

水氮耦合对沙培黄瓜养分吸收及水肥利用的影响

马新超^{1, 2}, 马国财^{4*}, 轩正英^{1, 2}, 闵昊哲^{1, 2}, 齐志文^{1, 2},
成宏宇^{1, 2}, 谭占明^{1, 2}, 王旭峰³

(1. 塔里木大学园艺与林学院, 新疆 阿拉尔 843300; 2. 塔里木大学南疆特色果树高效优质栽培与深加工技术国家地方联合工程实验室, 新疆 阿拉尔 843300; 3. 塔里木大学机械电气化工程学院, 新疆 阿拉尔 843300; 4. 塔里木大学分析测试中心, 新疆 阿拉尔 843300)

摘 要: 为了探明水氮耦合对沙培黄瓜养分吸收及水肥利用的影响, 以获取最适水氮耦合方案, 为温室沙培黄瓜水氮科学管理提供理论依据。以“优胜美”水果黄瓜为供试品种, 采用二次饱和 D- 最优设计进行了沙培黄瓜水氮耦合的田间试验, 试验共设 7 个处理, 每个处理 3 次重复, 分别于苗期、花期、初瓜期、盛瓜期及末瓜期测定黄瓜植株各器官的氮磷钾吸收量, 并对各处理的产量进行统计。结果表明: 苗期植株对氮磷钾的吸收量较少, 进入花期后植株养分吸收量快速增加, 各器官养分的分配总体上表现出叶片和果实吸氮量较大, 茎、根和花较少, 植株对氮磷钾的吸收均随着灌水水平和施肥量的增加而增加, 但过高的灌水水平和施氮量会抑制植株对氮磷钾的吸收; 产量随着灌水水平的增加呈现开口向下的抛物线趋势, 但灌水水平对产量的影响并不显著, 产量随着施氮量的增加而显著增加, 而过量施氮后会使得产量降低, 符合报酬递减规律, 施氮量与水分利用效率呈显著正相关, 与灌水水平呈负相关, 但未达到显著水平, 低水高氮的处理 T3 能获得最高的水分利用效率; 施氮量是影响肥料利用率和利用效率的主要因素, 并且其随着灌水水平的增加大体上呈现开口向下的抛物线趋势, 中等适宜的灌水水平下增施氮肥能够得到较高的肥料利用率和利用效率。运用熵权 TOPSIS 法进行综合评价, 各处理接近度 C_i 的排序为 $T4 > T5 > T3 > T6 > T7 > T1 > T2$, 得到 T4 为最优的水氮耦合方案, 即在 80.20% 的灌水水平下施用氮肥 623 kg/hm², 该方案能够达到农业生产中低投入和高产出的最终目标, 并减少水肥浪费, 可为温室沙培黄瓜水氮科学管理提供理论依据。

关键词: 黄瓜; 水氮耦合; 养分吸收; 水肥利用; 熵权 TOPSIS 法

国内自 1979 年张汉玲^[1]在黄瓜沙培试验上取得成功之后, 沙培黄瓜技术开始不断发展和推广, 由于沙子作为基质具有取材方便、生产成本低、消毒彻底和病虫害少等优势, 目前在可耕地面积积极少的新疆南疆地区已有大面积应用, 但农业生产者在沙培黄瓜栽培中为了追求高效益存在着盲目过量灌水与施肥的现象, 造成了资源浪费和环境污染, 同时也影响了植株对营养元素的吸收。合理的水氮耦合方案可以达到“以肥促水, 以水调肥”, 既能保证黄瓜必需的水分和养分, 又可

以提高水肥利用效率。因此, 探究不同水氮耦合下黄瓜植株养分吸收规律及水肥利用效率具有重要意义。

多年来, 关于温室黄瓜水氮耦合效应的研究已有大量报道, 研究内容主要集中在植株生长、产量、品质、水肥利用效率、植株生理等方面^[2-5]; 也有部分学者对植株养分的吸收规律进行了研究, 诸海焘等^[6]发现在水肥一体化条件下, 黄瓜对氮磷钾三要素的吸收, 以钾最多, 氮次之, 磷最少; 王丽英等^[7]研究表明, 优化水氮供应在保证黄瓜产量的前提下, 显著提高了氮肥利用效率、氮肥偏生产力和水分利用效率, 同时降低了黄瓜对磷钾的奢侈吸收; 方栋平等^[8]研究同样表明, 科学的水肥管理可以显著提高黄瓜的产量和养分的吸收利用; 但关于沙培黄瓜养分吸收规律及水肥利用的系统研究尚未见报道。

本文通过温室沙培黄瓜水氮耦合试验, 探究水

收稿日期: 2021-12-01; 录用日期: 2022-01-10

基金项目: 新疆重点产业支撑计划项目(2019DB001); 新疆生产建设兵团科技攻关项目(2018DB003); 塔里木大学研究生创新训练项目(TDGRI202023)。

作者简介: 马新超(1998-), 硕士研究生, 研究方向为设施农业, E-mail: mxczy@163.com。

通讯作者: 马国财, E-mail: ying0216mx@163.com。

氮耦合对沙培黄瓜养分吸收分配和水肥利用的影响,旨在为温室沙培黄瓜水氮科学管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料及地点

本试验选用“优胜美”水果黄瓜为试材,于2021年4~7月在塔里木大学园艺试验站(81°17'E, 40°32'N, 海拔990 m)7号节能型日光温室内进行。栽培基质为建筑用沙(粗沙),其理化性质:有机质6.53 g/kg、全氮1.29 g/kg、全磷0.24 g/kg、全钾0.46 g/kg、碱解氮6.61 mg/kg、有效磷8.01 mg/kg、速效钾38.34 mg/kg、硝态氮0.12 mg/kg、铵态氮3.32 mg/kg、pH值7.49、EC值3.16 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

