

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.10.002

干湿交替背景下排水沟渠底质磷形态及释放风险分析

那东坡, 李如忠, 黄从欣

(合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:文章针对巢湖流域的农田、村落和林地 3 种用地类型, 分别各自选取 3 种代表性排水沟渠, 采集干涸状态的沟渠底质, 开展室内淹水模式的底质磷转化模拟培养实验, 解析干湿交替情形下沟渠底质磷形态及释放风险变化特征。结果表明: 3 种排水沟渠都表现出覆水初期底质总磷(total phosphorus, TP)质量比下降, 而后呈现逐步回升的变化态势; 培养前、后底质无机磷(inorganic phosphorus, IP)中铁铝结合态磷(Fe/Al-P)质量比占比变化较为明显; 培养过程中各时间点底质与初始干涸状态底质磷形态差异程度总体较为显著, 特别是 TP、IP、Fe/Al-P 和不稳定性磷($\text{NH}_4\text{Cl-P}$)。此外, 干湿交替使底质磷平衡质量浓度(equilibrium phosphate concentration, EPC_0)上升, 提高了排水沟渠底质磷释放风险水平, 意味着干湿交替可能通过底质磷形态及其理化性质变化影响沟渠底质磷释放。

关键词:干湿交替; 底质; 磷形态; 磷释放风险; 排水沟渠

中图分类号: X522

文献标志码: A

文章编号: 1003-5060(2025)10-1302-07

Analysis of phosphorus forms and release risk of drainage ditch sediment under the background of wetting-drying alternation

NA Dongpo, LI Ruzhong, HUANG Congxin

(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: For the three land types in the Chaohu Lake basin, the farmland, village, and woodland, three representative drainage ditches were selected from each category. The dried-up sediment from these ditches was collected for the simulation experiment of sediment phosphorus transformation in indoor flooding mode. The variation characteristics of phosphorus forms and release risk of ditch sediment under the wetting-drying alternation were analyzed. Results showed that for the three types of drainage ditches, the content of total phosphorus (TP) in sediment decreased at the initial stage of water mulching and then gradually increased, and the proportion of iron-aluminum bound phosphorus (Fe/Al-P) in sediment inorganic phosphorus (IP) changed obviously before and after culture. There were significant differences in phosphorus forms between initial dried-up sediment and sediment at different times, especially TP, IP, Fe/Al-P and $\text{NH}_4\text{Cl-P}$. In addition, the wetting-drying alternation increased the equilibrium phosphate concentration (EPC_0) in the sediment, which increased the risk level of phosphorus release from the sediment. This means that the wetting-drying alternation may affect the phosphorus release from the sediment by changing the phosphorus forms and physiochemical properties of the sediment.

Key words: wetting-drying alternation; sediment; phosphorus form; phosphorus release risk; drainage ditch

磷是水体富营养化的重要限制因子。排水沟渠是农业活动和生活排水的重要通道, 具有汇集、输送及削减氮磷负荷的功能^[1], 对调节下游水体水质起着重要作用^[2]。20 世纪 90 年代以来, 欧

收稿日期: 2024-12-08; 修回日期: 2024-12-28

基金项目: 安徽省重点研究与开发计划资助项目(202004j07020005)和安徽省自然科学基金资助项目(2308085ME190)

作者简介: 那东坡(1998—), 男, 安徽宿州人, 合肥工业大学硕士生;

李如忠(1970—), 男, 安徽蚌埠人, 博士, 合肥工业大学教授, 博士生导师, 通信作者, E-mail: lrz1970@163.com.

美发达国家陆续开展了河流流域养分滞留和循环研究计划,推动了包括排水沟渠在内的源头小河流氮磷滞留的研究。近年来,在生态清洁小流域综合治理和建设工作的推动下,我国源头小河流水生态环境问题研究日益增多,排水沟渠氮磷滞留的环境生态功能逐步受到关注^[3-6]。

作为农业径流中悬浮颗粒物和溶解有机质富集的主要场所,农田排水沟渠也是众多微生物活动和生物地球化学过程的重要场地。村落、林地排水沟渠也具有类似特点。总体上,沟渠中磷素的去除主要通过沉积物吸附、植物吸收、微生物同化等途径实现的,而且不同形态磷的迁移、转化能力和生物有效性往往也不相同。干湿交替或转化过程极大地改变沟渠底质的环境条件,从而成为影响磷在底质-水界面迁移转化和释放风险的重要因素^[7-9]。研究发现干燥情形能够明显提高底质对磷的吸附力^[10-12]。

