

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.02.006

黄郑宸, 俞巧钢, 叶静, 等. 有机物料长期施用对稻田土壤养分的影响. 土壤, 2023, 55(2): 272–279.

## 有机物料长期施用对稻田土壤养分的影响<sup>①</sup>

黄郑宸<sup>1,2</sup>, 俞巧钢<sup>2\*</sup>, 叶静<sup>2</sup>, 胡妙丹<sup>3</sup>, 黄伟忠<sup>3</sup>, 孙万春<sup>2</sup>, 马军伟<sup>2</sup>

(1 浙江农林大学环境与资源学院, 浙江临安 311300; 2 浙江省农业科学院环境资源与土壤肥料研究所, 杭州 310021; 3 绍兴市农业科学研究所, 浙江绍兴 312003)

**摘要:** 通过 2010—2021 年连续 12 年的长期定位试验, 研究了紫云英、水稻秸秆、商品有机肥等有机物料还田施用对稻田土壤养分的影响。结果表明: 施用有机物料可以有效提高稻田土壤氮磷钾和有机质等含量。与单施化肥处理相比, 紫云英还田土壤碱解氮含量增加 6.97%, 商品有机肥配施土壤有效磷含量增加 49.30%, 水稻秸秆还田土壤速效钾含量增加 49.32%。3 种有机物料处理土壤有机质增加相近(6.0%~7.5%), 可以改善土壤酸性但差异不显著。不同有机物料对土壤基础养分的增加差异显著, 紫云英还田土壤固氮能力最强, 商品有机肥配施土壤磷素增加最明显, 秸秆还田土壤钾素提高最显著。可见, 有机物料长期还田施用是一种培肥土壤的有效措施, 有助于稻田土壤的可持续利用。

**关键词:** 长期定位试验; 有机物料; 土壤养分; 紫云英; 水稻秸秆; 商品有机肥

**中图分类号:** S158.5 **文献标志码:** A

### Effects of Long-term Application of Organic Materials on Soil Nutrients in Paddy Fields

HUANG Zhengchen<sup>1,2</sup>, YU Qiaogang<sup>2\*</sup>, YE Jing<sup>2</sup>, HU Miaodan<sup>3</sup>, HUANG Weizhong<sup>3</sup>, SUN Wanchun<sup>2</sup>, MA Junwei<sup>2</sup>

(1 College of Environment and Resources, Zhejiang A&F University, Lin'an, Zhejiang 311300, China; 2 Institute of Environment Resource and Soil Fertilizer, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China; 3 Shaoxing Academy of Agricultural Sciences, Shaoxing, Zhejiang 312003, China)

**Abstract:** The effects of returning organic materials, such as Chinese milk vetch, rice straw and commercial organic fertilizer, on soil nutrients in paddy fields were studied through a 12-year long-term positioning experiment from 2010 to 2021. The results show that application of organic materials can effectively increase the contents of nitrogen, phosphorus, potassium and organic matter in paddy soil. Compared with the single application of chemical fertilizer, Chinese milk vetch increases the content of soil alkali-hydrolyzable nitrogen by 6.97%, commercial organic fertilizer combined with chemical fertilizer increases the content of soil available phosphorus by 49.30%, rice straw increases the content of soil available potassium by 49.32%. Application of green manure, rice straw and commercial organic fertilizer increase the content of soil organic matter by 6.0% to 7.5%, and improve soil acidity but the difference is insignificant. There are significant differences in the increases of soil nutrients among different organic materials. Chinese milk vetch green manure has the strongest fixation ability of soil nitrogen, organic fertilizer and rice straw have the most significant increase in soil phosphorus and soil potassium, respectively. In conclusion, long-term application of organic materials is an effective measure to fertilize soil and contribute to the sustainable utilization of paddy soil.

**Key words:** Long-term located test; Organic materials; Soil nutrients; Chinese milk vetch; Rice straw; Commercial organic fertilizer

中国耕地大部分处于长期连年耕种状态, 作物的生长与收获不断从耕地带走养分, 输入与输出的不平衡导致耕地养分逐渐减少。施肥不仅是为了提高作物

的产量与品质, 更是对土壤养分的补充, 维持土壤的元素平衡, 避免过度耕种导致耕地肥力退化。但在另一方面, 肥料的施用又可能因为用量与用法的不当造

①基金项目: 浙江省重点研发计划项目(2020C02030), 浙江省科技创新领军人才项目(2021R52045)和国家自然科学基金项目(31672234)资助。

\* 通讯作者(yqganhzzj@sina.com)

作者简介: 黄郑宸(1996—), 男, 浙江宁波人, 硕士研究生, 主要研究方向为有机物料施用对土壤的影响。E-mail: hzchen96@163.com

成农业环境污染,如生物酸性肥料引起土壤酸化,化肥破坏土壤结构,重金属元素与有毒元素在土壤中积累等问题。就国内农业现状而言,施肥量已经高于经济意义上的最优施用量,其中以小麦、玉米的施肥过量程度最为严重<sup>[1]</sup>。

