

洞庭湖湿地 3 种典型植物群落土壤酶活性特征*

曾 静, 李 旭, 侯志勇, 谢永宏**

(中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程院重点实验室, 洞庭湖湿地生态系统观测研究站, 长沙 410125)

摘 要: 调查了洞庭湖湿地典型植物群落(短尖苔草(*Carex brevicuspis*)、南荻(*Triarrhena sacchariflora*)、辣蓼(*Polygonumhydropiper*))洪水期前后(5、10月)两次表层土壤酶活性及土壤养分性状。结果表明:3种典型群落之间具有明显的土壤养分性状及土壤酶活差异。辣蓼群落具有相对较高的土壤有机质、全氮、全磷、速效磷含量,短尖苔草群落次之,而南荻群落的土壤养分含量最低。3种典型植物群落的土壤有机质、全氮、全磷含量均表现为5月高于10月,土壤速效磷、速效钾洪水期前后无显著差异。辣蓼群落的蔗糖酶活性明显高于其他2个群落;3个群落脲酶活性均表现为10月高于5月,南荻、辣蓼群落有显著差异。磷酸酶以南荻群落最高,短尖苔草群落5月显著高于10月,南荻群落则10月显著高于5月;短尖苔草、南荻群落过氧化氢酶活性显著高于辣蓼群落,短尖苔草群落5月与10月间有显著差异,其余2个群落无显著差异。相关分析表明:脲酶活性与土壤养分含量关系不密切;蔗糖酶活性与土壤有机质、全磷、全氮及速效磷素含量均呈显著正相关。总体上,洞庭湖典型湿地植物群落显示了较为明显的土壤理化状况以及土壤酶活差异;同时也显示了季节性差异。相对而言,辣蓼群落土壤具有较快的物质循环与转化代谢速率,对于氮、磷等污染物具有较高的转化作用,而短尖苔草、南荻群落低于辣蓼群落,这可能与二者较低的土壤有机质以及氮磷养分积累有关。

关键词: 洞庭湖;湿地植物群落;土壤酶;土壤养分

Soil enzyme activities in three typical plant communities in Lake Dongting wetland with typical hygrophilous vegetations

ZENG Jing, LI Xu, HOU Zhiyong & XIE Yonghong**

(Lake Dongting Station for Wetland Ecosystem Observation and Research, Key Laboratory for Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, P.R. China)

Abstract: Soil nutrients and enzyme activities in surface soils covered by three typical hygrophilous vegetation communities(*Carex brevicuspis*, *Triarrhena sacchariflora* and *Polygonumhydropiper*) in Lake Dongting wetland were investigated before (May) and after (October) flooding. Results showed that significant difference in nutrients and enzyme activities was found among soils with the three vegetation communities. Soils covered by *P. hydropiper* had the highest soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) contents, followed by the soils covered by *C. brevicuspis*, and by *T. sacchariflora*. Soil organic matters, TN and TP of the three vegetation types were all higher in May than those in October, while no difference existed between different sampling time for available phosphorus (A-P) and available potassium. For soil enzyme activities, sucrase activity was significantly higher in *P. hydropiper* community than those in the other two vegetation types; urease activity was generally higher in October than those in May, and showed significant differences in *P. hydropiper* and *T. sacchariflora* communities; Phosphatase activity was highest in *T. sacchariflora* community and was significantly higher in October than those in May, while in *C. brevicuspis* community, the Phosphatase activity was higher in May than those in October; Catalase activity was a bit higher in *C. brevicuspis* and *T. sacchariflora* communities than those in *P. hydropiper* community, and moreover it varied significantly with sampling time in *C. brevicuspis* community. Correlation analysis indicated that sucrase activity was significantly and positively associated with soil nutrients, including SOC, TP, A-P, and TN. It was suggested by correlation analysis that urease activity was not related to soil nutrients,

* 国家科技支撑计划项目(2014BAC09B03)和国家自然科学基金项目(41601106)联合资助。2016-08-31收稿;2016-10-24收修稿。曾静(1981~),女,硕士,工程师;E-mail: zengjing@isa.ac.cn.

** 通信作者; E-mail: xyh@isa.ac.cn.

while sucrase activity was positively correlated to soil nutrient contents (including SOC, TP, A-P and TN). Overall, soils covered by different vegetation types varies greatly in the physicochemical features and enzyme activities.

