

张霞, 李健, 潘孝青, 等. 不同熟化垫料替代比例对稻麦轮作下作物产量、土壤肥力及重金属的影响[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(5): 1175-1182.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2021.05.012

不同熟化垫料替代比例对稻麦轮作下作物产量、土壤肥力及重金属的影响

张霞, 李健, 潘孝青, 邵乐, 秦枫, 翟频, 杨杰, 顾洪如
(江苏省农业科学院畜牧研究所, 农业农村部种养殖结合重点实验室, 江苏 南京 210014)

摘要: 针对中国化肥施用量较高、大田作物畜禽粪污有机肥施用率低等问题, 以稻麦轮作体系为研究对象, 在相等的施氮量(稻季 300 kg/hm², 麦季 225 kg/hm²)条件下, 以熟化垫料不同比例替代化肥[不施肥对照(CK)、施化肥(CF)、熟化垫料氮替代 1/4 氮素化肥氮(1/4DL)、熟化垫料氮替代 1/2 氮素化肥氮(1/2DL)、熟化垫料氮替代 3/4 氮素化肥氮(3/4DL)以及熟化垫料氮全量替代氮素化肥氮], 研究了在相等施氮量条件下熟化垫料替代化肥对稻麦轮作体系作物产量、土壤肥力以及重金属的影响。结果表明, 在水稻季施氮量 300 kg/hm²条件下, 熟化垫料替代处理的产量达到单施化肥处理的产量。不同处理间小麦产量差异极显著, 随熟化垫料替代量增加, 小麦产量表现出先增加后降低的趋势, 1/2DL 处理的小麦产量最高。稻麦轮作三季后, 熟化垫料替代氮素化肥处理耕层 0~20 cm 土壤全氮含量、有机质含量、pH 值均表现出先增加后降低的趋势, 3/4DL 处理最高, 而磷含量及电导率则呈线性增加趋势。稻麦轮作三季后, 耕层 0~20 cm 土壤铜、锌总含量均高于试验前土壤铜、锌总含量, 各处理铜、锌、镉、砷、铅等指标均在土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(GB 15618-2018)范围内。稻麦轮作三季后, 土壤内有效态铜、锌、镉、铅含量均高于试验前土壤, 砷则相反。对于施肥处理, 土壤内有效态铜、锌含量随熟化垫料施用量增加而增加, 有效态铅含量则随垫料用量增加而降低, 不同处理间有效态镉含量差异不显著。

关键词: 稻麦轮作; 有机肥; 土壤肥力; 重金属

中图分类号: X713 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2021)05-1175-08

Effects of different proportions of spent litters on crop yield, soil fertility and heavy metals in rice-wheat rotation

ZHANG Xia, LI Jian, PAN Xiao-qing, SHAO Le, QIN Feng, ZHAI Pin, YANG Jie, GU Hong-ru
(Institute of Animal Science, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Crop and Livestock Integrated Farming, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

Abstract: In order to solve the problems of excessive application of chemical fertilizer and low application rate of organic fertilizer in field crops in China, a field experiment was conducted to investigate the effects of spent litters on crop yield, soil fertility and heavy metals content in rice-wheat rotation. Under the condition of equal nitrogen application (300 kg/hm² in rice season, 225 kg/hm² in wheat season), inorganic fertilizer was replaced by different proportions of spent litters. The experiment included no fertilizer treatment (CK), inorganic fertilizer treatment (CF), 1/4 litter fertilizer replacement treatment (1/4DL), 1/2 litter fertilizer replacement treatment (1/2DL), 3/4 litter fertilizer replacement treatment (3/4DL) and all litter fertilizer replacement treatment. The results clearly demonstrated that the yield in litters replacement treatment was consistent with that in inorganic fertilizer treatment in rice season. There was a

收稿日期: 2021-05-25

基金项目: 国家兔产业技术体系-南京综合试验站项目(CARS-43-G-2)

作者简介: 张霞(1976-), 女, 河南新乡人, 博士, 副研究员, 主要从事畜禽粪便综合利用研究。(E-mail) 583765990@qq.com

通讯作者: 翟频, (E-mail) zhaipin@163.com

significant difference in wheat yield among different treatments. The yield of wheat increased first and then decreased with the increase of spent litters application rate. The wheat yield in 1/2DL treatment was the highest. After three seasons of rice-wheat rotation, the total nitrogen content, total phosphorus content, organic matter content, pH value and electrical conductivity in 0–20 cm soil increased with the increase of spent litters application amount. The total nitrogen content, organic matter content and pH value increased first and then decreased, and all the parameters in the 3/4DL treatment were the highest. The phosphorus content and electrical conductivity showed linear increasing trend. The total contents of Cu and Zn in 0–20 cm soil were higher than those before the experiment after three seasons of rice-wheat rotation. The total contents of Cu, Zn, As, Pb and Cd in 0–20 cm soil were in the range of soil environmental quality risk control standard for soil contamination of agricultural land (GB 15618–2018). After three seasons of rice-wheat rotation, the contents of Cu, Zn, Cd and Pb in 0–20 cm soil were higher than those before the experiment, but the content of As decreased. The contents of available Cu, available Zn increased with the increase of spent litters application rate, while the content of available Pb decreased. There was no significant difference in the content of available Cd among different treatments.

