

## 艾比湖湿地典型植物群落入冬期土壤呼吸日变化特征

赵明亮<sup>1,2</sup>, 李艳红<sup>1,2\*</sup>, 李发东<sup>1,2,3</sup>

(1.新疆师范大学地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054; 2.新疆维吾尔自治区重点实验室“新疆干旱区湖泊环境与资源实验室”, 乌鲁木齐 830054; 3.中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:**为研究艾比湖湿地典型植物群落下土壤呼吸变化的规律,采用LI-840A土壤碳通量自动测定仪监测了入冬期芦苇(*Phragmites australis*)和柽柳(*Tamarix ramosissima*)植物群落下的土壤呼吸过程,结果表明:(1)典型植物群落柽柳和芦苇土壤呼吸速率在入冬期日变化呈现不对称单峰曲线,最大值分别出现在11:00和13:00,最小值都出现在凌晨6:00;(2)全天土壤呼吸平均速率芦苇( $0.162 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )小于柽柳( $0.364 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ),但在13:00—17:00时段,芦苇土壤呼吸速率高于柽柳,其余时段相反;芦苇土壤呼吸速率在22:00—10:00左右,柽柳在凌晨4:00—9:00左右均出现负值,表现为碳汇现象,其中芦苇碳吸收高于柽柳;(3)芦苇和柽柳土壤呼吸速率与5 cm处土壤温度存在显著的线性关系, $Q_{10}$ 值分别为2.69和2.04,显示出入冬期艾比湖芦苇植物群落土壤呼吸对土壤温度变化的响应更显著;两种植物群落的土壤呼吸与5 cm处土壤水分关系不显著;芦苇和柽柳土壤呼吸速率与近地表气温存在显著的线性关系, $Q_{10}$ 值分别为1.89和1.64。

**关键词:**土壤呼吸;湿地;艾比湖;土壤温度;土壤含水量;入冬期

中图分类号:S153 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)12-2432-07 doi:10.11654/jaes.2015.12.025

## Diurnal Variation of Soil Respiration in a Typical Plant Community in the Ebinur Lake Wetland During Beginning Winter

ZHAO Ming-liang<sup>1,2</sup>, LI Yan-hong<sup>1,2\*</sup>, LI Fa-dong<sup>1,2,3</sup>

(1.Collegel of Geographic Science and Tourism,Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China; 2.Key Laboratory of Xinjiang Uygur Autonomous Region ,Xinjiang Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Area, Urumqi 830054, China; 3.Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Soil respiration from the surrounding wetland of a lake is a vital component of soil carbon cycle for inland water ecosystems. To date, however, there have been fewer studies on the soil respiration around high salt lakes during beginning of cold winter because of difficulties in field observations. In this study, two intensive field measurements were conducted at a wetland by the Ebinur Lake ( $82^{\circ}36' \sim 82^{\circ}50' \text{E}$ ,  $44^{\circ}30' \sim 45^{\circ}09' \text{N}$ ), located at the Xinjiang Uygur Autonomous Region in the Western China, in the early winter of 2014. A soil carbon flux automatic analyzer (LI-840A) was used to measure soil respiration in two typical plant communities, reed (*Phragmites australis*) and tamarisk (*Tamarix ramosissima*), in an interval of 2 hours for two whole days. At the same time, soil moisture, soil temperature, air humidity, and air temperature were also observed to understand the controlling factors of soil respiration of local ecosystem. Results showed that the peak of soil respiration occurred at 11:00 and 13:00 for tamarisk and reed, respectively, but the minimum value observed at 6:00 for both plants. The daily average of soil respiration rate was lower for the reed community ( $0.162 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) than for the tamarisk community ( $0.364 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ). However, the soil respiration rate for the reed was greater than that for the tamarisk between 13:00—17:00. Negative soil respiration rates were observed for reed between 22:00—10:00 and for tamarisk between 4:00—9:00, implying carbon sinks during these specific periods. Soil respiration rate was significantly linearly correlated with soil temperature at 5 cm depth and air temperature at 5 cm above ground for both reed and tamarisk. The  $Q_{10}$  values for soil and air temperature were 2.69 and 1.89 for reed and 2.04 and 1.64 for

收稿日期:2015-05-10

基金项目:新疆维吾尔自治区重点实验室开放课题(2015KL015);国家自然科学基金项目(41561104);新疆师范大学地理学博士点支撑学科(XJNU-DL-201506)

作者简介:赵明亮(1991—),男,新疆哈密县人,硕士研究生,主要从事干旱区资源开发与规划的研究。E-mail:1547884890@qq.com

\*通信作者:李艳红 E-mail:lyh0704@126.com

tamarisk, respectively, suggesting that the soil respiration for the reed community had a stronger response to soil temperature change than that for the tamarisk community by the Ebinur Lake in the early winter. Soil respiration rate had no linear correlation with soil water content at 5 cm for reed and tamarisk.

