

春小麦/春玉米间作模式光温环境特征研究

高莹^{1,2}, 吴普特^{1,2,3}, 赵西宁^{1,2,3}, 王自奎^{2,3}, 孙喜军⁴

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 4. 陕西省咸阳市渭城区农业技术推广站, 陕西 咸阳 712000)

摘要:春小麦/春玉米间作是我国西北地区一种较为普遍的间作种植模式。于2013年在内蒙古河套灌区开展试验,分析了小麦/玉米间作在不同供肥水平下光合有效辐射和土壤表层温度的空间和时间变化特征,以及光温环境改变对小麦和玉米农艺性状的影响。结果表明:在麦玉共生前期,间作玉米接收的太阳辐射减少,透光率平均比单作玉米降低3.9%~6.3%,土壤表层温度降低2.42~2.63℃。在共生后期,间作玉米的光照条件改善,透光率比单作玉米平均升高19.3%,土壤表层温度降低1.51~1.73℃。小麦收获之后间作玉米接收的光强显著增加,土壤温度平均比单作玉米升高2.14~2.37℃。间作条件下小麦的生长得到促进,表现出明显的边行效应;而间作玉米的营养生长受到限制,叶面积在各生育期都显著低于单作玉米。综合分析表明,间作模式对各组分作物农艺性状的影响主要是由于光温环境的改变所致。

关键词:间作; 小麦; 玉米; 光合有效辐射; 地温

中图分类号:S162.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2015)03-0163-07

Characteristics of Light Environment and Soil Temperature in the Spring Wheat/Spring Maize Intercropping System

GAO Ying^{1,2}, WU Pute^{1,2,3}, ZHAO Xining^{1,2,3}, WANG Zikui^{2,3}, SUN Xijun⁴

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Water Saving Agriculture in Arid Regions of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. Agro-technical Extension Station, Weicheng District, Xianyang, Shaanxi 712000, China)

Abstract: Spring wheat/spring maize intercropping is a common cropping pattern in northwestern China. Field experiments were conducted in the Hetao Irrigation District of the Inner Mongolia in 2013 to analyze the spatiotemporal dynamics of photosynthetically active radiation (PAR) and soil temperature and the effect on the agronomic characters of both wheat and maize among different nitrogen treatments. Results showed that during the early co-growth stage, the PAR accepted by the intercropped maize was much lower than the monoculture, the fraction of light transmitted in intercropped maize was 3.9%~6.3% lower than the monoculture maize, the soil temperature reduced by 2.42~2.63℃; during the later co-growth stage, the fraction of light transmitted in intercropped maize was 19.3% higher than monoculture maize, the soil temperature reduced by 1.51~1.73℃. After wheat harvest, the PAR accepted by the intercropped maize significantly increased, the soil temperature in intercropped maize increased by 2.14~2.37℃. With respect to wheat, the growth of the border plant was better than the inner plant. However, the vegetative growth of intercropped maize was negatively affected, as reflected by the significantly reduced plant height and leaf area. It is concluded that the effects of intercropping system on agronomic characters of component crops were primarily due to the changes in light and temperature environment.

Keywords: intercropping; wheat; maize; photosynthetically active radiation; soil temperature

收稿日期:2014-12-14

修回日期:2014-12-23

资助项目:国家科技支撑计划(2011BAD29B09);教育部、国家外国专家局“111”计划(B12007);西北农林科技大学青年学术骨干项目;西北农林科技大学基本科研业务费资助项目;旱区农业共性节水技术集成与示范项目(K303021301)

第一作者:高莹(1986—),女,山东济宁人,博士研究生,研究方向为农业水土资源高效利用。E-mail:gyxingkong@126.com

通信作者:吴普特(1963—),男,陕西武功人,教授,博士生导师,主要从事节水农业与水土保持方面的研究。E-mail:gizwpt@vip.sina.com

光是调控植物生长的重要环境因子,且光在作物群体冠层内的截获与分布状况影响光合物质积累^[1-2]和作物的生长发育^[3-4]。土壤温度是影响作物生长发育^[5]、土壤中水盐运移^[6]、生物的数量与活性^[7]、农田温室气体排放^[8]、土壤碳平衡^[9]等的重要因素。田间光温环境的变化规律一直是作物生产和农田生态系统研究的重要内容。

