

# 松嫩平原西部草甸草原典型植物群落 土壤呼吸动态及影响因素\*

王 铭<sup>1,2</sup> 刘兴土<sup>1</sup> 李秀军<sup>1\*\*</sup> 张继涛<sup>1</sup> 王国栋<sup>1,2</sup> 鲁新蕊<sup>1</sup> 李晓宇<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102; <sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要** 以松嫩平原西部草甸草原中典型植物虎尾草、碱茅、芦苇和羊草群落为对象,分析了4种植被群落土壤呼吸速率日动态和季节动态及其影响因素,以及土壤盐碱度与土壤呼吸碳排放量的关系.结果表明:4种植物群落的土壤呼吸速率日变化均呈明显的单峰曲线,峰值出现在11:00—15:00,而谷值大多出现在21:00—1:00或3:00—5:00;4种植被群落土壤呼吸速率的季节变化趋势一致,7、8月的土壤呼吸速率( $3.21 \sim 4.84 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )最高,10月最低( $0.46 \sim 1.51 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ );各群落土壤呼吸速率与土壤和近地表大气温度之间呈极显著相关关系,其中,虎尾草群落的土壤呼吸速率与土壤表层含水量极显著相关,芦苇和羊草群落土壤呼吸速率与近地表的相对湿度显著相关.土壤盐分含量明显抑制了土壤CO<sub>2</sub>排放量,土壤pH、电导率和土壤交换性钠可以解释该草甸草原土壤呼吸空间变异的87%~91%.

**关键词** 植被群落 土壤呼吸速率 CO<sub>2</sub> 影响因子 松嫩平原草甸草原

**文章编号** 1001-9332(2014)01-0045-08 **中图分类号** Q948; S154.1 **文献标识码** A

**Soil respiration dynamics and its controlling factors of typical vegetation communities on meadow steppes in the western Songnen Plain.** WANG Ming<sup>1,2</sup>, LIU Xing-tu<sup>1</sup>, LI Xiu-jun<sup>1</sup>, ZHANG Ji-tao<sup>1</sup>, WANG Guo-dong<sup>1,2</sup>, LU Xin-rui<sup>1</sup>, LI Xiao-yu<sup>1</sup> (<sup>1</sup>Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China; <sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2014, 25(1): 45-52.

**Abstract:** In order to accurately explore the soil respiration dynamics and its controlling factors of typical vegetation types in the western Songnen Plain, soil respiration rates of *Chloris virgata*, *Puccinellia distans*, *Phragmites australis* and *Leymus chinensis* communities were measured. The results showed that the diurnal curves of soil respiration rates of the four vegetation communities had simple peak values, which appeared at 11:00-15:00, and the valley values occurred at 21:00-1:00 or 3:00-5:00. The seasonal dynamic patterns of their soil respiration rates were similar, with the maximum ( $3.21-4.84 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) occurring in July and August and the minimum ( $0.46-1.51 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) in October. The soil respiration rates of the four vegetation communities had significant exponential correlations with ambient air temperature and soil temperature. Soil moisture, however, only played an important role in affecting the soil respiration rate of *C. virgata* community while air humidity near the soil surface was significantly correlated with the soil respiration rates of *P. australis* and *L. chinensis* communities. The soil salt contents seriously constrained the CO<sub>2</sub> dioxide emission, and the soil pH, electrical conductivity (EC), exchangeable sodium percentage (ESP) could explain 87%-91% spatial variations of the soil respiration rate.

**Key words:** vegetation community; soil respiration; CO<sub>2</sub>; controlling factor; meadow steppes in Songnen Plain.

\* 国家重点基础研究发展计划项目(2012CB956103)和公益性行业(农业)科研专项(201303095-8)资助.

\*\* 通讯作者. E-mail: lixiujun@neigae.ac.cn

2013-03-05 收稿, 2013-10-29 接受.

随着全球气候变化的加剧,CO<sub>2</sub>作为一种重要的温室气体,其源、汇及通量的研究日益得到重视<sup>[1]</sup>.土壤作为一个巨大的碳库,是大气CO<sub>2</sub>重要的源或汇,其轻微的变化将导致大气中CO<sub>2</sub>浓度的明显改变.开展土壤中CO<sub>2</sub>释放的研究,对于估算未来大气中CO<sub>2</sub>浓度及全球气候变化均具有重要的意义<sup>[2-3]</sup>.

研究表明,土壤呼吸作用不仅是由气候条件决定的,不同生物群区的土壤呼吸速率有着较大的差异<sup>[4-5]</sup>,而且在同一气候区内相邻的不同物种群落间的土壤呼吸速率也存在很大变异<sup>[6]</sup>.不同植被类型的差异在一定程度上反映了土壤温度、水分等环境要素在时空上的分异,而这些环境要素是影响土壤呼吸速率变化范围和季节动态的重要因子<sup>[5]</sup>.因此,探明同一气候区域不同植被类型土壤呼吸速率的变化范围、季节动态及其影响因子,可为该区域土壤的碳收支和不同时间尺度植被的碳源或汇作用的准确预测提供一定的参考依据. Conant 等<sup>[7]</sup>和 Maestre 等<sup>[8]</sup>研究发现,在半干旱区,植被类型、植被覆盖度、土壤特性的小尺度空间变异对土壤呼吸速率有着显著影响.目前关于半干旱-干旱区草原植被群落土壤呼吸速率的研究主要集中在内蒙古锡林河流域<sup>[5,9]</sup>、青藏高原<sup>[10-11]</sup>、新疆艾比湖地区及准噶尔盆地边缘地区<sup>[12-13]</sup>,而对我国东北地区草甸草原不同群落土壤呼吸速率的系统研究还较为少见.

