

水热因子对退化草原羊草恢复演替 群落土壤呼吸的影响

王凤玉 周广胜* 贾丙瑞 王玉辉

(中国科学院植物研究所植被数量生态学重点实验室, 北京 100093)

摘要 对内蒙古锡林郭勒白音锡勒牧场退化恢复羊草 (*Leymus chinensis*) 草原生态系统土壤呼吸作用的主要影响因素分析表明, 环境因子对土壤呼吸作用的影响程度依次表现为: 土壤水分 > 温度; 水分对土壤呼吸作用的影响可分成 3 段, 即 < 7.5%、7.5% ~ 18.4% 和 > 18.4%。当 0 ~ 10 cm 土壤含水量 < 7.5% 时, 土壤温度是土壤呼吸作用的主导控制因子, 土壤呼吸作用与 5 cm 土壤温度呈幂函数关系; 而当 0 ~ 10 cm 土壤含水量 > 7.5% 时, 土壤呼吸作用受土壤水分和土壤温度的共同作用。研究还表明: 在植物生长季内, 当土壤水分接近羊草草原土壤萎蔫系数 6.0% 时所测得土壤呼吸作用为植被在干旱胁迫下的土壤呼吸作用, 而当土壤水分大于羊草草原土壤萎蔫系数 6.0% 时, 土壤呼吸作用的增加主要是由于植物生长及其引起的根系活动和微生物数量、组成及其活性共同影响的, 进而可以解释不同水分条件下土壤及植物根系在土壤呼吸作用中的不同贡献, 为建立土壤呼吸作用模型及正确地理解陆地碳收支及其固碳潜力提供依据。

关键词 土壤呼吸作用 退化恢复草原 羊草草原 温度 水分

EFFECTS OF HEAT AND WATER FACTORS ON SOIL RESPIRATION OF RESTORING *LEYMUS CHINENSIS* STEPPE IN DEGRADED LAND

WANG Feng-Yu ZHOU Guang-Sheng* JIA Bing-Rui and WANG Yu-Hui

(Laboratory of Quantitative Vegetation Ecology, Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

Abstract The carbon cycle of restoring steppe in degraded land is one of the important parts of the global terrestrial carbon cycle. The study of soil respiration in restoring steppe plays a very important role in accurately evaluating the carbon budget of restoring steppe and its function in the global carbon budget. As we know, temperature and soil water content are two important environmental factors in understanding the soil respiration process in terrestrial ecosystems. To quantify their allocation and the relationship between soil respiration and temperature and soil moisture, we conducted field experiments to investigate soil respiration from June to September 2001. The effects of heat and water factors on soil respiration of restoring *Leymus chinensis* steppe in degraded land was studied at Baiyinxile pasture (43°55'N, 116°31'E, with an altitude of about 1 200 m) in Inner Mongolia. This region, un-grazed in June, has a typical temperate and semi-arid climate and the community structure of the vegetation consisted mainly of two species, *Leymus chinensis* and *Stipa grandis*; the soil type was classified as chestnut. Daily variation was investigated by taking measurements once an hour from 6:00 to 19:00 every ten days during the whole growing season using an enclosed chamber method. The results indicated that environmental factors affecting soil respiration ranged as soil water content > temperature, and the soil water content in the upper 10 cm of the soil was of real significance in all of the environmental factors. We analyzed the relationship between daily average soil respiration rate (6:00 - 19:00) and daily average soil water content (%) using the partial correlation analysis of the SPSS and the coefficients showed that soil water content of 7.5% and 18.4% were two thresholds affecting the soil respiration rate. Soil water content could be divided into three levels: < 7.5%, 7.5% - 18.4% and > 18.4% based on their effects on soil respiration. When soil water content was less than 7.5%, soil temperature was the dominant factor of soil respiration. Soil respiration (R_s) could be expressed as an exponential relationship with soil temperature (t) at the depth of 5 cm and their relationship was $R_s = 4.07t^{1.098}$ ($w < 7.5\%$, $R^2 = 0.49$, $n = 80$, $p \ll 0.01$). When soil water content was more than 7.5%, soil respiration was affected by soil temperature (t), soil moisture (w) and the interaction of the two, and their relationship was $R_s = -147.693 + 5.11w + 6.012t + 1.214wt$ ($w >$

