

# 星星草 (*Puccinellia tenuiflora*) 人工草地氮素积累 对松嫩盐碱草地植被演替的影响

陈 刚<sup>1,2</sup>, 孙国荣<sup>2,3,\*</sup>, 彭永臻<sup>3,4</sup>, 马东辉<sup>5</sup>, 岳中辉<sup>6</sup>, 那守海<sup>7</sup>, 阎秀峰<sup>7</sup>

(1. 扬州大学 江苏省作物遗传生理重点实验室, 扬州 225009; 2. 扬州大学生物科学与技术学院, 扬州 225009;

3. 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 哈尔滨 150009; 4. 北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100022;

5. Institute for Vegetable Science, University Hannover, Herrenhaeuserstr. 2, 30419 Hannover, Germany;

6. 哈尔滨师范大学生物系, 哈尔滨 150080; 7. 东北林业大学生命科学学院, 哈尔滨 150040)

**摘要:**通过对星星草 (*Puccinellia tenuiflora*) 生长不同年数盐碱土壤氮素营养状况的比较, 研究氮素积累作用的机理, 并探讨其在植被演替中的可能作用。结果表明: 在一维生态位空间 (土壤氮含量) 星星草和羊草 (*Leymus chinense*) 之间具有较小的生态位分离值和较大的生态位重叠值, 表明羊草对土壤高含氮量具有较强的竞争能力。这些也许是羊草以及其他植物在星星草生长一定年数后能够侵入碱斑土壤的机制。星星草作为盐碱土壤改良和植被恢复的先锋植物, 它的生长增强了盐碱草地土壤氮素的矿质化作用和生物固氮强度, 并减弱了氮素随地表径流的损失。最终促进了盐碱草地的氮素沉积, 达到了适合于其它物种 (如羊草) 生长的水平, 从而使碱斑植被得以恢复。

**关键词:** 星星草; 盐碱土; 氮积累; 土壤酶活性; 生态位; 植被演替

文章编号: 1000-0933(2008)05-2031-11 中图分类号: Q142, Q145, Q948, S812 文献标识码: A

## Effect of nitrogen accumulation in *Puccinellia tenuiflora* grassland on the succession of vegetation in Songnen alkaline grassland

CHEN Gang<sup>1,2</sup>, SUN Guo-Rong<sup>2,3,\*</sup>, PENG Yong-Zhen<sup>3,4</sup>, MA Dong-Hui<sup>5</sup>, YUE Zhong-Hui<sup>6</sup>, NA Shou-Hai<sup>7</sup>,  
YAN Xiu-Feng<sup>7</sup>

1 Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology of Jiangsu Province, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China

2 College of bioscience and Biotechnology, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China

3 School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150009, China

4 College of Environmental and Energy Engineering, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022, China

5 Institute for Vegetable Science, University Hannover, Herrenhaeuserstr. 2, 30419 Hannover, Germany

6 Department of Biology, Harbin Normal University, Harbin 150080, China

7 College of Life Science, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

*Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5): 2031 ~ 2041.

**Abstract:** With the exploitation and utilization of land resources, especially the non-sustainable utilization like overgrazing,

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (30600073, 30270234, 30770344); 国家“863”重大科技专项资助项目 (2007AA021402); 国家自然科学基金重点资助项目 (50138010); 扬州大学高层次人才科研启动基金资助项目

**收稿日期:** 2006-10-24; **修订日期:** 2007-11-05

**作者简介:** 陈刚 (1973 ~), 男, 江苏吴江人, 博士, 主要从事植物生理生态学教学与研究. E-mail: zws1 @ yzu.edu.cn

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: grsun @ yzu.edu.cn

**Foundation item:** The project was financially supported by NSF of China (No. 30600073, 30270234, 30770344), State 863 Key Sci-tech Special Program of China (No. 2007AA021402), Key Program of NSF of China (No. 50138010), Science Foundation of High Level Scholar of Yangzhou University

**Received date:** 2006-10-24; **Accepted date:** 2007-11-05

**Biography:** CHEN Gang, Ph. D., mainly engaged in plant physiology and ecology. E-mail: zws1 @ yzu.edu.cn

the extent of alkalization of Song-Nen grassland has been enlarged and the vegetation has been degraded seriously. The area of preponderant grass *Leymus chinense* (*L. chinense*) also reduced, the height of grass and the extent of closed canopy of grassland decreased, and the alkali spot with very little grass occurred in the grassland. *Puccinellia tenuiflora* (*P. tenuiflora*) could grow in alkalized soil after artificial planting, and ameliorate the alkalized soil. Then *L. chinense* and other plants intruded into the alkalized spot where *P. tenuiflora* had been grown for certain years, making the plant population no longer the singularity population of *P. tenuiflora*. The mechanism about the vegetation of *L. chinense* succeeding in recovery was not only due to the improvement of physical or chemical property of the soil, but also due to the anthropogenic nitrogen deposition, which could cause vegetation-type conversion. But the mechanisms of vegetation succession were not very clear. As to the cause of vegetation succession, there were many hypotheses, such as frequent fire and grazing, but nitrogen deposition had only recently been considered.

There were two aims of this study on the growth of *P. tenuiflora*. The first was to reveal that how the *P. tenuiflora* could meliorate the salt-alkali soil, the second was to quantify the changes of niche after the vegetation succession from *P. tenuiflora* to other kinds of plants. Niches of various plants in Song-Nen alkaline grassland were calculated. Comparing with the controlled alkali spot soil, all the evidences from the experiment indicated that *P. tenuiflora* improved the nitrogen nutrition status of salt-alkali soil. There were smaller value of niche separation and bigger value of niche overlap between *P. tenuiflora* and *L. chinense* in one dimension niche space (N content of soil) than those among other species, which indicated that *L. chinense* had stronger competition ability on soil with high nitrogen content. These appear to be the mechanism of *L. chinense* and other plants intruding into the alkalized spot in which *P. tenuiflora* has grown for certain years. As the pioneer plant of meliorating alkalized soil and vegetation restoration, the growth of *P. tenuiflora* could improve the nitrogen mineralization and nitrogen fixation in salt-alkali grassland, and decrease the nitrogen loss with water run-off. Finally, the nitrogen deposition in salt-alkali grassland was improved to the level that other plants (such as *L. chinense*) could grow normally, and the vegetation in alkali spot was restored.

