

文章编号: 1007-0435(2007)05-0442-07

# 青藏高原 3 种主要植被类型的表观量子效率和最大光合速率的比较

张法伟<sup>1,2</sup>, 李英年<sup>1\*</sup>, 李红琴<sup>3</sup>, 王勤学<sup>4</sup>, 杜明远<sup>5</sup>, 赵 亮<sup>1</sup>, 汪诗平<sup>1</sup>

(1. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810001; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;

3. 青海大学研究生部, 青海 西宁 810016; 4. 日本国立环境研究所, 日本 筑波 3050053;

5. 日本农业环境技术研究所, 日本 筑波 3058604)

**摘要:** 以海北高寒草甸生态系统定位站的涡度相关系统连续观测的 CO<sub>2</sub> 通量数据为基础, 分析了青藏高原的高寒矮嵩草 (*Kobresia humilis*) 草甸、高寒金露梅 (*Potentilla fruticosa*) 灌丛草甸和高寒藏嵩草 (*Kobresia tibetica*) 沼泽化草甸等 3 种主要植被类型在 2005 年植物生长季 (6 - 9 月) 的表观量子产额 ( $a$ )、最大光合速率 ( $P_{\max}$ ) 和呼吸速率 ( $R_{\text{eco}}$ ) 的变化特征。结果表明: 3 种植被类型白天的净生态系统 CO<sub>2</sub> 交换量 (NEE) 和光量子通量密度 (PPFD) 存在明显的直角双曲线关系 ( $P < 0.05$ ), 其  $a$ 、 $P_{\max}$  和  $R_{\text{eco}}$  呈现出相似的季节变化趋势, 在生长季初期 (6 月) 最小, 在 7 月或 8 月份达到最大; 高寒矮嵩草草甸的  $a$ 、 $P_{\max}$  和  $R_{\text{eco}}$  大于灌丛草甸和沼泽化草甸, 而后两者差别不大。

**关键词:** 青藏高原; 涡度相关; 表观量子产额; 最大光合速率; 呼吸速率

中图分类号: S812.1; Q948.112

文献标识码: A

## The Comparative Study of the Apparent Quantum Yield and Maximum Photosynthesis Rates of 3 Typical Vegetation Types on Qinghai-Tibetan Plateau

ZHANG Fa-wei<sup>1,2</sup>, LI Ying-nian<sup>1\*</sup>, LI Hong-qin<sup>3</sup>, WANG Qin-xue<sup>4</sup>, DU Ming-yuan<sup>5</sup>,  
ZHAO Liang<sup>1</sup>, WANG Shi-ping<sup>1</sup>

(1. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining, Qinghai Province 810001, China;

2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Graduate school, Qinghai University, Xining, Qinghai Province 810016, China;

4. National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, 3050053, Japan;

5. National Institute of Agro-environmental Sciences, Tsukuba, 3058604, Japan)

**Abstract:** Based on the continuous CO<sub>2</sub> flux data monitored by Eddy Covariance Method at Haibei Station, the variations of apparent quantum yield ( $a$ ), maximum photosynthesis rate ( $P_{\max}$ ), and ecosystem respiration rate ( $R_{\text{eco}}$ ) were analyzed for three vegetation types (alpine *Kobresia humilis* (C. A. Mey) Serg. meadow, alpine *Potentilla fruticosa* L. shrubland, and alpine *K. tibetica* Maxim. wetland) in growing season (from June to September) on the Qinghai-Tibetan Plateau. The results show that the daytime net ecosystem exchange (NEE) fitted very well with Photosynthetic photon flux density (PPFD) in a rectangular hyperbola equation in three types of vegetation ecosystems. Their  $a$ ,  $P_{\max}$ , and  $R_{\text{eco}}$  showed the similar seasonal changing pattern, the minimum was appeared in June and maximum in July or August; the  $a$ ,  $P_{\max}$  and  $R_{\text{eco}}$  of the alpine *K. humilis* meadow was higher than that of the other two vegetation types and no significant differences of  $a$ ,  $P_{\max}$ , and  $R_{\text{eco}}$  between alpine *P. fruticosa* shrubland and alpine *K. tibetica* wetland were detected.

**Key words:** Qinghai-Tibetan Plateau; Eddy Covariance Method; Apparent quantum yield; Maximum photosynthesis rate; Ecosystem respiration rate

收稿日期: 2006-09-12; 修回日期: 2007-06-25

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目 (KZCX1-SW-01-01A); 国家重点基础研究发展规划项目 (2002CB412501); “21 世纪亚洲陆地生态系统碳管理为目标的综合碳收支研究”以及中日合作“亚太地区环境创新战略计划 (APEIS)”

作者简介: 张法伟 (1981-), 男, 河南人, 硕士研究生, 研究方向为植物生态; \*通讯作者 Author for correspondence, E-mail: ynli@nwipb.ac.cn

