

不同栽培模式和施氮量对旱区西瓜氮素吸收运转的影响

段振佼¹, 薛亮^{2,3}, 马忠明^{2,3}, 赵安宇⁴

(1. 民勤县农业技术推广中心 甘肃民勤 733300; 2. 甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所 兰州 730070; 3. 国家农业环境张掖观测实验站 甘肃张掖 730070; 4. 甘肃省农业科学院张掖节水农业试验站 甘肃张掖 734000)

摘要:为探明旱作区不同栽培模式与氮肥管理的协同效应对西瓜氮素利用及产量、品质的影响,通过大田试验,采用裂区试验设计,设置覆膜平作(TD)、全膜沟播(TG)、全膜垄播(RM)和全膜垄上沟播(GM)4种栽培模式与0 kg·hm⁻²(N0)、120 kg·hm⁻²(N120)、240 kg·hm⁻²(N240)3个施氮水平,分析不同栽培模式及施氮量下西瓜干物质积累、氮素吸收运转的动态变化特征。结果表明,西瓜成熟期全膜垄上沟播栽培在施氮量240 kg·hm⁻²时干物质质量、地上部氮素累积量及产量分别为4 384.61 kg·hm⁻²、4.74 g·株⁻¹和40 798.51 kg·hm⁻²,均最高,较传统覆膜平作分别提高了15.75%、19.70%和27.16%。全膜垄上沟播栽培西瓜结果后叶转运氮和茎转运氮对成熟期西瓜果实的氮素累积贡献率分别为14.04%~16.89%和4.08%~7.13%,高于其他模式相同施氮水平;在施氮量为240 kg·hm⁻¹时西瓜叶、茎氮素转运率分别达28.07%和40.73%,叶、茎转运氮对果实的贡献率分别达到了16.89%和7.13%,均为各处理最高。全膜垄上沟播栽培和施氮量240 kg·hm⁻¹强化了营养生长阶段氮储备与生殖生长阶段的氮吸收,是陇东旱塬露地西瓜生产高产优质的栽培模式和氮素管理方案。

关键词:西瓜;旱区;栽培模式;施氮量;氮素吸收

中图分类号:S651

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2025)09-128-08

Effects of different cultivation models and nitrogen application rates on N absorption and translocation of watermelons in arid regions

DUAN Zhenjiao¹, XUE Liang^{2,3}, MA Zhongming^{2,3}, ZHAO Anyu⁴

(1. Minqin Agricultural Technology Extension Center, Minqin 733300, Gansu, China; 2. Institute of Soil, Fertilizer and Water-saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Science, Lanzhou 730070, Gansu, China; 3. National Agricultural Experimental Station for Agricultural Environment, Zhangye, Zhangye 730070, Gansu, China; 4. Zhangye Water-Saving Agricultural Experimental Station, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Zhangye 734000, Gansu, China)

Abstract: A field experiment was conducted to investigate the influence of the synergistic effects between different cultivation patterns and nitrogen fertilizer management in dryland farming areas on nitrogen utilization and quality in watermelon. A segmented experimental design was employed, with four cultivation modes, namely, covered surface cropping (TD), full-film furrow sowing (TG), full-film ridge sowing (RM), and full-film furrow sowing (GM) and three nitrogen application levels: 0 kg·hm⁻²(N0), 120 kg·hm⁻²(N120), and 240 kg·hm⁻²(N240). The dynamic change characteristics of dry matter accumulation and nitrogen absorption and translocation of watermelon under different cultivation patterns and nitrogen application rates were analyzed. The results showed that when the nitrogen application rate was 240 kg·hm⁻², the dry matter mass, aboveground nitrogen accumulation and yield of the full-film ridge-furrow sowing treatment were 4 384.61 kg·hm⁻², 4.74 g·plant⁻¹ and 40 798.51 kg·hm⁻², respectively, reaching the maximum values, which were 15.75%, 19.70% and 27.16% higher than those of the traditional flat planting with mulch, respectively. The nitrogen translocation from leaves and stems to fruits after fruit setting in full-film ridge-furrow seeding accounted for 14.04%-16.89% and 4.08%-7.13% of the nitrogen accumulation in mature fruits, respectively, which were higher than those in other cultivation patterns at the same nitrogen application level. When the nitrogen application rate was 240 kg·hm⁻², the translocation rates of leaves and stems reached 28.07% and 40.73%, respectively, and the contribution rates of nitrogen translocat-

收稿日期:2025-06-07;修回日期:2025-06-19

基金项目:甘肃省现代农业科技支撑体系区域创新中心重点科技项目(2020GAAS02);国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-25)

作者简介:段振佼,男,高级农艺师,主要从事节水农业研究。E-mail:564993889@qq.com

通信作者:薛亮,男,副研究员,主要从事节水农业研究。E-mail:xuel_3521@163.com

ed from leaves and stems to fruits were 16.89% and 7.13%, respectively, which were the highest among all treatments. The full-film ridge-furrow sowing and the nitrogen application rate of $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ enhances nitrogen reserve during the vegetative growth stage and promotes nitrogen uptake in the reproductive growth stage, which was a high-yield and high-quality cultivation pattern and nitrogen management scheme for field-grown watermelon production in the dryland area of eastern Gansu.

