

不同海拔地区紫外线B 辐射状况及植物 叶片紫外线吸收物质含量的分析

* 师生波 贲桂英 韩 发

(中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001)

摘 要 对不同海拔地区的太阳UV-B 辐射和植物叶片的光学特性进行了比较研究。结果表明: 位于高海拔地区的海北高寒草甸生态系统定位站, 太阳UV-B 辐射明显高于相近纬度的西宁、兰州和南京地区。UV-B 辐射与总辐射和PAR 的日变化规律相似, 都受太阳高度角的直接影响, 在当地太阳正午时最高。UV-B/Q 的日变化也为单峰曲线, 海北站地区的UV-B/Q 高于西宁的同期测定结果。对珠芽蓼等植物的研究表明, 生长于海北站地区的珠芽蓼, 其叶片中紫外线吸收物质的含量明显高于西宁的同种植物, 也略高于海拔较高的达坂山和小达坂山山顶的同种植物。叶绿素含量以海北站珠芽蓼最低, 达坂山和小达坂山的同种植物最高。珠芽蓼叶片中类胡萝卜素的含量以西宁最低, 海北站、达坂山和小达坂山依次升高。海北站矮嵩草与从海北站移植到西宁生长4年的同种植物相比, 叶片中紫外线吸收物质、叶绿素、类胡萝卜素的变化与生长于两地区的珠芽蓼相同。

关键词 海拔 太阳UV-B 辐射 珠芽蓼 紫外线吸收物质 叶绿素

ANALYSIS OF THE SOLAR UV-B RADIATION AND PLANT UV-B-ABSORBING COMPOUNDS IN DIFFERENT REGIONS

SHI Sheng-Bo BEN Gui-Ying and HAN Fa

(Northwest Plateau Institute of Biology, The Chinese Academy of Sciences, Xining 810001)

Abstract The solar UV-B radiation was measured at different elevation regions, Haibei Alpine Meadow Ecosystem Research Station (E1 3200m), Xining Northwest Plateau Institute of Biology (E1 2300m), Lanzhou Gaolan Agricultural Ecology Research Station (E1 1800m), and Nanjing Meteorological Academy (E1 32m). The results show that the solar UV-B radiation intensity was higher in Haibei Research Station region than in Xining, Lanzhou and Nanjing in June 1993. Diurnal variation of UV-B had the same trend as total solar radiation and PAR, which were all influenced by solar angle and higher at the local sun noon time. UV-B/Q is the value of solar UV-B radiation to total solar radiation. The daily change UV-B/Q also had one peak, and the peak value in Haibei was higher than that in Xining. In spite of influence of elevation above sea level, the cloud coverage and aerosols and haze were the main factors influencing the solar UV-B radiation on the earth's surface.

* 本文于1997-11-05收稿, 1998-05-26收到修改稿。

国家自然科学基金课题(编号39270139; 39570129)。海北高寒草甸生态系统定位站基金和中国科学院“九五”重点资助项目(KZ951-A 1-204-04-01)的部分研究内容。

The characteristics of optical properties of plants reflect the adaptation capacity of plants to solar UV-B radiation. The studies of *Kobresia humilis* and *Polygonum viviparum* indicate that alpine plants had some adaptation to higher solar UV-B radiation intensity. The content of UV-B-absorbing compounds in *P. viviparum* collected from Hebei was obviously higher than that from Xining, so was that from the top of Daban Mt and XiaoDaban Mt, although they were higher in altitude than Haibei Research Station. The total chlorophyll content was lowest in Haibei, but was highest in Daban Mt and XiaoDaban Mt. The content of carotenoid in *P. viviparum* collected from Xining was the lowest, and the content increased from Haibei Research Station, Daban Mt to XiaoDaban Mt. The UV-B-absorbing compounds, chlorophyll and carotenoid in *K. humilis* collected from Xining and Haibei had the same trend as *P. viviparum* collected from the same regions.

