

不同水位梯度下湿地土壤酶活性及微生物群落变化特征

徐佳¹, 左娟容¹, 田佩冉¹, 谭小婷¹, 杨贵宇¹, 柏松^{1,2*}

(1.西南民族大学化学与环境学院, 四川成都 610041; 2.青藏高原污染控制化学与环境功能材料国家民委重点实验室, 四川成都 610041)

摘要: 全球变暖引起的湿地水位变化对湿地土壤生态系统产生了重要影响, 但关于水位变化对湿地土壤生物学特性的影响研究结果不一。本研究以三岔湖湿地为对象, 对比分析不同水位梯度(高水位: 水深20~80 cm; 中水位: 水深-30~+30 cm; 低水位: 水深-20~-80 cm)湿地土壤酶活性和微生物多样性特征, 结果表明: 不同水位条件下湿地土壤有机碳含量差异不显著, 但全氮和全磷含量存在显著差异; 中水位湿地土壤荧光素二乙酸酯(Fluorescein Dacetate, FDA)水解酶活性和脲酶活性均显著高于低水位湿地, 但其土壤磷酸酶活性与低水位湿地差异不显著; 3种水位条件下 β -葡萄糖苷酶活性无显著差异; 水位变化对湿地土壤微生物群落多样性具有显著影响, 中水位环境的微生物群落多样性显著高于高水位和低水位环境; 不同水位湿地土壤微生物优势菌群结构组成差异不大, 但相对丰度存在差异。

关键词: 湿地; 土壤微生物; 土壤酶活性; 水位变化

中图分类号: X171.1; Q938

文献标志码: A

文章编号: 2095-4271(2026)05-0480-08

Characteristics of soil enzyme activities and microbial community changes in wetlands under different water level gradients

Xu Jia¹, Zuo Juanrong¹, Tian Peiran¹, Tan Xiaoting¹, Yang Guiyu¹, Bai Song^{1,2*}

(1.School of Chemistry and Environment, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China; 2.Key Laboratory of Pollution Control Chemistry and Environmental Functional Materials for Qinghai-Xizang Plateau of National Ethnic Affairs Commission, Chengdu 610041, China)

Abstract: Water level fluctuations in wetlands caused by global warming have important impacts on wetland soil ecosystems. However, existing studies report inconsistent findings regarding the impacts of water level changes on soil biological properties in wetlands. In this study, using Sancha Lake wetland as the research object, the enzyme activities and microbial diversity characteristics were compared under different water level gradients (high water level: water depth 20 - 80 cm, medium water level: water depth -30 to +30 cm, low water level: water depth -20 to -80 cm). The results showed that the soil organic carbon content did not differ significantly among the different water levels, whereas the total nitrogen and total phosphorus content showed significant differences. Fluorescein diacetate (FDA) hydrolase activity and urease activity in wetland soil under the medium water level were significantly higher than those under the low water level, whereas soil phosphatase activity did not dif-

收稿日期: 2025-06-12

*通信作者, E-mail: songbai1240@126.com

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金项目(ZYN2023110); 西南民族大学大学生创新创业训练计划项目(S202410656144)

引用格式: 徐佳, 左娟容, 田佩冉, 等. 不同水位梯度下湿地土壤酶活性及微生物群落变化特征[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2026, 52(5): 480-487.

Xu Jia, Zuo Juanrong, Tian Peiran, et al. Characteristics of soil enzyme activities and microbial community changes in wetlands under different water level gradients [J]. Journal of Southwest Minzu University (Natural Science Edition), 2026, 52(5): 480-487.

fer significantly between the medium and low water levels. There was no significant difference in β -glucosidase activity among the three water levels. Water level changes had a significant impact on the diversity of microbial communities in wetland soil, with significantly higher microbial community diversity under the medium water level than under the high and low water levels. The composition of the dominant microbial community structures in wetland soils showed little difference among the different water levels, whereas the relative abundances of these communities differed.

Keywords: wetland; soil microorganism; soil enzyme activity; water level change

湿地作为陆地生态系统的重要碳库,全球土壤有机碳总量约30%以上储存于湿地之中,其碳储量超过 6×10^{11} 吨,在缓解全球气候变化方面具有关键作用^[1].近年来,受气候变化和开沟排水等人为干扰影响,全球许多湿地正面临水位持续下降和波动加剧等问题.湿地水位变化涉及水位高程、淹水时长与淹水频率等多重水文要素的改变,这些变化通过直接或间接途径深刻影响着湿地系统的结构与功能.

