

洞庭湖区退田还湖后不同恢复模式下 土壤酶活性的变化^{*}

杨 刚^{1,2,3} 谢永宏^{1,*} 陈心胜¹ 侯志勇¹ 李 峰^{1,3}

(¹ 中国科学院亚热带农业生态研究所洞庭湖湿地生态研究站,长沙 410125 ;² 中国科学院成都山地灾害与环境研究所,成都 610041 ;³ 中国科学院研究生院,北京 100049)

摘 要 以洞庭湖区退田还湖后不同恢复模式下(恢复自然水域、种植芦苇、种植杨树)的典型堤垸(青山垸、官垸和小集成)为研究对象,通过与相邻堤垸农田生态系统(水田、旱田)土壤中蔗糖酶、脲酶、磷酸酶和过氧化氢酶活性的比较,揭示不同退田还湖模式下土壤酶活性的变化及其与土壤化学特性的相关关系。结果表明:与水田、旱田相比,在表层土壤中,以种植杨树为恢复方式的小集成样地的过氧化氢酶活性显著增加,其他酶活性无显著变化;以种植芦苇为恢复方式的官垸样地的蔗糖酶和磷酸酶活性有所下降,其他酶活性无显著变化;恢复自然水域的青山垸样地中,除磷酸酶活性下降外,其他酶活性没有表现出明显的差异性。相关分析表明,土壤有机质含量与4种酶活性均表现出显著的正相关关系($P < 0.01$),说明退田还湖后系统恢复模式导致的土壤有机质含量的变化是土壤酶活性变化的主要原因。

关键词 退田还湖 酶活性 恢复 土壤有机质

文章编号 1001-9332(2009)09-2187-06 中图分类号 X171 文献标识码 A

Soil enzyme activities under different restoration modes after returning farmland to lake in Dongting Lake area. YANG Gang^{1,2,3}, XIE Yong-hong¹, CHEN Xin-sheng¹, HOU Zhi-yong¹, LI Feng^{1,3} (¹ Dongting Lake Station for Wetland Ecosystem Research, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; ² Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; ³ Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). -Chin. J. Appl. Ecol. 2009 20(9):2187-2192.

Abstract : To reveal the effects of different restoration modes after returning farmland to lake on the soil biological characteristics in Dongting Lake area, the activities of soil saccharase, urease, phosphatase, and catalase at three typical sites (Xiaojicheng, Guanyuan, and Qingshanyuan) were studied. At the Xiaojicheng site where poplar was planted, soil catalase activity increased significantly, but the activities of other three test enzymes had no significant change. At the Guanyuan site where reed was planted, the activities of soil saccharase and phosphatase had somewhat decrease, and those of urease and catalase had less change. At the Qingshanyuan site where natural water area was restored, the test enzyme activities had less changes except that the phosphatase activity decreased. Correlation analysis showed that the test enzyme activities had significant positive correlations with soil organic matter content ($P < 0.01$), illustrating that the changes in the soil organic matter content under different restoration modes could be the main cause inducing the changes in soil enzyme activity.

Key words : returning farmland to lake ; enzyme activity ; restoration ; soil organic matter.

土壤酶是土壤生物性质的重要组成部分,其主

要来源于植物根系分泌物和土壤微生物的增殖及其死亡残体的胞溶^[1]。土壤中进行生物和生物化学过程是生态系统功能的基础,这些过程之所以能够持续进行,得益于土壤中酶的作用。土壤酶不仅是外源有机物质腐解转化的驱动力,也是土壤有机质转

^{*} 国家重点基础研究发展规划项目(2009CB421103)、中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-YW-08-01)和国家自然科学基金项目(30770362)资助。
^{**} 通讯作者。E-mail: yonghongxie@163.com
2008-12-22 收稿, 2009-07-09 接受。

化、土壤结构及其物理性状演变与保持的驱动力,在 C、N、P、等元素的生物循环中起着重要作用^[2]。土壤酶参与土壤中的一切生物化学活动,对环境条件的变化十分敏感^[3],其活性大小与土壤理化特性、肥力状况密切相关,所以土壤酶活性常被作为评价土壤质量的指示性指标^[4]。

