

郝田,范宁丽,于景金. CO₂ 浓度升高影响植物生长发育的研究进展[J]. 江苏农业科学,2020,48(21):52-56.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.21.009

CO₂ 浓度升高影响植物生长发育的研究进展

郝田,范宁丽,于景金

(南京农业大学草业学院,江苏南京 210095)

摘要:植物的生长发育如何响应及适应高浓度 CO₂ 环境,一直是当今学者广泛关注的热点问题。大气中的 CO₂ 浓度持续上升,引起全球降水格局的变化及温度的升高,给植物的生长发育带来极大的影响。这种影响不仅体现在植物的地上部分,还体现在植物的地下部分。综述了 CO₂ 浓度升高对植物地上部分发育进程、光合作用、抗逆性,地下部分根系生长及生物量的影响,并进行总结,以期对今后开展植物响应 CO₂ 浓度升高的研究提供参考。

关键词:CO₂ 浓度;植物生长发育;地上部分;地下部分

中图分类号:S688.401 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2020)21-0052-05

CO₂ 是大气的主要成分之一,其浓度在逐年上涨,预计到 21 世纪末,大气中 CO₂ 浓度可能会从目前的 400 μmol/mol 增加到 421~936 μmol/mol^[1-2]。出现这种情况,一方面是因为自 19 世纪工业革命以来,特别是最近几十年,人口数量快速增加,大量工业崛起,煤炭、石油、天然气等化石燃料过度燃烧,

导致生成的 CO₂ 大幅增加;另一方面是由于人类对森林的不合理砍伐,对草原过度放牧,为了城市和工厂的建设而损毁了大量农田,生态系统遭到严重破坏,使植物吸收的 CO₂ 量明显下降;再加之地表水域面积逐年减少,降水量呈下降趋势,水吸收溶解的 CO₂ 量也相应减少。这些因素共同作用,干扰了 CO₂ 生成和转化之间的动态平衡,导致大气中的 CO₂ 含量持续上升。

大气中的 CO₂ 是温室气体的主要成分,而温室气体排放量的增加是引发全球气候变暖的重要因素之一,气候变暖又引起降水模式改变,这些彼此关联的变化势必影响植物的生长发育、形态结构、

收稿日期:2020-02-08

基金项目:国家自然科学基金面上项目(编号:31971771);中国博士后科学基金面上项目(编号:2019M651866)。

作者简介:郝田(1996—),女,山西大同人,硕士研究生,主要从事草坪生理生态研究。E-mail:haotiancy18@163.com。

通信作者:于景金(1983—),博士,副教授,主要从事草坪生理生态研究。E-mail:jingjin_yu@126.com。

and potential mechanisms[J]. Science of the Total Environment, 2019,685:1201-1208.

[65]毕景望,单锐,韩静,等. 改性西瓜皮生物炭的制备及其对 Pb(II)的吸附特性[J]. 环境科学,2020,41(4):1770-1778.

[66]Gao R L, Fu Q L, Hu H Q, et al. Highly-effective removal of Pb by co-pyrolysis biochar derived from rape straw and orthophosphate[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019,371:191-197.

[67]Mortazavian S, Jones-Lepp T, Bae J H, et al. Heat-treated biochar impregnated with zero-valent iron nanoparticles for organic contaminants removal from aqueous phase; material characterizations and kinetic studies[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2019,76:197-214.

[68]Park J H, Wang J J, Xiao R, et al. Degradation of Orange G by Fenton-like reaction with Fe-impregnated biochar catalyst[J]. Bioresource Technology, 2018,249:368-376.

[69]Wan C C, Jiao Y, Li J. Core-shell composite of wood-derived biochar supported MnO₂ nanosheets for supercapacitor applications

[J]. RSC Advances, 2016,6(69):64811-64817.

[70]Wang C Y, Wang Y D, Herath H M S K. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in biochar-their formation, occurrence and analysis; a review[J]. Organic Geochemistry, 2017,114:1-14.

[71]Rechberger M V, Kloss S, Wang S L, et al. Enhanced Cu and Cd sorption after soil aging of woodchip-derived biochar: what were the driving factors? [J]. Chemosphere, 2019,216:463-471.

[72]周丹丹,吴文卫,吴敏. 生物炭的稳定性及其评价方法[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2015,38(3):116-122.