松嫩平原是世界三大盐碱化土壤分布区之一,其西部的盐碱化土地面积达 $3.73 \times 10^6 \text{ hm}^2$ <sup>[14]</sup>.盐生草甸草原是松嫩平原西部草原的主要类型,由于微地形和土壤水分状况的差异,土壤的盐碱化程度也有较明显的差异,使得草甸草原的植被分布具有明显的非地带性<sup>[15]</sup>.为了探明该区域不同植被类型土壤呼吸速率的时间变异模式以及该区域盐碱化土壤碳排放特征,本文基于2011年5—10月盐生草甸草原天然植被群落不同时期土壤呼吸速率动态和环境

因子的观测资料,分析其土壤呼吸速率的日、季节变化及其主要影响因素,旨在明确土壤性质对土壤碳排放量的影响,为各植被群落碳收支的动态模拟和植被恢复重建提供基础数据.

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区域设置在中国科学院大安盐碱地生态试验站,地处松嫩平原西部的洮儿河流域下游(45°35'58"—45°36'28" N, 123°50'27"—123°51'31" E),海拔120~160 m.该地区系半干旱-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.年均降水量410 mm,年日照时数3014 h,年均气温4.3℃,日均温 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温2921.3℃,无霜期137 d<sup>[16]</sup>.研究样地的土壤类型为中度至重度盐碱化土壤,土壤的基本理化性质见表1.主要植被类型:虎尾草(*Chloris virgata*)、碱茅(*Puccinellia distans*)、芦苇(*Phragmites australis*)和羊草(*Leymus chinensis*)群落均为自然野生植被群落,其中芦苇群落伴生种为长裂苦苣菜(*Sonchus brachyotus*)、刺儿菜(*Cirsium setosum*)、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** 样地设在中国科学院大安盐碱地生态试验站植被封育区内,选取分布均匀的天然羊草、虎尾草、碱茅和芦苇4个植物群落,在每个样地随机选取3个重复点依次监测,每两个重复点之间的距离 $\geq 20 \text{ m}$ (图1).测定日期为2011年生长季(5月初至10月中旬).监测前,在每个监测点内画出直径为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.采用Li-6400便携式土壤呼吸速率监测系统(IRGA; Li-6400-09; Li-Cor Inc., Lincoln, NE)测定土壤呼吸速率.监测时提前1 d将测定基座(直径10 cm、高5 cm的聚氯乙烯圆柱体)嵌入土壤中约2 cm,基座面积为 $78.5 \text{ cm}^2$ .经

表1 样地土壤基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil at study sites

样地 Site	有机碳 Soil organic carbon ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	全氮 Total nitrogen ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	全磷 Total phosphorus ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	电导率 Electrical conductivity ( $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	pH (水土比 1:5)	交换性钠 Exchangeable sodium percentage (%)	阳离子交换量 Cation exchange capacity ( $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	钠吸附比 Sodium adsorption ratio
Cv	11.5±1.6	0.7±0.1	54.7±5.5	1.1±0.3	10.2±0.7	74.1±9.2	22.7±3.5	8.1±0.7
Pd	7.4±0.3	0.6±0.1	70.3±7.6	1.3±0.3	10.3±0.8	71.3±6.5	26.7±2.7	9.3±0.8
Pa	15.8±1.8	1.0±0.1	81.8±7.0	0.3±0.1	8.2±0.5	24.8±2.8	26.0±2.3	2.3±0.8
Lc	12.8±1.9	0.5±0.1	73.6±4.4	0.7±0.1	9.4±0.7	52.8±5.3	24.5±1.8	5.8±0.8

Cv: 虎尾草群落 *Chloris virgata* community; Pd: 碱茅群落 *Puccinellia distans* community; Pa: 芦苇群落 *Phragmites australis* community; Lc: 羊草群落 *Leymus chinensis* community. 下同 The same below.

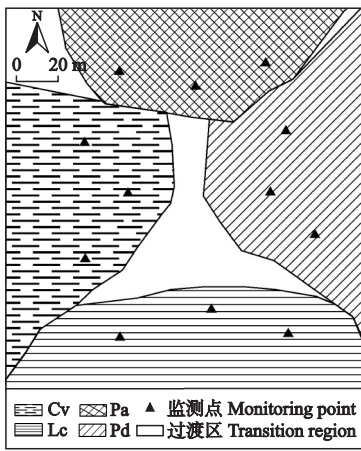


图1 监测区内植被群落的分布

Fig. 1 Distribution of four vegetation communities in the field.

Cv: 虎尾草群落 *Chloris virgata* community; Pd: 碱茅群落 *Puccinellia distans* community; Pa: 芦苇群落 *Phragmites australis* community; Lc: 羊草 *Leymus chinensis* community. 下同 The same below.

过 24 h 的平衡后,土壤呼吸速率恢复到基座放置前的水平,避免因安置气室对土壤的扰动造成短期内土壤呼吸速率的波动. 每个测点重复测定 3 次,每次测定时间为 1~3 min. 每个样地每月进行 1 次日变化观测,观测时间为 7:00 到次日 7:00,日观测频度为每 2 h 测定 1 次. 另外每月选取一日进行土壤呼吸速率季节变化的二次监测,监测时间为 7:00—10:00,该时间段内一般出现土壤呼吸速率的日均值<sup>[17]</sup>,根据每月的日变化均值出现的时间选取该段时间内土壤的日均值. 取该日均值与土壤呼吸速率日变化的平均值,表示该月土壤呼吸速率的季节性变化.

