

# 不同退耕年限下菜子湖湿地土壤酶活性变化<sup>①</sup>

包先明<sup>1</sup>, 程新锋<sup>1</sup>, 纪磊<sup>1</sup>, 郑真<sup>2</sup>, 孔令柱<sup>2</sup>, 张平究<sup>2</sup>

(1 淮北师范大学生命科学学院, 安徽淮北 235000;

2 安徽师范大学国土资源与旅游学院/安徽自然灾害过程与防控研究省级重点实验室, 安徽芜湖 241003)

**摘要:** 选取菜子湖区不同退耕年限(3、7、9、11、21 a)湿地为研究对象, 以仍耕作油菜地和原始湿地为参照, 分析了退耕还湖后湿地土壤过氧化氢酶、蔗糖酶、磷酸酶和脲酶活性特征, 探讨了退耕还湖后湿地土壤酶活性变化规律。结果表明: 相对于仍耕作油菜地, 退耕后湿地土壤过氧化氢酶活性表层与亚表层均表现为退耕 3~7 a 降低, 退耕 9~21 a 升高趋势; 表层土壤蔗糖酶活性呈现退耕 3 a 升高→退耕 7 a 降低→退耕 9~11 a 升高→退耕 21 a 降低的趋势, 而亚表层土壤退耕 3 年急剧升高, 而后呈降低的趋势; 表层土壤磷酸酶活性则呈现退耕 3~11 a 逐渐升高, 而后逐渐降低的趋势, 而亚表层土壤则表现为退耕 3~7 a 降低→退耕 9~11 a 升高→退耕 21 a 降低的趋势; 退耕后湿地表层土壤脲酶活性表现为退耕 3 a 降低, 退耕 7~9 a 升高, 退耕 11~21 a 降低趋势, 亚表层则呈现退耕 3 a 升高, 而后逐渐降低的趋势; 退耕 21 a 湿地土壤 4 种酶活性均与原始湿地仍存在显著性差异。退耕后水文条件的改变和植被的恢复致使土壤酶来源、酶促反应底物与产物和土壤环境因子变化, 进而影响退耕后湿地土壤酶活性变化。

**关键词:** 退耕还湖; 湿地土壤; 酶活性; 菜子湖

**中图分类号:** S154.2

湿地是地球表层系统中物质与能量交换最为活跃的生态系统, 扮演着生物地球化学循环中源、汇和转化器的功能, 进而影响着区域生态系统健康<sup>[1]</sup>。土壤酶正是湿地生态系统地球化学过程功能的执行者, 其强弱直接影响着湿地生态系统的功能<sup>[2-3]</sup>。土壤 pH<sup>[3-4]</sup>、温度<sup>[4-5]</sup>、水分条件<sup>[6-8]</sup>和有机质<sup>[9-14]</sup>等土壤环境因子均影响湿地土壤酶活性, 由于湿地类型<sup>[3,15-16]</sup>、植被状况<sup>[9,15,17-18]</sup>和湿地利用方式<sup>[12,17,19-21]</sup>等影响土壤理化性质, 进而影响湿地土壤酶活性。自 1998 年长江流域发生特大洪水以来, 退耕还湖成为长江中下游地区湿地生态恢复的重要举措。退耕后湿地土壤环境发生了变化<sup>[22-25]</sup>, 必定导致土壤酶活性等生物化学性质发生相应变化。

已有研究表明退耕后湿地利用方式和恢复植被类型均显著影响土壤酶活性<sup>[7,12,19,21]</sup>, 但尚未见到退耕时间序列下土壤酶活性变化的研究报道。退耕时间序列下湿地土壤酶活性研究, 可更深入认识退化湿地生态恢复的过程。本文选取菜子湖区不同退耕年限下湿地土壤为研究对象, 以邻近油菜地和原始湿地为对照, 对土壤过氧化氢酶、蔗糖酶、磷酸酶和脲酶活性进行比

较分析, 旨在阐明退耕还湖后湿地土壤酶活性变化规律, 为该地区湿地生态恢复及有效利用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 土壤样品采集与处理

