



干旱胁迫下栽植模式对葡萄根际土壤湿度和光合效率的影响

郭金丽, 李晓艳, 李志伟, 李连国*

(内蒙古农业大学 农学院, 呼和浩特 010019)

摘 要: 为了解西北干旱地区深畦栽植模式对葡萄光合效率的影响, 试验以鲜食葡萄品种‘京亚’和‘红地球’为材料, 以葡萄生产中常用的平畦栽植模式为对照, 研究了深畦栽植模式对葡萄根际土壤湿度及光合效率的影响。结果显示: (1) 干旱胁迫过程中, 2 种栽植模式的葡萄根际土壤相对含水量、气孔导度 (G_s)、净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r)、水分利用效率 (WUE) 均持续下降, 但深畦栽植的土壤相对含水量和 WUE 较平畦栽植下降缓慢, 且在胁迫后期严重干旱时两者均明显高于平畦栽植。(2) 根据 Logistic 模型对土壤相对含水量与 P_n 、 G_s 、 C_i 、 T_r 的关系的曲线拟合结果, 发现深畦栽植和平畦栽植下土壤相对含水量区间分别为 30%~50% 和 40%~60% 时显著影响葡萄的光合水分效率。(3) 以 Logistic 方程的拐点为根际土壤湿度阈值, 发现深畦栽植和平畦栽植葡萄的根际土壤湿度阈值分别为 41.76% 和 52.60%, 且此时葡萄光合水分效率最高。研究表明, 在干旱逆境下, 与平畦栽植相比, 深畦栽植下能够有效减缓根际土壤水分散失, 保持较高的根际土壤含水量, 而且能够在土壤含水量较低条件下实现更高的光合水分效率, 深畦栽植是干旱地区理想的葡萄抗旱节水栽植模式; 深畦栽植下, 葡萄品种‘京亚’和‘红地球’的根际土壤相对含水量分别在 40.19% 和 43.32% 时叶片光合水分效率最高, 且两葡萄品种光合作用的适宜土壤相对含水量范围分别是 40.19%~50% 和 43.32%~50%。

关键词: 西北干旱地区; 葡萄; 深畦栽植; 土壤湿度; 水分利用; 光合效率

中图分类号: Q945.79; S663.1 **文献标志码:** A

Effect of Different Cultivation Planting Patterns on Rhizosphere Soil Moisture and Photosynthetic Efficiency under Drought Stress in Grapes

GUO Jinli, LI Xiaoyan, LI Zhiwei, LI Lian'guo*

(College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China)

Abstract: The study aimed to explore the effect of deep-furrow planting pattern on photosynthetic efficiency of grape in the northwest arid region. The effects of deep-furrow planting pattern on the rhizosphere soil moisture and photosynthetic efficiency were studied with flat-furrow planting pattern as control using the table grape types of ‘Jingya’ and ‘Red globe’ as testing materials. The results showed: (1) under drought stress, the rhizosphere soil relative water content, net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s), Inter-cellular CO_2 concentration (C_i), transpiration rate (T_r) and water utilization efficiency (WUE) of grapevine in both deep-furrow planting and flat-furrow planting continued to drop; However, the rhizosphere soil relative water content and WUE under deep-furrow planting dropped at a slower rate than those under flat-furrow planting. In addition, during severe drought (towards the later part of

收稿日期: 2017-12-20; 修改稿收到日期: 2018-05-15

基金项目: 国家自然科学基金(31501747); 内蒙古呼和浩特农业重大科技专项(2015-农-重-7-4)

作者简介: 郭金丽(1972—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事果树生理生态及栽培等研究。E-mail: guojinli1111@163.com

* 通信作者: 李连国, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事果树生理生态及栽培等研究。E-mail: nmndllg@qq.com

drought stress), the rhizosphere soil relative water content and WUE under deep-furrow planting were significantly higher than those under flat-furrow planting. (2) Based on a logistic model, curve fitting was performed for the correlation between the soil relative water content to P_n , Cond, C_i , and T_r , and the following was revealed: relative water contents of 30%—50% and 40%—60% were the two ranges that significantly affected the photosynthetic efficiency in grapevines under deep-furrow planting and flat-furrow planting, respectively. (3) The inflection point of the logistic equation was defined as the soil moisture threshold. The rhizosphere soil moisture threshold was the point of highest efficiency in water utilization and photosynthesis for grapevine. Test results showed that the threshold of rhizosphere soil moisture in deep-furrow planting and flat-furrow planting were 41.76% and 52.60%, respectively. The above results apparently showed that under drought stress when compared with flat-furrow planting, water loss in rhizosphere soil could be effectively reduced in grapevines planted in deep furrow so that the WUE was higher in photosynthesis taking place in grapevines and higher photosynthesis efficiency could be achieved even when soil moisture was lower. Thus, deep-furrow planting is an ideal drought-resistant planting pattern for cultivating grapes in arid areas. In deep-furrow planting, the test results suggested that the rhizosphere soil relative water content of 43.43% and 40.19% were the most effective soil moisture that generated the highest WUE during photosynthesis in the leaves of ‘Jingya’ and ‘Red Globe’, respectively; the appropriate soil moisture range for ‘Jingya’ and ‘Red Globe’ were 43.32%—50% and 40.19%—50%, respectively.

