

毛茛草湿地土壤酶活性及活性有机碳组分 对水分梯度的响应

万忠梅^{1,2}, 宋长春^{1,*}, 郭跃东¹, 王 丽^{1,2}, 黄靖宇^{1,2}

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:通过设置的 W1(15cm)、W2(-5cm)、W3(-5~5cm)、W4(淹没)4 种水分梯度的毛茛草(*Carex lasiocarpa*)盆栽培养实验,研究了湿地土壤酶活性、微生物量碳(MBC)、可溶性有机碳(DOC)及毛茛草地上生物量对水分梯度的响应及土壤酶活性与 MBC、DOC、地上生物量的关系。土壤酸性磷酸酶、蔗糖酶和脲酶活性随着土壤水分增加而降低,但过氧化氢酶活性随着土壤水分增加而增加。与持续淹水相比,干湿交替(W3)增加了土壤酸性磷酸酶、蔗糖酶、脲酶和过氧化氢酶活性。土壤微生物量碳(MBC)含量表现为 W3 > W1 > W2 > W4,蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶活性与 MBC 呈显著正相关($p < 0.05$)。土壤可溶性有机碳(DOC)含量表现为 W4 > W1 > W3 > W2,脲酶和酸性磷酸酶活性与 DOC 呈极显著负相关($p < 0.01$)。毛茛草地上生物量与土壤酶活性呈正相关,其中,蔗糖酶、过氧化氢酶、脲酶活性与毛茛草生长状况密切相关。

关键词:湿地;土壤酶活性;微生物量碳;溶解有机碳;地上生物量;水分梯度

文章编号:1000-0933(2008)12-5980-07 中图分类号:X142; X172 文献标识码:A

Effects of water gradient on soil enzyme activity and active organic carbon composition under *Carex lasiocarpa* marsh

WAN Zhong-Mei^{1,2}, SONG Chang-Chun^{1,*}, GUO Yue-Dong¹, WANG Li^{1,2}, HUANG Jing-Yu^{1,2}

1 Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China

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

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(12): 5980 ~ 5986.

Abstract: The response of soil enzyme activity of freshwater marsh, microbial biomass carbon (MBC), dissolved organic carbon (DOC) and aboveground biomass to water gradient were studied by *Carex lasiocarpa* pot culture experiment. And the relationship between soil enzyme activity and MBC, DOC, aboveground biomass were discussed. The water gradients were W1: 15cm, W2: -5cm, W3: -5 ~ 5cm and W4: submerge. The results indicated that the activities of acid phosphatase, invertase, urease and those activities were decreased with the increase of water content, while Catalase activity was increased with water content increasing. And Drying-Wetting Alternation(W3) increased these soil enzyme activities, comparing with W1. MBC content was in the order of W3 > W1 > W2 > W4 and the activities of invertase, urease and catalase were significantly positively correlated with MBC ($p < 0.05$). DOC content was in the order of W4 > W1 > W3 >

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40771189;40701001);中国科学院重要方向性资助项目(kzcx2-yw-309);中国科学院“东北振兴”资助项目(DBZX-2-024)

收稿日期:2008-06-13; **修订日期:**2008-08-27

作者简介:万忠梅(1979~),女,吉林长春人,博士生,主要从事环境变化与物质循环研究. E-mail: zmw518@yahoo.com.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: songcc@neigae.ac.cn

Foundation item: The project was financially supported by The National Natural Science Foundation of China (No. 40771189;40701001); Important Direction Program, Chinese Academy of Sciences (No. kzcx2-yw-309) and Northeast revitalization program, Chinese Academy of Sciences (No. DBZX-2-024)

Received date: 2008-06-13; **Accepted date:** 2008-08-27

Biography: WAN Zhong-Mei, Ph. D. candidate, mainly engaged in material recycling and environmental change. E-mail: zmw518@yahoo.com.cn

W2 and the activities of urease and acid phosphatase were most significantly negatively correlated with DOC ($p < 0.01$). And MBC more closely related to soil enzyme activities. In addition, Drying-Wetting Alternation promoted the growth of *Carex lasiocarpa*. When the water submerged plant, the growth of *Carex lasiocarpa* was significantly inhibited. The aboveground biomass of *Carex lasiocarpa* was positively related to soil enzyme activity. And there were close relationship between the activities of invertase, urease and catalase and the growth situation of *Carex lasiocarpa*.

