

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

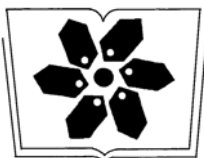
Acta Ecologica Sinica



第34卷 第7期 Vol.34 No.7 **2014**

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 34 卷 第 7 期

2014 年 4 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 青藏高原东北部 5000 年来气候变化与若尔盖湿地历史生态学研究进展 何奕忻, 吴 宁, 朱求安, 等 (1615)
- 天山云杉森林土壤有机碳沿海拔的分布规律及其影响因素 阿米娜木·艾力, 常顺利, 张毓涛, 等 (1626)

个体与基础生态

- 小兴安岭红松日径向变化及其对气象因子的响应 李兴欢, 刘瑞鹏, 毛子军, 等 (1635)
- 采伐剩余物对林地表层土壤生化特性和酶活性的影响 吴波波, 郭剑芬, 吴君君, 等 (1645)
- 庞泉沟自然保护区典型森林土壤大团聚体特征 白秀梅, 韩有志, 郭汉清 (1654)
- 思茅松天然林树冠结构模型 欧光龙, 肖义发, 王俊峰, 等 (1663)
- 镁缺乏和过量胁迫对纽荷尔脐橙叶绿素荧光特性的影响 凌丽俐, 黄 翼, 彭良志, 等 (1672)
- 斑块生境中食果鸟类对南方红豆杉种子的取食和传播 李 宁, 王 征, 鲁长虎, 等 (1681)
- 重金属铅与两种淡水藻的相互作用 刘 璐, 闫 浩, 李 诚, 等 (1690)
- 刺参养殖池塘初级生产力及其粒级结构周年变化 姜森颖, 周一兵, 唐伯平, 等 (1698)
- 控(微囊)藻鲢、鳙排泄物光能与生长活性 王银平, 谷孝鸿, 曾庆飞, 等 (1707)
- 五爪金龙中香豆素类物质含量及其对福寿螺、水稻和稗草的影响 犹昌艳, 杨 宇, 胡 飞, 等 (1716)

种群、群落和生态系统

- 西双版纳国家级自然保护区勐腊子保护区亚洲象种群和栖息地评价 林 柳, 金延飞, 陈德坤, 等 (1725)
- 莱州湾鱼类群落同功能种团的季节变化 李 凡, 徐炳庆, 马元庆, 等 (1736)
- 长期不同施肥方式对麦田杂草群落的影响 蒋 敏, 沈明星, 沈新平, 等 (1746)
- 极端干旱条件下燕麦垄沟覆盖系统水生态过程 周 宏, 张恒嘉, 莫 非, 等 (1757)

景观、区域和全球生态

- 流域景观格局变化对洪枯径流影响的 SWAT 模型模拟分析 林炳青, 陈兴伟, 陈 莹, 等 (1772)
- 近 20 年青藏高原东北部禾本科牧草生育期变化特征 徐维新, 辛元春, 张 娟, 等 (1781)
- 丽江城市不同区域景观美学 郭先华, 赵千钧, 崔胜辉, 等 (1794)
- 珠三角河网水域栅藻的时空分布特征 王 超, 李新辉, 赖子尼, 等 (1800)
- 博斯腾湖细菌丰度时空分布及其与环境因子的关系 王博雯, 汤祥明, 高 光, 等 (1812)
- 遗传算法支持下土地利用空间分形特征尺度域的识别 吴 浩, 李 岩, 史文中, 等 (1822)
- 川西亚高山不同海拔岷江冷杉树轮碳稳定同位素对气候的响应 靳 翔, 徐 庆, 刘世荣, 等 (1831)

基于 ESDA 的西北太平洋柔鱼资源空间热点区域及其变动研究 冯永玖,陈新军,杨铭霞,等 (1841)

城乡与社会生态

基于居民生态认知的非使用价值支付意愿空间分异研究——以三江平原湿地为例.....

..... 高 琴,敖长林,陈红光,等 (1851)

浑河河水及其沿岸地下水污染特征 崔 健,都基众,王晓光 (1860)

社会生态系统及脆弱性驱动机制分析 余中元,李 波,张新时 (1870)

研究简报

等渗 NaCl 和 Ca(NO₃)₂胁迫对黄瓜幼苗生长和生理特性的影响 周 珩,郭世荣,邵慧娟,等 (1880)

专家观点

关于“生态保护和建设”名称和内涵的探讨 沈国舫 (1891)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 282 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 29 * 2014-04



封面图说: 红豆杉人工林——红豆杉为常绿针叶乔木,树高可达 25m,属国家一级保护植物。红豆杉中含有的紫杉醇,具有独特的抗癌机制和较高的抗癌活性,能阻止癌细胞的繁殖、抑制肿瘤细胞的迁移,是世界公认的抗癌药。红豆杉在我国共有 4 个种和 1 个变种,即云南红豆杉、西藏红豆杉、东北红豆杉、中国红豆杉和南方红豆杉(变种)。由于天然红豆杉稀缺,国家严禁采伐利用,因而我国南方很多地方都采取人工种植的方法生产利用。人工种植的南方红豆杉在南方山区多呈斑块状分布,斑块生境中鸟类对红豆杉种子的传播有重要的影响。

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/stxb201303200467

周珩, 郭世荣, 邵慧娟, 陈新斌, 魏斌, 胡荣, 姜冬晨, 郑智航, 孙锦. 等渗 NaCl 和 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫对黄瓜幼苗生长和生理特性的影响. 生态学报, 2014, 34(7): 1880-1890.

Zhou H, Guo S R, Shao H J, Chen X B, Wei B, Hu R, Jiang D C, Zheng Z H, Sun J. Effects of iso-osmotic $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ and NaCl stress on growth and physiological characteristics of cucumber seedlings. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(7): 1880-1890.

等渗 NaCl 和 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫对 黄瓜幼苗生长和生理特性的影响

周珩, 郭世荣, 邵慧娟, 陈新斌, 魏斌, 胡荣, 姜冬晨, 郑智航, 孙锦*

(南京农业大学园艺学院, 农业部南方蔬菜遗传改良重点开放实验室, 南京 210095)

摘要:以盐敏感型的黄瓜品种‘津春 2 号’为材料, 采用营养液栽培方法, 研究了等渗 NaCl 和 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫对黄瓜幼苗生长和生理特性的影响。结果表明, NaCl 胁迫不仅抑制黄瓜幼苗地上部生长, 而且对根系生长也具有抑制作用; 而 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫主要抑制黄瓜幼苗地上部生长, 对根系生长没有明显影响。NaCl 胁迫下, 黄瓜幼苗净光合速率(P_n)降低不仅由非气孔因素引起, 而且碳同化能力也降低; 而 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫下 P_n 降低主要由非气孔因素引起, 对植株的碳同化能力没有明显影响。等渗 NaCl 和 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫导致黄瓜幼苗叶片光系统 II (PS II) 反应中心过剩光能(E_x)显著升高, 致使叶片超氧阴离子自由基(O_2^-)产生速率加快, 过氧化氢(H_2O_2)含量显著升高, 但 NaCl 胁迫的升高幅度均大于 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫。NaCl 胁迫在提高过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性的同时, 降低了超氧化物歧化酶(SOD)活性, 对活性氧(ROS)的清除能力有限, 致使叶片 ROS 大量积累, 膜质过氧化伤害严重; 而 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫显著提高了 SOD、POD 和 CAT 活性, 有效清除了 ROS, 对叶片未造成严重的膜质过氧化伤害。NaCl 和 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫分别导致黄瓜幼苗体内 Na^+ 和 Ca^{2+} 大量积累, 致使离子平衡被打破, 但过多 Na^+ 要比过多的 Ca^{2+} 对植物体的伤害作用大。上述结果说明, 黄瓜幼苗对等渗 NaCl 和 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫的生理响应存在差异。NaCl 胁迫下黄瓜幼苗体内 Na^+ 大量积累, 不仅限制了环境中 CO_2 进入叶肉细胞, 而且使碳同化能力降低, 加之 ROS 清除能力有限, 不能有效清除 PS II 反应中心过剩能量所导致的 ROS, 因而产生了严重的膜质过氧化, 影响了植株生长和光合速率; 而 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫下, 黄瓜幼苗碳同化能力没有受到影响, ROS 也能够被抗氧化系统有效清除, 植株没有产生严重的膜质过氧化, 因而对生长和光合速率的影响没有 NaCl 胁迫大。

关键词: 黄瓜; $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$; NaCl; 生长; 生理特性

Effects of iso-osmotic $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ and NaCl stress on growth and physiological characteristics of cucumber seedlings

ZHOU Heng, GUO Shirong, SHAO Huijuan, CHEN Xinbin, WEI Bin, HU Rong, JIANG Dongchen, ZHENG Zhihang, SUN Jin*

