

冬季种养结合对双季稻生长与土壤肥力的影响

张浪 周玲红 魏甲彬 成小琳 徐华勤* 肖志祥 唐启源 唐剑武

(湖南农业大学 农学院, 长沙 410128; *通讯联系人, E-mail: xu7541@163.com)

Effects of Rice Planting Combined with Chicken Raising in Winter on Double-cropping Rice Growth and Soil Fertility

ZHANG Lang, ZHOU Linghong, WEI Jiabin, CHENG Xiaolin, XU Huaqin*, XIAO Zhixiang, TANG Qiyuan, TANG Jianwu

(College of Agriculture, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; *Corresponding author, E-mail: xu7541@163.com)

Abstract: 【Objective】 The research aims to illuminate the effects of rice planting coupled with chicken grazing in winter on soil fertility and rice grain yield in the middle and lower reaches of the Yangtze River. **【Method】** Five treatments were designed, including milk vetch + chicken(MC), ryegrass + chicken(RC), milk vetch(M), ryegrass(R), winter fallow(WF).

【Result】 Yields in MC and RC were significantly higher than those of other treatments. Rice yield in MC was the highest. The content of organic matter, total nitrogen, ammonium nitrogen and nitrate nitrogen in double-cropping rice fields under MC and RC were significantly increased by 17.36% —22.95%, 73.73% —250.48%, 76.36% —85.11% and 67.89% —70.05%, respectively. However, the total phosphorus and available phosphorus contents under M were the highest, and every treatment had little effect on the total potassium content. Correlation analysis showed that there were significant correlations between theoretical yield of rice and soil nitrate nitrogen, ammonium nitrogen, total nitrogen or organic matter contents ($P < 0.05$). **【Conclusion】** Compared with green manures or winter fallow, chicken manure returning was more effective in improving the contents of soil organic matter, total nitrogen, ammonium nitrogen and nitrate nitrogen, which helps increase the rice tiller numbers, leaf area coefficient, dry matter and yields, and the changes under milk vetch + chicken was the most significant. Under the mode of rice planting combined with chicken raising in winter, soil organic matter, total nitrogen, ammonium nitrogen and nitrate nitrogen contents improved rice grain yield. Therefore, combining rice planting and chicken raising in winter meets the nutrient demand of rice growth in the following season. Thus, rice yield increase based on ecological field conservation plays an important role in sustainable development of rice production in the middle and lower reaches of the Yangtze River.

Keywords: rice planting combined with chicken raising in winter; chicken manure returning; double-cropping rice; soil fertility; grain yield

摘要: 【目的】以长江中下游地区冬季休闲稻田为研究对象,研究冬季种养制度对后季稻田土壤肥力及水稻产量的影响,以期为南方稻田生态保育提供理论依据。**【方法】**设置紫云英养鸡(milk vetch + chicken, MC)、黑麦草养鸡(ryegrass + chicken, RC)、单种紫云英(milk vetch, M)、单种黑麦草(ryegrass, R)及冬闲(winter fallow, WF) 5个处理。

【结果】冬季种养期间,MC和RC两处理水稻产量均显著高于其他处理,且MC处理增产效果最佳。MC和RC两处理能显著提高双季稻田有机质、全氮、铵态氮和硝态氮含量,与冬闲相比分别提高了17.36%和22.95%、73.73%和250.48%、76.36%和85.11%、67.89%和70.05%;土壤全磷和速效磷含量以M处理最高;各处理对全钾含量影响不大。相关分析表明,水稻理论产量与成熟期土壤硝态氮、铵态氮、全氮、有机质含量显著相关($P < 0.05$),冬季种养主要通过提高有效穗数影响水稻产量。**【结论】**与冬闲和单种绿肥相比,绿肥过腹还田有利于土壤有机质、全氮、铵态氮、硝态氮含量的提高;与单种绿肥相比,绿肥过腹还田更有利于水稻分蘖数、叶面积系数和干物质质量与稻谷产量的形成,且紫云英养鸡处理效果最显著。冬季种养结合模式下,有机质、全氮、铵态氮、硝态氮利于增源扩库,促进水稻增产。因此,冬闲田种养结合可满足后季水稻生长的养分需求,在稻田生态保育的基础上促进水稻增产,对长江中下游地区稻田可持续发展具有极其重要的指导意义。

关键词: 冬季种养; 过腹还田; 双季稻; 土壤肥力; 产量

中图分类号: S181.6; S511.47

文献标志码: A

文章编号: 1001-7216(2018)03-0226-11

土壤肥沃程度是影响水稻高产的要素,施肥是水稻高产的基本措施,但生产上盲目过量使用化肥

常会造成土壤耕层破坏和农田环境恶化^[1],因此,探索既能保障水稻稳产又能保育农田生态的农田利

收稿日期: 2017-12-15; 修改稿收到日期: 2018-03-13。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFD0300409); 国家水稻产业体系资助项目(CARS-01-30)。

用新模式尤为紧迫且必要。稻田冬季绿肥还田-培肥土壤模式, 前人已经做了大量研究, 主要集中在土壤养分特征^[2]、作物产量^[3-4]、微生物学特征等方面^[5]。在土壤养分及微生物方面, 绿肥腐解既能提高有机质含量, 活化土壤养分^[6], 又能供后季作物养分吸收^[7]; 紫云英配施化肥能促进微生物的生长, 有改善土壤养分的作用^[8]。绿肥还田还能抑制杂草的生长^[9], 避免土壤水分的蒸发和养分的逸散; 在作物产量方面, 紫云英翻耕还田后提高稻田有机质含量^[10], 进而达到增产效果^[11]; 油菜还田能提高水稻叶面积指数、光合速率和干物质积累量^[6]。诸多研究充分证实种植绿肥还田能调节水稻源库关系^[12], 进而优化水稻群体结构^[13], 提高水稻产量^[14]。

绿肥种植虽然可以培肥地力和促进作物增产, 但由于绿肥的直接经济效益不明显, 农民种植绿肥的积极性并不高^[15]。不过, 饲草过腹还田能有效促进土壤质量提升, 使作物增产^[16], 作为一种经济效益和生态效益双赢的循环农业模式, 在环境问题日益严重的当今社会正被大力推广, 该类模式特别是稻田种养结合综合利用模式的效果和机理已经越来越受到学者的重视^[17]。紫云英、黑麦草等冬季绿肥具有较高的营养价值, 同时也是一种优质牧草。采用冬种紫云英和黑麦草结合养鸡模式^[18], 紫云英和黑麦草作为高蛋白饲料可节省养鸡成本, 鸡粪原位腐解实现绿肥过腹(鸡粪)还田, 成鸡在春节前出栏具有较好的经济效益, 鸡出栏后绿肥继续生长, 还可有足够的生物量翻压进入土壤, 为后季水稻提供有机肥源。本课题组的前期研究表明, 该冬季种养模式能显著提高土壤微生物量碳氮和土壤可溶性碳氮的含量^[19], 是一种良好的固碳减排措施^[20]。本研究进一步报道冬季种养模式对稻田土壤养分及双季稻产量的影响, 以期为南方实现生态效益与经济效益双赢的稻田生态保育提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

试验于 2014—2015 年在湖南农业大学耘园试验基地进行。试验基地属亚热带季风性湿润气候, 土壤基础地力如下: 有机质 20.02 g/kg, 全 N 6.67 g/kg, 全 P 0.45 g/kg, 全 K 4.89 g/kg, pH 值 6.2。试验设置了 5 个处理: 紫云英养鸡(milk vetch + chicken, MC)、黑麦草养鸡(ryegrass + chicken, RC)、单种黑麦草(ryegrass, R)、单种紫云英(milk vetch, M), 对照

为冬闲(Winter Fallow, WF), 3 次重复, 小区面积 $14 \times 10 = 140 \text{ m}^2$ 。冬季阶段各小区皆不施肥。

