

文章编号: 1000-4025 (2006) 12-2528-05 *

青藏高原高寒灌丛非生长季节 CO₂ 通量特征

徐世晓, 赵亮, 赵新全, 李英年, 古松

(中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001)

摘要: 利用 2003 年和 2004 年涡度相关系统通量观测资料, 对青藏高原高寒灌丛非生长季节 CO₂ 通量特征及其主要影响因子进行了分析。(1) 从净生态系统 CO₂ 交换 (NEE) 日变化特征看, 除 13:00 ~ 19:00 时有较小的 CO₂ 净释放以外, 其余时段 NEE 均很小; (2) 高寒灌丛非生长季月份间 NEE 差异明显, 4 月和 10 月是 CO₂ 净释放量较大, 1 月和 12 月 CO₂ 净释放量较小; (3) 相对温带草原 (高秆草大草原) 草地类型, 低温抑制下的青藏高原高寒灌丛生态系统非生长季节日平均 CO₂ 释放率较低; (4) 高寒灌丛非生长季 NEE 日变化模式与 5 cm 土壤温度变化呈显著正相关, 土壤温度是影响非生长季节青藏高原高寒灌丛 NEE 变化的主导气候因子, 同时 NEE 变化还受降水的影响。

关键词: 青藏高原; 高寒灌丛; 净生态系统 CO₂ 交换; 温度

中图分类号: Q948.11 文献标识码: A

Carbon Dioxide Flux Characteristics of Alpine Shrubs in Qinghai-Tibet Plateau beyond the Growing Season

XU Shi-xiao, ZHAO Liang, ZHAO Xin-quan, LI Ying-nian, GU Song

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

Abstract: Eddy covariance with an open path system was adopted to measure carbon dioxide flux without interruption in 2003 and 2004 in order to study the characteristics and affecting factors of carbon dioxide flux of alpine shrubs in Qinghai-Tibet Plateau beyond the growing season. (1) The net ecosystem carbon dioxide exchanges indicated that there existed a low net diurnal carbon dioxide release within 13:00 ~ 19:00 and an extreme low diurnal carbon dioxide release in the other period of time; (2) In the alpine shrubs the net ecosystem carbon dioxide exchanges significantly differed among the months beyond the growing season, presenting high net carbon dioxide release in April and October and low net carbon dioxide release in January and December; (3) In Qinghai-Tibet Plateau the ecosystem of alpine shrubs suffering low temperature released carbon dioxide at lower rate beyond the growing season in contrast with those of temperate grasslands (tall grass prairie); (4) The variation pattern in the net ecosystem carbon dioxide exchanges of alpine shrubs appeared positively correlated with the variation in the temperature in 0 ~ 5 cm soil beyond the growing season, and soil temperature as well as rainfall was a dominating factor that affected the net ecosystem exchanges of alpine shrubs in Qinghai-Tibet Plateau.

Key words: Qinghai-Tibet Plateau; alpine shrub; net ecosystem carbon dioxide exchange; temperature

当前, 许多关于草地生态系统 CO₂ 通量方面的 研究主要着眼于生长季节 CO₂ 收支动态及其与各

* 收稿日期: 2006-07-07; 修改稿收到日期: 2006-11-13

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目 (KZCX1-SW-01-01A5); 国家自然科学基金资助项目 (30500080); 中国科学院“百人计划”项目 (0429091211)

作者简介: 徐世晓 (1973 -), 男 (汉族), 博士, 主要从事草地生态学研究。E-mail: xushixiaoqh@126.com

种环境因子之间的关系;尽管生长季节的 CO₂ 通量研究提供了草地生态系统碳收支的重要信息,但非生长季节的 CO₂ 通量研究同样重要,尤其对于冷季几乎占去半年时间的温带草地而言,漫长的冷季呼吸所释放的 CO₂ 量抵消了生长季节所固定的 CO₂ 的一大部分,因此,非生长季节 CO₂ 通量成为决定这些温带草地生态系统全年碳平衡的关键^[1]。一些冻原和山地生态系统方面的研究结果也表明:冬季土壤生物的代谢活动仍然在进行,通过呼吸所释放出的 CO₂ 量是全年 CO₂ 平衡的重要部分^[2~4]。冬季 CO₂ 通量的研究通常是短期的阶段性测定,尤其是用这些短期的研究结果来计算整个冬季的通量值时,常常会产生较大偏差^[5,6]。为了更加准确地估算生态系统 CO₂ 平衡,冬季长期连续的 CO₂ 通量监测非常必要。