Key words: northwest arid region; grape; deep-furrow planting; soil moisture; water utilization; photosynthetic efficiency

中国是全世界水资源极度匮乏的国家之一,而中国西北优质葡萄产区大多处于干旱半干旱地区;水资源短缺,土壤干旱等问题严重制约着中国西北葡萄产业的健康发展^[1]。长期以来,西北绝大部分葡萄产区一直引用内地常规平畦栽植模式,该栽植模式具有葡萄种植简单,土壤耕作方便的优点,但在西北干旱风大地区,平畦栽植存在土壤水分蒸发快、植株蒸腾剧烈、水分消耗量大、水分利用效率低以及冬季防寒困难等严峻问题^[2-3]。内蒙古农业大学葡萄课题组依据中国西北干旱地区的气候和水资源特点及葡萄产业势必进行节水高效栽培的需求,设计了西北干寒优质葡萄产区抗旱节水深畦栽植模式,并对该栽植模式的抗寒抗旱、优质丰产的生态生理学机理进行了系统的研究,前期试验已确定深畦栽植模式可以明显提高该区冬季葡萄的抗寒性^[4]。本试验以常规平畦栽植为对照,探索深畦栽植模式对葡萄根际土壤湿度、叶片光合作用中水分利用及光合效率的影响规律,为西北干旱沙地抗旱节水、优质高效的葡萄深畦栽植模式的建立奠定理论基础。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验在内蒙古大地生态农林科技研究发展中心试验基地进行,该基地位于内蒙古呼和浩特市赛罕区大黑河北岸风沙地段,年平均气温 6.5℃,≥10℃年活动积温 2 800℃,年降水量 200~400 mm,年

平均日照时数 2 877 h,无霜期约 130 d;土壤为沙质土,有机质含量 0.5%,pH7.0。

试验选用鲜食葡萄品种‘京亚’(*Vitis vinifera* L. cv. Jingya)和‘红地球’(*Vitis vinifera* L. cv. Red globe)作为试材。所选植株均为以贝达(Beta, *V. riparia*×*V. labrusca*)为砧木、无病虫害且长势一致的 2 年生葡萄苗木。

1.2 试验方法

1.2.1 栽植模式设计及干旱胁迫处理 葡萄深畦栽植模式,畦深(畦内栽植面距地面)0.5 m,畦底宽 0.8 m,畦口宽 1.2 m。采用双行单壁篱架栽植,株距 0.5 m,行距 0.6 m,南北行向。以常规平畦栽植为对照,其架式、株行距等与深沟栽培方法一致。

试验区采用透光性良好的塑料薄膜设置防雨棚,四周保持良好通风。试验设 3 次重复,每次重复 3 株葡萄,本试验 2 种栽植模式、2 个品种共 36 株。试验于 2015 年 7 月 15 日开始持续干旱胁迫处理,即对 2 种栽植模式同时进行 1 次充分灌水后停止供水,停止供水持续 30 d,期间每 5 d 取样进行 1 次相关指标测定,共测 7 次。每次测定时土壤相对含水量均于上午 10:00 进行;光合生理指标从 6:00~20:00 每隔 2 h 进行 1 次(每天共测 8 次),计算 8 次的平均值作为当天的测定值。

1.2.2 指标测定 (1) 根际土壤相对含水量:采用土壤水分测量仪测定,测定土壤深度为 30 cm,重复 3 次,并用烘干法进行校正。(2) 叶片光合作用参

数:每次选取 2 品种葡萄的新梢,从基部数第 3~5 节位成熟无病虫害的叶片进行活体测定。叶片净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间二氧化碳浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r)采用 Li-6400 光合仪开放式气路测定^[5],水分利用效率(WUE)采用公式计算。重复测定 5 次。首次测完叶片要对其编号,并挂牌标记以便下次测定。

1.3 数据分析处理

用 Excel 和 SAS 9.0 软件进行数据分析处理。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫下不同栽植模式对葡萄根际土壤相对含水量的影响

深畦栽植和平畦栽植的葡萄根际土壤相对含水量随着干旱胁迫程度加重均表现出持续下降的趋势,但两者下降速度和幅度具有明显的差异(表 1)。其中,在干旱胁迫 30 d 后,深畦栽植和平畦栽植葡萄根际土壤相对含水量分别为 30.59%和 15.61%,与胁迫前(0 d)相比分别显著下降了 62.44%和 81.33%;在整个干旱胁迫期间,深畦栽植的土壤相对含水量下降较平畦栽植缓慢,且均始终显著高于同期平畦栽植。说明干旱条件下深畦栽植能有效减缓葡萄根际土壤水分散失,具有更强的保水能力。