草地生态系统约占地球表面积的 1/3,在维持生物多样性和维护生态系统平衡、特别是在全球碳循环和碳平衡中起着重要作用<sup>[1-3]</sup>。作为世界第三极的青藏高原,既是全球气候变化的敏感区,也是生态系统的脆弱区<sup>[4]</sup>。其草地生态系统的面积约为  $2.5 \times 10^6 \text{ km}^2$ ,多分布在海拔 3000 m 以上<sup>[5]</sup>,其中高寒草甸、高寒灌丛草甸和高寒沼泽化草甸是分布面积最广的 3 种植被类型,面积分别为  $0.48 \times 10^6$ 、 $0.106 \times 10^6$  和  $0.049 \times 10^6 \text{ km}^2$ ,约占青藏高原草地总面积的 25%<sup>[6]</sup>。这些草地的分布不仅对涵养水源、维护区域生态起到重要的保护作用,而且在碳循环和碳平衡中具有不可忽视的地位。中国陆地生态系统通量研究观测网络(ChinaFLUX)的建立,为研究青藏高原碳收支提供了机遇。自 2001 年和 2002 年始,在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站(海北站),运用涡度相关系统对高寒矮嵩草(*Kobresia humilis*)草甸(嵩草草甸)、高寒金露梅(*Potentilla fruticosa*)灌丛草甸(灌丛草甸)和高寒藏嵩草(*Kobresia tibetica*)沼泽化草甸(沼泽草甸)等 3 种不同的植被类型进行了长期的  $\text{CO}_2$  和水热通量观测<sup>[7,8]</sup>。有关 3 种植被类型的  $\text{CO}_2$  交换量、水热平衡和生态系统呼吸的研究多有报道<sup>[9-13]</sup>,但其生态系统光合特征的研究鲜有报道<sup>[14]</sup>。

表观量子产额(Apparent quantum yield,  $a$ )、最大光合速率(Maximum photosynthesis rate,  $P_{\max}$ )和生态系统呼吸速率(Ecosystem respiration rate,  $R_{\text{eco}}$ )是决定生态系统光合特征三个关键的基本参数<sup>[15,16]</sup>。以前由于试验方法的限制,青藏高原植被  $a$ 、 $P_{\max}$  和  $R_{\text{eco}}$  的研究多集中于单叶尺度,而从生态系统的尺度上少有进行<sup>[17-19]</sup>,师生波等<sup>[20]</sup>利用开放式同化箱式法测定了海北矮嵩草草甸的群落光合、生态系统暗呼吸等要素,XU 等<sup>[14]</sup>利用涡度相关系统法测定了西藏当雄的高寒草甸的群落光合特征,得出了许多有意义的结果。

青藏高原的太阳年总辐射十分强烈,显著高于平原地区。气压较低、气候温凉, $\text{CO}_2$  密度又较平原低 1/3,同时紫外辐射较高等特殊的生态环境造就了高原植物独特的光合特征<sup>[21]</sup>。涡度相关系统(Eddy Covariance Methods, ECM)作为直接测量植被冠层与大气之间的  $\text{CO}_2$  和水热交换的唯一方法,为从生态系统尺度上研究其光合特征提供了可靠的数据基础<sup>[22]</sup>。目前,有关生态系统光合特征的研究多集中于温带草地生态系统<sup>[23-25]</sup>,而有关高寒草甸的研究不是很多。本文以 2005 年生长季(6-9 月)3 种植被类型的  $\text{CO}_2$  通量数据为基础,分析了高

寒矮嵩草草甸、高寒金露梅灌丛草甸和藏嵩草沼泽化草甸等 3 种生态系统生长季白天  $\text{CO}_2$  通量与光合有效辐射的关系,及其 3 种植被类型的  $a$ 、 $P_{\max}$  和  $R_{\text{eco}}$  在生长季的变化特征。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究在海北站进行。海北站(37037 N, 101019 E)地处青藏高原东北隅,祁连山北支冷龙岭东段南麓的大通河谷,海拔 3200 m。具有明显的高原大陆性季风气候,仅有冷暖两季,年平均气温 -1.7,夏季温暖多雨,最暖的 7 月平均气温 9.8;冬季寒冷干燥,最冷的 1 月平均气温 -14.8。年降水约 580 mm,植物生长季集中了全年降水的近 80%,土壤类型为草毡寒冻锥形土(Mat Cryosod Soil),呈微碱性,有机质含量丰富,土壤发育年轻,土层浅薄,能被植物利用的速效氮含量贫乏<sup>[26]</sup>。涡度相关系统分别设在矮嵩草草甸、金露梅灌丛草甸和藏嵩草沼泽化草甸。观测点地势平坦,地形开阔,下垫面同质均匀,具有足够大的“风浪区”,能满足涡度相关系统观测的要求(图 1)。

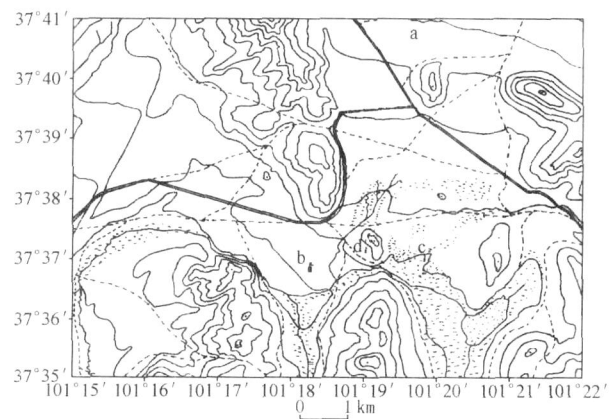


图 1 3 种高寒草甸植被类型的通量观测塔分布图

(a、b、c 和 d 分别为高寒金露梅灌丛、矮嵩草草甸、藏嵩草沼泽草甸和海北站)

