

不同温度及盐碱环境下盐地碱蓬的萌发策略*

管博^{1,2} 栗云召^{1,2} 于君宝^{1,3,*} 陆兆华^{1,3}

(¹中国科学院烟台海岸带研究所滨海湿地生态实验室, 中国科学院海岸带环境过程重点实验室, 山东烟台 264003 ²中国科学院研究生院, 北京 100049 ³滨州学院山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 山东滨州 256603)

摘要 为了研究黄河三角洲优势种盐地碱蓬在不同胁迫环境条件下的萌发策略, 分别在不同温度、盐度、碱度以及海水原溶液条件下, 进行了室内萌发实验, 并且测量了其幼苗体内的 Na^+ 和 K^+ 含量。结果表明, 盐地碱蓬种子发芽所需要的积温和最低温度分别为 $24.57\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{d}$ 和 $0.62\text{ }^\circ\text{C}$, 最适发芽温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}\sim 35\text{ }^\circ\text{C}$, 在温度 $5\text{ }^\circ\text{C}\sim 40\text{ }^\circ\text{C}$ 下均表现出较高的发芽率而且 $5\text{ }^\circ\text{C}\sim 35\text{ }^\circ\text{C}$ 下发芽速度随温度升高而显著增加。盐地碱蓬具有较高的耐盐性, 当盐浓度达到 $500\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 发芽率均高于 50%, 并且在 100% 海水溶液浓度下发芽率也能达到 38%, 高盐条件下未萌发的种子转移到淡水中, 均表现出较高的复萌率。盐地碱蓬幼苗体内 Na^+ 含量随盐度 (NaCl 溶液浓度) 升高而显著增加, 而 K^+ 含量在该盐度下差异不显著; 幼苗体内 Na^+ 、 K^+ 含量在高碱度 (200 和 $300\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaHCO}_3$) 中均显著低于其在低碱度 ($100\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaHCO}_3$ 溶液) 中的含量, 说明碱胁迫对幼苗生长产生了显著性影响; Na^+ 、 K^+ 含量均随着海水溶液浓度增加而显著增加。因此, 盐地碱蓬种子萌发的广温性、高耐盐性、高盐环境中的种子高存活率以及幼苗的较强的耐盐能力是盐地碱蓬种群在黄河三角洲适应滨海盐碱湿地复杂环境的主要生存策略。

关键词 黄河三角洲; 发芽率; 盐地碱蓬; 温度; 离子含量

中图分类号 Q948.1 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2011)7-1411-06

Gemination strategies of *Suaeda salsa* at different temperature and under different salt stress GUAN Bo^{1,2}, LI Yun-zhao^{1,2}, YU Jun-bao^{1,3,*}, LU Zhao-hua^{1,3} (¹Laboratory of Coastal Wetland Ecology, Key laboratory of Coastal Environment Processes, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, Shandong, China; ²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ³Research Center for Eco-Environmental Sciences of Yellow River Delta, Binzhou University, Binzhou 256603, Shandong, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(7): 1411-1416

Abstract Aimed to understand the gemination strategies of *Suaeda salsa* under different environmental stress in the Yellow River Delta, an indoor gemination test was conducted, and the seedling's Na^+ and K^+ contents were determined at different temperature, salinity and alkalinity, and in seawater solution. The thermal time and base temperature for the seed gemination were $24.57\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{d}$ and $0.62\text{ }^\circ\text{C}$, respectively, and the optimal temperature was $20\text{ }^\circ\text{C}\sim 35\text{ }^\circ\text{C}$. The gemination percentage was high at $5\text{ }^\circ\text{C}\sim 40\text{ }^\circ\text{C}$, and the gemination rate increased significantly when the temperature increased from $5\text{ }^\circ\text{C}$ to $35\text{ }^\circ\text{C}$. The gemination percentage was higher than 50% in $500\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ of NaCl and about 38% in 100% seawater. After seeds transferred from high concentration NaCl solutions to distilled water, the un-geminated seeds could geminate well, which indicated that the un-geminated seeds could remain active in high salt habitats. With the increasing concentration of NaCl in solution, the seedling's Na^+ content increased significantly while the K^+ content had less change. In 200 and $300\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ of

