

高 菊,李 艳,高 燕. UV-B 辐射增强下氮素对珙桐幼苗生长和光合特性的影响[J]. 江苏农业科学,2013,41(10):343-347.

# UV-B 辐射增强下氮素对珙桐幼苗生长和光合特性的影响

高 菊<sup>1,2</sup>, 李 艳<sup>1</sup>, 高 燕<sup>1,2</sup>

(1. 生态安全与保护四川省重点实验室,四川绵阳 621000; 2. 西华师范大学生命科学学院,四川南充 637002)

**摘要:**以 3 年生珙桐(*Davidia involucat* Baill)幼苗为材料,探讨了不同施氮水平下,UV-B 辐射增强对珙桐幼苗生长和光合特性的影响。结果表明,UV-B 辐射增强处理后,珙桐幼苗的生长和光合作用受到一定的抑制,但影响不显著。受到 UV-B 胁迫后,叶片的全碳含量显著降低。在 UV-B 的胁迫下,施加高氮或低氮在一定程度上缓和了珙桐幼苗在生长和光合作用上受到的抑制程度。

**关键词:**氮素;UV-B;珙桐;光合特征

**中图分类号:** Q945.78 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2013)10-0343-04

气候变化对植物的影响一直是研究的热点<sup>[1-6]</sup>,近年来关于植物对紫外线或氮素的响应报道很多<sup>[7-13]</sup>。国内外已有不少关于氮沉降增加和 UV-B 辐射增强复合作用对植物的影响研究。研究表明,UV-B 辐射增强对黄瓜幼苗的伤害程度取决于黄瓜幼苗对 UV-B 的敏感性、UV-B 辐射水平以及氮供应水平<sup>[14]</sup>。Yao 等指出,额外的氮供应对 UV-B 辐射增强下云杉幼苗生长不利<sup>[8]</sup>。方兴研究认为,UV-B 辐射增强背景下谷子生殖生长和抗性加强需要合适的氮素供应水平<sup>[15]</sup>。一方面,目前关于氮供应对 UV-B 辐射增强下的植物的响应仍不十分清楚,另一方面,当前研究主要是针对草本植物和经济作物,极少对乔木进行研究,针对珍稀濒危植物的研究更少。珙桐(*Davidia involucat* Baill)别称水梨子或鸽子树,是我国特有的珙桐科(Davidioideae)单型属植物,是第三纪古热带植物区系的孑遗种,也是我国一级保护植物<sup>[16]</sup>。本研究从生长、光合参数(光合色素、净光合速率、气孔导度、蒸腾速率等)、叶片碳氮含量等方面探讨珙桐幼苗对不同土壤氮素水平及 UV-B 的响应,找出全球气候变化下珙桐响应特征,旨在为保护珙桐树种提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

珙桐幼苗采自四川省安县千佛山。待珙桐休眠时,于 2011 年 1 月中下旬,选择生长健壮,无病虫害,粗度、高度及生长势大体一致的 3 年生植株,移栽于装满匀质土壤(森林

表层土壤,约 10 kg)、容积为(35 cm×25 cm)的塑料盆中,每盆定植 1 株。室内盆栽试验增加 UV-B 辐射和额外氮供应 2 个处理。UV-B 辐射设置 2 个水平:(1)大气 UV-B 辐射水平(UV-B 对照组),珙桐在自然光照下生长;(2)UV-B 辐射增加水平(UV-B 增强组),增补紫外线辐射,相当于四川地区夏至时晴天平均 UV-B 辐射水平增强 15%<sup>[17-19]</sup>。氮供应设置 3 个水平:(1)不施氮(N0,无氮沉降)、(2)低氮水平[LSN,50 kg/(hm<sup>2</sup>·年)的氮沉降]、(3)高氮水平[HSN,250 kg/(hm<sup>2</sup>·年)的氮沉降]。用硝酸铵(分析纯)提供氮营养<sup>[4,8,14]</sup>。试验共设 6 个处理组:(1)UV-B 对照组与 N0;(2)UV-B 对照组与 LSN;(3)UV-B 对照组与 HSN;(4)UV-B 增强组与 N0;(5)UV-B 增强组与 LSN;(6)UV-B 增强组与 HSN。每组 5 个重复。试验在绵阳师范学院植物园温室内进行。2010 年 12 月底将珙桐幼苗栽植于塑料盆中,每盆 1 株,盆土为森林表层土壤。幼苗放置在可调高度的框架下,框架用来悬挂 UV-B 灯管。整个试验期间正常浇水。