[73]Kaal J, Cortizas M A, Nierop K G J. Characterisation of aged charcoal using a coil probe pyrolysis-GC/MS method optimised for black carbon[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2009,85(1/2):408-416.

[74]Kuzakov Y, Bogomolova I, Glaser B. Biochar stability in soil: decomposition during eight years and transformation as assessed by compound-specific ¹⁴C analysis [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014,70:229-236.

内部激素稳态等,最终影响植物的生产力^[3-4]。植物光合作用的底料是 CO₂,其浓度高低对作物生长发育和产量有直接影响^[5]。CO₂ 的增加不可避免地会与其他环境因子相互作用,这也是当前全球气候变化大背景下的研究热点。目前有大量研究探讨了 CO₂ 浓度升高对植物生长发育的影响,主要利用环境条件可控的人工气候室来控制 CO₂ 浓度,研究对象既包括森林、草地、农田等宏观大尺度生态系统,又涉及各类木本、草本等微观个体。本综述在现有文献的基础上,总结植物生长发育对 CO₂ 浓度升高及其与逆境胁迫协同作用的响应,以期对未来气候变化大背景下研究植物对环境的适应机制提供借鉴。

1 CO₂ 浓度升高对植物地上部的影响

1.1 CO₂ 浓度升高对植物发育进程的影响

迄今为止,大部分研究证明 CO₂ 浓度升高能够缩短植物的发育进程,即表现为促使植物快速发芽,减少平均发芽天数,同时提高种子的发芽率、发芽势和发芽指数。如 CO₂ 浓度倍增,会使秋眠型、半秋眠型和极非秋眠型苜蓿 (*Medicago sativa*) 生育期提前^[6],也会使葫芦科植物种子发芽势升高^[7]。但也有研究表明,三叶草 (*Trifolium repens*)、辣椒 (*Capsicum frutescens*)、茼蒿 (*Chrysanthemum coronarium*)、玉米 (*Zea mays*)、康乃馨 (*Dianthus caryophyllus*) 种子的发芽率、发芽势、发芽指数在 CO₂ 浓度升高的环境中下降^[8]。出现结论不一致的原因可能是不同植物光合作用的 CO₂ 饱和点不同。普遍认为高浓度 CO₂ 会对植物的生长有正向作用,如在高 CO₂ 浓度下,大豆^[9] (*Glycine max*)、西瓜^[10] (*Citrullus lanatus*)、甜瓜^[11] (*Cucumis melo*)、番茄^[12] (*Solanum lycopersicum*) 的株高、叶面积指数均高于正常浓度下的对照组,水稻 (*Oryza sativa*) 分蘖数也出现增加现象^[13]。

1.2 CO₂ 浓度升高对植物光合作用的影响

CO₂ 是植物进行光合作用的底物^[14],对植物的生长发育和作物产量起着决定性的作用^[15]。由于正常空气中的 CO₂ 浓度比植物的 CO₂ 饱和点低很多,所以空气中的 CO₂ 浓度升高对多数植物的生长是有利的,特别是 C₃ 植物。研究发现,多种灌木 [紫丁香 (*Syringa oblata*)、紫叶矮樱 (*Prunus cistena*)、金叶榆 (*Ulmus pumila*)、水蜡 (*Ligustrum obtusifolium*)、榆叶梅 (*Amygdalus triloba*)] 的光合速

率均随空气中 CO₂ 浓度的升高而升高^[16],这与重要粮食作物大豆^[17] 和黄瓜^[18] (*Cucumis sativus*)、番茄^[19] 的变化一致。刘金祥等通过比较不同月份沿阶草 (*Ophiopogon bodinieri*) 的光合效率发现,随着 CO₂ 浓度升高,11 月和 3 月的沿阶草的光合速率均提高,但 3 月沿阶草的光合速率持续上升,而 11 月沿阶草的光合速率则随 CO₂ 浓度的增加呈现先急速上升后逐渐变缓的趋势^[20]。这种现象被统称为“光合上调”,一般发生在短期处理试验中。但也有些植物在长期 CO₂ 浓度升高的情况下没有表现出对光合速率的正效应,甚至会导致光合速率下调,这种现象被称作“光合适应”^[21]。

