

# 麻花艸叶片光合色素含量及厚度 对 UV-B 辐射的响应

尚艳霞<sup>1,2</sup>, 张波<sup>1,3</sup>, 朱鹏锦<sup>1,2</sup>, 师生波<sup>1\*</sup>

(1 中国科学院西北高原生物研究所 高原生物适应与进化重点实验室, 西宁 810001; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3 中国科学院国家科学图书馆兰州分馆 中国科学院资源环境科学信息中心, 兰州 730000)

**摘要:** 以中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站自然生长的麻花艸(*Gentiana straminea* Maxim.) 为材料, 进行了不同月份和草盛期不同天数的短期增补和过滤 UV-B 辐射试验, 比较分析叶片光合色素含量和叶片厚度等的变化。结果表明: (1) 生长季内麻花艸叶片叶绿素 a+b 含量呈波动变化的趋势, 7 月份含量均较高; 草盛期不同天数处理时, UV-B 辐射对麻花艸叶片叶绿素 a+b 含量的影响不大。(2) 生长季内麻花艸叶片类胡萝卜素含量也是 7 月份较高, 短期增补 UV-B 辐射有降低其含量的趋势。(3) 增加 UV-B 辐射能够降低 Chl a/b 值; 自然 UV-B 辐射下 Car/Chl 比值能维持一个较高水平, 是对强辐射的适应。(4) 随处理时间延长, 麻花艸叶片厚度有降低趋势, 其叶缘出现一些发黄、变黑、变透明等受害症状, 叶片能通过增加叶片厚度来适应增强的 UV-B 辐射。可见, 生长于高海拔地区的植物麻花艸虽然对 UV-B 辐射表现出诸多的生理适应特性, 但依然不可避免地受到其损伤。

**关键词:** UV-B 辐射; 麻花艸; 光合色素; 高山植物

中图分类号: Q945.79 文献标识码: A

## Response of *Gentiana straminea* to UV-B Radiation by Analysis of Photosynthetic Pigment Contents and Leaf Thickness

SHANG Yan-xia<sup>1,2</sup>, ZHANG Bo<sup>1,3</sup>, ZHU Peng-jin<sup>1,2</sup>, SHI Sheng-bo<sup>1\*</sup>

(1 Key Laboratory of Adaptation and Evolution of Plateau Biology, Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China; 2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 The Lanzhou Branch of the National Science Library, The Scientific Information Center for Resources and Environment, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The photosynthetic pigment contents were mainly analyzed in *Gentiana straminea* Maxim. after UV-B exclusive and UV-B supplementation treatment. Field experiments were conducted at the Haibei Alpine Meadow Ecosystem Research Station, the Chinese Academy of Sciences. The result indicated that: (1) Chlorophyll contents varied among different months with a high value appeared in July, and there were no seriously influence of UV-B radiation during 15 days of treatment. (2) Carotenoids contents also high in July, and there was a decreased tendency during short terms of increased UV-B radiation. (3) Chl a/b ration were decreased under high UV-B radiation treatment, and Car/Chl seems a little high in ambient UV-B radiation when compared with no UV-B treatment. (4) Increasing of leaf thickness was the one adaptation way to enhanced UV-B radiation; with prolongation of treatment, leaves became thinner than early due to

①收稿日期: 2010-01-13; 修改稿收到日期: 2010-11-28

基金项目: 国家自然科学基金(30670307, 30570270, 30170154); 国际科技合作重点项目(2002CB714006)

作者简介: 尚艳霞(1986-), 女(汉族), 在读硕士研究生, 主要从事植物光合生理方面的研究。E-mail: welcomesyx@126.com

\* 通讯作者: 师生波, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事高原植物的光合生理和植物对高原强辐射适应性研究。E-mail: sbshi@nwipb.

the accumulation of UV-B damage, as a results leaf color turned to yellow, the apex turned to purple and finally leaf margin got brown. It was obvious that alpine plants had some of physiological adaptation characters, but they still suffered a certain inevitable injury.

**Key words:** UV-B radiation; *Gentiana straminea* Maxim.; photosynthetic pigments; alpine plant

自英国科学家 Farman 等<sup>[1]</sup>首次观测到南极上空的臭氧空洞以来, 由于臭氧衰减而导致到达地面的 UV-B 辐射增强及其生物学效应受到国内外的普遍关注。同时, 在两极和世界其它地区都观测到太阳辐射中 UV-B 辐射的增强。青藏高原是全球气候变化敏感地区之一。熊效振等<sup>[2]</sup>的计算表明, 整个中国地区, 青藏高原的紫外辐射永远最强。周秀骥等<sup>[3]</sup>在青藏高原上空发现臭氧异常低值中心, 并证明该区是一个臭氧递减的强中心, 其臭氧低谷有加深的趋势, 夏季到达地表的辐射最大, 臭氧低谷最深。刘煜等<sup>[4]</sup>计算得出, 青藏高原比同纬度其它地区臭氧少 12.9%, 而 UV-B 辐射增加了 12.7%, 对 DNA 有害的辐射增加的最多, 达到了 33.2%。

