

不同灌溉条件下葡萄叶片光合特性研究

李雅善², 李 华¹, 徐成东², 王 波², 王振吉², 范树国²

(1. 西北农林科技大学 葡萄酒学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 楚雄师范学院 化学与生命科学学院, 云南 楚雄 675000)

摘 要:为探究不同灌溉条件下葡萄叶片光合特性,从葡萄萌芽开始,利用充分灌溉(Full irrigation, FI)、部分根区干燥(Part root-zone irrigation, PRD)、前期干旱(Early deficit, ED)和后期干旱(Late deficit, LD)4种不同的灌溉模式,研究不同灌溉措施对葡萄成熟期叶片光合参数和光合特性的影响。结果表明:FI和ED处理的葡萄叶片净光合速率、气孔导度和蒸腾速率高于PRD和LD处理,而水分利用效率则低于后者。FI和PRD处理的光补偿点和暗呼吸速率均低于ED和LD处理,而PRD的光饱和点最小,FI的最大净光合速率最大。直角双曲线修正模型对光合光响应曲线的拟合要优于直角双曲线和非直角双曲线,尤其是对光饱和点的结果来说。通过线性拟合获得的表观量子效率和暗呼吸速率要低于非线性拟合获得的,且非线性拟合所获得的值更接近于实测值。从经济和生态效益2个方面考虑,LD和PRD处理效果更好。

关键词:葡萄;灌溉方法;净光合速率;气孔导度;蒸腾速率;表观量子效率;光合光响应曲线

中图分类号:S 663.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2015)14-0001-06

葡萄(*Vitis vinifera*)属葡萄科(Vitaceae Juss.)葡萄属(*Vitis* L.)多年生藤蔓落叶植物^[1]。截至2011年底,中国葡萄栽培面积达568 000 hm²,居世界第4位。而我国葡萄主产区以干旱半干旱气候为主,在葡萄生长季节常遭受干旱的困扰,严重制约着葡萄产业的发展^[2]。然而,我国干旱半干旱地区水资源供需矛盾较为突出,如何高效用水已成为农业可持续发展所面临的关键性问题。针对这一问题,近年来以生物节水^[3]为核心的灌溉新技术、新理论不断涌现。其中调亏灌溉(Regulated Deficit Irrigation, RDI)^[4-6]、部分根区干燥(Part Root-zone Deficit, PRD)^[5,7]、隔沟交替灌溉^[8-9]等在葡萄生产中应用相对广泛,而隔沟交替灌溉实际上是部分根区干燥的一种特殊形式。

光合作用是作物生长发育和物质生产的基础,其与外界环境变化密切相关^[10-11]。光合作用光响应曲线的测定及拟合是研究植物生理生态学的重要手段之一,通过光响应曲线,可以获得最大净光合速率、光饱和点、光补偿点等光合参数,这对研究植物光合生产能力具有重

要的意义^[12-13]。国内外学者建立了许多光合作用的光响应模型^[14-15],其中以直角双曲线、非直角双曲线和直角双曲线修正模型应用最为广泛^[13,16-18]。尤其是后者,能够有效克服前2个模型的缺陷,提高拟合结果与实测数据之间的符合程度^[12-13]。干旱是植物光合作用过程中最主要的限制因子之一,对葡萄植株的生长发育、生理过程及果实产量有很大的影响^[19-21]。前人研究水分对葡萄植株光合特性的影响时,多集中在不同等级的水分胁迫对光合特性的影响方面,如房玉林等^[22]、管雪强等^[23]、刘世秋等^[24],却鲜见调亏灌溉、部分根区干燥等新技术对葡萄光合特性的影响研究。该试验以不同灌溉处理为手段,通过其对葡萄叶片光合特性的影响分析,揭示葡萄光合特性对不同灌溉技术的响应生理机制,旨在为高效灌溉、抗逆机理、改良品质及提高产量提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在陕西省杨凌示范区曹辛庄葡萄园进行,位于关中平原腹部,地处北纬34°15'~34°17',东经108°03'~108°07',属于暖温带季风区半湿润气候,平均气温10.7~13.7℃,全年有效积温3 400~4 600℃,无霜期184~216 d,年降水量552.6~663.9 mm。试验于2013年6月下旬在移动防雨棚内进行,土壤为粘土,容重为1.605 g/cm³,田间持水量为22.4%(质量分数)。葡萄采用棚架栽培,架高约2 m,宽3 m。

