

# 盐城海滨湿地盐沼植被及农作物下土壤酶活性特征

毛志刚<sup>1,2</sup>, 谷孝鸿<sup>1</sup>, 刘金娥<sup>3</sup>, 任丽娟<sup>3</sup>, 王国祥<sup>3,\*</sup>

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;  
3. 南京师范大学地理科学学院江苏省环境演变与生态建设重点实验室, 南京 210046)

**摘要:** 在盐城海滨湿地盐沼植被和农田内采集土壤样品, 测定了 4 种土壤酶(脲酶、转化酶、过氧化氢酶和碱性磷酸酶)的活性, 分析了盐沼植被、农作物及土壤理化因子对土壤酶活性的影响。结果表明: 由海滨湿地滩涂围垦形成的各类农田其土壤酶活性较高, 且均高于湿地盐沼植被; 湿地盐沼植被下 4 种土壤酶活性均高于无植被生长的光滩, 且不同类型植被间土壤酶活性差异显著; 4 种酶的活性大小总体表现为大豆(*Glycine max*)地 > 棉花(*Gossypium hirsutum*)地 > 玉米(*Zea mays*)地 > 互花米草(*Spartina alterniflora*)滩 > 白茅(*Imperata cylindrica* var. *major*)滩 > 碱蓬(*Suaeda salsa*)滩 > 光滩。相关分析表明, 4 种土壤酶之间及其与土壤有机碳、全氮均表现出显著正相关, 而与土壤盐分、pH 值之间存在显著负相关。海滨湿地盐沼植被的发育扩展不仅增加了土壤中的养分含量, 也提高了土壤酶活性。

**关键词:** 土壤酶; 盐沼植被; 农田; 土壤理化因子; 海滨湿地

## Distribution of the soil enzyme activities in different vegetation zones and farms in Yancheng coastal wetland

MAO Zhigang<sup>1,2</sup>, GU Xiaohong<sup>1</sup>, LIU Jine<sup>3</sup>, REN Lijuan<sup>3</sup>, WANG Guoxiang<sup>3,\*</sup>

1 State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Jiangsu Provincial Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China

**Abstract:** Soil samples were collected from natural vegetation zones and farms in the Yancheng coastal wetland, Jiangsu province. The activities of soil enzymes (urease, invertase, catalase, alkaline phosphatase) were determined and the influence of salt marsh vegetation communities and soil physico-chemical properties on soil enzyme activities was discussed. The results showed that the activities of the soil enzymes in the natural vegetation zones were higher than those in the mudflat without vegetation and there were significant differences among different vegetation zones. However, the activities of soil enzymes in farms were higher than those in the natural vegetation zones and these enzyme activities were represented in the order as: *Glycine max* field > *Gossypium hirsutum* field > *Zea mays* field > *Spartina alterniflora* flat > *Imperata cylindrica* var. *major* flat > *Suaeda salsa* flat > mudflat. Significant positive correlations were found among different soil enzymes and among enzyme activities, soil organic carbon and total nitrogen, but there were negative correlations among enzyme activities and soil salinity and pH value. Soil fertility and enzyme activities were shown to be improved along the development of vegetation.

**Key Words:** soil enzyme; salt marsh vegetation; farms; soil physico-chemical properties; coastal wetland

**基金项目:** 国家水专项资助项目(2008ZX07101-012-02); 国家重点基础研究发展计划资助项目(2008CB418104); 江苏海滨湿地保护与土地利用潜力评价资助项目(JS-908-02-07)

**收稿日期:** 2009-08-16; **修订日期:** 2009-11-09

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangguoxiang@njnu.edu.cn

湿地是陆地和水生生态系统间的过渡带,具有极高的资源开发价值和环境调节功能<sup>[1]</sup>。作为全球生物生产量最高的系统之一,湿地生态系统发挥着碳氮等营养物质的源、汇和转换器的功能<sup>[2-4]</sup>。酶是土壤生态系统代谢的一类重要动力,土壤中所进行的生物学和化学过程几乎都需要由酶的催化作用才能完成,土壤中酶活性的大小影响着湿地生态系统的物质循环过程<sup>[5-6]</sup>。许多研究显示湿地土壤酶活性具有明显的时间和空间变化<sup>[7-8]</sup>,并与土壤物理特征(土壤水分、土壤温度、土壤团聚体等)、有机质、土壤养分及土壤微生物等密切相关<sup>[9-11]</sup>,因而土壤酶活性也可作为湿地土壤质量和环境变化的生物活性指标。

