

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.035

脱硫石膏和磁化水对盐碱胁迫荞麦光合特性的影响

宁松瑞 赵雪 姬美玥 王全九

(西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048)

摘要: 为探明荞麦光合作用对土壤盐碱胁迫下不同改良措施的响应特征与适应规律, 设置盆栽试验, 测定盐碱胁迫土壤采用脱硫石膏、磁化水改良处理后荞麦的光合光响应特征, 分别采用直角双曲线模型、非直角双曲线模型、直角双曲线修正模型和指数模型对荞麦叶片光响应曲线进行分析, 确定了最优模型, 并对不同处理下的荞麦光合特征参数进行了分析。结果表明: 盐碱胁迫下, 磁化水灌溉对荞麦的光合特征影响明显, 荞麦净光合速率随脱硫石膏施用量的增大呈先增后减的趋势; 非直角双曲线模型的模拟精度最高, 可作为描述盐碱胁迫下荞麦叶片光响应曲线的最优模型; 11 t/hm² 脱硫石膏施用量下的荞麦光合特征参数 (暗呼吸速率、表观量子效率、最大净光合速率、光补偿点及光饱和点) 显著高于其他处理, 荞麦叶片对光强的适应能力增强, 有利于促进荞麦积累有机物; 磁化水灌溉对荞麦的光合光响应具有显著的促进作用。本研究可为寻求有效缓解盐碱胁迫对作物生长影响的调控方法提供参考。

关键词: 荞麦; 盐碱土; 光合特征; 光响应模型; 脱硫石膏; 磁化水

中图分类号: S156.4; S517 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)10-0310-08 **OSID:** 

Effect of Desulfurized Gypsum and Magnetized Water on Photosynthetic Characteristics of Buckwheat under Salt-alkali Stress

NING Songrui ZHAO Xue JI Meiyue WANG Quanjiu

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to explore the response and adaptation mechanisms of buckwheat photosynthesis to different improvement measures in saline-alkali soil, a pot experiment was set up to determine the photosynthetic light response characteristics of buckwheat under saline-alkali soil treated with desulfurized gypsum and magnetized water. With the aim to determine the optimal model which can calculate the photosynthetic characteristic parameters of buckwheat, the light response curves of buckwheat leaf were analyzed by the rectangular hyperbola model, non-rectangular hyperbola model and modified rectangular hyperbola model and exponential model. The results showed that the effect of irrigation with magnetized water on the photosynthetic characteristics of buckwheat was obvious, and the net photosynthetic rate was increased and then decreased with the increase of desulphurized gypsum application, under saline-alkali stress. The non-rectangular hyperbola model had the highest simulation accuracy and it can be used as the optimal model to describe the light response curve of buckwheat. Using the optimal light response curve model analysis showed that the photosynthetic characteristic parameters (e. g. dark respiration rate, apparent quantum efficiency, maximum photosynthetic rate, light compensation point, and light saturation point) of buckwheat were significantly higher than that of the other quantity processing in the application of 11 t/hm² desulfurized gypsum. And buckwheat leaves enhanced the adaptive ability of light intensity and promoted accumulation of organic matter. In addition, irrigation with magnetized water could enhance photosynthetic light response of buckwheat. The research result provided a reference for the development of effective regulation methods to alleviate the effects of soil saline-alkali stress on crop growth.

Key words: buckwheat; saline-alkali soil; photosynthetic characteristics; light response model; desulfurized gypsum; magnetized water

收稿日期: 2020-07-17 修回日期: 2020-08-06
基金项目: 国家自然科学基金项目(42007008、41830754、51679190)、陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2020JQ-640)和陕西省教育厅科研计划项目(20JK0789)
作者简介: 宁松瑞(1985—),男,博士后,主要从事土壤物理与溶质迁移研究,E-mail: ningsongrui@163.com
通信作者: 王全九(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事土壤物理与溶质迁移研究,E-mail: wquanjiu@163.com

0 引言

土壤盐碱化问题严重制约着干旱、半干旱地区农业的可持续发展。据统计,全世界盐渍化土地约为 9.50 亿 hm^2 ; 中国西北、东北及滨海地区的盐碱地面积超过 3 333.3 万 hm^2 , 其中近 1 333.3 万 hm^2 可供农业利用, 占耕地总面积的 10% 以上^[1-2]。合理利用盐碱地资源对保障国家粮食安全具有重要意义, 因此盐碱土壤改良长期备受关注。脱硫石膏是燃煤电厂的副产物, 其产量逐年增加, 因其含有丰富的 Ca、S、Si 等植物生长所必需或有益的矿质元素, 而被广泛应用于在盐碱土壤改良等方面^[3-5]。国内外学者对脱硫石膏在改良盐碱土中的作用进行了大量试验, 并取得显著成效。合理施用脱硫石膏可有效降低盐碱化土壤的 pH 值、碱化度和可溶性 Na^+ , 影响可溶盐淋洗效率及土壤导水率, 从而显著提高作物产量, 对改善土壤质量、保障粮食安全及保护生态环境具有重要意义^[6-10]。近年研究发现, 活化灌溉水技术可挖掘灌溉水的生理生产潜力, 如采用磁化水灌溉可增加作物的光合速率, 有利于积累有机物^[11], 这为盐碱化土壤改良提供了新的途径。

