

青藏高原矮嵩草草甸和金露梅灌丛草甸 CO₂ 通量变化与环境因子的关系*

赵 亮¹, 徐世晓¹, 李英年¹, 唐艳鸿²,
赵新全¹, 古 松¹, 杜明远³, 于贵瑞⁴

(1 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001 2 日本国立环境研究所, 日本 筑波 3050053 3 日本农林环境技术研究所, 日本 筑波 30508604 4 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘 要 利用涡度相关技术观测了青藏高原两个典型的生态系统即矮嵩草(*Kobresia humilis*)草甸和金露梅(*Potentilla fruticosa*)灌丛草甸的 CO₂ 通量, 并就 2003 年 8 月份的数据, 分析了生态系统通量变化与环境因子的关系。8 月份是这两个生态系统的叶面积指数达到最高也是相对稳定的时期, 在此期间矮嵩草草甸和金露梅灌丛草甸净碳吸收量分别达 56.2 和 32.6 g C · m⁻², 日 CO₂ 吸收量最大值分别为 12.7 μmol · m⁻² · s⁻¹ 和 9.3 μmol · m⁻² · s⁻¹, 排放量最大值分别为 5.1 μmol · m⁻² · s⁻¹ 和 5.7 μmol · m⁻² · s⁻¹。在相同光合有效光量子通量密度(PPFD)条件下, 矮嵩草草甸 CO₂ 吸收速度大于金露梅灌丛草甸。在 PPFD 高于 1 200 μmol · m⁻² · s⁻¹ 的条件下, 随气温增加, 两生态系统的 CO₂ 吸收速度都下降, 但矮嵩草草甸的下降速度(-0.086)比金露梅灌丛草甸(-0.016)快。土壤水分影响土壤呼吸, 并且影响差异因植被类型不同而不同。生态系统日 CO₂ 吸收量随昼夜温差增加而增大。较大的昼夜温差导致较高的净 CO₂ 交换量。植物反射率与 CO₂ 通量之间存在负相关关系。

关键词 高寒草甸 植被类型 生态系统净 CO₂ 交换量 涡度相关法

中图分类号 Q 948.12 文献标识码 A

Relations between Carbon Dioxide Fluxes and Environmental Factors of *Kobresia humilis* Meadows and *Potentilla fruticosa* Meadows

ZHAO Liang¹, XU Shi-xiao¹, LI Ying-nian¹, TANG Yan-hong²,
ZHAO Xin-quan¹, GU Song¹, DU Ming-yuan³, YU Gui-ru⁴

(1 Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China 2 National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Ibaraki 3050053, Japan 3 National Institute for Agro-Environmental Science, Tsukuba, Ibaraki 3058604, Japan 4 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Beijing 100101, China)

Abstract Carbon dioxide fluxes of *Kobresia humilis* and *Potentilla fruticosa* meadows, two typical ecosystems in Qinghai-Tibet Plateau, were measured by eddy covariance technology and the data collected in August 2003 were employed to analyze the relations between carbon dioxide fluxes and environmental factors of the ecosystems. August is the period of time for the two ecosystems to reach their peak leaf area indexes and keep stable, and during the period the net carbon absorptions of *Kobresia humilis* and *Potentilla fruti-*

* 收稿日期 2005-05-31 修改稿收到日期 2005-10-25

基金项目 中国科学院知识创新工程项目(KZCX1-SW-01-01A5) 国家“973”项目(2002cb412501)

作者简介 赵 亮(1974-), 男(汉族), 助理研究员, 从事生态学和数学建模研究. E-mail: zhaol@mwjpb.ac.cn

cosa meadows reach $56.2 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ and $32.6 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ with their highest daily carbon dioxide absorptions standing at $12.7 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ and $9.3 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, and their highest carbon discharges arriving at $5.1 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ and $5.7 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively. At the same photosynthetic photo flux densities (PPFD), the carbon dioxide-up-taking rate of *Kobresia humilis* meadow is higher than that of *Potentilla fruticosa* meadow where the photosynthetic photo flux densities (PPFD) are higher than $1200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, the carbon dioxide up-taking rates of the two ecosystems declined with increased air temperature, but the carbon dioxide rate of *Kobresia humilis* meadow decreased more quickly (-0.086) than that of *Potentilla fruticosa* meadow (-0.016). The soil moistures exert influence on the soil respirations and the influences vary with the vegetation types. The daily carbon dioxide absorptions of the ecosystems increase with increased diurnal temperature differences and higher diurnal temperature differences results in higher carbon dioxide exchanges. There exists a negative correlation between the vegetation albedos and the carbon dioxide fluxes.

Key words alpine meadow vegetation type net carbon dioxide exchange eddy covariance technology

青藏高原的草地生态系统多分布在海拔 3 000 m 以上。高寒草甸和高寒灌丛草甸共约占整个青藏高原面积的三分之一，是青藏高原分布面积最广的草地生态系统，是陆地生态系统的重要组成部分，对全球碳循环具有重要的作用^[1,2]。但到目前为止，对草地生态系统的研究多集中于海拔较低的地域，对海拔较高，尤其是对辽阔的青藏高原的草地生态系统碳收支研究还远远不够，所以探讨该类生态系统的碳循环对认识整个青藏高原草地生态系统乃至世界高海拔草原生态系统的碳循环都具有重要的意义。

高寒草甸和高寒灌丛草甸的土壤是在青藏高原隆升以后，在长期寒冷气候环境下形成的寒冻锥形土^[3]。由于土壤温度低而水分含量高，这类生态系统的有机残体分解慢^[4]，土壤有机质含量高。因此全球气候变暖有可能加速这类生态系统的分解过程。近年来的一些研究表明^[5]，青藏高原气温在不断升高，季节冻土及多年冻土退化，生态系统水热条件的变化无疑会进一步影响土壤有机质以及其它温室效应气体的动态。但是，对于这一地区的草地生态系统的土壤可能会发生何种变化几乎一无所知。另外，青藏高原夜间温度低，即使在最暖的 7 月份清晨气温也可以下降到 0 以下，同时白昼太阳辐射强，温度高，升温也快。这样的温度环境有利于白天的光合、碳吸收而不利于夜间的碳分解，结果是生态系统可能具有较高的碳蓄积能力^[6,7]。Gu 等^[8]的观测结果已经初步证实较大的昼夜温差有利于高寒草甸的碳

