

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.180006

杨滨娟, 孙丹平, 张颖睿, 黄国勤. 长江中游地区水旱复种轮作模式资源利用率比较研究[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(8): 1197-1205

YANG B J, SUN D P, ZHANG Y R, HUANG G Q. Comparison of resources use efficiencies among paddy-upland multi-crop rotation systems in the middle reaches of Yangtze River[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(8): 1197-1205

长江中游地区水旱复种轮作模式资源利用率比较研究*

杨滨娟, 孙丹平, 张颖睿, 黄国勤**

(江西农业大学生态科学研究中心 南昌 330045)

摘要: 为了实现农田资源高效利用, 维护农业生态良性循环, 优化长江中游地区传统种植模式, 本研究于2013年10月—2015年11月, 以冬闲连作为对照, 分析比较了不同水旱复种轮作模式(冬闲-早稻-晚稻→冬闲-早稻-晚稻、马铃薯-玉米||大豆-晚稻→蔬菜-花生||玉米-晚稻、蔬菜-花生||玉米-晚稻→绿肥-早稻-晚稻、绿肥-早稻-晚稻→油菜-花生-晚稻、油菜-花生-晚稻→马铃薯-玉米||大豆-晚稻)的光、温、水、土资源利用效率。结果表明: 水旱复种轮作模式的冬季、晚季和周年的光能利用率均比冬闲连作处理高, 周年光能利用率两年间分别高8.26%~82.50%和2.63%~121.42%, 其中均以“蔬菜-花生||玉米-晚稻→绿肥-早稻-晚稻”轮作模式最高。水旱复种轮作模式的年有效积温利用率均高于冬闲连作模式, 两年间分别高12.87%~21.26%和11.17%~25.88%, 以“蔬菜-花生||玉米-晚稻→绿肥-早稻-晚稻”轮作模式最佳。两年间水旱复种轮作模式的冬季、晚季和周年的水分利用率均比冬闲连作处理高, 其中周年水分利用率分别高45.36%~83.50%和40.00%~118.75%, 以“马铃薯-玉米||大豆-晚稻→蔬菜-花生||玉米-晚稻”轮作模式的晚季和周年水分利用率最高, “蔬菜-花生||玉米-晚稻→绿肥-早稻-晚稻”模式的冬季水分利用率最高。两年间土地利用效率均以“绿肥-早稻-晚稻”复种模式最高, 平均利用率达96.11%, “蔬菜-花生||玉米-晚稻→绿肥-早稻-晚稻”轮作模式的土地利用效率表现最好。因此, 各水旱复种轮作模式的周年光能利用率、年有效积温利用率、水分利用率和土地利用效率均高于冬闲对照, 其中以“蔬菜-花生||玉米-晚稻→绿肥-早稻-晚稻”和“绿肥-早稻-晚稻→油菜-花生-晚稻”轮作模式表现较好, 适宜在长江中游地区推广应用。

关键词: 长江中游地区; 水旱复种轮作; 种植模式; 光能利用率; 积温利用率; 水分利用率; 土地利用效率
中图分类号: S344; S55 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2018)08-1197-09

Comparison of resources use efficiencies among paddy-upland multi-crop rotation systems in the middle reaches of Yangtze River*

YANG Binjuan, SUN Danping, ZHANG Yingrui, HUANG Guoqin**

(Center for Ecological Science Research, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

Abstract: A field experiment was conducted to search for the possibility of efficient use of farmland resources, maintain virtuous circle of agricultural ecology and optimize traditional planting patterns in the middle reaches of Yangtze River. The use efficiencies of solar radiation, heat, water and land in 5 paddy-upland multi-crop rotation systems (winter fallow-early rice-late rice → winter

* 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ160395)、国家重点研发计划课题(2016YFD0300208)和国家科技支撑计划课题(2012BAD14B14)资助

** 通信作者: 黄国勤, 研究方向为作物学、生态学、农业发展与区域农业、资源环境与可持续发展等。E-mail: hgqjxes@sina.com
杨滨娟, 研究方向为耕作制度与农业生态。E-mail: yangbinjuan27@sina.com

收稿日期: 2018-01-03 接受日期: 2018-03-04

* This study was supported by the Project for Science and Technology Research of Department of Education of Jiangxi Province (GJJ160395), the National Key Research and Development Program of China (2016YFD0300208), and the National Key Technology R&D Program of China (2012BAD14B14).

** Corresponding author, E-mail: hgqjxes@sina.com
Received Jan. 3, 2018; accepted Mar. 4, 2018

fallow-early rice-late rice, potato-maize || soybean-late rice → vegetable-peanut || corn-late rice, vegetable-peanut || corn-late rice → green manure-early rice-late rice, milk vetch-early rice-late rice → rapeseed-peanut-late rice, rapeseed-peanut-late rice → potato-maize || soybean-late rice) with continuous cropping with winter fallow as the control were analyzed. Results showed that solar radiation use efficiency in winter, late season and for the year under paddy-upland multi-cropping rotation patterns was higher than continuous cropping with winter fallow. Annual solar radiation use efficiency was respectively 8.26%–82.50% and 2.63%–121.42% higher than continuous winter fallow during the two years. Vegetable-peanut || corn-late rice → green manure-early rice-late rice pattern had the highest solar radiation use efficiency in winter, spring and in the whole year. Annual effective accumulated temperature utilization rate of paddy-upland multi-cropping rotation patterns was higher than that of continuous cropping with winter fallow, which were respectively 12.87%–21.26% and 11.17%–25.88% higher than continuous cropping with winter fallow during the two years. Vegetable-peanut || corn-late rice → green manure-early rice-late rice pattern was the best among all patterns. Water use efficiency in winter, late season and for the year under paddy-upland multi-cropping rotation patterns was higher than that of continuous cropping with winter fallow, with annual water use efficiencies respectively 45.36%–83.50% and 40.00%–118.75% higher during the two years. Potato-maize || soybean-late rice → vegetable-peanut || corn-late rice pattern was best in late season and annual year. Vegetable-peanut || corn-late rice → green manure-early rice-late rice was the highest in winter. Land use efficiency of green manure-early rice-late rice rotation pattern was the highest, with an average utilization rate of 96.11%. Land use efficiency of vegetable-peanut || maize-late rice → green manure-early rice-late rice multi-cropping pattern was the highest. Comprehensive analysis showed that annual solar radiation use efficiency, annual effective accumulated temperature utilization rate, water use efficiency and land use efficiency under paddy-upland multi-cropping rotation patterns were higher than that under continuous cropping with winter fallow. Vegetable-peanut || corn-late rice → green manure-early rice-late rice, and milk vetch-early rice-late rice → rapeseed-peanut-late rice performed better and thus suitable for promotion in the middle reaches of Yangtze River.

