

CO₂ 浓度升高与温度、干旱相互作用 对植物生理生态过程的影响

王美玉¹, 赵天宏^{1*}, 张巍巍¹, 史 奕²

(1. 沈阳农业大学农学院, 辽宁 沈阳 110161; 2. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 辽宁 沈阳 110016)

摘 要: 从 CO₂ 浓度升高与温度、CO₂ 浓度升高与干旱的相互作用以及三者协同作用 3 个方面, 总结了近年来国内外关于全球变化对植物生理生态过程(包括光合作用、呼吸作用、水分利用率、化学成分以及生物量积累等方面)影响的研究进展, 在此基础上指出未来全球变化背景下植物生理生态的研究应在分子水平上进一步深入, 同时应加强 CO₂ 浓度升高与温度、土壤水分三者协同作用对植物影响的研究。

关键词: CO₂ 浓度升高; 温度; 干旱; 相互作用; 植物生理生态过程

中图分类号: Q945.79; Q948.112 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2007)02-0099-05

近年来, 大气 CO₂ 浓度日益增加, 现已达到约 360 μmol/mol, 预计本世纪中后期将达到 560~970 μmol/mol, 作为 CO₂ 浓度升高的结果, 预计到 2100 年, 全球大气平均温度也将增加 1.4℃~5.8℃^[1]。CO₂ 浓度升高在引起全球不同区域温度的剧烈升高或变化的同时, 降水格局亦将发生变化, 导致不同地区的水资源增加或减少, 变幅约 10%^[2]。降水量的增加并不意味着干旱化趋势的减缓, 因为温度的增加使得潜在蒸散增加, 从而使得干旱程度增加, 一些地区将变得更加干燥^[3]。因此, 作为影响植物生长、发育和功能的重要环境因子, 研究 CO₂ 浓度升高对植物的影响时, 必须考虑与温度、土壤水分联系在一起, 这样才能对未来气候条件下植物的生理生态过程做出正确推断。本文试图对近年来国内外关于 CO₂ 浓度升高与温度、干旱相互作用或三者共同作用对植物生理生态过程的影响研究进行综合分析和归类, 以了解植物对全球变化的适应机理, 为进一步深入研究提供思路。

1 CO₂ 浓度升高和温度相互作用对植物的影响

1.1 对光合作用的影响

CO₂ 是植物光合作用的底物, 其浓度升高必然会对植物的光合作用产生重要影响。一般来讲, 随 CO₂ 浓度升高, 植物光合作用的最适温度会增加 5℃~10℃^[4]。C₃ 植物在高温情况下, 单位面积净

CO₂ 同化率对 CO₂ 浓度升高的反应最大; 在低温时最小^[5]。

一些研究表明, 高温和高 CO₂ 浓度具有协同促进作用。Idso K E & S B Idso^[6]的研究表明, 夏季 CO₂ 浓度升高对酸桔光合作用的促进作用比冬季高, 而且温度升高可以使得这种促进作用进一步增大, 这主要是由于 CO₂ 升高降低光呼吸强度造成的^[5]。林伟宏等^[7]对水稻的研究表明, CO₂ 浓度和温度对水稻叶片光合作用有协同促进作用, 而对群体光合作用的促进则随时间的推移而减弱, 单叶光合受到的促进作用大于群体光合。也有研究表明, CO₂ 浓度升高条件下, 温度升高明显降低植物叶片的光合速率, 同时, 叶片叶绿体类囊体膜中氮和 Ru-bisco 含量降低, 单位叶面积 Rubisco 活化中心浓度降低^[8]。Joseph C V Vu^[9]的研究发现, 高温和高 CO₂ 浓度下, 花生叶片正午 CO₂ 交换率变大, 蒸腾和气孔导度降低, 水分利用率提高, 而叶片中 Rubis-co 含量和活性下降, 可溶性糖和淀粉则不受高温影响。

