

大米草 (*Spartina anglica*) 自然衰退种群对 N、P 添加的生态响应

李红丽, 智颖飙, 赵 磊, 安树青*, 邓自发, 周长芳, 顾舒平

(南京大学生命科学院, 湿地生态研究所, 南京 210093)

摘要 通过对外来植物大米草 (*Spartina anglica*) 自然衰退种群进行 N 肥、P 肥和 N-P 复合肥不同梯度水平的添加, 分析大米草的生长指标差异及其生理生态响应。结果表明: N、P 添加后使大米草种群株高均有不同程度的增加, 肥效强弱依次为 N 肥、P 肥、N-P 肥, 叶片数、主根数及总生物量均显著增加 ($p < 0.05$)。除 N 肥外, 其它处理的叶片面积和厚度与对照没有显著差异。3 种肥源的添加均显著提高了大米草自然衰退种群的光合速率 ($p < 0.05$); N 和 N-P 肥均以高浓度效果最显著, 但 P 肥却以中浓度效果最强, 光合速率分别比对照增加 $19.08 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $11.23 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $15.47 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; 14d 淡水淹没后, 肥源添加使大米草自然衰退种群的 SOD 和 POD 酶活性增强, 中浓度 N 和中浓度 P 添加使 SOD 活性增加最显著, 分别比对照增加 $320.74 \text{ unit} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $134.54 \text{ unit} \cdot \text{g}^{-1}$; 高浓度 N 和高浓度 N-P 肥添加使 POD 酶活性最显著增加。N 肥添加可以显著改善大米草自然衰退种群生长生理特性, 可以推断大米草种群的衰退与我国海岸带土壤营养中 N 素营养的限制有一定的相关性。

关键词 大米草; 自然衰退; 营养限制; 高生长; 生理生态

文章编号: 1000-0933 (2007) 07-2725-08 中图分类号: Q938 文献标识码: A

Eco-physiological responses of the declining population *Spartina anglica* to N and P fertilizer addition

LI Hong-Li, ZHI Ying-Biao, ZHAO Lei, AN Shu-Qing*, DENG Zi-Fa, ZHOU Chang-Fang, GU Shu-Ping

School of Life Science, Institute of Wetland Ecology, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (7) 2725 ~ 2732.

Abstract : N, P and combined N-P were added to a declining population of *Spartina anglica* Hubbard in coastal China. Some growth parameters and eco-physiological responses of *S. anglica* to different treatments were documented. The fertilizer addition had a highly significant effect on the dynamics of its height-growth, the number of leaves, the number of roots and total biomass; however, only N addition had significant effect on leaf area and the leaf thickness in all fertilizer addition. For the dynamics of its height-growth, the effect of N was most apparent; the effect of N-P was not greater than those of N and P separately. The fertilizer addition treatments all enhanced the photosynthesis rate. For the three series of fertilization treatments, the highest N, highest N-P, and medium P yielded the highest photosynthetic rates. The rates were higher by $19.08 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $15.47 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ and $11.23 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ than that of CK respectively. After

基金项目 国家自然科学基金资助项目 (30400054); 国家林业局 948 资助项目 (2005-4-13)

收稿日期 2006-12-23; 修订日期 2007-05-28

作者简介 李红丽 (1980 ~) 女, 山东东明人, 博士生, 主要从事湿地生态研究. E-mail: lihongli327@163.com

* 通讯作者 Correspondence author. Email: anshuq@nju.edu.cn

致谢 英文摘要经加拿大卡尔顿大学 (Carleton University) Naomi Cappuccino 博士润色, 特此致谢。

Foundation item The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30400054) and "948" Project of State Administration of Forestry of China (No. 2005-4-13)

Received date 2006-12-23; **Accepted date** 2007-05-28

Biography LI Hong-Li, Ph. D. candidate, mainly engaged in the wetland ecology. E-mail: lihongli327@163.com

freshwater stress for 14 days , treatments made the activity of SOD and POD increase. Effects of medium N and P was significant for SOD activity , However , POD activity of high N and N-P were distinctly higher. In a word , fertilizer addition improved the growth of declining populations of *S. anglica* , which indicated the decline of *S. anglica* was correlated with the nutriment deficiency in soil , especially lack of N.

Key Words : *Spartina anglica* ; dieback ; nutrient limitation ; height-growth ; eco-physiology

湿地是世界上生产力最高的生态系统 ,具有水文调节和化学循环的重要功能 ,被人们称作“地球之肾”^[1] ,湿地植物是湿地元素生物地球化学循环的重要载体和动力 ,其可以从湿地土壤中吸收各种营养元素 ,并能降解污染物质 ,使矿质元素转化为有机态 ,从而完成化学循环^[2]。处于海陆交界的海滨盐沼湿地植物尤其受到生态学界的高度重视^[3]。

