

水氮限量供给对盐渍化农田玉米光能利用与产量的影响

徐 昭¹ 史海滨¹ 李仙岳¹ 田 彤¹ 付小军² 李正中²

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018;

2. 内蒙古河套灌区解放闸灌域管理局沙壕渠试验站, 巴彦淖尔 015400)

摘要: 为确定河套灌区畦灌条件下盐渍化农田玉米适宜的灌溉和施氮量, 田间试验设置了3个灌溉水平150、225、300 mm(分别记为W1、W2和W3)和3个施氮水平172.5、258.8、345 kg/hm²(分别记为N1、N2和N3), 研究限量水氮对盐渍化农田玉米生殖生长阶段土壤水盐状况、光截获率、光能利用效率(R_{UE})及产量的影响, 并基于通径分析方法探讨了产量形成机制。结果表明: 相同施氮量下, W3和W2在玉米抽雄-灌浆期的光截获率显著高于W1($P < 0.05$), W3与W2差异不显著; 水、氮及交互效应显著影响 R_{UE} , 特别在灌浆期, R_{UE} 与灌溉量和施氮量在一定范围内呈正相关, 而过量灌溉或施氮对 R_{UE} 有抑制作用, 适度减氮控水能显著提高 R_{UE} ; W2N2的产量分别较W3N3、W3N2增产4.01%、3.91%($P > 0.05$), 适度节水节氮不会显著影响产量; 产量与灌浆期叶面积指数(L_{AI})、光合势、光截获率呈显著正相关, R_{UE} 对产量的直接贡献最大, 生物累积量、 L_{AI} 、光合势和光截获率均通过 R_{UE} 对产量的间接贡献较大; W2N2相比其他处理明显改善了玉米生长后期土壤水盐状况, 有利于促进冠层发育和提高光合生产力, 其较小平均叶倾角和较大 L_{AI} 有利于提高光截获量和光合作用面积, 特别是其灌浆后期 L_{AI} 和光合势较其他处理提高7.15%~42.24%和5.95%~37.60%, L_{AI} 下降速率分别较W3N3、W3N2减缓37.35%、53.49%, 具有更加合理的冠层结构, 表现出较高的光合性能, 显著促进了生物量的累积($P < 0.05$), 灌浆期 R_{UE} 较其他处理显著提高18.61%~66.93%, 在本试验条件下产量最高。W2N2处理具有节水、节肥、稳产及高光效的优势, 可作为河套灌区盐渍化农田玉米适宜水氮模式。

关键词: 玉米; 畦灌; 盐渍化农田; 限量灌溉和施氮; 光能利用效率

中图分类号: S274; S311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)12-0281-11

Effect of Limited Irrigation and Nitrogen Rate on Radiation Utilization Efficiency and Yield of Maize in Salinization Farmland

XU Zhao¹ SHI Haibin¹ LI Xianyue¹ TIAN Tong¹ FU Xiaojun² LI Zhengzhong²

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China

2. Shahaoqu Irrigation Experimental Station, Jiefangzha Management Bureau of Hetao Irrigation District, Bayannur 015400, China)

Abstract: Radiation use efficiency (R_{UE}) is critical for improving crop yield. The object was to explore the influence of limited irrigation and nitrogen rates on the canopy light interception rate, R_{UE} and yield of maize under border irrigation in salinization irrigation district and realize the efficient utilization of water and nitrogen. A field experiment was conducted in Hetao Irrigation District (HID). The experiment referred to the local conventional irrigation and nitrogen amounts in HID, which had three irrigation amounts (W1, 150 mm; W2, 225 mm; and W3, 300 mm, which was the local conventional irrigation amount) and three nitrogen amounts (N1, 172.5 kg/hm²; N2, 258.8 kg/hm²; and N3, 345 kg/hm², which was the local conventional nitrogen application amount), meanwhile, interactive experiments were carried out. The leaf area index (L_{AI}), leaf inclination angle (M_{FIA}), photosynthetic active radiation and biomass of maize were measured at the tasseling-filling stage, and soil water and salt contents and the final yield were also measured at the same time. To investigate the mechanism of maize yields in salinization farmland, the correlation analysis and path analysis methods were used. Main conclusions

收稿日期: 2018-06-29 修回日期: 2018-07-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51539005、51769024)和国家重点研发计划项目(2016YFC0400205)

作者简介: 徐昭(1991—), 男, 博士生, 主要从事节水灌溉理论与新技术研究, E-mail: xuzhaofufeng@qq.com

通信作者: 史海滨(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉理论及应用研究, E-mail: shi_haibin@sohu.com

were as follows: the light interception rate (F) of maize was significantly affected by irrigation at the tasseling-filling stage in salinization farmland. At the same nitrogen application rate, the F of W3 and W2 levels were higher than that of W1 level, but the difference of F between W2 and W3 was not significant; the R_{UE} of maize was significantly ($P < 0.05$) affected by irrigation, nitrogen and interaction effects in salinization farmland. Especially, at grain filling stage, R_{UE} was increased with the increase of irrigation and nitrogen rates, but the promotion of R_{UE} had inhibition growth effect when excessive irrigation or nitrogen application was conducted. The R_{UE} of maize was significantly improved with the moderate reduction of irrigation and nitrogen application rate; maize yields were significantly ($P < 0.05$) affected by irrigation and nitrogen in salinization farmland. Moderately reducing irrigation volume and nitrogen rate had no significant effect on maize yields. The yield of W2N2 treatment was 4.01% and 3.91% higher than those of W3N3 and W3N2 treatments ($P > 0.05$), respectively; correlation analysis showed that the yield was positively correlated with L_{AI} , leaf area duration (L_{AD}) and the light interception rate (F) during filling stage. Path analysis showed that L_{AI} had the greatest effect on yield mainly through L_{AD} and F . The R_{UE} had the greatest direct contribution to yield and biomass accumulation, L_{AI} , L_{AD} and F contributed indirectly to yield through R_{UE} ; compared with the rest of treatments, the conditions of soil water and salt were obviously improved by W2N2 treatment at the late growth stage of maize in salinization farmland, which was beneficial to promote the development of canopy and increase photosynthetic productivity. The W2N2 treatment with small M_{FLA} and large L_{AI} was beneficial to enhance the light interception rate and area of photosynthesis during the late growth stage. Especially, at late grain filling stage, the L_{AI} and L_{AD} of W2N2 treatment were 7.15% ~ 42.24% and 5.95% ~ 37.60% higher than the rest of treatments, respectively, the decreasing rate of L_{AI} was 37.35% and 53.49% lower than those of W3N3 and W3N2 treatments, respectively, which can construct proper canopy structure, keep high photosynthetic performance and increase biomass accumulation. Thus, W2N2 treatment was beneficial to the improvement of R_{UE} . The R_{UE} of W2N2 treatment was 18.61% ~ 66.93% higher than those of the rest of treatments. Finally, W2N2 treatment achieved the highest yield. In conclusion, the W2N2 treatment had the advantages of saving water and nitrogen, high yield and R_{UE} , as a water and nitrogen management mode, it was very suitable for maize planting in salinization farmland in HID.