第一作者简介:李雅善(1987-),男,河南鲁山人,硕士,助教,现主要从事葡萄生理生态等研究工作。E-mail:liys87@126.com.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31300370);云南省应用基础计划资助项目(2011FZ186);云南省重点建设学科基金资助项目(05YJJSXK03);云南省高校科技创新团队支持计划资助项目(IRTSTYN);楚雄师范学院学术后备人才资助项目(14XJRC21)。

收稿日期:2015-03-15

1.2 试验材料

供试葡萄品种为欧美杂交种“希姆劳特”,又名“喜乐无核”,该品种为特早熟鲜食品种,由西北农林科技大学葡萄酒学院引种,并于2009年定植于陕西省杨凌示范区葡萄酒学院曹辛庄葡萄园移动式防雨棚内,株行距为1 m×3 m,棚架栽培模式。

1.3 试验方法

试验采用4种不同的灌溉处理:充分灌溉(Full Irrigation, FI),整个葡萄生育期内保持土壤含水量为田间持水量的60%~80%;部分根区干燥(Part Root-zone Deficit, PRD),灌溉采用葡萄植株两侧交替灌水,灌水时间与充分灌溉相同,灌水量为充分灌溉的2/3;前期干旱(Early Deficit, ED),在葡萄转色前与充分灌溉同时灌溉,但灌水量为前者的2/3,转色后灌水量与充分灌溉相同;后期干旱(Late Deficit, LD),在葡萄转色前灌水时间及灌水量与充分灌溉相同,转色后灌水量是前者的2/3。移动防雨棚内试验采用60株葡萄,以小区为单位划分,每个小区5株葡萄,每个小区作为1个重复,每个处理重复3次,共12个小区,并采用随机区组排列。小区之间采用防水膜隔开,防止水分侧渗。灌溉采用滴灌,流量为3.75 L/h。每隔3~5 d用CS830中子土壤水分仪(南京驰顺科技发展有限公司)对土壤水分进行1次测量,以充分灌溉为参照,至灌水下限60%田间持水量附近进行灌溉,采用水表控制水量。

1.4 项目测定

1.4.1 光合参数日变化 选择浆果成熟期晴朗天气进行,测定时间为7:00—19:00,每隔2 h测定1次,所用的仪器是LI-6400便携式光合仪(LI-COR, USA)。测量的指

标有净光合速率($P_n, \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、气孔导度($G_s, \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、蒸腾速率($T_r, \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)等生理参数,这些指标均由仪器自动记录。水分利用效率(WUE, $\mu\text{mol}/\text{mmol}$)则由 P_n/T_r 计算得出。

1.4.2 光响应曲线 同样选择浆果成熟期晴朗天气,测定时间在9:00—11:00,利用LI-6400便携式光合仪(LI-COR, USA),开放式气路自动测定。 CO_2 浓度为390~400 $\mu\text{mol}/\text{mol}$,叶室温度控制在 $(25 \pm 0.5)^\circ\text{C}$,空气流量为400 $\mu\text{mol}/\text{s}$ 。利用LI-6400内置红蓝光源提供不同的光合有效辐射强度(PAR, $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),设定PAR由高到低依次为2 000、1 800、1 600、1 400、1 200、1 000、800、600、400、200、150、100、50、20、0 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,最少稳定时间设定为120 s,由仪器自动记录净光合速率($P_n, \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、气孔导度($G_s, \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、蒸腾速率($T_r, \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)等生理参数。

1.5 数据分析

基础数据处理采用Excel 2003,利用SPSS 17.0进行相关性分析,利用Origin 8.0软件进行线性拟合及直角双曲线、非直角双曲线、直角双曲线模型的非线性拟合。

2 结果与分析

2.1 不同灌溉处理下叶片主要生理参数日变化

由图1(a)可以看出,不同灌溉处理下的叶片净光合速率(P_n)日变化趋势均呈不规则的“M”形,其2个峰值分别出现在9:00—11:00和13:00—15:00。而中午都出现了较为明显的“午休”现象。在4种灌溉处理中,充分灌溉(FI)和前期干旱(ED)这2个处理的 P_n 要高于部分根区干燥(PRD)和后期干旱(LD)。FI的净光合速率除

