

水氮调控对轻度盐化土滴灌棉花生理特性与产量的影响

王振华^{1,2} 朱延凯^{1,2} 张金珠^{1,2} 李文昊^{1,2} 扁青永^{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: 为探讨轻度盐渍化地区不同水氮配比对滴灌棉花生理特性、产量、品质、灌溉水利用效率和氮肥偏生产力的影响,寻求适合盐渍化地区棉花种植的水氮组合,优化盐渍化地区滴灌棉花水肥管理,采用桶栽随机试验,在轻度盐渍土上设置3个灌溉水平2 750、3 750、4 750 m³/hm² (W1、W2、W3)和3个施氮水平300、600、900 kg/hm² (N1、N2、N3,氮素形式为尿素),对棉花光合、荧光、产量、品质、水氮利用效率及最佳灌水施肥模式进行研究。结果表明:轻度盐胁迫不同水氮调控条件下,灌水量和水氮交互作用对各生育期净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)及细胞间CO₂浓度(C_i)均具有极显著影响($P<0.01$),在W1和W2水平下, P_n 、 T_r 、 G_s 均随着施氮量的增加先上升后下降,且在W2N2处达到最大值。在W3水平下,均随着施氮量的增加而增加,而 C_i 却表现出相反的变化趋势;灌水对棉花各生育期功能叶最大光化学效率(F_v/F_m)和PSⅡ潜在活性(F_v/F_0)的影响不显著($P>0.05$),对光化学猝灭系数(q^p)和非光化学猝灭系数(NPQ)、实际光化学效率($Y(Ⅱ)$)和表观电子传递速率(ETR)的影响显著($P<0.05$);施氮对棉花各生育期功能叶NPQ的影响不显著($P>0.05$),对 F_v/F_m 和 F_v/F_0 、 q^p 、 $Y(Ⅱ)$ 和ETR的影响显著($P<0.05$);水氮交互作用均对棉花各生育期荧光参数的影响达到极显著水平($P<0.01$);水氮交互作用对籽棉产量(Y)、灌溉水利用效率(iWUE)、氮肥偏生产力(NPFP)及马克隆值的影响达到极显著水平($P<0.01$)。其中,籽棉产量(Y)最大值出现在W2N2处理,为5 854.5 kg/hm²,较出现在W1N1处理的最小值3 483.75 kg/hm²相对增加68.05%;通过多元回归分析及似然函数组合法计算,得到轻度盐化土棉花最佳灌水施氮量为3 740 m³/hm²和754 kg/hm²。

关键词: 滴灌棉花; 轻度盐分土壤; 水氮调控; 光合作用; 叶绿素荧光参数; 产量
中图分类号: S278;S562 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)06-0296-13

Effects of Water and Nitrogen Fertilization on Physiological Characteristics and Yield of Cotton under Drip Irrigation in Mildly Salinized Soil

WANG Zhenhua^{1,2} ZHU Yankai^{1,2} ZHANG Jinzhu^{1,2} LI Wenhao^{1,2} BIAN Qingyong^{1,2}

(1. College of Water and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China
2. Key Laboratory of Modern Water-Saving Irrigation of Xinjiang Production and Construction Group, Shihezi University, Shihezi 832000, China)

Abstract: Aiming to explore the mild salinization area ratio of different water and nitrogen physiological characteristics, yield and quality of drip-irrigated cotton, the influence of irrigation water use efficiency and nitrogen partial productivity, seek water and nitrogen combination suitable for cotton cultivation in salinization area, and optimize the salinization area for drip irrigation cotton basis, barrels and randomized trials were used, three irrigation levels of 2 750 m³/hm², 3 750 m³/hm² and 4 750 m³/hm² (W1, W2 and W3) and three nitrogen levels of 300 kg/hm², 600 kg/hm² and 900 kg/hm² (N1, N2, and N3, form of nitrogen in urea) were set up in mild saline soil, and the photosynthesis, fluorescence, yield and quality of cotton, water and nitrogen use efficiency and optimal irrigation fertilization mode were investigated. The results showed that mild salt stress under the condition of different water and nitrogen regulations, irrigation water and the interaction of water and nitrogen had significant effects ($P<0.01$) on P_n , T_r and G_s and C_i in the growth period, under the level of W1 and W2, P_n , T_r and G_s were increased with the increase of N application rate and then decreased, and reached the maximum at W2N2

treatment. At the level of W3, it was increased with the increase of N, while C_i showed the opposite trend. The influence of irrigation water on F_v/F_m and F_v/F_0 of different growth stages of cotton was not significant ($P > 0.05$), and it had significant influence on q^p and NPQ, $Y(II)$ and ETR ($P < 0.05$). The effect of nitrogen application on NPQ in the growth stage of cotton was not significant ($P > 0.05$), and it had significant influence on F_v/F_m and F_v/F_0 , q^p , $Y(II)$ and ETR ($P < 0.05$). The effect of water and nitrogen interaction on the fluorescence parameters of cotton in growing period reached a significant level ($P < 0.01$). The effect of water and nitrogen interaction on Y , iWUE, NPFP and macron values reached a significant level ($P < 0.01$). Among them, the maximum yield of seed cotton (Y) appeared in W2N2 treatment, as 5 854.5 kg/hm²; the minimum value appeared in W1N1 treatment, which was 3 483.75 kg/hm², with a relative increase of 68.05%; through the multiple regression analysis and the likelihood function group, the optimal irrigation water and nitrogen application rate of the mild saline-alkali soil were 3 740 m³/hm² and 754 kg/hm², respectively.

Key words: drip-irrigated cotton; mildly saline soil; water and nitrogen regulation; photosynthesis; chlorophyll fluorescence parameters; production

0 引言

棉花是世界上最主要的天然纺织纤维原料,也是世界范围内大宗国际贸易的特殊商品,棉花产业的健康发展意义重大^[1]。西北内陆是我国三大主产棉区之一,其面积占全国的35%,总产量占全国的41%,保持我国棉花生产的稳定发展对农村经济稳定具有重要意义^[2]。20世纪80年代以来,我国新增耕地的重心逐渐从东北向西北转移,而西北耕地开垦中心转向了西北绿洲农业区。因此,新疆已成为我国的粮食安全后备基地及粮棉生产基地^[3]。新疆地处西北内陆干旱区,土壤盐渍化问题严重,新疆第二次土壤普查数据表明,新疆耕地总面积为4.09 × 10⁶ hm²,盐渍化耕地面积1.27 × 10⁶ hm²,占耕地总面积的31.10%,轻度盐渍化占耕地面积的22.32%,中重度盐渍化占耕地面积的8.78%^[4]。土壤盐渍化严重降低了农业生产水平,并对新疆的粮食产量及农业安全构成了严重威胁^[5]。棉花耐盐性较强,是开发利用盐碱地的先锋作物。利用棉花耐盐性强的特点发展盐碱地植棉,一直备受政府的高度重视^[6]。因此,在淡水资源短缺及粮棉争地形势更加严峻的情况下,发展和研究盐碱地植棉技术成为保证棉花生产可持续发展的重要措施^[7]。

盐渍化地区农业生产的关键是水、肥的合理配合,研究水肥之间的相互关系,可对盐胁迫条件下如何提高水肥利用效率及作物产量进行科学指导^[8]。氮素是核酸和蛋白质的重要组成部分,施氮可以显著调控棉花产量的形成^[9]。合理的水氮投入不仅可以提高水氮利用效率和产量,也可起到节水调质的作用^[10]。过量的灌水和施氮不仅造成水肥资源的浪费,还容易导致土壤盐渍化进而使产量及品质下降^[11]。现代农业的关注点是水氮之间的耦合效

应,氮素和水分是膜下滴灌棉花获得高产及光合作用的主要限制因子^[12]。近年来,国内外学者对作物的水氮高效利用进行了大量研究。范雪梅等^[13]研究表明,在干旱胁迫条件下,施用氮肥可以提高作物的光合作用,同时可降低水分胁迫对作物造成的不利影响;MORGAN^[14]认为,施氮降低了干旱胁迫下作物的RUBP羧化酶活性和叶片净光合速率;马冬云等^[15]认为,在正常供水条件下,适量增施氮肥可提高叶绿素荧光动力学参数 F_v/F_m 和 F_v/F_0 ;刘瑞显等^[16]发现,在干旱胁迫下过量施氮加重了棉花受旱程度,并降低了PS II量子产量、PS II最大光化学效率等;SINGH等^[17]研究显示,当灌水量在(0.8 ~ 1.0) ET_c(棉花蒸腾蒸发量)时,棉花产量随施氮量的增加而增大,最大适宜施氮量为200 kg/hm²;谢志良等^[18]发现,水分亏缺减弱了氮素的增产效果;胡顺军等^[19]研究表明,水肥之间具有协同作用,且水的效力高于肥的效力。

长期以来,新疆棉花水氮调控研究主要集中在非盐化土上,而对于绿洲区盐化土棉田水氮调控效应的研究少见报道,且盐胁迫下水氮调控机理更加复杂。因此,本文通过桶栽对照试验,研究不同水氮调控组合对轻度盐化土棉花生理特性及产量品质的影响,寻求盐渍化灌区水氮高效利用模式,以期探明新疆绿洲区盐渍化棉田需水需肥规律,为新疆盐渍化地区植棉技术提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2017年4—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进行。试验站位于石河子市西郊石河子大学试验场二连,85°59'47"E,44°19'28"N,海拔412 m,平均地面坡度为0.6%,地下水埋深在5 m以下。年均日

照时间为 2 865 h,多年平均降雨量为 198 mm,平均蒸发量为 1 340 mm,大于 10℃ 积温为 3 463.5℃,大于 15℃ 积温为 2 960.0℃,无霜期 170 d。年平均风速为 1.5 m/s。

1.2 试验方法

本试验以棉花品种“农丰 133”为研究对象,采用桶栽试验,规格为 45 cm×50 cm(内径×高),桶底开孔,供试土壤预先盐处理,采用重盐碱土与中壤土按比例掺合,自然晾干碾碎去石块混合均匀后,按容重 1.40 g/cm³分层装土 45 cm。进行滴灌条件下水氮盐三因素(水氮 3 水平、盐分 1 水平)桶栽试验,棉花播种深度为 3~4 cm。

