

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.05.032

散射辐射对鄱阳湖平原典型稻田总初级生产力的影响

刘 博¹ 侯佳佳¹ 时元智² 崔远来³

(1. 扬州大学水利科学与工程学院, 扬州 225009;
 2. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210029;
 3. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 武汉 430072)

摘要: 探明散射辐射变化对稻田生态系统总初级生产力(Gross primary productivity, GPP)的影响可为稻田碳汇能力评估和产量估算提供参考。本研究以鄱阳湖平原双季稻田为研究对象, 利用涡度相关(Eddy covariance, EC)系统对稻田CO₂通量进行了连续两年(2017—2018年)的定位观测, 选取水稻生育中期数据, 按照散射辐射比例(Diffuse fraction, DF)进行分段, 分析了散射辐射对稻田GPP的影响, 探明并量化了不同DF条件下散射辐射与其他气象因素对稻田GPP的影响机制。结果表明: 不同类型辐射对GPP的影响存在差异, GPP随着直接光合有效辐射(Direct photosynthetically active radiation, PAR_{dir})的增加先迅速增长, 随后达到饱和; 在不同DF条件下, 早晚稻GPP随着散射光合有效辐射(Diffuse photosynthetically active radiation, PAR_{dif})的变化趋势存在差异, 当DF为0.1~0.4时, 早稻GPP随PAR_{dif}无明显变化趋势, 晚稻GPP随PAR_{dif}呈上升趋势(决定系数R²为0.23), 当DF为0.4~0.7时, 早晚稻GPP随PAR_{dif}呈下降趋势(R²为0.38、0.02), 当DF为0.7~1.0时, 早晚稻GPP随PAR_{dif}呈明显上升趋势(R²为0.32、0.89), 可见PAR_{dif}是影响水稻GPP的重要因素。早晚稻GPP与DF呈二次曲线关系(R²为0.45、0.67), 早晚稻光能利用效率(Light use efficiency, LUE)则与DF呈显著的线性正相关关系(R²为0.68、0.82), 早晚稻最优DF为0.48和0.40。DF变化同时引起气温(Air temperature, T_a)和饱和水汽压差(Water vapor pressure deficit, VPD)的变化, 进而对水稻GPP产生协同影响。气象因素与水稻GPP的通径分析结果表明: 不同DF条件下, 气象因素对水稻GPP的影响存在明显差异。总体而言, T_a和VPD升高分别对水稻GPP起促进和抑制作用, 当DF为0.1~0.4、0.4~0.7和0.7~1.0时, 影响早稻GPP的主要气象因素为T_a、PAR_{dir}和PAR_{dif}, 影响晚稻GPP的主要气象因素则为PAR_{dif}、PAR_{dir}和PAR_{dif}。

关键词: 散射辐射; 气溶胶; 总初级生产力; 稻田; 通径分析; 鄱阳湖平原

中图分类号: P422; Q148 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2024)05-0334-10

OSID: [http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1353.TQ.20240503.1010.001.html](#)



Effects of Diffuse Radiation on Gross Primary Productivity of Typical Paddy Fields in Poyang Lake Plain

LIU Bo¹ HOU Jiajia¹ SHI Yuanzhi² CUI Yuanlai³

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China
 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
 Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China
 3. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Exploring the impact of diffuse radiation changes on the gross primary productivity (GPP) of paddy ecosystem can provide a reference for the assessment of paddy carbon sink capacity and yield estimation. The eddy covariance (EC) system was used to measure the CO₂ flux in the double-cropping paddy field in the Poyang Lake Plain for two consecutive years (2017—2018). The data from the mid-season period of rice was segmented according to the diffuse fraction (DF), and the effect of diffuse radiation and other meteorological factors on GPP under different DF conditions were explored. The results showed that the effects of different types of radiation on GPP were different. For both the early rice

收稿日期: 2023-10-23 修回日期: 2024-01-06

基金项目: 国家自然科学基金长江水科学研究联合基金项目(U2040213)、江西省水利科技项目(202123YBKT09)和江苏省高等学校基础科学研究面上项目(21KJB210021)

作者简介: 刘博(1992—), 男, 讲师, 博士, 主要从事农田生态水文研究, E-mail: boliu@yzu.edu.cn

and the late rice, GPP and PAR showed a quadratic curve relationship (R^2 was 0.49 and 0.70). Under different DF conditions, the variation trend of GPP of early and late rice with diffuse photosynthetically active radiation (PAR_{dif}) was different. When DF was 0.1 ~ 0.4, GPP of early rice did not change significantly with PAR_{dif}, GPP of late rice was increased with PAR_{dif} ($R^2 = 0.23$), and GPP of early and late rice was decreased when DF was 0.4 ~ 0.7 (R^2 was 0.38 and 0.02). When DF was 0.7 ~ 1.0, GPP of early and late rice showed a significant upward trend with PAR_{dif} (R^2 was 0.32 and 0.89), indicating that PAR_{dif} was an important factor affecting GPP of rice. As for the direct photosynthetically active radiation (PAR_{dir}), when PAR_{dir} was between 0 ~ 10 mol/(m²·d), GPP was increased rapidly with the increase of PAR_{dir}, and then tended to be stable. With the increase of DF, GPP and DF showed a quadratic curve relationship (R^2 was 0.45 and 0.67), while the light use efficiency (LUE) and DF showed a significant linear positive correlation (R^2 was 0.68 and 0.82). The optimal DF of the early and the late rice were 0.48 and 0.40, respectively. The changes of DF caused the changes of meteorological factors such as air temperature (T_a) and water vapor pressure deficit (VPD), which had a synergistic effect on rice GPP. The results of path analysis between meteorological factors and GPP showed that the effects of meteorological factors on GPP varied under different DF conditions. Overall, the increase of T_a and VPD had positive and negative effects on rice GPP, respectively. T_a , PAR_{dir} and PAR_{dif} were the main meteorological factors affecting GPP for the early rice, and PAR_{dif}, PAR_{dir} and PAR_{dif} were the main meteorological factors for the late rice when DF was 0.1 ~ 0.4, 0.4 ~ 0.7 and 0.7 ~ 1.0, respectively.

Key words: diffuse radiation; aerosol; gross primary production; paddy field; path analysis; Poyang Lake Plain

0 引言

太阳辐射是驱动作物生长的能量来源,可以分为直接辐射和散射辐射两部分^[1]。总初级生产力(Gross primary productivity, GPP)是指单位时间内作物通过光合作用所固定的有机碳量,是表征作物光合作用强度的重要指标,同时也是粮食产量形成的起点^[2-3]。以往研究表明,相比直接辐射,散射辐射更易穿透冠层,促进作物阴叶的光合作用,从而提高作物冠层光能利用率(Light use efficiency, LUE)和GPP^[4-5]。20世纪50年代以来,工业发展与人类活动导致大气气溶胶浓度增高,全球各地监测到的地面总辐射和直接辐射呈显著下降趋势^[6-7],而散射辐射比例(Diffuse fraction, DF)显著升高,即“全球变暗”现象^[8-10]。进入21世纪以后,全球大部分地区开始呈现“变亮”的趋势,这一趋势将引起散射辐射的变化,势必对农田GPP产生影响。因此,探明并量化散射辐射变化对农田生态系统GPP的影响对于准确估算全球变暗/变亮背景下的农田固碳具有重要意义。

1991年菲律宾皮纳图博火山爆发后,大量气溶胶被释放到大气中,造成全球太阳总辐射明显下降,但散射辐射比例升高,导致全球陆地生态系统GPP持续增加了3年^[11]。这一事件引起了广大研究者的关注,研究者针对散射辐射对陆面生态系统GPP的影响开展了大量研究。杨晓亚等^[2]对山东省禹城地区冬小麦进行了两年的连续观测试验,发现GPP与DF间存在极显著的抛物线关系,当DF和光