盐城海滨湿地是我国面积最大、生态类型最齐全和冲淤演变最复杂的典型淤泥质海滨湿地<sup>[12]</sup>,国内外学者对其形成过程、自然环境条件以及生态系统等方面进行了大量研究<sup>[13-15]</sup>。本试验选择盐城海滨湿地以及由湿地滩涂围垦的农田作为研究区域,通过野外调查和采样测定,分析不同类型盐沼植被和农田作物下土壤养分等理化性质以及土壤酶的分布特征,探讨土壤酶活性变化与盐沼植被演替以及滩涂开垦为农田后的关系,以期对盐城海滨湿地的保护和合理利用提供科学依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

盐城国家级自然保护区位于江苏省盐城市,是我国最大的沿海滩涂湿地类型的自然保护区。保护区属于典型季风气候区,年平均气温 13.8℃,降雨量 1 000 mm,日光辐射总量 487—508 kJ·cm<sup>-2</sup>。选择位于保护区核心区的新洋港断面(33°32′—33°40′ N, 120°30′—120°40′ E)作为研究区,该区受人类干扰较少,基本保留海岸带原生植被演替序列,由海向陆依次为:光滩、互花米草(*Spartina alterniflora*)滩、盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)滩及由白茅(*Imperata cylindrica* var. *major*)、镥草(*Scirpus triquetus*)、獐毛(*Aeluropus littoralis* var. *sinensis*)、芦苇(*Phragmites communis*)组成的禾草滩<sup>[16]</sup>。核心区外筑有海堤,堤外开挖排水系统,淋盐洗盐,开垦滩涂为农田,种植棉花(*Gossypium hirsutum*)、玉米(*Zea mays*)、大豆(*Glycine max*)等作物。

### 1.2 研究方法

2008 年 5 月,在研究区由海向陆按植被分布情况设置 10 个采样点(图 1),分别代表不同类型植被的土壤,包括无植被生长的光滩 S<sub>1</sub>,互花米草滩 S<sub>2</sub>—S<sub>5</sub>,碱蓬滩 S<sub>6</sub>和白茅滩 S<sub>7</sub>,以及围垦湿地改造的农田,包括玉米地 S<sub>8</sub>、棉花地 S<sub>9</sub>和大豆地 S<sub>10</sub>。其中在互花米草滩,按米草发育程度设定 2008、2003、1989 和 2005 年 4 个不同时间下米草开始生长的采样点,分别对应 S<sub>2</sub>、S<sub>3</sub>、S<sub>4</sub>、S<sub>5</sub>。现场调查和测定植被及土壤的基本特征,在每个采样点附近随机选取 3 处位置采集 0—20 cm 的表层土样,并将 3 份土样等量混合,作为该采样点表层土壤的代表性样品。

样品带回实验室风干过筛处理测定土壤理化性质,有机碳采用低温外热重铬酸钾氧化-比色法测定;全氮采用半微量凯氏法测定;全磷采用高氯酸-钼锑抗比色法测定;全盐质量分数用电导法测定;pH 值用 pH 计测定;含水质量分数用烘干法测定<sup>[17]</sup>。各采样点理化性质见表 1。

土壤脲酶活性采用苯酚钠次氯酸钠显色法测定,酶活性以 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N(37℃, 1h)的毫克数表示;过氧化氢酶活性采用 KMnO<sub>4</sub> 滴定法测定,酶活性以 0.1 mol·L<sup>-1</sup> KMnO<sub>4</sub> (37℃, 20min) 的毫升数表示;蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸显色法测定,酶活性以葡萄糖(30℃, 1h)的毫克数表示;磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定,酶活性以酚(30℃, 1h)的毫克数表示<sup>[18]</sup>。

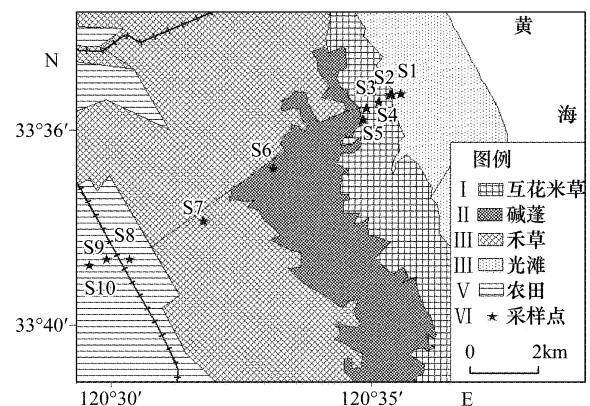


图 1 盐城海滨湿地采样点分布

Fig. 1 Study area and the sampling sites distribution

互花米草 *Spartina alterniflora*; 碱蓬 *Suaeda salsa*

### 1.3 数据处理

根据野外调查资料和实验室内的分析结果,采用 SPSS (11.5) 软件,选择单因素方差分析 (One-Way ANOVA) 进行差异显著性检验,并用 Pearson 相关系数评价不同因子间的相关关系。

