

盐分对棉花光合特性及根际土壤 CO₂ 浓度的影响

刘芳婷, 范文波, 张金玺, 董倩倩, 魏建涛, 李长晓

(石河子大学水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832000)

摘要: 为了探寻不同盐分含量土壤棉花生长根际 CO₂ 浓度与光合指标之间的关系, 通过桶栽试验, 对 4 种盐分(CK:0%, F1:0.2%, F2:0.4%, F3:0.6%)处理下 2 种质地(砂土和壤土)土壤 CO₂ 浓度和棉花光合特征的变化规律进行了研究。结果表明:随着棉花生育期的推进, 壤土和砂土的土壤 CO₂ 浓度均呈先升高后降低的“单峰”曲线变化趋势, 峰值出现在花铃期, 分别高达 17 061.95, 17 572.00 μmol/mol。在盐分处理下不同质地土壤 CO₂ 浓度随土层深度的增加而增加, 50 cm 处土壤 CO₂ 浓度均值为 13 540.32 μmol/mol, 是表层 10 cm 处的近 2 倍。随着盐分含量的增加, 2 种质地土壤 CO₂ 浓度差异显著, 均呈下降趋势, 且壤土 CO₂ 浓度明显高于砂土; 盐分和土壤质地类型的相互作用对棉花净光合速率(P_n)达到极显著水平($P < 0.01$)。同一土壤质地类型条件下, 各生育期棉花 P_n 随着盐分含量的增加而减小, 均在 F3 处理下达到最小值, 盐分含量较低时对棉花光合指标的影响不显著($P > 0.05$); 同一盐分处理下, 不同土壤质地棉花 P_n 差异显著, 表现为壤土 > 砂土。不同盐分处理下 2 种质地土壤 CO₂ 浓度与棉花净光合速率之间密切相关, 棉花 P_n 能够解释根际土壤 CO₂ 浓度变化的 81.2%, 说明盐分和土壤质地类型通过棉花净光合速率影响土壤 CO₂ 浓度的大小。研究结果可为作物生长环境提供理论参考。

关键词: 棉花; 盐分; 土壤质地; CO₂ 浓度; 光合特性

中图分类号: S562 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2019)01-0206-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.01.033

Effects of Salinity on Photosynthetic Characteristics of Cotton and CO₂ Concentration in Rhizosphere Soils

LIU Fangting, FAN Wenbo, ZHANG Jinxi, DONG Qianqian, WEI Jiantao, LI Changxiao

(College of Water & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000)

Abstract: In order to explore the relationship between photosynthetic index and the variation of CO₂ concentration in the rhizosphere of cotton soils with different salinity contents, four different salinity treatments (CK: 0%, F1: 0.2%, F2: 0.4%, F3: 0.6%) were set, and the variation of soil CO₂ concentration and photosynthetic characteristics of cotton under two soil texture (sandy soil and loam soil) were studied in barrel cultivated cotton. The results showed that with the development of cotton growth period, the CO₂ concentration of the two soil textures both increased first and then decreased, and the peak values appeared at the flowering and boll stage, and the maximum CO₂ concentration was 17 061.95 μmol/mol in loam and 17 572.00 μmol/mol in sandy soil. Under the salt treatments, the soil CO₂ concentration of the two soil textures both increased with the increasing of soil depth. The average value of soil CO₂ concentration at 50 cm soil depth was 13 540.32 μmol/mol, which was nearly two times that of the surface layer at 10 cm depth. With the increasing of salinity content, the difference of CO₂ concentration between the two texture soils was significant, both of them showed a downward trend, and the CO₂ concentration of loam soil was significantly higher than that of sandy soil. The interaction between salinity content and soil texture had extremely significant effects on net photosynthetic rate (P_n) of cotton ($P < 0.01$). Under the same soil texture condition, P_n of cotton showed a downward trend with the increasing of salinity content at different growth stages, and reached the minimum value in F3 treatment, but the effect of low salinity content on cotton photosynthesis index was not significant ($P > 0.05$). Under the same salinity treatment, there was significant difference in

收稿日期: 2018-07-19

资助项目: 国家自然科学基金项目(51569028)

第一作者: 刘芳婷(1993-), 女, 硕士研究生, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: 2449530939@qq.com

通信作者: 范文波(1975-), 男, 副教授, 主要从事农业节水灌溉理论与技术研究。E-mail: fwb205@163.com

P_n of cotton between different soil textures, showing loam > sandy soil. There was a close correlation between CO₂ concentration of two soil textures and cotton net photosynthetic rate under different salinity treatments, and cotton P_n could explain 81.2% of the variation of CO₂ concentration in rhizosphere soil, which indicated that salinity content and soil texture type affected soil CO₂ concentration through cotton net photosynthetic rate. The results could provide a theoretical reference for the growth environment of crop.