Keywords: Lake Dongting; hygrophilous vegetation; soil enzyme; soil nutrients

土壤酶是土壤的重要组成部分,影响着土壤新陈代谢,参与并催化了土壤中的一切生物化学反应,对环境条件的变化十分敏感,其活性是土壤质量评价的重要指标之一^[1-2].近些年来,生态学者越来越重视对湿地生态系统土壤酶活性的研究^[3-6],湿地中土壤和水体中的植物、微生物及少量动物通过分泌酶,加速有机体的腐解转化,控制着湿地生态系统的物质循环^[7-8].湿地土壤酶的分解作用参与并控制着湿地土壤中的生物化学过程在内的自然界物质循环过程,酶活性的高低直接影响物质转化循环的速率,并分解土壤中积累的有毒物质,对湿地生态系统平衡的维持和物质循环具有重要作用^[9].土壤酶的分解作用普遍被认为是生态系统中有有机物质整个分解过程的限制性步骤,控制着湿地生态系统的物质循环,常常被作为指示湿地物质分解循环过程强度很重要的指标.在湿地生态系统中,温度、水位波动、土壤营养物质、污染物质、植被生长等对湿地土壤酶活性均有影响,目前有关土壤酶活性的研究主要集中于土壤酶活性状况^[10]、土壤酶活性与营养元素和微生物的相互关系^[11-13]、土壤酶活性与土壤理化性质的关系等方面^[14-15].在湿地系统中酶的研究中,湖泊湿地生态系统中土壤酶研究极少.洞庭湖为我国第二大淡水湖,受大幅度水位周期变动的影 响,具有“夏季湖相,冬季河相”的景观特征,洪水期和枯水期在一年中各占一半^[16-17].在洞庭湖高水位的洪水季节,湿地处于典型的湖相水文状态,随着洞庭湖水位的降低,不同高程的洲滩相继显露,湿地植被发育,滩地和沼泽广布,呈现河、湖、滩交错的湿地景观.洞庭湖作为特有的吞吐性湖泊,有着特定的水位梯度变化、洲滩的淤积抬升等的影响.目前,国内外针对洞庭湖湿地的研究主要集中在植被空间分布及多样性调查、水文过程与水质分析以及土壤重金属含量等方面,在酶活性方面也多关注于土地耕作类型的酶活性影响,而对洞庭湖典型湿地植被类型的土壤酶活性变化特性研究尚少见报道.

洞庭湖区域气候温暖湿润,植被丰富且群落类型多样,植被演替模式较为复杂.典型的湿地植被群落有短尖苔草(*Carex brevicuspis*)、南荻(*Triarrhena sacchariflora*)、辣蓼(*Polygonum hydropiper*)、藨草(*Phalaris arundinacea*)等.由于受洞庭湖特定的水位梯度变化、洲滩的淤积抬升等的影响,在所选择的3个典型洲滩样地,植物群落沿高程的增加依次分布着辣蓼群落、苔草群落和南荻群落,呈明显的带状分布格局.一年之中,短尖苔草群落在洪水期前后有两个生长高峰期,南荻群落每年地上部分绝大多数被收割,只有根茬回归土壤,且并不易腐解.由于植物—土壤界面是土壤微生物最为活跃的场所,了解植物—土壤界面的土壤酶活性对于了解土壤生物地球化学过程具有重要作用.本文选取洞庭湖3处典型洲滩湿地(小西湖、六门闸和麻塘)为对象,对典型植物群落(短尖苔草、南荻、辣蓼)土壤蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶、磷酸酶活性特征进行研究,以便了解洞庭湖湿地土壤质量演变特征,深入探讨湿地生态系统结构和功能,进而为保护洞庭湖湿地生态系统提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

洞庭湖(24°39'~30°08'N, 108°47'~114°15'E)位于湖南省北部,湘水、资水、沅水、澧水四水汇入,湘江是洞庭湖水系最大的河流^[18-19].洞庭湖是我国第二大淡水湖,是国际上重要的湿地生态保护区之一,具有维系长江中下游防洪安全的功能,也是广大湖区人民赖以生存发展的基础^[20].在湿地生态系统中,温度、水位波动、土壤营养物质、污染物质、植被生长等对湿地土壤酶活性均有影响^[21].

本研究区的辣蓼群落(麻塘)(29°14'~29°16'N, 113°5'~113°7'E)处于湘江航道旁,海拔低,积水期长,一年有6个月的时间有积水,采样时土壤含水量最高,达34.8%.相对来说苔草群落(小西湖)(29°4'~29°6'N, 113°1'~113°3'E)积水期最短,一年有4个月的洪水浸泡期,采样时含水量分别为27.8%.荻群落(六门闸)(28°28'~29°1'N, 112°45'~113°2'E)积水期最短,一年大概只有2个月的洪水浸泡期,无长期积水,采样时含水量为31%.

