

松嫩平原旱生芦苇群落土壤呼吸动态及影响因子*

王 铭^{1,2} 刘兴土¹ 李秀军^{1**} 张继涛¹ 王国栋^{1,2}

(¹中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012; ²中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要 为研究松嫩平原旱生芦苇群落土壤呼吸作用的动态变化及其影响因子, 于 2011 年 5—10 月采用 LI-6400 土壤呼吸监测系统对旱生芦苇群落土壤呼吸进行连续野外观测, 并分析水热因子对土壤呼吸的影响。结果表明: 芦苇群落土壤呼吸具有明显的日变化和季节变化特征; 其日变化为明显的单峰曲线, 土壤呼吸速率峰值出现在中午 11:00—13:00; 7 和 8 月芦苇群落土壤呼吸作用最强, 10 月土壤呼吸作用最弱。影响旱生芦苇群落土壤呼吸的主导因子是温度, 土壤呼吸与近地表空气温度以及土壤 0~10、10~20、20~30 cm 温度均有显著相关性 ($P<0.01$), 而近地表空气温度和土壤表层温度对土壤呼吸的影响最大。在 5—10 月芦苇群落土壤呼吸温度敏感性 Q_{10} 值为 1.2~1.65, 变异系数为 15.4%。土壤含水量和近地表空气相对湿度不是影响该地区芦苇群落土壤呼吸的主要因素。

关键词 芦苇群落; 土壤呼吸; 动态变化; 影响因子

中图分类号 S154.1; Q948 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2012)10-2466-07

Dynamics of soil respiration under *Phragmites australis* community in dry habitats of Songnen Plain and related affecting factors. WANG Ming^{1,2}, LIU Xing-tu¹, LI Xiu-jun^{1**}, ZHANG Ji-tao¹, WANG Guo-dong^{1,2} (¹Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China; ²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(10): 2466–2472.

Abstract: Soil respiration is one of the important components in global carbon cycle, and a sensitive indicator of many soil processes that control soil metabolism. In order to understand the dynamics of soil respiration under the *Phragmites australis* community in dry habitats of Songnen Plain, Northeast China, a field observation on the soil respiration was conducted from May to October 2011 by using LI-6400 automated soil CO₂ flux system. There existed obvious diurnal and seasonal patterns of the soil respiration. The diurnal curve of the soil respiration was unimodal, with the peak appeared at 11:00–13:00, and the seasonal change of the soil respiration was with the maximum ($4.8 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) in July and August and the minimum ($1.51 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) in October. The main factor affecting the soil respiration was temperature. The soil respiration rate was significantly correlated with the near-ground ambient air temperature and the soil temperature at depths 0–10, 10–20, and 20–30 cm, of which, near-ground ambient air temperature and the soil temperature at depth 0–10 cm were the two most important controlling factors. The Q_{10} values of the soil respiration from May to October varied from 1.2 to 1.65, with a mean value of 1.39 and a coefficient of variation of 15.4%. Soil moisture content and near-ground air humidity were not the main environmental factors affecting the soil respiration.

Key words: *Phragmites australis* community; soil respiration; dynamic change; affecting factor.

全球气候变化已经成为公众和科学界关注的热点之一, CO₂ 作为一种重要的温室气体, 其源、汇及通量的研究格外得到重视 (Bouwman & Germon,

1998)。土壤作为一个巨大的碳库, 是大气 CO₂ 重要的源或汇, 其轻微的变化会导致大气中 CO₂ 浓度的明显改变。土壤 CO₂ 释放的研究对估算未来大气 CO₂ 浓度及全球变化具有举足轻重的意义 (Trumbore, 2006; Piao *et al.*, 2008)。

松嫩平原是我国重要的粮食生产基地, 也是我

* 国家重点基础研究发展计划项目 (2012CB956103) 资助。

** 通讯作者 E-mail: lixiujun@neigae.ac.cn

收稿日期: 2012-03-07 接受日期: 2012-06-12

国主要的草甸草原之一,区域内天然草地面积 985.8 万 hm^2 ,占东北地区草地面积的 24.0% (刘兴土,2001),而旱生芦苇群落 (*Phragmites australis*) 是该地区草甸草原的主要植被群落之一。目前关于芦苇群落土壤呼吸的研究主要集中在湿地芦苇的土壤呼吸作用 (谢艳兵等,2006;石冰,2010;杜紫贤等,2010),而对旱生芦苇群落的土壤呼吸作用研究还较为少见。本文基于 2011 年 5—10 月松嫩平原西部旱生芦苇群落不同时期土壤呼吸作用动态和环境因子的观测资料,分析芦苇群落土壤呼吸作用的日、季节变化动态,以及影响芦苇群落土壤呼吸作用的主要因素,为旱生芦苇群落碳收支的动态模拟提供参数。

