

地温及水氮耦合对秋冬茬番茄生理生化及果实品质的影响

王钰洁¹, 程云霞¹, 谭占明^{1,2}, 杨历雨¹, 王琦¹, 曹曼¹, 李琪¹,
刘梓煜¹, 刘梦范¹, 成伟¹, 黄塞¹, 刘禹¹

(1. 塔里木大学园艺与林学院·新疆设施农业兵团重点实验室 新疆阿拉尔 843300;

2. 阿克苏耐达农业科技有限公司 新疆阿克苏 843000)

摘要:探究地温及水氮耦合对秋冬茬沙培番茄生长发育、生理特性、果实品质及产量的影响,筛选最优水氮-地温调控组合。以明珠 F₁ 番茄为试材,设置地温(T)、灌水量(H)和施氮量(N)3 因素 5 水平,采用三元二次通用旋转组合设计,共 15 个处理,以常规栽培为对照(CK),测定植株生长、生理指标、果实品质及产量,并采用 TOPSIS 法进行综合评价。结果表明,不同地温及水氮耦合对番茄各指标均产生显著影响。A5 处理(H₂N₄T₄)综合表现最佳,其果实硬度、弹性及可溶性糖、可溶性蛋白、维生素 C 和可溶性固形物含量(w, 后同)分别为 83.27 N、4.97 mm、3.06%、33.95%、14.99 mg·100 g⁻¹ 和 3.33%,硝酸盐含量最低(0.52 mg·kg⁻¹),单株产量、小区产量和折合产量分别为 2.92 kg、43.85 kg·m⁻² 和 94.96 t·hm⁻²。TOPSIS 法评价结果表明,各处理综合效益排序为 A5>A4>A3>A13>A2>A10>A1>A9>A7>A8>A11>A14>A12>CK>A6。综上,地温是水氮耦合效应的重要调控因子,适宜地温(22 °C)与中等灌水量和较高施氮量的组合(H₂N₄T₄)可显著提升番茄品质与产量,实现提质增效。

关键词:沙培番茄;地温;水氮耦合;果实品质;产量

中图分类号:S641.2

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2026)09-128-10

Effects of soil temperature and water nitrogen coupling on the physiological, biochemical, and fruit quality of tomato in autumn and winter seasons

Wang Yujie¹, Cheng Yunxia¹, Tan Zhanming^{1,2}, Yang Liyu¹, Wang Qi¹, Cao Man¹, Li Qi¹, Liu Ziyu¹, Liu Mengfan¹, Cheng Wei¹, Huang Sai¹, Liu Yu¹

(1. College of Horticulture and Forestry, Tarim University/Xinjiang Production and Construction Corps Key Laboratory of Southern Xinjiang Protected Agriculture, Alar 843300, Xinjiang, China; 2. Aksu Naida Agricultural Science and Technology Co., Ltd., Aksu 843000, Xinjiang, China)

Abstract: This study aimed to investigate the effects of soil temperature and water - nitrogen coupling on growth, physiological characteristics, fruit quality, and yield of sand-cultivated tomato in the autumn - winter season, and to determine the optimal combination of water, nitrogen, and soil temperature. Mingzhu F₁ tomato was used as the experimental material. A three-factor(soil temperature, irrigation amount, and nitrogen application rate) five-level quadratic central composite design was employed with 15 treatments, the conventional cultivation was used control(CK). Growth parameters, physiological traits, fruit quality, and yield were measured, and a comprehensive evaluation was conducted using the TOPSIS method. The results showed that soil temperature and water-nitrogen coupling significantly affected all measured indices. Treatment A5(H₂N₄T₄) showed the best overall performance, with fruit hardness, elasticity, soluble sugar, soluble protein, vitamin C, and soluble solids content reaching 83.27 N, 4.97 mm, 3.06%, 33.95%, 14.99 mg·100 g⁻¹, and 3.33%, respectively, while nitrate content was the lowest(0.52 mg·kg⁻¹). The single plant yield, plot yield, and hectare yield were 2.92 kg, 43.85 kg·m⁻², and 94.96 t·hm⁻², respectively. The TOPSIS ranking of treatments was A5>A4>A3>A13>A2>A10>A1>A9>A7>A8>A11>A14>A12>CK>A6. Soil temperature plays a key regulatory role in water - nitrogen coupling. The combination of moderate irrigation, relatively high nitrogen application, and an optimal soil temperature of 22 °C(H₂N₄T₄) significantly improves tomato quality and yield, achieving synergistic enhancement of productivity and quality.

Key words: Sand-cultivated tomato; Soil temperature; Water-nitrogen coupling; Fruit quality; Yield

收稿日期:2025-12-01;修回日期:2026-04-29

基金项目:兵团财政科技计划项目(2023AB071);新疆维吾尔自治区天山英才培养计划(2023TSYCCY0002);第一师阿拉尔市科技计划项目(2024NY04);科技兴村共兴工程(2024YD025-二师 2410060);国家自然科学基金(32541115)

作者简介:王钰洁,女,在读硕士研究生,主要研究方向为设施作物栽培与生理。E-mail:825776893@qq.com

通信作者:程云霞,女,讲师,主要研究方向为设施蔬菜高效栽培。E-mail:1925619550@qq.com

番茄(*Solanum lycopersicum* L.)是我国重要的设施蔬菜作物之一,含有丰富的营养物质,如番茄红素和维生素C等。新疆是我国番茄生产和出口的重要地区,占全国产量约25%,出口量约70%^[1]。南疆地区昼夜温差大、光照充足、黄沙资源丰富,适宜发展设施农业,因此黄沙无土栽培成为主要生产模式。然而,黄沙保水保肥能力差,且为提高产量,生产中常过量施用氮肥,导致低产劣品及经济效益下降。

研究表明,水氮耦合调控对番茄生长发育、果实品质及产量具有显著影响^[2-4]。韩雪等^[5]研究指出,适宜的施氮量可提高番茄产量,而施氮量过高会导致产量下降;王雪科等^[6]研究表明,水氮耦合对番茄品质影响显著,适度灌水和施肥可调控糖酸比及硝酸盐含量;朱和等^[7]研究发现,合理水肥耦合能提升光合作用效率及叶绿素含量。番茄为喜温作物,对低温敏感^[8],南疆冬季地温低,加之温室结构限制,地温偏低可能影响根系生长,造成营养供应不足、产生畸形果及落果现象^[9-10]。因此,研究地温调控及水氮耦合效应对黄沙无土番茄生长和品质的影响具有重要意义^[11]。

鉴于此,笔者以明珠F₁番茄为试材,设置地温、灌水量及施氮量3个因素,采用三元二次通用旋转组合设计,旨在探究最适地温及水氮耦合比例,以期为设施黄沙无土栽培番茄生产提供理论依据,达到节水减氮、控温增产的目的。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于2023年8月至2024年1月在塔里木大学园艺试验站连栋温室进行,选用番茄品种为明珠F₁(来源:台湾益农种苗股份有限公司),口感佳、品质较优、抗病性强。

1.2 试验设计

采用黄沙代替土壤的无土栽培模式,供试肥料为尿素[含量(w,后同)46%]作氮肥,过磷酸钙(含量32%)作磷肥,农业用硫酸钾(含量50%)作钾肥,建立栽培槽、滴灌施肥装置及地温调控装置。试验设定不同的地温(T)、灌水量(H)及施氮量(N)3个因素,每个因素设定5个水平,共15个处理,3次重复,2个保护行,完全随机区组设计,采用三元二次通用旋转组合设计。各因素水平编码如表1所示,处理组合如表2所示,常规栽培作为对照(CK)。