Key words: corn; border irrigation; salinization farmland; limited irrigation and nitrogen rate; radiation utilization efficiency

0 引言

河套灌区是国家重要的粮食产区^[1],保障灌区农业的可持续发展对于国家粮食安全意义重大。然而,水资源短缺^[2]、土壤盐渍化^[3]以及氮素流失造成的环境污染^[4]等问题制约了河套灌区农业的可持续发展。因此,在地面灌溉作为灌区基本灌水方式的背景下,改进水氮模式、提高水氮利用率对促进灌区经济、环保、可持续的农业生产具有重要现实意义。

为了达到可持续的农业生产,作物水氮管理的改进需要通过深入了解其在限量水氮条件下的生理过程,利用尽可能低的水氮投入获得较大的经济产量。光合作用是产量的直接来源^[5],而光能是作物进行光合作用等生理活动的主要驱动因子^[6]。与水、肥等资源相比光能具有无限制性的特点,但它又是瞬时性的不能被储存,所以一定时间空间范围内光能截获和利用能力决定着农业系统的生产潜力^[7-8],实现作物光能利用的调控就成为作物生产的核心目标。已有研究表明,栽培管理措施等因素

通过影响作物冠层结构及冠层形成过程,进而影响作物的光能利用^[9-10],作物产量与生长后期光能利用关系极为密切^[11]。而关于作物光能利用的研究多以不同种植方式(间套作、密度)、品种形成不同群体结构,对作物冠层光能截获、分布以及光能利用率等进行研究^[12-13]。灌水和施氮对以上生理生态过程具有显著的影响,关于水、氮对光能利用的研究也引起了不少学者的关注。HAMZEI等^[14]研究表明,水、氮及交互作用显著影响油菜光截获率和光能利用效率,生物产量与光能截获量呈显著正相关;谷晓博等^[15]研究发现,水、氮对光能利用效率(R_{UE})的影响有显著的交互作用,中水中氮能显著提高冬油菜的 R_{UE} ,而过量灌溉或施氮对冬油菜 R_{UE} 促进作用不明显,甚至有下降趋势;张珂珂等^[16]研究表明,减氮补水处理在灌浆期明显改善了群体的光照环境,其孕穗期叶面积指数最高,灌浆期叶面积指数下降速率最慢,延长了叶片的功能期,光合势平均提高9.7%,提高了光能利用,最终产量最高。同样也有学者研究得出,土壤盐分是影响旱区作物生产的又一关键因素^[17],盐分通过抑制株高、叶面积指数等

指标^[18]显著影响作物冠层结构,进而影响作物群体光能利用。此外,过量施用氮肥有可能加重土壤的盐渍化,并且增大土壤盐分对作物生长的抑制作用^[19]。在河套灌区土壤盐渍化程度高、地下水埋深较浅的特殊环境下,不同水氮条件对盐渍化农田作物光能利用及产量的影响研究还未引起足够的重视,水氮互作的增产效应与光能利用间的关系还需进一步研究。

本文以河套灌区主要粮食作物玉米为研究对象,以当地常规水氮用量为参照,探究氮肥施用与水资源限量条件下盐渍化农田玉米在生殖生长阶段如何优化资源获取策略,以实现光能利用的调控,并以光能高效利用和稳产为依据,确定盐渍化农田玉米种植适宜水氮用量,以期为河套灌区畦灌条件下玉米农田水氮管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2016 年 4—9 月在内蒙古河套灌区沙壕渠试验站(40°54'25" N, 107°9'28" E, 海拔 1 038 m)进行。该试验地多年平均气温 7.7℃,无霜期 135~150 d。大于 10℃的年积温为 3 551℃,年平均日照时数 3 200 h,全年太阳总辐射约为 6 000 MJ/m²,热量充足,其中玉米种植面积已达到灌区总播种面积的 1/3 以上。该地区属于典型的干旱地区,多年平均降雨量 143 mm,蒸发量 2 100 mm。玉米生长季降雨量为 130 mm(图 1),玉米抽雄期和灌浆期的太阳辐射分别为 280.0、721.1 MJ/m²。

试验田土壤具有明显分层,0~20 cm 土层为粉壤土,20~40 cm 土层为粉质黏壤土,40~60 cm 土层为粉壤土,60~100 cm 为砂壤土。试验田 0~100 cm 平均土壤容重 1.48 g/cm³,平均田间持水率为 25.01%,播种前 0~100 cm 平均土壤电导率为 0.595 dS/m。试验前表层 0~30 cm 土壤速效氮、速效磷、速效钾和有机质质量比分别为 16.31 mg/kg、

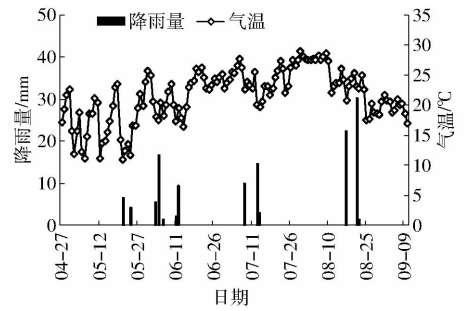


图 1 2016 年玉米生长季降雨量和气温

Fig. 1 Rainfall and air temperature during growing season of maize in 2016

5.26 mg/kg、128.75 mg/kg 和 4.23 g/kg。

1.2 试验设计

田间试验采用当地常规畦灌,设水、氮两个因素。参照当地玉米种植常规灌溉量^[20]和施氮量^[21],设 3 个灌水水平,分别为 W1(低水)、W2(中水)、当地常规灌溉量 W3(高水);3 个施氮水平,分别为 N1(低氮)、N2(中氮)、当地常规施氮量 N3(高氮)。试验共设 9 个处理,3 次重复,共 27 个小区,各小区区长 7 m,宽 5 m,面积为 35 m²。各小区间打 15 cm 高田埂并埋设 1 m 深聚氯乙烯塑料布隔离。

供试玉米品种为内单 314,大小行种植,大行距 70 cm,小行距 40 cm,株距 27.7 cm。根据当地生产实践,播前施 450 kg/hm² 基肥磷酸二铵(含氮质量分数 18%),剩余氮肥以尿素(含氮质量分数 46%)的形式分别在玉米拔节期及大喇叭口期灌溉时追施(施氮量各占 1/2)。全生育期在拔节期、大喇叭口期、灌浆期进行 3 次灌水,灌水量通过水表记录,具体灌水和施氮设计见表 1,施氮量为换算后的纯氮素量。

1.3 观测项目与方法

1.3.1 土壤含水率和电导率

取土样分 6 层,分别为:0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm。采用干燥法测定土壤含水率,采用电导率仪测定土水质量比为 1:5 的土壤浸提液的电导率。

表 1 灌溉和施氮量设计

Tab. 1 Design of amounts and dates of water and nitrogen application

处理	灌水定额/mm			总灌溉定额/mm	施氮量/(kg·hm ⁻²)		施氮总量/(kg·hm ⁻²)
	拔节期 (6月27日)	大喇叭口期 (7月10日)	灌浆期 (7月29日)		拔节期 (6月27日)	大喇叭口期 (7月10日)	
W1N1	50	50	50	150	86.25	86.25	172.5
W2N1	75	75	75	225	86.25	86.25	172.5
W3N1	100	100	100	300	86.25	86.25	172.5
W1N2	50	50	50	150	129.40	129.40	258.8
W2N2	75	75	75	225	129.40	129.40	258.8
W3N2	100	100	100	300	129.40	129.40	258.8
W1N3	50	50	50	150	172.50	172.50	345.0
W2N3	75	75	75	225	172.50	172.50	345.0
W3N3	100	100	100	300	172.50	172.50	345.0

1.3.2 叶面积指数和地上生物量

玉米出苗后每 10 ~ 15 d 取样测定 1 次叶面积和地上生物量,每个处理选取长势较均匀的 3 株玉米。测定完叶面积以后,将样品移至干燥箱,在 105℃ 的通风干燥箱中杀青 30 min,然后 70℃ 下干燥至恒定质量,测定单株的干质量。

1.3.3 光合势

光合势是反映作物群体绿叶面积大小及其持久性的生理指标,其大小直接反映了叶片的光合能力大小^[22],计算式为^[23]

$$L_{AD} = (L_{A1} + L_{A2}) (t_2 - t_1) / 2 \quad (1)$$

式中 L_{AD} ——作物群体光合势, $(\text{m}^2 \cdot \text{d}) / \text{m}^2$

L_{A1} 、 L_{A2} ——前后两次测定的叶面积指数, m^2 / m^2

t_1 、 t_2 ——前后两次测定时间, d

1.3.4 叶倾角

叶倾角是叶柄法线与水平面的夹角。每个处理选长势较均匀的 3 株玉米,在田间活体测定主茎和不同叶位叶片的叶基角(叶片与茎的夹角)和叶片面积,叶基角的余角即为叶倾角^[24]。冠层平均叶倾角计算式为^[24]

$$M_{FIA} = \frac{\sum_{i=1}^n (M_{FIAi} L_{Ai})}{L_A} \quad (2)$$

式中 M_{FIA} ——作物冠层平均叶倾角, $(^\circ)$

M_{FIAi} ——第 i 片叶的叶倾角, $(^\circ)$

L_{Ai} ——第 i 片叶的叶面积, m^2

L_A ——植株总叶面积, m^2

1.3.5 产量、千粒质量和单株籽粒数

玉米成熟时,在各小区非边行选取标准样株 20 株,单独收获考种测产,并分别测定每株籽粒的数量。然后混合均匀,随机取 1 000 粒,测定籽粒千粒质量,重复 3 次,取均值。

