

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

侯裕生^{1,2}, 王振华^{1,2}, 李文昊^{1,2}, 窦允清^{1,2}, 张继峰^{1,2}, 温越^{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: 为探讨水肥耦合对极端干旱区滴灌葡萄耗水规律的影响, 探明不同水肥组合下滴灌葡萄耗水在各生育期内分布规律, 以及在整个生育期的动态变化规律, 确定区域内滴灌葡萄作物系数, 利用水量平衡法和彭曼—蒙特斯公式, 以试验区内成龄无核白葡萄为研究对象开展大田小区试验, 设置灌水、施肥 2 因素, 其中设灌水处理 4 个水平 (600, 675, 750, 825 mm, 分别标记为 W1、W2、W3、W4); 施肥处理 3 水平 (450, 750, 1 050 kg/hm², 分别标记为 F1、F2、F3)。结果表明: 全生育期平均土壤含水率随灌溉定额增大而增大, 其中 W3、W4 处理含水率分别为 13.35% 和 14.04%, 均高于 12.80% (田间持水率的 80%), 水分供应充足。水肥耦合对产量及品质指标的影响均达极显著水平 ($P < 0.01$), 产量、可溶性固形物在 W3F2 处理达最高值, 可滴定酸和维生素 C 分别在 W4F2 和 W4F3 处理达到最优, 但与 W3F2 处理均无显著性差异 ($P > 0.05$)。不同水肥处理下, 灌水对总耗水量和各生育期内耗水量、耗水强度影响显著 ($P < 0.05$), 施肥对总耗水量和各生育期内耗水量、耗水强度未达显著水平 ($P > 0.05$), 水肥耦合效应对各生育期内耗水强度影响显著 ($P < 0.05$); 不同水肥处理下葡萄全生育期总耗水量维持在 665.96~902.90 mm; 各处理耗水量、耗水强度随生育期的推进总体呈先增大再减小的趋势, 且耗水强度和时间存在显著的二次曲线关系。各处理在浆果生长期和浆果成熟期耗水模数均值为 27.01%~27.36%, 为葡萄需水高峰期; 其中 W3F2 处理下的耗水规律可视为区域内葡萄需水规律。葡萄作物系数随生育期的推进总体呈先增大再减小的趋势, 与时间存在显著的二次曲线关系。研究可为吐哈盆地及类似地区无核白葡萄农田水肥管理与滴灌技术的推广提供科学依据, 对区域水资源高效利用及实现区域内社会经济的可持续发展具有重要意义。

关键词: 滴灌; 葡萄; 水肥耦合; 极端干旱区; 耗水规律; 作物系数

中图分类号: S275.6; S663.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)02-0279-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.02.043

Effects of Water and Fertilizer Coupling on Water Consumption and Crop Coefficient of Drip Irrigated Grape in Extreme Arid Area

HOU Yusheng^{1,2}, WANG Zhenhua^{1,2}, LI Wenhao^{1,2},

DOU Yunqing^{1,2}, ZHANG Jifeng^{1,2}, WEN Yue^{1,2}

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

Abstract: In order to explore the influence of water and fertilizer coupling on the water consumption rule of drip irrigated grape in extreme arid area, the distribution of water use in each growth stage and the dynamic changes in the whole growth stage were investigated under different water and fertilizer combinations. Then the crop coefficient of drip irrigated grape was determined in the area using the water balance method and the Penman-Montes formula. The age-old seedless white grape in the test area was taken as a research object, and two factors of irrigation and fertilization were set, including four irrigation treatments: 600, 675, 750, 825 mm (labeled W1, W2, W3, W4, respectively); three fertilization treatments: 450, 750, 1 050 kg/hm² (labeled F1, F2, F3, respectively). The results showed that the average soil water contents increased with the increases of irrigation quota. The water contents of W3 and W4 were 13.35% and 14.04%, respectively, both of which were higher than 12.80% (80% of field water holding capacity), indicating the sufficient water supply. The effects of water and fertilizer coupling on yields and quality indicators reached the very

收稿日期: 2018-10-24

资助项目: 中国工程院院士咨询研究项目“中国大田滴灌发展战略研究(2018-XY-36)”；兵团节水灌溉试验计划项目“十三师哈密垦区葡萄作物系数(K_c)及灌溉制度研究”(BTJSSY-201805)

第一作者: 侯裕生(1992—), 男, 山东济宁人, 硕士研究生, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: yushenghou@126.com

通信作者: 王振华(1979—), 男, 河南扶沟人, 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

significant level ($P < 0.01$). The yield and soluble solids reached the highest value in W3F2, but the titratable acid and vitamin C performed best in W4F2 and W4F3, respectively. There was no significant difference in W3F2 ($P > 0.05$). Under different treatments, irrigation had significant effects on the total water consumption and water consumption intensities during each growth period ($P < 0.05$), but the corresponding effects of fertilization did not reach significant level ($P > 0.05$). The water-fertilizer coupling had a significant effect on the water consumption intensity during each growth period ($P < 0.05$). The total water consumptions were maintained between 665.96 and 902.90 mm under the different treatments. The water consumption and water consumption intensities of each treatment increased first and then decreased during the growth periods. There was a significant quadratic curve relationship between water consumption intensities and time. The mean water consumption modulus of each treatment in the berry growth period and berry ripening period was 27.01%~27.36%, which was the peak of grape water demand. The water consumption law under W3F2 could be regarded as the regional water requirement of grape. The grape crop coefficient generally increased first and then decreased during the growth periods showing a significant quadratic curve relationship with time. This study could provide a scientific basis for the promotion of water and fertilizer management and drip irrigation technology in the non-nuclear white grape farmland in similar areas of the Tuha Basin. It also could be of great significance for the efficient use of regional water resources and the realization of sustainable socio-economic development regionally.

