

雷金银,金建新,桂林国. 基于水肥使用效率评价指标的番茄滴灌灌水施肥量优化[J]. 江苏农业科学,2019,47(23):129-133.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.23.031

基于水肥使用效率评价指标的番茄滴灌灌水施肥量优化

雷金银,金建新,桂林国

(宁夏农林科学院农业资源与环境研究所,宁夏银川 750002)

摘要:为探索宁夏干旱荒漠区番茄科学合理的滴灌灌水和施肥量,采用 $L_9(3^4)$ 饱和正交设计方法研究不同养分和灌水量组合对番茄产量、品质及水肥生产效率的影响,并利用空间分析法寻求各指标均达到最优时的灌水量和施肥量。结果表明,在水肥互作影响下,番茄产量表现为先增加后减少的趋势,在 T6 处理时达到最大值 110.6 t/hm^2 。水分利用效率(WUE)和养分生产效率(PFP)随着施肥量的增加和灌水量的减少,分别表现为增大和减少的变化趋势,各品质指标也表现为不同的水肥互作效应。当番茄各指标为 90% 的理论最大值时,能形成较为一致的水肥管理制度,番茄整个生育期灌溉量为 $1\ 925 \sim 2\ 015 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,各养分施肥量 N 为 $487.1 \sim 504.82 \text{ kg/hm}^2$, P_2O_5 为 $243.56 \sim 252.4 \text{ kg/hm}^2$, K_2O 为 $608.88 \sim 631.02 \text{ kg/hm}^2$ 。

关键词:番茄;评价指标;灌水量;施肥量;优化

中图分类号: S275.6;S365 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)23-0129-04

温室番茄在我国种植面积较大,是我国消费率最高的蔬菜之一,传统的种植方式和施肥结构是以产量最大化为最终目标,但是这种施肥方式不仅水肥资源利用效率不高,也带来了土壤面源污染、土壤质量下降等问题。因此,对现有的番茄生产水肥供应模式进行优化调整,从番茄产量和品质双重指标着手,提出产量高、品质优的滴灌灌水施肥量,对缓解过量施肥和灌水造成的环境问题等具有重要的作用,同时也对实现宁夏干旱荒漠区水肥资源高效配置和生态灌区建设具有重要的意义。国内外许多学者对番茄节水高效灌溉制度和生态环保施肥模式进行了探索,邢英英等从番茄根系生长、产量、品质及水肥利用效率等诸多因素入手,利用多元回归和空间分析等方法,对其灌水施肥制度进行优化研究,提出了番茄水肥调控效应和科学合理的水肥供应制度^[1]。陈碧华等对番茄灌水和施肥进行二因素二次回归分析,对番茄生长指标、品质和产量等不同指标均达到最优值时的水肥组合进行探索,提出了最佳灌水量和施肥量组合^[2]。贾宋楠等以氮肥为基础,分别进行了高、中、低和不施肥 4 个梯度施肥水平试验,以番茄干物质积累、水肥利用和产量等指标作为判别指标,得到番茄总施肥量和生育期内施肥配比关系^[3]。本研究在诸多学者研究报道的基础上,对宁夏干旱荒漠区番茄种植水肥供应量进行优化调整,从番茄产量、品质及水肥生产效率等指标出发,通过空间分析等方法寻求其指标在最优范围内的灌水量和施肥量组合。

量和施肥量组合。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2016—2017 年开展,2 年试验番茄均于 2 月 10 日定植,分别于 6 月 8 日和 6 月 15 日拉秧,采用一垄一带双行布置,行距 40 cm,株距 20 cm,灌水方式统一采用滴灌。试验以灌水和施肥 2 个因子作为变量,对照采用李建明等在陕西试验得到的结果^[4],即灌溉定额为 $2\ 518.74 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,施 N 量为 542.58 kg/hm^2 ,施 P_2O_5 量 206.3 kg/hm^2 ,施 K_2O 量为 940.03 kg/hm^2 ,灌水量和施肥量均设置上下浮动 30% 作为处理,根据 $L_9(3^4)$ 饱和正交设计原理,设置 4 因素 3 水平 9 个处理,另增加对照,共 10 个滴灌水肥处理,每个小区 25 m^2 ,每个小区边缘种植保护行,小区之间利用深埋的塑料薄膜隔离,随机区组排列,每个处理 3 个重复,磷肥全部采用基施,氮肥和钾肥以水肥一体化方式进行追肥,其他田间管理均相同(表 1)。