1.2 样品采集

选择3个典型植物群落都无积水的2015年4、10月分别在短尖苔草、南荻、辣蓼(小西湖、六门闸和麻

塘)3个洲滩的同一地点各取1次样,共采集土壤样品90个,每个洲滩取样30个.具体方法如下:分别在3条植被带上设置15个1 m×1 m的样方进行取样,在植被带上按照“S”型路线采集0~20 cm土层的样本5~8个,样方间隔50 m,混合均匀后用灭菌自封袋带回实验室^[22].

土壤样品采集回室内后,剔除土壤中的动植物残体、石块等杂物,于室内自然风干.随后用木锤捣碎后过20目尼龙筛,然后从中取50 g左右,在玛瑙研钵内进一步磨细,过10目和60目尼龙筛,储存于聚乙烯袋中待测.用于分析土壤酶活性及土壤化学性质,每个样品3次重复.

1.3 样品分析方法

土壤pH、有机质、全氮、全磷和全钾含量的测定分别采用玻璃电极法、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^[23].土壤蔗糖酶活性采用3,5-二硝基水杨酸比色法,酶活性以1 g土壤在37℃培养24 h后生成葡萄糖的量(mg/g)表示;土壤脲酶活性采用靛酚蓝比色法,酶活性以1 g土壤在37℃培养24 h释放出NH₃-N的量(mg/g)表示;酸性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定,酶活性以1 g土壤在37℃培养12 h后生成酚的量(mg/g)表示;过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定,酶活性以常温培养20 min后消耗0.1 mol/L KMnO₄的量(L/kg)表示^[24].

1.4 数据统计

所有数据采用SPSS 18.0和Microsoft Excel 2003软件进行统计、处理.变量之间方差分析采用One-way ANOVA;多重比较采用Tukey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.

2 结果与分析

2.1 3种典型湿地植物群落的土壤养分特征

3种典型湿地植物群落pH值的分布范围为6.23~8.23,以短尖苔草最高,平均值为8.03,辣蓼最低,平均值为6.42.3个样地表层有机质含量以辣蓼群落最高,5月为27.16 g/kg,10月为39.02 g/kg.短尖苔草群落与南荻群落相差不大,其5、10月有机质含量分别为24.52、19.55 g/kg,南荻群落5、10月分别为21.70、21.43 g/kg,2个群落5月与10月差异不显著.表层土壤全氮含量在0.78~2.54 g/kg,与有机质相似,其中辣蓼群落显著高于其他2个群落,且短尖苔草群落与南荻群落相差不大.

短尖苔草群落表层土壤全磷含量在5、10月分别为0.76、0.89 g/kg,南荻群落分别为0.67、0.63 g/kg,辣蓼群落分别为0.84、0.69 g/kg,3个群落之间差异不明显;3个群落中辣蓼群落的有机质、全氮、全磷含量都表现为5月显著高于10月.短尖苔草群落的有机质和全磷含量10月略高于5月,但是差异不显著,全氮含量5月显著高于10月.南荻群落有机质、全磷、速效磷含量洪水前后无明显变化,全氮含量5月显著高于10月.

3个群落土壤的速效钾含量范围为0.09~0.13 g/kg,群落之间以及洪水前后无明显差异.3个群落土壤的速效磷含量范围为5.48~44.61 mg/kg,辣蓼群落显著高于南荻、短尖苔草群落,3个群落速效磷含量在洪水期前后无显著差异.

从理化性质肥力指标看,5月辣蓼群落的有机质、全氮、全磷、速效磷含量都显著高于其他2个群落;10月辣蓼群落的有机质、全氮、速效磷含量都显著高于其他2个群落,而短尖苔草群落全磷含量显著高于辣蓼、南荻群落(表1).