收稿日期: 2002-11-18 接受日期: 2003-03-28

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G1999043407)、中国科学院知识创新工程项目(KZCX1-SW-01-12, KSCX2-1-07)和国家自然科学基金项目(40231018, 30070642, 30028001)

* 通讯作者 Author for correspondence E-mail: zhousg@public2.bta.net.cn

7.5%, $R^2 = 0.81$, $n = 69$, $p \ll 0.01$). When soil water content was close to the water wilting coefficient, about 6.0%, plant root respiration had few contributions to soil respiration. When soil water content was more than 7.5%, soil respiration mainly comes from the metabolism and other living activities of the plants and microbes. Thus, the contributions of soil and plants respectively to soil respiration might be explained from environmental factors. This research will help to develop soil respiration models and to understand accurately the carbon budget of terrestrial ecosystems. Our research implied that drought in the growing season in the year of 2001 tended to reduce the soil respiration rate but temperature did not. There were only three times when the soil water content was more than 18.4%, and so, because of the limitation of the data, the threshold of soil water content of 7.5% must be verified in future of experiments.

Key words Soil respiration rate, Restoring steppe in degraded land, *Leymus chinensis* steppe, Temperature, Soil water content

草地生态系统在全球碳循环中起着十分重要的作用,而草地土壤呼吸作用是理解草地生态系统碳循环的重要环节(Klein, 1977)。羊草(*Leymus chinensis*)草原是广泛分布于欧亚温带草原区东缘的地带性草原类型,据统计,我国草地退化面积已达 1.35 亿 hm^2 , 约占草地面积的 1/3, 且仍以 200 万 $\text{hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 的速度增加(周广胜, 2002), 分析和研究退化恢复草地的土壤呼吸作用及其主导控制因子, 有助于科学地评估我国退化恢复草地的碳收支, 对于准确地评估我国陆地碳收支、制定科学的国家碳排放清单具有重要的意义。

尽管许多学者(陈四清等, 1999; 崔骁勇等, 2000; 纪宝明, 2001; 李凌浩等, 2000; Li *et al.*, 2002a; 2002b)已经对内蒙古草原土壤呼吸作用开展了一些研究, 但由于观测时间都较短, 特别是关于日、季土壤呼吸作用动态的长期观测资料较少, 且主要集中于自然草地或放牧草地土壤呼吸作用的研究, 对于退化恢复草地土壤呼吸作用的研究较少, 加之观测方法的不统一, 如碱液吸收法和静态箱式法, 从而限制了对草原生态系统碳收支的理解。正因为如此, Schimel 等(2001)指出, 目前对整个陆地生态系统碳循环系统性的连续时间序列上的观测研究非常缺乏, 应予以高度重视。研究表明, 在日时间尺度上, 土壤呼吸作用的主导限制因子是温度(Dong *et al.*, 2000; 周广胜等, 2002), 而在季节尺度上, 土壤呼吸作用则受到温度与水分的共同影响(李凌浩等, 2000; Li *et al.*, 2002a; 2002b; 周广胜等, 2002)。温度和水分的量化关系和定量化的研究是理解土壤呼吸作用与建模的关键(Parker, 1987)。但是, 目前对于水热因子影响不同时间尺度土壤呼吸作用的机理及其模型的研究还很少, 亦还没有达成共识, 是限制当前碳收支评估准确性的重要因素之一。

本文试图基于内蒙古锡林郭勒白音锡勒牧场退化恢复羊草草原生态系统土壤呼吸作用及其环境因

子的观测实验, 分析退化恢复羊草草原土壤呼吸作用的主导环境因子以及水热因子的量化关系对于退化恢复羊草草原土壤呼吸作用的影响机理, 为进一步探讨不同时间尺度上环境因子对土壤呼吸作用的效应, 建立草地土壤呼吸作用模型, 科学地评估草地土壤呼吸作用在草地碳收支中的作用与地位提供参数与示范。