### 1.2 紫外线和施氮处理

紫外线增加处理时间约为 1 个月。UV-B 灯管由北京电光源研究所提供(UV-305 nm,波段 295~315 nm,40 W)。珙桐幼苗受到的 UV-B 辐射为温室内太阳辐射量加上灯管增补的 UV-B 辐射。每天补充 6 h(09:00—17:00)UV-B 辐射,阴雨天除外。根据 Caldwell 公式将仪器读数转变为生物有效辐射,增加的紫外线辐射强度为 6.85 μW·cm;在当地夏至晴天时大气 UV-B<sub>BE</sub>强度(单位 μW·cm)基础上增加约 15%的 UV-B 辐射。将灯管定向悬挂在植物上方(1 根灯管下放置约 5 盆植株,确保每盆植株接受的照射剂量相等)。用 UV-B 辐照计测定 297 nm 处的紫外线辐射强度(以植株顶叶部位为准)。定期调整灯管与植株顶端的距离以保证植物接受恒定剂量的 UV-B 辐射。同时每 4 d 调换 1 次同处理组中植株的位置,以保证同处理组内的植株接受的紫外线辐射较为均匀。为了消除微环境的影响,每 2 d 转动 1 次植株的方向,以确保植株整个冠幅获得的辐射剂量相同。

紫外线对照组:在植物上方悬挂与上述处理一样的紫外灯,采用 0.075 mm 聚酯烯膜包裹植物,吸收波长小于 315 nm

收稿日期:2013-03-01

基金项目:国家自然科学基金青年基金(编号:31200251);四川省教育厅项目(编号:11ZB136、10ZB047);四川省教育厅彝族文化中心项目(编号:YZWH1127);绵阳师范学院科研启动项目(编号:MQD2011A03)。

作者简介:高 菊(1988—),女,四川泸州人,硕士研究生,主要从事植物生理生态学研究。E-mail:gaoku880909@126.com。

通信作者:李 艳,博士,主要从事植物生理生态学研究。E-mail:leelechi@163.com。

的紫外光。所有珙桐幼苗都接受自然光照射<sup>[4]</sup>。

### 1.3 方法

1.3.1 植株株高、基径增长量测定 株高(茎基部到生长点)增长量测定:在处理初期和处理结束时采用卷尺进行测定。基径增长量测定:在处理初期和处理结束时采用游标卡尺进行测定。

1.3.2 色素测定 采用分光光度计法<sup>[20]</sup>测定叶片总叶绿素、叶绿素 a、叶绿素 b 含量。

1.3.3 光合指标测定 晴天时用 LI-6400 便携式光合仪(美国 LI-COR 公司)测定幼苗生长点下第 3 片展开叶的净光合速率、气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度、蒸腾速率等各项光合生理指标<sup>[21]</sup>。

1.3.4 全碳、全氮测定 用元素分析仪(PerkinElmer 2400, SeriesII, CHNS/O Analyzer)测定幼苗叶片的全碳、全氮含量<sup>[7]</sup>。

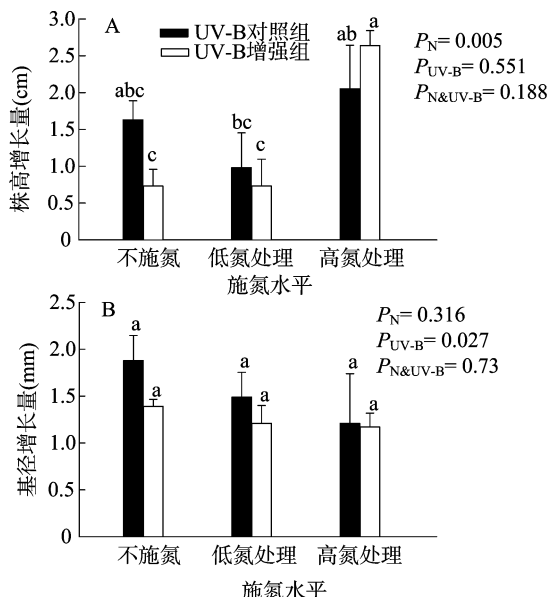
### 1.4 数据分析

采用 SPSS 17.0 软件分析数据,采用单因素方差分析及非参数方差分析检验处理间的差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 氮素与 UV-B 辐射处理对珙桐幼苗生长的影响

