

吴统贵, 吴明, 虞木奎, 萧江华, 成向荣. 杭州湾滨海滩涂盐基阳离子对植物分布及多样性的影响. 生态学报, 2011, 31(20): 6022-6028.

Wu T G, Wu M, Yu M K, Xiao J H, Cheng X R. Effects of soil base cation composition on plant distribution and diversity in coastal wetlands of Hangzhou Bay, East China. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(20): 6022-6028.

杭州湾滨海滩涂盐基阳离子对植物分布 及多样性的影响

吴统贵, 吴明, 虞木奎*, 萧江华, 成向荣

(中国林业科学研究院亚热带林业研究所 国家林业局杭州湾湿地生态系统定位研究站, 富阳 311400)

摘要:滨海滩涂由于其高含盐量显著影响了植物群落分布及生物多样性。目前有关滩涂含盐量与生物多样性的关系研究较多, 但不同区域盐基离子组成不同, 且对植物的影响也存在较大差异, 以杭州湾南岸不同年代形成的滩涂为研究对象, 系统监测了 50 个样方土壤交换性盐基阳离子的组成、分布和植物组成及多样性特征等, 采用去趋势典范对应分析(DCCA)、线性回归和多元逐步回归分析了 4 种盐基阳离子对物种数量、分布和多样性的影响。结果表明, 杭州湾南岸滩涂 4 种主要盐基阳离子含量(g/kg)大小顺序为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$, 其中 Ca^{2+} 占到总含量的 61.97%; 经 DCCA 分析发现 4 种盐基阳离子对植物群落的分布均有显著影响, 但以 Ca^{2+} 的影响程度最大; 随着盐基离子含量的逐渐降低, 物种数量逐渐增加, 多样性指数逐渐增加, 同时也发现 Ca^{2+} 对两种多样性指数影响最大。

关键词:杭州湾滨海湿地; 盐基离子; DCCA; 植物分布; 植物多样性

Effects of soil base cation composition on plant distribution and diversity in coastal wetlands of Hangzhou Bay, East China

WU Tonggui, WU Ming, YU Mukui*, XIAO Jianghua, CHENG Xiangrong

Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Wetland Ecosystem Research Station of Hangzhou Bay, State Forestry Administration, Fuyang, 311400, China

Abstract: There are 32 000 km of coastal line and $2 \times 10^6 \text{ hm}^2$ of beach land in coastal area, China. Hangzhou Bay coastal wetland is the intersection of north and south coastal wetlands in China, and which is implied that the research is of high value in the view of science. It is well known that plant distribution and bio-diversity are influenced strongly by soil salinity of beach in coastal wetlands. Relationships between plant species distribution, bio-diversity and soil salinity have been studied in many sites in past several decades, yet few focusing on soil base cations composition of beach and their effects on plant distribution and diversity. In this paper, soil base cations composition and distribution, plant species composition and diversity in 50 plots were monitored using method of line transects with random sampling in Hangzhou Bay coastal wetlands, and the effects of base cations on plant species distribution and diversity were analyzed using Detrended Canonical Correspondence Analysis (DCCA), stepwise regression and linear regression. The 4 main base cations concentrations (means \pm SD) were $(3.66 \pm 1.58) \text{ g/kg}$ (Ca^{2+}), $(1.83 \pm 1.25) \text{ g/kg}$ (Na^+), $(0.56 \pm 0.23) \text{ g/kg}$ (Mg^{2+}), $(0.22 \pm 0.12) \text{ g/kg}$ (K^+), respectively. And the concentration of Ca^{2+} was accounted for 61.97% of total base cations concentrations. While the base cations concentrations of coastal beach out of inning dam ((4.87 ± 0.41) , (2.19 ± 0.26) , (0.65 ± 0.12) , $(0.28 \pm 0.07) \text{ g/kg}$, respectively) were higher than in inning dam ($P < 0.05$). Meanwhile, 17 species

基金项目:国家林业局“948”引进项目(2010-4-20);“十一五”国家科技支撑课题(2009BADB2B03);中国林科院亚热带林业研究所基本科研业务费(RISF6154)