College of Horticulture, Nanjing Agricultural University/Key Laboratory of Southern Vegetable Crop Genetic Improvement, Ministry of Agriculture, Nanjing, Jiangsu 210095, China

Abstract: In order to compare the differences of physiological responses of cucumber seedlings under the $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ and NaCl stress, the effects of two iso-osmotic salts on growth, photosynthetic characteristics, reactive oxygen level, antioxidant enzymes activity and cations absorption of cv. ‘Jinchun No. 2’ (salt sensitive cultivar) cucumber seedlings cultivated hydroponically were investigated. The results showed that NaCl inhibited the growth of both shoots and roots of cucumber

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20100097120002); 国家重点基础研究发展计划项目(2009CB119000); 现代农业产业技术体系建设专项资金资助(CARS-25-C-03)

收稿日期: 2013-03-20; 修订日期: 2013-09-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jinsun@njau.edu.cn

seedlings, whereas the inhibiting effect by $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ was mainly on shoots, but not on roots. The results of photosynthetic gas exchange parameters indicate that NaCl stress restricted the entry of CO_2 from environment into mesophyll cells resulting in reduction of photosynthetic rate. According to analysis of chlorophyll *a* fluorescence parameters, the capacity of carbon assimilation of cucumber seedlings was also inhibited by NaCl stress. However, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ stress only affected the entry of CO_2 , but did not significantly affect the capacity of carbon assimilation. The portion of excessive energy in photosystem II (PS II) reaction center (E_x) was enhanced by both $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ and NaCl, which led to an increase of the production rate of superoxide anion radical ($\text{O}_2^{\cdot-}$) and content of hydrogen peroxide (H_2O_2) in cucumber seedling leaves. The increase of E_x , $\text{O}_2^{\cdot-}$ production rate and H_2O_2 content by NaCl stress was more than that by $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$. Changes of antioxidant enzymes activity of cucumber seedling leaves were different between $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ and NaCl stress. For example, the activity of peroxidase (POD) and catalase (CAT) was increased, but the activity of superoxide dismutase (SOD) in leaves was reduced by NaCl stress. However, the activity of antioxidant enzymes such as SOD, POD, CAT was all enhanced by $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$. We speculated that reactive oxygen species (ROS) quenching was limited under NaCl stress, leading to its accumulation and the serious lipid peroxidation. However, ROS was eliminated by antioxidant enzymes under $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ stress, so the lipid peroxidation damage by $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ stress was less than that by NaCl. Besides, NaCl stress remarkably increased accumulation of Na^+ , leading to reduction of ratio of K/Na, Mg/Na and Ca/Na in each plant organ of cucumber seedlings, and disturbing of ionic equilibrium in plants. $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ increased Ca^{2+} accumulation in cucumber seedlings, but decreased K^+ and Mg^{2+} content, which reduced ratio of K/Ca and Mg/Ca, and also disturbed ionic equilibrium in plants. However, the injury to cucumber seedlings by excessive Na^+ was more severe than by excessive Ca^{2+} . Our results suggested that physiological responses of cucumber seedlings under the iso-osmotic $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ and NaCl stress were different. NaCl stress increased the accumulation of Na^+ in cucumber seedlings, which not only restricted the entry of CO_2 from environment into mesophyll cells, but also reduced carbon assimilation. Because of limitation of ROS quenching, the rapid accumulation of ROS due to the rise of excess energy in PS II reaction center might activate lipid peroxidation damage, and reduce the growth and photosynthetic performances of cucumber seedlings. Carbon assimilation capacity of cucumber seedlings was not significantly affected by $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, because that ROS could be removed by antioxidant system in a timely manner without causing lipid peroxidation damage and significant reduction of photosynthetic rate as well as growth of cucumber seedling.

Key Words: cucumber (*Cucumis sativus* L.); salt stress; $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$; NaCl; growth; physiological characteristics

近年来,我国设施栽培面积迅速增加,由于设施土壤季节性或常年被覆盖,土壤得不到雨水淋洗,设施内温度高,土壤水分蒸发强烈,再加上化肥的过量施用,造成盐分在表层土壤积聚,引起土壤次生盐渍化^[1-2]。设施土壤次生盐渍化区别于盐土(以 NaCl 为主)和盐碱土(以 NaCl 和 NaHCO_3 或 Na_2CO_3 为主)的最大特点是以 Ca^{2+} 和 NO_3^- 等积累为主。研究表明,造成设施土壤次生盐渍化的主要阴离子有 NO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- ,阳离子有 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 和 Mg^{2+} ,在这些离子中,最多的是 Ca^{2+} 和 NO_3^- ,其中 Ca^{2+} 占有所有阳离子的 60%, NO_3^- 占有所有阴离子的 67%—76%^[3]。尽管 Ca^{2+} 和 NO_3^- 作为植物吸收钙元素和氮元素的主要形式,在植物生长发育中发挥重要的生

理功能,但设施土壤中过多的 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 积累也会导致植株产生严重的氧化胁迫和代谢紊乱,从而导致黄瓜^[4-5]、番茄^[6]等作物产量降低、品质下降。许多研究结果都证明, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 大量积累已经成为我国设施土壤次生盐渍化的主要盐类^[7]。

鉴于 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 对植物生长发育的特殊作用,植物对其胁迫的应答机制与 NaCl 胁迫必然有所不同,而国内外关于植物盐胁迫生理的研究大多都集中于 NaCl 胁迫,不能准确反映设施土壤次生盐渍化对作物的伤害机理。因此,开展作物对不同盐类胁迫响应差异的研究,对阐明设施土壤盐渍化对作物的伤害机理及寻求有效的克服途径和方法具有重要意义。前人也开展了等渗 NaCl 和 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫对黄瓜^[8]、南瓜^[9]、番茄^[10]等作物生长和生理特性的影

响,认为等渗的 NaCl 胁迫对作物的伤害大于等渗 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫,然而这些研究均未能解释造成这种差异的生理机制。

黄瓜(*Cucumis sativus* L.)是一种世界性的重要蔬菜作物,也是我国设施栽培中面积较大、种植范围较广的主要蔬菜作物之一,但其根系具有脆弱、好气、分布较浅的特点,对盐渍环境适应性较差,设施土壤盐分积累容易引发黄瓜植株的生理性病害,严重影响产量和品质。为此,本试验以盐敏感型的黄瓜品种‘津春 2 号’为材料,从生长、光合特性、活性氧代谢、阳离子吸收等方面,研究等渗 NaCl 和

$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫对黄瓜幼苗生长和生理特性的影响,探讨黄瓜幼苗对不同盐类胁迫的生理响应差异,为寻求有效克服设施土壤盐渍化的途径和方法提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验选用盐敏感型的黄瓜品种‘津春 2 号’^[8]为试材,种子由天津黄瓜研究所提供;选用的营养液配方为日本山崎黄瓜专用配方(表 1)。

表 1 日本山崎黄瓜专用配方

Table 1 Composition of special nutrient solution for cucumber proposed by Yamazaki

大量元素 Macronutrients	终质量浓度/(mg/L) Final concentration	微量元素 Micronutrients	终质量浓度/(mg/L) Final concentration
KNO_3	607	H_3BO_3	2.86
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	826	$\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	2.13
$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	115	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.22
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	483	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.08
		$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.02
		Na Fe-EDTA	30

1.2 材料培养与处理

试验于 2011 年 9 月—2012 年 12 月在南京农业大学牌楼试验基地的现代化玻璃温室中进行。黄瓜种子经浸种催芽后,播种于石英砂中育苗。待幼苗 2 叶 1 心时定植于盛有 1 个剂量日本山崎黄瓜专用配方的营养液栽培箱(18 cm×48 cm×24 cm;20 L)内,幼苗预培养 3 d 后一次性加盐处理,使营养液中 NaCl 和 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 的终浓度分别达到 75 mmol/L 和 50 mmol/L(根据预备试验,该浓度下两种盐处理的黄瓜幼苗生物量差异最大,数据略),用 FM-8P 全自动冰点渗透压计测得加盐后营养液的初始渗透势均为 -46.3 MPa。试验设 3 个处理,分别为:对照(CK,正常营养液栽培),75 mmol/L NaCl 处理(NaCl),50 mmol/L $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 处理($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$),每处理重复 3 次,随机区组排列,每个区组内各处理均 3 箱,每箱定植黄瓜幼苗 12 株。试验期间,温室内温度保持在 13—28 ℃,相对湿度(RH)60%—75%,光合有效辐射(PAR)为 400—800 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。盐胁迫处理 5 d 后,每重复取样 9 株幼苗(每箱取样 3 株)进行生长指标和生理指标测定;光合气体交换参数和叶绿

素荧光参数测定时,每重复取样 3 株(每箱取样 1 株)进行测定,取其平均值。叶片生理指标和光合、荧光参数测定时的取样部位为幼苗生长点之下第 2 和(或)第 3 片真叶。

