

不同生育期水分胁迫对设施延后栽培葡萄光合特性的影响

张正红¹, 成自勇¹, 张 芮¹, 李 晶¹, 薛燕翎²,
周继莹¹, 王俊林², 何兆全¹

(1. 甘肃农业大学工学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 张掖市水务局灌溉试验站, 甘肃 张掖 734000)

摘 要: 在张掖市灌溉试验站开展了设施延后栽培葡萄灌溉试验, 研究了不同生育期水分胁迫对温室栽培葡萄光合指标的影响。结果表明, 各个胁迫处理下光合速率均大于对照处理, 而胞间 CO₂ 浓度相比对照均有明显下降, 且以生育期的先后胁迫顺序从高到低排列。水分胁迫可以提高设施延后栽培葡萄的外观品质, 以开花期胁迫处理下果粒重、纵横径最大。萌芽期胁迫处理使得果实产量增加, 营养品质有所提高, 并且叶片水分利用效率最高, 可为设施延后栽培葡萄节水、调质、增效的灌溉制度提供依据。

关键词: 葡萄; 水分胁迫; 光合速率; 蒸腾速率; 水分利用效率

中图分类号: S663.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-7601(2013)05-0227-06

Effects of water stress in different stages on photosynthetic properties of greenhouse grape under delayed cultivation

ZHANG Zheng-hong¹, CHENG Zi-yong¹, ZHANG Rui¹, LI Jing¹,
XUE Yan-ling², ZHOU Ji-ying¹, WANG Jun-lin², HE Zhao-quan¹

(1. College of Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Irrigation Experiment Station, Zhangye Water Authority, Zhangye, Gansu 734000, China)

Abstract: The experiment was carried out at Zhangye Irrigation Experiment Station in Gansu Province to investigate the effects of water stress in different stages on the change of photosynthetic properties of greenhouse grape under delayed cultivation. The results showed that the net photosynthetic rate under all treatments of water stress was higher than that under the control. However the intercellular CO₂ concentration under all treatments of water stress was obviously lower than that under the control, and it was ranked from high to low according to the successive order of water stress. Water stress could improve the appearance quality of delayed grape. The single fruit weight, longitudinal diameter and transverse diameter were the largest under moderate water stress in flowering stage. Under the treatment of moderate water stress in sprout stage, both the yield and the nutritional quality of grape could be improved, and the water use efficiency of leaves was the highest. These results could provide basis for irrigation system of greenhouse grape under delayed cultivation so as to save water, improve quality and increase efficiency.

Keywords: grape; water stress; photosynthetic rate; transpiration rate; water use efficiency

葡萄是世界上重要的鲜食果品, 为世界四大水果之一, 1985 年以前, 葡萄产量和面积在水果生产中居世界第一。延迟栽培是以延迟葡萄浆果成熟期为目的, 实现果品的淡季供应, 提高葡萄经济效益的一种栽培方式。截止目前全国延迟栽培面积约 1 000 hm² 左右, 以甘肃省面积最大, 约占全国延迟栽培总面积 90% 以上^[1], 而甘肃设施葡萄延后栽培主要在河西的张掖、武威、金昌、酒泉等市。这些地区降水量小, 蒸发强度大, 植被恢复的水分条件差, 水分是限制植物生长的关键因子^[2]。

收稿日期: 2013-03-05
基金项目: 国家自然科学基金资助项目冷凉地区葡萄设施延后栽培水分品质响应机理研究(51269001); 甘肃省科技支撑计划(090NKCA069)
作者简介: 张正红(1988—), 女, 甘肃靖远人, 硕士生, 主要从事节水灌溉研究。E-mail: zhangzhenghong688@163.com。
通信作者: 成自勇(1956—), 男, 甘肃秦安人, 教授, 博导, 主要从事生态水利、水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: chengzy@gau.edu.cn。

