

青藏高原高寒草甸生态系统净二氧化碳交换量特征

徐玲玲^{1,2}, 张宪洲¹, 石培礼^{1*}, 于贵瑞¹, 孙晓敏¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:高寒草甸是青藏高原广泛分布的植被类型之一, 面积约 120 万 km², 地处青藏高原腹地的当雄草原站即位于该类植被的典型分布区。以 2003 年 8~10 月中旬在该站用涡度相关法连续观测的 CO₂ 通量数据资料为基础, 分析了高寒草甸生态系统 8~10 月份净二氧化碳交换量(*NEE*)的日变化规律, 及其与光合有效辐射、降水、温度等环境因子之间的关系。结果表明, 8~10 月份日均 *NEE* 有明显的日变化, 表现为单峰型, 通常在地方时 11:00~12:00 左右达到碳吸收的最大值, 平均为 -0.2680 mg CO₂/(m²·s) (-6.0800 μmol CO₂/(m²·s))。白天的 *NEE* 与光合有效辐射之间符合很好的直角双曲线关系, 表观量子产额平均为 0.0203 μmol CO₂/μmol *PAR*, 表观最大光合速率平均为 9.7411 μmol CO₂/(m²·s)。夜晚的 *NEE* 与 5cm 地温有很好的指数函数关系。

关键词:青藏高原; 高寒草甸; 涡度相关法; 二氧化碳通量; 环境因子

文章编号: 1000-0933(2005)08-1948-05 中图分类号: Q948.1 文献标识码: A

Net ecosystem carbon dioxide exchange of alpine meadow in the Tibetan Plateau from August to October

XU Ling-Ling^{1,2}, ZHANG Xian-Zhou¹, SHI Pei-Li^{1*}, YU Gui-Rui¹, SUN Xiao-Min¹ (1. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Beijing 100101, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8): 1948~1952.

Abstract: The alpine meadow is widely distributed on the Tibetan Plateau, covering about 1.2 million km². At the Damxung Grassland Station, located in the hinterland of the plateau is the place covered with this typical vegetation. The continuous carbon flux (from August to middle October, 2003) of the alpine meadow was measured using the open-path eddy covariance systems in order to analyze the diurnal variation patterns of net ecosystem carbon dioxide exchange (*NEE*) and its relationship with environmental factors, such as photosynthetically active radiation (*PAR*), precipitation and temperature. Obvious diurnal variation patterns of *NEE* with single-peaked carbon assimilation were observed at 11:00~12:00 (local time) with an average of -0.2680 mg CO₂/(m²·s) (-6.08 μmol CO₂/(m²·s)). During the daytime, *NEE* fitted fairly well with *PAR* in a rectangular hyperbola function, with apparent quantum yield of 0.0203 μmol CO₂/μmol *PAR* and maximum ecosystem assimilation of 9.7411 μmol CO₂/(m²·s). In the nighttime, *NEE* was fairly exponentially related with the soil temperature at 5cm below ground.

Key words: Tibetan Plateau; alpine meadow; eddy covariance; carbon dioxide flux; environmental factors

大气中 CO₂、CH₄ 等温室气体浓度升高导致的全球气候变化是人类共同关注的问题, 也是当今国际社会所面临的最为严重的挑战。青藏高原又称“世界第三极”, 是全球气候变化的敏感区和启动区。这里是地球表层太阳辐射量最高的地区之一^[1]; 但气压低, 气候温凉, 氧气和 CO₂ 浓度大多不及平原的 2/3。由于温凉的气候和低 CO₂ 浓度是高原植被生长的限制因子, 因此高原植被对气温升高、CO₂ 浓度增加要比平原地区敏感得多。在青藏高原这一独特的地理区域对陆地植被与大气间 CO₂ 通量进行长

基金项目: 国家 973 计划资助项目 (2002CB412501)