使用营养钵进行育苗,待黄瓜苗长至3叶1心时定植,缓苗5 d后进行水肥处理;试验采用槽式栽培,每个栽培槽面积 $0.5\text{ m} \times 2.6\text{ m}=1.3\text{ m}^2$,深0.4 m,设定株距为0.25 m,大行距为0.6 m,小行距为0.3 m,进行双行栽培,每小区定植20株黄瓜,每公顷保苗50000株。设7个处理,每个处理3次重复,共计21个小区和420株黄瓜,温室东西两侧各设一行保护栽培槽。

1.2 试验设计

试验设置灌水水平和施氮量二因素,采用二次饱和D-最优设计($p=2$ 的6点设计),并加设了一个处理T7最高码值处理,该处理只作参照,不参加回归分析,以保持原方案的优良性,试验设计具体方案见表1。

表1 黄瓜水氮耦合试验设计方案

处理	码值方案		实际值	
	灌水水平	施氮量	灌水水平 (%)	施氮量 (kg/hm^2)
T1	-1	-1	65	150
T2	1	-1	100	150
T3	-1	1	65	1250
T4	-0.1315	-0.1315	80.20	623
T5	0.3944	1	89.40	1250
T6	1	0.3944	100	917
T7	1	1	100	1250

试验所用大量元素肥料分别为尿素(N 46%)、磷酸二氢钾(P_2O_5 51%)和硫酸钾(K_2O 50%),

依据基质中的养分含量及养分平衡原则^[9]设定磷钾肥用量分别为290和800 kg/hm^2 ,氮磷钾肥料均作追肥随水施入,每隔5 d施肥1次,共计追施20次,各处理氮肥每次等量施入,前7次施入磷肥的49%、钾肥的21%,剩余磷钾肥每次等量施入,并视植株生长情况适时适量喷施微量元素。

灌水上限最大值设为田间持水量的100%,最小值设为田间持水量的65%;土壤水分下限为每天8:00测得的各处理的实际基质含水率,基质含水率用DM-300土壤水分速测仪实时测定,并定期采土用烘干法校准,当土壤含水率接近或降低至灌水下限60%时进行灌溉。灌水量依式(1)计算。

$$M_{\text{滴灌}} = r \times p \times h \times \theta f \times (q_1 - q_2) / \eta \quad (1)$$

式中: r 为土壤容重,取 $1.61\text{ g}/\text{cm}^3$; p 为土壤湿润比,取100%; h 为灌水计划湿润层,取0.35 m; θf 为田间持水量,为14.02%; q_1 、 q_2 分别为土壤水分上限、下限(以相对田间持水量的百分比表示); η 为水分利用系数,滴灌取0.9。田间试验结束后根据所记录的单次灌水量求和得出T1~T7各处理的总灌水量,依次为2166.51、5271.73、2446.28、4667.71、4455.20、5370.55、5326.89 m^3 。

1.3 测定项目及方法

分别于苗期(水氮处理后20 d)、花期(水氮处理后35 d)、初瓜期(水氮处理后53 d)、盛瓜期(水氮处理后78 d)、末瓜期(水氮处理后100 d)随机选取黄瓜植株3株,将根、茎、叶、花、果分开,根系用清水洗净,放入烘箱内在 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 下杀青15 min,然后于 $75\text{ }^\circ\text{C}$ 烘干至恒重,粉碎过0.149 mm网筛,用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 法消煮,消煮液用于养分的测定:全氮和全磷含量使用全自动间断化学分析仪(SmartChem200)测定,全钾含量用火焰分光光度法测定。

产量测定:从黄瓜初瓜期至拉秧,对采收的黄瓜果实使用百分之一天平直接称重,统计每小区每次采收黄瓜的单果重和产量,并折算每公顷产量。

各器官氮、磷、钾吸收量(kg/hm^2) = 各器官全氮、磷、钾含量 $\times$ 干物质量 $\times$ 种植密度

各器官的氮、磷、钾分配比例(%) = 各器官氮、磷、钾吸收量 / 植株总氮、磷、钾吸收量 $\times 100$

氮、磷、钾肥利用率 (FNUR、FPUR、FKUR, %)=植株总氮、磷、钾吸收量/(施氮、磷、钾量+基质中全氮、磷、钾含量)×100

氮、磷、钾肥利用效率 (FNUE、FPUE、FKUE)=产量/(施氮、磷、钾量+基质中全氮、磷、钾含量)

水分利用效率 (WUE)=产量/全生育期灌水量

1.4 数据处理

用 DPS 7.05 对各项指标进行数据处理; 用 Origin 2021 制图; 用 Excel 2019 制表并进行熵权 TOPSIS 分析。

2 结果与分析

2.1 水氮耦合对温室沙培黄瓜养分吸收和分配的影响

2.1.1 氮素吸收和分配

由图 1 可知, 植株的氮素吸收量随着生长发育不断增长, 高氮的 T3、T5 和 T7 在各时期氮素积累量均较高, 低氮的 T1 和 T2 植株吸氮量均显著低于其它处理, 植株的吸氮量随着施氮量的增加而增加。在不同时期各器官氮素分配的规律各不相同, 但总体上表现出叶片和果实吸氮量较大, 茎、根和花较少。