随着农业科研水平的发展与可持续农业理念的推广普及,盲目施用化肥对土壤的危害被人们逐渐认知,不再一味追求农业经济效益,传统的农业生产模式开始转变<sup>[2]</sup>。我国有机物料资源丰富,含有较多的氮磷钾养分,与化肥配合施用可兼顾作物生长所需的速效养分与长期养分,降低化肥对土壤的危害,同时达到作物增产与土壤培肥的效果<sup>[3]</sup>。近年来,有机物料还田的相关试验在国内外相继进行。研究表明,有机物料与化肥的配合施用,有效结合了有机肥料养分的持久性与化肥养分的速效性,可以实现土壤物理结构改善、土壤肥力提升、作物增产、农业有机废弃物资源化有效利用等多重效益<sup>[4]</sup>。就现阶段有机物料还田研究而言,对农业生产有较高应用价值的有机物料主要有秸秆、绿肥、粪肥等<sup>[5]</sup>。

短期田间试验因为田间环境因素的多样性、不完全可控性,导致试验所得数据具有偶然性,同时以水稻为例的作物生长周期较长,难以在试验数据存疑时进行二次试验。而有机物料还田的长期定位试验,则具有短期试验不具备的多项优势<sup>[6]</sup>。一是长期定位试验具有数据量大的特点,通过比对平行试验组的数据可以较直观地发现异常数据;二是有机物料还田的完整周期较长,其对土壤的部分影响具有滞后性,无法在短期试验的试验期内表现出来,而通过长期定位试验,可以更全面地分析评价有机物料还田的单项效应、复合效应、累加效应和平均效应。一般来说长期定位试验的结果会与短期田间试验结果相差较大。

由此,本研究以紫云英、水稻秸秆和商品有机肥作为有机物料,开展其在稻田长期还田施用对土壤肥力提升效果的研究,以期水稻的高产稳产和农田耕地可持续利用提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验点概况

2009 年在浙江绍兴建设农田土壤肥力长期监测平台,开展有机物料还田的长期定位研究,到 2021 年已经持续 12 年。该试验点位于绍兴市越城区桔桥村,为亚热带季风气候,年平均气温约 16.5 °C,2 月平均气温 4.1 °C,7 月平均气温 28.8 °C,年均降水量约 1 444.5 mm,年均日照时数 1 996.4 h。供试土壤为水稻土,耕层土壤容重 1.28 g/cm<sup>3</sup>,有机质 31.2 g/kg,全氮 1.52 g/kg,有效磷 23.63 mg/kg,速效钾 102.5 mg/kg,pH 5.0,土壤黏粒、粉粒和砂粒的含量分别为 448、437 和 115 g/kg。

长期定位试验设置不施肥(CK)、单施常规化肥(CF)、水稻秸秆还田(SR)、商品有机肥配施(OM)、紫云英还田(MR) 5 个处理,每个处理包含 3 个随机排列互不相邻的重复试验小区。试验小区面积 20 m<sup>2</sup>,长宽分别是 5 m 和 4 m,采用水泥田埂单独围隔,拥有独立的灌排水口,防止串水串肥。各处理养分用量相同,氮(N)、磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)、钾(K<sub>2</sub>O)的施用量分别为 225、75、150 kg/hm<sup>2</sup>。有机物料中所含氮磷钾养分含量经分析后,在总量中扣除,其投入的养分按当年矿化率 50% 计算。各处理具体的设计见表 1。其中,紫云英在每年 4 月下旬翻压还田,水稻秸秆在上一年度水稻收获后还田,商品有机肥在水稻移栽前 10 d 施用。试验稻田种植当地典型主栽水稻绍粳 18,每年 7 月上旬移栽,11 月中旬收获。氮肥为尿素,分为基肥和追肥施用。磷肥为过磷酸钙,钾肥为氯化钾,全部作为基肥施用。水稻按当地的传统种植习惯进行水分和病虫害防治等田间管理。

### 1.2 试验样品采集

水稻收获后,按 5 点取样法采集各个小区 0~20 cm 耕层土壤样品。将土壤样品剔除根系等杂物,自然风干后过 10 目筛作为粗土土样。再取一部分过 100 目筛,作为细土土样,用于测定土壤基础理化性质,剩余土样进行封存处理。水稻收获后测定干重产量。

表 1 试验处理设计(kg/hm<sup>2</sup>)  
Table 1 Experimental treatment design

处理代号	处理描述	有机物料用量	化肥 N 总量	化肥 N 基肥	化肥 N 追肥	化肥 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 基肥	化肥 K <sub>2</sub> O 基肥
CK	不施肥	0	0	0	0	0	0
CF	单施常规化肥	0	225	135	90	75	150
SR	水稻秸秆还田	9 000	211.5	126.9	84.6	70.5	118.5
OM	商品有机肥配施	6 000	165	99	66	18	111
MR	紫云英还田	52 500	147	88.2	58.8	49.5	72

### 1.3 试验指标测定

土壤碱解氮采用碱扩散法测定；有效磷采用 0.5 mol/L 碳酸氢钠溶液浸提，钼锑抗比色法测定；速效钾采用 1 mol/L  $\text{NH}_4\text{OAc}$  溶液浸提，火焰光度法测定；有机质(SOM)含量采用土样包膜称重后，借助于德国耶拿元素分析仪测定土壤总有机碳量(TOC)，再通过计算得到( $\text{SOM}=\text{TOC}\times 1.724$ )；pH 按 1:2.5 的土水质量比浸提，借助于 pH 酸度计测定。

