

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第14期 Vol.33 No.14 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 14 期 2013 年 7 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

石鸡属鸟类研究现状..... 宋 森,刘迺发 (4215)

个体与基础生态

不同降水及氮添加对浙江古田山 4 种树木幼苗光合生理生态特征与生物量的影响.....
..... 闫 慧,吴 茜,丁 佳,等 (4226)

低温胁迫时间对 4 种幼苗生理生化及光合特性的影响..... 邵怡若,许建新,薛 立,等 (4237)

不同施氮处理玉米根茬在土壤中矿化分解特性..... 蔡 苗,董燕婕,李佰军,等 (4248)

不同生育期花生渗透调节物质含量和抗氧化酶活性对土壤水分的响应.....
..... 张智猛,宋文武,丁 红,等 (4257)

天山中部天山云杉林土壤种子库年际变化..... 李华东,潘存德,王 兵,等 (4266)

不同作物两苗同穴互作育苗的生理生态效应..... 李伶俐,郭红霞,黄耿华,等 (4278)

镁、锰、活性炭和石灰及其交互作用对小麦镉吸收的影响..... 周相玉,冯文强,秦鱼生,等 (4289)

CO₂ 浓度升高对毛竹器官矿质离子吸收、运输和分配的影响 庄明浩,陈双林,李迎春,等 (4297)

pH 值和 Fe、Cd 处理对水稻根际及根表 Fe、Cd 吸附行为的影响 刘丹青,陈 雪,杨亚洲,等 (4306)

弱光胁迫对不同耐荫型玉米果穗发育及内源激素含量的影响..... 周卫霞,李潮海,刘天学,等 (4315)

玉米花生间作对玉米光合特性及产量形成的影响..... 焦念元,宁堂原,杨萌珂,等 (4324)

不同林龄胡杨克隆繁殖根系分布特征及其构型..... 黄晶晶,井家林,曹德昌,等 (4331)

植被年际变化对蒸散发影响的模拟研究..... 陈 浩,曾晓东 (4343)

蝇蛹金小蜂的交配行为及雄蜂交配次数对雌蜂繁殖的影响..... 孙 芳,陈中正,段毕升,等 (4354)

西藏飞蝗虫粪粗提物的成分分析及其活性测定..... 王海建,李彝利,李 庆,等 (4361)

不同水稻品种对稻纵卷叶螟生长发育、存活、生殖及飞行能力的影响..... 李 霞,徐秀秀,韩兰芝,等 (4370)

种群、群落和生态系统

基于 *mtCOII* 基因对山东省越冬代亚洲玉米螟不同种群的遗传结构分析
..... 李丽莉,于 毅,国 栋,等 (4377)

太湖湿地昆虫群落结构及多样性..... 韩争伟,马 玲,曹传旺,等 (4387)

西江下游浮游植物群落周年变化模式..... 王 超,赖子尼,李新辉,等 (4398)

环境和扩散对草地群落构建的影响..... 王 丹,王孝安,郭 华,等 (4409)

黄土高原不同侵蚀类型区生物结皮中蓝藻的多样性..... 杨丽娜,赵允格,明 姣,等 (4416)

景观、区域和全球生态

基于景观安全格局的建设用地管制分区..... 王思易,欧名豪 (4425)

黑河中游湿地景观破碎化过程及其驱动力分析..... 赵锐锋,姜朋辉,赵海莉,等 (4436)

2000—2010 年青海湖流域草地退化状况时空分析 骆成凤,许长军,游浩妍,等 (4450)

基于“源”“汇”景观指数的定西关川河流域土壤水蚀研究 李海防,卫 伟,陈 瑾,等 (4460)

农业景观格局与麦蚜密度对其初寄生蜂与重寄生蜂种群及寄生率的影响 ... 关晓庆,刘军和,赵紫华 (4468)

CO₂ 浓度和降水协同作用对短花针茅生长的影响..... 石耀辉,周广胜,蒋延玲,等 (4478)

资源与产业生态

城市土地利用的生态服务功效评价方法——以常州市为例..... 阳文锐,李 锋,王如松,等 (4486)

城市居民食物磷素消费变化及其环境负荷——以厦门市为例..... 王慧娜,赵小锋,唐立娜,等 (4495)

研究简报

间套作种植提升农田生态系统服务功能..... 苏本营,陈圣宾,李永庚,等 (4505)

矿区生态产业评价指标体系 王广成,王欢欢,谭玲玲 (4515)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 308 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 32 * 2013-07



封面图说: 古田山常绿阔叶林景观——亚热带常绿阔叶林是我国独特的植被类型,生物多样性仅次于热带雨林。古田山地处中亚热带东部,浙、赣、皖三省交界处,由于其特殊复杂的地理环境位置,分布着典型的中亚热带常绿阔叶林,是生物繁衍栖息的理想场所,生物多样性十分突出。中国科学院在这里建立了古田山森林生物多样性与气候变化研究站,主要定位于研究和探索中国亚热带森林植物群落物种共存机制,阐释生物多样性对森林生态系统功能的影响,以及监测气候变化对于亚热带森林及其碳库和碳通量的影响。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201204130524

庄明浩, 陈双林, 李迎春, 郭子武, 杨清平. CO₂ 浓度升高对毛竹器官矿质离子吸收、运输和分配的影响. 生态学报, 2013, 33(14): 4297-4305.

Zhuang M H, Chen S L, Li Y C, Guo Z W, Yang Q P. Effects of increased concentrations of gas CO₂ on mineral ion uptake, transportation and distribution in *Phyllostachys edulis*. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(14): 4297-4305.

CO₂ 浓度升高对毛竹器官矿质离子吸收、 运输和分配的影响

庄明浩, 陈双林*, 李迎春, 郭子武, 杨清平

(中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 富阳 311400)

摘要: 为了给大气 CO₂ 浓度逐渐升高背景下的毛竹林适应性经营管理提供理论依据, 运用开顶式气室 (OTCs) 模拟大气 CO₂ 浓度升高 (500、700 μmol/mol) 情景, 以目前环境背景大气为对照, 研究了 Na⁺、Fe²⁺-Fe³⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 等矿质离子在毛竹器官中吸收、运输和分配的变化规律。结果显示, 除 CO₂ 浓度 700 μmol/mol 对 Ca²⁺ 浓度在毛竹器官中大小排序会产生影响外, CO₂ 浓度 500、700 μmol/mol 并未改变毛竹器官中 Na⁺、Fe²⁺、Fe³⁺、Mg²⁺、Ca²⁺ 浓度的大小排序。CO₂ 浓度升高对竹叶 Fe²⁺-Fe³⁺ 和竹枝 Fe²⁺-Fe³⁺、Mg²⁺ 浓度无明显影响, 但对器官的其它矿质离子浓度会有不同程度的影响, 竹叶 Ca²⁺ 和 Mg²⁺、竹枝 Na⁺ 和 Ca²⁺、竹秆 Na⁺ 和 Ca²⁺ 及 Mg²⁺、竹根 Na⁺ 和 Mg²⁺ 浓度明显提高, 竹叶 Na⁺、竹秆 Fe²⁺-Fe³⁺、竹根 Fe²⁺-Fe³⁺ 和 Ca²⁺ 浓度明显降低; 随着 CO₂ 浓度的升高, 竹叶 Fe²⁺-Fe³⁺/Na⁺、Mg²⁺/Na⁺ 和 Ca²⁺/Na⁺, 竹枝 Ca²⁺/Mg²⁺ 及各器官 Mg²⁺/Fe²⁺-Fe³⁺、Ca²⁺/Fe²⁺-Fe³⁺ 均逐渐增大, 而竹枝、竹秆、竹根 Fe²⁺-Fe³⁺/Na⁺、Mg²⁺/Na⁺、Ca²⁺/Na⁺ 和竹叶、竹秆、竹根 Ca²⁺/Mg²⁺ 均逐渐减小; CO₂ 浓度升高后除竹根-竹秆 S_{Ca, Na}、竹秆-竹枝 S_{Mg, Fe} 和竹枝-竹叶 S_{Ca, Mg} 明显下降外, 其余的毛竹器官矿质离子向上运输系数变化平缓或明显提高。研究表明 CO₂ 浓度升高增强了毛竹立竹根部积累 Na⁺ 能力和 Fe²⁺-Fe³⁺、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 的向上选择性运输能力, 提高了光合器官竹叶中矿质养分元素浓度, 可维持体内矿质养分元素平衡, 有利于提高毛竹对高浓度 CO₂ 环境的适应能力。

