

锡林河流域生长季节不同草地类型根系呼吸特征研究

刘立新^{1,2}, 董云社^{1*}, 齐玉春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 100039)

摘要: 采用根系生物量外推法于 2005 年生长季对内蒙古锡林河流域温带半干旱草原中的羊草自由放牧草原、大针茅自由放牧草原和羊草退化草原根系呼吸占土壤总呼吸的比例进行了野外测定, 研究了不同草地类型土壤总呼吸、根系呼吸和根系呼吸占土壤总呼吸比例的季节变化规律, 同时就根系生物量和水热因子等环境要素对上述过程的影响进行了具体分析。结果表明, 3 个样地根系呼吸和土壤总呼吸的季节变化规律基本一致, 均表现为单峰曲线, 峰值出现在 7 月下旬, 但羊草退化草原受过度放牧的影响, 根系呼吸和土壤总呼吸速率均明显高于其它 2 个样地; 根系呼吸占土壤总呼吸的比例在生长季节内波动明显, 且 3 个样地差异较大, 但大多介于 40%~50% 之间, 平均值为 40.3%。

关键词: 土壤总呼吸; 根系呼吸; 生长季节; 区域差异

中图分类号: X142; X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)12-2376-06

Study on the Free-grazed Steppes Root Respiration of Growing Season in the Xilin River Basin, China

LIU Lixin^{1,2}, DONG Yunshe¹, QI Yuchun¹

(1. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: In order to determine the proportion of the root respiration to the total soil respiration, field experiments were conducted to measured soil respiration in three temperate grassland communities including *Leymus chinensis* free-grazed steppe, *stipa grandis* free-grazed steppe and *Leymus chinensis* degenerated free-grazed steppe using root biomass ratio-calculation method in the growing season, 2005. At the same time, seasonal variation including root respiration, total soil respiration and proportion of the root respiration to the total soil respiration in different grassland communities were compared, and the influence of root biomass, water and temperature to these processes were expounded. The results indicated that the rule of the root respiration and total soil respiration in the three steps was a one-peak pattern with the season dynamic, the maximum rate was in the late of July, but in *Leymus chinensis* degenerated free-grazed steppe, the rate was obviously larger than the other two types between July and August; The proportion of the root respiration to the total soil respiration obviously changed in the growing season, and the proportion was varied from 40%~50% with the mean value of 40.3%, but it was very different among three steps because of the regional differentiations.

Key words: root respiration; total soil respiration; growing season; regional differentiations

自工业革命以来, 人类活动对地球环境的影响逐渐扩大, 大气中 CO₂ 等温室气体浓度持续增加所导致的全球气候变化成为目前人类社会共同关注的重大环境问题, 也成为世界经济可持续发展和全人类所面临的最严峻挑战^[1~3]。

土壤呼吸作为陆地生态系统中土壤与大气之间 CO₂ 交换的最主要输出途径, 直接决定着土壤中碳的周转速率, 土壤呼吸的微小变化都会对全球碳收支平衡产生重要的影响。草地是陆地生态系统最重要的碳库之一, 其碳素总贮量约为 308Pg, 占陆地生态系统碳素总贮量的 15.2%, 且 90% 的碳均贮存在土壤中, 草地土壤呼吸的研究对于理解草地生态系统的碳循环过程尤为重要。在草地土壤呼吸过程中, 根系呼吸不仅是土壤呼吸的重要组成部分, 同时, 根系呼吸占土壤总呼吸的比例关系也是计算生

态系统碳平衡和土壤有机碳周转速率的关键参数^[4~8]。因此, 如何定量区分根系呼吸与土壤总呼吸量之间的关系成为近年来草地土壤呼吸研究的关键科学问题, 这个问题的解决也是定量描述草地生态系统碳循环过程与机制的重要基础。

在区分根系呼吸与土壤总呼吸的研究方面, 目前研究方法主要包括成分综合法、根去除法、根系生物量外推法和同位素标记法等^[9,10]。但是这些方法在实践应用中仍存在诸多不足之处, 例如对土壤的

收稿日期: 2005-12-23; 修订日期: 2006-02-22

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目 (KZCX1-SW-01-04); 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2002CB412503); 中国科学院地理科学与资源研究所知识创新工程项目 (CXIOG-E01-03-01); 国家自然科学基金项目 (40501072)