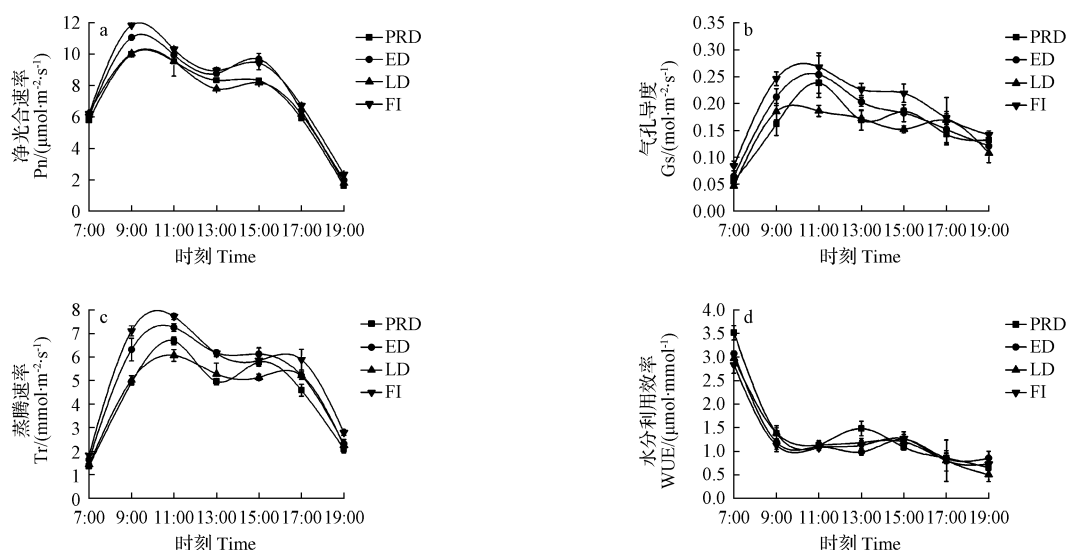


图1 葡萄净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、水分利用效率日变化

Fig. 1 Daily variation of net photosynthetic rate (P_n), stomata conductance (G_s), transpiration rate (T_r) and water use efficiency (WUE) of grapevine leaves under different irrigation methods

15:00 外全天都高于其它处理。

如图 1(b)所示,不同灌溉处理之间的葡萄叶片气孔导度日变化趋势有所差异,有单峰曲线也有近似“M”曲线。无论是哪种曲线,其最大值都出现在 9:00—11:00,这与净光合速率最大值出现的时间具有一致性。在 4 个不同的灌溉处理中,FI 和 ED 处理的气孔导度值要高于另外 2 个组。

如图 1(c)所示,蒸腾速率的日变化走势与净光合速率的日变化趋势相似,二者基本都呈现“M”形变化。4 个处理的蒸腾速率最大值均出现在 9:00—11:00,且为全天的最大值,其中 FI 和 ED 要明显高于另外 2 个组。

水分利用效率与上述生理参数有所不同,它是由净光合速率与蒸腾速率的比值得来的。如图 1(d)所示,其日变化走势像平躺的“S”曲线。各个处理在早上水分利用效率较高的状态下,随着时间的推移,不断下降,在下降过程中均有所反弹,尤以 PRD 处理反弹幅度为大。但是反弹时间并不相同,PRD 处理从 11:00 以后开始回

升,到 13:00 以后重新开始下降,而其它 3 个组则在 11:00 以后有小幅度的回升,至 15:00 以后缓慢下降。由图 1(d)还可以看出,PRD 和 LD 的水分利用效率在 15:00 之前要高于另外 2 个组,而 15:00 以后则要略低于另外 2 个组。

2.2 不同灌溉处理下叶片光合光响应曲线对比分析

分别用直角双曲线模型、非直角双曲线模型和直角双曲线修正模型对不同灌溉处理的葡萄叶片进行光合-光响应曲线拟合。从表 1 可以看出,无论哪种灌溉处理,由直角双曲线拟合得到的初始量子效率都要显著高于非直角双曲线和直角双曲线修正模型。由直角双曲线拟合得到的初始量子效率在 0.122~0.151,其中 LD 要显著高于其它 3 种灌溉处理,PRD 要显著低于其它 3 种处理。而由非直角双曲线拟合得到的初始量子效率在各处理之间差别并不显著。但由直角双曲线修正模型拟合得到的初始量子效率中,FI 的值仅为 0.059,显著低于 ED 和 LD。

表 1 葡萄叶片光合光响应参数实测值与模型拟合值

Table 1 The measured data of light response of net photosynthetic rate of grape leaves and the results fitted by different models

