

二氧化碳和臭氧浓度升高对四季竹矿质养分含量和运输的影响

庄明浩^{1,2}, 李迎春¹, 陈双林^{1*}

(1 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江富阳, 311400; 2 北京大学 环境科学与工程学院, 北京 100871)

摘 要:为阐明 CO₂ 和 O₃ 浓度升高对竹子矿质养分含量和运输的影响, 以 2 年生四季竹 (*Oligostachyum lubricum*) 为试材, 采用开顶式气室 (OTCs) 设置了环境背景大气 [CK, (40 ± 5) nmol · mol⁻¹ O₃, (360 ± 20) μmol · mol⁻¹ CO₂], O₃ 浓度升高 [EO, (100 ± 10) nmol · mol⁻¹ O₃, (360 ± 20) μmol · mol⁻¹ CO₂], CO₂ 浓度升高 [EC, (40 ± 5) nmol · mol⁻¹ O₃, (700 ± 35) μmol · mol⁻¹ CO₂], CO₂ 和 O₃ 浓度复合升高 [EOEC, (100 ± 10) nmol · mol⁻¹ O₃, (700 ± 35) μmol · mol⁻¹ CO₂] 4 个处理, 测定了竹叶、竹枝、竹秆和竹根的 Na⁺、Fe^(2+,3+)、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 含量, 并分析了矿质营养在器官间的转运情况。结果显示: 与 CK 比较, EO 处理显著降低了四季竹植株体内 Na⁺ 和 Fe^(2+,3+) 含量, 特别是竹根和竹叶, 同时也明显降低 Na⁺ 和 Fe^(2+,3+) 器官间的运输能力。EC 处理显著降低了四季竹植株体内 Na⁺ 含量, 而未改变其他矿质元素含量, 但其器官中的分配格局和运输能力发生变化, 尤其是竹枝向竹叶运输 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 的能力增强。EOEC 处理显著降低了四季竹植株体内 Na⁺ 含量, 但显著提高了 Fe^(2+,3+)、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 含量及其向上运输能力。研究表明, O₃ 浓度升高降低了四季竹植株体内矿质养分含量和器官间养分运输能力, 在一定程度上影响四季竹的正常生长; CO₂ 浓度升高通过提高 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 向光合器官叶片的运输能力, 促进四季竹生长; CO₂ 和 O₃ 浓度升高复合作用能够通过提高四季竹光合器官竹叶中 Fe^(2+,3+)、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 含量及其向光合器官叶片的运输能力, 以维持体内矿质养分元素的平衡, 提高四季竹对高浓度 CO₂ 和 O₃ 浓度复合环境下的适应能力。

关键词: 四季竹; 臭氧; 二氧化碳; 矿质养分; 选择运输能力

中图分类号: Q945.12; Q945.79

文献标志码: A

Effect of Elevated Carbon Dioxide and Ozone on the Mineral Nutrient Content and Distribution and Transportation in *Oligostachyum lubricum*

ZHUANG Minghao^{1,2}, LI Yingchun¹, CHEN Shuanglin^{1*}

(1 Research institute of Subtropical Forest, Chinese Forestry Academy, Fuyang, Zhejiang 311400, China; 2 College of Environmental Science and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: To provide theoretical evidence to aid adaptive management of bamboo plantation operating under the background of climate change, we studied the effects of simulated elevated atmospheric carbon dioxide (CO₂) and ozone (O₃) concentrations on mineral ion uptake and transportation in bamboo. We chose the biennial *Oligostachyum lubricum* as experiment material, and employed the open-top chambers (OTCs) test method in conjunction with a split-plot design to simulate the different atmospheric and elevated CO₂

收稿日期: 2016-02-28; 修改稿收到日期: 2016-06-05

基金项目: 国家林业局林业科学技术推广项目 ([2014]07); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金 (RISF2014006)

作者简介: 庄明浩 (1985—), 男, 在读博士研究生, 主要从事竹林生理生态研究。E-mail: zhuangminghao3@163.com

* 通信作者: 陈双林, 研究员, 主要从事竹林生态与培育研究。E-mail: cslbamboo@126.com

and O₃ concentrations, Control [CK, (40±5) nmol·mol⁻¹O₃, (360±20) μmol·mol⁻¹CO₂]; elevated O₃ [EO, (100±10) nmol·mol⁻¹O₃, (360±20) μmol·mol⁻¹CO₂]; elevated CO₂ [EC, (40±5) nmol·mol⁻¹O₃, (700±35) μmol·mol⁻¹CO₂] and combinations of elevated CO₂ and O₃ [EOEC, (100±10) nmol·mol⁻¹O₃, (700±35) μmol·mol⁻¹CO₂]. Our results showed that, compared with CK treatment, EO treatment decreased significantly the Na⁺ and Fe^(2+,3+) concentrations in *O. lubricum*, especially leaf and root, and the ions transportation ability among organs, while had no changes for the Ca²⁺ and Mg²⁺ concentrations. EC treatment had no changes in Fe^(2+,3+) and Ca²⁺ and Mg²⁺ concentrations with the exception of the decrease significant of Na⁺ concentration, but enhanced the Ca²⁺ and Mg²⁺ transportation ability from branch to leaf. EOEC treatment decreased significantly the Na⁺ concentration while increased the Fe^(2+,3+) and Ca²⁺ and Mg²⁺ concentrations and the transportation ability among organs. Based on these findings, we concluded that elevated ozone influenced the normal growth of *O. lubricum* by decreasing the concentrations of mineral nutrient and transportation ability among organs; elevated carbon dioxide benefited the growth of *O. lubricum* by enhanced the Ca²⁺ and Mg²⁺ transportation ability from other organs to leaf; the combinations of elevated ozone and carbon dioxide increased both the mineral nutrient concentrations and its transportation ability from other organs to leaf, and maintained the balance of mineral elements, and enhanced the adaptation capacity of *O. lubricum* to environments with higher ozone and carbon dioxide concentrations.