收稿日期:2011-06-05; 修订日期:2011-07-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yumukui@sina.com

were found in 50 plots, herbs mainly including typical beach plants, such as *Scirpus mariqueter*, *Phragmites communis*, *Spartina alterniflora*, etc., and shrubs including *Tamarix chinensis* and *Salix matsudana*. The DCCA axis 1, explained 59% of variance of species and environment relation and showed significant relationships to 4 base cations, reflected the gradient of 4 base cations, which meant they all influenced plant distribution. While Ca^{2+} , owned longest axis and smallest angle, was the most important factors. The DCCA axis 2, explained 25% of variance of species and environment relation, reflected the gradient of Mg^{2+} and K^+ . And we found the number of plant species decreased with the increasing of both DCCA axis 1 and DCCA axis 2. With the decreasing of base cations concentrations of plots, the values of diversity indices, both Shannon-Wiener index (H') and Simpson index (DS), increased. Moreover, significantly relationships were found between 4 base cations concentrations and H' , DS ($P < 0.05$). Hereafter, only Ca^{2+} was selected through stepwise regression, which indicated the importance of Ca^{2+} on plant diversity. The results may mean that calcium ion, with highest concentration on the beach, had most important effect on plant distribution and diversity in Hangzhou Bay coastal wetlands, which is different to other beach wetlands in China.

Key Words: Hangzhou Bay coastal wetlands; base cations; DCCA; plant distribution; plant diversity

我国海岸线(包括岛屿海岸线和大陆海岸线)总长度约 32 000 km,沿海滩涂湿地面积约 $2 \times 10^6 \text{ hm}^2$,土壤高含盐量一直是影响滩涂植物生长分布的主要因子之一^[1-2]。目前有关盐分对滨海植物生长、生存和生物多样性的影响多数集中在土壤 Na^+ 上^[3-4],然而不同区域滨海滩涂盐基离子组成存在较大差异^[5-7],同时各盐基离子对植物的影响也不尽相同^[8-9],因此深入研究滨海湿地土壤盐基离子的组成特征及主要盐基离子对滩涂植物分布和群落多样性特征的影响具有非常重要的科学意义。

杭州湾滨海滩涂是由长江和浙江入海河流输沙以及海底掀沙淤积而成,是我国滨海湿地的南北过渡带,在维持区域生态平衡、提供珍稀动植物栖息地和保护生物多样性等方面具有非常重要的作用。李侠等^[4]研究了该区域土壤 Na^+ 含量对植物多样性及优势度的影响,但有关本区域土壤盐基离子的组成特征还未有报道,本文监测了杭州湾南岸滨海滩涂 4 种主要交换性盐基阳离子(K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+})含量及其分布特征,分析了各离子对植物分布和多样性的影响,以期为本区域植被恢复和管理提供翔实的基础数据和理论依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于浙江省慈溪市国家林业局杭州湾湿地生态系统定位研究站境内,中心地理位置 $121^\circ 08' 43'' \text{E}$, $30^\circ 18' 40'' \text{N}$ 。该地区多年平均气温为 $16.0 \text{ }^\circ \text{C}$,1 月份最冷,平均气温为 $3.8 \text{ }^\circ \text{C}$,7 月份最热,平均气温 $28.2 \text{ }^\circ \text{C}$,全年平均日照时数约为 2 038.4 h,无霜期约为 244 d。多年平均降水量为 1 344.7 mm。同时,滩涂湿地受潮水影响较大,该区域潮流属不正规半日潮流,为往复流性质,涨潮历时 6 h,落潮历时 6.4 h,涨落潮流向几乎与海岸线平行。月平均潮位随季节变化,9 月份最高、1 月份最低,年变幅 0.5 m。土壤属滨海盐土和潮土化盐土,有机质含量 4.14—7.76 g/kg,氮含量 0.54—0.85 g/kg,磷含量 0.52—0.82 g/kg。

本研究区域滩涂湿地由不同年代淤积而成,分布着不同类型的植被群落,围垦塘外近海岸线滩涂主要分布着海三棱藨草(*Scirpus mariqueter*)、糙叶藨草(*Carex scabrifolia*)和芦苇(*Phragmites communis*)等草本植物群落,围垦塘内滩涂形成年份较早,主要分布着怪柳(*Tamarix chinensis*)、旱柳(*Salix matsudana*)等灌木群落^[10]。