调亏灌溉是指在作物生长的某一时期,人为地使其有一定程度的水分亏缺,以影响作物的生理和生化过程,从而达到节水、高产和提高作物水分利用效率的一种灌溉技术。水分胁迫对葡萄光合特性的影响的研究很多^[3-7],但是关于在不同生育期的水分胁迫对葡萄光合特性的影响的研究鲜有报道。本研究旨在探明在不同生育期水分胁迫下葡萄光合作用的变化,为形成设施延后栽培葡萄节水、调质、增效的灌溉制度提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验于 2012 年 5—12 月在甘肃省张掖市水务局重点灌溉试验站进行。该区属于典型的大陆性干旱气候地带,降雨稀少且变化率大。年平均气温:城区 7.3℃,浅山区 5.4℃,气温日差较大,为 13.3℃~15.7℃;该区土地面积 36.9 万 hm²,耕地 6.01 万

hm²,占总土地面积的 16.29%;用于耕作的土壤主要为中壤土,pH 值为 8.4,土壤容重为 1.46 g·cm⁻³,田间持水率为 22.8%,耕层内(0~20 cm)含有机物质 1.365%,碱解氮 61.8 mg·kg⁻¹,速效磷 13.4 mg·kg⁻¹,速效钾 190.4 mg·kg⁻¹。

1.2 供试作物

供试作物为 5 年生葡萄,选用当地主栽品种“红地球”。葡萄栽培设施采用当地普遍采用的日光温室,建筑面积 8 m×80 m。

1.3 试验设计

试验设计为 5 个处理,3 次重复,共 15 个试验小区,小区面积 6 m×4 m。试验处理见表 1。试验区葡萄采用小管出流灌溉技术,采用 1 管 1 行控制模式。当试验小区土壤含水率达到或接近表中土壤含水率下限时,即进行灌水,各试验处理采取相同的田间管理措施。

表 1 试验设计方案
Table 1 Experimental design

处理编号 Code	各阶段土壤含水率下限(占田间持水率的百分数%) Lower limit of soil moisture in different stages (percentage of field capacity, %)				
	萌芽期 Sprouting (05-09—05-27)	新梢生长期 Shoot growing (05-28—06-19)	开花期 Flowering (06-20—06-30)	果实膨大期 Fruit enlargement (07-01—09-10)	着色成熟期 Coloring and mature (09-11—12-26)
A	55	75	75	75	75
B	75	55	75	75	75
C	75	75	55	75	75
D	75	75	75	55	75
CK	75	75	75	75	75

1.4 主要测试项目及方法

1.4.1 光合指标的测定 用 ECA-PB0402 便携式光合测定仪测定光合作用过程中的 CO₂、蒸腾作用过程中的水分变化(RH)、光合有效辐射(PAR)、叶室温度(TC)、叶片温度(TL),并根据这些测定参数自动计算出相应的光合速率(Pn)、蒸腾速率(Tr)、水分利用效率(WUE)、气孔导度(Cleaf)、胞间 CO₂ 浓度(CO₂in)。在成熟期的初期进行观测,必须为晴天,每小区选择生长发育良好的植株上对称性好、发育正常的 3 片功能叶片进行测定,从早 9:00 开始到晚 7:00 结束,每 2 小时测定一次,共测 6 次。

1.4.2 产量与品质的测定

1) 产量的测定:葡萄成熟季节,各小区单独采收,用精度为 0.1 g 电子称称量各小区所有葡萄产量。

2) 品质的测定:设施延后栽培葡萄属鲜食葡萄

系列,在品质分析中主要考虑了外观和营养 2 类品质指标,其中外观品质采用单粒重、纵径、横径三个指标;营养品质选用了可溶性固形物、可滴定酸、VC 三个指标。在成熟期的初期通过游标卡尺来测定纵横径,可溶性固形物的测定是通过选取葡萄样本放入研钵捣出汁液,将葡萄汁滴入糖度计进行测定,所读数即为可溶性固形物的质量分数。可滴定酸通过指示剂滴定法测定,VC 含量用钼蓝比色法进行测定。

