

干旱区盐湖沿岸不同植物群落土壤 CO₂ 排放特征

李典鹏¹, 孙涛¹, 姚美思¹, 刘隋赞¹, 贾宏涛^{1,2*} (1.新疆农业大学草业与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2.新疆土壤与植物生态过程重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: 为探究盐湖区不同植物群落土壤 CO₂ 排放速率及影响因素,以新疆达坂城盐湖沿岸小獐毛、鸢尾、芨芨草、黑果枸杞群落和撂荒地土壤为研究对象,在 2016 年 4~12 月采用 Li-8100A 监测了不同植物群落土壤 CO₂ 排放特征,分析了 CO₂ 排放与 5(ST5),10(ST10),15cm(ST15)土壤温度、含水量、电导率的关系.结果如下:4~12 月小獐毛群落土壤 CO₂ 日排放呈单峰曲线,7 月土壤 CO₂ 排放速率最高,峰值出现在 14:00 左右;7 月鸢尾、芨芨草、黑果枸杞和撂荒地土壤 CO₂ 排放呈双峰曲线,峰值出现在 10:00 和 14:00~16:00 左右,其余月份均呈单峰曲线,峰值出现在 12:00~14:00;不同植物群落类型、同一植物类型不同月份土壤 CO₂ 排放存在显著差异($P<0.001$).4~12 月芨芨草群落土壤 CO₂ 累积排放量最高(2508.01g/m²),大于撂荒地(2235.01g/m²)、鸢尾(1903.03g/m²)、黑果枸杞(1690.27g/m²)和小獐毛(550.34g/m²)植物群落处理.小獐毛群落土壤 CO₂ 排放与 ST15 显著相关($R^2=0.739, P<0.05$),且对 ST15 变化最敏感;鸢尾、芨芨草、黑果枸杞群落和撂荒地处理土壤 CO₂ 排放与 ST5 相关性较高($R^2=0.708\sim0.821$),对 ST10 变化响应敏感.小獐毛群落土壤温度敏感系数(Q_{10})最大值出现在 6 月(7.97),鸢尾(21.74)、芨芨草(13.21)、黑果枸杞(18.23)和撂荒地(7.65)处理则出现在 11、12 月.不同植物群落土壤 CO₂ 排放与含水量相关性较低;一元线性方程($\log_e C_f = -0.149EC + 0.943$)能较好的模拟土壤电导率(EC)与 CO₂ 排放(C_f)的关系.除土壤温度外,盐分也是影响盐湖沿岸土壤碳排放的重要因素.因此,在考虑陆地生态系统碳收支时不能忽略盐湖生态系统,以及盐分对土壤碳过程的影响.

关键词: 达坂城盐湖; 碳排放; 土壤盐分; 温度敏感系数

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2019)05-1879-11

Characteristic of soil CO₂ emission under different plant communities in the shores of saline lake in arid region. LI Dian-peng¹, SUN Tao¹, YAO Mei-si¹, LIU Sui-yunhao¹, JIA Hong-tao^{1,2*} (1.College of Grassland and Environmental Science, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2.Xinjiang Key Laboratory of Soil and Plant Ecological Processes, Urumqi 830052, China). *China Environmental Science*, 2019,39(5): 1879~1889

Abstract: In order to investigate the emission rate of soil CO₂ and its influencing factors under different plant communities in arid saline lakes, four plant communities including *Aeluropus pungens*, *Iris tectorum*, *Achnatherum splendens*, *Lycium ruthenicum* Murr and abandoned land in Danbancheng Saline Lake were selected. The soil CO₂ emission rates, under the five plant communities were measured from April to December, 2016 using the LI-8100A. Meanwhile, the soil temperature in 5, 10 and 15cm depth, soil water content and electric conductivity were also measured. Results showed that the diurnal variation of soil CO₂ emission rate under *Aeluropus pungens* showed obvious single peak, the highest emission rate happened in July around 14:00. For other plant communities, the emission rates showed the sing peak in 12:00~14:00 in all months except July during which the emission rates had two peaks in 10:00 and 14:00 to 16:00. There were significant difference in the emission rate between different plant communities and among different months under the same plant community ($P<0.001$). During the research period, the cumulative soil CO₂ emission was highest under *Achnatherum splendens* (2508.01g/m²), followed by abandoned land (2235.01g/m²), *Iris tectorum* (1903.03g/m²), *Lycium ruthenicum* Murr (1690.27g/m²), and *Aeluropus pungens* (550.34g/m²). The correlation between soil CO₂ emission rate and soil temperature in 15cm depth under *Aeluropus pungens* was significant ($R^2=0.739, P<0.05$), and it was sensitive to the changes of soil temperature in 15cm depth. Under other plant communities, soil CO₂ emission rate have highest correlations with soil temperature in 5cm depth ($R^2=0.708\sim0.821$), indicating they are sensitive to the changes of soil temperature in 5cm depth. Plant communities had great effect on the temperature sensitive of soil CO₂ emission (Q_{10}) with largely ranging from 0.60 to 21.74. Values of Q_{10} was significantly different from April to December. The greatest Q_{10} under *Aeluropus pungens* was found at June (7.97), while the highest values under other plant communities were found at November or December: *Iris tectorum* (21.74), *Achnatherum splendens* (13.21), *Lycium ruthenicum* Murr (18.23) and abandoned land (7.65). Regression analysis results showed that the correlation between the CO₂ emission (C_f) and the soil moisture was low, the correlation with soil electric conductivity could be modeled ($\log_e C_f = -0.149EC + 0.943$). Our result also indicated that salinity was an important factor affecting soil carbon emissions among the saline lake. To conclude, the soil carbon process of the saline lake ecosystem in the arid area and the influence of soil salt

收稿日期: 2018-09-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31560171);国家大学生创新训练计划项目(201510758004)

* 责任作者, 教授, hongtaojia@126.com

content on the carbon emissions of the saline lake ecosystem should not been ignored when considering the carbon budget and carbon cycle of the terrestrial ecosystem.

Key words: Dabancheng Saline Lake; carbon emission; soil salinity; temperature sensitive coefficient (Q_{10})

土壤作为陆地生态系统最大的有机碳库,储存了约 1.5×10^{18} g 碳^[1];同时土壤也是大气 CO_2 最主要的源,每年排放 $7.0 \times 10^{16} \sim 8.1 \times 10^{16}$ g 碳,超过生态系统净初级生产力的总和^[2].因此,土壤碳库轻微的改变都会对大气 CO_2 浓度产生较大影响.不同生态系统温室气体排放水平的不确定性是造成未来气候预测不确定性的重要原因,为准确评估气候变化中的不确定性,需对不同生态系统及特殊环境土壤碳排放特征及其影响因素进行探究^[3].

内陆水体约占全球陆地表面面积的 2.3%,但其 CO_2 年排放速率达 $(1.4 \sim 2.1) \times 10^{15}$ g,是大气 CO_2 重要的源^[4-6].作为陆地水生态系统重要组成部分,水体沿岸土壤碳排放仍存在较多未知,特别是环境性质独特的区域.盐湖多位于干旱半干旱区,是一种含盐量高的特殊生态环境类型;全球面积大于 10hm^2 的盐湖占陆地水体面积的 44%,且其水体 CO_2 、 CH_4 等气体分压通常处于过饱和状态,是重要的温室气体排放源^[6-9].目前,关于湖泊空气界面气体交换的研究相对较多,而湖泊沿岸土壤碳通量易被忽略.研究表明,淡水湖沿岸土壤是重要的“碳源”^[10-11],而盐湖沿岸土壤的研究则相对较少,极少数研究表明盐湖沿岸土壤为“碳汇”^[12].

