

UV-B 胁迫下冬小麦光合作用 对温度变化的差异响应

陈怡平¹, 王玉洁², 贺军民²

(1. 中国科学院地球环境研究所 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710075;
2. 陕西师范大学 生命科学学院, 西安 710062)

摘要:以小麦为实验材料,研究了紫外线 B(UV-B)胁迫下冬小麦光合作用对温度变化的响应规律。结果表明:温度由21℃升高至31℃,小麦的光合作用主要参数(净光合速率、气孔导度、光和能力、羧化效率、RuBP 羧化酶/加氧酶、光合色素含量等)和生长发育速率逐步升高;当温度升高至36℃时,伴随着净光合速率的降低,气孔导度、光和能力、羧化效率、RuBP 羧化酶/加氧酶、光合色素含量和生长发育速率显著降低,光合作用降低既有气孔因素也有非气孔因素。而在21℃至36℃温度范围内,UV-B 辐射对小麦光合作用参数均有抑制效应,较低温度和高温下抑制作用加大。研究表明在温带和寒带,气候变暖有利于小麦光合作用,促进生长发育,有利于提高植物抗 UV-B 能力。

关键词:UV-B 辐射; 全球变暖; 温室效应; 气候变化; 光合作用; 小麦

中图分类号: Q945 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-9901(2010)01-0073-06

Difference response of wheat photosynthesis to temperature change under UV-B radiation

CHEN Yi-ping¹, WANG Yu-jie², HE Jun-min²

(1. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China; 2. College of Life Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract: To determine the effects of temperature change on the photosynthesis and growth development, wheat seedlings were subjected to UV-B radiation under different temperature and the photosynthesis parameters (e.g. net photosynthetic, stomatal conductance, photosynthesis, carboxylation efficiency, etc.) and biomass were determined. The results indicated that the photosynthesis parameters and biomass were increased with temperature enhancement, and then all those parameters began to decrease when the temperature was at 36℃. Moreover, UV-B radiation could result in decrease in photosynthesis and biomass accumulation, the worse effects were at the lower and higher temperature condition. This result suggested that warming can enhance the crops growth and enhance the crops physiological tolerance to UV-B damage in warm/cold temperate zone.

Key words: UV-B radiation; global warming; greenhouse effect; climate change; photosynthesis

人类未来面临的最大挑战是气候变化。IPCC 报告指出“由于气候变暖的影响,到 2020 年非洲的粮食作物可能减产 50% (IPCC, 2007)。其实,我们不能简单地用全球变暖来表征气候变化。气候变化表现为极端气候事件发生的频率增加(突然升温、

降温事件),它对农业的影响是十分严重。即便是平均气温十分有利于农作物生长发育的季节,在农作物生长发育的关键时期短期的极端温度也会影响作物的产量。在未来 50 年国际人口将会增加到 90 亿,提高粮食产量是满足民生的基本条件。因此,理

解作物对环境变化的适应与响应机理是提高粮食产量的前提和基础。植物的生理过程(尤其是光合作用)对温度变化是相当的敏感,植物不能像动物那样通过迁徙来适应环境的变化。因此不管多大程度的温度变化对植物生理都会产生影响(Giannakopoulos et al, 2009; Long and Ort, 2010)。