UV-B 辐射增强处理下珙桐幼苗叶片变小、卷曲,伴有褐斑,有的叶片失绿,UV-B 辐射增强处理加速了叶片老化。UV-B 辐射增强处理降低了珙桐幼苗的株高增长量和基径增长量,但差异不显著(图 1)。在 UV-B 辐射增强处理下,额外的氮供应使得 UV-B 辐射对植株株高和基径生长的抑制作用得到缓解。这表明氮供应可能在一定程度上缓解 UV-B 增强对珙桐幼苗的株高和基径生长的抑制作用。



$P_{UV-B}$  表示 UV-B 辐射增强对珙桐幼苗该生长参数影响的方差分析的  $P$  值;  $P_N$  表示氮处理对珙桐幼苗该生长参数影响的方差分析的  $P$  值;  $P_{N \& UV-B}$  表示 UV-B 和氮复合处理对珙桐幼苗该生长参数影响的方差分析的  $P$  值。下同。

图1 不同施氮量对 UV-B 辐射增强下珙桐幼苗株高增长量(A)和基径增长量(B)的影响

### 2.2 氮素与 UV-B 辐射对珙桐幼苗叶片叶绿素含量的影响

方差分析表明,UV-B 辐射增强处理下,幼苗叶片叶绿素

b、总叶绿素含量均高于 UV-B 对照组(图 2)。额外的氮供应会使叶片叶绿素 b、总叶绿素含量显著下降。这表明,臭氧层的进一步损耗和氮沉降将影响珙桐叶片叶绿素含量。UV-B 辐射增强处理降低了叶片叶绿素 a 含量,但差异不显著。

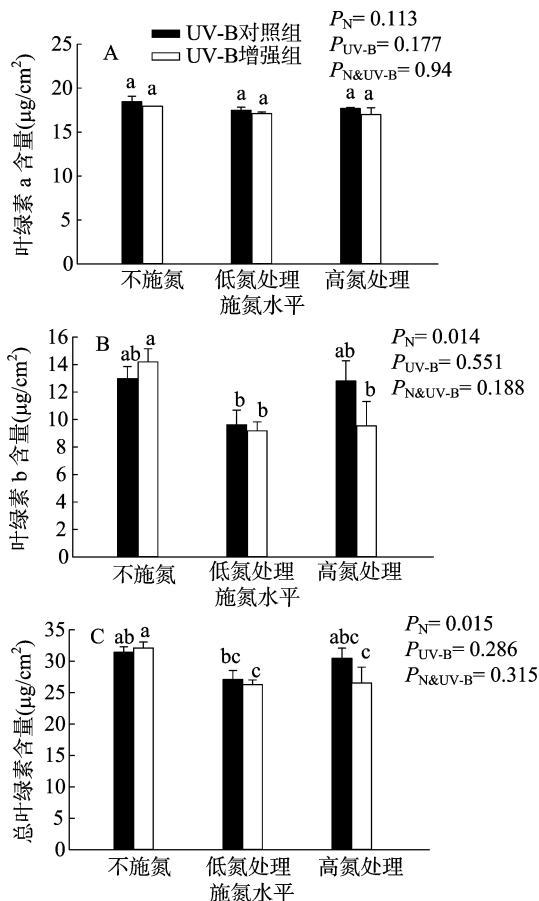


图2 不同施氮量对 UV-B 辐射增强下珙桐幼苗叶绿素 a 含量(A)、叶绿素 b 含量(B)、总叶绿素含量(C)的影响

### 2.3 氮素与 UV-B 辐射对珙桐幼苗光合作用参数的影响

由图 3 可知,UV-B 辐射增强处理降低了珙桐幼苗净光合速率、蒸腾速率、气孔导度,但 UV-B 辐射增强处理组与对照组差异不显著。额外的氮供应增加了幼苗的净光合速率,也在一定程度上减轻了 UV-B 辐射增强对幼苗蒸腾速率、气孔导度的抑制作用,这说明氮供应在一定程度上减轻了 UV-B 对植物光合作用的伤害,特别是高氮供应,但这种缓解作用不明显。UV-B 辐射增强处理降低了胞间 CO<sub>2</sub> 浓度。

### 2.4 氮素与 UV-B 辐射对珙桐幼苗叶片全碳、全氮含量的影响

由图 4 可知,UV-B 辐射增强处理显著降低了珙桐幼苗叶片的全碳含量,额外的氮供应对 UV-B 辐射增强对珙桐幼苗的抑制作用有所缓解,但影响不显著。UV-B 辐射增强处理增加了叶片全氮含量,但影响不显著。