湖泊沿岸土壤碳排放受非生物和生物因子的共同影响,例如,青海湖高寒草甸草原土壤呼吸受 5cm 土壤温度和水分的影 响^[10];洞庭湖沿岸杨树林、芦苇和农田土壤碳排放速率受土壤微生物调控^[9].而在干旱区博斯腾湖沿岸,除温度和水分外,土壤 pH 值也是影响碳排放的重要因子^[13];夏季艾比湖和达坂城盐湖沿岸不同植物群落的土壤 CO_2 排放受温度和含水量共同调控,且均未出现“碳汇”^[14].以往盐湖沿岸土壤 CO_2 排放的研究主要集中在夏季,且缺乏长期动态监测.干旱区盐湖区具有降雨稀少、地表径流补给不丰富、蒸发强度大的特点,湖岸土壤盐分含量高,多介于 0.08%~2.6%之间,养分贫瘠.盐湖区植物种类较贫乏且相对分布不均,郁闭度低,多以耐盐草本、藜科或小灌木为主.前人对碳排放影响因子探究中,土壤温度、含水量和生物量通常被优先纳入考虑和研究范围,常忽略盐分对土壤碳排放的影响.因

此,在盐湖沿岸开展长期 CO_2 通量监测,并探究盐分对 CO_2 排放的影响,对衡量干旱区湖泊对气候变化响应具有一定意义.

在 2015 年 7~9 月的研究基础上,以新疆达坂城盐湖沿岸不同植物群落土壤为研究对象,于 2016 年 4~12 月对土壤 CO_2 排放原位监测,同步测定了土壤温度、含水量和盐分等环境因子.试探明干旱区盐湖沿岸不同植物群落土壤 CO_2 排放规律及其影响因子;掌握盐湖沿岸土壤 CO_2 排放温度敏感性(Q_{10})的动态变化特征.以期为我国湖泊生态系统碳通量观测数据进行必要补充,同时有助于进一步加深对全球气候变暖背景下干旱半干旱区湖泊碳循环的认识与理解;也可为该区域盐湖生态系统应对未来气候变化适应措施、生态环境保护制度的制定和完善提供基础参考.

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

新疆达坂城盐湖($88^{\circ}04'E \sim 88^{\circ}12'E$, $43^{\circ}23'N \sim 43^{\circ}25'N$)位于乌鲁木齐达坂城区,距乌鲁木齐市约 70km.达坂城盐湖湖水主要依靠降水和地下水补给,补给系数 28.3.卤水密度 1.07g/cm^3 ,pH 值为 8.38,属硫酸钠亚型盐湖.湖区年均气温 5.1°C ,1 月平均气温 -14.5°C ,7 月平均气温 24.0°C ,极端高温 43.4°C ,年均降雨量 261mm,年均蒸散发 2074mm,属中温带大陆性气候.多年平均无霜期 160d,年均日照 2820h.盐湖区植被主要由旱生和盐生植物构成,以盐节木(*Halocnemum Strobilaceum*)、小 獐 毛(*Aeluropus pungens*)、鸢尾(*Iris tectorum*)、芨芨草(*Achnatherum splendens*)、黑果枸杞(*Lycium ruthenicum Murray*)等植物为主.

1.2 试验设计

在达坂城盐湖沿岸按照植物优势种(小獐毛、鸢尾、芨芨草、黑果枸杞群落和撂荒地)选择监测样地.在每块样地内随机选取 3 块 $10 \text{m} \times 10 \text{m}$ 样方,在每个样方内随机设置 2 个内径为 20cm,高 10cm 的 PVC 长期固定底座.小獐毛群落和撂荒地处理底座随机设置,安装好底座后剪去地上生物量和去除凋落物;

鸢尾、芨芨草和黑果枸杞群落底座置于丛间空地.于第 1 次试验(4 月)开始前,将底座嵌入土壤中,使上端高出地表约 5cm.在每块样地底座附近设置 3 套地温计用于 5(ST5),10(ST10)和 15cm(ST15)土壤温度的测定.土壤 CO₂ 排放采用土壤碳通量测量系统 LI-COR 8100A(Li-COR, Lincoln, NE, USA)监测.试验于 2016 年 4~12 月进行,每月中下旬选择 2~3 个相对晴朗的典型日进行土壤 CO₂ 排放监测,测定时段为 08:00~20:00,监测频率为每 2h 一次,数据采集频率为 1s 记录 1 个数据,测定时长为 100s,监测一轮累计用时约 1h.

1.3 土壤样品采集与植物调查

在监测土壤 CO₂ 排放时记录不同土层温度;用铝盒采取 0~10cm 土壤测定含水量,每块样地重复 3 次;同时采取底座周围 0~20cm 土壤样品,用于测定当月土壤电导率.于 2016 年 7 月对植物群落特征进行调查,小獐毛群落和撂荒地植被调查方法如下:在

所选样地附近,按一定方向设置 50m 样线,每隔 10m 布设一个 1m×1m 的样方.鸢尾、芨芨草、黑果枸杞群落则按一定方向设置 50m 样线,每隔 10m 布设一个 5m×5m 的样方,对样方内地表活体植物和凋落物进行采集和分析,估计样方内植被盖度,采集植物新鲜样带回实验室测定植物干重.

1.4 土壤与植物样品分析

土壤含水量采用烘干法(105℃)测定;土壤 pH 值采用 pH 计(PHSJ-4F,上海仪电科学仪器股份有限公司)测定(1:5 土水比);土壤电导率采用电导率仪(DDSJ-308F,上海仪电科学仪器股份有限公司)测定(1:5 土水比);土壤有机质采用重铬酸钾浓硫酸外加热法测定,土壤粒径采用吸管法测定^[15],土壤基本性质见表 1.将采集的新鲜植物样品在 105℃下杀青 30min,然后在 70℃烘至恒重,最后用称重法测定生物量;凋落物生物量测定方法与生物量测定方法一致,不同处理植被基本特征见表 1.

表 1 不同样地土壤基本性质和植物群落特征
Table 1 Basic information of soil under different plant communities

植物群落	土壤 pH 值	土壤电导率(mS/cm)	土壤有机质(g/kg)	土壤质地	盖度(%)	地上生物量(g/m ²)	凋落物(g/m ²)
小獐毛	9.02±0.08	8.96±0.87	16.44±1.71	砂土	53.6	126.87±21.40	83.65±9.18
鸢尾	8.44±0.02	6.32±1.23	34.64±3.26	砂壤土	28.0	24.47±2.54	8.86±0.59
芨芨草	8.47±0.05	4.43±1.12	21.94±1.31	壤土	30.7	131.25±25.35	28.70±1.19
黑果枸杞	8.53±0.05	6.66±0.98	24.09±1.19	壤土	46.3	52.30±14.26	18.40±1.32
撂荒地	8.60±0.05	4.59±0.62	22.67±2.02	壤土	55.7	65.50±8.64	18.06±1.17

注:表中数据为平均值,误差为标准误差,下同.

1.5 数据处理与分析

采用 Van't Hoff 模型模拟土壤温度与土壤 CO₂ 排放速率的关系,见公式(1):

$$C_f=a\times e^{bT}$$
(1)

式中: C_f 表示土壤 CO₂ 排放速率,μmol/(m²·s),下同; T 表示土壤温度,℃; a 、 b 均为参数.