1.2 实验方法

1.2.1 取样及测定

2007 年 7—8 月,在 GPS 辅助下,在不同年份的滩涂上采用样线法结合样方法对群落特征及土壤进行了取样调查。

植物调查:在塘外草本植物群落内平行于海岸线由东向西设置 6 条 500 m 样线,间隔 100 m(靠近海岸线的 2 条间隔 30 m),在每条样线上间隔 100 m 设置 1 样方,共设置 30 个 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 样方;塘内灌木群落相同方

法设置 4 条样线,在每条样线上间隔 100 m 设置 1 个 5 m × 5 m 的样方,共 20 个,并在每个样方中随机设置 3 个 1 m × 1 m 的草本样方。记录内容包括灌木、草本植物的种名、多度、高度、盖度、密度等。

土壤取样及测定:土壤取样点与植物取样点一一对应。在样方内,利用土壤采样器取 0—30 cm 的上层土壤,将采集的土壤样混匀、去杂、风干、研磨过筛后,采用乙酸铵交换法测定 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 的含量。

1.2.2 分析方法

灌木、草本的重要值用下面公式计算:

$$\text{重要值}(IV) = (\text{相对频度} + \text{相对盖度} + \text{相对密度}) / 3$$

所调查样方中共有 17 个物种,得到 17 × 50 的植被数据矩阵;环境因子包括土壤交换性 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 含量,得到 4 × 50 的环境因子数据矩阵。

用去趋势典范对应分析(Detrended Canonical Correspondence Analysis, DCCA)进行排序,DCCA 计算采用国际通用软件 CANOCO 完成。

物种多样性指数选用 Shannon-Wiener 和 Simpson 指数^[11]:

Shannon-Wiener 多样性指数(H')

$$H' = - \sum_{i=1}^k p_i \ln p_i$$

Simpson 多样性指数(DS)

$$DS = 1 - \sum_{i=1}^k p_i^2$$

式中, N_i 为第 i 个种在样方中的重要值, N 为样方中所有种的重要值之和, $p_i = N_i/N$, S 为样方内物种总数。

2 结果

2.1 杭州湾南岸滨海湿地交换性盐基阳离子组成特点

杭州湾南岸滩涂 4 种交换性阳离子含量较高(图 1),其中 Ca^{2+} 含量最高,在 1.51—6.98 g/kg 之间,平均为 3.66 g/kg,占 4 种阳离子总和的 61.97%; Na^+ 含量在 0.03—5.59 g/kg 之间,平均含量为 1.83 g/kg,变异系数较大; Mg^{2+} 含量在 0.18—1.11 g/kg 之间,平均为 0.56 g/kg; K^+ 含量在 0.04—0.53 g/kg 之间,平均为 0.22 g/kg,含量最小。经过对 50 个样方土壤 4 种盐基阳离子含量间相关性分析发现(表 1),各离子间均达到极显著正相关($P < 0.01$)。

围垦塘内外土壤盐基离子含量均存在显著差异($P < 0.05$)(图 1),塘外 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 平均含量分别为 0.28、4.87、2.19、0.65 g/kg,分别是塘内含量的 2.48、2.53、3.02 和 1.56 倍。

2.2 植物在盐基离子含量梯度上的 DCCA 分析

采用 DCCA 对 50 个样方的植物进行排序,根据前两个排序轴作排序图(图 2),物种在排序图上的分布基本上反映了群落空间变化的趋势和梯度。DCCA 的排序轴显著性检验表明所有的排序轴是显著的(表 2)。第一排序轴解释了植物群落与盐基离子之间关系的 59%,物种与环境因子的相关系数是 0.864,该轴与 4 种盐基离子间相关性均达到显著水平,其中 Ca^{2+} 含量的相关性最大,说明 Ca^{2+} 对该轴的贡献最大;同时还可以看出,沿着第一排序轴由左向右,物种数量逐渐增多;第二排序轴进一步解释了植物群落与环境因子之间关系的 25%,物种与环境因子的相关系数是 0.615,该轴主要反映了 Mg^{2+} 、 K^+ 含量的梯度变化。

