

吴琴, 胡启武, 曹广民, 李东. 高寒矮嵩草草甸冬季 CO₂ 释放特征. 生态学报 2011, 31(18): 5107-5112.

Wu Q, Hu Q W, Cao G M, Li D. CO₂ emission from an alpine *Kobresia humilis* meadow in winters. Acta Ecologica Sinica 2011, 31(18): 5107-5112.

高寒矮嵩草草甸冬季 CO₂ 释放特征

吴 琴^{1,2}, 胡启武^{1,2}, 曹广民^{2,*}, 李 东²

((1. 江西师范大学地理与环境学院, 南昌 330022; 2. 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001))

摘要: 冬季碳排放在高寒草地年内碳平衡中占有重要位置。为探讨高寒草地冬季碳排放特征及温度敏感性, 于 2003—2005 年在中国科学院海北高寒草甸生态系统研究站, 利用密闭箱—气相色谱法连续观测了高寒矮嵩草草甸 2 个冬季的生态系统、土壤呼吸通量特征。结果表明: 1) 高寒矮嵩草草甸冬季生态系统呼吸、土壤呼吸均具有明显的日变化和季节变化规律, 温度是其主要的控制因子, 能够解释 44% 以上的呼吸速率变异。2) 冬季生态系统呼吸与土壤呼吸速率在统计上没有显著差异, 土壤呼吸占生态系统呼吸的比例高达 85% 以上。3) 2003—2004 年冬季生态系统呼吸、土壤呼吸的 Q_{10} 值分别为 1.53、1.38; 2004—2005 年冬季生态系统呼吸与土壤呼吸的 Q_{10} 值为 1.86、1.68。2 个冬季生态系统呼吸的 Q_{10} 值均高于土壤呼吸。4) 未发现高寒矮嵩草草甸冷冬年份的 Q_{10} 值高于暖冬年份以及冬季的 Q_{10} 值高于生长季。

关键词: 高寒草甸; 生态系统呼吸; 土壤呼吸; Q_{10}

CO₂ emission from an alpine *Kobresia humilis* meadow in winters

WU Qin^{1,2}, HU Qiwu^{1,2}, CAO Guangmin^{2,*}, LI Dong²

1 School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China

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

Abstract: Winter carbon (C) flux is important for annual C balance over an ecosystem level, but the field measurements are still lacking, especially in alpine grasslands which occupy approximately one third of the Tibetan Plateau area. Consequently, a determination of winter carbon flux is essential for the assessment of alpine grassland carbon budget. Previous studies showed that temperature coefficient (Q_{10}), an index of temperature sensitivity for respirations, increased with decreasing temperature in other ecosystem. This research therefore hypothesized that Q_{10} of soil and ecosystem respiration in alpine meadows would be higher in winters than in summers and higher in cold winters than in warm winters. To test the hypothesis above, ecosystem and soil CO₂ fluxes were measured by a static chamber – chromatography method in an alpine *Kobresia humilis* meadow in two continues winters from 2003 to 2005 at Haibei Alpine Meadow Ecosystem Research Station of Chinese Academy of Sciences. The objectives of this study were to: 1) clarify the characteristics of winter soil and ecosystem CO₂ fluxes and their control factors, and 2) compare temperature sensitivity of CO₂ fluxes under different thermal regimes. Results showed that both ecosystem and soil respiration showed clear diurnal and seasonal patterns. Temperature mainly controlled ecosystem and soil respiration, explaining more than 44% of the respiration variance. Ecosystem respiration rates averaged 88.43 mgCO₂·m⁻²·h⁻¹ (ranging from 51.63 to 206.07 mgCO₂·m⁻²·h⁻¹) in the first winter and 89.50 mgCO₂·m⁻²·h⁻¹ (ranging from 35.12 to 145.17 mgCO₂·m⁻²·h⁻¹) in the second winter. By comparison, soil respiration rates varied from 47.41 to 152.94 mgCO₂·m⁻²·h⁻¹ (with mean of 77.01 mgCO₂·m⁻²·h⁻¹) in the first winter and ranged from 28.21 to 107.89 mgCO₂·m⁻²·h⁻¹ (with mean of 68.64 mgCO₂·m⁻²·h⁻¹) in the second winter. Because the aboveground parts were dead in winters, no significant difference was observed between ecosystem and