本文以安庆菜子湖湿地土壤为研究对象, 2012 年 4 月在菜子湖先让村、双兴村、玉咀村等地, 选取 5 个不同退耕年限(3、7、9、11、21 a)湿地为采样区, 并采集附近仍耕作的油菜地和原始自然湿地土壤作为参照。退耕后样地积水时为自然水域, 每年约 5 月至 8 月为淹水期, 时间长约为 3~4 个月, 地表植被均以苔草群落为主, 退耕湿地历史耕作均为油菜地。每个采样区分表层(0~5 cm)和亚表层(5~15 cm), 每个样区 3 个土样, 每个土样由 3 样点混合而成, 共采集 42 个土样, 用保鲜袋带回实验室, 剔除根系和石块后将土样分为 2 部分: 一部分鲜土保存于 4℃冰箱中, 用于土壤生化性质的测定; 另一部分自然风干后, 挑去根、虫体、石砾等后研细, 根据实验要求分别过 2、0.25 和 0.49 mm 筛, 保存用于理化性质测定<sup>[25]</sup>。研究区土壤基本理化性质见表 1。

基金项目: 资源植物生物学重点实验室项目(ZYZWSW2014006), 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07103-005), 国家自然科学基金项目(141001369; 41301249)和安徽省自然科学基金项目(1308085MD22)资助。

作者简介: 包先明(1978—)男, 安徽青阳人, 博士, 副教授, 主要研究方向为湖泊生态学。E-mail: xmbao96@126.com

表 1 研究区样地土壤基本理化性质<sup>[22,25]</sup>  
Table 1 Physical and chemical properties of the studied soils

| 样地  | 层次(cm) | pH   | 体积质量(g/cm <sup>3</sup> ) | 黏粒(%) | 有机质(g/kg) | 全氮(g/kg) | 有效氮(mg/kg) | 全磷(g/kg) | 有效磷(mg/kg) |
|-----|--------|------|--------------------------|-------|-----------|----------|------------|----------|------------|
| RF  | 0~5    | 4.79 | 0.79                     | 21.67 | 21.94     | 1.33     | 127.8      | 0.46     | 45.01      |
|     | 5~15   | 4.74 | 1.08                     | 21.33 | 15.50     | 1.09     | 106.8      | 0.55     | 75.28      |
| 3a  | 0~5    | 4.63 | 1.51                     | 19.02 | 21.24     | 1.05     | 91.2       | 0.54     | 43.28      |
|     | 5~15   | 4.60 | 1.38                     | 18.74 | 13.23     | 0.73     | 59.1       | 0.51     | 47.27      |
| 7a  | 0~5    | 4.77 | 1.21                     | 24.08 | 52.62     | 2.52     | 181.4      | 0.53     | 18.18      |
|     | 5~15   | 4.99 | 1.60                     | 23.53 | 12.16     | 0.81     | 72.5       | 0.55     | 13.82      |
| 9a  | 0~5    | 4.63 | 1.05                     | 26.47 | 47.26     | 2.47     | 175.2      | 0.44     | 15.13      |
|     | 5~15   | 4.99 | 1.46                     | 27.44 | 13.14     | 0.85     | 74.3       | 0.37     | 9.66       |
| 11a | 0~5    | 4.54 | 0.86                     | 32.78 | 50.69     | 2.52     | 213.2      | 0.43     | 19.61      |
|     | 5~15   | 4.84 | 1.51                     | 32.64 | 17.75     | 1.03     | 83.7       | 0.35     | 10.60      |
| 21a | 0~5    | 4.62 | 0.79                     | 27.27 | 52.66     | 2.37     | 159.4      | 0.40     | 30.73      |
|     | 5~15   | 4.91 | 1.50                     | 28.96 | 16.18     | 0.88     | 80.2       | 0.19     | 18.63      |
| NW  | 0~5    | 4.52 | 0.75                     | 35.36 | 60.62     | 3.61     | 215.3      | 1.24     | 71.36      |
|     | 5~15   | 4.71 | 1.01                     | 32.89 | 23.44     | 1.37     | 114.1      | 0.82     | 56.36      |