2014 年 10 月中旬撒播黑麦草和紫云英, 播种量分别为 40 和 23 kg/hm²; 2014 年 11 月 25 日将苗龄 30 d 的鸡放入稻田, 用笼子(尺寸 3 m×3 m)养鸡(30 只), 每笼每天补充玉米粉 5 kg 为鸡饲料, 鸡饲料含 N 为 1.80%。各养鸡小区内每 7 d 挪动一次鸡笼; 2015 年 2 月 2 日结束养鸡, 且小区紫云英和黑麦草继续生长; 2015 年 3 月 27 日翻压绿肥和鸡粪, 翻耕深度 20 cm。RC、MC、R 和 M 处理还田量分别为 14.88、8.55、13.23 和 15.61 t/hm², RC 处理黑麦草 N、P 和 K 养分还田量约为 372、40.18 和 306.53 kg/hm², MC 处理紫云英 N、P 和 K 还田量分别为 235.13、56.43 和 163.31 kg/hm², R 处理 N、P 和 K 还田量分别为 330.75、35.72 和 272.54 kg/hm², M 处理 N、P 和 K 还田量分别为 429.28、103.03 和 298.15 kg/hm², 新鲜鸡粪原位还田量约为 94.3 t/hm², 故鸡粪肥 N、P₂O₅ 和 K₂O 还田量分别约含为 463.19、422.72 和 391.24 kg/hm²。

生长季早、晚稻采用育苗移栽种植双季稻。早稻供试品种为中嘉早 17, 移栽规格为 16.7 cm×20 cm, 每穴 4 苗。2015 年 4 月 18 日播种, 5 月 5 日移栽, 7 月 12 日收获; 晚稻供试品种为湘晚籼 12, 晚稻移栽规格 20 cm×20 cm, 每穴 2 苗。2015 年 6 月 27 日播种, 7 月 25 日移栽, 11 月 6 日收获。早、晚稻分别在 5 月 28 日和 8 月 19 日达分蘖盛期开始晒田, 持续 7 d。水稻生育期各小区施肥量一致, 但均减少肥料施用量, 且基肥均不施氮肥。早稻施尿素(折合成纯氮)74.25 kg/hm², 施过磷酸钙(折合成 P₂O₅) 60 kg/hm², 施氯化钾(折合成 K₂O) 60 kg/hm², 晚稻则分别为 102 kg/hm², 60 kg/hm², 60 kg/hm²。早稻氮肥按 $m_{\text{分蘖肥}} : m_{\text{穗肥}} = 7 : 3$ 施用, 晚稻氮肥按 $m_{\text{分蘖肥}} : m_{\text{穗肥}} : m_{\text{粒肥}} = 5 : 3 : 2$ 施用; 早、晚稻磷肥做基肥一次性施用; 早、晚稻钾肥按 $m_{\text{基肥}} : m_{\text{穗肥}} = 1 : 1$ 施用。其中, 早稻的基肥、分蘖肥和穗肥的施用时间分别为 5 月 4 日、5 月 17 日和 6 月 16 日, 晚稻基肥、分蘖肥、穗肥和粒肥的施用时间分别为 7 月 24 日、8 月 3 日、8 月 30 日和 9 月 12 日。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 土壤的采集与测定

取样时间分别为早稻种植前(2015 年 4 月 21 日)、早稻苗期(5 月 13 日)、分蘖盛期(5 月 28 日)、孕穗期(6 月 11 日)、齐穗期(6 月 27 日)、成熟期(7 月 12 日); 晚稻苗期(8 月 3 日)、分蘖盛期(8 月 19 日)、孕穗期(9 月 11 日)、齐穗期(9 月 24 日)、成熟

期(11月6日)。采用5点取样法将采集完的土壤带回实验室后风干研磨过筛处理(其中早、晚到收获后均为成熟期土样),取土深度为20 cm。土壤有机质含量测定采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法;土壤全磷采用NaOH熔融-钼锑抗比色法;土壤全氮采用流动分析仪法;土壤全钾采用NaOH熔融-火焰光度法;土壤速效磷采用0.5 mol/L NaHCO₃法;土壤速效钾采用NH₄OAc浸提-火焰光度法;土壤铵态氮采用靛酚蓝比色法^[21]。硝态氮采用紫外分光光度法^[22]。

1.2.2 植株生长指标及产量的测定

分蘖动态从移栽期起,各小区定点10蔸,每隔7 d记录一次茎蘖数,直至齐穗期;干物质于早晚稻分蘖中期、孕穗期、齐穗期和成熟期4个时期按照平均数取样5蔸植株,剪去根,把茎鞘、叶、穗等分开放进牛皮纸袋中,105℃下杀青30 min后80℃下烘干至恒重,称量后计算出干物质产量;采用长×宽积系数法计算叶面积指数;早、晚稻收获时每小区连续调查120穴的有效穗数进行室内考种;每个小区实割200穴植株脱粒后测算出实际产量。

1.3 统计分析

用SPSS 12.5软件处理系统进行数据分析,并用SigmaPlot 12.5软件作图。

2 结果与分析

2.1 冬季种养对土壤肥力的影响

2.1.1 土壤有机质含量

土壤有机质含量随时间推移呈现先下降后增加的态势(图1)。与早稻种植前相比,早稻收获后各处理有机质含量均不同程度降低,晚稻收获后R和M

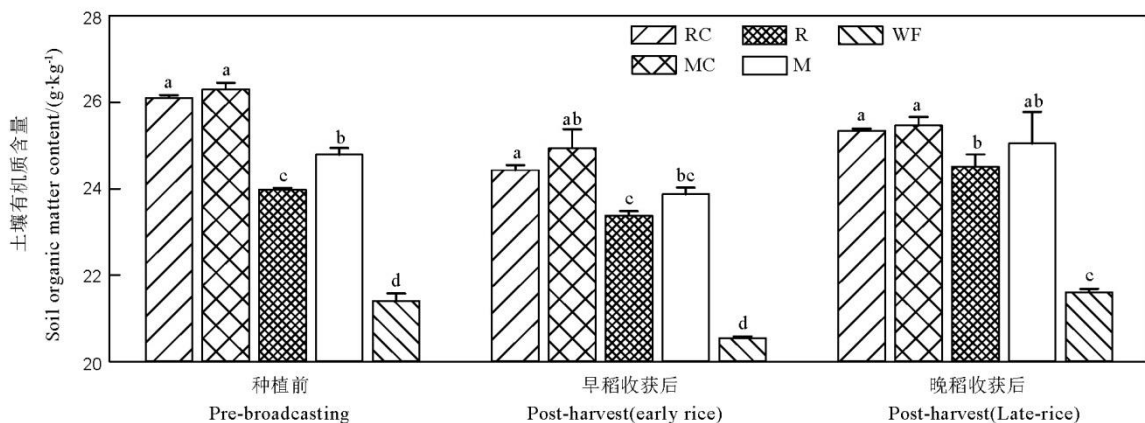
处理有机质含量有所增加(图1)。与WF相比,整个生育期RC、MC、R和M处理土壤有机质含量变化范围分别为17.36%~21.96%、17.87%~22.95%、12.06%~13.47%和15.84%~16.21%,(图1)。与WF相比,M、R和MC、RC均能提高稻田有机质含量($P<0.05$),而与单种草相比,养鸡过腹还田后更有利于有机质含量的提升。

2.1.2 全氮、全磷和全钾

图2表明,早稻种植前和早、晚稻收获后,MC处理全氮含量最高,RC、R和M处理次之,WF最低。与WF相比,整个生育期RC、MC、R和M的全氮含量变化范围分别为73.73%~166.67%、129.41%~250.48%、70.34%~97.14%和66.91%~153.33%,具有显著差异($P<0.05$);土壤全磷含量变化范围为0.76~1.07 g/kg。无论是早稻种植前、早稻收获后,还是晚稻收获后,M处理全磷含量最高。早稻种植前,M较WF处理增加35.53%。早稻收获后,各处理之间无显著差异。晚稻收获后R、M较WF分别增加30.26%和40.79%($P<0.05$)。在整个生育期,土壤全钾含量变化范围为13.45~16.35 g/kg,但各处理之间差异不显著。上述结果表明,较其他处理而言,MC处理能显著提高土壤全氮含量,M处理在提高全磷含量方面优于其他处理,各处理对全钾含量基本无显著影响。

2.1.3 铵态氮含量

由图3可见,土壤铵态氮含量随早稻生育期的变化呈先增长后下降的趋势,且在分蘖期达到最大值;晚稻基本上也呈现先增后降趋势,除了R处理外,其他处理的峰值都在分蘖期。在早稻分蘖期、晚稻返青期和分蘖期RC和MC处理铵态氮含量显著高于其他处理($P<0.05$)。早稻在分蘖期达最高值,



MC—紫云英养鸡; RC—黑麦草养鸡; R—黑麦草; M—紫云英; WF—冬闲。柱上相同小写字母表示同一时期不同处理间差异未达0.05显著水平。下同。
MC, Milk vetch + chicken; RC, Ryegrass + chicken; R, Ryegrass; M, Milk vetch; WF, Winter fallow. The same as below.

