

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

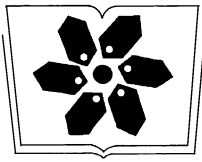
## Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 17 期 Vol.33 No.17 **2013**

中国生态学会  
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 17 期 2013 年 9 月 (半月刊)

## 目次

### 前沿理论与学科综述

- 植物角质层蜡质的化学组成研究综述 ..... 曾 琼, 刘德春, 刘 勇 (5133)
- 中国滨海盐沼湿地碳收支与碳循环过程研究进展 ..... 曹 磊, 宋金明, 李学刚, 等 (5141)

### 个体与基础生态

- 秸秆隔层对盐碱土水盐运移及食葵光合特性的影响 ..... 赵永敢, 逢焕成, 李玉义, 等 (5153)
- 盐地碱蓬二型性种子及其幼苗对盐渍环境的适应性 ..... 刘 艳, 周家超, 张晓东, 等 (5162)
- 不同抗旱性花生品种的根系形态发育及其对干旱胁迫的响应 ..... 丁 红, 张智猛, 戴良香, 等 (5169)
- 夏季苹果新梢生理指标与抗苹果绵蚜的关系 ..... 王西存, 周洪旭, 于 毅, 等 (5177)
- 花期海蓬子对盐胁迫的生理响应 ..... 刘伟成, 郑春芳, 陈 琛, 等 (5184)
- 白蜡多年卧孔菌生物学特性及驯化栽培 ..... 鲁 铁, 图力古尔 (5194)
- 重度火烧迹地微地形对土壤微生物特性的影响——以坡度和坡向为例 .....  
..... 白爱芹, 傅伯杰, 曲来叶, 等 (5201)
- 秸秆还田与施肥对稻田土壤微生物生物量及固氮菌群落结构的影响 ..... 刘骁蓓, 涂仕华, 孙锡发, 等 (5210)
- 大穗型小麦叶片性状、养分含量及氮素分配特征 ..... 王丽芳, 王德轩, 上官周平 (5219)
- 复合不育剂 EP-1 对小鼠空间记忆与焦虑行为的影响 ..... 王晓佳, 秦婷婷, 胡 霞, 等 (5228)

### 种群、群落和生态系统

- 小兴安岭阔叶红松混交林林隙特征 ..... 刘少冲, 王敬华, 段文标, 等 (5234)
- 高寒矮嵩草群落退化演替系列氮、磷生态化学计量学特征 ..... 林 丽, 李以康, 张法伟, 等 (5245)
- 中亚热带人工针叶林生态系统碳通量拆分差异分析 ..... 黄 昆, 王绍强, 王辉民, 等 (5252)
- 高寒山区一年生混播牧草生态位对密度的响应 ..... 赵成章, 张 静, 盛亚萍 (5266)
- 乳山近海大型底栖动物功能摄食类群 ..... 彭松耀, 李新正 (5274)

### 景观、区域和全球生态

- 采伐干扰对大兴安岭落叶松-苔草沼泽植被碳储量的影响 ..... 牟长城, 卢慧翠, 包 旭, 等 (5286)
- 西南喀斯特地区轮作旱地土壤 CO<sub>2</sub> 通量 ..... 房 彬, 李心清, 程建中, 等 (5299)
- 干湿季节下基于遥感和电磁感应技术的塔里木盆地北缘绿洲土壤盐分的空间变异性 .....  
..... 姚 远, 丁建丽, 雷 磊, 等 (5308)
- 东北温带次生林和落叶松人工林土壤 CH<sub>4</sub> 吸收和 N<sub>2</sub>O 排放通量 ..... 孙海龙, 张彦东, 吴世义 (5320)
- 新疆东部天山蝶类多样性及其垂直分布 ..... 张 鑫, 胡红英, 吕昭智 (5329)
- 玉米农田空气动力学参数动态及其与影响因子的关系 ..... 蔡 福, 周广胜, 明惠青, 等 (5339)

天山北坡家庭牧场复合系统对极端气候的响应过程..... 李西良,侯向阳,丁 勇,等 (5353)

大城市边缘区景观破碎化空间异质性——以北京市顺义区为例..... 李 灿,张凤荣,朱泰峰,等 (5363)

资源与产业生态

基于 GLBM 模型的中国大陆阿根廷滑柔鱼鱿钓渔业 CPUE 标准化 ..... 陆化杰,陈新军,曹 杰 (5375)

三峡库区古夫河水质时空分异特征..... 冉桂花,葛继稳,苗文杰,等 (5385)

城乡与社会生态

汉、藏、回族地区农户的环境影响——以甘肃省张掖市、甘南藏族自治州、临夏回族自治州为例.....

..... 赵雪雁,毛笑文 (5397)

研究简报

中国近海浮游动物群落结构及季节变化..... 杜明敏,刘镇盛,王春生,等 (5407)

海洋污染物对菲律宾蛤仔的免疫毒性..... 丁鉴锋,闫喜武,赵力强,等 (5419)

衰亡期沉水植物对水和沉积物磷迁移的影响..... 王立志,王国祥 (5426)

伊洛河流域外来草本植物分布格局..... 郭屹立,丁圣彦,苏 思,等 (5438)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 316 \* zh \* P \* ¥90.00 \* 1510 \* 32 \* 2013-09



**封面图说:** 帽儿山次生林林相——帽儿山属于长白山山脉的张广才岭西坡,松花江南岸支流阿什河的上游,最高海拔 805m,由侏罗纪中酸性火山岩构成,是哈尔滨市附近的最高峰,因其貌似冠状而得名。东北林业大学于 1958 年在此建立了实验林场。山上生长着松树、榆树、杨树及各种灌木等,栖息着山鸡、野兔等野生动物,在茂密的草地上还生长有各种蘑菇。其地带性植被为温带针阔混交林,目前状况为天然次生林。部分地方次生林转变为落叶松人工林后,落叶松林地的凋落物层影响了林地土壤水分的格局。

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/stxb201205250778

刘伟成, 郑春芳, 陈琛, 彭益全, 曾国权, 冀德伟, 陈少波, 谢起浪, 於俊琦. 花期海蓬子对盐胁迫的生理响应. 生态学报, 2013, 33(17): 5184-5193.  
Liu W C, Zheng C F, Chen C, Peng Y Q, Zeng G Q, Ji D W, Chen S B, Xie Q L, Yu J Q. Physiological responses of *Salicornia bigelovii* to salt stress during the flowering stage. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(17): 5184-5193.

## 花期海蓬子对盐胁迫的生理响应

刘伟成<sup>1,2</sup>, 郑春芳<sup>1,2,\*</sup>, 陈琛<sup>1,2</sup>, 彭益全<sup>3</sup>, 曾国权<sup>1,2</sup>, 冀德伟<sup>1,2</sup>,  
陈少波<sup>1,2</sup>, 谢起浪<sup>1,2</sup>, 於俊琦<sup>1,2</sup>

(1. 浙江省海洋水产养殖研究所, 浙江省近岸水域生物资源开发与保护重点实验室, 温州 325005;

2. 浙江永兴水产种业有限公司, 温州 325005;

3. 南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏省海洋生物学重点实验室, 南京 210095)

**摘要:**研究了花期阶段不同浓度 NaCl (0、10‰、20‰、30‰、40‰、50‰ 和 60‰) 对海蓬子 (*Salicornia bigelovii*) 生长、光合色素、光合参数、抗氧化和离子含量的影响。结果表明: 10‰ NaCl 盐处理下海蓬子株高、茎生物量、叶绿素 (Chl) 含量、净光合速率 ( $P_n$ )、气孔导度 ( $G_s$ )、蒸腾速率 ( $T_r$ )、胞间  $CO_2$  浓度 ( $C_i$ )、茎 SOD 活性和 POD 活性等指标值均显著高于其它处理, 而高盐 (40‰ NaCl 及其以上) 胁迫下, 上述指标值均表现为下降, 同时茎  $K^+$  含量也显著下降, 而茎  $Na^+$ 、 $Cl^-$ 、 $Na^+/K^+$  和 MDA 含量等显著上升。相关分析显示, 生物量与 Chl a/Chl b 呈现显著正相关, 与株高、茎  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $C_i$ 、 $T_r$ 、Chl 含量、 $K^+$  含量、SOD 和 POD 活性呈现极显著正相关, 与气孔限制值 ( $L_s$ )、Car/Chl、MDA 含量、 $Cl^-$  含量和  $Na^+/K^+$  等均呈极显著负相关。综上所述, 10‰ NaCl 处理是花期海蓬子生长和光合生长的最适宜盐度, 而无盐和高盐下海蓬子光合抑制主要是来自气孔因素, 同时高盐胁迫下还伴随着非气孔限制。