表1 土壤基本化学性质

Tab.1 Basic chemical properties of the tested soil

湿地植物群落	采样时间	pH值	有机质/(g/kg)	全氮/(g/kg)	全磷/(g/kg)	速效钾/(g/kg)	速效磷/(mg/kg)
短尖苔草	5月	8.23±0.03 ^a	24.52±2.73 ^{bc}	1.53±0.19 ^b	0.76±0.06 ^{ab}	0.11±0.04 ^a	7.39±1.13 ^b
	10月	7.83±1.03 ^b	19.55±5.58 ^c	0.78±0.36 ^d	0.89±0.18 ^a	0.09±0.01 ^a	5.48±1.00 ^b
南荻	5月	8.21±1.03 ^{ab}	21.70±0.53 ^{bc}	1.38±0.01 ^{bc}	0.67±0.02 ^b	0.10±0.02 ^a	6.15±1.21 ^b
	10月	8.08±4.03 ^{ab}	21.43±1.81 ^{bc}	0.86±0.07 ^d	0.63±0.17 ^b	0.13±0.03 ^a	6.78±1.29 ^b
辣蓼	5月	6.23±0.03 ^c	39.02±5.00 ^a	2.54±0.39 ^a	0.84±0.07 ^a	0.09±0.01 ^a	34.35±5.41 ^a
	10月	6.61±4.03 ^c	27.16±6.36 ^b	1.25±0.20 ^c	0.69±0.02 ^b	0.11±0.01 ^a	44.61±11.61 ^a

2.2 土壤酶活性

辣蓼群落的蔗糖酶活性最高, 5月显著高于10月, 5月和10月分别为89.4和33.93 mg/(g·24 h);短尖苔草群落分别为32.6和17.4 mg/(g·24 h);南荻群落分别为20.43和29.31 g/(kg·24 h), 3个群落除了5月的辣蓼群落蔗糖酶活性显著较高以外, 其他几个样品之间没有显著差异(图1).

3个群落表层土壤脲酶活性在0.03~0.43 mg/(g·24 h)之间, 其中5月短尖苔草、辣蓼群落分别为0.03和0.08 mg/(g·24 h), 南荻群落最高为0.11 mg/(g·24 h);10月份辣蓼群落最高为0.43 mg/(g·24 h), 其次为南荻群落和短尖苔草群落, 分别为0.40和0.15 mg/(g·24 h);3个群落的脲酶活性都是5月低于10月, 但是短尖苔草群落在2个月份之间的差异不明显.

3个群落土壤的磷酸酶活性在0.63~2.07 mg/(g·24 h)之间, 南荻群落、辣蓼群的磷酸酶活性10月显著高于5月, 其中10月的南荻群落磷酸酶活性显著高于其他群落;而短尖苔草群落的磷酸酶活性则与其他2个群落相反, 5月显著高于10月.

过氧化氢酶活性在2.47~4.80 L/(kg·24 h)之间, 其中辣蓼群落的活性显著低于其他2个群落, 其他2个群落之间相差不大. 3个群落的过氧化氢酶活性5月和10月比较稳定相差很小, 无明显变化.

辣蓼群落5月的土壤蔗糖酶活性显著比10月高, 并且比其他2个群落土壤蔗糖酶活性高, 其他2个群落的蔗糖酶活性之间, 以及5月与10月之间没有明显差异;辣蓼群落脲酶活性5月显著高于短尖苔草群落, 10月活性与短尖苔草、南荻群落无明显差异, 酶活性5月显著低于10月;辣蓼群落磷酸酶、过氧化氢酶活性5、10月均显著低于其他2个群落, 酶活性5、10月无明显差异.

短尖苔草群落蔗糖酶活性5月显著低于辣蓼略高于荻群落, 5、10月酶活性无显著变化;脲酶活性10月显著低于其他两个群落, 5、10月无显著变化;磷酸酶活性5月与辣蓼、南荻群落无明显变化, 10月显著低于其他两个群落, 酶活性5月显著低于10月;过氧化氢酶显著高于辣蓼群落, 与南荻群落之前无明显差距, 5、10月无明显变化.

南荻群落蔗糖酶活性5月显著低于辣蓼, 10月与短尖苔草、辣蓼群落无显著差异, 5、10月酶活性变化不大;脲酶活性5月与短尖苔草、辣蓼群落无显著差异, 10月显著高于短尖苔草群落, 5月酶活性显著低于10月;磷酸酶活性5月显著高于其辣蓼群落, 与短尖苔草群落无显著差异, 10月显著高于短尖苔草、辣蓼群落, 5月酶活性显著低于10月;过氧化氢酶活性显著高于辣蓼群落, 与短尖苔草群落之前无明显差距, 5、10月无明显变化(图1).

2.3 典型湿地植物群落土壤酶活性与土壤理化因子的相关关系

蔗糖酶活性与有机质和全氮含量均呈显著正相关, 与全磷和速效磷含量的相关性只表现在5月的样品中, 呈显著正相关. 脲酶活性与所有指标的相关性都不显著. 酸性磷酸酶活性在5月与所分析的4个土壤肥力指标均呈显著相关性, 与有机质、全磷和全氮、速效磷含量均呈显著负相关, 而与速效钾含量呈负相关, 而10月的样品只与有机质含量呈正相关. 过氧化氢酶活性与磷酸酶活性类似, 在5月的样品中与4个肥力指标均呈显著负相关, 而10月的样品与有机质、全氮和速效磷含量均呈显著负相关(表2).