收稿日期: 2004-04-16; 修订日期: 2004-09-19

作者简介: 徐玲玲 (1979~), 女, 山东泰安市人, 博士生, 主要从事青藏高原生理生态学研究。E-mail: xull@igsnr.ac.cn

Foundation item: The Major State Basic Research Development Program of China (No. 2002CB412501)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: shipl@igsnr.ac.cn

Received date: 2004-04-16; **Accepted date:** 2004-09-19

Biography: XU Ling-Ling, Ph.D. candidate, mainly engaged in physiological ecology on Tibetan Plateau. E-mail: xull@igsnr.ac.cn

期的观测不仅可以预测低气压条件下青藏高原植被对全球变化的响应程度,而且可以为平原地区全球变化的研究提供最为直接和有力的证据。

高寒草甸是青藏高原地区分布最为广泛的植被类型之一,面积约 120 万 km²,相当于青、藏两省区面积的 67%。它不仅是亚洲中部高寒环境中典型的生态系统之一,而且在世界高寒地区也极具代表性。涡度相关法,作为直接观测植被表层与大气间 CO₂ 和水热交换量的微气象学方法,有着传统生态学方法所无可比拟的优点。它的观测范围在空间尺度上可以达到几百米甚至几公里,时间尺度上可以从小时、天、季节到数年^[2]。这使得涡度相关技术在观测各种自然植被与大气间的碳通量方面得到了迅速而广泛的应用,目前已经成为通量观测网络 FLUXNET(AsiaFlux、AmeriFlux、KoFlux、OzFlux 等)的主要技术手段。本文以位于青藏高原腹地的当雄草原站 2003 年 8~10 月涡度相关法观测的碳通量数据为基础,探讨了高寒草甸生态系统 8~10 月份碳通量的日变化规律及主要环境因子对其的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

当雄高寒草甸通量观测站设在拉萨市北当雄草原站内,是中国科学院地理科学与资源研究所拉萨高原生态站的一个半定位试验站。该站距当雄县城 1km,地处 91°05'E, 30°25'N,海拔 4333m。气候属于高原性季风气候,具有太阳辐射强、气温低、日较差大,年较差小的特点。多年平均气温 1.3℃,最冷月(1月)均温-10.4℃,最热月均温 10.7℃,气温年较差 21.0℃,日较差 18.0℃,地面多年平均温度 6.5℃,冰冻期 3 个月(11 月至翌年 1 月)。多年年均降水量 476.8 mm,其中 85.1%集中在 6~8 月份,年蒸发量 1725.7mm,年平均湿润系数 0.28。年日照总时数 2880.9h,年太阳总辐射 7527.6 MJ/m²,光合有效辐射 3213.3 MJY/m²。

土壤属于高寒草甸土,结构为砂壤土,土壤厚度 0.3~0.5 m 之间,土壤砾石含量较高,达 30%,有机质 0.9%~2.97%,全氮 0.05%~0.19%,全磷 0.03%~0.07%,pH 值 6.2~7.7。植被为藏北高原典型的高寒草甸,建群种主要有丝颖针茅(*Stipa capillacea*),窄叶苔草(*Carex montis-everestii*)和小蒿草(*Kobresia pygmaea*),群落盖度约 80%。

1.2 研究方法

1.2.1 试验观测项目 当雄观测点的涡度相关仪高度为 2.1m,包括一套常规气象观测系统和一套开路系统。常规系统主要用于监测环境因子的变化,项目有风向、风速、空气温度、空气相对湿度、降雨量、大气压、光合有效辐射、净辐射、土壤温度(5cm、10cm、20cm、50cm、80cm)、土壤湿度(5cm、10cm、50cm)、土壤热通量等。开路系统包括一个 CSAT3 的三维超声风速仪(Campbell Scientific Inc.)和一个 LI-7500 开路红外气体分析仪(LI-Cor. Inc.);主要用于观测植被与大气界面的二氧化碳及水热通量。观测频率为 10Hz。

1.2.2 数据处理方法

(1)数据预处理 碳通量数据取回后,首先要进行预处理。主要包括野点去除(±3σ)、坐标旋转(三维风旋转)、Webb-Pearman-Leuning 校正^[3]等。缺失数据则是通过碳通量值与环境因子之间的非线性经验式进行插补。