1 材料和方法

1.1 样地概况

研究样地位于内蒙古锡林郭勒白音锡勒牧场(43°55' N, 116°31' E, 海拔 1 201 m), 属于典型羊草草原生态系统类型。2001 年 6 月 15 日进行围栏禁牧, 样地面积约 1.20 hm^2 。样地内优势植物为羊草(*Leymus chinensis*), 伴有大针茅(*Stipa grandis*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、黄囊苔草(*Carex korshinskyi*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)等禾草。土壤为栗钙土, 土壤腐殖质层较薄。该地区气候属大陆性半干旱草原气候, 年均温在 $-1.1 \sim 0.2$ $^{\circ}\text{C}$ 之间, 多年平均温度为 -0.4 $^{\circ}\text{C}$, 气温年较差和日较差较大。1 月均温为 -21.41 $^{\circ}\text{C}$, 7 月均温为 18.53 $^{\circ}\text{C}$ 。年均日照总时数达 2 617.54 h, 日照充分。年均降水量为 350.43 mm, 主要集中在 7~9 月; 可能蒸散量达 403.14 mm, 年际间变化较大(姜恕, 1985; 陈佐忠, 1988)。

1.2 土壤呼吸作用及其环境因子的测定

2001 年 6 月 19 日起在研究样地开展以碳循环为核心的典型退化羊草草原生态系统强化观测实验。观测内容包括: 优势植物羊草、大针茅的叶片光合生理特性; 优势植物叶面积和比叶面积; 植物地上分种生物量和地下分层生物量(0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm), 枯落物; 群落光合作用; 土壤呼吸作用; 土壤全 C、全 N、全 P、全 S 和有效 C、N、P 和 S, 土壤全 K、全 Na、全 Ca、全 Mg、全 Cu、全 Zn、全 Fe、全 Mn 和有效 K、Cu、Zn、Fe、Mn, 阳离子交换量, pH 值,

电导率,田间持水量,机械组成(国际制)和土壤团聚体分析;植物元素含量(C、N、P和S等);土壤水分、容重(0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm)以及小气候梯度观测(长春气象仪器研究所生产,MAOS-I型小气候自动观测系统),包括6.0 m高度处的风向,3个高度处(1.5 m,3 m和4.5 m)的空气温度、湿度、风速;1.5 m高度处的太阳总辐射、净辐射、光合有效辐射;土壤地表热通量及地表、不同层次的地温(0、5、10、15、30、40 cm)。除小气候梯度观测频率为每小时1次外,其它观测项目的频率为每10 d 1次。观测时间从2001年6月19日至2001年9月23日。

土壤呼吸作用采用静态箱式法测定。箱体由透明有机玻璃制成,底面积为50 cm×50 cm,高15 cm。箱体内对角线两侧各配有12 V电压0.13 A电流的风扇1个,并在箱体的另一边10 cm高处、箱内约10 cm处装有一高精度的温湿度探头(北京鑫诺金电子科技发展有限公司生产,型号:NKHT;相对湿度范围:0~100%,精度为±2%;温度范围:-20~80℃,精度为±0.3℃),与温湿度读数表(北京均方理化科技研究所,型号:3DD150)相连,测量箱内气体的温度和湿度。箱体内气体通过导气管与GXH-3010D便携式红外线分析器(北京市电脑技术应用研究所生产,测量范围为0~1000 ul·L⁻¹ CO₂,响应时间小于10 s)相连接,测定箱体内CO₂浓度。

土壤呼吸作用测定设置3个重复。在测定土壤呼吸作用前一天随机选取3个样方,将气体采集箱的底钢圈砸入待测样地土壤5 cm深处,测量时用密封条与气体分析室封闭联接。在测量的前一天,对待测土壤样地物种齐地剪取地上植物,第二天进行样地土壤呼吸作用测定,每10天1次。测量时,尽量选取晴朗天气,从6:00~20:00进行观测,8月中旬后由于白昼变短,测量时间改为6:00~19:00。每次土壤呼吸作用测定前进行仪器调零校准,扣箱前先让仪器的各项读数在自然状况下稳定,每次测量持续3 min,每间隔10 s记录箱内温度、湿度和CO₂浓度的变化值,计算3 min内的CO₂通量代表该测量时间的土壤呼吸作用。