Key words: Watermelon; Arid region; Cultivation model; Nitrogen application rate; Nitrogen absorption

陇东黄土旱塬是典型的旱作农业区,露地西瓜栽培面积达 1.5 万 hm^2 ,占甘肃省西瓜种植总面积的 47.7%^[1]。该区域降雨多集中在 7—9 月,降水时空不均,与西瓜生育期需水规律不匹配,易形成前期干旱后期水涝问题,对西瓜生产造成极大影响。垄作覆膜技术通过构建沟垄微地形实现降水再分配,结合地膜覆盖形成集水增温协同效应^[2-3],并结合氮肥管理在生产中发挥了显著的增产效应^[4-5]。探明覆膜垄作栽培与氮肥调控的互作机制,对优化黄土高原西瓜旱作栽培技术体系具有重要价值。

覆膜垄作技术通过构建“垄面覆膜+沟底集雨”的微地形,显著提高了旱区降水和热量的利用效率^[6]。研究表明,垄沟结构较传统平作可使耕作层土壤含水量增加 12.8%~46.1%^[7]。垄作冬小麦、夏玉米和水稻耗水量较平作分别降低了 9.2%~14.2%、3.7%~9.5%、1.1%~2.7%,水分利用率分别提高了 13.2%~23.4%、10.3%~24.8% 和 10.0%~19.7%^[8-9]。在西瓜种植中,全膜双垄沟技术结合 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 氮肥处理,可使西瓜可溶性固形物含量提高至 12.8%,单果质量增加了 18%~21%,但过量施氮($>300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)会导致果实硝酸盐积累量超标 23.6%^[10]。管恩晴^[11]在干旱区砂田中的研究表明,起垄覆膜能够明显提高降水和露水的汇聚效果,土壤表层(0~10 cm)的含水量增加了 0.53%~2.4%。在盐碱危害区域,起垄后明显促进了 0~20 cm 土层土壤盐分的淋洗,西瓜可溶性糖和番茄红素含量较平作处理分别提高了 20.57%和 52.92%^[12]。

研究表明针对陇东旱塬西瓜生长特性与区域气候特征,垄上沟播模式通过改良垄体形态和对播种点位优化,实现了水热需求与生育期的高度匹配,相较于常规起垄覆膜,该模式集雨增温效应明显,西瓜苗期 0~15 cm 土壤积温增加了 10.79%,0~40 cm 土壤含水量提高了 37.82%,促进生长效果明显,产量提高了 10.34%^[13-15]。然而,当前研究多聚焦于水分运移规律与热量转化机制方面,对垄上沟播模式下养分时空运筹方案的系统研究仍显不足,特别是氮素在“垄体-沟播”系统中的迁移转化特征尚未明晰。笔者通过设置栽培模式与氮素供应梯度,分析西瓜各生育阶

段氮素吸收动态及干物质质量分配规律,以期对旱区西瓜栽培中氮肥精准运筹提供理论依据,助力构建“以垄调水、以膜保墒、以肥促效”的高效生产模式。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2022 年在甘肃省庆阳市宁县焦村镇西沟村进行,属典型黄土旱塬区,海拔 1291 m,年均气温 $8.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$,年日照 2280 h,年降水量 550 mm。试验地为黑垆土,0~20 cm 土壤的 pH 为 7.19,有机质含量(w ,后同) $14.33 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮含量 $0.51 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷含量 $27.64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾含量 $136.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

试验采用裂区设计,主处理为栽培模式,分别为覆膜平作(TD)、全膜沟播(TG)、全膜垄播(RM)和全膜垄上沟播(GM),各处理起垄、覆膜和种植方式见表 1 和图 1;副处理为施氮量,分别为 $0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N0)、 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N120)、 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N240)。共 12 个处理,每处理设 3 次重复,共 36 个小区。小区长 10 m,宽 3.6 m,面积 36 m^2 。试验所用氮肥为尿素(N 46%)、磷肥为普过磷酸钙(P_2O_5 12%)、钾肥为硫酸钾(K_2O 50%),各处理磷、钾肥施用量一致,即 P_2O_5 : $220 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, K_2O : $350 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,磷、钾肥和 50%氮肥作基肥在起垄前条施于地面,起垄后封埋于垄中,剩余氮肥在伸蔓期和坐果期各在垄侧打孔追施 25%。西瓜单行播种,株距 80 cm,行距 130 cm,种植密度 $9615 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。试验采用嫁接苗移植栽培,嫁接方法为插接法,砧木选用金砧南瓜(由青岛育成砧木有限公司提供),接穗为中晚熟西瓜品种西农 8 号(由西北农林科技大学选育),于 2022 年 6 月 3 日移栽,8 月 22 日收获。

1.3 样品采集与测定方法

1.3.1 植株样品采集及相关指标测定 在西瓜伸蔓期、开花期、膨果期和成熟期分别采集地上部植株,每小区随机选择 5 株长势均匀的植株,分为茎、叶(包含叶柄)、果实(坐果后采集)3 部分,置于干燥箱中 $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 杀青 30 min 后, $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒质量,在干燥箱内冷却 20 min 后,使用万分之一天平测定各器官干物质质量。将植株茎、叶与果实烘干样本粉碎

表 1 不同栽培模式的起垄、覆膜方式

Table 1 Furrow-ridge and plastic film mulching methods under different cultivation modes				
处理 Treatment	名称 Name	起垄方式 Furrow-ridge modes	覆膜方式 Plastic film mulching modes	播种位置 Sowing position
TD	覆膜平作	不起垄	种植行覆膜,膜宽 70 cm	膜中间播种
	Covered surface cropping	Without ridging	Cover the planting rows with 70 cm wide plastic film	Middle line of the plastic film sowing
TG	全膜沟播	拱形垄,垄高 30 cm,垄宽 100 cm,垄间集水沟宽 30 cm,垄间距 130 cm	垄体覆膜,膜宽 140 cm	垄间集水沟播种
	Full-film furrow sowing	Arched ridges, height is 30 cm, width is 100 cm, width of furrow between ridges is 30 cm, ridge row spacing is 130 cm	The ridges are covered with 140 cm wide plastic film	Inter-row water furrow sowing
RM	全膜垄播	拱形垄,垄高 30 cm,垄宽 100 cm,垄间集水沟宽 30 cm,垄间距 130 cm	垄体覆膜,膜宽 140 cm	垄上播种
	Full-film ridge sowing	Arched ridges, height is 30 cm, width is 100 cm, width of furrow between ridges is 30 cm, ridge row spacing is 130 cm	The ridges are covered with 140 cm wide plastic film	Ridge-top sowing
GM	全膜垄上沟播	拱形垄,垄高 30 cm,垄宽 100 cm,垄间集水沟宽 30 cm,垄间距 130 cm; 垄顶开微沟,沟宽 20 cm,深 10 cm	垄体覆膜,膜宽 140 cm	垄上集水沟播种
	Full-film furrow sowing	Arched ridges, height is 30 cm, width is 100 cm, width of furrow between ridges is 30 cm, ridge row spacing is 130 cm; The micro-furrow on the ridge top is 20 cm wide and 10 cm deep	The ridges are covered with 140 cm wide plastic film	Micro-furrow sowing

