

内蒙古农牧交错区不同土地利用方式下土壤呼吸速率及其温度敏感性变化

马 骏^{1,2} 唐海萍^{1,2*}

¹北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; ²北京师范大学资源学院, 北京 100875

摘 要 2009年8–10月, 采用动态气室法观测了内蒙古农牧交错区多伦县农田、弃耕和围封3种土地利用方式下, 土壤呼吸速率从6:00到18:00的变化规律, 分析了不同深度的土壤温度与土壤含水量对土壤呼吸速率的控制作用。结果表明, 空间尺度上, 不同土地利用方式的土壤呼吸速率由高到低依次为: 农田>弃耕>围封; 时间尺度上, 土壤呼吸速率在6:00–18:00的变化趋势为单峰曲线, 在12:00–15:00达到峰值, 随后降低, 在18:00基本恢复到6:00左右的呼吸水平, 同时, 土壤呼吸速率在9、10月显著降低。利用Van't Hoff指数模型研究不同深度土壤温度对土壤呼吸速率的影响发现, 10–15 cm深度的土壤温度对土壤呼吸速率的影响最为显著, 其中, 土壤呼吸温度敏感性由高到低分别为: 农田>围封>弃耕。相反, 由于8–10月土壤含水量变化较小, 故土壤含水量与土壤呼吸速率间的相关性不显著, 土壤含水量不能解释该时段土壤呼吸速率的变化。

关键词 Q_{10} , 土壤呼吸速率, 土壤温度, 土壤含水量

Variations of soil respiration rate and its temperature sensitivity among different land use types in the agro-pastoral ecotone of Inner Mongolia

MA Jun^{1,2} and TANG Hai-Ping^{1,2*}

¹State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; and ²College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract

Aims Our objectives are to compare soil respiration rate and its temperature sensitivity at different land use types and discuss soil respiration response to soil temperature (T_s) and soil water content at different soil depths.

Methods Periodic measurements of soil respiration rates (R_s) were made during August–October 2009 with a LI-8100 portable automated soil CO₂ flux system in three agro-pastoral ecotone land use types: cropland, abandoned cultivated land and grazing enclosure. Soil temperature and soil water content at 0–5, 5–10 and 10–15 cm depths were measured simultaneous adjacent to the soil collar.

Important findings R_s is significantly different among the three land use types and greatest in cropland. R_s exhibited a unimodal curve during 6:00–18:00, with a maximum during 12:00–15:00. R_s decreased with T_s , so R_s was significantly higher in August than in September and October. With the Van't Hoff model, we concluded there is a positive, exponential relationship between measured T_s and R_s . In addition, temperature sensitivity of soil respiration (Q_{10}), which is derived from the Van't Hoff model, was largest in cropland. In contrast, R_s was negatively related to soil water content in different soil depths at the sites.

Key words Q_{10} , soil respiration rate, soil temperature, soil water content

土壤呼吸是将植物固定的CO₂重新释放回大气的主要途径(Högberg & Read, 2006)。由于从土壤进入大气的CO₂数量巨大, 且潜在的矿化碳主要存储在土壤中, 因此, 任何土壤CO₂通量对环境变化作出的响应都可能增加大气的CO₂浓度, 进而对全球变暖产生正反馈(Rustad *et al.*, 2000)。当前, 由于人

类活动而带来的土地利用和管理方式的变化, 被认为是全球碳动力的主要驱动因子(Raich & Schlesinger, 1992; Houghton *et al.*, 1999; Wang & Fang, 2009)。其中, 土地利用方式改变对土壤呼吸速率的增加或减少, 直接决定土壤在全球碳收支过程中的碳源/汇作用(Raich & Schlesinger, 1992; Hu

et al., 2001; Ishizuka *et al.*, 2002; Grünzweig *et al.*, 2003; Inubushi *et al.*, 2003; Campos, 2006; Liu *et al.*, 2008)。研究表明, 土地利用方式的改变将加剧土壤碳释放(Dixon *et al.*, 1994), 由于农田土壤呼吸速率在开垦初期要高于天然草地, 使草地开垦成为农田后1 m深度土层内的土壤碳损失达20%–30% (Buyanovsky *et al.*, 1987)。但也有部分研究发现, 在草地向农田转变的过程中, 土壤呼吸速率呈降低趋势(Tufekcioglu *et al.*, 2001; Frank *et al.*, 2006; Qi *et al.*, 2006, 2007)。上述研究结果表明, 土壤呼吸速率对土地利用方式转变的不同响应, 主要是受到研究区域土壤温湿度、土壤有机碳输入、土壤微生物量, 以及立地情况等诸多因素共同作用(Wang & Fang, 2009)。因此, 研究不同土地利用方式间的土壤呼吸速率, 对于进一步探讨土壤呼吸速率的时空变化规律, 揭示当地的碳源/汇作用, 具有极其重要的意义。

国内关于草地生态系统土壤呼吸作用的研究已经较为成熟, 但大多关注土壤呼吸速率对温度、水分与底物变化的响应机理(Wan *et al.*, 2007; Xu & Wan, 2008; Xia *et al.*, 2009), 而针对不同土地利用方式下, 土壤呼吸速率的比较研究则较少(吴建国等, 2003; 贾丙瑞等, 2004; 张金波等, 2005; 王旭等, 2006; Sheng *et al.*, 2010)。本文以位于北方农牧交错区的内蒙古自治区多伦县为例, 比较2009年8月底到10月初, 农田、弃耕、围封3种土地利用方式下土壤呼吸速率的差异, 分析在水分、生物量基本恒定的8–10月, 不同土地利用方式的土壤呼吸速率对土壤温度变化的响应规律以及土壤呼吸温度敏感性(Q_{10})的变化特点, 旨在为准确地估算该区域的碳收支状况提供依据。

