

交替隔沟灌溉与施氮量对日光温室黄瓜光合作用、生长及产量的影响^{*}

张利东^{1,3} 高丽红¹ 张柳霞¹ 王树忠² 眭晓蕾^{1**} 张振贤¹

(¹ 中国农业大学农学与生物技术学院, 北京 100193; ² 北京市农业技术推广站, 北京 100101; ³ 天津科润黄瓜研究所, 天津 300192)

摘 要 以黄瓜“津育5号”为试材,研究了交替隔沟灌溉和施氮量(零氮肥、优化氮肥和常规氮肥)对日光温室黄瓜(冬春茬、秋冬茬)光合作用、生长特性、产量形成和果实品质的影响.结果表明:交替隔沟灌溉下,植株上、中、下叶位叶片的净光合速率(P_n)略低于常规灌溉下的相应叶位,而蒸腾速率(T_r)显著降低,上、中叶位叶片的瞬时水分利用效率(WUE)有所提高;交替隔沟灌溉下植株光合作用的限制因素是气孔因素.交替隔沟灌溉下施氮量的增加有助于促进黄瓜功能叶片 P_n 和WUE的提高.与常规灌溉相比,交替隔沟灌溉下叶片叶绿素含量和植株总生物产量有所降低,但根生物产量、根冠比以及根和果实器官的干物质分配比例增加,经济产量持平,经济产量水平的水分利用效率(WUE_y)显著提高.交替隔沟灌溉有利于植株根系发育和果实形成.交替隔沟灌溉下随施氮量的增加,叶片叶绿素含量、叶绿素a/b、比叶重、植株总生物产量和经济产量呈增加趋势,果实Vc含量和可溶性糖含量升高,但优化氮肥与常规氮肥处理间差异不显著,氮肥施用对WUE_y无显著影响.冬春茬黄瓜的经济产量和生物产量显著高于秋冬茬.

关键词 日光温室 黄瓜 交替隔沟灌溉 氮肥 光合作用 水分利用效率 干物质分配

文章编号 1001-9332(2011)09-2348-07 **中图分类号** S607.1, S642.2 **文献标识码** A

Effects of alternative furrow irrigation and nitrogen application rate on photosynthesis, growth, and yield of cucumber in solar greenhouse. ZHANG Li-dong^{1,3}, GAO Li-hong¹, ZHANG Liu-xia¹, WANG Shu-zhong², SUI Xiao-lei¹, ZHANG Zhen-xian¹ (¹ College of Agriculture and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; ² Beijing Agro-Technical Extension Station, Beijing 100101, China; ³ Tianjin Kernel Cucumber Research Institute, Tianjin 300192, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2011, 22(9): 2348–2354.

Abstract: This paper studied the effects of alternative furrow irrigation and nitrogen (N) application rate (no N, optimal N, and conventional N) on the photosynthesis, growth characteristics, yield formation, and fruit quality of cucumber (*Cucumis sativus*) cultivar Jinyu No. 5 in a solar greenhouse in winter-spring growth season and autumn-winter season. Under alternative furrow irrigation, the net photosynthetic rate of upper, middle, and lower leaves was appreciably lower and the transpiration rate decreased significantly, and the transient water use efficiency of upper and middle leaves improved, as compared with those under conventional irrigation. Stomatal factor was the limiting factor of photosynthesis under alternative furrow irrigation. The photosynthesis and transient water use efficiency of functional leaves under alternative furrow irrigation increased with increasing N application rate. Comparing with conventional irrigation, alternative furrow irrigation decreased leaf chlorophyll content and plant biomass, but increased root biomass, root/shoot ratio, and dry matter allocation in root and fruit. The economic output under alternative furrow irrigation was nearly the same as that under conventional irrigation, whereas the water use efficiency for economic yield increased significantly, suggesting the beneficial effects of alternative furrow irrigation on root development and fruit formation. With the increase of N application rate, the leaf chloro-

^{*} 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-25-C-12)和国家自然科学基金重点项目(50939005)资助.

^{**} 通讯作者. E-mail: suixiaolei@cau.edu.cn

2010-12-26 收稿, 2011-06-15 接受.

phyll content, chlorophyll a/b, specific leaf mass, plant biomass, economic yield, and fruit Vc and soluble sugar contents under alternative furrow irrigation increased, but no significant difference was observed between the treatments optimal N and conventional N. N application had little effects on the water use efficiency for economic yield. The economic yield and biomass production of the cucumber were significantly higher in winter-spring growth season than in autumn-winter growth season.

Key words: solar greenhouse; cucumber; alternative furrow irrigation; nitrogen; photosynthesis; water use efficiency; dry matter allocation.

