

施氮量对复播青贮玉米光合特性和产量的影响

王久龙^{1,2}, 王振华¹, 李文昊^{1,2}, 裴磊^{1,2},
赵波^{1,2}, 扁青永^{1,2}, 朱延凯^{1,2}

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

摘要: 采用田间试验方法, 研究了一管两行(80+40)行距模式下灌溉量为 288 mm 时, 不同施氮量(CK ~ 14.04 kg·hm⁻², F1 ~ 97.56 kg·hm⁻², F2 ~ 167.16 kg·hm⁻², F3 ~ 236.76 kg·hm⁻², F4 ~ 306.36 kg·hm⁻², F5 ~ 375.96 kg·hm⁻²)对复播青贮玉米光合特性的影响, 观测了拔节期(08.20)和抽雄吐丝期(09.13)光合特性指标及生育期末期的干物质量、叶面积, 计算叶片水平的水分利用效率、光合势及净同化率。施氮量为 236.76 kg·hm⁻², 青贮玉米产量最大; 拔节期光合有效辐射为 1 500 ~ 2 000 μmol·m⁻²·s⁻¹、施氮量为 236.76 kg·hm⁻²时, 青贮玉米的光合指标较大; 抽雄吐丝期, 光合有效辐射为 800 ~ 1 900 μmol·m⁻²·s⁻¹、施氮量为 236.76 kg·hm⁻²时, 水分利用效率较大; 施氮量为 236.76 ~ 306.36 kg·hm⁻²时, 青贮玉米的光合势和净同化率均达到最大, 施氮量进一步增加, 光合势和净同化率降低显著。因此, 石河子地区青贮玉米适宜的光合有效辐射为 1 500 ~ 2 000 μmol·m⁻²·s⁻¹, 施氮量为 236.76 kg·hm⁻², 青贮玉米产量及水分利用效率达到最大。

关键词: 施氮量; 复播青贮玉米; 光合特性; 产量;

中图分类号: S275.6 文献标志码: A

Effects of nitrogen application rate on photosynthetic characteristics and yield of silage maize

WANG Jiu-long^{1,2}, WANG Zhen-hua^{1,2}, LI Wen-hao^{1,2}, PEI Lei^{1,2},
ZHAO Bo^{1,2}, BIAN Qing-yong^{1,2}, ZHU Yan-kai^{1,2}

(1. College of Water & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China;
2. Corps Key Laboratory of Modern Water-saving Irrigation, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

Abstract: In this study, a field experiment used a tube of two lines (80 + 40) spaced mode, irrigation quota of 288 mm, to study the effects of N application rate (CK ~ 14.04 kg·hm⁻², F1 ~ 97.56 kg·hm⁻², F2 ~ 167.16 kg·hm⁻², F3 ~ 236.76 kg·hm⁻², F4 ~ 306.36 kg·hm⁻², F5 ~ 375.96 kg·hm⁻²) on silage maize and photosynthetic characteristics. At the jointing stage (08.20) and tasseling stage (09.13), photosynthesis characteristic indexes, fertility of the final quality of dry matter, leaf area, the leaf level of water use efficiency, photosynthetic potential and net assimilation rate were calculated. When the N application rate was 236.76 kg·hm⁻², silage maize yield was the largest and when photosynthetic active radiation was 1 500 ~ 2 000 μmol·m⁻²·s⁻¹, N application rate was 236.76 kg·hm⁻², silage corn WUE was larger; at spinning tasseling stage, photosynthetic active radiation was 1 500 ~ 2 000 μmol·m⁻²·s⁻¹, and N application rate was 236.76 kg·hm⁻², the WUE was larger; when N application rate was 236.76 ~ 306.36 kg·hm⁻², silage maize photosynthetic potential and net assimilation rate achieved the maximum level. When the N application rate was increased, photosynthetic potential and net assimilation rate decreased significantly. Therefore, in Shihezi area, the photosynthetic active radiation of 1 500 ~ 2 000 μmol·m⁻²·s⁻¹, and N application rate of 236.76 kg·hm⁻², are the appropriate level to achieve the maximum silage corn yield and WUE.