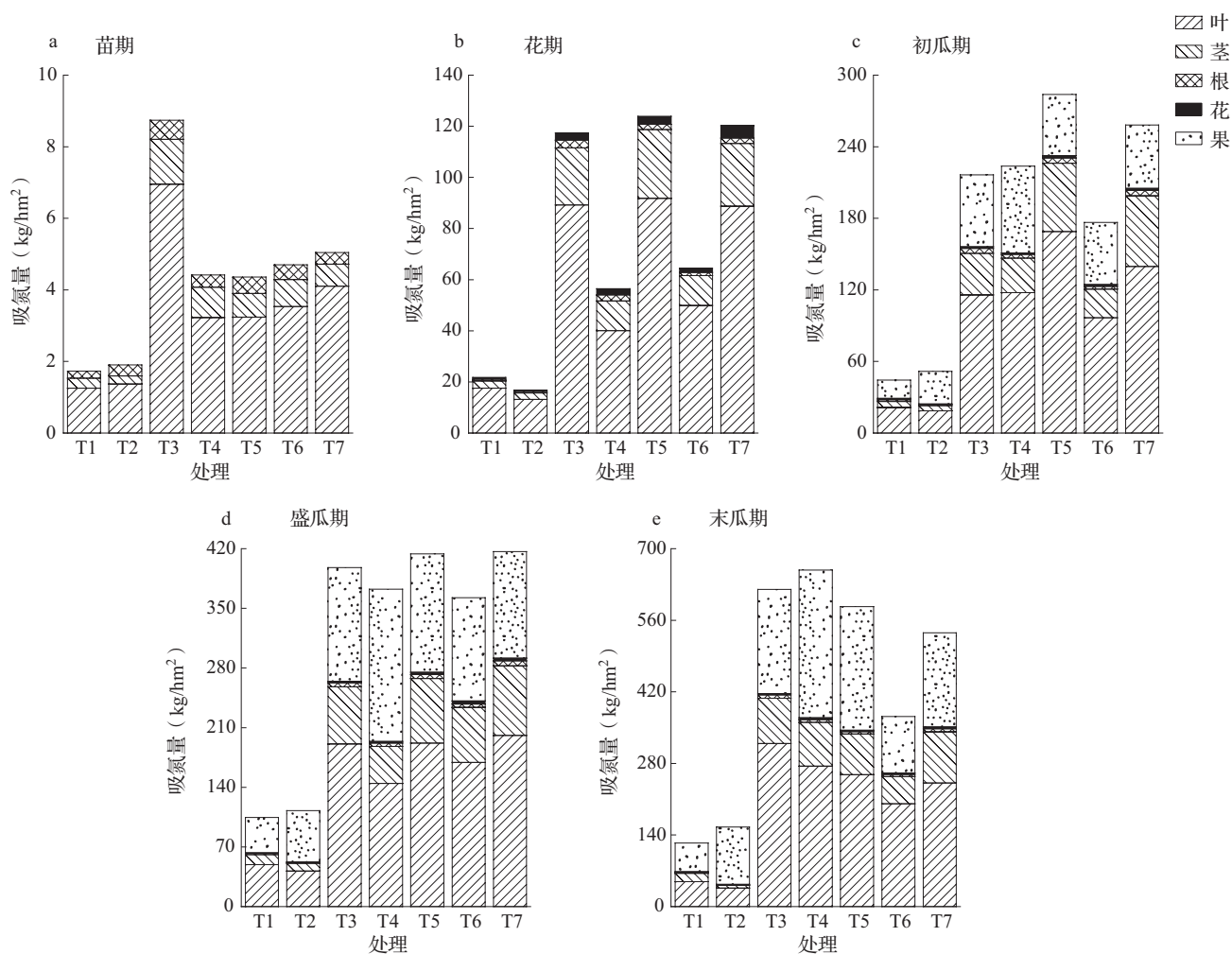


图 1 水氮耦合对温室沙培黄瓜氮素吸收和分配的影响

苗期植株对氮吸收量最少, 占全生育期总吸收量的 0.67% ~ 1.41%, 各处理器官中吸氮量除 T2 外均表现为叶 > 茎 > 根, 叶占植株总吸氮量的 72.14% ~ 81.30%、茎占 11.71% ~ 19.13%、根占

6.13% ~ 16.14%, T2 器官中吸氮量表现为叶 > 根 > 茎, 这可能是由于在高水低氮处理前期, 茎的含水率较高, 而根系的须根较多所造成的。低水高氮的 T3 吸氮量显著高于其它处理, 低氮处理的 T1 和 T2

均显著低于其它处理,表明苗期大量施氮有利于植株的生长发育,且增加了吸氮量。

花期植株氮素开始快速积累,占全生育期总吸收量的 8.58% ~ 22.46%,各处理器官中吸氮量大体上表现为叶>茎>花>根,叶占植株总吸氮量的 70.92% ~ 80.53%、茎占 13.07% ~ 21.67%、根占 1.66% ~ 4.06%,花占 2.42% ~ 4.41%,进入花期后花作为生殖器官虽然其在整株中占比较小,但吸氮浓度较高,因此,在植株总吸氮量中也占有和根系基本一致的比例。高氮的 T3、T5 和 T7 吸氮量显著高于其它处理,与苗期的结论相似。

初瓜期氮吸收量占全生育期总吸收量的 33.28% ~ 48.38%,盛瓜期占全生育期总吸收量的 56.59% ~ 97.50%,进入初瓜期后,黄瓜器官中氮素分配规律表现为果实和叶较多,茎、根和花较少,在初瓜期、盛瓜期、末瓜期中各器官氮素分配比例发生了变化,叶和茎中氮素分配比例明显变小,氮素往果实中转移,

尤其是在盛果期,转移的趋势最为明显。末瓜期各处理的吸氮量排序为 T4>T3>T5>T7>T6>T2>T1,在相同灌水水平下,吸氮量随着施氮量的增加而增加,大水高氮的 T7 吸氮量低于中水中氮的 T4,表明在充足的氮肥供给下,过高的灌水水平会对各器官氮浓度产生“稀释效应”,且降低了吸氮量。

2.1.2 磷素吸收和分配

如图 2 所示,与氮和钾相比,植株中磷累积量较少,最大不超过 84.20 kg/hm²,磷在植株中的累积和分配规律与氮相似,磷在植株中的累积量随着生育期的延长而不断增加,仅有 T6 在盛瓜期转入末瓜期时磷素累积量有所下降,这可能是因为生育期后期高灌水水平会提升植株的含水率而且其生殖生长较弱,在不同时期下各器官磷素分配的规律各不相同,但总体上表现出叶和果实吸磷量较大,茎、根和花较少。