积累^[6]。但是，现在还不知道其它高原生态系统是否具有同样的反应。

利用涡度相关法技术对矮嵩草草甸和金露梅灌丛草甸两种不同生态系统的 CO₂ 通量进行了长期观测，选择叶面积指数都达到最高并且最稳定的 8 月份数据，比较这两个典型生态系统碳循环过程以及环境对碳收支的影响。

1 材料与方法

1.1 研究地点概况

本研究于 2003 年 8 月在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站(图 1)进行。海北站地处青藏高原东北隅的青海省海北藏族自治州门源回族自治县境内，祁连山北支冷龙岭东段南麓坡地的大通河河谷西段，地理位置为 $37^{\circ}29' \sim 37^{\circ}45' \text{N}$, $101^{\circ}12' \sim 101^{\circ}23' \text{E}$ ，站区地形开阔，海拔在 3 200~ 3 600 m。该地区位于亚洲大陆腹地，具明显的高原大陆性气候，东南季风及西南季风微弱。受高海拔条件的制约，气温极低，按气候四季的标准划分，无明显四季之分，仅有冷暖二季之别，干湿季分明，空气稀薄，大气透明度高。年内无绝对无霜期，相对无霜期约为 20 d 左右，在最热的 7 月仍可出现霜冻、结冰、降雪(雨夹雪)等冬季所能有的天气现象。表现出冷季寒冷、干燥、漫长，暖季凉爽、湿润、短暂。

1.2 观测方法及资料处理

在 8 月 30 日测定了地上、地下生物量、叶面积

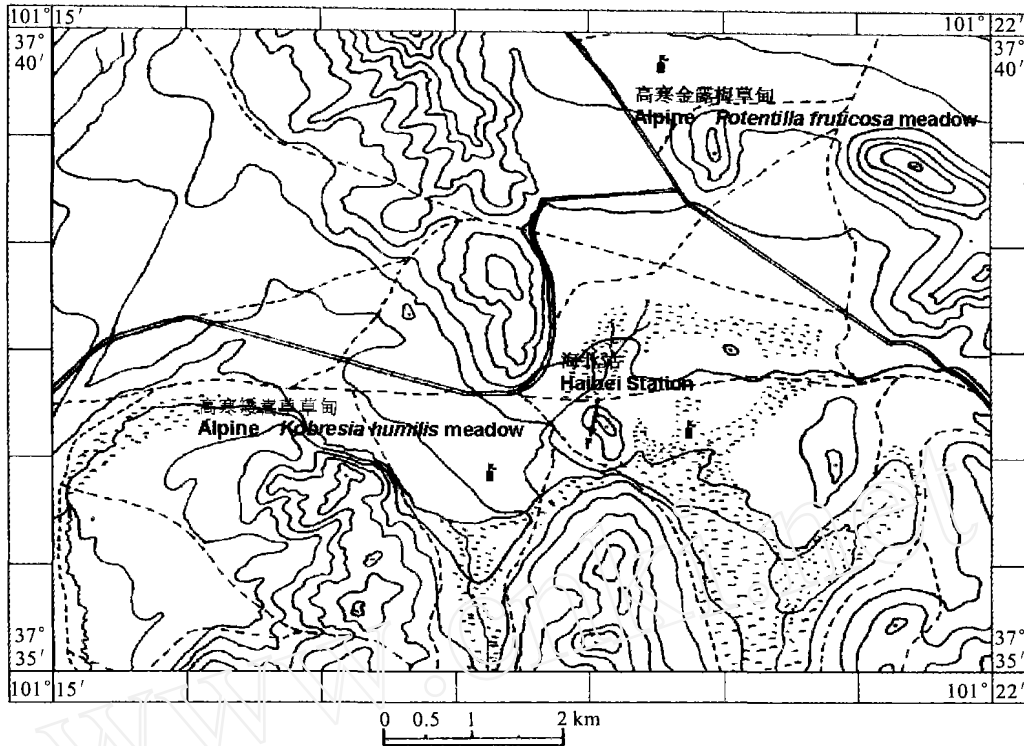


图 1 观测塔地形图

Fig 1 Topographical map around the flux tower

指数、土壤有机质等。地上生物量采用收割法,在 2 种不同植被类型随机选择 6 个 50 cm × 50 cm 的样方,用剪刀齐地面剪下装入纸袋。地下生物量在取过地上生物量的样方内再随机选择 3 个 25 cm × 25 cm 的二级样方,垂直分 0~ 10 cm、10~ 20 cm 和 20~ 40 cm 3 个层次,用铁铲和切刀分层取出,并及时筛选出草根装袋,再分样冲洗干净。然后在 65 °C 恒温烘箱内烘干至恒重后称重,单位取 g · m⁻²。叶面积指数采用(Li-3100, Li-cor Inc., Nebraska, USA)叶面积仪测定。土壤有机质测定是在取地下生物量的同时,分层收回少量土壤样品,送至中国科学院西

北高原生物研究所测试中心分析,采用重铬酸钾氧化-外加热法。通过以上资料分析及整理,以及对两种植被类型 CO₂ 通量观测站附近植物群落调查情况列于表 1。CO₂ 通量观测塔(涡度相关观测系统)分别设置矮嵩草草甸和金露梅灌丛草甸地势平坦,地形开阔,具有足够大的“风浪区”的中心带(图 1),其地理坐标分别为 37° 29' N、101° 23' E、海拔 3 180 m 和 37° 29' N、101° 23' E、海拔 3 250 m。观测系统离地面 220 cm 高,主要部分有 CSA T 型超声风速仪温度计(CSI)和 LI-7500 CO₂/H₂O 红外分析仪(Li-cor, Inc),其它观测项目见表 2。

表 1 观察点植被特征及相关要素

Table 1 Vegetation characters and other factor

类型 Type	建群种 Dominant species	植被高度 Vegetation height(cm)	土壤类型 Soil type	地上生物量 Above-ground biomass (g · m ⁻²)	地下生物量 Under-ground biomass (g · m ⁻²)	叶面积指数 Leaf area index (m ² · m ⁻²)	土壤有机质 Soil organic matter(g · kg ⁻¹)		
							0~ 10 cm	10~ 20 cm	20~ 40 cm
高寒灌丛 Alpine shrubs	金露梅 <i>Potentilla fruticosa</i>	60~ 70	暗沃寒冻锥形土 Mol-cryic cambisols	278.29	339.59	2.6	7.54	5.71	3.68
高寒草甸 Alpine meadows	矮嵩草 <i>Kobresia humilis</i>	25~ 30	草毡寒冻锥形土 Organic-cryic gleysols	1467.56	1276.06	2.8	5.19	5.01	3.04

