

不同水分条件对葡萄光合与荧光特性的影响

周兴本^{1,2}, 刘士冲¹, 郭修武¹, 王丛丛¹, 李 坤¹, 郭印山¹, 李成祥¹

(1. 沈阳农业大学 园艺学院, 辽宁 沈阳 110866; 2. 辽宁水利职业学院, 辽宁 沈阳 110122)

摘要:为探明葡萄在不同生长时期的光合特性与土壤水分含量之间关系。以2年生无核白鸡心葡萄为试材,研究了不同土壤水分条件(处理Ⅰ50%、处理Ⅱ65%、处理Ⅲ80%)对无核白鸡心葡萄光合特性和荧光特性的影响。结果表明,无核白鸡心葡萄在新梢生长期、坐果期和转色期均以80%田间持水量(处理Ⅲ)时的光合速率较高,而采后期以65%田间持水量(处理Ⅱ)的光合速率较高。在水分利用效率方面,新梢生长期和采收后与处理的田间持水量呈负相关,坐果期和转色期与处理的田间持水量呈正相关。各个荧光参数在不同时期的变化总体上随处理的田间持水量增加而增大,PI各时期的变化与光合指标在各时期的变化相似,有一定相关性。PI在新梢生长期、坐果期和转色期均以处理Ⅲ表现较好;采收后以处理Ⅱ条件下各个荧光参数表现最好。综合各项指标的结果,无核白鸡心在新梢生长期适宜采用处理Ⅲ(田间持水量80%)的灌溉量;坐果期、转色期和采收后适合采用处理Ⅱ(田间持水量65%)的灌溉量。

关键词:无核白鸡心葡萄;灌溉量;光合特性;荧光特性;水分利用效率

中图分类号:S663.01 文献标识码:A 文章编号:1000-7091(2014)04-0169-06

Effects of Photosynthetic and Fluorescence Characteristics of Centennial Seedless in Different Water Conditions

ZHOU Xing-ben^{1,2}, LIU Shi-chong¹, GUO Xiu-wu¹, WANG Cong-cong¹,
LI Kun¹, GUO Yin-shan¹, LI Cheng-xiang¹

(1. College of Horticulture, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 2. Liaoning Water Conservancy Vocational College, Shenyang 110122, China)

Abstract: In order to ascertain the relationship between photosynthetic characteristics and soil water content of grape in different growth periods. Centennial seedless grape was used to study the photosynthetic and fluorescence characteristics at three different water treatment levels (The soil moisture treatment I is 50%, treatment II is 65%, treatment III is 80%). The results showed that: The photosynthetic rate and irrigation is positively correlated at new shoot growth period, fruit setting period and veraison. The photosynthetic rate of the treatment II of medium irrigation amount is the highest in after picked. The water use efficiency of different period is not the same, water use efficiency and irrigation quantity was negatively correlated in new shoot growth period and after picked while fruit setting period and veraison is contrary. With the overall, the fluorescence parameters changes of Centennial seedless in different growth periods under different water conditions were positively related to irrigation amount. The comprehensive photosynthetic performance (PI) and photosynthetic parameters changes are similar. PI in the first three periods (New shoot growth period, fruit setting period and veraison) showed positive correlation with moisture; the treatment II of photosynthetic performance is the best after picked. Comprehensive indexes of the results were as follows: the irrigation of treatment III is suitable for Centennial seedless in shoot growth period; the irrigation of treatment II is suitable for centennial seedless in fruit setting period, veraison and after picked.

Key words: Centennial seedless; Irrigation quantity; Photosynthetic characteristics; Fluorescence characteristics; Water use efficiency

收稿日期: 2014-04-22

基金项目: 国家现代农业产业技术体系建设专项基金(CARS-30-yz-6)

作者简介: 周兴本(1977-), 男, 山东烟台人, 博士, 主要从事果树栽培生理研究。

通讯作者: 郭修武(1959-), 男, 辽宁抚顺人, 教授, 博士生导师, 主要从事果树栽培与生理生态研究。

干旱缺水是一个世界性的问题,中国是世界上严重缺水的国家之一,人均淡水资源占有量只有世界平均量的 $1/4$ ^[1]。水资源短缺已成为我国一些地区农业发展的首要制约条件,目前,农业用水占到国民经济总用水量的 70% 以上,其中灌溉用水占农业用水的 90% 以上,而灌溉水的实际利用量仅占灌溉量的 33%^[1]。因此,提高植物本身的水分利用效率,加大不同时期植物水分需求规律的研究力度是干旱地区农业节水的核心问题。