排水沟渠数目众多、分布广泛,在全球气候变化异常的大背景下,沟渠呈现出干湿交替或转化现象愈发频繁^[13]。因此,深入探究干湿交替或转化对排水沟渠底质磷形态的影响及其生态环境意义和对准确估算河道磷素污染负荷、科学制定流域面源污染控制策略都具有重要参考价值。本文以巢湖流域为研究对象,利用室内淹水模式的底质磷转化模拟培养实验,开展干湿交替背景下农田、村落和林地排水沟渠底质磷形态及其释放风险分析,以期为汇流区面源污染控制和生态清洁小流域建设提供依据。

1 研究区概况

巢湖是水体富营养化较严重的湖泊水体,磷素限制性较为突出。合肥是巢湖流域最大城市,也是湖泊氮磷污染负荷的最大提供者。该区域地处中纬度地带,属亚热带季风性湿润气候,四季分明,年均气温 15.7 °C,年均降水量约 1 000 mm。南淝河是合肥市境内最大河流,也是水污染负荷汇入巢湖的主要河流通道。南淝河流域土地利用类型多样,其中农业农村地区的面源污染不容忽视。

针对农田、村落和林地 3 种用地类型,各选取 3 种代表性排水沟渠,分别命名为 A1~A3、B1~B3 和 C1~C3。其中:农田排水沟渠两侧主要种植旱地农作物和蔬菜;村落排水沟渠都大致分布于村落道路两旁,周边植物主要有杨树、柳树、矮灌木及杂草等;林地排水沟渠位于城市边缘景观

公园内,周边树种主要有雪松、水杉、樟树和银杏等景观树种。

2 材料与方法

2.1 实验设计

2.1.1 处理设置及样品采集

2023 年 3 月下旬(春季),针对干涸状态的 9 条排水沟渠,分别布设 3 个采样点,采集表层 0~10 cm 新鲜底质样,均匀混合后代表该沟渠。将样品放置在实验室阴凉干燥处自然风干,研磨并过 100 目筛后,取适量底质进行氮磷形态、pH 值和有机质(organic matter, OM)质量浓度测定,其余干样装于自封袋中,用于培养实验。

2.1.2 底质培养方案

称取 600 g 干样,将其移入高度为 15 cm、直径为 10 cm 的透明 PVC 塑料罐中,加入去离子水,使其达到 2 cm 淹水状态。为模拟自然环境下沟渠淹水土柱的黑暗状态,对淹水下方塑料罐侧面进行遮光处理,并置于室外进行培养。由于培养过程中大约 10 d 时上覆水趋于干涸,因此分别对淹水培养后 0、5、10 d 测定上覆水 pH 值、温度 T 、电导率 κ 、溶解氧(dissolved oxygen, DO)和总溶解性固体(total dissolved solids, TDS),并在淹水培养后的 0、5、10、15、20 d 对底质柱进行表层采样(采用五点采样法),其中 20 d 底质基本完全处于干涸状态。

2.2 样品分析与测定

2.2.1 底质磷形态测定

采用修正的 Hedley 土壤磷素分级方法^[14],将底质磷划分为铁铝结合态磷(Fe/Al-P)、碳酸钙结合态磷(Ca-P)、无机磷(inorganic phosphorus, IP)、有机磷(organic phosphorus, OP)和总磷(total phosphorus, TP)等形态,采用标准测量测试法分析测试磷的赋存形态。采用 3.5 mol/L HCl 提取剂测定 TP、1 mol/L HCl 提取剂测定 IP、1 mol/L NaOH 提取剂测定 Fe/Al-P 和 Ca-P,并将 TP 与 IP 的质量比差值作为 OP 质量比。采用 1 mol/L NH_4Cl 震荡 0.5 h 测定活性磷。每一步提取后,以 4 000 r/min 转速离心 20 min,然后取适量上清液,采用钼锑抗分光光度法测定相应的磷质量浓度。

2.2.2 底质其他理化指标测定

利用质量与体积比为 5 : 1 的底质和水混合物测定 pH 值;OM 质量分数由 550 °C 下灼烧 4 h 后的质量差测定;采用碱性过硫酸碱消解法测定

总氮(total nitrogen, TN);硝态氮(NO_3^- -N)和氨氮(NH_4^+ -N)加 2 mol/L 氯化钾溶液浸提后离心,再分别以紫外分光光度法和可见光分光光度法进行测定。