## 3 结论与讨论

### 3.1 珙桐幼苗对 UV-B 辐射增强的响应

不同植物对 UV-B 辐射增强响应程度不同。UV-B 辐射过强能够抑制许多植物生长<sup>[4]</sup>,株高增长量是衡量植物对

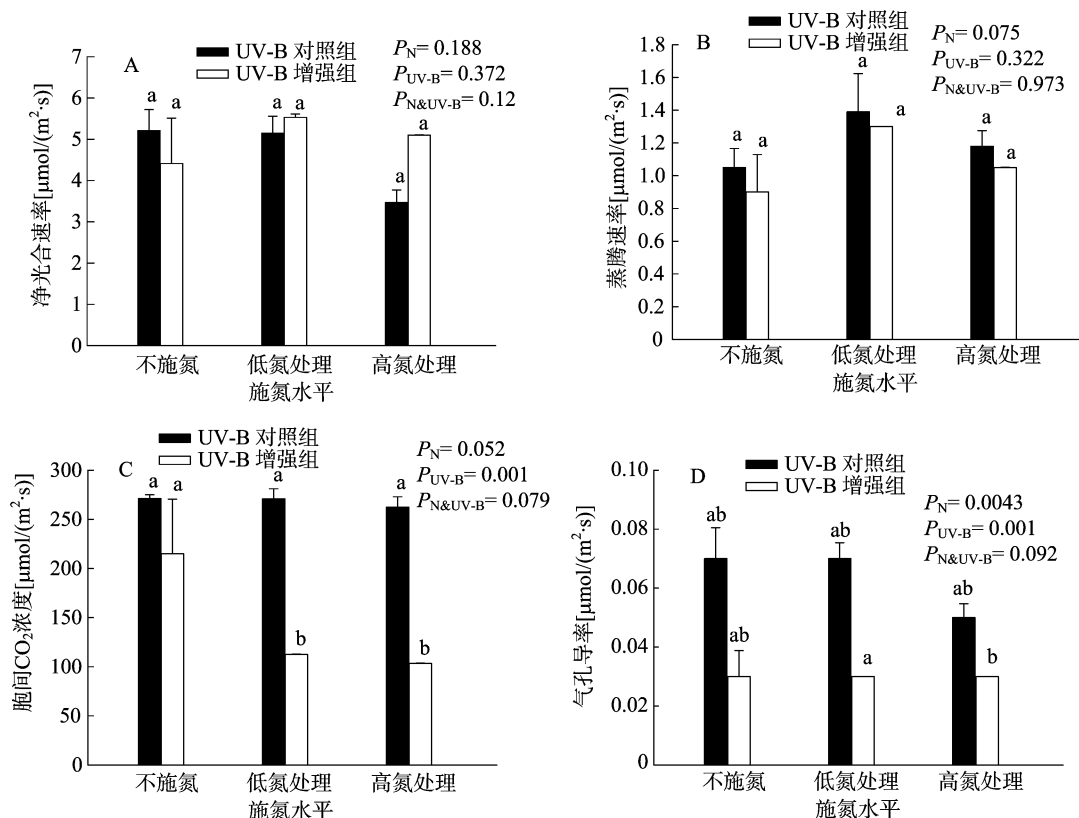


图3 不同施氮量对UV-B辐射增强下珙桐幼苗净光合速率(A)、蒸腾速率(B)、胞间 $\text{CO}_2$ 浓度(C)、气孔导度(D)的影响

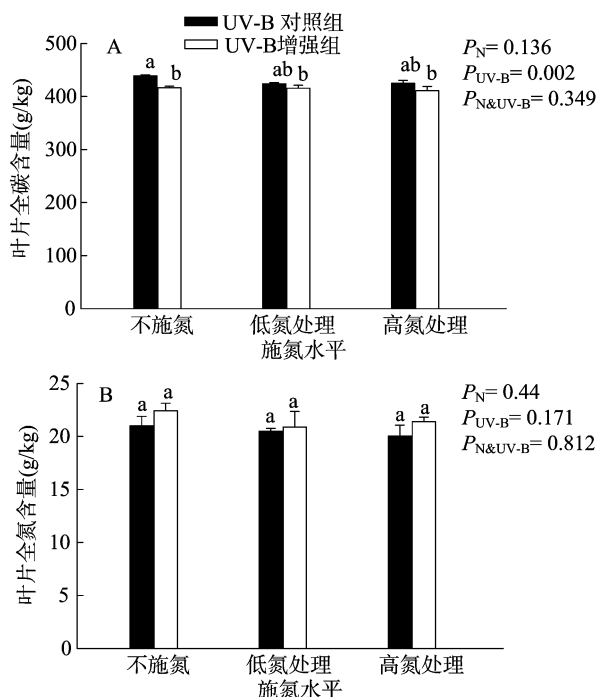


图4 不同施氮量对UV-B辐射增强下珙桐幼苗叶片全碳含量(A)和全氮含量(B)的影响

UV-B辐射敏感性的一个重要指标<sup>[22]</sup>。本研究表明,UV-B辐射增强在一定程度上抑制了珙桐幼苗的生长,这可能是由于UV-B增强引起植物生长素 IAA 被氧化,IAA 代谢受阻。也有人认为 UV-B 辐射导致植物发生形态学变化是植物对

UV-B辐射响应的一种正常的光形态建成反应<sup>[22]</sup>。叶绿素是植物进行光合作用的主要色素,叶绿素含量高低与植物的光合功能密切相关<sup>[23]</sup>,叶绿素含量在一定程度上能反映植物光合作用的强弱。研究表明,叶绿素含量变化并不一定导致光合速率产生对应的波动变化<sup>[13]</sup>。UV-B辐射增强会降低大多数植物叶片的叶绿素含量<sup>[22,24-25]</sup>,叶绿素 a 对 UV-B 辐射增强最为敏感<sup>[26]</sup>。也有研究表明,UV-B辐射增强对叶绿素含量没有影响,甚至能提高植物叶绿素含量<sup>[13]</sup>。本研究表明,UV-B辐射增强能增加叶片的叶绿素 b 和总叶绿素含量,这可能是由于植物在受到增强的 UV-B 辐射后,启动了生理防御机制,如增加了类胡萝卜素含量,使叶绿素含量不受显著影响,甚至有所增加。

UV-B辐射增强会对植物的光合作用产生不利影响<sup>[4,13,17]</sup>。引起植物光合速率降低的因素很多,如叶绿体结构发生改变、叶绿素和可溶性蛋白质分解、细胞膜透性增加、膜脂过氧化加剧、活性氧清除酶和与碳素固定有关的酶活性降低、叶片衰老加快等<sup>[13]</sup>。本研究表明,UV-B辐射增强导致珙桐幼苗光合速率下降,但影响不显著。