**Keywords:** soil respiration; wetland; Ebinur Lake; soil temperature; soil water content; beginning of winter

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>。土壤是陆地生态系统最重要的碳库<sup>[2]</sup>,是大气CO<sub>2</sub>重要的源或汇,其变化可导致大气中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。国内外有关土壤呼吸的研究,主要集中于森林、草地和农田生态系统,研究内容涉及土壤呼吸在不同时间尺度上的动态变化、土壤呼吸与环境因素的关系、土壤呼吸对CO<sub>2</sub>浓度升高及氮沉降的响应等<sup>[3-8]</sup>。全球湿地面积占全球总面积的1%~2%<sup>[9]</sup>,但湿地中碳储量占土壤碳总蓄积量的11%<sup>[10]</sup>,有研究表明,湿地生态系统是大气CO<sub>2</sub>的重要碳汇之一<sup>[11]</sup>。杨建军等<sup>[12]</sup>在秋季的10:00—22:00对艾比湖四种植物群落下的土壤呼吸速率研究表明,土壤呼吸速率基本呈单峰曲线特征;谢静霞等<sup>[13]</sup>对阜康荒漠生态系统土壤呼吸的研究表明,盐生荒漠的土壤CO<sub>2</sub>通量呈双峰型,盐生荒漠夜间的土壤CO<sub>2</sub>通量均为负值;张丽华等<sup>[14]</sup>对准噶尔盆地梭梭群落下的土壤呼吸的研究表明,梭梭植物群落下的土壤呼吸速率与温度相关性显著,与水分相关性不显著。目前,对于干旱区的湿地生态系统土壤呼吸及其影响因素的研究相对很少。在艾比湖,冬季周围湿地将全面封冻,传统方法无法测定土壤呼吸,通常认为可以忽略。然而,随着温度逐渐下降,入冬后数据极其缺乏。

本文以干旱区典型湖泊湿地艾比湖为研究区,选取典型植物群落芦苇与柽柳为研究对象,在入冬期,通过对芦苇与柽柳土壤呼吸速率、土壤温度、土壤湿度、空气温度的监测,分析典型植物群落下的土壤呼吸速率变化特征,并探讨土壤温度、土壤湿度、空气温度对芦苇和柽柳土壤呼吸速率的影响,为揭示艾比湖湿地土壤呼吸特征和固碳及CO<sub>2</sub>减排分析提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于艾比湖湿地自然保护区(82°36'~82°50'E,44°30'~45°09'N),该地区年平均气温6~8℃,极

端最高气温44℃,极端最低气温-33℃,年平均降水量100mm左右,年蒸发量1600mm,气候极端干燥,降水稀少,属典型温带大陆性气候。1972—2011年期间,艾比湖的面积在不断缩小,其值达115.03km<sup>2</sup><sup>[15]</sup>。实验点设在鸟岛管护站,根据样方计算,典型植物群落为芦苇(平均高度为1.31m)和柽柳(平均高度为1.68m),盖度分别为60%~70%和40%~50%;,芦苇表层土壤0~5cm有机质(16.41g·kg<sup>-1</sup>)小于柽柳(21.98g·kg<sup>-1</sup>),含量偏低;pH(9.32)高于柽柳(8.72);水分含量(0.108%)低于柽柳(0.125%);鸟岛站周围盐碱化严重,芦苇表层0~5cm盐分(17.81g·kg<sup>-1</sup>)小于柽柳(18.92g·kg<sup>-1</sup>),根据盐分分级标准<sup>[16]</sup>,鸟岛周围土壤盐化程度为重度盐化;土壤质地多为粉砂。

### 1.2 研究方法 with 数据采集

选取典型植物群落芦苇和柽柳,分别设3个10m×10m的样地,在每个样地内随机选取1个点。安置基座会对土壤呼吸速率产生影响,在样地齐地剪掉地上植物,于24h前埋入1个直径为22cm、内径为19.5cm的聚氯乙烯圆柱体,埋深为5~8cm,上部高出地面2~3cm。在2014年10月28日至11月6日,两次24h利用土壤碳通量测量系统LI-840A测定芦苇和柽柳的土壤呼吸速率日变化,每个监测点重复测定3次,每次测定时间为3min,观测时间为9:00到次日8:00,日观测频度为平均每2h测定1次<sup>[17]</sup>;用土壤温湿度传感器分别测定土壤5cm处温度和湿度,空气温湿度传感器监测地上5cm的空气温湿度;应用SPSS16.0软件进行数据的统计分析,应用Excel 2003软件进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 典型植物群落下土壤呼吸速率日变化

典型植物群落下的土壤呼吸速率日变化特征有所不同,但基本呈不对称的单峰曲线形式(图1)。芦苇土壤呼吸速率为(-0.879±0.0887)~(1.521±0.3661)μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,平均速率为0.162μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>;柽柳土壤呼吸速率为(-0.681±0.2131)~(1.125±0.6434)μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,平均速率为0.364μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>;土壤呼吸平均速率大小顺序为:芦苇<柽柳。芦苇从23:00到

