



玉米间隔耕作秸秆条带还田增密集成技术光热资源利用效率评估

米娜, 张富荣, 赵一俊, 张玉书, 纪瑞鹏, 于文颖, 陈妮娜, 姜英, 齐华, 武晋雯

引用本文:

米娜, 张富荣, 赵一俊, 等. 玉米间隔耕作秸秆条带还田增密集成技术光热资源利用效率评估[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(3): 475–483.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0277>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

单株定量施肥对夏玉米产量及养分吸收利用的影响

郭娅, 刘娇, 尹焕丽, 张倩, 李岚涛, 王宜伦

农业资源与环境学报. 2020, 37(6): 924–930 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0572>

玉米秸秆不同还田方式下麦田温室气体排放特征

李新华, 朱振林, 董红云, 杨丽萍, 郭洪海

农业资源与环境学报. 2016, 33(2): 176–181 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0260>

接种AM真菌对不同盐度土壤中向日葵生长的影响

周昕南, 杨亮, 许静, 王亚男, 杨久扬, 郝利君, 刁风伟, 郭伟

农业资源与环境学报. 2020, 37(5): 744–752 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0184>

免耕旧膜再利用对玉米产量及灌溉水生产力的影响

苏永中, 张珂, 刘婷娜, 王婷

农业资源与环境学报. 2016, 33(5): 491–498 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0055>

聚天门冬氨酸尿素对水稻产量及田面水氮素变化的综合影响

王娜, 徐嘉翼, 张鑫, 隋世江, 叶鑫, 牛世伟

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 96–103 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0072>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

米娜, 张富荣, 赵一俊, 等. 玉米间隔耕作秸秆条带还田增密集成技术光热资源利用效率评估[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(3): 475-483.

MI Na, ZHANG Fu-rong, ZHAO Yi-jun, et al. Evaluating the radiation and thermal use efficiency of the integrated technology of maize straw returning with alternate tillage and density increase[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(3): 475-483.



开放科学 OSID

玉米间隔耕作秸秆条带还田增密集成技术 光热资源利用效率评估

米娜¹, 张富荣^{3*}, 赵一俊⁴, 张玉书¹, 纪瑞鹏¹, 于文颖¹, 陈妮娜¹, 姜英², 齐华², 武晋雯¹

(1. 中国气象局沈阳大气环境研究所/辽宁省农业气象灾害重点实验室, 沈阳 110166; 2. 沈阳农业大学, 沈阳 110084; 3. 朝阳市气象局, 辽宁 朝阳 122000; 4. 盘锦市气象服务中心, 辽宁 盘锦 124010)

摘要:本研究以2019年辽宁省铁岭县蔡牛镇玉米间隔耕作秸秆条带还田增密集成技术示范区和普通农户种植区玉米为研究对象,分析了两个区域玉米的光温资源利用率、光能利用率和热量利用效率,并从叶片和冠层尺度净光合速率、光合生产能力与光合参数、地上生物量累积等角度分析了集成技术光热资源利用效率提高的原因。结果表明,玉米间隔耕作秸秆条带还田增密集成技术与农户技术相比,光温资源利用率、光能利用率和热量利用效率分别提高了8.6、0.25个百分点和19.4%。示范区各层叶片光合生产能力和光合作用参数均显著高于农户技术;吐丝期至籽粒形成期示范区冠层日净同化量累积较农户技术高35.5%;开花吐丝期前后示范技术地上生物量累积显著高出农户技术19.4%,利于籽粒形成,提高株籽粒数和产量。因此,玉米间隔耕作秸秆条带还田增密集成技术冠层结构设计合理,叶片和冠层尺度光合能力均优于传统农户技术,产量关键期(开花吐丝期前后)地上生物量累积速度快,是一种能有效提高玉米光热资源利用效率的技术模式。

关键词:玉米;光热资源利用效率;冠层净光合速率;光合生产能力;地上生物量累积;秸秆条带还田

中图分类号:S162

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2021)03-0475-09

doi: 10.13254/j.jare.2020.0277

Evaluating the radiation and thermal use efficiency of the integrated technology of maize straw returning with alternate tillage and density increase

MI Na¹, ZHANG Fu-rong^{3*}, ZHAO Yi-jun⁴, ZHANG Yu-shu¹, JI Rui-peng¹, YU Wen-ying¹, CHEN Ni-na¹, JIANG Ying², QI Hua², WU Jin-wen¹

(1. Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration (Shenyang)/Liaoning Provincial Key Laboratory of Agrometeorological Disasters, Shenyang 110166, China; 2. Shenyang Agricultural University, Shenyang 110084, China; 3. Chaoyang Meteorological Administration, Chaoyang 122000, China; 4. Panjin Meteorological Service Center, Panjin 124010, China)

Abstract: This study took maize cultivated using demonstration technology (SF treatment) and ordinary farmers' technology (CK treatment) as study objects and evaluated the radiation and thermal use efficiency of the two technologies. Reasons for improvements in radiation and thermal use efficiency were analyzed based on leaf- and canopy-level net photosynthesis rate, photosynthetic capacity and parameters, and cumulated above-ground biomass during the yield critical period. Results showed that compared with the CK, the utilization ratio of radiation temperature and energy of SF treatment increased by 8.6 and 0.25 percentage point, and the thermal use

收稿日期:2020-05-25 录用日期:2020-07-10

作者简介:米娜(1979—),女,辽宁锦州人,正高级工程师,主要从事农业气象学研究。E-mail:mina7921@126.com

*通信作者:张富荣 E-mail:lingyuanfurong@163.com

基金项目:国家重点研发计划粮食丰产增效科技创新重点专项(2018YFD0300309-02);辽宁省兴辽英才计划项目(XLYC1807262);中国气象局气候变化专项(CCSF201910)

Project supported: National Key R&D Program of China (2018YFD0300309-02); Liaoning Revitalization Talents Program (XLYC1807262); Climate Change Project of China Meteorological Administration (CCSF201910)

efficiency of the SF treatment increased by 19.4%. The photosynthetic production capacity and parameters of the SF, in particular, were significantly better than those of the CK. The accumulative daily assimilation during the silking-grain formation stage was higher in the SF, by 35.5%, than in the CK. The accumulative above-ground biomass during the anthesis-silking stage was higher in the SF, by 19.4%, than in the CK; this helped in grain formation and increasing the amount of grains per plant. Therefore, canopy construction is reasonable for maize straw returning with alternate tillage. The leaf- and canopy-level photosynthesis capacity of the SF is superior to the CK, and the rate of accumulative above-ground biomass during yield critical period is faster in the latter than the former. Thus, the higher radiation and thermal use efficiency of the demonstration SF technology can be applied widely.