Keywords: N application; multiple cropping silage maize; photosynthetic characteristics; yield

收稿日期: 2016-09-29

修回日期: 2016-12-08

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAD20B03)

作者简介: 王久龙(1988—), 男, 河北承德人, 硕士, 研究方向为节水灌溉理论与技术。E-mail: wjl2013007@126.com。

通信作者: 王振华(1979—), 男, 河南扶沟人, 教授, 博导, 博士, 主要从事干旱区节水灌溉理论与技术研究。E-mail: wzh2002027@163.com。

新疆充足的水土光热条件,蕴藏着较强的粮食生产能力,担负着国家粮食战略后备基地的重要责任。2010年,新疆生产建设兵团党委提出将“增粮”调整为“稳粮”,大力发展优质、高产、高效、生态农业。大量学者研究认为,在 $8^{\circ}\text{C} \sim 34^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内,玉米的叶片生长发育速率随温度升高而增加,随温度升高叶片生长发育速率下降,当日平均气温低于 16°C 时,玉米基本上停止灌浆^[1]。青贮玉米生长期一般为80~85 d,麦收后7—9月的月平均辐射为 $2.0 \sim 1.99 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 、地温最高温度 $26.3^{\circ}\text{C} \sim 19.9^{\circ}\text{C}$ 、最低温度为 $25.5^{\circ}\text{C} \sim 8.6^{\circ}\text{C}$,新疆地区光照、积温等条件能够满足青贮玉米的生长,“一年两作”的种植模式得到广泛应用。

不同施氮条件下的光合作用体现着作物的最直接生产力^[2],对玉米的光合特性有着不同的影响。氮素亏缺会直接影响玉米的光合作用,造成产量和品质下降^[3-4]。增加氮肥用量能够提高水分胁迫状态下的Gs、Tr和Rd,降低水分胁迫处理产生的影响。氮是限制作物产量形成的主要因素^[5],对玉米产量形成的影响可达显著、极显著水平^[6]。不合理施肥、过量施肥非但不能提高玉米的产量,而且还造成大量的氮素损失及浪费,并导致土壤环境日益恶化^[7-10]、产量下降^[11-12]等问题。

本研究拟通过查明两种行距配置模式在不同施氮条件下的光合有效辐射对滴灌复播青贮玉米产量及光合生理指标的影响,探究在青贮玉米高产、水分利用效率最高条件下的适宜行距模式和施氮量,探索光合有效辐射在该施氮条件下对青贮玉米产量及光合生理指标的影响机制,通过光合有效辐射进行大尺度范围内的产量预测。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2015年7—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($44^{\circ}19' \text{N}, 86^{\circ}03' \text{E}$)进行。试验区海拔451 m,年均日照时间2 865 h, $> 10^{\circ}\text{C}$ 积温为3 463.5 $^{\circ}\text{C}$, $> 15^{\circ}\text{C}$ 积温为2 960.0 $^{\circ}\text{C}$,无霜期170 d,多年平均降雨量207 mm,多年平均蒸发量为1 660 mm,地下水埋深大于5 m,土壤质地为中壤土,土壤的平均容重为 $1.68 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,田间持水率为20.84%,饱和含水率为33.32%。