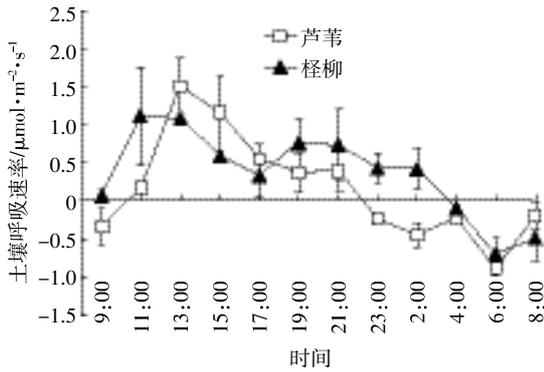


图1 典型植物群落下土壤呼吸速率日变化

Figure 1 Diurnal changes of soil respiration rate under typical plant communities

第2 d 9:00,柽柳区从第2 d 4:00到8:00均为负值,表明此实验时段内土壤吸收空气中的CO<sub>2</sub>,产生碳汇现象;芦苇和柽柳从9:00以后土壤呼吸速率增加,最终分别在13:00和11:00达到全天的最大值(1.521 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>和1.125 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>),此后土壤呼吸速率减小,到次日凌晨6:00达到最小值。

### 2.2 土壤呼吸速率与温度的关系

#### 2.2.1 土壤呼吸与土壤温度的关系

如图2所示,芦苇和柽柳植物群落下的土壤呼吸速率日变化与土壤5 cm处温度的昼夜波动趋势基本相同,且二者具有显著的正相关性,相关系数分别为0.731( $P<0.01$ )和0.671( $P<0.05$ ),其中,最为明显的是日出后随土壤温度升高到最高值后土壤温度曲线的逐渐降低,土壤呼吸速率在与之相应的时段内也表现出相同的趋势;但也存在差异,即土壤呼吸速率最大值的出现早于土壤5 cm处温度,两者间存在明显的时滞现象,芦苇土壤呼吸速率在13:00达到一天中的最大值1.521 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,而土壤5 cm处温度在

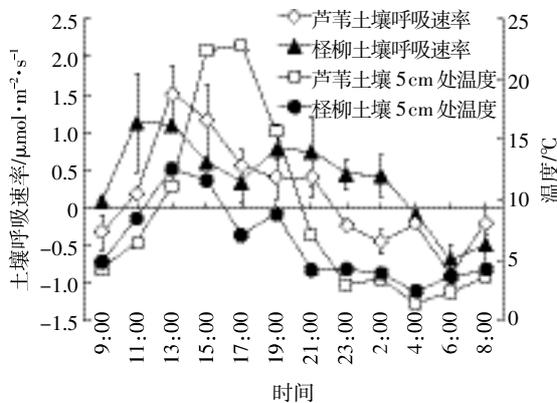


图2 典型植物群落下土壤呼吸速率与土壤温度日变化

Figure 2 Diurnal changes of soil respiration rate and soil temperature under typical plant communities

13:00继续上升,于17:00达到最大值22.83 °C;柽柳土壤呼吸速率在11:00达到最大值1.125 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,而土壤5 cm处温度最大值(19.66 °C)出现在13:00。

对芦苇和柽柳植物群落下的土壤呼吸速率与土壤5 cm处温度进行回归分析,从图3可以发现,二次模型可以较好地反应二者之间的关系。芦苇植物群落的土壤呼吸速率与土壤5 cm温度得出下式:

$$y=0.0659x-0.4123$$

$$R^2=0.5341 \quad (P<0.05)$$

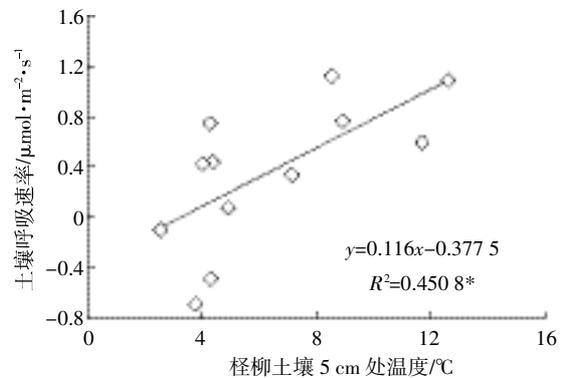
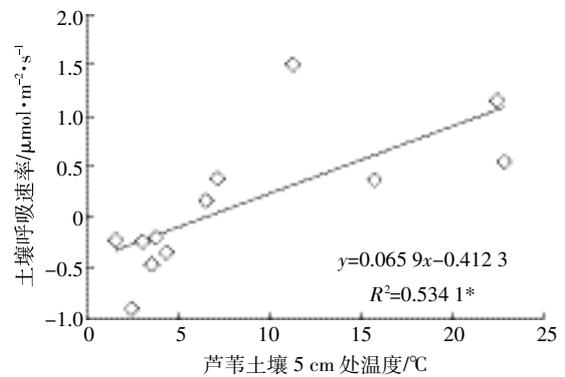
式中: $y$ 为土壤呼吸速率,μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>; $x$ 为土壤5 cm处温度,°C。显著度检验达显著相关,说明土壤温度是影响芦苇植物群落土壤呼吸速率的重要因素。温度敏感性系数 $Q_{10}$ 值,即温度增加10 °C土壤呼吸速率提高的倍数,根据回归方程可以算出,芦苇植物群落下的 $Q_{10}=2.69$ 。