1.3 测定方法

1.3.1 生长指标

用去离子水将黄瓜幼苗冲洗干净并吸干水分,从根茎结合处剪断,分为地上部和地下部,称得鲜重(g/株);在烘箱中 105 ℃下杀青 15 min 后,然后在 75 ℃的恒温下烘干至恒重,称得干重(g/株)。

1.3.2 叶绿素(Chl)含量

按沈伟其^[11]的方法分别测定 A645、A663 处的吸光值,并计算叶绿素 a(Chl a)、叶绿素 b(Chl b)和总叶绿素(Chl(a+b))含量。

1.3.3 活性氧(ROS)和丙二醛(MDA)含量测定

超氧阴离子自由基(O_2^-)产生速率按照王爱国和罗广华^[12]的羟胺反应法测定,以 $\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{鲜重} \cdot \text{min}^{-1}$ 表示;过氧化氢(H_2O_2)含量的测定参照 Uchida 等^[13]的方法,以 $\mu\text{mol/g}$ 鲜重表示;MDA 含量的测定

按照 Heath 和 Packer^[14] 的方法,以 nmol/g 鲜重表示。

1.3.4 抗氧化酶活性

超氧化物歧化酶(SOD)活性测定参照氮蓝四唑(NBT)光还原法^[15],过氧化物酶(POD)活性测定参照 Kochba 等^[16]的方法,过氧化氢酶(CAT)活性测定参照 Dhindsa 等^[15]的方法。

1.3.5 阳离子含量

将新鲜样品洗净后用吸水纸吸干水分,分别剪取根系、茎和不带叶柄的叶片,在 105 ℃ 下杀青 15 min 后在 70—80 ℃ 下烘干至恒重,磨碎后过 30 目筛,取 50 mg 样加 20 mL 蒸馏水摇匀,在 100 ℃ 沸水浴中煮 1.5—3 h,冷却后定容至 100 mL。黄瓜幼苗各器官中 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的含量分别在 OD 766.49、589.59、285.21、317.93 nm 下利用原子吸收分光光度计(日立 Z-2000)测定。

1.3.6 光合气体交换参数

采用便携式光合测定系统(Li-6400,美国 LI-COR 公司)于晴天 9:00—11:00 进行光合参数测定。测定时叶室温度控制在 (25 ± 1) ℃,光强控制在 $800 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,参比室 CO_2 浓度为 $(380 \pm 10) \mu\text{mol/L}$,相对湿度(RH)为 60%—70%。选取叶位一致、完全展开的功能叶测量其净光合速率(P_n , $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、气孔导度(G_s , $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、胞间 CO_2 浓度(C_i , $\mu\text{mol CO}_2/\text{mol}$),并计算气孔限制值^[17](L_s , %): $L_s = 1 - C_i/C_a$,式中 C_a 为空气中 CO_2 浓度($\mu\text{mol}/\text{mol}$)。

1.3.7 叶绿素荧光参数

选取与光合气体交换参数测定时相同的叶位用 PAM 2100 调制荧光仪(德国 Walz 公司)进行测定。叶片经过 30 min 充分暗适应,照射测量光,得到原初荧光 F_o ,随后打开饱和脉冲光 $8000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,

0.8 s 后关闭,得到暗适应最大荧光 F_m 。打开作用光,待叶片光合作用达到稳态后得到光合稳态荧光 F_s 并记录,打开饱和脉冲光 $8000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,0.8 s 得到光化学作用下最大荧光 F'_m ,然后关闭作用光,立即打开远红光,约 6 s 后关闭,得到光适应叶片的最小荧光 F'_o 。计算暗条件下最大光化学效率(F_v/F_m)、光系统 II (PS II) 实际光化学效率(Φ_{PSII})、光条件下最大光化学效率(F'_v/F'_m)、光化学淬灭系数(qP)、PS II 的潜在活性(F_v/F_o)和非光化学淬灭系数(qN)。光化学反应的能量部分(P)、天线耗散能量(D)、PS II 反应中心的过剩光能(E_x)的份额分别按下式计算^[18]: $P = (F'_m - F_s)/F'_m$; $D = 1 - F'_v/F'_m$; $E_x = F'_v/F'_m \times (1 - qP)$ 。

1.4 数据处理

数据分析采用 MS Excel 2003 软件制作图表, SAS9.0 软件进行数据单因素方差分析,数据显著性差异运用 Duncan's 新复极差法进行多重比较($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 等渗 NaCl 和 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫对黄瓜幼苗生长的影响

如表 2 所示,NaCl 和 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 处理显著抑制了黄瓜幼苗生长,总鲜重和总干重均显著低于对照,其中 NaCl 处理对黄瓜幼苗生长的抑制作用大于 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 处理。NaCl 胁迫下,黄瓜幼苗根系和地上部的鲜重、干重均显著低于对照; $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫下,黄瓜幼苗地上部生长显著受到抑制,而对根系生长的影响不明显。可见, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫主要抑制黄瓜幼苗地上部生长,而 NaCl 胁迫可使黄瓜幼苗根系和地上部的生长均受到抑制。

表 2 等渗 NaCl 和 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫对黄瓜幼苗生长的影响

Table 2 Effects of iso-osmotic $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ and NaCl stress on the growth of cucumber seedlings

处理 Treatments	地上部 Shoots		地下部 Roots		全株 Total plants	
	鲜重/(g/株) Fresh mass	干重/(g/株) Dry mass	鲜重/(g/株) Fresh mass	干重/(g/株) Dry mass	鲜重/(g/株) Fresh mass	干重/(g/株) Dry mass
CK	13.55 ± 0.43 a	1.17 ± 0.02 a	3.43 ± 0.13 a	0.17 ± 0.01 a	16.98 ± 0.12 a	1.34 ± 0.03 a
NaCl	8.04 ± 0.32 b	0.80 ± 0.01 b	2.01 ± 0.07 b	0.09 ± 0.01 b	10.05 ± 0.14 c	0.89 ± 0.01 c
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	9.93 ± 0.25 b	0.90 ± 0.02 b	3.02 ± 0.11 ab	0.15 ± 0.02 a	12.95 ± 0.21 b	1.05 ± 0.02 b

CK 表示正常营养液栽培;NaCl 表示 NaCl 胁迫处理; $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 表示 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫处理;同列中不同字母表示差异达 5% 水平 ($P < 0.05$)

2.2 等渗 NaCl 和 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫对黄瓜幼苗叶片叶绿素含量的影响

如表 3 所示,等渗 NaCl 和 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫下,黄

瓜幼苗叶片 Chl a、Chl b、Chl(a+b) 含量和 Chl a/Chl b 均显著下降,但 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫下黄瓜幼苗叶片 Chl a/Chl b 显著高于 NaCl 胁迫。

表 3 等渗 NaCl 和 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫对黄瓜幼苗叶片叶绿素含量的影响

Table 3 Effects of iso-osmotic $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ and NaCl stress on the chlorophyll content in leaves of cucumber seedlings

处理 Treatments	叶绿素 a/(mg/g 鲜重) Chl a	叶绿素 b/(mg/g 鲜重) Chl b	总叶绿素/(mg/g 鲜重) Chl(a+b)	叶绿素 a/叶绿素 b Chl a/Chl b
CK	1.419 ± 0.056 a	0.494 ± 0.027 a	1.913 ± 0.058 a	2.872 ± 0.0231 a
NaCl	0.719 ± 0.032 b	0.385 ± 0.046 b	1.104 ± 0.055 b	1.868 ± 0.0421 c
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	0.915 ± 0.058 b	0.433 ± 0.038 b	1.348 ± 0.039 b	2.113 ± 0.0236 b

Chl a: Chlorophyll a; Chl b: Chlorophyll b; Chl(a+b): Total chlorophyll; Chl a/Chl b: Ratio of chlorophyll a and chlorophyll b

2.3 等渗 NaCl 和 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫对黄瓜幼苗光合气体交换参数的影响

如图 1 所示,等渗 NaCl 和 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫下,黄瓜幼苗叶片 P_n 、 G_s 、 C_i 均显著低于对照,而 L_s 显著高

于对照,但 NaCl 胁迫引起的升高或降低幅度均大于 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫。按照 Farquhar 等^[19] 的判断标准,NaCl 与 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫引起黄瓜幼苗叶片光合速率降低主要是由气孔因素引起。