Keywords: drip irrigation; grape; water and fertilizer coupling; extreme arid area; water consumption law; crop coefficient

吐哈地区以其光照时间长、昼夜温差大等自然环境优势,成为我国著名的特色瓜果生产基地,其中早晚熟无核白葡萄种植面积占据全国 20%,占据全新疆 60%以上,是我国最大的无核白葡萄生产基地^[1]。现阶段,吐哈地区成龄葡萄大面积采用传统漫灌,灌溉定额高达 16 500 m³/hm²^[2],农业节水水平较低;同时,地区内缺乏科学合理的施肥技术指导生产,大量、过量施肥情况普遍存在。滴灌水肥一体化技术可实现肥料施用与水分供给的同步管控,将作物所需的水肥均匀地输送至根区,进而达到节水、增产的目的^[3]。耗水规律是作物合理灌溉及灌溉工程设计的基础^[4],因此要制定适合滴灌水肥一体化技术的灌溉制度,首先要针对不同水肥条件下作物耗水规律进行研究,作物系数作为间接估算作物蒸发蒸腾量的重要参数,可用来描述作物本身生物学特性以及土壤耕作条件对作物需水量的影响^[5],有必要针对吐哈地区独特的气候类型确定该地区滴灌葡萄作物系数。

国内外研究学者针对滴灌条件下作物耗水、需水规律及作物系数进行了大量研究并取得了很多成果,刘洪波等^[6]研究表明,葡萄生育期内各水分处理耗水呈现“先升再降再升再降”的波形变化趋势;纪学伟等^[7]认为,耗水强度和耗水模数均在葡萄浆果生长期达到峰值;何建斌^[8]等研究表明,哈密地区大枣耗水呈现由低到高再降低的变化趋势,耗水高峰期为白熟期;刘洪波等^[9]研究表明,库尔勒香梨的耗水量随灌溉定额的增大而增大,耗水强度在香梨整个生育期内的变化规律

与耗水量趋势一致;钱翠等^[10]研究表明,不同水肥处理下当归阶段需水量与灌水量大小成正比,作物系数随时间的推进呈现先增大后减小的趋势。

长期以来,对于作物耗水规律的研究主要集中在灌水单因素,或者集中在作物需水规律上。而针对特定区域内不同水肥处理下作物耗水规律变化及作物系数确定研究较少。因此,本研究通过开展大田小区试验,研究不同水肥组合下该地区滴灌葡萄耗水在各生育期内分布规律,以及在整个生育期的动态变化规律,通过分析不同水肥组合对葡萄产量及品质的影响,选取最优处理作为充分灌溉处理,进而确定滴灌无核白葡萄作物系数,为农田水肥管理与滴灌技术的推广提供科学依据,对区域水资源高效利用及实现区域内社会经济的可持续发展具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2018 年 4—10 月在新疆生产建设兵团第十三师哈密垦区灌溉试验站进行(42°41'57"N,93°37'22"E)。该地区处于中纬度亚欧大陆腹地,新疆维吾尔自治区最东端,受西风带控制影响,属典型温带大陆干旱性气候。干燥少雨,温差大,年平均气温 9.8℃,年降水量 33.8 mm,年蒸发量 3 300 mm,年均日照时间 3 358 h,全年太阳总辐射量 6 397.35 MJ/m²,≥10℃积温 4 058.3℃,无霜期 182 d。年平均风速 2.3~4.9 m/s,盛行偏东风。试验地地下水埋深>8.0 m,灌溉水源采用地下水,试验站内供试土壤(0—80 cm)基本理化性质见表 1。

表 1 供试土壤基本理化性质							
土层 深度/cm	土壤 类型	田间 持水量/%	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)
0—20	砂土	16.02±0.05	1.58±0.03	12.52	118.21	51.09	215.54
20—40	壤砂土	15.94±0.03	1.56±0.04	11.09	89.25	40.23	141.25
40—60	壤砂土	16.22±0.04	1.54±0.03	8.53	75.44	29.45	152.41
60—80	砂土	15.92±0.03	1.60±0.07	7.86	66.09	19.66	192.55

注:表中数据为平均值±标准差。

1.2 田间试验布置

以新疆生产建设兵团第十三师哈密垦区灌溉试验站内 15 年(2003 年定植)成龄无核白葡萄树为试验材料开展大田小区试验,葡萄种植采用当地小棚架栽培、大沟种植模式,沟长 40 m,沟宽 1.0 m,沟深 0.5 m。葡萄株距 1.0 m,行距 5.0 m,试验小区规格为长 40 m,宽 6.0 m,小区面积 240 m²,定植密度为 80 株/区。滴灌带铺设模式为 1 行 3 管,即在树根部及距树根 2 侧 30 cm 处分别布置 1 根滴灌带,滴灌带使用单翼迷宫式,内径 16 mm,壁厚 0.18 mm,滴头间距 300 mm,滴头设计流量 3.0 L/h,滴灌带工作压力 0.08~0.10 MPa。各小区处理均设有单独水表和施肥罐精确控制灌水施肥量,滴灌施肥均由水肥一体化设备控制。

1.3 试验设计

灌溉、施肥依据文献[11-12],在此基础上设置灌水、施肥 2 因素,其中设灌水处理 4 水平:600,675,750,825 mm,分别标记为 W1、W2、W3、W4;施肥处理 3 水平:450,750,1 050 kg/hm²,分别标记为 F1、F2、F3,采用 N:P₂O₅:K₂O 为 2:1:2 施肥比例。试验按照上述处理水平进行完全组合设计,共 12 个处理,设 3 次重复(表 2)。

表 3 各生育期灌水、施肥处理										
生育期	水处理						肥处理			
	灌水定额/mm				灌水 次数	灌水 周期/d	施肥量/(kg·hm ⁻²)			施肥 次数
	W1	W2	W3	W4			F1	F2	F3	
萌芽期	25	28.125	31.25	34.375	1	12	45	75	105	1
新梢生长期	125	140.625	156.25	171.875	5	7	90	150	210	2
花期	25	28.125	31.25	34.375	1	7	45	75	105	1
浆果生长期	200	225	250	275	8	5	180	300	420	4
浆果成熟期	175	196.875	218.75	240.625	7	5	90	150	210	2
枝蔓成熟期	50	56.25	62.50	68.75	2	12	0	0	0	0
全生育期	600	675	750	825	24	152	450	750	1050	10

1.4 测定项目与方法

1.4.1 土壤含水率 采用美国 CPN 公司生产的 503DR 型中子仪于萌芽期开始至枝蔓成熟期每隔 5 天测定土壤含水率,在灌水前后及降雨后加测。各小区处理在距植株底部 20,40 cm 处各布置 1 根中子管,测试深度为 80 cm,每 10 cm 读取 1 组数据。试

