

羊草草原和贝加尔针茅草原生态系统呼吸的差异分析

罗光强^{1,2}, 耿元波^{1*}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:应用静态暗箱-气相色谱法对羊草草原和贝加尔针茅草原的生态系统呼吸 CO_2 通量进行了测算, 分析了生态系统呼吸的影响因素, 比较了 2 种草原生态系统呼吸的差异并分析了产生差异的原因. 观测期间羊草草原生态系统呼吸 CO_2 通量平均为 $(12.03 \pm 2.10) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{min})^{-1}$, 显著低于贝加尔针茅草原 $[(20.09 \pm 4.41) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{min})^{-1}]$; 而羊草草原生物量显著大于贝加尔针茅草原 ($p < 0.001$). 羊草草原和贝加尔针茅草原生态系统呼吸都与温度 (箱内气温、5 cm 和 15 cm 地温) 具有显著的指数函数关系. 通过偏相关分析发现, 在地温作为控制变量时, 生态系统呼吸与 Eh 、 pH 间不再具有显著的相关性, Eh 、 pH 对 CO_2 通量的影响可能是由地温变化间接引起的, 而 CO_2 通量与活体生物量呈现出了一定的相关性, 与凋落物生物量无显著相关性. 2 种草原的 CO_2 通量都可以用温度指数模型进行很好地模拟, 基于地温的模拟效果 (R^2 为 0.568 ~ 0.639) 显著好于基于箱内气温的 (R^2 为 0.323 ~ 0.426). 地温是 2 种草原生态系统呼吸最重要的影响因素, 它掩盖了地上部植物体对生态系统呼吸的影响. 在该区域, 土壤呼吸占生态系统呼吸比例较高, 贝加尔针茅草原较高的有机质含量导致了其生态系统呼吸 CO_2 通量较高.

关键词:生态系统呼吸; 羊草草原; 贝加尔针茅草原; 温度; 土壤有机质

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)11-2732-08

Analysis of Difference Between Ecosystem Respirations of *Leymus chinensis* Steppe and *Stipa baicalensis* Steppe

LUO Guang-qiang^{1,2}, GENG Yuan-bo¹

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Static opaque chamber-chromatographic technique was applied to measure the ecosystem respirations of *Leymus chinensis* steppe and *Stipa baicalensis* steppe. The affecting factors of ecosystem respiration were analyzed. The difference between ecosystem respirations of the two grasslands was compared and the reasons resulting in the difference were analyzed. Ecosystem respiration of *Leymus chinensis* steppe [averaged $(12.03 \pm 2.10) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{min})^{-1}$] was significantly smaller than that of *Stipa baicalensis* steppe [averaged $(20.09 \pm 4.41) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{min})^{-1}$], while aboveground biomass of *Leymus chinensis* steppe was significantly larger than that of *Stipa baicalensis* steppe ($p < 0.001$). CO_2 fluxes of *Leymus chinensis* steppe and *Stipa baicalensis* steppe were significantly correlated with air temperature in chamber, soil temperature at 5 cm and 15 cm depth. The results of partial correlation analysis showed that there were no significantly correlation between CO_2 flux and Eh , pH , biomass of litter when soil temperature was unchanged, while it shows some correlation with biomass of living plant. The apparent liner relationship between CO_2 flux and Eh , pH may be caused by the change of soil temperature. The CO_2 fluxes of the two grasslands can be well explained by exponential models based on temperatures. Soil temperature can explain more variations of ecosystem respirations (R^2 0.568-0.639) than air temperature in chamber (R^2 0.323-0.426). Soil temperature was the most important affecting factor of ecosystem respiration and it may had concealed the effect of aboveground biomass on CO_2 flux. The contribution of soil respiration to ecosystem respiration was large in this region and its higher soil organic matter content led to higher CO_2 flux of *Stipa baicalensis* steppe.

Key words: ecosystem respiration; *Leymus chinensis* steppe; *Stipa baicalensis* steppe; temperature; soil organic matter

净生态系统交换是生态系统光合作用和生态系统呼吸作用收支平衡的结果^[1]. 精确测定陆地生态系统呼吸能减小碳收支评价的不确定性, 对科学估算陆地生态系统碳源、汇功能具有重要作用. 因此, 陆地生态系统呼吸一直是生态系统碳循环研究中的关键科学问题. 草地约占全球陆地面积的 $1/5$ ^[2], 具有较大的碳蓄积能力, 这些潜在的碳汇在全球碳循环中起着巨大的作用^[3]. 锡林河流域天然植被保

存完好, 在内蒙古高原东部具有很大的代表性, 主要分布着典型草原和草甸草原 2 种草原植被^[4]. 典

收稿日期: 2009-11-23; 修订日期: 2010-05-10

基金项目: 中国科学院地理科学与资源研究所自主部署创新项目 (200905009); “十一五”国家科技支撑计划项目 (2006BAJ10B04); 中国科学院地理科学与资源研究所三期创新项目

作者简介: 罗光强 (1984 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为生物地球化学循环, E-mail: gqlobnu@hotmail.com

* 通讯联系人, E-mail: gyb0741@sina.com

型草原是该区域分布面积最大的草原类型,草甸草原是该地区最为湿润的草原类型,以往对该区域典型草原生态系统呼吸和土壤呼吸的研究相对较多^[5~10],对草甸草原生态系统呼吸和土壤呼吸的研究则相对较少^[11],对两者生态系统呼吸的比较研究更少.对锡林河流域分布面积最广的典型草原和最为湿润的草甸草原生态系统呼吸进行比较研究,对分析生态系统呼吸的影响因素、区域的碳源、汇潜力及对未来气候变化的响应具有重要意义.

