



日光温室冬春茬黄瓜滴灌的肥水优化管理

李若楠^{1,2}, 黄绍文¹, 史建硕², 王丽英², 唐继伟¹, 张怀志¹, 袁硕¹, 翟凤芝², 任燕利², 郭丽²

(¹ 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; ² 河北省农林科学院农业资源环境研究所, 石家庄 050051)

摘要:【目的】明确滴灌黄瓜不同生育阶段适宜的土壤含水量指标和土壤氮素供应值, 优化关键生育时期肥水施用, 为保障设施黄瓜绿色生产与高产提供科学依据。【方法】供试作物为日光温室冬春茬黄瓜。在相同基肥用量下, 滴灌追肥设计低量(W1)、中量(W2)、高量(W3)3个灌水量和低量(F1)、中量(F2)、高量(F3)3个施肥量, 共9个肥水组合处理。分生育阶段分析产量、品质、养分吸收量与肥水用量、主根区(0—40 cm)土壤含水量及养分供应水平的响应关系。【结果】(1)与W1处理相比, W2、W3处理商品瓜总产量显著增加, 增幅11.1%—12.8%, 其中W3处理第1、2次肥水管理期间商品瓜产量显著降低, 降幅10.4%—17.7%, W2、W3处理第6—8、10—12和14—16次肥水管理期间商品瓜产量分别增加10.8%—26.2%、21.2%—40.3%和33.5%—46.4%; W2、W3处理氮、磷、钾总吸收量显著增加, 增幅分别为17.9%—20.2%、28.3%—36.3%、25.9%—33.7%, 其中进入产瓜盛期后, 阶段养分吸收量增加显著; W2、W3处理产瓜期间主根区平均体积含水量增加4.2—6.4个百分点, 保持在相对含水量79%—87%; 果实含水量增加0.2—0.3个百分点, 但果实可溶性固形物、硝酸盐、可溶性糖、Vc含量分别下降7.4%—10.1%、0.9%—5.4%、5.9%—6.2%、5.5%—12.8%; 产瓜期间主根区硝态氮含量降低9.1%—68.0%; 灌水利用效率下降31.1%—49.3%。(2)与F1处理相比, F2、F3处理商品瓜总产量增加4.0%—7.9%; 氮、磷、钾总吸收量显著增加, 增幅分别为9.7%—13.1%、7.9%—11.8%、12.6%—17.3%; F2、F3处理产瓜期间主根区硝态氮含量增加38.0%—162.0%, 分别保持在24.6—47.9、27.3—72.2 mg·kg⁻¹; 但果实硝酸盐含量增加5.5%—14.6%, 肥料利用效率下降32.1%—47.8%。(3)从全生育期角度综合肥水效应, W2F2处理能保持较高产量、肥水利用效率和较优品质, 同时降低土壤氮素残留, 为冬春茬黄瓜兼顾绿色生产与高产的滴灌肥水用量。【结论】高产(170—180 t·hm⁻²)温室滴灌冬春茬黄瓜3月下旬至4月下旬(产瓜初期)、4月下旬至5月中旬(产瓜盛期前期)、5月中旬至6月中旬(产瓜盛期)、6月中旬至7月上旬(产瓜末期)主根区土壤适宜相对含水量分别为63%、78%、82%、85%, 下限控制在61%、73%、78%、81%; 在3月下旬至4月上旬, 主根区相对含水量上限控制在67%—71%。产瓜期间主根区适宜硝态氮含量维持在25—40 mg·kg⁻¹。

关键词: 日光温室; 滴灌; 冬春茬黄瓜; 土壤含水量控制值; 土壤氮素供应值; 肥水管理方案

Optimization Management of Water and Fertilization for Winter-Spring Cucumber Under Greenhouse Drip Irrigation Condition

LI Ruonan^{1,2}, HUANG ShaoWen¹, SHI JianShuo², WANG LiYing², TANG JiWei¹, ZHANG HuaiZhi¹,
YUAN Shuo¹, ZHAI FengZhi², REN YanLi², GUO Li²

收稿日期: 2019-05-21; 接受日期: 2019-07-15

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0201001)、国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-23-B02)、河北省农林科学院科学技术研究与发展计划(2018130101)、河北省农林科学院农业资源高效利用与绿色增长创新团队项目(F17R01)

联系方式: 李若楠, E-mail: liruonan2004@163.com、通信作者黄绍文, E-mail: huangshaowen@caas.cn。通信作者王丽英, E-mail: wangliying5@163.com

(¹Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081; ²Institute of Agricultural Resources and Environment, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050051)

Abstract: 【Objective】 This study focused on determining the appropriate soil water parameters and the potential of soil nitrogen supply at different growth stages of drip irrigated cucumber to optimize the water and fertilizer management and to guarantee the sustainable green and high yield production. 【Method】 A plot experiment was conducted inside a greenhouse using cucumber as tested material during the winter-spring growing season. Drip irrigation with 3 water amounts (W1, W2 and W3) and 3 fertilizer amounts (F1, F2 and F3) were designed to form 9 combination treatments. The impacts of the irrigation and fertilization amounts on the fruit yield, qualities, nutrient uptakes, water and fertilizer use efficiencies, soil water contents and nutrient availabilities were analyzed in the study. The response relationships between the marketable yields, the root zone soil water and available nitrogen contents at different growth stages were built. 【Result】 (1) Compared with W1, the total marketable yields were increased by 11.1%-12.8% under W2 and W3. The marketable yields were decreased by 10.4%-17.7% under W3 during the 1st-2nd fertigation managements, but which increased by 10.8%-26.2%, 21.2%-40.3% and 33.5%-46.4% under W2 and W3 during the 6th-8th, 10th-12th and 14th-16th fertigation managements, respectively. The rootzone (0-40 cm soil layer) soil water contents were increased by 4.2-6.4 percentage point by maintaining at the soil relative water content of 79%-87% under W2 and W3 and the N, P₂O₅ and K₂O uptakes by 17.9%-20.2%, 28.3%-36.3% and 25.9%-33.7%, respectively. However, the rootzone nitrate nitrogen contents were decreased by 9.1%-68.0% under W2 and W3, the water use efficiency by 31.1%-49.3%, and the fruit soluble solids, nitrate, soluble sugar and Vc contents by 7.4%-10.1%, 0.9%-5.4%, 5.9%-6.2% and 5.5%-12.8%, respectively. (2) Compared with F1, the total marketable yields were increased by 4.0%-7.9% under F2 and F3. The rootzone (0-40 cm soil layer) nitrate nitrogen contents were increased by 38.0%-162.0% under F2 and F3, and the N, P₂O₅ and K₂O uptakes by 9.7%-13.1%, 7.9%-11.8% and 12.6%-17.3%, respectively. However, the fruit nitrate contents increased by 5.5%-14.6% under F2 and F3 and the partial factor productivities were decreased by 32.1%-47.8%. (3) From the view of whole growth period, W2F2 was recommended to drip irrigated cucumber because of the relatively higher yield, water and fertilizer use efficiencies and qualities, and lower residual soil nitrogen. 【Conclusion】 For greenhouse cucumber with a target yield of 170-180 t·hm⁻², the appropriate soil relative water contents were recommended as 63%, 78%, 82% and 85% during the March 21th- April 20th (the initial harvesting stage), April 21th-May 20th (the early vigorous harvesting stage), May 21th-June 20th (the vigorous harvesting stage) and June 21th-July 10th (the late harvesting stage), respectively. The corresponding low limits of soil relative water contents were recommended as 61%, 73%, 78% and 81%, respectively. The suitable rootzone nitrate nitrogen should be maintained at 25-40 mg·kg⁻¹ during the yield formation.