Key words: *Oligostachyum lubricum*; ozone; carbon dioxide; mineral nutrient; selective transportation index

全球变化和温室效应已成为国际社会普遍关注的重要环境问题,其中二氧化碳(CO₂)和臭氧(O₃)作为影响全球气候变化的最为主要的两大温室气体,其浓度的升高已成为当前研究的热点^[1]。由于化石燃料的燃烧和土地利用方式发生变化,CO₂浓度持续上升,其浓度由工业革命前的 280 μmol/mol 增至目前约 380 μmol/mol,预计到 21 世纪末将达到 730~1 020 μmol/mol^[2];1750 年以来全球 O₃ 浓度平均值由 25 nL/L 上升到目前的 40 nL/L,预计 2100 年对流层中 O₃ 浓度将增加 40%~60%^[3]。目前,关于 CO₂ 和 O₃ 浓度升高对植物生理生态影响的研究已较多报道。普遍认为 CO₂ 浓度升高具有施肥效应,能提高叶绿体内 CO₂ 与 O₂ 体积比,减小活性氧产生几率,反馈激活植物光合作用的光反应过程,促进合成更多的还原力,诱导植物抗氧化酶活性和抗氧化剂含量的上升,增强光合作用对 CO₂ 的固定能力,促进植物生长发育^[4],提高植物的生物量 and 经济产量^[5]。而 O₃ 浓度升高往往会抑制植物的生长,使植株矮化,叶面积减小,加速叶片衰老,使叶片黄化^[6-7],改变叶片细胞膜透性,降低植物抗氧化系统功能^[8]等。CO₂ 和 O₃ 浓度升高对植物的一系列影响很大程度上与植物体内矿质养分关系密切,包括植物对矿质养分的吸收、运输和分配等^[9-10]。迄今关于 CO₂ 和 O₃ 浓度复合升高对植物营养元素含量水平和分配格局的影响研究主要集中在大量元素上,即碳(C)、氮(N)、磷(P)和钾(K)^[11],而对植物生长发育同样起着非常重要作用

的中、微量元素而言,此类研究还相对较少且在有限的研究中所得结论还不尽相同^[11-12]。例如:有研究表明,O₃ 浓度升高对植物钙(Ca)、铁(Fe)、锰(Mn)、锌(Zn)等矿质养分的总含量没有明显影响,但会使植物体内矿质养分元素的分配发生改变^[11-12],如使马铃薯(*Solanum tuberosum*)地上部分的镁(Mg)含量降低,块茎中 N、Mg 含量显著增加^[13]。但也有研究认为,O₃ 浓度升高会降低小麦(*Triticum aestivum*)体内 Fe、Mn、Zn 的累积量^[14]。CO₂ 浓度升高会加速植物对矿质养分的吸收,提高矿质养分的含量,从而满足自身生长的需要^[15],如庄明浩等^[16]研究显示 CO₂ 浓度升高促进毛竹(*Phyllostachys edulis*)植株体内矿质养分的含量,但也有研究认为 CO₂ 浓度升高会降低植物矿质养分的含量^[17-18]。许多研究表明,CO₂ 和 O₃ 浓度复合升高对植物生长与生理生态的影响十分复杂,但可以确定的是 CO₂ 和 O₃ 浓度复合升高对植物的影响决不是两者单独作用的简单叠加^[19]。因此,进一步加强 CO₂ 和 O₃ 浓度升高及其复合作用对植物中、微量矿质养分吸含量、分配与转运的影响研究,有助于更加全面揭示气候变化背景下的植物适应与响应机制。

竹子是中国热带和亚热带地区重要的森林资源,竹林面积占中国森林面积的 3%^[20],竹产业已成为产竹区农村社会经济发展的重要产业和农民家庭经济收入的重要来源。开展气候变化条件下的竹子生理生态研究,不仅能拓展竹林生态研究领域,而且

可为全球气候变化背景下的竹林生态系统可持续经营管理提供理论参考。因此,本试验以四季竹(*Oligostachyum lubricum*)为研究对象,运用开顶式气室(OTCs)模拟 CO₂ 和 O₃ 浓度升高及其复合作用情景,以中、微量矿质元素 Na⁺、Fe^(2+,3+)、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 为研究元素,试图揭示 CO₂ 和 O₃ 浓度升高及其复合作用条件下是否会明显影响四季竹 Na⁺、Fe^(2+,3+)、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 的含量及其在器官间的运输能力和分配格局。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验地位于浙江省临安市(29°56′~30°23′N, 118°51′~119°72′E)太湖源镇太湖源观赏竹种园。于 2009 年 11 月在四季竹林中选取地径(12.15±1.25) mm、全高(2.70±0.30) m、生长健壮的 2 年生立竹,进行不带宿土的全梢竹盆栽,栽植盆上端直径 38 cm、下端直径 32 cm、高 35 cm,每盆栽植 1 株,共 60 盆。盆栽基质为红壤与细沙按体积比 3:1 均匀混合而成,pH5.8,水解氮 198.47 mg·kg⁻¹,速效磷 67.25 mg·kg⁻¹,速效钾 74.16 mg·kg⁻¹。盆栽试验竹苗经定期人工水分补充,及时去除笋芽和杂草等管护,至 2011 年 7 月开始进行 O₃ 和 CO₂ 浓度处理试验。

1.2 试验设计

开顶式气室(OTCs)由不锈钢管和无色透明玻璃构建,主要包括过滤系统、通风及布气系统和框架等,气室边长 1.5 m、高 4.0 m,室壁上部向内部倾斜 45°成斜面,玻璃室壁为正八边形。CO₂ 来源于钢瓶装纯 CO₂,O₃ 来源于 CFG-20 型臭氧发生器(中国济南三康环保科技有限公司生产)。环境大气经活性炭过滤后,再分别添加由 CFG-20 型臭氧发生器产生的 O₃ 和通过减压阀释放钢瓶中的 CO₂,添加的量先经气室体积和轴流风机流速计算后,通过流量计来调节,用 750 W 功率的轴流风机通入 OTCs 内。

试验共设 4 个处理,分别为 CK[环境背景大气,O₃ 浓度(40±5) nmol·mol⁻¹,CO₂ 浓度(360±20) μmol·mol⁻¹]、EO[O₃ 浓度(100±10) nmol·mol⁻¹,CO₂ 浓度(360±20) μmol·mol⁻¹]、EC[O₃ 浓度(40±5) nmol·mol⁻¹,CO₂ 浓度(700±35) μmol·mol⁻¹]、EOEC[O₃ 浓度(100±10) nmol·mol⁻¹,CO₂ 浓度(700±35) μmol·mol⁻¹],每个处理重复 3 次。每处理气室内均匀地放置 5 盆生长状况基本一致的四季竹试验盆栽苗。试验用 Model

205 双光束紫外 O₃ 分析仪(中国上海康卓自动化系统工程服务有限公司生产)对 OTCs 内 O₃ 浓度进行监测,用 CO₂ 红外传感器(中国上海兴卓环保仪器有限公司生产)对 OTCs 内 CO₂ 浓度进行实时监测,调节其浓度波动范围在目标值 5% 以内。

2011 年 7 月 10 日开始熏气,O₃ 每天熏气时间为 7:00~17:00,CO₂ 每天熏气 24 h,2011 年 10 月 30 日停止熏气。

1.3 取样和测定方法

熏气结束时,在每个气室内选取 5 株立竹,分别取秆、枝、叶、根混合样品各约 300 g,在烘箱中 105 ℃杀青 30 min,再 80 ℃烘至恒重,后磨碎过 40 目筛,称量后用硝酸-高氯酸法消煮。Na⁺ 含量采用火焰光度法测定^[21],Fe^(2+,3+)、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 含量采用原子分光光度法测定^[22]。