* 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (kzcx2-yw-223)、公益性行业 (农业) 科研专项经费项目 (200903001)、中国科学院百人计划项目、中国科学院国家外国专家局创新团队国际合作伙伴计划项目、“十一五”国家科技支撑计划项目 (2006BAC01A13)、国家自然科学基金项目 (30770412) 和山东省科技攻关计划项目 (2008GG2005006, 2008GG3NS07005) 资助。

** 通讯作者 E-mail: Junbao_yu@gnail.com

收稿日期: 2010-12-31 接受日期: 2011-03-29

NaHCO_3 , the seedling's Na^+ and K^+ contents were significantly lower than those in $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ of NaHCO_3 , indicating that high alkalinity stress affected the ion accumulation in *S. salsa* seedling's significantly. With increasing seawater concentration, the seedling's Na^+ and K^+ content also had significant increase. Therefore, the wide temperature-adaptation and high salt-tolerance for seed germination, the high seed vigor under high salt stress, and the high salt ion accumulation in seedling could be the main germination strategies of *S. salsa* adapting to the complicated environments in saline-alkaline wetlands of the Yellow River Delta.

Key words Yellow River Delta; germination percentage; *Suaeda salsa*; temperature; ion content

黄河三角洲地区属于暖温带季风气候区, 年平均气温 12.1°C , 年均降雨量 551.6 mm , 蒸发量达到 1962 mm , 干旱指数高达 3.56 。由于其特殊的地理位置和较短的成陆时间, 其湿地生态系统具有明显的脆弱性, 加之土壤成土历程短, 熟化程度低, 土壤养分少, 地表水分蒸发快, 极易造成盐碱化 (张晓龙, 2005; Cui et al., 2009)。而在盐渍化土壤中, 土壤盐化与碱化经常同时存在。目前黄河三角洲盐碱退化荒地已经达到 16.7 万 km^2 (李甲亮等, 2008), 其盐碱土的 pH 在 $8 \sim 9.5$ 内, 只有少数具有较高耐盐碱性的盐生植物可以生存。

植物在不同生长时期的耐受性不同, 发芽期是决定植物能否成功建植及生长的关键阶段。温度、盐度、光照以及土壤湿度均能够显著影响种子发芽 (Ehler & Al-Rawaj 2005, 2006)。盐生植物在发芽阶段对于盐胁迫的耐受性也各不相同 (Song et al., 2008; Wang et al., 2008; Wei et al., 2008)。研究表明, 当盐胁迫超过最适生长条件时, 一些盐生植物仍然能够保持种子活力 (Zia & Khan, 2004; 李峰等, 2009), 也有研究认为当盐胁迫强度超过耐受阈值时, 发芽就会完全受到抑制, 甚至导致种子死亡 (Khan et al., 2001)。因此, 探讨植物发芽阶段对于盐碱环境的耐受性是提高植物在盐碱胁迫条件下生存以及恢复退化盐碱生态系统的重要途径之一。植物能否成功发芽定居不仅需要适宜的土壤条件, 也需要达到一定的积温, 所以温度同样也是决定种子发芽时间以及分布的重要影响因子之一 (管博等, 2010)。

盐地碱蓬 (*Suaeda salsa*) 又名翅碱蓬, 碱蒿, 属于 1 年生肉质化盐生植物, 广泛生长于我国的东北、华北和西北等地区, 亦是黄河三角洲盐碱湿地先锋物种。关于盐地碱蓬耐盐性研究报道很多 (Liu et al., 2004; Li et al., 2005; Song et al., 2008), 但针对盐地碱蓬对于不同温度以及不同盐、碱胁迫的萌发