作者简介: 刘立新 (1977~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为全球变化与温室气体排放以及碳、氮元素生物地球化学循环等, E-mail: liulx@igsnrr.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: dongys@igsnrr.ac.cn

扰动所带来的不确定性以及活根与死根之间不能准确区分等问题,尤其是草本植物具有根系发达、细小且容易损伤等特点,更增加了对草地生态系统根系呼吸问题进行研究的难度.因此,早期相关研究多集中在森林和农田生态系统中进行,针对草地生态系统的研究相对较少^[11~14].本研究尝试在野外采用根系生物量外推法于 2005 年生长季对 3 种草地群落根系呼吸占土壤总呼吸的比例关系进行了测定,目的在于探索根系呼吸通量的季节排放规律,评价根系呼吸对草地生态系统碳循环的贡献,并在此基础上深入探讨水热因子等环境要素在草地群落的生长阶段对土壤总呼吸以及根系呼吸的主要影响机制.

1 试验地自然概况与研究方法

1.1 试验地自然概况

本试验的采样点位于内蒙古锡林河流域,该地区属中温带干旱、半干旱大陆性季风气候,具有“寒冷、风大、雨少”的气候特征,全年大风($> 17.3 \text{ m/s}$)

日数约 71d,年平均气温 -0.4°C ,最冷的 1 月份平均气温 -22.3°C ,最热的 7 月份平均气温 18.8°C ,降水量年际变化较大,多雨年份可达 500mm,干旱年份则少于 200mm,多年平均降水量为 350mm,且主要集中在 7~9 月(占全年降水的 60%~80%).研究中选择羊草(*Leymus chinense*)自由放牧草原($116^{\circ}04' \text{ E}$, $43^{\circ}26' \text{ N}$)、大针茅(*Stipa grandis*)自由放牧草原($116^{\circ}32' \text{ E}$, $43^{\circ}44' \text{ N}$)和羊草退化草原($116^{\circ}43' \text{ E}$, $43^{\circ}36' \text{ N}$)作为主要研究对象.其中,前 2 个样地均为常年自由放牧草场,放牧强度为 5~8 只羊/ hm^2 ,属过度放牧状态,羊草退化草原放牧强度大约为 10~15 只羊/ hm^2 ,过度放牧情况更加严重,致使草地呈现严重退化的生态景观,物种组成也发生了显著的变化,其中冷蒿(*Artemisia frigida*)和星毛委陵菜(*Potentilla acaulis*)成为草地退化的主要标志性植物.由于这 3 个样地在土壤理化性质、群落区系组成和利用强度等方面均存在显著的差异(表 1),是温带半干旱草原中几个代表性的草地群落类型,因此,研究结果具有广泛的代表性.

表 1 3 种草地类型的主要自然生态特征及土壤理化特性

Table 1 Main habitat characteristics and relevant physiochemical properties of the three steppes

草地类型	海拔/m	土壤类型	土壤有机质含量/%	容重/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	代表植物
羊草自由放牧草原	1 200~1 250	暗栗钙土	1.71	1.09	羊草、大针茅、冰草等
大针茅自由放牧草原	1 100~1 150	典型栗钙土	1.41	1.12	大针茅、杂类草
羊草退化草原	1 150~1 200	暗栗钙土	1.12	1.64	羊草、冷蒿、星毛委陵菜等

1.2 研究方法

本研究于 2005-05~2005-09 生长季对 3 种草地类型土壤总呼吸速率、根系呼吸速率、植物根系生物量以及相关的水热因子进行了同步观测,观测频率 5~7 月每月 1 次,8~9 月每月 2 次.

其中,根系呼吸速率的确定采用根系生物量外推法进行,其主要原理是:首先选择一系列根系生物量差异尽可能大的不同样点,通过对土壤总呼吸速率和相应根系生物量进行同时测定,建立起二者之间的数值关系模式,利用该数值关系外推根系生物量为零时的土壤呼吸速率,即为土壤中的微生物呼吸速率,然后利用土壤总呼吸速率减去土壤微生物呼吸速率求出根系呼吸量.