**关键词:** 海蓬子; NaCl 胁迫; 光合特性; 叶绿素; 离子吸收

## Physiological responses of *Salicornia bigelovii* to salt stress during the flowering stage

LIU Weicheng<sup>1,2</sup>, ZHENG Chunfang<sup>1,2,\*</sup>, CHEN Chen<sup>1,2</sup>, PENG Yiquan<sup>3</sup>, ZENG Guoquan<sup>1,2</sup>, JI Dewei<sup>1,2</sup>, CHEN Shaobo<sup>1,2</sup>, XIE Qilang<sup>1,2</sup>, YU Junqi<sup>1,2</sup>

1 Zhejiang Mariculture Research Institute, Zhejiang Key Laboratory of Exploitation and Preservation of Coastal Bio-resource, Wenzhou, Zhejiang 325005, China

2 Zhejiang Yongxing Kinds of Aquatic Products Industry Co., Ltd., Wenzhou, Zhejiang 325005, China

3 Jiangsu Provincial Key Laboratory of Marine Biology, College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

**Abstract:** Soil salinity has become an important issue in agriculture. One of the most urgent global problems is to provide enough water and land to meet the world's food needs. Sodium in soil adversely affects the growth and yield of most crop plants, as most crop species are highly sensitive to saline conditions. However, it is estimated that approximately 15% of undeveloped land in the world's coastal and inland salt deserts would be suitable for growing crops using saltwater for irrigation. The idea of using seawater for crop production along coastal deserts has been proposed over the past 30 years. These alternative sources of water and land could be used for cultivation of specialized, salt-tolerant crops. *Salicornia*

**基金项目:** 浙江省科技计划项目 (2010F20007, 2011F20032); 浙江省海洋经济和渔业新兴产业“海涂海水蔬菜种植与水产养殖复合高效利用技术开发与示范”; 浙江省重大科技资助项目 (2012C12017-3); 温州市科技计划项目 (S20110010)

**收稿日期:** 2012-05-25; **修订日期:** 2012-10-23

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zcfa66@126.com

*bigelovii*, a plant that can be used to treat a variety of diseases, is one the most promising halophytes for cultivation in such areas. *S. bigelovii* is a leafless, fast-growing, annual succulent. It is one of the most salt-tolerant plants, and is capable of growing under highly saline conditions on salt marshes. Consequently, it is considered to be a promising crop for cultivation in subtropical coastal deserts. Unfortunately, high salinity and water scarcity still adversely affect the physiological functions of this plant. We investigated the effects of different concentrations of NaCl (0, 10‰, 20‰, 30‰, 40‰, 50‰, and 60‰) on growth, photosynthesis, chlorophyll and carotenoids contents, the contents of  $K^+$  and  $Na^+$ , and components of the antioxidant system of *S. bigelovii* during the flowering stage. The results showed that the values for plant height, shoot biomass, chlorophyll content, net photosynthetic rate ( $P_n$ ), stomatal conductance ( $G_s$ ), transpiration rate ( $Tr$ ), intercellular  $CO_2$  concentration ( $C_i$ ), and activities of peroxidase and superoxide dismutase in the shoot were much greater in plants in the 10‰ NaCl treatment than in those treated with higher concentrations of NaCl. Plant height and biomass were both significantly decreased in the 40‰–60‰ NaCl treatments. High NaCl stress resulted in decreased contents of chlorophyll and carotenoids, lower  $P_n$ ,  $G_s$ ,  $Tr$ , and  $C_i$ , decreased activities of superoxide dismutase and peroxidase, and lower  $K^+$  content. High concentrations of NaCl increased the contents of malondialdehyde (a product of lipid peroxidation),  $Na^+$ , and  $Cl^-$ , and also markedly increased the  $Na^+/K^+$  ratio. Correlation analysis indicated that the biomass of *S. bigelovii* during the flowering stage was significantly positively related to the chlorophyll a/b ratio, and was highly significantly positively related to plant height,  $P_n$ ,  $G_s$ ,  $C_i$ ,  $Tr$ , chlorophyll content,  $K^+$  content, and superoxide dismutase and peroxidase activities in the shoot. In contrast, biomass was highly significantly negatively related to  $L_s$ , the carotenoids/chlorophyll ratio, malondialdehyde content,  $Cl^-$  content, and the  $Na^+/K^+$  ratio. In summary, *S. bigelovii* showed optimal growth in the 10‰ NaCl treatment. Stomatal inhibition was the main cause for the reduction in  $P_n$  of *S. bigelovii* in the no-salt and high-salt treatments, while both stomatal restriction and non-stomatal restriction occurred in the 60‰ NaCl treatment.

**Key Words:** *Salicornia bigelovii*; NaCl stress; photosynthetic characteristics; chlorophyll; ion absorption

海蓬子 (*Salicornia bigelovii* Torr.) 为 1 年生真盐生草本植物, 茎直立, 多分枝、有梗无叶, 其种子产量高, 含油量较大, 达 29% 以上, 并含有 87%—88% 的不饱和脂肪酸<sup>[1-2]</sup>, 可供人类安全食用, 榨油后的海蓬子饼粕含有约 40% 的粗蛋白, 可以作为动物蛋白精饲料, 是营养丰富的油料作物和牲畜饲料。同时, 海蓬子也是世界上最耐盐的种子植物之一, 积累的  $Na^+$ 、 $Cl^-$  可达到干物质 30%—40%<sup>[3]</sup>, 具有对高盐环境的独特适应机制。其适应盐渍环境的特点有两方面: 一是形态学上的适应, 即茎肉质化, 二是生理上的适应, 即具有较强的渗透调节和离子区域化能力。然而, 当盐度超过一定范围, 海蓬子仍会受到伤害。比如, Ventura 等<sup>[4]</sup>发现, 随着盐浓度增加, 海蓬子种子发芽率逐渐下降。高盐胁迫也能引起海蓬子幼苗净光合速率、气孔导度、蒸腾速率下降, 导致生物量降低<sup>[5]</sup>。

开花是植物生活史中的一个重要发育过程, 是作物籽粒产量形成的关键阶段, 也是受外界环境影响的敏感时期。目前, 国内外对海蓬子属植物耐盐性的研究大多都是集中在植株的萌发出苗期<sup>[6]</sup>、幼苗期<sup>[7-8]</sup>以及全生育期<sup>[9]</sup>上, 甚至, 还有人开展了有关延迟海蓬子生育期的研究<sup>[10]</sup>。然而, 花期盐胁迫对海蓬子的生理效应研究国内外仍无报道。一般来说, 种子灌浆期与作物开花期的光合作用有紧密的相关性, 其光合能力越强作物的结实率越高<sup>[11]</sup>。因此, 开展盐胁迫对花期海蓬子光合作用、离子稳态的影响研究将为后期籽粒产量形成期研究具有重要意义。基于以上分析, 本研究以海蓬子为材料, 在花前进行盐处理, 研究其在盐胁迫下的生长特性和光合特性、离子吸收以及抗氧化系统等变化, 探索花期海蓬子对盐胁迫响应的生理特性, 为海蓬子属植物在盐土农业上利用和开发提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料的培养和处理

试验于 2011 年 5 月 11 日至 2011 年 8 月 6 日在浙江省海洋水产养殖研究所永兴基地海涂上和玻璃温室

内进行。该地区属中亚热带季风气候,年平均降雨量约 1800 mm,年平均蒸发量为 1310 mm。2011 年 5 月 11 日播海蓬子 (*Salicornia bigelovii* Torr.) 种子于海涂上,播种前施过磷酸钙 375 kg/hm<sup>2</sup>,有机肥 600 kg/hm<sup>2</sup>,复合肥 300 kg/hm<sup>2</sup> 作为基肥。土壤为青紫坭粘土,母质为近代浅海与江涂沉积物,质地轻粘,土壤 pH 值 7.1,有机质 2.8 g/kg,碱解氮 111.2 mg/kg,速效磷 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 35.1 mg/kg,速效钾 (K<sub>2</sub>O) 670.0 mg/kg,氯化钠 0.98 g/kg。播种量为 25 kg/hm<sup>2</sup>,播后用海水(盐度约 15‰)浇透,水渗后覆盖遮荫网保湿。6 月 15 日,幼苗长到 9 cm 左右,选取大小基本一致的海蓬子幼苗移植到盛有 40 kg 海砂的塑料箱中培养。为了不影响海蓬子的生长,采用含 10‰ NaCl 的 Hoagland 营养液培养,每 3 d 换 1 次营养液,每天用自来水补充蒸发的水量。培养到 6 月 28 日,开始进行盐处理。为避免盐冲击效应,采用下表 1 方式进行加 NaCl 调节盐浓度。盐处理至 7 月 18 日左右,海蓬子进入开花期。8 月 5 日,测定光合,并取样测定其他指标。试验设计为随机区组设计,每个处理 3 次重复。