2.2.3 底质磷平衡质量浓度的确定

设置 0、0.5、1.0、5.0、10.0、15.0 mg/L 等 6 种不同初始质量浓度的磷酸二氢钾溶液。向每个 50 mL 离心管分别加入 0.4 g 底质干样,加入 20 mL 相应磷质量浓度溶液摇匀。将离心管加塞后置于 25 °C、200 r/min 条件下,恒温振荡 24 h。振荡结束后,4 000 r/min 转速离心 5 min;分别取上清液 10 mL 置于 50 mL 比色管中,定容到 50 mL 标线刻度,并加入 1 mL 抗坏血酸和 2 mL 钼酸盐溶液,加塞振荡摇匀,静置 15 min 后,利用分光光度计(700 nm 处吸光度)测定磷酸盐质量浓度。根据上述方案测定的磷酸盐质量浓度,采用 Langmuir 等温吸附模型确定底质磷平衡质量浓度(equilibrium phosphate concentration, EPC_0)^[15]。

2.3 统计与分析

采用 t 检验法,解析整个培养过程中底质与初始底质不同磷形态差异的显著性;采用基于 Origin 软件的偏最小二乘回归分析技术解析沟渠底质初始理化指标对底质 EPC_0 的重要性。相关

数据处理与图形绘制由 Excel、Origin 和 SPSS 软件完成。

3 结果与讨论

3.1 排水沟渠底质理化性质

3 种类型排水沟渠底质的 pH 值为 7.64~8.59,总体呈弱碱性;底质 OM 的质量分数为 3.47%~5.59%,总体偏低,且以林地沟渠相对较高。3 种类型排水沟渠底质 TN、 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 质量比均表现出农业沟渠最高,村落沟渠次之,林地沟渠最低的变化趋势。农田、村落、林地沟渠底质 TN 质量比均值分别为 2 806、1 660、1 465 mg/kg; NH_4^+ -N 质量比均值分别为 425.95、237.59、214.51 mg/kg; NO_3^- -N 质量比均值分别为 60.85、36.54、30.66 mg/kg。农田排水沟渠底质磷素处于中度污染水平,村落和林地沟渠均属于轻度污染水平。本文中农田、村落和林地沟渠底质 IP 质量比均值分别为 869.38、204.54、193.12 mg/kg; Fe/Al-P 质量比均值分别为 149.79、110.56、113.58 mg/kg。

3.2 干湿交替培养过程中上覆水水质变化

干湿交替培养实验过程中上覆水水质变化情况见表 1 所列。

表 1 培养过程中上覆水基本理化性质

培养时间/d	理化指标	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
1	pH 值	7.98	7.02	6.79	7.36	6.80	7.16	7.15	6.59	6.68
1	$t/^\circ\text{C}$	26.7	25.9	26.5	26.3	26.1	26.9	25.8	26.8	26.5
1	$\kappa/(\mu\text{S}/\text{cm})$	580	396	654	180	456	288	190	250	368
1	$\rho(\text{DO})/(\text{mg}/\text{L})$	7.29	6.89	6.96	6.98	7.20	7.24	7.04	7.36	6.89
1	$\rho(\text{TDS})/(\text{mg}/\text{L})$	290	198	327	90	228	144	95	125	184
1	$\rho(\text{TP})/(\text{mg}/\text{L})$	0.13	0.06	0.05	0.02	0.03	0.03	0.01	0.02	0.06
5	pH 值	8.29	8.12	7.68	8.10	7.79	7.96	8.24	8.29	7.98
5	$t/^\circ\text{C}$	27.5	27.2	27.3	27.3	28.2	27.8	27.8	28.1	27.5
5	$\kappa/(\mu\text{S}/\text{cm})$	620	350	680	160	440	260	180	210	338
5	$\rho(\text{DO})/(\text{mg}/\text{L})$	7.36	7.25	7.06	7.28	7.24	7.14	7.16	7.39	7.27
5	$\rho(\text{TDS})/(\text{mg}/\text{L})$	310	175	340	80	220	130	90	105	169
5	$\rho(\text{TP})/(\text{mg}/\text{L})$	0.86	0.58	0.63	0.08	0.06	0.07	0.07	0.06	0.23
10	pH 值	8.30	8.26	8.13	7.94	8.24	8.30	8.32	8.25	8.09
10	$t/^\circ\text{C}$	27.4	26.9	27.8	27.5	27.9	27.4	27.9	27.5	27.8
10	$\kappa/(\mu\text{S}/\text{cm})$	610	320	648	126	428	118	164	176	296
10	$\rho(\text{DO})/(\text{mg}/\text{L})$	6.82	6.59	6.74	6.82	6.59	5.85	5.43	6.85	5.97
10	$\rho(\text{TDS})/(\text{mg}/\text{L})$	305	160	324	63	214	59	82	88	148
10	$\rho(\text{TP})/(\text{mg}/\text{L})$	0.74	0.45	0.36	0.03	0.04	0.05	0.03	0.03	0.11

