



徐洁章, 韩科峰, 吴良欢. 长期外源有机物料添加对双季稻产量、土壤肥力及土壤质量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(12): 23-32.

XU Jiezhang, HAN Kefeng, WU Lianghuan. Effects of exogenous organic materials on the yield of double cropping rice, soil fertility and soil quality[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(12): 23-32.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.12.03

长期外源有机物料添加对双季稻产量、土壤肥力及土壤质量的影响

徐洁章¹ 韩科峰² 吴良欢^{2*}

(1. 浙江省永康市耕地质量服务中心 浙江 永康 321300;

2. 浙江大学 环境与资源学院/浙江省农业资源与环境重点实验室, 杭州 310058)

摘要 为探究连续13年不同有机物料添加对双季稻产量、土壤养分含量、团聚体及土壤质量的影响,在浙江省金华市水稻田,采用育秧移栽种植模式,设置单施化肥(NPK)、化肥配施秸秆添加快腐熟剂(RS)和控释掺混肥(BB)配施腐熟牛粪(CM)3个施肥处理,分析了长期外源有机物料添加对双季稻产量、土壤肥力及土壤质量的影响。结果表明:各处理双季稻产量由高到低均表现为CM>RS>NPK;与NPK相比,CM和RS的土壤pH分别升高0.40和0.09($P<0.05$),CM的土壤容重降低13.69%($P<0.05$),CM和RS的土壤有机质、有机碳、全氮和硝态氮含量的差异均达到显著水平,由高到低均表现为CM>RS>NPK;CM的碱解氮、铵态氮和交换性镁含量显著高于NPK($P<0.05$),分别较NPK升高49.59%、66.26%和106.06%,CM的土壤团聚体几何平均直径(GMD)和平均重量直径(MWD)分别为1.05和1.90,分别较NPK升高9.38%和9.54%,CM的土壤质量指数(SQI)最高,为0.71。综上,控释BB肥配施腐熟牛粪可显著提升浙中黄泥田土壤肥力和水稻产量。

关键词 黄泥田; 秸秆还田; 有机肥; 产量; 土壤养分含量; 水稳团聚体; 土壤质量指数

中图分类号 S143

文章编号 1007-4333(2024)12-0023-10

文献标志码 A

Effects of exogenous organic materials on the yield of double cropping rice, soil fertility and soil quality

XU Jiezhang¹, HAN Kefeng², WU Lianghuan^{2*}

(1. Zhejiang Yongkang Farmland Quality Service Center, Yongkang 321300, China;

2. College of Environmental and Resource Sciences/Zhejiang Provincial Key Laboratory of Agricultural Resource and Environment, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract To investigate the effects of 13 consecutive years of different organic amendments on the yield of transplanting double-cropping rice, soil nutrient content, soil aggregates, and soil quality, straw and decomposed cow manure were taken as materials. In the field of Jinhua city of Zhejiang Province, three treatments, e. g., chemical fertilizer alone (NPK), chemical fertilizer combined with straw and a rapid decomposer (RS), and controlled-release Bulk blending (BB) fertilizer combined with cattle manure (CM) were evaluated. The impacts of long-term organic amendments on the yield of double-cropping rice, soil nutrient content and soil quality were analyzed. The results showed that: The average yield of double-cropping rice from high to low was CM > RS > NPK. Compared to the NPK treatment, soil pH was significantly increased by 0.40 and 0.09 units under the CM and RS treatments, respectively ($P<0.05$).

收稿日期: 2024-07-16

基金项目: 浙江省科技计划项目(2022C02018); 2023年农业农村部化肥减量增效“三新”升级样板试点县项目

第一作者: 徐洁章(ORCID:0009-0009-9823-6794),高级农艺师,主要从事良种与耕地技术推广工作, E-mail: xjzykseed@foxmail.com

通讯作者: 吴良欢(ORCID:0009-0000-6210-5658),教授,主要从事肥料资源与养分综合管理研究, E-mail: lhwu@zju.edu.cn

The bulk density was significantly reduced by 13.69% in the CM treatment ($P < 0.05$). Compared to the NPK treatment, Soil organic matter, organic carbon, total nitrogen, and nitrate nitrogen contents were significantly enhanced under CM and RS treatments, which in descending order was CM, RS and NPK. Furthermore, the contents of alkaline nitrogen, ammonium nitrogen and exchangeable magnesium were significantly increased by 49.59%, 66.26% and 106.06% in the CM treatment, respectively ($P < 0.05$). Soil aggregate stability, as indicated by the geometric mean diameter (GMD) and mean weight diameter (MWD), was also improved under the CM treatment, with the increases of 9.38% and 9.54%, respectively, compared to the NPK treatment. Soil quality index (SQI) was highest in the CM treatment, with a value of 0.71. In summary, the soil fertility and rice yield were significantly improved by applying controlled-release BB fertilizer combined with cattle manure in the yellow mud field of central Zhejiang.

Keywords yellow mud field; straw returning; organic fertilizer; yield; soil nutrient; water-stable aggregates; soil quality index

施肥是提升土壤肥力和提高作物产量的重要措施之一^[1],不合理的施肥方式会造成土壤容重增加、板结、酸化、土壤肥力下降^[2-5]、有机质含量下降和肥料利用率降低等一系列问题,不仅影响了土壤质量和作物产量,还会造成农业面源污染^[6-7]。黄泥田是我国南方最重要的一类低产稻田^[8-9],存在土质较粘重、透气性差、透水性差、微生物活性低^[10-12]和营养元素转化困难等问题^[13-14]。因此,探究提高中低产黄泥田土壤质量的培肥模式,对提升黄泥田土壤肥力和保障当地粮食安全具有重要作用。

有机肥富含有机质和微量元素,具有改善土壤结构,提升土壤肥力,促进微生物繁殖,加速团聚体形成等作用^[15-17],已有研究表明,有机肥单施或与化学肥料配施能够有效提高土壤有机质和土壤养分含量、增加土壤有益微生物数量、提高土壤酶活性、增加作物产量,还可以促进土壤微团聚体胶结向大团聚体转化,提高土壤有机碳和全氮含量,以及土壤团聚体的稳定性^[18-20]。秸秆还田是一种利用秸秆粉碎后进行还田的措施。Li等^[21]研究表明,秸秆还田可以提高土壤有机质和养分含量,增加微生物数量,促进养分循环,提高耕地质量和土壤生产力^[22];还可以促进土壤大团聚体的形成^[23-24]。因此施用有机肥和秸秆还田等环境友好型作物生产技术正越来越受到重视,同时秸秆和牛粪是来源广泛的农业有机肥料资源,在废弃物处置利用方面具有重要意义和广阔的前景。虽然目前关于有机、无机肥配施对水稻产量及土壤养分含量的影响已有大量报道,但长期(>10年)化肥与不同有机物料配施对浙中红壤地区双季稻生长效果鲜有报道。本研究以浙中黄泥田为供试土壤,分别设置单施化肥、化肥配施秸秆添加快腐熟剂和控释BB肥配施腐熟牛粪3个施肥模式,测定土壤养分含量、水