但也有一些研究发现, 高温和高 CO₂ 浓度之间没有协同作用。Wang^[10]对 20~25 a 生欧洲赤松的研究发现, 单独进行 CO₂ 浓度升高或温度升高的处理, 对最大光合速率、光有效利用率、暗呼吸速率、光补偿点和光饱和点都有影响, 但温度升高的抑制作用抵消了 CO₂ 浓度升高的促进作用, 因而没有温度和 CO₂ 的协同作用。Jin-sheng He^[11]等研究发现,

收稿日期: 2006-09-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(30500069, 30570348)

作者简介: 王美玉(1981—), 辽宁沈阳人, 硕士研究生, 研究方向为植物生理生态学。

* 通讯作者: 赵天宏, 沈阳农业大学农学院, E-mail: zth1999@163.com

高温并没有增加高 CO₂ 浓度对光合作用的促进作用,这可能是由于 C₃ 植物维持呼吸和光呼吸的潜在增加提高了“库”对碳水化合物的需求^[12]。

此外,有学者得出这样的结论:在低温(0℃~10℃)下生长的植物,由于光合适应,低温时 CO₂ 浓度升高的促进作用会进一步加强^[13]。而 Long^[5]的 C₃ 光合作用模型表明:低温(<15℃)时,CO₂ 浓度升高,光合作用减弱。Kirsehbaum^[14]利用相同模型,指出在低温和高 CO₂ 浓度情况下,光合作用 CO₂ 敏感性最低,并强调生态系统光合反应的时间和生物地理差异。但上述两种模型都是在一定假设前提下成立的。早期的研究则发现,低温条件下,CO₂ 浓度升高对植物生长没有影响^[15]。因此,低温和高 CO₂ 浓度对植物的影响还有待于进一步的研究。

对 C₄ 植物而言,许多学者认为,温度变化不会影响高 CO₂ 浓度对植物生长的促进作用^[16]。

1.2 对呼吸作用的影响

Loloyd 和 Farquhar^[17]指出:光合作用对温度和 CO₂ 浓度的响应不能代表整株植物生长的响应。因为植物生长对 CO₂ 浓度和温度增加的响应不仅包括叶光合响应,也包括整株植物呼吸作用^[16]。生长对 CO₂ 浓度的响应取决于单位干物质呼吸速率。理论上认为,具有高维持呼吸/单位光合作用的植物对 CO₂ 浓度的相对敏感性更大^[17]。由于呼吸速率随温度升高而增大,在高温下,其对 CO₂ 浓度更敏感。

高温下,植物碳水化合物含量下降,呼吸作用和生长会受到限制^[18]。有研究认为升高 CO₂ 浓度能通过增加光合作用来促进植物叶片的呼吸作用^[19],因为高 CO₂ 浓度下光合作用的增加通常会导致大量非结构性碳水化合物的积累,这为呼吸提供了底物。Bolstad^[20]对两种落叶树种的研究发现,植物叶片的呼吸作用通常会对温度产生适应,长期处于一定范围的温度下,呼吸速率几乎或完全不受温度影响,但也有相反的结论^[21]。在不同 CO₂ 浓度下生长的植物,呼吸作用对 CO₂ 浓度增加的短期(直接)和长期(间接)响应有很大程度的差异^[22]。呼吸作用的不同表示方式在高 CO₂ 浓度下变化也不同。James A Bunce^[21]的研究表明,CO₂ 浓度升高条件下,单位叶面积表示的呼吸速率不变,单位干重表示的呼吸速率则降低。然而 Tjoelker 等^[23]的研究表明,温度和 CO₂ 浓度对呼吸作用的影响在很大程度上是独立的。有关温度和 CO₂ 浓度相互作用对呼