根系生物量外推法中根系生物量采集的具体方法是在每个试验样地分别选取 9 个采样点(即设为 9 个梯度),应用土坑法原位将暗箱下 40cm 深土壤带根全部取出(本区域的其它相关研究结果表明,典型草原植物根系主要集中分布于土壤表层,0~40cm 根系约占全部根系总量的 80%以上^[15,16]),取

根面积 $40\text{cm} \times 45\text{cm}$,根取出后带回实验室,分样点装入 60 目纱袋后用水反复冲洗,仔细区分出活根与死根,在烘箱中 65°C 持续烘 48h 后称其干重.在根系的采集过程中,在总结前人工作和经验的基础上,又对以下几个细节问题给予了特别的关注,具体包括:①在梯度选择上尽可能选择植被丰度差异比较明显的样点;②获取植物根系时尽量不破坏其完整结构;③洗根时选择网孔较细的纱袋,防止细小根系的损失;④按照颜色、抗张强度和纹理的不同仔细对活根与死根进行区分,并认为只有活根才能进行根系的呼吸作用等.

气体样品的采集主要应用静态暗箱法,每次采样时间多选择在上午 09:00~10:00 左右(此时段的气体通量基本可以代表 1d 的平均状况^[17]),每次采气持续时间为 21min,分别采集盖箱后 0min、7min、14min 和 21min 时的气体样品, CO_2 气体的浓度利用 Licor6252 型红外二氧化碳分析仪测得, CO_2 排放量的计算方法参见文献^[18],相关数据统计分析主要应用 SPSS11.0 软件包完成.

此外,在上述气体、植物样品采集的同时,同步进行相关水热因子的测定,其中,表层土壤(0~10cm、10~20cm、20~30cm)水分含量主要利用烘干法获得;大气温度、土壤温度(0cm、5cm、10cm)、采样箱内温度分别利用 DHM2 型机械通风干湿表、SN2202 型数字温度计以及水银温度计进行测定。

2 结果与分析

2.1 根系呼吸占土壤总呼吸的比例关系

将应用根系生物量外推法求得的根系呼吸速率(根系呼吸速率具体求算方法参见文献[7])与土壤总呼吸速率进行比较,进而求出根系呼吸占土壤总

呼吸的比例(表 2)。由于在根系呼吸求算过程中,相关拟合方程的拟合度(R^2)均在 0.67~0.99 之间,因此,利用根系生物量外推法中各拟合方程求得的根系呼吸结果具有较好的可信度。从表 2 可以看出,根系呼吸所占的比例在 3 个样地不同月份最大值为 56.1%(7 月下旬的羊草退化草原),最小值为 23.2%(9 月上旬的大针茅自由放牧草原),大部分的比例都介于 40%~50% 之间,平均值为 40.3%。另外,就不同群落类型与不同利用强度的 3 个样地而言,这一比例关系基本表现为:羊草退化草原>羊草自由放牧草原>大针茅自由放牧草原。

与以往国外的部分研究结果相比较,Wiant 等

表 2 3 种草地类型根系呼吸、微生物呼吸、土壤总呼吸及根系呼吸占土壤总呼吸的比例关系

Table 2 Root respiration, soil microorganism respiration, total soil respiration and the proportion of the root respiration to the total soil respiration of the three steppes

草地类型	研究对象	5 月	6 月	7 月	8 月上旬	8 月下旬	9 月上旬	9 月下旬
羊草退化草原	土壤总呼吸/ $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$	102.8	154.8	453.0	281.1	168.4	60.9	42.2
	根系呼吸/ $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$	43.9	61.3	230.6	152.6	77.9	17.3	20.0
	微生物呼吸/ $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$	58.9	93.5	222.4	128.5	90.5	43.6	22.2
	比例(根/总)/%	43.0	39.6	56.1	54.3	46.3	28.4	47.3
羊草自由放牧草原	土壤总呼吸/ $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$	142.0	162.7	216.8	155.3	139.5	46.8	50.8
	根系呼吸/ $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$	60.7	45.9	91.4	84.7	69.1	12.5	26.6
	微生物呼吸/ $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$	81.3	116.8	125.4	70.6	70.4	34.3	24.2
	比例(根/总)/%	42.7	28.2	42.2	54.5	49.5	26.7	52.4
大针茅自由放牧草原	土壤总呼吸/ $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$	119.2	167.1	258.1	157.4	141.2	40.4	43.0
	根系呼吸/ $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$	48.4	41.0	84.4	78.9	72.5	9.4	17.4
	微生物呼吸/ $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$	70.9	126.1	173.7	78.5	68.7	31.0	25.6
	比例(根/总)/%	40.6	24.6	32.7	50.1	51.3	23.2	40.5

