

肇思迪, 娄运生, 庞 渤, 等. UV-B 辐射增强下施硅对冬小麦光合特性和产量的影响[J]. 江苏农业学报, 2017, 33(5): 1036-1043.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2017.05.012

UV-B 辐射增强下施硅对冬小麦光合特性和产量的影响

肇思迪^{1,2}, 娄运生¹, 庞 渤², 朱怀卫¹, 张祎玮¹, 石一凡¹

(1. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心/江苏省农业气象重点实验室, 江苏 南京 210044; 2. 庄河市气象局, 辽宁 庄河 116400)

摘要: 通过大田试验, 研究 UV-B 增强下施硅对冬小麦光合和蒸腾生理相关参数以及产量的影响。UV-B 辐射设 2 水平, 即对照 (A, 自然光) 和增强 20% (E); 施硅量设 2 水平, 即对照 (Si0 , $0 \text{ kg/hm}^2 \text{ SiO}_2$) 和施硅 (Si1 , $200 \text{ kg/hm}^2 \text{ SiO}_2$)。结果表明, 不施硅条件下 (Si0), UV-B 辐射处理 (E) 的不同生育期小麦净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s)、胞间 CO_2 浓度 (C_i) 和蒸腾速率 (T_r) 比对照处理 (A) 分别降低 9.21%~18.94%、7.56%~23.66%、1.24%~12.81% 和 13.88%~27.85%, 提高气孔限制值 (L_s) 和水分利用率 (WUE) 5.07%~19.67% 和 2.35%~27.86%, 小麦产量降低 9.08%; UV-B 增强下 (E), 施硅处理 (Si1) 的不同生育期小麦净光合速率 (P_n)、气孔限制值 (L_s) 和水分利用率 (WUE) 比不施硅对照 (Si0) 分别提高 5.23%~12.23%、4.61%~45.32% 和 18.15%~61.33%, 气孔导度 (G_s)、胞间 CO_2 浓度 (C_i) 和蒸腾速率 (T_r) 分别降低 6.35%~10.94%、5.41%~11.01% 和 6.75%~30.51%, 小麦产量增加 4.83%。说明 UV-B 增强可显著降低冬小麦叶片的净光合速率和蒸腾速率, 提高水分利用率, 降低冬小麦产量, 而施硅可缓解 UV-B 辐射对冬小麦光合作用的抑制, 降低蒸腾速率和提高水分利用率, 使小麦不减产。

关键词: UV-B 辐射增强; 施硅; 冬小麦; 光合作用; 蒸腾作用

中图分类号: S512.1⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2017)05-1036-08

Effects of silicate application on photosynthesis and yield in winter wheat under elevated UV-B radiation

ZHAO Si-di^{1,2}, LOU Yun-sheng¹, PANG Bo², ZHU Huai-wei¹, ZHANG Yi-wei¹, SHI Yi-fan¹

(1. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters/Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing 210044, China; 2. Zhuanghe Meteorological Bureau, Zhuanghe 116400, China)

Abstract: A field experiment was conducted to investigate the effects of silicate application on photosynthesis, transpiration and yield in winter wheat under elevated UV-B radiation. The experiment had two UV-B radiation levels, ambient UV-B (A, ambient) and elevated UV-B radiation (E, elevated by 20%); and two silicate application levels, a control (Si0 , 0 kg/hm^2 , SiO_2) and added silicate (Si1 , 200 kg/hm^2 , SiO_2). The results indicated that, compared with the group of ambient UV-B radiation in the treatment of no silicate application, the net photosynthesis rate (P_n), stomatal conductivity (G_s), intercellular CO_2 concentration (C_i) and transpiration rate (T_r) of wheat at different stages in the group of elevated UV-B radiation decreased by 9.21%~18.94%, 7.56%~23.66%, 1.24%~12.81% and 13.88%~27.85%, respectively,

and stomatal limitation (L_s) and water use efficiency (WUE) increased by 5.07%~19.67% and 2.35%~27.86%, wheat yield decreased by 9.08%. Under elevated UV-B radiation, the treatment of silicate application significantly increased P_n , L_s and WUE of wheat at different stages by 5.23%~12.23%, 4.61%~45.32% and 18.15%~

收稿日期: 2017-02-27

基金项目: 国家自然科学基金 (41375159); 江苏省自然科学基金 (BK20131430)

作者简介: 肇思迪 (1992-), 女, 辽宁沈阳人, 硕士研究生, 主要从事农业气象研究。 (E-mail) 575562551@qq.com

通讯作者: 娄运生, (E-mail) yunshlou@163.com

61.33%, respectively, decreased G_s , C_i and T_r by 6.35%–10.94%, 5.41%–11.01% and 6.75%–30.51%, increased wheat yield by 4.83%. In conclusion, the treatment of elevated UV-B radiation significantly decreased the P_n and T_r , increased WUE in winter wheat leaves, and decreased wheat yield. However, the treatment of silicate application could alleviate the inhibitory effect of elevated UV-B radiation on P_n , decrease T_r and WUE , and increase the yield of wheat.