1.3 CO₂ 浓度升高对植物抗逆性的影响

干旱、高温、盐碱等不良环境条件会影响植物的正常生长发育,而 CO₂ 浓度升高能够在一定程度上改变植物对逆境的耐受性。就干旱胁迫而言,高浓度 CO₂ 通过降低气孔开度和导度使蒸腾速率下降,从而降低植物耗水量,提高水分利用效率^[22-23],从而缓解水分胁迫对植物造成的危害,提高植物的耐旱能力。高浓度 CO₂ 也可使植物体内叶绿素含量提高、各种生理代谢物增加,最终提高植物对不良环境的适应能力。CO₂ 浓度的增加可以促进干旱条件下开花期大豆叶片的光合速率和水分利用效率,但提升效果有限^[24];也能削弱干旱胁迫对泥胡菜 (*Hemistepta lyrata*)、风轮菜 (*Clinopodium chinense*) 的不利影响;但对于网果酸模 (*Rumex chalepensis*)、野豌豆 (*Vicia sepium*),CO₂ 浓度升高对干旱胁迫的减缓作用显著降低;干旱胁迫对藜的生长并不受 CO₂ 浓度变化的影响;但是 CO₂ 浓度升高对干旱条件下玉米的生长起抑制作用^[25]。可见,CO₂ 浓度升高能否缓解干旱的负面影响具有明显的种间差异。也有学者证实,在中度干旱条件下,CO₂ 浓度升高能提高黄瓜幼苗的光化学效率、表观量子效率和最大 CO₂ 同化率^[26]。但经过对羊草 (*Leymus chinensis*) 的研究,发现随着干旱的加剧,高浓度 CO₂ 的“施肥效应”会逐渐减弱,甚至消失^[27]。

水分利用效率起到关联植物叶片光合与耗水量的作用,表征植物在水分消耗不变的情况下固定 CO₂ 的能力,是植物叶片水分利用特征的基本生理参数。樊良新等研究发现,当 CO₂ 倍增与干旱胁迫共同作用时,紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 的水分利用效率在光照强度小于 200 ~ 250 μmol/(m² · s) 时快速增大,随后趋于稳定^[28]。刘锦春等发现,在不同

水分处理下,燕麦(*Avena sativa*)的瞬时水分利用效率均随 CO_2 浓度的增加而提高,且 CO_2 浓度越高水分利用效率增加幅度也越大^[29]。同时 CO_2 浓度升高会使飞机草(*Eupatorium odoratum*)、异叶泽兰^[30](*Eupatorium heterophyllum*)、黑麦草(*Lolium perenne*)、草地早熟禾(*Poa pratensis*)、高羊茅^[31](*Festuca arundinacea*)的水分利用效率都显著升高,黑麦草的增幅甚至高达 175%,这与水稻^[32]、甘蔗^[33](*Saccharum officinarum*)和高粱^[34](*Sorghum bicolor*)等作物的研究结果一致,但对重要农作物大豆和冬小麦^[31]的水分利用效率没有显著影响。这表明,不同植物对大气 CO_2 高浓度响应的敏感程度不同。同时也有研究表明,在干旱胁迫下植物的光合能力和水分利用效率可以通过 CO_2 倍增来提高,从而增强耐旱性^[35-36],但对大豆水分利用效率提高的程度远不及正常水分条件^[17]。说明 CO_2 浓度升高可提高植物的耐旱性或减轻干旱胁迫引起的危害,但不会完全抵消干旱的不利影响^[35]。

高温和盐胁迫等逆境对植物的生长发育也有很明显的抑制作用,而高浓度 CO_2 会削弱这种不利影响。高浓度 CO_2 对盐胁迫条件下黄瓜^[37]、番茄^[38]的株高、茎粗和叶面积有很明显的提升作用,能促进高温条件下高羊茅的生长速率和净光合速率^[39],能提高黄瓜^[40-41]、大豆^[42]的株高、茎粗和产量。综上所述,高浓度 CO_2 对逆境胁迫的缓解作用具有一定的普遍性,但这种缓解作用通常仅在胁迫强度在一定范围内的条件下发挥作用,当胁迫超出限度,该缓解作用则会逐渐消失。

