

施氮量对新疆滴灌冬小麦冠层结构及其小气候特征的影响

雷钧杰^{1,2,3} 张永强^{2,3} 陈兴武^{2,3} 赛力汗·赛^{1,2,3} 薛丽华^{2,3} 范贵强² 王志敏^{1*}

(1. 中国农业大学 农学院,北京 100193;

2. 新疆农业科学院 粮食作物研究所,乌鲁木齐 830091;

3. 农业部荒漠绿洲作物生理生态与耕作重点实验室,乌鲁木齐 830091)

摘要 为明确不同施氮量对新疆冬小麦冠层结构特征及其群体内部光、温变化的影响,于2013—2015年连续2个冬小麦生长周期,在大田滴灌条件下,采用单因素随机区组试验设计,共设置了0(N₀),94.5(N₁),180(N₂),240(N₃),300(N₄)和360 kg/hm²(N₅)6个施氮肥处理,研究了施氮量对冬小麦茎型特征,叶垂直分布及其形态特征,冠层光、温变化规律的影响。结果表明:与N₀处理相比,增施氮肥冬小麦叶片的长、宽及叶片总面积均显著增加。随着施氮量的增加,各叶层LAI、各节间长度和节间粗度均呈“先增后减”的趋势,株高变幅为71.83~85.88 cm(2014年)和70.56~85.18 cm(2015年);冠层中、下部的透光率和冠层温度均呈“先降后增”的趋势。各处理冠层温度日变化呈“凸”型曲线,均在15:00左右达到峰值,其值以N₃处理最低。2年试验产量均以N₃处理最高,为8 653.22(2013年)和8 415.20 kg/hm²(2014年),分别较同年N₀、N₁、N₂、N₄和N₅处理增产68.01%、32.39%、17.92%、5.34%、10.69%和67.39%、30.81%、19.31%、4.20%、11.49%。本试验条件下,施氮量控制在240 kg/hm²左右,滴灌冬小麦叶型、株型特征良好,冠层光、温适宜,有利于获得高产。

关键词 滴灌;冬小麦;施氮量;冠层结构;小气候

中图分类号 S512.1; S311

文章编号 1007-4333(2017)10-0001-14

文献标志码 A

Effects of nitrogen fertilizer rate on canopy structure and microclimate characteristics of drip-irrigated winter wheat in Xinjiang

LEI Junjie^{1,2,3}, ZHANG Yongqiang^{2,3}, CHEN Xingwu^{2,3}, SAILIHAN Sai^{1,2,3},
XUE Lihua^{2,3}, FAN Guiqiang², WANG Zhimin^{1*}

(1. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Research Institute of Grain Crops, Xinjiang Academy of Agricultural Science, Urumqi 830091, China;

3. Key Laboratory of Desert-Oasis Crop Physiology, Ecology and Cultivation, Ministry of Agriculture, Urumqi 830091, China)

Abstract Experiment was carried out to investigate effects of nitrogen fertilizer rate on canopy structure and dynamics of light and temperature within crop canopy of drip-irrigated winter wheat from 2013 to 2015 in Xinjiang. Six rates of nitrogen application, i. e. 0 (N₀), 94.5 (N₁), 180 (N₂), 240 (N₃), 300 (N₄) and 360 kg/hm² (N₅), were arranged in a randomized block experimental design. Stem morphological characters, the vertical distribution of leaf, canopy temperature variation, and light transmittance during wheat flowering stage were measured in different treatments. The results showed that, compared to N₀, nitrogen fertilizer increased the leaf length and width of winter wheat, especially for total leaf area. With the increase in nitrogen fertilizer rate, leaf area index in different canopy height, the internode length and the stem diameter increased at first and decreased afterwards. Plant height ranged from 71.83 cm to 85.88 cm in 2014 and 70.56 cm to 85.18 cm in 2015, respectively. The light transmittance of the middle and lower canopy as well

收稿日期: 2016-09-28

基金项目: 自治区公益性科研院所基本科研业务经费资助项目(KY2015002; KY2013058); 新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目(2014211A028); 自治区重点研发计划项目(2016B01002-3); 国家自然科学基金项目(31660370); 国家小麦产业技术体系(CARS-3)

第一作者: 雷钧杰, 研究员, 主要从事小麦高产栽培生理研究, E-mail: leijunjie@sohu.com

通讯作者: 王志敏, 教授, 主要从事小麦高产栽培生理研究, E-mail: zhimin206@263.net

as canopy temperature decreased at first and increased later. Diurnal variation of canopy temperature in both middle and lower canopy shown the curve of convex type, the maximum occurred at 15:00, the minimum value in N_3 . In this study, the highest yield was measured in N_3 in the two seasons, i. e. 8 653.22 kg/hm² in 2014 and 8 415.20 kg/hm² in 2015, which was increased by 68.01%, 32.39%, 17.92%, 5.34%, 10.69% with comparison to N_0 , N_1 , N_2 , N_4 and N_5 in the first season, and by 67.39%, 30.81%, 19.31%, 4.20%, 11.49% in the second season, respectively. The results indicated that nitrogen application rate of 240 kg/hm², which had optimum morphology of wheat leaf and plant, appropriate microclimate of temperature and light within wheat canopy and the highest yield, could be recommended as the optimum rate for winter wheat production with drip irrigation in Xinjiang.

Keywords drip irrigation; winter wheat; nitrogen fertilizer rate; canopy structure; microclimate

小麦是新疆的主要粮食作物,其生产对保证地区粮食安全至关重要,但新疆地处西北内陆,干旱缺水,农业生产“以水定地”种植,是典型的灌溉农业,水资源匮乏是制约该区域农业发展的主要因素,因此发展节水灌溉是新疆农业发展的必由之路^[1]。近年来,随着滴灌技术在小麦等作物上的推广应用,滴灌小麦栽培面积不断扩大^[2]。滴灌作为一种先进的高效节水灌溉技术,不仅可根据作物需水规律,将水分精准输送到作物根部,而且还可以将肥溶于水直接输送到作物的根部,大大提高了肥料利用效率^[3]。滴灌施肥虽然可以显著提高作物产量和化肥利用率^[4],但与之相匹配的施肥措施还不完善,增产机理及提高肥效机制尚不清楚,如何应用滴灌技术进行科学施肥,把施肥技术与节水灌溉技术结合起来,实现滴灌小麦水肥一体化栽培,从而提高养分与水分利用效率和土地产出率,是目前发展滴灌小麦亟待解决的问题之一^[5]。

氮素是影响作物生长发育的重要元素,其对作物农艺性状及群体结构存在影响,前人研究表明,在一定施氮范围内,作物群体结构、分蘖数、光合速率、水分利用效率和产量等因子均随氮素施用量的增加而提高或改善,但是当氮素施用量超过一定量时,反而不利于群体结构和植株功能的改善,因此,合理施用氮素对作物的生长发育、产量与品质建成均具有重要作用^[6-7]。目前,有关氮素对小麦的影响,前人已做出大量研究,涉及施氮量不同基追比^[8]、追氮时期^[9]及施肥频率^[10]对小麦干物质积累、产量、氮肥利用率及氮平衡^[11-12]、氮素吸收转运^[13]、籽粒灌浆特性、光合特性和产量的影响^[14]。众多研究表明,良好的冠层结构对产量的形成意义重大,且可通过采用合理的栽培技术有效地改善冠层光分布,进而改善冠层局部小气候,从而提高作物群体光合速率,最终增加作物产量^[15-17]。但基于绿洲灌溉农业区滴灌条件下,关于氮素对小麦冠层结构及小气候的影

响鲜有研究。

因此,本研究以新疆滴灌冬小麦为研究对象,通过设置不同的施氮量,研究施氮量对冬小麦开花期茎型特征,叶垂直分布及其形态特征,冠层光、温变化规律的影响,以期为新疆冬小麦滴灌“水-肥”一体化技术应用中如何合理施用氮肥提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

田间试验于2013—2015年在新疆农业科学院玛纳斯农业试验站(N44°18', E86°13')进行。玛纳斯农业试验站属暖温带大陆性干旱半干旱气候区,年均日照时数2 700~2 800 h,年均气温7.2℃,年均降雨量205 mm,蒸发量1 691 mm,极端最高气温39.6℃,极端最低气温-37.4℃,全年无霜期165~172 d。试验地土壤为沙壤土,前茬为大豆,播前0~20 cm土壤有机质含量为16.8 g/kg,碱解氮为62.3 mg/kg,速效磷为14.5 mg/kg和速效钾为164 mg/kg。