在 1 个混合森林测得根系呼吸占土壤总呼吸比例为 45%~60%^[19], Rochette 等测得玉蜀黍的这一比例为 5%~50%^[20], Kucera 和 Kirkham 在 Texas 高草草原的研究中得到的结论是 40%^[21]。分析造成各研究结果之间差异的原因,可能与不同植被类型生态特征的差异密切相关。由于 Wiant 是以森林为研究对象,林木根系发达且呼吸旺盛,因此根系呼吸所占比例明显高于草地植被。而 Rochette 等的研究对象是农作物,根系较浅且作物活根系的保持时间较短,根系呼吸所占的比例变化较大,因此与本文研究的结果也有一定的差距。而 Kucera 和 Kirkham 的研究对象与本文相似,均属于干旱-半干旱草地类型,因此得到非常近似的结果。

2.2 土壤总呼吸、根系呼吸及根系呼吸占土壤总呼吸比例的季节变化规律

对于 3 种草地群落的土壤总呼吸速率而言,从图 1 可以看出,其变化规律呈明显的单峰曲线,最大峰值约出现在 7 月下旬,生长季内 3 个样地相差不大(7 月份除外)。根系呼吸表现出类似的季节变化

规律(图 2),均为单峰曲线且峰值也是出现在 7 月下旬。但是,与土壤总呼吸速率的季节变化规律相比较,根系呼吸速率的最小值不是出现在草地返青的 5 月或气温最低的 9 月下旬,而是在 6 月末出现 1 个低谷,7 月份迅速回升达到峰值,随后缓慢下降,至 9 月上旬达到最小值,9 月下旬又略有回升,这与土壤表层水分的季节变化规律十分相似。

分析产生 3 样地呼吸速率上述对比关系及季节变化规律的原因,Risser 等人在北美温带草原的研究认为过度放牧可促进土壤呼吸作用,释放更多的 CO_2 ^[22]。王跃思等人也认为无论是丰水年还是一般年份,自由放牧都大大增加了草原 CO_2 排放量,随着放牧强度的增加, CO_2 排放速率呈直线增长,但不同的放牧强度对 CO_2 排放量的季节变化形式没有显著影响^[23],与本文的研究结果基本一致。这种现象可以解释为过度放牧导致地表植被数量和盖度均明显减少,因此在较强的太阳辐照强度下,6、7 月份过度放牧草原土壤表层温度始终保持较高的水平,同时该时段降水条件也相对充足,促使过度放牧草

原土壤呼吸作用相对强烈,但也有人得出完全相反的结论,认为与围栏样地相比较,放牧会使土壤呼吸作用减弱^[24]。由于放牧作用尤其是过度放牧作用,使草地生态系统在植被数量、根系、土壤孔隙、温度、水分和土壤微生物等方面均产生了明显变化,对土壤呼吸的影响较复杂,因此更深入的原因尚需进一步的研究。