Keywords: Middle reaches of Yangtze River; Paddy-upland multiple cropping rotation systems; Planting patterns; Solar radiation use efficiency; Accumulated temperature utilization rate; Water use efficiency; Land use efficiency

江西省是中国水稻(*Oryza sativa*)生产大省和双季稻主产区,地处江南丘陵和长江中下游平原结合部,光、热、水资源配合良好,具有适宜双季稻生长的良好气候条件^[1]。江西省水稻常年种植面积 320 万 hm^2 , 约占全国水稻种植面积的 10%, 是我国双季稻种植比例最高的省份,水稻总产 1 800 万 t 以上,居全国第 2 位,人均稻谷占有量居全国第 1 位^[2],有“江南粮仓”的美誉^[3],对我国水稻生产乃至维护全国粮食安全具有重要的现实意义。但目前长江中游地区普遍存在冬闲田面积大、种植结构单一、化肥过量与利用效率低、光热资源潜力发挥不足等现实问题,不但造成光、热、水、温资源的浪费,还导致土壤板结、酸化、病虫害抗(耐)药性上升、环境污染和生态平衡破坏等一系列问题,严重威胁着我国农产品质量和农业生态环境安全^[4]。因此,增加农田复种指数、合理利用农药化肥、提高肥料利用率是我国农业现代化的重心环节。众多研究表明^[5-12],冬季绿肥根系能够疏松土壤,活化矿质元素,翻压还田后,能够提高土壤肥力和肥料利用率,将农作物生长过程中需要的化肥或氮肥施用量较常规施肥减少 15%–40%,从而对农田保护和农业生产可持续发展具有十分重要的意义。前人研究表明,复种轮作模式比冬闲连作模式能显著提高资源利用率^[13]。王昆^[14]研究表明,“水稻-玉米(*Zea mays*)”轮作模式的周年资

源利用率效果较好,周年温度、降水生产效率和土地利用效率分别为 $6.63 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$ 、 $4.54 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$ 和 68.8%,比其他模式分别提高 4.7%~8.3%、6.6%~26.1% 和 1.21%~21.2%。陈阜等^[15]研究表明,发展多熟种植能在时间、空间及土地上集约高效地利用光、温、水等自然资源。何世龙等^[16]研究表明,玉米与马铃薯(*Solanumtuberosum*)间套作,改善了群体内部和下部的受光状况,提高了光能利用率。李立娟等^[17]研究表明,与传统冬小麦(*Triticum aestivum*)-夏玉米相比,黄淮海区双季玉米周年光、温生产效率平均增加 26.1%和 6.5%。前人对于农田资源利用率的研究较多,但对于长江中游地区不同水旱复种轮作模式资源利用率的比较研究鲜有报道。本研究旨在完善稻田种植结构,积极开发新的稻田种植模式,将冬季农业及水旱复种轮作体系应用到实际农田生产中,通过分析长江中游地区不同水旱复种轮作模式的资源利用率,为维持农田的地力、维护粮食安全、农业生态安全和推动南方稻区农业可持续发展提供重要的理论和实践参考价值。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2013 年 10 月—2015 年 11 月,在江西省余江县邓家埠水稻原种场试验田进行。试验地属于亚热

带湿润季风气候, 四季分明, 平均年降雨 1 788.8 mm, 年平均气温 17.6 °C, 年太阳辐射总量 454.27 kJ·cm⁻², 年无霜期平均 258 d。试验地水利资源丰富, 灌溉布局合理, 田地平整, 是水稻良种繁殖的理想之地, 多为泥沙淤积土, 少数为红壤土, 土质肥沃, 偏微酸性。试验前 0~20 cm 土层土壤肥力: 有机质 34.65 g·kg⁻¹, 全氮 1.85 g·kg⁻¹, 碱解氮 151.0 mg·kg⁻¹, 有效磷 59.76 mg·kg⁻¹,

速效钾 38.00 mg·kg⁻¹; pH 5.59。

1.2 试验设计

根据试验要求, 设置 5 个处理, 3 次重复, 共 15 个小区, 小区面积 63.75 m² (8.5 m×7.5 m), 小区间田埂、水沟和环沟的宽度分别为 0.5 m、1 m 和 0.5 m, 按随机区组排列。对照处理 A 为“冬闲-早稻-晚稻”连作种植模式, 其他 4 个处理进行两年复种轮作(表 1)。

表 1 试验设计
Table 1 Treatments description

| 处理 Treatment | 第 1 年度(2013 年冬—2014 年秋) The first year (winter 2013—autumn 2014) | 第 2 年度(2014 年冬—2015 年秋) The second year (winter 2014—autumn 2015) | 备注 Note |
|-----------------|---|--|---|
| A(CK) | 冬闲-早稻-晚稻 Winter fallow-early rice-late rice | 冬闲-早稻-晚稻 Winter fallow-early rice-late rice | 连作冬闲系统 Continuous cropping with winter fallow system |
| B | 马铃薯-玉米 大豆-晚稻 Potato-maize soybean-late rice | 蔬菜-花生 玉米-晚稻 Vegetable-peanut corn-late rice | 水旱复种轮作系统 Paddy-upland multiple cropping rotation systems |
| C | 蔬菜-花生 玉米-晚稻 Vegetable-peanut corn-late rice | 绿肥-早稻-晚稻 Green manure-early rice-late rice | 水旱复种轮作系统 Paddy-upland multiple cropping rotation systems |
| D | 绿肥-早稻-晚稻 Green manure-early rice-late rice | 油菜-花生-晚稻 Rapeseed-peanut-late rice | 水旱复种轮作系统 Paddy-upland multiple cropping rotation systems |
| E | 油菜-花生-晚稻 Rapeseed-peanut-late rice | 马铃薯-玉米 大豆-晚稻 Potato-maize soybean-late rice | 水旱复种轮作系统 Paddy-upland multiple cropping rotation systems |

“-”表示接茬, “||”表示间作。“-” represents continuous planting; “||” represents intercropping.