1.2 试验设计

采用单因素随机区组试验设计,在大田滴灌条件下,设置了0(N_0),94.5(N_1),180(N_2),240(N_3),300(N_4)和360 kg/hm²(N_5)共6个施氮肥处理,每个处理重复3次,各处理施肥方案见表1。小区面积48 m²,隔离带60 cm。前茬为大豆。整地3~4遍,在整地前施基肥。耙深8 cm左右。采用合墒播种,播种期为2013年10月1日和2014年9月28日。播种量270 kg/hm²(播种密度675万株/hm²)。播前结合翻地,基施氮肥采用尿素折算成纯氮94.5 kg/hm²,磷肥采用重过磷酸钙折算成P₂O₅ 172.5 kg/hm²,钾肥采用硫酸钾折算成K₂O 52.5 kg/hm²。在冬小麦开花期、灌浆前期和灌浆中期,结合滴灌每次滴施磷酸二氢钾(98%)22.5 kg/hm²。全生育期灌水8次,具体滴灌时期及滴灌量见表2。

表 1 滴灌小麦不同施氮肥总量及不同时期追氮量(纯氮)

Table 1 Total amount of nitrogen application and topdressing nitrogen application rate in different growth stages of winter wheat under drip irrigation (Pure nitrogen)

处理 Treatment	基肥/ (kg/hm ²) Base fertilizers	冬后 追肥量/ (kg/hm ²) Topdressing after winter	冬后追肥时期及比例/% Topdressing period and fertilizer proportion after winter					总施氮量/ (kg/hm ²) Total applied nitrogen amount
			起身期 Upstanding stage	拔节期 Jointing stage	孕穗期 Booting stage	抽穗期 Heading stage	开花期 Flowering stage	
			N ₀	0	0	0	0	
N ₁	94.5	0	0	0	0	0	0	94.5
N ₂	94.5	85.5	0	60	0	40	0	180
N ₃	94.5	145.5	20	40	20	0	20	240
N ₄	94.5	205.5	20	40	20	20	0	300
N ₅	94.5	265.5	20	40	20	0	20	360

表 2 不同滴灌时期滴灌量

Table 2 Amounts of drip irrigation in different stages

m³/hm²

冬前灌水量 Amounts of irrigation before winter	春季灌水总量 Amounts of irrigation in spring	起身期 Upstanding stage	拔节期 Jointing stage	孕穗期 Booting stage	抽穗期 Heading stage	开花期 Flowering stage	灌浆期前期 Early stage of filling	灌浆期中期 Middle stage of filling
900	3 750	375	750	937.5	375	562.5	375	375

1.3 测试项目与方法

1.3.1 小麦群体动态调查

基本苗、冬前总茎数、返青总茎数、起身期总茎数(春季最大总茎数)和收获穗数。

1.3.2 植株叶片形态测定

在小麦冬前、拔节期、孕穗期、开花期、花后 10 d,花后 20 d 和花后 30 d 取样,各试验小区在滴灌带同侧第一行和第二行各选取具有代表性的 50 cm 长植株样段带回室内,从带侧第一行、第二行各选取生长一致的 10 个单茎,用直尺测量每个单茎的旗叶、倒二叶、倒三叶和倒四叶叶长和叶宽。叶长即为叶基部到叶尖的距离,cm;叶宽即为叶片最宽处的宽度,cm。

1.3.3 叶面积及叶面积指数测定

根据 1.3.2 所测的叶片的长和宽,采用长宽系数法测定不同叶层的叶面积,系数取 0.82,计算公式如下:

$$\text{叶面积} = \text{叶长} \times \text{叶宽} \times 0.82 \quad (1)$$

$$\text{各叶层 LAI} = \text{单茎各层叶面积} \times \text{每公顷茎数} / 10 \quad (2)$$

1.3.4 植株茎节形态测定

在测定小麦叶片形态的同时测定小麦的株高、穗长和各节间的长度。用游标卡尺测定不同节间茎粗,从穗下节开始,依次为倒一节间(J₁),倒二节间(J₂)、倒三节间(J₃)、倒四节间(J₄)和倒五节间(J₅)。

1.3.5 冠层光分布测定

在冬小麦孕穗期、开花期及花后 10 和 20 d,选择晴朗无风的天气于 11:00—13:00,利用 ACCUPAR LP-80(美国产)冠层分析仪测定不同冠层光合有效辐射量,小麦植株顶部自然光强(I₀),按照距地面 2/3 株高处为中层(光照强度记为 I₁),距地面 1/3 株高处为下层(光照强度记为 I₂);并用探头测定小麦群体旗叶、倒二叶、倒三叶和倒四叶各叶层的光照强度,用 I_r 表示某一叶层光强,各层透光率计算公式如下:

$$\text{中层透光率} = I_1/I_0 \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{下层透光率} = I_2/I_0 \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{不同叶层透光率 } T = I_r/I_0 \times 100\% \quad (5)$$

1.3.6 冠层温度测定

在冬小麦开花期,于 9:00—21:00 使用 MicroLite5032P 温度记录仪(以色列产)测定不同处理冬小麦群体距地面 2/3 株高处的空气温度,距地面 1/3 株高处的空气温度,每 2 h 测定 1 次。另于 11:00—13:00 用 KS4000 手持气象站(美国产)测定冬小麦群体旗叶、倒二叶、倒三叶和倒四叶各叶层的空气温度。

1.3.7 测产与考种

在小麦成熟期,分别从各小区选取具有代表性的样点 4 m² (2 m×2 m),实收测产。同时每小区选取 20 株,用于调查单株生物重、穗粒数和千粒重。

收获指数 = 样段籽粒产量,

$$\text{kg/hm}^2/\text{样段总生物量,kg/hm}^2 \quad (6)$$

$$\text{氮肥农学效率,kg/kg} = (\text{施肥作物经济产量} - \text{不施肥作物经济产量})/\text{肥料投入量} \quad (7)$$

1.4 数据分析及处理方法

采用 Microsoft Excel 作图,用 DPS 7.05 软件进行统计及相关分析,采用 LSD 法测验显著性。

2 结果与分析

2.1 滴灌冬小麦产量及产量构成因素

由表 3 可知,与不施氮的处理相比,施用氮肥处理能显著增加滴灌冬小麦产量,但不同处理间,随着施氮量的增加,2 年籽粒产量均表现“先增后降”的变化趋势,且均以 N₃ 处理产量最高,为 8 653.22 kg/hm² (2014 年)和 8 415.20 kg/hm² (2015 年),分别较同年 N₀、N₁、N₂、N₄ 和 N₅ 处理增产 68.01%、32.39%、17.92%、5.34%、10.69% 和 67.39%、

表 3 不同处理对冬小麦产量、产量构成因素的影响

Table 3 Effects of the yield and yield components of winter wheat in different treatment

年份 Year	处理 Treatment	穗数/ (×10 ⁴ /hm ²) Spike number	穗粒数 Grains per spike (grain)	千粒重/g 1 000-grain weight	产量/ (kg/hm ²) Yield	生物量/ (kg/hm ²) Total biomass	收获指数 Harvest number	氮肥农学 利用效率/ (kg/kg) N partial factor productivity
2014	N ₀	492.23 bA	24.54 eB	42.42 cB	5 150.30 fE	16 063.11 dC	0.31 eC	
	N ₁	512.26 abA	28.57 dA	44.44 bcAB	6 536.01 eD	18 901.83 cB	0.34 dBC	14.66 aA
	N ₂	515.65 abA	30.43 cA	46.51 abAB	7 338.39 dC	20 255.94 cAB	0.35 cB	12.16 bB
	N ₃	531.04 aA	33.80 aA	47.97 aA	8 653.22 aA	21 778.84 aA	0.38 aA	14.60 aA
	N ₄	528.43 aA	33.26 abA	46.53 abAB	8 214.25 bAB	21 345.64 abA	0.37 bB	10.21 cC
	N ₅	523.89 aA	32.19 bA	46.13 abAB	7 817.60 cBC	20 630.85 bAB	0.36 bB	7.41 dD
2015	N ₀	486.89 bA	24.30 eB	42.28 cB	5 027.24 eE	16 605.13 dC	0.30 dB	
	N ₁	508.21 abA	28.86 dA	43.64 bcAB	6 433.25 dD	19 017.59 cB	0.32 dA	14.88 aA
	N ₂	511.43 abA	30.17 cdA	45.48 abAB	7 053.20 cCD	19 973.72 cAB	0.34 cA	11.26 bB
	N ₃	529.64 aA	33.42 aA	47.31 aA	8 415.20 aA	22 563.22 aA	0.37 aA	14.12 aA
	N ₄	526.51 aA	32.89 abA	46.40 aAB	8 075.92 aAB	22 090.49 abA	0.36 aA	10.16 cC
	N ₅	520.45 aA	31.48 bcA	45.84 abAB	7 547.88 bBC	21 188.61 bAB	0.35 bcA	7.00 dD

注:大小写字母分别表示差异达到 0.01 和 0.05 显著水平,下同。

Note: The capital and lowercase letters indicate significant difference at 0.01 and 0.05 level, respectively. The same as below.