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30970520, 40803022)

收稿日期: 2010-10-29; 修订日期: 2011-01-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: caogm@nwipb.ac.cn

soil respirations. Soil respiration accounted for more than 85% of ecosystem respiration, indicating that soil respiration composed the main C loss from alpine meadow ecosystems in winters. Our estimate showed soil respiration could release 86.9 gC/m² in one winter, which approximately counteracted 15% carbon fixed by alpine plants in the growing season. Higher ecosystem respiration than soil respiration in winters could be ascribed to additional decomposition of dead litter above the ground. The Q_{10} values of ecosystem respiration in the two winters were 1.86 and 1.53, respectively. By comparison, the Q_{10} values of soil respiration were 1.68 and 1.38, respectively. The Q_{10} values of ecosystem respiration were higher than those of soil respiration in both winters. This is mainly due to that aboveground standing or falling litter comprised more labile carbon, such as sugars, starch, etc, resulting in higher substrate - availability for ecosystem respiratory activities than soil. Additionally, the Q_{10} values of respirations were higher in the growing season than in the winter and higher in warm winter than that in cold winter, not supporting our hypothesis. This indicates that the Q_{10} was influenced not only by temperature, but also by substrate availability and microbial activities.

Key Words: alpine meadow; ecosystem respiration; soil respiration; Q_{10}

呼吸是生态系统碳循环的重要环节,冬季生态系统呼吸释放的 CO₂ 是区域碳收支极为重要的组成部分,显著地影响着生态系统的碳平衡^[1-4]。然而,以往有关生态系统或土壤呼吸的研究工作大多数集中于生长季,冬季 CO₂ 释放的野外观测数据极为缺乏,极易造成生态系统全年呼吸通量及碳收支估测的不确定性^[4]。对于冬季几乎占去半年甚至更长时间的高寒草地而言,其漫长的冬季呼吸所释放的 CO₂ 量抵消了生长季节所固定 CO₂ 的一大部分,因此,冬季 CO₂ 通量成为高寒草地生态系统全年碳收支估测的关键。研究表明,生态系统或土壤呼吸的温度敏感性指数 Q_{10} 值随着温度的降低而增加^[5-8]。据此,假设高寒草甸冬季呼吸的 Q_{10} 值要高于生长季,冷冬年份的 Q_{10} 值要高于暖冬年份。通过连续 2 个冬季的呼吸通量测定,本研究试图探讨如下两个科学问题: 1) 高寒草甸冬季 CO₂ 释放特征与控制因子; 2) 冬季 CO₂ 释放的温度敏感性,以验证科学假设。

1 材料与方法

1.1 实验区概况

实验设置于中国科学院海北高寒草甸生态系统研究站(海北站)。海北站地处青藏高原东北隅的青海海北藏族自治州门源回族自治县境内,地理位置为 37°29′—37°45′N, 101°12′—101°23′E, 海拔在 3200 m 左右。属典型的高原大陆性气候,冷季漫长而寒冷,暖季短暂而湿润,年均气温 -1.7 °C,最冷月(1 月)平均气温为 -15 °C,最热月(7 月)平均温度为 10 °C,绝对最高气温 27 °C,绝对最低气温可降至 -37 °C。年降水量约为 580 mm,主要集中于 5—9 月,占年降水量的 80% 左右。