关键词: 毛竹; CO₂ 浓度; 离子平衡; 选择性运输系数

Effects of increased concentrations of gas CO₂ on mineral ion uptake, transportation and distribution in *Phyllostachys edulis*

ZHUANG Minghao, CHEN Shuanglin*, LI Yingchun, GUO Ziwu, YANG Qingping

Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Forestry Academy, Fuyang 311400 China

Abstract: In recent years, human activities have caused rapid changes in the atmosphere and climate. In particular, the most important anthropogenic greenhouse gas, carbon dioxide (CO₂), has increased from a pre-industrial level of about 270 μmol/mol to a value of 360 μmol/mol reported in 2007. These CO₂ levels, which have been increasing since the beginning of the Industrial Revolution, will continue to rise as long as current levels of anthropogenic activity are maintained. In coming years, elevated CO₂ levels may alter many aspects of plant production environments. Results on the effects of elevated atmospheric CO₂ concentration on plants have already been obtained from some studies, but effects on plant photosynthesis at the physiological and biochemical level remain to be investigated. To provide theoretical evidence to aid adaptive management of bamboo plantations operating under the background of climate change, we studied the effects of simulated increased atmospheric CO₂ concentrations on mineral ion uptake, transportation, and distribution in *Phyllostachys*

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项 (201004008); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金 (RISF6915); 浙江省省院合作项目 (2010SY01)

收稿日期: 2012-04-13; 修订日期: 2012-09-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cslbamboo@126.com

edulis (moso bamboo). The open-top chamber (OTC) test method was employed in conjunction with a split-plot design and CO₂ concentrations set to 360, 500, and 700 μmol/mol. With the exception of Ca²⁺ at CO₂ concentrations of 700 μmol/mol, there was no significant change in ion concentrations (for Na⁺, Fe²⁺-Fe³⁺, Mg²⁺, and Ca²⁺) with respect to the size of different organs of *P. edulis* as CO₂ concentration was increased. In addition, with the exception of concentrations of Fe²⁺-Fe³⁺ in leaves and Fe²⁺-Fe³⁺ and Mg²⁺ in branches, which had no significant variation, mineral ion concentrations in various plant organs all changed to some extent with increasing CO₂ concentration. In particular, while concentrations of Mg²⁺ and Ca²⁺ in leaves, Na⁺ and Ca²⁺ in branches, Na⁺, Ca²⁺, and Mg²⁺ in stems, and Na⁺ and Mg²⁺ in roots increased significantly, they decreased significantly for Na⁺ in leaves, Fe²⁺-Fe³⁺ in stems and roots, and Ca²⁺ in roots. Gradual increases were observed for ratios of Fe²⁺-Fe³⁺/Na⁺, Mg²⁺/Na⁺, and Ca²⁺/Na⁺ in leaves, Ca²⁺/Mg²⁺ in branches, and Mg²⁺/Fe²⁺-Fe³⁺ and Ca²⁺/Fe²⁺-Fe³⁺ in all organs. In contrast, ratios of Fe²⁺-Fe³⁺/Na⁺, Mg²⁺/Na⁺, and Ca²⁺/Na⁺ in branches, stems, and roots, as well as Ca²⁺/Mg²⁺ in leaves, stems, and roots, all gradually decreased. In addition to measuring ion concentrations, we also studied the effect of increasing CO₂ concentration on selective transport ability in various plant organs. With increasing CO₂ concentration, S_{Ca,Na} from roots to stems, S_{Mg,Fe} from stems to branches, and S_{Ca,Mg} from branches to leaves decreased significantly. In other organs, the upward selective transport ability of the remaining ions increased either slightly or significantly. The results of this study suggest that elevated CO₂ levels enhance Na⁺ accumulation in roots, increase the upward selective transport ability of Fe²⁺-Fe³⁺, Ca²⁺, and Mg²⁺, increase mineral nutrient concentrations in leaves, and maintain the balance of mineral elements. These responses increase the adaptation capacity of *P. edulis* to environments with higher CO₂ concentrations. A complete understanding of the mechanisms underlying these responses may aid in the development of more effective adaptation management strategies on bamboo plantations in anticipation of global climate change.

Key Words: *Phyllostachys edulis*; CO₂ concentration; ion homeostasis; selective transportation index

CO₂ 作为最主要的温室气体,由于化石燃料的燃烧、森林砍伐及农业活动的影响,大气 CO₂ 浓度急剧升高,其浓度已经从工业革命前的 270 μmol/mol 增至目前的 360 μmol/mol,而且仍以每年 1—1.5 μmol/mol 的速度上升^[1-3]。CO₂ 作为植物光合作用最重要的碳源,其浓度升高会直接影响到植物的生长发育,对农业以及自然生态系统有着深远的影响^[4-6]。目前大气 CO₂ 浓度升高对植物生理生态的影响及植物的适应性管理已成为全球范围内的研究热点。近年来,针对大气 CO₂ 浓度升高条件下植物的响应机制已开展了较多的研究,主要集中在 CO₂ 的“施肥效应”,一方面 CO₂ 浓度升高可以提高植物光合作用的原料,有利于促进 Rubisco 的羧化作用,增强光合作用对 CO₂ 的固定能力^[7-11];另一方面提高叶绿体内 CO₂ 与 O₂ 体积比,致使活性氧产生几率减小,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的上升^[12],促进植物的生长,增加植物的生物量 and 经济产量^[13-14]。然而,也有研究证实长期高浓度 CO₂ 处理可能会导致植物的光合能力下降,出现光适应现象^[15],也会诱导植物叶片抗氧化活性下降,导致植物更易受到氧化胁迫^[16],从而对植物生长产生抑制作用。另外,有研究者认为植物生长对 CO₂ 浓度升高的响应与植物自身矿质营养元素的吸收、运输和分配密切相关^[17],且已有研究证实 CO₂ 浓度升高会加速植物对矿质营养元素的吸收,提高其含量用来满足自身生长的需要^[18],也有研究提出相反的观点^[19],总体来讲,植物矿质离子的吸收、运输和分配对 CO₂ 浓度升高的响应研究较少且缺乏深入系统的认识。因此有必要深入探讨 CO₂ 浓度升高条件下对植物矿质营养元素选择吸收、运输和分配的影响,这对于揭示 CO₂ 浓度升高对植物生长发育的影响机制具有重要意义。