大米草 (*Spartina anglica* Hubbard) 作为盐沼湿地先锋物种之一 ,我国于 1963 年引入 ,逐步定居且成功建立了种群 ,20 世纪 90 年代以前分布幅北自辽宁省盘山县 (40°53'N) ,南至广东省电白县 (21°30'N) ,面积一度扩展到 36 000 hm²^[4,5] ,成为我国海岸带湿地植被的优势群落之一^[6,7]。然而从 20 世纪 90 年代以后 ,我国引种的大米草却出现了严重的自然衰退。目前 ,仅在江苏的射阳 (33°42'N) 、启东 (31°56'N) 以及浙江温岭 (28°24'N) 有少量分布 ,覆盖面积锐减为 50 hm²^[4] ,并有加速衰退的趋势。在国外虽有小面积的衰退 ,但是在国外的主要分布区 ,大米草衰退具有局部性和暂时性 ,总体趋势仍属于种群爆发 ,特别是在英国、美国和澳大利亚等国家^[8]。在我国大米草种群自然衰退具体表现为植株矮化 ,生长发育极不正常 ,生物量减少和有性繁殖基本丧失^[4]。但大米草种群在中国海岸带自然衰退机制尚不清楚。

目前与盐沼湿地研究有关的生物地球化学元素中 ,研究较多是 N 和 P 元素^[2,3,9,10]。因为 N 和 P 是重要的生命元素 ,与其有关的化学循环机制直接影响到湿地生态系统的初级生产力 ,进而影响到湿地生态系统的结构和功能^[11,12]。虽然 Güsewell 等对 16 种湿地禾本科植物对 N、P 添加及不同的水分梯度的反应进行了一些研究^[13,14] ,但是不同肥源的添加对大米草衰退种群的生长及生理生态的影响却研究甚少 ,尤其对大米草生长发育的生态化学计量学的研究相对较少。因此研究大米草衰退种群对 N、P 添加的生理生态响应将有助于探讨大米草自然衰退与营养的关系 ,进而廓清大米草种群衰退与 N、P 元素的相关性。

为了廓清营养元素对大米草种群自然衰退的影响 ,探讨大米草自然衰退可能机制 ,本研究以我国江苏海岸带大米草自然衰退种群为对象 ,对其进行了 N、P 肥源添加的野外试验 ,测定了大米草在不同梯度 N、P 作用后的生长指标和生理指标 ,分析大米草自然衰退种群对不同施肥处理的生理生态响应 ,对导致大米草自然衰退的限制性元素及添加肥源最适浓度进行判识 ,以期近缘植物互花米草 (*S. alterniflora* Loisel.) 这一爆发种群的有效生物控制提供一定的理论依据。

1 研究区概况

试验区位于我国江苏省盐城海岸湿地 ,地理坐标为 32°34'~34°28'N ,119°48'~120°56'E。该区是温带和亚热带的过渡地带 ,受海洋性和大陆性气候的共同影响 ,季风盛行 ,四季分明。年平均光照时间 2199~2362 h ,太阳辐射 116.2×4.183~121.0×4.183J·cm⁻²。1 月份平均气温 -0.3~1.3℃ ,最低气温 -17.3℃ ;7 月份温度 26.7~27.4℃ ,最高温度 39.0℃ ,无霜期达 210~224 d。降水充沛 ,雨热同季 ,年平均降水量为 980~1070 mm ,70% 的降水集中在 5 月到 7 月份之间。灾害性天气有台风、暴雨、冰雹、龙卷风、寒潮与雾等。水源有陆地水和海洋水。海水淹没潮间带间隔为 7~12 h ,高潮位约 1.27~4.61 m。海水盐度 2.953~3.224 ,pH 值 8.0。滩涂是典型的淤泥质海岸 ,根据沉积、地貌、动力及发育演替特征 ,自海向陆可分为 4 个带 : (1) 低潮粉沙滩 (光滩) ,由大潮低潮位至小潮高潮位 ,主要植物为藻类 ,偶见零星分布的互花米草 ; (2) 泥-粉沙混合滩 ,由小潮高潮位至平均高潮位 ,滩面植物除了藻类外 ,主要是互花米草 ; (3) 高潮位泥沙滩 ,由平均高潮位至大潮高潮位 ,滩面植物主要是碱蓬 (*Suaeda salsa* (L.) Pall.) 和大米草等 ; (4) 草滩地 ,大潮高潮位以上 ,一

年约有两次被大潮淹没,植物为芦苇 (*Phragmites communis* (L.) Trin.)、蔗草 (*Scirpus triqueter* Linn.) 和大米草等。试验区位于第 4 潮带,处于草滩地。

2 材料与方法

2.1 材料

大米草属禾本科米草属 (*Spartina*) 的多年生植物,1879 年由 Schreber 命名,分为不育种 (*S. townsendii*) 和结籽种 (*S. anglica*) 两个种,天然分布于英国南海岸,为欧洲米草 (*S. maritime* (Curtis) Fernald.) 和互花米草 (*S. alterniflora* Loisel.) 的自然杂交种^[5]。