稳团聚体和土壤质量指数等指标,旨在探究连续13年不同有机物料施用对双季稻产量、土壤养分含量、团聚体及土壤质量的影响,以期为浙中双季稻的可持续发展提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

2011年起在浙江省金华市婺城区琅琊镇新朱村“浙江金华水稻科技小院”(29° 01'19" N, 119° 27'99" E, 85 m)水稻田开展长期定位研究,到2023年已经持续13年。试验地区属于中亚热带季风气候区,温和湿润,四季分明,光照充足,年降雨量较为充沛,平均为1 424 mm。历年月平均降雨量和气温见图1。该试验地土壤类型为黄泥田,其基本理化性状:pH 5.24,有机质含量28.10 g/kg,全氮含量1.75 g/kg,有效磷含量11.60 mg/kg,速效钾含量78.00 mg/kg,铵态氮含量5.65 mg/kg,硝态氮含量7.12 mg/kg。

1.2 试验设计

试验共设3个处理,分别为单施化肥(NPK)、化肥配施秸秆添加快腐熟剂(RS)、控释BB肥配施腐熟牛粪(CM),水稻种植模式为育秧移栽双季稻,早稻和晚稻种植过程中各处理均为等氮、等磷、等钾投入:N 180 kg/hm², P₂O₅ 90 kg/hm², K₂O 120 kg/hm²(仅为化学肥料施入量,不包括秸秆、牛粪中氮磷钾含量)。供试腐熟牛粪、秸秆及菌剂投入量分别为13 500、3 000、30 kg/hm²,所投入的秸秆和牛粪的C含量分别为438和289 g/kg, N含量为9.0和21.0 g/kg, P含量为1.0和10.0 g/kg, K含量为20和12 g/kg;供试化肥中氮肥为尿素(N 46 g/100 g),磷肥为过磷酸钙(P₂O₅ 12 g/100 g),钾肥为氯化钾(K₂O 60 g/100 g),控释BB肥(N 24 g/100 g、P₂O₅

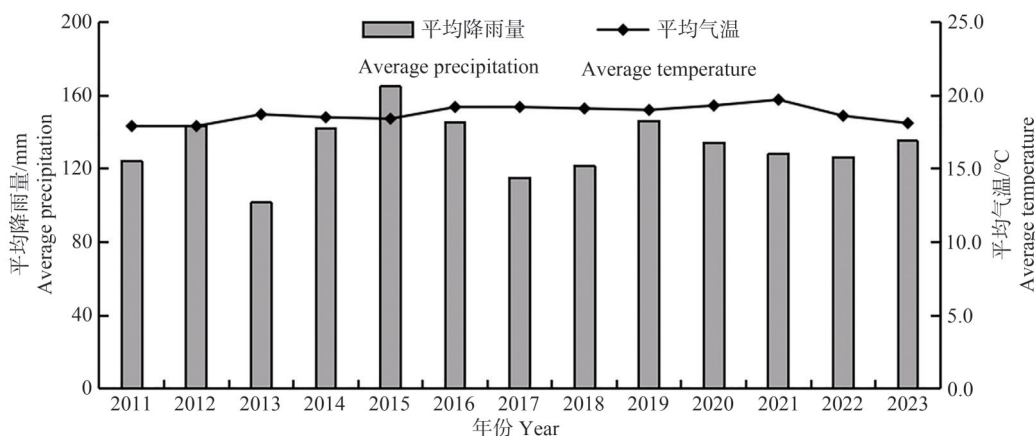


图 1 2011—2023 年月平均降雨量和气温

Fig.1 Annual average precipitation and temperature of month from 2011 to 2023

12 g/100 g、K₂O 60 g/100 g), 控释期为 3 个月, 由金正生态工程集团股份有限公司提供), 其中尿素施用早稻按照当地施肥习惯, 基肥、蘖肥、穗肥质量比为 4:3:3, 分次施用, 晚稻按基肥、蘖肥质量比为 4:6 分次施用, 磷肥、钾肥、秸秆、腐熟牛粪、菌剂和控释 BB 肥均作为基肥一次施入, 将腐熟牛粪均匀的撒到土壤表面, 菌剂与肥料拌匀后立即撒施到铺好秸秆的田内, 然后进行人工翻耕, 深度为 20 cm。各处理重复 3 次, 随机区组排列, 小区面积 30 m² (6 m×5 m), 小区之间设田埂, 并覆盖塑料薄膜。

1.3 数据采集及分析

1.3.1 样品采集和处理

水稻成熟后分小区实收, 计算历年早晚稻产量, 土壤于 2023 年晚稻收获后, 用土钻在试验田按 S 形路线随机采集 10 个点的土样, 取样深度为 0~20 cm, 混合后带入实验室, 剔除石块和动植物残体等杂质, 过 2 mm 筛后分为 2 份, 1 份待自然风干后研磨过 100 目筛后装入自封袋保存, 另外 1 份放入于 -20 °C 待用。

1.3.2 土壤理化性质测定

土壤 pH、有机质 (SOM)、有机碳 (SOC)、全氮 (TN)、碱解氮 (AN)、有效磷 (AP)、速效钾 (AK)、硝态氮 (NO₃⁻-N) 和铵态氮 (NH₄⁺-N) 含量参照鲍士旦^[25] 的方法进行; 交换性钾 (Exchangeable potassium, EK)、交换性钠 (Exchangeable sodium, ENa)、交换性钙 (Exchangeable calcium, ECa)、交换性镁 (Exchangeable magnesium, EMg) 用 NH₄OAc 浸提-原子吸收分光光度法测定。

1.3.3 土壤团聚体测定

土壤团聚体分级采用湿筛法进行水稳定性团聚

体分级。将风干土粒细分为 4 个不同的粒径组, 即分为 <0.25、>0.25~1.00、>1.00~2.00 和 >2.00 mm 团聚体。最终计算得到各粒径水稳定性团聚体质量的百分比。团聚体平均重量直径 (MWD)、几何平均直径 (GMD) 分别按以下公式计算:

$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^n (\bar{d}_i w_i)$$

$$\text{GMD} = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n m_i \ln \bar{d}_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \right]$$