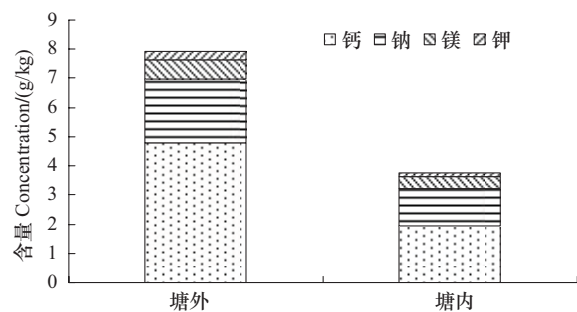


图 1 研究区塘内外 4 种盐基阳离子含量

Fig. 1 Concentrations of 4 base cations in and out of inling dam

表 1 4 种盐基阳离子相关性分析

Table 1 Correlation between 4 base cations			
	K^+	Ca^{2+}	Na^+
Ca^{2+}	0.7641 **		
Na^+	0.7000 **	0.4204 **	
Mg^{2+}	0.8854 **	0.6291 **	0.8639 **

** 表明极显著

2.3 杭州湾滨海湿地盐基阳离子对植物多样性的影响

各盐基阳离子含量对群落多样性的影响如图 3, 随着各盐基离子含量的逐渐增加, Shannon-Wiener (H') 和 Simpson 多样性指数 (DS) 均呈现逐渐降低的趋势。其中 Ca^{2+} 和 K^+ 含量与两多样性指数间均呈现极显著的线性相关 ($P < 0.01$), Mg^{2+} 和 Na^+ 与两多样性指数间也达到了显著水平 ($P < 0.05$)。以两多样性指数为因变量, 四种盐基阳离子为自变量进行逐步多元回归分析发现, 仅有 Ca^{2+} 含量被引入, 其它 3 种阳离子均被剔除, 这充分表明土壤 Ca^{2+} 含量对本研究区域植物多样性的重要性。

3 分析和讨论

3.1 盐基离子组成分布特征

张雪林^[12]认为由于海洋环境对浙江省海岛的独特影响, 使其土壤盐基离子组成以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 占优势。从本研究结果来看, 杭州湾湿地土壤 4 种盐基离子中 Ca^{2+} 含量最高, 且显著大于其他 3 种离子含量 ($P < 0.05$), 是盐基离子的主要组成部分; Na^+ 的含量也比较高, 与同区域研究结果相似^[4]。同时也可以看出, 杭州湾滩涂盐基阳离子组成与其他滨海区域^[5,7]存在较大差异。

随着滩涂形成时间和围垦时间的延长, 土壤盐度逐渐下降, 土壤环境逐步趋于中性化^[13], 这在本研究中也得到了验证。

3.2 盐基离子对植被分布和生物多样性的影响

DCCA 是目前研究植被与环境关系最先进的多元分析技术之一, 它因为结合物种构成和环境因子的信息计算样方排序值, 结果更理想, 已成为 20 世纪 90 年代以来植被梯度分析与环境解释的趋势性方法^[14]。在本研究中, 从 DCCA 分析发现 4 种盐基阳离子含量对杭州湾湿地植物的分布均具有显著的影响, 随着盐基离子含量的减少物种数量逐渐增加; 但以 Ca^{2+} 含量的影响最大, 这与前面盐基离子组成分析结果相同。这可为杭州湾滩涂湿地植被恢复与重建具体措施的实施提供支持。

新形成的塘外滩涂盐基离子含量较高, 容易导致植物产生水分胁迫^[15]、离子毒害^[16]及生理代谢紊乱^[17-18]等, 一般植物很难生长, 只有海三棱藨草等极少数耐盐植物成功定居^[10], 因此群落物种单一, 伴生物种较少, 具有较低的多样性; 随着先锋植物群落的形成, 盐生植物的生长必须吸收和积累一定的盐分作为体内的渗透调节物质, 从而起到脱盐作用, 土壤盐基离子含量逐渐下降, 更多植物成功入侵, 植物群落盖度明显增加^[19], 土壤表层水分的蒸发减少, 从而使土壤盐分比例进一步降低, 环境逐步趋于中性化, 并有中生性物种出现^[20-21], 因此植物的种类及数量逐渐增加^[14, 22], 其多样性显著增加。李侠等^[4]发现杭州湾滨海滩涂湿地植物多样性与 Na^+ 含量呈现显著的负相关, 这与本研究结果相似。