**Key Words:** *Puccinellia tenuiflora*; salt-alkali soil; nitrogen accumulation; soil enzyme activity; niche; vegetation succession

植被与土壤的关系是植物生态学研究的一个重要内容,人们常把二者作为一个系统予以研究,因为在同一气候条件下,土壤分异导致了植被的变化,尤其是盐生植被和盐渍化土壤的相关性更为明显<sup>[1]</sup>。松嫩草地地处温带,具半干旱大陆性气候特点,草甸草原是松嫩草地的主体类型<sup>[2]</sup>,羊草(*Leymus chinense*)是松嫩草地的优势禾草<sup>[3]</sup>,盐碱化的松嫩草地以羊草+杂类草群落为主。关于松嫩草地盐碱植物群落的分类和分布已有较深入的研究,对盐碱植物群落与盐碱生境相关性的生物生态学机制也有初步的探讨<sup>[3~5]</sup>。松嫩草地由于地形的变化及土壤基质的差异从而使不同地段土壤在水分状况、盐分状况、养分状况上都有差别,这种差别对植被具有选择作用,决定了各种植物能够生长的地段。同时,植物对土壤条件也有适应和改造的过程。这样,在植物与土壤的相互作用过程中,再加上植物种间的竞争作用,便形成了各种植物的种群分布格局,也就决定了各种植物在植被演替中的地位和作用。

多年生禾本科植物星星草(*Puccinellia tenuiflora*)经人工种植后能够在碱斑地上生长发育,是它被应用于生物治理碱性土壤的方法之一<sup>[6,7]</sup>,并对盐碱土壤具有改良作用。然而,星星草生长一定年数后,羊草等植物会侵入原来星星草生长的碱斑地,而改变植物群落为星星草单一种群的状况,最终使群落结构发生改变。这种盐碱草地微地域植被演替的土壤学机制目前还不清楚。星星草对土壤物理结构的影响,可以从两个方面来考虑<sup>[7~9]</sup>。一方面,星星草庞大而致密的根系,对土壤穿插和挤压,直接疏松了土壤,改善了土壤的通气性;另一方面,星星草由于根系更新而使枯死部分存留于土壤中,加之根系的分泌作用,以及根有机物质的分解,增加了土层中的团粒结构和肥力,为其他植被的生长和繁殖改良了土壤的物理环境<sup>[9]</sup>。种植星星草对土壤含

盐量和 pH 的影响限于土壤的一定深度。在 0 ~ 20 cm 土层, 种植星星草土壤的含盐量明显低于碱斑土壤, 种植星星草土壤与碱斑土壤剖面有机质和全氮含量的差异, 也是在 0 ~ 20 cm 差别最大<sup>[8,10]</sup>。在星星草的生长季节里, 从土壤中吸收一部分盐分<sup>[11]</sup> 以及促进盐分向下层的淋溶作用仅只是其改良作用的一个方面; 由于星星草的生长覆盖抑制土壤的返盐过程, 以及由于根系更新而使枯死部分存留于土壤中和根系的分泌作用, 改变了土壤的化学性质, 加之  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  含量的增加对于土壤物理结构的改良作用; 可能是星星草改良碱化土壤作用的更重要方面<sup>[8~10]</sup>。

然而, 星星草生长的碱斑地是由于羊草草地不合理利用、其植被被人为破坏而形成的, 由于星星草的生长最终使羊草植被得以恢复, 其机制看来不仅是土壤的物理或化学性质得到改良这么简单。因为氮的沉积一直是一个全球问题, 氮的沉积可以引起植被类型的转换, 如原来一度是复杂的灌木丛地变为低多样性的草地, 但植被变化的机制一直不清楚<sup>[12~14]</sup>。氮沉积下植被变化的主要机制是相对其他物种而言增强一些物种的生长, 如对欧洲的石楠树丛地转变为草地的研究表明 *Brachypodium pinnatum* (L) Beauv. 草的竞争能力因  $\text{NH}_4^+$  的沉积而增强<sup>[15]</sup>。南加利福尼亚在最近的数十年, 地中海 1 年生草本植物被沿海山艾树丛所取代<sup>[16~18]</sup>。人们假设的引起植被变化的原因有许多, 但氮的沉积仅只是最近才被考虑到<sup>[19~21]</sup>。

本文对星星草生长不同年数碱化土壤与碱斑土壤全氮含量、碱解氮含量、氨化强度、固氮强度、脲酶活性、蛋白酶活性、亚硝酸还原酶活性和硝酸还原酶活性进行比较研究的目的, 一方面揭示星星草的生长对盐碱土壤改良作用的氮素营养机制; 另一方面, 通过对星星草生长不同年数盐碱土壤氮素营养状况的比较, 研究氮素积累的作用机理, 并探讨其在植被演替中的可能作用。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验地在黑龙江省肇州县畜牧局草原试验场

该实验场位于该县西北部, 属松嫩平原的西部, 地理位置为东经  $124^{\circ}47' \sim 124^{\circ}50'$ , 北纬  $45^{\circ}46' \sim 45^{\circ}48'$ , 海拔 140 m。该地区属于温带大陆性气候, 四季分明, 冬长夏短, 光热资源比较丰富。年平均气温为  $3.6^{\circ}\text{C}$ , 1 月份和 7 月份平均气温分别为  $-19.3^{\circ}\text{C}$  和  $22.9^{\circ}\text{C}$ 。全年  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温为  $2800^{\circ}\text{C}$ , 无霜期平均 143 d。全年日照总时数 2900 h。年平均降雨量为 434.5 mm, 主要集中在 6 ~ 9 月份, 占全年降雨量的 69%。年平均蒸发量为 1800.0 mm, 以 4 ~ 7 月份最大, 干燥度为 1.2, 气候干热。土壤类型为苏打碱化草甸土。土壤 pH 为  $10.61 \pm 0.11$ , 全盐含量为  $0.99\% \pm 0.05\%$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  含量为  $(2.16 \pm 0.47) \text{ me (100g}^{-1})$  土,  $\text{HCO}_3^{-}$  含量为  $(11.92 \pm 1.91) \text{ me (100g}^{-1})$  土,  $\text{Na}^{+}$  含量为  $(14.55 \pm 0.23) \text{ me (100g}^{-1})$  土。

### 1.2 土壤样品采集和土壤测定方法

在人工星星草地(生长 2、3、4 和 5 年)及对应的碱斑裸地, 每样地选择  $1 \text{ m}^2$  对 0 ~ 20 cm 土层取土样; 每次取样重复 5 次, 进行以下土壤酶活性的测定, 每次测定重复 3 次。

