

李红芳, 刘 锋, 肖润林, 等. 水生植物对生态沟渠底泥磷吸附特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(1): 157–163.

LI Hong-fang, LIU Feng, XIAO Run-lin, et al. Effects of aquatic plants on phosphorus adsorption characteristics by sediments in ecological ditches[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(1): 157–163.

水生植物对生态沟渠底泥磷吸附特性的影响

李红芳¹, 刘 锋^{1*}, 肖润林¹, 何 洋^{1,2}, 王 迪^{1,2}, 吴金水¹

(1.中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:以用于小流域源头区农业面源污染防治的 3 条生态沟渠为研究对象,采集入口处(S1)、中间段(S2)和出口处(S3)沟渠底泥,分析其属性和磷吸附特性。结果表明,沟渠底泥全磷含量在 0.19~0.60 g·kg⁻¹ 范围内,且沿水流方向有增大趋势;草酸提取态磷(Pox)及有机质含量与全磷含量呈显著正相关($P<0.01$, $R^2=0.920$ 和 $P<0.05$, $R^2=0.549$, $n=9$);而底泥的 pH 值则随着水流方向有降低的趋势。Langmuir 方程拟合吸附数据发现,底泥吸附/解吸平衡磷浓度(EPC₀)、磷最大吸附量(S_{max})和磷吸附键能参数(K_c)分别为 0.08~0.38 mg·L⁻¹、555.6~909.1 mg·kg⁻¹ 和 0.18~0.52 L·mg⁻¹。样点 S2(挺水植物梭鱼草和沉水植物绿狐尾藻交接种植区)的 S_{max} 最大、EPC₀ 最小,样点 S3 次之,而样点 S1 的 S_{max} 最小、EPC₀ 最大。这说明水生植物的种植和合理配置,不仅能够影响底泥基本属性的变化,且能增强底泥对磷的吸附作用,有利于降低生态沟渠的磷输出风险。

关键词:生态沟渠;水生植物;底泥磷吸附;Langmuir 方程

中图分类号:X522 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)01-0157-07 doi:10.11654/jaes.2016.01.021

Effects of aquatic plants on phosphorus adsorption characteristics by sediments in ecological ditches

LI Hong-fang¹, LIU Feng^{1*}, XIAO Run-lin¹, HE Yang^{1,2}, WANG Di^{1,2}, WU Jin-shui¹

(1.Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha, 410125, China; Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Ecological ditches play important roles in controlling agricultural pollution of nitrogen and phosphorus. Here three ecological ditches were selected to investigate properties and P adsorption capacities of sediments. The sediment samples were collected at the inlet (S1), mid-section (S2), and outlet (S3) of a ditch. Total P concentrations in the sediments ranged from 0.19 to 0.60 g·kg⁻¹. Total P increased, but pH values decreased along water flow direction. Oxalate extractable P (Pox) and organic matters (OM) were significantly and positively related with total P ($P<0.01$, $R^2=0.920$ and $P<0.05$, $R^2=0.549$, respectively; $n=9$). The Langmuir equation showed good fitting of P adsorption. The equilibrium P concentration (EPC₀), sorption maximum (S_{max}), and adsorption constant (K_c) were 0.08~0.38 mg·L⁻¹, 555.6~909.1 mg·kg⁻¹, and 0.18~0.52 L·mg⁻¹, respectively. The sediments from S2, located at the joint site of two aquatic plants *Pontederia cordata* and *Myriophyllum aquaticum*, had the highest S_{max} and lowest EPC₀, followed by S3. The S1 sediments had the lowest S_{max} and highest EPC₀. Therefore, planting and rational combination of aquatic plants influence sediment properties, improve P adsorption capacity, and reduce the potential risk of P losses from the ditches.

Keywords: ecological ditch; aquatic plant; sediment phosphorus adsorption; Langmuir equation

排水沟渠作为流域氮磷污染排放与受纳水体(江湖湖泊等)之间的过渡带,具有湿地和河流的双重作

用,既是农田径流的“汇”,又是受纳水体的“源”,在截留和削减农业面源氮磷等污染物中起关键作用。已有研究表明,在水体可溶性磷的控制中,尤其是在磷的迁移和固定中,沟渠底泥的吸附和沉淀起主要作用^[1-2]。影响底泥磷吸附特性的因素很多,包括沟渠流经水体的水质状况(如营养盐、水体温度、pH、溶解氧等)、底泥的理化性质(如土壤质地、pH、有机质、无定

收稿日期:2015-08-18

基金项目:中科院重点部署项目(KZZD-EW-11-03);“十二五”国家支撑计划课题(2012BAD14B17)