1 研究区自然概况

内蒙古自治区锡林郭勒盟多伦县, 属中温带半干旱大陆性气候, 为典型的北方农牧交错区。年平均气温1.6 °C, 年平均最高气温9.1 °C, 年平均最低气温-5 °C。年平均降水量约385.5 mm, 夏季雨量集中, 为258.4 mm, 占年平均降水量的67%; 冬季降水量少, 为14.1 mm, 占年平均降水量的3.7%。年平均风速3.6 m·s⁻¹, 春季风速最大, 平均为4.5 m·s⁻¹。土壤以灰褐土、黑钙土、栗钙土、草甸土及风砂土等为主, 栗钙土占总面积的70.1%。土壤养分缺磷、少氮、钾有余, 有机质含量为2%–4%。样地位于中国科学院植物研究所多伦恢复生态学试验示范研究站, 从东到西依次为围封、弃耕、农田, 样地描述见表1。

2 研究方法 with 数据采集

2.1 前期处理

在农田、弃耕、围封3种土地利用方式中, 选择地势平坦、植被长势均匀的样地进行野外测定。每种土地利用方式中设置5个1 m × 1 m的样方, 每个样方相距10 m, 每个样方中放置一个土壤环。将待测样方内的植物, 分种齐地剪取地上部分(绿体、立枯、凋落)。为避免放置土壤环扰动土壤, 第一次测定前, 提前15天将土壤环嵌入土壤中, 待土壤稳定后再测定土壤呼吸速率, 且每次测定前, 保证土壤环内和样方内均无植物。

2.2 土壤呼吸速率和环境因子的测定

2009年8月26日、9月11日、9月21日、10月10日, 采用LI-8100土壤碳通量测定系统(LI-COR, Lincoln, NE)测定土壤呼吸速率。每次测定时间为6:00–18:00, 每隔3 h测定一次。土壤温度采用长杆

表1 样地描述

Table 1 Description of study sites

重要因子 Important factors	农田样地 Cropland plot	弃耕样地 Abandoned cultivated plot	围封样地 Grazing enclosure plot
地理位置 Geographical position	42°02'19.9" N 116°16'49.2" E	42°02'19.9" N 116°16'53.2" E	42°02'23.4" N 116°17'9.4" E
植被组成 Vegetation composition	小麦 <i>Triticum aestivum</i> 荞麦 <i>Fagopyrum tataricum</i>	冰草 <i>Agropyron cristatum</i> 冷蒿 <i>Artemisia frigida</i>	克氏针茅 <i>Stipa krylovii</i> 冷蒿 <i>Artemisia frigida</i>
土壤容重 Soil bulk density (g·cm ⁻³)	1.34	1.50	1.46
土壤有机质 Soil organic matter (%)	1.63	2.83	2.31
土地利用历史 Land-use history	1 year	9 years	10 years

针式土壤温度计测定, 分别测定土壤环周围0-5、5-10、10-15 cm深度的土壤温度, 每个样方测定一次。采用烘干法, 用土钻分0-5、5-10、10-15 cm深度取土, 放入铝盒中, 测定土壤质量含水量。2009年8月25日取0-10、10-20、20-30 cm深度的土样带回实验室测定土壤有机质和土壤容重。

2.3 数据分析

利用Lloyd和Taylor (1994)提出的简单经验指数模型描述土壤呼吸对温度变化的响应:

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

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

式中: R_s 为土壤呼吸速率($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); T_s 为不同深度(0-5、5-10、10-15 cm)土壤温度($^{\circ}\text{C}$); a 为 0°C 时的土壤呼吸速率; β 为温度响应系数; Q_{10} 为土壤呼吸温度敏感性。

采用SPSS 12.0统计分析软件中的Repeated Measures ANOVA, 对不同时间、不同土地利用方式下的土壤呼吸速率进行方差分析, 并结合Origin 7.5与Photoshop 7.0.1辅助作图。

3 结果和分析

3.1 土壤呼吸速率的变化规律

图1、2分别是不同土地利用方式下土壤呼吸速

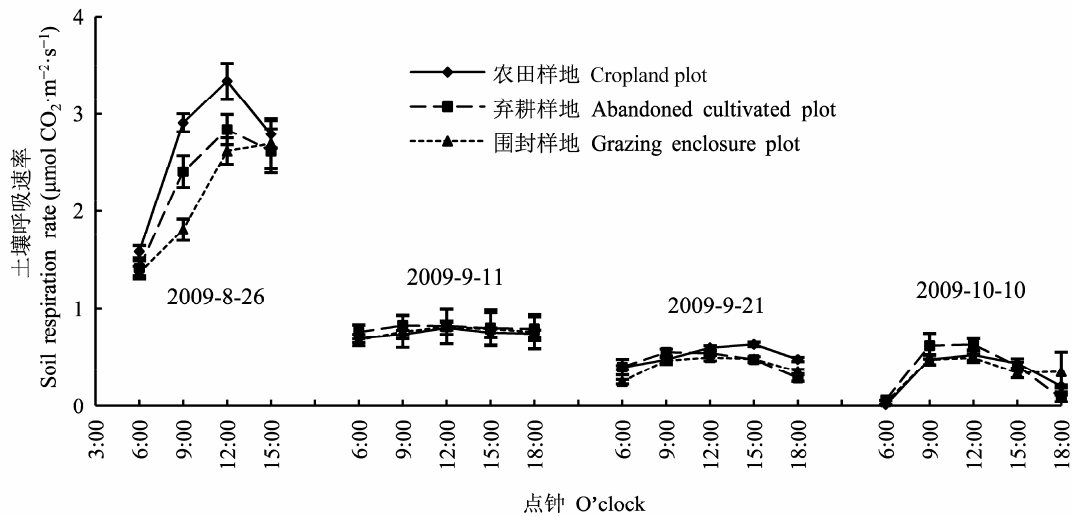


图1 农田、弃耕与围封样地土壤呼吸速率的变化(平均值±标准误差)。

Fig. 1 Variations of soil respiration rates in cropland, abandoned cultivated and grazing enclosure plots (mean ± SE).