Fig. 1 The location of flux monitoring towers in three types of vegetation ecosystems (a, b, c, and d was alpine *P. fruticosa* shrubland, *K. humilis* meadow, alpine *K. tibetica* wetland, and Haibei Station, respectively)

### 1.2 研究方法

1.2.1 试验观测项目 涡度相关系统观测项目包括  $\text{CO}_2$  通量和水热平衡以及微气象因素。该涡度相关开路系统包括了三维超声风速仪(CSAT3, Campbell,

USA), 开路红外  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$  分析仪 (LI7500, LI-Cor, USA) 和光量子通量 (Li-190SB, Li-Cor, USA)。微气象观测包括风向和风速 (110 cm 和 220 cm)、空气温度和湿度 (110 cm 和 220 cm)、净辐射 (150 cm)、土壤温度 (0, 2, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 cm)、土壤含水量 (5, 20, 50 cm)、土壤热通量 (2 cm, 沼泽草甸除外)、气压和降雨量等, 原始数据采集频率为 10 Hz, 除嵩草草甸变量用 15 min 平均值外, 灌丛草甸和沼泽草甸的变量为 30 min 平均值。由于 3 种植被类型下垫面冠层高度有明显差异, 矮嵩草草甸的建群种为矮嵩草, 植被最大平均高度在 25 ~ 30 cm, 金露梅灌丛草甸建群种为金露梅, 植被最大平均高度在 60 ~ 70 cm, 藏嵩草沼泽化草甸建群种为藏嵩草, 植被最大高度在 25 ~ 50 cm。故此三者的开路系统的架设高度分别为 220 cm、250 cm 和 250 cm。

在生长季中, 对 3 种植被类型的地上生物量和群落叶面积指数也进行同步测量。地上生物量从 5 月中旬开始, 9 月底结束, 每月中旬和月底采样测定。地上生物量采用收割法, 分别在 3 种植被类型上随机选取 5 个 50 × 50 cm 的样方, 而后用剪刀齐地面剪下装入纸袋, 在 65 °C 恒温箱中烘干至恒重后称重, 单位  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。群落叶面积指数从 6 月初开始, 8 月底结束, 每月平均每周测定 1 次。叶面积指数同样采用收割法, 样方面积为 25 × 25 cm, 3 种植被类型分别重复 5 次, 用剪刀齐地面剪下装入纸袋, 而后采用 Li-3000A 便携式叶面积仪测定植物绿色叶片的面积 (单位  $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ )。

**1.2.2 数据处理方法** 本次研究采用 2005 年 6 - 9 月 (其中灌丛草甸和沼泽草甸 9 月数据缺失 2/3) 3 种植被类型生长季的白天 (总辐射  $> 1.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ )  $\text{CO}_2$  通量数据, 由于电力和仪器故障等原因, 在长期的数据观测会出现“野点”, 采用  $|NEE| < 3.0 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 并对数据进行 WPL<sup>[27]</sup> 校正。3 种植被类型的  $a$ 、 $P_{\text{max}}$  和  $R_{\text{eco}}$  的计算采用 Michaelis-Menten 模型<sup>[28]</sup> 拟合:

$$NEE = \frac{a \cdot PPFD \cdot P_{\text{max}}}{a \cdot PPFD + P_{\text{max}}} - R_{\text{eco}}$$

其中, NEE 为白天 3 种植被类型的净生态系统的交换量 ( $\text{mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), PPFD 为光量子通量密度 ( $\mu\text{mol photon} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 即光合有效辐射),  $a$  为生态系统表观光量子产额 ( $\text{mg CO}_2 \cdot \mu\text{mol Photon}^{-1}$ ),  $P_{\text{max}}$  为生态系统最大光合速率 ( $\text{mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $R_{\text{eco}}$  为生态系统呼吸速率 ( $\text{mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )。  $a$ 、 $P_{\text{max}}$  和  $R_{\text{eco}}$  通过非线性拟和, 处理软件为 Origin 7.5 (Originlab Corporation, USA)。

## 2 结果与分析

### 2.1 地上生物量和群落叶面积指数的季节变化

3 种植被类型的地上生物量 (图 2a) 和群落叶面积指数 (图 2b) 变化趋势基本一致, 经历了缓慢积累、快速增加、相对稳定和折损减少 4 个阶段<sup>[26]</sup>。6 月下旬以前, 气温较低, 降水较少, 地表 30 cm 以下冻土还在维持, 植物生长受到春寒和春旱的胁迫, 植物生长处于返青时期, 生物量积累为缓慢阶段;