番茄幼苗于2023年9月育苗,采用草炭、蛭

石、珍珠岩体积比3:1:1的基质,2023年11月番茄幼苗3叶1心时定植于栽培槽中,定植15d后开始测定各项指标。定植前用多菌灵溶液冲洗基质,确保试验基质参数水平一致,单干整枝,第4穗果结果后摘心,每穗保留4个果,病虫害防治及田间除草等日常管理按常规栽培操作规程进行。试验地共有47个栽培槽,每个栽培槽代表一个小区,每个栽培槽宽30cm,长600cm,设定株距为30cm,行距60cm,单行栽培,每个栽培槽定植15株,栽培槽两边深15cm处理有地热线,采用铺设地热线+温控器方法调控地温;滴灌带+压力表调控灌水量。

表1 试验因素与水平			
Table 1 Experimental factors and levels			
水平 Level	灌水量 H Irrigation amount/m ³	施氮量 N Nitrogen application rate/(kg·hm ⁻²)	夜间地温 T Nighttime ground temperature/°C
1	3100	90	10
2	3690	285	14
3	4560	570	18
4	5430	855	22
5	6020	1049	26

表2 试验方案设计				
Table 2 Experimental scheme design				
处理 Treatment	灌水量 Irrigation amount/m ³	施氮量 Nitrogen application rate/(kg·hm ⁻²)	夜间地温 Nighttime ground temperature/°C	水平组合 Horizontal combination
A1	4(5430)	4(855)	4(22)	H ₄ N ₄ T ₄
A2	4(5430)	4(855)	2(14)	H ₄ N ₄ T ₂
A3	4(5430)	2(285)	4(22)	H ₄ N ₂ T ₄
A4	4(5430)	2(285)	2(14)	H ₄ N ₂ T ₂
A5	2(3690)	4(855)	4(22)	H ₂ N ₄ T ₄
A6	2(3690)	4(855)	2(14)	H ₂ N ₄ T ₂
A7	2(3690)	2(285)	4(22)	H ₂ N ₂ T ₄
A8	2(3690)	2(285)	2(14)	H ₂ N ₂ T ₂
A9	1(3100)	3(570)	3(18)	H ₁ N ₃ T ₃
A10	5(6020)	3(570)	3(18)	H ₅ N ₃ T ₃
A11	3(4560)	1(90)	3(18)	H ₃ N ₁ T ₃
A12	3(4560)	5(1049)	3(18)	H ₃ N ₅ T ₃
A13	3(4560)	3(570)	1(10)	H ₃ N ₃ T ₁
A14	3(4560)	3(570)	5(26)	H ₃ N ₃ T ₅
CK	3(4560)	3(570)	3(18)	H ₃ N ₃ T ₃

1.3 指标测定与方法

1.3.1 生长指标的测定 定植7d后提高地温,定植15d后开始指标测定,每个小区选6株长势一致的植株。株高(cm)用钢卷尺测量植株从基质表面

至自然生长点的高度^[12];茎粗(mm)用游标卡尺测量子叶下2 cm处的位置^[12];用游标卡尺测量从上至下第5~6片叶的节间长(mm)^[12];叶面积(cm²):摘取从上至下第6片功能叶后用根系扫描仪测定^[12];叶片数:每个小区选择固定的6株长势一致的植株,调查每个植株的叶片数^[12];每隔7 d测定1次。

1.3.2 生理指标的测定 番茄第2穗果坐果后,每个处理摘取从上至下第6片叶,将叶片擦拭干净后剪碎,测定叶片叶绿素含量、可溶性糖含量和可溶性蛋白含量^[12];每个小区选6株长势一致的植株,在晴天上午用荧光仪进行荧光参数(初始荧光 F_0 ;可变荧光 F_v ;最大荧光 F_m ;PSII最大光转化效率 F_v/F_m ;PSII活性 F_v/F_0)的测定。

1.3.3 果实质构指标的测定 在番茄第2穗果成熟后,每个小区取大小一致、着色均匀的9个番茄作为一组进行质构测定,并进行3次重复。采用TA-XT2i质构分析仪将硬度、黏附性、弹性、内聚性、胶着性和咀嚼性结果输出文档保存。

1.3.4 果实品质指标的测定 在番茄第2穗果成熟后,每个小区取大小一致、着色均匀的9个番茄作为一组进行品质测定,并进行3次重复。采用紫外-可见分光光度法测定番茄红素含量;采用草酸-EDTA法测定维生素C含量;采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量;采用考马斯亮蓝G-250染色法测定可溶性蛋白含量;采用紫外分光光度法测定硝酸盐含量;采用酸碱滴定法测定有机酸含量^[12]。

1.3.5 产量测定 采用电子天平(百分之一)测量单果质量(g),所得数据保留2位小数。记录平均单果质量、单株产量,统计各小区番茄总产量,根据小区面积,计算番茄单位面积产量。

1.4 数据分析

采用Excel 2019整理试验数据和绘图,采用SPSS 26.0进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 地温及水氮耦合对番茄生长发育的影响

2.1.1 地温及水氮耦合对番茄株高的影响 各处理的株高均呈“快—慢—快”的增长趋势(图1)。12月1日,CK株高66.5 cm,A4最高,为73.6 cm(较CK增加10.67%),A11最低,为51.2 cm(较CK降低23.01%)。12月22日,CK株高为76.0 cm,A4最高,为90.8 cm(较CK增加19.47%),A11最低,为63.9 cm(较CK降低15.92%)。1月5日,CK株高110.2 cm,A4最高,为123.4 cm(较CK增加11.98%),A11最低,为103.0 cm(较CK降低6.53%)。以上结果表明,适当增加灌水量、降低夜间地温及施氮量可促进株高增长,过度灌水或施肥不足会抑制生长。

2.1.2 地温及水氮耦合对番茄茎粗的影响 由图2可知,地温及水氮耦合下各处理茎粗呈“快—慢—快”的增长趋势。11月17日至12月8日增长较快,12月8日CK茎粗为8.71 mm,A2处理茎粗最大,为11.01 mm,较CK增加26.41%,A11处理茎粗最小,为8.44 mm,相较CK减小3.09%;12月8日至12月22日增长缓慢,12月22日CK茎粗为10.40 mm,A2处理茎粗最大,为12.21 mm,较CK增加17.40%,A11处理茎粗最小,为9.45 mm,较CK减小9.13%;12月22日至1月5日增长较快,1月5日CK茎粗为12.56 mm,A2处理茎粗最大,为13.56 mm,较CK增加7.96%,A11处理茎粗最小,