Key words: greenhouse; drip irrigation; winter-spring cucumber; soil water content limits; soil available nitrogen level; optimization of water and fertilization managements

0 引言

【研究意义】黄瓜作为温室栽培的主要蔬菜种类, 肥水超量施用问题一直受到普遍关注。滴灌将肥水精准输送至作物根区, 提高肥水利用效率, 是化肥减施与节水灌溉的关键技术之一。然而, 调查表明温室黄瓜滴灌肥水不合理施用问题较为突出。以山东寿光为例, 温室黄瓜单季滴灌水量 8 510.0 m³·hm⁻², 养分总施入量达 N 2 146.0、P₂O₅ 1 431.0、K₂O 2 075.0 kg·hm⁻²^[1], 远超高产黄瓜需求。研究温室冬春茬黄瓜滴灌肥水施用参数, 优化关键生育阶段肥水用量, 对于建立滴灌肥水精准量化管理技术, 促进设施蔬菜绿色生产与高产有重要意义。【前人研究进展】目前温

室冬春茬黄瓜滴灌肥水合理施用研究较少。一些研究表明, 设施冬春茬黄瓜滴灌灌水 4 586.0 m³·hm⁻², 施氮 659.6 kg·hm⁻², 并配施小麦秸秆, 能实现产量 120 t·hm⁻², 并显著降低氮素损失^[2-3]。温室冬春茬黄瓜膜下滴灌模型预测灌水下限为相对含水量 85%, 施氮 381.3 kg·hm⁻², 施钾 K₂O 600.7 kg·hm⁻², 能得到最高产量 136.1 t·hm⁻², 兼顾品质较优^[4]。温室冬春茬黄瓜滴灌模型模拟灌水 2 500.0 m³·hm⁻² 配合施氮 300 kg·hm⁻² 为最优管理, 能实现产量 100.0—120.0 t·hm⁻²^[5]。温室黄瓜模型模拟产量 138 t·hm⁻² 以上, 品质综合评分 88 分以上的肥水一体化优化施肥方案为 N 665.5—827.6 kg·hm⁻², P₂O₅ 267.9—334.3 kg·hm⁻², K₂O 1043.1—1 235.0 kg·hm⁻²^[6]。上述研究中产量低于实际生产水平

(150 t·hm⁻² 以上), 多以合理化滴灌肥水总量为主, 缺乏不同生育阶段适宜肥水用量研究, 对于模型模拟所得结果还需进一步验证。此外, 研究发现温室秋冬茬黄瓜滴灌水量 1 240.0—1 510.0 m³·hm⁻² 配合施氮量 318—504 kg·hm⁻², 能达到最优产量 (50—75 t·hm⁻²)、灌水效率和 Vc 含量^[7]。温室秋冬茬黄瓜产量水平 49.5 t·hm⁻², 滴灌水量 1 520.0 m³·hm⁻² 配合施氮 360 kg·hm⁻² 较为适宜^[8]。温室秋冬茬黄瓜滴灌按照 75%蒸发蒸腾量灌水配合施用 N 360 kg·hm⁻²、P₂O₅ 180 kg·hm⁻²、K₂O 540 kg·hm⁻², 能实现产量 65.5 t·hm⁻²^[9]。这些研究多集中于秋冬茬口, 由于不同种植茬口温室光温条件差异, 限制了所得滴灌肥水用量在冬春茬口上的应用。还有一些研究采用盆栽试验^[10-11], 所得肥水参数需进一步田间验证。【本研究切入点】以高产 (170—180 t·hm⁻²) 温室冬春茬黄瓜为研究对象, 以优化不同生育阶段滴灌肥水施用为目标, 采用团队多年研发的黄博系列滴灌专用肥, 田间定位研究不同肥水用量对产量、品质、肥水利用效率、土壤养分供应与利用的影响, 分生育阶段剖析产量、养分吸收与主根区土壤含水量和养分供应水平的响应关系。【拟解决的关键问题】提出基于高产温室冬春茬黄瓜发育阶段的滴灌适宜参数, 建立方便操作的简便量化滴灌肥水管理方案。

1 材料与方法

1.1 供试地点

供试温室位于河北省农林科学院大河试验园区, 为钢混结构塑料薄膜日光温室, 长 56 m, 宽 9 m。蔬菜种植区长 54 m, 宽 7.5 m。试验起始时间为 2016 年 8 月。供试土壤类型为黏壤质石灰性褐土。耕层土壤基础理化性质如下: NO₃⁻-N 12.0 mg·kg⁻¹, Olsen-P 16.3 mg·kg⁻¹, NH₄OAc-K 110.0 mg·kg⁻¹, 电导率 (EC_{5:1}) 108.0 μS·cm⁻¹, pH 8.2 (2.5 : 1 v/w, 25℃)。0—10、10—20、20—30、30—40 cm 土层土壤田间持水量 (体积含水量) 分别为 23.7%、25.0%、26.9%、27.7%。

1.2 试验设计

表 1 温室冬春茬黄瓜滴灌水量与肥量设计

Table 1 Water and fertilizer amounts for drip irrigated winter-spring cucumber under greenhouse condition

	单次滴灌水量 Irrigation rates (m ³ ·hm ⁻²)			单次滴灌肥量 Fertilizer rate (kg·hm ⁻²)		
	W1	W2	W3	F1	F2	F3
定植至开花期间 Seedling stage to flowering stage	90.0	135.0	180.0	37.5	75.0	112.5
花后至拉秧期间 Flowering stage to vine removed stage	120.0	195.0	270.0	75.0	112.5	150.0

供试温室 2016 年秋冬茬、2017 年冬春茬、2017 年秋冬茬种植番茄^[12]。本研究供试作物为 2018 年冬春茬黄瓜。采用膜下滴灌灌水方式。试验共设计低量 (W1)、中量 (W2)、高量 (W3) 3 个水量和低量 (F1)、中量 (F2)、高量 (F3) 3 个肥量, 共 9 个肥水组合处理。参考黄绍文等^[13]所得黄瓜每形成 1 000 kg 产量需吸收 N 2.14 kg、P₂O₅ 1.09 kg、K₂O 2.75 kg, 估算供试温室冬春茬黄瓜目标产量 170—180 t·hm⁻² 下, N、P₂O₅、K₂O 需求量分别为 363.8—385.2、185.3—196.2、467.5—495.0 kg·hm⁻²。采用研究团队多年研发的黄博系列滴灌专用肥, 根据河北、天津等地多年研究结果, 生育期内滴灌 15—20 次肥水, 各处理施肥量和灌水量见表 1。

试验开始前各处理基施商品有机肥 15 t·hm⁻² (鲜基)。有机肥干基 N、P₂O₅、K₂O 含量分别为 1.83%、3.88%、1.89%, 含水量为 29.5%。基肥有机肥 N、P₂O₅、K₂O 施入量分别为 193.3、409.9、200.1 kg·hm⁻²。供试滴灌追肥为团队多年研发的黄博系列全水溶滴灌专用肥。各处理黄瓜定植至第 1 根瓜收获期间施用黄博高氮型滴灌专用肥 2 次, 肥料 N-P₂O₅-K₂O 含量为 22-12-16+TE+BS (TE 指螯合态微量元素, BS 指海藻酸钾、植物诱抗蛋白等生物刺激物)。第 1 根瓜收获至拉秧期间施用黄博高钾型滴灌专用肥 14 次, 肥料 N-P₂O₅-K₂O 含量为 19-6-25+TE+BS。F1、F2、F3 处理滴灌追施 N-P₂O₅-K₂O 总量分别为 216.0-72.0-274.5 kg·hm⁻²、332.3-112.5-417.8 kg·hm⁻²、448.5-153.0-561.0 kg·hm⁻²。各处理统一灌溉定苗水和缓苗水, 按照常规管理进行, 单次水量 266.7 m³·hm⁻²。生育期间配合追肥滴水 16 次, 未滴灌清水。W1、W2、W3 处理总灌水量分别为 2 393.3、3 533.3、4 673.3 m³·hm⁻²。

试验为随机区组排列, 各处理设计 3 次重复。试验小区面积为 15 m² (7.5 m×2.0 m)。试验开始前, 小区内保持原状土, 在小区四周开挖沟槽放入 4 mm PVC 板, 埋深 100 cm, 进行小区隔离。在 F2 处理下, 低 (W1)、中 (W2)、高 (W3) 水量各小区 (9 个小区) 安装土壤水盐原位监测设备 (单杆多节式水盐

传感器，内含 7 层水盐同测传感探头，巍图科技），每小时监控记录 0—10、10—20、20—30、30—40、40—60、60—80 和 80—100 cm 土层水分和盐分含量变化。