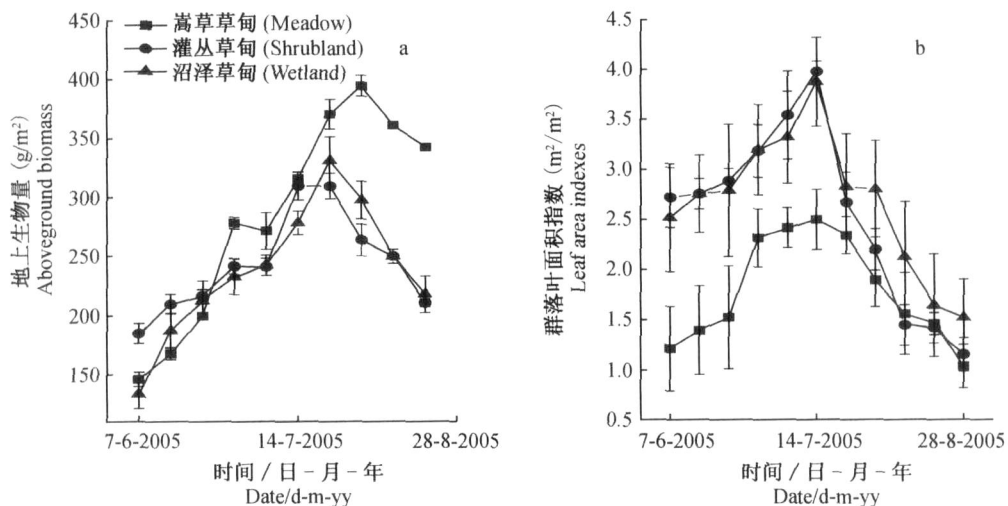


图 2 3 种植被类型的地上生物量 (图 a) 和群落叶面积指数 (图 b) 的动态变化

Fig. 2 The seasonal change of aboveground biomass (graph "a") and leaf area index (graph "b") in three types of vegetation ecosystems

6 月下旬到 8 月,气温升高,降水增多,有利的水热条件促使植物进入强度生长期,生物量快速增加;8 月到 9 月初,植物成熟,生物量达年内最高,并保持相对平稳;9 月中旬以后,天气开始转冷,降水减少,生物量不再积累,并受外界恶劣环境的影响,生物量逐渐降低。同时,三者地上生物量在前两个阶段区别不是很大,尤其是灌丛草甸和沼泽草甸。嵩草草甸在 8 月底达到最大值( $394.60 \pm 8.75 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ),而灌丛草甸和沼泽草甸在 8 月中旬达到最大值( $309.68 \pm 10.85, 331.33 \pm 19.98 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ),且明显低于嵩草草甸。灌丛草甸和沼泽草甸分别处在海拔相对较高和地表积水较多的地区,区域温度较低,地上最大生物量比温度稍高的矮嵩草草甸区低,表明地上生物量的积累主要与温度有关。

由图 2b 可知,嵩草草甸、灌丛草甸和沼泽草甸等 3 种植被类型的群落叶面积指数均在 7 月中旬达到最大( $3.98 \pm 0.10, 2.50 \pm 0.30, 3.88 \pm 0.44 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ ),与 Kato 调查的群落叶面积的极值一致<sup>[11]</sup>。三者达到最大值以前,嵩草草甸和沼泽草甸差别不大,明显高于灌丛草甸,这与灌丛草甸的植被盖度较小有关,其盖度一般在 70%,明显低于另外二者的 90%<sup>[29]</sup>。在进入逐渐下降期的时候,3 种植被类型的群落叶面积指数并无太大区别。

## 2.2 白天 NEE 与 PPFD 的拟和

3 种植被类型的白天生态系统  $\text{CO}_2$  净交换量与光合有效辐射之间能较好地符合 Michaelis-Menten 模型。在植被生长旺盛期的 7、8 月,3 种植被类型的模型达到最好的拟和效果,嵩草草甸 7 月和 8 月拟和曲线的  $R^2$  分别为 0.19 ( $n = 1490$ ) 和 0.22 ( $n = 1520$ ),而灌丛草甸两个月的  $R^2$  分别为 0.13 ( $n = 750$ ) 和 0.11 ( $n = 760$ ),拟和效果相对嵩草草甸稍差,沼泽草甸的  $R^2$  分别为 0.10 ( $n = 680$ ) 和 0.13 ( $n = 590$ ),其拟和效果最差,但与灌丛草甸相比差别不是很大,3 种植被类型的相关系数均达到了 0.01 的显著水平。嵩草草甸由于植被生长较好,整个生长季都能较好的符合 M-M 模型,其  $R^2$  平均达到了 0.17 ( $n = 1500$ )。其他二者的植被生长季开始较晚,结束较早,故在 6 月和 9 月的模拟效果较差。灌丛草甸和沼泽草甸 6 月的  $R^2$  分别为 0.05 ( $n = 800$ ) 和 0.03 ( $n = 400$ ),也达到了 0.01 的显著水平。9 月,由于电力原因导致近 2/3 数据缺失,灌丛草甸的  $R^2$  升至最大,达到了 0.25 ( $n = 50$ ),但是沼泽草甸的  $R^2$  依旧较低,为 0.08 ( $n = 80$ ),前者达到了 0.01 的显著水平,后者达到了 0.05 的显著水平。总体上,3 种植被类型的模型拟和效果较好,相关系数均达到了 0.05 的显著水平。