表 1 试验处理

处理	施肥处理(kg/hm^2)			灌水处理
	N	P_2O_5	K_2O	灌溉定额(m^3/hm^2)
T1	379.80	144.41	658.02	1 763.12
T2	379.80	206.30	940.03	2 518.74
T3	379.80	268.19	1 222.04	3 274.36
T4	542.58	144.41	940.03	3 274.36
T5	542.58	206.30	1 222.04	1 763.12
T6	542.58	268.19	658.02	2 518.74
T7	705.35	144.41	1 222.04	2 518.74
T8	705.35	206.30	658.02	3 274.36
T9	705.35	268.19	940.03	1 763.12
T10	542.58	206.30	940.03	2 518.74

收稿日期:2018-02-17

基金项目:国家科技支撑计划(编号:2014BAD14B006)。

作者简介:雷金银(1980—),男,宁夏西吉人,博士,副研究员,主要从事旱区农业和节水灌溉研究。E-mail:jinnxnk009@163.com。

通信作者:桂林国,硕士,研究员,主要从事土壤快速培肥和农业节水研究工作。Tel:(0951)6886763;E-mail:834887265@qq.com。

1.2 测定方法

1.2.1 产量 在成熟期,番茄按小区单独计产,从5月中旬开始收获直至拉秧完全结束,每隔7 d将颜色和成熟度一致的番茄采摘计产,计算2年试验各处理平均产量并换算为标准产量,水分利用效率(WUE)和养分生产效率(PFP)分别用式(1)和式(2)计算:

$$WUE = Y_m / I_a ; \tag{1}$$

$$PFP = Y_m / F_a 。 \tag{2}$$

式中:WUE为水分利用效率,kg/m³;Y_m为番茄产量,kg/hm²;I_a为总灌溉定额,m³/hm²;PFP为养分生产效率,kg/kg;F_a为总施肥量,kg/hm²。

1.2.2 品质 在番茄第3穗果成熟时,每个小区随机选择5颗番茄进行品质测定。番茄红素含量利用高效液相色谱法测定,硝酸盐含量采用水杨酸-硫酸法,维生素C含量采用光

度分析法,可溶性固形物含量和总酸度分别采用折光计法和滴定法,对2年测得的各项品质指标取平均值。

2 结果与分析

2.1 对番茄产量、WUE和PFP的影响

不同处理水肥耦合作用下对番茄产量的影响较大(表2),除T4和T9处理外其余各处理之间均表现为极显著性差异($P<0.01$),其产量在84.2~110.6 t/hm²之间变化,随着灌水量和施肥量的增加产量表现为先增加后减小的趋势,处理T6产量值达到最大,其次为T10处理,产量也达到了109.5 t/hm²,T1处理产量最小,为84.2 t/hm²,较T6处理降低23.9%,表明减少施N量会严重降低番茄产量,李建明等提出的施肥方案^[4]在宁夏干旱荒漠区仍需要进一步优化调整。

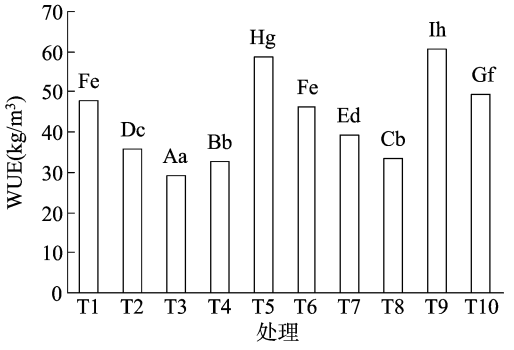
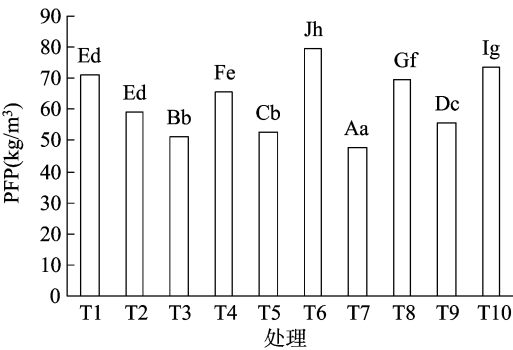
表2 水肥互作对番茄产量及品质的影响