策略尚未见报道。本文以盐地碱蓬为研究对象, 针对其在不同温度、盐、碱以及海水环境下的萌发策略以及离子积累状况做了研究, 以期对黄河三角洲退化盐碱湿地恢复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试种子于 2008 年秋天采自黄河三角洲滨海湿地, 采收的种子放置于 4°C 冰箱中保存, 于 2009 年 2—5 月进行。实验前将盐地碱蓬种子用 10% 次氯酸钠溶液消毒 10 min, 然后风干, 待测。

1.2 方法

1.2.1 温度处理 选取饱满的种子 50 粒放置于铺有两层滤纸的培养皿 (直径 10 cm) 中, 加入 10 mL 蒸馏水, 之后用封口膜密封, 以防止水分蒸发。每处理重复 4 次。以种子胚根突破种皮 1 mm 视为发芽, 每天同一时间观察种子发芽情况并记录发芽数。实验在培养箱 (BSG-80Q 上海) 中进行, 光照均采用 12 h 光照 ($200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $400 \sim 700 \text{ nm}$), 12 h 黑暗。温度处理分别为 5°C 、 10°C 、 15°C 、 20°C 、 25°C 、 30°C 、 35°C 、 40°C 恒温。发芽时间为 10 d 。

1.2.2 不同盐碱及海水处理 实验选取不同浓度 NaCl 和 NaHCO_3 模拟黄河三角洲滨海湿地盐、碱胁迫, 不同浓度海水溶液模拟海水入侵对盐地碱蓬产生的影响。其中 NaCl 和 NaHCO_3 浓度梯度均为 0 、 100 、 200 、 300 、 400 和 $500 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 海水溶液浓度为 0% 、 25% 、 50% 、 75% 和 100% (试验用海水的盐度为 3.3 相当于 $564.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaCl}$)。每处理重复 4 次。以种子胚根突破种皮 1 mm 视为发芽, 每天同一时间观察种子发芽情况并记录发芽数。实验在培养箱 (BSG-80Q 上海) 中进行, 光照均采用 12 h 光照 ($200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $400 \sim 700 \text{ nm}$), 12 h 黑暗, 发芽时间为 10 d 。

1.2.3 测定指标 种子发芽率 (G) = 实际发芽数 /

种子总数 $\times 100\%$

发芽速度 (GR) = $\sum G/t \times 100\%$ (Khan & Ungar 1984), 式中: G 为每天的发芽率; t 为发芽总时间。

复萌率 = 转移到清水后发芽种子数 / 转移到清水后的总种子数 $\times 100\%$

最终发芽率 = (溶液中发芽种子数 + 转移到清水后发芽种子数) / 种子总数 $\times 100\%$

积温 (S) = $(T - T_b) / t$ (Biehuizen & Wagenvoort 1974), 式中: T 为环境温度; T_b 为最低温度; t 为发芽天数。

Na^+ 、 K^+ 测定: 萌发 10 d 后, 将所有发芽的幼苗用蒸馏水清洗, 去除表面盐溶液, 于 $60^\circ C$ 烘干至恒重, 各处理的幼苗磨碎后分别取 50 mg 干样, 用 10 mL 去离子水于 $100^\circ C$ 下提取 1 h, 用原子吸收分光光度计测量幼苗体内 Na^+ 、 K^+ 含量。

1.3 数据处理

所有发芽数据均经过反正弦转换进行统计分析, 应用 SPSS 11.5 进行数据处理。实验数据均采用单因素方差分析, 差异显著性水平为 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 温度对盐地碱蓬发芽的影响

$5^\circ C \sim 40^\circ C$ 盐地碱蓬均表现出较高的发芽率 ($G > 61\%$), 发芽速度随着温度的升高显著增加 (图 1)。各温度下盐地碱蓬均具有较高的发芽率和发芽速度, 表明其能够在适宜的温度情况下迅速发芽定居。当温度达到 $40^\circ C$ 时, 发芽率与发芽速度均有