## 2 结果与分析

### 2.1 盐城海滨湿地盐沼植被及农作物下土壤理化因子的变化

盐城海滨湿地土壤理化因子的变化见表 1。研究区表层土壤中有有机碳、全氮含量分别为 2.28—8.46  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 0.24—0.97  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。各盐沼植被土壤中的有机碳、全氮含量均高于光滩,其中碳氮含量最高值均在 1989 年开始生长的互花米草滩  $S_4$ 。不同类型农田下土壤碳氮含量亦均高于光滩,且高于碱蓬滩和白茅滩,但与互花米草滩  $S_3$ 、 $S_4$  的含量接近。

研究区土壤全磷含量在 0.46—0.78  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间,但各盐沼植被下全磷含量均低于光滩,且各类农田的全磷含量亦低于光滩,这与有机碳、全氮的分布特征不一致。土壤有效磷含量分布与全磷不同,互花米草滩和各类农田下土壤有效磷含量较高,光滩含量最低。

表 1 盐城海滨湿地采样点植被特征及土壤基本理化性质

Table 1 Description of vegetation and soil physico-chemical properties in Yancheng coastal wetland

| 采样点<br>Sampling site | 植被类型<br>Vegetation type       | 生物量<br>/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ )<br>Biomass | 有机碳<br>/( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<br>Organic C | 全氮<br>/( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<br>Total N | 全磷<br>/( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<br>Total P | 有效磷<br>/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<br>Available P | 含水质量<br>分数/%<br>Water content | 全盐质量<br>分数/%<br>Total salt | pH   |
|----------------------|-------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|------|
| $S_1$                | 光滩 Mudflat                    | 0                                                    | 2.28                                                   | 0.24                                                | 0.78                                                | 6.93                                                      | 24.23                         | 0.54                       | 8.96 |
| $S_2$                | 互花米草 <i>S. alterniflora</i>   | 1.60                                                 | 2.40                                                   | 0.27                                                | 0.75                                                | 7.97                                                      | 26.00                         | 0.49                       | 8.98 |
| $S_3$                | 互花米草 <i>S. alterniflora</i>   | 2.73                                                 | 6.12                                                   | 0.70                                                | 0.65                                                | 15.76                                                     | 39.21                         | 0.93                       | 8.66 |
| $S_4$                | 互花米草 <i>S. alterniflora</i>   | 2.85                                                 | 8.27                                                   | 0.97                                                | 0.50                                                | 19.36                                                     | 47.61                         | 1.41                       | 8.54 |
| $S_5$                | 互花米草 <i>S. alterniflora</i>   | 1.53                                                 | 4.01                                                   | 0.41                                                | 0.46                                                | 10.52                                                     | 27.00                         | 0.76                       | 8.86 |
| $S_6$                | 碱蓬 <i>Suaeda salsa</i>        | 0.52                                                 | 3.21                                                   | 0.43                                                | 0.55                                                | 8.50                                                      | 26.73                         | 1.04                       | 8.81 |
| $S_7$                | 白茅 <i>Imperata cylindrica</i> | 2.30                                                 | 3.62                                                   | 0.53                                                | 0.47                                                | 6.25                                                      | 26.74                         | 0.38                       | 8.98 |
| $S_8$                | 玉米 <i>Zea mays</i>            | 2.39                                                 | 5.10                                                   | 0.60                                                | 0.54                                                | 10.89                                                     | 25.72                         | 0.01                       | 8.57 |
| $S_9$                | 棉花 <i>Gossypium hirsutum</i>  | 1.03                                                 | 7.46                                                   | 0.93                                                | 0.58                                                | 10.45                                                     | 23.99                         | 0.01                       | 8.30 |
| $S_{10}$             | 大豆 <i>Glycine max</i>         | 1.27                                                 | 8.46                                                   | 0.96                                                | 0.68                                                | 16.44                                                     | 23.81                         | 0.04                       | 8.40 |

湿地不同类型盐沼植被土壤的全盐质量分数和 pH 值的变化范围较大,互花米草滩  $S_4$  的全盐质量分数最高,但其 pH 值最低,而光滩和白茅滩全盐质量分数较低,pH 值较高。各类农田下土壤全盐质量分数剧减,仅为 0.01%—0.04%;pH 值亦低于湿地各类型盐沼植被。