间(套)作是一种在时间和空间上实现集约化的种植方式,它能充分利用土地、水、肥等资源^[10],有利于提高农业生态系统的作物多样化、系统稳定性和产品多样化^[11]。小麦是我国参与间套最多的作物,当前广泛分布的小麦/玉米间(套)作体系主要有:(1)小麦玉米套作,适用于华北、鄂西、西南等地;(2)小麦间作玉米,适于河西走廊、内蒙后套、银川平原以及东北南部^[12]。近年来国内外学者对于冬小麦春(夏)玉米间套作中光温等环境因素的观测研究较多^[13-16],而对于共生期最长、种间竞争最激烈^[17]的春小麦/春玉米间作群体中光温环境特性研究过少,而春小麦/春玉米间作是我国西北地区,特别是一熟制灌区的一种较为普遍的间作种植模式^[18]。因此本文结合不同供肥水平,研究春小麦/春玉米6:2间作模式中光温分布特征及其规律,以期能为进一步扩大间作对资源的捕获利用和优化间作种植提供科学和理论依据。

1 试验材料与试验设计

试验于2013年在内蒙古河套灌区沙濠渠试验站进行。试验点属于温带大陆性气候,2013年作物生育期内(3—9月)降雨量为102 mm,蒸发量为

1 698.2 mm,平均气温为19.18℃,日照时数2 046.9 h。试验田土壤属黄河灌淤土,具有明显分层,0—60 cm为粉质黏土,>60 cm为砂壤土。土壤基础肥力状况见表1。

试验设单作小麦、单作玉米、小麦玉米间作三种种植方式,以及 N_0 、 N_1 、 N_2 三种不同的氮肥施用水平(分别对应于小麦0,120,240 kg/hm²,玉米0,180,360 kg/hm²),共9个处理,3次重复,随机区组设计。

各小区东北西南方向种植。间作小区内设3个间作条带,每个条带宽1.7 m,包括6行小麦和2行玉米。其中小麦行距15 cm,玉米行距40 cm,小麦行与玉米行相距27.5 cm,小麦和玉米分别占据间作总面积的53%,47%。单作小区中两种作物的行距均与间作相同。每个小区5 m宽,10 m长。小区之间留1.5 m宽的隔离区。

供试小麦(*Triticum aestivum* L.)品种为永良4号,玉米(*Zea mays* L.)品种为内单314。小麦播种密度为667万株/hm²;玉米三叶期定苗,密度为8.33万株/hm²。单作和间作处理作物种植密度均相同。小麦于3月19号播种,7月15号收获,玉米于4月21号播种,9月20号收获。两作物共处期84 d。

试验使用肥料为氮肥(尿素,含N 46%)和三料磷肥(含P₂O₅ 46%);对于单作小麦和间作小麦带,全部磷肥和1/2氮肥,在播种前作基肥施入,剩下1/2氮肥在头水前追施。对于单作玉米和间作玉米带,全部磷肥和1/2氮肥在播种前施入,剩下1/2氮肥分两次分别于玉米拔节期和大喇叭口期于灌水前按株穴追施。灌溉及锄草等田间管理措施按当地生产实践。

表1 土壤基础肥力

土层/cm	容重/(g·cm ⁻³)	速效氮/(mg·kg ⁻¹)	速效磷/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)	有机碳/(g·kg ⁻¹)
0—30	1.492	105.3	55.9	120.0	9.8
30—60	1.435	74.1	16.8	78.7	4.5
60—100	1.512	51.5	5.6	67.5	2.5

2 测定项目与方法

2.1 光合有效辐射

采用LP-80冠层分析仪,在间作小区和单作小区内分别测量冠层顶部和冠层底部水平方向上各位点的光合有效辐射[$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]。单作小区的测定位点是在行与行中间。间作小区的测定位点如图1所示,分玉米带(C₁),条带东侧麦玉边界点(E₂, E₃, E₄),条带西侧麦玉边界点(W₄, W₃, W₂)以及小麦带(W₅)。测定时期选择小麦玉米共生前期(5月

20日—6月5日),共生后期(6月20日—7月5日)以及小麦收获前和收获之后(7月12日、8月13日)。每次测量选择天气晴朗时观测,8:00—18:00每隔1 h测一次,3次重复。各位点透光率=各位点光强/冠层上方光强。共生前期(5月27日—6月4日),小麦处于抽穗期,玉米处于苗期,小麦株高高于玉米;共生后期(6月20日—7月5日),小麦处于灌浆期,玉米处于拔节期,玉米株高高于小麦。

2.2 土壤表层温度

采用土壤温度测定仪(Thermo Recorder TR-52,

测量精度:±0.1℃),将其插入间作小区和单作小区各位点距离地表5 cm深度处,测量土壤表层温度。单作小区的测定位点是在行与行中间。间作小区的测定位点,如图1所示,选择玉米带(C₁),小麦带(W₅),麦玉边界带(E₃)。测定时期选择小麦玉米共生期(5月15日到7月15日,即玉米播后24~84 d)和小麦收获之后(7月15日到9月20日,即玉米播后84~149 d)。数据每半小时自动记录一次。