但叶绿素含量变化并不一定导致光合速率产生对应的波动变化,这说明了引起珙桐幼苗光合速率降低的原因不仅是叶绿素 a 含量的降低,也可能是蒸腾速率、气孔导度、胞间  $\text{CO}_2$  浓度等的降低。环境胁迫对叶片净光合速率的影响是通过气孔导度、胞间  $\text{CO}_2$  浓度等的响应实现的<sup>[13]</sup>。导致植物光合速率降低的因素有气孔限制和非气孔限制。植物气孔导度降低,会限制外界  $\text{CO}_2$  向叶组织扩散。UV-B辐射增强导致珙桐幼苗的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间  $\text{CO}_2$  浓度降低,说明此

时珙桐幼苗光合速率下降主要是由气孔因素引起的。研究表明,伴随光合过程出现碳水化合物的积累是非常普遍的现象<sup>[22]</sup>。本研究中 UV-B 辐射增强引起的叶片碳含量显著降低可能是由于叶片净光合速率降低,也可能是由于碳被运输到植物的其他部位,如茎、根等,合成对 UV-B 辐射增强响应的其他物质。故开展植物地下部分对 UV-B 辐射增强响应研究很有必要<sup>[27-28]</sup>。研究表明,UV-B 辐射增强增加了植物叶片全氮含量<sup>[12,22]</sup>,改变了营养元素在植物各个组织间的分配<sup>[4]</sup>。有学者认为,UV-B 辐射对植物叶片氮含量无影响。本研究表明,UV-B 辐射增强增加了植物叶片的全氮含量,但影响不显著。这可能是由于 UV-B 抑制了幼苗的生长并改变了氮在植物体内的分配<sup>[12]</sup>,表明不同树种对 UV-B 增强辐射采取了不同的反应模式。本研究显示,UV-B 辐射增强影响植物对矿质元素的吸收和迁移,可能是由于植物各种生理生化和营养代谢过程变化导致了 UV-B 辐射下植物营养元素含量的改变。这种变化可能会影响陆地生物圈的碳、氮等元素的循环。叶片是植物对环境胁迫敏感的器官,因此叶片往往能直接反映外界环境对植物的影响。UV-B 辐射增强处理下,珙桐幼苗叶子发生明显的卷曲和皱缩现象,并出现坏死斑点,这与姚晓芹的研究结果<sup>[4]</sup>一致。幼苗叶面积减小,减少了接受 UV-B 辐射的面积,这是幼苗对 UV-B 辐射增强的一种防御机制。