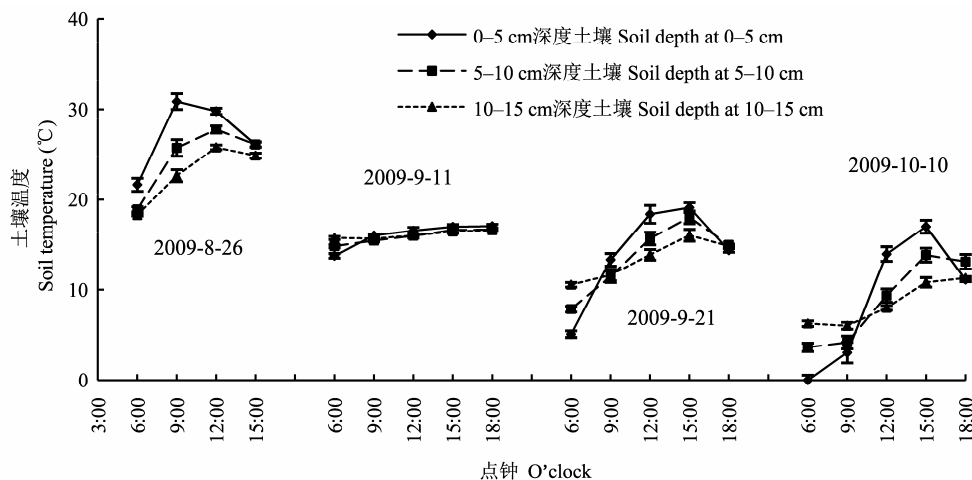


图2 不同深度的土壤温度(平均值±标准误差)。

Fig. 2 Soil temperatures at different soil depths (mean ± SE).

率与不同深度土壤温度的变化情况。土壤呼吸速率变化规律与土壤温度基本保持同步变化的趋势,即:日出后太阳辐射增强,土壤温度迅速增加,土壤呼吸速率也呈增加趋势,在12:00-15:00达到峰值,午后土壤温度开始下降,土壤呼吸速率随之降低,在18:00基本恢复到6:00左右的呼吸水平。最为明显的是,土壤温度曲线在8月和10月的6:00-12:00陡增,而土壤呼吸速率在这一时段也呈相同态势;9月土壤温度变化平稳,无明显增加或降低,土壤呼吸速率变化不明显,由此可见,8月和10月农田、弃耕、围封的土壤呼吸速率变化均为单峰曲线。观测中也发现,8月的农田日土壤呼吸速率高于弃耕和围封样地,日最大值为 $3.33 \mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (此时土壤温度为 29.8°C ,仅次于土壤日最高温度 30.1°C),日土壤呼吸速率最小值为围封样地,仅为 $1.37 \mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;9、10月土壤呼吸速率在6:00-18:00的变化范围从 $0.01 \mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 到 $0.83 \mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,变幅较小,且3种土地利用方式的土壤呼吸速率差异不显著。9、10月土壤呼吸速率低于8月,8月土壤呼吸日最小值约为9、10月日最大值的1.5倍。

从图3可以看出,9、10月份的农田、弃耕、围封样地中,土壤呼吸速率均呈现下降的趋势,并且与土壤温度变化趋势一致。8月末土壤呼吸速率最大,农田、弃耕、围封土壤呼吸速率分别能达到 2.67 、 2.33 和 $2.03 \mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,在生长季末期的9、10月,土壤呼吸开始下降,10月土壤呼吸均小于 $0.50 \mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。通过 Repeated Measures ANOVA分析发现,8、9月3种土地利用方式的土壤呼吸速率差异显著($p < 0.05$),农田>弃耕样地>围封样地,而10月土壤呼吸速率无显著差异($p > 0.05$)。

3.2 环境因子对土壤呼吸的影响

3.2.1 温度对土壤呼吸的影响

图4是不同深度土壤温度与土壤呼吸速率之间的关系。通过分析图1、2得出,土壤呼吸与土壤温度的动态变化规律具有一致性,图4进一步证明,不同深度的土壤温度与土壤呼吸速率显著相关($p < 0.001$)。采用方程(1)拟合的结果表明,随着土壤深度的增加,温度对土壤呼吸速率的解释能力也增加。以农田为例,0-5、5-10、10-15 cm土壤温度与呼吸速率的相关性依次为 0.662 、 0.699 、 0.718 ,说明上述深度土壤温度对土壤呼吸速率的解释能力