注：RF、3a、7a、9a、11a、21a 和 NW 分别为油菜地、退耕 3 年、7 年、9 年、11 年、21 年湿地和原始湿地。

### 1.2 土壤酶活性分析

土壤酶活性测定采用关荫松等<sup>[4]</sup>编著的《土壤酶及其研究方法》：用高锰酸钾滴定法测定过氧化氢酶活性，酶活性以 1 g 土壤 20 min 内消耗 0.1 mol KMnO<sub>4</sub> 的量表示，单位为 ml/(g·20min)；用磷酸苯二钠比色法测定磷酸酶活性，酶活性以 1 g 土壤 在 37℃ 培养 2 h 中每小时产生酚的量表示，单位为 μg/(g·h)；用 3, 5 二硝基水杨酸比色法测定蔗糖酶活性，酶活性以 1 g 土壤 在 37℃ 培养 24 h 中每小时产生葡萄糖的量表示，单位为 μg/(g·h)；用靛酚蓝比色法测定脲酶活性，酶活性以 1 g 土壤 在 37℃ 培养 24 h 中每小时释放出 NH<sub>3</sub>-N 的量表示，单位为 μg/(g·h)。

### 1.3 数据处理

应用 Excel 和 SPSS 等相关软件对实验数据进行整理分析，用 STST(最小显著差数)法检测同一因素下样品间的差异显著性。

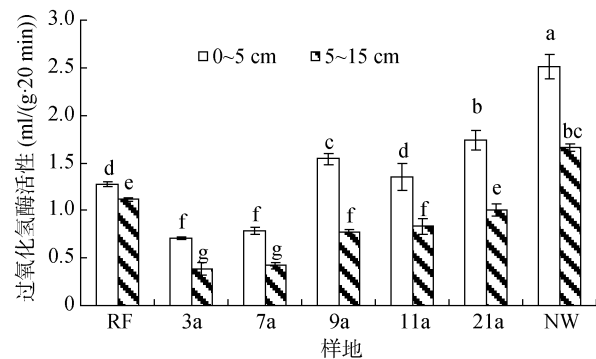
## 2 结果与分析

土壤酶是土壤生物地球化学的重要参与物质，主要来源于土壤微生物、植物根系分泌物和动植物残体<sup>[4]</sup>。土壤酶参与土壤中许多重要的生物化学过程，是土壤生物过程强度与方向的指示，也是评判土壤总的生物活性的一种重要手段之一<sup>[2,4]</sup>；土壤酶活性与土壤理化性质、土壤肥力状况密切相关<sup>[5,8,10,16,26]</sup>，因此，土壤酶活性也是评价土壤肥力的重要指标。

### 2.1 土壤过氧化氢酶活性

过氧化氢酶在土壤中广泛存在，是土壤腐殖质化

大小和有机质积累程度的指标，在微生物的代谢过程中有着重要的作用，能促进土壤中化合物的氧化、腐殖质的形成，催化过氧化氢水解，防止对生物体产生毒害作用<sup>[3-4]</sup>。研究区各个样地土壤过氧化氢酶活性如图 1 所示。从图 1 可知，相对于仍耕作油菜地，退耕 3 a 湿地表层土壤过氧化氢酶活性迅速降低，退耕 7 a 湿地与退耕 3 a 湿地无显著性差异，而退耕 9 a 后，土壤过氧化氢酶活性逐渐升高，且等于或大于仍耕作油菜地，但仍低于原始湿地；亚表层土壤退耕 3~7 a 相对于油菜地快速降低，而后随着退耕年限的增加，土壤过氧化氢酶活性有所增强，但其活性仍低于仍耕作油菜地和原始湿地。



(柱图上方不同小写字母表示各土样间酶活性差异在  $P < 0.05$  水平显著，下同)

图 1 不同退耕年下土壤过氧化氢酶活性变化  
Fig. 1 Changes of soil catalase activities of tested soils within various periods

### 2.2 土壤蔗糖酶活性

土壤蔗糖酶在土壤中对增加土壤中易溶有机物

质起重要作用,将土壤中的多糖水解成葡萄糖或果糖以便植物和土壤微生物吸收利用,为土壤生物提供能源,蔗糖酶活性是反映土壤有机质变化的重要指标<sup>[3-4]</sup>。研究区不同退耕年限湿地土壤蔗糖酶活性变化趋势如图 2 所示。相对于仍耕作油菜地,退耕 3 a 湿地表层土壤蔗糖酶活性明显增强,但在退耕 7 a 迅速降低,而在退耕 9~11 a 蔗糖酶活性急剧增强,并达到原始湿地水平,但在退耕 21 a 蔗糖酶活性降低,并低于原始湿地水平;退耕亚表层土壤蔗糖酶活性表现为:退耕 3 a 湿地急剧升高,退耕 7 a 降低,退耕 9~21 a 湿地降至仍耕作油菜地水平,到均显著高于原始湿地。