吸作用的影响仍需深入研究。

1.3 对生物量 and 生产力的影响

一些研究表明,升高 CO₂ 浓度能使植物物候提前^[24],但各物种和群落类型之间生殖分配各有不同,高 CO₂ 浓度抵消了高温对生殖分配的负效应^[25],高温也使物候提前^[26]。郭建平^[27]对几种农作物的研究也表明,高温和高 CO₂ 浓度会加速作物的生育进程,促使作物生长速度加快,在相同的发育期使作物叶面积、根、茎、叶生长量不足,生物量下降,但对不同作物产量结构的影响有差异,一定温度范围内,高温对作物的负效应大于高 CO₂ 浓度对作物的正效应。以往研究则表明,高温和高 CO₂ 浓度相互作用能促进生物量和产量的积累^[9]。二者对植物生长的促进作用主要是由于叶面积产物和消耗的改变,较少是因为其对光合作用、氮和水分利用率的影响^[28]。然而,一些研究报道,高 CO₂ 浓度能部分补偿高温对植物生物量所造成的负影响^[29],或高温下高 CO₂ 浓度对生物量的正效应变大^[30],但 Jinsheng He^[12]的研究既未发现高温对总生物量的影响,也未发现高温和高 CO₂ 浓度之间显著的相互作用。

利用地中海灌丛植被生理模型,Osborne 等^[31]指出,升高温度同时减少降水会减小净初级生产;但是,当同一模型在 CO₂ 浓度倍增情况下运行时,虽然也增温和减小雨量,但是植被生产力却增大 25%。但是,有人认为全球变暖会抵消这些 CO₂ 浓度升高的促进作用。控制环境生长室的研究结果表明,在未来气候条件下,包括大气 CO₂ 浓度和温度增加,可能不会增大美国西部黄松(*Pinus ponderosa*)的生长和生产力。因为光合作用的增长被 LAR(叶面积比率)降低抵消,更多的生物量分配到远离光合作用的组织^[32]。

此外,左闻韵等^[33]的研究还发现 CO₂ 浓度和温度之间的相互作用对植物气孔特性及表皮细胞密度没有显著影响,整体上 CO₂ 浓度增加的作用大于温度增加的作用,主要影响表皮细胞密度和气孔长度,物种间有显著差异。对针叶树的研究表明,高温和高 CO₂ 浓度明显增加了其总液流,但这一结果与单一高温处理相同,表明温度具有主导作用,高温和高 CO₂ 浓度之间无明显相互作用^[34]。还有研究发现,高温明显影响了大豆种子成分,而高 CO₂ 浓度则相对影响较小或不明显^[35]。

2 CO₂ 浓度升高和干旱胁迫相互作用对植物的影响

CO₂ 浓度升高导致植物叶片气孔导度降低,降

低了蒸腾速率,使单位叶面积土壤水分耗损率降低,提高了植物水分利用率,从而增加了植物避免干旱的能力(初级影响)^[36]。另外,尽管气孔导度减少,但 CO₂ 浓度升高增加了植物叶片的净同化率^[36],这样就使得整个冠层 C 获取增加,地下总非结构性碳水化合物迁移增加导致根系生物量增多^[37],进而增强了小麦吸收可利用的土壤水分和养分的能力(二级影响)。当干旱胁迫加重时,叶片组织的解剖结构适应和生理学过程诸如渗透调节增加了其干旱忍耐度,而 CO₂ 浓度升高可影响这些过程,从而使植株生长受到的有害影响降低^[38,39]。

在干旱条件下 CO₂ 浓度升高对光合作用的影响主要表现为气孔限制,在良好的水分条件下则既有气孔限制因素又有非气孔的限制因素^[40]。有关研究表明,高 CO₂ 浓度下发生土壤干旱使 C₃ 植物的光合作用敏感性降低^[6]。但在玉米的 FACE 实验中则发现,玉米的光合作用和产物不受干旱和 CO₂ 浓度升高的影响^[41]。

在水分胁迫时,与大气 CO₂ 浓度相比,高 CO₂ 浓度下生长的枇杷叶片荧光参数 F_v/F_m 和 F_v/F_o 值及 $\Phi PS II$ 下降幅度明显减少,SOD、POD 及 CAT 酶活性和膜脂过氧化水平的上升幅度也明显变小,可见 CO₂ 浓度升高对于水分胁迫所造成的氧化损伤有一定的缓解作用,能明显增强植物的抗干旱能力^[42]。对松树和橡树的研究也表明,干旱胁迫导致的抗氧化保护作用的降低和膜脂过氧化的增加在高 CO₂ 浓度下被抑制^[43]。

