



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

冬季作物-双季稻轮作模式资源利用效率及经济效益比较研究

张帆

引用本文:

张帆. 冬季作物-双季稻轮作模式资源利用效率及经济效益比较研究[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(1): 87-95.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0013>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

南方双季稻区生物质炭还田模式生态效益评价

陈春兰, 侯海军, 秦红灵, 王聪, 沈健林, 魏文学

农业资源与环境学报. 2016, 33(1): 80-91 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0180>

紫云英翻压条件下氮肥运筹对双季稻产量和肥料利用率的影响

王慧, 唐杉, 武际, 胡润, 韩上, 刘英, 朱勤, 李敏, 王允青, 石祖梁

农业资源与环境学报. 2018, 35(4): 327-333 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0321>

施氮水平对稻-稻-紫云英稻田土壤细菌数量及群落结构的影响

周艳飞, 聂江文, 王幼娟, 刘章勇, 朱波

农业资源与环境学报. 2018, 35(6): 508-517 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0021>

成都平原不同种植模式下重金属镉污染风险和经济效益评价

刘海涛, 陈一兵, 田静, 林超文

农业资源与环境学报. 2019, 36(2): 184-191 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0164>

稻麦两熟农田径流养分循环利用模式的能值分析与生态补偿标准测算

朱冰莹, 陈留根, 盛婧, 郑建初

农业资源与环境学报. 2019, 36(5): 592-599 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0142>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张帆. 冬季作物-双季稻轮作模式资源利用效率及经济效益比较研究[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(1): 87-95.

ZHANG Fan. Comparative study on resource utilization efficiency and economic benefits of winter crop-double cropping rice rotation system in Hunan Province[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(1): 87-95.



开放科学 OSID

冬季作物-双季稻轮作模式 资源利用效率及经济效益比较研究

张帆

(湖南省土壤肥料研究所, 长沙 410125)

摘要:湖南省是长江中游双季稻主产区,冬季作物-双季稻轮作模式是该区重要的三熟种植制度。为优化种植模式、促进资源高效利用及农民增收,开展了13年的长期冬季作物-双季稻轮作种植定位试验,分析比较冬闲-双季稻、马铃薯-双季稻、黑麦草-双季稻、紫云英-双季稻、油菜-双季稻5种轮作模式的光热资源利用效率、NPK养分资源利用效率及经济效益。结果表明:马铃薯-双季稻模式年总光能利用率显著高于其他模式;马铃薯-双季稻模式轮作周年光能生产效率比黑麦草-双季稻、紫云英-双季稻、油菜-双季稻模式分别显著提高了0.16、0.18、0.21 $\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1}$ ($P < 0.05$),轮作周年积温生产效率比黑麦草-双季稻、紫云英-双季稻、油菜-双季稻模式分别显著提高了1.24、1.36、1.52 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ($P < 0.05$)。各模式轮作周年P养分干物质生产效率差异不显著 ($P > 0.05$);各轮作模式周年N养分干物质生产效率大小依次为马铃薯-双季稻(73.23)>冬闲-双季稻(69.84)>油菜-双季稻(68.30)>黑麦草-双季稻(65.47)>紫云英-双季稻(60.99);各轮作模式周年K养分干物质生产效率大小依次为紫云英-双季稻(70.63)>冬闲-双季稻(66.10)>油菜-双季稻(57.58)>黑麦草-双季稻(56.37)>马铃薯-双季稻(47.91)。各轮作模式的早、晚稻NPK偏生产力差异不显著 ($P > 0.05$),晚稻NPK收获指数差异显著 ($P < 0.05$)。各轮作模式经济效益大小依次为马铃薯-双季稻>油菜-双季稻>黑麦草-双季稻>紫云英-双季稻>冬闲-双季稻。马铃薯-双季稻模式为高投入高产型,黑麦草-双季稻和油菜-双季稻模式为低投入中产出型,紫云英-双季稻模式为低投入低产出型。综合来看,马铃薯-双季稻模式适合在湖南双季稻区推广应用。

关键词:冬季作物;双季稻;轮作;资源利用效率;经济效益

中图分类号:S511.42;S344.1 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2021)01-0087-09 doi: 10.13254/j.jare.2020.0013

Comparative study on resource utilization efficiency and economic benefits of winter crop-double cropping rice rotation system in Hunan Province

ZHANG Fan

(Hunan Soil and Fertilizer Institute, Changsha 410125, China)

Abstract: Hunan is the main double cropping rice production area in the middle reaches of the Yangtze River. A long-term experiment of a winter crop-double cropping rice rotation system began in 2004 on a red paddy soil in Hunan Province. The experiment consisted of five treatments, including fallow-double cropping rice, potato-double cropping rice, ryegrass-double cropping rice, milk vetch-double cropping rice, and rape-double cropping rice, with three replicates of all the treatments. In order to optimize winter crop-double cropping rice rotation pattern, promote efficient use of resources, and increase farmers' income, the efficiencies of solar radiation and heat resource, and the economic benefit of the five rotation systems were analyzed and compared in 2017. The annual solar radiation use efficiency of potato-double cropping rice rotation system was significantly higher than other models. Compared with ryegrass-double cropping rice, milk

收稿日期:2020-01-07 录用日期:2020-04-06

作者简介:张帆(1977—),女,辽宁昌图人,博士,副研究员,从事农作制度与生态农业研究。E-mail: zhangfan898@sina.com

基金项目:国家重点研发计划专项(2016YFD0300208)

Project supported: The National Key Research and Development Project of China(2016YFD0300208)

