江西农业大学学报　2026,48(2)　　http://xuebao.jxau.edu.cn
Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis　　https://doi.org/10.3724/aauj.2026028

张雪滢,周泉,封亮,等.不同种植模式对作物产量、养分积累及气候资源利用效率的影响[J].江西农业大学学报,2026,48(2):325-335.
ZHANG X Y,ZHOU Q,FENG L,et al.Effects of different planting modes on crop yield, nutrient accumulation and utilization efficiency of climate resources[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2026,48(2):325-335.

不同种植模式对作物产量、养分积累及气候资源利用效率的影响

张雪滢,周　泉*,封　亮,徐慧芳,杨文亭,何朝鸣,王淑彬*

(江西农业大学 作物生理生态与遗传育种教育部重点实验室,江西 南昌 330045)

摘要:【目的】旨在探讨不同种植模式对作物产量、养分积累及气候资源利用效率的影响。【方法】设置玉米单作、春玉米Ⅱ春大豆、马铃薯/春玉米/夏大豆、油菜-夏玉米Ⅱ夏大豆、黑麦草-春玉米/夏大豆以及黑麦草-春玉米Ⅱ春大豆共6种不同的种植模式,通过2年的田间定位试验,对产量、养分积累量及光、温、水资源利用效率进行测定。【结果】复合种植模式(间作、套作、间套作及轮作)显著优于单作模式。其中马铃薯/春玉米/夏大豆模式下2年的平均周年经济产量最高,较玉米单作提高247.65%。不同种植模式下的氮、磷、钾素积累总量,均以马铃薯/春玉米/夏大豆处理和黑麦草-春玉米Ⅱ春大豆处理显著高于其他处理;与玉米单作相比,马铃薯/春玉米/夏大豆处理下的周年氮、磷、钾素积累总量分别增加38%、26%和59%,黑麦草-春玉米Ⅱ春大豆周年氮、磷、钾素积累总量分别增加55%、15%和40%。在光、温、水资源利用方面,马铃薯/春玉米/夏大豆模式显著优于其他处理,光能生产效率、积温生产效率及降水生产效率较玉米单作分别显著提高72%、17%和50%。【结论】马铃薯/春玉米/夏大豆套作和黑麦草-春玉米Ⅱ春大豆种植模式有助于实现作物高产、养分高效利用及气候资源充分开发,可为长江中下游地区玉米大豆高效种植模式的筛选与推广提供科学依据与技术支撑。

关键词:种植模式;作物;产量;养分;气候资源;利用效率
中图分类号:S513;S565.1　　**文献标志码:**A　　**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**
文章编号:1000-2286(2026)02-0325-11
CSTR:32399.14.aauj.2026028

Effects of different planting modes on crop yield, nutrient accumulation and utilization efficiency of climate resources

ZHANG Xueying, ZHOU Quan*, FENG Liang, XU Huifang, YANG Wenting, HE Zhaoming, WANG Shubin*

(Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding, Ministry of Education, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

收稿日期:2025-09-02　　**修回日期:**2025-10-07　　**接受日期:**2025-10-12
基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0300209-06)
Project supported by the National Key Research and Development Project of China(2016YFD0300209-06)
作者简介:张雪滢,硕士生,orcid.org/0009-0009-9134-2076,zhangxueying808@163.com;*共同第一作者;*通信作者:王淑彬,副教授,博士,主要从事耕作与农业生态研究,orcid.org/0000-0002-1454-4776,shubinwjxau@126.com。
©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND协议

Abstract: [**Objective**] To investigate the effects of different planting modes on crop yield, nutrient accumulation, and utilization efficiency of climate resources. [**Method**] Six cropping patterns were established: maize monocropping, spring maize ‖ spring soybean, potato/spring maize/summer soybean, rapeseed-summer maize ‖ summer soybean, ryegrass-spring maize/summer soybean, and ryegrass-spring maize ‖ spring soybean. A two-year field experiment was conducted to measure yield, nutrient accumulation, and utilization efficiency of light, temperature, and water resources. [**Result**] The results showed that combined cropping patterns (intercropping, relay intercropping, inter-relay cropping, and rotation) significantly outperformed the monocropping pattern. Specifically, the potato/spring maize/summer soybean pattern had the highest average annual economic yield over two years, increasing by 247.65% compared with maize monocropping. The total accumulation of nitrogen, phosphorus, and potassium under the potato/spring maize/summer soybean and ryegrass-spring maize ‖ spring soybean treatments were significantly higher than those under other treatments. Compared with maize monocropping, the total annual accumulation of nitrogen, phosphorus, and potassium in the potato/spring maize/summer soybean treatment increased by 38%, 26%, and 59%, respectively; those in the ryegrass-spring maize ‖ spring soybean treatment increased by 55%, 15%, and 40%, respectively. In terms of utilization of light, temperature, and water resources, the potato/spring maize/summer soybean pattern was significantly superior to other treatments, with light energy production efficiency, accumulated temperature production efficiency, and precipitation production efficiency increasing by 72%, 17%, and 50% compared with maize monocropping, respectively. [**Conclusion**] The relay intercropping pattern of potato/spring maize/summer soybean and the cropping pattern of ryegrass-spring maize ‖ spring soybean contribute to high crop yield, efficient nutrient utilization, and full exploitation of climate resources, providing scientific basis and technical support for the screening and promotion of high-efficiency maize-soybean cropping patterns in the middle and lower reaches of the Yangtze River.

