 1125-1129.
- [42] Friesl W, Friedl J, Platzer K, et al. Remediation of contaminated agricultural soils near a former Pb/Zn smelter in Austria: Batch, pot and field experiments[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 144(1): 40-50.
- [43] 崔 旭, 吴龙华, 王文艳. 土壤主要理化性质对湘粤污染农田镉稳定效果的影响[J]. *土壤*, 2019, 51(3): 530-535.
- CUI Xu, WU Long-hua, WANG Wen-yan. Effects of soil properties on cadmium immobilization of contaminated soils in Guangdong and Hunan Provinces using sepiolite and lime[J]. *Soils*, 2019, 51(3): 530-535.
- [44] Zeng F R, Ali S, Zhang H, et al. The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants[J]. *Environmental pollution*, 2011, 159(1): 84-91.
- [45] 冯璞阳, 李 哲, 者渝芸, 等. 我国18种不同理化性质的土壤对硒酸盐的吸附解吸作用研究[J]. *环境科学*, 2016, 37(8): 3160-3168.
- FENG Pu-yang, LI Zhe, ZHE Yu-yun, et al. Selenate adsorption and desorption in 18 kinds of Chinese soil with their physicochemical properties[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(8): 3160-3168.
- [46] 吴 曼, 徐明岗, 徐绍辉, 等. 有机质对红壤和黑土中外源铅镉稳定化过程的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(3): 461-467.
- WU Man, XU Ming-gang, XU Shao-hui, et al. Effects of organic matter on the stabilization process of added cadmium and lead in red soil and black soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(3): 461-467.