2.3 小麦株高、叶面积

在小麦开花期,分边行、内行和单作行在每个间作小区和单作小区内分别选取50 cm段长的小麦植株,然后从其中随机抽取20株测量株高和单株叶面积。单片叶面积=叶长×叶宽×叶面积系数;叶面积折算系数为0.835。

2.4 玉米叶面积和农艺性状

在玉米苗期,各间作小区和单作小区内分别随机取10株测定单株叶面积。从拔节期到成熟期,各小区分别选取4株进行测定。叶面积测定方法采用系数法,玉米叶面积折算系数为0.7。在收获期各小区随机采样4株,测定玉米株高,茎粗,穗位高等农艺性状。茎粗选择地上部分茎秆第二节进行测定。

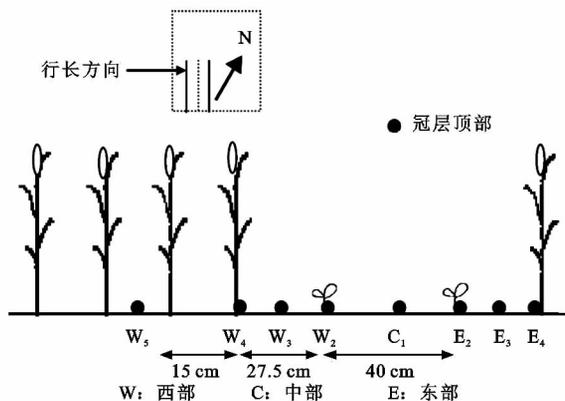


图1 小麦/玉米间作模式光合有效辐射强度和土壤温度行间测定位置示意图

3 数据处理

采用Excel 2007软件对数据进行统计分析,采用单因素方差分析法和LSD法进行方差分析与多重比较($\alpha=0.05$)。利用Sigmaplot 11.0软件作图。

4 结果与分析

4.1 共生期间作系统和单作系统冠层内各位点的透光率比较

由图2a可知,在共生前期(5月27日—6月4日),各施氮处理间作小区内冠层底部水平方向上各位点的透光率变化表现一致:条带两边(W₅, E₄)透光

率最低,条带中间玉米带(C₁)的透光率最高,为0.8~0.87。间作与单作相比,间作玉米带C₁的透光率低于单作玉米,间作小麦带W₅的透光率高于单作小麦。具体表现为,N₂, N₁, N₀处理间作玉米带C₁的透光率(分别是0.79, 0.80, 0.82)比单作玉米(分别是0.82, 0.85, 0.87)相应低3.9%, 6.3%, 5.9%;间作小麦带W₅的透光率(0.12~0.16)比单作小麦的透光率(0.09~0.10)平均高33.7%~55.7%,这表明在共生前期间作玉米接收的太阳辐射明显减少,而间作小麦接收的太阳辐射增加。不同施氮处理中, N₂和N₁处理各位点间透光率无显著性差异,而N₀处理各位点的透光率显著高于N₂和N₁处理($p < 0.05$),分别比N₂, N₁处理高15.1%, 13.0%。

图2b显示,在共生后期(6月20日—7月5日),由于冠层郁闭,各处理间作小区内水平方向上各位点的透光率已显著低于共生前期, W₅的透光率下降34.1%; W₄, W₃, W₂下降0.7%~135.5%; C₁下降96.8%; E₂, E₃, E₄下降67.8%~256.5%。各位点之间,玉米带C₁透光率仍最高,为0.40~0.43。单作小麦和单作玉米的透光率也比共生前期显著下降,分别下降17.2%, 147.6%。间作与单作相比,间作玉米带C₁的透光率已高于单作玉米,平均高19.3%;间作小麦带W₅的透光率高于单作小麦,平均高28.9%,表明间作玉米在共生后期逐渐摆脱弱光照的胁迫状况,而间作小麦仍接收了较多的太阳辐射。不同施氮处理之间,仍表现出N₀处理的透光率高于N₂, N₁处理,平均高11.4%, 11.3%。