苗期和花期植株吸磷量分别占总吸收量的

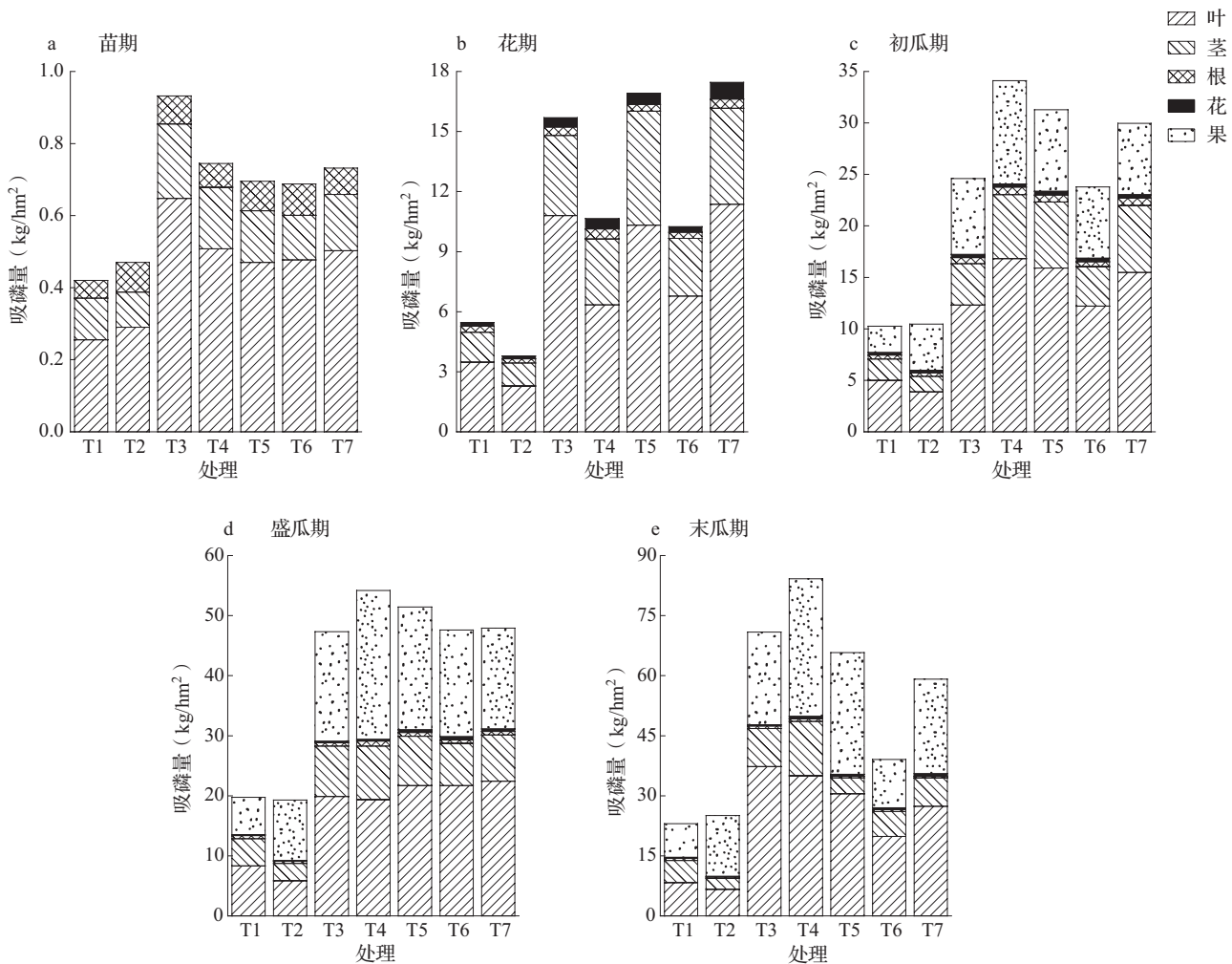


图 2 水氮耦合对温室沙培黄瓜磷素吸收和分配的影响

0.88% ~ 1.88% 和 12.66% ~ 29.52%，苗期低水高氮的 T3 吸磷量最多，较最低的 T1 提升了 121.82%，花期高氮处理的 T3、T5 和 T7 吸磷量显著高于其它处理，表明增施氮肥可以提升植株对磷的吸收能力。自花期之后，植株吸磷量快速增加，初瓜期植株吸磷量占总吸收量的 34.70% ~ 60.83%，在盛瓜期，植株吸磷量比初瓜期平均增长了 36.33%。进入初瓜期后，各器官氮素分配比例发生明显变化，叶和茎中氮素分配比例明显变小，氮素不断往果实中转移，在盛果期时果实吸磷量占植株总吸收量的 31.44% ~ 52.16%，表明在盛果期时增施氮肥可以明显提升果实对磷素的吸收能力。

末瓜期各处理的吸磷量排序为 T4>T3>T5>T7>T6>T2>T1，这与末瓜期吸氮量的排序一致，磷素累积量最高的 T4 为 84.20 kg/hm²，是最低 T1 的 3.66 倍，表明适宜的灌水施氮方案同样能促进植株

对磷的吸收。

2.1.3 钾素吸收和分配

水氮耦合对沙培黄瓜植株钾素吸收和分配的影响如图 3 所示，植株对钾的吸收量大于吸磷量，小于吸氮量，植株钾素累积和分配规律与氮磷相似，但是茎在植株总吸钾量中所占的比例与叶片占比大体相当，这可能是由于钾素是促进茎秆维管束发育和参与光合产物的运输所导致的。

苗期植株吸钾量较小，占总吸收量的 1.16% ~ 2.17%，低水高氮的 T3 吸钾量最多，较最低的 T1 提升了 212.88%，花期植株吸钾量开始快速增加，占总吸收量的 13.05% ~ 25.43%，不同水氮处理下，T5 的钾累积速率最快，为 4.92 kg/(hm²·d)，吸收量最大，且高氮处理的 T3、T5 和 T7 吸钾量显著高于其它处理，初瓜期植株吸钾量占总吸收量的 33.45% ~ 43.33%，在盛瓜期，植株吸钾量比初瓜期平均增长了 37.80%。自黄瓜开花坐