一般而言,CO₂ 浓度升高会增加植物生物量和干物质积累,具有“施肥效应”^[44]。而土壤干旱对植物生物量和干物质积累的影响则为负效应,且随着干旱程度的加重负面影响增大,植物通过增大根冠比,根向深层土壤延伸利用深层土壤水来适应干旱环境维持生长^[45]。高 CO₂ 浓度下发生土壤干旱胁迫时,CO₂ 的施肥效应受到了一定程度抑制^[46]。此外,高 CO₂ 浓度和干旱对 C、N 含量及分配均有影响,但不同植物表现出不同的规律^[47]。对大豆、冬小麦和 3 种牧草的研究^[48]发现,高 CO₂ 浓度下发生土壤干旱增加了冬小麦含硫量和籽粒含硫量,并且高 CO₂ 浓度加剧了干旱造成的小麦籽粒减产;而同一条件下大豆的籽粒含硫量减少,叶片含硫量增加;对 3 种牧草含硫量的影响则较为复杂,但最终均表现为负效应。

3 CO₂ 浓度和温度升高及干旱协同作用对植物的影响

目前同时考虑土壤水分变化、温度和大气 CO₂

浓度三因子共同作用对植物影响的研究还很少。Erik P Hamerlynck 等^[40]对 1 年生沙漠灌木 *Larrea tridentate* [DC] Cov. 幼苗在 3 种 CO₂ 浓度、两种水分处理下对高温胁迫的适应与响应机制进行了研究。研究表明,高 CO₂ 浓度能提高植物对干旱的适应能力,缓解干旱胁迫;CO₂ 浓度、干旱和高温胁迫时间对净光合速率和叶片气孔导度的影响存在着显著的互作效应;在干旱和高 CO₂ 浓度条件下极大地提高了植物高温解除后的光系统 II 的光化学效率 (F_v/F_m),说明植物在高 CO₂ 浓度条件下经高温锻炼后对干旱适应性更强。廖建雄^[49]研究了 CO₂ 浓度升高、高温和干旱对干旱区小麦叶片化学成分的影响,结果表明:CO₂ 浓度升高可减小因为土壤水分不同而造成的小麦化学成分之间的差异;高温对小麦化学成分的主要影响是引起 N 含量的显著降低;CO₂ 浓度升高、高温和干旱三因子对干旱区小麦化学成分的复合影响则是 N 含量的显著上升,说明未来 CO₂ 浓度升高对植物影响的研究,必须考虑其与高温、干旱等其他环境因子的协同作用。而对春小麦光合、蒸发蒸腾及水分利用效率的研究^[50]则表明,CO₂ 浓度升高和高温共同作用使各水分处理的小麦光合增强、气孔阻力增加、水分利用效率增大,但对蒸腾速率影响不显著,对蒸发蒸腾的影响因土壤水分不同而不同,在低水分条件下使其减少,高、中水分条件下则使其增加。

4 小 结

全球环境变化特别是 CO₂ 浓度升高及其与气候因子和环境胁迫因子的协同作用,对植物生理生态过程以及生态系统的影响已引起各国政府和科学家的广泛关注。目前关于 CO₂ 浓度升高与温度、干旱交互作用对植物生理生态过程的影响研究已有很大进展,但大多数还局限于生理水平上,对于一些响应机理解释还存在较大分歧,需要在分子水平上进一步深入研究。并且现有的研究成果多数是针对 CO₂ 浓度升高与温度或干旱等两两交互作用的研究,对于三者协同作用对植物影响的研究则相对较少,而未来气候条件下的 CO₂ 浓度升高必然伴随着温度和土壤水分的变化,因此,今后应加强对 CO₂ 浓度升高与温度、土壤水分三者协同作用对植物影响的研究。