2.2 方法

于 2005 年 4~11 月进行野外试验,选取 10 块大小为 2 m × 10 m 均质的滩涂,试验地为草滩地,与留存的大米草具有相同的高程,土壤的有机质含量、全 N 和全 P 的背景值分别为 (0.92 ± 0.2) mg·kg⁻¹、(0.55 ± 0.01) mg·kg⁻¹ 和 (1.43 ± 0.02) mg·kg⁻¹ [15,16]。分别对样地进行 3 种不同类型肥源添加:(1) 每 2 m × 2 m 的面积内均匀施加尿素;(2) 每 2 m × 2 m 面积内均匀施加过磷酸钙;(3) 每 2 m × 2 m 面积内均匀施加 N-P 复合肥。每种不同的肥源添加分为低、中和高 3 种浓度处理,其低、中和高浓度处理依次为每 2 m × 2 m 面积内分别施加 250、500 g 和 750 g 肥源(表 1)。建立无任何肥源添加的试验区作为对照(CK),N 肥(尿素)添加(低、中和高浓度)、P 肥(过磷酸钙)添加(低、中和高浓度)和 N-P 复合肥添加(低、中和高浓度) 10 个处理,每处理 5 个小区重复,试验处理分别依次缩写为 CK、N1、N2、N3、P1、P2、P3、N-P1、N-P2 和 N-P3,为完全随机排列小区试验。生长旺盛期(2005 年 7 月)利用地势改造对试验区进行没顶淹没淡水胁迫处理。

表 1 不同类型肥源的成分与含量标准
Table 1 The standard of the concentration in different fertilizers

肥源 Fertilizer types	尿素 (NH ₂) ₂ CO	过磷酸钙 CaH ₄ (PO ₄)H ₂ O	N-P 复合肥
N 含量 N Content (%)	46.3	—	—
水 H ₂ O Content (%)	< 0.5	< 14	—
过磷酸钙 CaH ₄ (PO ₄)H ₂ O	—	12	—
游离酸 Free acid (%)	缩二脲 Biuret < 1.0	P ₂ O ₅ < 5.5	—
等级标准 Standard	GB2401-91	4B	—
氮 NH ₄ (%)	—	—	8
磷 P ₂ O ₅ (%)	—	—	9

2.3 指标测定

株高以克隆系单个最高植株为准。野外分别于返青期(2005-05-08)、生长期(2005-06-08)、生长旺季(2005-07-09、2005-08-09、2005-09-08、2005-10-08)和生长末期(2005-11-08)分别测定种群株高的动态变化。2005 年 7 月 29 日选取生长健壮的功能叶,用 Li-COR-6400 测定各个处理的光合速率,光强设定为 1200 μmol·m⁻²·s⁻¹。7 月份由于大量降雨,通过地貌改造对试验样地的各个处理没顶淹没 14 d,进行淡水淹没胁迫处理 14 d。取各处理的叶片马上放入冰壶,带回实验室用氮蓝四唑(NBT)法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性,过氧化物酶(POD)活性用愈创木酚法测定^[17]。在大米草生长末期(2005-11-08)随机采样,每重复取 1 丛植物,每处理 5 丛。在实验室内用水冲洗洗净后测定其生长参数(叶数、叶片厚度、叶面积、主根数量、总生物量)。叶面积使用 LI-3000A 型叶面积仪测量 6 片克隆系代表性功能叶片测量后取均值。叶片厚度以取 6 片克隆系代表性功能叶片用游标卡尺测量后取均值。80℃烘恒重称生物量。

2.4 统计分析

数据通过 SPSS (ver13.0) 进行方差分析(One-way ANOVA)等统计分析以及 Duncan 多重比较后续检验($p = 0.05$ 或 $p = 0.01$)。

3 结果与分析

3.1 不同 N、P 水平添加对大米草自然衰退种群生长指标的影响

3.1.1 不同 N、P 水平添加对大米草自然衰退种群高生长动态变化的影响

不同 N、P 添加处理对大米草自然衰退种群的高生长有显著影响 (图 1)。在自然状况下 (CK) 的高生长呈现明显的 “S” 型曲线。大米草自然衰退种群的高生长对不同 N、P 添加的响应有显著差异。添加 N 肥后, 对高生长动态有显著影响 (图 1. a), N1 高生长趋势类似直线, N2 和 N3 为类似的 “S” 曲线。在生长的每个阶段株高都极显著增加 ($p < 0.01$); 生长前期 5 月份和 6 月份, N 肥处理株高显著高于 CK, 但处理间株高差异不显著 ($p > 0.05$); 7 月份后, N2 和 N3 的株高都显著高于 N1, N1 显著高于 CK ($p < 0.05$), 以 N2 最高。由图 1. b 表明, P 肥的添加对大米草自然衰退种群高生长增加趋势较缓。5 月和 6 月份, P1、P2 和 P3 略微高于 CK, P 肥处理间差异不显著 ($p > 0.05$); 7 月份后, 均显著高于 CK ($p < 0.05$), 其中以 P2 最高。添加 N-P 肥后, 高生长趋势仍然呈比较一致的 “S” 曲线, 但是在生长的每个阶段都显著高于 CK ($p < 0.05$)。6、8、9 和 10 月份, N-P3 的株高显著高于 N-P1 和 N-P2, 而 7 月与 11 月份添加 N-P 处理间差异不显著 (图 1. c)。相同量不同的肥料类型处理后, 在生长的各个阶段, 其效果强弱依次为 N 肥 > P 肥 > N-P 肥 (图 1d、e 和 f)。