在测定土壤呼吸作用的同时,每隔2 h分3层(0~10、10~20、20~30 cm)在3个样方附近10 cm处用土钻分层钻取地下土壤后,105℃烘干48 h测定土壤含水量。

土壤呼吸作用(即CO₂通量)可用下式计算:

$$Q = \Delta m / (A \cdot \Delta t) = (\rho \cdot v \cdot \Delta c) / (A \cdot \Delta t)$$

式中:Q为待测土壤呼吸作用(mg·m⁻²·h⁻¹), Δm

为箱体内CO₂质量的增量(mg),A为箱体底面积(m²), Δt 为测量时间间隔(s), Δc 为箱体内CO₂浓度的变化($\mu\text{l}\cdot\text{L}^{-1}$),v为箱体体积(m³), ρ 为箱体内CO₂密度(mg·L⁻¹)。

2 结果与分析

2.1 土壤呼吸作用与单环境因子的相关关系

基于2001年观测到的165组土壤呼吸作用资料与环境因素(165组温度资料、84组不同土壤深度水分资料以及165组不同高度的风速资料),利用SPSS统计分析软件对退化恢复羊草草原土壤呼吸作用与环境因子的单因子关系分析表明,土壤呼吸作用与单一环境因子的相关系数在3种相关分析(皮尔逊相关分析,肯德尔相关分析和斯皮尔曼等级相关分析)中表现出相似的趋势。图1给出了皮尔逊相关系数。

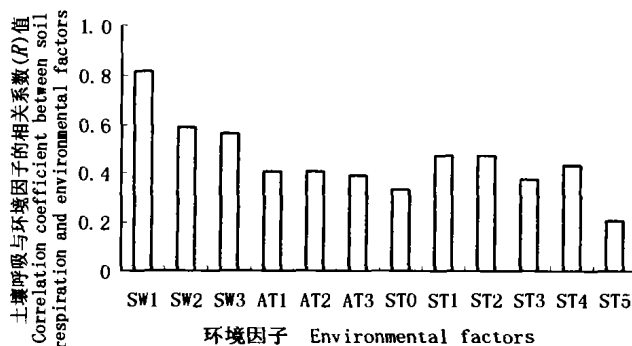


图1 退化羊草草原土壤呼吸作用与单环境因子的皮尔逊相关系数(R)

Fig. 1 Relationships between soil respiration and single environmental factor in restoring *Leymus chinensis* steppe in degraded land

SW1、SW2、SW3分别为土壤0~10、10~20、20~30 cm质量百分含水量(%),AT1、AT2、AT3分别为1.5、3.0、4.5 m高的大气温度 ST0至ST5分别为0、5、10、15、30、40 cm土壤温度 SW1, SW2, SW3 indicate respectively soil water content (%) in 0-10, 10-20, 20-30 cm depths AT1, AT2 and AT3 indicate air temperatures respectively at the height of 1.5, 3.0, 4.5 m ST0 to ST5 respectively point to the soil temperature in 0, 5, 10, 15, 30, 40 cm depths

从土壤呼吸作用与环境因子的相关系数可以看出,环境因子对土壤呼吸作用的影响程度依次表现为:土壤水分>温度,并且0~10 cm土壤含水量和5 cm处土壤温度与土壤呼吸作用的相关系数较大,并且在主成分分析中两者的累计百分比达到81.92%。这表明,就小时时间尺度而言,土壤水分对瞬时土壤呼吸作用的影响最大,与以前研究所得的温度是土壤呼吸作用的主要影响因子的结论不同(周广胜等,2002)。这可能是对一天的土壤呼吸作用而言,水分的变化不大,但当将所有资料集成分析时,水分

的变化就较大,尤其对于干旱和半干旱区,在大气降水较小而蒸发强烈的植物生长季节,土壤水分的波动将更加剧烈,对土壤呼吸作用就更为重要。对于温度而言,土壤 20 cm 深度以上及大气温度对于土壤呼吸作用影响较大,而其它温度的影响则不大,表明土壤界面的小气候因子对于土壤呼吸作用影响较大。因此,在建立土壤呼吸作用模型时应该尽可能地获取长时间的观测资料以正确地理解影响土壤呼吸作用的主导因子。