处理	产量 (t/hm ²)	维生素C含量 (mg/100 g)	可溶性糖含量 (%)	可溶性固形物含量 (%)	番茄红素含量 (mg/kg)	有机酸含量 (%)	糖酸比
T1	84.2Aa	44.3Ee	1.61Ef	4.26Hh	30.5Gg	0.14Bc	11.4Cc
T2	90.3Bb	40.6Gh	1.79Cc	4.30Gg	32.2Ff	0.15BCd	11.8Bb
T3	95.8Cc	38.7Hi	1.02Ij	4.32Gg	35.8Dd	0.14Bc	7.1Ii
T4	104.8Ff	47.8Dd	1.36Gh	4.68Ff	40.6Cc	0.12Aa	10.8Ee
T5	102.6Ee	48.4Cc	1.82Bb	5.14Bb	43.7Aa	0.18Df	10.2Ff
T6	110.6Hh	52.6Aa	1.76Cd	4.96Dd	43.9Aa	0.13ABb	13.5Aa
T7	98.7Dd	40.8Gh	1.54Fg	5.04Cc	26.4Hh	0.17De	8.9Hh
T8	107.6Gg	41.7Fg	1.15Hi	4.76Ee	41.8Bb	0.12Aa	9.4Gg
T9	106.9Ff	42.1Ff	1.86Aa	5.42Aa	30.5Gg	0.17De	10.7Ee
T10	109.5Ii	49.5Bb	1.68De	5.13Bb	32.7Ee	0.15BCd	11.1Dd

注:同列数据后不同小写字母、大写字母分别表示在0.05、0.01水平差异显著、极显著。

由图1可见,各处理之间PFP和WUE差异极显著($P<0.01$),其变化范围分别为47.64~79.39 kg/kg和28.44~60.63 kg/m³。处理T10较T6施肥量增加14.98%,而PFP减小7%,从T10到T7施肥量增加了22.67%,PFP减小35%,表明当灌水量相同时PFP随着施肥量的增加而减小,并且在超过一定阈值后其下降速率更大,WUE整体上表现为随着灌水量的增加而下降,T1比T2和T3分别高33.2%和63.2%。

在水肥互作影响下,随着施肥量的增加和灌水量的减少,WUE和PFP分别表现为增大和减少的变化趋势,即WUE为处理T9最大(60.63 m³/kg),PFP为T6处理最大(79.39 kg/kg),在总施肥量增加、灌水量减少时,与T8相比,T10处理的PFP增加2.89%,而T5处理PFP则下降24.72%,WUE则增加35.81%和75.54%。



柱上不同小写字母和大写字母分别表示不同处理之间差异显著($P<0.05$)和差异极显著($P<0.01$)

图1 水肥耦合对番茄 PFP 和 WUE 的影响

2.2 对番茄品质的影响

灌水和施肥对番茄各品质指标均有显著影响,并且灌水比施肥影响更大(表2)。维生素C、可溶性糖、番茄红素含量随着灌水量的增大而减小,随着施肥量的增加表现为先增大后减小的趋势,可溶性固形物含量随着灌水量的减小而增大,

随着施肥量的减小而减小,有机酸含量和施肥量正相关,和灌水量之间的关系不显著。在水肥互作影响下,维生素C含量在T6处理达到最大值,其次为T10,最大值比最小值T3处理高35.9%,可溶性糖和可溶性固形物含量均为T9最大,其次为T5,两者之间表现为极显著性差异($P<0.01$);处理T6番

茄红素含量为 43.9 mg/kg,达到最大值,和 T5 之间差异不显著;有机酸含量以 T5 最大,其次为 T7 和 T9;糖酸比以 T6 最大,其次为 T2,且前者比后者高 14.4%,两者呈极显著差异 ($P < 0.01$)。