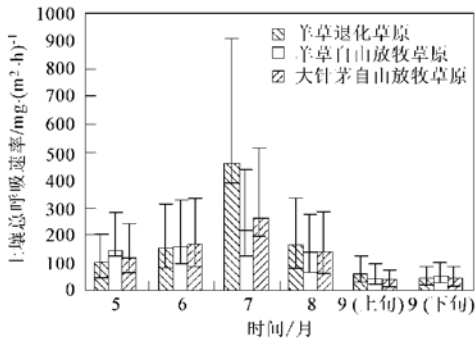


图 1 3 种草地类型土壤总呼吸的季节变化

Fig. 1 Seasonal variation of total soil respiration of the three steppes

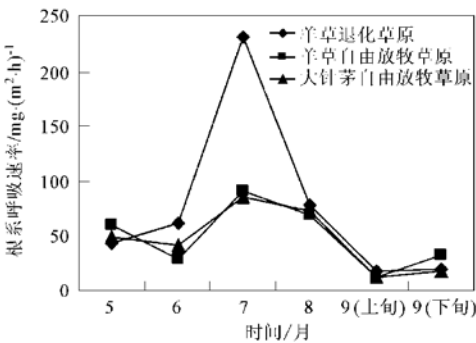


图 2 3 种草地类型根系呼吸的季节变化

Fig. 2 Seasonal variation of root respiration of the three steppes

另外,分析根系呼吸占土壤总呼吸的比例在生长季内的变化(图 3)可以看出,这种变化形式相对复杂,但仍存在一定规律。首先是季节变化形式大体一致,但与根系呼吸和土壤总呼吸的单峰曲线季节变化形式有所不同,整体来看 3 个样地根系呼吸所占比例波动明显;其次,3 个样地根系呼吸比例的峰值均出现在 7 月至 8 月下旬,但不同样地略有差别,其中羊草退化草原的峰值出现在 7 月下旬,羊草自由放牧草原和大针茅自由放牧草原的峰值则出现在 8 月下旬;同时,6~7 月份 3 样地根系呼吸占土壤总呼吸的比例相差较大。

2.3 主要影响因子分析

基于根系呼吸、土壤总呼吸以及根系呼吸占土壤总呼吸比例关系对草地生态系统的重要意义,在研究其季节变化规律的同时,找出影响其变化的关

键环境因子,探讨其影响机制对于草地碳循环的相应机理研究至关重要。

2.3.1 根系生物量

植被根系生物量的季节变化与区域分异是造成根系呼吸速率变化的根本原因。将根系生物量分别与土壤总呼吸、根系呼吸以及根系呼吸占土壤总呼吸的比例关系进行相关分析(表 3),发现根系生物量与土壤总呼吸以及根系呼吸均呈线性正相关,且与土壤总呼吸的相关性更显著,但与根系呼吸占土壤总呼吸的比例则无显著相关关系。这说明尽管根系生物量的大小是决定根系碳排放量变化的重要基础,但决定这一比例关系大小的根系呼吸与土壤微生物呼吸同时还受到温度、水分等环境因子的制约,尤其是在水分条件较差的温带半干旱草原。因此,在本研究中,根系生物量的变化并没有成为影响根系呼吸与土壤总呼吸比例关系变化的主导环境因子。

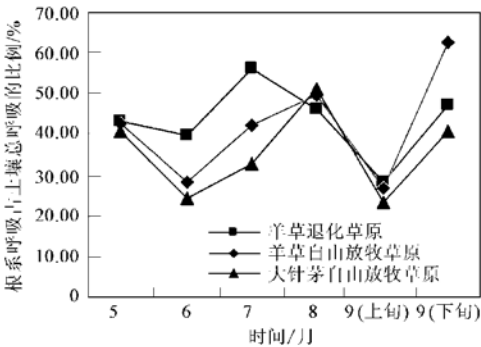


图 3 3 种草地类型根系呼吸占土壤总呼吸比例的季节变化

Fig. 3 Seasonal variation of the proportion of the root respiration to the total soil respiration of the three steppes

表 3 根系生物量与根系呼吸、土壤总呼吸及根系呼吸占土壤总呼吸比例的相关系数(R^2)

Table 3 R^2 of root biomass and total soil respiration, root respiration, the proportion of the root respiration to the total soil respiration

草地类型	土壤总呼吸与根系生物量	根系呼吸与根系生物量	根系呼吸占土壤总呼吸的比例与根系生物量
羊草退化草原	0.760 ¹⁾	0.749 ¹⁾	0.413
羊草自由放牧草原	0.812 ¹⁾	0.679 ¹⁾	0.081
大针茅自由放牧草原	0.775 ¹⁾	0.533	0.494

1) 在 0.05 水平下,根系生物量与研究对象之间相关性显著

2.3.2 水热因子的影响

土壤总呼吸主要包含根系呼吸和土壤微生物呼吸 2 部分,均受到温度和水分等气候因子的强烈影响^[25~27],且由于本研究区域属温带干旱-半干旱草地群落,气候恶劣,年降水量低,二者对水热因子的变化更为敏感。因此,研究草地生态系统土壤呼吸对