Keywords: cropping patterns; crop; yield; nutrients; climate resources; utilization efficiency

【研究意义】长江中下游地区气候温暖潮湿，水热资源丰富，以多熟种植为主要的农业生产特点，是我国重要的粮食生产地[1]。玉米大豆作为我国重要的粮食和饲料作物，随着经济的发展，人们对其的需求量将会进一步增加。然而，人地关系紧张以及气候异常变化导致的极端天气增加，对我国玉米大豆的产量增长构成威胁，传统的单一种植模式越来越无法满足人们的需求。间(套)作、轮作等复合种植模式，可以通过作物间的时空互补与生态互作，充分提高资源利用效率，在应对环境挑战的同时保持作物生产力[2-3]。由于玉米大豆的生态位不同，两者搭配可以充分实现物种间氮素的高效利用，提高生产效益，这为禾豆不同种植模式的构建提供了理论基础[4]。【前人研究进展】养分利用效率能直接影响作物产量及土壤肥力。在禾豆种植体系中，豆科植物的固氮作用可以提供充足的氮素，供其他作物吸收利用[5]。同时，植物从土壤中高效获取养分资源的重要机制与植物根系息息相关。高氮磷钾需求的玉米与大豆间作时，根系分布与养分吸收的差异可降低种间竞争，实现养分的分层利用[6]。此外，绿肥翻压还田也是实现减肥增产、提高养分利用效率、改善农田生态环境的有效措施[7]。光、温、水资源是作物生长的关键因素，光能利用是作物进行光合作用实现增产增效的重要前提，水分是保障作物生长发育和产量形成的必要条件，但实际生产中作物光能利用率和水分生产效率一般都很低[8]。

【本研究切入点】三熟种植模式较传统两熟种植模式可以在时间和空间上高效集约化利用光、温、水、土等资源，可以获得更高的资源利用率[9]。但不同玉米大豆种植模式下养分循环与转化规律及资源利用等仍有待进一步明确。【拟解决的关键问题】通过田间试验针对玉米大豆种植体系设置6种不同的种植模式，研究玉米大豆不同种植模式下光、温、水资源与养分的利用特性，找出最有利模式，为长江中下游地区玉米大豆的高效种植提供科学依据与技术支撑。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验地点为江西省红壤研究所(28°15′N,116°20′E),属于亚热带季风气候,年平均气温为18.1 ℃,年均降雨量为1 537 mm,年蒸发量为1 150 mm。试验田土壤为红壤土,初始土壤基本养分状况:pH值为5.00,有机质含量为20.70 g/kg,全氮含量为0.93 g/kg,全磷含量为0.42 g/kg,全钾含量为27.60 g/kg,碱解氮含量为80.79 mg/kg,有效磷含量为14.90 mg/kg,速效钾含量为114.00 mg/kg。土壤肥力为中等。

1.2　试验设计

本试验于2017年10月开始,2019年10月结束。设6个处理,每个处理重复3次,共18个小区,采用随机区组设计。处理A:冬闲-玉米;处理B:冬闲-春玉米‖春大豆;处理C:马铃薯/春玉米/夏大豆;处理D:油菜-夏玉米‖夏大豆;处理E:黑麦草-春玉米/夏大豆;处理F:黑麦草-春玉米‖春大豆(-表示接茬,/表示套作,‖表示间作)。玉米间作大豆种植方式如图1所示。

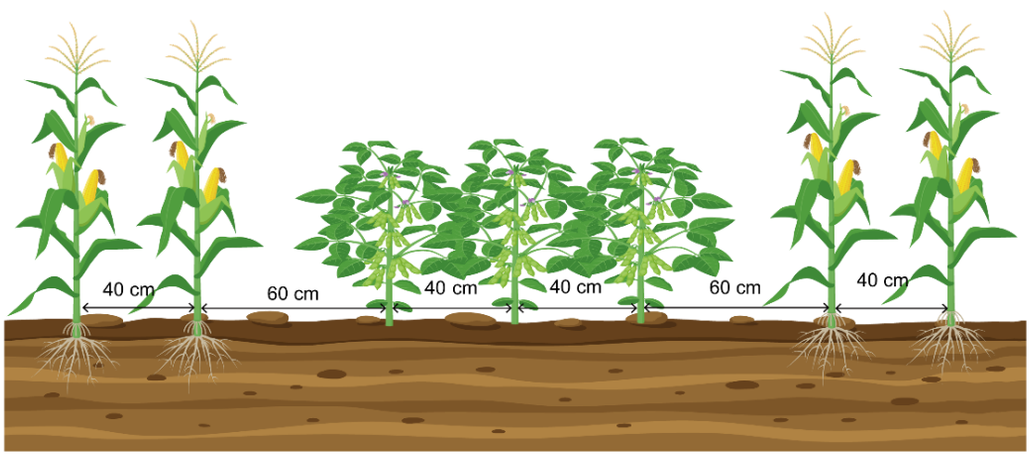


图1　玉米间作大豆种植方式

Fig.1　Diagram of maize intercropped with soybeans

每个小区面积为5 m×7 m,单作处理下玉米行距为70 cm,株距为24 cm。间作处理下带宽240 cm,玉米间作大豆的行比均为2∶3,玉米行距为40 cm,株距为13.8 cm。在玉米宽行距间种3行大豆,玉米大豆间行距为60 cm,大豆间的窄行距为40 cm,株距为8.3 cm。单作玉米每667 m^2密度为4 000株,单株定植。马铃薯的行距为40 cm,株距为25 cm,播种量为2 250 kg/hm^2;油菜行距为50 cm,株距为8 cm,播种量为7.5 kg/hm^2;黑麦草播种量为30 kg/hm^2。玉米底肥每公顷配施过磷酸钙600 kg(含P_2O_5 12%),氯化钾150 kg(含K_2O 60%),全生育期共施纯氮180 kg/hm^2,按m(底肥)∶m(穗肥)=5∶5比例施用。大豆基肥配施尿素75 kg/hm^2、过磷酸钙600 kg/hm^2、氯化钾60 kg/hm^2,油菜于每年10月初直播,施基肥45%三元素复合肥450 kg/hm^2,硼肥22.5 kg/hm^2。12月初5叶期时,施尿素112.5 kg/hm^2。马铃薯于每年12月中旬后开沟坂田直播,基肥施45%三元素复合肥750 kg/hm^2,其他管理同一般大田。各作物品种与播种、收获日期如表1所示。

1.3　测定项目与方法

1.3.1　产量的计算

于玉米、大豆收获期测定作物的籽粒产量,计算周年经济产量。

1.3.2　养分测定

在作物收获期采集植株样品,使用粉碎机将植株粉碎,过40目筛,进行植株养分的测定。作物含氮量采用凯氏定氮法测定;含磷量采用分光光度计进行测定;含钾量采用火焰光度计测定。之后计算不同模式下的植株养分吸收与利用效率[10-11]。