1.4 数据处理与分析

根据 Pitman^[23]的方法计算四季竹器官 Na⁺、Fe^(2+,3+)、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 矿质养分选择性运输系数(S_x=库器官/源器官)。

在 Excel 2007 软件中进行实验数据的整理与作图表,在 SPSS17.0 统计软件中进行单因素方差分析,在 0.05 水平上进行 LSD 多重比较。试验数据均为平均值±标准差。

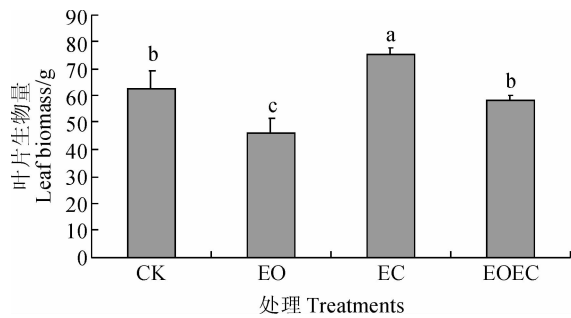
2 结果与分析

2.1 CO₂ 和 O₃ 浓度升高条件下四季竹叶片生物量的变化

图 1 显示,在 CO₂ 和 O₃ 浓度升高及其复合作用条件下,四季竹单株竹叶生物量在单独 O₃ 浓度升高处理(EO)下比环境背景大气处理(CK)显著降低 26.63%,在单独 CO₂ 浓度升高处理(EC)下比 CK 显著升高 20.90%,而在 CO₂ 和 O₃ 浓度同时升高处理(EOEC)下与 CK 并无明显差异;同时,EO 处理的四季竹叶片生物量显著低于 EC 和 EOEC 处理,而 EC 处理又显著高于 EOEC 处理。以上结果说明 O₃ 浓度升高能显著降低成年四季竹叶片生物量,而 CO₂ 浓度则显著提高叶片生物量,O₃ 和 CO₂ 浓度复合作用并不会显著改变四季竹叶片生物量。

2.2 CO₂ 和 O₃ 浓度升高条件下四季竹器官矿质养分含量的变化

CO₂ 和 O₃ 浓度升高及其复合作用条件下四季竹植株体内各器官矿质养分含量情况如表 1 所示。首先,四季竹植株体内的 Na⁺ 含量在 EO、EC 和 EOEC 处理下均比 CK 显著降低,但 EO、EC 和 EO-



CK. 对照[(40±5) nmol·mol⁻¹O₃, (360±20) μmol·mol⁻¹CO₂];
EO. O₃ 浓度升高[(100±10) nmol·mol⁻¹ O₃, (360±20) μmol·
mol⁻¹ CO₂];EC. CO₂ 浓度升高 [(40±5) nmol·mol⁻¹ O₃ ,
(700±35) μmol·mol⁻¹ CO₂];EOEC. CO₂ 和 O₃ 浓度复合升高
[(100±10) nmol·mol⁻¹ O₃ , (700±35) μmol·mol⁻¹ CO₂];
不同字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著

图 1 CO₂ 和 O₃ 浓度升高及其复合作用条件下四季竹
竹叶生物量的变化

CK. Control[(40±5) nmol·mol⁻¹O₃, (360±20) μmol·mol⁻¹CO₂];
EO. Elevated O₃[(100±10) nmol·mol⁻¹ O₃, (360±20) μmol·
mol⁻¹ CO₂];EC. Elevated CO₂[(40±5) nmol·mol⁻¹ O₃ , (700±
35) μmol·mol⁻¹ CO₂];EOEC. Combinations of elevated CO₂ and
O₃[(100±10) nmol·mol⁻¹ O₃ , (700±35) μmol·mol⁻¹ CO₂];
The different normal letters indicate significant difference among
treatments at 0.05 level

Fig. 1 Leaf biomass of *Oligostachyum lubricum* treated
with different CO₂ and O₃ concentrations

EC 处理间均无显著差异。四季竹各器官中 Na⁺ 含量在 EO、EC 和 EOEC 处理下与 CK 差异表现不同,EO 处理 Na⁺ 含量在所有器官中均显著低于 CK,EC 处理 Na⁺ 含量在除竹秆外的器官中均显著低于 CK,EOEC 处理 Na⁺ 含量仅在竹叶和竹根中显著低于 CK;各器官 Na⁺ 含量在 EO、EC 和 EOEC 处理间变化较为复杂,除在竹秆中 EO、EC 和 EO-EC 处理间无显著差异,在其余器官中各处理间均有显著差异。

其次,四季竹植株体内 Fe^(2+,3+) 含量在 EO 处理下比 CK 显著降低,在 EOEC 处理下比 CK 显著升高,在 EC 处理中与 CK 无显著差异,而 EC 和 EOEC 处理均显著高于 EO 处理。各器官中 Fe^(2+,3+) 含量在 EO、EC 和 EOEC 处理下与 CK 差异表现也存在不同,EO 处理除竹枝中比 CK 显著升高外,其余器官中均比 CK 显著降低;EC 处理除竹根中与 CK 相比无显著变化外,竹叶和竹秆中均比 CK 显著降低,而在竹枝中则比 CK 显著升高;EOEC 处理除竹叶中与 CK 相比无显著变化外,竹枝和竹根中均显著升高,竹秆中则显著降低。各处理间四季竹器官 Fe^(2+,3+) 含量除在竹枝中无显著差异外,竹叶、竹秆和竹根中

EOEC 处理均显著高于 EO 和 EC 处理,在竹秆和竹根中 EC 处理又显著高于 EO 处理。

再次,四季竹植株体内 Ca²⁺ 含量在 EO 和 EC 处理下与 CK 比较无显著变化,在 EOEC 处理中显著升高,而在 EO、EC 和 EOEC 处理间均无显著差异。各器官中 Ca²⁺ 含量,EO 处理在竹叶和竹根中与 CK 比较均无显著变化,在竹枝中比 CK 显著升高,竹秆中比 CK 显著降低;EC 和 EOEC 处理仅在竹叶和竹根中比 CK 显著升高。EO 和 EOEC 处理竹叶和竹根中 Ca²⁺ 含量显著高于 EO 处理,但 EC 与 EOEC 处理间在各器官中均无显著差异。