### 1.4 数据处理与统计分析

采用 Excel 2021 完成数据处理与图表绘制，借助 SPSS 26 中 Duncan 法进行数据的多重比较， $P<0.05$  表示差异具有统计学意义。

## 2 结果与讨论

本试验为时间跨度达 12 年的长期定位试验，试验的外部环境变化会对历年的试验数据有一定影响，历年土壤的养分含量比较会存在一定的阶段性差异，主要用于观察不同有机物料对土样不同养分的影响趋势。从平均值的角度，对历年土壤的养分含量进行分析比较，可以排除不同年份下的外部环境因素导致

的数据偏差，更好地比较有机物料对土壤养分的影响。在排除长期定位试验长时间跨度下的外部环境因素的误差后，可以较直观地看出不同处理对土壤各种养分含量的影响，其中，对土壤碱解氮含量的增加作用各处理表现为  $\text{MR}>\text{OM}>\text{SR}>\text{CF}>\text{CK}$ ，对土壤有效磷含量的增加作用表现为  $\text{OM}>\text{SR}\approx\text{MR}\approx\text{CF}>\text{CK}$ ，对土壤速效钾含量的增加作用表现为  $\text{SR}>\text{MR}\approx\text{OM}>\text{CF}>\text{CK}$ ，对土壤有机质含量的增加作用表现为  $\text{SR}\approx\text{OM}\approx\text{MR}>\text{CF}\geq\text{CK}$ (表 2)。

### 2.1 长期定位试验土壤的碱解氮含量

土壤碱解氮，也叫水解性氮或有效氮，代表土壤近期内氮素供应情况，反映了当季作物可利用的氮含量。经过 12 年连续种植水稻与施肥后，与 CK 处理相比，CF 处理增加了 4.57%，SR 处理增加了 7.66%，OM 处理增加了 9.93%，MR 处理增加了 11.86%；而与 CF 处理相比，SR 处理增加了 2.95%，OM 处理增加了 5.12%，MR 处理增加了 6.97%(表 2)。可见，有机物料的施用可以有效提升土壤碱解氮含量，且肥效均优于单施化肥，其中以紫云英绿肥还田对提高土壤供氮能力的效应最强。

表 2 不同处理土壤历年养分均值

Table 2 Mean annual values of soil nutrients under different treatments

处理	碱解氮(mg/kg)	有效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)	有机质(g/kg)	pH
CK	110.59 ± 37.04 a	9.11 ± 6.45 b	62.81 ± 22.33 b	29.05 ± 2.37 b	5.53 ± 0.36 a
CF	115.64 ± 40.61 a	15.06 ± 7.49 b	71.80 ± 23.56 b	30.57 ± 2.81 ab	5.59 ± 0.38 a
SR	119.06 ± 36.89 a	15.05 ± 5.18 b	103.80 ± 21.20 a	32.50 ± 2.91 a	5.58 ± 0.36 a
OM	121.56 ± 35.95 a	22.48 ± 7.86 a	77.81 ± 19.58 b	32.88 ± 3.47 a	5.69 ± 0.31 a
MR	123.70 ± 40.30 a	14.86 ± 6.65 b	79.23 ± 21.67 b	31.90 ± 2.64 a	5.59 ± 0.40 a

注：表中数据为平均值 ± 标准差；同列数据后不同小写字母表示处理间在  $P<0.05$  水平差异显著。

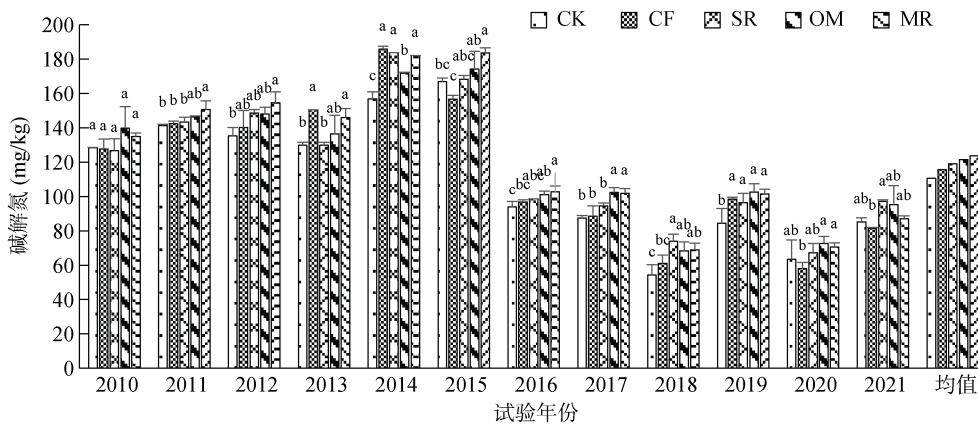
与初始土壤养分含量(2010 年 CK 处理)相比，2021 年 CK、CF、SR、OM、MR 处理碱解氮含量分别减少了 33.56%、36.48%、24.25%、25.84%、32.12%。但观察历年土壤的碱解氮含量，可以发现目前土壤碱解氮含量均低于初始含量是由于外部因素影响带来的氮素流失导致，且历年土壤碱解氮含量呈上升趋势，说明试验土壤的氮素施肥充足且不过量(图 1)。