Keywords: maize; radiation and thermal use efficiency; canopy net photosynthesis rate; photosynthetic production capacity; accumulative above-ground biomass; straw returning with alternate tillage

辽宁省是我国玉米种植的主要基地之一。2018年辽宁省玉米种植面积 $2.11 \times 10^6 \text{ hm}^2$,产量 $1.039 \times 10^7 \text{ t}$,其中,辽西北5市(沈阳、铁岭、锦州、朝阳、阜新)2016—2018年玉米种植总面积占全省种植面积的68.1%^[1]。近年来,针对辽宁玉米主要种植区秸秆还田方式不合理、影响出苗、农机农艺结合不佳等问题,集成创新了“玉米间隔耕作秸秆条带还田”技术^[2-3],在此基础上,增加玉米种植密度,构建不同的群体冠层结构,有利于改善玉米群体对光能资源的利用,有效提高玉米群体产量^[4]。上述技术主要在辽宁铁岭开展了试验与应用示范研究。高产高效可持续发展的现代农业需要充分利用自然资源,这对气候资源高效利用提出了更高的要求。因此,评估玉米间隔耕作秸秆条带还田增密技术的光热资源利用效率,阐述光热资源利用效率提高的原因,对于促进辽宁玉米秸秆还田增密技术模式应用、实现玉米持续稳产具有重要的意义。

玉米间隔耕作秸秆条带还田增密集成技术将还田带与播种带分离,进行交错耕作,避免了作物与秸秆的直接接触,一定程度上缓解了传统还田方式下播种和出苗困难的问题。该技术兼具免耕与深耕等优点,通过深、免耕间隔作业,田间呈“虚实相间”的耕层结构,既能有效解决秸秆全层还田中播种层土壤环境恶化与氮素竞争的问题,同时也破解了旱地合理耕层构建和地力提升问题,可同时实现提地力、防径流、控水蚀、蓄水保墒的多重目标,最大限度降低秸秆还田的不利影响,是构建合理耕层、改善玉米播种环境的有效途径^[2],2019年该技术被农业农村部列为全国农业主推技术。采用玉米间隔耕作秸秆条带还田技术构建合理耕层、提升地力的同时,合理密植玉米,有利于发挥地力的作用,增加有机物质的积累,提高收获穗数与产量^[4]。目前,亟待开展该集成创新模式的光热资源利用效率评估。

自20世纪90年代以来,我国关于光热资源利用效率评估研究屡见报道,有针对地域和作物的光热资源利用效率评估或变化特征分析,如河南省夏玉米和冬小麦^[5-7]、陕西省玉米^[8]、东北三省6种作物(玉米、水稻、春小麦、高粱、谷子和大豆)^[9]、黑龙江大豆^[10]、安徽双季稻^[11];有针对农业高产高效栽培技术的光热资源利用效率比较或评估,如玉米小麦间套作技术^[12-13]、冬小麦-夏玉米与双季玉米种植模式^[14]、冬小麦-夏玉米“双晚”种植模式^[15]、冬小麦高产高效栽培模式^[16]。在上述光热资源利用效率评估中,大多研究使用了光、热资源分别评估法,即分别使用光能利用率(光能生产效率)和热量利用效率(积温生产效率)2类评估指标,较少研究使用光热资源综合评估法,即采用光合资源利用率和光温资源利用率^[5,13,16]。在计算中,光能利用率(%)一般采用籽粒产量与干物质燃烧热量乘积再除以生长期间太阳总辐射量进行计算^[6,8,10],光能生产效率($\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1}$)则使用籽粒产量与生长季单位面积太阳辐射量的比值计算^[11,15,17];热量利用效率和积温生产效率($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)都是使用籽粒产量与生长季积温的比值计算。近年来,有学者开始关注两熟制作物的周年气候资源分配与利用研究^[18-19],为实现产量和资源利用效率双提升、促进两熟制种植模式可持续发展提供了理论依据。此外,还有研究开始关注作物的光能生产效率差和温度生产效率差,旨在明确农业生产条件和栽培措施对效率差的贡献率,以协同缩减产量差和效率差^[20]。本研究借鉴以往研究经验,综合选取光热资源利用效率评估指标,对玉米间隔耕作秸秆条带还田增密集成技术开展光热资源利用效率科学评估,开展田间对比试验观测,从叶片尺度光合能力与生理参数、冠层尺度净光合累积、产量关键期地上干物质积累等方面阐述光热资源利用效率提高的原因,为玉米持续高效稳产增产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究地点与技术模式

研究地点位于辽宁省铁岭县蔡牛镇(42°21'N, 123°37'E),该研究区属温带大陆性季风气候,四季分明,年平均气温和降水量分别为6.3℃和675.6mm。试验区的土壤为典型棕壤,0~20cm土层有机质含量19.7g·kg⁻¹[2]。玉米间隔耕作秸秆条带还田增密集成技术示范区面积6.7hm²。在示范区和普通农户种植区分别选取45m×12m作为试验小区,设置3个重复,分别记作SF和CK处理。SF和CK处理播种日期为2019年4月26日,收获日期为2019年9月30日。收获期专家田间现场测产。SF与CK处理的主要技术要点如表1所示。

玉米间隔耕作秸秆条带还田高产栽培技术是在秋季玉米机收后,通过秸秆条带还田机将经过灭茬作业的玉米秸秆残茬归带混拌于0~30cm土层中形成还田带,翌年春季在非还田带(即播种带)进行免耕播种,如此年际间交替作业。

表1 示范区(SF)与普通种植区(CK)处理的主要技术要点

Table 1 The main technical points of SF and CK treatment

项目 Items	SF	CK
栽培要点	旋耕秸秆条带还田、 大垄双行	秋季旋耕起垄、等行距
品种	中晚熟品种	中晚熟品种
播种密度/(株·m ⁻²)	6.75	5.25
施肥量/(kg·hm ⁻²)	N 240 P ₂ O ₅ 75 K ₂ O 225	N 240 P ₂ O ₅ 75 K ₂ O 225