土壤酶不仅参与并催化土壤中的各种生物化学反应^[5],而且参与土壤有机质的合成与分解及营养元素的物质循环,并分解土壤中积累的有毒物质^[6]。土壤酶活性较容易测定,而且与其他土壤特性具有较强的关联性。目前有关土壤酶活性的研究主要集中于土壤酶活性状况^[7]、土壤酶活性与营养元素和微生物的相互关系^[8-12]、土壤酶活性与土壤理化性质的关系^[13-14]等方面,而对于人为活动退出生态系统后(如“退田还湖”的“双退”^[15])土壤酶活性的变化特征尚未见报道。

退田还湖类型分为单退和双退两种。单退指退人不退田,即只将居住区外迁,农民仍在境内进行农业生产,在大洪水年作为蓄洪区。双退相对单退而言,是指阻碍行洪严重,需要实施平垸行洪、削毁堤防、退人又退田的垸垸、巴垸、江心洲等。双退垸在居民迁至垸外安置后,退耕、削堤、行洪。本文选取同一时间进行“双退”后的 3 种主要恢复模式(恢复自然水域、种植芦苇(*Phragmites australis*)、种植意杨(*Populus euramevicana*))为研究对象,分别以邻近垸垸农田生态系统(水田和旱地)为对照,对不同退田还湖模式下土壤酶活性进行比较分析,旨在阐明退田还湖后土壤酶活性的空间分布规律及其变化,揭示退田还湖工程对土壤生态特征的影响,为南方湿地恢复及其有效利用提供理论和实践依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区自然概况

洞庭湖位于 27°55′—30°23′ N, 110°50′—113°45′ E, 该区处于中亚热带向北亚热带过渡的地带,气候温暖湿润,年平均气温 16.4~17.0℃,无霜期 260~280 d,年平均降水量 1200~1550 mm。土壤类型可分为潮土、沼泽化草甸土和底泥土,以潮土为主。“退田还湖”实施过程中,不同的“双退区”因地制宜地选择了种植芦苇、杨树或自然水域水产养殖作为恢复模式,旨在寻求经济收益与湿地生态调蓄功能间的平衡。本研究所选的 3 种恢复模式的典型垸垸皆为 1998 年^[15-17]所退:小集成(29°41′ N, 112°56′ E)以种植杨树为恢复方式,即在居民迁至

垸外安置后,退耕并栽植大量的杨树,形成以杨树为建群种的人工林系统;官垸(28°28′ N, 112°03′ E)“退田还湖”后与外湖直接相连,受洪水影响较大,以种植芦苇为恢复方式,建群种为芦苇;青山垸(28°51′ N, 112°12′ E)以恢复自然湖泊为目的,建群种为苔草(*Carex* sp.)、藨草(*Phalaris arundinacea*)、茭草(*Potamogeton crispus*)、穗花狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)等湿生或水生植物,同时进行“绿色”水产养殖(不施肥,不投饵料等),垸垸设有水位控制闸,一般在春末夏初开闸蓄水,洪水期间关闭闸门维持水位,冬初开闸放水收获水产品。

1.2 样品采集

2006 年 11 月,依据典型性和代表性原则,在每个退田还湖模式的垸垸设置 3~5 个样地(10 m×10 m),每块样地用原状土样取样器(直径 3 cm)随机取 100 cm 深土柱 3 条,按 0~30 cm、30~60 cm、60~100 cm 分层。同时,在不同退田还湖模式相邻垸垸的水田、旱田设定样地作为对照,取样方法与退田还湖区相同。采样过程中用 GPS 对每个样点进行了准确定位。将同一样地分层后的土样进行混合,并用封口袋密封带回实验室,仔细去除新鲜土样中可见植物残体及土壤动物并过 2 mm 筛,然后于 4℃ 冰箱中保存。

1.3 测定项目与方法

不同退田还湖模式及其对照的土壤有机质、全 N、全 P 和全 K 的测定分别采用重铬酸钾-外加热法、半微量开氏定氮法、氢氧化钠碱熔-钼锑抗比色法和氢氧化钠碱熔-火焰光度法进行,其含量如表 1 所示。