表2 土壤酶活性与土壤理化因子的相关关系

Tab.2 Relationships between soil enzymes activities and soil physic chemical properties

土壤酶	时间	有机质	全磷	全氮	速效磷	速效钾
蔗糖酶活性	5月	0.828 **	0.784 **	0.796 **	0.931 **	0.344
	10月	0.733 **	0.391	0.649 **	0.449	0.424
脲酶活性	5月	0.056	-0.354	0.082	-0.056	0.014
	10月	0.057	-0.383	0.296	0.376	0.322
磷酸酶活性	5月	-0.724 **	-0.677 **	-0.704 **	-0.799 **	-0.375
	10月	0.108	-0.438	-0.086	-0.198	-0.218
过氧化氢酶活性	5月	-0.883 **	-0.689 **	-0.849 **	-0.927 **	-0.219
	10月	-0.592 *	0.038	-0.763 **	-0.858 **	-0.681 **

* 表示显著性水平为0.05, ** 表示显著性水平为0.01.

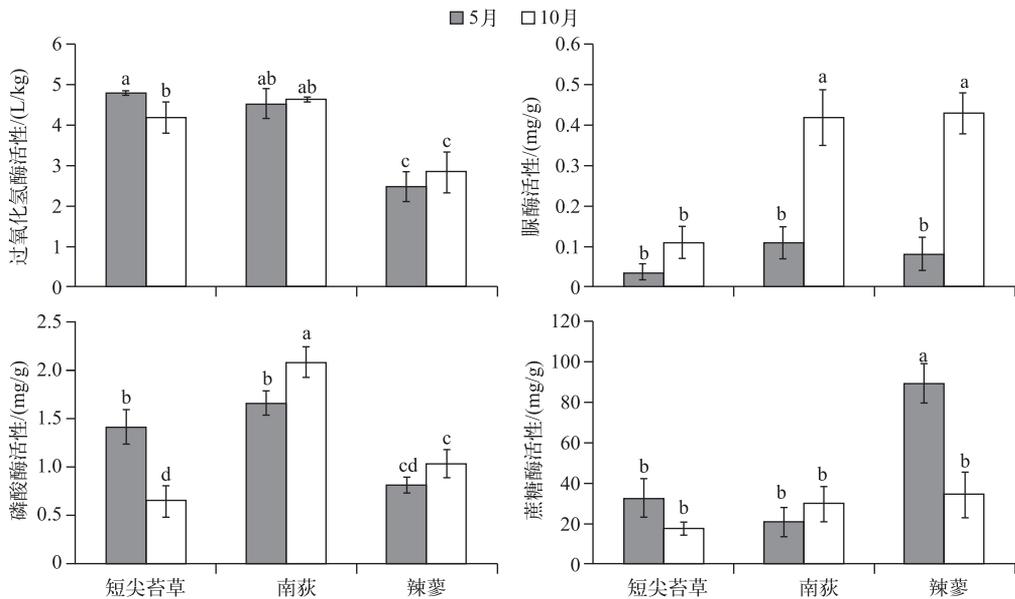


图1 洞庭湖典型湿地植物群落间土壤酶活性特征

Fig.1 Soil enzyme activity in typical hygrophilous vegetation of Lake Dongting

3 讨论

土壤酶活性在土壤能量和营养物质的循环、转化过程中能够表达土壤营养物质的循环状况,植物群落的演替是植物与土壤相互作用的过程,对土壤酶活性有着一定影响^[25-26]。植被生长、水位波动、土壤营养物质、污染物质等对湿地土壤酶活性也有不同的影响^[27-30]。本研究中,辣蓼群落表层土壤蔗糖酶活性显著高于其他2个群落,短尖苔草、南荻群落的蔗糖酶活性相差较小,2个群落没有显著差异,此外脲酶活性也高于其他2个群落,这可能是辣蓼群落由于长期的淹水环境有利于表层土壤有机质与氮、磷含量的累积,而土壤中养分的增加在适宜的土壤与水分条件下能显著提高土壤中相应转化酶的活性,该结果与王晓龙等研究的鄱阳湖典型湿地植物群落土壤酶活性中结果一致^[3]。蔗糖酶活性与土壤有机质及氮素含量呈现了良好的正相关关系,可表征土壤有机质与氮素的积累状况;此外蔗糖酶活性与土壤全磷、速效磷含量也呈显著正相关,表明蔗糖酶活性在表征洞庭湖湖湿地洲滩土壤质量上具有一定代表性。脲酶与土壤中氮素的循环转化密切相关,而磷酸酶能催化土壤中磷酸单酯水解,将有机磷水解为无机磷酸以供植物吸收^[16]。