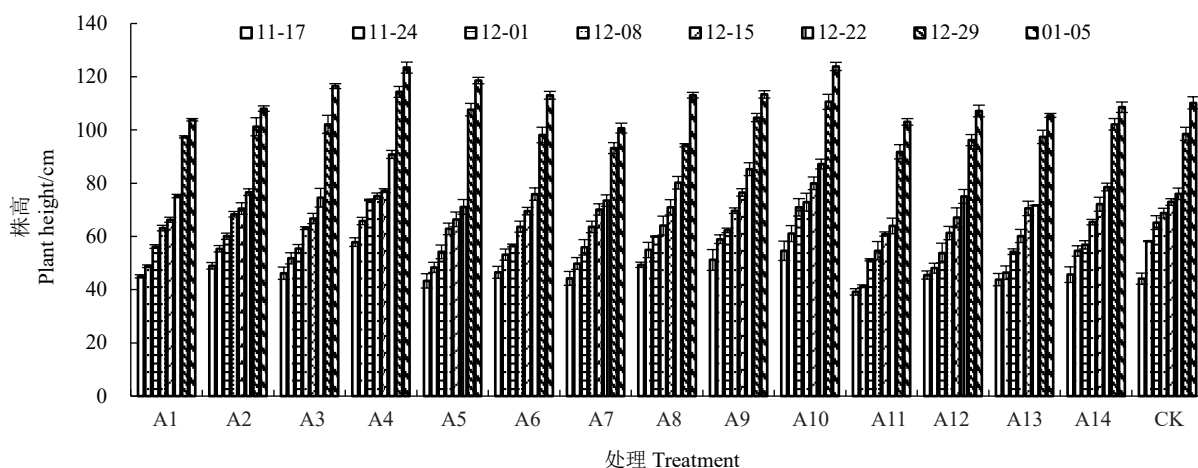


图1 地温及水氮耦合对番茄株高的影响

Fig. 1 Effects of soil temperature and water nitrogen coupling on plant height of tomato

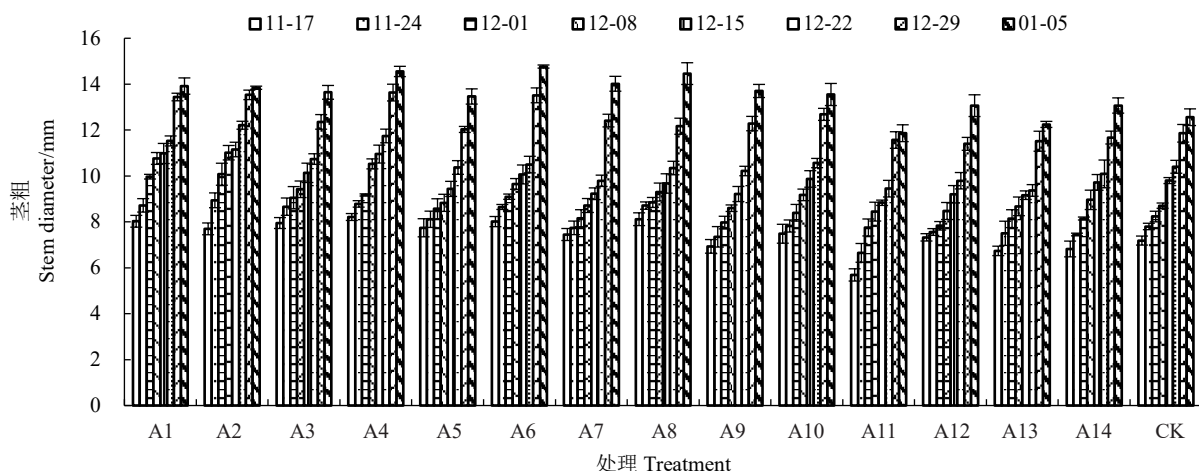


图2 地温及水氮耦合对番茄茎粗的影响

Fig. 2 Effects of soil temperature and water nitrogen coupling on stem diameter of tomato

为 11.84 mm,较 CK 减小 5.73%。以上结果表明,适当增加灌水量及施氮量,降低夜间地温能有效促进茎粗增加,夜间地温过高、过度灌水或施肥以及亏缺灌溉均会影响植株生长发育。

2.1.3 地温及水氮耦合对番茄节间长的影响 由图 3 可知,地温及水氮耦合下各处理节间长呈“快—慢—快”的增长趋势。11 月 17 日至 12 月 1

日增长较快,12 月 1 日 CK 节间长为 27.94 mm,A8 处理节间长最长,为 29.22 mm,较 CK 增加 4.58%,A5 处理节间长最短,为 20.09 mm,较 CK 减小 28.09%;12 月 1 日至 12 月 22 日增长缓慢,12 月 22 日 CK 节间长为 33.02 mm,A8 处理节间长最长,为 41.65 mm,较 CK 增加 26.14%,A5 处理节间长最短,为 21.92 mm,较 CK 减小 33.62%;12 月 22 日至

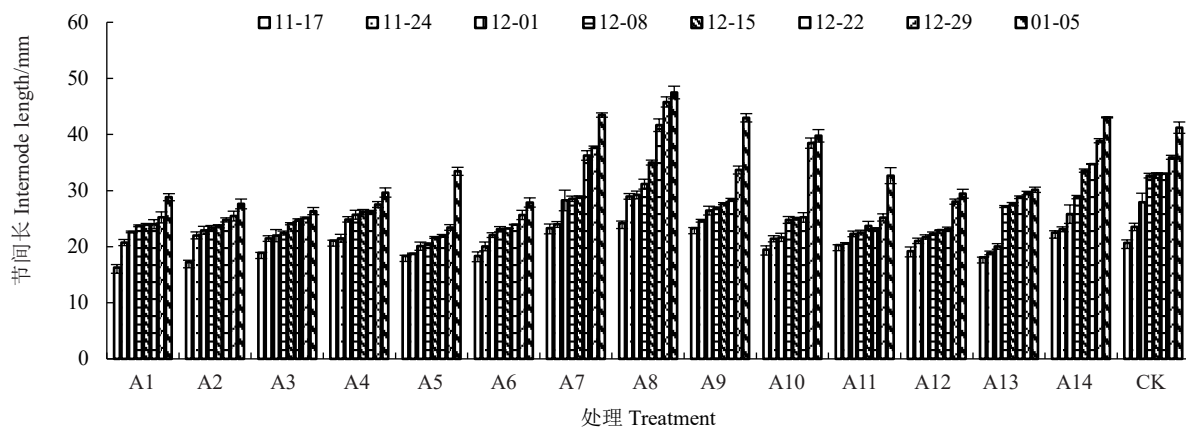


图3 地温及水氮耦合对番茄节间长的影响

Fig. 3 Effects of soil temperature and water nitrogen coupling on internode length of tomato

1 月 5 日增长较快,1 月 5 日 CK 节间长为 41.22 mm,A8 处理节间长最长,为 47.48 mm,较 CK 增加 15.18%,A3 处理节间长最短,为 26.35 mm,较 CK 减小 36.07%。以上结果表明,当灌水量一致时,适当降低夜间地温及施氮量能有效防止植株徒长,过量灌水或施肥、夜间地温过高均会造成植株徒长。

2.1.4 地温及水氮耦合对番茄叶面积的影响 由图 4 可知,地温及水氮耦合下各处理叶面积呈

“快—慢—快”的增长趋势。11 月 17 日至 12 月 1 日增长较快,12 月 1 日 CK 叶面积为 397.13 cm²,A8 处理叶面积最大,为 489.05 cm²,较 CK 增加 23.15%,A11 处理叶面积最小,为 269.84 cm²,较 CK 减小 32.05%;12 月 1 日至 12 月 22 日增长缓慢,12 月 22 日 CK 叶面积为 484.74 cm²,A2 处理叶面积最大,为 578.05 cm²,较 CK 增加 19.25%,A11 处理叶面积最小,为 353.79 cm²,较 CK 减小 27.01%;12 月 22 日至 1 月 5 日增长较快,1 月 5 日 CK 叶面积为