2.5 水肥耦合对番茄生产的互作效应

表征番茄特性的营养品质较多,邢英英等通过层次分析

法、客观熵权法等方法对番茄各品质指标进行赋值和权重计算,确定番茄红素含量和糖酸比在表征番茄营养品质中所占的权重较大^[1,5]。因此,在分析水肥耦合作用对番茄生产能力影响关系回归方程中,品质因素中选用番茄红素含量和糖酸比,其次为产量、水分利用效率 *WUE* 和养分生产效率 *PPF*,水肥互作对番茄生产要素的回归方程见表 3。

表 3 水肥互作对番茄生产要素的回归方程

因变量 <i>y</i>	回归方程	R^2	<i>P</i> 值
番茄红素	$y = -28.65 + 0.028W + 0.042F + 0.000\ 005\ 7W^2 + 0.000\ 006\ 6F^2 - 0.000\ 031WF$	0.76	0.000
糖酸比	$y = -18.97 + 0.021W + 0.013F - 0.000\ 002\ 4W^2 - 0.000\ 001\ 2F^2 - 0.000\ 005\ 8WF$	0.88	0.001
产量	$y = -240\ 507.65 + 78.23W + 308.87F - 0.008\ 8W^2 - 0.077F^2 - 0.021WF$	0.68	0.002
<i>WUE</i>	$y = -37.12 - 0.023W + 0.16F + 0.000\ 003\ 1W^2 - 0.000\ 041F^2 - 0.000\ 007\ 3WF$	0.91	0.000
<i>PPF</i>	$y = -42.96 + 0.055W + 0.087F - 0.000\ 006\ 1W^2 - 0.000\ 026F^2 - 0.000\ 014\ 8WF$	0.75	0.002

注:W 为总灌水量,F 为总施肥量。

灌水和施肥对番茄各主要产量和品质指标均有较大的影响,且往往表现为交互效应,利用 MATLAB 软件中最大值求解功能对表 3 中各回归方程进行最大值求解,得到各方程中指标取得最大值时的灌水量和施肥量,求解结果见表 4。

表 4 方程求解得到的灌水量和施肥量

因变量	指标最大值	灌水量 (m^3/hm^2)	施肥量 (kg/hm^2)
番茄红素	60.36 mg/kg	3 274.32	1 182.23
糖酸比	14.51	2 889.34	1 182.23
产量	111.95 t/hm ²	2 443.58	1 663.28
<i>WUE</i>	61.25 kg/m ³	1 763.12	1 761.35
<i>PPF</i>	81.61 kg/kg	3 107.17	1 182.23

由表 4 可以看出,当施肥量为 1 182.23 kg/hm²,灌水量为 3 274.32、2 889.34、3 107.17 m³/hm² 时,番茄红素含量、糖酸比和 *PPF* 达到最大值,分别为 60.36 mg/kg、14.51、81.61 kg/kg;当灌水量为 2 443.58 m³/hm²、施肥总量为 1 663.28 kg/hm² 时,番茄产量达到最大值 111.95 t/hm²; *WUE* 取得最大值 61.25 kg/hm² 时,需要的灌水量和施肥量分别为 1 763.12 m³/hm² 和 1 761.35 kg/hm²,可见表征番茄产量、品质及水肥利用效率的筛选指标不能同时达到最优化值,因此需要对方程求解得到的各灌水量和施肥量进行进一步优化,以使其在各指标同时达到近似优化水平时的水肥供应量。利用 Origin 8.0 绘制灌水和施肥两因素对表 4 中各指标的二因素互作效应如图 2 所示。

若反映番茄产量、品质及水肥利用效率的各指标按理论最大值降低 95% 和 90% 的允许范围,利用空间分析法对各指标对应的灌水量和施肥量范围进行计算。结果表明,灌水量介于 2 336.98 ~ 3 253 m³/hm² 时,番茄红素含量、糖酸比、产量及 *PPF* 指标均达到理论最大值的 95% 以上,但是其 *WUE* 为 48.3 ~ 32.6 kg/m³,较理论最大值下降 21.1% ~ 46.8%;另外施肥量在 1 448.45 ~ 1 925.6 kg/hm² 时,产量和 *WUE* 达到理论最大值的 95% 以上,但是要保证番茄红素含量、糖酸比和 *PPF* 在理论最大值的 95% 以上,施肥量必须小于 1 225.58 kg/hm²。可见要保证番茄各产量、品质指标均大于理论最大值的 95% 以上较为困难,将目标降低到理论最大值的 90% 时,利用空间分析法对适宜的灌溉量和施肥量进行计

