

极端干旱区滴灌葡萄耗水特征及水肥制度寻优

温越^{1,2}, 王振华^{1,2*}

(1.石河子大学 水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832000;

2.现代节水灌溉兵团重点实验室, 新疆 石河子 832000)

摘要:【目的】探寻极端干旱区无核白葡萄的适宜水肥制度。【方法】在萌芽期充分供水条件下, 以全生育期充分灌溉为对照(CK), 设置新梢生长期(W1)、开花期(W2)、果实膨大期(W3)、着色成熟期(W4)4个亏水处理($\theta=65\%\sim 90\%$), 同时设置3个施肥配比, 分别为: N施量、 P_2O_5 施量、 K_2O 施量为275.0、275.0、275.0 kg/hm²(F1), 235.7、235.7、353.6 kg/hm²(F2), 330.0、165.0、330.0 kg/hm²(F3), 共15个处理, 研究了不同水肥配比对滴灌葡萄产量、品质和耗水特征的影响。【结果】灌水是影响土壤含水率的主要因素, 果实膨大期调亏灌溉土壤含水率波动最明显; 在果实膨大期进行调亏灌溉, 会造成大幅减产和品质降低, 而在着色成熟期进行调亏灌溉对产量影响不显著, 且可以显著提高还原性糖量和可溶性固形物量, F2施肥处理产量、还原性糖量和可溶性固形物量均达到最大值。CKF2处理产量最大, 为28 003 kg/hm², W4F2处理产量与最大处理无显著差异, 但还原性糖量和可溶性固形物量取得最大值, 分别为23.00%和23.50%, W3F3处理产量和还原性糖量最低, 较CKF2处理和W4F2处理降低34.29%和28.70%。果实膨大期是无核白葡萄的需水关键期, 调亏灌溉会大幅降低生育期耗水强度和耗水量, 耗水强度和耗水量随氮肥施用增加而逐渐增大。【结论】W4F2处理, 即在着色成熟期进行调亏灌溉, 且N施量、 P_2O_5 施量、 K_2O 施量分别为235.7、235.7 kg/hm²和353.6 kg/hm²(F2), 可作为极端干旱区无核白葡萄的适宜水肥制度。

关键词: 滴灌葡萄; 产量品质; 耗水特征; 水肥制度

中图分类号: S275.6; S663.1

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2021358

OSID:



温越, 王振华. 极端干旱区滴灌葡萄耗水特征及水肥制度寻优[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(1): 1-8.

WEN Yue, WANG Zhenhua. Water Consumption and Fertigation Optimization of Drip-irrigated Grape in Arid Regions[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(1): 1-8.

0 引言

【研究意义】吐哈盆地位于新疆东部, 受天山山脉阻隔, 终年干旱少雨, 水资源极度匮乏^[1]。而太阳辐射强烈, 昼夜温差大的独特优势使得特色瓜果种植成为吐哈地区支柱产业。近年来, 水资源短缺和化肥滥用成为制约吐哈地区葡萄产业发展的主要因素^[2], 限水政策使当地灌溉用水分配不合理的缺点凸显出来, 滥用化肥更造成了土壤板结和退化等问题, 因此亟须采用合理的水肥配比来实现葡萄的增产提质。

【研究进展】调亏灌溉是最具有发展潜力的几种灌溉方式之一, 其通过减少某一生育期内的水分补给, 改变作物光合产物的分配模式, 利用其后补

偿机制获得更高的经济产量, 是解决吐哈地区水资源短缺的有效手段。强薇等^[3]研究表明, 调亏灌溉会降低核桃的叶片活性, 导致组织受损, 其可以减少对应生育期的耗水量, 并提高水分利用效率^[4], 但重度水分胁迫会对葡萄树造成不可逆的损伤^[5]。Wen等^[6]研究表明调亏灌溉对棉花产量无显著影响, 依提卡尔·阿不都沙拉木等^[7]则认为对灰枣在开花坐果期进行调亏灌溉可以提高单果质量、可溶性固形物量和糖酸比。李晶等^[8]认为葡萄果实膨大期亏水会造成大幅减产和果实品质降低, 在着色成熟期亏水则可提升品质。赵霞等^[9]则认为单个生育期亏水对葡萄果实品质无显著影响。已有研究表明, 农田土壤养分最大的补充途径是施肥^[10], 而土壤养分对果树生长起到重要作用。肥料种类^[11]、配比^[12]和施用量^[13]是影响作物生理活动和产量的主要施肥因素。

【切入点】近年来, 调亏灌溉受到越来越多的关注, 诸多专家学者进行了相应研究^[14-16]。但是在调亏灌溉基础上, 考虑施肥比例的研究较少。【拟解决的关键问题】本文以吐哈地区优势葡萄品种无核

收稿日期: 2021-08-08

基金项目: 兵团节水灌溉试验计划项目(BTJSSY-2202105); 兵团科技创新团队项目(2019CB004)

作者简介: 温越(1996-), 男, 博士研究生, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: 17699534686@163.com

通信作者: 王振华(1979-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事干旱区节水灌溉理论与技术研究。E-mail: wzh2002027@163.com