柽柳植物群落的土壤呼吸速率与土壤5 cm温度回归方程为:

$$y=0.116x-0.3775$$

$$R^2=0.4508 \quad (P<0.05)$$

可以得出 $Q_{10}=2.04$ 。



\*表示显著相关( $P=0.05$ )。\* shows significance at 0.05 level

图3 典型植物群落下土壤呼吸速率与土壤温度的关系

Figure 3 Relationship between soil respiration rate and soil temperature under typical plant communities

### 2.2.2 土壤呼吸与空气温度的关系

通过对典型植物群落下的土壤呼吸速率与近地表5 cm空气温度日变化进行比较,由图4可以看出,芦苇植物群落下的近地表空气温度要高于柽柳植物群落;芦苇和柽柳植物群落下的土壤呼吸速率与近地表气温在相应的时段内也表现出相同的趋势;但同中有异,土壤呼吸速率最大值的出现早于近地表气温,两者间存在明显的时滞现象,芦苇的土壤呼吸速率在13:00达到一天中的最大值,而近地表5 cm气温在13:00继续上升,于15:00达到最大值18.13℃;柽柳的土壤呼吸速率在11:00达到最大值,而近地表5 cm气温最大值(9.49℃)出现在13:00。

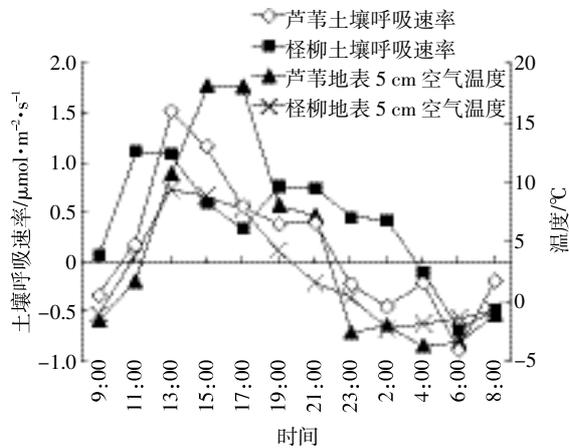
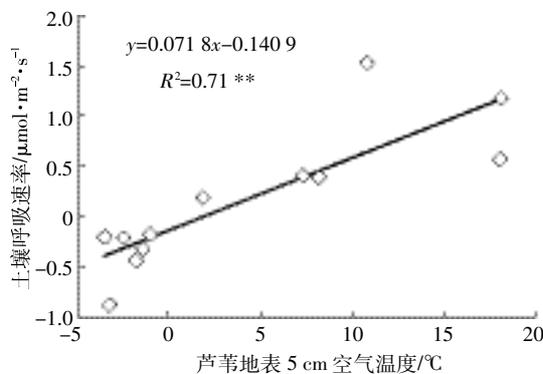


图4 典型植物群落下的土壤呼吸速率与近地表气温日变化  
Figure 4 Diurnal changes of soil respiration rate and air temperature 5 cm above ground under typical plant communities

通过对近地表5 cm处空气温度与芦苇和柽柳植物群落进行相关分析表明,芦苇植物群落的土壤呼吸速率与地上5 cm空气温度表现为极显著的正相关,



相关系数为0.843( $P=0.01$ ),柽柳植物群落的土壤呼吸速率与地上5 cm空气温度表现为显著正相关,相关系数为0.625( $P=0.05$ );对芦苇和柽柳植物群落下的土壤呼吸速率与近地表5 cm处空气温度进行回归分析,从图5可以发现,二次模型可以较好地反应二者之间的关系。芦苇植物群落的土壤呼吸速率与近地表5 cm处空气温度得出下式:

$$y=0.0718x-0.1409$$

$$R^2=0.71 \quad (P<0.01)$$

式中: $y$ 为土壤呼吸速率, $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $x$ 为近地表5 cm处空气温度, $^{\circ}\text{C}$ 。显著度检验达显著相关,说明近地表5 cm处空气温度同样是影响芦苇植物群落土壤呼吸速率的重要因素。根据回归方程可以算出,芦苇植物群落下的 $Q_{10}=1.89$ 。

柽柳植物群落的土壤呼吸速率与土壤5 cm温度回归方程为:

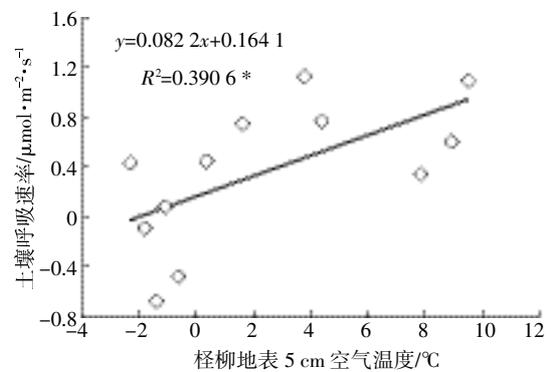
$$y=0.0822x+0.1641$$

$$R^2=0.3906 \quad (P<0.05)$$

可以得出 $Q_{10}=1.64$ 。

### 2.3 土壤呼吸速率与土壤含水量的关系

土壤含水量与土壤呼吸的关系密切,尤其在干旱或半干旱地区当土壤水分成为胁迫因子时可能取代温度而成为土壤呼吸的主要控制因子<sup>[18]</sup>。通过分析典型植物群落下的土壤呼吸速率日变化与5 cm处土壤含水量间的关系可发现(图6),芦苇和柽柳5 cm处土壤含水量均很低,变化范围分别为0.281%~0.329%和0.189%~0.225%。对芦苇和柽柳植物群落下的土壤呼吸速率与5 cm处土壤含水量进行曲线拟合可以发现,二者之间的决定系数 $R^2$ 分别为0.0822、0.0231,均未达到显著水平,这说明在入冬期5 cm处土壤含



\*\*表示极显著相关( $P=0.01$ );\*表示显著相关( $P=0.05$ )  
\*\*shows significance at 0.01 level and \*shows significance at 0.05 level

图5 典型植物群落下土壤呼吸速率与空气温度的关系

Figure 5 Relationship between soil respiration rate and air temperature under typical plant communities

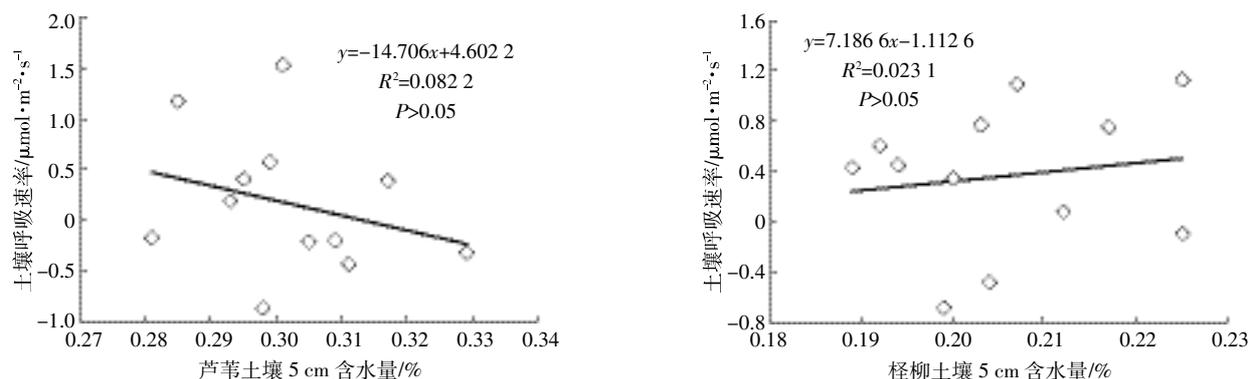


图6 典型植物群落土壤呼吸速率与5 cm处土壤含水量的关系

Figure 6 Relationship between soil respiration rate and soil moisture at 5 cm depth under typical plant communities