选择长期适应于高寒生态环境下形成的耐寒中生植物高寒矮嵩草草甸为研究对象,为冬春草场。其植物群落以矮嵩草(*Kobresia humilis*)、羊茅(*Festuca ovina*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、早熟禾(*Poa* spp.)、恰草(*Koeleria cristata*)、二柱头蔗草(*Scirpus distigmaticus*)、麻花苳(*Gentiana straminea*)、美丽风毛菊(*Saussurea superba*)、雪白萎陵菜(*Potentilla nivea*) 等为优势种,植被覆盖度达 95% 以上。土壤为草毡寒冻锥形土,理化性状参见相关文献^[9]

1.2 实验设计

选择地势较平坦、植被分布较均一、具有代表性的地段为实验样地。设置两种处理,FC: 保持自然状态下的天然草地,代表生态系统呼吸; FJ: 齐地面剪除植物的地上部分并清除地表凋落物(此工作在每次实验的前一天进行),代表土壤呼吸,主要是土壤微生物对有机质的分解和植物根系呼吸两大部分; 每个处理随机设置 3 个重复。

1.3 气体样品的采集与分析

气体样品的采集用密闭静态箱法^[10], 采样箱用进口 304K 薄不锈钢板,用氩弧焊焊接制造,由地箱和顶箱

组成。地箱为四面体(50 cm × 50 cm × 20 cm), 上端有水槽, 在实验开始前一个月将地箱埋入土中, 周围以湿土压实, 在实验期间固定不动, 防止土壤扰动而影响测量结果。顶箱为正五面体(50 cm × 50 cm × 50 cm), 箱顶壁安装 2 个搅拌风扇, 箱侧面分别安装电源插头、取气接口和便携式温度计探头, 并配有 F46 采气管线 7 m, 箱外面粘贴一层 3 cm 的泡沫隔热板, 外覆白色防雨布, 以防止太阳辐射下箱内温度的升高而影响观测结果。采样时地箱密封水槽内加水, 使地箱与顶箱间的气路密封, 切断箱内外空气的自由交换。

从 2003 年至 2005 年进行了连续 2a 的冬季(具体时间为 2003 年 11 月—2004 年 4 月; 2004 年 11 月—2005 年 4 月) CO₂ 通量观测。观测频次为每月进行 2—3 次, 每次采样均在 9:00—11:00, 此外, 在 2004 年冬季的 4 月份进行了 1 次日变化观测, 观测时间段为 10:00, 13:00, 16:00, 20:00, 0:00, 04:00, 7:00。用 100 mL 医用注射器在扣箱后 0、10、20、30 min 取样, 并及时带回实验室进行分析。CO₂ 采用 Aligent 4890D 气相色谱仪进行分析, 具体参数见文献^[9]。进行 CO₂ 通量测定的同时, 用 JM624 便携式数字温度计测定土壤表层、土壤 5 cm 温度、箱内温度及气温, 并记录采样时间段地表积雪等环境要素。

1.4 通量的计算

$$F = \rho \frac{V}{A} \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T} \frac{dC_t}{dt}$$

式中 F (单位为 $\text{mgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) 是被测气体排放通量, V (cm^3) 是箱体体积, A (cm^2) 是箱体底面积, dC_t/dt ($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) 为采样箱内被测气体体积混合比浓度变化率, t (min) 是采样时间, ρ (g/L) 是标准状态下的被测气体密度, T_0 (°C) 和 P_0 (bar) 分别为标准状况下的空气绝对温度和气压, P (bar) 为采样地点的气压, T (°C) 为采样时的绝对温度。

1.5 数据处理与分析

平均值的比较、相关、回归等统计分析均采用 SPSS 10.0 软件, 数据处理、制图采用 Excel、Sigma Plot 9.0 等软件。

2 结果与分析

2.1 生态系统呼吸与土壤呼吸的日变化特征

高寒矮嵩草草甸冬季生态系统呼吸(FC 处理)与土壤呼吸(FJ 处理)均具有明显的日变化规律, 且变化趋势基本一致。生态系统、土壤呼吸速率日变化范围分别为 $73.95 - 175.98 \text{ mgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, $58.99 - 134.30 \text{ mgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 其中, 夜间呼吸速率分别是白昼的 67%、56%; 土壤呼吸占生态系统呼吸速率 68%。生态系统、土壤呼吸速率在 16:00 左右达到最大值, 然后逐渐下降, 在 1:00—4:00 左右达到最小值, 这种变化规律与土壤 5 cm 温度的变化规律基本一致(图 1), 二者之间达到显著正相关($r = 0.86, 0.87, n = 7, P < 0.05$)。