太阳 UV-B 辐射的能量较高, 且能部分穿过植物叶片的表皮层到达光合机构等敏感部位。地球表面的 UV-B 辐射增强, 将对植物产生多方面影响, 其中包括对 DNA、光系统 II、光合作用、抗氧化酶系统以及植物体内类黄酮等的影响。近几年来<sup>[5]</sup>, 从细胞及分子水平出发来探讨植物响应 UV-B 辐射内部机理的研究较为多见, 但是从生理角度出发探讨 UV-B 辐射对植物光合色素以及光合作用的影响也是非常必要的。

麻花苳(*Gentiana straminea* Maxim.) 为龙胆科龙胆属多年生草本植物, 主要分布于青藏高原海拔 2 000~4 950 m 的山坡草地、河滩、灌丛及高寒草甸中, 是矮嵩草草甸的主要伴生种<sup>[6]</sup>。本试验以高山植物麻花苳为研究对象, 探讨了自然光背景下短期增补 UV-B 辐射和滤除自然光谱中的 UV-B 辐射成分对不同月份叶片光合色素含量的影响, 以及草盛期不同处理天数后光合色素含量的变化, 以期为极端环境下高山植物光合作用的深入研究奠定基础。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验样地概况

试验样地位于中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站。该站位于青藏高原东北部(37°37' N, 101°19' E), 海拔 3 200 m, 具有明显的高原大陆性气候特征。受高海拔的影响, 冷暖季节交替出现, 无明显四季之分。全年总辐射量为  $5, 866 \times 10^6 \sim 6. 704$

$\times 10^6$  kJ/m<sup>2</sup>, 年平均温度为 -1.7℃, 年平均降雨量为 580 mm 左右, 且主要集中于 5~9 月份(占年降水量 80%)。年内无绝对无霜期, 相对无霜期约为 20 d, 即使在最热的 7 月仍可出现霜冻、结冰、降雪等天气现象<sup>[7]</sup>。

### 1.2 UV-B 辐射处理

短期 UV-B 辐射处理分两种方式: 自然光背景下的增补 UV-B 试验和滤除自然光谱中 UV-B 辐射成分的试验。(1) 增补 UV-B 试验: 采用荧光灯管法, 金属灯架(30 cm × 30 cm × 40 cm) 上安装 4 只 UV-B 荧光灯管(UV-B-308, 北京电光源研究所), 灯管垂直位于待测植物上方; 其中 3 个灯架的灯管包以纤维素双乙酸酯薄膜(CA 膜, 厚度 0.13 mm, 过滤  $\lambda < 280$  nm 的少量致死性紫外线 C), 为增补 UV-B 处理, 用 UV-A + UV-B 表示; 另外 3 个灯架的灯管包以 Mylar 膜(厚度 0.08 mm, 过滤  $\lambda < 315$  nm 的紫外线), 为增补 UV-B 处理的对照, 因能透过与处理相匹配的 UV-A 成分, 用 UV-A 表示。(2) 滤除自然光谱中 UV-B 辐射成分的试验: 采用选择性薄膜法, 金属架(120 cm × 80 cm × 45 cm) 东西向排列, 其中的 3 个金属架上覆有 Luminar 薄膜(厚度 0.13 mm, 滤除自然光中的 UV-B 成分), 表示为 no UV-B; 另外 3 个框架覆有 CA 膜作为对照, 因能透过自然光中的 UV-B 成分, 用 amb UV-B 表示。4 个处理之间 UV-B 辐射强度以 UV-A + UV-B、UV-A、amb UV-B 和 no UV-B 的顺序依次降低, 组成一个从增补到滤除的 UV-B 梯度。

试验样地为试验站的半封育矮嵩草草甸, 选择植被较为均一地段, 选择物候期一致且叶片舒展、长势良好的麻花苳植株作为研究材料, 分别从两个方面研究两种方式的 UV-B 辐射效应。(A) 不同季节 UV-B 辐射处理, 于 2008 年 6~9 月每个月的月初进行, 处理时间为 7 d; (B) 草盛期不同天数 UV-B 辐射处理, 于 2008 年 7 月下旬和 8 月中上旬及 2009 年 7、8 月进行, 处理时间为 15 d, 并在 2009 年 7、8 月份, 在 UV-B 辐射处理同时测定麻花苳叶片厚度。

