

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2018.07.004

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

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*

杨晓亚¹, 李俊², 江晓东¹, 同小娟³, 于强^{4,2}

(1. 南京信息工程大学应用气象学院/江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 3. 北京林业大学林学院, 北京 100101; 4. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100)

摘要: 利用冬小麦拔节-乳熟期 (2004-04-01—05-20 和 2005-04-10—05-31) 在田间观测的每 30min 涡度相关和小气候数据, 计算散射辐射比例 (DF) 与光能利用率 (LUE) 和总初级生产力 (GPP) 之间的数量关系, 以期为提高 LUE 模型和作物模型的模拟准确度提供依据。结果表明: 冬小麦拔节-乳熟期 DF 与 LUE 间呈极显著的线性正相关关系 ($P < 0.001$), DF 与 GPP 间为极显著的抛物线关系 ($P < 0.001$), 即随着 DF 的增加, LUE 呈线性增长, 而 GPP 呈先增加后降低的变化趋势。2004 年和 2005 年观测实验表明, 中等太阳辐射条件下, 即 DF 和光合有效辐射 (PAR) 的均值分别为 0.57 和 $27.7 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 时, 冬小麦 GPP 达到最高。2004 年与 2005 年相比较, DF 与 LUE、DF 与 GPP 关系均存在较大差异, 这主要归因于两年间冬小麦拔节-乳熟期 PAR 水平和 DF 分布频率的差异。

关键词: 散射辐射比例; 光能利用率; 总初级生产力; 光合有效辐射; 冬小麦

Relationships between Diffuse Radiation Fraction and Light Use Efficiency and Gross Primary Productivity of Winter Wheat

YANG Xiao-ya¹, LI Jun², JIANG Xiao-dong¹, TONG Xiao-juan³, YU Qiang^{4,2}

(1. College of Applied Meteorology/Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Key Laboratory of Water Cycle & Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101; 3. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100101; 4. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100)

Abstract: The quantitative relationships between the diffuse radiation fraction (DF) and light use efficiency (LUE) and gross primary productivity (GPP) from jointing to milky maturity of winter wheat (from April 1, 2004 to May 20 and from April 10, 2005 to May 31) were analyzed in this research on the basis of field CO_2 flux observation. The research results can improve the simulation accuracy of LUE model and crop model. The results indicated that the relationship between DF and LUE was significantly positive linear ($P < 0.001$), and the relationship between DF and GPP was significantly parabolic curve ($P < 0.001$). LUE increased linearly with the increasing of DF, while GPP increased first and then decreased. Observational experiments on 2004 and 2005 showed that the GPP of winter wheat reached the highest under the condition of moderate solar radiation, with the average values of DF and photosynthetic active radiation (PAR) were 0.57, $27.7 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, respectively. The quantitative equations between DF and LUE and GPP in two years were different. The differences were mainly attributed to the different PAR level and the distribution frequency of DF from jointing to milky maturity of winter wheat during the two years.

* 收稿日期: 2017-12-21

基金项目: 江苏省自然科学基金青年基金 (BK20140988); 国家自然科学基金青年基金 (31400416)

作者简介: 杨晓亚 (1983-), 女, 博士, 研究方向为气候变化与作物生理生态。E-mail: yangxy@nuist.edu.cn

Key words: Diffuse radiation fraction; Light use efficiency; Gross primary productivity; Photosynthetic active radiation; Winter wheat

近几十年的辐射观测数据表明, 全球范围内太阳辐射呈显著减弱趋势^[1]。1960年以来, 中国受云量增多、大气气溶胶浓度升高等因素的影响, 到达地表的太阳辐射以 $2.5\% \cdot 10a^{-1}$ 的速度减弱^[2]; 而散射辐射从 1981–2010 年以 $7.03MJ \cdot m^{-2} \cdot 10a^{-1}$ 的速度增长^[3-4]。太阳辐射和散射辐射的变化对农业生产和生态系统的影响成为近年来的研究热点^[5-7], 准确评估和预测这种影响对粮食安全和全球碳循环十分重要。