表 2 试验处理设计

处理	灌水 定额/mm	施肥量/(kg·hm ⁻²)			
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	总计
W1F1	600	180	90	180	450
W1F2	600	300	150	300	750
W1F3	600	420	210	420	1050
W2F1	675	180	90	180	450
W2F2	675	300	150	300	750
W2F3	675	420	210	420	1050
W3F1	750	180	90	180	450
W3F2	750	300	150	300	750
W3F3	750	420	210	420	1050
W4F1	825	180	90	180	450
W4F2	825	300	150	300	750
W4F3	825	420	210	420	1050

无核白葡萄在整个生育期内具有明显阶段性,根据无核白葡萄在不同阶段的生长特性,将其生育期划分为 6 个阶段,即:萌芽期(4 月 16—28 日)、新梢生长期(4 月 29 日—5 月 28 日)、花期(5 月 29 日—6 月 7 日)、浆果生长期(6 月 8 日—7 月 12 日)、浆果成熟期(7 月 13 日—8 月 21 日)、枝蔓成熟期(8 月 22 日—9 月 15 日),生育期总计 152 天。灌水、施肥采取少量多次原则,每次灌水、施肥量均相同。施肥时将肥料完全溶解于施肥罐中,施肥前 30 min 滴水,停水前 30 min 结束施肥。不同生育期灌水、施肥处理情况见表 3。

验开始前,采用取土烘干法对中子仪进行标定,标定数字方程为:

$$\theta_v=0.168x-0.013 \quad (R^2=0.924) \quad (1)$$

式中: θ_v 为土壤体积含水率(%);0.168,-0.013 分别为标定方程斜率和截距; x 为中子仪相对计数率, $x=cnt/std$,其中 cnt 为中子仪测定土壤中子数计数

值, std 为标准介质 (25 °C 时中子仪在纯水或室内仪器的防护层内) 条件下的标准计数^[13]。

1.4.2 参考作物蒸发蒸腾量 根据气象站所提供的观测资料, 采用 FAO—56 推荐的 Penman—Monteith 公式计算葡萄生育期内参考作物蒸发蒸腾量。

1.4.3 作物耗水量 根据《灌溉试验规范》, 葡萄生育期阶段耗水量采用田间水量平衡公式计算, 计算公式为:

$$ET_{1-2} = 10 \sum_{i=1}^n H_i (W_{i1} - W_{i2}) + M + P + K - C \quad (2)$$

式中: ET_{1-2} 为阶段作物耗水量 (mm); i 为土壤层次计数; n 为土壤层次总数; H_i 为第 i 层土壤厚度 (cm); W_{i1} 为第 i 层土壤在时段始的体积含水率 (%); W_{i2} 为第 i 层土壤在时段末的体积含水率 (%); M 为时段内灌水定额 (mm); P 为时段内的降雨量 (mm); K 为时段内的地下水补给量 (mm); C 为时段内的排水量 (mm)。

本试验研究中, 时段内灌水定额 M 可由水表读数精确计算; 时段内有效降雨 P 由于研究区地处极端干旱区, 降雨少且蒸发强烈, 忽略不计; 时段内地下水补给量 K 由于试验地地下水埋深 > 8.0 m, 忽略不计; 阶段内排水量 C 由于研究区内土层在 80—90 cm 处出现隔水层, 无排水, 忽略不计。

1.4.4 产量与品质 产量: 于浆果成熟期在每个小区选定 5 棵进行采摘, 取平均值, 再折合为公顷产量。

品质: 测产后取各处理 500 g 葡萄鲜样, 委托农业农村部食品质量监督检验测试中心 (石河子) 测定可溶性固形物、可滴定酸和维生素 C 等品质指标。

1.4.5 作物系数 作物系数计算式可用实测计算的

作物需水量 (ET) 与时段内参考作物蒸发蒸腾量 (ET_0) 的比值表示, 计算公式为:

$$K_c = \frac{ET}{ET_0} \quad (3)$$

式中: K_c 为作物系数; ET 为作物需水量 (mm); ET_0 为参考作物蒸发蒸腾量 (mm)。

1.5 数据处理

使用 Microsoft Excel 2016 进行数据计算, SPSS 22.0 统计软件进行数据统计分析, Origin 2017 软件进行数据绘图。

2 结果与分析

2.1 生育期内不同水肥处理土壤含水率动态变化

以 0—80 cm 土壤含水率平均值绘制各处理土壤含水率动态变化。从图 1 可以看出, 各处理土壤含水率的变化规律基本相似, 总体呈现先增大后减小的趋势。在萌芽期和新梢生长前期, 土壤含水率处于较低水平, 主要是由于该时期生长发育缓慢, 灌溉周期较长; 随着作物生长发育, 灌溉周期缩短, 土壤含水率自新梢生长中期至浆果成熟期均维持在较高水平; 进入枝蔓成熟期后, 作物生长发育减缓, 灌溉周期变长, 土壤含水率有所降低。全生育期平均土壤含水率随灌溉定额增大而增大, 其中 W3、W4 处理含水率分别为 13.35%, 14.04%, 均高于 12.80% (田间持水率的 80%), 处于最优水分状态。同一灌溉处理下, 土壤含水率随施肥量的增加而减小, 总体表现为 $F1 > F2 > F3$, 即在 W4F1 处理下土壤含水率保持较高水平, 全生育期平均值为 14.07%, 在 W1F3 处理水平较低, 全生育期平均值为 11.36%, W1F3 较 W4F1 降低 2.71%。