水分对果树光合作用的影响一直是前人研究重点。葡萄的生长发育与光合作用息息相关,叶片的光合能力直接影响到浆果的品质和产量。不同水分条件对葡萄的生长发育有显著影响,田间持水量较高时,可显著增加葡萄蒸腾速率,适度干旱则有利于提高葡萄的水分利用率^[2]。Loveys 等^[3]对葡萄的研究表明:调亏灌溉处理水分利用效率比普通滴灌提高 59.0%,需水量减少 46.0%,产量减少 13.8%,但葡萄和葡萄酒品质大大改善。因此,研究不同水分条件下葡萄的光合特性及影响因素,对于采取合理的水分管理模式,提高葡萄的生产水平具有重要的指导意义。葡萄叶片的荧光特性与光合特性关系密切,同样受土壤水分条件的影响,其影响规律却少见报道。

本试验以无核白鸡心葡萄为试材,研究了不同水分条件下葡萄光合与荧光特性在各个生长期变化规律,旨在探明葡萄在不同生长时期的光合特性与土壤水分含量之间关系,为制定合理的水分管理措施提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验在沈阳农业大学葡萄试验园进行,供试材料为两年生无核白鸡心葡萄(Centennial seedless)贝达砧木嫁接苗。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计 将无核白鸡心葡萄栽植于避雨棚内的砖槽里,砖槽规格(内部长×宽×高)为 1600 mm×900 mm×500 mm。每个槽内土量及土样相同,每槽种植 6 株,为一小区。称重法测定槽内土壤的最大田间持水量,根据前期预备试验结果设置 3 个处理,处理 I 为最大田间持水量的 50%,处理 II 为最大田间持水量的 65%,处理 III 为最大田间持水量的 80%。3 次重复。利用水势仪分别对 3 个处理标定土壤水势,定期检测水势值,当不同处理对应的水势下降到设定值时进行灌水,使土壤含水量维持

在设定值。槽内覆盖薄膜防止水分蒸发。

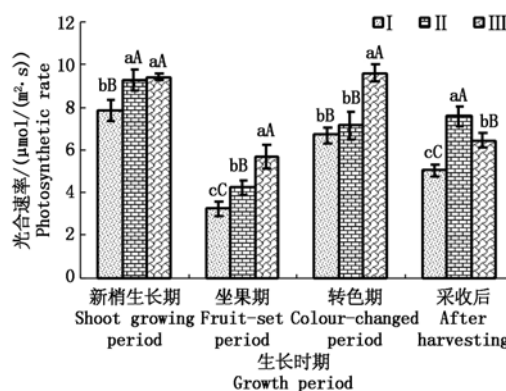
1.2.2 不同时期光合指标与荧光参数的测定 在新梢生长期、坐果期、转色期和采收后 4 个时期测定光合指标和荧光参数。每个生长时期测 5 次,取平均值。在晴天上午 9:00–11:00,选择发育良好、长势中庸的植株取新梢顶端向下第 5~6 片长势接近的功能叶进行测定,每小区测 3 株,取平均值。采用 CARIS-1 便携式光合仪测定光合特性指标:光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、水分利用率(WUE)= P_n/T_r ;采用 Hand-PEA 荧光仪测定荧光参数:吸收光能为基础的光合性能指数(PI)、PS II 原初光能转化效率(F_v/F_m)和可变荧光强度(F_v)。叶绿素 a 含量的测定采用丙酮法^[4]。

1.2.3 数据处理 试验数据用 SPSS 数据分析软件进行统计分析并进行新复极差多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同水分条件下无核白鸡心葡萄光合特性变化

2.1.1 水分处理对光合速率的影响 不同水分处理对葡萄光合速率的影响如图 1 所示。整个生长期以新梢生长期 3 个处理的光合速率较高,且新梢生长期、坐果期、转色期光合速率随不同处理的田间持水量增加而提高。



不同大写字母表示差异极显著 ($P < 0.01$); 不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), $n = 3$ 。图 2~8 同。

Different capital letters indicate very significant difference ($P < 0.01$); Different lowercase indicate significant difference ($P < 0.05$), $n = 3$. The same as Fig. 2–8.

