DOI：10.11766/trxb201710090366

极端干旱区滴灌葡萄水肥耦合效应研究*

张江辉　刘洪波†　白云岗　丁　平
（新疆水利水电科学研究院，乌鲁木齐　830049）

摘　要　葡萄作为新疆吐哈地区的特色支柱产业，受到干旱少雨、蒸散量大等特殊自然条件的限制，导致在水肥管理上存在着灌溉定额过大和高耗低效等问题。采用滴灌水肥技术，通过对不同水肥条件下葡萄园土壤耗水量和产量的监测，分析水肥耦合效应对葡萄产量的影响。结果表明：水肥耦合效应对葡萄的产量影响较大，在节水不超过56%、节肥25%左右时，滴灌葡萄适宜的灌溉定额在8 250 m^3 hm^{-2}～9 000 m^3 hm^{-2}，施肥水平在300 kg hm^{-2}～450 kg hm^{-2}，可以获得较高的葡萄产量。以二元二次多项式拟合葡萄产量（Y）与灌水量（W）、施氮量（F）的关系，得到数学模型：$Y=-9\ 197+10.04W-7.713F-0.000\ 6W^2+0.010\ 4F^2+0.000\ 9WF$，对数学模型求极值可得到最佳灌水量和施氮量分别为8 736 m^3 hm^{-2}、390 kg hm^{-2}，最高产量可达到34 393 kg hm^{-2}。

关键词　葡萄；灌水量；施氮量；最高产量；模型
中图分类号　S152.7　　文献标识码　A

葡萄是目前世界上加工比例最高、产业生产链最长、产品种类最多的果树。国内外众多学者在葡萄高产栽培[1-2]、遗传育种[3-4]、病虫害防治[5-6]及水肥一体化[7-8]等方面进行了广泛而深入的研究。在新疆，由于气候干旱、少雨、蒸发量大等特点，年平均降水量仅16.5 mm，而年平均蒸发能力高达3 300 mm，属极端干旱区，对葡萄的正常生长发育和产量影响非常大。同时，由于葡萄灌溉普遍采用地面沟灌，耗水量大，造成水资源日益紧张，对此，多位学者对葡萄高效节水增产技术进行了研究，如杨艳芬等[9]以及李淑芹等[10]采用地面滴灌和垂直线源灌的研究显示，与常规滴灌相比，葡萄水分生理指标和产量均处于较高水平，垂直线源灌方式下根层土壤平均含水率可达到田间持水率的75.1%，而常规滴灌方式为田间持水率的60%。同时，垂直线源灌方式与常规滴灌相比，产量提高了1.2%，水分利用效率提高了57.4%[11]。

水肥是影响作物产量和品质的重要因子。由于水肥对作物生长发育起着相互制约与相互促进的作用，存在明显的耦合关系，对二者耦合关系的研究是提高作物品质和产量的关键所在。在果树生产复合系统中，水分和养分之间相互促进、相互影响，对水肥协同管理，不仅能够提高水肥的利用效率，而且能够提高果品产量和质量[12]。如对设施延后栽培葡萄通过水肥调控，葡萄产量随施肥量的增加而增加，随水分的亏缺先增大后减小，适量的施肥和适度的缺水可增加花色苷含量，提高糖酸比[13-14]。在常规氮磷钾化肥的基础上增施中微量元素钙镁硫能显著促进新梢生长，增施腐殖酸则能显著提高叶绿素含量，明显降低总酸度，改善葡萄品质[15]。在宁夏贺兰山东麓，葡萄随着灌溉定额增加产量提高，当灌溉定额为3 825 m^3 hm^{-2}时产量最大，增加施肥量在一定程度内可提高葡萄产量[16]。在云南省西双版纳州普文镇实验林场的水肥试验认为，灌溉是影响果实水分、可溶性固形物

* 国家自然科学基金地区基金项目（51569034）资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China（No. 51569034）

† 通讯作者 Corresponding author，E-mail：lhb090@163.com
作者简介：张江辉（1963—），男，陕西兴平人，研究员，主要从事农业水土工程研究。E-mail: skyzjh@163. net
收稿日期：2017-10-09；收到修改稿日期：2017-12-25；优先数字出版日期（www.cnki.net）：2018-01-19

含量的主要因子，施肥则对总糖、还原糖的影响极显著[17]。由于受到区域地理和气候条件限制，葡萄灌水量和施肥量也会受到多种因素影响而存在差异[13-14]。

在多种经济作物上的应用研究结果已表明，水肥耦合能促进作物生长、提高产量。在极端干旱区，对葡萄灌水技术方面的研究颇多，但在水肥耦合效应上的研究甚少，因此，本试验通过葡萄滴灌水肥一体化技术，就葡萄水肥耦合效应对产量的影响进行研究，旨在进一步探明滴灌条件下葡萄的水肥协调与互补效应，这对节水技术的应用与推广、提高葡萄品质与产量以及保障我国重要葡萄基地生产的可持续发展具有重要的现实意义。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

试验点位于火焰山以南，吐鲁番市东南部的葡萄乡铁提尔村，距吐鲁番市区12 km，地理坐标：42° 56′ N，89° 13′ E，海拔−68.8 m。年均降水量为16.6 mm，年均蒸发量为3 300 mm，地下水位为30 m，年均气温为14.4℃，多年最高气温、最低气温分别为48.3℃，−28.8℃，10℃以上活动积温为5 455℃，全年年均日照时数为3 095 h，无霜期达210 d。葡萄品种为无核白（Thompson seedless），中晚熟品种，所需大于10℃的活动积温在3 300℃左右。

试验葡萄品种于1998年开始定植。栽培沟为东西走向，沟长为60 m，沟宽为1.0～1.2 m，沟深约为0.5 m；株距为1.2～1.5 m，行距3.5～4.5 m，栽培方式为小棚架栽培。以沟面为参考面，棚架前端高2.0 m，后端高0.8 m，平均高1.2 m。试验区土壤为黄棕壤，质地较均一。传统灌溉方式为地面沟灌。