合有效辐射(Photosynthetically active radiation, PAR)均值为0.57和27.7 mol/(m²·d)时,冬小麦GPP达到最高。李登秋等^[12]利用BEPS模型模拟了不同辐射条件下2003—2005年千烟洲人工常绿针叶林GPP的变化特征,发现太阳总辐射降低10%将导致直接辐射降低大约20%,但由于散射辐射增加0.66% ~ 2.59%,导致最终的GPP基本没有变化。也有研究表明,散射辐射与直接辐射光谱特性不同,具有更多有利于植被光合的蓝光,即使在相同辐射强度下,接收散射辐射的叶片光合作用更强^[13]。ZHOU等^[14]对全球200多个通量站点研究发现,散射辐射每增加1 W/m²,GPP可以提高0.44% ~ 1.01%,大约是相同强度直接辐射的2.5倍。散射辐射也可以通过影响其他环境因素来间接影响作物光合作用^[15-16]。当散射辐射增加时,饱和水汽压差(Water vapor pressure deficit, VPD)降低可增加叶片气孔导度,有利于植被吸收CO₂进行光合作用^[17];STEINER等^[18]指出,正午时向光叶片温度可能超过光合最佳温度,散射辐射升高可降低叶片温度,从而增加叶片光合速率。由此可见,散射辐射与其他环境因素对作物GPP具有协同影响。然而,目前大部分研究集中于森林生态系统以及旱作农田,有关散射辐射对稻田生态系统GPP影响的研究仍较少。

鄱阳湖平原是我国南方主要的水稻产区,该地区水热资源充足,水稻种植模式为一年两季,即早晚稻模式。近年来,随着环鄱阳湖城市群的快速发展,

该区域气溶胶排放增大。此外,由于鄱阳湖平原三面环山,气溶胶难以扩散,导致散射辐射处于较高水平。随着我国“双碳”战略的逐步实施,未来该区域散射辐射比例将显著降低^[19],必将影响稻田GPP,进而改变水稻最终产量。因此,有必要探明散射辐射变化对鄱阳湖平原稻田GPP的影响,从而为“双碳”背景下鄱阳湖平原水稻可持续发展提供理论依据。综上,本研究基于鄱阳湖平原典型稻田,使用涡度相关系统对稻田CO₂通量进行定位监测,结合散射辐射和其他环境因素,探明散射辐射对鄱阳湖平原稻田GPP的影响机制。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究站点位于江西省灌溉试验中心站(28°26'N, 116°00'E, 海拔22 m),属于鄱阳湖平原。该区属于典型亚热带季风气候,四季分明,水资源丰富且日照充足,年均气温在17~18°C之间,年平均降雨量为1663 mm,早稻生长季降雨丰富,晚稻生长季降雨少。该区土壤为粉砂质黏土,属于典型南方红壤水稻土,干密度为1.34 g/cm³,饱和含水率为49%。当地水稻种植模式为一年两季,生长季为4月至10月,其中,早稻多于4月下旬移栽,7月中旬收获;晚稻多于7月下旬移栽,10月底收获^[20]。

1.2 观测项目

1.2.1 CO₂通量观测

使用涡度相关(Eddy covariance, EC)系统(图1,图中黑色虚线框表示90%通量贡献区范围)观测大气-冠层间CO₂通量。EC系统位于试验田南侧偏西,主要包括开路式红外CO₂/H₂O分析仪(LI-7500A型, LI-COR公司,美国)、三维超声风速仪(R3-50型,Gill公司,英国)和数据采集器(LI-7550型, LI-COR公司,美国)等设备。红外CO₂/H₂O分析仪和三维超声风速仪安装在地面以上2.5 m,采样频率为10 Hz,每30 min汇总一组数据储存在数据采集器(CR1000型, Campbell公司,美国)中。



图1 涡度相关系统及其位置图

Fig. 1 Schematic showing eddy covariance system and its location

1.2.2 环境因素与叶面积指数

通量塔同时配套了环境因素观测仪器:空气温湿度传感器(HMP155型,Vaisala公司,芬兰)、净辐射传感器(NR-lite2型,Kipp&Zonen公司,美国)、光合有效辐射传感器(LI-190SB型,LI-COR公司,美国)和雨量筒(TE525MM型,Texas公司,美国),以上探头安装在地面以上3 m;土壤温湿度传感器(ML2x型,Delta-T公司,英国)和土壤热通量板(HFP01型,Hukseflux公司,芬兰)安装在地面以下5 cm,所有设备每隔30 min计算一组均值,通过数据采集器进行存储。试验站内另有一套自动监测气象站,观测数据包括日照时数、空气温湿度、风速、降水量、大气压等,两套数据可以相互补充和验证,保证气象资料的完整性。

使用冠层分析仪每隔7~14 d观测一次叶面积指数(Leaf area index, LAI),使用非线性回归法建立LAI与移栽后时间(DAT)的模型,逐日LAI由模型计算获取,详见文献[21]。

1.3 数据计算与处理

1.3.1 通量数据计算与校正

使用EddyPro 6.2.1对原始数据进行计算和校正,校正方法包括倾斜校正、WPL校正、频率响应校正、质量控制^[21~23]等,最终输出30 min净生态系统交换量(Net ecosystem exchange, NEE)。试验站主风向为东北风,占所有风向95%以上,通量贡献区显示白天主风向90%通量均来自水稻试验田范围(图1)。使用非线性回归法对NEE进行插补并将NEE分解为GPP和生态系统呼吸(Ecosystem respiration)。首先使用Lloyd & Taylor呼吸模型^[20,24]对夜间NEE(即生态系统呼吸)进行插补,计算式为

$$R_{\text{eco}} = ae^{bT_a} \quad (1)$$

式中 R_{eco} —生态系统呼吸量

a, b —拟合参数

T_a —空气温度, °C

同时使用该模型估算白天 R_{eco} ,白天有效GPP可由有效NEE与白天 R_{eco} 的差值得到,根据MONTEITH的辐射使用效率理论,缺失的GPP可由非矩形双曲模型^[25]模拟得到,公式为

$$GPP = \frac{1}{2\theta}(\alpha PAR + A_{\max} - \sqrt{(\alpha PAR + A_{\max})^2 - 4\alpha\theta A_{\max}PAR}) \quad (2)$$

式中 θ —光响应曲线曲率

α —表观量子效率

PAR —光合有效辐射, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

A_{\max} ——生态系统最大净光合速率,
 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

1.3.2 散射辐射比例与散射/直接光合有效辐射

DF 为散射辐射与地表接收到的太阳总辐射的比值, DF 可按照 REINDL 等^[26]提出的方法使用晴空指数(Cloudiness index)进行估算, 计算式为

$$DF =$$

$$\begin{cases} 1 - 0.232K_t + 0.029\sin\omega - 0.000682T_a + 0.0195R_h & (0 \leq K_t \leq 0.3) \\ 1.329 - 0.716K_t + 0.267\sin\omega - 0.0035T_a + 0.106R_h & (0.3 < K_t < 0.78) \\ 0.426K_t - 0.256\sin\omega + 0.00349T_a + 0.0734R_h & (K_t \geq 0.78) \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$K_t = \frac{R_s}{R_a} \quad (4)$$

$$R_a = \frac{24 \times 60}{\pi} G_{sc} d_r [(\omega_2 - \omega_1) \sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta (\sin\omega_2 - \sin\omega_1)] \quad (5)$$