<http://www.aed.org.cn>

vetch-double cropping rice, and rape-double cropping rice, solar radiation productive efficiency of potato-double cropping rice rotation system was significantly increased by 0.16, 0.18 $\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1}$, and 0.21 $\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1}$, respectively. The accumulated heat productive efficiency of the potato-double cropping rice rotation system was significantly increased by 1.24, 1.36 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, and 1.52 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, respectively. There were no significant differences in phosphorus nutrient biomass production efficiency of the five rotation systems. The order of nitrogen nutrient biomass production efficiency was potato-double cropping rice (73.23) > fallow-double cropping rice (69.84) > rape-double cropping rice (68.30) > ryegrass-double cropping rice (65.47) > milk vetch-double cropping rice (60.99). The order of potassium nutrient biomass production efficiency was milk vetch-double cropping rice (70.63) > fallow-double cropping rice (66.10) > rape-double cropping rice (57.58) > ryegrass-double cropping rice (56.37) > potato-double cropping rice (47.91). There was no significant differences in the NPK partial factor productivity of early rice and late rice in the five rotation systems ($P > 0.05$), and there was a significant difference in the NPK harvest index of late rice ($P < 0.05$). The order of the economic benefits was potato-double cropping rice > rape-double cropping rice > ryegrass-double cropping rice > milk vetch-double cropping rice > fallow-double cropping rice. The potato-double cropping rice was high input and high output type, ryegrass-double cropping rice and rape-double cropping rice were low input and middle output type, and milk vetch-double cropping rice was low input and low output type. The results indicate that the potato-double cropping rice rotation system is suitable for popularization and application in Hunan double cropping rice area.

Keywords: winter crop; double cropping rice; rotation; resource utilization efficiency; economic benefit

轮作、间套作及复种等多熟种植能在时间、空间及土地上集约高效地利用光、温、水等自然资源,是我国精耕细作的农艺模式精华。探索生态环境友好、资源高效利用、保障粮食安全的种植模式是现代种植制度的研究热点。

湖南省是长江中游双季稻主产区,以开发冬闲田促进农民增收,稻田温、光、水、土资源高效利用及用地与养地相结合为目的的“冬季作物-双季稻”轮作模式是该区典型的多熟种植制度^[1]。目前对冬季作物-双季稻轮作种植模式的研究主要集中在稻田土壤微生物与肥力^[2-7]、温室气体^[8]、水稻生长^[9-10]及轮作系统NPK养分循环^[1]等方面,但是关于光热资源利用率和经济效益的研究极少。前期研究^[1]表明,长期的冬季作物-双季稻轮作种植未显著影响水稻产量和糙米NPK养分含量,间接说明该种植模式冬季作物的产投影响着农民所获得的直接经济效益。分析比较不同冬季作物-双季稻轮作各模式光热资源及NPK养分资源利用效率和经济效益的差异及其原因,对湖南双季稻区种植结构调整、合理利用和开发冬闲田、促进农民增收农业增效具有重要意义。

本研究基于13年的冬季作物-双季稻轮作种植模式长期定位试验,分析比较冬闲-双季稻、马铃薯-双季稻、黑麦草-双季稻、紫云英-双季稻及油菜-双季稻5种轮作模式的资源利用效率及经济效益,旨在为湖南冬季作物-双季稻轮作模式的合理发展提供理论依据与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设计与栽培管理

冬季作物-双季稻轮作模式定位试验于2004年9月在湖南省土壤肥料研究所实验网室开始进行,试验小区为防渗水泥池(面积1.1 m^2),长、宽、高分别为130 $\text{cm} \times 85 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}$,设有可封堵的排水口和灌水口。供试土壤为第四纪红黏土发育的红黄泥,试验前耕层土壤基础理化性状为土壤有机碳13.3 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮1.46 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷0.81 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效氮154.5 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷39.2 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾120.43 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH为5.40^[1]。试验设冬闲-双季稻(对照)、马铃薯-双季稻、黑麦草-双季稻、紫云英-双季稻、油菜-双季稻5个处理,每处理重复3次,随机区组排列。

各作物种植季农事操作:马铃薯在每年12月中上旬采用稻草覆盖、穴播种植,密度为 $7.5 \times 10^4 \text{ 穴} \cdot \text{hm}^{-2}$ (大约用马铃薯种子3 000.0 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$);黑麦草、紫云英、油菜均在晚稻收获前套播,播种量分别为22.0、37.5、4.0 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;对照处理冬季空闲,伴有当地常见的冬季杂草自然生长;早稻移栽时间是在每年5月份的第1周,晚稻在早稻收获后第3 d移栽,约在每年7月份第2周,早稻和晚稻的插植密度均为20 $\text{cm} \times 12.5 \text{ cm}$;每年早稻移栽种植前的1~2周内冬季作物均被收获,其中黑麦草和紫云英被翻压还田作绿肥,还田量为25.0 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$;马铃薯和油菜收获后其秸秆全部翻压还田;早稻收获后其秸秆人工模拟机械粉碎翻压还

田,晚稻收获后秸秆不还田,大约 2/3 的晚稻秸秆留作马铃薯栽培用^[1]。

氮、磷、钾化肥分别为尿素(含 N 量 46%)、过磷酸钙(含 P₂O₅ 量 12%)和氯化钾(含 K₂O 量 60%)。

各冬季作物种植前基肥纯 N 施用量均为 34.5 kg·hm⁻²、基肥 P₂O₅ 施用量均为 45.0 kg·hm⁻²,只有马铃薯施基肥 K₂O(360.0 kg·hm⁻²)。油菜和黑麦草(第一次刈割后)追施氮肥,追肥纯 N 施用量分别为 66.7、34.5 kg·hm⁻²。各处理早、晚稻移栽前均施基肥,其中纯 N 施用量分别为 103.5、138.0 kg·hm⁻²,P₂O₅ 和 K₂O 施用量均为 45.0、67.5 kg·hm⁻²;早、晚稻均在移栽后的第 7 d 追施氮肥,纯 N 施用量分别为 69.0、87.4 kg·hm⁻²。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 气象因子的监测

所用气象数据由湖南省气象科学研究院提供。利用生成的日值气象资料,计算冬季作物-双季稻轮作周年和不同作物种植季的总辐射和有效积温。以最早播种的冬季作物开始到次年晚稻收获为 1 周年(即本研究的时间为 2016 年 9 月 21 日—2017 年 11 月 3 日),计算年积温为 6 972.6 ℃,太阳辐射能量为 4 665.90 MJ·m⁻²。冬季作物-双季稻轮作各模式生育期和相应的积温与太阳辐射见表 1 和表 2。