毛竹 (*Phyllostachys edulis*) 隶属禾本科 (Poaceae) 竹亚科 (Bambusoideae) 刚竹属,是中国分布最广、面积最大、利用领域最广、最为重要的经济竹种,具有生长快、产量高、效益好等特点,而且毛竹林对区域水源涵养、水

土保持、固碳排氧和调节气候等方面发挥着巨大的生态保护作用^[20]。鉴于毛竹对区域社会经济发展和生态环境保护的重要性,针对大气 CO₂ 浓度逐渐升高的背景,就很有必要开展大气 CO₂ 浓度升高对毛竹生长发育和生理生态的影响研究。为此,本文运用开顶式气室(OTCs)模拟 CO₂ 浓度升高情景,测定不同 CO₂ 浓度条件下的毛竹器官矿质离子浓度,分析 CO₂ 浓度升高条件下的毛竹器官矿质离子选择性吸收、运输和分配特征,旨在为气候变化背景下的毛竹林适应性经营管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在浙江省临安市(29°56′—30°23′N, 118°51′—119°72′E)太湖源镇太湖源观赏竹种园中进行。于 2009 年 11 月在浙江省安吉竹博园的毛竹林中选取地径(18.15±1.75) mm, 全高(2.75±0.09) m, 生长健壮的 1 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 50 盆。盆栽基质为红壤与细沙体积比 3:1 均匀混合而成, pH 值 5.8, 水解氮 198.47 mg/kg, 速效磷 67.25 mg/kg, 速效钾 74.16 mg/kg。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 月开始进行大气 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 为钢瓶装纯 CO₂。环境大气经活性炭过滤后, 再添加钢瓶中通过 CO₂ 减压阀释放的 CO₂ 气体, CO₂ 添加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。气室顶部装有自动喷灌系统, 对试验竹苗进行水分定期供应。

试验共设 3 个 CO₂ 浓度处理, 分别为环境背景大气(CK, 360—380 μmol/mol)、500 μmol/mol(T1, 475—530 μmol/mol)、700 μmol/mol(T2, 685—730 μmol/mol)。每个处理重复 3 次。每处理气室内均匀放置 5—6 盆毛竹试验盆栽苗(也用于显微结构、抗性生理等试验), 竹冠不重叠。OTCs 内 CO₂ 浓度用上海兴卓环保仪器有限公司生产的 CO₂ 红外传感器进行监测, 每隔 3 d 在气室的上部、中部、下部各测定 1 次。

1.3 取样和测定方法

2011 年 7 月 10 日开始熏气, 每天熏气 24 h, 于 2011 年 10 月 10 号停止熏气。熏气结束时, 即在每个气室内选取 5 株立竹, 分别取秆、枝、叶、根混合样品各约 300 g, 在烘箱中 105 °C 杀青 30 min, 再 80 °C 烘至恒重, 后磨碎过 40 目筛, 称量后用硝酸-高氯酸法消煮。Na⁺采用火焰光度法测定^[21], Fe²⁺-Fe³⁺、Ca²⁺和 Mg²⁺采用原子分光光度法测定^[22]。

1.4 数据处理与分析

根据 Pitman 的方法^[23]计算毛竹器官对矿质离子的运输系数 $S_{X, Na} = \text{库器官}(X/Na^+)/\text{源器官}(X/Na^+)$, $S_{X, Fe} = \text{库器官}(X/Fe^{2+}-Fe^{3+})/\text{源器官}(X/Fe^{2+}-Fe^{3+})$, $S_{X, Ca} = \text{库器官}(X/Ca^{2+})/\text{源器官}(X/Ca^{2+})$, $S_{X, Mg} = \text{库器官}(X/Mg^{2+})/\text{源器官}(X/Mg^{2+})$ 。

在 Excel 2003 统计软件中进行试验数据的整理与作图表, 在 DPS 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 浓度升高对毛竹器官矿质离子浓度的影响

不同 CO₂ 浓度条件下, 毛竹 Na⁺浓度由大到小的器官顺序均为: 竹根>竹枝>竹秆>竹叶, 而且竹根极显著地大于其他器官, 竹枝极显著地大于竹叶和竹秆。环境背景大气条件下, 竹叶、竹秆的 Na⁺浓度无显著差异, 但随着 CO₂ 浓度的升高, 竹秆极显著地大于竹叶。随着 CO₂ 浓度的升高, 叶片 Na⁺浓度呈下降趋势, T1、T2 处理无显著差异, 但与 CK 均有显著差异。而竹枝、竹秆和竹根 Na⁺浓度随 CO₂ 浓度升高均呈提高趋势, 竹枝和竹秆 Na⁺浓度 CK、T2 处理差异显著, 与 T1 处理差异均不显著。竹根 Na⁺浓度各处理间均差异显著(图 1)。

不同 CO_2 浓度条件下,毛竹 Fe^{2+} - Fe^{3+} 浓度由大到小的器官顺序均为:竹根>竹叶>竹枝>竹秆,其中,竹根极显著地大于其他器官,竹叶、竹枝无显著差异,均极显著地高于竹秆。随着 CO_2 浓度的升高,各器官 Fe^{2+} - Fe^{3+} 浓度均呈下降趋势。竹叶、竹枝 Fe^{2+} - Fe^{3+} 浓度各处理间均无显著差异。竹秆 Fe^{2+} - Fe^{3+} 浓度 CK、T2 处理差异显著,T1 处理与 CK、T2 处理差异均不显著。竹根 Fe^{2+} - Fe^{3+} 浓度 T1、T2 处理差异不显著,与 CK 差异均显著(图 1)。

不同 CO_2 浓度条件下,毛竹 Mg^{2+} 浓度由大到小的器官顺序均为:竹叶>竹根>竹枝>竹秆,其中,竹叶极显著地大于其他器官,竹根、竹枝无显著差异,均极显著地高于竹秆。随着 CO_2 浓度的升高,竹叶、竹秆 Mg^{2+} 浓度呈提高趋势,且 T1、T2 处理差异不显著,与 CK 均有显著差异。竹枝 Mg^{2+} 浓度各处理间均无显著差异。竹根 Mg^{2+} 浓度也随 CO_2 浓度升高而提高,CK、T2 处理间差异显著,与 T1 处理差异均不显著(图 1)。

在 CK 和 T1 处理下,毛竹器官 Ca^{2+} 浓度由大到小的器官顺序均为:竹叶>竹根>竹秆>竹枝,而 T2 处理下,顺序为:竹叶>竹秆>竹枝>竹根。竹叶 Ca^{2+} 浓度极显著地大于其他器官。竹枝、竹秆 Ca^{2+} 浓度无显著差异,CK、T1 处理均极显著地低于竹根,而在 T2 处理均极显著地高于竹根;随着 CO_2 浓度的升高,竹叶 Ca^{2+} 浓度呈显著升高趋势。竹枝、竹秆 Ca^{2+} 浓度也均呈升高趋势,其中,竹枝 CK、T2 处理差异显著,与 T1 处理均无显著差异,竹秆 T1、T2 处理无显著差异,与 CK 均差异显著。竹根 Ca^{2+} 浓度呈降低趋势,CK、T1 处理无显著差异,与 T2 处理均差异显著(图 1)。