白为试验对象,采用单一生育期调亏灌溉与不同施肥比例相结合的方式,探究不同水肥配比下葡萄植株耗水的变化特征,并通过分析产量和品质指标筛选适宜水肥配比,提出合理水肥制度,为吐哈地区水肥合理分配和滴灌葡萄产业可持续发展提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2019 年 3—9 月在新疆十三师哈密垦区灌溉试验站(海拔 660 m, 93°37' E、42°42' N)进行。试验区位于亚欧大陆腹地,是典型的温带大陆性干旱气候区,年平均温度为 9.8 °C,年均降水量为 38.0 mm,年均蒸发量为 3 092 mm,无霜期 187 d,年均日照时间 3 357.6 h, ≥ 10 °C 积温 4 124.1~4 842.5 °C。试验区地下水埋深 >10 m,土壤类型为砂壤土,0~80 cm 土层平均体积质量为 1.56 g/cm³,田间体积持水率为 18.42%,土壤全氮量为 0.49 g/kg,有机质量为 9.0 g/kg,有效磷量为 20.61 mg/kg,速效钾量为 175.44 mg/kg,80~90 cm 土层存在黏土隔水层。灌溉水源为地下水,矿化度为 0.98 g/kg,采用管道进行输水。

1.2 试验设计

试验作物选用无核白鲜食葡萄,采用小棚架栽培,大沟沟道种植模式,各小区分别定植 80 株葡萄,株距为 1.0 m,行距为 5.0 m,灌水不存在侧渗影响,小区面积为 80.0 m² (80.0 m×1.0 m),于 3 月 31 日进行棚架绑扎,9 月 15 日进行收获测产。葡萄的生育期分别为萌芽期(4 月 13—28 日),新梢生长期(4 月 29 日—5 月 28 日),花期(5 月 29 日—6 月 10 日),果实膨大期(6 月 11 日—7 月 15 日),着色成熟期(7 月 16 日—8 月 21 日),枝蔓成熟期(8 月

22 日—9 月 15 日)。田间灌溉采用滴灌,每个小区用水表和施肥罐精确控制水肥用量。试验采用调亏灌溉和施肥配比双因素设计。试验组分别对无核白葡萄在新梢生长期、开花期、果实膨大期和着色成熟期进行调亏灌溉(分别记为 W1、W2、W3、W4),并设置全生育期充分灌溉为对照组(CK),调亏灌溉土壤含水率上下限定为田间体积持水率 θ_f 的 65%~90%,充分灌溉土壤含水率上下限定为田间体积持水率 θ_f 的 75%~100%,计划湿润层深度为 60 cm,灌水方案见图 1。施肥配比设置 3 个水平,分别为 F1 (N:P₂O₅:K₂O=1:1:1)、F2 (N:P₂O₅:K₂O=2:2:3)、F3 (N:P₂O₅:K₂O=2:1:2),常规施肥水平 N 施量、P₂O₅ 施量、K₂O 施量分别为 330.0、165.0、330.0 kg/hm²,即 F3 处理,肥料类型为:氮肥(尿素,含 N 46%)、磷肥(磷酸二铵,含 P₂O₅ 51%)、钾肥(硫酸钾,含 K₂O 51%)。全生育期施肥量统一为 825 kg/hm²。具体实施方案见表 1。试验按照 2 因素水平进行完全试验设计,共计 15 个处理,每个处理设置 3 个重复。各处理田间管理措施均一致。为保证植株顺利萌芽,各处理在 4 月 17 日进行开沟灌溉,灌水定额为 60 mm。

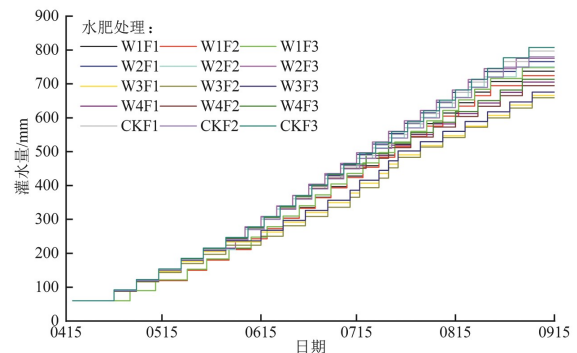


图 1 无核白葡萄生育期内灌水方案

Fig.1 Irrigation scheme for seedless white grapes during the growth periods

表 1 不同生育期施肥量

Table 1 Fertilization amount in different growth periods

kg/hm²

施肥处理	肥料种类	萌芽期	新梢生长期	开花期	果实膨大期	着色成熟期	施肥总量
F1	N	82.5	82.5	55.0	27.5	27.5	275.0
	P ₂ O ₅	27.5	55.0	55.0	82.5	55.0	275.0
	K ₂ O	27.5	27.5	27.5	110.0	82.5	275.0
F2	N	70.7	70.7	47.1	23.6	23.6	235.7
	P ₂ O ₅	23.6	47.1	47.1	70.7	47.1	235.7
	K ₂ O	35.4	35.4	35.4	141.4	106.1	353.6
F3	N	99.0	99.0	66.0	33.0	33.0	330.0
	P ₂ O ₅	16.5	33.0	33.0	49.5	33.0	165.0
	K ₂ O	33.0	33.0	33.0	132.0	99.0	330.0

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤含水率

于 4 月 12 日统一在各处理中间植株根部埋设 1 根中子管,采用中子仪(503DR, CPN, USA)在

全生育期内对土壤体积含水率每隔 7 d 测量 1 次,灌水前后及降雨后加测,以中子仪水分数据作为土壤含水率上下限的判定依据。测试深度为 80 cm,每 10 cm 读取 1 次数据,同时采用取土烘干法和环刀取