1.3.6 光合有效辐射(PAR)

参考 WANG 等^[25]和崔亮等^[12]测定方法,在玉米拔节期灌水后利用 AccuPAR LP-80 型冠层仪(Decagon Devices, Pullman, 美国)测定冠层顶部 30 cm 和底部的 PAR,每隔 10 ~ 15 d 选择晴朗天气测定,测定时间为 11:00—13:00^[12,26],观测在小区中间位置进行,重复 5 次。

1.3.7 入射太阳辐射

采用 LI-200SA 型太阳总辐射传感器连续测定冠层顶部入射太阳辐射,每 1 h 记录一次。

1.3.8 地下水位

在试验田安置地下水位观测井,生育期每 2 ~ 5 d 测 1 次地下水位。玉米苗期-大喇叭口期地下水

位较浅,平均为 1.01 m。生长后期(抽雄期-收获期)地下水位较深,平均为 1.59 m。

1.4 计算方法

土壤储水量计算式为

$$W = \sum_{i=1}^n (\gamma_i d_i \theta_i / 10) \quad (3)$$

式中 W ——土壤储水量, mm

γ_i ——第 i 层土壤容重, g / cm^3

d_i ——第 i 层土层厚度, cm

θ_i ——第 i 层土壤质量含水率, %

光截获率 F 的计算采用 Beer 定律,计算式为^[21]

$$F = [1 - \exp(-kL_{AI})] \times 100\% \quad (4)$$

其中 $k = -\frac{1}{L_{AI}} \ln \frac{I_S}{I_0}$ (5)

式中 F ——光截获率, %

k ——作物消光系数

L_{AI} ——叶面积指数

I_S ——作物冠层底部的光合有效辐射强度, $\text{MJ} / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$

I_0 ——作物冠层顶部的光合有效辐射强度, $\text{MJ} / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$

光能利用效率参考 HAMZEI 等^[14]和崔亮等^[12]的计算方法,阶段光合有效辐射总量参考 DANSO 等^[9]的计算方法,其参考 MONTEITH 等^[27]研究成果,假设太阳总辐射的一半为光合有效辐射,具体计算公式为

$$R_{UE} = \Delta W / I_{PAR} \quad (6)$$

其中 $I_{PAR} = \sum_{i=1}^n (Q_i F \times 0.5)$ (7)

式中 R_{UE} ——玉米光能利用效率, g / MJ

ΔW ——该阶段地上部生物累积量, g / m^2

I_{PAR} ——阶段光合有效辐射总量, MJ / m^2

Q_i ——每日太阳总辐射, MJ / m^2

其中玉米抽雄期冠层光截获率 F 根据 7 月 13 日和 7 月 26 日 2 次测定平均求得,灌浆期光截获率 F 根据 8 月 5 日、8 月 15 日和 8 月 26 日 3 次测定平均求得。

1.5 数据分析

采用 Excel 整理数据和制图,利用 SPSS 17.0 软件进行方差分析和相关分析,多重比较采用 LSD 法。通径分析具体计算过程参见文献[28]。

2 结果与分析

2.1 水氮限量供给对土壤水分和盐分的影响

土壤水盐状况影响着作物冠层的发育和光合生产能力,探讨不同水氮处理对土壤水盐环境的影响,

可为进一步研究玉米光能利用指标提供一定的理论支持。

不同水氮处理在 0~60 cm 和 60~100 cm 土层的储水量变化过程如图 2a 和图 2b 所示。抽雄期,高水中氮处理(W3N2)在 0~60 cm 土层水分消耗量较其余处理显著增加 15.45%~39.40%。中水中氮处理(W2N2)在 60~100 cm 土层水分消耗量较其余处理(除了与 W3N2 差异不显著)显著增加 15.71%~43.94%。灌浆前

中期,当地常规水氮处理(W3N3)、W2N2 在 0~60 cm 土层水分消耗量显著高于其余处理($P < 0.05$),而 W2N2 该土层水分消耗量较 W3N3 显著减小 14.62%。灌浆期灌水后至收获,W2N2 在 60~100 cm 土层水分消耗量最大,较其余处理(除了与 W1N2 差异不显著)显著增加了 14.24%~53.34%。说明 W3N3 主要利用 0~60 cm 浅层土壤水分,而 W2N2 明显促进了玉米对深层土壤水分的利用。

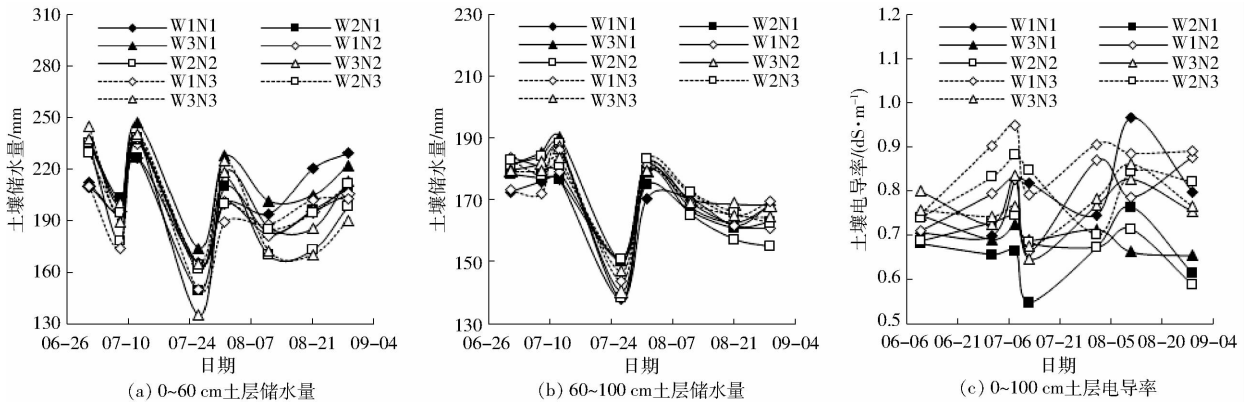


图 2 不同水氮条件下玉米土壤储水量和土壤电导率变化

Fig. 2 Dynamics of soil water condition and soil electrical conductivity in maize growth stage in 2016

不同水氮条件下 0~100 cm 土层电导率变化过程如图 2c 所示。拔节期灌溉和追肥后,低水 W1 和中水 W2 水平下,低氮 N1、中氮 N2 的土壤电导率分别较常规施氮 N3 减小 22.76%、12.15% 和 21.31%、12.43%;高水 W3 水平下,N1、N2 的土壤电导率较 N3 减小 6.90%、2.20%,差异不显著。大喇叭口期灌水和追肥后,W3N2 土壤电导率较 W2N2 减小 5.75%,差异不显著。分析各处理抽雄-灌浆期土壤电导率均值发现,相同灌溉水平下土壤电导率均值随着施氮量的增加而增大。W2N2 抽雄-灌浆期 0~100 cm 土壤电导率均值较其余水氮处理(除了与 W3N1、W2N1 差异不显著)减小 11.31%~23.55%。