图1 种养结合对双季稻田土壤有机质含量的影响

Fig. 1. Effects of rice planting combined with chicken grazing on soil organic matter in double-cropping paddy field.

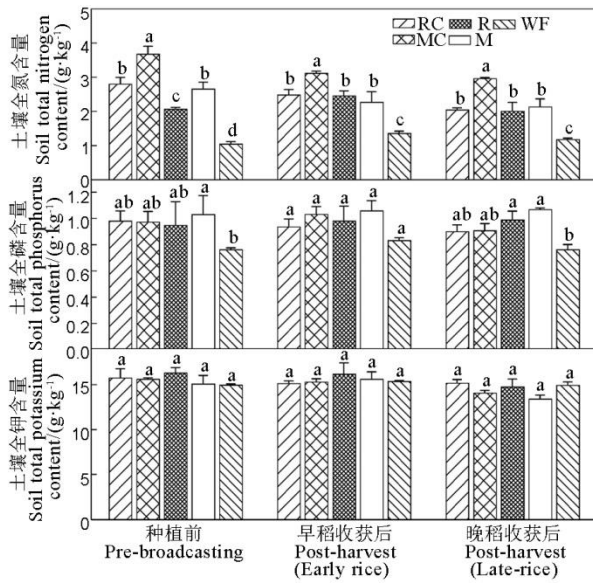


图 2 种养结合对双季稻田土壤全氮、磷、钾含量的影响
 Fig. 2. Effects of rice planting combined with chicken grazing on soil total nitrogen content, total phosphorus content and total potassium content in double-cropping paddy field.

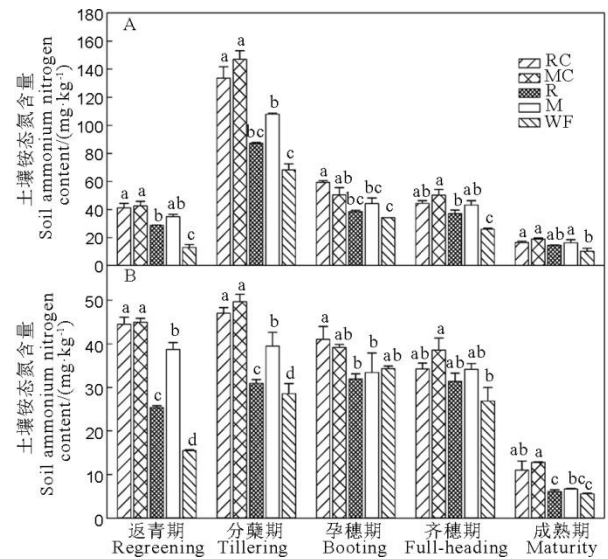
晚稻在生育前期较高，早晚稻在成熟期急剧下降。早晚稻整个双季稻生长季基本表现为 MC>RC>M>R>WF。上述结果说明，在整个水稻生长季，相比其他各处理，铵态氮含量以 MC 和 RC 处理较高，MC 处理最高。

2.1.4 硝态氮含量

早稻硝态氮含量随生育期推进呈先降后增再降的趋势，且在返青期达最大值；晚稻则表现出“M”型变化趋势，NO₃⁻-N 含量分蘖期和齐穗期有两个峰值，其中分蘖期达最大值，灌浆期和成熟期急剧下降(图 4)。在不同处理条件下，早稻和晚稻 NO₃⁻-N 变幅较大，分别为 1.41~15.57 和 0.59~11.92 mg/kg(图 4)。早晚稻整个双季稻生长季基本表现为 MC>RC>M>R>WF(图 4)。上述结果说明，RC 和 MC 处理下硝态氮含量显著高于 WF，且 MC 处理最佳。

2.1.5 速效磷含量

图 5 显示，从双季稻整个生育期来看，除晚稻孕穗期外，土壤速效磷含量均以 M 处理最高。早稻速效磷含量均表现为 M 处理最高，除孕穗期和齐穗期外，M 相比其他处理达到显著水平。早稻生长期速效磷含量变化较小，晚稻则相反；晚稻齐穗期速效磷含量降到最低，在成熟期达到最高值。早稻生



A—早稻；B—晚稻。MC—紫云英养鸡；RC—黑麦草养鸡；R—黑麦草；M—紫云英；WF—冬闲。下同。
 A, Early rice; B, Later rice. MC, Milk vetch + chicken; RC, Ryegrass + chicken; R, Ryegrass; M, Milk vetch; WF, Winter fallow. The same as below.

图 3 种养结合对稻田土壤铵态氮含量的影响
 Fig. 3. Effects of rice planting combined with chicken grazing on ammonium nitrogen content in soil of paddy field.

育期间各处理显著高于 WF 处理，齐穗期、晚稻返青期和灌浆期，MC 和 M 显著高于其他处理 (P<0.05)。早、晚稻整个双季稻生长季速效磷含量基本表现为 M>MC>RC>R>WF。除了晚稻孕穗期外，各处理之间速效磷含量以 M 处理最高。

2.2 冬季种养对后季双季稻产量及其构成的影响

2.2.1 分蘖消长动态

分蘖是水稻生长的一个重要特性，无论是早稻还是晚稻，随生育期的推进，分蘖数呈“S”型增长曲线，即先增加，达到最高分蘖数之后，逐渐下降并趋于稳定(图 6)。早稻各处理除 M 和 WF 外，均在移栽后 17 d 达最高分蘖数，早稻 RC、MC 和 M 处理后期的有效分蘖数显著高于 R 和 WF 处理，晚稻分蘖数 RC 和 MC 高于其他处理。整个双季稻生长季除 M 处理外，均表现为 MC>RC>M>R>WF，即 MC 处理下早晚稻的分蘖数更多。

2.2.2 叶面积系数的动态变化

图 7 表明，除 WF 外，早晚稻各处理分蘖期至孕穗期水稻叶面积系数逐渐上升，孕穗后叶面积系数逐渐下降。早稻 RC 和 MC 基本高于其他处理，在孕穗期与 M 和 R 差异显著。晚稻各生育时期 RC、MC 和 M 处理均高于 R 和 WF，孕穗期和灌浆期与 WF 差异显著 (P<0.05)。

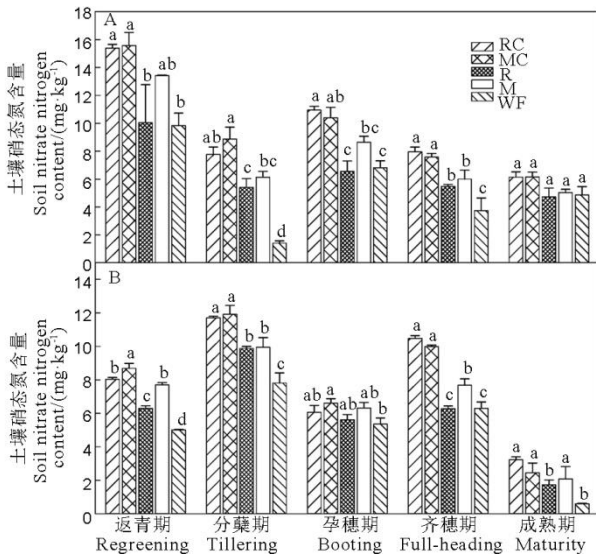


图4 种养结合对双季稻田土壤硝态氮含量的影响
Fig. 4. Effects of rice planting combined with chicken grazing on soil nitrate nitrogen in double-cropping paddy field.

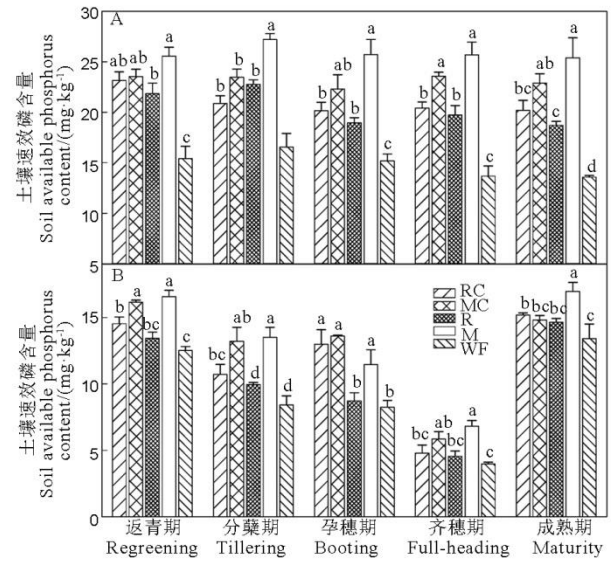


图5 种养结合对双季稻田土壤速效磷的影响
Fig. 5. Effects of rice planting combined with chicken grazing on soil available phosphorus content in double-cropping paddy field.