水量对土壤呼吸速率的影响较小。

### 3 讨论

#### 3.1 典型植物群落下土壤呼吸速率日变化规律

对土壤呼吸速率日变化研究表明,艾比湖湿地典型植物群落芦苇和柽柳的土壤呼吸速率日变化基本呈不对称的单峰曲线形式,这与杨建军等<sup>[12]</sup>研究艾比湖不同植物群落下的土壤呼吸速率的结果基本一致,其中不同的是本文在夜间监测了土壤呼吸速率,并出现负值。两种植物群落下的土壤呼吸速率在早上9:00左右出现负值,这与Zhang等<sup>[19]</sup>在中国新疆地区对土壤呼吸速率的日变化研究中认为9—11月间,土壤呼吸速率在每天8:00左右出现负值基本一致。进入冬季的艾比湖,早晨温度低,土壤微生物活性和生化反应速率不高,无机过程作用弱,可能导致土壤呼吸速率出现负值。芦苇和柽柳植物群落下的土壤呼吸速率在9:00以后升高,出现正值,说明土壤向外界释放 $\text{CO}_2$ ,柽柳在11:00达到全天的最大值,这与黄湘等<sup>[20]</sup>8月份对塔里木河下游荒漠河岸林中的柽柳植物群落全天最大值出现在16:00不同,可能是由于监测土壤呼吸的时间不同,主要是由于8月份和10月底11月初温度变化不同;芦苇在13:00达到全天的最大值,与王铭等<sup>[21]</sup>对松嫩平原旱生芦苇群落土壤呼吸速率全天最大值出现在12:00相差1 h,这可能是由干旱区相比平原区温差大导致的;夜间,芦苇和柽柳的土壤呼吸速率出现负值,表明此时段内土壤吸收空气中的 $\text{CO}_2$ ,土壤成为碳汇,这与Xie等<sup>[22]</sup>研究发现在中国西北的盐漠地区,土壤呼吸速率在夜间呈负值一致,这种现象可能与自然条件下盐碱化土壤较强的 $\text{CO}_2$ 吸收能力有关,还有研究表明干旱区土壤呼吸速率为负值的情况可能与该地区的低温相关<sup>[23]</sup>。凌

晨6:00出现最小值,与谢继萍等<sup>[24]</sup>对准噶尔盆地南缘梭梭群落春季融雪期土壤呼吸速率(9:00—19:00北京时间)最小值出现在早上9:00不同,可能由于本研究时间段为入冬期,晚上温度比白天低,温度下降到最低后又回升,土壤微生物活性和一系列生化反应速率随温度降低后升高,导致土壤呼吸速率先降低再升高。

#### 3.2 典型植物群落下水热因子对土壤呼吸速率的影响

土壤呼吸是一个复杂的土壤生态过程,其中任何一个呼吸过程的改变都会促使呼吸速率发生变化<sup>[25]</sup>。众多研究表明,温度是影响土壤呼吸的主要因素之一<sup>[19,26-27]</sup>。芦苇和柽柳植物群落下的土壤呼吸速率与土壤5 cm处温度存在显著相关性,且土壤呼吸速率日变化与土壤表层5 cm处温度具有较好的一致性。在13:00—17:00时段,芦苇土壤呼吸速率高于柽柳,这是因为当土壤温度在升高时,芦苇的根系呼吸增强,土壤呼吸速率相对柽柳增加;在13:00—17:00时段外,芦苇土壤呼吸速率低于柽柳,这可能是芦苇植物群落下的有机质含量较低,pH相对高,不利于微生物活动,在温度降低时,根系呼吸下降,而较少的微生物呼吸和碳矿化过程导致了土壤呼吸速率相对柽柳减弱;在此条件下,表层土质疏松,土壤孔隙度大,决定了土壤与大气中的 $\text{CO}_2$ 交换增强,可能产生土壤碳汇现象。基于回归方程得出的芦苇和柽柳与土壤5 cm处温度的 $Q_{10}$ 值分别为2.69和2.04,这说明芦苇植物群落下的温度变化对土壤呼吸速率的影响强于柽柳。近地表空气温度对芦苇和柽柳植物群落下的土壤呼吸速率表现为显著正相关,说明空气温度对芦苇和柽柳植物群落的土壤呼吸速率有显著影响,基于回归方程可得的芦苇和柽柳与5 cm处空气温度的 $Q_{10}$ 值分别为1.89和1.64,可知芦苇植物群落下的空气

温度变化对土壤呼吸速率的影响强于柽柳。土壤呼吸速率与土壤5 cm处含水量相关性不显著,这与杨建军等<sup>[12]</sup>对艾比湖不同植物群落下的土壤呼吸速率与水分显著相关的结果不同,可能是由于当土壤含水量达到土壤微生物永久性萎蔫点或超过了田间持水力的情况下,土壤呼吸速率才会明显地受到土壤水分的影响,如果水分的变化没有超出极端范围,并不足以影响微生物和植物根系的活动,则很难明显地测出水分对土壤呼吸的影响,此时土壤水分的影响很可能被其他因子的影响所掩盖<sup>[30-31]</sup>,由于本试验的研究时间为入冬期,土壤微生物的呼吸、根系的呼吸、动物的呼吸大多停止,对水分的需求大大减弱,这可能也造成土壤含水量在入冬期对土壤呼吸强度影响不明显。在较为干旱的荒漠生态系统,土壤呼吸主要受温度和水分共同作用<sup>[32]</sup>,而在本研究中,土壤温度对芦苇和柽柳植物群落下的土壤呼吸速率的影响大于土壤含水量。

#### 4 结论

(1)艾比湖湿地典型植物群落下的土壤呼吸日变化基本呈不对称的单峰曲线形式,典型植物群落芦苇和柽柳下的土壤呼吸速率日变化范围分别为(-0.879~1.521)、(-0.681~1.125) $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,最大值分别出现在11:00和13:00,最小值都出现在凌晨6:00。