土壤过氧化氢酶活性、蔗糖酶活性、脲酶活性、磷酸酶活性分别用高锰酸钾滴定法、3,5-二硝基水杨酸比色法、次氯酸钠比色法、磷酸苯二钠比色法测定^[18]。蔗糖酶活性以 0.1 mol·L⁻¹ Na₂S₂O₄ ml·g⁻¹土(37℃ 24 h)表示,脲酶活性以 NH₃-N ml·g⁻¹土(37℃ 24 h)表示,磷酸酶活性以酚 ml·g⁻¹土(37℃ 24 h)表示;过氧化氢酶活性以 0.1 mol·L⁻¹ KMnO₄ ml·g⁻¹土(25℃ 20 min)表示。各指标的分析测定均在中国科学院亚热带农业生态研究所农业生态工程重点实验室完成。

1.4 数据处理

采用 SPSS 10.0 统计软件对数据进行处理。多重比较采用 Duncan 检验,因子间相关分析采用双变量相关分析法,选择 Pearson 相关系数。

表 1 土壤基本化学性质
Tab.1 Basic chemical properties of the tested soils

样 地 Plot	类 型 Type	有机质 Organic matter (g · kg ⁻¹)	全 氮 Total N (g · kg ⁻¹)	全 磷 Total P (g · kg ⁻¹)	全 钾 Total K (g · kg ⁻¹)
小集成 Xiaojicheng	退耕地 Fallow	11.7 ± 2.9	3.6 ± 2.5	0.69 ± 0.04	22.5 ± 1.7
	水田 Paddy	12.3 ± 7.4	1.9 ± 0.9	0.61 ± 0.02	20.0 ± 0.5
	旱田 Glebe	9.7 ± 3.3	7.3 ± 2.3	0.57 ± 0.06	21.6 ± 0.7
官垵 Guanyuan	退耕地 Fallow	14.0 ± 3.2	5.5 ± 3.2	0.79 ± 0.09	23.0 ± 1.3
	水田 Paddy	22.5 ± 3.3	8.6 ± 1.0	0.71 ± 0.09	24.0 ± 0.7
	旱田 Glebe	17.5 ± 3.3	2.7 ± 0.5	0.72 ± 0.06	22.9 ± 0.4
青山垵 Qingshanyuan	退耕地 Fallow	12.2 ± 2.4	1.7 ± 0.9	0.50 ± 0.03	25.6 ± 0.9
	水田 Paddy	16.1 ± 4.0	2.3 ± 1.3	0.56 ± 0.04	26.2 ± 0.8
	旱田 Glebe	10.9 ± 1.8	2.2 ± 0.3	0.54 ± 0.02	24.5 ± 0.4

2 结果与分析

2.1 不同恢复模式下土壤蔗糖酶活性

由表 2 可知 ,蔗糖酶活性在以种植杨树为恢复方式的小集成样地中 ,在 0 ~ 30 cm 土层表现为退耕地(3.4 ml · g⁻¹)小于水田(4.7 ml · g⁻¹) ,旱田则与水田和退耕地之间没有显著差异 ;在 30 ~ 60 cm 土层 ,各系统间没有显著差异 ;在 60 ~ 100 cm 土层 ,水田(1.1 ml · g⁻¹)大于旱田(0.4 ml · g⁻¹)和退耕地(0.4 ml · g⁻¹) ,旱田和退耕地之间没有显著差异 .在以种植芦苇为恢复方式的官垵样地中 ,蔗糖酶活性在整个土壤剖面中均表现为水田 > 旱田 > 退耕地 ;在以恢复自然湖泊为方式的青山垵样地中 ,蔗糖酶活性在 0 ~ 30 cm 和 60 ~ 100 cm 土层均没有表现出显著差异性 ,而在 30 ~ 60 cm 土层 ,退耕地(1.0 ml · g⁻¹)显著大于水田(0.3 ml · g⁻¹) .可见 ,在 0 ~ 30 cm 表层土壤中 ,蔗糖酶活性在恢复自然水域的青山垵样地与对照没有差异 ,而在以种植芦苇和杨树为恢复方式的官垵和小集成样地蔗糖酶活性相对降低(*P* < 0.05) .

2.2 不同恢复模式下土壤脲酶活性

脲酶活性在以种植杨树为恢复方式的小集成样地中 ,在 0 ~ 30 cm 和 30 ~ 60 cm 土层中表现为退耕地与旱田没有显著差异 ,但均大于水田 ;在 60 ~ 100 cm 土层表现为退耕地(0.09 ml · g⁻¹) > 旱田(0.06 ml · g⁻¹) > 水田(0.01 ml · g⁻¹) .在以种植芦苇为恢复方式的官垵和恢复自然水域的青山垵样地中 ,脲酶活性在整个土壤剖面的各个层次中均与对照(旱田和水田)没有显著差异(表 2) .可见 ,仅在小集成样地中 ,退耕地土壤的脲酶活性显著高于水田 .