大量氯氟烃类气体释放到大气中,导致大气臭氧层减薄,造成太阳射线中到达地面的紫外线B($280\sim320\text{ nm}$) (ultraviolet B, UV-B) 辐射增强而且还有继续增强的趋势(Kerr, 1988; McKenzie et al, 2003)。UV-B 辐射增强直接导致植物形态结构、生理代谢、花粉萌发、遗传特性和生长周期等方面发生变化(Juan et al, 2009; Dmytro et al, 2010; Zu et al, 2010)。然而,全球环境变化是多因子的复合效应,增强 UV-B 辐射只是全球环境变化的主要内容之一。植物对增强的 UV-B 辐射响应也同样受其他环境因子(例如光合有效辐射、重金属、干旱和营养限制等等)影响,仅仅研究增强 UV-B 辐射对植物的影响很难准确评价自然界中 UV-B 辐射增强的实际生物学效应。要全面、合理评价全球环境变化引起的生物学效应,必须研究多因子复合作用下植物对其变化的响应规律及其机理。目前 UV-B 辐射与其他因子复合效应的研究越来越受到国内外研究者重视,并已成为全球变化生物学研究的热点之一(崔瑛和陈怡平, 2008)。然而,UV-B 胁迫下冬小麦幼苗对突然升温、降温如何响应?这个问题目前尚未引起关注。为此,本研究以小偃 926 冬小麦品种为材料,研究了 UV-B 辐射条件下冬小麦光合作用对温度变化的响应规律,探讨了增强 UV-B 辐射下农作物光合作用对温度变化响应的可能机制,旨在为准确评估全球气候变化的生态效应提供科学依据。

1 实验方法

1.1 材料处理

挑选大小均匀、籽粒饱满的冬小麦种子(*Triticum aestivum*, 品种为小偃 926, 购置于陕西省西安市种子公司), 种子经 5% 次氯酸钠消毒后于 25°C 恒温箱催芽 24 h, 然后选取萌发一致的种子, 在控光、控温、控湿的人工气候箱中沙培。试验共设 8 个组: T_1 组(昼/夜温度为 $21^\circ\text{C}/16^\circ\text{C}$), $T_1 + \text{VU}$ 组(昼/夜温度为 $21^\circ\text{C}/16^\circ\text{C}$, UV-B 剂量为 $8.82\text{ KJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), T_2 组(昼/夜温度为 $26^\circ\text{C}/21^\circ\text{C}$), $T_2 + \text{VU}$ 组(昼/夜温度为 $26^\circ\text{C}/21^\circ\text{C}$, UV-B 剂量为 $8.82\text{ KJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), T_3 组(昼/夜温度为 $31^\circ\text{C}/26^\circ\text{C}$), $T_3 + \text{VU}$ 组(昼/夜温度为

$31^\circ\text{C}/26^\circ\text{C}$, UV-B 剂量为 $8.82\text{ KJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), T_4 组(昼/夜温度为 $36^\circ\text{C}/31^\circ\text{C}$), $T_4 + \text{VU}$ 组(昼/夜温度为 $36^\circ\text{C}/31^\circ\text{C}$, UV-B 剂量为 $8.82\text{ KJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)。每天光照 14 h (6:00~20:00), RH: 70%, 人工气候箱光照强度设置为 $300\text{ }\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

上述 $T_1 + \text{VU}$ 组、 $T_2 + \text{VU}$ 组、 $T_3 + \text{VU}$ 组、 $T_4 + \text{VU}$ 组从播种第一天开始 UV-B 辐射处理。UV-B 辐射光源为秦牌紫外灯管(波长峰值 305 nm , 宝鸡光源研究所生产), UV-B 剂量为 $8.82\text{ KJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 紫外辐射剂量用 UV-B 辐照计测定(北京师范大学光电仪器厂生产)。

1.2 光合参数的测定

待播种后 8 天进行光合作用参数的测定。净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、胞间隙 CO_2 浓度(Ci)、参比 CO_2 浓度(Ca) 和 $Pn/f(Ci)$ 响应曲线(按仪器设定, Ca 梯度依次为大气 CO_2 浓度的 100%、75%、60%、45%、25% 和 0%) 用便携式 TPS-1 型光合测定仪(PP SYSTEM 公司制造) 测定。每次测定用幼苗第一对真叶, 实验重复 3 次, 数据取其平均值。测定时光照强度为 $900\sim1000\text{ }\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 测定时间为每日 14:00—16:00。

根据 Farquhar and Sharkey(1982) 的理论, 气孔限制值(Ls)、光合能力(Ao) 及羧化效率(CE) 由 $Pn/f(Ca)$ 和 $Pn/f(Ci)$ 两条曲线计算得出。 $Ls = (1 - A/Ao) \times 100\%$, 式中 A 为大气 CO_2 下幼苗叶片的 Pn , Ao 为 Ci 等于大气 CO_2 浓度时幼苗叶片的 Pn 。 CE 用 $Pn/f(Ci)$ 响应曲线直线部分的斜率表示。