供试黄瓜品种为津优 35，定植时间 1 月 30 日，拉秧时间 7 月 6 日。每小区种植行距 0.67 m，株距 0.3 m。试验由具有蔬菜栽培经验的技术人员进行日常管理，包括除草、定期喷药预防病虫害。

1.3 测试项目及方法

黄瓜每次收获记录各小区产量和果实数量，实收实产。在苗期（3 月 13 日）、产瓜初期（4 月 14 日）、产瓜盛期（5 月 24 日）、产瓜末期（拉秧，7 月 5 日）各小区选取两株代表性样品，分根、茎、叶 60℃烘干，测定干重。各小区选取 5 株植株，采集全生育期打下叶片，烘干测定干重。选取产瓜盛期商品果实测定硝酸盐、Vc、可溶性固形物、可溶性糖和水分含量。植株和商品果实干样研磨成粉测定全氮、全磷、全钾含量。在苗期、产瓜初期、产瓜盛期、产瓜末期在两株之间靠近根部按照“S”形采集 0—20 和 20—40 cm 土壤样品，每小区 10 钻制备混合样，测定硝态氮含量。

植株和果实样品均用硫酸-过氧化氢消煮，全氮用蒸馏定氮法测定，全磷用钼锑抗比色法测定，全钾用原子吸收分光光度计测定^[14]。果实硝酸盐采用紫外分光光度法测定；可滴定酸采用 0.1 mol·L⁻¹ NaOH 滴定法测定；Vc 采用 2,6-二氯酚酚滴定法测定；可溶性固

形物采用 ATAGO PAL—1 手持式折射仪测定；可溶性糖采用硫酸-蒽酮比色法测定。土壤硝态氮采用 2 mol·L⁻¹ KCl 浸提，紫外分光光度法测定；土壤速效磷采用 0.5 mol·L⁻¹ 碳酸氢钠溶液浸提，钼锑抗比色法测定；土壤速效钾采用 1 mol·L⁻¹ 醋酸铵溶液浸提，火焰光度计测定；土壤电导率采用水土比 5：1，电导率仪测定；土壤 pH 采用水土比 2.5：1，pH 计测定^[14]。田间持水量采用原位饱灌后 24 h，由土壤水分原位监测设备软件作物水盐廓线监测分析系统（IrriScan）分析得出。

1.4 数据处理

肥料利用效率（肥料偏生产力 PFP，kg·kg⁻¹）为单位滴灌专用肥氮磷钾用量下作物的经济产量。

$PFP=(Y\times1000)/F$ ，式中 Y 为商品产量（t·hm⁻²），F 为专用肥氮磷钾总施入量（kg·hm⁻²）；

灌水利用效率（IWUE，kg·m⁻³）为单位灌水量下作物的经济产量， $IWUE=(Y\times1000)/I$ 式中 I 为配合专用肥滴灌水量（m³·hm⁻²）。

本研究采用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据处理与图表制作。采用 SAS 软件两因素方差分析对数据进行统计。

2 结果

2.1 滴灌肥水量对冬春茬黄瓜产量的影响

表 2 为滴灌肥水量对黄瓜产量及其构成的影

表 2 滴灌肥水量对冬春茬黄瓜商品产量、瓜条数、单瓜重和肥水利用效率的影响

Table 2 Commercial yield, fruit number, signal fruit weight and water and fertilizer use efficiencies of drip irrigated cucumber as affected by the different water and fertilizer rates

处理 Treatment	商品瓜 Marketable cucumber				肥料利用效率 Fertilization use efficiency (kg·kg ⁻¹)
		总产量 Total fruit yield (t·hm ⁻²)	瓜条数 Total fruit number (×10 ⁴ ·hm ⁻²)	单瓜重 Signal fruit weight (g)	
灌水量 Irrigation rate	W1	160.8 b	86.9 b	185.8 a	86.4
	W2	178.7 a	93.0 a	192.1 a	59.6
	W3	181.4 a	93.8 a	193.5 a	43.8
施肥量 Fertilization rate	F1	167.0 B	86.7 B	192.9 A	296.9
	F2	173.8 AB	92.2 A	188.4 A	201.5
	F3	180.1 A	94.7 A	190.1 A	154.9
P 值 P value					
	W	<0.01**	0.03*	0.06	—
	F	0.01*	0.02*	0.37	—
	W×F	0.45	0.62	0.87	—

小写字母代表滴灌水量处理间差异达到 5%显著水平；大写字母代表滴灌肥量处理间差异达到 5%显著水平。*表示差异显著（P<0.05），**表示差异极显著（P<0.01）。下同
Data followed by lowercase letters indicate the significant differences between irrigation rates at the 5% level. Data followed by uppercase letters indicate the significant differences between fertilizer rates at the 5% level. * represents significant difference at the 5% level; ** represents significant difference at the 1% level. The same as below

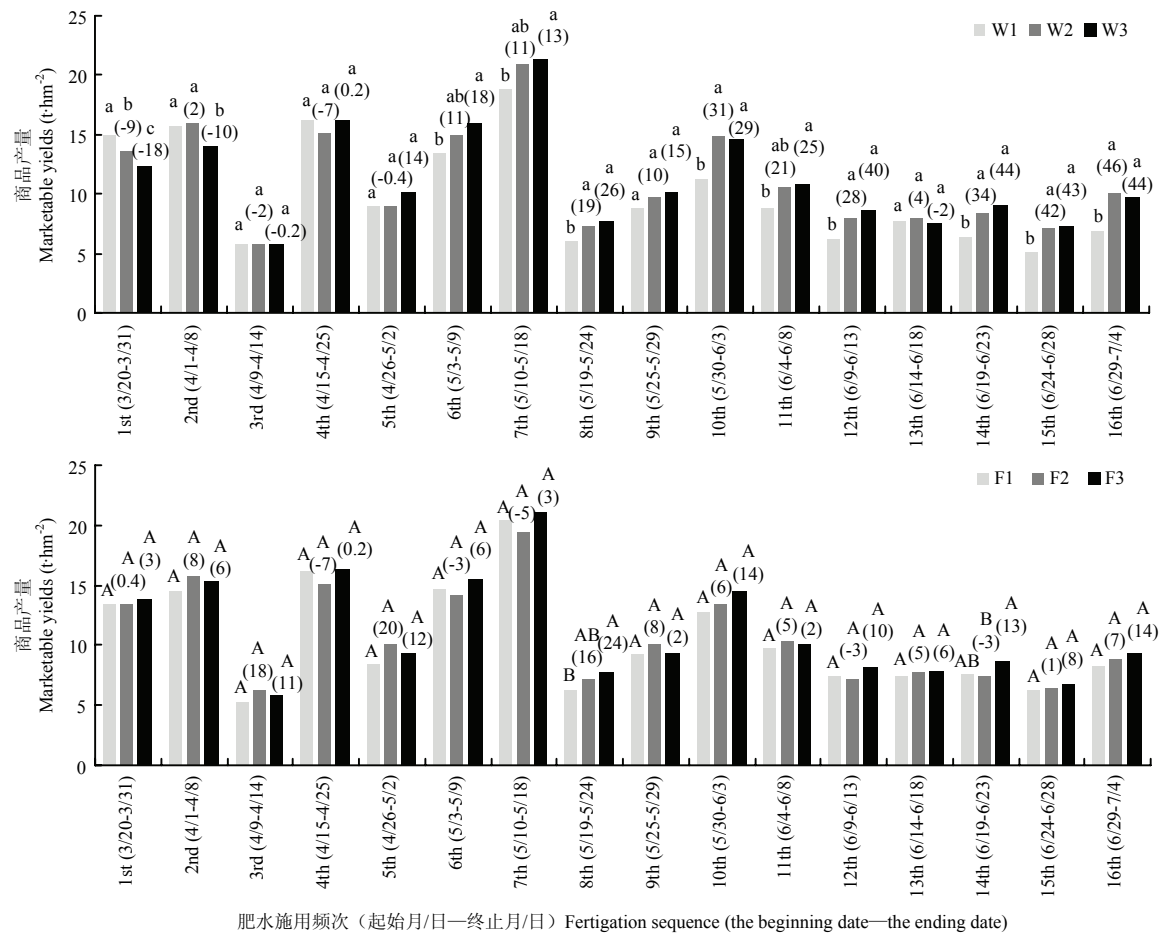
响。肥水交互效应对商品瓜产量及构成没有显著影响，单独对主效应进行分析。W2、W3 处理商品瓜总产量和瓜条数较 W1 处理显著增加，商品产量增幅分别为 11.1%、12.8%，瓜条数增幅分别为 7.1%、8.0%。F2、F3 处理商品瓜较 F1 处理分别增产 4.0%、7.9%，瓜条数分别增加 6.4%、9.2%，其中 F1 处理与 F3 处理差异显著。滴灌肥水利用效率随肥水用量的增加而降低，W2、W3 处理灌水利用效率较 W1 处理分别下降 31.1%、49.3%，F2、F3 处理肥料利用效率较 F1 处理分别下降 32.1%、47.8%。