图 1 不同土壤水分条件下无核白鸡心葡萄不同时期光合速率比较

Fig. 1 Comparison the photosynthetic rate of Centennial seedless in different water treatment

新梢生长期处理 II 和处理 III 光合速率差异不显著,但均显著高于处理 I ($7.85 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)。此时期光合速率较高,一方面在于此时期的环境温度在 26°C 左右,适宜植物光合作用,另一方面此时叶片光合机构建造完成,处于营养生长的旺盛时期。

由此可见,新梢期土壤含水量低不利于叶片光合机构建成,导致光合速率下降。

坐果期光合速率在生长期中处于较低水平,主要的原因是此时期环境温度升高较快,尤其在避雨棚下中午达到 35 ℃ 左右,气孔关闭,不利于气体交换;另一方面,高温、强光使叶片受光抑制,影响光合相关酶的活性,从而导致光合速率下降。坐果期处理Ⅲ的光合速率明显高于处理Ⅱ和处理Ⅰ,且处理间达到差异显著水平。这与荧光特性分析中田间持水量多能够减轻叶片的光抑制伤害一致。

转色期光合速率明显提高,且转色期处理Ⅲ(9.6 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$)的光合速率与新梢生长期的光合速率相当,说明转色期是无核白鸡心葡萄光合速率的又一个高峰期,处理Ⅲ的田间持水量对促进光合速率的提高最明显,极显著高于处理Ⅱ和处理Ⅰ。

采收后光合速率以处理Ⅱ(7.5 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$)较高,且整体水平较低。可能与生长后期葡萄叶片开始衰老、光合功能下降有关。

2.1.2 水分处理对蒸腾速率的影响 在不同的生育时期,无核白鸡心葡萄的蒸腾速率差异明显,整体以坐果期蒸腾速率较高(图2)。其中,坐果期处理Ⅲ蒸腾速率最大(4.09 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$),这主要与此时期环境温度过高有关。在葡萄的新梢生长期、坐果期、转色期,处理Ⅲ的蒸腾速率显著高于处理Ⅰ和处理Ⅱ,说明田间持水量高会增加葡萄叶片的蒸腾速率。此外,在采收后蒸腾速率的变化规律与光合速率采收后的变化一致,说明采收后光合速率与蒸腾速率存在内在联系。

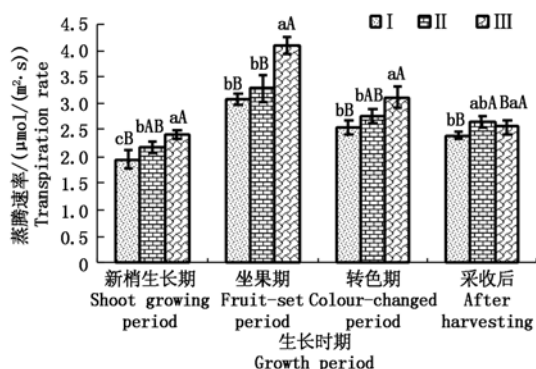


图2 不同土壤水分条件下无核白鸡心葡萄不同时期蒸腾速率比较

Fig. 2 Comparison the transpiration rate of Centennial seedless in different water treatment

2.1.3 水分处理对气孔导度的影响 试验结果表明(图3),3个处理在新梢生长期、坐果期、转色期叶片的气孔导度随处理的田间持水量增加而增大,其中以新梢生长期气孔导度最高。这与光合速率新

梢生长期的结果一致,说明气孔导度显著影响叶片的光合速率^[2],主要原因是气孔导度较高有利于气体交换,二氧化碳能够更快地得到利用,从而促进光合速率的提高。坐果期处理Ⅰ和处理Ⅱ的气孔导度水平在4个时期中最低,可能与此时期环境温度过高且田间持水量相对不足有关,而且此时期光合速率最低,可见光合速率的下降主要是气孔因素造成的。转色期和采收后叶片的气孔导度都与采收后光合速率的变化趋势相一致,更进一步说明气孔因素是导致光合速率变化的主要原因。