经 UV-B 辐射处理后, 于晴天选取长势良好、无病虫害侵袭的健康植株采集叶片样品, 采样时间一

一般为当地时间 10:00 或 15:00。叶片采集后,放入自封袋,置于冰瓶带回实验室清理干净,立即进行光合色素相关定量和浸提处理。

### 1.3 光合色素含量和叶片厚度的测定

挑选无伤斑的完全展开叶,避开主脉,用打孔器(直径 0.7 cm)打取叶圆片,混匀后随机取其中 6 片置于 10 mL 叶绿素萃取液(乙醇:丙酮:水溶液为 45%:45%:10%)中,盖紧密封、避光低温保存 10 d 至叶圆片无色。用 UV-1601 紫外分光光度计(日本岛津公司)检测波长在 663、645、440 nm 处的吸光度值。叶绿素含量的测定与计算参照 Arnon<sup>[8]</sup>的方法。类胡萝卜素含量的测定与计算参照朱广廉<sup>[9]</sup>的方法。

采用电子数显外径千分尺(桂林广陆量具厂生产),测量处理框架下麻花苻叶片的厚度。测定时每一处理框架下取向光性较好、成熟的完全展开叶 6 片,以叶片中下部 2/3 部位为准,避开叶片主脉,分左右测定。每个处理重复 3 次。

### 1.4 数据分析

原始数据的计算与处理采用 Excel 软件,采用 Spss 13.0 软件进行方差分析和显著性检验。图中数据以平均数和标准误(SE)表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 UV-B 处理对麻花苻叶片叶绿素含量的影响

草盛期不同天数的处理试验表明,麻花苻叶片叶绿素含量在增补和过滤 UV-B 辐射的试验间均无显著性差异(图 1, A)。其中,增补 UV-B 辐射试验中,UV-A 处理的叶绿素 a+b 含量在第 10 天时达到最大值,后随处理时间的延长而降低;而增补处理 UV-A+UV-B 的叶绿素 a+b 的含量在第 5 天和第 15 天均较高,且第 15 天最高。过滤 UV-B 辐射试验中,amb UV-B 处理叶片叶绿素 a+b 含量在处理 10 天后出现最大值,而在滤减辐射处理 no UV-B 的叶绿素 a+b 值在第 10 天时较低。不同处理之间相比较时, no UV-B 辐射处理的叶绿素 a+b 含量均高于 UV-A+UV-B 处理; no UV-B 与 amb UV-B 辐射处理相比,麻花苻叶片的叶绿素 a+b 的含量在处理第 5、15 天均高于 amb UV-B,而在第 10 天时略低于 amb UV-B。这说明增强 UV-B 辐射可以降低草盛期麻花苻叶片的叶绿素的含量;麻花苻已经适应了高原 UV-B 辐射条件,从而滤减 UV-B 处理叶片叶绿素 a+b 的含量在处理至 15 d 时表现出增加的趋势。

植物生长季内的测定结果(图 1, B)表明,各处理麻花苻叶片的叶绿素含量均表现为先升高后降低的趋势,并都在 7 月份达到最高值;同一月份各处理间比较时,仅 6 月份具有显著差异。增补 UV-B 辐射试验中,与 UV-A 相比,UV-A+UV-B 处理的叶绿素 a+b 含量在 6 月份显著降低( $P < 0.05$ ),7 月份稍低,8 月份略有升高,9 月份几无差异;过滤自然光谱中的 UV-B 辐射试验中,与 amb UV-B 对照相比, no UV-B 处理的叶绿素 a+b 含量在 6 月份显著降低( $P < 0.05$ ),7~9 月份则均有增加趋势(图 1, B)。即增补 UV-B 辐射初期能显著降低叶片的叶绿素含量,而在此后的生育期虽有一定幅度升降但均未达到显著水平;过滤自然光谱中 UV-B 辐射成分处理时,麻花苻叶片叶绿素 a+b 含量除 6 月份显著降低外,其余月份均有增加趋势。说明麻花苻植物叶片在生长初期对增补的 UV-B 辐射强度较为敏感,但叶片显然已适应环境中的 UV-B 辐射强度,滤除自然光谱中 UV-B 辐射成分处理时,麻花苻叶片叶绿素含量在 7~9 月份略有提高。