1.2.2 冬季作物和水稻样品的采集与测定

2016 年 9 月 21 日—2017 年 11 月 3 日轮作周年,黑麦草是在每次刈割后、紫云英和马铃薯均在收获期测定每重复小区地上部分鲜样产量,同时取鲜样 0.50 kg 测定其干物质质量。其中马铃薯地上部分鲜样包括马铃薯秸秆和鲜薯,分开测产与取样分析。油菜收获时每重复小区随机取 2 株植株样测定其秸秆干物质质量,每重复小区单打单收测其油菜籽产量。在早、晚稻收获期,每重复小区随机取 3 丛水稻植株(分为水稻籽粒和秸秆)测定其干物质质量。试验处理每小区早、晚稻单打单收,脱粒并晒干去杂质后测其籽粒产量。各种植冬季作物的经济目标产量和秸秆干物质质量见表 3。

植株样均是 105 ℃杀青 1 h,75 ℃烘干至恒质量,测其各部分干物质质量后磨碎过筛。植株样全 N 采用硫酸-过氧化氢消煮,扩散法测定^[11],植株样全 P 采用硫酸-过氧化氢消煮,钼锑抗比色法测定^[11],植株样全 K 采用硫酸-过氧化氢消煮,火焰光度法测定^[11]。

1.3 物质、能量生产与光热及养分资源效率分析

1.3.1 干物质产能

单位面积生产的干物质产量与其干质量热值(即单位干物质热量)的乘积为干物质产能。干质量热值(GCV)指每千克干物质完全燃烧所释放的能量

表 1 冬季作物-双季稻轮作各模式生育期

Table 1 Growth period of different winter crop and double cropping rice systems

轮作模式 Rotation system	冬季作物季 Winter crop season	早稻季 Early rice season	晚稻季 Late rice season	大田生育期 Growth period/d			
				冬季作物季 Winter crop season	早稻季 Early rice season	晚稻季 Late rice season	轮作周年 Rotation cycle(autumn 2016—winter 2017)
冬闲-双季稻	—	2017/5/4—2017/7/20	2017/7/24—2017/11/3	—	77	102	179
马铃薯-双季稻	2016/12/20—2017/4/24	2017/5/4—2017/7/20	2017/7/24—2017/11/3	125	77	102	304
黑麦草-双季稻	2016/9/21—2017/4/18	2017/5/4—2017/7/20	2017/7/24—2017/11/3	209	77	102	388
紫云英-双季稻	2016/9/21—2017/4/18	2017/5/4—2017/7/20	2017/7/24—2017/11/3	209	77	102	388
油菜-双季稻	2016/9/21—2017/4/30	2017/5/4—2017/7/20	2017/7/24—2017/11/3	221	77	102	400

表 2 冬季作物-双季稻轮作模式各作物生育期积温和太阳辐射

Table 2 Accumulated temperature and solar radiation of different winter crop and double cropping rice systems in the growth period

轮作模式 Rotation system	积温 Accumulated temperature(≥10 ℃)/(℃·d)				太阳辐射 Solar radiation/(MJ·m ⁻²)			
	冬季作物季 Winter crop season	早稻季 Early rice season	晚稻季 Late rice season	轮作周年 Rotation cycle	冬季作物季 Winter crop season	早稻季 Early rice season	晚稻季 Late rice season	轮作周年 Rotation cycle
冬闲-双季稻	—	1 954.0	2 529.9	4 483.9	—	1 253.66	1 455.35	2 709.01
马铃薯-双季稻	989.8	1 954.0	2 529.9	5 473.7	1 041.52	1 253.66	1 455.35	3 750.53
黑麦草-双季稻	2 096.3	1 954.0	2 529.9	6 580.2	1 638.48	1 253.66	1 455.35	4 347.49
紫云英-双季稻	2 096.3	1 954.0	2 529.9	6 580.2	1 638.48	1 253.66	1 455.35	4 347.49
油菜-双季稻	2 323.4	1 954.0	2 529.9	6 807.3	1 839.69	1 253.66	1 455.35	4 548.70

表3 各种植季作物的经济目标产量和秸秆干物质质量(kg·hm⁻²)Table 3 Economic target yield and straw biomass of crops in each season(kg·hm⁻²)

轮作模式 Rotation system	冬季作物 Winter crop		早稻 Early rice			晚稻 Late rice	
	还田的秸秆干物质质量 Winter crop straw incorporated	未还田的秸秆干物质质量 Unreturned winter crop straw	经济目标产量 Economic yield	籽粒产量 Yield	秸秆干物质质量 Straw biomass	籽粒产量 Yield	秸秆干物质质量 Straw biomass
冬闲-双季稻	—	—	—	4 337.06a	2 918.79a	6 721.89a	5 727.27a
马铃薯-双季稻	1 345.54	—	22 760.61	4 229.37a	3 987.88a	6 756.45a	6 889.70a
黑麦草-双季稻	3 100.96	—	32 584.85	4 673.19a	2 647.27a	6 558.47a	3 656.97b
紫云英-双季稻	3 700.03	888.01	—	4 399.07a	2 621.82a	7 513.81a	4 717.58ab
油菜-双季稻	3 614.99	—	1 110.00	4 405.60a	3 343.03a	6 838.16a	4 250.91b

注:同列不同字母表示在5%水平上差异显著。下同。

Note: Different letters in a column indicate significant difference at 5% level. The same below.