1.2　试验设计

试验于2015年进行。滴灌采用一沟两管布置，即在距葡萄根30 cm处两侧各放置一条滴灌带，滴灌毛管为16 mm的滴灌带，滴头间距30 cm，滴头流量3.2 L h^{-1}。在滴灌条件下设3个灌水处理[18-20]：10 950 m^3 hm^{-2}（高水W_1）、7 800 m^3 hm^{-2}（中水W_2）、5 550 m^3 hm^{-2}（低水W_3），在上述3种不同灌水处理下分别设3种不同的施肥水平处理，分别为750 kg hm^{-2}（高肥F_1）、450 kg hm^{-2}（中肥F_2）和300 kg hm^{-2}（低肥F_3），各处理设2次重复，每个试验小区面积约0.05 hm^2。各处理基肥均在葡萄开花前期（3月下旬）根部附近施入磷酸二铵1 200 kg hm^{-2}，施肥深度40 cm；在果实膨大期（6月中旬）同样在根部附近施入硫酸钾镁750 kg hm^{-2}和磷酸二铵1 800 kg hm^{-2}；追肥在5月上旬葡萄萌芽期、6月上旬葡萄坐果期和7月上旬果实成熟初期各施1次，高、中、低肥3次按1∶2∶2进行滴施，即低肥分3次分别施60 kg hm^{-2}、120 kg hm^{-2}、120 kg hm^{-2}；中肥3次分别施90 kg hm^{-2}、180 kg hm^{-2}、180 kg hm^{-2}；高肥3次分别施150 kg hm^{-2}、300 kg hm^{-2}、300 kg hm^{-2}。追肥肥料采用昆仑牌尿素（中国石油天然气股份有限公司），总氮含量≥46.4%。对照处理（CK）采用当地常规沟灌，灌溉定额12 750 m^3 hm^{-2}，无追肥，生育期共灌水6次。

1.3　测定指标

土壤含水量采用中子仪（CNC-503D型，加利福尼亚坎贝尔太平洋核子公司，美国）定期监测，于每次灌水后测定土壤含水量。此外，在各个生育期选择一个灌水周期进行连续测定，观测不同处理0～20、20～40、40～60、60～80、80～100 cm土层的田间土壤含水率。

在葡萄收获时，根据每个处理的葡萄总串数，在每个处理随机摘取18串有代表性葡萄，所摘葡萄尽可能反映整个处理葡萄的生长状况，并对每串葡萄进行称重，根据各处理实际面积及果树数量和总串数与串重等换算成每公顷的产量。

1.4　数据处理

作物耗水量：$ET=I+P-\Delta W-R-S$　　（1）

式中，ET为农田作物生育期内的耗水量，mm；I 为灌水量，mm；P 为降水量，mm；ΔW为土体贮水量的变化（增加为正，减少为负），mm；R 为径流量，mm；S 为土体下边界净通量（向下为正，向上为负），mm。

式（1）中，灌水量由水表控制，在本文的试验过程中，由于特殊气候条件，径流量和降雨量可以忽略不计，ΔW可以通过测定土壤含水量获得，当下边界远大于计划灌水层时，下边界净通量可假

设为零。在充分满足作物对水肥需要以及上述对各变量的假设情况下，上式可以转化为：

$$ET=I-\Delta W \quad (2)$$

水肥交互效应的计算公式如下[21]：

$$E_W=(Y_{Wx}-Y_{WL})/Y_{WL} \quad (3)$$

式中，E_W为水分效应，%；Y_{Wx}为同等施肥量条件下某水分处理产量，kg hm^{-2}；Y_{WL}为同等施肥量条件下低水分处理产量，kg hm^{-2}。

$$E_F=(Y_{Fx}-Y_{FL})/Y_{FL} \quad (4)$$

式中，E_F为肥料效应，%；Y_{Fx}为同等灌水量条件下某肥料处理产量，kg hm^{-2}；Y_{FL}为同等灌水量条件下低肥料处理产量，kg hm^{-2}。

$$E_I=(Y_{WxFx}-Y_{WLFL})/Y_{WLFL} \quad (5)$$

式中，E_I为增产效应，%；Y_{WxFx}为某水分处理和某肥料处理产量，kg hm^{-2}；Y_{WLFL}为低水分低肥料处理产量，kg hm^{-2}。

$$E_{WF}=E_I-E_W-E_F \quad (6)$$

式中，E_{WF}为水肥交互效应，%；E_I为增产效应，%；E_W为水分效应，%；E_F为肥料效应，%。

采用Excel 2003进行制图和数据分析，采用SPSS 22.0进行水肥耦合效应分析。

2 结 果

2.1 不同水肥处理葡萄耗水量

葡萄在不同水肥条件下各生育期的耗水量如表1所示。从表1可看出，葡萄从萌芽期至收获期，各水肥处理在不同生育阶段的耗水量均表现出先增大后减小的规律，各生育期总耗水量除了与灌溉定额有关，还与生育期内葡萄自身耗水能力以及生育期长短有关。各水肥处理不同生育期的耗水量和总耗水量的差异主要是由于灌溉定额不同所致，其中，在萌芽期，由于气温较低，土面蒸发及植株蒸腾相对较小，耗水量较少；果实膨大期是葡萄的第一个需水关键期，由于持续时间较长，该阶段的耗水量较大，且各水肥处理的耗水量随灌溉定额的增大而增大，如低水低肥处理为213.5 mm，而高水高肥为242.8 mm。葡萄的第二个需水关键期是果浆成熟期，其持续时间最长，因此该阶段耗水量最大，且耗水规律与果实膨大期一致；葡萄采摘后，进入枝蔓成熟期间，随着气温的下降，葡萄耗水强度相应开始减小，葡萄在该时期的耗水量也随之减少，但仍大于萌芽期和新梢生长期时的耗水量。

表1 不同水肥处理下各生育期葡萄耗水量

Table 1 Water consumption of the grape vines relative to growing stage and treatment (mm)