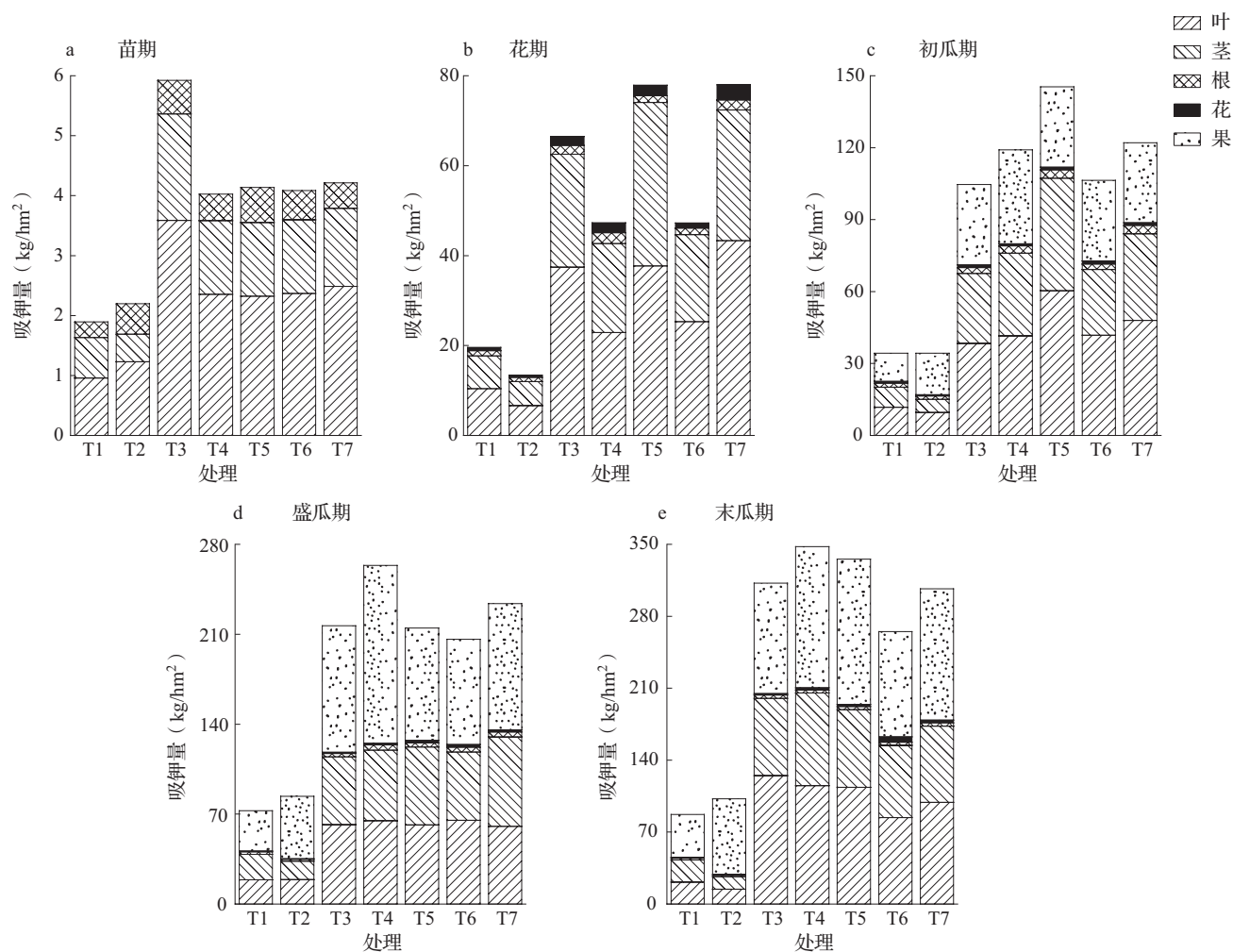


图 3 水氮耦合对温室沙培黄瓜钾素吸收和分配的影响

果后钾素迅速积累,体现了钾素是果实的重要营养元素之一。末瓜期各处理的吸钾量排序为 $T4>T5>T3>T7>T6>T2>T1$, 钾素累积量最高的 T4 为 347.73 kg/hm^2 , 是最低 T1 的 4 倍, 排序与氮磷相比, T3 排名有所下降, 这表明在同一施氮量下, 植株吸钾量随着灌水水平的提高而增加, 在同一灌水水平下, 植株吸钾量同样随着施氮量的增加而增加, 但过高的灌水水平和施氮量反而会降低植株对钾素的吸收能力, 在适宜的灌水施氮方案下才能获得较高的植株吸钾量。

2.2 水氮耦合对温室沙培黄瓜产量和水肥利用的影响

如表 2 所示, 水氮耦合对温室沙培黄瓜产量和水肥利用的各项指标均有显著影响。中水中氮的 T4 其 FNUR、FPUR、FKUR 和 FNUE 均为最大, 较最低的分别增加了 44.07%、17.98%、29.08% 和 54.51 g/g , T5 的 FPUE 和 FKUE 均为最大, 较最低的分别增加了 238.32 和 90.47 g/g , 产量最高的是处理 T5, 为 107.43 t/hm^2 , 其次是 T4, 为 101.93 t/hm^2 ; 水分利用效率最高的是低水高氮的 T3, 为 38.67 kg/m^3 ,

其次为 T5 和 T4, 分别为 24.11 和 21.84 kg/m^3 , 从产量和水肥利用情况来看, T4 和 T5 为产量较高, 且能较好地吸收利用水肥, 达到高效高产的目的。但灌水水平和施氮量各因子对各指标的效应尚不清晰, 因此针对二次饱和 D- 最优设计的特点, 进行二次多项式回归分析, 以灌水水平对应码值 (X_1) 和施氮量对应码值 (X_2) 为自变量, 产量和水肥利用的各指标实际值 (Y) 为因变量构建各指标的回归方程, 以定量描述灌水水平和施氮量与各指标间的关系, 结果如表 3 所示。