Keywords: cotton; salinity; soil texture; CO₂ concentration; photosynthetic characteristics

新疆地处内陆干旱地区,盐碱化土壤分布广泛,是全国主要的盐渍土壤分布区。根据2013年遥感影像解译和实际调查结果,新疆耕地总面积达 8.63×10^6 hm²,其中盐渍化耕地面积 3.23×10^6 hm²,占耕地总面积的37.46%^[1]。棉花(*Malvaceae Gossypium* Spp)是新疆主要经济作物之一,土壤盐碱含量的高低直接影响棉花光合作用和根系呼吸作用,进而影响到棉花的生长。国内外许多学者^[2-3]在土壤盐分对作物光合特性影响方面做了大量研究,研究发现土壤盐分对作物光合特性有显著影响,但是针对不同质地含盐土壤条件下棉花光合作用与土壤CO₂浓度之间关系的研究报道较少。

土壤质地是反映潜在土壤生产力的重要指标,前人^[4]研究认为不同的土壤质地其土壤理化性质差异较大,颗粒组成、机械阻力和总孔隙度都不一样,这些因素通过影响水、热、气和营养在土壤中的分布和含量而影响作物根系的生长发育和产量。不同土壤质地中作物根系吸收养分的能力存在差异,对作物光合特性产生重要作用。农田土壤呼吸是CO₂的重要排放源,主要包括植物根系呼吸和土壤微生物及动物呼吸作用,在作物生长旺盛时期,根系呼吸作用更为突出^[5]。土壤质地通过影响土壤通气性和水分含量,进而影响CO₂在土壤中的扩散速率及作物光合作用和土壤呼吸作用的相对强弱;土壤质地还影响土壤有机质的分解速率,进而影响产CO₂微生物的基质供应。目前,土壤质地对棉花N₂O排放影响的研究已有报道,而对土壤CO₂排放的影响报道较少。徐华等^[6]研究发现不同质地土壤N₂O排放量大小关系表现为壤土>砂土>黏土。

植物光合作用和土壤呼吸是整个陆地生态系统碳循环的重要组成部分,土壤呼吸引起大气CO₂浓度变化,大气CO₂浓度又影响植物的光合作用。因此,土壤呼吸与植物光合之间的关系成为全球碳平衡和气候变化研究的热点问题之一。本试验选择2种土壤类型(壤土和砂土),研究了盐分与土壤质地对各生育期棉花光合特性和土壤CO₂浓度的影响,分析了棉花光合指标与土壤CO₂浓度之间的关系,可为今后研究土壤气体、盐分、土壤类型等环境要素对作物生长的影响提供理论参考。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验于2017年5—10月在石河子大学水利建筑工程学院水利与土木工程实验中心展开(44°18'25" N, 86°03'27" E)。该区地处天山北麓中段,准噶尔盆地的南缘,属于典型的温带大陆性气候类型。平均海拔450.8 m,多年平均气温6~8℃,多年平均降水量180~270 mm,全年蒸发量1 000~1 500 mm,日照时间2 300~2 700 h,无霜期160~170 d。壤土有机质含量为15.35 g/kg,砂土有机质含量为13.58 g/kg。

1.2 试验设计

采用桶栽试验,塑料桶规格(顶部内径×底部内径×高)为48 cm×39 cm×55 cm,在桶的底部打孔。选择2种不同的土壤类型,即壤土(S1)和砂土(S2)。将氯化钠和硫酸钠等摩尔量混合,按不同的盐土比均匀掺入经自然风干、过筛去杂后的基础土壤中,按设计容重1.29 g/cm³分层装土50 cm,设计对照处理CK及3个盐分梯度(土壤盐分含量分别为CK:0%, F1:0.2%, F2:0.4%, F3:0.6%),试验共8个处理,每个处理重复3次,采用完全随机设计。

供试棉花品种为农丰133号,于2017年4月24日采用“干播湿出”方式播种,播种深度为3~4 cm。5月3日开始出苗,定苗后每桶留3株长势一致的棉株,10月12日吐絮结束。各处理采用相同的水管理,全生育期灌水12次,灌溉定额为4 500 m³/hm²。采用输液管模拟滴头进行灌溉,精确控制每个桶的灌水量,滴头流量为1.8 L/h。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤CO₂浓度 在距土壤表面10,20,30,40,50 cm处理设土壤空气采集器,分别在棉花蕾期(6月23日)、花铃期(8月16日)、吐絮期(9月9日)采用注射器法采集各处理不同深度土壤气体样品,用气相色谱仪法测定样品中CO₂的浓度,采气时间为10:00。

1.3.2 光合指标 在棉花蕾期(6月23日)、花铃期(8月16日)、吐絮期(9月9日)选取棉花功能叶采用LC pro+全自动便携式光合仪测定其光合特性,测定时间为10:00—20:00,时间间隔为2 h,各处理连续测量3株,每株棉花选取3片叶子进行测定并取平均值。测定项目包括棉花净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)

和胞间 CO_2 浓度(C_i)等光合生理指标。

1.4 数据处理与分析

利用 SPSS 20.0 软件对数据进行统计分析,采用 Origin 8.5 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 盐分与土壤质地对棉花根际土壤 CO_2 浓度的影响