2.2 生态系统呼吸与土壤呼吸的季节动态

2003—2004 年冬季(11 月—翌年的 4 月), 生态系统呼吸与土壤呼吸速率变化范围为 $51.63 - 206.07 \text{ mgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, $47.41 - 152.94 \text{ mgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。2004—2005 年冬季生态系统呼吸与土壤呼吸速率变化范围为 $35.12 - 145.17 \text{ mgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, $28.21 - 107.89 \text{ mgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。2 个冬季生态系统呼吸与土壤呼吸变化趋势相近, 均表现出随着气温或土壤温度的降低而降低, 至 3—4 月份气温逐渐回升时, 呼吸速率逐渐增加(图 2)。统计分析显示 2 个冬季的生态系统呼吸差异未达到显著性水准, 土壤呼吸速率之间差异亦不显著。由于冬季地表植被呈完全枯萎状态, 土壤呼吸与生态系统呼吸速率之间在统计上未达到显著性差异。2003—2004 年冬季, 土壤呼吸占生态系统呼吸的平均比例为 91%, 2004—2005 年冬季二者的比例则为 78%。相应

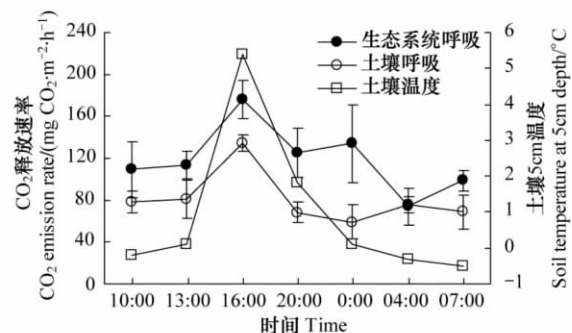


图 1 高寒矮嵩草草甸冬季 CO₂ 释放日变化

Fig. 1 Diurnal variation of CO₂ emission from alpine *Kobresia humilis* meadow in winter