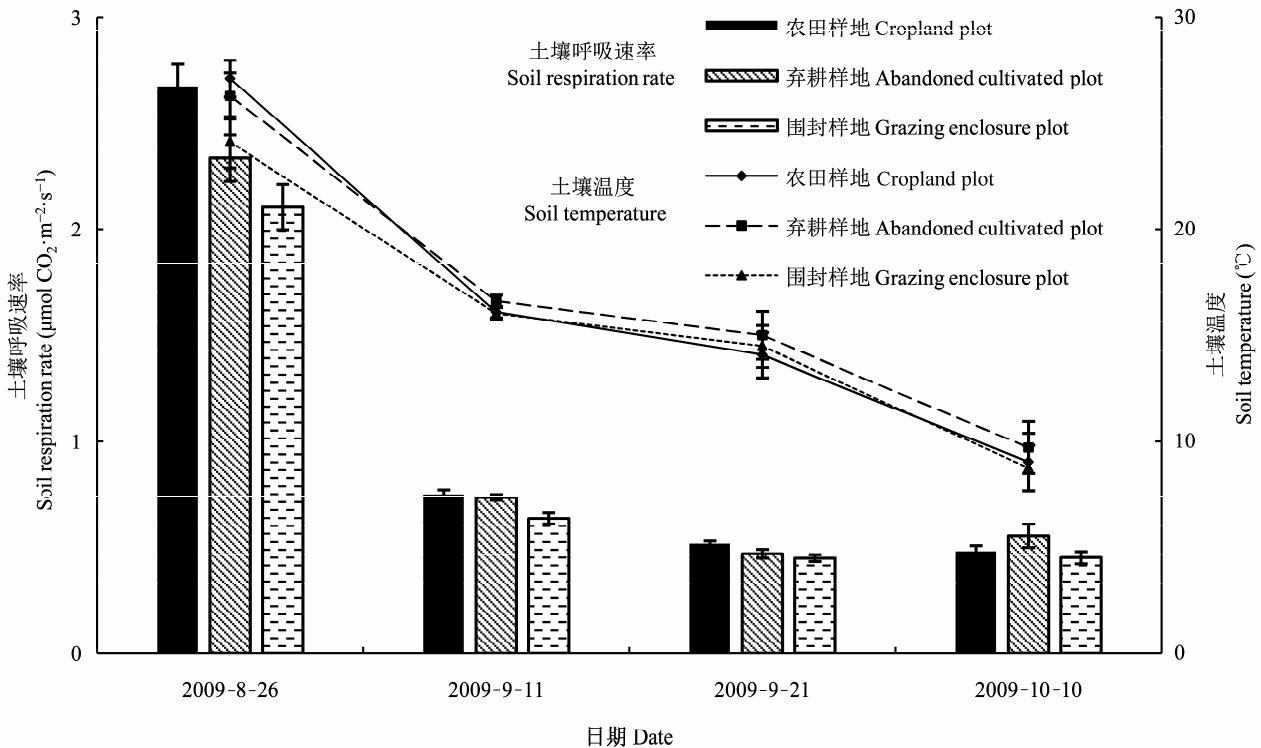


图3 农田、弃耕与围封样地土壤呼吸速率的比较(平均值±标准误差)。 Fig. 3 Comparisons of soil respiration rates among cropland, abandoned cultivated and grazing enclosure plots (mean ± SE).

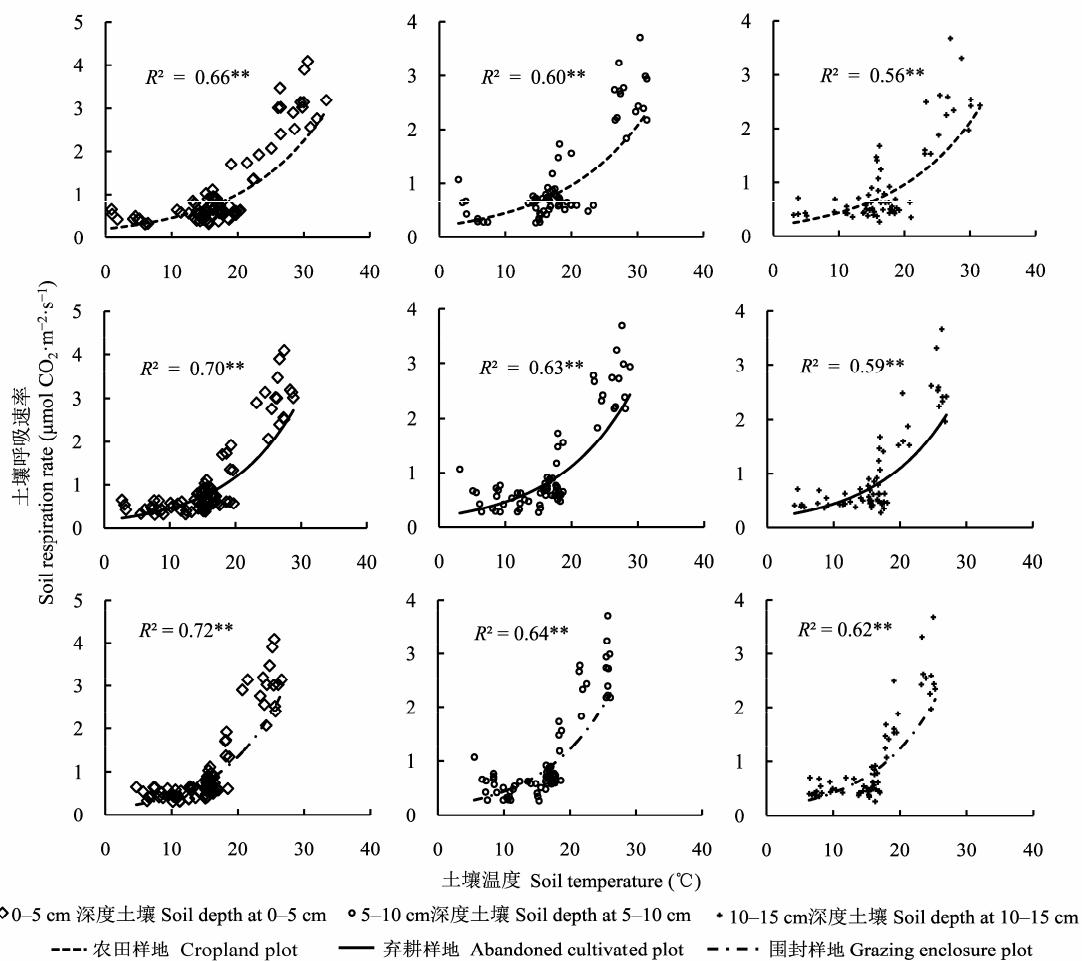


图4 不同深度土壤温度与土壤呼吸速率之间的关系。**, 相关性达到极显著水平($p < 0.01$)。
 Fig. 4 Relationships between soil respiration rate and soil temperature at different soil depths. **, correlation is significant at the 0.01 level.