表 2 观测要素及安装高度

Table 2 Measured parameters and instrument-positioned heights

观察要素 Meteorological elements	仪器介绍 Instruments or sensor	设置高度 Location(cm)
CO ₂ 和 H ₂ O 浓度 CO ₂ and H ₂ O concentrations	Li7500, LiCor, USA	220
三维风速和空气 Vertical wind and air temperature	CSAT3, CSI, USA	220
净辐射 Net radiation	CNR-1, Kipp and Zonen, Netherlands	150
光量子通量 Photosynthetic photon flux density	Li190SB, LiCor, USA	150
风速和风向 Wind speed and direction	014A and 034A-L, CSI, USA	110, 220
空气温度和湿度 Air temperature and humidity	HUM P45C, CSI, USA	110, 220
地表面温度 Soil surface temperature	107, CSI, USA	0
土壤热通量 Soil heat flux	HFT-3, CSI, USA	- 2
土壤温度 Soil temperature	105T, CSI, USA	- 2, - 5, - 10, - 20, - 30, - 40, - 50, - 60, - 70
土壤含水量 Soil water content	TDR, CS615, CSI, USA	- 5, - 20, - 50
降雨量 Precipitation	TE523MM, CSI, USA	50

数据取自 8 月 1 日至 8 月 31 日。当有降水或清晨有露水时,因在 CO₂/H₂O 分析仪的探头上常存在水珠,水汽对通量有一定的影响,从而对出现类似现象的数据,以及出现较大“野点”的数据在统计时剔除,并运用 WPL 方法^[9]对通量值进行校正,并且取摩擦速度阈值 $U^* > 0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的通量值 (F_c) 与 5 cm 土壤温度 (T_s) 拟合得到的指数方程 (1) 式来插补夜间 $U^* < 0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的和丢失的通量数据,利用通量 (F_c) 与光合有效辐射 (PPFD) 拟合得到的方程 (2) 式来插补白天丢失的通量数据。

$$F_c = R_{10} Q_{10}^{(T_s - 10)/10} \quad (1)$$

$$F_c = \frac{a_1 \cdot \text{PPFD}}{a_2 + \text{PPFD}} + a_0 \quad (2)$$

(1) 式中 R_{10} 为温度在 10 时的系统呼吸量 Q_{10} 为温度每升高 10 的系统呼吸量;(2) 式中 a_0 , a_1 和 a_2 为拟合常数。

2 结果与分析

2.1 不同植被类型区光合有效辐射(PPFD), 空气温度(T_a), 5 cm 的土壤温度(T_s) 和实际水汽压(D) 变化特征

因实验地区海拔高,大气透明,太阳总辐射强烈,PPFD 也较高(图 2),2003 年 8 月日均 PPFD 达 $27.45 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,最大 PPFD 约 $2.330 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。尽管 PPFD 较高,但 T_a 比较低,矮嵩草草甸和金露梅灌丛草甸 2 种不同植被类型区 8 月平均气温分别为 10.04 和 9.96 。但 2 植被区气温日较差大,气温日间最低可降至 -3 以下,最高可

升高到 15 。气温不仅在日间变化强烈,而且因 8 月正是青藏高原由暖季向冷季转换交替时期,月内日平均气温变化明显,如矮嵩草草甸日平均气温在 $3.79 \sim 27.53$ 之间,金露梅灌丛草甸区日平均气温在 $3.87 \sim 19.48$ 之间。同期 2 种植被类型区 T_s 日变化则相对平稳,温度日较差平均分别保持在 7.39 和 6.76 左右,日平均分别为 15.75 和 12.46 。D 变化范围较小(图 2),嵩草草甸和灌丛草甸分别从 $0.48 \sim 3.51 \text{ kPa}$ 和从 $0.43 \sim 1.43 \text{ kPa}$ 。

由图 2 可以看到,因金露梅灌丛草甸区海拔高于矮嵩草草甸,加之植被和土壤类型及土壤结构不同分布,矮嵩草草甸 T_a , T_s , D 显著高于金露梅灌丛草甸 ($T_a: t = 7.29, df = 3.140, P < 0.0001$; $T_s: t = 36.65, df = 3.010, P < 0.0001$; D: $t = 39.55, df = 4.436, P < 0.0001$)。

2.2 生态系统净 CO₂ 交换量

高寒草甸生态系统净 CO₂ 交换量 (F_c) 有明显的日变化。8 月虽然植物生长进入成熟阶段,到后期植物干物质积累缓慢^[11]。在白天,近地表层(作用层)吸收大气中的 CO₂,夜间作用层向大气排放 CO₂ 并且变化明显。其吸收/排放量的大小因植被类型不同而存在显著差异(图 3)。一般矮嵩草草甸生态系统的 CO₂ 吸收的最大值明显高于金露梅灌丛草甸,而最大排放量矮嵩草草甸又明显小于金露梅灌丛草甸。统计发现矮嵩草草甸和金露梅灌丛草甸在 8 月份生态系统净 CO₂ 交换量分别为 -56.16 和 $-32.62 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$,矮嵩草草甸 CO₂ 吸收量比金露梅灌丛草甸高 42%。