Key words Elevation, Solar UV-B radiation, *Polygonum viviparum*, UV-B-absorbing compounds, Chlorophyll

太阳紫外线B (UV-B, 280~320nm) 辐射是太阳辐射光谱中能部分到达地表, 且对地球上的生物构成伤害的一段电磁光谱。由于大气平流层中臭氧的保护作用, 能到达地球表面的紫外线辐射主要为紫外线A (UV-A, 320~400nm) 和少量对生物具有重要意义的UV-B, 而波长低于280nm 的紫外线C (UV-C) 辐射则几乎完全被臭氧和大气层中的氧所吸收, 不能到达地表 (Caldwell, 1981)。近一个世纪以来, 由于工业废气的大量排放, 尤其是受航天及航空业等排放的氟氯烃化物 (CFCs, Chlorofluorocarbons) 的影响, 平流层中的臭氧浓度已有了一定程度的降低, 从而导致了到达地球表面的太阳UV-B 辐射明显增强 (Madronich *et al.*, 1995)。高原地区太阳直接辐射较强 (贲桂英等, 1991), 但太阳光谱中UV-B 辐射是不是也一定明显地增强? 长期生长在高原地区的植物对UV-B 辐射的适应性如何? 本文通过比较相近纬度不同海拔地区的太阳UV-B 辐射, 以及植物叶片紫外线吸收物质等的变化, 对高原植物的适应性进行了初步研究。

1 材料及方法

1.1 太阳UV-B 辐射的测定

1993年6月份, 依次在南京气象学院 (海拔32m)、兰州皋兰农业生态研究站 (海拔1800m)、西宁 (海拔2300m) 西北高原生物研究所院内和海北高寒草甸生态系统开放试验站 (海拔3200m) 4个地区对太阳辐射进行了观测。太阳总辐射、光合有效辐射 (PAR) 用美国产Li-188B 量子辐射计测定; UV-B 辐射采用北京师范大学光电仪器厂生产的紫外线辐射计测定, 光谱响应曲线的峰为297nm。观测选择全晴天进行, 分地面水平方向和垂直太阳辐射方向两种测定方式。1994年6月份, 再次在兰州、西宁及海北定位站3地区进行了重复试验。

1.2 植物叶片紫外线吸收物质的测定

以生长于西宁、达坂山、小达坂山和海北站的珠芽蓼 (*Polygonum viviparum*), 以及西宁与海北站的矮嵩草 (*Kobresia humilis*) 为材料。西宁珠芽蓼是用海北站珠芽蓼的珠芽繁

殖的,且已栽培在西北高原生物所院内生长了两年。西宁矮嵩草为1992年从海北站移植至生物所院内生长了4年的同种植物。试验选用无伤斑的完全展开叶。在不同叶片上取直径0.7cm的叶圆片共20片,分两组,分别浸入两个含10ml的79%酸化甲醇的样品瓶中,盖紧密封,避光低温保存,带回实验室后提取测定。方法见Caldwell(1968)文。

1.3 叶绿素含量的测定

选无伤斑的完全展开叶,在不同叶片上取直径0.7cm的叶圆片共20片,分两组,分别浸入10ml 45%无水乙醇和45%丙酮的提取液中,盖紧样品瓶盖并密封,避光低温保存至叶圆片无色。叶绿素含量的测定与计算见Arnon(1949)文方法。

1.4 类胡萝卜素含量的测定

叶片处理和提取方法同叶绿素的测定,类胡萝卜素含量的计算见朱广廉(1990)文。

2 结果与分析

2.1 不同海拔地区太阳UV-B辐射的日变化差异

1993年6月,我们依次在南京、兰州、西宁和海北4地区,对近地表面的太阳UV-B辐射

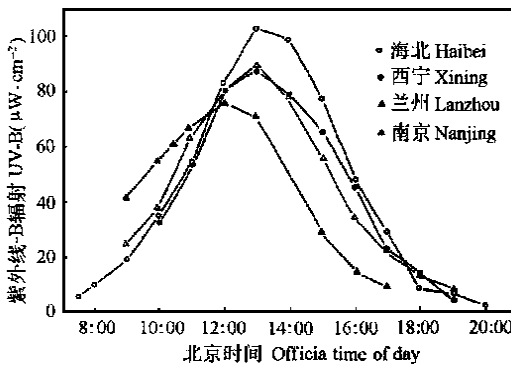


图1 不同海拔地区太阳UV-B辐射的日变化规律(1993年6月)

Fig.1 Diurnal variations of solar UV-B radiation in different elevation regions(June, 1993)