(2)全天土壤呼吸平均速率芦苇(0.162  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )小于柽柳(0.364  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ),芦苇土壤呼吸速率从22:00—10:00左右,柽柳从凌晨4:00—9:00左右均为负值,表明此时段内土壤以某种方式吸收空气中的 $\text{CO}_2$ ,表现为碳汇现象。

(3)芦苇和柽柳土壤呼吸速率与5 cm处土壤温度和地上5 cm空气温度存在显著的线性关系,而与5 cm处土壤含水量相关性不显著,这表明对于干旱区植物而言,温度是影响土壤呼吸速率的一个重要因素,且不同植物群落类型的土壤呼吸对温度的敏感性不同。

#### 参考文献:

- [1] 康永祥,夏国威,刘建军,等. 秦岭小陇山锐齿栎林皆伐迹地土壤呼吸特征[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2):342-350.  
KANG Yong-xiang, XIA Guo-wei, LIU Jian-jun, et al. Soil respiration characteristics in the clear-cutting site of *Quercus diena* var. *acuteserrata* forest in Xiaolong Mountain in Qinling Mountains[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(2):342-350.
- [2] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1):7-20.
- [3] Davidson E A, Verchot L V, Cattanio J H, et al. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of Eastern Amazonia[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1):53-69.
- [4] Brown M, Whitehead D, Hunt J E, et al. Regulation of soil surface respiration in a grazed pasture in New Zealand[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(2):205-213.
- [5] King J S, Hanson P J, Bernhard T E Y, et al. A multiyear synthesis of soil respiration responses to elevated atmospheric  $\text{CO}_2$  from four forest face experiments[J]. *Global Change Biology*, 2004, 10(6):1027-1042.
- [6] 张宪洲,刘允芬,钟华平,等. 青藏高原农田生态系统土壤呼吸的日变化和季节变化特征[J]. 资源科学, 2003, 25(5):103-107.  
ZHANG Xian-zhou, LIU Yun-fen, ZHONG Hua-ping, et al. Daily and seasonal variation of soil respiration of farmland in the Tibetan Plateau[J]. *Resources Science*, 2003, 25(5):103-107.
- [7] 彭家中,常宗强,冯一起. 温度和土壤水分对祁连山青海云杉林土壤呼吸的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(3):165-169.  
PENG Jia-zhong, CHANG Zong-qiang, FENG Qi. Influence of temperature and soil moisture on soil respiration of *Picea crassifolia* in Qilian Mountains[J]. *Journal of Arid Resources and Environment*, 2008, 22(3):165-169.
- [8] 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.  
CHEN Hai-jun, WANG Ming-jiu, HAN Guo-dong, et al. Effect of different grazing intensities on soil respiration and soil microorganism in *Stipa baicalensis* Steppe[J]. *Journal of Arid Resources and Environment*, 2008, 22(4):165-169.
- [9] Matthews E, Fung I. Methane emission from natural wetlands:Global distribution, area and environmental characteristics of sources[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1987, 1(1):61-86.
- [10] Franzen L G. Can the earth afford to lose the wetlands in the battle against the increasing greenhouse effect[M]//International Peat Society Proceedings of International Peat Congress. Uppsala, 1992:1-18.
- [11] Brix H, Sorrel B K, Lorenzen B. Are *Phragmites*-dominated wetlands a net source or net sink of greenhouse gases?[J]. *Aquatic Botany*, 2001, 69(2-4):313-324.
- [12] 杨建军,吕光辉,张燕,等. 艾比湖流域不同植物群落土壤呼吸研究[J]. 环境科学研究, 2009, 22(3):362-370.  
YANG Jian-jun, LÜ Guang-hui, ZHANG Yan, et al. Respiration of different plant communities in Ebinur Lake watershed[J]. *Research of Environmental Science*, 2009, 22(3):362-370.
- [13] 谢静霞,翟翠霞,李彦. 盐生荒漠与绿洲农田土壤 $\text{CO}_2$ 通量的对比研究[J]. 自然科学进展, 2008, 3(18):262-268.  
XIE Jing-xia, ZHAI Cui-xia, LI Yan. Comparative study of salt desert and oasis soil  $\text{CO}_2$  flux[J]. *Progress in Natural Science*, 2008, 3(18):262-268.
- [14] 张丽华,陈亚宁,李卫红,等. 准噶尔盆地梭梭群落下土壤 $\text{CO}_2$ 释放规律及其影响因子的研究[J]. 中国沙漠, 2007, 27(2):266-272.  
ZHANG Li-hua, CHEN Ya-ning, LI Wei-hong, et al. Soil carbon dioxide emission and affecting factors under haloxylon ammodendron