1.2 试验设计

麦收后,在有滴灌系统的土地上带茬播种青贮玉米,品种为“瑞玉 F98”。每个小区由球阀单独控

制灌溉和施肥,小区面积为 83.7 m^2 (长 \times 宽: $18.6 \text{ m} \times 4.5 \text{ m}$),滴灌带(外径16 mm、壁厚0.3 mm、滴头间距30 cm、滴头流量在 $1.8 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$)采用的是天业生产的单翼迷宫式,支管道内压力控制为0.06 MPa,采用压差式施肥罐进行水肥一体化施肥,行距模式为一管两行($80 \text{ cm} + 40 \text{ cm}$)(详见图1),播种深度4~5 cm,株距20 cm,种植密度 $83\ 333 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。采用干播湿出的播种方法,7月8日播种,7月12日出苗,10月1日收获,全生育期总81天,灌溉定额为288 mm,灌水次数7次,即苗期(7月17日)1次。拔节期(8月1日、8月11日、8月21日)3次、抽雄吐絮期(9月2日、9月8日)2次、灌浆期(9月23日)1次,施尿素(含纯氮46.4%)和磷酸钾铵(含纯氮6%,五氧化二磷51%,氧化钾17%)的次数均为6次(除苗期不施肥外,其余施肥和灌水一致),施氮处理详见表1。

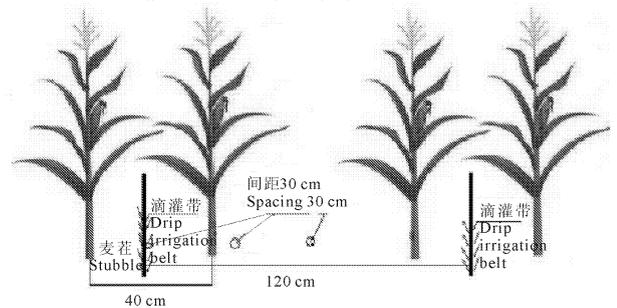


图1 一管两行(80+40)布置模式示意图

Fig.1 A tube of two lines (80+40) decorate form

表1 青贮玉米不同处理的施氮量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

Table 1 Nitrogen treatment

处理 Treatment	全生育期 Whole growth	拔节期 Jointing stage	抽雄吐絮期 Tasseling wadding stages	灌浆期 Filling stage
CK	14.04	7.02	4.68	2.34
F1	97.56	48.78	32.52	16.26
F2	167.16	83.58	55.72	27.86
F3	236.76	118.38	78.92	39.46
F4	306.36	153.18	102.12	51.06
F5	375.96	187.98	125.32	62.66

1.3 测定项目与方法

1.3.1 叶面积、干物质质量测定 每隔10 d每个小区自南向北选取连续3株,取回实验室,用直尺对每片叶片进行测量。叶长为从叶片基部到叶尖,叶宽为叶片最宽处。按照茎、叶、穗分类、编号,称其鲜重和鼓风干燥箱 85°C 下烘干至恒重后的干重。

青贮玉米单片叶面积(cm^2) = 长(cm) \times 宽(cm) $\times 0.75$

单株叶面积(cm^2) = 单个叶片叶面积的总和
光合势的计算公式如下:

$$LAD = \frac{(L_2 - L_1)}{T_2 - T_1} \quad (1)$$

式中, LAD 为光合势($\text{cm}^2 \cdot \text{d}^{-1}$); L 为叶面积(cm^2); T 为时间(d)。

净同化率(NAR) 的计算公式为:

$$NAR = \frac{1}{F} \cdot \frac{dW}{dt} \quad (2)$$

式中, NAR 为净同化率($\text{g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$); F 为叶面积(cm^2); W 为干物质重(g); t 为时间(d)。

1.3.2 光合指标测定 分别在青贮玉米拔节期(8月20日,晴天)和抽雄吐丝期(9月20日,晴天)进行。使用美国 CI-340 光合仪测定光合有效辐射(PAR),采用控光模块控制该时刻的光合有效辐射,拔节期实测最大光合有效辐射为 $2\,300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,抽雄吐丝期实测最大光合有效辐射为 $1\,900 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,因此,分别选择了拔节期和抽雄吐丝期的最大光合有效辐射极限值为参考值进行研究,选取青贮玉米顶层功能叶片测定青贮玉米的净光合速率、蒸腾速率等光合指标,每组3次重复,根据测定数据,计算青贮玉米叶片水分利用效率 WUE ,其公式为: $WUE = P_n / T_r$ 。