1.2 资料来源

2019年1月1日至12月31日铁岭(42°18'N, 123°52'E,海拔85.4m)逐日平均气温和日照时数数据来源于辽宁省气象信息中心。

1.3 光热资源利用效率评估

综合以往研究^[6,13-15,17],本研究从以下3个方面对玉米生产光热资源利用效率进行评估。

(1) 光温资源利用率

$$E_{RT} = \frac{Y}{Y_p} \times 100\% \quad (1)$$

式中: E_{RT} 为光温资源利用率,%; Y 为单位面积作物籽粒产量,kg·hm⁻²; Y_p 为单位面积作物的光温生产潜力,kg·hm⁻²。计算方法参考文献[5]。

(2) 光能利用率

$$E_R = \frac{H \times Y}{\sum_{i=SD}^{MD} PAR} \times 100\% \quad (2)$$

式中: E_R 为光能利用率,%; H 为粮食作物干质量热值,表示单位质量干物质燃烧时释放出的热量,MJ·kg⁻¹,玉米为17.2MJ·kg⁻¹; $\sum_{i=SD}^{MD} PAR$ 为作物生长期(播种期SD至成熟期MD)的光合有效辐射,MJ·m⁻²。计算方法参考文献[8]。

(3) 热量利用效率

$$HUE = \frac{Y}{\sum_{i=SD}^{MD} CT} \quad (3)$$

式中:HUE为热量利用效率,kg·hm⁻²·℃⁻¹·d⁻¹; $\sum_{i=SD}^{MD} CT$ 为作物生长期大于等于生物学下限温度 B 的有效积温,℃·d,玉米生长下限温度取10℃;CT的计算方法如下:

$$CT = \begin{cases} 0 & T_{mean} \leq B \\ T_{mean} - B & T_{mean} > B \end{cases} \quad (4)$$

式中: T_{mean} 指的是日均气温。

1.4 小气候及光合生理指标测定

(1)小气候要素测定:在玉米试验区田间安装小气候观测塔,塔高4m,观测塔上方配有标准小气候观测站,采集的气候要素包括:总辐射、光合有效辐射、平均气温、最高气温、最低气温、相对湿度、风速风向、降水量和水汽压等,时间步长为30min。

(2)光合有效辐射测定:分别于2019年7月16日(孕穗期)和8月2日(籽粒形成-灌浆期)对SF和CK处理各层叶片接受到的光合有效辐射进行测定。使用ACCUPAR LP-80植物冠层分析仪同时测定SF与CK处理冠层顶层(冠层上方20cm)、冠层不同叶位层(第1展开叶、第3展开叶、第5展开叶等,以此类推)的光合有效辐射,冠层上方取4个点的平均值,其他各层取12个点的平均值。

(3)开花吐丝期不同叶位叶片的光合生产能力($P_n \times LAI$)^[21]测定:分别于2019年7月16日和8月2日对SF和CK处理各层叶片的净光合速率及叶片面积进行测定。使用LI-6400便携式光合作用仪测定定光强(1500μmol·m⁻²·s⁻¹)下植株上层(年轻的新展开的叶片,第1~2片)、中层(穗位叶或穗位上下的叶)、下层(相对较老的叶)叶片净光合速率,每个处理选取6株,取平均值。使用长宽法原位测定叶片面积,基于播种密度换算为叶面积指数(LAI)。

(4)叶片光响应和CO₂响应曲线测定:在玉米开花吐丝期选择晴朗天气上午进行穗位叶光曲线测定,选择3株叶片测定,将光梯度设置为2 000、1 800、1500、1200、1000、800、600、400、200、100、80、60、40、20、0 μmol·m⁻²·s⁻¹,外接CO₂小钢瓶,CO₂浓度设为400 μL·L⁻¹。穗位叶CO₂响应曲线测定同样选择3个叶片进行,红蓝光源设为1 500 μmol·m⁻²·s⁻¹,CO₂浓度梯度为400、200、25、50、100、150、200、300、400、600、800、1 000 μL·L⁻¹、1 200 μL·L⁻¹。测定后分别使用光合作用的非直角双曲线方程(式5)^[22]和Farquhar生化模型^[23-24]对光曲线和CO₂曲线进行拟合,由光曲线得到P_{max}(最大净光合速率)和α(表观量子效率)两个参数,由CO₂曲线得到V_{c,max}(最大羧化速率)和J_{max}(最大电子传递速率)两个参数。

非直角双曲线模型:

$$P_n = \frac{\alpha I + P_{\max} - \sqrt{(\alpha I + P_{\max})^2 - 4\theta(\alpha I P_{\max})}}{2\theta} - R_d \quad (5)$$

式中:P_n代表净光合作用速率;I为光量子通量密度;α为初始量子效率,即光响应曲线在I=0时的斜率;P_{max}为最大净光合速率;R_d为暗呼吸速率。

(5)开花吐丝期前后地上生物量累积测定:于玉米开花前10 d左右(2019年7月11日)和开花后14 d左右(2019年8月8日)取植株地上部分,每个处理取6株,带回实验室将玉米植株分离装袋,置于烘箱中,先105℃杀青1 h,之后80℃烘干至恒质量。比较两个处理开花期前后地上生物量累积值的差异。

1.5 冠层光合作用模拟

使用以Leuning等^[25]的多层模型为基础的冠层光合作用模型^[26-27]对吐丝期至籽粒形成期冠层光合作用进行模拟,比较SF和CK处理的冠层光合能力。冠层光合模型包括3部分:冠层的辐射吸收、耦合单叶气孔导度-能量平衡-光合作用模型、冠层尺度模型。模型模拟的时间步长为30 min,输入数据包括总辐射、光合有效辐射、空气密度、空气中CO₂浓度、气温、风速、叶面积指数、土壤含水量、饱和水汽压差、水汽压等。输出数据包括冠层光合、蒸腾、叶温、气孔导度(可区分阴阳叶片)。模型的详细描述及主要模拟过程参见文献[28]。

1.6 数据分析

采用SPSS 24.0进行SF处理与CK处理光合有效辐射、光合生产能力、光合作用参数、地上生物量累积等数据的显著性检验(显著性水平设为0.05)。

2 结果与分析

2.1 玉米光热资源利用效率评估结果

光热资源利用效率评估结果如表2所示,2019年示范技术(SF)光温资源利用率、光能利用率、热量利用效率分别为54.2%、1.54%和7.4 kg·hm⁻²·℃⁻¹·d⁻¹,较2019年农户技术(CK)分别提高了8.6、0.25个百分点和19.4%。