### 2.2 盐城海滨湿地盐沼植被下土壤酶活性的变化

盐沼植被的生长能够显著提高土壤酶活性。对于无植物生长的光滩,所测定的各种酶的活性均很低(表 2),其中碱性磷酸酶活性仅为 0.04  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 。各类型盐沼植被下 4 种土壤酶活性均高于光滩,其中除脲酶外其他 3 种酶在互花米草滩  $S_4$  均达到最高值。 $S_4$  的脲酶、转化酶、过氧化氢酶和碱性磷酸酶活性分别是光滩的 1.2、4.4、2.7、8.6 倍,碱性磷酸酶活性提高最快。

不同类型盐沼植被对土壤酶活性的影响具有差别。由表 2 可以看出,海滨湿地上不同自然植被群落间土壤酶活性差异显著。脲酶活性在白茅滩最高,转化酶和过氧化氢酶活性在互花米草滩  $S_4$  最高,而碱性磷酸酶活性在白茅滩和米草滩  $S_4$  均最高。4 种酶的活性大小在各植被群落基本表现为互花米草( $S_4$ ) > 白茅滩 > 碱蓬滩。碱蓬滩土壤酶活性相对于光滩分别提高 0.5 倍(脲酶)、0.4 倍(转化酶)、1.6 倍(过氧化氢酶)和 4.0 倍(碱性磷酸酶),而在具有更高生物量的互花米草滩,植物群落下的土壤与光滩之间酶活性差异更为明显。

植被的发育程度对湿地土壤酶活性有显著影响。不同发育程度的互花米草滩  $S_2$ — $S_5$ ,除转化酶活性  $S_2$  大于  $S_4$  外,4 种土壤酶活性大小基本一致,即  $S_4$  (1989 年) >  $S_3$  (2003 年) >  $S_5$  (2005 年) >  $S_2$  (2008 年)。土壤

酶活性的大小与植被的发育程度密切相关,酶活性随着植被生长年限的增长而提高,但不同酶活性的增速不一致。1989 年生米草滩土壤的转化酶、过氧化氢酶和碱性磷酸酶活性比 2008 年生米草滩土壤分别提高了 1.7、2.3、6.0 倍,但脲酶只增加了 12.0%。

表 2 盐城海滨湿地土壤酶活性的分布特征

Table 2 Distribution characteristic of soil enzymes in Yancheng coastal wetland

| 采样点<br>Sampling site | 脲酶<br>$/(mg \cdot g^{-1} \cdot h^{-1})$<br>Urease | 转化酶<br>$/(mg \cdot g^{-1} \cdot h^{-1})$<br>Invertase | 过氧化氢酶<br>$/(ml \cdot g^{-1} \cdot (20min)^{-1})$<br>Catalase | 碱性磷酸酶<br>$/(mg \cdot g^{-1} \cdot h^{-1})$<br>Alkaline phosphatase |
|----------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| S <sub>1</sub>       | 0.18ij                                            | 0.26ghij                                              | 0.28j                                                        | 0.04j                                                              |
| S <sub>2</sub>       | 0.19hij                                           | 0.42ghij                                              | 0.33i                                                        | 0.06i                                                              |
| S <sub>3</sub>       | 0.25f                                             | 0.96def                                               | 0.71defgh                                                    | 0.32gh                                                             |
| S <sub>4</sub>       | 0.21fghi                                          | 1.12def                                               | 0.75defgh                                                    | 0.36gh                                                             |
| S <sub>5</sub>       | 0.25efgh                                          | 0.31ghij                                              | 0.70defgh                                                    | 0.20f                                                              |
| S <sub>6</sub>       | 0.27defg                                          | 0.35ghij                                              | 0.72defgh                                                    | 0.21de                                                             |
| S <sub>7</sub>       | 0.29de                                            | 0.97def                                               | 0.72defgh                                                    | 0.36de                                                             |
| S <sub>8</sub>       | 0.49c                                             | 4.12c                                                 | 1.35c                                                        | 0.55c                                                              |
| S <sub>9</sub>       | 0.65b                                             | 9.63b                                                 | 1.70a                                                        | 0.83b                                                              |
| S <sub>10</sub>      | 0.74a                                             | 10.52a                                                | 1.57b                                                        | 1.16a                                                              |

