

Si 缓解 UV-B 辐射增强对大豆幼苗生长的影响

王玉州, 翁 傲, 张明才, 李建民

(中国农业大学 农学与生物技术学院/农业部农作制度开放实验室, 北京 100193)

**摘 要:**以中黄 35、华严 0926 和华严 1 号为材料,研究了硅(Si)和紫外(UV-B)辐射增强(5.4 kJ·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>)对大豆幼苗生长的影响以及 Si 对 UV-B 辐射增强的缓解效应。结果表明:UV-B 辐射增强对中黄 35 叶绿素含量和生物量的抑制作用较明显,但对叶面积、节间长度和株高的影响较小,而华严 0926 和华严 1 号对 UV-B 辐射增强的响应与中黄 35 相比有着明显的不同;Si 在一定程度上缓解了 UV-B 辐射对大豆生物量和植株形态等方面的影响。由此判断,选择合适的品种和使用硅肥对大豆抗 UV-B 辐射栽培具有重要意义。

**关键词:**大豆;UV-B 辐射;硅;形态;生物量

**中图分类号:**S565. 1      **文献标识码:**A      **DOI:**10. 11861/j. issn. 1000-9841. 2015. 03. 0522

Silicon Alleviates the Effects of Enhanced UV-B Radiation on Soybean Seedling Growth

WANG Yu-zhou, WENG Ao, ZHANG Ming-cai, LI Jian-min

(College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University/Key Laboratory of Farming System, Ministry of Agriculture, Beijing 100193, China)

**Abstract:** In this experiment, three soybean cultivars, Zhonghuang 35, Huayan 0926 and Huayan 1, were employed as materials and the effects of silicon on soybean seedling growth under enhanced UV-B radiation (5.4 kJ·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>) were determined. The main results are as follows:the enhanced UV-B radiation showed much more inhibiting effect on the biomass and chlorophyll content rather than the leaf areas, internode lengths and plant heights in Zhonghuang 35, while there were significant differences showed in Huayan 0926 and Huayan 1. Silicon could alleviate the adverse effects of enhanced UV-B radiation on soybean seedling growth to some extent. It is suggested that there is of great significance to select suitable cultivar and apply silicon fertilizer in soybean production for ultravioresistant cultivation.

**Keywords:** Soybean; UV-B radiation; Silicon; Morphology; Biomass

全球气候变化是人类面临的重大挑战。其中,由平流层臭氧损耗导致的地表紫外-B(UV-B,280~320 nm)辐射增强因对地球生态系统和农业生产具有重大影响而广受关注<sup>[1-3]</sup>。植物受 UV-B 辐射的影响包括 DNA 损伤、膜脂过氧化、产生胁迫反应、改变次生代谢和光形态建成等多个层面<sup>[3-4]</sup>。在大田生产条件下,UV-B 辐射增强会引起生物量、株高和叶面积等下降,从而显著降低作物产量<sup>[5-6]</sup>。

选用抗紫外品种和施用硅肥是缓解 UV-B 辐射增强影响的有效措施。有研究表明,在 UV-B 辐射条件下,不同豇豆品种在光合作用、粒重及地上部干重等方面存在显著差异<sup>[7]</sup>;不同纬度地区的大豆品种对 UV-B 的敏感性存在显著差异<sup>[8]</sup>。硅(Si)是土壤中第二大丰富元素,研究表明 Si 能通过强化细胞壁、激活防卫机制等方式缓解各种生物与非生物胁迫<sup>[9-10]</sup>。本试验以不同大豆品种为材料,研究探讨了 Si 缓解 UV-B 辐射增强对幼苗生长影响的效应,以期为大豆抗 UV-B 辐射栽培提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2012~2013 年在中国农业大学农学与生物技术学院进行,供试品种中黄 35 由中国农业科学院作物科学研究所提供,华严 0926 和华严 1 号由西南大学提供。试验采取裂区设计,3 个品种为主区,每个品种设置 4 个处理:(1)CK,不施 Si、不加 UV-B;(2)Si,施 Si、不加 UV-B;(3)UV,不施 Si、加 UV-B;(4)Si + UV,施 Si、加 UV-B。每处理 3 次重复。