1 材料与方法

1.1 自然概况

研究区域位于中国科学院大安盐碱地生态试验站,该站坐落在洮儿河流域下游低平原上。地理坐标为 $123^{\circ}50'27''\text{E}$ — $123^{\circ}51'31''\text{E}$, $45^{\circ}35'58''\text{N}$ — $45^{\circ}36'28''\text{N}$ 。该区位于吉林西部的半干旱-半湿润过渡区,属中温带季风气候,春季干旱多风,夏季炎热多雨。多年平均降水量 410 mm,全年日照时数 3014 h,年平均气温 $4.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,日均温 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$,积温 $2921.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,无霜期 137 d (邓伟等,2006)。

研究样地的土壤类型为中度盐碱化土壤,土壤的基本理化性质见表 1。植物群落中优势植物以芦苇为主,最大生物量时期的植被盖度在 80% 左右,约为 $100\text{ 株}\cdot\text{m}^{-2}$ 。伴生种为苣荬菜 (*Sonchus brachyotus*)、大刺儿菜 (*Cephalanoplos setosum*) 和旋覆花 (*Inula japonica*) 等菊科植物。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤呼吸速率的监测 土壤呼吸速率采用 LI-6400 (IRGA; LI-6400-09; Li-Cor Inc., Lincoln, NE) 土壤呼吸测定系统进行测定。在芦苇群落分布均匀的样地随机选取 3 个重复点依次测定,每 2 个

重复点之间的距离 $>20\text{ m}$ 。监测前,在每个重复点内选出直径为 20 cm 的样圆,将样圆内的植物齐地面剪掉,并去除地表覆盖物。监测时提前 1 d 将测定基座嵌入土壤中,上端高出地表约 2 cm,基座为直径 10 cm,高 5 cm 的聚氯乙烯圆柱体。经过 24 h 的平衡后,土壤呼吸速率恢复到基座放置前的水平,避免由于安置气室对土壤扰动,而造成短期内土壤呼吸速率的波动。每个样地每月进行一次日变化观测,观测时间为早 7:00 到次日凌晨 5:00,日观测频率为每 2 h 测定 1 次,每个测点监测时又设置 3 次重复测定。另在每月选取一日进行土壤呼吸季节变化的二次监测,监测时间为 7:00—11:00,该时间段内一般出现土壤呼吸的日均值 (郑聚峰等,2006;van Straaten *et al.*,2010),根据每月日变化日均值出现的时间选取改段时间内土壤日均值。取该日均值与土壤呼吸日变化均值共同进行分析,表示该月土壤呼吸的季节性变化。

1.2.2 环境因子的监测 在测定呼吸速率的同时,使用热敏电阻器同步测量土壤近地表、土壤 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30 cm 的温度。由于土壤含水量在一天之内变化幅度不大,因此每月测土壤呼吸时,每一天仅测一次土壤 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30 cm 含水量,采用铝盒法测土壤质量含水量,同时挖土壤剖面,使用环刀法测土壤容重,计算土壤体积含水量。近地表空气相对湿度由 LI-6400 土壤呼吸测定系统测土壤呼吸时同步监测。

1.2.3 数据处理 使用 Q_{10} 值来表示土壤呼吸速率对温度变化的敏感程度,并采用指数关系模型进行计算 (Kucera & Kirkham,1971; Norman *et al.*,1992; Raich & Potter,1995):

$$R_s = ae^{bt}$$

式中, R_s 为土壤呼吸; t 为气温; a 为温度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的土壤呼吸,也称为基础呼吸; b 为温度反应系数。 Q_{10} 值通过下式确定:

$$Q_{10} = e^{10b}$$

表 1 芦苇样地各层土壤理化性质及主要水溶性盐离子含量

Table 1 Physical and chemical properties and main ion contents of soil in different depths of *Phragmites australis* community

土层 (cm)	EC ($\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$) *	pH *	ESP ¹⁾ (%)	CEC ²⁾ ($\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$)	SAR ³⁾ ($\text{mmol}_\text{c}^{-1}$) ^{1/2}	Na^+ ($\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$) *	$\frac{1}{2}\text{Ca}^{2+}$ 、 $\frac{1}{2}\text{Mg}^{2+}$ ($\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$) *	HCO_3^- 、 $\frac{1}{2}\text{CO}_3^{2-}$ ($\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$) *
0 ~ 10	0.30±0.02	8.3±0.4	14.3±2.1	16.8±1.6	1.96±0.70	12.85±0.37	8.60±0.15	3.60±0.02
10 ~ 20	0.32±0.02	8.2±0.5	24.4±2.3	30.7±2.4	2.39±0.85	16.95±0.53	10.05±0.13	7.80±0.30
20 ~ 30	0.40±0.03	8.0±0.4	35.7±3.0	30.5±2.8	2.68±0.74	21.30±0.58	12.6±0.32	10.50±0.22