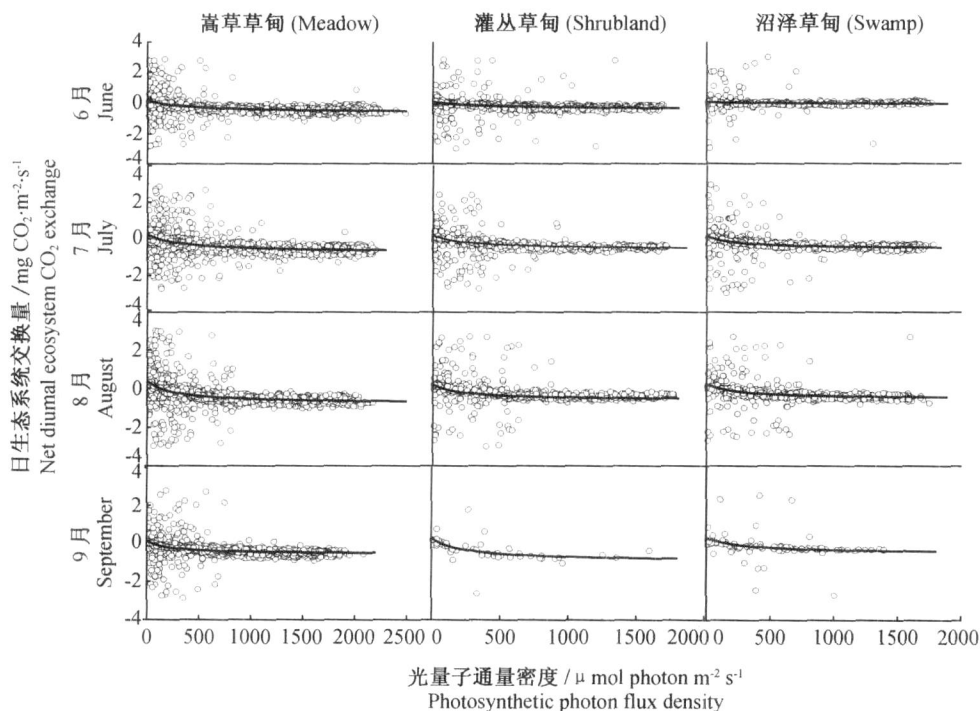


图 3 3 种植被类型生长季净生态系统  $\text{CO}_2$  的交换量与光合有效辐射拟和

Fig. 3 The fitted graphs of  $a$ ,  $P_{\max}$ , and  $R_{\text{eco}}$  in three types of vegetation ecosystems in growing season

### 2.3 $a$ 、 $P_{\max}$ 和 $R_{\text{eco}}$ 的季节动态变化

由上述拟合可以得到6-9月各月份的  $a$ 、 $P_{\max}$ 和  $R_{\text{eco}}$  (图4)。其中,灌丛草甸的  $a$  的季节动态变化不是很明显,振幅仅为  $0.00147 \text{ mg CO}_2 \cdot \mu\text{mol Photon}^{-1}$ ,6、7和9月的差别不是很大,而沼泽草甸的  $a$  的季节动态较为明显,振幅达到了  $0.00347 \text{ mg CO}_2 \cdot \mu\text{mol Photon}^{-1}$ ,只是在8、9月的差别较小,但是二者均在7月达到最大 ( $0.00251 \pm 0.001$ ,  $0.00356 \pm 0.00195 \text{ mg CO}_2 \cdot \mu\text{mol Photon}^{-1}$ )。嵩

草草甸的  $a$  的季节动态最为明显,振幅略小于沼泽草甸,达到了  $0.00345 \text{ mg CO}_2 \cdot \mu\text{mol Photon}^{-1}$ ,在8月达到最大 ( $0.00414 \pm 0.001 \text{ mg CO}_2 \cdot \mu\text{mol Photon}^{-1}$ )。总体上可知,矮嵩草草甸的  $a$  较高与其他2种类型草甸,而沼泽草甸又略大于灌丛草甸。这可能由于嵩草草甸的物种组成较为丰富(54种),群落盖度一般在90%以上,而优势种复杂,明显较高于灌丛草甸(47种)和沼泽草甸(24种)。尽管沼泽草甸的物种丰富度较小,但其群落盖度一般在95%,远大于灌丛草甸的70%<sup>[29]</sup>。