黄瓜是我国设施栽培的主要蔬菜,而土壤水分和植株施肥管理是作物高产栽培的关键技术环节。我国农业灌溉以传统的畦、沟地面灌溉为主,水分利用效率较低。在节水的前提下,国内外开发了多种灌溉技术,其中交替隔沟灌溉是一种切实可行的节水灌溉技术^[1-3]。研究表明,通过交替灌溉作物根系部分区域的方式,对不同区域的根系产生水分胁迫锻炼,从而使其产生的胁迫信号传递至叶片气孔,以调节气孔开放度,减少“奢侈”蒸腾耗水,达到不牺牲光合产物积累而减少作物生长冗余和提高水分利用效率的目的^[4-6]。如在玉米、棉花等大田作物上的试验表明,交替隔沟灌溉在灌水量减少 1/2 或 1/3 的情况下作物产量不降低或者减产很少^[4,6-7];对日光温室黄瓜的研究发现,交替隔沟灌溉在保证黄瓜产量的前提下可以节水 37%~48%,作物水分利用效率提高 47%~82%,极大节省了水资源^[8]。氮素是作物生长发育必需营养元素,不仅需求量较大,而且其吸收利用与水分供应密切相关。现代农业生产强调水氮耦合,灌溉和施氮对作物产量起着决定性作用。在交替隔沟灌溉方式下,如何合理施肥、提高肥料利用效率和作物产量成为水肥耦合研究的热点。邢维芹等^[9]研究表明,半干旱地区玉米水肥同区交替灌溉和水肥异区交替灌溉是较好的水肥空间耦合方式,在这种方式下作物产量和灌溉水及肥料利用效率均较高。目前交替隔沟灌溉施肥在大田作物中的研究较为深入^[7,9],但在日光温室蔬菜生产中的相关研究尚鲜有报道。本文以日光温室黄瓜为试材,研究交替隔沟灌溉和氮肥施用对植株光合特性、产量形成和水分利用效率的影响,以为设施黄瓜生产中水氮利用效率的提高和栽培技术的改良提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料与土壤肥力状况

试验在北京顺义区大孙各庄镇绿奥蔬菜合作社日光温室内进行。供试黄瓜 (*Cucumis sativus*) 品种为

津育 5 号。试验土壤为轻沙壤土,有机质含量 $9.85 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $6.35 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效氮 $213.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $33.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $106.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,容重 $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,田间持水量 28%,pH 6.83,EC 值 $0.43 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

试验分为冬春茬(2—7月)和秋冬茬(8月—翌年1月),单垄栽培,垄距 75 cm,株距 30 cm,密度 $50300 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。基肥普施“一特”有机肥 $3100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。灌溉和追肥处理设为:1) 常规灌溉+常规氮肥,每次灌溉水量 $450 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,各沟均灌溉,冬春茬施纯氮 $840 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,秋冬茬施纯氮 $465 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (CK₁);2) 交替隔沟灌溉下零氮肥,每次灌溉水量 $225 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,各沟间隔灌溉,黄瓜整个生育期内不追施氮肥(CK₂);3) 交替隔沟灌溉下优化氮肥(AINo);4) 交替隔沟灌溉下常规氮肥(AINc),施肥量同 CK₁,共 4 个处理。常规灌溉量和施肥量通过调查农民实际生产确定。优化氮肥施用量根据土壤养分平衡法公式^[10]计算,其中计划产量根据该地区日光温室黄瓜栽培水平确定,冬春茬和秋冬茬分别为 120000 和 $52000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,计算得出两茬口黄瓜优化施氮量分别为 240 和 $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。小区面积 $6 \text{ m} \times 5.5 \text{ m}$,小区两侧设 2 垄保护行以防肥侧渗,3 次重复,随机排列,除灌溉施肥处理外均按常规管理。追施氮肥为尿素(含 N 46%),均在灌溉时随水施入。冬春茬黄瓜 2009 年 2 月 21 日定植,氮肥分别于 4 月 12 日、4 月 19 日、5 月 2 日、5 月 15 日、5 月 24 日、5 月 31 日平均随灌溉施入,6 月 12 日试验结束;秋冬茬黄瓜 8 月 28 日定植,氮肥分别于 10 月 7 日、10 月 22 日、11 月 6 日、11 月 29 日平均随灌溉施入,12 月 23 日试验结束。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 植株生长量、经济产量和生物产量测定 灌溉施肥处理开始后每隔 7 d(冬春茬)或 14 d(秋冬茬)测量黄瓜株高、叶片数。按照小区采收并计产,计算累计经济产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、劣果率(大头瓜、尖

嘴瓜、弯瓜、裂瓜等均计为劣果)及经济产量水平的水分利用效率 WUE_y ($WUE_y = \text{经济产量}/\text{灌溉水量}$). 每小区选择代表性黄瓜植株,对分次采收的果实,栽培结束时植株的根、茎、叶,以及日常管理中每次摘除的老叶烘干称量,经换算求得各处理下黄瓜根、茎、叶、果的生物产量(干物质量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),并计算植株各器官干物质量的分配百分比及根冠比. 每小区取 3~5 株求平均值.