供试作物: 2014 年和 2015 年早稻品种均为‘中嘉早 17’, 属中熟偏迟粳型早稻品种; 晚稻品种均为‘农香 98’, 为粳型常规水稻。两年冬季绿肥(紫云英)品种为‘余江大叶籽’, 油菜、马铃薯、蔬菜(白菜)、玉米、大豆和花生的品种分别为‘泮油 737’、‘中薯 7 号’、‘黑叶四月慢’、‘赣新花糯’、‘台湾 292 糯’和‘粤油 551 糯’。各处理的旱作物种植规格均为每穴 3 粒, 定苗后留 1 株, 花生、玉米和大豆的行株距分别为 30 cm×25 cm、60 cm×33 cm 和 40 cm×25 cm; 玉米间作大豆和玉米间作花生的行比均为 2:3, 玉米 || 大豆的间距 40 cm, 玉米 || 花生的间距为 35 cm。

1.3 田间管理措施

2014 年早稻于 3 月 26 日播种, 4 月 23 日移栽, 行株距为 20 cm×14 cm, 7 月 21 日收获; 晚稻于 6 月 28 日播种, 7 月 29 日移栽, 行株距为 20 cm×17 cm, 11 月 5 日收获。2015 年早稻于 3 月 26 日播种, 4 月 25 日移栽, 行株距为 20 cm×14 cm, 7 月 12 日收获; 晚稻于 6 月 25 日播种, 7 月 25 日移栽, 行株距为 20 cm×17 cm, 11 月 10 日收获。水稻田间管理措施: 秧苗 3 叶期要保持 3~4 cm 深的水, 加快分蘖生长; 5~6 叶期轻晒田, 7~8 叶期重晒田, 控制无效分蘖。孕穗期至抽穗期田间保持浅水层, 灌浆结实期间歇灌溉, 干湿交替, 养根保叶, 收割前一周断水。

2013 年紫云英于 10 月 5 日撒播, 油菜和蔬菜于

11 月 24 日移栽, 12 月 2 日种植马铃薯, 2014 年 4 月 10 日冬季作物测产; 2014 年 4 月 15 日种植春季旱作物单作花生、花生间作玉米、玉米间作大豆等, 2015 年 7 月 21 日收获。2014 年紫云英于 10 月 7 日撒播, 油菜、蔬菜和马铃薯于 11 月 16 日移栽, 2015 年 4 月 15 日冬季作物测产; 2015 年 4 月 25 日种植春季旱作物单作花生、花生间作玉米、玉米间作大豆等, 2015 年 7 月 15 日收获。冬季作物田间管理措施: 紫云英和油菜测产后均作绿肥翻压还田, 翻耕前喷施除草剂“稻杰”, 紫云英和油菜播种量分别为 37.5 kg·hm⁻² 和 7.5 kg·hm⁻²。紫云英播种后保持 2 d 潜水层, 促发芽, 马铃薯采用稻草覆盖免耕栽培技术种植, 蔬菜撒播, 油菜移栽。

化肥施用主要有钙镁磷肥(P₂O₅ 12%)、氯化钾(K₂O 60%)和尿素(N 46%)。油菜和蔬菜施钙镁磷肥 150 kg·hm⁻² 作基肥, 氯化钾 250 kg·hm⁻²、尿素 80 kg·hm⁻² 作追肥; 紫云英不施肥; 马铃薯施钙镁磷肥 375 kg·hm⁻², 氯化钾 80 kg·hm⁻², 尿素 80 kg·hm⁻², 用量以全生育期用量的 2/3 作基肥, 1/3 作追肥; 玉米施尿素 375 kg·hm⁻², 过磷酸钙 225 kg·hm⁻², 氯化钾 300 kg·hm⁻², 施肥比例为 N:P₂O₅:K₂O=1:0.6:0.8, 磷肥作为基肥, 钾肥采用苗肥: 穗肥=2:1, 氮肥采用基肥: 苗肥: 穗肥=2:3:5 施用; 大豆和花生施钾肥 100 kg·hm⁻², 按基肥: 花肥=1:1, 钙镁磷肥 250 kg·hm⁻²、尿素 100 kg·hm⁻², 按基肥: 花肥=2:3

施用;早稻施肥为钙镁磷肥 500 kg·hm⁻²、尿素 320 kg·hm⁻² 和氯化钾 108.3 kg·hm⁻²,以基肥为主,早施追肥,适增磷、钾肥;晚稻施肥为钙镁磷肥 333 kg·hm⁻²、尿素 173.9 kg·hm⁻² 和氯化钾 416.7 kg·hm⁻²,其中 80%作基肥,20%作穗肥,后期少施氮肥。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 气象因子监测

所用气象数据由江西省气象台提供。利用生成的日值气象资料,计算周年和不同作物季的总辐射、有效积温和降雨量。

1.4.2 生物量测定

于水稻成熟期取样调查早稻干物重积累量,每小区 5 丛,4 次重复,叶片、茎鞘和穗(抽穗后)分开,105 °C 杀青 30 min,80 °C 下烘干至恒重,测定干物质重。

1.4.3 产量测定

于水稻成熟期,在各小区普查 50 蔸作为有效穗计算的依据,然后用平均数法在各小区中随机选取有代表性的水稻植株 5 蔸,作为考种材料,调查其产量构成,即每穗粒数、结实率及千粒重。并于成熟期取样测产,小区测产面积为 63.75 m²,脱粒并晒干,清除杂质后,测定总重和含水量,按照 14% 含水量折算水稻产量。

1.5 数据统计方法

本研究主要考察稻田水旱复种轮作模式的光能利用率、年有效积温利用率、水分利用率和土地利用效率等资源利用率。

1)光能利用率。光能利用率计算方法见式(1)^[18]:

$$E(\%) = \frac{\sum(h \times M)}{\sum S} \times 100\% \quad (1)$$

式中: E 为光能利用率; M 为单位面积作物产量的干重; h 为单位干物质燃烧产生的热量; S 为全年太阳辐射能,其中太阳 1 年辐射能量在研究区为 4 542.7 MJ·m⁻²·a⁻¹。

2)年有效积温利用率。作物从种到收的日平均气温总和称为积温,日平均气温超过 10 °C 的部分相加称为有效积温。

$$\text{年有效积温利用率}(\%) = \frac{\text{作物生育期间有效积温}}{\text{全年有效积温}} \quad (2)$$

3)水分利用率。水分利用率反映降水量对作物产量形成的贡献,采用产量水平的水分利用率计算^[19-20],研究区年均降雨量为 1 788.8 mm,冬季作物与旱作物无灌溉,水稻进行间歇灌溉与晒田相结合。

$$\text{水分利用率} = \frac{\text{干物质产量}}{\text{总耗水量}} \quad (3)$$

(耗水量=降水量+灌溉量)