参 考 文 献:

[1] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J. Climate change 2001: the scientific basis[A]. Contribution of working group to third assess-

- ment report to the intergovernmental panel on climate change (IPCC) [C]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001.
- [2] Wallace J S. Increasing agricultural water use efficiency to meet future food production[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2000, 82, 105—119.
- [3] 尚宗波, 高 琼. 中国水分状况对全球气候变化的敏感性分析[J]. 生态学报, 2001, 21(4), 528—537.
- [4] Allen L H Jr. Carbon dioxide increase: direct impacts on crops and indirect effects mediated through anticipated climatic changes [A]. Boote K J. Physiology and Determination of Crop Yield [C]. USA: Madison, 1994. 425—459.
- [5] Long S P. Modifications of the response of photosynthetic productivity to rising temperature by atmospheric CO₂ concentration; has its importance been understood [J]. Plant, Cell and Environment, 1991, 14, 729—739.
- [6] Idso K E, Idso S B. Plant responses to atmospheric CO₂ enrichment in the face of environmental constraints; a review of the past 10 years' research [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1994, 69, 153—203.
- [7] 林伟宏, 白克智, 匡廷云. 大气 CO₂ 浓度和温度升高对水稻叶片及群体光合作用的影响[J]. 植物学报, 1999, 41(6), 624—628.
- [8] 孙谷畴, 赵 平, 饶兴权, 等. 供氮和增温对倍增二氧化碳浓度下荫香叶片光合作用的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(8), 1399—1404.
- [9] Joseph C V Vu. Acclimation of peanut (*Arachis hypogaea* L.) leaf photosynthesis to elevated growth CO₂ and temperature [J]. Environmental and Experimental Botany, 2005, 53, 85—95.
- [10] Wang K, Kellomaki S, Laitinen. Effects of needle age, long-term temperature and CO₂ treatment on the photosynthesis of Scots pine [J]. Tree Physiology, 1995, 15, 211—218.
- [11] He Jin Sheng, Kelly S Wolfe-Bellin, Bazzaz F A. Leaf-level physiology, biomass, and reproduction of *Phytolacca Americana* under conditions of elevated CO₂ and altered temperature regimes [J]. International Journal of Plant Sciences, 2005, 166(4), 615—622.
- [12] Griffin K L, Turnbull M, Murthy R. et al., Leaf respiration is differentially affected by leaf vs. stand-level night-time warming [J]. Global Change Biology, 2002, 8, 479—485.
- [13] Teskey R O. A field study of the effects of elevated CO₂ on carbon assimilation, stomatal conductance and leaf and branch growth of *Pinus Taeda* Trees [J]. Plant, Cell and Environment, 1997, 18, 565—573.
- [14] Kirschbaum M U F. The sensitivity of C₃ photosynthesis to increasing CO₂ concentration; a theoretical analysis of its dependence on temperature and background CO₂ concentration [J]. Plant, Cell and Environment, 1994, 17, 747—754.
- [15] Idso S B, Kimball B A. Growth response of carrot and radish to atmospheric CO₂ enrichment [J]. Environmental and Experimental Botany, 1989, 29, 135—139.