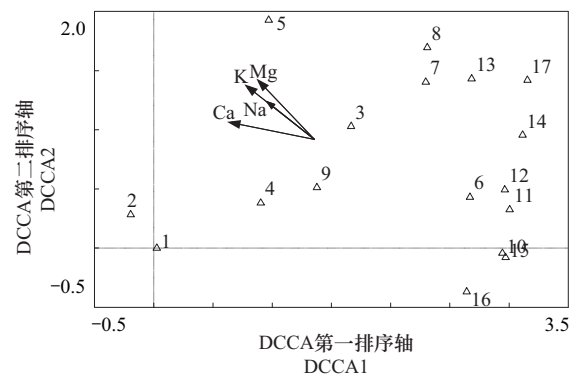


图 2 杭州湾滨海湿地植被群落物种 DCCA 排序图

Fig. 2 DCCA ordination diagram of vegetation in Hangzhou Bay

1. 海三棱藨草 *Scirpus mariqueter*; 2. 糙叶藨草 *Carex scabrifolia*;
3. 芦苇 *Phragmites communis*; 4. 互花米草 *Spartina alterniflora*;
5. 南方碱蓬 *Suaeda australis*; 6. 钻叶紫菀 *Aster subulatus*; 7. 柽柳 *Tamarix chinensis*;
8. 绢毛飘拂草 *Fimbristylis sericea*; 9. 碱菀 *Tripolium vulgare*;
10. 白茅 *Imperata cylindrical*; 11. 早柳 *Salix matsudana*;
12. 加拿大一枝黄花 *Solidago Canadensis*; 13. 野艾蒿 *Artemisia lavandulaefolia*;
14. 多裂翅果菊 *Pterocypsela laciniata*;
15. 野塘蒿 *Conyza bonariensis*;
16. 水烛 *Typha angustifolia*;
17. 匍茎苦菜 *Sonchus brachyotus*

表 2 DCCA 排序结果

Table 2 DCCA ordination

		Axis1	Axis2
环境因子与前 2 轴的相关性	K^+	-0.7824 *	0.7090 *
	Ca^{2+}	-0.9623 **	0.2374
	Na^+	-0.5748 *	0.5002
	Mg^{2+}	-0.6594 *	0.7725 *
物种与环境的相关系数		0.864	0.615
特征值总和		3.484	84%
典范特征值总和		1.018	
排序轴显著性检验		$F=4.464$	$P=0.002$