另外,四季竹植株体内 Mg²⁺ 含量在 EO 和 EC 处理下与 CK 比较无显著变化,在 EOEC 处理下则比 CK 显著升高,并显著高于 EO 和 EC 处理。各器官中 Mg²⁺ 含量则存在差异,EO 处理在竹叶和竹枝中均与 CK 相比无显著变化,竹秆中则比 CK 显著升高,竹根中又比 CK 显著降低;EC 处理 Mg²⁺ 含量除竹秆中显著比 CK 降低外,其余器官中均与 CK 相比无显著变化;EOEC 处理 Mg²⁺ 含量在竹叶中比 CK 显著升高,竹秆中比 CK 显著降低,竹枝和竹根中与 CK 相比无显著变化。竹叶和竹根中 Mg²⁺ 含量在 EOEC 处理下均显著高于 EO 和 EC 处理,而 EO 与 EC 处理间无显著差异;竹枝中 Mg²⁺ 含量在 EOEC 处理下与 EO 和 EC 处理无显著差异,而 EO 处理显著高于 EC 处理;竹秆中 Mg²⁺ 含量在 EO 处理下显著高于 EC 和 EOEC 处理,EC、EOEC 处理间无显著差异。

以上结果说明 O₃ 浓度升高总体显著降低四季竹植株体内 Na⁺ 含量和 Fe^(2+,3+) 含量,并未改变植株体内 Ca²⁺ 含量和 Mg²⁺ 含量;CO₂ 浓度升高总体上降低植株体内 Na⁺ 含量,却未改变其余矿质离子的浓度;O₃ 浓度和 CO₂ 浓度升高总体显著降低植株体内 Na⁺ 含量和提高 Fe^(2+,3+) 含量、Ca²⁺ 含量和 Mg²⁺ 含量。

2.3 CO₂ 和 O₃ 浓度升高及其复合作用条件下四季竹器官矿质养分含量比的变化

CO₂ 和 O₃ 浓度升高及其复合作用条件下四季竹各器官矿质养分比变化情况如表 2 所示。就各器官中 Fe^(2+,3+)/Na⁺、Ca²⁺/Na⁺ 和 Mg²⁺/Na⁺ 而言,在竹叶中均表现为 EO、EC 和 EOEC 处理显著高于 CK;EO 处理竹枝中 Fe^(2+,3+)/Na⁺、Ca²⁺/Na⁺ 和 Mg²⁺/Na⁺、竹秆中 Mg²⁺/Na⁺ 均比 CK 显著升高,而竹根中 Fe^(2+,3+)/Na⁺ 比 CK 显著降低;EC 处理竹枝中 Fe^(2+,3+)/Na⁺ 和 Ca²⁺/Na⁺、竹根中 Fe^(2+,3+)

表 1 CO₂ 和 O₃ 浓度升高及其复合作用下四季竹器官矿质养分含量

Table 1 The mineral ion contents in different organs of *Oligostachyum lubricum* treated with different CO₂ and O₃ concentrations/(g/kg)

器官 Organ	处理 Treatment	Na ⁺	Fe ^(2+,3+)	Ca ²⁺	Mg ²⁺
竹叶 Leaf	CK	0.077 7±0.010 0a	0.4163±0.032 5a	1.843 3±0.023 0b	4.650 0±0.347 7b
	EO	0.060 0±0.003 5bc	0.361 3±0.035 2b	1.856 7±0.080 8b	4.746 7±0.617 8b
	EC	0.054 3±0.004 6c	0.360 7±0.143 7b	1.963 3±0.213 6a	4.836 7±1.075 1b
	EOEC	0.066 7±0.000 6b	0.436 0±0.050 7a	2.093 3±0.063 5a	8.700 0±0.086 6a
竹枝 Branch	CK	0.280 0±0.017 3a	0.247 7±0.042 2b	0.623 3±0.040 4b	0.740 0±0.034 6ab
	EO	0.213 3±0.005 8b	0.311 0±0.052 0a	0.880 0±0.121 2a	0.833 3±0.028 9a
	EC	0.216 7±0.020 8b	0.313 0±0.043 3a	0.740 0±0.147 3ab	0.630 0±0.017 3b
	EOEC	0.273 3±0.015 3a	0.362 7±0.085 2a	0.783 3±0.072 3ab	0.730 0±0.135 2ab
竹秆 Stem	CK	0.041 3±0.011 5a	0.188 7±0.015 9a	0.256 7±0.025 2a	0.346 7±0.040 4b
	EO	0.026 0±0.006 6b	0.098 3±0.019 7d	0.190 0±0.026 5b	0.416 7±0.097 1a
	EC	0.038 7±0.002 3ab	0.114 0±0.008 7c	0.226 7±0.023 1ab	0.236 7±0.028 9c
	EOEC	0.033 3±0.002 3ab	0.149 0±0.024 2b	0.216 7±0.005 8ab	0.243 3±0.028 8c
竹根 Root	CK	0.293 3±0.005 8a	10.593 3±1.911 0b	0.876 7±0.132 8b	0.956 7±0.046 2a
	EO	0.213 3±0.030 5b	4.673 3±0.892 7c	0.883 3±0.064 3b	0.810 0±0.165 2b
	EC	0.180 0±0.020 0c	8.860 0±2.823 4b	0.966 7±0.155 0a	0.843 3±0.015 3ab
	EOEC	0.170 0±0.017 3c	13.566 7±1.097a	0.986 7±0.127 9a	0.943 3±0.109 7a
植株 Plant	CK	0.692 3±0.023 0a	11.446 0±1.861 5b	3.600 0±0.197 0b	6.693 3±0.331 3b
	EO	0.512 7±0.083 5b	5.444 0±0.913 7c	3.810 0±0.213 8ab	6.806 7±0.770 0b
	EC	0.489 7±0.073 0b	9.647 7±1.795 6b	3.896 7±0.351 0ab	6.546 7±1.111 3b
	EOEC	0.543 3±0.021 2b	14.514 3±0.976 5a	4.080 0±0.167 0a	10.616 7±0.162 6a

注:同列相同器官内不同小写字母表示处理间在 0.05 水平存在显著性差异;下同。

Note: The different normal letters within the same column and organ indicate significant difference among treatments at 0.05 level; The same as below.