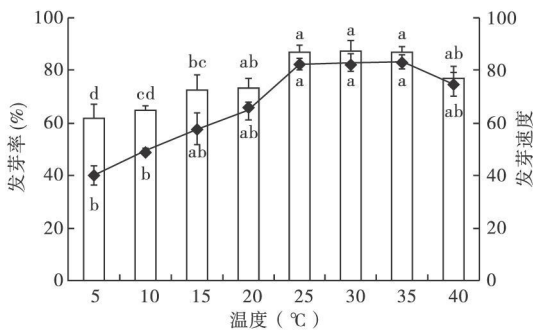


图 1 不同温度对盐地碱蓬发芽率 (柱) 以及发芽速度 (线) 的影响

Fig 1 Final germination percentage (columns) and germination rate (points) of *Suaeda salsa* seeds at different temperature regimes

同指标不同字母表示不同温度间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

所下降, 并且出现种子发芽后大量死亡的现象, 可能是由于温度过高导致幼苗无法正常生存。由图 1 可见, 盐地碱蓬最适发芽温度为 $20^\circ C \sim 35^\circ C$, 此时发芽率和发芽速度均达到最高。 $5^\circ C$ 和 $10^\circ C$ 时发芽率最低, 原因可能为低温导致种子新陈代谢受到抑制而延缓或停止种子发芽。经计算得出, 盐地碱蓬种子发芽所需的积温和最低温度分别为 $24.57^\circ C \cdot d$ 和 $0.619^\circ C$, 因此, 较低温度下种子要想获得足够的积温, 就必须延长发芽时间, 这也是发芽速度随着温度降低而显著降低的原因。

2.2 盐碱及海水对盐地碱蓬发芽的影响

由图 2 和表 1 可以看出, 发芽率、发芽速度均与不同盐处理呈极显著相关性。随着盐浓度的增加, 盐地碱蓬发芽率均显著降低 (图 2)。 $NaCl$ 和

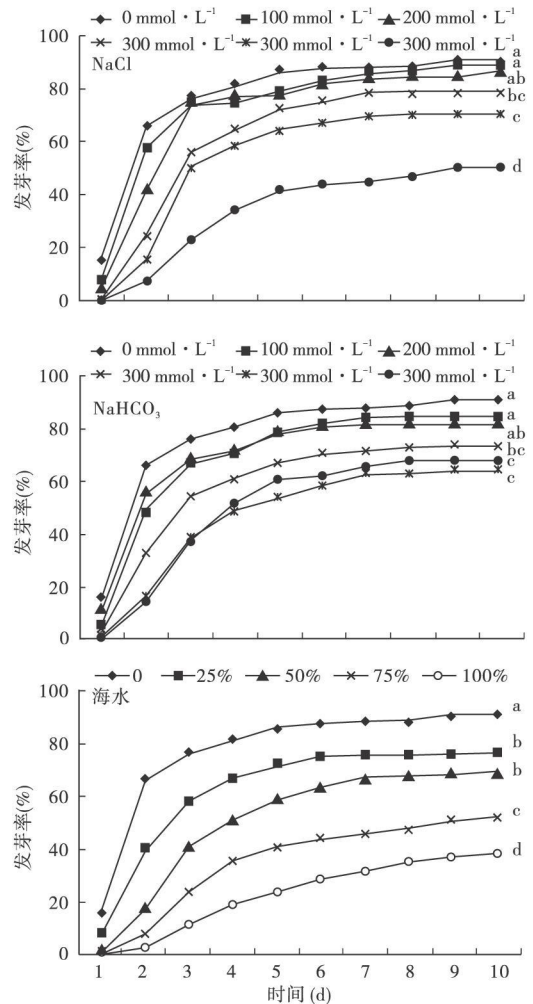


图 2 盐地碱蓬发芽率随不同浓度 $NaCl$ 、 $NaHCO_3$ 以及海水溶液处理的变化趋势

Fig 2 Cumulative germination percentages of *Suaeda salsa* seeds incubated in $NaCl$, $NaHCO_3$ and seawater treatments