辣蓼群落表层土壤较高的土壤酶活性也表明,辣蓼湿地土壤具有较快的物质循环与转化代谢速率,对于氮、磷等污染物具有较高的转化作用,而短尖苔草、南荻群落低于辣蓼群落这可能与二者较低的土壤有机质以及氮磷养分积累有关;此外过氧化氢酶、磷酸酶的活性辣蓼群落最低。在淡水湿地生态系统中,植物通过根系分泌物与根系释放的氧气不仅能影响土壤中酶的构成与活性,也能重新活化在厌氧条件下被其他蛋白质或化学物质固定的土壤酶,短尖苔草、南荻群落过氧化氢酶、磷酸酶表现了较高的酶活性,这可能跟洞庭湖年内水位变幅巨大,南荻群落其较高的初级生产力以及稳定的群落结构也有利于土壤微生物量与土壤酶活性的提高再加上地下部分(根系)均较多,根系分布深且丰富,通过根系穿插可对下层土壤通气。3个群落的过氧化氢酶与磷酸酶的活性与有机质、全磷、全氮、速效磷均呈极显著负相关,在一定程度上可表征湿地土壤质量的演变动态。然而,除了水位波动条件及温度对土壤酶活性的影响外,湿地土壤中大多数酶的活性与有机质含量以及水文过程密切相关,湿地土壤中营养物质的成分及分布状况对土壤酶活性的影响更为显著^[6]。

土壤酶活性是由森林土壤性质、水热条件、土壤、生物种类及数量以及森林物种组成等多种因素决定的,同时不同种类酶的活性对环境变化的敏感程度也不完全相同^[24]。本研究中短尖苔草群落和辣蓼群落的蔗糖酶活性5月高于10月,南荻群落则变化不大5月低于10月,5月各植物群落都生长旺盛,根系代谢频

繁, 10月洲滩辣蓼正逐渐枯黄, 而短尖苔草还处于第二生长季的萌芽期, 这是土壤酶活性低于5月的重要原因。洞庭湖洲滩湿地受人为干扰较少, 土壤养分积累主要来自于植物凋落物与根系腐解, 磷酸酶活性与湿地土壤养分积累过程呈现较高的一致性。3个群落的脲酶活性都是5月低于10月, 原因在于10月洲滩辣蓼正逐渐枯黄, 植物开始凋落, 而短尖苔草第一季也已经凋落, 凋落物为土壤微生物提供丰富营养, 增强了与土壤酶分泌相关的微生物活动, 该结果与宋学贵等^[27]、熊浩冲等^[31]的研究结果一致。3个群落的过氧化氢酶活性5月和10月比较稳定相差很小, 无明显变化, 土壤酶活性的季节变化在很大程度上受土壤水分和土壤温度直接作用和间接作用共同影响^[32]。

总体上, 洞庭湖典型湿地植物群落显示了较为明显的土壤理化状况以及土壤酶活性差异; 也显示了在时间上洪水前后的(5、10月)差异。然而, 湿地土壤酶活性受众多因素影响, 研究洞庭湖湿地土壤酶活性差异特征还需探讨。水、热条件、植物以及季节变化在不同程度上影响等多重因素对土壤酶活性的影响机制, 长期定位观测, 建立体现湿地土壤酶指标体系。