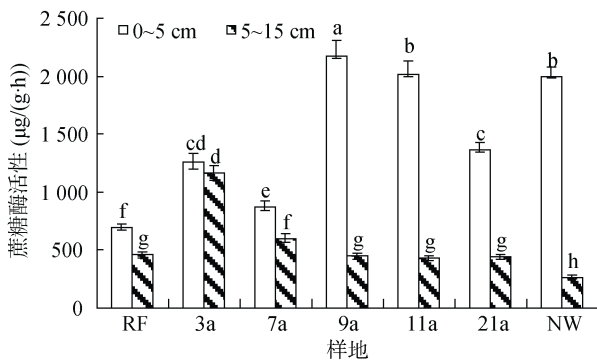


图 2 不同退耕年下土壤蔗糖酶活性变化

Fig. 2 Changes of soil invertase activities of tested soils within various periods

### 2.3 土壤磷酸酶活性

在植物的磷素营养物质中,有机磷占有一定比例,而有机磷往往要在土壤磷酸酶酶促作用下,才能转化成被植物可利用的形态<sup>[3-4]</sup>。因此,土壤磷酸酶对改善土壤磷素有效性具有重要作用。土壤中磷酸酶的活性与有机质、微生物生物量以及土壤类型等关系密切。由图 3 可得,退耕后,湿地土壤表层磷酸酶活性在退耕 3~9 a 整体呈上升趋势,退耕 11 a 达到最高峰,退耕 21 a 又降低,但仍高于原始湿地,且表

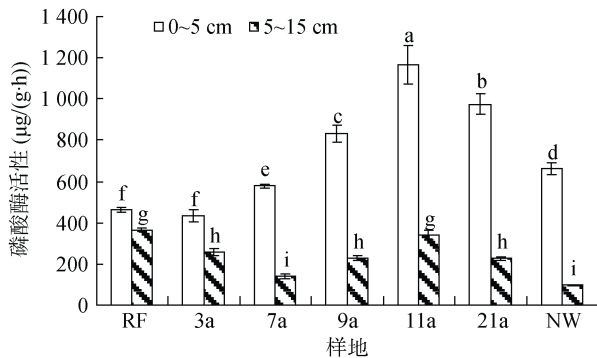


图 3 不同退耕年下土壤磷酸酶活性变化

Fig. 3 Changes of soil phosphatase activities of tested soils within various periods

层磷酸酶活性明显高于亚表层;相对于仍耕作油菜地,亚表层土壤磷酸酶活性在退耕 3 a 开始降低,退耕 7 a 达到最低,后退耕 7~11 a 期间逐渐增加,在退耕 21 a 降低,但仍高于原始湿地。

### 2.4 土壤脲酶活性

脲酶广泛存在于土壤中,主要来源于微生物,能酶促有机质分子中酰胺键水解,而植被所需氮素营养直接来源于其水解产物氨,其活性反映氮素转化和供应能力的强弱<sup>[3-4]</sup>。图 4 反映不同退耕年限湿地土壤脲酶活性的变化特征。与仍耕作油菜地相比,退耕后表层土壤脲酶活性在退耕 3 a 降低,后至退耕 9 a 期间脲酶活性逐渐变强,退耕 9 a 土壤脲酶活性最强,退耕 11~21 a 期间湿地土壤脲酶活性有所下降,退耕 21 a 湿地表层土壤脲酶活性低于原始湿地;相对于仍耕作油菜地,亚表层土壤脲酶活性在退耕 3 a 显著增加,而后至退耕 21 a 期间,逐渐降低,退耕 21 a 湿地土壤脲酶活性低于原始湿地水平。