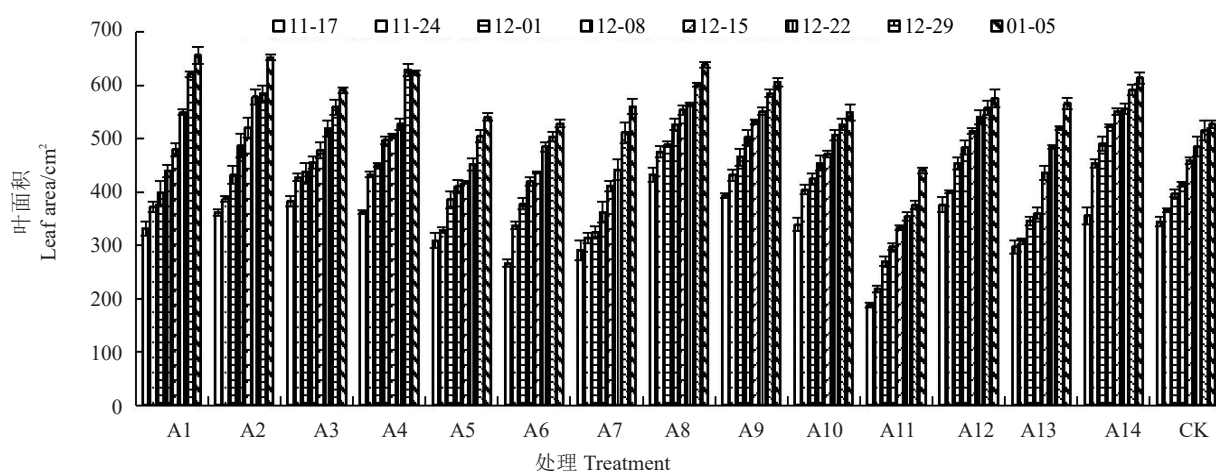


图4 地温及水氮耦合对番茄叶面积的影响

Fig. 4 Effects of soil temperature and water nitrogen coupling on leaf area of tomato

526.81 cm², A1 处理叶面积最大, 为 656.01 cm², 较 CK 增加 24.52%, A11 处理叶面积最小, 为 440.81 cm², 较 CK 减小 16.32%。以上结果表明, 适当增加灌水量能促进叶面积增加, 而灌水量和夜间地温一致时, 降低施氮量会减小叶面积。

2.1.5 地温及水氮耦合对番茄叶片数的影响 由

图 5 可知, 地温及水氮耦合下各处理叶片数呈“快—慢—快”的增长趋势。11 月 17 日至 12 月 1 日增长较快, 12 月 1 日 CK 叶片数为 13, A6 处理叶片数最多, 为 14, 较 CK 增加 7.69%, A11 处理叶片数最少, 为 12, 较 CK 减少 7.69%; 12 月 1 日至 12 月 22 日增长缓慢, 12 月 22 日 CK 叶片数为 17, A8

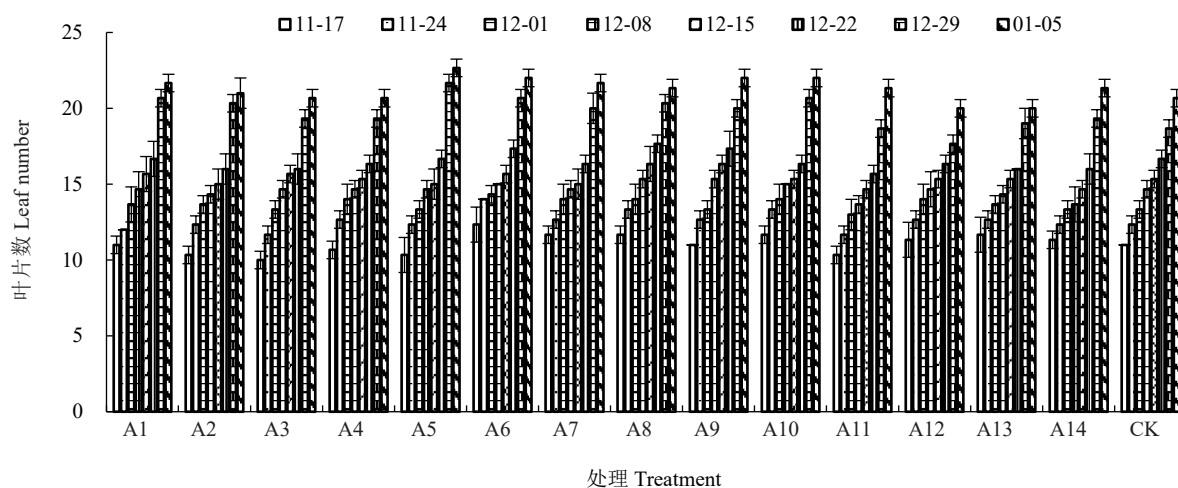


图5 地温及水氮耦合对番茄叶片数的影响

Fig. 5 Effects of soil temperature and water nitrogen coupling on leaf number of tomato

处理叶片数最多, 为 18, 较 CK 增加 5.88%, A11 处理叶片数最少, 为 16, 较 CK 减少 5.88%; 12 月 22 日至 1 月 5 日增长较快, 1 月 5 日 CK 叶片数为 21, A5 处理叶片数最多, 为 23, 较 CK 增加 9.52%, A12 处理叶片数最少, 为 20, 较 CK 减少 4.76%。以上结果表明, 适当降低灌水量、增加施氮量能有效促进植株叶片数增加, 而灌水量和夜间地温一致时, 施氮量增多或减少均会减缓植株生长发育。

2.2 地温及水氮耦合对番茄生理特性的影响

2.2.1 地温及水氮耦合对番茄荧光参数的影响

由表 3 可知, 地温及水氮耦合下各处理间番茄的荧光参数呈显著差异。其中, F_0 范围为 152.67~246.33, 除 A11 处理外, A3 处理与其他处理均无显著差异; F_v 范围为 323.33~510.33, A1 处理最大, 与 A2、A3、A13 处理无显著差异, 较 CK 显著提高 17.06%; F_m 范围为 556.33~691.00, A2 处理最大, 除 A4、A6、A10 外, 与其他处理均无显著差异; F_v/F_m 范围为 0.50~0.77, A1 处理最大, 除 A7 外, 与其他处理均无显著差异; F_v/F_0 范围为 1.77~3.58, A1 处理最大, 较 CK 显著提高 76.35%。以上结果表明, 较高

表 3 地温及水氮耦合对番茄荧光参数的影响					
Table 3 Effects of ground temperature and water nitrogen coupling on fluorescence parameters of tomato					
处理 Treatment	F_o	F_v	F_m	F_v/F_m	F_v/F_o
A1	154.00±54.29 b	510.33±22.55 a	664.33±55.18 abc	0.77±0.07 a	3.58±1.21 a
A2	217.33±56.36 ab	473.67±55.73 abc	691.00±109.42 a	0.69±0.04 a	2.24±0.39 b
A3	152.67±32.15 b	482.00±47.84 ab	648.00±47.95 abcd	0.74±0.03 a	2.24±1.46 b
A4	189.67±48.27 ab	323.33±102.48 e	579.67±130.50 bcd	0.68±0.01 a	2.28±0.33 b
A5	194.33±18.01 ab	427.67±35.30 bcd	622.00±21.38 abcd	0.68±0.04 a	2.22±0.36 b
A6	178.00±35.38 ab	378.33±38.55 de	556.33±73.19 d	0.68±0.02 a	2.16±0.24 b
A7	191.33±38.89 ab	434.00±14.73 bcd	625.33±48.68 abcd	0.50±0.39 b	2.32±0.39 b
A8	197.00±16.52 ab	404.33±48.35 cd	601.33±63.01 abcd	0.67±0.02 a	2.05±0.14 b
A9	184.00±13.45 ab	403.00±39.95 cd	587.00±37.72 abcd	0.68±0.03 a	2.20±0.30 b
A10	182.33±33.29 ab	374.67±34.59 de	557.00±8.54 cd	0.67±0.06 a	2.13±0.65 b
A11	246.33±8.08 a	436.33±23.12 bcd	682.67±23.03 ab	0.64±0.02 ab	1.77±0.12 b
A12	154.60±122.83 b	417.33±29.37 bcd	647.67±76.84 abcd	0.65±0.04 ab	1.79±0.50 b
A13	203.00±38.97 ab	454.67±33.83 abc	657.67±70.04 abcd	0.69±0.03 a	2.28±0.34 b
A14	202.67±24.79 ab	431.00±37.32 bcd	633.67±53.01 abcd	0.68±0.03 a	2.14±0.25 b
CK	214.74±2.53 ab	435.96±2.63 bcd	652.09±3.00 abcd	0.67±0.01 ab	2.03±0.01 b