养分积累总量=成熟期地上部各部位干物质量×各部位养分含量　　(1)

养分干物质生产效率=成熟期单位面积干物质量/养分积累总量　　(2)

表 1 作物品种及播种、收获日期

Tab.1 Crop varieties, sowing date and harvest date

作物 Crop	品种 Variety	播种日期 Sowing date	收获日期 Harvest date
黑麦草	鑫大叶	2017-10-03	2017-03-14
Ryegrass	Xin daye	2018-09-27	2018-03-20
油菜	沣油 730	2017-10-03	2017-04-26
Rape	Feng you 730	2018-10-03	2018-05-11
马铃薯	田园春	2017-12-20	2017-05-15
Potato	Tian yuan chun	2019-01-23	2019-05-24
		2018-04-09	2018-07-22
玉米	吉祥一号	2018-05-17	2018-08-23
Maize	Jixiang No.1	2019-04-08	2019-07-30
		2019-06-16	2019-08-30
		2018-04-09	2018-07-09
大豆	旱豆 1 号	2018-05-17	2018-08-04
Soybean	Drought-resistant soybean No.1	2019-04-08	2019-07-11
		2019-06-16	2019-10-29

养分利用效率=籽粒产量/养分积累总量 (3)

养分收获指数=籽粒养分积累量/养分积累总量×100% (4)

1.3.3 光温水气象数据资料收集

从江西省气象台获取试验期间进贤当地的太阳辐射、日温度和降雨量等气象数据，计算周年的光热水资源利用效率[12-14]。

光能生产效率=籽粒产量/生育期间总辐射量 (5)

光能利用效率=光能生产效率×干重热值×100% (6)

积温生产效率=籽粒产量/生育期间总积温量 (7)

积温利用效率=作物生育期间有效积温/全年有效积温×100% (8)

降水生产效率=籽粒产量/生育期间总降水量 (9)

水分利用效率=作物生育期间降水量/全年总耗水量×100% (10)

式(6)中：干重热值(GCV)为每克干物质完全燃烧时释放的热量，玉米干重热值取 18 589 J/g，大豆籽粒取 24 139 J/g[15]。有效积温为生育期内日平均气温高于 10 ℃期间的积温。

1.4 数据分析

使用 Excel 2019 及 SPSS Statistics 27.0 软件对数据进行分析整理。本研究中所有试验数据采用单因素方差分析(one-way ANOVA)检验处理间的差异显著性，并使用 Duncan's 法进行多重比较(P<0.05)；使用 Origin(Origin2024b)进行图表的绘制。

2 结果与分析

2.1 不同种植模式周年经济产量

由图 2 可知，种植模式处理(C、E、F)下的周年经济产量均显著高于处理 A。处理 D 的周年经济产量两年均显著低于其他处理。2018 年周年经济产量由高到低依次为处理 C、E、F、A、B 和 D，其中处理 C 比其他处理分别高 99.1%、109.0%、195.7%、267.6%、276.5%。2019 年周年经济产量由高到低依次为处理 E、F、C、B、D 和 A，除处理 A 和 E 之间没有显著差异外，其他种植模式间均表现出显著差异。处理 B、C、D、E、F 下的周年经济产量分别比处理 A 增加了 942.87，16 541.90，296.19，27 491.42，25 121.27 kg/hm^2，增幅分别为 22.58%、396.20%、7.09%、658.44%、601.67%。

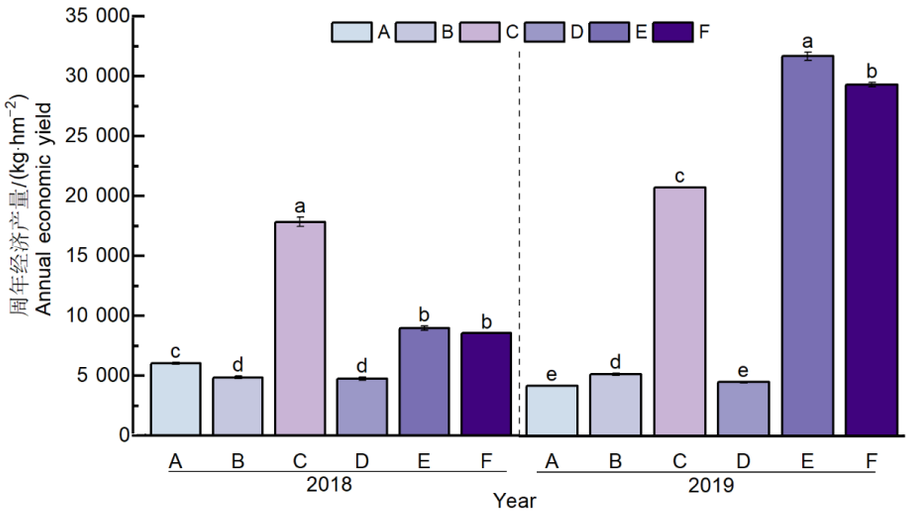


图2　不同种植模式周年经济产量

Fig.2　Annual economic yield of different planting patterns

2.2　不同种植模式养分利用效率分析

2.2.1　种植模式对作物氮素吸收与利用的影响

由图3可知,不同种植模式能显著影响大豆、玉米对氮素的吸收利用。2018年各处理氮素积累量由高到低依次为处理C、F、B、A、E和D,各处理的氮素干物质生产效率和氮素利用效率变化趋势一致,由高到低依次为处理A、E、B、F、D和C,其中处理B、D和F间无显著差异。氮收获指数由高到低依次为处理B、A、F、E、D和C,处理B较处理A、C、D、E和F显著增加了2.04%、25.05%、21.10%、12.90%和6.14%。2019年氮素积累量由高到低依次为处理F、B、C、E、D和A,各处理的氮素干物质生产效率和氮素利用效率变化趋势基本一致(处理D除外),处理A的氮素干物质生产效率显著高于处理B、C、D、E和F,分别高109.57%、62.62%、113.54%、68.97%和136.03%;其氮素利用效率亦显著高于处理B、C、D、E和F,分别高83.60%、43.75%、137.85%、42.33%和105.99%。氮收获指数两年间差异明显,处理B两年氮收获指数均值高于处理A、C、D、E和F 9.87%、20.57%、22.71%、25.31%和14.33%。