作者简介:李红芳(1989—),女,河南安阳人,硕士研究生,研究方向为土壤环境与农业生态。E-mail:2008lhok@163.com

* 通信作者:刘 锋 E-mail:liufeng@isa.ac.cn

形态铁铝等)、沟渠内水生植物分布等。目前,关于沟渠内流经水体的水质、底泥理化性质对磷吸附特性的影响研究较多^[3-5],但针对水生植物种植对沟渠底泥磷的吸附特性的研究相对较少,尤其针对以水生植物种植为主要措施的生态沟渠来说,研究植物在沟渠底泥对磷吸附作用中的影响尤为重要。

本研究以典型的农业小流域(开慧河流域)为对象,在该区域实施生态清洁小流域建设后,选取构建的 3 条生态沟渠,分析沟渠底泥的基本理化性质及磷的吸附特性,研究生态沟渠构建后水生植物的种植对沟渠底泥磷吸附的影响,旨在为生态沟渠的构建、植物的配置提供参考意见,同时为生态沟渠在农业面源污染控制中的推广应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

选取位于湖南省长沙县开慧镇的开慧河流域源头区域为研究对象,研究区占地面积约 4.4 km²,属于典型的亚热带湿润气候区,雨量充沛,多年平均降雨量为 1 434.3 mm,年平均气温 17.1 ℃(−11.3 ℃~39.8 ℃),日照充足。农田、生态林、菜地、池塘、茶园、河道、村庄、果林和道路等为主要土地利用类型,其中农田占比 32.3%,比例最大。农田排水、生活污水和养猪废水是流域内主要水体污染源。由于区域内河道和沟渠缺乏治理,部分水体已出现严重的富营养化现象。研究区域在 2012 年 6 月至 2013 年 1 月期间进行了生态清洁型小流域建设,针对该流域内主要水体开慧河的氮磷污染,采用的生态措施主要为河道、沟渠的清淤和生态沟渠的构建等。研究区主要土地利用类型及所研究的生态沟渠分布如图 1 所示。

1.2 生态沟渠的构建

2012 年 6—8 月,对研究区内原有的农田排水沟渠清淤疏通后构建生态沟渠。生态沟渠呈倒梯形结构,断面宽度在原排水沟渠基础上扩宽 50%,根据 200 m²/1.0 km² 汇水区设置生态沟渠长度,底部坡度比降约 1%,每间隔 10~20 m 筑一条 15 cm 高的拦水

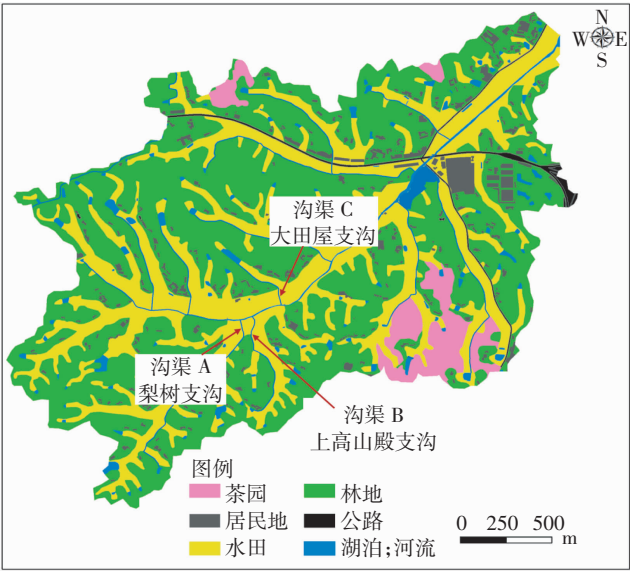


图 1 研究选取的生态沟渠分布示意图
Figure 1 Distribution map of selected ecological ditches

坎。生态沟渠中种植植物主要包括挺水植物梭鱼草(*Pontederia cordata*)和沉水植物绿狐尾藻(*Myriophyllum aquaticum*)。生态沟渠前段(约占所建生态沟渠长度的 1/3)种植梭鱼草(种植密度 9 株·m^{−2}),便于拦截泥沙,避免降雨径流携带泥沙对植物覆盖,减缓水体流速,在沟渠中部及后段(约占生态沟渠长度的 2/3)种植生物量大、生长周期长且去污能力强的绿狐尾藻。研究选取的 3 条沟渠的基本情况如表 1 所示。