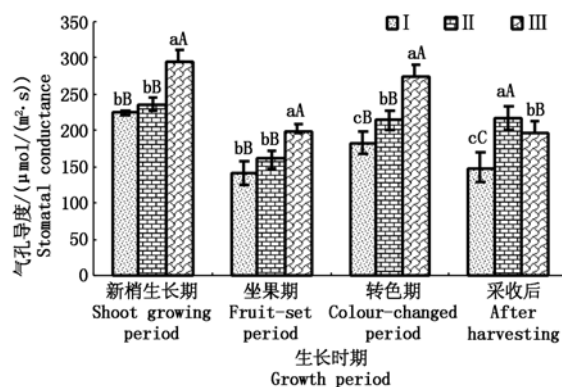


图3 不同土壤水分条件下无核白鸡心葡萄不同时期气孔导度比较

Fig. 3 Comparison the stomatal conductance of Centennial seedless in different water treatment

2.1.4 水分处理对水分利用效率的影响 试验结果表明(图4),新梢生长期水分利用效率最高,此结果与新梢生长期光合速率最高相一致,处理Ⅰ显著高于处理Ⅲ,说明该时期适度的减少灌水有利于提高葡萄对水分的利用率,这与前人的研究结果基本一致^[2]。坐果期水分利用效率最低,这由于水分利用率由 Pn/Tr 计算得来,坐果期温度高,蒸腾量大(图2),光合速率也因高温、强光的抑制而变小(图1),从而导致水分利用效率降低。

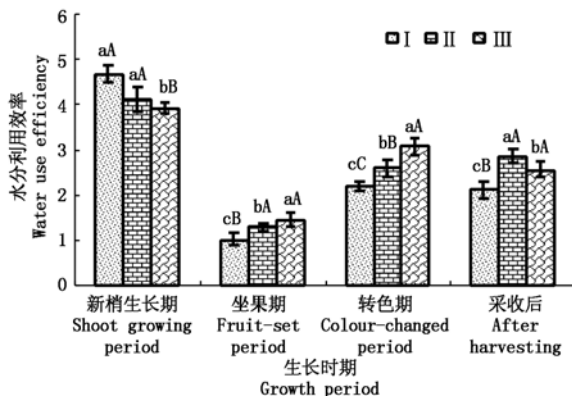


图4 不同土壤水分条件下无核白鸡心葡萄不同时期水分利用率比较

Fig. 4 Comparison the water use efficiency of Centennial seedless in different water treatment

转色期水分利用率高于坐果期低于新梢生长期,且随田间持水量的增加而提高,处理间差异显著,说明转色期增加田间持水量可以提高水分利用率。采收后水分利用率的变化与蒸腾速率(图2)、光合速率的变化(图1)一致,说明光合速率与水分利用效率有直接的内在联系。

2.2 不同水分条件下无核白鸡心葡萄不同时期叶绿素 a 含量及荧光特性变化

2.2.1 水分处理对叶片叶绿素 a 含量的影响

植物进行光合作用所需要的能量是由叶绿素吸收太阳能经过转化而提供的。这些色素中最重要的是叶绿素 a,作为天线色素的重要作用就在于捕获太阳能用于光合所需的能量。

试验结果如图5所示,总体上不同处理的叶绿素 a 含量与田间持水量呈正相关,新梢生长期和转色期叶绿素 a 含量明显高于坐果期和采收后。各个时期3个处理间的叶绿素 a 含量差异程度不同,以新梢生长期含量最高。在整个生长期,处理 I 的叶绿素 a 含量显著低于处理 II 和处理 III。

新梢生长期叶片生长迅速,光合机构迅速建成,也处于营养生长的旺盛时期,光合作用强,较多的水分供应促进了叶绿素 a 含量的提高;坐果期处于生殖生长期,此时期以果实的形成为主,外界环境温度和光照都处于较高的状态,且田间持水量不足使得天线色素部分失活或者降解,因此总体含量比新梢生长期有所下降;转色期果实膨大完成,进入第2次营养生长的高峰期,叶绿素 a 含量明显增加,转色期3个处理的叶绿素 a 含量差异显著;采收后葡萄叶片容易衰老,叶绿素分解加快,造成含量下降,以处理 I 下降最明显。