注:同列中不同小写字母表示差异显著水平为  $P < 0.05$

### 2.3 盐沼植被与围垦滩涂农作物下土壤酶活性的比较

农作物与盐沼植被下的土壤酶活性有显著差异,不同农作物之间土壤酶活性也有明显差别。由表 2 可知,3 种类型农田玉米地 S<sub>8</sub>、棉花地 S<sub>9</sub>和大豆地 S<sub>10</sub>的土壤酶活性较高,且均高于盐沼植被,4 种酶的活性大小基本表现为大豆地 > 棉花地 > 玉米地 > 盐沼植被。其中大豆地土壤脲酶、转化酶、过氧化氢酶和碱性磷酸酶活性分别是盐沼植被中酶活性最高的米草滩 S<sub>4</sub>的 3.5、9.4、2.1、3.2 倍。不同类型农田间也存在差别,玉米地 4 种酶的活性均低于大豆地和棉花地,其中转化酶和碱性磷酸酶活性较低,仅为大豆地的 39% 和 41%。

### 2.4 土壤酶活性及其与壤理化因子的相关性分析

所测酶活性之间的相关系数如表 3 所示,可以看出,4 种酶之间均呈极显著相关关系,表明土壤中各种酶之间关系密切并相互影响。从表 3 的分析发现,自然植物群落包括农作物下土壤酶活性与土壤养分具有较为密切的关系,4 种酶与土壤有机碳和全氮均达到显著相关,但与磷素无明显相关性。其他土壤理化因子中,含水质量分数与酶活性之间无明显相关性,土壤全盐质量分数也只与脲酶和转化酶显著相关,但土壤 pH 值与 4 种酶均呈极显著相关。

表 3 盐城海滨湿地土壤酶活性及其与部分土壤理化因子的相关性

Table 3 Correlations of soil enzyme activities and some physical-chemical properties in Yancheng coastal wetland

| 项目<br>Item                 | 脲酶<br>Urease | 转化酶<br>Invertase | 过氧化氢酶<br>Catalase | 碱性磷酸酶<br>Alkaline phosphatase |
|----------------------------|--------------|------------------|-------------------|-------------------------------|
| 转化酶 Invertase              | 0.978 **     | —                | —                 | —                             |
| 过氧化氢酶 Catalase             | 0.951 **     | 0.915 **         | —                 | —                             |
| 碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase | 0.960 **     | 0.951 **         | 0.926 **          | —                             |
| 有机碳 Organic C              | 0.640 *      | 0.694 *          | 0.728 *           | 0.794 **                      |
| 全氮 Total N                 | 0.653 *      | 0.699 *          | 0.753 *           | 0.804 **                      |
| 全磷 Total P                 | -0.010       | 0.094            | -0.242            | -0.075                        |
| 有效磷 Available P            | 0.247        | 0.308            | 0.342             | 0.456                         |
| 含水质量分数 Water content       | -0.404       | -0.336           | -0.223            | -0.178                        |
| 全盐质量分数 Total salt          | -0.737 *     | -0.692 *         | -0.611            | -0.580                        |
| pH                         | -0.798 **    | -0.832 **        | -0.885 **         | -0.842 **                     |

\*  $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$ ;  $n = 10$

### 3 讨论

#### 3.1 盐城海滨湿地盐沼植被下土壤酶活性的变化

土壤酶是土壤生态系统代谢的一类重要动力,土壤中所进行的生物学和化学过程几乎都要由酶的催化作用才能完成。它不仅能反映土壤生物活性的高低,而且能够表征土壤养分转化的快慢,在一定程度上反映了土壤肥力状况<sup>[6]</sup>。

从表 3 可以看出,研究区内土壤酶活性与土壤养分关系密切,4 种酶活性均与有机碳和全氮达到显著相关。土壤酶是具有蛋白质性质的高分子生物催化剂,参与土壤中腐殖质的合成与分解、有机物和动植物及微生物残体的水解与转化,促进土壤中各种有机、无机物质转化与能量交换。与此同时,土壤肥力状况又是土壤酶活性的基础,土壤有机质存在的状况及氮磷等营养物质的形态和含量都与土壤酶活性变化有关<sup>[19]</sup>。靳正忠<sup>[20]</sup>、万忠梅等<sup>[21]</sup>人的研究也证明了这种观点。由此推测随着植被的出现和生长发育,通过植物积累的碳氮等养分不断进入土壤,一方面为土壤中微生物提供的养分增多,微生物代谢增强;另一方面,植物的残体在分解的过程中也能够向土壤释放酶,或者在分解的植物细胞组织中保持部分活性。因此,植被的出现使得土壤中酶活性迅速提高,同时各种酶反过来催化土壤中的生物化学过程,碳氮等土壤养分得到转化积累,又促进了植物的生长,三者之间形成一种密切关系。这也是盐城海滨湿地植被覆盖区土壤酶活性均高于无植被生长的光滩的主要原因。