4)土地利用效率

土地利用效率(%)=周年土地利用期(d)/365×100% (4)
式中:土地利用期(d)用作物大田生育期表示。

1.6 数据处理和评价

采用 Microsoft Excel 2010 处理数据,用 SPSS 17.0 系统软件进行数据处理和统计分析。

2 结果与分析

2.1 稻田水旱复种轮作对光能利用率的影响

光能利用率是单位面积土地上作物光合作用所合成的有机物中贮存的化学能占照射在该土地面积上的太阳光能量的百分数,作物光能利用率的提高一定程度上可以提高作物产量^[21]。热值是评价植物太阳能累计和化学能转化效率的重要指标^[20]。作物单位干物质热量参考表 2^[22-23],作物秸秆能量~籽粒能量^[24]。

表 2 稻田水旱复种轮作系统中各作物单位干物质热量
Table 2 Heat of per unit dry matter of crops of the tested paddy-upland multiple cropping rotation systems

| 农作物 Crop | 热值 Heat value (10 ³ cal·kg ⁻¹) | 单位干物质热量 Heat of per unit dry matter (kJ·kg ⁻¹) |
|-----------------------|---|--|
| 稻谷 Rice | 3 700.0 | 15 466.0 |
| 稻草 Straw | 3 360.0 | 14 044.8 |
| 蔬菜(干) Vegetable (dry) | 3 918.0 | 16 377.2 |
| 花生 Peanut | 5 600.0 | 23 408.0 |
| 玉米籽实 Grains of maize | 3 950.0 | 16 511.0 |
| 玉米秸秆 Straw of maize | 3 470.0 | 14 504.6 |
| 紫云英 Milk vetch | 4 785.0 | 20 000.0 |
| 油菜籽 Rapeseed | 6 300.0 | 26 334.0 |
| 油菜秆 Rape straw | 3 380.0 | 14 128.4 |
| 马铃薯(鲜) Potato (fresh) | 890.0 | 3 720.2 |
| 大豆 Soybean | 3 620.0 | 15 131.6 |

由表 3 可知,2014 年和 2015 年各水旱复种轮作模式的冬季、晚季和周年的光能利用率均比冬闲连作处理高,其中周年光能利用率分别高 8.26%~82.50%和 2.63%~121.42%,其中均以“蔬菜-花生 || 玉米-晚稻”模式最高。由光能利用率的复种均值可知,“油菜-花生-晚稻”模式的冬季光能利用率最高,“蔬菜-花生 || 玉米-晚稻”的春季和周年光能利用率最高,而“绿肥-早稻-晚稻”模式的晚季光能利用率最高。综合两年轮作模式的光能利用率平均值可知,“蔬菜-花生 || 玉米-晚稻→绿肥-早稻-晚稻”轮作模式的冬季、春季和周年光能利用率均最高,晚季最高的是“马铃薯-玉米 大豆-晚稻 蔬菜-花生 玉米-晚稻”轮作模式。

2.2 稻田水旱复种轮作对年有效积温利用率的影响

表 4 反映了稻田水旱复种轮作对年有效积温利用率的影响。数据来源于 2014 年和 2015 年余江县日平

表 3 稻田不同水旱复种轮作对光能利用率的影响
Table 3 Solar radiation use efficiencies of different paddy-upland multiple cropping rotation systems %

| 试验 Experiment | 种植模式 Cropping pattern | 有效积温 Effective accumulated temperature (°C) | | | | 年有效积温利用率 Utilization rate of annual effective accumulated temperature (%) |
|---|---|---|---------------------|--------------------|--------------|--|
| | | 冬季 Winter season | 春季 Spring season | 晚季 Later season | 周年 Annual | |
| 2014 年 In 2014 | 冬闲-早稻-晚稻 Winter fallow-early rice-late rice | 0.000 | 0.350 | 0.473 | 0.823 | |
| | 马铃薯-玉米 大豆-晚稻 Potato-maize soybean-late rice | 0.131 | 0.218 | 0.542 | 0.891 | |
| | 蔬菜-花生 玉米-晚稻 Vegetable-peanut corn-late rice | 0.692 | 0.332 | 0.478 | 1.502 | |
| | 绿肥-早稻-晚稻 Green manure-early rice-late rice | 0.361 | 0.399 | 0.539 | 1.299 | |
| | 油菜-花生-晚稻 Rapeseed-peanut-late rice | 0.835 | 0.180 | 0.484 | 1.498 | |
| 2015 年 In 2015 | 冬闲-早稻-晚稻 Winter fallow-early rice-late rice | 0.000 | 0.324 | 0.437 | 0.761 | |
| | 蔬菜-花生 玉米-晚稻 Vegetable-peanut corn-late rice | 0.760 | 0.440 | 0.484 | 1.685 | |
| | 绿肥-早稻-晚稻 Green manure-early rice-late rice | 0.449 | 0.343 | 0.529 | 1.321 | |
| | 油菜-花生-晚稻 Rapeseed-peanut-late rice | 0.771 | 0.202 | 0.453 | 1.427 | |
| | 马铃薯-玉米 大豆-晚稻 Potato-maize soybean-late rice | 0.114 | 0.213 | 0.453 | 0.781 | |
| 复种均值 Mean of multiple cropping | 冬闲-早稻-晚稻 Winter fallow-early rice-late rice | 0.000 | 0.337 | 0.455 | 0.792 | |
| | 蔬菜-花生 玉米-晚稻 Vegetable-peanut corn-late rice | 0.726 | 0.386 | 0.481 | 1.593 | |
| | 绿肥-早稻-晚稻 Green manure-early rice-late rice | 0.405 | 0.371 | 0.534 | 1.310 | |
| | 油菜-花生-晚稻 Rapeseed-peanut-late rice | 0.803 | 0.191 | 0.468 | 1.463 | |
| | 马铃薯-玉米 大豆-晚稻 Potato-maize soybean-late rice | 0.123 | 0.216 | 0.498 | 0.836 | |
| 轮作均值 Mean of rotation | 冬闲-早稻-晚稻→冬闲-早稻-晚稻 | 0.000 | 0.337 | 0.455 | 0.792 | |
| | Winter fallow-early rice-late rice→winter fallow-early rice-late rice | | | | | |
| | 马铃薯-玉米 大豆-晚稻→蔬菜-花生 玉米-晚稻 | 0.446 | 0.329 | 0.513 | 1.288 | |
| | Potato-maize soybean-late rice→vegetable-peanut corn-late rice | | | | | |
| | 蔬菜-花生 玉米-晚稻→绿肥-早稻-晚稻 | 0.571 | 0.338 | 0.503 | 1.412 | |
| | Vegetable-peanut corn-late rice→green manure-early rice-late rice | | | | | |
| | 绿肥-早稻-晚稻→油菜-花生-晚稻 | 0.566 | 0.301 | 0.496 | 1.363 | |
| Green manure-early rice-late rice→rapeseed-peanut-late rice | | | | | | |
| 油菜-花生-晚稻→马铃薯-玉米 大豆-晚稻 | 0.474 | 0.197 | 0.468 | 1.139 | | |
| Rapeseed-peanut-late rice→potato-maize soybean-late rice | | | | | | |