式中 K_t ——晴空指数

ω ——太阳时角, rad

R_h ——相对湿度

R_s ——到达地球表面的太阳辐射, 由日照时数推求, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$

R_a ——太阳天顶辐射, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$

G_{sc} ——太阳常数, 取 $0.0820 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$

d_r ——日地间相对距离的倒数

ω_1 ——时段初太阳时角, rad

ω_2 ——时段末太阳时角, rad

φ ——地理纬度, rad

δ ——太阳磁偏角, rad

散射光合有效辐射(Diffuse photosynthetically active radiation, PAR_{dif})和直接光合有效辐射(Direct photosynthetically active radiation, PAR_{dir})计算式为

$$\begin{cases} PAR_{\text{dif}} = PAR \cdot DF \\ PAR_{\text{dir}} = PAR - PAR_{\text{dif}} \end{cases} \quad (6)$$

1.3.3 光能利用效率

LUE 是指植物某一生长时段内累积干物质量与该时段植物冠层吸收的光合有效辐射的比值^[27], LUE 计算式为

$$LUE = \frac{GPP}{PAR} \quad (7)$$

式中 GPP ——总初级生产力, $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$

为避免作物物候对 GPP 的影响, 选取水稻生长期数据分析散射辐射对 GPP 的影响。

1.4 通径分析

通径分析是一种多元统计技术, 可以通过对自变量与因变量之间表面直接相关性的分解, 来研究自变量对因变量的直接、间接重要性, 已被广泛应用于解析气象因子与水碳通量之间的关系^[28]。研究表明, 除 PAR 外, T_a 和 VPD 也是影响 GPP 的重要气象因素, 因此本研究选取 PAR_{dif}、PAR_{dir}、 T_a 和 VPD 4 个气象因素, 使用 SPSS 27 计算不同 DF 条件下气象因素对 GPP 的直接和间接通径系数。

2 结果与分析

2.1 散射辐射比例对气象因素的影响

2017—2018 年水稻生育期主要气象因素季节变化见图 2(图中灰色阴影区域为水稻生育期), 水稻生育期 T_a 在 $14.37 \sim 33.83^\circ\text{C}$ 之间, 两年 T_a 变化趋势差异不大, 均呈先上升后下降趋势; VPD 在 $0.04 \sim 2.33 \text{ kPa}$ 之间, 两年间变化差异不大, 总体呈平稳趋势; PAR 在 $3.90 \sim 39.25 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 之间、PAR_{dir} 在 $0 \sim 34.08 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 之间、PAR_{dif} 在 $2.40 \sim 14.90 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 之间, PAR_{dir} 与 PAR_{dif} 占比由天空条件决定, 整体变化波动较大。PAR 两年间的变化趋势不大, 早稻期间 PAR 波动较大, 晚稻期间波动略小。

为探明不同 DF 条件下环境因素的差异, 将 DF 划分为 3 段, 分别为 $0.1 \sim 0.4$ 、 $0.4 \sim 0.7$ 、 $0.7 \sim 1.0$, 早稻期间不同 DF 分段占比依次为 26%、17%、57%, 晚稻期间为 47%、33%、20%, 早稻期间高 DF 的天数明显多于晚稻。不同 DF 条件下早晚稻 T_a 、VPD 及 PAR 如图 3 所示。早稻期间, 3 个不同 DF 条件下的 T_a 均值分别为 $(28.30 \pm 2.62)^\circ\text{C}$ 、 $(26.81 \pm 2.17)^\circ\text{C}$ 、 $(26.06 \pm 2.62)^\circ\text{C}$, 随 DF 的升高而降低; VPD 均值分别为 $(1.50 \pm 0.41) \text{ kPa}$ 、 $(0.90 \pm 0.43) \text{ kPa}$ 、 $(0.70 \pm 0.35) \text{ kPa}$, 随 DF 的升高显著降低; PAR 均值分别为 $(32.45 \pm 3.63) \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $(25.96 \pm 3.65) \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $(13.55 \pm 3.92) \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 随 DF 的升高而降低, 其中, PAR_{dir} 均值分别为 $(7.91 \pm 1.7) \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $(12.49 \pm 1.62) \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $(11.22 \pm 1.98) \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 呈先升高后降低的趋势, PAR_{dir} 均值分别为 $(24.54 \pm 4.27) \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $(13.47 \pm 4.57) \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $(2.33 \pm 2.55) \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 随之显著降低。晚稻期间 T_a 、VPD、PAR、PAR_{dir}、PAR_{dif} 随 DF 升高的变化趋势与早稻期间基本相同。

2.2 直接辐射和散射辐射对总初级生产力的影响

PAR 是影响作物光合作用最主要的因素, 稻田 GPP 对 PAR、PAR_{dir} 和 PAR_{dif} 的响应如图 4 所示。早

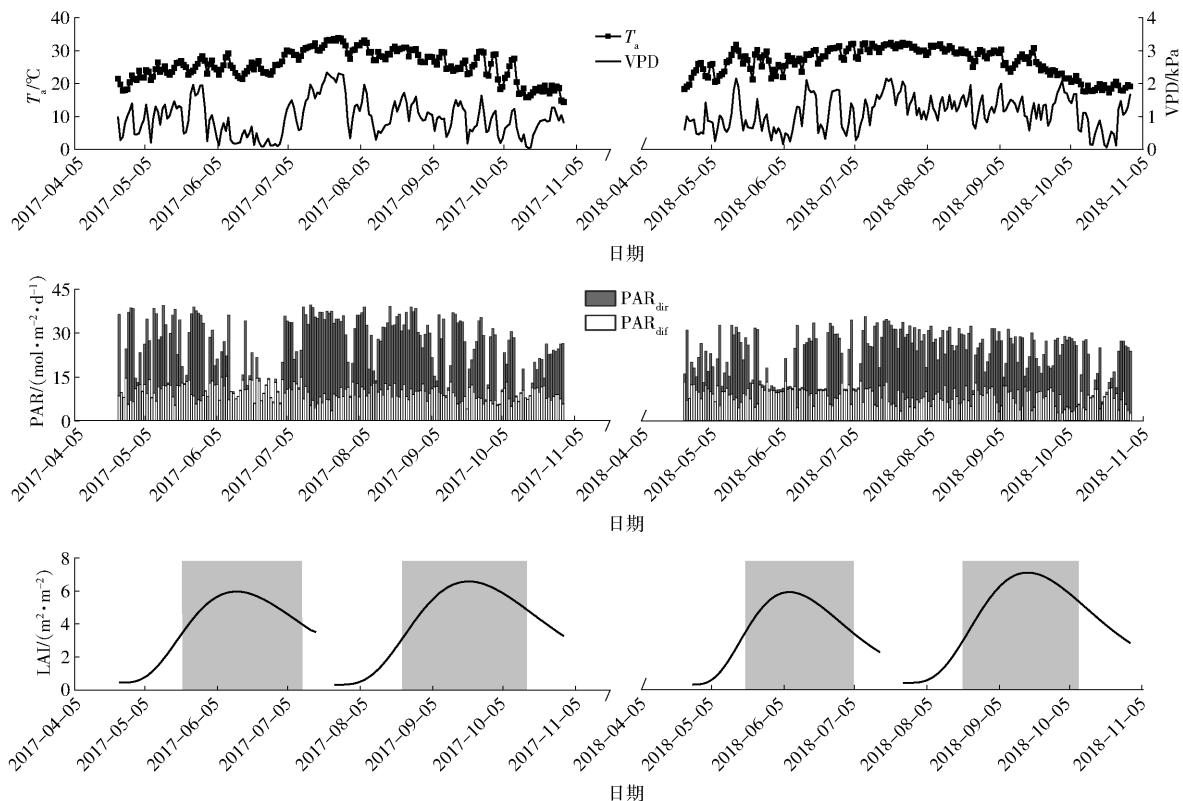


图2 2017—2018年水稻生育期主要气象因素季节变化

Fig. 2 Seasonal variations of major meteorological factors during rice growing season in 2017 and 2018