Key Words: marsh; soil enzyme activity; microbial biomass carbon (MBC); dissolved organic carbon (DOC); aboveground biomass; water gradient

湿地作为一种特殊的自然综合体,以其特殊的性质如地表积水或土壤饱和、淹水土壤、厌氧条件和适应湿环境的动植物^[1],而有别于其它生态系统^[2]。水分是维持湿地生态系统功能的重要环境因子,影响着湿地生物地球化学循环,控制和维持着湿地生态系统的结构和功能^[3]。土壤酶和土壤活性有机碳对湿地生态系统的物质循环起着重要作用。土壤酶参与了土壤环境中的一切生物化学过程,与有机物质分解、营养物质循环、能量转移、环境质量等密切相关^[4~6],是土壤生物化学过程的主要调节者^[7],并受到植被特征、土壤水分等生物和非生物因素的影响^[8]。土壤活性有机碳不仅是土壤微生物活动能源和土壤养分的驱动力,而且直接参与土壤生物化学转化过程^[9,10]。近年来,由于人类垦殖活动及气候变化的影响导致湿地水位的波动较大,这必然引起土壤酶活性和活性有机碳组分的变化,而有关这方面的研究鲜见报道。因此,采用毛苔草野外盆栽控制实验,研究与湿地土壤碳、氮、磷转化循环有关的土壤酶活性、活性有机碳组分及地上生物量对水分梯度的响应,可为深入揭示湿地水分变化对其土壤生态过程的影响机理提供理论依据。

1 试验地点与研究方法

1.1 试验地点及自然概况

野外盆栽培养试验区布置在黑龙江省中国科学院三江平原沼泽湿地生态试验站试验区内。该地属温带湿润半湿润季风气候,年平均气温 1.9℃,年降雨量为 550 ~ 600mm,主要集中在 6 ~ 9 月份,占全年降水量的 70%,无霜期为 125d 左右。试验场内主要植被有毛苔草(*Carex lasiocarpa*)和小叶章(*Deyeuxia angustifolia*)。毛苔草生长在地势低洼,常年淹水生境。

1.2 实验设计及样品采集

盆栽模拟试验设在试验区内的人工模拟试验场内,选择地势较为平坦的自然空地挖坑建一个 3m × 2m × 1.2 m 的蓄水池,用于水位控制。2007 年 5 月初,在试验场附近挖取草甸沼泽土,于阴凉处自然风干,剔出石块、植物残体的杂物并充分混匀,过筛后,土壤分别装到直径为 30cm,桶高为 35cm 的塑料培养桶中,每桶装土 9kg,并且装土时尽量保持培养桶内的土壤容重一致。在试验场内选取株高、长势基本一致的毛苔草幼苗植株移栽到培养桶中,每桶移栽 13 株。植物生长稳定后,根据野外毛苔草的实际生长密度,每桶定植 12 株,进行水位处理。淹水处理从 2007 年 5 月 25 日开始,将培养桶放在已注入沼泽水的水池内,通过调节培养桶的放置高度调节水位,设 4 个水位处理:淹水处理 W1 持续淹水 15cm;干旱处理 W2(-5cm),在距离土壤表面 5cm 处用电焊打一个通水孔,控制水位面位于土壤表面以下 5cm 处;干湿交替处理 W3(-5 ~ 5cm),水位在土壤表面以下 5cm 和以上 5cm 之间以 10d 为周期人为控制进行水位波动;淹没处理 W4 水位淹没毛苔草。W1、W2、W4 分别模拟不同稳定水分条件,W3 模拟波动水分条件即干湿交替。每个处理设 3 次重复,随机排列。2 个月,于 7 月 25 日采集毛苔草地上生物量。同时用混合采样法垂直采集土壤样品,土样混合均匀后,一部分鲜土过 2mm 筛于 4℃ 保存,用于测定土壤微生物量碳、可溶性有机碳;另一部分室内风干,过 1mm 筛用于测定土壤酶活性。