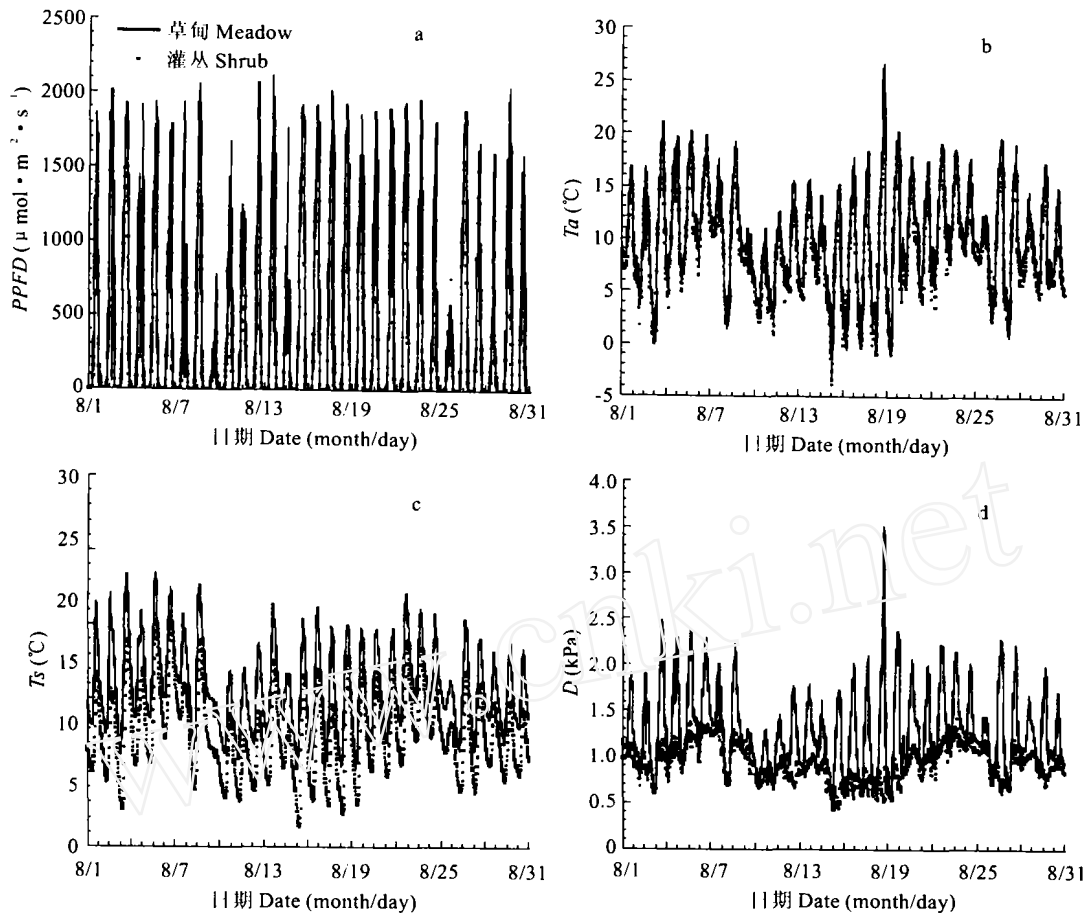


图 2 光合有效辐射(PPFD)(a)、空气温度(Ta)(b)、5 cm 的土壤温度(Ts)(c)和饱和水汽压(D)(d)的变化

Fig. 2 Change of the photosynthetic photon flux densities (PPFD) (a), air temperature (Ta) (b), temperature at the soil depth of 5 cm (Ts) (c) and air vapor pressure deficit (D) (d)

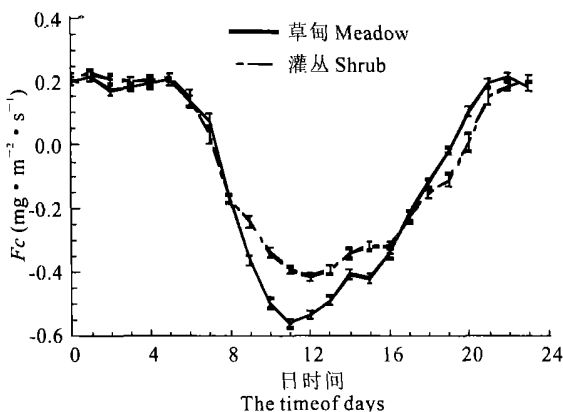


图 3 净生态系统 CO₂ 交换量(Fc)的日变化

Fig. 3 Diurnal net CO₂ exchange fluxes (Fc)

2.3 土壤温度和水对净生态系统 CO₂ 交换量的影响

在探明土壤含水量对高寒草甸生态系统 CO₂ 排放量的影响时,首先将观测期 5 cm 土壤含水量划

分为 3 个区间.在划分区间时,由于土壤含水量范围在不同草甸的类型之间差异,将矮高草甸的土壤水分划分为小于 0.40、0.40~0.50 和大于 0.50 三个区间,将金露梅灌丛草甸的土壤含水量划分为小于 0.25、0.25~0.30 和大于 0.30 三个区间.然后再在对土壤含水量这 3 个不同区间划分的条件下研究 CO₂ 通量与土壤温度的关系(表 3,图 4).由表 3 和图 4 可知,高寒草甸生态系统中植被呼吸强度及 CO₂ 通量与土壤温度关系不仅因水分条件的不同而不同,而且在 2 种植被类型也存在明显的差异.在矮高草甸区域,当土壤水分小于 0.40 或大于 0.50 时,CO₂ 通量随着土壤温度升高而增大.土壤水分在 0.40~0.50 之间时,CO₂ 通量不随土壤温度的增大而改变,基本保持稳定, Q₁₀ 近接 1(表 3).在金露梅灌丛草甸区,不同土壤水分条件下的 CO₂ 通量与土壤温度关系与矮高草甸区截然相反,当土壤水分小于 0.25 或大于 0.30 时,CO₂ 通量随土壤温度升高而降低.土壤水分在 0.25~0.30 条件下,CO₂ 通

量随土壤温度的升高而增加。由表 3 还可以看出不同土壤水分条件下, 2 种植被类型的 Q_{10} 大小不同, 矮嵩草草甸在土壤水分小于 0.40 或大于 0.50 时的 Q_{10} 大于土壤水分在 0.40~0.50; 而金露梅灌丛草甸

土壤水分小于 0.25 或大于 0.30 时小于在 0.25~0.30; 金露梅灌丛草甸在较低和较高土壤水分时, Q_{10} 值大小基本上一致。

表 3 CO_2 通量与土壤温度之间关系式系数

Table 3 Coefficients of the relations between the carbon dioxides fluxes (F_c) and the temperature of the soil depth of 5 cm (T_s) in nighttime

类型 Type	土壤含水量 Soil water content ($m^3 \cdot m^{-3}$)	R_{10} ($mg/10^\circ$)	Q_{10} ($mg/10^\circ$)	F 检测 F test
蒿草草甸 A lpine meadow	< 0.40	0.16	2.00	$F(2,63)=90.03^{**}$
	0.40~0.50	0.22	0.98	$F(2,519)=455.54^{**}$
	> 0.50	0.16	1.55	$F(2,141)=137.11^{**}$
灌丛草甸 A lpine shrub	< 0.25	0.18	0.70	$F(2,23)=25.76^{**}$
	0.25~0.30	0.17	1.85	$F(2,355)=374.75^{**}$
	> 0.30	0.18	0.75	$F(2,59)=82.99^{**}$

