

希拉穆仁围封草原土壤呼吸通量研究

高天明¹, 张瑞强¹, 梁占岐¹, 刘铁军¹, 郭建英¹, 郝瑞²

(1. 水利部牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010020; 2. 鄂尔多斯水土保持工作站, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘要: 利用 ACE 土壤呼吸作用自动测定仪对希拉穆仁草原围封 6 年的克氏针茅(*Stipa krylovii*) 群落从 4 月末至 10 月初每隔 10 d 进行土壤呼吸作用日动态监测, 并结合土壤温度和水分状况分析其复合相关关系。结果表明, 1) 生长季内土壤呼吸日动态均呈单峰曲线, 最高值出现在中午 12:00—14:00 夜间土壤呼吸速率很低, 最低值出现在凌晨 1:00—3:00。2) 土壤呼吸昼夜变化在不同物候期明显不同, 特别是在地温低于 0 °C 时出现了土壤呼吸负通量现象。提高土壤呼吸通量的观测频率, 加强相应物理化学机制的深入探讨将有助于我们对草地土壤年呼吸量的准确估算。3) 土壤水分与日均土壤呼吸速率的关系为二次函数关系, 理论日均呼吸速率最高值为 456.2 mg/(m²·h), 对应的土壤体积含水量为 20%, 与田间持水量 21% 基本吻合。4) 生长季 Q₁₀ 值介于 1.16~6.28, 与土壤水分呈二次函数关系, 不同于以往研究结果, 这对于全球变化条件下研究土壤呼吸具有指导意义。

关键词: 希拉穆仁草原; 土壤呼吸; 土壤水分; Q₁₀ 值

中图分类号: S812.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-0629(2011)01-0033-06

土壤呼吸是土壤和大气交换 CO₂ 的过程, 它不仅是全球碳循环的重要环节, 也是大气 CO₂ 的重要来源, 因 CO₂ 可导致强烈的温室效应而倍受人们关注。土壤呼吸作用包括 3 个生物学过程(植物根系呼吸、土壤微生物呼吸和土壤动物呼吸) 和 1 个非生物学过程(含碳物质的化学氧化过程), 其中土壤动物呼吸和含碳物质的化学氧化过程非常微弱, 可以忽略不计^[1]。我国拥有天然草原近 4 亿 hm², 占国土总面积的 41.7%, 其中可利用草原面积 3.3 亿 hm², 是我国面积最大的陆地生态系统。草地生态系统有机碳绝大部分集中于表层土壤中。因此, 针对草地土壤呼吸进行野外实验研究和相应方法论的探讨将对我国乃至全球碳源—汇的准确估算具有重要的科学意义。阴山北麓地区包括内蒙古自西向东 11 个旗县, 面积 6 万 km², 是我国北方重要的生态安全屏障, 对该地区草地土壤呼吸的系统性研究目前未见报道。本研究选取阴山北麓中部的希拉穆仁草原克氏针茅(*Stipa krylovii*) 群落为研究样点, 在地理位置和植被类型方面具有较强的代表性。本研究目的在于通过监测该地区围封条件下的草地土壤呼吸日动态和季节动态, 并结合土壤表层水热条件分析该地区围封草地土壤呼吸特性, 为准确计算该地区年 CO₂ 排放量提供基础数据。

1 研究地区概况与研究方法

1.1 研究区概况 希拉穆仁草原地处内蒙古包头市达尔罕茂明安联合旗希拉穆仁镇。中温带半干旱大陆性季风气候, 春秋季节干旱多风, 夏季雨量较充沛, 冬季干燥寒冷。平均降水量为 284 mm, 蒸发量为 2 305 mm, 降水主要集中在 7—9 月; 年均气温 2.5 °C, ≥10 °C 年有效积温 1 985~2 800 °C·d; 年均日照时数 3 100~3 300 h; 无霜期 83 d; 年均风速 4.5 m/s, 冬春以北风和西北风为主, 年大风日数为 63 d。地带性土壤为栗钙土, 多为轻质土壤。建群植物种为克氏针茅。2009 年降水量为 190.2 mm, 降水频率为 92%。