/Na⁺、Ca²⁺/ Na⁺ 和 Mg²⁺/ Na⁺ 均比 CK 显著升高,竹秆中 Fe^(2+,3+)/Na⁺、Ca²⁺/ Na⁺ 比 CK 显著降低;EOEC 处理竹枝中 Fe^(2+,3+)/Na⁺、竹根中 Fe^(2+,3+)/Na⁺、Ca²⁺/ Na⁺ 和 Mg²⁺/ Na⁺ 均比 CK 显著升高。EO、EC 和 EOEC 处理间 Fe^(2+,3+)/Na⁺ 在竹叶、竹秆和竹枝中均无显著差异,但在竹根中 EOEC 处理显著高于 EO 和 EC 处理,而 EC 处理又显著高于 EO 处理;EO、EC 和 EOEC 处理间 Ca²⁺/ Na⁺ 在竹根中无显著差异;Mg²⁺/Na⁺ 在竹枝和竹秆中表现为 EO 处理显著高于 EC 和 EOEC 处理,EC 和 EOEC 处理间无显著差异,在竹叶和竹根中表现为 EOEC 处理显著高于 EO 和 EC 处理,EO 和 EC 处理间无显著差异。

同时,与 CK 比较,EO 处理竹秆中 Ca²⁺/ Fe^(2+,3+) 和 Mg²⁺/Fe^(2+,3+)、竹根中 Mg²⁺/Fe^(2+,3+) 显著升高;EC 处理竹叶和竹秆中 Ca²⁺/Fe^(2+,3+) 显著升高,其竹枝中 Mg²⁺/Fe^(2+,3+) 显著降低;EOEC

处理竹叶中 Mg²⁺/Fe^(2+,3+) 显著降低。Ca²⁺/ Fe^(2+,3+) 除 EO 处理在竹根中高于 EOEC 处理外,在其余器官中 EO、EC 和 EOEC 处理间均无显著差异;Mg²⁺/Fe^(2+,3+) 在竹叶中表现为 EOEC 处理显著高于 EO 和 EC 处理,在竹秆和竹根中则为 EO 处理显著高于 EC 和 EOEC 处理。

另外,与 CK 比较,四季竹 Mg²⁺/Ca²⁺ 仅在 EO 处理竹秆中和 EOEC 处理竹叶中显著升高,在 EC 处理竹枝中显著降低,而在其余器官、处理中均无显著变化;竹叶中 Mg²⁺/Ca²⁺ 在 EOEC 处理下显著高于 EO 和 EC 处理,竹秆中 Mg²⁺/Ca²⁺ 在 EO 处理下显著高于 EC 和 EOEC 处理。

以上结果说明 O₃ 浓度升高主要显著提高竹叶和竹枝中 Fe^(2+,3+)/Na⁺、Ca²⁺/ Na⁺ 和 Mg²⁺/ Na⁺ 和竹秆和竹根中 Ca²⁺/ Fe^(2+,3+)、Mg²⁺/ Fe^(2+,3+) 和 Mg²⁺/Ca²⁺;CO₂ 浓度升高显著升高竹叶和竹枝中 Fe^(2+,3+)/Na⁺、Ca²⁺/ Na⁺ 和 Mg²⁺/ Na⁺ 和竹叶

表 2 CO₂ 和 O₃ 浓度升高及其复合作用下四季竹器官矿质养分含量比值
Table 2 The mineral ion concentrations ratio in different organs of *O. lubricum* treated with different CO₂ and O₃ concentrations

器官 Organ	处理 Treatment	Fe ^(2+,3+) /Na ⁺	Ca ²⁺ /Na ⁺	Mg ²⁺ /Na ⁺	Ca ²⁺ /Fe ^(2+,3+)	Mg ²⁺ /Fe ^(2+,3+)	Mg ²⁺ /Ca ²⁺
竹叶 Leaf	CK	5.39±0.46b	24.04±3.52c	60.96±2.80c	4.45±0.41b	11.24±1.58b	2.52±0.16b
	EO	6.06±0.97a	31.07±3.25b	79.70±5.41b	5.16±0.26ab	13.11±0.41b	2.55±0.22b
	EC	6.97±0.68a	36.55±1.26a	90.51±8.96b	6.02±1.18a	14.45±1.70b	2.45±0.35b
	EOEC	6.54±0.82a	31.40±0.68b	130.50±2.17a	4.85±0.67ab	20.14±2.39a	4.16±0.09a
竹枝 Branch	CK	0.88±0.11b	2.23±0.21c	2.66±0.30b	2.58±0.53a	3.05±0.60a	1.19±0.09a
	EO	1.46±0.28a	4.14±0.67a	3.91±0.24a	2.84±0.09a	2.72±0.40ab	0.96±0.11ab
	EC	1.44±0.16a	3.41±0.55ab	2.89±0.29b	2.35±0.16a	2.01±0.17b	0.86±0.07b
	EOEC	1.33±0.32a	2.86±0.17bc	2.69±0.64b	2.21±0.38a	2.10±0.73ab	0.95±0.16ab
竹秆 Stem	CK	4.89±0.81a	6.67±0.57a	9.05±1.63b	1.36±0.08b	1.83±0.09b	1.35±0.04b
	EO	3.92±0.21ab	7.78±1.01a	16.91±1.02a	1.98±0.43a	4.22±0.43a	2.19±0.43a
	EC	2.95±0.05b	5.85±0.26b	6.17±1.54b	1.99±0.05a	2.10±0.43b	1.06±0.25b
	EOEC	4.45±0.40ab	6.53±0.60ab	7.36±0.26b	1.48±0.25ab	1.68±0.42b	1.12±0.10b
竹根 Root	CK	36.04±5.74b	2.98±0.39b	3.26±0.09b	0.08±0.00b	0.09±0.01b	1.10±0.11a
	EO	22.15±1.27c	4.58±0.49ab	4.11±0.97b	0.21±0.08a	0.19±0.05a	0.91±0.13a
	EC	52.74±2.92b	6.16±0.24a	5.20±0.04a	0.12±0.05ab	0.10±0.03b	0.89±0.14a
	EOEC	80.75±3.86a	5.89±0.27a	5.54±0.08a	0.07±0.00b	0.07±0.01b	0.98±0.15a

和竹枝中 Ca²⁺/Fe^(2+,3+) 以及降低竹秆中 Fe^(2+,3+)/Na⁺ 和 Ca²⁺/Na⁺; O₃ 和 CO₂ 浓度主要显著提高竹叶中各矿质养分含量比值。