2.2.2　种植模式对作物体系磷素吸收与利用的影响

由图3可知,处理A和处理C的磷素积累总量在2018年显著高于其他处理,处理B、D、E和F之间无显著差异。各处理之间的磷素干物质生产效率和磷素利用效率变化趋势一致,处理A的磷素干物质生产效率分别高于处理B、C、D、E和F 32.95,140.37,137.12,38.10,58.56 kg/kg。磷素利用效率分别高于处理B、C、D、E和F 32.46,74.31,67.45,25.25 ,43.98 kg/kg。磷收获指数则以处理B最高,处理C和D显著低于其他处理。2019年磷素积累总量与2018年有所差别,处理A显著低于其他处理,处理C、E和F的积累总量较高,但三者之间无显著差异。磷素干物质生产效率和磷素利用效率变化趋势一致,均由高到低依次为处理A、C、B、F、E和D。磷收获指数以处理B最高,显著高于处理A、C、D、E和F 6.19%、4.92%、56.71%、24.52%和24.35%。

2.2.3　种植模式对作物体系钾素吸收与利用的影响

各处理的周年钾素积累量在2018年以处理C最高,其次为处理D,其他各处理间无显著差异。钾素干物质生产效率和钾素利用效率均为处理D最低,处理A最高,处理B、E和F之间无显著差异。钾收获指数处理A最高,但与处理C和E间无显著差异,处理B显著高于处理D 31.99%。各处理间的钾素积累量在年际间发生变化,2019年处理F显著高于处理A、B、C、D和E 87.12%、82.59%、16.14%、52.81%和17.69%。各处理钾素干物质生产效率和钾素利用效率在年际间变化一致,表现为处理A最高,处理D最低。钾收获指数则在年际间产生差异,处理C的钾收获指数在2019年显著高于处理A、B、D、E和F 15.95%、7.99%、103.72%、59.09%和59.78%。

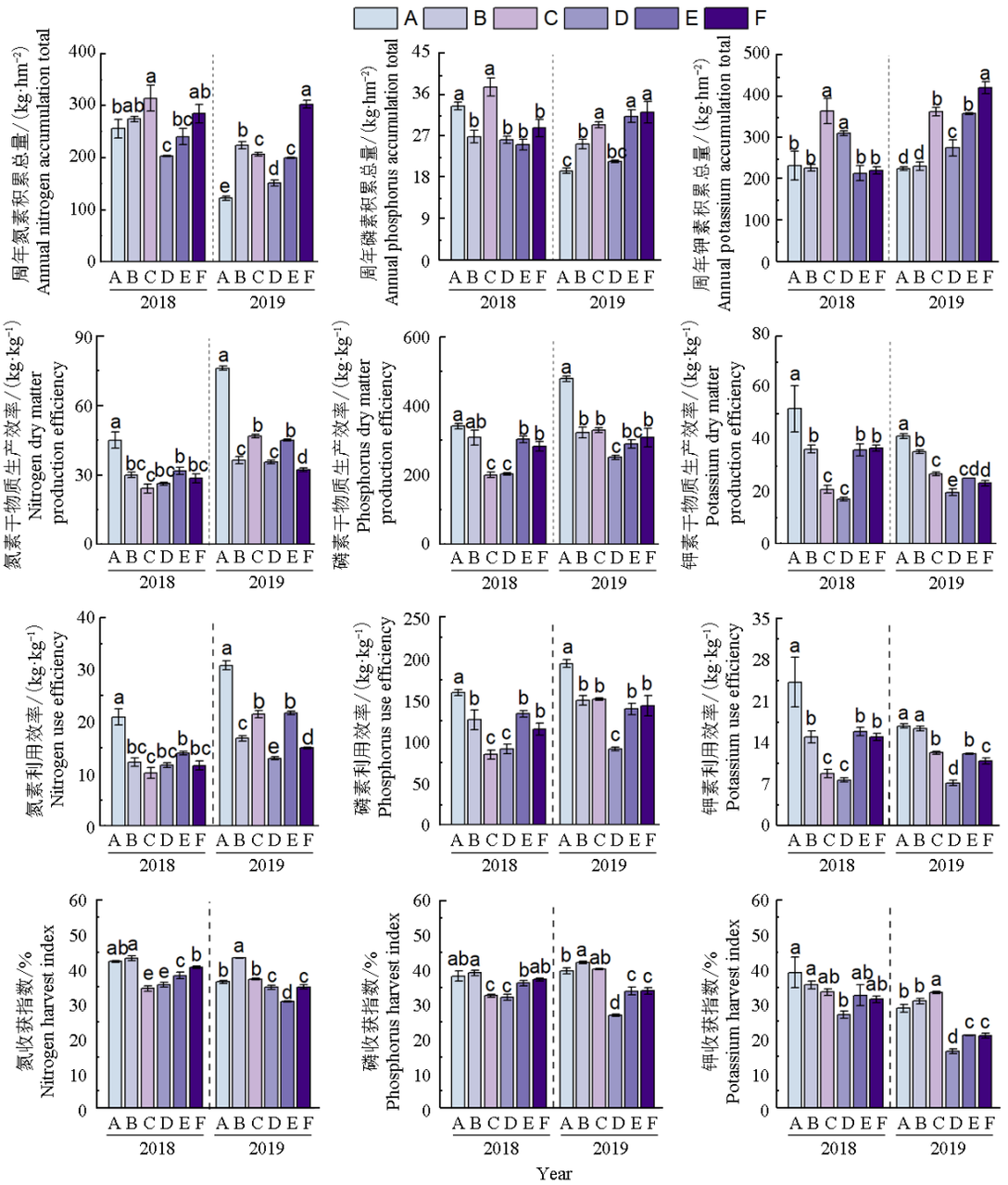


图3 不同种植模式下的养分利用

Fig.3 Nutrient utilization under different planting patterns

2.3 不同种植模式资源利用效率分析

2.3.1 光能生产效率及利用率

由图4可知,各处理的光能生产效率逐年增加,处理C下的光能生产效率两年内均显著高于其他处理。2018年,处理C的周年光能生产效率比处理A、E分别提高0.03 g/MJ和0.06 g/MJ,增幅分别为29%、76%。2019年,处理C、E的光能生产效率比处理A分别高0.17 g/MJ和0.06 g/MJ,增幅分别为100%和37.26%。2018年处理A的光能利用率分别比处理B、C、D、E和F显著高17%、32%、39%、35%和32%,而2019年处理A显著低于其他处理(处理D除外),处理F则显著高于其他处理。