1.3.2 叶片叶绿素含量和比叶重测定 于黄瓜盛瓜期选取植株中上部功能叶片,采用丙酮浸提-分光光度法测定并计算叶片叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 (a+b) 含量和叶绿素 a/b^[11]. 叶片用一定直径的打孔器打孔,120 ℃下杀酶 30 min, 80 ℃烘干 48 h 后称量,计算比叶重(单位叶面积干样质量).

1.3.3 果实品质测定 于黄瓜盛瓜期测定果实品质相关指标,维生素 C、硝酸盐、亚硝酸盐和可溶性糖含量分别采用 2,6-二氯酚靛酚(2,6-D)滴定法、水杨酸法、磺胺比色法和蒽酮法测定^[11].

1.3.4 叶片光合速率和蒸腾速率测定 在实施灌溉施肥处理的最后 1 个周期内,于晴好天气 9:00—12:00,选取植株上、中、下叶位叶片,采用 Li-6400 便携式光合作用测定系统(Li-Cor, USA)测定净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i),并计算气孔限制值 $L_s = 1 - C_i/C_a$ (C_a 为大气 CO_2 浓度)和瞬时水分利用效率 $iWUE = P_n/T_r$. 测定时叶室内温度 25 ℃,开放气路,空气流速 $500 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$,测定光强冬春茬和秋冬茬分别为 900 和 $800 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. 以上数据测定均重复 3~5 片叶取平均值.

1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 软件做图,利用 SPSS 11.5

统计软件进行数据分析,最小显著差异法(LSD)进行多重比较.

2 结果与分析

2.1 交替隔沟灌溉与施氮量对黄瓜叶片叶绿素含量和比叶重的影响

与常规灌溉相比,交替隔沟灌溉下黄瓜叶片叶绿素 a、b 和叶绿素 (a+b) 含量(以单位叶面积计)有所降低,但除零氮肥处理(CK_2)外,差异不显著,2 个茬口变化规律基本相似(表 1). 交替隔沟灌溉下,随施氮量的增加(CK_2 、 AINo 、 AINc),叶绿素 (a+b) 总量、叶绿素 a/b 呈增加趋势(除秋冬茬 AINc 处理的叶绿素 a/b 外), AINo 和 AINc 处理显著高于 CK_2 ,表明氮素有利于叶绿素尤其是叶绿素 a 的形成,但 AINo 与 AINc 处理之间叶绿素含量差异不显著. 比叶重的变化规律与叶绿素含量类似,表明交替隔沟灌溉下施氮量的增加有助于单位面积叶片干物质的积累,即叶片相对变厚.

2.2 交替隔沟灌溉与施氮量对黄瓜叶片光合作用和蒸腾作用的影响

与常规灌溉相比,交替隔沟灌溉对冬春茬黄瓜植株光合作用有一定影响. 由图 1 可知,交替隔沟灌溉处理下各叶位叶片的净光合速率(P_n)均略低于常规灌溉(CK_1),但除 CK_2 外差异不显著. 交替隔沟灌溉下叶片具有较低的气孔导度(G_s),同时胞间 CO_2 浓度(C_i)呈下降趋势,而气孔限制值(L_s)有所增大. 交替隔沟灌溉下随施氮量的增加,黄瓜叶片光合作用增强,优化氮肥(AINo)和常规氮肥处理(AINc)上位叶片 P_n 较 CK_2 分别增加 7.2% 和 10.1%,中位叶片分别增加 11.9% 和 12.1%. 植株各叶位之间比较,下位叶片的 P_n 和 G_s 较上、中位叶

表 1 交替隔沟灌溉与施氮量对黄瓜叶片叶绿素含量和比叶重的影响
Table 1 Effects of alternative furrow irrigation and nitrogen application rate on chlorophyll contents and specific leaf mass of cucumber

季 节 Season	处 理 Treatment	叶绿素 a Chl a ($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	叶绿素 b Chl b ($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	叶绿素 a+b Chl (a+b) ($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	叶绿素 a/b Chl a/b	比叶重 Specific leaf mass ($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$)
冬春茬 Winter-spring season	CK_1	0.062a	0.246a	0.086a	2.51a	4.4a
	CK_2	0.054b	0.219b	0.076b	2.48b	3.9b
	AINo	0.059a	0.228a	0.082a	2.61a	4.2a
	AINc	0.060a	0.225a	0.083a	2.68a	4.5a
秋冬茬 Autumn-winter season	CK_1	0.032a	0.114a	0.043a	2.76a	4.7a
	CK_2	0.024b	0.009b	0.033b	2.70b	4.5b
	AINo	0.028a	0.010a	0.038a	2.85c	4.6a
	AINc	0.028a	0.010a	0.039a	2.79a	5.0a

CK_1 : 常规灌溉常规氮肥 Conventional irrigation and conventional nitrogen; CK_2 : 交替隔沟灌溉零氮肥 Alternative furrow irrigation and no nitrogen; AINo : 交替隔沟灌溉优化氮肥 Alternative furrow irrigation and optimal nitrogen; AINc : 交替隔沟灌溉常规氮肥 Alternative furrow irrigation and conventional nitrogen. 同一茬口同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) In the same batch and rank, different small letters in the same column meant significant difference at 0.05 level among treatments. 下同 The same below.

