

贵州草海湿地农田沟渠沉积物氮磷的 吸附动力学及影响因素

薛 飞¹, 刘 文², 夏品华^{1*}, 林 陶¹, 邓河霞¹, 孔祥亮^{1,3}, 张俊美¹

(1.贵州师范大学贵州省山地环境信息系统和生态环境保护重点实验室, 贵阳 550001; 2.贵州草海国家级自然保护区管理局, 贵
州 威宁 553100; 3.贵州大学农学院, 贵阳 550001)

摘 要:以草海-湿地农田沟渠系统为研究对象,运用模拟实验的方法,针对沟渠系统对氮磷的截留效用、沟渠沉积物对氮磷的吸附动力学及其影响因素进行了研究。结果表明,湿地农田沟渠系统对 TP 和 TN 的截留率分别为 66.7%~79.7%和 66.0%~76.4%,对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的截留率最高,为 82.8%~89.3%。沟渠沉积物与太湖、滇池沉积物相比较而言,沉积物对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 吸附平衡时间较长。盐度、 $[\text{SO}_4^{2-}]$ 和 $[\text{NO}_3^-]$ 对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附都具有一定的抑制作用;而 $[\text{Ca}^{2+}]$ 对两者的影响具有明显的差别: Ca^{2+} 对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的吸附在低浓度下抑制,在高浓度下有促进作用;对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附具有明显的抑制作用,且当 $[\text{Ca}^{2+}]$ 浓度为 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时吸附量最小。

关键词:湿地农田;沟渠沉积物;吸附; $\text{NH}_4^+\text{-N}$; $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$

中图分类号:X522 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2012)10-1999-07

Adsorption of Nutrient Elements by the Sediment from Ditch System in a Farmland-Wetland in Guizhou Province, China: Kinetics and Influential Factors

XUE Fei¹, LIU Wen², XIA Pin-hua^{1*}, LIN Tao¹, DENG He-xia¹, KONG Xiang-liang^{1,3}, ZHANG Jun-mei¹

(1.Guizhou Key Laboratory for Mountainous Environmental Information and Ecological Protection, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2.The Administration Bureau of the Caohai National-Level Natural Reserve in Guizhou, Weining 553100, China; 3.Agricultural College, Guizhou University, Guiyang 550001, China)

Abstract: This research is to investigate the removal effects of ditch system in a farmland-wetland on nitrogen and phosphorus. A simulation experiment was carried out to study the kinetic characteristics of nitrogen and phosphorus adsorptions on the sediment of the agricultural ditch system in Caohai Wetlands. Results showed that the retention rates of the everglade farmland ditch system for TP, TN and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ were 66.7%~79.7%, 66.0~76.4% and 82.8~89.3%, respectively. The equilibrium time of adsorption on nitrogen and phosphorus were long, comparing with the sediments from Taihu and Dianchi. With the increasing concentrations of the salinity, SO_4^{2-} and NO_3^- , the sorption ability of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ on the sediment declined, respectively. However, the influence of Ca^{2+} on $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ sorption might be divided into two patterns: Restraining at low concentration and promoting at high concentration, and Ca^{2+} was found to have a significant restraining effect on $\text{NH}_4^+\text{-N}$ adsorption, with the minimum adsorption value at the Ca^{2+} concentration of $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

Keywords: farmland-wetland; ditch sediment; adsorption; $\text{NH}_4^+\text{-N}$; $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$

草海是云贵高原上重要的湖泊湿地生态系统。随着经济发展及人口膨胀,围湖造田活动是流域内扩大

耕地面积满足人口增长对粮食需求的一种重要的人类活动方式,此过程中通过开挖沟渠排水的方法形成了大片网状格局的湿地农田。湿地农业面源污染问题突出,已经成为水体富营养化进程的一个重要原因^[1]。湿地农田沟渠对污染物具有“汇”、“源”和“转化器”的功能,在污染物拦截,保护水质方面发挥着重要作用。据 Woltemade^[2]研究,美国和加拿大有 65%的农田利

收稿日期:2012-03-25

基金项目:国家科技支撑计划课题(2011BAC02B02)

作者简介:薛 飞(1988—),男,山东青岛人,硕士研究生,主要从事水土污染控制及生态修复研究。E-mail: xuefeiwin@yeah.net

* 通信作者:夏品华 E-mail: pinhuayy@163.com

用沟渠排水。沟渠系统截留的流失养分占流域总输出的 60%~90%^[3],其中,沟渠沉积物对污染物的吸附作用在很大程度上控制着污染物的分布^[4]。

本文选取草海-湿地农田沟渠系统为研究对象,获取沟渠系统内不同渠系级别的水质指标,调查沟渠对氮磷的截留效益,研究了沟渠沉积物对氮磷的吸附动力学,并对其吸附影响因素进行探讨,阐述沉积物对氮磷的吸附截留效应,从而为草海湿地农业面源污染的管理和控制提供依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