表 1 不同处理的加盐方式  
Table 1 Adding salt method of different treatments

| 时间<br>Time /d | NaCl 处理 NaCl treatment/‰ |    |    |    |    |    |    |
|---------------|--------------------------|----|----|----|----|----|----|
|               | 0                        | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| 0             | 10                       | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 2             | 8                        | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 |
| 4             | 6                        | 10 | 14 | 18 | 22 | 26 | 30 |
| 6             | 4                        | 10 | 16 | 22 | 28 | 34 | 40 |
| 8             | 2                        | 10 | 18 | 26 | 34 | 42 | 50 |
| 10            | 0                        | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |

## 1.2 测定项目与方法

### 1.2.1 植株形态指标的测定

在盐处理结束时,每重复选 5 株测量株高,然后蒸馏水冲洗数次,吸干表面水分,105 °C 烘箱中杀青 10 min,75 °C 下烘至恒量,称得干质量,得到植株生物量。

### 1.2.2 光合色素含量的测定

称取 0.1 g 茎尖,剪成数段放入 25 mL 提取液(1:1 的无水乙醇和丙酮)中,在 25 °C 黑暗条件下提取 24 h,测定提取液在 663、645 和 470 nm 处的吸光值,参照文献<sup>[12]</sup>计算叶绿素 a(Chl a)、叶绿素 b(Chl b)、总叶绿素(Chl)以及类胡萝卜素(Car)含量。

### 1.2.3 光合指标的测定

采用 LI-6400(Li-Cor Inc,美国)便携式光合测定系统于 9:00—11:00 测定海蓬子距茎尖约 2 cm 成熟区净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )以及蒸腾速率( $T_r$ )。采用开放式气路,CO<sub>2</sub> 浓度约为 385 μmol/L 左右,选择红蓝光源叶室,设定光合有效辐射(PAR)为 1000 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>。每个处理每重复选择 5 株植株测定。根据邱念伟和孔甜甜文献<sup>[13]</sup>换算各光合系统参数。茎尖水分利用率(WUE, μmol CO<sub>2</sub> · mmol<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>O) =  $P_n/T_r$ 。

### 1.2.4 超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)活性和丙二醛(MDA)含量的测定

参照文献<sup>[14]</sup>方法,取 0.5 g 茎尖,加 5 mL 50 mmol/L pH 值 7.0 磷酸提取液冰浴研磨,4 °C (10000 ×g)离心 30 min,上清液为待测提取液。用氯化硝基四氮唑蓝(NBT)法,560 nm 比色测定 SOD 活性;愈创木酚法测定 POD 活性;按照文献<sup>[15]</sup>的方法测定 MDA 含量。

### 1.2.5 离子含量测定

取 0.1 g 干样,加 5 mL 浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 消煮,30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 作为催化剂,定容到 100 mL,稀释数倍,采用原子吸收法测定 K<sup>+</sup> 和 Na<sup>+</sup> 含量。植株地上部分 Cl<sup>-</sup> 测定参照 Akram 等<sup>[16]</sup>方法。

## 1.3 数据处理

采用 SPSS 软件对试验数据进行方差分析和 LSD 显著性测验。数据结果为平均值+标准差(mean +SD)。

采用 SigmaPlot10.0 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 花期盐胁迫对海蓬子生长的影响

由图 1 可以看出,海蓬子的株高和地上部生物量均随着 NaCl 浓度增加呈先增后降的趋势。当 NaCl 浓度为 10‰ 时,其株高和地上部生物量均达到最大,分别为对照 1.1 倍和 1.2 倍,且均达到显著水平 ( $P < 0.05$ );当 NaCl 浓度达到 30‰ 时,其株高和地上部生物量均显著降低 ( $P < 0.05$ )。随着盐度的进一步上升,其株高和地上部生物量下降愈显著,当 NaCl 浓度为 60‰ 时,其株高和地上部生物量分别为对照的 83% 和 58%。

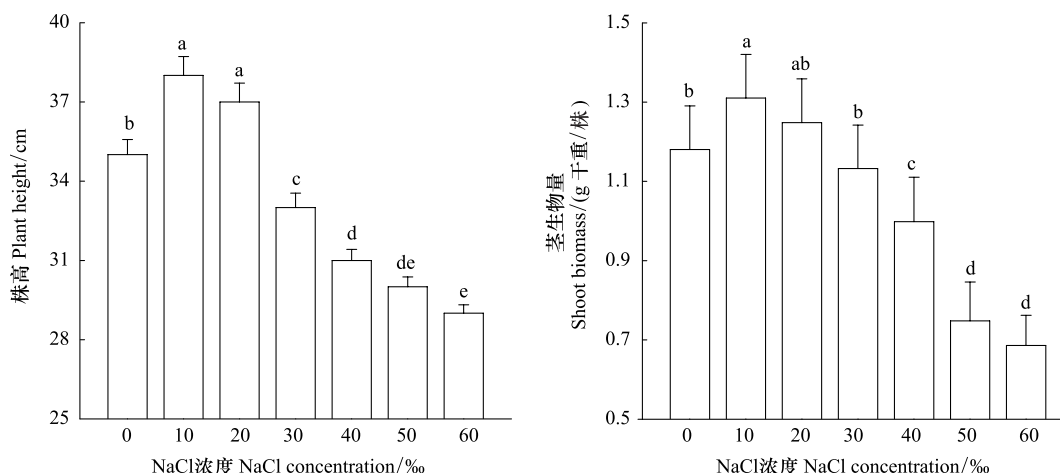


图 1 花期盐胁迫对海蓬子株高和地上部干重的影响

Fig. 1 Effect of salt stress on plant height and shoot dry biomass of *Salicornia bigelovii* during flowering stage

不同的小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )

### 2.2 花期盐胁迫对海蓬子茎光合色素含量和构成的影响

随盐浓度增加,海蓬子茎总叶绿素 (Chl) 含量呈先增后降的趋势,其中当 NaCl 浓度为 10‰ 时,其 Chl 含量最高,30‰—60‰ NaCl 处理下,其 Chl 含量显著低于对照 (图 2)。与 Chl 含量变化不同,类胡萝卜素 (Car) 含量变化较平缓 (图 2)。与对照相比,NaCl 浓度为 10、20‰ 时,处理间 Car 含量无显著差异;当 NaCl 浓度为 30‰、40‰、50‰ 和 60‰ 时,Car 含量均显著低于对照 ( $P < 0.05$ ),其处理间差异不显著 (图 2)。其叶绿素 a 含量/叶绿素 b 含量 (Chl a/Chl b) 这一比值随盐浓度增加,呈先增后降。其中,当 NaCl 浓度为 20‰ 时,其 Chl a/Chl b 达到最大;而类胡萝卜素含量/叶绿素含量 (Car/Chl) 这一比值随着盐度的增加,出现显著增加的趋势 ( $P < 0.05$ , 图 2)。

### 2.3 花期盐胁迫对海蓬子光合特性的影响

与海蓬子生长趋势相似,海蓬子茎的净光合速率 ( $P_n$ )、气孔导度 ( $G_s$ )、蒸腾速率 ( $T_r$ ) 以及水分利用率 (WUE) 随盐浓度上升增加呈先增后降 (图 3)。当 NaCl 浓度为 10‰ 时,海蓬子  $P_n$ 、 $G_s$  以及  $T_r$  均达到最大,分别比对照增加 10%、17% 以及 14%,均达到显著水平 ( $P < 0.05$ )。当 NaCl 浓度达到 40‰ 时,其  $P_n$  比对照降低 9%,达到显著水平 ( $P < 0.05$ );与对照相比, $G_s$  和  $T_r$  均在 NaCl 浓度为 50‰ 时才显著下降 ( $P < 0.05$ )。与光合其他指标不同,当 NaCl 浓度低于 40‰ 时,其 WUE 间的差异并不显著,而当 NaCl 浓度高于 50‰ 时其 WUE 显著低于对照 ( $P < 0.05$ , 图 3)。

NaCl 浓度为 10‰、20‰ 以及 30‰ 时,海蓬子  $C_i$  和对照差异均不显著,随着盐度进一步上升,其  $C_i$  逐渐显著下降 ( $P < 0.05$ , 图 3),而海蓬子气孔限制值 ( $L_s$ ) 变化却相反。与对照相比,NaCl 浓度为 10‰、20‰ 以及 30‰ 时海蓬子  $L_s$  均显著下降 ( $P < 0.05$ )。随着盐度的进一步上升,海蓬子  $L_s$  快速上升,但 NaCl 浓度为 60‰ 时才与对照间有显著差异 ( $P < 0.05$ )。