1.3 样品采集与分析

如图 2 所示,2013 年 8 月,选取研究区内 3 条生态沟渠,在沟渠入水口(S1)、中间段(两种水生植物相交处,S2)及出水口(S3)分别设置 3 个采样点采集沟渠底泥,分析其基本属性和磷吸附特性。样点 S1 位于生态沟渠前端约 1 m 处,由于生态沟渠修建时沟渠该处未进行清淤处理,S1 的样品可作为原沟渠的底泥本底值。采用自制管状采泥器采集混合底泥样品,去除其中的植物组分及其他杂质后,自然风干并研磨过筛(0.149 mm,100 目)后,自封袋分装,于 4 ℃冷藏保存备用。

表 1 构建的生态沟渠基本情况
Table 1 Basic information of constructed ecological ditches

沟渠名称	人口/人	畜群/头	污水量 m ³ ·d ^{−1}	生态沟面积/m ²	生态沟尺寸/m		
					长度	底宽	深度
沟渠 A(梨树支沟)	25	15	6	733	100	2.8	2
沟渠 B(上高山殿支沟)	30	18	7.2	672	80	4	1.5
沟渠 C(大田屋支沟)	85	50	18.2	1004	85	2.2	2.9

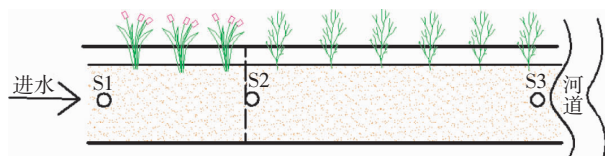


图 2 沟渠底泥采样点示意图

Figure 2 Distribution of sampling points in ecological ditches

底泥基本属性的分析方法:采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法测定底泥全磷;采用酸性草酸铵法提取底泥活性铁、铝、磷,用 ICP-OES (Agilent Technologies, 700 Series) 同时测定活性铁(Fe_{ex})、活性铝(Al_{ex})和活性磷(P_{ex})含量,其中底泥磷饱和度 $DPS=P_{ex}/[\alpha \times (Fe_{ex} + Al_{ex})] \times 100\%$,在酸性湿地沉积物中 α 值为 0.5^[6];采用重铬酸钾容量-外加加热法测定底泥有机质含量;利用含玻璃电极的 pH 计按水土质量比 2.5:1 测定底泥 pH 值。

试验期间,在生态沟渠进、出水口设置水样监测点,每月一次采集水样。采集水样过 0.45 μm 孔径滤膜后,直接用流动分析仪(AA3)测定铵态氮浓度;采用碱性过硫酸钾消解后用流动分析仪(AA3)测定总氮浓度;采用钼酸铵分光光度法(GB 11893—1989)测定总磷和磷酸盐浓度。

1.4 底泥磷等温吸附试验

等温吸附试验的主要步骤如下:称取 0.5 g 底泥样品于 50 mL 聚丙烯材质离心管中,加入用 0.01 mol·L⁻¹ KCl 配置的 P 含量分别为 0、1、2、5、10、20、50、100 mg·L⁻¹ 的溶液 20 mL,并滴加 2 滴 0.1% 的氯仿以抑制微生物活动;25 °C 下恒温振荡(200 r·min⁻¹) 24 h,然后离心(4000 r·min⁻¹) 10 min、过 0.45 μm 滤膜,采用钼锑抗显色法测定滤液中 P 含量。

吸附参数通过 Langmuir 方程计算^[7]:

$$S_1 + S_0 = S_{max} K_c C_i / (1 + K_c C_i) \quad (1)$$

式中: S_1 为试验中底泥吸附的磷量 mg·kg⁻¹; S_0 为初始状态下吸附的磷量,mg·kg⁻¹; S_{max} 为磷吸附最大值,mg·kg⁻¹; K_c 为键能参数,L·mg⁻¹; C_i 为振荡 24 h 后溶液平衡浓度,mg·L⁻¹。

当 $S_1=0$ 时,底泥磷的净吸附或解吸为零(吸附/解吸平衡浓度),此时 C_i 值即为溶液磷对应的 EPC_0 ,由公式(1)可得:

$$EPC_0 = C_i = S_0 / [K_c (S_{max} - S_0)] \quad (2)$$

1.5 数据分析

采用 Microsoft Excel 2013 软件对磷的等温吸附数据进行 Langmuir 方程拟合。采用 SPSS 18.0 软件进

行底泥属性与磷形态的相关分析,统计检验的显著性水平 $P \leq 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 生态沟渠进出口水质分析