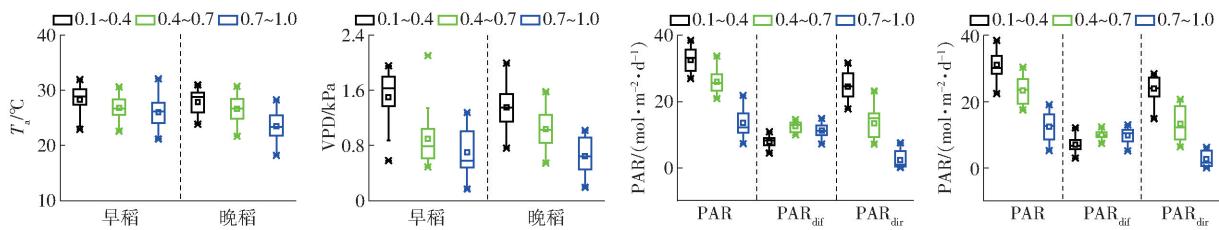


图3 2017—2018年水稻生育旺盛期不同散射辐射比例下气象因素对比

Fig. 3 Comparison of meteorological factors under different DF segmentation during rice mid-season period in 2017 and 2018

稻期间, GPP 随 PAR 的增大先增大后减小,两者呈抛物线关系(决定系数 $R^2 = 0.49$),当 PAR 为 $25.00 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 左右时,GPP 处在峰值;GPP 与 PAR_{dif} 在 3 个分段下均呈线性关系,当 DF 为 $0.1 \sim 0.4$ 时,GPP 随 PAR_{dif} 变化无明显趋势,当 DF 为 $0.4 \sim 0.7$ 时,GPP 随 PAR_{dif} 呈下降趋势($R^2 = 0.38$),当 DF 为 $0.7 \sim 1.0$ 时,GPP 随 PAR_{dif} 呈上升趋势($R^2 = 0.32$);对于 PAR_{dir} ,当 PAR_{dir} 在 $0 \sim 10 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 之间时,GPP 随 PAR_{dir} 的增大而增大,随后趋于平稳。晚稻期间,GPP 与 PAR 呈抛物线关系($R^2 = 0.70$),但 GPP 随 PAR 增加而增大的阈值较早稻偏高,当 PAR 为 $34.44 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 左右时,GPP 处在峰值,这可能是因为晚稻叶片具有更强的光合能力,且晚稻生育中期叶面积指数更大,导致晚稻达到光饱和的 PAR 更大;在 3 个分段下,晚稻 GPP 与

PAR_{dif} 的关系与早稻略有不同,当 DF 为 $0.1 \sim 0.4$ 时,GPP 随 PAR_{dif} 呈上升趋势($R^2 = 0.23$),当 DF 为 $0.4 \sim 0.7$ 时,GPP 与 PAR_{dif} 无明显线性关系,当 DF 为 $0.7 \sim 1.0$ 时,GPP 随 PAR_{dif} 呈明显上升趋势($R^2 = 0.89$);晚稻 GPP 与 PAR_{dif} 的关系与早稻相近。

图 5 为 DF 变化对早晚稻 GPP 与 LUE 的直接影响。由图 5 可知,早晚稻 GPP 均随着 DF 的升高呈先增大后减小的抛物线趋势, R^2 为 0.45 和 0.67,表明 DF 分别可以解释早晚稻 GPP 变化的 45% 和 67%。当 DF 为 0.48 和 0.40 时,早晚稻 GPP 达到最大值,表明中等辐射条件更有利于水稻 GPP 的增长;早晚稻 LUE 均随着 DF 呈显著的线性正相关关系,线性方程斜率为 0.38、0.39 g/mol, R^2 为 0.68 和 0.82。可见,随着 DF 的升高,水稻冠层对光能的利用效率明显增高。

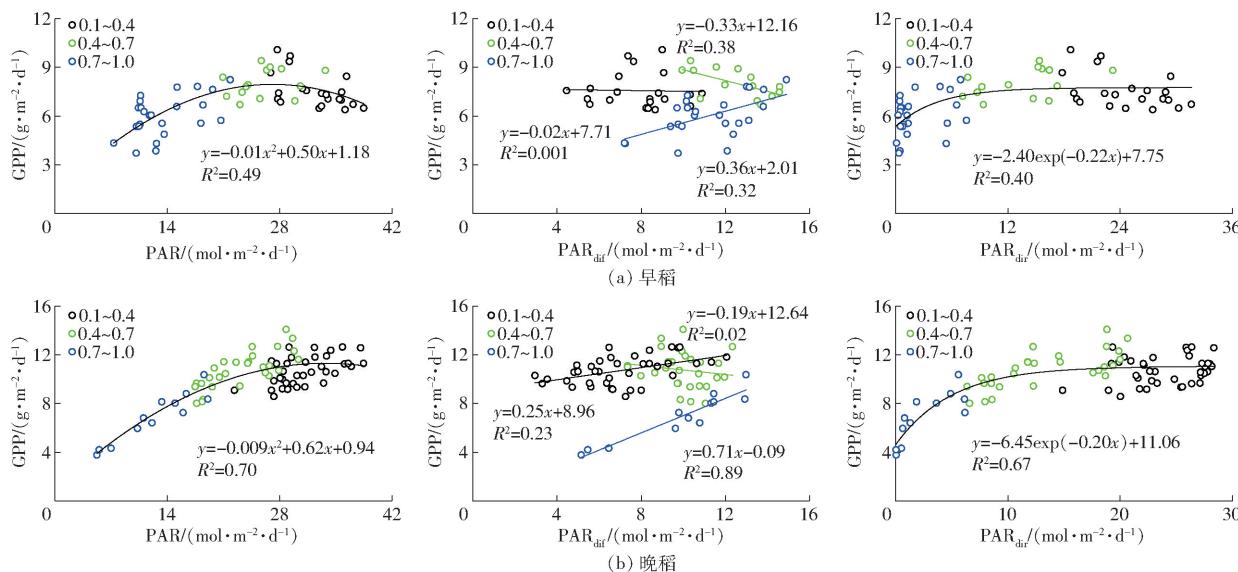


图4 2017—2018年光合有效辐射及其组分与水稻生育中期总初级生产力的关系

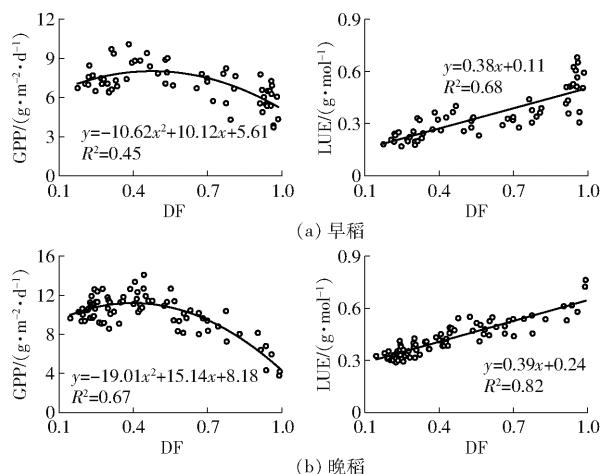
Fig. 4 Correlations between photosynthetically active radiation and its components (PAR , PAR_{dif} , PAR_{dir}) and mid-season GPP of early rice and late rice in 2017 and 2018