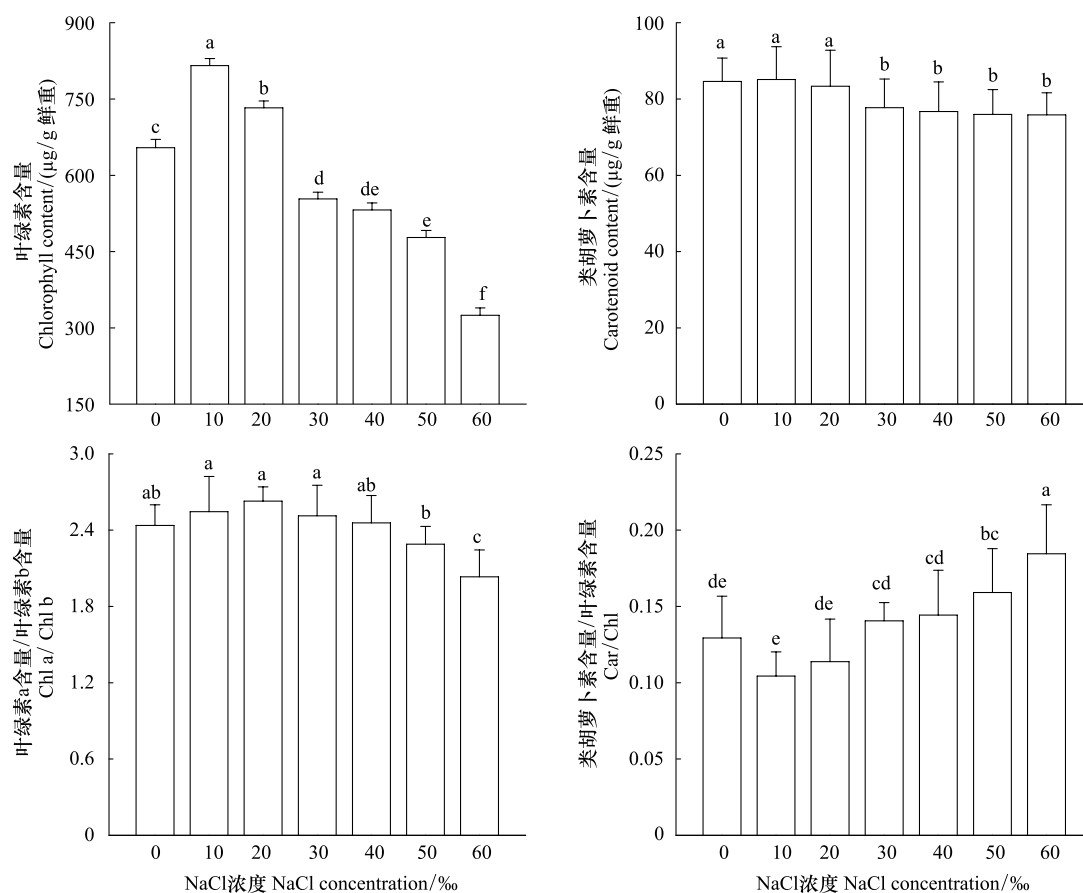


图2 花期盐胁迫对海蓬子叶绿素、类胡萝卜素含量以及叶绿素 a/叶绿素 b、类胡萝卜素/叶绿素值的影响

Fig. 2 Effect of salt stress on contents of chlorophyll and carotenoid and ratio of Chl a/ Chl b and Car/ Chl in *Salicornia bigelovii* during flowering stage

## 2.4 花期盐胁迫对海蓬子茎 SOD、POD 活性及其 MDA 含量的影响

随着盐浓度的增加,海蓬子茎 SOD、POD 活性均先升后降,当盐浓度为 10‰ 时,其 SOD、POD 活性均达到最大,分别比对照增加 9% 和 10%,且均达到显著水平 ( $P < 0.05$ )。当 NaCl 浓度上升,海蓬子茎 POD 活性降幅要大于 SOD 活性(图 4)。10、20‰ NaCl 处理下,其 MDA 含量和对照间差异不显著,随着盐度的增加,海蓬子茎 MDA 含量显著增加 ( $P < 0.05$ ,图 5)。

## 2.5 花期盐胁迫对海蓬子茎 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{K}^+$ 含量和 $\text{Na}^+/\text{K}^+$ 比的影响

随盐浓度上升,海蓬子  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  含量和  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  比均逐渐增加,而  $\text{K}^+$  含量则逐渐减少(图 6)。当 NaCl 浓度增加到 30‰ 以上,其茎  $\text{K}^+$  含量不再显著下降;而当 NaCl 水平增加到 40‰ 以上,茎  $\text{Na}^+$  含量也不再显著增加, $\text{Cl}^-$  含量和  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  比在 50‰ 和 60‰ NaCl 处理时差异不显著,但均显著高于 40‰ NaCl 处理 ( $P < 0.05$ )。

## 2.6 花期盐处理下海蓬子生长指标与其它生理生化指标的相关性分析

相关分析(表 2)显示,茎生物量除了与茎的水分利用率(WUE)、类胡萝卜素(Car)含量、 $\text{Na}^+$  含量没有相关性外,与 Chl a/Chl b 呈现显著正相关 ( $P < 0.05$ ),与茎  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $C_i$ 、 $Tr$ 、Chl 含量、 $\text{K}^+$  含量、SOD 和 POD 活性呈现极显著正相关 ( $P < 0.01$ ),与茎气孔限制值( $L_s$ )、Car/Chl、MDA 含量、 $\text{Cl}^-$  含量和  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  等均呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ );株高与其 WUE、Chl a/Chl b 没有相关性,与茎  $\text{Na}^+$  含量呈现显著负相关 ( $P < 0.05$ ),与  $L_s$ 、Car/Chl、MDA 含量、 $\text{Cl}^-$  含量和  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  等均呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ ),与茎  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $C_i$ 、 $Tr$ 、Chl 含量、Car 含量、 $\text{K}^+$  含量、SOD 和 POD 活性呈现极显著正相关 ( $P < 0.01$ )。



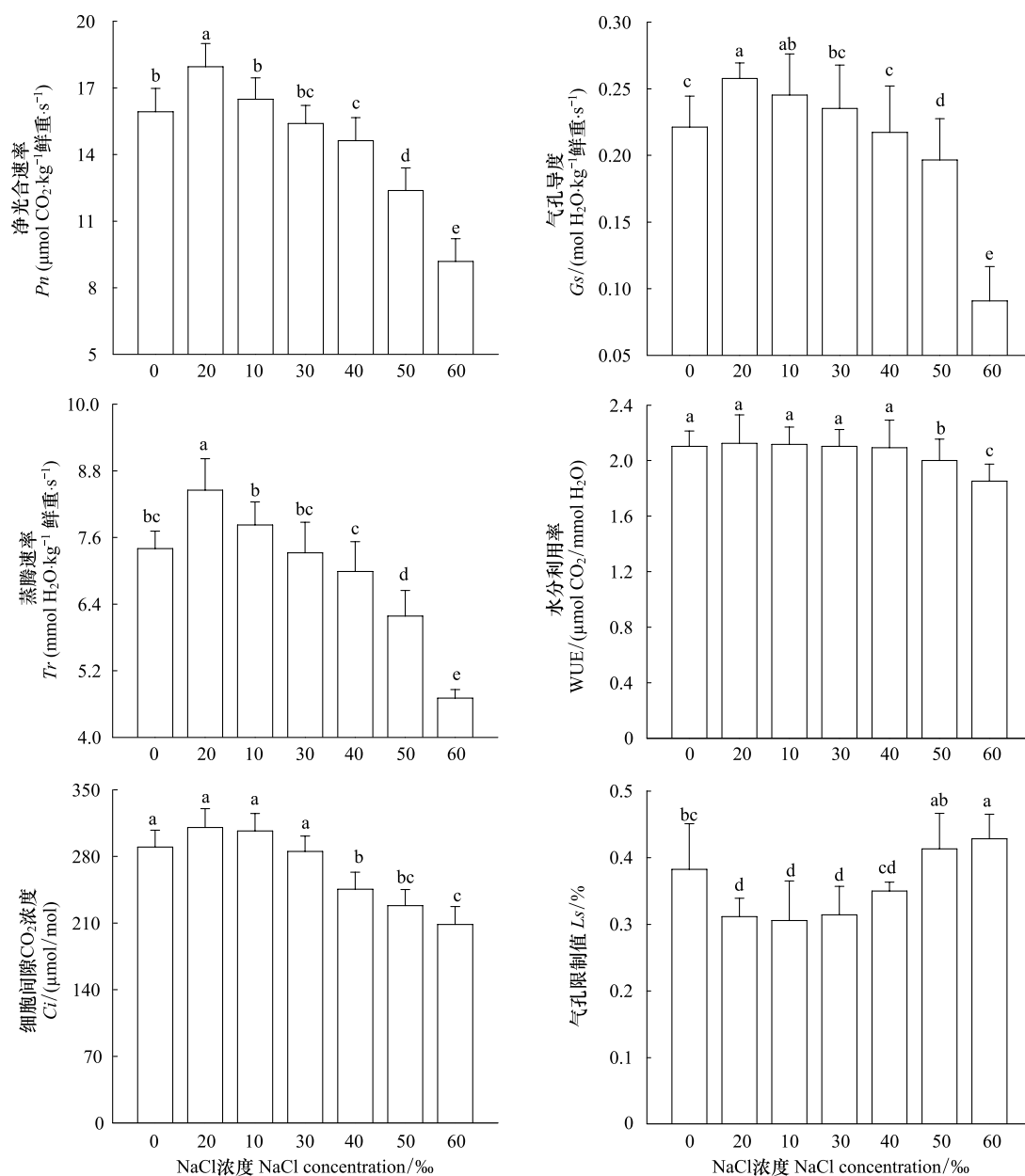


图3 花期盐胁迫对海蓬子净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、水分利用率、细胞间隙  $\text{CO}_2$  浓度以及气孔限制值的影响