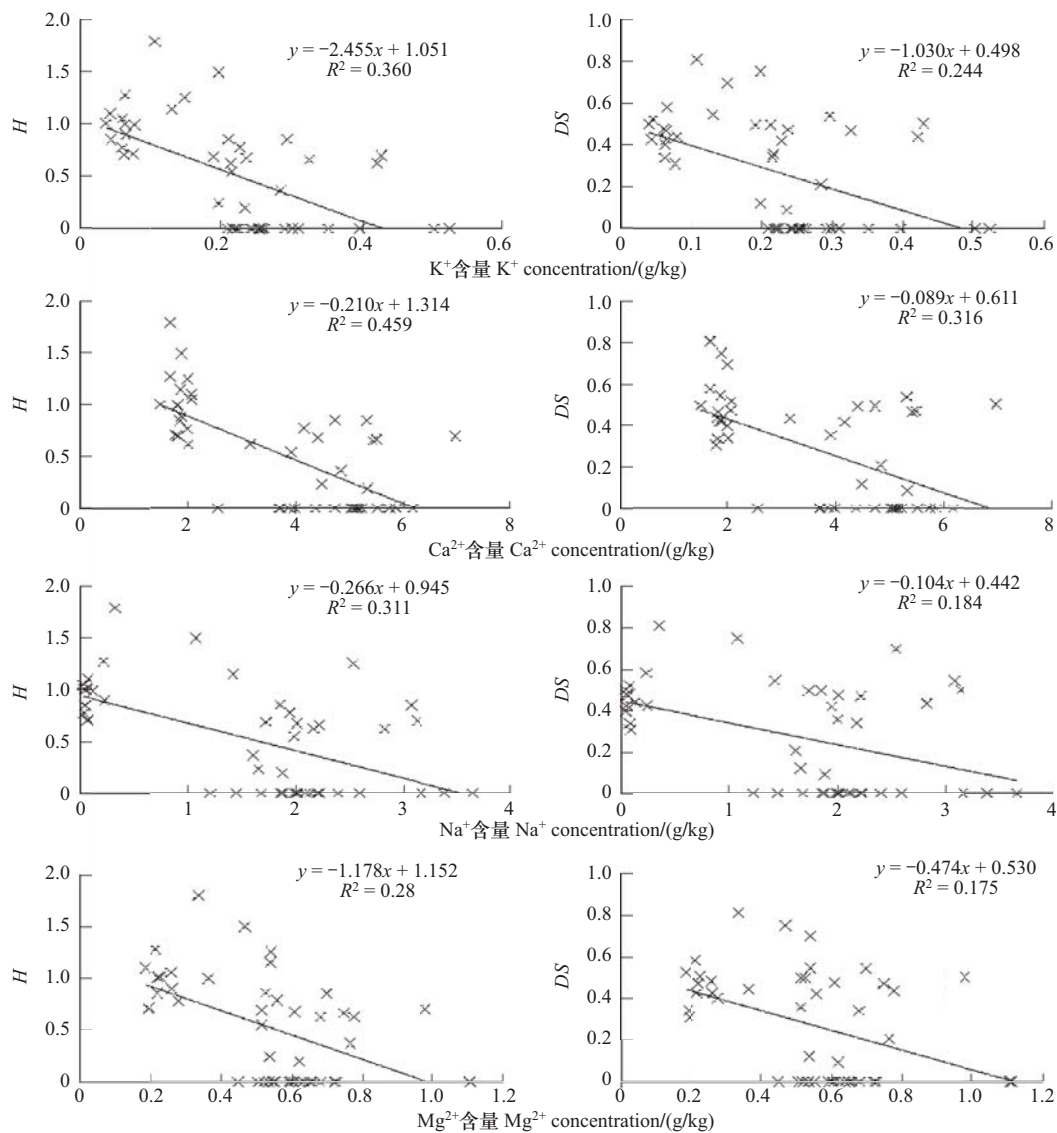


图3 多样性指数与土壤盐基阳离子含量的线性拟合

Fig. 3 Linear regression between diversity indices and soil cations concentrations

研究表明,土壤中适量 Ca^{2+} 不仅不会对植物产生胁迫作用,还可以提高植物对逆境(干旱、高温、盐害等)的抵御能力^[23];但含量过高后也会对植物生长产生不利影响,比如可在细胞质中与磷酸根形成沉淀,干扰与磷代谢有关的过程,或妨碍正常的信号传导等^[24],同时还会造成C骨架和膜结构的破坏等^[25]。梁洁等^[26]在研究木麻黄扦插苗 NaCl 胁迫时发现,土壤中 Ca^{2+} 浓度为 0.7 g/kg 时可以有效提高木麻黄对中度盐胁迫 (Na^+ , 10 g/kg) 的抗性,超过此值后效果逐渐降低,而对重度盐胁迫的缓解作用不明显,并会加重对植物的伤害,类似研究结论在其他研究中也有报道^[27]。 Ca^{2+} 在影响杭州湾滩涂湿地植物分布和多样性起到最重要的作用,一方面由于塘外土壤 Ca^{2+} 含量极其高(最高可达 6.16 g/kg),同时土壤显碱性^[10],碱性 Ca^{2+} 对植物产生更深的伤害^[20],造成只有少数植物生存;另一方面,塘内 Ca^{2+} 浓度明显降低,可能对其他盐基离子的胁迫产生缓冲作用,增加了植物对土壤中其他盐基离子胁迫的抗性,因此物种数量明显增加。

References:

- [1] Howard R J. Intraspecific variation in growth of marsh macrophytes in response to salinity and soil type: implications for wetland restoration. *Estuaries and Coasts*, 2010, 33(1): 127-138.