1.4 CO_2 浓度升高对植物地上生物量的影响

CO_2 浓度升高对植物生物量的影响受多种因素限制。有试验指出,当水分、养分充足且温度、光照、湿度等环境条件均适宜时, CO_2 浓度升高能提高植物的总生长量^[43]。在不同程度水分处理下, CO_2 浓度升高使红砂^[44](*Reaumuria soongorica*)、玉米^[45]等植物的地上生物量明显增加。在水分充足的条件下, CO_2 浓度的增加使大豆地上生物量在 2 年内平均增长 15.2%;而在水分亏缺条件下,这种促进作用更明显,达到 22.6%^[15]。但也有试验表明, CO_2 浓度升高与其他环境因子协同作用下,植物的生物量不但没有提高,反而有所下降^[46]。然而,无论 CO_2 浓度高低,生物量的积累都是随着水分含量的降低而减少,这主要是由于水分胁迫使植物生

长过程受到抑制,导致总叶面积减少,从而使地上生物量降低^[29]。

2 CO_2 浓度升高对植物地下部的影响

2.1 CO_2 浓度升高对植物根长的影响

大多数植物地上部分的生长都受到根系从土壤中吸收水分和养分能力的影响^[47]。根系是植物吸收和运输养分最主要的器官,根系还能固定植物、合成和储存有机物质^[48]。根系在土层中的空间分布及与土壤的接触表面积对植物吸收养分非常重要。根深才能叶茂,为了获取更多的养分,植物往往形成发达的根系,尽可能增加其与土壤的接触面积。根系具有形态和生理方面的可塑性,会根据环境的变化而改变自身在土壤剖面中的空间分布^[49]。在 CO_2 浓度升高时,植物地上生物量增加,汇能力提高,对养分的需求也相应增加,刺激地下根系适时变化,这是植物的一种自我反馈调节方式。

CO_2 浓度升高对大多数作物根系的生长都起着促进作用,促进效果比对地上部分的更明显^[50]。但根系长度的变化因作物种类不同而不同,既存在高浓度 CO_2 导致根系增长的情况^[51-53],也存在根系变短的现象^[8]。 CO_2 浓度变化导致植物根系数量和长度的改变,除了因植物品种不同而存在差异外,也与温度、湿度、土壤状况等很多条件相关^[54]。

2.2 CO_2 浓度升高对植物根系生物量的影响

大多数研究认为, CO_2 浓度增加可以提高植物的光合效率,增加的碳水化合物需要在不同器官进行再分配,因此植物根系的生物量随之增大。 CO_2 浓度升高可以促进三叶草、辣椒、茼蒿、玉米、康乃馨^[7]、小麦^[55](*Triticum aestivum*)、黄瓜^[56]、水稻^[57]、红桦^[58]、番茄^[59]等物种根系生物量的增加。这些研究表明, CO_2 对植物的影响除了与植物的遗传背景有关外^[60],可能也是植物适应大气成分变化的一个普遍现象。同时,研究 CO_2 浓度升高对植物根系生物量的影响时,还要兼顾考虑空气和土壤温度以及土壤肥力等条件的变化^[49]。例如,高氮条件下, CO_2 浓度升高对植物根系生物量的提升效果大于低氮条件^[61];高浓度 CO_2 与高养分浓度营养液结合时,对番茄根系生物量的促进作用才能达到最佳^[62]。

3 研究展望

目前,关于高浓度 CO_2 对植物生长发育影响的

研究有很多,且主要集中在 CO_2 浓度升高及其与逆境胁迫协同作用对植物生长、光合作用及形态等方面的影响。普遍结论是 CO_2 浓度升高会缩短植物的发育进程,增加植株地上和地下部分的生物量,提升光合效率、水分利用率,加强植物抗逆性。事实上,高浓度 CO_2 对植物生长发育的影响比较复杂,因植物种类、品种、生长发育阶段的不同而不同。由于植物的生长发育是由自身生理生态过程和多个环境因子共同调控的,仅从某一方面研究和解释高浓度 CO_2 对植物生长发育的影响机制比较片面。在研究高浓度 CO_2 对植物生长发育的影响时,许多研究集中在植株个体水平,并且尚无定论。因此,今后研究高浓度 CO_2 对植物的影响,应侧重探讨不同物种长期适应高浓度 CO_2 的生理机制,并深入展开对高浓度 CO_2 影响植物生长的分子作用机制等方面的研究。

参考文献:

- [1] Bala G. Digesting 400 ppm for global mean CO_2 concentration[J]. Current Science, 2013, 104(11): 1471–1472.
- [2] 杜乐山, 刘海燕, 翟晓朦, 等. CO_2 浓度升高对不同秋眠型苜蓿叶片解剖结构的影响[J]. 草业科学, 2018, 35(7): 1704–1712.
- [3] Feng G Q, Yi L, Cheng Z M. Plant molecular and genomic responses to stresses in projected future CO_2 environment[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2014, 33(2/3): 238–249.
- [4] 赵天宏, 王美玉, 张巍巍, 等. 大气 CO_2 浓度升高对植物光合作用的影响[J]. 生态环境, 2006, 15(5): 1096–1100.
- [5] Kimball B A. Crop responses to elevated CO_2 and interactions with H_2O , N, and temperature[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2016, 31: 36–43.
- [6] 翟晓朦, 张晓波, 王铁梅, 等. CO_2 浓度升高对不同秋眠类型苜蓿生长发育的影响[J]. 草业科学, 2017, 34(3): 523–531.
- [7] 高素华, 郭建平, 毛 飞, 等. CO_2 浓度升高对植物种子萌发及叶片的影响[J]. 资源科学, 2000, 22(6): 18–21.
- [8] 李志华, 蒋兴川, 钱 蕾, 等. CO_2 体积分数升高对西花蓟马主要寄主植物种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2014, 29(4): 508–513.
- [9] 蒋跃林, 张庆国, 岳 伟, 等. 大气 CO_2 浓度升高对大豆生长和产量的影响[J]. 中国农学通报, 2005, 21(6): 355–357.
- [10] 武佩琪, 许小勇, 姬胜男, 等. 增施 CO_2 对西瓜生长发育及品质的影响[J]. 山西农业科学, 2019, 47(5): 801–804, 818.
- [11] 朱世东, 徐文娟, 赵冠艳, 等. 大棚西瓜、甜瓜苗期 CO_2 加富的生理效应[J]. 华中农业大学学报, 2004(增刊2): 287–291.
- [12] 高 宇, 崔世茂, 宋 阳, 等. CO_2 加富对番茄幼苗生长及光合特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(24): 147–149.
- [13] 黄建晖, 杨洪建, 董桂春, 等. 开放式空气 CO_2 浓度增高对水稻产量形成的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13(10): 1210–1214.
- [14] 韩 枫, 邓红章, 李春荣, 等. 土壤高浓度 CO_2 对植物生理生化特性的影响[J]. 应用化工, 2017, 46(3): 422–425.
- [15] Li D X, Liu H L, Qiao Y Z, et al. Effects of elevated CO_2 on the growth, seed yield, and water use efficiency of soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] under drought stress [J]. Agricultural Water Management, 2013, 129: 105–112.
- [16] 艾力江·麦麦提, 买尔旦·阿不都卡德, 木合太·尼亚孜, 等. 乌鲁木齐城市绿化树种光合能力对 CO_2 浓度增高的响应[J]. 绿色科技, 2019(9): 6–8.
- [17] Hao X Y, Han X, Lam S K, et al. Effects of fully open – air elevation on leaf ultrastructure, photosynthesis and yield of two soybean cultivars[J]. Photosynthetica, 2012, 50(3): 362–370.
- [18] 潘 璐, 崔世茂, 宋 阳, 等. 长期加富 CO_2 条件下温室黄瓜光合作用对高温的应答机理[J]. 北方园艺, 2015(16): 1–6.
- [19] Li J, Zhou J M, Duan Z Q, et al. Effect of CO_2 enrichment on the growth and nutrient uptake of tomato seedlings [J]. Pedosphere, 2007, 17(3): 343–351.
- [20] 刘金祥, 麦嘉玲, 刘家琼. CO_2 浓度增强对沿阶草光合生理特性的影响[J]. 中国草地, 2004, 26(3): 13–17, 23.
- [21] 许大全. 光合作用及有关过程对长期高 CO_2 浓度的响应[J]. 植物生理学通讯, 1994, 30(2): 81–87.
- [22] Bernacchi C J, Kimball B A, Quarles D R, et al. Decreases in stomatal conductance of soybean under open – air elevation of [CO_2] are closely coupled with decreases in ecosystem evapotranspiration[J]. Plant Physiology, 2007, 143(1): 134–144.
- [23] 郭丽丽, 张茜茜, 郝立华, 等. 大气 CO_2 倍增条件下冬小麦气体交换对高温干旱及复水过程的响应[J]. 作物学报, 2019, 45(6): 949–956.
- [24] 李炳言, 王 娜, 郝兴宇, 等. 大气 CO_2 浓度升高和干旱的交互作用对大豆光合作用的影响[J]. 山西农业科学, 2019, 47(2): 222–225, 258.
- [25] 高凯敏, 刘锦春, 梁千慧, 等. 6 种草本植物对干旱胁迫和 CO_2 浓度升高交互作用的生长响应[J]. 生态学报, 2015, 35(18): 6110–6119.
- [26] Li Q M, Liu B B, Zou Z R. Effects of doubled CO_2 concentration on physiological characteristics of cucumber seedlings under drought stresses[J]. Acta Horticulturae, 2012, 936: 103–111.
- [27] 高素华, 郭建平, 周广胜. 羊草叶片对高 CO_2 浓度和干旱胁迫的响应[J]. 草地学报, 2001, 9(3): 202–206.
- [28] 樊良新, 刘国彬, 薛 蕙, 等. CO_2 浓度倍增及干旱胁迫对紫花苜蓿光合生理特性的协同影响[J]. 草地学报, 2014, 22(1): 85–93.
- [29] 刘锦春, Cornelissen J C. CO_2 浓度变化下燕麦对干旱胁迫的生理响应[J]. 草业科学, 2015, 32(7): 1116–1123.
- [30] 柴伟玲, 类延宝, 李扬苹, 等. 外来入侵植物飞机草和本地植物异叶泽兰对大气 CO_2 浓度升高的响应[J]. 生态学报, 2014, 34(13): 3744–3751.
- [31] 郑云普, 李 菲, 侯毅凯, 等. 大气 CO_2 浓度增加对作物光合性能及叶片水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(10): 91–98.
- [32] Baker J, Allen L H, Boote K, et al. Rice responses to drought under