表 4 稻田水旱复种轮作对年有效积温利用率的影响
Table 4 Utilization rates of annual effective accumulated temperature of different paddy-upland multiple cropping rotation systems

| 试验 Experiment | 种植模式 Cropping pattern | 有效积温 Effective accumulated temperature (°C) | | | | 年有效积温利用率 Utilization rate of annual effective accumulated temperature (%) |
|---|---|---|---------------------|--------------------|--------------|--|
| | | 冬季 Winter season | 春季 Spring season | 晚季 Later season | 周年 Annual | |
| 2014 年 In 2014 | 冬闲-早稻-晚稻 Winter fallow-early rice-late rice | 0.00 | 1 396.00 | 1 569.00 | 4 022.00 | 73.72 |
| | 马铃薯-玉米 大豆-晚稻 Potato-maize soybean-late rice | 294.00 | 1 483.50 | 1 569.00 | 4 022.00 | 83.20 |
| | 蔬菜-花生 玉米-晚稻 Vegetable-peanut corn-late rice | 337.00 | 1 483.50 | 1 569.00 | 4 022.00 | 84.27 |
| | 绿肥-早稻-晚稻 Green manure-early rice-late rice | 630.50 | 1 396.00 | 1 569.00 | 4 022.00 | 89.40 |
| | 油菜-花生-晚稻 Rapeseed-peanut-late rice | 337.00 | 1 483.50 | 1 569.00 | 4 022.00 | 84.27 |
| 2015 年 In 2015 | 冬闲-早稻-晚稻 Winter fallow-early rice-late rice | 0.00 | 1 309.00 | 1 597.00 | 3 913.50 | 74.26 |
| | 蔬菜-花生 玉米-晚稻 Vegetable-peanut corn-late rice | 324.50 | 1 309.00 | 1 597.00 | 3 913.50 | 82.55 |
| | 绿肥-早稻-晚稻 Green manure-early rice-late rice | 752.00 | 1 309.00 | 1 597.00 | 3 913.50 | 93.47 |
| | 油菜-花生-晚稻 Rapeseed-peanut-late rice | 324.50 | 1 309.00 | 1 597.00 | 3 913.50 | 82.55 |
| | 马铃薯-玉米 大豆-晚稻 Potato-maize soybean-late rice | 324.50 | 1 309.00 | 1 597.00 | 3 913.50 | 82.55 |
| 复种均值 Mean of multiple cropping | 冬闲-早稻-晚稻 Winter fallow-early rice-late rice | 0.00 | 1 352.50 | 1 583.00 | 3 967.75 | 73.98 |
| | 蔬菜-花生 玉米-晚稻 Vegetable-peanut corn-late rice | 330.75 | 1 396.25 | 1 583.00 | 3 967.75 | 83.42 |
| | 绿肥-早稻-晚稻 Green manure-early rice-late rice | 691.25 | 1 352.50 | 1 583.00 | 3 967.75 | 91.41 |
| | 油菜-花生-晚稻 Rapeseed-peanut-late rice | 330.75 | 1 396.25 | 1 583.00 | 3 967.75 | 83.42 |
| | 马铃薯-玉米 大豆-晚稻 Potato-maize soybean-late rice | 309.25 | 1 396.25 | 1 583.00 | 3 967.75 | 82.88 |
| 轮作均值 Mean of rotation | 冬闲-早稻-晚稻→冬闲-早稻-晚稻 | 0.00 | 2 705.00 | 3 166.00 | 7 935.50 | 73.98 |
| | Winter Fallow-early rice-late rice→winter fallow-early rice-late rice | | | | | |
| | 马铃薯-玉米 大豆-晚稻→蔬菜-花生 玉米-晚稻 | 618.50 | 2 792.50 | 3 166.00 | 7 935.50 | 82.88 |
| | Potato-maize soybean-late rice→vegetable-peanut corn-late rice | | | | | |
| | 蔬菜-花生 玉米-晚稻→绿肥-早稻-晚稻 | 1 089.00 | 2 792.50 | 3 166.00 | 7 935.50 | 88.81 |
| | Vegetable-peanut corn-late rice→green manure-early rice-late rice | | | | | |
| | 绿肥-早稻-晚稻→油菜-花生-晚稻 | 955.00 | 2 705.00 | 3 166.00 | 7 935.50 | 86.02 |
| Green manure-early rice-late rice→rapeseed-peanut-late rice | | | | | | |
| 油菜-花生-晚稻→马铃薯-玉米 大豆-晚稻 | 661.50 | 2 792.50 | 3 166.00 | 7 935.50 | 83.42 | |
| Rapeseed-peanut-late rice→potato-maize soybean-late rice | | | | | | |

均气温统计,以紫云英撒播开始到晚稻收获为 1 周年计算年有效积温和日有效积温。连续两年稻田水旱复种轮作模式的年有效积温利用率均高于冬闲连作处理,分别高 12.87%~21.26%和 11.17%~25.88%,且以 2015 年“绿肥-早稻-晚稻”复种模式最佳,平均有效积温利用率达 93.47%,轮作模式以“蔬菜-花生||玉米-晚稻→绿肥-早稻-晚稻”最佳,“绿肥-早稻-晚稻→油菜-花生-晚稻”轮作模式次之。由于绿肥在晚稻收获前撒播,与晚稻套种生长,生育期较长,吸收的有效积温较多,使得“绿肥-早稻-晚稻”模式表现较好,从而促进后作作物的生长。

2.3 稻田水旱复种轮作对水分利用率的影响

由表 5 可知,2014 年和 2015 年各水旱复种轮作模式的冬季、晚季和周年水分利用率均比冬闲连作处理高,其中周年水分利用率分别高 45.36%~83.50%和 40.00%~118.75%,其中“蔬菜-花生||玉米-晚稻”复种模式表现较好。综合两年轮作模式的水分利用率平均值可知,除春季以外,各水旱轮作模式的冬季、晚季和周年的水分利用率均高于冬闲连作处理,其中“马铃薯-玉米||大豆-晚稻→蔬菜-花生||玉米-晚稻”模式的晚季和周年水分利用率均达到最高,而冬季水分利用率是“蔬菜-花生||玉米-晚稻→绿肥-早稻-晚稻”模式最高。