土壤酶主要来源于土壤微生物的活动、植物根系分泌物和动植物残体腐解过程中释放的酶<sup>[22]</sup>。不同植物群落的植被特征,如盖度、植物多样性,特别是植物生物量的差异会导致土壤养分含量差异,从而造成不同植物群落下土壤酶活性差异。同时,植物可以直接通过根的分泌产生土壤酶,植物群落的物种多样性和物种组成亦可影响土壤中微生物和动物的数量及种类<sup>[23]</sup>,从而间接地影响土壤酶活性,这些也是不同植被群落间酶活性差异的原因。植物开始生长的时间也非常重要,碱蓬的生物量低于新生的互花米草,但由于碱蓬在潮滩发育时间长,碱蓬滩的土壤酶活性高于新生的互花米草滩。

试验结果还表明在互花米草滩,随着植被生长年限的增加,土壤酶的活性亦随着提高。互花米草发育过程中不断将碳氮等营养元素送入土壤,生长年限越长,养分积累越多,对酶活性的影响也不断增大。土壤微生物群落也会随着米草群落的生长年限增加而扩大<sup>[24]</sup>,从而土壤中由微生物活动产生的酶得到增加。

#### 3.2 土壤酶活性及其与壤理化因子的相关性分析

脲酶、转化酶、过氧化氢酶和碱性磷酸酶的活性极显著相关,表明土壤酶在促进土壤有机物转化中存在共性关系。这几种酶能够在一定程度上反映植被群落的演替和植被的恢复程度,自然封育对提高土壤生物学质量有重要的作用。

土壤酶活性的影响因素非常复杂,除了土壤养分、微生物种类与数量外,水气热状况、酸碱度、盐分及土壤结构组成等都显著地影响着土壤酶活性。从表 3 可以看出,土壤 pH 值与 4 种酶均呈显著或极显著负相关,表明土壤 pH 值的升高不利于土壤酶活性的增加。土壤酸碱性直接影响着土壤酶参与生化反应的速度,有些酶促反应对 pH 值变化很敏感,甚至只能在较窄的 pH 范围内进行,当 pH 值超过其最适范围,就会对酶活性产生抑制作用<sup>[18]</sup>。同样,研究区土壤盐分与脲酶、转化酶呈显著负相关,与过氧化氢酶和碱性磷酸酶也有较大的负相关性,表明土壤盐分与土壤酶的关系是随着土壤盐分的增加而土壤酶活性呈递减趋势。这与马献发<sup>[25]</sup>在对松嫩平原苏打草甸碱土的研究结果一致,但杨志勇等<sup>[26]</sup>在江苏大丰湿地的实验显示土壤过氧化氢酶与盐分呈显著负相关,而碱性磷酸酶却与盐分呈显著正相关。

#### 3.3 盐沼植被与围垦滩涂农田作物下土壤酶活性的比较

1949 年以来,江苏省共经历了 5 次滩涂围垦高潮,其中大部分农田都是在近几年新淤长的滩涂上进行围垦形成的。由于滩涂的自然淡化程度没有达到种植要求,因此,现在进行农业生产的滩涂基本都经过人为的洗盐和压盐处理,缩短了“自然脱盐-淡水环境土壤发育”的自然过程,是一种超越滩涂自然演化过程的土地利用方式<sup>[27]</sup>。研究区农田经过淋盐洗盐、耕作管理后,土壤性质得到较大改善,土壤 pH、盐分含量等低于围垦

前的自然盐沼植被。由前面的分析可知,土壤 pH 值、全盐质量分数与土壤酶活性呈负相关,特别是高含盐量会对土壤酶产生抑制作用。而农田土壤的全盐质量分数仅为 0.01%—0.04%,这也是农田土壤的养分含量在与发育较成熟的互花米草滩差别不大的情况下,其土壤酶活性却迅速提高的原因。

从以上分析看出,盐城海滨湿地盐沼植被的出现是造成湿地土壤酶活性变化的主要原因,同时土壤的理化性质(土壤养分、pH 及盐分等)也对土壤酶活性产生不同程度的影响,而 4 种酶也都能比较敏感地反映盐沼植被演替发育对土壤质量的影响。