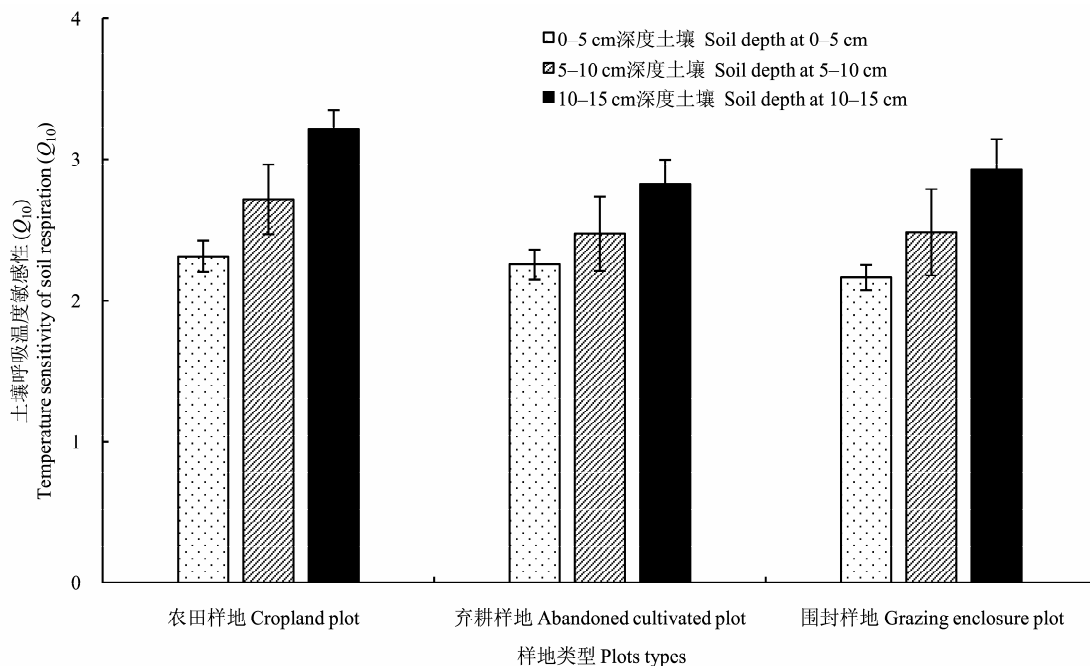


图5 农田、弃耕、围封样地中不同土壤深度的 Q_{10} 值(平均值±标准误差)。
 Fig. 5 Q_{10} at different soil depths at cropland, abandoned cultivated and grazing enclosure plots (mean \pm SE).

表2 不同深度土壤含水量与土壤呼吸速率的关系
Table 2 Relationships between soil respiration rates and soil water content at different soil depths

	土壤深度 Soil depth (cm)	方程 Equation	R^2	p
农田样地 Cropland	0–5	$y = 0.5197e^{2.0925x}$	0.0289	$p > 0.05$
plot	5–10	$y = 0.4096e^{3.4954x}$	0.0959	$p > 0.05$
	10–15	$y = 0.4466e^{3.0492x}$	0.1045	$p > 0.05$
弃耕样地 Abandoned cultivated plot	0–5	$y = 1.0294e^{-15.000x}$	0.5058	$p > 0.05$
plot	5–10	$y = 0.4010e^{7.8008x}$	0.0518	$p > 0.05$
	10–15	$y = 0.1985e^{26.016x}$	0.2926	$p > 0.05$
围封样地 Grazing enclosure plot	0–5	$y = 0.3626e^{6.3713x}$	0.0655	$p > 0.05$
plot	5–10	$y = 0.3764e^{6.5976x}$	0.0172	$p > 0.05$
	10–15	$y = 0.2987e^{12.059x}$	0.1433	$p > 0.05$

分别为66.2%、69.9%、71.8%。当土壤温度超过20 °C时，土壤呼吸速率的分布开始逐渐远离曲线，呈发散状。拟合方程中系数 a 为0 °C时土壤呼吸速率，0 °C时土壤呼吸速率随着深度的增加而降低。将方程(1)中的 β 值带入方程(2)计算 Q_{10} 。图5为不同深度土壤的 Q_{10} 值，图5显示 Q_{10} 值的变化范围为2.16–3.06， Q_{10} 随着土壤深度的增加而增加，农田的 Q_{10} 值大于弃耕、围封样地， Q_{10} 的最大值出现在土壤深度10–15 cm的农田($Q_{10} = 3.06$)，最小值在土壤深度0–5 cm的弃耕样地($Q_{10} = 2.16$)。

3.2.2 土壤呼吸速率与土壤含水量

表2是不同深度土壤含水量与土壤呼吸速率间的关系。从表2可以看出，土壤含水量日变幅不大，农田土壤含水量较高，基本在4%–12%之间变动，围封、弃耕样地的土壤含水量较低，主要在2%–6%之间。除弃耕样地0–5 cm土壤深度含水量与土壤呼吸呈负相关外，其余样地的土壤含水量与土壤呼吸速率之间均呈正相关关系，且随着土壤深度的增加，两者的相关性逐渐增强，但无显著相关性($p > 0.05$)。土壤含水量对土壤呼吸的解释作用较低，其中，弃耕样地10–15 cm土壤含水量对土壤呼吸的解释能力为29.26%，是研究区土壤含水量对呼吸作用解释能力最强的，其余样地不同深度的土壤含水量对呼吸作用的解释能力均在0.1%–14%之间。