表 5 稻田水旱复种轮作对水分利用率的影响

Table 5 Water use efficiencies of different paddy-upland multiple cropping rotation systems

| 试验 Experiment | 种植模式 Cropping pattern | kg·m ⁻³ | | | |
|---|--|---------------------|---------------------|--------------------|--------------|
| | | 冬季 Winter season | 春季 Spring season | 晚季 Later season | 周年 Annual |
| 2014 年 In 2014 | 冬闲-早稻-晚稻 Winter fallow-early rice-late rice | 0.00 | 0.89 | 2.20 | 0.97 |
| | 马铃薯-玉米 大豆-晚稻 Potato-maize soybean-late rice | 2.00 | 0.59 | 2.52 | 1.44 |
| | 蔬菜-花生 玉米-晚稻 Vegetable-peanut corn-late rice | 3.24 | 0.78 | 2.22 | 1.78 |
| | 绿肥-早稻-晚稻 Green manure-early rice-late rice | 1.21 | 1.01 | 2.51 | 1.43 |
| | 油菜-花生-晚稻 Rapeseed-peanut-late rice | 2.43 | 0.37 | 2.25 | 1.41 |
| 2015 年 In 2015 | 冬闲-早稻-晚稻 Winter fallow-early rice-late rice | 0.00 | 0.74 | 1.85 | 0.80 |
| | 蔬菜-花生 玉米-晚稻 Vegetable-peanut corn-late rice | 1.57 | 0.91 | 2.05 | 1.75 |
| | 绿肥-早稻-晚稻 Green manure-early rice-late rice | 1.43 | 0.78 | 2.24 | 1.26 |
| | 油菜-花生-晚稻 Rapeseed-peanut-late rice | 2.04 | 0.37 | 1.92 | 1.19 |
| | 马铃薯-玉米 大豆-晚稻 Potato-maize soybean-late rice | 1.50 | 0.52 | 1.92 | 1.12 |
| 复种均值 Mean of multiple cropping | 冬闲-早稻-晚稻 Winter fallow-early rice-late rice | 0.00 | 0.81 | 2.03 | 0.88 |
| | 蔬菜-花生 玉米-晚稻 Vegetable-peanut corn-late rice | 2.40 | 0.84 | 2.14 | 1.77 |
| | 绿肥-早稻-晚稻 Green manure-early rice-late rice | 1.32 | 0.90 | 2.37 | 1.34 |
| | 油菜-花生-晚稻 Rapeseed-peanut-late rice | 2.24 | 0.37 | 2.08 | 1.30 |
| | 马铃薯-玉米 大豆-晚稻 Potato-maize soybean-late rice | 1.75 | 0.56 | 2.22 | 1.28 |
| 轮作合计 Total of rotation | 冬闲-早稻-晚稻→冬闲-早稻-晚稻 Winter fallow-early rice-late rice→winter fallow-early rice-late rice | 0.00 | 0.81 | 2.03 | 0.88 |
| | 马铃薯-玉米 大豆-晚稻→蔬菜-花生 玉米-晚稻 Potato-maize soybean-late rice→vegetable-peanut corn-late rice | 1.78 | 0.75 | 2.29 | 1.60 |
| | 蔬菜-花生 玉米-晚稻→绿肥-早稻-晚稻 Vegetable-peanut corn-late rice→green manure-early rice-late rice | 2.34 | 0.78 | 2.23 | 1.52 |
| | 绿肥-早稻-晚稻→油菜-花生-晚稻 Green manure-early rice-late rice→rapeseed-peanut-late rice | 1.63 | 0.69 | 2.21 | 1.31 |
| | 油菜-花生-晚稻→马铃薯-玉米 大豆-晚稻 Rapeseed-peanut-late rice→potato-maize soybean-late rice | 1.96 | 0.44 | 2.08 | 1.26 |

2.4 稻田水旱复种轮作对土地利用率的影響

由表 6 可知,2014 年和 2015 年的各水旱复种轮作模式土地利用率均高于冬闲连作处理,且均以“绿肥-早稻-晚稻”复种模式最高,两年平均土地利用率达 96.11%,其次为“蔬菜-花生||玉米-晚稻”和“油菜-花生-晚稻”,平均土地利用率均为 92.64%;“蔬菜-花生||玉米-晚稻→绿肥-早稻-晚稻”轮作模式的土地利用率表现最高,其次为“绿肥-早稻-晚稻→油菜-花生-晚稻”模式。

3 讨论与结论

长江中游地区是我国重要的种植业优势区,该区种植业结构在不断地调整。20 世纪 70 年代起,该区逐渐形成粮经饲初步结合,实现粮(后季稻)、饲(春玉米)、经菜果(冬春间套作)等多元种植,成为该区农作制度向新阶段发展的一个重要标志。目前,农业生产的资源利用效率问题日益成为国内外研究热点。热量资源是影响作物种植制度的一个重要因素,江西省光热资源丰富,成为水旱复种轮作模式

表 6 稻田水旱复种轮作对土地利用率的影响
Table 6 Land use efficiencies of different paddy-upland multiple cropping rotation systems