光能利用率 (Light use efficiency, 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 (Photosynthetic active radiation, PAR) 的比值^[8]。LUE 是作物生长模型和大尺度的生态系统碳交换模型的重要参数。不少研究者基于涡度相关技术研究了多种生态系统类型中 LUE 与太阳辐射变化的关系, 发现散射辐射比例 (Diffuse radiation fraction, DF) 的增加对生态系统 LUE 有明显促进作用^[9-11]。Greenwald 等在作物模型中添加 DF 与 LUE 的关系式^[12-13], 来研究 DF 变化对作物产量的影响。而 DF 与 LUE 关系式是否准确, 决定了作物模型能否准确评估 DF 变化对作物产量的影响^[12, 14]。因此, 需要在观测数据的基础上, 明确 DF 与 LUE 的数量关系。

生态系统总初级生产力 (Gross primary productivity, GPP) 代表了植物通过光合作用对 CO_2 的吸收状况。太阳辐射作为光合作用的能量来源, 其下降会导致 GPP 的下降, 而伴随着太阳辐射的降低, 散射辐射比例 DF 则会增加, 从而导致光能利用率 LUE 提高, 对 GPP 产生正面影响。一些研究表明, DF 增加对 LUE 产生的促进作用可以提高一些植物类型的 GPP^[15-16]。然而也有不少研究表明, 这种促进作用不足以抵消太阳辐射下降导致的生态系统生产力的下降^[17-18]。这两种相反作用对 GPP 的综合影响还有待明确^[19], 需要在不同植物类型和环境因素条件下进一步研究。本研究基于冬小麦田间涡度相关通量观测, 研究 DF 与冬小麦 LUE 和 GPP 的数量关系, 以期正确评价太阳辐射和散射辐射变化对作物生产的影响提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 实验站概况

观测实验在中国科学院禹城农业综合实验站 ($36^{\circ}57'N$, $116^{\circ}38'E$) 进行, 位于山东省禹城市, 属暖温带季风气候, 年平均气温 $13.1^{\circ}C$; 年降水量 528mm, 主要分布在 6–8 月。作物种植制度为冬小麦–夏玉米一年两熟。冬小麦品种为“科禹 13”。冬小麦生长期给予充足的灌水和施肥, 叶面积由叶面积仪测定。土壤母质为黄河冲积物, 以潮土和盐化潮土为主。

1.2 通量观测数据及其处理

2004–2005 年在冬小麦田开展涡度相关和小气候梯度观测。涡度相关系统主要包括 LI-7500 型 CO_2/H_2O 分析仪 (Li-Cor Inc., USA) 和 CSAT3 型三维超声风速仪 (Campbell Sci. Inc., USA), 可观测冠层上方的 CO_2 浓度。仪器采样频率为 10Hz, 由 CR5000 型数据采集器采集和存储数据。以 CO_2 浓度数据为基础计算 30min 尺度的 CO_2 通量, 即净生态系统 CO_2 交换量 (Net ecosystem exchange of CO_2 , NEE)。小气候梯度观测包括太阳辐射 (S_0)、光合有效辐射 (Photosynthetic active radiation, PAR)、气温 (T_a)、土壤 5cm 处温度 (T_s) 和空气相对湿度 (ϕ), 每 30min 输出一组数据, 由 CR23x 型数据采集器采集和存储。有关观测和仪器情况详见文献[20]。逐日 PAR 由白天时段 30min 尺度的 PAR 数据相加得到。

在 CO_2 通量观测过程中, 仪器故障或降雨等天气因素, 会造成观测数据缺失或异常, 需要对数据进行筛选, 并剔除异常值。根据文献[20], 剔除摩擦风速小于 $0.15m \cdot s^{-1}$ 的夜间通量数据和与月平均值相差超过 3 倍方差的数据。对 2h 以内的缺失数据, 采用线性内插法插补; 对于 2h 以上的缺失数据采用平均日变化法进行插补。

1.3 研究时段的选择

冬小麦叶面积指数 (Leaf area index, LAI) 随着生育进程的推进呈先升高后降低的变化趋势 (图 1), 为尽量排除叶片生长即光合作用面积的变化对净生态系统 CO_2 交换量 NEE 的影响, 选取 2004 年和 2005 年 LAI 较为稳定的冬小麦拔节–乳熟期 NEE 和小气候梯度观测数据进行分析, 2004 年观测时间为 4 月 1 日–5 月 20 日, 2005 年为 4 月 10 日–5 月 31 日。