对生态沟渠进出口水质进行分析,结果如表 2 所示。可以看出,流经 3 条生态沟渠的水体污染程度不同,进水氮磷浓度有明显差异,沟渠 C 的氨氮、总氮、磷酸盐及总磷的浓度分别为 0.239、1.596、0.160、0.523 mg·L⁻¹,均大于沟渠 A 和沟渠 B,水体污染严重。经过生态沟渠的处理,3 条沟渠出水口水质明显改善,浓度有所降低,氨氮、总氮、磷酸盐及总磷的平均去除率分别为 37.72%、32.63%、39.35%、54.58%,但 3 条沟渠对各种污染物去除能力差异较大。这与水流速以及生态沟渠的宽度、长度、深度及所种植物面积等相关。

表 2 生态沟渠进出水水质状况(mg·L⁻¹)Table 2 Quality of water in ecological ditches(mg·L⁻¹)

沟渠名称	进水				出水			
	氨氮	总氮	磷酸盐	总磷	氨氮	总氮	磷酸盐	总磷
沟渠 A	0.044	1.256	0.058	0.142	0.028	1.076	0.043	0.085
沟渠 B	0.041	1.323	0.115	0.209	0.027	0.929	0.016	0.089
沟渠 C	0.239	1.596	0.160	0.523	0.137	0.737	0.150	0.179

2.2 生态沟渠底泥属性

如表 3 所示,由各沟渠底泥的基本理化性质差异可以看出,3 条沟渠底泥全磷含量在 0.19~0.60 g·kg⁻¹,在每一条沟渠中,全磷的含量随着采样点的位置有所变化,从进水口(S1)到出水口(S3),呈整体增大趋势。尤其是沟渠 A,趋势较明显($S_1 < S_2 < S_3$),而沟渠 B 中 S_1 与 S_2 接近,但远小于 S_3 ,仅有 S_3 全磷含量的二分之一,沟渠 C 则三个样点差异较小,均在 0.30 g·kg⁻¹ 左右。这与张燕^[8]研究的沟渠底泥总磷减少的趋势不同,可能与绿狐尾藻自身生长特性有关,8 月份气温过高,绿狐尾藻根系密集,易发生腐烂,导致底泥磷含量有所增加,可见生态沟渠运行后的植物管理十分必要。3 条沟渠草酸提取态铁铝(Fe_{ex} , Al_{ex})含量整体分布差异较小,其中沟渠 C 的 Fe_{ex} 含量明显低于沟渠 A 和 B,但 Al_{ex} 则相反。提取态磷(P_{ex})含量与全磷呈现相似的变化趋势,且显著正相关($P < 0.01$, $R^2 = 0.920$, $n = 9$),随着水流方向有变大趋势,但 3 条沟渠之间差

表3 生态沟渠底泥属性

Table 3 Selected physico-chemical properties of ditch sediments

沟渠及采样点	全磷/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	草酸提取态/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$			DPS/%	有机质/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	pH
		Fe	Al	P			
沟渠 A	S1	0.19	2876	798	20	0.55	13.52
	S2	0.38	3375	941	159.9	3.71	21.45
	S3	0.53	3935	859	246.1	5.13	31.57
沟渠 B	S1	0.34	2582	728	150	4.53	20.37
	S2	0.33	3710	871	131.6	2.87	18.57
	S3	0.60	3314	896	441.8	10.49	19.91
沟渠 C	S1	0.29	1879	1012	49.8	1.31	11.91
	S2	0.24	2648	1146	36	1.01	11.18
	S3	0.31	2765	819	89.8	3.11	16.18

异较大,含量分布在 $20.04\sim 441.86\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。有机质含量呈现出与全磷类似的规律,显著相关($P<0.05, R^2=0.549, n=9$),总体有变大趋势。由3条沟渠的pH值可以看出,沟渠底泥呈酸性,可能与当地土壤质地有关,并且随着水流方向及水生植物的种植,沟渠底泥pH发生明显变化,逐渐降低,可能与水生植物根际分泌物有关。

2.3 生态沟渠底泥磷的等温吸附过程

3条生态沟渠底泥磷的等温吸附试验结果如图3所示。随着磷浓度的增加($0\sim 90\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),底泥对磷的吸附量也依次增加($0.43\sim 885.82\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。由采样点的位置及水流方向可以看出,3条沟渠的磷吸附量均是 $S2>S3>S1$,即中间位置磷吸附量最大,出水口磷吸附量次之,进水口最小。这可能与植物种植的种类不同有关,S2样点位于梭鱼草与绿狐尾藻之间。沟渠A中S2磷的吸附量($833.33\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和S3($769.23\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)较接近,而与S1($588.24\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)差异较大;沟渠2则是较小的S1与S3样点磷的吸附量接近,分别为 $625.00, 714.29\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,而含量最高的样点S2则为 $909.09\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,与沟渠A的样点S2接近。沟渠C三个采样点磷的吸附量差异均比较明显, $S2>S3>S1$,分别为 $909.09>666.67>555.56\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。三条沟渠磷的等温吸附试验既有相似的规律,又各不相同,可能与沟渠的长短、植物种植差异及汇入水体不同等多种因素相关。