注: ** 表示 0.01 水平差异显著性。

Note: ** means significant difference at $P=0.01$ level

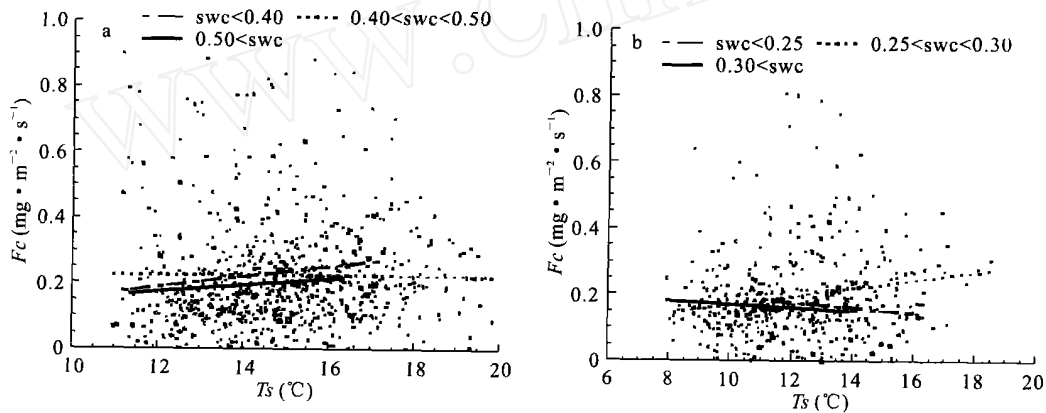


图 4 不同水分条件下(SWC)高寒草甸(a)和灌丛(b)夜间 CO_2 通量(F_c)与土壤温度(T_s)的关系

Fig. 4 The CO_2 fluxes densities (F_c) and temperatures at the soil depth of 5 cm of the (T_s) alpine meadow (a) and shrubs (b) at 3 different soil moistures (SWC) in inighttime

2.4 光合有效辐射(PPFD)与 CO_2 的交换量关系

为探明光合有效辐射(PPFD)对 CO_2 的交换量的影响, 根据测定值分析了不同天气状况下(多云或少云)的 PPFD 与总碳吸收量(G_c)之间的关系。 G_c 由测定的 CO_2 通量和估计的生态系统排放量(Re)求和得到, 即 $G_c = F_c + Re$ 。其中 Re 可由(1)式求得。不同植被类型在不同天气状况下的 PPFD 与 G_c 之间关系如图 5 所示。不同植被类型在不同天气状况下, G_c 对 PPFD 响应趋势是一致, 均随 PPFD 的升高而增大。另一方面, 在较低 PPFD 条件下, G_c 随着 PPFD 迅速增大。然而, 在较高的 PPFD 条件下, G_c 几乎不随 PPFD 增大而增大, 二者相互独立。在相同的 PPFD 的条件下, 矮嵩草草甸 $G_c(25.81 g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1})$ 大于金露梅灌丛草甸 $(20.02 g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1})$ 。

$d^{-1})(t=14.84, df=1491, P<0.001)$ 。少云天气状况下 G_c 日平均量与多云天气状况下的大小因植被不同而不同, 在矮嵩草草甸区少云天气状况下日平均量 $G_c(26.41 g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1})$ 显著地高于多云天气状况下的日平均量 $G_c(25.28 g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1})(t=2.10, df=1303, P<0.05)$; 而在金露梅灌丛草甸, 少云天气状况下日平均量 $G_c(19.39 g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1})$ 显著低于多云天气状况下的日平均量 $G_c(20.61 g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1})(t=-2.15, df=560, P<0.05)$ 。当 $PPFD > 1200 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, 净 CO_2 交换量(F_c)随着温度从 10 到 22 变化而显著地降低(图 6), 蒿草草甸的降低速率大于灌丛草甸的降低速率。这一结果证明, 在一个较高的 PPFD 水平下, 温度对呼吸的影响比 PPFD 对呼吸影响大, 并且不同的草甸类

型对温度响应程度是不一样的。

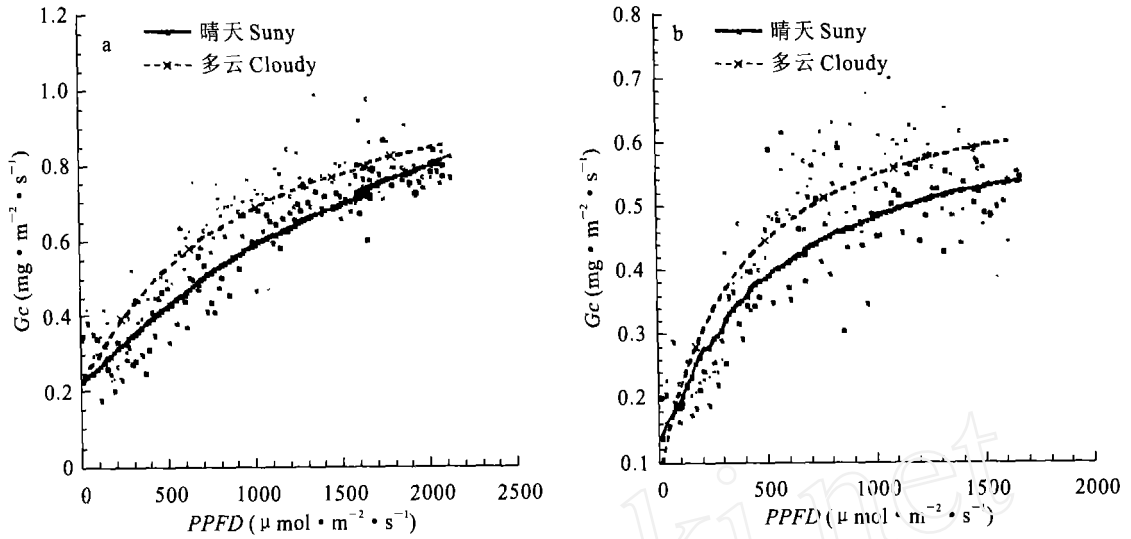


图 5 不同天气状况下高寒草甸(a)和灌丛(b)的总 CO₂ 吸收量(Gc)与光合有效辐射(PPFD)之间的关系
 Fig. 5 Relation between the gross CO₂ uptakes (Gc) and photosynthetic photon flux densities (PPFD) of the alpine meadows (a) and shrubs (b) under two typical weathers, sunny and cloudy weathers