* 土水比 1 : 5 浸提液测定;1) ESP: 土壤碱化度;2) CEC: 阳离子交换量;3) SAR: 钠吸附比。

表 2 芦苇群落土壤呼吸日变化基本特征
Table 2 Basic characteristics of daily pattern of soil respiration rate

月份	土壤呼吸 速率峰值 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	峰值出现 时间	土壤呼吸 速率谷值 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	谷值出现 时间	日间平均土 壤呼吸速率 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	夜间平均 土壤呼吸速率 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	日平均土壤 呼吸速率 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	日较差 (日间均值- 夜间均值)	日变化幅度 (峰值/谷值)
5	2.90	11:00–13:00	1.21	3:00–5:00	2.23	1.32	1.78	0.91	2.40
6	4.00	11:00–13:00	2.01	3:00–5:00	3.49	2.51	3.00	0.98	1.99
7	4.90	11:00–13:00	2.70	5:00–7:00	4.21	2.99	3.6	1.23	1.81
8	5.17	11:00–13:00	2.69	1:00–3:00	4.46	3.24	3.85	1.22	1.92
9	2.96	11:00–13:00	1.17	23:00–1:00	2.43	1.36	1.89	1.07	2.53
10	2.05	11:00–13:00	1.25	3:00–5:00	1.71	1.30	1.51	0.40	1.64

将每次测定的数据利用 Excel 进行数据整理, 并使用 SigmaPlot 10.0 分析并作图, 应用 SPSS 11.0 统计软件分析土壤呼吸作用与各影响因子之间的关系。

2 结果与分析

2.1 土壤呼吸作用日动态变化

从图 1 可见, 5—10 月芦苇群落土壤呼吸作用日动态具有一定的波动性, 特别是在 5 和 9 月, 日变化幅度(峰值/谷值)分别为 2.40 和 2.53, 为 6 个月中最大的, 波动性最小的为 10 月, 日变化幅度为 1.64。同时 10 月的日较差(日间均值-夜间均值)也是 6 个月中最小的, 仅为 0.4, 而 5—9 月 5 个月之间的日较差相差不大, 但与 10 月差异较大。说明 10 月份土壤呼吸作用变的最弱, 且昼夜差异不大。土壤呼吸作用最旺盛的月份为 7 和 8 月, 均值分别为 3.6 和 3.85 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。8 月的 11:00—13:00 出现 4 个月内土壤呼吸速率的最高值 5.17 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 是 6 个月土壤呼吸速率最低值 1.17 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的 4.42 倍。

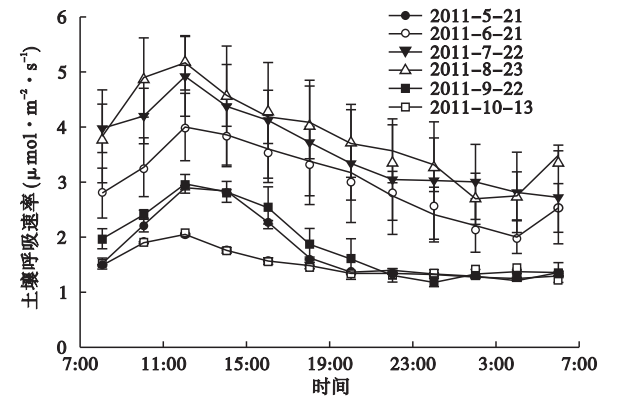


图 1 芦苇群落土壤呼吸日变化
Fig.1 Diurnal variation of soil respiration of *Phragmites australis* community

2.2 土壤呼吸季节变化特征

从图 2 可以看出, 芦苇群落的土壤呼吸特征呈明显的单峰曲线变化, 从 5 月初开始, 气温逐步上升, 土壤温度升高, 土壤呼吸作用速率随之增加; 土壤温度在 7 月下旬达到最高值, 之后逐渐下降。同时, 7—8 月为芦苇营养生长高峰期, 芦苇生长逐渐