### 3.2 额外的氮供应影响珙桐幼苗对 UV-B 辐射增强的响应

Levizou 等报道,在高营养水平下,UV-B 辐射增强处理有助于橙花糙苏 (*Phlomis fruticosa*) 幼苗的生长<sup>[29]</sup>。研究表明,UV-B 辐射对富含硝酸盐条件下生长的黄瓜幼苗生长抑制作用较大<sup>[14]</sup>。本研究表明,UV-B 辐射对植物生长的影响与氮营养有关。氮供应对 UV-B 辐射增强下珙桐幼苗的株高和基径增长量的降低有一定的缓和作用。这表明不同物种对全球变化的敏感性不同;同时也说明全球变化下,UV-B 辐射增强和氮供应联合作用对某些植株生长并没有显著的影响。然而,对某些植物而言,UV-B 辐射增强和氮供应共同作用将会抑制其生长,如云杉、冷杉、色木槭<sup>[4]</sup>、黄瓜幼苗<sup>[14]</sup>等。在 UV-B 辐射增强与氮供应的共同作用下,植物叶片总叶绿素含量降低<sup>[4]</sup>。研究表明,UV-B 辐射增强处理下的黄瓜幼苗叶片叶绿素 a 含量随着施氮量增加而降低<sup>[14]</sup>。本研究表明,氮的施加导致 UV-B 辐射增强下珙桐幼苗叶片总叶绿素、叶绿素 a、叶绿素 b 含量降低,且随施氮浓度增加,降低程度明显。这可能是因为,UV-B 辐射增强下氮的施加使珙桐幼苗产生了抵抗 UV-B 胁迫的物质。UV-B 辐射增强显著抑制了许多植物的光合作用。氮供应在一定程度上对植物光合作用有利。伴随着全球气候变化,陆地生态系统可能会同时出现 UV-B 辐射增强和氮营养增加(氮沉降)<sup>[30]</sup>。本研究表明,氮营养增加对 UV-B 胁迫下珙桐幼苗光合参数的降低有一定的缓和作用,但是这种缓和作用不足以抵消其所受到的伤害。这充分说明,伴随着全球变化,UV-B 辐射增强和氮增加(氮沉降)联合作用对珙桐幼苗光合作用影响较小,珙桐幼苗对气候变化的适应性可能比许多物种强。UV-B 辐射增强常会显著降低植物的碳含量。本研究表明,氮施加在一定程度上缓和了 UV-B 处理下珙桐幼苗叶片碳含量降低的趋势。姚晓芹认为,UV-B 辐射增强处理下,氮供应提高

了红棕子叶片氮含量,氮供应对 UV-B 辐射下的色木槭叶片的氮含量影响不显著<sup>[4]</sup>,本研究结论与其类似。

本研究表明,UV-B 辐射增强处理抑制了珙桐幼苗的株高增长量、基径增长量、净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度、全碳含量,不利于幼苗生长,但珙桐幼苗对 UV-B 辐射有一定的防御力。施加氮素能在一定程度上缓解 UV-B 对珙桐幼苗的损害。但是氮素与紫外线辐射对珙桐幼苗产生影响的生理机制和分子机制还不清楚,这将是今后的研究重点。