Key words: elevated UV-B radiation; silicate application; winter wheat; photosynthesis; transpiration

近年来,人类活动排放的大量氮氧化物(NO_x)和氯氟烃类物质(CFCs),使大气臭氧层变薄,导致到达地面的UV-B辐射增强^[1]。大气平流层臭氧浓度每减少1%,到达地表的UV-B辐射将增加2%^[2]。国内外研究结果表明,UV-B辐射会影响作物光合和蒸腾作用,使叶片气孔开度降低,降低叶片净光合速率和蒸腾速率,减少根际微生物数量和抑制土壤酶活性^[3-7]。UV-B辐射还会抑制作物生长,使作物矮化,叶绿素含量下降,叶面积减小,分蘖数减少^[8],进而使作物生物量和产量降低^[9-11]。

硅是作物有益营养元素,施硅能提高叶绿素含量,促进光合作用,促进根系生长和干物质积累,提高抗倒伏能力,进而提高作物产量^[12-19]。施硅还会降低作物细胞膜脂过氧化程度,提高作物对干旱、低温、重金属毒害和UV-B辐射等非生物胁迫及病虫害等生物胁迫的抗性^[20-23]。小麦是重要的禾谷类作物之一,是江苏第二大粮食作物,种植面积和总产量居全国前列^[24]。现今有关UV-B增强或施硅单一因素对小麦生长、生理特性的影响已有不少报道,但关于施硅是否能缓解UV-B对小麦不利影响,目前尚无报道。本文以冬小麦为试验材料,通过大田试验研究UV-B辐射增强下施硅对冬小麦生理生态及产量的影响,为评价UV-B辐射增强对冬小麦生产的不利影响,及适应未来气候变化的应对措施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本试验于2015年11月至2016年5月在南京信息工程大学农业气象试验站(32.16°N, 118.86°E)进行。该试验站地处亚热带季风性气候区,年均气温为15.6℃,年均降水量为1 000~1 100 mm。试验地土壤为潜育型水稻土,耕层土壤质地为壤质黏土,土壤基本理化性质为,全碳19.4 g/kg,全氮1.5 g/kg, pH为6.2(1:1水土比),黏粒含量为261 g/kg。供试冬小麦品种为宁麦13,供试硅肥为硅酸钠。

本试验设UV-B辐照和施硅两个试验因素,UV-B

辐照强度设2水平,即对照(A,自然光)、增强20%(E)。采用可升降灯架,将UV-B灯管(光谱为280~320 nm)置于冠层上方,用来模拟UV-B增强,灯管用醋酸纤维素膜包裹以滤掉280 nm以下波段(UV-C),只有UV-B增强。施硅量设2水平,即对照(SiO , 0 kg/hm², SiO_2)和施硅($Si1$, 200 kg/hm², SiO_2)。试验共设4个处理,即UV-B增强+施硅(E+ $Si1$), UV-B增强+不施硅(E+ $Si0$), 自然光+施硅(A+ $Si1$), 自然光+不施硅(A+ $Si0$)。每个处理重复3次,随机排列,共12个小区,小区面积为2 m×2 m=4 m²。

冬小麦于2015年11月29日播种,每小区播种小麦种子100 g,播撒密度为250 kg/hm²,每小区施用复合肥料(N:P₂O₅:K₂O=15:15:15)500 kg/hm²。小麦分蘖后(2016年3月3日),在施硅处理的小区($Si1$)施入硅酸钠200 kg/hm²(SiO_2)。从分蘖期(3月3日)开始进行UV-B辐照处理,光源与植株顶部之间距离始终保持约0.8 m,每天辐照时间为8:00–16:00,共计8 h,阴雨天停止照射,直至小麦成熟。大田常规管理,病虫害防治依据实际情况进行。

1.2 测定方法

观测小麦的生长发育进程,在小麦主要生育期拔节期(3月28日)、抽穗期(4月11日)、开花期(4月14日)和灌浆期(5月1日),分别选择晴朗无风天气,用Li-6400型便携式光合仪进行光合和蒸腾指标测定,在每个小区随机选取3片旗叶,测定叶片中部的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间CO₂浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r)。气孔限制值(L_s)的计算公式为: $L_s = 1 - C_i/C_a$,式中 C_i 为胞间CO₂浓度(μmol/mol); C_a 为大气中CO₂浓度(μmol/mol)。水分利用效率(WUE)的计算公式为: $WUE = P_n/T_r$,式中 P_n 为净光合速率[μmol/(m²·s)]; T_r 为蒸腾速率[mmol/(m²·s)]。

采用便携式叶绿素仪(SPAD仪)测定叶片中叶绿素含量,在各主要生育期内,每个小区随机选取3株小麦,分别测量每株小麦旗叶上、中、下3个叶位,取其平均值作为该旗叶的SPAD值,3组数据的平均

值即为该生育期的测定值。

成熟后,每小区取 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m} = 0.25\text{ m}^2$ 样方进行测产,测定有效穗数和穗粒数,将样方内所有小麦进行脱粒风干后称质量,测定千粒质量和实际产量。