体积质量法对仪器进行标定。

1.3.2 生育期耗水量

生育期耗水量平衡方程计算式为：

$$ET_i = 10 \sum_{j=1}^n H_j (W_{j1} - W_{j2}) + M + P + K - C, \quad (1)$$

式中： ET_i 为无核白葡萄各生育期阶段耗水量 (mm)； H_j 为第 j 层土层厚度 (cm)； W_{j1} 和 W_{j2} 分别为生育期前后土壤体积含水率 (%)； M 为生育期内灌水量 (mm)； P 为生育期内有效降水量 (mm)，因为试验区地处极端干旱区，降水极少，因此 $P=0$ ； K 为生育期内地下水补给量 (mm)，因试验区地下水埋深大于 10 m，因此 $K=0$ ； C 为生育期内深层渗漏量 (mm)，由于地下 80~90 cm 土层为隔水层，不存在深层渗漏，因此 $C=0$ 。

1.3.3 产量和品质

在各处理小区随机选取 3 株摘取全部葡萄进行单株测产，推算各处理小区产量并换算为标准产量。测产后各处理分别摘取 3 串葡萄鲜样，委托新疆农垦科学院测定可溶性固形物量、总糖量、可滴定酸量、维生素 C 品质指标。

1.4 数据处理

图形绘制采用 Origin Pro 2017，数据分析采用 Microsoft Excel 2016，统计分析采用 SPSS 22.0，显著性分析采用 Duncan's 新复极差法。

2 结果与分析

2.1 水肥比对滴灌葡萄土壤平均含水率的影响

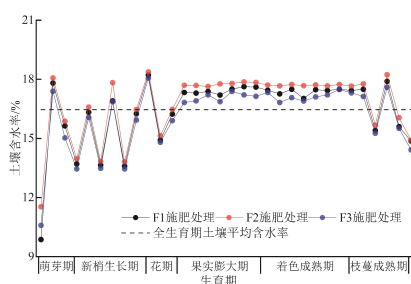
图 2 为不同水肥处理滴灌葡萄对土壤含水率的响应特征。在萌芽期，不同灌水处理土壤含水率变化特征相同，随灌水的增加土壤含水率逐渐增大；进入新梢生长期后，受调亏灌溉影响，W1 处理土壤含水率发生明显波动，低于其全生育期土壤平均含水率，其他灌水处理土壤含水率均逐渐增大；随着葡萄植株生长和生理反应的加剧，在果实膨大期，除 W3 处理外，其余 4 个处理土壤含水率均在平均值附近及以上，而 W4 处理在着色成熟期土壤含水率有明显波动；在枝蔓成熟期，土壤含水率逐渐下

降，葡萄植株生长几乎停滞，叶片功能逐渐衰弱。从全生育期来看，W1 处理和 W2 处理土壤含水率变化特征与 CK 最为接近，W3 处理和 W4 处理全生育期平均土壤含水率处于较低水平，分别为 15.41% 和 15.24%，且 W3 处理土壤含水率波动幅度最大。相同灌溉条件下，不同施肥处理土壤含水率始终表现为 F2 处理 > F1 处理 > F3 处理。从不同水肥处理来看，W1F2 处理全生育期土壤平均含水率最高，为 16.76%；W4F3 处理最低，为 15.02%，W4F3 处理较 W1F2 降低 10.38%。

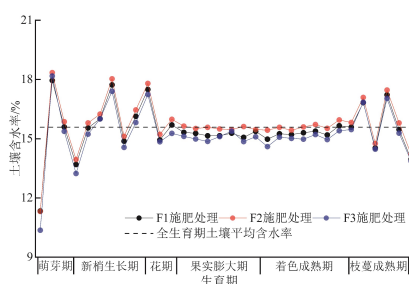
2.2 水肥比对滴灌葡萄产量和品质的影响

表 2 为不同水肥配比下滴灌葡萄产量和品质指标。灌水单因素对无核白葡萄的产量、还原性糖量、可溶性固形物量和可滴定酸均有极显著影响 ($P<0.01$)；施肥单因素对无核白葡萄的产量影响极显著 ($P<0.01$)，对还原性糖量和可溶性固形物量影响显著 ($P<0.05$)，对可滴定酸无显著影响 ($P>0.05$)；水肥交互作用对产量影响显著 ($P<0.05$)，对还原性糖量、可溶性固形物量和可滴定酸影响均为极显著 ($P<0.01$)。

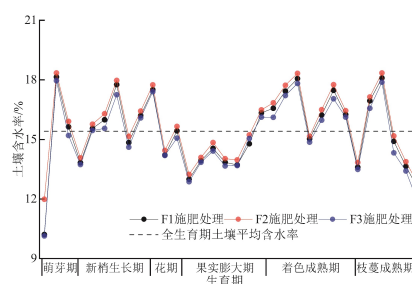
灌水单因素下，CK 产量最高，与 W4 处理间无显著差异 ($P>0.05$)，与 W1、W2、W3 处理间具有显著差异 ($P>0.05$)，CK 产量较 W3 处理提高 48.03%；施肥单因素下，F2 处理产量、可溶性固形物量、还原性糖量均取得最大值，较 F1、F3 处理分别提高 3.54% 和 3.95%、7.88% 和 4.29%、6.57% 和 9.90%；产量在 CKF2 处理取得最大值 28 003 kg/hm²，W3F3 处理产量最小，较 CKF2 处理降低 34.29%，CKF1、CKF3、W4F1 处理和 W4F2 处理产量与 CKF2 处理无显著差异 ($P>0.05$)；还原性糖量和可溶性固形物量在 W4F2 处理最大值 23.00% 和 23.50%，可滴定酸在 W3F3 处理最大值 0.665 2%，W4F2 处理取得最小值 0.436 3%。基于无核白葡萄产量和品质分析，W4F2 处理水肥处理效果更佳。