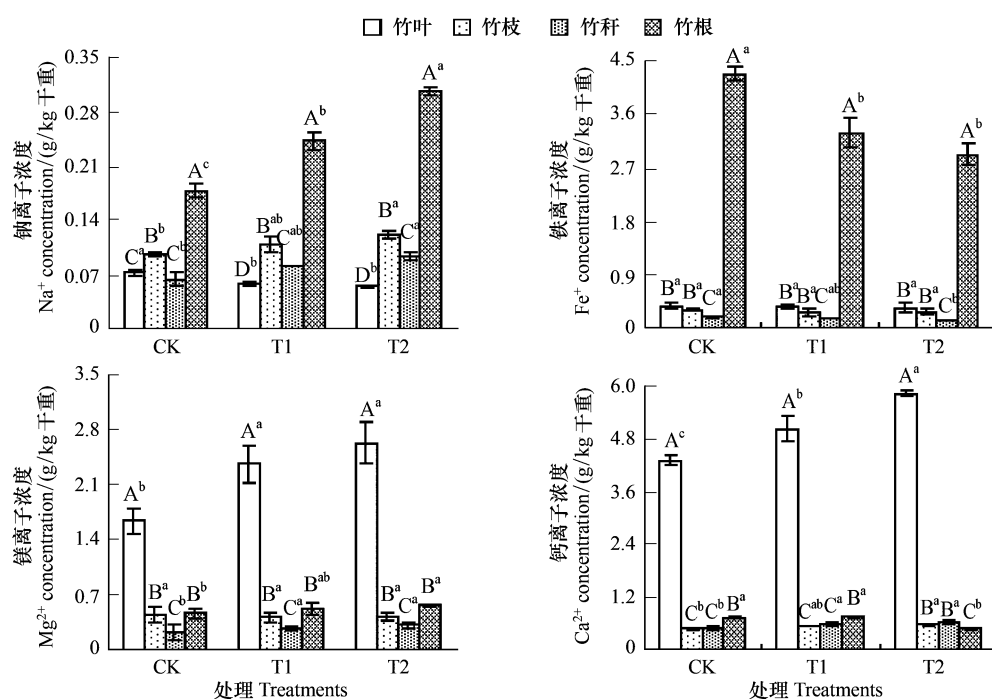


图 1 不同 CO_2 浓度条件下毛竹器官矿质离子浓度

Fig. 1 Mineral ion concentrations in different organs of *Phyllostachys edulis* treated with different CO_2 concentrations

前面大写字母为相同处理不同器官间比较,不同大写字母示差异显著 ($P < 0.05$);后面小写字母为同一器官不同处理间比较,不同小写字母示差异显著 ($P < 0.05$)

2.2 CO_2 浓度升高对毛竹器官矿质离子浓度比的影响

由表 1 分析可知,随着 CO_2 浓度的升高,毛竹器官 Fe^{2+} - $\text{Fe}^{3+}/\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 和 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 在竹叶中逐渐增大,而在其他器官中均逐渐减小。竹叶 Fe^{2+} - $\text{Fe}^{3+}/\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 和 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$, 竹枝 Fe^{2+} - $\text{Fe}^{3+}/\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$, 竹秆 Fe^{2+} - $\text{Fe}^{3+}/\text{Na}^+$ 、竹根 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 在 T1、T2 处理间均无显著差异,均与 CK 差异显著。竹枝 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 和竹秆 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 各处理间均无显著差异,而竹根 Fe^{2+} - $\text{Fe}^{3+}/\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 各处理间差异显著。

毛竹竹叶、竹枝、竹秆和竹根 $\text{Mg}^{2+}/\text{Fe}^{2+}\text{-Fe}^{3+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Fe}^{2+}\text{-Fe}^{3+}$ 均随 CO₂ 浓度的升高而逐渐增大,但不同器官的影响程度不同。随着 CO₂ 浓度的升高,竹叶、竹秆 $\text{Mg}^{2+}/\text{Fe}^{2+}\text{-Fe}^{3+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Fe}^{2+}\text{-Fe}^{3+}$ 均显著增大,而竹根 $\text{Mg}^{2+}/\text{Fe}^{2+}\text{-Fe}^{3+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Fe}^{2+}\text{-Fe}^{3+}$ 和竹枝 $\text{Ca}^{2+}/\text{Fe}^{2+}\text{-Fe}^{3+}$ T1、T2 处理均无显著差异,且均与 CK 差异显著,对竹枝 $\text{Mg}^{2+}/\text{Fe}^{2+}\text{-Fe}^{3+}$ 无明显影响。

随着 CO₂ 浓度的升高,毛竹竹枝 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 逐渐增大,而竹叶、竹秆、竹根 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 均逐渐减小。竹枝 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 各处理间均无显著差异。竹叶 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ T1、T2 处理无显著差异,均与 CK 差异显著。竹秆和竹根 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 均为 CK、T2 处理差异显著,均与 T1 处理无显著差异。

表 1 不同 CO₂ 浓度条件下毛竹器官矿质离子浓度比值Table 1 Mineral ion concentration ratio in different organs of *Phyllostachys edulis* treated with different CO₂ concentrations

器官 Organ	处理 Treatments	$\text{Fe}^{2+}\text{-Fe}^{3+}/\text{Na}^+$	$\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$	$\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$	$\text{Mg}^{2+}/\text{Fe}^{2+}\text{-Fe}^{3+}$	$\text{Ca}^{2+}/\text{Fe}^{2+}\text{-Fe}^{3+}$	$\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$
竹叶 Leaf	CK	5.19±0.25 b	22.26±1.77 b	58.42±3.81 b	4.28±0.57 c	11.25±0.56 c	2.63±0.05 a
	T1	5.90±0.41 a	38.84±1.87 a	83.01±3.65 a	6.93±0.46 b	15.20±0.82 b	2.16±0.05 b
	T2	6.02±0.11 a	46.30±2.71 a	102.45±2.30 a	9.64±0.71 a	21.22±0.85 a	2.15±0.02 b
竹枝 Branch	CK	3.20±0.24 a	4.63±0.29 a	4.94±0.41 a	1.43±0.12 a	1.54±0.05 b	1.12±0.08 a
	T1	2.52±0.05 b	3.83±0.20 b	4.81±0.48 a	1.53±0.25 a	1.96±0.03 a	1.28±0.07 a
	T2	2.28±0.25 b	3.44±0.41 b	4.56±0.49 a	1.54±0.21 a	2.05±0.04 a	1.33±0.06 a
竹秆 Stem	CK	2.97±0.36 a	3.26±0.23 a	7.64±0.39 a	1.14±0.12 c	2.56±0.14 c	2.50±0.17 a
	T1	1.88±0.07 b	3.29±0.34 a	7.14±0.66 a	1.75±0.22 b	3.80±0.46 b	2.20±0.09 ab
	T2	1.37±0.03 b	3.27±0.39 a	6.51±0.12 a	2.39±0.33 a	4.75±0.15 a	2.01±0.11 b
竹根 Root	CK	23.86±0.79 a	2.59±0.25 a	4.04±0.26 a	0.11±0.11 b	0.17±0.01 b	1.54±0.09 a
	T1	13.58±0.81 b	2.15±0.31 ab	3.10±0.09 b	0.16±0.03 a	0.23±0.02 a	1.45±0.08 a
	T2	9.59±0.58 c	1.85±0.08 b	1.56±0.04 c	0.19±0.01 a	0.24±0.01 a	0.85±0.09 b

相同器官不同处理间比较;不同小写字母示差异显著 ($P<0.05$),相同小写字母示差异不显著 ($P>0.05$)