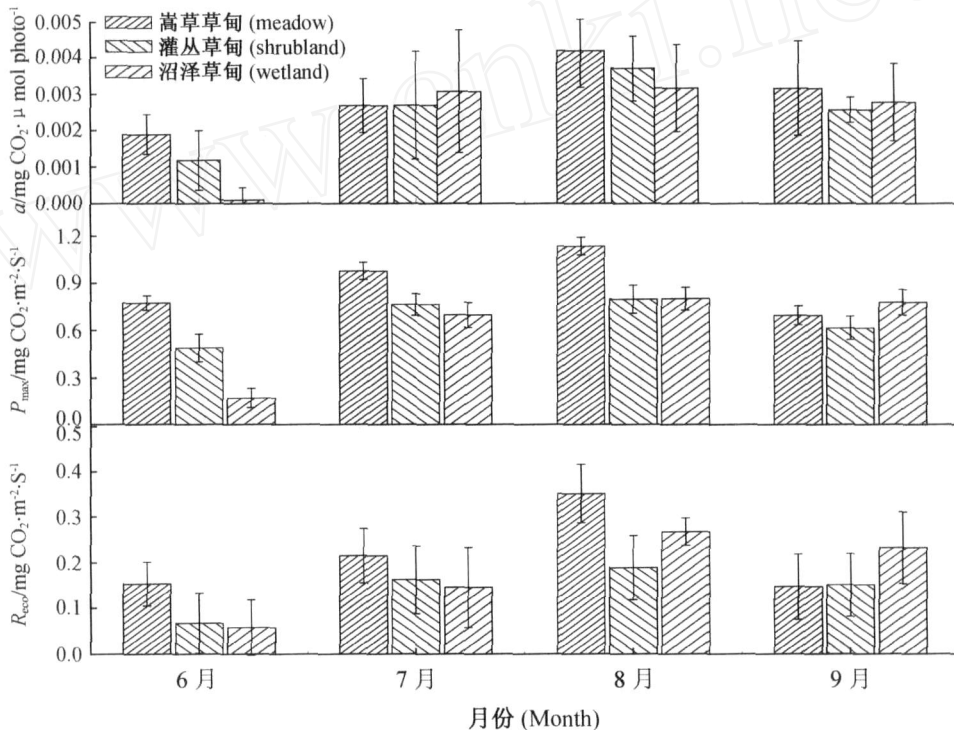


图4 3种植被类型生长季的  $a$ 、 $P_{\max}$ 和  $R_{\text{eco}}$ 的季节动态变化

Fig. 4 The seasonal dynamic of  $a$ ,  $P_{\max}$ , and  $R_{\text{eco}}$  in three types of vegetation ecosystems in growing season.

3种植被类型的  $P_{\max}$ 的变化与  $a$  有所差异,均在8月达到各自的最大值,但是嵩草草甸  $P_{\max}$  值的动态变化较明显区别与其他2种类型。3种植被类型的  $P_{\max}$  平均值的大小顺序为嵩草草甸 > 灌丛草甸 > 沼泽草甸,这与嵩草草甸的物种组成丰富,而且优势种较多,群落叶面积指数也较高有关,具有较高的最大  $\text{CO}_2$  吸收量 ( $282 \text{ g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{year}^{-1}$ <sup>[10]</sup>)。灌丛草甸的物种组成也较为丰富,但优势种单一,群落叶面积指数最低,而沼泽草甸则相反。但三者振幅大小为沼泽草甸 > 嵩草草甸 > 灌丛草甸,这由于沼泽草甸由于枯枝落叶和有机残体的分解慢,植被在6月末7月初才进入旺盛生长期,致使沼泽草甸的  $P_{\max}$  在6月最低,仅有  $0.14983 \pm 0.51391 \text{ mg}$

$\text{CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,分别是灌丛草甸和嵩草草甸的29.0%和19.8%,而在7-9月与其它二者的差别不是很大。同时,灌丛草甸和沼泽草甸的在7、8月动态变化不是很大,其值分别维持在  $0.73 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这与二者的群落结构简单有关。金露梅为灌丛草甸灌木层的单优势种,而其草本层的植物种类较少;沼泽草甸结果更为简单,仅为草本一层,优势种(帕米尔苔草)单一<sup>[29]</sup>。

### 3 讨论与结论

矮嵩草草甸的表观光量子产额的研究结果与卢存福对矮嵩草的研究结果相似(其  $a$  为  $0.0259 \text{ mg}$

$\text{CO}_2 \cdot \mu\text{mol Photon}^{-1}$ )<sup>[30]</sup>,也与 Zhang L M 等对长白山阔叶红松林的研究结果范围相符<sup>[31]</sup>。3种植被类型的  $a$  的最大值明显高于 Xu L L 等对西藏当雄高寒草甸的研究结果(极大值为  $0.00107 \text{ mg CO}_2 \cdot \mu\text{mol Photon}^{-1}$ )<sup>[14]</sup>,原因可能是在海北地区海拔较当雄的 5500 m 为低,植物生长季水热条件较好,植被生长良好,而且最大叶面积指数也明显远大于当雄的  $1.86 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ 。其  $P_{\text{max}}$  的变化规律,与师声波和 kato 对矮嵩草草甸植物群落的研究结果一致,在生长季的 6 - 8 月依次增大<sup>[11,20]</sup>,但是嵩草草甸  $P_{\text{max}}$  最大值为  $1.13364 \pm 0.05737 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,略大于 kato 的  $0.896 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

$R_{\text{eco}}$  的季节变化原因可能是  $R_{\text{eco}}$  与土壤 5 cm 温度之间的指数关系<sup>[9,11~13,28]</sup>。其中,由于嵩草草甸的 5 cm 地温较高于其他二者约 1,嵩草草甸的  $R_{\text{eco}}$  值较大,季节动态变化最为明显(最大值为  $0.35146 \pm 0.064 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),这与 kato 对 2002 年嵩草草甸生态系统的呼吸规律基本一致,生态系统呼吸的最大值为  $0.53 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,出现在 8 月中旬<sup>[11]</sup>,也较高于其他 2 种草甸类型的最大值。沼泽草甸的  $R_{\text{eco}}$  略大于灌丛草甸 ( $0.138 > 0.127 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),这与沼泽草甸常年累积的枯枝落叶和有机残体主要在 7、8 月进行分解有关,7、8 月  $R_{\text{eco}}$  分别为  $0.18354 \pm 0.09449$  和  $0.19154 \pm 0.07536 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,明显高于灌丛草甸。灌丛草甸 8 月达最大值 ( $0.16117 \pm 0.0658 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),较小于其他二者的最大值。