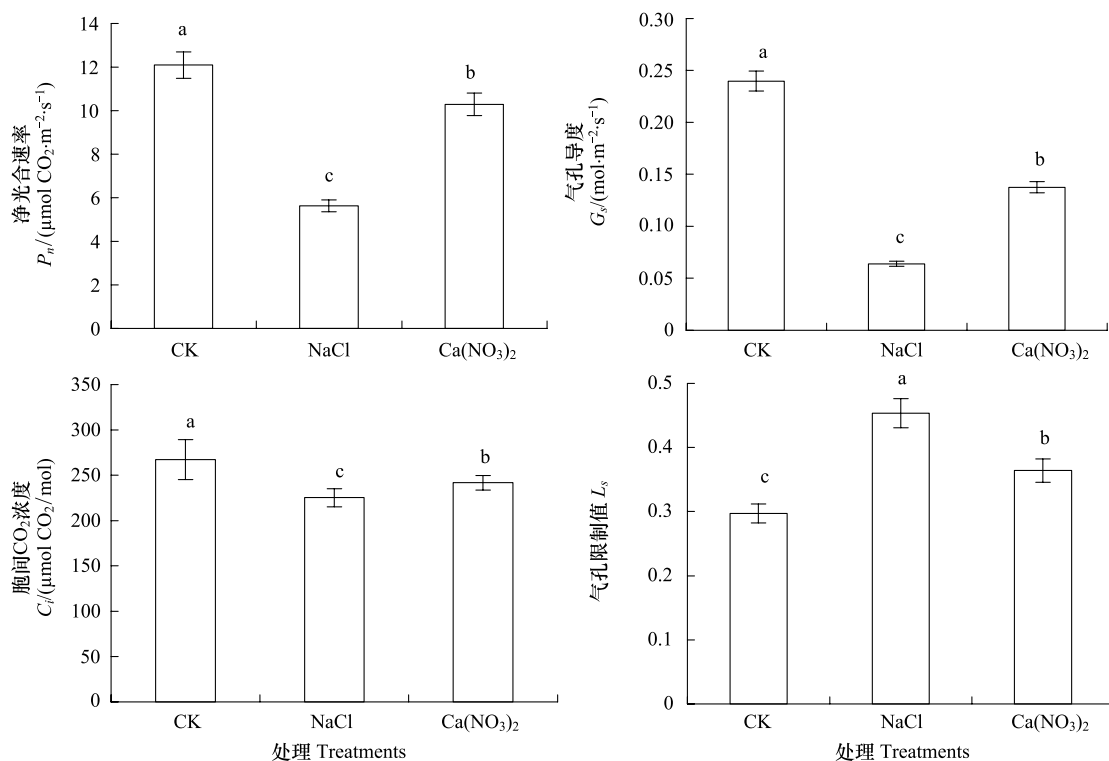


图 1 等渗 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 和 NaCl 胁迫对黄瓜幼苗叶片光合气体交换参数的影响

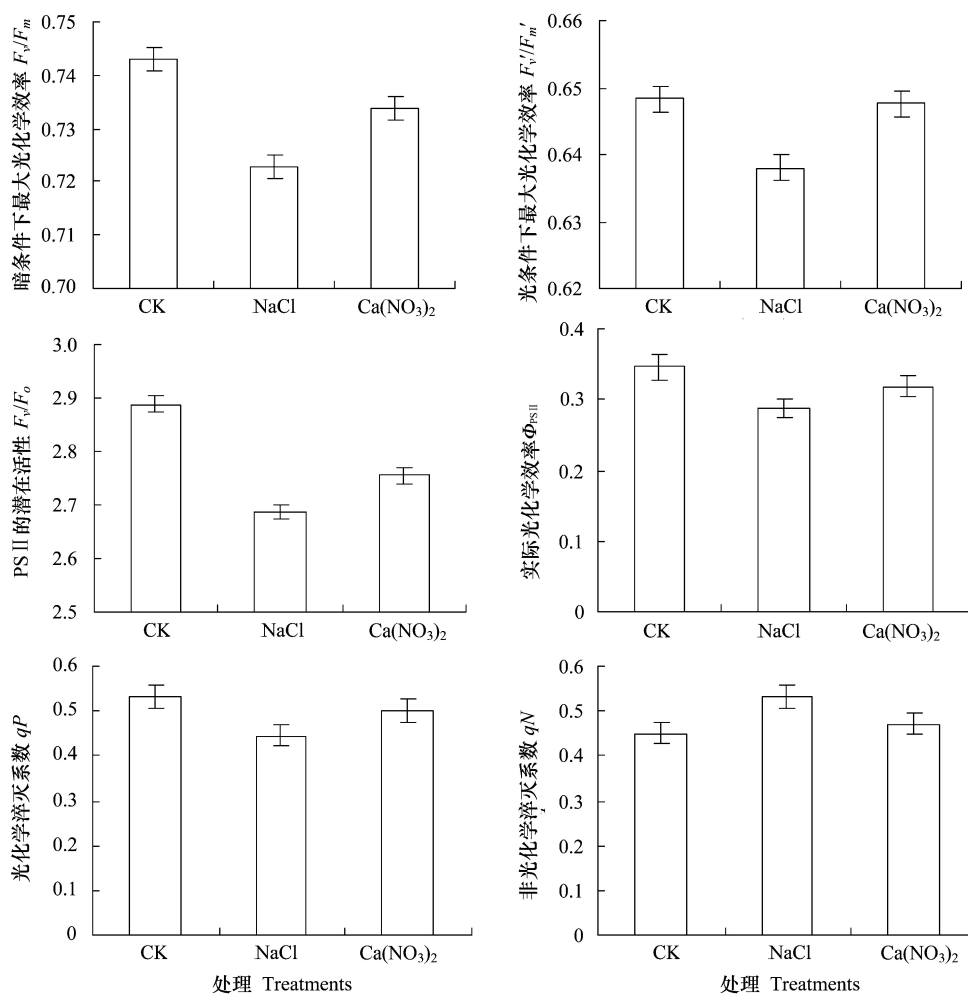
Fig.1 Effects of iso-osmotic $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ and NaCl on photosynthetic gas exchange parameters of cucumber seedling leaves

CK: 正常营养液栽培 Control; NaCl: NaCl 胁迫处理 NaCl stress; $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$: $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫处理 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ stress; 不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

2.4 等渗 NaCl 和 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫对黄瓜幼苗叶片叶绿素荧光参数的影响

如图 2 所示,NaCl 胁迫显著降低黄瓜幼苗叶片的 F_v/F_m 、 F'_v/F'_m 、 F_v/F_o 、 Φ_{PSII} 和 qP 值,显著提高

qN 值; $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫显著降低了黄瓜幼苗叶片的 F_v/F_m 和 F_v/F_o 值,但对 F'_v/F'_m 、 Φ_{PSII} 、 qP 和 qN 值无显著影响。

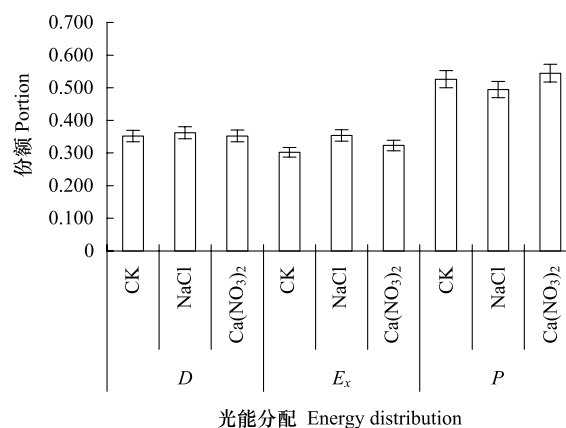
图2 等渗 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 和 NaCl 胁迫对黄瓜幼苗叶片叶绿素荧光参数的影响Fig.2 Effects of iso-osmotic $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ and NaCl on fluorescence parameters of cucumber seedling leaves

2.5 等渗 NaCl 和 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫对黄瓜幼苗叶片吸收光能分配的影响

利用叶绿素荧光参数将植物叶片吸收的光能分为3部分, D 、 E_x 和 P 。通过测算植物叶片的 P 、 D 、 E_x 的份额,可以了解植物的光能分配情况^[18]。图3表明,NaCl胁迫下,黄瓜幼苗叶片的 P 显著降低,而 E_x 显著升高16.89%,对 D 无明显影响; $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫对 P 和 D 无明显影响,但使 E_x 显著升高6.95%。

2.6 等渗 NaCl 和 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫对黄瓜幼苗叶片 O_2^- 产生速率、 H_2O_2 含量和MDA含量的影响

由图4所示,NaCl胁迫显著提高了黄瓜幼苗叶片的 O_2^- 产生速率、 H_2O_2 和MDA含量, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫也显著提高了黄瓜幼苗叶片的 O_2^- 产生速率和 H_2O_2 含量,但对MDA含量无显著影响。

图3 等渗 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 和 NaCl 胁迫对黄瓜幼苗叶片 PS II 光化学反应能量部分(P)、天线耗散能量部分(D)和 PS II 反应中心过剩光能(E_x)分配的影响Fig.3 Effects of iso-osmotic $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ and NaCl on allocation of photochemistry energy (P), dissipation energy (D) by antenna and excessive energy in PS II (E_x) of cucumber seedling leaves

