

盐碱地滴灌春小麦光合特性与耐盐指标研究

王振华^{1,2} 裴磊^{1,2} 郑旭荣^{1,2} 李文昊^{1,2}

(1. 石河子大学水利建筑工程学院, 石河子 832000; 2. 石河子大学现代节水灌溉兵团重点实验室, 石河子 832000)

摘要: 通过盆栽试验,在非盐化土、轻度盐化土、中度盐化土、强度盐化土、盐土等5种不同的土壤盐分含量(分别为CK; 2.0 g/kg、T1:5.0 g/kg、T2:9.0 g/kg、T3:16.5 g/kg、T4:24.5 g/kg)处理条件下,使用美国产CI-340型手持式光合仪于春小麦拔节期(5月20日)、抽穗期(5月28日)和乳熟期(6月11日)测定了光合有效辐射、气温、大气CO₂浓度等环境因子指标,以及净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间CO₂浓度等光合生理特性指标的变化,根据记录数据计算叶片光合作用的气孔限制值和非气孔限制值,同时观测了春小麦产量和土壤盐分数据,通过线性回归分析计算耐盐指标。结果表明,不同盐分处理下春小麦叶片净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间CO₂浓度日变化规律相近,光合作用“午休”现象明显。气孔与非气孔因素同时存在限制春小麦叶片光合作用,净光合速率的下降在低盐分土壤处理下主要由气孔因素引起,而在高盐分土壤处理下主要由非气孔因素引起。春小麦在0~40 cm土层耐盐临界值为6.46 g/kg,耐盐极限值为30.72 g/kg;减产10%的耐盐阈值为9.63 g/kg。初步认为滴灌春小麦适宜种植于非盐化土以及轻度盐化土。

关键词: 春小麦; 滴灌; 土壤盐分; 光合特性; 耐盐指标

中图分类号: S278 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)04-0065-08

Photosynthetic Characteristics and Salt-tolerance Indexes of Spring Wheat with Drip Irrigation in Saline-alkali Soils

Wang Zhenhua^{1,2} Pei Lei^{1,2} Zheng Xurong^{1,2} Li Wenhao^{1,2}

(1. College of Water and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China

2. Key Laboratory of Modern Water-saving Irrigation Corp, Shihezi University, Shihezi 832000, China)

Abstract: Influence of soil salinity on crops is a very complicated process. Planting crops on saline-alkali lands have become one of important restricts in sustainable agricultural development. Xinjiang, locating in the arid region of Northwest China, is encountering serious soil salinization. Wheat is the most commonly grown cereal crop in Xinjiang. Wheat cultivation in saline-alkali lands based on drip irrigation has become the key of agricultural development in Xinjiang. However, the changes of photosynthetic characteristics of wheat under drip irrigation with soil salt content are still not clear, and the salt-tolerance indexes such as salt-tolerance critical value and salt-tolerance limit are unknown in this region. Therefore, it is necessary to explore effects of soil salt content on photosynthetic characteristics and yield component of spring wheat under drip irrigation, comprehend the photosynthesis restriction mechanism of spring wheat as well as the correlation between its yield and soil salt content, and determine salt-tolerance indexes. The pot experiment was carried out in the test site of Key Laboratory of Modern Water-saving Irrigation Corp of Shihezi University from March to October, 2015. Five treatments were set, including growing wheat in non-saline soil, mild saline soil, moderate saline soil, strong saline soil and saline soil, respectively, and each treatment had three replicates. Soil salt contents of the five treatments were

收稿日期: 2015-11-10 修回日期: 2016-01-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51169022)、“十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAD20B03)、石河子大学高层次人才专项(RCZX201433)和兵团中青年科技创新领军人才计划项目(2015BC001)

作者简介: 王振华(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事干旱区节水灌溉理论与技术研究, E-mail: wzh2002027@163.com

2.0 g/kg (CK), 5.0 g/kg (T1), 9.0 g/kg (T2), 16.5 g/kg (T3) and 24.5 g/kg (T4). Each plot adopted the same irrigation and fertilization management independently. Dripper flow for drip irrigation was controlled at about 1.8 L/h. The irrigation amount for each time was 44 mm and totally 11 irrigations were given during the growth period. Photosynthetic characteristics of spring wheat at elongation stage (May 20th), heading stage (May 28th) and milk-ripe stage (June 11th) were tested by using the CI-340 portable photosynthesis system (USA). Test items included environmental indexes (photosynthetically active radiation, air temperature and CO₂ concentration in air) and photosynthetic physiological indexes (net photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance and intercellular CO₂ concentration). Stomatal limitation and non-stomatal limitation values of leaf photosynthesis were calculated according to the recorded data. Meanwhile, changes of spring wheat yield and soil salt content were observed. Salt-tolerance indexes were calculated through linear regression analysis. Results showed that soil salt content significantly affected photosynthetic physiological indexes of spring wheat under drip irrigation. Coexistence of stomatal and non-stomatal factors inhibited leaf photosynthesis of spring wheat. Reduction of net photosynthetic rate under low soil salt content was mainly caused by stomatal factors, while its reduction under high soil salt content was mainly caused by non-stomatal factors. Salt-tolerance critical value and salt-tolerance limit of spring wheat (0~40 cm) in Xinjiang under drip irrigation were 6.46 g/kg and 30.72 g/kg, respectively. When soil salt content was controlled lower than 9.63 g/kg, the relative yield of spring wheat under drip irrigation could be generally higher than 90%. It was concluded that spring wheat was suitable to be grown with drip irrigation in non-saline and mild saline soils. The results could provide theoretical supports for field management and high-efficient production of spring wheat using drip irrigation in saline-alkali soils in Xinjiang.