**致谢:**葛绪广、潘国权、冯冰冰和周崴协助采集样品,傅侃协助样品测试,谨致谢忱。

#### References:

- [ 1 ] Mitsch W J, Gosselink J G. Wetlands. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 2000: 1-22.
- [ 2 ] Maltby E, Immirzi P. Carbon dynamics in peatlands and other wetland soils: Regional and global perspectives. *Chemosphere*, 1993,27:999-1023.
- [ 3 ] Matthews E, Fung I Y. Methane emissions from natural wetlands: Global distribution, area, and environmental characteristics of sources. *Global Biogeochemical Cycles*, 1987,1:61-86.
- [ 4 ] Shi F C, Li R L, Wang S Q, Sasa K. Profile distribution and accumulation characteristics of organic carbon and total nitrogen in typical marshes in Sanjiang Plain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007,18(7):1425-1431.
- [ 5 ] Zhou L K. *Soil Enzymology*. Beijing: Science Press, 1987: 4-15.
- [ 6 ] Cao H, Sun H, Yang H, Sun B, Zhao Q G. A review: soil enzyme activity and its indication for soil quality. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2003,9(1):105-109.
- [ 7 ] Wright A L, Reddy K R. Phosphorus loading effects on extracellular enzyme activity in everglades wetland soils. *The Soil Science Society of America Journal*, 2001,65(2):588-599.
- [ 8 ] Yue Z H, Wang B W, Wang H F, Yan X F. Seasonal dynamics of soil enzymatic activities in west Songnen alkali degraded grassland. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008,22(6):162-165.
- [ 9 ] Boschker H T S, Cappenberg T E. Patterns of extracellular enzyme activities in littoral sediments of Lake Goimeer, The Netherlands. *FEMS Microbiology Ecology*, 1998,25:79-86.
- [ 10 ] Kang H, Freeman C. Phosphatase and arylsulphatase activities in wetland soils: annual variation and controlling factors. *Soil Biology & Biochemistry*, 1999,31:449-454.
- [ 11 ] Liu C Q, Lu J J, Li H P. The landward changes of soil enzyme activities in a tidal flat wetland of the Yangtze River estuary and correlations with physico-chemical factors. *Acta Ecologica Sinica*, 2007,27(9):3663-3669.
- [ 12 ] Wang Y, Zhang Z K, Zhu D K, Yang J H, Mao L J, Li S H. River-sea interaction and the North Jiangsu Plain formation. *Quaternary Sciences*, 2006,26(3):301-320.
- [ 13 ] Yang G S, Shi Y F, Zhang C. The ecological response of typical mudflat to sea level change in Jiangsu Coastal Plain. *Acta Geographica Sinica*, 2002,57(3):325-332.
- [ 14 ] Zhou H X, Liu J E, Zhou J, Qin P. Effect of an Alien Species *Spartina alterniflora* Loisel on Biogeochemical Processes of Intertidal Ecosystem in the Jiangsu Coastal Region, China. *Pedosphere*, 2008,18:77-85.
- [ 15 ] Zhou H X, Liu J E, Qin P. Effects of an alien species (*Spartina alterniflora*) on soil microorganism diversity in salt marshes, Jiangsu coastal intertidal ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 2005,25(9):2304-2311.
- [ 16 ] Ren M E. *The Comprehensive Survey Report of Jiangsu Coastal Zone and Tidal Flat Resources*. Beijing: Ocean Press, 1986: 6-23.
- [ 17 ] Liu G S. *Soil Physical and Chemical Analysis & Description of Soil Profiles*. Beijing: Chinese Standard Press, 1996: 24-87.
- [ 18 ] Guan S Y. *Soil Enzymes and Their Methology*. Beijing: Agriculture Press, 1986: 38-71.
- [ 19 ] Zhang Y H, Wu M, He P, She G L, Wu B S, Wei J S. Research advance of the relationship between soil enzyme activity and soil fertility. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007,35(34):11139-11142.
- [ 20 ] Jin Z Z, Lei J Q, Xu X W, Li S Y, Fan J H, Zhao S F, Zhou H W, Gu F, Qiu Y Z, Xu B. Canonical correlations of soil nutrients, microbial biomass and enzyme activity of forest land drip-irrigated with saline water in the hinterland of Taklimakan Desert. *Acta Pedologica Sinica*, 2008,45(6):1119-1127.
- [ 21 ] Wan Z M, Song C C. Soil enzyme activity and its relationship with the soil nutrient environment of different types wetland in Sanjiang Plain. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008,22(5):158-161.
- [ 22 ] Aon M A, Colaneri A C. Temporal and spatial evolution of enzyme activities and physico-chemical properties in an agricultural soil. *Applied Soil*

Ecology, 2001, 18: 255-270.