采样点位于贵州省威宁县草海国家湿地保护区白马河流域(图 1),该流域沟渠总长度超过 3 km,其中,干渠总长度约为 1500 m。根据地形及控制面积的大小划分渠系级别,分为毛渠(I级)、农渠(II级)、斗渠(III级)、支渠(IV级)、干渠(V级)5级(图 2)。本次试验所取水样、沉积物样品来自于 5 级沟渠,沿各级沟渠共设 15 个采样点,根据每级沟渠长度设至 2~4 个采样点,平均分布于整个流域,如图 1 所示:毛渠(I级)采样点 3 个(S1~S3),农渠(II级)采样点 4 个

(S4~S7),斗渠(III级)采样点 3 个(S8~S10),支渠(IV级)采样点 3 个(S11~S13),干渠(V级)采样点 2 个(S14、S15)。

2011 年夏季进行实验样品采集,在每一个样点,先用水质检测仪(HQ-30D,美国,哈希)当场测定水中温度(TEMP)、溶解氧(DO);然后用酸洗过的 500 mL 塑料瓶采集水样,先将塑料瓶用采样点下游附近水

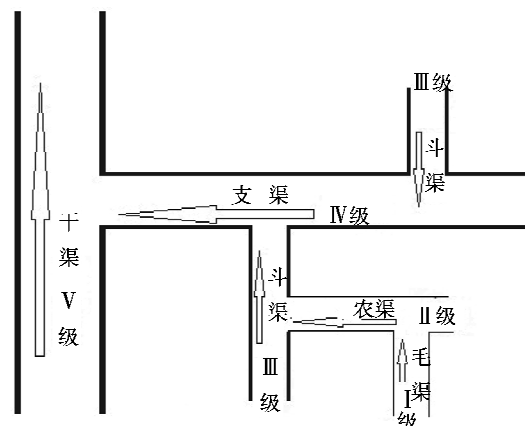


图 2 草海多级沟渠系统示意图

Figure 2 Skeptic map of multi-stage ditch system in Caohai Wetlands

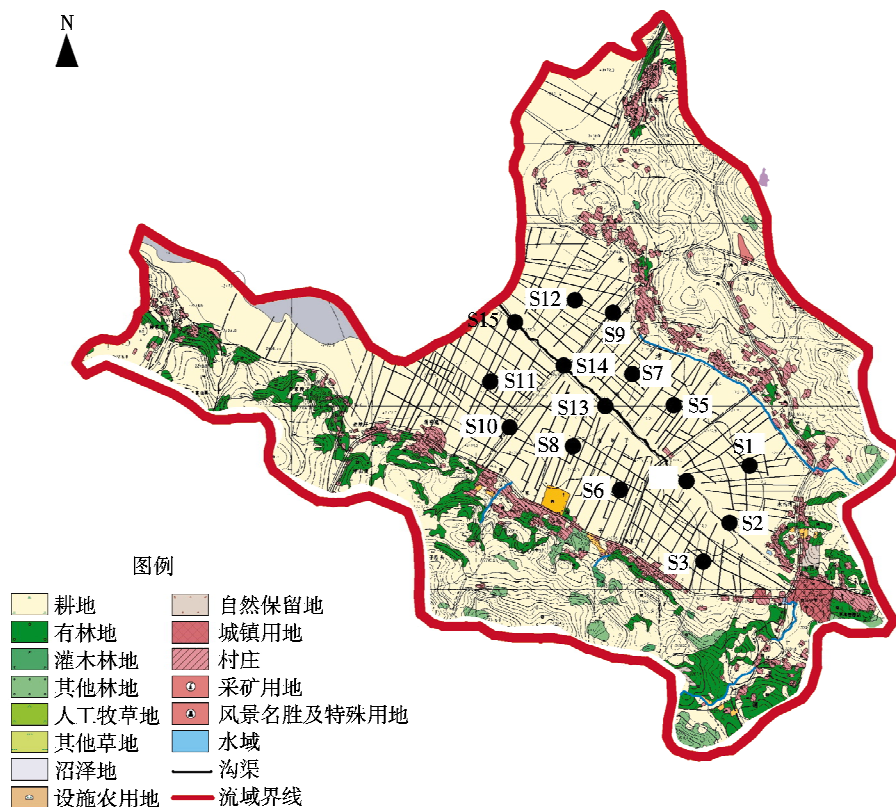


图 1 草海湿地典型区域多级沟渠系统及采样点分布图

Figure 1 The distribution of multi-stage ditch systems and sample in Caohai Wetlands

涮洗 3 次,然后在水面下 5 cm 采水,盖严,保存于便携冰箱中。运回实验室,检测总氮(TN)、氨态氮(NH_4^+-N)、硝态氮(NO_3^--N)和总磷(TP)。沉积物样品采自表层 0~5 cm,样品放入便携式冰箱内冷藏,运回实验室置于背光、通风处阴干,按四分法混合研磨备份进行分析。沉积物主要物理化学性质见表 1。