水位变化对湿地生态系统的影响已成为学术界关注的热点.已有大量研究聚焦于水位变化对湿地土壤理化性质及生物学特性的影响.研究表明,水位下降通常增加土壤氧气含量,促进有机质好氧分解,从而改变土壤的化学特性^[2-5].Surich等发现湿地水位降低会引起土壤有机碳和全氮含量显著下降^[6];徐宁泽等基于沼泽湿地的研究表明,土壤氮、磷等养分含量随水位下降而迅速流失^[7].相对于土壤化学性质的响应,水位波动对土壤酶活性的影响更为复杂,不同酶类对水文变化的响应模式各异^[8].肖烨等研究指出,湿地土壤纤维素酶活性在平水期最高,而过氧化氢酶活性则在丰水期更高^[9];陈港等近期研究发现,湿地水位下降会导致土壤中参与碳循环的关键酶活性总体呈上升趋势^[10].

湿地土壤微生物群落对水文条件变化极为敏感.水位变化可通过调控水分状况、氧化还原电位、温度及底物可利用性等,直接或间接影响微生物的生长、代谢及群落构建^[11].多项研究表明,水位下降会显著抑制微生物活性并降低细菌多样性^[12];高水位湿地的微生物群落结构通常表现出更高的多样性指数^[13].新近研究进一步揭示,水位下降后湿地土壤中变形菌门、酸杆菌门等关键菌群的相对丰度显著降低,整体物种丰富度也随之下降^[10].尽管已有研究普遍认为水位是调控湿地土壤微生物群落结构、活性及功能的关键环境因子,但在不同湿地类型,如沼泽湿地、高寒湿地、湖滨湿地

等中,微生物对水位变化的响应模式既有共性也存在特异性,目前相关规律尚未得到系统性阐明.

湖滨湿地作为湖泊与陆地之间的生态过渡带,通常具有面积狭小、水文波动强烈的特点,其水位动态同时受湖泊季节性涨落和短期气象事件的双重驱动,水位波动较其他湿地类型更为频繁和剧烈.然而,目前关于湖滨湿地水位动态如何影响土壤酶活性及微生物群落多样性,其内在作用机制尚不明晰,相关研究仍较为缺乏.三岔湖是我国西南地区典型的浅水型湖泊,平均水深8.3 m,其周边发育有梯度特征显著的湖滨湿地,为研究水位波动下湿地土壤微生物响应机制提供了理想场所.本研究以三岔湖湿地为对象,通过对比分析不同水位梯度下土壤酶活性与微生物多样性的变化特征,探讨水位变化对湿地土壤生物学特性的影响,为揭示气候变暖背景下湿地生态系统的演变过程提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省简阳市三岔镇三岔湖湿地(东经 $104^{\circ}11'23''$ 至 $104^{\circ}53'36''$,北纬 $30^{\circ}5'27''$ 至 $30^{\circ}38'48''$),海拔约780 m.该区属中亚热带季风气候,年均温约 17°C ,湿地面积约 2.3 km^2 .三岔湖湿地湖滨带多为淤积土,质地黏重,湿地边缘常见潜育化沼泽土.湖滨带水生植物稀疏,挺水带优势植物以芦苇(*Phragmites australis*)和香蒲(*Typha orientalis*)为主.受不同高程生态环境与长期水位变化的共同作用,湿地植被呈现明显的带状分布格局.本研究选取距离道路较远且垂直于湖岸带、具有显著水位差异的湿地作为研究样地.

1.2 样品采集

于2024年3月和7月在三岔湖湿地,依据水位梯度选取3块典型样地,分别代表高水位(H)、中水位

(M)与低水位(L)生境. 高水位样地(H)常年处于淹水状态,地表以上水层深度为20~80 cm,平均约50 cm;中水位样地(M)水位在地表上下30 cm范围内波动;低水位样地(L)长期处于非淹水状态,地表以下水位埋深为20~80 cm,平均约50 cm. 每一样地内设置4个5 m×5 m样方,采用五点梅花取样法,在各样方内使用不锈钢土钻采集10~30 cm表层土壤样品. 采集后剔除植物残体与根系,将土壤均匀混合,并分装为两份:一份用于测定土壤化学指标;另一份置于-80℃冰箱中冷冻保存,用于后续土壤生物学指标分析.