1.3.3 产量测定 选取 $1.2 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$ 的3个区域内所有青贮玉米进行产量测定,测定每个区域内的玉米总鲜重。选择其中3株玉米按照茎、叶和穗分类、编号,测定其鲜重和 85°C 下烘干至恒重后的干重。

2 结果与分析

2.1 施氮量对青贮玉米经济产量的影响

由图2可知,青贮玉米施氮量与产量呈抛物线关系,即玉米产量随施氮量的增加先增加后趋于稳定。抛物线型回归方程为 $y = -0.65787x^2 + 357.03$

$x + 52821$ ($R^2 = 0.93$),理论施氮量为 $271.35 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,青贮玉米理论产量为 $101\,261.58 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,施氮量为 $236.76 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,青贮玉米的实际产量为 $108\,194.44 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,比施氮量 $271.35 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的理论产量多 6.8% ,施氮量为 $306.36 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,青贮玉米的实际产量为 $95\,138.89 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,比施氮量 $271.35 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的理论产量少 6.0% 。

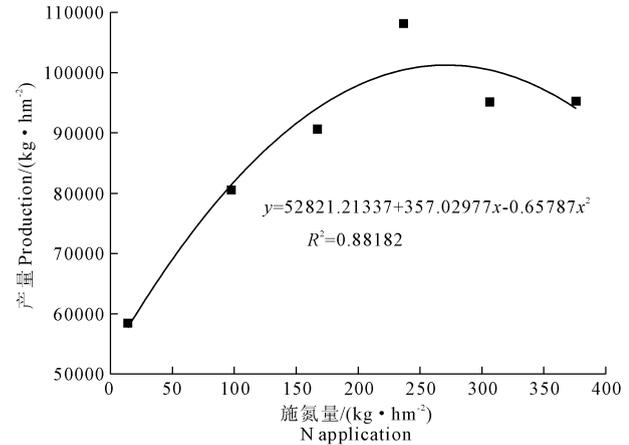


图2 施氮量对产量的影响

Fig.2 Effect of N application on Production

2.2 施氮量对青贮玉米净光合速率的影响

由表2可知,拔节期,青贮玉米的净光合速率随光合有效辐射的增加呈现出先增加后降低的趋势,光合有效辐射为 $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,净光合速率随着施氮量增加而增大,施氮量为 $375.96 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,净光合速率最大,为 $29.13 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。光合有效辐射为 $1\,500 \sim 2\,000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,施氮量为 $236.76 \sim 306.36 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,净光合速率最大;施氮量超过 $306.36 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,青贮玉米的净光合速率降低。光合有效辐射为 $2\,300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,净光合速率显著降低,施氮量对净光合速率的有一定的影响,但未达到极显著水平。

表2 拔节期(08-20)净光合速率($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

Table 2 Jointing stage (08-20) net photosynthetic rate

处理 Treatment	PAR = 1 000 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	PAR = 1 500 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	PAR = 1 800 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	PAR = 2 000 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	PAR = 2 300 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
CK	13.09cC	13.29dD	17.07dC	20.49dC	15.34bA
F1	13.48cC	23.69cCD	21.79cBC	30.18cdB	23.70abA
F2	22.31bB	23.78cC	22.82bcBC	35.93cAB	25.87aA
F3	22.10bB	35.91aAB	41.67aA	42.52bA	22.81abA
F4	23.56bB	35.77abA	41.85aA	41.83aA	23.16abA
F5	29.13aA	29.54bcBC	25.18bB	36.00cAB	20.72abA

注:同列不同小写字母表示差异达5%显著水平,大写字母表示显著差异达1%显著水平。下同。

Note: Different lower letters in the same column indicate significant difference at $P < 0.05$, different capital letters indicate significant difference at $P < 0.01$. The same below.