**3.1** 3种植被类型的地上生物量和群落叶面积指数呈现出相似的变化规律。嵩草草甸地上生物量在 8 月底最大 ( $394.60 \pm 8.75 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ),而灌丛草甸和沼泽草甸在 8 月中旬到达最大值 ( $309.68 \pm 10.85$ ,  $331.33 \pm 19.98 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ),且明显低于嵩草草甸。3种植被类型的群落叶面积指数均在 7 月中旬到达最大,嵩草草甸和沼泽草甸差别不大,明显高于灌丛草甸。

**3.2** 3种植被类型的 Michaelis-Menten 模型拟和效果较好,相关系数均达到了 0.05 的显著水平,嵩草草甸整个生长季都能较好的符合 M - M 模型,其  $R^2$  平均达到了 0.17 ( $n = 1500$ )。其他二者在 6 月和 9 月的模拟效果较差,嵩草草甸和灌丛草甸均达到了 0.01 的显著水平,沼泽草甸平均达到了 0.05 的显著水平。

**3.3** 3种植被类型的  $a$ 、 $P_{\text{max}}$  和  $R_{\text{eco}}$  均呈现出一定的季节变化规律,除沼泽草甸和灌丛草甸的  $a$  在 7 月达到最大值,其他均在 8 月份达到最大值。其中,嵩

草草甸的  $a$ 、 $P_{\text{max}}$  和  $R_{\text{eco}}$  总体上均较高于其他 2 种植被类型,同时表现出较强的季节规律。灌丛草甸的  $a$  和  $R_{\text{eco}}$  略小于沼泽草甸,其  $P_{\text{max}}$  略大于沼泽草甸,但二者的 3 个生态系统光合参数在 7 - 9 月的动态变化不甚明显,季节变化趋势较弱于嵩草草甸。

**3.4** 嵩草草甸的  $a$ 、 $P_{\text{max}}$  和  $R_{\text{eco}}$  的最大值分别为  $0.00414 \pm 0.00097 \text{ mg CO}_2 \cdot \mu\text{mol Photon}^{-1}$ 、 $1.14184 \pm 0.05699 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $0.35447 \pm 0.06409 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,明显高于灌丛草甸和沼泽草甸,除了沼泽草甸的  $R_{\text{eco}}$  略大于灌丛草甸,其  $a$  和  $P_{\text{max}}$  均略小于灌丛草甸。嵩草草甸的  $a$ 、 $P_{\text{max}}$  和  $R_{\text{eco}}$  振幅  $>$  沼泽草甸  $>$  灌丛草甸。这与嵩草草甸具有较高的物种丰富度、群落叶面积和 5 cm 地温有关。

## 参考文献

- [1] Adams J M, Faure H, Farue-Denand L, et al. Increases in terrestrial carbon storage from the Last Glacial Maximum to the present[J]. Nature, 1990, 348: 711-714
- [2] Scurlock J M O, Hall D O. The global carbon sink: a grassland perspective[J]. Global Change Biology, 1998, 4: 229-233
- [3] 李英年,赵亮,王勤学,等. 高寒金露梅灌丛生物量及年周转量[J]. 草地学报,2006, 14(1):72-76.
- [4] 郑度. 青藏高原自然地域系统研究[J]. 中国科学(D 辑), 1998, 26(4): 336-341
- [5] Zheng D, Zhang Q S, Wu S H. Mountain geo-ecology and sustainable development of the Tibetan Plateau [M]. Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic Publisher. 2000
- [6] Sun H. Formation and evolution of Qinghai-Tibetan Plateau [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press. 1996
- [7] 赵亮,徐世晓,李英年,等. 青藏高原两种草甸地表通量季节变化特征[J]. 草地学报,2006,14(3):248-253
- [8] 蒲继延,李英年,赵亮,等. 矮松嵩草草甸生物量季节动态及其与气候因子的关系[J]. 草地学报,2005,13(3):231-241
- [9] Gu S, Tang Y H, Du M Y, et al. Short-term variation of  $\text{CO}_2$  flux in relation to environmental controls in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical research, 2003, 108: 4670-4679
- [10] Kato T, Tang Y, Gu S, et al. Carbon dioxide exchange between the atmosphere and an alpine meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 124: 121-134
- [11] Kato T, Tang Y, Gu S, et al. Seasonal patterns of gross primary production and ecosystem respiration in an alpine meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical research, 2004, 109: 109-118
- [12] Zhao L, Li Y N, Gu S, et al. Carbon dioxide exchange be-