进行了观测。结果表明(图1),海北高寒草甸生态系统开放试验站地区的太阳UV-B辐射强度明显高于低海拔的其它3个地区;兰州皋兰农业生态研究站的观测结果与西宁生物所院内观测的结果很接近;4地区中南京气象学院的海拔最低,近地表面的UV-B辐射强度也最低。南京气象学院所处的地理经度与北京地区相差不大,故最高值出现在北京时间的正午时(12:00)左右。西宁、兰州和海北3地区地理位置偏西,由于地理经度与北京地区相差较大,太阳UV-B辐射的最大值出现在北京时间13:00左右,与当地太阳正午时间(Solar noon; 约为北京时间

13:00)相一致。

2.2 太阳短波辐射中UV-B、PAR和总辐射的变化

西宁和海北定位站地区近地表面太阳辐射状况的比较研究表明(图2),UV-B与太阳总辐射和PAR的日变化趋势相似,受太阳高度角的直接影响,都在当地太阳正午时最高。地面水平方向观测的UV-B辐射强度具有明显的值峰,而垂直于太阳辐射方向的观测值,其峰值不甚明显,一般在北京时间11:00与15:00之间变化较为平坦(图3)。UV-B/Q比值代表太阳短波辐射中UV-B辐射强度的相对大小。观测表明,UV-B/Q在1天中也有变化,其日变化为单峰曲线,在当地太阳正午时比值最高。比较研究表明,海北定位站地区的UV-B/Q值高于西宁的观测结果(地面水平方向观测值,分别为0.0995%和0.0872%;测定日期同图2)。

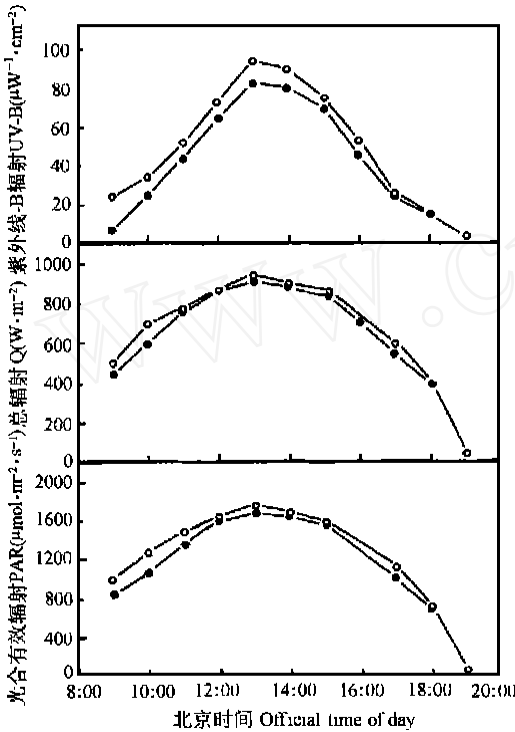


图2 西宁与海北高寒草甸地区的太阳辐射特征比较
 Fig 2 The comparison of solar radiation in Xining and Haibei regions (July 27, 1994 for Xining and 29 for Haibei, respectively)
 海北 Haibei 西宁 Xining

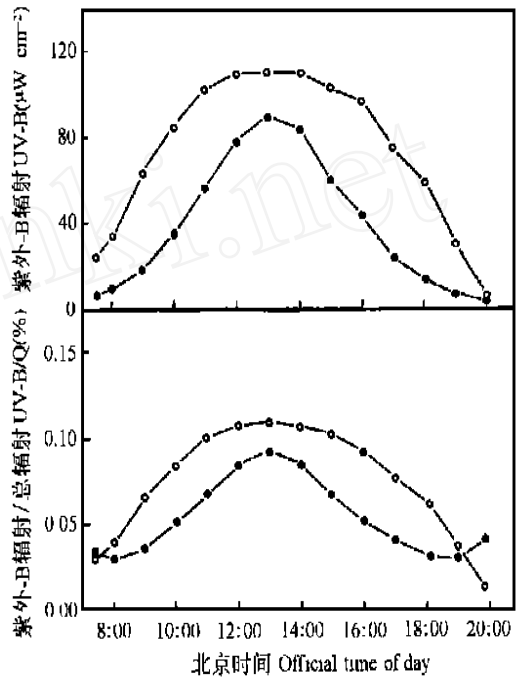


图3 海北高寒草甸地区的太阳UV-B辐射特征 (1993年7月31日)
 地面水平方向 Horizontal
 垂直太阳辐射方向 Vertical

Fig 3 The characteristics of solar UV-B radiation in Haibei alpine meadow region (July 31, 1993)
 地面水平方向 Horizontal
 垂直太阳辐射方向 Vertical