(kJ·kg⁻¹),本试验冬季作物-双季稻轮作模式中各作物及农副产品的干质量热值见表4^[12]。

干物质产能(MJ·m⁻²)=单位面积的干物质产量×干质量热值

1.3.2 光能生产效率和年总辐射利用率^[13]

光能生产效率以生育期间平均单位热量生产的单位面积干物质质量表示^[13]。

光能生产效率(g·MJ⁻¹)=干物质生产量/单位面积的太阳辐射

年总光能利用率(%)=干物质产能/单位面积的全年太阳辐射×100^[13]

1.3.3 积温生产效率和年有效积温利用率^[13]

积温生产效率是指生育期间日均温≥10℃有效积温生产的单位面积干物质质量^[13]。

积温生产效率(kg·hm⁻²·℃⁻¹·d⁻¹)=单位面积干物质生产量/生育期间有效积温

年有效积温利用率(%)=作物生育期间有效积温/全年有效积温×100^[13]

1.3.4 养分利用效率

表4 冬季作物-双季稻轮作模式各作物单位干物质热量

Table 4 Heat of per unit dry matter of crops of the winter crop and double cropping rice rotation systems

农作物 Crop	单位干物质热量 Heat of per unit dry matter/(kJ·kg ⁻¹)
稻谷 Rice	15 480.80
稻草 Straw	14 177.27
油菜籽 Rapeseed	26 359.20
油菜秆 Rape straw	14 346.10
马铃薯(鲜) Potato(fresh)	4 303.66
马铃薯秧(干) Dried potato straw	13 498.63
紫云英 Chinese milk vetch	2 127.56
黑麦草 Ryegrass	4 675.83

养分积累总量=Σ成熟期地上部各部位干物质质量×各部位养分含量

养分干物质生产效率(kg·kg⁻¹)=成熟期单位面积干物质质量/养分积累总量

养分收获指数(%)=籽粒养分积累量/养分积累总量×100

养分偏生产力(kg·kg⁻¹)=籽粒产量/养分施用量

1.3.5 经济效益计算

经济效益(元·hm⁻²)=产值(元·hm⁻²)-成本(元·hm⁻²)

产值(元·hm⁻²)=产量(kg·hm⁻²)×单价(元·kg⁻¹)

成本包括劳动力成本和农用投入品成本。本研究中双季稻劳动力成本(包括翻耕、水稻移栽、杂草与病虫害防治、收割以及管理等劳动力支出)和投入品成本(农药、水稻种子、肥料以及灌溉等)按2017年生产实际支出并参考大田计算,分别为6 000.00元·hm⁻²和10 600.00元·hm⁻²。冬季作物种植季增加的投入品成本另外计算,暂不考虑冬季作物种植季投入的劳动力成本。

成本均以2017年湖南省双季稻区实际价格为参考:化肥N、P₂O₅、K₂O市场价分别为3.80、5.20、5.30元·kg⁻¹;紫云英种子价格为20.00元·kg⁻¹;黑麦草种子价格为10.00元·kg⁻¹;油菜种子价格为100.00元·kg⁻¹;马铃薯种薯价格为5.00元·kg⁻¹。劳动力工价为150.00元·d⁻¹。

2017年各季作物经济目标产出收购价格:马铃薯鲜薯为1.50元·kg⁻¹;黑麦草鲜草为0.15元·kg⁻¹;油菜籽为5.00元·kg⁻¹;早、晚稻谷分别为2.40、2.52元·kg⁻¹。

1.4 数据处理

数据采用Excel数据表和DPS 7.05(Data processing system for practical statistics)软件进行分析整理,

用 Duncan 新复极差法检验数据差异的显著性水平 ($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 冬季作物-双季稻轮作模式光热资源利用效率

不同冬季作物-双季稻轮作模式的光温生产效率与周年利用率见表 5。马铃薯-双季稻模式的年总光能利用率显著高于其他轮作模式,且轮作周年光能生产效率比黑麦草-双季稻、紫云英-双季稻、油菜-双季稻分别提高了 0.16、0.18、0.21 $\text{g}\cdot\text{MJ}^{-1}$,增幅分别为 28.1%、32.7%、40.4%,差异达显著水平 ($P<0.05$)。从轮作周年各作物种植季光能生产效率来看,冬季作物种植季光能生产效率马铃薯-双季稻模式显著高于紫云英-双季稻和油菜-双季稻模式;早稻种植季光能生产效率马铃薯-双季稻模式显著高于紫云英-双季稻模式;晚稻种植季光能生产效率马铃薯-双季稻模式显著高于黑麦草-双季稻模式和油菜-双季稻模式。但是马铃薯-双季稻模式早、晚稻季光能生产效率及轮作周年光能生产效率与冬闲-双季稻模式相比差异不显著。

油菜-双季稻模式年有效积温利用率高于其他模式,接近饱和状态(97.63%),黑麦草-双季稻模式、紫云英-双季稻模式年有效积温利用率也较高,均超过 94%。马铃薯-双季稻模式轮作周年有效积温生产效率比黑麦草-双季稻、紫云英-双季稻、油菜-双季稻分别显著提高了 1.24、1.36、1.52 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$,增幅分别为 33.2%、37.6%、43.9%,差异达显著水平 ($P<0.05$)。从轮作周年各作物种植季有效积温生产效率来看,冬季作物种植季有效积温生产效率马铃薯-双季稻模式显著高于其他模式;早稻种植季有效

积温生产效率马铃薯-双季稻模式显著高于紫云英-双季稻模式;晚稻种植季有效积温生产效率马铃薯-双季稻模式显著高于黑麦草-双季稻模式和油菜-双季稻模式。综上所述,从光热资源利用效率的角度来看,马铃薯-双季稻模式优于其他模式。