全氮含量的测定用凯氏定氮法( $\text{g}/100\text{g}$  土,  $25^{\circ}\text{C}$ ), 碱解氮含量的测定用扩散吸收法( $\text{mg}/100\text{g}$  土,  $35^{\circ}\text{C}$ , 16 h)<sup>[22]</sup>, 氨化强度的测定用奈氏比色法( $\text{mg}/100\text{g}$  土,  $28^{\circ}\text{C}$ , 9 d)<sup>[23]</sup>, 固氮强度的测定用凯氏定氮法( $\text{g}/100\text{g}$  土,  $25^{\circ}\text{C}$ , 10 d)<sup>[23]</sup>, 蛋白酶活性的测定用茚三酮比色法( $\text{Gly}$ ,  $\text{mg}/\text{g}$  土,  $30^{\circ}\text{C}$ , 24 h)<sup>[23]</sup>, 脲酶活性的测定用 Hoffmann 比色法( $\text{NH}_3\text{-N}$ ,  $\text{mg}/100\text{g}$  土,  $37^{\circ}\text{C}$ , 24 h)<sup>[23]</sup>, 硝酸还原酶(NR)活性的测定用酚二磺酸比色法( $\text{NO}_3^{-}$ ,  $\text{mg}/\text{g}$  土,  $30^{\circ}\text{C}$ , 24 h)<sup>[23]</sup>, 亚硝酸还原酶(NiR)活性的测定用 TPUC 比色法( $\text{NO}_2^{-}$ ,  $\text{mg}/\text{g}$  土,  $30^{\circ}\text{C}$ , 24 h)<sup>[23]</sup>。

### 1.3 植物种群重要值的测定

每次野外研究, 都是在不同的群落类型中选取 3 个样方, 样方面积  $0.5 \times 0.5 \text{ m}^2$ , 记录样方内每种植物的多度( $D$ ), 株高( $H$ ), 盖度( $C$ ), 和频度( $f$ )。取样方下深度为 20 cm 的土样以供室内分析其理化性质。因为植物生长在松嫩盐碱草地这一特殊的土壤条件下, 对其生长影响最大的是 0 ~ 20 cm 深的土壤, 虽然其它深度的土层对其也有影响, 但是其影响程度较小, 所以只就 0 ~ 20 cm 深的土壤理化性质进行研究, 并将它们作为生态位维(即植物所赖以生存的资源状态, 或称为生态位空间)。

将多度( $D$ ),株高( $H$ ),盖度( $C$ )和频度( $f$ )换算成相对值( $D', H', C', f'$ ),然后再计算出其重要值( $IV$ )。

$$IV = (D' + H' + C' + f') / 4 \times 100\%$$

#### 1.4 生态位宽度、生态位分离和生态位重叠的测度

##### 1.4.1 生态位宽度

参照 Yu and Orloci<sup>[24]</sup>的方法并根据松嫩草地的具体特点对公式进行了改进,得出各主要植物种群的一维生态位宽度。具体计算公式如下:

$$p_{..} = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^t P_{ij} \quad (1)$$

$$q_{..} = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^t P_{ij} \quad (2)$$

$$2I_{12} = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^t [P_{ij} \ln P_{ij} / (p_{ij} + q_{ij}) \times 2 + q_{ij} \ln q_{ij} / (p_{ij} + q_{ij}) \times 2] \quad (3)$$

$$2I_{\max} = 2 \{ P_{..} \ln p_{..} + q_{\min}(ij) \times 2 + q_{\min}(ij) \ln q_{\min}(ij) / (p_{..} + q_{\max}(ij) \times 2 + \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^t q_{ij} \ln (q_{ij} / q_{\min}(ij) \times 2) \} \quad (4)$$

$$H_B = (1 - 2I_{12} / 2I_{\max} \times \bar{l}_{ij}^{p_{..}} \times \bar{l}_{ij}^{q_{..}} \times \bar{l}_{ij}^{q_{\min}}) \quad (5)$$

式中, $p_{ij}$ 表示物种出现于生态位空间各分室上的性能或频度,或这一量的相对比例。 $q_{ij}$ 表示样本出现于生态位空间分室中的数目或多度。 $H_B$ 表示生态位宽度, $\bar{l}_{ij}^p$ 为引入的加权因子,即生态因子间隔。生态因子间隔的计算方法如下:

$$l_{ij}^p = x_{ij}^j - x_{ij}^{j-1} \quad (6)$$

$$\bar{l}_{ij}^p = \sum_{j=1}^{n-1} l_{ij}^p / (n - 1) \quad (7)$$

式中, $\bar{l}_{ij}^p$ 为生态因子间隔的平均值, $x_{ij}^j$ 为某一资源状态的具体数值。

##### 1.4.2 生态位分离

参照余世孝, Orloci<sup>[25,26]</sup>的方法,自编计算程序处理数据,得出松嫩盐碱草地各主要植物种群的一维生态位分离。计算公式如下:

$$S_{hi} = \sum_{j=1}^k D_j | P_{hj} - P_{ij} | \quad (8)$$

式中, $P_{hi}$ 和 $P_{ij}$ 分别指物种 $h$ 和 $i$ 在某一生态位空间的分布比例量。 $D_j$ 是生态位空间中一定点到理论生态位中心点的距离。

##### 1.4.3 生态位重叠

参照 Wang 等<sup>[27]</sup>的方法,自编计算程序处理数据,得出各主要植物种群的一维生态位重叠。计算公式如下:

$$N.O. = \sum_{i_1=1} \cdots \sum_{i_n=1} \varphi(x_{i_1}^{i_1}, x_{i_1}^{i_2}, \cdots, x_{i_1}^{i_n}) l_{i_1}^{i_1} \cdot l_{i_2}^{i_2} \cdots l_{i_n}^{i_n} / \text{Max} [ \sum_{i_1=1} \cdots \sum_{i_n=1} f_1(x_{i_1}^{i_1}, x_{i_2}^{i_2}, \cdots, x_{i_n}^{i_n}) l_{i_1}^{i_1} l_{i_2}^{i_2} \cdots l_{i_n}^{i_n}, \sum_{i_1=1} \cdots \sum_{i_n=1} f_2(x_{i_1}^{i_1}, x_{i_2}^{i_2}, \cdots, x_{i_n}^{i_n}) l_{i_1}^{i_1} l_{i_2}^{i_2} \cdots l_{i_n}^{i_n} ] \quad (9)$$

式中, $N.O.$ 为生态位重叠, $\varphi(x_{i_1}^{i_1}, x_{i_2}^{i_2}, \cdots, x_{i_n}^{i_n})$ 为某一生态位空间中两个种利用资源状态效能的最小值, $f_1(x_{i_1}^{i_1}, x_{i_2}^{i_2}, \cdots, x_{i_n}^{i_n})$ 和 $f_2(x_{i_1}^{i_1}, x_{i_2}^{i_2}, \cdots, x_{i_n}^{i_n})$ 分别为两个种在某一生态空间中利用资源的效能值。 $l_{i_n}^{i_n}$ 为引入的加权因子,即生态因子间隔。

以上的计测公式运用了集合映射理论和较严谨的数学语言表达,便于生态位的定量研究。在生态位重叠和宽度的计测公式中,引入了生态因子间隔这一加权因子,消除了因资源位划分不均匀而造成的计测生态位