2.3 CO₂ 浓度升高对毛竹器官矿质离子选择性运输能力的影响

$S_{\text{X,Na}}$ 、 $S_{\text{X,Fe}}$ 、 $S_{\text{X,Ca}}$ 和 $S_{\text{X,Mg}}$ 反映了植物器官中的 Na^+ 、 $\text{Fe}^{2+}\text{-Fe}^{3+}$ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的选择性运输能力。由表 2 可以看出,不同的 CO₂ 浓度条件下,竹根-竹秆、竹秆-竹枝 $S_{\text{Fe,Na}}$ 、 $S_{\text{Mg,Na}}$ 无明显变化,而竹枝-竹叶 $S_{\text{Fe,Na}}$ 、 $S_{\text{Mg,Na}}$ 在 T1、T2 处理间虽差异不显著,但较 CK 均有显著提高,表明 CO₂ 浓度升高使竹枝向上运输 $\text{Fe}^{2+}\text{-Fe}^{3+}$ 和 Mg^{2+} 的能力显著增强。随着 CO₂ 浓度的升高,竹根-竹秆 $S_{\text{Ca,Na}}$ 呈下降趋势,CK、T₂ 处理差异显著,竹秆-竹枝 $S_{\text{Ca,Na}}$ 各处理间无显著变化,而竹枝-竹叶 $S_{\text{Ca,Na}}$ 呈显著提高趋势,表明 CO₂ 浓度升高使竹根-竹秆运输 Ca^{2+} 能力下降,而竹枝向上运输 Ca^{2+} 能力明显提高。竹根-竹秆 $S_{\text{Mg,Fe}}$ 随 CO₂ 浓度升高变化不明显,而竹秆-竹枝 $S_{\text{Mg,Fe}}$ 在 T1、T2 处理间差异不显著,均显著地低于 CK,而竹枝-竹叶 $S_{\text{Mg,Fe}}$ 与竹秆-竹枝则呈相反变化规律,表明 CO₂ 浓度升高使竹秆-竹枝运输 $\text{Fe}^{2+}\text{-Fe}^{3+}$ 能力强于 Mg^{2+} ,而竹枝-竹叶则相反。竹根-竹秆、竹枝-竹叶 $S_{\text{Ca,Fe}}$ 随 CO₂ 浓度升高呈提高趋势,尤其 T2 处理显著高于 CK、T1 处理,而竹秆-竹枝 $S_{\text{Ca,Fe}}$ 无明显变化,说明 CO₂ 浓度升高使竹根-竹秆、竹枝-竹叶运输 Ca^{2+} 能力强于 $\text{Fe}^{2+}\text{-Fe}^{3+}$ 。竹根-竹秆、竹秆-竹枝 $S_{\text{Ca,Mg}}$ 随 CO₂ 浓度升高均呈上升趋势,CK、T2 处理差异显著,与 T1 处理均差异不显著,而竹枝-竹叶 $S_{\text{Ca,Mg}}$ 呈下降趋势,竹秆-竹枝、竹枝-竹叶 $S_{\text{Ca,Mg}}$ 在 T1、T2 处理间无显著差异,均与 CK 差异显著,说明 CO₂ 浓度升高使竹根-竹秆、竹秆-竹枝运输 Ca^{2+} 能力强于 Mg^{2+} ,而竹枝-竹叶运输 Ca^{2+} 能力低于 Mg^{2+} 。可见,CO₂ 浓度升高显著提高了 $\text{Fe}^{2+}\text{-Fe}^{3+}$ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的向上运输能力,尤其是 Mg^{2+} ,且 $\text{Fe}^{2+}\text{-Fe}^{3+}$ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 在立竹各器官的选择吸收运输能力竹叶显著强于其他器官,即越接近地上生长末端,矿质离子的选择性运输能力就越强,表明竹叶具有较强的离子调节能力,有利于维持细胞内的矿质离子平衡。

表 2 不同 CO₂ 浓度条件下毛竹器官离子选择性运输系数

Table 2 Selective transportation of ions in organs of *Phyllostachys edulis* treated with different CO₂ concentrations

		离子选择性运输系数 selective transportation index					
处理 Treatments		Fe, Na 的离子 选择性运输 系数 S _{Fe,Na}	Mg, Na 的离子 选择性运输 系数 S _{Mg,Na}	Ca, Na 的离子 选择性运输 系数 S _{Ca,Na}	Mg, Fe 的离子 选择性运输 系数 S _{Mg,Fe}	Ca, Na 的离子 选择性运输 系数 S _{Ca,Fe}	Ca, Mg 的离子 选择性运输 系数 S _{Ca,Mg}
竹根-竹秆 Root-Stem	CK	0.12±0.03 a	1.35±0.15 a	2.87±0.23 a	10.31±0.97 a	16.09±1.97 b	1.77±0.34 b
	T1	0.14±0.01 a	1.53±0.06 a	2.31±0.26 ab	11.11±0.40 a	16.80±1.39 b	1.50±0.11 b
	T2	0.15±0.01 a	1.67±0.14 a	1.90±0.34 b	12.43±0.98 a	29.82±2.40 a	2.43±0.02 a
竹秆-竹枝 Stem-Branch	CK	1.12±0.05 a	1.53±0.11 a	0.69±0.04 a	1.32±0.21 a	0.61±0.09 a	0.47±0.08 b
	T1	1.33±0.12 a	1.16±0.07 a	0.68±0.06 a	0.88±0.11 b	0.51±0.07 a	0.59±0.09 a
	T2	1.54±0.18 a	1.01±0.09 a	0.70±0.06 a	0.65±0.07 b	0.43±0.09 a	0.66±0.02 a
竹枝-竹叶 Branch-Leaf	CK	1.61±0.23 b	4.85±0.49 b	11.89±1.01 c	3.07±0.31 b	7.40±0.58 b	2.45±0.56 a
	T1	2.33±0.32 a	10.22±0.12 a	17.30±1.04 b	4.67±0.53 a	8.00±0.36 b	1.69±0.11 b
	T2	2.95±0.84 a	14.72±0.17 a	22.67±1.61 a	6.08±0.38 a	10.25±0.23 a	1.68±0.08 b

3 讨论

植物体内离子的平衡状态反映了植物细胞内环境的稳定程度,是维持细胞内部各种生理活动正常进行的前提。许多逆境往往会改变植物器官中的离子浓度,破坏离子间的动态平衡,从而会影响植物正常的代谢^[24-25]。普遍认为,CO₂ 浓度升高会刺激植物的生长,但也有经长期的 CO₂ 浓度升高条件下的研究发现,CO₂ 浓度升高会影响植物矿质营养元素的吸收,降低植物器官中的矿质营养元素含量,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^[26-27]。本研究发现,一方面,CO₂ 浓度升高对毛竹不同器官矿质离子浓度的影响程度存在着差异,其中,对竹叶、竹根的影响最为明显。在竹叶中积累更多的 Mg²⁺ 和 Ca²⁺,分析这可能是 CO₂ 浓度升高条件下有利于植物光合色素合成,促进光合作用的机制之一。在竹根中积累更多的 Na⁺,有利于对根部起到渗透调节,降低水势,保持植物水分吸收能力,减轻对地上部分代谢活动干扰等作用,而且很可能会减轻其他器官过多的 Na⁺使代谢中的酶形成无活性的蛋白对植物的毒害,提高毛竹的耐盐能力,这方面值得进一步研究。另一方面,毛竹各器官矿质离子浓度随 CO₂ 浓度升高呈现不同的变化规律,分析认为可能与试验测定的矿质离子化学性质具有一定的相似性,植物吸收转运过程之中会产生一定程度的协同或拮抗作用,及细胞容纳金属离子数量(金属配合位点数量)有限等有关^[28]。