表2 2019年示范技术(SF)与农户技术(CK)光热资源利用效率比较

Table 2 Radiation and thermal use efficiency of demonstration technology(SF) and ordinary farmers' technology(CK)

评估指标 Evaluation index	CK	SF
光温资源利用率/%	45.6	54.2
光能利用率/%	1.29	1.54
热量利用效率/(kg·hm ⁻² ·℃ ⁻¹ ·d ⁻¹)	6.2	7.4

2.2 各层叶片光合有效辐射对比

由图1可见,冠层上部(第1展开叶至第3展开叶)接受到的光合有效辐射SF和CK间无显著差异,冠层下部(第5展开叶至第9展开叶)接受到的光合有效辐射CK显著高于SF(P<0.05,图1),原因在于CK播种密度较SF小,冠层透光性更好。

2.3 定光强下各层叶片的光合生产能力对比

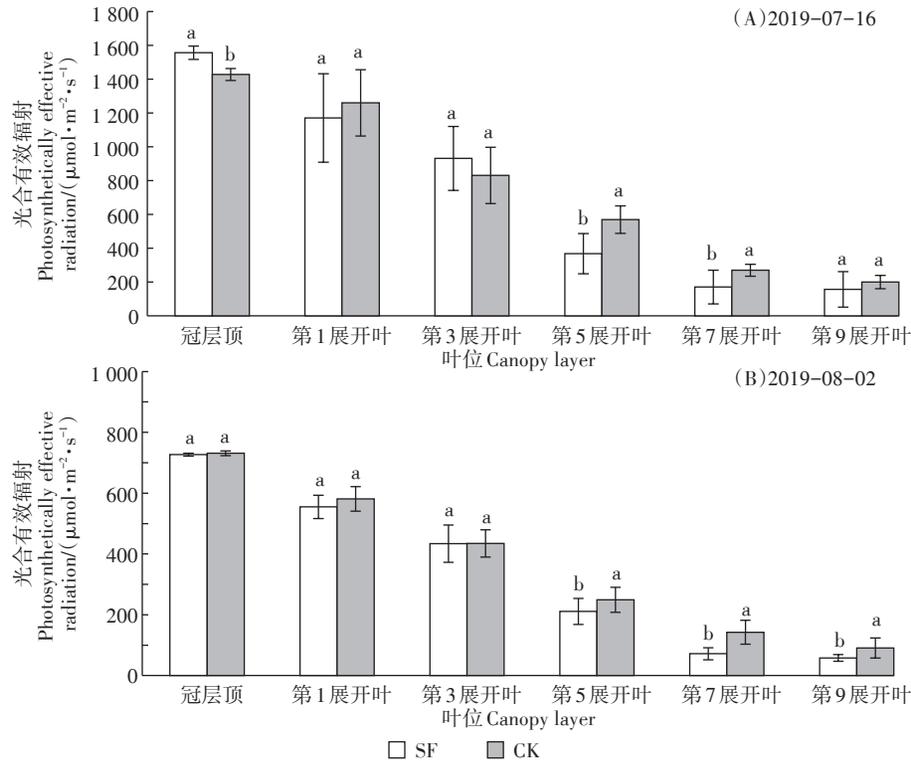
通过测定定光强(1 500 μmol·m⁻²·s⁻¹)下植物叶片的净光合作用速率和叶面积指数,比较了各层叶片的光合生产能力(图2),结果显示,SF上、中、下三层叶片光合生产能力(P_n×LAI)均大于CK,且差异显著(P<0.05)。由此可见,采用了间隔耕作秸秆条带还田高产栽培示范技术的玉米植株具有较强的光合生产能力,利于植株积累同化产物。

2.4 叶片光合作用参数对比

通过测定玉米产量关键期穗位叶片的光响应与CO₂响应曲线,利用光合作用的非直角双曲线方程和Farquhar生化模型拟合出四个光合参数,即最大净光合速率(P_{max})、表观量子效率(α)、最大羧化速率(V_{c,max})、最大电子传递速率(J_{max})的数值,如表3所示。两次测定结果均显示,SF处理P_{max}、α、V_{c,max}、J_{max}值均显著高于CK(P<0.01),分别较CK处理高4.3%~24.5%、28.9%~62.2%、50.4%~78.2%、31.9%~70.4%,表明SF处理利于提高光合作用效率。

2.5 吐丝期至籽粒形成期冠层光合作用对比

应用冠层光合作用模型模拟了玉米吐丝期至籽



不同字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。下同

The different lowercase letters indicate significant differences between SF and CK ($P<0.05$). The same below

图1 孕穗期和籽粒形成期SF与CK处理各层叶片光合有效辐射对比

Figure 1 Photosynthetically effective radiation of each layer for maize canopy of SF and CK treatments at boot stage and grain formation stage

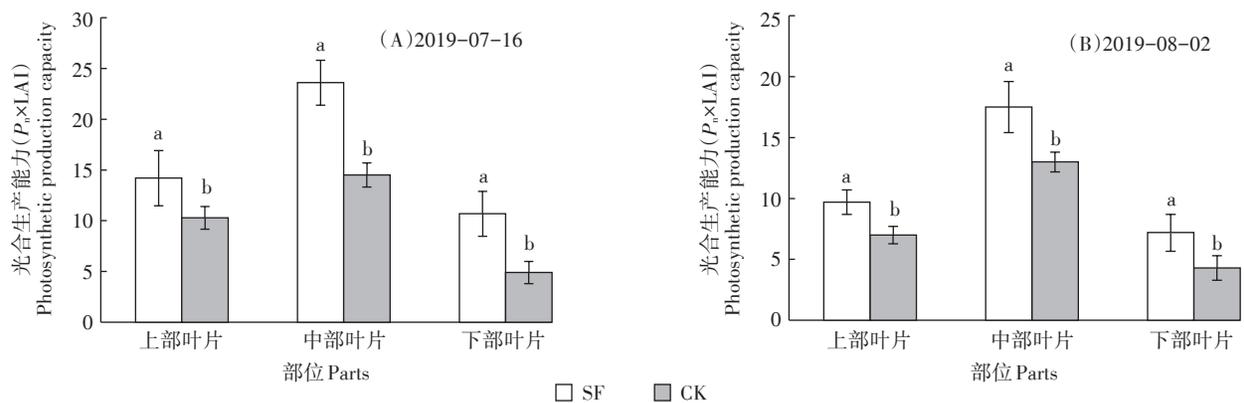


图2 孕穗期和籽粒形成期SF与CK处理定光强下各层叶片的光合生产能力对比

Figure 2 Photosynthetic capacity at a certain radiation of each layer for maize canopy of SF and CK treatments at boot stage and grain formation stage