**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(44008; Yellow Spring)同步测量近地表、10 cm、20 cm 和 30 cm 的土壤温度. 由于土壤含水量在一天之内变化幅度不大,每个监测日仅测一次土壤 0~10 cm 含水量,采用铝盒法测土壤质量含水量,同时使用环刀法挖取土壤剖面,测定土壤容重,计算土壤体积含水量. 近地表空气相对湿度由 Li-6400 土壤呼吸速率测定系统对土壤呼吸速率进行同步监测. 由于土壤性质在短时间内变化不大,分别在 2011 年 7 月对土壤 0~10、10~20 和 20~30 cm 层采样,于实验室内自然风干混匀后磨碎过 1 mm 筛备用. 电导率(EC)采用 DDS-307 型电导率仪(上海精密仪器厂)测定, pH 用 PHS-3B 型 pH 计(上海雷磁科学仪器厂)测定. 使用重铬酸钾氧化法测定土壤有机碳(SOC),土壤阳离子交换量(CEC)采用乙酸铵法测定,土壤交换性钠(ESP)采用乙酸

铵-氢氧化铵交换-火焰光度法测定,采用 EDTA 络合滴定法测定土壤可溶性  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  总量,计算土壤钠吸附比(SAR)<sup>[18]</sup>. 另一部分风干土样磨碎过 0.149 mm 筛,用元素分析仪(Thermo Finnigan, Italy)测定土壤全氮(N)和全磷(P).

### 1.3 数据处理

利用 Excel 和 SPSS 11.0 统计软件对数据进行整理,使用 Sigmaplot 10.0 进行统计分析并作图,采用 Pearson 相关模型分析土壤呼吸速率与环境因子的关系. 用方程  $R_s = ae^{bT}$  表示温度(T)与土壤呼吸速率( $R_s$ )的关系. 采用一般线性模型分析土壤呼吸速率与土壤含水量、土壤 pH、EC、ESP 的关系. 显著性水平设定为  $\alpha = 0.05$ .

## 2 结果与分析

### 2.1 4 种植被群落土壤呼吸速率的日动态

由图 2 可以看出,4 种植被群落各月的土壤呼吸速率日变化均表现为明显的单峰曲线. 从 7:00 开始,随着温度的升高,土壤呼吸速率增强,在 11:00—15:00 土壤呼吸速率达到日峰值,之后,随着温度的下降,土壤呼吸速率也下降,谷值出现 21:00—1:00 或 3:00—5:00. 4 种植被群落土壤呼吸速率在不同月份峰谷值出现的时间不同. 虎尾草、碱茅和羊草种群土壤呼吸速率的日峰值均出现在 7 月,分别为  $5.61$ 、 $4.25$  和  $4.81 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,芦苇峰值出现在 8 月,为  $5.17 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 4 种群落土壤呼吸速率日谷值均出现在 10 月,虎尾草、碱茅、芦苇和羊草群落土壤呼吸速率的最低值分别为  $0.01$ 、 $0.01$ 、 $1.17$  和  $0.37 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ .

### 2.2 4 种植被群落土壤呼吸速率的季节动态

4 种植被群落季节动态与土壤温度的变化趋势一致(图 3). 从 5 月初开始,随着土壤温度逐渐升高,土壤呼吸速率增加;虎尾草、碱茅和羊草群落均在 7 月达到土壤呼吸速率的全年最大值,分别为  $4.02$ 、 $3.21$  和  $3.90 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,芦苇群落土壤呼吸速率在 8 月最强,达  $4.84 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . 8 月后期随着气温的下降,土壤呼吸速率迅速减小,到 10 月,土壤呼吸速率日均值达到最小值,分别为  $0.46$ 、 $0.64$ 、 $1.51$  和  $0.74 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . 整个生长季内芦苇群落的土壤呼吸速率最强,平均值为  $2.75 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,其次是羊草群落,为  $2.38 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,碱茅群落与虎尾草群落的呼吸速率较弱,分别为  $1.52$  和  $1.42 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ .

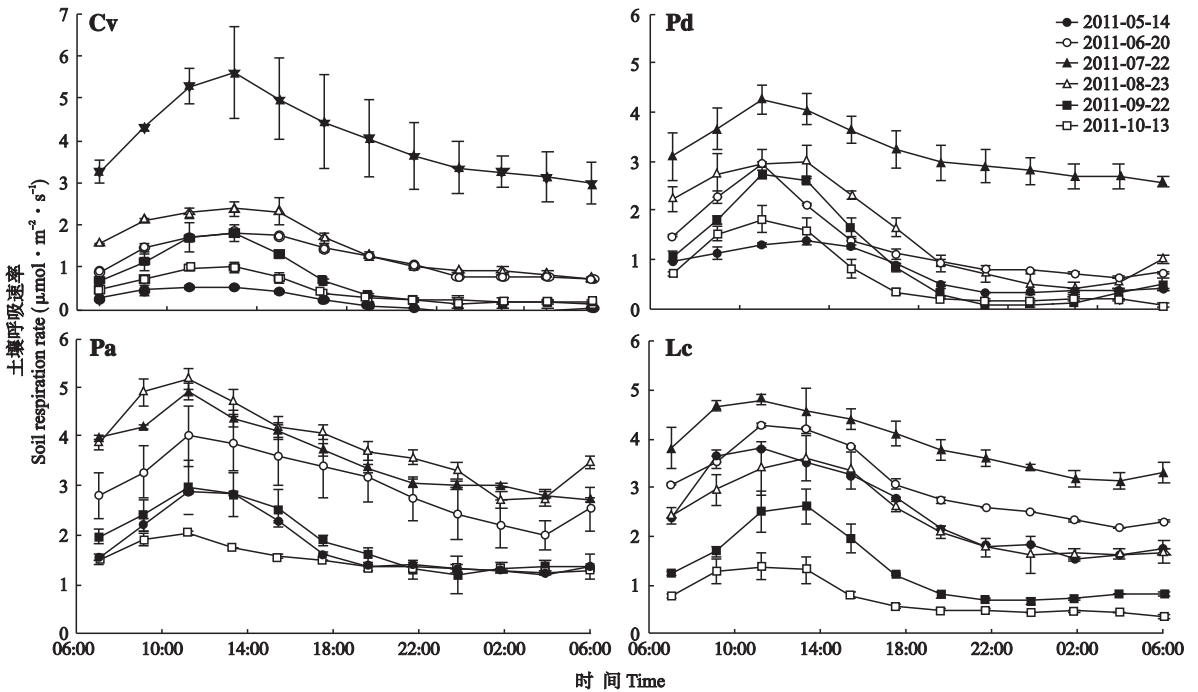


图2 生长季各植被群落土壤呼吸速率的日变化

Fig. 2 Diurnal patterns of soil respiration rates of four vegetation communities during the growing season (mean±SE).

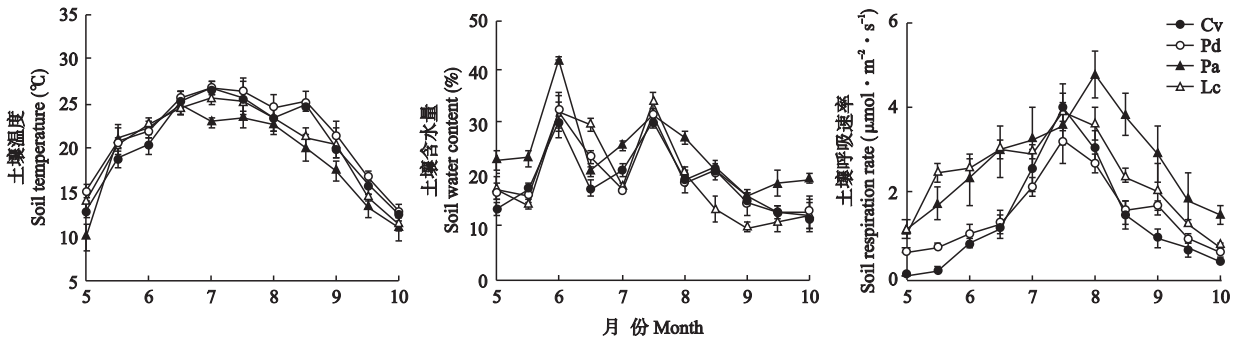


图3 4种植被群落土壤温度、土壤水分、土壤呼吸速率的季节动态

Fig. 3 Seasonal variations of soil temperature, soil water content and soil respiration rate at four community sites during the growing season (mean±SE).

### 2.3 4种植被群落土壤呼吸速率与环境因子的相关性分析

将4种植被群落土壤呼吸速率与各环境因子进行相关分析(表2),结果表明,4种群落土壤呼吸速

率与温度因子均极显著正相关,但近地表空气温度和土壤10 cm 温度对土壤呼吸速率的影响高于土壤20 和30 cm 温度. 指数回归方程可较好地反映土壤呼吸速率与近地表及土壤10 cm 温度之间的关系

表2 4种植被群落土壤呼吸速率与环境因子间的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between soil respiration rate of four vegetation communities and environmental factors

样地 Site	近地表气温 Near-surface air temperature	土壤温度 Soil temperature			土壤含水量 Soil water content (0 ~ 10 cm)	近地表相对湿度 Near-surface relative air humidity
		10 cm	20 cm	30 cm		
Cv	0.763 **	0.764 **	0.685 **	0.679 **	0.897 **	0.029
Pd	0.907 **	0.742 **	0.900 **	0.625 **	0.142	-0.217
Pa	0.870 **	0.860 **	0.770 **	0.790 **	0.503	-0.370 *
Lc	0.862 **	0.923 **	0.315 *	0.319 *	0.542	-0.709 **

\* P<0.05; \*\* P<0.01.