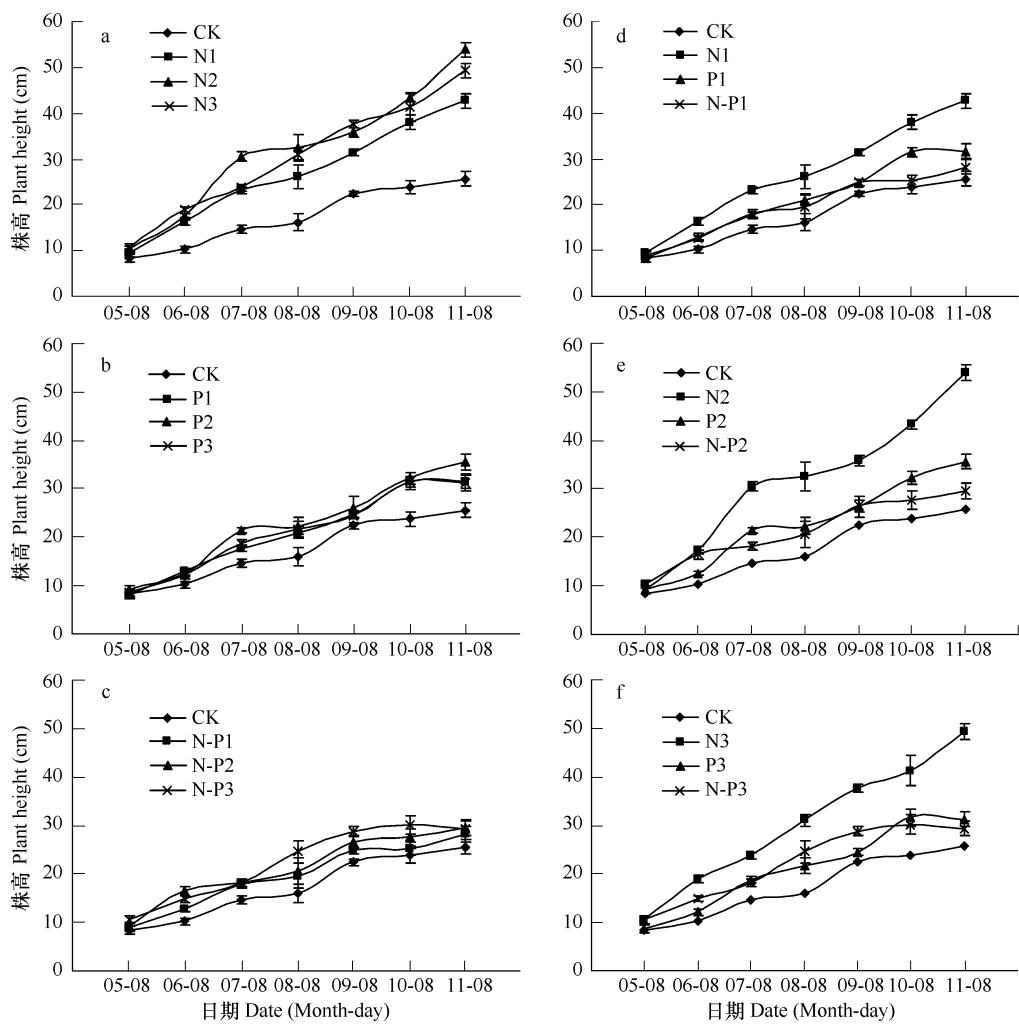


图 1 大米草自然衰退种群对不同施肥处理的高生长动态响应
Fig. 1 Height-growth responses of *S. anglica* to different treatments

3.1.2 不同 N、P 水平添加对大米草自然衰退种群生长参数的影响

由表 2 可知, N、P 添加对大米草自然衰退种群的叶片数、主根数量及总生物量等指标有显著影响, 而对叶

片面积和叶片厚度以 N、P 种类不同而异。N 肥添加后 ,以 N1 处理的叶片数、主根的数量及总生物量均显著高于 N2 和 N3 处理 ,且均极显著高于 CK ($p < 0.01$)。同时 ,叶片面积和叶片厚度却以 N3 和 N2 水平显著高于其它 N 处理 ($p < 0.05$)。P 肥添加后 ,叶片数和主根数分别以 P2 和 P1 水平最高 ,总生物量在磷肥水平间差异不显著 ,但各指标均显著高于对照 ($p < 0.05$)。N-P 复合肥添加后 ,效果处于单独的 N、P 肥添加效果之间 ,叶片数、主根数量及总生物量规律与 N 肥一致 ,叶片面积和叶片厚度与 P 肥效果一致。

表 2 不同的施肥处理对大米草自然衰退种群的生长参数的影响
Table 2 Effect of different treatments on the some growth parameters