Key words: rice-wheat rotation; organic fertilizer; soil fertility; heavy metals

稻麦轮作是长江流域最重要的种植模式,常年稻麦种植面积高达 $1.3 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 占全国水稻小麦轮作种植总面积的 1/3 以上^[1-2], 江苏省常年轮作种植稻麦面积达 $1.3 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ^[3]。中国稻麦轮作农田普遍存在化肥施用量大、有机肥严重不足的不良情况,江苏省稻麦轮作产区年均施氮量高达 550~680 kg/hm²^[4]。采用有机肥替代部分化肥不仅大大降低了化肥过量施用对土壤的不良影响,而且与单独施有机肥相比,化肥有机肥配施肥效较快、氮素当季利用率相对较高,对于维持稻麦轮作作物的产量及促进农业的可持续发展具有重要的意义^[5-6]。毛伟等认为,在长江中下游的河网区有机肥氮代替 20%~30% 的化学肥料氮,对小麦产量可以达到单独施化肥的产量结果,而且明显提高中低肥力田的土壤有机质含量^[7]。用有机肥替代 20% 化肥时,水稻产量和综合效益均最高^[8]。欧阳虹等人的多项研究表明,用 25% 的有机肥替代化肥时,水稻产量最高,且明显有利于提高水稻的氮肥利用效率^[9-10]。Han 等也认为稻麦轮作时增施有机肥显著提高了稻麦的产量及氮肥利用效率^[11]。和单施化肥相比,有机无机肥配施对土壤的培肥作用更好^[12-13]。印度恒河平原稻麦轮作试验结果表明,多年增施有机肥显著增加了土壤有机碳、水溶性碳含量^[14],降低了土壤容重^[15]。Zhao 等在河南封丘做的连续 9 年稻麦轮作试验结果显示,施用有机肥显著提高了土壤有机碳和活性炭含量,提高了土壤团聚体的比例^[16]。

近年来,中国畜牧业蓬勃发展,随着生产规模的增加,粪尿排量也随之增加,据统计近年来全国每年

畜禽粪便产生量约为 $3.8 \times 10^9 \text{ t}$ 。畜禽粪污尤其是猪场粪污异位发酵床处理,是农业农村部近几年推荐的一种粪污处理方式^[17]。熟化垫料作为一种优质的有机资源,含有丰富的养分。尽管从 2017 年起国家已经再次提高饲料卫生标准,但只是降低了畜禽饲料中重金属的添加量,饲料内仍然含有一定量的重金属,从而使得发酵床熟化垫料内含有一定量的重金属元素^[18]。长期施用畜禽粪等有机肥可能引起重金属在土壤及植物中富集,从而对生态环境及人身健康产生危害^[19]。

本研究针对江苏地区存在的化肥施用量大、有机肥施用比例低等问题,以熟化垫料为有机肥,以稻麦轮作体系作为研究的对象,采用大田试验,在熟化垫料还田的基础上,研究在相等施氮量条件下熟化垫料替代部分化肥对稻麦轮作体系下作物产量、土壤理化特性以及土壤重金属含量的影响,以探究在化肥减施条件下熟化垫料与化肥配施在稻麦轮作生产体系中的适宜比例,构建熟化垫料农田安全施用技术体系,为当地稻麦轮作体系下作物高产高效生产提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 实验地概况

试验地点设在江苏省农业科学院六合动物科学基地试验田。该基地处于长江中下游,北纬 32.36°,东经 118.83°,属于亚热带季风气候。试验田土壤的类型为黄棕壤发育成的马肝土。试验前耕层土壤(0~20 cm)营养成分为:有机质含量 9.70 g/kg,全氮含量 0.75 g/kg,全磷含量 0.56 g/kg,速

效钾含量 97.00 mg/kg。前茬所种作物为紫云英。

1.2 试验设计

试验于 2017 年至 2018 年进行。水稻季施氮 300 kg/hm²,小麦季施氮 225 kg/hm²。试验设置不同梯度的熟化垫料用量,共设 6 个处理,分别为:①不施肥对照(CK),②氮素化肥处理(CF),③熟化垫料氮替代 1/4 氮素化肥氮处理(1/4DL),④熟化垫料氮替代 1/2 氮素化肥氮处理(1/2DL),⑤熟化垫料氮替代 3/4 氮素化肥氮处理(3/4DL),⑥熟化垫料氮全量替代氮素化肥氮处理(QDL)。采用随机区组设计,3 次重复。小区面积 5 m×8 m,区组之间隔 1 m,小区之间间隔 50 cm。氮素化肥(CF)以 60% N 作底肥,熟化垫料氮 1/4、1/2、3/4 替代及全氮量替代处理以有机肥为底肥,其余以尿素追施,水稻季在分蘖高峰期一次性追施,小麦季在拔节期追施。