2.4 生态沟渠底泥磷的吸附特性

用Langmuir方程拟合底泥对磷的等温吸附数据(表4),拟合度检验达极显著水平($P<0.001$)。 $S_{\max}$ 在 $555.56\sim 909.09\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围,均值为 $730.05\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,高 K_d 值表示底泥与磷的结合能力强,3条沟渠 K_d 均值

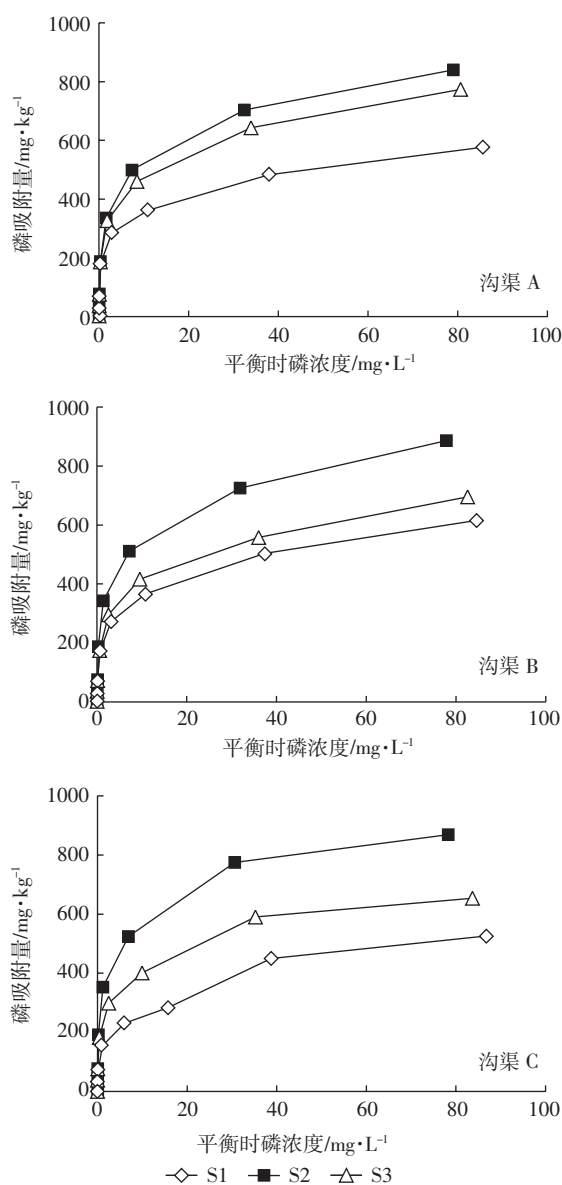


图3 底泥对磷的等温吸附曲线

Figure 3 Phosphorus adsorption isotherms of sediments

表 4 底泥对磷等温吸附拟合参数

Table 4 Parameters for phosphorus sorption by sediments

沟渠及采样点		Langmuir 方程拟合			
		$S_{\max}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$K_c/\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$	r^2	$\text{EPC}_0/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
沟渠 A	S1	588.24	0.36	0.99	0.20
	S2	833.33	0.40	0.99	0.12
	S3	769.23	0.35	0.99	0.14
沟渠 B	S1	625.00	0.27	0.99	0.23
	S2	909.09	0.35	0.99	0.12
	S3	714.29	0.27	0.99	0.20
沟渠 C	S1	555.56	0.18	0.98	0.38
	S2	909.09	0.52	1.00	0.08
	S3	666.67	0.42	0.99	0.15

为 $0.35 \text{ L}\cdot\text{mg}^{-1}$,均以样点 S2 为最大,说明沟渠中在梭鱼草跟绿狐尾藻两种植物交界处的底泥与磷的结合能力最强。试验底泥吸附/解吸平衡浓度(EPC_0)值为 $0.08\sim 0.38 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,沟渠 C 底泥 EPC_0 明显大于其他两条沟渠,植物根系较为发达的 S2 处明显低于其他两个样点。