1.2 试验方法

1.2.1 材料培养 精选大豆种子,经次氯酸钠消毒,用吸水纸包埋并充分浸水后置于光照培养室中培养,定期浇水。待两片真叶露出(约播后 7 d),挑选生长一致的幼苗移至盛有 1/2 Hogland 营养液的塑料钵中培养(应用空气压缩机和软胶管对营养液进行 24 h 通气),3 d 后更换成 Hogland 营养液,以

收稿日期:2014-06-11  
基金项目:国家“十二五”科技支撑计划(2011BAD16B15)。  
第一作者简介:王玉州(1990-),男,硕士,主要从事作物栽培生理研究。E-mail:wangyuzhou-wyzh@163.com。  
通讯作者:李建民(1958-),男,教授,博导,主要从事作物抗逆栽培生理研究。E-mail:ljmsmylny@cau.edu.cn。

后每 3 d 更换 1 次。生长室的培养条件为:光周期为 12 h/12 h(光照/黑暗),光照强度为 400  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,温度为 25/22℃(昼/夜),相对湿度为 50%。

1.2.2 Si 处理 在大豆幼苗第 1 复叶出现时,将所有材料分成 2 组:一组为 CK,营养液 Si 浓度为 0;另一组为 Si 处理,Si 浓度为 1.6  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (硅酸钾,  $\text{K}_2\text{SiO}_4\cdot n\text{H}_2\text{O}$ )。为消除  $\text{K}^+$  的影响,在 CK 组加入相同单位  $\text{KNO}_3$ ,并用 1  $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  的  $\text{H}_2\text{SO}_4$  和 KOH 将 pH 调至 6.5~6.8。

1.2.3 UV-B 处理 在大豆幼苗第 3 复叶出现时,将 CK 组和 Si 组材料各分成 2 小组:第 1 小组置于紫外灯管(中国电光源研究所,UV 308,40 W,灯管发射波长在 290~320 nm)下,进行 UV-B 辐照增强处理(UV,Si+UV 处理);第 2 小组置于与紫外灯管相同功率的日光灯下(CK,Si 处理)。为防止 UV-B 辐射对相邻处理的影响,处理间用 1.5 m 高的 PVC 阳光板(可吸收 90% 以上的 UV-B 辐射)隔开。紫外辐射每天进行 7 h(9:00~16:00),用 742 型紫外辐射仪(北京师范大学生产)测定 UV-B 辐射强度,试验实际强度为 5.4  $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。每 3 d 调整一次灯管与植株冠层之间的距离(80~100 cm)。

1.2.4 测定项目 叶面积使用 LI3000C 叶面积仪进行测定,UV-B 辐射 7 d 后,中黄 35 和华严 1 号的第 4 复叶已展开(尚未定形),而华严 0926 第 5 复叶刚展开,第 4 复叶已定形。叶面积测定以三出复叶的中间小叶片为对象。叶绿素含量参照 Arnon<sup>[11]</sup>的方法,取样标准为 0.1 g。

节间长度和株高用直尺测量,株高取子叶节至

心叶的高度。  
鲜重和干重测定时,将待测植株冲洗干净,用滤纸吸干表面水分,分为地上部和根系两个部分,用分析天平称取鲜重;然后置于 105℃ 鼓风干燥箱中杀青 15 min,再于 80℃ 烘箱中烘干至恒重,称取干重。

1.3 数据分析

使用 Excel 2007 和 SPSS 16.0 软件进行数据处理,采用 LSD 法比较差异显著性( $P=0.05$ )。

2 结果与分析

2.1 Si 和 UV-B 对大豆幼苗叶面积的影响

Si 处理和 UV-B 处理分别开始于主茎第 1 和第 3 复叶出现时,因此 Si 处理应对第 2~4 复叶均有影响,而 UV-B 处理则主要影响第 3 和第 4 复叶。由表 1 可知,中黄 35 的 Si 处理对第 2 和第 3 复叶面积影响不明显,而显著增加了第 4 复叶面积;UV-B 处理显著抑制了第 3 和第 4 复叶面积,Si 处理在第 4 复叶上表现出显著的缓解效应;华严 0926 的结果表明,Si 处理显著促进了第 4 复叶面积的增加,缓解了 UV-B 处理对第 3 复叶面积的显著影响;Si 处理仅对华严 1 号第 2 复叶面积产生了显著地增加效应,但能缓解 UV-B 处理对第 3 复叶面积的显著影响。