| 试验 Experiment | 种植模式 Cropping pattern | 土地利用期 Land use period (d) | | | | 土地利用效率 Land use efficiency (%) |
|------------------------------------|--|---------------------------|---------------|--------------|--------|-----------------------------------|
| | | 冬季 | 春季 | 晚季 | 周年 | |
| | | Winter season | Spring season | Later season | Annual | |
| 2014 年 In 2014 | 冬闲-早稻-晚稻 Winter fallow-early rice-late rice | 0 | 89 | 99 | 188 | 52.222 |
| | 马铃薯-玉米 大豆-晚稻 Potato-maize soybean-late rice | 129 | 97 | 99 | 325 | 90.278 |
| | 蔬菜-花生 玉米-晚稻 Vegetable-peanut corn-late rice | 137 | 97 | 99 | 333 | 92.500 |
| | 绿肥-早稻-晚稻 Green manure-early rice-late rice | 156 | 89 | 99 | 344 | 95.556 |
| | 油菜-花生-晚稻 Rapeseed-peanut-late rice | 137 | 97 | 99 | 333 | 92.500 |
| 2015 年 In 2015 | 冬闲-早稻-晚稻 Winter fallow-early rice-late rice | 0 | 78 | 108 | 186 | 51.667 |
| | 蔬菜-花生 玉米-晚稻 Vegetable-peanut corn-late rice | 151 | 75 | 108 | 334 | 92.778 |
| | 绿肥-早稻-晚稻 Green manure-early rice-late rice | 162 | 78 | 108 | 348 | 96.667 |
| | 油菜-花生-晚稻 Rapeseed-peanut-late rice | 151 | 75 | 108 | 334 | 92.778 |
| | 马铃薯-玉米 大豆-晚稻 Potato-maize soybean-late rice | 151 | 75 | 108 | 334 | 92.778 |
| 复种合计 Total of multiple cropping | 冬闲-早稻-晚稻 Winter fallow-early rice-late rice | 0 | 167 | 207 | 374 | 51.233 |
| | 蔬菜-花生 玉米-晚稻 Vegetable-peanut corn-late rice | 288 | 172 | 207 | 667 | 91.370 |
| | 绿肥-早稻-晚稻 Green manure-early rice-late rice | 318 | 167 | 207 | 692 | 94.795 |
| | 油菜-花生-晚稻 Rapeseed-peanut-late rice | 288 | 172 | 207 | 667 | 91.370 |
| | 马铃薯-玉米 大豆-晚稻 Potato-maize soybean-late rice | 280 | 172 | 207 | 659 | 90.274 |
| 轮作合计 Total of rotation | 冬闲-早稻-晚稻→冬闲-早稻-晚稻 Winter fallow-early rice-late rice→winter fallow-early rice-late rice | 0 | 167 | 207 | 374 | 51.233 |
| | 马铃薯-玉米 大豆-晚稻→蔬菜-花生 玉米-晚稻 Potato-maize soybean-late rice→vegetable-peanut corn-late rice | 280 | 172 | 207 | 659 | 90.274 |
| | 蔬菜-花生 玉米-晚稻→绿肥-早稻-晚稻 Vegetable-peanut corn-late rice→green manure-early rice-late rice | 299 | 175 | 207 | 681 | 93.288 |
| | 绿肥-早稻-晚稻→油菜-花生-晚稻 Green manure-early rice-late rice→rapeseed-peanut-late rice | 307 | 164 | 207 | 678 | 92.877 |
| | 油菜-花生-晚稻→马铃薯-玉米 大豆-晚稻 Rapeseed-peanut-late rice→potato-maize soybean-late rice | 288 | 172 | 207 | 667 | 91.370 |

的重要基础^[25]。为此本文针对长江中游不同水旱复种轮作模式的资源利用率展开比较研究。研究表明,水旱复种轮作模式的冬季、晚季和周年的光能利用率均比冬闲连作处理高,其中周年光能利用率两年分别高 8.26%~82.50%和 2.63%~121.42%。李小勇^[24]研究也表明,与传统双季稻模式相比,“春玉米-晚稻”周年土地资源利用率,光、温、水资源生产效率和光能利用率分别提高 9.75%、14.70%、20.40%、12.10%和 19.10%。绿肥种植和水旱轮作对于光能的获取具有一定的优势,目前高产田的光能利用率为 1%~2%,一般低产田只有 0.5%左右,长江中下游地区稻田的光能利用率较低,仅为 1.03%左右^[26]。本研究表明,水旱复种轮作模式的周年光能利用率范围为 0.76%~1.69%,“蔬菜-花生 || 玉米-晚稻→绿肥-早稻-晚稻”轮作模式在光能利用率上优势显著,因而在周年物质生产上具有无可比拟的相对优势。

李淑娅等^[27]研究表明,与双季稻相比,“春玉米-晚稻”和双季玉米积温生产效率分别提高 16.4%和 11.4%。本研究中,与冬闲连作模式相比,水旱复种轮

作模式的年有效积温利用率两年分别高 12.87%~21.26%和 11.17%~25.88%,轮作模式以“蔬菜-花生 || 玉米-晚稻→绿肥-早稻-晚稻”最佳。Alberto 等^[28]研究表明,“玉米-水稻”两年轮作后,玉米水分利用率平均为 1.51 kg·m⁻³,水稻水分利用率平均为 0.59 kg·m⁻³。本研究中 2014 年和 2015 年水旱复种轮作模式的冬季、晚季和周年的水分利用率均比冬闲连作处理高,其中周年水分利用率高出幅度分别为 45.36%~83.50%和 40.00%~118.75%,其中“蔬菜-花生 || 玉米-晚稻”复种模式的周年平均水分利用率最高。

因此,稻田水旱复种轮作模式的周年光能利用率、年有效积温利用率、水分利用率和土地利用效率均高于冬闲连作模式,其中以“蔬菜-花生 || 玉米-晚稻→绿肥-早稻-晚稻”和“绿肥-早稻-晚稻→油菜-花生-晚稻”轮作模式表现较好,适宜在长江中游地区推广应用。但稻田水旱复种轮作模式单纯从光、温、水、土这几种自然资源利用的角度,还不足以说明谁好谁坏,尤其是种植作物多,使投入增加。因此,化肥、农药增加对于土地的压力和环境影响是否加