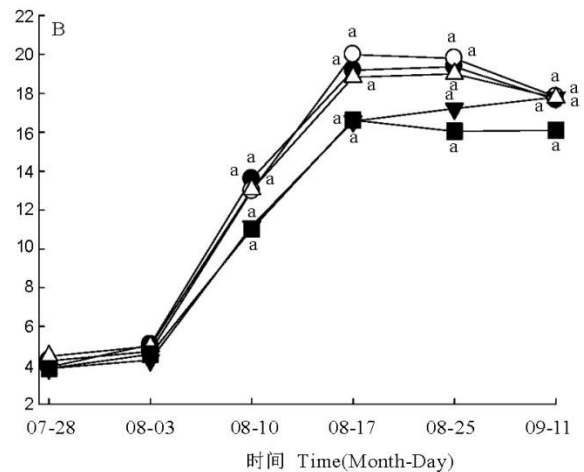
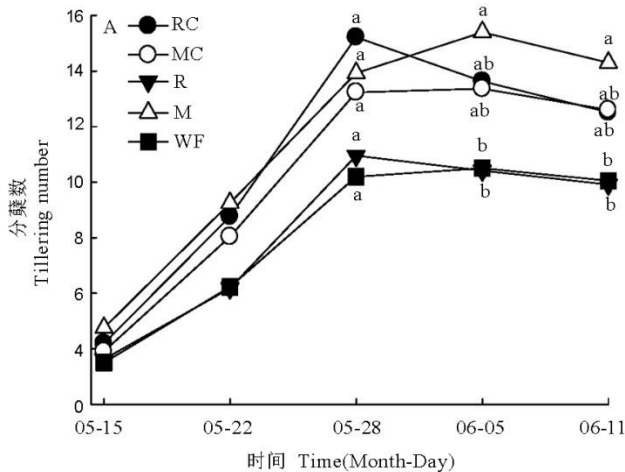


图6. 种养结合对水稻分蘖数的动态变化
Fig. 6. Dynamics of rice tiller numbers under rice planting combined with chicken grazing.

由图7可知,早稻的叶面积系数与WF相比,在分蘖期RC、MC分别增加了130.72%、90.12%。在孕穗期与WF相比,RC、MC分别增加了99.04%和92.68%。RC在分蘖期比R和M分别增加61.52%和66.98%,在孕穗期增加了36.72%和22.02%。MC与R和M相比,在分蘖期分别增加了39.34%和44.05%,在孕穗期分别增加了38.56%和23.66%;与WF相比,晚稻叶面积系数在分蘖期RC、MC、R、M分别增加了25.60%、42.52%、13.09%和35.60%。在成熟期MC、RC、R、M与WF相比,分别提高了62.16%、89.55%、41.01%和69.57%。

这表明MC和RC更有利于提高后季水稻叶面积系数,R和M处理优于WF。

2.2.3 干物质质量的动态变化

水稻各主要生育时期干物质积累测定结果如图8所示,早、晚稻干物质产量随水稻的生长逐渐增加,早、晚稻均表现为RC、MC>R、M>WF。早稻齐穗期前干物质RC和MC显著高于其他处理(P<0.05),孕穗期和成熟期RC和MC与R和M相近,但高于WF。而晚稻除分蘖盛期外,各处理呈MC>RC>M>R>WF。与对照WF相比,RC、MC、R和M处理下干物质早稻分别增加了

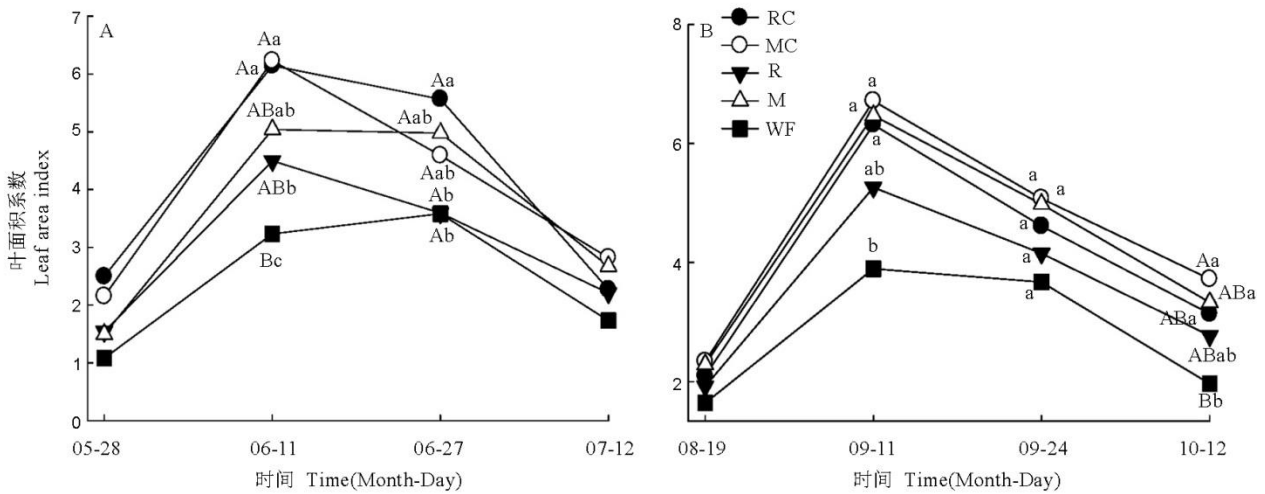


图7 种养结合对到水稻叶面积系数的动态变化
 Fig. 7. Dynamics of rice leaf area index under rice planting combined with chicken grazing.

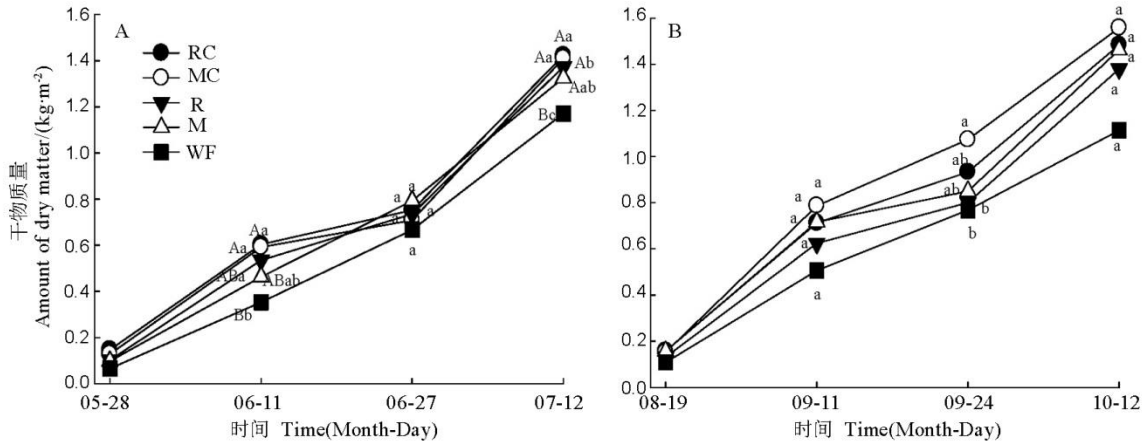


图8 种养结合对水稻干物质量的动态变化
 Fig. 8. Dynamics of dry matter weight of rice under rice planting combined with chicken grazing.