1.3 核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶/加氧酶(Rubisco)含量的测定

Rubisco 的测定参照 Makino(2003) 的方法并略加修改。取 8 龄苗的第一对真叶 0.5 g , 加 3 mL 蛋白提取液 [Tris-HCl $50\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, SDS 2% (W/V), 巯基乙醇 3% (V/V), 甘油 5% (V/V), EDTA $2\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, PMSF $1\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, pH = 8.5] 充分研磨, 1500 g 冷冻离心 15 min, 上清液用 4 倍体积的 -20°C 丙酮沉淀, 再冷冻离心后弃上清液(1000 g , 10 min), 沉淀溶于 3 mL 样品溶解液 [Tris-HC $62.5\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, pH = 6.8, SDS 2% (W/V) 巯基乙醇 5% (V/V), 甘油 10% (V/V)], 然后在沸水煮 3 min 用于琼脂糖凝胶电泳分析。

电泳分离胶浓度为 12% (W/V), 浓缩胶浓度为 5% (W/V)。电泳上样量 $25\text{ }\mu\text{L}$, 电流为 15 mA 。电泳结束后将胶片于温室下用 0.25% (W/V) 的考马斯亮蓝 R250 染色液染色 5 h, 然后在脱色液脱色至

背景无色。将 Rubisco 大小亚基条带切下, 溶于 2 mL 甲酰胺中, 50℃洗脱 5 h, 洗脱液在 595 nm 下比色, 背景胶洗脱液作空白。用于作标准曲线的牛血清蛋白溶于样品溶解液, 并与样品在同样条件下进行电泳及含量测定。

1.4 叶绿素的提取以及含量测定

取 8 龄苗的叶片 0.5 g, 加 10 mL 丙酮和无水乙醇混合液 (V: V = 1:1) 在黑暗条件下进行叶绿素的提取, 用紫外分光光度计测定叶绿素的吸光度并计算含量, 方法参照文献(张志良, 1990)。

1.5 形态指标测定

胚芽鞘长度用直尺测量。生物量测定: 取 30 株幼苗在 90℃下烘至恒重, 在天平上称量干重, 并重复 3 次。

1.6 数据统计

文中数据均为 3 次实验的平均值。显著性差异采用 Duncan's 的多重统计分析进行处理。

2 结果与分析

2.1 UV-B 辐射对不同温度条件下小麦光合作用主要表征参数的影响

从图 1 可以看出, Pn (A) 和 Gs (B) 随着温度的升高而升高, 31℃时小麦幼苗 Pn 和 Gs 最高, 随后开始下降。补充 UV-B 条件下小麦净光合速率和气孔导度的响应曲线与无 UV-B 辐射条件下相似。细胞间隙 CO_2 浓度变化趋势则是先升高、降低再升高。UV-B 辐射条件下细胞间隙 CO_2 浓度则随着温度变化而变化。在 21℃条件下, T_{21} 组细胞间隙 CO_2 浓度降低了 12%; 在 26℃条件下, T_{26} 组细胞间隙 CO_2 浓度降低了 14%; 在 31℃条件下, T_{31} 组细胞间隙 CO_2 浓度无显著性变化 ($P > 0.05$); 在 36℃条件下, T_{36} 组细胞间隙 CO_2 浓度提高了 10%。气孔限制值在对照和 UV-B 辐射条件下均随着温度升高而降低。在 21℃和 26℃, 对照和 UV-B 辐射条件下有显著差异, 在 31℃和 36℃, 对照和 UV-B 辐射条件下无显著差异。