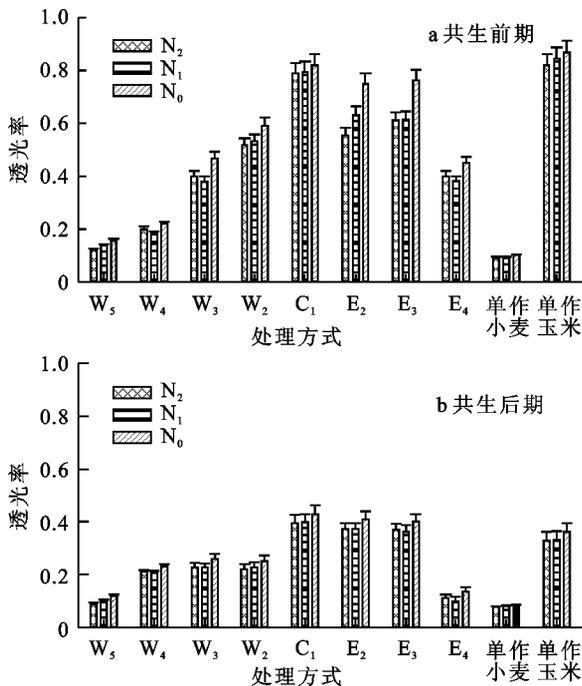


图2 共生期间作系统和单作系统冠层内各位点的透光率

4.2 共生期间作系统冠层内不同位点光的日变化特征

比较图 3a—c 可知,5 月 27 日,不同施氮处理中均表现出单作玉米的日光合有效辐射强度最高,间作玉米带 C_1 次之,接下来是麦玉边界带各位点 (E_3, E_4 或 W_3),最低的是间作小麦带 W_5 。具体表现为, N_2, N_1, N_0 处理单作玉米的日光强分别比间作玉米带高 7.7%, 3.2%, 7.0%, 比相应边界带位点 (E_3, E_4, W_3) 高 46.8%, 25.2%, 66.1%, 比间作小麦带高 3.21 倍、3.59 倍、1.78 倍。各位点的光强日动态均呈现出早晚高中午低的单峰曲线变化,但是各位点的光强到达最高值的时间却有差别。受太阳高度角和种植方向的影响,条带西侧取得光强最高值的时间早于条带东侧,其中条带西侧位点 (W_5, W_3) 在上午 11:00—12:00 之间取得光强最高值,条带东侧位点 (E_3, E_4) 在下午 14:00 左右取得光强最高值。

图 3d, e 显示,6 月 27 日,各位点的日光合有效辐射强度比之前 5 月 27 日均显著下降,日光强最高值都不超过 $1\ 500\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,但是间作玉米带 C_1 接收的光强逐渐高于单作玉米,在 9:00—16:00 之间比单作玉米高 57.4%。

4.3 共生期结束前后间作玉米和单作玉米接收的日平均光强对比

由表 2 可看出,共生期结束前,即小麦收获之前,在 7 月 12 日,各施氮处理 (N_2, N_1, N_0) 间作玉米带的光强都高于单作玉米,分别高 32.5%, 37.1%, 71.0%。8 月 13 日,虽然日太阳辐射比 7 月 12 日下降,但是间作玉米由于独立生长,接收到的日太阳辐射增加,而单作玉米由于荫蔽接受到的太阳辐射下降,造成间作玉米带的光强与单作玉米接收到的光强差距加大,各施氮处理 (N_2, N_1, N_0) 间作玉米带接收的光强比单作玉米分别高 2.53 倍、2.54 倍、3.95 倍。不同施氮处理中, N_2 和 N_1 处理接收的光强无显著差别, N_0 处理间作玉米接收到的光强则显著比 N_2 和 N_1 处理高。

4.4 不同时期间作玉米和单作玉米的土壤表层温度比较

由图 4 可知,无论晴天还是阴天,在共生前期(图 4a),单作玉米的土壤表层温度都高于间作玉米带;在共生后期,如图 4b 所示,邻近小麦收获,单作玉米与间作玉米带之间的温度差距减少,小麦收获之后,间作玉米带的温度逐渐高于单作玉米。图 4c 中在间作玉米独立生长的时期,间作玉米带的温度高于单作玉米,且在晴天时两者之间温度的差距高于阴天。

实际测定结果显示,各施氮处理间作系统内,从

玉米播种 24~54 d 内,单作玉米的土壤表层温度平均每天比间作玉米高 $2.42\sim 2.63\text{ }^\circ\text{C}$,在玉米播种 54~72 d 内,单作玉米平均每天比间作玉米高 $1.51\sim 1.73\text{ }^\circ\text{C}$,在玉米播种 72~82 d 内,两者无明显差异,在玉米播种 82 d 一直到玉米收获,间作玉米的土壤温度比单作玉米平均每天高 $2.14\sim 2.37\text{ }^\circ\text{C}$ 。