由表3可知,抽雄吐丝期,青贮玉米由营养生长转向生殖生长,也是青贮玉米干物质积累量较大的时期,氮素在该生育期内消耗量较大,净光合速率的大小将决定青贮玉米产量的高低,抽雄吐丝期的光合有效辐射最大值为 $1\ 900\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。光合有效辐射为 $800\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,净光合速率随着施氮量增加而增大,光合有效辐射为 $1\ 500\sim 1\ 900\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、施氮量为 $306.36\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,净光合速率较大,施氮量进一步增加,净光合速率降低。

2.3 施氮量对青贮玉米蒸腾速率的影响

由表4可知,拔节期蒸腾速率随光合有效辐射增加而先增加后减少。光合有效辐射为 $1\ 500\sim 2\ 000\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,蒸腾速率最大;光合有效辐射为 $1\ 000\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,施氮量为 $375.96\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,蒸腾速率最大,为 $3.62\ \text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;光

合有效辐射为 $1\ 500\sim 2\ 000\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,施氮量 $236.76\sim 306.36\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 对蒸腾速率的影响最显著,蒸腾速率较大,为 $4.6\sim 5.4\ \text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;光合有效辐射为 $2\ 300\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,施氮量对青贮玉米蒸腾速率的影响不显著。

表3 抽雄吐丝期(09-13)净光合速率($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
Table 3 Spinning tasseling stage (09-13) net photosynthetic rate

处理 Treatment	PAR = 800 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	PAR = 1 500 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	PAR = 1 900 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
CK	18.30cD	23.04cB	24.30cB
F1	20.46cCD	26.07bcB	30.88bAB
F2	20.46cCD	28.19bAB	32.92abA
F3	26.73bB	34.60aA	33.81abA
F4	24.89bBC	34.80aA	38.43aA
F5	30.25aA	33.78aA	35.60abA

表4 拔节期(08-20)蒸腾速率($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)

Table 4 Transpiration rate at Jointing stage (08-20)

处理 Treatment	PAR = 1 000 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	PAR = 1 500 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	PAR = 1 800 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	PAR = 2 000 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	PAR = 2 300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
CK	1.71dD	1.84dD	3.80cBC	3.43bB	2.23aA
F1	1.38dD	2.99bB	3.85cBC	3.34bAB	4.65bB
F2	2.55cBC	4.01cC	4.99bcC	4.13aB	5.42bcB
F3	2.46cC	5.11aA	5.92aA	5.51aA	4.98bcB
F4	2.93bB	5.31aA	6.01aA	5.57aA	4.91bcB
F5	3.62aA	5.05aA	5.06bAB	4.51aAB	4.85cB

抽雄吐丝期青贮玉米蒸腾速率变化见表5。抽雄吐丝期的光合有效辐射为 $800\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,蒸腾速率较低,施氮量对蒸腾速率的影响不显著,光合有效辐射过低限制了蒸腾速率的增加;光合有效辐射为 $1\ 500\sim 1\ 900\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,蒸腾速率随着施氮量的增加而先增大后减少,施氮量为 $306.36\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,蒸腾速率最大,为 $3.51\sim 5.50\ \text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,施氮量进一步增加,则导致蒸腾速率降低,光合有效辐射增大,青贮玉米的蒸腾速率随之增加。

2.4 施氮量对青贮玉米水分利用效率的影响

拔节期水分利用效率见表6。青贮玉米叶片水平的水分利用效率随着施氮量增加而先增加后减少,施氮量为 $167.16\sim 236.76\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,水分利用效率较大,随着光合有效辐射增加,水分利用效率呈现出逐渐递减趋势,光合有效辐射为 $2\ 000\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,水分利用效率增加较为显著,光合有效辐射为 $2\ 300\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,水分利用效率最小。

抽雄吐丝期水分利用效率见表7。抽雄吐丝期

的水分利用效率随着光合有效辐射增加而逐渐递减,随着施氮量增加,水分利用效率呈现出先增加后减少的趋势,光合有效辐射为 $800\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、施氮量为 $236.76\sim 306.36\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,水分利用效率最大,光合有效辐射为 $1\ 500\sim 1\ 900\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、施氮量为 $97.56\sim 236.76\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,水分利用效率最大。