图5 2017—2018年早晚稻总初级生产力和光能利用效率随散射辐射比例的变化

Fig. 5 Changes of GPP and LUE with increasing DF for early rice and late rice in 2017 and 2018

2.3 不同DF条件下水稻GPP对气象因素的响应机制

散射辐射变化也会引起 T_a 和VPD的同步变化(图3),进而影响稻田GPP^[29~30]。不同DF条件下鄱阳湖平原典型稻田GPP与气象因素的通径分析结果如图6(图中*、**和***表示在0.1、0.05和0.01水平上显著,e表示剩余因子)和表1、2所示。对于早稻,当DF为0.1~0.4时,气象因素可以解释早稻49.8%的GPP变化,此时PAR以 PAR_{dir} 为主, PAR_{dif} 较低,VPD和 T_a 较高。各气象因素直接通径系数的绝对值由大到小依次为 T_a 、 PAR_{dif} 、 PAR_{dir} 、VPD,表明气象因素中 T_a 对GPP的影响最大。 PAR_{dif} 和 PAR_{dir} 对GPP的直接通径系数分别为0.320和0.155,此条件下到达地面的太阳辐射量最

高,水稻GPP对 PAR_{dir} 的响应基本饱和,故此时 PAR_{dir} 增大对GPP促进作用较小;相应地, PAR_{dif} 增大可以增强阴叶的光合作用,从而对水稻GPP起促进作用;VPD对早稻GPP的直接影响最弱。当DF为0.4~0.7时,气象因素可以解释早稻69.2%的GPP变化,此时PAR的组分 PAR_{dif} 和 PAR_{dir} 均处于中等水平。影响水稻GPP最主要的气象因素为 PAR_{dir} ,直接通径系数为0.912,其次为 T_a ,直接通径系数为0.290。在该DF条件下,水稻上层叶片光合作用处在不饱和状态,因此 PAR_{dir} 增加有利于水稻光合作用; PAR_{dif} 对GPP的直接通径系数最小, PAR_{dif} 主要通过影响 PAR_{dir} 间接对GPP起抑制作用。当DF为0.7~1.0时,气象因素可以解释早稻43.5%的GPP变化,此时PAR主要由 PAR_{dif} 组成,上下层叶片的光合作用均处在不饱和状态。GPP对 PAR_{dif} 的响应最敏感,直接通径系数为0.676, PAR_{dir} 对GPP的直接影响不明显,这是因为此时 PAR_{dir} 占比过小,其增加对水稻总体GPP的影响有限, PAR_{dir} 主要通过与 PAR_{dif} 的相互作用对GPP产生间接影响, T_a 对GPP有直接促进作用,直接通径系数为0.300;VPD对GPP有较弱的直接抑制作用,但在 PAR_{dif} 和 T_a 的间接作用协同影响下,VPD与GPP呈正相关关系。对于晚稻,各气象因素对GPP的影响与早稻较为相似,总体可以解释晚稻40.4%~93.0%的GPP变化。当DF为0.1~0.4时,由于晚稻光合能力较强,此时 PAR_{dif} 是影响GPP的主要气象因素, PAR_{dir} 对GPP仍有促进作用,但相比 PAR_{dif} 较弱;当DF为0.4~0.7时,除了 PAR_{dif} ,VPD是影响晚稻GPP第2重要的气象因素;当DF为0.7~

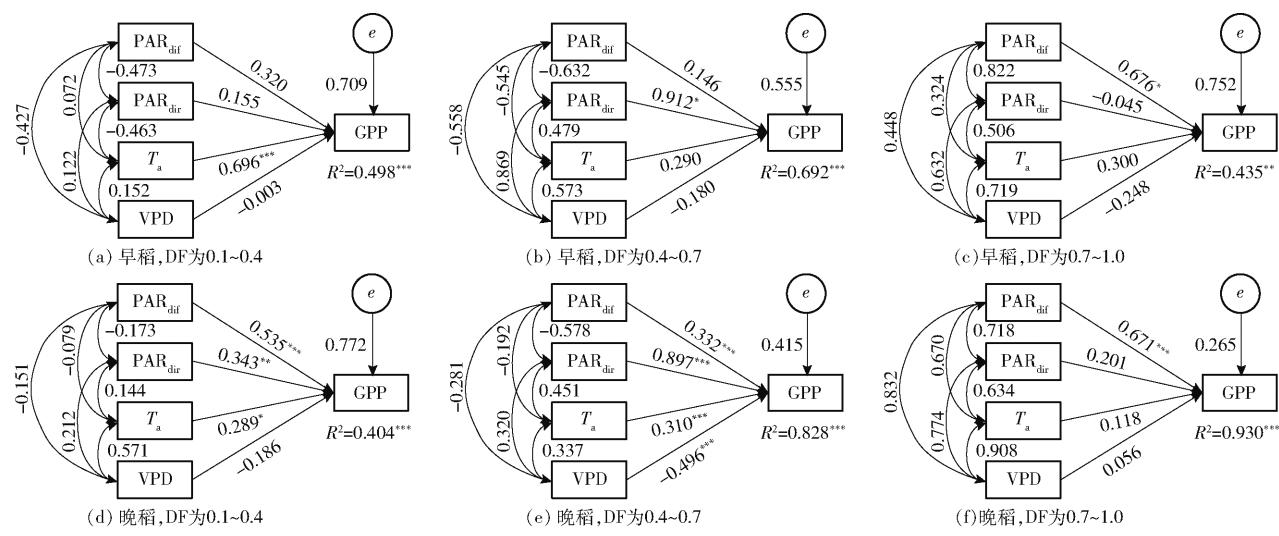


图 6 不同 DF 下早稻和晚稻 GPP 与不同气象因素的通径分析

Fig. 6 Path analysis between GPP over early/late rice and different meteorological factors under three DF segments

表 1 不同散射辐射比例下早稻总初级生产力与气象因素通径分析结果

Tab. 1 Results of path analysis between GPP over early rice and meteorological factors under different DF segments

散射辐射比例	变量	相关系数	间接通径系数			
			直接通径系数	PAR _{dif}	PAR _{dir}	T _a
0.1~0.4	PAR _{dif}	0.294	0.320		-0.074	0.046
	PAR _{dir}	-0.308	0.155	-0.153		-0.309
	T _a	0.648	0.696	0.021	-0.069	
	VPD	0.001	-0.003	-0.137	0.029	0.112
0.4~0.7	PAR _{dif}	-0.488	0.146		-0.576	-0.158
	PAR _{dir}	0.802	0.912	-0.093		0.139
	T _a	0.544	0.290	-0.080	0.437	
	VPD	0.697	-0.180	-0.082	0.792	0.166
0.7~1.0	PAR _{dif}	0.625	0.676		-0.037	0.097
	PAR _{dir}	0.506	-0.045	0.556		0.152
	T _a	0.318	0.300	0.219	-0.023	
	VPD	0.242	-0.248	0.303	-0.029	0.216

表 2 不同散射辐射比例下晚稻总初级生产力与气象因素通径分析结果

Tab. 2 Results of path analysis between GPP over late rice and meteorological factors under different DF segments