青藏高原这一独特的地理单元,是世界上海拔最高、面积最大、形成最晚的高原,也是我国天然草地分布面积最大的一个区域。受高海拔环境条件的影响,青藏高原非生长季寒冷而漫长(10月至翌年4月),分析非生长季节 CO₂ 释放量和变化特征是阐述青藏高原草地生态系统碳平衡的重要内容。高寒灌丛是由耐寒的中生或旱生灌木为优势种而形成的一类植被,是青藏高原植被类型的重要组成部分,也是当地的优势植被之一,常呈大面积连续分布于高山和高原林线之上向高寒植被过渡的过渡地带。由于我国青藏高原和其它高大山系的分布,高寒灌丛约有 116 400 km²,分布面积居世界之最^[7]。对青藏高原高寒灌丛非生长季 CO₂ 通量模式及其主要气候影响因素的分析,无疑将有助于青藏高原草地生态系统碳收支的估算。

1 研究地区概况与研究方法

1.1 研究地区概况

通量观测样地设在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站(海北站)试验区,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河谷(37°37'N,101°19'E),海拔 3 200 m。气候以东南季风和西伯利亚高压为主,属于大陆性季风气候,无明显的四季之分,冷季寒冷漫长(11月~次年4月),暖季短暂凉爽(5~9月)。年平均气温 - 1.7℃,极端高温 27.6℃,极端低温 - 37.1℃;最暖(7月)和最冷(1月)月平均气温分别为 9.8℃ 和 - 14.8℃^[8]。多年均降水量约 580 mm,主要集中于 5~9月,约

占年总降水量的 80%,10月至翌年4月仅为年降水量的 20%左右^[9]。主要植被类型为高寒灌丛(alpine shrub)和高寒草甸(alpine meadow),在滩地、山地阳坡分布着嵩草草甸,而在山地阴坡、偏阴坡广泛分布有高寒灌丛。

1.2 研究方法

选择广泛分布于青藏高原的高寒灌丛为观测点,植被以金露梅(*Potentilla fruticosa*)灌丛为主要建群种,草本以线叶嵩草(*Kobresia capillifolia*)、矮嵩草(*Kobresia humilis*)、美丽风毛菊(*Saussurea superba*)等为主,地表通常具有较厚的苔鲜层和枯枝落叶层。对选定的青藏高原高寒灌丛 CO₂ 通量进行连续观测,并利用以下公式计算高寒灌丛 CO₂ 通量:

$$F_{CO_2} = \overline{ws} = \frac{1}{T} \int_0^T ws dt = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i s_i \quad (1)$$

式中 F_{CO_2} 为生态系统 CO₂ 通量, w 为空气瞬时垂直速度脉动量,用三维超声风速计(CSAT3, CSI, USA)测定, s 为空气 CO₂ 的脉动量,用红外线分析仪(Li-7500, Li-Cor, USA)测定,上横线表示在某一时间段的平均^[10]。传感器高度为距地面 2.20 m, $T = 30$ min,数据采样频率为 10 Hz。同时对土壤温度(105T, CSI, USA)、土壤湿度(TDR, CS615, CSI, USA)及降水量(Model 52203, RM Young, Inc.)等进行连续监测。所有的数据由 CR5000 数据采集器(CSI)采集并计算。用摩擦速度阈值 $u^* > 0.2$ m · s⁻¹ 的通量值 (F_{CO_2}) 与 5 cm 土壤温度 (T_{soil}) 拟合得到的指数方程(2)式来计算 $u^* < 0.2$ m · s⁻¹ 时段和缺失的通量数据^[9]:

$$F_{CO_2} = b_0 \exp(b_1 T_{soil}) \quad (2)$$

2 结果与分析

2.1 净生态系统 CO₂ 交换日变化特征

将非生长季各月每日每小时的净生态系统 CO₂ 交换(NEE)平均,得到非生长季 NEE 日变化特征。非生长季青藏高原高寒灌丛生态系统 NEE 日变化振幅不明显,2003 年 NEE 最大值为 0.12 g CO₂ · m⁻² · h⁻¹,而最小值约为 0.041 g CO₂ · m⁻² · h⁻¹;2004 年 NEE 最大和最小值分别为 0.11 和 0.054 g CO₂ · m⁻² · h⁻¹。一般在 13:00~19:00 之间为相对明显的 CO₂ 净释放,而其余大部时段 NEE 均较小;NEE 峰值通常出现在 15:00~19:00,最小值出现在 8:00 左右(图 1)。

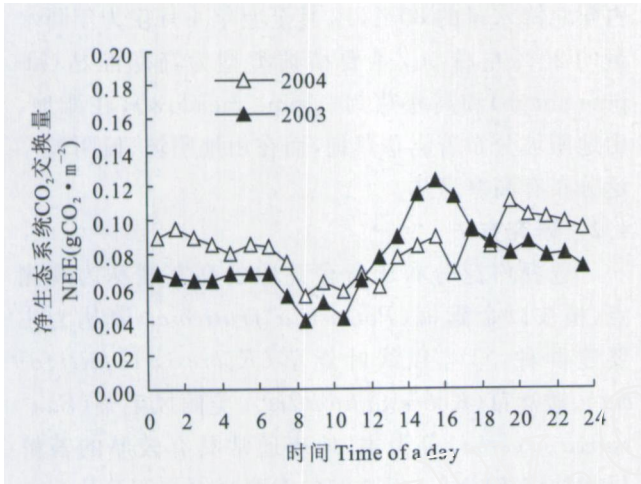


图1 高寒灌丛非生长季节净生态系统 CO₂ 交换日变化(NEE)

Fig. 1 Diurnal net ecosystem CO₂ exchanges (NEE) of alpine shrubs beyond the growing season

2.2 净生态系统 CO₂ 交换月变化特征

在整个非生长季节,4和10月份是青藏高原高寒灌丛生态系统 CO₂ 的净释放量最大的2个月,而1、2及12月份 CO₂ 的净释放量明显低于其它月份(图2)。4和10月份 CO₂ 的净释放量达到 111 和 77 g CO₂ · m⁻² (2003年)、107 和 117 g CO₂ · m⁻² (2004年)。2003年青藏高原高寒灌丛1、2和12月份 CO₂ 的净释放量仅为 27、33 和 25 g CO₂ · m⁻²; 2004年这3个月份的净释放值分别为 26、29 和 37 g CO₂ · m⁻²。青藏高原高寒季节性气候变化决定了高寒灌丛 CO₂ 通量季节变化模式。非生长季节中12月至翌年2月间是青藏高原气候较为寒冷的时段,低温抑制土壤微生物的代谢活动,土壤有机质分解缓慢,故这一时段高寒灌丛 CO₂ 通量较小。

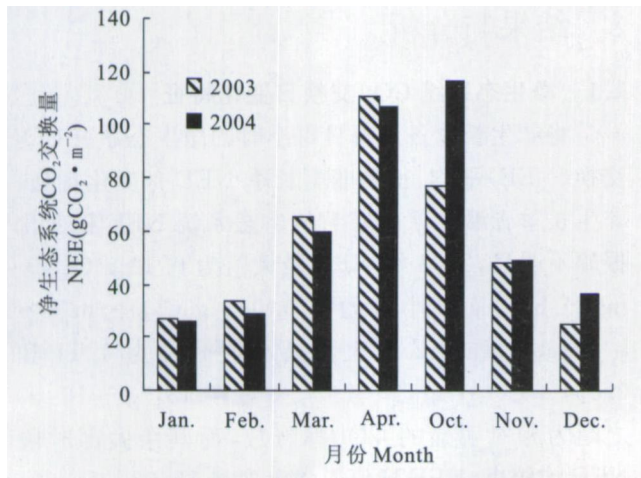


图2 非生长季节每月净生态系统 CO₂ 交换量(NEE)
Fig. 2 Monthly net ecosystem CO₂ exchange (NEE) beyond the growing season