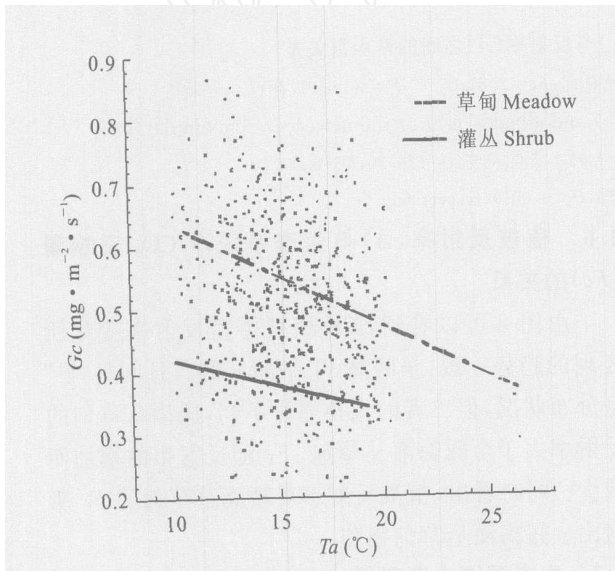


图 6 在 PPFD > 1 200 μmol·m⁻²·s⁻¹ 条件下空气温度(Ta)与净生态系统 CO₂ 交换量(Fc)之间的线性关系
 高草草甸 $F_c = -0.086T_a + 0.5078, F_{(1,131)} = 9.92, P < 0.001$
 灌丛草甸 $F_c = -0.0163T_a + 0.8010, F_{(1,439)} = 64.30, P < 0.001$

Fig. 6 Linear relation between the air temperatures (Ta) and CO₂ exchanges (Fc) of the net ecosystems with the PPFD > 1 200 μmol·m⁻²·s⁻¹
 The linear relations for the meadows and shrubs are $F_c = -0.086T_a + 0.5078 (F_{(1,131)} = 9.92, P < 0.001)$ and $F_c = -0.0163T_a + 0.8010 (F_{(1,439)} = 64.30, P < 0.001)$, respectively.

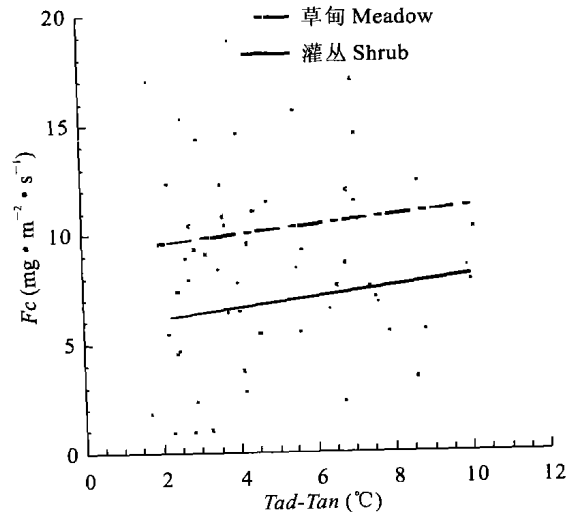


图 7 气温差(Tad- Tan)与净生态系统 CO₂ 交换量(Fc)之间的关系
 线性关系 高草草甸 $F_c = 0.2194(T_{ad} - T_{an}) + 9.1116, F_{(1,26)} = 0.36, P > 0.05$
 灌丛草甸 $F_c = 0.2496(T_{ad} - T_{an}) + 5.6527, F_{(1,26)} = 0.69, P > 0.05$

Fig. 7 Relationship between net daily CO₂ exchange (Fc) and day/night temperature difference (Tad- Tan)
 The linear relations are given for meadow : $F_c = -0.2194(T_{ad} - T_{an}) + 9.1116 (F_{(1,26)} = 0.36, P > 0.05)$, and $F_c = 0.2496(T_{ad} - T_{an}) + 5.6527 (F_{(1,26)} = 0.69, P > 0.05)$, respectively

2.5 昼夜温差与净 CO₂ 交换量的关系

因高寒草甸植物具有耐寒抗寒能力,在温度小于-7 的低温环境条件下仍可正常生长,即表明植物可进行光合作用.矮嵩草草甸和金露梅灌丛草甸的8月份白天(从日出到日落)的平均气温比较低,分别为11.43 和11.02 ,晚上的平均气温分别为

7.07 和6.07 .2种植被类型的最大昼夜温差可达到11 .为了探明温差对生态系统净CO₂ 交换量的影响,统计分析了温差与生态系统净CO₂ 交换量的关系(图7).虽然生态系统净CO₂ 交换量与温差相关性不甚显著,但是生态系统净CO₂ 交换量随日温差的增加而增大.

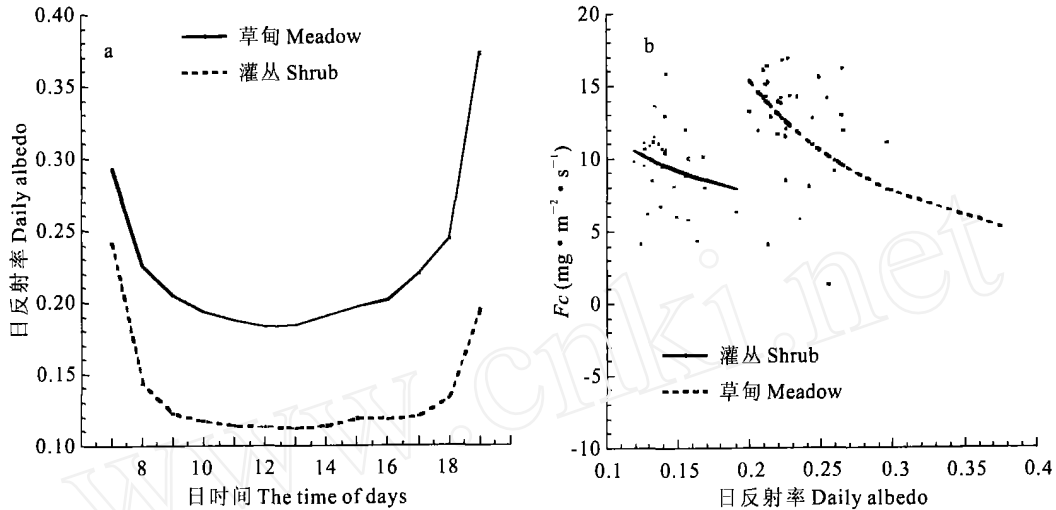


图8 白天的净生态系统CO₂ 交换量(F_c)与反射率(A)之间的幂函数关系

高草草甸 $F_c = 0.96A^{-1.72}$, $F_{(2,30)} = 126.30$, $P > 0.001$ 灌丛草甸 $F_c = 2.81A^{-0.62}$, $F_{(2,30)} = 191.36$, $P < 0.001$