式中: $\bar{d}_i$, 团聚体平均直径, mm; w_i , 粒级团聚体重量的百分比, %; m_i , 土壤不同粒级团聚体的重量, g。

1.3.4 土壤质量指数计算

根据土壤质量指数 (SQI) 进行土壤质量评价, 包括指标选择、指标评价、指标权重分配和 SQI 计算 4 个步骤。

1) 指标选择 采用全量数据集 (TDS) 法, 选取试验地土壤容重、pH、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾、有机质、有机碳、铵态氮、硝态氮、交换性钾、交换性钠、交换性钙、交换性镁、平均重量直径和几何平均直径作为土壤质量评价指标。

2) 根据标准评分功能 (Standard scoring function, SSF) 模型 采用正 S 型效应方程对各土壤质量指标进行无量纲、归一化评分赋值。

$$S_{ij} = \begin{cases} 0 & S_{ij} \leq b \\ \frac{S_{ij} - a}{a - b} & b < S_{ij} < a \\ 1 & S_{ij} \geq a \end{cases}$$

式中: i , 土壤样本; j , 土壤质量指标; S_{ij} , i 土壤样本的第 j 项质量指标经归一化转换后的得分值; a 、 b 分别

为第 j 项土壤质量指标的评价上限值和下限值。

3) 指标权重分配 先计算第 i 项土壤质量指标与其他各项土壤质量指标相关系数的平均值(R_i),再计算各项土壤质量指标的 R_i 之和,两者比值即为第 i 项土壤质量评价指标的权重。

$$W_i = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^n R_i}$$

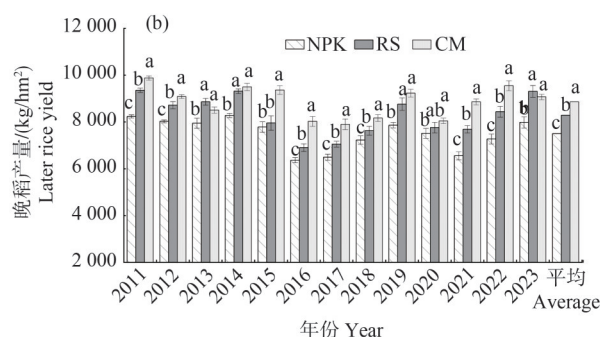
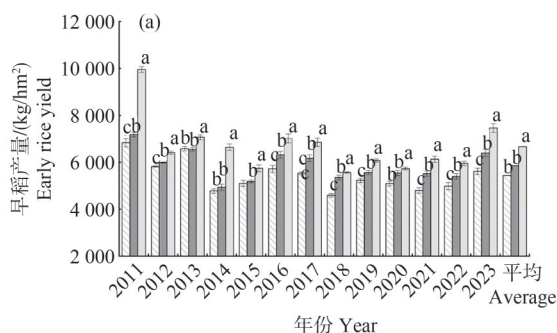
式中: R_i ,第 i 项土壤质量指标与其他各项土壤指标相关系数的平均值; n ,土壤质量指标的个数; W_i 代表第 i 项土壤质量指标的权重。

4) SQI 计算 各土壤质量指标的得分和权重乘积之和即为其SQI。

$$SQI_i = \sum_{j=1}^n W_i S_{ij}$$

式中: i ,第 i 项土壤指标; n 表示土壤质量指标的个数; S_{ij} 为归一化转换后的第 j 个土壤样本的第 i 个质量指标的得分值; W_i 表示第 i 项土壤质量指标的权重。

1.4 数据处理



NPK,单施化肥;RS,化肥配施秸秆添加快腐熟剂;CM,控释BB肥配施牛粪。不同小写字母表示不同处理间差异显著水平($P<0.05$)。下同。

NPK, single application of chemical fertilizer; RS, chemical fertilizer combined with straw; CM, controlled-release BB fertilizer combined with cow manure. Different lowercase letter indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

图2 历年不同施肥处理的早稻(a)和晚稻(b)产量

Fig. 2 Annual early rice yield (a) and later rice yield (b) under different fertilization treatment

2.2 长期外源有机物料添加对土壤养分含量的影响

由表1可知,连续13年长期定位试验后,与NPK相比,RS和CM的土壤有机质、有机碳、全氮和硝态氮含量均达到显著差异($P<0.05$)。与2011年土壤初始相比,2023年RS和CM的土壤有机质、有效磷、全氮和碱解氮含量均有一定幅度升高,增幅分别为33.84%~58.79%、64.66%~267.07%、2.29%~12.51%和21.75%~46.05%;NPK的有

试验数据采用Excel 2019软件计算处理,采用SPSS13.0统计软件进行差异显著性检验,采用IBM SPSS 22.0进行方差分析(Analysis of variance, ANOVA)。

2 结果与分析

2.1 长期外源有机物料添加对双季稻产量的影响

由图2可知,各处理的双季稻产量历年变化趋势基本一致。与常规施肥(NPK)相比,2011—2012、2015—2019、2021—2023年的RS和CM的早稻产量均有显著性差异($P<0.05$),早稻产量从高到低均为 $CM>RS>NPK$,2013—2015、2020年CM的早稻产量均显著高于RS和NPK($P<0.05$);2011—2012、2016—2018、2021—2022年各处理晚稻产量均有显著差异($P<0.05$),晚稻产量从高到低均为 $CM>RS>NPK$,2013—2015、2019—2020、2023年RS和CM的晚稻产量均显著高于NPK($P<0.05$),而RS与CM的晚稻产量无显著差异($P>0.05$)。

机质和有效磷含量均有不同幅度升高,分别为11.28%和29.91%,但其全氮、碱解氮、以及速效钾含量分别下降9.71%、2.37%和53.42%。土壤速效钾含量以RS最高,且显著高于其他2个处理($P<0.05$);与NPK相比,CM的铵态氮和硝态氮含量均有显著增加($P<0.05$),分别为9.56和12.13 mg/kg,增幅分别为66.26%和69.65%。

2.3 长期外源有机物料添加对土壤pH、容重和盐基离子的影响

表 1 不同施肥处理的土壤养分含量
Table1 Soil nutrition concentration of different fertilization treatment

处理 Treatment	含量/(g/kg) Content		
	有机质 SOM	有机碳 SOC	全氮 TN
初始值 Initial value	28.10	15.32	1.75
NPK	31.27±2.38 ^c	18.14±1.38 ^c	1.58±0.12 ^b
RS	37.61±2.68 ^b	21.81±1.55 ^b	1.79±0.08 ^a
CM	44.62±1.49 ^a	25.89±0.86 ^a	1.97±0.02 ^a

处理 Treatment	含量/(g/kg) Content				
	碱解氮 AN	有效磷 AP	速效钾 AK	铵态氮 NH ₄ ⁺	硝态氮 NO ₃ ⁻
初始值 Initial value	117.10	11.60	78.00	5.65	7.12
NPK	114.33±12.34 ^b	15.07±0.67 ^b	36.33±3.86 ^b	5.75±0.32 ^b	7.15±0.94 ^b
RS	142.57±8.33 ^{ab}	19.10±1.83 ^b	95.00±3.56 ^a	5.80±0.70 ^b	10.08±1.14 ^a
CM	171.03±19.60 ^a	42.58±4.90 ^a	46.00±6.98 ^b	9.56±0.60 ^a	12.13±0.60 ^a

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同
Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ($P<0.05$). The same below.