散射辐射比例	变量	相关系数	间接通径系数			
			直接通径系数	PAR _{dif}	PAR _{dir}	T _a
0.1~0.4	PAR _{dif}	0.481	0.535		-0.059	-0.023
	PAR _{dir}	0.253	0.343	-0.092		0.042
	T _a	0.190	0.289	-0.042	0.049	
	VPD	-0.028	-0.186	-0.081	0.073	0.165
0.4~0.7	PAR _{dif}	-0.106	0.332		-0.518	-0.060
	PAR _{dir}	0.686	0.897	-0.192		0.140
	T _a	0.483	0.310	-0.064	0.404	
	VPD	-0.198	-0.496	-0.093	0.287	0.105
0.7~1.0	PAR _{dif}	0.941	0.671		0.144	0.079
	PAR _{dir}	0.801	0.201	0.481		0.075
	T _a	0.746	0.118	0.450	0.128	
	VPD	0.877	0.056	0.558	0.156	0.107

1.0 时, VPD 对晚稻 GPP 的影响不明显, 这可能与研究时段较低 VPD 有关 ($< 0.5 \text{ kPa}$), 当 VPD 为低

值时对气孔的控制能力较弱, 因而 VPD 对 GPP 的直接通径系数较小。

由以上通径分析结果可知,在不同 DF 条件下,气象因素对 GPP 的影响程度存在明显差异。随着 DF 的升高,PAR_{dir} 对 GPP 的直接影响先由弱变强,随后又变弱,而 PAR_{dif} 对 GPP 的直接影响正好相反;VPD 对 GPP 的直接影响总体呈现抑制作用; T_a 增大始终对 GPP 有直接的促进作用。不同 DF 条件下,剩余因子的通径系数在 0.265~0.772 之间。对于早稻,当 DF 为 0.1~0.4 和 0.7~1.0 时,剩余因子的通径系数较大,而对于晚稻,当 DF 为 0.1~0.4 时,剩余因子的通径系数较大,此时 GPP 的变化还有 50.2%~59.6% 未被解释,表明气象因素不是影响 GPP 的唯一因素,在未来的研究中还应该考虑冠层导度、叶龄等作物生理因素对水稻 GPP 的影响。总体而言,在较低 DF 条件下,PAR_{dif} 和 T_a 是影响 GPP 的主要气象因素,在中等 DF 条件下,PAR_{dir} 是影响 GPP 的主要气象因素,在较高 DF 条件下,PAR_{dif} 是影响 GPP 的主要气象因素。

3 讨论

散射辐射对作物生产力的作用可分为直接作用和间接作用。一方面,散射辐射可渗透至植被冠层内部,且垂直分布均匀,促进冠层中阴叶的光合作用,增强植被生产力散射施肥效应^[31],提高作物生产力,但散射辐射的增加会导致直接辐射的减少,从而降低阳叶的光合速率,抑制生态系统 GPP。可见,直接辐射和散射辐射对 GPP 的影响存在消长效应^[32~33],因此必然存在某个最优 DF,使得作物冠层 GPP 最大。植被 GPP 的最优 DF 受多种因素影响,如植被类型、叶面积指数、冠层结构、气候区等。例如,C4 作物光饱和点较高,散射辐射的增加通常无法弥补直接辐射降低对光合作用的负面影响,因而最优 DF 可能较低,而 C3 作物较易达到光饱和点,直接辐射降低对阳叶光合速率的影响有限,散射辐射对阴叶的“施肥”效果更强,故最优 DF 可能较高;高叶面积指数和复杂冠层结构的植被上层叶片更易遮蔽下层叶片,更有利“散射辐射施肥效应”,因此其最优 DF 可能较高。ALTON^[34] 指出草地的最优 DF 仅为 0.2~0.3,而森林最优 DF 可达 0.4~0.7;YANG 等^[35]指出,在我国华北平原,山东禹城和安徽寿县冬小麦 GPP 最优 DF 为 0.55 和 0.50;KANNIAH 等^[29]指出,澳大利亚疏林稀树草原 GPP 最优 DF 为 0.3~0.4;ZHOU 等^[36]基于全球 200 多个通量站点实测结果发现,绝大多数植被类型的最优 DF 在 0.4~0.6 之间。此外,植被最优 DF 也与纬度有关,高纬度地区太阳入射角更低,植被阴叶占

比更高,因而可以利用更多的散射辐射^[37~38]。本研究发现,鄱阳湖平原早晚稻 GPP 对散射辐射的响应趋势与以往研究结论一致,早晚稻最优 DF 为 0.48 和 0.40,这一结果在以往研究植被的最优 DF 范围之内,低于冬小麦^[35],高于草地^[34],其中,早稻最优 DF 略大于晚稻,这可能与早稻较弱的光合能力有关。

另一方面,散射辐射的变化伴随着温度和饱和水汽压差的变化^[39],温度升高可以促进光合作用过程中的化学反应速率,从而促进作物光合作用,但过高的温度反而抑制光合速率;饱和水汽压差可调控植被叶片气孔的开放程度,从而对作物 GPP 产生影响^[40]。ZHANG 等^[41]在分析我国 5 种典型生态系统 GPP 对天气状况的响应中得出,较低 T_a 更有利于植被光合作用,且阴天条件下 VPD 的降低会诱导气孔开放,从而增强光合作用;DENGE 等^[13]分析了 2 种针叶林在不同天空条件下的冠层气孔导度,得出散射辐射增大可使 VPD 下降,从而增大冠层气孔导度。本研究发现,对于鄱阳湖平原稻田, T_a 和 VPD 的升高总体分别对 GPP 起促进和抑制作用。综合考虑散射辐射和其他气象因素对水稻 GPP 的影响,当 DF 为 0.1~0.4、0.4~0.7、0.7~1.0 时,影响早稻 GPP 的主要气象因素为 T_a 、PAR_{dir} 和 PAR_{dif},而影响晚稻 GPP 的主要气象因素则为 PAR_{dif}、PAR_{dir} 和 PAR_{dir}。这一研究结果与以往研究有一定差异,例如 JIANG 等^[42]在成都平原研究指出,无论何种天空条件下,影响猕猴桃林 GPP 的主要气象因素均为 PAR_{dif};HAN 等^[43]指出,在江西省千烟洲生态研究站针叶林的日尺度研究中,PAR_{dif} 对 GPP 的影响最为显著,其次为 PAR_{dir}、 T_a 、土壤体积含水率,VPD 的影响相对较弱。可见,散射辐射及其他气象因素对不同区域、不同植被类型 GPP 的影响机制存在差异。也有研究表明不同环境特征下,散射辐射对 GPP 的影响程度也存在差异。例如,GUI 等^[44]分析了我国 9 个通量站点数据,发现当 VPD 为 0~0.5 kPa、 T_a 为 20~25℃ 时,“散射辐射施肥”效应最强。高源等^[45]发现,当生态系统未受到水分胁迫时,杨树人工林 GPP 随气溶胶浓度增大(即 DF 升高)先增大后减少,而当生态系统遭到水分胁迫后,气溶胶对 GPP 没有显著影响。本研究稻田没有受到明显的水分胁迫,然而对于我国南方水稻,随着节水灌溉模式^[46]的推广和未来干旱频率^[47]的增加,水稻可能面临更加频繁的水分胁迫。在此背景下,散射辐射升高能否有效提高稻田生产力尚未可知。此外,极端高温、CO₂ 浓度和地面臭氧浓度升高^[48~49]与散射辐射对农田生产力的协同影响也有

待进一步探讨。因此,未来有必要充分考虑各种复杂环境,揭示散射辐射和其他环境、生理因素对稻田生产力的协同影响。

4 结论

(1) 不同 DF 条件下气象因素存在差异。随着 DF 的升高,早晚稻的 T_a 和 VPD 呈下降趋势,PAR 和 PAR_{dir} 呈下降趋势,PAR_{dif} 则先上升后下降。

(2) GPP 随 DF 呈先升后降的二次曲线关系,存

在最优 DF 使早晚稻 GPP 最高,早晚稻最优 DF 为 0.48 和 0.40,DF 可以解释早晚稻 GPP 变化的 45% 和 67%;LUE 与 DF 呈显著的线性正相关关系,决定系数为 0.68 和 0.82。