3 个品种相比,受 UV-B 辐射影响,中黄 35 第 3 和第 4 复叶面积分别下降了 17.7% 和 23.0%,华严 0926 分别下降了 41.1% 和 22.7%,华严 1 号则分别下降了 34.6% 和 35.1%。由此判断,UV-B 辐射对中黄 35 叶面积的影响明显小于华严 0926 和华严 1 号。

表 1 Si 与 UV-B 对中黄 35、华严 0926 和华严 1 号叶面积的影响  
Table 1 Effect of Si and UV-B on leaf areas of soybean seedlings ( $\text{cm}^2$ )

品种 Cultivar	处理 Treatment	第 2 片叶 2nd leaf	第 3 片叶 3rd leaf	第 4 片叶 4th leaf
中黄 35 Zhonghuang 35	CK	23.23 b	43.70 a	27.69 b
	Si	24.50ab	44.01 a	32.69 a
	UV	28.19 a	35.95 b	21.32 c
	Si + UV	27.65 a	33.89 b	27.39 b
华严 0926 Huayan 0926	CK	18.02 a	42.69 a	37.61 b
	Si	16.82 a	42.41 a	48.04 a
	UV	21.03 a	25.15 b	29.06 c
华严 1 号 Huayan 1	Si + UV	19.48 a	35.20 a	27.86 c
	CK	27.98 c	47.48 a	32.77 a
	Si	31.60 ab	45.90 a	36.15 a
	UV	33.00 a	31.04 c	21.28 b
	Si + UV	29.36 bc	37.13 b	24.13 b

同一列的不同字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。  
Values in the same columns followed by different letter are significantly different according to Fisher's protected LSD ( $P<0.05$ ). The same below.

2.2 Si 和 UV-B 对大豆幼苗叶片叶绿素含量的影响

由表 2 可知,对于中黄 35,经 Si 处理后,其叶片中叶绿素 a、b 和叶绿素总量均显著升高;紫外处理显著降低了叶绿素 b 和叶绿素总量,但未对叶绿素 a 含量产生显著影响;Si 处理缓解了紫外辐射对叶片 a、b 和叶绿素总量的抑制作用。华严 0926 的数据表明,Si 处理显著提高了叶片中叶绿素 a 的含量,但对叶绿素 b 和叶绿素总量无影响;紫外处理抑制

了叶片中叶绿素 a、b 和叶绿素总量的含量,但 Si 处理可以缓解紫外辐射对叶绿素 b 和叶绿素总量的影响。从华严 1 号的叶绿素含量来看,Si 处理并未对其产生显著影响,UV-B 辐射仅降低了叶绿素 a 的含量,但 Si 处理缓解了紫外辐射的影响。

3 个品种相比,Si 对中黄 35 的影响最大,对华严 0926 和华严 1 号的影响较小;紫外处理显著抑制了中黄 35 和华严 0926 叶片中的叶绿素含量,对华严 1 号的影响较小。

表 2 Si 与 UV-B 对大豆幼苗叶片叶绿素含量的影响

Table 2 Effects of Si and UV-B on the chlorophyll contents of soybean seedling leaves (mg·g<sup>-1</sup>)

品种 Cultivar	处理 Treatment	叶绿素 a Chlorophyll a	叶绿素 b Chlorophyll b	叶绿素总量 Total chlorophyll
中黄 35 Zhonghuang 35	CK	1.64 c	1.57 b	3.21 b
	Si	1.96 a	1.87 a	3.83 a
	UV	1.64 c	0.92 c	2.56 c
	Si + UV	1.78 b	1.48 b	3.26 b
华严 0926 Huayan 0926	CK	2.40 b	1.67 a	4.07 ab
	Si	2.58 a	1.76 a	4.34 a
	UV	2.37 b	1.42 b	3.79 b
	Si + UV	2.48 ab	1.61 a	4.09 a
华严 1 号 Huayan 1	CK	2.48 a	1.56 a	4.04 a
	Si	2.52 a	1.60 a	4.12 a
	UV	2.38 b	1.52 a	3.90 a
	Si + UV	2.50 a	1.58 a	4.08 a