所用熟化垫料水分含量为 40%~50%,熟化垫料养分含量见表 1。试验田水稻季、小麦季田间管理同大田。第一季水稻品种为杂交稻 II 优 999,第二季小麦品种为宁麦 26,第三季水稻品种为南粳 5055。

表 1 熟化垫料全氮、全磷、全钾和有机质含量

Table 1 Contents of total nitrogen, total phosphorus, total potassium and organic matter in spent litters

熟化垫料	氮含量 (g/kg)	磷含量 (g/kg)	钾含量 (g/kg)	有机质含量 (g/kg)
垫料 1	26.6	10.7	12.3	530.9
垫料 2	22.2	8.4	9.7	491.0
垫料 3	19.7	12.2	10.3	514.2

1.3 测定方法

1.3.1 水稻产量及产量构成 各处理每小区分别选取 2 个 2.0 m²的田块进行收割,人工脱粒,测定实际产量。同时每小区选 1.0 m²调查单位面积穗数。并随机选取 3 穴整株拔起,带回实验室,剪去根部,测量水稻的株高、穗长、穗粒数等指标。将穗与秸秆分开,杀青后于 60 ℃ 的烘箱烘干至恒质量。稻谷脱壳后的糙米、秸秆与稻壳烘干后粉碎待测。

1.3.2 小麦的产量及产量构成 各处理每小区分别选取 2 个 2.0 m²的田块收割,用小型实验用脱粒机脱粒,测定实际小麦产量。同时每一个小区分别取 1.0 m 长两行田块调查穗数,每一个小区随机选

取两个 0.5 m 行长的小麦植株整株拔起,带回实验室,剪去根部,调查其株高、穗长以及穗粒数等指标。小麦穗、秸秆分开,置于 60 ℃ 烘箱内烘干至恒质量。烘干后的样品粉碎待测。

1.3.3 籽粒、秸秆等全氮含量 采用凯氏定氮法测定。

1.3.4 土壤肥力 在第三季水稻收获时,每一个小区均采集 0~20 cm 层的 2 个土壤样品混合成一个混合样,放在实验室自然风干,并剔除杂物。土壤样品过 100 目筛后,待测。土壤有机质含量:采用重铬酸钾(K₂Cr₂O₇)氧化外加热法(GB 7857-87)测定。全氮含量:采用凯氏定氮法测定。全磷含量:采用钼锑抗混合显色法测定(GB 9837-1988)。速效钾含量:用 1 mol/L NH₄OAc 溶液浸提,采用火焰原子吸收光度法测定。无机氮含量:采用 2 mol/L 的 KCl 溶液提取,铵态氮含量直接使用连续流动化学分析仪测定,硝态氮含量采用人工紫外分析光度法测定。pH 值:用水土比为 2.5:1.0(质量比)进行振荡提取,直接使用 Mettler Toledo FiveEasy Plus pH 计测定。电导率:使用 Hanna instruments ES215 Conductivity Meter 电导率仪测定。

重金属含量测定:土壤重金属采用 HF:HNO₃:HClO₄ 为 2:1:1(体积比)的混酸消煮,不同有效态重金属采用 DTPA 浸提法浸提,消煮液及提取液用江苏省农业科学院中心实验室的(Inductively Coupled Plasma, ICP)电感耦合等离子体测定。

2 结果与分析

2.1 稻、麦产量

第一季水稻实测产量在 9 222.94~9 978.32 kg/hm²,氮素化肥处理产量最高(表 2),不同处理间水稻实测产量及千粒质量差异均不显著。有效穗不同处理间差异显著,1/2DL 处理有效穗最高 1 hm² 1.793×10⁶穗,其次是熟化垫料全量替代处理(QDL) 1 hm² 1.730×10⁶穗,CK 最低为 1 hm² 1.490×10⁶穗。

第二季不同处理之间的小麦产量差异显著($P < 0.05$),随熟化垫料替代量的增加,小麦产量呈现出先增长后逐渐减少的趋势,1/2DL 处理的小麦产量最高(表 2),其产量由高到低依次为 1/2DL(6 153.58 kg/hm²)>1/4DL(5 777.41 kg/hm²)>CF(5 489.85 kg/hm²)>3/4DL(4 959.51 kg/hm²)>QDL(3 726.56

kg/hm²) > CK (1 585.01 kg/hm²)。小麦穗粒数在 28.02 至 38.62 之间, CF 处理 (38.62) 显著高于其他处理, CK (28.02) 及 QDL (29.11) 显著低于其他处理, 1/4DL、1/2DL、3/4DL 处理穗粒数处于中等水平。有效穗数在不同处理之间差异显著, 随熟化垫料替代量增加表现为先增加后减少的趋势, 从高到低依次为 1/2DL、1/4DL、CF、3/4DL、QDL、CK。