1.3 数据统计分析

采用 Microsoft Office Excel 2010 和 SPSS 21.0 软件处理和分析数据,用 LSD 法对结果进行差异显著性检验。

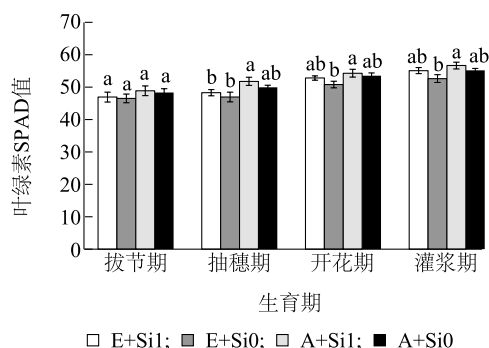
2 结果与分析

2.1 施硅对 UV-B 辐射增强下小麦叶绿素含量的影响

植株叶片的 SPAD 值是用数值来表示叶片中叶绿素相对含量的参数,可以根据 SPAD 值大小来判断叶绿素含量高低。由图 1 可看出,小麦叶片 SPAD 值从拔节期到灌浆期呈升高趋势。相同施硅水平下,UV-B 增强对不同生育期小麦叶片叶绿素含量均有抑制作用。不施硅条件下,与自然光对照相比,UV-B 辐射增强使拔节期、抽穗期、开花期、灌浆期小麦叶绿素含量分别降低 3.77%、5.97%、5.06% 和 4.64%。施硅条件下,与自然光对照相比,UV-B 辐射增强使拔节期、抽穗期、开花期、灌浆期小麦叶绿素含量分别降低 3.94%、6.76%、2.75% 和 2.77%,在抽穗期差异达显著水平 ($P < 0.05$)。在相同 UV-B 辐射水平下,施硅对小麦叶片叶绿素含量均有促进作用。自然光条件下,与不施硅对照相比,施硅使拔节期、抽穗期、开花期、灌浆期小麦叶片叶绿素含量升高 1.08%、3.72%、1.47% 和 2.64%。UV-B 增强下,与不施硅对照相比,施硅使拔节期、抽穗期、开花期、灌浆期小麦叶片叶绿素含量升高 0.91%、2.84%、3.94% 和 4.64%,说明 UV-B 辐射增强在一定程度上降低小麦叶片叶绿素含量,而施硅可在一定程度上提高小麦叶片叶绿素含量。

2.2 施硅对 UV-B 辐射增强下小麦光合生理的影响

由图 2A 可看出,不同处理下小麦的净光合速率在整个生育期内大致呈先升高后降低趋势,在抽穗期,小麦的净光合速率达到最大值。在相同施硅水平下,UV-B 辐射增强对不同生育期的小麦光合作用有抑制作用。不施硅条件下,与自然光对照相比,UV-B 辐射增强使拔节期、抽穗期、开花期、灌浆期小麦净光合速率降低 18.94%、11.91%、12.75% 和 9.21%。施硅条件下,与自然光对照相比,UV-B 辐射增强使拔



A: 自然光对照; E: UV-B 增强; Si0: 不施硅对照; Si1: 施硅。同一生育期不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 1 施硅对 UV-B 增强下小麦叶绿素含量的影响

Fig.1 Effect of silicate application on chlorophyll II content of wheat under elevated UV-B radiation

节期、抽穗期、开花期、灌浆期小麦净光合速率降低 19.76%、14.76%、22.62% 和 25.41%。在相同 UV-B 辐射水平下,施硅对不同生育期的小麦光合有促进作用。自然光条件下,施硅处理的小麦拔节期、抽穗期、开花期、灌浆期净光合速率高于不施硅对照 6.31%、10.11%、19.59% 和 36.62%,除拔节期外各生育期差异达显著水平。UV-B 增强下,施硅处理的小麦拔节期、抽穗期、开花期、灌浆期净光合速率高于不施硅对照 5.23%、6.53%、6.06% 和 12.23%。说明 UV-B 辐射增强在一定程度上降低小麦叶片的净光合速率,而施硅处理能显著提高小麦的净光合速率,减轻 UV-B 辐射增强对小麦净光合速率的抑制作用。