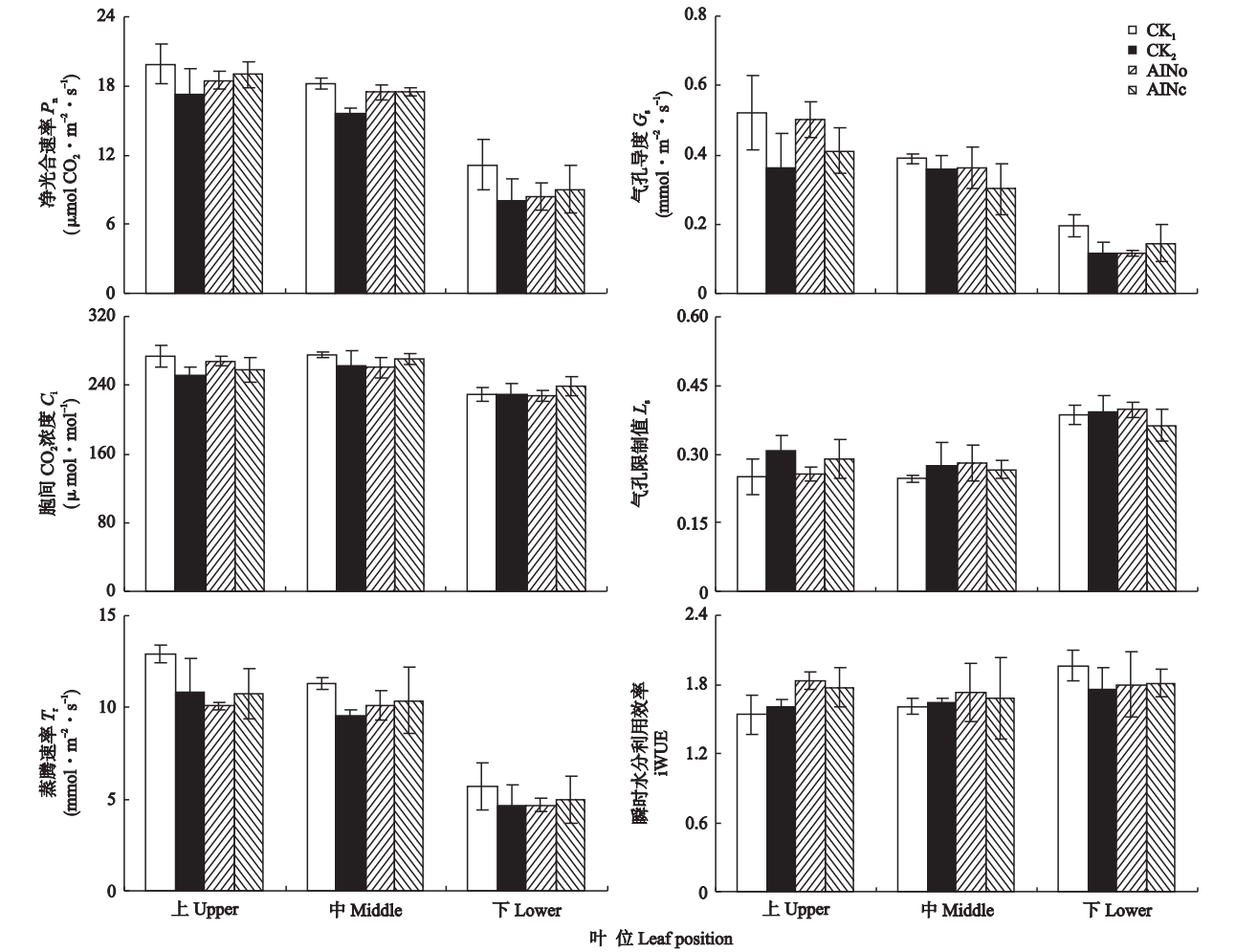


图 1 交替隔沟灌溉与施氮量对黄瓜不同叶位叶片光合作用和蒸腾作用的影响(冬春茬)
Fig. 1 Effects of alternative furrow irrigation and nitrogen application rate on photosynthesis and transpiration of different position leaves of cucumber (winter-spring season).