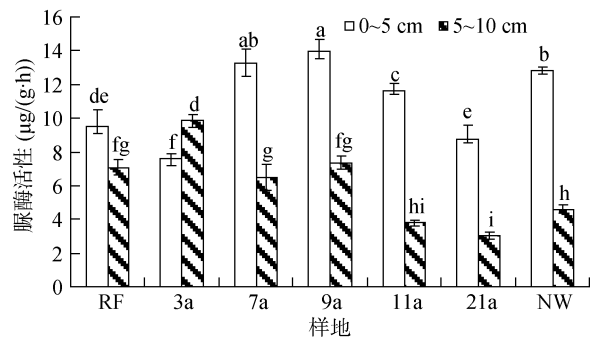


图 4 不同退耕年下土壤脲酶活性变化

Fig. 4 Changes of soil urease activities of tested soils within various periods

### 2.5 土壤脲酶活性与土壤理化性质和微生物生物量间的相关性

土壤酶主要来源于土壤微生物、植物根系分泌物和动植物残体<sup>[4]</sup>,其中土壤微生物具有重要贡献。土壤理化性质及土壤肥力影响土壤生物活性,进而影响土壤酶活性,因此,土壤酶与土壤环境因子密切相关<sup>[3-4]</sup>。如表 2 所示,研究区土壤过氧化氢酶活性除了与 pH 外,与土壤含水量、黏粒、有机质、全磷、有效磷、全氮、有效氮和微生物生物量碳氮含量间存在显著或极显著正相关关系;土壤蔗糖酶活性除了与容重(体积质量)、含水量、黏粒、全磷和有效氮含量间相关性不强,与 pH 存极显著负相关关系,与有机质、全氮、有效氮和微生物生物量碳氮含量均存在极显著正相关关系;土壤磷酸酶活性与土壤体积质量和 pH 分别存在极显著和显著负相关关系,而与土壤、有机质、全氮、有效氮和微生物生物量碳氮含量

表 2 研究区土壤酶活性与土壤理化性质和微生物量相关性  
Table 2 Correlations among soil enzyme activities and soil physical and chemical properties as well as microbial biomass

|         | 过氧化氢酶    | 蔗糖酶      | 磷酸酶      | 脲酶       |
|---------|----------|----------|----------|----------|
| 体积质量    | -0.801** | -0.473   | -0.768** | -0.454   |
| 含水量     | 0.762**  | 0.335    | 0.165    | 0.198    |
| 黏粒      | 0.662**  | 0.169    | 0.235    | -0.080   |
| pH      | -0.406   | -0.757** | -0.615*  | -0.694** |
| 有机质     | 0.855**  | 0.838**  | 0.864**  | 0.617*   |
| 全磷      | 0.577*   | 0.290    | 0.035    | 0.344    |
| 有效磷     | 0.550*   | 0.010    | 0.062    | 0.070    |
| 全氮      | 0.891**  | 0.794**  | 0.782**  | 0.628*   |
| 有效氮     | 0.906**  | 0.788**  | 0.816**  | 0.633*   |
| 微生物生物量碳 | 0.653*   | 0.832**  | 0.783**  | 0.478    |
| 微生物生物量氮 | 0.785**  | 0.907**  | 0.796**  | 0.686**  |

注：n=14，\*\* 表示在  $P<0.01$  水平极显著相关，\* 表示在  $P<0.05$  水平显著相关。

均存在极显著正相关关系；土壤脲酶活性与土壤有机质、全氮、有效氮和微生物生物量氮含量存在显著或极显著正相关关系。

### 3 讨论

湿地土壤酶在湿地生态系统物质循环过程中具有重要作用，参与湿地土壤中几乎所有的生化过程，进而影响湿地的生态系统功能发挥。而土壤酶主要来源于土壤微生物、植物根系分泌物和动植物残体<sup>[4]</sup>，其中土壤微生物是最重要贡献者。本研究区退耕还湖后湿地土壤水文条件恢复到自然条件，植被状况逐步恢复，土壤含水量、有机质、pH、体积质量、黏粒含量、磷素、磷素组分、氮素、微生物生物量碳与氮等都发生了变化<sup>[23-26]</sup>，退耕后土壤环境的变化势必导致土壤酶活性受到影响。研究区内相对于仍耕作油菜地，随着退耕年限增加，总体上退耕湿地土壤过氧化氢酶活性先降低后逐渐升高，退耕 21 a 湿地仍未达到原始湿地水平；退耕后湿地土壤蔗糖酶活性呈现升高→降低→升高→降低趋势，退耕 21 a 湿地仍低于原始湿地水平；退后湿地土壤蔗糖酶活性有逐渐升高后降低趋势，退耕 21 a 湿地高于原始湿地水平；而退耕后湿地土壤先增加，后降低，退耕 21 a 湿地显著低于原始湿地水平；研究区湿地表层土壤与亚表层土壤这些酶活性变化趋势存在一定差异，退耕后总体表层土壤酶活性变化幅度大于亚表层。