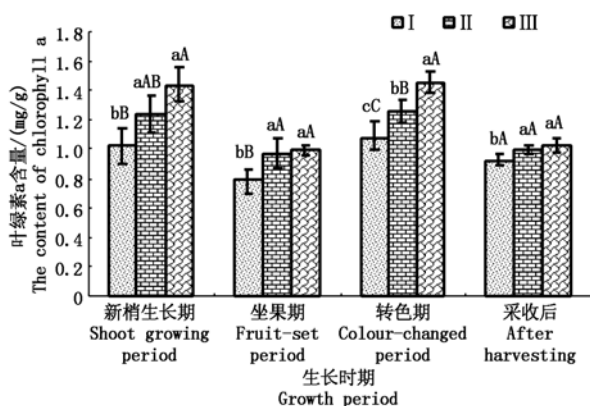


图5 不同土壤水分条件下无核白鸡心葡萄不同时期叶绿素 a 含量比较

Fig. 5 Comparison the content of chlorophyll a of Centennial seedless in different water treatment

2.2.2 水分处理对叶片原初光能转化效率 (F_v/F_m) 的影响

F_v/F_m 指最大光化学效率(原初光能

转化效率), F_v/F_m 的降低常用来判断植物是否受到光抑制,其值越低受到光抑制的程度越高^[5]。

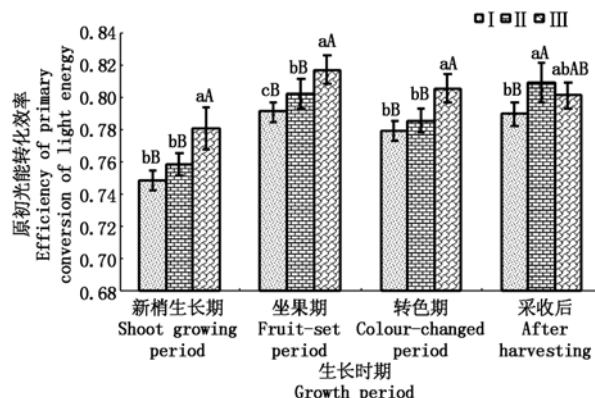


图6 不同土壤水分条件下无核白鸡心葡萄不同时期原初光能转化效率比较

Fig. 6 Comparison the efficiency of primary conversion of light energy of Centennial seedless in different water treatment

3个处理在新梢生长期、坐果期、转色期的 F_v/F_m 随着水分的减少而降低(图6),说明水分越少葡萄受到光抑制的程度越大。各时期之间比较来看,坐果期光化学效率最高,此时期是果实成长的关键时期,光化学效率较高与此关系密切,另外此时期高温,强光条件下本应该光抑制最强,而从 F_v/F_m 的大小来看,此时期对环境有了一定的适应,对光抑制的耐受能力反而比其他时期要高,以处理 III 的表现最好;转色期 F_v/F_m 变化与坐果期相似,而采收后与前几个时期不同,以处理 II 受光抑制的程度最小,且处理 II 光化学效率高于转色期,说明处理 II 的田间持水量更有利于葡萄采收后光化学效率的提高。

2.2.3 水分处理对叶片可变荧光 (F_v) 的影响

F_v 值与植物叶片 PS II 水光解释放氧气的过程有关,可作为 PS II 反应中心活性大小的相对指标^[6-7]。

如图7所示,各个时期3个处理都以处理 I 的 F_v 值最低,表明处理 I 的 PS II 反应中心活性较低,新梢生长期处理 II 和处理 III 差异不显著;坐果期 F_v 的比较表现为处理 III 极显著高于处理 II 和处理 I;转色期处理 I 和处理 II 的 F_v 差异不显著,但是都显著低于处理 III;采收后 PS II 反应中心活性以处理 II 最高,可见采收后处理 II 的田间持水量对 PS II 反应中心活性最有利。 F_v 的结果表明,处理 I 的田间持水量在各个时期都对光合作用过程中水的光解产生了不利影响;处理 III 的田间持水量在坐果期和转色期都对水的光解有促进作用;处理 II 的田间持水量只在采收后对光合过程最有利。可见,从田间持水量对 PS II 反应中心活性的方面考虑,各个时期应该