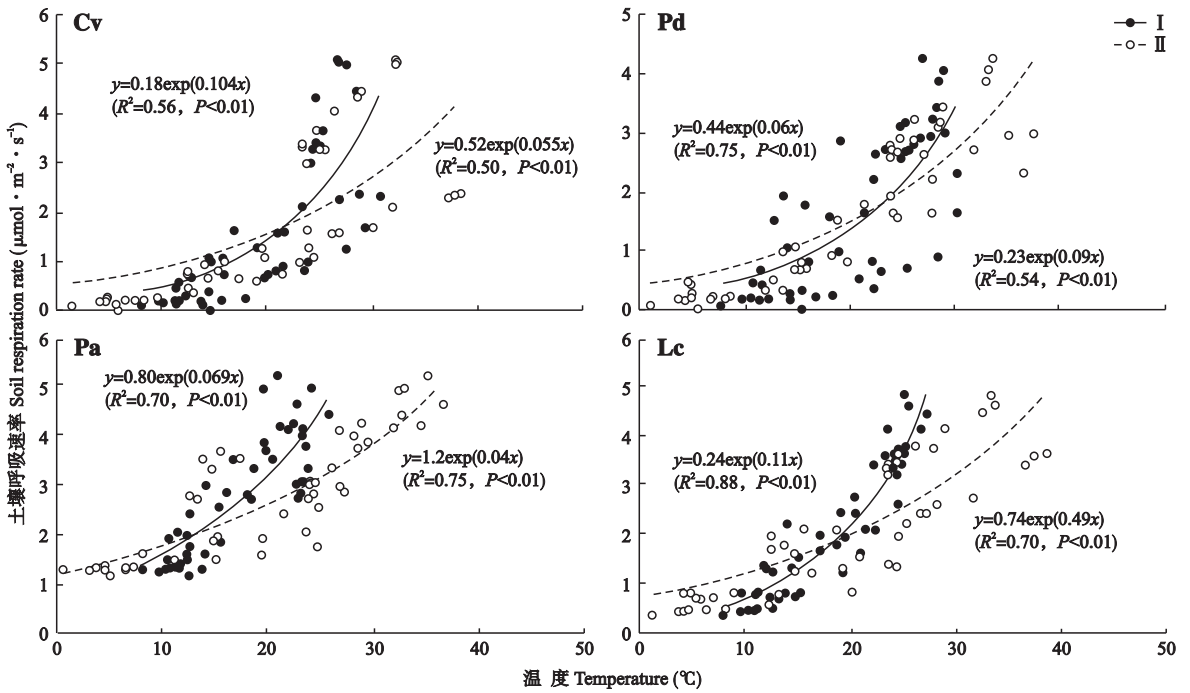


图 4 土壤呼吸速率与近地表空气温度 ( II ) 及土壤 10 cm 温度 ( I ) 的相关关系

Fig. 4 Correlations between soil respiration rate and near-surface air temperature ( II ), soil temperature at 10 cm depth ( I ) of four vegetation communities.

(图 4), 相关系数 ( $R^2$ ) 分别为 0.50 ~ 0.75 和 0.54 ~ 0.88. 4 种植物群落中, 仅虎尾草群落土壤呼吸速率与土壤表层含水量之间存在极显著相关关系, 拟合方程可以解释虎尾草土壤呼吸速率的 90% (图 5); 碱茅、芦苇和羊草群落土壤呼吸速率和土壤含水量之间没有显著相关关系; 芦苇和羊草群落土壤呼吸速率和近地表的空气相对湿度存在负相关关系, 而虎尾草和碱茅群落则无显著相关性.

#### 2.4 土壤性质对土壤碳排放的影响

在不考虑植被类型对土壤呼吸速率影响的条件下, 对 4 种植物群落覆盖下的土壤性质与土壤呼吸速率间的关系进行分析, 得到土壤呼吸速率与土壤交换性钠 (ESP)、电导率 (EC) 和 pH 值均呈显著负

相关 (图 6). 随着土壤 ESP、EC、pH 值的升高, 土壤

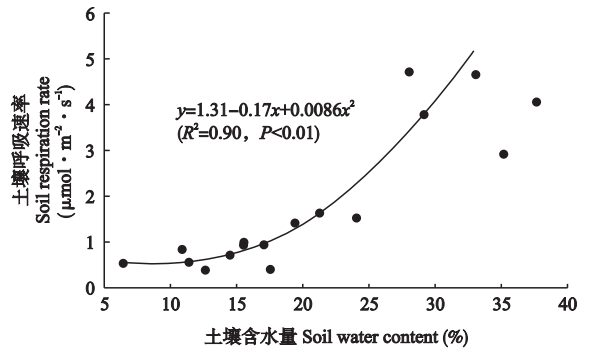


图 5 虎尾草群落土壤呼吸速率与土壤 0 ~ 10 cm 含水量的相关关系

Fig. 5 Correlation between soil respiration rate and soil water content at the 0-10 cm depth of *Chloris virgata* community.

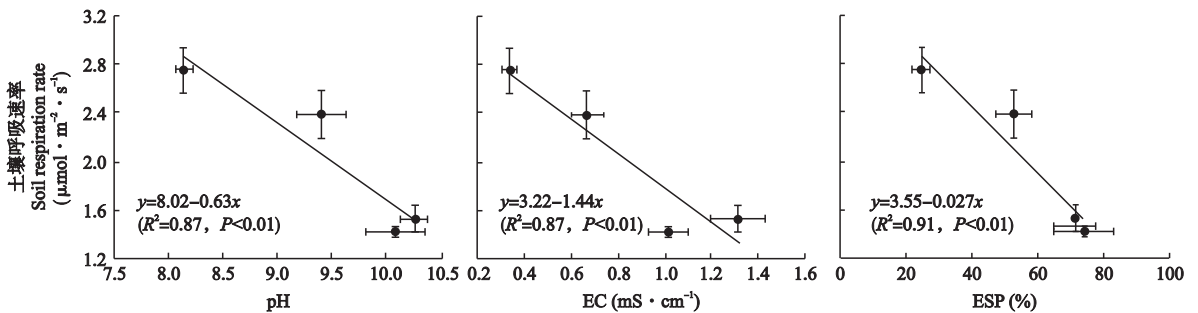


图 6 土壤 pH、电导率 (EC)、交换性钠 (ESP) 与土壤呼吸速率的相关关系

Fig. 6 Relationship between soil respiration rate and soil pH, EC, ESP (mean $\pm$ SE).

呼吸速率逐渐降低,即土壤的盐碱化程度越严重,其通过土壤呼吸向大气释放的 $\text{CO}_2$ 越少.土壤pH、EC、ESP与土壤 $\text{CO}_2$ 释放量的拟合方程可以解释该草地生态系统土壤碳排放量的87%~91%.