1.3 土壤化学性质及酶活性分析

土壤pH用酸度计(pHS-25,上海雷磁)测定,土水比为1:5. 有机碳(Soil Organic Carbon, SOC)含量采用重铬酸钾氧化-分光光度法测定;全氮(Total Nitrogen, TN)采用全自动凯氏定氮仪(ZDDN-11,拓普云农)测定;全磷(Total Phosphorus, TP)采用H₂SO₄-HClO₄消煮钼锑抗-分光光度法(UV2600,日本Shimadzu)测定;荧光素二乙酸酯(FDA)水解酶采用分光光度法测定;脲酶采用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定; β -葡萄糖苷酶采用硝基酚比色法测定;磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法测定.

1.4 土壤微生物多样性分析

利用MP-soil试剂盒提取微生物基因组总DNA. 利用1.0%琼脂糖凝胶电泳测定DNA的纯度和浓度. 用引物扩增细菌16S rRNA基因的高变异区V3-V4. 所有样品均为一式三份的扩增,从2%琼脂糖凝胶中提取PCR产物,使用AxyPrep DNA Gel Extraction Kit进行纯化,并使用Quantus™ Fluorometer进行定量.

1.5 数据处理与分析

本研究采用SPSS 23.0软件对实验数据进行正态性检验和方差齐性检验. 通过单因素方差分析(ANOVA)对不同水位梯度下土壤化学指标和酶活性指标的差异进行显著性检验. Alpha多样性分析基于去噪后获得的扩增子序列变体(ASV)丰度表进行计算,涵盖Sobs、Shannon、Simpson、Ace、Chao1指数. Beta多样性分析采用主成分分析(PCA)对群落结构进行降维可视化,并通过置换多元方差分析(PERMANOVA)检验不同水位梯度间细菌群落结构的显著性差异,采用Duncan法进行组间多重比较. 所有图表的绘制均在GraphPad Prism 10.0软件中完成.

2 结果与分析

2.1 不同水位梯度湿地土壤化学特性

在3种水位条件下,湿地土壤的各项化学指标存在明显差异(表1). 高水位湿地土壤pH显著高于中水位湿地(高约7.11%),但与低水位湿地间无显著差异. 土壤有机碳(SOC)含量虽随水位变化呈现不同趋势,但差异未达到显著水平($P>0.05$). 水位变化对土壤全氮和全磷含量具有一定影响. 高水位湿地与低水位湿地土壤全氮含量无显著差异,但与中水位湿地相比显著降低了63.17%($P<0.05$). 3种水位条件下土壤全磷含量差异较大,全磷含量由高到低依次为中水位>低水位>高水位.

表1 不同水体梯度下湿地土壤化学特性

Table 1 Soil chemical properties of wetlands under different water level gradients

湿地类型	pH	有机碳 SOC/%	全氮 TN/g·kg ⁻¹	全磷 TP/mg·kg ⁻¹
低水位湿地(L)	7.94±0.36 ^{ab}	16.68±1.22 ^a	10.36±2.47 ^{ab}	57.12±2.83 ^b
中水位湿地(M)	7.87±0.14 ^b	6.66±0.59 ^a	13.87±2.27 ^a	76.46±5.33 ^a
高水位湿地(H)	8.43±0.06 ^a	4.65±1.36 ^a	5.11±0.77 ^b	40.32±6.42 ^c