地,地上部分的(立枯+凋落物)的CO₂释放在2个冬季大致占据9%~22%。

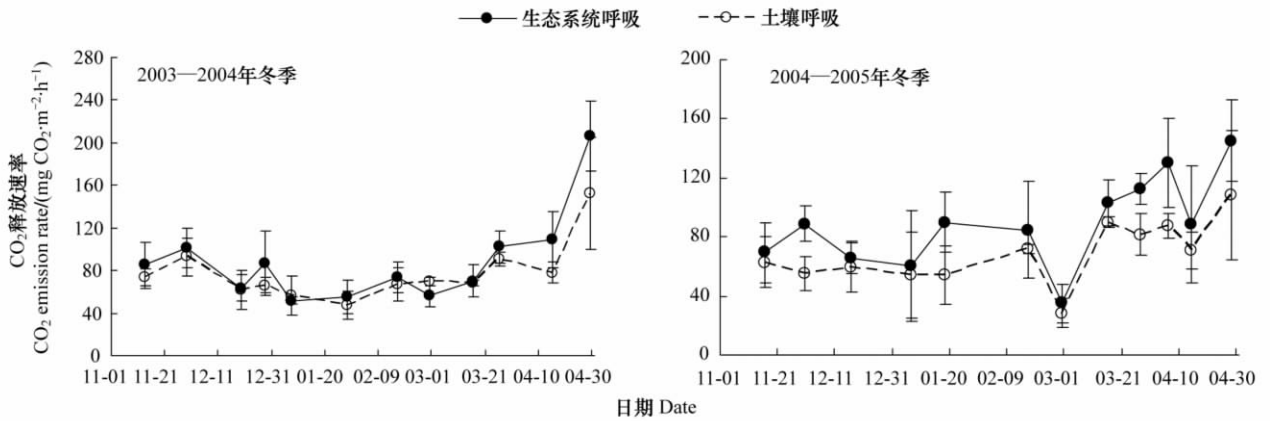


图2 高寒矮嵩草甸冬季CO₂释放季节动态

Fig. 2 Seasonal variation of CO₂ emission from alpine *Kobresia humilis* meadow in winters

2.3 高寒草甸CO₂释放速率与温度的关系

实验期间,气温、土壤5 cm 温度与生态系统呼吸和土壤呼吸之间均存在显著正相关关系,且气温、土壤5 cm 的温度与呼吸速率之间的相关性相当。日变化中,温度可以解释74%以上的呼吸速率变异;而季节变化中,呼吸速率44%以上的变异可以用温度来解释,温度成为高寒矮嵩草甸冬季CO₂释放的主要控制因子,二者之间的关系可以用指数函数很好的拟合(图3)。此外,温度与呼吸速率之间的相关性系数在2个冬季有所差异,2003—2004年冬季气温与生态系统呼吸、土壤呼吸之间的相关系数($r = 0.83, 0.76, n = 12, P < 0.01$) 低于2004—2005年冬季($r = 0.83, 0.76, n = 12, P < 0.01$)。

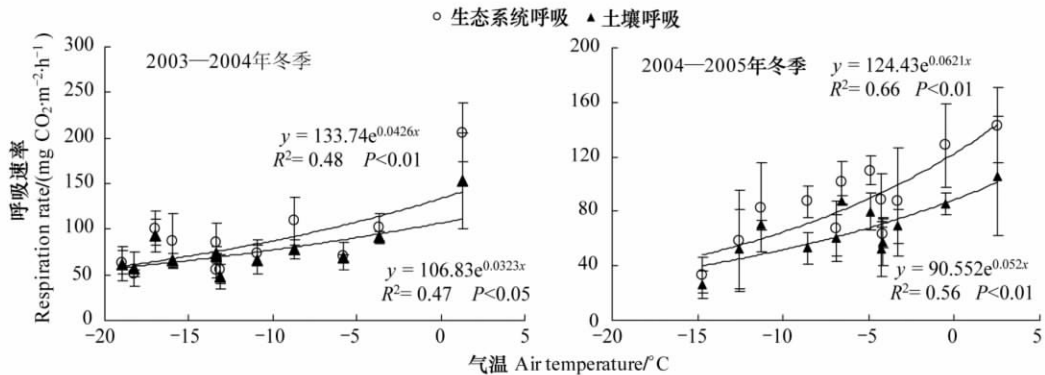


图3 高寒矮嵩草甸冬季CO₂释放与气温之间的关系

Fig. 3 Relationship between air temperature and respiration rate of *Kobresia humilis* meadow in winters

3 讨论

3.1 高寒矮嵩草甸冬季碳排放特征

早期研究认为,冬季土壤呼吸速率很小,因此在分析地气CO₂交换过程中可以忽略不计。但最近的研究发现,冬季土壤呼吸占全年土壤呼吸的很大比例,即使在高纬度和高寒地区也不能忽略^[4, 11]。高寒矮嵩草甸冬季时间长达6个月,因此,冬季碳排在年内碳平衡中占据重要位置。根据2003—2005年2个冬季的观测,高寒矮嵩草甸冬季生态系统、土壤平均呼吸速率分别达到88.96、72.83 mgCO₂·m⁻²·h⁻¹,大约相当于生长季生态系统呼吸速率(586.97 mgCO₂·m⁻²·h⁻¹)的15%,土壤呼吸速率(400.40 mgCO₂·m⁻²·h⁻¹)的18%^[9]。以6个月的冬季时间初步估算高寒矮嵩草甸冬季土壤呼吸排放的碳大约为86.9 gC/m²,与文献报道的针叶林冬季土壤呼吸平均值89.1 gC/m²相当,略低于落叶林的冬季土壤呼吸平均值103.3 gC/m²,明显高于极