2.3.2 积温生产效率及利用率

由图4可知,两年积温生产效率最高均为处理C。与处理A周年积温生产效率相比,处理C在2018年显著提高了26%。处理D的周年积温生产效率显著高于处理B和F,增幅为19%和32%,而在2019年处理B、F的积温生产效率却显著高于处理D 0.09 kg/(℃·hm²)和0.21 kg/(℃·hm²)。两年间的有效积温利用

率变化趋势基本一致(2019 年处理 E 除外)。其中 2018 年处理 C 和 E 的有效积温利用率分别比处理 A 高 39% 和 60%,处理 D 和 F 分别比处理 B 高 78% 和 46%,2019 年处理 C 和 E 的有效积温利用率分别比处理 A 高 104.61% 和 137.63%,处理 D 和 F 分别比处理 B 高 105.35% 和 51.77%。

2.3.3　降水生产效率及利用率

由图 4 可知,各处理的降水生产效率与积温生产效率变化一致,年际间降水生产效率总体呈现下降的趋势,处理 C 的降水生产效率两年均为最高,处理 D 最低。在 2018 年处理 C 比处理 A 和 E 显著提高了 26% 和 76%,处理 D 分别比处理 B 和 F 显著增加了 5.88 kg/(mm^2·hm^2)和 8.87 kg/(mm^2·hm^2),处理 B 和 F 之间无显著差异。处理 C、E 在 2019 年的降水生产效率比处理 A 显著增加 99.63% 和 36%,处理 F 比处理 B 显著增加 17.38%。两年间的水分利用效率变化趋势有所不同。两年处理 C 和处理 E 的有效积温利用率分别平均比处理 A 高 69.47% 和 84.96%。2018 年处理 D 和 F 分别比处理 B 高 82.79% 和 74.84%,而 2019 年处理 F 的水分利用效率处于最低水平,分别比处理 B 和 D 降低 66.12% 和 88.52%。

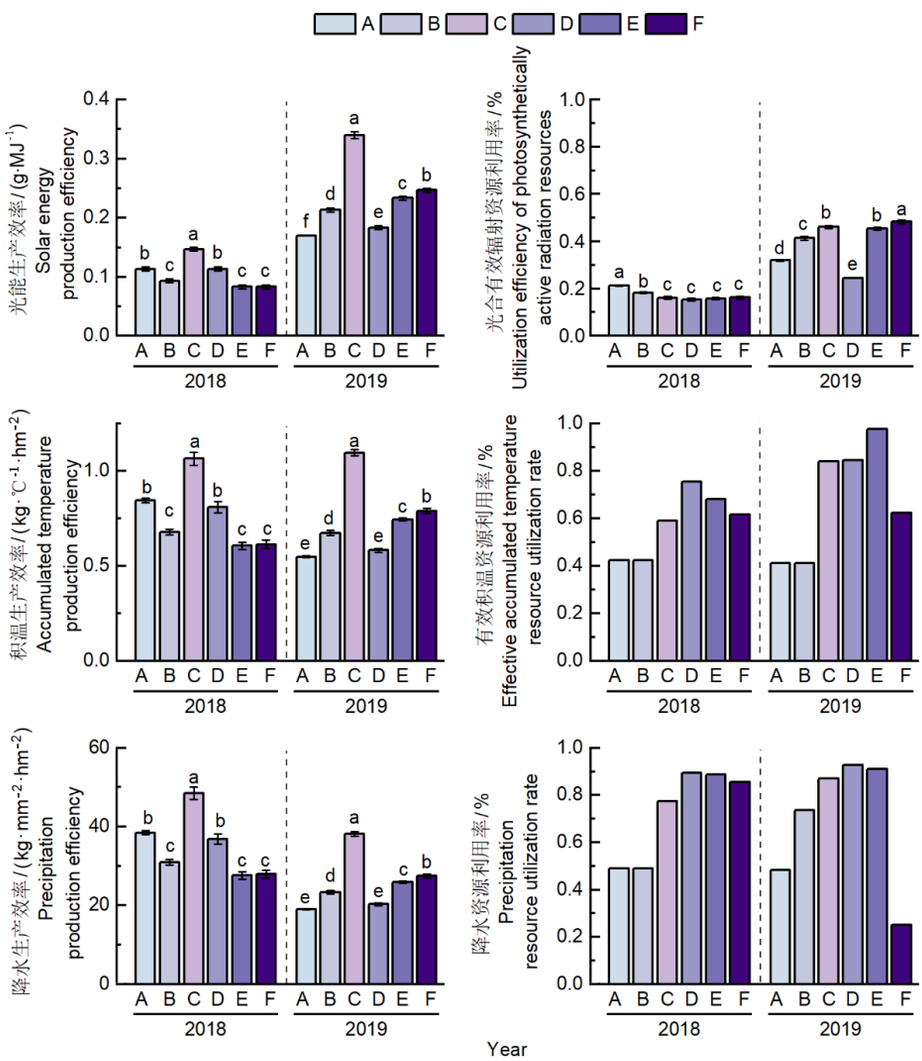


图 4　不同种植模式下的资源利用

Fig.4　Resource utilization under different planting patterns

3　讨　论

3.1　不同种植模式对作物周年产量的影响

间、混、套作是我国传统农业的精华,是南方红壤地区高质量种植的重要方式,具有重要的生态系统功能。通过间套作能够增加农田生物多样性,促进作物增产稳产,充分利用光、温、热资源[16]。禾本科与豆科间套作是主要的间套作种植方式之一。本研究发现,套作模式(处理 C、E)的周年经济产量显著高

于单作模式(处理A),这与王恒震等[17]关于间套作提高玉米大豆产量的结论一致。其主要原因是在马铃薯收获前及时套种春玉米,相比玉米单一种植,三熟种植模式有助于实现时间的叠加使用与空间的综合利用,从而收获多季作物[18-19]。