气候变化的响应,是探讨草地土壤碳排放机理以及对未来碳排放趋势进行预测的关键和基础。

研究中利用多元线性回归中的逐步回归方法,建立了根系呼吸、土壤总呼吸与主要水热因子(包括大气温度、地表温度、地下 5cm 温度、地下 10cm 温度、0~10cm 土壤水分、10~20cm 土壤水分)的逐步回归方程(表 4),从表 4 可以看出,各草地类型根系呼吸和土壤总呼吸均与土壤水分含量关系十分密切,尤其是 0~10cm 土壤含水量,其变化可以解释根系呼吸速率变异的 84.9%~97.2%,解释土壤总呼吸速率变异的 80.5%~89.0%。由此可以说明,在半干旱的典型草原区域,由于土壤水分多处于较低的水平,且研究时段气候较往年干旱(整个生长季土壤水分含量变化范围为 1.83%~7.58%),因此土壤中的呼吸过程受到土壤水分条件的强烈制约,使得呼吸速率与其它因子的相关性由于过分干旱的气候而被土壤水分所掩盖。对比以往的其它相关研究结果,Ye^[28]等应用长期野外监测数据建立的数学模型预测出温度和水分因素决定了 89.0% 以上的土壤呼吸,董云社^[25]、李凌浩^[26]、Davidson^[29]等在温带半干旱草原和森林地区的研究也认为温度和水

分是控制土壤呼吸的主要因素,但研究也同时指出,在土壤水分含量很低的情况下,土壤中有有机质的分解受到限制,也弱化了其它环境因子对土壤 CO₂ 产生与排放的影响,这与本文的研究结论是十分吻合的。

同时,在 3 个样地根系呼吸和土壤总呼吸与水热因子的回归方程中可以看到,羊草退化草原 0~10cm 土壤水分含量的标准化回归系数(156.182 和 116.831)明显大于羊草自由放牧草原(20.922 和 41.621)和大针茅自由放牧草原(32.667 和 15.601),因此在羊草退化草原,土壤水分含量的微小升高都会使土壤呼吸速率明显变大。分析原因,羊草退化草原受过度放牧的影响,草地严重退化,植株较其它 2 个样地更为稀疏矮小,土质沙化,植物根系也不发达,持续的干旱使土壤水分蒸发强烈,而稀疏弱小的根系又不能起到很好的固持水分的作用,因此,在羊草退化草原,土壤呼吸受到土壤水分的强烈制约作用。在水分条件变化时其响应更为敏感,这也充分解释了羊草退化草原在水分条件明显改善的 7 月和 8 月,土壤总呼吸和根系呼吸明显高于其它 2 个样地的原因。

表 4 3 种草地类型根系呼吸与主要水热因子的多元逐步回归方程¹⁾

Table 4 Statistic prediction of root respiration and climatic factors

草地类型	研究对象	回归方程	F 值	R ²	p
羊草退化草原	根系呼吸	$y = 156.182x_5 - 96.210x_6$	150.170	0.980	0.002
	土壤总呼吸	$y = 116.831x_5 - 182.106$	21.497	0.878	0.011
羊草自由放牧草原	根系呼吸	$y = 20.922x_5$	57.838	0.905	0.001
	土壤总呼吸	$y = 41.621x_5 - 126.906$	10.180	0.772	0.020
大针茅自由放牧草原	根系呼吸	$y = 32.667x_5$	38.313	0.861	0.002
	土壤总呼吸	$y = 15.601x_5 + 11.237x_4$	12.863	0.811	0.037

1) 参与回归的环境因子包括, x_1 : 气温/℃; x_2 : 0cm 地温/℃; x_3 : 5cm 地温/℃; x_4 : 10cm 地温/℃; x_5 : 0~10cm 土壤含水量/%; x_6 : 10~20cm 土壤含水量/%; y 为土壤呼吸速率/ $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$