处理 Treatments	叶片数 The number of leaves	叶片面积 Leaf area (cm ²)	叶片厚度 Leaf thickness (mm)	主根数量 The number of roots	总生物量 Total biomass (g)
CK	16.6 ± 3.5 c	6.40 ± 0.88 c	0.047 ± 0.002 b	54.4 ± 4.9 c	4.9547 ± 1.0145 c
N1	88.6 ± 14.1 a	7.88 ± 1.54 bc	0.047 ± 0.021 b	223.2 ± 10.6 a	24.7611 ± 0.9534 a
N2	42.2 ± 6.5 b	10.88 ± 0.89 ab	0.054 ± 0.020 a	108.0 ± 9.2 b	14.8695 ± 2.0555 b
N3	48.6 ± 5.4 b	11.60 ± 0.85 a	0.046 ± 0.010 b	133.8 ± 18.5 b	15.3942 ± 1.7157 b
F	12.552	12.552	4.149	35.297	30.335
p	0.000**	0.000**	0.024*	0.000**	0.000**
CK	16.6 ± 3.5 b	6.40 ± 0.88 a	0.047 ± 0.002 a	54.4 ± 4.9 c	4.9547 ± 1.0145 b
P1	44.0 ± 11.9 ab	7.45 ± 0.85 a	0.045 ± 0.002 a	118.2 ± 16.1 a	11.1699 ± 1.8153 a
P2	54.2 ± 12.6 a	9.44 ± 1.12 a	0.049 ± 0.003 a	81.2 ± 8.3 b	11.5911 ± 2.3103 a
P3	29.8 ± 4.9 ab	7.58 ± 0.57 a	0.047 ± 0.002 a	83.0 ± 14.3 b	11.3731 ± 1.0185 a
F	3.170	2.046	0.675	4.907	3.486
p	0.053	0.148	0.580	0.013*	0.041*
CK	16.6 ± 3.5 b	6.40 ± 0.88 a	0.047 ± 0.002 a	54.4 ± 4.9 c	4.9547 ± 1.0145 c
N-P1	40.8 ± 7.4 a	8.20 ± 0.44 a	0.047 ± 0.001 a	132.2 ± 35.1 a	13.6924 ± 2.0203 a
N-P2	36.2 ± 6.1 a	9.20 ± 1.21 a	0.054 ± 0.002 a	87.2 ± 18.6 b	8.5138 ± 0.7632 ab
N-P3	27.3 ± 1.8 ab	8.81 ± 0.23 a	0.0465 ± 0.004 a	86.6 ± 21.9 b	6.1096 ± 0.3393 bc
F	3.733	2.089	2.305	9.195	5.309
p	0.037*	0.148	0.119	0.001**	0.012*

* 同列不同的字母表示同一施肥种类间差异性分析 ,下同 The small letters show significantly different in treatments , the same below

3.2 不同 N、P 水平添加对大米草自然衰退种群生理生态的影响

3.2.1 不同 N、P 水平添加对大米草自然衰退种群最大光合速率的影响

研究结果表明 ,在 7 月份生长旺季 ,N、P 添加使大米草自然衰退种群的光合速率显著增加 (图 2)。自然状况下 (CK),大米草种群的光合速率为 (15.27 ± 0.53) μmol·m⁻²·s⁻¹。施加 N 肥后 ,光合速率显著增加 ,以 N3 水平的光合速率最高 ,为 (34.35 ± 0.84) μmol·m⁻²·s⁻¹ ,显著高于 N1 和 N2 水平 ,均显著高于 CK ($p < 0.05$)。施加 P 肥后 ,以 P2 水平的光合速率最高 ,显著高于 P1 和 P3 ($p < 0.05$) ,均显著高于 CK ($p < 0.01$)。施加 N-P 复合肥后 ,与施加 N 肥效果趋于一致 ,N-P3 的光合速率显著高于 N-P1 和 N-P2 ($p < 0.05$) ,达到 (26.40 ± 1.25) μmol·m⁻²·s⁻¹ ,均显著高于 CK ($p < 0.05$)。

3.2.2 不同 N、P 水平添加对大米草 SOD 和 POD 酶活性的影响

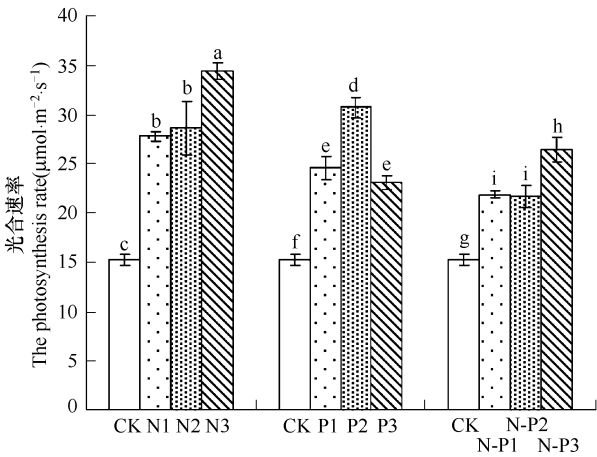


图 2 不同施肥处理对大米草自然衰退种群的光合速率的影响
Fig. 2 Effect of different treatments on the photosynthesis rat

经过 14d 淡水淹没胁迫处理 ,施加 N 肥时 ,超氧化物歧化酶活性 (SOD)和过氧化物酶 (POD)活性有所增加 ,但因 N 处理水平不同而有差异 (图 3)。N2 的 SOD 酶活性为 $(574.00 \pm 17.61) \text{ unit} \cdot \text{g}^{-1}$,显著高于 N1 水平 ($p < 0.01$) ,N1 处理又极显著高于 N3 和 CK ($p < 0.01$) ,而对于 POD 酶活性 ,各 N 肥处理水平间差异不显著 ,但均显著高于 CK ($p < 0.05$)。施加 P 肥时 ,SOD 酶活性因 P 处理水平不同而异 ,P2 和 P3 酶活性显著高于 CK ,而 P1 处理 SOD 酶活性与 CK 差异不显著 ($p > 0.05$) ,P 肥处理对 POD 酶活性无显著影响 ($p > 0.05$)。施加 N-P 复合肥时 ,N-P2 和 N-P3 的 SOD 酶活性均显著高于 N-P1 和 CK ($p < 0.05$) ,但是 N-P2 和 N-P3 之间及 N-P1 和 CK 之间均差异不显著 ($p > 0.05$) ,N-P3 的 POD 酶活性显著高于其它处理 ,N-P1 和 N-P2 酶活性显著高于 CK ($p < 0.05$)。