25.88%、25.55%、20.05%和 19.34%；晚稻分别增加了 31.71%、43.06%、17.61%和 27.63%。早晚稻 RC 和 MC 的干物质量产量比 R 和 M 分别提高了 4.57、5.48%和 3.19、21.64%。这表明 MC 和 RC 处理更有利于后季水稻干物质量积累，R 和 M 处理优于 WF。

2.2.4 产量及其构成

由表 1 可知，无论是早稻还是晚稻，理论产量均表现为 MC>RC>R>M>WF，RC 和 MC 均显著高于 R、M 和 WF，MC 处理的水稻产量最高，其次为 RC 处理。RC、MC 处理下，早晚稻的有效穗均显著高于 WF，增幅分别为 26.90%、23.51%和 24.65%、33.34%。早稻有效穗数 RC 显著高于 R 和 M，分别高出 10.80%和 9.34%；晚稻有效穗数 RC 和 MC 显著高于 M，分别高出 11.32%和 19.12%。

每穗粒数早、晚稻均以 M 最高，且晚稻 M 和 WF 处理显著高于 RC 和 MC 处理($P<0.05$)。实际产量 RC 和 MC 显著高于 WF ($P<0.05$)。由此表明，MC 和 RC 处理更有利于提高后季水稻产量，且 MC 为最佳处理，WF 最低。

2.3 双季稻产量、各产量构成因素与土壤各化学性状之间的相关性分析

由表 2 可知，不同成熟期土壤养分含量与双季稻理论产量构成之间存在不同程度的相关性，以此影响水稻产量。就早稻而言，铵态氮含量与叶面积、干物质、有效穗数显著相关($P<0.05$)；速效磷含量与分蘖数和叶面积指数显著相关($P<0.05$)；全氮含量与分蘖数、干物质显著相关($P<0.05$)，与有效穗数极显著相关($P<0.01$)，相关系数达到 $r=0.9613$ 。全磷含量与叶面积指数显著相关($P<0.05$)；有机质

表1 种养结合对水稻产量构成因素的影响

Table 1. Effects of rice planting combined with chicken grazing on yield components of rice.

处理 Treatment	有效穗数 Effective panicle number ($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)	每穗粒数 Grain number per panicle	结实率 Seed-setting rate /%	千粒重 Thousand-grain Weight/g	理论产量 Theoretical yield /(t hm^{-2})	实际产量 Actual yield /(t hm^{-2})
早稻 Early rice growth period						
RC	310.27 \pm 12.93 a	113 \pm 3.1 ab	76.71 \pm 0.02 a	26.29 \pm 0.94 a	7.03 \pm 0.09 a	6.19 \pm 0.17 a
MC	301.97 \pm 3.38 ab	116 \pm 3.6 ab	75.47 \pm 0.03 ab	26.81 \pm 0.86 a	7.12 \pm 0.07 a	6.34 \pm 0.13 a
R	280.03 \pm 2.22 b	111 \pm 1.2 b	79.87 \pm 0.04 a	26.95 \pm 0.44 a	6.69 \pm 0.04 b	6.17 \pm 0.17 ab
M	283.78 \pm 1.37 b	124 \pm 0.9 a	70.17 \pm 0.01 b	26.67 \pm 0.35 a	6.59 \pm 0.14 b	6.06 \pm 0.05 ab
WF	244.50 \pm 3.28 c	113 \pm 4.2 ab	79.82 \pm 0.03 a	27.63 \pm 0.28 a	6.08 \pm 0.08 c	5.64 \pm 0.12 b
晚稻 Later rice growth period						
RC	396.64 \pm 10.61 ab	88.8 \pm 1.2 c	82.97 \pm 0.01 ab	27.37 \pm 0.14 a	8.00 \pm 0.17 a	7.15 \pm 0.18 a
MC	424.44 \pm 6.13 a	84.7 \pm 1.4 d	82.62 \pm 0.02 ab	27.53 \pm 0.10 a	8.17 \pm 0.16 a	7.04 \pm 0.18 a
R	371.14 \pm 1.89 bc	90.5 \pm 0.7 bc	80.77 \pm 0.01 ab	27.26 \pm 0.11 a	7.39 \pm 0.10 b	6.70 \pm 0.24 ab
M	356.31 \pm 5.35 c	96.0 \pm 0.1 a	78.94 \pm 0.02 b	27.32 \pm 0.23 a	7.37 \pm 0.00 b	6.89 \pm 0.17 a
WF	318.21 \pm 19.77 d	92.7 \pm 1.2 ab	83.58 \pm 0.01 a	27.38 \pm 0.06 a	6.74 \pm 0.24 c	6.10 \pm 0.35 b

MC—紫云英养鸡; RC—黑麦草养鸡; R—黑麦草; M—紫云英; WF—冬闲。同列中不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

MC, Milk vetch + chicken; RC, Ryegrass + chicken; R, Ryegrass; M, Milk vetch; WF, Winter fallow. Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level, respectively. The same as below.

表2 双季稻产量、各产量构成因素与土壤理化性状之间的相关性

Table 2. Correlation between rice yields, yield components and soil chemical properties.

参数 Parameter	理论产量 Theoretical yield /(t hm^{-2})	分蘖 Tiller number	叶面积指数 LAI	干物质量 Dry matter /(kg m^{-2})	有效穗数 Effective panicles /($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)	每穗粒数 Grain number /panicle	千粒重 Thousand-grain weight/g	结实率 Seed-setting rate/%
早稻 Early rice growth duration								
硝态氮 Nitrate N	0.8079	0.4603	0.5006	0.6516	0.8181	0.7393	0.6230	0.4240
铵态氮 Ammonium N	0.9294*	0.6808	0.9340*	0.8906*	0.9153*	0.5249	0.7949	0.2819
速效磷 Available P	0.6319	0.8815*	0.9440*	0.6460	0.5780	0.0262	0.7212	0.6733
全氮 Total N	0.9458*	0.4306	0.8484	0.9175*	0.9613**	0.6841	0.6862	0.1780
全磷 Total P	0.6121	0.7080	0.9408*	0.6541	0.5845	0.0779	0.6065	0.7363
全钾 Total K	0.2133	0.3907	0.0594	0.0078	0.2261	0.3051	0.1966	0.5978
有机质 Organic matter	0.9530*	0.6363	0.8727	0.9528*	0.9107*	0.4969	0.8764	0.3024
晚稻 Late rice growth duration								
硝态氮 Nitrate N	0.9036*	0.781	0.7894	0.8796*	0.9817**	0.1293	0.2138	0.2138
铵态氮 Ammonium N	0.9256*	0.4757	0.7409	0.7412	0.8095	0.0241	0.7779	0.7779
速效磷 Available P	0.3315	0.6893	0.6656	0.6503	0.5027	0.8240	0.2028	0.2028
全氮 Total N	0.8767	0.8065	0.9501*	0.9185*	0.7901	0.2763	0.5428	0.5428
全磷 Total P	0.2902	0.8162	0.6131	0.6348	0.4519	0.5934	0.4041	0.4041
全钾 Total K	0.0943	0.3972	0.5615	0.4173	0.1032	0.9113*	0.1248	0.1248
有机质 Organic matter	0.8799*	0.9647**	0.9328*	0.9852**	0.9431*	0.3094	0.1522	0.1522

* $P<0.05$; ** $P<0.01$. LAI, Leaf area index.

含量与干物质量和有效穗数显著相关($P<0.05$)。这说明提高土壤铵态氮、全氮和有机质含量,进而提高了早稻有效穗数。对晚稻而言,硝态氮含量与干物质量显著相关($P<0.05$),与有效穗数极显著相关($P<0.01$);全氮与叶面积指数和干物质量显著相关($P<0.05$);有机质含量与分蘖数、干物质量极显著相关(相关系数 $r=0.9647$ 、 $r=0.9852$);全钾与有效穗数显著相关($P<0.05$)。说明硝态氮、铵态氮、有机质含量主要提高了晚稻有效穗数,全钾提高了每穗粒数。

总的来说,对于早稻,铵态氮、有机质和全氮含量主要影响水稻有效穗数;对于晚稻,硝态氮、

铵态氮、有机质含量影响水稻有效穗数,以此达到增产。这表明冬季种养结合模式有利于提高后季水稻有效穗数。

3 讨论

绿肥还田能提高土壤养分和优化土壤结构^[23-24]。如紫云英还田矿化后土壤氮含量升高,已经得到大量研究证实^[25],而黑麦草还田亦可使土壤有机质、全氮、全磷和全钾含量增加^[26],其根茬腐解液中还存在促进水稻生长的活性物质,具有增产效益^[27]。同时,有研究表明畜粪等有机肥还田也有良好培肥