设尿素 3 个水平:300、600、900 kg/hm²(分别标记为 N1、N2、N3);灌水 3 个水平:灌溉定额分别为 2 750、3 750、4 750 m³/hm²(分别标记为 W1、W2、W3);1 种土壤含盐水平:轻度盐化土(4~5 g/kg)。3 次重复,采用随机排列,共 27 个桶。全生育期灌溉次数为 12 次,灌水定额、灌溉次数结合郑旭荣等^[20]前期对滴灌棉花灌水制度研究制定。氮肥施量定额结合吴立峰等^[21]对滴灌棉花不同施肥水平研究定制,并参阅石河子及周边农场近年滴灌棉花灌溉、施肥水平实际定额制定。土壤含盐水平根据耕地土壤盐化程度分级标准制定^[22]。磷肥、钾肥以磷酸二氢钾作基肥一次施入,各处理均为 300 kg/hm²。每个桶单独控制灌水,采用医用输液管模拟滴头,可保证每个桶精确控制灌水量与施肥量,灌水滴头流量 1.8 L/h 左右。各生育期具体灌水、施肥处理详见表 1。

表 1 棉花各生育期灌水及施肥处理

Tab.1 Irrigation and fertilizer treatments during each growth period of cotton

生育期	苗期	蕾期	花铃期	吐絮期	全生育期
灌水、施肥周期/d	15	8	7	15	140
灌水次数	3	2	5	2	12
施肥次数	3	2	5	2	12
灌水比例/%	10	15	60	15	100
施肥比例/%	10	15	60	15	100

1.3 测试项目与方法

1.3.1 光合指标

使用美国产 CI-340 型手持光合测量仪在棉花盛花期(7 月 7 日)、盛铃期(8 月 1 日)、吐絮期(9 月 12 日)测定其功能叶(倒四叶)光合特性,并对测定的叶子做好标记。测定项目包括棉花蒸腾速率(T_r)、净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、细胞间 CO₂ 浓度(C_i)光合生理指标。选取棉花功能叶在每个生育期晴朗无云的一天,从 08:00 时开始测量至

18:00 结束,时间间隔为 2 h,各处理连续测量 3 株,试验数据为全天测定的平均值。

1.3.2 荧光指标

采用 PAM2500 型荧光仪及 2030B 型光适应叶夹(Walz,Germany)测量叶片的叶绿素荧光参数,荧光参数的测定与气体交换参数同时进行,各处理所测叶片与测定气体交换参数时的叶片相同。在凌晨太阳未升起前测量叶片最大荧光产量(F_m)及叶片初始荧光产量(F_0)。先测定初始荧光产量(F_0)和最大荧光产量(F_m),在测量叶绿素荧光参数之前,手动输入对应叶片的 F_m 和 F_0 。随后以自然光为光化光,打开饱和脉冲进行猝灭分析,测定任意时间段的实际荧光产量(F')及光适应下的最大荧光产量(F'_m),计算最大光化学效率(F_v/F_m)、PS II 潜在活性(F_v/F_0)、光化学猝灭系数(q^p)、非光化学猝灭系数(NPQ)、实际光化学效率($Y(II)$)及表观电子传递速率(ETR)。各荧光参数计算公式参照 ROHÁČEK 的方法^[23],即

$$F_v/F_m = (F_m - F_0)/F_m$$
 (1)

$$F_v/F_0 = (F_m - F_0)/F_0$$
 (2)

$$q^p = (F'_m - F')/(F'_m - F'_0)$$
 (3)

$$F_{NPQ} = F_m/F'_m - 1$$
 (4)

$$F_{Y(II)} = (F'_m - F')/F'_m$$
 (5)

$$F_{ETR} = F_{PAR} F_{Y(II)} \times 0.84 \times 0.5$$
 (6)

式中 F_v ——可变荧光产量
 F_{NPQ} ——非光化学猝灭系数
 $F_{Y(II)}$ ——实际光化学效率
 F_{ETR} ——表观电子传递速率,μmol/(m²·s)
 F_{PAR} ——光合有效辐射,μmol/(m²·s)
 F'_0 ——光适应下的最小荧光产量

1.3.3 产量与棉纤维品质指标

分别于 8 月 25 日、9 月 10 日和 9 月 28 日分 3 次采摘吐絮较好的棉花,每个处理选取棉样 20 g,委托农业部棉花质量检测中心(乌鲁木齐)测定棉纤维马克隆值、纤维长度、整齐度指数、断裂比强度及伸长率,使用 HVI 1000M 700 型棉花纤维检测仪进行检测,采用 HVICC 进行校准。各处理棉花实行单打单收,以实收产量计算籽棉产量。

1.3.4 水、肥利用效率

灌溉水利用效率(iWUE)计算公式^[24]为

$$iWUE = Y/I$$
 (7)

式中 Y ——籽棉产量,kg/hm²
 I ——灌水量,m³/hm²

氮肥偏生产力(NPFP)计算公式^[25]为

$$N_{PFP} = Y/N$$
 (8)

式中 N ——施氮量,kg/hm²

2 结果与分析

2.1 盐胁迫水氮调控对棉花光合指标的影响

2.1.1 盐胁迫水氮调控对棉花 P_n 及 T_r 的影响

轻度盐胁迫不同水氮调控条件下棉花各生育期净光合速率 (P_n) 变化规律及方差分析见表 2。可知,滴灌棉花功能叶 P_n 在盛花期达到最大值,各处理平均值 27.28 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;盛铃期有所下降,各处理平均值为 20.21 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;吐絮期降到最低,各处理平均值 12.32 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,自盛花期至吐絮期各处理 P_n 呈现出逐渐降低的趋势。在 W1

和 W2 灌溉条件下, P_n 均随着施氮量的增加先上升后下降,均在 N2 水平下达到最大值。在 W3 灌溉条件下,盛花期 N3 与 N2 比 N1 处理分别高 14.19% 和 10.69%;在 W1 灌溉条件下,N2 比 N3 和 N1 处理分别高 19.3% 和 26.54%;在 W2 灌溉条件下,N2 比 N3 和 N1 处理分别高 23.48% 和 32.93%;各生育期 W2N2 处理的 P_n 值高于其他各处理,W2N2 表现出明显的交互效应。方差分析显示:灌水及水氮交互作用对棉花各生育期 P_n 的影响达到极显著水平 ($P<0.01$),施肥达到显著水平 ($P<0.05$)。说明,只有适宜的水氮配比才能达到“水肥相济”的效果。

表 2 盐胁迫水氮调控对棉花 P_n 及 T_r 的影响
Tab.2 Effects of salt stress and water and nitrogen regulation on P_n and T_r of cotton

水肥处理	净光合速率 $P_n/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$			蒸腾速率 $T_r/(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$		
	盛花期	盛铃期	吐絮期	盛花期	盛铃期	吐絮期
W1N1	(21.10 ± 0.58) ^e	(13.73 ± 0.45) ^e	(7.47 ± 0.52) ^d	(3.88 ± 0.04) ^e	(2.63 ± 0.01) ^e	(1.98 ± 0.04) ^f
W1N2	(26.70 ± 0.91) ^d	(18.88 ± 0.62) ^{cd}	(12.21 ± 0.61) ^{bc}	(4.87 ± 0.04) ^c	(3.74 ± 0.13) ^c	(2.79 ± 0.02) ^d
W1N3	(22.38 ± 0.08) ^e	(13.82 ± 0.25) ^e	(7.31 ± 0.43) ^d	(4.62 ± 0.04) ^d	(3.31 ± 0.02) ^d	(2.53 ± 0.06) ^e
W2N1	(25.60 ± 1.10) ^d	(18.09 ± 0.43) ^d	(11.30 ± 0.48) ^c	(4.91 ± 0.08) ^c	(3.73 ± 0.05) ^c	(2.89 ± 0.03) ^{cd}
W2N2	(34.03 ± 0.70) ^a	(26.94 ± 0.33) ^a	(17.52 ± 0.33) ^a	(6.30 ± 0.04) ^a	(5.35 ± 0.03) ^a	(4.27 ± 0.05) ^a
W2N3	(27.56 ± 0.60) ^{cd}	(20.19 ± 0.30) ^c	(12.78 ± 0.69) ^{bc}	(5.70 ± 0.02) ^b	(4.78 ± 0.04) ^b	(3.33 ± 0.06) ^b
W3N1	(27.13 ± 0.68) ^d	(19.78 ± 0.51) ^c	(11.64 ± 0.31) ^c	(4.98 ± 0.07) ^c	(3.81 ± 0.06) ^c	(3.01 ± 0.04) ^c
W3N2	(30.03 ± 1.23) ^{bc}	(24.56 ± 0.52) ^b	(15.78 ± 0.96) ^{ab}	(5.81 ± 0.06) ^b	(4.91 ± 0.05) ^{ab}	(4.30 ± 0.03) ^a
W3N3	(30.98 ± 0.89) ^b	(25.89 ± 0.47) ^{ab}	(16.87 ± 0.43) ^a	(6.28 ± 0.16) ^{ab}	(5.26 ± 0.03) ^a	(4.38 ± 0.04) ^a
W	6.468 **	8.091 **	7.004 **	8.827 **	9.124 **	10.164 **
N	6.094 *	6.403 *	6.658 *	5.896 *	5.765 *	3.635 *
W × N	23.589 **	118.123 **	39.751 **	139.458 **	310.358 **	409.323 **

注: * 表示差异显著 ($P<0.05$), ** 表示差异极显著 ($P<0.01$); 同一列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$), 下同。

由表 2 可知,不同处理滴灌棉花蒸腾速率 (T_r) 与 P_n 变化趋势一致,均在盛花期达到最大值,各处理平均值 5.27 $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,随生育期的推进呈现出下降趋势,至吐絮期达到最小值,各处理平均值 3.27 $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,自盛花期至吐絮期各处理 T_r 平均降低 37.95%。在 W1 和 W2 水平下, T_r 随着施氮量的增加先升高后降低,盛花期 N2 比 N1 和 N3 处理分别高 25.52% 和 5.4%;在 W3 水平下, T_r 随着施氮量的增加而增加,均在 N3 处达到最大值。在 W2 水平下,盛花期 N2 比 N1 和 N3 处理分别高 28.31% 和 10.53%;在 W3 水平下,盛花期 N2 和 N3 比 N1 处理分别高 16.67% 和 26.10%。在 N2 水平下,W2 处理的 T_r 高于 W1 和 W3 处理,W2N2 处理具有显著的交互效应。其中,灌水及水氮交互处理对 T_r 影响极显著 ($P<0.01$),施肥对 T_r 影响显著 ($P<0.05$)。结果表明,适宜的水氮供应可减少棉花叶片的脱落酸 (ABA) 含量,增加细胞分裂素、生长素等的含量,从而提高净光合速率和蒸腾速率。