注:同列不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

水平的地温及水氮耦合能提升番茄荧光参数,过高或过低会对其产生抑制。

2.2.2 地温及水氮耦合对叶绿素含量的影响 叶绿素是植物进行光合作用的重要色素,叶绿素含量会影响植物的光合作用效率。由表 4 可知,地温及水氮耦合下各处理间叶绿素含量具有显著差异。其中叶绿素 a 含量范围为 0.77~1.28 mg·g⁻¹, A7、A13 处理最高,除 A1、A3、A6、A8 处理外,与其他处理均无显著差异;叶绿素 b 含量范围为 0.44~0.77 mg·g⁻¹,CK 最高,显著高于除 A13 外的其他处理;总叶绿素含量范围为 1.24~2.05 mg·g⁻¹,A13 处理最高,与 CK 无显著差异。以上结果表明,适当的夜间地温及水氮用量能提高叶绿素 a、叶绿素 b 及总叶绿素含量,在低温中水中氮条件下叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素含量较高,而过度减少灌水或施氮则降低叶绿素含量。

2.2.3 地温及水氮耦合对叶片可溶性糖和可溶性蛋白含量的影响 由表 5 可知,地温及水氮耦合下各处理间叶片的可溶性糖和可溶性蛋白含量具有显著差异。其中,叶片可溶性糖含量范围为 107.02~350.65 mg·g⁻¹,A4 处理最高,较 CK 显著提高 227.64%;叶片可溶性蛋白含量范围为 30.36~112.57 mg·g⁻¹,A10 处理最高,与 A11 处理无显著差异,较 CK 显著提高 77.36%。以上结果表明,适当的地温及水氮耦合有利于可溶性糖和可溶性蛋白的积累,在温度较低时,高水低氮能提高可溶性糖

表 4 地温及水氮耦合对番茄叶绿素含量的影响

Table 4 Effects of ground temperature and water nitrogen coupling on chlorophyll content in tomato

(mg·g⁻¹)

处理 Treatment	w(叶绿素 a) Chlorophyll a content	w(叶绿素 b) Chlorophyll b content	w(总叶绿素) Total chlorophyll content
A1	1.02±0.03 cd	0.48±0.01 d	1.50±0.02 f
A2	1.16±0.01 abcd	0.59±0.01 b	1.75±0.01 de
A3	0.99±0.02 d	0.45±0.01 d	1.44±0.02 f
A4	1.20±0.01 ab	0.60±0.02 b	1.79±0.02 cde
A5	1.24±0.01 a	0.63±0.01 b	1.87±0.02 cd
A6	1.04±0.00 bcd	0.44±0.01 d	1.47±0.01 f
A7	1.28±0.01 a	0.64±0.01 b	1.92±0.02 bc
A8	0.77±0.39 e	0.48±0.12 d	1.24±0.27 g
A9	1.19±0.01 abc	0.58±0.01 bc	1.76±0.02 de
A10	1.20±0.05 ab	0.51±0.08 cd	1.71±0.04 e
A11	1.19±0.01 abc	0.64±0.03 b	1.83±0.04 cde
A12	1.21±0.02 a	0.62±0.03 b	1.83±0.06 cde
A13	1.28±0.04 a	0.76±0.08 a	2.05±0.11 a
A14	1.18±0.01 abc	0.59±0.01 b	1.78±0.02 de
CK	1.24±0.00 a	0.77±0.01 a	2.01±0.01 ab

含量,温度较高促进叶片中可溶性糖积累。

2.3 地温及水氮耦合对番茄果实品质的影响

2.3.1 地温及水氮耦合对番茄外观品质的影响 由表 6 可知,地温及水氮耦合下各处理番茄外观品质具有显著差异。其中,果实横径范围为 51.99~65.82 mm,A7 处理最大,与 A2、A5、A13 处理无显

表 5 地温及水氮耦合对番茄叶片可溶性糖和可溶性蛋白含量的影响

Table 5 Effects of soil temperature and water nitrogen coupling on soluble sugar and soluble protein content in tomato leaves (mg·g⁻¹)

处理 Treatment	w(可溶性糖) Soluble sugar content	w(可溶性蛋白) Soluble protein content
A1	169.35±4.19 ef	30.36±20.21 d
A2	223.09±18.57 bc	43.82±41.45 bcd
A3	236.82±17.21 bc	56.35±12.28 bcd
A4	350.65±63.70 a	70.49±7.24 b
A5	257.30±5.94 b	72.03±18.24 b
A6	218.29±14.40 c	40.33±17.68 bcd
A7	208.77±17.79 cd	64.44±17.24 bc
A8	147.17±9.89 efgh	62.68±15.90 bc
A9	175.35±25.80 de	32.98±29.53 cd
A10	157.78±13.39 efgh	112.57±9.16 a
A11	137.00±21.92 fghi	110.47±2.08 a
A12	129.89±6.73 ghi	35.52±4.39 cd
A13	119.81±12.41 hi	56.48±22.17 bcd
A14	167.53±25.99 efg	61.39±16.05 bcd
CK	107.02±16.83 i	63.47±14.49 bc

著差异,较 CK 显著增加 18.21%;果实纵径范围为 38.77~53.39 mm,A2 处理最大,与 A3、A5、A7、A9、A13 处理无显著差异,较 CK 显著增加 27.18%;果形指数范围为 0.73~0.88,A4 处理最大,除 A6、A7、A10、A11、A12、CK 外,与其他处理均无显著差异,较 CK 显著增加 17.33%。以上结果表明,适当的地温及水氮耦合比例有利于提高番茄果实纵径、横径

表 6 地温及水氮耦合对番茄外观品质的影响

Table 6 Effects of ground temperature and water nitrogen coupling on appearance quality of tomato

处理 Treatment	横径 Transverse diameter/mm	纵径 Longitudinal diameter/mm	果形指数 Fruit shape index
A1	53.15±1.14 de	44.54±2.03 cd	0.84±0.03 abc
A2	64.87±1.27 a	53.39±0.71 a	0.82±0.02 abcd
A3	59.69±1.40 c	50.96±7.40 ab	0.85±0.10 ab
A4	53.44±1.20 de	47.14±2.12 bc	0.88±0.04 a
A5	64.82±1.42 a	53.26±0.57 a	0.82±0.02 abcd
A6	60.32±1.75 bc	47.24±2.87 bc	0.78±0.05 bcdef
A7	65.82±3.37 a	50.52±2.96 ab	0.77±0.01 cdef
A8	51.99±2.55 e	42.00±2.23 de	0.81±0.07 abcde
A9	61.09±2.34 bc	51.38±1.68 ab	0.84±0.01 ab
A10	60.85±1.40 bc	44.86±1.29 cd	0.74±0.04 f
A11	52.04±0.93 e	38.77±3.25 e	0.75±0.05 ef
A12	53.53±1.63 de	39.23±1.18 e	0.73±0.04 f
A13	63.20±0.31 ab	51.12±0.87 ab	0.81±0.02 abcde
A14	53.81±2.17 de	44.39±3.00 cd	0.83±0.05 abc
CK	55.68±1.17 d	41.98±0.55 de	0.75±0.01 def