土壤温度、水分、pH、有机质及氮、磷等养分等土壤环境因子影响微生物数量与活性、植物根系生长及土壤动物生存，进而影响土壤酶数量与活性<sup>[3,4,6,15]</sup>；同时土壤温度、水分、pH、酶促底物、酶促产物和某些微量元素可直接影响土壤酶的活性<sup>[3,4,27-30]</sup>。本研

究区同处于菜子湖区，除仍耕作油菜样地植被为油菜外，其他样地优势植被均为由于退耕年限不同而长势有异的苔草，但土壤母质、土地利用方式、样地高程、水文条件导致的干湿交替和洪水频率与性质均基本相同<sup>[23-24]</sup>。因此，不同退耕年限后土壤酶来源的植被、土壤微生物和动物恢复状况差异是影响湿地土壤酶活性的重要因素之一。研究区随着退耕年限增加，退耕湿地植被不断恢复，植物残体及根系分泌物不断增加，其中有研究表明湿地植物根系分泌物比表层枯枝落叶是更重要土壤酶来源<sup>[13]</sup>，植被的恢复不仅促进研究区土壤有机质不断提高，也促进土壤其他养分如全氮，有效氮含量不断升高<sup>[23-25]</sup>，进而促进了土壤微生物数量也不断增加<sup>[25]</sup>和土壤动物种群恢复<sup>[31]</sup>，导致退耕后湿地土壤酶来源多样性与丰富性提升。其中土壤有机物不仅是土壤酶来源，也是土壤多种酶促反应的底物，可诱导酶活性提升<sup>[3-4]</sup>。有研究表明湿地土壤全氮、有效氮等养分，尤其土壤有机质与土壤酶活性存在显著或极显著正相关关系<sup>[5,9-10,16-17,19]</sup>。研究区 4 种土壤酶活性分别与土壤有机质、全氮、有效氮、微生物生物量碳和微生物生物量氮间均存在显著或极显著正相关关系(表 2)。因此，退耕 3~9 a 期间，随着植被恢复，湿地土壤酶来源与酶促底物增加促进了退耕后湿地 4 种土壤酶活性不断增加。

研究区退耕经过 9~11 a 植被基本恢复，土壤有机质与养分恢复到一定程度，但仍未达到原始湿地水平<sup>[23-25]</sup>，退耕后十几年期间(11~21 a)周期性淹水可能成为比退耕 9a 时影响土壤酶活性更重要的因素。有研究表明，淹水影响土壤酶活性，其中可促进氧化氢酶活性提升，而对土壤蔗糖酶、磷酸酶和脲酶均有降低作用<sup>[6-9]</sup>。研究区退耕后十几年期间(11~21 a)

湿地土壤过氧化氢酶活性确实增加,蔗糖酶、磷酸酶与脲酶活性降低。同时有研究表明土壤酶活性受酶促反应产物抑制,外源氮添加导致湿地土壤脲酶活性降低<sup>[3,14]</sup>,而有效磷促使土壤磷酸酶活性降低<sup>[3,19,29]</sup>。退耕后十几年期间湿地土壤全氮、有效氮、全磷和有效磷升高到一定水平<sup>[23-25]</sup>,这些酶促反应产物得到提升,可能也抑制了这些酶活性。同时随着退耕年限增加,土壤 pH 波动性下降<sup>[23-25]</sup>,研究区土壤蔗糖酶、磷酸酶和脲酶活性与 pH 呈极显著负相关( $P < 0.01$ ),可见退耕土壤 pH 在一定程度上影响土壤酶活性。

土壤酶是湿地土壤有机物生物地球化学过程控制因子,也是评价土壤肥力和微生物活性重要指标,指示着湿地生态状况<sup>[2-4]</sup>。人类活动影响湿地土壤酶活性,湿地垦殖等人类活动可导致土壤微生物生物量降低,而退耕还湿后土壤微生物生物量和酶活性发生变化<sup>[12,17,19-21]</sup>。退耕 21 a 湿地土壤酶活性仍与原始湿地存在显著性差异,而将土壤理化性质和微生物生物量作为本研究区生态质量指标的研究也证明退耕 21 a 湿地生态系统尚未恢复至原始湿地水平<sup>[23-25]</sup>,退耕 21 a 湿地土壤酶活性现状进一步证明了生态系统尚未恢复到原始湿地水平。