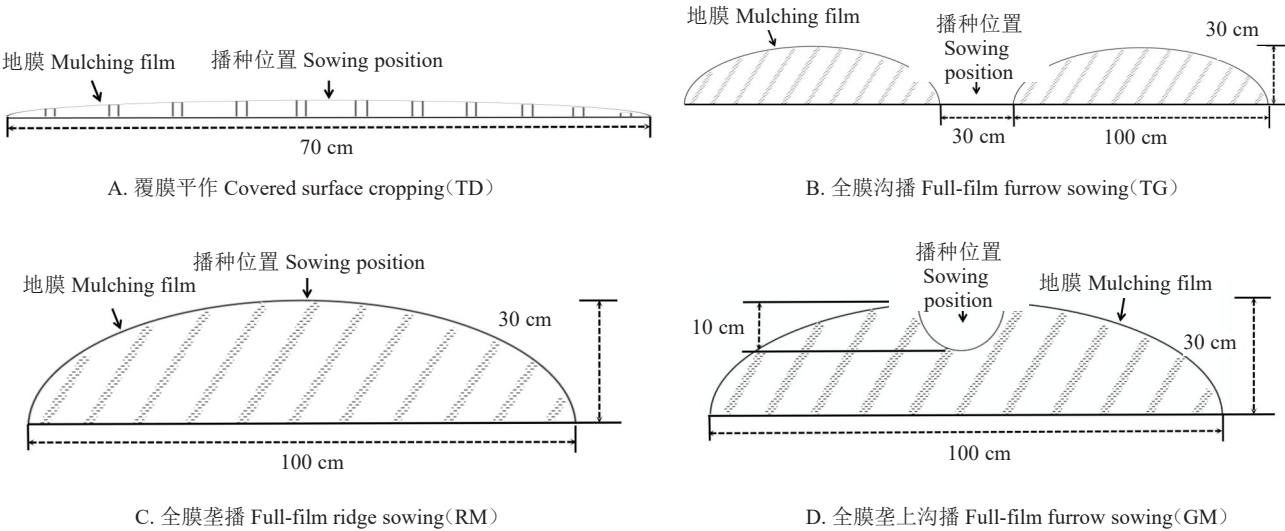


图 1 起垄方法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ridging method

后过筛(0.25 mm),分别称样,经 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮后,使用半自动凯氏定氮仪测定各器官全氮含量^[16]。

1.3.2 产量和品质测定 西瓜成熟后,根据小区面积称质量并计算产量。每小区随机选取果实 11 个,称量单瓜质量,然后将西瓜纵切,用手持式折光仪测定果实中心可溶性固形物含量(SSC),用 2,6-二氯靛酚钠比色法测定西瓜果实维生素 C 含量^[17]。

1.3.3 各指标计算方法 氮素累积量/(kg·hm⁻²)=全氮含量×干物质质量;

营养器官氮素转运量/(g·株⁻¹)=开花期营养器官氮素累积量-成熟期营养器官氮素累积量;

营养器官氮素转运率/%=营养器官氮素转运

量/开花期营养器官氮素累积量×100;

营养器官转运氮对果实的贡献率/%=营养器官氮素转运量/果实氮素累积量×100。

1.4 数据处理与分析方法

采用 WPS Office V12 统计数据,采用 SAS 9.0 进行 ANOVA 方差分析,不同变量之间的显著性检验采用单因子方差分析和邓肯法。

2 结果与分析

2.1 栽培模式与施氮量对西瓜不同生育期干物质量累积的影响

由表 2 可知,不同栽培模式与施氮量均能极显

著调控西瓜干物质积累进程。在西瓜伸蔓期,TD、TG、GM 模式下施用氮肥西瓜干物质累积量均显著高于不施氮处理。在生育阶段演进中,不同栽培模式与施氮量下西瓜植株干物质质量均持续增长,膨果期和成熟期干物质累积量分别占全生育期总量的46.99%~62.83%和34.43%~39.44%。GM 模式西瓜植株成熟期干物质质量在 N240 施氮水平下达 $4\,384.61\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,较 TD 模式同施氮处理提高15.75%。同一施氮水平 GM 模式各生育期干物质质量均最高。同一施氮水平下,GM 模式成熟期西瓜植株干物质质量较 TD、TG、RM 模式分别提高了11.97%~15.75%、17.99%~20.17%、8.49%~9.88%。

增施氮肥能显著促进干物质质量积累,N240 处理较 N0 在伸蔓期、开花期、膨果期和成熟期干物质

量分别提高 16.76%~23.39%、23.80%~47.16%、14.50%~21.60%和 10.65%~14.76%。成熟期不同栽培模式下,施氮量由 N0 增至 N120,西瓜植株干物质质量提高了 5.70%~7.65%;施氮量由 N120 增至 N240,西瓜植株干物质质量提高了 3.12%~6.61%,表明增施氮肥对干物质质量提升的效果随施氮量的增加而递减。