表5 抽雄吐丝期(09-13)蒸腾速率($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)

Table 5 Transpiration rate at tasseling stage (09-13)

处理 Treatment	PAR = 800 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	PAR = 1 500 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	PAR = 1 900 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
CK	0.99bB	2.12cC	3.75cC
F1	1.10abAB	2.09cC	3.60cC
F2	1.15abAB	2.30cBC	4.06bcBC
F3	1.15abAB	2.81bB	4.26bcBC
F4	1.22aA	3.51aA	5.50aA
F5	1.20aAB	2.87bB	4.04bcBC

表 6 拔节期(08-20)水分利用效率($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 6 WUE at Jointing stage (08-20)

处理 Treatment	PAR = 1 000 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	PAR = 1 500 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	PAR = 1 800 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	PAR = 2 000 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	PAR = 2 300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
CK	7.64bB	7.22abA	5.41bB	4.96dC	4.29cB
F1	10.85aA	5.91bA	5.27bB	6.13cB	4.62bcB
F2	8.75abAB	5.85bA	6.87aA	9.39aA	5.11bB
F3	9.00aA	7.68abA	6.53aA	7.12bB	6.99aA
F4	8.04abAB	8.17aA	5.60bB	7.24bB	4.75bcB
F5	8.03abAB	6.74abA	5.56bB	7.01bB	4.79bcB

表 7 抽雄吐丝期(09-13)水分利用效率($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 7 WUE at tasseling stage (09-13)

处理 Treatment	PAR = 800 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	PAR = 1 500 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	PAR = 1 900 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
CK	18.12cdC	10.82abAB	6.46bB
F1	18.27cdC	12.42aA	8.32aA
F2	17.49dC	12.15aA	8.09aAB
F3	22.84bAB	12.23aA	7.91aAB
F4	26.82aA	9.86bB	6.97bB
F5	20.40bcBC	11.69abAB	8.79aA

2.5 施氮量对青贮玉米光合势的影响

青贮玉米光合势的变化见表 8。拔节期光合势最大,其次为苗期和抽雄吐丝期的光合势,灌浆期为青贮玉米生殖生长的关键时期,叶面积的变化较小,光合势的变化也较小。苗期施氮处理对青贮玉米光合势影响不显著;拔节期施氮量增加,青贮玉米光合势增加,施氮量为 $236.76 \sim 306.36 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,光合势最大,为 $266.60 \pm 3.85 \text{ cm}^2\cdot\text{d}^{-1}$,施氮量进一步增加,光合势则降低;抽雄吐丝期,施氮量增加,青贮玉米的光合势先增加后减少,施氮量为 $236.76 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时光合势最大,为 $75.50 \text{ cm}^2\cdot\text{d}^{-1}$,施氮量超过 $306.36 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,光合势则逐渐降低;灌浆期,施氮量小于 $167.16 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,光合势的差异性不显著,施氮量为 $306.36 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,光合势最大,为 $13.33 \text{ cm}^2\cdot\text{d}^{-1}$,施氮量进一步增加,光合势则降低。

表 8 光合势($\text{cm}^2\cdot\text{d}^{-1}$)

Table 8 Photosynthetic potential

处理 Treatment	苗期 Seedling stage	拔节期 Jointing stage	抽雄吐丝期 Tasseling wadding stages	灌浆期 Filling stage
CK	74.09abAB	187.38cC	31.50eE	8.00cC
F1	76.70aA	216.92bB	24.00fF	8.67cC
F2	72.52abcAB	237.69bB	42.00dD	8.67cC
F3	74.09abAB	270.46aA	75.50aA	10.67bB
F4	68.35bcAB	262.15aA	68.50bB	13.33aA
F5	67.30cB	217.85bB	52.50cC	10.00bB