重叠和宽度时的误差;公式中采用种群在生态因子梯度上分布的绝对值,因而避免了其他公式中利用种群分布的相对比例而造成的信息损失,保证了生态学合理性。因为生态因子在生态因子轴上的配置是不均匀的,在计测物种的生态位重叠和宽度时所用的数据是在有关的生态因子梯度上取得的,但在生态因子梯度上布置样方(或样点)时,要使其全部等间隔地排列是很难做到的,因此要计测重叠和宽度就必须考虑样方在生态因子轴上的间距,因此引入生态因子间隔这一加权因子。生态位分离这一测度的引入避免了以前计测物种生态位时只计算重叠所带来的偏差,这一测度的引入可以表明物种生态位的非相似性。

### 1.5 统计分析方法

统计分析采用 SAS 软件,在  $P < 0.01$  或  $P < 0.05$  水平通过 Duncan 多重比较进行差异显著性检验,用 SigmaPlot 2000 统计软件进行相关分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 星星草的生长对盐碱土壤全氮含量和碱解氮含量的影响

星星草在盐碱土壤上生长不同年数后土壤全氮含量不同,但都高于碱斑裸地(图 1)。星星草生长 2a、3a、4a、5a 的土壤全氮含量与碱斑裸地差异显著 ( $F = 4.84 > F_{4,20,0.05}$ ),但是星星草生长不同年数后的土壤全氮含量间没有差异,维持在一定的水平。说明由于星星草的生长,土壤全氮含量增加到一定水平后,处于动态平衡状态。

星星草在盐碱土壤上生长不同年数后土壤碱解氮含量不同,但都高于碱斑裸地,星星草生长 3a 后土壤的碱解氮含量最高(图 2)。星星草生长不同年数对盐碱土壤碱解氮含量影响的大小顺序为:生长 3a > 生长 2a  $\geq$  生长 4a > 生长 5a > 碱斑裸地 ( $F = 8.20 > F_{4,20,0.05}$ )。说明星星草的生长对盐碱土壤有效氮素含量的影响较大,星星草生长 4、5a 后土壤可利用氮素降低。

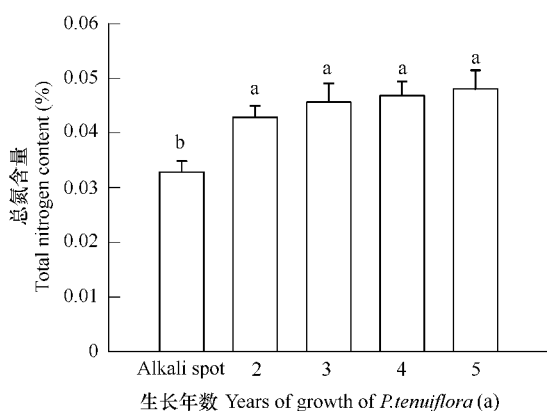


图 1 星星草生长不同年数后盐碱土中的总氮含量

Fig. 1 Total nitrogen content of alkalinized soil of which *P. tenuiflora* had grown for different years (The data is means of five experiment,  $n = 5$ )

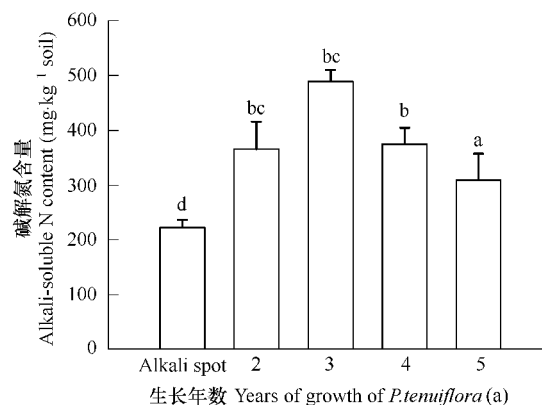


图 2 星星草生长不同年数后盐碱土中的碱解氮含量

Fig. 2 Alkali-soluble N content in alkalinized soil of which *P. tenuiflora* had grown for different years

### 2.2 星星草的生长对盐碱土壤氮化强度的影响

星星草在盐碱土壤上生长不同年数后土壤氮化强度不同,但都高于碱斑裸地,星星草生长 5a 后的氮化强度最高(图 3)。星星草生长不同年数对盐碱土壤氮化强度影响的大小顺序为:生长 5a > 生长 4a  $\approx$  生长 3a > 生长 2a  $\approx$  碱斑裸地 ( $F = 24.67 > F_{4,20,0.05}$ )。说明由于星星草的生长,土壤氮化强度增强。

### 2.3 星星草的生长对盐碱土壤固氮强度的影响

星星草在盐碱土壤上生长不同年数后土壤固氮强度不同,但都高于碱斑裸地(图 4)。星星草生长后土壤固氮强度在星星草生长 3a 后显著增强,高于碱斑裸地,并一直保持到第 4 年、第 5 年 ( $F = 3.36 > F_{4,20,0.05}$ )。

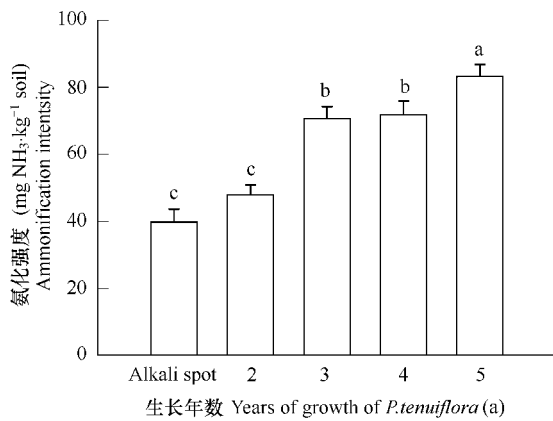


图3 星星草生长不同年数后盐碱土中的氨化强度

Fig. 3 Ammonification intensity of alkalinized soil of which *P. tenuiflora* had grown for different years

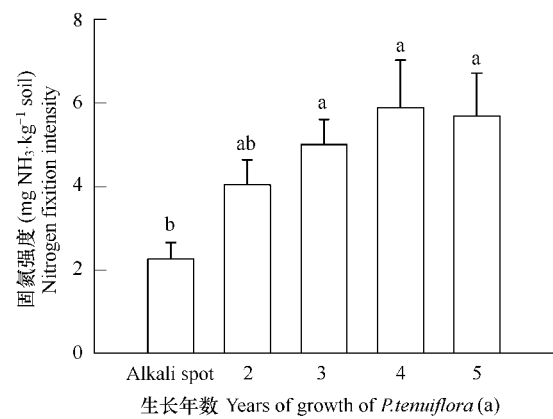


图4 星星草生长不同年数后盐碱土中的固氮强度

Fig. 4 Nitrogen fixation intensity of alkalinized soil of which *P. tenuiflora* had grown for different years