4 参考文献

- [1] Hao F, Lai X. Effects of land use changes on the ecosystem service values of a reclamation farm in northeast China. *Environmental Management*, 2012, **50**(5): 888-899.
- [2] Theriote JM, Conkleb JL, Pezeshkic SR *et al.* Will hydrologic restoration of Mississippi River riparian wetlands improve their critical biogeochemical functions? *Ecological Engineering*, 2013, **60**: 192-198.
- [3] Wang Xiaolong, Xu Ligang, Bai Li *et al.* Soil enzyme activities in Poyang Lake wetlands with typical hygrophilous vegetations. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(4): 798-803. [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. 生态学杂志, 2011, **30**(4): 798-803.]
- [4] Xu XF, Song CC, Song X *et al.* Carbon mineralization and there late denzyme activityof soil in wetland. *Ecology and Environment*, 2004, **13**(1): 40-42.
- [5] Kang H, Kima SY, Fenner N *et al.* Shifts of soil enzyme activities in wetlands exposed to elevated CO₂. *Science of the Total Environment*, 2005, **337**: 207-212.
- [6] Xu Xiaofeng, Song Changchun, Song Xia *et al.* Carbon mineralization and the related enzyme activity of soil in wetland. *Ecology and Environment*, 2004, **13**(1): 40-42.
- [7] Nie Dagang, Wang Liang, Yin Chengqing *et al.* Soil phosphatases activity and its affecting factors in Baiyangdian wetland. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, **28**(4): 698-703. [聂大刚, 王亮, 尹澄清等. 白洋淀湿地磷酸酶活性及其影响因素. 生态学杂志, 2009, **28**(4): 698-703.]
- [8] Gutknecht JLM, Goodman RM, Balsler TC. Linking soil processs and microbial ecology in fresh water wetland ecosystems. *Plant and Soil*, 2006, **289**: 17-34.
- [9] Liao Yujing, Song Changchun. Research advances for the degradation of wetland ecosystem. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, **40**(5): 1199-1203. [廖玉静, 宋长春. 湿地生态系统退化研究综述. 土壤通报, 2009, **40**(5): 1199-1203.]
- [10] Gllvear DJ, Bradley C. Hydrological monitoring and surveillance for wetland conservation and management; a UK perspective. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 2000, **25**(7): 571-588.
- [11] Yue Chunlei, Chang Jie, Ge Ying *et al.* Spatial distribution of enzymatic activities in substrate of constructed wetland and its correlation with purification of wastewater. *Bulletin of Science and Technology*, 2004, **20**(2): 112-115. [岳春雷, 常杰, 葛滢等. 人工湿地基质中土壤酶空间分布及其与水质净化效果之间的相关性. 科技通报, 2004, **20**(2): 112-115.]
- [12] Xue Li, Chen Hongyue, Kuang Ligang. Soil nutrient, microorganism and enzyme activity in *Pinus elliottii* mixed stands. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, **14**(1): 157-159. [薛立, 陈红跃, 邝立刚. 湿地松混交林地土壤养分、微生物和酶活性的研究. 应用生态学报, 2003, **14**(1): 157-159.]
- [13] Yang Wenbin, Gong Yuqing, Wang Dongmei. The activities of soil enzyme under different vegetation types in Li river riparian ecotones. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(14): 1-12. [杨文彬, 耿玉清, 王冬梅. 漓江水陆交错带不同植被类型土壤酶活性研究. 生态学报, 2015, **35**(14): 1-12.]
- [14] Meng Yali, Wang Ligu, Zhou Zhiguo *et al.* Dynamics of soil enzyme activity and nutrient content in intercropped cotton rhizosphere and non-rhizosphere. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, **16**(11): 2076-2080. [孟亚利, 王立国, 周治国等. 套作棉根际与非根际土壤酶活性和养分的变化. 应用生态学报, 2005, **16**(11): 2076-2080.]