(2)数据分析方法 白天生态系统净碳通量(*NEE*)对光合有效辐射(*PAR*)的响应关系用 Michaelis-Menten 模型^[4]进行拟合,具体如下:

$$NEE_d = \frac{\alpha PAR NEE_{\infty}}{\alpha PAR + NEE_{\infty}} - R$$

式中, $\alpha(\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \mu\text{mol})$ *PAR*)为表观初始光能利用效率,表征光合作用中的光能最大转化效率;*PAR*($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)为光合有效辐射;*NEE*_∞($\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)为表观最大光合速率;*R*($\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)为表观暗呼吸速率

夜晚生态系统净碳通量(*NEE_n*),则选择摩擦风速 *u** 高于 0.15m/s 时的数据用下式进行拟合:

$$NEE_n = b_0 \exp(b_1 T_{\text{soil}})$$

式中,*b*₀ *b*₁ 为系数;*T*_{soil} 为 5cm 土壤温度。

2 结果与分析

2.1 生长季碳通量的平均日变化

该生态系统 8 月~9 月净 CO₂ 交换量 *NEE* 的平均日变化规律见图 1。夜间整个生态系统是一个碳源(*NEE* 为正,表示为净碳排放),所能达到的排放峰值为 0.094 mg CO₂/(m² · s)

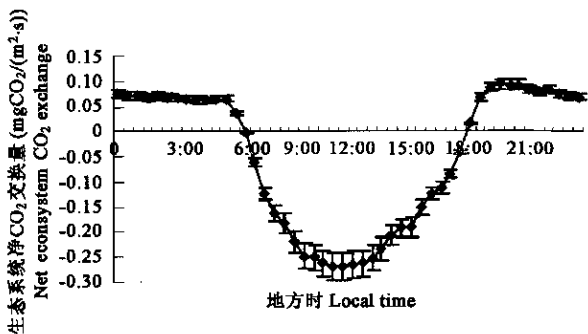


图 1 当雄地区 2003 年 8~9 月净生态系统 CO₂ 交换量 *NEE* 的平均日变化

Fig. 1 Averaged diurnal variation of *NEE* from August to September, 2003 in Dangxun

($2.13\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{s})$);白天随着光合作用的加强,在 8:00 左右整个生态系统转换为一个碳汇(NEE 为负,表示为净碳吸收),并通常在当地时 12:00 左右达到碳吸收的最大值,约为 $-0.268\text{ mg CO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ($6.08\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{s})$)。

为了分析当雄地区净 CO_2 交换量与环境因子之间的关系,逐月选取了观测资料中的代表性晴天(8 月 12 日、9 月 24 日、10 月 17 日)对该生态系统 8~10 月份的主要环境因子(PAR 、 T_a 、 VPD)的变化情况进行了分析。图 2 分别是这些典型晴天的光合有效辐射(PAR)、空气温度(T_a)、空气饱和和水气压差(VPD)及 NEE 的基本资料。从图中可以看出,8 月份的光合有效辐射最高的,可以达到 $2300\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;9 月份的 PAR 是最低,仅为 $1200\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,而 10 月份的 PAR 居中。9 月份的辐射量低大概是因为这个月的降水比较多,该月的降雨量可达到 97.2mm ,仅次于 8 月份(104.2mm)。就空气温度而言,8 月份的变化范围在 $10\sim 20\text{ }^\circ\text{C}$,9 月份大约在 $5\sim 15\text{ }^\circ\text{C}$,到了 10 月份就出现了低于零度的情况。8 月份的 VPD 最大,峰值可以达到 1.6kPa ;9 月份的最低,峰值仅为 0.8kPa ,10 月份居中。从这 3d 的净二氧化碳交换量 NEE 来看,都有很好的日变化规律,即在夜间 NEE 为正值,整个生态系统表现为净碳排放;而在白天随着光合作用的加强, NEE 为负值,整个生态系统表现为净碳吸收,并在中午左右达到碳吸收的最大值。8 月份的日吸收峰值最大,可以达到 $-0.18\text{ mg CO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,9 月份仅为 $-0.072\text{ mg CO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;到了 10 月份,随着植物生长季的结束,整个生态系统几乎变为一个碳源。可见,8 月份虽然 VPD 最大,但水分不是其制约因子,充足的光照和适宜的温度使其表现为最大的碳吸收;10 月份的光照虽然比 9 月份充足,但由于在清晨时空气温度已低于零度,植物已经进入枯黄衰亡期,使 10 月份整个生态系统几乎变为一个碳源。当然,10 月份的降雨量只有 9.6mm ,水分不足也许是一个很大的制约因子。