### 2.2 UV-B 处理对麻花苻叶片类胡萝卜素含量影响

图 2, A 显示,在麻花苻草盛期增补 UV-B 试验中,UV-A+UV-B 处理后叶片类胡萝卜素含量具有

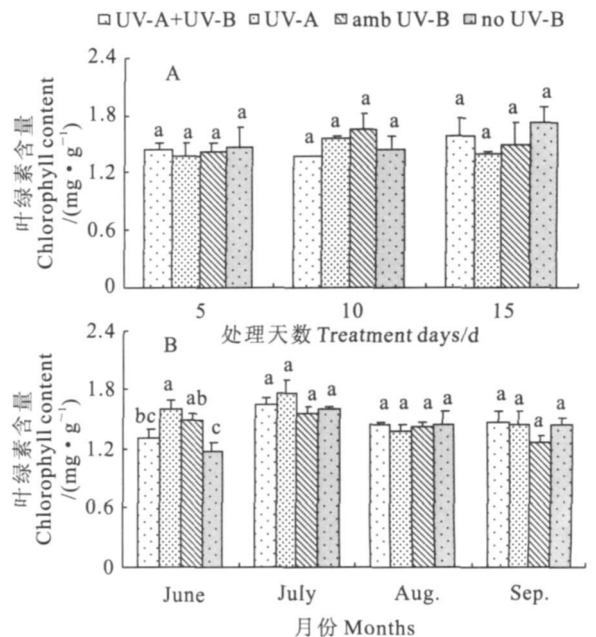


图 1 不同 UV-B 处理下麻花苻叶片叶绿素 a+b 含量的变化趋势

不同小写字母表示处理间在 0.05 水平有显著差异。下同

Fig. 1 Changes of chlorophyll contents in *G. straminea* during UV-B treatment

Different normal letters represent the significant difference among treatments at 0.05 level. The same as below

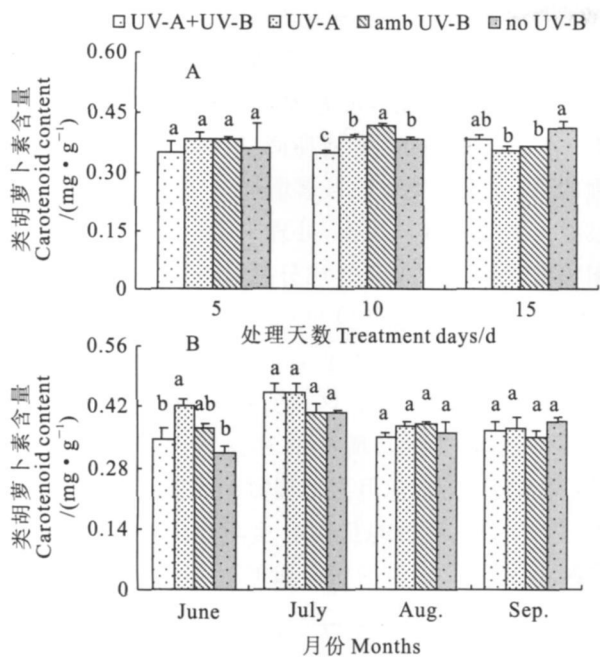


图2 不同 UV-B 处理下麻花苳叶片类胡萝卜素的含量的变化趋势

Fig. 2 Changes of carotenoids contents in *G. straminea* during UV-B treatment

低于 UV-A 对照的趋势, 且处理第 10 天时达到显著性差异水平 ( $P < 0.05$ ), 随处理天数延长至第 15 天时, 增补 UV-B 辐射的类胡萝卜素含量又略高于 UV-A; 在草盛期过滤 UV-B 辐射的试验中, 随处理天数延长, no UV-B 辐射后所测叶片类胡萝卜素含量值有增加的趋势, 而 amb UV-B 辐射处理的类胡萝卜素含量的变化则趋势相反。

如图 2, B 所示, 在生长季 UV-B 辐射试验中, 麻花苳叶片类胡萝卜素含量也呈现波动变化趋势。其中, 在增补 UV-B 辐射试验中, 叶片类胡萝卜素含量在 7 月份最高; 生长季内短期增补 UV-B 条件下, 麻花苳叶片类胡萝卜素的含量均低于 UV-A 对照, 但仅在 6 月份具有显著性差异。在过滤 UV-B 辐射试验中, 叶片类胡萝卜素的含量也是 7 月份最高; 除 9 月份外, no UV-B 处理的类胡萝卜素的含量都低于 amb UV-B 对照。以上结果说明, 麻花苳叶片类胡萝卜素含量也是在生长初期对环境 UV-B 辐射的变化较为敏感, 短期增补 UV-B 辐射能引起麻花苳叶片类胡萝卜素含量的降低。

### 2.3 UV-B 处理对麻花苳叶片 Chl a/b 和 Car/Chl 比值的影响

**2.3.1 Chl a/b 比值的变化** 在草盛期增补 UV-B 辐射条件下, 随处理天数的增加, 麻花苳叶片 Chl a/b 值呈现低-高-低的变化趋势; 而 UV-A 对照中

Chl a/b 值随处理天数的延长而逐渐降低 (图 3, A)。其中, 在 UV-A + UV-B 处理中, 增补 UV-B 辐射第 5 天时的 Chl a/b 值显著低于 UV-A ( $P < 0.05$ ), 第 10 天和第 15 天虽均高于 UV-A, 但其间无显著差异 ( $P > 0.05$ )。在草盛期不同天数过滤 UV-B 辐射试验中, no UV-B 和 amb UV-B 处理麻花苳叶片 Chl a/b 值均呈现随处理时间的延长而降低趋势, 但两者之间始终无显著差异 ( $P > 0.05$ )。可见, 麻花苳叶片 Chl a/b 值对短期 UV-B 辐射反应不敏感。