处理 Treatment	模型 Model	初始量子效率 Initial quantum efficiency	光补偿点 Light compensation point /($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	光饱和点 Light saturation point /($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	暗呼吸速率 Dark respiratory rate /($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大净光合速率 Maximum net photosynthetic rate /($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	决定系数 Determination coefficient (R^2)
FI	直角双曲线模型	0.135±0.006a(b)	14.682±2.443a(b)	312.597±8.564c(ab)	1.689±0.280a(bc)	11.736±0.329a(a)	0.836±0.049b(b)
	非直角双曲线模型	0.052±0.005b(a)	12.853±2.993a(a)	311.094±39.524c(a)	0.796±0.291b(b)	11.123±0.731a(bc)	0.857±0.046b(b)
	直角双曲线修正模型	0.059±0.005b(b)	11.570±2.431a(c)	790.748±41.024b(ab)	0.666±0.183b(b)	10.852±0.176a(a)	0.966±0.007a(a)
	实测值	—	—	1 400.000±163.299a(a)	0.940±0.271b(bc)	11.190±0.057a(a)	—
PRD	直角双曲线模型	0.122±0.006a(c)	13.684±0.109a(b)	296.128±8.682c(bc)	1.441±0.058a(c)	10.750±0.327a(b)	0.893±0.018b(ab)
	非直角双曲线模型	0.055±0.001b(a)	12.211±0.820a(a)	298.679±16.636c(a)	0.771±0.059b(b)	10.830±0.223a(c)	0.912±0.027ab(ab)
	直角双曲线修正模型	0.067±0.008b(ab)	14.200±1.133a(c)	823.267±13.315b(a)	0.903±0.171b(b)	9.370±0.322b(b)	0.960±0.021a(a)
	实测值	—	—	1 266.667±94.281a(b)	0.760±0.073b(c)	9.727±0.281b(b)	—
ED	直角双曲线模型	0.133±0.003a(b)	22.279±2.376ab(a)	327.868±8.778d(a)	2.385±0.258a(a)	12.087±0.262b(a)	0.917±0.011b(a)
	非直角双曲线模型	0.077±0.012b(a)	18.401±3.815b(a)	376.337±29.056c(a)	1.751±0.145b(a)	14.037±1.251a(a)	0.935±0.012b(a)
	直角双曲线修正模型	0.076±0.003b(a)	27.171±3.676a(a)	835.682±17.112b(a)	1.843±0.278b(a)	9.677±0.053c(b)	0.980±0.007a(a)
	实测值	—	—	1 400.000±0.000a(a)	1.603±0.177b(a)	9.933±0.084c(b)	—
LD	直角双曲线模型	0.151±0.000a(a)	16.678±1.055a(b)	290.080±1.133c(c)	2.044±0.121a(ab)	10.875±0.463ab(b)	0.865±0.011b(ab)
	非直角双曲线模型	0.078±0.025b(a)	15.457±3.272a(a)	322.726±56.305c(a)	1.404±0.090b(a)	12.079±1.732a(ab)	0.885±0.020b(ab)
	直角双曲线修正模型	0.078±0.003b(a)	20.756±1.684a(b)	750.223±6.583b(b)	1.474±0.166b(a)	9.237±0.313c(b)	0.958±0.140a(a)
	实测值	—	—	1 400.000±0.000a(a)	1.253±0.057b(ab)	9.813±0.345c(b)	—

注:括号里的不同小写字母表示同一拟合模型(或在实测值)条件下、不同水分处理间差异显著($P<0.05$);不带括号的不同小写字母表示同一水分处理条件下、不同模型及实测值之间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in parentheses show significant differences across four water supply methods under the same fitting model, but different lowercase letters without parentheses show significant differences across three fitting models and the measured value under the same water supply methods according to test ($P<0.05$).

光补偿点和光饱和点不能直接通过拟合求得,必须利用拟合得到的参数计算得到(表 1)。除 ED 外,无论哪种灌溉处理中,通过 3 种拟合模型获得的参数计算得到的光补偿点的差异均不显著。但在不同灌溉处理中,通过同一拟合模型获得的光补偿点却呈现出不同的差异显著性。而通过非直角双曲线模型拟合得到的光补

偿点在 4 个灌溉处理中的差异并不显著。通过直角双曲线修正模型获得的光补偿点中,ED 要显著高于 FI、PRD 和 LD。对于光饱和点来说,在各个不同的灌溉处理内,实测值均显著高于通过 3 种拟合模型所获得的值。相比较而言,最接近实测值的当属通过直角双曲线修正模型拟合获得的光饱和点,它显著高于另外 2 种拟