本研究中黑麦草-春玉米‖春大豆种植模式下的产量高于单作玉米,可能与作物间的互补效应相关,在合适的间作配置下,能够充分利用地上空间,为大豆创造散射光环境,同时由于大豆的固氮作用,提高土壤氮素有效性,进一步促进玉米的生长[20-22]。2019年黑麦草-春玉米/夏大豆模式下产量最高,可能与黑麦草冬季覆盖提高了土壤硝态氮以及有机质含量,从而提高土壤养分的有效性,并改善土壤质量有关[23]。在本研究结果中,处理D(油菜-夏玉米‖夏大豆)两年的周年经济产量均为最低,主要是因为作物搭配不恰当,油菜收获后衔接夏玉米时间紧张,一是油菜收获后土壤氮素残留不足,二是夏玉米抽穗及籽粒灌浆期容易受到高温干旱胁迫,导致玉米生长受阻[24-25]。对比两年数据,发现处理C、E、F在2019年周年经济产量均高于2018年,可能与2019年夏季降水均匀,能够缓解高温干旱对作物的影响有关。

3.2 不同种植模式对养分利用效率的影响

氮素利用方面,大豆的固氮作用对套作系统贡献显著。处理E、F中大豆与玉米间作,能通过根瘤菌固氮,减少氮肥投入,同时提高土壤氮素有效性,促进玉米对氮的吸收利用[26]。2019年处理F的氮素积累量最高,可能是黑麦草作为绿肥翻压后释放的氮素与大豆固氮的协同效应,替代部分化肥氮,使大豆根瘤固氮活性提高,同时减少根瘤发育的能量消耗[27]。

磷钾素利用的差异则与作物根系分布及养分竞争有关。玉米是高磷钾需求作物,与大豆间作时,大豆根系能够分泌活化土壤中固定磷素的有机酸,提高磷素有效性[28]。处理C中马铃薯与玉米套作,马铃薯属于浅根系,而玉米则是深根系两者间根系通过分层吸收,可以利用不同深度土壤中的养分,提高养分利用效率,减少了磷钾竞争,使磷素干物质生产效率较单作提高[29-30]。处理C的钾素收获指数在2019年显著升高,可能是因为2019年处理C各作物经济产量高,钾的吸收也比较好;而2018年钾素利用效率略低,可能是降水导致钾素淋失,影响对钾元素的吸收[31-32]。

3.3 不同种植模式对资源利用效率的影响机制

套作和间作模式在光能、积温及降水利用上表现出显著优势。套作模式(处理C、E)的光能生产效率显著高于单作,玉米大豆的高矮搭配提高了整个种植系统的光能利用效率并且大豆对散射光的高效利用弥补了单作玉米下层光照不足的缺陷。另外,三熟制套作能够通过生长期重叠延长田间绿色覆盖时间,减少光能漏射[33-35]。2019年各处理下的光能生产效率普遍高于2018年,可能与2019年光照时长较多有关,有利于作物群体光合作用。

处理C两年的积温生产效率均最高,主要是由于各作物之间种植衔接精准。在马铃薯收获后及时套种春玉米和夏大豆,使玉米生长期避开了高温峰值,有效利用了适宜积温,减少了高温胁迫[36]。种植黑麦草可以通过冬季覆盖减少土壤热量散失,保水保土作用更强[37]。

降水生产效率与积温表现一致,处理C两年均为最高,这可能是由于套作系统中较多植被覆盖降低了地表径流和蒸发,有效缓解了土壤水分蒸发,提高水分利用效率。相反,处理D降水生产效率最低,主要是油菜收获后土壤暴露时间过长,又遇夏季暴雨频繁,导致养分流失和水分无效蒸发[38]。年际间对比发现,2018年降水生产效率普遍低于2019年,可能与2018年降雨不均匀、部分时段出现干旱胁迫有关,影响了作物对水分的有效利用。

4 结 论

对不同种植模式的研究表明,马铃薯/玉米/大豆套作和黑麦草-玉米‖大豆种植模式有助于大豆和玉米对氮素、磷素和钾素的吸收,对光、温资源具有高效的捕捉能力,显著提高了大豆和玉米的产量,获得较高的周年作物产量。综合来看,这2种种植模式是提升红壤区作物产量与资源利用效率的有效途径。

参考文献 References:

[1] 郝心怡,张江,白瑞,等.长江中下游地区耕地复种指数时空特征及驱动机制研究[J].国土资源科技管理,2021,38(4):15-27.

HAO X Y, ZHANG J, BAI R, et al.Spatial and temporal characteristics and driving mechanism of multiple cropping index of cultivated land in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J].Scientific and technological management of land and resources, 2021, 38(4): 15-27.

[2] YU R P, DRESBØLL D B , FINCKH M R, et al.Intercropping: ecosystem functioning and sustainable agriculture[J].Plant and soil, 2025, 506: 1-6.

[3] MOORE V M, PETERS T, SCHLAUTMAN B, et al.Toward plant breeding for multicrop systems[J].Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America, 2023, 120(14): e2205792119.

[4] 柴强, 胡发龙, 陈桂平. 禾豆间作氮素高效利用机理及农艺调控途径研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(1): 19-26.
CHAI Q, HU F L, CHEN G P.Research advance in the mechanism and agronomic regulation of high-efficient use of nitrogen in cereal-legume intercropping[J].Chinese journal of eco-agriculture, 2017, 25(1): 19-26.

[5] 岳高红, 黄业昌, 高锡腾, 等. 甜玉米/鲜食大豆间作对根际固氮细菌和丛枝菌根真菌的影响[J]. 玉米科学, 2024, 32(5): 67-77.
YUE G H, HUANG Y C, GAO X T, et al.Effects of different sweet maize/vegetable soybean interplanting systems on rhizosphere nitrogen-fixing bacteria and arbuscular mycorrhizal fungi communities[J].Journal of maize sciences, 2024, 32(5): 67-77.