Fig. 8 Exponential-function relation between CO₂ fluxes (F_c) and albedos (A) of the net ecosystems in daytime

The relation for the meadows and shrubs are $F_c = 0.96A^{-1.72}$ ($F_{(2,30)} = 126.30$, $P > 0.001$), and $F_c = 2.81A^{-0.62}$ ($F_{(2,30)} = 191.36$, $P < 0.001$), respectively

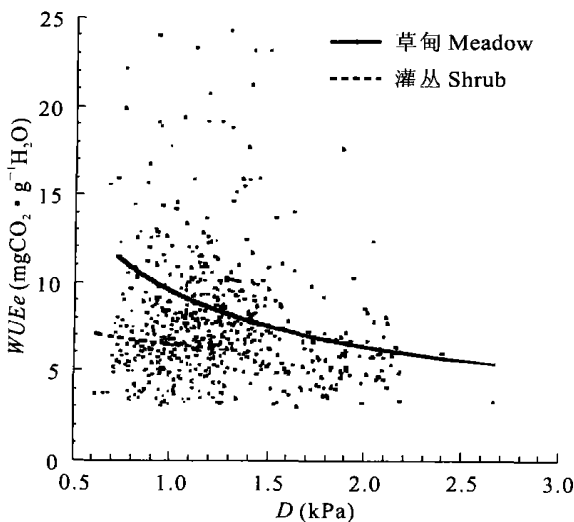


图9 饱和水汽压(D)与生态系统水汽利用效率(WUE_e)的关系

Fig. 9 Relation between the water use efficiencies (WUE_e) of the net ecosystems and vapor pressure deficits (D)

2.6 植被反射率(A)与生态系统净CO₂ 交换量(F_c)的关系

由图8可以看到,2种植被类型反射率变化所表现的趋势一致,早晚高,中午前后低.日间呈“U”型分布状况,但二者的大小显著不同,矮嵩草草甸的反射率大于金露梅灌丛草甸.F_c 随反射率的增加而减少.同时看出,植被反射率对矮嵩草草甸的F_c 影响比金露梅灌丛草甸强烈.

2.7 生态系统水汽利用效率(WUE_e)

为了评价WUE_e,采用Baldocchi^[10]方法,用CO₂ 通量和水汽通量分别代替植物光合作用吸收的CO₂ 量和蒸发量来计算WUE_e.WUE_e 被定义为总CO₂ 吸收量(G_c)与水汽通量(E)的比,即总WUE_e = G_c/E.从图9可以看出,当实际水汽压(D)较小时,WUE_e 比较大,当D 较大时,WUE_e 达到一个比较稳定的值.高草草甸的WUE_e 比灌丛草甸高.

3 讨论

本研究发现在草盛期,青藏高原高寒草甸生态

系统和相同海拔草地或生态系统^[12~14]相比具有较高的净 CO₂ 吸收量,这印证了高寒草甸在很短的生长期具有较高的生产力的观测结果^[6~8,15]。但是,这两个生态系统在白天吸收和晚上放出 CO₂ 量的最大值却都比较小,说明高寒草甸吸收和放出 CO₂ 的潜在能力要小于同纬度的其它草地或森林生态系统,其原因可能是高寒地区的低温限制了生态系统的 CO₂ 交换能力。

比较矮嵩草草甸和金露梅灌丛草甸在 8 月份碳固定速度发现,矮嵩草草甸的碳吸收速度明显高于金露梅灌丛草甸。有 3 个因素可能导致这种差异:(1)矮嵩草草甸具有较高的叶面积指数^[16],因而吸收光能多,有可能多固定一些碳;(2)矮嵩草草甸的土壤水分条件比金露梅灌丛草甸好,有利于光合作用;(3)金露梅灌丛草甸具有较高的土壤有机质,这使得土壤呼吸较高,结果净生产力下降。

在全球气候变暖的背景下,土壤有机碳将受到温度、降水等影响,其分解速率有可能加快,对全球变暖起到正反馈作用。在青藏高原,虽然金露梅灌丛草甸的土壤有机质明显高于矮嵩草草甸(表 1),但金露梅灌丛草甸的净 CO₂ 交换量小于矮嵩草草甸。表明生态系统净 CO₂ 交换量不一定与土壤有机质的含量成正比关系。

草地生态系统放出的 CO₂ 常常主要来自土壤,土壤呼吸强弱又受土壤水热的影响,且因植被群落类型和地理位置的不同而异^[17]。Rey^[18]等指出植物根系呼吸以及土壤微生物活性对土壤温度的变化都很敏感,土壤水分充足且不成为限制因素的条件下土壤呼吸与土壤温度呈正相关^[19~21],而在水分含量成为限制因子的干旱、半干旱地区,水分含量和温度共同起作用。高寒草甸土壤温度虽没达到微生物活性的最适温度^[22],但土壤微生物活动是长期适应于寒冷湿润的环境,因而当土壤温度稍有升高时,微生物活动便会急剧加强。在不考虑土壤水条件时,青藏高原高寒草甸的土壤呼吸与土壤温度呈现指数关

系。在较低或过高的水分条件下,2 种植被类型土壤呼吸对土壤温度比较敏感,但二者响应趋势截然相反,矮嵩草草甸的土壤呼吸依土壤温度增高而增大,金露梅灌丛草甸则相反。由此证明,在不考虑土壤水分时,CO₂ 通量与土壤温度呈正相关关系,这与以往的研究是相一致的,但考虑土壤水分时,CO₂ 通量与土壤温度关系因土壤水分条件不同而不同,并且还和植被类型不同分布而存在差异。一般认为土壤呼吸作用具有适宜的范围。Kucera^[23]发现草原土壤含水量在饱和或永久萎蔫含水量时均导致土壤呼吸作用的停滞。王森等^[24]报道较低和过高的水分均抑制阔叶红松林土壤 CO₂ 的排放。本实验结果证明,金露梅灌丛草甸在较低和较高的水分条件下,存在一个小于 1 的 Q₁₀ 值,说明较低和较高的水分条件下对灌丛草甸的土壤呼吸有很大影响。另外,在适宜的水分条件下,矮嵩草草甸的土壤呼吸与土壤温度不存在正相关关系。因而表明,土壤温度和水分是影响高寒草甸生态系统 CO₂ 释放速率的主要因素,此结论与张金霞等^[25]和周党卫等^[26]报道的结论相反。