由各指标回归方程可知, 施氮量对 FNUR 影响显著, FNUR 和 FPUR 均随着施氮量和灌水水平的增加呈现开口向下的抛物线趋势, FNUR 取得最大值时水氮对应的编码值分别为 -0.1109 和 -0.1003 , FPUR 取得最大值时水氮对应的编码值分别为 -0.2532 和 0.4327 ; 施氮量与 FKUR 呈显著正相关, 灌水水平对 FKUR 影响不显著, FKUR 随着灌水水平的增加呈现开口向下的抛物线趋势, FKUR 取得最大值时水氮对应的编码值分别

表 2 水氮耦合对温室沙培黄瓜产量和水肥利用的影响

处理	FNUR (%)	FPUR (%)	FKUR (%)	FNUE (g/g)	FPUE (g/g)	FKUE (g/g)	产量 (t/hm ²)	WUE (kg/m ³)
T1	29.63e	6.76e	9.72c	73.65c	90.92d	34.51d	30.93d	14.28d
T2	37.02bc	7.36e	11.43c	62.72de	77.43d	29.39d	26.34d	5.00e
T3	40.81b	20.84b	34.84ab	62.24de	278.07bc	105.56bc	94.61bc	38.67a
T4	73.70a	24.75a	38.80a	114.14a	299.59ab	113.73ab	101.93ab	21.84b
T5	38.59bc	19.33bc	37.43a	70.68cd	315.74a	119.86a	107.43a	24.11b
T6	31.31de	11.49d	29.58b	82.90 b	289.23abc	109.79abc	98.40abc	18.32c
T7	35.24cd	17.37c	34.22ab	59.63e	266.42c	101.13c	90.64c	15.40d

注: 同列不同字母表示在 0.05 水平差异显著。

表 3 黄瓜产量和水肥利用各指标的回归方程

指标	二次多项式回归方程	指标	二次多项式回归方程
FNUR (%)	$Y=73.11-6.82X_1-4.93X_2-25.99X_1^2-18.72X_2^2-10.51X_1X_2$	FPUE (g/g)	$Y=314.01-3.93X_1+96.39X_2-46.44X_1^2-87.00X_2^2+2.82X_1X_2$
FPUR (%)	$Y=25.09-3.27X_1+3.47X_2-9.51X_1^2-5.05X_2^2-3.57X_1X_2$	FKUE (g/g)	$Y=119.20-1.49X_1+36.59X_2-17.64X_1^2-33.02X_2^2+1.07X_1X_2$
FKUR (%)	$Y=40.26-1.77X_1+9.93X_2-10.33X_1^2-9.42X_2^2-2.63X_1X_2$	产量 (t/hm ²)	$Y=106.84-1.34X_1+32.80X_2-15.817X_1^2-29.59X_2^2+0.96X_1X_2$
FNUE (g/g)	$Y=113.60-5.25X_1-5.49X_2-18.30X_1^2-32.60X_2^2+0.22X_1X_2$	WUE (kg/m ³)	$Y=22.26-7.20X_1+9.635X_2+1.12X_1^2-4.10X_2^2-2.56X_1X_2$

为 -0.1555 和 0.5487; FNUE 随着灌水水平和施氮量的增加呈现开口向下的抛物线趋势, 但均未达到显著水平, FNUE 取得最大值时水氮对应的编码值分别为 -0.1439 和 -0.0847; 施氮量与 FPUE、FKUE 均呈显著正相关, 而灌水水平对两指标的影响不显著, FPUE 和 FKUE 取得最大值时水氮对应的编码值分别为 -0.0255、0.5536 和 -0.0256、0.5536。

产量随着施氮量的增加而显著增加, 但过量施氮反而会降低产量, 符合报酬递减规律, 产量随着灌水水平的增加呈现开口向下的抛物线趋势, 其取得最大值时水氮对应的编码值分别为 -0.0255 和 0.5537; 施氮量与水分利用效率呈显著正相关, 灌水水平呈负相关, 但未达到显著水平, 水分利用效率取得最大值时水氮对应的编码值分别为 -1.0000 和 1.0000。

综上所述, 施氮量是水氮耦合影响黄瓜产量和水肥利用的主要因素, 增施氮肥能够明显提高黄瓜产量和水肥利用效率, 但过量的增施氮肥会造成减产和水肥利用率降低; 同时各指标随着灌水水平的增加大体上呈现开口向下的抛物线趋势, 这表明在中等适宜的灌水水平下增施氮肥能够得到较高产量的同时减少水肥的浪费。

2.3 基于熵权 TOPSIS 法的温室沙培黄瓜水氮适宜方案综合评价

从单一指标的二次多项式回归方程可以看出, 产量和水肥利用效率无法在同一处理下同时达到最优, 因此以单一指标评价水氮方案的优劣不具有说服力, 因此基于熵权 TOPSIS 法^[10], 以氮、磷、钾肥利用率 (FNUR、FPUR、FKUR), 氮、磷、钾肥利用效率 (FNUE、FPUE、FKUE), 水分利用效率 (WUE) 和产量这 8 项单一指标进行综合评价, 其结果如表 4 所示。

由表 4 可知, 不同水氮耦合处理表现差距很大, T4 的 C_i 最大, 为 0.890, 其次是 T5 和 T3, C_i 值分别为 0.501 和 0.478, 低施氮量 T1 和 T2 的 C_i 值明显低于其它处理, 且作为对照的大水大肥 T7 的 C_i 值仅大于处理 T1 和 T2, 这说明只有适宜的灌水水平和施氮量才能增产增效、减少肥料浪费。本试验条件下, 从高产、减少投入和水肥利用效率高的角度出发, T4 为最优的水氮耦合方案。

表 4 水氮耦合方案的熵权 TOPSIS 综合评价

处理	正负理想解距离		接近度	排名
	D_i^+	D_i^-	C_i	
T1	0.340	0.056	0.140	6
T2	0.347	0.036	0.093	7
T3	0.239	0.219	0.478	3
T4	0.044	0.360	0.890	1
T5	0.227	0.228	0.501	2
T6	0.247	0.193	0.438	4
T7	0.273	0.180	0.398	5