2.1.2 盐胁迫水氮调控对棉花 G_s 及 C_i 的影响

表 3 是不同水氮处理对棉花功能叶 7 月 7 日 (盛花期)、8 月 1 日 (盛铃期) 及 9 月 12 日 (吐絮期) 气孔导度 (G_s) 和细胞间 CO_2 浓度 (C_i) 的影响。可以看出,气孔导度 (G_s) 随着生育期的推进逐渐减小,最大值出现在盛花期;细胞间 CO_2 浓度 (C_i) 随着生育期的推进逐渐增大,吐絮期各处理平均值最大。其中,灌水对棉花各生育期功能叶 G_s 和 C_i 的影响达到极显著水平 ($P<0.01$),施氮对棉花各生育期 G_s 和 C_i 的影响达到显著水平 ($P<0.05$),水氮交互作用对棉花各生育期 G_s 和 C_i 的影响达到极显著水平 ($P<0.01$)。

由表 3 可知,自盛花期至盛铃期各处理 G_s 平均减小 30.27%,盛铃期至吐絮期各处理 G_s 平均降低 37.98%。W1 和 W2 水平下, G_s 随着施氮量的增加先升高后降低。W3 水平下, G_s 随着施氮量的增加而增加,盛花期 N3 比 N1 和 N2 处理分别高 1.12% 和 6.25%。在 W1 水平下,盛花期 N2 比 N1 和 N3 处理分别高 2.67% 和 1.69%。在 W2 水平下,盛花

表 3 盐胁迫水氮调控对棉花 G_s 及 C_i 的影响

Tab.3 Effects of salt stress and water and nitrogen regulation on G_s and C_i of cotton

水肥处理	气孔导度 $G_s/(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$			细胞间 CO_2 浓度 $C_i/(\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1})$		
	盛花期	盛铃期	吐絮期	盛花期	盛铃期	吐絮期
W1N1	(480.06 ± 1.73) ^g	(331.17 ± 1.67) ^f	(179.31 ± 0.6) ^f	(194.01 ± 4.64) ^a	(241.54 ± 4.29) ^a	(277.10 ± 4.57) ^a
W1N2	(492.87 ± 0.47) ^f	(350.17 ± 0.50) ^c	(208.65 ± 1.53) ^d	(152.97 ± 8.69) ^{bc}	(220.06 ± 6.78) ^{bc}	(250.08 ± 7.25) ^{cd}
W1N3	(484.67 ± 1.34) ^g	(336.82 ± 1.49) ^e	(199.34 ± 0.95) ^e	(177.88 ± 3.35) ^a	(235.92 ± 4.26) ^{ab}	(270.75 ± 2.92) ^{ab}
W2N1	(485.67 ± 4.01) ^g	(348.16 ± 1.49) ^c	(205.51 ± 1.42) ^d	(158.14 ± 5.29) ^b	(218.09 ± 3.75) ^c	(248.08 ± 3.59) ^{cd}
W2N2	(548.67 ± 1.34) ^a	(380.67 ± 1.01) ^a	(255.33 ± 0.72) ^a	(131.93 ± 6.10) ^d	(172.66 ± 6.02) ^{ef}	(215.84 ± 4.70) ^e
W2N3	(530.00 ± 1.67) ^c	(363.50 ± 1.83) ^b	(224.15 ± 1.13) ^c	(135.5 ± 5.89) ^{cd}	(181.09 ± 5.54) ^{de}	(220.56 ± 3.39) ^e
W3N1	(508.25 ± 1.25) ^e	(342.00 ± 1.33) ^d	(222.61 ± 1.27) ^c	(151.34 ± 5.79) ^{bc}	(217.19 ± 3.64) ^c	(259.75 ± 4.09) ^{bc}
W3N2	(534.03 ± 1.70) ^d	(364.51 ± 0.64) ^b	(240.15 ± 1.12) ^a	(112.15 ± 4.59) ^e	(196.50 ± 7.34) ^d	(244.75 ± 3.58) ^d
W3N3	(540.00 ± 3.33) ^b	(383.50 ± 0.83) ^a	(255.90 ± 3.75) ^a	(100.34 ± 2.49) ^e	(159.56 ± 3.87) ^f	(228.98 ± 3.83) ^e
W	7.21 ^{**}	5.572 [*]	10.139 ^{**}	18.717 ^{**}	7.735 ^{**}	9.802 ^{**}
N	4.246 [*]	8.096 ^{**}	4.801 [*]	6.267 [*]	4.56 [*]	4.135 [*]
W × N	145.666 ^{**}	234.6 ^{**}	248.7 ^{**}	29.673 ^{**}	30.231 ^{**}	23.714 ^{**}

期 N2 比 N1 和 N3 处理分别高 12.97% 和 3.52% ; 而盛花期至盛铃期各处理 C_i 平均增加 16.85% , 盛铃期至吐絮期各处理 C_i 平均增加 28.67% 。W1 和 W2 水平下, C_i 随着施氮量的增加先降低后升高。W3 水平下, C_i 随着施氮量的增加而减小, 盛花期 N3 比 N1 和 N2 处理分别低 33.40% 和 10.53% 。W1 水平下, 盛花期 N2 比 N1 和 N3 处理分别低 21.53% 和 13.26% 。W2 水平下, 盛花期 N2 比 N1 和 N3 处理分别低 16.57% 和 2.63% 。结果表明, 合理的水氮用量可降低硝酸还原酶的活性, 使叶片叶绿素含量增加、维管束鞘细胞的碳水化合物得到积累, 进而增强棉花叶片的气体交换能力, 最终使棉株的光合

碳化能力得到提高。

2.2 盐胁迫水氮调控对棉花叶绿素荧光参数的影响

2.2.1 盐胁迫水氮调控对棉花 F_v/F_m 及 F_v/F_0 的影响

表 4 是不同水氮处理对棉花功能叶盛花期、盛铃期及吐絮期 F_v/F_m 和 F_v/F_0 的影响。可知, F_v/F_m 和 F_v/F_0 均随着生育期的推进逐渐减小, 至吐絮期达到最小值。其中, 灌水对棉花各生育期功能叶 F_v/F_m 和 F_v/F_0 的影响不显著 ($P > 0.05$), 施氮对棉花各生育期 F_v/F_m 和 F_v/F_0 的影响达到极显著水平 ($P < 0.01$), 水氮交互作用对棉花各生育期 F_v/F_m 和 F_v/F_0 的影响达到极显著水平 ($P < 0.01$)。

表 4 盐胁迫水氮调控对棉花 F_v/F_m 及 F_v/F_0 的影响

Tab.4 Effects of salt stress and water and nitrogen regulation on F_v/F_m and F_v/F_0 of cotton

水肥处理	F_v/F_m			F_v/F_0		
	盛花期	盛铃期	吐絮期	盛花期	盛铃期	吐絮期
W1N1	(0.769 ± 0.01) ^e	(0.735 ± 0.01) ^f	(0.705 ± 0.01) ^e	(3.266 ± 0.07) ^e	(2.767 ± 0.18) ^f	(2.364 ± 0.10) ^f
W1N2	(0.827 ± 0.03) ^b	(0.795 ± 0.02) ^c	(0.769 ± 0.02) ^b	(4.113 ± 0.04) ^{bc}	(3.756 ± 0.13) ^{bc}	(3.134 ± 0.13) ^{bc}
W1N3	(0.840 ± 0.02) ^{ab}	(0.798 ± 0.01) ^c	(0.771 ± 0.01) ^b	(3.859 ± 0.06) ^{cd}	(3.499 ± 0.08) ^{cd}	(3.045 ± 0.13) ^{cd}
W2N1	(0.785 ± 0.01) ^d	(0.750 ± 0.01) ^e	(0.724 ± 0.01) ^d	(3.415 ± 0.11) ^e	(3.044 ± 0.06) ^{ef}	(2.563 ± 0.10) ^{ef}
W2N2	(0.828 ± 0.02) ^b	(0.807 ± 0.03) ^{bc}	(0.782 ± 0.01) ^{ab}	(4.445 ± 0.09) ^{ab}	(4.051 ± 0.09) ^{ab}	(3.482 ± 0.04) ^a
W2N3	(0.839 ± 0.03) ^{ab}	(0.814 ± 0.01) ^{bc}	(0.783 ± 0.03) ^{ab}	(4.276 ± 0.25) ^{bc}	(3.748 ± 0.10) ^{bc}	(3.429 ± 0.08) ^{ab}
W3N1	(0.804 ± 0.01) ^c	(0.765 ± 0.01) ^d	(0.746 ± 0.02) ^c	(3.564 ± 0.13) ^{de}	(3.230 ± 0.09) ^{de}	(2.809 ± 0.09) ^{de}
W3N2	(0.845 ± 0.02) ^a	(0.828 ± 0.02) ^a	(0.797 ± 0.01) ^a	(4.425 ± 0.06) ^{ab}	(4.119 ± 0.05) ^a	(3.574 ± 0.07) ^a
W3N3	(0.849 ± 0.01) ^a	(0.831 ± 0.01) ^a	(0.800 ± 0.01) ^a	(4.764 ± 0.19) ^a	(4.372 ± 0.13) ^a	(3.619 ± 0.06) ^a
W	0.900	1.436	1.649	1.522	1.915	1.979
N	35.479 ^{**}	35.541 ^{**}	26.621 ^{**}	17.900 ^{**}	18.175 ^{**}	21.178 ^{**}
W × N	39.530 ^{**}	88.453 ^{**}	33.429 ^{**}	15.752 ^{**}	24.555 ^{**}	24.255 ^{**}

F_v/F_m 反映了棉株光系统 II 的最大光合量子产量(表 4)。由表 4 可知, 滴灌棉花功能叶 F_v/F_m 在盛花期达到最大值, 各处理平均值为 0.82; 盛铃期有所下降, 各处理平均值为 0.79; 吐絮期降到最低,

各处理平均值为 0.76, 自盛花期至吐絮期各处理 F_v/F_m 值呈现出逐渐降低的趋势。在同一灌溉水平下, 棉花各生育期功能叶的 F_v/F_m 值随着施氮量的增加而增加, 均在 W3N3 处取得最大值, W1N1 处取

