

doi:10.11937/bfyy.20174223

气候变化对木本植物光合产物分配与果实品质的影响

哈 蓉, 马亚平, 曹 兵

(宁夏大学 农学院, 宁夏 银川 750021)

摘 要:大气 CO₂ 浓度升高引起的温室效应导致全球地表平均气温升高,引起全球降水格局发生变化,对农林业生产与生态系统产生重要影响。木本植物对气候变化的生理生态响应机制受到极大关注。该文综述了 CO₂ 浓度升高、气温升高及干旱胁迫对木本植物光合产物分配与果实品质影响的研究进展。模拟试验表明,随着大气 CO₂ 浓度升高,植物的光合能力会增大,但长期生长在高 CO₂ 浓度下的植物会出现光合能力下降的光适应现象;气温升高会降低植株光合酶活性和叶绿素含量等,从而导致光合速率下降;干旱胁迫通过减小气孔导度和光合活性来降低光合作用。CO₂ 浓度升高或干旱胁迫下,光合产物向根系分配的比例增加,温度升高则会降低植物的根冠比。在果实品质方面,CO₂ 浓度升高增加了果实中的可溶性固形物含量;气温升高会影响果实生长,部分糖含量及有机酸含量增加;干旱胁迫对果实生长有一定抑制作用,但增加了可溶性糖、维生素 C 含量等;同时认为气温升高减缓干旱胁迫对果实品质的抑制作用,提高果实品质。因此,气候变化引起的环境胁迫有助于果实糖分的累积。

关键词:气候变化;光合;产物分配;果实品质

中图分类号:S 6-33 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2018)10-0161-07

气候变化指的是气候平均状态统计学意义上的巨大改变,或者持续较长一段时间的气候变动。近年来,关于气候变化的问题一直是学术界研究的热点^[1]。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告指出人类对气候系统的影响是明确的,自 1950 年以来,系统观测到的许多气候变化相比过去几十年甚至近千年都是史无前例的^[2]。目前认为,温室气体尤其是 CO₂ 浓度的增

加,引起的温室效应是全球气候变化的显著特征之一。在过去的 150 年,CO₂ 浓度逐渐升高,2013 年达到了 400 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,比 250 年前高了 40%;预计 20 世纪末,大气 CO₂ 浓度将达到 720~760 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ^[3-5]。温室效应的不断加剧,使过去的 130 年里全球温度平均升高 0.85 $^{\circ}\text{C}$,且未来气候变暖将持续。据预测,21 世纪气温将升高 1.5~4.5 $^{\circ}\text{C}$ ^[6-7]。中国近百年陆地区域平均增温 1.20 $^{\circ}\text{C}$,其不确定性范围在 0.90~1.52 $^{\circ}\text{C}$,明显高于全球平均增温速率,且北部增温趋势显著^[8-9]。全球气候变暖将改变降水格局,导致不同地区水资源的增加或减少^[10]。陈亚宁等^[11]对近 40~50 年西北干旱区的降水研究表明,整个西北干旱区由 20 世纪 70 年代的降水量减少,转变为 20 世纪 80 年代后期和 90 年代的降水量增加。但在最近 10 年,西北干旱区降水量的增加幅度降

第一作者简介:哈蓉(1994-),女,硕士研究生,研究方向为果树生理生态及高效栽培。E-mail:350897371@qq.com.
责任作者:曹兵(1970-),男,博士,教授,现主要从事旱区森林培育与经济栽培生理教学与研究等工作。E-mail:bingcao2006@126.com.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31660199, 30860227)。

收稿日期:2018-02-24

低,并且约有45%台站的降水量较20世纪90年代表现为减少趋势。

气候变化已经对自然生态系统和人类社会各方面产生了显著的影响,气候变化所导致的气候极端事件的增多引发气象灾害以及水资源短缺等问题,大大加剧了中国农业的脆弱^[12-13]。吴绍洪等^[14]认为,气候变暖导致病虫害呈加重态势、耕地质量总体下降;不考虑技术进步,气候变暖将造成中国粮食自给率下降,粮食安全风险增加。经济林作为一种特殊的林业资源,大面积发展既能起到一定的森林在建立良好生态环境方面的效应,又能取得较高的经济效益和社会效益,应成为大农业结构中的重要组成部分^[15]。揭示木本植物光合产物分配与果实品质形成对气候变化的响应机制,已经成为木本植物生理生态学研究热点之一。