大, 需要进一步研究和探讨。

参考文献 References

- [1] 陈波, 周年兵, 郭保卫, 等. 江西双季晚稻不同纬度产量、生育期及温光资源利用的差异[J]. 中国农业科学, 2017, 50(8): 1403-1415
CHEN B, ZHOU N B, GUO B W, et al. Differences of double-cropping late rice in yield, growth stage and utilization of temperature and illumination in different latitudes of Jiangxi Province[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(8): 1403-1415
- [2] 欧阳林娟, 陈小荣, 傅军如, 等. 关于发展江西水稻种子企业的对策与建议[J]. 中国稻米, 2011, 17(6): 28-30
OUYANG L J, CHEN X R, FU J R, et al. Countermeasures and suggestions on developing rice seed enterprises in Jiangxi[J]. China Rice, 2011, 17(6): 28-30
- [3] 石庆华, 潘晓华. 双季水稻生产技术问答[M]. 南昌: 江西科学技术出版社, 2010: 6
SHI Q H, PAN X H. Technical Questions and Answers on Double-Season Rice Production[M]. Nanchang: Jiangxi Science & Technology Press, 2010: 6
- [4] 侯方舟, 屠乃美, 何康, 等. 南方双季稻区冬种绿肥对土壤质量的影响研究进展[J]. 作物研究, 2015, 29(6): 682-686
HOU F Z, TU N M, HE K, et al. Research progress in the effect of winter planting-green manure on double cropping rice system of south[J]. Crop Research, 2015, 29(6): 682-686
- [5] EDMEADES D C. The long-term effects of manures and fertilizers on soil productivity and quality: A review[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2003, 66(2): 165-180
- [6] JAMA B, PALM C A, BURESH R J, et al. *Tithonia diversifolia* as a green manure for soil fertility improvement in western Kenya: A review[J]. Agroforestry Systems, 2000, 49(2): 201-221
- [7] 李成亮, 孔宏敏, 何园球. 施肥结构对旱地红壤有机质和物理性质的影响[J]. 水土保持学报, 2004, 18(6): 116-119
LI C L, KONG H M, HE Y Q. Effect of fertilization structures on soil organic matter and physical properties of upland field in red soil area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(6): 116-119
- [8] 焦彬, 顾荣申, 张学上. 中国绿肥[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 50-65
JIAO B, GU R S, ZHANG X S. Green Manure in China[M]. Beijing: Agriculture Press, 1986: 50-65
- [9] 王琴, 潘兹亮, 吕玉虎, 等. 紫云英绿肥对土壤养分的影响[J]. 草原与草坪, 2011, 31(1): 58-60
WANG Q, PAN Z L, LYU Y H, et al. Effects of ploughing down *Astragalus sinicus* on soil nutrients[J]. Grassland and Turf, 2011, 31(1): 58-60
- [10] 王允青, 张祥明, 刘英, 等. 施用紫云英对水稻产量和土壤养分的影响[J]. 安徽农业科学, 2004, 32(4): 699-700
WANG Y Q, ZHANG X M, LIU Y, et al. Effect of Chinese milk vetch on rice yield and soil nutrients[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2004, 32(4): 699-700
- [11] 杨曾平, 徐明岗, 聂军, 等. 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[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 92-97
YANG Z P, XU M G, NIE J, et al. Effect of long-term winter planting-green manure on reddish paddy soil quality and its comprehensive evaluation under double-rice cropping system[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(3): 92-97
- [12] 郭周云, 尹小怀, 王劲松, 等. 翻压等量绿肥和化肥减量对红壤旱地烤烟产量产值的影响[J]. 云南农业大学学报, 2010, 25(6): 811-816
GUO Y Z, YIN X H, WANG J S, et al. Effects of equal quantity green manure application and different fertilizer rates on yield and output value of flue-cured tobacco in red soil of upland in Yunnan[J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2010, 25(6): 811-816
- [13] 唐劲驰, MBOREHA I A, 余丽娜, 等. 大豆根构型在玉米/大豆间作系统中的营养作用[J]. 中国农业科学, 2005, 38(6): 1196-1203
TANG J C, MBOREHA I A, SHE L N, et al. Nutritional effects of soybean root architecture in a maize/soybean intercropping system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(6): 1196-1203
- [14] 王昆. 南方稻田水稻-玉米不同搭配种植模式的产量与资源利用效率比较研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2014
WANG K. A comparative study on yield and resource utilization efficiency of rice-maize with different planting patterns in paddy field in south China[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2014
- [15] 陈阜, 梁志杰, 陈述泉. 多熟制的发展前景[J]. 世界农业, 1997, (6): 18-20
CHEN F, LIANG Z J, CHEN S Q. The development prospects of multi-mature[J]. World Agriculture, 1997, (6): 18-20
- [16] 何世龙, 艾厚煜. 玉米、马铃薯间套作模式评价[J]. 作物杂志, 2001, (3): 18-20
HE S L, AI H Y. Evaluation on intercropping models of maize and potato[J]. Crops, 2001, (3): 18-20
- [17] 李立娟, 王美云, 薛庆林, 等. 黄淮海双季玉米产量性能与资源效率的研究[J]. 作物学报, 2011, 37(7): 1229-1234
LI L J, WANG M Y, XUE Q L, et al. Yield performance and resource efficiency of double-cropping maize in the Yellow, Huai and Hai River valleys region[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(7): 1229-1234
- [18] 黄国勤. 中国耕作学[M]. 北京: 新华出版社, 2001: 61
HUANG G Q. The Farming in China[M]. Beijing: Xinhua Press, 2001: 61
- [19] 王美云, 任天志, 赵明, 等. 双季青贮玉米模式物质生产及资源利用效率研究[J]. 作物学报, 2007, 33(8): 1316-1323
WANG M Y, REN T Z, ZHAO M, et al. Matter production and resources use efficiency of double-cropping silage maize system[J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(8): 1316-1323
- [20] 侯连涛, 江晓东, 韩宾, 等. 不同覆盖处理对冬小麦气体交换参数及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(9): 58-63
HOU L T, JIANG X D, HAN B, et al. Effects of different mulching treatments on the gas exchange parameters and water use efficiency of winter wheat[J]. Transactions of the

- CSAE, 2006, 22(9): 58–63
- [21] 徐学华. 作物光能利用率的影响因素及提高途径[J]. 现代农业科技, 2011, (19): 127
XU X H. Influencing factors of utilization rate of crop light energy and ways to improve[J]. Modern Agricultural Sciences and Technology, 2011, (19): 127
- [22] 骆世明. 农业生态学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001: 8
LUO S M. Agroecology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2001: 8
- [23] 徐勇, 齐文虎, 谢高地, 等. 农业自然资源利用效率的因子-能量评价模型及其应用[J]. 资源科学, 2002, 24(3): 86–91
XU Y, QI W H, XIE G D, et al. The factor-energy evaluation model of agricultural natural resources utilization efficiency and its application[J]. Resources Science, 2002, 24(3): 86–91
- [24] 李小勇. 南方稻田春玉米-晚稻种植模式资源利用效率及生产力优势研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2011
LI X Y. Study on the utilization efficiency and productivity of spring maize-late rice cropping model in south China[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2011
- [25] 陈夔. 我国南方地区多熟种植制度的模式及效益浅析[J]. 南方农业, 2012, 6(5): 13–15
CHEN K. Analysis on the mode and benefit of multi-cropping system in south China[J]. South China Agriculture, 2012, 6(5): 13–15
- [26] 周淑新, 董梅英, 孙苏卿. 作物生产与光合效率的相关分析[J]. 张家口农专学报, 2003, 19(2): 4–5
ZHOU S X, DONG M Y, SUN S Q. Correlation analysis of crop production and photosynthetic efficiency[J]. Journal of Zhangjiakou Agricultural College, 2003, 19(2): 4–5
- [27] 李淑娅, 田少阳, 袁国印, 等. 长江中游不同玉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 S Y, TIAN S Y, YUAN G Y, 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
- [28] ALBERTO M C R, QUILTY J R, BURESH R J, et al. Actual evapotranspiration and dual crop coefficients for dry-seeded rice and hybrid maize grown with overhead sprinkler irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2014, 136: 1–12