采用 Jian 等^[2]方法计算土壤 CO₂ 排放对不同土层温度变化敏感程度(Q_{10-ST5} , $Q_{10-ST10}$, $Q_{10-ST15}$),即对应土壤温度升高 10℃时 CO₂ 排放速率变化的倍数(ST5,ST10,ST15 分别表示 5,10,15cm 土壤温度).采用线性回归模型拟合 ST5,ST10,ST15,含水量和盐分与 CO₂ 排放速率的关系:

$$C_f=c+d\times x$$
(2)

式中: x 为土壤环境因子; c 、 d 均为回归系数.

采用 Excel 2016 对数据进行处理.重复测量方

差分析比较小獐毛、鸢尾、芨芨草、黑果枸杞和撂荒地之间土壤 CO₂ 排放的差异以及不同月份同一群落土壤 CO₂ 排放的差异;采用单因素方差分析 4~12 月土壤 CO₂ 累积排放量进行差异性分析($\alpha=0.05$);对土壤温度、含水量、电导率与土壤 CO₂ 排放进行回归分析,得出各因子(x)与土壤 CO₂ 排放(C_f)之间的回归方程;主成分分析用于研究 ST5,ST10,ST15,含水量和电导率对土壤 CO₂ 排放的影响并计算各因子的影响权重.所有统计分析均使用 SPSS 20.0 完成,采用 Origin Pro 2017 绘图.

2 结果与分析

2.1 土壤 CO₂ 排放日动态变化

4~12 月小獐毛群落土壤 CO₂ 日排放呈单峰曲线,峰值出现在 14:00~16:00,11~12 月土壤碳排放

无明显日变化规律特征(图 1).鸢尾、芨芨草、黑果枸杞和撂荒地植物群落 7 月土壤 CO₂ 日排放呈双峰曲线,峰值出现在 10:00 和 14:00~16:00 左右,谷值出现在 12:00,11~12 月土壤 CO₂ 排放速率无明显日动态变化规律;其他月份均为单峰曲线,峰

值出现在 12:00~14:00 之间.不同植物群落处理间土壤 CO₂ 排放均存在显著性差异(表 2);同一群落不同月份土壤 CO₂ 排放也存在显著差异;且群落类型与时间变化对土壤 CO₂ 排放的影响存在交互作用.

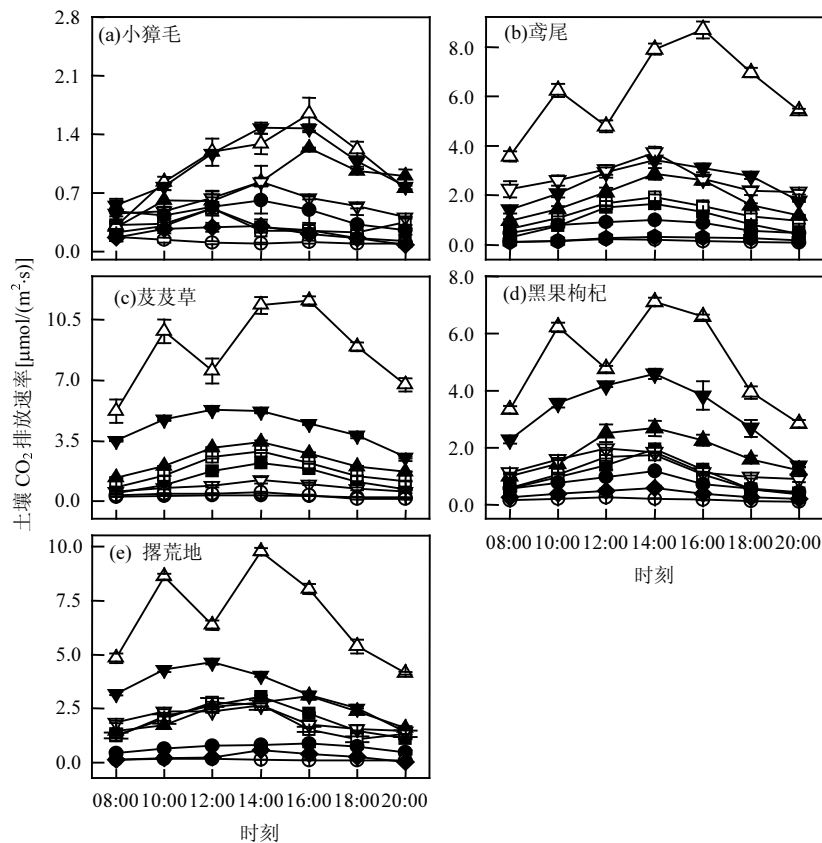


图 1 4~12 月不同植物群落土壤 CO₂ 排放日动态变化

Fig.1 Daily dynamics of the soil CO₂ emission rate of different plant communities from April to December
—■—4 月—□—5 月—▲—6 月—△—7 月—▼—8 月—▽—9 月—●—10 月—○—11 月—◆—12 月

表 2 土壤 CO₂ 排放重复测量方差分析

Table 2 Repeated-measures analysis of variance of soil CO₂ emission

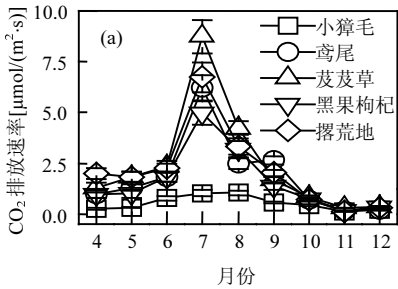
变异来源	SS	df	均方	F 值	P 值
时间*	437.57	2.05	213.68	644.82	<0.001
群落	75.64	4.00	18.91	483.08	<0.001
时间×群落*	110.59	8.20	13.50	40.74	<0.001
重复测量误差	10.18	30.72	0.34		

注:表中SS为平方和,df为自由度.*表示经球形检验,P<0.05,采用Greenhouse Geisser法校正自由度.

2.2 土壤 CO₂ 排放月动态变化

4~12 月达坂城盐湖沿岸土壤 CO₂ 日排放呈明显单峰曲线,7 月各处理土壤 CO₂ 日排放通量达峰值(图 2a).芨芨草群落土壤 CO₂ 排放速率为(8.74±0.73) μmol/(m²·s),显著高于其他处理;小獐毛群落土壤

CO₂ 排放速率最低.在监测时段内(4~12 月)土壤 CO₂ 累积排放量表现为芨芨草>撂荒地>鸢尾>黑果枸杞>小獐毛(图 2b),芨芨草群落累积排放量为 2508.01g/m²,显著高于鸢尾(1903.03g/m²)、黑果枸杞(1690.27g/m²)和小獐毛(550.34g/m²)处理,但与撂荒地(2235.01g/m²)处理不存在显著差异.