2.6 施氮量对青贮玉米净同化率的影响

施氮量对青贮玉米净同化率的影响见表 9。苗期和拔节期为青贮玉米净同化率较大的时期,其次为抽雄吐丝期,灌浆期最小。苗期,青贮玉米的净同化率为 $0.36 \pm 0.1 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$;拔节期,净同化率随着施氮量增加而先增加后减少,施氮量为 $236.76 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,净同化率最大,为 $0.29 \pm 0.01 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$;抽雄吐丝期,净同化率随施氮量增加而增大,施氮量为 $236.76 \sim 306.36 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,净同化率最大,为 $0.16 \pm 0.1 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$;灌浆期,青贮玉米的净同化率较小,施氮量间的差异不显著。

表 9 净同化率($\text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$)

Table 9 Net assimilation rate

处理 Treatment	苗期 Seedling stage	拔节期 Jointing stage	抽雄吐丝期 Tasseling wadding stage	灌浆期 Filling stage
CK	0.24dD	0.16dD	0.07eD	0.01aA
F1	0.28cBC	0.22cC	0.13cBC	0.04aA
F2	0.26cdCD	0.21cC	0.11dC	0.06aA
F3	0.35aA	0.30aA	0.17aA	0.02aA
F4	0.37aA	0.27bB	0.15bAB	0.03aA
F5	0.31bB	0.28bAB	0.13cBC	0.02aA

3 讨论

青贮玉米的光合有效辐射较低($\leq 1000 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)时,净光合速率和蒸腾速率随着施氮量增加而增大。云菲等^[13]研究也发现光合有效辐射较低时,增施氮肥能够显著改善光合性能,提高光能利用率。光合有效辐射为 $1500 \sim 2000 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,施氮量为 $236.76 \sim 306.36 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,净光合速率和蒸腾速率最大,施氮量为 $375.96 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,青贮玉米的净光合速率和蒸腾速率呈现一定程度的降低,这与韩晓日、叶君等^[14-16]的研究结果相同。光合有效辐射为 $2300 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 青贮玉米的净光合速率和蒸腾速率出现了一定程度的降低,施氮量对其产生的影响均不显著,这与裴磊^[17-18]、李云

光^[19]、赵宏瑾^[20]等人在青贮玉米、棉花等光合日变化过程出现的“午休”现象导致净光合速率和蒸腾速率降低的研究结果相同。但也有学者认为光合有效辐射 $1\ 000 \sim 2\ 500\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,净光合速率增速放缓,且维持在较高水平,并未出现下降趋势^[21]。该现象的出现是由于在直角双曲线修正模型本身在参数设定时为充分考虑光合有效辐射进一步增加,光和性能指标出现下降的可能,另外由于在使用直角双曲线修正模型前人为设定了气源 CO_2 浓度及空气湿度等参数导致拟合结果的偏差;青贮玉米施氮量为 $236.76 \sim 306.36\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,光合势最大,施氮量过大后,光合势则降低,由于施氮量过大,生育前期营养生长过旺,致使植株生育后期贪青晚熟,这与李卫华^[22]、杨新泉^[23]等人的研究结果类似。

4 结 论

施氮量为 $236.76\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,青贮玉米产量最大,施氮量增加,青贮玉米产量降低显著。

拔节期,光合有效辐射为 $1\ 500 \sim 2\ 000\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、施氮量为 $236.76 \sim 306.36\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,净光合速率和蒸腾速率最大,施氮量为 $167.16 \sim 236.76\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,水分利用效率较大。

抽雄吐丝期,光合有效辐射为 $800\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、施氮量为 $236.76 \sim 306.36\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,水分利用效率最大,光合有效辐射为 $1\ 500 \sim 1\ 900\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、施氮量为 $97.56 \sim 236.76\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,水分利用效率最大。

施氮量为 $236.76 \sim 306.36\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,青贮玉米的光合势和净同化率均达到最大,施氮量进一步增加,光合势和净同化率降低显著。

因此,推荐石河子地区青贮玉米获得最高产量时的适宜光合有效辐射为 $1\ 500 \sim 2\ 000\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、施氮量为 $236.76\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