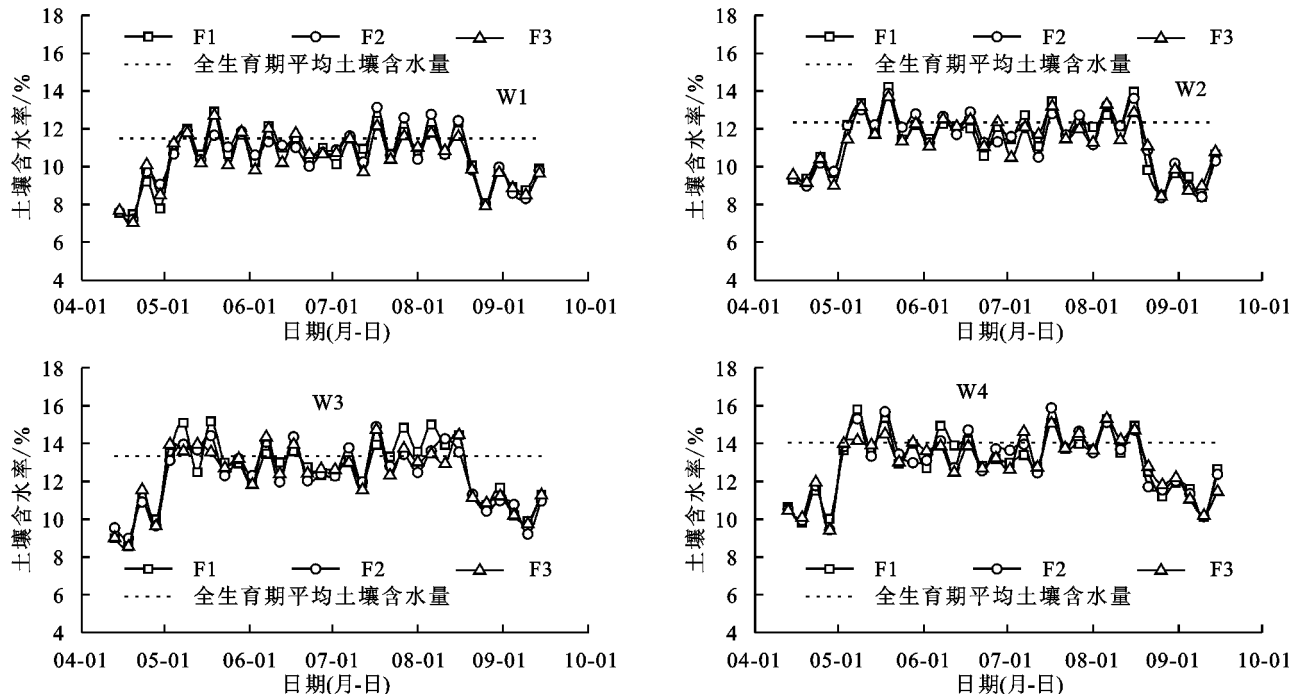


图 1 生育期内不同水肥处理土壤含水率动态变化

2.2 不同水肥处理对滴灌葡萄产量与品质的影响

从表 4 可以看出,灌水对产量的影响极显著($P<0.01$),对可滴定酸的影响显著($P<0.05$),施肥对可溶性固形物和维生素 C 的影响极显著($P<0.01$),对可滴定酸的影响显著($P<0.05$),水肥耦合对产量及品质指标的影响均达极显著水平($P<0.01$)。

不同水肥处理下产量为 20 317~26 346 kg/hm²,可溶性固形物为 19.56%~22.45%,均为 W3F2 处理达到最高值,可滴定酸及维生素 C 分别在 W4F2(0.541%)及 W4F3(8.52 mg/100 g)处理达到最优,但与 W3F2 处理均无显著性差异($P>0.05$)。总体上分析,W3F2 处理对提高产量和品质效果最优。

表 4 不同水肥处理对滴灌葡萄产量与品质的影响

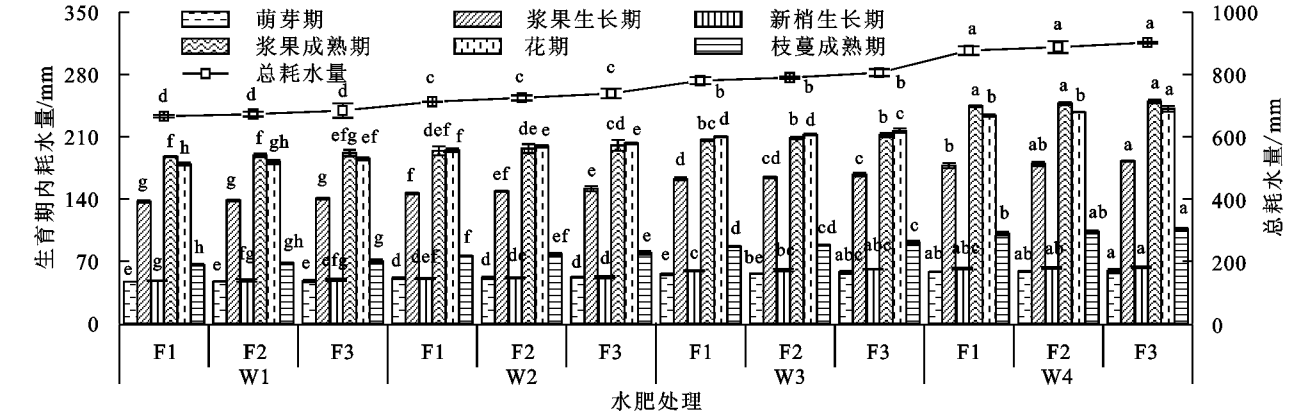
水肥处理		产量/ (kg·hm ⁻²)	可溶性 固形物/%	可滴 定酸/%	维生素 C/ (mg·100 g ⁻¹)
W1F1		20317±287g	19.56±0.20h	0.420±0.02e	7.37±0.06f
W1F2		20676±376fg	21.31±0.30cd	0.445±0.01de	7.92±0.05d
W1F3		21266±79f	20.94±0.16de	0.495±0.01bc	8.34±0.07b
W2F1		22562±183e	19.83±0.18gh	0.445±0.02de	7.69±0.01e
W2F2		22828±534e	21.72±0.20bc	0.502±0.01bc	8.06±0.01c
W2F3		23725±287d	21.29±0.28cd	0.506±0.01ab	8.32±0.03b
W3F1		24356±175cd	20.08±0.27fgh	0.467±0.01cd	7.97±0.02cd
W3F2		26364±397a	22.45±0.42a	0.541±0.01a	8.45±0.10ab
W3F3		25320±190b	20.92±0.24de	0.492±0.02bc	8.49±0.02a
W4F1		24649±272bc	20.44±0.17ef	0.501±0.03bc	7.71±0.08b
W4F2		26077±313a	22.07±0.28ab	0.541±0.02a	8.33±0.07b
W4F3		24715±162bc	20.26±0.25fg	0.522±0.02ab	8.52±0.10a
双因素	W	54.931**	0.343	4.706*	1.711
方差分析	F	0.553	36.909**	5.300*	28.686**
(F 值检验)	W×F	95.18**	24.912**	11.316**	74.356**