由表 2 可知,与 NPK 相比,RS 和 CM 可显著提高土壤 pH($P<0.05$),分别升高了 0.09 和 0.40。此外 CM 容重最低,较 NPK 降低 13.69%($P<0.05$),RS 和 NPK 两者间无显著差异($P>0.05$)。在土壤盐基离子含量方面,与 NPK 相比,RS 交换性钾和 CM 交换性镁离子含量分别升高 194.32% 和 106.06%($P<0.05$)。虽然各处理间土壤交换性钠、钾离子无显著差异,但由高到低均表现为 CM>RS>NPK。

表 2 不同施肥处理的土壤 pH、容重和盐基离子含量
Table 2 Soil pH value, bulk density, and exchange base of different fertilization treatment

处理 Treatment	pH	容重/(g/cm ³) Bulk density	盐基离子/(mg/kg) Exchange base			
			K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
NPK	5.17±0.02 ^c	0.95±0.03 ^a	344.20±49.10 ^b	238.95±13.00 ^a	871.92±91.07 ^a	78.50±0.46 ^b
RS	5.26±0.03 ^b	0.93±0.02 ^{ab}	1 010.16±82.74 ^a	256.25±11.13 ^a	925.32±72.50 ^a	90.58±6.49 ^{ab}
CM	5.57±0.03 ^a	0.82±0.08 ^b	511.94±69.6 ^{ab}	295.50±35.54 ^a	1 116.6±188.69 ^a	162.03±14.64 ^a

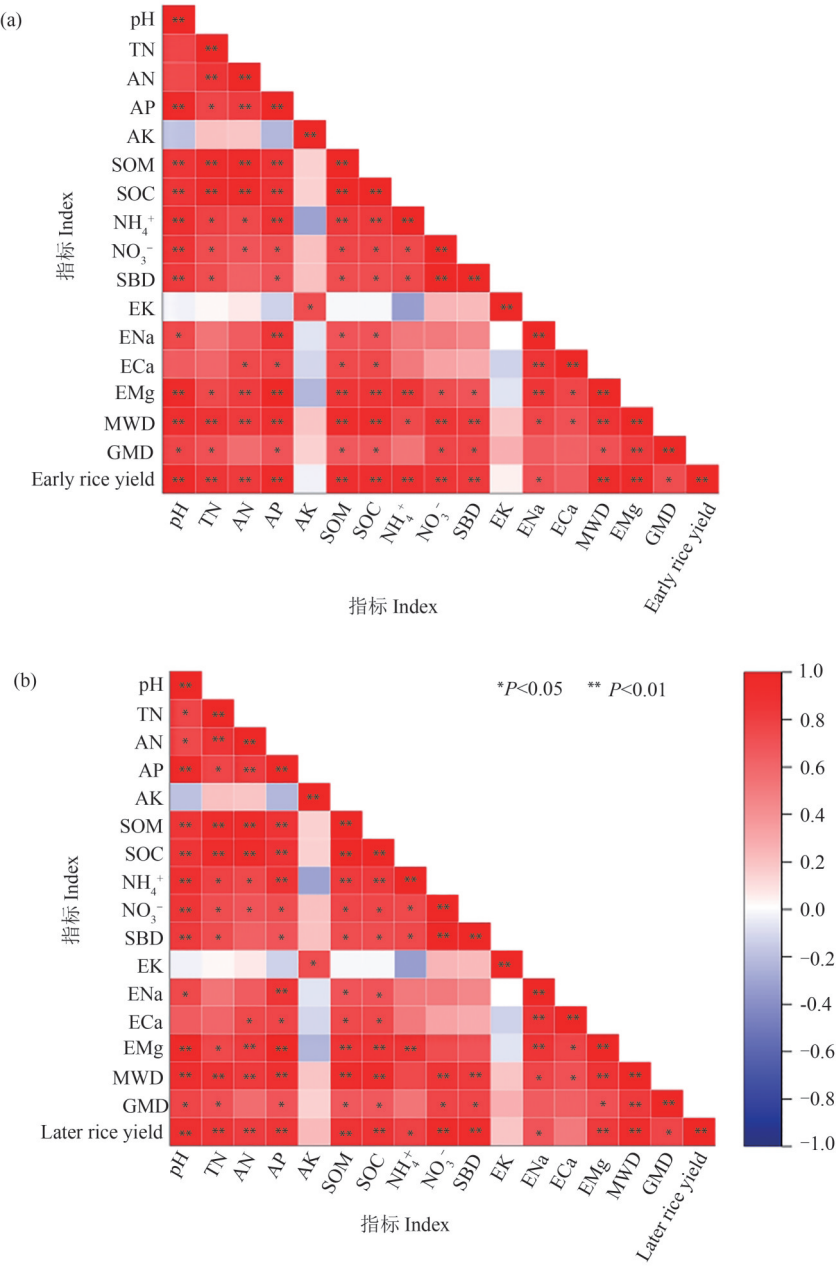
2.4 土壤养分含量与双季稻产量的相关性

由图 3 可知,早稻产量与土壤 pH、全氮、碱解氮、有效磷、有机质、有机碳、铵态氮、硝态氮、土壤容重、交换性镁离子含量以及平均重量直径(MWD)均呈极显著正相关($P<0.01$),土壤交换性钠和几何平均直径(MWD)达到显著正相关性($P<0.05$);晚稻产量与土壤 pH、全氮、碱解氮、有效磷、有机质、有机碳和硝态氮、土壤容重、交换性镁离子含量、MWD 均达到了极显著正相关性($P<0.01$),土壤铵态氮和交换性钠和几何平均直径之间达到了显著正相关($P<0.05$),土壤速效钾含量与双季