合模型。在不同灌溉处理间,通过直角双曲线拟合得到的光饱和点中,ED 要显著高于 PRD 和 LD,但与 FI 差异不显著。而通过非直角双曲线得到的值差异并不显著,但通过直角双曲线修正模型得到的值中,LD 要显著低于 PRD 和 ED。对光饱和点来说,直角双曲线和非直角双曲线拟合得到的值都要远低于实测值,而直角双曲线修正模型所得值则更加接近实测值,充分显示了直角双曲线修正模型在预测光饱和点方面的优势。

在各个灌溉处理内,由直角双曲线拟合得到的暗呼吸速率要显著高于非直角双曲线、直角双曲线修正模型和实测值。在不同的灌溉处理间,由直角双曲线模型和直角双曲线修正模型拟合得到的值中,ED 均显著高于 FI 和 PRD,非直角双曲线拟合得到的值中则是 LD 和 ED 要显著高于 FI 和 PRD。实测值显示 ED、LD 的暗呼吸速率显著高于 PRD。无论在何种灌溉处理中,由直角双曲线拟合获得的暗呼吸速率要显著高于其它曲线和实测值,因此,该种曲线在拟合暗呼吸速率方面存在着弊端。

通过不同拟合曲线及实测获得的最大光合速率在各个灌溉处理中的差异性不尽相同。在 FI 中,差异并不显著。而在 PRD 中,直角双曲线和非直角双曲线模型拟合得到的值要显著高于直角双曲线修正模型拟合值和实测值。在 ED 中,非直角双曲线模型的拟合值要显著高于其它 3 个。而在 LD 中,则是直角双曲线模型和非直角双曲线模型的拟合值要显著高于另外 2 个。但无论在何种灌溉处理内,通过直角双曲线修正模型拟合得到的值均与实测值并无显著差异。这表明,直角双曲线修正模型在预测最大净光合速率方面比直角双曲线和非直角双曲线更有优势。在不同的灌溉处理间,通过直角双曲线模型拟合得到的值中,FI 和 ED 要显著高于 PRD 和 LD。通过非直角双曲线拟合得到的值,则是

ED 要显著高于 FI 和 PRD,但与 LD 并差异并不显著。通过直角双曲线修正模型拟合得到的值,则是 FI 显著高于其它 3 种灌溉处理。实测值也显示,FI 要显著高于其它 3 种灌溉处理。

在 4 个灌溉处理中有 3 个显示,通过直角双曲线修正模型拟合获得的决定系数要显著高于直角双曲线和非直角双曲线。由直角双曲线修正模型所获得的决定系数均在 0.958 以上,其它 2 个模型都在 0.935 以下,这与所采用的拟合曲线的性质有关。

2.3 不同灌溉处理下叶片在低光强区的光响应

多数研究表明,在低光强区 ($PAR \leq 200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 植物叶片的净光合速率对光合有效辐射的响应是线性的^[13,25]。表 2 给出了在低光强条件下不同灌溉处理的葡萄叶片的净光合速率对光合有效辐射的线性拟合参数值,包括表观量子效率、光补偿点和暗呼吸。由表 2 可知,各灌溉处理的表观量子效率差异并不显著,最大的 ED 处理为 0.041,最小的是 PRD 处理为 0.038。说明 ED 处理对弱光的利用效率相对要高一些。但是,线性拟合得到的表观量子效率要明显低于非线性拟合所得到的初始量子效率(表 1)。光补偿点和暗呼吸速率 2 个参数对比中,ED 处理要显著高于 FI 和 PRD,但 ED 与 LD 之间的差异并不显著。同样,线性拟合得到的暗呼吸速率也明显低于非线性拟合得到的值,但光补偿点在二者中的差异并不明显。在 3 个参数中,最大的均为 ED 处理。一般来说,表观量子效率大,则其光补偿点就小,但是对 ED 来说,其暗呼吸速率过大是造成其光补偿点大的重要原因。综合分析表 1、2,尽管拟合方式及拟合的光合有效辐射范围不同,就不同灌溉处理之间的差异显著性来说,二者存在着较强的一致性,尤其是暗呼吸速率。但是,葡萄叶片在低光强区暗呼吸速率的值要明显低于曲线拟合的所得值和实测值。

表 2 葡萄叶片在低光强区 ($PAR \leq 200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 的表观量子效率、光补偿点和暗呼吸速率的线性拟合值

Table 2 The fitted value of apparent quantum yield, light compensation point and dark respiration rate of leaves of grape under lower levels of light intensity ($PAR \leq 200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

灌溉处理 Irrigation treatment	表观量子效率 Apparent quantum yield	光补偿点 Light compensation point	暗呼吸速率 Dark respiration rate
FI	0.039±0.001a	13.447±5.385b	0.529±0.212b
PRD	0.038±0.002a	12.679±0.939b	0.483±0.056b
ED	0.041±0.000a	29.950±5.364a	1.217±0.231a
LD	0.040±0.002a	20.751±3.683ab	0.846±0.191ab

注:不同的小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters show significant differences across four irrigation treatments.