由上述分析可以看出,W2N2 处理明显改善了玉米生长后期土壤水盐状况,有利于光合生理活动的进行。

2.2 不同水氮条件下冠层光截获率及其影响要素

2.2.1 不同水氮处理对冠层叶面积指数的影响

叶面积指数(L_{AI})是影响光截获的主要因素。表 2 数据分析表明,灌溉和施氮显著影响抽雄-灌浆期 L_{AI} ,水氮交互作用对 L_{AI} 影响不显著。在 W1 水平下,N2 显著大于 N3 和 N1;在 W2 水平下,N2 的 L_{AI} 显著大于 N3,N2 与 N1 差异不显著;在 W3 水平下,各施氮水平的 L_{AI} 由大到小表现为 N3、N2、N1,差异不显著。说明盐渍化农田玉米 L_{AI} 在一定范围内随

着施氮量的增加而增大,而过量施氮不会显著提高 L_{AI} ,特别在限量灌溉条件下甚至有显著抑制的趋势。相同施氮水平下,W3、W2 的 L_{AI} 显著大于 W1。比较各水氮交互处理 L_{AI} ,W2N2 最大(4.96),较其余处理高 1.64%~26.53%,但与 W3N3 无显著差异,说明盐渍化农田适度减水控氮不会显著影响玉米 L_{AI} 。

2.2.2 不同水氮处理对冠层平均叶倾角的影响

叶倾角(M_{FIA})是表征作物冠层几何结构的参数,叶角的分布与冠层光截获关系紧密。由表 2 可知,灌溉、施氮及交互效应对 M_{FIA} 影响不显著。相同灌溉量平均后显示,W2 的 M_{FIA} 最小,较 W1、W3 小 4.06°、1.86°;相同施氮量平均后显示,N2 的 M_{FIA} 最小,较 N1、N3 减小 0.61°、1.89°。各水氮交互处理间,W2N2 的 M_{FIA} 最小,较其余水氮处理(除了与 W3N3、W2N1 差异不显著)显著减小 9.05%~17.01%,较小的 M_{FIA} 表征冠层结构更加披散,有利于冠层光能截获。这是由于叶倾角的变化与 L_{AI} 的动态变化关系密切,随着玉米生育进程的推进,较大的叶片在重力作用下逐渐向下倾斜, M_{FIA} 逐渐减小。

2.2.3 不同水氮处理对冠层光截获率的影响

由表 2 可知,灌溉显著影响玉米抽雄-灌浆期的光截获率,施氮和水氮交互作用对光截获率影响不显著。相同灌溉水平下,各施氮水平的 L_{AI} 无显著差异。相同施氮水平下,W3 和 W2 的光截获率

表2 玉米抽雄-灌浆期光截获率、光合势及影响要素方差分析和均值比较

Tab.2 Analysis of variance and means comparison for light interception rate, leaf area duration of maize and influencing factors during tasseling-filling stage

处理	抽雄-灌浆期		抽雄期	灌浆期	抽雄期光合势/ ($(\text{m}^2 \cdot \text{d}) \cdot \text{m}^{-2}$)	灌浆期光合势/ ($(\text{m}^2 \cdot \text{d}) \cdot \text{m}^{-2}$)
	叶面积指数	叶倾角/($^\circ$)	光截获率/%	光截获率/%		
W1N1	3.92 ^{bB}	57.38 ^{aA}	82.49 ^{bA}	82.54 ^{bA}	63.87 ^{bB}	119.62 ^{bA}
W2N1	4.70 ^{aAB}	54.10 ^{aAB}	88.44 ^{aA}	89.08 ^{aA}	74.48 ^{aAB}	143.98 ^{aA}
W3N1	4.67 ^{aA}	57.22 ^{aA}	89.14 ^{aA}	88.91 ^{aA}	79.13 ^{aA}	135.14 ^{aB}
W1N2	4.23 ^{bA}	57.05 ^{aA}	84.37 ^{bA}	83.97 ^{bA}	68.77 ^{bA}	129.49 ^{bA}
W2N2	4.96 ^{aA}	52.31 ^{bB}	89.52 ^{aA}	89.61 ^{aA}	78.56 ^{aA}	149.68 ^{aA}
W3N2	4.82 ^{aA}	57.52 ^{aA}	88.28 ^{aA}	88.97 ^{aA}	78.90 ^{aA}	150.41 ^{aA}
W1N3	3.93 ^{cB}	61.21 ^{aA}	83.05 ^{bA}	82.46 ^{bA}	63.79 ^{bB}	120.62 ^{cA}
W2N3	4.31 ^{bB}	57.04 ^{abA}	88.11 ^{aA}	87.81 ^{aA}	71.40 ^{aB}	130.45 ^{bB}
W3N3	4.88 ^{aA}	54.31 ^{bA}	89.70 ^{aA}	89.22 ^{aA}	78.53 ^{aA}	149.40 ^{aA}
灌溉	36.619 ^{**}	2.179	22.404 ^{**}	19.865 ^{**}	9.645 ^{**}	18.878 ^{**}
施氮	5.576 [*]	0.492	1.471	1.181	3.443 [*]	4.542 [*]
灌水 × 施氮	2.821	1.750	1.805	1.409	2.025	2.362

注:相同施氮水平下,同一列数字后的不同小写字母表示不同灌水水平在0.05水平上差异显著。相同灌水水平下,同一列数字后的不同大写字母表示不同施氮水平在0.05水平上差异显著。*和**分别表示在0.05和0.01水平上差异显著。下同。

显著高于W1, W3和W2,差异不显著,这可归因于低水显著减小 L_{AI} ,不利于光截获。比较各水氮交互处理抽雄-灌浆期光截获率均值,W2N2最大(89.56%),但与W3、W2各处理差异不显著。这说明盐渍化农田限量25%灌溉和施氮不会造成玉米冠层光截获率的显著变化。

2.3 不同水氮条件下光能利用效率

作物的光能利用效率是一个复杂的过程,其受到阶段生物量和光截获量的综合影响。作物光能利用效率(R_{UE})通常表述为地上生物量与光截获量之比^[15]。不同水氮处理对光能利用效率的影响见表3。

表3 玉米抽雄-灌浆期生物累积量和光能利用效率方差分析和均值比较

Tab.3 Analysis of variance and means comparison for biomass accumulation and R_{UE} of maize during tasseling-filling stage

处理	抽雄期生物	灌浆期生物	抽雄期光能	灌浆期光能
	累积量/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	累积量/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	利用效率/ ($\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1}$)	利用效率/ ($\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1}$)
W1N1	271.50 ^{bA}	389.33 ^{bB}	2.35 ^{bB}	1.31 ^{aB}
W2N1	486.97 ^{aA}	413.78 ^{abB}	3.93 ^{aA}	1.29 ^{aC}
W3N1	303.47 ^{bB}	494.65 ^{aA}	2.43 ^{bB}	1.54 ^{aA}
W1N2	299.01 ^{bA}	561.35 ^{bA}	2.47 ^{baB}	1.81 ^{bA}
W2N2	338.08 ^{bB}	690.15 ^{aA}	2.70 ^{bB}	2.15 ^{aA}
W3N2	606.30 ^{aA}	516.71 ^{bA}	4.90 ^{aA}	1.61 ^{bA}
W1N3	351.42 ^{bA}	523.29 ^{aA}	3.06 ^{bA}	1.76 ^{aA}
W2N3	494.37 ^{aA}	516.27 ^{abB}	4.01 ^{aA}	1.63 ^{abB}
W3N3	373.35 ^{bB}	481.30 ^{aA}	2.97 ^{bB}	1.49 ^{bA}
灌水	30.440 ^{**}	3.813	35.463 ^{**}	4.440 [*]
施氮	6.430 [*]	33.342 ^{**}	9.510 ^{**}	51.498 ^{**}
灌水 × 施氮	30.555 ^{**}	8.620 ^{**}	51.556 ^{**}	14.309 ^{**}

灌溉显著影响抽雄-灌浆期的 R_{UE} ($P < 0.05$)。在抽雄期,相同灌溉量平均后,W1平均2.63 g/MJ,显著低于W2、W3,W2与W3无显著差异。在灌浆期,从W1到W2玉米 R_{UE} 平均增大3.68%,而从W2到W3则平均减小8.28%,这种现象可能是因为W2较W3灌浆期生物累积量增加8.54%,而光能截获率较W3降低0.46%,从而具有较高的 R_{UE} 。