1.2 样地设置 2003 年春季围封 3 hm² 代表性坡地(坡度 5°, 坡向东西), 经过 6 年的围封, 2009 年样地立地条件为: 土壤 0~25 cm 有机质 3.03%, pH 值 8.25, 容重 1.51 g/cm³, 质地为中石质砂质壤土, 8 月中旬建群种开花期植被盖度 47%, 群落高度 48 cm, 生物量干质量 165 g/m², 建群种为克氏针茅。

1.3 研究方法与数据处理 土壤呼吸速率测定利用英国 ADC 公司产 ACE 土壤呼吸作用自动测

① 收稿日期: 2010-03-05 接受日期: 2010-08-12

基金项目: 中国水科院科研专项——内蒙古不同类型草原区水土流失生态基础数据监测研究[MKSX(1)09]; 草地碳汇功能与植被盖度及地表生物量关系研究[MKSX(1)10]

作者简介: 高天明(1981-), 男(蒙古族), 内蒙古赤峰人, 工程师, 硕士。主要从事草地生态研究。

E-mail: zaohuer@163.com

定义(共3台)进行。测量频率为生长季内4月末至10月初,每隔10d进行1次,基本能代表整个生长季的平均状况。选取3块地势平整、植被均匀地段(记为3次重复),试验开始前2d将仪器配套钢圈(直径30cm,高8cm)砸入土内3cm并轻轻压实,以保证钢圈与土体无缝隙结合。试验开始前1h将圈内植物齐地面剪掉,待干扰平衡后,安装ACE土壤呼吸作用自动测定仪,并连接仪器配套温度探头和水分探头,分别同步测定0~2cm地温和0~5cm土壤体积含水量^[2-4]。设定每台仪器单次测量周期为30min,连续测量时间不短于24h。

对每台仪器测定的数据系列去掉前后各3组数据以及异常数据。用Excel初步分析数据并做图,然后再进行统计学分析。

样地土壤的田间持水量和萎蔫系数根据样地土壤pF曲线(中国农科院草原研究所测定)求得分别为21%和4%(体积含水量)。

土壤呼吸与温度之间的关系采用指数回归分析,所用模型如下^[5-7]:

$$R_s = ae^{bt} \quad (1)$$

式中, R_s 为土壤呼吸; t 为地温; a 是温度为0℃时的土壤呼吸; b 为温度反应系数。 Q_{10} 值通过下式确定:

$$Q_{10} = e^{10b} \quad (2)$$

2 结果与讨论

2.1 草地土壤呼吸的时序动态

许多研究表明,土壤呼吸速率与土壤表层水热状况关系最密切^[5-9],因此本研究只进行了土壤0~2cm温度和0~5cm水分的测定。一般认为,土壤呼吸速率与地温呈指数正相关关系^[5-10]。本研究中,虽然生长季内不同物候期草地土壤呼吸强度有较大差异,但土壤呼吸日动态均呈单峰曲线,峰值出现在中午12:00—14:00,16:00以后呼吸速率迅速下降,夜间土壤呼吸速率很低,特别是夜间地温均低于5℃时,不超过100mg/(m²·h),白天地温迅速升高,土壤呼吸速率也随之大幅提高(图1)。这与刘立新等^[6]研究土壤呼吸对温度的敏感性结果相符。