第三季水稻施肥处理产量 (9 142.72~9 800.31 kg/hm²) 显著高于不施肥对照产量 (8 216.69 kg/hm²) (表 2)。4 个熟化垫料氮替代氮素化肥氮

处理间水稻产量无显著差异, 且均与氮素化肥处理无显著差异。施用熟化垫料量较多的 QDL、1/2DL、3/4DL 处理的水稻穗粒数显著高于 CK 及 CF、1/4DL。水稻单位面积有效穗数随熟化垫料替代量的增加而显著降低, 从高到低依次为 CF、1/4DL、1/2DL、3/4DL、QDL、CK。稻谷千粒质量 CK 最高, 为 26.37 g。在施肥处理中, 随着熟化垫料替代量增加, 千粒质量逐渐增加, 1/2DL 处理千粒质量达到峰值, 在此之后随着熟化垫料替代量增加, 千粒质量逐渐减少。

表 2 熟化垫料替代化学氮肥对稻麦产量的影响

Table 2 Rice and wheat yield under replacement of chemical nitrogen fertilizer with spent litters

轮作制度	处理	实测产量 (kg/hm ²)	穗粒数	有效穗数 (×10 ⁴ , 1 hm ²)	千粒质量 (g)
第一季水稻	CK	9 222.94a	224.5a	149.0c	21.51a
	CF	9 978.32a	215.6a	161.7abc	21.93a
	1/4DL	9 346.34a	228.3a	156.0bc	21.30a
	1/2DL	9 316.32a	218.1a	179.3a	21.09a
	3/4DL	9 709.85a	242.0a	167.3ab	21.24a
	QDL	9 434.72a	233.3a	173.0ab	21.09a
	CK	1 585.01d	28.02c	198.33d	38.32b
第二季小麦	CF	5 489.85ab	38.62a	418.89b	40.49ab
	1/4DL	5 777.41ab	35.46ab	463.33ab	40.45ab
	1/2DL	6 153.58a	34.47b	501.11a	41.28a
	3/4DL	4 959.51b	35.19b	400.56bc	40.25ab
	QDL	3 726.56c	29.11c	333.89c	40.90a
	CK	8 216.69b	88.57b	309.59c	26.37a
	CF	9 800.31a	86.03b	400.87a	24.81c
第三季水稻	1/4DL	9 708.44a	84.99b	394.44a	25.36bc
	1/2DL	9 793.81a	104.47a	374.44ab	26.05a
	3/4DL	9 590.93a	93.24ab	359.37b	25.94ab
	QDL	9 142.72ab	105.23a	314.92c	25.81ab

CK: 不施肥对照; CF: 氮素化肥处理; 1/4DL: 熟化垫料氮替代 1/4 氮素化肥氮处理; 1/2DL: 熟化垫料氮替代 1/2 氮素化肥氮处理; 3/4DL: 熟化垫料氮替代 3/4 氮素化肥氮处理; QDL: 熟化垫料氮全量替代氮素化肥氮。

由表 3 可知, 三季稻麦总产量不同处理之间差异显著, CF 处理的产量最高, 为 25 271.23 kg/hm²。

表 3 熟化垫料替代化学氮肥对三季总产量的影响

Table 3 Total yield of rice and wheat in three seasons of rice-wheat rotation under replacement of chemical nitrogen fertilizer with spent litters

处理	CK	CF	1/4DL	1/2DL	3/4DL	QDL
实测产量 (kg/hm ²)	19 025.43c	25 271.23a	24 835.07ab	25 266.79a	24 262.78ab	22 305.86b

CK、CF、1/4DL、1/2DL、3/4DL、QDL 见表 2 注。

2.2 土壤理化性质

2.2.1 土壤养分含量 稻麦轮作三季后 (表 4), 土壤全氮含量为 0.53~0.80 g/kg, 并随熟化垫料替代量增加表现为先增加后降低的趋势。3/4DL 处理全

其次是 1/2DL 处理, 产量为 25 266.79 kg/hm²。

氮含量最高为 0.80 g/kg, CF 处理与 1/4DL 处理土壤全氮含量均为 0.60 g/kg。土壤全磷含量为 0.49~1.01 g/kg, 不同处理之间表现为随着熟化垫料替代量的增加而显著上升。QDL 处理土壤全磷