2.3 Si 和 UV-B 对大豆幼苗节间长度和株高的影响

从表 3 的中黄 35 的数据来看,Si 处理显著增加了其株高和第 4 节间的长度,对第 2、3 节间的长度无显著影响,UV-B 辐射处理显著降低了中黄 35 的株高,但并未对第 2、3、4 节间长度产生显著影响,Si 处理缓解了紫外辐射对中黄 35 株高的影响。对于华严 0926,Si 处理显著增加了第 2、4 节间的长度,对第 3 节间长度和株高无显著影响;UV-B 处理降低了第 4 节间长度和株高,而 Si 处理缓解了紫外辐射对第 4 节间的影响。华严 1 号的结果表明,Si 处理显著增加了第 4 节间长度和株高,第 2、3 节间长度未受显著影响,紫外处理显著降低了第 2、3 节间长度和株高,Si 处理减缓了紫外辐射对第 4 节间长度和株高的抑制作用。

从 3 个品种的对比来看,Si 处理对于 3 个品种植株第 4 节间长度均有明显的促进作用,增幅分别为 20.4%、16.1%、15.2%;紫外处理下第 4 节间长度均呈下降趋势,降低幅度为 10.9%、17.5% 和

25.0%;而紫外辐射下,Si 处理减缓了 UV-B 辐射对第 4 节间长度的抑制作用。

2.4 Si 和 UV-B 对大豆幼苗单株鲜重和干重的影响

从 3 个品种的单株鲜重和干重数据(表 4)看,对于中黄 35,Si 处理显著增加了植株根部鲜重和地上部分干重,紫外辐射下植株地上和地下部分的鲜重、干重均显著下降,Si 处理减缓了紫外辐射对植株根部干重和茎叶干重、鲜重的负面影响。Si 处理下,华严 0926 仅茎叶干重呈现显著增加,紫外辐射处理对植株地上部的鲜重起到了抑制作用,而 Si 处理可以减缓这一负面影响。华严 1 号植株的鲜重及地上部分干重在 Si 处理下呈显著上升,紫外辐射仅显著降低了茎叶鲜重量,同样 Si 处理延缓了紫外辐射对茎叶鲜重的抑制作用。

3 个品种中,Si 处理均对植株生物量表现出了一定的促进作用,紫外辐射对中黄 35 和华严 0926 的干重、鲜重影响较大,华严 1 号所受影响较小。

表 3 Si 与 UV-B 对大豆幼苗节间长度和株高的影响

Table 3 Effects of Si and UV-B on the internode lengths and plant height of soybean seedlings

品种 Cultivar	处理 Treatment	第 2 节间长度	第 3 节间长度	第 4 节间长度	株高
		2nd internode length /mm	3rd internode length /mm	4th internode length /mm	Plant length /cm
中黄 35 Zhonghuang 35	CK	46.5 a	86.0 ab	105.3 b	59.4 b
	Si	47.5 a	92.5 a	126.7 a	64.3 a
	UV	47.3 a	78.9 b	93.8 b	51.8 c
	Si + UV	43.9 a	86.6 ab	97.1 b	56.5 b
华严 0926 Huayan 0926	CK	38.2 b	66.9 a	74.5 b	53.8 a
	Si	61.5 a	74.2 a	86.5 a	53.9 a
	UV	31.7 b	67.1 a	61.5 c	49.7 b
	Si + UV	56.9 a	63.9 a	76.6 ab	51.6 ab
华严 1 号 Huayan 1	CK	93.5 ab	139.3 a	182.7 b	90.4 b
	Si	95.6 a	140.3 a	210.5 a	98.9 a
	UV	84.6 b	116.0 b	137.0 d	80.7 c
	Si + UV	83.9 b	123.0 b	162.5 c	88.5 b

表 4 Si 与 UV-B 对大豆幼苗鲜重和干重的影响

Table 4 Effects of Si and UV-B on the fresh and dry matter weights of soybean seedlings