2.3 净生态系统 CO₂ 交换对温度的响应

非生长季节青藏高原高寒灌丛生态系统 NEE 呈现出与土壤温度一致的变化趋势,随着土壤温度的升高高寒灌丛生态系统 NEE 增加(图3)。统计分析结果表明,2003 和 2004 年非生长季节青藏高原高寒灌丛 NEE 小时变化与 5 cm 土壤温度呈极显著的正相关关系(相关系数 *R* 分别为 0.728 2 和 0.700 1, *P* < 0.01, *n* = 23)。从10月初开始,随着平均温度的不断降低,植物开始枯黄,光合作用能力下降直至丧失,青藏高原高寒灌丛生态系统土壤呼吸成为 NEE 的主体。在土壤 CO₂ 释放率的测定中, Q₁₀ 定律十分重要,表示温度每升高 10 °C, 土壤呼吸增加的倍数,被看作土壤呼吸对温度变化的敏感性,常常被用来推算土壤呼吸速率的大小^[11]。2003 和 2004 年海北地区非生长季节高寒灌丛生态系统土壤 CO₂ 释放的 Q₁₀ 值分别为 4.66 和 4.46。

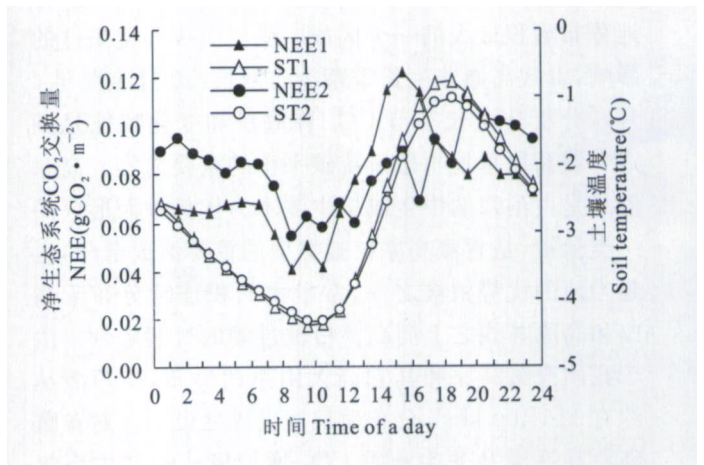


图3 非生长季节日净生态系统交换(NEE)与土壤温度
NEE1. 2003年 NEE; NEE2. 2004年 NEE; ST1. 2003年土壤温度; ST2. 2004年土壤温度

Fig. 3 Net ecosystem CO₂ exchange (NEE) and soil temperature beyond the growing season
NEE1. NEE of 2003; NEE2. NEE of 2004; ST1. Soil temperature of 2003; ST2. Soil temperature of 2004

2.4 降水对净生态系统 CO₂ 交换的影响

海北地区近 80% 的降水量集中在短暂的生长季节,9 月份以后降水发生的频次开始降低,每年的 10、11 月份初,经过较长的无雨时段后,常有 1~10 mm 的降雨。一些研究表明这种降水能够在一定程度上增加土壤湿度,并使土壤呼吸量急剧增加^[12,13]。分别以 2003 和 2004 年 10、11 月份为例,分析降水对海北地区高寒灌丛非生长季节 NEE 的影响,结果表明 2003、2004 年 10 和 11 月份的降水对高寒灌丛生态系统 NEE 具有显著影响。例如,2003 年 10 月 10~13

日的降水使 NEE 由降雨前 1 天的 1.20 上升到降雨当天的 3.76 g CO₂ · m⁻² · d⁻¹,在降雨后的第 2 天维持在 2.10 g CO₂ · m⁻² · d⁻¹;2004 年 10 月 20、21 日