注:表中数据为“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。

2.3 生育期内不同水肥处理下滴灌葡萄耗水规律

从图 2 可以看出,作物耗水量随生育期的推进呈现先增后减再增再减的变化趋势,在浆果生长期达到较高水平,各处理平均值为 210.78 mm;在萌芽期达最低水平,各处理平均值为 53.49 mm。同一灌溉处理下,作物耗水量随施肥量的增加而增加,以生理生长活动较为活跃的浆果生长期为例:在 W1 灌溉条件下,F3 比 F1 和 F2 处理分别高 2.07%和 1.28%;在 W2 灌溉条件下,F3 比 F1 和 F2 处理分别高 3.21%和 1.87%;在 W3 灌溉条件下,F3 比 F1 和 F2 处理分别高 2.54%和 1.50%;在 W4 灌溉条件下,F3 比 F1 和 F2 处理分别高 2.15%和

1.09%。同一施肥处理下,同一生育期内作物耗水量随灌溉定额的增加而增加,同样浆果生长期为例:在 F1 施肥条件下,W4 比 W1、W2 和 W3 处理分别高 30.16%,25.88%和 18.4%;在 F2 施肥条件下,W4 比 W1、W2 和 W3 处理分别高 30.56%,25.59%和 18.48%;在 F3 施肥条件下,W4 比 W1、W2 和 W3 处理分别高 30.33%,24.65%和 18.01%;在水肥耦合条件下,该时期作物耗水量最高处理(W4F3)比最低处理(W1F1)高 33.03%。方差分析显示,灌水对作物耗水量的影响显著($P<0.05$);施肥未达到显著水平($P>0.05$)。说明在作物生长发育过程中,灌水对作物耗水量的影响较大。



注:图中同一生育期不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$);折线图中不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

图 2 不同水肥处理对滴灌葡萄耗水规律的影响

从图 2 还可看出,同一灌溉处理下,作物总耗水量 随施肥量的增加而略有增加,同一灌溉定额下若以 F3

水平时总耗水量为 100%，则 F2 水平时为 98.01%~98.44%，平均为 98.24%，F1 水平时为 96.47%~97.32%，平均为 96.95%；同一施肥处理下，作物总耗水量随灌溉定额的增加而明显增加，同一施肥水平下若以 W4 水平时总耗水量为 100%，则 W3 水平时为 88.92%~89.31%，平均为 89.08%，W2 水平时为 81.28%~81.86%，平均为 81.58%，W1 水平时为 75.73%~75.91%，平均为 75.81%；在水肥耦合条件下，作物总耗水量最高处理(W4F3)比最低处理(W1F1)高 35.58%。方差分析显示，灌水对作物总耗水量的影响显著，且达极显著水平($P<0.01$)；施肥虽然产生一定影响，但影响较小，并未达到显著水平($P>0.05$)。

从表 5 可以看出，不同水肥处理下滴灌葡萄各生育期耗水模数变化规律与作物耗水量一致。各处理耗水模数均在浆果生长期达到峰值，为 26.26%~

28.21%，平均为 27.36%，说明该生育期为葡萄整个生育期内需水高峰期；在浆果成熟期，各处理耗水模数为 26.69%~27.45%，平均为 27.01%；其次为新梢生长期，该时期葡萄生长发育较快，需水量相对较大，各处理耗水模数为 20.20%~27.45%，平均为 20.53%；在枝蔓成熟期，随着温度降低，耗水模数相对上一生育期开始降低，各处理耗水模数为 9.92%~11.73%，平均为 10.90%；由于花期持续时间较短，因此该生育期内耗水模数较小，为 7.02%~7.62%，平均为 7.24%；萌芽期叶片尚未展开未产生蒸腾耗水，耗水模数最低，为 6.57%~7.17%，平均为 6.96%。由于生育期的长短在影响耗水模数的因素中占主导地位，造成在不同生育期耗水模数差异较大，且有明显变化规律；而同一生育期内不同水肥处理下耗水模数差异不大，且没有明显变化规律，也进一步说明了水肥因素对耗水模数影响较小。

表 5 不同水肥处理下滴灌葡萄各生育期耗水模数 单位：%

水肥处理	萌芽期	新梢生长期	花期	浆果生长期	浆果成熟期	枝蔓成熟期	全生育期
W1F1	7.07	20.65	7.23	28.21	26.92	9.92	100.00
W1F2	7.04	20.56	7.22	28.13	26.99	10.05	100.00
W1F3	6.98	20.51	7.22	28.03	27.08	10.19	100.00
W2F1	7.13	20.52	7.09	27.25	27.35	10.66	100.00
W2F2	7.06	20.49	7.11	27.14	27.45	10.75	100.00
W2F3	7.02	20.54	7.10	27.13	27.42	10.79	100.00
W3F1	7.09	20.84	7.60	26.45	26.89	11.12	100.00
W3F2	7.11	20.82	7.61	26.40	26.89	11.18	100.00
W3F3	7.17	20.80	7.62	26.26	26.90	11.25	100.00
W4F1	6.64	20.24	7.02	27.88	26.69	11.54	100.00
W4F2	6.61	20.20	7.03	27.82	26.75	11.59	100.00
W4F3	6.57	20.23	7.02	27.68	26.77	11.73	100.00
平均	6.96	20.53	7.24	27.36	27.01	10.90	100.00

2.4 生育期内不同水肥处理下滴灌葡萄耗水强度的动态变化

从表 6 可以看出，耗水强度随生育期的推进呈现先增后减的变化趋势。在浆果生长期达到最大值，各处理平均值为 6.02 mm/d；在枝蔓成熟期达到较低水平，各处理平均值为 3.38 mm/d。同一灌溉处理下，同一生育期内作物耗水强度随施肥量的增加而增加。以生理生长活动较为活跃的浆果生长期为例：在 W1 灌溉条件下，F3 比 F1 和 F2 处理分别高 2.05%和 1.29%；在 W2 灌溉条件下，F3 比 F1 和 F2 处理分别高 3.24%和 1.96%；在 W3 灌溉条件下，F3 比 F1 和 F2 处理分别高 2.54%和 1.51%；在 W4 灌溉条件下，F3 比 F1 和 F2 处理分别高 2.15%和 1.13%。在同一施肥处理下、同一生育期内作物耗水强度随灌溉定额的增加而增加，同样以生理生长活动较为活跃的浆果生长期为例：在 F1 施肥条件下，W4 比 W1、W2