- [16] Gifford R M. Interaction of carbon dioxide with growth-limiting environmental factors in vegetation productivity; implications for the global carbon cycle [J]. Advances in Bioclimatology, 1992, (1), 24—58.
- [17] Loloyd J, Farquhar G D. The CO₂ dependence of photosynthesis, plant growth responses to elevated CO₂ concentrations and their interactions with soil nutrient status I: general principles and forest ecosystems [J]. Functional Ecology, 1996, 10, 4—32.
- [18] Rowland-Bamford A J, Baker S J. Interactions of CO₂ enrichment and temperature on carbohydrate accumulation and partitioning in rice [J]. Environmental and Experimental Botany, 1996, 36, 111—124.
- [19] Amthor J S. The McCree-de Wit-Penning de Vries-Thornley respiration paradigms; 30 years later [J]. Annals of Botany, 2000, 86, 1—20.
- [20] Bolstad P V, Reich P, Lee T. Rapid temperature acclimation of leaf respiration rates on *Quercus alba* and *Quercus rubra* [J]. Tree Physiology, 2003, 23, 969—976.
- [21] James A Bunce. Responses of respiration of soybean leaves grown at ambient and elevated carbon dioxide concentrations to day-day variation in light and temperature under field conditions [J]. Annals of Botany, 2005, 95, 1059—1066.
- [22] Drake B G, Gonzalez-Meier M A, Long S P. More efficient plants; a consequence of rising atmospheric CO₂ [J]. Annual Reviews of Plant Physiology and Molecular Biology, 1997, 48, 609—639.
- [23] Tjoelker M G, Reich P B, Oleksyn J. Changes in leaf nitrogen and carbohydrates underlie temperature and CO₂ acclimation of dark respiration in five boreal tree species [J]. Plant, Cell and Environment, 1999, 22, 767—778.
- [24] LaDeau S L, Clark J S. Rising CO₂ levels and the fecundity of forest trees [J]. Science, 2001, 292, 95—98.
- [25] Amthor J S. Effects of atmospheric CO₂ concentration on wheat yield; review of results from experiments using various approaches to control CO₂ concentration [J]. Field Crop Research, 2001, 73, 1—34.
- [26] Morison J I L, Lawlor D W. Interactions between increasing CO₂ concentration and temperature on plant growth [J]. Plant, Cell and Environment, 1999, 22, 659—682.
- [27] 郭建平, 高素华. 高温、高 CO₂ 对农作物影响的试验研究 [J]. 中国生态农业学报, 2002, 10(1), 17—20.
- [28] Coleman J S, Bazzaz F A. Effects of CO₂ and temperature on growth and resource use of co-occurring C₃ and C₄ annuals [J]. Ecology, 1992, 73, 1244—1259.
- [29] Lilley J M, Bolger T P, Gifford R M. Productivity of *Trifolium subterraneum* and *Pbalaris aquatica* under warmer, high CO₂ conditions [J]. New Phytologist, 2001, 150, 371—383.
- [30] Tjoelker M G, Oleksyn J, Reich P B. Temperature and ontogeny mediate growth response to elevated CO₂ in seedlings of five boreal tree species [J]. New Phytologist, 1998, 140, 197—210.
- [31] Osborne C P, Mitchell P L, Sheehy J E, et al. Modeling the recent historical impacts of atmospheric CO₂ and climate change on Mediterranean vegetation [J]. Global Change Biology, 2000, 6, 445—458.