施氮显著影响抽雄-灌浆期的 R_{UE} ($P < 0.05$)。在抽雄期,相同施氮量平均后显示,N2、N3的光能利用效率显著高于N1,N2与N3无显著差异。在灌浆期,相同灌溉水平下, R_{UE} 随着施氮量的增加呈先增后减的趋势。相同施氮量平均后显示从N1到N2玉米 R_{UE} 平均增大34.78%,而从N2到N3则平均减小12.37%,这可归因于常规施氮N3显著增大了土壤电导率,已有研究表明盐分胁迫导致光能转化效率的降低^[29]。

水氮交互作用对抽雄-灌浆期 R_{UE} 影响显著。比较各水氮交互处理,抽雄期W3N2的 R_{UE} 显著高于其余处理($P < 0.05$)。原因可能是W3N2在抽雄初期的 L_{AI} 较小(4.79,见图3),但基本接近作物冠层 L_{AI} 临界值。据报道作物冠层 L_{AI} 临界值为5.0,此时可以最大化地拦截入射辐射^[30]。相比其余处理,W3N2在可较大化地拦截入射辐射的同时,减少了抽雄初期蒸腾水分消耗^[31],而且较高的灌溉量和较低的施氮量可相对减少土壤含盐量,有利于玉米抽雄中后期的生长。W3N2在抽雄期0~60 cm土层水分消耗量较其余处理增加15.45%~39.40%,这也说明了W3N2在抽雄期生长旺盛。W3N2在抽雄

期累积了较多的生物量,最终具有较高的 R_{UE} 。灌浆期 R_{UE} 最高的为 W2N2 处理,较其余水氮处理显

著提高 18.61% ~ 66.93% ($P < 0.05$), 其中较 W3N3 提高 44.30%。

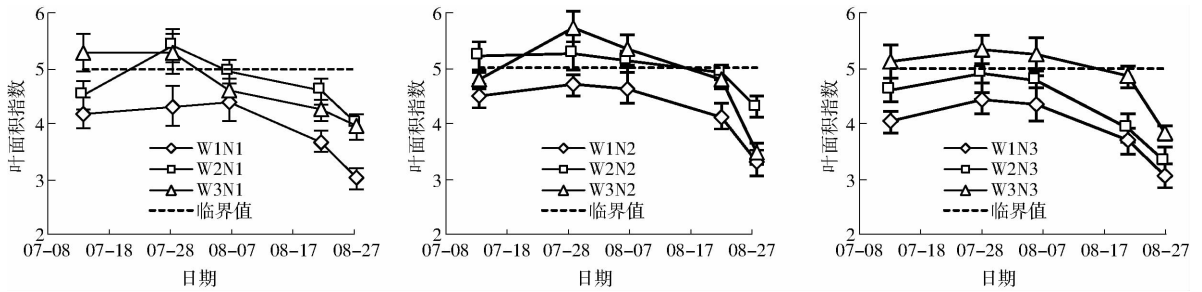


图 3 玉米抽雄-灌浆期叶面积指数动态变化

Fig. 3 Dynamic changes of L_{AI} during tasseling-filling stage

由以上分析可以看出,盐渍化农田玉米在籽粒形成的灌浆期,光能利用效率与灌溉量和施氮量在一定范围内呈正相关,而过量灌溉或施氮对玉米的 R_{UE} 有抑制作用,适度减氮控水能显著提高 R_{UE} 。

2.4 不同水氮条件下产量和产量构成要素

如表 4 所示,灌溉显著影响产量及产量构成要素(除收获指数)。施氮显著影响产量、生物产量及千粒质量,而对收获指数和单株籽粒数影响不显著。水氮交互作用显著影响千粒质量,而对其余指标影响不显著。相同灌溉量下,玉米产量随施氮量增加

呈抛物线变化趋势。在 W3 和 W1 水平下, N3 和 N2 的产量显著高于 N1, N3 与 N2 无显著差异;在 W2 水平下, N2 的产量显著高于 N3 和 N1。相同施氮水平下, W1 的产量和单株籽粒数显著低于 W2 和 W3。因此,同一施氮量下, W1 产量显著低于 W3、W2 的原因是其单株籽粒数的显著减小。ESTRADA-CAMPUZANO 等^[30] 研究发现,不同水分条件下小麦产量的变化主要与单位面积籽粒数量有关,水分亏缺显著减少单位面积籽粒数量,这与本文研究结果相近。

表 4 产量及产量构成要素方差分析和均值比较

Tab. 4 Analysis of variance and means comparison for yield and yield components

处理	产量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	生物产量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	收获指数/%	单株籽粒数	千粒质量/g
W1N1	7 055.4 ^{cb}	15 229.6 ^{ba}	46.3 ^{aA}	456 ^{ba}	246.7 ^{ab}
W2N1	8 831.6 ^{ab}	17 862.7 ^{aA}	49.4 ^{aA}	553 ^{aA}	246.1 ^{ab}
W3N1	8 283.5 ^{bb}	16 999.6 ^{abB}	48.7 ^{aAB}	566 ^{aA}	237.9 ^{baB}
W1N2	7 890.6 ^{ba}	16 314.5 ^{ba}	48.4 ^{aA}	489 ^{ba}	244.5 ^{bb}
W2N2	9 384.3 ^{aA}	19 287.3 ^{aA}	48.7 ^{aA}	572 ^{aA}	258.0 ^{aA}
W3N2	9 030.8 ^{aA}	20 128.4 ^{aA}	44.9 ^{aB}	591 ^{aA}	241.2 ^{ba}
W1N3	7 754.5 ^{ba}	16 434.6 ^{ba}	47.2 ^{aA}	438 ^{ca}	271.4 ^{aA}
W2N3	8 616.3 ^{ab}	18 711.1 ^{aA}	46.0 ^{aA}	522 ^{ba}	249.9 ^{bb}
W3N3	9 022.8 ^{aA}	17 613.0 ^{abAB}	51.2 ^{aA}	608 ^{aA}	230.8 ^{cb}
灌水	54.077 ^{**}	10.872 ^{**}	0.235	23.825 ^{**}	49.539 ^{**}
施氮	12.194 ^{**}	4.756 [*]	0.187	1.359	7.198 ^{**}
灌水 × 施氮	2.539	0.943	1.826	0.952	23.166 ^{**}

由表 4 可以看出,最大生物产量是 W3N2 ($20\ 128.4\ \text{kg}/\text{hm}^2$),其次是 W2N2 ($19\ 287.3\ \text{kg}/\text{hm}^2$),最小为 W1N1 ($15\ 229.6\ \text{kg}/\text{hm}^2$), W3N2、W2N2 之间差异不显著。由收获指数分析得到, W3N2 的收获指数最小 (44.9%), 显著小于 W2N2 ($P < 0.05$)。由产量分析可知, W2N2 产量最大 ($9\ 384.3\ \text{kg}/\text{hm}^2$), W2N2 较 W3N3、W3N2 增产 4.01%、3.91%, 差异不显著, W1N1 产量最小 ($7\ 055.4\ \text{kg}/\text{hm}^2$)。综合分析可以看出 W2N2 产量最大的原因是其千粒质量较 W3N3 的显著提高 ($P < 0.05$)。

2.5 产量效应影响因素分析

表 5 是不同灌溉量及施氮量条件下玉米产量与灌浆期的耗水量、土壤电导率、 L_{AI} 、生物累积量、光合势、光截获率、 R_{UE} 的相关分析和通径分析。从表 5 可知,产量与灌浆期的 L_{AI} 、光合势、光截获率、耗水量呈显著正相关。 L_{AI} 与产量的相关系数最大 ($R = 0.929$)。