光合光响应能力是植物生长发育的重要指标, 可衡量植物受盐碱等环境胁迫的影响程度^[12]。定量研究植物的净光合速率与光合有效辐射之间的关系是揭示植物光合过程对环境响应的重要基础^[13], 光合光响应曲线的测量及模拟可估算表观量子效率、最大净光合速率、光补偿点、光饱和点及暗呼吸速率等生理参数。学者们建立了不同形式的光合光响应模拟模型, 如直角双曲线模型、非直角双曲线模型、直角双曲线修正模型和指数模型等。不同模型的参数估算值存在差异性, 为确保参数的准确性, 需根据植物所处的生境选取合适的模型^[12]。如水分胁迫下小麦、米槁、胡杨等的光合作用光响应最佳模型为直角双曲线修正模型^[12-14], 100、300 mmol/L NaCl 处理下海滨锦葵的光合光响应最适模型为直角双曲线模型^[15]。荞麦是干旱盐碱胁迫地区的主要作物之一, 其光合作用对盐碱胁迫土壤采用脱硫石膏、磁化水等改良措施后的响应特征尚未见报道, 盐碱胁迫土壤不同改良措施处理下其光合光响应模型的拟合效果及其适用性尚不清楚。本文通过设置盆栽试验, 测定盐碱胁迫土壤采用脱硫石膏、磁化水改良处理下荞麦的光合光响应特征, 对荞麦光合光响应特征进行分析, 以期明确盐碱土不同改良方法下荞麦叶片光响应过程的最优模型, 并通过最优模型计算荞麦的表观量子效率、最大净光合速率、光补偿点、光饱和点、暗呼吸速率等生理指标, 为有效缓

解盐碱胁迫下的荞麦高产优质栽培提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2019 年 7—10 月在西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室农水试验场进行。供试土壤来自陕西省榆林市定边县盐碱农田的耕作层。土壤质地为沙壤土, 容重为 1.35 g/cm^3 , pH 值为 8.61, 种植前土壤的含水率及含盐量分别为 16.13% 和 2.58 g/kg 。试验设置的处理分别为: 脱硫石膏施用量分别为 0、5.5、11、16.5 t/hm^2 , 对应的编号分别为 CK、A、B、C, 采用常规水质进行灌溉。另外, 脱硫石膏施用量为 0 的处理, 灌溉水经磁化强度为 400 T 的装置(包头鑫达磁性材料厂)处理后用于灌溉(编号为 M)。每个处理设置 3 组重复。

试验采用桶栽种植方式。种植前, 首先挑选出饱满的荞麦种子, 将荞麦种子在日光灯下光照(24 h)后放置在 30℃ 温水中浸泡 24 h, 进行催芽。将浸泡后的种子种植在直径为 18 cm、高 23 cm 的圆柱形塑料桶中。根据陕北农田的荞麦实际种植密度, 每个桶内种 4 窝, 每窝放 3 粒种子, 待定苗后每桶保留长势最好的 4 株幼苗。

1.2 测定内容与方法

为了分析不同改良措施下的荞麦光响应特征, 在荞麦开花-成熟期, 采用 LC-pro 型便携式光合仪(英国 ADC 公司)进行荞麦光响应曲线测定。选择晴朗天气, 观测时间为 09:00—11:30, 每个处理随机选取 3 株长势良好的荞麦叶片进行观测, 每个叶片重复观测 5 次, 所得数据取算术平均值。采用 LC-pro 型便携式光合仪自带的红蓝光源测定不同光合有效辐射(PAR)梯度下的荞麦叶片净光合速率(P_n)。光合有效辐射设置 14 个光强梯度, 由于测量过程中需要进行光诱导, 按 2 000、1 600、1 400、1 200、1 000、800、600、400、200、100、80、50、20、0 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的梯度顺序测定, 在各光强下停留一段时间, 待各项数据显示稳定后记录净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)等指标。

根据测定得到不同光合有效辐射下的净光合速率, 可绘制光合速率的光响应曲线(P_n -PAR), 通过测定光响应曲线估算表观量子效率(α)、最大净光合速率($P_{n\text{max}}$)、光补偿点(LCP)、光饱和点(LSP)和暗呼吸速率(R_d)等指标。

1.3 光合光响应模型

(1) 直角双曲线模型

光合光响应直角双曲线模型^[16]具体表示为

$$P_n = \frac{\alpha I P_{nmax}}{\alpha I + P_{nmax}} - R_d \tag{1}$$

式中 I ——光合有效辐射

其中光补偿点 (LCP) 计算式为

$$LCP = \frac{R_d P_{nmax}}{\alpha (P_{nmax} - R_d)} \tag{2}$$

直线 $y = P_{nmax}$ 与直线 $y = \alpha I - R_d$ 相交, 交点所对应 x 轴的数值即光饱和点 (LSP)。

(2) 非直角双曲线模型

光合光响应非直角双曲线模型^[16]具体表示为

$$P_n = \frac{\alpha I + P_{nmax} - \sqrt{(\alpha I + P_{nmax})^2 - 4 I \alpha k P_{nmax}}}{2k} - R_d \tag{3}$$

式中 k ——非直角双曲线的曲角, 取 0 ~ 1

若模型拟合效果较好, 光补偿点 (LCP) 计算式为

$$LCP = \frac{R_d P_{nmax} - k R_d^2}{\alpha (P_{nmax} - R_d)} \tag{4}$$

(3) 指数模型

光合光响应指数模型^[16]具体表示为

$$P_n = P_{nmax} (1 - e^{-\alpha I / P_{nmax}}) - R_d \tag{5}$$

估算 LSP 时, 设 P_n 为 $0.99 P_{nmax}$ 所对应的光强为饱和光强。

(4) 直角双曲线修正模型

光合光响应直角双曲线修正模型^[17]具体表示为

$$P_n = \alpha \frac{1 - \beta I}{1 + \gamma I} (I - LCP) \tag{6}$$

式中 β ——光抑制系数

γ ——独立于 I 的系数

暗呼吸速率 (R_d) 表示为

$$R_d = -P(I=0) = -\alpha LCP \tag{7}$$

光饱和点 (LSP) 表示为

$$LSP = \frac{\sqrt{\beta + \gamma + \frac{1 + \gamma LCP}{\beta}} - 1}{\gamma} \tag{8}$$