2.2 不同水位梯度湿地土壤酶活性特征

目前,关于水位变化对湖滨湿地土壤酶活性影响的研究相对较少,且已有研究结果之间存在较大不一致性. 本研究结果表明(图1),水位变化对三岔湖湿地土壤中FDA水解酶、磷酸酶及脲酶活性具有不同程度的影响,而对 β -葡萄糖苷酶活性影响不显著. 总体来看,中水位湿地的土壤酶活性普遍高于低水位和高水位湿地. 具体而言,中水位湿地土壤FDA水解酶活性显著高于低水位湿地($P<0.05$),但与高水位湿地之间无显著差异. 脲酶活性变化趋势与FDA水解酶相似,中水位湿地脲酶活性较低水位湿地高79.55%,而与高水位湿地差异不显著. 磷酸酶活性则呈现不同规律:中水位湿地与低水位湿地之间差异不显著,但显著高于高水位湿地(高59.31%, $P<0.05$). 3种水位梯度下土壤 β -葡萄糖苷酶活性均无显著差异($P>0.05$),表明水位变化对该酶活性影响较小. 综上,水位变化对4种土壤酶活性的影响存在差异,其中对FDA水解酶、磷酸酶和脲酶活性的影响较为明显,而对 β -葡萄糖苷酶的影响较小.

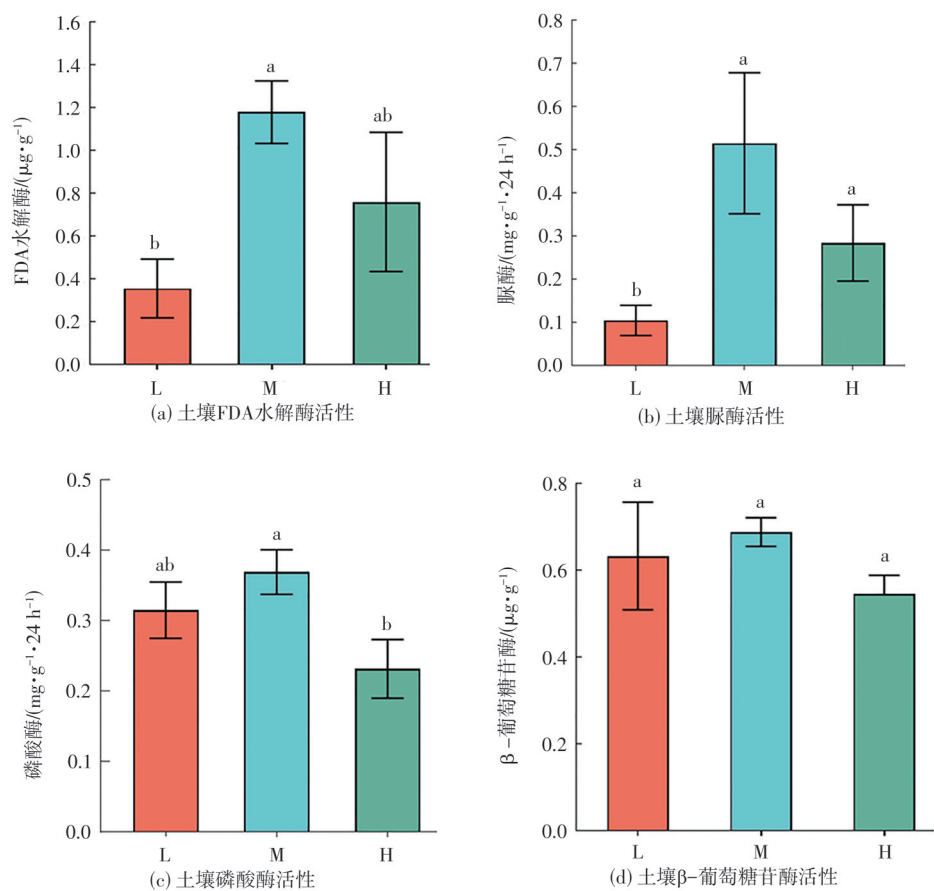


图1 不同水位条件下湿地土壤酶活性特征

Fig.1 Characteristics of soil enzyme activities in wetlands under different water levels

2.3 不同水位湿地土壤微生物多样性特征

2.3.1 土壤微生物 Alpha 多样性

不同水位条件下湿地土壤微生物物种数量存在差异(表2). 物种总数由高到低依次为高水位(4 359种)、中水位(4 228种)、低水位(4 054种),并随水位降低呈递减趋势. 高水位湿地土壤Simpson指数显著高于低水位和中水位湿地($P<0.05$),但低水位与中水位湿地之间Simpson指数差异不显著($P>0.05$). 高水位湿地土

壤Shannon指数显著低于中水位湿地($P<0.05$),但与低水位湿地差异不显著. 此外,三种水位湿地土壤的Sobs指数、Ace指数和Chao1指数均无显著差异($P>0.05$). 上述结果表明,水位变化对湿地土壤微生物群落多样性具有显著影响,但对群落丰富度影响不明显. 在三岔湖湖滨湿地中,中水位环境具有更高的微生物群落多样性,而高水位与低水位湿地间的微生物多样性无明显差异.