片显著降低, C_i 有所下降, L_s 显著增大, 各处理下变化规律相似, 表明随叶龄的增大, 叶片光合作用能力明显下降。

与常规灌溉相比, 交替隔沟灌溉显著降低了植株上、中位叶片的蒸腾速率 (T_r), 提高了叶片瞬时水分利用效率 ($i\text{WUE}$)。交替隔沟灌溉下 AIN₀ 和 AIN_c 处理叶片与 CK₂ 相比具有较高的 T_r 和 WUE, 表明增施氮肥在一定程度上影响了叶片的水分利用情况。各处理下不同叶位 T_r 的变化规律与 P_n 相似, 即下位叶片显著低于上、中位叶片, 而不同叶位间 WUE 的变化没有显著差异。秋冬茬试验结果与冬春茬相似(数据未附)。

2.3 交替隔沟灌溉与施氮量对黄瓜生长的影响

由图 2 可见, 与 CK₁ 相比, 交替隔沟灌溉下植株的株高和叶片数均有一定程度降低, 并且与 CK₁ 处理间的差异随植株生长逐渐加大, 尤以 CK₂ 明显。交

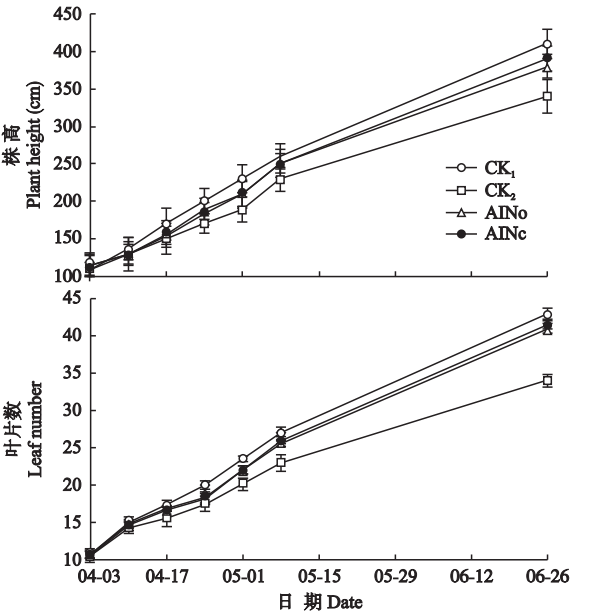


图 2 交替隔沟灌溉与施氮量对黄瓜生长的影响(冬春茬)
Fig. 2 Effects of alternative furrow irrigation and nitrogen application rate on cucumber growth (winter-spring season).

表 2 交替隔沟灌溉与施氮量对黄瓜产量形成、干物质分配和水分利用效率的影响
Table 2 Effects of alternative furrow irrigation and nitrogen application rate on the yield, dry matter distribution and water use efficiency of cucumber

季节 Season	处 理 Treatment	经济产量 Economic yield (kg · hm ⁻²)	劣果率 Inferior fruits rate (%)	生物产量(干物质量) Biomass yield (dry mass, kg DM · hm ⁻²)					根冠比 Root/shoot ratio	水分利用效率 Water use efficiency (kg · mm ⁻¹ · hm ⁻²)
				根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	果实 Fruit	总量 Total		
冬春茬 Winter-spring season	CK ₁	86096a	12. 3a	85. 5a	1440a	4441a	3124a	9091a	0. 0095a	223. 1a
	CK ₂	84338b	15. 5b	84. 0b	1303b	3738c	2914b	8038c	0. 0106b	336. 0b
	AINo	85602a	13. 9a	89. 1c	1351a	4107b	3103a	8677 a	0. 0104b	341. 0b
	AINc	85572a	12. 4a	87. 0c	1429a	4148b	3082a	8747 a	0. 0101a	340. 9b
秋冬茬 Autumn-winter season	CK ₁	40220a	22. 1a	43. 4a	588a	1944a	1802a	4378 a	0. 0101a	144. 9a
	CK ₂	39606b	25. 6b	42. 3a	480b	1492c	1695c	3709 b	0. 0115b	211. 2b
	AINo	40417a	22. 3a	46. 1b	570a	1815b	1798b	4229 a	0. 0110b	215. 6b
	AINc	40549a	23. 3a	45. 3b	571a	1877b	1822b	4315 a	0. 0106a	216. 3b

替隔沟灌溉下随施氮量的增加,植株生长各时期的株高和叶片数均呈增加趋势,其中优化氮肥(AINo)和常规氮肥(AINc)与CK₂之间差异显著,表明氮素施用对植株营养生长具有明显促进作用. 秋冬茬黄瓜生长指标变化规律与冬春茬相似(数据未附).

2.4 交替隔沟灌溉与施氮量对黄瓜产量形成、干物质分配和水分利用效率的影响

由于交替隔沟灌溉显著减少了灌溉量,其经济产量略低于常规灌溉,但是除CK₂外,处理间差异不显著(表2). 交替隔沟灌溉条件下黄瓜经济产量随施氮量的增加而增加,但优化氮肥(AINo)和常规氮肥(AINc)处理间差异不显著. 交替隔沟灌溉显著提高了黄瓜植株经济产量水平的水分利用效率WUE_y,但是不同施氮量处理WUE_y差异不显著. 与CK₁相比,交替隔沟灌溉处理劣果率有所上升,尤以CK₂处理更为明显.