- [32] DeLucia E H, Callaway R M, Schlesinger W H. Offsetting changes in biomass allocation and photosynthesis in ponderosa pine (*Pinus ponderosa*) in response to climate change[J]. *Tree Physiology*, 1994, 14: 669—677.
- [33] 左闻韵, 贺金生, 韩梅, 等. 植物气孔对大气CO₂浓度和温度升高的反应——基于在CO₂浓度和温度梯度中生长的10种植物的观测[J]. *生态学报*, 2005, 25(3): 565—574.
- [34] Wang Kai Yun, Seppo Kellomäki, Tian shan Zha, et al. Annual and seasonal variation of sap flow and conductance of pine trees grown in elevated carbon dioxide and temperature[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2005, 56(409): 155—165.
- [35] Thomas J M G, Boote K J, Allen L H, et al. Elevated temperature and carbon dioxide effects on soybean seed composition and transcript abundance[J]. *Crop Science*, 2003, 43(4): 1548—1557.
- [36] Wall G W, Adam N R, Brooks T J, et al. Acclimation response of spring wheat in a free-air CO₂ enrichment (FACE) atmosphere with variable soil nitrogen regimes. 2 Net assimilation and stomatal conductance of leaves[J]. *Photosynthesis Research*, 2000, 66: 79—95.
- [37] Wechsung G, Wechsung F, Wall G W, et al. The effects of free-air CO₂ enrichment and soil water availability on spatial and seasonal patterns of wheat root growth[J]. *Global Change Biology*, 1999, 5: 519—529.
- [38] Turner N C, Kramer P J. Adaptation of plants to water and high temperature stress[M]. New York: Wiley, 1980. 482.
- [39] Wullschlegel S D, Tschaplinski T J, Norby R J. Plant water relations at elevated CO₂: implications for water-limited environments[J]. *Plant, Cell and Environment*, 2002, 25: 319—331.
- [40] Erik P Hamerlynck, Travis E Huxman, Michael E Loik, et al. Effects of extreme high temperature, drought and elevated CO₂ on photosynthesis of the Mojave Desert evergreen shrub, *Larrea tridentate*[J]. *Plant Ecology*, 2000, 148(2): 183—193.
- [41] Andrew D B Leakey, Martin Uribeharrea, Elizabeth A Ainsworth, et al. Photosynthesis, productivity and yield of maize are not affected by open-air elevation of CO₂ concentration in the absence of drought[J]. *Plant Physiology*, 2006, 140(2): 779—790.
- [42] 陈丹, 张放. 水分胁迫条件下CO₂加富对枇杷叶绿素荧光及抗氧化酶的影响[J]. *浙江农业学报*, 2004, 16(2): 63—67.
- [43] Peter Schwanz, Andrea Polle. Differential stress responses of antioxidant systems to drought in pendunculate oak (*Quercus robur*) and maritime pine (*Pinus pinaster*) grown under high CO₂ concentrations[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2001, 52(354): 133—143.
- [44] Curtis P S, Wang X. A meta-analysis of elevated CO₂ effects on woody plant mass, form, and physiology[J]. *Oecologia*, 1998, 113: 299—313.
- [45] 郭建平, 高素华. 沙地植物生长对CO₂增加和土壤干旱的响应[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(4): 174—176.
- [46] 高素华, 郭建平, 周广胜. 高CO₂浓度下羊草对土壤干旱胁迫的响应[J]. *中国生态农业学报*, 2002, 10(4): 31—33.
- [47] 许振柱, 周广胜, 肖春旺, 等. CO₂浓度倍增条件下土壤干旱对两种沙生灌木碳氮含量及其适应性的影响[J]. *生态学报*, 2004, 24(10): 2186—2191.
- [48] 郭建平, 高素华. 高CO₂浓度与土壤干旱对植物体内硫积累及分配的影响研究[J]. *中国生态农业学报*, 2005, 13(1): 108—110.
- [49] 廖建雄, 王根轩. CO₂和温度升高及干旱对小麦叶片化学成分的影响[J]. *植物生态学报*, 2000, 24(6): 744—747.
- [50] 廖建雄, 王根轩. 干旱、CO₂和温度升高对春小麦光合、蒸腾及水分利用效率的影响[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(5): 547—550.

Effects of interactions between elevated CO₂ concentration and temperature, drought on physio-ecological processes of plants

WANG Mei-yu¹, ZHAO Tian-hong^{1*}, ZHANG Wei-wei¹, SHI Yi²

(1. College of agronomy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China;

2. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: CO₂ concentration, temperature and drought are main environmental factors which can affect the growth and development of plants, so that interactions between them will have important effects on plants. New advances in the studies on the effects of global change on physio-ecological processes of plants, including photosynthesis, respiration, water utilizing efficiency, chemical component and biomass et al. were reviewed in three aspects: interactions between elevated CO₂ concentration and temperature, interactions between elevated CO₂ concentration and drought, and interactions among three of them. It put forward that research at molecule level should be emphasized in the future studies on plant physio-ecological processes on the background of global change. In addition, studies on the effects of interactions among elevated CO₂ concentration, temperature and soil moisture on plants should be enhanced.

Keywords: elevated CO₂ concentration; temperature; drought; interactions; plant physio-ecological processes