由表 2 可知,栽培模式与施氮量在开花期($F=14.09$)和膨果期($F=5.75$)均存在极显著交互。施氮量为 N240 时 GM 模式开花期干物质质量($1\,453.89\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)较其他模式提高 25.81%~49.47%,说明 GM 模式能更高效地利用高氮资源,将氮素转化为干物质,且 GM 模式在 N240 下的优势远大于 N0。

表 2 不同栽培模式及施氮量对西瓜不同生育期干物质的影响
Table 2 Effects of different cultivation modes and nitrogen application rates on dry matter mass of watermelons at various growth stages

处理 Treatment		伸蔓期 Extension stage	开花期 Flowering stage	膨果期 Expansion stage	成熟期 Maturing stage
TD	N0	101.92±3.07 b	785.68±17.30 c	2 113.85±17.18 c	3 423.30±65.07 c
	N120	114.08±5.68 a	907.54±12.66 b	2 309.72±33.74 b	3 673.34±19.02 b
	N240	119.34±3.71 a	972.68±16.59 a	2 448.83±90.48 a	3 787.94±40.89 a
TG	N0	97.78±2.82 b	785.31±8.93 c	2 059.06±45.76 c	3 238.16±98.43 c
	N120	110.72±7.31 a	866.61±25.08 b	2 139.07±14.55 b	3 485.91±116.61 b
	N240	120.65±6.90 a	1 155.63±29.14 a	2 357.59±36.87 a	3 716.15±21.00 a
RM	N0	108.94±8.16 b	860.70±14.74 c	2 158.66±23.78 c	3 541.13±41.98 c
	N120	119.51±3.59 ab	975.36±11.25 b	2 350.77±30.77 b	3 791.93±81.76 b
	N240	127.20±6.61 a	1 135.20±37.65 a	2 624.93±11.39 a	4 003.50±23.47 a
GM	N0	111.80±4.11 b	1 067.38±26.36 c	2 356.58±2.50 c	3 891.15±61.52 c
	N120	126.82±3.06 a	1 253.82±34.65 b	2 602.76±12.75 b	4 112.94±89.27 b
	N240	134.91±10.12 a	1 453.89±34.35 a	2 742.64±44.94 a	4 384.61±103.29 a
F 值	栽培模式	11.73**	486.35**	102.30**	167.59**
F value	Cultivation method(C)				
	施氮量	33.74**	413.79**	328.06**	123.21**
	Nitrogen application rate(N)				
	C×N	0.21 ns	14.09**	5.75**	1.29 ns

注:表中同列不同小写字母表示同一栽培模式下不同施氮量间差异显著($P<0.05$)。C 表示栽培方式;N 表示施氮量;*表示差异显著,**表示差异极显著,ns 表示差异不显著。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column of the table indicate significant differences among different nitrogen application rates under the same cultivation mode ($P<0.05$). C represents the cultivation method. N represents the nitrogen application rate. * indicates significant difference, ** indicates extremely significant difference, and ns indicates no significant difference. The same below.

2.2 栽培模式与施氮量对西瓜氮素累积量的影响

不同栽培模式和施氮条件下,西瓜开花期和成熟期氮素累积量如表 3 所示。由开花期至成熟期,西瓜地上部氮素累积量均大幅增加,但不同模式下增加程度不同。与开花期相比,TD、TG、RM 和 GM 模式成熟期西瓜地上部氮累积量分别增加了 1.56~1.81 $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$ 、1.44~1.85 $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$ 、1.59~2.16 $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$ 和

1.61~2.35 $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$,其中 GM 模式西瓜地上部氮累积量增加量最多。施氮量为 N240 时 TD 模式增加量最少,其他施氮量水平下 TG 模式增加量均最少。在成熟期,不同施氮量水平下,GM 模式地上部氮素累积量均最多,较 TD 模式提高了 9.22%~19.70%,而 TG 模式氮素累积量较 TD 模式降低了 1.01%~4.75%。

由表3可知,施氮量对西瓜不同生育期地上部氮素累积量均有显著或极显著影响。开花期和成熟期施氮量由N0增加到N120时,西瓜地上部氮素累积量分别增加了31.21%~42.18%和25.37%~37.99%,由N120增加到N240时,西瓜地上部氮

素累积量分别提高了14.35%~22.60%和6.23%~14.96%。在GM模式下,N0至N120,西瓜开花期地上部氮素累积量增加了0.62 g·株⁻¹,N120至N240氮素累积量增加了0.30 g·株⁻¹,氮素累积量的增量降低了51.61%,同一条件下成熟期的增量降低

表3 不同栽培模式及施氮量对西瓜氮素累积量的影响
Table 3 Effects of different cultivation modes and nitrogen application rates on nitrogen accumulation in watermelons (g·plant⁻¹)