Key words: spring wheat; drip irrigation; soil salinity; photosynthetic characteristics; salt-tolerance indexes

引言

当前世界耕地次生盐碱化愈演愈烈,盐渍土面积迅速增加,加之人口增长造成的巨大粮食需求压力,如何利用盐碱地种植作物,成为农业可持续发展所面临的重要问题之一。作物受到盐分危害时,新叶生长减缓,老叶叶尖渐黄,严重时作物相继死亡。一般情况下,作物产量开始降低时的土壤盐分含量被称为作物耐盐临界值;当土壤盐分含量增大到一定基准值时,作物会停止生长,叶片边缘灼伤,继而失去膨压、落叶以致植株死亡^[1],此时的土壤盐分含量被称为作物耐盐极限值^[2]。然而,土壤盐分对作物的影响是极其复杂的过程,诸多学者对此做了大量研究。土壤盐分造成渗透胁迫、离子毒害和营养缺乏,抑制植物生长,代谢紊乱,光合能力降低,加速衰老甚至死亡^[3-6]。光合作用一方面受到气孔导度的限制,使得胞间 CO₂ 不能满足光合作用的需求,称为光合作用的气孔限制;另一方面由于叶绿体活性与 Rubisco 活性降低、RuBP 再生能力下降等引起光合作用能力降低,称为非气孔限制^[7],而光合能力直接影响作物的生长状况与最终产量^[8]。一些学者建立了作物产量与土壤盐分含量的响应关

系^[9-11],将盐碱地农业生产由定性研究推向定量研究。MASS 等研究提出分段式作物耐盐函数,即在一定限度范围内作物产量随土壤盐分的增加保持稳定,超过耐盐临界值后作物产量随土壤盐分增加而呈近似直线下降趋势^[12]。

新疆大部分位于西北内陆干旱区,该区降水量少,气候干燥,蒸发剧烈,水资源短缺且时空分布不均。20 世纪 50 年代以后的大规模开垦和对盐渍化危害的认识不足,再加上部分原生含盐土母质等因素影响,造成土壤盐渍化严重,居全国之首,其盐渍化耕地面积占耕地总面积的 30.85%^[13-14]。小麦是新疆第一大粮食作物,种植面积占粮食作物的 65% 以上,应用滴灌技术在盐碱地种植小麦已成为新疆农业发展的重点方向。目前,对于盐碱地滴灌春小麦光合特性及耐盐指标的研究较少,滴灌条件下小麦光合特性以及耐盐指标受土壤盐分含量的影响亟待探求。因此,本文通过盆栽试验,研究探索不同盐分含量情况下滴灌春小麦的光合特性及产量构成变化,了解春小麦光合作用限制机理及产量与土壤含盐量之间的响应关系,确定耐盐指标,为新疆盐碱地滴灌春小麦田间管理及高效生产提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验地点概况

试验于 2015 年 3—10 月在现代节水灌溉兵团重点实验室试验基地暨石河子大学节水灌溉试验站(东经 85°59′47″,北纬 44°19′28″,海拔高度 412 m,平均地面坡度为 0.6%)进行,地处准噶尔盆地西南缘天山北麓中段,属中温带大陆性干旱气候,年平均日照时间为 2 865 h,年平均气温 7.7℃,多年平均降水量为 213 mm,平均蒸发量为 1 342 mm,其中大于 10℃积温为 3 463.5℃,大于 15℃积温为 2 960.0℃,无霜期为 170 d。

1.2 试验设计

试验选取春小麦品种“新春 6 号”为研究对象,采用盆栽试验,试验用桶规格为 0.45 m×0.35 m×0.52 m(顶部内径×底部内径×高),桶底开孔,供试土壤预先进行盐处理,采用盐土与中壤土去除石块后,自然晾干碾碎按不同比例掺合均匀,按容重 1.40 g/cm³分层装土 45 cm。根据文献[15]中耕地

土壤盐化程度的分级标准,设计非盐化土、轻度盐化土、中度盐化土、强度盐化土、盐土 5 种不同的土壤盐分含量处理(土壤盐分含量分别为 CK: 2.0 g/kg、T1: 5.0 g/kg、T2: 9.0 g/kg、T3: 16.5 g/kg、T4: 24.5 g/kg),各处理 3 次重复。

春小麦采用“一管四行”的种植模式,3 月 28 日播种,播种深度为 4~5 cm,4 月 13 日出苗,三叶期定苗 40 株/盆,6 月 29 日收获,全生育期总共 94 d。所有处理采用相同的水、肥管理,灌溉定额均为 440 mm,灌溉次数为 11 次;施用尿素(N 质量分数大于等于 46.4%)和磷酸二氢钾(P₂O₅质量分数大于等于 51.0%,K₂O 质量分数大于等于 34.0%),各处理施肥量相同,均为 N:260 kg/hm²、P₂O₅:140 kg/hm²、K₂O:40 kg/hm²,其中,N:65 kg/hm²;P₂O₅:84 kg/hm²作为基肥在装土时施入土壤。春小麦各生育期不同处理的具体设计方案详见表 1。

每个盆栽试验单独控制水、肥管理,采用塑胶细管模拟滴灌滴头,保证每盆精确控制灌水量与施肥量,采用螺旋止水夹调节灌水流量,控制在 1.8 L/h 左右。

表 1 试验设计
Tab.1 Experiment design

生育期	日期	水处理		肥处理			
		灌水量/mm	灌水次数	N 施肥量/ (kg·hm ⁻²)	P ₂ O ₅ 施肥量/ (kg·hm ⁻²)	K ₂ O 施肥量/ (kg·hm ⁻²)	施肥次数
播种-出苗	03-28—04-12	40	1				
出苗-分蘖	04-13—04-27	40	1				
分蘖-拔节	04-28—05-10	40	1	18.2			1
拔节-抽穗	05-11—05-21	120	3	104.0	42.0	30.0	3
抽穗-乳熟	05-22—06-04	160	4	52.0	14.0	10.0	3
乳熟-收获	06-05—06-29	40	1	20.8			1
全生育期	78 d	440	11	195.0	56.0	40.0	8

1.3 测试指标及方法

1.3.1 土壤盐分测试

称取 20 g 过 1 mm 筛的风干土样置于三角瓶中,加入 100 mL 蒸馏水,将三角瓶置于振荡机上振荡 10 min,静置 15 min 后过滤,制成水土质量比为 5:1 的澄清液^[16]。用 DDS11-A 型数显电导率仪测定其电导率。