2.2 水热因子与土壤呼吸作用的量化关系

一般而言,水、热因素是影响土壤呼吸作用的重要环境因子(刘绍辉等, 1997; Holt, 1990; 周广胜等, 2002)。表 1 中土壤呼吸作用和单因子的相关系数也证实 0~10 cm 土壤含水量和 5 cm 的地温与

土壤呼吸作用的相关性最大,但是如何区分、甚至定量化水热因子在土壤呼吸作用中的贡献则是理解土壤呼吸作用及其主导因子的关键。研究表明,土壤含水量处于土壤最大田间持水量和永久萎蔫系数范围内,土壤呼吸作用与土壤含水量呈显著的正相关(Tesarova & Gloser, 1976; de Jong *et al.*, 1974; Holt, 1990; Koizumi *et al.*, 1999),在温度作为非限制性因素条件下,与影响土壤呼吸作用的最适土壤水分相比,无论土壤含水量增加还是减少,土壤呼吸作用均呈现下降趋势(Linn & Doran, 1984; Grant & Rochette, 1994);而土壤温度与土壤呼吸作用有显著的指数函数关系(李凌浩等, 1998)。这表明水热因子的量化关系对于土壤呼吸作用影响具有重要的意义。

表 1 不同土壤含水量水平下的土壤呼吸作用和温度、土壤水分的相关系数(R)
Table 1 Correlation coefficients (R) between soil respiration and soil water content and soil temperature under different soil water content levels

相关系数 Correlation coefficients		0~10 cm 土壤含水量 < 7.5% 0-10 cm soil water content < 7.5%				0~10 cm 土壤含水量 > 7.5% 0-10 cm soil water content > 7.5%			
		土壤含水量 Soil water content		5 cm 土壤温度 5 cm soil temperature		土壤含水量 Soil water content		5 cm 土壤温度 5 cm soil temperature	
		土壤呼吸 Soil respiration	皮尔逊 Pearson 肯德尔 Kendall 斯皮尔曼 Spearman	-0.233* -0.141 -0.215	$p=0.037$ $p=0.06$ $p=0.55$	0.649** 0.453** 0.636**	$p<0.01$ $p<0.01$ $p<0.01$	0.581** 0.286** 0.447**	$p<0.01$ $p<0.01$ $p<0.01$

*: $p < 0.05$ **: $p < 0.01$

为定量研究水热因子在土壤呼吸作用中的贡献,选用 5 cm 土壤温度和 0~10 cm 土壤含水量这两个对土壤呼吸作用影响显著的环境因子,考虑到最大限度地消除温度在水分因子与土壤呼吸作用相关性分析中的作用,利用 SPSS 统计分析软件的偏相关分析方法(Partial correlations)分析白天土壤呼吸作用与 0~10 cm 土壤含水量的关系,以了解水分在土壤呼吸作用中的贡献。

图 2 给出了土壤呼吸作用与 0~10 cm 日均土壤含水量(%)的偏相关系数随日均土壤含水量的变化。分析土壤呼吸作用与 0~10 cm 日均土壤含水量(%)的偏相关系数和日均土壤含水量的关系,得如下拟合曲线:

$$R_s = -0.0275w^2 + 0.7132w - 3.8036$$

式中: R_s 为土壤呼吸作用与 0~10 cm 日均土壤含水量(%)的偏相关系数, w 为日均土壤含水量(%)。求解该方程,可以得到土壤呼吸作用与 0~10 cm 日均土壤含水量(%)的偏相关系数为零时的日均土壤含水量分别为 7.5% 和 18.4%。因此,根据水分对于土壤呼吸作用的影响不同,可将 0~10 cm 的土壤

含水量分为 3 段来讨论,即 0~10 cm,土壤含水量 < 7.5%,也就是植被受到干旱胁迫(羊草草原土壤萎蔫系数 6.0%); 7.5%~18.4%; 0~10 cm 土壤含水量 > 18.4%,即植被在土壤水分相当充足条件下的土壤呼吸作用(羊草草原田间持水量为 24.4%)。从 2001 年的观测数据来看,0~10 cm 土壤含水量 > 18.4% 的数据只有 3 个,这是由于 2001 年是干旱年分的缘故,该年 1~11 月的降水量总和为 286.6 mm,低于年平均降水量 350.4 mm 的水平。为此,本文重点讨论 0~10 cm 土壤含水量 < 18.4% 的水热配置与土壤呼吸作用的关系。