生长季不同月份增补 UV-B 试验表明, 生长季内各处理麻花苳叶片的 Chl a/b 比值先逐渐下降, 至 9 月份时又有所回升 (图 3, B)。其中, UV-A + UV-B 处理麻花苳叶片的 Chl a/b 在 6 月份显著高于 UV-A, 而其值在 7~9 月又均低于 UV-A 对照, 但仅在 8 月份达到显著性水平 ( $P < 0.05$ ), 说明生长季增补 UV-B 辐射能够降低麻花苳叶片 Chl a/b 比值。在滤除 UV-B 试验中, 与 amb UV-B 对照相比, no UV-B 处理的 Chl a/b 值在 6、7、8 三个月有降低的趋势, 且在 8 月份达到显著性水平 ( $P < 0.05$ ); 9 月份略有回升, 且 no UV-B 处理值高于 amb UV-B 处理, 但无显著性差异, 这说明麻花苳叶片已适应高原强 UV-B 辐射的环境。

**2.3.2 Car/Chl 比值的变化** 在草盛期不同天数增补 UV-B 试验中 (图 4, A), 麻花苳叶片 Car/Chl

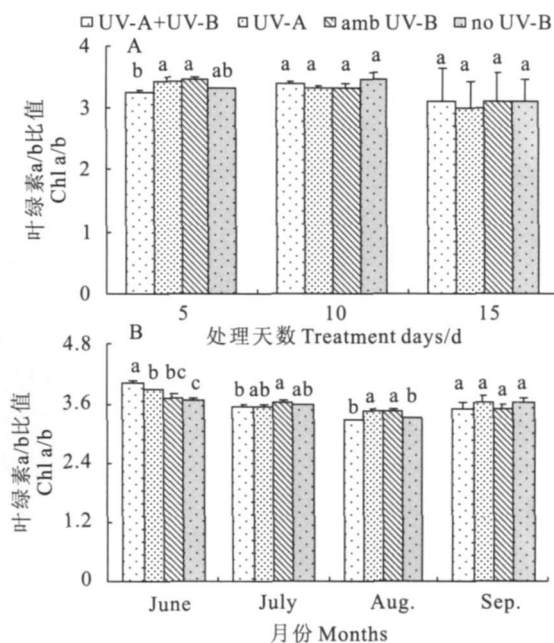


图3 不同 UV-B 处理下麻花苳叶片叶绿素 a/b 值的变化趋势

Fig. 3 Changes of chlorophyll a/b ratio in *G. straminea* during UV-B treatment

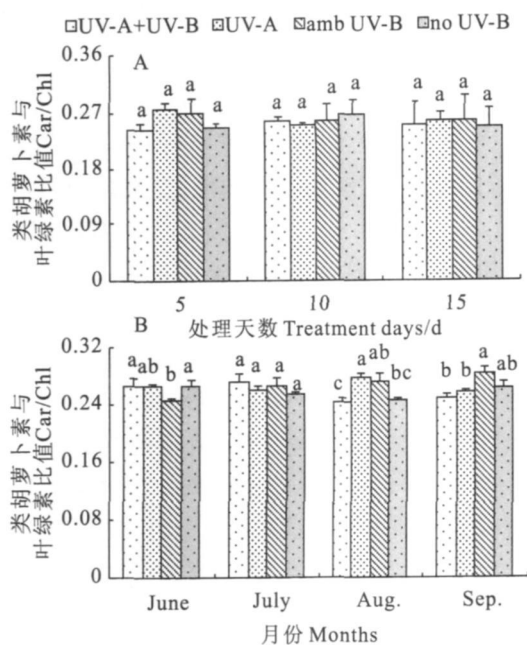


图4 不同UV-B处理下麻花苳叶片光合色素比值的变化趋势

Fig. 4 Changes of photosynthetic pigment ratio in *G. straminea* during UV-B treatment

比值在增补UV-B处理第5天和第15天时低于UV-A处理对照,第10天时高于对照;在不同天数过滤UV-B试验中,no UV-B处理的Car/Chl值同样在在处理第5天和第15天时低于amb UV-B对照,而在处理第10天是高于amb UV-B对照。但在草盛期同期所有处理间的Car/Chl值均没有显著差异( $P > 0.05$ )。