从表 1 可以看出:各沟渠上覆水 pH 值均随培养时间延长呈现缓慢上升的趋势;除农田沟渠电导率、TDS 总体表现为先上升后下降规

律外,其他 2 种沟渠都表现为持续下降的趋势;另外,3 种沟渠 $\rho(\text{TP})$ 与 $\rho(\text{DO})$ 均呈现先上升再下降的变化特征。

3.3 干湿交替培养过程的底质磷形态变化

10 d 后实验装置内底质上覆水已存留不多, 15 d 后基本干涸, 20 d 完全干涸。因此, 在整个

培养实验过程中沟渠底质经历了“干—湿—干”的完整干湿交替变化周期。不同培养时间节点底质各形态磷质量比变化情况如图 1 所示。

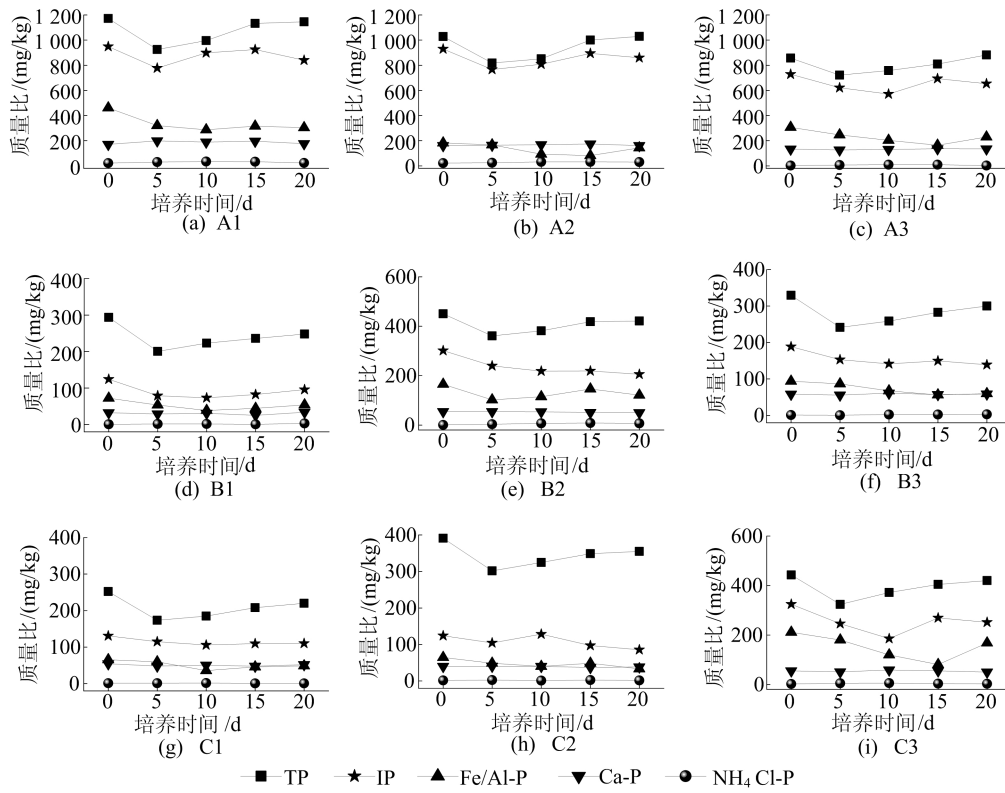


图 1 培养过程中底质各磷形态质量比变化

从图 1 可以看出, 干湿交替对底质 TP 质量比影响相对较明显, 3 种沟渠都表现为覆水初期底质 TP 质量比下降, 5 d 后又逐步回升直至 20 d 后底质干涸。对于持续多日处于干涸状态的排水沟渠, 覆水初期底质磷释放可能增大降雨径流的磷质量比, 导致雨后河流水质下降。

总的来看, 农田排水沟渠底质 IP 质量比及其在 TP 中占比, 都明显高于其他 2 种沟渠。在培养过程中, 农田排水沟渠底质 IP 质量比都表现出下降、上升、再下降的波动变化性, 而村落和林地

沟渠则大都表现为缓慢下降或波动变化。

3 种排水沟渠 Fe/Al-P 质量比都表现出随培养时间延长开始缓慢下降, 后期稍微抬升的趋势; Ca-P 质量比较为稳定, 在整个干湿交替培养中变化较弱。作为有效磷源, 不稳定性磷(NH₄Cl-P)是底质表层通过电性吸附并且易于水溶性磷交换的磷形态^[16-17], 质量约占 TP 质量的 0.33%, 未表现出显著的动态变化特征。