2.3 不同恢复模式下土壤磷酸酶活性

由表 2 可知 ,磷酸酶活性在以种植杨树为恢复

方式的小集成样地中 ,在 0 ~ 30 cm 土层表现为水田(14.3 ml · g⁻¹)大于退耕地(2.4 ml · g⁻¹)和旱田(2.0 ml · g⁻¹) ,退耕地和旱田之间没有显著差异 ;在 30 ~ 60 cm 和 60 ~ 100 cm 两个土层中均表现为水田 > 退耕地 > 旱田 .在以种植芦苇为恢复方式的官垵样地中 ,磷酸酶活性在 0 ~ 30 cm 土层表现为水田(4.0 ml · g⁻¹) > 旱田(2.9 ml · g⁻¹) > 退耕地(1.5 ml · g⁻¹) ;在 30 ~ 60 cm 土层中 ,表现为水田(2.3 ml · g⁻¹)大于退耕地(1.0 ml · g⁻¹)和旱田(1.6 ml · g⁻¹) ,退耕地和旱田之间没有显著差异 ;在 60 ~ 100 cm 土层中 ,退耕地、水田和旱田之间没有表现出显著差异 .在以恢复自然湖泊为方式的青山垵样地中 ,磷酸酶活性在 0 ~ 30 cm 土层表现为水田(8.5 ml · g⁻¹) > 退耕地(4.8 ml · g⁻¹) ;在 30 ~ 60 cm 土层 ,水田大于退耕地和旱田 ,退耕地和旱田之间没有显著差异 ;在 60 ~ 100 cm 土层 ,退耕地、水田和旱田之间没有表现出显著差异 .可见 ,在 0 ~ 30 cm 表层土壤中 ,退田还湖实施后土壤磷酸酶活性显著减小 .

2.4 不同恢复模式下土壤过氧化氢酶活性

过氧化氢酶在以种植杨树为恢复方式的小集成样地中 ,在 0 ~ 30 cm 和 60 ~ 100 cm 土层中表现为退耕地大于水田和旱田 ,而水田和旱田之间没有显著差异 ;在 30 ~ 60 cm 土层中 ,表现为退耕地(2.1 ml · g⁻¹) > 水田(1.3 ml · g⁻¹) > 旱田(1.0 ml · g⁻¹) .在以种植芦苇为恢复方式的官垵样地中 ,过氧化氢酶活性在整个土壤剖面表现为退耕地和水田之间没有显著差异 ,但均大于旱田 .在以恢复自然湖泊为方式的青山垵样地中 ,过氧化氢酶活性在 0 ~ 30 cm 和 60 ~ 100 cm 土层中均与对照无明显差异 ;在 30 ~ 60 cm 土层中 ,退耕地和旱田之间没有显著差异 ,但均大于水田(表 2) .可见 ,过氧化氢酶活性在

表 2 不同恢复模式下蔗糖酶、脲酶、磷酸酶和过氧化氢酶活性的空间分布特征
Tab.2 Spatial distribution characteristics of saccharase , urease , phosphatase and catalase activity in soil under different restoration patterns