表2 土壤细菌 Alpha 多样性指数

Table 2 Alpha diversity index of soil bacteria

湿地类型	Sobs 指数	Shannon 指数	Simpson 指数	Ace 指数	Chao1 指数
低水位湿地(L)	2 695±84 ^a	6.77±0.05 ^{ab}	0.002 5±0.000 2 ^b	3 365±153 ^a	3 375±157 ^a
中水位湿地(M)	2 851±117 ^a	6.81±0.06 ^a	0.002 7±0.000 3 ^b	3 545±195 ^a	3 528±214 ^a
高水位湿地(H)	2 749±218 ^a	6.62±0.11 ^b	0.003 5±0.000 6 ^a	3 565±227 ^a	3 565±214 ^a

2.3.2 土壤微生物 Beta 多样性

3种水位梯度下湿地土壤微生物群落组成存在显著差异($R^2=0.332\ 2$, $P=0.003$)(图2). 在门水平

上,不同类群的响应模式有所区别. 放线菌门(*Actinobacteriota*)在各水位组间差异显著($P=0.007$);芽单胞菌门(*Gemmatimonadota*)在低水位

与高水位湿地间差异不显著,但与中水位湿地相比差异显著;脱硫菌门(*Desulfobacterota*)在高水位与

中水位湿地间差异不明显,但显著区别于低水位湿地。

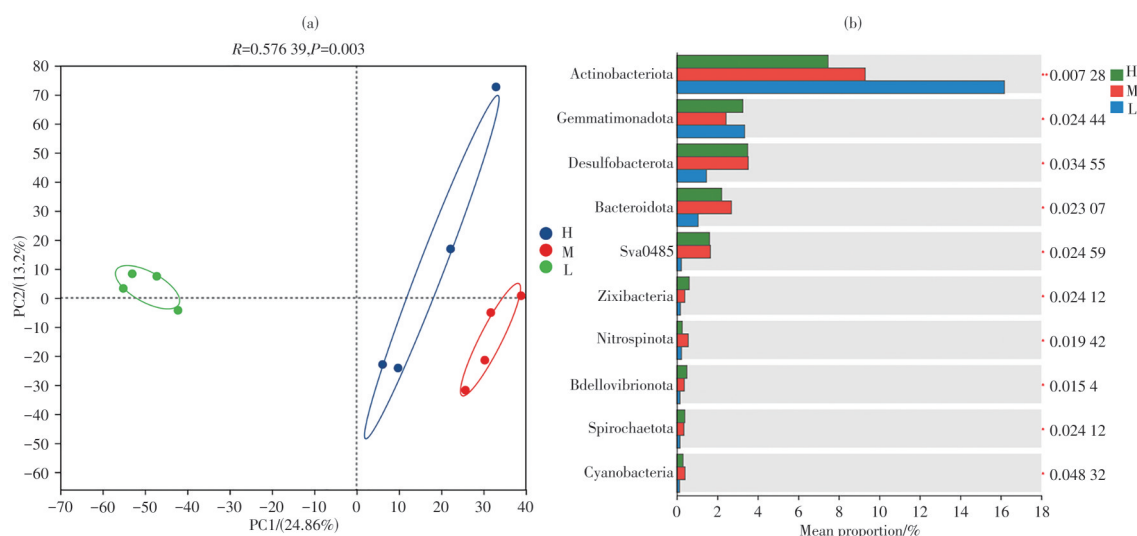


图2 土壤微生物 Beta 多样性(a) 及其群落组成的差异分析(b)

Fig.2 Beta diversity of soil microorganisms (a) and analysis on the difference of soil microbial community composition (b)