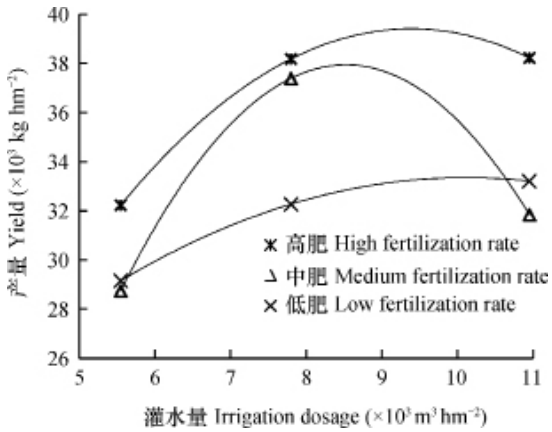
处理 Treatments	生育期Growth period						总耗水量 Total water consumption
	萌芽期 Sprouting period	新梢生长期Shoot growing period	花期Blooming period	果实膨大期Fruit bulging period	果浆成熟期Fruit maturing period	枝蔓成熟期Fruit pulp ripening period	
CK	27.6	65.4	93.8	291.8	324.2	69.3	872.1
W_1F_1	18.5	55.4	102.2	242.8	269.6	65.0	753.4
W_1F_2	20.5	52.7	99.3	238.6	271.5	58.6	741.2
W_1F_3	23.6	58.9	97.4	241.2	275.8	61.5	758.4
W_2F_1	36.4	65.2	82.6	229.9	222.8	60.5	697.5
W_2F_2	32.1	67.4	85.3	216.6	211.4	62.6	675.4
W_2F_3	29.8	52.2	78.6	223.4	221.6	57.5	663.1
W_3F_1	20.6	33.6	87.9	215.0	142.2	54.5	553.8
W_3F_2	18.8	35.5	90.7	206.6	148.6	42.6	542.8
W_3F_3	19.5	34.3	90.5	213.5	138.8	48.9	545.5

注：W_1、W_2、W_3分别表示高水、中水和低水，F_1、F_2、F_3分别表示高肥、中肥和低肥，CK表示对照处理，W_1F_1表示高水高肥处理，下同。葡萄各生育期时间分别为，萌芽期（4月5日—4月19日）、新梢生长期（4月20日—5月13日）、花期（5月14日—5月27日）、果实膨大期（5月28日—6月23日）、果浆成熟期（6月24日—9月5日）、枝蔓成熟期（9月5日—10月14日）Note: W_1, W_2 and W_3 stands for irrigation dosage high, medium and low in, respectively; F_1, F_2 and F_3 for fertilization rate high, medium and low, respectively; CK for control; W_1F_1 for the treatment high in irrigation dosage and high in fertilization rate, and the same below. The growth period was divided into sprouting period (5th, Apr.-19th, Apr.), new shoot growing period (20th, Apr.-13th, May), blooming period (14th, May-27th, May), fruit bulging period (28th, May-23th, Jun.), fruit maturing period (24th, Jun.-5th, Sept.) and branch and tendril maturing period (5th, Sept.-14th, Oct.)

2.2　灌水量、施肥量和耗水量与产量的相关关系

不同施肥处理灌水量与产量的关系如图1所示。根据当年各处理对应产量数据分析发现，在施肥量一定时，灌水量与产量呈二次多项式相关关系。通过拟合得到的相关方程可得出，当施肥量为750 kg hm^{-2}时，最佳灌水量和最佳产量分别为9 148 m^3 hm^{-2}和38 304 kg hm^{-2}；当施肥量为450 kg hm^{-2}时，最佳灌水量和最佳产量分别为8 851 m^3 hm^{-2}和40 810 kg hm^{-2}；当施肥量为300 kg hm^{-2}时，最佳灌水量和最佳产量分别为10 177 m^3 hm^{-2}和33 475 kg hm^{-2}。

从不同施肥水平下拟合得到的最佳灌水量与最佳产量可看出，施肥量为300 kg hm^{-2}时的最佳灌水量大于其他两个施肥水平，而最佳产量小于其他两个施肥水平，在施肥量为450 kg hm^{-2}时，拟合得到的最佳灌水量和最佳产量均优于其他两个水平。



注：高肥、中肥、低肥的施肥量分别为750 kg hm^{-2}、450 kg hm^{-2}和300 kg hm^{-2} Note: The high, medium and low fertilization rate was 750 kg hm^{-2}, 450 kg hm^{-2} and 300 kg hm^{-2}, respectively

图1　不同施肥水平下灌水量与产量的关系

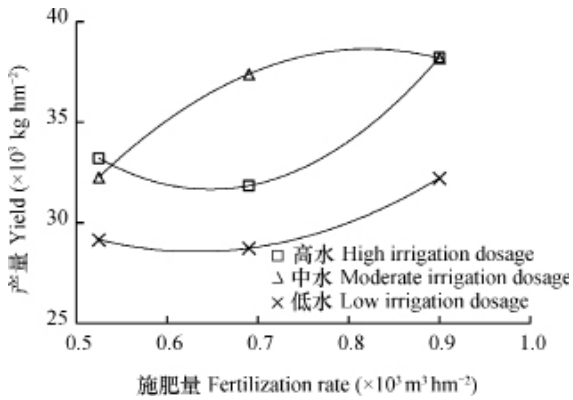
Fig.1　Relationship between irrigation dosage and grape yield relative to fertilization rate

图2为不同灌水量下施肥量与产量的关系。由图2可知，由于高水和低水条件下低肥处理的实测产量大于中肥处理，而中水条件下低肥处理的实测产量小于中肥处理，因此，当灌水量为定值时，施肥量与产量虽然均呈二次抛物线关系，但抛物线的开口方向却不同，其中，当灌水水平为高水时，Y=0.0675 x^2−59.77 x+45 067；当灌水水平为中水时，Y=−0.07 x^2+86.64 x+12 582，当灌水水平为低水时，Y=0.032 x^2−26.73 x+34 300。通过对回归方程计算得到，灌水量为中水（7 800 m^3 hm^{-2}）和低水（5 550 m^3 hm^{-2}）时得到的最优产量比较接近且均小于灌水量为高水（10 950 m^3 hm^{-2}）时的最优产量（39 391 kg hm^{-2}），其产量分别为31 836 kg hm^{-2}和28 718 kg hm^{-2}。