3 结论与讨论

该研究中,FI 和 ED 处理在净光合速率、气孔导度和蒸腾速率方面大部分时间均高于 PRD 和 LD,而在水分利用效率上则低于后二者。不同灌溉处理的葡萄叶

片净光合速率日变化均呈明显的“M”型,或者说是双峰曲线,这样的变化趋势与多数文献^[22,26-27]相符。但也有文献表明,其日变化趋势是单峰曲线^[28],甚至不断下降^[9,29],这种差异可能来源于干旱胁迫及气候条件的不

同。有文献^[30]认为,某段时间进行水分亏缺之后,紧接着给予充足水分,能产生补偿效应,甚至超额补偿。但从该试验前期干旱处理的净光合速率与充分灌溉处理的比较结果来看,并没有产生补偿效应。PRD 和 LD 能在一定程度上降低净光合速率(图 1a)、气孔导度(图 1b)以及蒸腾速率(图 1c),这与葡萄在该时期处于干旱状态有很大关系。但是由于净光合速率与蒸腾速率在各个处理之间的降低幅度不同,造成了水分利用效率的差异。由图 1d 可以看出,干旱胁迫可以在一定程度上提高水分利用效率。由于水分利用效率可在单叶、植株、群体上分别表达,该试验中的水分利用效率体现在单叶瞬时水平上。尽管在单叶瞬时水平上可以暂时评述不同处理之间的优劣,但从农业灌溉上说,更多的是强调植株和群体水平上的水分利用效率。前人的研究^[9,29]表明,调亏灌溉和部分根区干燥相较充分灌溉都有提高水分利用效率的潜力。这种水分利用效率是以单方水的经济产出来表示的。因此,对葡萄生产来说,从群体层面以长时间跨度计算水分利用效率更加实用一些。从这方面来讲,试验的 2 种调亏灌溉处理和部分根区干燥处理与充分灌溉的水分利用效率相比较,孰优孰劣有待从长时间尺度进一步研究。

试验中不同灌溉处理的葡萄叶片在强光下均会出现光抑制现象,这与惠竹梅等^[26]的研究结果相似。但房林等^[31]、李雅善等^[32]的研究结果显示,葡萄叶片在强光下不会出现光抑制的现象,这可能与葡萄品种、栽培模式及当地气候有关。综合光合光响应曲线拟合的结果,直角双曲线修正模型的预测结果与实测值相比较另外 2 种拟合曲线更加吻合,尤其是体现在光饱和点的预测上。此外,直角双曲线修正模型模拟结果的决定系数也优于另外 2 种模型。直角双曲线和非直角双曲线都是单调递增函数,在有限光强下均不存在极值^[13]。但试验中的葡萄叶片均在强光下表现出了光抑制现象,这就造成了在强光下,这 2 种曲线的拟合是不符合实际情况的。而直角双曲线修正模型则可以模拟强光下光抑制现象,弥补直角双曲线和非直角双曲线的不足^[12-13]。虽然二次函数也能模拟光抑制现象,但是模拟结果所得到的参数并没有具体的生理学意义,因此较为少用。有研究表明^[33],植物表观量子效率的理论值可以达到 0.083~0.125,但在自然条件下仅在 0.04~0.07 范围内。就该试验的结果来看,表观量子效率在 0.04 附近,表明试验葡萄的弱光利用能力相对较低,该结果与惠竹梅等^[26]、李雅善等^[32]的研究结果是一致的。表观量子效率和初始量子效率都在一定程度上显示了叶片对低光的利用能力,但拟合所得到的表观量子效率要小于初始量子效率,这与叶子飘等^[13]的研究结果一样。就表观量子效率与光补偿点的关系而言,有文献^[34-35]显示表观量子效率

越大,光补偿点越小。而有的文献^[26]则是表观量子效率越大,光补偿点越大。也有文献^[36-37]指出二者相关性不强。从该试验的结果来看(表 2),表观量子效率与光补偿点的关系与文献^[26]相似。