2.2 UV-B 辐射对不同温度条件下小麦叶绿素和 Rubisco 含量的影响

从图 2 看出, 叶绿素和 RuBP 羧化酶/加氧酶含量随着温度的升高而升高, 31℃小麦叶绿素和 RuBP 羧化酶含量最高, 随后开始下降。UV-B 辐射条件下也呈现出类似的趋势。与 T_{21} 处理组相比, T_{26} 组的叶绿素含量增加了 50% ($P < 0.05$), RuBP 羧化酶含量增加了 11% ($P < 0.05$); T_{31} 组的叶绿素含量增加了 86% ($P < 0.05$), RuBP 羧化酶含量增加了

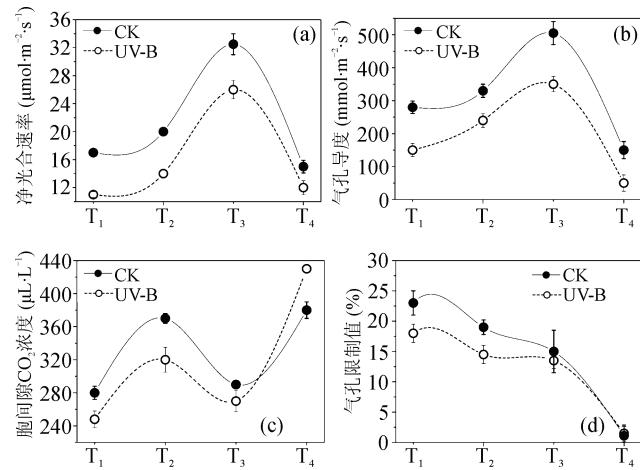


图 1 UV-B 辐射对不同温度条件下小麦光合作用主要表征参数的影响

图中横坐标 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 分别代表 21℃、26℃、31℃、36℃。CK 为 21℃、26℃、31℃、36℃ 条件下的对照组, UV-B 为 21℃、26℃、31℃、36℃ 条件下的紫外线 B 处理组。

39% ($P < 0.05$); T_{36} 组的叶绿素含量增加了 37% ($P < 0.05$), RuBP 羧化酶含量增加了 25% ($P < 0.05$)。而不同温度下 UV-B 辐射显著降低了小麦生叶绿素和 RuBP 羧化酶含量。在 21℃条件下, UV-B 辐射导致叶绿素含量降低 18% ($P < 0.05$), RuBP 羧化酶含量降低了 27% ($P < 0.05$); 在 26℃条件下, UV-B 辐射导致叶绿素含量降低 3% ($P < 0.05$), RuBP 羧化酶含量降低了 20%; 在 31℃条件下, UV-B 导致叶绿素含量降低 10% ($P < 0.05$), RuBP 羧化酶含量降低了 17%; 在 36℃条件下, UV-B 导致叶绿素含量降低 15% ($P < 0.05$), RuBP 羧化酶含量降低了 22%。

2.3 UV-B 辐射对不同温度条件下小麦光合能力和羧化效率的影响

根据 Farquhar 和 Sharkey 的理论, 净光合速率 (Pn) 与细胞间隙 CO_2 曲线的初始斜率代表羧化率 (CE), 它反映叶肉细胞固定 CO_2 的能力。光合能力 (Ao) 是细胞间隙 CO_2 与大气浓度相等时的光合强度, 是表征叶肉细胞光合强弱的重要参数。从表 1 的分析结果来看, 温度由 21℃升高至 36℃时, 羧化率和光合能力随着温度升高先升高再降低, 31℃时羧化率和光合能力最强。与 T_{21} 组相比, T_{26} 处理组光合能力提高了 12%, 羧化率提高了 8%; T_{31} 处理组光合能力提高了 80%, 羧化率提高了 88%; T_{36} 处理组的光合能力与 T_{31} 组相比降低了 58%, 羧化率提高了 59%。而 UV-B 辐射在不同温度条件下均降低了羧化效率和光合能力, 变化趋势与无 UV-B