根据水量平衡公式计算得到的葡萄总耗水量与灌水量的线性相关关系极显著（R^2=0.92）（图3），表明葡萄耗水量随着灌水量的增加而增加，这是因为试验区年降水量极少，地下水位低，葡萄耗水量主要来自于灌水量的缘故。

2.3　综合水肥处理与产量的关系

从综合施肥水平和灌水水平下葡萄的产量



注：高水、中水、低水的灌水量分别为10 950 m^3 hm^{-2}、7 800 m^3 hm^{-2}、5 550 m^3 hm^{-2} Note: The high, medium and low irrigation dosage was 10 950 m^3 hm^{-2}, 7 800 m^3 hm^{-2} and 5 550 m^3 hm^{-2}, respectively

图2　不同灌水水平下施肥量与产量的关系

Fig.2　Relationship between fertilization rate and yield at different irrigation levels

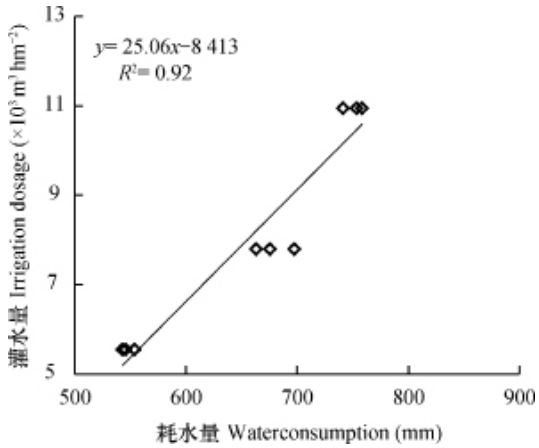


图3　灌水量与耗水量的关系

Fig.3　Relationship between irrigation dosage and water consumption

（表2）可看出，在同一灌水水平下，高肥处理的产量最高，平均为36 210 kg hm^{-2}，低肥的平均产量最低，为31 548 kg hm^{-2}，差异极显著，可见，增加施肥量能增加产量。在同一施肥水平下各灌水水平平均产量中，中水的产量最高，为35 948 kg hm^{-2}，高水和低水的产量分别为34 426 kg hm^{-2}和30 043 kg hm^{-2}，说明合理增加灌水量能相应地增加产量，但过多的灌水同样会降低产量。

2.4 水肥交互作用对葡萄产量的影响

从水肥交互作用分析表（表3）中可以看出，在同等施肥条件下，灌水量的水分效应由大到小为：中水、高水、低水。水分效应最大为施肥450 kg hm^{-2}、灌水量为7 800 m^3 hm^{-2}时，增产30%；水分效应最小为施肥300 kg hm^{-2}、灌水量为7 800 m^3 hm^{-2}时，增产11 %。同等灌水量条件下，累积施肥的肥料效应由大到小为：中肥、高肥、低肥。肥料效应最大为灌水量为10 950 m^3 hm^{-2}、施肥750 kg hm^{-2}时，增产18%。综合比较各水肥处理增产效应可看出，在高肥和中肥条件下，灌水量为高水和中水时的增产效应要显著优于低肥条件下的各灌水处理。

表2 综合施肥水平和灌水水平下葡萄产量

Table 2 Yield of grape under optimal combination of fertilization and irrigation

处理Treatments		平均灌水量Average irrigation dosage (m^3 hm^{-2})	平均施肥量Average fertilization rate (kg hm^{-2})	产量Yield (kg hm^{-2})
灌水处理 Irrigated treatment	W_1	10 950	500	34 426
	W_2	7 800	500	35 948
	W_3	5 550	500	30 043
施肥处理 Fertilized treatment	F_1	8 100	750	36 210
	F_2	8 100	450	32 660
	F_3	8 100	300	31 548

表3 水肥交互作用的增产效应

Table 3 Yield increasing effect of the interaction of water and fertilizer

施肥处理 Fertilization treatment	灌水处理 Irrigation treatment	产量Yield (kg hm^{-2})	E_W (%)	E_F (%)	E_I (%)	E_{WF} (%)
F_1	W_1	38 221	19	15	31	−3
	W_2	38 179	18	18	9	−28
	W_3	32 230	0	11	14	3
F_2	W_1	31 844	11	−4	31	24
	W_2	37 393	30	16	28	−18
	W_3	28 743	0	−1	11	12
F_3	W_1	33 213	14	0	11	−3
	W_2	32 273	11	0	−1	−12
	W_3	29 157	0	0	0	0

注：E_W为水分效应，E_F为肥料效应，E_I为增产效应，E_{WF}为水肥交互效应Note: E_W stands for contribution from water, E_F for contribution from fertilizer, E_I for yield increasing effect, and E_{WF} for interactive effect of water and fertilizer

葡萄水肥耦合的节水节肥效应如表4所示。其节水节肥及增产指标是与对照处理进行比较。从表4可以看出，与对照处理相比，在节水14%和39%、施肥量增加25%和减少25%时，葡萄产量增

加明显。节肥50%时产量相差很小。节水56%、节肥26%时葡萄产量减少。说明葡萄在滴灌条件下，节水不超过56%、节肥在25%左右时葡萄能获得最佳产量。

表4　水肥耦合的节水节肥效应

Table 4　Water saving and fertilizer saving effects of the combination of water and fertilizer

处理 Treatments	施肥量 Fertilization rate (kg hm^{-2})	灌水量Irrigation dosage (m^3 hm^{-2})	产量Yield (kg hm^{-2})	节水Water-saving (%)	节肥 Fertilizer-saving (%)	增产Yield increased (%)
W_1F_1	750	10 950	38 221	14	−25	31
W_1F_2	450	10 950	31 844	14	25	9
W_1F_3	300	10 950	33 213	14	50	13
W_2F_1	750	7 800	38 179	39	−25	30
W_2F_2	450	7 800	37 393	39	25	28
W_2F_3	300	7 800	32 273	39	50	10
W_3F_1	750	5 550	32 230	56	−25	10
W_3F_2	450	5 550	28 743	56	25	−2
W_3F_3	300	5 550	29 157	56	50	0
CK	600	12 750	29 276	0	0	0