2.3.3 土壤微生物群落组成差异分析

本研究结果表明,高水位、中水位与低水位湿地土壤中的优势菌群组成基本一致(图3),主要为绿弯菌门(*Chloroflexi*)、变形菌门(*Proteobacteria*)及酸杆菌门(*Acidobacteriota*)。其中,绿弯菌门在3种水位条件下占比均为最高,分别占各水位样地细菌群落的22.11%、25.45%和22.37%;变形菌门次之,相对丰度分别为20.00%、17.56%和15.40%;酸杆菌门相对丰度分别为11.72%、10.94%和16.45%。值得注意的是,水位变化影响了部分菌群的相对丰度:随着水位降低,硝化螺旋菌门(*Nitrospirota*)的相对丰度显著下降,而放线菌门(*Actinobacteriota*)则有所上升。此外,各优势菌门在不同水位条件下的相对丰度呈现差异。例如,绿弯菌门在中水位湿地中相对丰度最高,变形菌门在高水位湿地中最高,而酸杆菌门在低水位湿地中最高。其余相对丰度较低的细菌类群在不同水位间变化不明显。

2.4 与环境因子的RDA分析

通过不同水位梯度下土壤化学性质、酶活性与微生物群落的RDA分析(图4),我们发现RDA1和RDA2共同解释了土壤微生物群落组成变异的49.5%(RDA1:35.12%;RDA2:14.38%)。

在众多环境因子中,土壤全氮是土壤微生物群落

组成变化的主要化学因子,且对中水位湿地土壤影响较大,而土壤有机碳和全磷对微生物群落的影响较小。土壤脲酶和FDA水解酶活性与微生物群落结构的关联最为显著,而磷酸酶和 β -葡萄糖苷酶活性的解释力相对较弱。需要指出的是,酶活性本身是微生物代谢功能的表现,其与群落结构的强相关性可能反映了微生物在响应水位变化时,其功能活性与群落组成之间存在协同变化。因此,这些酶活性指标可视为微生物功能响应的敏感指标,其与群落结构的共同变异可能由水位梯度所驱动的环境因子(如土壤湿度、养分有效性等)所调控。在高水位和低水位湿地土壤中,微生物群落结构与所测环境因子之间的关联性均较弱。

3 讨论

3.1 不同水位梯度湿地土壤化学特性

研究发现,水位升高会显著提高土壤pH,这与王钰婷等关于淹水后土壤pH上升的研究结果相符^[14]。水位降低后湿地土壤全氮含量显著增加,该结果与刘石宁等(2023)的研究结论一致^[15]。其可能原因在于水位下降引起了湿地植被群落结构的改变,部分湿生或水生植物衰退,而陆生植物比例上升,进而促进凋落物产量增加;同时,较低的水位有利于凋落物在土

活性显著高于低水位湿地,这与周际海等的研究结果存在一定差异。周际海等研究指出,土壤含水量升高会抑制微生物有氧呼吸促使其酶活性减弱^[18],因而水分含量高的土壤中 FDA 水解酶活性相对较低^[19]。Bonnett 等^[20]研究结果显示,较高的土壤水分含量对应较高的 β -葡萄糖苷酶活性。但在本研究中, β -葡萄糖苷酶活性在高、中、低水位梯度下未呈现显著差异。原因可能是 3 种湿地的水位均维持在土壤氧化还原过渡带(水位距地表-50 cm 至+50 cm),未形成强烈的氧化-还原界面,在该水位梯度范围内,水分尚未成为限制 β -葡萄糖苷酶活性的关键因子,其活性主要受其他稳定因素的调控。土壤酶活性是多重环境因子共同作用的结果,水位变化会同步改变土壤氧含量、温度、pH 或有机质组成等,这些因子也会对 β -葡萄糖苷酶活性产生抵消性影响。例如高水位虽增加水分,但可能导致缺氧,从而抑制好氧微生物的酶合成;而低水位虽水分较低,但可能通过提高氧分压和温度而维持酶活性,使得三者间净效应不显著^[20-21]。