地苔原的平均值 12.27 gC/m²[4,12]。高寒矮嵩草草甸年净初级生产力(包括地上与地下)为 1523.5 g/m²(干物质质量)[13], 换算成固碳量为 609.4 gC/m²。因此, 高寒矮嵩草草甸全年固定的碳大约 15% 被冬季土壤呼吸消耗掉。

冬季矮嵩草草甸土壤呼吸与生态系统呼吸在统计上没有显著差异, 显示冬季生态系统碳排放主要以土壤呼吸的形式进行。2 个冬季土壤呼吸与生态系统呼吸的平均比例为 85%, 远高于二者生长季的比例[14]。根据研究区气象站的观测, 2003—2004 年冬季为相对冷冬, 其平均气温为 -8.0 °C, 2004—2005 年则为相对暖冬, 平均气温为 -5.7 °C。土壤呼吸与生态系统呼吸的比例也由 2003—2004 年冬季的 91% 降到 2004—2005 年冬季的 78%。这可能是由于暖冬年份气温升高有利于地表立枯及凋落物的分解, 从而增加了地上部分的 CO₂ 释放, 相应降低了土壤呼吸占生态系统呼吸的比例。

雪是土壤过程的重要调节者, 持续的雪覆盖能有效地隔离土壤与大气, 起着绝缘体的作用, 通常能够防止土壤冻结, 为生物过程提供有效的水分[15-16]。Monson 等在一个山地森林的研究表明: 冬季土壤呼吸对积雪厚度的变化非常敏感, 雪覆盖的减少导致了土壤呼吸速率的降低[17]。冬季通量观测也出现了类似的结果, 例如, 实验期间的 2005 年 3 月 16 日、3 月 27 日地表均有积雪, 积雪深度分别为 15 cm、5 cm。这 2 次的生态系统呼吸分别达到 103.43 mgCO₂·m⁻²·h⁻¹、112.01 mgCO₂·m⁻²·h⁻¹; 土壤呼吸速率则达到 89.84 mgCO₂·m⁻²·h⁻¹、81.72 mgCO₂·m⁻²·h⁻¹, 均明显高于气温相差不大的其它通量观测日的生态系统、土壤呼吸速率。

3.2 高寒矮嵩草草甸冬季 CO₂ 释放的温度敏感性

Q₁₀ 值被广泛应用于评价土壤或生态系统呼吸对于温度变化的敏感性, 其值一般在 1.3—3.3 之间变化[18-19]。根据生态系统呼吸和土壤呼吸与气温之间的指数关系(图 3), 分别计算了冬季矮嵩草草甸 CO₂ 释放的温度敏感性指数 Q₁₀, 其中, 2003—2004 年冬季生态系统呼吸的 Q₁₀ 值为 1.53, 土壤呼吸的 Q₁₀ 值为 1.38; 2004—2005 年冬季生态系统呼吸与土壤呼吸的 Q₁₀ 值分别为 1.86、1.68。2 个冬季生态系统呼吸的 Q₁₀ 值均高于土壤呼吸, 这可能是因为植物地上立枯部分及凋落物含有更多易分解的碳, 如糖类、淀粉等碳水化合物, 从而使得生态系统呼吸的基质活性高于土壤呼吸[20]。