1.3 分析方法

1.3.1 毛苔草地上生物量的测定

地上生物量用收获法测定。培养结束后,用剪刀剪下培养桶中的地上毛苔草植株,放入已知重量的信封

中,在 80℃ 下烘干称重,差减法得每桶地上生物量,并换算成每平方米的地上生物量。

1.3.2 土壤酶活性测定

土壤脲酶活性采用靛酚蓝比色法测定(以 NH_4^+ -N 计);土壤蔗糖酶活性采用 3,5 二硝基水杨酸比色法(以葡萄糖计);过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法(以 KMnO_4 计)^[8];酸性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定(以酚计)^[11]。

1.3.3 土壤溶解有机碳的测定

称 20g(干土重)新鲜土壤放入盛有 100ml 去离子水的三角瓶中,常温下震荡浸提 30 min,用高速离心机离心,上清液过 0.45 μm 滤膜,用岛津 TOC- V_{CPH} 仪测定浸提液有机碳浓度,得到溶解有机碳^[12]。

1.3.4 土壤微生物量碳测定

采用氯仿熏蒸- K_2SO_4 浸提法,熏蒸和未熏蒸的样品分别用 0.5mol/L 的 K_2SO_4 浸提 30 min,用岛津 TOC- V_{CPH} 仪测定浸提液有机碳浓度。然后用以下公式计算微生物量碳^[13]:

$$\text{MBC} = E_c / 0.38$$

式中, MBC 为微生物量碳, E_c 为熏蒸和未熏蒸样品浸提液测定的有机碳差值。

1.4 数据统计分析

所有数据采用 SPSS 11.5 和 Microsoft Excel 2003 软件进行处理。用 One-Way ANOVA 分析不同水分处理湿地土壤酶活性及活性有机碳的差异显著性,用 Pearson 相关性系数表示土壤酶活性与土壤活性有机碳组分及地上生物量的相关性。

2 结果与分析

2.1 毛茛草地上生物量对水分梯度的响应

湿地水分条件和水位变化直接影响到湿地生态系统植物群落的分布及其生产量^[14],水分梯度对毛茛草地上生物量的影响由图 1 可见。W3 处理即水位由 -5 ~ 5cm 波动条件下,毛茛草湿地的地上生物量最高,为 $(264.2 \pm 26.0) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,且极显著高于其它 3 种水位处理($p < 0.01$)。淹没处理(W4)的毛茛草地上生物量最低,为 $(50.1 \pm 9.9) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,且极显著低于其它处理($p < 0.01$)。持续淹水 15cm(W1)与 -5cm 水位处理(W2)的地上生物量分别为 $(146.0 \pm 14.9) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, $(146.1 \pm 28.8) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,这两种处理的地上生物量平均值差距甚微,但是变异系数分别为 10.2%、16.7%。

2.2 毛茛草湿地土壤酶活性对水分梯度的响应

湿地土壤酸性磷酸酶、蔗糖酶、脲酶和过氧化氢酶活性对水分变化的响应不同(图 2)。酸性磷酸酶能促进土壤有机磷化合物的水解,使之转化为植物可吸收利用的无机磷,其活性变化是土壤生物学状况的良好表征指标^[15],能够反映土壤供应有效磷的潜在能力。该酶活性表现为 $\text{W2} > \text{W3} > \text{W1} > \text{W4}$,与 W1 处理相比,水位在 -5cm(W2)和 -5 ~ 5cm 波动(W3)时的酸性磷酸酶活性分别高出 38.50% 和 24.87%,而淹没处理(W4)的酶活性仅仅降低 1.07%,且 W2 处理的该酶活性显著高于 W3 处理($p < 0.05$),极显著高于 W1 和 W4 处理($p < 0.01$)。说明持续淹水的条件下,不利于土壤有机磷的降解,因此提供给地上植物的磷素营养的潜力低。

蔗糖酶是参与湿地碳素转化循环的重要酶类,其能水解土壤中碳水化合物,为植物和微生物提供可利用的营养物质。蔗糖酶活性表现为 $\text{W3} > \text{W2} > \text{W1} > \text{W4}$,这种变化规律与毛茛草地上生物量的变化规律表现一致,并且 W4 处理的蔗糖酶活性显著低于其它处理($p < 0.05$),而 W3、W2、W13 种水分处理间的酶活性变化不