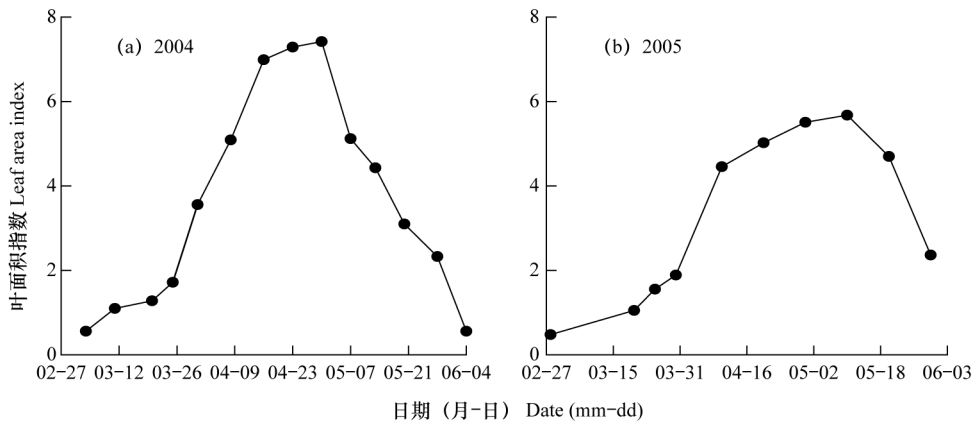


图 1 2004 年和 2005 年冬小麦叶面积指数的动态变化

Fig. 1 Variation of leaf area index of winter wheat in 2004 and 2005

1.4 散射辐射比例的计算

散射辐射不是常规观测数据, 根据 Reindl 等^[21]提供的计算方法估算散射辐射比例 (DF), 具体方法为

当 $0 \leq k_t \leq 0.3$ 时

$$DF = 1 - 0.232k_t + 0.0239\sin\alpha - 0.000682T_a + 0.0195\phi \quad (1)$$

当 $0.3 < k_t < 0.78$ 时

$$DF = 1.329 - 1.716 k_t + 0.267\sin\alpha - 0.00357T_a + 0.106\phi \quad (2)$$

当 $k_t \geq 0.78$ 时

$$DF = 0.426k_t - 0.256\sin\alpha + 0.00349T_a + 0.0734\phi \quad (3)$$

式中, DF 为散射辐射比例, 即散射辐射与地表接受的太阳总辐射的比值, α 为太阳高度角, T_a 和 ϕ 分别为小气候梯度观测的空气温度 ($^{\circ}\text{C}$) 和相对湿度。 k_t 为晴空指数, 指一定太阳高度角下地表接受的总太阳辐射 ($S_0, \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) 与地球大气上方平行于地表面上接受的总太阳辐射 ($S_e, \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) 的比值^[22], 即

$$k_t = \frac{S_0}{S_e} \quad (4)$$

$$S_e = S_{sc} [1 + 0.033\cos(360t_d/365)] \sin\alpha \quad (5)$$

式中, S_0 为观测数据, S_{sc} 为太阳常数 ($1370\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), t_d 为日序数 (以 1 月 1 日为 1), α 为太阳高度角。计算白天时段的半小时尺度散射辐射比例平均值得到逐日的散射辐射比例。

由逐日的散射辐射比例的变化可以判断天气晴朗程度^[16-17]。DF 越小, 表示天气越晴朗, DF=0.5 时, 为多云天气中等太阳辐射条件; DF 越大, 表示

到达地面的散射辐射越多, 而总太阳辐射较小, 为阴天天气状况。2004 年和 2005 年禹城站冬小麦拔节-乳熟期 DF 主要分布在 0.5 (图 2), 表明研究时段内中等天气状况出现的时间最多。比较两年的 DF 分布可知, 2004 年 DF 在 0.3 的分布频率明显低于 2005 年, 而在 0.7、0.9、1.0 的分布频率明显高于 2005 年, 表明 2004 年的阴天天气状况多于 2005 年。

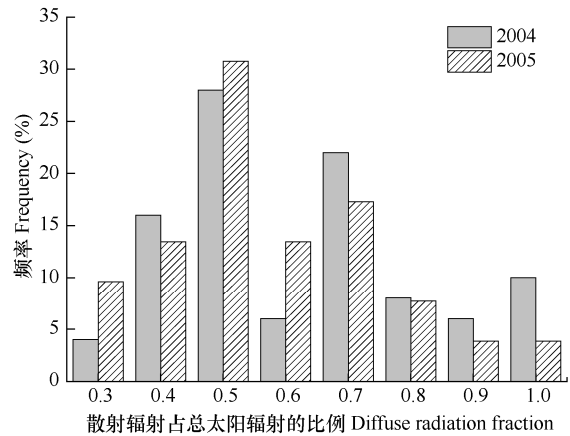


图 2 冬小麦拔节-乳熟期散射辐射占总太阳辐射比例 (DF) 的分布频率

Fig. 2 Distribution frequency of diffuse radiation fraction (DF) from jointing to milky maturity of winter wheat