稻产量均没有显著性差异($P>0.05$)。说明除了速效钾、交换性钾和交换性钙离子,其他养分含量是影响水稻产量的重要因子。

2.5 长期外源有机物料添加对土壤水稳团聚体的影响

由图 4 可知,不同施肥模式显著影响土壤团聚体的稳定性($P<0.05$)。与 NPK 相比,CM 显著提高了土壤团聚体 GMD 和 MWD,分别升高 9.38% 和 5.28%。RS 和 NPK 两者土壤团聚体 GMD 没有显著性差异,但土壤团聚体 MWD 存在显著性差异($P<0.05$),各处理土壤团聚体 GMD



pH:酸碱度;TN:总氮;AN:碱解氮;AP:有效磷;AK:速效钾;SOM:有机质;SOC:有机碳;NH₄⁺:铵态氮;NO₃⁻:硝态氮;SBD:容重;EK:交换性钾;ENa:交换性钠;ECa:交换性钙;EMg:交换性镁;MWD:平均重量直径;GMD:几何平均直径;Early rice yield:早稻产量;Later rice yield:晚稻产量。*表示显著相关($P<0.05$),**表示极显著相关($P<0.01$)。

pH: acidity or alkalinity; TN: total nitrogen; AN: alkaline hydrolyzed nitrogen; AP: available phosphorus; AK: available potassium, SOM: soil organic matter; SOC: soil organic carbon; NH₄⁺: ammonium nitrogen; NO₃⁻: nitrate nitrogen; SBD: bulk density; EK: exchangeable potassium; ENa: exchangeable sodium; ECa: exchangeable calcium; EMg: exchangeable magnesium; MWD: average weight diameter; GMD: geometric mean diameter. *, significant at the 0.05 level ($P<0.05$); **, significant at the 0.01 level ($P<0.01$).

图3 土壤性质与双季稻产量的相关性

Fig. 3 Correlation analysis between soil nutrients and double rice yield

和 MWD 从大到小均依次表现为 CM>RS>NPK。

2.6 长期外源有机物料添加对土壤质量指数的影响

由图 5 可知,各处理间的土壤质量指数(SQI)差异达极显著水平($P<0.01$),其中 CM 的 SQI 最高,RS 的 SQI 次之,NPK 的 SQI 最低,分别为 0.71、0.34 和 0.12,这表明长期有机物料培肥后可极显著

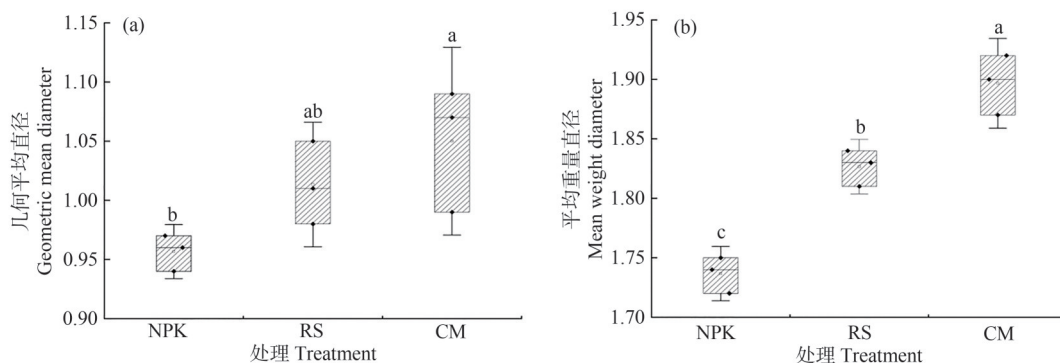
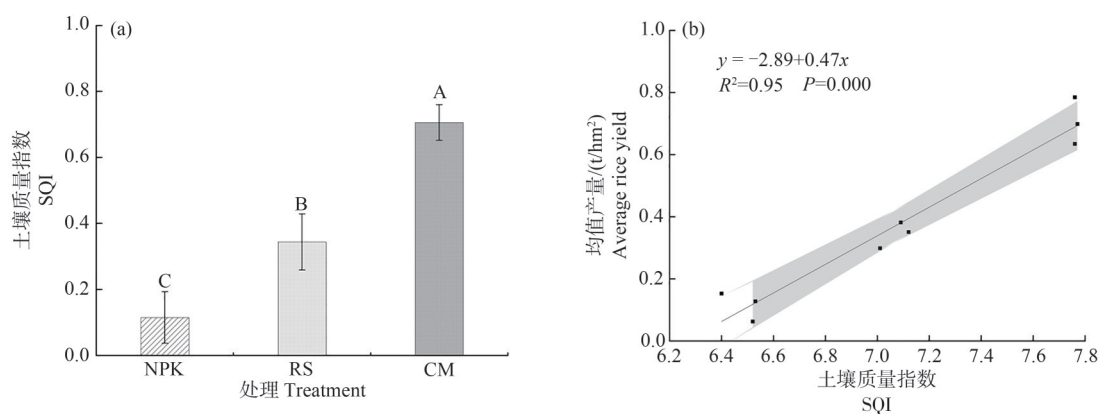


图 4 不同施肥处理土壤的水稳团聚体的几何平均直径(a)和平均重量直径(b)

Fig. 4 Geometric mean diameter (a) and mean weight diameter (b) of water stable aggregates different fertilizations treatment

提高土壤 SOI。同时相关性分析表明,双季稻均值

产量与 SQI 呈显著正相关($R^2=0.95, P=0.000$)。



不同大写字母表示差异极显著($P < 0.01$)。

Different capital letters indicate significant difference at 0.01 level.

图 5 各处理土壤质量指数(a)及质量指数与产量的关系(b)

Fig. 5 Soil quality index under different treatments (a) and relationship between SQI and rice yield (b)

3 讨论

3.1 长期外源有机物料添加对双季稻产量及土壤养分含量的影响

有机培肥模式是提高土壤肥力和增加作物产量的重要措施^[26]。本研究发现,与常规施肥(NPK)相比,施用不同有机物料不仅能增加双季稻产量,还提高了土壤养分含量,以控释BB肥配施腐熟牛粪效果最显著。其原因可能是牛粪含有丰富的矿质养分和有机养分^[27],相对于秸秆还田培肥模式,腐熟牛粪碳氮比较低,有利于有机养分向矿质养分转化,使土壤中潜在养分得到激活,并且控释BB肥具有缓慢释放养分的特性,经过长期有机培肥后,土壤养分含量明显升高,同时土壤物理结构得到改善,扩大了作物根部的生

长空间,有利于作物根系对养分的吸收和利用,从而增加作物产量,这与袁嫚嫚等^[28]的研究结果一致。另本研究结果发现,秸秆还田可显著提高土壤速效钾含量,其原因可能是长期秸秆还田为农田土壤微生物提供了养分和良好的生长环境,加速秸秆中有机物的转化,增加了土壤养分含量,另外秸秆本身钾含量较高,导致土壤速效钾含量增加高于其他处理。侯红乾等^[29]研究结果表明,化肥配施有机肥不仅能有效提高土壤养分含量,还可以增加水稻产量。宓文海等^[30]研究结果也表明,与单施化肥比,有机物料的添加对于土壤养分含量的增加效果更显著,且猪粪堆肥处理效果好于秸秆还田。高菊生等^[31]在红壤性稻田的研究中发现,长期化肥配施牛粪处理不但能增加水稻产量还可以提高土壤肥力。