在 12 年的长期定位试验期间，试验土壤的碱解氮含量整体表现为上升趋势，且前 6 年间碱解氮含量稳步上升，其中 2010 年与 2014 年的碱解氮均值提升较大，分别为 10.14% 与 27.09%。表明各个处理的氮肥供应量略大于水稻生长吸收的氮素量。其中 2016 年、2018 年、2020 年的土壤碱解氮含量较上一年明显减少，应是受外部水热条件影响。各个处理间

相比较，土壤剩余碱解氮含量整体上表现为  $\text{MR}>\text{OM}>\text{SR}>\text{CF}>\text{CK}$ ，个别年份的表现与此排序不符，则应是由于各试验小区的排水系统差异导致的土壤氮素流失与沉积差异。试验结果同时表明，MR 处理对土壤氮素的增加效应高于其他处理，这与李峰等<sup>[7]</sup>对紫云英还田的研究结果相同。

### 2.2 长期定位试验土壤的有效磷含量

对于长期定位试验中土壤有效磷均值的提升，与 CK 相比，CF 处理增加了 65.31%，SR 处理增加了 65.29%，OM 处理增加了 146.81%，MR 处理增加了 63.11%；而与 CF 处理相比，SR 处理减少了 0.01%，OM 处理增加了 49.30%，MR 处理减少了 1.33%(表 2)。表明有机肥与化肥配合施用对土壤磷素的提升最显著，秸秆还田与紫云英还田则与单施化肥的肥效相近。



(图中不同小写字母表示同一年份不同处理间差异在  $P < 0.05$  水平显著，下同)

图 1 不同处理土壤碱解氮含量

Fig. 1 Soil alkali-hydrolyzable N contents under different treatments

对比试验前后土壤有效磷的含量,与 2010 年 CK 处理相比,2021 年 CK 处理减少了 75.84%,CF 处理减少了 50.94%,SR 处理减少了 30.40%,OM 处理增加了 22.78%,MR 处理减少了 38.84%。说明试验土壤的磷素施肥量低于水稻生长吸收的磷素,秸秆还田与紫云英还田有效抑制了土壤磷素的下降,而有机肥配施带来的磷素增长甚至可能导致磷肥施用量(图 2)。

魏猛等<sup>[8]</sup>研究表明,长期施磷会使耕层土壤有效磷含量逐年增加,不施磷则会使土壤稳态磷向有效态转化,使有效磷能够保持在较低含量,本试验的有效磷变化与之基本一致。各个处理间,土壤有效磷含量整体上表现为  $OM \gg SR \approx MR \geq CF > CK$ ,其中 OM 处理对土壤有效磷含量的提升非常显著。从 2010—

2021 年,与 CF 处理相比,OM 处理在历年分别提高了土样的有效磷含量 40.38%、90.58%、7.21%、56.61%、73.16%、69.61%、41.05%、92.83%、54.34%、72.33%、77.40%、150.25%。SR 处理和 MR 处理对土壤有效磷含量的提升则不显著,与 CF 处理土壤有效磷含量相近,这是因为有机物料还田降低了磷肥的释放速率,延长了磷肥的持久性,这样可以提高磷肥的利用率。

缺磷会严重限制作物的产量,合理施用磷肥可以有效提高作物的产量。但刘方等<sup>[9]</sup>研究发现,土壤磷容易以水溶态和颗粒态的形式随地表径流流失,造成地表水的磷污染;降雨较强时磷还会通过土壤空隙向下迁移,造成地下水的磷污染。因此,施用含磷非常高的有机肥时一定要注意用量。

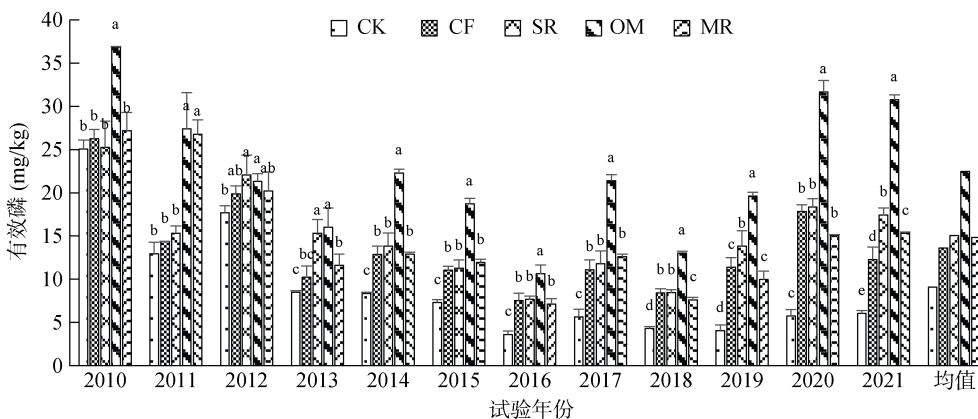


图 2 不同处理土壤有效磷含量

Fig. 2 Soil available P contents under different treatments

### 2.3 长期定位试验土壤的速效钾含量

对于长期定位试验中土壤速效钾均值的提升,与 CK 处理相比,CF 处理增加了 13.45%,SR 处理增加了 69.41%,OM 处理增加了 25.92%,MR 处理增加