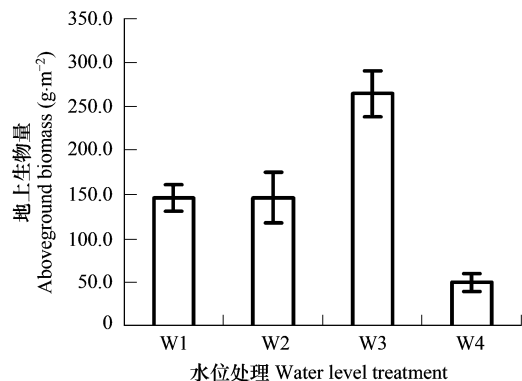


图 1 不同水位条件下毛茛草地上生物量的变化

Fig. 1 *Carex lasiocarpa* aboveground biomass varied with water level

显著。表明干湿交替能够促进蔗糖酶活性,而蔗糖酶活性的增加则加速了土壤中碳水化合物的转化,而当水分完全淹没毛茛草时,蔗糖酶依然具有活性,但该酶活性受到显著抑制($p < 0.05$)。

脲酶是土壤中氮素转化的关键酶,能分解尿素,促进其水解生成氨和 CO_2 ,其中氨是植被氮素营养的直接来源,该酶活性高低表征了土壤氮素营养状况^[16]。脲酶活性随水位变化的总体活性规律表现为 $W3 > W2 > W1 > W4$,与蔗糖酶活性的变化规律一致。干湿交替条件下土壤脲酶活性最高,依次比其它 3 个处理的酶活性高出 10.7%、23.0%、34.8%,且水分在 $-5 \sim 5\text{cm}$ 波动处理的酶活性显著高于淹水及淹没处理的酶活性($p < 0.05$)。说明常年淹水湿地干湿交替及水分疏干,增强了有机氮化合物的水解。

过氧化氢广泛存在于植物体和土壤中,对生物和土壤均具有毒害作用。土壤中真菌、细菌和植物根都能够分泌过氧化氢酶,将过氧化氢分解为水和氧,从而解除过氧化氢的毒害。该酶活性表现为 $W3 > W4 > W1 > W2$, $W3$ 处理的酶活性比其他 3 种处理依次高出 18.2%、24.1%、36.1%,且极显著高于其它 3 种处理($p < 0.01$),说明干湿交替更有利于去除过氧化氢对植被的毒害作用,并且淹水条件下,随淹水位的增加土壤过氧化氢酶活性增高,这是由于淹水使土壤处于厌氧环境,过氧化氢得到累积,致使过氧化氢酶作用基质含量高,一定程度上激活了过氧化氢酶活性。