- [15] Qiu Liping, Liu Jun, Wang Yiquan *et al.* Research on relationship between soil enzyme activities and soil fertility. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, **10**(3): 277-280. [邱莉萍, 刘军, 王益权等. 土壤酶活性与土壤肥力的关系研究. 植物营养与肥料学报, 2004, **10**(3): 277-280.]
- [16] Wan Zhongmei, Song Changchun. Vertical dynamics of soil enzyme activities and its relationship with active organic carbon indicators in *Calamagrostis angustifolia* Wetland. *Wetland Science*, 2008, **6**(2): 249-257. [万忠梅, 宋长春. 小叶章湿地土壤酶活性分布特征及其与活性有机碳表征指标的关系. 湿地科学, 2008, **6**(2): 249-257.]
- [17] Li Xu, Li Feng, Xie Yonghong *et al.* Vegetation dynamics of *Triarrhena sacchariflora* and *Carex* sp. community acetone and determining factors in Lake Dongting: A case study in the Beizhouzi lake-shore. *J Lake Sci*, 2015, **27**(6): 1020-1026. DOI: 10.18307/2015.0605. [李旭, 李峰, 谢永宏等. 洞庭湖荻-苔草群落交错带植被动态及影响因素——以北洲子洲滩为例. 湖泊科学, 2015, **27**(6): 1020-1026.]
- [18] Wan Zhongmei, Wu Jingui. Study progress on factors affecting soil enzyme activity. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2005, **33**(6): 87-92. [万忠梅, 吴景贵. 土壤酶活性影响因子研究进展. 西北农林科技大学学报, 2005, **33**(6): 87-92.]
- [19] Xie Yonghong, Chen Xinsheng. Effects of Three-Gorge Project on succession of wetland vegetation in Lake Dongting. *Research of Agricultural Modernization*, 2008, **29**(6): 684-687. [谢永宏, 陈心胜. 三峡工程对洞庭湖湿地植被演替的影响. 农业现代化研究, 2008, **29**(6): 684-687.]
- [20] Long Yong. The spatial distribution and adaptability analysis of vegetation and its biomass in east Dongting Lake wetland and the influence of Three Gorges Project [Dissertation]. Chashang: Hunan University, 2013. [龙勇. 东洞庭湖湿地植被及其生物量研究与三峡工程影响分析[学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2013.]
- [21] Yuan Min. Effect of the Three Gorges Project on the water surface area of Dongting Lake by remote sensing technique [Dissertation]. Changsha: Hunan University, 2013. [袁敏. 基于遥感技术的三峡工程建设对洞庭湖水面积的影响研究[学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2013.]
- [22] Li Feng, Xie Yonghong, Yang Gang *et al.* Preliminary survey on aquatic vegetations in Baiyangdian Lake. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, **19**(7): 1597-1603. [李峰, 谢永宏, 杨刚等. 白洋淀水生植被初步调查. 应用生态学报, 2008, **19**(7): 1597-1603.]
- [23] Dong Meng, Zhao Yunlin, Lei Cunxi *et al.* Distribution and pollution evaluation of four kinds of heavy metals in chau embankment soil of south Lake Dongting. *Soils*, 2010, **42**(3): 452-458. [董萌, 赵运林, 雷存喜等. 南洞庭湖洲垸土壤中四种重金属的分布特征及污染状况评价. 土壤, 2010, **42**(3): 452-458.]
- [24] GB 15618-1995, Environmental quality standard for soils. [GB 15618-1995, 土壤环境质量标准.]
- [25] Guan Songyin, Zhang Dsheng, Zhang Zhiming eds. Methods of soil enzyme activities analysis. Beijing: China Agriculture Press, 1986. [关松荫, 张德生, 张志明. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986.]
- [26] An Shaoshan, Huang Yimei, Li Bicheng *et al.* Characteristics of soil enzymatic activities in enclosed area of Yunwu Mountain. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2004, **24**(6): 14-17. [安韶山, 黄懿梅, 李璧成等. 云雾山自然保护区不同植物群落土壤酶活性特征研究. 水土保持通报, 2004, **24**(6): 14-17.]
- [27] Song Xuegui, Hu Tingxing, Xian Junren *et al.* Soil enzyme activities and its response to simulated nitrogen deposition in an evergreen broad-leaved forest, southern Sichuan. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, (3): 1234-1240. [宋学贵, 胡庭兴, 鲜俊仁等. 川南天然常绿阔叶林土壤酶活性特征及其对模拟N沉降的响应. 生态学报, 2009, (3): 1234-1240.]
- [28] Yang Gang, Xie Yonghong, Chen Xinsheng *et al.* Soil enzyme activities under different restoration modes after returning farm land to lake in Lake Dongting area. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, **20**(9): 2187-2192. [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. 应用生态学报, 2009, **20**(9): 2187-2192.]
- [29] 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.
- [30] Ren Bo, Yang Gang, Xie Yonghong *et al.* Effects of land use patterns on enzyme activity in soils in the Dongting Lake area. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2009, **25**(4): 8-11. [任勃, 杨刚, 谢永宏等. 洞庭湖区不同土地利用方式对土壤酶活性的影响. 生态与农村环境学报, 2009, **25**(4): 8-11.]
- [31] Xiong Haochong, Wang Kaiyun, Yang Wanqin. Seasonal variations of soil enzyme activities and birch forests in subalpine area of western Sichuan. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2004, **10**(4): 416-420. [熊浩冲, 王开运, 杨万勤. 川西亚高山冷杉林和白桦林土壤酶活性季节动态. 应用与环境生物学报, 2004, **10**(4): 416-420.]
- [32] Yikim Maynurl, Zhang Bingchang, Sulayman Mamtimin *et al.* Seasonal variations of microbial biomass and soil enzyme activity in biological soil crusts in the gurbantunggut desert. *Journal of Dessert Research*, 2013, **33**(4): 1091-1097. [玛伊努尔·依克木, 张丙昌, 买买提明·苏来曼等. 古尔班通古特沙漠生物结皮中微生物量与土壤酶活性的季节变化. 中国沙漠, 2013, **33**(4): 1091-1097.]