了 27.85%;而与 CF 处理相比,SR 处理增加了 49.32%,OM 处理增加了 10.99%,MR 处理增加了 12.69%(表 2)。表明秸秆还田对土壤钾素的提升非常显著,而有机肥配施与紫云英类绿肥还田的肥效则高

于单施化肥但远低于秸秆还田。

对比试验前后土壤速效钾的含量,与 2010 年 CK 处理相比,2021 年 CK 处理减少了 57.53%,CF 处理减少了 54.57%,SR 处理减少了 21.67%,OM 处理减少了 42.04%,MR 处理减少了 49.35%(图 3),说明各处理的钾素施肥量均少于水稻生长吸收量,可以考虑适量提升钾素施肥量。

与 CK、CF 处理相比,SR 处理对土壤速效钾含量的提升具有显著性,而 OM 与 MR 处理对速效钾含量的提升则不显著。从 2010—2021 年,与 CF 处理相比,SR 处理的土壤速效钾含量提升了 25.28%、

1.03%、39.96%、48.20%、93.75%、113.77%、62.16%、70.25%、39.88%、25.52%、35.63%、72.41%,而 OM 处理与 MR 处理的土壤速效钾提升量大多约为 10%。钾主要以离子形态存在于秸秆中,秸秆还田后其中含有的钾素迅速释放,而秸秆中磷与氮则释放缓慢,因此秸秆还田对提高土壤速效钾的效果非常显著<sup>[10]</sup>。

钾能促进植物光合作用并增强植物的抗倒伏性<sup>[11]</sup>。速效钾因为可被作物直接吸收利用,可视为土壤钾素的供给指示器<sup>[12]</sup>。但钾素积累过量会妨碍作物吸收钙、镁等阳离子<sup>[13]</sup>。因此,理清农田土壤速效钾含量分布现状对于科学施肥、增效提质至关重要。

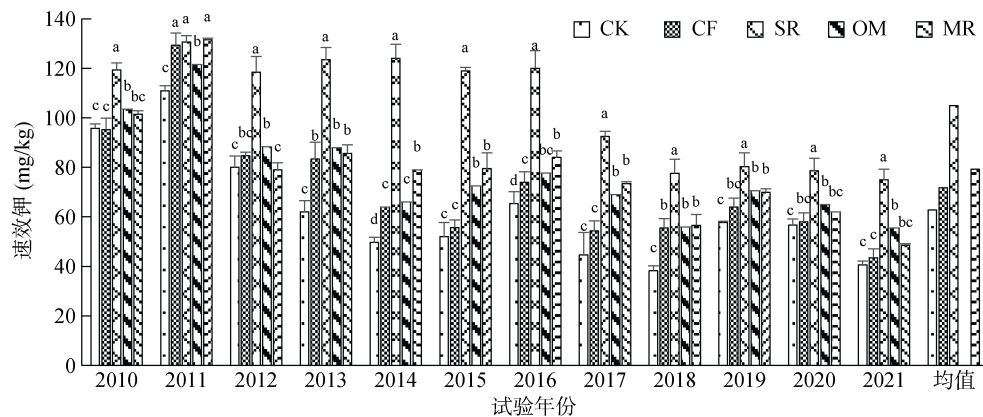


图 3 不同处理土壤速效钾含量

Fig. 3 Soil available K contents under different treatments

## 2.4 长期定位试验土壤的有机质含量

对于长期定位试验中土壤有机质均值的提升,与 CK 处理相比,CF 处理增加了 3.14%,SR 处理增加了 10.78%,OM 处理增加了 10.56%,MR 处理增加了 9.38%;而与 CF 处理相比,SR 处理增加了 7.41%,OM 处理增加了 7.19%,MR 处理增加了 6.05%(表 2)。表明有机物料的施用均能提高土壤有机质含量,且优于单施化肥。

对比试验前后土壤有机质含量,与 2010 年 CK 处理相比,2021 年 CK 处理减少了 8.97%,CF 处理减少了 12.81%,SR 处理增加了 3.58%,OM 处理减少了 1.54%,MR 处理减少了 4.95%。CF 处理的有机质含量下降甚至超过了 CK 处理,说明施肥增产的同时也加大了作物生长对土壤所积累的有机质的消耗,而有机物料的施用则可以减少有机质消耗甚至积累有机质(图 4)。可见,在农业种植中有机物料的施用是必要的,否则,在经过长期的单一化肥保产增收后,会导致土壤积累的有机质耗竭,土壤肥力下降甚至土壤退化。

有机物料配合化肥施用可以有效提高土壤有机

质含量,但有机物料转换为有机质需要较长时间,配施效果具有一定滞后性,因此在试验初期不同处理间的有机质含量差异不显著。而从试验的第 7 年开始,不同处理间的有机质含量开始出现较大差异。在长期定位试验下,有机物料还田可以逐步积累土壤有机质,而且经过碳化或腐熟处理后再还田,对土壤有机质含量的提升会比直接还田更显著<sup>[14]</sup>。