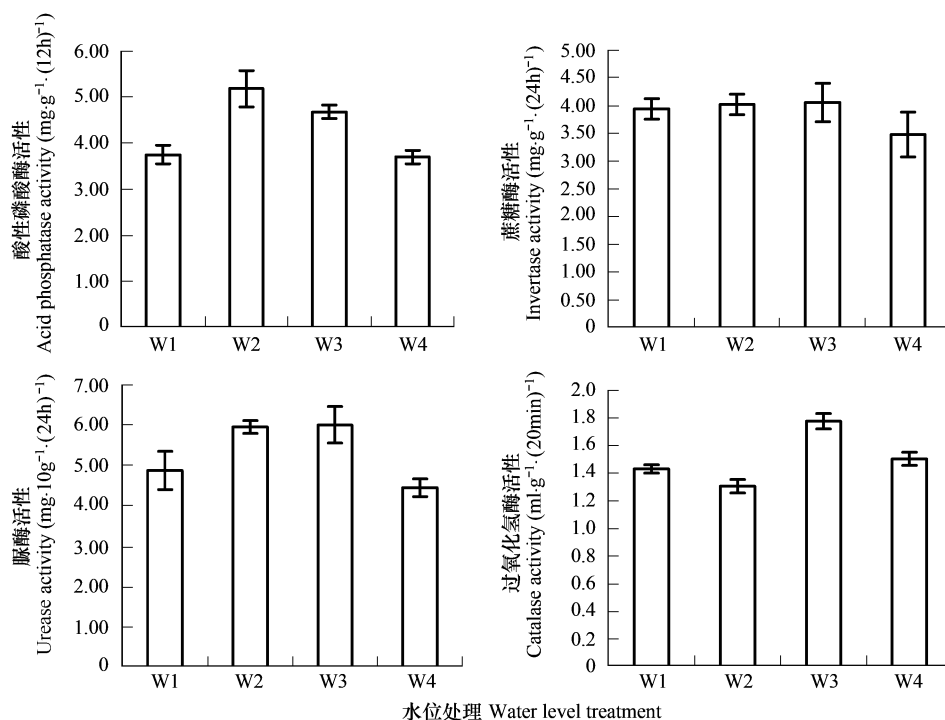


图2 不同水位处理湿地土壤酶活性变化

Fig.2 Wetland soil enzyme activities varied with water level

2.3 毛茛草湿地土壤活性有机碳组分对土壤水分梯度的响应

土壤微生物量碳、可溶性有机碳是土壤活性有机碳的两个重要表征指标^[17]。湿地水分梯度直接影响土壤氧化还原电位,因此土壤微生物种类和数量会受到影响,土壤微生物量碳的变化由图 3 可见,不同水分梯度下,毛茛草湿地土壤 MBC 含量表现为 $W3 > W1 > W2 > W4$,且干湿交替处理的土壤 MBC 含量显著高于其它 3 个处理($p < 0.05$)。持续淹水 15cm 处理(W1)的土壤 MBC 含量为 $(582.86 \pm 30.87) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,与 W1 相比,水分干湿交替(W3)使土壤 MBC 含量增加 15.32%,而干旱(W2)和淹没(W4)处理分别下降了 7.6% 和 18.58%,且淹没处理微生物量显著降低($p < 0.05$)。说明干湿交替使土壤微生物量碳含量增加,而干旱导致土壤微生物量碳含量降低,但当水位增加并淹没了毛茛草植株时,微生物生长显著受到抑制。

由图 4 可以看出,土壤可溶性有机碳随水分梯度的变化表现为 $W4 > W1 > W3 > W2$,淹没处理的 DOC 含

量为 $(70.23 \pm 4.84) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 比其它 3 个处理分别高出 10.13%、37.11%、45.22% 说明淹水条件下土壤可溶性有机碳含量高于相对干燥的土壤, 而与持续干旱相比, 干湿交替更有利于可溶性有机碳的释放。

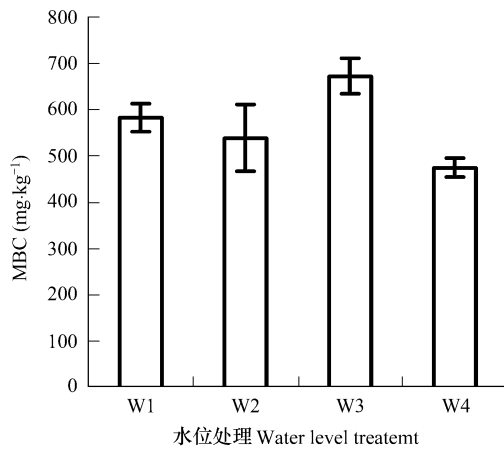


图3 湿地土壤 MBC 对水分梯度的响应

Fig. 3 Response of wetland soil MBC to water gradient

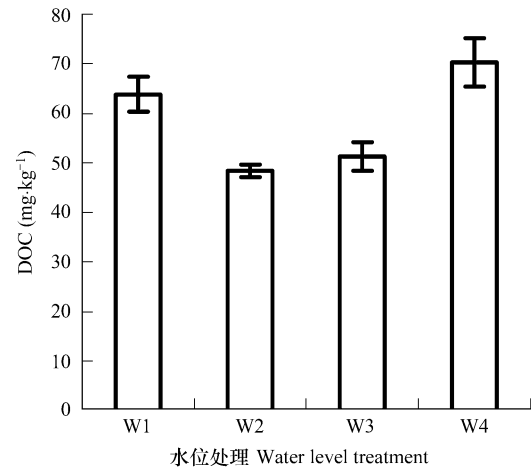


图4 湿地土壤 DOC 对水分梯度的响应

Fig. 4 Response of wetland soil DOC to water gradient

2.4 湿地土壤酶活性与活性有机碳组分及地上生物量随水分梯度变化的关系

不同水分梯度下, 土壤酶活性与毛茛草地上生物量的关系由表 1 可见。土壤酶活性与地上生物量呈正相关关系, 其中蔗糖酶、过氧化氢酶与地上生物量呈显著正相关, 脲酶活性与地上生物量呈极显著正相关。这是因为土壤酶活性来源于土壤中动物、植物和微生物细胞的分泌物及其残体的分解物^[8], 并且酶活性可以控制养分的释放而影响植物和微生物生长^[18], 因此土壤酶活性与地上植物生物量密切相关。