参 考 文 献:

- [1] 张建立. 气候因子对豫南夏玉米生长发育的影响[J]. 河南农业科学, 2011, 40(1): 54-57.
- [2] 王成业, 贺建峰, 武建华. 气候因子对豫南夏玉米生长发育的影响及对策研究[J]. 陕西农业科学, 2010, 56(4): 57-59.
- [3] Yang J-S(杨吉顺). Planting density and row spacing on the influence of super-high-yield summer maize yield formation[D]. Shandong Agricultural University (山东农业大学), 2010.
- [4] Ning S-Y(宁硕瀛). Planting density and row spacing on photosynthetic characteristics and yield of summer corn group[D]. Northwest Agriculture and Forestry University(西北农林科技大学), 2012.
- [5] 张玉华, 王志杰, 刘子江, 等. 玉米长效专用复合肥不同施肥量对玉米产量和经济效益的影响[J]. 玉米科学, 2000, 8(2): 80-83.
- [6] 张瑞珍, 张恩和, 孙长占. 不同基因型玉米品种氮素营养效率差异的研究[J]. 吉林农业大学学报, 2003, 25(2): 183-186.
- [7] 李红莉, 张卫峰, 张福锁, 等. 中国主要粮食作物化肥施用量与效率变化分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(5): 1136-1143.
- [8] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327: 1008-1010.
- [9] 杨恩琼, 黄建国, 何腾兵, 等. 施氮量对普通玉米产量和营养品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(3): 509-513.
- [10] 赵姗姗, 赵全力, 贾良良, 等. 白洋淀沿湖农田不同施氮水平对夏玉米土壤及土壤溶液硝态氮含量的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(6): 1491-1496.
- [11] 孙 浒, 张吉旺, 靳立斌. 玉米高产与氮肥高效协同实现存在的问题及其途径[J]. 玉米科学, 2014, 22(1): 143-148.
- [12] 李洪杰, 郭 瑞, 张小燕. 播期和密度对大豆新品种鲁黄1号产量因子及产量的影响[J]. 农业科技通讯, 2012, (6): 68-70.
- [13] 云 菲, 刘国顺, 史宏志, 等. 光氮互作对烤烟光合作用及叶绿素荧光特性的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(5): 932-941.
- [14] 韩永超, 李静平, 冀 红, 等. 不同施肥处理对膜下滴灌玉米光合特性和产量的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2012, 34(3): 248-253.
- [15] 张 越, 王创云, 邓 妍, 等. 不同施肥处理对玉米光合特性及产量形成的影响[J]. 山西农业科学, 2015, (4): 430-433, 438.
- [16] 叶 君, 高聚林, 王志刚, 等. 施氮量对超高产春玉米花粒期叶片光合特性及产量的影响[J]. 玉米科学, 2011, 19(6): 74-77.
- [17] 裴 磊, 王振华, 郑旭荣, 等. 氮肥对北疆滴灌复播青贮玉米光合特性及养分利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(2): 176.
- [18] 裴 磊, 王振华, 姜国军, 等. 毛管布置模式对北疆滴灌复播青贮玉米光合特性和产量的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31(30): 79.
- [19] 李云光, 王振华, 张金珠, 等. 液体地膜对滴灌棉花生理特性和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(13): 105.
- [20] 赵宏瑾, 朱仲元, 王喜喜, 等. 不同生育期榆树净光合速率对生态因子和生理因子的响应[J]. 生态学报, 2016, 36(6): 1-7.
- [21] 冷寒冰, 秦 俊, 叶 康, 等. 不同光照环境下荷花叶片光合响应模型比较[J]. 应用生态学报, 2014, 25(10): 2855-2860.
- [22] 李卫华, 郝乃斌. 高产大豆品种的高光效特性[J]. 生物物理学报, 2000, 16(2): 421-426.
- [23] 杨新泉, 冯 锋, 宋长青, 等. 主要农田生态系统氮素行为与氮肥高效利用研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(3): 373-376.