- [2] Watson E B, Byrne R. Abundance and diversity of tidal marsh plants along the salinity gradient of the San Francisco Estuary: implications for global change ecology. *Plant Ecology*, 2009, 205(1): 113-128.
- [3] Ihm B S, Lee J S, Kim J W, Kim J H. Coastal plant and soil relationships along the southwestern coast of South Korea. *Journal of Plant Biology*, 2007, 50(3): 331-335.
- [4] Li X, Yu M J, Shen J H, Hu R Y, Li M H. Effects of soil Na content on plant diversity and dominance in the wetland of the Hangzhou Bay. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(11): 4603-4611.
- [5] Yin J D, Gong H Z, Kikuo H, Xi J B, Li X F, Liu D X. Earlier stage study of forest exploitation and utilization on salinized soil in Shandong Province — analysis of soil salt composition and salt harmfulness to plants. *Journal of Northeast Forestry University*, 1998, 26(1): 29-33.
- [6] Guvensen A, Ozturk M. Halophytic plant diversity of south Aegean coastal zone in Turkey. *Pakistan Journal of Botany*, 2003, 35(5): 853-864.
- [7] Liu X J, Li W Q, Yang Y M, Duan D Y. Studies on the nutrient characteristics of soil and halophyte in coastal saline soil of Hebei Province. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2003, 11(2): 76-77.
- [8] Imada S, Yamanaka N, Tamai S. Effects of salinity on the growth, Na partitioning, and Na dynamics of a salt-tolerant tree, *Populus alba* L. *Journal of Arid Environments*, 2009, 73(3): 245-251.
- [9] Xue Y F, Liu Z P. Effects of NaCl and Na₂CO₃ stresses on photosynthesis and parameters of chlorophyll fluorescence in *Helianthus tuberosus* seedlings. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(1): 161-167.
- [10] Wu T G, Wu M, Xiao J H. Dynamics of community succession and species diversity of vegetations in beach wetlands of Hangzhou Bay. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(8): 1284-1289.
- [11] Zhang J T. Succession analysis of plant communities in abandoned croplands in the eastern Loess Plateau of China. *Journal of Arid Environments*, 2005, 63(2): 458-474.
- [12] Zhang X L. The genetic properties and classification of soil in islets of Zhejiang province. *Journal of Zhejiang Normal University (Natural Sciences)*, 2001, 24(4): 385-388.
- [13] Min B M, Kim J H. Plant succession and interaction between soil and plants after land reclamation on the west coast of Korea. *Journal of Plant Biology*, 2000, 43(1): 41-47.
- [14] Feng Y, Ma K M, Zhang Y X, Qi J. DCCA analysis of plant species distributions in different strata of Oak (*Quercus liaotungensis*) forest along an altitudinal gradient in Dongling Mountain, China. *Journal of plant Ecology*, 2008, 32(3): 568-573.
- [15] Wu W H. *Plant Physiology*. Beijing: Science Press, 2003.
- [16] Li Q Y, Ge H B, Hu S M, Wang H Y. Effects of sodium and calcium salt stresses on Strawberry photosynthesis. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2006, 26(8): 1713-1717.
- [17] Koyro H W. Effect of salinity on growth, photosynthesis, water relations and solute composition of the potential cash crop halophyte *Plantago coronopus* (L.). *Environmental and Experimental Botany*, 2006, 56(2): 136-146.
- [18] Li N Y, Chen S L, Zhou X Y, Li C Y, Shao J, Wang R G, Fritz E, Hüttermann A, Polle A. Effect of NaCl on photosynthesis, salt accumulation and ion compartmentation in two mangrove species, *Kandelia candel* and *Bruguiera gymnorhiza*. *Aquatic Botany*, 2008, 88(4): 303-310.
- [19] Garde L M, Nicol J M, Conran J G. Changes in vegetation patterns on the margins of a constructed wetland after 10 years. *Ecological Management and Restoration*, 2004, 5(2): 111-117.
- [20] Crain C M, Silliman B R, Bertness S L, Bertness M D. Physical and biotic drivers of plant distribution across estuarine salinity gradients. *Ecology*, 2004, 85(9): 2539-2549.
- [21] Lang F, von der Lippe M, Schimpel S, Scozzafava-Jaeger T, Straub W. Topsoil morphology indicates bio-effective redox conditions in Venice salt marshes. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2010, 87(1): 11-20.
- [22] Shen J H, Hu R Y, Li M H, Ding P, Yu M J, Ding B Y. Influence of reclamation on plant diversity of beach wetlands in Hangzhou Bay and Yueqing Bay in East China. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 2006, 33(3): 324-328.
- [23] Liu T W, Wu F H, Wang W H, Chen J, Li Z L, Dong X J, Patton J, Pei Z M, Zheng H L, Rennenberg H. Effects of calcium on seed germination, seedling growth and photosynthesis of six forest tree species under simulated acid rain. *Tree Physiology*, 2011, 31(4): 402-413.
- [24] Jiang T H, Zhan X H, Xu Y C, Zhou L X, Zong L G. Roles of calcium in stress-tolerance of plants and its ecological significance. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(5): 971-976.
- [25] Mao G L, Xu X, Zheng G Q, Xiao G J, Yue Z H, Yang J. Effects of desulfurization waste treatment on calcium distribution and calcium ATPase activity in oil-sunflower seedlings under alkaline stress. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(9): 2532-2538.
- [26] Liang J, Yan C L, Li Y H, Zhang R F, Zhu Z. Effect of Ca(NO₃)₂ on phycological characteristics in *Casuarina equisetifolia* cutting seedlings under NaCl stress. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(5): 1073-1077.
- [27] Candan N, Tarhan L. Effects of calcium stress on contents of chlorophyll and carotenoid, LPO levels, and antioxidant enzyme activities in *Mentha*.