2.2 干旱胁迫下不同栽植模式对葡萄叶片光合气体交换参数的影响

表 2 显示,随着干旱胁迫程度加重,不同栽植模式下 2 种葡萄叶片的 P_n 、 G_s 、 T_r 变化总趋势相似,均表现为持续下降,但两品种间和模式间下降的程度均明显不同。干旱胁迫结束时,深畦栽植的‘京亚’和‘红地球’叶片 P_n 与胁迫前相比分别下降了 63.87%和 56.93%,它们的 G_s 则分别下降了 59.02%和 39.62%, T_r 则相比分别下降了 64.52%和 55.40%;同期平畦栽植的‘京亚’和‘红地球’叶片 P_n 与胁迫前相比分别下降了 89.04%和 89.77%, G_s 则分别下降了 75.45%和 60.48%, T_r

分别下降了 85.12 了%和 80.52%。各指标胁迫后降幅均表现为平畦栽植明显大于深畦栽植,而品种‘京亚’又大于‘红地球’。同时,干旱胁迫期间,深畦栽植下 2 种葡萄叶片的 P_n 、 G_s 、 T_r 均始终高于同期的平畦栽植;其中,深畦栽植下‘京亚’和‘红地球’叶片 G_s 分别于胁迫 10 d 后和 15 d 后极显著高于平畦栽植,而深畦栽植下 2 种葡萄叶片 P_n 和 T_r 均于胁迫 10 d 后极显著高于平畦栽植。

另外,随着干旱胁迫持续,不同栽植模式下 2 种葡萄叶片的 C_i 持续升高。胁迫结束时,深畦栽植的‘京亚’和‘红地球’叶片 C_i 与胁迫前相比分别升高了 65.44%和 127.25%,平畦栽植则分别相应升高了 79.47%和 157.72%;胁迫期间,深畦栽植下 2 种葡萄叶片的 C_i 均低于同期的平畦栽植。

此外,随着干旱胁迫程度加重,2 种栽植模式下 2 种葡萄叶片 WUE 均持续降低,深畦栽植的 2 种葡萄叶片 WUE 下降较平畦栽植缓慢;胁迫结束时,深畦栽植的‘京亚’和‘红地球’叶片 WUE 与胁迫前相比分别降低了 12.40%和 28.49%,平畦栽植则分别降低了 55.00%和 73.98%。在干旱胁迫期间,深畦栽植的 2 种葡萄叶片 WUE 均高于同期的平畦栽植,深畦栽植的‘京亚’和‘红地球’ WUE 分别于胁迫 15 d 后和 10 d 后极显著高于平畦栽植(表 2)。

综合上述结果可知,深畦栽植的各葡萄品种叶片 P_n 、 G_s 、 T_r 和 WUE 在干旱胁迫期间均高于平畦栽植,尤其在后期严重干旱胁迫时明显高于平畦栽植,干旱逆境下深畦栽植葡萄与平畦栽植葡萄相比具有更高效的水分利用效率和光合能力。

2.3 干旱胁迫下不同栽植模式根际土壤湿度与葡萄光合效率的关系

葡萄叶片光合作用与其根际土壤湿度密切相关。根据葡萄根际土壤相对含水量与光合参数的关系建立回归模型,发现不同栽植模式葡萄根际土壤相对含水量与叶片 P_n 、 G_s 、 C_i 、 T_r 的关系均符合 Logistic 方程,其中相关系数的检验均达到极显著水平

表 1 干旱胁迫下不同栽植方式葡萄根际土壤相对含水量的变化							
Table 1 The change of rhizosphere soil relative water content at different cultivation patterns under drought stress							
栽植方式 Cultivation pattern	干旱胁迫时间 Drought stress days/d						
	0	5	10	15	20	25	30
深畦 Deep-furrow	83.79aA	70.79aA	55.63aA	45.57aA	39.53aA	35.87aA	32.59aA
平畦 Flat-furrow	83.59aA	60.29bA	40.16bB	30.81bB	23.52Bb	18.72bB	15.61bB

注:不同小写和大写字母分别代表同期栽培模式间在 0.05 和 0.01 水平存在显著性差异;下同
Note: The different normal and capital letters within same stage indicate significant difference among patterns at 0.05 and 0.01 levels, respectively. The same as below

表 2 干旱胁迫和不同栽植模式下葡萄叶片光合参数的变化

Table 2 The photosynthetic parameters of grape with different cultivation patterns under drought stress