含量最高,为 1.01 g/kg。随着熟化垫料替代量的增加,土壤有机质含量从 1.13% 显著上升至 1.52% ($P<0.05$)。1/2DL、3/4DL、QDL 处理其耕层土壤有机质含量分别为 1.49%、1.52%、1.50%,显著高于 CK 及 CF 处理的 1.13%、1.14% ($P<0.05$)。土壤铵态氮含量随熟化垫料替代量增加呈下降趋势,单施化肥处理(CF)铵态氮含量最高,为 15.26 mg/kg,显著高于 CK 的 11.86 mg/kg,但 1/4DL、1/2DL、3/4DL 处理铵态氮含量与 CF 处理差异不显著。土壤

硝态氮含量随熟化垫料替代量增加先增加后降低,各施肥处理土壤硝态氮含量显著高于 CK,其中 1/4DL 处理与 1/2DL 处理硝态氮含量最高,其次是 CF 处理,再次是 QDL、3/4DL 处理。随熟化垫料替代量增加,耕层土壤 pH 值显著增加,CK 与 CF 处理最低,分别为 6.12 与 6.13,3/4DL 处理土壤 pH 值最高,为 6.62。土壤电导率随熟化垫料替代量增加显著增加,从 CK 的 35.17 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 增加到 QDL 处理的 57.67 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

表 4 稻麦轮作三季后土壤肥力

Table 4 Soil fertility after three seasons of rice-wheat rotation

处理	氮含量 (g/kg)	磷含量 (g/kg)	有机质 (%)	NH_4^+-N (mg/kg)	NO_3^--N (mg/kg)	pH 值	电导率 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
CK	0.53c	0.49d	1.13b	11.86c	3.73b	6.12c	35.17c
CF	0.60bc	0.50d	1.14b	15.26a	5.97ab	6.13c	38.67cd
1/4DL	0.60bc	0.61cd	1.28ab	13.93abc	6.91a	6.32bc	41.33cd
1/2DL	0.67abc	0.75bc	1.49a	14.50ab	6.92a	6.43ab	46.50bc
3/4DL	0.80a	0.92ab	1.52a	13.75abc	5.09ab	6.62a	52.50ab
QDL	0.72ab	1.01a	1.50a	12.92bc	5.17ab	6.50ab	57.67a

CK、CF、1/4DL、1/2DL、3/4DL、QDL 见表 2 注。

2.2.2 土壤重金属含量

2.2.2.1 土壤重金属总量 稻麦轮作三季后,耕层 0~20 cm 土壤总铜含量 30.10~33.87 mg/kg、总锌含量 49.09~61.80 mg/kg、总镉含量 0.14~0.23 mg/kg 均高于试验前土壤总铜含量(28.53 mg/kg)、总锌含量(47.44 mg/kg)、总镉含量(0.13 mg/kg),总砷含量 24.84~27.32 mg/kg,其中只有 1/4DL 处理的总砷含量高于试验前土壤总砷含量。耕层 0~20 cm 土壤总铅含量(20.63~22.02 mg/kg)低于试验前土壤总铅含量(22.43 mg/kg)(表 5)。所有处理土壤铜、锌、砷、镉、铅的总含量均在中国土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(GB 15618-2018)对于 $5.5<\text{pH}<6.5$ 的水田土壤重金属含量(Cu 50 mg/kg、Zn 200 mg/kg、As 30 mg/kg、Cd 0.4 mg/kg、Pb 100 mg/kg)的范围内。

2.2.2.2 土壤有效态重金属含量 稻麦轮作三季后,土壤有效态铜含量(4.54~8.60 mg/kg)、有效态锌含量(1.29~6.71 mg/kg)、有效态镉含量(0.043~0.048 mg/kg)、有效态铅含量(0.98~1.26 mg/kg)均高于试验前土壤有效态铜含量(3.37 mg/kg)、有效态锌含量(1.47 mg/kg)、有效态镉含量(0.041 mg/kg)及有效态铅含量(0.83 mg/kg),

而有效态砷含量(0.24~0.32 mg/kg)低于试验前土壤有效态砷含量(0.39 mg/kg)(表 6)。对于施肥处理,土壤铜、锌有效态含量随熟化垫料替代量增加呈现增加的趋势,QDL 处理的有效态铜含量、有效态锌含量均达到最高值。有效态铅含量则随熟化垫料替代量增加呈现降低的趋势,从 CF 处理的 1.24 mg/kg 与 1/4DL 处理的 1.26 mg/kg 显著降至 1/2DL 处理的 1.01 mg/kg、3/4DL 处理的 0.98 mg/kg 以及 QDL 处理的 0.99 mg/kg。有效态镉含量不同处理间无显著差异。

表 5 稻麦轮作三季后土壤重金属总量

Table 5 Total content of heavy metal in soil after three seasons of rice-wheat rotation

处理	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)	As (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)
CK	30.45a	50.01bc	24.84a	0.23a	21.69a
CF	30.10a	49.09c	25.45a	0.18ab	21.68a
1/4DL	32.42a	54.59abc	27.32a	0.16ab	21.99a
1/2DL	32.51a	56.81abc	26.08a	0.18ab	20.63a
3/4DL	33.87a	59.47ab	25.57a	0.14b	22.02a
QDL	33.66a	61.80a	25.65a	0.14b	21.30a
试验前土壤	28.53	47.44	26.10	0.13	22.43