培养前、后底质中 OP、IP 质量比及其在 TP 中质量占比情况如图 2 所示。

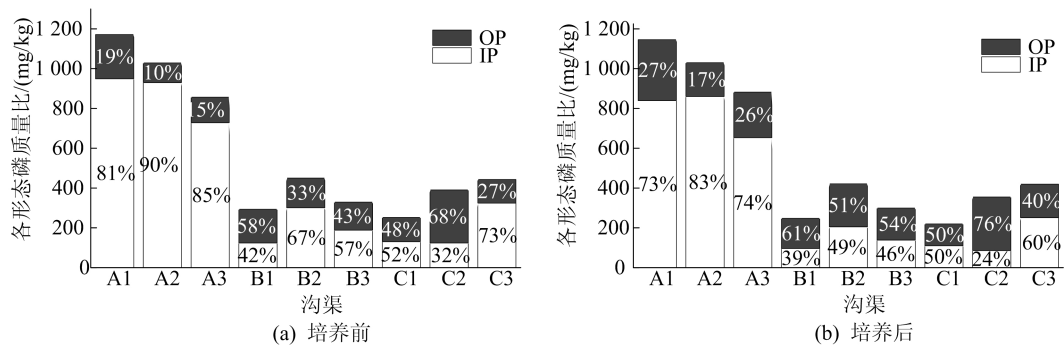


图 2 底质中 OP 与 IP 的质量占比

从图 2 可以看出,经过一个完整的干湿交替培养后,3 种排水沟渠底质都呈现出 IP 质量比下降、OP 质量比上升,TP 中 OP 质量占比上升、IP 质量占比下降的特点,意味着干湿交替有利于底质中磷由 IP 形态向 OP 形态转化。

培养前、后底质中 Ca-P、Fe/Al-P 和其他无

机磷质量比及其在 IP 中占比情况如图 3 所示。从图 3 可以看出,Fe/Al-P 质量占比相对较高,特别是村落和林地沟渠,但培养后总体略有下降;而 Ca-P 质量比则在培养后占比略有上升;其他无机磷质量比在经过一个完整的干湿交替培养后,其质量比占比变化幅度不大。

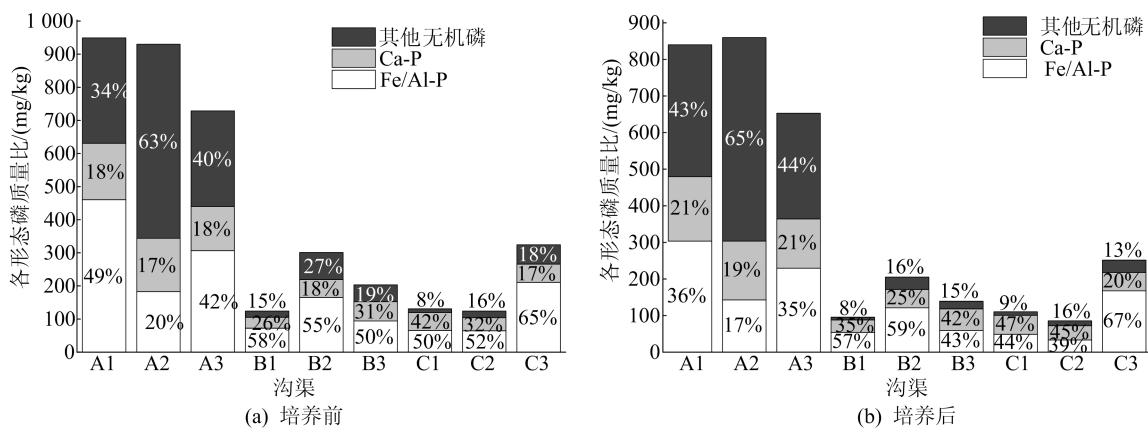


图 3 底质中各形态无机磷质量比及其分布

培养过程中各时间节点底质与初始干涸状态下底质磷形态的差异程度,结果见表 2 所列。

从表 2 可以看出,各时间节点 TP、IP、Fe/Al-P 和 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 都与初始底质存在显著的差异性。而且,在覆水期间(即 0~10 d),TP 的 $|T|$ 、IP 的 $|T|$ 、Fe/Al-P 的 $|T|$ 和 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 的 $|T|$ 值都随时间延长而增大,特别是 TP 的 $|T|$ 和 IP 的 $|T|$ 在第 15 天(落干期)达到峰值,即差异程度达到最大。相比而言,整个培养过程 Ca-P 的 $|T|$ 值变化平稳,这与 Ca-P 自身性质和来源稳定有很大关系。