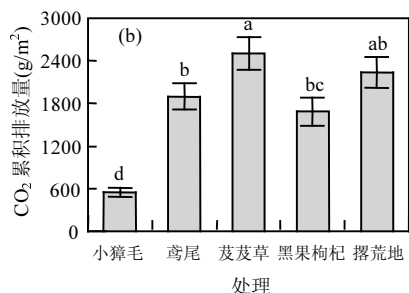


图2 不同植物群落土壤 CO₂ 排放月动态变化及 4~12 月日累积排放量

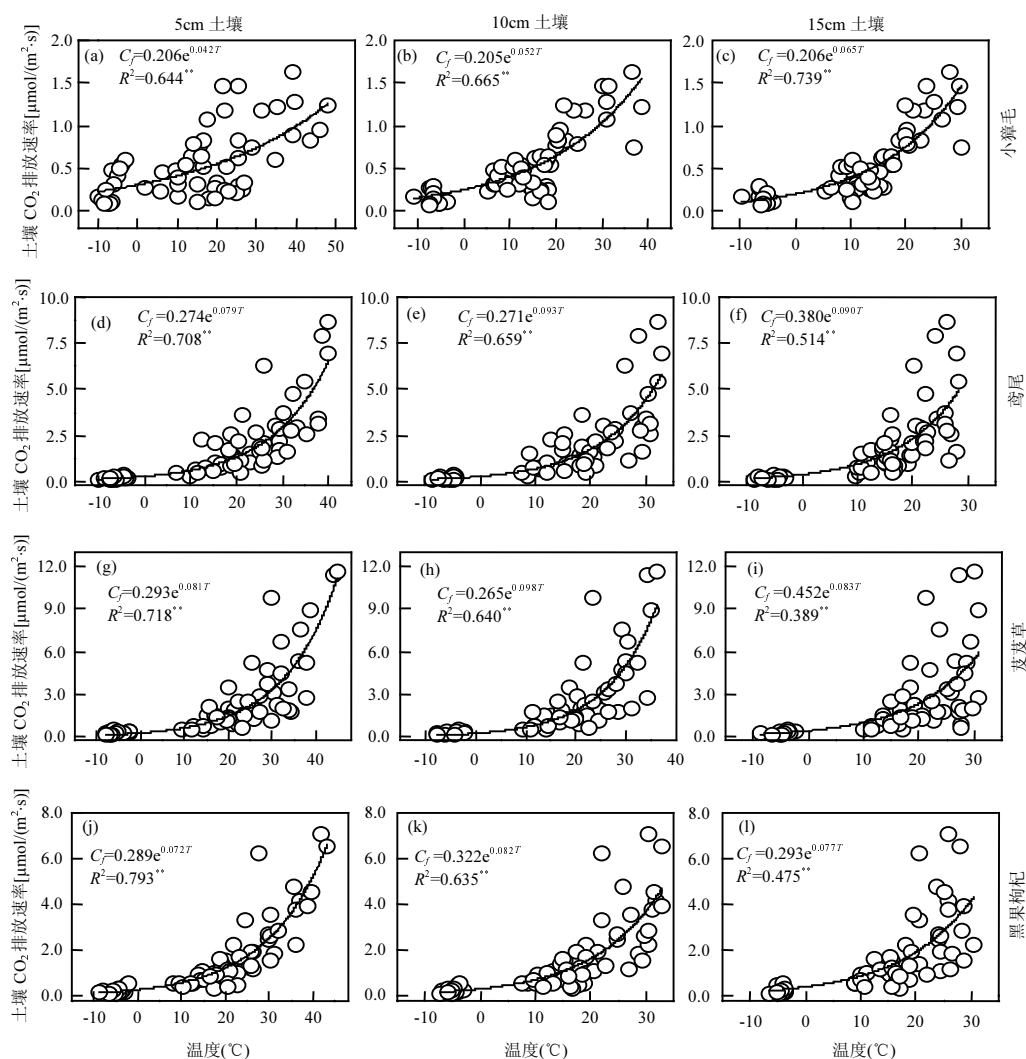
Fig.2 Monthly dynamics of the soil CO₂ emission rate and soil cumulative CO₂ emission from April to December of different plant communities

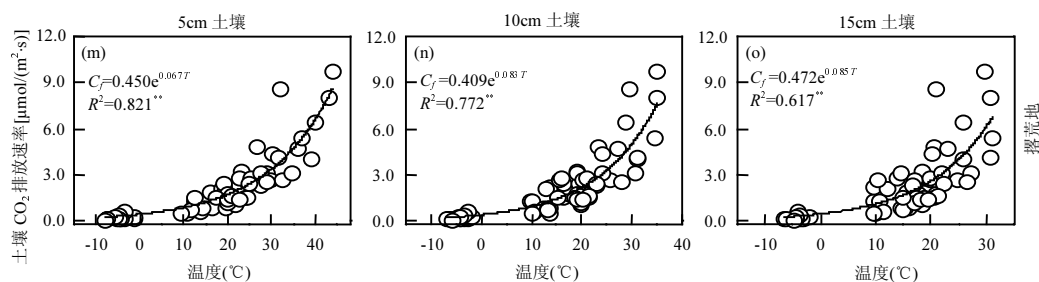
图中数据均为平均值,误差为标准误差;不同字母表示在 0.05 水平上显著相关

2.3 土壤 CO₂ 排放与温度的关系及 Q₁₀ 的变化

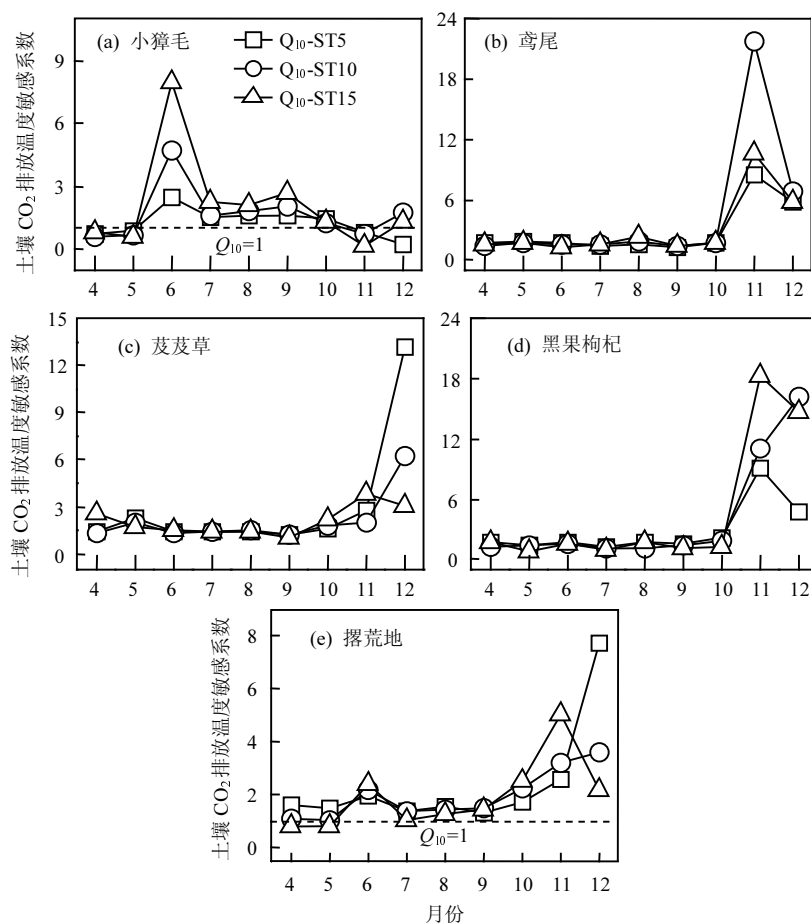
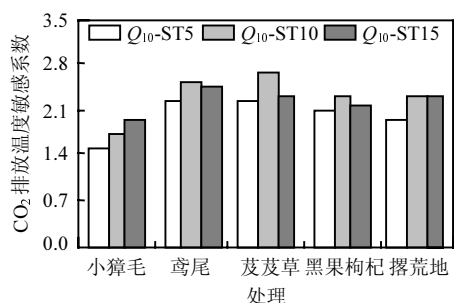
土壤 CO₂ 排放与不同深度土壤温度存在显著指数相关(图 3).小獐毛群落土壤 CO₂ 排放速率与温度显著相关,且相关性随土层深度增加而增加,与 ST15