### 3 讨论

#### 3.1 土壤呼吸速率的季节变化

植被群落通常具有明显的季节性变化.不同季节中,由于水热因子的变化,植物群落生物量、碳素和分配同化能力、微生物和根系的数量和活性存在显著差异<sup>[19-20]</sup>,使土壤呼吸速率呈现季节变化.本研究中,4种植被群落的土壤呼吸速率在春季(5月)和秋季(9、10月)较弱,夏季(6—8月)较高,且7、8月土壤呼吸速率高于其他月份.土壤呼吸速率季节变化的影响因素主要有两个方面:其一,在植被生长发育过程中,植物生长旺盛的成熟期的土壤呼吸速率高于发育初期和成熟期.夏季7、8月为植物营养和生殖生长最旺盛时期,植物的光合作用强烈,光合产物向土壤的输送加快,土壤呼吸速率达到峰值;而在植物生长的发育期和成熟期,植物体内的碳素主要输送于地上部分和果实,地下部分分配的光合产物较少,呼吸作用较弱<sup>[21]</sup>.其二,不同季节土壤呼吸速率的差异主要与环境因子的季节变化有关<sup>[22]</sup>,土壤温度、水分等的季节变化对土壤中微生物活性将产生一定影响.夏季的水热条件较好,有利于微生物活动和对凋落物的分解,释放较多的 $\text{CO}_2$ <sup>[6]</sup>;而春季和秋冬季的低温和干旱等因素,对土壤微生物活性有一定限制<sup>[23]</sup>.以上两方面共同作用,使植被群落的土壤呼吸速率表现出一定的季相变化.

#### 3.2 温度和水分对土壤呼吸速率的影响

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.温度条件在一定程度上是影响土壤呼吸速率最主要的环境因子.它主要通过影响土壤中微生物的代谢、植物根系生长以及有机质的分解来调控土壤呼吸速率<sup>[24-25]</sup>.本研究中,4种群落5—10月的土壤呼吸速率与近地表空气温度和表层土壤温度表现出较好的相关性( $R^2$ 为0.50~0.88),说明近地表温度是影响土壤呼吸速率的主要因子.有机质作为微生物分解的基质,主要以凋落物形式覆盖于地表,而微生物活动主要发生在地表和土壤表层,因此,近地表温度的变化直接影响微生物活性.深层土壤温度变幅较小,且其变化滞后于地表和气温,对微生物分解活动的影响也相对较小<sup>[26]</sup>.但

由于植被根系主要分布于0~30 cm土层,较深层的温度可以通过植物根系来影响土壤呼吸速率.根系呼吸是土壤呼吸的主体部分.在4种植被群落中,芦苇的毛细根系深达250 cm,且在0~30 cm土层地下茎及根系的分布密度最大<sup>[27]</sup>,因此,土壤30 cm温度的变化对芦苇群落的土壤呼吸速率有一定影响;羊草群落的地下生物量以其发达的根茎为主,而其根茎主要分布在土壤表层0~10 cm,且向水平方向伸展<sup>[28]</sup>,因此羊草群落土壤呼吸速率与土壤0~10 cm温度的相关性最大,而与较深层土壤温度的相关性较小.

本文中,低温时土壤呼吸速率与温度模型的拟合效果好于高温时的拟合效果,当温度 $<15\text{ }^\circ\text{C}$ 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.李凌浩等<sup>[9]</sup>对羊草群落的研究发现,当温度 $<15\text{ }^\circ\text{C}$ 时,气温与土壤呼吸速率的相关性非常高;当温度 $>15\text{ }^\circ\text{C}$ 时,温度对土壤呼吸速率的影响则减弱.陈全胜等<sup>[29]</sup>对锡林河流域退化草地及邓爱娟等<sup>[30]</sup>对华北麦田土壤呼吸速率的研究也有相似结果.产生该现象的原因可能是:在温度低于 $15\text{ }^\circ\text{C}$ 的时间段(6月中旬之前和8月下旬之后),土壤呼吸速率以微生物对土壤有机质的分解为主,所以温度的影响十分突出;而在植物生长旺盛期(6月中旬至8月下旬),植物活根系的呼吸占有较大比重,此时土壤呼吸速率由温度和水分共同控制<sup>[9]</sup>.即在温度较低时,温度是影响植被群落土壤呼吸速率的主要因素;当温度升高时,土壤中的植物根系和微生物很容易受到其他因素的影响,温度不再是唯一的限定因子.

本研究中,土壤含水量与虎尾草群落土壤呼吸速率存在极显著相关,通过水分模型可以解释土壤呼吸速率的90%,表明表层土壤水分是虎尾草群落土壤呼吸的重要影响因素.在同一区域内,不同植被群落中土壤水分对土壤呼吸速率的影响有所差异,可能与不同植被在不同生长阶段的需水量、植被根系的分布深度、土壤的性质,以及水分对土壤中微生物活性的影响等因素有关<sup>[31]</sup>.Wang等<sup>[32]</sup>认为,当土壤水分成为限制植物和微生物生长的胁迫因子时,即土壤水分低于土壤微生物永久性萎蔫点或者超过了田间持水量的情况下,土壤 $\text{CO}_2$ 释放量才会受到影响.碱茅、羊草和芦苇群落均为多年生草本植物,根系发达,生育期贯穿整个生长季,抗旱性较强,对土壤水分的适应性也较强.研究区域处于半干旱半湿润过渡区域,土壤含水量在10%~30%,水分