样 地 Plot	土 层 Soil depth (cm)	类 型 Type	蔗 糖 酶 Saccharase	脲 酶 Urease	磷 酸 酶 Phosphatase	过 氧 化 氢 酶 Catalase
小集成 Xiaojicheng	0 ~ 30	退耕地 Fallow	3. 4 ± 0. 8b	0. 4 ± 0. 1a	2. 4 ± 0. 6b	2. 7 ± 0. 1a
		水田 Paddy	4. 7 ± 0. 3a	0. 2 ± 0. 0b	14. 3 ± 0. 1a	1. 6 ± 0. 1b
		旱田 Glebe	4. 2 ± 0. 3ab	0. 5 ± 0. 0a	2. 0 ± 0. 1b	1. 5 ± 0. 2b
	30 ~ 60	退耕地 Fallow	1. 0 ± 0. 7a	0. 09 ± 0. 03a	0. 8 ± 0. 1b	2. 1 ± 0. 1a
		水田 Paddy	1. 5 ± 0. 1a	0. 02 ± 0. 00b	1. 8 ± 0. 1a	1. 3 ± 0. 3b
		旱田 Glebe	0. 7 ± 0. 2a	0. 07 ± 0. 00a	0. 4 ± 0. 1c	1. 0 ± 0. 0c
	60 ~ 100	退耕地 Fallow	0. 4 ± 0. 3b	0. 09 ± 0. 02a	0. 8 ± 0. 1b	2. 2 ± 0. 3a
		水田 Paddy	1. 1 ± 0. 1a	0. 01 ± 0. 00c	1. 1 ± 0. 0a	1. 0 ± 0. 2b
		旱田 Glebe	0. 4 ± 0. 1b	0. 06 ± 0. 00b	0. 3 ± 0. 0c	1. 2 ± 0. 2b
官垵 Guanyuan	0 ~ 30	退耕地 Fallow	1. 7 ± 0. 9c	0. 2 ± 0. 2a	1. 5 ± 0. 6c	2. 6 ± 0. 1a
		水田 Paddy	5. 2 ± 0. 4a	0. 4 ± 0. 0a	4. 0 ± 0. 1a	2. 7 ± 0. 1a
		旱田 Glebe	3. 8 ± 0. 2b	0. 5 ± 0. 0a	2. 9 ± 0. 0b	2. 2 ± 0. 0b
	30 ~ 60	退耕地 Fallow	0. 5 ± 0. 3c	0. 07 ± 0. 06a	1. 0 ± 0. 5b	2. 7 ± 0. 1a
		水田 Paddy	2. 5 ± 0. 3a	0. 07 ± 0. 00a	2. 3 ± 0. 2a	2. 7 ± 0. 1a
		旱田 Glebe	1. 3 ± 0. 2b	0. 07 ± 0. 00a	1. 6 ± 0. 1b	2. 5 ± 0. 1b
	60 ~ 100	退耕地 Fallow	0. 4 ± 0. 2c	0. 06 ± 0. 06a	1. 0 ± 0. 5a	2. 7 ± 0. 1a
		水田 Paddy	1. 4 ± 0. 2a	0. 01 ± 0. 00a	1. 2 ± 0. 1a	2. 7 ± 0. 0a
		旱田 Glebe	1. 1 ± 0. 2b	0. 02 ± 0. 00a	1. 0 ± 0. 0a	2. 5 ± 0. 0b
青山垵 Qingshanyuan	0 ~ 30	退耕地 Fallow	2. 8 ± 0. 8a	0. 2 ± 0. 0a	4. 8 ± 1. 8b	2. 3 ± 0. 4a
		水田 Paddy	3. 2 ± 0. 2a	0. 1 ± 0. 00a	8. 5 ± 0. 3a	2. 1 ± 0. 2a
		旱田 Glebe	2. 2 ± 0. 2a	0. 2 ± 0. 0a	6. 9 ± 0. 3ab	1. 9 ± 0. 1a
	30 ~ 60	退耕地 Fallow	1. 0 ± 0. 4a	0. 08 ± 0. 06a	1. 1 ± 0. 2b	2. 4 ± 0. 4a
		水田 Paddy	0. 3 ± 0. 1b	0. 05 ± 0. 00a	1. 6 ± 0. 3a	1. 6 ± 0. 1b
		旱田 Glebe	0. 9 ± 0. 1ab	0. 10 ± 0. 00a	1. 2 ± 0. 2b	2. 4 ± 0. 1a
	60 ~ 100	退耕地 Fallow	1. 0 ± 0. 3a	0. 08 ± 0. 04a	1. 1 ± 0. 3a	2. 4 ± 0. 3a
		水田 Paddy	0. 5 ± 0. 6a	0. 04 ± 0. 00a	0. 9 ± 0. 2a	2. 3 ± 0. 2a
		旱田 Glebe	0. 5 ± 0. 2a	0. 08 ± 0. 00a	0. 9 ± 0. 0a	2. 5 ± 0. 1a

不同字母表示同一土层不同处理间差异显著($P < 0. 05$)Different letters meant significant difference among treatments at the same soil depth at 0. 05 level.

以杨树为恢复方式的小集成样地中显著增加 ,而在官垵、青山垵样地中无明显变化($P > 0. 05$) ,更接近农田系统.