相关性最高($R^2=0.739$).芨芨草、黑果枸杞和撂荒地土壤 CO₂ 排放与温度的相关性随土层深度增加而降低,与 ST5 相关性较高(图 3).不同植物群落土壤 CO₂ 排放对不同土层温度变化的响应程度不同(图 4).总体上,小獐毛群落土壤 Q₁₀ 呈先增加后下降的趋势,最大值出现在 6 月(7.97);芨芨草、黑果枸杞和撂荒地则呈增加趋势,Q₁₀ 最大值出现在 11 或 12 月.小獐毛群落处理 4,5,11 月 Q₁₀ 均低于 1,4 月最低为 0.61.芨芨草(21.74)、黑果枸杞(18.23)和撂荒地(7.65)土壤 Q₁₀ 在 11 或 12 月出现最大值;撂荒地处理 4,5 月 Q₁₀-ST15 均低于 1.4~12 月土壤 CO₂ 排放对不同土层温度变化的响应程度见图 5,小獐毛群落和撂荒地土壤 CO₂ 排放对温度变化的敏感性随土层深度增加而增加,Q₁₀-ST15 最高分别为 1.91,2.34.芨芨草和黑果枸杞群落土壤 CO₂ 排放对温度变化的敏感性随土层深度先增加后降低趋势,Q₁₀-ST10 值分别为 2.53,2.66,2.27.



图3 土壤 CO₂ 排放与不同土层温度的相关性Fig.3 The relationship between soil CO₂ emission and different layers soil temperature

**表示在 0.01 水平上显著相关; *表示在 0.05 水平上显著相关(下同); T 为土壤温度

图4 4~12月土壤 CO₂ 排放温度敏感系数(Q_{10})动态变化Fig.4 Monthly dynamic of soil CO₂ emission sensitive of temperature (Q_{10}) from April to December图5 土壤 CO₂ 排放对不同土层温度变化的敏感性Fig.5 Soil CO₂ emission sensitive of different soil layers temperature under different plant communities

2.4 土壤 CO₂ 排放与含水量的相关性

达坂城盐湖沿岸土壤 CO₂ 排放与土壤含水量相关性较低(图6).小獐毛、鸢尾群落和撂荒地土壤 CO₂ 排放与土壤含水不存在显著相关性;芨芨草和黑果枸杞群落土壤 CO₂ 排放与温度存在显著相关性 ($P < 0.05$).单因子线性方程能较好模拟土壤 CO₂ 排放与含水量的关系;黑果枸杞群落土壤 CO₂ 排放与土壤含水量呈显著二次函数相关 ($P < 0.05$).

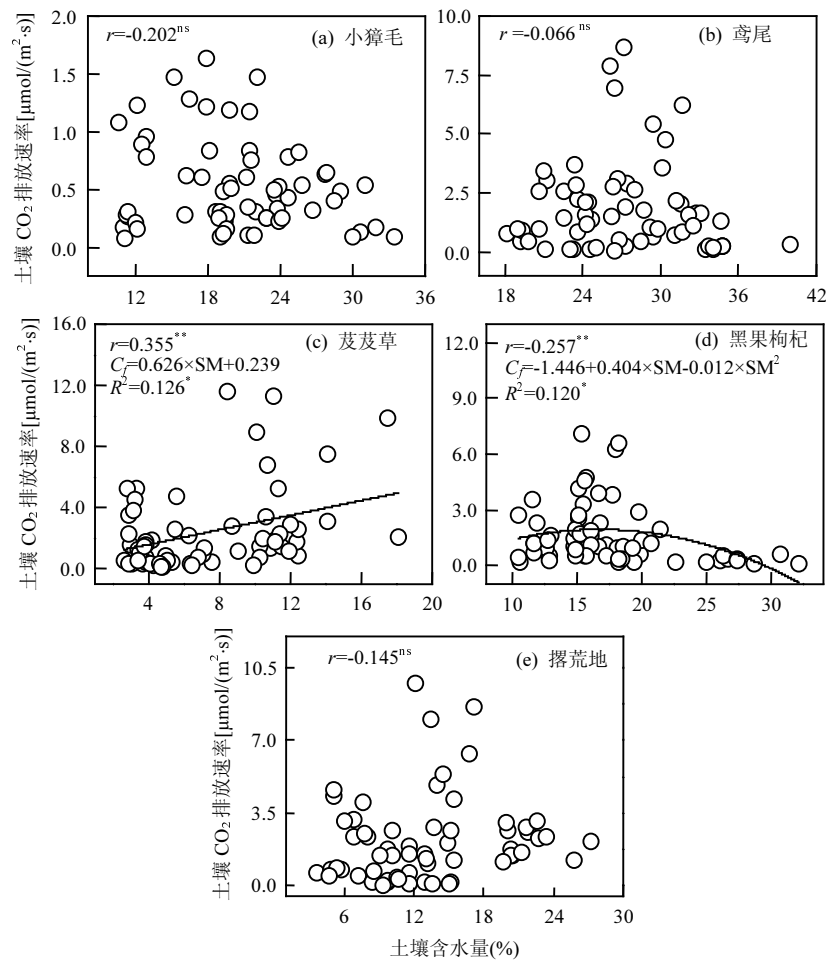


图 6 土壤 CO₂ 排放速率与土壤含水量的相关性

Fig.6 The relationship between soil CO₂ emission rate and soil moisture

SM 为土壤含水量;ns 表示不存在显著性差异

2.5 土壤 CO₂ 排放与电导率的相关性

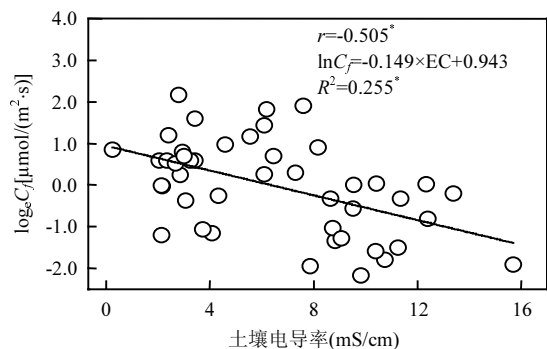


图 7 土壤电导率与土壤 CO₂ 排放的回归分析

Fig.7 Regression analysis of soil electrical conductivity and soil CO₂ emissions rate

C_f 为土壤 CO₂ 排放速率,EC 为土壤电导率

盐湖沿岸不同植物群落土壤电导率介于 0.22~15.70mS/cm.土壤 CO₂ 排放速率经对数转换后,与土壤电导率显著负相关($r=-0.505,P<0.05$).回归分析表

明(图 7),一元线性方程能较好模拟土壤电导率对 CO₂ 排放影响.回归方程表明电导率增加 1mS/cm,土壤 CO₂ 排放速率降低 0.86μmol/(m²·s).