最大净光合速率 (P_{nmax}) 表示为

$$P_{nmax} = \alpha \frac{1 - \beta LSP}{1 + \gamma LSP} (LSP - LCP) \tag{9}$$

$I=0$ 处的量子效率定义为内禀量子效率 (ϕ_0), 表示为

$$\phi_0 = P'(I=0) = \alpha [1 + (\gamma + \beta) LCP] \tag{10}$$

$I = LCP$ 处的量子效率代表表观量子效率 (ϕ_c)^[18], 表示为

$$\phi_c = P'(I=LCP) = \alpha \frac{1 + (\gamma - \beta) LCP - \beta \gamma LCP^2}{(1 + \gamma LCP)^2} \tag{11}$$

光响应曲线上 $I=0$ 和 $I=LCP$ 两点连线斜率的绝对值 (ϕ_{c0}) 为

$$\phi_{c0} = |P(I=0)/LCP| = \alpha \tag{12}$$

由于直角双曲线模型、非直角双曲线模型和指数模型均是单调递增函数, 故无法准确求出饱和光强 (LSP)。因此需要通过直线方程拟合弱光下 (小于等于 $200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) 所测得的光响应数据, 获得表观量子效率 (α), 然后求解方程 $P_{nmax} = \alpha I - R_d$, 进而求得饱和光强^[19]。

式(1) ~ (12) 中, α 反映植物在弱光下吸收、转换和利用光能的能力^[20]。 LSP 反映植物利用光照强度的能力, 饱和光强越大, 说明植物生长发育的过程中在强光的刺激下越不容易发生光抑制现象; LCP 反映了植物在光合作用中, 光同化效率与呼吸损耗相互抵消时的光照强度, 光补偿点越低, 植物利用低光强的能力越强。 R_d 反映了植物在无光照条件下的呼吸速率, 植物在暗呼吸时消耗光合作用产生的氧气和有机物质, 释放的能量基本都以热的形式散失, 但其中小部分用于植物的生理活动^[21-22]。

1.4 数据处理

利用 SPSS 25.0 中非线性回归分析对实测的光响应数据进行拟合。试验数据处理的由 Excel 2016 完成。分别通过决定系数 (R^2)、均方根差 (RMSE)、平均绝对误差 (MAE) 来评价不同模型的拟合精度。RMSE、MAE 越小, R^2 越接近于 1, 说明模型拟合精度越高, 反之, 则拟合精度越差^[12]。

2 结果与分析

2.1 养麦的光合生理特性分析

净光合速率在一定程度上反映了植物光合作用的强弱。养麦开花-成熟期实测的净光合速率随 PAR 变化特征如图 1a 所示, $PAR < 200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 各处理的 P_n 均随 PAR 的增加而迅速上升, 说明 P_n 对 PAR 响应敏感。当 $PAR > 1\,000 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时, 各处理 P_n 缓慢增加至光饱和点, 达到最大光合速率。在 P_n 较为稳定的光照强度范围内, 如 PAR 为 $1\,600 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时, 与 CK P_n ($1.110 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) 相比, A 处理、B 处理、C 处理及 M 处理的 P_n 分别增加了 28.83%、249.01%、163.33% 和 872.02%, 由大到小依次为 M 处理、B 处理、C 处理、A 处理、CK 处理。结果表明: 盐碱胁迫下, 磁化水进行灌溉对养麦的光合特征影响明显, 有效提高养麦叶片的净光合速率, 有利于干物质的累积; 此外, 随着脱硫石膏施用量的增大, P_n 呈现先增加后减小的变化趋势, 其中 B 处理的 P_n 最大, 对养麦光合特征影响最为明显。

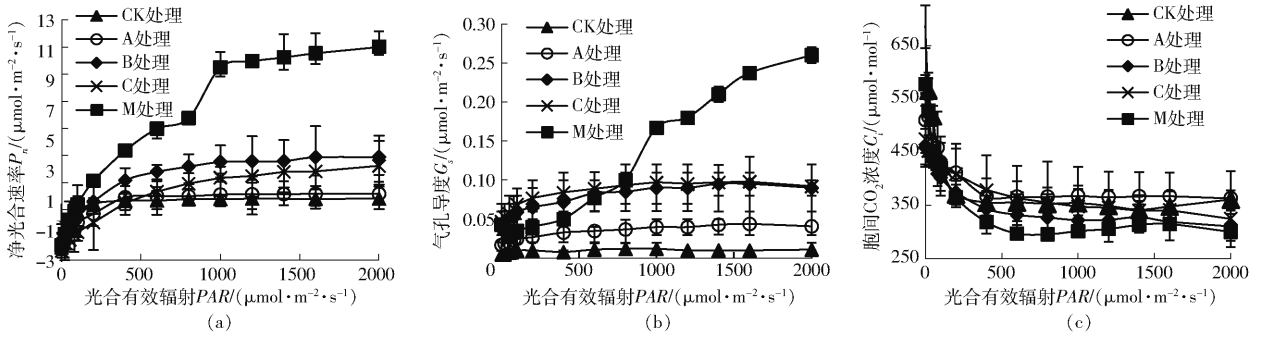


图 1 不同处理下荞麦开花-成熟期的光合生理特性

Fig. 1 Photosynthetic physiological characteristics of buckwheat in flowing - ripening stage under different treatments