状况不是影响 3 种植被土壤呼吸速率变异的主要因素。而虎尾草为一年生草本, 生长期较短, 一般在 6 月中下旬萌发, 8 月下旬至 9 月初停止生长<sup>[33]</sup>。在松嫩平原西部, 6—8 月是雨量最充沛的季节, 也是虎尾草生长最旺盛的时期, 此时虎尾草群落的土壤呼吸速率最高; 8 月后期的雨量较少, 虎尾草群落的土壤呼吸速率也迅速下降。因此, 虎尾草的土壤呼吸速率与土壤含水量的拟合效果较好。

### 3.3 土壤性质对土壤呼吸速率的影响

土壤性质的差异往往导致植被类型的不同, 影响植被根系分布、微生物的数量和活性<sup>[34]</sup>。本研究中, 土壤呼吸速率与土壤 pH、EC、ESP 表现出明显的负相关性, 土壤含盐量抑制了土壤 CO<sub>2</sub> 向大气中的释放过程。草甸草原多呈微地形分布, 使得小区域尺度上土壤性质有较大的差异, 导致草甸草原植被的非地带性分布<sup>[16]</sup>。虎尾草和碱茅群落的土壤性质较为接近, 土壤碳排放量均较低; 羊草群落的土壤理化性质得到明显改善, 土壤碳排放量较高; 芦苇群落土壤性质最好, 碳排放量在 4 种植被当中最高。以上分析表明, 土壤的盐碱化程度直接影响植被类型, 间接影响土壤的碳排放量。同时, 较高的土壤盐分直接影响土壤中微生物的数量和活性。张巍和冯玉杰<sup>[35]</sup>研究表明, 随着土壤 pH 和电导率的升高, 草甸草原不同盐碱度土壤中细菌、真菌、放线菌和藻类的数量显著下降。Mavi 等<sup>[36]</sup>研究表明, 较高的土壤盐分可以明显抑制土壤微生物活性, 从而影响土壤的呼吸作用。周洪华等<sup>[37]</sup>研究发现, 土壤电导率和盐分含量与土壤呼吸速率显著相关。因此, 土壤性质可能通过植被类型来影响土壤中微生物的数量及活性, 间接地影响土壤有机碳含量及土壤碳排放量, 导致土壤碳排放量的空间差异。

## 4 结 论

在生长季内, 温度是影响草甸草原典型植被土壤呼吸速率日变化和季节变化的主要驱动因素。4 种植被群落的土壤呼吸速率对水分变异的响应有所差异, 土壤表层含水量仅对虎尾草群落土壤呼吸速率产生极显著影响, 芦苇和羊草群落的土壤呼吸速率与近地表的相对湿度显著相关。土壤盐碱化程度对草甸草原土壤碳排放有重要影响, 土壤 EC、pH、ESP 可能通过影响植被类型以及土壤微生物的数量和活性来抑制土壤 CO<sub>2</sub> 释放, 拟合模型可较好地预测生长季节不同盐碱化程度的土壤碳排放量。松嫩平原西部地域面积较大, 土壤性质差异明显, 植被呈

非地带性分布, 在计算该区域的土壤碳通量时, 需要按照不同的植被类型及土壤性质进行分析。本研究可为准确估算松嫩平原西部草甸草原土壤的碳收支提供一定的数据积累和方法支持。

### 参考文献

- [1] Bouwmann AF, Germon JC. Special issue: Soils and climate change: Introduction. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, **27**: 219
- [2] Trumbore S. Carbon respired by terrestrial ecosystems: Recent progress and challenges. *Global Change Biology*, 2006, **12**: 141–153
- [3] Piao SL, Ciais P, Friedlingstein P, et al. Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming. *Nature*, 2008, **451**: 49–52
- [4] Raich JW, Schlesinger WH. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus B*, 1992, **44**: 81–89
- [5] Chen QS, Wang QB, Han XG, et al. Temporal and spatial variability and controls of soil respiration in a temperate steppe in northern China. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010, **24**: doi: 10.1029/2009GB003538
- [6] Shi Z (施政), Wang J-S (汪家社), He R (何容). Seasonal variation and temperature sensitivity of soil respiration under different plant communities along an elevation gradient in Wuyi Mountains of China. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2008, **19**(11): 2357–2362 (in Chinese)
- [7] Conant RT, Klopatek JM, Malin RC, et al. Carbon pools and fluxes along an environmental gradient in northern Arizona. *Biogeochemistry*, 1998, **43**: 43–61
- [8] Maestre FT, Cortina J. Small-scale spatial variation in soil CO<sub>2</sub> efflux in a Mediterranean semiarid steppe. *Applied Soil Ecology*, 2003, **23**: 199–209
- [9] Li L-H (李凌浩), Wang Q-B (王其兵), Bai Y-F (白永飞). Soil respiration of *Aleymus chinensis* grassland stand in the Xilin River basin as affected by over-grazing and climate. *Acta Phytocologica Sinica (植物生态学报)*, 2000, **24**: 680–686 (in Chinese)
- [10] Gu S, Tang YH, Du MY, et al. Short-term variation of CO<sub>2</sub> flux in relation to environmental controls in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**: 4670–4679
- [11] Lin XW, Zhang ZH, Wang SP, et al. Response of ecosystem respiration to warming and grazing during the growing seasons in the alpine meadow on the Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, **151**: 792–802
- [12] Ye X-J (叶晓俊), Ma Y (马媛), He X-M (何学敏), et al. Research on soil respiration of cotton fields and abandoned lands in Ebinur Lake area. *Xinjiang Agricultural Sciences (新疆农业科学)*, 2011, **48**(9): 1665–1673 (in Chinese)
- [13] Zhang L-H (张丽萍), Chen Y-N (陈亚宁), Li W-H (李卫红), et al. Carbon dioxide emission of soil in the *Halostachys caspica* community and its affecting factors in the Junggar Basin, Xinjiang. *Arid Zone Research (干旱区研究)*, 2007, **24**(6): 854–860 (in Chinese)
- [14] Li X-J (李秀军). The alkali-saline land and agricultur-