2.1.1 不同深度土壤 CO_2 浓度的变化特征 由图 1 可知,不同试验处理下土壤 CO_2 浓度呈现上低下高的分布特征,表层 10 cm 处最低,随着土层深度的增加总体呈递增趋势,50 cm 处土壤 CO_2 浓度是 10 cm 处的 2 倍左右。在棉花蕾期,表层 10 cm 处土壤 CO_2 浓度平均值为 $6\ 201.20\ \mu\text{mol}/\text{mol}$, 20, 30, 40 cm 处土壤 CO_2 浓度分别比 10 cm 处增加了 17.52%, 47.71%, 74.52%, 50 cm 处土壤 CO_2 浓度是 10 cm 处的 2.09 倍。在花铃期,10 cm 处土壤 CO_2 浓度均值为 $8\ 334.04\ \mu\text{mol}/\text{mol}$, 20, 30, 40, 50 cm 处土壤 CO_2 浓度分别是 10 cm 处的 1.25, 1.47, 1.62, 1.93 倍。在棉花吐絮期,10 cm 处土壤 CO_2 浓度均值为 $5\ 702.17\ \mu\text{mol}/\text{mol}$, 比 20, 30, 40, 50 cm 处分别降低了 11.21%, 27.15%, 39.78%, 50.56%。这种强烈的 CO_2 浓度垂直梯度可能是由于表层土壤孔隙发达,作物根系呼吸和微生物呼吸产生的 CO_2 能够快速扩散、逸出土壤,而深层土壤容重大、孔隙度小以及犁底层等限制了 CO_2 的扩散,使其在较深土层积累较多,从而造成了上低下高的剖面分布特点。

2.1.2 不同生育期土壤 CO_2 浓度的变化特征 由图 1 可知,随着生育期的延长,各处理的土壤 CO_2 浓度整体呈先升高后降低的变化趋势。在棉花蕾期,各处理土壤 CO_2 浓度平均值为 $9\ 291.23\ \mu\text{mol}/\text{mol}$;在花铃期,各处理土壤 CO_2 浓度有所增加,达到最大值,各处理平均值为 $12\ 129.27\ \mu\text{mol}/\text{mol}$,这是由于花铃期棉花生长发育较旺盛,根系呼吸作用强, CO_2 的产生速率快。在棉花生育后期(吐絮期),各处理根际土壤 CO_2 浓度降到最低,均值为 $8\ 190.51\ \mu\text{mol}/\text{mol}$ 。

2.1.3 盐分对根际土壤 CO_2 浓度的影响 由图 1 可知,在壤土(S1)和砂土(S2)2 种土壤质地类型条件下,土壤 CO_2 浓度随着盐分含量的增加而减小,土壤 CO_2 浓度的大小为 $\text{CK} > \text{F1} > \text{F2} > \text{F3}$,说明土壤盐分含量显著影响土壤 CO_2 浓度。在 S1 土壤质地类型条件下,花铃期 CK 比 F1、F2 和 F3 处理分别高 7.89%, 15.71% 和 26.94%。在 S2 土壤质地类型条件下,花铃期 CK 比 F1、F2 和 F3 处理分别高 6.21%, 18.89% 和 30.66%。产生的原因是土壤盐分含量最低(CK)时,植物根系呼吸作用和土壤微生物活动较强,土壤有机碳的分解速率快,致使土壤 CO_2 浓度达到最大

值;随着盐分含量的升高,棉花生长受到严重胁迫,根系呼吸作用和土壤微生物活动受到抑制,减少了土壤 CO_2 的释放量,使土壤中 CO_2 浓度较低。

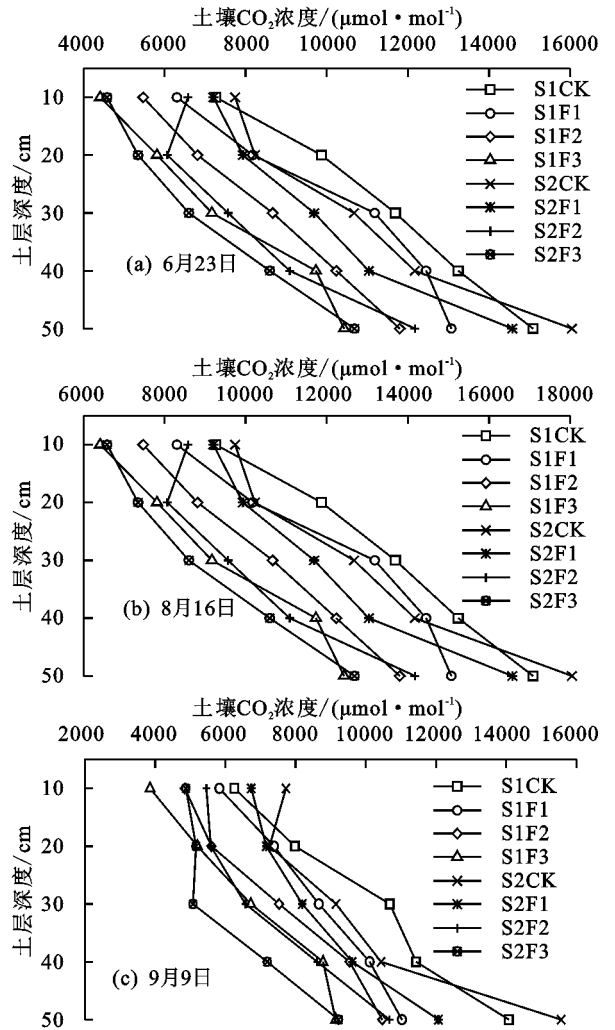


图 1 盐分条件下不同质地土壤 CO_2 浓度的变化

2.1.4 土壤质地对根际土壤 CO_2 浓度的影响 由图 1 可知,在同一盐分含量条件下,2 种土壤质地类型的土壤 CO_2 浓度总体表现为壤土 $>$ 砂土。在 CK、F1、F2 和 F3 盐分含量处理下,花铃期壤土(S1)比砂土(S2)处理分别高 2.93%, 1.33%, 5.76%, 5.94%,主要是由于壤土具有较强的保水能力和较高的肥力,土壤微生物呼吸速率和棉花根系呼吸作用强度较高,所以壤土中的 CO_2 浓度较高于砂土。