(3) 不同 DF 条件下气象因素与 GPP 间的通径分析结果表明:当 DF 为 0.1~0.4 时,PAR_{dif} 和 T_a 是影响 GPP 的主要气象因素;当 DF 为 0.4~0.7 时,PAR_{dir} 是影响 GPP 的主要气象因素;当 DF 为 0.7~1.0 时,PAR_{dif} 是影响 GPP 的主要气象因素。

参 考 文 献

- [1] 孙敬松,周广胜. 散射辐射测量及其对陆地生态系统生产力影响的研究进展[J]. 植物生态学报, 2010, 34(4): 452~461.
SUN Jingsong, ZHOU Guangsheng. Review of advances in measurements and effects of diffuse radiation on terrestrial ecosystem productivity[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(4): 452~461. (in Chinese)
- [2] 杨晓亚,李俊,江晓东,等. 散射辐射比例与冬小麦光能利用率和总初级生产力的关系[J]. 中国农业气象, 2018, 39(7): 462~467.
YANG Xiaoya, LI Jun, JIANG Xiaodong, et al. Relationships between diffuse radiation fraction and light use efficiency and gross primary productivity of winter wheat[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2018, 39(7): 462~467. (in Chinese)
- [3] 袁艳芳,张城芳,黄鹏,等. 基于日光诱导叶绿素荧光的陆地总初级生产力估算[J]. 农业机械学报, 2022, 53(4): 183~191.
YUAN Yanfang, ZHANG Chengfang, HUANG Peng, et al. Estimation of global terrestrial gross primary productivity based on solar-induced chlorophyll fluorescence[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 183~191. (in Chinese)
- [4] GU L, BALDOCCHI D D, WOFSY S C, et al. Response of a deciduous forest to the Mount Pinatubo eruption: enhanced photosynthesis[J]. Science, 2003, 299(5615): 2035~2038.
- [5] FARQUHAR G D, RODERICK M L. Pinatubo, diffuse light, and the carbon cycle[J]. Science, 2003, 299(5615): 1997~1998.
- [6] STANHILL G, GOHEN S. Global dimming: a review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation of its probable causes and possible agricultural consequences [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 107(4): 255~278.
- [7] LI X, WAGNER F, PENG W, et al. Reduction of solar photovoltaic resources due to air pollution in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of USA, 2017, 114(45): 11867~11872.
- [8] CAO J, SHEN Z, CHOW J C, et al. Winter and summer PM 2.5 chemical compositions in fourteen Chinese cities[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2012, 62(10): 1214~1226.
- [9] MATSUI H, KOIKE M, KONDO Y, et al. Spatial and temporal variations of aerosols around Beijing in summer 2006: model evaluation and source apportionment[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2009, 114(D2): 4427~4433.
- [10] TIE X, CAO J. Aerosol pollution in China: present and future impact on environment[J]. Particuology, 2010, 7(6): 426~431.
- [11] MERCADO L M, BELLOUIN N, SITCH S, et al. Impact of changes in diffuse radiation on the global land carbon sink[J]. Nature, 2009, 458(7241): 1014~1017.
- [12] 李登秋,周艳莲,居为民,等. 太阳辐射变化对亚热带人工常绿针叶林总初级生产力影响的模拟分析[J]. 植物生态学报, 2014, 38(3): 219~230.
LI Dengqiu, ZHOU Yanlian, JU Weimin, et al. Modelling the effects of changes in solar radiation on gross primary production in subtropical evergreen needle-leaf plantations[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(3): 219~230. (in Chinese)
- [13] DENGEL S, GRACE J. Carbon dioxide exchange and canopy conductance of two coniferous forests under various sky conditions [J]. Oecologia, 2010, 164: 797~808.
- [14] ZHOU Y, WU X, JU W, et al. Modeling the effects of global and diffuse radiation on terrestrial gross primary productivity in China based on a two-leaf light use efficiency model[J]. Remote Sensing, 2020, 12(20): 1~21.
- [15] KNOHL A, BALDOCCHI D D. Effects of diffuse radiation on canopy gas exchange processes in a forest ecosystem[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2008, 113(G2): G02023.
- [16] KANNIAH K D, BERNINGER J, NORTH P, et al. Control of atmospheric particles on diffuse radiation and terrestrial plant productivity: a review[J]. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 2012, 36(2): 209~237.
- [17] 闫敏,李增元,田昕,等. 黑河上游植被总初级生产力遥感估算及其对气候变化的响应[J]. 植物生态学报, 2016, 40(1): 1~12.
YAN Min, LI Zengyuan, TIAN Xin, et al. Remote sensing estimation of gross primary productivity and its response to climate change in the upstream of Heihe River Basin[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40(1): 1~12. (in Chinese)
- [18] STEINER A L, CHAMEIDES W L. Aerosol-induced thermal effects increase modelled terrestrial photosynthesis and