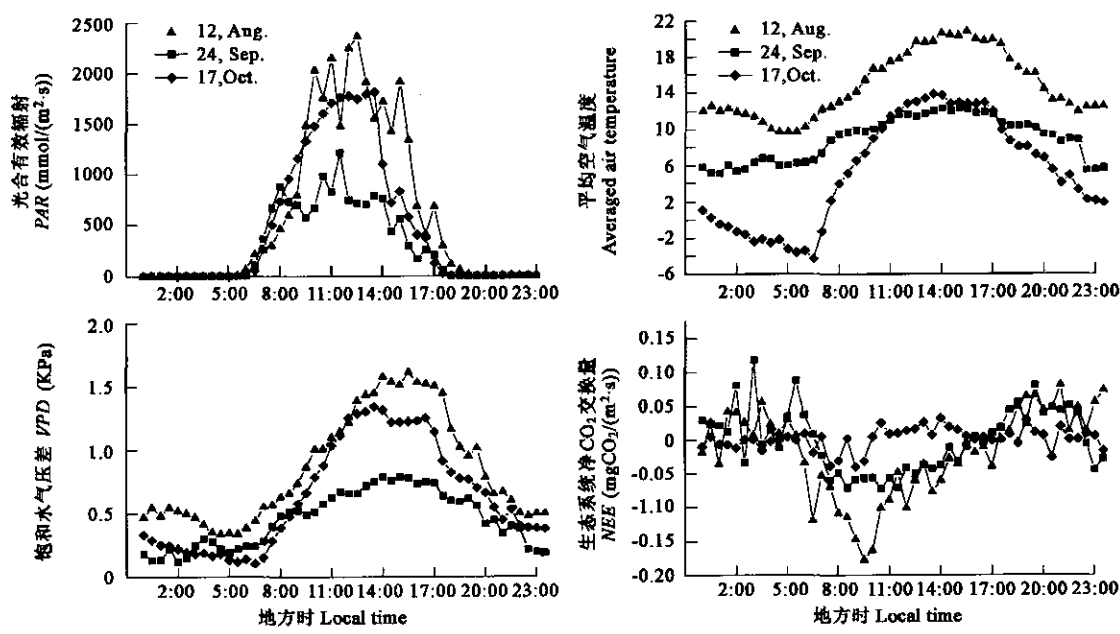


图 2 8~10 月典型晴天光合有效辐射、平均空气温度、饱和水气压差、生态系统净 CO_2 交换量的比较
Fig. 2 Comparison of PAR 、 T_a 、 VPD 、 NEE on typical clear days from August to October

2.2 生长季碳通量与主要环境因子的关系

对 8~9 月底的净生态系统 CO_2 交换量 NEE 的观测数据进行分析,结果发现高寒草甸生态系统白天的 NEE 与光合有效辐射 PAR 之间符合很好的直角双曲线关系(图 3),8 月~9 月底的表观量子产额平均为 $0.0203\mu\text{mol CO}_2/\mu\text{mol PAR}$,表观最大光合速率为 $9.7411\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,表观暗呼吸速率为 $1.6159\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。刘允芬、张宪洲等^[5]曾对高原冬小麦的表观量子速率进行了分析,认为高原 α 值大约只及平原地区的约 $2/3$,但这只是单叶水平的测定,与生态系统水平的 α 值有很大差异。