采取不同的田间持水量。新梢生长期和采收后以处理Ⅱ的田间持水量较好,坐果期和转色期以处理Ⅲ田间持水量最好。

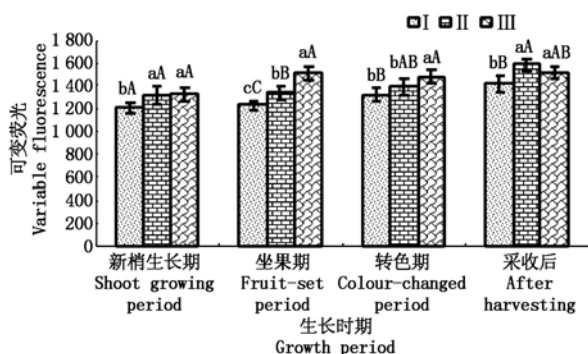


图7 不同土壤水分条件下无核白鸡心葡萄不同时期可变荧光比较

Fig. 7 Comparison the variable fluorescence of Centennial Seedless in different water treatment

2.2.4 水分处理对叶片光合综合性能指数 (PI) 的影响 光合性能指数 (PI) 由 RC/ABS 、 ϕP_o 和 ψ_o 这3个参数计算而来,这3个参数相互独立,它们对某些环境变化比 F_v/F_m 更敏感,能更好地反映光合机构对外界环境变化的影响^[8-10]。

试验结果(图8)表明,前3个时期光合性能与田间持水量呈显著正相关,新梢生长期处理Ⅲ的光合性能比处理Ⅱ和处理Ⅰ分别高出14.6%和15.2%;坐果期高出9.1%和17.4%;转色期高出13.5%和23.4%。从数据上看出转色期差异最大。表明转色期光合综合性能PI对土壤水分含量最敏感,且随田间持水量增加而显著提高。采收后处理Ⅱ田间持水量的光合性能较高,这一结果与光化学效率和可变荧光的变化相同,进一步说明采收后应控制灌水,降低土壤含水量。总体来看,坐果期的光合性能最低,可能此时期受到的光抑制和光破坏最严重,导致光合性能的下降。

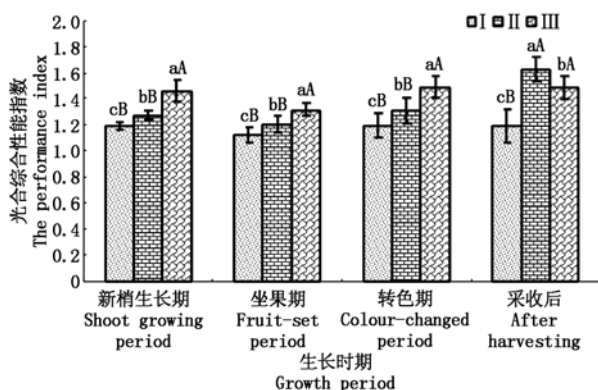


图8 不同土壤水分条件下无核白鸡心葡萄不同时期光合综合性能指数比较

Fig. 8 Comparison the performance index on absorption basis of Centennial seedless in different water treatment

3 讨论

3.1 不同田间持水量对不同生长期光合指标变化的影响

植物光合作用受到很多环境因素的影响,水分减少造成的光合下降并不是由于水原料供应不足引起的,而是缺少水分造成的气孔和非气孔因素造成的^[11]。本试验研究表明,各个生长期无核白鸡心葡萄光合速率和气孔导度与处理的田间持水量呈正相关,因此影响光合速率的原因主要可能是缺水造成的气孔因素。除了气孔因素以外可能还与光合相关的酶有关,对于光合酶活性的研究还有待进一步测定研究。