2.3 珠芽蓼叶片中紫外线吸收物质含量的变化

选取生长于不同海拔地区的珠芽蓼,以叶面积为基础测定甲醇提取物的紫外吸收光谱,并以265nm和325nm处的吸光度表示紫外吸收物质的相对含量。结果表明(图4),生长于海北定位站河滩开阔地域的珠芽蓼,叶片中紫外线吸收物质的含量明显高于栽培在西宁生物所院内的同种植物,也略高于生长于达坂山(海拔4000m)及小达坂山(海拔3800m)山顶的珠芽蓼。

2.4 叶绿素和类胡萝卜素含量的变化

表1表明,生长于不同海拔地区的珠芽蓼,叶片中叶绿素和类胡萝卜素的含

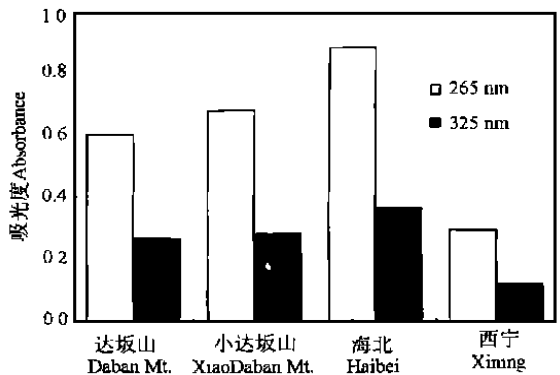


图4 不同海拔地区珠芽蓼叶片中紫外线吸收物质含量的变化 (1996年8月24日)

Fig 4 The changes of UV-B-absorbing compounds of *Polygonum viviparum* (discs 3.85cm²; 125ml) determined as the absorbance at 265nm and 325nm in different elevation regions (August 24, 1996)

量也具有一定的差异。以叶面积为基础时, 生长在海北站地区的珠芽蓼, 叶绿素总含量最低; 栽培在西宁生物所院内的珠芽蓼, 叶绿素总含量较高; 而采自达坂山和小达坂山山顶的珠芽蓼, 叶绿素总含量最高。叶绿素 a、b 之比则以海北站的珠芽蓼最高。西宁珠芽蓼叶片中类胡萝卜素的含量最低, 海北站、达坂山和小达坂山依次增高。海北站地区的矮嵩草与西宁生物所院内已移植4年的同种植物相比, 叶绿素和类胡萝卜素含量的变化规律与生长于两地区珠芽蓼相同(表2)。

表 1 不同海拔地区珠芽蓼叶片中叶绿素和类胡萝卜素含量的变化

Table 1 The changes of contents of chlorophyll and carotenoid in *Polygonum viviparum* collected from different elevation regions (August 25, 1996)

	Chl a	Chl b	Chl(a+ b)	Chl a/Chl b	Car
达坂山 Daban Mt (E1 4000m)	0.0284	0.0104	0.0388	2.731	0.0124
小达坂山 Xiaodaban Mt (E1 3800m)	0.0307	0.0107	0.0414	2.858	0.0144
海北站 Haibei (E1 3200m)	0.0232	0.0075	0.0307	3.076	0.0099
西宁 Xining (E1 2300m)	0.0247	0.0091	0.0337	2.715	0.0092

1) 表中所列为4次实验中的1次结果 Data listed in the table is the results of a representative one of four experiments

2) 叶绿素和类胡萝卜素含量用 $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 表示 The contents of chlorophyll and carotenoid are expressed in $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$

表 2 西宁和海北地区的矮嵩草叶片中叶绿素和类胡萝卜素含量的变化

Table 2 The changes of contents of chlorophyll and carotenoid in *Kobresia humilis* collected from Xining and Haibei

	Chl a	Chl b	Chl(a+ b)	Chl a/Chl b	Car
海北站 Haibei (E1 3200m)	0.0181	0.0067	0.0248	2.708	0.0074
西宁 Xining (E1 2300m)	0.0190	0.0072	0.0262	2.659	0.0068

1) 表中所列为2次实验中的1次结果 Data listed in the table is the results of a representative one of two experiments

2) 叶绿素和类胡萝卜素含量用 $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 表示 The contents of chlorophyll and carotenoid are expressed in $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$