## 2.4 星星草的生长对盐碱土壤硝酸还原酶(NR)和亚硝酸还原酶(NiR)活性的影响

星星草在盐碱土壤上生长不同年数后土壤硝酸还原酶活性都高于碱斑裸地,星星草生长5a后土壤硝酸还原酶活性最高(图5)。方差分析结果表明,星星草生长不同年数对盐碱土壤硝酸还原酶活性影响的大小顺序为:生长5a≈生长4a>生长3a≈生长2a≈碱斑裸地( $F=24.80 > F_{4,20,0.05}$ )。说明星星草生长一定年数后,土壤硝酸还原酶活性增强,从而提高了土壤氨态氮的含量。

星星草在盐碱土壤上生长不同年数后土壤亚硝酸还原酶活性都高于碱斑裸地,星星草生长5a后土壤亚硝酸还原酶活性最高(图6)。星星草生长不同年数对盐碱土壤亚硝酸还原酶活性影响的大小顺序为:生长5a>生长4a>生长3a≈生长2a≈碱斑裸地( $F=9.82 > F_{4,20,0.05}$ )。说明星星草生长一定年数后土壤亚硝酸还原酶活性增强。

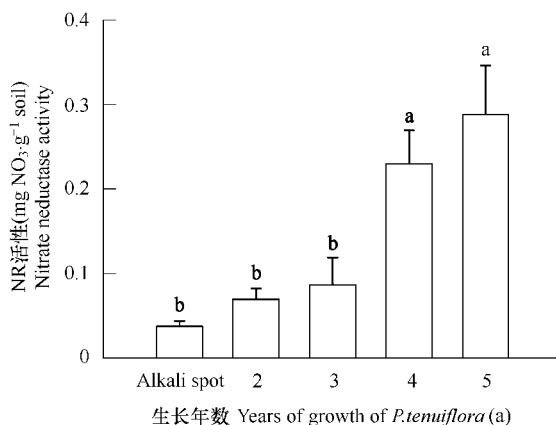


图5 星星草生长不同年数后盐碱土中的NR活性

Fig. 5 Nitrate reductase activity of alkalinized soil of which *P. tenuiflora* had grown for different years

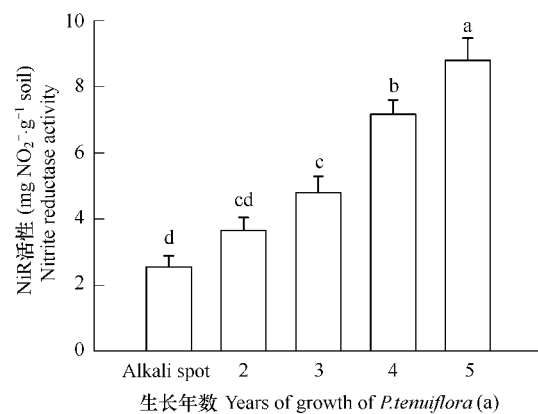


图6 星星草生长不同年数后盐碱土中的NiR活性

Fig. 6 Nitrite reductase activity of alkalinized soil of which *P. tenuiflora* had grown for different years

## 2.5 星星草的生长对盐碱土壤脲酶的影响

星星草在盐碱土壤上生长不同年数后土壤脲酶活性不同,但都高于碱斑裸地,星星草生长3a后土壤脲酶活性最高(图7)。方差分析结果表明,星星草生长不同年数对盐碱土壤脲酶活性影响的大小顺序为:生长3a>生长4a≈生长5a>生长2a≈碱斑裸地( $F=40.18 > F_{4,20,0.05}$ )。说明星星草生长一定年数后使盐碱土壤脲

酶活性增强。

## 2.6 星星草的生长对盐碱土壤蛋白酶活性的影响

星星草在盐碱土壤上生长不同年数后土壤蛋白酶活性都高于碱斑裸地(图8)。方差分析结果表明,星星草生长不同年数对盐碱土壤蛋白酶活性影响的大小顺序为:生长3a $\approx$ 生长5a $\approx$ 生长4a $\geq$ 生长2a $\approx$ 碱斑裸地( $F=5.83 > F_{4,20,0.05}$ )。说明星星草生长一定年数后使土壤蛋白酶活性增强。

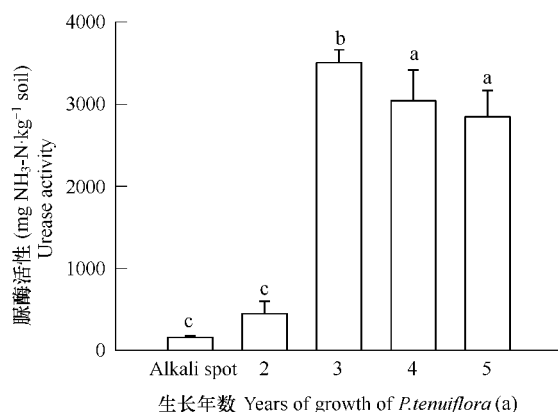


图7 星星草生长不同年数后盐碱土中的脲酶活性

Fig. 7 Urease activity of alkalized soil of which *P. tenuiflora* had grown for different years

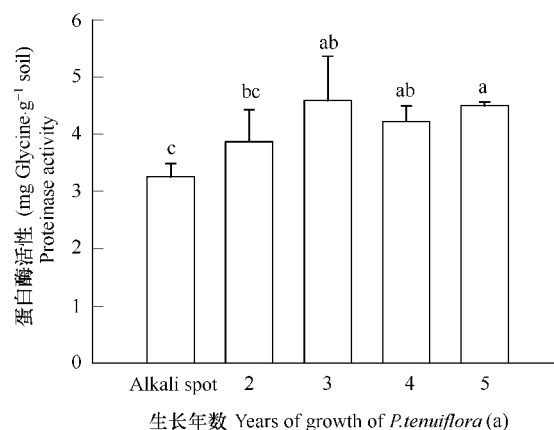


图8 星星草生长不同年数后盐碱土中的蛋白酶活性

Fig. 8 Proteinase activity of alkalized soil of which *P. tenuiflora* had grown for different years

## 3 讨论

由于在碱斑裸地上建植人工星星草地不施用任何肥料,因此,土壤中氮素营养的来源主要由降水、凋落物、有机残体分解及生物固氮作用来补给。因星星草的生长使盐碱土壤有机质和腐殖质含量增加<sup>[28,29]</sup>,并且植物根的沉积增加了土壤活性C池,并作为能量源提高土壤微生物活性,促进有机物矿化,从而增加土壤无机氮的供应<sup>[30]</sup>。而有机质对土壤氮素的累积,特别是促进土壤中稳定性氮化合物迅速转化为低分子氮化合物的矿质化作用<sup>[10]</sup>,从而使盐碱土壤保蓄有效氮素营养的能力增强,加之星星草的生长减弱了氮素随地表径流的损失。这可能是星星草生长后土壤碱解氮含量(图2)增加的原因之一。再者,由于星星草的生长,使盐碱土壤蛋白酶活性(图8)、土壤氮化强度(图3)和硝酸还原酶活性(图5)增强,提高了盐碱土壤有机氮的矿质化过程以及氮素间的转化过程。这可能是星星草生长后土壤碱解氮含量(图2)增加的又一重要原因。土壤氮素的积累还有一个重要的方面即生物固氮作用,这种作用对提高土壤含氮量,减少氮素损失有重要意义。星星草生长3a后,土壤固氮强度(图4)增加,这也是星星草生长后土壤碱解氮含量(图2)增加的重要因素。之所以土壤碱解氮含量(图2)在星星草生长第4年后降低,而土壤全氮含量(图1)却并不下降,主要原因可能是由于盐碱土壤中有有机氮的矿质化能力有限,而降水和生物固氮作用所提供的可利用氮素满足不了星星草生长的需要,即星星草的生长利用大于补给所造成的。