目前,测定生态系统呼吸主要有涡度相关法和箱法 2 种方法,箱法简单、快捷、经济,能够对低矮植被的生态系统呼吸进行直接观测,还可以通过多点观测来评价生态系统呼吸的空间变异程度^[12,13].本研究利用静态暗箱-气相色谱技术测算典型草原群落羊草草原和草甸草原群落贝加尔针茅草原生态系统呼吸,比较 2 种草原群落的 CO₂ 排放通量,分析生态系统呼吸的影响因素,探讨二者生态系统呼吸是否存在差异及产生差异的原因.

1 材料与amp;方法

1.1 研究地点

实验区位于内蒙古锡林郭勒盟境内,锡林河流域的中上游,在中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站附近.锡林郭勒草原位于内蒙古高原的中部,是内蒙古高原半干旱草原区的主体部分.羊草草原和贝加尔针茅草原是该地区的主要草原类型,分别属于典型草原和草甸草原,在土壤类型、代表

植物群系等方面存在一定的差异^[14].因此笔者以羊草草原和贝加尔针茅草原作为研究对象,其具体情况如下.

羊草草原选取定位站羊草 99 样地(43°43'N, 116°38'E)为研究对象,海拔约 1 250 m,自 1999 年起进行围栏封育实验.样地内建群种为根茎禾草羊草(*Leymus chinensis*),优势种包括大针茅(*Stipa grandis*)和冰草(*Agropyron cristatum*)等密丛禾草,禾草以外的杂类草大多数是多年生草本.群落的平均高度(7~8 月)达到 40~50 cm,群落盖度可达 40%~50%,土为暗栗钙土,土层深度为 100~150 cm,土壤有机质层厚达 20~30 cm,钙积层不显著或不存在.年均降水量 350~450 mm,年均气温 -0.3~1℃.

贝加尔针茅草原选取当地围封打草的贝加尔针茅草原为研究对象(43°33'N, 116°49'E),海拔约 1 350 m,位于锡林河上游地势较高的三级熔岩台地上,是一种较为湿润的草原类型,主要用于打草草场.该草原植物群落内物种丰富,包括贝加尔针茅(*Stipa baicalensis*)、羊草(*Leymus chinensis*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)等 50 余种^[15],建群种为贝加尔针茅.植被高度为 35~60 cm 不等,群落盖度 50%~90% 之间,土为黑钙土,腐殖质层厚度约 50 cm 左右.年均降水量 450 mm 左右,年均气温约为 -1.4℃.

羊草草原与贝加尔针茅草原 0~30 cm 各层次 TOC、TN 含量见表 1.

表 1 羊草草原与贝加尔针茅草原土壤 TOC、TN 含量¹⁾
Table 1 TOC and TN content in soils of *Leymus chinensis* steppe and *Stipa baicalensis* steppe

层次/cm	羊草草原		贝加尔针茅草原	
	TOC/%	TN/%	TOC/%	TN/%
0~10	2.31±0.09 ^a	0.22±0.01 ^A	2.36±0.29 ^a	0.23±0.02 ^A
10~20	1.47±0.06 ^a	0.15±0.01 ^A	2.28±0.24 ^b	0.22±0.03 ^B
20~30	1.14±0.03 ^a	0.12±0.01 ^A	1.77±0.13 ^b	0.17±0.03 ^B

1)数据为 M ± SD, n=12; TOC:总有机碳, TN:全氮;同一行 TOC 或 TN 所带上标字母不同表示达到 0.05 水平的差异

1.2 研究方法

1.2.1 采样方法

2008 年 7 月下旬至 9 月初期间,采用静态暗箱法在羊草草原及贝加尔针茅草原采集气体样品.在 7 月底、8 月中、8 月底、9 月初在羊草草原共采集样品 4 次,8 月初(与羊草草原 7 月底对应)、8 月中、8 月底在贝加尔针茅草原共采集 3 次(实验后期牧民开始打草,采样次数比羊草草原少 1 次).每个采样日从早上 8 点开始采样,以 2 h 为间隔,每

天采样 5 次,每次随机选取 2 个植被状况存在一定差异的样方,1 d 共对 10 个样方进行采样.在羊草草原采集 40 个样方的气体样品,在贝加尔针茅草原共采集 30 个样方的样品,构成分析比较样本.采用静态暗箱取气可以克服明箱扣箱后箱内温度快速上升的缺点^[16,17],还暂时屏蔽了生态系统光合作用.静态暗箱箱体(40 cm × 50 cm, 30 cm 高)用 5 mm 厚黑色有机玻璃制成,并在箱体的外部贴上锡纸反光膜来减缓箱内温度的上升.箱体上部中间装

有空气搅拌小风扇(12 V, 0.13 A)、精密水银温度计以及用于取气的硅胶导管和三通阀. 考虑到呼吸过程及取气引起的密封静态箱内外气压差的存在, 在箱体顶部装了一个小气球(约 5 cm 长)来平衡气压, 减小气压变化对 CO₂ 通量的影响. 在选定采样点后将不锈钢底座砸入土中约 5 cm 深处, 调至水平, 平衡 1 h 后再进行气体采集. 采集时将采样箱放入不锈钢底座外缘沟槽中, 用水密封, 打开风扇电源, 分别在扣箱后第 0、7、14、21、28 min 取气, 每次取气约 400 mL 打入密封聚乙烯铝膜气袋(容积 500 mL, 大连光明化工研究设计院生产). 一次采样时间约 28 min, 对采样点自然状况无明显扰动.