1 木本植物光合产物的分配

植物的光合产物分配又称同化物分配,存在2个时间尺度的分配过程:第一,在秒或者小时尺度上,光合作用生成的碳水化合物(包括淀粉、蔗糖与非结构性碳水化合物)在植物体内的分配,通常使用稳定同位素法研究叶片中的固定的¹⁴C向植物体内不同库的分配;第二,在月或者年尺度上,短时间分配对不同器官光合产物积累的影响,包括生物分配和碳分配2种分配形式。在研究中通常采用根冠比表征光合产物分配格局的变化^[16]。植物光合产物分配过程受环境因子和生物因子(自身遗传特性、生长发育等)的共同影响。关于环境因子如光照、水分、养分、温度和CO₂浓度等的影响,已有大量研究^[17-18]。这些环境因素通过影响同化物生产、同化物运输以及同化物的吸收利用,对同化物在整个植株上的分配产生影响。

1.1 CO₂浓度升高对木本植物光合作用及产物分配的影响

1.1.1 CO₂浓度升高对光合作用的影响

在植物光合作用中,CO₂浓度作为重要原料之一,其浓度升高必定会对植物的光合作用产生影响^[19]。整个陆地植被总固碳量的50%是通过林木的光合作用所固定的碳,成为全球碳收支的

一个关键组成部分。银杏在高浓度CO₂条件下,其固碳释氧能力显著提高,晴天比对照提高119.5%,而阴天提高了175.4%^[20]。有试验结果表明,短期增加CO₂浓度,植物的光合能力会增大,特别是C₃植物,光合速率增幅一般为20%~40%,但因植物品种及光合途径不同而有所差异。相比之下,C₄植物的光合作用对CO₂浓度的响应低于C₃植物^[19,21]。阔叶树在长期高CO₂浓度环境下生长对CO₂变化反应比针叶树种敏感^[22]。长期高浓度CO₂处理对植物最初的促进作用会随着时间的推移而逐渐消失^[23]。这种因长期生活在高浓度CO₂下导致植物光合能力下降的现象称为光合适应。但尽管在高浓度CO₂下生长的植物存在光合适应现象,但它的光合速率仍比正常大气CO₂条件下的高^[24]。

目前光合适应现象产生的机制尚无定论,徐胜等^[25]认为该机制有2种代表性的假说:光合产物反馈抑制和库源关系的调节下的资源重新分配。其依据是:在养分尤其是氮素亏缺的条件下,多发生光合能力下降的现象,此时木本植物叶片中积累了大量的糖类,同时降低氮素及1,5-二磷酸核酮糖羧化/加氧酶(Rubisco酶)含量,平衡源库关系的重建,体现了氮素的合理性再分配。但要全面深入理解其机理还需长期的考证和研究。

1.1.2 CO₂浓度升高对木本植物光合产物分配的影响

关于CO₂浓度升高对植物光合产物分配影响的研究甚多,大多数研究认为,CO₂浓度升高会使光合产物向根系的分配比例增加^[26]。其理论依据是:植物各个器官的氮含量会随CO₂浓度的升高而降低,因此植物为确保提供养分,将增加光合产物向根系的分配比例。此外,CO₂浓度升高会增加植物叶片的淀粉含量,使根系和叶片之间产生一定膨压梯度,导致较多的光合产物向根系分配^[16]。根系能够保证木本植物营养和水分循环,在高浓度CO₂处理下,其生物量一般表现为增加的趋势,但不同树种间也有很大的差异^[25]。也有研究认为,在养分匮乏的条件下光合产物向根系分配较为明显,而在养分充足的环境中,CO₂浓度升高对光合产物分配格局的影响不大^[27]。CO₂浓度升高对植物根冠比影响的差异性可能与植物本身的遗传特征、个体发育的差异、