如图4, B所示,生长季不同月份增补UV-B试验中,UV-A对照中麻花苳叶片Car/Chl比值在8月份达到最大值,而UV-A+UV-B处理中Car/Chl比值在8月份最小;7月份UV-A+UV-B处理的Car/Chl比值高于UV-A对照,而8和9月份却低于UV-A,且在8月份具有显著性差异( $P < 0.05$ )。在不同月份过滤UV-B试验中,no UV-B处理的麻花苳叶片Car/Chl比值先逐渐降低,至9月有所回升,而对照(amb UV-B)叶片中的Car/Chl比值从6月到9月则持续上升;其中,no UV-B处理的Car/Chl比值除6月份显著高于对照(amb UV-B)外,7~9月份Car/Chl比值均低于amb UV-B,但均无显著性差异。这说明自然水平的UV-B辐射没有影响麻花苳的正常生长,其叶片的Car/Chl比值维持在相对较高的水平。

#### 2.4 短期UV-B辐射处理对麻花苳叶片厚度影响

2009年7、8月份,在草盛期短期UV-B辐射处

理试验中同时测定了麻花苳叶片厚度。如图5所示,在短期增补UV-B辐射处理实验中,UV-B+UV-A处理的麻花苳叶片厚度在第5天和第15天都比相应对照(UV-A)有所降低( $P > 0.05$ ),但至处理的第10天却比对照显著增加( $P < 0.05$ );在短期过滤UV-B辐射试验中,处理初期(第5天)过滤太阳辐射光谱中的UV-B成分后,no UV-B处理引起麻花苳叶片厚度显著降低( $P < 0.05$ ),但随处理时间延长,麻花苳叶片厚度变化趋于稳定,处理间无显著性差异( $P > 0.05$ )。这说明在短时间内UV-B辐射能够诱导植物以增加叶片厚度的方式来抵抗UV-B辐射的伤害,但当处理时间进一步延长(如15天)后,UV-B辐射的负影响逐渐显现,叶片厚度则会减小,UV-B辐射的伤害加重。

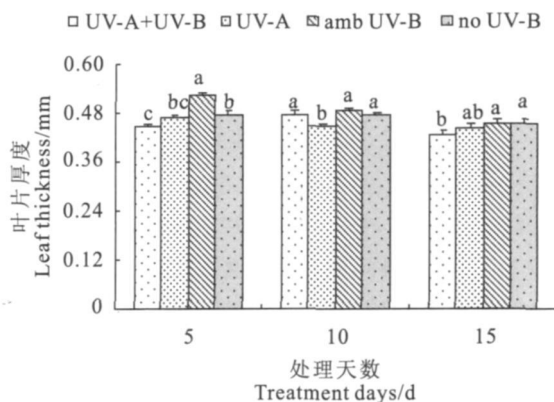


图5 不同UV-B辐射处理的麻花苳叶片厚度

Fig. 5 The leaf thickness of *G. straminea* under different UV-B treatment

### 3 讨论

本研究发现,生长季不同月份短期增补UV-B辐射处理时,麻花苳叶片的叶绿素a+b含量呈现波动变化趋势,且UV-B+UV-A处理的叶绿素含量在6月份显著低于UV-A对照。有研究表明<sup>[10]</sup>,较强的紫外线辐射能破坏植物的叶绿体结构及其前体或使它的合成受阻,从而降低叶片中的叶绿素含量<sup>[11]</sup>。本研究的试验地海北高寒草甸位于青藏高原东北隅,UV-A和UV-B年变化明显,且在太阳高度角最高的6月达年内最高值<sup>[12]</sup>。6月份,麻花苳植株尚处于生长前期,植物叶组织尚在形成过程中,此时外界辐射又较强,由于辐射量与叶绿素含量呈负相关<sup>[13]</sup>,因此叶片中相对较低的叶绿素含量可吸收较少的光,避免强光对麻花苳光合器官的损伤,从而起到光保护作用。但麻花苳显然已经适应了此时环境中的UV-B辐射强度,短期过滤自然光谱中

UV-B 辐射成分处理时, no UV-B 处理后光合色素的降低意味着对环境 UV-B 辐射的一定适应性。不同月份处理中, 无论是增补还是过滤 UV-B 辐射处理的麻花苳叶片叶绿素 a+b 的高峰值均出现在 7 月份, 显然此时麻花苳进入草盛期, 处于生命力旺盛阶段, 因此叶绿素含量较高; 8、9 月份, 自然光照强度降低, 麻花苳的叶绿素含量比 7 月份有所下降, 不利于光合速率的提高。