1.5 总初级生产力的计算

涡度相关法只能得到净生态系统 CO_2 交换量 ($\text{NEE}, \text{mgCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), 需要对 NEE 进行组分拆分, 计算得到总初级生产力 ($\text{GPP}, \text{mgCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), 即

$$\text{GPP} = R_e - \text{NEE} \quad (6)$$

式中, R_e 为生态系统呼吸量 ($\text{mgCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)。NEE 为负值时, 表示生态系统吸收 CO_2 , 为正值表

示生态系统释放 CO₂。夜间植物不进行光合作用，因此，夜间观测到的 NEE 值即为 R_c。利用夜间的 R_c 与夜间土壤 5cm 处温度数据对 Lloyd-Taylor 方程^[23]进行拟合，将拟合好的方程，以白天土壤 5cm 处温度数据为输入，计算白天的 R_c，从而计算白天的 GPP。白天时段 30min 尺度的 GPP 累加之和即为逐日 GPP。

$$R_c = R_{ref} e^{E_0 \left(\frac{1}{T_{ref}-T_0} - \frac{1}{T_s-T_0} \right)} \quad (7)$$

式中，T_s 为土壤 5cm 处的温度 (°C)，为观测数据；T₀ 为常数 (-46.02°C)，R_{ref} 为生态系统在参考温度 T_{ref} (10°C) 下的呼吸值 (mgCO₂·m⁻²·s⁻¹)，E₀ 为活化能 (J·mol⁻¹)。式 (7) 中需要拟合的参数为 R_{ref} 和 E₀。

1.6 光能利用率的计算

生态系统光能利用率为总初级生产力 (GPP) 与光合有效辐射 (PAR) 的比值，即

$$LUE = \frac{GPP}{PAR} \quad (8)$$

式中，PAR 为相应时间段作物冠层接受到的光合有效辐射量 (μmol·m⁻²·s⁻¹)，为小气候观测数据。因此，LUE 的单位为 (mgCO₂·μmol⁻¹)，本研究将其转换为 (gCO₂·mol⁻¹)。

2 结果与分析

2.1 散射辐射比例与光能利用率的关系

2004 年和 2005 年冬小麦拔节-乳熟期的光能利用率(LUE)均值分别为 1.42 和 1.37gCO₂·mol⁻¹，2004 年的 LUE 高于 2005 年，表明阴天天气的增加(图 2)会提高该年份冬小麦拔节-乳熟期的 LUE。由图 3 可见，两年内冬小麦拔节-乳熟期 LUE 与散射辐射比

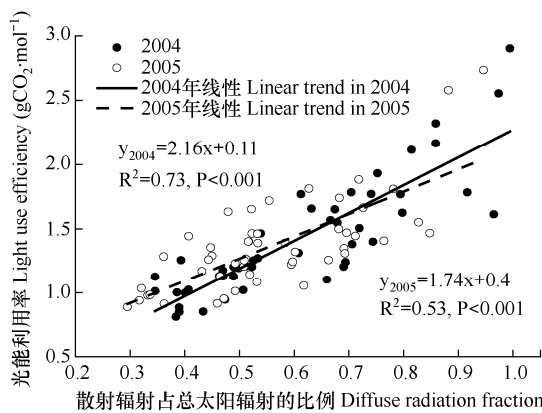


图 3 冬小麦拔节-乳熟期散射辐射比例与光能利用率的关系
Fig. 3 Relationships between diffuse radiation fraction and light use efficiency from jointing to milky maturity of winter wheat

例 (DF) 均呈显著线性正相关关系 (P<0.001)，随着 DF 从 0.3 增至 1.0，LUE 从 0.8gCO₂·mol⁻¹ 增至 2.9gCO₂·mol⁻¹。2004 年和 2005 年线性方程的斜率分别为 2.16gCO₂·mol⁻¹ 和 1.74gCO₂·mol⁻¹，2004 年明显高于 2005 年，主要是由于 2004 年的阴天天气较多，其 LUE 值较高。表明不同年份冬小麦生长期间天气状况的差别，会引起 LUE 与 DF 之间数量关系的差异。