植物生长环境差异以及采样时间不同等因素有关。

1.2 气温升高对木本植物光合作用及产物分配的影响

1.2.1 气温升高对木本植物光合作用的影响

植物的光合作用是地球上最重要的生物化学反应之一,极易受到温度变化的影响^[28]。温度是影响植物光合作用最重要的环境因子之一,当温度较高时,植株光合酶活性降低,电子传递链遭到破坏,引发光抑制,从而导致光合速率下降^[29]。温度变化不仅影响植物的光合作用,而且还通过其它的生理过程来改变光合作用,主要表现在木本植物的叶绿素含量、Rubisco 酶、气孔导度、光饱和点、光补偿点、表观量子效率等方面^[30]。赵娜等^[31]研究表明,不同生活类型的植物对高温的影响规律存在差异,大部分木本植物油的光合生理指标在不同温度处理下差异并不显著,但不同的草本植物光合生理指标在种间的差异较大,30℃内,温度升高与藤本植物的光合生理指标呈正相关。

1.2.2 气温升高对木本植物光合产物分配的影响

植物光合产物分配对高温的响应还没有得到较为一致的结论。在空气温度方面,有研究表明,其温度升高会使叶片同化产物的积累降低,光合产物向叶片的分配比例增加,可能是温度升高后,植物体内的氮含量增加,同时土壤养分的供应能力提高,导致植物根冠比降低^[16]。对于土壤温度,在一定的温度范围内,土壤温度的升高会降低光合产物向根系的分配比例,超出这一范围分配比例则会增大^[32]。此外,在作物方面有研究表明,高温胁迫会导致玉米光合速率降低,光合产物的形成减少,进而导致籽粒充实不良,影响了玉米的物质生产能力,并降低干物质分配到雌穗的比例^[33];张洁等^[34]认为亚高温降低了光合产物向番茄根系和叶片中的分配,使同化物向果实中的分配比率明显加大,使果实在生育前期发育速度加快,果实提早成熟。LITTON 等^[35]研究了全球范围内植物光合产物分配对温度的响应,结果显示在温带和热带地区,光合产物向地下的分配比例随年平均温度的升高而增加。

1.3 干旱胁迫对木本植物光合作用及产物分配的影响

1.3.1 干旱胁迫对木本植物光合作用的影响

水分同样是影响植物生长的主要环境因子之一,水分胁迫(尤其是干旱胁迫)是经常发生且阻碍植物生长发育的重要逆境问题,植物在干旱胁迫下光合作用会下降已得到大量证实^[36-37]。影响植物光合作用的因素可分为气孔因素和非气孔因素 2 类,前者是水分胁迫导致气孔导度下降,使 CO₂ 进入叶片受阻从而降低光合率,后者是叶肉细胞的光合活性下降。干旱胁迫时植物光合作用的下降是二者共同的作用^[38-40]。但裴斌等^[41]认为具体哪个为主导因素还与试验植物的种类、年龄、生长状况以及试验处理方式等有关。

长时间的干旱胁迫对植物将造成不可逆转的伤害,如光合色素含量和光系统 PSII 活力的降低、光合同化酶活性下降、光合磷酸化和电子传递受到抑制^[39]。郭有燕等^[38]对黑果枸杞的研究表明,干旱胁迫强度的增加显著降低黑果枸杞幼苗叶片中的叶绿素 a、叶绿素 b 含量,同时 PSII 最大光化学效率(Fv/Fm)和实际光化学效率(Φ_{PSII})在干旱胁迫下均逐渐降低。韦莉莉等^[42]选取 5 种树种幼苗进行干旱胁迫试验,结果显示干旱胁迫对各树种幼苗叶片叶绿素相对含量的影响较大,且 5 种幼苗的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度也随干旱程度呈现逐渐降低的趋势。除此之外,干旱胁迫引起气孔关闭,水分散失减少,同样限制了叶肉细胞 CO₂ 的供应,使 CO₂ 同化速率降低,从而降低光合作用^[39-40]。