2.5　葡萄水肥耦合效应模型

仅考虑氮素或水分一个因素与作物产量关系的生产函数称为单因素生产函数。而实际上，作物产量是多个影响因素综合作用的结果，且各因素之间有交互作用。因此，在单因素生产函数的基础上，建立双因素（水、肥）生产函数，将更能准确地反映作物产量与水肥的影响关系。

水肥生产函数可定义为：在农业生产其他影响因素一致的条件下，农田水资源和氮素耦合投入与作物产出（籽粒产量或干物质）之间的函数关系。根据10组对应的葡萄产量（Y）、灌水量（W）、施氮量（F）数据，得到数学回归模型：

$$Y=-9\ 197+10.04W-7.713F-0.000\ 6W^2+0.010\ 4F^2+0.000\ 9WF \quad (7)$$

对式(7)进行显著性检验：F值为6.47，且Dubrni-Watsno统计量d=3.31，决定系数R^2=0.94，结果表明回归可靠，说明灌水量和施氮量二因素与葡萄产量之间存在极其显著的回归关系。

由表5可以看出，当灌水量固定时，葡萄产量随着施氮量的增加呈增大趋势，有产量最高点。同样，当施氮量固定时，葡萄产量随着灌水量的增加呈先增加后降低的变化趋势，表明随着灌水量的增加，葡萄产量相应增加，但当灌水量继续增大至一定值后，葡萄产量反而减小。

表5　水氮耦合对葡萄产量的影响

Table 5　Effects of combination of water and nitrogen on grape yield (kg hm^{-2})

灌水量 Irrigation dosage (m^3 hm^{-2})	施氮量Nitrogen application rate (kg hm^{-2})			
	150	200	300	400
6 750	31 247	31 347	31 703	32 268
7 500	32 469	32 602	33 026	33 658
8 250	33 015	33 183	33 674	34 373
9 000	32 886	33 088	33 647	34 413
9 750	32 083	32 318	32 944	33 778
10 500	30 604	30 873	31 567	32 469

续表

灌水量 Irrigation dosage (m^3 hm^{-2})	施氮量Nitrogen application rate (kg hm^{-2})			
	150	200	300	400
11 250	28 451	28 753	29 515	30 484
12 000	25 622	25 959	26 787	27 824
12 750	22 119	22 489	23 385	24 489

对式（7）式进行求导，可得到灌水量和施氮量的效应方程：

$$Y'_w = \frac{\partial Y}{\partial w} = 10.04 + 0.000\,9F - 0.001\,2W \quad (8)$$

$$Y'_F = \frac{\partial Y}{\partial F} = -7.713 + 0.000\,9W + 0.020\,8F \quad (9)$$

若$\frac{\partial Y}{\partial w} = \frac{\partial Y}{\partial F} = 0$，对式（5）求极值可得到最佳的灌水量和施氮量分别为8 736 m^3 hm^{-2}、390 kg hm^{-2}，最高产量可达到34 393 kg hm^{-2}。

3 讨 论

在影响葡萄生长的诸多因素中，水、肥因素起着决定性作用，也仅有水分和养分最容易人为调控，同时，它们也是一对互相作用的因子，它们既有自己特殊的作用，又互相牵制和制约，影响着彼此效果的发挥[22]。氮肥是葡萄生长过程中需要量较大的元素，施用氮肥可以增加葡萄枝叶的数量，促进葡萄副梢的萌发，并提高葡萄的产量。有研究显示，葡萄滴灌追施氮、磷、钾的比例在萌芽至开花期为1 ：0.26：0.12，在葡萄果实膨大期为1 ：1.54：1.97时，可以显著提高葡萄的产量[23]。在N：P：K= 2：5：3时，可以有效提高氮肥利用率，增加氮素积累，促进无核白鸡心幼树营养生长[24]。在常规氮磷钾化肥的基础上，增施中微量元素钙、镁、硫能显著促进新梢生长；在滴灌条件下，增施腐殖酸和钙、镁、硫后可以提高产量、降低总酸度[18]。而在葡萄营养生长期，配合施用适量镁肥，并适量补充微量元素，同样能促进植株生长，提高果实品质[25]。此外，水分过量或者亏缺同样会引起植物体内一系列的生理生化反应，而且灌溉方式和灌水量对形成优质果品也起着重要的作用[26]，采用滴灌技术不仅可以提高水分利用效率，提高肥效，而且可以改善葡萄生长环境和发育条件，从而促使葡萄优质高产，增加经济效益[27]。滴灌灌水量随地区不同而差异显著，如在河北张家口的酿酒葡萄高产园灌溉量为1 822 m^3 hm^{-2}时较为适宜[28]。在吉林省长春市，在灌水量270 mm，施肥量为N 225 kg hm^{-2}+P_2O_5 180 kg hm^{-2}+K_2O 248 kg hm^{-2}的组合处理对稳定葡萄产量和改善果实品质有显明作用[7]。对于干旱区的宁夏银川酿酒葡萄，生育期滴灌灌溉量在4 500 m^3 hm^{-2}左右[29]；而在新疆，由于特殊的气候环境，葡萄滴灌灌水量更大，如在博乐市南郊的克瑞森无核葡萄园在年灌水总量6 000 m^3 hm^{-2}、氮磷钾年施肥量367.2 kg hm^{-2}时产量最高[21]，在哈密市郊的葡萄园优质高产的最佳模式为灌溉定额6 750 m^3 hm^{-2}、尿素489.15 kg hm^{-2}、磷酸二氢钾809.4 kg hm^{-2}。本研究是在极端干旱的吐哈地区，由于干旱少雨、蒸发量大的特点，葡萄滴灌灌水量在高水和中水处理、施肥量同样在中肥和高肥时的产量最大，但产量相差不明显，即在灌水量为7 800 m^3 hm^{-2}、施肥量为450 kg hm^{-2}时，可使产量提高30%。当灌水量过大，达到10 950 m^3 hm^{-2}，或是施肥量过大，达到750 kg hm^{-2}时，产量反而降低，其试验结果与多数研究结果[22, 24, 28-29]一致，表明滴灌水肥能明显促进葡萄植株生长并提高产量，但灌水量和施肥量必须适量。