Journal of Plant Nutrition, 2005, 28(1): 127-139.

参考文献:

- [4] 李侠, 于明坚, 慎佳泓, 胡仁勇, 李铭红. 杭州湾滩涂 Na 元素含量对植物多样性和优势度的影响. 生态学报, 2007, 27(11): 4603-4611.
- [5] 尹建道, 龚洪柱, 生原喜久雄, 郗金标, 李秀芬, 刘德玺. 山东省盐渍土林业开发利用前期研究——土壤盐基组成及其对植物危害分析. 东北林业大学学报, 1998, 26(1): 29-33.
- [7] 刘小京, 李伟强, 杨艳敏, 段德玉. 河北省滨海盐碱地土壤与盐生植物养分特征的研究. 中国生态农业学报, 2003, 11(2): 76-77.
- [9] 薛延丰, 刘兆普. 不同浓度 NaCl 和 Na₂CO₃ 处理对菊芋幼苗光合及叶绿素荧光的影响. 植物生态学报, 2008, 32(1): 161-167.
- [10] 吴统贵, 吴明, 萧江华. 杭州湾滩涂湿地植被群落演替与物种多样性动态. 生态学杂志, 2008, 27(8): 1284-1289.
- [12] 张雪林. 浙江省海岛土壤发生特征及其分类. 浙江师范大学学报(自然科学版), 2001, 24(4): 385-388.
- [14] 冯云, 马克明, 张育新, 祁建. 辽东栎林不同层植物沿海拔梯度分布的 DCCA 分析. 植物生态学报, 2008, 32(3): 568-573.
- [15] 武维华. 植物生理学. 北京: 科学出版社, 2003.
- [16] 李青云, 葛会波, 胡淑明, 王惠英. 钠盐和钙盐胁迫对草莓光合作用的影响. 西北植物学报, 2006, 26(8): 1713-1717.
- [22] 慎佳泓, 胡仁勇, 李铭红, 丁平, 于明坚, 丁炳扬. 杭州湾和乐清湾滩涂围垦对湿地植物多样性的影响. 浙江大学学报(理学版), 2006, 33(3): 324-328.
- [24] 蒋廷惠, 占新华, 徐阳春, 周立祥, 宗良钢. 钙对植物抗逆能力的影响及其生态学意义. 应用生态学报, 2005, 16(5): 971-976.
- [25] 毛桂莲, 许兴, 郑国琦, 肖国举, 岳自慧, 杨涓. 脱硫废弃物对碱胁迫下油葵幼叶细胞钙分布及 Ca²⁺-ATPase 活性的影响. 生态学报, 2011, 31(9): 2532-2538.
- [26] 梁洁, 严重玲, 李裕红, 张瑞峰, 朱珠. Ca(NO₃)₂ 对 NaCl 胁迫下木麻黄扦插苗生理特征的调控. 生态学报, 2004, 24(5): 1073-1077.