表 1 沉积物的物理化学性质

Table 1 Physical and chemical characteristics of the tested sediment

pH	总磷/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	总氮/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	Fe/Al-P/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	Ca-P/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	有机质/%
6.93	0.835	9.23	0.250	0.173	4.72

1.2 样品分析方法

水样检测方法:总氮(TN)碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB 11894—1989);总磷(TP)钼酸铵分光光度法(GB 11893—1989);氨态氮(NH_4^+-N)纳氏试剂光度法(GB 7479—1987);硝态氮(NO_3^--N)采用 0.45 μm 微孔滤膜过滤,酚二磺酸紫外分光光度法比色(GB 7480—1987)。

磷的吸附动力学实验:于一系列 50 mL 聚乙烯塑料管中分别加入 2.50 g 左右混合沟渠沉积物,再分别加入质量浓度为 40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 KH_2PO_4 标准溶液 50 mL,在(25±1) °C 下分别振荡不同时间后,离心并用 0.45 μm 微孔滤膜抽滤,用钼锑抗分光光度法测定上清液中活性磷酸盐(PO_4^{3-} 平衡质量浓度),同时做空白实验。根据吸附前后溶液中 PO_4^{3-} 的起始质量浓度和平衡质量浓度之差,扣除空白,计算沉积物对 PO_4^{3-} 的吸附量。

氨氮吸附动力学实验:于一系列 50 mL 聚乙烯塑料管中分别加入 5.00 g 左右混合沟渠沉积物,再分别加入质量浓度为 40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NH_4Cl 标准溶液 50 mL,在(25±1) °C 下分别振荡不同时间后,离心并用 0.45 μm 微孔滤膜抽滤,用纳氏试剂分光光度法测定上清液中铵根离子含量(NH_4^+-N 平衡质量浓度),同时做空白实验。根据吸附前后溶液中 NH_4^+ 的起始质量

浓度和平衡质量浓度之差,扣除空白,计算沉积物对 NH_4^+ 的吸附量。

影响因素实验方法:分别称取 0.500 g 左右的沉积物样(分别改变溶液的盐度、硝酸根、硫酸根和钙离子浓度)于若干个 50 mL 聚乙烯塑料管中,其他实验条件及操作同上,分别计算不同条件下沉积物对 PO_4^{3-} 或 NH_4^+ 的吸附量。

每个样品平行测定 3 次,结果取平均值,相对误差<5%。实验所用器皿均用稀硝酸浸泡,药品均为分析纯以上,所用水为超纯水。

1.3 截留率计算方法

根据下式计算截留率:

$$\text{截留率} = (C_1 - C_v) / C_1 \times 100\%$$

式中: C_1 为毛沟污染物浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; C_v 为干渠污染物浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

1.4 数据分析

利用 SPSS18.0 进行统计分析。利用独立样本 T 检验处理影响因素与空白对照样本的显著性差异检验。

2 结果与讨论

2.1 渠系对氮磷的截留效应

从表 2 可以看出,渠系中氮磷浓度除 I 级毛沟较高外,其余均较低。氮磷在渠系中的变化受多种因素的影响,如自然的稀释、光解、生物降解等。渠系 I 级至 V 级,TP 和 TN 的截留率分别为 66.7%~79.7%和 66.0%~76.4%; NH_4^+-N 的截留率最高,为 82.8%~89.3%。调查发现,连接村寨的沟渠水体氮磷浓度较高,而农田源头的沟渠氮磷浓度较低,这说明引起沟渠水体氮磷浓度增高的主要因素应该是四周比较集中的村寨生活污水排放^[9]。白马河 I 级毛沟沟渠宽度为 30~40 cm,深度 40 cm 左右,底泥沉积物为深褐色半流体状,厚度为 15~20 cm;坡度较大,排水沟渠快,流量小,处于沟渠系统的最末端,主要汇集了周围村落任意排放的生活废水,因而水质较差。I 级毛沟汇集

表 2 白马河渠系对 TP、TN、 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的截留率Table 2 TP、TN、 NH_4^+-N and NO_3^--N retention rates in the ditch systems

沉积物氮磷	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级	截留率
TP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.19±0.012	0.03±0.009	0.07±0.008	0.02±0.010	0.05±0.009	66.7%~79.7%
TN/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	4.51±0.36	1.45±0.21	2.43±0.24	1.26±0.18	1.28±0.13	66.0%~76.4%
$\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	2.77±0.21	0.24±0.09	0.48±0.11	0.18±0.03	0.38±0.06	82.8%~89.3%
$\text{NO}_3^--\text{N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1.07±0.19	0.39±0.08	0.50±0.11	0.38±0.06	0.43±0.07	43.2%~71.4%