1.4.3 数据处理 试验数据均采用 Excel-2003 进行分析。

2 结果与分析

2.1 不同时期水分胁迫对净光合速率的影响

由图 1 可以看出,不同生育阶段水分处理葡萄成熟叶的净光合速率表现出明显差异。早晨 9:00

光强较弱,叶片净光合速率比较低。随着光强的变强,各处理下的净光合速率都开始逐渐增大,在中午 11:00 左右达到极大值,出现第一次峰值。相比较胁迫处理而言,对照处理下的增长曲线稍平缓一些,而且光合速率也明显要低于各个生育期胁迫下的植株,这说明土壤水分含量对植株的净光合速率起决定作用。由表 2 可以看出,此时 A、B、C、D 处理的 P_n 值分别为 CK 的 115%,143%,143%,140%,平均值为 CK 的 135%,其中 B、C、D 处理差异达极显著水平。这表明不同生育期的水分胁迫对光合速率的影响是不同的,而以抽蔓期(处理 B)、开花期(处理 C)、果实膨大期(处理 D)调亏下对植株的光合速率影响最大。随着光强继续增强,叶片部分气孔开始关闭,出现“午休”现象,在 13:00 左右叶片净光合速率达到极小值。由下图可以看出,B、C、D 处理的光合速率迅速降低,而 CK 和 A 处理的则是缓慢降低达到极小值。以上结果说明,正常水分胁迫下和萌芽期胁迫处理下的叶片对光能的利用率较高,而在其他三种胁迫下光能利用率越来越低,光合机构吸

收的光能将超过光合作用所能利用的量,由此看来,萌芽期的胁迫对作物的光合速率影响不大,而后三个时期的胁迫对光合速率的影响是巨大的。随后由于部分气孔关闭,蒸腾速率降低,使得叶片含水量增加,各个处理净光合速率又开始缓慢增加,并于 15:00 左右再次达到极大值。随后太阳辐射减弱,其他处理的光合速率逐渐降低,而 C 处理的降低幅度最大。

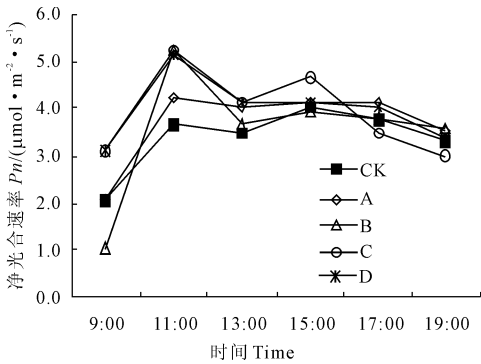


图 1 不同时期水分胁迫对净光合速率的影响
Fig.1 Effects of water stress on net photosynthetic rate (P_n) in different stages

表 2 不同处理的光合参数

Table 2 Photosynthesis parameters of grape under different treatments

处理 Treatments	光合参数 Photosynthesis parameters				
	P_n	G_s	C_i	T_r	WUE
	$/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$/(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$/(\text{mmol}\cdot\text{mol}^{-1})$	$/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$/(\mu\text{mol}\cdot\mu\text{mol}^{-1})$
CK	3.67	305.87	717.17	22.50	0.20
A	4.23	336.30	676.47	23.20	0.43
B	5.23	311.70	626.83	23.33	0.30
C	5.23	300.70	577.90	23.73	0.37
D	5.13	361.13	534.53	26.30	0.15
A/CK * 100%	115%	110%	94%	103%	217%
B/CK * 100%	143%	102%	87%	104%	150%
C/CK * 100%	143%	98%	81%	105%	183%
D/CK * 100%	140%	118%	75%	117%	75%
(A + B + C + D)/4	4.96	327.46	603.93	24.14	0.31
(A + B + C + D)/4/CK * 100%	135%	107%	84%	107%	156%

2.2 不同时期水分胁迫对气孔导度的影响

气孔是植物与外界联系的通道,它直接影响和控制着植物的蒸腾作用和光合作用。由图 2 可以看出,不同生育期的胁迫处理对葡萄气孔导度日变化规律影响不同,但总体变化趋势相同,从早上 9:00 ~ 11:00, G_s 急速上升到一稳定值,由表 2 可看出, A、B、C、D 处理的 G_s 值分别为 CK 的 110%、102%、98%、118%,平均值为 CK 的 107%,其中处理 D 差异达到极显著水平,处理 A 差异显著, B、C 处理差异不明显。从 11:00 ~ 13:00 缓慢平滑下降,这是因

为随着叶温的升高,蒸腾速率增强,光合速率达到极大值,而叶片的含水量和细胞间隙 CO_2 浓度持续降低,导致叶片部分气孔开始关闭,气孔导度降低。随后由于气孔的关闭,叶片含水量增加,光合作用增强,气孔导度又开始增大,与对照处理 CK 相比,处理 B 的变化趋势较为剧烈,说明抽蔓期的胁迫使得作物对外界气孔的开放程度比较敏感。处理 A、C、D 的变化较对照低,说明萌芽期、开花期、果实膨大期的水分亏缺影响了气孔开张,使得气孔导度降低。