得最小值。在 W1 水平下,盛花期 N3 比 N1 和 N2 处理分别高 9.23% 和 1.57%;在 W3 水平下,盛花期 N3 比 N1 和 N2 处理分别高 5.60% 和 0.47%。

F_v/F_0 反映了棉株光系统Ⅱ的原初光能转化效率(表4)。由表4可知,滴灌棉花功能叶 F_v/F_0 在盛花期达到最大值,各处理平均值为 4.01;盛铃期有所下降,各处理平均值为 3.62;吐絮期降到最低,各处理平均值为 3.11,自盛花期至吐絮期各处理 F_v/F_0 值呈现出逐渐降低的趋势。在 W1 和 W2 水平下,棉花各生育期功能叶的 F_v/F_0 值随着施氮量的增加先增加后减小,在 W3 水平下,棉花各生育期 F_v/F_0 值随着施氮量的增加而增加,并在 W3N3 处达到最大值。在 W1 水平下,盛花期 N2 比 N1 和 N3 处理分别高 25.93% 和 6.58%;W2 水平下,盛花期 N2 比 N1 和 N3 处理分别高 30.16% 和 3.95%;在 W3 水平下,盛花期 N3 比 N1 和 N2 处理分别高

33.67% 和 7.66%。说明,合理的灌水、施氮量可增强棉花光合功能叶中 RUBP 羧化酶的活性,提高叶绿素荧光动力学参数 F_v/F_m 和 F_v/F_0 ,从而提高了棉株光合产物的积累量。

2.2.2 盐胁迫水氮调控对棉花 q^p 及 NPQ 的影响

表5是不同水氮处理对棉花功能叶盛花期、盛铃期及吐絮期 q^p 和 NPQ 的影响。可知, q^p 随着生育期的推进逐渐减小,至吐絮期达到最小值。NPQ 随着生育期的推进逐渐增大,至吐絮期达到最大值。其中,灌水对棉花盛花期、盛铃期功能叶 q^p 的影响极显著($P < 0.01$),施氮对棉花各生育期 q^p 的影响达到显著水平($P < 0.05$);灌水对棉花各生育期功能叶 NPQ 的影响极显著($P < 0.01$),施氮对棉花各生育期 NPQ 无显著影响($P > 0.05$),水氮交互作用对棉花各生育期 q^p 和 NPQ 的影响达到极显著水平($P < 0.01$)。

表 5 盐胁迫水氮调控对棉花 q^p 及 NPQ 的影响
Tab.5 Effects of salt stress and water and nitrogen regulation on q^p and NPQ of cotton

水肥处理	q^p			NPQ		
	盛花期	盛铃期	吐絮期	盛花期	盛铃期	吐絮期
W1N1	(0.799 ± 0.01) ^e	(0.643 ± 0.01) ^e	(0.480 ± 0.01) ^d	(1.140 ± 0.10) ^b	(1.514 ± 0.02) ^a	(1.814 ± 0.06) ^a
W1N2	(0.868 ± 0.02) ^{bc}	(0.727 ± 0.01) ^{bcd}	(0.522 ± 0.01) ^{bc}	(1.049 ± 0.11) ^b	(1.346 ± 0.03) ^b	(1.647 ± 0.02) ^b
W1N3	(0.820 ± 0.01) ^{de}	(0.695 ± 0.01) ^{de}	(0.509 ± 0.01) ^c	(1.446 ± 0.13) ^a	(1.601 ± 0.01) ^a	(1.769 ± 0.05) ^{ab}
W2N1	(0.865 ± 0.02) ^{bcd}	(0.734 ± 0.02) ^{bcd}	(0.517 ± 0.01) ^{bc}	(0.907 ± 0.06) ^{bc}	(1.133 ± 0.03) ^c	(1.409 ± 0.04) ^c
W2N2	(0.907 ± 0.02) ^{ab}	(0.783 ± 0.03) ^{ab}	(0.556 ± 0.02) ^a	(0.693 ± 0.04) ^{cd}	(0.978 ± 0.05) ^{cd}	(1.283 ± 0.02) ^{cd}
W2N3	(0.858 ± 0.01) ^{cd}	(0.718 ± 0.02) ^{cd}	(0.510 ± 0.01) ^c	(0.541 ± 0.06) ^d	(0.669 ± 0.06) ^e	(1.232 ± 0.04) ^{de}
W3N1	(0.892 ± 0.01) ^{abc}	(0.796 ± 0.02) ^a	(0.541 ± 0.03) ^{ab}	(0.592 ± 0.07) ^d	(1.133 ± 0.09) ^c	(1.273 ± 0.08) ^{cd}
W3N2	(0.927 ± 0.01) ^a	(0.799 ± 0.01) ^a	(0.567 ± 0.01) ^a	(0.518 ± 0.05) ^d	(0.904 ± 0.08) ^d	(1.217 ± 0.04) ^{de}
W3N3	(0.870 ± 0.01) ^{bc}	(0.756 ± 0.02) ^{abc}	(0.525 ± 0.01) ^{bc}	(0.451 ± 0.06) ^d	(0.548 ± 0.04) ^e	(1.102 ± 0.02) ^e
W	7.426 ^{**}	10.645 ^{**}	5.209 [*]	25.379 ^{**}	15.515 ^{**}	56.741 ^{**}
N	3.986 [*]	1.647 [*]	4.704 [*]	1.142	2.06	1.075
W × N	8.498 ^{**}	8.619 ^{**}	9.899 ^{**}	17.008 ^{**}	48.27 ^{**}	31.695 ^{**}

q^p 代表了原初电子受体的 QA 的还原状态(表5)。由表5可知,滴灌棉花功能叶 q^p 在盛花期达到最大值,各处理平均值为 0.87;盛铃期有所下降,各处理平均值为 0.74;吐絮期降到最低,各处理平均值为 0.52,自盛花期至吐絮期各处理 q^p 值呈现出逐渐降低的趋势。在各灌水水平下,棉花各生育期功能叶的 q^p 值随着施氮量的增加先增加后减小。在 W1 水平下,盛花期 N2 比 N1 和 N3 处理分别高 8.64% 和 5.85%;W2 水平下,盛花期 N2 比 N1 和 N3 处理分别高 4.86% 和 5.71%;在 W3 水平下,盛花期 N2 比 N1 和 N3 处理分别高 3.92% 和 6.55%。

NPQ 反映了植株光系统Ⅱ的热耗散情况,可表示植物受胁迫的程度。由表5可知,滴灌棉花功能叶 NPQ 值在盛花期最小,各处理平均值为 0.81;盛铃期有所升高,各处理平均值为 1.09;吐絮期达到

最大值,各处理平均值为 1.42,自盛花期至吐絮期各处理 NPQ 值呈现出逐渐升高的趋势。在 W1 水平下,棉花各生育期功能叶的 NPQ 值随着施氮量的增加先减小后增加。在 W2 和 W3 水平,NPQ 值随着施氮量的增加逐渐减小。在 W1 水平下,盛花期 N2 比 N1 和 N3 处理分别低 7.98% 和 27.46%;W2 水平下,盛花期 N1 比 N2 和 N3 处理分别高 30.88% 和 67.65%;在 W3 水平下,盛花期 N1 比 N2 和 N3 处理分别高 14.29% 和 31.26%。结果表明,合理的灌水、施氮可提高 PSⅡ反应中心光化学淬灭系数及光化学活性,从而提高了植株的光合能力。

2.2.3 盐胁迫水氮调控对棉花 Y(Ⅱ)及 ETR 的影响

表6是不同水氮处理对棉花功能叶盛花期、盛铃期及吐絮期 Y(Ⅱ)和 ETR 的影响。可知,Y(Ⅱ)和 ETR 均随着生育期的推进逐渐减小,至吐絮期达

到最小值。其中,灌水对棉花盛花期、盛铃期功能叶 $Y(\text{II})$ 和 ETR 的影响显著 ($P < 0.05$),对棉花吐絮期 $Y(\text{II})$ 和 ETR 的影响极显著 ($P < 0.01$);施氮对棉花盛花期 $Y(\text{II})$ 和 ETR 的影响达到极显著水平 ($P < 0.01$),施氮对棉花盛铃期和吐絮期 $Y(\text{II})$ 和 ETR 的影响显著 ($P < 0.05$);水氮交互作用均对棉花各生育期 $Y(\text{II})$ 和 ETR 的影响达到极显著水平 ($P < 0.01$)。

表 6 盐胁迫水氮调控对棉花 $Y(\text{II})$ 及 ETR 的影响

Tab.6 Effects of salt stress and water and nitrogen regulation on $Y(\text{II})$ and ETR of cotton						
水肥处理	$Y(\text{II})$			ETR/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$		
	盛花期	盛铃期	吐絮期	盛花期	盛铃期	吐絮期
W1N1	(0.611±0.01) ^d	(0.430±0.01) ^c	(0.361±0.01) ^d	(299.437±3.43) ^d	(244.511±7.69) ^c	(190.946±6.88) ^d
W1N2	(0.681±0.01) ^{bc}	(0.486±0.01) ^b	(0.439±0.01) ^{bc}	(333.497±7.11) ^{bc}	(276.677±6.26) ^b	(232.203±6.35) ^{bc}
W1N3	(0.678±0.02) ^{bc}	(0.475±0.01) ^b	(0.403±0.02) ^c	(332.027±7.60) ^{bc}	(270.130±6.55) ^b	(213.161±3.17) ^c
W2N1	(0.669±0.01) ^{bc}	(0.483±0.02) ^b	(0.425±0.01) ^{bc}	(328.107±6.62) ^{bc}	(274.969±6.26) ^b	(224.533±4.50) ^{bc}
W2N2	(0.725±0.01) ^a	(0.533±0.01) ^a	(0.453±0.03) ^{ab}	(355.061±5.15) ^a	(303.433±6.26) ^a	(258.385±3.97) ^a
W2N3	(0.708±0.01) ^{ab}	(0.497±0.03) ^{ab}	(0.489±0.01) ^a	(346.729±1.72) ^{ab}	(282.939±4.55) ^{ab}	(239.608±12.17) ^{ab}
W3N1	(0.665±0.01) ^c	(0.474±0.01) ^b	(0.430±0.02) ^{bc}	(325.656±5.15) ^c	(269.845±4.55) ^b	(227.178±6.08) ^{bc}
W3N2	(0.725±0.01) ^a	(0.532±0.02) ^a	(0.486±0.01) ^a	(355.306±5.39) ^a	(302.864±12.52) ^a	(257.063±5.82) ^a
W3N3	(0.731±0.02) ^a	(0.539±0.01) ^a	(0.494±0.01) ^a	(358.491±5.15) ^a	(306.564±8.25) ^a	(261.030±6.61) ^a
W	4.000 [*]	4.670 [*]	6.584 ^{**}	4.000 [*]	4.670 [*]	6.584 ^{**}
N	8.780 ^{**}	5.479 [*]	5.133 [*]	8.780 ^{**}	5.479 [*]	5.133 [*]
W×N	11.747 ^{**}	7.565 ^{**}	12.279 ^{**}	11.747 ^{**}	7.561 ^{**}	12.255 ^{**}