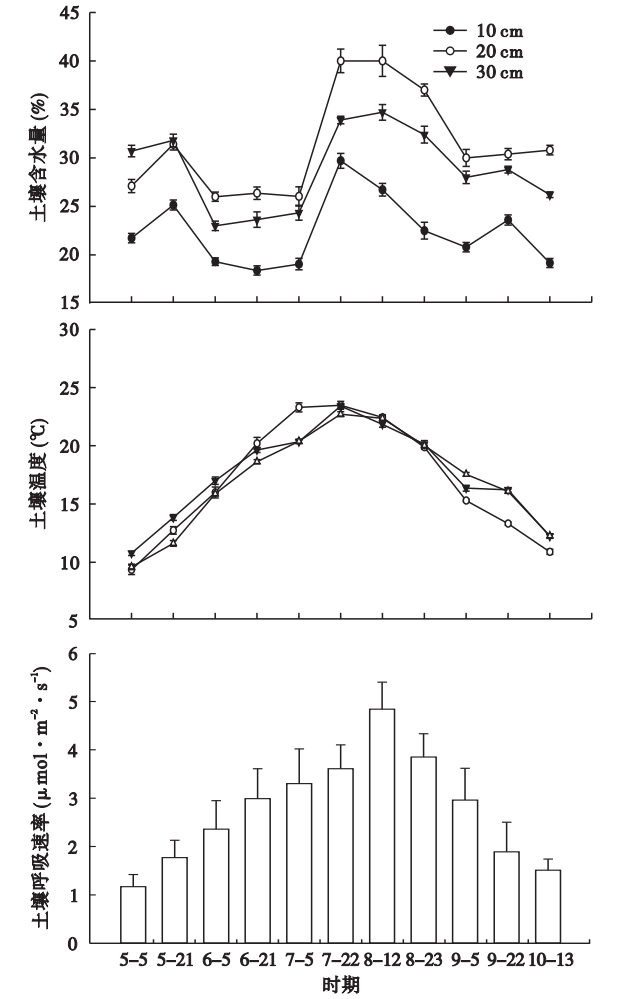


图 2 土壤温度、土壤含水量及土壤呼吸速率季节变化
Fig.2 Seasonal patterns of soil respiration rate, temperature and soil moisture

旺盛,根系呼吸作用加强,也导致土壤呼吸作用速率的上升,在8月上旬土壤呼吸作用达到最高峰,日均值为 $4.8\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。土壤温度在7月下旬后缓慢下降,土壤呼吸在8月初达到峰值后也缓慢下降,9月开始,随着气温的迅速下降,芦苇进入抽穗期,生殖生长代替营养生长,种群密度的增高,种群内部的竞争光能和营养,使得根系呼吸作用迅速减小,微生物的活动减弱,土壤呼吸作用速率也迅速减小,到10月,土壤呼吸作用日均值达到最小值 $1.51\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。其中,7月下旬的监测在雨后3 d进行,土壤含水量较高,限制了土壤中 CO_2 的产生与扩散,因此虽然处于芦苇生长的最旺盛期,但土壤呼吸速率较7月初的变化并不大。

2.3 土壤呼吸作用影响因素

土壤呼吸作用是包括3个生物学过程(植物的根系呼吸作用、土壤微生物的异氧呼吸作用以及土壤动物呼吸作用)和一个非生物学过程(少量的土壤有机物氧化而产生的二氧化碳)的复杂过程(Singh & Gupta,1977)。有研究表明,土壤呼吸速率的变化受温度和水分的共同协调(Davidson *et al.*, 2000),特别是在野外条件下所测定的土壤呼吸实际上是包含空气温度、土壤温度、土壤含水量等众多因子联合作用的结果(谢慧慧等,2010)。对旱生芦苇群落土壤呼吸作用与环境因子的相关分析表明,土壤呼吸作用受多种因素的影响,其中近地表空气温度与土壤温度是主要因素,近地表相对湿度也与土壤呼吸有一定的相关性,土壤各层含水量与土壤呼吸之间并没有发现相关性(表3)。

2.3.1 温度对土壤呼吸的影响 温度是调节和控制陆地生态系统生物地球化学过程的关键因素。在一定程度上,温度条件是影响总土壤呼吸速率最主要的环境因子,但它往往不是唯一的控制因子,它主要是通过通过对土壤中微生物代谢和植物根系生长的影响来调控土壤的呼吸作用(Lou *et al.*, 2003)。从表3可以看出,土壤呼吸作用与近地表温度、土壤0~10cm温度、土壤10~20cm温度以及土壤20~30cm温度均具有显著正相关关系($P<0.01$)。其中与