4 讨论

4.1 土壤呼吸对温度的响应

温度作为陆地生态系统土壤呼吸的一个控制因素，是预测土壤呼吸对全球变化响应的基本参数

之一(Cox *et al.*, 2000; Reichstein *et al.*, 2005; Trumbore, 2006)。一天当中，早晨的土壤CO₂通量随着土壤温度的升高而增加，在12:00至16:00达到高峰，16:00以后到整个夜间都随温度的降低而下降(Xu & Qi, 2001)，本研究与上述结论一致，土壤呼吸速率的变化趋势为明显的单峰型曲线，在12:00–15:00出现峰值，最小值出现在2:00–4:00。

众多研究表明，土壤呼吸速率与土壤温度具显著相关性，但由于研究区域的差异，不同深度的土壤温度对土壤呼吸速率会产生不同的影响。本研究认为，10–15 cm深度土壤温度对土壤呼吸速率的解释能力高于表层0–5、5–10 cm的土壤温度；与此相反，Rayment和Jarvis (2000)、崔晓勇等(2000)、贾丙瑞等(2004)、吴琴等(2005)、Pavelka等(2007)的研究表明，0–10 cm深度的土壤温度对土壤呼吸速率影响较大。分析其原因，一方面是由于不同研究地点、不同植被类型都会对二者的关系产生影响(齐玉春等, 2010)，从而使土壤呼吸速率不仅仅受土壤温度的控制。王庚辰等(2004)对温带典型草原土壤呼吸特征的研究表明，在干旱年份，土壤呼吸速率与土壤温度的关系明显减弱，与空气温度的关系却显著增强；而丰水年土壤呼吸速率与土壤温度有较强的相关性。另一方面，由于本研究采用便携式长杆针式土壤温度计测定地温，每次测定深度与测定结果不如固定的地温表读数稳定、准确，也可能会造成研究结果的分歧。总结草原生态系统土壤温度与土壤呼吸速率的关系发现，0–20 cm深度的土壤温度对土壤呼吸速率影响较为显著。

4.2 土壤呼吸温度敏感性

土壤呼吸温度敏感性 Q_{10} 值是反映土壤呼吸对温度变化敏感性的重要指标。本文中 Q_{10} 值由高到低分别为：农田>围封样地>弃耕样地，表明在农牧交错区农田生态系统对温度变化的响应较为敏感，草地向农田生态系统的转变过程会导致土壤碳库的损失。另一方面，Yuste等(2004)发现，同一地区植被类型的季节性变化也是导致 Q_{10} 值出现差异的重要原因。农牧交错区秋季农作物收获、草地刈割等土地利用管理方式使地表覆盖类型发生巨大变化，不仅使地上碳库发生改变，影响地下土壤呼吸过程，同时地表植被覆盖的迅速减少，造成地表温度迅速上升、土壤含水量降低等，从而使不同土地利用/覆盖方式下的 Q_{10} 值出现差异。

4.3 土壤呼吸对土壤含水量的响应

土壤含水量是影响土壤呼吸速率的另一个重要因素。在内蒙古典型草原生态系统中, 0–20 cm深度土壤含水量能够解释土壤呼吸速率变化的51%–80%, 两者间存在很好的线性相关关系(崔骁勇等, 2000; 贾丙瑞等, 2004; 师广旭等, 2008; 齐玉春等, 2010)。但是本研究研究区域的土壤含水量与土壤呼吸速率无显著相关性($p > 0.05$), 对土壤呼吸的解释能力较弱。究其原因, 主要是由于2009年5–12月总降水量为176 mm, 降水量较低, 弃耕、围封样地土壤含水量均在6%以下, 农田土壤含水量在12%以下。因此, 土壤含水量变化较小, 可能掩盖了土壤呼吸随水分变化的真实规律, 从而使土壤呼吸速率与土壤水分之间无显著相关关系。

4.4 不同土地利用方式下土壤呼吸速率的差异

冯朝阳等(2008)对华北山地不同植被类型土壤呼吸的研究表明, 农田和退耕地的土壤呼吸速率高于自然状态下的林地, 农田释放量是自然状态下土壤的2倍以上, 退耕行为有助于降低土壤CO₂释放量。本文的研究结果也表明, 在空间尺度上, 不同土地利用方式的土壤呼吸速率由高到低依次为: 农田>弃耕样地>围封样地, 说明通过退耕、围封等保护性措施, 可以有效地控制土壤向大气排放CO₂。但也有研究结果显示, 草地向农田转变的过程中, 土壤呼吸速率呈下降趋势(Frank *et al.*, 2006; Qi *et al.*, 2006, 2007)。因此, 在探讨不同土地利用方式对土壤呼吸速率的影响时, 还需要考虑受土地利用变化而引起的小气候因子、地表植被覆盖类型等生物与非生物因子对土壤呼吸速率的控制作用。已有研究表明, 除温度、水分外, 植物的光合作用也会对土壤呼吸作用产生驱动影响(Rochette *et al.*, 1997; Tang *et al.*, 2005), 促进根际呼吸。这也从一个方面解释了本研究9月末到10月初3种土地利用方式之间的土壤呼吸速率无显著差异($p > 0.05$)的原因, 主要是受生长季末期植物光合作用显著降低的影响, 土壤呼吸作用出现下降趋势。相反, 在生长旺盛期8月, 农田土壤呼吸速率显著高于弃耕和围封样地, 也从另一个角度验证了植物光合作用会对土壤呼吸速率产生影响。另一方面, 王妮和郭继勋(2002)、陈四清等(1999)也提出不同土地利用方式下土壤呼吸速率的差异, 还需要进一步从地上、地下生物量的角度考虑, 探讨其影响机理。