2.2 盐分与土壤质地对棉花光合特征的影响

2.2.1 盐分与土壤质地对棉花净光合速率(P_n)和蒸腾速率(T_r)的影响 由表 1 可知,随着生育期的推进,棉花叶片的 P_n 和 T_r 均呈现出先增加后减小的趋势,在花铃期(8月16日)达到最大值,最小值均出现在吐絮期(9月9日)。在壤土(S1)和砂土(S2)2 种土壤质地类型条件下,棉花净光合速率和蒸腾速率随着盐分含量的增加而下降,较对照组均有所减小。在 S1 土壤质地类型条件下, F1、F2 和 F3 处理的净

光合速率相对于 CK 分别减少了 3.02%, 10.71% 和 20.21%, 蒸腾速率相对于 CK 分别减少了 2.77%, 12.74% 和 20.08%; 在 S2 土壤质地类型条件下, F1、F2 和 F3 处理的净光合速率相对于 CK 分别减少了

6.73%, 13.09%, 22.08%, 蒸腾速率相对于 CK 分别减少了 7.67%, 15.84%, 23.19%, 说明盐分含量低时对棉花 P_n 和 T_r 的影响较小, 盐分含量较高时, 棉花叶片净光合速率和蒸腾速率显著降低。

表 1 不同处理对棉花光合速率和蒸腾速率的影响

处理	净光合速率/($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)			蒸腾速率/($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)		
	6 月 23 日	8 月 16 日	9 月 9 日	6 月 23 日	8 月 16 日	9 月 9 日
S1CK	21.41±0.25a	25.55±0.42a	19.45±0.26a	4.79±0.19a	5.41±0.50a	4.51±0.42a
S1F1	20.37±0.28ab	25.21±0.28a	18.82±0.28ab	4.58±0.18a	5.27±0.32a	4.45±0.15a
S1F2	19.16±0.50cd	23.62±0.27b	16.51±0.32c	3.94±0.28b	4.98±0.15ab	3.92±0.27b
S1F3	17.66±0.48e	20.46±0.25e	14.86±0.35d	3.67±0.27bc	4.60±0.25bc	3.48±0.15bc
S2CK	19.88±0.19bc	23.26±0.57bc	18.48±0.17b	4.61±0.37a	5.36±0.23a	4.41±0.15a
S2F1	18.39±1.44de	22.54±0.33c	16.54±0.31c	4.40±0.16a	5.10±0.50ab	3.77±0.33b
S2F2	17.45±0.36e	21.41±0.97d	14.69±0.24d	3.85±0.13bc	4.64±0.07bc	3.61±0.14bc
S2F3	15.70±0.48f	19.35±0.30f	12.96±0.82e	3.49±0.19c	4.33±0.20c	3.22±0.27c
土质	25.913**	61.775**	102.950**	13.446**	4.831**	11.264**
盐分	7.439*	7.205*	4.270	0.566	1.176	2.878
土质×盐分	13.148**	15.429**	27.227**	32.113**	10.583**	13.540**

注: * 表示差异显著 ($P < 0.05$); ** 表示差异极显著 ($P < 0.01$); 同列数值后不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

不同盐分处理下 2 种土壤质地棉花净光合速率和蒸腾速率不同, 总体表现为壤土 > 砂土。在 CK、F1、F2 和 F3 处理下, 壤土的净光合速率分别比砂土高 7.77%, 12.05%, 10.71%, 10.35%; 在 CK、F1 和 F3 处理下, 壤土的蒸腾速率比砂土高 2.30%, 7.73%, 6.43%。方差分析显示: 土壤质地和盐分的交互作用对棉花各生育期 P_n 和 T_r 达到极显著水平 ($P < 0.01$), 土壤质地类型对棉花各生育期 P_n 和 T_r 达到极显著水平 ($P < 0.01$); 盐分对棉花 P_n 和 T_r 的影响总体上不显著 ($P > 0.05$)。各生育期 S1CK 处理的 P_n 和 T_r 值高于其他处理, 表现出明显的交互作用。说明只有适宜的土壤质地类型和盐分含量才有利于棉花生长。