处理 Treatment		开花期 Flowering stage			成熟期 Maturing stage			
		叶 Leaf	茎 Stem	地上部 Aboveground part	叶 Leaf	茎 Stem	果实 Fruit	地上部 Aboveground part
TD	N0	1.07±0.04 c	0.19±0.02 c	1.26±0.04 c	0.95±0.02 c	0.16±0.01 c	1.70±0.11 b	2.81±0.09 b
	N120	1.50±0.02 b	0.27±0.01 b	1.77±0.03 b	1.14±0.08 b	0.19±0.01 b	2.25±0.08 a	3.58±0.03 a
	N240	1.79±0.03 a	0.39±0.02 a	2.17±0.05 a	1.44±0.02 a	0.26±0.01 a	2.26±0.06 a	3.96±0.05 a
TG	N0	1.05±0.01 c	0.23±0.01 c	1.28±0.01 c	0.94±0.02 c	0.20±0.01 b	1.58±0.03 c	2.72±0.01 c
	N120	1.46±0.04 b	0.28±0.01 b	1.73±0.04 b	1.28±0.04 b	0.21±0.01 b	1.91±0.03 b	3.41±0.06 b
	N240	1.66±0.05 a	0.41±0.02 a	2.07±0.04 a	1.39±0.02 a	0.26±0.01 a	2.26±0.05 a	3.92±0.04 a
RM	N0	1.18±0.01 c	0.23±0.01 c	1.41±0.02 c	1.13±0.02 c	0.18±0.01 c	1.69±0.13 b	3.00±0.16 b
	N120	1.53±0.01 b	0.31±0.02 b	1.85±0.02 b	1.40±0.02 b	0.24±0.02 b	2.37±0.08 a	4.01±0.09 a
	N240	1.78±0.05 a	0.43±0.01 a	2.21±0.06 a	1.50±0.06 a	0.30±0.01 a	2.47±0.06 a	4.26±0.09 a
GM	N0	1.19±0.01 c	0.28±0.01 c	1.47±0.02 c	0.91±0.06 b	0.20±0.01 c	1.97±0.14 c	3.08±0.13 c
	N120	1.70±0.06 b	0.39±0.02 b	2.09±0.04 b	1.29±0.03 a	0.24±0.02 b	2.72±0.21 b	4.25±0.23 b
	N240	1.85±0.05 a	0.54±0.02 a	2.39±0.04 a	1.33±0.06 a	0.32±0.01 a	3.09±0.11 a	4.74±0.16 a
F 值 栽培模式(C)		2.57 ns	20.14**	6.07*	4.75 ns	6.46*	12.16**	4.69 ns
F value Cultivation method								
施氮量(N)		71.21*	107.00**	114.46**	50.03**	43.57**	32.23**	44.13**
Nitrogen application rate								
C×N		17.08*	4.66**	15.05**	6.70**	5.17**	5.78**	4.14**

了58.12%。

不同栽培模式和施氮量的交互作用对西瓜各部位及地上部氮素累积量的影响均达显著或极显著水平,二者存在相互调节的协同效应。开花期施氮量为N0时西瓜叶的氮素累积量4种栽培模式差异较小,施氮量为N120时,GM模式叶的氮素累积量较TD、TG、RM分别提高13.33%、16.44%和11.11%;施氮量为N120时GM模式西瓜地上部氮素累积量较TD、TG、RM分别提高18.08%、20.81%、12.97%,施氮量为N240时GM模式仍最高,说明GM模式在中高施氮量下对西瓜地上部氮素累积的促进作用显著。成熟期施氮量为N120时,GM模式果实氮素累积量较TD、TG、RM模式分别提高20.89%、42.41%和14.77%,施氮量由N120增加到N240,TD和RM模式果实氮素累积量差异不显著,GM模式差异显著,增幅达13.60%,可持续促进果实氮素累积。施氮量为N240时GM模式地上部氮素累积量最高,较其他模式提高了11.27%~20.92%,但施氮量为N120时GM模式仅较RM模式高5.99%,说明高施氮量下GM模式的

地上部氮素累积优势更突出。

2.3 栽培模式与施氮量对西瓜氮素转运的影响

栽培模式显著影响西瓜叶、茎氮素在生殖生长阶段的转运和对果实的贡献率(表4)。随着施氮量由N0增至N240,TD模式的叶、茎氮素转运量分别从0.11和0.03 g·株⁻¹提高至0.35和0.13 g·株⁻¹,TD模式叶转运率为10.36%~19.47%,低于GM模式的叶转运率(23.25%~28.07%)。GM模式N240处理下叶、茎转运率分别为28.07%和40.73%,较TD模式N240处理下分别提高了8.60个百分点和7.17个百分点,且结合表3可知,GM模式N240处理下地上部开花期到成熟期氮素累积量增加为2.35 g·株⁻¹,较TD、TG和RM模式高0.56、0.50和0.3 g·株⁻¹,表明全膜垄上沟播更有利于氮素在生育后期的吸收与转运。

施氮量对氮素再分配具有极显著调控作用。随着施氮量从N0增至N240,各栽培模式下叶氮素转运量增幅为85.71%(GM)~480.00%(RM),茎氮素转运量增幅为160.00%~400.00%。叶、茎转运氮对果实的贡献率分别从3.23%~14.04%和1.59%~