2.2 散射辐射比例与总初级生产力的关系

2004 年和 2005 年冬小麦拔节-乳熟期总初级生产力 (GPP) 的均值分别为 35.2 和 42.0gCO₂·m⁻²·d⁻¹，2004 年明显低于 2005 年，表明阴天天气的增加对 LUE 的提高，还不足以补偿光合有效辐射 (PAR) 的降低对 GPP 的负面影响。由图 4 可见，2004 年和 2005 年冬小麦拔节-乳熟期的 GPP 随着散射辐射比例 DF 的增加呈先上升后下降的抛物线型变化趋势 (P<0.001)。分别对 2004 年和 2005 年 DF 和 GPP 关系的拟合方程进行求解，可得到当 GPP 达到最大值时，2004 年和 2005 年的 DF 值分别为 0.62 和 0.52，表明中等太阳辐射条件下，最有利于冬小麦拔节-乳熟期的 GPP 增长。2004 年的 GPP 达到最高值时对应的 DF 值大于 2005 年，主要是由于 2004 年阴天天气的增加，致使达到最大 GPP 需要的 DF 值增加。

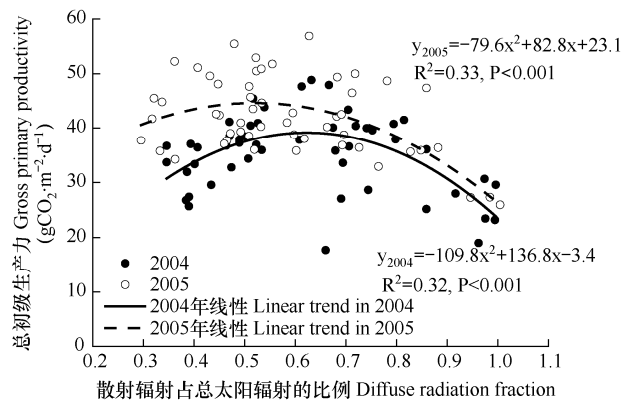


图 4 冬小麦拔节-乳熟期散射辐射比例与总初级生产力的关系

Fig. 4 Relationships between diffuse radiation fraction and gross primary productivity from jointing to milky maturity of winter wheat

明确 DF 与 PAR 之间的数量关系，可以得出 GPP 达到最高值时的 PAR 值。2004 年拔节-乳熟期的 PAR 均值为 26.1mol·m⁻²·d⁻¹，2005 年为 31.5mol·m⁻²·d⁻¹，比 2004 年增加了 20.7%。由图 5 可见，DF 与 PAR 之间为极显著线性负相关关系，结合 DF 与 PAR 的线性方程可以得出，2004 年和 2005 年 GPP 达到最

高值时的 PAR 值分别为 $24.6\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $30.8\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, 2004 年低于 2005 年, 表明拔节-乳熟期 PAR 均值较低时, 冬小麦 GPP 达到最高值时的 PAR 值也会相应降低。

综合以上结果可知, DF 的增加虽然有利于 LUE 的增长 (图 3), 但是 DF 增加超过一定值时, 由于 PAR 的相应降低, 会导致 GPP 下降。本研究通过确定 DF 与 GPP, 以及 DF 与 PAR 的数量关系, 得出了 GPP 达到最高值时的 DF 与 PAR 均值分别为 0.57 和 $27.7\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, 此状态下最有利于冬小麦拔节-乳熟期 GPP 的增加。2004 年与 2005 年 GPP 达到最高时对应的 DF 和 PAR 存在差别, 主要是由于两年间拔节-乳熟期 PAR 水平和 DF 分布频率的变化所致。

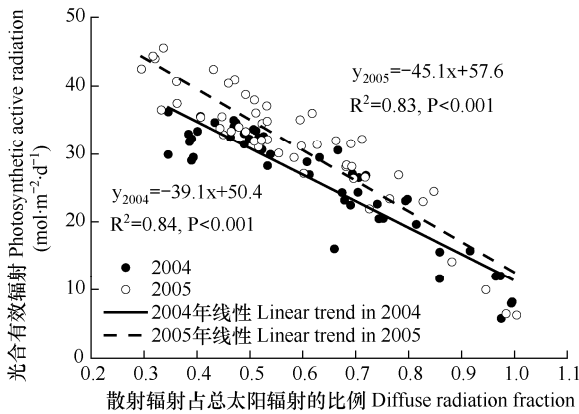


图 5 冬小麦拔节-乳熟期散射辐射比例与光合有效辐射的关系

Fig. 5 Relationships between diffuse radiation fraction and photosynthetic active radiation from jointing to milky maturity of winter wheat