及果形指数,低温高水高氮能促进果实纵径、横径及果形指数增加,低温低氮会产生抑制作用。

2.3.2 地温及水氮耦合对番茄内在品质的影响
由表 7 可知,地温及水氮耦合下各处理间番茄质构指标具有显著差异。其中,破裂力范围为 48.55~78.72 N,A2 处理最大,与 A3 处理无显著差异,较 CK 显著增加 30.87%;内聚性范围为 0.14~0.19,各处理间无显著差异;黏附性范围为 0.19~1.34 N·mm⁻¹,

表 7 地温及水氮耦合对番茄质构指标的影响

Table 7 Effects of ground temperature and water nitrogen coupling on tomato texture index

处理 Treatment	破裂力 Rupture force/N	内聚性 Cohesion	黏附性 Adhesion/(N·mm ⁻¹)	硬度 Hardness/N	弹性 Elasticity/mm	胶黏性 Adhesive viscosity/N	咀嚼性 Chewiness/mj
A1	53.85±1.14 h	0.17±0.05 a	0.20±0.05 h	50.99±3.76 fg	2.33±0.07 fgh	11.60±0.17 de	29.57±3.77 gh
A2	78.72±1.61 a	0.14±0.05 a	1.34±0.09 a	60.84±1.89 d	3.06±0.09 d	11.71±0.94 de	36.06±1.06 f
A3	77.43±1.77 ab	0.16±0.04 a	0.73±0.14 b	74.52±1.90 c	4.56±0.08 a	16.80±0.59 b	76.55±1.55 c
A4	69.05±1.27 c	0.15±0.05 a	0.29±0.03 gh	54.32±4.03 ef	3.50±0.22 c	12.27±1.23 cd	44.33±2.24 e
A5	68.12±3.21 c	0.19±0.01 a	0.42±0.06 def	83.27±0.45 b	4.97±0.28 a	21.31±1.53 a	93.54±0.74 a
A6	48.55±0.47 i	0.15±0.03 a	0.29±0.01 gh	37.33±1.67 k	1.93±0.15 h	8.43±1.43 g	16.64±0.16 l
A7	64.14±1.17 d	0.14±0.04 a	0.39±0.07 efg	43.85±0.05 hij	2.12±0.26 h	9.16±0.81 fg	20.18±1.06 kl
A8	63.15±1.89 de	0.14±0.04 a	0.38±0.03 efg	45.66±2.24 hi	2.60±0.17 efg	10.09±0.12 efg	26.51±1.71 hi
A9	55.91±0.50 gh	0.14±0.01 a	0.49±0.01 cde	40.27±0.10 jk	2.20±0.01 gh	9.17±0.21 fg	22.07±1.57 jk
A10	67.70±2.44 c	0.17±0.03 a	0.38±0.04 fg	55.17±2.82 e	3.16±0.55 cd	13.48±0.94 c	43.47±3.44 e
A11	60.76±0.05 def	0.15±0.02 a	0.29±0.02 gh	43.15±3.46 ij	2.29±0.46 gh	10.64±0.10 def	24.84±0.74 ij
A12	74.03±3.89 b	0.16±0.05 a	0.37±0.05 fg	71.16±3.48 c	2.94±0.35 de	16.12±0.12 b	51.58±3.24 d
A13	67.71±0.42 c	0.17±0.02 a	0.19±0.03 h	88.87±3.55 a	4.02±0.13 b	20.04±2.64 a	83.55±4.75 b
A14	58.42±4.26 fg	0.15±0.01 a	0.51±0.13 cd	47.75±0.60 gh	2.75±0.15 def	10.38±0.15 ef	30.95±2.39 g
CK	60.15±1.11 ef	0.14±0.03 a	0.56±0.08 c	45.11±0.64 hi	2.31±0.29 gh	9.70±0.47 fg	23.78±1.68 ijk

A2 处理最高,较 CK 显著增加 139.29%;硬度范围为 37.33~88.87 N,A13 处理最大,较 CK 显著增加 97.01%;弹性范围为 1.93~4.97 mm,A5 处理最大,与 A3 处理无显著差异,较 CK 显著增加 115.15%;胶黏性范围为 8.43~21.31 N,A5 处理最大,与 A13 处理无显著差异,较 CK 显著增加 119.69%;咀嚼性范围为 16.64~93.54 mj,A5 处理最大,较 CK 显著增加 293.35%。

由表 8 可知,地温及水氮耦合下各处理间番茄内在品质具有显著差异。其中,可溶性糖含量范围 0.91%~3.12%,A11 处理最高,较 CK 显著提高 0.34

百分点;可溶性蛋白含量范围为 0.92%~33.95%,A5 处理最高,较 CK 显著提高 24.17 百分点;维生素 C 含量范围为 0.81~14.99 mg·100 g⁻¹,A5 处理最高,较 CK 显著提高 228.73%;硝酸盐含量范围为 0.52~2.12 mg·kg⁻¹,A5 处理最低,较 CK 显著降低 50.94%;有机酸含量范围为 0.08%~0.16%,A8 处理最低,除 A1、A3、A12 处理外,与其他处理均无显著差异,较 CK 降低 0.04 百分点;番茄红素含量范围为 0.94~2.68 mg·100 g⁻¹,A2 处理最高,较 CK 显著提高 185.11%;可溶性固形物含量范围为 2.33%~3.83%,A13 处理最高,与 A2、A4、A5、A9、A11、A12