表 1 不同盐浓度对发芽速度、复萌率和最终发芽率的影响
Table 1 Effects of different salts on gem ination rate ger mination recovery and final gem ination percentage

盐	浓度 (mmol·L ⁻¹)	发芽速度	复萌率 (%)	最终发芽率 (%)
NaCl	0	77.55±1.39 a	0	91
	100	73.10±1.19 a	0	89
	200	70.05±3.39 ab	38	92
	300	61.30±1.35 bc	38	87
	400	54.20±0.42 c	24	78
	500	34.60±4.67 d	24	62
NaHCO ₃	0	77.55±1.39 a	0	91
	100	69.67±1.25 ab	0	85
	200	69.55±3.98 ab	16	85
	300	58.40±5.21 bc	43	85
	400	47.55±3.17 c	42	79
	500	50.00±4.29 c	39	81
海水	0%	77.55±1.39 a	0	91
	25%	62.50±1.87 b	32	84
	50%	50.80±2.74 b	31	79
	75%	35.25±4.85 c	41	72
	100%	23.15±3.29 c	44	65

不同字母表示不同浓度处理差异显著 ($P < 0.05$)。

NaHCO₃ 浓度低于 200 mmol·L⁻¹ 时,发芽率与清水中的发芽率差异不显著;当浓度达到 500 mmol·L⁻¹ 时,发芽率分别为 50% 和 60%,说明盐地碱蓬具有很高的耐盐能力,即使是处于 100% 海水溶液浓度下,发芽率也达到 38%。而将盐溶液中未发芽的种子转到清水中时,盐地碱蓬均出现了较高的复萌率,其最终发芽率达到或接近了清水的发芽率(表 1)。作为黄河三角洲滨海盐碱湿地的先锋物种,在一定盐碱环境中盐地碱蓬能够正常萌发生长,而在不适萌发的高盐条件下,盐地碱蓬种子能够保持活力,并在盐浓度降低后迅速萌发,这正是其在复杂的盐碱环境中生存的适应性机制。

由图 3 可知,发芽速度与不同浓度的 NaCl NaHCO₃ 和海水溶液均呈现良好的线性关系 ($R^2 = 0.94\ 0.87\ 0.99$)。图 3 表 1 和表 2 均表明盐浓度是影响发芽速度的决定性因素。

2.3 不同盐对盐地碱蓬幼苗体内离子积累的影响

由表 3 可知,不同盐浓度下盐地碱蓬体内 Na⁺、

表 2 盐地碱蓬发芽率、发芽速度与温度和不同盐处理之间的单因素方差分析

	发芽率 (%)			发芽速度		
	自由度 <i>df</i>	方差 <i>MS</i>	<i>F</i>	自由度 <i>df</i>	方差 <i>MS</i>	<i>F</i>
温度	7	462.212	6.350***	7	1254.889	22.321***
NaCl	5	969.500	28.940***	5	993.332	38.543***
NaHCO ₃	5	417.849	8.916***	5	566.720	10.715***
海水溶液	4	1725.700	23.924***	4	1854.265	49.054***