2.2 冬季作物-双季稻轮作模式 NPK 养分利用率

不同冬季作物-双季稻轮作模式的 NPK 养分干物质生产效率见表 6。各模式轮作周年 P 养分干物质生产效率无显著差异 ($P>0.05$)。各模式轮作周年 N 养分干物质生产效率大小依次为马铃薯-双季稻(73.23)>冬闲-双季稻(69.84)>油菜-双季稻(68.30)>黑麦草-双季稻(65.47)>紫云英-双季稻(60.99),其中马铃薯-双季稻模式轮作周年 N 养分干物质生产效率比黑麦草-双季稻和紫云英-双季稻分别显著提高了 11.9% 和 20.1% ($P<0.05$),而紫云英-双季稻模式轮作周年 N 养分干物质生产效率比冬闲-双季稻模式显著降低了 12.7%。各轮作模式周年 K 养分干物质生产效率大小依次为紫云英-双季稻(70.63)>冬闲-双季稻(66.10)>油菜-双季稻(57.58)>黑麦草-双季稻(56.37)>马铃薯-双季稻(47.91),其中马铃薯-双季稻模式轮作周年 K 养分干物质生产效率比紫云英-双季稻和油菜-双季稻模式分别显著降低了 32.2% 和 16.8% ($P<0.05$),马铃薯-双季稻与黑麦草-双季稻模式轮作周年 K 养分干物质生产效率分别比冬闲-双季稻显著降低了 27.5% 和 14.7% ($P<0.05$)。冬闲-双季稻与油菜-双季稻模式轮作周年 NPK 养分干物质生产效率无显著差异。从 NPK 养分干物质生产效率角度来看,冬闲-双季稻和油菜-双季稻模式优于其他模式。

本研究不同冬季作物-双季稻模式轮作 13 年后

表 5 不同冬季作物-双季稻轮作模式的光温生产效率与周年利用率

Table 5 Production efficiency and annual use efficiency of solar radiation and effective accumulated temperature of different winter crop and double cropping rice rotation systems

轮作模式 Rotation system	光能生产效率 Production efficiency of solar radiation/(g·MJ ⁻¹)				年总光能利用率 Use efficiency of annual solar radiation/%	有效积温生产效率 Production efficiency of effective accumulated temperature/(kg·hm ⁻² ·℃ ⁻¹ ·d ⁻¹)				年有效积温 利用率 Use efficiency of annual effective accumulated temperature/%
	冬季作物 Winter crop season	早稻季 Early rice season	晚稻季 Late rice season	轮作周年 Rotation cycle		冬季作物 Winter crop season	早稻季 Early rice season	晚稻季 Late rice season	轮作周年 Rotation cycle	
冬闲-双季稻	—	0.58±0.07ab	0.86±0.09ab	0.73±0.08a	0.63±0.07c	—	3.71±0.43ab	4.92±0.53ab	4.39±0.49ab	64.31
马铃薯-双季稻	0.52±0.16a	0.66±0.05a	0.94±0.03a	0.73±0.05a	0.95±0.08a	5.47±1.74a	4.21±0.34a	5.39±0.20a	4.98±0.36a	78.50
黑麦草-双季稻	0.43±0.07ab	0.58±0.02ab	0.70±0.08c	0.57±0.05b	0.64±0.04c	3.38±0.52b	3.74±0.11ab	4.04±0.46c	3.74±0.31bc	94.37
紫云英-双季稻	0.28±0.06b	0.56±0.04b	0.84±0.04ab	0.55±0.04b	0.64±0.03c	2.19±0.46b	3.59±0.22b	4.83±0.23ab	3.62±0.26c	94.37
油菜-双季稻	0.26±0.08b	0.62±0.05ab	0.76±0.07bc	0.52±0.06b	0.78±0.10b	2.03±0.61b	3.97±0.29ab	4.38±0.39bc	3.46±0.42c	97.63

未显著影响早、晚稻产量(表3),各模式早、晚稻季施肥管理一致,因此各模式未显著影响早、晚稻NPK偏生产力(表7)。各模式早稻N、P收获指数差异不显著,紫云英-双季稻模式早稻K收获指数比马铃薯-双

季稻模式显著提高了45.6% ($P<0.05$);各模式晚稻K收获指数差异显著,黑麦草-双季稻模式晚稻PK收获指数显著高于其他模式 ($P<0.05$)。从双季稻生产和双季稻NPK养分利用率角度来看,黑麦草-双季稻模

表6 不同冬季作物-双季稻轮作模式的NPK干物质生产效率($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 6 N, P and K efficiency for biomass production of different winter crop and double cropping rice rotation systems ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

轮作模式 Rotation system	N			
	冬季作物 Winter crop	早稻 Early rice	晚稻 Late rice	轮作周年 Rotation cycle
冬闲-双季稻	—	62.56±5.17a	75.17±7.25ab	69.84±5.32ab
马铃薯-双季稻	62.41±4.55a	68.59±7.76a	82.69±5.10a	73.23±2.98a
黑麦草-双季稻	66.15±5.74a	65.35±2.97a	65.38±7.67b	65.47±3.15bc
紫云英-双季稻	45.54±8.11b	63.04±5.23a	68.70±3.82b	60.99±1.70c
油菜-双季稻	66.98±4.60a	64.25±0.36a	72.61±5.50ab	68.30±2.18ab
轮作模式 Rotation system	P			
	冬季作物 Winter crop	早稻 Early rice	晚稻 Late rice	轮作周年 Rotation cycle
冬闲-双季稻	—	387.89±11.03a	497.97±51.51a	450.28±31.40a
马铃薯-双季稻	431.50±83.54ab	336.07±84.11a	510.78±21.50a	422.54±58.83a
黑麦草-双季稻	342.26±53.48b	371.51±17.30a	472.84±53.93a	395.07±32.07a
紫云英-双季稻	549.87±76.89a	401.70±18.96a	443.23±20.75a	446.47±24.37a
油菜-双季稻	399.38±34.45b	379.47±12.68a	448.06±40.10a	412.74±18.77a
轮作模式 Rotation system	K			
	冬季作物 Winter crop	早稻 Early rice	晚稻 Late rice	轮作周年 Rotation cycle
冬闲-双季稻	—	69.74±7.67ab	64.27±5.39ab	66.10±5.49ab
马铃薯-双季稻	27.69±2.28b	63.05±5.92b	55.20±1.82b	47.91±1.92d
黑麦草-双季稻	34.79±2.38b	75.87±5.64a	75.03±9.76a	56.37±2.97cd
紫云英-双季稻	66.86±31.26a	74.38±2.94a	72.29±2.06a	70.63±8.36a
油菜-双季稻	36.60±1.15b	69.04±4.59ab	66.23±5.76a	57.58±1.85bc