2.6 土壤因子对 CO₂ 排放的贡献率分析

表 3 主成分载荷矩阵及权重系数			
Table 3 Principal component loading matrix and weight coefficient			
指标	提取的主成分		权重系数
	PC1	PC2	
ST5	0.976	0.178	0.228
ST10	0.983	0.149	0.226
ST15	0.982	0.113	0.222
土壤含水量	-0.184	0.882	0.148
土壤电导率	-0.583	0.501	0.176
特征值	3.204	1.096	
贡献率(%)	64.10	21.90	

为研究 ST5,ST10,ST15,含水量和电导率对土壤

CO₂排放影响的总效应,采用主成分分析对以上5个土壤指标进行主成分提取.由表3可知,提取的前2个主成分对CO₂总变异的解释率达86.0%,主成分1和2分别64.10%和21.90%.通过计算各土壤因子对CO₂排放影响的权重可知,ST5,ST10所占权重较大,其次为ST15、EC和SM,其中EC对CO₂排放的影响权重达0.176,仅次于土壤温度.

3 讨论

3.1 盐湖沿岸土壤CO₂排放特征

干旱区盐湖沿岸土壤CO₂排放存在明显的日变化规律.除7月外,不同植物群落土壤CO₂排放呈单峰曲线.这与胡保安等^[16]研究结果一致,土壤水分和温度的变化会影响土壤微生物活性,进而导致土壤CO₂排放通量的动态变化^[17-18].土壤排放的CO₂源于土壤微生物、根系和动物呼吸以及含碳矿物质的化学氧化作用,温度和水分几乎影响呼吸作用的各个阶段^[19-20],在日时间尺度上,土壤温度呈先增加后下降的趋势,故土壤CO₂排放也存在类似趋势.7月鸢尾、芨芨草、黑果枸杞和撂荒地处理土壤CO₂日排放呈双峰曲线,峰值出现在10:00和14:00~16:00左右.目前对于土壤CO₂排放日动态呈双峰的报道相对较少,这与在新疆阜康盐生荒漠和呼图壁盐柴类荒漠的研究结果相似^[21-22].土壤CO₂排放随温度的升高而下降可能是因为正午温度较高抑制微生

物酶活性^[23].此外也有研究表明,植物每年将通过光合作用固定的20%~30%的有机物通过根系输入到土壤中,而土壤排放的CO₂很大部分源于微生物对植物根系分泌物的分解^[24-25].马彦军等^[26]对黑果枸杞光合速率日变化的研究表明,光合速率日变化呈明显的双峰曲线,这与本研究土壤CO₂排放规律一致.故大气温度升高引起的光合同化速率降低也可能是导致土壤CO₂排放速率下降的原因.而有关干旱区盐湖沿岸土壤CO₂排放呈双峰曲线变化的机理还有待进一步探究.

不同类型湖泊沿岸不同植物群落下土壤CO₂排放速率见表4.淡水湖沿岸不同植物群落土壤CO₂排放介于0.85~4.47μmol/(m²·s),盐湖为-0.19~2.40μmol/(m²·s).东台吉乃尔盐湖属硫酸盐型湖泊,在监测期间土壤为“碳汇”,CO₂吸收速率为-0.19μmol/(m²·s)^[29];而氯化物型盐湖茶卡盐湖和硫酸钠型盐湖艾比湖、达坂城盐湖沿岸土壤CO₂均为“碳源”^[29],且淡水湖沿岸土壤CO₂排放速率普遍高于盐湖.年均温度和年降水量是影响土壤碳排放的重要因子,淡水湖沿岸土壤CO₂排放速率较高可能与该地区温度和土壤含水量相对较适宜有关^[28].东台吉乃尔盐湖沿岸土壤为“碳汇”,这与大部分湖泊沿岸的研究结果不一致;艾比湖、达坂城盐湖和东台吉乃尔盐湖沿岸土壤均呈碱性,具有吸收CO₂的条件,而“源汇”关系不一致,可能与土壤盐分类型和监测仪器不一致有关.

表4 不同湖泊沿岸植物群落土壤CO₂排放速率
Table 4 Soil CO₂ emission rate under different type lake shores

湖泊	经纬度	湖泊类型	年均温度(℃)	年降水量(mm)	植被	CO ₂ 排放速率 [μmol/(m ² ·s)]	参考文献
洞庭湖	28°59'N~29°38'N 112°43'E~113°15'E	淡水湖	17.0	1238	杨树林	4.47	[9]
					芦苇	2.58	
					农田	0.85	
青海湖	36°32'N~37°15'N 99°36'E~100°16'E	淡水湖	0.8	398	针茅等	2.50	[10]
博斯腾湖	41°56'N~42°14'N 86°40'E~87°26'E	淡水湖	8.6	77	人工芦苇	2.19	[13,27]
					天然芦苇	1.67	
太湖	30°56'N~31°34'N 119°54'E~120°36'E	淡水湖	15.6	1100	芦苇、水蓼、旱柳等	2.20	[28]
东台吉乃尔盐湖	37°22'N~37°36'N 93°45'E~94°07'E	硫酸镁亚型盐湖	3.6	110	-	- 0.19	[29]
茶卡盐湖	36°37'36"N 99°13'8"E	氯化物型盐湖	4.0	110	-	0.21	[29]
艾比湖	44°30'N~45°09'N 82°36'E~82°50'E	硫酸钠亚型盐湖	7.0	100	芦苇	0.16	[12]
					桉柳	0.36	

续表 4

湖泊	经纬度	湖泊类型	年均温度(℃)	年降水量 (mm)	植被	CO ₂ 排放速率 [μmol/(m ² ·s)]	参考文献
艾比湖	44°30'N~45°09'N 82°36'E~82°50'E	硫酸钠亚型盐湖	7.0	100	胡杨	0.78	[11]
					沙地梭梭	0.27	
					盐渍地梭梭	0.21	
					芦苇	1.55	
					盐节木	0.33	
达坂城盐湖	43°23'N~43°25'N 88°04'E~88°12'E	硫酸钠亚型盐湖	5.1	261	小獐毛	0.53	本研究
					鸢尾	1.84	
					芨芨草	2.40	
					黑果枸杞	1.62	
					撂荒地	2.14	

3.2 盐湖沿岸土壤 CO₂ 排放的影响因子

土壤温度是影响 CO₂ 排放的重要因子之一^[30]. 达坂城盐湖沿岸不同植物群落土壤 CO₂ 排放与 ST5,ST10,ST15 显著相关.Li 等^[31]在艾比湖沿岸芦苇、柽柳和裸地的研究表明,土壤呼吸与大气温度、ST5 呈显著正相关;杨建军等^[11]对艾比湖沿岸胡杨、梭梭、芦苇和盐节木等 24 种植物群落土壤呼吸的研究表明,土壤温度、含水量和呼吸速率显著负相关;同样对艾比湖沿岸测定农田、撂荒地、芦苇和胡杨土壤 CO₂ 排放特征的研究表明,CO₂ 排放速率与 ST5,ST10 显著正相关^[32].在淡水湖博斯腾湖沿岸,芦苇湿地土壤 CO₂ 排放通量与温度显著正相关;青海湖北岸高寒草甸草原非生长季土壤呼吸与温度同样呈正相关^[10].综上可知,干旱区湖泊沿岸不同植被类型和利用方式下土壤 CO₂ 排放与温度存在正相关或负相关,这可能是由于植被类型和利用方式不同导致的;而淡水湖沿岸土壤 CO₂ 排放与温度正相关,可能与该研究区温度日变化幅度较小有关.