大量研究表明，水分、肥料对产量在一定范围内具有明显的正效应。二者还存在显著耦合效应，即高水配高肥的增产效应加大，肥力增产效应随水分提高而提高；同理水分的增产效应随肥力增大而增大。但是，高水配高肥并不是无限制的，水肥对小麦产量效应为报酬递减函数，表现为肥力增产效应随肥力增加而减弱，水分也同样如此。生产中水、肥的配合存在一个上限，产量有其最大值。在氮、磷、钾三个肥料要素中，尤其是氮肥的施用量受水分条件制约程度很大。其效益能否充分发挥与农田水分状况关系十分密切，不同的农田水分动

态过程、不同的灌溉用水量，同样的施肥量所获得的产量差异也很大。即，不同的灌溉供水状况下，施氮量与作物产量的响应关系是不同的。因此，选择施氮量和水分两个因子来进行葡萄水肥效应的研究，探讨节水条件下提高肥效并获得增产，为农田灌溉和施肥制度的制定提供理论依据。本文中，通过模型计算得到的最佳灌水量（8 736 m^3 hm^{-2}）和施肥量（390 kg hm^{-2}），与试验设计灌水量和施肥量处理有一定差异，而且葡萄属多年生果树，其土壤基肥对树体次年长势和产量也存在一定影响，因此，在水肥处理的设置、灌溉参数的确定以及水肥耦合对葡萄植株生长和产量形成的影响机理等方面，仍需要做深入的试验研究。

4 结　论

通过对不同水肥条件下葡萄园土壤耗水量和产量的监测结果显示，在葡萄各生育期耗水量上，果浆成熟期和果实膨大期较大，其次为花期和枝蔓成熟期，新梢生长期和萌芽期较少。在产量上，W_1F_1（38 221 kg hm^{-2}）最大，其次是W_2F_1（38 179 kg hm^{-2}）和W_2F_2（37 393 kg hm^{-2}），CK（29 276 kg hm^{-2}）仅大于W_3F_3（29 157 kg hm^{-2}）处理。利用水肥耦合效应的分析得到，在相同灌水水平下，高肥处理的产量最高，平均为36 210 kg hm^{-2}，低肥的平均产量最低，为31 548 kg hm^{-2}；在相同施肥水平下，中水的产量最高。说明葡萄在滴灌水肥条件下，节水不超过56%、节肥在25%左右时葡萄能获得最佳产量。以二元二次多项式回归数学模型拟合葡萄产量（Y）与灌水量（W）、施氮量（F）的关系，得到数学模型为：$Y=-9\ 197+10.04W-7.713F-0.000\ 6W^2+0.010\ 4F^2+0.000\ 9WF$，决定系数$R^2=0.94$，达到极显著水平。对数学模型求极值可得到最佳的灌水量和施氮量分别为8 736 m^3 hm^{-2}、390 kg hm^{-2}，最高产量可达到34 393 kg hm^{-2}。研究表明，水肥对葡萄的产量影响很大，合理增加灌水量能相应地增加产量，但过多的灌水同样会降低产量。利用数学模型与实际产量的对比结果，确定该地区滴灌葡萄适宜的灌溉定额在8 250～9 000 m^3 hm^{-2}，施肥水平在300～450 kg hm^{-2}时，可以获得较高的葡萄产量。

参 考 文 献

[1] 张克坤，刘凤之，王孝娣，等. 不同光质补光对促早栽培“瑞都香玉”葡萄果实品质的影响. 应用生态学报，2017，28（1）：115—126
Zhang K K，Liu F Z，Wang X D，et al. Effects of supplementary light with different wavelengths on fruit quality of ‘RuiduXiangyu’ grape under promoted cultivation（In Chinese）. Chinese Journal of Applied Ecology，2017，28（1）：115—126

[2] Sánchez Palomo E，Diaz-Maroto M C，González Vias M A,et al. Aroma profile of wines from Albillo and Muscat grape varieties at different stages of ripening. Food Control，2007，18（5）：398—403

[3] Mejia N，Hinrichsen P. A new,highly assertive scar marker potentially useful to assist selection for seedlessness in table grape breeding. Acta Horticulturae，2003，603：559—564

[4] 刘笑宏，郭淑华，牛彦杰，等. 8个葡萄品种的花色苷组分及含量分析. 果树学报，2017，34（4）：444—453
Liu X H，Guo S H，Niu Y J，et al. Analysis of anthocyanin compositions and contents in eight grape cultivars（In Chinese）. Journal of Fruit Science，2017，34（4）：444—453

[5] 姜彩鸽，王国珍，张怡，等. 不同葡萄品种对灰霉病菌胁迫的响应. 西北农业学报，2017，26（2）：262—273
Jiang C G，Wang G Z，Zhang Y，et al. Response of different grape cultivars to *botrytis cinerea* stress（In Chinese）. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica，2017，26（2）：262—273

[6] Cappellini R A，Cepoinis M J，Lightner G W. Disorders in table grape shipments to the New York market，1972-1984. Plant Diseaes，1986，70：1075—1079

[7] 王连君，王程翰，乔建磊，等. 膜下滴灌水肥耦合对葡萄生长发育、产量和品质的影响. 农业机械学报，2016，47（6）：113—119，92
Wang L J，Wang C H，Qiao J L，et al. Effects of water and fertilizer coupling on growth，yield and quality of grape under drip irrigation with film mulching（In Chinese）. Journal of Agricultural Machinery，2016，47（6）：113—119，92

[8] 王锐，孙权. 基于水肥一体化的酿酒葡萄高效栽培与效益分析. 农业机械学报，2016，47（10）：115—121
Wang R，Sun Q. High-efficiency cultivation and

benefit analysis of wine grape based on fertigation（In Chinese）. Journal of Agricultural Machinery，2016，47（10）：115—121

［9］ 杨艳芬，王全九，白云岗，等. 极端干旱地区滴灌条件下葡萄生长发育特征. 农业工程学报，2009，25（12）：45—50
Yang Y F，Wang Q J，Bai Y G，et al. Characteristics of grape growth under drip irrigation condition in extremely arid regions（In Chinese）. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2009，25（12）：45—50