以 0~10 cm 土壤含水量 7.5% 为分界点将土壤呼吸作用及其影响因子分段分析土壤呼吸作用与温度和水分的关系(表 1)。

从表 1 可以看出,当 0~10 cm 土壤含水量 < 7.5% 时,土壤呼吸速率与土壤水分呈现弱负相关关系,而与温度则呈现较强的相关性,且达到极显著水平,表明在土壤水分较小时,植被受到干旱胁迫,温度是影响土壤呼吸作用的主导因子;当 0~10 cm 土壤含水量 > 7.5% 时,土壤水分和土壤温度与土壤呼

吸作用的相关性均达到极显著水平,也就是说温度和水分共同影响着土壤的呼吸作用。为进一步探讨不同土壤含水量水平下土壤呼吸作用与温度、土壤含水量的关系,分别给出了土壤呼吸作用在 0~10 cm 土壤含水量 <7.5% 和 >7.5% 时,土壤呼吸作用与土壤温度的关系(图 3)。

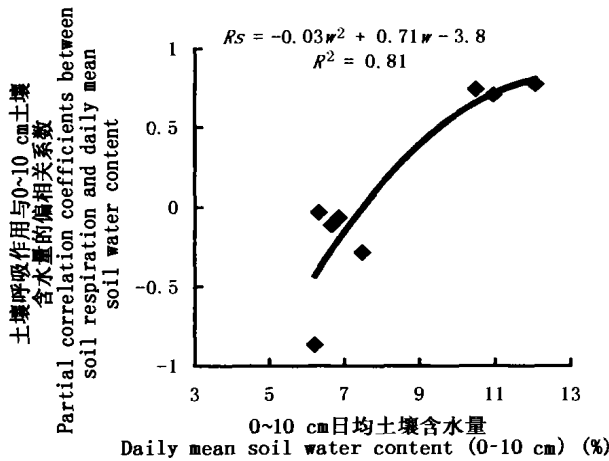


图 2 土壤呼吸作用与 0~10 cm 日土壤含水量(%)的偏相关系数
Fig.2 Relationship between soil water content (0~10 cm) and the partial correlation coefficients between soil respiration and daily mean soil water content (%)

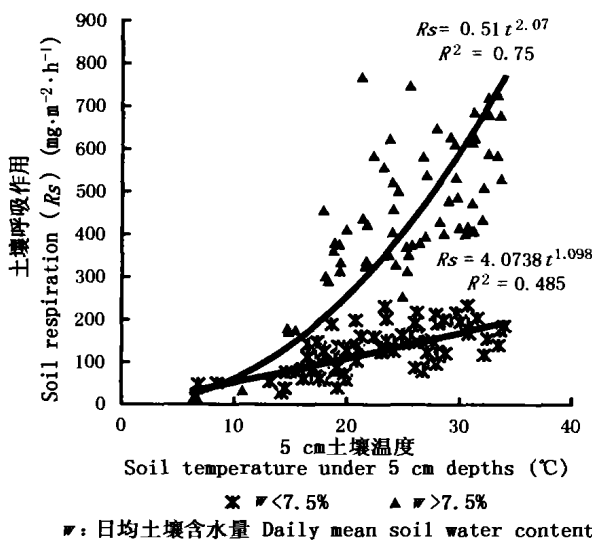


图 3 0~10 cm 土壤含水量 <7.5% 和 >7.5% 时土壤呼吸作用随土壤温度的变化
Fig.3 Relationships between soil respiration and soil temperature under different levels of soil water content at the depth of 10 cm (>7.5% and <7.5%)

可以看出,0~10 cm 土壤含水量 >7.5% 时,土壤呼吸作用明显高于 0~10 cm 土壤含水量 <7.5% 时的土壤呼吸作用,其平均值之比为 3.1。更为重要的是,无论土壤水分如何,土壤呼吸作用均随着温