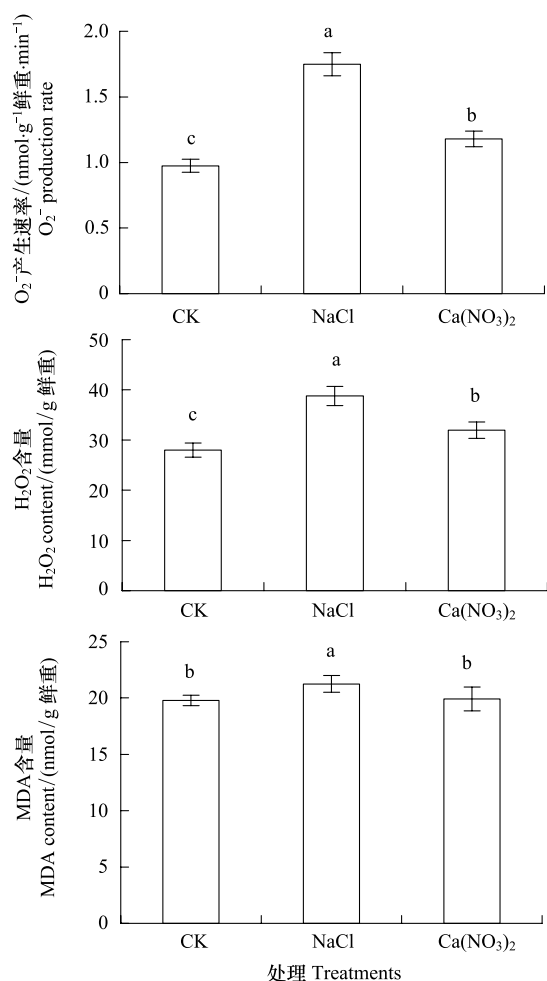


图4 等渗 $Ca(NO_3)_2$ 和 NaCl 胁迫对黄瓜幼苗叶片 O_2^- 产生速率、 H_2O_2 含量和 MDA 含量的影响

Fig.4 Effects of iso-osmotic $Ca(NO_3)_2$ and NaCl on O_2^- production rate, H_2O_2 and MDA content in cucumber seedling leaves

2.7 等渗 NaCl 和 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫对黄瓜幼苗叶片 SOD、POD、CAT 活性的影响

图5所示,NaCl胁迫下,黄瓜幼苗叶片 SOD 活性显著低于对照,而 POD 和 CAT 活性则高于对照; $Ca(NO_3)_2$ 胁迫下,黄瓜幼苗叶片 SOD、POD 和 CAT 活性均显著高于对照和 NaCl 胁迫处理。

2.8 等渗 NaCl 和 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫对黄瓜幼苗体内阳离子含量和离子吸收比率的影响

由表4可以看出,NaCl胁迫下,黄瓜幼苗各器官中的 Na^+ 含量显著升高, K^+ 含量显著下降,而 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量在各器官中的变化不一致; $Ca(NO_3)_2$ 胁迫下,黄瓜幼苗各器官中的 Na^+ 含量变化不明显,而使 Ca^{2+} 含量均显著升高, K^+ 和 Mg^{2+} 含量均有所降低。

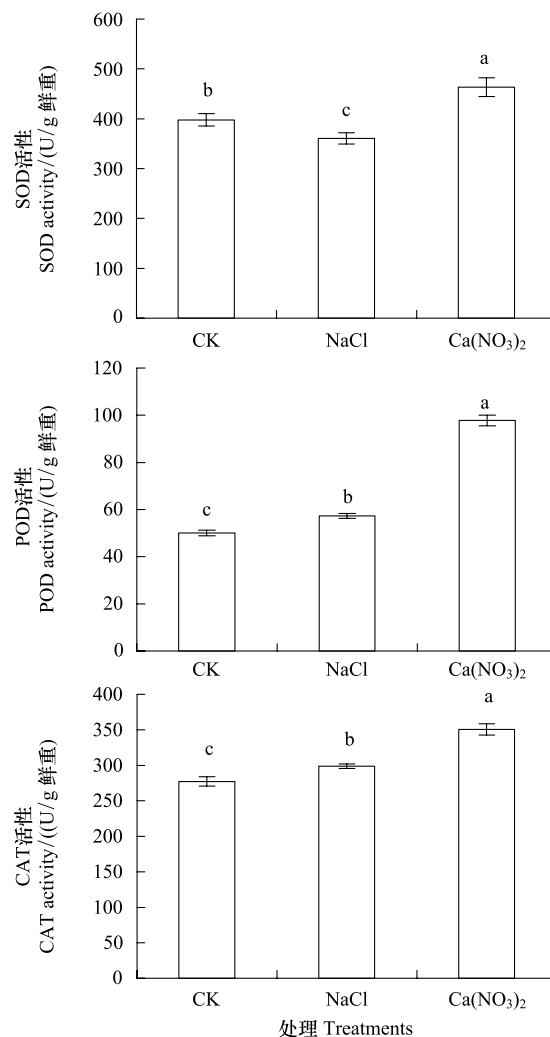


图5 等渗 NaCl 和 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫对黄瓜幼苗叶片 SOD、POD、CAT 活性的影响

Fig.5 Effects of iso-osmotic $Ca(NO_3)_2$ and NaCl stress on SOD, POD and CAT activities in leaves of cucumber seedlings

为了更准确反应胁迫条件下离子吸收状况,分析了胁迫条件对离子吸收比率的影响,结果表明,NaCl胁迫下,黄瓜幼苗根、茎、叶的 K/Na 、 Mg/Na 、 Ca/Na 比值均显著降低; $Ca(NO_3)_2$ 胁迫下,黄瓜幼苗根、茎、叶的 Ca/Na 比值显著升高(表5),而根、茎、叶的 K/Ca 、 Mg/Ca 均显著降低(表6)。

3 讨论

3.1 等渗 NaCl 和 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫对黄瓜幼苗生长的影响存在差异

盐胁迫下,由于植株碳同化量减少、渗透调节能耗和维持生长能耗增加等原因,一般会使植株生长量和积累量减少^[20]。本试验结果表明,75 mmol/L

表 4 等渗 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 和 NaCl 胁迫对黄瓜幼苗不同器官 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 含量的影响
Table 4 Effects of iso-osmotic $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ and NaCl stress on K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} and Ca^{2+} content in different organs of cucumber seedlings

处理 Treatments	根 Roots					茎 Stems					叶 Leaves				
	Na^+ (mg/g 干重)	K^+ (mg/g 干重)	Mg^{2+} (mg/g 干重)	Ca^{2+} (mg/g 干重)	Na^+ (mg/g 干重)	K^+ (mg/g 干重)	Mg^{2+} (mg/g 干重)	Ca^{2+} (mg/g 干重)	Na^+ (mg/g 干重)	K^+ (mg/g 干重)	Mg^{2+} (mg/g 干重)	Ca^{2+} (mg/g 干重)	Na^+ (mg/g 干重)	K^+ (mg/g 干重)	Ca^{2+} (mg/g 干重)
CK	0.36 ± 0.01 b	53.25 ± 2.25 a	2.76 ± 0.02 a	2.98 ± 0.02 c	1.54 ± 0.01 b	79.79 ± 0.49 a	3.03 ± 0.02 b	6.36 ± 0.05 c	0.35 ± 0.01 b	34.16 ± 0.98 a	4.38 ± 0.11 a	11.11 ± 0.41 b			
NaCl	22.34 ± 0.75 a	12.78 ± 0.65 c	2.08 ± 0.01 b	9.47 ± 0.15 b	33.54 ± 0.01 a	35.26 ± 0.05 c	4.34 ± 0.00 a	9.97 ± 0.04 b	23.21 ± 0.04 a	18.85 ± 0.06 c	3.11 ± 0.01 ab	3.95 ± 0.04 c			
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	0.35 ± 0.02 b	49.38 ± 1.80 b	1.81 ± 0.01 c	14.82 ± 0.11 a	1.51 ± 0.01 b	57.34 ± 0.24 b	2.90 ± 0.01 b	24.37 ± 0.12 a	0.19 ± 0.00 b	23.12 ± 0.08 b	2.42 ± 0.01 b	25.07 ± 0.05 a			

表 5 等渗 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 和 NaCl 胁迫对黄瓜幼苗不同器官离子吸收比率的影响
Table 5 Effects of iso-osmotic $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ and NaCl stress on ratios of cations absorption in different organs of cucumber seedlings