30.81%、19.31%、4.20%、11.49%，除与 2015 年 N_4 处理间差异不显著外，与其他处理间差异均达显著 ($P < 0.05$) 和极显著 ($P < 0.01$)。不同处理间穗数呈“先增后降”的变化趋势，2 年试验均以 N_3 处理最高分别为 531.04 (2014 年) 和 529.64 万穗/hm² (2015 年)，其与 N_1 、 N_2 、 N_4 和 N_5 处理间差异不显著，但与 N_0 处理间差异达显著 ($P < 0.05$)；而 N_1 、 N_2 处理与 N_0 处理间亦未达到显著。穗粒数处理间差异明显，表现为： $N_3 > N_4 > N_5 > N_2 > N_1 > N_0$ ， N_3 、 N_4 处理间差异不显著，但 N_3 显著高于 N_0 、 N_1 、 N_2 和 N_5 处理 ($P < 0.05$)。千粒重与穗粒数、产量的变化趋势一致，且最大值均出现在 N_3 处理，分别为 47.97 g (2014 年) 和 47.31 g (2015 年)。地上部分生物量与籽粒产量的变化规律一致，亦呈“先增后降”的变化趋势；收获指数随着施氮量的增加基本呈“先升后降”的变化规律，且在 N_3 处理达到最大，为 0.38 (2014 年) 和 0.37 (2015 年)；氮肥农学利用效率具体表现为： $N_1 > N_3 > N_2 > N_4 > N_5$ ，2 年试验变化规律一致。

2.2 冠层结构垂直变化

2.2.1 叶片特征差异

叶片是植物进行光合作用的主要器官，叶片的大小和空间分布不仅受遗传因子的限制，也受栽培条件的影响。叶片形态特征和面积在冠层的分布是衡量群体结构是否合理的重要指标。由表 4 可以看出，2 年试验数据均表明，适量增施氮肥能有效促进冬小麦叶片长和宽的增加，显著提高冬小麦的总叶面积；随着叶片层次的降低，滴灌冬小麦单叶面积呈下降趋势，表现为：旗叶 > 倒二叶 > 倒三叶 > 倒四叶。各处理间，随着施氮量的增加，同一叶层的叶面积表现出“先增后减”的变化规律，2 年试验均在 N_3 处理达到最大， N_0 处理最低；单茎总叶面积表现为： $N_3 > N_4 > N_5 > N_2 > N_1 > N_0$ ， N_3 处理最高为 80.66 cm² (2014 年) 和 85.78 cm² (2015 年)，分别较同年 N_0 、 N_1 、 N_2 、 N_4 、 N_5 处理高出 37.83%、29.67%、17.85%、3.06%、15.51% 和 37.71%、27.50%、16.23%、4.87%、14.24%，除与 N_4 处理差异不显著外，与其他各处理差异均达到了极显著 ($P < 0.01$)。可见施氮量对滴灌冬小麦叶片的形态特征影响显著，适量增施氮肥可以有效扩大单叶叶面积，提高光合有效面积，进而可以提高小麦产量。

2.2.2 叶面指数变化

叶面积指数 (LAI) 是反映小麦群体结构的重要

指标之一。由表 5 可以看出，滴灌冬小麦随着叶片层次的降低，各叶层 LAI 变化规律为：旗叶 > 倒二叶 > 倒三叶 > 倒四叶。2 年试验数据均表明，处理间随着施氮量的增加，各叶层 LAI 均表现为： $N_3 > N_4 > N_5 > N_2 > N_1 > N_0$ 的变化规律。不同处理开花期滴灌冬小麦的总 LAI 随着施氮量的增加呈“先增后降”的变化规律，2 年试验均在 N_3 处理达到最高，分别为 4.60 (2014 年) 和 4.89 (2015 年)，分别较同年 N_0 、 N_1 、 N_2 、 N_4 、 N_5 处理提高了 37.72%、29.58%、17.95%、3.14%、15.58% 和 37.75%、27.68%、16.15%、4.94%、14.25%，除与 N_4 处理差异不显著外， N_3 处理与其他各处理均达到了极显著差异水平 ($P < 0.01$)。综合分析可知，在一定范围内增施氮肥可以有效提高不同叶层的 LAI，但施氮量过高，各层次 LAI 和总 LAI 不增反降。

2.3 茎型特征差异

2.3.1 株高与节间长度变化

小麦的株高由节间和节组成，而株高的差异主要取决于节间长度的差异。由表 6 可以看出，2 年试验数据均表明，随着节层层次的降低，滴灌冬小麦各节节间长度 (J) 均呈依次降低的变化趋势，具体为： $J_1 > J_2 > J_3 > J_4 > J_5$ 。随着施氮量的增加，各处理节层节间长度和株高均逐渐增加，处理间株高变幅为 71.83~85.88 cm (2014 年) 和 70.56~85.18 cm (2015 年)；穗长随着施氮量的增加呈现“先增后降”的变化趋势，且 2 年试验均以 N_3 处理最长，分别为 7.50 cm (2014 年) 和 7.40 cm (2015 年)，其中 2013 年 N_3 处理与 N_0 、 N_1 处理间呈极显著差异水平 ($P < 0.01$)，与 N_2 处理呈显著差异水平 ($P < 0.05$)；2015 年 N_3 处理与 N_0 、 N_1 处理间呈显著差异水平 ($P < 0.05$)，与其他处理间差异不显著。

2.3.2 茎节粗度

施氮量对滴灌冬小麦的茎节粗度也有一定的影响，由表 7 可知，2 年试验数据表明，随着施氮量的增加，滴灌冬小麦开花期各茎节粗度呈“先增后降”的变化趋势，且均以 N_3 处理最粗，以倒三节茎粗度为例，分别为 0.218 cm (2014 年) 和 0.213 cm (2015 年)； N_0 处理最细，分别为 0.188 cm (2014 年) 和 0.185 cm (2015 年)。表明适宜增施氮肥可以增加滴灌冬小麦茎节粗度，有利于提高抗倒伏能力。同一施氮量条件下，随着冬小麦节位自上而下的下降，茎节粗度以倒三节节间最粗，倒一节间最细，二者相差波动范围在 0.037~0.055 cm。

表4 不同处理滴灌冬小麦开花期叶片形态比较
Table 4 Leaf configuration of individual plant at anthesis of winter wheat under drip irrigation in different treatments