$Y(\text{II})$ 和 ETR 分别代表了植株光系统 II 的实际光合量子产量、相对电子传递速率(表 6)。由表 6 可知,滴灌棉花功能叶 $Y(\text{II})$ 在盛花期达到最大值,各处理平均值为 0.69;盛铃期有所下降,各处理平均值为 0.49;吐絮期降到最低,各处理平均值为 0.44,自盛花期至吐絮期各处理 $Y(\text{II})$ 值呈现出逐渐降低的趋势。在 W1 水平下,盛花期 N2 比 N1 和 N3 处理分别高 11.46% 和 0.44%;W2 水平下,盛花期 N2 比 N1 和 N3 处理分别高 8.37% 和 2.40%;在 W3 水平下,盛花期 N3 比 N1 和 N2 处理分别高 9.92% 和 0.83%。ETR 变化趋势与 $Y(\text{II})$ 相似:在盛花期取得最大值,随着生育进程逐渐降低,在吐絮期降到最小值。且在 W1 和 W2 水平下,

棉花各生育期 ETR 均随着施氮量的增加呈先增高后降低的趋势。在 W3 水平下,各生育期 ETR 均随着施氮量的增加而增加。说明,合理的水氮用量可能增强了棉花叶片的抗氧化能力,使膜脂氧化速度减慢,进而提高了植株的光能利用率,使其光合电子能力得到提高、光合能力增强。

2.3 盐胁迫水氮调控对棉花产量及品质的影响

2.3.1 盐胁迫水氮调控对棉花产量及水、肥利用效率的影响

表 7 是不同水氮处理对棉花籽棉产量 (Y)、灌溉水利用效率 ($iWUE$)、氮肥偏生产力 ($NPFP$) 及增产效应 (E_i) 的影响。可知,灌水对 Y 及 $iWUE$ 的影响极显著 ($P < 0.01$),对 $NPFP$ 影响显著 ($P < 0.05$);

表 7 盐胁迫水氮调控对棉花产量及水肥利用效率的影响

Tab.7 Effects of salt stress and water and nitrogen regulation on cotton yield and utilization efficiency of water and fertilizer				
水处理肥	$Y/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$	$iWUE/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$NPFP/(\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1})$	$E_i/\%$
W1N1	(3 483.75±39) ^d	(1.27±0.01) ^c	(25.06±0.28) ^c	
W1N2	(4 177.88±7) ^c	(1.52±0.01) ^b	(15.03±0.03) ^c	19.92
W1N3	(4 432.88±86) ^c	(1.61±0.03) ^a	(10.61±0.21) ^g	27.24
W2N1	(4 480.50±159) ^c	(1.19±0.04) ^{cd}	(32.23±1.14) ^b	28.61
W2N2	(5 854.50±176) ^a	(1.56±0.05) ^{ab}	(21.06±0.63) ^d	68.05
W2N3	(5 718.75±95) ^a	(1.53±0.03) ^{ab}	(13.68±0.23) ^{ef}	64.16
W3N1	(4 847.63±69) ^b	(1.02±0.01) ^f	(34.88±0.50) ^a	39.15
W3N2	(5 554.13±15) ^a	(1.17±0.01) ^{de}	(19.98±0.06) ^d	59.43
W3N3	(5 151.38±104) ^b	(1.08±0.02) ^{ef}	(12.32±0.23) ^f	47.87
W	11.78 ^{**}	11.71 ^{**}	0.81 [*]	
N	3.32 [*]	3.25	50.19 ^{**}	
W×N	32.20 ^{**}	70.82 ^{**}	310.77 ^{**}	

施氮对 Y 的影响达到显著水平 ($P < 0.05$)、对 NPFP 的影响达到极显著水平 ($P < 0.01$),但对 iWUE 无显著影响 ($P > 0.05$);水氮交互作用对 Y 、iWUE 及 NPFP 的影响达到极显著水平 ($P < 0.01$)。

由表 7 可知,在 W1 水平下, Y 、iWUE 均随着施氮量的增加而增加;在 W2 和 W3 水平下, Y 、iWUE 均随着施氮量的增加呈先升高后降低的趋势。其中,籽棉产量 (Y) 最大值出现在 W2N2 处理,为 $5\,854.5\text{ kg/hm}^2$;最小值出现在 W1N1 处理,为 $3\,483.75\text{ kg/hm}^2$,相对增加 68.05%。说明,适宜的水氮条件才能使棉花产量、灌溉水利用效率达到最优。在同一灌水水平下,NPFP 随着施氮量的增加逐渐减小。且在 N1 水平出现最大值,N3 水平出现最小值;最大值出现在 W3N1 处理,为 34.88 kg/kg ;最小值出现在 W1N3 处理,为 10.61 kg/kg 。在不同水氮处理下,增产效应 (E_i) 表现出先增加后减小的

趋势,最大值出现在 W2N2 处理。这可能是由于适宜的水氮用量提高了棉花叶片超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 等的活性,使膜脂过氧化程度降低、细胞膜的稳定性增强,减缓了植株的衰老速度,提高了棉株单铃质量,进而提高了棉花产量。

2.3.2 盐胁迫水氮调控对棉花纤维品质的影响

表 8 是不同水氮处理对棉花纤维品质 (马克隆值、纤维长度、整齐度指数、断裂比强度、伸长率) 的影响。可知,灌水对马克隆值及纤维长度的影响极显著 ($P < 0.01$),对整齐度指数、断裂比强度及伸长率无显著影响 ($P > 0.05$);施氮对马克隆值的影响达到显著水平 ($P < 0.05$),但对纤维长度、整齐度指数、断裂比强度及伸长率无显著影响 ($P > 0.05$);水氮交互作用对马克隆值的影响达到极显著水平 ($P < 0.01$),对其他指标则无显著影响 ($P > 0.05$)。

表 8 盐胁迫水氮调控对棉花纤维品质的影响
Tab.8 Effects of salt stress and water and nitrogen regulation on fiber quality of cotton

水肥处理	马克隆值	纤维长度/mm	整齐度指数/%	断裂比强度/($\text{cN}\cdot\text{tex}^{-1}$)	伸长率/%
W1N1	(4.45 ± 0.05) ^{bcd}	(27.30 ± 0.1) ^b	(80.05 ± 0.05) ^a	(26.80 ± 0.10) ^a	(7.75 ± 0.25) ^a
W1N2	(5.05 ± 0.05) ^{ab}	(29.20 ± 0.2) ^{ab}	(80.40 ± 0.60) ^a	(25.75 ± 1.05) ^a	(6.35 ± 0.15) ^a
W1N3	(5.48 ± 0.08) ^a	(27.20 ± 1.4) ^b	(81.70 ± 0.20) ^a	(29.25 ± 0.15) ^a	(6.95 ± 0.25) ^a
W2N1	(4.25 ± 0.30) ^d	(28.25 ± 0.1) ^{ab}	(80.75 ± 0.95) ^a	(26.70 ± 0.60) ^a	(6.20 ± 0.12) ^a
W2N2	(4.68 ± 0.23) ^{bcd}	(29.15 ± 0.5) ^{ab}	(81.45 ± 0.55) ^a	(27.55 ± 0.55) ^a	(6.15 ± 0.45) ^a
W2N3	(4.90 ± 0.20) ^{abc}	(28.95 ± 0.1) ^{ab}	(81.25 ± 0.05) ^a	(26.40 ± 2.00) ^a	(6.70 ± 0.90) ^a
W3N1	(3.43 ± 0.23) ^c	(29.40 ± 0.1) ^{ab}	(81.05 ± 0.15) ^a	(27.60 ± 0.20) ^a	(7.30 ± 0.70) ^a
W3N2	(4.08 ± 0.03) ^d	(30.45 ± 0.8) ^a	(80.40 ± 0.80) ^a	(27.10 ± 1.40) ^a	(6.80 ± 0.50) ^a
W3N3	(4.38 ± 0.22) ^{cd}	(30.15 ± 0.9) ^a	(80.95 ± 0.65) ^a	(25.90 ± 1.20) ^a	(6.35 ± 0.55) ^a
W	8.115 ^{**}	6.887 ^{**}	0.505	0.129	1.377
N	4.477 [*]	1.168	1.392	0.093	1.258
W × N	10.966 ^{**}	3.121	0.974	1.096	1.188

由表 8 可知,大体上,马克隆值随着灌水量的增加而降低。在相同灌水处理下,各处理的马克隆值均随着施氮量的增加逐渐增加,但不存在显著差异。表明,影响马克隆值的主要因素是水分,次要因素为氮肥。在相同灌水处理下,纤维长度大体上随着施氮量的增加呈现出先升高后降低的趋势,但 N2 和 N3 水平不存在差异性;在同一氮肥水平下,纤维长度大体随着灌水量的增加而增加。不同水氮处理对整齐度指数、断裂比强度及伸长率基本无影响。灌水处理对马克隆值及纤维长度影响较大,氮肥只对马克隆值具有显著影响,且最优值均为 W2N2 处理。可能的原因是,水氮用量过多或过少均会使植株碳氮代谢过程受阻,导致棉株出现早衰或贪青晚熟现象,致使棉纤维品质降低。因此,只有适宜的水氮用量才会使纤维品质达到最优。