2.2.2 盐分与土壤质地对棉花气孔导度 (G_s) 和胞间 CO₂ 浓度 (C_i) 的影响 气孔是水分和 CO₂ 进出植物体的重要通道, 对植物生长具有一定的调节作用。由表 2 可知, 气孔导度和胞间 CO₂ 浓度随着生育期的推进呈现出“上升—下降”的变化趋势, 蕾期至花铃期气孔导度值和胞间 CO₂ 浓度值增加, 而后花铃期至吐絮期气孔导度值和胞间 CO₂ 浓度值又下降, 与棉花净光合速率的变化趋势一致, 但 C_i 的最小值出现在蕾期, 与 G_s 和 P_n 不同。方差分析表明: 土壤质地类型和盐分的交互作用对棉花各生育期气孔导度 (G_s) 和胞间 CO₂ 浓度 (C_i) 达到极显著水平 ($P < 0.01$), 其中土壤质地类型对棉花 G_s 和 C_i 影响不显著 ($P > 0.05$); 盐分对棉花各生育期 G_s 和 C_i 均达到极显著水平 ($P < 0.01$)。

表 2 不同处理对棉花气孔导度和胞间 CO₂ 浓度的影响

处理	气孔导度/($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)			胞间 CO ₂ 浓度/($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)		
	6 月 23 日	8 月 16 日	9 月 9 日	6 月 23 日	8 月 16 日	9 月 9 日
S1CK	272.55±0.18a	425.29±1.43a	225.12±1.34a	367.91±0.19a	408.99±1.26a	368.42±0.23a
S1F1	270.11±1.85a	425.56±3.01a	222.98±0.31ab	367.36±0.32a	397.95±0.72b	368.12±0.08a
S1F2	265.92±2.20b	403.45±3.18c	203.33±3.03c	359.27±0.57b	363.43±0.38d	359.33±0.34c
S1F3	248.20±3.68d	386.43±1.20d	186.41±1.19d	310.26±0.83d	351.26±0.39e	331.41±0.19d
S2CK	265.61±0.21b	420.18±1.15ab	220.26±1.08ab	359.84±0.75b	408.01±0.30a	367.26±0.10b
S2F1	257.29±0.96c	417.60±6.97b	217.27±6.69b	358.32±0.33b	395.16±0.41c	395.27±0.32c
S2F2	243.00±3.41e	392.14±2.52d	191.98±2.71d	333.22±2.70c	362.34±0.98d	331.32±0.19d
S2F3	223.59±0.40f	369.13±5.47e	169.13±5.47e	297.42±0.79e	349.53±0.28f	298.46±0.04e
土质	8.880**	1.660	1.517	1.780	0.027	3.620
盐分	12.219**	55.696**	58.292**	62.947**	3360.526**	23.788**
土质×盐分	192.821**	95.226**	104.489**	1842.662**	4172.886**	42192.087**

在壤土(S1)和砂土(S2)2种土壤质地类型条件下,随着盐分含量的增加各处理的棉花 G_s 和 C_i 逐渐减小,均在F3处理下达到最小值。在S1土壤质地类型条件下,F1、F2和F3处理的气孔导度分别比CK减少了0.47%、5.45%和11.04%,胞间 CO_2 浓度相对于CK分别减少了0.99%、5.38%和13.21%;在S2土壤质地类型条件下,F1、F2和F3处理的气孔导度分别比CK减少了1.53%、8.71%和15.92%,胞间 CO_2 浓度相对于CK分别减少了1.97%、9.54%和16.71%。说明盐分含量越高,对棉花叶片气孔导度和胞间 CO_2 浓度的抑制作用越强。

由表2可知,不同盐分处理下2种土壤质地棉花 G_s 和 C_i 不同,总体表现为壤土>砂土。在CK、F1、F2和F3处理下,壤土的气孔导度分别比砂土高1.87%、2.97%、5.51%、7.77%,胞间 CO_2 浓度比砂土高0.90%、1.86%、5.37%、5.03%。

2.3 土壤 CO_2 浓度与棉花光合指标的相关分析

对棉花净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i)与土壤 CO_2 浓度进行相关分析。由表3可知,棉花 P_n 、 T_r 、 G_s 和 C_i 与土壤 CO_2 浓度的相关系数分别为0.910、0.923、0.872、0.843,显著水平均在0.01以下,对土壤 CO_2 浓度有极显著影响。进一步采用通径分析对各光合指标对土壤 CO_2 浓度的作用进行了分析(表4)。各光合指标对土壤 CO_2 浓度的直接作用差异较大,作用系数分别为-0.076、0.425、0.425和0.241,反映了棉花 P_n 、 T_r 、 G_s 和 C_i 对土壤 CO_2 浓度的作用程度。在直接作用中, T_r 和 G_s 作用最明显,作用系数均为0.425,表现为正效应,其次是 C_i , P_n 对土壤 CO_2 浓度产生负的直接作用效应;在间接作用中,间接作用系数最大的为 P_n ,说明 P_n 对土壤 CO_2 浓度的间接作用最大,主要是通过 T_r 、 G_s 和 C_i 对土壤 CO_2 浓度产生正的间接作用效应,其次是 C_i 和 T_r ,作用系数分别为0.602和0.498。由通径分析结果可知,这4

个光合指标及其交互效应对土壤 CO_2 浓度的决定系数是0.897,剩余通径系数为0.321,可见,光合指标与土壤 CO_2 浓度有着密切的关系。

表3 棉花光合指标与土壤 CO_2 浓度的相关性分析

指标	P_n	T_r	G_s	C_i	CO_2
P_n	1	0.959**	0.888**	0.836**	0.910**
T_r		1	0.833**	0.900**	0.923**
G_s			1	0.666**	0.872**
C_i				1	0.843**
CO_2					1