土壤呼吸速率昼夜模式在不同物候期明显不同。4月末至5月中旬为牧草返青期,随着水热条件的改善,土壤呼吸速率也在增加,但夜间低于100

mg/(m²·h),有时地温低于0℃时,土壤呼吸速率为负值,例如4月27日,这与董云社等^[6]在冬季观测到土壤呼吸负通量相似。5月20日虽然地温与5月10日近似,但土壤含水量仅为5.5%,接近样地的萎蔫系数4%,所以导致土壤呼吸速率白天较之前大幅下降(50%左右),而夜间呼吸速率由于地温均低于5℃而并无显著差异^[9]。进入6月,降雨增多,牧草也开始拔节,生长旺盛,这也预示着植物根系呼吸的加强,且此时水分条件的改善以及夜间地温逐渐提高,昼夜土壤呼吸速率均呈上升趋势,至6月21、22和24日时,夜间呼吸速率接近200mg/(m²·h),中午普遍超过500mg/(m²·h)。然而,此后连续40余日无有效降雨,土壤蒸发与植物蒸腾使土壤含水量达到了萎蔫系数4%,干旱抑制了植物新陈代谢和土壤微生物数量^[11-12],因此土壤呼吸速率在7月1日白天最高值仅100mg/(m²·h)左右,夜间普遍在50mg/(m²·h)以下。8月降雨量增加,同时植物进入抽穗开花期,新陈代谢旺盛,土壤呼吸作用也随之加强,但在8月20日,夜间地温在10℃以上,土壤含水量达到23%,超过了样地田间持水量(21%),过多的水分对土壤中气体扩散产生不利影响^[9-12],因此该日的土壤呼吸速率虽然很高,但却低于地温相似、土壤含水量14%~17%时的6月21、22和24日。9月13日虽然土壤含水量为14%,但此时为植物结实期,植株逐渐枯萎,根系呼吸较之前也下降许多,夜间温度大幅下降,普遍为5℃左右,使夜间土壤呼吸速率低于100mg/(m²·h),白天为200mg/(m²·h)以下。10月3日,植物完全枯萎,根系呼吸可视为停止,夜间地温低于0℃时同样观测到了土壤呼吸的负通量,白天虽然地温仍较高,但此时土壤含水量仅为3.5%,干旱严重限制了土壤呼吸作用。

2.2 草地土壤呼吸日均值对土壤水分的响应

当温度较低时发生的温度变化,水分对土壤呼吸的影响可能会被温度的效果所掩盖^[9],为减少这种混淆效果,将地温较低时4—5月和9—10月数据剔除,以温度较高的6—8月的土壤呼吸日均值和同期土壤水分进行了二次函数曲线拟合(图2),相关系数 $r = 0.946 > r_{0.01, 9} 0.735$, $F = 76.96 > F_{0.01(1, 9)} 10.56$,相关较显著,回归效果较好。求得函数的一

阶导数, 计算土壤呼吸速率理论最大值为 $456.2 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 对应土壤含水量为 20%, 与样地田间持水量 21% 基本吻合。但值得注意的是, 土壤含水量 14%~17% 时的 6 月 21、22 和 24 日, 日均土

壤呼吸速率分别为 516.4、470.4 和 468.9 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 高于理论最大值, 其原因可能是此时为牧草拔节期, 根系生长旺盛, 根系呼吸的加强占土壤呼吸的比重增加所致。