用干燥残渣法确定土壤含盐量与电导率之间的标定关系式为

$$S=0.005EC-0.25 \quad (R^2=0.9920) \quad (1)$$

式中 S——土壤含盐量,g/kg

EC——电导率,μS/cm

1.3.2 光合生理指标测试

在春小麦拔节期(5 月 20 日)、抽穗期(5 月 28 日)、乳熟期(6 月 11 日)测定其光合特性。使用美

国产 CI-340 型手持式光合仪,选取春小麦旗叶及青储玉米顶层功能叶,于 12:00—14:00(北京时间)每隔 2 h 左右测定一次,3 次重复。测定项目包括光合有效辐射(PAR)、气温(T_a)、大气 CO₂ 浓度(C_a)等环境因子指标,以及净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、胞间 CO₂ 浓度(C_i)等光合生理特性指标。根据记录数据计算叶片光合作用的气孔限制值(L_s)^[17]、非气孔限制值(C_i/G_s)^[18],其计算公式为

$$L_s=1-C_i/C_a \quad (2)$$

1.3.3 产量测试

春小麦每盆单收单打,测定穗长、有效穗数、穗粒数和千粒质量。穗长(cm)为自穗节基部量至穗尖(不连芒)的长度。有效穗数(穗)为每穗结实粒数大于等于 5 粒的穗数。穗粒数(粒)为每盆选取

5 株有代表性的植株的麦穗混合脱粒,数清总粒数,用总粒数除以 5 得到。千粒质量(g)为每 1 000 粒质量。

1.4 数据处理

所有数据均使用 Microsoft Excel 及 SPSS 17.0 软件进行处理、分析,使用 Origin 8.5 制图。

2 结果与分析

2.1 环境因子

春小麦各生育期光照有效辐射、温度以及大气 CO₂ 浓度等环境因子的日变化见表 2。

表 2 春小麦环境因子
Tab.2 Environmental factors of spring wheat

生育期	环境因子	08:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00
拔节期	光照有效辐射/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	1 057.88 ^g	1 862.64 ^d	2 220.25 ^b	2 256.29 ^a	2 049.49 ^e	1 716.81 ^e	1 230.91 ^f
	大气温度/℃	27.86 ^d	32.30 ^c	35.11 ^b	37.55 ^a	38.11 ^a	36.79 ^a	32.42 ^e
	大气 CO ₂ 浓度(摩尔比)/($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	621.72 ^a	558.67 ^b	489.68 ^c	392.18 ^f	408.77 ^e	428.57 ^d	501.62 ^c
抽穗期	光照有效辐射/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	916.15 ^g	1 806.03 ^c	2 025.46 ^b	2 110.81 ^a	2 046.11 ^c	1 942.01 ^d	1 541.72 ^f
	大气温度/℃	22.03 ^f	29.52 ^c	33.67 ^d	34.83 ^b	36.77 ^a	34.21 ^c	30.74 ^e
	大气 CO ₂ 浓度(摩尔比)/($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	621.91 ^a	523.30 ^b	488.59 ^c	418.35 ^f	437.42 ^e	466.83 ^d	515.68 ^b
乳熟期	光照有效辐射/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	1 017.84 ^e	1 809.35 ^c	1 909.35 ^{bc}	2 166.27 ^a	2 060.48 ^a	1 807.34 ^c	1 377.11 ^d
	大气温度/℃	20.83 ^d	28.60 ^c	31.73 ^b	32.37 ^b	34.33 ^a	33.90 ^a	28.32 ^c
	大气 CO ₂ 浓度(摩尔比)/($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	525.77 ^a	452.02 ^c	419.17 ^e	377.76 ^g	398.36 ^f	431.53 ^d	495.14 ^b

注:同行数值后不同小写字母表示在 P<0.05 水平下差异显著,下同。

由表 2 知,各生育期环境因子日变化趋势基本相同。光照有效辐射在 08:00 时均处于最小值,14:00 时均达到最大值,之后逐渐减弱。温度与光照有效辐射的日变化趋势相同,在 08:00 时均处于最小值,之后迅速升高,16:00 时达到最大值,之后逐渐下降。大气 CO₂ 浓度经过夜间的富集,在早晨最高,随着作物光合作用的进行,大气 CO₂ 浓度迅速下降,在 14:00 时达到谷值,之后随着光合作用的减弱再次升高。

2.2 春小麦光合特性

2.2.1 气体交换参数

(1)净光合速率
土壤盐分含量对春小麦净光合速率的影响见

图 1。从图 1 可知,3 个观测日期内春小麦叶片净光合速率随着土壤盐分含量的增大而减小,表现为:CK>T1>T2>T3>T4,不同处理同一时段内叶片净光合速率之间差异显著(P<0.05),说明土壤盐分显著影响春小麦叶片净光合速率。3 个观测日期内春小麦叶片净光合速率日变化趋势呈双峰型,而且第 1 次峰值明显大于第 2 次峰值;上午随着光强的增加净光合速率逐渐增大,下午随光强的减弱净光合速率逐渐减小,上午净光合速率整体上高于下午,中午出现了不同程度的“午休”现象。春小麦净光合速率季节性变化特征表现为:抽穗期>拔节期>乳熟期。

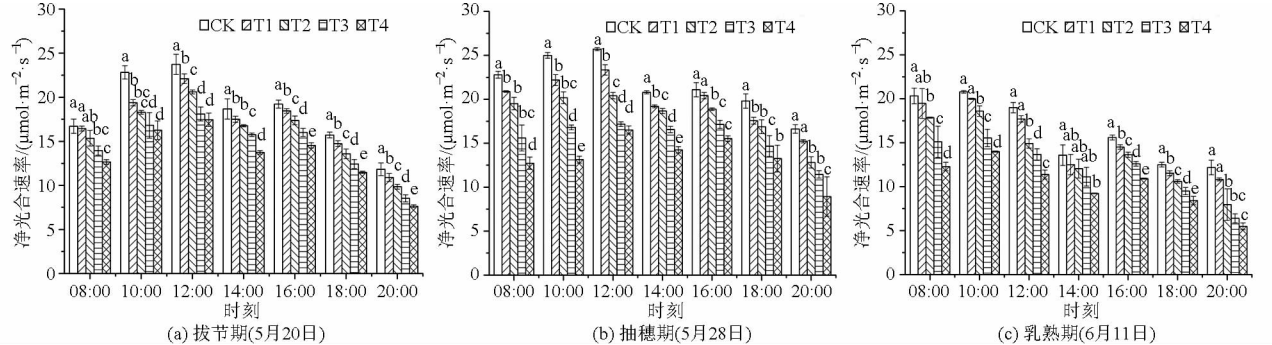


图 1 土壤盐分含量对春小麦净光合速率日变化的影响

Fig.1 Effects of soil salt content on diurnal variation of spring wheat net photosynthetic rate