2.4 盐胁迫条件下绿洲区棉田最佳灌水、施氮量分析
2.4.1 水氮调控与产量、净光合速率、 F_v/F_m 、马克隆值的关系

如表 9 所示,以水氮投入为自变量,以棉花产量、净光合速率、 F_v/F_m 、马克隆值为因变量,分别建立了二元二次回归方程。所建立的回归方程均在 95% 置信区间,水氮投入对各因变量的影响均达到极显著水平 ($P < 0.01$),决定系数均在 0.86 以上。图 1a 反映了灌水量与施氮量对棉花产量的耦合效应为开口向下的正凸曲面,且水氮量对产量的影响大体一致,呈现先增加后减少的趋势,当灌水量为 $3\,895\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 、施氮量为 720 kg/hm^2 ,产量达到最大值 $5\,691\text{ kg/hm}^2$;由图 1b 可以看出,灌水量与施氮量对棉花叶片净光合速率耦合效应同产量一样,呈现开口向下的正凸曲面,当灌水量为 $3\,760\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 、施氮量为 745 kg/hm^2 ,净光合速率达到最大值

25.35 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; 图 1c 反映了灌水量与施氮量对叶片 F_v/F_m 的耦合效应,整体上 F_v/F_m 随灌水量、施肥量的增加而增加,当灌水量为 4 680 m^3/hm^2 、施氮量为 840 kg/hm^2 ,荧光达到最大值 0.84;图 1d 是

灌水量与施氮量对马克隆值的耦合效应,品质随灌水量的增加呈现先增加后减少的趋势,随施肥量的增加而增加,当灌水量为 3 981 m^3/hm^2 、施氮量为 871 kg/hm^2 ,马克隆值达到最大值 5.47。

表 9 盐胁迫水氮用量与产量、净光合速率、 F_v/F_m 及马克隆值间的回归关系

Tab.9 Regression relationship between amount of water and nitrogen in salt stress and yield , net photosynthetic rate , F_v/F_m and Micronaire value		置信区间/%	自由度	F	显著性
输出变量	回归方程				
产量	$Y_1 = -7.4 \times 10^{-4} I^2 - 5.7 \times 10^{-3} N^2 - 5.3 \times 10^{-4} IN + 6.47I + 10.20N - 11002.63$ ($R^2 = 0.938$)	95	17	36.54	<0.01
净光合速率	$Y_2 = -2.9 \times 10^{-6} I^2 - 3.1 \times 10^{-5} N^2 - 8.6 \times 10^{-8} IN + 2.5 \times 10^{-3} I + 0.4N - 40.185$ ($R^2 = 0.961$)	95	16	54.99	<0.01
F_v/F_m	$Y_3 = 3.0 \times 10^{-9} I^2 - 2.8 \times 10^{-9} N^2 - 1.1 \times 10^{-8} IN - 1.8 \times 10^{-6} I + 4.8 \times 10^{-4} N - 0.61$ ($R^2 = 0.986$)	95	16	160.33	<0.01
马克隆值	$Y_4 = 3.1 \times 10^{-7} I^2 - 4.1 \times 10^{-7} N^2 + 6.4 \times 10^{-8} IN + 2.4 \times 10^{-3} I + 4.9 \times 10^{-4} N + 1.245$ ($R^2 = 0.867$)	95	16	6.69	<0.01

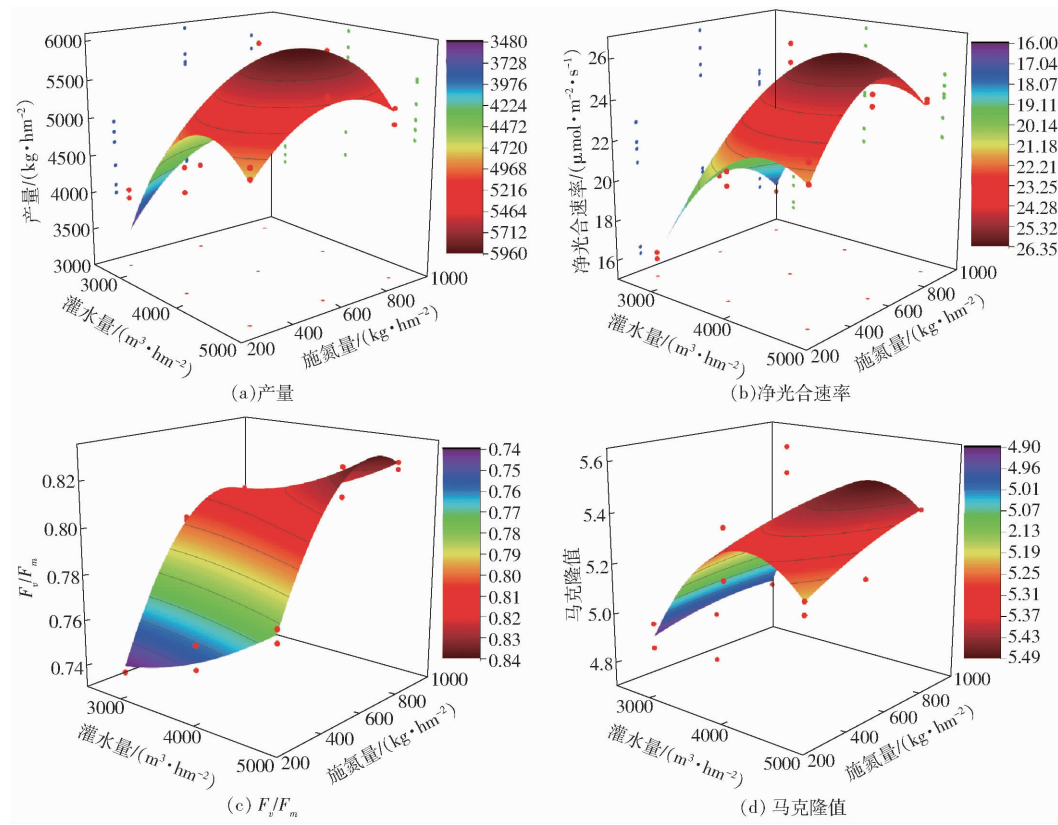


图 1 水氮处理对盐胁迫棉花产量、净光合速率、 F_v/F_m 及马克隆值的影响

Fig.1 Effects of water and nitrogen treatment on yield, net photosynthetic rate, F_v/F_m and micronutrient values of salt stress

2.4.2 水氮调控与相对产量、相对净光合速率、相对荧光参数 (F_v/F_m) 及相对马克隆值的关系

由于棉花产量、净光合速率、 F_v/F_m 、马克隆值难以同时达到最大值,且具有不同的量纲,不能直接比较,因此将棉花产量、净光合速率、 F_v/F_m 、马克隆值进行标准化处理,即各处理棉花产量、净光合速率、荧光指标、品质指标分别除以其最大值,可以得到水氮投入与相对产量、相对净光合速率、相对荧光指标和相对品质指标的关系。

对棉花相对产量、相对净光合速率 (P_n)、相对

荧光参数 (F_v/F_m) 和相对品质指标 (马克隆值) 进行评价。由图 2 可以看出,各指标在相对值 0.9 可接受区域时相对产量、相对净光合速率、相对马克隆值有重合区域,而荧光区域相差太远;在相对值 0.8 可接受区域时棉花各指标有重叠区域,因此大于等于相对值 0.8 区域定为合理的可接受范围。

由图 2 可知,本研究参考了相关学者的参数估计中所用的似然函数组合方法^[26],分别记为加法组合方式 C1、乘法组合方式 C2 和均方根组合方式 C3,同时对棉花产量、净光合速率、荧光、马克隆值同时达到相对值 0.8 以上的区域用 3 种组合方式进

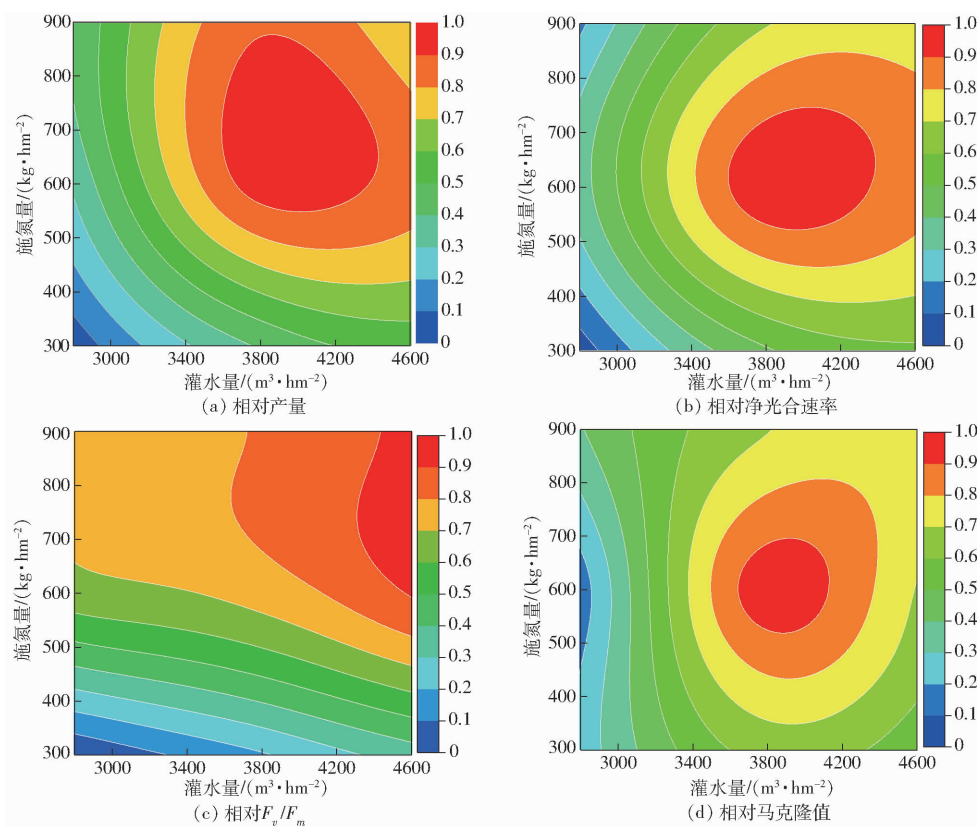


图 2 水氮处理与盐胁迫棉花相对产量、相对净光合速率、相对 F_v/F_m 及相对马克隆值的关系

Fig.2 Relationship between relative yield, relative net photosynthetic rate, relative F_v/F_m and relative micronutrients of salt stress treated by water and nitrogen treatment