品种 Cultivar	处理 Treatment	鲜重 Fresh weight /g		干重 Dry matter weight /g	
		根 Root	茎叶 Shoot	根 Root	茎叶 Shoot
中黄 35 Zhonghuang 35	CK	7.05 b	21.22 a	0.89 ab	3.74 b
	Si	7.73 a	20.09 a	1.08 a	4.80 a
	UV	6.33 c	14.26 c	0.62 c	3.13 c
	Si + UV	6.68 bc	15.81 b	0.85 b	4.00 b
华严 0926 Huayan 0926	CK	7.05 a	19.27 a	0.94 ab	5.25 bc
	Si	7.22 a	19.01 a	1.19 a	7.34 a
	UV	7.11 a	16.31 c	0.82 b	4.31 c
	Si + UV	5.91 b	17.61 b	1.11 ab	6.08 b
华严 1 号 Huayan 1	CK	5.91 bc	12.90 c	0.84 a	4.60 b
	Si	6.47 a	17.12 a	1.03 a	5.88 a
	UV	5.69 c	11.83 d	0.90 a	4.65 b
	Si + UV	6.36 ab	14.27 b	1.07 a	5.28 ab

3 结论与讨论

Kadur 等<sup>[12]</sup>通过除去 UV-B 与 UV-A/B 的方法研究了紫外处理对大豆形态及光合系统的影响,结果显示,将自然光照中的紫外滤去后,大豆的生物量、株高等都呈明显上升现象,由此证明了 UV-B 对大豆生长具有抑制作用;研究还认为紫外辐射更多的是通过影响植物形态而非光合系统来影响大豆的生长。本试验通过模拟 UV-B 辐射增强的方法进一步证明了 UV-B 对大豆幼苗生长的负面效应。本试验在大豆幼苗第 3 片复叶露出时施加 UV-B 辐射,第 3、4 片叶的叶面积均呈现出不同程度的下降,

其中尤以华严 0926 和华严 1 号两个品种下降更为明显;3 个品种的第 4 节间长度和株高在 UV-B 辐射下也表现出了抑制效应。此外,UV-B 辐射对中黄 35 和华严 0926 的生物量和叶片中叶绿素的含量有较为明显的负面效应。试验结果表明,UV-B 辐射对大豆幼苗的叶面积、节间长度、叶绿素含量和植株生物量有着较为明显的抑制作用。

此前已有研究表明 Si 在提高植物应对生物和非生物胁迫方面具有重要的作用,如 Si 可通过增强抗氧化系统提高大麦和黄瓜对盐害的抗性<sup>[13-14]</sup>。从本试验 Si 处理的结果来看,施 Si 处理有利于增加 3 个品种幼苗的生物量,中黄 35 和华严 1 号的第 4

叶面积、中黄 35 的叶绿素含量以及中黄 35 和华严 1 号的株高均呈现显著的升高。由此可见 Si 对于大豆幼苗的生长有着明显的促进作用。此外, Si 在一定程度上缓解了 UV-B 辐射对大豆幼苗叶面积、节间长度、株高以及叶绿素含量和生物量等的负面影响, 进一步表明了 Si 可以作为一种抗逆元素, 对植物的生长发育起到重要的保护作用。

3 个品种在 Si 和 UV-B 处理下的表现存在差异。UV-B 辐射对于中黄 35 的影响主要集中在生物量和叶片的叶绿素含量方面, 而华严 0926 和华严 1 号在 UV-B 辐射下所受影响主要集中在形态方面, 在生物量和叶绿素含量方面变化不大。单独施 Si 处理对中黄 35 品种幼苗的促进作用更为明显, Si 处理下对幼苗进行紫外辐射, 显著减缓了 UV-B 辐射的影响; Si 处理对华严 0926 和华严 1 号的增益效应虽然没有中黄 35 明显, 但幼苗在 Si 处理下进行紫外辐射也表现出了较强的抗性。

Surabhi 等<sup>[7]</sup>的研究表明, 在 UV-B 辐射条件下, 不同品种在光合作用、粒重及地上部干重等方面存在显著差异。此外, 植物生长地区的海拔也是影响紫外辐射对其光合、生理特性的发生改变的因素之一<sup>[15-16]</sup>。由此推测, 造成不同大豆品种 UV-B 耐受性差异的原因很可能与其所处的海拔和纬度有较大关系。根据祝青林等<sup>[17]</sup>的研究, 我国紫外辐射的空间分布呈自南向北递减的趋势。低纬度、高海拔地区的紫外辐射强度往往高于高纬度低海拔地区。来自于高强度紫外辐射地区的两个云南品种, 在长期的进化过程中很可能已经拥有一套比较完善的系统能够抵抗高剂量的 UV-B 辐射。因此, 纬度因素也是大豆抗 UV-B 辐射栽培中所需要考虑的因素。

参考文献

[1] Bais A F, Lubin D, Arola A, et al. Surface ultraviolet radiation: past, present and future[M]// Scientific assessment of ozone depletion: 2006, Global Ozone Research and Monitoring Project-Report Geneva: World Meteorol. Org., 2007.