(2)蒸腾速率

土壤盐分含量对春小麦蒸腾速率的影响见图 2。由图 2 可知,3 个观测日期内春小麦叶片蒸腾速率随着土壤盐分含量的增大而减小,表现为:CK>T1>T2>T3>T4,不同处理同一时段内叶片蒸腾速率之间差异显著(P<0.05),说明土壤盐分

显著影响春小麦叶片蒸腾速率。3 个观测日期内春小麦叶片蒸腾速率日变化趋势呈单峰型,上午随光强增强、气温增加而增大,在 14:00 时达到最大,下午随光强减弱、气温降低而下降。春小麦蒸腾速率季节性变化特征表现为:抽穗期>拔节期>乳熟期。

(3) 气孔导度

土壤盐分含量对春小麦气孔导度的影响见图3。由图3可知,3个观测日期内春小麦叶片气孔导度随着土壤盐分含量的增大而减小,表现为:CK > T1 > T2 > T3 > T4,不同处理同一时段内叶片气孔导度之间差异显著 ($P < 0.05$),说明土壤盐分显著影响春小麦叶片气孔导度。3个观测日期内春小麦叶

片气孔导度日变化趋势呈双峰型,而且第1次峰值明显大于第2次峰值;气孔导度日变化由环境因子的日变化引起,其中,光照强度是主要影响因子,叶片气孔早晨开放,上午张开到最大,中午因光照强度大、蒸腾作用强而出现暂时性闭合,出现“午休”现象,下午再次张开,日落时关闭。春小麦气孔导度季节性变化特征表现为:抽穗期 > 拔节期 > 乳熟期。

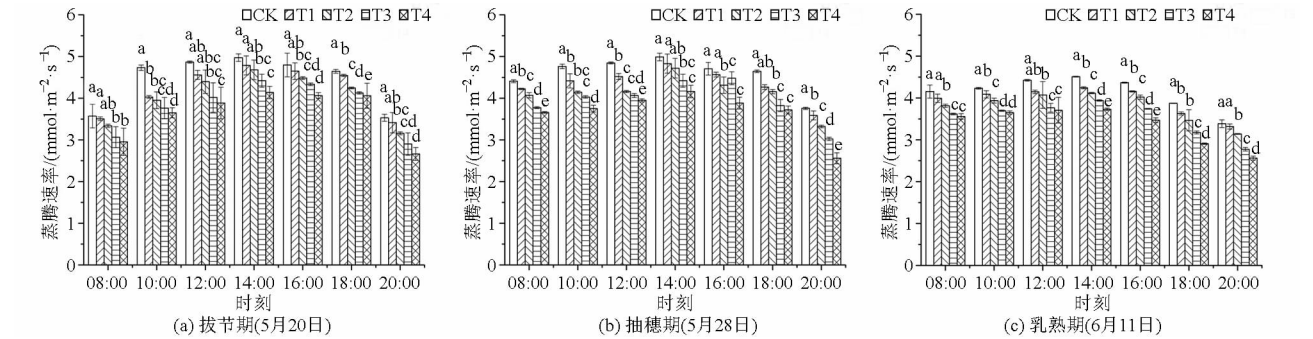


图2 土壤盐分含量对春小麦蒸腾速率日变化的影响

Fig. 2 Effects of soil salt content on diurnal variation of spring wheat transpiration rate

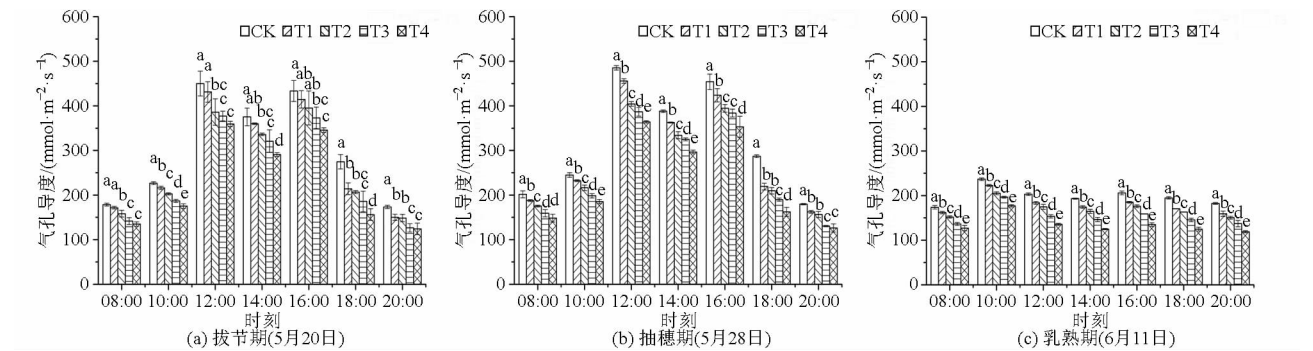


图3 土壤盐分含量对春小麦气孔导度日变化的影响

Fig. 3 Effects of soil salt content on diurnal variation of spring wheat stomatal conductance

(4) 胞间 CO₂ 浓度

土壤盐分含量对春小麦胞间 CO₂ 浓度的影响见图4。由图4可知,3个观测日期内春小麦叶片胞间 CO₂ 浓度(摩尔比)随着土壤盐分含量的增大而增大,表现为:CK < T1 < T2 < T3 < T4,不同处理同一时段内叶片胞间 CO₂ 浓度之间差异显著 ($P < 0.05$),说明土壤盐分显著影响春小麦叶片胞间 CO₂ 浓度。春小麦胞间 CO₂ 浓度季节性变化特征表现为:抽穗