3 讨论

本研究中 3 条沟渠对氮磷的拦截效果明显,但 3 条沟渠对氮磷的去除率存在差异。生态沟渠主要通过拦截径流泥沙、植物吸收、底泥吸附和微生物降解等作用有效减少氮磷等营养物质向下游水体迁移,沟渠本身的长度、深度、断面大小、坡降比等自然条件都影响沟渠对水体氮磷的去除。一般来说,相较于窄深型渠道,宽浅型的沟渠水生植物生长状况更好,与水体接触面积更大,有利于水生植物对氮磷的吸收和利用^[9]。另外,沟渠的几何尺寸还能够对水体动力条件产生较大的影响,沟渠纵坡比越大,水流流速越大,水力停留时间越短,不利于沟渠对氮磷的持留和去除^[10]。由 3 条生态沟渠进出水氮磷浓度比较可以看出,生态沟渠的构建对于农业面源氮磷污染的防控具有重要作用。

生态沟渠对磷素的去除,沉淀和吸附是其主要途径之一。研究表明,湿地中的磷 70%~87% 主要通过沉淀和底泥吸附而去除^[11-12]。沟渠纵坡比小,水体流速慢,水力停留时间越长,则越有利于减少水体扰动、促进泥沙颗粒及颗粒吸附物随底泥的沉降。本研究的 3 条生态沟渠的底泥磷 $S_{\max}$ 在 $555.56\sim 909.09 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,高于张树楠等^[13]研究的我国亚热带地区金井河流域生态沟渠的底泥磷 $S_{\max}$ ($391\sim 563 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),且远高于

美国马里兰州一个长期用猪尿粪施肥的农场中 8 个沟渠底泥样的 $S_{\max}$ 值 ($81\sim 232 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[14],与作者已有的研究在该流域内池塘底泥的 $S_{\max}$ 范围相当^[15],但低于爱尔兰的韦克斯福德和沃特福德州两处理养殖废水的人工湿地底泥 $S_{\max}$ ($538\sim 1707 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[16-17]。 $S_{\max}$ 反映底泥对磷的吸附能力, $S_{\max}$ 值越大,表示底泥对磷的吸附固定能力越强。影响沟渠底泥磷的吸附特性的主要因素包括底泥的组成和性质、有机质含量、pH 和无定形态的铁铝含量等。由于铁、铝氧化物能为磷的吸附提供丰富的磷吸附表面积,使富含无定型铁、铝氧化物的底泥对水中磷的吸附与去除能力更强^[18]。试验底泥 $S_{\max}$ 与草酸提取态铁铝之和显著相关 ($R=0.707, P<0.05, n=9$),说明铁铝氧化物含量对底泥磷的吸附有显著影响;而 Fe_{ox} 含量与铁铝含量之和显著相关 ($R=0.981, P<0.01, n=9$),说明在影响底泥磷吸附中, Fe_{ox} 含量的影响因素更大,与张树楠等^[13]及 Liu 等^[7]的研究结果类似。试验中有机质含量与 Fe_{ox} 含量及铁铝含量之和显著相关 ($P<0.05, R^2=0.578$ 和 $R^2=0.489, n=9$),有机质通过与铁铝氧化物螯合可以提供磷的吸附活性表面,说明生态沟渠的构建对有机质的影响会促进底泥磷的吸附^[15]。

生态沟渠所种植物不同,对沟渠底泥的理化性质和磷吸附的影响不同。试验沟渠不同位置采样点磷的吸附特性呈现出两种植物交错处 $S_{\max}$ 最大的趋势(即: $S_2>S_3>S_1$),可能与植物所种植的面积不同有关,也可能受生态沟渠本身的构建影响^[8]。一般来说,水生植物影响底泥对磷的吸附主要通过影响和改变底泥的物理化学性质而实现。一方面,水生植物的存在可以降低水体流速,加速沉降,植物根系越密集,越有利于颗粒物(包括铁、铝胶体等)的沉降^[19-20];另一方面,植物根系泌氧可以改变底泥的化学特性,一定条件下能够降低 pH、提高 Eh 和可溶性金属离子浓度,促进 Fe^{2+} 氧化成 Fe^{3+} ,进而促进底泥对磷的吸附^[21-22]。Liu 等^[7]研究生态沟渠中 5 种植物对底泥磷的吸附作用,结果表明美人蕉和狐尾藻的种植能够提高沟渠底泥表层(0~5 cm)有机质和草酸提取态铁的含量,进而促进底泥对磷的吸附。本研究中沟渠植物主要为梭鱼草和绿狐尾藻,其中梭鱼草同样已被证明为一种既具有净水作用同时可作观赏用的作物,具有较高的氮磷积累量,而绿狐尾藻根系密集,能够拦截更多的细颗粒,均对生态沟渠底泥磷的吸附具有促进作用^[23-24]。但针对植物的季节性生长和容易腐烂等特点,需要对其进行合理和及时的管理,以免产生二次污染。