叶绿素 a、b 含量的高低可作为植物受胁迫及外界环境因子干扰的指示器<sup>[14]</sup>。不同月份 UV-B 辐射试验中, 叶绿素 a/b 比值从 6 月到 8 月份逐渐下降, 到 9 月份又有所回升且高于 8 月份。根据叶绿素 a 和 b 在光合作用中的不同分工<sup>[15]</sup>, 叶绿素 a/b 的比值大, 表明叶绿素 a 直接被光能激发的分子较多, 直接参与光化学反应的分子较多, 有利于光合效率的提高; 该比值下降, 表明叶绿素 b 在叶绿素中的比例增加, 有利于吸收、利用光强较弱的光照。与 8 月份相比, 9 月份叶绿素 a/b 的比值增加, 表明此时叶绿素 a 在叶绿体中的比例增加, 有利于更快的将 CO<sub>2</sub> 转化为光合产物, 为麻花苳的营养积累作准备。草盛期不同天数 UV-B 辐射处理中, UV-A+UV-B 处理第 5 天时所测 Chl a/b 值显著低于 UV-A, 此时叶绿素 b 在叶绿素中的比例增加, 有利于吸收和利用光强较弱的光照; 随处理时间延长, 在 10、15 天后其值均高于 UV-A, 但未达到显著性差异, 这可能说明此阶段有较多的叶绿素 a 直接被光能激发, 导致参与光化学反应的分子增加, 有利于光合效率的提高。

同时, 在生长季不同月份对麻花苳进行的 UV-B 辐射处理中, 类胡萝卜素与叶绿素的变化趋势一致, 均在 7 月份达到最大值, 且含量与对照差异不显著。由于类胡萝卜素分子能够接受过剩的能量, 避免激发态的叶绿素分子与分子氧反应形成单线态氧<sup>[16, 17]</sup>, 因此, 7 月份类胡萝卜素含量伴随叶绿素而增加, 可以起到光保护作用, 使叶绿素免受强光损伤。草盛期不同天数的 UV-B 辐射处理中, 麻花苳叶片中类胡萝卜素的含量均有所降低。即在试验初期, UV-B 辐射处理并不能增加类胡萝卜素的含量, 但随处理时间的延长则会增加叶片类胡萝卜素的含量。这与张波等对不同海拔高原植物唐古特山莨菪光合色素的比较研究结果一致<sup>[18]</sup>。

另外, 生长季不同月份 UV-B 辐射试验中, 麻花苳叶片 Car/Chl 的变化趋势与叶绿素 a+b 和类胡萝卜素的含量变化一致, 表明由于受到自身生理周期以及环境的影响, 麻花苳叶片叶绿素在短时间(7 d) UV-B 辐射试验中与类胡萝卜素变化趋势相同。不同天数的 UV-B 试验进一步表明, UV-B 辐射可以增加 Car/Chl 的含量。

Teramura 等<sup>[19]</sup>认为, 植物对 UV-B 辐射最敏感的时期是植物从营养生长向生殖生长的过渡。也有研究表明<sup>[20]</sup>, 随生长的进行, 植物叶片内光合色素含量随叶片成熟逐渐增加, 而至叶片进入成熟期后光合色素的含量开始下降。当植物由营养生长向生殖生长过渡时, 足以调整各项代谢来适应周围的环境。

植物叶片对环境胁迫较为敏感, 在强 UV-B 辐射下形态特征倾向于减少辐射伤害的变化, 包括叶片厚度增加, 植株变矮, 紫外吸收物质增加等<sup>[21]</sup>。在本研究中也观察到了此种现象, 如增补 UV-B 辐射试验中, 麻花苳叶片厚度在处理 5 d 后减小, 在 10 d 后显著增加, 在 15 d 后又有所降低; 过滤 UV-B 辐射试验初期, 麻花苳叶片厚度显著低于对照, 随处理时间延长, 这种减小的幅度逐渐降低, 至 15 d 后在数值上几乎无变化。这说明 UV-B 辐射诱导植物以增加叶片厚度的方式来适应强 UV-B 辐射环境。Bacon 等对挪威云杉两年的 UV-B 增补试验发现<sup>[22]</sup>, 随照射时间的延长, UV-B 处理的一些云杉的针叶开始发黄, 随后逐渐变为亮红色, 且叶片中叶绿素的含量也很少, 表明这些针叶过早地进入了衰老期。本研究也观察到, 在对麻花苳进行为期 15 d 的处理时, 随处理时间延长, 增补 UV-B 辐射处理的麻花苳叶片不同程度地出现发黄、叶缘变褐的现象, 而且同步进行的叶片厚度测定也显示出某些植株叶片厚度变薄的现象。然而在过滤 UV-B 辐射的处理中, 很少观察到这种现象。一般认为<sup>[23]</sup>, 臭氧、自由基、缺水、大量元素缺乏、病毒和真菌的侵染都能诱导枯叶现象的发生, 而枯叶现象的出现表明植物体内的叶绿素累积不足。因此, 我们认为青藏高原的高山植物依然承受着强太阳 UV-B 辐射的胁迫, 当 UV-B 辐射超过一定的阈值时, 植物叶片将出现一些发黄、变黑、变透明等受害症状。