期 > 拔节期 > 乳熟期。

2.2.2 气孔与非气孔因素的限制作用

(1) 气孔限制因素

分析春小麦叶片气孔限制值的日变化规律可知(图5),3个观测日期内春小麦叶片气孔限制值随着土壤盐分含量的增大而减小,表现为:CK > T1 > T2 > T3 > T4,不同处理同一时段内叶片气孔限制值之间差异显著 ($P < 0.05$),说明土壤盐分显著影响

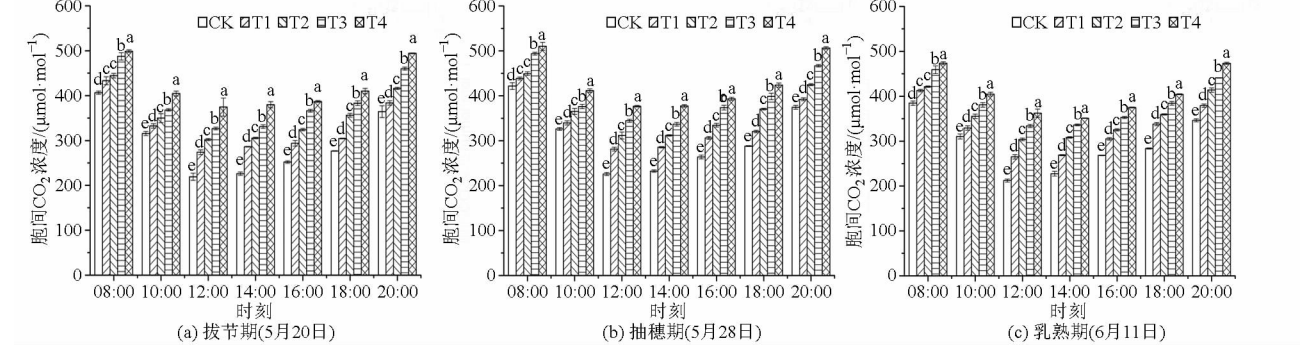


图4 土壤盐分含量对春小麦胞间 CO₂ 浓度日变化的影响

Fig. 4 Effects of soil salt content on diurnal variation of spring wheat intercellular CO₂ concentration

春小麦叶片气孔限制值。3 个观测日期内春小麦叶片气孔限制值日变化趋势呈单峰型,在叶片光合“午休”期间,胞间 CO₂ 浓度处于最小值,净光合速率呈下降趋势,气孔限制值达到最大,表现出较强的

气孔限制现象。也就是说,叶片光合“午休”是由气孔限制因素引起的,而且导致气孔关闭的外界环境因子是强光照辐射。春小麦气孔限制值季节性变化特征表现为:拔节期 > 抽穗期 > 乳熟期。

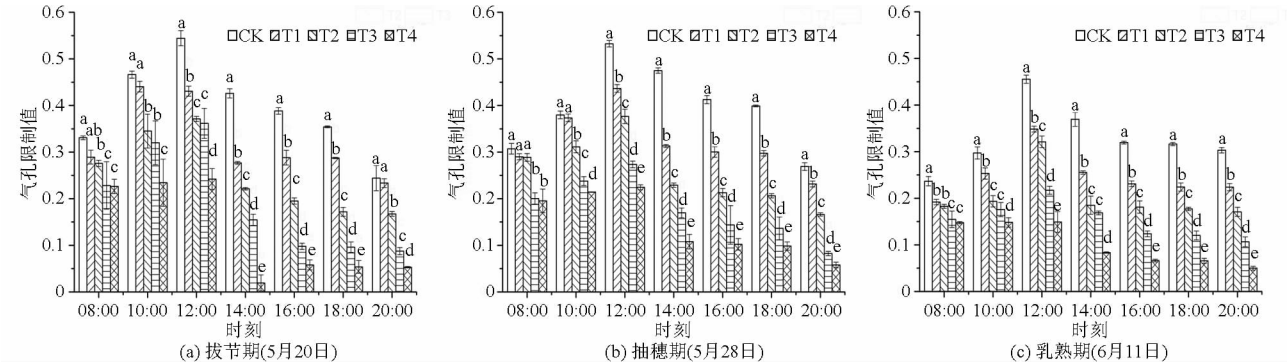


图 5 土壤盐分含量对春小麦气孔限制值日变化的影响

Fig. 5 Effects of soil salt content on diurnal variation of spring wheat stomatal limitation value

(2)非气孔限制因素
分析春小麦叶片非气孔限制值的日变化规律可知(图 6),3 个观测日期内春小麦叶片气孔限制值随着土壤盐分含量的增大而增大,表现为:CK < T1 <

T2 < T3 < T4,不同处理同一时段内叶片非气孔限制值之间差异显著 ($P < 0.05$),说明土壤盐分显著影响春小麦叶片非气孔限制值。春小麦非气孔限制值季节性变化特征表现为:拔节期 < 抽穗期 < 乳熟期。

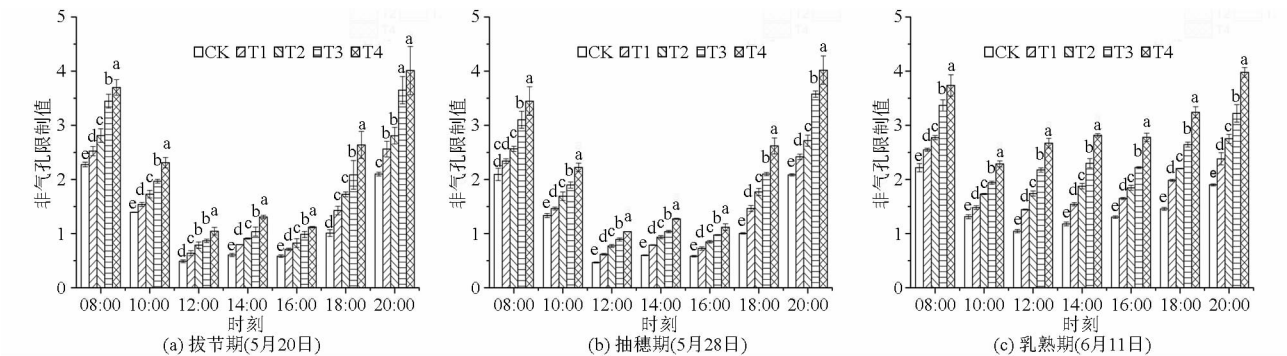


图 6 土壤盐分含量对春小麦非气孔限制值日变化的影响

Fig. 6 Effects of soil salt content on diurnal variation of spring wheat non-stomatal limitation value