5 结论

本文以农牧交错区不同土地利用方式为研究对象, 探讨土壤呼吸速率以及 Q_{10} 的变化规律。研究结论如下:

(1)在空间尺度上, 不同土地利用方式的土壤呼吸速率由高到低依次为: 农田>弃耕样地>围封样地。时间尺度上, 土壤呼吸速率6:00–18:00的变化规律为单峰曲线, 在12:00–15:00达到一天中的峰值, 随后开始降低, 在18:00基本恢复到6:00左右的呼吸水平。8月的土壤呼吸速率显著高于9、10月。

(2)通过研究土壤呼吸速率对土壤温度的响应发现, 在0–5、5–10、10–15 cm深度, 土壤呼吸速率和土壤温度显著相关, 且随着土壤深度的增加而增加, 10–15 cm深度的 Q_{10} 值高于浅层土壤, 同时, 农田对土壤温度变化的敏感度高于围封和弃耕样地。

(3)8–10月降水较少, 土壤含水量变化不大, 故土壤水分与呼吸速率间的相关性不显著($p > 0.05$), 不能解释土壤呼吸速率变化的原因。因此, 在今后的研究中需要进一步观测土壤呼吸速率与温度、水分以及两者间的耦合关系, 同时引入生物因子, 为构建更加精确的土壤呼吸模型提供数据支持。

致谢 国家自然科学基金委员会科学部主任基金项目“内蒙古农牧交错带土壤呼吸与 Q_{10} 值研究”(批准号: 31040012)和国家重点实验室自主研究课题(2008-ZZ-08)共同资助。中国科学院植物研究所多伦恢复生态学试验示范研究站李凌浩研究员、李鑫老师对本研究的野外工作给予大力支持与帮助, 课题组李滨勇、吴立恒、李青寰同学在试验中也付出辛勤的劳动, 在此一并致谢。

参考文献

- Buyanovsky GA, Kucera CL, Wagner GH (1987). Comparative analysis of carbon dynamics in native and cultivated ecosystems. *Ecology*, 68, 2023–2031.
- Campos CA (2006). Response of soil surface CO₂-C flux to land use changes in a tropical cloud forest (Mexico). *Forest Ecology and Management*, 234, 305–312.
- Chen SQ (陈四清), Cui XY (崔骁勇), Zhou GS (周广胜), Li LH (李凌浩) (1999). Study on the CO₂-release rate of soil respiration and litter decomposition in *Stipa grandis* steppe in Xilin River Basin, Inner Mongolia. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 41, 645–650. (in Chinese with English abstract)
- Cox PM, Betts RA, Jones CD, Spall SA, Totterdell IJ (2000). Acceleration of global warming due to carbon-cycle

- feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, 408, 184–187.
- Cui XY (崔骁勇), Chen SQ (陈四清), Chen ZZ (陈佐忠) (2000). CO₂ release from typical *Stipa grandis* grassland soil. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 11, 390–394. (in Chinese with English abstract)
- Dixon RK, Brown S, Houghton RA, Solomon AM, Trexler MC, Wisniewski J (1994). Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 263, 185–190.
- Feng CY (冯朝阳), Lü SH (吕世海), Gao JX (高吉喜), Liu SH (刘尚华), Lin D (林栋) (2008). Soil respiration characteristics of different vegetation types in the mountain areas of north China. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 30(2), 20–26. (in Chinese with English abstract)
- Frank AB, Liebig MA, Tanaka DL (2006). Management effects on soil CO₂ efflux in northern semiarid grassland and cropland. *Soil and Tillage Research*, 89, 78–85.
- Grünzweig JM, Sparrow SD, Chapin FS (2003). Impact of forest conversion to agriculture on carbon and nitrogen mineralization in subarctic Alaska. *Biogeochemistry*, 64, 271–296.
- Högberg P, Read DJ (2006). Towards a more plant physiological perspective on soil ecology. *Trends in Ecology and Evolution*, 21, 548–554.
- Houghton RA, Hackler JL, Lawrence KT (1999). The U.S. carbon budget: contributions from land-use change. *Science*, 285, 574–578.
- Hu RG, Kusa K, Hatano R (2001). Soil respiration and methane flux in adjacent forest, grassland, and cornfield soils in Hokkaido, Japan. *Soil Science and Plant Nutrition*, 47, 621–627.
- Inubushi K, Furukawa Y, Hadi A, Purnomo E, Tsuruta H (2003). Seasonal changes of CO₂, CH₄ and N₂O fluxes in relation to land-use changes in tropical peatlands located in coastal area of South Kalimantan. *Chemosphere*, 52, 603–608.
- Ishizuka S, Tsuruta H, Murdiyarso D (2002). An intensive field study on CO₂, CH₄, and N₂O emissions from soils at four land use types in Sumatra, Indonesia. *Global Biogeochemical Cycles*, 16, 1049, doi: 10.1029/2001GB001614.
- Jia BR (贾丙瑞), Zhou GS (周广胜), Wang FY (王凤玉), Wang YH (王玉辉) (2004). A comparative study on soil respiration between grazing and fenced typical *Leymus chinensis* steppe, Inner Mongolia. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 15, 1611–1615. (in Chinese with English abstract)
- Liu H, Zhao P, Lu P, Wang YS, Lin YB, Rao XQ (2008). Greenhouse gas fluxes from soils of different land-use types in a hilly area of South China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 124, 125–135.
- Lloyd J, Taylor JA (1994). On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology*, 8, 315–323.
- Pavelka M, Acosta M, Marek MV, Kutsch W, Janous D (2007). Dependence of the Q₁₀ values on the depth of the soil temperature measuring point. *Plant and Soil*, 292, 171–179.
- Qi YC (齐玉春), Dong YS (董云社), Liu LX (刘立新), Liu XR (刘杏认), Peng Q (彭琴), Xiao SS (肖胜生), He YT (何亚婷) (2010). Spatial-temporal variation in soil respiration and its controlling factors in three steppes of *Stipa L.* in Inner Mongolia, China. *Science China Earth Science* (中国科学: 地球科学), 40, 341–351. (in Chinese)
- Qi YC, Dong YS, Liu JY, Domroes M, Geng YB, Liu LX, Liu XR, Yang XH (2007). Effect of the conversion of grassland to spring wheat field on the CO₂ emission characteristics in Inner Mongolia, China. *Soil and Tillage Research*, 94, 310–320.
- Qi YC, Dong YS, Manfred D, Geng YB, Liu LX, Liu XR (2006). Comparison of CO₂ effluxes and their driving factors between two temperate steppes in Inner Mongolia, China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 23, 726–736.
- Raich JW, Schlesinger WH (1992). The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 44B, 81–99.
- Rayment MB, Jarvis PG (2000). Temporal and spatial variation of soil CO₂ efflux in a Canadian boreal forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 32, 35–45.
- Reichstein M, Kätterer T, Andrén O, Ciais P, Schulze ED, Cramer W, Papale D, Valentini R (2005). Temperature sensitivity of decomposition in relation to soil organic matter pools: critique and outlook. *Biogeosciences*, 2, 317–321.
- Rochette P, Ellert B, Gregorich EG, Desjardins RL, Pattey E, Lessard R, Johnson BG (1997). Description of a dynamic closed chamber for measuring soil respiration and its comparison with other techniques. *Canadian Journal of Soil Science*, 77, 195–203.
- Rustad LE, Huntington TG, Boone RD (2000). Controls on soil respiration: implications for climate change. *Biogeochemistry*, 48, 1–6.
- Sheng H, Yang YS, Yang ZJ, Chen GS, Xie JS, Guo JF, Zou SQ (2010). The dynamic response of soil respiration to land-use changes in subtropical China. *Global Change Biology*, 16, 1107–1121.
- Shi GX (师广旭), Geng HL (耿浩林), Wang YL (王云龙), Wang YH (王玉辉), Qi XR (齐晓荣) (2008). Daily and seasonal dynamics of soil respiration and their environmental controlling factors in *Stipa krylovii* steppe. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 28, 3408–3416. (in Chinese with English abstract)
- Tang J, Baldocchi DD, Xu L (2005). Tree photosynthesis modulates soil respiration on a diurnal time scale. *Global Change Biology*, 11, 1298–1304.