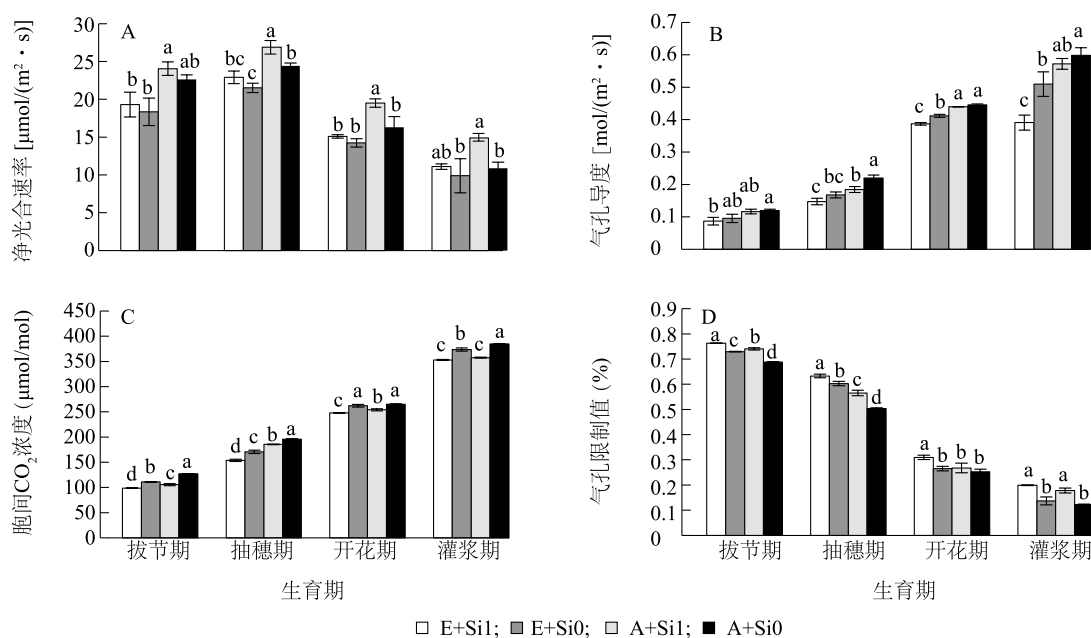
由图 2B 可看出,在整个生育期内,小麦的气孔导度呈逐渐升高的趋势。在相同施硅水平下,UV-B 辐射增强对不同生育期的小麦气孔导度有抑制作用。不施硅条件下,与自然光对照相比,UV-B 增强使拔节期、抽穗期、开花期、灌浆期小麦的气孔导度降低 20.23%、23.66%、7.56% 和 14.88%,除拔节期外差异均达显著水平。施硅条件下,与自然光对照相比,UV-B 增强使小麦拔节期、抽穗期、开花期、灌浆期的气孔导度降低 25.47%、20.12%、11.93% 和 31.69%,除拔节期外差异均达显著水平。在相同 UV-B 辐射水平下,施硅对不同生育期的小麦气孔导度有抑制作用。自然光条件下,与不施硅对照相比,施硅使拔节期、抽穗期、开花期、灌浆期小麦的气孔导度降低 2.74%、16.11%、1.31% 和 4.43%。UV-B 增强下,与不施硅对照相比,施硅使拔节期、抽穗期、开花期、灌浆期小麦的气孔导度降低 9.13%、8.99%、6.35% 和 10.94%,除

拔节期外差异均达显著水平。结果表明 UV-B 增强可降低小麦气孔导度。在同一辐射水平下,施硅处理比不施硅对照小麦气孔导度低,增施硅肥会加剧 UV-B 增强对小麦气孔导度的抑制作用。

由图 2C 可看出,在整个生育期内,小麦的胞间 CO_2 浓度呈逐渐升高的趋势。在相同施硅水平下,UV-B 辐射增强对不同生育期的小麦胞间 CO_2 浓度有抑制作用。不施硅条件下,与自然光对照相比,UV-B 增强使小麦拔节期、抽穗期、开花期、灌浆期小麦的胞间 CO_2 浓度降低 12.58%、12.81%、1.24% 和 2.87%,除开花期外差异均达显著水平。施硅条件下,与自然光对照相比,UV-B 增强使拔节期、抽穗期、开花期、灌浆期小麦的胞间 CO_2 浓度降低 6.52%、17.11%、2.49% 和 1.24%,除灌浆期外差异均达显著水平。在相同 UV-B 辐射水平下,施硅对不同生育期的小麦胞间 CO_2 浓度有抑制作用。自然光条件下,与不施硅对照相比,施硅使拔节期、抽穗期、开花期、灌浆期小麦的胞间 CO_2 浓度降低 16.77%、5.31%、4.18% 和 7.05%,差异显著。UV-B 增强下,与不施硅对照相比,施硅使拔节期、抽穗期、开花期、灌浆期小麦的胞间 CO_2 浓度降低 11.01%、9.97%、5.41% 和 5.49%,差异显著。说明 UV-B 增强可降低小麦胞间 CO_2 浓度,且差异显著。在同一辐射水平下,施硅处理可显著降

低小麦胞间 CO_2 浓度,增施硅肥会加剧 UV-B 增强对小麦胞间 CO_2 浓度的抑制作用。

由图 2D 可看出,在整个生育期内,小麦叶片气孔限制值呈逐渐降低的趋势。在相同施硅水平下,UV-B 辐射增强对不同生育期的小麦气孔限制值有促进作用。不施硅条件下,与自然光对照相比,UV-B 增强使小麦拔节期、抽穗期、开花期、灌浆期小麦叶片气孔限制值分别升高 6.06%、19.67%、5.07% 和 11.86%。施硅条件下,与自然光对照相比,UV-B 增强使拔节期、抽穗期、开花期、灌浆期小麦叶片气孔限制值升高 3.07%、11.97%、15.69% 和 11.62%,除灌浆期外差异均达显著水平。在相同 UV-B 辐射水平下,施硅对不同生育期的小麦气孔限制值有促进作用。自然光条件下,与不施硅对照相比,施硅使拔节期、抽穗期、开花期、灌浆期小麦叶片气孔限制值升高 7.65%、12.22%、6.11% 和 45.62%,除开花期外差异均达显著水平。UV-B 增强下,与不施硅对照相比,施硅使拔节期、抽穗期、开花期、灌浆期小麦叶片气孔限制值升高 4.61%、5.01%、16.83% 和 45.32%,差异显著。说明 UV-B 增强在一定程度上能显著提高小麦叶片气孔限制值。在同一辐射水平下,施硅能显著提高小麦叶片气孔限制值。