CK、CF、1/4DL、1/2DL、3/4DL、QDL 见表 2 注。

表 6 稻麦轮作三季后土壤重金属有效态含量

Table 6 Available content of heavy metal in soil after three seasons of rice-wheat rotation

处理	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)	As (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)
CK	4.54c	1.39b	0.24c	0.043a	1.14ab
CF	4.85bc	1.29b	0.26bc	0.044a	1.24a
1/4DL	6.15b	2.49b	0.24c	0.048a	1.26a
1/2DL	7.99a	5.00a	0.32a	0.047a	1.01b
3/4DL	7.79a	5.22a	0.31a	0.044a	0.98b
QDL	8.60a	6.71a	0.28ab	0.045a	0.99b
试验前土壤	3.73	1.47	0.39	0.041	0.83

CK、CF、1/4DL、1/2DL、3/4DL、QDL 见表 2 注。

3 讨论

3.1 熟化垫料对稻麦轮作产量的影响

作物产量是衡量经济效益的重要指标,无论是施用化肥还是用有机肥替代,均要在保证一定产量的前提下进行。本研究是在熟化垫料氮等量替代氮素化肥氮条件下进行。在本大田试验所设计的处理下,第一季的杂交水稻单施氮素化肥(CF)处理水稻产量最高,这是因为在土壤肥力相对较低时,化肥提供丰富的速效养分对产量水平有较大的提升^[20-22],但不同处理间的水稻产量差异不大。第二季小麦在相同施氮量(225 kg/hm²)条件下,不同处理之间产量差异达到显著水平,1/2DL 处理产量最高,为 6 153.58 kg/hm²。主要是通过增加小麦的有效穗数达到增产的效果,也证明了适宜的有机肥氮替代比例替代化肥氮是能够满足作物对氮素养分的需求^[23]。与 1/2DL 处理相比,3/4DL 与 QDL 小麦产量显著降低,说明由于有机肥速效养分释放慢,在相对较短的时期内高量有机肥替代化肥尚不能满足作物生长对营养的需求^[12,24-25]。拔节期追施化肥促进了分蘖的分化,1/2DL 处理的有效穗数显著高于其他处理,说明 1/2DL 处理能满足此阶段营养需要。熟化垫料施用量大的 3/4DL、QDL 处理,由于有机肥养分释放慢而致使有效穗数显著下降。1/2DL、3/4DL、QDL 处理的小麦穗粒数显著低于 CF 处理,说明在籽粒分化形成期对营养敏感,由于有机肥速效氮供应不足,使穗粒数显著下降。第三季粳稻产量施肥处理(熟化垫料氮全量替代氮素化肥氮处理除外)显著高于 CK。尤其是 1/2DL 处理与 CF 处理水稻产量差异很小,穗粒数以及千粒质量显著高于

单施化肥处理,说明 1/2DL 处理对土壤肥力提升高于单施化肥处理。与 1/2DL 处理相比,QDL 处理第三季的水稻产量降低,这主要是由于速效养分的供应较低引起的^[12]。与水稻相比,小麦对有机肥替代化肥的效果更明显。从三季稻麦产量总和可以看出,CF 处理产量最高,达到 25 271.23 kg/hm²,1/4DL、1/2DL、3/4DL 处理稻麦总产量均达到了单施化肥的产量水平。说明在本试验中,1/4DL、1/2DL、3/4DL 处理能够满足稻麦生产的营养需求。

3.2 熟化垫料对稻麦轮作农田土壤养分及 pH 值的影响

很多研究结果表明,有机肥替代部分化肥可明显提高土壤肥力^[25-26]。本研究结果显示,稻麦轮作三季后,随熟化垫料替代化肥量的增加,耕层 0~20 cm 土壤全磷含量及有机质含量增加,这是因为有机肥补充了土壤内的磷素,使土壤磷含量提高。同时,耕层内的土壤及外源有机肥中的大量微生物也通过腐殖化,把耕层外源的有机质转化为土壤有机质的成分^[5,27-28]。土壤全氮含量随熟化垫料替代量的增加表现为先增加后降低,3/4DL 处理达到最高,这说明高量有机肥替代化肥对土壤肥力的提升效果更好,但在短期内由于速效养分释放较慢会使作物的产量受到一定影响,这与侯红乾等对有机肥长期(30 年)替代化肥的研究结果一致^[12]。