- community in Junggar Basin[J]. *Journal of Desert Research*, 2007, 27(2):266-272.
- [15] 李磊, 李艳红, 陈成贺日, 等. 1972—2011年期间艾比湖面积变化研究[J]. *湿地科学*, 2014, 12(2):263-268.  
LI Lei, LI Yan-hong, CHEN Cheng-he-ri, et al. Change of Ebinur Lake Area during 1972—2011[J]. *Wetland Science*, 2014, 12(2):263-268.
- [16] 新疆农业厅, 新疆土壤普查办公室. 新疆土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1996.  
The Xinjiang Department of Agriculture, Xinjiang Soil Survey Office. Soil in Xinjiang[M]. Beijing: Science Press, 1996.
- [17] 王铭, 刘兴土, 李秀军, 等. 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[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(1):45-52.  
WANG Ming, LIU Xing-tu, LI Xiu-jun, et al. Soil respiration dynamics and its controlling factors of typical vegetation communities on meadow steppes in the Western Songnen Plain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(1):45-52.
- [18] 孟春, 王立海, 沈微. 择伐对生长季针阔混交林土壤分室呼吸的影响[J]. *林业科学*, 2008, 44(8):24-28.  
MENG Chun, WANG Li-hai, SHEN Wei. Effect of selective cutting on soil partitioning respiration in a conifer-broadleaved forest during growing season[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(8):24-28.
- [19] Zhang L H, Chen Y N, Li W H, et al. Soil respiration in desert ecosystems of the arid region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5):1911-1922.
- [20] 黄湘, 李卫红, 陈亚宁, 等. 塔里木河下游荒漠河岸林群落土壤呼吸及其影响因子[J]. *生态学报*, 2007, 27(5):1951-1959.  
HUANG Xiang, LI Wei-hong, CHEN Ya-ning, et al. Soil respiration of desert riparian forests in the lower reaches of Tarim River as affected by air temperature at 10 cm above the ground surface and soil water[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5):1951-1959.
- [21] 王铭, 刘兴土, 李秀军, 等. 松嫩平原旱生芦苇群落土壤呼吸动态及影响因子[J]. *生态学报*, 2012, 31(10):2466-2472.  
WANG Ming, LIU Xing-tu, LI Xiu-jun, et al. Dynamics of soil respiration under phragmites australis community in dry habitats of Songnen Plain and related affecting factors[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(10):2466-2472.
- [22] Xie J X, Li Y, Zhai C X, et al. CO<sub>2</sub> absorption by alkaline soils and its implication to the global carbon cycle[J]. *Environmental Geology*, 2009, 56(5):953-961.
- [23] Lee M S, Nakane K, Nakatsubo T. Effects of rainfall events on CO<sub>2</sub> flux in a cool temperate deciduous broad-leaved forest[J]. *Ecological Research*, 2002, 17(3):401-409.
- [24] 谢继萍, 钟文昭, 黄刚, 等. 准噶尔盆地南缘梭梭群落春季融雪期的土壤呼吸动态[J]. *干旱区研究*, 2013, 30(3):430-437.  
ZHANG Ji-ping, ZHONG Wen-zhao, HUANG Gang, et al. Dynamic change of respiration in haloxylon ammodendron community in Southern edge of Junggar Basin in snowmelt season[J]. *Arid Zone Research*, 2013, 30(3):430-437.
- [25] 张东秋, 石培礼, 张宪洲. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展[J]. *地理科学进展*, 2005, 20(7):778-785.  
ZHANG Dong-qiu, SHI Pei-li, ZHANG Xian-zhou. Some advance in the main factors controlling soil respiration[J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(7):778-785.
- [26] Osazawa S, Hasegawa S. Diel and seasonal changes in carbon dioxide concentration and flux in an arid soil[J]. *Soil Sc*, 1995, 160(2):117-124.
- [27] 齐玉春, 董云社, 刘纪远, 等. 内蒙古半干旱草原 CO<sub>2</sub> 排放通量日变化特征及环境因子的贡献[J]. *中国科学(D辑)*, 2005, 35(6):495-500.  
QI Yu-chun, DONG Yun-she, LIU Ji-yuan, et al. Inner Mongolia semi-arid grassland CO<sub>2</sub> flux diurnal variation characteristics and environmental factors contribution[J]. *Chinese Science(D)*, 2005, 35(6):495-500.
- [29] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tellus B*, 1992, 44(2):81-99.
- [30] Kuera C L, Kirkham D R. Soil respiration studies in tall grass prairie in Missouri[J]. *Ecology*, 1971, 52(5):912-915.
- [31] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水分对土壤呼吸的影响及机理[J]. *生态学报*, 2003, 23(5):972-978.  
CHEN Quan-sheng, LI Ling-hao, HAN Xing-guo, et al. Effects of water content on soil respiration and the mechanisms[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5):972-978.
- [32] 王新源, 李玉霖, 赵学勇, 等. 干旱半干旱区不同环境因素对土壤呼吸影响研究进展[J]. *生态学报*, 2012, 32(15):4890-4901.  
WANG Xin-yuan, LI Yu-lin, ZHAO Xue-yong, et al. Responses of soil respiration to different environment factors in semi-arid and arid areas[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(15):4890-4901.