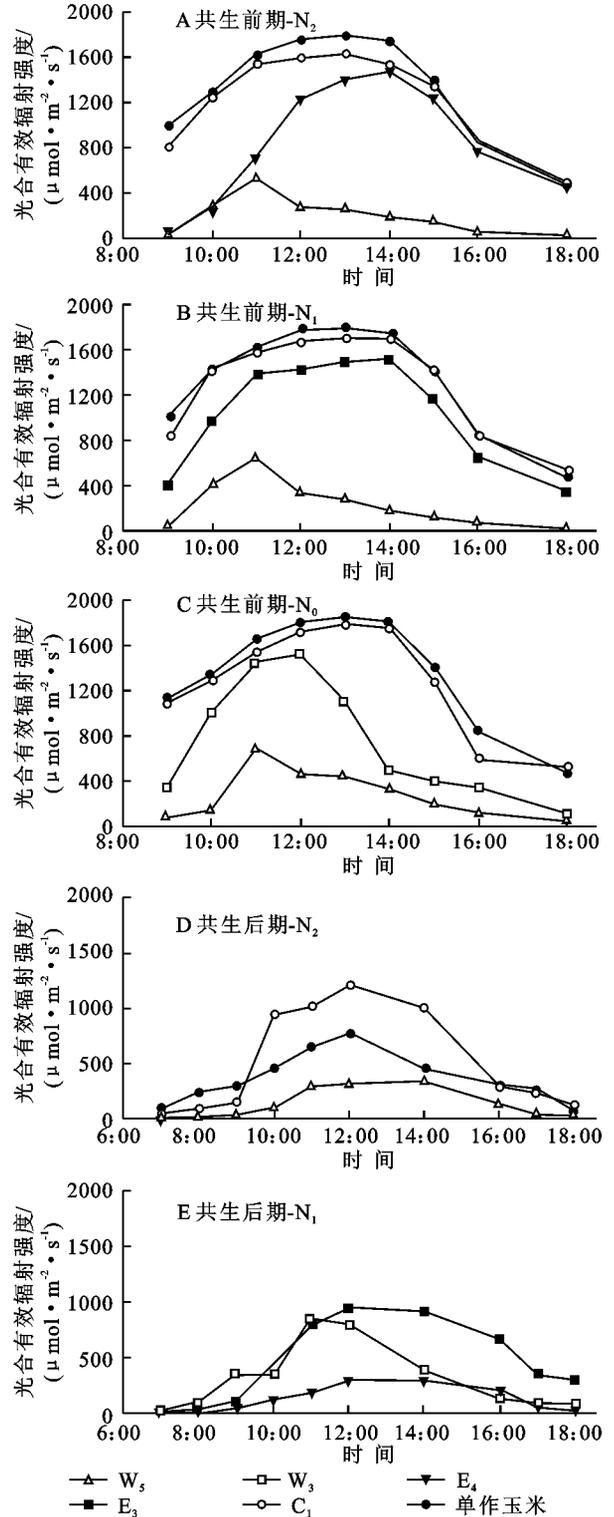


图 3 共生期间作系统各位点的光强日变化动态

4.5 不同时期各位点的土壤表层温度昼夜变化比较

土壤温度变化是土壤随着太阳辐射和大气温度

的变化而吸收或释放能量的过程。白天随着日总量不断增加,热量由作物层向土壤层传递,土层不断升高并达到最大值。夜间,作物层热量不断向外扩散,土层热量向表层释放,土温不断下降并达到最低值。图5中各点的土壤温度在不同生育时期均近似呈正弦函数变化,在8:00—9:00达到最低,15:00—16:00达到最高。然而不同时期土壤温度的昼夜变化存在差异。

图5a中土壤温度的昼夜变化幅度表现为单作玉米>间作玉米带C₁>间作小麦带W₅>单作小麦。单作玉米土壤温度白天和夜间都显著高于间作玉米带,平均高2.52℃;间作小麦带土壤温度白天和夜间都低于单作小麦,平均低0.45℃;表明间作玉米在这

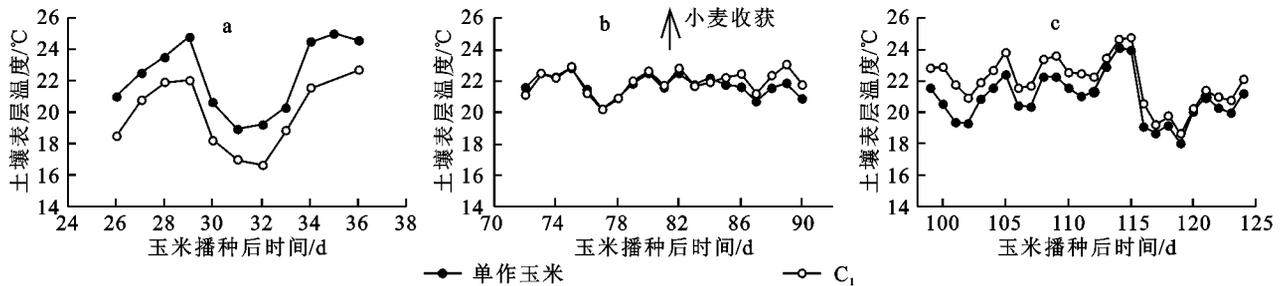


图4 玉米播种后不同时期单作玉米和间作玉米带的土壤表层温度比较(N₂间作系统)