和 W3 处理分别高 30.17%、25.95%和 18.47%；在 F2 施肥条件下，W4 比 W1、W2 和 W3 处理分别高 30.5%，25.62%和 18.46%；在 F3 施肥条件下，W4 比 W1、W2 和 W3 处理分别高 30.29%、24.61%和 18.02%；在水肥耦合条件下，该时期作物耗水强度最高处理(W4F3)比最低处理(W1F1)高 32.96%。方差分析显示，灌水及水肥耦合对作物耗水强度的影响极显著($P<0.01$)；施肥未达到显著水平($P>0.05$)。

为准确详细了解葡萄生长发育过程中耗水强度的动态变化，在葡萄萌芽期(4 月 16 日)至枝蔓成熟期(9 月 15 日)期间，以每 5 天为 1 个阶段，共计 31 个阶段，计算每 1 个阶段内葡萄耗水强度，绘制整个生育期内不同水肥处理下耗水强度动态变化图(图 3)。从图 3 可以看出，不同水肥处理下作物耗水强度动态变化与表 5 不同生育期滴灌葡萄耗水强度变化趋势基本一致。

表 6 水肥耦合对不同生育期滴灌葡萄耗水强度的影响 单位:mm/d

水肥处理		萌芽期	新梢生长期	花期	浆果生长期	浆果成熟期	枝蔓成熟期
W1F1		3.14±0.01e	4.58±0.04e	4.82±0.04f	5.37±0.03f	4.48±0.10g	2.64±0.18h
W1F2		3.16±0.18de	4.61±0.21de	4.86±0.11ef	5.41±0.16f	4.54±0.11g	2.71±0.14gh
W1F3		3.19±0.10de	4.68±0.08de	4.94±0.11ef	5.48±0.11ef	4.63±0.01fg	2.79±0.37fgh
W2F1		3.39±0.06cde	4.88±0.01cde	5.06±0.03def	5.55±0.01def	4.87±0.16ef	3.04±0.16efg
W2F2		3.42±0.03cde	4.95±0.17cde	5.15±0.20de	5.62±0.04de	4.98±0.06de	3.12±0.11def
W2F3		3.46±0.10bcd	5.06±0.08bcd	5.25±0.14d	5.73±0.06cd	5.07±0.08cde	3.19±0.01cde
W3F1		3.69±0.01abc	5.43±0.04abc	5.94±0.03c	5.90±0.04bc	5.25±0.14bcd	3.47±0.14bcd
W3F2		3.74±0.16ab	5.48±0.13ab	6.02±0.21bc	5.96±0.08b	5.31±0.16bc	3.53±0.03bc
W3F3		3.85±0.10a	5.59±0.01a	6.15±0.11abc	6.05±0.14b	5.42±0.20b	3.63±0.25b
W4F1		3.88±0.01a	5.92±0.01a	6.16±0.07abc	6.99±0.04a	5.85±0.11a	4.05±0.16a
W4F2		3.92±0.17a	5.98±0.08a	6.25±0.16ab	7.06±0.03a	5.94±0.16a	4.12±0.08a
W4F3		3.95±0.30a	6.09±0.04a	6.34±0.10a	7.14±0.13a	6.04±0.06a	4.24±0.04a
双因素	W	140.040**	174.906**	166.836**	282.449**	129.498**	164.684**
方差分析	F	0.051	0.066	0.069	0.041	0.091	0.072
(F 值检验)	W×F	10.950**	61.772**	48.127**	116.467**	38.474**	21.458**

注:表中数据为“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。下同。

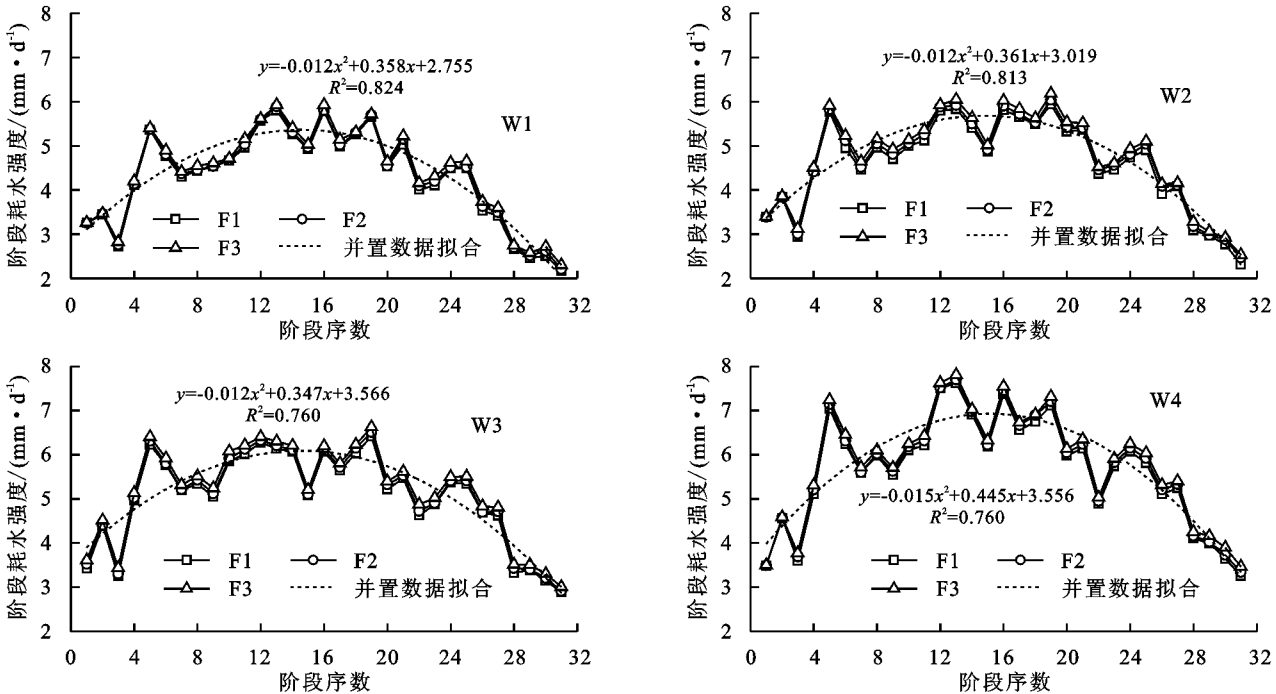


图 3 不同水肥处理下滴灌葡萄阶段耗水强度的动态变化

不同水肥处理下耗水强度随时间的推进有明显规律性。为研究耗水强度随时间的变化规律,对各水肥处理下对应 3 个施肥水平的耗水强度随时间变化进行了数据拟合分析。由于施肥水平并未对耗水强度产生显著影响,因此在进行数据拟合时,对同一灌溉水平下 3 个施肥水平所对应的数据进行了并置数据拟合,即只拟合 1 个方程。从拟合出的 4 个方程可以看出,在不同灌水处理下,滴灌葡萄耗水强度和时间均存在显著的二次曲线关系。