1.3.2 干旱胁迫对木本植物光合产物分配的影响

植物光合产物的分配受光合作用、呼吸作用等内在因子及光照、温度和 CO₂ 浓度等外在因子共同的影响。在高光强和高温条件下,叶片受到水分胁迫会通过植株的气孔关闭引起反馈调节来增大光合产物向根部的分配比例,促进根系吸收水分^[16]。叶片¹⁴C 同化物的输出速率会随水分的减少而降低,汇组织¹⁴C 同化的输入速率也同样降低,由于地下部分输入速率的降低幅度小于叶的输出速率的降低幅度,因此表现出分配到根的产物增加^[43]。有关干旱对植物光合产物分配的

影响已有不少研究,谷艳芳等^[43]认为小麦拔节期土壤水分状况对根的影响明显,轻度干旱能促进根系生长,根系光合产物分配比增大,韦莉莉等^[42]研究表明水分胁迫对地上部分的限制大于地下部分,促使光合产物向地下部分运输,地下部分的分配比例增加,使其具有较大的根冠比。MOKANY 等^[44]在生态系统水平上的研究表明,降水量的增加会降低森林、灌木和草原生态系统的根冠比。水分胁迫会导致减弱植物体内蛋白质合成,降低了植物体内的氮含量,但并不增加淀粉含量,促使光合产物较多地分配到根系^[16]。与营养亏缺相同,通常水分亏缺对分配格局的改变趋势是分配到根的生物量比例随着水分胁迫的增强而增加,但是绝对量不增加^[43]。

2 木本植物的果实品质

果实品质是保证其商品性以及吸引消费者的直接因素,美观、优质的果实往往有更大的消费市场和优良的经济效应。它往往是由外观、营养组分和挥发性气体等多种综合因素决定的。对于木本植物果实,外观品质、营养品质和风味品质在消费中起着举足轻重的作用。外观品质包括果实形状、果形指数、单果质量、果实着色等,营养品质包括维生素、有机酸、可溶性固形物、可溶性糖含量等,风味品质包括糖酸比和香味等。

2.1 CO₂ 浓度升高对木本植物果实品质的影响

植物品质的形成是品种遗传特性和环境条件综合作用的结果,CO₂ 又是植物光合作用的必要原料,因此可以通过影响光合速率、生理代谢及干物质生产来决定作物的品质。张志明^[45]研究发现,CO₂ 施肥的番茄果实在各个时期其可溶性固形物、可滴定有机酸、可溶性蛋白质、维生素 C、番茄红素和类胡萝卜素含量,以及乙稀释放量均显著高于同期的对照,同时,番茄的感官品质色泽和挥发性芳香物质也显著提高,大大促进了番茄果实风味品质的提高。潘静^[46]对枸杞的研究显示,CO₂ 浓度倍增处理下,枸杞果实中还原糖、蔗糖、淀粉的含量显著降低,枸杞果实多糖和总糖含量以及牛磺酸、黄酮、类胡萝卜素等有效成分的含量也明显减少,导致品质有所下降。

2.2 气温升高对木本植物果实品质的影响

温度是大多数植物生长发育的主要驱动因

子。有研究表明,番茄维生素 C 含量随温度的升高差异不显著,但随温度增加,可溶性固形物、可溶性糖和有机酸含量均与对照差异显著,且温度越高果实糖酸比越低,这是由于有机酸含量升高所致。可见长期的亚高温处理会降低番茄果实的口感和风味品质^[47]。还有研究认为随着气温升高,灵武长枣果实的坐果率、单个枣吊的吊果量及果实横径的生长受到不同程度的抑制作用,而对灵武长枣果实单果质量、单个枣核质量及果实纵径的生长有促进作用,同时,果实中糖酸比增加,果实着色率下降^[48]。而也有研究显示,增温处理降低了枸杞的百粒干质量、横径和纵径,营养品质方面,多糖和蔗糖的含量有下降的缓慢趋势,增温还降低了枸杞中黄酮和类胡萝卜素含量。因此,温度升高降低了枸杞的果实品质^[30]。