图 1b 为不同处理下荞麦的气孔导度随 PAR 变化特征。各处理的 G_s 均随 PAR (小于 $100 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$) 的增加迅速上升; 当 $PAR \geq 100 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时, 施加脱硫石膏处理的 G_s 变化较为平稳, 由大到小依次为 C 处理、B 处理、A 处理、CK 处理。说明随着脱硫石膏施用量的增加, G_s 总体呈现增加的趋势。但当 $PAR \geq 800 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时, M 处理的 G_s 明显高于其他处理; 这说明在较高的光强下, 磁化水灌溉能有效提高盐碱胁迫下荞麦的 G_s , 有助于促进荞麦的光合作用。类似的, 荞麦的胞间 CO_2 浓度随 PAR 变化的特征表明 (图 1c), 光强较弱时 ($PAR < 400 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$) 各处理的 C_i 下降幅度均较大; 随着光强的增加 ($400 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s}) < PAR < 2000 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$), 不同处理 C_i 呈现缓慢下降并渐趋平稳, 总体由大到小表现为 A 处理、CK 处理、C 处理、B 处理、M 处理。这可能是因为初始阶段光强较弱时, 叶片 P_n 急速增加, 消耗的 CO_2 量较大, 导致 C_i 的急速下降; 当 PAR 超过一定范围之后, 光合作

用增幅变缓, C_i 变化趋缓。

2.2 光合光响应模型评估荞麦光响应特征适用性分析

采用 4 种光合光响应模型对实测的荞麦光响应曲线进行拟合, 如图 2 所示。4 种光合光响应模型均能较好地拟合荞麦叶片的光响应过程。 PAR 为 $2000 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时, 直角双曲线模型和非直角双曲线模型的拟合值均比实测值高, 而指数模型的拟合值基本小于实测值, 这 3 种模型均是没有极值的渐近线, 因此均不能很好地拟合饱和和光强后的 P_n 变化过程。而直角双曲线修正模型与这 3 种模型不同, 能够准确地拟合发生光抑制现象的光响应曲线。但在本文所设定的光照范围内, 各处理的荞麦 P_n 均未出现下降趋势, 即在光响应测量过程中未出现光抑制现象。分析比较 4 种光响应曲线的宏观拟合情况, 指数模型和直角双曲线修正模型的拟合效果最差, 直角双曲线模型和非直角双曲线模型拟合效果较好, 但非直角双曲线模型拟合曲线与实测值变化

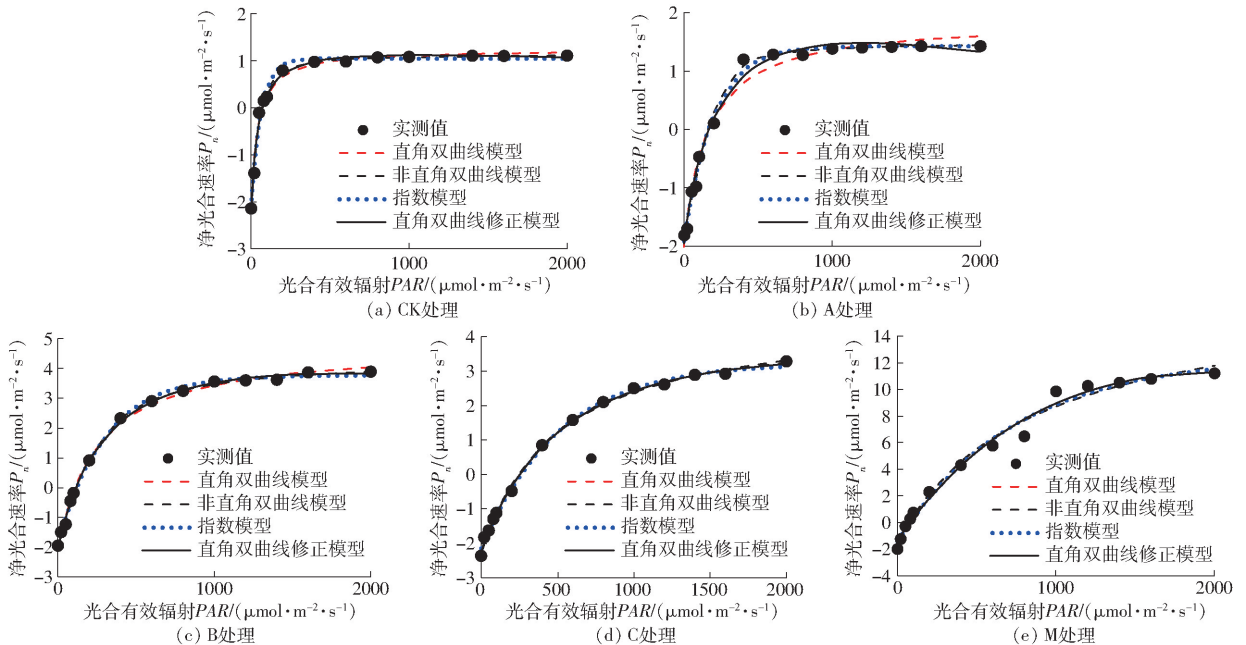


图 2 4 种模型对荞麦光响应曲线拟合效果比较

Fig. 2 Simulation of light response curves of buckwheat by four light response models

趋势更为一致,因此其拟合效果最佳。

结合图 2 和表 1 可知,4 种模型均能较好地拟合荞麦的光响应过程。施用脱硫石膏的处理中,非直角双曲线模型的拟合精度 ($R^2 \geq 0.993$ 且 RMSE 与 MAE 最小) 优于其他 3 个模型;磁化水灌溉处理,直角双曲线修正模型拟合精度最高,非直角双曲线模型拟合精度次之,直角双曲线模型和指数模型的拟合精度最差。综合比较 4 种模型对荞麦光响应的拟合效果,非直角双曲线模型的拟合曲线较其他模型与实测值最为接近,同时 R^2 更接近于 1 且 RMSE 与 MAE 较小;说明非直角双曲线模型的拟合精度更高,可作为描述盐碱胁迫土壤采用脱硫石膏、磁化水改良处理下荞麦叶片光响应曲线的最优模型。