2. 5 不同恢复模式下土壤化学特性与土壤酶活性的相关关系

从表 3 可以看出 ,蔗糖酶与脲酶、磷酸酶活性呈

显著正相关($P < 0. 01$) ,相关系数分别为 0. 761 和 0. 654 ;脲酶与磷酸酶活性呈显著相关($P < 0. 01$). 蔗糖酶活性与有机质、全氮含量呈显著正相关($P < 0. 01$) ,与全钾含量呈负相关($P < 0. 05$) ;脲酶活性与有机质、全氮、全磷含量呈显著正相关($P < 0. 01$) ;磷酸酶活性与有机质含量呈显著正相关

表 3 土壤化学特性与土壤酶活性的相关关系
Tab.3 Correlativity between soil chemical properties and soil enzyme activities

	有机质 Organic matter	全 氮 Total N	全 磷 Total P	全 钾 Total K	蔗 糖 酶 Saccharase	脲 酶 Urease	磷 酸 酶 Phosphatase	过 氧 化 氢 酶 Catalase
有机质 Organic matter	1							
全氮 Total N	0. 462 **	1						
全磷 Total P	0. 444 **	0. 547 **	1					
全钾 Total K	0. 166 *	-0. 158 *	-0. 326 *	1				
蔗糖酶 Saccharase	0. 589 **	0. 255 **	0. 110	-0. 015	1			
脲酶 Urease	0. 346 **	0. 239 **	0. 268 **	0. 008	0. 761 **	1		
磷酸酶 Phosphatase	0. 532 **	0. 005	-0. 089	-0. 006	0. 654 **	0. 264 **	1	
过氧化氢酶 Catalase	0. 363 **	0. 139	0. 391 **	0. 366 **	-0. 014	0. 092	-0. 170 *	1

* $P < 0. 05$;* * $P < 0. 01$.

($P < 0.01$), 过氧化氢酶活性与有机质、全磷、全钾含量呈显著正相关($P < 0.01$). 土壤化学特性与土壤酶活性的相关关系表明土壤酶活性明显受土壤养分尤其是有机质含量的影响.

3 讨 论

土壤中的过氧化氢酶主要来源于细菌、真菌以及植物根系的分泌物, 其能促过氧化氢分解为水和氧, 从而解除过氧化氢对生物体和土壤的毒害作用. 土壤过氧化氢酶活性与土壤微生物活性密切相关, 反映了土壤中微生物作用的强度. 对土壤过氧化氢酶活性的研究, 国内外已有大量报道^[19-21]. 关松荫^[22]认为过氧化氢酶与土壤有机质含量极显著相关, 测定过氧化氢酶不仅能间接了解有机质的含量水平, 而且可以判断土壤有机质的转化状况. 在 3 种不同退田还湖模式中, 仅种植杨树的小集成样地过氧化氢酶活性显著增加, 其他酶活性无显著变化. 以种植杨树为恢复模式的小集成样地可以通过凋落物的腐解归还促进有机质的累积, 同时由于杨树的高生产力及深根性等生物学特性, 土壤有机质累积速率较高, 有助于土壤深层的有机质累积. 杨树林地的深根性使其可通过根系穿插促进下层土壤通气, 增加了土壤呼吸及微生物的活动强度, 从而导致土壤生物酶活性提高.

蔗糖酶可以把土壤中高分子量的糖逐渐分解成能够被植物和土壤微生物吸收利用的葡萄糖和果糖, 为土壤微生物活动提供能源, 促进土壤中物质的生物循环, 其活性变化反映了土壤有机碳累积与分解转化的规律. 磷酸酶可以酶促分解各种有机磷化合物, 为植物生长提供有效磷素, 其活性是评价土壤中磷素生物转化方向和强度的指标. 已有研究表明, 蔗糖酶和磷酸酶活性均与土壤有机质含量呈明显正相关^[23-24]. 本研究中, 退田还湖后磷酸酶活性表现为显著减小, 蔗糖酶活性在青山垵样地中与水田、旱田相比没有明显差异性, 但在官垵样地中显著减小. 官垵样地与外湖直接相连, 所以经常受到洪水冲击, 易将表层积累的有机质带入湖泊, 同时人为收割也减缓了有机质累积的速度, 故土壤有机质含量较水田和旱田低, 土壤蔗糖酶和磷酸酶活性也随着有机质含量的降低而减弱.