[6] 张德闪, 李洪波, 申建波. 集约化互作体系植物根系高效获取土壤养分的策略与机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1547-1555.
ZHANG D S, LI H B, SHEN J B.Strategies for root′s foraging and acquiring soil nutrient in high efficiency under intensive cropping systems[J].Journal of plant nutrition and fertilizer, 2017, 23(6): 1547-1555.

[7] 庾振宇, 方畅宇, 刘芳禧, 等. 绿肥配施氮肥对双季稻产量和养分吸收的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(5): 320-327.
YU Z Y, FANG C Y, LIU F X, et al.Effects of green manure with nitrogen fertilizer on the yield and nutrient absorption of double-cropping rice[J].Journal of soil and water conservation, 2023, 37(5): 320-327.

[8] 李盼, 陈桂平, 苟志文, 等. 绿洲灌区春小麦光能利用与水分生产效益对秸秆还田方式的响应[J]. 作物学报, 2023, 49(5): 1316-1326.
LI P, CHEN G P, GOU Z W, et al.Response on light energy utilization and water production benefit of spring wheat to straw retention in an oasis irrigated area[J].Acta agronomica Sinica, 2023, 49(5): 1316-1326.

[9] 关凯心, 郭尔静, 高继卿, 等. 华北地区一年两熟种植模式智慧应对气候变化的水氮管理措施[J]. 中国农业气象, 2023, 44(6): 453-468.
GUAN K X, GUO E J, GAO J Q, et al.Climate-smart water-nitrogen managements for main patterns of double-cropping system in north China plain[J].Chinese journal of agrometeorology, 2023, 44(6): 453-468.

[10] 张占田, 徐维华, 姜学玲, 等. 有机肥替代化肥对玉米生长、养分吸收和土壤肥力的影响[J]. 分子植物育种, 2025, 23(5): 1531-1540.
ZHANG Z T, XU W H, JIANG X L, et al.Effects of organic fertilizer instead of chemical fertilizer on maize growth, nutrient absorption and soil fertility[J].Molecular plant breeding, 2025, 23(5): 1531-1540.

[11] FAGERIA N K, BALIGAR V C.Methodology for evaluation of lowland rice genotypes for nitrogen use efficiency[J].Journal of plant nutrition, 2003, 26(6): 1315-1333.

[12] 鲁宝庆, 李华荣. 覆盖措施对春玉米水分利用效率及产量的影响[J]. 农业技术与装备, 2025(7): 162-163.
LU B Q, LI H R.The influence of covering measures on the water use efficiency and yield of spring maize[J].Agricultural technology & equipment, 2025(7): 162-163.

[13] 周宝元, 王志敏, 岳阳, 等. 冬小麦－夏玉米与双季玉米种植模式产量及光温资源利用特征比较[J]. 作物学报, 2015, 41(9): 1393-1405.
ZHOU B Y, WANG Z M, YUE Y, et al.Comparison of yield and light-temperature resource use efficiency between wheat-maize and maize-maize cropping systems[J].Acta agronomica Sinica, 2015, 41(9): 1393-1405.

[14] 郭志鹏, 李盼, 胡发龙, 等. 绿洲灌区玉米光能利用与水分生产效益对地膜秸秆带状覆盖的响应[J]. 玉米科学, 2024, 32(9): 59-69.
GUO Z P, LI P, HU F L, et al.Response of light use efficiency and water production efficiency of maize in oasis irrigation areas to strip mulching with plastic film and straw[J].Journal of maize sciences, 2024, 32(9): 59-69.

[15] 姜向阳, 范仲卿, 格桑, 等. 山东主要农作物籽实及不同器官的热值研究[J]. 中国农学通报, 2014, 30(27): 109-113.
JIANG X Y, FAN Z Q, GE S, et al.Study on caloric value of crop seeds and various crop organs in Shandong Provinces[J].

Chinese agricultural science bulletin,2014,30(27):109-113.

[16] 李隆.间套作强化农田生态系统服务功能的研究进展与应用展望[J].中国生态农业学报,2016,24(4):403-415.
LI L.Intercropping enhances agroecosystem services and functioning:current knowledge and perspectives[J].Chinese journal of eco-agriculture,2016,24(4):403-415.

[17] 王恒震,罗炳元,朱镇选,等.玉米-大豆间套作对养分利用及根系影响的研究进展[J].安徽农业科学,2025,53(12):1-4.
WANG H Z,LUO B Y,ZHU Z X,et al.Research progress on the effect of intercropping maize and soybean on nutrient utilization and root system[J].Journal of Anhui agricultural sciences,2025,53(12):1-4.

[18] 叶天承,陈惠哲,向镜,等.粮油多熟制种植模式研究进展[J].中国稻米,2023,29(5):17-22.
YE T C,CHEN H Z,XIANG J,et al.Research progress on the planting model of multiple cropping of grain and oil[J].China rice,2023,29(5):17-22.

[19] EL-MEHY A A,SHEHATA M A,MOHAMED A S,et al.Relay intercropping of maize with common dry beans to rationalize nitrogen fertilizer[J].Frontiers in sustainable food systems,2023,7:1052392.

[20] 吴欣,李相涛,张冬菊,等.大豆-玉米间作种植模式效应分析[J].陕西农业科学,2022,68(3):85-88.
WU X,LI X T,ZHANG D J,et al.Effect analysis of soybean-maize intercropping patterns[J].Shaanxi journal of agricultural sciences,2022,68(3):85-88.

[21] 雷雲翔,应晓成,彭先进,等.不同间作处理对鲜食玉米和鲜食大豆农艺性状、产量及土地生产力的影响[J].玉米科学,2025,33(3):79-86.
LEI Y X,YING X C,PENG X J,et al.Effects of different intercropping patterns on agronomic traits,yield,and land productivity of fresh maize and fresh soybean[J].Journal of maize sciences,2025,33(3):79-86.

[22] 冉漫雪,孙东宝,丁军军.种植模式对作物产量及间作系统种间关系的影响[J].干旱地区农业研究,2024,42(6):61-68.
RAN M X,SUN D B,DING J J.Effects of cropping patterns on crop yields and interspecific relationships in intercropping systems[J].Agricultural research in the arid areas,2024,42(6):61-68.

[23] BREWER M,KANISSERY R G,STRAUSS S L,et al.Impact of cover cropping on temporal nutrient distribution and availability in the soil[J].Horticulturae,2023,9(10):1160.