2.3 非直角双曲线模型拟合的光响应参数变化特征

为了定量对比不同处理对荞麦光响应特征的影响,根据非直角双曲线模型计算获得表观量子效率 (α)、最大净光合速率 (P_{nmax})、光补偿点 (LCP)、光饱和点 (LSP)、暗呼吸速率 (R_d) 等光合特征参数。此外,光补偿点较低、饱和光强较高的植物对光环境的适应性较强,既能充分利用弱光又能在光强较高环境中生长良好;而光补偿点较高、饱和光强较低的植物对光照的适应性较窄。因此,用 ΔI 表示荞麦叶片可利用光照强度范围,结果如表 2 所示。

表 2 荞麦光响应模型参数

Tab.2 Light response parameters of buckwheat under different treatments

处理	α	$P_{nmax}/$ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	$LCP/$ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	$LSP/$ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	$R_d/$ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	$\Delta I/$ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	R^2
CK	0.054	3.334	66.499	102.278	2.189	35.779	0.993
A	0.012	3.292	167.397	424.750	1.805	257.353	0.994
B	0.020	6.263	115.145	410.750	1.952	295.605	0.999
C	0.011	6.388	258.511	780.182	2.194	521.671	0.998
M	0.023	19.288	77.092	908.696	1.612	831.604	0.986

2.3.1 脱硫石膏施用量对荞麦光响应参数的影响

不同脱硫石膏施用量处理,表观量子效率 (α)、最大净光合速率 (P_{nmax})、光补偿点 (LCP)、光饱和点 (LSP)、暗呼吸速率 (R_d) 差异较为明显 (表 2)。A、B、C 处理的 α 比 CK 处理分别减少了 77.78%、62.96% 和 79.63%,同时 A、B、C 处理的 LCP 相比 CK 处理分别增加了 151.73%、73.12% 和 288.75%,这表明随着盐碱土中脱硫石膏施用量的增加,荞麦对弱光的利用能力不断下降,说明施加脱硫石膏会降低荞麦在弱光条件下的光合作用。A 处理的 P_{nmax} 略小于 CK 处理 (减小了 1.26%),与 A 处理的 P_{nmax} ($3.292 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$) 相比,B、C 处理的 P_{nmax} 分别增大了 87.85% 和 91.60%。同时 A、B、C 处理的 LSP 均大于 CK 处理,相比 CK 处理分别增加

表 1 4 种模型对光响应曲线的模拟精度比较

Tab.1 Comparison of simulation values of light response curves of buckwheat by four light response models

处理	模型	RMSE/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	MAE/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	R^2
CK	直角双曲线模型	0.117	0.082	0.986
	非直角双曲线模型	0.084	0.054	0.993
	直角双曲线修正模型	0.109	0.073	0.988
	指数模型	0.111	0.085	0.988
A	直角双曲线模型	0.117	0.082	0.986
	非直角双曲线模型	0.084	0.054	0.993
	直角双曲线修正模型	0.109	0.073	0.988
	指数模型	0.111	0.085	0.988
B	直角双曲线模型	0.130	0.109	0.996
	非直角双曲线模型	0.080	0.061	0.999
	直角双曲线修正模型	0.098	0.074	0.998
	指数模型	0.104	0.090	0.998
C	直角双曲线模型	0.093	0.063	0.998
	非直角双曲线模型	0.085	0.055	0.998
	直角双曲线修正模型	0.086	0.075	0.998
	指数模型	0.096	0.070	0.988
M	直角双曲线模型	0.556	0.439	0.986
	非直角双曲线模型	0.557	0.408	0.986
	直角双曲线修正模型	0.531	0.407	0.988
	指数模型	0.544	0.431	0.987

了 315.29%、301.60% 和 662.81%,说明施加脱硫石膏,提高了荞麦对强光的利用与转化能力,这可能是因为施用脱硫石膏有效减缓了土壤盐碱胁迫,增加了叶片气孔对 CO_2 的吸收,增强了植株的光合作用。分析不同处理的 ΔI 可知,施加脱硫石膏可有效增加荞麦的可利用光照范围及对光强的适应性; R_d 越大,说明植物叶片的生理活性越高,消耗植株体内有机物等营养物质速度越快。A 处理 R_d 最小 ($1.805 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$),C 处理 R_d 最大 ($2.194 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$);说明施加脱硫石膏导致荞麦利用弱光的能力变弱,但提高了强光的利用能力,同时减少了呼吸消耗,荞麦以此积累有机物以抵御及适应土壤盐碱胁迫。

根据上述分析可知,盐碱土中合理施加脱硫石

膏可以提高养麦的光合作用。其中 B 处理和 C 处理中养麦可利用光强的范围较大,对光环境的适应性较强。但 C 处理的 R_d 大于 B 处理,其消耗有机物的速率更快,不利于干物质累积。故而 B 处理即脱硫石膏施用量为 11 t/hm^2 时,可有效提高养麦的光合作用,增强养麦对光照的利用及转化能力,增加可利用光照范围,有利于促进养麦生物量累积,盐碱地改良效果最好。