2.4 CO₂ 和 O₃ 浓度升高及其复合作用条件下四季竹器官矿质养分选择运输能力的变化

表 3 显示,与 CK 比较,EO 处理的竹根-竹秆 S_{Fe,Na} 和 S_{Mg,Na}、竹秆-竹枝 S_{Fe,Na} 和 S_{Ca,Na} 均显著升高,而竹枝-竹叶 S_{Fe,Na} 和 S_{Ca,Na} 显著降低,表明 EO 处理能提高竹根向竹秆、竹秆向竹枝运输 Fe^(2+,3+)、竹根向竹秆运输 Mg²⁺ 以及竹秆向竹枝运输 Ca²⁺ 的能力,但降低了竹枝向竹叶运输 Fe^(2+,3+)、Ca²⁺ 的能力;同时,与 CK 相比,EC 处理的竹根-竹秆 S_{Fe,Na}、S_{Mg,Na} 和 S_{Fe,Na} 均显著下降,而其竹秆-竹枝 S_{Fe,Na}、S_{Mg,Na} 和 S_{Fe,Na} 均显著升高,其竹枝-竹叶 S_{Fe,Na} 显著下降、S_{Mg,Na} 显著升高,表明 EC 处理降低了竹根向竹秆运输 Fe^(2+,3+)、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 以及竹枝向竹叶运输 Fe^(2+,3+)、Ca²⁺ 和 Mg²⁺、竹枝向竹叶运输 Mg²⁺ 的能力;再者,与 CK 比较,EOEC 处理竹根-竹秆 S_{Fe,Na}、S_{Mg,Na} 和 S_{Fe,Na}、竹秆-竹枝 S_{Fe,Na} 和竹枝-竹叶 S_{Fe,Na} 均显著下降,其竹秆-竹枝 S_{Fe,Na} 和竹枝-竹叶 S_{Mg,Na} 显著升高,表明 EOEC 处理降低了竹根向竹

秆运输 Fe^(2+,3+)、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 和竹秆向竹枝、竹枝向竹叶运输 Fe^(2+,3+) 的能力,提高了竹秆向竹枝运输 Fe^(2+,3+) 和竹枝向竹叶运输 Mg²⁺ 的能力。

另外,与 CK 比较,EO 处理竹根-竹秆 S_{Ca,Fe} 和竹秆-竹枝 S_{Mg,Fe} 显著降低,显示竹根向竹秆运输 Ca²⁺ 和竹秆向竹枝运输 Mg²⁺ 的能力均低于运输 Fe^(2+,3+) 的能力;EC 处理竹秆-竹枝 S_{Ca,Fe} 和 S_{Mg,Fe} 比 CK 显著降低,竹枝-竹叶 S_{Ca,Fe} 和 S_{Mg,Fe} 比 CK 显著升高,又表明竹秆向竹枝运输 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 的能力低于运输 Fe^(2+,3+) 的能力,但竹枝向竹叶运输 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 的能力强于运输 Fe^(2+,3+) 的能力;EOEC 处理只有竹枝-竹叶 S_{Mg,Fe} 比 CK 显著升高,说明竹枝向竹叶运输 Mg²⁺ 的能力强于运输 Fe^(2+,3+) 的能力。与 CK 比较,EO 处理的竹根-竹秆 S_{Mg,Ca} 显著升高,而其竹秆-竹枝 S_{Mg,Ca} 显著降低,但 EOEC 处理仅竹枝-竹叶 S_{Mg,Ca} 显著升高,从而表明 EO 处理下竹秆向竹枝运输 Mg²⁺ 的能力强于运输 Ca²⁺ 的能力,竹秆向竹叶运输 Mg²⁺ 的能力低于运输 Ca²⁺ 的能力,EC 处理下器官间运输 Mg²⁺ 和 Ca²⁺ 的能力相当,EOEC 处理下竹枝向竹叶运输 Mg²⁺ 的能力强于运输 Ca²⁺ 的能力。

表3 CO₂ 和 O₃ 浓度升高及其复合作用条件下四季竹器官矿质养分选择性运输系数

Table 3 The selective transportation of mineral ion in different organs of *O. lubricum* treated with different CO₂ and O₃ concentrations

器官 Organ	处理 Treatment	矿质养分选择性运输系数 Selective transportation index					
		S _{Fe,Na}	S _{Ca,Na}	S _{Mg,Na}	S _{Ca,Fe}	S _{Mg,Fe}	S _{Mg,Ca}
竹根-竹秆 Root-Stem	CK	0.14±0.06b	2.27±0.17a	2.78±0.48b	16.41±1.39a	20.28±3.26a	1.23±0.09b
	EO	0.18±0.07a	2.03±0.54a	4.81±1.63a	10.70±1.85b	24.24±2.97a	2.49±0.84a
	EC	0.06±0.01c	1.14±0.16b	1.39±0.24c	17.88±0.47a	22.86±1.67a	1.19±0.09b
	EOEC	0.05±0.01c	1.16±0.35b	1.33±0.23c	20.53±2.14a	24.12±2.21a	1.18±0.25b
竹秆-竹枝 Stem-Branch	CK	0.20±0.02d	0.36±0.10b	0.32±0.09b	1.89±0.33a	1.66±0.26a	0.88±0.04a
	EO	0.39±0.08b	0.59±0.15a	0.25±0.07b	1.48±0.32ab	0.65±0.12b	0.46±0.05b
	EC	0.49±0.06a	0.58±0.11a	0.48±0.08a	1.18±0.10b	0.99±0.23b	0.84±0.23a
	EOEC	0.30±0.09c	0.44±0.05ab	0.35±0.04ab	1.55±0.51ab	1.29±0.40ab	0.84±0.18a
竹枝-竹叶 Branch-Leaf	CK	6.16±0.78a	10.84±1.90a	23.41±2.75c	1.77±0.31b	3.78±0.87c	2.13±0.27b
	EO	4.21±0.73b	7.61±1.12b	20.35±1.38c	1.82±0.08b	4.88±0.75c	2.69±0.44b
	EC	4.74±0.17b	10.90±1.54a	31.35±2.88b	2.53±0.78a	7.15±1.05b	2.85±0.16b
	EOEC	5.01±0.53b	11.00±0.87a	50.34±4.11a	2.20±0.12ab	10.09±1.28a	4.61±0.21a

3 讨 论

3.1 O₃ 浓度升高对四季竹器官矿质养分的影响

高浓度 O₃ 暴露条件下会影响植物体内矿质养分的累积和分配,继而影响植物的生长^[12]。本研究结果表明 O₃ 浓度升高能改变植物体内一些矿质养分的含量,四季竹植株体内总的 Na⁺ 和 Fe^(2+,3+) 含量降低,但并未减少植株体内总的 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 含量。造成这种现象的原因,一方面与 O₃ 浓度升高对四季竹植株体内不同器官矿质养分重新分配和转运有影响,显著降低竹根、竹秆、竹枝和竹叶 Na⁺ 和 Fe^(2+,3+) 含量,尤其是竹叶中的含量;另一方面,不同植物体内的矿质元素在植物生长代谢中所起的作用也会导致其含量的变化来应对环境变化的响应;再者可能与 O₃ 浓度升高会显著改变四季竹器官间矿质养分的选择运输能力,加剧器官间矿质养分的竞争格局等有关。