A、E、Si0、Si1 见图 1 注。同一生育期不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 2 施硅对 UV-B 增强下小麦光合生理参数的影响

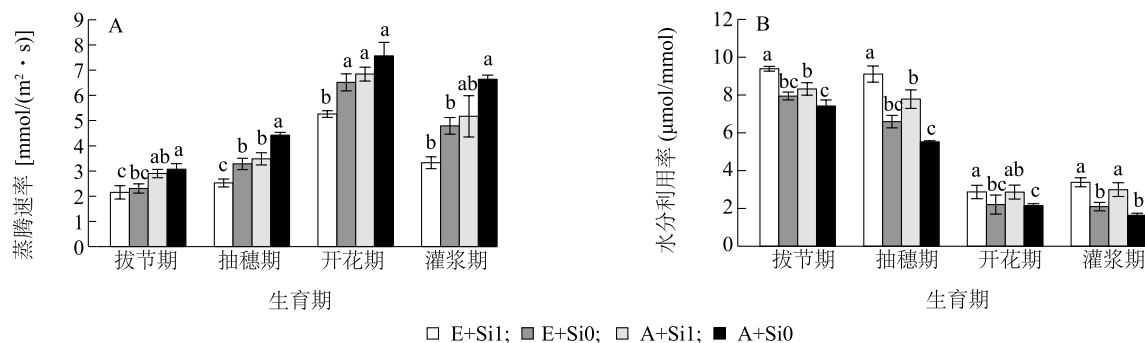
Fig.2 Effect of silicate application on photosynthesis parameters of wheat under elevated UV-B radiation

2.3 施硅对 UV-B 辐射增强下小麦蒸腾生理的影响

由图 3A 可知,小麦蒸腾速率的变化呈先上升后下降的趋势,在开花期达到最大值。在相同施硅水平下,UV-B 辐射增强对不同生育期的 wheat 蒸腾速率有抑制作用。不施硅条件下,与自然光对照相比,UV-B 增强使拔节期、抽穗期、开花期、灌浆期小麦蒸腾速率分别降低 24.76%、25.78%、13.88% 和 27.85%,除开花期外差异均达显著水平。施硅条件下,与自然光对照相比,UV-B 增强使拔节期、抽穗期、开花期、灌浆期小麦蒸腾速率分别降低 25.75%、27.43%、23.14% 和 35.62%,除灌浆期外差异均达显著水平。在相同 UV-B 辐射水平下,施硅对不同生育期的 wheat 蒸腾速率有抑制作用。自然光条件下,施硅使拔节期、抽穗期、开花期、灌浆期小麦蒸腾速率分别降低 5.52%、21.24%、9.54% 和 22.12%。UV-B 增强下,施硅使拔节期、抽穗期、开花期、灌浆期小麦蒸腾速率分别降低 6.75%、22.98%、19.27% 和 30.51%,除灌浆期外差异均达显著水平。说明 UV-B 辐射增强对小麦蒸腾速率有抑制作用,而施硅能加剧这种抑制作用,从而提高水分利用率,以进一步抵抗 UV-B 辐射对其自身的

伤害。

由图 3B 可看出,在整个生育期内小麦的水分利用率呈下降趋势。在相同施硅水平下,UV-B 辐射增强对不同生育期的 wheat 水分利用率有促进作用。不施硅条件下,与自然光对照相比,UV-B 增强使拔节期、抽穗期、开花期、灌浆期小麦水分利用率提高 7.13%、19.38%、2.35% 和 27.86%。施硅条件下,与自然光对照相比,UV-B 增强使拔节期、抽穗期、开花期、灌浆期小麦水分利用率提高 12.82%、17.02%、0.21% 和 12.99%。在相同 UV-B 辐射水平下,施硅对不同生育期的 wheat 水分利用率有促进作用。自然光条件下,与不施硅对照相比,施硅使拔节期、抽穗期、开花期、灌浆期小麦水分利用率提高 12.19%、40.92%、33.16% 和 82.55%,差异显著。UV-B 增强下,与不施硅对照相比,施硅使拔节期、抽穗期、开花期、灌浆期小麦水分利用率提高 18.15%、38.14%、30.38% 和 61.33%,差异显著。说明 UV-B 增强在一定程度上可使小麦水分利用率提高,但差异并不显著,而在整个生育期内施硅可显著提高小麦水分利用率。



A、E、Si0、Si1 见图 1 注。同一生育期不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 3 施硅对 UV-B 增强下小麦蒸腾生理参数的影响

Fig.3 Effect of silicate application on transpiration parameters of wheat under elevated UV-B radiation