土壤各种养分含量不是互相独立的,而是相互影响、相互联系的,土壤碱解氮含量与土壤有机质含量有关<sup>[15]</sup>。除 CK 处理外,其余处理的总施氮量一致,CF 处理土壤碱解氮含量低于其他 3 个处理,一是因为有机物料与化肥配合施用,提高了肥效的持久性;二是因为 SR、OM、MR 三个处理的土壤有机质含量远高于 CF 处理,提高了土壤的保肥能力。

## 2.5 长期定位试验土壤的 pH

各个处理间的历年土壤 pH 差异不显著。试验田初始的 pH 均接近 5.0,经过 12 年长期定位试验水稻种植后,各试验小区的土壤酸性略有改善,现 pH 均值已达到 6.0(图 5)。说明有机肥、化肥、有机物料的施用,均能促进土壤酸碱性的改善,但均未达显著水平。

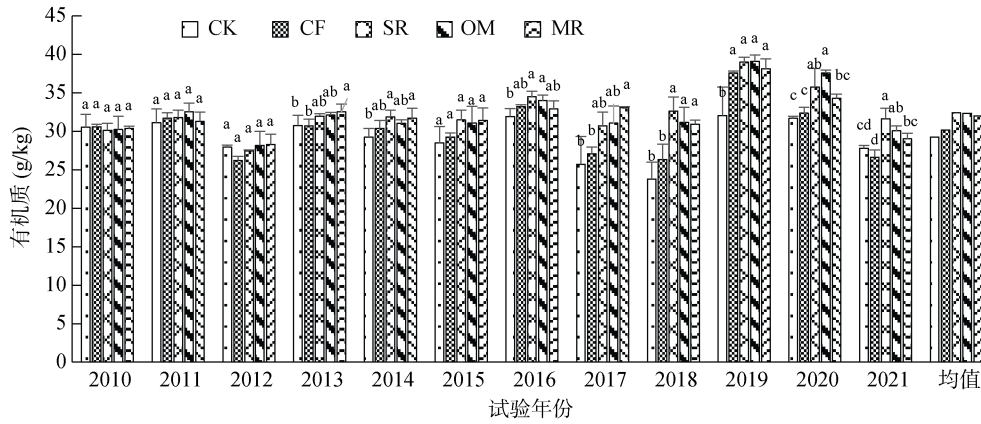


图 4 不同处理土壤有机质含量

Fig. 4 Soil organic matter contents under different treatments

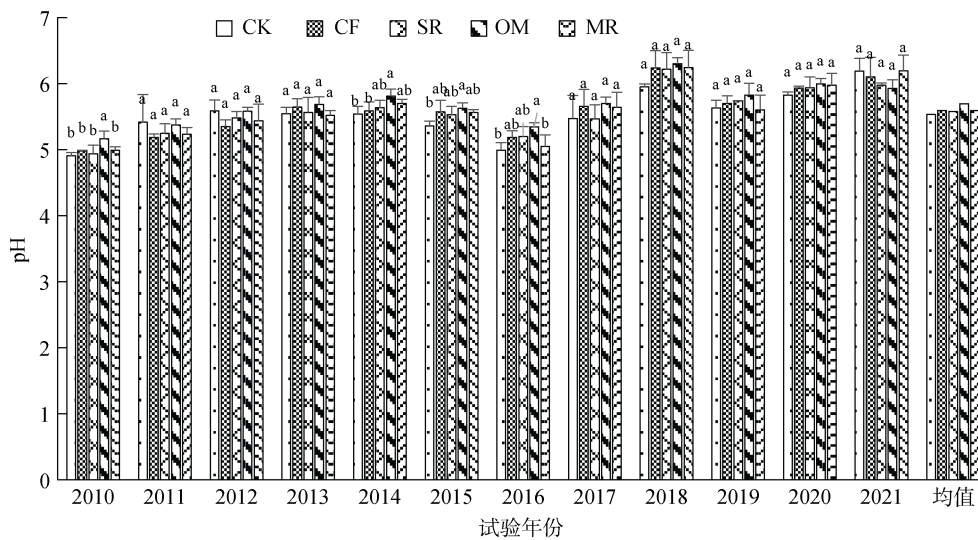


图 5 不同处理土壤 pH

Fig. 5 Soil pH values under different treatments

pH 较低会抑制土壤微生物活动，导致土壤有机质的矿化与分解变慢，即有机物料在偏酸性土壤中腐解较慢，导致秸秆和紫云英还田的有机质积累效率不如有机肥<sup>[16]</sup>。因此，随着土壤酸性的逐步改善，秸秆与紫云英还田的有机质积累效率会逐渐反超有机肥配施。

### 2.6 长期定位试验的水稻产量

为了进一步阐明不同施肥处理对水稻生长的影响，对长期定位试验小区的历年水稻产量进行了分析比较，发现各小区的水稻年产量均呈现下降趋势，这与上文对试验土壤的养分分析相吻合。试验土壤的碱解氮、有效磷、速效钾含量均逐年下降，说明各施肥处理的氮磷钾肥施用量少于水稻生长需求量，导致了水稻产量的逐年下降(图 6)。结合各小区水稻产量与土壤养分进行分析，发现在 12 年的长期定位试验中，OM 处理的水稻产量始终高于 CF 处理；SR 处理的水