2.3 产量

穗长、有效穗数、穗粒数、生物量、千粒质量是小

麦考种的重要指标,不同土壤盐分含量处理对春小麦产量影响较大,结果见表 3。

表 3 不同土壤盐分处理对春小麦产量及其构成的影响

Tab.3 Effect of different soil salt content treatments on spring wheat yield and yield component						
处理	穗长/cm	有效穗数/(穗·盆 ⁻¹)	穗粒数/粒	生物量/(g·株 ⁻¹)	千粒质量/g	产量/(g·盆 ⁻¹)
CK	9.55 ± 0.13 ^a	118.33 ± 1.67 ^a	29.47 ± 1.07 ^a	2.19 ± 0.16 ^a	43.61 ± 0.14 ^a	148.08 ± 1.89 ^a
T1	9.03 ± 0.22 ^b	115.00 ± 3.21 ^a	28.53 ± 1.99 ^a	2.09 ± 0.11 ^a	42.38 ± 0.19 ^a	140.33 ± 3.56 ^a
T2	8.55 ± 0.07 ^c	110.00 ± 3.21 ^a	26.40 ± 0.12 ^{ab}	1.96 ± 0.10 ^a	40.43 ± 0.09 ^b	125.41 ± 4.12 ^b
T3	7.99 ± 0.10 ^d	95.67 ± 4.33 ^b	22.60 ± 1.14 ^{bc}	1.37 ± 0.22 ^b	31.83 ± 0.62 ^c	75.82 ± 4.78 ^c
T4	7.10 ± 0.15 ^e	84.67 ± 3.53 ^c	19.13 ± 1.14 ^c	1.02 ± 0.29 ^b	18.84 ± 0.96 ^d	37.52 ± 3.57 ^d

土壤盐分含量显著影响春小麦穗长,各处理间穗长均有显著性差异,非盐化土处理 CK 麦穗最长,随着土壤盐分含量的增大,穗长逐渐减小,表现为:CK > T1 > T2 > T3 > T4。表明春小麦穗部生长受土壤盐分影响较大,土壤盐分含量越高麦穗越短小。各处理春小麦有效穗数均低于 CK 处理,表现

为:CK > T1 > T2 > T3 > T4。非盐化土处理 CK、轻度盐化土处理 T1、中度盐化土处理 T2 之间有效穗数无显著差异,与重度盐化土处理 T3 和盐土处理 T4 差异显著。表明土壤盐分会导致有效穗数减少,盐分含量较低时对其影响不大,盐分含量较高时对有效穗数影响显著。

各处理春小麦穗粒数均低于 CK 处理,表现为:CK>T1>T2>T3>T4。土壤盐分含量对春小麦穗粒数有显著性影响,但土壤盐分含量相差不大时穗粒数无显著性差异。表明土壤盐分会导致穗粒数减少,但影响相对较小。

各处理春小麦生物量均低于 CK 处理,表现为:CK>T1>T2>T3>T4。非盐化土处理 CK、轻度盐化土处理 T1、中度盐化土处理 T2 之间生物量显著差异,与重度盐化土处理 T3 和盐土处理 T4 差异显著。处理 T1、T2、T3、T4 的生物量分别比非盐化土处理 CK 降低 4.57%、10.50%、37.44%、53.42%。表明春小麦生物量受土壤盐分影响较大,土壤盐分含量越高生物量越小。

各处理春小麦千粒质量均低于 CK 处理,表现为:CK>T1>T2>T3>T4。非盐化土处理 CK、轻度盐化土处理 T1 之间千粒质量无显著差异,与中度盐化土处理 T2、重度盐化土处理 T3 和盐土处理 T4 差异显著。处理 T1、T2、T3、T4 的千粒质量分别比非盐化土处理 CK 降低 2.82%、7.29%、27.01%、56.80%。表明土壤盐分会导致千粒质量降低,盐分含量较低时对其影响不大,盐分含量较高时对千粒质量影响明显。

各处理春小麦产量均低于 CK 处理,表现为:CK>T1>T2>T3>T4。非盐化土处理 CK、轻度盐化土处理 T1 之间产量无显著差异,与中度盐化土处理 T2、重度盐化土处理 T3 和盐土处理 T4 差异显著。表明土壤盐分会导致产量降低,盐分含量较低时对

其影响不大,盐分含量较高时对产量影响明显。

因此,土壤盐分含量对春小麦穗长、有效穗数、穗粒数、生物量、千粒质量和产量影响较大,适宜的土壤盐分环境能够促进春小麦生殖发育,提高产量。

2.4 盐分生产函数

通过盆栽试验观测数据,根据作物盐分生产函数模型^[11],对春小麦 0~40 cm 土层深度的作物-盐分响应关系进行拟合,以产量为研究对象,初步确定出春小麦的耐盐性指标。

作物盐分生产函数模型为

$$Y_r = \frac{Y}{Y_m} = \begin{cases} 1 & (S \leq S_i) \\ 1 - C(S - S_i) & (S_i < S \leq S_0) \\ 0 & (S > S_0) \end{cases} \quad (3)$$

式中 Y_r ——相对产量 Y ——作物产量,g/盆
 Y_m ——对照组作物产量,g/盆
 C ——作物产量下降系数
 S_i ——作物耐盐临界值,即无产量降低时的土壤盐分含量(质量比),g/kg
 S_0 ——作物产量为零时的土壤盐分含量(质量比),g/kg

对春小麦千粒质量与土壤盐分含量关系进行拟合,得出同春小麦的耐盐函数模型,如表 4 所示。由表 4 可知,春小麦耐盐临界值(S_i)为 6.46 g/kg,表明当土壤盐分含量达到 6.46 g/kg 时,春小麦产量开始下降;耐盐上限值(S_0)达 30.72 g/kg,表明当土壤盐分含量达到或超过 30.72 g/kg 时,春小麦绝产无收。