表7 不同冬季作物-双季稻轮作模式早、晚稻NPK利用率

Table 7 N, P and K use efficiency of early and late rice in different winter crop and double cropping rice rotation systems

轮作模式 Rotation system	早稻 Early rice					
	偏生产力 Partial factor productivity/ ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)			收获指数 Harvest index/%		
	N	P	K	N	P	K
冬闲-双季稻	25.14±4.88a	220.72±42.78a	77.43±15.01a	57.9±3.7a	72.5±7.8a	12.8±2.5ab
马铃薯-双季稻	24.52±3.80a	215.24±33.34a	75.51±11.70a	53.6±5.6a	71.8±12.1a	10.3±2.7b
黑麦草-双季稻	27.09±1.23a	237.82±10.83a	83.43±3.80a	62.7±7.3a	75.2±4.4a	14.5±2.4ab
紫云英-双季稻	25.50±2.54a	223.87±22.30a	78.54±7.82a	61.7±1.0a	76.6±4.5a	15.0±1.3a
油菜-双季稻	25.54±3.30a	224.20±28.91a	78.66±10.14a	56.0±3.7a	75.7±5.0a	13.0±2.2ab
轮作模式 Rotation system	晚稻 Late rice					
	偏生产力 Partial factor productivity/ ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)			收获指数 Harvest index/%		
	N	P	K	N	P	K
冬闲-双季稻	29.82±5.95a	342.08±68.25a	120.01±23.94a	55.8±0.8c	72.5±0.4c	11.5±0.4d
马铃薯-双季稻	29.97±2.30a	343.84±26.39a	120.63±9.26a	41.8±1.4d	68.4±0.3d	9.04±0.1e
黑麦草-双季稻	29.10±5.11a	333.76±58.62a	117.09±20.56a	65.2±0.3a	77.8±0.3a	17.1±0.6a
紫云英-双季稻	33.34±2.54a	382.38±29.08a	134.15±10.20a	60.8±0.9b	77.1±0.2b	15.7±0.3b
油菜-双季稻	30.34±4.35a	348.00±49.87a	122.09±17.49a	63.5±1.8a	77.0±0.3b	14.7±0.2c

式优于其他模式。

2.3 冬季作物-双季稻轮作模式经济效益分析

将冬季作物纳入到双季稻的种植制度中,在不考虑冬季作物季劳动力成本投入的情况下,不同冬季作物-双季稻轮作种植模式经济效益见表 8。不同模式轮作周年经济效益以马铃薯-双季稻模式最高,冬闲-双季稻模式最低。与冬闲-双季稻模式相比,马铃薯-双季稻模式经济效益增加了 155.0%,油菜-双季稻模式增加了 46.4%,黑麦草-双季稻模式增加了 42.5%,紫云英-双季稻模式增加了 9.6%。

因本研究不同冬季作物-双季稻轮作种植模式未显著影响早、晚稻产量,不同冬季作物-双季稻轮作种植模式经济效益差异主要是由冬季作物种植季的投入成本和产值造成。马铃薯-双季稻模式轮作周年成本是最高的,为高投入高产出型。黑麦草-双季稻模式和油菜-双季稻模式为低投入中产出型。紫云英-双季稻模式为低投入低产出型。从经济效益的角度看,马铃薯-双季稻模式优于其他模式。

3 讨论

马铃薯是调整优化种植结构的重要替代作物。本研究马铃薯-双季稻模式技术亮点是利用晚稻秸秆覆盖种植马铃薯且马铃薯收获后其秸秆翻压还田,促进了稻田周年农业废弃物的循环利用。冬闲-双季稻、紫云英-双季稻及油菜-双季稻模式轮作周年 K 养分干物质生产效率均显著高于马铃薯-双季稻模式;前期研究的长期定位试验结果^[1]也表明:马铃薯-双季稻模式在马铃薯种植季 K 盈余为 255.21 kg K·hm⁻²、N 盈余为 26.01 kg N·hm⁻²,说明在保证双季稻稳产条件下今后需要开展冬闲稻田种植马铃薯的化肥减施、NPK 肥料运筹及节本增效研究,因为相比于三大主粮作物,浅根系的马铃薯植株不易吸收根层以下

的养分,容易造成 NPK 肥料利用率下降、环境风险增加的隐患^[14]。本研究表明马铃薯-双季稻模式在光热资源利用率和经济效益上优于其他模式,但实际生产中要考虑马铃薯种植的瓶颈,如薯块繁殖系数低,种植、储运成本高,易携带病虫害等问题^[15]。

稻田冬种黑麦草不仅能产生大量的优质牧草,也能改善稻田土壤生态环境和土壤肥力^[16-18]。前期研究的长期定位试验结果^[1]也表明:稻田冬种黑麦草有利于促进早稻产量稳定性和可持续性的提高。发展黑麦草-双季稻模式还要因地制宜地考虑本地区及周边地区的畜牧业和渔业发展情况,让刈割的黑麦草替代部分工业化加工饲料。稳定可靠的需求可能会降低农民种植黑麦草的市场风险、保障其种植收益。

紫云英作为冬季豆科绿肥作物,利用其固氮贮碳作用既可减少水稻生产中的化学 N 肥投入又能保证水稻稳产高产,在双季稻区“减肥减药”战略中成为研究热点。国内很多研究表明稻田冬种紫云英可减少水稻生产中的化肥投入并保证水稻稳产,经济效益比冬闲-双季稻模式高^[6, 19-21]。无论从资源利用率角度,还是经济效益角度看,紫云英-双季稻并不是最优模式。本研究紫云英-双季稻模式中,紫云英种植季投入了化学 N 肥和 P 肥,且早稻移栽前部分未翻压还田作绿肥的紫云英鲜草被移出田(移出田的紫云英鲜草 2017 年为 8 868.18 kg·hm⁻²,相当于移出田 24.28 kg N·hm⁻²、2.05 kg P·hm⁻²、14.45 kg K·hm⁻²),造成绿肥生物资源的浪费。建议在紫云英-双季稻模式中减少紫云英种植季的化学肥料投入并在早稻移栽前将紫云英鲜草全量还田,充分利用紫云英的生物固氮作用和冬闲田光热资源来保证双季稻的稳产高产、降低购买化学肥料投入以增加该模式经济效益。唐海明等^[8]研究表明:稻田冬种紫云英不仅增加了稻田冬闲期温室气体 CH₄和 N₂O 的总排放量,紫云英翻压还田