生态系统或土壤呼吸的温度敏感性指数 Q₁₀ 值随着温度的降低而增加[5-8]。据此, 假设高寒草甸冷冬年份 CO₂ 释放的 Q₁₀ 值要高于暖冬年份, 冬季 Q₁₀ 值要高于生长季, 而实验结果并没有支持我们的假设, 相反, 暖冬年份的生态系统、土壤呼吸的 Q₁₀ 值均高于冷冬年份。此外, 矮嵩草草甸植物生长季生态系统呼吸的 Q₁₀ 值为 2.0, 亦高于 2 个冬季生态系统呼吸的 Q₁₀ 值[14]。Q₁₀ 的变化不仅受温度的影响, 还受到土壤水分、基质有效性、土壤微生物活性等因素的影响以及这些因素的交互作用影响[20]。例如, 温度变化会降低水分有效性, 进而导致呼吸的温度敏感性降低。有学者观测到一年中相对干旱时期的土壤呼吸、生态系统呼吸的温度敏感性较低, 即归因于水分有效性降低后使得基质通过土壤水膜供给微生物的有效性降低而导致的[21-24]。因此, 矮嵩草草甸出现的生长季生态系统呼吸的 Q₁₀ 值高于冬季, 以及暖冬年份的 Q₁₀ 值高于冷冬年份与各时段用于呼吸的基质有效性密切相关。高寒草甸生长季植物体不同器官的光合产物(碳水化合物)蕴藏丰富, 用于自养呼吸的基质有效性极高, 且土壤水分有效性高、微生物活跃。在这种没有其它生态因子限制的情形下, 生态系统呼吸很可能对温度表现出更高的敏感性, 因此, 出现较高的 Q₁₀ 值。2003—2004 年的冷冬年份, 整个通量观测时段的平均气温为 -11.5 °C、土壤 5 cm 平均温度 -5.9 °C; 2004—2005 年暖冬年份通量观测时段的平均气温、土壤温度则分别为 -6.3、-3.1 °C。因此, 受基质有效性、微生物活性等影响, 基于冷冬极低温度下的观测数据而得到的 Q₁₀ 要低于暖冬年份的 Q₁₀ 值。

References:

- [1] Valentini R, Matteucci G, Dolman A J, Schulze E D, Rebmann C, Moors E J, Granier A, Gross P, Jensen N O, Pilegaard K, Lindroth A, Grelle A, Bernhofer C, Grünwald T, Aubinet M, Ceulemans R, Kowalski A S, Vesala T, Rannik Ü, Berbigier P, Loustau D, Gumundsson J, Thorgeirsson H, Ibrom A, Morgenstern K, Clement R, Moncrieff J, Montagnani L, Minerbi S, Jarvis P G. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature*, 2000, 404: 861-865.