- tween the atmosphere and alpine shrubland meadow during the Growing season on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Journal of Interative plant biology*, 2005, 47 (3) : 271-282
- [13] Zhao L, Li Y N, Zhao X Q, *et al.* Comparative study of net exchange ecosystem of CO<sub>2</sub> in 3 types vegetation ecosystems on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50: 1767-1774
- [14] Xu L L, Zhang X Z, Shi P L, *et al.* Establishment for apparent quantum yield and maximum ecosystem assimilation on Tibetan Plateau alpine meadow ecosystem[J]. *Science in China Series D: Earth Science*, 2005, 48 (Supply) : 141-147
- [15] Ruimy A, Javis P G, Baldocchi D D, *et al.* CO<sub>2</sub> fluxes over plant canopies and solar radiation: a review[J]. *Advance in Ecological Research*, 1995, 26: 1-69
- [16] Schulze E D, Caldwell M M. *Ecophysiology of photosynthesis* [M]. Beilin, Heidelberg, Germany: Springer-Verlag. 1994
- [17] 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[J]. *生态学报*, 2000, 20(1) : 35-38
- [18] 易现峰, 贲桂英, 师生波, 等. 高寒草甸矮蒿草种群光合作用及群落生长季节变化[J]. *中国草地*, 2000, 1: 12-15
- [19] 张树源, 陆国泉, 武海, 等. 青海高原主要 C3 植物的光合作用[J]. *植物学报*, 1992, 34(3) : 176-184
- [20] 师声波, 贲桂英, 韩发. 矮蒿草甸植物群落的光合特性研究[J]. *植物生态学报*, 1996, 20: 225-234
- [21] 周兴民. 中国高草草甸[M]. 北京: 科学出版社. 2001
- [22] Baldocchi D D, Hicks B B, Meyers T P. Measuring biosphere-atmosphere exchange of biologically related gases with micrometeorological methods[J]. *Ecology*, 1988, 69 (5) : 1331-1340
- [23] Andrew E S, Shashi B, Verma. Year-round observations of the net ecosystem exchange of carbon dioxide in a native tall-grass prairie[J]. *Global Change Biology*, 2001, 7: 279-289
- [24] Douglas W A, Heuer M L, Mayeux H S. Carbon dioxide fluxes over bermudagrass native prairie and sorghum[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 93: 121-139
- [25] Kim J, Verma S B. Carbon dioxide exchange in a temperate grassland ecosystem [J]. *Bound Layer Meteorology*, 1990, 52: 135-149
- [26] 李英年, 赵新全, 曹广民, 等. 河北高寒草甸生态系统定位站气候、植被生产力背景分析[J]. *高原气象*, 2004, 23(4) : 558-568
- [27] Webb E K, Pearman G, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water transfer[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1980, 106: 85-100
- [28] Falge E, Baldocchi D D, Olson R, *et al.* Gap filling strategies for defensible and annual sums of net ecosystem exchange[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107: 43-69
- [29] 周兴民, 吴珍兰. 植被与植物检索表[M]. 西宁: 青海人民出版社. 2006
- [30] 卢存福, 贲桂英, 韩发, 等. 矮蒿草光合作用与环境因素关系的比较研究[J]. *植物生态学报*, 1995, 19: 72-78
- [31] Zhang L M, Yu G R, Sun X M, *et al.* Seasonal variations of ecosystem apparent quantum yield and maximum photosynthesis rate of different forest ecosystem in China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006:176-187

(责任编辑 才杰)

## 《草业学报》征订启事

《草业学报》创刊于 1990 年,由中国草学会、兰州大学草地农业科技学院、甘肃草原生态研究所共同主办,是国内外公开发行的高级学术期刊。由任继周院士任名誉主编,南志标教授任主编。本刊为:中国科学引文数据库(CSCD)核心期刊,中国科技论文统计源期刊,英国 CABI 文摘数据库来源期刊,《中国生物学文摘》中国生物学文摘数据库收录期刊,中国核心期刊(遴选)数据库收录期刊,《中国学术期刊(光盘版)》全文收录期刊,《万方数据-数字化期刊群》入网期刊。

据中国科学技术信息研究所 2006 年 12 月出版的《中国科技期刊引证报告》统计,《草业学报》的影响因子为 1.627,在全国被统计的 1652 种期刊中排名第 22 位,在畜牧兽医类期刊中排名第一位,荣获“百种中国杰出学术期刊”。2005 年评为“甘肃省优秀科技期刊”。

本刊主要报道国内外草业科学及其相关领域,如畜牧学、农学、林学、经济学等领域的高水平理论研究和技术创新成果,发表国内外草业领域创新性的研究论文,刊载学术价值较高的草业科学专论、综述、评论等,探讨草业发展的新理论与新构思,是草业新秀成长的园地,推动草业科学发展的论坛。其读者对象主要是从事农林牧渔、园林绿化、生态环境、国土资源等领域的科研管理及教学等专业人员。

本刊为双月刊,大 16 开本,130 页,定价 10 元,邮发代号:54-84,全国各地邮局均可订阅,若错过订期,可在本编辑部直接办理订阅。

地址:兰州市嘉峪关西路 768 号(或兰州市 61 号信箱)《草业学报》编辑部

邮编:730020 电话:0931-8913494, E-mail:cyxb@lzu.edu.cn。