Fig. 3 Effect of salt stress on net photosynthetic rate, stomatal conductance, transpiration rates, WUE, intercellular  $\text{CO}_2$  concentration and stomatal limitation of *Salicornia bigelovii* during flowering stage

### 3 讨论

海蓬子开花前后处于温度较高的夏季,生长相对比较旺盛。本研究发现,无盐条件下海蓬子仍能够正常生长;当 NaCl 浓度在 10‰ 时,海蓬子的株高和生物量均表现最高,显著高于对照(无盐处理)。但当浓度超过 40‰,生长即受到显著抑制,这与海蓬子幼苗期<sup>[17]</sup>的相关研究相似。从营养器官物质转运及其对籽粒增产的贡献来看,籽粒产量形成与花期作物生物量成正相关<sup>[18]</sup>,不同 NaCl 浓度下花期海蓬子的生物量的积累可能也会影响后期籽粒形成和产量。已有研究表明,盐胁迫条件下不同生育期海蓬子的生长与其光合作用、离子积累和分配、营养吸收等生理生化代谢有密切关系<sup>[19-21]</sup>。

盐胁迫既可以直接影响甜土植物生长,也可以通过降低净光合速率、气孔导度、蒸腾速率而间接抑制植物生长<sup>[22]</sup>。与甜土植物不同,盐土植物往往不仅能够在高盐条件下存活,而且适宜浓度 NaCl 可以提高其光合

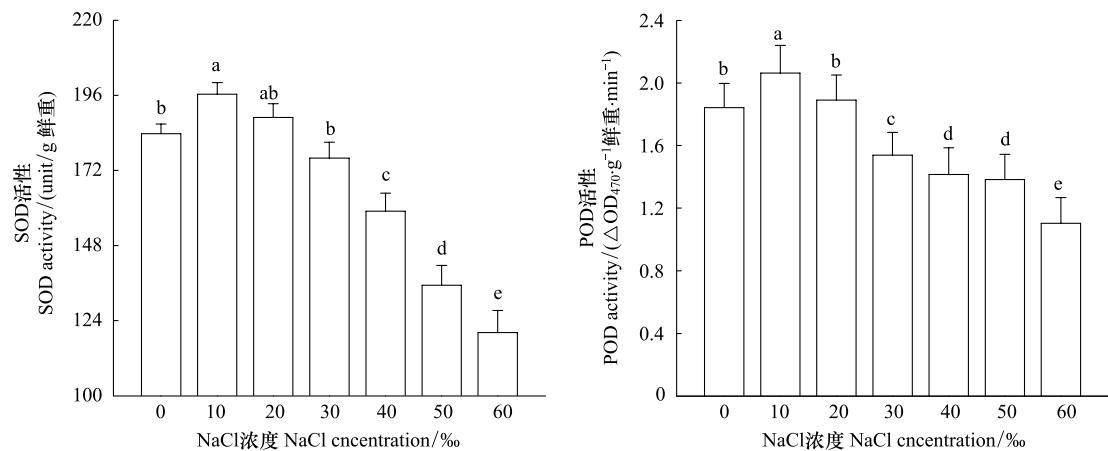


图4 花期盐胁迫对海蓬子茎 SOD 和 POD 酶活性的影响

Fig.4 Effect of salt stress on the activities of SOD and POD in shoot of *Salicornia bigelovii* during flowering stage

能力,促进生长<sup>[23-24]</sup>。花期 10‰NaCl 浓度处理能够显著地提高海蓬子的净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、蒸腾速率( $T_r$ )等,从而显著地促进植株生长,但当 NaCl 浓度超过 40‰时其光合能力就显著下降,这种生长和光合的正相关性与 NaCl 胁迫对海蓬子幼苗期光合作用研究基本一致的<sup>[25]</sup>,但幼苗期盐胁迫条件下海蓬子光合速率下降的主要原因仍存未定论<sup>[25]</sup>。一般来说,逆境胁迫条件下引起植物叶片光合速率降低的植物自身因素主要有气孔部分关闭导致的气孔限制和叶肉细胞光合活性下降导致的非气孔限制两类。当  $C_i$  和  $P_n$  两者均减少,且  $L_s$  增大时,光合速率下降主要是由于气孔导度的降低;否则,如果  $P_n$  下降, $C_i$  升高, $L_s$  减少,则是因为叶肉细胞光合活性的降低<sup>[26]</sup>。与 10‰NaCl 浓度时相比,0、30‰、40‰、50‰、60‰ NaCl 浓度处理的植株  $P_n$ 、 $C_i$  均降低,而  $L_s$  均增加。表明此时气孔的部分关

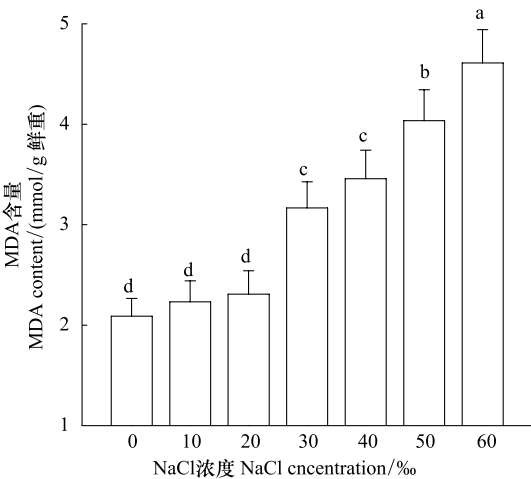
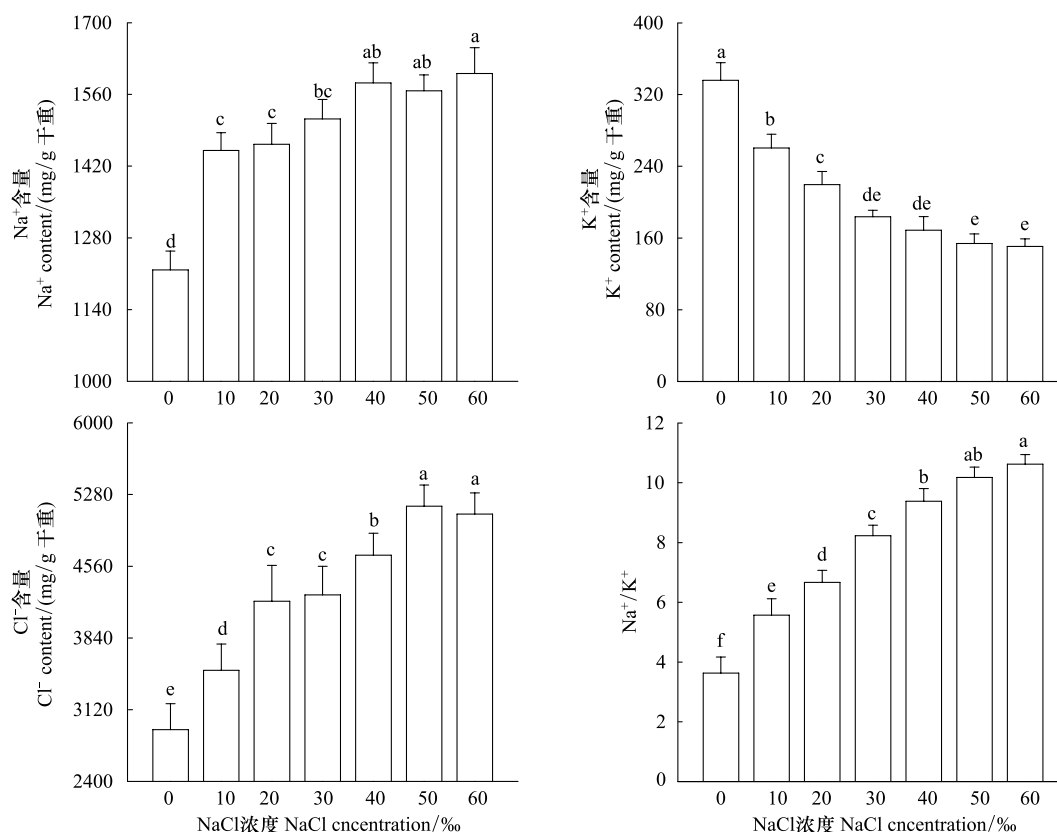