- [2] Mast M A , Wickland K P , Striegl R T. Winter fluxes of CO₂ and CH₄ from subalpine soils in Rocky Mountain National Park , Colorado. *Global Biogeochemical Cycles* ,1998 ,12(4) : 607-620.
- [3] Monson R K. Climatic influences on net ecosystem CO₂ exchange during the transition from wintertime carbon source to springtime carbon sink in a high elevation , subalpine forest. *Oecologia* ,2005 ,146(1) : 130-147.
- [4] Wang W , Wang T , Peng S S , Fang J Y. Review of winter CO₂ efflux from soils: a key process of CO₂ exchange between soil and atmosphere. *Journal of Plant Ecology* ,2007 ,31(3) : 394-402.
- [5] Kirschbaum M U F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition and the effect of global warming on soil organic C storage. *Soil Biology and Biochemistry* ,1995 ,27(6) : 753-760.
- [6] Davidson E A , Belk E , Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Global Change Biology* ,1998 ,4(2) : 217-227.
- [7] Luo Y Q , Wan S Q , Hui D F , Wallace L L. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie. *Nature* ,2001 ,413: 622-625.
- [8] Oechel W C , Vourlitis G L , Hastings S J , Zulueta R C , Hinzman L , Kane D. Acclimation of ecosystem CO₂ exchange in the Alaskan Arctic in response to decadal climate warming. *Nature* ,2000 ,406: 978-981.
- [9] Wu Q , Cao G M , Hu Q W , Li D , Wang Y S , Li Y M. A primary study on CO₂ emission from soil-plant systems of *Kobresia humilis* meadow. *Resources science* ,2005 ,27(2) : 96-102.
- [10] Wang Y S , Wang Y H. Quick measurement of CH₄ , CO₂ and N₂O emissions from short-plant ecosystems. *Advances in Atmospheric Sciences* ,2003 ,20(5) : 842-844.
- [11] Monson R K , Lipson D L , Burns S P. Winter forest soil respiration controlled by climate and microbial community composition. *Nature* ,2006 ,439: 711-714.
- [12] Fahnestock J T , Jones M H , Welker J M. Wintertime CO₂ efflux from arctic soils: implications for annual carbon budgets. *Global Biogeochemical Cycle* ,1999 ,13(3) : 775-779.
- [13] Li Y N , Wang Q X , Gu S , Fu Y L , Du M Y , Zhao L , Zhao X Q , Yu G R. Integrated monitoring of alpine vegetation types and its primary production. *Acta Geographica Sinica* ,2004 ,59(1) : 40-48.
- [14] Hu Q W , Wu Q , Cao G M , Li D , Wang Y S. Growing season ecosystem respirations and associated component fluxes in two alpine meadows on the Tibetan Plateau. *Journal of Integrative Plant Biology* ,2008 ,50(3) : 271-279.
- [15] Marchand P J. *Life in the Cold: An Introduction to Winter Ecology*. Hanover: University Press of New England ,1987.
- [16] Jones H G. The ecology of snow-covered systems: a brief overview of nutrient cycling and life in the cold. *Hydrological Processes* ,1999 ,13(14) : 2135 -2147.
- [17] Monson R K , Burns S P , Williams M W. The contribution of beneath-snow soil respiration to total ecosystem respiration in a high elevation , subalpine forest. *Global Biogeochemical Cycles* ,2006 ,20(3) : GB3030 ,doi: 10. 1029/ 2005GB002684.
- [18] Raich J W , Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus* ,1992 ,44B (2) : 81-99.
- [19] Boone R D , Nadelhoffer K J , Canary J D , Kaye J P. Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration. *Nature* ,1998 ,396: 570-572.
- [20] Davidson E A , Janssens I V , Luo Y Q. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q₁₀. *Global Change Biology* ,2006 ,12(2) : 154-164.
- [21] Rey A , Pegoraro E , Tedeschi V , Parri L D , Jarvis P G , Valentini R. Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in Central Italy. *Global Change Biology* ,2002 ,8(9) : 851-866.
- [22] Janssens I A , Pilegaard K. Large seasonal changes in Q₁₀ of soil respiration in a beech forest. *Global Change Biology* ,2003 ,9(6) : 911-918.
- [23] Curiel Yuste J , Janssens I A , Carrara A , Ceulemans R. Annual Q₁₀ of soil respiration reflects plant phenological patterns as well as temperature sensitivity. *Global Change Biology* ,2004 ,10(2) : 161-169.
- [24] Reichstein M , Tenhunen J , Rouspar O , Ourcival J M , Rambal S , Miglietta F , Peressotti A , Pecchiari M , Tironc G , Valentini R. Severe drought effects on ecosystem CO₂ and H₂O fluxes at three Mediterranean evergreen sites: revision of current hypotheses? *Global Change Biology* ,2002 ,8 (10) : 999-1017.

参考文献:

- [4] 王妮,汪涛,彭书时,方精云. 冬季土壤呼吸: 不可忽视的地气 CO₂ 交换过程. *植物生态学报* ,2007 ,31(3) : 394-402.
- [9] 吴琴,曹广民,胡启武,李东,王跃思,李月梅. 矮嵩草甸植被-土壤系统 CO₂ 的释放特征. *资源科学* ,2005 ,27(2) : 96-102.
- [13] 李英年,王勤学,古松,伏玉玲,杜明远,赵亮,赵新全,于贵瑞. 高寒植被类型及其生产力的监测. *地理学报* ,2004 ,59(1) : 40-48.