2.3 干旱胁迫对木本植物果实品质的影响

水分是影响植物生长的关键因子,又是实现对作物品质改善的媒体和介质^[49]。许多学者就水分对果实品质的影响进行了深入的研究,肖玉明等^[50]研究表明,柑橘果实在水分胁迫处理下与对照相比,生长受到明显的抑制,果实的单果质量、横径以及纵径减小,果汁体积减小,维生素 C 含量减少,果实有机酸含量明显增加,可溶性固形物含量增加,在 40% 水分胁迫条件下葡萄糖、蔗糖和总糖含量有增加。宋丽华等^[48]研究表明,灵武长枣在常温下,随着干旱程度的增加,果实的单果质量、横径、纵径和单个果核质量均减小,而果实着色、可溶性糖含量和有机酸含量,干旱胁迫几乎均增加,同时还认为增温伴随干旱,以上指标大体上呈现增加的趋势。张芮等^[51]研究表明,葡萄在膨大初期和开花期进行水分胁迫处理对果实的膨大有利,在着色成熟期和开花期进行水分胁迫处理,可溶性固形物和总糖含量均高于充足供水处理。因此,在适度的水分胁迫下,果实单果质量和果实大小可能会减小,但可溶性糖含量、有机酸含量和维生素 C 含量均增加。

3 研究展望

气候变化引起的环境胁迫对木本植物生长发育以及果实品质影响的研究,在评价气候变化对木本植物的可能影响及发展趋势,制定适应与减

缓气候变化不良影响的措施与对策中起到重要作用,对木本植物栽培、育种及产业发展具有重要意义。REDDY等^[52]详尽描述了CO₂浓度升高对植物光合及生产力的影响,并认为与其它环境因素之间存在着交互作用。并有一些研究认为,与单一胁迫相比,高温干旱复合胁迫对植物光合特性与叶绿素荧光参数,以及果实的外观品质和部分营养品质的影响程度较大^[48,53],但三者是否存在多因素交互作用还需进一步研究,更应结合现代分子生物学技术。

对光合产物分配的影响机制已有大量研究,但也存在大量争议,在今后关于环境因子对光合产物分配影响的研究中,应考虑到呼吸部分所占的比例。除环境因子外,生物因子(自身遗传特性、生长发育)也是影响光合产物分配的一个重要因素,但目前并无合理的假说解释植物的个体发育与环境因子的协同作用对光合产物分配的影响。