表 8 不同冬季作物-双季稻轮作种植模式经济效益比较(元·hm⁻²)

Table 8 Comparison of economic benefit of different winter crop-double cropping rice rotation systems(yuan·hm⁻²)

轮作模式 Rotation system	产值 Total income				成本 Cost			经济效益 Net income		
	冬季作物 Winter crop season	早稻 Early rice season	晚稻 Late rice season	轮作周年 Rotation cycle	冬季作物 Winter crop season	双季稻 Double cropping rice season	轮作周年 Rotation cycle	冬季作物 Winter crop season	双季稻 Double cropping rice season	轮作周年 Rotation cycle
冬闲-双季稻	—	10 408.95	16 939.15	27 348.10	—	16 600.00	16 600.00	—	10 748.10	10 748.10
马铃薯-双季稻	34 140.91	10 150.49	17 026.26	61 317.66	17 273.10	16 600.00	33 873.10	16 867.81	10 576.75	27 444.56
黑麦草-双季稻	4 887.73	11 215.66	16 527.35	32 630.74	716.20	16 600.00	17 316.20	4 171.53	11 143.02	15 314.55
紫云英-双季稻	—	10 557.76	18 934.79	29 492.55	1 115.10	16 600.00	17 715.10	-1 115.10	12 892.55	11 777.45
油菜-双季稻	5 550.00	10 573.43	17 232.16	33 355.59	1 018.56	16 600.00	17 618.56	4 531.44	11 205.59	15 737.03

后也增加后茬双季稻生育期间温室气体 CH_4 和 N_2O 的总排放量,紫云英-双季稻模式较冬闲-双季稻模式增加了稻田综合温室效应。因此,亟需兼顾生态环境效益开展对紫云英-双季稻模式的综合效益评价探讨和研究。

菜籽油是国内自产的第一大食用植物油,在国内食用油市场具有不可替代的重要地位。我国长江流域是双季稻的主产区,也是冬油菜主产区,油菜-双季稻模式是该区重要的三熟制模式。本研究结果表明:油菜-双季稻模式经济效益为低投入中产出型;NPK养分资源利用率优于紫云英-双季稻模式和马铃薯-双季稻模式。前期长期定位试验结果^[1]也表明:稻田冬种油菜有益于晚稻产量稳定性和可持续性的提高。油菜秸秆还田能改善土壤肥力和增加水稻产量^[22],油菜-双季稻模式中油菜籽收获后油菜秸秆还田在湖南大田生产中也已被实践和推广。本研究在晚稻田套播油菜,大田生产上会影响晚稻机械化收割。随着农村劳动力的减少和水稻生产的全程机械化,需要选育、选用迟播早熟油菜品种以解决湖南油菜-双季稻模式前后茬的时间矛盾;同时也要推广油菜轻简化生产技术,以提高农民生产效益。虽然冬闲田种植油菜的经济效益没有马铃薯高,但油菜开花能促进农村观光,产生的间接经济效益不容忽视。在农业供给侧改革和市场消费理念触动下,也需要开展“菜用”油菜(油菜苔)或饲用油菜(双低油菜)与双季稻轮作的相关研究。

总之,将冬季作物纳入到双季稻的种植体系中,开发冬闲稻田,大力发展冬季农业,不仅可保障粮食安全、促进农民增收,而且使冬季作物-双季稻轮作种植模式资源得到优化配置,有望在稻作区扶贫攻坚和乡村振兴国家战略中发挥重要作用。

4 结论

冬闲-双季稻、马铃薯-双季稻、黑麦草-双季稻、紫云英-双季稻及油菜-双季稻5种轮作模式相比较,马铃薯-双季稻模式光热资源利用率高、经济效益好,适合在湖南双季稻区推广,可成为增加农民收入的一种方式。

参考文献:

- [1] 张帆. 冬季作物-双季稻轮作种植模式氮、磷、钾养分循环与产量可持续性特征[J]. 中国生态农业学报, 2019, 27(5): 705-716. ZHANG Fan. Nitrogen, phosphorus and potassium cycling and sustainability of