光合参数 Photosynthetic parameter	品种 Variety	栽植模式 Cultivation pattern	干旱胁迫时间 Drought stress days/d						
			0	5	10	15	20	25	30
净光合速率 P_n	京亚 Jingya	深畦 Deep-furrow	14.08aA	12.33aA	10.24aA	8.17aA	6.87aA	5.82aA	5.09aA
		平畦 Flat-furrow	13.95aA	10.62aA	5.81bB	3.52bB	2.20bB	1.73bB	1.53bB
	红地球 Red globe	深畦 Deep-furrow	14.35aA	13.38aA	11.72aA	8.10aA	7.64aA	6.91aA	6.18aA
		平畦 Flat-furrow	13.93aA	11.40aA	5.31bB	3.41bB	2.09bB	1.73bB	1.43bB
气孔导度 G_s	京亚 Jingya	深畦 Deep-furrow	0.24aA	0.22aA	0.19aA	0.16aA	0.14aA	0.11aA	0.10aA
		平畦 Flat-furrow	0.22aA	0.17bA	0.11bB	0.09bB	0.08bB	0.07bB	0.06bB
	红地球 Red globe	深畦 Deep-furrow	0.21aA	0.19aA	0.17aA	0.17aA	0.15aA	0.13aA	0.13aA
		平畦 Flat-furrow	0.21aA	0.16aA	0.13aA	0.11bB	0.10bB	0.10bB	0.08bB
蒸腾速率 T_r	京亚 Jingya	深畦 Deep-furrow	7.08aA	6.70aA	5.50aA	4.39aA	3.30aA	2.69aA	2.51aA
		平畦 Flat-furrow	6.88aA	4.67bB	2.87bB	1.93bB	1.17bB	1.03bB	1.02bB
	红地球 Red globe	深畦 Deep-furrow	6.79aA	6.55aA	5.50aA	4.41aA	3.84aA	3.25aA	3.03aA
		平畦 Flat-furrow	6.60aA	4.79bB	3.14bB	2.66bB	1.93bB	1.31bB	1.29bB
水分利用效率 WUE	京亚 Jingya	深畦 Deep-furrow	57.83aA	56.67aA	52.77aA	52.54aA	48.09aA	53.56aA	50.66aA
		平畦 Flat-furrow	62.25aA	62.18aA	52.30aA	38.32bB	26.47bB	26.54bB	28.02bB
	红地球 Red globe	深畦 Deep-furrow	67.75aA	69.50aA	68.01aA	48.92aA	49.69aA	52.18Aa	48.45aA
		平畦 Flat-furrow	66.29aA	69.33aA	40.32bB	30.55bB	20.31bB	17.76bB	17.25bB

($P<0.01$;表 3)。

利用模型进行葡萄根际土壤相对含水量与叶片 P_n 、 G_s 、 C_i 、 T_r 的曲线拟合。可以看出,2 种栽植模式下 2 种葡萄土壤相对含水量与 P_n 、 G_s 、 C_i 和 T_r 的关系均呈拉长的“S”型曲线,随根际土壤相对含水量的增加, P_n 、 G_s 、 T_r 逐渐增大,而 C_i 逐渐减小(图 1)。在不同的根际土壤相对含水量下, P_n 、 G_s 、 T_r 和 C_i 的变化分为 3 个阶段:在深畦栽植和平畦栽植的土壤相对含水量分别取 0~30%和 0~40%区间时,葡萄叶片 P_n 、 G_s 、 T_r 和 C_i 变化微小;而当深畦栽植和平畦栽植的土壤相对含水量分别取 30%~50%和 40%~60%区间时,4 项叶片光合参数的变化幅度极大,栽植模式间差异达到极显著水平;之后,在深畦栽植和平畦栽植的土壤相对含水量分别高于 50%和 60%时,4 项光合参数的变化又趋于平缓。以上结果说明,深畦栽植和平畦栽植葡萄光合作用受到显著影响的土壤相对含水量范围分别为 30%~50%和 40%~60%,也就是光合水分效率最高的土壤湿度区间。

另外,在这两个土壤湿度区间内均存在着一个转折点(即 Logistic 方程的拐点^[6-9]),它代表了对葡萄光合作用参数 P_n 、 G_s 、 C_i 、 T_r 产生最大影响的根际土壤湿度点值。在该点土壤水分微小的变化就会

对葡萄光合作用产生很大的影响,该点之后随着土壤湿度的增加,光合作用也在增强,但增加速度减小。说明该点是葡萄光合水分效率最高的土壤湿度。因此,定义模型拐点值为根际土壤湿度阈值,作为土壤湿度影响光合作用的临界值。从表 3 计算 4 个光合指标 Logistic 方程拐点的平均值可得:‘京亚’深畦栽植和平畦栽植的根际土壤湿度阈值分别为 43.32%、53.54%;‘红地球’深畦栽植和平畦栽植的根际土壤湿度阈值分别为 40.19%、51.66%。深畦栽植和平畦栽植的根际土壤湿度平均阈值分别为 41.76%和 52.60%。2 种葡萄在深畦栽植模式下的根际土壤湿度阈值均低于平畦栽植。可见,深畦栽植葡萄光合作用对土壤湿度的需求低于平畦栽植,深畦栽植模式能在土壤相对湿度较低时即可实现葡萄较高的光合效率。