从对 3 样地根系呼吸占土壤总呼吸比例关系的分析可以看出,其季节变化规律相对复杂。但从水热因子的影响角度来分析,7、8 月份是本研究区域降水条件明显改善的季节,相对于其它月份来说更适合根系对 CO₂ 的释放,出现 CO₂ 排放的高峰,根系呼吸所占的比值也就达到最大。同时,由于植物物种、土壤有机质含量和土壤孔隙度等方面的差异,使羊草退化草原、羊草自由放牧草原和大针茅自由放牧草原的土壤呼吸作用对水热因子的敏感性明显不同,造成各样地在水热条件明显改善时土壤总呼吸和根系呼吸速率方面的较大差异,因此在这一时段根系呼吸占土壤总呼吸的比值差异也较大。在笔者的研究中,根系呼吸对水分的变化比较敏感(0~

10cm 土壤水分含量解释根系呼吸速率变异的 84.9%~97.2%),而微生物呼吸对温度的变化比较敏感(地表温度可以解释微生物呼吸速率变异的 84% 以上)。9 月下旬,气温降幅很大,土壤水分的变异却很小,从而使温度制约了土壤中微生物的呼吸作用,但对根系呼吸的影响较小,使土壤总呼吸速率降低而根系呼吸速率下降不显著,因此 9 月下旬根系呼吸占土壤总呼吸的比值较大。

由以上研究结果可以看出,不同区域水热以及生态因子及其配置的差异也就决定不同区域、不同季节根系呼吸所占比例的差异,因此,在碳循环研究中仅用单个群落的短期研究结果来计算整个区域的根系呼吸总量,势必会造成较大的估算误差。

3 结论

(1) 根系呼吸占土壤总呼吸的比例在温带典型草原 3 个样地不同月份最大值为 56.1% (7 月下旬的羊草退化草原), 最小值为 23.2% (9 月上旬的大针茅自由放牧草原), 大部分的结果介于 40% ~ 50% 之间, 平均值为 40.3%。

(2) 3 种草地类型土壤总呼吸和根系呼吸的季节变化规律基本一致, 均为明显的单峰曲线形式, 最大值出现在 7 月下旬, 但根系呼吸速率在 7 月份达到峰值后缓慢下降, 至 9 月上旬达到最小值, 9 月下旬又略有回升, 与土壤水分的季节变化规律一致。此外, 羊草退化草原由于过度放牧的影响, 根系呼吸速率和土壤总呼吸速率在 7 月份明显高于其它 2 个样地。而根系呼吸占土壤总呼吸的比例在生长季节内波动明显, 并且 3 样地根系呼吸的比例相差较大。

(3) 3 种草地类型根系生物量与土壤总呼吸和根系呼吸均呈线性正相关, 且与土壤总呼吸相关性更显著, 与根系呼吸占土壤总呼吸的比例关系则无明显相关性。根系呼吸和土壤总呼吸与土壤水分含量尤其是 0~10cm 土壤含水量关系密切, 可以解释根系呼吸速率变异的 84.9%~97.2%, 解释土壤总呼吸速率变异的 80.5%~89.0%, 说明本研究区域 2005 年的生长季节内土壤呼吸作用受到水分条件的强烈制约。但是, 在根系呼吸占土壤总呼吸的比例方面, 由于不同区域水热以及生态因子及其配置的差异决定了不同区域根系呼吸占土壤总呼吸比例的差异。

参考文献:

- King D A. Climate change science: adapt, mitigate, or ignore? [J]. *Science*, 2004, **303**: 176~ 177.
- Bouwman A F, Van der Hoek K W, Olivier J G J. Uncertainties in the global source distribution of nitrous oxide [J]. *Geophys. Res.*, 1995, **100**: 2785~ 2800.
- 刘东生. 全球变化和可持续发展科学[J]. *地学前缘*, 2002, **9** (1): 1~ 8.
- Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tellus*, 1992, **44B**: 81~ 99.
- Schlesinger W H. An overview of the carbon cycle[A]. In: Lai R, *et al.* Soils and global change[C]. Florida: CRC press, Boca Raton., 1995. 9~ 25.
- 方精云, 朴世龙, 赵淑清. CO₂ 失汇与北半球中高纬度陆地生态系统的碳汇[J]. *植物生态学报*, 2001, **25**(5): 594~ 602.
- 李凌浩, 韩兴国, 王其兵, 等. 锡林河流域一个放牧草原群落中根系呼吸占土壤总呼吸比例的初步估计[J]. *植物生态学报*, 2002, **26**(1): 29~ 32.
- 马红亮, 朱建国, 谢祖彬. 大气 CO₂ 浓度升高对植物-土壤系统地下过程影响的研究[J]. *土壤*, 2003, **35**(6): 465~ 472.
- 程慎玉, 张宪洲. 土壤呼吸中根系与微生物呼吸的区分方法与应用[J]. *地球科学进展*, 2003, **18**(4): 597~ 603.
- 易志刚, 蚁伟民, 周丽霞. 土壤各组分呼吸区分方法研究进展[J]. *生态学杂志*, 2003, **22**(2): 65~ 69.
- Daniel L, Kelting, James A. Estimating root respiration, microbial respiration in the rhizosphere, and root-free soil respiration in forest soils [J]. *Soil Biology Biochemistry*, 1998, **30**(7): 961~ 968.
- Zolt R, John R, Seiler. A method for the in situ measurement of fine root gas exchange of forest trees[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 1997, **37**: 107~ 113.
- David C, Coleman, Mark D. Soil respiration from four aggrading forested watersheds measured over a quarter century [J]. *Forest Ecology and Management*, 2002, **157**: 247~ 253.
- Cupta S R, Singh J S. Soil respiration in tropical grassland [J]. *Soil Biochemist*, 1981, **13**: 261~ 268.
- 黄德华, 陈佐忠, 张鸿芳. 内蒙古锡林郭勒盟白音锡勒牧场不同类型草原根系生物量的比较研究[A]. 见: 草原生态系统研究[C]. 北京: 中国科学院内蒙古草原生态系统定位站, 1981. 28~ 36.
- 陈佐忠, 黄德华. 内蒙古锡林河流域羊草草原与大针茅草原地下部分生产力和周转值的测定[A]. 见: 草原生态系统研究(第 2 集)[C]. 北京: 中国科学院内蒙古草原生态系统定位站, 1988. 132~ 138.
- 杜睿, 王庚辰, 吕仁达, 等. 箱法在草地温室气体通量野外实验观测中的应用研究[J]. *大气科学*, 2001, **25**(1): 61~ 70.
- 齐玉春. 内蒙古温带草地生态系统生物地球化学循环中主要温室气体通量与碳平衡[D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2003.
- Wiant H V. Contribution of roots to forest soil respiration [J]. *Advance in Frontier Plant Sciences*, 1967b, **18**: 163~ 167.
- Rochette P, Flanagan L B. Quantifying rhizosphere respiration in a corn crop under field conditions [J]. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 1997, **61**: 466~ 474.
- Kucera C, Kirkham D. Soil respiration studies in tall grass prairie in Missouri [J]. *Ecology*, 1971, **52**: 912~ 915.
- Risser D G, Birney E C, Blocker H D. The true prairie ecosystem [J]. *Stroudsburg Pennsylvania: Hutchinson Ross Publishing Company*, 1981. 244~ 246.
- 王跃思, 胡玉琼, 纪宝明. 放牧对内蒙古草原温室气体排放的影响[J]. *中国环境科学*, 2002, **22**(6): 490~ 494.
- 贾丙瑞, 周广胜, 王凤玉, 等. 放牧与围栏羊草草原生态系统土壤呼吸作用比较[J]. *应用生态学报*, 2004, **15**(9): 1611~ 1615.
- 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.
- 李凌浩, 王其兵, 白永飞, 等. 锡林河流域羊草草原群落土壤呼吸及其影响因子的研究[J]. *植物生态学报*, 2000, **24**(6): 680~ 686.
- 王凤玉, 周广胜, 贾丙瑞, 等. 水热因子对退化草原羊草恢复演替群落土壤呼吸的影响[J]. *植物生态学报*, 2003, **27**(5): 644~ 649.
- Ye Q, Xu M, Wu J G. Temperature sensitivity of soil respiration and its effects on ecosystem carbon budget: nonlinearity begets surprises [J]. *Ecological Modeling*, 2002, **153**: 131~ 142.
- Davidson E A, Verchot L V, Cattaneo J H, *et al.* Effect of soil water content on soil respiration in forest and cattle pastures of eastern Amazonian [J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**: 53~ 69.