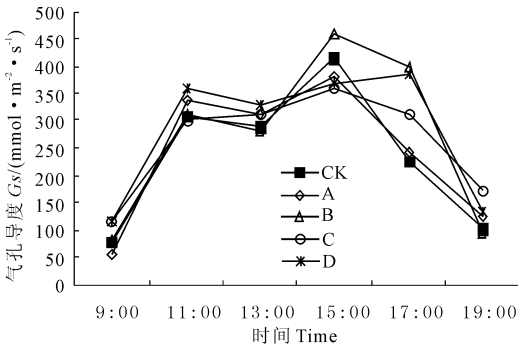


图 2 不同时期水分胁迫对气孔导度的影响

Fig.2 Effects of water stress on stomatal conductance (G_s) in different stages

2.3 不同时期水分胁迫对胞间 CO_2 浓度的影响

含水量对细胞间 CO_2 浓度的影响,主要是通过气孔开闭及叶片光合作用和呼吸作用的影响间接实现的。 CO_2 是植物进行光合作用制造有机物质的原料,即当叶片含水量充足时气孔张开,大气中 CO_2 进入叶内,叶片光合作用旺盛。这时叶内细胞间的 CO_2 浓度显著低于叶外。但是,随着叶片含水量的下降,细胞间 CO_2 浓度迅速增高。由图 3 可知,9:00 ~ 11:00 之间,各处理的 C_i 都开始迅速增大,对照 CK 处理的 C_i 明显要高于各生育期胁迫下的处理,由高到低的顺序依次为 CK 处理 > A 处理 > B 处理 > C 处理 > D 处理。由表 2 可看出,此时 A、B、C、D 处理的 C_i 值分别为 CK 的 94%, 87%, 80%, 75%, 平均值为 CK 的 84%。其中 C、D 处理下降达极显著。11:00 ~ 13:00 之间,随着光合作用的增强,各处理都有缓慢的下降趋势;13:00 以后,随着“午休”现象的结束,CK 处理和 A 处理的 C_i 迅速下降到极小值,而 B 处理则是缓慢下降直至极小值,相反, C 处理和 D 处理则是增加到一定程度才出现下降的趋势。综上所述,开花期(处理 C)和果实膨大期(处理 D)的调亏对设施延后葡萄的光合作用产生了极大的影响。

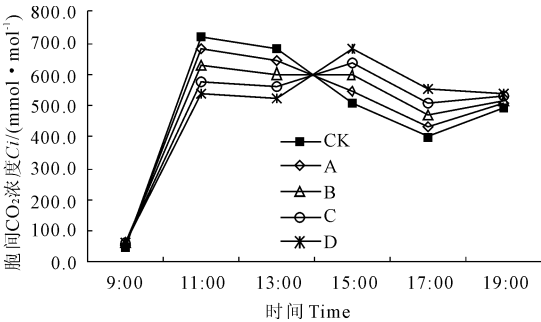


图 3 不同时期水分胁迫对胞间 CO_2 浓度的影响

Fig.3 Effects of water stress on intercellular CO_2 concentration (C_i) in different stages

2.4 不同时期水分胁迫对蒸腾速率的影响

蒸腾作用是一个复杂的生理过程和物理过程,受多种因素的控制。如图 4 所示,葡萄蒸腾速率的日变化表现出周期性变化,与土壤水分条件的关系是密不可分的。9:00 ~ 11:00,随着光合速率的增强,土壤水分条件也比较充裕, T_r 也逐渐增强。由表 2 可看出, A、B、C、D 处理的 T_r 值分别为 CK 的 103%, 104%, 105%, 117%, 平均值为 CK 的 107%, 其中处理 D 极显著增加。11:00 ~ 13:00,由于中午光照强度最大,气温最高, T_r 逐渐增大,然而水分供应不足,气孔会自动调节,明显减小或部分关闭一段时间, T_r 逐渐降低。当光强和气温在午后逐渐减弱时,蒸腾作用又逐渐增强,以 B 处理和 C 处理的增加幅度最大, A 处理缓慢增加, D 处理由于果实膨大期的调亏,使得水分严重亏缺,整体反应过程比较慢,直至 15:00 以后才略有增加。最后随着 PAR 等气象因素的下降以及气孔的逐渐关闭, T_r 又趋于减弱。