度的升高呈现增加趋势,但是增加的幅度不同。当 0~10 cm 土壤含水量 <7.5% 时,土壤温度是土壤呼吸作用的主导控制因子,其关系可表示如下:

$$R_s = 4.07t^{1.098} \quad w < 7.5\%, \quad R^2 = 0.49, \quad n = 80, \quad p < 0.01$$

当 0~10 cm 土壤含水量 >7.5% 时,土壤呼吸作用受土壤水分和土壤温度的共同作用,其关系可表示如下:

$$R_s = -147.693 + 5.11w + 6.012t + 1.214wt \quad w > 7.5\% \quad R^2 = 0.81, \quad n = 69, \quad p < 0.01$$

式中, R_s 为土壤呼吸作用, w 为 0~10 cm 土壤含水量(%), t 为 5 cm 土壤温度(°C)。

3 结论与讨论

水热因子是影响土壤呼吸作用的重要因素,了解水热因子对土壤呼吸作用的影响及其机理是正确地建立土壤呼吸作用模型,准确地评估土壤呼吸作用及陆地碳收支的关键之一。对内蒙古锡林郭勒白音锡勒牧场退化恢复羊草草原生态系统土壤呼吸作用的主导影响因子分析表明,环境因子对土壤呼吸作用的影响程度依次表现为:土壤水分 > 温度。对土壤呼吸作用与 0~10 cm 日均土壤含水量(%)的偏相关系数随日均土壤含水量的变化分析发现,水分对于土壤呼吸作用可分成 3 段,即 <7.5%、7.5%~18.4% 和 >18.4%。当 0~10 cm 土壤含水量 <7.5% 时,土壤温度是土壤呼吸作用的主导控制因子,土壤呼吸作用与 5 cm 土壤温度呈幂函数关系,土壤含水量是使植物受到胁迫的限制性因子;而当 0~10 cm 土壤含水量 >7.5% 时,土壤呼吸作用受土壤水分和土壤温度的共同作用。

当土壤水分含量小于 7.5%,甚至接近羊草草原土壤萎蔫系数(6.0%)时,由于受干旱胁迫作用,植物的新陈代谢活动受到抑制,这时植物根系对土壤呼吸作用的贡献相当小;而当土壤水分大于 7.5% 这个临界值时,土壤呼吸作用的增加主要是由于植物生长、根系活动及其环境的改变引起的土壤微生物数量、种类组成和活性所共同导致的,进而可以解释土壤和植物根系在土壤呼吸作用中的不同贡献,为理解土壤呼吸作用提供了依据。研究亦表明,在建立土壤呼吸作用模型时,应该将土壤呼吸作用中的根系作用与土壤作用分别考虑,以正确地理解陆地生态系统碳收支及其固碳潜力。

同时,由于 2001 年观测数据的局限性,以及羊草草原群落退化恢复过程中群落结构演替、植物适

应性和环境条件的改变, 仅仅由一年的数据分析中把 0~10 cm 土壤含水量为 7.5% 和 18.4% 作为影响土壤呼吸作用的临界点还需要在进一步的实验中加以检验和验证。