夜间的 NEE 则选取了湍流比较充分($u^* > 0.15\text{m/s}$)的数据与 5cm 的土壤温度做了指数回归,从图 4 中可以看出夜间的 NEE 与土壤温度之间存在比较好的相关性。

3 讨论与结论

当雄高寒草甸生态系统 8~9 月份净 CO_2 日均最大吸收速率平均仅有 $-0.2680\text{ mg CO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ($-6.0800\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{s})$),与世界上其他的草地生态系统相比明显偏小。北美大草原生长季 CO_2 日吸收速率最高可以达到 $-1.3^{[6]}\text{ mg CO}_2/$

($\text{m}^2 \cdot \text{s}$)($30\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$), $-1.2^{[7]} \text{ mg CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ($27.2\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$),原因可能是这些地区叶面积指数比较高,可达 $4\sim 5\text{m}^2/\text{m}^2$,而且通常都由比较耐旱的C4植物组成^[8]。降水是影响 CO_2 日最大吸收速率的一个重要因子。Lawrence B^[9]等对加拿大北部温带C3草地生态系统连续3年的观测结果表明,降水充足的年份 CO_2 日吸收峰值为 $-14\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;而在干旱的条件下,峰值仅为 $-5\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。另外,叶面积指数(LAI)也是影响 CO_2 日最大吸收速率的一个关键因子。Andrew^[10]等对美国高草原的观测结果表明,LAI为0.6时(4月底), CO_2 日最大吸收速率为 $-0.25 \text{ mg CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ($5.7\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$);而7月中旬LAI达到2.8时, CO_2 日最大吸收速率增为 $-1.4 \text{ mg CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ($31.8\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$),到9月份植物进入衰败期时,峰值又降为 $-0.9 \text{ mg CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ($20.4\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)。青藏高原8月下旬至9月份气温开始降低,降水减少,部分植物已经进入枯黄衰老期,导致光合速率下降,这大概是当雄高寒草甸生态系统8~9月净 CO_2 日吸收最大速率偏低的原因。另外,青藏高原地理环境特殊,水热条件比较差,植株矮小,一般高3~5cm,地上生物量小,叶面积指数较低,也会对结果产生一定的影响。所以,高寒草甸生态系统具有碳吸收的潜力,但潜力的大小还有待于进一步的观测数据进行分析。

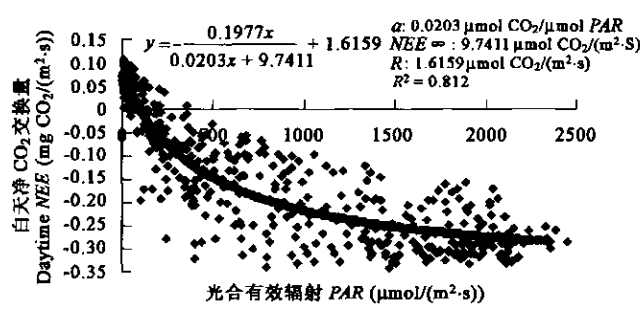


图3 当雄地区8~9月份白天NEE与光合有效辐射PAR关系
Fig. 3 relationship between daytime NEE and PAR from August to September in Damxung

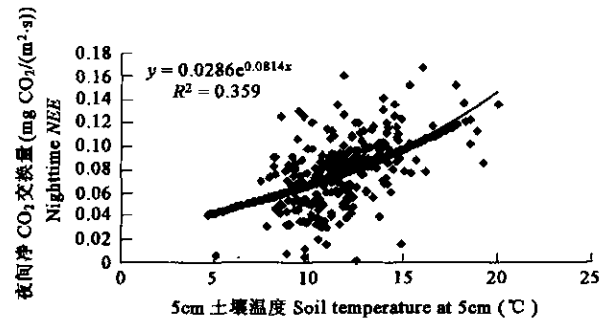


图4 当雄地区8~9月份夜间NEE与5cm土壤温度的关系
Fig. 4 relationship between nighttime NEE and soil temperature at 5cm from August to September in Damxung