*** $P < 0.001$

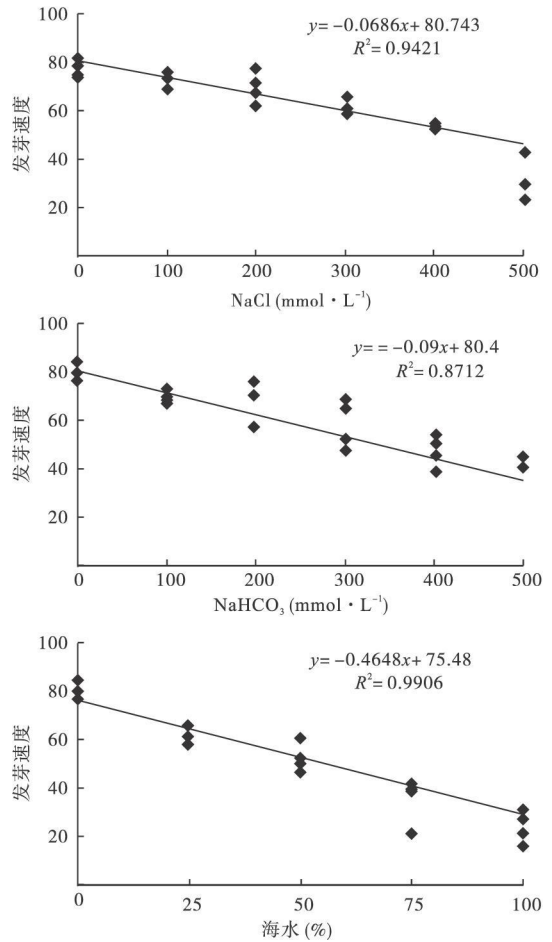


图 3 发芽速度与盐胁迫浓度的线性回归
Fig 3 Linear regression between gem ination rate and salt stresses

K⁺ 含量差异显著。随着 NaCl 溶液浓度的升高, Na⁺ 含量显著增加, K⁺ 变化差异不显著。说明在高盐环境中,盐地碱蓬能够通过大量吸收环境中 Na⁺ 而适应胁迫环境。但 200 和 300 mmol·L⁻¹ NaHCO₃ 中, Na⁺、K⁺ 显著低于 100 mmol·L⁻¹ NaHCO₃ 处理,原因可能为在较高浓度的 NaHCO₃ 溶液中,盐地碱蓬不仅受到渗透胁迫和离子胁迫,较高的 pH 也成为其正常生长的限制性因素,使之不能大量吸收盐离子。在海水溶液浓度增加的情况下, Na⁺、K⁺ 含量均显著

表 3 不同盐处理下盐地碱蓬幼苗体内 Na^+ 、 K^+ 含量 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 干重) 以及 K^+ / Na^+ 的情况Table 3 Content of Na and K in *Suaeda salsa* seedlings treated with different salt solutions

盐	浓度 ($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)	Na^+	K^+	K^+ / Na^+
NaCl	0	537.8 ± 28.5 a	229.5 ± 16.9 a	0.43
	100	1253.1 ± 27.7 b	237.9 ± 5.5 a	0.19
	200	1787.9 ± 65.8 c	205.7 ± 3.0 a	0.11
	300	2447.1 ± 11.8 d	203.0 ± 3.4 a	0.08
NaHCO_3	0	537.8 ± 28.5 a	229.5 ± 16.9 a	0.43
	100	1194.0 ± 91.7 c	194.8 ± 4.8 a	0.16
	200	851.3 ± 15.0 b	108.7 ± 5.5 b	0.13
	300	840.2 ± 14.4 b	94.0 ± 2.0 b	0.11
海水溶液	0%	537.8 ± 28.5 a	229.5 ± 16.9 a	0.43
	25%	1450.1 ± 15.0 b	56.1 ± 6.8 b	0.39
	50%	1836.0 ± 37.5 c	53.4 ± 17.2 b	0.29
	75%	2370.0 ± 18.0 d	60.9 ± 5.2 b	0.26
	100%	2684.4 ± 18.6 e	61.2 ± 26.0 b	0.23

不同字母表示不同浓度盐溶液下差异显著 ($P < 0.05$)。

性增加, 因为海水中含有大量的离子以及营养元素, 所以幼苗体内 Na^+ 、 K^+ 等均产生积累现象。而 K^+ / Na^+ 随盐浓度增加而降低则是由于幼苗体内大量积累 Na^+ 引起的。

3 讨论

本研究表明, 盐地碱蓬能在较广的温度范围内发芽, 并保持较高的发芽速度, 最适发芽温度为 $20^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$ 。经过不同温度下发芽响应整合出的相关系数带入发芽积温模型得到盐地碱蓬种子发芽所需的积温和最低温度分别为 $24.57^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 和 0.62°C 。在较低温度下, 盐地碱蓬需要延长发芽时间而获得发芽所需的足够积温。许多研究表明, 在野外环境中, 多数物种都有识别并选择有利的发芽条件的能力而进行定居 (Grime 2001; Zhang *et al.*, 2007; 李秋艳和方海燕, 2008)。每年春季, 随着温度逐渐升高, 种子发芽所需的积温条件成熟, 大量种子开始萌发。这也正是黄河三角洲滨海湿地地区盐地碱蓬种子萌发对于温度响应的策略。