参考文献

- [1] ALEXANDROV V A, HOOGENBOOM G. The impact of climate variability and change on crop yield in Bulgaria[J]. Agricultural and Forest, 2000, 104(4): 315-327.
- [2] 沈亚平, 王国亚. IPCC第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土, 2013, 35(3): 1068-1076.
- [3] IPCC. Climate Change 2013: The physical science basis. contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 1-1552.
- [4] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>.
- [5] 江怀友, 沈平平, 宋新民, 等. 世界气候变暖及二氧化碳埋存现状与展望[J]. 古地理学报, 2008(3): 323-328.
- [6] IPCC. Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of to intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 1-989.
- [7] CONNOR T G, HAINES L M, SNYMAN H A. Influence of pre-cipitation and species composition on phytomass of a semi-arid African grassland[J]. Journal of Ecology, 2001, 89: 850-860.
- [8] 丁一汇, 王会军. 近百年中国气候变化科学问题的新认识[J]. 科学通报, 2016, 61(10): 1029-1041.
- [9] 翟盘茂, 郎旭惜. 1951-2003年中国气温和降水变化及其对干旱的影响[J]. 气候变化研究进展, 2005, 1(1): 16-18.
- [10] 周平. 全球气候变化对我国农业生产的可能影响与对策[J]. 云南农业大学学报, 2001, 16(1): 1-4.
- [11] 陈亚宁, 李稚, 范煜婷, 等. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展[J]. 地理学报, 2014(9): 1295-1304.
- [12] NISHIMORI M. Impact of global climate change on agriculture and food security over Asia[J]. Global Environmental Research, 2006, 10(2): 175-179.
- [13] 刘颖杰, 林而达. 气候变暖对中国不同地区农业的影响[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(4): 229-233.
- [14] 吴绍洪, 罗勇, 王浩, 等. 中国气候变化影响与适应: 态势和展望[J]. 科学通报, 2016, 61(10): 1042-1054.
- [15] 张茂君. 论木本植物在我省西部农业发展中的战略地位[J]. 吉林农业科学, 1999, 24(4): 41-44.
- [16] 平晓燕, 周广胜, 孙敬松. 植物光合产物分配及其影响因子研究进展[J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 100-111.
- [17] DOMISCH T, FINER L, LEHTO T. Effects of soil temperature on biomass and carbohydrate allocation in Scots pine (*Pinus sylvestris*) seedlings at the beginning of the growing season[J]. Tree Physiology, 2001, 21: 465-472.
- [18] RACHMILEVITCH S, HUANG B, LAMBERS H. Assimilation and allocation of carbon and nitrogen of thermal and nonthermal *Agrostis* species in response to high soil temperature[J]. New Phytologist, 2006, 170: 479-490.
- [19] 赵天宏, 王美玉, 张巍巍. 大气CO₂浓度升高对植物光合作用的影响[J]. 生态环境, 2006, 15(5): 1096-1100.
- [20] 付士磊, 何兴元, 陈玮. CO₂质量浓度升高对沈阳市银杏生长及光合固碳能力的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2006, 25(S1): 269-271.
- [21] 郝兴宇, 韩雪, 李萍, 等. 大气CO₂浓度升高对绿豆叶片光合作用及叶绿素荧光参数的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(10): 2776-2780.
- [22] 王森, 代力民, 韩士杰, 等. 高CO₂浓度对长白山阔叶红松林主要树种的影响[J]. 应用生态学报, 2000, 11(5): 675-679.
- [23] 韩文军, 廖飞勇, 何平. 大气二氧化碳浓度倍增对闽楠光合性状的影响[J]. 中南林学院学报, 2003, 23(2): 62-65.
- [24] ROGERS A, ALLEN D J, DAVEY P A. Leaf photosynthesis and carbohydrate dynamics of soybeans grown throughout their life-cycle under free-air carbon dioxide enrichment[J]. Plant Cell and Environment, 2004(27): 449-458.
- [25] 徐胜, 陈玮, 何兴元, 等. 高浓度CO₂对木本植物生理生态的影响研究进展[J]. 生态学报, 2015, 35(8): 2452-2460.
- [26] 马永亮, 王开运, 孙卿, 等. 大气CO₂浓度升高对植物根系的影响[J]. 生态学杂志, 2007, 26(10): 1640-1645.
- [27] LIU S R, BARTON C, LEE H, et al. Long-term response of Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.) to CO₂ enrichment and nitrogen supply. I. Growth, biomass allocation and physiology[J]. Plant Biosystems, 2000, 136: 189-198.
- [28] MACKEY K R M, PAYTAN A, CALDEIRA K, et al. Effect of temperature on photosynthesis and growth in *Marine synechococcus* spp[J]. Plant Physiology, 2013, 163(2): 815-829.