表3 孕穗期和籽粒形成期SF与CK处理叶片光合作用参数对比

Table 3 Comparing of photosynthesis parameters between SF and CK treatments at boot stage and grain formation stage

处理 Treatments	$P_{\max}/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$		α		$V_{c,\max}/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$		$J_{\max}/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	
	2019-07-16	2019-08-02	2019-07-16	2019-08-02	2019-07-16	2019-08-02	2019-07-16	2019-08-02
SF	51.2a	40.6a	0.049a	0.060a	50.4a	63.6a	57.5a	71.9a
CK	49.1a	32.6b	0.038b	0.037b	33.5b	35.7b	43.6b	42.2b

注:同列不同字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: The different lowercase letters in a column indicate significant differences between SF and CK ($P<0.05$). The same below.

粒形成期(2019年7月23日至8月8日)冠层光合作用的日变化。由图3可见,冠层光合日变化呈现出单峰曲线,多数日期的峰值均出现在上午,SF处理的冠层净光合速率日最大值为50~60 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,而CK处理的冠层净光合速率日最大值仅为30~40 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。从冠层日净同化量(图4)来看,SF处理吐丝期至籽粒形成期冠层日净同化量累积值为332 $\text{g C}\cdot\text{m}^{-2}$,较CK处理(245 $\text{g C}\cdot\text{m}^{-2}$)高35.5%。

2.6 开花吐丝期前后地上生物量累积

玉米株籽粒数与开花吐丝期前后4~5周同化物的生产有关,因此玉米开花吐丝期前后(通常指开花前10 d至开花后15 d)这段时间为“产量关键期”^[29]。此阶段玉米生物量累积多意味着有充足的同化产物向植物各个器官分配,尤其是向贮藏器官分配。本研究分别于2019年7月11日和8月8日对玉米地上部分进行了取样测定,结果表明SF处理在开花吐丝期生物量累积值为947.3 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,比CK处理(793.1 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)提高了19.4%,且差异显著($P<0.05$,表4)。

3 讨论

本研究所用的光温资源利用率计算方法,是在王

表4 SF与CK处理开花吐丝期前后地上生物量累积值对比

Table 4 Cumulated above-ground biomass during flowering-silking stage for SF and CK treatments

处理 Treatments	生物量累积 Accumulated biomass/ ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	处理 Treatments	生物量累积 Accumulated biomass/ ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)
SF-1	1 002.4	CK-1	616.9
SF-2	961.9	CK-2	706.1
SF-3	968.6	CK-3	829.5
SF-4	948.4	CK-4	876.8
SF-5	914.6	CK-5	939.8
SF-6	887.6	CK-6	789.8
Mean±SD	947.3±40.8a	Mean±SD	793.1±117.0b

亚帆^[13]研究的基础上改进而来,将原公式中的分子,即作物生物量,用单位面积的作物籽粒产量代替,原因在于作物生物量不是农业生产部门的常规观测因子,改为单位面积的作物籽粒产量后,数据易于获得,有利于计算与比较。光温资源利用率在以往研究中并不多见,该概念是将光温生产潜力作为一个地区可以利用的光温资源,其中光温生产潜力采用逐级订正法进行计算。王亚帆^[13]使用作物生物量计算的小麦不同栽培模式光温利用率为52.7%~67.2%,比本研究

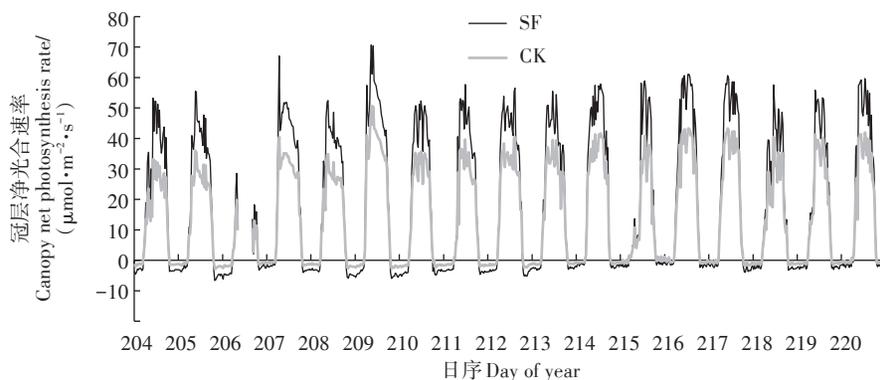


图3 2019年SF与CK处理冠层净光合速率日变化对比

Figure 3 Diurnal variation of canopy net photosynthesis rate for SF and CK treatment in 2019