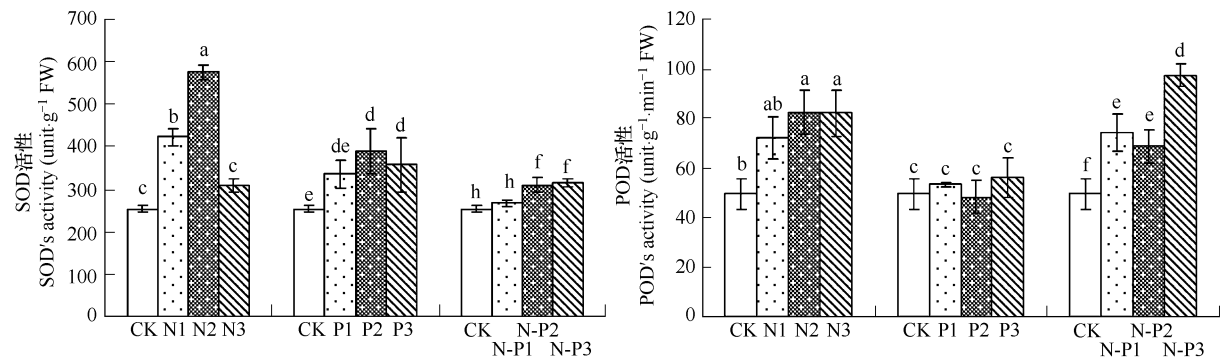


图 3 不同施肥处理对大米草自然衰退种群的 SOD 和 POD 酶活性的影响
Fig. 3 Effect of different treatments on the SOD and POD's activities

4 讨论

植物高生长、叶片数、主根数和总生物量是植物对生态因子的综合响应的结果。对植物高生长及生物量的积累研究是揭示植物生长及能量积累规律的重要指标 ,同时研究植物生长与环境因子的相互关系 ,能够为探讨植物本身的生存策略提供重要依据^[18]。植物必需的营养元素 ,大多是细胞结构物质的组成成分 ,也是植物生命活动的调节者 ,并参与酶的活动 ,同时起电化学的作用 ,及离子浓度的平衡、胶体的稳定和电荷中和等。特别是植物必需大量元素 N 是构成蛋白质的主要成分 ,当 N 素受限时 ,植株矮小 ,叶绿素含量少 ,分蘖和分枝减少 ,从而影响有性繁殖 ,植物必需大量元素 P 作为核苷酸的组成成分 ,在糖类代谢、蛋白质代谢和脂肪代谢中起着重要的作用 ,缺 P 时 ,蛋白质合成受阻 ,影响细胞分裂 ,植物发育缓慢 ,叶小^[9]。因此 ,N、P 营养对大米草自然衰退种群的高生长及生物量累积具有重要影响。研究结果表明 ,大米草在不同梯度 N、P 水平作用下 ,其高生长、叶数、主根数及生物量积累均产生了显著差异 ,这与 Hemminga 等的研究一致 ,其研究表明大米草生物量积累与土壤中的 N、P 沉积水平的线性关系 ,当土壤中沉积的氮磷营养缺乏时 ,大米草生物量较低^[20] ; Güsewell 等人研究也表明 N、P 处理使海滨禾本科植物生物量显著增加 ,但在不同的年度间效果明显不同^[13,14]。若大米草植株体内的氮水平片面过量 ,大量的糖类用于合成蛋白质、叶绿素等 ,使得构成细胞壁的纤维素等物质大量较少 ,细胞变得个大而壁薄 ,易受到病虫侵害 ,同时也会引起体内离子的失衡^[19] ,进而影响大米草的生长 ,生物量的积累 ,N1 的生物量显著高于 N2 和 N3 ,N2 和 N3 处理可能是氮水平片面过量 ,而与 P 水平不协调的缘故。

光合作用是植物生物量积累的基础 ,而光合速率是体现光合作用强弱的重要指标^[9]。不同梯度的 N、P 添加处理后 ,显著促进了叶面积增大 ,叶片数增多 ,显著提高了大米草种群的光合作用能力 ,N 肥与 N-P 复合肥添加效果一致 ,均在高浓度水平达到最高 ,P 肥以中浓度水平最高 ,这与前人的研究一致 ,研究表明 N 肥是限制互花米草生产力的主要限制因子^[20] ,施加 N 肥可以提高互花米草的光合能力^[21]。植物受到环境胁迫时 ,自由基活性氧的产生与自由基消除系统的平衡失调 ,引起细胞膜的伤害^[17] ,研究植物受到水分胁迫时自由基消除酶活性的变化 ,可以深入探讨植物生态选择压力下的生理特性。大米草自然衰退种群受到淡水胁

迫 肥源处理使大米草自然衰退种群的 SOD 和 POD 酶活性增强。N 和 P 均在中浓度水平 SOD 活性增加显著 ,N 和 N-P 高浓度水平使 POD 酶活性增加显著。