年份 Year	处理 Treatment	旗叶 Flag leaf			倒二叶 2 nd from flag			倒三叶 3 rd from flag			倒四叶 4 th from flag			总叶面积/ cm ² Total leaf area
		长/cm Length	宽/cm Width	面积/cm ² Area	长/cm Length	宽/cm Width	面积/cm ² Area	长/cm Length	宽/cm Width	面积/cm ² Area	长/cm Length	宽/cm Width	面积/cm ² Area	
2014	N ₀	19.40 bC	1.20 eB	19.09 dD	19.10 cB	1.00 cB	15.66 cC	18.60 bB	0.90 cC	13.73 cC	17.50 dC	0.70 bB	10.05 dC	58.52 dC
	N ₁	20.20 bBC	1.30 bAB	21.53 cC	19.50 cB	1.00 cB	15.99 cC	18.90 bB	0.90 cC	13.95 cC	18.70 eBC	0.70 bB	10.73 cBC	62.21 cC
	N ₂	20.80 bBC	1.30 bAB	22.17 cC	20.70 bAB	1.10 bA	18.67 bB	19.80 bAB	1.00 bB	16.24 bB	19.80 bA	0.70 bB	11.37 bB	68.45 bB
	N ₃	22.90 aA	1.40 aA	26.29 aA	21.90 aA	1.20 aA	21.55 aA	20.90 aA	1.10 aA	18.85 aA	21.30 aA	0.80 aA	13.97 aA	80.66 aA
	N ₄	22.20 aAB	1.40 aA	25.49 aAB	21.70 aA	1.20 aA	21.35 aA	20.30 aAB	1.10 aA	18.31 aA	20.00 bA	0.80 aA	13.12 aA	78.27 aA
2015	N ₀	22.00 aAB	1.30 bAB	23.45 bBC	20.80 bAB	1.10 bA	18.76 bB	20.10 aAB	1.00 bB	16.48 bB	19.40 bcAB	0.70 bB	11.14 bB	69.83 bB
	N ₁	20.10 cB	1.30 cB	21.43 dC	19.70 dB	1.00 cB	16.15 dD	18.70 cC	0.90 cC	13.80 cC	19.00 bA	0.70 cC	10.91 cC	62.29 dC
	N ₂	20.50 cB	1.30 cB	21.85 dC	20.40 cB	1.10 bA	18.40 cC	19.20 cC	0.90 cC	14.17 cC	19.60 bA	0.80 bB	12.86 bB	67.28 cC
	N ₃	21.80 bAB	1.40 bAB	25.03 cB	21.20 bAB	1.10 bA	19.12 bB	20.40 bB	1.00 bB	16.73 bB	19.70 aA	0.80 bB	12.92 bB	73.80 cB
	N ₄	23.70 aA	1.50 aA	29.15 aA	22.30 aA	1.20 aA	21.94 aA	21.60 aA	1.10 aA	19.48 aA	20.60 aA	0.90 aA	15.20 aA	85.78 aA
2015	N ₁	22.50 bA	1.50 aA	27.68 bA	22.10 aA	1.20 aA	21.75 aA	21.30 aA	1.00 bB	17.47 bB	20.20 aA	0.90 aA	14.91 aA	81.80 bAB
	N ₂	22.00 bA	1.40 bAB	25.26 cAB	21.70 bAB	1.10 bA	19.57 bB	20.90 bAB	1.00 bB	17.14 bB	20.00 aA	0.80 bB	13.12 bB	75.09 cB

表 5 不同处理滴灌冬小麦开花期叶面积指数垂直分布
Table 5 Leaf configuration of individual plant at anthesis of
winter wheat under drip irrigation in different treatments

年份 Year	处理 Treatment	旗叶 Flag leaf	倒二叶 2 nd from flag	倒三叶 3 rd from flag	倒四叶 4 th from flag	总叶面积指数 Total leaf area index
2014	N ₀	1.09 dD	0.89 cC	0.78 cC	0.57 eC	3.34 dE
	N ₁	1.23 cC	0.91 cC	0.80 cC	0.61 dC	3.55 cDE
	N ₂	1.26 cC	1.06 bB	0.93 bB	0.65 cB	3.90 bCD
	N ₃	1.50 aA	1.23 aA	1.07 aA	0.80 aA	4.60 aA
	N ₄	1.45 aAB	1.22 aA	1.04 aA	0.75 bA	4.46 aAB
	N ₅	1.34 bBC	1.07 bB	0.94 bB	0.63 cdB	3.98 bBC
2015	N ₀	1.22 dD	0.92 dC	0.79 dC	0.62 cC	3.55 dD
	N ₁	1.25 dD	1.05 cB	0.81 dC	0.73 bB	3.83 cCD
	N ₂	1.43 cC	1.09 bcB	0.95 cB	0.74 bB	4.21 bBC
	N ₃	1.66 aA	1.25 aA	1.11 aA	0.87 aA	4.89 aA
	N ₄	1.58 bAB	1.24 aA	1.00 bB	0.85 aA	4.66 aAB
	N ₅	1.44 cBC	1.12 bB	0.98 bcB	0.75 bB	4.28 bBC

表 6 不同处理滴灌冬小麦开花期节间长度与株高构成指数

Table 6 Internode length and plant height component index at anthesis of
winter wheat under drip irrigation in different treatments

cm

年份 Year	处理 Treatment	株高 Plant height	穗长 Ear length	各节间长度 Internode length				
				J ₁	J ₂	J ₃	J ₄	J ₅
2014	N ₀	71.83 dC	6.60 bC	21.32 cC	17.43 cC	12.22 cC	9.56 cB	4.70 cC
	N ₁	76.97 cBC	6.70 bBC	23.70 bB	18.82 bABC	12.49 cBC	9.87 cB	5.40 bB
	N ₂	81.60 bAB	6.90 bABC	24.33 bAB	19.07 bABC	13.84 abA	11.48 bA	5.97 bA
	N ₃	83.42 aA	7.50 aA	25.58 aA	18.20 bBC	13.61 bAB	12.24 aA	6.30 aA
	N ₄	85.15 aA	7.40 aA	25.89 aA	19.37 aAB	13.93 aA	12.27 aA	6.30 aA
	N ₅	85.88 aA	7.30 aAB	26.08 aA	20.06 aA	14.41 aA	11.72 abA	6.31 aA
2015	N ₀	70.56 cC	6.70 bA	19.83 bC	17.49 bB	11.98 cC	9.46 dB	5.10 bB
	N ₁	73.20 cBC	6.90 bA	20.46 bC	18.20 bB	12.23 cBC	10.11 cB	5.30 bB
	N ₂	78.72 bAB	7.30 aA	21.29 bBC	19.47 aA	13.44 bAB	11.34 bA	5.88 aA
	N ₃	81.15 bA	7.40 aA	22.93 aAB	20.43 aA	13.08 bAB	11.37 bA	5.94 aA
	N ₄	83.08 aA	7.30 aA	23.45 aA	21.02aA	13.49 bA	11.79 aA	6.03 aA
	N ₅	85.18 aA	7.20 aA	23.68 aA	21.55 aA	14.61 aA	12.02 aA	6.12 aA

表7 不同处理滴灌冬小麦开花期茎粗特征

Table 7 Characteristics of stem diameter at anthesis of winter wheat under drip irrigation in different treatments

年份 Year	处理 Treatment	cm				
		倒一节茎粗 1 st stem Diameter	倒二节茎粗 2 nd stem diameter	倒三节茎粗 3 rd stem diameter	倒四节茎粗 4 th stem diameter	倒五节茎粗 5 th stem diameter
2014	N ₀	0.151 bB	0.154 bB	0.188 bB	0.148 dC	0.132 cB
	N ₁	0.154 bB	0.159 bAB	0.197 bB	0.159 cB	0.173 bA
	N ₂	0.164 aAB	0.164 aAB	0.209 aAB	0.167 bB	0.183 aA
	N ₃	0.167 aA	0.172 aA	0.218 aA	0.184 aA	0.190 aA
	N ₄	0.165 aA	0.168 aAB	0.214 aAB	0.168 bAB	0.181 aA
	N ₅	0.164 aAB	0.165 aAB	0.210 aAB	0.162 bcB	0.175 bA
2015	N ₀	0.145 bB	0.160 cB	0.185 cB	0.152 dB	0.135 eD
	N ₁	0.148 bAB	0.166 bcAB	0.198 bAB	0.158 cdB	0.145 dD
	N ₂	0.158 abAB	0.171 bAB	0.205 aA	0.166 abAB	0.159 cC
	N ₃	0.162 aA	0.181 aA	0.213 aA	0.174 aA	0.185 aA
	N ₄	0.159 abAB	0.177 aA	0.209 aA	0.171 aA	0.180 aAB
	N ₅	0.153 bAB	0.175 aAB	0.208 aA	0.165 bcAB	0.167 bBC

2.4 冠层透光率的差异

2.4.1 冠层不同层次透光率变化

冠层叶片形态和各层次 LAI 的差异构成滴灌冬小麦不同的冠层结构,小麦冠层的郁闭程度也将会影响冠层内部的光、温变化。由表 8 可知,2 年试验数据表明,随着施氮量的增加,滴灌冬小麦不同生育时期,在冠层垂直方向上,冠层中部和下部的透光率均呈“先增后降”,具体为: N₀ > N₁ > N₂ > N₅ > N₄ > N₃,且冠层中部的透光率明显高于下部,这主要是由于冠层中上部叶片遮光较大所致;同一施氮量条件下,随着生育进程的推进,中层和下层的透光率均呈增大趋势,且各处理均在花后 20 d 最高,孕穗期最低,中层透光率增幅在 6.51~9.19 个百分点,下层透光率增幅在 6.16~8.33 个百分点。这可能是由于随着生育进程的推进,小麦叶片逐渐衰亡,冠层郁闭程度降低,透光率增大。