注: $N=24$; **表示在 $P=0.01$ 水平上显著。

表4 棉花光合指标对土壤 CO_2 浓度作用的通径分析

光合指标	直接作用	间接作用	通径分析系数矩阵				决策系数(R_i^2)
			$\rightarrow P_n$	$\rightarrow T_r$	$\rightarrow G_s$	$\rightarrow C_i$	
P_n	-0.076	0.987	0.408	0.377	0.202	-0.145	
T_r	0.425	0.498	-0.073	0.354	0.217	0.604	
G_s	0.425	0.447	-0.068	0.354	0.161	0.561	
C_i	0.241	0.602	-0.064	0.383	0.283	0.348	

注:决定系数=0.897,剩余通径系数=0.321。

比较各光合指标决策系数的大小: $R_{(T_r)}^2 > R_{(G_s)}^2 > R_{(C_i)}^2 > R_{(P_n)}^2$,说明棉花蒸腾速率和气孔导度对土壤 CO_2 浓度的作用程度最大,其次是胞间 CO_2 浓度和净光合速率。

由以上相关分析和通径分析表明:盐分处理下不同土壤质地棉花 P_n 、 T_r 、 G_s 和 C_i 对土壤 CO_2 浓度的作用系数和决策系数很大,进一步说明盐分和土壤质地类型通过棉花净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO_2 浓度影响土壤 CO_2 浓度的大小。通过对土壤 CO_2 浓度与光合指标进行拟合。由图2可知, P_n 、 T_r 、 G_s 和 C_i 与土壤 CO_2 浓度均呈现二次曲线关系,决定系数 R^2 分别为0.812、0.841、0.756、0.686,能够解释土壤 CO_2 浓度变化的68.6%~81.2%。根据拟合度可知,土壤 CO_2 浓度与 P_n 、 T_r 、 G_s 和 C_i 之间关系密切,均表现为正相关,也表明植株光合作用对土壤呼吸有影响,进而影响土壤 CO_2 浓度。

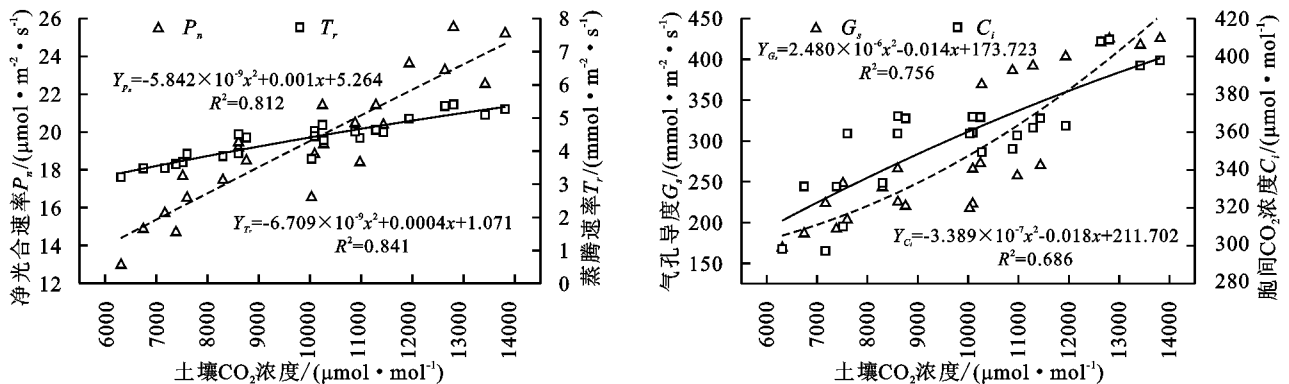


图2 土壤 CO_2 浓度与棉花光合指标的相关性

3 讨论

陆地碳循环研究主要包括植物光合固碳与土壤呼吸释碳这 2 个重要的生态学过程,CO₂ 通过植物光合作用从大气进入到生态系统,再通过土壤呼吸的释碳作用返回大气,这两者始终伴随着碳的输入和输出,因此植物光合与土壤呼吸的研究已成为陆地碳循环研究的关键问题之一。本文采用桶栽试验,研究了不同盐分处理下 2 种土壤质地棉花光合指标和土壤 CO₂ 浓度的变化特征,并分析了土壤 CO₂ 浓度与光合指标的关系,为进一步探求土壤质地类型和盐分含量影响作物生长发育的深层机理提供理论参考。

3.1 土壤 CO₂ 浓度的变化特征

土壤是一个多孔介质,土壤中 CO₂ 浓度的空间分布主要取决于土壤气体的产生、大气向下垂直扩散以及土壤气体向大气排放的综合结果。Kusa 等^[7] 研究表明,土壤剖面 CO₂ 浓度在 0—40 cm 土层随着深度增加而增大,而 40 cm 以下 CO₂ 浓度趋于稳定。本试验研究发现,50 cm 处土壤 CO₂ 浓度是表层 10 cm 的 2 倍左右,表明棉花栽培土壤 CO₂ 浓度随着土层深度的增加而增加,这与 Wang 等^[8] 小麦—玉米轮作土壤研究结果基本一致,但 CO₂ 浓度的大小不同,这可能与气候环境、土壤环境和作物类型等有关。赵志敏等^[9] 采用 GMP222 对棉花冠幅下和棉花间隙土壤不同深度 CO₂ 浓度进行测定,结果发现种植棉花的土壤 CO₂ 浓度明显高于棉花之间空地的 CO₂ 浓度,这可能是裸地土壤中 CO₂ 的产生取决于土壤微生物的呼吸,棉花地的土壤 CO₂ 是土壤微生物呼吸和植物根系呼吸共同作用的结果。