## 4 结论

1) 退耕湿地土壤过氧化氢酶活性先降低后逐渐升高,土壤蔗糖酶活性呈现升高→降低→升高→降低趋势,土壤蔗糖酶活性有逐渐升高后降低趋势,土壤脲酶活性先增加,后降低;退耕 21a 湿地 4 种土壤酶活性与原始湿地间仍存在显著差异,表层土壤与亚表层土壤这些酶活性变化趋势存在显著差异。

2) 退耕后植被逐渐恢复下湿地生物量与活性增加和酶促反应底物增加是主导退耕后 10 年期间湿地土壤酶活性提升的主要因子;而退耕后十几年期间水文条件(周期性淹水)和酶促反应产物是主导湿地土壤酶活性主要因子。

## 参考文献:

[1] 吕宪国, 刘晓辉. 中国湿地研究进展—献给中国科学院东北地理与农业生态研究所建所 50 周年[J]. 地理科学, 2008, 28(3): 301-308

[2] Dunn C, Jones T G, Girard A, et al. Methodologies for extracellular enzyme assays from wetland soils[J]. Wetland, 2014, 34: 9-17

[3] 刘存歧, 王伟伟, 李贺鹏, 等. 湿地生态系统中土壤酶的研究进展[J]. 2005, 25(4): 443-448

[4] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1986

[5] 徐惠风, 刘兴土. 长白山区沟谷沼泽乌拉苔草湿地土壤酶活性与氮素、土壤微生物相关性研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(5): 946-950

[6] 万忠梅, 宋长春, 郭跃东, 等. 毛苔草湿地土壤酶活性及活性有机碳组分对水分梯度的响应[J]. 生态学报, 2008, 28(12): 5 980-5 986

[7] 张鑫, 耿玉清, 徐明, 等. 鄱阳湖湖滨湿地土壤酶活性及影响因素[J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(1): 34-40

[8] Que Vo N X, Kang H. Regulation of soil enzyme activities in constructed wetlands under a short-term drying period[J]. Chemistry and Ecology, 2013, 29: 146-165

[9] 王忠梅, 宋长春, 杨桂生, 等. 三江平原湿地土壤活性有机碳组分特征及其与土壤酶活性的关系[J]. 环境科学学报, 2009, 29(2): 406-412

[10] 刘云鹏, 申卫博, 张社奇, 等. 黄河中游湿地土壤养分与酶活性特征及相关性研究[J]. 草地学报, 2013, 21(3): 474-478

[11] Inglett P W, Inglett K S. Biogeochemical changes during early development of restored calcareous wetland soils[J]. Geoderma, 2013, 192: 132-141

[12] Song Y Y, Song C C, Yang G S, et al. Changes in labile organic carbon fractions and soil enzyme activities after marshland reclamation and restoration in the Sanjiang Plain in Northeast China[J]. Environmental Management, 2012, 50: 418-426

[13] Kotroczo Z, Veres Z, Fekete I, et al. Soil enzyme activity in response to long-term organic matter manipulation[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2014, 70: 237-243

[14] Song Y Y, Song C C, Tao B X, et al. Short-term responses of soil enzyme activities and carbon mineralization to added nitrogen and litter in a freshwater marsh of Northeast China[J]. European Journal of Soil Biology, 2014, 61: 72-79

[15] 王晓龙, 徐力刚, 白丽, 等. 鄱阳湖典型湿地植物群落土壤酶活性[J]. 生态学杂志, 2011, 30(4): 798-803

[16] 田幼华, 谢辉, 吕光辉. 艾比湖湿地典型群落土壤酶分布规律初探[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(9): 173-188

[17] 杨刚, 谢永宏, 陈心胜, 等. 洞庭湖区退田还湖后不同恢复模式下土壤酶活性的变化[J]. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2187-2192

[18] Menon R, Jackson C R, Holland M M. The influence of vegetation on microbial enzyme activity and bacterial community structure in freshwater constructed wetland sediments[J]. Wetlands, 2013, 33: 265-378

[19] 张平究, 赵永强, 孟向东. 安庆沿江湿地退耕还湖 18 年的湿地土壤生物化学性质研究[J]. 湿地科学, 2012, 10(3): 299-305

[20] 任勃, 杨刚, 谢永红, 等. 洞庭湖区不同土地利用方式对土壤酶活性的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2009, 25(4): 8-11