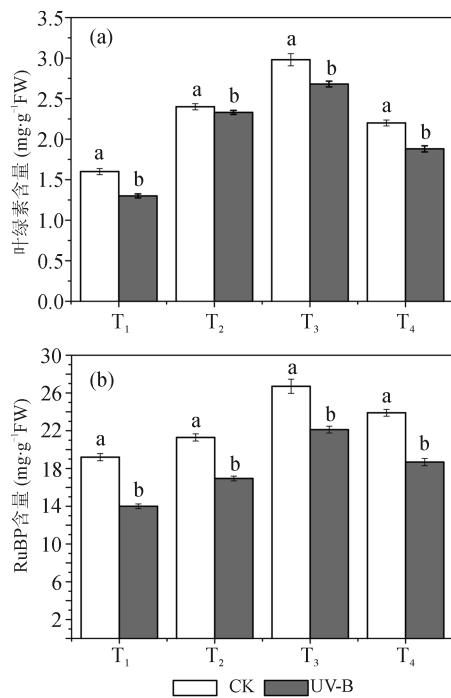


图2 UV-B 辐射对不同温度条件下小麦叶绿素(a)和RuBP羧化酶含量(b)的影响

图中横坐标 T₁、T₂、T₃、T₄ 分别代表 21℃、26℃、31℃、36℃。CK 为 21℃、26℃、31℃、36℃ 条件下的对照组, UV-B 为 21℃、26℃、31℃、36℃ 条件下的紫外线 B 处理组。

辐射条件下基本一致。与 T₂₁ 组相比, T₂₁ B 处理组光合能力降低了 28%, 羧化率降低了 25%; 与 T₂₆ 组相比, T₂₆ B 处理组光合能力降低了 26%, 羧化率降低了 15%; 与 T₃₁ 组相比, T₃₁ B 处理组光合能力降低了 22%, 羧化率降低了 14%; 与 T₃₆ 组相比, T₃₆ B 处理组光合能力降低了 20%, 羧化率降低了 15%。

2.4 UV-B 辐射对不同温度条件下小麦生长的影响

根系是植物吸收养分和水分的主要器官, 也是许多物质同化、转化及合成的器官, 根系的生长发育及根系活力直接影响植物的生长发育, 植物的生长发育状况可以生长势和生物量来衡量。在农业上通常用胚芽鞘表示生长势。从图 3 可以看出, 胚芽鞘和生物量随着温度的升高先升高后降低。与 T₂₁ 处理组相比, T₂₆ 组的胚芽鞘长度增加了 5% ($P < 0.05$), 生物量增加了 38% ($P < 0.05$); T₃₁ 组的胚芽鞘长度增加了 15% ($P < 0.05$), 生物量增加了 50% ($P < 0.05$); 与 T₃₁ 组相比较, T₃₆ 组的胚芽鞘长度减小了 5% ($P < 0.05$), 生物量减少了 16% ($P < 0.05$), 这说明温度升高至 31℃ 有利于小麦的生长发育和生物量的积累, 继续升高则不利于小麦

生长发育。而 UV-B 辐射显著降低了不同温度下小麦生长发育和生物量的积累, 降低程度随温度变化而变化。在 21℃ 条件下, UV-B 导致胚芽鞘长度降低 13% ($P < 0.05$), 生物量增加了 25% ($P < 0.05$); 在 26℃ 条件下, UV-B 导致胚芽鞘长度降低 6% ($P < 0.05$), 生物量增加了 12% ($P < 0.05$); 在 31℃ 条件下, UV-B 导致胚芽鞘长度降低 5% ($P < 0.05$), 生物量增加了 9% ($P < 0.05$); 在 36℃ 条件下, UV-B 导致胚芽鞘长度降低 5% ($P < 0.05$), 生物量增加了 7% ($P < 0.05$); 这说明增强 UV-B 辐射会抑制小麦的生长发育和生物量的积累, 尤其在高温和低温条件下, 而气候变暖可以提高小麦抗 UV-B 能力。