注:以上 TP、TN、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 含量数值为均值±SD 值。

的污水排入散布在农田中的湿地,水质得以改善。

2.2 吸附动力学及影响因素试验

沟渠具有河流和湿地的特征,是一种人类活动影响下的半自然化的湿地生态系统,对氮、磷等污染物具有明显的去除效力^[6]。湿地对污染物的去除机理主要包括:物理过滤、化学吸附、土壤基质作用、植物吸收、微生物降解等^[7]。因此选取沟渠沉积物混合样品,研究其对氮磷的吸附动力学,探讨吸附影响因素对于阐明截留效用具有重要意义。

2.2.1 沉积物对氮磷的吸附动力学试验

图3反映了沉积物对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附动力学过程,可以看出沉积物对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附速率不是一个零级反应,即沉积物对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附不受浓度影响的反应,吸附累积量与时间之间呈曲线变化。此过程是一个复合动力学过程,包括快速吸附和慢吸附2个阶段,这与Lopez^[8]、高丽^[9]等研究是一致的。Maguire等研究也表明,当P加入到土壤后,土壤对P的吸附表现出开始时有一个快速吸附过程,之后是一个慢速吸附过程。

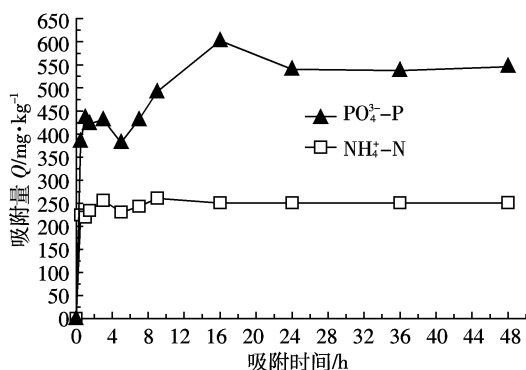


图3 沉积物对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附动力学曲线

Figure 3 Kinetic curve of phosphate-P and ammonia-N sorption on sediment

在0~9 h内,沉积物对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的吸附快速的增加,第10 h吸附量增加到 $500.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,第16 h出现最大吸附量为 $602.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,经过24 h吸附基本达到动态平衡,吸附量稳定在 $540.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。对比 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附过程可看出沉积物对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附较为平稳,达到平衡的时间也较 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的吸附快,在0~3 h内沉积物对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附为快速吸附阶段。沉积物对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的最大吸附量为 $255.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,经过9 h吸附趋于平衡。相比国内类似研究结果,太湖沉积物对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的吸附0~5 h内为快速吸附阶段,对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附0~3 h内为快速吸附阶段^[10];滇池沉积

物对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 在0~2 h内快速进行,主要吸附阶段为0~6 h^[9]。发现草海沟渠沉积物对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 吸附平衡时间较长,这可能是与沉积物种类存在地域性差异有关。不同沉积物在同粒度大小、同初始浓度下,吸附作用和沉积物种类有很大的关系,泥质底的吸附作用远大于沙质底的吸附作用^[11]。调查发现,白马河流域农田湿地渠系,每年都会进行人工疏浚清淤。疏浚过程中会造成颗粒物发生再悬浮,使得新生表层直接与氧含量较充分的上覆水接触,致使氧化还原电位上升,从而使上覆水中的无机颗粒物质,以铁、锰离子等为基本结构的粘土矿物及氧化物胶体显著增加,有利于底泥对氮磷的专属性吸附^[12]。因此可以看出人工清淤有利于强化渠系对氮磷的截留。

图3显示沉积物对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 在快速吸附阶段中,沉积物对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 吸附曲线波动较大,这可能是由于水体搅动不均匀,pH^[10]及温度波动等因素使其处于一个动态过程中。沉积物对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附过程中,经过5 h出现的拐点可能是由于吸附达到饱和之后,由于外界因素的干扰,如水体扰动,温度的突变而引起的释放,此原因还有待进一步的讨论。

2.2.2 磷酸盐吸附影响因素

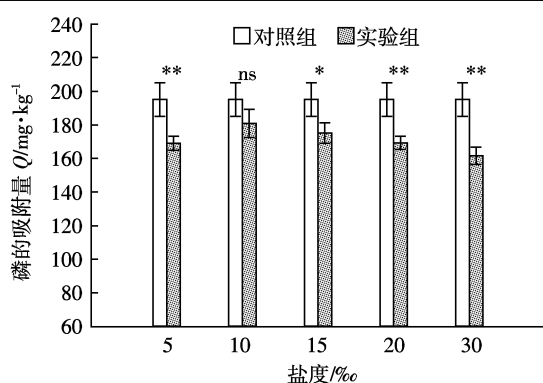
水体中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 在沉积物表面的吸附是一个复杂的过程,包括离子吸附、配位吸附等过程^[13],诸多环境因子如pH、盐度、水生生物状况、水动力学条件、钙铁离子等都能对这一过程产生影响^[14-16]。本实验主要考虑盐度, Ca^{2+} 以及水体中的主要无机阴离子 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 对氮磷吸附的影响。