[21] 王树起, 韩晓增, 乔云发, 等. 不同土地利用方式对三江平原湿地土壤酶活性分布特征及相关肥力因子的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(4): 150-153, 192

[22] 孔令柱, 刘爽, 郑真, 等. 不同退耕年限下安庆沿江湿地土壤氮、磷变化研究[J]. 水土保持研究, 2014, 21(1): 43-46

- [23] 刘文静, 张平究, 董国政, 等. 不同退耕年限下菜子湖湿地土壤磷素组分特征变化[J]. 生态学报, 2014, 34(10): 2 654–2 662
- [24] 杨艳芳, 孟向东, 张平究. 不同退耕年限条件下菜子湖湿地土壤理化性质变化[J]. 生态与农村环境学报, 2013, 29(3): 322–328
- [25] 郑真, 杨艳芳, 孔令柱, 等. 退耕还湖后菜子湖湿地土壤理化性质及微生物量变化[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(6): 821–826
- [26] 徐福银, 包兵, 梁晶, 等. 城市不同利用区域绿地土壤酶活性特征——以上海市为例[J]. 土壤, 2014, 46(2): 297–301
- [27] 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[J]. 生态学报, 2007, 27(9): 3 663–3 669
- [28] 李文华, 邵学新, 吴明, 等. 杭州湾潮滩湿地土壤碱性磷酸酶活性分布及其与磷形态的关系[J]. 环境科学学报, 2013, 33(12): 3 341–3 349
- [29] 姜经梅, 赵慧, 沈铭能, 等. 长江口潮滩表层沉积物中碱性磷酸酶活性及其影响因素[J]. 环境科学学报, 2011, 31(10): 2 233–2 239
- [30] 褚洪龙, 李莎, 唐明. 黄土高原油松根际土壤酶活性及真菌群落多样性研究——以黄龙山林场为例[J]. 土壤学报, 2015, 52(1): 154–161
- [31] 姜加虎, 张琛. 洞庭湖退田还湖及其生态恢复过程分析[J]. 湖泊科学, 200, 16(4): 325–330

## Characteristics of Soil Enzyme Activities in Wetlands with Various Restoration Ages in Caizi Lake, Anhui Province

BAO Xianming<sup>1</sup>, CHENG Xinfeng<sup>1</sup>, JI Lei<sup>1</sup>, ZHENG Zhen<sup>2</sup>, KONG Lingzhu<sup>2</sup>, ZHANG Pingjiu<sup>2</sup>

(1 College of Life Science, Huaibei Normal University, Huaibei, Anhui 235000, China; 2 Anhui Key Laboratory of Natural Disasters Process and Prevention/College of Territorial Tourism, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241003, China)

**Abstract:** The activities of soil catalase, invertase, phosphatase and urease were investigated in wetlands under various ages (3, 5, 7, 9, 11 and 21a) of returning farmland to lake (RFL), rape field and native wetland in the Caizi Lake region, Anhui Province. The results indicated that all soil enzyme activities changed along the period of RFL. Compared to rape field, catalase activities of surface and subsurface soils decreased during the 3-7a of RFL, and increased during the 9-21a of RFL. Invertase activities of surface soil increased during the 3a of RFL, declined after 7a of RFL, increased again during the 9-11a of RFL and increased again after 21a of RFL, while invertase activities of subsurface soil increased sharply during the 3a of RFL and then decreased gradually. Phosphatase activities of surface soil increased during the 3-11a of RFL and then decreased gradually, while phosphatase activities of subsurface soil decreased during the 3-7a of RFL, increased during the 9-11a of RFL and declined again after 21a of RFL. Urease activities of surface soil declined during the 3a of RFL, increased during the 7-9a of RFL and decreased again during the 11-21a of RFL, while urease activities of subsurface soil increased during the 3a of RFL and then decreased gradually. Moreover, all soil enzyme activities showed significant difference between wetlands with 21a of RFL and natural wetland. The changes of all soil enzyme activities were attributed to the shift of soil physical and chemical property due to the changes of hydrological condition and vegetation recovery status during the period of RFL.

**Key words:** Returning farmland to lake; Wetland soil; Enzyme activity; Caizi Lake