3 讨论

矿质营养元素直接参与植物的各种生理代谢过程, 是完成植物生命活动周期所不可缺少的^[11]。本试验条件下, 植株的氮磷钾积累量均随着生育期的推进而增长, 在不同时期下各器官氮素分配的规律各不相同, 但总体上表现出叶片和果实养分积累量较大, 茎、根和花积累量较少的现象, 这与前人^[8, 11]的研究结果有相似之处, 但其研究均指出氮磷钾吸收和分配规律表现为果实 > 叶片 > 茎 > 根, 这与本试验有一定出入, 这可能是由于本试验的试验材料为水果黄瓜, 含水率较高; 本研究表明, 自进入花期之后, 植株内氮磷钾积累量快速增加, 这与方栋平等^[8]对黄瓜养分吸收的研究有一定出入, 这可能是由于本试验水氮处理时间较早, 黄瓜刚移栽不久, 仍处于缓苗阶段, 对肥料的吸收能力较弱; 王丽英等^[7]研究表明, 结瓜期是黄瓜氮磷钾需求关键时期, 这与本研究中盛瓜期植株氮磷钾吸收量较大的现象一致; 大量研究^[12-14]表明, 植株对氮磷钾的吸收随着灌水量和施肥量的增加而增加, 这与本试验结果相似; 而过高的施氮量会降低植株对氮磷钾的吸收, 这进一步验证了李欢欢等^[15]的研究结果: 因为施氮量过大, 在一定程度上降低了作物根际的土壤溶质势, 造成水势降低, 作物水分和养分运输受阻, 进而影响作物对养分的吸收。在充足的氮肥供给下, 过高的灌水水平同样会降低植株的养分积累量, 这可能是由于沙子作为基质其离子交换能力较弱, 过高的灌水水平会加大氮磷钾从基质胶体的解离, 使矿质营养元素向下迁移和根系吸收养分受限。

适宜的水氮管理能够显著提高黄瓜的产量、水分利用效率和养分吸收利用, 本试验中产量随着施

氮量的增加而显著增加,但过量施氮反而会降低产量,符合报酬递减规律,产量随着灌水水平的增加呈现出开口向下的抛物线趋势,这与已有相关研究^[16-17]结果相似,但张新燕等^[18]研究表明,灌水量和施肥量对番茄产量均有显著影响,且灌水因素大于施肥因素,这与本研究结果有一定出入,这可能是由于试验设计的灌水施氮量不同所导致的。施氮量与水分利用效率呈显著正相关,与灌水水平呈负相关,这表明想获得较高的水分利用率可以直接通过降低灌水水平并提升施氮量来实现,这与肖自添^[19]的观点一致。本研究表明施氮量是影响肥料利用率和利用效率的主要因素,并且其随着灌水水平的增加大体上呈现开口向下的抛物线趋势,中等适宜的灌水水平下增施氮肥能够得到较高产的肥料利用率和利用效率,这与金辉等^[20]研究结果相似;但邢英英等^[11]研究发现,灌水量和施肥量均较低时,可显著提高养分利用率,这可能是由于沙培下基质营养元素匮乏,需肥量较大。

考虑农业生产中低投入和高产出的最终目标,并减少水肥浪费,寻求最优水氮耦合方案,运用熵权 TOPSIS 法进行综合评价,得出贴近期最高的水氮组合为 T4。

4 结论

(1) 植株对氮磷钾的吸收随着灌水水平和施肥量的增加而增加,但过高的灌水水平和施氮量会抑制植株对氮磷钾的吸收。

(2) 产量随着施氮量的增加而显著增加,但过量施氮反而会降低产量,符合报酬递减规律,T3 的水分利用效率为 38.67 kg/m^3 ,显著高于其它处理,低水高氮的水氮组合能获得最高的水分利用效率。

(3) 施氮量是影响肥料利用率和利用效率的主要因素,并且其随着灌水水平的增加大体上呈现开口向下的抛物线趋势,中等适宜的灌水水平下增施氮肥能够得到较高产的肥料利用率和利用效率。

(4) 从高产、减少投入和水肥利用效率高的角度出发,运用熵权 TOPSIS 法进行综合评价得到 T4,即在 80.20% 的灌水水平下施用氮肥 623 kg/hm^2 为最优的水氮耦合方案。

参考文献:

[1] 张汉玲. 沙培黄瓜简介[J]. 河北农业科技, 1979 (4):

22-23.