表 4 不同栽培模式及施氮量对西瓜氮素转运的影响							
Table 4 Effects of different cultivation modes and nitrogen application rates on nitrogen transport in watermelons							
处理 Treatment		叶转运量/(g·株 ⁻¹) Volume of leaf transfer/(g·plant ⁻¹)	茎转运量/(g·株 ⁻¹) Volume of stem transfer/(g·plant ⁻¹)	叶转运率 Transshipment ratio of leaf/%	茎转运率 Transshipment ratio of stem/%	叶转运氮对 果实贡献率 Nitrogen contribution rate of leaf to fruit/%	茎转运氮对 果实贡献率 Nitrogen contribution rate of stem to fruit/%
TD	N0	0.11±0.04 c	0.03±0.01 c	10.36±3.71 b	14.17±2.20 c	6.61±2.88 c	1.59±0.43 c
	N120	0.25±0.06 b	0.08±0.01 b	18.15±4.17 a	29.53±3.64 b	11.20±2.35 b	3.59±0.55 b
	N240	0.35±0.02 a	0.13±0.02 a	19.47±2.46 a	33.56±2.44 a	15.38±1.09 a	5.77±0.91 a
TG	N0	0.11±0.02 b	0.03±0.01 c	10.54±2.22 b	15.03±0.75 c	7.04±1.41 b	2.19±0.04 c
	N120	0.17±0.02 b	0.07±0.01 b	11.84±1.53 ab	23.58±1.67 b	9.04±1.29 ab	3.41±0.35 b
	N240	0.27±0.07 a	0.15±0.02 a	16.29±3.69 a	35.78±2.99 a	12.01±2.91 a	6.45±0.91 a
RM	N0	0.05±0.01 b	0.05±0.01 b	4.54±1.16 b	21.70±3.03 b	3.23±1.09 b	2.94±0.33 b
	N120	0.13±0.02 b	0.07±0.01 b	8.74±1.51 b	23.19±1.53 b	5.65±0.91 b	3.07±0.21 b
	N240	0.29±0.02 a	0.13±0.02 a	16.15±1.44 a	30.57±3.30 a	11.65±1.03 a	5.28±0.77 a
GM	N0	0.28±0.06 c	0.08±0.01 c	23.25±4.89 a	28.86±2.64 b	14.04±2.64 a	4.08±0.57 c
	N120	0.41±0.08 b	0.15±0.03 b	23.88±3.95 a	38.03±5.38 a	15.03±3.40 a	5.56±1.26 b
	N240	0.52±0.10 a	0.22±0.01 a	28.07±4.96 a	40.73±0.96 a	16.89±3.71 a	7.13±0.57 a
F 值	栽培模式(C)	13.26**	68.29**	4.89**	9.48**	29.15**	16.83**
F value	Cultivation method						
	施氮量(N)	22.99**	247.47**	25.95**	46.67**	36.11**	84.75**
	Nitrogen application rate						
	C×N	3.02*	4.03**	3.09*	11.30**	4.89**	2.13 ns

4.08%增至 11.65%~16.89%和 5.28%~7.13%。

栽培模式与施氮量对氮素茎转运量、茎转运率及叶转运氮对果实贡献率存在极显著交互作用。在施氮量为 N240 时,GM 模式茎转运率较 TD 模式高 7.17 百分点,GM 模式叶转运氮对果实贡献率为 16.89%,较 RM 模式提高 5.24 百分点。交互效应表明,采用全膜垄上沟播(GM)配合高氮(N240)可协同优化结果后氮转运与吸收,其叶、茎转运率及转运氮对果实贡献率均为最高,分别为 28.07%、40.73%和 16.89%、7.13%,为提升果实氮素累积的关键调控组合。

2.4 栽培模式与施氮量对西瓜产量和品质的影响

由表 5 可知,栽培模式和施氮量均对西瓜产量和 SSC 产生极显著影响。施氮量相同时,相对于 TD 模式,TG、RM 和 GM 模式产量分别提高了 2.91%~4.88%、6.22%~13.11%和 4.65%~27.16%;未施氮时,4 种栽培模式产量排序为 RM>TG>GM>TD,施用氮肥后,4 种栽培模式的产量排序为 GM>RM>TG>TD。施氮量对产量的提高呈现边际递减效应,当施氮量从 N0 增至 N120 时,各处理增产幅度为 7.01%~26.75%,从 N120 增至 N240 时,增产幅度为 1.26%~7.01%。栽培模式与施氮量对西瓜产量存在显著互作,相对于 TD、TG 和 RM 模式,施氮

量为 N120 时,GM 模式产量分别增加了 20.34%、17.25%和 13.29%;施氮量为 N240,GM 模式产量分别增加了 27.16%、23.56%和 12.42%。互作效应在 TD 与 GM 模式间表现最为明显,并在 GM 模式施氮量为 N240 时产量最高,为 40 798.51 kg·hm⁻²,较同模式 N0 处理增幅达 35.63%。

栽培模式显著影响西瓜 SSC。GM 模式在 N240 施氮水平下 SSC 最高,为 10.87%,较 TD 模式同处理提高 0.63 百分点(表 5)。施氮量对 SSC 提升效果显著,同一栽培模式下,N120 处理和 N240 处理 SSC 分别较 N0 处理提高 0.18~0.42 百分点和 0.23~0.83 百分点,N240 处理较 N120 处理提高幅度为 0.04~0.41 百分点。维生素 C 含量变化与 SSC 呈相同趋势,GM 模式在 N240 施氮水平下达 5.82 mg·100 g⁻¹,较其他模式同一施氮水平提高 0.87%~1.22%。同一栽培模式下维生素 C 含量对施氮量的响应效率存在差异,N120 处理较 N0 处理提高 11.27%~30.57%,N240 处理较 N120 处理提高 1.23%~5.24%。

3 讨论与结论

垄作改变了地形,垄间的集水沟和垄顶微沟都能汇聚降水,从而优化垄体水分空间分布^[18]。垄作

表 5 不同施氮量及栽培模式对西瓜产量和品质的影响

Table 5 Effects of different nitrogen application rates and cultivation patterns on watermelon yield and quality				
处理 Treatment		产量 Yield/(kg·hm ⁻²)	w(中心可溶性固形物) Central soluble solids content/%	w(维生素 C) Vitamin C content/(mg·100 g ⁻¹)
TD	N0	28 745.92±1 508.46 b	9.95±0.58 a	4.35±0.63 b
	N120	31 683.95±1 107.81 a	10.20±0.74 a	5.68±0.33 a
	N240	32 084.59±321.97 a	10.24±0.08 a	5.75±0.27 a
TG	N0	30 148.16±656.79 b	9.90±0.29 a	4.75±0.37 b
	N120	32 518.61±551.64 a	10.08±0.18 a	5.51±0.15 a
	N240	33 019.41±115.64 a	10.16±0.03 a	5.77±0.14 a
RM	N0	31 450.24±1 309.76 b	10.07±0.65 a	4.81±0.24 b
	N120	33 653.76±1 302.08 b	10.21±0.24 a	5.58±0.33 a
	N240	36 291.31±851.85 a	10.30±0.22 a	5.75±0.10 a
GM	N0	30 081.39±1 333.80 c	10.04±0.35 b	4.97±0.31 b
	N120	38 127.57±551.64 b	10.46±0.11 ab	5.53±0.29 a
	N240	40 798.51±1 682.97 a	10.87±0.29 a	5.82±0.15 a
F 值	栽培模式(C)	15.08*	2.97**	1.25 ns
F value	Cultivation method			
	施氮量(N)	47.19**	2.90**	39.89**
	Nitrogen application rate			
	C×N	5.31**	0.37 ns	0.95 ns