由产量与上述指标的直接通径系数可以看出,各因素对产量的影响顺序由大到小为: R_{UE} 、光合势、光截获率、耗水量、土壤电导率、 L_{AI} 、生物累积量。由产量与上述指标的间接通径系数可以看出,耗水

表5 玉米产量与影响因素的相关分析和通径分析

Tab.5 Correlation analysis and path analysis between yield of maize and influence factors during filling stage

因素	简单相关系数	直接通径系数	间接通径系数						
			X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7
X_1	0.709*	0.018		0.004	-0.693	-0.795	0.839	0.897	0.440
X_2	-0.629	0.007	0.009		0.713	0.619	-0.789	-0.921	-0.266
X_3	0.929**	-0.989	0.013	-0.005		-0.847	1.249	1.068	0.440
X_4	0.487	-2.589	0.006	-0.002	-0.323		0.416	0.282	2.697
X_5	0.927**	1.261	0.012	-0.004	-0.979	-0.855		1.027	0.464
X_6	0.909**	1.151	0.014	-0.006	-0.917	-0.634	1.125		0.176
X_7	0.335	2.747	0.003	-0.001	-0.158	-2.543	0.213	0.074	

注： X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 、 X_6 、 X_7 分别表示灌浆期的耗水量、0~100 cm 平均土壤电导率、叶面积指数、生物累积量、光合势、光截获率和光能利用效率。

量通过光截获率对产量的贡献最大,为 0.897。土壤电导率通过 L_{AI} 对产量的贡献最大,为 0.713。 L_{AI} 、光截获率、 R_{UE} 分别通过光合势对产量的贡献最大,分别为 1.249、1.125、0.213。生物累积量通过 R_{UE} 对产量的贡献最大,为 2.697。光合势通过光截获率对产量的贡献最大,为 1.027。

通过以上分析可以得到, R_{UE} 对产量的直接贡献最大,光合势、光截获率对产量的直接贡献较大,生物累积量、 L_{AI} 、光合势和光截获率均通过 R_{UE} 对产量的间接贡献较大。 L_{AI} 通过光合势、光截获率、 R_{UE} 对产量的间接贡献较大。结合简单相关分析与间接通径系数分析, L_{AI} 之所以对产量影响较大,主要是间接通过光合势、光截获率和 R_{UE} 的作用来实现的。

3 讨论

3.1 灌溉和施氮量对盐渍化农田水土环境的影响

作物冠层结构及形成过程直接影响太阳光照资源的截获量和转化效率^[32]。本研究通过水氮用量的调控来改变盐渍化农田水土环境,进而影响玉米冠层结构。河套灌区土壤盐渍化程度高,减少灌溉量虽然不利于盐分的淋洗,但可以改善盐渍土壤通透性,且已有研究表明作物生长初期适度减少灌溉量可促进作物根系生长^[33],更有利于地下水浅埋区作物利用根际深层水肥资源。河套灌区玉米追肥所用肥料为尿素,王秀君等^[34]研究表明,尿素水解后主要以 NH_4^+ 、 NO_3^- 形式存在于土壤中供作物吸收利用,然而在盐渍土壤中过量施用尿素,则多出的氮素水解后相当于增加土壤盐分^[35],适度减氮可以相对降低土壤盐分含量。所以利用两者的互补性进行水氮管理的改进,适度的限制水氮用量可改善盐渍土壤通透性、促进生根机制、减轻土壤盐分胁迫等,这为作物生长前期冠层发育提供了较好的基础。

GAO 等^[36]研究表明,在河套灌区减少灌溉量,有利于增大玉米对浅埋地下水的利用量。本研究表

明,在盐渍化农田玉米灌浆期灌水后至收获,W2N2 处理 60~100 cm 土层水分消耗量最大,较其余处理(除了与 W1N2 差异不显著)显著增加了 14.24%~53.34%,明显促进了玉米对深层土壤水分的利用,这与 GAO 等^[36] 研究结果一致。符鲜等^[37] 研究发现同一盐渍化程度土壤电导率均随着施氮量的增加而增大。这与本研究结果相似,相同灌溉水平下盐渍化农田玉米抽雄-灌浆期土壤电导率均值随着施氮量的增加而增大。本研究中 W2N2 较其余处理(除了与 W3N1、W2N1 差异不显著)显著降低了玉米抽雄-灌浆期土壤电导率。这是因为土壤盐分变化受到灌溉、施氮、 L_{AI} 、蒸发等多种因素影响,W2N2 相比高氮处理,适度减氮相对减小了盐渍土壤电导率,且其较大的 L_{AI} 可以抑制棵间蒸发^[31] 和盐分表聚,而 W3N2 处理由于灌水量较多,在抽雄期生长旺盛,加重了作物蒸腾耗水,导致盐分向耕作层迁移。谷晓博等^[15] 研究表明不同灌水量处理下的氮素营养指数均随施氮量的增加而增加。因此,W2N2 在改善玉米生长后期土壤水盐状况的同时,相比 W3N1、W2N1 施用较多的氮肥,可保障生长后期光合作用所需的氮素供应。说明适度减氮控水的 W2N2 改善了盐渍化农田玉米生长后期土壤水、盐及养分状况,为作物生长后期合理冠层结构的形成和较高光合性能的保持提供了有利条件。

3.2 灌溉和施氮量对盐渍化农田玉米冠层结构的影响

冠层结构的改变会影响作物对光能的利用。叶面积指数、叶倾角是构建作物合理冠层结构的重要调控指标^[12]。本研究发现,盐渍化农田玉米 L_{AI} 在一定范围内随着施氮量的增加而增大,而过量施氮不会显著提高 L_{AI} ,特别在限量灌溉条件下甚至有显著抑制的趋势。这是由于盐渍化土壤电导率随着施氮量的增加而增大,过量施氮可能会加重土壤盐分胁迫,抑制作物生长^[19]。W2N2 处理的 L_{AI} 最大,与

W3N3 无显著差异。W2N2 的叶倾角最小,显著小于其余水氮处理(除了与 W3N3、W2N1 差异不显著),较小的叶倾角表征冠层结构更加披散。说明 W2N2 具有披散的冠层结构与较大的叶面积指数,其冠层结构能更加合理高效的截获光照资源。GARDNER 等^[38]研究认为,作物有效利用太阳光能、增加干物质量,必须是叶片截获更多的太阳辐射,使光合作用达到最大值。光照强度是影响植物光合作用的主要因子^[6]。因此,提高作物冠层光能截获量在一定程度上能更好地满足叶片光合作用的需求,有利于提高其光合作用效率。本研究中,W2N2 的光截获率与各 W3、W2 处理无显著差异,这可能与 L_{AI} 临界值有关。ESTRADA-CAMPUZANO 等^[30]也研究表明,水分胁迫对黑小麦开花后光截获量影响不显著,这与开花后叶面积指数达到临界值有关。

作物生长后期合理高效的冠层结构是作物高产的基础^[12]。由图 3 可知,本研究在玉米灌浆后期(8月21日—8月27日)W2N2 的 L_{AI} 最大(4.29),较其余处理提高 7.15% ~ 42.24%,除了与 W2N1 差异不显著,显著高于其他水氮处理,具有较大的光合作用面积,有利于增加碳捕获和减少棵间蒸发;W2N2 的 L_{AI} 下降速率较 W3N3、W3N2 显著减缓了 37.35%、53.49% (图 3),与 W2N1 差异不显著。W2N2 灌浆后期光合势较其余处理提高 5.95% ~ 37.60%,除了与 W3N3、W2N1 差异不显著,显著大于其他水氮处理(图 4)。以上分析说明,W2N2 处理提高了生长后期光合作用面积,延长了叶片功能的持续时间,延迟了叶片衰老进程^[16],具有更加合理的冠层结构,为光能的高效利用和高产效益的形成奠定了基础。张珂珂等^[16]也发现减氮补水处理有利于提高小麦孕穗期 L_{AI} ,减缓灌浆期 L_{AI} 下降速率,延长叶片功能期,光合势平均提高 9.7%,从而提高了光能利用效率。