近地表和土壤表层温度的相关性最大,可能是由于作为微生物分解基质的有机质主要以凋落物形式集中于地表(Chapman & Thurlow, 1996),而微生物活动也主要发生在地表和土壤表层,近地表的温度变化会直接影响到微生物的活性,因而影响到土壤呼吸作用。旱生芦苇的地下茎及根系十分发达,毛细根系深度达250 cm,在30 cm以内的土层地下茎及根系分布密度最大(李修仓等,2008),而根系是土壤呼吸的主体部分,因此,土壤0~30 cm温度变化均对土壤呼吸有一定的影响。

2.3.2 土壤呼吸作用的温度敏感性 土壤呼吸过程对温度变化的敏感性通常用 Q_{10} 来描述, Q_{10} 是温度增加10℃所造成的呼吸速率的改变商。当温度和土壤呼吸之间的关系用一个指数函数拟合时, Q_{10} 就可以通过式(1)中的系数 b 计算出来。陆地生态系统土壤呼吸的 Q_{10} 值变化在1.3~3.3,这取决于生态系统类型及其地理分布(Raich & Schelesinger, 1992)。

为区分该区土壤呼吸速率温度敏感性的时间变异性,本文对5—10月每月的土壤呼吸速率与近地表温度进行指数关系分析。结果表明,温度对土壤呼吸有极显著的影响(表4),土壤呼吸速率均随温度的增加而呈上升趋势(图3),指数模型能够较好地描述它们之间的相关关系(R^2 为0.78~0.93, $P<0.01$), Q_{10} 值为1.21~1.65,均值为1.39,变异系数15.4%。其中7月的 Q_{10} 值最大为1.65,10月最低,说明7月时土壤呼吸作用受温度条件变化影响最大;10月最弱。

从图3可以看出,模型在低温时拟合效果要好于高温时的拟合效果,温度较低时土壤呼吸速率的散点聚积在拟合曲线附近,随着温度的升高,土壤呼吸速率的散点渐渐发散开来。李凌浩等(2000)在研究羊草群落的土壤呼吸速率时发现,温度 $<15\ ^\circ\text{C}$ 时,气温与土壤呼吸之间的相关性非常高。陈全胜等(2003)对同样为半干旱地区的锡林河流域退化草原土壤呼吸作用进行研究时发现,温度较低的情况下土壤呼吸受温度变化的影响较显著。谢慧慧等

表3 环境因子与土壤呼吸速率的相关关系

Table 3 Relationship between soil respiration rate and environmental factors

	空气 温度	土壤温度			空气相对 湿度	土壤含水量		
		0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm		0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm
土壤呼吸速率	0.87**	0.86**	0.77**	0.79**	-0.37*	0.31	0.69	0.39

**在 $P<0.01$ 水平上显著相关; *在 $P<0.05$ 水平上显著相关。

表 4 生长季各月土壤呼吸速率与近地表温度的关系方程及 Q_{10} 值

Table 4 Relation equation of soil respiration rate and air temperature as well as Q_{10} value in growing season

月份	关系方程	相关系数	显著性	Q_{10}
5	$y=0.50e^{0.045x}$	$R^2=0.93$	$P<0.01$	1.57
6	$y=1.37e^{0.024x}$	$R^2=0.87$	$P<0.01$	1.27
7	$y=0.85e^{0.05x}$	$R^2=0.91$	$P<0.01$	1.65
8	$y=2.44e^{0.019x}$	$R^2=0.78$	$P<0.01$	1.21
9	$y=1.12e^{0.035x}$	$R^2=0.97$	$P<0.01$	1.42
10	$y=1.21e^{0.018x}$	$R^2=0.86$	$P<0.01$	1.20

(2010)对黄土高原典型植被土壤呼吸的研究以及邓爱娟等(2009)对华北麦田土壤呼吸的研究也有相似结果。这些结果表明,在温度较低时,温度是影响芦苇群落土壤呼吸速率的主要因素,当温度升高时,土壤中植物的根系和微生物很容易受到其他因素的影响,温度也就不再是唯一的限定因子。