逆境胁迫会造成植株体内离子毒害和营养元素的吸收困难,使组织器官的离子比例失衡^[29-30]。本研究表明,随着 CO₂ 浓度的升高,竹叶 Mg²⁺/Na⁺、Ca²⁺/Na⁺和 Fe²⁺-Fe³⁺/Na⁺增大,表明 CO₂ 浓度升高促进了竹叶对 Mg²⁺、Ca²⁺和 Fe²⁺-Fe³⁺的吸收,这对于维持 CO₂ 浓度升高条件下叶片中 Mg²⁺、Ca²⁺和 Fe²⁺-Fe³⁺的平衡至关重要。分析原因可能是一方面 CO₂ 浓度升高促进了毛竹的生长,尤其是竹叶的生长,需要从其他器官吸收更多的矿质营养元素 Mg²⁺、Ca²⁺和 Fe²⁺-Fe³⁺向竹叶运输来满足其生长,并且对 Mg²⁺、Ca²⁺和 Fe²⁺-Fe³⁺的吸收速率大于植株竹叶碳水化合物化合物的合成速率^[18];另一方面可能与 CO₂ 浓度升高使土壤水分含量增大^[31],微生物活性上升,有机质分解加快,可利用的矿质养分增加等有关^[32-33]。而 Mg²⁺/Na⁺、Ca²⁺/Na⁺和 Fe²⁺-Fe³⁺/Na⁺在其他器官中则均减小,尤其是竹根中下降尤为显著,表明 CO₂ 浓度升高可明显促进除竹叶外的其他器官对 Na⁺的吸收,其中,竹根对 Na⁺的吸收最为明显,这有利于维持细胞渗透平衡和水分吸收,维持离子区域平衡。另外, Mg²⁺/Fe²⁺-Fe³⁺和 Ca²⁺/Fe²⁺-Fe³⁺各器官中均随 CO₂ 浓度的升高而增大,而 Ca²⁺/Mg²⁺除在竹枝中稍有增大外,其它器官中均减小。一方面说明 CO₂ 浓度升高不同程度地影响了毛竹器官对植物细胞新陈代谢、光合作用等重要生理过程的必需元素 Fe²⁺-Fe³⁺、Mg²⁺和 Ca²⁺的吸收、运输和分配;另一方面各器官矿质离子间比值对 CO₂ 浓度升高呈现出不同的响应规律,意味着 CO₂ 浓度升高改变了毛竹器官矿质离子的竞争格局,可能与矿质营养离子的性质,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^[25,34-35],其中机理有待于进一步研究。

离子选择性运输系数反映了植物不同器官对矿质离子向上运输的选择能力^[36]。CO₂ 浓度升高,Fe²⁺-Fe³⁺、Mg²⁺从竹根、竹秆分别向竹秆和竹枝的选择性运输系数略有增大,从竹枝向竹叶的选择性运输系数则显著增大,Ca²⁺从竹根向竹秆、竹秆向竹枝的选择性运输系数逐渐减小或变化平缓,而竹枝向竹叶的选择性运输系数明显增大。说明 CO₂ 浓度升高会使 Fe²⁺-Fe³⁺、Mg²⁺、Ca²⁺从竹枝向竹叶的选择性向上运输能力明显增强,这有利于毛竹的光合作用正常进行。对不同矿质离子的运输能力进行综合比较,竹叶中矿质离子运输能力大小依次为 Mg²⁺> Ca²⁺> Fe²⁺-Fe³⁺。可见,CO₂ 浓度升高会影响毛竹不同器官矿质离子的选择性运输能力,及矿质元素在不同器官中的积累,目的是维持植物体内的矿质离子平衡。

综上所述,CO₂ 浓度升高对毛竹器官矿质离子选择性吸收、运输和分配会产生影响,对竹叶、竹根的影响最为明显,增强了竹叶 Mg²⁺和 Ca²⁺、竹根 Na⁺的积累能力和 Fe²⁺-Fe³⁺、Ca²⁺、Mg²⁺的向上选择性运输能力,提高了光合器官竹叶中矿质养分元素浓度,维持了体内矿质养分元素平衡,有利于提高毛竹对高 CO₂ 浓度环境的适应能力。

致谢:感谢杭州临安太湖源观赏竹种园有限公司顾李俭和刘剑对试验材料的日常管理和维护,中国林业科学研究院亚热带林业研究所张建锋研究员对本文写作的帮助。

References:

- [1] Carnol M, Hogenboom L, Jach M E, Remacle J, Ceulemans R. Elevated atmospheric CO₂ in open top chambers increases net nitrification and potential denitrification. *Global Change Biology*, 2002, 8(6): 590-598.
- [2] Ruan Y N, He X Y, Chen W, Xu S, Xu W D. Effects of elevated CO₂ on lipid peroxidation and activities of antioxidant enzymes in *Ginkgo biloba*. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3): 1106-1112.
- [3] Zhao G Y, Liu J S, Dou J X, Zhou W M, Wang Y, Qin S J. Effects of CO₂ concentration doubling on physiological characteristics of *calamagrostis angustifolia* in freshwater marsh. *Research of Environmental Science*, 2008, 21(5): 134-138.
- [4] Ziska L H, Moya T B, Wassmann R, Namuco O S, Lantin R S, Aduna J B, Abao E Jr, Bronson K F, Neue H U, Olszyk D. Long-term growth at elevated carbon dioxide stimulates methane emission in tropical paddy rice. *Global Change Biology*, 1998, 4(6): 657-665.
- [5] Ruan Y N, He X Y, Chen W, Chen Z J, Sun Y. Effects of elevated CO₂ concentration on anti-oxidative enzyme activities of urban *Pinus tabulaeformis*. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(5): 839-844.
- [6] Zhao T H, Wang M Y, Zhang W W, Zhang X. Effects of elevated CO₂ concentration on plant photosynthesis. *Ecology and Environment*, 2006, 15(5): 1096-1100.
- [7] Jiang Y L, Zhang Q G, Yang S Y, Zhang S D, Wu J. Ecophysiological responses of 28 species of garden plants to atmospheric CO₂ enrichment. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2006, 15(2): 1-6.
- [8] Wang M Y, Zhao T H, Zhang W W, Guo D, He X Y, Fu S L. Effects of elevated CO₂ concentration on photosynthetic characteristics of two urban forest species in Shenyang city. *Chinese Bulletin of Botany*, 2007, 24(4): 470-476.
- [9] Long S P. Modification of the response of photosynthetic productivity to rising temperature by atmospheric CO₂ concentrations: Has its importance been underestimated? *Plant, Cell and Environment*, 1991, 14(8): 729-739.
- [10] Donnelly A, Craigan J, Black C R, Colls J J, Landon G. Does elevated CO₂ ameliorate the impact of O₃ on chlorophyll content and photosynthesis in potato (*Solanum tuberosum*)?. *Physiologia Plantarum*, 2001, 111(4): 501-511.
- [11] Manderscheid R, Burkart S, Bramm A, Weigel H J. Effect of CO₂ enrichment on growth and daily radiation use efficiency of wheat in relation to temperature and growth stage. *European Journal of Agronomy*, 2003, 19(3): 411-425.
- [12] Rao M V, Hale B A, Ormrod D P. Amelioration of zone-induced oxidative damage in wheat plants grown under high carbon dioxide. *Plant Physiology*, 1995, 109: 421-432.
- [13] Yang S T, Li Y F, Hu Y X, Lin J X. Effects of CO₂ concentration doubling on the leaf morphology and structure of 10 species in gramineae. *Acta Botanica Sinica*, 1997, 39(9): 859-866.
- [14] Jiang G M, Han X G, Lin G H. Response of plant growth to elevated: a review on the chief methods and basic conclusions based on experiments in the external countries in past decade. *Acta Phytoecologica Sinica*, 1997, 21(6): 489-502.
- [15] Chen G Y, Yong Z H, Liao Y, Zhang D Y, Chen Y, Zhang H B, Chen J, Zhu J G, Xu D Q. Photosynthetic acclimation in rice leaves to free-air