图5 花期盐胁迫对海蓬子茎 MDA 含量的影响

Fig.5 Effect of salt stress on MDA content in shoot of *Salicornia bigelovii* during flowering stage

表2 海蓬子茎生物量、株高与其他指标间的相关性分析

| Table 2 Correlative coefficients between shoot biomass and plant height the other indexes of <i>Salicornia bigelovii</i> during flowering stage |                |                    |                          |                |                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|--------------------|--------------------------|----------------|--------------------|
|                                                                                                                                                 | 生物量<br>Biomass | 株高<br>Plant height |                          | 生物量<br>Biomass | 株高<br>Plant height |
| 生物量 Biomass                                                                                                                                     | 1              |                    | 株高 Plant height          | 0.896 **       | 1                  |
| $P_n$                                                                                                                                           | 0.872 **       | 0.742 **           | $G_s$                    | 0.837 **       | 0.737 **           |
| $C_i$                                                                                                                                           | 0.755 **       | 0.569 **           | $T_r$                    | 0.072          | 0.138              |
| WUE                                                                                                                                             | -0.635 **      | -0.635 **          | $L_s$                    | 0.964 **       | 0.904 **           |
| 叶绿素含量 Chl content                                                                                                                               | 0.913 **       | 0.891 **           | 类胡萝卜素含量 Car content      | 0.39           | 0.559 **           |
| Chl a/ Chl b                                                                                                                                    | 0.450 *        | 0.199              | Car/ Chl                 | -0.812 **      | -0.649 **          |
| SOD 活性 SOD activity                                                                                                                             | 0.938 **       | 0.871 **           | POD 活性 POD activity      | 0.857 **       | 0.826 **           |
| MDA 含量 MDA content                                                                                                                              | -0.871 **      | -0.804 **          | $Na^+$ 含量 $Na^+$ content | -0.391         | -0.497 *           |
| $K^+$ 含量 $K^+$ content                                                                                                                          | 0.655 **       | 0.646 **           | $Na^+/K^+$               | -0.721 **      | -0.754 **          |
| $Cl^-$ 含量 $Cl^-$ content                                                                                                                        | -0.776 **      | -0.710 **          |                          |                |                    |

图6 花期盐胁迫对海蓬子 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup> 含量以及 Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup> 的影响Fig. 6 Effects of salt stress on contents of Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> and Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup> ratio of *Salicornia bigelovii* during flowering stage

闭是引起海蓬子光合速率下降的主要原因。其相关性分析也充分证实了这一点,即在本研究诸多指标中, $L_s$ 与植株的耐盐性的相关性要高于其它所有指标。另外,当 NaCl 浓度为 60‰ 时其气孔导度低于  $0.10 \text{ H}_2\text{O kg}^{-1} \text{ 鲜重 s}^{-1}$  时也伴随着非气孔限制因素<sup>[27]</sup>,表明高盐胁迫下花期海蓬子光合作用的降低是被气孔导度和非气孔限制两种限制因素影响,这又不同于幼苗期光合速率下降原因的可能猜测<sup>[25]</sup>。此外,气孔也控制着植株与外界环境的水气交换,当 NaCl 浓度超过 30‰ 时, $G_s$  降低,一方面减少了植株对外界  $\text{CO}_2$  的吸收,导致  $C_i$  下降;另一方面使水分通过气孔扩散受阻,抑制了植株的  $T_r$ ,减少水分的过度散失。此外,当 NaCl 浓度超过 50‰ 时,海蓬子的光合作用受到严重抑制,导致植株 WUE 显著下降。

正如本研究中相关分析所示,叶绿素 (Chl) 含量的高低与光合作用密切相关,盐胁迫能导致植物 Chl 含量降低<sup>[28]</sup>,其原因有两方面,一方面 NaCl 能提高叶绿素酶活性,促进 Chl 分解<sup>[29]</sup>;另一方面在于类胡萝卜素 (Car) 含量降低,减少了对活性氧的淬灭,导致了细胞内积累较多的氧自由基,加速了 Chl 分解<sup>[30]</sup>。本研究发现,10‰ NaCl 处理下,花期海蓬子 Chl 显著增加,而 Car 含量无明显变化,但当浓度增加至 40‰ 时均开始下降。Chl 含量降幅明显大于 Car,这表明 Chl 对盐度的变化远比 Car 敏感,而 Car 的稳定性很可能对维持海蓬子较高的耐盐性具有显著的生理意义。本研究进一步发现,海蓬子 Car/Chl 值与其清除活性氧的 SOD、POD 活性呈极显著负相关 ( $R^2 = -0.781^{**}$  和  $R^2 = -0.810^{**}$ ),而与 MDA 含量呈极显著正相关 ( $R^2 = 0.772^{**}$ ),这也说明了 Car/Chl 与海蓬子清除活性氧和忍受盐胁迫的能力紧密相关。周泉澄等<sup>[31]</sup>通过海水浇灌海蓬子幼苗发现,POD 并不是盐环境下主要抗氧化酶,仅 SOD、CAT 才是耐盐植物筛选的重要指标,而本研究却发现,花期盐胁迫条件下 SOD、POD 活性均与叶绿素含量变化一致,与植株生物量均存在极显著正相关 ( $R^2 = 0.917^{**}$  和  $R^2 = 0.934^{**}$ ),表明花期盐胁迫中 SOD、POD 对改善海蓬子抗氧化能力具有明显作用。从 NaCl 浓度效应分析,与无盐处理相比,花期 10‰ NaCl 能提高 Chl 含量、Car/Chl 以及 SOD、POD 活性,促进植株正常

生长,而当 NaCl 浓度超过 40‰时海蓬子的抗氧化酶活性均显著降低,而 MDA 含量迅速积累,最终对机体细胞产生毒害作用,促使 Chl 分解,降低其光合作用。这与 Aghaleh 等<sup>[32]</sup>在海蓬子幼苗上的相关研究近乎一致。另外,王标等<sup>[33]</sup>指出,Chl a/Chl b 的比值越大,被光能激发的 Chl a 分子就越多,直接参与光化学反应的分子就越多,利于光合效率的提高。本研究也发现 NaCl 浓度在 10‰—20‰时,叶绿素 a/b 的比值较高,而当 NaCl 浓度超过 40‰时,其值显著下降。其比值与植株耐盐性也有显著的相关性。

海蓬子是耐盐植物,是典型的稀盐盐生植物,细胞内 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>吸收是明显分开的环节,其中 K<sup>+</sup>的吸收并不因 Na<sup>+</sup>介入而改变<sup>[34]</sup>。已有研究发现,低盐胁迫下,海蓬子幼苗主要将 Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>积累在地上部分,海蓬子将 Na<sup>+</sup>从细胞质中转运到液泡中,区域化储存在液泡中,从而引起植株中 Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup>比值均明显上升,但结合生长特性分析,K<sup>+</sup>并不是影响海蓬子幼苗生长的关键因素<sup>[25,35]</sup>。这与本研究结果一致,但本研究还发现,当 NaCl 浓度超过 30‰时花期海蓬子体内 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>含量变化均趋于平缓,生物量却显著下降。表明在高盐胁迫下花期海蓬子不可能在液泡中积累过高的浓度,当超过最高浓度时可能引起细胞质中 Na<sup>+</sup>的积累,因为体外研究发现盐生植物和甜土植物细胞质中的酶都不能忍受较高的 Na<sup>+</sup>浓度<sup>[36]</sup>,所以花期高盐胁迫仍会使海蓬子受到离子毒害,这又有别于幼苗期<sup>[25]</sup>。

总之,海蓬子具有较强的耐盐能力。花期盐胁迫环境下,10‰ NaCl 浓度较为显著地促进其生长;40‰ NaCl 浓度则显著地抑制其生长。按照相关性分析和相关系数显示,适宜评价花期海蓬子耐盐性的指标为: Ls、SOD 活性、Chl 含量、株高、Pn、MDA 含量、POD 活性、Gs、Car/Chl、Cl<sup>-</sup>含量、Ci、Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>含量和 WUE。其中以 Ls 的相关性最为明显,这表明,气孔因素在海蓬子光合作用抑制中起主要作用。海蓬子耐盐性有待深入探讨。