- [2] Fasina A S, Shittu O S, Ogunleye K S, et al. Effect of drip irrigation frequency and n-fertilization on yield and water use efficiency of cucumber (*Cucumis sativus*) in Ado-Ekiti, Nigeria [J]. Research on Crops, 2021, 22 (2): 292-300.
- [3] Oladele A G, Sunday F A, Samuel S O, et al. Effect of drip irrigation frequency and N-fertilization on soil physical properties, yield and water use efficiency of cucumber (*Cucumis sativus* L.) in Ado Ekiti, southwestern Nigeria [J]. Biology Agriculture and Healthcare, 2016, 6 (4): 32-46.
- [4] 陈修斌, 蒋梦婷, 尹鑫, 等. 水氮配施对绿洲温室黄瓜氮素代谢及产量品质的影响 [J]. 土壤与作物, 2021, 10 (1): 79-90.
- [5] Cai S M, Zhang Z H, Xin X S, et al. Effects of different irrigation pattern and nitrogen input levels on fruit yield and N use efficiency of greenhouse cucumber in early spring [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, 34 (7): 606-613.
- [6] 诸海燕, 李建勇, 朱恩, 等. 水肥一体化条件下设施黄瓜的氮磷钾吸收分配规律研究 [J]. 上海农业学报, 2017, 33 (1): 74-78.
- [7] 王丽英, 张彦才, 李若楠, 等. 水氮供应对温室黄瓜干物质积累、养分吸收及分配规律的影响 [J]. 华北农学报, 2012, 27 (5): 230-238.
- [8] 方栋平, 吴立峰, 张富仓, 等. 灌水量和滴灌施肥方式对温室黄瓜产量和养分吸收的影响 [J]. 灌溉排水学报, 2016, 35 (11): 34-41.
- [9] 鲁如坤, 刘鸿翔, 闻大中, 等. 我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究 IV. 农田养分平衡的评价方法和原则 [J]. 土壤通报, 1996 (5): 197-199.
- [10] 胡永宏, 贺思辉. 综合评价方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2000. 123-129.
- [11] 邢英英, 张富仓, 张燕, 等. 膜下滴灌水肥耦合促进番茄养分吸收及生长 [J]. 农业工程学报, 2014, 30 (21): 70-78.
- [12] Gao N, Zhang Y L, Liu Y, et al. Regulation effects of irrigation and nitrogen fertilization on nutrient absorption, water/nitrogen use efficiency and yield of rape [J]. Zhongguo Shengtai Nongye Xuebao/Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25 (6): 821-828.
- [13] Cai S M, Tian J L, Li J Y, et al. Nutrient absorption and dry matter accumulation of greenhouse vegetable under optimized coupling of water and fertilizer [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2015, 31 (3): 385-389.
- [14] Wang H, Wu L, Wang X, et al. Optimization of water and fertilizer management improves yield, water, nitrogen, phosphorus and potassium uptake and use efficiency of cotton under drip fertigation [J]. Agricultural Water Management, 2021, 245: 106662.
- [15] 李欢欢, 刘浩, 庞婕, 等. 水氮互作对盆栽番茄生长发育和养分累积的影响 [J]. 农业机械学报, 2019, 50 (9): 272-279.

- [16] Li J, Pan T, Wang L, et al. Effects of water-fertilizer coupling on tomato photosynthesis, yield and water use efficiency [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30 (10): 82-90.
- [17] Wang X, Yun J, Shi P, et al. Root growth, fruit yield and water use efficiency of greenhouse grown tomato under different irrigation regimes and nitrogen levels [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2019, 38 (2): 400-415.
- [18] 张新燕, 王浩翔, 牛文全. 水氮供应对温室滴灌番茄水氮分布及利用效率的影响 [J]. 农业工程学报, 2020, 36 (9): 106-115.
- [19] 肖自添. 温室基质培番茄水氮耦合效应研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2008.
- [20] 金辉, 侯东颖, 张曼, 等. 水肥耦合对大棚西瓜产量、品质及养分吸收的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2021 (2): 141-148.

Effects of water and nitrogen coupling on nutrient absorption and utilization of water and fertilizer in cucumber

MA Xin-chao^{1, 2}, MA Guo-cai^{4*}, XUAN Zheng-ying^{1, 2}, MIN Hao-zhe^{1, 2}, QI Zhi-wen^{1, 2}, CHENG Hong-yu^{1, 2}, TAN Zhan-ming^{1, 2}, WANG Xu-feng³ (1. College of Horticulture and Forestry, Tarim University, Alar Xinjiang 843300; 2. National and Local Joint Engineering Laboratory of High-Efficiency and High-quality Cultivation and Deep Processing Technology of Featured Fruit Trees in Southern Xinjiang, Tarim University, Alar Xinjiang 843300; 3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Tarim University, Alar Xinjiang 843300; 4. Analysis and Testing Center, Tarim University, Alar Xinjiang 843300)

Abstract: The effects of water and nitrogen coupling on nutrient absorption and water and fertilizer utilization of sand-cultured cucumbers were explored in order to obtain the most suitable water-nitrogen coupling scheme and provide a theoretical basis for scientific management of water and nitrogen in greenhouse sand-cultured cucumbers. With the “Yosemite” fruit cucumber as the test variety, a field experiment of water-nitrogen coupling of sand cultured cucumber was carried out by using the twice-saturated D-optimal design. There were 7 treatments in total, and each treatment was repeated 3 times. The absorption of nitrogen, phosphorus and potassium in various organs of cucumber plants was measured at the seedling stage, flowering stage, early melon stage, full melon stage and last melon stage, and the yield of each treatment was estimated. The result showed that plants at the seedling stage absorbed less nitrogen, phosphorus, and potassium, and the plant nutrient absorption increased rapidly after entering the flowering stage. The nutrient distribution of various organs generally showed that the leaves and fruits absorbed a large amount of nitrogen, while stems, roots and flowers absorbed less nitrogen. The plant’s absorption of nitrogen, phosphorus, and potassium increased with the increase of irrigation level and fertilization, but too high irrigation level and nitrogen application inhibited the plant’s absorption of nitrogen, phosphorus, and potassium. The trend of yield increasing with the increase of irrigation level showed a downward parabolic trend, but the level of irrigation had no significant effect on yield. Yield increased significantly with the increase of nitrogen application rate, but excessive nitrogen application would reduce yield, which conformed to the law of diminishing returns. There is a significantly positive correlation between nitrogen application rate and water use efficiency, and a negative correlation with irrigation level, but it didn’t reach a significant level. The treatment T3 with low water and high nitrogen obtained the highest water use efficiency. Nitrogen application is the main factor affecting fertilizer utilization and utilization efficiency and with the increase of irrigation level, it generally presents a downward parabolic trend. Increased application of nitrogen fertilizer under moderate irrigation level can achieve higher fertilizer utilization and utilization efficiency. Using the entropy TOPSIS method for comprehensive evaluation, the sorting order of the proximity C_i of each treatment was $T4>T5>T3>T6>T7>T1>T2$, and the optimal water-nitrogen coupling scheme was obtained at treatment T4, which was 80.20% irrigation with 623 kg/hm² of nitrogen fertilizer application. This treatment can achieve the ultimate goal of low input and high output in agricultural production, reduce water and fertilizer waste, and provide a theoretical basis for scientific management of water and nitrogen of cucumber in greenhouse.

key words: cucumber; water-nitrogen coupling; nutrient absorption; utilization of water and fertilizer; entropy TOPSIS method