3 讨 论

3.1 深畦栽植模式下葡萄根际土壤湿度和光合效率的变化特征

植物正常生长代谢所需的水分由根际土壤提供,根际土壤水分的变化对植物光合作用产生重要的影响^[10-11]。本试验中,随着水分胁迫程度加重,深畦栽植和平畦栽植的葡萄根际土壤相对含水量均

表 3 干旱胁迫下不同栽植方式根际土壤湿度与葡萄光合效率的相关分析

Table 3 The correlation between rhizosphere soil moisture and photosynthetic efficiency of grapes at different cultivation patterns under drought stress

品种 Variety	光合参数 Photosynthetic parameter	栽植方式 Cultivation pattern	拟合方程 Logistic fitting equation	相关系数 R^2 Correlation coefficient	拐点 x Inflection point $x/\%$
京亚 Jingya	P_n	深畦 Deep-furrow	$y=15.384/(1+11.692e^{-0.0555x})$	0.998 **	44.29
		平畦 Flat-furrow	$y=15.370/(1+26.744e^{-0.0672x})$	0.999 **	48.90
	G_s	深畦 Deep-furrow	$y=0.2954/(1+6.0693e^{-0.0398x})$	0.962 **	45.33
		平畦 Flat-furrow	$y=0.3135/(1+7.2694e^{-0.0356x})$	0.992 **	55.68
	C_i	深畦 Deep-furrow	$y=416.53/(1+0.5415e^{0.0149x})$	0.981 **	41.20
		平畦 Flat-furrow	$y=402.38/(1+0.3621e^{0.0178x})$	0.994 **	57.06
	T_r	深畦 Deep-furrow	$y=7.4232/(1+19.5527e^{-0.0704x})$	0.992 **	42.47
		平畦 Flat-furrow	$y=8.0311/(1+18.4233e^{-0.0555x})$	0.994 **	52.50
红地球 Red globe	P_n	深畦 Deep-furrow	$y=15.491/(1+9.527e^{-0.0566x})$	0.983 **	39.85
		平畦 Flat-furrow	$y=15.258/(1+29.845e^{-0.0704x})$	0.995 **	48.51
	G_s	深畦 Deep-furrow	$y=0.2908/(1+2.3255e^{-0.0212x})$	0.952 **	39.81
		平畦 Flat-furrow	$y=0.3064/(1+3.6536e^{-0.0243x})$	0.993 **	53.40
	C_i	深畦 Deep-furrow	$y=411.15/(1+0.3865e^{0.0227x})$	0.909 **	41.88
		平畦 Flat-furrow	$y=403.06/(1+0.2015e^{0.0296x})$	0.993 **	54.19
	T_r	深畦 Deep-furrow	$y=7.6026/(1+7.1084e^{-0.0502x})$	0.972 **	39.23
		平畦 Flat-furrow	$y=8.0000/(1+10.232e^{-0.0460x})$	0.989 **	50.55

注: x 为土壤相对含水量, y 为光合参数; ** 表示相关性达到 0.01 显著性水平
Note: x refers for the soil relative water content, y refers for photosynthetic parameters; ** represent the correlation significance at 0.01 level