与CK₁相比,交替隔沟灌溉下冬春茬黄瓜植株的果实、茎、叶生物产量及总生物产量有所降低,但根生物产量、根冠比以及根和果实的干物质分配比例明显增加(CK₂根生物产量除外),向叶的干物质分配比例下降;而常规灌溉下植株总生物产量较高,植株干物质主要向叶和果实分配,分别占总生物产量的48. 9%和34. 4%(表2,图3),这表明交替隔沟灌溉在减少灌溉量的同时还有利于植株根系发育和果实形成. 交替隔沟灌溉下随施氮量的增加,茎、叶生物产量、总生物产量以及向叶的干物质分配比例呈增加趋势,而根、果实生物产量先增加后略有减少,并且向根、果实的干物质分配比例呈下降趋势(表2,图3),表明增施氮肥更有利于叶的生长. 冬春茬黄瓜的生物产量和经济产量显著高于秋冬茬,两茬口试验结果类似.

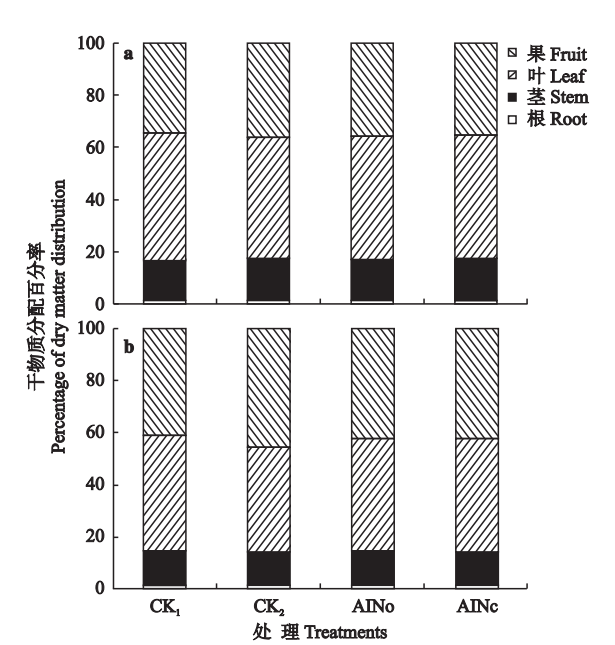


图 3 交替隔沟灌溉与施氮量对黄瓜各器官干物质分配比例的影响
Fig. 3 Effects of alternative furrow irrigation and nitrogen application rate on allocation of dry matter in different parts of cucumber plants.

a) 冬春茬 Winter-spring season; b) 秋冬茬 Autumn-winter season.

2.5 交替隔沟灌溉与施氮量对黄瓜果实硝酸盐、亚硝酸盐、Vc 和可溶性糖含量的影响

交替隔沟灌溉下,随施氮量的增加,冬春茬或秋冬茬黄瓜果实中硝酸盐、亚硝酸盐和可溶性糖含量均有所上升(表3). CK₂果实Vc含量最低,冬春茬和秋冬茬分别为9. 5和13. 5 mg · (100 g)⁻¹,优化氮肥(AINo)和常规氮肥(AINc)处理Vc含量较CK₂有所增加,但优化氮肥与常规氮肥处理间无显著差异. 表明尽管交替隔沟灌溉条件下不施用尿素等化学肥料可以降低果实硝酸盐和亚硝酸盐含量,但Vc

表 3 交替隔沟灌溉与施氮量对黄瓜果实硝酸盐、亚硝酸盐、Vc 和可溶性糖含量的影响
Table 3 Effects of alternative furrow irrigation and nitrogen application rate on nitrate, nitrite, vitamin C and soluble sugar contents of cucumber fruits

季节 Season	处 理 Treatment	硝酸盐含量 Nitrate content ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ FM)	亚硝酸盐含量 Nitrite content ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ FM)	维生素 C 含量 Vc content ($\mu\text{g} \cdot 100 \text{ mg}^{-1}$ FM)	可溶性糖含量 Soluble sugar content ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ FM)
冬春茬 Winter-spring season	CK ₁	62.9a	0.41a	11.5a	3.64a
	CK ₂	35.7b	0.32b	9.5b	3.29a
	AINo	43.5b	0.35b	10.8ab	3.58a
	AINc	67.0a	0.45a	11.8ab	3.61a
秋冬茬 Autumn-winter season	CK ₁	63.2a	0.42a	16.0a	4.84a
	CK ₂	45.8b	0.33b	13.5b	3.89b
	AINo	58.6a	0.34b	17.2a	5.22a
	AINc	68.9a	0.49a	17.8a	5.32a

和可溶性糖含量也显著下降,果实营养品质有所降低;而优化氮肥处理果实硝酸盐和亚硝酸盐含量仍符合我国蔬菜食用硝酸盐安全标准^[12],同时,Vc 和可溶性糖含量升高,在一定程度上改善了黄瓜品质.