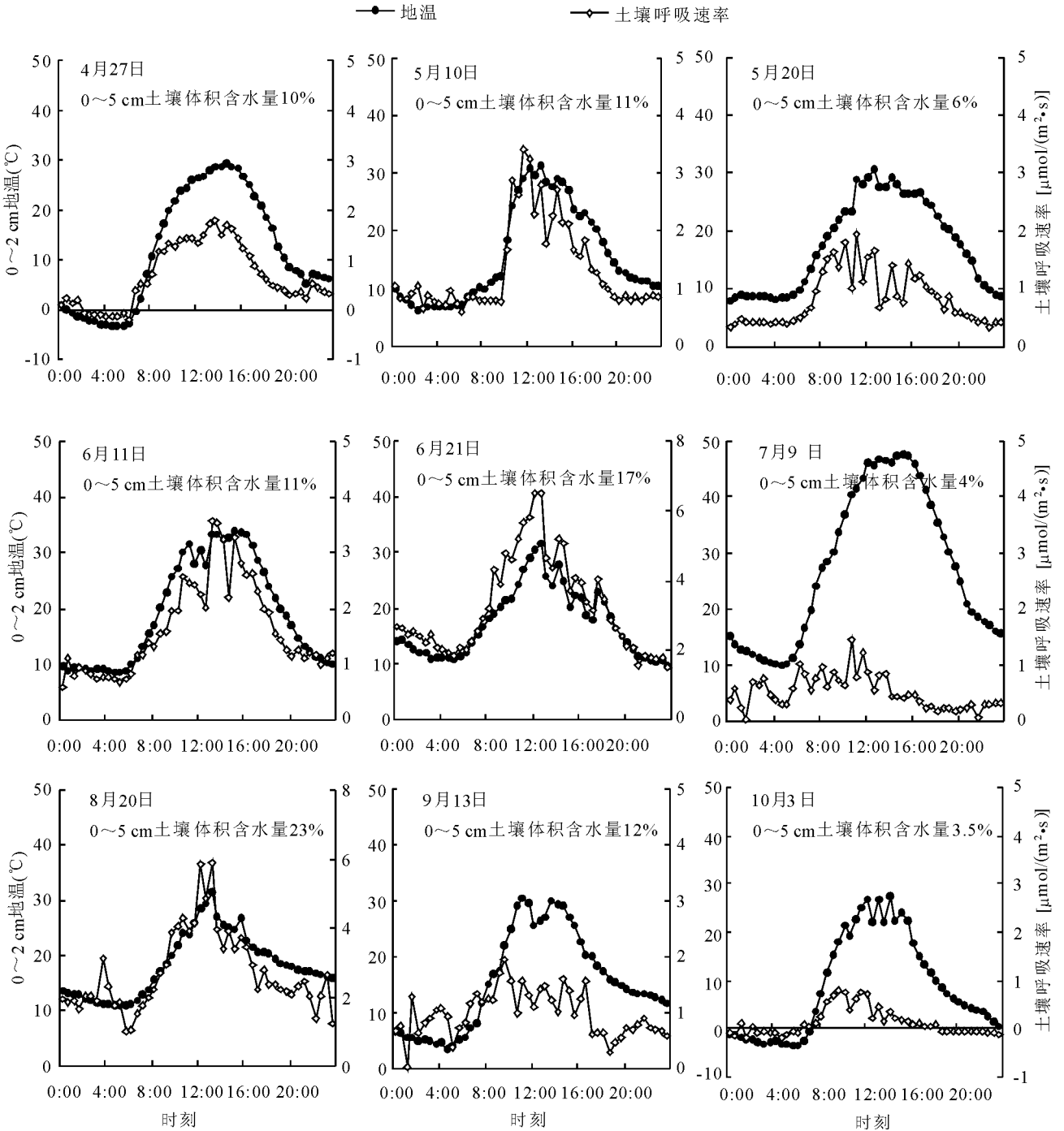


图 1 生长季内土壤呼吸速率和 0~2 cm 地温日动态

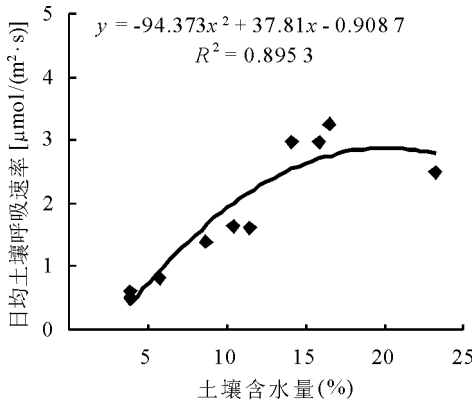


图2 日均土壤呼吸速率对土壤水分的响应

2.3 Q_{10} 值对土壤水分的响应 Q_{10} 值代表土壤呼吸对温度的敏感程度,图3中,采用当天7:00—19:00的日照时间范围内的数据计算日均 Q_{10} 值,这主要基于3点考虑:第一,水分对土壤呼吸的影响在低温时被限制^[9];第二,夜间较低温度和土壤呼吸速率时,很小的绝对误差会造成较大的相对误差,并且在指数运算时又会被放大;第三,0℃以下时出现的土壤呼吸负通量无法进行指数计算。因此选用白天温度较高时的数据进行 Q_{10} 值的计算。结果显示生长季内样地日均 Q_{10} 值介于1.16~6.28,平均为3.14,高于以往研究结果,与近年来一些研究结果相似^[4,6-7,9]。将日均 Q_{10} 值与同期土壤含水量进行二次函数拟合(见图3),相关系数 $r = 0.779 > r_{0.01, 13} = 0.641$, $F = 18.57 > F_{0.01(1, 13)} = 9.07$,相关较显著,回归效果较好。这证实了罗光强和耿元波^[4]、高艳红等^[11]研究的土壤水分影响了土壤呼吸的温度敏感性。但笔者基于上述3点考虑认为此结论只有在温