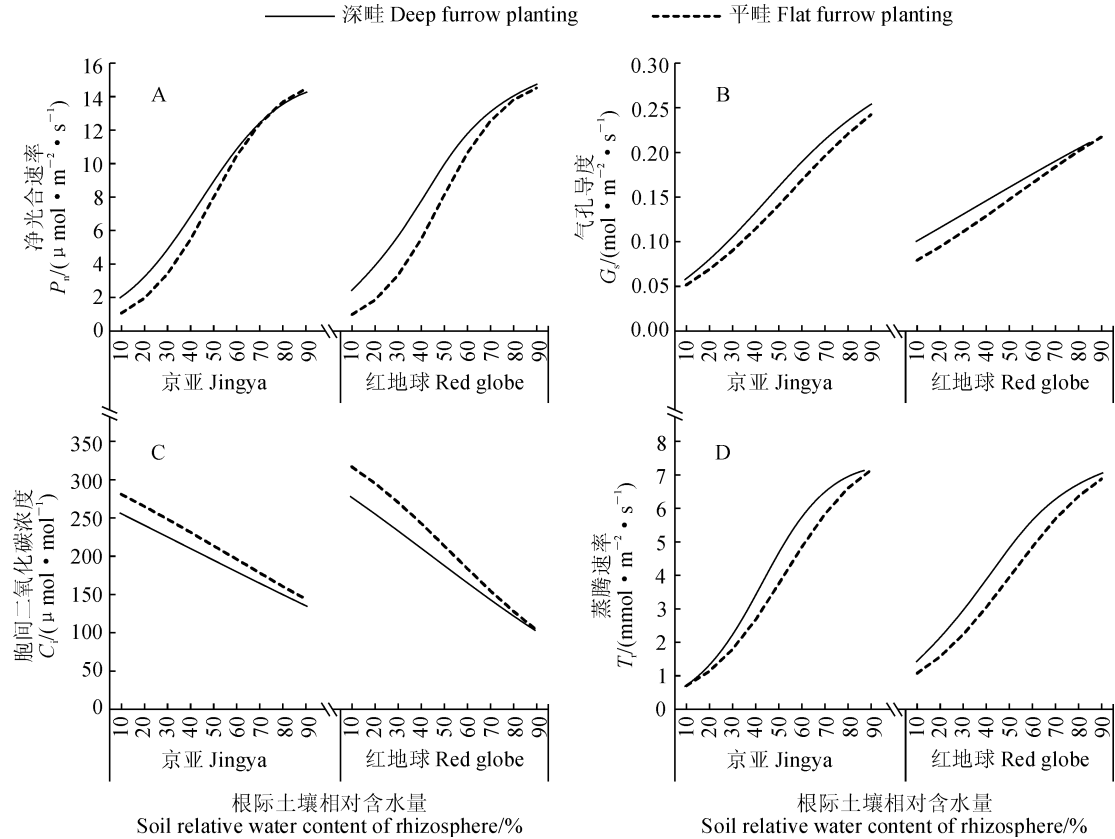


图 1 干旱胁迫下不同栽植模式根际土壤相对含水量与葡萄叶片净光合速率(A)、气孔导度(B)、胞间二氧化碳浓度(C)、蒸腾速率(D)的曲线拟合
Fig. 1 The curve fitting of soil relative water content and P_n (A), G_s (B), C_i (C), T_r (D) at different cultivation patterns under drought stress

表现为持续下降,但深畦栽植的土壤相对含水量下降较平畦栽植缓慢,且最终深畦栽植的土壤相对含水量极显著高于平畦栽植。胁迫结束时,深畦栽植葡萄根际土壤相对含水量为 30.59%,葡萄仍生长正常;平畦栽植土壤相对含水量仅为 15.61%,葡萄叶片呈现萎缩下垂。以上干旱胁迫下土壤水分变化及葡萄生长表现说明,干旱逆境下,与常规平畦栽植相比,葡萄采用深畦栽植在减少根际土壤水分损耗方面具有明显的优势,能有效减缓根际土壤水分散失,维持较高的根际土壤湿度,为葡萄生长提供更有利的水分条件。

干旱胁迫对植物光合作用的限制包括气孔和非气孔因素,气孔限制指干旱胁迫使气孔导度下降, CO_2 进入叶片受阻而使光合能力下降;干旱使叶绿体结构发生变化,光合色素降解,叶肉细胞光合活性降低引起同化力不足,从而导致光合能力下降则属于非气孔限制^[12-13]。许多研究认为轻度和中度干旱条件下,植物光合作用主要受气孔因素限制,重度干旱胁迫下主要受非气孔因素限制^[14]。 G_s 、 P_n 、 T_r 是反映植物光合能力的主要生理指标, G_s 是叶片与环境进行气体交换的关键限制因子, P_n 、 T_r 均受到气孔的控制, G_s 与 P_n 、 T_r 呈正相关^[15]。众多研究表明:干旱胁迫下通常气孔因素比非气孔因素对胁迫更敏感,土壤含水量下降,首先引起植物部分气孔关闭, G_s 下降,从而引起 P_n 和 T_r 下降^[16]。 WUE 以 P_n 和 T_r 的比值来表示,可以综合反映植物叶片光合作用过程中对水分的利用,是干旱地区农业生产中评价和选择植物种类和栽培模式的一项重要指标^[17-18],一般 WUE 越大表明植物种类或栽培模式的水分利用效率越高,节水能力越强^[19-24]。

本试验结果显示干旱胁迫下深畦栽植葡萄叶片的 G_s 、 P_n 、 T_r 、 WUE 在整个胁迫期间均高于平畦栽植,尤其在后期严重干旱胁迫时明显高于平地栽植。可见,相对于平畦栽植,干旱条件下采用深畦栽植葡萄能有效减缓根际土壤水分散失,维持较好的根际土壤湿度,为葡萄进行光合作用提供较好的土壤水分条件,有利于保持较高的 P_n 和较低的 T_r ,从而导致深畦栽植葡萄叶片保持更高的 WUE 。因此,干旱逆境下,深畦栽植葡萄具有较高的水分利用效率,从而实现更高效的光合作用。