脲酶活性在某些方面可以反映土壤的供氮能力与水平, 与土壤中氮循环体系密切相关. 它是一种酰胺酶, 存在于大多数细菌、真菌和高等植物中, 能酶促有机物分子中酰胺键的水解, 其酶促作用极为专一,

仅能水解尿素, 最终产物是氨和碳酸. 土壤脲酶活性与土壤的微生物数量、有机物质含量、全氮和速效磷含量呈正相关. 脲酶的主要来源是微生物细胞的增加和裂解以及植物根系本身向土壤提供的酶^[25]. 本研究中, 土壤脲酶活性在退田还湖后没有显著变化, 但青山垵样地与小集成、官垵样地相比, 酶活性差异明显. 小集成、官垵样地受水位影响较小, 而青山垵样地则长期处于淹水状态, 不利于微生物的繁殖、生长, 因此造成了微生物区系组成的差异, 致使青山垵样地土壤脲酶活性较低.

土壤养分尤其有机质是土壤微生物生长繁殖的主要碳源和氮源, 而土壤微生物的种类和数量又在某种程度上决定土壤酶的来源. 土壤脲酶、蔗糖酶、磷酸酶和过氧化氢酶在进行酶促反应时, 不仅具有自身的专一特性, 而且还相互促进, 存在着一些共性. 有机质含量则充当了连接各个酶活性的桥梁, 有机质、全氮与土壤蔗糖酶、脲酶、磷酸酶和过氧化氢酶均显示出良好的相关性(表 3), 这与前人的研究结果一致. Tabatabai^[26]研究发现, 土壤酶活性的高低与土壤有机质含量密切相关, 因为土壤有机质对土壤酶的合成与稳定起很大的作用. 同时, 土壤酶主要来自土壤微生物, 而土壤有机质能促进微生物的生命活动, 并形成良好的土壤团聚体使土壤其他物理条件得到改善, 进而促进土壤酶活性增强.

土壤作为一个完整的生态系统, 任何干扰因素或者管理方式的改变都将对其功能与过程造成影响. 洞庭湖退田还湖工程旨在恢复自然湖泊系统, 但它是在人为选择下进行的, 人为的选择修复造成了生态系统土壤养分累积的差异, 尤其是有机质含量的分异是导致土壤酶活性变化的主要原因.

参考文献

- [1] Zhang L-L (张丽莉), Zhang Y-L (张玉兰), Chen L-J (陈利军), *et al.* Response of soil saccharidase activities to free-air carbon dioxide enrichment (FACE) under rice-wheat rotation. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, 15(6): 1019-1024 (in Chinese)
- [2] Sun B (孙波), Zhao Q-G (赵其国), Zhang T-L (张桃林), *et al.* Soil quality and sustainable environment. III. Biological indicators for assessment of soil quality. *Soils* (土壤), 1997, 29(4): 169-224 (in Chinese)
- [3] Sun B (孙波), Zhao Q-G (赵其国), Zhang T-L (张桃林). Soil quality and sustainable environment. II. Indicators of carbon and nitrogen for assessment of soil quality. *Soils* (土壤), 1997, 29(4): 169-175,