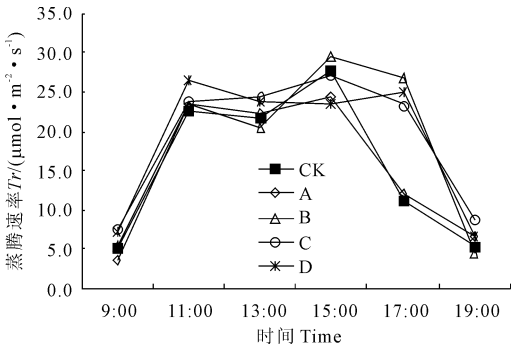


图 4 不同时期水分胁迫对蒸腾速率的影响

Fig.4 Effects of water stress on transpiration rate (T_r) in different stages

2.5 不同时期水分胁迫对水分利用效率的影响

水分利用效率 (WUE) 是植物光合与蒸腾特性的综合反映,植物的 WUE 值越大,则表明植物节水能力越强,耐旱生产力越高^[8]。由图 5 可看出,不同生育阶段的水分胁迫下, WUE 有明显差异。由表 2 可看出, A、B、C、D 处理的 WUE 值分别为 CK 的 217%, 150%, 183%, 75%, 平均值为 CK 的 156%。其中 A 处理极显著增加, B、C 处理达到了显著水平,而 D 处理极显著下降。这表明葡萄在萌芽期(处理 A)、抽蔓期(处理 B)、开花期(处理 C)调亏处理下的水分利用效率都有了显著提高,尤其以萌芽期调亏处理下的水分利用效率增加幅度最大,说明萌芽期调亏是水分利用效率最高的调亏模式,但果实膨大期调亏处理下的水分利用效率最低。由此说明,果实膨大期是设施延后栽培葡萄需水临界期,该

阶段亏水会显著降低水分利用效率。随后由于光照增强、气温上升、空气的相对湿度明显下降,引起气孔部分关闭而限制了 H₂O 和 CO₂ 的扩散,从而导致 WUE 显著下降。11:00~15:00 之间,基本处于一种稳定的状态,起伏不大。但 15:00 过后,随着光合有效辐射的减弱以及蒸腾速率降低,各处理的 WUE 又有了显著提高。

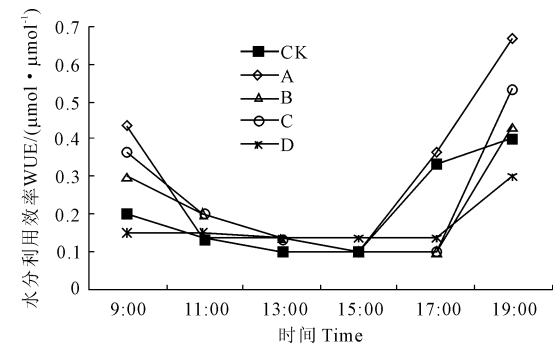


图 5 不同时期水分胁迫对水分利用效率的影响
Fig.5 Effects of water stress on water use efficiency (WUE) in different stages

2.6 不同时期水分胁迫对葡萄产量的影响

在成熟期对葡萄进行采摘,CK、A、B、C、D 小区

的产量分别为 6 760. 741、7 198. 641、5 896. 626、5 527. 721、3 586. 105 kg·hm⁻²。由此可看出,A(萌芽期亏水)处理产量最大,D(果实膨大期亏水)处理产量最小,比 CK 处理减产 88. 67%,B(抽蔓期亏水)、C(开花期亏水)与 CK 处理相比均减产 14. 65%、22. 31%。经方差分析,与 CK 处理相比,A、B、C 处理产量差异不明显,而 D 处理产量差异显著($P>0.05$)。由此说明果实膨大期亏水对设施延后栽培葡萄产量造成显著水平的影响,而其他处理对产量影响不明显,反而萌芽期适度亏水还有利于提高产量。

2.7 不同时期水分胁迫对葡萄品质的影响

2.7.1 对外观品质影响 由表 3 可以看出,所有处理中,C 处理(开花期亏水)的葡萄单粒重和果实纵横径均达到最大,CK 处理的最小,从大到小依次排列为 C 处理>B 处理>A 处理>D 处理>CK 处理。C 处理的单粒重、纵横径依次为 11. 8 g、30. 2 mm、26. 07 mm,单粒重与 CK 相比存在显著差异,而其他亏水处理的单粒重与 CK 相比不存在显著差异。由此可看出,无论在哪个生育期进行胁迫都有利于提高延后栽培葡萄的外观品质(果粒重、纵横径)。