- rice yield in a winter crop-double cropping rice rotation system[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(5): 705-716.
- [2] 张帆, 黄凤球, 肖小平, 等. 冬季作物对稻田土壤微生物量碳、氮和微生物熵的短期影响[J]. 生态学报, 2009, 29(2): 734-739. ZHANG Fan, HUANG Feng-qiu, XIAO Xiao-ping, et al. Short-term influences of winter crops on microbial biomass carbon, microbial biomass nitrogen and C_{mic} -to- C_{org} in a paddy soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(2): 734-739.
- [3] 王丽宏, 曾昭海, 杨光立, 等. 前茬冬季覆盖作物对稻田土壤的生物特征影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(1): 164-167. WANG Li-hong, ZENG Zhao-hai, YANG Guang-li, et al. Effects of former stubble winter cover crop on microbial characteristics in paddy soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(1): 164-167.
- [4] 杨曾平, 高菊生, 郑圣先, 等. 长期冬种绿肥对红壤性水稻土微生物特性及酶活性的影响[J]. 土壤, 2011, 43(4): 576-583. YANG Zeng-ping, GAO Ju-sheng, ZHENG Sheng-xian, et al. Effects of long-term winter planting-green manure on microbial properties and enzyme activities in reddish paddy soil[J]. *Soils*, 2011, 43(4): 576-583.
- [5] 刘春增, 常单娜, 李本银, 等. 种植翻压紫云英配施化肥对稻田土壤活性有机碳氮的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(3): 657-669. LIU Chun-zeng, CHANG Dan-na, LI Ben-yin, et al. Effects of planting and incorporation of Chinese milk vetch coupled with application of chemical fertilizer on active organic carbon and nitrogen in paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(3): 657-669.
- [6] 周春火, 潘晓华, 吴建富, 等. 不同复种方式对水稻产量和土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 304-311. ZHOU Chun-huo, PAN Xiao-hua, WU Jian-fu, et al. Effects of different cropping patterns on crop yields and soil fertility[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(2): 304-311.
- [7] 唐海明, 程凯凯, 肖小平, 等. 不同冬季覆盖作物对双季稻田土壤有机碳的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(2): 465-473. TANG Hai-ming, CHENG Kai-kai, XIAO Xiao-ping, et al. Effects of different winter cover crops on soil organic carbon in a double cropping rice paddy field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(2): 465-473.
- [8] 唐海明, 汤文光, 帅细强, 等. 不同冬季覆盖作物对稻田甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(12): 3191-3199. TANG Hai-ming, TANG Wen-guang, SHUAI Xi-qiang, et al. Effects of winter cover crop on methane and nitrous oxide emission from paddy field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(12): 3191-3199.
- [9] 王丽宏, 胡跃高, 杨光立, 等. 南方冬季覆盖作物的碳蓄积及其对水稻产量的影响[J]. 生态环境, 2006, 15(3): 616-619. WANG Li-hong, HU Yue-gao, YANG Guang-li, et al. Carbon fixation by winter cover crops in south China and the effects of WCC on rice yields[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(3): 616-619.
- [10] 于天一, 逢焕成, 任天志, 等. 冬季作物种植对双季稻根系酶活性及形态指标的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(24): 7894-7904. YU Tian-yi, PANG Huan-cheng, REN Tian-zhi, et al. Effects of winter crops on enzyme activity and morphological characteristics of root in subsequent rice crops[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(24): 7894-7904.

- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 106-163, 308-315, 421-428. LU Ru-kun. Analytical methods for agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 106-163, 308-315, 421-428.
- [12] 骆世明. 农业生态学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001. LUO Shi-ming. Agroecology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2001.
- [13] 李淑娅, 田少阳, 袁国印, 等. 长江中游不同水稻种植模式产量及资源利用效率的比较研究[J]. 作物学报, 2015, 41(10): 1537-1547. LI Shu-ya, TIAN Shao-yang, YUAN Guo-yin, et al. Comparison of yield and resource utilization efficiency among different maize and rice cropping systems in middle reaches of Yangtze River[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(10): 1537-1547.
- [14] 于静, 熊兴耀, 高玉林, 等. 中国马铃薯不同产区氮肥利用率的比较分析[J]. 中国蔬菜, 2019(7): 43-50. YU Jing, XIONG Xing-yao, GAO Yu-lin, et al. Comparative analysis of nitrogen use efficiency in different potato production areas of China[J]. *China Vegetables*, 2019(7): 43-50.
- [15] 李彦军, 耿伟, 史超, 等. 马铃薯种质资源现状及发展对策[J]. 中国果菜, 2019, 39(8): 61-67. LI Yan-jun, GENG Wei, SHI Chao, et al. Current situation and development countermeasures of potato germplasm resources[J]. *China Fruit & Vegetable*, 2019, 39(8): 61-67.
- [16] 王丽宏, 杨光立, 曾昭海, 等. 稻田冬种黑麦草对饲草生产和土壤微生物效应的影响[J]. 草业学报, 2008, 17(2): 157-161. WANG Li-hong, YANG Guang-li, ZENG Zhao-hai, et al. Effects of winter ryegrass growth for forages production and soil microbial activity in six paddy soils[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2008, 17(2): 157-161.
- [17] 朱波, 胡跃高, 肖小平, 等. 冬种黑麦草对六种稻田土壤微生物量碳、氮的影响[J]. 中国农学通报, 2009, 25(3): 225-229. ZHU Bo, HU Yue-gao, XIAO Xiao-ping, et al. Effects of ryegrass on soil microbial biomass C, N in six different paddy soils[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(3): 225-229.
- [18] 赵晓萌, 刘婧娜, 易丽霞, 等. 绿肥还田对双季稻根际土壤产甲烷古菌群落结构的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(5): 698-707. ZHAO Xiao-ming, LIU Jing-na, YI Li-xia, et al. Community structure of methanogens from double-rice rhizosphere soil as affected by green manure incorporation[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(5): 698-707.
- [19] 吕玉虎, 郭晓彦, 李本银, 等. 翻压不同量紫云英配施减量化肥对土壤肥力和水稻产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(5): 94-98. LÜ Yu-hu, GUO Xiao-yan, LI Ben-yin, et al. Effects of the incorporation of various amounts of Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) and reducing chemical fertilizer on soil fertility and rice yield[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017(5): 94-98.
- [20] 周国朋, 谢志坚, 曹卫东, 等. 稻草高茬-紫云英联合还田改善土壤肥力提高作物产量[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 157-163. ZHOU Guo-peng, XIE Zhi-jian, CAO Wei-dong, et al. Co-incorporation of high rice stubble and Chinese milk vetch improving soil fertility and yield of rice[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(23): 157-163.
- [21] 周兴, 廖育林, 鲁艳红, 等. 减量施肥下紫云英与稻草协同利用对双季稻产量和经济效益的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2017, 43(5): 469-474. ZHOU Xing, LIAO Yu-lin, LU Yan-hong, et al. Effects of Chinese milk vetch and rice straw synergistic dispatching on grain yield and economic benefit of double cropping rice system under fertilizer reduction[J]. *Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences)*, 2017, 43(5): 469-474.
- [22] 胡宏祥, 程燕, 马友华, 等. 油菜秸秆还田腐解变化特征及其培肥土壤的作用[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(3): 297-302. HU Hong-xiang, CHENG Yan, MA You-hua, et al. Decomposition characteristics of returned rapeseed straw in soil and effects on soil fertility[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(3): 297-302.