将产瓜期划分为 16 个阶段，分别对应每次滴灌肥水管理（图 1）。在第 1、2 次肥水管理期间，W3 处理商品瓜较 W1 处理显著减产，降幅 10.4%—17.7%。在第 6—8、10—12 和 14—16 次肥水管理期间，W2、W3 处理商品瓜较 W1 处理分别增产 10.8%—26.2%、

21.2%—40.3%、33.5%—46.4%，其中 W1 处理与 W3 处理在上述期间商品瓜产量差异显著，W1 处理与 W2 处理在第 8、10、12、14、15、16 次肥水管理期间商品瓜产量差异显著。滴灌肥量（除第 8 次肥水管理期间）和肥水交互效应对不同阶段商品产量没有显著影响。

2.2 滴灌肥水用量对冬春茬黄瓜品质的影响

分析产瓜盛期黄瓜品质变化（表 3）发现，与 W1 处理相比，W2、W3 处理果实硝酸盐、可溶性糖、Vc 和可溶性固形物含量逐渐降低，而果实含水量呈增加趋势，其中 W2、W3 处理果实可溶性固形物含量下降显著，降幅 7.4%—10.1%。与 F1 处理相比，F2、F3 处理果实硝酸盐含量逐渐增加，其中 F3 处理硝酸盐含量增加显著，增幅 14.6%；可溶性糖、Vc、可溶性固形物含量对滴灌肥量没有显著响应。肥水交互作用对各品质指标没有显著影响。



图号中数据为 W2、W3 处理较 W1 处理增减产百分比 (%)
Yield changes of W2 and W3 treatments to W1 treatment were displayed by the percentage in parentheses

图 1 滴灌肥水用量对冬春茬黄瓜不同阶段商品产量的影响

Fig. 1 Marketable yields of drip irrigated cucumber as affected by the different water and fertilizer rates at various harvesting stages

表 3 滴灌肥水用量对冬春茬黄瓜产瓜盛期品质的影响

Table 3 Fruit qualities of drip irrigated cucumber as affected by the different water and fertilizer rates

处理		硝酸盐	可溶性糖	Vc	可溶性固形物	果实含水量
Treatment		Nitrate content	Soluble sugar content	(mg·100 g ⁻¹)	Soluble solids content	Fruit water content
		(mg·kg ⁻¹)	(mg·g ⁻¹)		(%)	(%)
灌水 Irrigation rate	W1	269.7 a	57.1 a	1.2 a	3.9 a	96.6 a
	W2	267.3 a	53.7 a	1.2 a	3.6 b	96.8 a
	W3	255.0 a	53.6 a	1.1 a	3.5 b	96.9 a
施肥量 Fertilization rate	F1	247.4 B	55.9 A	1.1 A	3.7 A	96.7 A
	F2	261.1 AB	54.5 A	1.2 A	3.7 A	96.8 A
	F3	283.5 A	54.0 A	1.2 A	3.7 A	96.8 A
P 值 P value						
W		0.51	0.08	0.60	0.02*	0.14
F		0.05*	0.48	0.45	0.80	0.62
W×F		0.95	0.87	0.63	0.91	0.24

2.3 滴灌肥水用量对冬春茬黄瓜不同生育阶段养分吸收的影响

分析不同生育阶段养分吸收（图 2）变化发现，W2、W3 处理产瓜盛期和产瓜末期养分阶段吸收量较 W1 处理显著增加，产瓜盛期氮、磷、钾阶段吸收量增幅分别为 21.3%—27.3%、26.8%—34.2%、20.8%—33.6%，产瓜末期对应增幅分别为 27.4%—35.3%、47.8%—61.9%、49.5%—59.2%。W1、W2、W3 处理产瓜初期氮、磷、钾阶段吸收量没有显著差异。综合全生育期，W2、W3 处理氮、磷、钾总吸收量较 W1 处理显著增加，增幅分别为 17.9%—20.2%、28.3%—36.3%、25.9%—33.7%。

F3 处理产瓜初期氮、磷、钾阶段吸收量较 F1 处理显著增加，增幅分别为 22.4%、17.8%、18.3%；产瓜盛期和产瓜末期 F2、F3 处理仅钾素阶段吸收量较 F1 处理显著增加，增幅分别为 13.1%—17.3%、13.1%—16.1%。综合全生育期，F2、F3 处理氮、磷、钾总吸收量较 F1 处理显著增加，增幅分别为 9.7%—13.1%、7.9%—11.8%、12.6%—17.3%。肥水交互效应对养分吸收没有显著影响。

2.4 滴灌水量对冬春茬黄瓜主根区土壤含水量的影响

分析不同阶段主根区（0—40 cm 土体）土壤含水量发现（表 4），第 1—16 次肥水管理期间，W2、W3 处理主根区土壤平均体积含水量较 W1 处理分别增加 1.4—6.0、3.9—8.4 个百分点，平均相对含水量分

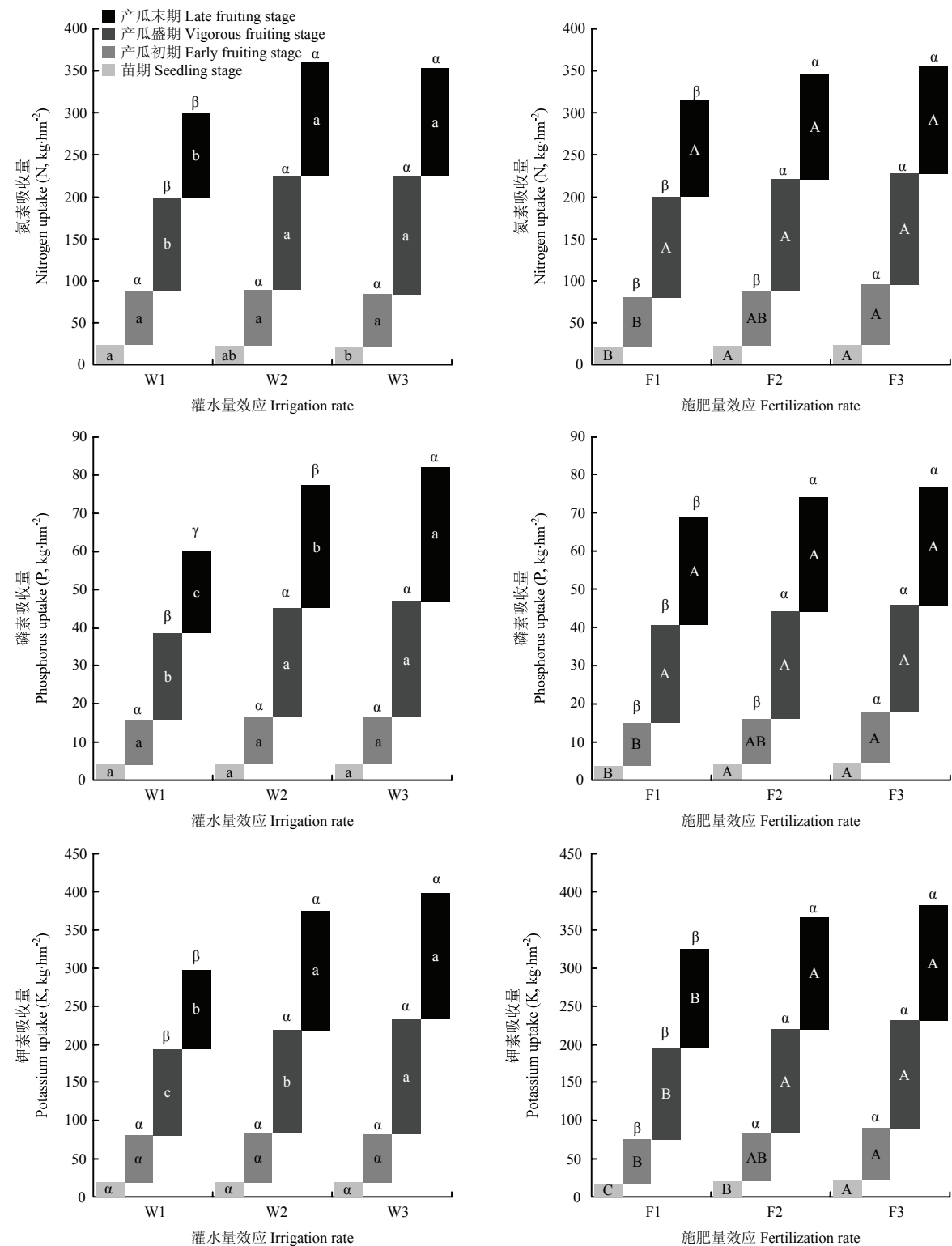
别在 69%—86%、79%—93%之间。从第 3 次肥水管理开始，W1 与 W3 处理主根区土壤含水量差异显著；从第 5 次肥水管理开始，W1 与 W2 处理主根区土壤含水量差异显著。