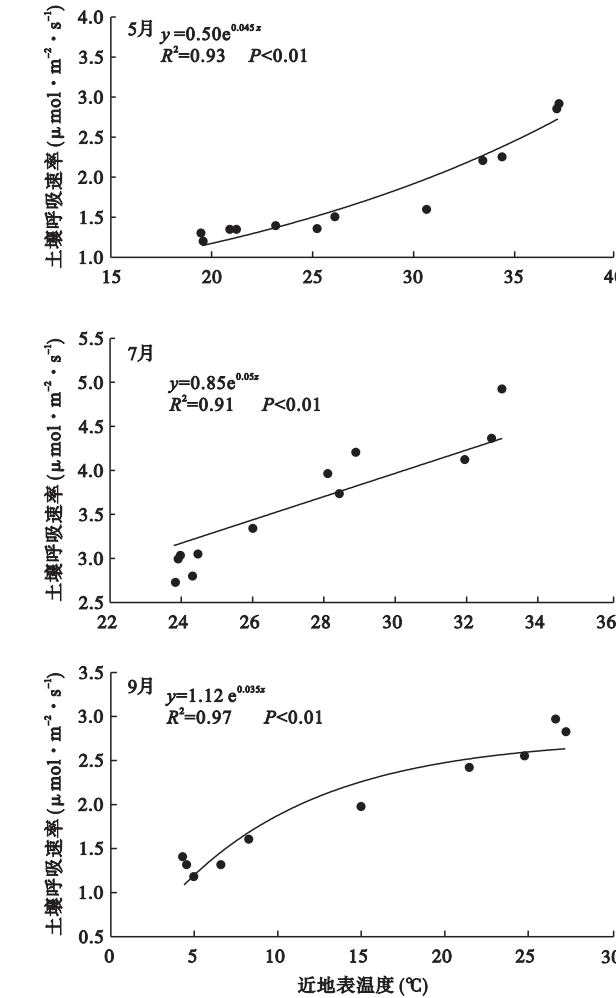
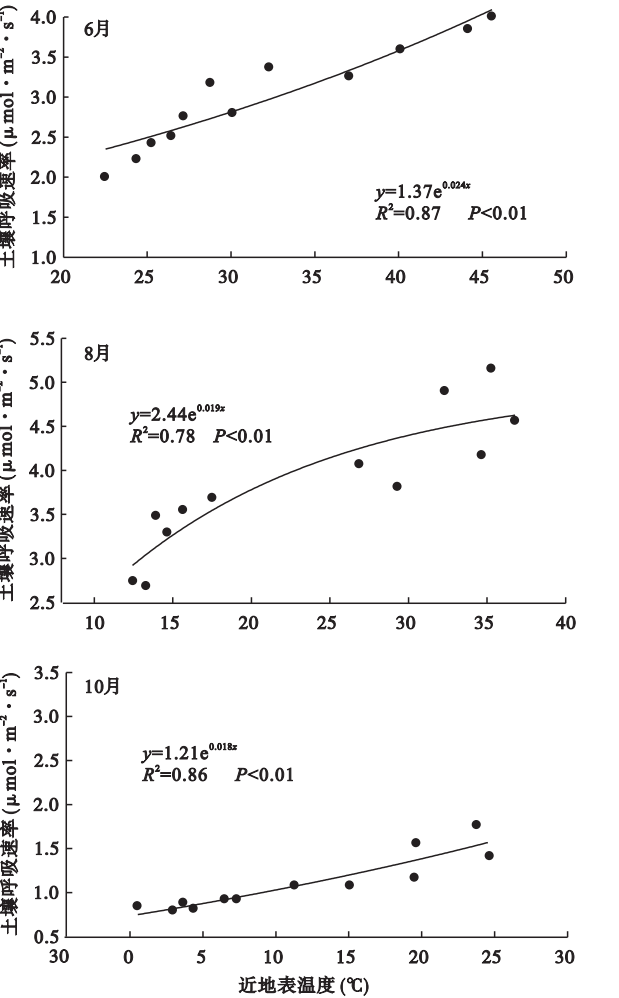


图 3 土壤呼吸速率与近地表温度间关系
Fig. 3 Relationship between soil respiration rate and air temperature

2.3.3 近地表相对湿度对土壤呼吸的影响 研究区域处于半干旱-半湿润气候区,空气中的水分会随气温的升高和降低发生变化,近地表的相对湿度与近地表温度的相关关系为-0.930($P<0.01$),呈显著负相关,即近地表的温度越高,空气的相对湿度也就越低。虽然土壤呼吸与近地表相对湿度具有显著性负相关($P<0.05$),但由图 4 可以看出,近地表空气的相对湿度与土壤呼吸的拟合方程并不能很好地解释土壤呼吸时间变异($R^2=0.30$),可见,空气相对湿度对芦苇土壤呼吸的影响很微弱。

2.3.4 土壤含水量对土壤呼吸的影响 土壤含水量是影响土壤呼吸的另一重要因子,它也影响着土壤中各种各样的反应和过程(陈述悦等,2004);但在本研究中,旱生芦苇群落土壤呼吸作用与土壤各层含水量均无相关关系,表明土壤含水量不是影响芦苇土壤呼吸的主要因素。产生该现象的原因可能