土壤 CO₂ 排放温度敏感系数(Q_{10})是预测土壤碳通量的重要指标^[33].达坂城盐湖沿岸不同植物群落土壤 Q_{10} 介于 0.60~21.74 之间,11 或 12 月 Q_{10} 最大,这与 Chen 等^[34]研究结果基本一致. Q_{10} 与土壤温度显著负相关^[35-36],故 Q_{10} 在 4~10 月相对低,11、12 月温度低 Q_{10} 相对较高.中国不同生态系统 Q_{10} -ST5, Q_{10} -ST10, Q_{10} -ST15 和 Q_{10} -ST20 分别为 2.03,2.61, 3.19 和 3.02, Q_{10} 随土层深度增加而增加^[36],与鸢尾、芨芨草和黑果枸杞 Q_{10} 随不同土层温度变化的规律不一致,这可能与盐湖区不同季节温度差异较大有关.中国和全球陆地生态系统 Q_{10} 算术平均值为 2.40^[36-37],达坂城盐湖不同植物群落土壤 Q_{10} 算术平

均值为 2.69,高于我国不同生态系统,表明盐湖生态系统土壤 CO₂ 排放对温度的响应程度高,对气候变化的响应程度也较为敏感.

土壤含水量是影响土壤 CO₂ 排放的重要因子^[38].达坂城盐湖沿岸不同植物群落土壤 CO₂ 排放与含水量相关性较低,这与赵明亮等^[12]、王金龙等^[13]在艾比湖和博斯腾湖沿岸研究结果相似.而青海湖北岸草甸土壤碳排放与含水量显著正相关^[10].土壤含水量与 CO₂ 排放速率相关性较低,是因为干旱区年均降水量小于 200mm,蒸发量大,土壤含水量低,日变化和年变化较小,因此,当土壤含水量发生轻微改变时,微生物活性和群落结构不会立刻发生改变,故 CO₂ 排放与含水量存在相关性较小.此外,土壤含水量对 CO₂ 排放的影响也很可能被其他因子所掩盖^[39].水分与盐分对土壤 CO₂ 排放的影响存在交互作用,达坂城盐湖沿岸土壤 CO₂ 排放与土壤电导率存在显著负相关,且电导率对 CO₂ 排放的影响较大,这与李旭等^[22]研究结果一致.当土壤盐分含量较高时,土壤微生物活性和生长都会受到渗透胁迫,从而降低土壤 CO₂ 排放^[40-42].盐湖沿岸土壤盐分含量普遍较高,这与淡水湖存在明显差异,而盐分类型与碳“源汇”的关系还有待深入研究.

4 结论

4.1 干旱区盐湖沿岸土壤 CO₂ 排放日变化特征明显,除小獐毛群落外,7 月各处理土壤 CO₂ 排放日变化呈双峰曲线,其余月份均呈单峰曲线;同一月份不同处理以及不同月份同一植物群落处理土壤 CO₂ 排放存在显著差异;芨芨草群落土壤 CO₂ 累积排放量 (2508.01g/m²)显著高于其他处理.

4.2 土壤 CO_2 排放与土壤温度呈指数显著相关, ST5 和 ST15 能较好拟合土壤 CO_2 排放的变化。4~12 月干旱区盐湖沿岸土壤 Q_{10} 普遍呈增加趋势, Q_{10} 最大值出现在 11 或 12 月。土壤 CO_2 排放对 ST10 和 ST15 的变化最敏感。

4.3 盐湖沿岸土壤 CO_2 排放与含水量的相关性较低;一元线性方程能较好模拟土壤 CO_2 排放与电导率的关系。因此,除土壤温度外盐分也是影响干旱区盐湖沿岸土壤 CO_2 排放的重要因子。

参考文献:

- [1] Batjes N H. Harmonized soil property values for broad-scale modelling (WISE30sec) with estimates of global soil carbon stocks [J]. *Geoderma*, 2016,269:61–68.
- [2] Jian J, Steele M K, Thomas R Q, et al. Constraining estimates of global soil respiration by quantifying sources of variability [J]. *Global Change Biology*, 2018,24:4143–4159.
- [3] 段青云,夏 军,缪驰远,等.全球气候模式中气候变化预测预估的不确定性 [J]. *自然杂志*, 2016,38(3):182–188.
Duan Q Y, Xia J, Miu C Y, et al. The uncertainty in climate change projections by global climate models [J]. *Chinese Journal of Nature*, 2016,38(3):182–188.
- [4] Tranvik L J, Downing J A, Cotner J B, et al. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate [J]. *Limnology & Oceanography*, 2009,54:2298–2314.
- [5] Raymond P A, Hartmann J, Lauerwald R, et al. Global carbon dioxide emissions from inland waters [J]. *Nature*, 2014,507(7492):355–359.
- [6] 谢燕红,张 弥,肖 薇,等.湖泊和水库氧化亚氮通量分析 [J]. *中国环境科学*, 2018,38(9):3481–3493.
Xie Y H, Zhang M, Xiao W, et al. Analysis of nitrous oxide flux from lakes and reservoirs [J]. *China Environmental Science*, 2018,38(9):3481–3493.
- [7] 唐 洁,李志辉,汤玉喜,等.洞庭湖滩地土壤微生物与土壤呼吸特征分析 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2011,31(4):20–24.
Tang J, Li Z H, Tang Y X, et al. Characteristics analyses of soil respiration and microorganisms in beach of Dongting Lake [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2011,31(4):20–24.
- [8] 郑小兰,刘 敏,文帅龙,等.冬季太湖草、藻型湖区 N_2O 的生成与排放特征 [J]. *中国环境科学*, 2018,38(2):683–693.
Liu X L, Liu M, Wen S L, et al. Characteristics of N_2O formation and emission in algae and grass type zones in Lake Taihu in winter [J]. *China Environmental Science*, 2018,38(2):683–693.
- [9] 蒲旖旎,贾 磊,杨诗俊,等.太湖藻型湖区 CH_4 冒泡通量 [J]. *中国环境科学*, 2018,38(10):3914–3924.
Pu Y N, Jia L, Yang S J, et al. The methane ebullition flux over algae zone of Lake Taihu [J]. *China Environmental Science*, 2018,38(10):3914–3924.
- [10] 陈 骥,曹军骥,魏永林,等.青海湖北岸高寒草甸草原非生长季土壤呼吸对温度和湿度的响应 [J]. *草业学报*, 2014,23(6):78–86.
Chen J, Cao J J, Wei Y L, et al. Effect of grazing exclusion on soil respiration during the dormant season in alpine meadow grassland ecosystems on the northern shore of Qinghai Lake, China [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014,23(6):78–86.
- [11] 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 J J, Lv G H, Zhang Y, et al. Soil respiration of different plant communities in Ebinur Lake watershed [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009,22(3):362–370.
- [12] 赵明亮,李艳红,李发东.艾比湖湿地典型植物群落入冬期土壤呼吸日变化特征 [J]. *农业环境科学学报*, 2015,34(12):2432–2438.
Zhao M L, Li Y H, Li F D. Diurnal variation of soil respiration in a typical plant community in the Ebinur Lake wetland during beginning winter [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015,34(12):2432–2438.
- [13] 王金龙,李艳红,李发东.博斯腾湖人工和天然芦苇湿地土壤呼吸动态变化规律及其影响因素 [J]. *农业环境科学学报*, 2017,36(1):167–175.
Wang J L, Li Y J, Li F D. Dynamics of soil respiration and its influential factors on artificial and natural reed wetlands in Boston Lake [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017,36(1):167–175.
- [14] 李典鹏,姚美思,韩东亮,等.新疆达坂城盐湖不同植物群落土壤呼吸研究 [J]. *土壤*, 2017,49(3):621–629.
Li D P, Yao M S, Han D L, et al. Soil Respirations under different plant communities in Dabancheng Salt Lake of Xinjiang [J]. *Soils*, 2017,49(3):621–629.
- [15] 鲍士旦.土壤农化分析 [M]. 北京:中国农业出版社, 2000,25–38.
Bao S D. Soil agricultural chemistry analysis [M]. Beijing: China Agricultural Science Press, 2000:25–38.
- [16] 胡保安,贾宏涛,朱新萍,等.巴音布鲁克高寒湿地夏季 CO_2 和 CH_4 通量日变化研究 [J]. *干旱区资源与环境*, 2016,30(6):167–172.
Hu B A, Jia H T, Zhu X P, et al. Daily characteristics of summer CO_2 and CH_4 fluxes under different water conditions at Bayinbuluke alpine wetland [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016,30(6):167–172.
- [17] Yang F, Ali M, Zheng X Q, et al. Diurnal dynamics of soil respiration and the influencing factors for three land-cover types in the hinterland of the Taklimakan Desert, China [J]. *Journal of Arid Land*, 2017,9(4):568–579.
- [18] Wang H, Liao G, D'Souza M, et al. Temporal and spatial variations of greenhouse gas fluxes from a tidal mangrove wetland in Southeast China [J]. *Environment Science Pollution Research International*, 2016,23(2):1873–1885.
- [19] Rubio V E, Detto M. Spatiotemporal variability of soil respiration in a seasonal tropical forest [J]. *Ecology & Evolution*, 2017,7(17):7104–7116.
- [20] Bond-Lamberty B, Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record [J]. *Nature*, 2010,464:579–582.
- [21] 马 杰,王忠媛,唐立松,等.非生物过程对盐碱土土壤 CO_2 通量的影响 [J]. *干旱区地理*, 2014,37(3):555–560.
Ma J, Wang Z Y, Tang L S, et al. Effect of soil abiotic processes on soil CO_2 flux in saline/alkaline soils [J]. *Arid Land Geography*, 2014,37(3):555–560.