## 参考文献:

- [1] FARMAN J C, GARDINER B G, SHANKLIN J D. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO<sub>x</sub>-NO<sub>x</sub> interaction[J]. *Nature*, 1985, 315: 207- 210.
- [2] XIONG X ZH(熊效振), WANG G CH(王庚辰). Distribution of solar ultraviolet radiation at the ground and its response to atmospheric ozone depletion in China[J]. *Scientia Atmospherica Sinica*(大气科学), 1993, 17(5): 611- 620(in Chinese).
- [3] ZHOU X J(周秀骥), LI W L(李维亮), CHEN L X(陈隆勋), LIU Y(刘煜). Study of ozone change over Tibetan Plateau[J]. *Acta Meteorologica Sinica*(气象学报), 2004, 62(5): 513- 527(in Chinese).
- [4] LIU Y(刘煜), LI W L(李维亮). Deepening of ozone valley over Tibetan Plateau and its possible influences[J]. *Acta Meteorologica Sinica*(气象学报), 2001, 59(1): 97- 106(in Chinese).
- [5] ZHONG CH(钟楚), CHEN ZY(陈宗瑜), WANG Y(王毅), LIU Y ZH(刘彦中). Molecular level study of the effects of UV-B radiation on plant: A review[J]. *Chinese Journal of Ecology*(生态学杂志), 2009, 28(1): 129- 137(in Chinese).
- [6] 何廷农. 中国植物志(第62卷)[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 62.
- [7] LI Y N(李英年), ZHAO X Q(赵新全), CAO G M(曹广民), ZHAO L(赵亮), WANG Q X(王勤学). Analyses on climates and vegetation productivity background at Haibei Alpine Meadow Ecosystem Research Station[J]. *Plateau Meteorology*(高原气象), 2004, 23(4): 558- 559(in Chinese).
- [8] ARNON D I. Copper enzymes in isolated chloroplasts: polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*[J]. *Plant Physiology*, 1949, 24(3): 1- 15.
- [9] 朱广廉. 植物生理学试验[M]. 北京: 北京大学出版社, 1990: 51- 54.
- [10] 赵福庚, 何龙飞. 植物逆境生理生态学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 115- 117.
- [11] LU C F(卢存福), BEN G Y(龚桂英). Photosynthetic characteristics of plants at high altitudes[J]. *Chinese Bulletin of Botany*(植物学通报), 1995, 12(2): 38- 42(in Chinese).
- [12] LI Y N(李英年), ZHAO L(赵亮), XU SH X(徐世晓), DU M Y(杜明远), WANG Q X(王勤学), ZHAO X Q(赵新全). Study on the UV-A and UV-B changes and their correlations with meteorological factors in the Haibei Alpine Meadow in the Qilian Mountains[J]. *Arid Zone Research*(干旱区研究), 2008, 25(2): 271- 272(in Chinese).
- [13] 李元, 岳明. 紫外辐射生态学[M]. 北京: 环境科学出版社, 2000: 1- 257.
- [14] RICHARDSON A, DUIGAN S, BERLYN G. An evaluation of non invasive methods to estimate foliar chlorophyll content[J]. *New Phytologist*, 2002, 153(1): 185- 194.
- [15] 王中英. 矮化苹果树营养生理[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996: 113- 128.
- [16] 孙存菁, 张建中, 段绍瑾. 自由生物学导论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999: 48- 50.
- [17] 曹仪植, 宋占午. 植物生理学[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1998: 101- 154.
- [18] ZHANG B(张波), SHI SH B(师生波), LI H P(李和平), HAN F(韩发). Comparison of photosynthetic pigment contents and antioxidant activity of *Anisodus tanguticus* from different leaf layers grown at two altitudes level in Qinghai Tibet Plateau[J]. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.*(西北植物学报), 2008, 28(9): 1784- 1785(in Chinese).
- [19] TREASURE A H. Implications of stratospheric ozone depletion upon plant production[J]. *Hort Science*, 1990, 25(12): 1557- 1560.
- [20] MENG X H(孟祥海), ZHANG Y J(张跃进), PI L(皮莉), YANG D F(杨东风), ZHAI Y J(翟宇君). Effect of shading on the photosynthetic pigment and protective enzyme activities in *Pinellia ternata* leaves[J]. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.*(西北植物学报), 2007, 27(6): 1167- 1171(in Chinese).
- [21] DU Y J(杜英君), JIN Y H(靳月华). Effect of far ultraviolet radiation on lipid peroxidation and inherent protection system in seedlings of *Taxus cuspidate*[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2000, 11(5): 660- 664(in Chinese).
- [22] BACON J, GABERŠČIK A, BATIČ F. Influence of UV-B radiation on photosynthetic activity and chlorophyll fluorescence kinetics in Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.] seedlings[J]. *Trees*, 1996, 10: 172- 176.
- [23] MORI I C, UTSUGI S, TANAKAMARU S, TANI A, ENOMOTO T, KATSUHARA M. Biomarkers of green roof vegetation: anthocyanin and chlorophyll as stress marker pigments for plant stresses of roof environments[J]. *Environ. Eng. Manage*, 2009, 19(1): 21- 27.