2.4.2 冠层各叶位透光率变化

太阳光透射到小麦群体各叶层叶片的光照强度的变化,关系到各叶层叶片的光合作用,进而影响到小麦籽粒产量。由图 1 可以看出,不同施氮量条件下,滴灌冬小麦冠层透光率随着叶层层次的降低呈下降趋势,各处理均在旗叶达到最大。处理间,随着施

氮量的增加透光率呈“先降后升”,且不同叶层透光率均在 N₀ 处理达到最高, N₃ 处理达到最低,呈现出 N₀ > N₁ > N₂ > N₅ > N₄ > N₃。进一步对各处理不同叶层透光率累加并求其平均可得,各处理叶层平均透光率最高为 25.47% (N₀ 处理),较 N₁、N₂、N₃、N₄ 和 N₅ 处理分别提高了 1.05、2.45、4.35、3.95 和 3.42 个百分点。

2.5 冠层空气温度的差异

2.5.1 冠层空气温度日变化

小麦冠层空气温度的变化取决于其群体结构内部不同茎叶层透射太阳辐射的强弱,与冠层透光率密切相关。适宜的冠层空气温度能提高与光合作用相关酶的活性,进而能提高净光合速率,达到增产的目的。由图 2 可知,不同处理滴灌冬小麦冠层中部与下部的空气温度日变化趋势一致,基本均呈现出: N₀ > N₁ > N₂ > N₅ > N₄ > N₃,这与透光率的变化相似。进一步分析可知,各处理冠层空气温度均表现为早、晚较低,午后最高的单峰型抛物线,且各处理均在下午 15:00 左右达到峰值,以 N₀ 处理最高,分别为 34.51 和 32.00 °C,较同一层次 N₁、N₂、N₃、N₄ 和 N₅ 处理分别增高了 1.67%、2.13%、6.91%、4.72%、4.15% 和 2.24%、4.23%、5.61%、1.59%、1.27%,其与 N₃ 处理达到显著差异 (P < 0.05)。

表 8 不同处理滴灌冬小麦冠层透光率分布

Table 8 Canopy distribution of light transmission rate of winter wheat under drip irrigation in different treatments

层次 Canopy layer	处理 Treatment	透光率/% Light transmission rate			
		孕穗期 Booting	开花期 Anthesis	花后 10 d 10 d after anthesis	花后 20 d 20 d after anthesis
中层 Middle layer	N ₀	21.16 aA	23.41 aA	24.61 abA	30.35 aA
	N ₁	20.83 aA	23.04 aAB	24.91 aA	28.75 bAB
	N ₂	18.75 bB	22.53 aAB	23.48 bAB	25.47 deC
	N ₃	16.02 cC	20.22 cC	22.14 cB	24.81 eC
	N ₄	18.75 bB	21.02 cBC	22.89 cB	25.26 deC
	N ₅	18.77 bB	21.27 bBC	23.17 cAB	26.34 cdBC
	均值 Average		19.05 bB	21.92 bABC	23.53 bAB
下层 Lower layer	N ₀	6.30 aA	7.22 aA	9.58 aA	14.52 aA
	N ₁	5.50 bB	6.84 bA	8.90 bA	13.83 aA
	N ₂	4.32 eD	5.75 cB	7.76 cB	12.50 bB
	N ₃	3.89 fE	4.38 fD	6.43 ec	10.05 fD
	N ₄	4.50 deC	4.84 eCD	6.47 ec	10.99 eCD
	N ₅	4.60 dC	5.26 dBC	7.37 dB	11.85 cBC
	均值 Average		4.85 cC	5.72 cB	7.75 cB

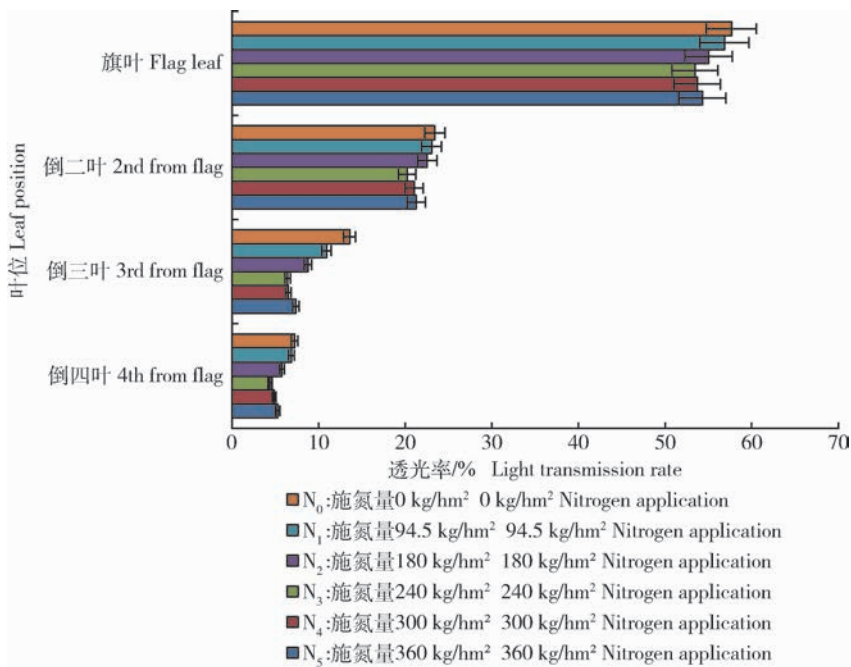


图 1 不同处理滴灌冬小麦开花期冠层透光率分布

Fig. 1 Canopy distribution of light transmission rate at anthesis of winter wheat under drip irrigation in different treatments

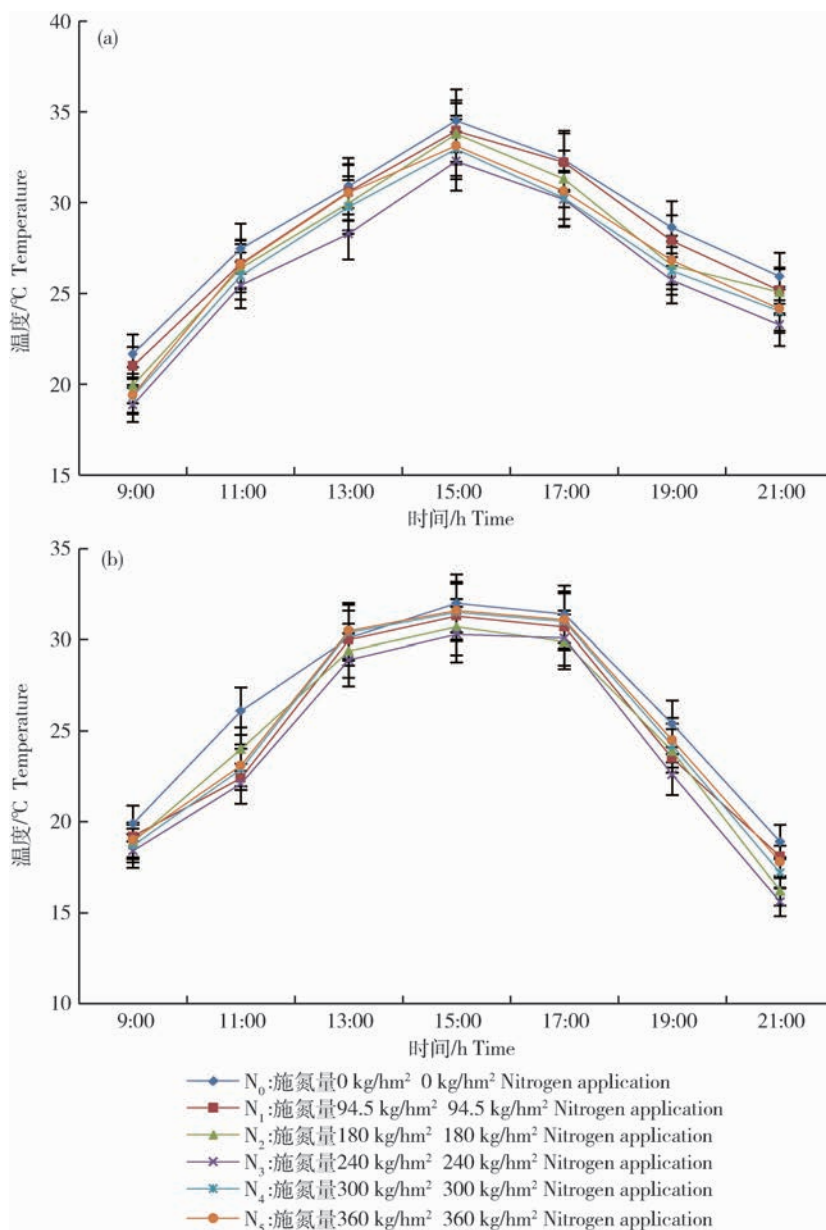


图 2 不同处理滴灌冬小麦开花期冠层上部(a)和下部(b)温度日变化

Fig. 2 The canopy temperature changes upside(a) and lower(b) at anthesis of winter wheat under drip irrigation in different treatments