在每次采样前后分别测定大气压及 5、15 cm 深处的地温, 每次取气后均立即记录当时的箱内气温. 大气压采用高原空盒气压表测定, 地温用北京师范大学司南仪器厂生产的 SN2202 型数字测温仪测定, 箱内气温用高精度水银温度计测定. 取气完成后采集样方内植物体地上生物量, 按照活体和凋落物分开, 盛装在样品袋中待烘. 随后在样方中选取 5 个点, 使其均匀分布在样方的四角及中部, 用土钻分别钻取 0~10、10~20、20~30 cm 深处的土壤, 每个深度采集土壤样品量约 1 kg, 用密封袋盛装.

1.2.2 样品分析

CO₂ 浓度采用 HP 5890 II 型气相色谱仪测定, HW-2000 色谱工作站软件进行处理分析. 检测器为 FID(氢火焰离子化检测器), 检测器温度为 200℃. 在 FID 检测 CO₂ 之前, 样品先经过镍触酶转化器将 CO₂ 转化为 CH₄^[18]. 色谱柱采用长度为 2 m、直径为 2 mm 的 60~80 目 13XMS 填充物来分离 CH₄, 分离柱温度为 55℃, 载气为 N₂, 流速为 30 mL·min⁻¹. 标气(CO₂、CH₄ 和 N₂O 混合气体)由国家标准物质中心提供, CO₂ 浓度测定分析精密度约为 2%.

水分含量(烘干基)、pH、Eh 分析参照土壤农化分析^[19], 植物生物量在鼓风干燥箱内 65℃ 烘干至恒重, 得到干重.

1.2.3 通量计算及统计分析

根据通量定义推导得到 CO₂ 通量计算公式为:

$$F = S \cdot H \cdot M \cdot (P_a/P_s) \cdot (T_s/T_a)/22.262 \quad (1)$$

式中, F 为通量 [mg·(m²·min)⁻¹], S 为 CO₂ 体积浓度对时间做线性回归所得到的斜率 [μL·(L·min)⁻¹], H 为静态箱体有效高度 (m), M

为 CO₂ 摩尔质量 (44 g·mol⁻¹), P_s 、 T_s 为标准状况下的大气压 (1.013 × 10⁵ Pa) 及温度 (273.15 K), P_a 、 T_a 为实际测得的大气压及箱内平均温度 (单位与标准状况相同), 22.262 为 1 mol CO₂ 气体在标准状况下的体积 (L·mol⁻¹).

采用独立样本 t 检验分析 2 种草原的 CO₂ 通量、生物量和地温间是否存在显著差异. 对 CO₂ 通量与各影响因素进行 1-sample K-S 检验, 在符合正态分布的基础上对 CO₂ 通量和各影响因素进行 Pearson 相关分析和偏相关分析. 对 CO₂ 通量和温度采用指数关系模型进行模拟并计算 Q_{10} 值, 公式如下^[20]:

$$F = ae^{bT}, Q_{10} = e^{10b} \quad (2)$$

式中, F 为 CO₂ 通量, T 为温度, a 、 b 为模拟计算值.

所有统计分析均在 SPSS 17.0 中完成, 采用 Origin 7.5 作图.

2 结果与讨论

2.1 羊草草原与贝加尔针茅草原 CO₂ 排放通量

经通量计算发现, 观测期间羊草草原生态系统呼吸 CO₂ 通量为正通量, 数值介于 8.44 ~ 17.73 mg·(m²·min)⁻¹ 之间, 平均排放通量为 (12.03 ± 2.10) mg·(m²·min)⁻¹; 贝加尔针茅草原 CO₂ 通量也为正通量, 排放通量介于 11.49 ~ 27.55 mg·(m²·min)⁻¹ 之间, 平均排放通量为 (20.09 ± 4.41) mg·(m²·min)⁻¹ (图 1).

独立样本 T 检验结果表明羊草草原 CO₂ 排放

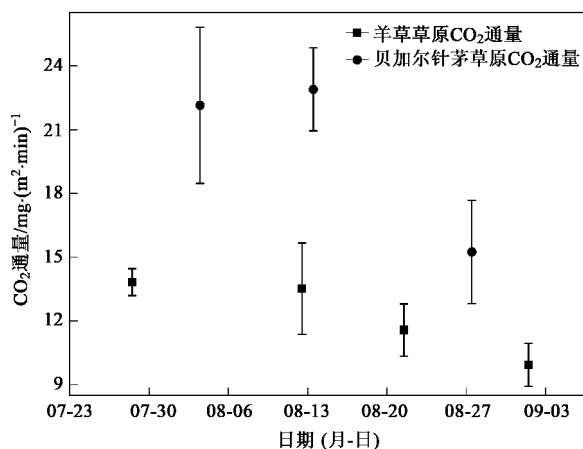


图 1 观测期间羊草草原与贝加尔针茅草原 CO₂ 通量

Fig. 1 CO₂ fluxes of *Leymus chinensis* steppe and *Stipa baicalensis* steppe during observation period