3.2 盐分与土壤质地对土壤 CO₂ 浓度和棉花光合特性的影响

3.2.1 盐分与土壤质地对土壤 CO₂ 浓度的影响

盐分和土壤质地是土壤 CO₂ 含量的调控因子,盐分对土壤 CO₂ 的影响主要取决于微生物活性对盐离子胁迫的适应性。有研究^[10] 表明,高盐条件下,盐分胁迫提高了微生物的胞外渗透势而使微生物活性下降,土壤 CO₂ 生成速率降低,盐分产生的离子毒害减少了微生物数量,从而降低了其向土壤中分泌的土壤酶量和酶活性,抑制 CO₂ 的产生。本研究中,土壤 CO₂ 浓度随盐分含量的升高而减小,表明盐分对土壤 CO₂ 浓度产生抑制作用,盐分越高,抑制作用越强。

土壤质地通过改变水的渗透能力和气体扩散速率,进而影响土壤 CO₂ 的产生。Dilustro 等^[11] 分析了美国乔治亚洲西南部混交松树林土壤呼吸对土壤质地的动态响应,指出黏土的土壤 CO₂ 生成速率高

于砂土,也有学者^[12] 发现柠条林地黄绵土的土壤 CO₂ 生成速率高于风砂土,由此可见,不同土壤质地对土壤 CO₂ 浓度有不同程度的影响。本试验结果表明,壤土中的 CO₂ 浓度明显高于砂土,可能是因为砂土颗粒间孔隙大,保水性差,通气性强,土壤中作物根系呼吸和微生物呼吸产生的 CO₂ 快速逸出土壤,从而使土壤 CO₂ 浓度较低,而壤土保水性好,肥力高,通气性弱,植物生长旺盛,根系呼吸作用较强,致使土壤中 CO₂ 浓度较高,当然这还需要以后进一步研究。

3.2.2 盐分与土壤质地对棉花光合特性的影响 棉花是一种喜光作物,光合作用是棉花生长发育过程中重要的生理活动特征。本文从土壤质地的角度分析了盐分含量对棉花光合作用的影响。研究发现,随盐分含量的增加棉花叶片的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO₂ 浓度逐渐减小,这与前人^[13-14] 研究结果相似。张雷等^[13] 发现随土壤盐分水平的提高,棉花功能叶的蒸腾速率和净光合速率均下降,可能是盐分胁迫通过离子毒害、渗透胁迫等途径使植物的正常光合作用受到抑制。

不同土壤质地土壤孔隙度不同,土壤孔隙度又进一步影响土壤温度、养分和水分含量,进而影响植物的生长,植物的生长发育与地上部分的光合作用有一定的相关关系。本试验研究发现,不同土壤质地棉花叶片的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO₂ 浓度均表现为:壤土>砂土。邵云等^[15] 通过盆栽试验研究铬胁迫条件下土壤质地对小麦植株形态及旗叶光合特性的影响,发现壤土的 P_n 值极显著高于砂土,砂土显著高于黏土, T_r 均表现为壤土>黏土>砂土,与本研究结果基本相同。综合分析盐分和土壤质地对土壤 CO₂ 浓度和棉花光合作用影响的研究结果,可知棉花根系在低盐分的壤土基质上能够正常生长,土壤 CO₂ 的生成速率快,光合能力强,故低盐分的壤土更适宜棉花的生长。

3.3 光合指标与土壤 CO₂ 浓度的关系

土壤呼吸是全球碳循环的重要组成部分,也是陆生植物固定的 CO₂ 返回大气的主要途径。目前,不少研究^[16-17] 发现土壤呼吸与地上部分光合作用之间具有紧密联系,光合作用的强弱在很大程度上影响植被根系活性,进而影响土壤 CO₂ 浓度。国外学者 Hogberg 等^[18] 对树木进行环割,结果发现土壤呼吸迅速下降了 50%;也有研究^[19] 表明土壤呼吸与叶面积指数存在显著相关性。本研究通过对土壤 CO₂ 浓度与光合指标的函数拟合,得出土壤 CO₂ 浓度与净光合速率、蒸腾速率、气孔导度及胞间 CO₂ 浓度的拟合相关系数分别为 0.812,

0.841, 0.756, 0.686, 均呈现二次曲线关系, 表明棉花光合生理指标与土壤 CO_2 浓度具有密切的相关关系, 这与郁珊珊等^[20]的研究结果一致。