2.5.2 冠层不同叶位叶片温度变化

由图 3 可知,随着叶位的降低,各处理冬小麦冠层不同叶位叶片温度呈逐渐降低,穗部至倒四叶叶位叶片温度下降幅度在 5.9~9.8 °C, N₃ 处理叶片温度下降最明显为 9.8 °C, N₀ 处理下降幅度最小为 5.9 °C,这可能是由于 N₃ 处理的株高、各叶层叶面积指数较高,冠层郁闭程度较大,导致太阳辐射在各叶层截留量增大原因所致;进一步分析处理间同一

叶层叶片温度变化可知,随着施氮量的增加,叶片温度呈“先降后增”,且各叶层均在 N₀ 处理最高,在 N₃ 处理最低。对比可知,冬小麦冠层不同叶位叶片温度变化趋势与冠层各叶位透光率变化趋势吻合,说明各叶层获得的光照强度是影响叶层局部温度的重要因素,因此可以通过施氮量调控冬小麦各叶层叶面积,使其不同叶层获得合理的光照强度和相应的温度。

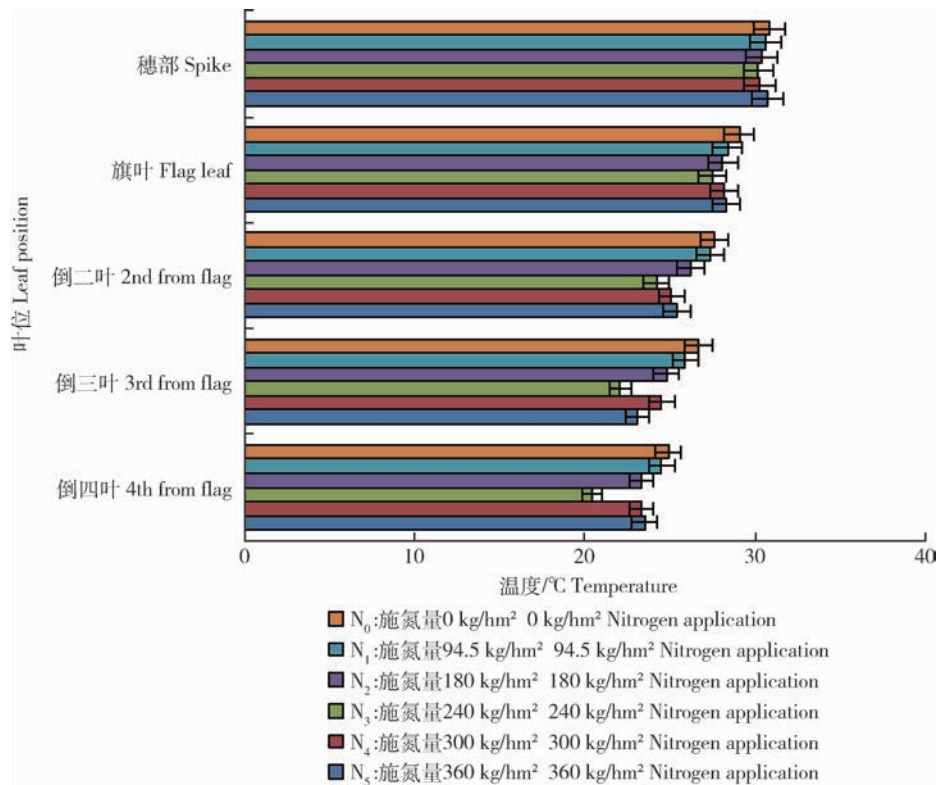


图 3 不同处理滴灌冬小麦开花期不同叶层温度变化

Fig. 3 The temperature changes of different leaf layers at anthesis of winter wheat under drip irrigation in different treatments

3 讨论与结论

小麦冠层结构特征不仅受内在基因的控制,还受外部环境及栽培技术^[18-23]等诸多因素影响,而在栽培技术中,施氮量是影响小麦冠层结构的主要因素之一^[24]。研究表明,氮素供应能有效增加叶面积指数,增强光合作用,进而促进作物生长发育^[25],但施氮量过大易造成冠层下部透光率降低^[26]。本研究结果表明,同一叶层的叶面积和单茎总叶面积随着施氮量的增加均呈现“先增加后降低”,一定范围内增施氮肥有利于增大冬小麦各叶位叶面积指数,但高氮肥处理小麦 LAI 不增反降,这可能是由于冠层下部叶片衰老加速导致,这与前人研究结论一致。不同处理冬小麦株高变幅为 71.83~85.88 cm (2014 年)和 70.56~85.18 cm (2015 年),随施氮量的增大,冬小麦各茎节节间长度和株高逐渐增加,茎节粗度呈现“先升后降”。在施氮量为 240 kg/hm² (N₃ 处理)时,滴灌冬小麦穗长最长,且植株高度适中,茎秆相对粗壮,抗倒伏能力增强,有利于获得

高产。

小麦开花期受温度影响较大,冠层温度过高、过低均会导致小麦结实率降低,从而影响产量。关于不同施肥处理对小麦冠层温度的影响研究较少,且所得结论因试验地点、研究品种不同而异^[27-28]。本研究结果表明,施氮量对滴灌冬小麦冠层温度日变化影响明显,各处理冠层空气温度均表现为早、晚较低,午后最高的单峰型抛物线,其中, N₃ 处理较未施氮的 N₀ 处理开花期中部冠层温度平均降低 2.48 °C,下部冠层温度平均降低 2.26 °C,这可能是由于中氮、高氮处理植株营养状况良好,叶片蒸腾作用旺盛,导致冠层温度适当降低;各叶层叶位空气温度随着叶位的降低呈现不同程度的下降,下降幅度在 5.9~9.8 °C,这可能是由于各叶层获得的太阳辐射不同所致。

已有研究表明,在常规灌溉条件下,随着施氮量的增加,小麦氮肥利用率降低,氮素损失量显著增加^[29-31]。适当推迟氮肥施用时期和提高氮肥追施比例能显著提高小麦氮肥的吸收利用率,协调小麦产

量和品质同步提高,减轻氮素流失对环境的污染^[32-35],可以提高旗叶净光合速率,进而提高旗叶叶绿素含量^[36-37]。氮肥后移可提高小麦千粒重^[38]。本研究对象是滴灌条件下的冬小麦,不同时期的氮肥随水追施,以比较精准的方式输入到小麦根部,供小麦吸收利用,在保证基肥和拔节肥的情况下,采取少量多次的原则,采取氮肥后移的方式,尽量做到在不同时期施肥,供小麦充分利用,特别是在小麦起身期、拔节期、孕穗期、抽穗期和开花期以一定比例施氮肥,在灌浆期施磷酸二氢钾等叶面肥。对本试验结果综合分析可知,本试验 N₃ 处理表现最好,但不足之处就是未设计多个该施氮量下的氮肥施用时期和氮肥追施比例的处理。究竟什么样的氮肥施用时期和氮肥追施比例更利于滴灌小麦优质、高产和高效,以及滴灌条件下冬小麦最佳氮肥运筹模式,有待进一步深入研究。综合分析认为,施氮量可以调节滴灌冬小麦的群体结构和冠层内部小气候,其主要原因是施氮量改变了小麦的株高和叶面积,从而导致小麦冠层内部透光性改变,进而影响小麦冠层内空气温度的变化,改善其群体内部微环境。从本试验看,施氮量控制在 240 kg/hm² 左右,滴灌冬小麦叶型、株型特征良好,冠层光、温适宜,产量最高可达 8 653.22 kg/hm² (2014 年)和 8 415.20 kg/hm² (2015 年),可供实际生产参考。