通量显著小于贝加尔针茅草原. 当年测得的羊草草原植物体活体量平均为 $(228.07 \pm 11.62) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 贝加尔针茅草原为 $(164.37 \pm 6.15) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 羊草草原活体量显著大于贝加尔针茅草原. 羊草草原凋落物量平均为 $(319.60 \pm 23.42) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 远远大于用作打草场的贝加尔针茅草原 $[(53.28 \pm 6.53) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}]$. 可见, 在观测期间, 尽管羊草草原地上部生物量显著大于贝加尔针茅草原, 但其 CO_2 排放通量却相对较小.

2.2 CO_2 排放通量影响因素分析

分别对羊草草原和贝加尔针茅草原 CO_2 通量 (F)、箱内气温 (T_c)、5、15 cm 地温 (T_5 、 T_{15})、0 ~ 10、10 ~ 20 cm 土壤水分含量 (W_{10} 、 W_{20})、0 ~ 10、10 ~ 20 cm pH 值 (pH_{10} 、 pH_{20})、0 ~ 10、10 ~ 20 cm

Eh 值 (Eh_{10} 、 Eh_{20})、活体量 (H)、凋落物量 (D) 进行 1-sample K-S 检验, 结果表明 2 种草原 CO_2 通量与各因素均符合正态分布. 因此, 对 CO_2 通量与各因素进行 Pearson 相关分析, 分析结果见表 2、3.

从表 2、3 可以看出, 羊草草原生态系统呼吸 CO_2 通量与箱内气温、5 cm 地温、15 cm 地温、0 ~ 10、10 ~ 20 cm 土壤 Eh 值具有极显著的相关性, 与 0 ~ 10 cm 土壤水分含量、0 ~ 10 cm 土壤 pH 值具有显著的相关性, 但相关性均不强. 贝加尔针茅草原生态系统呼吸 CO_2 通量与箱内气温、5 cm 地温、15 cm 地温、0 ~ 10、10 ~ 20 cm 土壤 Eh 值也都具有极显著的相关性, 而与各层的土壤水分含量、pH 值无显著的相关性. 2 种草原生态系统呼吸 CO_2 通量均与活体量和凋落物量无显著相关性.

表 2 羊草草原 CO_2 通量与各因素相关系数¹⁾

Table 2 Correlation coefficients between CO_2 flux of <i>Leymus chinensis</i> steppe and affecting factors												
	F	T_c	T_5	T_{15}	W_{10}	W_{20}	pH_{10}	pH_{20}	Eh_{10}	Eh_{20}	H	D
F	1.000											
T_c	0.634 **	1.000										
T_5	0.751 **	0.816 **	1.000									
T_{15}	0.748 **	0.754 **	0.968 **	1.000								
W_{10}	0.394 *	0.222	0.380 *	0.444 **	1.000							
W_{20}	0.243	-0.187	0.042	0.099	0.600 **	1.000						
pH_{10}	0.397 *	0.472 **	0.531 **	0.512 **	-0.007	-0.203	1.000					
pH_{20}	0.187	0.224	0.285	0.279	-0.250	-0.263	0.576 **	1.000				
Eh_{10}	-0.549 **	-0.291	-0.528 **	-0.685 **	-0.694 **	-0.699 **	-0.298	-0.134	1.000			
Eh_{20}	-0.584 **	-0.318	-0.567 **	-0.698 **	-0.612 **	-0.818 **	-0.458 *	-0.162	0.815 **	1.000		
H	0.230	-0.004	0.031	0.100	0.049	-0.148	0.280	0.251	-0.088	-0.207	1.000	
D	-0.202	-0.104	-0.198	-0.162	0.066	0.219	-0.152	-0.095	0.044	-0.184	0.080	1.000

1) * 代表在 0.05 水平下显著, ** 代表在 0.01 水平下显著, 下同

表 3 贝加尔针茅草原 CO_2 通量与各因素相关系数

Table 3 Correlation coefficients between CO_2 flux of <i>Stipa baicalensis</i> steppe and affecting factors												
	F	T_c	T_5	T_{15}	W_{10}	W_{20}	pH_{10}	pH_{20}	Eh_{10}	Eh_{20}	H	D
F	1.000											
T_c	0.555 **	1.000										
T_5	0.752 **	0.847 **	1.000									
T_{15}	0.789 **	0.821 **	0.939 **	1.000								
W_{10}	-0.032	-0.639 **	-0.363 *	-0.364 *	1.000							
W_{20}	0.159	-0.207	0.139	0.038	0.531 **	1.000						
pH_{10}	0.152	0.370 *	0.236	0.259	-0.530 **	-0.238	1.000					
pH_{20}	0.023	0.046	0.072	0.120	-0.061	-0.059	-0.175	1.000				
Eh_{10}	-0.621 **	-0.204	-0.482 *	-0.597 **	-0.252	0.066	-0.054	0.065	1.000			
Eh_{20}	-0.678 **	-0.353	-0.539 *	-0.628 **	-0.302	-0.114	0.148	-0.230	0.699 **	1.000		
H	0.187	-0.120	-0.012	-0.114	0.285	0.302	-0.200	-0.058	0.477 *	0.244	1.000	
D	0.345	0.351	0.565 **	0.599 **	-0.003	0.106	-0.101	0.329	-0.520 *	-0.555 *	-0.036	1.000