土壤对不同物种的氮素供应能力差异很大<sup>[30]</sup>。氮素累积通过直接增加氮素的可利用性而影响植被,并且植被梯度在很大程度上受到土壤酸度、氮素供应、冠层组成和样地的位置的控制<sup>[31]</sup>,同时受其影响的群落范围很大,包括低地的欧石南丛生的荒野、森林地表植被、石灰质草地、沿海沙丘、沼泽地和丘陵高沼地<sup>[32~34]</sup>。在瑞典、荷兰和奥地利的各种森林地表植被中,富含氮素地点的典型种类(*Urtica dioica*, *Chamaenerion angustifolium*, *Rubus idaeus* 和 *Oxalis acetosella*)的频度增加<sup>[32]</sup>。本文研究结果表明,不同物种的重要值与土壤氮含量之间存在不同的相关关系(表1)。这些表明主要植被的梯度很大程度上由土壤氮素供应所控制<sup>[31,35,36]</sup>。

表 1 不同植物的重要值和土壤氮含量间的相关关系

Table 1 Relationship between the importance value of different plant species and nitrogen content of soil

| 植物种类 Plant species     | 相关方程 Dependent equation            | 相关系数(R) Correlation coefficient |
|------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| <i>Suaeda glauca</i>   | $Y = -151 + 3041X - 12385.29X^2$   | 0.8893                          |
| <i>P. tenuiflora</i>   | $Y = -172 + 2281.27X - 5496.20X^2$ | 0.8568 **                       |
| <i>Leymus chinense</i> | $Y = -195.21 + 1639X - 2648.81X^2$ | 0.8581 **                       |
| <i>Carex</i> sp.       | $Y = 27.79 - 109.09X + 306.87X^2$  | 0.5001                          |
| <i>Potentilla</i> sp.  | $Y = -55.45 + 219.87X$             | 0.9611 **                       |
| 其它植物 Other plants      | $Y = -102.27 + 400.11X$            | 0.8573 **                       |

\*\* 在  $P < 0.01$  水平相关关系显著 means the relationship is significant at the level of  $P < 0.01$

在英国,也已记载了在丘陵地、林地和草地因大气氮输入引起的植被变化<sup>[37~39]</sup>。形成盐生植物群落复合体的主导因素是土壤盐分,它是决定植物群落种类组成、结构、分布格局和种的多样性的主导因素<sup>[40]</sup>。土壤盐分同样也是决定松嫩盐碱草地植物种群分布格局的主导因素<sup>[35,36]</sup>,土壤含氮量和土壤含盐量之间呈极显著相关关系(图 9),暗示着土壤含盐量对盐碱草地植被的影响也许在某种程度上通过影响土壤含氮量而起作用。在盐碱草地中的不同植物物种具有不同的一维(N)生态位宽度值(图 10),进一步揭示了土壤氮含量在植被分布中的作用和植物物种对土壤氮素竞争能力上的差异。在一维生态位空间(土壤氮含量)星星草(*P. tenuiflora*)和羊草(*Leymus chinense*)之间具有较小的生态位分离值(表 2)和较大的生态位重叠值(表 3),表明羊草对土壤高含氮量具有较强的竞争能力。这些也许是羊草以及其他植物在星星草生长一定年数后能够侵入碱斑土壤的机制。

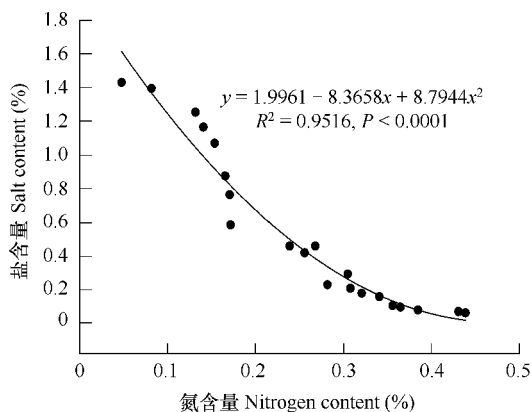


图 9 土壤氮含量和盐含量间的相关关系

Fig. 9 Relationship between nitrogen content and salt content of soil

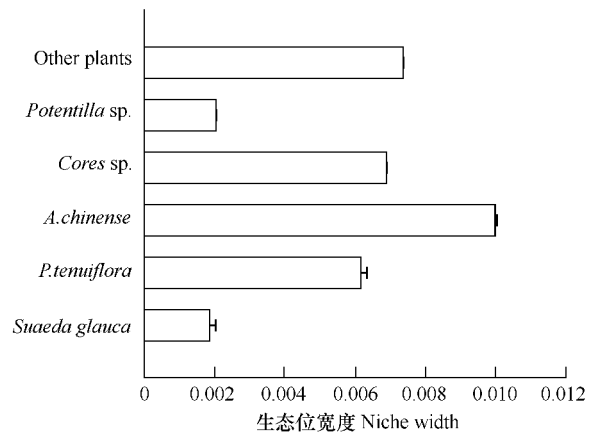


图 10 不同植物种的一维生态位宽度值(土壤 N 含量)

Fig. 10 The value of niche width of different plant species in one dimension (N content of soil)

表 2 不同植物种在一维生态位空间(土壤含氮量)的生态位分离值(%)

Table 2 The value of niche separation of different plant species in one dimension niche space (N content of soil) (%)

| 植物种类 Plant species     | <i>Suaeda glauca</i> | <i>P. tenuiflora</i> | <i>Leymus chinense</i> | <i>Carex</i> sp. | <i>Potentilla</i> sp. | 其它植物 Other plants |
|------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|------------------|-----------------------|-------------------|
| <i>Suaeda glauca</i>   | 0                    |                      |                        |                  |                       |                   |
| <i>P. tenuiflora</i>   | 0.24917              | 0                    |                        |                  |                       |                   |
| <i>Leymus chinense</i> | 0.23908              | 0.166589             | 0                      |                  |                       |                   |
| <i>Carex</i> sp.       | 0.58302              | 0.020727             | 0.251784               | 0                |                       |                   |
| <i>Potentilla</i> sp.  | 0.123776             | 0.060197             | 0.271827               | 0.134606         | 0                     |                   |
| 其它植物 Other plants      | 0.329509             | 0.248940             | 0.426960               | 0.287440         | 0.241752              | 0                 |