3.2 长期外源有机物料添加对土壤水稳定性团聚体及土壤质量指数的影响

团聚体作为土壤结构的构成单元是土壤的重要组成部分^[32-33],对土壤的许多物理、化学和生物学性质起到了重大影响^[34],众多研究都用团聚体稳定性表示土壤结构的稳定性和团聚程度^[35],本研究发现,与NPK相比,长期有机物料培肥模式(RS和CM)土壤团聚体稳定性有一定幅度增加,且CM土壤团聚体水稳定性效果好于RS,其原因可能与秸秆和牛粪两者有机物料本身理化性质不同有关^[36],且秸秆添加腐熟菌剂后,存在秸秆腐熟较慢,养分释放缓慢,有机酸积累等问题^[37],不利于土壤结构形成和土壤养分的积累,而CM施用的是充分腐熟的牛粪,能快速分解及时释放养分,同时一次性施用控释BB肥,能够保证作物整个生育期养分的供给,减少了人为因素对土壤结构的扰动,进一步促进了黄泥田团聚体结构的形成^[38]。土壤质量评价作为评估管理措施及土地利用变化等人类活动对土壤影响的有效手段,有助于及时掌握土壤质量的现状和变化动态^[39],在构建土壤质量指数上采用全量数据集(TDS)法,选取试验地土壤容重、pH、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾、有机质、有机碳、铵态氮、硝态氮、交换性钾、交换性钠、交换性钙、交换性镁离子含量、平均重量直径和几何平均直径作为土壤质量评价指标基本涵盖了本研究涉及的土壤指标。本研究结果表明,长期有机培肥模式(RS和CM)均可以提高土壤质量指数,且CM处理土壤质量指数显著高于RS和NPK,由高到低依次为CM>RS>NPK。今后需进一步增加对土壤生物学性质的关注,以期系统阐明长期有机培肥对土壤质量的影响。

4 结 论

经过13年的长期定位试验结果表明,控释BB肥配施腐熟牛粪(CM)和化肥配施秸秆添加快腐熟剂(RS)处理的有机物料年总用量分别为27 000 kg/hm²(早稻和晚稻用量均为13 500 kg/hm²)和6 000 kg/hm²(早稻和晚稻用量均为3 000 kg/hm²)对浙中黄泥田双季稻产量均有显著提升作用,并且CM双季稻增产效果显著优于RS;CM能显著提高土壤pH、有机质、有机碳、全氮、碱解氮、有效磷、铵态氮和硝态氮含量;而对于土壤速效钾含量的升高,RS

效果更显著;在土壤团聚体结构方面,CM能显著提高土壤团聚体几何平均直径(GMD)和平均重量直径(MWD)。综上,控释BB肥配施腐熟牛粪可显著提升浙中黄泥田土壤肥力和水稻产量。

参考文献 References

- [1] 王艳群,彭正萍,薛世川,杨云马,周亚鹏,赵立宾. 过量施肥对设施农田土壤生态环境的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(S1):81-84
Wang Y Q, Peng Z P, Xue S C, Yang Y M, Zhou Y P, Zhao L B. Effects of excessive fertilization on soil ecological environment of protected farmland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(S1): 81-84(in Chinese)
- [2] 祁通,汤胜,周静杰,马庆旭,吴良欢. 长期覆膜旱作和施用包膜尿素对水稻产量、氮肥利用率及土壤养分的影响[J]. 浙江大学学报:农业与生命科学版, 2024, 50(1):109-122
Qi T, Tang S, Zhou J J, Ma Q X, Wu L H. Effects of long-term non-flooding plastic film mulching and application of coated urea on rice yield, nitrogen use efficiency and soil nutrients [J]. *Journal of Zhejiang University*, 2024, 50(1): 109-122(in Chinese)
- [3] 胡诚,刘东海,陈云峰,乔艳,伍德春,孙斌,李双来. 不同土壤改良措施对低产黄泥田土壤性质及水稻产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016(3):117-121
Hu C, Liu D H, Chen Y F, Qiao Y, Wu D C, Sun B, Li S L. Effects of different soil melioration practices on soil properties and rice yields in low-yielding yellow clayey land [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2016(3): 117-121(in Chinese)
- [4] 孟祥天,蒋瑞霖,王晓玥,孙波. 生物炭和秸秆长期还田对红壤团聚体和有机碳的影响[J]. 土壤, 2018, 50(2):326-332
Meng X T, Jiang Y J, Wang X Y, Sun B. Effects of long-term application of biochar and straws on red soil aggregate composition and organic carbon distribution[J]. *Soils*, 2018, 50(2): 326-332(in Chinese)
- [5] 韩科峰,陈余平,胡铁军,张丰,周飞,陈剑秋,吴良欢. 硅钙钾镁肥对浙江省酸性水稻土壤的改良效果[J]. 浙江农业学报, 2018, 30(1):117-122
Han K F, Chen Y P, Hu T J, Zhang F, Zhou F, Chen J Q, Wu L H. Effects of silicon, calcium, potassium and magnesium fertilizer on acid paddy soil improvement in Zhejiang Province [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2018, 30(1): 117-122(in Chinese)
- [6] 施林林,柳开楼,董林林,沈园,陈培峰,沈明星,王海侯. 太湖地区稻麦轮作系统有机氮肥替代率的演变特征及其影响因素[J]. 中国农学通报, 2024, 40(1): 1-6
Shi L L, Liu K L, Dong L L, Shen Y, Chen P F, Shen M X, Wang H H. Evolution characteristics and influence factors of substitution rate of organic nitrogen in rice-wheat rotation system in Taihu Lake Region[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2024, 40(1): 1-6(in Chinese)
- [7] 徐新朋,丁文成,何萍,周卫. 基于产量反应和农学效率的水稻智能化推荐施肥方法研究[J]. 植物营养与肥料科学, 2023, 29(5):802-812
Xu X P, Ding W C, He P, Zhou W. The study of intelligent fertilizer recommendation method for rice based on yield response and agronomic efficiency [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(5): 802-812(in Chinese)
- [8] 王利民,黄东风,何春梅,刘彩玲,李清华,黄毅斌,王飞. 紫云英还田对黄泥田土壤理化和微生物特性及水稻产量的影响[J]. 生态学报, 2023, 43(11):4782-4797
Wang L M, Huang D F, He C M, Liu C L, Li Q H, Huang Y B, Wang F. Impacts of the Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) residue