[24] KIÆR L P,SKOVGAARD I M,ØSTERGÅRD H.Effects of inter-varietal diversity,biotic stresses and environmental productivity on grain yield of spring barley variety mixtures[J].Euphytica,2012,185(1):123-138.

[25] 杨勤,赵前,田效琴,等.冬油菜季氮肥减量对后茬夏玉米氮素供应与产量的影响[J].中国土壤与肥料,2022(12):141-145.
YANG Q,ZHAO Q,TIAN X Q,et al.Effect of reduced nitrogen applied to winter rape on the nitrogen supply and grain yield of the following summer maize[J].Soil and fertilizer sciences in China,2022(12):141-145.

[26] 张晓娜,陈平,杜青,等.玉米/大豆、玉米/花生间作对作物氮素吸收及结瘤固氮的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2019,27(8):1183-1194.
ZHANG X N,CHEN P,DU Q,et al.Effects of maize/soybean and maize/peanut intercropping systems on crops nitrogen uptake and nodulation nitrogen fixation[J].Chinese journal of eco-agriculture,2019,27(8):1183-1194.

[27] TAMAGNO S,SADRAAS V O,HAEGELE J W,et al.Interplay between nitrogen fertilizer and biological nitrogen fixation in soybean:implications on seed yield and biomass allocation[J].Scientific reports,2018,8:17502.

[28] KRISHNAPRIYA V,PANDEY R.Root exudation index:screening organic acid exudation and phosphorus acquisition efficiency in soybean genotypes[J].Crop and pasture science,2016,67(10):1096-1109.

[29] 郝晓然,彭亚静,张丽娟,等.根层调控措施对甜玉米-黄瓜设施蔬菜轮作体系土壤硝态氮的影响[J].中国农业科学,2015,48(12):2390-2400.
HAO X R,PENG Y J,ZHANG L J,et al.Effect of root layer regulations on soil nitrate of the rotation system of sweet corn-cucumber in greenhouse vegetable production system[J].Scientia agricultura Sinica,2015,48(12):2390-2400.

[30] DAI J,KUYPER T W,ZHAO C R,et al.Mycorrhizal networks promote interspecific facilitation in P uptake by a maize/faba bean mixture[J].Plant and soil,2025,514:345-358.

[31] 齐欣,赵亚南,司玉坤,等.钾肥用量对夏大豆干物质、养分累积和产量的影响[J].湖北农业科学,2020,59(13):35-38.
QI X,ZHAO Y N,SI Y K,et al.Effects of potassium fertilizer application on dry matter,nutrient accumulation and yield of soybean[J].Hubei agricultural sciences,2020,59(13):35-38.

[32] 董艳红,王火焰,周健民,等.不同土壤钾素淋溶特性的初步研究[J].土壤,2014,46(2):225-231.

DONG Y H, WANG H Y, ZHOU J M, et al.Preliminary study on potassium leaching characteristics of different soils[J]. Soils, 2014, 46(2): 225-231.

[33] LIU X, RAHMAN T, SONG C, et al.Changes in light environment, morphology, growth and yield of soybean in maize-soybean intercropping systems[J].Field crops research, 2017, 200: 38-46.

[34] PHILLIPS X A, KANDEL Y R, LICHT M A, et al.Estimating soybean radiation use efficiency using a UAV in Iowa[J]. Agronomy, 2020, 10(12): 2002.

[35] 李晶晶,梁冰,蒲甜,等.长江流域旱地多熟种植模式气候资源利用比较研究[J].四川农业大学学报,2025,43(2):406-417.
LI J J, LIANG B, PU T, et al.Comparative study on climate resource utilization of multiple crop planting patterns in the drylands of the Yangtze River Basin[J].Journal of Sichuan agricultural university, 2025, 43(2): 406-417.

[36] 展文洁,张吉旺,袁静超,等.调整播期提高春玉米对养分和气候资源的利用效率[J].植物营养与肥料学报,2021,27(10):1725-1734.
ZHAN W J, ZHANG J W, YUAN J C, et al.Adjusting sowing dates enhance the efficiency of climate and nutrient resources for spring maize[J].Journal of plant nutrition and fertilizers, 2021, 27(10): 1725-1734.

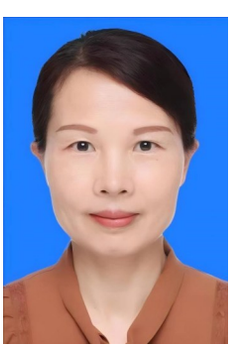
[37] 杜伟嘉,王芙臣,李斐,等.覆盖作物对坡耕地的减流减沙效应及玉米产量的影响[J].玉米科学,2023,31(6):100-107.
DU W J, WANG F C, LI F, et al.Effects of cover crops on sand reduction effects and corn yield on slope arable land[J].Journal of maize sciences, 2023, 31(6): 100-107.

[38] 孙巨龙,刘帅,胡启星,等.麦棉两熟种植模式下棉田土壤水分分布特征研究[J].山东农业科学,2024,56(11):52-60.
SUN J L, LIU S, HU Q X, et al.Soil moisture distribution characteristics of cotton fields under wheat and cotton cropping system[J].Shandong agricultural sciences, 2024, 56(11): 52-60.

(责任编辑:张前锋)



第一作者简介:张雪滢,现为江西农业大学农学院农艺与种业专业2023级硕士研究生,主要围绕作物栽培及农田生态调控等方向开展学习与科研实践,获2024年和2025年学业奖学金。



通信作者简介:王淑彬,副教授,博士。主要从事耕作学与农业生态学等方面的教学、科研工作。中国农学会耕作制度分会常务理事,江西省生态经济学会副理事长。主持完成国家重点研发计划子课题1项,主持完成省级项目1项,校级项目多项。参与完成国家自然科学基金和国家科技支撑项目等多项,获江西省科技进步奖三等奖3项、江西省农牧渔业技术改进一等奖一项,江西农业大学教学成果奖一等奖1项、二等奖3项。获得实用新型专利一项,在国内外期刊杂志发表研究论文40余篇。参编教材2本,参编科技著作2本,编撰论文集9本。