(a) 新梢生长期调亏灌溉 (W1)



(b) 花期调亏灌溉 (W2)



(c) 果实膨大期调亏灌溉 (W3)

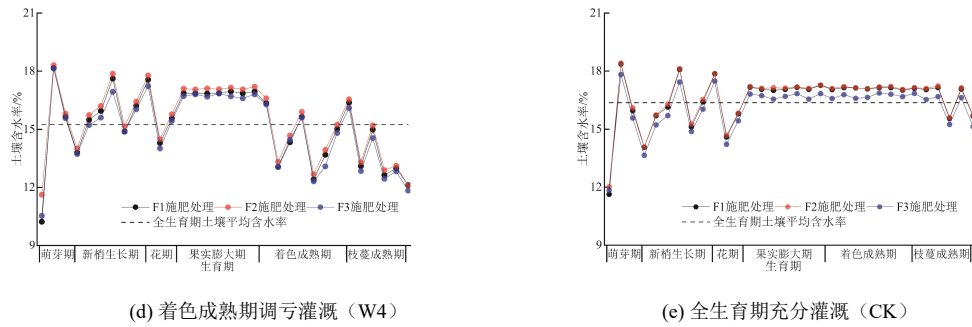


图 2 不同水肥配比各处理土壤含水率动态变化

Fig.2 Dynamic changes of soil moisture content of each treatment under different water and fertilizer ratios

表 2 不同水肥配比滴灌葡萄产量和品质

Table 2 Grape yield and quality under drip irrigation with different ratio of water and fertilizer

处理	产量/(kg·hm ⁻²)	还原性糖量/%	可溶性固形物量/%	可滴定酸量/%
W1F1	25 317±287d	20.70±0.18de	21.50±0.28ef	0.4 838±0.02ef
W1F2	26 676±376c	21.50±0.17bc	22.80±0.23b	0.4 548±0.02f
W1F3	24 866±204d	20.20±0.30ef	22.50±0.18bc	0.4 918±0.01ef
W2F1	22 162±184f	18.80±0.12h	18.80±0.14hi	0.5 347±0.01cde
W2F2	23 828±393e	20.60±0.24de	21.00±0.11fg	0.4 987±0.01def
W2F3	22 725±287f	18.20±0.21i	19.40±0.13h	0.5 799±0.02bc
W3F1	18 656±249h	17.00±0.23j	18.60±0.14i	0.6 209±0.02ab
W3F2	19 320±191g	19.40±0.51g	20.50±0.21g	0.6 128±0.01ab
W3F3	18 400±346h	16.40±0.30k	19.20±0.21hi	0.6 652±0.02a
W4F1	27 449±151ab	20.00±0.35b	21.80±0.34de	0.4 515±0.03f
W4F2	27 877±314ab	23.00±0.21a	23.50±0.33a	0.4 363±0.01f
W4F3	27 315±403b	21.20±0.27cd	22.40±0.06bcd	0.4 741±0.03ef
CKF1	27 828±197ab	20.60±0.28de	20.70±0.42g	0.5 805±0.01bc
CKF2	28 003±144a	21.00±0.14cd	21.90±0.57cde	0.5 666±0.02bcd
CKF3	27 624±322ab	19.90±0.28fg	21.60±0.34ef	0.6 035±0.01abc
W	**	**	**	**
方差分析 F	**	*	*	ns
W×F	*	**	**	**

注 数值为“平均值±标准差”，同一列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)；*表示在 $P=0.05$ 水平差异显著，**表示在 $P=0.01$ 水平差异显著，ns 表示在 $P=0.05$ 水平差异不显著。下同。

2.3 水肥对比对滴灌葡萄耗水特征的影响

表 3 为不同水肥处理在不同生育期下耗水强度的动态变化。灌水单因素对无核白葡萄萌芽期耗水强度影响不显著 ($P>0.05$)，对其他生育期影响均为极显著 ($P<0.01$)；施肥单因素对无核白葡萄萌芽期耗水强度影响极显著 ($P<0.01$)，对其他生育期影响均为不显著 ($P>0.05$)；水肥交互作用对无核白葡萄新梢生长期耗水强度影响极显著，对其他生育期影响均为不显著 ($P>0.05$)。

不同水肥处理耗水强度随生育期总体表现为先增大后减小，在果实膨大期达到峰值，因此果实膨大期为无核白葡萄需水关键期。充分灌溉处理 (CK) 在全生育期耗水强度均为最大，CKF3 处理耗水强度在果实膨大期取得全生育期最大值 6.73

mm/d。萌芽期，因灌水量相同，各水肥处理耗水强度相近，随着调亏灌溉的进行，各调亏处理耗水强度有明显降低，W3 处理耗水强度在果实膨大期降低最为明显，经复水后在着色成熟期仍未达到常规水平。在生育期末，植株叶片脱落，生长繁殖近乎停滞，为越冬期做准备，CK 此时耗水强度仍高于其他灌水处理，差异显著 ($P<0.05$)。F3 处理耗水强度在整个生育期内均处于最高水平，但施肥对葡萄植株和果实生长主要时期的耗水强度影响远小于灌水。