2.3.2 磁化水灌溉对养麦光响应参数的影响

由表 2 可知, M 处理的 α 低于 CK 处理,同时其 LCP 比 CK 处理偏高 $10.593 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 相比增加了 15.93%, 表明磁化水灌溉会降低养麦在弱光条件下的光合作用能力,降低养麦对弱光的利用能力; M 处理的 $P_{n\max}$ 及 LSP 均明显大于 CK 处理, 比 CK 处理分别增大了 478.52% 和 788.46%, 说明磁化水灌溉增强了养麦对强光的利用能力,其光合作用不易受到强光的抑制,忍受强光的能力显著增加,这可能是磁化水灌溉改善了盐碱土的理化性质并降低了土壤含盐量,使得养麦对养分的吸收利用能力增加,提高了养麦对盐碱胁迫的抗逆性^[11]; M 处理比 CK 处理的 R_d 降低了 $0.577 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 说明黑暗条件下 M 处理对养麦消耗光合作用产生的氧气和有机物质速率比 CK 处理低,降低了 26.36%, 可能是因为磁化水灌溉提高了养麦的光合作用,有效减少养麦的暗呼吸作用,减少有机物的消耗,有助于有机物累积,增强了养麦在盐碱土壤环境中的抗逆性。此外,分析 ΔI 可知, M 处理比 CK 处理对光照的适应性较强,范围更大,即磁化水灌溉可有效增加养麦的可利用光照范围及对光强的适应性,可有效增加作物的光合速率,有利于作物积累有机物;这与李铮^[23]、ANAND 等^[24]及 MOUSSA^[25]的研究结论基本一致。

3 讨论

通过不同光响应模型进行分析时,由于每个模型所体现机制不同,其拟合效果不尽相同,故而各个模型存在优缺点。因此,在研究植物光合作用,选用合适的光合光响应模型时,应根据植物所处的生境条件、植物种类等选择最佳拟合模型。本研究中,直角双曲线模型、直角双曲线修正模型、非直角双曲线模型和指数模型这 4 种光合光响应模型均可以较好拟合养麦的光响应过程,其中非直角双曲线模型拟合效果最佳。这可能由于直角双曲线模型、非直角双曲线模型和指数模型都是一条不存在极值的渐近线,不能很好地表达达到饱和光强后的光抑制现象,其适应性和拟合精度均受到一定的限制^[26-27]。在

对水稻^[28]和杜鹃红山茶^[29]等乔灌木及农作物的研究中也得到了类似结果,说明直角双曲线模型拟合所得的 $P_{n\max}$ 等光合指标数值偏大,这可能是模型自身缺陷所致,不会因植物种类的不同而发生改变。另外,指数模型本身不存在极值,所以只能拟合不存在 PS II 动力学下调的光合过程^[30]。非直角双曲线模型与直角双曲线模型拟合效果相似,但非直角双曲线模型拟合的曲线与养麦光合实测值的变化趋势最为接近,并且 R^2 较直角双曲线模型和指数模型更接近于 1,且 RMSE 与 MAE 较小,其拟合精度最高。根据对杠柳的研究发现,直角双曲线修正模型表达式与上述 3 种模型相反,能够准确地拟合发生光抑制现象的光响应曲线^[31]。但在本研究所设定的光照范围内,养麦没有出现明显的光抑制现象,因此直角双曲线修正模型拟合效果低于非直角双曲线模型。故而非直角双曲线模型是研究养麦光合光响应特征的最优模型。

光响应及其参数特征显示(表 2),盐碱胁迫下,磁化水灌溉处理的 $P_{n\max}$ 、 LSP 及 ΔI 明显增加,说明磁化水灌溉可以增强养麦对强光的耐受能力,且增加养麦对可利用光强的范围。相同条件下, PAR 为 $2000 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时, P_n 始终维持在一个较高的水平,这与李铮^[23]、ANAND 等^[24]及 MOUSSA^[25]对番茄、玉米及豆科作物采用磁化水灌溉得到的光合光响应特征结论相似,磁化水灌溉较常规水灌溉可有效增加作物的光合速率,对作物生长发育中诸多生理过程呈现积极作用,有利于作物积累有机物。这可能是采用磁化水灌溉有助于土壤盐分溶解、提高脱盐率,促进 Cl^- 、 HCO_3^- 和 Na^+ 的淋洗量^[32-33];此外,采用磁化水灌溉可改善土壤物理性质,有利于土壤团聚体结构的形成,对盐碱土壤的改良效果较好^[34]。

随着脱硫石膏施用量增加, P_n 、 LSP 等光合参数大于 CK 处理。说明施加脱硫石膏改良盐碱土可有效提高养麦的净光合速率,这与邹璐等^[35]的试验结果较为一致。施用脱硫石膏减缓了土壤盐分胁迫,改善了植株水分亏缺、叶片气孔关闭的状况,增加了叶片气孔对 CO_2 的吸收,增强了植株的光合作用^[35]。土壤中游离的碳酸钠和碳酸氢钠与石膏中的 Ca^{2+} 作用产生了碳酸钙沉淀、碳酸氢钙和中性盐硫酸钠;土壤中交换性 Na^+ 被 Ca^{2+} 取代形成了可溶性的硫酸钠,从而降低了土壤碱性,改善了土壤理化性质^[6]。在不同脱硫石膏施用量下, P_n 随着 PAR 的增加呈现先增后减的变化趋势,其中 B 处理的 P_n 最大,可知 B 处理对养麦的光合特征影响最为明显。说明施用脱硫石膏改善了盐碱土的理化性质,增加

了荞麦叶片的光敏感程度,但当脱硫石膏施用量进一步增加时,反而会降低荞麦的光合作用,可能是因为脱硫石膏施用量的增加导致土壤含盐量增加,但荞麦仍保持了较高的光合能力,说明荞麦在遭受盐碱胁迫时,能够通过自身生理调节来适应外界环境的不利变化,从而维持一定的光合作用。