- CO₂ enrichment related to both ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylation limitation and ribulose-1, 5-bisphosphate regeneration limitation. *Plant and Cell Physiology*, 2005, 46(7): 1036-1045.
- [16] Verro E, Bruni R, Bianchi A, di Toppi L S. Elevated atmospheric CO₂ decreases oxidative stress and increases essential oil yield in leaves of *Thymus vulgaris* grown in a mini-FACE system. *Environmental and Experimental Botany*, 2009, 65(1): 99-106.
- [17] Stafford N. The other greenhouse effect. *Nature*, 2007, 448(7153): 526-528.
- [18] Guo J. Response of Main Mineral Bioavailability to Atmospheric CO₂ Enrichment in Paddy Ecosystem [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011.
- [19] Peñuelas J, Idso S B, Ribas A, Kimball B A. Effects of long-term atmospheric CO₂ enrichment on the mineral concentration of *Citrus aurantium* leaves. *New Phytologist*, 1997, 135(3): 439-444.
- [20] Jiang Z H, Xiao J H, Xu H C. Bamboo and Rattan in the World. Liaoning: Liaoning Technology Press, 2002.
- [21] Li P F, Bai W B, Yang Z C. Effects of NaCl stress on ions absorption and transportation and plant growth of tall fescue. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(7): 1458-1565.
- [22] Hunt J. Dilute hydrochloric acid extraction of plant material for routine cation analysis. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1982, 13(1): 49-55.
- [23] Pitman M G. Transport across the root and shoot/root interaction // Staples R C, Toennissen G A, eds. *Salinity Tolerance in Plants*. Milton: Wiley, 1984.
- [24] Liu A R, Zhang Y B, Zhang X P, Li B X. Effect of lead pollution on growth, inorganic ion distribution and Pb²⁺ accumulation in *Festuca arundinacea*. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2009, 23(1): 128-133.
- [25] Yang CH W, Li CH Y, Zhang M L, Liu J, Ju M, Shi D C. pH and ion balance in wheat-wheatgrass under salt-or alkali stress. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(5): 1000-1005.
- [26] Reich P B, Hobbie S E, Lee T, Ellsworth D S, West J B, Tilman D, Knops J M H, Naeem S, Trost J. Nitrogen limitation constrains sustainability of ecosystem response to CO₂. *Nature*, 2006, 440(7086): 922-925.
- [27] Duval B D, Blankinship J C, Dijkstra P, Hungate B A. CO₂ effects on plant nutrient concentration depend on plant functional group and available nitrogen: a meta-analysis. *Plant Ecology*, 2012, 213(3): 505-521.
- [28] Worms I, Simon D F, Hassler C S, Wilkinson K J. Bioavailability of trace metals to aquatic microorganisms: importance of chemical, biological and physical processes on biouptake. *Biochimie*, 2006, 88(11): 1721-1731.
- [29] Zhu J K. Regulation of ion homeostasis under salt stress. *Current Opinion in Plant Biology*, 2003, 6(5): 441-445.
- [30] Hao Y B, Liu H L, Ci X K, Dong S T, Zhang J W, Liu P. Effects of arsenic on maize growth, antioxidant system, and ion distribution. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(12): 3183-3190.
- [31] Margan J A, Pataki D E, Körner C, Clark H, Del Grosso S J, Grünzweig J M, Knapp A K, Mosier A R, Newton P C D, Niklaus P A, Nippert J B, Nowak R S, Parton W J, Polley H W, Shaw M R. Water relations in grassland and desert ecosystems exposed to elevated atmospheric CO₂. *Oecologia*, 2004, 140(1): 11-25.
- [32] Liu J X, Zhang D Q, Zhou G Y, Faivre-Vuillin B, Deng Q, Wang C L. CO₂ enrichment increases nutrient leaching from model forest ecosystems in subtropical China. *Biogeosciences*, 2008, 5(6): 1783-1795.
- [33] Liu J X, Zhou G Y, Xu Z H, Duan H L, Li Y L, Zhang D Q. Photosynthesis acclimation, leaf nitrogen concentration, and growth of four tree species over 3 years in response to elevated carbon dioxide and nitrogen treatment in subtropical China. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, 11: 1155-1164.
- [34] Liu J, Zhao H T, Sheng H J, Xu Y Q, Feng K. Effects of Fe³⁺ on growth and Calcium/Magnesium ions uptakes of three common algae in Taihu lake. *Environmental Science and Technology*, 2011, 34(1): 59-64.
- [35] Yang C L, Duan R J, Li R M, Hu X W, Fu S P, Guo J C. The physiological characteristics of salt-tolerance in *Sesuvium portulacastrum* L. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(17): 4617-4627.
- [36] Ning J F, Zheng Q S, Yang S H, Zou X Z, Sun L L, Chen Y. Impact of high salt stress on *Apocynum venetum* growth and ionic homeostasis. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(2): 325-330.

参考文献:

- [2] 阮亚男, 何兴元, 陈玮, 徐胜, 徐文铎. CO₂ 浓度倍增对城市银杏 (*Ginkgo biloba*) 叶片膜脂过氧化与抗氧化酶活性的影响. *生态学报*,

2007, 27(3): 1106-1112.