图5b为间作体系内土壤温度在水平方向上的分布,可以看出土壤温度水平方向呈现不均一变化,边界带E₃白天的温度低于间作玉米带C₁,而高于间作小麦带W₅,夜间各点的温度表现一致,没有明显差异。

图5c中,该天是多云天气,可以看出各位点土壤温度的昼夜变化幅度均减小。该时期属于小麦成熟

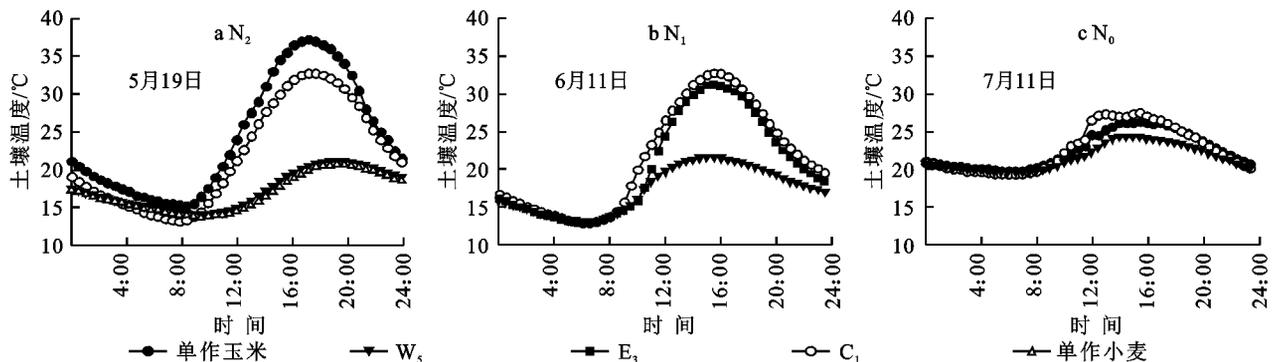


图5 不同时期不同位点土壤表层温度的昼夜变化动态

4.6 作物农艺性状比较

从表3可以看出,各施氮水平间作玉米的叶面积在任何生育期都显著低于单作玉米。其中苗期间作玉米的叶面积在N₂,N₁,N₀三种施氮水平分别比单作玉米下降39.5%,71.1%,64.5%,灌浆期分别下降1.8%,7.3%,27.1%;同时,收获期间作玉米的农艺性状比单作玉米也显著减少或降低。其中,N₂,N₁,N₀三种施氮水平间作玉米的株高比单作玉米分别减少17.4%,26.0%,47.2%;茎粗分别减少

一时期获得的热量减少,而间作小麦却获得了较多的热量。另外,白天最低温度出现在单作小麦,而夜间最低温度出现在间作玉米带。

表2 不同观测时期间作玉米带和单作玉米接收到的日平均光强对比 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

观测日期	处理	冠层上方	单作玉米	间作玉米带 C ₁
7月12日	N ₂		175.2a	232.1b
	N ₁	1055.4	173.1a	237.3b
	N ₀		177.1a	302.9a
8月13日	N ₂		71.5a	253.1b
	N ₁	870.8	73.0a	258.2b
	N ₀		76.1a	381.9a

注:同行不同小写字母表示处理间差异显著($p < 0.05$),下表同。

期,玉米大喇叭口期,间作玉米已摆脱了遮阴影响,玉米带C₁在白天10:00—18:00的土壤温度高于单作玉米。夜间三者没有明显差异。由图中也可以看出间作玉米带C₁的土壤温度日变化并没有表现出明显的峰值,这主要是因为在此生育时期,玉米植株高,茎秆粗壮,土壤温度受间作玉米茎秆的遮阴影响所致。

12.1%,4.2%,31.1%,穗位高分别降低11.5%,14.9%,64.0%。这表明间作条件下,玉米的营养生长受到强烈抑制。

相反,间作对小麦的生长具有促进作用。如表4所示,在小麦开花期,边行的株高和叶面积显著比内行和单作行高。其中,边一行较内行(边二行和边三行)株高增加1.1%~10.5%,叶面积增加16.3%~64.5%,较单作行株高增加0.6%~16.6%,叶面积增加9.4%~69.4%。