处理 Treatments	根 Roots			茎 Stems			叶 Leaves		
	K/Na	Mg/Na	Ca/Na	K/Na	Mg/Na	Ca/Na	K/Na	Mg/Na	Ca/Na
CK	149.86 ± 2.25 a	7.8 ± 0.07 a	8.42 ± 0.25 b	51.66 ± 0.19 a	1.96 ± 0.01 a	4.11 ± 0.05 b	97.17 ± 3.25 b	12.83 ± 4.19 a	31.47 ± 2.77 b
NaCl	0.57 ± 0.01 c	0.09 ± 0.00 c	0.43 ± 0.06 c	1.05 ± 0.00 c	0.13 ± 0.00 b	0.29 ± 0.00 c	0.81 ± 0.00 c	0.13 ± 0.00 b	0.17 ± 0.00 c
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	141.09 ± 3.07 b	5.17 ± 0.06 b	42.34 ± 0.23 a	37.97 ± 0.02 b	1.92 ± 0.08 a	16.14 ± 0.16 a	121.68 ± 7.76 a	12.74 ± 0.89 a	131.95 ± 9.74 a

表 6 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫对黄瓜幼苗不同器官 K/Ca、Mg/Ca 比值的影响Table 6 Effects of $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ stress on ratios of K/Ca, Mg/Ca in different organs of cucumber seedlings

处理 Treatments	根 Roots		茎 Stems		叶 Leaves	
	K/Ca	Mg/Ca	K/Ca	Mg/Ca	K/Ca	Mg/Ca
CK	17.87 ± 2.11 a	0.92 ± 0.02 a	12.55 0.40 a	0.48±0.01 a	3.07 ± 0.26 a	0.39± 0.16 a
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	3.33 ± 0.15 b	0.12 ± 0.04 b	2.35 ± 0.01 b	0.12± 0.01 b	0.92± 0.02 b	0.10± 0.01 b

NaCl 和 50 mmol/L $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 处理均显著抑制了黄瓜幼苗生长(表 2),这与董辉等^[8]的研究结果一致。本实验中, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫抑制黄瓜幼苗生长主要是抑制其地上部分的生长,而对根系生物量积累的影响不大(表 2)。之前的研究发现, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫显著影响了黄瓜幼苗根系的形态,使其根系伸长受到抑制,但侧根急剧缩短,分枝增多,导致侧根密度显著增大,根尖数增多,且根系平均直径变大^[21],这可能是 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫对黄瓜幼苗根系生物量积累无显著影响的主要原因。

3.2 黄瓜幼苗对等渗 NaCl 和 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫响应的光合特性差异

光合作用是植物生长发育的基础。盐胁迫下,由于渗透平衡被破坏,根系低水势引起植物叶片失水,气孔关闭或开度减小, CO_2 供应不足,导致植物光合速率下降^[22,19]。本试验也得到了类似的结果(图 1)。目前认为,盐胁迫导致光合作用效率下降的主要原因有以下两个因素:① 气孔关闭,导致胞间 CO_2 浓度下降,用于光合作用的原料减少,即气孔因素;② 非气孔因素^[23],如 CO_2 同化能力降低、光合电子传递受阻、光合膜蛋白的减少^[24]、能量消耗增多、光合色素含量减少^[25]等。然而,限制光合作用的气孔因素、非气孔因素二者之间并不是相互独立的^[26],在气孔因素发挥主导作用的同时,非气孔因素同样在发挥作用。为了更好地理解 NaCl 与 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫下,黄瓜幼苗叶片 P_n 降低的非气孔限制,分析了二种盐胁迫下黄瓜幼苗的叶绿素荧光参数,发现 F_v/F_m 和 F_v/F_o 均显著降低(图 2),说明 PS II 原初光能转化效率和 PS II 的潜在活性降低,PS II 受到了损伤^[27]。但是,在 NaCl 胁迫下, F'_v/F'_m 和 Φ_{PSII} 显著降低(图 2),说明 PS II 反应中心原初光能捕获效率和实际原初光能捕获效率均降低,特别是 Φ_{PSII} 的降低阻止了植株同化力(NADPH、ATP)的形成,同时 qP 显著降低,光合电子传递受到抑制^[28],从而影响了植株对碳的固定和同化;而 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫对

F'_v/F'_m 、 Φ_{PSII} 和 qP 无明显影响(图 2),表明 CO_2 固定和同化没有受到影响。至此,可以认为,NaCl 胁迫导致黄瓜幼苗光合速率降低,是由于在气孔导度降低而造成 CO_2 扩散至叶肉细胞受到限制的同时,碳同化能力也降低;而 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫导致黄瓜幼苗 P_n 降低,主要是因为气孔因素造成的 CO_2 供应减少所致。当然,NaCl 胁迫下黄瓜幼苗 qN 显著升高,不难理解为捕获的光能不能完全通过光合电子传递给 PS II 反应中心时,为了避免过剩光能对光合器官的损伤,通过非光化学的形式予以耗散。

3.3 黄瓜幼苗对等渗 NaCl 和 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫响应的活性氧代谢差异

当植物叶片吸收的光能除了用于光化学反应、热耗散和荧光发射外仍有过剩时,短期内植物发生光抑制,净光合速率降低^[29];长期则使过剩光能激发 Chl 分子变为三线态叶绿素分子($^3\text{Chl}^*$), $^3\text{Chl}^*$ 释放电子与 O_2 结合形成破坏性更强的自由基如 O_2^- 、 H_2O_2 、羟自由基($\text{OH}^\cdot$)等,进而破坏膜系统和 Chl 分子^[30],导致膜质过氧化。本实验结果表明,NaCl 胁迫引起黄瓜幼苗叶片用于光化学反应的能量部分 P 显著降低(图 3),促使 PS II 反应中心过剩能量 E_x 显著升高,而这些过剩光能不能通过热耗散等途径有效耗散(D 无明显变化),从而激发形成了大量 O_2^- 、 H_2O_2 等 ROS,加重了膜质过氧化伤害程度(图 4),并导致总叶绿素尤其是 Chl a 显著降低(表 3);而 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫对 P 和 D 无明显影响,从而使 E_x 升高幅度有限(升高 6.95%),激发形成的 ROS 伤害程度较小。

正常情况下,植物体内存在 ROS 清除系统,使植物在生命活动中产生的 ROS 处于产生和消除的动态平衡,从而使植物免受 ROS 伤害。其中,SOD 与 CAT、POD 以及 B_2 胡萝卜素等抗氧化剂协同作用,可防御 ROS 等自由基对细胞膜系统的伤害。当植物处于盐胁迫等逆境时,ROS 动态平衡被打破,产生大量 ROS,造成植物体产生严重的膜质过氧化伤害,并导

致光合色素含量降低,影响植株的光合性能^[31]。本实验结果表明, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫下,黄瓜幼苗叶片 SOD、POD 和 CAT 活性均显著升高(图 5),ROS 清除能力增强,并未对黄瓜幼苗植株造成严重的膜质过氧化伤害;而 NaCl 胁迫下,尽管 POD 和 CAT 活性显著升高,但升高幅度不大,再加上 SOD 活性显著降低(图 5),对 ROS 清除能力有限,导致 ROS 积累(图 4),引起了膜质过氧化产物 MDA 积累(图 4)和 Chl 含量降低(表 3)。

3.4 黄瓜幼苗对等渗 NaCl 和 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫响应的离子吸收特性差异

盐胁迫对作物造成的危害主要有离子毒害、渗透胁迫和营养失衡^[32],这些危害均与作物对盐分离子的吸收累积有着直接和间接的关系^[33],而维持细胞内离子动态平衡是植物在盐胁迫下生存的基础^[34]。本实验结果表明,NaCl 胁迫下,黄瓜幼苗各器官中的 Na^+ 含量显著升高(表 4),根、茎、叶中的 K/Na 、 Mg/Na 、 Ca/Na 比值均显著降低(表 5),离子平衡被打破, Na^+ 与 K^+ 、 Ca^{2+} 等各种营养元素相互竞争而造成植株矿质营养胁迫,严重影响黄瓜幼苗植物正常生长。 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫下,黄瓜幼苗各器官中的 Ca^{2+} 含量显著升高,而 K^+ 和 Mg^{2+} 含量均有所降低(表 4),致使 K/Ca 、 Mg/Ca 比值显著降低(表 5),离子平衡同样被打破。尽管 Ca^{2+} 在植物生长发育中起着重要的作用,作为第二信使参与植物体内的许多生理过程^[35],如激活 NAD 激酶、膜结合蛋白激酶及 Ca^{2+} -ATP 酶(Ca^{2+} -ATPase)等许多酶的活性,还可通过调节保卫细胞内膨压的变化影响气孔的开放^[36],但是,高钙胁迫则会造成细胞骨架和生物膜结构的破坏,并最终导致细胞内物质代谢的紊乱等^[37]。尽管如此,植物细胞积累过多的 Na^+ 要比积累过多的 Ca^{2+} 对植物体的伤害作用要大,这是因为 Na^+ 在细胞中大量积累,不仅会改变细胞膜系统的结构和功能,而且会导致光合作用中具有重要作用的酶活性降低。如在 NaCl 胁迫下,玉米幼苗的苹果酸脱氢酶(MDH)、磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶(PEPC)以及 RuBP 羧化酶的活性都显著降低^[38]。这就不难解释在本实验中,NaCl 胁迫下黄瓜幼苗植株碳同化能力降低的原因,而 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫对碳同化的影响不大。