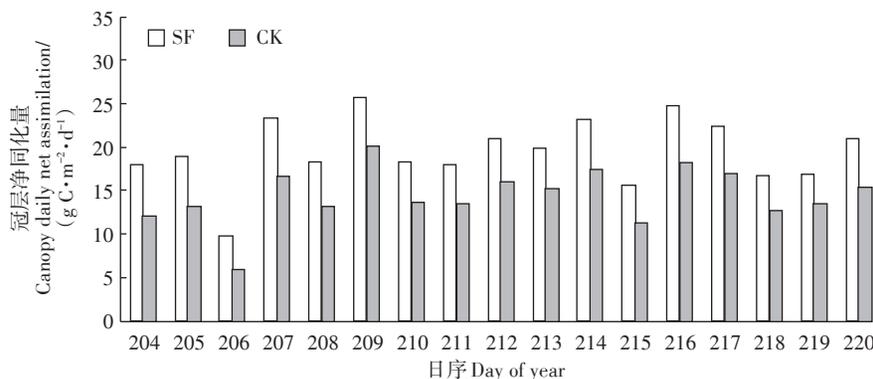


图4 2019年SF与CK处理冠层日净同化量对比

Figure 4 Canopy daily assimilation of SF and CK treatment in 2019

玉米光温资源利用率的计算值(45.6%~54.2%)偏高,主要是由于作物差异以及计算时所使用的变量不同。光能利用率在以往资源利用效率评估中较为常用,胡毅等^[30]对于光能利用率的计算,分子采用单位面积干物质收获量与单位干物质燃烧所放出的热量乘积,分母为作物全生育期单位面积的光合有效辐射,与其他文献计算方法并不一致,而其他文献中分子多使用籽粒产量进行计算,分母则使用太阳总辐射^[6,14]或光合有效辐射^[9]。光能利用率的理论计算值一般可达6%~8%,但实际生产中仅为0.5%~1%,最大可达2%~3%。本研究中玉米的光能利用率为1.29%~1.54%,较豫北地区夏玉米光能利用率(0.42%~0.96%)^[6]偏高。热量利用效率是资源利用效率评估中另一个较为常用的指标,文献中对该指标的定义较为一致,大多采用作物经济产量与作物生长期有效积温的比值进行计算。本研究中玉米的热量利用效率为6.2~7.4 kg·hm⁻²·°C⁻¹·d⁻¹,高于豫北地区夏玉米热量利用效率(2.5~5.1 kg·hm⁻²·°C⁻¹·d⁻¹)^[6],也高于黄淮海地区冬小麦-夏玉米周年热量利用效率(3.1~3.6 kg·hm⁻²·°C⁻¹·d⁻¹)^[14]。

从本研究结果来看,对于SF处理来说,无论从叶片尺度还是冠层尺度,其光合性能均优于CK处理(图2~图4,表3)。此外,SF处理玉米开花吐丝期前后地上生物量的累积量较CK提高19.4%。虽然,SF处理冠层中下部及下部叶片接受到的光合有效辐射较CK处理偏低,但其较强的冠层光合性能足以抵消掉中下部叶片辐射减少所带来的不利影响,最终使SF处理的光热资源利用效率高于CK处理。以往研究中,用玉米植株各叶位的净光合速率(P_n)乘以对应的叶面积指数(LAI)来反映各叶位的光合生产能力,玉米冠层内不同叶位的光合生产能力分布自上而下呈单峰不对称曲线形式^[21],本研究结果显示三层叶片光合生产能力的大小表现为中部叶片>上层叶片>下层叶片,符合冠层内不同叶位叶片的光合生产能力分布规律。

光曲线模型反映了净光合作用速率对光合有效辐射的响应,通过曲线模型拟合光合有效辐射与净光合速率的关系,可求出最大净光合速率、表观量子效率等光合生理参数。在众多光响应曲线模型中,非直角双曲线模型的使用频率最高^[31-32]。表观量子效率(α)是反映作物净光合速率光响应特征的重要指标,能够反映作物在弱光下对光能的吸收、传递和利用的能力,理论上最大量子效率为0.08~0.125,但实际 α 值远小于理论上限,对于长势良好的作物, α 值一般为

0.04~0.07^[33-34]。本研究中SF与CK处理的 α 值为0.037~0.060,与以往的研究结果^[33-34]较为一致。最大净光合速率(P_{max})是衡量作物冠层光合能力的重要指标,与以往研究对正常生长条件下玉米所拟合出的 P_{max} 值(28.8~52.1 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)^[32,35-36]相比,本研究的 P_{max} 值(32.6~51.2 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)在合理范围内。光合作用对CO₂浓度的响应研究中,Farquhar等^[23]建立的生化模型被广泛地应用于植物的生理生态学研究中,根据此生化模型以及此后的修正模型^[37-38],可以计算出植物的最大羧化速率和电子传递速率^[39],这两个参数同时也是生态系统模型中的两个重要参数,用于计算叶片和冠层的同化速率。叶片最大羧化速率对冠层光合速率具有决定作用,提高叶片最大羧化速率是提高光能利用率的关键^[40]。本研究结果显示,无论是 $V_{c,max}$ 还是 J_{max} ,SF处理的值均显著高于CK处理,从光合作用生理角度解释了SF处理比CK处理光热资源利用率高的原因。

本研究采用多层模型模拟了玉米吐丝期至籽粒形成期的冠层净光合速率,研究发现SF处理和CK处理在此期间的冠层净光合速率峰值分别为50~60 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和30~40 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,该值与Grant等^[41]对玉米冠层净光合速率的模拟值较为一致,与基于涡度相关法观测到的玉米农田净生态系统生产力(NEP)的值^[42]也有较好的一致性,但高于顾生浩等^[43]基于三维冠层模型模拟的结果(玉米最大冠层净光合速率为19.6~26.2 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),不同模拟方法所产生的结果差异,一方面可能是因为三维光分布模型和二维多层模型的光分布计算结果存在较大差异;另一方面,多层模型没有考虑叶片光合生理特性的垂直差异可能也是模拟不确定性的原因。本研究只比较了SF与CK处理冠层净光合速率的模拟值,缺乏冠层净光合实测数据的验证,今后当条件具备时应结合涡度相关通量观测数据,对多层模型的模拟效果进行检验。

4 结论

(1)玉米间隔耕作秸秆条带还田增密集成技术与农户技术相比,光热资源利用效率显著提高。

(2)示范区各层叶片光合生产能力和光合作用参数均显著大于农户技术。

(3)吐丝期至籽粒形成期示范区冠层日净同化量累积较农户技术高35.5%。

(4)开花吐丝期前后示范技术地上生物量累积显著高于农户技术(增幅19.4%),利于籽粒形成,提高

株籽粒数与产量。

因此,玉米间隔耕作秸秆条带还田增密集成技术所采用的大垄双行冠层结构设计合理,叶片和冠层尺度光合能力均优于传统农户技术,产量关键期(开花吐丝期前后)地上生物量累积速度快,是一种能有效提高玉米光热资源利用效率的集成技术模式。

参考文献:

- [1] 李秀芳, 辽宁省玉米生产情况及产业结构调整趋势[J]. 新农业, 2019(6): 38-39. LI Xiu-fang. Maize productions and industrial structure adjustment trends in Liaoning Province[J]. *New Agriculture*, 2019(6): 38-39.
- [2] 安俊朋, 李从锋, 齐华, 等. 秸秆条带还田对东北春玉米产量、土壤水氮及根系分布的影响[J]. 作物学报, 2018, 44(5): 774-782. AN Jun-peng, LI Cong-feng, QI-hua, et al. Effects of straw strip returning on spring maize yield, soil moisture, nitrogen contents and root distribution in northeast China[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(5): 774-782.
- [3] 张文可, 安俊朋, 隋鹏祥, 等. 行间耕作对玉米生长发育及根系分布的影响[J]. 玉米科学, 2018, 26(3): 108-114. ZHANG Wen-ke, AN Jun-peng, SUI Peng-xiang, et al. Effect of inter-row tillage on growth and root distribution of maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2018, 26(3): 108-114.
- [4] 王洪君, 王楠, 胡宇, 等. 半干旱区玉米行距调整增密对群体冠层结构及产量的影响[J]. 玉米科学, 2018, 26(6): 75-78. WANG Hong-jun, WANG Nan, HU Yu, et al. Effects of row spacing on canopy structure and yield of maize in semi-arid area[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2018, 26(6): 75-78.
- [5] 张鹏岩, 王开泳, 闫江虹, 等. 基于GIS的河南夏玉米光合光温资源利用效率评价[J]. 资源科学, 2011, 33(12): 2408-2416. ZHANG Peng-yan, WANG Kai-yong, YAN Jiang-hong. Evaluation of utilization efficiency of photosynthetic and photo-temperature resources of summer maize in Henan Province[J]. *Resource Science*, 2011, 33(12): 2408-2416.
- [6] 刘晓迎, 陈罗成, 赵巧梅, 等. 豫北主要农作物光热资源利用效率研究[J]. 河南农业科学, 2012, 41(4): 29-33. LIU Xiao-ying, CHEN Luo-cheng, ZHAO Qiao-mei, et al. Light and heat utilization efficiency of winter wheat and summer maize in northern region of Henan Province[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2012, 41(4): 29-33.
- [7] 徐延红, 李树岩. 气候变化对河南省小麦和玉米气候资源利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(5): 218-225. XU Yan-hong, LI Shu-yan. Impact of climate change on climatic resources utilization efficiency of wheat and maize in Henan Province[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(5): 218-225.
- [8] 钱锦霞, 胡良温. 山西省玉米气候资源利用效率分析[J]. 玉米科学, 2008, 16(4): 192-195. QIAN Jin-xia, HU Liang-wen. Analysis of climatic resources utilization efficiency of maize in Shanxi Province[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2008, 16(4): 192-195.
- [9] 王晓煜, 杨晓光, 孙爽, 等. 气候变化背景下东北三省主要粮食作物产量潜力及资源利用效率比较[J]. 应用生态学报, 2015, 26(10): 3091-3102. WANG Xiao-yu, YANG Xiao-guang, SUN Shuang, et al. Comparison of potential yield and resource utilization efficiency of main food crops in three provinces of northeast China under climate change[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(10): 3091-3102.
- [10] 王畅, 赵海东, 冯乃杰, 等. 两个生态区大豆光热资源利用率和产量的差异及对化控剂的响应[J]. 应用生态学报, 2018, 29(11): 3615-3624. WANG Chang, ZHAO Hai-dong, FENG Nai-jie, et al. Differences in light and heat utilization efficiency and yield of soybean in two ecological zones and their response to chemical control regulators[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(11): 3615-3624.
- [11] 岳伟, 陈金华, 阮新民, 等. 安徽省沿江地区双季稻光热资源利用效率变化特征及对气象产量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(6): 929-940. YUE Wei, CHEN Jin-hua, RUAN Xin-min, et al. Variation in characteristics of light and heat resource utilization efficiency of double-season rice and its impact on meteorological yield along the Yangtze River in Anhui Province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(6): 929-940.
- [12] 赵延魁, 王玉凤, 阎春风, 等. 玉米小麦间套作对光热资源利用效率的研究[J]. 辽宁农业科学, 1994(1): 11-14. ZHAO Yan-kui, WANG Yu-feng, YAN Chun-feng, et al. Research on light and thermal use efficiency for intercropping of maize and wheat[J]. *Liaoning Agricultural Science*, 1994(1): 11-14.
- [13] 王亚帆. 黄淮海玉米两熟区不同栽培模式下小麦资源利用效率研究[D]. 郑州: 河南师范大学, 2015. WANG Ya-fan. Study on resource use efficiency of winter wheat under different cultivation models in wheat and maize rotation system of Huang-Huai area[D]. Zhengzhou: Henan Normal University, 2015.
- [14] 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 Bao-yuan, WANG Zhi-min, YUE Yang, 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.
- [15] 付雪丽, 张惠, 贾继增, 等. 冬小麦-夏玉米“双晚”种植模式的产量形成及资源效率研究[J]. 作物学报, 2009, 35(9): 1708-1714. FU Xue-li, ZHANG Hui, JIA Ji-zeng, et al. Yield performance and resources use efficiency of winter wheat and summer maize in double late-cropping system[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(9): 1708-1714.
- [16] 姜丽娜, 李金娜, 齐红志, 等. 不同栽培模式冬小麦物质积累转运及光热资源利用研究[J]. 河南农业科学, 2018, 47(12): 14-19. JIANG Li-na, LI Jin-na, QI Hong-zhi, et al. Matter accumulation and transport of winter wheat and utilization of photothermal resources under different cultivation patterns[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2018, 47(12): 14-19.
- [17] 杜立丰, 高丽锋, 周荣华, 等. 基于重组自交系群体的小麦光温生产效率分析及新品系培育[J]. 中国农业科学, 2013, 46(8): 1523-1532. DU Li-feng, GAO Li-feng, ZHOU Rong-hua, et al. Wheat photosynthetic and temperature production efficiency characters and varieties screening based on recombinant inbred lines populations[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(8): 1523-1532.
- [18] 周宝元, 马玮, 孙雪芳, 等. 播/收期对冬小麦-夏玉米一年两熟模式周年气候资源分配与利用特征的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(9): 1501-1517. ZHOU Bao-yuan, MA Wei, SUN Xue-fang,