图 3 为不同水肥配比下各生育期耗水量，各水肥处理总耗水量在 672.15~842.27 mm 之间。相同施肥条件下，各灌水处理总耗水量始终表现为 CK>W1 处理>W2 处理>W4 处理>W3 处理，CK 总耗水量较 W3 处理提高 21.80%；而相同灌水条件下，

F3 处理总耗水量较 F1、F2 处理分别提高 1.69% 和 5.04%。从不同生育期来看，各生育期耗水量随生长天数呈现“双峰”变化趋势，除 W3 处理外，其余处理生育期耗水量均表现为反复升降的波动规律。从同一生育期来看，萌芽期各水肥处理耗水量无显

著差异，而调亏灌溉处理相应生育期较其余正常处理生育期耗水量有明显下降，最明显的生育期为果实膨大期，此时 W3F2 处理耗水量最小，较最大处理 CKF3 降低 43.99%。

表 3 水肥供应下各处理耗水强度动态变化

处理	萌芽期	新梢生长期	开花期	果实膨大期	着色成熟期	枝蔓成熟期
W1F1	3.57±0.06de	3.16±0.02g	5.83±0.06ab	6.38±0.05e	5.86±0.01bc	3.71±0.09bcd
W1F2	3.51±0.02e	3.12±0.02g	5.68±0.08cd	6.26±0.06f	5.66±0.05e	3.66±0.07cd
W1F3	3.62±0.06d	3.19±0.01g	5.94±0.06a	6.56±0.03bc	5.95±0.02ab	3.73±0.04bc
W2F1	3.72±0.02abc	4.78±0.06cd	3.52±0.07fg	6.49±0.07cde	5.70±0.02de	3.77±0.03bc
W2F2	3.66±0.05bcd	4.55±0.03f	3.46±0.05g	6.38±0.05e	5.67±0.05e	3.73±0.04bc
W2F3	3.73±0.04ab	4.89±0.04c	3.58±0.04f	6.64±0.04ab	5.78±0.07cd	3.78±0.05b
W3F1	3.66±0.03bcd	4.87±0.07bc	5.77±0.08bc	3.84±0.01gh	5.17±0.03fg	3.53±0.06ef
W3F2	3.64±0.02bcd	4.81±0.09cd	5.60±0.05d	3.77±0.07h	5.11±0.06g	3.50±0.07ef
W3F3	3.76±0.09a	5.07±0.08a	5.84±0.02ab	3.91±0.08g	5.23±0.04f	3.60±0.02de
W4F1	3.59±0.04de	4.72±0.01de	5.61±0.01d	6.54±0.03bcd	3.79±0.06h	3.41±0.07f
W4F2	3.51±0.04e	4.62±0.04ef	5.43±0.04e	6.44±0.06de	3.80±0.07h	3.42±0.02f
W4F3	3.65±0.01bcd	4.82±0.07bcd	5.76±0.07bc	6.66±0.05ab	3.82±0.08h	3.44±0.05f
CKF1	3.62±0.04cd	4.87±0.05bc	5.72±0.02bcd	6.63±0.08ab	5.97±0.04ab	3.99±0.02a
CKF2	3.57±0.03de	4.82±0.02bcd	5.66±0.03cd	6.57±0.05bc	5.91±0.02b	3.95±0.01a
CKF3	3.68±0.02abcd	4.93±0.05b	5.78±0.03bc	6.73±0.02a	6.03±0.04a	4.04±0.05a
W	ns	**	**	**	**	**
方差分析 F	**	ns	ns	ns	ns	ns
W×F	ns	**	ns	ns	ns	ns

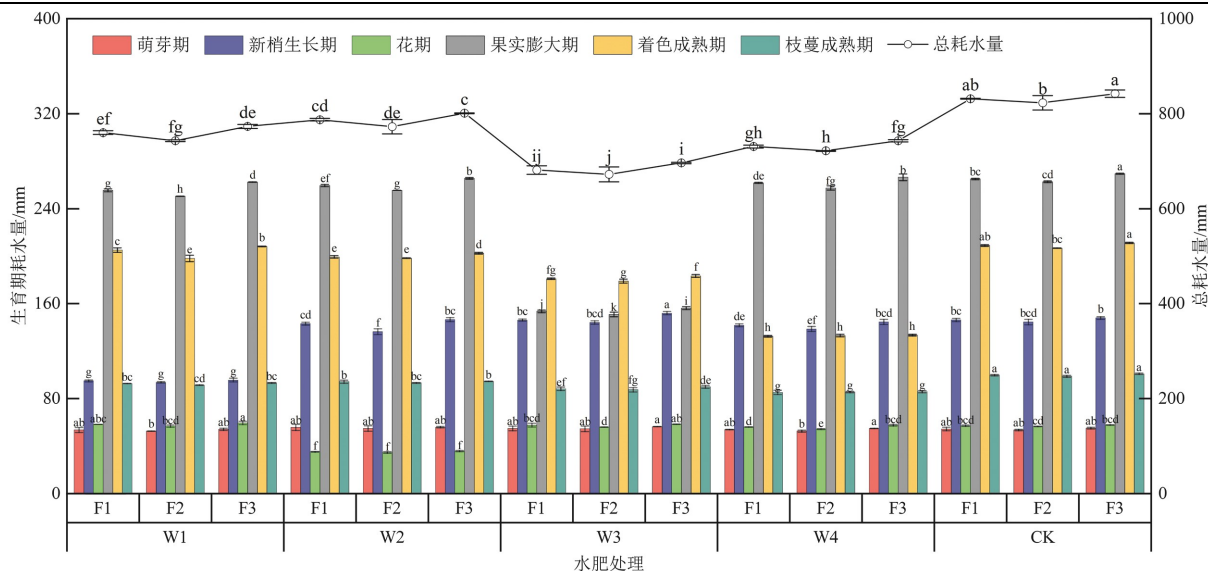


图 3 不同水肥配比各处理生育期耗水量

Fig.3 Water consumption during growth period of each treatment under different water and fertilizer ratios