- [22] 李 旭. 盐柴类荒漠生态系统碳交换特征及其对环境因子的响应研究 [D]. 新疆农业大学, 2016.
- Li X. Characteristic of carbon exchange and its response to environmental factors of saline desert ecosystem [D]. Xinjiang Agricultural University, 2016.
- [23] Ma J, Zheng X J, Li Y. The response of CO₂ flux to rain pulses at a saline desert [J]. Hydrological Processes, 2012,26(26):4029–4037.
- [24] Kuzyakov Y, Friedel J K, Stahr K. Review of mechanisms and quantification of priming effects [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2000,32(11):1485–1498.
- [25] Pausch J, Kuzyakov Y. Carbon input by roots into the soil: Quantification of rhizodeposition from root to ecosystem scale [J]. Global Change Biology, 2017,24(1):1–12.
- [26] 马彦军, 王亚涛, 杨万鹏, 等. 10 个种源黑果枸杞光合作用特性研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2018,32(6):155–159.
- Ma Y J, Wang Y T, Yang W P, et al. Photosynthetic characteristics in 10 provenances of *Lycium ruthenicum* [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018,32(6):155–159.
- [27] 王金龙, 李艳红, 李发东. 博斯腾湖人工和天然芦苇湿地土壤 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放通量 [J]. 生态学报, 2018,38(2):668–677.
- Wang J L, Li Y H, Li F D. Emission fluxes of CO₂, CH₄, and N₂O from artificial and natural reed wetlands in Bosten Lake, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(2):668–677.
- [28] 冯育青. 太湖湖滨带土壤呼吸与微生物生物量研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2010.
- Feng Y Q. Dynamics of Soil respiration and soil microbial biomass in a riparian zone in Taihu Lake [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2010.
- [29] 林 丽, 曹广民, 徐世晓, 等. 青海盐湖碳源/汇功能初探 [J]. 干旱区资源与环境, 2010,24(8):22–26.
- Lin L, Cao G M, Xu S X, et al. Carbon sink or source to salt lakes in Qinghai [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010,24(8):22–26.
- [30] Liu X, Zhang W, Zhang B, et al. Diurnal variation in soil respiration under different land uses on Taihang Mountain, North China [J]. Atmospheric Environment, 2016,125:283–292.
- [31] Li Y, Zhao M, Li F. Soil respiration in typical plant communities in the wetland surrounding the high-salinity Ebinur Lake [J]. Frontiers of Earth Science, 2018:1–14.
- [32] 秦 璐, 吕光辉, 何学敏, 等. 艾比湖地区土壤呼吸对季节性冻土厚度变化的响应 [J]. 生态学报, 2013,33(22):7259–7269.
- Qin L, Lv G H, He X M, et al. Responses of soil respiration to changes in depth of seasonal frozen soil in Ebinur Lake area, arid area of Northwest China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013,33(22):7259–7269.
- [33] Curiel Y J, Janssens I A, Carrara A, et al. Annual Q₁₀ of soil respiration reflects plant phenological patterns as well as temperature sensitivity [J]. Global Change Biology, 2004,10(2):161–169.
- [34] Chen B Y, Liu S R, Ge J P, et al. Annual and seasonal variations of Q₁₀ soil respiration in the sub-alpine forests of the Eastern Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2010,42(10):1735–1742.
- [35] Power J M, Wettenhall R L. Does a general temperature-dependent Q₁₀ model of soil respiration exist at biome and global scale? [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2005,47(11):1288–1302.
- [36] Peng S S, Shilong P, Tao W, et al. Temperature sensitivity of soil respiration in different ecosystems in China [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2009,41(5):1008–1014.
- [37] Zhou T, Shi P, Hui D, et al. Global pattern of temperature sensitivity of soil heterotrophic respiration (Q₁₀) and its implications for carbon-climate feedback [J]. Journal of Geophysical Research Biogeosciences, 2015,114(G2):271–274.
- [38] Ru J, Zhou Y, Hui D, et al. Shifts of growing-season precipitation peaks decrease soil respiration in a semiarid grassland [J]. Global Change Biology, 2018,24(3):1001–1011.
- [39] 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 X Y, Li Y L, Zhao X Y, 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.
- [40] Setia R, Marschner P, Baldock J, et al. Is CO₂ evolution in saline soils affected by an osmotic effect and calcium carbonate? [J]. Biology & Fertility of Soils, 2010,46(8):781–792.
- [41] Setia R, Marschner P, Baldock J, et al. Relationships between carbon dioxide emission and soil properties in salt-affected landscapes [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2011,43(3):667–674.
- [42] Rietz D N, Haynes R J. Effects of irrigation-induced salinity and sodicity on soil microbial activity [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2003,35(6):845–854.

致谢: 本试验的野外监测工作得到了研究生胡保安、王宁宁和李政以及王辉、蒋大勇、马宁等同学大力帮助, 在此表示感谢。

作者简介: 李典鹏(1992–), 男, 湖南新邵人, 新疆农业大学硕士研究生, 主要从事干旱区湖泊碳循环方面研究. 发表论文 10 余篇。