### 参考文献:

- [1] Glass D M. Nitrogen use efficiency of crop plants: physiological constraints upon nitrate adsorption [J]. Crit Rev Plant Sci, 2003, 22: 453-470.
- [2] 王宁宁. 珙桐苗木光合特性对干旱、光照强度和二氧化碳浓度的响应 [D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- [3] Athanasiou K, Dyson B C, Webster R E, et al. Dynamic acclimation of photosynthesis increases plant fitness in changing environments [J]. Plant Physiology, 2010, 152 (1): 366-373.
- [4] 姚晓芹. 青藏高原东缘几种树苗对增强紫外线-B 和氮供应的响应 [D]. 成都: 中国科学院研究生院成都生物研究所, 2007.
- [5] 蔡锡安, 彭少麟, 夏汉平. 不同演替阶段树种的光合和生长对增强 UV-B 辐射的响应 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2007, 46 (2): 72-76.
- [6] 李德军, 莫江明, 方运霆, 等. 模拟氮沉降对三种亚热带树苗生长和光合作用的影响 [J]. 生态学报, 2004, 24 (5): 876-882.
- [7] 曹际玲, 朱建国, 马红亮, 等. 不同氮素水平下冬小麦叶片酚酸类物质代谢对 FACE 的响应 [J]. 中国生态农业学报, 2009, 17 (5): 837-841.
- [8] Yao X Q, Liu Q. Changes in photosynthesis and antioxidant defenses of *Picea asperata* seedlings to enhanced ultraviolet-B and to nitrogen supply [J]. Physiologia Plantarum, 2007, 129 (2): 364-374.
- [9] Correia C M, Pereira J M, Coutinho J F, et al. Ultraviolet-B radiation and Nitrogen affect the photosynthesis of maize: a Mediterranean field study [J]. European Journal of Agronomy: the Journal of the European Society for Agronomy, 2005, 22: 337-347.
- [10] 瞿先能, 陈宗瑜, 郭世昌, 等. UV-B 辐射的增强对作物形态及生理功能的影响 [J]. 中国农业气象, 2006, 27 (2): 102-106.
- [11] Weih M, Johanson U, Gwynn-Jones D. Growth and nitrogen utilization in seedlings of mountain birch (*Betula pubescens* ssp. *tortuosa*) as affected by ultraviolet radiation (UV-A and UV-B) under laboratory and outdoor conditions [J]. Trees-Structure and Function, 1998, 12: 201-207.
- [12] 陈 兰, 张守仁. 增强 UV-B 辐射对暖温带落叶阔叶林土庄绣线菊水分利用效率、气孔导度、叶氮素含量及形态特性的影响 [J]. 植物生态学报, 2006, 30 (1): 47-56.
- [13] 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.
- [14] Hunt J E, Mcneil D L. Nitrogen status affects UV-B sensitivity of cucumber [J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1998, 25: 79-86.
- [15] 方 兴. 增强 UV-B 辐射及不同水平氮素条件下谷子的生理生态研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2008.

油秋平,支崇远,王璐,等.赤水河底栖硅藻多样性及其与重金属相关性分析[J].江苏农业科学,2013,41(10):347-349.

# 赤水河底栖硅藻多样性及其与重金属相关性分析

油秋平,支崇远,王璐,周玉春

(贵州师范大学生命科学学院,贵州贵阳 550001)

**摘要:**为了解赤水河底栖硅藻多样性及其与水体中重金属含量的关系,对赤水河底栖硅藻及水体中重金属含量进行调查,并对底栖硅藻多样性与水体中重金属含量的相关性进行分析。结果表明:共 164 个底栖硅藻种(包括变种及变型),隶属 7 目 11 科 30 属,其中异极藻属 29 种,占总藻种数的 17.68%;桥弯藻属 24 种,占总藻种数的 14.63%;舟形藻属 23 种,占总藻种数的 14.02%;脆杆藻属 18 种,占总藻种数的 10.98%;底栖硅藻的丰度与水体中 Cr 含量的相关性极显著( $r=0.896, P<0.01$ ),与水体 As 含量显著相关( $r=0.421, P<0.05$ )。*Synedra gaillonii* 和 *Gomphonema pseudosphaerophorum* 是赤水河水体中 Cr、As 的指示硅藻属种。

**关键词:**赤水河;底栖硅藻;重金属;相关性分析

**中图分类号:**Q945.79 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2013)10-0347-03

在河流中,底栖硅藻生物多样性要远远超过其他藻类<sup>[1]</sup>。硅藻已广泛用于河流水质监测与生态健康的指示生物类群<sup>[2-3]</sup>。硅藻的生长会受到重金属污染的影响,其中镉、铅、铜、汞等能在藻细胞内大量富集而干扰细胞代谢过程,最终影响藻类的生长和繁殖<sup>[4]</sup>。硅藻对重金属的生态适应机