2.4 施硅对 UV-B 辐射增强下小麦产量及构成因素的影响

表 1 表明,在相同施硅条件下,UV-B 增强处理的小麦有效穗数、穗粒数、千粒质量和实际产量均出现了不同程度的降低。不施硅条件下,与自然光对照相比,UV-B 增强使小麦有效穗数、穗粒数、千粒质量和实际产量分别减少 4.62%、8.02%、2.39% 和 9.08%。施硅条件下,与自然光对照相比,UV-B 增强使小麦有效穗数、穗粒数、千粒质量和实际产量分别减少 11.40%、5.87%、8.21% 和 22.61%,其中有

效穗数、千粒质量和实际产量与自然光对照的差异达显著水平。结果表明 UV-B 增强会通过降低小麦有效穗数和千粒质量来降低产量。在自然光和 UV-B 增强下,施硅处理的小麦有效穗数、穗粒数、千粒质量和实际产量均出现了不同程度的升高。自然光条件下,与不施硅对照相比,施硅使小麦有效穗数、穗粒数、千粒质量和实际产量分别增加 7.95%、3.85%、10.00% 和 23.15%,其中有效穗数、千粒质量和实际产量差异达显著水平。UV-B 增强下,与不施硅对照相比,施硅使小麦有效穗数、穗粒数、千

粒质量和实际产量分别增加 0.27%、6.28%、3.44% 和 4.83%,但差异不显著。

表 1 UV-B 增强下施硅对小麦产量的影响

Table 1 Effects of silicate application on grain yield of wheat under elevated UV-B radiation

处理	有效穗数 (个/m ²)	穗粒数 (个)	千粒质量 (g)	实际产量 (g/m ²)
E+Si1	497.33±5.33b	40.60±1.14ab	39.37±1.12b	655.71±17.21b
E+Si0	496.00±14.05b	38.20±2.23 b	38.06±0.21b	625.48±27.55b
A+Si1	561.33±5.81a	43.13±1.13a	42.89±0.37a	847.24±34.61a
A+Si0	520.00±6.93b	41.53±0.57ab	38.99±1.42b	687.96±20.68b

A、E、Si0、Si1 见图 1 注。同一列中相同的字母表示差异不显著,不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

3 讨论

UV-B 辐射增强显著降低小麦净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度和蒸腾速率,提高气孔限制值和水分利用率,在一定程度上降低叶绿素含量。原因可能是:(1)UV-B 辐射增强,小麦叶片气孔导度减小,气孔阻力增大,阻碍 CO₂ 进入叶片,引起胞间 CO₂ 浓度降低,二氧化碳供应不足,从而限制了光合作用的碳同化;(2)UV-B 辐射增强破坏类囊体光系统,导致叶绿体吸收光能减少,光能转换效率下降;(3)UV-B 辐射增强破坏光系统反应中心 II (PS II),抑制电子传递功能,叶绿体中参与暗反应的 Rubisco 酶活性下降,导致净光合速率下降^[25]。根据 Farquhar 和 Sharkey 的理论^[26],导致光合速率降低的因素有气孔限制因素和非气孔限制因素,如果气孔导度减小而叶肉细胞仍在活跃地进行光合作用,胞间 CO₂ 浓度明显下降,气孔限制值升高,这种情况是典型的气孔限制所致;反之,如果叶肉细胞本身光合活性下降,使其利用 CO₂ 的能力降低,从而胞间 CO₂ 浓度升高,气孔限制值下降,则为典型的非气孔限制因素所致。本试验中,UV-B 辐射增强下,冬小麦气孔导度降低,气孔限制值提高,胞间 CO₂ 浓度降低,说明小麦净光合速率下降的主要原因是气孔限制因素。研究发现,UV-B 增强降低大麦净光合速率和气孔导度,但对胞间 CO₂ 浓度无明显影响^[27]。还有研究发现,UV-B 辐射增强使大豆净光合速率、气孔导度、气孔限制值降低,胞间 CO₂ 浓度上升,大豆光合速率下降的主要原因是非气孔因素^[28]。这些相反的结果可能是由于试验对象和环境条件不同造成的。植物叶片蒸腾作用的方式主要有两种,一是角质蒸腾,二是气孔蒸腾,其中气孔蒸腾是其主要方式。本试验中,UV-B 增强使小麦叶片气孔导度降

低,气孔限制值提高,从而降低蒸腾速率,提高水分利用率。说明在 UV-B 辐射增强下叶片通过降低气孔导度,抑制蒸腾作用,提高水分利用率,减轻 UV-B 辐射对自身的伤害^[28]。研究发现,UV-B 增强会使叶片气孔开度减小,气孔阻力增大,改变叶片运输和分配,降低蒸腾速率和水分利用率^[29]。也有研究发现,UV-B 增强会提高春小麦叶片蒸腾速率,降低水分利用率^[30]。不同的研究结果可能与作物类型、土壤理化性质和气候条件有关。