植被反射率是作用层面最为重要的小气候参数,因它在能量分配中占据重要地位,故在土壤-植被的 C 固定方面有着重要的影响作用。因植被类型不同,植物群落结构(植物种类、层片结构、高度、盖度等)不同,由此引起下垫面反射率不同,从而导致不同植被类型 CO₂ 通量出现随反射率增加而减少的现象。表明下垫面反射率也是影响系统 CO₂ 通量的一个重要因子。

自从 Tanner 和 Sinclair^[27]把水分利用效率(WUE)定义为干物质产量(NPP)与水汽通量之比后,大量研究表明水分利用效率与实际水汽压成反比关系。本研究结果与前人的一致^[6],即青藏高原高寒草甸生态系统中二者的关系也满足反比关系,并且不同草甸类型的生态系统水汽利用效率也是不一样的。

参考文献:

- [1] HALL D O, SCURLOCK J M O. Climate change and productivity of natural grasslands[J]. *A nn Bot*, 1991, 67(suppl): 49- 55.
- [2] SCURLOCK J M O, HALL D O. The global carbon sink: a grassland perspective[J]. *Glob Change Biol*, 1998, 4: 229- 233.
- [3] LI Y N (李英年), BAO X K (鲍新奎), CAO G M (曹广民). Comparison of the earth temperature between fiborthic histosols and Mat-Cryic cambisols in Tibet plateau[J]. *A cta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2001, 38: 145- 152 (in Chinese).
- [4] 周兴民. 中国嵩草草甸[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [5] FENG S (冯 松), YAO T D (姚檀栋), JIANG H (江 灏), et al. Temperature variations over Qinghai-Xizang Plateau in the past 600 years[J]. *P lateau M eteorology* (高原气象), 2001, 20: 105- 108 (in Chinese).

- [6] ZHAO L, LI Y N, GU S, *et al* Carbon dioxide exchange between the atmosphere and an alpine shrubland meadow during the growing season on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *J. Integrative Plant Biology*, 2005, 47: 271- 282
- [7] ZHAO L, LI Y N, ZHAO X Q, *et al* Comparative study of the net exchange of CO₂ in 3 type of vegetation ecosystems on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50: 1767- 1774
- [8] GU S, TANG Y H, DU M Y, *et al* Short-term variation of CO₂ flux in relation to environmental controls in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *J. Geophys Res*, 2003, 108: 4670- 4679
- [9] WEBB E K, PEARMAN G I, LEUNG R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1980, 106: 85- 100
- [10] BALDOCCHID D. A comparative study of mass and energy exchange rates over a closed C₃(wheat) and an open (corn) crop: II CO₂ exchange and water use efficiency[J]. *Agric. For. Meteorol.*, 1994, 67: 291- 321.
- [11] LI Y N (李英年), ZHOU H K (周华坤), SHEN ZH X (沈振西). The association analysis of herbage yield and meteorological factors in alpine meadow [J]. *Acta Agraria Sinica* (草地学报), 2001, 9: 232- 238(in Chinese).
- [12] HUM J M, KNAPP A K. Fluxes of CO₂, water vapor, and energy from a prairie ecosystem during the seasonal transition from carbon sink to carbon source[J]. *Agric. For. Meteorol.*, 1998, 89: 1- 14.
- [13] FRANK A B, DUGAS W A. Carbon dioxide fluxes over a northern, semi-arid, mixed-grass prairie[J]. *Agric. For. Meteorol.*, 2001, 108: 317- 326
- [14] HUNT J E, KELLSHER F M, McSEVEN Y T M, *et al* Evaporation and carbon dioxide exchange between the atmosphere and a tussock grassland during a summer drought[J]. *Agric. For. Meteorol.*, 2000, 90: 291- 304
- [15] KATO T, TANG Y H, GU S, *et al* Carbon dioxide exchange between the atmosphere and an alpine meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *China Agric. For. Meteorol.*, 2004, 124: 121- 134
- [16] LI Y N (李英年), WANG Q X (王勤学), GU S (古松), *et al* Integrated monitoring of alpine vegetation types and its primary production[J]. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 2004, 59: 40- 48(in Chinese).
- [17] SINGH J S, GUPTA S R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems[J]. *The Botanical Review*, 1977, 43: 449- 528
- [18] REY A, PEGORARO E, TEDESCHI V. Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in central Italy [J]. *Global Change Biology*, 2002, 8: 851- 866
- [19] WITKAMP M. Cycles of temperature and carbon dioxide evolution from litter and soil[J]. *Ecology*, 1969, 50: 922- 924
- [20] MATHES K, SCHRÖDER T H. Soil respiration during secondary succession: influence of temperature and moisture [J]. *Soil Biology Biochem.*, 1985, 17: 205- 211.
- [21] PETERSON K M, BILLINGS W D. Carbon dioxide flux from tundra soils and vegetation as related to temperature at Barrow, Alaska [J]. *Am. Midl. Nat.*, 1975, 94: 88- 94
- [22] BAO X Q (鲍新奎), ZHAO B L (赵宝莲), CAO G M (曹广民). Net mineralization of organic phosphorus in alpine soil[J]. *Alpine Meadow Ecosystem*, 1991, 3: 227- 236(in Chinese).
- [23] KUCERA C, KIRKHAM D. Soil respiration as studied in tallgrass prairie in Missouri[J]. *Ecology*, 1971, 52: 912- 915
- [24] WANG M (王淼), JILZH (姬兰柱), LIQR (李秋荣), *et al* Effects of soil temperature and moisture on soil respiration in different forest types in Changbai Mountain[J]. *Chin. J. Appl. Ecol.* (应用生态学报), 2003, 14: 234- 238(in Chinese).
- [25] ZHANG J X (张金霞), CAO G M (曹广民), ZHOU D W (周党卫), *et al* Carbon dioxide emission of M₁ at cryo-sod soil in the Haibei alpine meadow ecosystem [J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2001, 21(4): 544- 549(in Chinese).
- [26] ZHOU D W (周党卫), CAO G M (曹广民), ZHANG J X (张金霞), *et al* Relations between carbon dioxide fluxes and environmental factors of *Kobresia humilis* meadow and *Potentilla fruticosa* meadow [J]. *Chin. J. Appl. Ecol.* (应用生态学报), 2003, 14(3): 367- 371(in Chinese).
- [27] TANNER C B, SNCLAIR T R. Efficient water use in crop production: research or research? [A]. Taylor H M, Jordan W R, Sinclair T R, eds. *Limitations to efficient water use in crop production*[C]. Am. Soc. Agron., Madison, WI, USA, 1983: 1- 27.