制则主要是通过表面官能团络合反应以及释放的有机配体化合物吸附重金属<sup>[5]</sup>。Duong 等<sup>[6]</sup>研究了硅藻与镉浓度之间的相关性,发现谷皮菱形藻、内丝藻(*Encyonema minutum*)、双菱藻(*Surirella angusta*)及微小异极藻(*Gomphonema parvulum*)与镉浓度之间呈正相关,表明这些硅藻能够耐受高浓度的镉污染。Cattaneo 等<sup>[7]</sup>研究了加拿大矿区湖泊中重金属污染下硅藻群落和种群水平变化,表明硅藻群落对重金属污染具有很高的耐受能力。

赤水河为长江中上游支流,全长 523 km,流域面积 2.04 万 km<sup>2</sup><sup>[8]</sup>。煤电开发、白酒酿制、农业生产、旅游开发等是赤水河流域的代表产业,酿造业尤为发达,茅台酒和郎酒的生产基地茅台镇就坐落在赤水河畔<sup>[9]</sup>。本试验以赤水河底栖硅藻为研究对象,对河水中的 Pb、Cu、Cr、Cd、Pb 和 As 6 种

收稿日期:2013-03-06

基金项目:国家自然科学基金(编号:41062005、30560011);贵州省国际科技合作项目[编号:黔科合外字 G 字(2012)800107];贵州省科技支撑计划(2012);贵州省国际科技合作重点项目[编号:(2012)800107]。

作者简介:油秋平(1984—),女,山东菏泽人,硕士研究生,研究方向为植物生理生态。E-mail: yqp\_666@126.com。

通信作者:支崇远,博士,教授。E-mail: zhicy@126.com。

[16]朱利君,苏智先,胡进耀,等.珍稀濒危植物珙桐过氧化物酶活性和丙二醛含量[J].生态学报,2009,28(3):451-455.

[17]王海霞.增强 UV-B 辐射对喜树幼苗的生理影响[D].西安:西北大学,2008.

[18]刁丽军,顾松山,王普才,等.北京地面紫外辐射(光谱)的观测与分析[J].气象科学,2003,23(1):22-30.

[19]杨永清.沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.)在低温和增强 UV-B 胁迫下的生态生理反应[D].成都:中国科学院研究生院成都生物研究所,2006.

[20]Xu X, Zhao H, Zhang X, et al. Different growth sensitivity to enhanced UV-B radiation between male and female *Populus cathayana* [J]. Tree Physiology, 2010, 30(12): 1489-1498.

[21]贺正山,蔡志全,蔡传涛.不同水分和施氮量对催吐萝芙木光合特性和生长的影响[J].中国生态农业学报,2010,18(4):758-764.

[22]吕艳伟.增强 UV-B 辐射对粗枝云杉(*Picea asperata* Mast.)和青杨(*Populus cathayana* Rehd.)的影响[D].成都:中国科学院研究生院成都生物研究所,2008.

[23]徐兴利,金则新,何维明,等.不同增温处理对夏蜡梅光合特性和叶绿素荧光参数的影响[J].生态学报,2012,32(20):6343-6353.

[24]师生波,尚艳霞,师瑞,等.高山植物美丽风毛菊 PSII 光化学效率和光合色素对短期增补 UV-B 辐射的响应[J].植物生态学报,2012,36(5):420-430.

[25]韩超.模拟增温与 UV-B 辐射增强对云杉种子萌发和幼苗生长的影响[D].成都:中国科学院成都生物研究所,2008.

[26]瞿先能,强继业,陈宗瑜,等. UV-B 辐射对云南报春花叶绿素含量变化的影响[J].农业环境科学学报,2006,25(3):587-591.

[27]Caldwell M M. Plant response to solar ultraviolet radiation [J]. Physiol Plant Ecol, 1981, 12: 169-197.

[28]Mackerness S H, Surplus S L, Jordan B R, et al. Ultraviolet-B effects on transcript levels for photosynthetic genes are not mediated through carbohydrate metabolism [J]. Plant, Cell & Environment, 1997, 20: 1431-1437.

[29]Levizou E, Manetas Y. Combined effects of enhanced UV-B radiation and additional nutrients on growth of two Mediterranean plant species [J]. Plant Ecology, 2001, 154: 181-186.

[30]Shellv K, Heraud P, Beardall J. Nitrogen limitation in *Dunaliella tertiolecta* (Chlorophyceae) leads to increased susceptibility to damage by ultraviolet-B radiation but also increased repair capacity [J]. Journal of Phycology, 2002, 38: 713-720.