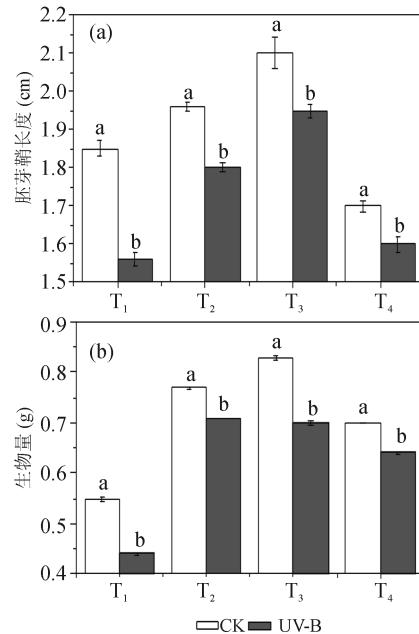


图3 UV-B 辐射对不同温度条件下小麦生长的影响

图中横坐标 T₁、T₂、T₃、T₄ 分别代表 21℃、26℃、31℃、36℃。CK 为 21℃、26℃、31℃、36℃ 条件下的对照组, UV-B 为 21℃、26℃、31℃、36℃ 条件下的紫外线 B 处理组。

3 讨论

植物的光合作用是一个复杂的生理生化过程, 对环境变化及其敏感, 其光合速率受外界环境因子的调节。光合色素含量、羧化效率、叶肉细胞光合能力、气孔导度等均可以用来衡量叶肉细胞本身的光合活性。外界环境因子可以通过调节气孔和非气孔途径来影响植物光合速率, 最终影响植物的生长发育。气孔是植物与外界进行气体交换的通道, 气孔导度是反应气孔行为的一个重要指标。RuBP 羧化酶/加氧酶是参与碳同化与光呼吸的关键酶, 光合色素也是植物光反应的接受天线, 参与光合作用过程中光能的吸收、传递和转化。它们是影响植物光合

速率的主要非气孔因素。UV-B 辐射增强和全球变暖是全球环境变化的主要内容。UV-B 辐射增强会导致植物光合速率降低, 生产力下降(Caldwell et al., 1998)。本研究发现在 21℃ 至 36℃ 温度范围内, UV-B 辐射抑制小麦光合作用, 较低温度和高温下抑制作用加大, 表现为小麦的净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、光合能力(Ao)、羧化效率(CE)、RuBP 羧化酶/加氧酶含量、光合色素生物量均低于非 UV-B 辐射处理组。在无 UV-B 辐射条件下, 随着温度由 21℃ 升高至 31℃, 小麦的净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、光合能力(Ao)、羧化效率(CE)、RuBP 羧化酶/加氧酶含量、光合色素生物量逐步升高, 当温度升高至 36℃ 时, 伴随着 Pn 的降低, Gs、Ao、CE、RuBP 羧化酶/加氧酶含量及光合色素均显著降低。实验结果说明在温带和寒带, 气候变暖有利于小麦光合作用, 有利于提高植物抗 UV-B 能力, 减小 UV-B 造成的损伤, 促进生长发育, 尤其在高海拔地区, 气候变暖对低温、强 UV-B 辐射条件下的农作物生长发育更有利。

UV-B 辐射和温度变化对小麦光合作用均有显著影响, 其影响途径到底是通过调节气孔张开来影响光合作用, 还是非气孔途径来影响植物光合速率。根据 Farquhar and Sharkey(1982)的理论, 净光合速率、细胞间隙 CO₂ 浓度、气孔限制值、气孔导度之间