底泥磷的吸附/解析平衡浓度 EPC_0 可用来描述底泥磷吸附的方向,当 EPC_0 低于水体磷浓度时,底泥表现为磷吸附状态,反之, EPC_0 值越高则表示底泥对外源磷的缓冲能力越弱,潜在的磷释放风险越高。3条沟渠外源磷输入负荷不同,3条沟渠对外源磷的缓冲能力不同。由入水口 S1 样点可以看出,沟渠 C 接收污水量最大,水体磷浓度较高,底泥对磷的缓冲能力较弱, EPC_0 明显高于沟渠 A 和 B。但整体来说,3条沟渠进水口(S1) EPC_0 明显高于出水口(S3),说明生态沟渠的构建能够提高对外源磷的缓冲能力,水生植物的种植能够提高底泥磷的吸附能力而降低磷的释放风险,进一步肯定了生态沟渠的重要作用及构建生态沟渠的必要性^[25-26]。

4 结论

(1)生态沟渠底泥全磷、草酸提取态磷(P_{ex})及有机质含量,沿水流方向,有增大趋势,而沟渠底泥的 pH 值变化则与之相反。可见,生态沟渠的构建及净水植物的种植,影响了沟渠底泥基本属性。

(2)生态沟渠底泥出水口(S3)磷最大吸附量(S_{max})明显高于进水口(S1),而低于中间位置(S2,两种水生植物交叉种植区),说明梭鱼草与狐尾藻的配置种植有利于提升底泥对磷的吸附能力。

(3)生态沟渠能净化污染水体,说明生态沟渠对农业面源污染防控具有重要作用。本研究表明水生植物种植能影响生态沟渠底泥属性及其磷吸附特性,因此在生态沟渠构建时,应综合考虑水生植物的净水能力及合理配置,以提高其对污染物的去除效果。

参考文献:

- [1] Reddy K R, Kadlec R H, Flaig E, et al. Phosphorus retention in streams and wetlands: A review[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 1999, 29(1): 83-146.
- [2] 姚鑫, 杨桂山. 自然湿地水质净化研究进展[J]. *地理科学进展*, 2009, 28(5): 825-832.
YAO Xin, YANG Gui-shan. Progress on the study of water purification ability of natural wetlands[J]. *Progress in Geography*, 2009, 28(5): 825-832.
- [3] Simard R R, Beauchemin S B, Haygarth P M. Potential for preferential path ways of phosphorus transport[J]. *Enviro Qual*, 2002, 29: 97-105.
- [4] Nairn R W, Mitsch W J. Phosphorus removal in created wetland ponds receiving rivers overflow[J]. *Ecological Engineering*, 2000, 14: 107-126.
- [5] 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.
ZHAO Hai-chao, WANG Sheng-rui, ZHANG Li, et al. Effect of OM content and constituents on phosphorus adsorption-release of the sediment from Erhai Lake[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(9): 2346-2354.
- [6] Maguire R O, Sims J T, Foy R H. Long-term kinetics for phosphorus sorption-desorption by high phosphorus soils from Ireland and the Delmarva Peninsula, USA[J]. *Soil Science*, 2001, 166(8): 557-565.
- [7] Liu F, Xiao R L, Wu J S, et al. Effect of a novel constructed drainage ditch on the phosphorus sorption capacity of ditch soils in an agricultural headwater catchment in subtropical central China[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 58: 69-76.
- [8] 张燕. 农田排水沟渠对氮磷的去除效应及管理措施[D]. 沈阳: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2013.
ZHANG Yan. Removal effect and management measures of nitrogen and phosphorus in agricultural drainage ditches[D]. Shenyang: Northeast Institute of Geography and Agro-ecology, Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [9] 王沛芳, 王超, 胡颖. 氮在不同生态特征沟渠系统中的衰减规律研究[J]. *水利学报*, 2007, 38(9): 1135-1139.
WANG Pei-fang, WANG Chao, HU Ying. Nitrogen degradation efficiency in channels with different ecological characteristics[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(9): 1135-1139.
- [10] 杨林章, 周小平, 王建国, 等. 用于农田非点源污染控制的生态拦截型沟渠系统及其效果[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(11): 1371-1374.
YANG Lin-zhang, ZHOU Xiao-ping, WANG Jian-guo, et al. Ecological ditch system with interception function and its effects on controlling farmland non-point pollution[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(11): 1371-1374.
- [11] 马永生, 张淑英, 邓兰萍. 氮、磷在农田沟渠湿地系统中的迁移转化机理及其模型研究进展[J]. *甘肃科技*, 2005, 21(2): 106-107.
MA Yong-sheng, ZHANG Shu-ying, DENG Lan-ping. Progress on nitrogen and phosphorus transformation mechanism and model in agricultural drainage ditches wetland system[J]. *Gansu Science and Technology*, 2005, 21(2): 106-107.
- [12] Gopal B. Natural and constructed wetlands for wastewater treatment potential and problems[J]. *Water Science and Technology*, 1999, 40(3): 27-35.
- [13] 张树楠, 贾兆月, 肖润林, 等. 生态沟渠底泥属性与磷吸附特性研究[J]. *环境科学*, 2013, 34(3): 1101-1106.
ZHANG Shu-nan, JIA Zhao-yue, XIAO Run-lin, et al. Study on phosphorus adsorption characteristic of sediments in an ecological ditch[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(3): 1101-1106.
- [14] Vaughan R E, Needelman B A, Kleinman P J, et al. Vertical distribution of phosphorus in agricultural drainage ditch soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2007, 36(6): 1895-1903.
- [15] 李红芳, 刘锋, 杨凤飞, 等. 农业小流域源头区池塘底泥磷形态和吸附特征[J]. *生态与农村环境*, 2014, 30(5): 634-639.
LI Hong-fang, LIU Feng, YANG Feng-fei, et al. Study on phosphorus forms and phosphorus adsorption characteristic of the pond sediments in the headstream area of an agricultural watershed[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, 30(5): 634-639.
- [16] Dunne E J, Culleton N, Donovan G, et al. Phosphorus retention and