3 讨论

太阳 UV-B 辐射是到达地球表面的太阳短波辐射中最具有活力的一部分电磁辐射。平流层臭氧 (O_3) 的耗损可使到达地球表面的太阳 UV-B 辐射的环境水平明显增加。研究表明 UV-B 辐射的增强对生物圈、对流层大气质量及材料(如木材和塑料)都有潜在的危害性(Caldwell *et al.*, 1995)。

由于高空空气稀薄, UV-B 辐射强度一般随地表海拔高度的升高而增加。对智利边远地区的测定表明: 高度每升高 1km, UV 辐射将增加 4% ~ 10%。而在其它地区垂直梯度可能更大, 如瑞士的阿尔卑斯山地区每升高 1km UV 增加 9% ~ 23% (Madronich *et al.*, 1995)。海北定位站与西宁相比, 当地正午时(约北京时间 13:00)的 UV-B 辐射强度要比西宁地区高 10% ~ 15%。而西宁与兰州皋兰农业生态研究站的 UV-B 辐射差异不大, 这可能与兰州皋兰站的地理位置有关。兰州皋兰站位于兰州市以北 18km 的山顶, 由于远离城市污染, 空气中气溶胶颗粒物含量可能相对较低。已有研究表明, 对流层中气溶胶颗粒物的增强可以抵偿 UV-B 辐射增加的效应(王少彬, 1993)。

在影响太阳 UV-B 辐射的诸因素中, 云层对紫外线辐射有着重要的衰减作用, 一般可

用 Green 等(1974)提出的公式近似计算平均云层的作用。

$$F = 1 - 0.056C$$

其中 C 为以10为单位表示的天空平均云量。达坂山和小达坂山尽管海拔高于海北定位站地区,但由于受地形和地理位置的影响,山顶常被云雾笼罩,云的存在降低了地表紫外线辐射强度(尽管有时瞬间UV-B辐射可能很强,但UV-B的日辐射总量明显低于海拔较低的海北定位站)。生长在这两地区的植物可能较多地受到寒冷和低气压的胁迫,而UV-B辐射的影响并不明显。

研究表明太阳UV-B辐射的增加对植物的危害大于对人体健康的影响(王少彬, 1993)。植物叶片为了进行光合作用,必须承受过量热和潜在的UV-B辐射的伤害。已经有大量的实验证明植物对UV-B辐射具有一定程度的适应性,如人工增强UV-B辐射可以引起叶片表皮细胞中紫外线吸收物质含量的增加,叶内抗氧化物质含量的提高和活性氧清除酶活性的增强等(Vandestaaij *et al.*, 1995; Fiscus & Booker, 1995; Singh, 1996; Takeuchi *et al.*, 1996)。

高山植物具有较低的叶绿素含量(Billings & Mooney, 1968),一般认为光是影响叶绿素含量的主要环境因子,植物生长在高光强下时,叶绿素含量降低,Chl a/Chl b升高。近期的研究表明,在自然条件下人工增强UV-B辐射时,叶片的叶绿素含量也呈下降趋势(Singh, 1996; Day *et al.*, 1996),很可能UV-B对叶绿素也具有直接的破坏作用。类胡萝卜素包括胡萝卜素和胡萝卜素醇两大部分,其分子中共轭双键的存在决定了在光谱的紫外线区域的强烈吸收。类胡萝卜素一方面可吸收过多的光能,避免叶绿素的光氧化;另一方面,可通过直接吸收紫外线辐射,减少紫外线对植物的伤害。因此,高海拔地区的植物类胡萝卜素含量的增高,很可能是对强辐射环境条件的适应结果。

紫外线吸收物质主要为类黄酮和一些酚醛类化合物。对不同地区珠芽蓼叶片中紫外线吸收物质含量的测定表明,随着太阳UV-B辐射强度和日辐射总量的增加,叶片中紫外线吸收物质的含量也明显增加。生长在海北定位站地区的植物由于遭受较强的太阳UV-B辐射,故其叶片中紫外线吸收物质含量较高;而生长于西宁生物所院内的同种植物,由于受太阳UV-B辐射的影响较小,其叶片中紫外线吸收物质含量也较低。生长于达坂山和小达坂山的植物,可能是由于遭受的UV-B日辐射的总量低于海拔较低的海北定位站,故其叶片中紫外线吸收物质的含量略低。