水分通过气孔蒸腾是蒸腾作用的主要方式,蒸腾作用和气孔导度存在显著的相关性^[12]。本研究发现无核白鸡心葡萄的蒸腾速率与气孔导度之间的相关性在不同生育期存在差异,在转色期和采后期表现为蒸腾速率与气孔导度正相关,与前人研究结果一致^[12];而在新梢生长期和坐果期的蒸腾速率与气孔导度并没有呈现显著正相关,新梢生长期气孔导度最大,而蒸腾速率却不是最大的,相反在坐果期气孔导度较小,而蒸腾速率却高于新梢生长期,之所以出现这种情况,与这两个时期的环境条件变化可能有着直接的关系。坐果期比新梢生长期温度高出5~6℃,甚至达到35℃的高温,而葡萄的适宜生长温度为20~30℃,新梢生长期温度在25℃左右,虽然气孔导度较高但是温度适宜,因此散失的水分较少,而坐果期高温条件下尽管部分气孔关闭,但是剧烈蒸发反而使水分散失增多,加上其他途径的蒸腾,总体上反而使蒸腾速率高于新梢生长期。

水分利用效率取决于 P_n 与 T_r 的比值,光合作用的生理生态研究机制表明, T_r 主要受到气孔的限制,而 P_n 除受气孔还受到非气孔因素的限制^[13-14]。许多学者对不同植物的研究表明,土壤可用水分减少会导致内在水分利用效率增高^[15]。本试验结果只是在新梢生长期和采收后的水分利用效率变化规律与前人研究结果一致,既适度的缺水有利于水分利用效率的提高,但是在坐果期和转色期水分利用效率的变化规律与前人研究不一致^[15]。可能原因有两个方面,一方面研究试材的不同,另一方面可能由于在坐果期和转色期避雨棚内的光照和温度较高,环境条件与前人研究存在差异,可进一步研究。

3.2 不同田间持水量对叶绿素 a 含量变化和荧光参数的影响

叶绿素 a 荧光诱导动力学检测技术是以植物体

内叶绿素 a 为天然探针, 包含丰富的光合信息^[16]。因此, 本试验采用叶绿素荧光的相关参数对不同水分对无核白鸡心葡萄光合性能的影响进行探测。

Fv/Fm 在胁迫条件下的下降比较明显^[17-18], 同时单一的高温、低温或者水分不足等逆境胁迫不一定会对 PSII 产生伤害而造成 Fv/Fm 下降, 但是逆境 + 强光则会导致 Fv/Fm 的明显降低^[19]。本试验处理 I (50%) 的田间持水量对无核白鸡心葡萄可产生轻度干旱胁迫, 结合避雨棚内高温, 进而导致 Fv/Fm 下降到 0.74 ~ 0.76。同时发现, 提高田间持水量可以明显降低高温胁迫对 Fv/Fm 的影响, 提高 Fv/Fm 比值。

PI 是一个比 Fv/Fm 敏感得多的一个荧光参数, 当外界环境条件发生变化时, 在 Fv/Fm 还没有发生变化的时候, PI 已经发生了明显的变化^[20]。PI 是在综合方面指示植物即将发生伤害或者不适应的一个信号, 反映对改变后环境的耐受能力, PI 的减小并不能用来判断无核白鸡心在本试验的处理中受到了严重的伤害, 因此, PI 与葡萄光合系统受伤害程度并不成正比关系。利用 PI 变化反映无核白鸡心葡萄对于田间持水量的敏感与否, 达到快速检测, 从而调整灌水量的目的。

4 结论

不同水分条件下无核白鸡心葡萄在新梢生长期、坐果期和转色期的光合速率随处理的田间持水量增加而提高, 尤其以新梢生长期和转色期的光合速率较高, 由此说明, 在葡萄生长前期适当提高土壤含水量有利于植株光合速率提高。采收后植株整体光合速率下降, 处理 II 的光合速率显著高于其他处理, 说明采收后适度控水利于光合速率的提高。

新梢生长期和采收后水分利用效率随不同处理的田间持水量增加而下降, 坐果期和转色期的水分利用效率随不同处理的田间持水量增加而提高。说明高温、强光的生长时期多灌水有利于水分利用率的提高, 进而促进光合产物的积累。无核白鸡心葡萄的荧光参数在新梢生长期、坐果期、转色期的变化总体随不同处理的田间持水量增加而呈上升趋势, 采收后以处理 II 各个荧光参数的表现较好。

根据不同水分条件下无核白鸡心葡萄光合与荧光各个参数生长期的变化规律提出以下的灌溉计划: 新梢生长期采用处理 III (田间持水量的 80%) 的灌溉量, 以促进新梢和叶片快速生长从而进一步促进光合速率的提高; 坐果期和转色期采用处理 II (田间持水量的 65%) 的灌溉量, 既能保证光合速率