表 2 培养过程底质与初始底质磷形态差异程度检验

磷形态	$ T $ 值			
	培养 5 d	培养 10 d	培养 15 d	培养 20 d
TP	6.218	6.347	14.209	2.994
IP	3.319	4.095	6.367	6.177
Fe/Al-P	2.759	4.163	3.714	3.548
Ca-P	0.230	1.195	0.591	0.393
OP	8.853	1.068	0.211	2.804
$\text{NH}_4\text{Cl-P}$	2.689	3.046	2.830	2.380

注: $n=9$; $T_{0.05}(8)=2.306$; 当 $|T| > T_{0.05}(n-1)$ 时,表示磷质量比有显著差异。

3.4 干湿交替培养过程中底质 EPC_0 变化

EPC_0 是指底质固相与周边水溶液中的磷酸盐达到吸附与解吸附平衡时水相中的磷酸盐质量

浓度,通常用来描述底质对磷的吸附或解吸潜力^[18]。培养过程中各排水沟渠不同时间节点底质磷释放风险情况如图 4 所示。

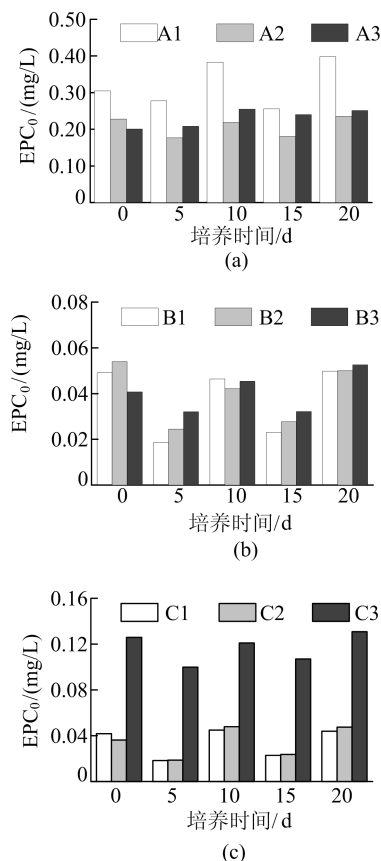


图 4 干湿交替培养过程中 EPC_0 的变化

从图 4 可以看出,农田排水沟渠初始 EPC_0 最高,变化范围为 0.201~0.305 mg/L,均值为 0.245 mg/L;林地沟渠次之,变化范围为 0.036~0.126 mg/L,均值为 0.068 mg/L;村落沟渠最低,变化范围仅为 0.041~0.051 mg/L,均值仅为 0.047 mg/L,意味着农田排水沟渠底质磷释放风险最高、村落沟渠最低。各类型排水沟渠底质 EPC_0 基本都表现出相似的变化特征,即呈现出先降低后升高,再降低再升高的变化态势,而且培养后 EPC_0 高于培养前初始值,说明干湿交替提高了排水沟渠底质磷释放风险水平。

排水沟渠底质初始理化指标对初始底质、培养后底质 EPC_0 的重要性见表 3 所列。其中,TP、Fe/Al-P、Ca-P、TN、 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 对初始底质 EPC_0 表现出了重要性(即 $F_{VIP}>1$),其他指标重要性不显著,且 OP、OM 对底质 EPC_0 有负影响;上述指标对培养后的 EPC_0 也都表现出了重要性($F_{VIP}>1$)。

表 3 初始理化指标对 EPC_0 的 F_{VIP} 与因子载荷的影响

沟渠底质初始 理化指标	沟渠底质初始 EPC_0		干湿交替培养后 EPC_0	
	F_{VIP}	因子载荷	F_{VIP}	因子载荷
TP	1.3	2.67	1.1	2.61
OP	0.2	-0.26	0.5	-0.31
Fe/Al-P	1.2	2.31	1.0	2.22
Ca-P	1.2	2.71	1.1	2.66
pH 值	0.8	1.52	0.8	1.66
OM	0.7	-1.61	0.8	-1.73
TN	1.1	2.73	1.2	2.74
NH_4^+-N	1.1	2.75	1.2	2.74
NO_3^--N	1.1	2.70	1.2	2.72