大量研究表明紫外线吸收物质主要集聚在叶表皮层中(通常在上表皮层细胞中较多),以胸腺嘧啶二聚体的形式保护叶肉细胞DNA和光合机构等免遭UV-B辐射的伤害(Beggs & Wellmann, 1994; Fiscus & Booker, 1995)。生长在强UV-B辐射下的植物,其叶片中紫外线吸收物质的增加可影响植物叶片对UV-B辐射的穿透性,减少UV-B辐射进入叶肉组织的量,从而降低UV-B辐射引起的伤害。海北定位站地区珠芽蓼和大部分阔叶植物(资料未列)具有较高含量的紫外线吸收物质,反映了高原植物对强UV-B辐射环境的适应性。但如果太阳UV-B辐射的强度进一步增强,是否会由于各植物种群的适应性存在着差异,从而导致群落物种多样性组成的改变,进而引起高寒草甸生态系统结构和功能的变化,有待于进一步研究。

参 考 文 献

- Arnon D. I 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts: polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, **24**: 1~ 15.
- Beggs C. G. & E. Wellmann. 1994. Photocontrol of flavonoid biosynthesis. In: Kendrick R. E. & G. H. M. Kronenberg eds. *Photomorphogenesis in Plants* Vol. 2. Dordrecht: Kluwer Academic, 733~ 750.
- Ben G. Y. (賁桂英), F. Han (韩发), S. B. Shi (师生波) & C. F. Lu (卢存福). 1991. Microclimate and plant physiological responses in alpine meadow ecosystem. I Characteristics of the solar radiation in the region of Haibei Research Station and an analysis for the radiation absorption of plant canopy. *Alpine Meadow Ecosystem (高寒草甸生态系统)*, 35~ 45. (in Chinese)
- Billings W. D. & H. A. Mooney. 1968. The ecology of arctic and alpine plants. *Biochemistry Review*, **43**: 481~ 529.
- Caldwell M. M. 1968. Solar ultraviolet radiation as an ecological factor for alpine plants. *Ecological Monographs*, **38** (3): 243~ 267.
- Caldwell M. M., A. H. Teramura, M. Tevini, J. F. Bornman, L. O. Björn & G. Kulandaivelu. 1995. Effects of increased solar UV radiation on terrestrial plants. *Ambio*, **24**: 166~ 173.
- Caldwell M. M. 1981. Plant response to solar ultraviolet radiation. In: Lange O. L., P. S. Nobel, C. B. Osmond & H. Ziegler eds. *Physiological Plant Ecology* IV Volume **12A**: 169~ 198.
- Day T. A., B. W. Howells & C. T. Ruhland. 1996. Changes in growth and pigment concentrations with leaf age in pea under modulated UV-B radiation field treatments. *Plant, Cell and Environment*, **19**(1): 101~ 108.
- Fiscus E. L. & F. L. Booker. 1995. Is increased UV-B a threat to crop photosynthesis and productivity? *Photosynthesis Research*, **43**(2): 81~ 92.
- Green A. E. S., J. Sawada & E. P. Shettle. 1974. The middle ultraviolet reaching the ground. *Photochemistry and Photobiology*, **19**: 251~ 259.
- Madronich S., R. L. McKenzie, M. M. Caldwell & L. O. Björn. 1995. Changes in ultraviolet radiation reaching the earth's surface. *Ambio*, **24**(3): 143~ 152.
- Singh A. 1996. Growth, physiological, and biochemical responses of three tropical legumes to enhanced UV-B radiation. *Canadian Journal of Botany*, **74**(1): 135~ 139.
- Takeuchi Y., H. Kubo, H. Kasahara & T. Sakaki. 1996. Adaptive alterations in the activities of scavengers of active oxygen in cucumber cotyledons irradiated with UV-B. *Journal of Plant Physiology*, **147**(5): 589~ 592.
- Vandestaaij J. W. M., W. H. O. Ernst, H. W. J. Hakvoort & J. Rozema. 1995. Ultraviolet-B (280~ 320nm) absorbing pigments in the leaves of *Silene vulgaris*: their role in UV-B tolerance. *Journal of Plant Physiology*, **147**(1): 75~ 80.
- Wang S. B. (王少彬). 1993. Assessment of solar ultraviolet biologically effective radiation in Beijing and Kunming regions. *Science in China (Series B) (中国科学(B 辑))*, **23**(2): 139~ 144. (in Chinese)
- Zhu G. L. (朱广廉). 1990. *The plant physiological experiment*. Beijing: Beijing University Press. 51~ 54. (in Chinese)