在 4 种灌溉处理中,FI 的净光合速率日变化及最大净光合速率要高于其它 3 种处理,同时其光补偿点较低而光饱和点较高,显示了其在积累光合产物方面的优势。ED 的光补偿点最高,且暗呼吸速率最大,表明其积累光合产物能力相对 FI 较差。PRD 和 LD 在光补偿点、光饱和点(实测值)、暗呼吸速率(实测值)方面与 FI 差异并不显著,尽管其净光合速率日变化和最大净光合速率均低于 FI,但是其水分利用效率相对较高,而且相对干燥的环境有利于优质葡萄的生产。因此,从兼顾经济效益与生态效益方面考虑,PRD 和 LD 灌溉处理相对较好。

参考文献

- [1] 李华. 葡萄栽培学[M]. 北京:中国农业出版社,2008:10-20.
- [2] 綦伟,李瑞臣,徐月华,等. 葡萄抗旱性研究进展[J]. 中外葡萄与葡萄酒,2005(3):33-36.
- [3] 山仑,邓西平,张岁岐. 生物节水研究现状及展望[J]. 中国科学基金,2006(2):66-71.
- [4] INTRIGLIOLO D S, PÉREZ D, RISCO D, et al. Yield components and grape composition responses to seasonal water deficits in Tempranillo grapevines[J]. Irrigation Science, 2012, 30: 339-349.
- [5] LOPES C M, SANTOS T P, MONTEIRO A, et al. Combining cover cropping with deficit irrigation in a Mediterranean low vigor vineyard[J]. Scientia Horticulturae, 2011, 129: 603-612.
- [6] SANTESTEBAN L G, MIRANDA C, ROYO J B. Regulated deficit irrigation effects on growth, yield, grape quality and individual anthocyanin composition in *Vitis vinifera* L. cv. 'Tempranillo' [J]. Agricultural Water Management, 2011, 98: 1171-1179.
- [7] PONI S, BERNIZZONI F, CIVARDI S. Response of "Sangiovese" grapevines to partial root-zone drying: Gas-exchange, growth and grape composition [J]. Scientia Horticulturae, 2007, 114: 96-103.
- [8] DU T, KANG S, ZHANG J, et al. Water use efficiency and fruit quality of table grape under alternate partial root-zone drip irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95: 659-668.
- [9] 杜太生, 康绍忠, 夏桂敏, 等. 滴灌条件下不同根区交替湿润对葡萄生长和水分利用的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 21(11): 43-48.
- [10] TUITTILA E S, VASANDER H, LAINE J. Sensitivity of C sequestration in reintroduced Sphagnum to water-level variation in a cutaway peatland[J]. Restoration Ecology, 2004, 12(4): 483-493.
- [11] 许大全. 光合作用测定及研究中一些值得注意的问题[J]. 植物生理学通讯, 2006, 42(6): 1163-1167.
- [12] 叶子飘, 于强. 一个光合作用光响应新模型与传统模型的比较[J]. 沈阳农业大学学报, 2007, 38(6): 771-775.
- [13] 叶子飘, 于强. 光合作用光响应模型的比较[J]. 植物生态学报, 2008, 32(6): 1356-1361.
- [14] MIKO U F K, GRAHAM D F. Investigation of the CO₂ dependence of quantum yield and respiration in eucalyptus pauciflora[J]. Plant Physiology, 1987, 83(4): 1032-1036.
- [15] THORNLEY J H M. Dynamic model of leaf photosynthesis with accli-

mation to light and nitrogen[J]. Annals of Botany, 1998, 81(3): 421-430.

[16] 郎莹, 张光灿, 张征坤, 等. 不同土壤水分下山杏光合作用光响应过程及其模拟[J]. 生态学报, 2011, 31(16): 4499-4508.

[17] 韩瑞锋, 李建明, 胡晓辉, 等. 甜瓜幼苗叶片光合变化特性[J]. 生态学报, 2012, 32(5): 1471-1480.

[18] 张力文, 钟国成, 张利, 等. 3 种鼠尾草植物光合作用—光响应特性研究[J]. 草业学报, 2012, 21(2): 70-76.

[19] JUNQUERA P, LISSARRAGUE J R, JIMÉNEZ L, et al. Long-term effects of different irrigation strategies on yield components, vine vigour, and grape composition in cv. Cabernet-Sauvignon (*Vitis vinifera* L.)[J]. Irrigation Science, 2012, 30: 351-361.