4 讨 论

干湿交替是影响沟渠底质中磷素转化的重要环境因子之一^[19]。研究表明,干旱可导致底质中 NH_4Cl-P 、Fe/Al-P、OP 增加和 Ca-P 减少,而再湿润又会导致底质中 NH_4Cl-P 、Fe/Al-P、OP 减少和 Ca-P 增加,这与本研究结论一致。究其原因,可能由于干旱将会导致底质开裂、缝隙增大,进入的空气促使底质中 Fe 和 Mn 氧化,导致与之结合的磷不易被释放;而再湿润则促进 Fe 和 Mn 还原,使得水溶性磷被吸附或沉淀^[20]。

沟塘底质磷质量浓度和形态分布受很多因素的影响,包括底质理化性质、生化作用、水动力条件及人类活动等^[21]。一般地,干湿交替通过物理、化学和生物等 3 个方面影响底质-水界面磷酸

盐交换。其中,物理和化学方面主要包括底质压实、聚集及孔隙度变化产生的影响,间隙水蒸发和迁移、剩余磷酸盐最终质量浓度的影响,以及与磷结合的金属(如铁铝氧化物)发生变化等,从而导致磷吸附容量的发生改变。文献[22]表明,干湿交替对底质 TP 量影响不大,但可能改变底质中磷形态的分布,本研究证实了这一结论;文献[23]表明,干湿变化对底质中弱吸附态磷(Ex-P)和铁结合态磷(Fe-P)量的影响最为显著,这是由于长期暴露过程有利于其他形态磷向 Ex-P 和 Fe-P 转化。一般地,蒸发作用可使底质失水,引起底质间隙水发生迁移和溶解性磷扩散梯度发生变化,导致溶解在底质间隙水中的磷酸盐化合物向上迁移,从而在表层出现活性磷的累积现象。本研究中,经过一个完整的干湿交替后,底质中 Fe/Al-P 量下降显著,特别是农田沟渠 Fe/Al-P 在底质 IP 占比平均下降了 11%,在 TP 占比下降了 9%,表明 Fe/Al-P 是底质“源”“汇”转化过程中最活跃的磷组分。

本研究中农田、村落和林地排水沟渠底质磷释放风险变化规律基本一致,都表现为培养 0~5 d 先下降、5~10 d 上升、10~15 d 开始下降和 15~20 d 开始上升。究其原因呈在底质覆水培养的 0~5 d,底质处于完全的覆水状态,由于底质不断向上覆水释磷,导致第 5 天时底质各形态磷质量浓度下降,释磷能力也随之减弱, EPC_0 呈现下降趋势;至覆水培养 5~10 d,底质可能处于缺氧状态, EPC_0 上升;在 10~15 d 培养阶段,底质开始逐步干涸并开始出现裂缝,导致底质逐步处于好氧环境下, EPC_0 又开始下降;在 15~20 d 培养阶段,底质已经完全干涸,上覆水中磷回落至沉积物表面,底质中无定形铁氧化物形成结晶度更高的铁氧化物,释磷能力增强^[24]。事实上,底质磷最大吸附量与 Fe^{3+} 和总有机碳质量浓度有较好的正相关关系^[25];文献[26]表明底质对磷的吸附量随着底质颗粒的变粗而减少,并且吸附量与有机磷之间存在着很好的相关关系,相关成果都很好地解释了底质完全干涸后 EPC_0 再度上升的原因。

5 结 论

1) 干湿交替过程对底质 TP 质量浓度波动性的影响较为明显,3 种排水沟渠都表现出了覆水初期底质 TP 质量比显著下降,而后逐步回升的变化态势;且 3 种排水沟渠底质 Fe/Al-P 质量

比也都表现出随培养时间缓慢下降,后期稍微抬升的变化特点。

2) 培养前、后底质 Fe/Al-P 质量在 IP 中占比变化较为明显,绝大多数处于下降状态;培养过程中各时间节点的 TP、IP、Fe/Al-P 和 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 质量比都与初始底质存在显著的差异性,意味着干湿交替状态对底质磷形态影响较大。

3) 培养过程中 3 种排水沟渠底质 EPC_0 基本都表现出波动性变化特征,且培养后底质 EPC_0 高于初始底质质量浓度,意味着干湿交替提高了排水沟渠底质磷释放风险水平。