相关分析结果表明, 羊草草原和贝加尔针茅草原生态系统呼吸 CO_2 通量与箱内气温、5、15 cm 地温及各层 Eh 值都具有极显著的相关性. 土壤或生

态系统呼吸通量通常随温度上升呈指数函数增大, 而且在一定的温度范围内得到了不同生态系统观测数据的证实^[21~25], 因此以指数关系式[式(2)]对

CO₂ 通量与箱内气温、5 cm 地温、15 cm 地温进行回归分析并计算 Q₁₀值, 结果见表 4.

从表 4 CO₂ 通量与温度指数模型关系可以看出, CO₂ 通量与箱内气温、5 cm 地温及 15 cm 地温都具有显著的指数函数关系, 基于地温的回归方程

可以解释羊草草原和贝加尔针茅草原生态系统呼吸 CO₂ 通量约 60% 的变化, 其拟合效果显著好于基于箱内气温的. 羊草草原 5 cm 地温和 15 cm 地温解释效果基本相同, 贝加尔针茅草原 15 cm 地温解释效果要略好于 5 cm 地温.

表 4 CO₂ 通量与温度指数模型参数及 Q₁₀值

温度	羊草草原					贝加尔针茅草原				
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>p</i> 值	<i>Q</i> ₁₀	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>p</i> 值	<i>Q</i> ₁₀
<i>T</i> _e	4.708	0.036	0.426	<0.001	1.43	9.004	0.031	0.323	<0.01	1.36
<i>T</i> ₅	5.441	0.038	0.568	<0.001	1.46	6.694	0.047	0.588	<0.001	1.60
<i>T</i> ₁₅	4.767	0.050	0.571	<0.001	1.65	6.667	0.059	0.639	<0.001	1.80

生态系统呼吸 CO₂ 通量与 0 ~ 10、10 ~ 20 cm 土 壤 Eh 值也具有极显著的相关性, 线性回归结果见图 2. 2 种草原 CO₂ 通量均与 Eh 表现出负相关关系, 土壤 Eh 值下降的原因可能是土壤微生物活动强烈、土壤有机质含量较多及 pH 值升高等^[26], 所以 Eh 值下降时土壤呼吸 CO₂ 通量可能增大. 从

表 2、3 可以看出, Eh 值与地温具有显著的负相关关系, 以 5 cm 地温或 15 cm 地温为控制变量, 对 CO₂ 通量与相应的 0 ~ 10 cm 土壤 Eh 值或 10 ~ 20 cm 土壤 Eh 值进行偏相关分析. 结果表明 CO₂ 通量与 Eh 值之间不再具有显著的相关性, Eh 值对 CO₂ 通量的影响可能是由地温变化间接引起的.

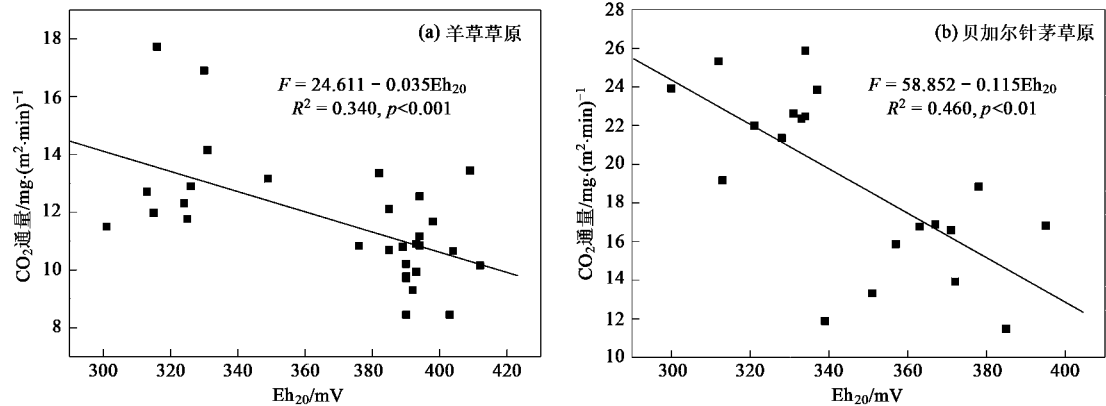


图 2 羊草草原和贝加尔针茅草原 CO₂ 通量与土壤 Eh 值的关系
Fig. 2 Relationship between CO₂ flux and soil Eh

与贝加尔针茅草原不同, 羊草草原生态系统呼吸 CO₂ 通量与 0 ~ 10 cm 土壤水分含量、pH 值之间也具有显著相关性, 羊草草原土壤呼吸作用主要发生在有机质含量较高的表层. 对羊草草原 CO₂ 通量与 0 ~ 10 cm 土壤水分含量、pH 值进行线性回归, 回归结果见图 3.