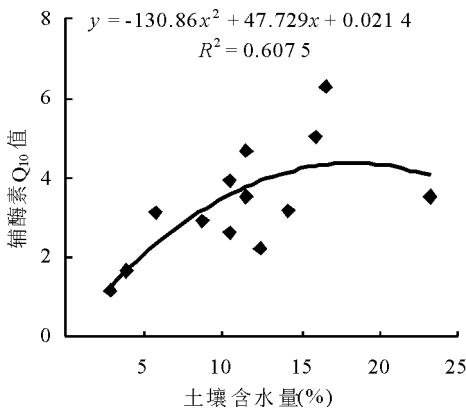


图3 Q_{10} 值对土壤水分的响应

度较高时($> 5\text{ }^{\circ}\text{C}$)适用。根据回归方程计算理论峰值土壤含水量为18%,这与田间持水量并无显著差异,日均 Q_{10} 值峰值为4.37。

3 讨论

3.1 水热因子对草地土壤呼吸的影响 一般情况下,一天之内土壤水分及理化性质不会发生显著变化,因此土壤呼吸日变化主要是由温度变化所引起的。土壤呼吸速率与温度呈显著的指数正相关关系^[5-10],二者在一天之中的峰值和谷值以及波动变化基本同步。

由于不同时期土壤水分的巨大差异,土壤呼吸速率也存在较大的差异。例如图1中,5月20日、6月11日、6月21日、8月20日、9月13日,这5d各时段地温基本相同,但土壤水分的不同造成了土壤呼吸速率的显著差异(两两进行显著性检验,显著性水平 $\alpha = 0.05$)。土壤水分与土壤呼吸速率呈二次函数关系,当土壤水分较低时,限制了土壤可溶性有机质的扩散,从而会很大程度上限制了微生物的活性和能量供应,同时较低的土壤水分限制作用会降低土壤呼吸随温度上升的幅度,降低温度的作用效应,因此,较低的土壤水分含量明显降低了土壤呼吸作用^[4,6,9,11];过高的土壤水分会抑制气体在土壤中扩散作用,同样降低细胞新陈代谢以及土壤呼吸强度;只有在土壤水分适中的田间持水量附近时,土壤中的大孔隙多数被空气所充填,这有利于气体的扩散,而且小孔隙的空间大多被水分所占据,便于可溶性基质进行扩散从而促进细胞新陈代谢^[9,12],土壤呼吸强度达到最高。

另外,4—6月的返青期至拨节期日均土壤呼吸速率总体高于7—10月孕穗期至枯萎期(秩和检验,显著性水平 $\alpha = 0.05$)。其原因很可能是由于植物在营养生长期,根系也处于生长期,而在植物生殖生长期,根系生长缓慢甚至不生长,且许多根系的结构和功能的发生转变,由吸收矿物质的活细胞转变为输导水分的木质部死细胞^[14-15]。因此,能够进行呼吸作用的根逐渐减少导致在同样水热条件下,处于植物营养生长期的土壤呼吸速率高于生殖生长期。当我们由于条件限制不能长期进行连续通量观测时,如何选择适合的观测时间进行测量以此来代表一段时间内通量的平均状况是十分重要的。

3.2 土壤水分对 Q_{10} 值的影响 本研究 24 h 连续观测, 计算 7:00—19:00 整点和半点的 Q_{10} 值, 然后取平均值, 在计算 Q_{10} 值过程中发现, 上午 7:00—10:00 的 Q_{10} 值呈逐渐下降趋势, 最大降幅可达 3 倍以上, 10:00 以后直至日落虽相对稳定但仍有 10%~30% 的变幅, 而以往研究者^[3,7-8,10] 大多利用静态暗箱法只进行上午 10:00 左右和下午 3:00 左右仅 2~4 h 的人工观测, 不可能发现这一规律。因此, 本研究计算的 Q_{10} 值普遍大于他们的计算结果。罗光强和耿元波^[4] 研究得出土壤水分与 Q_{10} 值呈二次函数关系, 并计算 Q_{10} 值最大值时的土壤水分含量接近田间持水量, 过低和过高的土壤含水量不仅限制土壤呼吸速率也同时影响了土壤呼吸的温度敏感性, 这与本研究结果几乎相同。这对于全球变化条件下研究土壤呼吸具有指导意义。