行计算,取相对 C1、C2、C3 组合平均参数为最佳水肥量,通过计算得出最佳灌水施肥量为 $3\,740\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 和 $754\text{ kg}/\text{hm}^2$ 。

3 讨论

光合作用是棉花生长发育及品质、产量形成的基础,灌水、施肥均会对植物光合产生重要影响^[27],而叶绿素荧光分析可反映环境胁迫下植物 PS II 功能的变化^[28]。研究不同水氮处理下盐渍化土壤上棉花生理生长特性及其机理,对寻求盐渍化地区棉花种植所需的合理水氮配比及盐碱地的改良具有现实意义。

光合作用是植物利用太阳能将大气中的水和二氧化碳等无机物转化成有机物并释放氧气的过程,植物会自动适应周围环境并朝着有利于光合作用的方向发展^[29]。未来作物产量提高的方式将主要依靠光合作用转化度的提高^[30]。本研究表明,在 W1 和 W2 灌溉条件下, P_n 、 T_r 及 G_s 均随着施氮量的增加先上升后下降,而 C_i 随着施氮量的增加先降低后升高。在 W3 灌溉水平下, P_n 、 T_r 及 G_s 均随着施氮量的增加而增加, C_i 随着施氮量的增加而减小;在 W2 灌溉条件下,各生育期 N2 处理的 P_n 和 T_r 均高于 N1 和 N3 处理。说明施氮过高或过低均不利于棉花的光

合作用,只有适宜的施氮量才能使光合达到最高的转化效率,且生育期光合作用呈现出明显的非气孔限制因素,这与权丽双等^[31]的研究结论一致。水分胁迫影响了植物的正常光合作用,降低了棉花的 P_n 和 T_r ^[32]。本研究得出,在 N2 水平下,W2 处理的棉花 P_n 和 T_r 显著高于 W1 和 W3 处理。表明灌水量过高或过低均会降低植株的 P_n 和 T_r ,只有适宜的灌水量才能达到较好的光合效应。

适宜的灌水施氮改善了植株的光合性能,并可提高棉花叶片的 PS II 总光化学量子产量、最大光化学效率及光能的利用效率^[33], F_v/F_m 和 F_v/F_0 的变化可作为判断植物是否受光抑制的指标^[34]。本试验得出,在同一灌溉水平下,棉花各生育期功能叶的 F_v/F_m 值随着施氮量的增加而增加,均在 W3N3 处取得最大值,W1N1 处取得最小值。表明增施氮肥可以提高 F_v/F_m 值,这可能是因为氮的供应缓解了水分胁迫引起的光抑制和光损伤^[35];在 W1 和 W2 水平下,棉花各生育期功能叶的 F_v/F_0 值随着施氮量的增加先增加后减小,在 W3 水平下,棉花各生育期 F_v/F_0 值随着施氮量的增加而增加,说明合理的水氮供应可显著提高 PS II 反应中心光能转化效率^[36]。 q^p 表示 PS II 反应中心的开放程度^[23],NPQ 是衡量 PS II 反应中心非辐射能量耗散的指标^[37]。

本试验表明,在各灌水水平下,棉花各生育期功能叶的 q^p 值随着施氮量的增加先增加后减小;在 W2 和 W3 水平,NPQ 值随着施氮量的增加逐渐减小;ETR 变化趋势与 Y(Ⅱ)相似:在 W1 和 W2 水平下,棉花各生育期 ETR 均随着施氮量的增加呈先升高后降低的趋势。在 W3 水平下,各生育期 ETR 均随着施氮量的增加而增加。说明合理的灌水施氮可以增强光能利用率,并提高光合电子传递能力^[16]。

水肥的田间管理是农业生产中的一个重要问题,当两者关系达到最优时才可能实现低投入、高品质和高产出的目标^[38],且不同灌水量所对应的最佳施氮量之间存在一定差别^[17]。王振华等^[39]研究表明,合理的增水增氮可以增加植株内氮素的有效累积,促进油葵对氮素利用吸收,进而达到高产的目的。本试验研究结果与以上相似:在 W1 水平下,Y、iWUE 均随着施氮量的增加而增加;在 W2 和 W3 水平下,Y、iWUE 均随着施氮量的增加呈先升高后降低的趋势。其中,Y 最大值出现在 W2N2 处理,为 5 854.5 kg/hm²。在同一灌水水平下,NPFP 随着施氮量的增加逐渐减小,这与 AUJLA 等^[40]的研究结果一致。棉花纤维品质是其主要的目标性状,马克隆值、断裂比强度及纤维长度等是评价其品质的重要指标^[41],本试验得出,大体上,马克隆值随着灌水量的增加而降低,纤维长度大体随着灌水量的增加而增加,这与李勇等^[25]的研究结论相同。

对水氮投入量和棉花产量、净光合速率、 F_v/F_m 、马克隆值,分别建立了二元二次回归方程,并参考似然函数组合方法,得出最佳灌水施氮量为 3 740 m³/hm²和 754 kg/hm²。这一灌水施肥量为盐渍地区棉田水肥管理提供理论支撑,此优化方法可准确量化所求目标的最优值^[26]。

4 结 论

(1)轻度盐胁迫不同水氮调控条件下,灌水量和水氮交互作用对各生育期 P_n 、 T_r 、 G_s 及 C_i 均具有极显著影响($P < 0.01$),施氮量对各生育期 P_n 、 T_r 、 G_s 及 C_i 均具有显著影响($P < 0.05$)。不同处理滴灌棉花 P_n 、 T_r 、 G_s 均随生育期的推进呈现出下降趋势,

即在盛花期达到最大,吐絮期降到最小,而 C_i 却随着生育期的推进逐渐增大,吐絮期各处理平均值最大;其中,在 W1 和 W2 水平下, P_n 、 T_r 、 G_s 均随着施氮量的增加先上升后下降,且在 W2N2 处达到最大值。在 W3 水平下,均随着施氮量的增加而增加,而 C_i 却表现出相反的变化趋势。

(2)不同水氮处理滴灌棉花功能叶 F_v/F_m 和 F_v/F_0 、 q^p 、Y(Ⅱ)和 ETR 均随着生育期的推进逐渐减小,至吐絮期达到最小值。而 NPQ 随着生育期的推进逐渐增大,至吐絮期达到最大值。其中,灌水对棉花各生育期功能叶 F_v/F_m 和 F_v/F_0 的影响不显著($P > 0.05$),对 q^p 和 NPQ、Y(Ⅱ)和 ETR 的影响显著($P < 0.05$);施氮对棉花各生育期功能叶 NPQ 的影响不显著($P > 0.05$),对 F_v/F_m 和 F_v/F_0 、 q^p 、Y(Ⅱ)和 ETR 的影响显著($P < 0.05$);水氮交互作用均对棉花各生育期荧光参数的影响达到极显著水平($P < 0.01$)。

(3)灌水对 Y、iWUE、马克隆值及纤维长度的影响极显著($P < 0.01$),对 NPFP 影响显著($P < 0.05$),对整齐度指数、断裂比强度及伸长率无显著影响($P > 0.05$);施氮对 Y 及马克隆值的影响达到显著水平($P < 0.05$),对 NPFP 的影响达到极显著水平($P < 0.01$),但对 iWUE、纤维长度、整齐度指数、断裂比强度及伸长率无显著影响($P > 0.05$);水氮交互作用对 Y、iWUE、NPFP 及马克隆值的影响达到极显著水平($P < 0.01$)。其中,籽棉产量(Y)最大值出现在 W2N2 处理,为 5 854.5 kg/hm²;最小值出现在 W1N1 处理,为 3 483.75 kg/hm²,二者相对增加 68.05%。

(4)以水氮投入为自变量,以棉花产量、净光合速率、 F_v/F_m 、马克隆值为因变量,分别建立了二元二次回归方程。水氮投入对各因变量的影响均达到极显著水平($P < 0.01$),决定系数均在 0.86 以上。采用似然函数组合方法,对棉花产量、净光合速率、荧光指标、马克隆值同时达到相对值 0.8 以上的区域用 3 种组合方式进行计算,得到轻度盐碱土滴灌棉花最佳灌水施氮量为 3 740 m³/hm²和 754 kg/hm²。

参 考 文 献

1 崔光莲. 新疆棉花产业发展问题研究[M]. 乌鲁木齐:新疆人民出版社,2002:1-2.
2 喻树迅. 我国棉花生产现状与发展趋势[J]. 中国工程科学,2013,15(4):9-13.
YU Shuxun. Present situation and development trend of cotton production in China[J]. Engineering Sciences,2013,15(4):9-13. (in Chinese)
3 刘纪远,匡文慧,张增祥,等. 20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J]. 地理学报,2014,69(1):3-14.
LIU Jiyan, KUANG Wenhui, ZHANG Zengxiang, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s[J]. Acta Geographica Sinica,2014,69(1):3-14. (in Chinese)