长期大量施化肥也是引起农田耕层土壤酸化的主要及重要原因之一^[29-31]。很多数据表明,随着有机肥使用量的增加,耕层土壤的 pH 值明显增加。孟红旗通过研究长年施用有机肥条件下,不同类型土壤不同施肥方式下土壤 pH 值变化,认为长期使用有机肥料,可以弥补因为农产品移除而引起的土壤碱性物质的损失,从而有效缓解耕层土壤的酸化^[30]。有研究数据证明使用有机肥提高了耕层土壤的 pH 缓冲容量(pHBC)和抗酸化能力^[32-33]。很多研究结果表明随着有机肥施用量的增加,土壤 pH 值提高^[34]。本研究发现,稻麦轮作三季后,随着有机肥替代化肥比例增加,土壤 pH 增加。

3.3 熟化垫料对稻麦轮作土壤重金属残留的影响

化肥和有机肥料中均含有一定量的重金属^[35-36],长期施用化肥或有机肥均可能造成土壤重金属累积^[37-38]。Liao 等研究认为中国农田土壤重金属的主要来源为大气沉降、施肥和灌水^[39],Peng 等认为中国南方地区畜禽粪便是土壤重金属的主要

来源之一^[40],还有其他研究者认为长期施用有机肥使土壤重金属累积^[40-41]。本研究结果显示,连续施用三季有机肥后,土壤铜、锌、镉总量均有累积现象。但是土壤有效态重金属含量的变化不同,金属元素之间差异较大。稻麦轮作三季后,土壤有效态铜、锌、镉、铅含量均高于试验前土壤,而且随着有机肥替代量增加,有效态铜、锌含量显著增加,这说明施用有机肥对土壤有效态重金属的累积作用。但是土壤有效态铅含量则随有机肥替代量增加而降低,这可能是因为施用熟化垫料显著增加土壤有机质含量,土壤有机质表面的官能基团如羧基、羟基等与Pb结合^[42-43],同时熟化垫料提高了土壤的pH值^[44],两方面均可以降低土壤有效态铅的含量。

参考文献:

- [1] 国家统计局.中国农业年鉴[M].北京:中国统计出版社,2019.
- [2] 夏文建.优化施氮下稻麦轮作农田氮素循环特征[D].北京:中国农业科学院,2011.
- [3] 朱利群,王春杰,陈利根,等.长江下游稻麦轮作农田不同施肥措施的固碳潜力分析[J].浙江农业学报,2016,28(7):1249-1261.
- [4] 崔 振.江苏泰州市稻-麦轮作体系土壤氮磷钾养分平衡状况[J].植物营养与肥料学报,2019,25(6):1002-1009.
- [5] 聂佳如.有机肥与化肥配施对土壤养分的影响研究[J].环境科学与管理,2016,41(9):52-55.
- [6] 李春喜,刘 晴,邵 云,等.有机物料还田和减施氮肥对麦-玉周年农田碳氮水足迹及经济效益的影响[J].农业资源与环境学报,2020,37(4):527-536.
- [7] 毛 伟,曾洪玉,李文西,等.不同土壤肥力下有机氮部分替代化学氮对小麦产量构成及土壤养分的影响[J].江苏农业学报,2020,36(5):1189-1196.
- [8] 郑仁兵,李 敏,韩 上,等.有机肥替代氮肥的水稻产量效应研究[J].安徽农业科学,2017,45(22):32-33,64.
- [9] 张 丹.湖北稻麦轮作系统中有机无机肥料配施效应研究[D].南京:南京农业大学,2016.
- [10] 欧杨虹,徐阳春,沈其荣.有机氮部分替代无机氮对水稻产量和氮素利用率的影响[J].江苏农业学报,2009,25(1):106-111.
- [11] HAN X M, HU C, CHEN Y F, et al. Crop yield stability and sustainability in a rice-wheat cropping system based on 34-year field experiment[J]. European Journal of Agronomy, 2020, 113: 125965.
- [12] 侯红乾,冀建华,刘秀梅,等.不同比例有机肥替代化肥对水稻产量和氮素利用率的影响[J].土壤,2020,52(4):758-765.
- [13] 吕真真,吴向东,侯红乾,等.有机-无机肥配施比例对双季稻田土壤质量的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(4):904-913.
- [14] BRAR B S, SINGH K, DHERI G S, et al. Carbon sequestration and soil carbon pools in a rice-wheat cropping system: Effect of long-term use of inorganic fertilizers and organic manure - Science-Direct[J]. Soil and Tillage Research, 2013, 128(1):30-36.
- [15] CHAUDHARY S, DHERI G S, BRAR B S. Long-term effects of NPK fertilizers and organic manures on carbon stabilization and management index under rice-wheat cropping system[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 166:59-66.
- [16] ZHAO Z H, GOO S F, LU C Y, et al. Effects of different tillage and fertilization management practices on soil organic carbon and aggregates under the rice-wheat rotation system[J]. Soil and Tillage Research, 2021,212:105071.
- [17] 顾洪如,杨 杰,潘孝青,等.异位发酵床猪粪尿处理技术综述[J].江苏农业科学,2017,45(21):6-9.
- [18] 张 霞,李 健,潘孝青,等.发酵床熟化垫料重金属含量、形态及农用潜在风险分析[J].江苏农业学报,2020,36(5):1212-1217.
- [19] 孙国峰,陈虞雯,盛 婧,等.稻麦农田土壤Cu累积条件下猪粪安全施用量[J].农业环境科学学报,2016,35(12):2361-2366.
- [20] 刘守龙,童成立,吴金水,等.等氮条件下有机无机肥配比对水稻产量的影响探讨[J].土壤学报,2007,44(1):106-112.
- [21] 侯红乾,冀建华,刘秀梅,等.不同比例有机肥替代化肥对水稻产量和氮素利用率的影响[J].土壤,2020,52(4):758-765.
- [22] 侯红乾,刘秀梅,刘光荣,等.有机无机肥配施比例对红壤稻田水稻产量和土壤肥力的影响[J].中国农业科学,2011,44(3):516-523.
- [23] 李永华,武雪萍,何 刚,等.我国麦田有机肥替代化学氮肥的产量及经济环境效应[J].中国农业科学,2020,53(23):4879-4890.
- [24] XIN X L, QIN S W, ZHANG J B, et al. Yield, phosphorus use efficiency and balance response to substituting long-term chemical fertilizer use with organic manure in a wheat-maize system[J]. Field Crops Research, 2017, 208:27-33.
- [25] CAI Z C, QIN S W. Dynamics of crop yields and soil organic carbon in a long-term fertilization experiment in the Huang-Huai-Hai Plain of China[J]. Geoderma, 2006, 136(3):708-715.
- [26] 王先挺,王 斌,孙万春,等.有机肥施用对稻麦轮作系统作物生产和土壤健康的影响[J].浙江农业科学,2020,61(8):1531-1534.
- [27] 李其胜,赵 贺,汪志鹏,等.有机肥替代部分化肥对稻麦轮作土壤养分利用和酶活性的影响[J].土壤通报,2020,51(4):912-919.
- [28] QIN W, WANG D, GUO X, et al. Productivity and sustainability of rainfed wheat-soybean system in the North China Plain: results from a long-term experiment and crop modelling[J]. Scientific Reports, 2015, 5(1):17514.
- [29] 孟红旗.长期施肥农田的土壤酸化特征与机制研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2013.
- [30] 孟红旗,吕家珑,徐明岗,等.有机肥的碱度及其减缓土壤酸化