综上所述,黄瓜幼苗对等渗 NaCl 和 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$

胁迫的生理响应存在差异。NaCl 胁迫下黄瓜幼苗体内 Na^+ 大量积累,不仅限制了环境中 CO_2 进入叶肉细胞,而且使碳同化能力降低,加之 ROS 清除能力有限,不能有效清除 PS II 反应中心过剩能量所导致的 ROS,因而产生了严重的膜质过氧化,影响了植株生长和光合速率;而 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫下,黄瓜幼苗碳同化能力没有受到影响,ROS 也能够被抗氧化系统有效清除,植株没有产生严重的膜质过氧化,因而对生长和光合速率的影响没有 NaCl 胁迫大。

References:

- [1] Liang Y C, Si J, Nikolic M, Peng Y, Chen W, Jiang Y. Organic manure stimulates biological activity and barley growth in soil subject to secondary salinization. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(6): 1185-1195.
- [2] Yu H Y, Li T X, Zhou J M. Secondary salinization of greenhouse soil and its effects on soil properties. *Soils*, 2005, 37(6): 581-586.
- [3] Li D P, Wu Z J, Liang C H, Chen L J. Characteristics and regulation of greenhouse soil environment. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(5): 192-197.
- [4] Sun Y D, Luo W R, Li X Z, Qi A G. Effects of $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ stress on the growth and physiological indexes of cucumber seedlings. *Environmental Science and Information Application Technology*, 2009, 1: 268-271.
- [5] Jin C Y, Sun J, Guo S R. Effects of exogenous spermidine on growth and active oxygen metabolism in cucumber seedlings under $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ stress. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2010, 30(8): 1627-1633.
- [6] Zhang G W, Liu Z L, Zhou J G, Zhu Y L. Effects of $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ stress on oxidative damage, antioxidant enzymes activities and polyamine contents in roots of grafted and non-grafted tomato plants. *Plant Growth Regulation*, 2008, 56(1): 7-19.
- [7] Tong Y W, Chen D F. Study on the cause and control of secondary saline soils in greenhouse. *Acta Horticulturae Sinica*, 1991, 18(2): 159-162.
- [8] Tong H, Sun J, Guo S R, Zhang Z X. Effects of iso-osmotic $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ and NaCl stress on the growth and osmotic substances of cucumber seedlings. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2012, 32(2): 306-311.
- [9] Wang L P, Sun J, Guo S R, Tian J, Lu X M, Yang Y J. Growth and reactive oxygen metabolism in different cucumber grafted rootstock seedlings under $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ or NaCl stress. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2011, 31(10): 2045-2051.
- [10] Liu Z Y, Zhu Z J, Qian Y R, Yu J Q. Effect of iso-osmotic $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ and NaCl on growth of tomato seedlings. *Acta Horticulturae Sinica*, 2001, 28(1): 31-35.
- [11] Shen W Q. Extraction of mixed solution for determination of chlorophyll content in rice leaf blade. *Plant Physiology Communications*, 1988, 24(3): 62-64.
- [12] Wang A G, Luo G H. Quantitative relation between the reaction of hydroxylamine and superoxide anion radicals in plants. *Plant Physiology Communications*, 1990, 26(6): 55-57.
- [13] Uchida A, Jagendorf A T, Hibino T, Takabe T, Takabe T. Effects of hydrogen peroxide and nitric oxide on both salt and heat stress tolerance in rice. *Plant Science*, 2002, 163(3): 515-523.
- [14] Heath R L, Packer L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts:

- I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. Archives of Biochemistry and Biophysics, 1968, 125(1): 189-198.
- [15] Dhindsa R S, Plumb-Dhindsa P, Thorpe T A. Leaf senescence: correlated with increased levels of membrane permeability and lipid peroxidation, and decreased levels of superoxide dismutase and catalase. Journal of Experimental Botany, 1981, 32(1): 93-101.
- [16] Kochba J, Lavee S, Spiegel-Roy P. Differences in peroxidase activity and isoenzymes in embryogenic and non-embryogenic 'Shamouti' orange ovular callus lines. Plant and Cell Physiology, 1977, 18(2): 463-467.
- [17] Berry J A, Downton W J S. Environmental regulation of photosynthesis // Govindjee N Y, ed. Photosynthesis, Development, Carbon Metabolism, and Plant Productivity, vol. 2. New York: Academic Press, 1982: 263-343.
- [18] Deming-Adams B, Adams III W W, Barker D H, Logan B A, Bowling D R, Verhoeven A S. Using chlorophyll fluorescence to assess the fraction of absorbed light allocated to thermal dissipation of excess excitation. Physiologia Plantarum, 1996, 98(2): 253-264.
- [19] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis. Annual Review of Plant Physiology, 1982, 33(1): 317-345.
- [20] Luo Q Y, Yu B J, Liu Y L. Effect of NaCl on the growth, K^+ , Na^+ and Cl^- distribution in seedlings of 6 soybean cultivars (*Glycine max* L. Merrill). Soybean Science, 2001, 20(3): 177-182.
- [21] Tong H, Sun J, Guo S R, Zhang Z X. Effects of iso-osmotic $Ca(NO_3)_2$ and NaCl stress on root morphology and activity of cucumber seedlings. Journal of Nanjing Agricultural University, 2012, 35(3): 37-41.
- [22] Kao W Y, Tsai T T, Shih C N. Photosynthetic gas exchange and chlorophyll a fluorescence of three wild soybean species in response to NaCl treatments. Photosynthetica, 2003, 41(3): 415-419.
- [23] Mehta P, Jajoo A, Mathur S, Bharti S. Chlorophyll a fluorescence study revealing effects of high salt stress on photosystem II in wheat leaves. Plant Physiology and Biochemistry, 2010, 48(1): 16-20.
- [24] Munns R, Tester M. Mechanisms of salinity tolerance. Annual Review of Plant Biology, 2008, 59(1): 651-681.
- [25] Shu S, Yuan L Y, Guo S R, Sun J, Liu C J. Effects of exogenous spermidine on photosynthesis, xanthophyll cycle and endogenous polyamines in cucumber seedlings exposed to salinity. African Journal of Biotechnology, 2012, 11(22): 6064-6074.
- [26] Shu S, Guo S R, Sun J, Yuan Y H, Yuan L Y. Research progress on photosynthesis under salt Stress. China Vegetables, 2012, (18): 53-61.
- [27] Lu C M, Zhang Q D, Kuang T Y. The effects of water stress on the chlorophyll a fluorescence induction kinetics in wheat seedlings. Acta Biophysica Sinica, 1993, 9(3): 453-457.
- [28] Genty B, Briantais J M, Baker N R. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence. Biochimica et Biophysica Acta, 1989, 990(1): 87-92.
- [29] Foryer C H, Noctor G. Leaves in the dark see the light. Science, 1999, 284(5414): 599-601.
- [30] Reinbothe S, Reinbothe C. The regulating of enzymes involved in chlorophyll biosynthesis. European Journal of Biochemistry, 1996, 237(2): 323-343.
- [31] Takahashi S, Murata N. How do environmental stresses accelerate photoinhibition? Trends in Plant Science, 2008, 13(4): 178-182.
- [32] Zhu H J, Wang R G, Chen S L, Zhang Y X, Li N Y, Shao J. Genotypic differences between *Populus euphratica* and *P. Popularis* in antioxidative ability and salt tolerance under NaCl stress. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(10): 4113-4121.
- [33] Ma C L, Liu X H, Wang X P. Study on the growth and characteristics of mineral nutrition and ion absorption of pomelo seedlings under salt stress. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(3): 319-323.
- [34] Niu X, Bressan R A, Hasegawa P M, Pardo J M. Ion homeostasis in NaCl stress environments. Plant Physiology, 1995, 109(3): 735-742.
- [35] Dieter P. Calmodulin and calmodulin-mediated progress in plants. Plant, Cell and Environment, 1986, 7: 371-380.
- [36] Willmer C M, Mansfield T A. A critical examination of the use of detached epidermis in studies of stomatal physiology. The New Phytologist, 1969, 68(2): 363-375.
- [37] Bangerth F. Calcium-related physiological disorders of plants. Annual Review of Phytopathology, 1979, 17(1): 97-122.
- [38] Guo S K, Zhao K F. The possible mechanisms of NaCl inhibit photosynthesis of maize seedlings. Acta Phytophysiologica Sinica, 2001, 27(6): 461-466.