## References:

- [ 1 ] Desai P D, Dave A M, Devi S. Alcoholysis of salicornia oil using free and covalently bound lipase onto chitosan beads. Food Chemistry, 2006, 95 (2): 193-199.
- [ 2 ] Tang W Z, Liu Z P, Zhu J H, Pen H X, Li H L. A study on the component content of two North American glasswort new species. Journal of Guangxi Agriculture, 2003, (5): 33-35.
- [ 3 ] Pandya J B, Gohil R H, Patolia J S, Shah M T, Parmar D R. A study on Salicornia (*S. brachiata* Roxb.) in salinity ingressed soils of India. International Journal of Agricultural Research, 2006, 1(1): 91-99.
- [ 4 ] Ventura Y, Wuddineh W A M, Myrzabayeva M, Alikulov Z, Khozin-Goldberg I, Shpigel M, Samocha T M, Sagi M. Effect of seawater concentration on the productivity and nutritional value of annual *Salicornia* and perennial *Sarcocornia* halophytes as leafy vegetable crops. Scientia Horticulturae, 2011, 128(3): 189-196.
- [ 5 ] Lü S, Jiang P, Chen X, Fan P, Wang X, Li W. Multiple compartmentalization of sodium conferred salt tolerance in *Salicornia europaea*. Plant Physiology and Biochemistry, 2012, 51: 47-52.
- [ 6 ] Khan M A, Gul B, Weber D J. Germination responses of *Salicornia rubra* to temperature and salinity. Journal of Arid Environments, 2000, 45 (3): 207-214.
- [ 7 ] Katsching D, Broekman R, Rozema J. Salt tolerance in the halophyte *Salicornia dolichostachya* Moss: growth, morphology and physiology. Environmental and Experimental Botany, 2012, <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.04.002>.
- [ 8 ] Ventura Y, Wuddineh W A, Ephraim Y, Shpigel M, Sagi M. Molybdenum as an essential element for improving total yield in seawater-grown *Salicornia europaea* L. Scientia Horticulturae, 2010, 126(3): 395-401.
- [ 9 ] Ventura Y, Wuddineh W A, Myrzabayeva M, Alikulov Z, Khozin-Goldberg I, Shpigel M, Samocha T M, Sagi M. Effect of seawater concentration on the productivity and nutritional value of annual *Salicornia* and perennial *Sarcocornia* halophytes as leafy vegetable crops. Scientia Horticulturae, 2011, 128(3): 189-196.
- [ 10 ] Ventura Y, Wuddineh W A, Shpigel M, Samocha T, Klim B C, Cohen S, Shemer Z, Santos R, Sagi M. Effects of day length on flowering and yield production of *Salicornia* and *Sarcocornia* species. Scientia Horticulturae, 2011, 130(3): 510-516.
- [ 11 ] Egli D B, Bruening W P. Increasing sink size does not increase photosynthesis during seed filling in soybean. European Journal of Agronomy, 2003, 19(2): 289-298.
- [ 12 ] Li H S. Experimental Principle and Technique for Plant Physiology and Biochemistry. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [ 13 ] Qin N W, Kong T T. Determination of net photosynthetic rate based on unit fresh weight of anomalous plant material. Plant Physiology Journal, 2011, 47(4): 406-408.
- [ 14 ] Tan W, Liu J, Dai T, Jing Q, Cao W, Jiang D. Alterations in photosynthesis and antioxidant enzyme activity in winter wheat subjected to post-anthesis waterlogging. Photosynthetica, 2008, 46(1): 21-27.
- [ 15 ] Du Z, Bramlage W J. Modified thiobarbituric acid assay for measuring lipid oxidation in sugar-rich plant tissue extracts. Journal of Agricultural and



- Food Chemistry, 1992, 40(9): 1566-1570.
- [16] Akram M S, Ashraf M, Akram N A. Effectiveness of potassium sulfate in mitigating salt-induced adverse effects on different physio-biochemical attributes in sunflower (*Helianthus annuus* L.). Flora, 2009, 204(6): 471-483.
- [17] Ayala F, O'Jeary J W. Growth and physiology of *Salicornia bigelovii* Torr. at suboptimal salinity. International Journal of Plant Sciences, 1995, 156(2): 197-205.
- [18] Yang H, Zhang Y, Xu S, Li G, Guo J, Wang Z. Characteristics of dry matter and nutrients accumulation and transformation of super-high yield spring maize. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(2): 315-323.
- [19] Boyer K E, Fong P, Vance R R, Ambrose R F. *Salicornia Virginica* in a southern California salt marsh: Seasonal patterns and a nutrient-enrichment experiment. Wetlands, 2001, 21(3): 315-326.
- [20] Riehl T E, Ungar I A. Growth and ion accumulation in *Salicornia europaea* under saline field conditions. Oecologia, 1982, 54(2): 193-199.
- [21] Ushakova S A, Kovaleva N P, Tikhomirova N A, Gribovskaya I V, Kolmakova A A. Effect of photosynthetically active radiation, salinization, and type of nitrogen nutrition on growth of *Salicornia europaea* plants. Russian Journal of Plant Physiology, 2006, 53(6): 886-894.
- [22] Zheng C, Jiang D, Liu F, Dai T, Jing Q, Cao W. Effects of salt and waterlogging stresses and their combination on leaf photosynthesis, chloroplast ATP synthesis, and antioxidant capacity in wheat. Plant Science, 2009, 176(4): 575-582.
- [23] Flowers T J, Troke P F, Yeo A R. The mechanism of salt tolerance in halophytes. Annual Review of Plant Physiology, 1977, 28(1): 89-121.
- [24] Maggio A, Reddy MP, Joly R. Leaf gas exchange and solute accumulation in the halophyte *Salvadora persica* grown at moderate salinity. Environmental and Experimental Botany, 2000, 44(1): 31-38.
- [25] Wang L Y, Zhao K F. Effect of NaCl stress on ion compartmentation, photosynthesis and growth of *Salicornia bigelovii* Torr.. Journal of Plant Physiology and Molecular Biology, 2004, 30(1): 94-98.
- [26] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis. Annual Review of Plant Physiology, 1982, 33(1): 317-345.
- [27] Flexas J, Bota F, Loreto F, Cornic G, Sharkey T D. Diffusive and metabolic limitations to photosynthesis under drought and salinity in C3 plants. Plant Biology, 2004, 6(3): 269-279.
- [28] Tang W, Luo Z, Wen S M, Dong H Z, Li W J, Xin C S. Comparison of inhibitory effects on leaf photosynthesis in cotton seedlings between drought and salinity stress. Cotton Science, 2007, 19(1): 28-32.
- [29] Dao W Q, Zhang W H, Liu Y L. Changes in composition and function of thylakoid membrane isolated from barley seedling leaves under salt stress. Acta Photophysiol Sinica, 1997, 23(2): 105-110.
- [30] Sakaki T, Kondo N, Sugahara K. Breakdown of photosynthetic pigments and lipids in spinach leaves with ozone fumigation Role of active oxygens. Physiologia Plantarum, 1983, 59(1): 28-34.
- [31] Zhou Q, Hua C, Zhou F, Chen Q, Wang R. Study on adaptability of antioxidant and osmoregulation substance in seedling of *Salicornia bigelovii* Torr. and *Salicornia europaea* L. watered with artificial seawater. Chinese Journal of Grassland, 2010, 32(5): 101-105.
- [32] Aghleh M, Niknam V, Ebrahimzadeh H, Razavi K. Salt stress effects on growth, pigments, proteins and lipid peroxidation in *Salicornia persica* and *S. europaea*. Biologia Plantarum, 2009, 53(2): 243-248.
- [33] Wang B, Yu M K, Sun H J, Cheng X R, Dan Q H, Fang Y M. Photosynthetic characters of *Quercus acutissima* from different provenances under effects of salt stress. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(8): 1817-1824.
- [34] Glenn E P, Brown J J. Salt tolerance and crop potential of halophytes. Critical Reviews in Plant Sciences, 1999, 18(2): 227-255.
- [35] Aghaleh M, Niknam V, Ebrahimzadeh H, Razavi K. Effect of salt stress on physiological and antioxidative responses in two species of *Salicornia* (*S. persica* and *S. europaea*). Acta Physiologiae Plantarum, 2011, 33(4): 1261-1270.
- [36] Flowers T J. The effect of sodium chloride on enzyme activities from four halophytes specie of chenopodiaceae. Phytochemistry, 1972, 11(6): 1881-1886.

#### 参考文献:

- [2] 唐文忠, 刘泽平, 朱建华, 彭宏祥, 李华林. 两个北美海蓬子新品种组分含量研究. 广西农学报, 2003, (5): 33-35.
- [12] 邱念伟, 孔甜甜. 不规则植物材料单位鲜重光合速率的测定. 植物生理学报, 2011, 47(4): 406-408.
- [13] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [18] 杨恒山, 张玉芹, 徐寿军, 李国红, 高聚林, 王志刚. 超高产春玉米干物质及养分积累与转运特征. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 315-323.
- [25] 王丽燕, 赵可夫. NaCl 胁迫对海蓬子 (*Salicornia bigelovii* Torr.) 离子区室化、光合作用和生长的影响. 植物生理与分子生物学报, 2004, 30(1): 94-98.
- [28] 唐薇, 罗振, 温四民, 董合忠, 李维江, 辛承松. 干旱和盐胁迫对棉苗光合抑制效应的比较. 棉花学报, 2007, 19(1): 28-32.
- [29] 刁丰秋, 章文华, 刘友良. 盐胁迫对大麦叶片类囊体膜组成和功能的影响. 植物生理学报, 1997, 23(2): 105-110.
- [31] 周泉澄, 华春, 周锋, 陈全战, 王仁雷. 毕氏海蓬子和盐角草幼苗抗氧化酶与渗透物质对海水浇灌的适应性研究. 中国草地学报, 2010, 32(5): 101-105.
- [33] 王标, 虞木奎, 孙海菁, 成向荣, 单奇华, 方炎明. 盐胁迫对不同种源麻栎叶片光合特征的影响. 应用生态学报, 2009, 20(8): 1817-1824.

# ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 17 Sep. ,2013 (Semimonthly)

## CONTENTS

### Frontiers and Comprehensive Review

- The overview and prospect of chemical composition of plant cuticular wax ..... ZENG Qiong, LIU Dechun, LIU Yong (5133)
- Research progresses in carbon budget and carbon cycle of the coastal salt marshes in China .....  
..... CAO Lei, SONG Jinming, LI Xuegang, et al (5141)

### Autecology & Fundamentals

- Effects of straw interlayer on soil water and salt movement and sunflower photosynthetic characteristics in saline-alkali soils .....  
..... ZHAO Yonggan, PANG Huancheng, LI Yuyi, et al (5153)
- Adaptations of dimorphic seeds and seedlings of *Suaeda salsa* to saline environments .....  
..... LIU Yan, ZHOU Jiachao, ZHANG Xiaodong, et al (5162)
- Responses of root morphology of peanut varieties differing in drought tolerance to water-deficient stress .....  
..... DING Hong, ZHANG Zhimeng, DAI Liangxiang, et al (5169)
- The relationship between physiological indexes of apple cultivars and resistance to *Eriosoma lanigerum* in summer .....  
..... WANG Xicun, ZHOU Hongxu, YU Yi, et al (5177)
- Physiological responses of *Salicornia bigelovii* to salt stress during the flowering stage .....  
..... LIU Weicheng, ZHENG Chunfang, CHEN Chen, et al (5184)
- Biological characteristics and cultivation of fruit body of wild medicinal mushroom *Perenniporia fraxinea* .....  
..... LU Tie, BAU Tolgor (5194)
- The study of characteristics of soil microbial communities at high severity burned forest sites for the Great Xingan Mountains: an  
example of slope and aspect ..... BAI Aiqin, FU Bojie, QU Laiye, et al (5201)
- Effect of different fertilizer combinations and straw return on microbial biomass and nitrogen-fixing bacteria community in a paddy  
soil ..... LIU Xiaoqian, TU Shihua, SUN Xifa, et al (5210)
- Structural characters and nutrient contents of leaves as well as nitrogen distribution among different organs of big-headed wheat .....  
..... WANG Lifang, WANG Dexuan, SHANGGUAN Zhouping (5219)
- Effects of EP-1 on spatial memory and anxiety in *Mus musculus* ..... WANG Xiaojia, QIN Tingting, HU Xia, et al (5228)

### Population, Community and Ecosystem

- Gap characteristics in the mixed broad-leaved Korean pine forest in Xiaoxing'an Mountains .....  
..... LIU Shaochong, WANG Jinghua, DUAN Wenbiao, et al (5234)
- Soil nitrogen and phosphorus stoichiometry in a degradation series of *Kobresia humilis* meadows in the Tibetan Plateau .....  
..... LIN Li, LI Yikang, ZHANG Fawei, DU Yangong, et al (5245)
- An analysis of carbon flux partition differences of a mid-subtropical planted coniferous forest in southeastern China .....  
..... HUANG Kun, WANG Shaoqiang, WANG Huimin, et al (5252)
- The niche of annual mixed-seeding meadow in response to density in alpine region of the Qilian Mountain, China .....  
..... ZHAO Chengzhang, ZHANG Jing, SHENG Yaping (5266)
- Functional feeding groups of macrozoobenthos from coastal water off Rushan ..... PENG Songyao, LI Xinzhen (5274)

### Landscape, Regional and Global Ecology

- Effects of selective cutting on vegetation carbon storage of boreal *Larix gmelinii*-*Carex schmidtii* forested wetlands in Daxing'anling,  
China ..... MU Changcheng, LU Huicui, BAO Xu, et al (5286)
- CO<sub>2</sub> flux in the upland field with corn-rape seed rotation in the karst area of southwest China .....  
..... FANG Bin, LI Xinqing, CHENG Jianzhong, et al (5299)
- Monitoring spatial variability of soil salinity in dry and wet seasons in the North Tarim Basin using remote sensing and electromagn-  
etic induction instruments ..... YAO Yuan, DING Jianli, LEI Lei, et al (5308)
- Methane and nitrous oxide fluxes in temperate secondary forest and larch plantation in Northeastern China .....  
..... SUN Hailong, ZHANG Yandong, WU Shiyi (5320)
- Butterfly diversity and vertical distribution in eastern Tianshan Mountain in Xinjiang .....  
..... ZHANG Xin, HU Hongying, LÜ Zhaozhi (5329)

- Dynamics of aerodynamic parameters over a rainfed maize agroecosystem and their relationships with controlling factors ..... CAI Fu, ZHOU Guangsheng, MING Huiqing, et al (5339)
- The response process to extreme climate events of the household compound system in the northern slope of Tianshan Mountain ..... LI Xiliang, HOU Xiangyang, DING Yong, et al (5353)
- Analysis on spatial-temporal heterogeneities of landscape fragmentation in urban fringe area; a case study in Shunyi district of Beijing ..... LI Can, ZHANG Fengrong, ZHU Taifeng, et al (5363)
- Resource and Industrial Ecology**
- CPUE Standardization of *Illex argentinus* for Chinese Mainland squid-jigging fishery based on generalized linear Bayesian models ..... LU Huajie, CHEN Xinjun, CAO Jie (5375)
- Spatial-temporal differentiation of water quality in Gufu River of Three Gorges Reservoir ..... RAN Guihua, GE Jiwen, MIAO Wenjie, et al (5385)
- Urban, Rural and Social Ecology**
- Comparison environmental impact of the peasant household in han, zang and hui nationality region; case of zhangye, Gannan and Linxia in Gansu Province ..... ZHAO Xueyan, MAO Xiaowen (5397)
- Research Notes**
- The seasonal variation and community structure of zooplankton in China sea ..... DU Mingmin, LIU Zhensheng, WANG Chunsheng, et al (5407)
- Immunotoxicity of marine pollutants on the clam *Ruditapes philippinarum* ..... DING Jianfeng, YAN Xiwu, ZHAO Liqiang, et al (5419)
- Influence of submerged macrophytes on phosphorus transference between sediment and overlying water in decomposition period ..... WANG Lizhi, WANG Guoxiang (5426)
- Distribution patterns of alien herbs in the Yiluo River basin ..... GUO Yili, DING Shengyan, SU Si, et al (5438)

# 《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 张利权

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)

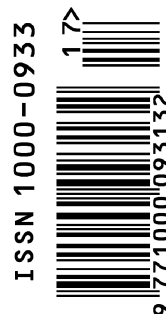
第 33 卷 第 17 期 (2013 年 9 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 17 (September, 2013)

|               |                                                                                                                    |                 |                                                                                                                                                                                 |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 编 辑           | 《生态学报》编辑部<br>地址:北京海淀区双清路 18 号<br>邮政编码:100085<br>电话:(010)62941099<br>www.ecologica.cn<br>shengtaixuebao@rcees.ac.cn | Edited by       | Editorial board of<br>ACTA ECOLOGICA SINICA<br>Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China<br>Tel:(010)62941099<br>www.ecologica.cn<br>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<br>中国科学院生态环境研究中心<br>地址:北京海淀区双清路 18 号<br>邮政编码:100085                                                        | Sponsored by    | Ecological Society of China<br>Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS<br>Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China                                 |
| 出 版           | 科 学 出 版 社<br>地址:北京东黄城根北街 16 号<br>邮政编码:100717                                                                       | Published by    | Science Press<br>Add:16 Donghuangchenggen North Street,<br>Beijing 100717, China                                                                                                |
| 印 刷           | 北京北林印刷厂                                                                                                            | Printed by      | Beijing Bei Lin Printing House,<br>Beijing 100083, China                                                                                                                        |
| 发 行           | 科 学 出 版 社<br>地址:东黄城根北街 16 号<br>邮政编码:100717<br>电话:(010)64034563<br>E-mail:journal@cspg.net                          | Distributed by  | Science Press<br>Add:16 Donghuangchenggen North<br>Street, Beijing 100717, China<br>Tel:(010)64034563<br>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<br>地址:北京 399 信箱<br>邮政编码:100044                                                                         | Foreign         | China International Book Trading<br>Corporation<br>Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China                                                                                      |
| 广告经营<br>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