表 3 延后栽培葡萄外观品质和营养品质指标分析

Table 3 Appearance quality and nutritional quality of delayed grape in greenhouse

处理 Treatment	单粒重/g Single fruit weight	纵径/mm Longitudinal diameter	横径/mm Transverse diameter	可滴定酸/mL Titratable acidity	VC /(mg·g ⁻¹)	可溶性固形物/% Soluble solids
A	10. 1ab	29. 51a	24. 06 a	9. 85a	0. 21a	15. 68a
B	10. 2ab	28. 78a	25. 2a	11. 38a	0. 15b	13. 6b
C	11. 8a	30. 2a	26. 07a	11. 02a	0. 145b	14. 01ab
D	9. 5ab	28. 43a	23. 88a	11. 3a	0. 16ab	15. 59a
CK	9. 1b	27. 86a	24a	12. 05a	0. 145b	14. 65ab

2.7.2 对营养品质影响 由表 3 可以看出,所有处理的可滴定酸含量不存在显著性差异,从大到小依次为 CK 处理、B 处理、D 处理、C 处理、A 处理,由此可得知 CK 的可滴定酸最高,A 处理的最低,口感最好。A 处理的 VC 含量最高,为 0. 21,与 CK 相比存在显著差异,其次为 D 处理,为 0. 16,但与 CK 处理和 A 处理相比都不存在显著性差异。其余处理 VC 含量较 CK 有所提高,但差异不显著。A 处理的可溶性固形物含量也最高,为 15. 68%,其次为 D 处理,为 15. 59%,与 CK 处理相比差异均不显著,含量最低的为 B 处理,与 CK 处理相比差异不显著,但与 A、D 处理相比差异显著。

3 结论与讨论

植物光合作用是对环境变化很敏感的生理过程,其过程受到许多环境因素的影响,而水分胁迫是重要因素之一^[9]。在作物的生长过程中,不同生育时期的水分胁迫必定会使植物体内的生理代谢发生变化^[10]。本试验研究表明, P_n 、 G_s 、 C_i 、 Tr 、 WUE 对不同水分处理的响应不同,对照处理的 P_n 均要低于胁迫处理,萌芽期胁迫处理下相差不明显,而后三个生育期差异极显著。与对照处理的 G_s 相比,果实膨大期胁迫处理 D 极显著增加,萌芽期胁迫处理 A 显著增加,抽蔓期胁迫处理 B、开花期胁迫处理 C 差异不明显。而抽蔓期胁迫处理下的整体变化比较

剧烈,对外界气孔的开放程度比较敏感。各胁迫处理的 G_i 均要低于对照处理,并以先后胁迫顺序从高到低排列,即 CK 处理 > A 处理 > B 处理 > C 处理 > D 处理,其中 C、D 处理下降达极显著。 Tr 与 G_s 的变化趋势基本一致,说明 Tr 的大小与气孔的开放程度是直接相关的,与对照处理的 Tr 相比,果实膨大期胁迫处理极显著增加。而 WUE 变化曲线与 Tr 曲线恰恰相反,果实膨大期胁迫处理下的 WUE 极显著下降,其余三个胁迫处理均要大于对照处理,以萌芽期胁迫处理增加幅度最大,达到了极显著水平,说明轻度水分胁迫会降低 Tr ,但 P_n 下降很小,使 WUE 较高,蒸腾速率明显受土壤水分条件的影响,进而影响水分利用效率^[11]。许多学者^[12-15]研究表明,适度水分胁迫能使植物 WUE 显著提高,该研究结果也支持这一观点,即适度的水分胁迫能够提高设施延后栽培葡萄的水分利用效率。

任何时期的水分胁迫都可以提高设施延后栽培葡萄的外观品质,以开花期胁迫处理下果粒重、纵横径最大。萌芽期的胁迫使得果实产量增加,营养品质有所提高,可滴定酸含量低,VC 含量和可溶性固形物含量均为最高,口感较好。果实膨大期是葡萄需水临界期,该时期的胁迫使作物严重减产,与对照处理相比有显著差异,在栽培管理中应引起足够的重视。

适当的水分胁迫对作物生长有利,而不同生育期的水分胁迫对作物的各项生理指标的影响不同,掌握设施延后栽培条件下葡萄的水分胁迫程度及时期对实现节水、调质、增效的灌溉制度非常有意义。

参 考 文 献:

[1] 王海波,王孝娣,王宝亮.中国设施葡萄产业现状及发展对策

[J].中外葡萄与葡萄酒,2009,(9):61-65.