- sorption by constructed wetland soils in Southeast Ireland[J]. *Water Research*, 2005, 39(18):4355–4362.
- [17] Zhou A M, Tang H X, Wang D S. Phosphorus adsorption on natural sediments: Modeling and effects of pH and sediment composition[J]. *Water Research*, 2005, 39(7):1245–1254.
- [18] Derrick Y F, Kin C L. Phosphorus sorption by sediments in a subtropical constructed wetland receiving storm water runoff[J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35(5):735–743.
- [19] 刘兵钦, 王万贤, 宋春雷, 等. 菹草对湖泊沉积物磷状态的影响[J]. 武汉植物学研究, 2004, 22(5):394–399.
- LIU Bing-qin, WANG Wan-xian, SONG Chun-lei, et al. Influences of *Potamogeton crispus* L. on phosphorus status in lake sediments[J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2004, 22(5):394–399.
- [20] 鲁露. 滇池流域生态沟渠截留-去除污染物的影响因素及控制技术[D]. 昆明: 云南大学, 2015.
- LU Lu. Retention-removal effects and control technology of pollutants in ecological ditches of Dianchi watershed[D]. Kunming: Yunnan University.
- [21] Boon P I, Sorrell B K. Biogeochemistry of billabong sediments: I. The effect of macrophytes[J]. *Freshwater Biology*, 1991, 26(2):209–226.
- [22] 韩沙沙, 温琰茂. 富营养化水体沉积物中磷的释放及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2004, 23(2):98–101.
- HAN Sha-sha, WEN Yan-mao. Phosphorus release and affecting factors in the sediments of eutrophic water[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(2):98–101.
- [23] 刘霄, 黄岁樑, 唐婷芳子, 等. 人工湿地植物生长特性及其对氮磷富集能力研究[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(5):1–5.
- LIU Xiao, HUANG Sui-liang, TANG Ting-fang-zi, et al. Growth characteristic and nitrogen phosphorous accumulation ability of artificial wetland plants[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2011, 22(5):1–5.
- [24] 余红兵, 杨知建, 肖润林, 等. 梭鱼草(*Pontederiacordata*)拦截沟渠中氮、磷的效果研究[J]. 农业现代化研究, 2012, 33(4):508–512.
- YU Hong-bing, YANG Zhi-jian, XIAO Run-lin, et al. Research of ditch interception effect of nitrogen and phosphorus of *Pontederia cordata*[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2012, 33(4):508–512.
- [25] Lin C Y, Wang Z G, He M C, et al. Phosphorus sorption and fraction characteristics in the upper, middle and low reach sediments of the Daliao River systems, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 170(1):278–285.
- [26] Pant H K, Reddy K R. Phosphorus sorption characteristics of estuarine sediments under different redox conditions[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(4):1474–1480.