参考文献:

- [2] 余海英, 李廷轩, 周健民. 设施土壤次生盐渍化及其对土壤性质的影响. 土壤, 2005, 37(6): 581-586.
- [3] 李东坡, 武志杰, 梁成华, 陈利军. 设施土壤生态环境特点与调控. 生态学杂志, 2004, 23(5): 192-197.
- [5] 金春燕, 孙锦, 郭世荣. 外源亚精胺对 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫下黄瓜幼苗生长和活性氧代谢的影响. 西北植物学报, 2010, 30(8): 1627-1633.
- [7] 童有为, 陈淡飞. 温室土壤次生盐渍化的形成和治理途径研究. 园艺学报, 1991, 18(2): 159-162.
- [8] 童辉, 孙锦, 郭世荣, 张振兴. 等渗 $Ca(NO_3)_2$ 和 NaCl 胁迫对黄瓜幼苗生长及渗透调节物质含量的影响. 西北植物学报, 2012, 32(2): 306-311.
- [9] 王丽萍, 孙锦, 郭世荣, 田婧, 陆晓民, 阳燕娟. 等渗 $Ca(NO_3)_2$ 和 NaCl 胁迫对黄瓜幼苗用南瓜幼苗生长和活性氧代谢的影响. 西北植物学报, 2011, 31(10): 2045-2051.
- [10] 刘志媛, 朱祝军, 钱亚榕, 喻景权. 等渗 $Ca(NO_3)_2$ 和 NaCl 对番茄幼苗生长的影响. 园艺学报, 2001, 28(1): 31-35.
- [11] 沈伟其. 测定水稻叶片叶绿素含量的混合液提取法. 植物生理学通讯, 1988, 24(3): 62-64.
- [12] 王爱国, 罗广华. 植物的超氧化物自由基与羟胺反应的定量关系. 植物生理学通讯, 1990, 26(6): 55-57.
- [20] 罗庆云, 於丙军, 刘友良. 大豆苗期耐盐性鉴定指标的检验. 大豆科学, 2001, 20(3): 177-182.
- [21] 童辉, 孙锦, 郭世荣, 张振兴. 等渗 $Ca(NO_3)_2$ 和 NaCl 胁迫对黄瓜幼苗根系形态及活力的影响. 南京农业大学学报, 2012, 35(3): 37-41.
- [26] 束胜, 郭世荣, 孙锦, 袁颖辉, 袁凌云. 盐胁迫下植物光合作用的研究进展. 中国蔬菜, 2012, (18): 53-61.
- [27] 卢从明, 张其德, 匡廷云. 水分胁迫对小麦叶绿素 a 荧光诱导动力学的影响. 生物物理学报, 1993, 9(3): 453-457.
- [32] 朱会娟, 王瑞刚, 陈少良, 张云霞, 李妮亚, 邵杰. NaCl 胁迫下胡杨 (*Populus euphratica*) 和群众杨 (*P. Popularis*) 抗氧化能力及耐盐性. 生态学报, 2007, 27(10): 4113-4121.
- [33] 马翠兰, 刘星辉, 王湘平. 盐胁迫下柚实生苗生长、矿质营养及离子吸收特性研究. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(3): 319-323.
- [38] 郭书奎, 赵可夫. NaCl 胁迫抑制玉米幼苗光合作用的可能机理. 植物生理学报, 2001, 27(6): 461-466.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.7 Apr., 2014 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- The 5000-year climate change of northeastern Qinghai-Tibetan Plateau and historical ecology of Zoige wetlands HE Yixin, WU Ning, ZHU Qiu'an, et al (1615)
- Altitudinal distribution rule of *Picea schrenkiana* forest's soil organic carbon and its influencing factors Aminem ELI, CHANG Shunli, ZHANG Yutao, et al (1626)

Autecology & Fundamentals

- Daily stem radial variation of *Pinus koraiensis* and its response to meteorological parameters in Xiaoxing'an mountain LI Xinghuan, LIU Ruipeng, MAO Zijun, et al (1635)
- Effects of logging residues on surface soil biochemical properties and enzymatic activity WU Bobo, GUO Jianfen, WU Junjun, et al (1645)
- Characteristics of soil macroaggregates under typical forests in Pangquangou Nature Reserve BAI Xiumei, HAN Youzhi, GUO Hanqing (1654)
- Modeling tree crown structure of Simao pine (*Pinus kesiya* var. *langbianensis*) natural forest OU Guanglong, XIAO Yifa, WANG Junfeng, et al (1663)
- Influence of magnesium deficiency and excess on chlorophyll fluorescence characteristics of Newhall navel orange leaves LING Lili, HUANG Yi, PENG Liangzhi, et al (1672)
- Seed foraging and dispersal of Chinese yew (*Taxus chinensis* var. *mairei*) by frugivorous birds within patchy habitats LI Ning, WANG Zheng, LU Changhu, et al (1681)
- Interactions between heavy metal lead and two freshwater algae LIU Lu, YAN Hao, LI Cheng, et al (1690)
- Annual variations of the primary productivity and its size-fractioned structure in culture ponds of *Apostichopus japonicus* Selenka JIANG Senhao, ZHOU Yibing, TANG Boping, et al (1698)
- Growth and photosynthetic activity of *Microcystis* colonies after gut passage through silver carp and bighead carp WANG Yinping, GU Xiaohong, ZENG Qingfei, et al (1707)
- Contents of two coumarins in *Ipomoea cairica* and their effects on *Pomacea canaliculata*, *Orzya sativa*, and *Echinochloa crusgalli* YOU Changyan, YANG Yu, HU Fei, et al (1716)

Population, Community and Ecosystem

- Population and habitat status of Asian elephants (*Elephas maximus*) in Mengla Sub-reserve of Xishuangbanna National Nature Reserve, Yunnan of China LIN Liu, JIN Yanfei, CHEN Dekun, et al (1725)
- Seasonal changes of functional guilds of fish community in Laizhou Bay, East China LI Fan, XU Bingqing, MA Yuanqing, et al (1736)
- Effect of long-term fertilization pattern on weed community diversity in wheat field JIANG Min, SHEN Mingxing, SHEN Xinpeng, et al (1746)
- Ecological process of water transformation in furrow and ridge mulching system in oat field under extreme drought scenario ZHOU Hong, ZHANG Hengjia, MO Fei, et al (1757)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Simulations and analysis on the effects of landscape pattern change on flood and low flow based on SWAT model LIN Bingqing, CHEN Xingwei, CHEN Ying, et al (1772)
- Phenological variation of alpine grasses (Gramineae) in the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau, China during the last 20 years XU Weixin, XIN Yuanchun, ZHANG Juan, et al (1781)
- Landscape aesthetics in different areas of Lijiang City GUO Xianhua, ZHAO Qianjun, CUI Shenghui, et al (1794)
- Temporal and spatial pattern of *Scenedesmus* in the river web of the Pearl River Delta, China WANG Chao, LI Xinhui, LAI Zini, et al (1800)

- Spatiotemporal dynamics of bacterial abundance and related environmental parameters in Lake Bosten WANG Bowen, TANG Xiangming, GAO Guang, et al (1812)
- Scale domain recognition for land use spatial fractal feature based on genetic algorithm WU Hao, LI Yan, SHI Wenzhong, et al (1822)
- Relationships of stable carbon isotope of *Abies faxoniana* tree-rings to climate in sub-alpine forest in Western Sichuan JIN Xiang, XU Qing, LIU Shirong, et al (1831)
- An exploratory spatial data analysis-based investigation of the hot spots and variability of *Ommastrephes bartramii* fishery resources in the northwestern Pacific Ocean FENG Yongjiu, CHEN Xinjun, YANG Mingxia, et al (1841)
- Urban, Rural and Social Ecology**
- Spatial differentiation research of non-use value WTP based on the residents' ecological cognition: taking the sanjiang plain as a case GAO Qin, AO Changlin, CHEN Hongguang, et al (1851)
- Contamination characteristics in surface water and coastal groundwater of Hunhe River CUI Jian, DU Jizhong, WANG Xiaoguang (1860)
- Social ecological system and vulnerability driving mechanism analysis YU Zhongyuan, LI Bo, ZHANG Xinshi (1870)
- Research Notes**
- Effects of iso-osmotic $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ and NaCl stress on growth and physiological characteristics of cucumber seedlings ZHOU Heng, GUO Shirong, SHAO Huijuan, et al (1880)
- View Point**
- The discussion about the designation and content of ecological conservation and construction SHEN Guofang (1891)

《生态学报》2014 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,280 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 魏辅文

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 34 卷 第 7 期 (2014 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 7 (April, 2014)

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

国内外公开发刊

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元