在 UV-B 增强下施硅提高冬小麦叶片净光合速率、气孔限制值和水分利用率,降低气孔导度、胞间二氧化碳浓度和蒸腾速率,在一定程度上提高叶片叶绿素含量。其原因可能是,冬小麦吸收硅素之后,叶绿体体积明显增大,基粒数增加,抑制基部叶片过氧化酶 (POD) 活性,木质化程度降低,延缓了基部叶片的衰老,从而增强其对光的吸收与转化能力^[31]。同时,施硅使植株的株型紧凑,叶片与茎夹角缩小,最适叶面积增大,改善冠层受光姿态,从而提高叶片净光合速率^[32]。本试验中,在 UV-B 增强下施硅使气孔导度降低,气孔限制值增加,胞间二氧化碳浓度降低。根据 Farquhar 和 Sharkey 的理论^[26],冬小麦净光合速率升高的主要原因是非气孔因素,即叶肉细胞的光合活性提高,促进碳同化作用,致使净光合速率有所提升。小麦蒸腾速率有所降低的原因是施硅加厚细胞壁,硅素沉积在角质层下的表皮细胞中,形成“角质-硅双层”结构,增大气孔阻力,降低叶片蒸腾速率,从而提高水分利用率^[33]。研究发现,施硅能通过提高水稻净光合速率、胞间 CO₂ 浓度、气孔导度和水分利用率,降低蒸腾速率,以缓解 UV-B 增强引起的抑制作用^[34]。还有研究发现,UV-B 增强下施硅可提高净光合速率,有效缓解 UV-B 增强对其光合作用的抑制^[35]。这

与本研究结果一致。

UV-B 增强会降低小麦有效穗数、穗粒数、千粒质量和实际产量。UV-B 增强抑制了小麦的光合作用,进而影响小麦后期的物质积累和灌浆结实,最终导致小麦减产。这与前人在水稻上的研究结果一致^[36]。UV-B 增强下施硅能减轻 UV-B 辐射增强的不利影响,增加小麦有效穗数、穗粒数、千粒质量,使小麦不减产。施硅能改变作物株型,使叶片与茎夹角缩小,叶片挺立,增大最适叶面积,从而增加了对光的吸收,促进冠层光合作用,提高净光合速率,促进生育后期灌浆结实过程^[37]。施硅还有利于小麦形成“角质-双硅层”,使作物茎秆粗壮,叶片增厚,从形态上抵御 UV-B 辐射的伤害^[38]。另外,施硅可调节作物体内的酚类代谢,促进叶片酚类物质的合成以吸收 UV-B 辐射,进而增强其抵御 UV-B 辐射的抑制能力^[39]。

在农业生产中,通过增施硅肥可提高冬小麦对 UV-B 辐射增强的抵抗力,缓解 UV-B 辐射增强对小麦生产的不利影响。后续试验将进一步探讨在 UV-B 辐射增强下不同施硅量、施硅方法对冬小麦光合和蒸腾作用的影响。

参考文献:

- [1] THE SCIENTIFIC ASSESSMENT PANEL THE MONTREAL PROTOCOL ON SUBSTANCES THAT DEplete THE OZONE LAYER. Final of UNEP/WMO scientific assessment of ozone depletion[R]. Nairobi, UNEP: 2002.
- [2] MADRONICH S, MC KENZIE R L, BJÖRN L O, et al. Changes in biologically-active ultraviolet radiation reaching the Earth's surface[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 1998, 46(1-3): 5-19.
- [3] MOHAMMED A R, TARPLEY L. Morphological and physiological responses of nine southern U.S. rice cultivars differing in their tolerance to enhanced ultraviolet-B radiation[J]. Environmental and Experimental Botany, 2011, 70: 174-184.
- [4] 王伟, 王岩, 梁变变, 等. 初花期喷钼对 UV-B 辐射增强下紫花苜蓿光合及荧光特性的影响[J]. 中国农业气象, 2017, 38(4): 230-239.
- [5] 李俊, 杨玉皎, 王文丽, 等. UV-B 辐射增强对马铃薯叶片结构及光合参数的影响[J]. 生态学报, 2017, 8(16): 1-14.
- [6] 韩艳, 韩晨光, 崔荣华, 等. 外源水杨酸对 UV-B 增强下花生叶片光合特性的影响[J]. 中国农业气象, 2016, 37(4): 437-444.
- [7] 张令瑄, 谢婷婷, 王瑾, 等. 大田条件下 UV-B 辐射增强对大豆根际土壤相关指标的影响[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(1): 118-122.
- [8] MOHAMMED A R, ROUNDS E W, TARPLEY L. Response of rice (*Oryza sativa* L.) tillering to sub-ambient levels of ultraviolet-B radiation[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2007, 193(5): 324-335.
- [9] FENG H, AN L, CHEN T, et al. The effect of enhanced ultraviolet-B radiation on growth, photosynthesis and stable carbon isotope composition ($\delta^{13}\text{C}$) of two soybean cultivars (*Glycine max*) under field conditions[J]. Environmental & Experimental Botany, 2003, 49(1): 1-8.
- [10] 祁虹, 段留生, 王树林, 等. 全生育期 UV-B 辐射增强对棉花生长及光合作用的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(5): 708-719.
- [11] 吕志伟, 张令瑄, 王瑾, 等. 田间条件下 UV-B 辐射增强对大豆生长及光合特性的影响[J]. 河南农业科学, 2016, 45(1): 42-45.
- [12] 贾国涛, 顾会战, 许自成, 等. 作物硅素营养研究进展[J]. 山东农业科学, 2016, 48(5): 153-158.
- [13] KANG J, ZHAO W, ZHU X. Silicon improves photosynthesis and strengthens enzyme activities in the C_3 succulent xerophyte *Zygophyllumxanthoxylum* under drought stress[J]. Journal of Plant Physiology, 2016, 199: 76-86.
- [14] 华海霞. 4 种植物对硅的吸收动力学[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(11): 440-442.
- [15] 刘景凯, 刘世琦, 冯磊, 等. 硅对青蒜苗生长、光合特性及品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 989-997.
- [16] 张国芹, 牟建梅, 何玲莉, 等. 氮硅配施对不结球白菜养分吸收及产量和品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(5): 1128-1133.
- [17] TAMAI K, MA J F. Reexamination of silicon effects on rice growth and production under field conditions using a low silicon mutant[J]. Plant and Soil, 2008, 307(1/2): 21-27.
- [18] 柯用春, 曹明, 杨小锋, 等. 喷施不同浓度有机硅肥对热带地区甜瓜产量和品质的影响[J]. 南方农业学报, 2015, 46(1): 53-57.
- [19] 于立河, 高聚林. 硅对小麦产量与籽粒品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2012, 32(3): 469-473.
- [20] 张黛静, 马建辉, 杨淑芳, 等. 硅对铜胁迫下小麦幼根细胞超微结构的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(8): 2385-2389.
- [21] 李冬香, 李光德, 张华, 等. 硅作用下镉对小麦幼苗生理生化指标的影响研究[J]. 中国农学通报, 2013, 44(36): 84-90.
- [22] 宁东峰, 梁永超. 硅调节植物抗病性的机理: 进展与展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5): 1280-1287.
- [23] BALAKHNINA T, BORKOWSKA A. Effects of silicon on plant resistance to environmental stresses: review[J]. International Agrophysics, 2013, 27(2): 225-232.
- [24] 王龙俊, 陈荣振, 朱新开, 等. 江苏省小麦品质区划研究初报[J]. 江苏农业科学, 2002(2): 15-18.
- [25] 蔡锡安, 夏汉平, 彭少麟. 增强 UV-B 辐射对植物的影响[J]. 生态环境, 2007(3): 1044-1052.

- [26] FARQUHAR G D, SHARKEY T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1982, 33: 317-345.
- [27] 娄运生,黄 岩,李永秀,等. UV-B 辐射增强对不同大麦品种生理特性的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2011, 27(4): 51-55.
- [28] 郑有飞,徐卫民,吴荣军,等. 地表臭氧浓度增加和 UV-B 辐射增强及其复合处理对大豆光合特性的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(8): 2515-2524.
- [29] 郑有飞,张金恩,吴荣军,等. UV-B 辐射增强与 O₃ 胁迫对冬小麦光合特征的影响[J]. 环境科学, 2011, 32(10): 3023-3032.
- [30] 张莉娜,安黎哲,冯虎元. 增强 UV-B 辐射和干旱对春小麦光合作用及其生长的影响[J]. 西北植物学报, 2010, 30(5): 981-986.
- [31] LI W B, SHI X H, WANG H, et al. Effects of silicon on rice leaves resistance to ultraviolet-B[J]. Acta Bot Sin, 2004, 46(6): 691-697.
- [32] 高玉凤,焦 峰,沈巧梅. 水稻硅营养与硅肥应用效果研究进展[J]. 中国农学通报, 2009, 25(16): 156-160.
- [33] 陈明灿,王贺正,姚孚荣,等. 硅对小麦幼苗生长及部分生理指标的影响[J]. 广东农业科学, 2014, 41(21): 7-10.
- [34] 吴 蕾,娄运生,孟 艳,等. UV-B 增强下施硅对水稻抽穗期生理特性日变化的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1): 32-38.
- [35] 娄运生,韩 艳,刘朝阳,等. UV-B 增强下施硅对大麦抽穗期光合和蒸腾生理日变化的影响[J]. 中国农业气象, 2013, 34(6): 668-672.
- [36] 苗秀莲,刘传栋,郭 彦,等. UV-B 辐射增强及 CO₂ 浓度升高对水稻产量及品质的影响[J]. 作物杂志, 2015(1): 138-142.
- [37] 丁燕芳,梁永超,朱 佳,等. 硅对干旱胁迫下小麦幼苗生长及光合参数的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(3): 471-478.
- [38] 宫海军,陈坤明,陈国仓,等. 硅对小麦生长及其抗氧化酶系统的影响[J]. 土壤通报, 2003, 34(1): 55-57.
- [39] 郭 彬,娄运生,梁永超,等. 氮硅肥配施对水稻生长、产量及土壤肥力的影响[J]. 生态学杂志, 2004, 23(6): 33-36.

(责任编辑:姜华珏)