从图 3 可以看出, CO₂ 通量与土壤水分含量、pH 值的相关关系都较弱. 羊草草原 0 ~ 10 cm 土壤 pH 值与地温具有极显著的相关性(表 2), 以 5 cm 地温为控制变量, 对羊草草原 CO₂ 通量与 0 ~ 10 cm 土壤 pH 值进行偏相关分析, 结果表明 CO₂ 通量与 pH 值不再具有显著相关性, pH 对 CO₂ 通量的影响

可能也是由地温变化间接造成的. 在干旱半干旱地区, 土壤水分含量是土壤呼吸的重要影响因素, 当土壤水分含量成为限制因素时可能取代温度而成为土壤呼吸的主要控制因子^[27]. 观测期间, 羊草草原 0 ~ 10 cm 土壤水分含量平均为 19.57% ± 0.38%, 贝加尔针茅草原为 21.22% ± 0.55%, 水分含量相对比较适宜, 对呼吸的限制作用较小, 因此与生态系统呼吸相关性较差. 2 种草原生态系统呼吸 CO₂ 通量均与活体量、凋落物量没有显著的相关关系, 这可能与土壤呼吸起主要作用、植物体作用被温度等因素所掩盖有关. 以羊草草原 5 cm 地温为控制变量, 对 CO₂ 通量与活体量、凋落物量作偏相关分

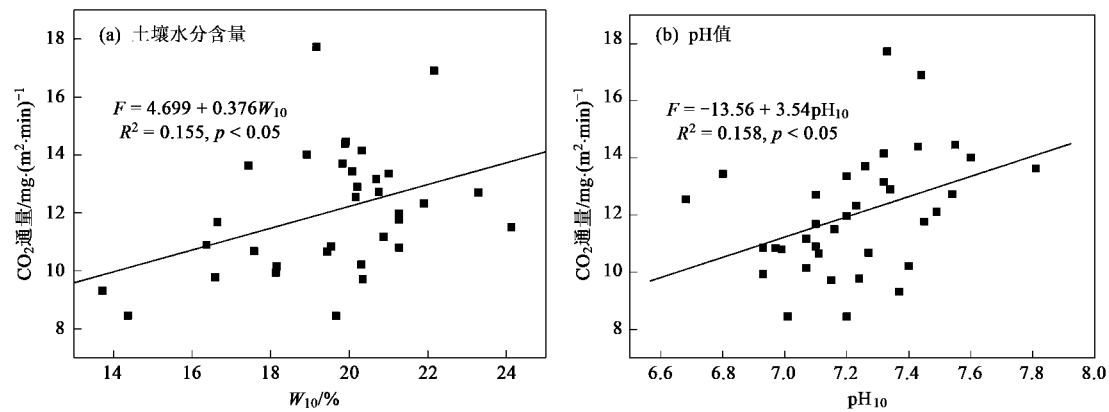


图3 羊草草原 CO₂ 通量与土壤水分含量、pH 值的关系

Fig.3 Relationship between CO₂ efflux and soil water content, pH of *Leymus chinensis* steppe

析,分析结果见表5. 鉴于贝加尔针茅草原 15 cm 地温解释效果要好于 5 cm 地温,因此以贝加尔针茅草原 15 cm 地温为控制变量,对 CO₂ 通量与活体量、凋落物量作偏相关分析,分析结果见表6. 从表5、6 可以看出,以地温作为控制变量时 CO₂ 通量与活体生物量之间呈现出一定的相关性,而与凋落物生物量之间仍然没有显著相关性. 凋落物分解是一个较为缓慢的过程,分解排放 CO₂ 通量在土壤呼吸中也只占一小部分^[28~30],因此 CO₂ 通量与凋落物生物量间无显著相关性. 通过以上分析可以看出,观测期间地温对 2 种草原生态系统呼吸具有决定性的影响作用.

表5 羊草草原偏相关分析结果

Table 5 Result of partial correlation analysis in *Leymus chinensis* steppe

控制变量		F	H	D
T ₅	F	1.000		
	H	0.314 ¹⁾	1.000	
	D	-0.082	0.088	1.000

1) $p = 0.066$

表6 贝加尔针茅草原偏相关分析结果

Table 6 Result of partial correlation analysis in *Stipa baicalensis* steppe

控制变量		F	H	D
T ₁₅	F	1.000		
	H	0.453 *	1.000	
	D	-0.260	0.041	1.000

2.3 2 种草原 CO₂ 排放通量差异分析

2 种草原生态系统呼吸 CO₂ 通量均与箱内气温、地温具有极显著的相关性,可以用指数关系进行很好地模拟(R^2 为 0.323 ~ 0.639). 从表2、3 可以看出箱内气温和地温具有极显著的相关性,它们可以不同程度地表征生态系统呼吸的变化特征(表