水分变化引起土壤微生物种群与土壤酶活性的变化, 导致物质循环转化强度改变, 因此土壤活性有机碳含量会发生相应的改变。由表 1 可见, 不同水分处理毛茛草土壤蔗糖酶、脲酶、酸性磷酸酶、过氧化氢酶活性与土壤微生物量碳含量呈正相关关系, 其中, 蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶活性与土壤微生物量碳含量呈显著正相关 ($p < 0.05$)。说明土壤酶活性与土壤微生物量碳的变化趋势相近, 这与旱田土壤的研究结果基本一致^[19]。而 4 种酶活性与土壤水溶性有机质均呈负相关关系, 并且脲酶和酸性磷酸酶活性与 DOC 呈极显著负相关关系 ($p < 0.01$), 这是因为淹水抑制了土壤酶活性, 但却增加了土壤可溶性有机碳含量。

表 1 湿地土壤酶活性与 MBC、DOC 及地上生物量的相关性

Table 1 The correlation between marsh soil enzyme activities and MBC、DOC、aboveground biomass

项目 Item	酸性磷酸酶 Acid phosphatase	蔗糖酶 Invertase	脲酶 Urease	H ₂ O ₂ 酶 Catalase
地上生物量 Aboveground biomass	0.532	0.676 *	0.795 **	0.591 *
MBC	0.385	0.668 *	0.603 *	0.628 *
DOC	-0.849 **	-0.474	-0.854 *	-0.042

$n = 12$, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

3 讨论

湿地水位梯度是一个重要的环境梯度, 水位波动是控制湿地特征的关键因子, 是湿地典型的扰动特征之一^[20]。有学者指出水流停滞的湿地或持续淹水和排水湿地具有低的生产力, 受脉冲补给的湿地通常具有较高的生产力^[21]。本研究结果表明 (图 1), 持续淹水和干旱条件下毛茛草的地上生物量低, 并且随着淹水增加到毛茛草被淹没时, 地上生物量极显著降低 ($p < 0.01$), 而水分波动下的地上生物量最高。这是因为土壤水分过多和过低均不利于土壤微生物的生长和繁衍, 减少了土壤酶的来源, 造成土壤酶活性降低, 因此限制了植物营养物质的供应, 植物生长受到限制。而湿地条件下的积水可改变微生物群落, 影响土壤酶的释放, 并在还

原条件下增加了诸如 Fe^{2+} 等抑制因子的浓度而影响土壤酶活性^[22~24]。淹水后,湿地土壤 3 种水解酶即蔗糖酶、脲酶、酸性磷酸酶活性显著低于干旱和干湿交替处理的酶活性,所以 3 种酶参与碳、氮、磷有机化合物水解为植物和微生物可利用养分的能力低,并且氮素是湿地最重要的限制性养分^[21]。与持续淹水相比,干湿交替促进了土壤酶活性,这是因为干湿交替促进了毛茛草的生长,因此根系分泌的酶量增加。不同水分处理下蔗糖酶、脲酶活性与毛茛草地上生物量呈显著或极显著正相关关系(表 1),说明提高土壤蔗糖酶和脲酶活性能够更好的促进植被生长。其他学者的研究也表明酶活性影响植物的生长发育^[25,26]。由此表明对于水解酶活性来说,湿地土壤在干旱和干湿交替条件下,酶活性要高于持续淹水和淹没条件下的酶活性,这也说明毛茛草湿地水分疏干后,水热状况等发生改变,水解酶活性增加,则土壤有机质的分解强度加大,给植物生长提供良好的氮素营养,这也是干湿交替处理毛茛草地上生物量高的一个原因。