- [29] 赵琴. 气温升高与干旱胁迫对宁夏枸杞生长与果实品质的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2015.
- [30] 李洪军, 吴玉环, 张志祥, 等. 温度变化对木本植物光合生理生态的影响[J]. 贵州农业科学, 2009, 37(9): 39-42.
- [31] 赵娜, 李富荣. 温度升高对不同生活型植物光合生理特性的影响[J]. 生态环境学报, 2016, 25(1): 60-66.
- [32] PENG Y Y, DANG Q L. Effects of soil temperature on biomass production and allocation in seedlings of four boreal tree species[J]. Forest Ecology and Management, 2003, 180: 1-9.
- [33] 赵龙飞, 李潮海, 刘天学, 等. 花期前后高温对不同基因型玉米光合特性及产量和品质的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(23): 4947-4958.
- [34] 张洁, 李天来, 徐晶. 长期昼间亚高温对日光温室番茄光合作用及光合产物分配的影响[J]. 中国蔬菜, 2005(3): 7-10.
- [35] LITTON C M, GIARDINA C P. Below-ground carbon flux and partitioning: Global patterns and response to temperature[J]. Functional Ecology, 2008, 22: 941-954.
- [36] 云文丽, 侯琼, 王海梅, 等. 不同土壤水分对向日葵光合响应的影响[J]. 应用气象学报, 2014, 25(4): 476-482.
- [37] 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.
- [38] 郭有燕, 刘宏军, 孔东升, 等. 干旱胁迫对黑果枸杞幼苗光合特性的影响[J]. 西北植物学报, 2016, 36(1): 124-130.
- [39] 王玉环, 付秋实, 郑禾, 等. 干旱胁迫对黄瓜幼苗生长、光合生理及气孔特征的影响[J]. 中国农业大学学报, 2010, 15(5): 12-18.
- [40] 曹慧, 兰彦平, 王孝威, 等. 木本植物水分胁迫研究进展[J]. 木本植物学报, 2001, 18(2): 110-114.
- [41] 裴斌, 张光灿, 张淑勇, 等. 土壤干旱胁迫对沙棘叶片光合作用和抗氧化酶活性的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1386-1396.
- [42] 韦莉莉, 张小全, 侯振宏, 等. 杉木苗木光合作用及其产物分配对水分胁迫的响应[J]. 植物生态学报, 2005, 29(3): 394-402.
- [43] 谷艳芳, 丁圣彦, 高志英, 等. 干旱胁迫下冬小麦光合产物分配格局及其与产量的关系[J]. 生态学报, 2010, 30(5): 1167-1173.
- [44] MOKANY K, RAISON R J, PROKUSHKIN A S. Critical analysis of root: Shoot ratios in terrestrial biomes[J]. Global Change Biology, 2006(12): 84-96.
- [45] 张志明. 二氧化碳施肥对番茄果实品质的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [46] 潘静. CO₂ 浓度倍增对宁夏枸杞光合产物分配与果实品质的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2013.
- [47] 李天来, 李森. 短期昼间亚高温胁迫对番茄光合作用的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 220-225.
- [48] 宋丽华, 秦芳, 白祥, 等. 气温升高与干旱胁迫对灵武长枣坐果与果实品质的影响[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(2): 129-133.
- [49] 康绍忠, 杜太生, 孙景生, 等. 基于生命需水信息的作物高效节水调控理论与技术[J]. 水利学报, 2007, 38(6): 661-667.
- [50] 肖玉明, 卢晓鹏, 黄成能, 等. 水分胁迫对温州蜜柑果实品质及柠檬酸代谢相关基因表达的影响[J]. 湖南农业大学学报, 2014, 40(3): 281-287.
- [51] 张芮, 成自勇, 王旺田, 等. 不同生育期水分胁迫对延后栽培葡萄产量与品质的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 105-113.
- [52] REDDY A R, GIRISH K. The impact of global elevated CO₂ concentration on photosynthesis and plant productivity[J]. Current Science, 2010, 99(1): 46-57.
- [53] 叶波, 吴永波, 邵维, 等. 高温干旱复合胁迫及复水对构树幼苗光合特性和叶绿素荧光参数的影响[J]. 生物学杂志, 2014, 33(9): 2343-2349.