需要注意的是,植物体内矿质养分的含量和分配最终反映在植物正常生长上,主要是植物光合器官叶片的光合作用。O₃ 浓度升高改变植物体内矿质养分的含量,可能会改变植物叶片中光合作用所需要的元素而影响植物的生长。本研究发现 O₃ 浓度升高一方面会降低四季竹叶片中养分含量,这与先前研究认为 O₃ 直接作用于植物叶片,导致叶片的损伤并破坏光合作用,而植物的自我修复机制会

消耗自身更多的矿质养分以修补叶片损伤和维持光合作用,进而导致植物体内矿质养分含量的降低^[24-27]相一致;另一方面会进一步导致其他器官向竹叶运输矿质养分的能力降低,使叶片无法通过吸收其它来源的养分来满足自身生长所需要的养分要求,进一步加剧了四季竹生长的限制,尤其是竹叶的生长,这与笔者先前研究认为 O₃ 浓度升高会抑制四季竹生长相吻合^[28]。但同时也要注意,不同矿质养分在植物生长过程中自身的作用和参与的生理生化过程不同,O₃ 浓度升高改变不同矿质养分含量和分配格局也进一步导致其参与的过程发生紊乱,进而抑制植物的生长,如蛋白质合成受阻及渗透调节与膜生理功能受到干扰等^[29]。

3.2 CO₂ 浓度升高对四季竹器官矿质养分的影响

普遍认为 CO₂ 浓度升高会刺激植物的生长,但也有研究认为 CO₂ 浓度升高会影响植物矿质养分的吸收,降低植物器官矿质养分含量,尤其是叶片会出现养分稀释效应,降低植物的光合速率,表现出对植物生长的抑制作用^[30,31]。本研究结果显示,CO₂ 浓度升高降低了四季竹植株体内总的 Na⁺ 含量,但未改变四季竹植株体内总的 Fe^(2+,3+)、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 含量。造成 CO₂ 浓度升高对四季竹植株体内总的矿质养分差异的原因,我们认为,一方面 CO₂ 浓度升高可促进光合作用进行,进而促进植物的生长,尤其是促进叶片的生长,在一定程度上稀释效应

导致元素含量降低,尤其是竹叶中 Na^+ 和 $\text{Fe}^{(2+,3+)}$ 的含量;另一方面, CO_2 浓度升高促进植物生长会改变器官间不同养分的竞争格局,这很大程度上与矿质养分的性质及在植物生长中所起的作用有关^[15]。

尽管 CO_2 浓度升高并未改变四季竹植株内总的 $\text{Fe}^{(2+,3+)}$ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量,但在不同器官内 $\text{Fe}^{(2+,3+)}$ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量却表现出不同的变化规律。分析认为可能与矿质养分自身的作用有关, $\text{Fe}^{(2+,3+)}$ 主要用于调节渗透离子平衡和维持叶片光合作用, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要用于满足叶片光合作用。在我们先前的研究中证实 CO_2 浓度升高促进了四季竹的生长,尤其是光合器官竹叶的生长^[28],这就需要更多的养分来满足其生长。本研究中发现 CO_2 浓度升高促进四季竹生长主要是通过提高竹叶中 Mg^{2+} 含量和从其他器官向竹叶转运更多的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 来满足其生长的需要,并且对 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的吸收速率大于植株竹叶碳水化合物的合成速率^[15]。

3.3 CO_2 和 O_3 浓度升高复合作用对四季竹器官矿质养分的影响

高浓度 CO_2 和 O_3 复合条件下会改变植物养分的吸收和运输,其变化很大程度上取决于植物本身及其所处的自然环境条件^[32]。本研究发现高浓度 CO_2 和 O_3 复合条件下降低了四季竹植株体内总的 Na^+ 含量,但提高了植株体内总的 $\text{Fe}^{(2+,3+)}$ 、 Ca^{2+} 和

Mg^{2+} 含量。原因可能是,一方面高浓度 O_3 和 CO_2 复合条件下四季竹植株体内通过选择性蓄积所需要的矿质养分以修补 O_3 浓度升高造成的叶片损伤,同时也为满足四季竹叶片正常的光合作用所需要的养分,这也是 CO_2 浓度升高一定程度上会缓解 O_3 浓度升高给四季竹生长造成的损伤的重要原因。另一方面,高浓度 CO_2 和 O_3 复合条件下改变了四季竹对矿质养分的选择运输能力,尤其是提高了 $\text{Fe}^{(2+,3+)}$ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 从竹枝向竹叶的向上运输能力,这可能与矿质养分的性质,包括离子半径、电荷数、电子层结构及在植物生长中所起的作用等有关^[16],以维持植物体内矿质养分平衡。

综上所述, CO_2 和 O_3 浓度升高及其复合作用条件下,四季竹器官的矿质养分含量和运输会发生适应性变化。 O_3 浓度升高降低了四季竹植株体内矿质养分含量和器官间养分运输能力,在一定程度上影响四季竹的正常生长; CO_2 浓度升高虽未改变四季竹植株体内矿质养分含量,但能通过提高 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 向光合器官叶片的运输能力,促进四季竹生长; CO_2 和 O_3 浓度升高复合作用能通过提高四季竹光合器官竹叶中 $\text{Fe}^{(2+,3+)}$ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量及其向光合器官叶片的运输能力,以维持体内矿质养分元素的平衡,提高四季竹对高浓度 CO_2 和 O_3 浓度复合环境下的适应能力。

参考文献:

[1] AINSWORTH E A. Rice production in a changing climate; a meta-analysis of responses to elevated carbon dioxide and elevated ozone concentration[J]. *Global Change Biology*, 2008, 14: 1 642-1 650.

[2] IPCC. Climate Change 2007: The Scientific Basis [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

[3] KOSTIAINEN K, JALKANEN, H, KAAKINEN S, *et al.* Wood properties of two silver birch clones exposed to elevated CO_2 and O_3 [J]. *Global Change Biology*, 2006, 12: 1 230-1 240.

[4] PINKARD E A, BEADLE C L, MENDHAM D S, *et al.* Determining photosynthetic responses of forest species to elevated CO_2 : Alternatives to FACE[J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 260(8): 1 251-1 261.

[5] ARANDA X, AGUSTI C, JOFFRE R, *et al.* Photosynthesis, growth and structural characteristics of holm oak resprouts originated from plants grown under elevated CO_2 [J]. *Physiologia Plantarum*, 2006, 128(2): 302-312.

[6] WITTING V E, AINSWORTH E A, LONG S P. To what extent do current and projected increases in surface ozone affect photosynthesis and stomatal conductance of trees? A meta-analytic review of the last 3 decades of experiments[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2007, 30(9): 1 150-1 162.

[7] WITTING V E, AINSWORTH E A, NAIDU S L, *et al.* Quantifying the impact of current and future tropospheric ozone on tree biomass, growth, physiology and biochemistry: a quantitative meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2009, 15(2): 396-424.