的关系判断的依据。当净光合速率降低的同时, 若气孔导度 Gs 与细胞间隙 CO₂ 浓度 Ci 降低, 而气孔限制值增加, 那么净光合速率降低的原因是气孔因素所为; 当净光合速率降低的同时, 若气孔导度 Gs 与细胞间隙 CO₂ 浓度 Ci 升高, 而气孔限制值减小, 那么净光合速率降低的原因是非气孔因素所为, 也就是说是由于 RuBP 羧化酶/加氧酶含量、光合色素含量等降低造成。在 21~26℃, 无 UV-B 辐射和 UV-B 辐射处理组小麦净光合速率升高的同时, 伴随着细胞间隙 CO₂ 浓度 Ci 升高, 而气孔限制值减小, 说明在 21~26℃, UV-B 和温度主要是通过影响气孔张开度来影响光合作用; 在 21~26℃, 无 UV-B 辐射和 UB-B 辐射处理组小麦净光合速率升高的同时, 伴随着细胞间隙 CO₂ 浓度 Ci 降低, 而气孔限制值没有变化, 说明在 26~31℃, UV-B 和温度主要是通过非气孔因素来影响光合作用; 在 31~36℃, 无 UV-B 辐射和 UB-B 辐射处理组小麦净光合速率下降的同时, 伴随着细胞间隙 CO₂ 浓度 Ci 升高, 说明在 31~36℃, UV-B 和温度升高主要是通过非气孔因素来影响光合作用。也就是说 UV-B 辐射主要通过抑制 RuBP 羧化酶/加氧酶大小亚基 mRNA 转录水平、光合色素生物合成和叶肉细胞固定能力, 降低了 RuBP 羧化酶/加氧酶、叶绿素含量和叶肉细胞的羧化效率, 从而降低了小麦的光合能力。

表 1 UV-B 和温度变化条件下小麦幼苗的 CO₂ 响应曲线*

处理组	CO ₂ 响应曲线方程	斜率方程	光合能力 (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	羧化效率 (mol·m ⁻² ·s ⁻¹)
T ₁	$y = 12.37\ln(X) - 51.696$ $R^2 = 0.9854$	$y = 0.1138X - 8.5428$ $R^2 = 0.9767$	21.1100	0.1183
T ₁ B	$y = 9.15\ln(X) - 38.675$ $R^2 = 0.9639$	$y = 0.0886X - 6.9295$ $R^2 = 0.9889$	15.1819	0.0886
T ₂	$y = 11.61\ln(X) - 44.702$ $R^2 = 0.9553$	$y = 0.1282X - 7.5728$ $R^2 = 0.9946$	23.6500	0.1282
T ₂ B	$y = 9.43\ln(X) - 36.217$ $R^2 = 0.9844$	$y = 0.1136X - 6.7523$ $R^2 = 0.9774$	17.599	0.1058
T ₃	$y = 24.10\ln(X) - 107.77$ $R^2 = 0.9844$	$y = 0.2234X - 17.2870$ $R^2 = 0.9774$	38.103	0.2234
T ₃ B	$y = 16.17\ln(X) - 65.55$ $R^2 = 0.9820$	$y = 0.1909X - 13.5210$ $R^2 = 0.9954$	29.65	0.1909
T ₄	$y = 8.2038\ln(X) - 32.100$ $R^2 = 0.9757$	$y = 0.092X - 6.104$ $R^2 = 0.9828$	16.189	0.0921
T ₄ B	$y = 5.683\ln(X) - 20.561$ $R^2 = 0.9617$	$y = 0.0779X - 4.6832$ $R^2 = 0.9937$	12.89	0.0779

* 表 1 中 T₁、T₂、T₃、T₄ 分别代表 21℃、26℃、31℃、36℃ 条件下的对照组; T₁B、T₂B、T₃B、T₄B 分别代表 21℃、26℃、31℃、36℃ 条件下的 UV-B 处理组。

UV-B 辐射增强导致植物生理、生化及形态结构发生一系列的变化。UV-B 辐射可以降解植物激素吲哚乙酸,使之变成无活性的 3-甲基吲哚,从而抑制植物生长 (Ros and Tevni, 1995; Strid et al, 1996),使植株矮化、叶片厚度增加、叶面积指数降低,光合面积减小,影响根冠比 (Kakani et al, 2003)。植物总生物量积累是衡量植物生长发育的重要指标。总生物量代表着所有生理、生化和生长因子的长期响应的综合结果。光合作用是植物生物量“源”,也是对环境变化敏感的生理过程。实验表明小麦光合作用、生物量随着温度的升高先升高后降低,31℃有利于小麦的生长发育和生物量的积累,温度继续升高则生物量下降。而 UV-B 辐射显著降低了不同温度下小麦生长发育和生物量的积累,尤其在高温和低温条件下。而适当升高温度会减缓这种损伤效应,而过高的升温则会加剧损伤。但是从 IPCC 报告的变暖温度范围来看,温带寒带气候变暖远不会导致胁迫效应。因而,气候变暖湿有利于温、带寒农业生产,也有利于提高农作物抗 UV-B 胁迫能力。