4 结论

1) 土壤呼吸日动态呈单峰曲线, 峰值出现在中午 12:00—14:00, 下午 16:00 以后呼吸速率迅速下降, 夜间土壤呼吸速率很低, 最低值出现在凌晨 1:00—3:00。土壤呼吸速率季节模式总体呈双峰曲线, 峰值出现在禾草拔节期和抽穗开花期。在返青期和植物枯萎期夜间地温低于 0 °C 时会出现土壤呼吸速率为负值的现象。有研究^[8] 认为可能是由于冬季气温与土壤温度均很低, 土壤微生物和根系呼吸基本停止, 土壤空气中没有 CO₂ 的累积, 致使土壤空气与大气 CO₂ 失衡, 在大气与土壤 CO₂ 浓度差的驱动下, 大气中的 CO₂ 向土壤扩散, 从而被土壤固定。另外, 可能是低温促进了 CO₂ 在土壤溶液中的溶解度, 同时低温促使空气中的水汽凝结在土壤表面进而增加了土壤含水量, 这两方面因素也很有可能成为土壤呼吸负通量的原因之一。土壤呼吸作用在低温时的负通量说明以往仅利用生长季的观测资料所估算的土壤年呼吸总量将比实际值偏大。

2) 土壤呼吸速率与土壤含水量呈二次函数关系, 土壤呼吸速率理论最大值为 456.2 mg/(m²·h), 对应土壤含水量为 20%, 与样地田间持水量 21% 基本吻合。过高和过低的土壤含水量都会限制土壤呼吸作用。提高土壤呼吸作用观测频率, 特别是在降水以后和非生长季节进行持续观测, 加强相应物理化学机制以及根系呼吸的季节变化的

深入探讨将有助于我们对草地土壤年呼吸量的准确估算。

3) 土壤呼吸作用温度敏感指数 Q_{10} 值在生长季变化很大, 变幅最高达 5 倍, 明显不同于以往研究结果, 与近年来一些研究结果相近^[4,9,11]。 Q_{10} 值与土壤含水量呈二次函数关系, 过低和过高的土壤含水量不仅限制土壤呼吸速率也同时影响了土壤呼吸的温度敏感性。计算理论 Q_{10} 值峰值为 4.37, 土壤含水量峰值为 18%, 与田间持水量并无显著差异, 这对于研究全球变化条件下的土壤呼吸作用有重要意义。

参考文献

- [1] 刘立新, 董云社, 齐玉春. 草地生态系统土壤呼吸研究进展[J]. 地理科学进展, 2004, 23(4): 35-42.
- [2] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水分对土壤呼吸的影响及机理[J]. 生态学报, 2003, 23(5): 972-978.
- [3] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水热条件对锡林河流域典型草原退化群落土壤呼吸的影响[J]. 植物生态学报, 2003, 27(2): 202-209.
- [4] 罗光强, 耿元波. 温度和水分对羊草草原土壤呼吸温度敏感性的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(5): 1938-1943.
- [5] Jia B, Zhou G, Wang Y, et al. Effects of temperature and soil water content on soil respiration of grazed and ungrazed *Leymus chinensis* steppes Inner Mongolia [J]. Journal of Arid Environments 2006, 67: 60-76.
- [6] 刘立新, 董云社, 齐玉春, 等. 内蒙古锡林河流域土壤呼吸的温度敏感性[J]. 中国环境科学, 2007, 27(2): 226-230.
- [7] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 温带草原 11 个植物群落夏秋土壤呼吸对气温变化的响应[J]. 植物生态学报, 2003, 27(4): 441-447.
- [8] 董云社, 齐玉春, 刘纪远, 等. 不同降水强度 4 种草地群落土壤呼吸通量变化特征[J]. 科学通报, 2005, 50(5): 473-480.
- [9] 李洪建. 不同生态系统土壤呼吸与环境因子的关系研究[D]. 太原: 山西大学, 2008.
- [10] 赵哈林, 李玉强, 周瑞莲. 沙漠化对科尔沁沙质草地土壤呼吸速率及碳平衡的影响[J]. 土壤学报, 2009(5): 809-816.
- [11] 高艳红, 张志山, 刘立超, 等. 腾格里沙漠植被重建对土壤呼吸的影响[J]. 土壤学报, 2009(4): 626-633.