[8] RYANF S Z, WOO S Y, KWON S Y, *et al.* Changes of net photosynthesis, antioxidant enzyme activities, and antioxidant contents of *Liriodendron tulipifera* under elevated ozone[J]. *Photosynthetica*, 2009, 47(1): 19-25.

[9] STAFFORD N. The other greenhouse effect[J]. *Nature*, 2007, 448(7 153): 526-528.

[10] 李 硕, 郑有飞, 吴荣军, 等. 臭氧污染胁迫下植物营养生长及防护研究[J]. 中国农业科技导报, 2014, 16(1): 117-124.

- LI S H, ZHENG Y F, WU R J, *et al.* Research progress on plant vegetative growth and protection under pollution stress [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2014, **16**(1): 117-124.
- [11] THOMAS V F D, BRAUN S, FLUCKIGER W. Effects of simultaneous ozone exposure and nitrogen loads on carbohydrate concentrations, biomass, and growth of young spruce trees (*Picea abies*) [J]. *Environmental Pollution*, 2005, **137** (3): 507-516.
- [12] PIIKKI K, VORNE V, OJANPERK, PLEIJEL H. Impact of elevated O₃ and CO₂ exposure on potato (*Solanum tuberosum* L.) tuber macronutrients (N, P, K, Mg, Ca) [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2007, **118**(1/4): 55-64.
- [13] FANGMEIER A, DE TEMMERMAN L, BLACK C, *et al.* Effects of elevated CO₂ and /or ozone on nutrient concentrations and nutrient uptake of potatoes [J]. *European Journal of Agronomy*, 2002, **17**(4): 353-368.
- [14] 尹微琴, 张贤臣, 王小治, 等. O₃ 浓度升高对麦季土壤-植株系统中微量元素的影响 [J]. *农业环境学报*, **31** (11): 2 094-2 100.
- YIN W Q, ZHANG X C, WANG X Z, *et al.* Effect of ozone enrichment on DTPA-extractable microelements in soil and accumulation of microelements of mature crops in the wheat season [J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2012, **31**(11): 2 094-2 100.
- [15] 郭 嘉. 稻田系统主要矿质元素生物有效性对大气 CO₂ 浓度升高的响应研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
- [16] 庄明浩, 陈双林, 李迎春, 等. CO₂ 浓度升高对毛竹器官矿质离子吸收、运输和分配的影响 [J]. *生态学报*, 2013, **33** (14): 4 297-4 305.
- ZHUANG M H, CHEN S L, LI Y C, *et al.* Effects of increased concentrations of gas CO₂ on mineral ion uptake, transportation and distribution in *Phyllostachys edulis* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(14): 4 297-4 305.
- [17] PENUELAS J, IDSO S B, RIBAS A, *et al.* Effects of long-term atmospheric CO₂ enrichment on the mineral concentration of *Citrus aurantium* leaves [J]. *New Phytologist*, 1997, **135**(3): 439-444.
- [18] LOLADZE I. Rising atmospheric CO₂ and human nutrition: toward globally imbalanced plant stoichiometry? [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2002, **17**(10): 457-461.
- [19] MCKEE I F, EIBLMEIER M, POLLE A. Enhanced ozone-tolerance in wheat grown at an elevated CO₂ concentration: Ozone exclusion and detoxification [J]. *New Phytologist*, 1997, **137**: 275-284.
- [20] 江泽慧, 萧江华, 许煌灿. 世界竹藤 [M]. 辽宁: 辽宁科学技术出版社, 2002.
- [21] 李品芳, 白文波, 杨志成. NaCl 胁迫对苇状羊茅离子吸收与运输及其生长的影响 [J]. *中国农业科学*, 2005, **38**(7): 1 458-1 565.
- LI P F, BAI W B, YANG Z C. Effects of NaCl stress on ions absorption and transportation and plant growth of tall fescue [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, **38** (7): 1 458-1 565.
- [22] HUNT J. Dilute hydrochloric acid extraction of plant material for routine cation analysis [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1982, **13**(1): 49-55.
- [23] PITMAN M G. Transport across the root and shoot /root interaction [M]// Staples R C, Toennissen G A. Salinity Tolerance in Plants. Milton: Wiley, 1984.
- [24] 宫玉艳. 近地层臭氧浓度升高对水稻元素吸收和分配的影响 [D]. 扬州: 扬州大学, 2010.
- [25] SIEFERMANN-HARMS D, PAYER H D, SCHRAMMEL P, *et al.* The effect of ozone on the yellowing process of magnesium-deficient clonal Norway spruce grown under defined conditions [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2005, **162**(2): 195-206.
- [26] 郑飞翔, 王效科, 侯培强, 等. 臭氧胁迫对水稻生长以及 C、N、S 元素分配的影响 [J]. *生态学报*, 2011, **31**(6): 1 479-1 486.
- ZHENG F X, WANG X K, HOU P Q, *et al.* Influences of elevated ozone on growth and C, N, S allocations of rice [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(6): 1 479-1 486.
- [27] DROGOUDI P D, ASHMORE M R. ¹⁴C-allocation of flowering and deblossomed strawberry in response to elevated ozone [J]. *New Phytologist*, 2001, **152**(3): 455-461.
- [28] 庄明浩, 陈双林, 李迎春, 等. 高浓度 CO₂ 和 O₃ 对四季竹叶片膜脂过氧化及抗氧化系统的影响 [J]. *生态学杂志*, 2012, **31**(9): 2 184-2 190.
- ZHUANG M H, CHEN S L, LI Y C, *et al.* Effects of elevated O₃ and CO₂ concentrations on the membrane lipid peroxidation and antioxidant system of *Oligostachyum lubricum* leaves [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, **31**(9): 2 184-2 190.
- [29] YAMAJI K, JULKUNEN-TIITTO R, ROUSI M, *et al.* Ozone exposure over two growing seasons alters root-to-shoot ratio and chemical composition of birch (*Betula pendula* R.) [J]. *Global Change Biology*, 2003, **9**: 1 363-1 377.
- [30] REICH P B, HOBBI E S, LEE T, *et al.* Nitrogen limitation constrains sustainability of ecosystem response to CO₂ [J]. *Nature*, 2006, **440**: 922-925.
- [31] DUVAL B D, BLANKINSHIP J C, DIJKSTRA P, *et al.* CO₂ effects on plant nutrient concentration depend on plant functional group and available nitrogen: a meta-analysis [J]. *Plant Ecology*, 2012, **213**(3): 505-521.
- [32] LE THIEC D, MANNINEN S. Ozone and water deficit reduced growth of Aleppo pine seedlings [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2003, **41**(1): 55-63.

(编辑: 裴阿卫)