2.2.2.1 盐度对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 吸附的影响

如图4所示,随着盐度的升高,沉积物对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的吸附呈现下降趋势,即盐度对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的吸附有抑制作用。Hartikainen^[17]和Niskanen^[18]认为P吸附能力与有机质及Fe、Al氧化物含量呈正相关,有机质由具有多种官能团的分子构成,这些官能团为 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的吸附提供位点^[19-20]。随着盐度的增加,溶液中越来越多的 Cl^- 与 PO_4^{3-} 竞争沉积物表面的位点,从而降低了沉积物对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的吸附能力,使得吸附量逐渐下降。

2.2.2.2 Ca^{2+} 对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 吸附的影响

如图5所示, Ca^{2+} 在低浓度情况下对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的吸附具有微弱的抑制作用,随着浓度的增加促进作用明显。这可能是由于在低浓度时加入钙离子的同时伴随加入 Cl^- (Ca^{2+} 浓度梯度溶液是由优级纯 CaCl_2 配置), Cl^- 对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 吸附的抑制作用强于 Ca^{2+} 的促进作用;而在高浓度下,达到磷酸钙沉积浓度,则 Ca^{2+} 与 PO_4^{3-}



** $P < 0.01$; * $P < 0.05$; ns 差异性不显著。下同

图4 盐度对 PO_4^{3-} -P 吸附量的影响

Figure 4 Effects of various salinity concentrations on phosphate-P sorption

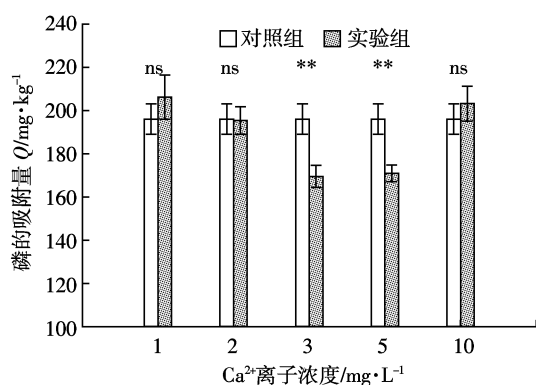


图5 $[Ca^{2+}]$ 对 PO_4^{3-} -P 吸附量的影响

Figure 5 Effects of various calcium concentrations on phosphate-P sorption

集合生成磷酸钙,从而使得吸附量增加。

2.2.2.3 SO_4^{2-} 对 PO_4^{3-} -P 吸附的影响

图6为不同浓度 SO_4^{2-} 对 PO_4^{3-} -P 吸附量的影响,随着溶液中 SO_4^{2-} 浓度的上升,磷的吸附量呈现出下降趋势,从 $175.2 mg \cdot kg^{-1}$ 下降到 $160.7 mg \cdot kg^{-1}$ 。 SO_4^{2-} 对 PO_4^{3-} -P 吸附的抑制作用也主要表现在对沉积物表面“活性位点”的竞争上,但其对磷的吸附抑制能力明显低于 Cl^- ,这可能是由于两者之间的电荷数及其水合半径的差异导致静电引力的不同造成的。

2.2.2.4 NO_3^- 对 PO_4^{3-} -P 吸附的影响

如图7所示,比较溶液中 NO_3^- 初始浓度为0、2、4、6、8、10 $mg \cdot L^{-1}$ 时的吸附分别为 156.9、164.7、163.7、164.3、160.5、154.6 $mg \cdot kg^{-1}$,发现 NO_3^- 对 PO_4^{3-} -P 吸附量的影响不明显,即 NO_3^- 对 PO_4^{3-} -P 有微弱的抑制作用。原因可能是溶液中存在大量的阴离子,而同为阴离子的 NO_3^- 虽然可以通过与竞争沉积物表面的交换“活性位点”的途径来抑制 PO_4^{3-} -P 的吸附,但其竞争