2.5 滴灌肥水用量对冬春茬黄瓜主根区土壤硝态氮含量的影响

分析不同生育阶段主根区土壤硝态氮含量变化发现（表 5 和表 6），在苗期、产瓜初期、产瓜盛期、产瓜末期，W2、W3 处理 0—20 cm 土层硝态氮含量较 W1 处理显著降低，降幅分别为 28.0%—39.6%、33.7%—49.5%、26.4%—37.4%、45.3%—68.0%；W2、W3 处理 20—40 cm 土层硝态氮含量也呈降低趋势，其中 W3 处理硝态氮含量下降显著，对应时期降幅分别为 41.4%、18.2%、30.0%、55.9%。

在产瓜初期、产瓜盛期、产瓜末期，与 F1 处理相比，F2、F3 处理 0—20 cm 土层硝态氮含量逐渐增加，其中在产瓜盛期、产瓜末期增加显著，对应增幅分别为 57.1%—155.1%、73.7%—162.0%；F2、F3 处理产瓜初期、产瓜盛期、产瓜末期 20—40 cm 土层硝态氮含量较 F1 处理分别增加 38.0—92.8%、71.8%—145.4%、50.7%—123.4%，处理间差异均显著。

肥水交互作用对产瓜盛期 0—20 cm 土层、产瓜末期 0—40 cm 土体硝态氮含量影响显著（表 6），表现为上述时期对应土层增加单位水量 F3 处理硝态氮含量降幅显著高于 F1 处理，增加单位肥量 W1 处理硝态氮含量增幅显著高于 W3 处理。



某生育阶段期间养分吸收量差异用英文字母表示，标注于该生育期对应柱形中部；从定植至某生育阶段养分积累量差异用希腊字母表示，标注于柱形顶端
English letters represent nutrient uptakes during a growing interval and marking in the column; Greek letters represent nutrient uptakes from the transplanting to a certain growing stage and marking at the top of the column

图 2 滴灌肥水用量对冬春茬黄瓜不同阶段养分吸收量的影响

Fig. 2 Nutrient uptake of drip irrigated cucumber as affected by the different water and fertilizer rates at various growing stages

表 4 不同滴灌水量下冬春茬黄瓜主根区 0—40 cm 土体不同阶段平均体积含水量 (%) 变化

Table 4 Average soil volumetric water contents at 0-40 cm soil depth as affected by the different drip irrigation rates at various harvesting stages

肥水施用频次 (起始月/日—终止月/日) Fertigation sequence (the beginning date — the ending date)	W1	W2	W3
第 1 次 The first practice (3/23—3/31)	16.6 a (64)	18.0 a (70)	20.4 a (79)
第 2 次 The second practice (3/31—4/8)	15.9 a (62)	17.9 a (69)	20.3 a (79)
第 3 次 The third practice (4/8—4/14)	16.4 b (63)	19.4 ab (75)	21.7 a (84)
第 4 次 The forth practice (4/14—4/25)	16.6 b (64)	19.8 ab (76)	21.8 a (84)
第 5 次 The fifth practice (4/25—5/2)	16.6 b (64)	20.4 a (79)	22.0 a (85)
第 6 次 The sixth practice (5/2—5/9)	15.8 b (61)	20.2 a (78)	22.2 a (86)
第 7 次 The seventh practice (5/9—5/18)	14.8 b (57)	20.1 a (77)	22.3 a (86)
第 8 次 The eighth practice (5/18—5/24)	14.5 b (56)	20.5 a (79)	22.9 a (89)
第 9 次 The ninth practice (5/24—5/29)	15.2 b (59)	21.1 a (81)	23.3 a (90)
第 10 次 The tenth practice (5/29—6/3)	15.6 b (60)	21.2 a (82)	23.2 a (90)
第 11 次 The eleventh practice (6/3—6/8)	15.6 b (60)	21.3 a (82)	23.3 a (90)
第 12 次 The twelfth practice (6/8—6/13)	16.0 b (62)	21.6 a (83)	23.6 a (92)
第 13 次 The thirteenth practice (6/13—6/18)	16.7 b (65)	21.9 a (84)	23.7 a (92)
第 14 次 The fourteenth practice (6/18—6/23)	17.2 b (67)	22.0 a (85)	23.7 a (92)
第 15 次 The fifteenth practice (6/23—6/28)	17.6 b (68)	22.2 a (86)	23.9 a (93)
第 16 次 The sixteenth practice (6/28—7/4)	17.8 b (69)	22.1 a (85)	23.5 a (91)
开花至拉秧期间 (3/23—7/4) Flowering to vine removing	16.2 b (63)	20.4 a (79)	22.5 a (87)

括号内数字为相对含水量值；同行数据后不同字母代表处理间差异达到 5%显著水平
Relative water contents were displayed in parentheses. Data within rows followed by different letters indicate significant differences between irrigation treatments at the 5% level

表 5 滴灌肥水用量对冬春茬黄瓜不同阶段 0—40 cm 土体硝态氮含量的影响 (mg·kg⁻¹)

Table 5 Soil nitrate nitrogen contents at 0-40 cm soil depths as affected by the different water and fertilizer rates of drip irrigation at various growing stages (mg·kg⁻¹)

处理 Treatment		0—20 cm 土层 0-20 cm soil layer		20—40 cm 土层 20-40 cm soil layer		
		苗期 Seedling stage	产瓜初期 Early fruiting stage	苗期 Seedling stage	产瓜初期 Early fruiting stage	产瓜盛期 Vigorous fruiting stage
灌水量 Irrigation rate	W1	36.6 a	35.9 a	31.0 a	28.2 a	32.6 a
	W2	26.4 b	23.8 b	24.8 b	25.6 ab	27.8 ab
	W3	22.1 b	18.1 b	18.2 c	23.1 b	22.8 b
施肥量 Fertilization rate	F1	24.8 A	16.6 B	21.7 A	17.9 C	16.1 C
	F2	26.4 A	26.5 AB	25.0 A	24.6 B	27.6 B
	F3	33.9 A	34.7 A	27.3 A	34.4 A	39.5 A
P 值 P value						
W		<0.01**	<0.01**	<0.01**	0.04*	0.04*
F		0.06	<0.01**	0.09	<0.01**	<0.01**
W×F		0.77	0.36	0.75	0.75	0.34

表 6 滴灌肥水量对冬春茬黄瓜不同阶段 0—40 cm 土体硝态氮含量的交互效应分析 (mg·kg⁻¹)

Table 6 Soil nitrate nitrogen contents at 0—40 cm soil depths as affected by the interaction of water and fertilizer rates at various growing stages (mg·kg⁻¹)