［10］ 李淑芹，王全九. 垂直线源入渗土壤水分分布特性模拟. 农业机械学报，2011，42（3）：51—57
Li S Q，Wang Q J. Simulation of soil water distribution under vertical line source in filtration（In Chinese）. Journal of Agricultural Machinery，2011，42（3）：51—57

［11］ 王永杰，王全九，苏李君，等. 极端干旱区垂直线源灌方式对葡萄生长及水分利用效率的影响. 干旱地区农业研究，2012，30（3）：63—77
Wang Y J，Wang Q J，Su L J，et al. Effect of vertical line source irrigation method on grape growth and water use efficiency in extremely arid regions（In Chinese）. Agricultural Research in the Arid Areas，2012，30（3）：63—77

［12］ 王振华，权利双，何建斌. 极端干旱区水肥耦合对滴灌葡萄耗水及产量的影响. 节水灌溉，2014（6）：13—15
Wang Z H，Quan L S，He J B. Effect of water and fertilizer coupling on water consumption and yield of drip irrigation grape in extreme arid region（In Chinese）. Water Saving Irrigation，2014（6）：13—15

［13］ 黄英，安进强，张芮，等. 水肥调控对设施延后栽培葡萄产量和品质的影响. 干旱地区农业研究，2015，33（2）：191—195
Huang Y，An J Q，Zhang R，e tal. Effects of fertilizer - water regulation on quality and yield of greenhouse grape under delayed cultivation（In Chinese）. Agricultural Research in the Arid Areas，2015，33（2）：191—195

［14］ 何岸镕，张芮，安进强，等. 水肥调控对设施延后栽培葡萄生长特性的影响. 节水灌溉，2016（12）：27—31
He A R，Zhang R，An J Q，et al. Effects of fertigation treatment on growth characteristic of greenhouse grape under delayed phonological period（In Chinese）. Water Saving Irrigation，2016（12）：27—31

［15］ 王锐，孙权，郭洁，等. 不同灌溉及施肥方式对酿酒葡萄生长发育及产量品质的影响. 干旱地区农业研究，2012，30（5）：123—127
Wang R，Sun Q，Guo J，et al. Influence of irrigation and fertilization on the wine grape growth，yield and quality（In Chinese）. Agricultural Research in the Arid Areas，2012，30（5）：123—127

［16］ 朱洁，刘学军，陆立国，等. 宁夏贺兰山东麓酿酒葡萄滴灌水肥一体化试验研究. 节水灌溉，2016（8）：76—81
Zhu J，Liu X J，Lu L G，et al. Wine grapes at the eastern foot of Helan Mountain of Ningxia experimental study on integration of water and fertilizer of drip irrigation（In Chinese）. Water Saving Irrigation，2016（8）：76—81

［17］ 邓佳，张晓敏，严毅，等. 旱季不同水肥管理对葡萄柚果实营养品质的影响. 西北林学院学报，2014，29（2）：129—134
Deng J，Zhang X M，Yan Y，et al. Effects of water and fertilizer managements on nutritional quality the grape fruit in dry season（In Chinese）. Journal of Northwest Forestry University，2014，29（2）：129—134

［18］ 苏李君，王全九，吴忠东. 滴灌毛管布置方式对极端干旱区葡萄地上生物量的影响. 干旱区研究，2016，33（5）：1012—1019
Su L J，Wang Q J，Wu Z D. Effect of layout styles of drip irrigation on grape above ground biomass in an extremely arid area（In Chinese）. Arid Zone Research，2016，33（5）：1012—1019

［19］ 王永杰，张江辉，王全九，等. 极端干旱区滴灌葡萄适时控制灌溉试验研究. 灌溉排水学报，2013，32（3）：101—104
Wang Y J，Zhang J H，Wang Q J，et al. Study on the timely controlled drip irrigation of grape in extremely arid region（In Chinese）. Journal of Irrigation and Drainge，2013，32（3）：101—104

［20］ 南庆伟，王全九，苏李君. 极端干旱区滴灌条件下葡萄茎流变化规律研究. 干旱地区农业研究，2012，30（6）：60—66
Nan Q W，Wang Q J，Su L J. Experiments on variation of grape sap flow under drip irrigation in extremely arid areas（In Chinese）. Agricultural Research in the Arid Areas，2012，30（6）：60—66

［21］ 胡安焱，董新光，魏光辉，等. 滴灌条件下水肥耦合对干旱区红枣产量的影响. 灌溉排水学报，2010，29（6）：60—63
Hu A Y，Dong X G，Wei G H，et al. Coupling effects of water and fertilizer on yield of Chinese jujube under

drip irrigation in the arid area （In Chinese）. Journal of Irrigation and Drainage，2010，29（6）：60—63

［22］ 郭绍杰，吴新宏，李铭，等. 水肥耦合对新疆克瑞森无核葡萄产量的影响. 江苏农业科学，2013，41（10）：125—126
Guo S J，Wu X H，Li M，et al. Effects of water and fertilizer coupling on yield of Xinjiang Kelixin seedless grape （In Chinese）. Journal of Jiangsu Agricultural Sciences，2013，41（10）：125—126

［23］ 郑睿，康绍忠，胡笑涛，等. 水氮处理对荒漠绿洲区酿酒葡萄光合特性与产量的影响. 农业工程学报，2013，29（4）：133—141
Zheng R，Kang S Z，Hu X T，et al. Effects of water and nitrogen conditions on the diurnal variation of Photosynthesis characteristic and yield of grape vine in arid oasis region（In Chinese）. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2013，29（4）：133—141

［24］ 周兴本，郭修武，王丛丛，等. 水肥配比对葡萄生长发育及^{15}N-硫酸铵吸收分配及利用的影响. 干旱地区农业研究，2015，33（2）：183—190
Zhou X B，Guo X W，Wang C C，et al. Effects of water and fertilizer ratio on the growth and absorption distribution and utilization of ^{15}N-ammonium sulfate of Grape （In Chinese）. Agricultural Research in the Arid Areas，2015，33（2）：183—190