3 讨 论

气孔是叶片 CO₂ 和水分进出的门户,气孔行为对植株光合和蒸腾起重要作用. 一般来说,植物光合作用的限制因素包括气孔和非气孔因素. 已有研究表明,在轻度和中度水分胁迫下,光合速率的降低主要是气孔限制的结果^[13]. Cowan^[14] 早在 1982 年就提出了植物水分利用的气孔优化调节理论,现有大量试验结果也证明,植株根系合成的脱落酸(ABA)可将土壤干旱信息传导至地上部叶片,促使开放的气孔部分关闭或抑制关闭的气孔开放,即调节实现气孔最优开度,在保持光合速率不下降或少下降的前提下,降低蒸腾速率,最终表现为 WUE 的大幅提高^[3-4,15]. 本试验中,交替隔沟灌溉方式通过土壤干湿交替,对黄瓜根系产生一定的水分亏缺胁迫,从而影响到地上部叶片的光合作用. 按照许大全^[13]、Farqhar 和 Sharkey^[16] 的观点,判断叶片 P_n 降低的主要原因是气孔因素还是非气孔因素,主要依据 C_i 及 L_s 的变化方向: C_i 降低和 L_s 升高表明气孔因素是主要原因,而 C_i 升高和 L_s 降低则表明非气孔因素是主要原因. 本研究中,与常规灌溉相比,交替隔沟灌溉下黄瓜上、中、下叶位叶片光合速率的小幅度降低是气孔限制所致,即气孔开度发生变化的结果. 叶片水平上的 WUE 指单位水量通过叶片蒸腾散失时光合作用所形成的有机物量,以 P_n 与 T_r 的比值来表示,是 WUE 的理论值,因此植物叶片 WUE 的高低取决于气孔控制的光合作用和蒸腾作用两个耦合过程^[17-18]. 本研究中,与常规灌溉相比,交替隔沟灌溉

下尽管黄瓜功能叶片的 P_n 和 T_r 均有所下降,但 P_n 降幅小于 T_r ,因此叶片 iWUE 提高,表明交替隔沟灌溉下气孔对 WUE 的调节作用增强. 本试验结果还表明,交替隔沟灌溉下,与零氮肥处理相比,增施氮肥(优化氮肥和常规氮肥处理)有助于黄瓜叶片 WUE 的提高. 氮素是植物叶绿素的主要组成元素,提高施氮水平可以提高叶片叶绿素含量,对植株光合能力和营养生长具有明显的促进作用^[19-20];邢倩等^[21] 研究认为,氮素等矿质营养能通过促进光合速率来提高叶片水分利用效率,本研究结果与此相同. 另外,交替隔沟灌溉及不同施氮处理下,与上、中叶位相比,黄瓜下叶位叶片较低的光合速率可能是气孔限制的结果,即 CO₂ 从周围空气进入叶片羧化部位的 G_s 降低;同时也可能存在非气孔限制因素,即叶片衰老过程中叶绿素的分解或光合关键酶 Rubisco 的降解等使下叶位叶片光合速率显著低于植株中上部功能叶片^[13].

本研究表明,与常规灌溉相比,日光温室黄瓜水肥同区交替隔沟灌溉减少了 50% 的灌溉量,并且由于局部根区灌溉造成了一定程度的水分亏缺,植株的株高、叶片数等表观生长指标和总生物产量有所降低,但是根生物产量、根冠比,以及根和果实干物质分配比例增加,经济产量与常规灌溉基本持平, WUE_y 显著升高. 原因可能是交替隔沟灌溉通过适度的作物根区干湿交替,以及对植株营养生长和生殖生长的促控结合,有效减少了生长冗余,调节了光合产物在各个器官之间的分配,优化了根冠比,从而实现大量节水而不减产或减产幅度较小,这与在棉花^[22]、玉米^[4] 等作物上的研究结果一致. 本试验中,交替隔沟灌溉下常规氮肥处理(AINc)施氮量分别为优化氮肥处理(AINo)的 3.5 倍(冬春茬)和 10.3 倍(秋冬茬),尽管随施氮量的增加(CK₂、AINo、

AINc), 植株总生物产量和经济产量呈增加趋势, 但 AINc 与 AINo 之间差异不显著, 并且 AINc 处理根生物产量有所下降, 根冠比趋于减小, 果实干物质分配比例降低. 这表明目前生产上普遍存在的过量氮肥施用不仅影响植株根系的生长, 而且不能大幅度提高作物经济产量, 并极有可能造成土壤表层盐分的积累及土壤深层氮素的淋失, 降低植株氮素利用效率. 因此, 日光温室黄瓜交替隔沟灌溉下如何获得最佳的水氮耦合模式以及进一步提高水氮利用效率, 尚需要深入研究.