算,发现当灌溉量为 1 925 ~ 2 015 m³/hm² 时,各指标均能达到理论最大值的 90% 以上,当施肥量为 1 339.53 ~ 1 388.25 kg/hm² 时,糖酸比、*WUE*、产量和 *PPF* 等 4 个指标均达到理论最大值的 90% 以上,但是番茄红素含量只有当施肥量小于 1 309.6 kg/hm² 时才能达到上述结果,在该范围内时,番茄红素含量较理论最大值下降 14.6% ~ 24.3%,基本认为可以接受。

根据水肥耦合对番茄各产量和品质指标交互影响的总量分析,结合 $L_9(3^4)$ 饱和正交设计原理,对番茄 N、P₂O₅ 和 K₂O 的施入量进行估算,得到番茄整个生育期灌溉量为 1 925 ~ 2 015 m³/hm²,施肥量为 1 339.53 ~ 1 388.25 kg/hm²,与处理 T6 较为接近,按照处理 T6 的各养分比例,对所计算得到的施肥量进行分配,即 N : P₂O₅ : K₂O 为 2 : 1 : 2.5,得到各养分施肥量 N 为 487.1 ~ 504.82 kg/hm²,P₂O₅ 为 243.56 ~ 252.4 kg/hm²,K₂O 为 608.88 ~ 631.02 kg/hm²。

3 讨论与结论

农田水肥管理的目标主要为提高水资源和农田养分的利用效率,追求较高的灌溉水利用系数和养分生产效率是现代高效农业的基本要求。农田土壤中水分和养分之间相互制约、相互影响,在一定范围之内,增加灌溉水量和养分输入能较大地提高番茄产量,改善番茄生产品质,但是过量的水肥供应不仅造成水肥资源的浪费,而且还会造成产量和品质降低,王文娟等通过建立模型,对日光温室小管出流番茄产量和水分的关系进行了研究,发现其为单峰偏右函数,当水分超过一定阈值,其水分贡献率逐渐降低^[6]。吴泳辰等研究表明,适当的水分欠缺不会导致番茄产量严重降低,且对番茄品质的提高具有一定的促进作用,同时有助于根系向下生长,吸收深层土壤水分,对提高水分利用效率具有重要的意义^[7-8]。

本研究利用饱和正交设计原理,对宁夏中部干旱带日光温室番茄生产水肥供应量进行优化,提出适宜该地区及相同生态区番茄生产的灌溉定额和施肥量,分析不同水肥处理对番茄产量、*WUE*、*PPF* 和品质指标的耦合作用效应,并用相关学者提出的表征番茄营养品质中权重比较大的指标和产量、*WUE*、*PPF* 与水肥施用量建立了回归方程,对其进行求解,得到了番茄各指标取得理论最大值时的水肥施用量,但是由于各指标对应的水肥施用量差异较大,因此,通过空间分析法对