盐地碱蓬具有较高的耐盐性, 在盐浓度达到 $500 \text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 发芽率也能达到 50% 以上。盐浓度较低时, 盐地碱蓬具有更高的发芽率和较快的发芽速度, 在野外恶劣的盐碱环境中也能够正常生存。许多盐生植物在较高盐环境中能够保持种子活力而不发芽, 当转移到清水中时即恢复发芽能力 (Khan & Ungar 1984; Wei *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2010)。也有一些植物种子在高盐环境中浸泡一定

时间会丧失复萌的能力 (Tlig *et al.*, 2008)。而本研究表明, 盐地碱蓬种子在高于最适发芽的盐环境中能够保持活力, 待盐浓度下降后迅速萌发。在黄河三角洲高盐碱环境下, 盐地碱蓬种子暂不萌发, 而在降雨或有淡水冲洗后大量萌发, 这样就可避免高盐环境对植株的毒害, 这种对于一定盐浓度的耐受能力以及高盐浓度下保持种子活力的能力均是盐地碱蓬种子适应盐碱环境的生存策略。

NaCl 溶液对种子萌发的影响主要是渗透胁迫和离子胁迫, 而 NaHCO_3 溶液中不但有渗透胁迫和离子胁迫, 还有 pH 胁迫, 本研究中不同浓度 NaHCO_3 溶液的 pH 范围为 $8.4 \sim 9.0$ 。较高的 pH 胁迫能够造成种子周围矿质营养状况的严重破坏, 虽然对发芽过程并未产生决定性影响, 但对幼苗的离子积累的能力却造成了严重的破坏。有研究表明, 在复杂盐碱混合条件下, 盐生植物叶片中 Na^+ 含量均随盐碱浓度的升高而显著升高 (Yang *et al.*, 2007)。而本实验结果表明, 在单纯的 NaHCO_3 溶液中, 幼苗体内 Na^+ 、 K^+ 含量在 200 和 $300 \text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaHCO_3 中均显著低于其在 $100 \text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaHCO_3 溶液中的含量, 但却显著高于对照组。在黄河三角洲滨海湿地地区, 由于经常受到海水侵蚀, 所以本实验用不同浓度的海水溶液进行模拟胁迫处理, 盐地碱蓬幼苗体内 Na^+ 、 K^+ 均随着海水溶液浓度的升高而显著升高, 正是因为海水中存在大量 Na^+ 、 K^+ 以及营养元素, 使之在盐地碱蓬幼苗体内大量积累所致。

盐地碱蓬作为黄河三角洲滨海湿地的先锋物种, 广泛的发芽温度范围, 较高的耐盐性, 高盐环境中种子活力的保持能力以及较强的吸收盐离子的能力均成为其能够在复杂多变的盐碱环境中成功萌发并定居的生存策略。本实验结果不仅对盐地碱蓬萌发阶段的生理生态功能研究提供了一定理论依据, 也对利用盐生植物进行黄河三角洲重度退化盐碱湿地修复工作起到了一定的指导意义。

致谢 刘玉虹博士帮助修改论文英文摘要, 在此表示感谢。

参考文献

- 管 博, 周道玮, 田 雨, 等. 2010 盐碱及变温条件对花苜蓿种子发芽的影响. 中国草地学报, 32(1): 58–63
- 李 峰, 谢永宏, 覃盈盈. 2009 盐胁迫条件下湿地植物的适应策略. 生态学杂志, 28(2): 314–321
- 李甲亮, 陆兆华, 田家怡, 等. 2008 造纸废水灌溉对滨海盐碱化湿地的生态修复. 中国矿业大学学报, 37(2):