- 4 季方,樊自立,李和平.新疆1:100万土地资源图总说明书[G]//中国科学院新疆生物土壤沙漠研究所.新疆土壤与土地资源研究文集.北京:科学出版社,1991:11-19.
- 5 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.
ZHANG Shouyu, WU Shixin, HE Ke. Spatiotemporal variation of salinized cultivated land with different cultivation years in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(5): 972-979. (in Chinese)
- 6 董合忠.盐碱地棉花栽培学[M].北京:科学出版社,2010.
- 7 张俊鹏,曹彩云,冯棣,等.微咸水造墒条件下植棉方式对产量与土壤水盐的影响[J/OL].农业机械学报,2013,44(2):97-102. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130219&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.019.
ZHANG Junpeng, CAO Caiyun, FENG Di, et al. Effects of different planting patterns on cotton yield and soil water-salt under brackish water irrigation before sowing[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 97-102. (in Chinese)
- 8 田德龙,史海滨,闫建文,等.含盐土壤水肥耦合对向日葵生理性状的影响[C]//现代节水高效农业与生态灌区建设(上),2010.
TIAN Delong, SHI Haibin, YAN Jianwen, et al. Physiolocal traits of sunflower under water and fertilizer coupling in saline soil [C]// Modern Water-saving and High-efficiency Agriculture and Ecological Irrigation District Construction (I), 2010. (in Chinese)
- 9 SALVAGIOTTI F, MIRALLES D J. Radiation interception, biomass production and grain yield as affected by the interaction of nitrogen and sulfur fertilization in wheat[J]. European Journal of Agronomy, 2008, 28(3): 282-290.
- 10 邵东国,孙春敏,王洪强,等.稻田水肥资源高效利用与调控模拟[J].农业工程学报,2010,26(12):72-78.
SHAO Dongguo, SUN Chunmin, WANG Hongqing, et al. Simulation on regulation for efficient utilization of water and fertilizer resources in paddy fields[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(12): 72-78. (in Chinese)
- 11 张文斌,张荣,李文德,等.水肥耦合对河西绿洲板蓝根生理特性及产量影响[J].西北农业学报,2017,26(1):25-31.
ZHANG Wenbin, ZHANG Rong, LI Wende, et al. Effect of yield and physiological characteristics on *Isatis tinctoria* L. under treatment of water and fertilizer coupling in Hexi Oasis[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2017, 26(1): 25-31. (in Chinese)
- 12 MANSOURI-FAR C, SANAVY S A M M, SABERALI S F. Maize yield response to deficit irrigation during low-sensitive growth stages and nitrogen rate under semi-arid climatic conditions[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97: 12-22.
- 13 范雪梅,姜东,戴廷波,等.花后干旱或渍水下氮素供应对小麦光合和籽粒淀粉积累的影响[J].应用生态学报,2005, 16(10):1883-1888.
FAN Xuemei, JANG Dong, DAI Tingbo, et al. Effects of nitrogen supply on flag leaf photosynthesis and grain starch accumulation of wheat from its anthesis to maturity under drought or waterlogging[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(10): 1883-1888. (in Chinese)
- 14 MORGAN J A. The effect of N nutrition on the water relations and gas exchange characteristics of wheat[J]. Plant Physiology, 1986, 80(1): 52-58.
- 15 马冬云,郭天财,宋晓,等.施氮对冬小麦旗 RuBP 羧化酶活性及叶绿素荧光参数的影响[J].西北植物学报,2010,30(11): 2197-2202.
MA Dongyun, GUO Tiancai, SONG Xiao, et al. Effects of nitrogen fertilizer application on RuBP Carboxylase activity and chlorophyll fluorescence parameters in flag leaves of winter wheat[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2010, 30(11): 2197-2202. (in Chinese)
- 16 刘瑞显,王友华,陈兵林,等.花铃期干旱胁迫下氮素水平对棉花光合作用与叶绿素荧光特性的影响[J].作物学报,2008, 34(4):675-683.
LIU Ruixian, WANG Youhua, CHEN Binglin, et al. Effects of nitrogen levels on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics under drought stress in cotton flowering and boll-forming stage[J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(4): 675-683. (in Chinese)
- 17 SINGH Y, RAO S S, REGAR P L. Deficit irrigation and nitrogen effects on seed cotton yield, water productivity and yield response factor in shallow soils of semi-arid environment[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97: 965-970.
- 18 谢志良,田长彦.膜下滴灌水氮耦合对棉花干物质积累和氮素吸收及水氮利用效率的影响[J].植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 160-165.
XIE Zhiliang, TIAN Changyan. Coupling effects of water and nitrogen on dry matter accumulation, nitrogen uptake and water-nitrogen use efficiency of cotton under mulched drip irrigation[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2011, 17(1): 160-165. (in Chinese)
- 19 胡顺军,田长彦,王方,等.膜下滴灌棉花水肥耦合效应研究初报[J].干旱区资源与环境,2005,19(2):192-195.
HU Shunjun, TIAN Changyan, WANG Fang, et al. Preliminary research report for coupling effects of water and fertilizer on drip irrigation for cotton under plastic mulch in awati county[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2005, 19(2): 192-195. (in Chinese)
- 20 郑旭荣,胡晓棠,李明思,等.棉花膜下滴灌田间耗水规律的试验研究[J].节水灌溉,2000(5):25-27.
ZHENG Xurong, HU Xiaotang, LI Mingsi, et al. Experimental study on water consumption rules of field under drip irrigation on cotton film[J]. Water Saving Irrigation, 2000(5): 25-27. (in Chinese)
- 21 吴立峰,张富仓,周罕觅,等.不同滴灌施肥水平对北疆棉花水分利用率和产量的影响[J].农业工程学报,2014,30(20): 137-146.
WU Lifeng, ZHANG Fucang, ZHOU Hanmi, et al. Effect of drip irrigation and fertilizer application on water use efficiency and cotton yield in North of Xinjiang[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(20): 137-146. (in Chinese)

- 22 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.
- 23 ROHÁČEK K. Chlorophyll fluorescence parameters: the definitions, photosynthetic meaning, and mutual relationships[J]. *Photosynthetica*, 2002, 40(1): 13-29.
- 24 杨小振, 张显, 马建祥, 等. 滴灌施肥对大棚西瓜生长、产量及品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(7): 109-118.
YANG Xiaozhen, ZHANG Xian, MA Jianxiang, et al. Effects of drip fertigation on growth, yield and quality of watermelon in plastic greenhouse[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(7): 109-118. (in Chinese)
- 25 李勇, 王峰, 孙景生, 等. 内蒙古西部旱区机采棉膜下滴灌水氮耦合效应[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(3): 845-854.
LI Yong, WANG Feng, SUN Jingsheng, et al. Coupling effect of water and nitrogen on mechanically harvested cotton with drip irrigation under plastic film in arid area of western Inner Mongolia, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(3): 845-854. (in Chinese)
- 26 HE J. Best management practice development with the CERES-Maize model for sweet corn production in North Florida[D]. Gainesville, FL: University of Florida, 2008.
- 27 BILGER W, BJÖRKMANN O. Role of the xanthophyll cycle in photoprotection elucidated by measurements of light-induced absorbance changes, fluorescence and photosynthesis in leaves of *Hedera canariensis*[J]. *Photosynthesis Research*, 1990, 25(3): 173-185.
- 28 KRAUSE G H, WEIS E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics[J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1991, 42: 319-359.
- 29 SILVIA A, MARTA C, MONICA G, et al. Estimation of Mediterranean forest transpiration and photosynthesis through the use of an ecosystem simulation model driven by remotely sensed data[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2004, 13(4): 371-380.
- 30 ZHU X G, LONG S P, ORT D R. Improving photosynthetic efficiency for greater yield[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2010, 61: 235-261.
- 31 权丽双, 郑旭荣, 王振华, 等. 水氮耦合对滴灌复播油葵光合特性和土壤水分利用的影响[J]. *核农学报*, 2016, 30(5): 1021-1029.
QUAN Lishuang, ZHENG Xurong, WANG Zhenhua, et al. Effect of water-nitrogen coupling on photosynthesis and soil water use of oil sunflower in drip-irrigated multiple cropping system[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2016, 30(5): 1021-1029. (in Chinese)
- 32 于文颖, 纪瑞鹏, 冯锐, 等. 不同生育期玉米叶片光合特性及水分利用效率对水分胁迫的响应[J]. *生态学报*, 2015, 35(9): 2902-2909.
YU Wenying, JI Ruipeng, FENG Rui, et al. Response of water stress on photosynthetic characteristics and water use efficiency of maize leaves in different growth stage[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(9): 2902-2909. (in Chinese)
- 33 张旺锋, 勾玲, 王振林, 等. 氮肥对新疆高产棉花叶片叶绿素荧光动力学参数的影响[J]. *中国农业科学*, 2003, 36(8): 893-898.
ZHANG Wangfeng, GOU Ling, WANG Zhenlin, et al. Effect of nitrogen on chlorophyll fluorescence of leaves of high-yielding cotton in Xinjiang[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(8): 893-898. (in Chinese)
- 34 郭相平, 刘展鹏, 王青梅, 等. 采用 PEG 模拟干旱胁迫及复水玉米光合补偿效应[J]. *河海大学学报: 自然科学版*, 2007, 35(3): 286-290.
GUO Xiangping, LIU Zhanpeng, WANG Qingmei, et al. Study on photosynthetic compensatory effects of PEG osmotic stress and rewatering on maize[J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2007, 35(3): 286-290. (in Chinese)
- 35 WU F Z, BAO W K, LI F L, et al. Effects of water stress and nitrogen supply on leaf gas exchange and fluorescence parameters of *Sophora davidii* seedlings[J]. *Photosynthetica*, 2008, 46(1): 40-48.
- 36 陶先萍, 罗宏海, 张亚黎, 等. 根域限制下水氮供应对膜下滴灌棉花叶片光合生理特性的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(12): 3676-3687.
TAO Xianping, LUO Honghai, ZHANG Yali, et al. Effects of water and nitrogen under root restriction on photosynthetic characters of cotton plants grown with under-mulch drip irrigation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(12): 3676-3687. (in Chinese)
- 37 林禄, 汤昀, 张纪涛, 等. 不同水势对黄瓜花后叶片气体交换及叶绿素荧光参数的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(7): 2030-2040.
LIN Lu, TANG Yun, ZHANG Jitao, et al. Effects of different water potentials on leaf gas exchange and chlorophyll fluorescence parameters of cucumber during post-flowering growth stage[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(7): 2030-2040. (in Chinese)
- 38 邢英英, 张富仓, 张燕, 等. 膜下滴灌水肥耦合促进番茄养分吸收及生长[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(21): 70-80.
XING Yingying, ZHANG Fucang, ZHANG Yan, et al. Irrigation and fertilization coupling of drip irrigation under plastic film promotes tomato's nutrient uptake and growth[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(21): 70-80. (in Chinese)
- 39 王振华, 权丽双, 郑旭荣, 等. 水氮耦合对滴灌复播油葵氮素吸收与土壤硝态氮的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(10): 91-100. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161013&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.013.
WANG Zhenhua, QUAN Lishuang, ZHENG Xurong, et al. Effects of water-nitrogen coupling on nitrogen uptake and nitrate accumulation in soil of oil sunflower in drip-irrigated multiple cropping system[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(10): 91-100. (in Chinese)
- 40 AUJLA M S, THIND H S, BUTTAR G S. Cotton yield and water use efficiency at various levels of water and N through drip irrigation under two methods of planting[J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 71: 167-179.
- 41 申孝军, 张寄阳, 孙景生, 等. 灌水模式及下限对滴灌棉花产量和品质的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2014, 32(8): 711-718.
SHEN Xiaojun, ZHANG Jiyang, SUN Jingsheng, et al. Effect of drip irrigation pattern and irrigation lower limit on yield and quality of cotton[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2014, 32(8): 711-718. (in Chinese)