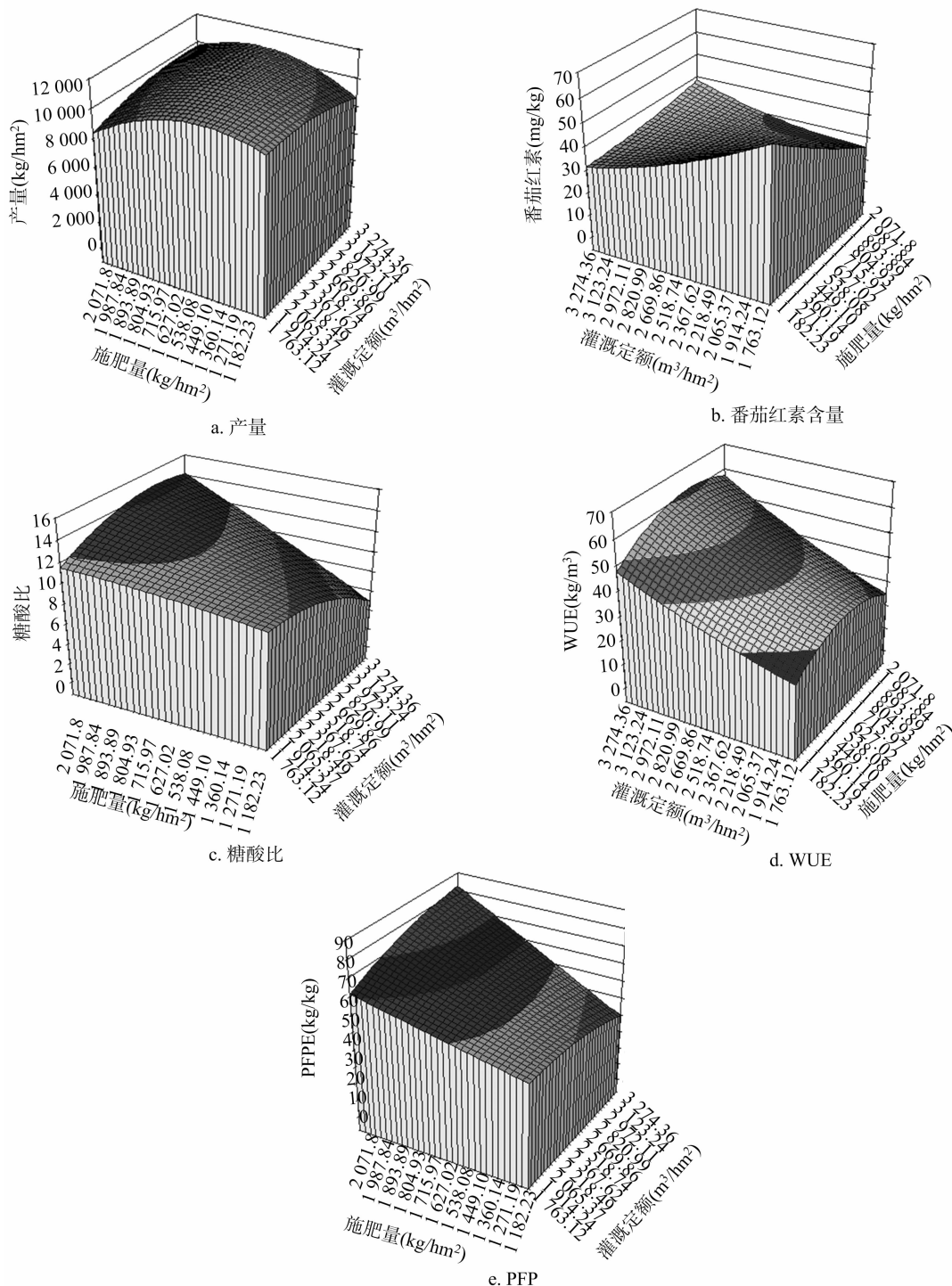


图2 水肥耦合对番茄关键指标的互作效应

各指标为理论最大值的 95% 和 90% 时的水肥施用量进行求解和分析,发现当番茄各指标为 90% 的理论最大值时,能形成较为一致的水肥管理制度,结合前人研究结果,提出番茄整个生育期灌溉量为 $1\,925 \sim 2\,015 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,各养分施肥量 N 为 $487.1 \sim 504.82 \text{ kg}/\text{hm}^2$, P_2O_5 为 $243.56 \sim 252.4 \text{ kg}/\text{hm}^2$, K_2O 为 $608.88 \sim 631.02 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。

参考文献:

[1]邢英英,张富仓,吴立峰,等. 基于番茄产量品质水肥利用效率确

定适宜滴灌灌水施肥量[J]. 农业工程学报,2015,31(增刊1): 110-121.

[2]陈碧华,邵庆炉,孙 丽. 番茄日光温室膜下滴灌水肥耦合效应研究[J]. 核农学报,2009,23(6):1082-1086.

[3]贾宋楠,范凤翠,刘胜尧,等. 施肥量对温室滴灌番茄干物质累积、产量及水肥利用的影响[J]. 灌溉排水学报,2017,36(5): 21-29.

[4]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.