参 考 文 献

- Chen, S. Q. (陈四清), X. Y. Cui (崔晓勇), G. S. Zhou (周广胜) & L. H. Li (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)
- Chen, Z. Z. (陈佐忠). 1988. Topography and climate of Xilin River Basin. *Research on Grassland Ecosystem* (草原生态系统研究), **3**: 13~22. (in Chinese with English abstract)
- Cui, X. Y. (崔晓勇), S. Q. Chen (陈四清) & Z. Z. Chen (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)
- de Jong, E., H. J. V. Schappert & K. B. Macdonald. 1974. Carbon dioxide evolution from virgin and cultivated soil as affected by management practices and climate. *Canadian Journal of Soil Science*, **54**: 299~307.
- Dong, Y. S., S. Zhang, Y. C. Qi & Z. Z. Chen. 2000. Fluxes of CO₂, N₂O and CH₄ from a typical temperate grassland in Inner Mongolia and its daily variation. *Chinese Science Bulletin*, **45**: 1590~1594.
- Grant, R. F. & P. Rochette. 1994. Soil microbial respiration at different water potentials and temperatures: theory and mathematical modeling. *Soil Science Society of America Journal*, **58**: 1681~1690.
- Holt, J. A. 1990. Soil respiration in the seasonally dry tropics near Townsville, north Queensland. *Australian Journal of Soil Research*, **28**: 737~745.
- Jiang, S. (姜恕). 1985. An introduction on the Inner Mongolia Grassland Ecosystem Research Station, Academia Sinica. *Research on Grassland Ecosystem* (草原生态系统研究), **1**: 1~10. (in Chinese with English abstract)
- Ji, B. M. (纪宝明), Y. F. Wang (王艳芬) & X. Z. Li (李香真). 2001. CH₄ and CO₂ concentration in soils of the major grassland of the Xilin River Basin of Inner Mongolia. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), **25**: 371~374. (in Chinese with English abstract)
- Klein, D. A. 1977. Seasonal carbon flow and decomposer relationship in a semi-arid grassland soil. *Ecology*, **58**: 184~190.
- Koizumi, H., M. Kontturi & S. Mariko. 1999. Soil respiration in three soil types in agricultural ecosystems in Finland. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science*, **49**: 65~74.
- Li, L. H. (李凌浩) & Z. Z. Chen (陈佐忠). 1998. Soil respiration in grassland communities in the world. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), **17**(4): 45~51. (in Chinese with English abstract)
- Li, L. H. (李凌浩), Q. B. Wang (王其兵), Y. F. Bai (白永飞) & G. S. Zhou (周广胜). 2000. Soil respiration of a *Leymus chinensis* grassland stand in the Xilin River Basin as affected by overgrazing and climate. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), **24**: 680~686. (in Chinese with English abstract)
- Li, L. H., X. G. Han, Q. B. Wang, W. M. Bai, Y. F. Bai, Z. D. Yan, Q. S. Chen, Y. Zhang, J. Yang, X. Li & S. H. Song. 2002a. Soil carbon balance in a native temperate grassland in the Xilin River Basin of Inner Mongolia. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), **44**: 740~742.
- Li, L. H., X. G. Han, Q. B. Wang, Q. S. Chen, Y. Zhang, J. Yang, Z. D. Yan, X. Li, W. M. Bai & S. H. Song. 2002b. Correlations between plant biomass and soil respiration in a *Leymus chinensis* community in the Xilin River Basin of Inner Mongolia. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), **44**: 593~597.
- Linn, D. M. & J. W. Doran. 1984. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and non-tilled soils. *Soil Science Society of America Journal*, **48**: 1267~1272.
- Liu, S. H. (刘绍辉) & J. Y. Fang (方精云). 1997. Effect factors of soil respiration and the temperature effects on soil respiration in the global scale. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **5**: 469~476. (in Chinese with English abstract)
- Parker, L. W. 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grassland. *Soil Science Society of America Journal*, **51**: 1137~1179.
- Schimel, D. S., J. I. House, K. A. Hibbard, P. Bousquet, P. Ciais, P. Peylin, B. H. Braswell, M. J. Apps, D. Baker, A. Bondeau, J. Canadell, G. Churkina, W. Cramer, A. S. Denning, C. B. Field, P. Friedlingstein, C. Goodale, M. Heimann, R. A. Houghton, J. M. Melillo, B. Moore, D. Murdiyarso, I. Noble, S. W. Pacala, I. C. Prentice, M. R. Raupach, P. J. Rayner, R. J. Scholes, W. J. Steffen & C. Wirth. 2001. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystem. *Nature*, **414**: 169~172.
- Tesarova, M. & J. Gloser. 1976. Total CO₂ output from alluvial soils with two types of grassland communities. *Pedobiologia*, **16**: 364~372.
- Zhou, G. S. (周广胜) & Y. H. Wang (王玉辉). 2002. Conversion of terrestrial ecosystems and carbon cycling. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), **26**: 250~254. (in Chinese with English abstract)
- Zhou, G. S. (周广胜). 2002. Northeast China Transect (NECT) and global change — aridification, human activities and ecosystems. Beijing: Meteorological Press. 3~8. (in Chinese)

责任编辑: 杨允菲 责任编辑: 姜联合