- 184 (in Chinese)
- [4] Yang W-Q (杨万勤), Wang K-Y (王开运). Advances in forest soil enzymology. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2004, **40**(2): 152–157 (in Chinese)
- [5] Ladd JN. Origin and range of enzymes in soil// Burns RG, ed. *Soil Enzymes*. London, UK : Academic Press, 1978 : 51–96
- [6] Acosta-Martínez V, Cruz L, Sotomayor-Ramírez D, et al. Enzyme activities as affected by soil properties and land use in a tropical watershed. *Applied Soil Ecology*, 2007, **35** : 35–45
- [7] Yue C-L (岳春雷), Chang J (常杰), Ge Y (葛滢), et al. Spatial distribution of enzymatic activities in substrate of constructed wetland and its correlation with purification of wastewater. *Bulletin of Science and Technology* (科技通报), 2004, **20**(2): 112–115 (in Chinese)
- [8] Askin T, Kizilkaya R. Assessing spatial variability of soil enzyme activities in pasture topsoils using geostatistics. *European Journal of Soil Biology*, 2006, **42** : 230–237
- [9] Xue L (薛立), Chen H-Y (陈红跃), Kuang L-G (邝立刚). Soil nutrient, microorganism and enzyme activity in *Pinus elliottii* mixed stands. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2003, **14**(1): 157–159 (in Chinese)
- [10] Liu J-X (刘建新). Correlative research on the activity of enzyme and soil nutrient in the different types of farmland. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2004, **35**(4): 523–525 (in Chinese)
- [11] Gao M (高明), Zhou B-T (周保同), Wei C-F (魏朝富), et al. Effect of tillage system on soil animal microorganism and enzyme activity in paddy field. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(7): 1177–1181 (in Chinese)
- [12] Meng Y-L (孟亚利), Wang L-G (王立国), Zhou Z-G (周治国), et al. Dynamics of soil enzyme activity and nutrient content in intercropped cotton rhizosphere and non-rhizosphere. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(11): 2076–2080 (in Chinese)
- [13] He B (何斌), Wen Y-G (温远光), Yuan X (袁霞), et al. Study on soil physical and chemical properties and enzyme activities of different mangrove communities in Yingluo Bay of Guangxi. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2002, **38**(2): 21–26 (in Chinese)
- [14] Xue L (薛立), Chen H-Y (陈红跃), Xu Y-B (徐英宝), et al. Soil physical properties, microbial biomass and enzyme activity in mixed stands. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2004, **35**(2): 154–158 (in Chinese)
- [15] Zheng J-M (郑景明), Wang L-Y (王灵艳), Sun Q-X (孙启祥), et al. Change of landscape patterns before and after the land conversion for restoration in Dongting Lake region and its ecological safety. *Wetland Science & Management* (湿地科学与管理), 2009, **5**(1): 40–43 (in Chinese)
- [16] Li J-B (李景保), Zhu X (朱翔), Cai B-H (蔡炳华), et al. A study on approaches to sustainable utilization of wetland in the Dongting Lake. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2002, **17**(3): 387–392 (in Chinese)
- [17] Hou Z-Y (侯志勇), Xie Y-H (谢永宏), Yu X-Y (于晓英), et al. Characteristics of soil seed banks in different water level areas after returning farmland into lake in Dongting Lake. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(6): 1323–1328 (in Chinese)
- [18] Guan S-Y (关松荫). *Soil Enzyme and Its Analysis Method*. Beijing : China Agriculture Press, 1986
- [19] Frankenberger WT Jr, Dick WA. Relationships between enzyme activities and microbial growth and activities indices in soil. *Soil Science Society of America Journal*, 1983, **47** : 945–951
- [20] Huang S-W (黄世伟). Soil enzyme activity and soil fertility. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 1981(4): 37–39 (in Chinese)
- [21] Wang Y-P (汪远品), He T-B (何藤兵), Li G-Z (李广枝). Preliminary study on relationship between two enzymes activity and properties of low-yield paddy soil in east region of Guizhou. *Journal of Guizhou Agricultural Sciences* (贵州农业科学), 1992, **20**(4): 35–38 (in Chinese)
- [22] Guan S-Y (关松荫). Relationship between soil enzyme and soil fertility. *Soil and Fertilizer* (土壤肥料), 1980 (2): 19–21 (in Chinese)
- [23] Yu Q-Y (于群英). Study on soil phosphatase activity and their influenced factors. *Journal of Anhui Technical Teachers College* (安徽技术师范学院学报), 2001, **15**(4): 5–8 (in Chinese)
- [24] Lu M (陆梅), Tian K (田昆), Chen Y-H (陈玉惠), et al. Studies on soil nutrients and enzyme activities of degraded wetland in Napahai. *Journal of Southwest Forestry College* (西南林学院学报), 2004, **24**(1): 34–37 (in Chinese)
- [25] Fan J (樊军). Study on Soil Enzyme Activities of a Long-term Experiment in Loess Plateau. Master Thesis. Yangling : Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, 2001 (in Chinese)
- [26] Tabatabai M. Soil enzymes// Weaver RW, Angle JS, Bottomley PS, eds. *Methods of Soil Analysis : Microbiological and Biochemical Properties*. Madison, WI : Part 2. SSSA Book Ser. 5. SSSA, 1994 : 775–833

作者简介 杨刚,男,1983年生,博士研究生.主要从事湿地生态环境研究,发表论文6篇. E-mail : yanggang903@163.com

责任编辑 张凤丽