2.4 极端干旱区滴灌葡萄水肥制度优选

表 4 为极端干旱区无核白滴灌葡萄的最优水肥制度。W4F2 处理产量较最大处理 CKF2 仅降低 0.45%，耗水量（721.72 mm）却降低 12.30%，还原性糖量和可溶性固形物量分别提高 9.52% 和

7.31%。因此，W4F2 处理，即全生育期灌水 22 次，灌溉定额 695 mm，施肥总量 825 kg/hm² 的水肥制度是最优的选择，可以在不降低产量的前提下，获得较高的品质。

表 4 最优水肥制度

Table 4 Suitable water and fertilizer systems for seedless white grapes in extreme arid areas

生育期	灌溉处理			施肥处理			施肥次数
	W4			F2			
	灌水定额/mm	灌水次数	灌水周期/d	N/(kg·hm ⁻²)	P ₂ O ₅ /(kg·hm ⁻²)	K ₂ O/(kg·hm ⁻²)	
萌芽期	60.0	1	12	70.7	23.6	35.4	1
新梢生长期	30.2	5	7	35.4	23.6	17.7	2
开花期	30.0	1	7	47.1	47.1	35.4	1
果实膨大期	30.0	7	5	5.9	17.7	35.4	4
着色成熟期	30.5	6	7	7.9	15.7	35.4	3
枝蔓成熟期	30.5	2	7	0	0	0	0
全生育期	695	22	-	235.7	235.7	353.6	11

3 讨论

增产提质是农业生产的最终目标,水肥合理配比在其中起着极为重要的作用^[17-18]。本研究中,水肥单因素对无核白葡萄产量影响均为极显著,在果实膨大期进行调亏灌溉减产最大,且还原性糖量和可溶性固形物量最低,这是因为果实膨大期缺水会严重抑制果实细胞分裂和养分转化^[19]。而在着色成熟期进行调亏灌溉,产量与充分灌溉无显著差异,还原性糖量和可溶性固形物量会有显著提升,可滴定酸明显降低,这是因为着色成熟期葡萄果实由生殖生长转为营养生长,水分亏缺并不会显著降低浆果质量,反而会减少果实水分,促进糖分转化^[20]。肥料配比也对葡萄产量品质有着显著影响^[21],F2 施肥处理产量、还原性糖量和可溶性固形物量处于最高水平,这说明适宜的施肥水平能保证较高的经济效益。水肥耦合效应对葡萄产量和品质的影响显著,W4F2 处理下葡萄的产量、还原性糖量和可溶性固形物量均处于较高水平,这说明合理的水肥配比可以使葡萄产量和品质均处于较优水平。

各水肥处理全生育期土壤平均含水率受灌水影响更大,受施肥影响不显著,W3 处理土壤含水率波动最明显,结合产量和品质指标,说明不稳定的土壤水分环境会抑制葡萄植株生长和果实发育。探明作物不同生育期耗水特性可以为灌溉水资源合理分配提供理论依据^[22-23]。本研究表明,灌水是影响无核白葡萄不同生育期耗水强度和耗水量的主要因素,水肥耦合效应对耗水影响不显著,这说明调亏灌溉和不同施肥比例的耦合更多的是影响了葡萄的生理反应,对植株水分的吸收转化作用影响较小。果实膨大期调亏灌溉会显著降低葡萄总耗水量和灌溉定额,但产量品质极差,这与牛最荣等^[24]和张梅花等^[5]的研究结果相同。相同灌水条件下,F2 施肥处理总耗水量小于 F1 处理和 F3 处理,这可能是因

为较少的氮肥减少了植株的蒸腾作用,而较多的钾肥可以调节叶片气孔导度,以适应吐哈地区高温及缺水环境,从而更利于葡萄植株生长^[25]。合理的水肥配比可以在降低灌溉用水量的前提下提高葡萄生理活性,为产量构成和品质提升奠定基础。

4 结论

施肥对葡萄主要生育期的耗水影响不显著。果实膨大期调亏灌溉降低了生育期耗水强度和总耗水量,但产量和品质最差;而在着色成熟期进行调亏灌溉产量无显著变化,且品质大幅提升,因此可在着色成熟期进行调亏灌溉以提高经济效益。F2 施肥水平总耗水量小,且产量和品质较高,综合分析产量、品质和耗水特征,着色成熟期调亏灌溉配合 N、P₂O₅、K₂O 施加比例为 2:2:3,总施肥量为 825 kg/hm² 的施肥配比是吐哈地区无核白葡萄适宜的水肥制度。

参考文献:

- [1] 杨慧慧,王振华,何新林,等.极端干旱区葡萄滴灌耗水规律试验研究[J].节水灌溉,2011(2):24-28,32.
YANG Huihui, WANG Zhenhua, HE Xinlin, et al. Experimental study on water consumption characteristics of grape under drip irrigation condition in extremely arid regions[J]. Water Saving Irrigation, 2011(2): 24-28, 32.
- [2] 侯裕生,王振华,李文昊,等.水肥耦合对极端干旱区滴灌葡萄耗水规律及作物系数影响[J].水土保持学报,2019,33(2):279-286,330.
HOU Yusheng, WANG Zhenhua, LI Wenhao, et al. Effects of water and fertilizer coupling on water consumption and crop coefficient of drip irrigated grape in extreme arid area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(2): 279-286, 330.
- [3] 强薇,赵经华,付秋萍,等.调亏灌溉对滴灌核桃树生长及产量的影响[J].干旱区资源与环境,2018,32(8):186-190.
QIANG Wei, ZHAO Jinghua, FU Qiuping, et al. Effects of regulated deficit irrigation on growth and yield of walnut trees under drip irrigation[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(8): 186-190.
- [4] 夏桂敏,张柏纶,胡家齐,等.不同生育期连续调亏灌溉对花生生长及

- 耗水过程的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2018, 49(2): 180-187.
- XIA Guimin, ZHANG Bailun, HU Jiaqi, et al. Response of growth and water consumption at different growth stages of peanut to continuous regulated deficit irrigation[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2018, 49(2): 180-187.
- [5] 张梅花, 刘静霞, 张芮, 等. 不同生育期调亏灌溉对酿酒葡萄耗水及产量和品质的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2019, 54(4): 53-59.
- ZHANG Meihua, LIU Jingxia, ZHANG Rui, et al. Effect of deficit irrigation on water consumption, yield and quality of wine grape at different growth stages[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2019, 54(4): 53-59.
- [6] WEN Y J, DARAPUNENI M K, CHEN D H, et al. Phenotypical responses of cotton and relation to lint yield under deficit irrigation schemes in semi-arid environments[J]. Agronomy Journal, 2018, 110(4): 1 339-1 353.
- [7] 依提卡尔·阿不都沙拉木, 朱成立, 柳智鹏, 等. 调亏灌溉对枣树生长与果实品质和产量的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(10): 948-951, 957.
- YITIKAER·Abudushalamu, ZHU Chengli, LIU Zhipeng, et al. Effects of regulated deficit irrigation on growth, fruit quality and yield of jujube tree[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(10): 948-951, 957.
- [8] 李晶, 李华, 王华. 不同生育期水分亏缺对‘赤霞珠’耗水及果实品质的影响[J]. 西北农业学报, 2018, 27(5): 727-734.
- LI Jing, LI Hua, WANG Hua. Effect of water deficit at different growth stage on water consumption and fruit quality of *vitis vinifera* cv. ‘cabernet sauvignon’[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2018, 27(5): 727-734.
- [9] 赵霞, 张芮, 成自勇, 等. 不同生育期调亏灌溉对荒漠绿洲区葡萄生长、产量和品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(10): 20-23.
- ZHAO Xia, ZHANG Rui, CHENG Ziyong, et al. Effect of regulated deficit irrigation at different growth stages on growth and fruit quality of wine grape in desert oasis[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(10): 20-23.
- [10] 张会民, 刘红霞, 苗艳芳, 等. 钾、锰配施对旱地冬小麦养分吸收与产量的影响[J]. 西北农业学报, 2002, 11(4): 63-66.
- ZHANG Huimin, LIU Hongxia, MIAO Yanfang, et al. Effect of potassium and manganese fertilizers cooperating application on nutrient uptake and yield of winter wheat in dryland[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2002, 11(4): 63-66.
- [11] 朱从飞, 罗汉东, 胡冬南, 等. 不同肥料类型对油茶生长和产量的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(8): 60-65.
- ZHU Congfei, LUO Handong, HU Dongnan, et al. Effects of different types of fertilizers on growth and fruit yield in *C.oleifera* trees[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2017, 37(8): 60-65.
- [12] 李文倩, 张莹, 王梦茹, 等. 不同施肥配比对蒙古黄芪产量及品质的影响[J]. 草地学报, 2020, 28(1): 221-229.
- LI Wenqian, ZHANG Ying, WANG Mengru, et al. Effects of different fertilization ratio on yield and quality of *astragalus membranaceus* var. *mongolicus*[J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(1): 221-229.
- [13] 李永虎, 曹梦琳, 杜慧玲, 等. 施肥位置及施肥量对杂交谷子干物质累积、转运和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(22): 4 177-4 190.
- LI Yonghu, CAO Menglin, DU Huiling, et al. Effect of fertilization location and amount on dry matter accumulation, translocation and yield of hybrid millet[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(22): 4 177-4 190.
- [14] 周晨莉, 张恒嘉, 巴玉春, 等. 调亏灌溉对膜下滴灌苜蓿生长发育和产量的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(4): 193-200.
- ZHOU Chenli, ZHANG Hengjia, BA Yuchun, et al. Effects of regulated deficit irrigation on growth and yield of *isatis indigotica* under mulched drip irrigation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(4): 193-200.
- [15] JU Y L, XU G Q, YUE X F, et al. Effects of regulated deficit irrigation on amino acid profiles and their derived volatile compounds in cabernet sauvignon (*vitis vinifera* L.) grapes and wines[J]. Molecules, 2018, 23(8): 1 983.
- [16] HOOSHMAND M, ALBAJI M, BOROOMAND NASAB S, et al. The effect of deficit irrigation on yield and yield components of greenhouse tomato (*Solanum lycopersicum*) in hydroponic culture in Ahvaz region, Iran[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 254: 84-90.
- [17] 毕丽霏, 张富仓, 王海东, 等. 水肥调控对滴灌马铃薯生长、品质及水肥利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(1): 155-165.
- BI Lifei, ZHANG Fucang, WANG Haidong, et al. Effects of regulated water and fertilizer on potato growth, quality, water and fertilizer use efficiency under drip irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(1): 155-165.
- [18] 侯裕生, 王振华, 李文昊, 等. 水肥耦合对南疆沙区滴灌红枣光合特性及叶绿素相对含量的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(9): 914-919, 924.
- HOU Yusheng, WANG Zhenhua, LI Wenhao, et al. Effects of water and fertilizer coupling on photosynthetic characteristics and chlorophyll relative contents of jujube under drip irrigation in southern Xinjiang sandy area[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(9): 914-919, 924.
- [19] 邓浩亮, 孔维萍, 张恒嘉, 等. 不同生育期调亏灌溉对酿酒葡萄耗水及果实品质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(9): 1 196-1 205.
- DENG HaoLiang, KONG Weiping, ZHANG Hengjia, et al. Effect of regulated deficit irrigation at different growth stages on water consumption and fruit quality of wine grape[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(9): 1 196-1 205.
- [20] 蔺宝军, 张芮, 董博, 等. 不同生育期干旱胁迫对温室葡萄 *WUE*、产量及品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(12): 11-18.
- LIN Baojun, ZHANG Rui, DONG Bo, et al. Effects of drought stress on *WUE*, yield and quality of greenhouse grape at different growth stages[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(12): 11-18.
- [21] ZHANG Y J, WANG R, WANG H, et al. Soil water use and crop yield increase under different long-term fertilization practices incorporated with two-year tillage rotations[J]. Agricultural Water Management, 2019, 221: 362-370.
- [22] SANG X G, WANG D, LIN X. Effects of tillage practices on water consumption characteristics and grain yield of winter wheat under different soil moisture conditions[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 163: 185-194.
- [23] 崔政军, 高玉红, 剡斌, 等. 水氮耦合对土壤水分时空分布与胡麻耗水特性及产量的影响[J]. 核农学报, 2019, 33(2): 398-411.
- CUI Zhengjun, GAO Yuhong, YAN Bin, et al. Effect of water and nitrogen coupling on spatial and temporal distribution of soil water and water consumption characteristic and grain yield of oil flax[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, 33(2): 398-411.
- [24] 牛最荣, 赵霞, 张芮, 等. 水分胁迫对日光温室葡萄叶片生理变化及果实发育的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(2): 265-271.
- NIU Zuirong, ZHAO Xia, ZHANG Rui, et al. Effects of water stress at different growth stages on leaf physiological changes and fruit development of grape in greenhouse[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(2): 265-271.
- [25] KNOLL M, ACHLEITNER D, REDL H. Response of zweigelt grapevine to foliar application of potassium fertilizer: Effects on gas exchange, leaf potassium content, and incidence of traubenwelke[J]. Journal of Plant Nutrition, 2006, 29(10): 1 805-1 817.