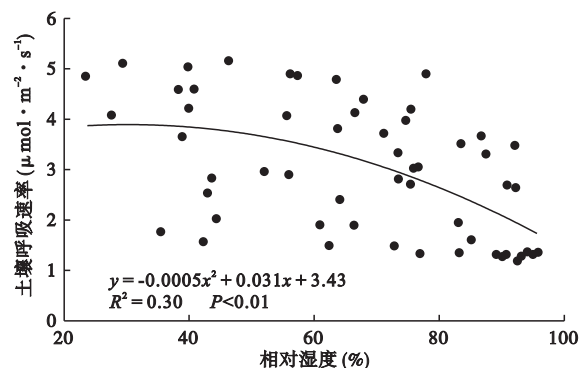


图4 土壤呼吸速率与近地表相对湿度间的关系

Fig. 4 Relationship between soil respiration rate and air humidity near the soil surface

是由于土壤含水量并未限制土壤中植物根系和微生物的生长。Wang 等 (2003) 认为, 只有当土壤水分成为限制植物和微生物生长的胁迫因子时, 才可能取代温度而成为土壤呼吸的主要控制因子。Conant 等 (1998) 也认为, 土壤呼吸作用在干旱季节才受到水分的限制, 即在土壤含水量达到土壤微生物永久性萎蔫点或者超过了田间持水力的情况下, 才会影响土壤 CO_2 的释放。盐化草甸芦苇维持正常生长的土壤体积含水量在 32.0% 以上, 正常生长所允许的最低土壤体积含水量为 25.1% 左右 (谢涛和杨志峰, 2009)。本研究的芦苇群落样地中, 各月的土壤 10 ~ 20 cm 和 20 ~ 30 cm 含水量基本都大于 25.1%, 只有表层土壤的含水量变化幅度较大, 这主要是由于较高的温度使得土壤表层蒸散发强烈, 土壤水分变化明显。同时, 只有 6 月和 7 月初土壤 0 ~ 30 cm 平均体积含水量低于 25.1%, 而这两次较低的土壤含水量也主要是其表层土壤含水量低, 土壤 10 ~ 20 cm 和 20 ~ 30 cm 含水量也均大于 25.1% (图 2)。所以土壤含水量未对土壤呼吸产生影响的原因可能是土壤水分并没有影响到土壤中芦苇根系和微生物的正常生长。张丽萍 (2007) 在干旱区对柽柳-芦苇群落进行土壤呼吸的研究表明, 土壤呼吸作用与土壤含水量没有表现出显著相关性, 说明水分也不是柽柳-芦苇群落土壤呼吸的限制因子。

3 结 论

本文基于对松嫩平原旱生芦苇群落生长季 5—10 月的野外观测资料, 分析了芦苇群落土壤呼吸作用的动态变化及其主要影响因子, 得到以下主要结论:

(1) 旱生芦苇群落土壤呼吸作用具有明显的日

变化, 且呈明显的单峰曲线变化, 呼吸作用峰值出现在 11:00—13:00, 谷值均出现在夜间, 出现时间一般为 3:00—5:00。

(2) 芦苇群落土壤呼吸作用具有明显的季节变化, 与温度的变化趋势趋于一致。土壤呼吸从 5 月开始随温度的升高而上升, 7、8 月为土壤呼吸作用最强烈的月份, 8 月中旬达到峰值, 之后逐渐降低, 10 月土壤呼吸作用降到最弱。

(3) 影响旱生芦苇群落土壤呼吸作用的主导因子是温度, 土壤呼吸与近地表空气温度以及土壤 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 30 cm 温度均有显著相关性 ($P < 0.01$), 其中近地表和土壤表层温度对土壤呼吸的影响最大; 5—10 月土壤呼吸的 Q_{10} 值变化范围为 1.20 ~ 1.65, 均值为 1.39, 变异系数为 15.4%; 近地表空气的相对湿度虽与土壤呼吸有相关关系 ($P < 0.05$), 但对土壤呼吸作用的影响较弱; 由于土壤含水量没能成为芦苇群落正常生长的限制因素, 因而不对芦苇群落的土壤呼吸作用产生影响。