在耕翻过程中降低了土壤容重和紧实度,增加了土壤大团聚体含量^[19],有效降低了土壤空间内优先流的发生和分布密度,进而抑制水分向下部移动,达到扩大土壤蓄水空间的效果^[20]。拱形垄增加了受热面积,加上地膜的作用,垄作模式的土壤热量高于平作^[18]。同时,垄作模式采用肥料集中深施的方式代替平作的撒施,提高了耕作层养分的持留比例^[21]。水热条件的改善和充足的养分供应有利于土壤总体酶活性的提高^[22],也增加了微生物多样性和生物量,有利于保持土壤生态系统的动态平衡,给作物生长、产量提高提供了优化环境^[23]。本试验结果显示,西瓜成熟期,GM 模式西瓜地上部干物质质量在施氮量为 N0 时较 TD、TG、RM 模式分别提高 13.67%、20.17%、9.88%,施氮量为 N120 时分别提高 11.97%、17.99%、8.47%,施氮量为 N240 时分别提高 15.75%、17.99%、9.52%;西瓜成熟期 GM 模式西瓜地上部氮素累积量在施氮量为 N0 时较 TD、TG、RM 模式分别提高 9.22%、13.24%、2.67%,施氮量为 N120 时分别提高 18.72%、24.63%、5.99%,施氮量为 N240 时分别提高 19.70%、20.92%、11.27%。收获后,GM 模式西瓜产量在施氮量为 N0 时较 TD 高 4.65%,但较 TG、RM 模式分别降低 0.22%、4.35%,随着施氮量增加,GM 模式优势显现出来,施氮量为 N120 时较 TD、TG、RM 模式分别提高 20.34%、17.25%、13.29%,施氮量为 N240 时分别

提高 27.16%、23.56%、12.42%。与西瓜产量趋势类似,GM 模式西瓜 SSC 在施氮量为 N0 时较 TD 和 TG 提高 0.09 百分点和 0.14 百分点,但较 RM 模式降低 0.03 百分点,在施氮量为 N120 时较 TD、TG、RM 模式分别提高 0.26 百分点、0.38 百分点、0.25 百分点,施氮量为 N240 时分别提高 0.63 百分点、0.71 百分点、0.57 百分点。与以上指标不同,GM 模式较其他模式西瓜维生素 C 含量随施氮量增加而有所降低,GM 模式对西瓜品质的提升作用与其特殊构型有关,陇东旱塬的多雨时段正处于西瓜果实同化物累积的成熟期,GM 模式的播种点在垄顶微沟,大部分根系分布在垄体中,大垄的拱形结构会分流部分水分,水分通过垄间集水沟进入土壤深层,西瓜根系始终处于水分较为适宜的土壤环境,使蔗糖合成酶和淀粉合成相关酶的活性得以提高,促进了可溶性固形物、维生素 C 的合成^[24]。类似的结果在通过滴灌控制水分的试验中也得到了验证^[25]。

有效提高同化物转运量的途径是增加营养器官的累积量,协调与平衡“源库”关系,增大库容,并延长转运时间^[26-27]。垄作模式和施氮量有明显的协同效应,能够提高西瓜营养生长阶段叶片的叶绿素含量,增强光合同化能力,加快营养器官的同化物累积进程,促进“源”的生产能力^[28]。本试验结果显示,GM 模式施氮量为 N240 时结果前(开花期)地

上部氮素累积量较其他处理高 8.14%~15.46%,为同化物向果实的转运做好了充足的储备;结果后至成熟阶段,施氮量为 N240 时叶和茎的转运量和转运率均高于其他处理,果实中氮素累积量分别较 N0、N120 处理高 56.85%和 13.60%,表明 N240 处理的氮素供应较为充足。但同时也发现,GM 模式中,相对于 N0 至 N120,N120 至 N240 时西瓜地上部氮素累积增量在结果前降低了 51.61%,成熟期降低了 58.12%,这一现象符合报酬递减规律^[29]。表明在本试验条件下,GM 模式 N240 处理实现了营养生长阶段氮素累积和生殖生长阶段氮素转运的高效协同,是优化的栽培管理方案。

旱区露地西瓜生长受栽培模式和施氮量的共同影响。GM 模式在施氮量 240 kg·hm⁻²时,成熟期干物质量、地上部氮素累积量及产量均最高,分别为 4 384.61 kg·hm⁻²、4.74 g·株⁻¹和 40 798.51 kg·hm⁻²,较传统覆膜平作相同施氮量分别提高 15.75%、19.70%和 27.16%;同时可溶性固形物与维生素 C 含量也均最高,分别为 10.87%和 5.82 mg·100 g⁻¹。