3 结论与讨论

在冬小麦田间 CO_2 通量观测的基础上, 明确了冬小麦拔节-乳熟期散射辐射比例 (DF) 与光能利用率 (LUE) 为线性正相关关系。此结果与前人^[24-25]采用模拟或观测研究手段针对不同作物种类的研究结果一致。但是不同研究得出 DF 与 LUE 关系的线性方程的斜率存在较大差异。Choudhury^[24]利用模型和观测数据研究表明, 冬小麦 LUE 和 DF 线性方程的斜率在 $1.0\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ 左右变化; Rodriguez 等^[25]针对冬小麦开花前 20d 至开花后 14d 的模拟结果表明, 线性方程斜率为 $1.6\text{g}\cdot\text{MJ}^{-1}$ 。本研究表明 2004 年和 2005 年冬小麦拔节-乳熟期 DF 与 LUE 关系的线性方程斜率分别为 $2.16\text{g}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{mol}^{-1}$ 和 $1.74\text{g}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{mol}^{-1}$, 两年结果的差别主要是由于研究时段内 DF 分布频

率的差异所导致。

冬小麦拔节-乳熟期 DF 与总初级生产力 (GPP) 呈开口向下的抛物线关系, 即 GPP 随着 DF 的增加表现为先升高后降低的变化趋势。2004 年 DF 和 PAR 为 0.62 和 $24.6\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, 2005 年为 0.52 和 $30.8\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 时, GPP 达到最高值, 即中等太阳辐射条件最有利于冬小麦拔节-乳熟期对碳的吸收。这个结论与前人^[15, 26]针对森林生态系统的研究结果相似。由于 2004 年阴天天气多于 2005 年, 冬小麦拔节-乳熟期 GPP 达到最高值时 PAR 值低于 2005 年, 而 DF 值高于 2005 年。当然, DF 与 LUE 和 GPP 的数量关系, 尚需更多站点和年份的观测数据来进一步确定, 后续研究将进一步深入完善。

参考文献 References

[1] IPCC. In: Solomon S, Qin D, Manning M, et al (Eds.). Climate change, 2007: the physical science basis: working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 18.

[2] Qian Y, Wang W, Leung L, et al. Variability of solar radiation under cloud-free skies in China: the role of aerosols [J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34: 2111-2121.

[3] Ren X L, He H L, Zhang L, et al. Spatiotemporal variability analysis of diffuse radiation in China during 1981-2010 [J]. Annales Geophysicae, 2013, 31: 277-289.

[4] 韩玮, 苏敬. 城市发展对上海太阳辐射特征的影响分析 [J]. 自然资源学报, 2014, 29(9): 1485-1495.

Han W, Shu J. Analysis of effects of urbanization on solar radiation features in Shanghai [J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(9): 1485-1495. (in Chinese)

[5] 任义方, 王春乙, 赵艳霞. 气溶胶辐射效应对作物及生态系统的影响综述 [J]. 中国农业气象, 2010, 31(4): 533-540.

Ren Y F, Wang C Y, Zhao Y X. Review on impact of atmospheric aerosol radiation effect on crops and ecological system [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2010, 31(4): 533-540. (in Chinese)

[6] 刘秀位, 张小雨, 张喜英. 大气气溶胶增加对作物的影响研究进展 [J]. 生态学报, 2016, 36(7): 2084-2090.