表 8 地温及水氮耦合对番茄内在品质的影响								
Table 8 Effects of ground temperature and water nitrogen coupling on the intrinsic quality of tomato								
处理 Treatment	w(可溶性糖) Soluble sugar content/%	w(可溶性蛋白) Soluble protein content/%	w(维生素 C) Vitamin C content/ (mg·100 g ⁻¹)	w(硝酸盐) Nitrate content/ (mg·kg ⁻¹)	w(有机酸) Organic acid content/%	w(番茄红素) Lycopene content/ (mg·100 g ⁻¹)	w(可溶性固形物) Soluble solids content/%	糖酸比 Sugar acid ratio
A1	3.03±0.17 b	14.37±1.67 c	6.77±0.73 c	0.66±0.03 g	0.16±0.01 a	1.83±0.75 b	3.00±0.50 bcdef	19.54±1.50 d
A2	0.91±0.13 j	10.39±1.22 ef	4.95±0.44 efg	0.87±0.01 f	0.11±0.04 cb	2.68±0.02 a	3.67±0.76 ab	9.57±3.79 e
A3	1.22±0.07 i	10.90±2.35 fde	5.25±0.97 defg	1.02±0.02 de	0.16±0.01 a	1.80±0.14 bc	2.67±0.29 def	7.49±0.46 e
A4	2.09±0.02 g	23.38±1.47 b	10.31±0.59 b	1.35±0.04 b	0.09±0.01 c	1.51±0.23 bc	3.50±0.00 abc	22.12±2.41 cd
A5	3.06±0.20 b	33.95±1.31 a	14.99±0.52 a	0.52±0.02 h	0.11±0.01 bc	0.99±0.05 bc	3.33±0.29 abcd	28.89±2.50 abc
A6	1.74±0.02 h	11.95±1.02 de	5.44±0.33 fde	0.68±0.15 g	0.09±0.01 c	1.52±0.27 cd	2.33±0.58 f	19.69±2.01 d
A7	2.63±0.33 d	3.54±0.59 h	1.92±0.26 i	1.01±0.03 de	0.10±0.03 bc	1.25±0.36c de	2.83±0.29 cdef	29.31±8.84 abc
A8	2.47±0.11 e	9.34±1.24 fg	4.44±0.54 gh	1.21±0.01 c	0.08±0.00 c	1.36±0.11 cde	2.67±0.29 def	29.53±0.21 ab
A9	2.59±0.04 d	12.85±0.88 dc	5.89±0.34 d	0.65±0.01 g	0.10±0.02 bc	1.28±0.32 def	3.17±0.29 abcde	26.22±4.61 bcd
A10	2.18±0.05 f	0.92±0.94 i	0.81±0.41 j	0.99±0.02 de	0.10±0.03 bc	1.65±0.18 efg	2.83±0.29 cdef	24.20±6.99 bcd
A11	3.12±0.20 a	10.58±0.29 ef	5.03±0.14 defg	0.96±0.02 e	0.09±0.01 c	2.02±0.29 efgh	3.17±0.29 abcde	35.14±3.83 a
A12	2.46±0.33 e	8.08±1.24 g	3.92±0.51 h	1.24±0.09 c	0.15±0.06 ab	1.09±0.30 efgh	3.50±0.00 abc	19.06±7.08 d
A13	2.81±0.08 c	11.95±0.68 de	5.65±0.28 de	0.67±0.04 g	0.12±0.03 abc	1.71±0.07 fgh	3.83±0.58 a	24.95±5.61 bcd
A14	2.15±0.83 f	9.01±0.98 fg	4.38±0.44 gh	2.12±0.03 a	0.12±0.03 abc	1.21±0.20 gh	2.50±0.50 ef	19.04±3.58 d
CK	2.78±0.41 c	9.78±0.51 efg	4.56±0.31 fgh	1.06±0.01 d	0.12±0.02 abc	0.94±0.23 h	3.00±0.00 bcdef	24.05±3.42 bcd

处理无显著差异,较 CK 显著提高 0.83 百分点;糖酸比范围为 7.49~35.14,A11 处理最高,除 A5、A7、A8 外,与其他处理均呈显著差异。以上结果表明,适当的地温及水氮耦合比例有利于番茄果实品质提升,过高或过低均会产生抑制效果。

2.4 地温及水氮耦合对番茄产量的影响

由表 9 可知,单果质量范围为 127.16~214.62 g,A4 处理最高,与 A3 处理无显著差异,较 CK 显著提高 49.67%;单株产量范围为 2.03~3.43 kg,A4 处理最高,与 A3 处理无显著差异,较 CK 显著提高 55.20%;小区产量范围为 30.52~51.51 kg·m²,A4 处理最高,与 A3 处理无显著差异,较 CK 显著提高 55.24%;折合产量范围为 66.09~111.55 t·hm⁻²,A4 处理最高,与 A3 处理无显著差异,较 CK 显著提高

55.23%。以上结果表明,适当的地温及水氮耦合比例能提升番茄产量,低温高水低氮、高温高水低氮均能提升番茄产量,而过高或过低的地温及水氮耦合配比会造成产量下降。

2.5 TOPSIS 法综合效益评价

番茄综合效益受生长指标、生理指标、品质指标及产量等的共同影响,为全面客观评价番茄综合效益,本试验选取株高、茎粗、叶绿素含量、荧光参数、番茄红素含量及产量等 33 个指标作为评价因子,采用 TOPSIS 法对各处理番茄综合效益进行评估。

由表 10 可知,各处理番茄综合效益评分从高分到低分依次为 A5>A4>A3>A13>A2>A10>A1>A9>A7>A8>A11>A14>A12>CK>A6,其中 A5 处理的综合效益评分最高,为 0.65,A6 处理综合

表 9 地温及水氮耦合对番茄产量的影响

Table 9 Effects of ground temperature and water nitrogen coupling on tomato yield

处理 Treatment	单果质量 Single fruit mass/g	单株产量 Single plant yield/kg	小区产量 Plot yield/(kg·m ²)	产量 Yield/(t·hm ²)
A1	140.46±2.84 g	2.25±0.05 g	33.71±0.68 g	73.00±1.48 g
A2	169.89±16.12 c	2.72±0.26 c	40.77±3.87 c	88.30±8.38 c
A3	206.93±2.47 a	3.31±0.04 a	49.66±0.60 a	107.55±1.28 a
A4	214.62±5.63 a	3.43±0.09 a	51.51±1.35 a	111.55±2.93 a
A5	182.71±0.92 b	2.92±0.02 b	43.85±0.22 b	94.96±0.48 b
A6	158.45±3.95 de	2.54±0.07 de	38.03±0.95 de	82.35±2.05 de
A7	166.39±6.51 cd	2.66±0.11 cd	39.93±1.56 cd	86.48±3.38 cd
A8	167.79±0.70 cd	2.68±0.02 cd	40.27±0.17 cd	87.20±0.37 c
A9	167.82±1.40 cd	2.69±0.03 cd	40.28±0.34 cd	87.22±0.73 c
A10	163.91±0.50 cde	2.62±0.01 cde	39.34±0.12 cde	85.19±0.26 cd
A11	147.30±5.19 fg	2.36±0.09 fg	35.35±1.25 fg	76.56±2.70 fg
A12	127.16±10.29 h	2.03±0.17 h	30.52±2.47 h	66.09±5.35 h
A13	154.73±3.26 ef	2.48±0.06 ef	37.13±0.79 ef	80.42±1.70 ef
A14	163.34±0.05 cde	2.61±0.00 cde	39.20±0.01 cde	84.90±0.03 cde
CK	138.26±8.64 g	2.21±0.14 g	33.18±2.08 g	71.86±4.49 g

表 10 TOPSIS 评价结果

Table 10 The results of TOPSIS evaluation

处理 Treat- ment	正理想解距离 Normal ideal solution distance	负理想解距离 Negative ideal solution distance	综合效益评分 Comprehensive benefit score	排名 Rank
A1	3.78	3.19	0.46	7
A2	3.40	3.31	0.49	5
A3	3.18	3.59	0.53	3
A4	3.00	3.72	0.55	2
A5	2.31	4.23	0.65	1
A6	4.10	2.56	0.38	15
A7	3.68	2.97	0.45	9
A8	3.76	2.87	0.43	10
A9	3.55	2.96	0.46	8
A10	3.35	3.10	0.48	6
A11	3.93	2.96	0.43	11
A12	3.90	2.73	0.41	13
A13	3.25	3.49	0.52	4
A14	3.62	2.58	0.42	12
CK	3.94	2.74	0.41	14

效益评分最低,为 0.38,CK 综合效益评分为 0.41,表明在 H₂N₄T₄ 水平组合处理下番茄综合效益最高。

3 讨 论

3.1 地温及水氮耦合对番茄生长发育的影响

番茄营养生长受水分、氮素及温度的协同调控,其中地温通过影响根系活力及养分吸收效率发挥关键作用^[13]。本研究表明,适宜地温配合中等水氮水平显著促进植株生长,而低温或高水高氮均表

现出抑制效应,这与王虎兵等^[14]、于红等^[15]的研究结果一致。与李耀霞等^[16]对茎粗的研究结果不同,本研究发现地温参与后显著增强水氮对茎粗的调控作用,说明地温可能通过促进根系代谢及水氮吸收,从而放大水氮耦合效应。此外,氮素对叶面积的促进存在适宜范围,过量或不足均抑制生长,表明植株营养生长依赖于水氮供给与温度条件的协同匹配。