3.3 不同水位湿地土壤微生物多样性特征

本研究结果显示,中水位湿地微生物多样性显著高于低水位及高水位湿地,这与张洪霞等^[22]的研究结论存在差异;孙彩丽等^[23]亦指出,较高水位条件有助于促进微生物生长。刘岳燕等^[24]研究进一步表明,不同水分条件下湿地土壤微生物群落多样性存在显著差异,这与微生物能够通过调整自身群落结构以适应环境变化的机制有关^[16]。由此可见,关于水位变化对微生物群落的影响,已有研究结果仍存在一定分歧。例如, Yang 等^[25]发现不同水位波动区域之间土壤菌群多样性无显著差异;刘亚军等^[26]的研究也显示细菌群落受淹水深度的直接影响较小;另有研究表明,中等水位梯度下土壤菌群丰度及多样性更高^[27]。这些不一致的结果说明,水位变化对土壤微生物群落的影响可能受多因素调控。除水文条件外,湿地植物根系分泌物、土壤氧化还原状态以及养分有效性等均可能对细菌群落结构与功能产生重要影响^[28-29],这也是导致不同研究间结果差异的原因之一。

在微生物群落组成方面,酸杆菌门(*Acidobacteriota*)相对丰度在低水位湿地中最高,绿弯菌门(*Chloroflexi*)则在中水位环境下最高,该趋势与呼唤等^[30]的研究结果一致。通常认为,高水位厌氧环境会抑制好

氧微生物的代谢活动^[31],而中水位条件更有利于兼性厌氧菌(如绿弯菌门)的生长^[32]。尽管有研究指出变形菌门(*Proteobacteria*)相对丰度随水位上升而降低^[33],但本研究中并未观察到一致规律,这可能与变形菌门内不同类群处于不同生长阶段时对水位变化的响应差异有关。

4 结论

本研究探讨了 3 种水位变化对湖滨湿地土壤酶活性及微生物群落组成的影响,结果表明:(1)水位变化对土壤养分含量的影响存在差异。土壤有机碳含量在水位梯度间未呈现显著变化,但全氮与全磷含量对水位变化响应明显。中水位湿地土壤全氮含量显著高于高水位湿地,中水位湿地全磷含量显著高于低水位和高水位湿地。(2)中水位条件有利于维持较高的土壤酶活性。中水位湿地土壤中 FDA 水解酶与脲酶活性均显著高于低水位湿地, β -葡萄糖苷酶活性则未受水位变化明显影响。(3)水位变化显著改变了微生物 Alpha 多样性,中水位环境具有更高的微生物群落多样性。尽管 3 种水位梯度下土壤在门水平上的优势菌群组成相似,但其相对丰度随水位变化呈现规律性差异,反映出水位通过改变生境条件对微生物群落结构具有重要调控作用,部分土壤酶活性及微生物多样性均对水位变化表现出不同程度的响应。本研究可为湿地水文调控与土壤生态功能协同管理提供科学依据。

参考文献

- [1]Zhang Y M, Naafs B D A, Huang X Y, et al. Variations in wetland hydrology drive rapid changes in the microbial community, carbon metabolic activity, and greenhouse gas fluxes[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2022, 317: 269-285.
- [2]Tian L Q, Wu G P, Chi S Y, et al. Water level fluctuation regulated the effect of bacterial community on ecosystem multifunctionality in Poyang Lake wetland [J]. *Journal of Environmental Management*, 2025, 373: 123965.
- [3]Morelle J, Parlanti E, Lecarpentier T, et al. Impact of water level management on organic carbon availability and nitrogen transformations in wetland sediments [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 947: 174643.
- [4]赵仕博. 三江平原沼泽湿地植被-土壤系统对水位变化的响应研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2024.