另外,与湿地土壤持续淹水相比,干湿交替能够增加土壤微生物量碳含量,而水分淹没毛茛草时显著降低,说明干湿交替能加速土壤微生物的繁衍周期,淹水则限制了微生物生长。而淹水促进了土壤可溶性有机碳的释放。而随水分梯度变化,土壤微生物量碳与酶活性呈正相关,而可溶性有机碳呈负相关,且土壤酶活性与土壤微生物量碳的关系更为密切。

4 结论

(1) 毛茛草湿地不同土壤酶活性对水分梯度的响应不同,但 3 种水解酶—酸性磷酸酶、蔗糖酶、脲酶活性具有类似的变化规律,表现为干湿交替和较干旱条件下酶活性高于持续淹水状况的酶活性,并且随水分含量的增加酶活性降低。而过氧化氢酶活性则与 3 种水解酶活性变化规律不一致,干湿交替同样表现为促进该酶活性,但酶活性随水分含量的增加而增加。因此,湿地水分疏干及干湿交替可加速土壤有机质的分解。

(2) 与湿地土壤持续淹水相比,干湿交替能够增加土壤微生物量碳含量,而水分淹没毛茛草时显著降低,而淹水促进了土壤可溶性有机碳的释放。并且随水分梯度变化,土壤微生物量碳与酶活性呈正相关,而可溶性有机碳呈负相关,且土壤酶活性与土壤微生物量碳的关系更为密切。

(3) 干湿交替促进了毛茛草生长,当水位增加到可淹没毛茛地上植株时,生长受到显著抑制。并且土壤酶活性与毛茛草地上生物量呈正相关关系,其中蔗糖酶、过氧化氢酶与地上生物量呈显著正相关,脲酶活性与地上生物量呈极显著正相关。

References:

- [1] Lu X G. A review and prospect for wetland science. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2002, (3): 170—172.
- [2] Liu J S, Yang G S, Yu J B, *et al.* Study on Vertical Distributon of Soil Organic Carbon in Wetlands Sanjiang Plain. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(3): 5—8.
- [3] Meng X M. Wetlands and global environmental changes. *Scientia Geographica Sinica*, 1999, 19(5): 385—391.
- [4] Dick R P. Soil enzyme activities as indicators of soil quality. In: J. W. Doran, D. C. Coleman, D. F. Bezdicek, B. A. Stewart eds. *Defining Soil Quality for A Sustainable Environment*. American Society of Agronomy, Madison, WI, 1994. 107—124.
- [5] Dick R P. Soil enzyme activities as integrative indicators of soil health. In: C. E. Pankhurstl, B. M. Double, V. V. S. R. Gupta eds. *Biological Indicators of Soil Health*. CAB International, Wallingford, UK, 1997, 121—156.
- [6] Xiao-hua Y, Hang M, Zhen-hua L, *et al.* Influence of acetamiprid on soil enzymatic activities and respiration. *European Journal of Soil Biology*, 2006, 42: 120—126.
- [7] Max M-C, Wood M, Jarvis S C. A microplate flurimetric assay for the study of enzyme diversity in soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, 33: 1633—1640.
- [8] Guan S Y. *Soil Enzymology and Research Method*. Beijing: Agricultural Press, 1986. 274—323.
- [9] Coleman D C, Reid C P P, Cole C. Biological strategies of nutrient cycling in soil systems. *Advances in Ecological Research*, 1983, 13: 1—55.
- [10] Wander M M, Traina S J, Stinner B R, *et al.* The effects of organic and conventional management on biologically active soil organic matter fractions. *Soil Sci Soc Am J*, 1994, 58: 1130—1139.
- [11] Zhao L P, Jiang Y. Measure method of soil phosphatase. *Chinese Journal of Soil Science*, 1986, 17(3): 138—141.
- [12] Ghani A, Dexter M, Perrott K W. Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilization, grazing