全膜垄上沟播(GM)模式提高了营养器官氮素转运效率,该模式下结果后叶转运氮对成熟期西瓜果实的氮素累积贡献率为 14.04%~16.89%,茎贡献率为 4.08%~7.13%,高于其他模式相同施氮水平。在施氮量为 240 kg·hm⁻²时全膜垄上沟播模式可优化氮素分配,叶、茎转运率分别达 28.07%和 40.73%,较传统覆膜平作模式分别提高 8.60 个百分点和 7.17 百分点;叶、茎转运氮对果实的贡献率分别达到 16.89%和 7.13%,为各处理最高。全膜垄上沟播模式配合施氮 240 kg·hm⁻²强化了营养生长阶段氮储备与生殖生长阶段氮吸收的协同,是陇东旱塬露地西瓜生产高产优质的栽培模式和氮素管理方案。

参考文献

- [1] 甘肃农村年鉴编委会.甘肃农村年鉴[M].北京:中国统计出版社,2001.
- [2] DAI C T, LIU Y J, WANG T W, et al. Exploring optimal measures to reduce soil erosion and nutrient losses in southern China[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 210: 41-48.
- [3] NYAWADE S O, KARANJA N N, GACHENE C K K, et al. Effect of potato hilling on soil temperature, soil moisture distribution and sediment yield on a sloping terrain[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 184: 24-36.
- [4] 雒兴刚, 万海元, 安丽蓉, 等. 垄作条播下春小麦品种与施氮量对边行效应、产量与水分利用效率的影响[J]. *作物杂志*, 2025 (4): 251-258.
- [5] 周浩露, 申朝阳, 罗新宇, 等. 氮肥对垄沟集雨种植谷子氮素利用效率及产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2024, 57 (5): 885-899.
- [6] 倪东宁, 史海滨, 李瑞平, 等. 春玉米覆膜垄作沟灌条件下土壤水热效应及对产量的影响[J]. *水土保持研究*, 2016, 23 (2): 89-94.
- [7] 李永平, 杨改河, 冯永忠, 等. 黄土高原土壤风蚀区玉米起垄覆盖集水效应[J]. *农业工程学报*, 2009, 25 (4): 59-65.
- [8] 马丽, 刘天学, 韩德果, 等. 垄作对冬小麦、夏玉米产量和水分利用效率的影响[J]. *核农学报*, 2010, 24 (5): 1062-1067.
- [9] 姚林, 郑华斌, 刘建霞, 等. 分蘖期水分胁迫对不同栽培方式水稻生长发育及产量的影响[J]. *作物研究*, 2014, 28 (5): 455-460.
- [10] 熊丽. 全膜双垄沟种植模式下不同水氮处理对旱作春玉米产量及资源利用的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- [11] 管恩晴. 干旱地区垄沟集水覆盖模式对西瓜生长的影响研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2024.
- [12] 王莉莉, 田军仓, 王西娜, 等. 栽培方式施肥改良剂对盐碱地土壤水盐分布及西瓜产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2025, 41 (8): 88-96.
- [13] 白玉龙. 栽培模式对旱地土壤水热效应和西瓜生长的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2013.
- [14] 肖正璐, 薛亮, 南炳东, 等. 陇东黄土旱地西瓜全膜垄上沟播栽培技术[J]. *中国蔬菜*, 2018 (3): 89-90.
- [15] 马忠明, 白玉龙, 薛亮, 等. 不同覆膜栽培方式对旱地土壤水热效应及西瓜产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48 (3): 514-522.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [17] 康利允, 李晓慧, 高宁宁, 等. 不同硝铵配比对甜瓜叶片生理特性及产量、品质的影响[J]. *果树学报*, 2021, 38 (5): 760-770.
- [18] 张楷楷, 赵德明, 马菊花, 等. 垄沟秸秆覆盖对旱作马铃薯土壤水热特征及产量的影响[J]. *作物杂志*, 2025 (1): 139-146.
- [19] 郁宁, 马任甜, 寇太记, 等. 基于不同方法评价玉米-花生垄作间作和施磷对土壤团聚体稳定性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30 (11): 2053-2062.
- [20] 许昊, 陈晓冰, 杨婷, 等. 覆膜种植措施对垄作农地土壤优先流空间异质性的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2024 (7): 28-39.
- [21] 吴金芝, 黄修利, 侯园泉, 等. 垄沟种植对旱地玉米-麦轮作体系生产力和土壤硝态氮累积量的影响[J]. *中国农业科学*, 2023, 56 (11): 2078-2091.
- [22] 阙以琴, 刘玉兰, 李名莉, 等. 垄作栽培提升黄花菜产量及改善根际土壤环境[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2024, 44 (4): 71-81.
- [23] 张曼, 郝科星, 张焕, 等. 菌肥与生物炭配施对设施西瓜生长及土壤理化性质的影响[J]. *中国瓜菜*, 2023, 36 (5): 72-77.
- [24] YANG J C, ZHANG J H, WANG Z Q, et al. Activities of key enzymes in sucrose-to-starch conversion in wheat grains subjected to water deficit during grain filling[J]. *Plant Physiology*, 2004, 135 (3): 1621-1629.
- [25] 杨小振, 张显, 马建祥, 等. 滴灌施肥对大棚西瓜生长、产量及品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2014, 30 (7): 109-118.
- [26] 李帅, 程李洋, 常相杰, 等. 生物有机肥施用量对连作甜瓜产量及品质的影响[J]. *中国瓜菜*, 2025, 38 (2): 90-97.
- [27] 郭亚雯, 崔建利, 孟延, 等. 设施早熟西瓜和甜瓜的化肥施用现状及减施潜力[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26 (5): 858-868.
- [28] 魏海燕, 张洪程, 杭杰, 等. 不同氮素利用效率基因型水稻氮素积累与转移的特性[J]. *作物学报*, 2008, 34 (1): 119-125.
- [29] 于滨杭, 姬建梅, 白伟桦, 等. 基于产量和水氮利用效率的玉米/大豆间作系统炭氮配施方案优选[J]. *灌溉排水学报*, 2023, 42 (7): 25-33.