- et al. Effects of different sowing and harvest dates of winter wheat-summer maize under double cropping system on the annual climate resource distribution and utilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(9):1501-1517.
- [19] 杜祥备,孔令聪,习敏,等.江淮区域稻麦两熟制周年资源分配、利用特征[J].中国生态农业学报(中英文),2019,27(7):1078-1087. DU Xiang-bei, KONG Ling-cong, XI Min, et al. Characteristics of resource allocation and utilization of rice-wheat double cropping system in the Jianghuai area[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(7):1078-1087.
- [20] 王洪章,刘鹏,董树亭,等.夏玉米产量与光温生产效率差异分析——以山东省为例[J].中国农业科学,2019,52(8):1355-1367. WANG Hong-zhang, LIU Peng, DONG Shu-ting, et al. Analysis of gap between yield and radiation production efficiency and temperature production efficiency in summer maize: Taking Shandong Province as an example[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(8):1355-1367.
- [21] 范盼盼,谢瑞芝,明博,等.基于不同叶位受光条件的玉米冠层光合生产能力分析[J].玉米科学,2017,25(5):68-72. FAN Pan-pan, XIE Rui-zhi, MING Bo, et al. Analysis of photosynthetic productivity of maize canopy based on light conditions of different leaf positions[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2017, 25(5):68-72.
- [22] Thornley J H M. Mathematical models in plant physiology[M]. London: Academic Press, 1976.
- [23] Farquhar G D, von Caemmerer S, Berry J A. A biochemical model of photosynthetic CO₂ fixation in leaves of C₃ species[J]. *Planta*, 1980, 149:78-90.
- [24] Long S P, Bernacchi C J. Gas exchange measurements, what can they tell us about the underlying limitations to photosynthesis? Procedures and sources of error[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2003, 54(392):2393-2401.
- [25] Leuning R, Kelliher F M, De Pury D G G, et al. Leaf nitrogen, photosynthesis, conductance and transpiration: Scaling from leaves to canopies[J]. *Plant Cell and Environment*, 1995, 18(10):1183-1200.
- [26] 陈妮娜,袁凤辉,王安志,等.气候变化对长白山阔叶红松林冠层蒸腾影响的模拟[J].应用生态学报,2011,22(2):309-316. CHEN Ni-na, YUAN Feng-hui, WANG An-zhi, et al. Simulation of the effects of climate change on canopy transpiration over a broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountains[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(2):309-316.
- [27] Chen N N, Wang A Z, An J, et al. Modeling canopy carbon and water fluxes using a multilayered model over a temperate meadow in Inner Mongolia[J]. *International Journal of Plant Production*, 2020, 14:141-154.
- [28] Shi T T, Guan D X, Wang A Z, et al. Modeling canopy CO₂ and H₂O exchange of a temperate mixed forest[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2010, 115:D17117.
- [29] Borrás L, Westgate M E, Astini J P, et al. Coupling time to silking with plant growth rate in maize[J]. *Field Crops Research*, 2007, 102(1):73-85.
- [30] 胡毅,李萍,杨建功,等.应用气象学[M].二版.北京:气象出版社,2015. HU Yi, LI Ping, YANG Jian-gong, et al. Applied meteorology [M]. 2nd Edition. Beijing: China Meteorological Press, 2015.
- [31] 王圣杰,黄大庄,闫海霞,等.4种经验模型在藏川杨光响应研究中的适用性[J].北华大学学报(自然科学版),2011,12(2):208-212. WANG Sheng-jie, HUANG Da-zhuang, YAN Hai-xia, et al. Applicability of four empirical models on photosynthesis light response of *Populus szechuanica* Schneid[J]. *Journal of Beihua University(Natural Science)*, 2011, 12(2):208-212.
- [32] 李义博,宋贺,周莉,等.C4植物玉米的光合-光响应曲线模拟研究[J].植物生态学报,2017,41(12):1289-1300. LI Yi-bo, SONG He, ZHOU Li, et al. Modeling study on photosynthetic-light response curves of a C4 plant, maize[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2017, 41(12):1289-1300.
- [33] Long S P, Humphries A S, Falkowski P G. Photoinhibition of photosynthesis in nature[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2003, 45(1):633-662.
- [34] 陆佩玲,于强,罗毅,等.冬小麦光合作用的光响应曲线的拟合[J].中国农业气象,2001,22(2):12-14. LU Pei-ling, YU Qiang, LUO Yi, et al. Fitting light response curves of photosynthesis is of winter wheat[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2001, 22(2):12-14.
- [35] 刘明,齐华,孙世贤,等.水分胁迫对玉米光合特性的影响[J].玉米科学,2008,16(4):86-90. LIU Ming, QI Hua, SUN Shi-xian, et al. Effects of water stress on maize photosynthetic characteristics[J]. *Journal of Maize Science*, 2008, 16(4):86-90.
- [36] 夏璐,赵蕊,王怡针,等.干旱胁迫对夏玉米光合作用和叶绿素荧光特性的影响[J].华北农学报,2019,34(3):102-110. XIA Lu, ZHAO Rui, WANG Yi-zhen, et al. Effects of drought stress on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics of summer maize[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2019, 34(3):102-110.
- [37] Von Caemmerer S, Farquhar G D. Some relationships between the biochemistry of photosynthesis and the gas exchange of leaves[J]. *Planta*, 1981, 153(4):376-387.
- [38] Von Caemmerer S. Biochemical models of leaf photosynthesis, techniques in plant sciences[M]. Collingwood:CSIRO Publishing, 2000.
- [39] 叶子飘,于强.光合作用对胞间和大气CO₂响应曲线的比较[J].生态学杂志,2009,28(11):2233-2238. YE Zi-piao, YU Qiang. A comparison of response curves of winter wheat photosynthesis to flag leaf intercellular and air CO₂ concentration[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(11):2233-2238.
- [40] 张彦敏,周广胜.植物叶片最大羧化速率及其对环境因子响应的研究进展[J].生态学报,2012,32(18):5907-5917. ZHANG Yan-min, ZHOU Guang-sheng. Advances in leaf maximum carboxylation rate and its response to environmental factors[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(18):5907-5917.
- [41] Grant R F, Peters D B, Larson E M, et al. Simulation of canopy photosynthesis in maize and soybean[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1989, 48(1/2):75-92.
- [42] Kothavala Z, Arain M A, Black T A, et al. The simulation of energy, water vapor and carbon dioxide fluxes over common crops by the Canadian Land Surface Scheme (CLASS)[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 133(1/2/3/4):89-108.
- [43] 顾生浩,王勇健,温维亮,等.基于三维冠层模型的玉米光合作用和光能利用模拟[J].农业工程学报,2019,35(21):178-184. GU Sheng-hao, WANG Yong-jian, WEN Wei-liang, et al. Modelling maize photosynthesis and light utilization based on a 3D maize canopy model[J]. *Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(21):178-184.