- carbon dioxide enrichment. 1. Growth and yield [J]. *Global Change Biology*, 1997, 3(2): 119–128.
- [33] Joseph C V, Allen L H. Growth at elevated CO₂ delays the adverse effects of drought stress on leaf photosynthesis of the C₄ sugarcane [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2009, 166(2): 107–116.
- [34] Allen L J, Kakani V G, Vu J C, et al. Elevated CO₂ increases water use efficiency by sustaining photosynthesis of water-limited maize and sorghum [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2011, 168(16): 1909–1918.
- [35] Wang A, Lam S K, Hao X Y, et al. Elevated CO₂ reduces the adverse effects of drought stress on a high-yielding soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] cultivar by increasing water use efficiency [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2018, 132: 660–665.
- [36] 张学霞, 杨璐璐, 华开. CO₂ 浓度对高羊茅抗旱性及水分利用效率的影响分析 [J]. *草地学报*, 2015, 23(3): 502–509.
- [37] 厉书豪, 李曼, 张文东, 等. CO₂ 加富对盐胁迫下黄瓜幼苗叶片光合特性及活性氧代谢的影响 [J]. *生态学报*, 2019, 39(6): 2122–2130.
- [38] 李旭芬, 石玉, 李斌, 等. CO₂ 加富对盐胁迫下番茄幼苗生长和渗透调节特性的影响 [J]. *西北农业学报*, 2019, 28(8): 1309–1316.
- [39] 于景金, 范宁丽, 李冉, 等. 高浓度 CO₂ 对热胁迫条件下高羊茅生长和抗氧化系统的影响 [J]. *草业学报*, 2017, 26(8): 113–122.
- [40] 张之为, 李晓静, 白金瑞, 等. 高温条件下 CO₂ 对黄瓜叶片光合速率和气孔特性的影响 [J]. *作物杂志*, 2016(5): 81–86.
- [41] 刘金泉, 严海欧, 张清梅, 等. CO₂ 加富和短期昼间亚高温对温室嫁接黄瓜植株生长和光合作用的影响 [J]. *北方园艺*, 2016(15): 50–54.
- [42] 苏营, 张逸飞, 牟文雅, 等. 大豆主要株型和产量指标对大气 CO₂ 和温度升高的响应 [J]. *生态学报*, 2016, 36(9): 2597–2606.
- [43] 梁千慧, 刘锦春, 高凯敏, 等. 6 种草本植物对“过去-现在-未来”CO₂ 浓度的生长响应 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2017, 39(1): 61–68.
- [44] 种培芳, 詹瑾, 贾向阳, 等. 模拟 CO₂ 浓度升高及降雨变化对荒漠灌木红砂光合及生长的影响 [J]. *林业科学*, 2018, 54(9): 27–37.
- [45] 孟凡超, 张佳华, 郝翠, 等. CO₂ 浓度升高和不同灌溉量对东北玉米光合特性及产量的影响 [J]. *生态学报*, 2015, 35(7): 2126–2135.
- [46] 武海霞, 郭丽丽, 郝立华, 等. 水分和 CO₂ 浓度对冬小麦气孔特征、气体交换参数和生物量的影响 [J]. *作物学报*, 2018, 44(10): 1570–1576.
- [47] Hammer G L, Dong Z, McLean G, et al. Can changes in canopy and/or root system architecture explain historical maize yield trends in the U. S. Corn Belt [J]. *Crop Science*, 2009, 49(1): 299–312.