3.2 地温及水氮耦合对番茄生理特性的影响

叶绿素含量和叶绿素荧光参数是反映光合作用效率的重要指标^[17-19]。本研究发现,适宜水氮水平可提高 F_v/F_m 和 F_v/F_o ,而过高或过低均产生抑制作用,与宫兆宁等^[20]的研究结果一致。地温对荧光参数的影响最为明显,说明温度是限制光系统Ⅱ活性和光能转换效率的关键因子,这一结果与张耀丰^[21]的一致。在叶绿素含量方面,本研究与李春雨等^[19]的结果存在差异:低温高水中氮条件下叶绿素含量较高,可能是由于低温抑制生长速率,从而减缓叶绿素降解,表现为相对积累。可溶性糖和可溶性蛋白含量的变化反映植株对环境的适应策略。本研究表明,施氮量对可溶性蛋白含量的影响最为显著,而可溶性糖含量则受温度与水分协同调控,说明番茄通过调节碳氮代谢平衡以适应不同水热条件。

3.3 地温及水氮耦合对番茄果实品质的影响

果实品质受水分、养分与温度的综合影响。已有研究表明,水肥调控对番茄品质具有显著作

用^[22-23]。本研究发现,低温高水高氮有利于果实大小及果形指数提升,表明适宜地温条件下水氮配置可促进同化产物向果实分配。在内在品质方面,本研究与赵嘉诺等^[24]的研究结果基本一致,即适宜水氮条件可提高可溶性糖、维生素C及番茄红素含量,并降低硝酸盐含量。

3.4 地温及水氮耦合对番茄产量的影响

番茄产量是光合产物积累与分配的综合结果,受水分、氮素及温度协同调控^[25-26]。本研究结果表明,不同水分条件下最优氮素与地温组合存在差异:低水条件下,提高地温并增加施氮量有利于增产,而高水条件下则需降低施氮量,这与王雪科等^[6]、任志雨^[27]的研究结果一致。其机制可能在于适宜地温可增强根系活力,提高水氮利用效率;而过量水氮则促进营养生长、抑制生殖生长,导致产量下降。因此,番茄高产依赖于地温、水分与氮素的动态匹配,而非单一因素的增加。

4 结 论

笔者基于三因素耦合试验,明确了地温与水氮协同调控对秋冬茬沙培番茄的作用规律,主要结论如下:(1)地温是水氮耦合效应的关键调控因子。适宜地温(22℃)可显著提高水氮利用效率,促进植株生长与光合作用,而低温或过量水氮均产生抑制作用。(2)地温-水氮协同调控通过影响光合效率与碳氮代谢,决定番茄品质与产量形成。适宜耦合条件可提高叶绿素含量及荧光参数,促进可溶性糖、维生素C和番茄红素积累,同时降低硝酸盐含量,实现提质增效。(3)不同目标下最优调控模式存在差异。综合效益最优为 $H_2N_4T_4$ ($3690\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $855\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、22℃),高产则以 $H_4N_2T_4$ 和 $H_4N_2T_2$ 更优,表明精准匹配水氮与地温是实现高效生产的关键。本研究揭示了地温在水氮耦合中的放大效应及其对光合作用、品质与产量的调控路径,可为新疆地区设施番茄生产节水减氮与稳产提质提供理论依据。

参考文献

- 祝洋,刘志应,李新苗,等.水肥耦合对蛭石为主复合基质栽培番茄产量、水分利用效率及品质的影响[J].江苏农业科学,2024,52(2):144-151.
- 李建明,潘铜华,王玲慧,等.水肥耦合对番茄光合、产量及水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2014,30(10):82-90.
- 王雪梅,曹红霞,韩红亮.水氮耦合对隔沟灌溉温室番茄品质的影响[J].西北农业学报,2017,26(8):1197-1201.
- 李艳梅,廖上强,薛高峰,等.减量灌溉下番茄施控释肥的水氮耦合效应研究[J].农业环境科学学报,2014,33(1):134-140.
- 韩雪,曲梅,李银坤,等.不同施肥水平对温室番茄生长、氮吸收及产量品质的影响[J].中国土壤与肥料,2021(2):162-169.
- 王雪科,吴春燕,韩潇怡,等.水肥耦合对日光温室番茄产量和品质的影响[J].江苏农业科学,2023,51(20):167-172.
- 朱和,田军仓,杨凡,等.水肥气热耦合对枸杞光合作用和产量的影响[J].排灌机械工程学报,2022,40(5):511-518.
- 宋建文,杨卓兮,张睿,等.番茄耐寒性研究进展[J].广东农业科学,2024,51(12):24-39.
- 杜佳庚,郑艳,张展,等.新疆地区设施番茄黄沙无土栽培存在的问题及对策[J].新疆农垦科技,2021,44(6):31-32.
- 郭亚宁,周建朝,王秋红,等.作物水氮耦合效应的研究进展[J].中国农学通报,2019,35(15):1-5.
- 向凌潇.水氮钾耦合对温室番茄生长发育的影响及叶面积模型构建[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2024.
- 高俊凤.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2006.
- 王虎兵,曹红霞,郝舒雪,等.水肥耦合对温室番茄生长和叶绿素荧光参数的影响[J].排灌机械工程学报,2018,36(10):1047-1052.
- 王虎兵,曹红霞,郝舒雪,等.温室番茄植株养分和光合对水肥耦合的响应及其与产量关系[J].中国农业科学,2019,52(10):1761-1771.
- 于红,宫志宏,李春,等.夜间低温对温室番茄及黄瓜苗期生长的影响[J].北方园艺,2017(3):56-60.
- 李耀霞,郁继华,张国斌,等.灌水上限和施肥量对温室番茄生长发育的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2020,48(2):42-51.
- 周振翔.水稻叶片叶绿素含量对光合生理及产量的影响[D].江苏扬州:扬州大学,2016.
- 祝洋,刘志应,李新苗,等.水肥耦合对设施番茄叶片酶活性及水肥利用的影响[J].节水灌溉,2023(12):18-26.
- 李春雨,谭占明,程云霞,等.水肥耦合对沙培番茄叶绿素含量以及光合特性日变化的影响[J].新疆农业科学,2024,61(12):3006-3013.
- 宫兆宁,范云豹,刘辉,等.不同水氮梯度下典型挺水植物叶绿素荧光的响应特性[J].植物学报,2016,51(5):631-638.
- 张耀丰.根区低温对番茄幼苗光合作用和根系生长的影响[D].沈阳:沈阳农业大学,2019.
- 王景燕,龚伟,李伦刚,等.水肥对汉源花椒幼苗抗逆生理的影响[J].西北植物学报,2015,35(3):530-539.
- 王瑞,刘晓奇,颜博杰,等.水分亏缺对番茄果实外观品质和糖酸组分的动态调控[J].西北农业学报,2023,32(9):1356-1364.
- 赵嘉诺,时建业,魏昊泰,等.氮素水平对基质培番茄不同成熟期果实品质的影响[J].中国蔬菜,2024(12):79-89.
- 傅国海,杨其长,刘文科,等.根区温度对设施作物生理生态影响的研究进展[J].中国蔬菜,2016(10):20-27.
- 康海.水氮耦合技术在经济作物栽培中的应用[J].农业工程,2022,12(7):84-87.
- 任志雨.根区温度对番茄生长和产量的影响[J].天津农业科学,2006(3):15-16.