处理 Treatment		0—20 cm 土层 0- 20 cm soil layer		20—40 cm 土层 20-40 cm soil layer
		产瓜盛期 Vigorous fruiting stage	产瓜末期 Late fruiting stage	产瓜末期 Late fruiting stage
灌水量 Irrigation rate	W1	38.7 a	79.0 a	52.9 a
	W2	28.5 b	43.3 b	31.3 b
	W3	24.3 b	25.3 c	23.3 c
施肥量 Fertilization rate	F1	17.9 C	27.6 C	22.7 C
	F2	28.1 B	47.9 B	34.2 B
	F3	45.6 A	72.2 A	50.6 A
灌水量×施肥量 Irrigation rate×Fertilization rate	F1	W1	19.7 cd	47.9 c
		W2	17.9 cd	19.8 e
		W3	15.9 d	14.9 e
	F2	W1	34.1 b	74.4 b
		W2	28.9 bc	41.9 cd
		W3	21.2 cd	27.3 de
	F3	W1	62.4 a	114.7 a
		W2	38.7 b	68.1 b
		W3	35.6 b	33.7 cde
P 值 P value				
	W	<0.01**	<0.01**	<0.01**
	F	<0.01**	<0.01**	<0.01**
	W×F	0.02*	0.02*	<0.01**

3 讨论

3.1 温室滴灌冬春茬黄瓜关键生育时期适宜土壤含水量

从全生育期角度，中、高水量滴灌冬春茬黄瓜较低水量显著增产，并达到高产水平。由于高水量下存在过量灌溉问题，因此参考中水量推荐冬春茬黄瓜产量 180 t·hm⁻²，滴灌水量 3 533.3 m³·hm⁻² 较适宜。定位研究表明温室冬春茬黄瓜滴灌水量 3 420—4 170 m³·hm⁻²，能实现产量 160—200 t·hm⁻²^[15]。本研究结果与定位试验所得结果较为接近。此外，一些研究显示温室冬春茬黄瓜滴灌水量 2 217.0—5 635.9 m³·hm⁻²，能实现产量 70.0—133.1 t·hm⁻²^[3, 16-18]。但上述研究产量水平较实际生产偏低。

从不同生育阶段角度，根据阶段产量与主根区土壤含水量响应关系，明确在第 1—4 次肥水管理期间(3 月 20 日至 4 月 25 日)，低水量为较适宜滴灌水量，

对应主根区平均相对含水量 63%，为该阶段适宜土壤含水量。低水量下该阶段产量较优可能与地温相对较高有关。研究发现随着土壤含水量的增加，温室滴灌黄瓜番茄 20 cm 和 30 cm 处地温降低^[19]。在第 5—16 次肥水管理期间(4 月 26 日至 7 月 4 日)，中水量为较适宜滴灌水量，对应主根区平均相对含水量为 77%—86%，为该阶段适宜土壤含水量。

进一步研究产量建成发现，本研究第 10 次肥水管理期间(5 月 30 日至 6 月 3 日)日产瓜速率最高(2.3—3.0 t·hm⁻²)。这与华北平原冬春茬黄瓜产瓜高峰在 5 月底至 6 月中旬^[20]的研究结果一致。黄瓜产瓜高峰期为需水高峰期，日耗水强度可达 4.7 mm^[21]。根据冬春茬黄瓜产瓜高峰形成规律和耗水规律，将第 5—16 次肥水管理分为 3 个阶段：第 5—7 次肥水期间(4 月 25 日至 5 月 18 日，产瓜盛期前期)、第 8—12 次肥水期间(5 月 19 日至 6 月 13 日，产瓜盛期)、第 13—16 次肥水期间(6 月 14 日至 7 月 4 日，产瓜末期)，

对应中水量下主根区平均相对含水量分别为 78%、82%、85%，为较适宜土壤含水量。前人研究表明温室膜下滴灌春茬黄瓜产瓜期应保持土壤相对含水量 85%—90%^[22]。负压灌溉下网室砂壤土盆栽秋茬黄瓜叶片碳同化和蒸腾耗水协同平衡的适宜土壤相对含水量为开花期 70%—93%、产瓜盛期 78%—103%、产瓜末期 73%—104%^[10]。本研究冬春茬黄瓜产瓜盛期及末期土壤适宜含水量接近前人研究结果。

3.2 温室滴灌冬春茬黄瓜关键生育时期灌溉上限与下限

在第 1、2、3、4 次肥水管理期间，低水量下主根区相对含水量分别在 61%—67%、60%—64%、60%—66%、60%—67% 之间波动，表明滴灌下限控制在土壤相对含水量 61% 时该阶段黄瓜产量不受影响。在第 5、6、7、8、9、10、11、12、13、14、15、16 次肥水管理期间，中水量下主根区相对含水量分别在 73—83%、73—82%、73—81%、73—82%、76—84%、78—88%、78—87%、78—88%、81—89%、81—89%、81—90%、81—92% 之间波动，表明第 5—7 次、第 8—12 次、第 13—16 次肥水期间滴灌下限分别控制在土壤相对含水量 73%、78%、81% 时黄瓜产量不受影响。研究表明温室冬春茬黄瓜膜下滴灌适宜灌水下限为相对含水量 85%^[4]。温室膜下滴灌秋冬茬黄瓜产瓜初期灌水下限设置为土壤相对含水量 65% 为宜，产瓜盛期保证灌水下限为土壤相对含水量 80% 有利于产量的增加^[23]。本研究所得冬春茬黄瓜灌溉下限与前人结果较为接近。

然而，在第 1 次肥水期间，中水量下显著减产（主根区平均相对含水量 70%），以低水量下主根区相对含水量波动上限 67%，为该阶段滴灌上限。在第 2 次肥水管理期间，高水量下显著减产（主根区平均相对含水量 79%），以中水量下主根区相对含水量波动上限 71%，为该阶段滴灌上限。研究表明温室滴灌春茬黄瓜定植后灌溉上限控制在相对含水量 90% 左右能保证优质、高产^[24]。温室滴灌黄瓜无论春茬或秋茬产瓜期适宜的灌溉上限为土壤相对含水量 90%^[25]。砂壤土盆栽滴灌春夏茬黄瓜全生育期灌溉上限以土壤相对含水量 90% 为宜^[26]。本研究所得冬春茬黄瓜产瓜初期滴灌灌水上限与前人有较大差异，这与春茬（4 月 11—14 日）、春夏茬（3 月 16 日）较冬春茬（1 月 31 日）黄瓜定植晚，此时地温升高，地温不再对产量构成限制有关。

3.3 温室滴灌冬春茬黄瓜关键生育时期适宜施肥参数

本研究在中低土壤肥力下，中、高肥量滴灌冬春

茬黄瓜较低肥量增产 4.0%—7.9%，产量水平达到 170—180 t·hm⁻²。估算有机肥作为基肥提供的当季可利用 N、P₂O₅、K₂O 量分别为 77.3、286.9、180.1 kg·hm⁻²^[27]。结合追施养分量，估算低肥量当季可利用 N、P₂O₅、K₂O 总量分别为 293.3、358.9、454.6 kg·hm⁻²，对应中肥量分别为 409.6、399.4、597.9 kg·hm⁻²，高肥量分别为 525.8、439.9、741.1 kg·hm⁻²。参考中、高肥量下全生育期全株养分吸收量，确定产量水平 170—180 t·hm⁻²，需要吸收 N 344.7—355.1 kg·hm⁻²、P₂O₅ 170.0—176.1 kg·hm⁻²、K₂O 441.2—459.6 kg·hm⁻²。根据上述，低肥量下当季可利用氮量低于高产黄瓜氮素需求量，这是低肥量减产的原因。在低肥量下，产瓜期间主根区硝态氮维持在 17.0—25.1 mg·kg⁻¹，表明该土壤氮素供应难以满足黄瓜 170 t·hm⁻² 以上产量需求，但可实现 160 t·hm⁻² 产量。

在与供试条件相近的温室，冬春茬黄瓜目标产量 175 t·hm⁻²，在基施有机粪肥 15 t·hm⁻² 下，滴灌水量 3 533.3 m³·hm⁻²，参考中肥量推荐滴灌追施 N 330 kg·hm⁻²、P₂O₅ 110 kg·hm⁻²、K₂O 420 kg·hm⁻² 较为适宜。前人研究表明在中低土壤肥力下，温室冬春茬黄瓜产量水平 170 t·hm⁻²，滴灌灌水 3 719.0 m³·hm⁻²，经济施氮量为 300 kg·hm⁻²，施磷不宜超过 P₂O₅ 300 kg·hm⁻²^[15, 28]。本研究较上述结果推荐施氮量略高，可能与基础土壤肥力差异有关。此外，一些研究显示在中等土壤肥力下，设施冬春茬黄瓜滴灌灌水 2 250.0—4 586.0 m³·hm⁻²，施氮 245.0—673.2 kg·hm⁻²，能实现产量 70—136.1 t·hm⁻²^[3-5, 17]。上述研究黄瓜产量偏低。