- incorporation on soil physicochemical, microbial properties and rice yields in yellow-mud paddy field[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(11): 4782-4797(in Chinese)
- [9] 王飞, 李清华, 何春梅, 王珂, 游燕玲, 黄毅斌. 不同施肥处理对黄泥田团聚体有机碳固持及其组分的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(2):315-324
- Wang F, Li Q H, He C M, Wang K, You Y L, Huang Y B. Effects of different fertilization treatments on organic carbon retention and composition of aggregates in yellow mud field[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(2): 315-324(in Chinese)
- [10] Zhao J S, Chen S, Hu R G, Li Y Y. Aggregate stability and size distribution of red soils under different land uses integrally regulated by soil organic matter, and iron and aluminum oxides[J]. *Soil & Tillage Research*, 2017, 167: 73-79
- [11] 陈超, 密文海, 居静, 吴良欢, 赵海涛. 长期不同施肥模式对中低产黄泥田土壤团聚体组成及碳组分的影响[J]. 华北农学报, 2022, 37(3): 168-174
- Chen C, Mi W H, Ju J, Wu L H, Zhao H T. Effect of long-term different fertilization pattern on soil aggregate composition and organic carbon fractions in yellow clayey paddy soil [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2022, 37(3): 168-174(in Chinese)
- [12] Gu Y, Mi W H, Xie Y N, Ma Q X, Wu L H, Hu Z P, Dai F. Nitrapyrin affects the abundance of ammonia oxidizers rather than community structure in a yellow clay paddy soil[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(2): 872-882
- [13] 戴竞雄, 王飞. 长期施肥对南方黄泥田水稻养分吸收利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020, 21(6):189-196
- Dai J X, Wang F. Effects of long-term fertilization on nutrient uptake and utilization of rice in yellow-mud paddy soils in Southern China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020, 21(6): 189-196 (in Chinese)
- [14] 李奕, 刘玲玲, 房焕, 李大明, 柳开楼, 彭新华, 彭显龙, 周虎. 长期施肥对水稻土碳氮矿化与团聚体稳定性的影响[J]. 土壤, 2019, 51(3):451-457
- Li Y, Liu L L, Fang H, Li D M, Liu K L, Peng X H, Peng X L, Zhou H. Effects of long-term fertilization on paddy soil carbon and nitrogen mineralization and aggregates stability[J]. *Soils*, 2019, 51(3): 451-457 (in Chinese)
- [15] 韩宝, 于跃跃, 朱文, 徐凯, 郭宁. 有机肥不同量级对小麦产量和土壤培肥的影响[J]. 中国农学通报, 2021, 37(24):73-78
- Han B, Yu Y Y, Zhu W, Xu K, Guo N. Effects of different levels of organic fertilizer on wheat yield and soil fertility[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(24):73-78(in Chinese)
- [16] 王威雁, 沈鹏飞, 张侯平, 莫非, 温晓霞, 廖允成. 长期保护性耕作下土壤团聚体全氮与氮功能微生物关系研究[J/OL]. 土壤学报, 2024, 48(2): 1-14
- Wang W Y, Shen P F, Zhang H P, Mo F, Wen X X, Liao Y C. Study on the relationship between total nitrogen and nitrogen functional microorganisms in soil aggregates under long-term conservation tillage [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 48(2):1-14(in Chinese)
- [17] Kuypers M M M, Marchant H K, Kartal B. The microbial nitrogen-cycling network[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2018, 16(5): 263-276
- [18] 高燕, 梁爱珍, 黄丹丹, 张延, 张畅, 王阳, 张士秀, 陈学文. 长期免耕对黑土氮磷硫循环微生物功能潜力的影响[J]. 应用生态学报, 2023, 34(4): 913-920
- Gao Y, Liang A Z, Huang D D, Zhang Y, Zhang Y, Wang Y, Zhang S X, Chen X W. Effects of long-term no-tillage on the functional potential of microorganisms involved in the nitrogen, Phos-phorus and sulfur cycles of black soil [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(4): 913-920(in Chinese)
- [19] 刘红梅, 李睿颖, 高晶晶, 朱平, 路杨, 高洪军, 张贵龙, 张秀芝, 彭畅, 杨殿林. 保护性耕作对土壤团聚体及微生物学特性的影响研究进展[J]. 生态环境学报, 2020, 29(6):1277-1284
- Liu H M, Li R Y, Gao J J, Zhu P, Lu Y, Gao H J, Zhang G L, Zhang X Z, Peng C, Yang D L. Research progress on the effects of conservation tillage on soil aggregates and microbiological characteristics[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(6): 1277-1284(in Chinese)
- [20] Kan Z R, Ma S T, Liu Q Y, Liu B Y, Virk A L, Qi J Y, Zhao, X, Lal R, Zhang H L. Carbon sequestration and mineralization in soil aggregates under long-term conservation tillage in the North China Plain [J/OL]. *CATENA*, (2019-12-28). DOI:10. 1016/j. catena. 2019. 104428
- [21] Li T T, Zhang J Z, Wang X, Hartley I P, Zhang J L, Zhang Y L. Fungal necromass contributes more to soil organic carbon and more sensitive to land use intensity than bacterial necromass [J/OL]. *Applied Soil Ecology*, (2022-04-12). DOI:10. 1016/j. apsoil. 2022. 104492
- [22] 廖超林, 黎丽娜, 谢丽华, 孙钰翔, 邹炎, 戴齐, 尹力初. 增减施有机肥对红壤性水稻土团聚体稳定性及胶结物的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(4): 978-988
- Liao C L, Li L N, Xie L H, Sun Y X, Zou Y, Dai Q, Yin L C. Effect of increased or decreased application of organic manure on aggregates stability and soil cement in red paddy soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(4): 978-988(in Chinese)
- [23] 张艺, 戴齐, 尹力初, 谷忠元. 后续施肥措施改变对水稻土团聚体有机碳分布及其周转的影响[J]. 土壤, 2017, 49(5): 969-976
- Zhang Y, Dai Q, Yin L C, Gu Z Y. Effects of following-up fertilization reforming on distribution and turnover of aggregate-associated organic carbon in paddy soils [J]. *Soils*, 2017, 49(5): 969-976(in Chinese)
- [24] 赵影, 孟庆峰. 长期施用腐熟牛粪对东北黑土地草甸碱土水稳性团聚体及其稳定性的影响[J]. 农业工程技术, 2023, 15(3):139-145
- Zhao Y, Meng Q F. Distribution and stability of water-stable aggregates as affected by long-term cattle manure application to saline-sodic soil in the black soil region of Northeastern China[J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2023, 15(3): 139-145(in Chinese)
- [25] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000
- Bao S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis* [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000(in Chinese)
- [26] 晁赢, 付铜锋, 阎祥慧, 杭中桥, 杨全刚, 王会, 潘红, 姜燕宏, 诸葛玉平. 有机肥对作物品质、土壤肥力及环境影响的研究进展[J]. 中国农学通报, 2022, 38(29):103-107
- Chao Y, Fu, G F, Yan X H, Hang Z Q, Yang Q G, Wang H, Pan H, Lou Y H, Zhuge Y P. Effects of organic fertilizer on crop quality, soil fertility and environment: Research progress [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(29):103-107(in Chinese)
- [27] 谢军, 梁丰, 姜冠杰, 张新平, 甘雅芬, 张焱. 不同培肥模式下红壤性水稻土的酸度变化特征及其影响因素[J]. 江西农业大学学报, 2020, 42(3): 626-632
- Xie J, Liang F, Jiang G J, Zhang X P, Gan Y F, Zhang Q. Characteristics of soil acidity change and its influencing factors of red paddy soil under different fertilization patterns [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2020, 42(3): 626-632(in Chinese)
- [28] 袁媛媛, 邹刚, 胡润, 孙义祥. 秸秆还田配施化肥对稻油轮作土壤有机碳组分及产量影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1):27-35
- Yuan M M, Wu G, Hu R, Sun Y X. Effects of straw returning plus fertilization on soil organic carbon components and crop yields in rice-rapeseed rotation system [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(1): 27-35(in Chinese)
- [29] 侯红乾, 冀建华, 刘秀梅, 吕真真, 蓝贤瑾, 刘益仁. 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
- Hou H Q, Ji J H, Liu X M, Lu Z Z, Lan X J, Liu Y R. Effect of long-term combined application of organic and inorganic fertilizers on rice