参考文献 References

[1] 尹飞虎,周建伟,董云社,何帅,胡卫东,陆朝阳. 兵团滴灌节水技术的研究与应用进展[J]. 新疆农垦科技, 2010(1):3-7
Yin F H, Zhou J W, Dong Y S, He S, Hu W D, Lu Z Y. Research and application of water-saving irrigation technology under drip irrigation in corps [J]. *Xinjiang Farmland Reclamation Science & Technology*, 2010(1):3-7 (in Chinese)

[2] 张娜,张永强,唐江华,牛海生,徐文修,李怀胜,郝维维. 滴灌带配置方式对冬小麦生长及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2013,33(6):1197-1201
Zhang N, Zhang Y Q, Tang J H, Niu H S, Xu W X, Li H S, Hao W W. Effect of drip irrigation layout on growth and yield of winter wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2013,33(6):1197-1201 (in Chinese)

[3] 张娜,张永强,李大平,牛海生,张洋,胡春辉,赵有来,徐文修. 滴灌量对冬小麦光合特性及干物质积累过程的影响[J]. 麦类作物学报, 2014,34(6):795-801
Zhang N, Zhang Y Q, Li D P, Niu H S, Zhang Y, Hu C H, Zhao Y L, Xu W X. Effect of drip irrigation amount on photosynthesis characteristics and dry matter accumulation of

winter wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2014,34(6):795-801 (in Chinese)

[4] 关新元,尹飞虎,陈云. 滴灌随水施肥技术综述[J]. 新疆农垦科技, 2002(3):43-44
Guan X Y, Yin F H, Chen Y. Summary of drip irrigation fertilizer with water [J]. *Xinjiang Farmland Reclamation Science & Technology*, 2002(3):43-44 (in Chinese)

[5] 张磊,曾胜和,高志建,何江勇,梁飞. 不同氮磷配比对滴灌小麦产量及养分利用效率的影响[J]. 西北农业学报, 2012,21(5):79-83
Zhang L, Zeng S H, Gao Z J, He J Y, Liang F. Effects of fertilizer N,P on drip irrigation wheat yield and fertilizer use efficiency[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2012,21(5):79-83 (in Chinese)

[6] 张娜,徐文修,李兰海,仵妮平,吴培杰,程雪峰. 施氮量对滴灌冬小麦冠层垂直结构特征、粒叶比及经济效益的影响[J]. 应用生态学报, 2016,27(8):2491-2498
Zhang N, Xu W X, Li L H, Wu N P, Wu P J, Cheng X F. Effects of nitrogen application on canopy vertical structure, grain-leaf ratio and economic benefit of winter wheat under drip irrigation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016,27(8):2491-2498 (in Chinese)

[7] 张喜文,宋殿珍,刘源湘,姚克明. 氮肥和氮磷配合对谷子籽粒营养品质和食味品质的影响[J]. 土壤通报, 1992,23(3):122-123
Zhang X W, Song D Z, Liu Y X, Yao K M. Study on the effect of nitrogen fertilizer and nitrogen-phosphorus fertilization on the quality and eating quality of millet[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1992,23(3):122-123 (in Chinese)

[8] 张晶,王姣爱,党建友,裴雪霞,王小泰,张定一. 氮肥底追比对不同小麦品种生长发育及产量的影响[J]. 农学学报, 2015,5(3):15-19
Zhang J, Wang J A, Dang J Y, Pei X X, Wang X T, Zhang D Y. Effect of nitrogen topdressing ratio on the growth and yield in different wheat cultivars[J]. *Journal of Agriculture*, 2015,5(3):15-19 (in Chinese)

[9] Paul M J, Foyer C H. Sink regulation of photosynthesis[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2001,52(360):1383-1400

[10] 周艳,李明思,蓝明菊,李东伟. 施肥频率对滴灌春小麦生长和产量的影响试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2011,30(4):72-75
Zhou Y, Li M S, Lan M J, Li D W. Effect of the frequency of fertilizer application on the grain yield and growth of spring wheat under drip irrigation [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2011,30(4):72-75 (in Chinese)

[11] 雷钧杰,张永强,赛力汗·赛,薛丽华,乔旭,张宏芝,于建新,冯兵,梁玉超,王成,陈兴武. 施氮量对滴灌冬小麦干物质积累、分配及转运特征的影响[J]. 新疆农业科学, 2016,53(1):77-83
Lei J J, Zhang Y Q, Sai L H · S, Xue L H, Qiao X, Zhang H Z, Yu J X, Feng B, Liang Y C, Wang C, Chen X W. Effect of different nitrogen application rates on dry matter accumulation, distribution and translocation in winter wheat under drip

- irrigation[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2016, 53(1): 77-83 (in Chinese)
- [12] 冉辉, 蒋桂英, 徐红军, 李梦格, 郝梦超. 灌溉频率和施氮量对滴灌春小麦干物质积累及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(3): 379-386
- Ran H, Jiang G Y, Xu H J, Li M G, Hao M C. Effect of irrigation frequency and nitrogen application rate on dry matter accumulation and yield of drip-irrigated spring wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35(3): 379-386 (in Chinese)
- [13] 张杰, 王备战, 冯晓, 李国强, 赵巧丽, 胡峰, 郑国清. 氮肥调控对冬小麦干物质质量、产量和氮素利用效率的影响[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(4): 516-520
- Zhang J, Wang B Z, Feng X, Li G Q, Zhao Q L, Hu F, Zheng G Q. Effect of nitrogen fertilizer management on the dry matter quantity, yield and N utilization in winter wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2014, 34(4): 516-520 (in Chinese)
- [14] 张彦群, 王建东, 龚时宏, 隋娟. 滴灌条件下冬小麦施氮增产的光合生理响应[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 170-177
- Zhang Y Q, Wang J D, Gong S H, Sui J. Photosynthetic response of yield enhancement by nitrogen fertilization in winter wheat fields with drip irrigation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(6): 170-177 (in Chinese)
- [15] 冯国艺, 姚炎帝, 罗宏海, 张亚黎, 杜明伟, 张旺锋, 夏冬利, 董恒义. 新疆超高产棉花冠层光分布特征及其与群体光合生产的关系[J]. 应用生态学报, 2012, 23(5): 1286-1294
- Feng G Y, Yao Y D, Luo H H, Zhang Y L, Du M W, Zhang W F, Xia D L, Dong H Y. Canopy light distribution and its correlation with photosynthetic production in super-high yielding cotton fields of Xinjiang, Northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(5): 1286-1294 (in Chinese)
- [16] 杨吉顺, 高辉远, 刘鹏, 李耕, 董树亭, 张吉旺, 王敬锋. 种植密度和行距配置对超高产夏玉米群体光合特性的影响[J]. 作物学报, 2010, 36(7): 1226-1233
- Yang J S, Gao H Y, Liu P, Li G, Dong S T, Zhang J W, Wang J F. Effects of planting density and row spacing on canopy apparent photosynthesis of high-yield summer corn[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(7): 1226-1233 (in Chinese)
- [17] 朱元刚, 董树亭, 张吉旺, 刘鹏, 杨今胜, 贾春兰, 柳京国, 李登海. 种植方式对夏玉米光合生产特征和光温资源利用的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(6): 1417-1424
- Zhu Y G, Dong S T, Zhang J W, Liu P, Yang J S, Jia C L, Liu J G, Li D H. Effects of cropping patterns on Photo-synthesis characteristics of summer maize and its utilization of solar and heat resources [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(6): 1417-1424 (in Chinese)
- [18] 杨文雄. 旱地春小麦株型指标与产量形成关系研究[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(1): 43-46
- Yang W X. Relationship between plant type indices and yield formation in spring wheat on dry land [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006, 24(1): 43-46 (in Chinese)
- [19] 李志勇, 郭永新, 王璞, 翟志席, MARION Boening Zilkens. 几种水氮模式处理下冬小麦冠层结构的差异[J]. 麦类作物学报, 2007, 27(6): 1085-1088
- Li Z Y, Guo Y X, Wang P, Zhai Z X, Zilkens M B. A Comparative study of canopy structures of winter wheat under different models of irrigation and N fertilization[J]. *Journal of Triticeae Crop*, 2007, 27(6): 1085-1088 (in Chinese)
- [20] Blake N K, Lanning S P, Martin J M, Sherman J D, Talbert L E. Relationship of flag leaf characteristics to economically important traits in two spring wheat crosses[J]. *Crop Science*, 2007, 47: 491-496
- [21] 李春明, 熊淑萍, 赵巧梅, 杨颖颖, 马新明. 有机无机肥配施对小麦冠层结构、产量和蛋白质含量的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(12): 4287-4293
- Li C M, Xiong S P, Zhao Q M, Yang Y Y, Ma X M. Effects of organic manure and urea mixture on canopy architecture grain yield and protein content of wheat [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(12): 4287-4293 (in Chinese)
- [22] 杨文平, 郭天财, 刘胜波, 王晨阳, 王永华, 马冬云. 行距配置对‘兰考矮早八’小麦后期群体冠层结构及其微环境的影响[J]. 植物生态学报, 2008, 32(2): 485-490
- Yang W P, Guo T C, Liu S B, Wang C Y, Wang Y H, Ma D Y. Effects of row spacing in winter wheat on canopy structure and microclimate in later growth stage [J]. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 2008, 32(2): 485-490 (in Chinese)
- [23] 李春明, 熊淑萍, 杨颖颖, 马新明. 不同肥料处理对豫麦 49 小麦冠层结构与产量性状的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(5): 2514-2519
- Li C M, Xiong S P, Yang Y Y, Ma X M. Effect of different fertilizer treatments on canopy architecture and grain yield characteristics of winter wheat-Yumai 49 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(5): 2514-2519 (in Chinese)
- [24] Vos J, Van der Putten P E L, Birch C J. Effect of nitrogen supply on leaf appearance, leaf growth, leaf nitrogen economy and photosynthetic capacity in maize (*Zea mays* L) [J]. *Field Crops Research*, 2005, 93: 64-73
- [25] Latiri-Souki K, Nortcliff S, Lawlor D W. Nitrogen fertilizer can increase dry matter, grain production and radiation and water use efficiencies for durum wheat under semi-arid conditions [J]. *European Journal Agronomica*, 1998, 9: 21-34
- [26] 李国强, 汤亮, 张文宇, 曹卫星, 朱艳. 施氮量对不同株型小麦品种叶型垂直分布特征的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(1): 127-137
- Li G Q, Tang L, Zhang W Y, Cao W X, Zhu Y. Effect of nitrogen rate on vertical distribution characteristics of leaf-type in wheat with different plant types [J]. *Acta Agronomica sinica*, 2011, 37(1): 127-137 (in Chinese)
- [27] 赵春江, 黄文江, 王之杰, 王北洪, 王纪华. 不同水肥处理下冬小麦冠层含水率与温度关系的研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 25-28