当雄地区高寒草甸生态系统8~9月的表观量子产额平均为 $0.0203\mu\text{mol CO}_2/\mu\text{mol PAR}$,而Andrew^[10]等生长季时在美国Oklahoma高草原(C4植物)用涡度相关法测得的 α 值没有水分胁迫时平均为 $0.0348\mu\text{mol CO}_2/\mu\text{mol PAR}$;当有水分胁迫时 α 值仅为 $0.0234\mu\text{mol CO}_2/\mu\text{mol PAR}$;当植物进入衰亡期时 α 值只有 $0.0114\mu\text{mol CO}_2/\mu\text{mol PAR}$ 。Ruimy^[11]等认为C3、C4植物生长季旺盛期的 α 值最高不能大于 $0.0441\mu\text{mol CO}_2/\mu\text{mol PAR}$ 。许大全^[12]认为同一种植物在自然条件下测定时,随海拔升高光合作用和表观量子效率的降低可能与空气中的 CO_2 分压有关。当雄地区海拔4300m,高海拔及低 CO_2 分压会对结果产生一定的影响,另外9月底部分植物已经进入枯黄衰老期,这也可能导致 α 值偏低,具体机理还有待于进一步的研究。

References:

[1] Zhang X Z, Wang Q D, Zhang Y G. The spectral measurement of the solar global radiation on Tibetan Plateau during April-October. *Acta Meteorological Sinica*, 1996, **54**(5): 620~624.

[2] Baldocchi D, Finnigan J, Wilson K, et al. On measuring net ecosystem carbon exchange over tall vegetation on complex terrain. *Boundary-Layer Meteorology*, 2000, **96**: 257~291.

[3] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1980, **106**: 85~100.

[4] Falge E, Baldocchi D, Olson R, et al. Gap filling strategies for defensible and annual sums of net ecosystem exchange. *Agric. For. Meteorol.*, 2001, **107**: 43~69.

[5] Liu Y F, Zhang X Z, Zhou Y H, et al. Apparent quantum yield of photosynthesis of winter wheat in the field in Tibet Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, **20**(1): 35~38.

[6] Kim J, Verma S B. Carbon dioxide exchange in a temperate grassland ecosystem *Bound. Layer Meteorol.*, 1990, **52**: 135~149.

[7] Dugas W A, Heuer M L, Mayeux H S. Carbon dioxide fluxes over bermudagrass, native prairie and sorghum. *Agric. For. Meteorol.*, 1999, **93**: 121~139.

[8] Hunt J E, Kelliher F M, et al Evaporation and carbon dioxide exchange between the atmosphere and a tussock grassland during a summer

drought. *Agric. For. Meteorol.* , 2002,**111**:65~82.

[9] Lawerence B, Flanagan, Linda A, *et al* Seasonal and interannual variation in carbon dioxide exchange and carbon balance in a northern temperate grassland. *Global Change Biology*, 2002,**8**:599~615.

[10] Andrew E, Suyker and Shashi B Verma. Year-round observations of the net ecosystem exchange of carbon dioxide in a native tallgrass prairie. *Global Change Biology*,2001,**7**:279~289.

[11] Ruimy A, Jarvis P G, Baldocchi D D, *et al.* CO₂ fluxes over plant canopies and solar radiation :a review. , *Advances in Ecological Research*, 1995,**26**:1~68.

[12] Xu D Q. Photosyntheu efficiency. *Plant Physiology Communications*,1988,**5**:51~54.

参考文献：

[1] 张宪洲,王其冬,张谊光. 青藏高原 4~10 月太阳总辐射的分光测量. 气象学报,1996, **54**(5):620~624.

[5] 刘允芬,张宪洲,周允华,等. 西藏高原田间冬小麦的表观光合量子效率. 生态学报,2000,**20**(1):35~38.

[12] 许大全 光合作用速率. 植物生理学通讯, 1988,**5**:51~54.