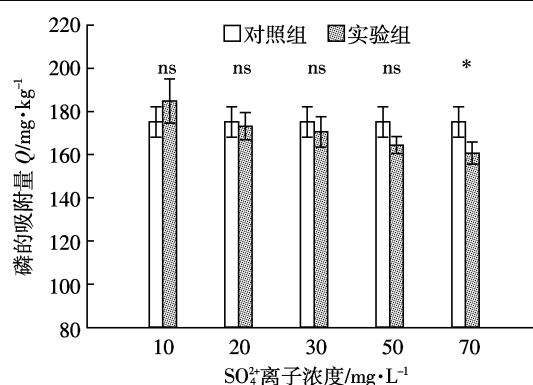


图6 $[SO_4^{2-}]$ 对 PO_4^{3-} -P 吸附的影响

Figure 6 Effects of various sulphate concentrations on phosphate sorption

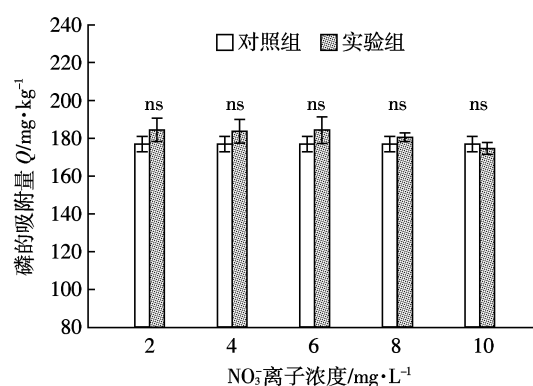


图7 $[NO_3^-]$ 对 PO_4^{3-} -P 吸附的影响

Figure 7 Effects of various nitrate concentrations on phosphate sorption

力较差,导致沉积物对磷表现为吸附量小,这与胡智弢等^[10]的研究结论一致。

2.2.3 氨氮吸附影响因素

2.2.3.1 盐度对 NH_4^+ -N 吸附的影响

图8反映出盐度对 NH_4^+ -N 的吸附具有一定的抑制作用。当盐度从0‰升至10‰时,吸附量迅速下降并达到最低值,吸附量为 $118.0 mg \cdot kg^{-1}$ 。此后随着盐度的增大吸附量在 $134.0 \sim 127.7 mg \cdot kg^{-1}$ 之间,变化不大。

盐度对 NH_4^+ -N 吸附的影响可能是通过抑制或促进离子吸附反应生成配位键的形式影响沉积物对 NH_4^+ -N 的吸附^[21]。随着盐度的增加, NH_4^+ 与 Cl^- 生成离子对,部分中和了 NH_4^+ 的极性,从而降低了沉积物对 NH_4^+ -N 的吸附量。

2.2.3.2 Ca^{2+} 对 NH_4^+ -N 吸附的影响

如图9所示, Ca^{2+} 浓度对沉积物 NH_4^+ -N 吸附量的影响很大,在0~2 h内 NH_4^+ -N 的吸附量迅速减小,在溶液中的 Ca^{2+} 浓度达到 $5 mg \cdot L^{-1}$ 时,沉积物对 NH_4^+ -N

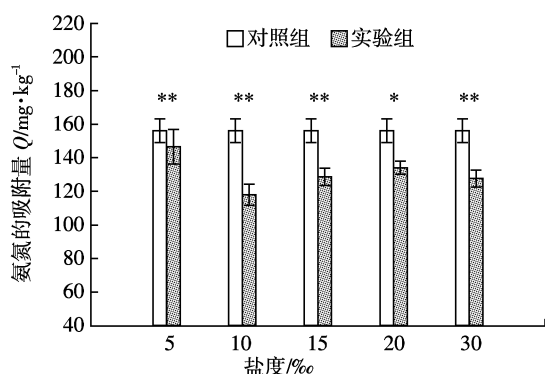
图8 盐度对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 吸附量的影响

Figure 8 Effects of various salinity concentrations on ammonia sorption

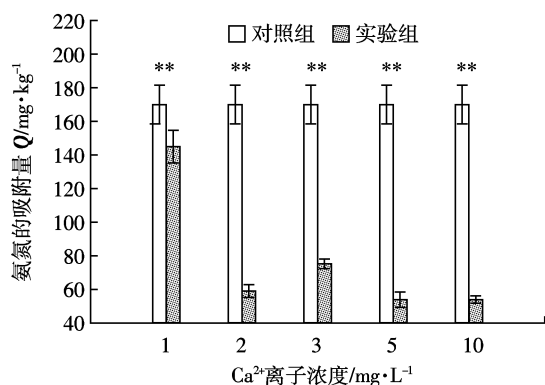
图9 $[\text{Ca}^{2+}]$ 对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 吸附量的影响

Figure 9 Effects of various calcium concentrations on ammonia sorption

的吸附量最小为 $54.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。说明 Ca^{2+} 对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附有很强的抑制作用,这同样是由于溶液中的 Ca^{2+} 与 NH_4^+ 竞争沉积物表面的“活性位点”,从而使得 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附量降低。

2.2.3.3 SO_4^{2-} 对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 吸附的影响

图10为 SO_4^{2-} 对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 吸附的影响曲线,当 SO_4^{2-} 的浓度小于 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,影响较小,此后随着浓度的增加吸附量出现明显的下降趋势。这可能是由于在低浓度时, NH_4^+ 与 SO_4^{2-} 形成配位键,降低了 NH_4^+ 极性,从而影响沉积物对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附容量。当溶度进一步增大使溶液中的 $\text{K}^+(\text{SO}_4^{2-}$ 溶度梯度溶液是由优级纯 K_2SO_4 固体配置)迅速占据沉积物表面的负等位点。从而使得沉积物对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附容量迅速降低。此原因将在下一阶段的实验中进一步探究。