- 的机制[J].植物营养与肥料学报,2012,18(5):1153-1160.
- [31] 孟红旗,刘 景,徐明岗,等.长期施肥下我国典型农田耕层土壤的 pH 演变[J].土壤学报,2013,50(6):1109-1116.
- [32] 姜 军,徐仁扣,赵安珍.用酸碱滴定法测定酸性红壤的 pH 缓冲容量[J].土壤通报,2006(6):1247-1248.
- [33] SHI R, LIU Z, LI Y, et al. Mechanisms for increasing soil resistance to acidification by long-term manure application [J]. Soil and Tillage Research, 2019, 185(1):77-84.
- [34] 陶玥玥,金梅娟,汤云龙,等.水生植物堆肥替代部分氮肥提高水稻产量与稻田土壤肥力[J].农业工程学报,2017,33(18):196-202.
- [35] 王 美,李书田.肥料重金属含量状况及施肥对土壤和作物重金属富集的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(2):466-480.
- [36] 穆虹宇,庄 重,李彦明,等.我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析[J].环境科学,2020,41(2):986-996.
- [37] 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.
- [38] NING C C, GAO P D, WANG B Q, et al. Impacts of chemical fertilizer reduction and organic amendments supplementation on soil nutrient, enzyme activity and heavy metal content[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(8):1819-1831.
- [39] LIAO S, JIN G, KHAN M A, et al. The quantitative source apportionment of heavy metals in peri-urban agricultural soils with UNMIX and input fluxes analysis[J]. Environmental Technology & Innovation, 2020, 21(1/2/3/4):101232.
- [40] PENG H, CHEN Y L, WENG L P, et al. Comparisons of heavy metal input inventory in agricultural soils in North and South China: A review-ScienceDirect [J]. Science of The Total Environment, 2019, 660(C):776-786.
- [41] 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.
- [42] LI F, LI Z, MAO P, et al. Heavy metal availability, bioaccessibility, and leach ability in contaminated soil: effects of pig manure and earth worms [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(20):20030-20039.
- [43] WAN Y N, HUANG Q Q, WANG Q, et al. Accumulation and bioavailability of heavy metals in an acid soil and their uptake by paddy rice under continuous application of chicken and swine manure[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 384:121293.
- [44] HUANG Q Q, YU Y, WAN Y N, et al. Effects of continuous fertilization on bioavailability and fractionation of cadmium in soil and its uptake by rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 215:13-21.

(责任编辑:蒋永忠)