[2] Clarke J M. Effect of drought stress on residual transpiration and its relationship with water use of wheat[J]. Canadian Journal of Plant Science, 2000,(3):695-702.

[3] 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):170-172.

[4] 房玉林,惠竹梅,陈洁.水分胁迫对葡萄光合特性的影响[J].干旱地区农业研究,2006,24(2):136-138.

[5] 周新明,惠竹梅,焦旭亮,等. UVB 辐射增强下葡萄叶片光合特性与叶龄关系的研究[J].干旱地区农业研究,2007,25(4):217-220.

[6] 刘廷松,李桂芬.设施栽培条件下葡萄盛花期的光合特性[J].园艺学报,2003,30(5):568-570.

[7] 李涛,张建丰,程慧娟,等.在不同水分处理条件下葡萄成熟叶净光合速率日变化规律研究[J].干旱区资源与环境,2010,24(9):180-184.

[8] 张建国,李吉跃,沈国舫.树木耐旱特性及其机理研究[M].北京:中国林业出版社,2000:1-9.

[9] 王红,王百田,王婷,等.不同土壤含水量对山杏盆栽幼苗蒸腾速率和光合速率的影响[J].北方园艺,2010,(2):1-5.

[10] 孙宪芝,郑成淑,王秀峰.木本植物抗旱机理研究进展[J].西北植物学报,2007,27(3):629-634.

[11] 张华,王百田,郑培龙.黄土半干旱区不同土壤水分条件下刺槐蒸腾速率的研究[J].水土保持学报,2006,20(2):122-125.

[12] Turner C. Plant water relations and irrigation management[J]. Agricultural Water Management,1990,17:59-73.

[13] Monclu S R, Dreyer E, Villar M, et al. Impact of drought on productivity and water use efficiency in 29 genotypes of *Populus deltoides* *Populus nigra*[J]. New Phytologist,2006,169(4):765-777.

[14] Chaves M M, Santos T P, Souza C R, et al. Deficit irrigation in grapevine improves water-use efficiency while controlling vigour and production quality[J]. Annals of Applied Biology, 2007, 150(2):237-252.

[15] 张芮,成自勇,李毅,等.小管出流亏缺灌溉对设施延后栽培葡萄产量与品质的影响[J].农业工程学报,2012,28(20):108-113.

(上接第 129 页)

[40] Christopher B Barrett A, Thomas Reardon B, Patrick Webb C. Non-farm income diversification and household livelihood strategies in rural Africa: concepts, dynamics, and policy implications[J]. Food Policy, 2001,(26):315-331.

[41] 崔欣婷,苏筠.小空间尺度农业旱灾承灾体脆弱性评价初探——以湖南省常德市鼎城区双桥坪镇为例[J].地理与地理信息科学,2005,21(3):80-87.

[42] 杨春燕,王静爱,苏筠,等.农业旱灾脆弱性评价——以北方农牧交错带兴和县为例[J].自然灾害学报,2005,14(6):88-93.

[43] H-M Fussel. Adaptation planning for climate change: concepts, assessment approaches, and key lessons[J]. Integrated Research System for Sustainability Science and Springer,2007,2:265-275.

[44] 何艳芬,张柏,刘志明.农业旱灾及其指标系统研究[J].干旱地区农业研究,2008,26(5):239-244.

[45] 杨彬云,吴荣军,郑有飞,等.河北省农业旱灾脆弱性评价[J].

安徽农业科学,2008,36(15):649-650.

[46] 樊运晓,罗云,陈庆寿.区域承灾体脆弱性综合评价指标权重的确定[J].地球科学进展,2001,16(1):85-87.

[47] 徐新创,葛全胜,郑景云,等.农业干旱风险评估研究综述[J].干旱地区农业研究,2010,28(6):263-270.

[48] 王静爱,商彦蕊,苏筠,等.中国农业旱灾承灾体脆弱性诊断与区域可持续发展[J].北京师范大学学报,2005,(3):130-137.

[49] IPCC. Climate Change: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University press, 2001.

[50] Michael J Mortimore, William M Adams. Farmer adaptation, change and 'crisis' in the Sahel[J]. Global Environmental Change,2011,11:49-57.