参考文献

- [1] Kang S-Z (康绍忠), Zhang J-H (张建华), Liang Z-S (梁宗锁), *et al.* The controlled alternative irrigation—A new approach for water saving regulation in farmland. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 1997, **15**(1): 1–6 (in Chinese)
- [2] Kang S-Z (康绍忠), Pan Y-H (潘英华), Shi P-Z (石培泽), *et al.* Controlled root divided alternative irrigation—Theory and experiments. *Journal of Hydraulic Engineering* (水利学报), 2001(11): 80–86 (in Chinese)
- [3] Sun J-S (孙景生), Kang S-Z (康绍忠), Cai H-J (蔡焕杰), *et al.* Water saving mechanism for promoting water use efficiency by using alternate furrow irrigation techniques. *Journal of Hydraulic Engineering* (水利学报), 2002(3): 64–68 (in Chinese)
- [4] Liang Z-S (梁宗锁), Kang S-Z (康绍忠), Shi P-Z (石培泽), *et al.* Effect of alternate furrow irrigation on maize production, root density and water-saving benefit. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2000, **33**(6): 26–32 (in Chinese)
- [5] Pan Y-H (潘英华), Kang S-Z (康绍忠). Irrigation water infiltration in furrows and crop water use of alternate furrow irrigation. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2000, **16**(1): 39–43 (in Chinese)
- [6] Du T-S (杜太生), Kang S-Z (康绍忠), Hu X-T (胡笑涛), *et al.* Effect of alternate partial root-zone drip irrigation on yield and water use efficiency of cotton. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2005, **38**(10): 2061–2068 (in Chinese)
- [7] Wang Z-C (王振昌), Du T-S (杜太生), Yang L (杨磊). Responses of cotton growth, yield and economic value to alternate furrow irrigation in desert oasis of Northwest China. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2008, **26**(5): 84–89 (in Chinese)
- [8] Cao Q (曹琦), Wang S-Z (王树忠), Gao L-H (高丽红), *et al.* Effect of alternative furrow irrigation on growth and water use of cucumber in solar greenhouse. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2010, **26**(1): 47–53 (in Chinese)
- [9] Xing W-Q (邢维芹), Wang L-Q (王林权), Luo Y-M (骆永明), *et al.* Effect of spatial coupling between irrigation water and fertilizer on corn in semiarid area. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2002, **18**(6): 46–49 (in Chinese)
- [10] Zhang F-M (张福漫). *Facilities Horticulture*. Beijing: China Agricultural University Press, 2000: 189–192 (in Chinese)
- [11] Li H-S (李合生), Sun Q (孙群), Zhao S-J (赵世杰), *et al.* *Principles and Techniques of Plant Physiology and Biochemical Experiment*. Beijing: Higher Education Press, 1999 (in Chinese)
- [12] Zhou ZY, Wang MJ, Wang JS. Nitrate and nitrite contamination in vegetables in China. *Food Reviews International*, 2000, **16**: 61–76
- [13] Xu D-Q (许大全). *Photosynthetic Efficiency*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2002 (in Chinese)
- [14] Cowan IR. Regulation of water use in relation to carbon gain on higher plants// Lange OL, Nobel PS, Osmond CB, eds. *Physiological Plant Ecology II. Water Relations and Carbon Assimilation*. Berlin: Springer, 1982: 589–614
- [15] Zhang J-H (张建华), Jia W-S (贾文锁), Kang S-Z (康绍忠). Partial root zone irrigation: Its physiological consequences and impact on water use efficiency. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* (西北植物学报), 2001, **21**(2): 191–197 (in Chinese)
- [16] Farquhar GD, Sharkey TD. Stomatal conductance and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology*, 1982, **33**: 317–345
- [17] Li W-M (李卫民), Zhou L-Y (周凌云). Physiological and ecological responses of wheat leaves to soil water and nitrogen. I. Effects of soil water and nitrogen on wheat photosynthesis and water use efficiency. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2004, **35**(2): 136–142 (in Chinese)
- [18] Wang J-L (王建林), Yu G-R (于贵瑞), Fang Q-X (房全孝), *et al.* Responses of water use efficiency of nine plant species to light and CO₂ and their modeling. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(2): 525–533 (in Chinese)
- [19] Yin L (尹丽), Hu T-X (胡庭兴), Liu Y-A (刘永安), *et al.* Effect of drought stress on photosynthetic characteristics and growth of *Jatropha curcas* seedlings under different nitrogen levels. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(3): 569–576 (in Chinese)
- [20] Li X-P (李小平), Wang J-Y (王景燕), Wang D (王东), *et al.* Effects of fertilization level on diurnal variation of gas exchange of young *Eucalyptus grandis* leaf. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(11): 2734–2741 (in Chinese)
- [21] Xing Q (邢倩), Gu Y-F (谷艳芳), Gao Z-Y (高志英), *et al.* Effects of N, P and K nutrition on photosynthesis and water use efficiency of winter wheat. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2008, **27**(3): 355–360 (in Chinese)
- [22] Du T-S (杜太生), Kang S-Z (康绍忠), Zhang J-H (张建华). Response of cotton growth and water use to different partial root zone irrigation. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2007, **40**(11): 2546–2555 (in Chinese)

作者简介 张利东,男,1983 生,硕士研究生. 主要从事蔬菜生理生态与分子生物学研究. E-mail: zhanglidong20008@163.com

责任编辑 张凤丽