4 结论

(1) 盐分处理下 2 种质地土壤 CO_2 浓度呈上低下高的分布特点, 50 cm 处土壤 CO_2 浓度是表层 10 cm 的 2 倍左右; 不同生育期壤土和砂土的土壤 CO_2 浓度具有明显的差异, 整体呈现出“上升一下降”的趋势, 峰值出现在花铃期, 分别高达 17 061.95, 17 572.00 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 。在不同盐分含量和土壤质地类型条件下土壤 CO_2 浓度差异明显, 其随着盐分含量的增加呈下降趋势, 且壤土中的 CO_2 浓度高于砂土。

(2) 盐分和土壤质地类型的交互作用对棉花净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO_2 浓度具有极显著影响 ($P < 0.01$)。在棉花各生育阶段, P_n 、 T_r 、 G_s 和 C_i 随着盐分含量的增加均呈下降趋势, 峰值均出现在花铃期。吐絮期的 P_n 、 T_r 、 G_s 均小于蕾期, 而 C_i 大于蕾期。同一盐分处理下, 不同土壤质地类型的棉花 P_n 、 T_r 、 G_s 和 C_i 均表现为壤土 $>$ 砂土, 低盐分壤土更适宜棉花的生长。

(3) 盐分处理下 2 种质地土壤 CO_2 浓度与棉花光合指标具有密切的相关关系, 棉花 P_n 、 T_r 、 G_s 和 C_i 与土壤 CO_2 浓度均呈现二次曲线关系, 能够解释土壤 CO_2 浓度变化的 68.6%~81.2%。说明盐分和土壤质地类型通过棉花净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO_2 浓度影响土壤 CO_2 浓度的大小。

参考文献:

- [1] 张寿雨, 吴世新, 贺可. 基于开垦年龄的新疆盐渍化耕地时空特征分析[J]. 干旱区研究, 2017, 34(5): 972-979.
- [2] 朱延凯, 王振华, 李文昊. 不同盐胁迫对滴灌棉花生理生长及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(2): 298-305.
- [3] 郭丽, 郑春莲, 曹彩云, 等. 长期咸水灌溉对小麦光合特性与土壤盐分的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 183-190.
- [4] 路海东, 薛吉全, 马国胜, 等. 陕西榆林春玉米高产田土壤理化性状及根系分布[J]. 应用生态学报, 2010, 21(4): 895-900.
- [5] 李晓莎, 武宁, 刘玲, 等. 不同秸秆还田和耕作方式对夏玉米农田土壤呼吸及微生物活性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1765-1771.
- [6] 徐华, 邢光熹, 蔡祖聪, 等. 土壤质地对小麦和棉花田 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2000, 19(1): 1-3.
- [7] Kusa K, Sawamoto T, Hu R, et al. Comparison of N_2O and CO_2 concentrations and fluxes in the soil profile between a Gray Lowland soil and an Andosol [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2010, 56(1): 186-199.
- [8] Wang Y Y, Hu C S, Ming H, et al. Concentration profiles of CH_4 , CO_2 and N_2O in soils of a wheat-maize rotation ecosystem in North China Plain, measured weekly over a whole year [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2013, 164(1): 260-272.
- [9] 赵志敏, 赵成义, 于波, 等. 基于 GMP222 连续测定土壤剖面 CO_2 浓度的干旱区棉田土壤呼吸研究[C]// 中国农业生态环境保护协会. 第四届全国农业环境科学学术研讨会论文集. 天津: 农业环境科学学报, 2011: 640-650.
- [10] 操庆, 曹海生, 魏晓兰, 等. 盐胁迫对设施土壤微生物量碳氮和酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 300-304.
- [11] Dilustro J J, Collins B, Duncan L, et al. Moisture and soil texture effects on soil CO_2 efflux components in southeastern mixed pine forests [J]. Forest Ecology and Management, 2005, 204(1): 87-97.
- [12] Cable J M, Ogle K, Williams D G, et al. Soil texture drives responses of soil respiration to precipitation pulses in the Sonoran Desert: Implications for climate change [J]. Ecosystems, 2008, 11(6): 961-979.
- [13] 张雷, 张国伟, 孟亚利, 等. 盐分条件下棉花相关生理特性的变化及水分胁迫指数模型的构建[J]. 中国农业科学, 2013, 46(18): 3768-3775.
- [14] 阿曼古丽·买买提阿力, 王立红, 郑慧, 等. 盐胁迫对海岛棉幼苗生长的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(2): 121-126.
- [15] 邵云, 刘会娟, 胡永娟, 等. 土壤质地对铬胁迫下小麦灌浆期形态与旗叶光合特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2012, 32(6): 1150-1155.
- [16] 井艳丽, 关德新, 吴家兵, 等. 光合作用调控土壤呼吸研究进展[J]. 应用生态学报, 2013, 24(1): 269-276.
- [17] 林力涛, 孙学凯, 雷倩, 等. 光合速率与光合条件对沙质草地土壤呼吸的调控作用[J]. 生态学杂志, 2018, 37(7): 2107-2113.
- [18] Högborg P, Nordgren A, Buchmann N, et al. Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration [J]. Nature, 2001, 411(6839): 789.
- [19] Bahn M, Rodeghiero M, Andersson M, et al. Soil respiration in European grasslands in relation to climate and assimilate supply [J]. Ecosystems, 2008, 11(8): 1352-1367.
- [20] 郁珊珊, 王浩, 王亚军. 福州市绿地生态系统光合特性及土壤呼吸研究[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(6): 483-488.