的降水使 NEE 由降雨前 1 天的 3.28 上升到降雨当天的 4.34 g CO₂ · m⁻² · d⁻¹,在降雨后的第 2 天达到 5.65 g CO₂ · m⁻² · d⁻¹ (图 4)。

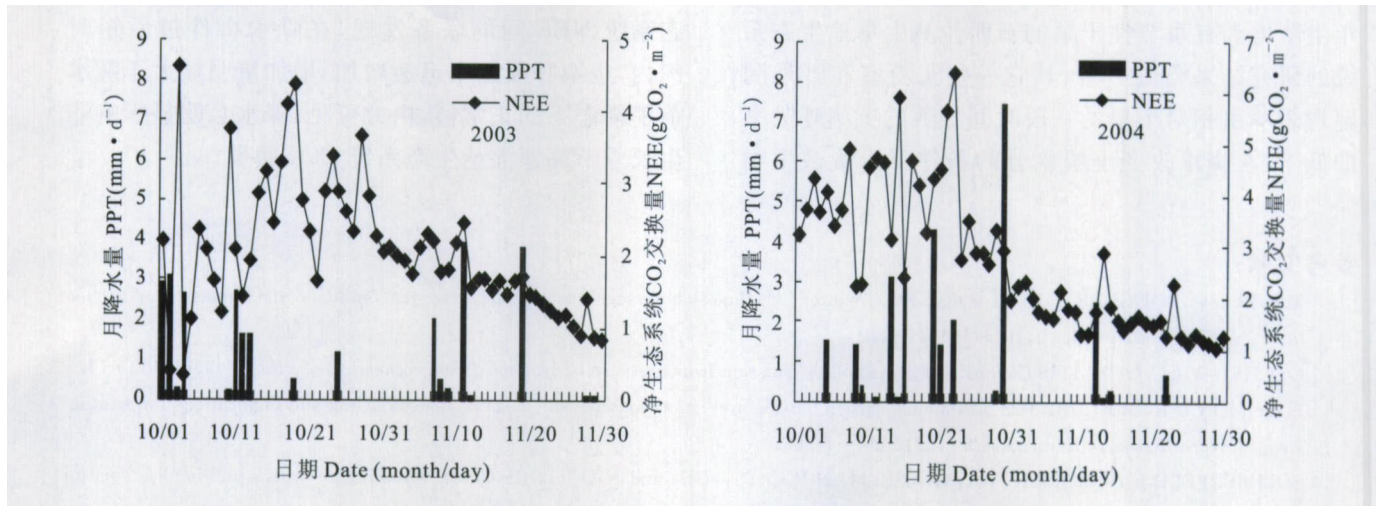


图 4 日降水量(PPT)和净生态系统 CO₂ 交换(NEE)

Fig. 4 Diurnal precipitations and net ecosystem CO₂ exchanges (NEE)

3 讨论

在青藏高原,土壤微生物活动是在长期适应高寒、土壤潮湿等环境下进行的,但温度稍微升高时,微生物代谢活动便会急剧加强^[9]。非生长季青藏高原夜间温度很低,1月的夜间温度甚至低于-30℃;低温抑制土壤生物代谢活动,CO₂通量值很小。白昼9:00时以后太阳辐射增强,土壤温度上升,土壤微生物活性随之增强,CO₂通量也逐步增加,直至19:00时后,随着土壤温度回落,生态系统CO₂通量也随之降低。青藏高原高寒草原土壤月CO₂释放总量最小值出现在12和翌年1月^[14]。海北地区高寒灌丛生态系统也具有类似的变化规律,CO₂释放月总量最小值出现在12至翌年2月。