稻产量则在前 4 年低于 CF 处理，但在之后几年产量超过了后者，甚至高于 OM 处理；而 MR 处理的产量则普遍低于 CF 处理，这应该与绿肥的缓效性有关。紫云英于每年 4 月下旬翻压还田，水稻于每年 7 月上旬移栽，导致紫云英还田带来的土壤养分未能在水稻生长期被充分吸收，因此在水稻收获期的土壤养分测定中，MR 处理的土壤养分高于 CF 处理，但产量反而不如后者。其中，2012 年各处理水稻产量均高于前一年，这应该与 2011 年水稻收获后的土壤速效钾含量均高于前一年直接相关，说明试验土壤的速效钾含量是限制小区水稻产量的最小养分因子。

与试验初期(2010 年)相比，土壤养分含量与水稻产量整体呈下降趋势。对各处理土壤养分与水稻产量进行相关性分析，发现所有处理水稻产量与土壤碱解氮、速效钾含量整体呈中度相关，部分处理水稻产量与土壤有效磷含量呈中度相关，且水稻产量与碱解

氮、速效钾含量的相关性显著或极显著,但与有效磷含量的相关性不显著(表 3)。这一结果与邓仕俊和顾瑜<sup>[17]</sup>的试验结果一致,即氮肥是影响水稻产量最主要的元素,磷肥则对水稻产量有一定的影响,而钾肥对水稻产量和籽粒千粒重都有影响。将水稻产量与试验土壤的肥力水平相联系,在施肥量难以满足水稻生长需求量的条件下,某一时期的产量升高必然伴随着土壤中一种或多种养分含量的骤降,如 2012 年水稻产量升高但土壤速效钾含量骤降,2016 年水稻产量升高但土壤碱解氮含量骤降,这是水稻在外部施肥不足情况下过度汲取土壤养分来满足自身生长需求的表现。长期的供肥不足,不但会导致水稻产量的逐年下降,还会导致土壤肥力的下降,进一步造成土壤结构的改变,甚至导致土壤不再适合作物耕种,因此应当及时培肥土壤。雷琬莹等<sup>[18]</sup>研究表明,有机物料本身就是培肥土壤的优选,其具有腐解后长期持续培肥土壤的特点<sup>[18]</sup>。针对长期耕种造成土壤肥力下降,可以通过加大有机物料的施用量,必要时也可以配施化肥或采取休耕,及时补充土壤肥力,达成农业生态系统的良性可持续发展。

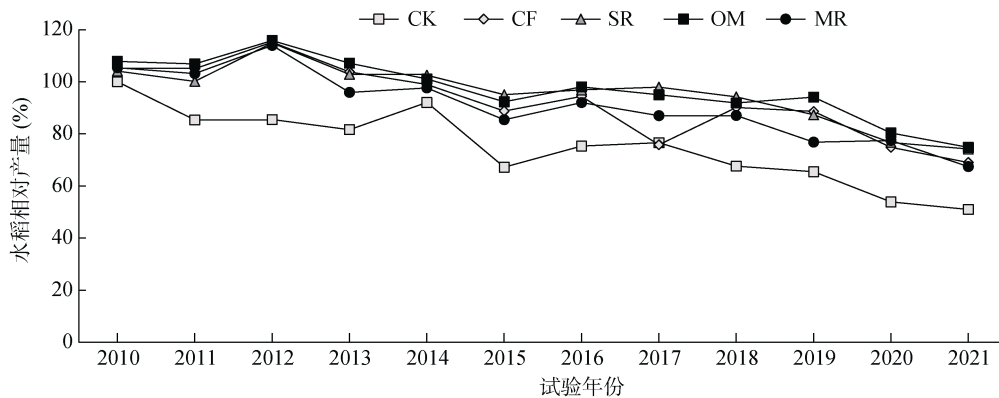
紫云英类绿肥还田在补充土壤肥力时要优于商品有机肥配施,而秸秆则具有可利用资源量巨大的优势<sup>[19]</sup>。Liao 等<sup>[20]</sup>的研究表明,长期施肥可以增加固

氮菌的丰度并改变其群落结构,而有机肥和化学氮磷钾肥的配合施用可以显著提高固氮菌群落的活性。而 Xie 等<sup>[21]</sup>研究发现,与单施化肥相比,紫云英类绿肥配施有利于土壤微生物的生长繁殖,显著提高解磷菌与固氮菌的数量、细菌与真菌丰度,进而提升土壤肥力,促进作物生长和提高产量。有机物料的施用除增加土壤的基础养分外,还可以补充土壤的铁、锌、硫、锰、铜等中微量元素,作物生长对这些元素需求量不大,但中微量元素的不足会导致农作物产质量下降<sup>[22-23]</sup>。单一的化肥施用势必导致土壤有机质含量的不断下降,施用有机物料补充土壤有机质是必要的,而且因为有机物料在土壤中转化为有机质需要一定时间,所以有机物料的施用应尽早普及。

表 3 长期定位试验土壤的养分与产量相关性分析  
Table 3 Correlation analysis between soil nutrients and rice yield in long-term located test

处理	碱解氮	有效磷	速效钾	有机质
CK	0.62*	0.71	0.61*	0.24
CF	0.66*	0.35	0.75**	-0.11
SR	0.62*	0.17	0.76**	-0.59*
OM	0.60*	-0.15	0.73**	-0.34
MR	0.60*	0.53	0.69*	-0.33