表 3 间作玉米和单作玉米在收获期的株高、茎粗、穗位高以及不同时期的单株叶面积

不同处理	株高/ cm	茎粗/ mm	穗位高/ cm	单株叶面积/cm ²				
				苗期(5月22日)	拔节期(6月28日)	灌浆期(8月2日)	成熟期(9月7日)	
N ₂	间作玉米	184b	20.7b	78b	43b	3644b	9161b	7125b
	单作玉米	216a	23.2a	87a	60a	4421a	9330a	7288a
N ₁	间作玉米	173b	21.3b	74b	45b	3174b	8602b	5675b
	单作玉米	218a	22.2a	85a	77a	3499a	9234a	8162a
N ₀	间作玉米	142b	16.7b	50b	31b	1169b	7332b	5776b
	单作玉米	209a	21.9a	82a	51a	2389a	9316a	7615a

表 4 间作小麦和单作小麦不同行在开花期的株高和单株叶面积的比较

不同处理	不同行位置	株高/cm	单株叶面积/cm ²
N ₂	边 1 行	68.9a	68.9a
	边 2 行	68.1a	58.8c
	边 3 行	63.8b	53.3d
	单作行	66.9a	63.0b
N ₁	边 1 行	66.1a	68.5a
	边 2 行	66.0a	59.1c
	边 3 行	64.8b	58.7c
	单作行	65.7a	62.1b
N ₀	边 1 行	56.1a	67.1a
	边 2 行	52.7b	41.4b
	边 3 行	49.0c	40.2b
	单作行	48.1c	39.6b

5 结论与讨论

水肥条件会改变作物的冠层发育动态和冠层结构,进而影响作物对光能的截获和利用^[19]。本研究中,在共生期,不施氮处理比施氮处理透光率高,这主要是因为不施氮处理植株生长矮小(表 3,4),光的截获能力弱。这与高阳等^[19]在玉米大豆间作中的研究结果一致。

土壤温度反映了地表面热量收支状况。在共生前期,图 5a 中,间作玉米带的夜间温度最低,主要是因为间作玉米尚处于苗期,植株矮小,土壤在夜间没有很好的遮挡,直接同大气接触,大量散发热量,使得温度下降剧烈。同样地,Zhang 等^[20]在小麦棉花套作研究中也得出了共生期棉花带夜间温度较低的结论。

通过本文可明显看出间作过程中小麦获得较多的光能和热量,对小麦的生长具有促进作用,且这种生长优势又因为光照和温度的空间分布表现出明显的边际效应,这与前人^[21-22]的研究结果一致。但是间

作模式中玉米处于劣势地位。由试验结果可以看出,共生前期小麦对玉米的遮光严重,到了共生后期,遮光逐渐减轻,尤其小麦收获之后,间作玉米的光温条件变得更好,但是尽管生长后期土壤温度的升高有促进玉米早熟的作用^[23],共生期长时间的低热量胁迫和弱光胁迫还是显著抑制了玉米的营养生长。玉米是喜光作物,光饱和点高^[24]。玉米幼苗期的最适温度为 20~24℃,在适宜温度范围内温度升高,生长加快^[14]。在玉米苗期过低的温度和过少的光照抑制了玉米的生长,导致生育期叶面积显著下降(表 3),这对玉米的光合作用以及干物质积累产生很大影响。

前人已经报道了华北地区冬小麦春玉米间作中玉米受到荫蔽影响的情况^[13-14],但是冬小麦春玉米间作由于共生期相对较短(30~45 d),田间热状况优于春小麦/春玉米间作,谭力军等^[25]研究表明冬小麦春玉米间作中,共生期间作玉米的土壤温度比单作玉米低,但最大不超过 1.3℃。本文中小麦对玉米的遮阴严重,共处期长达 84 d,其中共生前期平均每天温度降低了 2.42~2.63℃。

为最大程度发挥春小麦/春玉米间作种植潜力,可培育高光效玉米品种,增强在弱光环境下的适应能力,并结合各种农艺措施,在共生期采取起垄种植,覆膜等方式,改善光照和热量环境。因此,有待进一步研究不同措施、不同品种间作模式光热资源的捕获利用及调控机理,探讨作物对环境的适应与反馈的生理生化机制。

参考文献:

- [1] 郑丕尧. 作物生理学导论 [M]. 北京:北京农业大学出版社,1992:233-263.
- [2] Sinoquet H, Thanisawanyangkura S, Mabrouk H, et al. Characterization of the light environment in canopies using 3D digitising and image processing [J]. Annals of Botany, 1998, 82(2): 203-212.
- [3] Vesala T, Markkanen T, Palva L, et al. Effect of vari-

- ations of PAR on CO₂ exchange estimation for Scots pine [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 100(4):337-347.
- [4] Choudhury B J. Modeling radiation-and carbon-use efficiencies of maize, sorghum, and rice [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 106(4):317-330.
- [5] Kim S H, Gitz D C, Sicher R C, et al. Temperature dependence of growth, development, and photosynthesis in maize under elevated CO₂ [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, 61(3):224-236.
- [6] Cookson W R, Cornforth I S, Rowarth J S. Winter soil temperature (2-15°C) effects on nitrogen transformations in clover green manure amended or unamended soils: A laboratory and field study [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(10):1401-1415.
- [7] Andersson S, Nilsson S I. Influence of pH and temperature on microbial activity, substrate availability of soil-solution bacteria and leaching of dissolved organic carbon in a mor humus [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(9):1181-1191.
- [8] Bekku Y S, Nakatsubo T, Kume A, et al. Effect of warming on the temperature dependence of soil respiration rate in arctic, temperate and tropical soils [J]. *Applied Soil Ecology*, 2003, 22(3):205-210.
- [9] 李琳, 张海林, 陈阜, 等. 不同耕作措施下冬小麦生长季农田二氧化碳排放通量及其与土壤温度的关系 [J]. *应用生态学报*, 2007, 18(12):2765-2770.
- [10] Li L, Li S M, Sun J H, et al. Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104(27):11192-11196.
- [11] 周海燕, 柴强, 黄高宝, 等. 绿洲灌区典型间作模式的产量和光能利用效率 [J]. *甘肃农业大学学报*, 2012, 47(6):68-73.
- [12] 林文. 作物复合群体结构与高产光合生理生态研究概况 [J]. *福建稻麦科技*, 2003, 21(4):7-10.
- [13] 高阳, 段爱旺. 冬小麦—春玉米间作模式下光合有效辐射特性研究 [J]. *中国生态农业学报*, 2006, 14(4):115-118.
- [14] 张保民, 张黎黎. 麦田套种对玉米环境因子及生长发育影响的研究 [J]. *山东农业大学学报:自然科学版*, 2008, 39(4):495-500.
- [15] 高阳, 段爱旺. 冬小麦间作春玉米土壤温度变化特征试验研究 [J]. *中国农村水利水电*, 2006(1):1-3.
- [16] Knörzner H, Grözinger H, Graeff-Hönninger S, et al. Integrating a simple shading algorithm into CERES-wheat and CERES-maize with particular regard to a changing microclimate within a relay-intercropping system [J]. *Field Crops Research*, 2011, 121(2):274-285.
- [17] 郑亭. 株行配置对麦/玉套作复合群体质量及田间小气候的影响 [D]. 四川雅安:四川农业大学, 2013.
- [18] 金绍龄, 李隆, 张丽慧. 小麦/玉米带田作物氮营养特点 [J]. *西北农业大学学报*, 1996, 24(5):35-41.
- [19] 高阳, 申孝军, 杨林林, 等. 不同水氮处理对玉米/大豆间作群体内作物光能截获、竞争和利用的影响 [J]. *生态学报*, 2015, 35(3):1-11.
- [20] Zhang L, Vanderwerf W, Zhang S, et al. Temperature-mediated developmental delay may limit yield of cotton in relay intercrops with wheat [J]. *Field Crops Research*, 2008, 106(3):258-268.
- [21] 逢焕成, 宋吉作, 刘光亮. 小麦玉米套种共生期的气候生态效应与小麦边际效应分析 [J]. *耕作与栽培*, 1994(4):15-16.
- [22] Zhang L, Van der Werf W, Bastiaans L, et al. Light interception and utilization in relay intercrops of wheat and cotton [J]. *Field Crops Research*, 2008, 107(1):29-42.
- [23] 赵延魁, 王玉凤, 阎春风, 等. 玉米小麦间套作对光热资源利用效率的研究 [J]. *辽宁农业科学*, 1994(1):11-14.
- [24] 贾士芳, 董树亭, 王空军, 等. 玉米花粒期不同阶段遮光对籽粒品质的影响 [J]. *作物学报*, 2007, 33(12):1960-1967.
- [25] 谭立军, 李萍萍, 卞新民, 等. 小麦春玉米套作共生期间种间互作效应的微气候学研究 [J]. *江苏农业学报*, 1996(3):51-53.