[2] McKenzie R L, Bjorn L O, Bais A F, et al. Changes in biologically active ultraviolet radiation reaching the Earth's surface [J]. Photochemical & Photobiological Sciences, 2003, 2: 5-15.

[3] Wargent J J, Jordan B R. From ozone depletion to agriculture: Understanding the role of UV radiation in sustainable crop production [J]. New Phytologist, 2013, 197: 1058-1076.

[4] Zlatev Z S, Lidon F J C, Kaimakanova M. Plant physiological responses to UV-B radiation [J]. Emirates Journal of Food and Agriculture, 2012, 24: 481-501.

[5] Searles P S, Flint S D, Caldwell M M. A meta-analysis of plant

field studies stimulating stratospheric ozone depletion [J]. Oecologia, 2001, 127: 1-10.

[6] Caldwell M M, Bornman J F, Ballare C L, et al. Terrestrial ecosystems, increased solar ultraviolet radiation, and interactions with other climate change factors [J]. Photochemical & Photobiological Sciences, 2007, 6(3): 252-266.

[7] Surabhi G K, Reddy K R, Singh S K. Photosynthesis, fluorescence, shoot biomass and seed weight responses of three cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) cultivars with contrasting sensitivity to UV-B radiation [J]. Environmental and Experimental Botany, 2009, 66(2): 160-171.

[8] Sanjay S, Sunita K, Pandey G G. Intraspecific variation in sensitivity to ambient ultraviolet-B radiation in growth and yield characteristics of eight soybean cultivars grown under field conditions [J]. Brazilian Journal of Plant Physiology, 2011, 23: 197-202.

[9] Epstein E. The anomaly of silicon in plant biology [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1994, 91: 11-17.

[10] Liang Y C, Chen Q, Liu Q, et al. Exogenous silicon (Si) increases antioxidant enzyme activity and reduces lipid peroxidation in roots of saltstressed barley (*Hordeum vulgare* L.) [J]. Journal of Plant Physiology, 2003, 160: 1157-1164.

[11] Arnon D I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in beta vulgaris [J]. Plant Physiology, 1949, 24(1): 1-15.

[12] Kadur G, Swapan B, Sunita K, et al. Growth enhancement of soybean (*Glycine max*) upon exclusion of UV-B and UV-B/A components of solar radiation: Characterization of photosynthetic parameters in leaves [J]. Photosynthesis Research, 2007, 94(2-3): 299-306.

[13] Zhua Z J, Wei G Q, Li J, et al. Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.) [J]. Plant Science, 2004, 167: 527-533.

[14] Ma J F. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2004; 50(1), 11-18.

[15] 彭慧超, 韩发, 师生波, 等. 3 种高山植物紫外吸收物质含量随海拔与季节的变化特征 [J]. 西北植物学报, 2010, 30(6): 1197-1203. (Peng H C, Han F, Shi S B, et al. Characteristics of seasonal and altitude variation of UV-absorbing compounds content in three alpine plants on Qinghai Tibet Plateau [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2010, 30(6): 1197-1203.)

[16] 朱建国, 郝文芳, 赵洁, 等. 增强 UV-B 辐射对达乌里胡枝子紫外吸收物质和渗透调节物质含量的影响 [J]. 北方园艺, 2012(5): 13-17. (Zhu J G, Hao W F, Zhao J, et al. The effects of enhance UV-B radiation on the content variation of UV-absorbing compounds and adjusting osmotic substances of *Lespedeza davurica* [J]. Northern Horticulture, 2012(5): 13-17.)

[17] 祝青林, 于贵瑞, 蔡福, 等. 中国紫外辐射的空间分布特征 [J]. 资源科学, 2005, 27(1): 108-113. (Zhu Q L, Yu G R, Cai F, et al. Spatialization research on ultraviolet radiation in China [J]. Resources Science, 2005, 27(1): 108-113.)