2.5 充分灌溉条件下生育期内作物系数的动态变化

以产量及品质指标为反馈,结合土壤含水率情况,确定在 W3F2 处理基础上计算研究区内滴灌无

核白葡萄作物系数。作物系数萌芽期为 0.80,新梢生长期为 1.09,花期为 1.13,浆果生长期为 1.07,浆果成熟期为 1.03,枝蔓成熟期为 0.82,随生育期的推进整体呈现先增大再减小的趋势,其中在花期、浆果生长期和新梢生长期达到较高水平,在萌芽期与枝蔓成熟期达到较低水平。

为准确详细了解葡萄生长发育过程中作物系数的动态变化,在葡萄萌芽期(4 月 16 日)至枝蔓成熟期(9 月 15 日)期间,以每 5 天为 1 个阶段,共计 31 个阶段,计算每 1 个阶段内葡萄作物系数,绘制 W3F2 处理作物系数随时间变化的动态图并对其进行拟合。从图 4 可以看出,作物系数随时间的推进总体呈先增大再减小的趋

势,并和时间均存在显著的二次曲线关系。

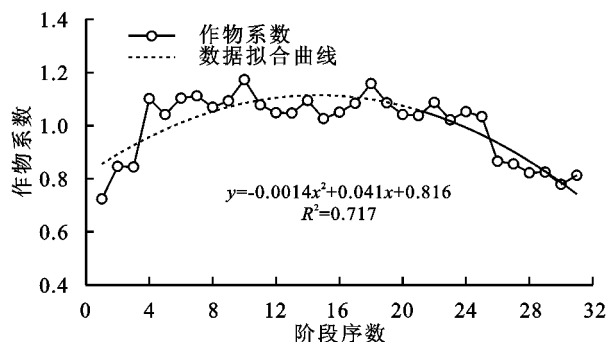


图 4 充分灌溉条件下滴灌葡萄阶段作物系数的动态变化

3 讨论

提高作物产量与品质因素是实现高产高效的基础,而水肥耦合技术的关键在于“以水促肥,以肥调水”,通过合理的灌溉施肥达到高产优质的目的。本试验条件下,水肥耦合对产量及品质的影响达到极显著水平,水肥供应不足时,适当增加水肥用量可提高葡萄产量和品质,但过高水肥用量会降低葡萄产量及品质,综合分析,W3F2 处理水肥供应量适宜,满足葡萄生长发育,有利于提高葡萄产量及品质。在 W3 灌溉水平下,全生育期平均土壤含水率维持在田间持水率的 80% 以上,土壤水分充足,因此 W3F2 处理下的耗水规律可视为区域内葡萄需水规律,同时可在该处理基础上进行作物系数的计算分析。

作物耗水规律是地区水利资源规划、灌排工程规划及设计和农田灌排工程运行管理的基本依据,在地区农业生产实践中占据重要地位^[14]。本研究表明,作物耗水量在浆果生长期达到峰值,在萌芽期最低,主要是由于在浆果生长期生长发育进入了全生育期最活跃的阶段,而在萌芽期时葡萄树叶片未展开,作物本身生理生长活动消耗水量并不大,这与何建斌等^[11]、张学优^[12]、张国军等^[15]的研究结果存在相似之处。作物各生育期内耗水量及全生育期总耗水量在同一灌水处理下随施肥量的增加而略有增加,在同一施肥处理下随灌溉定额的增加而明显增加,受灌水影响显著,施肥未达到显著水平,这与何园球等^[16]和刘晓宏等^[17]的研究结果存在差异,一方面是由于研究作物不同,另一方面是由于试验区地处极端干旱区,作物对水分响应比较明显。研究发现作物耗水强度在生育期内动态变化呈先增大后减小趋势,耗水强度和时间存在显著的二次曲线变化规律;由于各处理下葡萄其他田间管理措施及所处外界环境相同,所以不同水肥处理下各生育期内耗水模数差异不大。

作物系数是确定作物需水量的基础和依据,反映作物自身的生物学特性、土壤水肥状况以及田间管理水平等因素对作物需水量的影响^[18-19]。杨慧慧^[2]研

究表明,葡萄作物系数在浆果生长期达到最大值;耿林等^[20]研究表明,温室苦瓜作物系数呈现先增加后减小的趋势;钱翠等^[10]研究表明,当归作物系数生育期内呈先增大后减小的趋势。本试验条件下,作物系数在生育期内呈先增大后减小的变化趋势,并与时间存在显著二次曲线变化规律。

4 结论

(1)水肥耦合条件下葡萄产量品质存在差异,其中产量和可溶性固形物在 W3F2 处理达到最高值,可滴定酸及维生素 C 分别在 W4F2 (0.541%) 及 W4F3 (8.52 mg/100g) 处理达到最优,但与 W3F2 处理均无显著性差异 ($P > 0.05$)。

(2)水肥耦合效应对葡萄耗水规律存在影响,其中灌水对耗水量的影响显著 ($P < 0.05$),灌水及水肥耦合对耗水强度的影响极显著 ($P < 0.01$),施肥对耗水量、耗水强度的影响不显著 ($P > 0.05$)。不同水肥处理下葡萄全生育期总耗水量为 665.96 ~ 902.9 mm,由于前期储水量的影响均大于灌溉定额。不同生育期内葡萄耗水量随生育期的推进呈现先增后减再增再减的变化趋势。浆果生长期和浆果成熟期为葡萄需水的高峰期。耗水强度随生育期的推进总体呈先增大再减小的趋势。不同阶段耗水强度和时间存在显著的二次曲线关系。其中 W3F2 处理下的耗水规律可视为区域内葡萄需水规律。

(3)葡萄作物系数萌芽期为 0.80,新梢生长期为 1.09,花期为 1.13,浆果生长期为 1.07,浆果成熟期为 1.03,枝蔓成熟期为 0.82,随生育期的推进总体呈先增大再减小的趋势,且与时间存在显著的二次曲线关系。

参考文献:

- [1] 白云岗. 极端干旱区成龄葡萄需水规律及微灌节水技术研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2011.
- [2] 杨慧慧. 吐哈盆地滴灌葡萄耗水规律及灌溉制度研究[D]. 新疆 石河子:石河子大学,2011.
- [3] 王振华,扁青永,李文昊,等. 南疆沙区成龄红枣水肥一体化滴灌的水肥适宜用量[J]. 农业工程学报,2018,34(11):96-104.
- [4] 裴青宝,刘伟佳,张建丰,等. 多点源滴灌条件下红壤水分溶质运移试验与数值模拟[J]. 农业机械学报,2017,48(12):255-262.
- [5] 胡永翔,李援农,张莹. 黄土高原区滴灌枣树作物系数和需水规律试验[J]. 农业机械学报,2012,43(11):87-91.
- [6] 刘洪波,张江辉,白云岗,等. 极端干旱区成龄葡萄耗水特征分析[J]. 节水灌溉,2012(11):5-8.
- [7] 纪学伟,成自勇,张芮,等. 干旱荒漠绿洲区酿酒葡萄滴灌控水灌溉试验研究[J]. 干旱地区农业研究,2015,33(2):135-140.

- 效性研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 130-134.
- [15] Bouain N, Shahzad Z, Rouached A, et al. Phosphate and zinc transport and signalling in plants: Toward a better understanding of their homeostasis interaction [J]. Journal of Experimental Botany, 2017, 65 (20): 5725-5741.
- [16] 张祎, 任宗萍, 李鹏, 等. 黄土丘陵区小流域生态恢复对土壤有机碳和全氮的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32 (1): 97-103.
- [17] 董炜华, 李晓强, 宋扬. 土壤动物在土壤有机质形成中的作用[J]. 土壤, 2016, 48(2): 211-218.
- [18] 吴东明, 任常琦, 李勤奋, 等. 溶解性有机质对铁铝土吸附 2, 4—D 的影响[J]. 中国环境科学, 2018, 38 (3): 1090-1098.
- [19] Chen M, Zhang L L, Li J, et al. Bioaccumulation and tolerance characteristics of a submerged plant (*Ceratophyllum demersum* L.) exposed to toxic metal lead [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, 122: 313-321.
- [20] 曹林, 马丽, 吴玉环, 等. 菊芋对酸铝复合胁迫的生理响应[J]. 生态环境学报, 2016, 25(2): 233-240.
- [21] 张晗芝, 郭庆军, 杨俊兴. 镉胁迫下蓖麻对镉及矿质元素的富集特征[J]. 生态环境学报, 2015, 24(2): 323-328.
- [22] 顾艳, 吴良欢, 胡兆平. 土壤 pH 值和含水量对土壤硝化抑制剂效果的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(8): 132-138.
- [23] 廉梅花, 孙丽娜, 胡筱敏, 等. pH 对不同富集能力植物根际土壤溶液中镉形态的影响[J]. 生态学杂志, 2015, 34(1): 130-137.
- [24] Muhammad I, Puschenreiter M, Wenzel W W. Cadmium and Zn availability as affected by pH manipulation and its assessment by soil extraction, DGT and indicator plants[J]. Science of the Total Environment, 2012, 416: 490-500.
- [25] Zeng F R, Ali S, Zhang H, et al. The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavymetal availability and their uptake by rice plants[J]. Environmental Pollution, 2011, 159: 84-91.
- [26] 郭碧林, 陈效民, 景峰, 等. 生物质炭添加对重金属污染稻田土壤理化性状及微生物量的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 279-284.
- [27] 方继宇, 贾永霞, 张春梅. 马缨丹对镉的生长响应及其富集、转运和亚细胞分布特点研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23(10): 1677-1682.
- [28] 杨艳, 吴宗萍, 张敏. 头花蓼对重金属 Cd 的吸收特性与累积规律初探[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(11): 2094-2099.
- [29] Wang Z H, Shao Y, Li C H, et al. RNA-seq analysis revealed ROS-mediated related genes involved in cadmium detoxification in the razor clam *Sinonovacula constricta* [J]. Fish and Shellfish Immunology, 2016, 57: 350-360.
- (上接第 286 页)
- [8] 何建斌, 何新林, 王振华, 等. 滴灌哈密大枣耗水规律初步研究[J]. 中国农村水利水电, 2012(9): 9-12.
- [9] 刘洪波, 张江辉, 白云岗, 等. 滴灌条件下库尔勒香梨耗水特征分析[J]. 新疆农业科学, 2014, 51(12): 2206-2211.
- [10] 钱翠, 饶碧玉, 罗绍芹, 等. 不同水肥处理对当归种植需水量的影响[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(9): 5613-5617.
- [11] 何建斌, 王振华, 何新林, 等. 极端干旱区不同灌水量对滴灌葡萄生长及产量的影响[J]. 农学学报, 2013, 3 (2): 65-69.
- [12] 张学优. 深层坑渗灌溉施肥制度对成龄葡萄土壤养分和生长特性影响研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- [13] 谢森传, 段新杰. 503DR 中子水分仪的标定[J]. 核农学通报, 1987(6): 14-19.
- [14] 樊引琴, 蔡焕杰. 单作物系数法和双作物系数法计算作物需水量的比较研究[J]. 水利学报, 2002, 33(3): 50-54.
- [15] 张国军, 王晓玥, 孙磊, 等. 北京典型冲积平原葡萄耗水规律研究[J]. 华北农学报, 2016, 31(增刊 1): 51-56.
- [16] 何园球, 沈其荣, 王兴祥, 等. 不同水分和施磷量对旱作水稻耗水量和水分利用率的影响[J]. 土壤学报, 2003, 40(6): 901-907.
- [17] 刘晓宏, 肖洪浪, 赵良菊. 不同水肥条件下春小麦耗水量和水分利用率[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(1): 56-59.
- [18] 赵娜娜, 刘钰, 蔡甲冰. 夏玉米作物系数计算与耗水量研究[J]. 水利学报, 2010, 41(8): 953-959.
- [19] 陈凤, 蔡焕杰, 王健, 等. 杨凌地区冬小麦和夏玉米蒸发蒸腾和作物系数的确定[J]. 农业工程学报, 2006, 22 (5): 191-193.
- [20] 耿琳, 王甫, 崔宁博, 等. 温室苦瓜耗水规律及作物系数研究[J]. 西北农业学报, 2014, 23(12): 154-160.