2.2.3.4 NO_3^- 对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 吸附的影响

图11可以看出 NO_3^- 对 NH_4^+ 吸附具有一定的抑制作用,但其对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的抑制能力较 Cl^- 弱。这可能是由于沉积物中的可变电荷对 Cl^- 、 NO_3^- 离子的吸附主要是受静电引力控制。两种阴离子的吸附亲合力的次

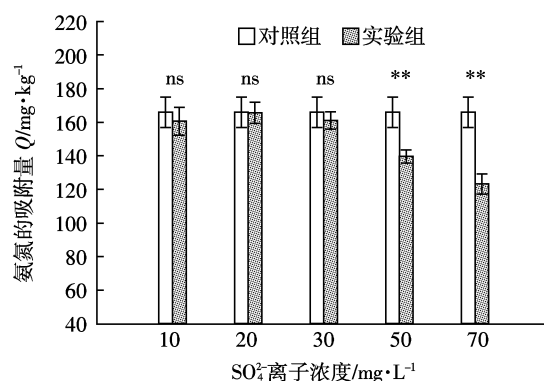
图10 $[\text{SO}_4^{2-}]$ 对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 吸附的影响

Figure 10 Effects of various sulphate concentrations on ammonia sorption

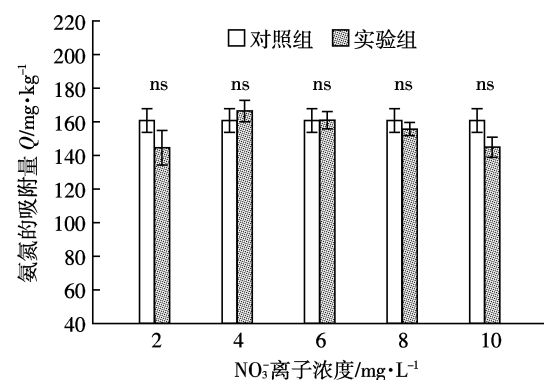
图11 $[\text{NO}_3^-]$ 对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 吸附的影响

Figure 11 Effects of various nitrate concentrations on ammonia sorption

序为 $\text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$ ^[13]。同样, Blok 和 Bruyn^[22]等也证实可变电荷对一价阴离子的吸附中专属性的次序为: $\text{Cl}^- > \text{Br}^- > \text{I}^- > \text{NO}_3^- > \text{ClO}_4^-$, 因而 NO_3^- 对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的抑制能力较 Cl^- 弱。

3 结论

(1)湿地农田多级沟渠系统对氮磷具有一定的截留效用, I级至V级时TP和TN的截留率分别为66.7%~79.7%和66.0%~76.4%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的截留率最高,为82.8%~89.3%。干渠V级水质好于低级农田渠系水质。沟渠定期清淤疏浚将有利于强化截留作用。

(2)沟渠沉积物与太湖、滇池沉积物相比较而言,沟渠沉积物对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 吸附平衡时间较长。沟渠沉积物对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的吸附0~9 h为快速吸附阶段,经过9 h趋于稳定,而对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附平衡时间与 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的吸附相比时间较短,在3 h后趋于动态平衡。

(3)盐度、 $[\text{SO}_4^{2-}]$ 和 $[\text{NO}_3^-]$ 对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附都具有

一定的抑制作用,而 $[\text{Ca}^{2+}]$ 对两者的影响具有明显不同, Ca^{2+} 对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的吸附在低浓度下抑制,高浓度下促进;对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附具有明显的抑制作用,且当 Ca^{2+} 浓度为 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时吸附量最小。

参考文献:

- [1] 金相灿,任丙相.太湖重点污染控制区综合治理方案研究[J].环境科学,1999,12(5):1-5.
JIN Xiang-can, REN Bing-xiang. Comprehensive treatment plan for key-polluted regions of Lake Taihu[J]. *Research of Environmental Sciences*, 1999, 12(5):1-5.
- [2] Woltemade C J. Ability of restored wetlands to reduce nitrogen and phosphorus concentrations in agricultural drainage water[J]. *Soil Water Cons*, 2000, 55(3):303-309.
- [3] Peterson B J, Wollheim W M, Mulholland P J, et al. Control of nitrogen export from watershed by headwater streams[J]. *Science*, 2001, 292:86-90.
- [4] 翟丽华,刘鸿亮,席北斗,等.农业源头沟渠沉积物氮磷吸附特性研究[J].农业环境科学学报,2008,27(4):1359-1363.
ZHAI Li-hua, LIU Hong-liang, XI Bei-dou, et al. Property of nitrogen and phosphate adsorption on sediments in headwater ditches[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4):1359-1363.
- [5] 赵庆良,李湘中.化学沉淀法去除渗滤液中的氨氮[J].环境科学,1999,20(5):90-92.
ZHAO Qing-liang, LI Xiang-zhong. Ammonianitrogen removal from landfill leachate by chemical precipitation[J]. *Environmental Science*, 1999, 20(5):90-92.
- [6] 毛战坡,尹澄清,王雨春,等.污染物在农田溪流生态系统中的动态变化[J].生态学报,2003,23(12):2615-2622.
MAO Zhan-po, YIN Cheng-qing, WANG Yu-chun, et al. A study on nitrogen transport in a farm landstream in Liuchahe watershed[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(12):2615-2622.
- [7] 毛战坡,单保庆,尹澄清,等.磷在农田溪流中的动态变化[J].环境科学,2003,24(6):1-8.
MAO Zhan-po, SHAN Bao-qing, YIN Cheng-qing, et al. Spatial phosphorus retention in an agricultural headwater stream[J]. *Environment Science*, 2003, 24(6):1-8.
- [8] Lopez P, Lluch X, Vidal M, et al. Adsorption of phosphorus on sediments of the Balearic Islands(Spain) related to their composition[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 1996, 42:185-196.
- [9] 高丽,杨浩,周健民,等.滇池沉积物磷酸盐吸附和矿物质学特征的研究[J].农业环境科学学报,2004,23(2):259-262.
GAO Li, YANG Hao, ZHOU Jian-min, et al. Adsorption of phosphate and mineral characteristic in sediment in Dianchi Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(2):259-262.
- [10] 胡智强,孙红文,谭媛.湖泊沉积物对N和P的吸附特性及影响因素研究[J].农业环境科学学报,2004,23(6):1212-1216.
HU Zhi-tao, SUN Hong-wen, TAN Yuan. Adsorptive characteristic of nutrient elements and influential factors in Taihu Lake sediment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(6):1212-1216.
- [11] 李曰嵩,杨红.长江口沉积物对磷酸盐的吸附与释放的研究[J].海洋环境科学,2004,23(3):39-42.
LI Yue-song, YANG Hong. Adsorption and release of phosphorus in sediments of the Changjiang Estuary[J]. *Marine Environmental Science*, 2004, 23(3):39-42.
- [12] 余居华,钟继承,张银龙,等.湖泊底泥疏浚对沉积物再悬浮及营养盐负荷影响的模拟[J].湖泊科学,2012,24(1):34-42.
YU Ju-hua, ZHANG Ji-cheng, ZHANG Yin-long, et al. Simulation of influence of dredging on sediment resuspension and nutrient loading in lake[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, 24(1):34-42.
- [13] 于天仁,李国亮,于昌璞,等.可变电荷土壤的电化学[M].北京:科学出版社,1996.
YU Tian-ren, LI Guo-liang, YU Chang-pu, et al. Electrochemistry of Variable Charge Soils[M]. Beijing:Science Publishing, 1996.
- [14] 周孝德,韩世平,陈惠君.环境因素对滇池底泥磷吸附的影响[J].水力学报,1998(S1):12-17.
ZHOU Xiao-de, HAN Shi-ping, CHEN Hui-jun, et al. The influences of environmental factors on phosphate sorption by sediments in lake Dianchi[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1998(S1):12-17.
- [15] Sakadevan K, Bavor H J. Phosphate adsorption characteristics of soils, slags and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems[J]. *Water Research*, 1998, 32:393-399.
- [16] Waruken K W, Gill G A, Santschi P H, et al. Benthic exchange of nutrients in Galveston Bay[J]. *Texase Etuaries*, 2000, 23(5):647-661.
- [17] Hartikainen H. Phosphorus and its reactions in terrestrial soils and lake sediments[J]. *J Sci Agric Soc Finl*, 1979, 51:537-624.
- [18] Niskanen R. Sorption capacity of phosphate in mineral soils II: Dependence of sorption capacity on soil properties[J]. *J Agri Sci Finl*, 1990, 62:9-15.
- [19] Ericd V H, Franck A, Veronique D, et al. Impact of alum treatment on Dphosphorus sediment fractionation and short term release in polymictic shallow lake influence of pH conditions[J]. *RMZ-Materials and Geoenviron*, 2005, 52(1):63-66.
- [20] Day G M, Hart B T, Mckelvie I D, et al. Adsorption of natural organic matter onto goethite[J]. *Colloids and Surfs A*, 1994, 8:1-13.
- [21] 刘培芳,陈振楼,刘杰,等.环境因子对长江口潮滩沉积物中 NH_4^+ 的释放影响[J].环境科学研究,2002(15):28-31.
LIU Pei-fang, CHEN Zhen-lou, LIU Jie, et al. Effects of environmental factors on NH_4^+ release in tidal flat sediments along the Yangtze Delta[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2002(15):28-31.