- [3] 赵光影, 刘景双, 窦晶鑫, 周旺明, 王洋, 秦胜金. CO₂ 浓度倍增对湿地小叶章生理特性的影响. 环境科学研究, 2008, 21(5): 134-138.
- [5] 阮亚男, 何兴元, 陈玮, 陈振举, 孙雨. CO₂ 浓度倍增对城市油松抗氧化酶活性的影响. 生态学杂志, 2009, 28(5): 839-844.
- [6] 赵天宏, 王美玉, 张巍巍, 张鑫. 大气 CO₂ 浓度升高对植物光合作用的影响. 生态环境, 2006, 15(5): 1096-1100.
- [7] 蒋跃林, 张庆国, 杨书运, 张仕定, 吴健. 28 种园林植物对大气 CO₂ 浓度增加的生理生态反应. 植物资源与环境学报, 2006, 15(2): 1-6.
- [8] 王美玉, 赵天宏, 张巍巍, 郭丹, 何兴元, 付士磊. CO₂ 浓度升高对两种沈阳城市森林树种光合特性的影响. 植物学报, 2007, 24(4): 470-476.
- [13] 杨松涛, 李彦舫, 胡玉熹, 林金星. CO₂ 浓度倍增对 10 种禾本科植物叶片形态结构的影响. 植物学报, 1997, 39(9): 859-866.
- [14] 蒋高明, 韩兴国, 林光辉. 大气 CO₂ 浓度升高对植物的直接影响——国外十余年来模拟实验研究主要手段及基本结论. 植物生态学报, 1997, 21(6): 489-502.
- [18] 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.
- [20] 江泽慧, 萧江华, 许煌灿. 世界竹藤. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2002.
- [21] 李品方, 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. 中国农业科学, 2005, 38(7): 1458-1565.
- [24] 刘爱荣, 张远兵, 张雪平, 李百学. 铅污染对高羊茅生长、无机离子分布和铅积累量的影响. 核农学报, 2009, 23(1): 128-133.
- [25] 杨春武, 李长有, 张美丽, 刘杰, 鞠森, 石德成. 盐、碱胁迫下小冰麦体内的 pH 及离子平衡. 应用生态学报, 2008, 19(5): 1000-1005.
- [30] 郝玉波, 刘华琳, 慈晓科, 董树亭, 张吉旺, 刘鹏. 砷对玉米生长、抗氧化系统及离子分布的影响. 应用生态学报, 2010, 21(12): 3183-3190.
- [34] 刘静, 赵海涛, 盛海君, 徐轶群, 封克. 铁对太湖常见藻类生长及 Ca²⁺、Mg²⁺ 离子吸收的影响. 环境科学与技术, 2011, 34(1): 59-64.
- [35] 杨成龙, 段瑞军, 李瑞梅, 胡新文, 符少萍, 郭建春. 盐生植物海马齿耐盐的生理特性. 应用生态学报, 2010, 30(17): 4617-4627.
- [36] 宁建凤, 郑青松, 杨少海, 邹献中, 孙丽丽, 陈勇. 高盐胁迫对罗布麻生长及离子平衡的影响. 应用生态学报, 2010, 21(2): 325-330.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 14 Jul. ,2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

A review of the researches on *Alectoris* partridge SONG Sen, LIU Naifa (4215)

Autecology & Fundamentals

Effects of precipitation and nitrogen addition on photosynthetically eco-physiological characteristics and biomass of four tree seedlings in Gutian Mountain, Zhejiang Province, China YAN Hui, WU Qian, DING Jia, et al (4226)

Effects of low temperature stress on physiological-biochemical indexes and photosynthetic characteristics of seedlings of four plant species SHAO Yiruo, XU Jianxin, XUE Li, et al (4237)

Decomposition characteristics of maize roots derived from different nitrogen fertilization fields under laboratory soil incubation conditions CAI Miao, DONG Yanjie, LI Baijun, et al (4248)

The responses of leaf osmoregulation substance and protective enzyme activity of different peanut cultivars to non-sufficient irrigation ZHANG Zhimeng, SONG Wenwu, DING Hong, et al (4257)

Interannual variation of soil seed bank in *Picea schrenkiana* forest in the central part of the Tianshan Mountains LI Huadong, PAN Cunde, WANG Bing, et al (4266)

Physiological & ecological effects of companion-planted grow seedlings of two crops in the same hole LI Lingli, GUO Hongxia, HUANG Genghua, et al (4278)

Effects of magnesium, manganese, activated carbon and lime and their interactions on cadmium uptake by wheat ZHOU Xiangyu, FENG Wenqiang, QIN Yusheng, et al (4289)

Effects of increased concentrations of gas CO₂ on mineral ion uptake, transportation and distribution in *Phyllostachys edulis* ZHUANG Minghao, CHEN Shuanglin, LI Yingchun, et al (4297)

Effects of pH, Fe and Cd concentrations on the Fe and Cd adsorption in the rhizosphere and on the root surfaces of rice LIU Danqing, CHEN Xue, YANG Yazhou, et al (4306)

Effects of low-light stress on maize ear development and endogenous hormones content of two maize hybrids (*Zea mays* L.) with different shade-tolerance ZHOU Weixia, LI Chaohai, LIU Tianxue, et al (4315)

Effects of maize || peanut intercropping on photosynthetic characters and yield forming of intercropped maize JIAO Nianyuan, NING Tangyuan, YANG Mengke, et al (4324)

Cloning root system distribution and architecture of different forest age *Populus euphratica* in Ejina Oasis HUANG Jingjing, JING Jialin, CAO Dechang, et al (4331)

Impact of vegetation interannual variability on evapotranspiration CHEN Hao, ZENG Xiaodong (4343)

Mating behavior of *Pachycrepoides vindemmiae* and the effects of male mating times on the production of females SUN Fang, CHEN Zhongzheng, DUAN Bisheng, et al (4354)

Component analysis and bioactivity determination of fecal extract of *Locusta migratoria tibetensis* (Chen) WANG Haijian, LI Yili, LI Qing, et al (4361)

Effects of different rice varieties on larval development, survival, adult reproduction, and flight capacity of *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée) LI Xia, XU Xiuxiu, HAN Lanzhi, et al (4370)

Population, Community and Ecosystem

Genetic structure of the overwintering Asian corn borer, *Ostrinia furnacalis* (Guenée) collections in Shandong of China based on *mtCOII* gene sequences LI Lili, YU Yi, GUO Dong, TAO Yunli, et al (4377)

The structure and diversity of insect community in Taihu Wetland HAN Zhengwei, MA Ling, CAO Chuanwang, et al (4387)

Annual variation pattern of phytoplankton community at the downstream of Xijiang River WANG Chao, LAI Zini, LI Xinhui, et al (4398)

Effect of species dispersal and environmental factors on species assemblages in grassland communities WANG Dan, WANG Xiao'an, GUO Hua, et al (4409)

- Cyanobacteria diversity in biological soil crusts from different erosion regions on the Loess Plateau: a preliminary result YANG Lina, ZHAO Yunge, MING Jiao, et al (4416)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Zoning for regulating of construction land based on landscape security pattern WANG Siyi, OU Minghao (4425)
- Fragmentation process of wetlands landscape in the middle reaches of the Heihe River and its driving forces analysis ZHAO Ruifeng, JIANG Penghui, ZHAO Haili, et al (4436)
- Analysis on grassland degradation in Qinghai Lake Basin during 2000—2010 LUO Chengfeng, XU Changjun, YOU Haoyan, et al (4450)
- Research on soil erosion based on Location-weighted landscape index (LWLI) in Guanchuanhe River basin, Dingxi, Gansu Province LI Haifang, WEI Wei, CHEN Jin, et al (4460)
- Effects of host density on parasitoids and hyper-parasitoids of cereal aphids in different agricultural landscapes GUAN Xiaoqing, LIU Junhe, ZHAO Zihua (4468)
- Effects of interactive CO₂ concentration and precipitation on growth characteristics of *Stipa breviflora* SHI Yaohui, ZHOU Guangsheng, JIANG Yanling, et al (4478)

Resource and Industrial Ecology

- Eco-service efficiency assessment method of urban land use: a case study of Changzhou City, China YANG Wenrui, LI Feng, WANG Rusong, et al (4486)
- Changes in phosphorus consumption and its environmental loads from food by residents in Xiamen City WANG Huina, ZHAO Xiaofeng, TANG Lina, et al (4495)

Research Notes

- Intercropping enhances the farmland ecosystem services SU Benying, CHEN Shengbin, LI Yonggeng, et al (4505)
- Assessment indicator system of eco-industry in mining area WANG Guangcheng, WANG Huanhuan, TAN Lingling (4515)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 骆世明

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 14 期 (2013 年 7 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 14 (July, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元