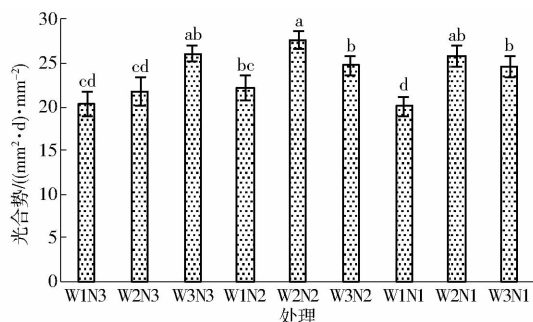


图 4 不同水氮处理对玉米灌浆后期光合势的影响
Fig. 4 Effects of different water and nitrogen treatments on leaf area duration of maize at late grain filling stage

的冠层结构可改善玉米群体内部光传输和分布状况,提高冠层中部功能叶的光合有效辐射,进而提高光合速率和光能利用效率。关于限量灌溉和施氮条件下盐渍化农田玉米冠层内部 PAR(光合有效辐射)分布特征与群体光合特性之间的关系,还有待进一步研究。

3.3 灌溉和施氮量对光能利用效率的影响

本研究表明水氮交互作用对盐渍化农田玉米抽雄期和灌浆期 R_{UE} 影响显著,过量灌溉或施氮对玉米灌浆期 R_{UE} 有抑制作用,适度减氮控水能显著提高玉米灌浆期 R_{UE} 。谷晓博等^[15]发现灌溉和施氮对非盐渍土冬油菜 R_{UE} 的影响有显著的交互作用,在当地水氮用量的基础上适当减少灌水量和施氮量能显著提高冬油菜蕾薹期 R_{UE} ,而过量灌溉或施氮对冬油菜 R_{UE} 促进作用不明显,甚至有下降趋势。可见,水氮交互作用能显著影响作物的光能利用效率,适宜的灌溉量和施氮量有利于作物生长后期光能利用效率的提高,为作物高产奠定基础。

本研究中,W2N2 玉米灌浆期 R_{UE} 显著高于其余水氮处理($P < 0.05$)。这是由于 W2N2 相比其余处理明显改善了生长后期土壤水土环境,有利于光合生理活动的进行。特别是在灌浆后期 W2N2 具有更加合理高效的冠层结构,保持了较高的光合性能,能够更好地利用和转化光照资源。因此,W2N2 较其余处理显著增加了生物累积量(表 3)($P < 0.05$),而 W2N2 的光截获率与各 W3、W2 处理无显著差异,最终导致 W2N2 具有较高的 R_{UE} ,体现出光能利用的高效性及后效性。

3.4 灌溉和施氮量对产量的影响

闫建文^[20]研究发现盐渍化土壤适量的节水减氮对玉米产量造成的影响并不显著。本研究表明,盐渍化农田在常规水氮用量的基础上,限量 25% 灌溉和施氮量的 W2N2 较常规水氮模式增产 4.01%,差异不显著,两者结果一致,也验证了前面讨论的 W2N2 在籽粒形成的灌浆期具有较高光能利用效率。作物群体 L_{AI} 对作物光能利用及产量起决定性作用^[39],在本研究中 L_{AI} 对产量的影响还表现在叶片的光合势上,产量与 L_{AD} 显著正相关。从表 2 可以看出,W2N2 在抽雄—灌浆期具有较高的 L_{AD} ,较其余水氮处理(除了 W3N3、W3N2)延长 5.7 ~ 30.1 ($\text{mm}^2 \cdot \text{d}$)/ mm^2 ,这与王永宏等^[40]研究得到吐丝后光合势比例越高产量越高的结论相似,这也在一定程度上可以解释适当减氮控水在一定程度上有助于产量提高的原因。

从光能利用角度分析,提高作物产量,一方面要尽量截获光能,另一方面要提高光能利用效率^[21],

作物的光合作用与冠层光分布关系密切,合理

就本研究而言, W2N2 的光截获率与 W3N3 无显著差异, 生长后期光能利用效率的大幅度提高是该模式增产的主要原因。ESTRADA-CAMPUZANO 等^[30]也研究发现在黑小麦开花后, 水分胁迫显著影响光能利用效率, 但对光截获量影响不显著。

4 结束语

限量灌溉和施氮改变了盐渍化农田水土环境, 进而影响了玉米群体冠层结构, 群体冠层结构的改变导致了光能截获量、生物量和光能利用效率的差异, 进而影响籽粒产量。在不同水氮管理模式中, 水氮用量过少或过多都不利于构建合理的玉米冠层结构, 从而降低其光合生产能力、光能利用效率和产量。相关分析和通径分析表明, 玉米产量与灌浆期

的 L_{AI} 、光合势、光截获率呈显著正相关, L_{AI} 之所以对产量影响最大, 主要通过光合势和光截获率的作用实现。 R_{UE} 对产量的直接贡献最大, 生物累积量、 L_{AI} 、光合势和光截获率均通过 R_{UE} 对产量的间接贡献较大。W2N2 明显改善了盐渍化农田玉米生长后期土壤水盐状况, 优化了玉米群体生长后期的冠层结构, 提高了生长后期光合作用面积, 延长了叶片功能的持续时间, 延迟了叶片衰老进程, 保持了较高的光合性能, 为光能的高效利用和高产效益的形成奠定了基础。W2N2 与 W3N3 相比, 在节水节氮 25% 的前提下, 增产 4.01%, 灌浆期光能利用效率提高 44.3%。全面考虑节水、节肥增产并达到高光效的目的, 本试验中较优的盐渍化农田玉米水氮模式为灌溉量 225 mm、施氮量 258.8 kg/hm²。

参 考 文 献

- LIU H, WANG X, ZHANG X, et al. Evaluation on the responses of maize (*Zea mays* L.) growth, yield and water use efficiency to drip irrigation water under mulch condition in the Hetao Irrigation District of China [J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 179(1):144-157.
- XUE Jing, REN Li. Evaluation of crop water productivity under sprinkler irrigation regime using a distributed agro-hydrological model in an irrigation district of China [J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 178:350-365.
- GAO Xiaoyu, HUO Zailin, BAI Yining, et al. Soil salt and groundwater change in flood irrigation field and uncultivated land: a case study based on 4-year field observations [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(5):2127-2139.
- WU Yong, SHI Xiaohong, LI Changyou, et al. Simulation of hydrology and nutrient transport in the Hetao Irrigation District, Inner Mongolia, China [J]. *Water*, 2017, 9(3):169.
- 路文静. 植物生理学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2011:124-126.
- MONTEITH J L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems [J]. *Journal of Applied Ecology*, 1972, 9(3):747-766.
- LIU Yi, YANG Shenjiao, LI Shiqing, et al. Growth and development of maize (*Zea mays* L.) in response to different field water management practices: resource capture and use efficiency [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2010, 150(4):606-613.
- 同小娟, 李俊, 于强. 农田生态系统光能利用效率及其影响因子分析 [J]. *自然资源学报*, 2009, 24(8):1393-1401.
TONG Xiaojuan, LI Jun, YU Qiang. Analysis of bio-physical controls on light use efficiency in a farmland ecosystem [J]. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(8):1393-1401. (in Chinese)
- DANSO E O, ABENNEY-MICKSON S, SABI E B, et al. Effect of different fertilization and irrigation methods on nitrogen uptake, intercepted radiation and yield of okra (*Abelmoschus esculentum* L.) grown in the Keta Sand Spit of Southeast Ghana [J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 147(2):34-42.
- 岳俊芹, 张德奇, 李向东, 等. 氮钾配施下施磷对冬小麦群体发育特性、冠层光截获及产量的影响 [J]. *中国农业科学*, 2016, 49(5):840-851.
YUE Junqin, ZHANG Deqi, LI Xiangdong, et al. Effects of phosphorus on winter wheat population characteristics, canopy intercepted photosynthetically active radiation and yield under certain nitrogen-potassium rates [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(5):840-851. (in Chinese)
- LAKE L, SADRAS V. Associations between yield, intercepted radiation and radiation-use efficiency in chickpea [J]. *Crop & Pasture Science*, 2017, 68(2):140-147.
- 崔亮, 苏本营, 杨峰, 等. 带状套作大豆群体冠层光能截获与利用特征 [J]. *中国农业科学*, 2015, 48(1):43-54.
CUI Liang, SU Benying, YANG Feng, et al. Relationship between light interception and light utilization of soybean canopy in relay strip intercropping system [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(1):43-45. (in Chinese)
- WANG R, CHENG T, HU L. Effect of wide-narrow row arrangement and plant density on yield and radiation use efficiency of mechanized direct-seeded canola in Central China [J]. *Field Crops Research*, 2015, 172:42-52.
- HAMZEI J, SOLTANI J. Deficit irrigation of rapeseed for water-saving: effects on biomass accumulation, light interception and radiation use efficiency under different N rates [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2012, 155(28):153-160.
- 谷晓博, 李援农, 杜娅丹, 等. 水氮耦合对冬油菜氮营养指数和光能利用效率的影响 [J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(2):122-132. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160217&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.017.
- GU Xiaobo, LI Yuannong, DU Yadan, et al. Effects of water and nitrogen coupling on nitrogen nutrition index and radiation use efficiency of winter oilseed rape [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(2):122-132. (in Chinese)
- 张珂珂, 周苏政, 张嫒, 等. 减氮补水对小麦高产群体光合性能及产量的影响 [J]. *应用生态学报*, 2016, 27(3):863-872.
ZHANG Keke, ZHOU Sumei, ZHANG Man, et al. Effects of reduced nitrogen application and supplemental irrigation on photosynthetic characteristics and grain yield in high-yield populations of winter wheat [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*,