- yield, nitrogen uptake and utilization in red soil area of China[J]. *Soil*, 2020, 52(4): 758-765(in Chinese)
- [30] 宓文海, 吴良欢, 马庆旭, 张宣, 刘彦伶. 有机物料与化肥配施提高黄泥田水稻产量和土壤肥力[J]. 农业工程学报, 2016, 32(13): 103-108
- Mi W H, Wu L H, Ma Q X, Zhang X, Liu Y L. Combined application of organic materials and inorganic fertilizers improving rice yield and soil fertility of yellow clayey paddy soil [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(13): 103-108(in Chinese)
- [31] 高菊生, 黄晶, 董春华, 徐明岗, 曾希柏, 文石林. 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 J S, Huang J, Dong C H, Xu M G, Zeng X B, Wen S L. 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(in Chinese)
- [32] 李伟, 代镇, 张光鑫, 刘杨, 韩娟. 生物炭和氮肥配施提高土团聚体稳定性及作物产量[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(05): 782-791
- Li W, Dai Z, Zhang G X, Liu Y, Han J. Combination of biochar and nitrogen fertilizer to improve soil aggregate stability and crop yield in Lou soil [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(5): 782-791(in Chinese)
- [33] 石艳香, 迟凤琴, 张久明, 匡恩俊, 佟玉欣, 马星竹, 朱莹雪, 袁佳慧. 不同施肥处理黑土中添加秸秆对土壤团聚体稳定性及有机碳贡献率的影响[J]. 土壤通报, 2023, 54(4): 856-863
- Shi Y X, Chi F Q, Zhang J M, Kuang E J, Tong Y X, Ma X Z, Zhu Y X, Yuan J H. Effects of straw addition on stability of soil aggregates and contribution of organic carbon under different fertilization treatments in black soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023, 54(4): 856-863(in Chinese)
- [34] 郑学博, 樊剑波, 周静. 沼液还田对旱地红壤有机质及团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(16): 3201-3210
- Zheng X B, Fan J B, Zhou J. Effects of biogas slurry on soil organic matter and characteristics of soil aggregates in upland red earth [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(16): 3201-3210(in Chinese)
- [35] 杨如萍, 郭贤仕, 吕军峰, 侯慧芝, 郭天文. 不同耕作和种植模式对土壤团聚体分布及稳定性的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 252-256
- Yang R P, Guo X S, Lv J F, Hou H Z, Guo T W. Affects of distribution and stability on soil aggregate in different patterns of tillage and cropping [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(1): 252-256(in Chinese)
- [36] 金春娥, 姬强, 王亚麒, 王锐, 何进勤, 雷金银. 不同培肥措施对宁南旱地土壤酶活性和微生物多样性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023, (12): 40-49
- Jin C E, Ji Q, Wang Y Q, Wang R, He J Q, Lei J Y. Effects of different fertilization measures on soil enzyme activity and microbial diversity in dryland of southern Ningnan [J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2023, (12): 40-49(in Chinese)
- [37] 关强, 蒲瑶瑶, 张欣, 王媛媛, 李大明, 李辉信, 胡锋, 焦加国. 管晓进. 长期施肥对水稻根系有机酸分泌和土壤有机碳组分的影响[J]. 土壤, 2018, 50(1): 115-121
- Guan Q, Pu Y Y, Zhang X, Wang Y Y, Li D M, Li H X, Hu F, Jiao J G, Guan X J. Effects of long-term fertilization on organic acids in root exudates and SOC components of red paddy soils [J]. *Soils*, 2018, 50(1): 115-121(in Chinese)
- [38] 祁迎春, 王益权, 刘军, 于雄胜, 周彩景. 不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 340-347
- Qi Y C, Wang Y Q, Liu J, Yu X S, Zhou C J. Comparative study on composition of soil aggregates with different land use patterns and several kinds of soil aggregate stability index [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(1): 340-347(in Chinese)
- [39] 宫殿清, 王兆锋, 张锦锂, 胡晓阳, 谷昌军, 魏博. 拉萨河谷设施农地土壤质量变化及空间分异特征[J]. 土壤学报, 2023, 60(6): 1582-1594
- Gong D Q, Wang Z F, Zhang Y L, Hu X Y, Gu C J, Wei B. Soil quality change and spatial differentiation characteristics of greenhouses land soil in Lhasa River Valley [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(6): 1582-1594(in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅



第一作者简介: 徐洁章, 高级农艺师, 永康市耕地质量服务中心副主任, 主要从事作物良种与耕肥领域的农业技术推广工作。主持省部级项目4项, 发表论文4篇, 软件著作权授权4件; 其中水稻“测土配方+侧深施肥+无人机追肥”三位一体稻虾轮作减肥增效技术模式和“浙样施”+“浙农优品”互连互通的“永康模式”被评为全省推广的技术模式。



通讯作者简介: 吴良欢, 浙江大学环境与资源学院教授, 博士生导师, 浙江余杭蜜梨科技小院首席专家, 主要从事肥料资源与养分综合管理研究。先后主持各类科研项目60余项, 发表论文200余篇, 专利20余项。曾获国家科技进步奖二等奖1项, 省部级科技进步奖二等奖4项。获“全国优秀科技特派员”“浙江省功勋科技特派员”“浙江省农业科技先进工作者”等荣誉称号。