- and cultivation. *Soil Biol. and Biochem.*, 2003, 35:1231—1243
- [13] Lu R K. *Soil Agrochemistry Analysis Method*. Beijing: Chinese Agrotechnology Press, 2000. 228—233
- [14] Wang H Y, Chen J K, Zhou J. Influence of water level gradient on plant growth, reproduction and biomass allocation of wetland plant species. *Acta Phytocologica Sinica*, 1999, 23(3): 269—274.
- [15] Zornoza R, Guerrero C, Mataix-Solera J, *et al.* Assessing air-drying and rewetting pre-treatment effect on some soil enzyme activities under Mediterranean conditions. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38: 2125—2134.
- [16] Sun R L, Zhao B Q, Zhu L S. Effects of long-term fertilization on soil its role in adjusting—controlling enzyme activities and soil fertility. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(4): 406—410.
- [17] Liang B C, Mackenzie A E, Schnitzer M, *et al.* Management—induced change in labile soil organic matter under continuous corn in eastern Canadian soils. *Biol. Fertil. Soils*, 1998, 26:88—94.
- [18] Roldán A, Salinas-García J R, Alguacil M M. Changes in soil enzyme activity, fertility, aggregation and C sequestration mediated by conservation tillage practices and water regime in a maize field. *Applied Soil Ecology*, 2005, 30:11—20.
- [19] Shen H, Cao Z H, Xu B S. Dynamics of soil microbial biomass and soil enzyme activity and their relationship during maize growth. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(4): 471—474.
- [20] Xu Z G, He Y, Yan B X, *et al.* Effects of nutrients and water level fluctuation on wetland plants. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(1): 87—92.
- [21] Lu J J, He W S, Tong C F, *et al.* *Wetland Ecology*. Beijing: Higher Education Press, 2006. 78—94.
- [22] Pulford I D, Tabatabai M A. Effect of the waterlogging on enzyme activities in soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 1988, 20: 215—219.
- [23] Freeman C, Liska G, Ostle N J, *et al.* Microbial activity and enzymic decomposition processes following peatland water table drawdown. *Plant and Soil*, 1996, 180:121—127.
- [24] Kang H, Freeman C. Phosphatase and arylsulphatase activities in wetland soils: annual variation and controlling factors. *Soil Biol. Biochem.*, 1999, 31: 449—454.
- [25] Zaidi, Almas, Khan, *et al.* Interactive effect of rhizotrophic microorganisms on growth, yield, and nutrient uptake of wheat. *Journal of Plant Nutrition*, 2005, 28: 2079—2092.
- [26] Ma Z B, Xiong S P, He J G, *et al.* Effect of nitrogen forms on rhizosphere microorganisms and soil enzyme activity under cultivation of contrasting wheat cultivars during booting and grain filling period. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(4): 1544—1551.

参考文献:

- [1] 吕宪国. 湿地科学研究进展及研究方向. *中国科学院院刊*, 2002 (3): 170~172.
- [2] 刘景双, 杨继松, 于君宝, 等. 三江平原沼泽湿地土壤有机碳的垂直分布特征研究. *水土保持学报*, 2003, 17(3): 5~8.
- [3] 孟宪民. 湿地与全球环境变化. *地理科学*, 1999, 19(5): 385~391.
- [8] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986. 274~323.
- [11] 赵兰坡, 姜岩. 土壤磷酸酶测定方法的探讨. *土壤通报*, 1986, 17(3): 138~141.
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 228~233
- [14] 王海洋, 陈家宽, 周进. 水位梯度对湿地植物生长、繁殖和生物量分配的影响. *植物生态学报*, 1999, 23(3): 269~274.
- [16] 孙瑞莲, 赵秉强, 朱鲁生. 长期定位施肥对土壤酶活性的影响及其调控土壤肥力的作用. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(4): 406~410.
- [19] 沈宏, 曹志洪, 徐本生. 玉米生长期间土壤微生物量与土壤酶变化及其相关性研究. *应用生态学报*, 1999, 10(4): 471~474.
- [20] 徐治国, 何岩, 闫百兴, 等. 营养物及水位变化对湿地植物的影响. *生态学杂志*, 2006, 25(1): 87~92.
- [21] 陆健健, 何文珊, 童春富, 等. 湿地生态学. 北京: 高等教育出版社, 2006. 78~94.
- [26] 马宗斌, 熊淑萍, 何建国, 等. 单素形态对专用小麦中后期根际土壤微生物和酶活性的影响. *生态学报*, 2008, 28(4): 1544~1551.