- Zhao C J, Huang W J, Wang Z J, Wang H B, Wang J H. Relationship between canopy water content and temperature of winter wheat under different water and nitrogen treatments [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2002, 18(2): 25-28 (in Chinese)
- [28] Blad B L, Bauer A, Hatfield J L, Kanemasu E T, Major D J, Reginato R J, Hubbard K G. Influence of water and nitrogen levels on canopy temperatures of winter wheat grown in the North American Great Plains [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1988, 44: 159-173
- [29] 刘学军, 赵紫娟, 巨晓棠, 张福锁. 基施氮肥对冬小麦产量、氮肥利用率及氮平衡的影响[J]. *生态学报*, 2002, 22(7): 1122-1128
Liu X J, Zhao Z J, Ju X T, Zhang F S. Effect of N application as basal fertilizer on grain yield of winter wheat, fertilizer n recovery and n balance [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(7): 1122-1128 (in Chinese)
- [30] 霍中洋, 葛鑫, 张洪程, 戴其根, 许轲, 龚振恺. 施氮方式对不同专用小麦氮素吸收及氮肥利用率的影响[J]. *作物学报*, 2004, 30(5): 449-454
Huo Z Y, Ge X, Zhang H C, Dai Q G, Xu K, Gong Z K. Effect of different nitrogen application types on n-absorption and n-utilization rate of specific use cultivars of wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2004, 30(5): 449-454 (in Chinese)
- [31] 巨晓棠, 潘家荣, 刘学军, 张福锁. 北京郊区冬小麦/夏玉米轮作体系中氮肥去向研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(3): 264-270
Ju X T, Pan J R, Liu X J, Zhang F S. Study on the fate of nitrogen fertilizer in winter wheat/summer maize rotation system in Beijing suburban [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(3): 264-270 (in Chinese)
- [32] 武际, 郭熙盛, 杨晓虎, 黄晓荣. 氮肥施用时期及基追比例对土壤矿质氮含量时空变化及小麦产量和品质的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(11): 2382-2387
Wu J, Guo X S, Yang X H, Huang X R. Effects of application time and basal/topdressing ratio of nitrogen fertilizer on the spatiotemporal variation of soil NO_3^- -N and NH_4^+ -N contents and the grain yield and its quality of wheat [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(11): 2382-2387 (in Chinese)
- [33] 郭明明, 董召娣, 易媛, 张明伟, 李银银, 代丹丹, 刘立伟, 朱新开, 郭文善, 赵广才, 彭永欣. 氮肥运筹对不同筋型小麦产量和品质的影响[J]. *麦类作物学报*, 2014, 34(11): 1559-1565
Guo M M, Dong Z D, Yi Y, Zhang M W, Li Y Y, Dai D D, Liu L W, Zhu X K, Guo W S, Zhao G C, Peng Y X. Effects of nitrogen management on grain yield and quality of wheat cultivars with different gluten types [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2014, 34(11): 1559-1565 (in Chinese)
- [34] 张耀兰, 曹承富, 李华伟, 乔玉强, 赵竹, 杜世州. 氮肥运筹对晚播冬小麦产量、品质及叶绿素荧光特性的影响[J]. *麦类作物学报*, 2013, 33(5): 965-971
Zhang Y L, Cao C F, Li H W, Qiao Y Q, Zhao Z, Du S Z. Effect of nitrogen application on yield, quality and fluorescent characteristic of late-sown winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2013, 33(5): 965-971 (in Chinese)
- [35] 魏凤珍, 李金才, 王成雨, 屈会娟. 氮肥运筹模式对冬小麦氮素吸收利用的影响[J]. *麦类作物学报*, 2010, 30(1): 123-128
Wei F Z, Li J C, Wang C Y, Qu H J. Effects of nitrogen application model on nitrogen absorption and utilization in winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(1): 123-128 (in Chinese)
- [36] 马东辉, 赵长星, 王月福, 吴钢, 林琪. 施氮量和花后土壤含水量对小麦旗叶光合特性和产量的影响[J]. *生态学报*, 2008, 28(10): 4896-4901
Ma D H, Zhao C X, Wang Y F, Wu G, Lin Q. Effects of nitrogen fertilizer rate and post anthesis soil water content on photosynthetic characteristics in flag leaves and yield of wheat [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(10): 4896-4901 (in Chinese)
- [37] 郭天财, 冯伟, 赵会杰, 朱云集, 王晨阳, 阎耀礼, 罗毅. 水分和氮素运筹对冬小麦生育后期光合特性及产量的影响[J]. *西北植物学报*, 2003, 23(9): 1512-1517
Guo T C, Feng W, Zhao H J, Zhu Y J, Wang C Y, Yan Y L, Luo Y. Effects of water and nitrogen application on photosynthetic characteristics and yield of winter wheat in the late growing and developing period [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2003, 23(9): 1512-1517 (in Chinese)
- [38] 武文明, 陈洪俭, 李金才, 魏凤珍, 王世济, 周向红. 氮肥运筹对孕穗期受渍冬小麦旗叶叶绿素荧光与籽粒灌浆特性的影响[J]. *作物学报*, 2012, 38(6): 1088-1096
Wu W M, Chen H J, Li J C, Wei F Z, Wang S J, Zhou X H. Effects of Nitrogen fertilization on chlorophyll fluorescence parameters of flag leaf and grain filling in winter wheat suffered waterlogging at booting stage [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(6): 1088-1096 (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