地力的效果^[28], 而绿肥和牛粪混合堆腐后增加水溶性有机组分, 更有利于作物吸收^[29]。本研究通过冬闲稻田设置种草结合原位养鸡试验发现, 与单种紫云英和黑麦草相比, 种紫云英和黑麦草与养鸡组合显著提高水稻生育期土壤有机质和全氮含量, 铵态氮和硝态氮的含量也显著增加。产生这种结果的原因可能是一方面田间原位放养鸡啄食紫云英或黑麦草后, 代谢产生的鲜鸡粪中水分、粗脂肪、粗蛋白和粗灰分等含量很高, 在微生物的作用下腐解成土壤养分, 而这些腐解物中的有机成分易与水分子及土壤本身养分元素发生重组, 活化了土壤养分, 建立了新的土壤养分动态平衡^[30]。而且, 成年鸡啄食过程扰动了稻田土壤, 提高了微生物的活性, 加速了微生物的新陈代谢^[31]。另一方面, 早稻种植前, 翻压的紫云英和黑麦草腐烂后, 增加了土壤有机质^[26]、氮含量^[25]等。关于土壤磷变化过程不同研究结果不一致。赵鲁等^[32]发现苜蓿茎叶还田显著提高了土壤速效磷含量, 也有研究表明鸡粪能有效提高土壤磷素, 秸秆还田能提高土壤钾的含量, 两者配施益于互补^[33], 但本研究中单种紫云英后土壤全磷和速效磷含量高于绿肥过腹还田处理, 且土壤全氮处理之间无显著差异, 其可能原因与紫云英和黑麦草的秸秆原位过腹还田后土壤淋失作用有关, 这还需进一步探究其机理。

产量是评估农艺措施效果的主要指标。产量相关因素如分蘖数、叶面积系数、有效穗数、干物质质量提高有利于促进水稻增产^[34], 究其原因, 可能是叶片光合作用合成干物质的速度加快, 提高了水稻群体质量和光能利用率, 促进产量的形成, 同时也是源增库扩的结果^[35]。胡志华等^[36]研究发现紫云英结合猪粪和稻草覆盖模式利于水稻增产。马艳芹等^[37]研究发现紫云英配施缓控氮肥在有效促进水稻增产的同时可提高氮肥利用率。也有研究表明, 22500 kg/hm²紫云英搭配70%化肥的增产效果较好^[38]。本研究发现较冬闲和单种绿肥相比, 冬种紫云英和黑麦草过腹(鸡粪)还田后水稻产量相关因素如分蘖数、叶面积系数、有效穗数、干物质质量均有提高, 产量也得到促进。其原因可能是田间原位新鲜鸡粪腐解后与土壤养分建立更高层次的养分平衡, 可以长期缓效及时补充作物对土壤养分的转化和吸收, 而且早稻种植前翻耕绿肥、动物粪便与植物残体在土壤中又能发生互作^[29], 促进后期植株对养分的持续利用, 更加利于水稻的生长发育。

水稻产量、产量构成因素与土壤各化学性状之间关系极为密切。杨滨娟等^[39]通过连续8年的试验,

发现稻田冬种绿肥模式下水稻产量、产量构成与土壤碱解氮、有机质、pH值存在显著相关, 这是改良土壤养分状况进而优化水稻产量构成的结果。本研究相关分析结论与之类似, 土壤铵态氮、有机质、全氮和硝态氮含量与水稻产量显著相关, 其主要原因是重塑的土壤养分结构增加, 水稻有效穗数, 表明本研究中冬季种养模式促进水稻增产的机制在于促进水稻植株对土壤氮素、有机质含量等的吸收, 转化为水稻产量构成因素中有效穗数的增加。黄山等^[40]的研究结果同样表明有机肥处理主要是通过提高有效穗数影响产量, 本研究进一步证实了这一论点。

胡志华等^[36]发现, 绿肥紫云英与其他有机肥(秸秆、猪粪等)配施系统经济效益显著高于单一施用绿肥紫云英, 绿肥过腹还田模式中的畜禽粪便等有机肥来自于原位养鸡, 同样具有较好的增产效果。本研究利用冬季休闲稻田种草结合养鸡, 鸡粪和绿肥的还田减少了化肥的投入量, 降低了大量施用化肥造成的环境污染问题, 减少了有机肥堆沤和运输的成本, 稻田散养的生态土鸡在春节前上市具有良好的市场, 而同样促进水稻增产, 从而进一步提高了稻田生态系统的经济效益^[41]。

与单种绿肥相比, 将绿肥作为饲草通过养殖畜禽过腹还田, 组建农田种养结合模式更有利于促进农作物增产^[42-43]。而在可供选择的冬闲田养殖畜禽中, 鸡的饲喂操作简便, 在冬闲田种养结合模式上具有较好的发展潜力。章学东等^[44]研究了冬闲田种草养鸡对土壤及后季作物的影响, 发现撒播黑麦草两月后放养优质黄鸡于围栏内, 种草养鸡的玉米单穗重对单种草提高 13.1%, 平均亩产量提高 38.1%, 土壤有机质含量也明显提高, 与本研究的结论相似。本研究还发现, 紫云英养鸡过腹还田后增产效果优于黑麦草养鸡过腹, 黑麦草秸秆还田有助于土壤有机质含量的提升, 而紫云英秸秆还田对土壤氮素的提升更有益, 其与鸡粪结合后的增产效果可能与稻田土壤本身的碳氮比有关, 具体的养分转化机理还不明晰。在冬闲田种养结合复合模式中, 草的生长、鸡的采食和鸡粪腐解过程中的碳氮转化动态变化, 还有待于进一步研究。

4 结论

较传统的冬闲或单种草相比, 冬种紫云英和黑麦草过腹(鸡粪)还田能有效提高土壤有机质含量和全氮含量铵态氮、硝态氮含量, 且冬季种植紫云英

过腹(鸡粪)还田效果最好。与冬闲或单种绿肥相比,冬季种植紫云英和黑麦草过腹(鸡粪)还田更有利于水稻分蘖数、叶面积系数和干物质量与产量的提高,而且,冬季种植紫云英过腹(鸡粪)还田效果更佳。因此,冬季种植绿肥过腹还田不仅利用空闲农田产出了生态畜禽产品,并能满足后季水稻生长的养分需求,同时易于稻田土壤用养循环,具有较大的发展潜力。

参考文献:

- [1] 张北赢, 陈天林, 王兵. 长期施用化肥对土壤质量的影响. *中国农学通报*, 2010, 26(11): 182-187.
Zhang B Y, Chen T L, Wang B. Effects of long-term uses of chemical fertilizers on soil quality. *Chin Agric Sci Bull*, 2010, 26(11): 182-187. (in Chinese with English abstract)
- [2] Chen Z M, Wang H Y, Liu X W, Zhao X L, Lu D J, Zhou J M. Changes in soil microbial community and organic carbon fractions under short-term straw return in a rice-wheat cropping system. *Soil Till Res*, 2017, 165: 121-127.
- [3] Lee C H, Park K D, Jung K Y, Lee D, Ali M A, Gutierrez J, Kim P J. Effect of Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) as a green manure on rice productivity and methane emission in paddy soil. *Agric, Ecosys & Environ*, 2010, 138(3): 343-347.
- [4] 黄晶, 高菊生, 刘淑军, 曹卫东, 张杨珠. 冬种紫云英对水稻产量及其养分吸收的影响. *中国土壤与肥料*, 2013(1): 88-92.
Huang J, Gao J S, Liu S J, Cao W D, Zhang Y Z. Effect of Chinese milk vetch in winter on rice yield and its nutrient uptake. *Chin Soil Fer*, 2013(1): 88-92. (in Chinese)
- [5] Brookes P C, Landman A, Puden G. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biol Biochem*, 1985(17): 837-842.
- [6] 王丹英, 彭建, 徐春梅, 赵锋章, 章秀福. 油菜作绿肥还田的培肥效应及对水稻生长的影响. *中国水稻科学*, 2012, 26(1): 85-91.
Wang D Y, Peng J, Xu C M, Zhao F, Zhang X F. Effects of rape straw manuring on soil fertility and rice growth. *Chinese J Rice Sci*, 2011, 26(1): 85-91. (in Chinese with English abstract)
- [7] Wang J Z, Wang X J, Xu M G, Feng G, Zhang W J, Lu C A. Crop yield and soil organic matter after long-term straw return to soil in China. *Nutr Cycl Agroecos*, 2015, 102(3): 371-381.
- [8] 杨滨娟, 黄国勤, 王超, 林青, 徐宁. 稻田冬种绿肥对水稻产量和土壤肥力的影响. *中国生态农业学报*, 2013, 21(10): 1209-1216.
Yang B J, Huang G Q, Wang C, Lin Qing, Xu Ning. Effects of winter green manure cultivation on rice and fertility in paddy field. *Chin J Eco-Agric*, 2013, 21(10): 1209-1216. (in Chinese with English abstract)
- [9] 徐华勤, 崔国贤, 杨知建, 赵志力, 杨凤飞. 冬闲苕麻田套种牧草对杂草生物多样性的影响. *草业科学*, 2014, 31(1): 139-143.
Xu H Q, Cui G X, Yang Z X, Zhao Z L, Yang F F. Effects of interplanting cold-season grass on weeds biodiversity in ramie plantation in winter. *Pratacul Sci*, 2014, 31(1): 139-143. (in Chinese)
- [10] 杨曾平, 徐明岗, 聂军, 郑圣先, 高菊生, 谢坚, 廖育林. 长期冬种绿肥对双季稻种植下红壤性水稻土质量的影响及其评价. *水土保持学报*, 2011, 25(3): 92-97, 102.
Yang C P, Xu M G, Nie J, Zheng S X, Gao J S, Xie J, Liao Y L. Long-term regional green manure for cropping plant under the influence of red soil paddy soil quality and its evaluation. *J Soil Water Conser*, 2011, 25(3): 92-97, 102. (in Chinese with English abstract)
- [11] 吴增琪, 朱贵平, 张惠琴, 陈惠哲. 紫云英结荚翻耕还田对土壤肥力及水稻产量的影响. *中国农学通报*, 2010, 26(15): 270-273.
Wu Z Q, Zhu G P, Zhang H Q, Chen H Z. Effects of *Astragalus sinicus* returning to field in maturity on soil fertility and yield of rice. *Chin Agric Sci Bull*, 2010, 26(15): 270-273. (in Chinese with English abstract)
- [12] 张珺瞳, 曹卫东, 徐昌旭, 刘佳. 种植利用紫云英对稻田土壤微生物及酶活性的影响. *中国土壤与肥料*, 2012(1): 19-25.
Zhang J T, Cao W D, Xu C X, Liu J. Effects of incorporation of mick vetch (*Astragalus sinicus*) on microbial populations and enzyme activities of poddey soil in Jiangxi. *Soil Fert Sci China*, 2012(1): 19-25. (in Chinese with English abstract)
- [13] 潘圣刚, 莫钊文, 田华, 聂俊, 罗一鸣, 段美洋, 唐湘如. 源库调节对水稻生长发育的影响. *广东农业科学*, 2012, 39(14): 1-3
Pan S G, Mo Z W, Tian H, Lie J, Luo Y M, Duan M Y, Tang X R. Effects of source-sink regulation on the growth of rice. *Guangdong Agric Sci*, 2012, 39(14): 1-3. (in Chinese)
- [14] 江学海, 周维佳, 李敏, 周彩霞, 罗德强, 姬广梅, 李立江, 丁艳锋, 王绍华, 李刚华. 紫云英还田对常规红米水稻产量和品质的影响. *中国稻米*, 2016, 22(6): 34-37.
Jiang X H, Zhou W J, Li M, Zhou C X, Luo D Q, Ji G M, Li L J, Ding Y F, Wang S H, Li G H. Effects of total returning of *Astragalus sinicus* on yield and quality of the conventional red rice varieties. *China Rice*, 2016, 22(6): 34-37. (in Chinese)
- [15] 何录秋, 薛灿辉, 张亚. 经济绿肥在湖南农田循环生产中应用研究——经济绿肥品种比较. *耕作与栽培*, 2010(5): 24-25, 44.
He L Q, Xue X H, Zhang Y. Application of economic green fertilizer in farmland recycling production in hunan province-comparison of economic green fertilizer variety. *Till Cult*, 2010(5): 24-25, 44. (in Chinese)

- [16] 宿庆瑞. 玉米秸秆过腹还田培肥增产综合技术与效益的研究. 黑龙江农业科学, 1997(6): 36-37.
Su Q R. Study on the comprehensive technology and benefit of increasing yield and yield of corn straw. *Heilongjiang Agric Sci*, 1997(6): 36-37. (in Chinese)
- [17] 辛国荣, 杨中艺, 徐亚幸, 陈三有, 郭仁东. “黑麦草-水稻”草田轮作系统的研究: V. 稻田冬种黑麦草的优质高产栽培技术. 草业学报, 2000, 9(2): 17-23.
Xin G R, Yang Z Y, Xu Y X, Chen S Y, Guo R D. Cultivation technology for high yield and quality ryegrass fodder in a ryegrass-rice rotation system. *Acta Pratacul Sin*, 2000, 9(2): 17-23. (in Chinese with English abstract)
- [18] 唐剑武, 魏甲斌, 徐华勤, 唐先亮. 用于农闲田轮牧养鸡的移动鸡笼: CN204653383U, 2015-09-23.
Tang J W, Wei J B, Xu H Q, Tang X L. A mobile chicken cage for farming and raising chickens in farmlands: CN204653383U, 2015-09-23. (in Chinese with English abstract)
- [19] 周玲红, 魏甲彬, 唐先亮, 成小琳, 肖志祥, 徐华勤, 唐剑武. 冬季种养结合对稻田土壤微生物量及有效碳氮库的影响. 草业学报, 2016, 25(11): 103-114.
Zhou L H, Wei J B, Tang X L, Chen X L, Xiao Z X, Xu H Q, Tang J W. Effects of winter green manure crops with and without chicken rearing on microbial biomass and effective carbon and nitrogen pools in a double-crop rice paddy soil. *Acta Pratacul Sin*, 2016, 26(11): 103-114. (in Chinese with English abstract)
- [20] 魏甲彬, 周玲红, 徐华勤, 唐启源, 傅志强, 成小琳, 肖志祥, 唐剑武. 南方种养结合模式对冬季稻田净碳交换和不同土层活性碳氮转化的影响. 草业学报, 2017, 26(07): 138-146.
Wei J B, Zhou L H, Xu H Q, Tang Q Y, Fu Z Q, Chen X L, Xiao Z X, Tang J W. Effects of forage planting and chickens on net carbon exchange and transformation of soil active carbon and nitrogen at different layers in paddy fields in south China in winter. *Acta Pratacul Sin*, 2017, 26(07): 138-146. (in Chinese with English abstract)
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000. Bostown. Analysis of soil agronomation. Beijing: China agricultural press, 2000. (in Chinese)
- [22] 涂成, 黄威, 陈安磊, 宋歌, 陈春兰, 王卫, 谢小立. 测定土壤硝态氮的紫外分光光度法和镉柱还原法比较. 土壤, 2016, 48(01): 147-151.
Tu C, Huang W, Chen A L, Sun G, Chen C L, Wang W, Xie X L. Comparison between ultraviolet spectrophotometry and cadmium reduction method in determination of soil nitrate-N. *Soils*, 2016, 48(1): 147-151. (in Chinese with English abstract)
- [23] 潘福霞, 鲁剑巍, 刘威, 耿明建, 李小坤, 曹卫东. 三种不同绿肥的腐解和养分释放特征研究. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 216-223.
Pan F X, Lu J W, Liu W, Gen M J, Li X K, Cao W D. Study on characteristics of decomposing and nutrients releasing of three kinds of green manure crops. *Plant Nutr Fert Sci*, 2011, 17(1): 216-223. (in Chinese with English abstract)
- [24] Chang L, Meng L, Jun C, Bo L, Chang M F. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: A meta-analysis. *Glob Chan Biol*, 2014, 20(5): 1366-1381.
- [25] 王飞, 林诚, 林新坚, 何春梅, 李清华, 李昱, 黄功标, 钟少杰. 连续翻压紫云英对福建单季稻产量与化肥氮素吸收、分配及残留的影响. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 896-904.
Wang F, Lin C, Lin X J, He C M, Li Q H, Li X, Huang G B, Zhong S J. Effects of continuous turnover of *Astragalus sinicus* on rice yield and N absorption, distribution and residue in single-cropping rice regions of Fujian Province. *Plant Nutr Fer Sci*, 2014, 20(4): 896-904. (in Chinese with English abstract)
- [26] 乔伟艳, 顾洪如, 沈益新. 稻茬种植多花黑麦草对土壤肥力和微生物组成的影响. 草业科学, 2017, 34(2): 240-245.
Qiao W Y, Gu H R, Shen Y X. Effects of planting Italian ryegrass in winter fallow fields on soil fertility and microorganisms. *Pratacul Sci*, 2017, 34(02): 240-245. (in Chinese)
- [27] 黎国喜, 李厚金, 杨中艺, 辛国荣, 唐湘如, 袁剑刚. “黑麦草-水稻”草田轮作系统的根际效应: V. 意大利黑麦草(*Lolium multiflorum*)根茬腐解物中存在促水稻生长活性物质的证据. 中山大学学报: 自然科学版, 2008(4): 88-93.
Li G X, Li H J, Yang Z Y, Xin G R, Tang X R, Yuan J G. The rhizosphere effects in “Italian ryegrass-Rice” rotational system. V. Evidences for the existence of rice stimulators in decaying products of Italian ryegrass residues. *Acta Sci Nat Univ Sun*, 2008(4): 88-93. (in Chinese with English abstract)
- [28] 李江涛, 钟晓兰, 赵其国. 畜禽粪便施用对稻麦轮作土壤质量的影响. 生态学报, 2011, 31(10): 2837-2845.
Li J T, Zhong X L, Zhao Q G. Enhancement of soil quality in a rice-wheat rotation after long-term application of poultry litter and livestock manure. *Acta Ecol Sin*, 2011, 31(10): 2837-2845. (in Chinese with English abstract)
- [29] 张振都, 吴景贵, 石峰. 不同绿肥与牛粪混合堆腐过程中有机组分的动态变化. 土壤通报, 2012, 43(1): 87-92.
Zhang Z D, Wu J G, Shi F. Dynamics of Organic Components during Decomposition of Cow Manure Mixed with Different Green Manures. *Chin J Soil Sci*, 2012, 43(1): 87-92. (in Chinese with English abstract)
- [30] 韩天龙, 李宝栋, 王敏, 赵瑞霞, 红敏, 萨其仍贵, 乌仁图雅, 李志明. 不同堆放时间对鸡粪营养成分的影响. 黑龙江畜牧兽医, 2016(6): 52-54.
Han T L, Li B D, Wang M, Zhao R X, Hong M, Sa Q R G, Wu R T Y, Li Z M. Effect of different stacking time on the nutritional components in chicken manure. *Heilongjiang Animal Sci Veter Med*, 2016(6): 52-54. (in Chinese)
- [31] 杨志辉, 黄璜, 王华. 稻-鸭复合生态系统稻田土壤质量研究. 土壤通报, 2004, 35(2): 117-121.
Yang Z H, Huang H, Wang H. Paddy soil quality of a