Effects of Climate Change on Photosynthate Distribution and Fruit Quality of Woody Plants

HA Rong, MA Yaping, CAO Bing

(School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021)

Abstract: The greenhouse effect caused by the elevated atmospheric CO₂ concentration leads to the increase of the global surface mean temperature, which results in the change of the global precipitation pattern, and has an important influence on the ecosystem and the production of agriculture and forestry. Therefore, the physiological and ecological responded mechanism of woody plants to climate change had attracted more attention. In this study the effects of increased CO₂ concentration, temperature rise and drought stress on photosynthetic product distribution of woody plants and fruit quality were reviewed. The simulation experiments showed that, as the increase of atmospheric CO₂ concentration, the photosynthetic capacity of plants would increase, but long-term growth in high CO₂ concentration of plants would show a decline in photosynthetic capacity-light adaptation phenomenon.

doi:10.11937/bfyy.20173379

牡丹革质花盘亚组野生种质资源研究进展

翟立娟, 史倩倩, 牛立新, 张延龙

(西北农林科技大学 风景园林艺术学院, 国家林业局油用牡丹工程技术研究中心, 陕西 杨凌 712100)

摘要:综述了牡丹革质花盘亚组野生种在分类、资源调查、遗传多样性及系统演化, 以及与中国栽培品种群的关系等方面的研究进展; 阐述其分类历史和存在的分歧, 展示资源调查结果; 多种遗传多样性研究方法结合证明该亚组牡丹具有较高的遗传多样性且系统演化复杂; 总结得出革质花盘亚组牡丹野生种中除四川牡丹外, 其余野生种均参与栽培牡丹的起源; 最后, 指出研究过程中存在的问题并提出相应建议, 以期为该亚组牡丹野生种的保护和利用奠定基础。

关键词:革质花盘亚组; 牡丹; 野生种; 研究进展

中图分类号:S 685.110.24 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2018)10-0167-08

牡丹(*Paeonia suffruticosa*)属芍药科(Paeoniaceae)芍药属(*Paeonia*)牡丹组(Sect. Mouton

DC.)多年生落叶小灌木, 不仅是我国重要的传统观赏植物和药用植物, 也是一种重要的新兴木本油料作物。牡丹组可分为革质花盘亚组(Subsect. Vagintae)和肉质花盘亚组(Subsect. Delavayanae)^[1]。其中, 革质花盘亚组主要包括矮牡丹(*P. jishanensis*)、卵叶牡丹(*P. qiui*)、杨山牡丹(*P. ostii*)、紫斑牡丹(*P. rockii*)、四川牡丹(*P. decomposita*)5个野生种和牡丹(*P. suffruticosa*)一个栽培种及延安牡丹(*P. yananensis*)一个自然杂交种, 紫斑牡丹和四川牡丹各有一个亚种, 分别为太白山紫斑牡丹(*P. rockii* subsp. *atava*)和

第一作者简介:翟立娟(1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向为园林植物应用。E-mail:18792499294@163.com.

责任作者:张延龙(1964-), 女, 博士, 教授, 现主要从事园林植物遗传育种等研究工作。E-mail:zhangyanlong@nwsuaf.edu.cn.

基金项目:国家林业公益性行业科研专项资助项目(201404701); 西北农林科技大学 2015 博士科研启动资助项目(Z109021611)。

收稿日期:2018-02-23

Temperature raise could decrease the activity of photosynthetic enzyme and chlorophyll content, which led to the photosynthetic rate declined. Drought stress reduced photosynthesis by diminishing stomatal conductance and photosynthetic activity. Under the condition of high CO₂ concentration or drought stress, the ratio of photosynthate distribution to root system was increased, and the root shoot ratio of plant was decreased when the temperature increased. Besides, in the fruit quality, elevated concentrations of CO₂ increased the soluble solids content in fruits. The increase of temperature affected the growth of fruit, and the content of some sugars and organic acids increased. Drought stress could inhibit fruit growth, however, increased soluble sugar, vitamin C content and so on. It was suggested that temperature increase could slow down the inhibition of drought stress on fruit quality and improve fruit quality. Accordingly environmental stresses caused by climate change contribute to the accumulation of sugar in fruits.

Keywords: climate change; photosynthesis; product allocation; fruit quality