281–286

- 李秋艳, 方海燕. 2008 温度、基质对泡泡刺种子萌发的影响. 生态学杂志, **27**(5): 723–728
- 张晓龙. 2005 现代黄河三角洲滨海湿地环境演变及退化研究 (博士学位论文). 青岛: 中国海洋大学.
- Bierhuizen JF, Wagenvoort WA. 1974 Some aspects of seed germination in vegetables I. The determination and application of heat sums and minimum temperature for germination. *Scientia Horticulturae*, **2**: 213–219
- Cui BS, Yang QC, Yang ZF *et al.* 2009 Evaluating the ecological performance of wetland restoration in the Yellow River Delta, China. *Ecological Engineering*, **35**: 1090–1103
- Etkewlavy A, Ahravai A. 2005 Effects of salinity, temperature and light on germination of invasive *Prosopis juliflora* (Sw.) D. C. *Journal of Arid Environments*, **61**: 555–565
- Grimé JP. 2001 Plant Strategies, Vegetation Processes and Ecosystem Properties. Chichester: John Wiley & Sons Ltd
- Khan MA, Gul B, Weber DJ. 2001 Seed germination characteristics of *Halogelton glomeratus*. *Canadian Journal of Botany*, **79**: 1189–1194
- Khan MA, Ungar I. 1984 The effect of salinity and temperature on the germination of polymorphic seeds and growth of *Atriplex triangularis* Willd. *American Journal of Botany*, **71**: 481–489
- Li RL, Shi FC, Fukuda K. 2010 Interactive effects of salt and alkali stresses on seed germination, germination recovery, and seedling growth of a halophyte *Spartina alterniflora* (Poaceae). *South African Journal of Botany*, **76**: 380–387
- Li WQ, Li XJ, Khan MA, *et al.* 2005 The effect of plant growth regulators, nitric oxide, nitrate, nitrite and light on the germination of dimorphic seeds of *Suaeda salsa* under saline conditions. *Journal of Plant Research*, **118**: 207–214
- Liu XJ, Yang YM, Li WQ, *et al.* 2004 Interactive effects of sodium chloride and nitrogen on growth and ion accumulation of a halophyte. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **35**: 2111–2123
- Song J, Fan H, Zhao YY, *et al.* 2008 Effect of salinity on germination, seedling emergence, seedling growth and ion accumulation of a euhalophyte *Suaeda salsa* in an intertidal zone and on saline inland. *Aquatic Botany*, **88**: 331–337
- Tig T, Goni M, Neffati M. 2008 Germination responses of *Diploaxis harra* to temperature and salinity. *Fibra*, **203**: 421–428
- Wang L, Huang ZY, Baskin CC, *et al.* 2008 Germination of dimorphic seeds of the desert annual halophyte *Suaeda aralocaspica* (Chenopodiaceae), a C₄ plant without Kranz anatomy. *Annals of Botany*, **102**: 757–769
- Wei Y, Dong M, Huang ZY, *et al.* 2008 Factors influencing seed germination of *Salsola affinis* (Chenopodiaceae), a dominant annual halophyte inhabiting the deserts of Xinjiang, China. *Flora*, **203**: 134–140
- Yang CW, Chong JN, Li CY, *et al.* 2007 Osmotic adjustment and ion balance traits of an alkali resistant halophyte *Kochia sieversiana* during adaptation to salt and alkali conditions. *Plant and Soil*, **294**: 263–276
- Zhang H, Zhou DW, Wang P, *et al.* 2007 Germination responses of four wild species to diurnal increase or decrease in temperature. *Seed Science and Technology*, **35**: 291–302
- Zia S, Khan MA. 2004 Effect of light, salinity, and temperature on seed germination of *Limonium stocksii*. *Canadian Journal of Botany*, **82**: 151–157

作者简介 管博,男,1981年生,博士研究生。主要从事滨海退化湿地修复研究。Email: guanb62@yahoo.cn
责任编辑 魏中青