3.2 深畦栽植模式下根际土壤湿度与葡萄叶片光合效率的关系

在已明确干旱逆境中葡萄采用深畦栽植可以维

持较好的土壤湿度和具有较高的水分利用效率的基础上,本试验进一步探讨了显著影响葡萄光合作用的土壤湿度区间和土壤湿度阈值。有关此方面的文献研究极少。李连国等^[25]之前曾研究了根际土壤湿度与葡萄叶片水分代谢的关系(试验材料为‘贝达’葡萄,采用平畦栽植模式),建立了根际土壤湿度与叶片水势、气孔扩散阻力、蒸腾速率的 Logistic 方程,方程的拐点被定义为根际土壤湿度阈值,阈值为 52.15%;并指出利用平畦栽植葡萄时土壤湿度不应低于 52.15%。

本研究建立了根际土壤湿度与 P_n 、 G_s 、 C_i 、 T_r 的 Logistic 方程,根据 Logistic 模型进行葡萄土壤相对含水量与 4 项光合参数的曲线拟合显示: P_n 、 G_s 、 C_i 、 T_r 均随土壤相对含水量的变化呈拉长的“S”型曲线,光合效率会随着土壤湿度的升高而增加,但并不会无限增加,当土壤湿度达到一定程度后光合效率逐渐趋于稳定。由此,本研究得到深畦栽植下显著影响葡萄光合效率的土壤相对含水量区间为 30%~50%,而平畦栽植为 40%~60%,并进一步得出深畦栽植和平畦栽植的根际土壤湿度阈值分别为 41.76%和 52.60%。综合 2 种栽植模式下显著影响葡萄光合效率的土壤湿度区间和土壤湿度阈值可以看出,与平畦栽植相比,深畦栽植葡萄光合作用对土壤湿度的需求较低,深畦栽植下相对较低的土壤湿度即可达到相对较高的光合效率;深畦栽植模式可以协调葡萄光合作用和水分消耗之间的关系,具有较高的水分利用效率和光合效率,是干旱地区进行葡萄抗旱节水生产的理想模式。

在生态学上,土壤湿度阈值是葡萄进行光合作用时水分利用最有效的土壤湿度点值。土壤湿度保持在阈值及其以上时,能保证葡萄进行高效的光合作用;土壤湿度低于阈值时,土壤湿度将成为葡萄进行光合作用的限制因素。针对干旱地区进行葡萄生产,若以低于阈值的土壤湿度来追求节水,将会导致光合速率下降;而以高于阈值的土壤湿度求得光合速率的提高,将会过多的浪费水分浪费。因此,干旱地区采用深畦栽植模式进行葡萄生产时,根际土壤相对含水量 30%~50%是显著影响葡萄光合作用水分利用效率的土壤湿度区间;根际土壤相对含水量分别在 43.32%~50.00%和 40.19%~50.00%是‘京亚’和‘红地球’适宜的土壤湿度范围;根际土壤相对含水量 43.32%和 40.19%分别为两品种进行光合作用时水分利用效率达到最高的最适土壤湿度。

参考文献:

[1] 许迪,吴普特,梅旭荣.我国节水农业科技创新成效与进展[J].农业工程学报,2003,19(3):5-9.
XU D,WU P T, MEI X R. Innovation and progress of agricultural water-saving science and technology in China[J]. *Transactions of the CSAE*,2003,19(3):5-9.

[2] 李昭楠,李唯,刘继亮,等.不同滴灌水量对干旱荒漠区酿酒葡萄光合及产量的影响[J].中国生态农业学报,2011,19(6):1324-1329.
LI Z N, LI W, LIU J L, *et al.* Effect of drip irrigation pattern on wine grape growth, yield, photosynthesis and water use efficiency in arid desert regions[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011,19(6):1324-1329.

[3] 李昭楠,李唯,姜有虎,等.西北干旱区戈壁葡萄膜下滴灌需水量和灌溉制度[J].水土保持学报,2011,25(5):247-251.
LI Z N, LI W, JIANG Y H, *et al.* Water demand and irrigation schedule of drip irrigation for gobi grape under plastic mulch in northwest arid region of China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011,25(5):247-251.

[4] 李爽.西北沙地深畦栽植葡萄抗寒抗旱机理的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2013.

[5] 刘世秋,张振文,惠竹梅,等.干旱胁迫对酿酒葡萄赤霞珠光合特性的影响[J].干旱地区农业研究,2008,26(5):169-172.
LIU S Q, ZHANG Z W, HUI Z M, *et al.* Effects of drought stress on photosynthetic properties of grapevine[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008,26(5):169-172.

[6] SEBASTIAN ANIȚA, VIOREL ARNĂUTU, RĂZVAN ȘTEFĂNESCU. Numerical optimal harvesting for a periodic age-structured population dynamics with logistic term[J]. *Numerical Functional Analysis and Optimization*, 2009,30:3-4,183-198.

[7] YUKO ARAKI, SADANORI KONISHI, SHUICHI KAWANO, *et al.* Functional logistic discrimination via regularized basis expansions[J]. *Communications in Statistics-Theory and Methods*, 2009,38,16-17,2944-2957.