注: \*表示在  $P<0.05$  水平显著相关; \*\*表示在  $P<0.01$  水平极显著相关。



(图中相对产量是以 2010 年 CK 处理的水稻产量作为 100% 进行换算)

图 6 长期定位试验小区水稻的相对产量

Fig. 6 Annual rice relative yields in the long-term located test plot

### 3 结论

不同有机物料施用对土壤基础养分的增加差异显著,其中紫云英还田对土壤碱解氮含量的提高达 6.97%,其固氮能力强于水稻秸秆还田与商品有机肥配施;商品有机肥配施对土壤有效磷含量的提高达 49.30%,可以快速补充土壤有效磷,适用于缺磷素的耕地;水稻秸秆还田对土壤速效钾含量的提高达

49.32%,远高于紫云英还田与商品有机肥配施,优先适用于缺钾素类土壤。对于土壤有机质的积累,不同有机物料施用均有较好的促进效果,且肥效相近。

### 参考文献:

- [1] 史常亮,朱俊峰.我国粮食生产中化肥投入的经济评价和分析[J].干旱区资源与环境,2016,30(9):57-63.
- [2] 肖新成,谢德体.农户对过量施肥危害认知与规避意愿

- 的实证分析——以涪陵榨菜种植为例[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2016, 38(7): 138-148.
- [3] 张丽芳, 杨成春, 王萍, 等. 长期施肥对红壤氮磷养分和玉米生长、氮磷吸收的影响[J]. 浙江农业科学, 2020, 61(9): 1757-1759.
- [4] 刘晓霞, 陆若辉, 戴佩彬, 等. 化肥与有机肥长期配施对水稻产量和土壤肥力的影响[J]. 浙江农业科学, 2018, 59(5): 694-697.
- [5] 李春阳, 王海江. 不同种类有机物料培肥土壤的效果分析及评价指标[J]. 农业与技术, 2020, 40(11): 36-37, 103.
- [6] 史吉平, 张夫道, 林葆. 长期定位施肥对土壤腐殖质含量的影响[J]. 土壤肥料, 2002(1): 15-19, 22.
- [7] 李峰, 周方亮, 黄雅楠, 等. 紫云英和秸秆还田对土壤肥力性状的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020(3): 75-81.
- [8] 魏猛, 张爱君, 李洪民, 等. 长期施肥条件下黄潮土有效磷对磷盈亏的响应[J]. 华北农学报, 2015, 30(6): 226-232.
- [9] 刘方, 黄昌勇, 何腾兵, 等. 长期施肥下黄壤旱地磷对水环境的影响及其风险评价[J]. 土壤学报, 2003, 40(6): 838-844.
- [10] 黄婷苗, 郑险峰, 侯仰毅, 等. 秸秆还田对冬小麦产量和氮、磷、钾吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 853-863.
- [11] 董环, 娄春荣, 王秀娟, 等. 氮、钾运筹对设施番茄产量、果实硝酸盐含量及土壤硝态氮含量的影响[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(2): 378-383.
- [12] 徐晓燕, 马毅杰, 张瑞平. 土壤中钾的转化及其与外源钾的相互关系的研究进展[J]. 土壤通报, 2003, 34(5): 489-492.
- [13] 曹婧, 陈怡平, 江瑶, 等. 陕西省农田土壤速效钾时空变化及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2021, 35(5): 296-302, 311.
- [14] 霍启煜, 马丽娟, 徐悦轩, 等. 秸秆还田方式及施氮量对滴灌棉田土壤有机碳氮的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(3): 207-212.
- [15] 王洋. 盘锦芦苇湿地土壤有效氮季节动态变化研究[J]. 农业科技与装备, 2017(1): 14-15, 17.
- [16] 陕红. 有机物料对土壤酸碱度的影响[J]. 中国农学通报, 2017, 33(32): 70-76.
- [17] 邓仕俊, 顾瑜. 不同氮磷钾肥用量对水稻产量及肥料利用率的影响[J]. 上海农业科技, 2022(3): 98-100.
- [18] 雷琬莹, 李娜, 滕培基, 等. 农田生态系统有机物料腐解过程及土壤培肥机制研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(9): 1393-1408.
- [19] 杨璐, 曾闹华, 白金顺, 等. 紫云英季土壤固氮微生物对外源碳氮投入的响应[J]. 中国农业科学, 2020, 53(1): 105-116.
- [20] Liao H K, Li Y Y, Yao H Y. Fertilization with inorganic and organic nutrients changes diazotroph community composition and N-fixation rates[J]. Journal of Soils and Sediments, 2018, 18(3): 1076-1086.
- [21] Xie Z J, He Y Q, Tu S X, et al. Chinese milk vetch improves plant growth, development and <sup>15</sup>N recovery in the rice-based rotation system of South China[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 1-11.
- [22] 邹长明, 王允青, 杨杰, 等. 化肥配施紫云英对稻田土壤微生物及养分的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2013(6): 28-31.
- [23] 李可懿. 黄土高原旱地与豆科绿肥轮作和施氮对小麦产量及籽粒矿质养分的影响及其土壤学机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.