4 结论

(1)采用直角双曲线模型、直角双曲线修正模型、非直角双曲线模型和指数模型拟合实测的荞麦光合光响应曲线,结果表明,非直角双曲线模型对荞

麦光响应曲线的拟合精度最高,是盐碱胁迫土壤采用脱硫石膏、磁化水改良措施下描述荞麦光合特征的最优光响应模型。

(2)脱硫石膏施用量为 11 t/hm^2 时,荞麦叶片对光强的适应能力增强,荞麦可利用光强范围增大,促进了荞麦的光合作用,有利于促进荞麦积累有机物和提高产量。

(3)磁化水灌溉可促进盐碱胁迫下荞麦的光合作用,有效减小荞麦暗呼吸作用,降低有机物的消耗,荞麦可利用光强范围增大,有利于促进荞麦积累有机物。

参 考 文 献

- LIANG Y C, YANG C G, SHI H H. Effects of silicon on growth and mineral composition of barley grown under toxic levels of aluminum[J]. J. Plant Nutr., 2001, 24(2): 229–243.
- 徐鹏程,冷翔鹏,刘更森,等. 盐碱土改良利用研究进展[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(5): 293–298.
XU Pengcheng, LENG Xiangpeng, LIU Gengsen, et al. Research progress in the improvement and utilization of saline-alkali soil[J]. Jiangsu Agricultural Science, 2014, 42(5): 293–298. (in Chinese)
- CLARK R B, RITCHEY K D, BALIGAR V C. Benefits and constraints for use of FGD products on agricultural land[J]. Fuel, 2001, 80(6): 821–828.
- 徐胜光,李淑仪,廖新荣,等. 花生施用燃煤烟气脱硫副产物研究初报[J]. 土壤与环境, 2001, 10(1): 23–26.
XU Shengguang, LI Shuyi, LIAO Xinrong, et al. Study on the use of desulphurisation products in planting peanut in a pot-experiment[J]. Soil and Environmental Sciences, 2001, 10(1): 23–26. (in Chinese)
- 李淑仪,蓝佩玲,徐胜光,等. 燃煤烟气脱硫副产物在酸性土壤的农业资源化利用[J]. 生态科学, 2003, 22(3): 222–226.
LI Shuyi, LAN Peiling, XU Shengguang, et al. Agricultural resource use study of desulphurization byproduct of burn coal smoke with acid soils[J]. Ecologic Science, 2003, 22(3): 222–226. (in Chinese)
- FRENKE H L. Solution of gypsum and improvement of sodic soil aroused by element exchange[J]. J. Soil Sci., 1989, 40(3): 599–611.
- 李跃进,苗青旺,陈昌和,等. 土壤碱化和化学改良对土壤团粒结构的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(1): 136–139.
LI Yuejin, MIAO Qingwang, CHEN Changhe, et al. Influence of sodication and chemical improvement on soil aggregate[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(1): 136–139. (in Chinese)
- 王嘉航,杨培岭,任树梅,等. 脱硫石膏配合淋洗改良碱化土壤对土壤盐分分布及作物生长的影响[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(9): 123–132.
WANG Jiahang, YANG Peiling, REN Shumei, et al. Effect of flue gas desulphurized gypsum and sodic soil reclamation by leaching water on soil salt distribution and the growth of crop[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(9): 123–132. (in Chinese)
- 李茜,孙兆军,秦萍,等. 燃煤烟气脱硫废弃物和糠醛渣对盐碱土的改良效应[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(4): 70–73.
LI Qian, SUN Zhaojun, QIN Ping, et al. Amelioration of saline-sodic soil with the by-product of flue gas desulphurization (BFGD) and furfural residue[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, 26(4): 70–73. (in Chinese)
- 张俊华,孙兆军,贾科利,等. 燃煤烟气脱硫废弃物及专用改良剂改良龟裂碱土的效果[J]. 西北农业学报, 2009, 18(5): 208–212.
ZHANG Junhua, SUN Zhaojun, JIA Keli, et al. Effect of desulfurization gypsum and special soil amendment for improvement of takyrsolonetzs[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2009, 18(5): 208–212. (in Chinese)
- 王全九,孙燕,宁松瑞,等. 活化灌溉水对土壤理化性质和作物生长影响途径剖析[J]. 地球科学进展, 2019, 34(6): 660–670.
WANG Quanjiu, SUN Yan, NING Songrui, et al. Effects of activated irrigation water on soil physicochemical properties and crop growth and analysis of the probable pathway[J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(6): 660–670. (in Chinese)
- 马莉,王全九. 不同灌溉定额下春小麦光合光响应特征研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 271–277.
MA Li, WANG Quanjiu. Photosynthetic and light response characteristics of spring wheat under different irrigation schedules [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 271–277. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180632&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.032. (in Chinese)
- 李佳,刘济明,文爱华,等. 米槁幼苗光合作用及光响应曲线模拟对干旱胁迫的响应[J]. 生态学报, 2019, 39(3): 913–922.
LI Jia, LIU Jiming, WEN Aihua, et al. Simulated photosynthetic responses of *Cinnamomum migao* during drought stress evaluated using light-response models[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(3): 913–922. (in Chinese)
- 王海珍,韩路,徐雅丽,等. 干旱胁迫下胡杨光合光响应过程模拟与模型比较[J]. 生态学报, 2017, 37(7): 2315–2324.
WANG Haizhen, HAN Lu, XU Yali, et al. Simulated photosynthetic responses of *Populus euphratica* during drought stress using light-response models[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(7): 2315–2324. (in Chinese)
- 温黎明,赵秀梅,董轲,等. 不同盐渍条件下海滨锦葵光合-光响应模型[J]. 山东科学, 2018, 31(5): 81–88.