4). 2 种草原生态系统呼吸基于地温的模拟效果(R^2 为 0.568 ~ 0.639)要显著好于基于箱内气温的(R^2 为 0.323 ~ 0.426),这说明地温对生态系统呼吸的影响要大于箱内气温;进一步从 Q_{10} 来看,生态系统呼吸对地温的敏感性(1.46 ~ 1.80)要大于对箱内气温的敏感性(1.36 ~ 1.43). 用静态暗箱法测定的生态系统呼吸包括地上部植物体呼吸和土壤呼吸两部分,同一时间段本课题组对同一地区羊草草原的研究发现,土壤呼吸占生态系统呼吸的比例平均为 59.4%. 贝加尔针茅草原地上部植物体生物量显著少于羊草草原,而且土壤有机质含量显著高于羊草草原(表1),因此土壤呼吸占生态系统呼吸的比例相对羊草草原将更高. 贝加尔针茅草原 CO₂ 通量基于地温的模拟效果要优于羊草草原,这也说明贝加尔针茅草原土壤呼吸占生态系统呼吸的比例更高. 在该区域土壤呼吸是生态系统呼吸的重要组成部分,地温是影响生态系统呼吸的重要因素. 目前,尽管普遍认为土壤呼吸或生态系统呼吸随温度升高呈指数函数增加,但在具体温度指标的选取上并没有较为明确的结论^[31]. 对于草原生态系统, Xu 等^[32]、Kato 等^[33]以各温度和系统呼吸通量的相关程度作为判断标准,认为 1 表层温度(如 5 cm 地温)最为适合,本研究结果与其基本一致.

独立样本 T 检验结果表明,尽管羊草草原地上生物量显著大于贝加尔针茅草原,其 CO₂ 释放量却远小于贝加尔针茅草原,产生这种差异的原因主要是土壤有机质含量的不同. 从影响因素分析部分可以看出,生态系统呼吸速率主要受温度的影响,生态系统呼吸速率随着温度的上升呈指数函数上升(表4),温度升高会释放更多的 CO₂. 实验期间,

羊草草原 5 cm 地温的平均值为 $20.7^{\circ}\text{C} \pm 0.6^{\circ}\text{C}$, 贝加尔针茅草原为 $22.8^{\circ}\text{C} \pm 0.7^{\circ}\text{C}$, 二者存在显著差异。羊草草原 15 cm 地温的平均值为 $18.1^{\circ}\text{C} \pm 3.0^{\circ}\text{C}$, 贝加尔针茅草原为 $18.4^{\circ}\text{C} \pm 3.4^{\circ}\text{C}$, 二者没有显著差异 ($p=0.643$)。5 cm 地温或 15 cm 地温均可以解释 2 种草原生态系统呼吸约 60% 的变化(表 4)。根据回归结果, 即使将羊草草原 5 cm 地温提高到贝加尔针茅草原的水平, 在方程模拟的温度范围内 ($14 \sim 30^{\circ}\text{C}$), 羊草草原生态系统呼吸 CO_2 通量也将一直小于贝加尔针茅草原。贝加尔针茅草原基于地温的 Q_{10} 值大于羊草草原的 Q_{10} 值, 这与贝加尔针茅草原土壤有机质含量较高有着直接的关系。土壤有机碳不仅能为微生物活动提供能源, 而且对土壤物理、化学和生物学性质都有深刻影响, 土壤呼吸与有机碳的含量和组成有关^[34]。贝加尔针茅草原土壤类型为黑钙土, 尽管其作为打草场, 近些年地上植被以凋落物形式进入土壤量要远远小于羊草草原, 其土壤有机质含量还是要超过暗栗钙土的羊草草原。2 种草原土壤呼吸占生态系统呼吸的比例均较高, 因此, 土壤有机质含量的差异导致了生态系统呼吸 CO_2 通量的差异。

3 结论

(1) 观测期间羊草草原地上生物量显著大于贝加尔针茅草原, 但其生态系统呼吸 CO_2 通量显著小于贝加尔针茅草原。

(2) 羊草草原和贝加尔针茅草原生态系统呼吸 CO_2 通量均与温度具有极显著的指数函数关系, 5 cm 地温或 15 cm 地温可以解释 CO_2 通量约 60% 的变化 (R^2 为 $0.568 \sim 0.639$)。2 种草原 CO_2 通量均与活体量、凋落物量无显著相关关系, 活体生物量作用被地温所掩盖, 凋落物分解较慢且其释放 CO_2 通量较小, 因此与生态系统呼吸相关性较差。

(3) 地温对 2 种草原生态系统呼吸的影响要大于箱内气温, 土壤呼吸是生态系统呼吸的重要组成部分。贝加尔针茅草原生态系统呼吸 CO_2 通量显著大于羊草草原是由其土壤有机质含量较高造成的。

致谢: 感谢植物所王智平研究员、地理科学与资源研究所袁国富副研究员、内蒙古草原生态系统定位研究站何念鹏站长和大气物理所郑循华研究员给本研究的大力支持和帮助, 感谢内蒙古草原生态系统定位研究站提供实验样地和气象数据。

参考文献:

- [1] Falge E, Baldocchi D, Tenhunen J, *et al.* Seasonality of ecosystem respiration and gross primary production as derived from FLUXNET measurements [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, **113** (1-4): 53-74.
- [2] Scurlock J M O, Hall D O. The global carbon sink: a grassland perspective [J]. *Global Change Biology*, 1998, **4** (2): 229-233.
- [3] 于贵瑞, 李海涛, 王绍强. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积 [M]. 北京: 气象出版社, 2003. 182.
- [4] 陈佐忠, 汪诗平, 崔晓勇, 等. 中国典型草原生态系统 [M]. 北京: 科学出版社, 2000. 1-5.
- [5] 崔晓勇, 陈四清. 大针茅典型草原土壤 CO_2 排放规律的研究 [J]. *应用生态学报*, 2000, **11** (3): 390-394.
- [6] 王庚辰, 杜睿, 孔琴心, 等. 中国温带典型草原土壤呼吸特征的实验研究 [J]. *科学通报*, 2004, **49** (7): 692-696.
- [7] 贾丙瑞, 周广胜, 王凤玉, 等. 放牧与围栏羊草草原土壤呼吸作用及其影响因子 [J]. *环境科学*, 2005, **26** (6): 1-7.
- [8] 伏玉玲, 于贵瑞, 王艳芬, 等. 水分胁迫对内蒙古羊草草原生态系统光合和呼吸作用的影响 [J]. *中国科学: D 辑*, 2006, **36** (A01): 183-193.
- [9] 郝彦宾, 王艳芬, 孙晓敏, 等. 内蒙古羊草草原碳交换季节变异及其生态学解析 [J]. *中国科学: D 辑*, 2006, **36** (A01): 174-182.
- [10] 黄祥忠, 郝彦宾, 王艳芬, 等. 极端干旱条件下锡林河流域羊草草原净生态系统碳交换特征 [J]. *植物生态学报*, 2006, **30** (6): 894-900.
- [11] 陈海军, 王明玖, 韩国栋, 等. 不同强度放牧对贝加尔针茅草原土壤微生物和土壤呼吸的影响 [J]. *干旱区资源与环境*, 2008, **22** (4): 165-169.
- [12] Law B, Ryan M, Anthoni P. Seasonal and annual respiration of a ponderosa pine ecosystem [J]. *Global Change Biology*, 1999, **5** (2): 169-182.
- [13] 郑泽梅, 于贵瑞, 孙晓敏, 等. 涡度相关法和静态箱/气相色谱法在生态系统呼吸观测中的比较 [J]. *应用生态学报*, 2008, **19** (2): 290-298.
- [14] 耿远波, 章申, 董云社, 等. 草原土壤的碳氮含量及其与温室气体通量的相关性 [J]. *地理学报*, 2001, **56** (1): 44-53.
- [15] 白永飞, 李凌浩, 王其兵, 等. 锡林河流域草原群落植物多样性和土壤生产力沿水热梯度变化的样带研究 [J]. *植物生态学报*, 2000, **24** (6): 667-673.
- [16] Lohila A, Aurela M, Regina K, *et al.* Soil and total ecosystem respiration in agricultural fields: effect of soil and crop type [J]. *Plant and Soil*, 2003, **251** (2): 303-317.
- [17] Zou J W, Huang Y, Zheng X H, *et al.* Static opaque chamber-based technique for determination of net exchange of CO_2 between terrestrial ecosystem and atmosphere [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, **49** (4): 381-388.
- [18] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CH_4 , CO_2 and N_2O emissions from a short-plant ecosystem [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, **20** (5): 842-844.
- [19] 鲍士旦, 江荣风, 杨超光, 等. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] Luo Y, Wan S Q, Hui D F, *et al.* Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie [J]. *Nature*, 2001,

- 413(6856): 622-625.
- [21] Fang C, Moncrieff J. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, **33**(2): 155-165.
- [22] 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.
- [23] Flanagan L, Johnson B. Interacting effects of temperature, soil moisture and plant biomass production on ecosystem respiration in a northern temperate grassland [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, **130**(3-4): 237-253.
- [24] Davidson E, Richardson A, Savage K, *et al.* A distinct seasonal pattern of the ratio of soil respiration to total ecosystem respiration in a spruce-dominated forest[J]. *Global Change Biology*, 2006, **12**(2): 230-239.
- [25] 张丽华, 宋长春, 王德宣, 等. 沼泽湿地生态系统呼吸与温度, 氮素及植物生长的相互关系[J]. *环境科学*, 2007, **28**(1): 1-8.
- [26] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 179-183.
- [27] Wang Y S, Hu Y Q, Ji B M, *et al.* An investigation on the relationship between emission/uptake of greenhouse gases and environmental factors in semiarid grassland [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, **20**(1): 119-127.
- [28] 陈四清, 崔骁勇, 周广胜, 等. 内蒙古锡林河流域大针茅草原土壤呼吸和凋落物分解的 CO₂ 排放速率研究[J]. *植物学报*, 1999, **41**(6): 645-650.
- [29] 刘忠宽, 汪诗平, 韩建国, 等. 内蒙古温带典型草原植物凋落物和根系的分解及养分动态的研究[J]. *草业学报*, 2005, **14**(1): 24-30.
- [30] 王丽丽, 宋长春, 郭跃东, 等. 三江平原不同土地利用方式下凋落物对土壤呼吸的贡献[J]. *环境科学*, 2009, **30**(11): 3130-3135.
- [31] 朱咏莉, 吴金水, 童成立, 等. 稻田 CO₂ 通量对光强和温度变化的响应特征[J]. *环境科学*, 2008, **29**(4): 1040-1044.
- [32] Xu L K, Baldocchi D. Seasonal variation in carbon dioxide exchange over a Mediterranean annual grassland in California [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, **123**(1-2): 79-96.
- [33] 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, China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, **124**(1-2): 121-134.
- [34] La Scala N, Marques J, Pereira G, *et al.* Carbon dioxide emission related to chemical properties of a tropical bare soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, **32**(10): 1469-1473.