Water Consumption and Fertigation Optimization of Drip-irrigated Grape in Arid Regions

WEN Yue^{1,2}, WANG Zhenhua^{1,2*}

(1. College of Water & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China; 2. Key Laboratory of Modern Water-saving Irrigation of Xinjiang Production & Construction Group, Shihezi University, Shihezi 832000, China)

Abstract: **【Background and Objective】** Tuha in Xinjiang province is one of the most important grape production bases in China, but the crop relies on irrigation and fertilization due to the aridity of this region. Understanding the mechanisms underlying water use of the grape and optimizing its fertigation is hence critical to its sustainable production but is currently lacking. The purpose of this paper is to fill this knowledge gap. **【Method】** The field experiment imposed deficit irrigation by controlling soil water content within 65%~90% of the field capacity at shoot growth (W1), flowering (W2), berry growth (W3) and berry mature stages (W4), respectively, with sufficient irrigation taken as the control (CK). Each irrigation treatment had three fertilizations: applying N, P₂O₅ and K₂O at 275.0, 275.0 kg/hm² and 275.0 kg/hm² (F1), 235.7, 235.7 kg/hm² and 353.6 kg/hm² (F2), and 330.0, 165.0 kg/hm² and 330.0 kg/hm² (F3), respectively. **【Result】** Irrigation mediated soil water content, especially the deficit irrigation during the fruit expansion stage. Thirsting the crop at the fruit-expansion stage reduced its yield and fruit quality. In contrast, imposing deficit irrigation at the berry-mature stage not only kept the yield unchanged, but also increased the content of both reduced-sugar and soluble solids. The combination CK+ F2 gave the highest yield at 28 003 kg/hm²; there was no significant difference in the yield between W4+F2 and CK+F2. W4+F2 gave the highest contents of reduced-sugar and soluble solids, being 23.00 g/L and 23.50 g/L, respectively. The yield and contents of reduced-sugar were the lowest in W3+F3, down by 34.29% and 28.70%, compared to that in CKF2 and W4F2, respectively. The grape was mostly water-demanding in the fruit-expansion stage, and imposing deficit irrigation in this period reduced its water consumption rate and total water consumption, especially when nitrogen fertilization was high. **【Conclusion】** Of all treatments, imposing a deficit irrigation at coloring and maturity stage, coupled with fertilization of N, P₂O₅ and K₂O at 235.7, 235.7, 353.6 kg/hm², was optimal for saving water without resulting a detrimental impact on its yield while in the meantime improving fruit quality. It can be used as an improved cultivation for grapes grown in arid regions in Xinjiang province.

Key words: drip irrigation; grape; yield and quality; water consumption; fertigation optimization

责任编辑: 陆红飞