表 4 耐盐函数参数

Tab.4 Parameters of salt-tolerance function

参数	耐盐指标			作物盐分生产函数	R^2
	C	$S_i/(g \cdot kg^{-1})$	$S_0/(g \cdot kg^{-1})$		
数值	0.031 3	6.46	30.72	$Y_r = 1 - 0.031\ 3(S - 6.46)$	0.980 9

3 讨论

一般情况下,土壤盐分会使植物类囊体膜糖脂含量明显下降,减少植物对光的吸收,从而抑制植物的光合作用,而且土壤盐分含量越高,抑制程度越明显^[19]。本试验结果显示,3 个观测日内,随着土壤盐分含量的增加,春小麦净光合速率呈下降趋势。轻度、中度、重度盐化土以及盐土处理的净光合速率分别比非盐化土处理在拔节期 12:00 时(图 1a)降低 6.87%、13.19%、23.73%、26.46%;在抽穗期 12:00 时(图 1b)降低 9.22%、20.61%、33.18%、35.78%;在乳熟期 10:00 时(图 1c)降低 3.80%、10.53%、25.25%、32.66%。文献[20]研究表明叶肉导度(G_m)控制着胞间 CO_2 向叶绿体内 CO_2 扩散

的阻力,其值上午大于下午。本试验中,上午胞间 CO_2 浓度较小,说明胞间 CO_2 向叶绿体内扩散的速率大于大气 CO_2 向胞间扩散的速率;下午胞间 CO_2 浓度较大,说明大气 CO_2 向胞间扩散的速率大于胞间 CO_2 向叶绿体内扩散的速率。春小麦叶片气孔限制值的日变化规律呈现早晚较低、中午较高趋势。早晚春小麦叶片气孔导度较低,但光合作用所消耗的 CO_2 量更低,表现为较低的气孔限制值;中午叶片气孔导度较高,但光合作用消耗的 CO_2 量更高,表现为较高的气孔限制值,这表明气孔限制是一个相对的概念,它是由叶片气孔对 CO_2 的导度与光合作用的需求量所共同决定的。春小麦叶片非气孔限制值日变化规律与气孔限制值日变化规律大致相反,表现为早晚较高、中午较低。这是因为早晚光照有效

辐射过低,叶绿体活性、Rubisco 和 RuBP 再生能力较低,表现出较强的非气孔限制,而 12:00—16:00 时段内非气孔限制值也表现出了一个极大值,表明此阶段的非气孔限制也不可忽视。不同土壤盐分处理间比较则显示:气孔限制值随土壤盐分含量的增加而减小,非气孔限制值随土壤盐分含量的增加而增大,根据 FARQUHAR 等^[21]的观点,本试验中,在低盐分土壤处理下春小麦净光合速率的下降主要由气孔因素引起,而在高盐分土壤处理下主要由非气孔因素引起。

C_s 、 S_0 、 S_i 为作物产量对土壤盐分含量的响应指标,当 $S \leq S_i$ 时,作物基本不受盐分的危害;当 $S_i < S \leq S_0$ 时,作物受不同土壤盐分含量的影响, S 值越大,对产量的影响越大; $S > S_0$ 时,作物受盐分胁迫基本不能生长。以作物无产量降低时的土壤含盐量作为作物的耐盐临界值(S_i),以作物减产 10% 时的土壤含盐量作为作物的耐盐阈值($S_{10\%}$),由表 4 知,春小麦的耐盐临界值为 6.46 g/kg,耐盐阈值为 9.63 g/kg。因此,春小麦种植在非盐土(盐分含量

小于等于 3.0 g/kg)、轻度盐化土(盐分含量小于等于 6.0 g/kg)上能够正常生长;种植在中度盐化土(盐分含量小于等于 10.0 g/kg),减产 10% 左右;种植在强度盐化土(盐分含量小于等于 20.0 g/kg),生长受到严重抑制;种植在盐土(盐分含量大于 20.0 g/kg),只有个别植株成活甚至绝产无收。

4 结论

(1) 土壤盐分含量显著影响滴灌春小麦叶片净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度等光合生理指标。气孔与非气孔因素同时存在限制春小麦叶片光合作用,净光合速率的下降在低盐分土壤处理下主要由气孔因素引起,而在高盐分土壤处理下主要由非气孔因素引起。

(2) 新疆滴灌春小麦 0~40 cm 土层耐盐临界值为 6.46 g/kg,耐盐极限值为 30.72 g/kg;土壤盐分控制在 9.63 g/kg 以下,滴灌春小麦相对产量一般在 90% 以上。初步认为滴灌春小麦适宜在非盐化土以及轻度盐化土上种植。