表 3 不同植物种在一维生态位空间(土壤含氮量)的生态位重叠值

Table 3 The value of niche overlap of different plant species in one dimension niche space (N content of soil) (%)

| 植物种类<br>Plant species  | <i>Suaeda glauca</i> | <i>P. tenuiflora</i> | <i>Leymus chinense</i> | <i>Carex</i> sp. | <i>Potentilla</i> sp. | 其它植物<br>Other plants |
|------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|------------------|-----------------------|----------------------|
| <i>Suaeda glauca</i>   | 1.000000             |                      |                        |                  |                       |                      |
| <i>P. tenuiflora</i>   | 0.058366             | 1.000000             |                        |                  |                       |                      |
| <i>Leymus chinense</i> | 0.000000             | 0.374345             | 1.000000               |                  |                       |                      |
| <i>Carex</i> sp.       | 0.000000             | 0.088559             | 0.265843               | 1.000000         |                       |                      |
| <i>Potentilla</i> sp.  | 0.000000             | 0.037917             | 0.259615               | 0.780226         | 1.000000              |                      |
| 其它植物 Other plants      | 0.000000             | 0.109329             | 0.305800               | 0.513939         | 0.521233              | 1.000000             |

综上所述,星星草作为盐碱土壤改良和植被恢复的先锋植物,它的生长增强了盐碱草地土壤氮素的矿质化作用和生物固氮强度并减弱了氮素随地表径流的损失。最终促进了盐碱草地的氮素沉积,达到了适合于其它物种(如羊草)生长的水平,从而碱斑植被得以恢复。

#### References:

- [ 1 ] Wu Z F, Zhao S L, Zhang X L, *et al.* Studies on interrelation between salt vegetation and soil salinity in the yellow river delta. *Acta Phytocologica Sinica*, 1994, 18 (2): 184—193.
- [ 2 ] Zhang Y L. Song-Nen grassland types and their utilization. *Pratacultural Science*, 1991, 8 (3): 40—42.
- [ 3 ] Du X G, Zheng H Y, Liu C D. A preliminary study on the main plant communities in the saline soils of Song-Nen plain. *Acta Phytocologica Sinica*, 1994, 18(1): 41—49.
- [ 4 ] Zhang W Z. The relationship between vegetation degeneration and soil salinization in an *Aneurolepidium chinense* grassland of Song-Nen plain. *Acta Phytocologica Sinica*, 1994, 18(1): 50—55.
- [ 5 ] Zheng H Y, Li J D. A preliminary study on the formation of saline-alkali plant communities in the Song-Nen plain. *Acta Phytocologica Sinica*, 1995, 19(1): 1—12.
- [ 6 ] Tang C S. Study on the cultivation and acclimatization of *Puccinellia tenuiflora*. *Chinese Grassland*, 1980, (4): 13—18.
- [ 7 ] Li J X, Ma Y, Fu X L. Study on implantation of *Puccinellia tenuiflora* to improve alkalized soil. *Chinese Grassland*, 1985, (2): 53—55.
- [ 8 ] Yan X F, Sun G R. Study on the Physiological Ecology of *Puccinellia tenuiflora*. Beijing: Science Press, 2000. 123—128.
- [ 9 ] Sun G R, Yan X F, Li J. Effects of the growth of *Puccinellia tenuiflora* on the physical properties of alkali soil. *Acta Agrestia Sinica*, 2002, 10 (2): 118—123.
- [ 10 ] Sun G R, Yan X F, Li J. Effects of the growth of *Puccinellia tenuiflora* on the chemical properties of alkali soil, *Acta Agrestia Sinica*, 2002, 10 (3): 179—183.
- [ 11 ] Yan X F, Sun G R. Li J X, *et al.* Primary studies on salt excretion ability of *Puccinellia tenuiflora*. *Pratacultural Science*, 1994, 11 (3): 36—39.
- [ 12 ] Heil G W, Werger M J A, de Mol W, *et al.* Capture of atmospheric ammonium by grassland canopies. *Science*, 1988, 239: 764—765.
- [ 13 ] Vitousek P M, Aber J D, Howarth R W, *et al.* Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecological Applications*, 1997, 7: 737—750.
- [ 14 ] 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.
- [ 15 ] van Dam D, Heil G W, Bobbink R, *et al.* Atmospheric deposition to grassland canopies: lysimeter budgets discriminating between interception deposition, mineral weathering and mineralization. *Water, Air and Soil Pollution*, 1990, 53: 83—101.
- [ 16 ] Freudenberger D O, Fish B E, Keeley J E. Distribution and stability of grasslands in the Los Angeles Basin. *Bulletin of the Southern California Academy of Sciences*, 1987, 86: 13—26.
- [ 17 ] O'Leary J F. Coastal sage scrub: threats and current status. *Fremontia*, 1995, 23: 27—31.
- [ 18 ] Minnich R A, Dezzani R J. Historical decline of coastal sage scrub in the Riverside-Perris plain, California. *Western Birds*, 1998, 29: 366—391.
- [ 19 ] Allen E B, Eliason S A, Marquez V J, *et al.* What are the limits to restoration of coastal sage scrub in southern California? In: Keeley J E, Keeley M B, Fotheringham C J eds. *Second Interface between Ecology and Land Development in California*, USGS Open-File Report 00-62, Sacramento,