[8] 徐文科,孙广山,李凤日.Logistic方程统计建模及对红松单木生长的拟合[J].东北林业大学学报,2011,39(6):114-115.
XU W K, SUN G S, LI F R. Statistical modeling of logistic equation and fitting of individual tree growth of *Pinus koraiensis* [J]. *Journal of Northeast for Forestry University*, 2011,39(6):114-115.

[9] 姜宁,付强,孙颖娜.基于Logistic模型的黑龙江省西部半干旱区有效灌溉面积分析[J].水土保持研究,2010,17(2):174-177.
JIANG N, FU Q, SUN Y N. Analysis on effective irrigated land area in western heilongjiang province based on logistic mode[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2010,17(2):174-177.

[10] 申艳梅.景天科植物耐旱性及其机理的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2010.

[11] MA Q L, FANG C, YOU J L. Spatial heterogeneity of soil water content in the reversion process of desertification in arid areas[J]. *Journal of Arid Land*, 2011,3(4):268-277.

[12] LAWLOR D. Limitation to photosynthesis in water-stressed leaves: stomata, metabolism and the role of ATP[J]. *Annals of Botany*, 2002,189(7):871-880.

[13] 徐俊增,彭世彰,魏征,等.节水灌溉水稻叶片胞间CO₂浓度及气孔与非气孔限制[J].农业工程学报,2010,26(7):76-80.
XU J Z, PENG S Z, WEI Z, *et al.* Intercellular CO₂ concentration and stomatal or non-stomatal limitation of rice under water saving irrigation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010,26(7):76-80.

[14] 杨泽粟,张强,郝小翠.自然条件下半干旱雨养春小麦生育后期旗叶光合的气孔和非气孔限制[J].中国生态农业学报,2015,23(2):174-182.
YANG Z S, ZHANG Q, HAO X C, *et al.* Stomatal or non-stomatal limitation of photosynthesis of spring wheat flag leaf at late growth stages under natural conditions in semiarid rainfed regions[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015,23(2):174-182.

[15] 郭春芳,孙云,张木清.土壤水分胁迫对茶树光合作用——光响应特性的影响[J].中国生态农业学报,2008,16(6):1413-1418.
GUO C F, SUN Y, ZHANG M Q. Effect of soil water stress on photosynthetic light response curve of tea plant (*Camellia sinensis*) [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008,16(6):1413-1418.

[18] SANTESTEBAN L G, MIRANDA C, ROYO J B. Effect of water deficit and rewatering on leaf gas exchange and Transpiration decline of excised leaves of four grapevine (*Vitis-vinifera* L.) cultivars [J]. *Sci. Horti.*, 2009,(121):434-439.

[19] 王颖,魏国印,张志强,等.7种园林树种光合参数及水分利用效率的研究[J].河北农业大学学报,2006,29(6):44-48.
WANG Y, WEI G Y, ZHANG Z Q, *et al.* Water use efficiency of seven afforestation tree species in different apportioning environment[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2006,29(6):44-48.

[20] 彭羽,薛达元,王艳杰,等.利用光合水分利用率进行引进葡萄品种选择[J].华北农学报,2011,26(增刊):80-84.
PENG Y, XUE D Y, WANG Y J, *et al.* Using photosynthetic water use efficiency as an indicator for selection of introduced grape(*Vitis vinifera*) varieties[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2011,26(Supplement):80-84.

[21] AVOLA G, CAVALLARO G, PATAN C, *et al.* Gas exchange and photosynthetic water use efficiency in response to light,CO₂ concentration and temperature in *Vicia faba* [J]. *Plant Physio.*, 2008,(165):796-804.

[22] KITAHASHI Y, ICHIE T, MARUYAMA Y, *et al.* Photosynthetic water use efficiency in tree crowns of *Shorea beccariana* and *Dryobalanops aromatica* in a tropical rain forest in Sarawak, East Malaysia[J]. *Photosynthetica*, 2008,(46):151-155.

[23] TANAKA-ODA A, KENZO T, *et al.* Ontogenetic changes in water-use efficiency (δ¹³C) and leaf traits differ among tree species growing in a semiarid region of the Loess Plateau[J]. *China Forest Ecol. Manag.*, 2010,(259):953-957.

[24] 刘吉利,赵长星,等.苗期干旱及复水对花生光合特性及水分利用效率的影响[J].中国农业科学,2011,44(3):469-476.
LIU J L, ZHAO C X, *et al.* Effects of drought and rewatering at seedling stage on photosynthetic characteristics and water use efficiency of peanut[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011,44(3):469-476.

[25] 李连国,李小燕,刘志华.根际土壤湿度和叶幕微气候对葡萄叶片水分代谢影响的模拟分析[J].果树科学,1996,13(3):171-174.
LI L G, LI X Y, LIU Z H. Simulated analysis of effects of soil moisture and canopy microclimate on leaf water metabolism in grape[J]. *Journal of Fruit Science*, 1996,13(3):171-174.

(编辑:裴阿卫)