- wetland rice-duck complex ecosystem. *Chin J Soil Sci*, 2004, 35(2): 117-121. (in Chinese with English abstract)
- [32] 赵鲁, 史冬燕, 高小叶, 安渊. 紫花苜蓿绿肥对水稻产量和土壤肥力的影响. *草业科学*, 2012, 29(7): 1142-1147.
Zhao L, Shi DY, Gao XY, An Y. Effects of alfalfa green manure on rice yield and soil fertility. *Pratacul Sci*, 2012, 29(7): 1142-1147. (in Chinese)
- [33] 张影, 刘星, 焦瑞峰, 李东方, 任秀娟, 吴大付, 陈锡岭. 生物质炭与有机物料配施的土壤培肥效果及对玉米生长的影响. *中国生态农业学报*, 2017, 25(9): 1287-1297.
Zhang Y, Liu X, Jiao R F, Li D F, Ren X J, Wu D F, Chen X L. Effects of combined biochar and organic matter on soil fertility and maize growth. *Chin J Eco-Agric*, 2017, 25(9): 1287-1297. (in Chinese with English abstract)
- [34] 马义虎, 葛立立, 杨凯鹏, 刘立军. 有机肥对水稻生长发育产量及土壤环境的影响. *安徽农业科学*, 2012, 40(16): 8888-8891, 8894.
Ma Y H, Ge L L, Yang K P, Liu L J. Effects of organic fertilizer on growth and yield of rice and soil environment. *J Anhui Agri Sci* 2012, 40(16): 8888-8891, 8894. (in Chinese with English abstract)
- [35] 慕美财, 张曰秋, 崔从光, 衣淑玉, 麻常运, 荀艳波. 冬小麦高产群体源-库-流特征及指标研究. *中国生态农业学报*, 2010, 18(1): 35-40.
Mu M C, Zhang Y Q, Cui C G, Yi S Y, Ma C Y, Xun Y B. Analysis of source-sink-translocation characteristics and indicators for high-yield colony of winter wheat. *Chin J Eco-Agric*, 2010, 18(01): 35-40. (in Chinese with English abstract)
- [36] 胡志华, 李大明, 徐小林, 余喜初, 柳开楼, 叶会财, 周利军, 胡惠文, 黄庆海. 不同有机培肥模式下双季稻田碳汇效应与收益评估. *中国生态农业学报*, 2017, 25(2): 157-165.
Hu Z H, Li D M, Xu X L, Yu X C, Liu K L, Ye H C, Zhou L J, Hu H W, Huang Q H. Evaluation of net carbon sink effects and costs/benefits of double-cropped rice fields under different organic fertilizer applications. *Chin J Eco-Agric*, 2017, 25(2): 157-165. (in Chinese with English abstract)
- [37] 马艳芹, 钱晨晨, 邓丽萍, 黄国勤. 紫云英配施氮肥对双季稻产量、干物质质量及氮素吸收利用的影响. *核农学报*, 2017, 31(12): 2399-2407.
Ma Y Q, Qian C C, Deng L P, Huang G Q. Effects of combining chinese milk vetch with nitrogen fertilizer on grain and dry matter yield, nitrogen absorption and utilization of double-cropping rice. *J Nucl Agric Sci*, 2017, 31(12): 2399-2407. (in Chinese with English abstract)
- [38] 万水霞, 唐杉, 蒋光月, 李帆, 郭熙盛, 王允青, 曹卫东. 紫云英与化肥配施对土壤微生物特征和作物产量的影响. *草业学报*, 2016, 25(6): 109-117.
Wan S X, Tang S, Jiang G Y, Li F, Guo X S, Wang Y Q, Cao W D. Effects of Chinese milk vetch manure and fertilizer on soil microbial characteristics and yield of rice. *Acta Pratacul Sin*, 2016, 25(6): 109-117. (in Chinese with English abstract)
- [39] 杨滨娟, 黄国勤, 王超, 林青, 徐宁. 稻田冬种绿肥对水稻产量和土壤肥力的影响. *中国生态农业学报*, 2013, 21(10): 1209-1216.
Yang B J, Huang G Q, Wang C, Li Q, Xu N. Effects of Winter green manure cultivation on rice and fertility in paddy field. *Chin J Eco-Agric*, 2013, 21(10): 1209-1216. (in Chinese with English abstract)
- [40] 黄山, 汤军, 廖萍, 曾勇军, 潘晓华, 石庆华. 冬种紫云英和稻草还田下氮钾肥减量施用对双季水稻产量和养分吸收的影响. *江西农业大学学报*, 2016, 38(4): 607-615.
Huang S, Tang J, Liao P, Zeng Y J, Pan X H, Shi Q H. Yield and nutrient uptake of double rice affected by winter legume covering (*Astragalus sinicus L.*) and straw retention with reduced rates of inorganic nitrogen and potassium fertilizers. *Acta Agric Univ Jiangxi*, 2016, 38(4): 607-615. (in Chinese with English abstract)
- [41] 李洁静, 潘根兴, 张旭辉, 费庆华, 李志鹏, 周萍, 郑聚锋, 邱多生. 太湖地区长期施肥条件下水稻-油菜轮作生态系统净碳汇效应及收益评估. *应用生态学报*, 2009, 20(7): 1664-1670.
Li J J, Pan G X, Zhang X H, Fei Q H, Li Z P, Zhou P, Zheng J F, Qiu D S. An evaluation of net carbon sink effect and cost/benefits of a rice-rape rotation ecosystem under long-term fertilization from Tai Lake region of China. *Chin J Appl Ecol*, 2009, 20(7): 1664-1670. (in Chinese with English abstract)
- [42] 倡国涵, 彭成林, 徐祥玉, 徐大兵, 袁家富, 李金华. 稻虾共作模式对涝渍稻田土壤理化性状的影响. *中国生态农业学报*, 2017, 25(1): 61-68.
Si G H, Peng C L, Xu D B, Xu D B, Yuan J F, Li J H. Effects of integrated rice-crayfish farming system on soil physico-chemical properties in waterlogged paddy soils. *Chin J Eco-Agric*, 2017, 25(1): 61-68. (in Chinese with English abstract)
- [43] Sara E, Katarina H, Anna M. Soil enzyme activities, microbial community composition and function after 47 years of continuous green manuring. *Appl Soil Ecol*, 2007, 35(3): 610-620.
- [44] 章学东, 楼立峰, 严甦, 陈效绘, 王竺美. 冬闲田种草养鸡对土壤和后期作物的影响试验. *浙江畜牧兽医*, 2010(2): 5-6.
Zhang X D, Lou L F, Yan S C, Chen X L, Wang Z M. Experimental study on the impact of seedling and chicken breeding on soil and later crops. *Zhejiang Anim Hus Vet Med*, 2010(2): 5-6. (in Chinese)