- California, USA, 2000. 253—262.
- [20] Allen E B, Padgett P E, Bytnerowicz A, *et al.* Nitrogen deposition effects on coastal sage vegetation of southern California. In: Bytnerowicz A, Arbaugh M J, Schilling S eds. *Proceedings of the International Symposium on Air Pollution and Climate Change Effects on Forest Ecosystems*. Riverside, California, February 5 9, 1996. USDA Forest Service, Pacific Southwest Research Station, PSW-GTR-166, 1998. 131—140.
- [21] Yoshida L C, Allen E B. Response to ammonium and nitrate by a mycorrhizal annual invasive grass and native shrub in southern California. *American Journal of Botany*, 2001, 88: 1430—1436.
- [22] Nanjing Soil Institute of CAS. *Physical and chemical analysis of soil*. Shanghai: Shanghai Technologic Press, 1978. 62—76.
- [23] Guan S Y. *Enzyme of soil and its research methods*. Beijing: Agriculture Press, 1986. 206—239.
- [24] Yu S X, Orloci L. Multivariate measure of niche breadth. *Acta Ecologica Sinica*, 1994, 14(1): 32—39.
- [25] Yu S X, Orloci L. On the implications of fundamental, realized niche and niche center. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 1993, 32(4): 69—80.
- [26] Yu S X, Orloci L. The implication of niche separation and its measure. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1993, 17(3): 253—263.
- [27] Wang G, Zhao S L, Zhang P Y, *et al.* The discussion about the definition of niche and the research on improvement of calculation formula of niche overlap. *Acta Ecologica Sinica*, 1984, 4(4): 119—127.
- [28] Li J X, Sun G R, Yan X F. *Study on Plant Physiological Ecology of Alkaline Grassland in Song-Nen Plain*. Harbin: Northeast Forestry University Press, 1996. 28—32.
- [29] Yue Z H, Sun G R, Yan X F. The effect on humus and some enzymes' activity in alkali soil by different ameliorative ways. *Bulletin of Botanical Research*, 2003, 23(2): 211—214.
- [30] Sanchez J E, Paul E A, Willson T C, *et al.* Corn root effects on the nitrogen-supplying capacity of a conditioned soil. *Agronomy Journal*, 2002, 94: 391—396.
- [31] Brunet J, Diekmann M, Falkengren-Grerup U. Effects of nitrogen deposition on field layer vegetation in south Swedish oak forests. *Environmental Pollution*, 1998, 102, S1: 35—40.
- [32] Sutton M A, Pitcairn C E R, Fowler D. The exchange of ammonia between the atmosphere and plant communities. *Advances in Ecological Research*, 1993, 224: 301—393.
- [33] Bobbink R, Boxman D, Fremstad E, *et al.* Nitrogen eutrophication and critical load for nitrogen based upon changes in flora and fauna in (semi)-natural terrestrial ecosystems. In: *Critical Loads for Nitrogen*. Proceedings of a UN-ECE workshop at Lokeberg, Sweden, 6-10 April 1992. Nordic Council of Ministers, Copenhagen, Denmark, 1993. 111—159.
- [34] Bobbink R, Hornung M, Roelofs J G M. Empirical nitrogen critical loads for natural and semi-natural ecosystems. In: *Manual of Methodologies and Criteria for Mapping Critical Levels/Loads and Geographical Areas Where They Are Exceeded*. UN ECE Convention on Long-Range Trans-boundary Air Pollution, Federal Environmental Agency, Berlin, 1996.
- [35] Yan X F, Sun G R, Li J. Soil nutrient field analysis: an approach to analyzing the relationship between plant population and soil nutrition on alkaline grassland. *Bulletin of Botanical Research*, 1999, 19(4): 435—444.
- [36] Yan X F, Sun G R, Li J. Soil nutrient field analysis for plant species in Song-Nen alkaline grassland. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(12): 1973—1985.
- [37] Pitcairn C E R, Fowler D, Grace J. Changes in species composition of semi-natural vegetation associated with the increase in atmospheric inputs of nitrogen. Report to Nature Conservancy Council. Institute of Terrestrial Ecology, Edinburgh, UK, 1991. 80.
- [38] Pitcairn C E R, Leith I D, Sheppard L J, *et al.* The relationship between nitrogen deposition, species composition and folia nitrogen concentrations in woodland flora in the vicinity of livestock farms. *Environmental Pollution*, 1998, 102, S1: 41—48.
- [39] Woodin S J, Farmer A M. Impacts of sulphur and nitrogen deposition on sites and species of nature conservation importance in Great Britain. *Biological Conservation*, 1993, 63: 23—30.
- [40] Xu L, Nan Y H. Salt ecology of main plant communities of halophyte community complex in Keerqin sandy land. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1991, 2(1): 23—31.

#### 参考文献:

- [1] 吴志芬, 赵善伦, 张学雷, 等. 黄河三角洲盐生植被与土壤盐分的相关性研究. *植物生态学报*, 1994, 18(2): 184—193.
- [2] 张毅力. 浅谈松嫩草地的类型及其利用. *草业科学*, 1991, 8(3): 40—42.
- [3] 杜晓光, 郑慧莹, 刘存德. 松嫩平原主要盐碱植物群落生物生态学机制的初步研究. *植物生态学报*, 1994, 18(1): 41—49.
- [4] 张为政. 松嫩平原羊草草地植被退化与土壤盐渍化的关系. *植物生态学报*, 1994, 18(1): 50—55.
- [5] 郑慧莹, 李建东. 松嫩平原盐碱植物群落形成过程的探讨. *植物生态学报*, 1995, 19(1): 1—12.

- [6] 唐超世. 星星草栽培驯化的研究. 中国草原, 1980, (4): 13 ~ 18.
- [7] 李景信, 马义, 傅喜林. 种植星星草改良碱斑地的研究. 中国草原, 1985, (2): 53 ~ 55.
- [8] 阎秀峰, 孙国荣. 星星草生理生态学研究. 北京: 科学出版社, 2000. 123 ~ 128.
- [9] 孙国荣, 阎秀峰, 李晶. 星星草对碱化土壤物理性质的影响. 草地学报, 2002, 10(2): 118 ~ 123.
- [10] 孙国荣, 阎秀峰, 李晶. 星星草对碱化土壤化学性质的影响. 草地学报, 2002, 10(3): 179 ~ 183.
- [11] 阎秀峰, 孙国荣, 李景信, 等. 星星草泌盐能力的初步研究. 草业科学, 1994, 11(3): 36 ~ 39.
- [22] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. 62 ~ 76.
- [23] 关松荫. 土壤酶及其研究方法. 北京: 农业出版社, 1986. 206 ~ 239.
- [24] 余世孝, Orloci L. 物种多维生态位宽度测度. 生态学报, 1994, 14(1): 32 ~ 39.
- [25] 余世孝, Orloci L. 基础与实现生态位及其中心点的涵义与测度. 中山大学学报(自然科学版), 1993, 32(4): 69 ~ 80.
- [26] 余世孝, Orloci L. 生态位分离的涵义与测度. 植物生态学与地植物学学报, 1993, 17(3): 253 ~ 263.
- [27] 王刚, 赵松岭, 张鹏云, 等. 关于生态位定义的探讨及生态位重叠计测公式改进的研究. 生态学报, 1984, 4(4): 119 ~ 127.
- [28] 李景信, 孙国荣, 阎秀峰. 松嫩盐碱草地植物生理生态学研究. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1996, 28 ~ 32.
- [29] 岳中辉, 孙国荣, 阎秀峰. 不同改良方法对盐碱土壤腐殖质及几种酶活性的影响. 植物研究, 2003, 23(2): 211 ~ 214.
- [35] 阎秀峰, 孙国荣, 李晶. 盐碱草地植物种群分布与土壤营养关系的一种分析方法——土壤营养位分析, 植物研究, 1999, 19(4): 435 ~ 444.
- [36] 阎秀峰, 孙国荣, 李晶. 松嫩盐碱草地几种植物的土壤营养位分析. 生态学报, 2001, 21(12): 1973 ~ 1985.
- [40] 徐岚, 南寅镐. 科尔沁沙地盐生植物群落复合体中主要植物群落的盐分生态. 应用生态学报, 1991, 2(1): 23 ~ 31.