Liu X W, Zhang X Y, Zhang X Y. A review of the research on crop responses to the increase in aerial aerosol [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(7): 2084-2090. (in Chinese)

[7] 江晓东, 陈惠玲, 姜琳琳, 等. 弱光条件下散射辐射比例增加对冬小麦籽粒灌浆进程的影响 [J]. 中国农业气象, 2017, 38(12):

- 753-760.
- Jiang X D, Chen H L, Jiang L L, et al. Effect of increasing diffuse radiation fraction under low light condition on the grain-filling process of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2017, 38(12): 753-760. (in Chinese)
- [8] Monteith J L. Solar-radiation and productivity in tropical ecosystems [J]. Journal of Applied Ecology, 1972, 9: 747-766.
- [9] Oliphant A J, Dragoni D, Deng B, et al. The role of sky conditions on gross primary production in a mixed deciduous forest [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 115: 781-791.
- [10] Zhang M, Yu G R, Zhang L M, et al. Impact of cloudiness on net ecosystem exchange of carbon dioxide in different types of forest ecosystems in China [J]. Biogeosciences, 2010, 7: 711-722.
- [11] Dengel S, Grace J. Carbon dioxide exchange and canopy conductance of two coniferous forests under various sky conditions [J]. Oecologia, 2010, 164: 797-808.
- [12] Greenwald R, Bergin M H, Jin X, et al. The influence of aerosols on crop production: a study using the CERES crop model [J]. Agricultural Systems, 2006, 89: 390-413.
- [13] Chen C, Wang E L, Yu Q, et al. Quantifying the effects of climate trends in the past 43 years (1961-2003) on crop growth and water demand in the North China Plain [J]. Climatic Change, 2010, 100: 559-578.
- [14] Yang X Y, Senthil A, Mike T F W, et al. Quantifying the interactive impacts of global dimming and warming on wheat yield and water use in China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 182-183: 342-351.
- [15] 张弥, 于贵瑞, 张雷明, 等. 太阳辐射对长白山阔叶红松林净生态系统碳交换的影响 [J]. 植物生态学报, 2009, 33(2): 270-282.
- Zhang M, Yu G R, Zhang L M, et al. Effects of solar radiation on net ecosystem exchange of broadleaved-korean pine mixed forest in Changbai Mountain, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2009, 33(2): 270-282. (in Chinese)
- [16] Jing X, Huang J, Wang G, et al. The effects of clouds and aerosols on net ecosystem CO₂ exchange over semi-arid loess plateau of northwest China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, 10: 8205-8218.
- [17] Alton P B. Reduced carbon sequestration in terrestrial ecosystems under overcast skies compared to clear skies [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148: 1641-1653.
- [18] Kanniah K D, Beringer J, Hutley L. Exploring the link between clouds, radiation, and canopy productivity of tropical savannas [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 182-183 (12): 304-313.
- [19] 何学兆, 周涛, 贾根锁, 等. 光合有效辐射总量及其散射辐射比例变化对森林 GPP 影响的模拟 [J]. 自然资源学报, 2011, 26(4): 619-634.
- He X Z, Zhou T, Jia G S, et al. Modeled effects of changes in the amount and diffuse fraction of PAR on forest GPP [J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(4): 619-634. (in Chinese)
- [20] 李俊, 于强, 孙晓敏, 等. 华北平原农田生态系统碳交换及其环境调控机制 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, 36(s1): 210-223.
- Li J, Yu Q, Sun X M, et al. Carbon dioxide exchange and the mechanism of environmental control in a farmland ecosystem in North China Plain [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2006, 36(suppl 1): 210-223. (in Chinese)
- [21] Reindl D T, Beckman W A, Duffie J A. Diffuse fraction correlations [J]. Solar Energy, 1990, 45: 1-7.
- [22] Gu L H, Fuentes J D, Shugart H H, et al. Responses of net ecosystem exchanges of carbon dioxide to changes in cloudiness results from two North American deciduous forests [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1999, 104(D24): 31421-31434.
- [23] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration [J]. Functional Ecology, 1994, 8(3): 315-323.
- [24] Choudhury B J. A sensitivity analysis of the radiation use efficiency for gross photosynthesis and net carbon accumulation by wheat [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 101: 217-234.
- [25] Rodriguez D, Sadras V. The limit to wheat water-use efficiency in eastern Australia I: gradients in the radiation environment and atmospheric demand [J]. Australian Journal of Agricultural Research, 2007, 58: 287-302.
- [26] 刘佳, 同小娟, 张劲松, 等. 太阳辐射对黄河小浪底人工混交林净生态系统碳交换的影响 [J]. 生态学报, 2014, 34(8): 2118-2127.
- Liu J, Tong X J, Zhang J S, et al. Impacts of solar radiation on net ecosystem carbon exchange in a mixed plantation in the Xiaolangdi Area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(8): 2118-2127. (in Chinese)