- al sustainable development of the western Songnen plain in China. *Scientia Geographica Sinica* (地理科学), 2000, **20**(1): 51–55 (in Chinese)
- [15] Song C-C (宋长春), He Y (何岩), Deng W (邓伟). Ecological Geochemistry of Salinization Soil in Songnen Plain. Beijing: Science Press, 2003 (in Chinese)
- [16] Deng W (邓伟), Qiu S-W (裘善文), Liang Z-W (梁正伟). Background of Regional Eco-environment in Da'an Sodic Land Experiment Station of China. Beijing: Science Press, 2006 (in Chinese)
- [17] Jiang C-S (江长胜), Hao Q-J (郝庆菊), Song C-C (宋长春), *et al.* Effects of marsh reclamation on soil respiration in the Sanjiang Plain. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30**(17): 4539–4548 (in Chinese)
- [18] Lu R-K (鲁如坤). Analytical Method of Soil Agrochemistry. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 1999 (in Chinese)
- [19] Tesarova M, Gloser J. Total CO<sub>2</sub> output from alluvial soils with two types of grassland communities. *Pedobiologia*, 1976, **16**: 364–372
- [20] Li G, Jiang R, Fu Y. Phytomass and the seasonal dynamics of an alpine meadow in Tianzhu. Proceedings of the International Symposium on Grassland Vegetation. Hohhot, 1987: 407–412
- [21] Meng L (孟磊), Ding W-X (丁维新), Cai Z-C (蔡祖聪), *et al.* Storage of soil organic C and soil respiration as effected by long-term quantitative fertilization. *Advance in Earth Sciences* (地球科学进展), 2005, **20**(6): 687–692 (in Chinese)
- [22] Yuste CJ, Janssens IA, Carrara A, *et al.* Interactive effects of temperature and precipitation on soil respiration in a temperate maritime pine forest. *Tree Physiology*, 2003, **23**: 1263–1270
- [23] Yan J-X (严俊霞), Li H-J (李洪建), Tang Y (汤亿), *et al.* Effect of vegetation types on soil respiration characteristics on a smaller scale. *Environmental Science* (环境科学), 2009, **30**(9): 3121–3129 (in Chinese)
- [24] Wan SQ, Luo YQ. Substrate regulation of soil respiration in a tallgrass prairie: Results of a clipping and shading experiment. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, **17**: 1054
- [25] Luo Y, Wan S, Hui D, *et al.* Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie. *Nature*, 2001, **413**: 622–625
- [26] Chapman SJ, Thurlow M. The influence of climate on CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emission from organic soils. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, **79**: 205–217
- [27] Li X-C (李修仓), Hu S-J (胡顺军), Li Y-T (李岳坦), *et al.* Study on the root distribution and soil water dynamics under *Phragmites* arid area. *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), **17**(2): 97–101 (in Chinese)
- [28] Wang Z, Li L, Han XG, *et al.* Do rhizome severing and shoot defoliation affect clonal growth of *Leymus chinensis* at ramet population level? *Acta Oecologica*, 2004, **26**: 255–260
- [29] Chen Q-S (陈全胜), Li L-H (李凌浩), Han X-G (韩兴国), *et al.* Influence of temperature and soil moisture on soil respiration of a degraded steppe community in the Xilin River basin of Inner Mongolia. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2003, **27**(2): 202–209 (in Chinese)
- [30] Deng A-J (邓爱娟), Shen S-H (申双和), Zhang X-S (张雪松), *et al.* Soil respiration of winter wheat fields in North China Plain. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2009, **28**(11): 2286–2292 (in Chinese)
- [31] Davidson EA, Verchot LV, Cattânio JH, *et al.* Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. *Biogeochemistry*, 2000, **48**: 53–69
- [32] Wang YS, Hu YQ, Ji BM, *et al.* An investigation on the relationship between emission/uptake of greenhouse gases and environmental factors in semiarid grassland. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, **20**: 119–127
- [33] Guo J-X (郭继勋), Wang R-D (王若丹), Wang W (王妮). Caloric value and energy allocation of *Chloris virgata* in northeast grassland. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2001, **12**(3): 384–386 (in Chinese)
- [34] Tripathi S, Kumari S, Chakraborty A, *et al.* Microbial biomass and its activities in salt-affected coastal soils. *Biology and Fertility of Soils*, 2006, **42**: 273–277
- [35] Zhang W (张巍), Feng Y-J (冯玉杰). Distribution of soil microorganism and their relations with soil factors of saline-alkaline grasslands in Songnen Plain. *Grassland and Turf* (草地与草坪), 2008, **3**(3): 7–11 (in Chinese)
- [36] Mavi MS, Marschner P, Chittleborough DJ, *et al.* Salinity and sodicity affect soil respiration and dissolved organic matter dynamics differentially in soils varying in texture. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, **45**: 8–13
- [37] Zhou H-H (周洪华), Li W-H (李卫红), Yang Y-H (杨余辉), *et al.* Soil respiration variant and its effecting factors at different land use in arid land. *Scientia Geographica Sinica* (地理科学), 2011, **31**(2): 190–196 (in Chinese)

---

作者简介 王铭,女,1986年生,博士研究生.主要从事草地生态系统土壤碳通量研究. E-mail: wangming@neigae.ac.cn

责任编辑 李凤琴

---