- [5] Liu L F, Chen H, Jiang L, et al. Water table drawdown reshapes soil physicochemical characteristics in Zoige peatlands[J]. *Catena*, 2018, 170: 119-128.
- [6] Säurich A, Tiemeyer B, Don A, et al. Drained organic soils under agriculture-The more degraded the soil the higher the specific basal respiration[J]. *Geoderma*, 2019, 355: 113911.
- [7] 徐宁泽, 赵光影, 臧淑英, 等. 小兴安岭沼泽土壤溶解性有机碳含量变化特征[J]. *湿地科学*, 2016, 14(1): 7-11.
- [8] Wei J Q, Li X Y, Liu L, et al. Radiation, soil water content, and temperature effects on carbon cycling in an Alpine swamp meadow of the northeastern Qinghai - Tibetan Plateau[J]. *Biogeosciences*, 2022, 19(3): 861-875.
- [9] 肖烨, 黄志刚, 肖菡曦, 等. 不同水位时期东洞庭湖湿地土壤微生物生物量碳氮和酶活性变化[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(8): 2958-2966.
- [10] 陈港. 模拟地下水下降对川西北高寒湿地土壤有机碳组分及微生物群落的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2024.
- [11] 李欣. 大兴安岭多年冻土区沼泽湿地土壤微生物群落及酶活性特征研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2023: 11-12.
- [12] Urbanová Z, Bárta J. Effects of long-term drainage on microbial community composition vary between peatland types[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 92: 16-26.
- [13] 邹锋. 蚌湖湿地土壤微生物群落结构和功能活性对年际水位变化的响应[D]. 南昌: 南昌大学, 2018.
- [14] 王钰婷, 徐志伟, 孙德敬, 等. 水位恢复对排水泥炭沼泽土壤酶活性的影响[J]. *生态学杂志*, 2022, 41(10): 1940-1947.
- [15] 刘石宁, 徐志伟, 张云萍, 等. 白江河天然和排水泥炭沼泽中4种灌木碳、氮和磷的生态化学计量学特征[J]. *湿地科学*, 2020, 18(2): 244-250.
- [16] 刘善江, 夏雪, 陈桂梅, 等. 土壤酶的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(21): 1-7.
- [17] 盛宣才, 邵学新, 吴明, 等. 水位对杭州湾芦苇湿地土壤有机碳、氮、磷含量的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2015, 31(5): 718-723.
- [18] 周际海, 唐嘉婕, 郜茹茹, 等. 土壤水分含量对石油污染土壤微生物活性的影响[J]. *南昌工程学院学报*, 2019, 38(6): 27-32.
- [19] 杜瑞英, 唐明灯, 艾绍英, 等. 含水量对Cd污染菜地土壤中微生物多样性的影响[J]. *安全与环境学报*, 2013, 13(2): 1-4.
- [20] Bonnett S A F, Ostle N, Freeman C. Seasonal variations in decomposition processes in a valley-bottom riparian peatland[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 370(2-3): 561-573.
- [21] 贺灵, 向武, 孙兴庭, 等. 泥炭沼泽土壤酶活性对水热条件变化的响应及其与CO₂释放通量的关系——以小兴安岭地区为例[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(6): 2326-2333.
- [22] 张洪霞, 郑世玲, 魏文超, 等. 水分条件对滨海芦苇湿地土壤微生物多样性的影响[J]. *海洋科学*, 2017, 41(5): 144-152.
- [23] 孙彩丽. 根际微生物对植物竞争和水分胁迫的响应机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [24] 刘岳燕, 姚槐应, 黄昌勇. 水分条件对水稻土壤微生物群落多样性及活性的影响[J]. *土壤学报*, 2006, 43(5): 828-834.
- [25] Yang F, Zhang D D, Wu J J, et al. Anti-seasonal submergence dominates the structure and composition of prokaryotic communities in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 663: 662-672.
- [26] 刘亚军. 湿地土壤微生物群落结构和功能对水分条件变化的响应[D]. 南昌: 南昌大学, 2017.
- [27] 王鹏, 陈波, 张华. 基于高通量测序的鄱阳湖典型湿地土壤细菌群落特征分析[J]. *生态学报*, 2017, 37(5): 1650-1658.
- [28] Zhang J, Wang Q, Fan J L, et al. Comparisons of microbial abundance and community among different plant species in constructed wetlands in summer [J]. *Ecological Engineering*, 2015, 82: 376-380.
- [29] 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.
- [30] 呼唤, 李丹蕾, 王玉莹, 等. 富磷湖滨湿地底泥细菌群落结构及多样性对水位变化的响应[J]. *环境化学*, 2021, 40(5): 1452-1463.
- [31] 杨桂生, 宋长春, 王丽, 等. 水位梯度对小叶章湿地土壤微生物活性的影响[J]. *环境科学*, 2010, 31(2): 444-449.
- [32] 李媛媛. 采煤塌陷地泥浆泵复垦土壤微生物多样性及土壤酶活性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- [33] 杨文焕, 张元, 王志超, 等. 寒旱区湖泊沉积物中固氮微生物群落特征——以包头南海湖为例[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(6): 2674-2682.

(责任编辑:和力新,殷锋,付强,张阳,肖丽;英文编辑:郑玉才,周序林)