- [12] 阿斯嘎, 高丽, 朴顺姬, 等. 库布齐沙地土壤呼吸及其影响因素分析[J]. 草业科学, 2009, 26(9): 43-48. 出版社, 2005: 137-143.
- [13] 戴雅婷, 那日苏, 吴洪新, 等. 我国北方温带草原碳循环研究进展[J]. 草业科学, 2009, 26(9): 99-104. [15] 邬建国. 现代生态学讲座(III[M]). 北京: 高等教育出版社, 2007: 92-173.
- [14] Stuart F, Pamela A, Harold A. 李博, 赵斌, 彭容豪, 等[译]. 陆地生态系统生态学原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009, 18(2): 184-193. [16] 周萍, 刘国彬, 薛蕙. 草地生态系统土壤呼吸及其影响因素研究进展[J]. 草业学报, 2009, 18(2): 184-193.

Soil respiration efflux of fencing grasslands in the Xilamuren regions

GAO Tian-ming¹, ZHANG Rui-qiang¹, LIANG Zhan-qi¹, LIU Tie-jun¹,
GUO Jian-ying², HAO Rui²

(1. The Institute of Water Resources for Pastoral Areas, Inner Mongolia Huhhot 010020, China;

2. Erdos water and soil conservation working station, Inner Mongolia Erdos 017000, China)

Abstract: ACE soil respiration measurement system was used to monitor the diurnal changes of the soil respiration rate of fencing grassland from the end of April to the early October every ten days in Xilamuren regions and the correlation relationships between the soil respiration rate and soil temperature and moisture were discussed in this study. This study indicated that diurnal changes of soil respiration was one-peak curve with the highest value at 12:00–14:00 and the lowest value at 1:00–3:00. The soil respiration flux was different day and night at the different phenological stage and showed a negative value while soil temperature was under 0 °C, implying that the increase in observation frequency of soil respiration observation and sighting into the related mechanism were helpful to estimate accurately the whole year carbon flux. Soil respiration rate showed a quadratic function with soil water content and the theoretical highest respiration rate was 456.2 mg/(m² · h) when soil water content was 21%, coinciding with field water-holding capacity with 20%. During growing season, Q₁₀ value were between 1.16 and 6.28, and showed a quadratic function with soil water content, differing from previous study results, which would be a important guidance to soil respiration under global change.

Key words: Xilamuren grassland; soil respiration; soil water content; Q₁₀ value

本期出现的植物种名

‘阿坝’硬秆仲彬草 <i>Kengyilia rigidula</i> cv. Aba	矮蒿草 <i>Kobresia humilis</i>	桉树 <i>Eucalyptus robusta</i>
白花草木樨 <i>Melilotus albus</i>	白沙蒿 <i>Artemisia sphaerocephala</i>	稗草 <i>Echinochloa crusgalli</i>
瓣蕊唐松草 <i>Thalictrum petaloideum</i>	北方蒿草 <i>Kobresia bellardii</i>	北美车前 <i>Plantago virginica</i>
薜荔 <i>Ficus pumila</i>	扁蓄 <i>Polygonum aviculare</i>	菟豆 <i>Dolichos lablab</i>
不结球白菜 <i>Brassica pestris</i> ssp. <i>chinensis</i>	藏北蒿草 <i>Kobresia littledalei</i>	草地早熟禾 <i>Poa pratensis</i>
草木樨 <i>Melilotus alba</i>	草原糙苏 <i>Phlomis pratensis</i>	草原老鹳草 <i>Geranium pratense</i>
裸花碱茅 <i>Puccinellia nudiflora</i>	马齿苋 <i>Portulaca oleracea</i>	马唐 <i>Digitaria sanguinalis</i>
猫尾草 <i>Phleum pratense</i>	毛白杨 <i>Populus tomentosa</i>	毛瓣棘豆 <i>Oxytropis glabra</i>
美国槐 <i>Sophora xanthantha</i>	美丽风毛菊 <i>Saussurea pulchella</i>	糜蒿 <i>Artemisia blepharolepis</i>
摩荇草 <i>Morina chinensis</i>	棘豆 <i>Glycine max</i>	牛筋草 <i>Elyusine indica</i>
女贞 <i>Ligustrum lucidum</i>	爬山虎 <i>Parthenocissus tricuspidata</i>	蓬子菜 <i>Galium verum</i>
草原苔草 <i>Carex liparocarpos</i>	侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	叉分蓼 <i>Polygonum divaricatum</i>
朝天委陵菜 <i>Potentilla supina</i>	车前 <i>Plantago asiatica</i>	柽柳 <i>Tamarix ramosissima</i>

(下转第 67 页)