中肥量下产瓜期间 0—40 cm 土层硝态氮含量维持在 25.6—41.0 mg·kg⁻¹，表明滴灌下该土壤氮素供应能保证黄瓜 175 t·hm⁻² 产量水平，低于黄绍文等^[29]给出的中等肥力蔬田硝态氮适宜供应量 50—100 mg·kg⁻¹。沟灌下冬春茬黄瓜获得最佳产量的土壤硝态氮含量为 37.4—72.9 mg·kg⁻¹^[30]。该结果表明与沟灌下相比，滴灌黄瓜在较低的土壤氮素供应量下即可获得高产。中肥量下产瓜末期较产瓜盛期 0—40 cm 土体硝态氮含量呈增加趋势，表明接近黄瓜拉秧时可适量减少 1—2 次追肥。由于供试有机粪肥磷素含量偏高，导致有机肥用量偏低，从提升土壤有机质的角度，有条件的区域可适当配施秸秆。

3.4 温室滴灌冬春茬黄瓜优化肥水管理方案

根据上述研究结果，建立高产温室冬春茬黄瓜简便量化滴灌肥水管理方案。在与供试条件相近的温室，冬春茬黄瓜目标产量 175 t·hm⁻²，基施有机粪肥 15

t·hm⁻², 定苗水、缓苗水按常规管理进行, 单次 266.7 m³·hm⁻², 苗期到开花期和产瓜期分别选择 N-P₂O₅-K₂O 配比接近 22-12-16 和 19-6-25 的全水溶滴灌专用肥, 推荐滴灌肥水追施方案如下: 苗期可根据长势滴灌肥水 1 次, 单次水量 90 m³·hm⁻², 单次肥量 37.5 kg·hm⁻²; 3 月下旬至 4 月上旬 (20 d, 开花期—产瓜初期), 每 10 天滴灌肥水 1 次, 滴灌 2 次, 单次水量 90 m³·hm⁻², 单次肥量 75 kg·hm⁻²; 4 月中旬至 4 月下旬 (20 d, 产瓜初期), 每 9—10 天滴灌肥水 1 次, 滴灌 2 次, 单次水量 120 m³·hm⁻², 单次肥量 112.5 kg·hm⁻²; 5 月上旬至 5 月中旬 (20 d, 产瓜盛期前期), 每 7 天滴灌 1 次, 滴灌 3 次, 单次水量 195 m³·hm⁻², 单次肥量 112.5 kg·hm⁻²; 5 月下旬至 6 月中旬 (30 d, 产瓜盛期), 每 5—6 天滴灌 1 次, 滴灌 5 次, 单次水量 195 m³·hm⁻², 单次肥量 112.5 kg·hm⁻²; 6 月下旬至 7 月初 (15 d, 产瓜末期), 每 4 天滴灌 1 次, 滴灌 3 次肥水和 1 次清水, 单次水量 195 m³·hm⁻², 单次肥量 112.5 kg·hm⁻²。采用该方案时应视冬春茬口天气情况做灵活调整。综合上述方案, 冬春茬黄瓜全生育期滴灌水量 3 383 m³·hm⁻², 滴灌追施 N 319 kg·hm⁻²、P₂O₅ 110 kg·hm⁻²、K₂O 396 kg·hm⁻²。

4 结论

提出高产 (170—180 t·hm⁻²) 温室冬春茬黄瓜各生育阶段的滴灌适宜参数: 3 月下旬至 4 月下旬 (产瓜初期)、4 月下旬至 5 月中旬 (产瓜盛期前期)、5 月中旬至 6 月中旬 (产瓜盛期)、6 月中旬至 7 月上旬 (产瓜末期) 主根区土壤适宜相对含水量分别为 63%、78%、82%、85%, 控制下限分别为 61%、73%、78%、81%; 在 3 月下旬至 4 月上旬, 主根区相对含水量上限控制在 67%—71%, 避免过量灌溉; 产瓜期间主根区适宜硝态氮含量维持在 25—40 mg·kg⁻¹。根据上述滴灌参数, 建立高产温室冬春茬黄瓜简便量化滴灌肥水管理方案。

References

- [1] 郭金花. 典型设施蔬菜生产系统水肥、农药投入及环境影响的生命周期评价[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
- GUO J H. Inputs of irrigation water, fertilizers, pesticides to and life cycle assessment of environmental impacts from typical greenhouse vegetable production systems in China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [2] SUN Y, HU K L, ZHANG K F, JIANG L H, XU Y. Simulation of

- nitrogen fate for greenhouse cucumber grown under different water and fertilizer management using the EU-Rotate N model. *Agricultural Water Management*, 2012, 112: 21-32.
- [3] 孙媛, 胡克林, 邱建军, 江丽华, 徐钰. 不同水肥管理下设施黄瓜地氮素损失及水氮利用效率模拟分析. *中国农业科学*, 2013, 46(8): 1635-1645.
- SUN Y, HU K L, QIU J J, JIANG L H, XU Y. Simulation and analysis of nitrogen loss, water and nitrogen use efficiencies of greenhouse cucumber under different water and fertilizer managements. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(8): 1635-1645. (in Chinese)
- [4] 王丽学, 李振华, 姜熙, 孟维忠, 陈伟, SHAIKH Abdullah AI Mamun Hossain. 不同水肥条件对温室黄瓜生长及产量品质的影响. *沈阳农业大学学报*, 2019, 50(1): 78-86.
- WANG L X, LI Z H, JIANG X, MENG W Z, CHEN W, SHAIKH A A M H. Effects of different water and fertilizer conditions on growth, yield and quality of greenhouse cucumber. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2019, 50(1): 78-86. (in Chinese)
- [5] SUN Y, ZHANG J, WANG H Y, WANG L G, LI H. Identifying optimal water and nitrogen inputs for high efficiency and low environment impacts of a greenhouse summer cucumber with a model method. *Agricultural Water Management*, 2019, 212: 23-34.
- [6] 王颀, 吴春涛, 李丹丹, 王海光, 毕焕改, 艾希珍. 水肥一体化模式下日光温室黄瓜氮磷钾优化施肥方案的研究. *园艺学报*, 2018, 45(4): 764-774.
- WANG Q, WU C T, LI D D, WANG H G, BI H G, AI X Z. Studies on the optimized scheme of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizations of cucumber in solar-greenhouse under integral control of water and fertilization. *Acta Horticulturae Sinica*, 2018, 45(4): 764-774. (in Chinese)
- [7] WANG H D, LIA J, CHENG M H, ZHANG F C, WANG X K, FAN J L, WU L F, FANG D P, ZOU H Y, XIANG Y Z. Optimal drip fertigation management improves yield, quality, water and nitrogen use efficiency of greenhouse cucumber. *Scientia Horticulturae*, 2019, 243: 357-366.
- [8] 李静, 张富仓, 方栋平, 李志军, 高明霞, 王海东, 吴东科. 水氮供应对滴灌施肥条件下黄瓜生长及水分利用的影响. *中国农业科学*, 2014, 47(22): 4475-4487.
- LI J, ZHANG F C, FANG D P, LI Z J, GAO M X, WANG H D, WU D K. Effects of water and nitrogen supply on the growth and water use efficiency of cucumber (*Cucumis sativus* L.) under fertigation. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(22): 4475-4487. (in Chinese)
- [9] 方栋平, 张富仓, 李静, 王海东, 向友珍, 张燕. 灌水量和滴灌施肥方式对温室黄瓜产量和品质的影响. *应用生态学报*, 2015, 26(6):