参考文献

- 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 2003. 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. 植物生态学报, 27(2): 202—209.
- 陈述悦, 李 俊, 陆佩玲, 等. 2004. 华北平原麦田土壤呼吸特征. 应用生态学报, 15(9): 1552—1560.
- 邓 伟, 裘善文, 梁正伟. 2006. 中国大安碱地生态试验站区域生态环境背景. 北京: 科学出版社.
- 邓爱娟, 申双和, 张雪松, 等. 2009. 华北平原地区麦田土壤呼吸特征. 生态学杂志, 28(11): 2286—2292.
- 杜紫贤, 曾宏达, 黄向华, 等. 2010. 城市沿江芦苇湿地土壤呼吸动态及影响因子分析. 亚热带资源与环境学报, (3): 49—55.
- 李凌浩, 王其兵, 白永飞, 等. 2000. 锡林河流域羊草草原群落土壤呼吸及其影响因子的研究. 植物生态学报, 24(6): 680—686.
- 李修仓, 胡顺军, 李岳坦, 等. 2008. 干旱区旱生芦苇根系分布及土壤水分动态. 草业学报, 17(2): 97—101.
- 刘兴土. 2001. 松嫩平原退化土地整治与农业发展. 北京: 科学出版社.
- 石 冰. 2010. 崇明东滩围垦芦苇生长和繁殖对大气温度升高的响应 (硕士学位论文). 上海: 华东师范大学.
- 谢 涛, 杨志峰. 2009. 黄河三角洲芦苇湿地土壤水分安全阈值. 水科学进展, 20(5): 683—688.
- 谢慧慧, 樊 军, 齐丽彬, 等. 2010. 黄土高原水蚀风蚀交错区典型植被下土壤呼吸季节变化特征与影响因素. 环境科学, 30(12): 2996—3003.
- 谢艳兵, 庆 宇, 周 莉, 等. 2006. 盘锦湿地芦苇群落土壤呼吸作用动态及其影响因子分析. 气象与环境学报, 28(4): 53—58.

- 张丽萍. 2007. 准噶尔盆地西北缘荒漠植物群落土壤呼吸特征及其影响因子分析(硕士学位论文). 乌鲁木齐: 新疆农业大学.
- 郑聚锋, 张旭辉, 潘根兴, 等. 2006. 水稻土基底呼吸与 CO_2 排放强度的日动态及长期不同施肥下的变化. 植物营养与肥料学报, **12**(4): 485–494.
- Bouwman AF, Germon JC. 1998. Introduction. *Biology and Fertility of Soils*, **27**: 219.
- Chapman SJ, Thurlow M. 1996. The influence of climate on CO_2 and CH_4 emission from organic soils. *Agricultural and Forest Meteorology*, **79**: 205–217.
- Conant RT, Klopatek JM, Malin RC, *et al.* 1998. Carbon pools and fluxes along an environmental gradient in Northern America. *Biogeochemistry*, **43**: 43–61.
- Davidson EA, Verchot L V, Cattaneo JH, *et al.* 2000. Effects of soil water content on soil respiration in forest and cattle pastures of eastern Amazonia. *Biogeochemistry*, **48**: 53–69.
- Kucera CL, Kirkham D. 1971. Soil respiration studies in tall-grass prairie in Missouri. *Ecology*, **52**: 912–915.
- Lou YS, Li ZP, Zhang TL. 2003. Carbon dioxide flux in a subtropical agricultural soil of China. *Water, Air and Soil Pollution*, **149**: 281–293.
- Norman JM, Garcia R, Verma SB. 1992. Soil surface CO_2 fluxes and the carbon budget of a grassland. *Journal of Geophysical Research*, **97**: 18845–18853.
- Piao SL, Ciais P, Friedlingstein P, *et al.* 2008. Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming. *Nature*, **451**: 49–52.
- Raich JW, Potter CS. 1995. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biogeochemical Cycles*, **9**: 23–36.
- Raich JW, Schelesinger WH. 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, **44B**: 81–99.
- Singh JS, Gupta SR. 1977. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. *The Botanical Review*, **43**: 449–528.
- Trumbore S. 2006. Carbon respired by terrestrial ecosystems: Recent progress and challenges. *Global Change Biology*, **12**: 141–153.
- van Straaten O, Veldkamp E, Köhler M, *et al.* 2010. Spatial and temporal effects of drought on soil CO_2 efflux in a cacao agroforestry system in Sulawesi, Indonesia. *Biogeosciences*, **7**: 1223–1235.
- Wang YS, Hu YQ, Ji BM, *et al.* 2003. An investigation on the relationship between emission/uptake of greenhouse gases and environmental factors in semiarid grassland. *Advances in Atmospheric Sciences*, **20**: 119–127.

作者简介 王 铭,女,1986年生,博士研究生,主要研究方向为盐碱地生态学。E-mail: wangming@neigae.ac.cn

责任编辑 王 伟