- WEN Liming, ZHAO Xiumei, DONG Ke, et al. Photosynthetic and light-response models of *Kosteletzkyia virginica* under different salt stress[J]. Shandong Science, 2018, 31(5):81–88. (in Chinese)
- [16] THORNLEY J H M. Mathematical models in plant physiology[M]. Academic Press, 1976.
- [17] YE Z P. A new model for relationship between irradiance and the rate of photosynthesis in *Oryza sativa*[J]. Photosynthetica (Prague), 2007, 45(4): 637–640.
- [18] ASPINWALL M J, KING J S, MCKEAND S E, et al. Leaf-level gas-exchange uniformity and photosynthetic capacity among loblolly pine (*Pinus taeda* L.) genotypes of contrasting inherent genetic variation[J]. Tree Physiology, 2011, 31(1): 78–91.
- [19] 孙赫, 赵春梅, 代忠迪, 等. 光合-光响应模型的研究进展[J], 林业科技情报, 2016(4): 15–17.
- SUN He, ZHAO Chunmei, DAI Zhongdi, et al. Current research situation for the photosynthetic light response model[J]. Forestry Science and Technology Information, 2016(4): 15–17. (in Chinese)
- [20] 段萌, 杨伟才, 毛晓敏. 覆膜和水分亏缺对春小麦光合特性影响及模型比较[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 219–227.
- DUAN Meng, YANG Weicai, MAO Xiaomin. Effects of water deficit on photosynthetic characteristics of spring wheat under plastic mulching and comparison of light response curve models[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 219–227. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180127&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.027. (in Chinese)
- [21] 张淑勇, 周泽福, 夏江宝, 等. 不同土壤水分条件下小叶扶芳藤叶片光合作用对光的响应[J]. 西北植物学报, 2007, 27(12): 2514–2521.
- ZHANG Shuyong, ZHOU Zefu, XIA Jiangbao, et al. The responses of *Euonymus fortunei* var. *radicans* sieb. leaf photosynthesis to light in different soil moisture[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2007, 27(12): 2514–2521. (in Chinese)
- [22] COLEY P D. Herbivory and defensive characteristics of tree species in a low land tropical forest [J]. Ecological Monographs, 1983, 53(2): 209–233.
- [23] 李铮. 不同水处理对番茄幼苗生长及其质量的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
- LI Zheng. Effect of the different water treatment on tomato seeding growth and quality[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [24] ANAND A, NAGARAJAN S, VERMA A P S, et al. Pre-treatment of seeds with static magnetic field ameliorates soil water stress in seedlings of maize (*Zea mays* L.) [J]. India Journal of Biochemistry & Biophysics, 2012, 49(1): 63–70.
- [25] MOUSSA H R. The impact of magnetic water application for improving common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) [J]. New York Science Journal, 2011, 4(6): 15–20.
- [26] 韩刚, 赵忠. 不同土壤水分下 4 种沙生灌木的光合光响应特性[J]. 生态学报, 2010, 30(15): 4019–4026.
- HAN Gang, ZHAO Zhong. Light response characteristics of photosynthesis of four xerophilous shrubs under different soil moistures[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(15): 4019–4026. (in Chinese)
- [27] 江浩, 周国逸, 黄钰辉, 等. 南亚热带常绿阔叶林林冠不同部位藤本植物的光合生理特征及其对环境因子的适应[J]. 植物生态学报, 2011, 35(5): 567–576.
- JIANG Hao, ZHOU Guoyi, HUANG Yuhui, et al. Photosynthetic characteristics of canopy-dwelling vines in lower subtropical evergreen broad leaved forest and response to environmental factors[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(5): 567–576. (in Chinese)
- [28] 闫小红, 尹建华, 段世华, 等. 四种水稻品种的光合光响应曲线及其模型拟合[J]. 生态学杂志, 2013, 32(3): 604–610.
- YAN Xiaohong, YIN Jianhua, DUAN Shihua, et al. Photosynthesis light response curves of four varieties and model fitting [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(3): 604–610. (in Chinese)
- [29] 张方秋, 杨会肖, 徐斌, 等. 杜鹃红山茶的光响应特性及其最适模型筛选[J]. 生态环境学报, 2015, 24(10): 1599–1603.
- ZHANG Fangqiu, YANG Huixiao, XU Bin, et al. Photosynthesis light response characteristics of *Camellia azalea* and fitting of application model[J]. Ecology and Environment Sciences, 2015, 24(10): 1599–1603. (in Chinese)
- [30] WHITE A J, CRITCHLEY C. Rapid light curves: a new fluorescence method to assess the state of the photosynthetic apparatus [J]. Photosynthesis Research, 1999, 59(1): 63–72.
- [31] 王荣荣, 夏江宝, 杨吉华, 等. 贝壳砂生境干旱胁迫下杠柳叶片光合光响应模型比较[J]. 植物生态学报, 2013, 37(2): 111–121.
- WANG Rongrong, XIA Jiangbao, YANG Jihua, et al. Comparison of light response models of photosynthesis in leaves of *Periploca sepium* under drought stress in sand habitat formed from seashells[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2013, 37(2): 111–121. (in Chinese)
- [32] CONSTABLE S. Marine electromagnetic methods: a new tool offshore exploration[J]. Society of Exploration Geophysicists, 2006, 25(4): 438–444.
- [33] MOSTAFAZADEH-FARD B, KHOSHRAVESH M, MOUSAVI S F, et al. Effects of magnetized water on soil chemical components underneath trickle irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2012, 138(12): 1075–1081.
- [34] 穆艳, 赵国庆, 赵巧巧, 等. 活化水灌溉在农业生产中的应用研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(4): 403–411.
- MU Yan, ZHAO Guoqing, ZHAO Qiaoqiao, et al. Advances in the application of activated water irrigation[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2019, 36(4): 403–411. (in Chinese)
- [35] 邹璐, 范秀华, 孙兆军, 等. 盐碱地施用脱硫石膏对土壤养分及油菜光合特性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2012, 18(4): 575–581.
- ZOU Lu, FAN Xiuhua, SUN Zhaojun, et al. Effect of desulfurized gypsum addition on saline-alkali soil nutrients and photosynthetic characteristic of cultivated oil-sunflower[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2012, 18(4): 575–581. (in Chinese)