4 结论

随着温度有 21℃ 升高至 31℃,小麦的净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、光合能力(Ao)、羧化效率(CE)、RuBP 羧化酶/加氧酶含量及光合色素逐步升高,当温度升高至 36℃ 时,伴随着 Pn 的降低,Gs、Ao、CE、RuBP 羧化酶/加氧酶含量及光合色素均显著降低。而在 21℃ 至 36℃ 温度范围内,UV-B 辐射对小麦光合作用参数均有抑制效应,较低温度和高温下抑制作用加大。实验结果说明在温带寒带气候变暖有利于小麦光合作用,有利于提高植物抗 UV-B 能力,减小 UV-B 造成的损伤,促进生长发育,尤其在高海拔地区(低温、强 UV-B 辐射)气候变暖更加有利于农业生产。

参考文献

- 崔瑛,陈怡平. 2008. 近五年增强 UV-B 辐射对植物影响的研究趋势 [J]. 生态毒理学报, 3:1-8.
- 张志良. 1990. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 134-135.
- Caldwell M M, Bjorn L O, Björn J F. 1998. Effects of increased solar ultraviolet radiation on terrestrial ecosystems [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 46, 40-50.
- Dmytro I L, Alla I Y, Yaroslav B B. 2010. UV-B overexposure induces programmed cell death in a BY-2 tobacco cell line [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 68, 51-57.
- Farquhar G D, Sharkey T D. 1982. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 33, 17-345. Giannakopoulos C, Sager P L, Bindi M, et al. 2009. Climatic changes and associated impacts in the Mediterranean resulting from a 2 °C global warming [J]. *Glob-al and Planetary Change*, 68, 209-224.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis [G]//Solomon S, Qin D H, Manning M, et al. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.
- Juan A G, Mariana R, Maria F P, et al. 2009. Morphological and physiological responses of two varieties of a highland species (*Chenopodium quinoa* Willd.) growing under near-ambient and strongly reduced solar UV-B in a lowland location [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 96, 144-151.
- Kakani V G, Reddy K R, Zhao D. 2003. Effects of ultraviolet-B radiation on cotton (*Gossypium hirsutum* L.) morphology and anatomy [J]. *Annals of Botany*, 91, 817-826.
- Kerr R A. 1988. Ozone hole bodes ill for the global [J]. *Science*, 241, 785-786.
- Long S P, Ort D R. 2010. More than taking the heat:crops and global change [J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 13, 241-248.
- Makino A, Sakuma H, Sudo E, et al. 2003. Differences between maize and rice in Nuse efficiency for photosynthesis and protein allocation [J]. *Plant Cell Physiol*, 44, 952-956.
- McKenzie R L, Björn L O, Bais A, et al. 2003. Changes in biologically active ultraviolet radiation reaching the earth's surface [J]. *Photochem Photobio Sci*, 2, 5-15.
- Ros J, Tevni M. 1995. Interaction of UV radiation and IAA during growth of seedlings and hypocotyls segments of sunflower [J]. *Plant Physiology*, 146, 295-302.
- Strid A, Chow W S, Anderson J M. 1996. Temperature dependency of changes in the relaxation of relect rochromic shifts of chlorophyll fluorescence and in the levels of mRNA transcripts in detached leaves from *Pisum sativum* exposed to supplementary UV-B radiation [J]. *Plant Science*, 115, 199-206.
- Zu Y G, Pang H H, Yu J H, et al. 2010. Responses in the morphology, physiology and biochemistry of *Taxus chinensis* var. mairei grown under supplementary UV-B radiation [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 98, 152-158.