- [23] Li Y Y, Zhou Y C, Zou J, Liu L, Li L K. Study on rhizosphere soil enzyme activities of different vegetation types in the limestone area of Guizhou Province. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, 35(30): 9607-9609.
- [24] Xia B C. Effect of vegetation on structure of soil microbial community. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, 9(3): 296-300.
- [25] Ma X F, Zhou L R, Chen R. Effect of recovering quickly vegetation ameliorative ways in meadow solonetz soil on salt content and enzyme activities. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(4): 761-763.
- [26] Yang Z Y, Li G, Yao C, Wang G, Qin P. Comparative studies on the soil enzymic activities of two plant communities in Dafeng ecological engineering wetland of Northern Jiangsu. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(7): 3649-3657.
- [27] Yan C Q, Sun W, Lu X P, Yan D Y. Study on coastal wetlands use and its ecological protection of Jiangsu Province. *Ecological science*, 2007, 26(3): 263-268.

#### 参考文献:

- [4] 石福臣, 李瑞利, 王绍强, Sasa Kaichiro. 三江平原典型湿地土壤剖面有机碳及全氮分布与积累特征. *应用生态学报*, 2007, 18(7): 1425-1431.
- [5] 周礼恺. 土壤酶学. 北京: 科学出版社, 1987: 4-15.
- [6] 曹慧, 孙辉, 杨浩, 孙波, 赵其国. 土壤酶活性及其对土壤质量的指示研究进展. *应用与环境生物学报*, 2003, 9(1): 105-109.
- [8] 岳中辉, 王博文, 王洪峰, 阎秀峰. 松嫩平原西部退化盐碱草地土壤酶活性的季节动态. *水土保持学报*, 2008, 22(6): 162-165.
- [11] 刘存歧, 陆健健, 李贺鹏. 长江口潮滩湿地土壤酶活性的陆向变化以及与环境因子的相关性. *生态学报*, 2007, 27(9): 3663-3669.
- [12] 王颖, 张振克, 朱大奎, 杨竞红, 毛龙江, 李书恒. 河海交互作用与苏北平原成因. *第四纪研究*, 2006, 26(3): 301-320.
- [13] 杨桂山, 施雅风, 张琛. 江苏滨海潮滩湿地对潮位变化的生态响应. *地理学报*, 2002, 57(3): 325-332.
- [15] 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): 2304-2311.
- [16] 任美镔. 江苏省海岸带和海涂资源综合调查报告. 北京: 海洋出版社, 1986: 6-23.
- [17] 刘光菰. 土壤理化分析与剖面描述. 北京: 中国标准出版社, 1996: 24-87.
- [18] 关松荫. 土壤酶及其研究方法. 北京: 农业出版社, 1986: 38-71.
- [19] 张焱华, 吴敏, 何鹏, 余贵连, 吴炳孙, 韦家少. 土壤酶活性与土壤肥力关系的研究进展. *安徽农业科学*, 2007, 35(34): 11139-11142.
- [20] 靳正忠, 雷加强, 徐新文, 李生字, 范敬龙, 赵思峰, 周宏伟, 谷峰, 邱永志, 许波. 沙漠腹地咸水滴灌林地土壤养分、微生物量和酶活性的典型相关关系. *土壤学报*, 2008, 45(6): 1119-1127.
- [21] 万忠梅, 宋长春. 三江平原不同类型湿地土壤酶活性及其与营养环境的关系. *水土保持学报*, 2008, 22(5): 158-161.
- [23] 李媛媛, 周运超, 邹军, 刘浪, 李龙凯. 黔中石灰岩地区不同植被类型根际土壤酶研究. *安徽农业科学*, 2007, 35(30): 9607-9609.
- [24] 夏北成. 植被对土壤微生物群落结构的影响. *应用生态学报*, 1998, 9(3): 296-300.
- [25] 马献发, 周连仁, 陈然. 快速修复苏打草甸碱土植被对土壤盐分和酶活性的影响. *土壤学报*, 2007, 44(4): 761-763.
- [26] 杨志勇, 李刚, 姚成, 王光, 钦佩. 苏北大丰生态工程区两种植物群落土壤酶活性比较. *生态学报*, 2009, 29(7): 3649-3657.
- [27] 严长清, 孙伟, 陆效平, 杨达源. 江苏省沿海滩涂土地利用与生态保护研究. *生态科学*, 2007, 26(3): 263-268.