［25］ 孙美，李栋梅，董业雯，等. 养分供应量对玫瑰香葡萄矿质元素和水分吸收的影响. 西北植物学报，2017，37（3）：526—533
Sun M，Li D M，Dong Y W，et al. Absorption of mineral elements and water in muscathambrug grape with different nutrient supply （In Chinese）. Acta Botanica BorealL-Occidentalla Sincia，2017，37（3）：526—533

［26］ Keller M，Kummer M，Vasconcelos M C. Reproductive growth of grape vines in response to nitrogen supply and root stock. Australian Journal of Grape and Wine Research，2001，7（1）：12—18

［27］ Legind C N，Kennedy C M，Rein A，et al. Dynamic plant uptake model applied for drip irrigation of an insecticide to pepper fruit plants. Pet Management Science，2011，67（5）：521—527

［28］ 王探魁，吉艳芝，张丽娟，等. 不同产量水平葡萄园水肥投入特点及其土壤、树体养分特征分析. 水土保持学报，2011，25（3）：136—141
Wang T K，Ji Y Z，Zhang L J，et al. Characteristics of water and fertilizer in puts in different production levels wine yards and soil-tree nutrient characteristics analyse（In Chinese）. Journal of Soil and Water Conservation，2011，25（3）：136—141

［29］ 杜军，沈润泽，马术梅，等. 宁夏贺兰山东麓葡萄滴灌灌溉水肥一体化技术研究. 中国农村水利水电，2013（8）：65—69，72
Du J，Shen R Z，Ma S M，et al. A study of the technology of the drip fertigation of wine grape in the east-foot of Ningxia Helan Mountain （In Chinese）. China Rural Water and Hydropower，2013（8）：65—69，72

Coupling Effect of Water and Fertilizer on Grape under Drip Irrigation in Extremely Arid Regions

ZHANG Jianghui　LIU Hongbo†　BAI Yungang　DING Ping
（*Xinjiang Research Institute of Water Resources and Hydropower*，*Urumqi* 830049，*China*）

Abstract　【Objective】Grape plantation is a special pillar industry of the Turpan-Hami region of Xinjiang. As the region is extremely arid, short of rain, and very high in evapotranspiration rate, the grape plantations in that region are often perplexed by problems in water and nutrient management, such as over-dozed irrigation, high cost with low efficiency, etc.. To solve these problems, a field experiment on drip fertigation was conducted to explore coupling effect of water and fertilizer on grape yield, and further on coordinating and complementary effects of the two, in an attempt to work out a quota for drip irrigation and a rate for fertilization suitable to the grape plantations in the region.【Method】The experiment used a technique integrating drip irrigation with fertilization and was designed to have three levels of irrigation quota, i.e. W_1, high volume (10 950 $m^3 hm^{-2}$); W_2, moderate volume (5 500 $m^3 hm^{-2}$) and W_3, low volume

(5 500 m^3 hm^{-2}), three levels of fertilization rate, i.e. F_1, high rate(750 kg hm^{-2}); F_2, moderate rate(450 kg hm^{-2}) and F_3, low rate(300 kg hm^{-2}), and a control, CK (conventional furrow irrigation at 12 750 m^3 hm^{-2} and no sidedressing). Fertilizer was applied in the sprouting period (the first ten-day period of May), the fruit bearing period (the first ten-day period of June), and early fruit maturing period (the first ten-day period of July), once each time, making up a total of 3 times a year. So, the fertilizer applied to the fertilization treatment were divided into three portions in line with the ratio of 1:2:2, and applied sequentially, that is. 60 kg hm^{-2}, 120 kg hm^{-2} and 120 kg $hm^{-2}$for Treatment F_3, 90 kg hm^{-2}, 180 kg hm^{-2} and 180 kg hm^{-2} for Treatment F_2, and 150 kg hm^{-2}, 300 kg hm^{-2} and 300 kg $hm^{-2}$for Treatment F_1. 【Result】Results show that water consumptions at all the growth stages exhibited a trend of rising first and then falling in all the treatments, and the total water consumption was not only related to the quota of water irrigated, but also to water consuming capability of the grape vine per se during its growth period and length of its growing season. The plants in the fruit bulging and maturing periodswere highest in water consumption and then in the blooming period and the branch and tendril mature period, and the lowest in the sprouting and new shoot growing periods. The grape yield in Treatment W_1F_1, W_1F_2, W_1F_3, W_2F_1, W_2F_2, W_2F_3, W_3F_1, W_3F_2, W_3F_3 and CK was 38 221 kg hm^{-2}, 31 844 kg hm^{-2}, 33 213 kg hm^{-2}, 38 179 kg hm^{-2}, 37 393 kg hm^{-2}, 32 273 kg hm^{-2}, 32 230 kg hm^{-2}, 28 743 kg hm^{-2}, 29 157 kg hm^{-2} and 29 276 kg hm^{-2} respectively. The relations of grape yield (Y) with water consumption (W), and nitrogen rate (F) could well be described with a binary quadratic polynomial, expressed as: Y=-9 197+10.04W-7.713F-0.000 6W^2+0.010 4F^2+0.000 9WF, from which extremes were worked out, indicating that the optimal irrigation quota and nitrogen application rateis 8 736 kg hm^{-2} and 390 kg hm^{-2}, respectively, that may bring the yield up to as high as34 393 kg hm^{-2}.【Conclusion】With the same irrigation dosage, the treatments, the highest in fertilization rate were the highest in yield, averaged to be 36 210 kg hm^{-2}, and the lowest in fertilization rate, the lowest in yield, averaged to be 31 548 kg hm^{-2}. With the same fertilization rate, the treatments, the highest in irrigation dosage, were the highest in yield, which meant that water and fertilizer has great positive effects on grape yield. The yield could be increased by increasing irrigation dosage within a reasonable range, and the yield would decrease once irrigation was done beyond the range. However, optimum grape yield could still be obtained with the irrigation dosage cut off by no more than 56%, and fertilization rate by around 25%. Comparison of the predicted yield using the mathematical model with the measured yield shows that grape yield in this region could be maintained at a relatively high level with the irrigation quota set to be 8 250~9 000 m^3 hm^{-2} and fertilization rate to be 300~450 kg hm^{-2}.

Key words Grape; Water consumption; Nitrogen consumption; Highest yield; Mathematical model

（责任编辑：陈荣府）