- Trumbore S (2006). Carbon respired by terrestrial ecosystems: recent progress and challenges. *Global Change Biology*, 12, 141–153.
- Tufekcioglu A, Raich JW, Isenhardt TM, Schultz RC (2001). Soil respiration within riparian buffers and adjacent crop fields. *Plant and Soil*, 229, 117–124.
- Wan SQ, Norby RJ, Ledford J, Weltzin J (2007). Responses of soil respiration to elevated CO₂, air warming, and changing soil water availability in a model old-field grassland. *Global Change Biology*, 13, 2411–2424.
- Wang GC (王庚辰), Du R (杜睿), Kong QX (孔琴心), Lü DR (吕达仁) (2004). Study on characteristics of soil respiration in temperate steppe in China. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 49, 692–696. (in Chinese)
- Wang W, Fang JY (2009). Soil respiration and human effects on global grasslands. *Global and Planetary Change*, 67, 20–28.
- Wang W (王妮), Guo JX (郭继勋) (2002). Contribution of CO₂ emission from soil respiration and from litter decomposition in *Leymus chinensis* community in Northeast Songnen Grassland. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 22, 655–660. (in Chinese with English abstract)
- Wang X (王旭), Zhou GS (周广胜), Jiang YL (蒋延玲), Li F (李峰) (2006). Comparison of soil respiration in broad-leaved Korean pine forest and reclaimed cropland in Changbai Mountains, China. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)* (植物生态学报), 30, 887–893. (in Chinese with English abstract)
- Wu JG (吴建国), Zhang XQ (张小全), Xu DY (徐德应) (2003). The temporal variations of soil respiration under different land use in Liupan Mountain forest zone. *Environmental Science* (环境科学), 24(6), 23–32. (in Chinese with English abstract)
- Wu Q (吴琴), Cao GM (曹广民), Hu QW (胡启武), Li D (李东), Wang YS (王跃思), Li YM (李月梅) (2005). A primary study on CO₂ emission from soil-plant systems of *Kobresia humilis* meadow. *Resources Science* (资源科学), 27(2), 96–102. (in Chinese with English abstract)
- Xia JY, Han Y, Zhang Z, Zhang ZJ, Wan SQ (2009). Effects of diurnal warming on soil respiration are not equal to the summed effects of day and night warming in a temperate steppe. *Biogeosciences*, 6, 1361–1370.
- Xu M, Qi Y (2001). Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California. *Global Change Biology*, 7, 667–677.
- Xu WH, Wan SQ (2008). Water- and plant-mediated responses of soil respiration to topography, fire, and nitrogen fertilization in a semiarid grassland in northern China. *Soil Biology and Biochemistry*, 40, 679–687.
- Yuste JC, Janssens IA, Carrara A, Ceulemans R (2004). Annual Q_{10} of soil respiration reflects plant phenological patterns as well as temperature sensitivity. *Global Change Biology*, 10, 161–169.
- Zhang JB (张金波), Song CC (宋长春), Yang WY (杨文燕) (2005). Temperature sensitivity of soil respiration and its effecting factors in the different land use. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 25, 1537–1542. (in Chinese with English abstract)

责任编辑: 贺金生 责任编辑: 王 葳