的正常水平又能保证果实品质; 采收后采用处理 II (田间持水量的 65%) 的灌溉量可保持较好的光合性能, 有利于采收后葡萄的营养储备。

参考文献:

- [1] 冯广志. 我国节水灌溉发展的总体思路 [C] // 科学技术部农村与社会发展司, 水利部国际合作与科技司. 中国节水农业问题论文集. 北京: 中国水利水电出版社, 1999: 17 - 18.
- [2] 严巧娣, 苏培玺. 不同土壤水分条件下葡萄叶片光合特性的比较 [J]. 西北植物学报, 2005, 25 (8): 1601 - 1606.
- [3] Loveys B R, Dry P R, Stoll M, et al. Using plant physiology to improve the water use efficiency of horticultural crops [J]. Acta Horticulturae, 2000, 25 (1): 187 - 197.
- [4] 程瑞平, 束怀瑞. 水分胁迫对果树生长和叶中矿质元素含量的影响 [J]. 植物生理学通讯, 1999, 28 (1): 32 - 34.
- [5] Krause G H, Weis E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis the basics Ann Rev [J]. Plant Physiol Mol Biol, 1991, 42 (1): 313 - 349.
- [6] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数及其意义的讨论 [J]. 植物学通报, 1999, 16 (4): 444 - 448.
- [7] 李志博, 魏亦农, 张荣华, 等. 棉花不同叶位叶绿素荧光特性的初步研究 [J]. 棉花学报, 2005, 17 (3): 189 - 190.
- [8] Appenroth K J, Stöckel J, Srivastava A, et al. Multiple effects of chromate on the photosynthetic apparatus of *Spirodela polyrrhiza* as probed by OJIP chlorophyll a fluorescence measurements [J]. Environ Pollut, 2001, 115 (1): 49 - 64.
- [9] Van Heerden P D, Tsimilli-Michael M, Krüger G H, et al. Dark chilling effects on soybean genotypes during vegetative development: parallel studies of CO₂ assimilation, chlorophyll a fluorescence kinetics O-J-I-P and nitrogen fixation [J]. Physiol Plant, 2003, 117 (2): 476 - 491.
- [10] Van Heerden P D, Strasser R J, Krüger G H. Reduction of dark chilling stress in N₂-fixing soybean by nitrate as indicated by chlorophyll a fluorescence kinetics [J]. Plant Physiol, 2004, 121 (1): 239 - 249.
- [11] 余叔文, 汤章城. 植物生理与分子生物学 [M]. 北京: 科学出版社, 1999: 262 - 276.
- [12] 曹仪植, 宋占午. 植物生理学 [M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1998: 21 - 47, 144 - 157.
- [13] Sharkey T D. Photosynthesis of intact leaves of C₃ plants: physics, physiology and rate limitations [J]. Bot Rev, 1985, 51 (1): 51 - 105.
- [14] Taylor G E, Gunderson C A. Physiological site of ethylene effects on carbon dioxide assimilation in *Glycine max* L. Merr [J]. Plant Physiol, 1987, 86 (1): 85 - 92.
- [15] 尤 杨, 周秀梅, 申小雨. 金桔秋季光合特性初步研究 [J]. 亚热带植物科学, 2010, 39 (1): 21 - 24.
- [16] 关军峰. 果品品质研究 [M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2001: 105 - 116.
- [17] 许大全. 光系统 II 反应中心的可逆失活及其生理意义 [J]. 植物生理学通讯, 1999, 35 (4): 273 - 276.
- [18] 吴长艾, 孟庆伟, 邹 琦, 等. 小麦不同品种叶片对光氧化胁迫响应的比较研究 [J]. 作物学报, 2003, 29 (3): 339 - 344.
- [19] Takaha SS, Murata N. How do environmental stresses accelerate photoinhibition [J]. Trends in Plant Science, 2008, 13 (4): 68 - 74.
- [20] 李鹏民, 高辉远. 快速叶绿素荧光诱导动力学分析在光合作用中的应用 [J]. 植物生理学与分子生物学学报, 2005, 31 (6): 559 - 566.