- [48] 赵旭, 刘涛, 姚慧敏, 等. 长期根际 CO₂ 浓度升高对雾培番茄植株营养吸收及果实产量和品质的影响 [J]. *江苏农业学报*, 2020, 36(1): 158–163.
- [49] Benlloch-Gonzalez M, Jens B, Helen B, et al. The plasticity of the growth and proliferation of wheat root system under elevated CO₂ [J]. *Plant and Soil*, 2014, 374(1/2): 963–976.
- [50] Kimball B A, 朱建国, 程磊, 等. 开放系统中农作物对空气 CO₂ 浓度增加的响应 [J]. *应用生态学报*, 2002, 13(10): 1323–1338.
- [51] Chaudhuri U, Burnett R, Kirkham M, et al. Effect of carbon dioxide on sorghum yield, root growth, and water use [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1986, 37(2): 109–122.
- [52] Rogers H H, Peterson C M, McCrimmon J N, et al. Response of plant roots to elevated atmospheric carbon dioxide [J]. *Plant Cell and Environment*, 1992, 15(6): 749–752.
- [53] Reddy V R, Reddy K R, Hodges H F. Carbon dioxide enrichment and temperature effects on cotton canopy photosynthesis, transpiration, and water-use efficiency [J]. *Field Crops Research*, 1995, 41(1): 13–23.
- [54] 侯颖, 王开运, 张远彬, 等. CO₂ 浓度和温度升高对川西亚高山红桦幼苗根系结构的影响 [J]. *北京林业大学学报*, 2008, 30(1): 29–33.
- [55] Jeremy D B, Ollerenshaw J H, Whitfield C P. Effects of elevated CO₂ and/or O₃ on growth, development and physiology of wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Global Change Biology*, 1995, 1(2): 129–142.
- [56] 尹燕东, 裴立群, 魏珉, 等. 温室 CO₂ 施肥对黄瓜幼苗根系生长及分泌物和伤流液组成的影响 [J]. *生态学报*, 2010, 30(7): 1860–1867.
- [57] 陈改革, 朱建国, 谢祖彬, 等. 开放式空气 CO₂ 浓度升高对水稻根系形态的影响 [J]. *生态环境*, 2005, 14(4): 503–507.
- [58] 李青超, 张远彬, 王开运, 等. 大气 CO₂ 浓度升高对红桦幼苗根系的影响 [J]. *生态学杂志*, 2007, 26(10): 1674–1678.
- [59] 王月, 章永松, 方萍, 等. 不同供磷状况下 CO₂ 浓度升高对番茄根系生长及养分吸收的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(5): 871–876.
- [60] Benlloch-Gonzalez M, Jens B, Helen B, et al. The plasticity of the growth and proliferation of wheat root system under elevated CO₂ [J]. *Plant and Soil*, 2014, 374(1/2): 963–976.
- [61] 寇太记, 朱建国, 谢祖彬, 等. CO₂ 浓度增加和不同氮肥水平对冬小麦根系呼吸及生物量的影响 [J]. *植物生态学报*, 2008, 32(4): 922–931.
- [62] 李娟, 周建民, 段增强, 等. CO₂ 与养分交互作用对番茄幼苗根生长的影响 [J]. *西北植物学报*, 2005, 25(10): 2112–2117.