- transpiration [J]. Tellus B, 2005, 57(5): 404–411.
- [19] 徐北瑶, 王体健, 李树, 等. “双碳”目标对我国未来空气污染和气候变化的影响评估 [J]. 科学通报, 2022, 67(8): 784–794.
XU Beiyao, WANG Tijian, LI Shu, et al. Assessment of the impact of “dual-carbon” goal on future changes in air pollution and climate in China [J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(8): 784–794. (in Chinese)
- [20] 刘博, 汪文超, 崔远来, 等. 基于水碳通量耦合的长江中下游稻田蒸散发组分分解 [J]. 农业工程学报, 2021, 37(24): 94–101.
LIU Bo, WANG Wenchao, CUI Yuanlai, et al. Evapotranspiration partitioning using the water-carbon flux coupling method over a paddy field in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(24): 94–101. (in Chinese)
- [21] LIU B, CUI Y, LUO Y, et al. Energy partitioning and evapotranspiration over a rotated paddy field in Southern China [J]. Agricultural and Forest Meteorological, 2019, 276–277: 107626.
- [22] 时元智, 崔远来, 才硕, 等. WPL校正和坐标轴旋转对稻田湍流通量计算的影响 [J]. 中国农村水利水电, 2016(9): 5–9.
SHI Yuanzhi, CUI Yuanlai, CAI Shuo, et al. Influence of WPL correction and coordinate rotation on turbulent flux in paddy fields [J]. China Rural Water Conservancy and Hydropower, 2016(9): 5–9. (in Chinese)
- [23] 李成, 王让会, 李兆哲, 等. 冬小麦-夏玉米农田蒸散与CO₂净交换特征及影响因素 [J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 331–339.
LI Cheng, WANG Ranghui, LI Zhaozhe, et al. Characteristics and influencing factors of evapotranspiration and net CO₂ exchange in winter wheat–summer maize field [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 331–339. (in Chinese)
- [24] LLOYD J, TAYLOR J A. On the temperature dependence of soil respiration [J]. Functional Ecology, 1994, 8(3): 315–323.
- [25] GILMANOV T G, VERMA S B, SIMS P L, et al. Gross primary production and light response parameters of four Southern Plains ecosystems estimated using long-term CO₂-flux tower measurements [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2003, 17(2): 1071.
- [26] REINDL D T, BECKMAN W A, DUFFIE J A. Diffuse fraction correlations [J]. Solar Energy, 1990, 45: 1–7.
- [27] MONTEITH J L. Solar-radiation and productivity in tropical ecosystems [J]. Journal of Applied Ecology, 1972, 9: 747–766.
- [28] MATIAS L, CASTRO J, ZAMORA R. Effect of simulated climate change on soil respiration in a Mediterranean-type ecosystem: rainfall and habitat type are more important than temperature or the soil carbon pool [J]. Ecosystem, 2012, 15(2): 299–310.
- [29] KANNIAH K D, BERNINGER J, HUTLEY L. Exploring the link between clouds, radiation, and canopy productivity of tropical savannas [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 182–183: 304–313.
- [30] XU H, ZHANG Z, CHEN J, et al. Cloudiness regulates gross primary productivity of a poplar plantation under different environmental conditions [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2017, 47: 648–658.
- [31] PARK S B, KNOHL A, LUCAS-MOFFAT A M, et al. Strong radiative effect induced by clouds and smoke on forest net ecosystem productivity in central Siberia [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 250: 376–387.
- [32] HAN J, ZHANG L, LI S, et al. Effects of sky conditions on net ecosystem productivity of a subtropical coniferous plantation vary from half-hourly to daily timescales [J]. Science of the Total Environment, 2019, 651: 3002–3014.
- [33] MERCADO L M, BELLOUIN N, SITCH S, et al. Impact of changes in diffuse radiation on the global land carbon sink [J]. Nature, 2009, 458(7241): 1014–1017.
- [34] ALTON P B. Reduced carbon sequestration in terrestrial ecosystems under overcast skies compared to clear skies [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(10): 1641–1653.
- [35] YANG X, LI J, YU Q, et al. Impacts of diffuse radiation fraction on light use efficiency and gross primary production of winter wheat in the North China Plain [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 275: 233–242.
- [36] ZHOU H, YUE X, LEI Y, et al. Responses of gross primary productivity to diffuse radiation at global FLUXNET sites [J]. Atmospheric Environment, 2021, 244: 117905.
- [37] YUE X, UNGER N. Fire air pollution reduces global terrestrial productivity [J]. Nature Communications, 2018, 9: 5413.
- [38] 刘沛荣, 同小娟, 孟平, 等. 散射辐射对中国东部典型人工林总初级生产力的影响 [J]. 植物生态学报, 2022, 46(8): 904–918.
LIU Peirong, TONG Xiaojuan, MENG Ping, et al. Effect of diffuse radiation on gross primary productivity of typical planted forests in eastern China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2022, 46(8): 904–918. (in Chinese)
- [39] 邵思雅, 张晶, 周丽花, 等. 气溶胶直接辐射效应对全球陆地生态系统碳循环的影响 [J]. 自然资源学报, 2018, 33(1): 27–36.
SHAO Siya, ZHANG Jing, ZHOU Lihua, et al. Impacts of aerosol direct radiative effect on carbon cycle in global terrestrial ecosystem [J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(1): 27–36. (in Chinese)
- [40] LIU P, TONG X, MENG P, et al. Biophysical controls on water use efficiency of six plantations under different sky conditions [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2022, 320: 108938.

- MA Chanyuan. Design and implementation of distributed text clustering system based on K-Means [D]. Xi'an: Xidian University, 2018. (in Chinese)
- [30] 李玉功. K-means 聚类算法的改进及其在彩色图像分割中的应用[D]. 合肥:安徽大学,2018.
- LI Yugong. Improvement of K-means clustering algorithm and its application in color image segmentation[D]. Hefei: Anhui University, 2018. (in Chinese)
- [31] 武沛多. 基于聚类与图割算法的图像分割方法[D]. 北京:华北电力大学,2020.
- WU Peiduo. Image segmentation method based on clustering and graph cut algorithm[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020. (in Chinese)
- [32] KRIGE D G. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 1994, 94(3):95–111.
- [33] SHUKLA M K, LAL R, VANLEEUWEN D. Spatial variability of aggregate-associated carbon and nitrogen contents in the reclaimed minesoils of Eastern Ohio[J]. Soil Science Society of America Journal, 2007, 71(6):1748–1757.
- [34] 张涛. 变异函数模型的对比优选研究[D]. 南京:南京大学,2017.
- ZHANG Tao. Optimization of spatial semi-variogram models[D]. Nanjing: Nanjing University, 2017. (in Chinese)
- [35] 叶露萍. 黄土高原土壤团聚体-水-植被的时空变异分析[D]. 北京:中国科学院大学,2020.
- YE Luping. Spatio-temporal variations of soil aggregate – water – vegetation on the Loess Plateau[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science, 2020. (in Chinese)
- [36] 李晓萍. 压砂地土壤水分的时空稳定性特征研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2016.
- LI Xiaoping. Study on spatial-temporal stability characteristics of soil moisture in gravel-sand mulched field[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [37] 赵文举,李晓萍,范严伟,等. 西北旱区压砂地土壤水分的时空分布特征[J]. 农业工程学报,2015,31(17):144–151.
- ZHAO Wenju, LI Xiaoping, FAN Yanwei, et al. Spatial-temporal stability distribution characteristics of soil moisture in gravel-sand mulched field in northwestern arid area[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(17):144–151. (in Chinese)
- [38] 傅斌,王玉宽,朱波,等. 紫色土坡耕地降雨入渗试验研究[J]. 农业工程学报,2008, 24(7):39–43.
- FU Bin, WANG Yukuan, ZHU Bo, et al. Experimental study on rainfall infiltration in sloping farmland of purple soil[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(7):39–43. (in Chinese)

(上接第343页)

- [41] ZHANG M, YU G, ZHUANG J, et al. Effects of cloudiness change on net ecosystem exchange, light use efficiency, and water use efficiency in typical ecosystems of China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151: 803–816.
- [42] JIANG S Z, HUANG Y W, ZHAO L, et al. Effects of clouds and aerosols on ecosystem exchange, water and light use efficiency in a humid region orchard[J]. Science of the Total Environment, 2022, 811: 152377.
- [43] HAN J, GUO C, YE S, et al. Effects of diffuse photosynthetically active radiation on gross primary productivity in a subtropical coniferous plantation vary in different timescales[J]. Ecological Indicators, 2020, 115: 106403.
- [44] GUI X, WANG L, SU X, et al. Environmental factors modulate the diffuse fertilization effect on gross primary productivity across Chinese ecosystems[J]. Science of the Total Environment, 2021, 793: 148443.
- [45] 高源,律江,李春征,等. 大气气溶胶对北京杨树人工林生态系统生产力的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(12): 4892–4902.
- GAO Yuan, LÜ Jiang, LI Chunzheng, et al. Effects of atmospheric aerosols on the ecosystem productivity of a poplar plantation in Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(12): 4892–4902. (in Chinese)
- [46] 刘笑吟,王海明,王钥,等. 节水灌溉稻田蒸发蒸腾过程及其比例变化特征研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 271–282.
- LIU Xiaoyin, WANG Haiming, WANG Yue, et al. Characteristics of rice transpiration and soil evaporation and their proportion variation in water-saving irrigated paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 271–282. (in Chinese)
- [47] 刘小刚,冷险险,孙光耀,等. 基于1961—2100年SPI和SPEI的云南省干旱特征评估[J]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 236–245, 299.
- LIU Xiaogang, LENG Xianxian, SUN Guangzhao, et al. Assessment of drought characteristics in Yunnan Province based on SPI and SPEI from 1961 to 2100[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 236–245, 299. (in Chinese)
- [48] ZHANG T Y, YUE X, UNGER N, et al. Modeling the joint impacts of ozone and aerosols on crop yields in China: an air pollution policy scenario analysis[J]. Atmospheric Environment, 2021, 15: 118216.
- [49] AGATHOKLEOUS E, FREI M, KNOPF O M, et al. Adapting crop production to climate change and air pollution at different scales[J]. Nature Food, 2023, 4: 854–865.