- 1735-1742.
- FANG D P, ZHANG F C, LI J, WANG H D, XIANG Y Z, ZHANG Y. Effects of irrigation amount and various fertigation methods on yield and quality of cucumber in greenhouse. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(6): 1735-1742. (in Chinese)
- [10] 李生平, 武雪萍, 高丽丽, 龙怀玉, 李景, 王碧胜, 党建友, 裴雪霞. 黄瓜光合特征及水分利用效率对土壤含水量的响应. *中国农业科学*, 2017, 50(15): 2993-3005.
- LI S P, WU X P, GAO L L, LONG H Y, LI J, WANG B S, DANG J Y, PEI X X. Response of photosynthetic characteristics and water use efficiency of cucumber to soil water content. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(15): 2993-3005. (in Chinese)
- [11] 李邵. 水肥耦合对温室黄瓜产量与品质形成的影响及其生理机制[D]. 扬州: 扬州大学, 2010.
- LI S. Effects of water and fertilizer coupling on yield and quality formation of greenhouse cucumber and their physiological mechanism[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2010. (in Chinese)
- [12] 李若楠, 黄绍文, 史建硕, 王丽英, 唐继伟, 袁硕, 任燕利, 郭丽. 日光温室冬春茬番茄优化滴灌肥水管理参数研究. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(6): 1010-1021.
- LI R N, HUANG S W, SHI J S, WANG L Y, TANG J W, YUAN S, REN Y L, GUO L. Optimization of water and fertilization management parameters for winter-spring tomato under greenhouse drip irrigation condition. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2019, 25(6): 1010-1021. (in Chinese)
- [13] 黄绍文, 唐继伟, 李春花, 张怀志, 袁硕. 我国蔬菜化肥减施潜力与科学施用对策. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6): 1480-1493.
- HUANG S W, TANG J W, LI C H, ZHANG H Z, YUAN S. Reducing potential of chemical fertilizers and scientific fertilization countermeasure in vegetable production in China. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(6): 1480-1493. (in Chinese)
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 308-311.
- LU R K. *Methods in Agricultural Soil Chemical Analysis*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999: 308-311. (in Chinese)
- [15] 李若楠, 武雪萍, 张彦才, 王丽英, 李孝兰, 陈丽莉, 翟凤芝. 滴灌氮肥用量对设施菜地硝态氮含量及环境质量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(6): 1642-1651.
- LI R N, WU X P, ZHANG Y C, WANG L Y, LI X L, CHEN L L, ZHAI F Z. Nitrate nitrogen contents and quality of greenhouse soil applied with different N rates under drip irrigation. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(6): 1642-1651. (in Chinese)
- [16] 韦彦, 孙丽萍, 王树忠, 王永泉, 张振贤, 陈青云, 任华中, 高丽红. 灌溉方式对温室黄瓜灌溉水分分配及硝态氮运移的影响. *农业工程学报*, 2010, 26(8): 67-72.
- WEI Y, SUN L P, WANG S Z, WANG Y Q, ZHANG Z X, CHEN Q Y, REN H Z, GAO L H. Effects of different irrigation methods on water distribution and nitrate nitrogen transport of cucumber in greenhouse. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(8): 67-72. (in Chinese)
- [17] 蔡树美, 张中华, 徐四新, 张德闪, 曹亮亮, 顾富家, 诸海焘. 不同灌溉方式下施氮水平对设施春黄瓜产量及氮肥利用率的影响. *生态与农村环境学报*, 2018, 34(7): 606-613.
- CAI S M, ZHANG Z H, XU S X, ZHANG D S, CAO L L, GU F J, ZHU H T. Effects of different irrigation pattern and nitrogen input levels on fruit yield and n use efficiency of greenhouse cucumber in early spring. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018, 34(7): 606-613. (in Chinese)
- [18] 赵志成, 杨显贺, 李清明, 刘彬彬, 杨振超. 不同膜下滴灌方式对设施黄瓜生理特性及水分利用效率的影响. *生态学报*, 2014, 34(22): 6597-6605.
- ZHAO Z C, YANG X H, LI Q M, LIU B B, YANG Z C. Effects of different drip irrigation methods under plastic film on physiological characteristics and water use efficiency of protected cucumber. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(22): 6597-6605. (in Chinese)
- [19] 韦泽秀. 水肥对大棚黄瓜和番茄生理特性及土壤环境的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- WEI Z X. Effect the condition of soil water and fertilizer on the physiological characteristics of plant and soil environments of cucumber and tomato in greenhouse[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2009. (in Chinese)
- [20] 李若楠, 武雪萍, 黄绍文, 王丽英, 陈丽莉, 翟凤芝, 史建硕, 任燕利. 不同施磷水平下温室冬春茬黄瓜日产量变化及其与光温环境的关系. *园艺学报*, 2018, 45(2): 289-298.
- LI R N, WU X P, HUANG S W, WANG L Y, CHEN L L, ZHAI F Z, SHI J S, REN Y L. Variation of greenhouse cucumber daily yield and its responses to sunlight duration and air temperature with different phosphorus rates. *Acta Horticulturae Sinica*, 2018, 45(2): 289-298. (in Chinese)
- [21] 张西平, 绳莉丽, 刘宏权, 张慧, 蔡焕杰. 日光温室膜下滴灌黄瓜参考作物蒸发蒸腾量与气象因子的关系. *节水灌溉*, 2014(9): 1-4.
- ZHANG X P, SHENG L L, LIU H Q, ZHANG H, CAI H J. Relationship between reference crop evapotranspiration and meteorological factors of cucumber under drip irrigation with plastic mulch in solar greenhouse. *Water Saving Irrigation*, 2014(9): 1-4. (in Chinese)

- Chinese)
- [22] 张西平. 日光温室膜下滴灌黄瓜需水规律的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2005.
- ZHANG X P. Research of cucumber water requirement with drip irrigation under plastic mulch in greenhouse[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2005. (in Chinese)
- [23] 胡越. 设施黄瓜耗水规律及节水灌溉制度研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014.
- HU Y. Research of facilities cucumber water consumption and water saving irrigation system[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [24] 冯嘉明. 温室春黄瓜灌溉指标的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2004.
- FENG J Y. Study on water-saving irrigation index for greenhouse cucumber during springtide[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2004. (in Chinese)
- [25] 李清明. 温室黄瓜 (*Cucumis sativus* L.) 节水高效灌溉上限指标的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2005.
- LI Q M. Study on water-saving and high efficiency irrigation maximum indexes of greenhouse cucumber (*Cucumis salivus* L.) [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2005. (in Chinese)
- [26] 廖凯. 黄瓜不同生长期适宜灌溉土壤水分指标试验研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011.
- LIAO K. Study on optimal irrigation index of soil water for cucumber at different growth stages [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2011. (in Chinese)
- [27] EGHBALL B, WIENHOLD B J, GILLEY J E, EIGENBERG R A. Mineralization of manure nutrients. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 57(6): 470-473.
- [28] 李若楠, 武雪萍, 张彦才, 王丽英, 翟凤芝, 陈丽莉, 史建硕, 徐强胜, 黄绍文. 减量施磷对温室菜地土壤磷素积累, 迁移与利用的影响. *中国农业科学*, 2017, 50(20): 3944-3952.
- LI R N, WU X P, ZHANG Y C, WANG L Y, ZHAI F Z, CHEN L L, SHI J S, XU Q S, HUANG S W. Effects of reduced phosphorus fertilization on soil phosphorus accumulation, leaching and utilization in greenhouse vegetable production. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(20): 3944-3952. (in Chinese)
- [29] 黄绍文, 王玉军, 金继运, 唐继伟. 我国主要菜区土壤盐分、酸碱性 and 肥力状况. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(4): 906-918.
- HUANG S W, WANG Y J, JIN J Y, TANG J W. Status of salinity, pH and nutrients in soils in main vegetable production regions in China. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(4): 906-918. (in Chinese)
- [30] 李若楠, 武雪萍, 张彦才, 王丽英, 陈丽莉, 翟凤芝. 节水减氮对温室土壤硝态氮与氮素平衡的影响. *中国农业科学*, 2016, 49(4): 695-704.
- LI R N, WU X P, ZHANG Y C, WANG L Y, CHEN L L, ZHAI F Z. Effects of reduced application of nitrogen and irrigation on soil nitrate nitrogen content and nitrogen balance in greenhouse production. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(4): 695-704. (in Chinese)
- (责任编辑 李云霞)