Kim等^[15]对以高杆草为优势种的温带大草原的研究表明,在旱季和牧草枯黄期该类草地日平均CO₂净生态系统交换为3 g CO₂ · m⁻² · d⁻¹(净释放);Ham和Knapp^[16]报道堪萨斯州高杆草原日平均CO₂净生态系统交换为3.5 g CO₂ · m⁻² · d⁻¹;俄克拉荷马州高杆草原冷季非生长季节日平均NEE为2.25 g CO₂ · m⁻² · d⁻¹^[17];瑞士低地石灰质草地生态系统非生长季节日平均NEE为4.4 g CO₂ · m⁻² · d⁻¹^[18];而2003和2004年非生长季节海北高寒灌丛日平均CO₂净释放为1.82 g CO₂ · m⁻² · d⁻¹和1.99 g CO₂ · m⁻² · d⁻¹。青藏高原高寒灌丛非生长季节日平均CO₂净释放低于以高杆草为优势种的温带大草原。非生长季节青藏高原

低温抑制生态系统土壤呼吸是海北地区高寒灌丛生态系统日平均CO₂净排放量较低的重要原因。

张宪洲等^[14]研究表明青藏高原高寒草原土壤CO₂释放与5 cm地温关系密切。非生长季节青藏高原高寒灌丛生态系统NEE与土壤温度变化也呈现出显著的正相关。从9月底开始,植物光合作用能力下降,生态系统逐步表现为CO₂净释放以土壤呼吸成为生态系统CO₂通量的主体。土壤呼吸包括3个生物学过程(土壤微生物呼吸、活根系呼吸和土壤动物呼吸)和一个非生物学过程(含碳物质的化学氧化作用)。凡能影响它们的生命活动和土壤气体扩散的因素都能导致土壤呼吸强度的改变。温度通过影响土壤生物新陈代谢速率而影响土壤CO₂的释放,这是影响土壤CO₂释放强度最主要的因素^[19,20],所以在非生长季节,温度可能更是影响CO₂通量的主导因子。Q₁₀值是土壤呼吸对温度变化的敏感程度,陆地生态系统土壤呼吸的Q₁₀值变化在1.3~5.6之间。一般在高纬度地区Q₁₀比较大,在低纬度地区Q₁₀比较小。5~15时温带森林凋落物土壤呼吸的Q₁₀在2左右,而北极地区凋落物土壤呼吸的Q₁₀在0~10时可以达到3.7,苔原冻土带在-10~25时土壤呼吸Q₁₀在4.0左右^[21]。海北地区高寒灌丛生态系统非生长季节较高的Q₁₀值表明,青藏高原高寒灌丛生态系统对升温的响应更加敏感,全球变暖背景下的气候温暖化会导致该类生态系统更多的有机碳分解释放,尤其是非生长季节CO₂释放增加可能导致的源/汇效应

的变化需要进一步通过连续监测进行系统研究。

海北地区高寒灌丛 10、11 月份生态系统 CO₂ 通量对降水的响应,与地中海气候的加利福尼亚一年生草地和有季节性干旱的新西兰丛生草地生态系统的研究结果类似^[12,13];其它一些实验室和野外测定均表明由相对干旱的一段时间导致的土壤呼吸率的低下,在降水改变土壤水分的条件下土壤微生物

的呼吸可以快速恢复^[13]。降水事件发生后,土壤湿度增加,植物和土壤微生物活动加强,土壤呼吸会迅速升高。通过分析海北地区日降水量与高寒灌丛生态系统 NEE 间的联系发现,在降水事件过后短时间内,土壤呼吸速率迅速增加,增加量明显大于降水前平衡态下的正常值,由此可见,降水会明显影响非生长季节高寒灌丛生态系统 CO₂ 通量。

参考文献:

- [1] TAGIR G G, DOUGLAS A, NICANOR Z, et al. Winter CO₂ fluxes above sagebrush-steppe ecosystems in Idaho and Oregon[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 126:73 - 88.
- [2] OECHEL W C, VOURLITIS G, et al. Cold season CO₂ emission from arctic soils[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1997, 11:163 - 172.
- [3] SOLOMON D K, CERLING T E. The annual carbon dioxide cycle in a montane soil: observations, modeling and implications for weathering[J]. *Water Resource Research*, 1987, 23:2 257 - 2 265.
- [4] SOMMERFELD R A, MOISER A R, MUSSELMAN R C. CO₂, CH₄ and N₂O flux through a Wyoming snowpack and implications for global budgets[J]. *Nature*, 1993, 361:140 - 142.
- [5] FRANK A B, DUGAS W A. Carbon dioxide fluxes over a northern semiarid, mixed-grass prairie[J]. *Agricultural Forest and Meteorology*, 2001, 108:317 - 326.
- [6] SIMS P L, et al. Carbon dioxide fluxes in a southern plains prairie[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 109:117 - 134.
- [7] YU Y W(于应文), HU Z ZH(胡自治), XU CH L(徐长林), et al. Study on the vegetation types and distribution of alpine shrubs in Eastern Qiliang Mountains[J]. *Journal of Gansu Agricultural University* (甘肃农业大学学报), 1999, 34(1):12 - 17(in Chinese).
- [8] XU SH X(徐世晓), ZHAO X Q(赵新全), SUN P(孙平), et al. A study on acid detergent lignin content and digestibility of 5 species herbage in Tibetan Plateau[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报), 2003, 23(9):1 605 - 1 608(in Chinese).
- [9] ZHAO L(赵亮), XU SH X(徐世晓), et al. Relations between carbon dioxide fluxes and environmental factors of *Kobresia humilis* meadows and *Potentilla fruticosa* meadows[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报), 2006, 26(1):133 - 142(in Chinese).
- [10] ZHU ZH L(朱治林), SUN X M(孙晓敏), et al. The estimate of energy and mass exchanges in Inner Mongolia semi-arid grassland using micrometeorological methods[J]. *Climatic and Environmental Research* (气候与环境变化研究), 2002, 7(3):351 - 358(in Chinese).
- [11] 方精云,唐艳鸿,林俊达,将高明. 全球生态学气候变化与生态响应[M]. 北京:高等教育出版社. 施普林格出版社, 2000.
- [12] HUNT J E, KELLIHER 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]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 111:65 - 82.
- [13] XU L K, BALDOCCHI D D. Seasonal variation in carbon dioxide exchange over a Mediterranean annual grassland in California[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 1232:79 - 96.
- [14] ZHANG X ZH, SHI P L, LIU Y F, OU YANG H. Experimental study on soil CO₂ emission in the alpine grassland ecosystem on the Tibetan Plateau[J]. *Science in China* (Ser. D Earth Sciences) (中国科学·D辑·地球科学), 2005, 48(Supp.):218 - 224(in Chinese).
- [15] KIM J, et al. Carbon dioxide budget in temperate grassland ecosystem[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97:6 057 - 6 063.
- [16] HAM 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]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 89:1 - 14.
- [17] GILMANOV T G, VERMA S B, SIMS P L, et al. Gross primary production and light response parameters of four Southern Plains ecosystems estimated using long-term CO₂-flux tower measurements[J]. *Global Biogeochemistry Cycles*, 2003, 17:401 - 416.
- [18] VOLK M, NIKLAUS P A. Respiratory carbon loss of calcareous grassland in winter shows no effect of 4 years CO₂ enrichment[J]. *Functional Ecology*, 2002, 16:162 - 166.
- [19] CAO G M(曹广民), LI Y N(李英年), ZHANG J X(张金鑫), et al. Effect of soil circum stances biogeochemical factors on carbon dioxide emission from Mollic-Gryic Cambisols[J]. *Acta A grestia Sinica* (草地学报), 2001, 9(4):307 - 312(in Chinese).
- [20] PEI ZH Y(裴志永), OU YANG H(欧阳华), ZHOU C P(周才平). A study on carbon fluxes from alpine grassland ecosystem on Tibetan Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2003, 23(2):231 - 236(in Chinese).
- [21] ZH D Q(张东秋), SHI P L(石培礼), ZH X ZH(张宪洲). Some advance in the main factors controlling soil respiration[J]. *A dvance in Earth Science* (地球科学进展), 2005, 20(7):778 - 785(in Chinese).