李琬婷,黄晓霞,程小毛. 雄黄连木遗传多样性[J]. 江苏农业科学,2019,47(23):133-136.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.23.032

雄黄连木遗传多样性

李琬婷,黄晓霞,程小毛

(西南林业大学园林学院/国家林业局西南风景园林工程研究中心,云南昆明 650224)

摘要:选取雄黄连木(*Pistacia chinensis* Bunge)为研究材料,利用 10 对扩增片段长度多态性(AFLP)引物对来自河南省的 6 个不同种群总计 136 份雄黄连木个体进行遗传多样性分析,从不同层次揭示其变异规律以及为后期黄连木雌雄鉴定和合理利用提供理论依据。结果表明,物种水平上,Shannon 信息指数 I (0.49)和基因多样性指数(0.33)均反映出雄黄连木种群具有中等遗传多样性水平。分子方差分析(AMOVA)结果表明,雄黄连木种群内的遗传变异占 93.35%,种群间的变异占 6.65%,二者都说明该地区黄连木的遗传变异主要发生在种群内部。6 个黄连木群体间的遗传距离范围在 0.035 3~0.149 5 之间,遗传相似性的范围在 0.861 1~0.965 3 之间,基因流 N_m 为 2.612 6,说明黄连木不同群体间相似程度较高,遗传分化较低,基因交流较充分。

关键词:黄连木;AFLP;遗传变异;遗传分化

中图分类号: S792.990.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)23-0133-04

黄连木(*Pistacia chinensis* Bunge)系漆树科(Anacardiaceae)黄连木属(*Pistacia*)落叶乔木,雌雄异株,是广泛分布于我国

的生物能源树种之一^[1]。在能源危机日益加剧的今天,对生物柴油能源植物进行利用研究具有极其重要的价值与意义,黄连木作为一种优良的木本油料树种,显示出其广阔的开发利用前景,受到广泛的关注^[2-3]。对于雌雄异株植物而言,一般雄株生长得更快且有更好的适应性^[4],通过对雌雄黄连木的合理搭配,来满足当前对黄连木种群大面积繁育的需要,雌雄植株黄连木性别发育很难通过形态学特征来进行鉴别,故对雄黄连木进行遗传多样性研究具有极高价值。由于过去对黄连木的研究相对落后,主要集中于栽培管养^[5]、病虫害防治^[6]、生理特性^[7]以及资源分布^[8]等方面,有关其雌雄植株

收稿日期:2018-08-21

基金项目:国家自然科学基金(编号:31100292);云南省自然科学基金(编号:2010ZC267);云南省省级重点学科园林植物与观赏园艺建设经费(编号:50097401)。

作者简介:李琬婷(1993—),女,云南昆明人,硕士,主要从事园林植物应用研究。E-mail:2861283663@qq.com。

通信作者:程小毛,博士,副教授,主要从事林木遗传育种研究。

E-mail:30375713@qq.com。

表 5 各指标的二因素互作效应方差分析

因变量	变异来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
产量	回归	650 658 347.27	5	130 131 669.45	0.800 5	0.602 0
	残差	650 281 652.72	4	162 570 413.18		
	总变异	1 300 940 000.00	9			
番茄红素含量	回归	190.64	5	38.13	0.932 7	0.542 0
	残差	163.52	4	40.88		
	总变异	354.16	9			
糖酸比	回归	24.28	5	4.85	6.196 7	0.050 7
	残差	3.14	4	0.78		
	总变异	27.41	9			
WUE	回归	988.67	5	197.74	8.130 0	0.032 0
	残差	97.38	4	24.35		
	总变异	1 086.05	9			
PFP	回归	749.76	5	158.95	2.471 5	0.200 7
	残差	257.26	4	64.31		
	总变异	1 052.02	9			

[5]吴雪,王坤元,牛晓丽,等. 番茄综合营养品质指标构建及其对水肥供应的响应[J]. 农业工程学报,2014,31(7):119-127.

[6]王文娟,王铁良,李波,等. 小管出流灌溉方式下日光温室番茄水分生产函数模型研究[J]. 北方园艺,2012(3):40-42.

[7]吴泳辰,韩国君,陈年来. 调亏灌溉对加工番茄产量、品质及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报,2016,35(7):104-107.

[8]潘红霞,付恒阳,王建莹. 不同水分胁迫和覆盖方式对番茄产量和水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报,2016,35(1):42-46.