综合上述分析 ,N、P 添加特别是 N 肥的添加可以显著使大米草自然衰退种群高生长改善、叶片数和主根数显著增多、叶片面积显著增大、总生物量显著增加 ,光合能力显著提高 ,SOD 和 POD 酶活性显著增强 ,进而 ,可以有效的抑制大米草种群退化的具体表现。表明大米草种群的日益退化的趋势与盐沼湿地生态系统中土壤营养的缺乏 ,特别是 N 素的限制具有相关性。其它的研究也表明了这一点 ,Stewart 等研究表明盐沼湿地生态系统的主要植物群落如大米草群落缺乏 N 营养^[22]。盐沼植物长势较弱主要由于营养不足造成的 ,特别是 N 素的缺乏^[23~27]。不仅湿地生态系统 ,其它生态系统如在澳大利亚的干旱及半干旱生态系统中 N 素的缺乏是限制植物生长的关键因素^[28]。生态系统中种群植物组织中的 N:P 的比值可以作为指示湿地生态系统及其它生态营养缺乏或者饱和的指示因子^[29] ,但是对于具体的生态系统还要具体的测定^[30,31]。对于大米草自然衰退种群对 N、P 元素含量响应的时空变异以及沼泽湿地生态系统物种的 N:P 比与营养缺乏的关系有待进一步研究。

5 结论

(1) N、P 肥源添加后使相同生育期大米草自然衰退种群株高均有不同程度的增加 ,肥效强弱依次为 N 肥 > P 肥 > N-P 肥 ,叶片数、主根数及总生物量均显著增加。而除 N 肥外 ,其它处理与对照的叶片面积和厚度没有显著差异。

(2) N、P 肥源的添加均显著提高了大米草自然衰退种群的光合速率 ,14d 淡水胁迫后 ,肥源添加使大米草自然衰退种群的 SOD 和 POD 酶活性增强。

(3) 添加 N 肥可以显著改善大米草自然衰退种群生长生理特性 ,可以推断大米草种群的衰退趋势与海岸带沉积物中 N 素营养的限制具有较强相关性。

References :

[1] Chen Y Y , Lu X G. The wetland function and research tendency of wetland science. Wetland Science , 2003 , 9 : 7 — 12.

[2] Bai J H , Deng W , Zhu Y M. Advance in study on the biogeochemical process in wetlands. Chinese Journal of Ecology , 2002 , 21 (1) : 53 — 57.

[3] Bai J H , Ou Y H , Deng W , et al. A review on nitrogen transmission processes in natural wetlands. Acta Ecologica Sinica , 2005 , 25 (2) : 326 — 333.

[4] An S Q , Wang Z S , Zhou C F , et al. Varying success of *Spartina* spp. Invasions in China : Genetic diversity or differentiation ? Proceedings of the Third International Conference on Invasive *Spartina*. Cambridge : Cambridge Press , 2006.

[5] Chung C H. Brief history of *Spartina anglica* and research work abroad. Journal of Nanjing University — Research Advances in *Spartina* , Special issue , 1985 , 1 — 30.

[6] Li X P , Tang G G , Wang D S , et al. Studies on the community characteristics , the distribution and succession patterns of wetland vegetation in Jiangsu Province. Journal of Nanjing Forestry University , 1998 , 22 (1) : 47 — 52.

[7] Sheng Y M , Wang H , Zeng H. Characteristics of halophyte and associated soil a long aggradational muddy coasts in Jiangsu Province , Acta Ecologica Sinica , 2005 , 25 (1) : 1 — 6.

[8] Kriwoken L K , Hedge P. Exotic species and estuaries : managing *Spartina anglica* in Tasmania , Australia. Ocean Coast Management , 2000 , 43 : 573 — 584.

[9] Wang G P. Character of phosphorus biogeochemistry on wetlands. Journal of Soil and Water Conservation , 2004 , 18 (4) : 193 — 196.

[10] Wang G P , Liu J Q. Overview on wetlands biogeochemistry. Journal of Soil and Water Conservation , 2002 , 16 (4) : 144 — 149.

[11] Aerts R. Interspecific competition in natural plant communities : mechanisms , trade-offs and plant-soil feedbacks. Journal of Experimental Botany , 1999 , 50 : 29 — 37.

[12] Bobbink R , Hornung M , Roelofs J G M. The effects of air-borne nitrogen pollutants on species diversity in natural and semi-natural European vegetation. Journal of Ecology , 1998 , 86 : 717 — 738.

[13] G sewell S. High nitrogen :phosphorus ratios reduce nutrient retention and second-year growth of wetland sedges. New Phytologist , 2005 , 166 : 537 — 550.

[14] G sewell S , Bollens U , Ryser P , et al. Contrasting effects of nitrogen , phosphorus and water regime on first- and second-year growth of 16 wetland

plant species. Functional Ecology 2003 ,17 :754 —765.

[15] Chen Y N ,Gao S ,Jia J J ,Wang A J. Tidalfat ecological changes by transplanting *Spartina angelica* and *Spartina alterniflora* ,northern Jiangsu coast. Oceanologia Etlimnologia Sinica ,2006 ,35 (5) :394 —403.

[16] Zhou H X ,Liu J E ,Qin P. Effects of an alien species (*Spartina alterniflora*) on soil microorganism diversity in saltmarsh ,Jiangsu coastal inter-tidal ecosystem. Acta Ecologica Sinica ,2005. 25 (9) 2304 —2411.