参 考 文 献

- 邢旭光,赵文刚,马孝义,等. 覆膜滴灌条件下棉花根层土壤盐分时间稳定性研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 146–153.
XING Xunguang, ZHAO Wen'gang, MA Xiaoyi, et al. Temporal stability of soil salinity in root zone cotton under drip irrigation with plastic mulch[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 146–153. (in Chinese)
- 康绍忠. 农业水土工程概论[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007: 140–151.
- FLOWERS T J, TROKE P F, YEO A R. The mechanism of salt tolerance in halophytes[J]. Annual Review of Plant Biology, 1977, 28: 89–121.
- SONNEVELD C, DE KREIJ C. Response of cucumber (*Cucumis sativus* L.) to an unequal distribution of salts in the root environment[J]. Plant and Soil, 1999, 209(1): 47–56.
- VELASQUEZ B, BALZARINI M, TALEISNIK E. Salt tolerance variability amongst Argentine Andean potatoes (*Solanum tuberosum* L. subsp. andigena)[J]. Potato Research, 2005, 48(1–2): 59–67.
- FORKUTSA I, SOMMER R, SHIROKOVA Y I, et al. Modeling irrigated cotton with shallow groundwater in the Aral Sea Basin of Uzbekistan: II. Soil salinity dynamics[J]. Irrigation Science, 2009, 27(4): 319–330.
- 徐俊增,彭世彰,魏征,等. 节水灌溉水稻叶片胞间 CO_2 浓度及气孔与非气孔限制[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 76–80.
XU Junzeng, PENG Shizhang, WEI Zheng, et al. Intercellular CO_2 concentration and stomatal or non-stomatal limitation of rice under water saving irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(7): 76–80. (in Chinese)
- 尹海龙,田长彦. 不同盐度环境下盐地碱蓬幼苗光合生理生态特征[J]. 干旱区研究, 2014, 31(5): 850–855.
YIN Hailong, TIAN Changyan. Photosynthesis characteristics of *Suaeda salsa* seedlings under different salt conditions[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(5): 850–855. (in Chinese)
- MAGGIO A, DALTON F N, PICCINNI G. The effects of elevated carbon dioxide on static and dynamic indices for tomato salt tolerance[J]. European Journal of Agronomy, 2002, 16(3): 197–206.
- SKAGGS T H, VAN GENUCHTEN M T, SHOUSE P J, et al. Macroscopic approaches to root water uptake as a function of water and salinity stress[J]. Agricultural Water Management, 2006, 86: 140–149.
- 童文杰. 河套灌区作物耐盐性评价及种植制度优化研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
TONG Wenjie. Study on salt tolerance of crops and cropping system optimization in Hetao Irrigation District[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- MASS E V, HOFFMAN G J. Crop salt tolerance-current assessment[J]. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 1977, 103: 115–134.
- 王芳芳,吴世新,乔木,等. 基于 3S 技术的新疆耕地盐渍化状况调查与分析[J]. 干旱区研究, 2009, 26(3): 366–371.
WANG Fangfang, WU Shixin, QIAO Mu, et al. Investigation and analysis on the salinization degree of cultivated land in Xinjiang based on 3S technology[J]. Arid Zone Research, 2009, 26(3): 366–371. (in Chinese)

- 9 吕丽华,李谦,董志强,等. 灌水方式和灌溉量对冬小麦根冠结构的影响[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(11):1537-1544.
LÜ Lihua, LI Qian, DONG Zhiqiang, et al. Effects of different irrigation methods and amount on root and canopy structure of winter wheat [J]. Journal of Triticeae Crops, 2014, 34 (11):1537-1544. (in Chinese)
- 10 王艳哲,刘秀位,孙宏勇,等. 水氮调控对冬小麦根冠比和水分利用效率的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(3): 282-289.
WANG Yanzhe, LIU Xiuwei, SUN Hongyong, et al. Effects of water and nitrogen on root/shoot ratio and water use efficiency of winter wheat [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(3): 282-289. (in Chinese)
- 11 武荣,李援农. 水氮耦合对冬小麦根系分布和根冠比及产量的影响[J]. 南方农业学报, 2013, 44(6):963-967.
WU Rong, LI Yuannong. Effect of water and nitrogen fertilizer coupling on root distribution, root/shoot ratio and yield of winter wheat [J]. Journal of Southern Agriculture, 2013, 44(6): 963-967. (in Chinese)
- 12 金善宝. 中国小麦学[M]. 北京: 农业出版社, 1996: 162-166.
- 13 孟兆江,段爱旺,王景雷,等. 调亏灌溉对冬小麦根冠生长影响的实验研究[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(4):37-41.
MENG Zhaojiang, DUAN Aiwang, WANG Jinglei, et al. Effect of regulated deficit irrigation on growth of root and shoot in winter wheat [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(4):37-41. (in Chinese)
- 14 HSIAO T, XU L R. Sensitivity of growth of roots versus leaves to water stress: biophysical analysis and relation to water transport [J]. Journal of Experimental Botany, 2000, 51(350): 1595-1616.
- 15 杨书运,严平,梅雪英,等. 土壤水分亏缺对冬小麦根系的影响[J]. 麦类作物学报, 2007, 27(2): 309-313.
YANG Shuyun, YAN Ping, MEI Xueying, et al. Effects of different soil water deficits on roots of winter wheat [J]. Journal of Triticeae Crops, 2007, 27(2): 309-313. (in Chinese)
- 16 LIU Xiuwei, ZHANG Xiyang, CHEN Suying, et al. Subsoil compaction and irrigation regimes affect the root-shoot relation and grain yield of winter wheat [J]. Agricultural Water Management, 2015, 154: 59-67.
- 17 汪可欣,付强,姜辛,等. 秸秆覆盖模式对玉米生理指标及水分利用效率的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 181-186.
WANG Kexin, FU Qiang, JIANG Xin, et al. Effect of straw mulching mode on maize physiological index and water use efficiency [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 181-186. (in Chinese)
- ~~~~~

(上接第 72 页)

- 14 周和平,王少丽,姚新华,等. 膜下滴灌土壤水盐定向迁移分布特征及排盐效应研究[J]. 水利学报, 2013, 44(11): 1380-1388.
ZHOU Heping, WANG ShaoLi, YAO Xinhua, et al. Research on distribution characteristics and salt-dicharging effect of direcynal migration of water and salt in soil through drip irrigation under plastic film [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(11): 1380-1388. (in Chinese)
- 15 罗家雄. 新疆垦区盐碱地改良[M]. 北京:水利电力出版社, 1985: 36-37.
- 16 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 179-180.
- 17 LAROCQUE G R. Coupling a detailed photosynthetic model with foliage distribution and light attenuation functions to compute daily gross photosynthesis in sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.) stands[J]. Ecological Modelling, 2002, 148(3): 213-232.
- 18 RAMANJULU S, SREENIVASALU N, SUDHAKAR C. Effect of water stress on photosynthesis in two mulberry genotypes with different drought tolerance[J]. Photosynthetica, 1998, 35(2): 279-283.
- 19 MULLER M, SANTARIUS K A. Changes in chloroplast membrane lipids during adaption of barely to salinity [J]. Plant Physiology, 1978, 62(3):326-331.
- 20 杨泽粟,张强,郝小翠. 自然条件下半干旱雨养春小麦生育后期旗叶光合的气孔和非气孔限制[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(2): 174-182.
YANG Zesu, ZHANG Qiang, HAO Xiaocui. Stomatal or non-stomatal limitation of photosynthesis of spring wheat flag leaf at late growth stages under natural conditions in semiarid rainfed regions[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(2): 174-182. (in Chinese)
- 21 FARQUHAR G D, SHARKEY T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annual Review of Physiology, 1982, 33(1): 317-345.