- 2016, 27(3):863-872. (in Chinese)
- 17 HAO Y, XU X, REN D, et al. Distributed modeling of soil water-salt dynamics and crop yields based on HYDRUS-EPIC model in Hetao Irrigation District[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(11):110-116.
- 18 曾文治, 徐驰, 黄介生, 等. 土壤盐分与施氮量交互作用对葵花生长的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(3):86-94. ZENG Wenzhi, XU Chi, HUANG Jiesheng, et al. Interactive effect of salinity and nitrogen application on sunflower growth[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(3):86-94. (in Chinese)
- 19 CECCOLI G, EUGENIA S M, BUSTOS D, et al. Genetic variability for responses to short- and long-term salt stress in vegetative sunflower plants[J]. Journal of Plant Nutrition & Soil Science, 2012, 175(6):882-890.
- 20 闫建文. 盐渍化土壤玉米水氮迁移规律及高效利用研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2014. YAN Jianwen. Study on the water and nitrogen migration regularity and efficient utilization of maize in the salinity soil [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- 21 王自奎. 小麦/玉米间作复合群体光能和水分传输利用试验与模拟研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2015. WANG Zikui. Light and water transmission and utilization in wheat/maize strip intercropping system[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese)
- 22 郭江, 肖凯, 郭新宇, 等. 玉米冠层结构、光分布和光合作用研究综述[J]. 玉米科学, 2005, 13(2):55-59. GUO Jiang, XIAO Kai, GUO Xinyu, et al. Review on maize canopy structure, light distributing and canopy photosynthesis[J]. Journal of Maize Science, 2005, 13(2):55-59. (in Chinese)
- 23 张宪政. 作物生理研究法[M]. 北京:中国农业出版社, 1992:136-156.
- 24 朱相成, 汤亮, 张文宇, 等. 不同品种和栽培条件下水稻冠层光合有效辐射传输特征[J]. 中国农业科学, 2012, 45(1):34-43. ZHU Xiangcheng, TANG Liang, ZHANG Wenyu, et al. Transfer characteristics of canopy photo-synthetically active radiation in different rice cultivars under different cultural conditions[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(1):34-43. (in Chinese)
- 25 WANG Z, ZHAO X, WU P, et al. Radiation interception and utilization by wheat/maize strip intercropping systems[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 204:58-66.
- 26 CHARLES-EDWARDS D A, LAWN R J. Light interception by grain legume row crops[J]. Plant Cell & Environment, 1984, 7(4):247-251.
- 27 MONTEITH J L, UNSWORTH M H. Principles of environmental physics[M]. London:Edward Arnold, 1990.
- 28 崔党群. 通径分析的矩阵算法[J]. 生物数学学报, 1994, 9(1):71-76. CUI Dangqun. The matrix solutions on path analysis[J]. Journal of Biomathematics, 1994, 9(1):71-76. (in Chinese)
- 29 张国伟, 张雷, 唐明星, 等. 土壤盐分对棉花功能叶气体交换参数和叶绿素荧光参数日变化的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(7):1771-1781. ZHANG Guowei, ZHANG Lei, TANG Mingxing, et al. Diurnal variation of gas exchange and chlorophyll fluorescence parameters of cotton functional leaves under effects of soil salinity[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(7):1771-1781. (in Chinese)
- 30 ESTRADA-CAMPUZANO G, SLAFER G A, MIRALLES D J. Differences in yield, biomass and their components between triticale and wheat grown under contrasting water and nitrogen environments[J]. Field Crops Research, 2012, 128(128):167-179.
- 31 张大龙, 常毅博, 李建明, 等. 大棚甜瓜蒸腾规律及其影响因子[J]. 生态学报, 2014, 34(4):953-962. ZHANG Dalong, CHANG Yibo, LI Jianming, et al. The critical factors of transpiration on muskmelon in plastic greenhouse[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(4):953-962. (in Chinese)
- 32 ACRECHE M M, BRICENO-FELIX G, MARTIN S J A, et al. Radiation interception and use efficiency as affected by breeding in Mediterranean wheat[J]. Field Crops Research, 2009, 110:91-97.
- 33 刘世全, 曹红霞, 张建青, 等. 不同水氮供应对小南瓜根系生长、产量和水氮利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(7):1362-1371. LIU Shiquan, CAO Hongxia, ZHANG Jianqing, et al. Effects of different water and nitrogen supplies on root growth, yield and water and nitrogen use efficiency of small pumpkin[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(7):1362-1371. (in Chinese)
- 34 王秀君, 罗盛国. 尿素肥效的影响因素及其施用技术[J]. 土壤学进展, 1995(1):21-26. WANG Xiujun, LUO Shengguo. Urea fertilizer efficiency influence factors and its application technology[J]. Soil Science Progress, 1995(1):21-26.
- 35 李为萍. 盐渍化灌区油菜品质对水-肥-盐耦合的动态响应效应研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2013. LI Weiping. Dynamic response of sunflower quality on the soil condition of water-fertilizer-salt coupling in the salinization district[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- 36 GAO X, BAI Y, HUO Z, et al. Deficit irrigation enhances contribution of shallow groundwater to crop water consumption in arid area[J]. Agricultural Water Management, 2017, 185:116-125.
- 37 符鲜, 杨树青, 刘德平, 等. 不同盐渍化土壤中微生物对氮肥的响应关系研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(3):661-667. FU Xian, YANG Shuqing, LIU Deping, et al. Responses of soil microbes to N fertilizers in two saline soils[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(3):661-667. (in Chinese)
- 38 GARDNER F P, PEARCE R B, MITCHELL R L. Physiology of crop plants[M]. Iowa: Iowa State University Press, 1985:31-46.
- 39 程建峰, 沈允钢. 作物高光效之管见[J]. 作物学报, 2010, 36(8):1235-1247. CHENG Jianfeng, SHEN Yungang. My humble opinions on high photosynthetic efficiency of crop[J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(8):1235-1247. (in Chinese)
- 40 王永宏, 王克如, 赵如浪, 等. 高产春玉米源库特征及其关系[J]. 中国农业科学, 2013, 46(2):257-269. WANG Yonghong, WANG Keru, ZHAO Rulang, et al. Relationship between the source and sink of spring maize with high yield[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(2):257-269. (in Chinese)