[17] Wang J G ,Chen G C ,Zhang C L. The effects of water stress on soluble protein content ,the activity of SOD ,POD and CAT of two ecotypes of reeds (*Phragmites communis*). Acta Botany Boreal-Occident ,2002 ,22 (3) :561 —565.

[18] Zhou D W ,Jiang S C ,Hu Y J. Changes in plant height growth ,moisture and chlorophy II content following a grassland burying. Journal of Northeast Normal University ,1999 ,4 :91 —94.

[19] Zhou Y L. Plant biology. Beijing :Higher Education Press ,2004. 156 —157.

[20] Chalmers A G. The effects of fertilization on nitrogen distribution in a *Spartina alterniflora* salt marsh. Estuarine and Coastal Marine Science ,1979 ,8 :327 —337.

[21] Daia T ,Wiegert R G. A field study of photosynthetic capacity and its response to nitrogen fertilization in *Spartinaalterniflora*. Estuarine ,Coast Shelf Science ,1997 ,45 :273 —283.

[22] Stewart G R ,Lee J A ,Orebamjo T O. Nitrogen metabolism of halophytes II . nitrate availability and utilization. New Phytologist ,1973 ,72 :539 —546.

[23] Kiehl K ,Esselink P ,Bakker J P. Nutrient limitation and plant species composition in temperate salt marshes. Oecologia ,1997 ,111 :325 —330.

[24] Ngai J T ,Jefferies R L. Nutrient limitation of plant growth and forage quality in Arctic coastal marshes. Journal of Ecology ,2004 ,92 :1001 —1010.

[25] Bradley P M ,Morris J T. Effect of salinity on the critical nitrogen concentration of *Spartina alterniflora* Loisel. Aquatic Botany ,1992 ,43 :149 —161.

[26] Paluda C ,Morris J T. Distribution and speciation of phosphorus along a salinity gradient in intertidal marsh sediments. Biogeochemistry ,1999 ,45 :197 —221.

[27] Harm J ,Wijnen V ,Bakker J. Nitrogen and phosphorus limitation in a coastal barrier salt marsh :the implications for vegetation succession. Journal of Ecology ,1999 ,87 :265 —272.

[28] Bennett L T ,Adams M A. Response of a perennial grassland to nitrogen and phosphorus additions in sub-tropical ,semi-arid Australia. Journal of Arid Environment ,2001 ,48 :289 —308.

[29] Karl D M ,Bjorkrkman K M ,Dore J E ,et al. Ecological nitrogen-to-phosphorus stoichiometry at station. Aloha Deep-Sea Research II ,2001 ,48 :1529 —1566.

[30] Koerselman W ,Meuleman A F. The vegetation N:P ratio :a new tool to detect the nature of nutrient limitation. Journal of Applied Ecology ,1996 ,33 :1441 —1450.

[31] Tessier J T ,Raya1 D J. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation ,Journal of Applied Ecology ,2003 ,40 :523 —534.

参考文献：

[1] 陈宜瑜,吕宪国. 湿地功能与湿地科学的研究方向. 湿地科学,2003 ,9 :7 ~12.

[2] 白军红,邓伟,朱颜明. 湿地生物地球化学过程研究进展. 生态学杂志,2002 ,21 (1) :53 ~57.

[3] 白军红,欧阳华,邓伟,等. 湿地氮素传输过程研究进展. 生态学报,2005 ,2 :326 ~334.

[5] 仲崇信. 大米草简史及国外研究概况. 南京大学学报——米草研究的进展专集,1985 ,1 ~30.

[6] 李湘萍,汤庚国,王定胜,等. 江苏湿地植物群落学特征及其分布和演替规律. 南京林业大学学报,1998 ,22 (1) :47 ~52.

[7] 沈永明,曾华,王辉,等. 江苏典型淤长岸段潮滩盐生植被及其土壤肥力特征. 生态学报,2005 ,25 (1) :1 ~6.

[9] 王国平. 湿地磷的生物地球化学特性. 水土保持学报,2004 ,18 (4) :193 ~196.

[10] 王国平,刘景双. 湿地生物地球化学研究概述. 水土保持学报,2002 ,16 (4) :144 ~149.

[15] 陈一宁,高抒,贾建军,等. 米草属植物 *S. angelica* 和 *S. alterniflora* 引种后江苏海岸湿地生态演化的初步探讨,海洋与湖沼,2006 ,35 (5) 394 ~403.

[16] 周虹霞,刘金娥,钦佩. 外来种互花米草对盐沼土壤微生物多样性的影响——以江苏滨海为例. 生态学报,2005 ,25 (9) :2304 ~2411.

[17] 王俊刚,陈国仓,张承烈. 水分胁迫对2种生态型芦苇 (*Phragmites communis*) 的可溶性蛋白含量、SOD、POD、CAT 活性的影响. 西北植物学报,2002 ,22 (3) :561 ~565.

[18] 周道玮,姜世成,胡勇军. 高原植物高生长、体内水分和叶绿素含量对火烧的反应. 东北师范大学学报 (自然科学版),1999 ,4 :91 ~94.

[19] 周云龙,方瑾,张崇浩,等. 植物生物学. 北京 :高等教育出版社,1999. 156 ~157.