参 考 文 献

- [1] KUMWIMBA N M, ZHU B, DONG Z, et al. Assessing nutrient, biomass, and sediment transport of drainage ditches in the three gorges reservoir area [J]. CLEAN-Soil, Air, Water, 2017, 45(1): 1-12.
- [2] 李乾岗, 田颖, 刘玲, 等. 水体中沉积物氮和磷的释放机制及其影响因素研究进展 [J]. 湿地科学, 2022, 20(1): 94-103.
- [3] 李如忠, 徐圣伟, 傅扬, 等. 基于数值模拟的排水沟渠营养盐滞留机制解析 [J]. 环境科学学报, 2023, 43(4): 391-399.
- [4] 李如忠, 何芮, 徐圣伟, 等. 基于原位调控的排水沟渠深潭氮磷滞留实证研究 [J]. 环境科学学报, 2023, 43(5): 100-107.
- [5] 王哲, 王丽玲, 王雅娟, 等. 受污染城市河道沉积物磷吸附特征及其影响因素 [J]. 环境工程学报, 2023, 17(7): 2412-2423.
- [6] 李如忠, 殷齐贺, 高苏蒂, 等. 农业排水沟渠硝态氮吸收动力学特征及相关性分析 [J]. 环境科学, 2018, 39(5): 2174-2183.
- [7] LI J, WANG J, ZENG D, et al. The influence of drought intensity on soil respiration during and after multiple drying-wetting cycles [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 127: 82-89.
- [8] 鞠颂. 淹没/落干对南四湖消落带底泥磷释放性能影响及控制措施 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2021.
- [9] 任文畅, 王沛芳, 钱进, 等. 干湿交替对土壤磷素迁移转化影响的研究综述 [J]. 长江科学院院报, 2015, 32(5): 41-47.
- [10] XIAO W J, SONG C L, CAO X Y, et al. Effects of air-drying on phosphorus sorption in shallow lake sediment, China [J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2012, 21: 672-678.
- [11] PELTOVUORI T, SOINNE H. Phosphorus solubility and sorption in frozen, air-dried and field-moist soil [J]. European Journal of Soil Science, 2005, 56(6): 821-826.
- [12] HOFFMANN C C, HEIBER G L, AUDET J, et al. Low phosphorus release but high nitrogen removal in two restored riparian wet-lands inundated with agricultural drainage water [J]. Ecological Engineering, 2012, 46: 75-87.
- [13] MAHBASHI A M A, ELKADY T, SHAMRANI A M. The role of stress states on the hysteric behavior of expansive soil under multiple drying-wetting cycles [J]. Buildings, 2023, 13(7): 1619-1627.
- [14] HEDLEY M J, CHAUHAN J W B. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations [J]. Soil Science Society of America Journal, 1982, 46(5): 970-978.
- [15] 黄威, 刘星, 赵丽, 等. 岱海沉积物内源磷释放特征的研究 [J]. 环境科学研究, 2020, 33(9): 2094-2102.
- [16] 金晓丹, 吴昊, 陈志明, 等. 长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性 [J]. 环境科学, 2015, 36(2): 448-456.
- [17] 郑菲菲, 龙星宇, 夏品华, 等. 贵州草海沉积物中磷的形态分布及释放通量研究 [J]. 人民长江, 2023, 54(12): 34-41.
- [18] 李如忠, 宋敏, 杨继伟. 城市新城区公园沟塘沉积物磷释放风险及影响因素分析 [J]. 环境科学, 2021, 42(9): 4287-4295.
- [19] 周驰, 李阳, 曹秀云, 等. 风干和淹水过程对巢湖流域土壤和沉积物磷吸附行为的影响 [J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(增刊 2): 10-17.
- [20] 周健, 李春辉, 张志永, 等. 淹水落干下三峡水库消落带土壤无机磷形态转化特征 [J]. 环境科学, 2018, 39(1): 130-136.
- [21] ISABEL M A, MARIA S, JAVIER M, et al. Role of dry watercourses of an arid watershed in carbon and nitrogen processing along an agricultural impact gradient [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 33(3): 117-126.
- [22] 魏琳琳, 徐刚, 孙军娜, 等. 干湿交替变化对土壤中磷形态影响及环境意义 [J]. 环境保护前沿, 2012, 2(2): 15-19.
- [23] 侯立军, 陆健健, 刘敏, 等. 长江口沙洲表层沉积物磷的赋存形态及生物有效性 [J]. 环境科学学报, 2006, 26(3): 488-494.
- [24] 王婷, 王坤, 姜霞. 东洞庭湖沉积物覆水后磷形态变化及其释放量 [J]. 湖泊科学, 2018, 30(4): 937-947.
- [25] WAN J, WANG Z, LI Z, et al. Critical velocity in phosphorus exchange processes across the sediment-water interface [J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, 25(10): 1966-1971.
- [26] 赵海超, 王圣瑞, 张莉, 等. 有机质含量及其组分对洱海沉积物磷吸附释放影响 [J]. 环境科学学报, 2014, 34(9): 2346-2354.

(责任编辑 吴 亮)