[20] WILLIAMS L E, GRIMES D W, PHENE C J. The effects of applied water at various fractions of measured evapotranspiration on water relations and vegetative growth of Thompson Seedless grapevines[J]. Irrigation Science, 2010, 28: 221-232.

[21] NETZER Y, YAO C, SHENKER M, et al. Water use and the development of seasonal crop coefficients for superior seedless grapevines trained to an open-gable trellis system[J]. Irrigation Science, 2009, 27(2): 109-120.

[22] 房玉林, 惠竹梅, 陈洁, 等. 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): 135-138.

[23] 管雪强, 赵世杰, 李德全, 等. 干旱胁迫下抑制光呼吸对‘赤霞珠’葡萄光抑制的影响[J]. 园艺学报, 2004, 31(4): 433-436.

[24] 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.

[25] 吴彦琼, 胡玉佳. 外来植物南美蟛蜞菊, 裂叶牵牛和五爪金龙的光合特性[J]. 生态学报, 2004(10): 2334-2339.

[26] 惠竹梅, 焦旭亮, 张振文. 渭北旱塬‘赤霞珠’葡萄浆果膨大期光合特性研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(4): 111-116.

[27] 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[J]. 农业工程学报, 2013, 29(4): 133-141.

[28] 周兴本, 刘士冲, 郭修武, 等. 不同水分条件下无核白鸡心葡萄光合日变化[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(12): 182-184.

[29] 杜太生, 康绍忠, 张霁, 等. 不同沟灌模式对沙漠绿洲区葡萄生长和水分利用的效应[J]. 应用生态学报, 2006, 17(5): 805-810.

[30] 周磊, 甘毅, 欧晓彬, 等. 作物缺水补偿节水的分子生理机制研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(1): 217-225.

[31] 房林, 张振文, 贾媛媛, 等. 杨凌地区 3 个葡萄品种光合特性比较[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(5): 203-208.

[32] 李雅善, 李华, 王华, 等. 赤霞珠葡萄光合-光响应曲线拟合模型的比较分析[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(2): 20-25.

[33] 余叔文. 植物生理学和分子生物学[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 236-243.

[34] 黄秦军, 黄国伟, 丁昌俊, 等. 美洲黑杨杂种不同生长势无性系光合特征[J]. 林业科学, 2013, 49(3): 56-62.

[35] 常青山, 张利霞, 陈煜, 等. 菊花黄绿突变体的光合与类囊体膜光谱[J]. 林业科学, 2013, 49(2): 72-78.

[36] 种培芳, 苏世平, 高暎, 等. 4 个地理种源白刺气体交换特性比较[J]. 草业学报, 2013, 22(2): 307-312.

[37] 梁开明, 曹洪麟, 徐志防, 等. 台湾青枣及野生种的光合作用日变化及光响应特征[J]. 园艺学报, 2008, 35(6): 793-798.

Study on the Photosynthetic Characteristics of Grape Under Different Irrigation Conditions

LI Yashan², LI Hua¹, XU Chengdong², WANG Bo², WANG Zhenji², FAN Shuguo²

(1. College of Enology, Northwest Agricultural and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100; 2. Department of Chemistry and Life Science, Chuxiong Normal University, Chuxiong, Yunnan 675000)

Abstract: Four irrigation methods, concluding full irrigation (FI), part root-zone irrigation (PRD), early deficit (ED), late deficit (LD), were used to study on the photosynthetic characteristics of grape leaves beginning after bud. Then the photosynthetic parameters was measured and photosynthetic characteristics during mature period was analyzed. The results showed that the net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s) and transpiration rate (T_r) of grape leaves of FI and ED were higher than the leaves of PRD and LD, while the water use efficiency (WUE) of FI and ED were lower than PRD and LD. The light compensation point (LCP) and dark respiratory rate (R_d) of FI and PRD were lower than ED and LD. And the light saturation point (LSP) of PRD was the least, while the net photosynthetic rate ($P_{n_{max}}$) of FI was the highest. Modified rectangular hyperbola model was better than rectangular hyperbola and non-rectangular hyperbola in fitting light-response curve of photosynthesis, especially in the result of LSP. The apparent quantum efficiency (AQY) and R_d acquired by linear fitting under lower levels of light intensity ($PAR \leq 200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) were lower than non-linear fitting under $PAR \leq 2\ 000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, and the later was more close to measured value. Considering the economic and ecologic benefits, the LD and PRD were the better irrigation methods.

Keywords: grape; irrigation method; net photosynthetic rate; stomatal conductance; transpiration rate; apparent quantum efficiency; light-response curve of photosynthesis