

中文核公期刊/CSCD

请通过网上投稿系统投稿 网址:http://www.aes.org.cn

池塘水力停留时间和氮素分层滞留能力分析

文雯,张名瑶,钟泳林,高绣纺,吕明权,吴胜军

引用本文:

文雯,张名瑶,钟泳林,高绣纺,吕明权,吴胜军.池塘水力停留时间和氮素分层滞留能力分析[J].农业环境科学学报,2022, 41(10):2277-2286.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0329

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

红树林人工湿地的脱氮除磷效果研究

刘永,张诗涵,肖雅元,吴鹏,王腾,李纯厚 农业环境科学学报. 2022, 41(8): 1788-1799 https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1478

暗管农田不同类型肥料对向日葵生长及土壤氮素分布的影响

祁茜, 史海滨, 闫建文, 李仙岳, 高晓瑜, 范理权, 郝云凤 农业环境科学学报. 2022, 41(3): 559-567 https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0840

养殖肥液不同灌溉强度下硝化-脲酶抑制剂-生物炭联合阻控氮淋溶的研究 杨涵博,罗艳丽,赵迪,赖睿特,张克强,梁军锋,沈丰菊,王风 农业环境科学学报.2020,39(10):2363-2370 https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0471

不同质量浓度硝态氮在潮白河模拟河床中去除效果研究

王西涵, 王莹, 刘云, 杨丽虎, 梁琼, 张茜茜, 王浚亦 农业环境科学学报. 2022, 41(1): 144-152 https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0635

不同雨强和植被盖度对稻田径流及氮素流失的影响

严磊,邓旭哲,薛利红,侯朋福,徐德福,杨林章 农业环境科学学报. 2021, 40(12): 2761-2769 https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0397



关注微信公众号,获得更多资讯信息

农业环境科学学报 Journal of Agro-Environment Science

文雯,张名瑶,钟泳林,等.池塘水力停留时间和氮素分层滞留能力分析[J].农业环境科学学报,2022,41(10):2277-2286. WEN W, ZHANG M Y, ZHONG Y L, et al. Analysis of pond water retention time and retention capacity of nitrogen stratification[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(10): 2277-2286.



池塘水力停留时间和氮素分层滞留能力分析

文雯1,2,张名瑶1,2,钟泳林2,高绣纺1,吕明权2*,吴胜军2

(1.长江大学,武汉 430000; 2.中国科学院重庆绿色智能技术研究院,重庆 400714)

摘 要:为揭示池塘不同深度的水力滞留能力和氮素养分吸收滞留特征,在重庆市北碚区碑湾流域筛选一池塘作为试验塘,于冬季开展野外脉冲示踪试验。在此基础上,采用水力停留时间分布方法,对水力滞留能力进行评价分析,同时利用基于养分螺旋原理的TASCC方法,开展硝态氮滞留能力特征分析。结果表明:(1)池塘底层的营养盐浓度要高于上层,且底层的营养盐滞留能力强于上层,进入池塘的大部分氮素随水流从底层缓慢流经并聚积在塘底,少部分从上层快速流走,便于后续氮素去除;(2)池塘充分混匀后各层的NO₃-N背景浓度吸收速率的变化范围为2.50~9.13 μg·m⁻²·s⁻¹,NO₃-N背景浓度吸收速度的变化范围为0.12~0.40 m·s⁻¹,池塘的整个上覆水都对氮素进行吸收转化,滞留在底层的氮素在上覆水-沉积物间不断交换,进行硝化反硝化等作用,减少农业非点源氮素污染。

关键词:池塘;水力滞留;氮养分滞留;停留时间分布(RTD);TASCC方法

中图分类号:X52 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)10-2277-10 doi:10.11654/jaes.2022-0329

Analysis of pond water retention time and retention capacity of nitrogen stratification

WEN Wen^{1,2}, ZHANG Mingyao^{1,2}, ZHONG Yonglin², GAO Xiufang¹, LÜ Mingquan^{2*}, WU Shengjun²

(1. Yangtze University, Wuhan 430000, China; 2. Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China)

Abstract: To reveal the characteristics of water retention capacity and nitrogen retention at different pond depths, an experimental pond in Beibei District, Chongqing City was selected and the field pulse tracer experiment was carried out in winter. The residence time distribution was adopted to evaluate and analyze the hydraulic retention capacity. Characteristics of nitrate nitrogen retention capacity were analyzed by the additions of tracer additions TASCC method based on nutrient spiral principle. The concentration of nutrients in the bottom layer of the pond was higher than that in the upper layer, and the retention capacity of nutrients in the bottom layer was stronger than that in the upper layer. Most of the nitrogen entering the pond flowed slowly through the bottom and accumulated in the bottom of the pond with water flow. The remainder flowed away quickly from the upper layer, facilitating subsequent nitrogen removal. In the background concentration, the absorption rate of NO_3^-N background concentration of each layer depth varied from 2.50 to 9.13 µg·m⁻²·s⁻¹, the absorption rate of NO_3^-N background concentration of each layer depth varied from 2.50 to 9.13 µg·m⁻²·s⁻¹, the absorption rate of NO_3^-N background concentration of each layer depth varied from 2.50 to 9.13 µg·m⁻²·s⁻¹, the absorption rate of NO_3^-N background concentration of each layer depth varied from 2.50 to 9.13 µg·m⁻²·s⁻¹, the absorption rate of NO_3^-N background concentration of each layer depth varied from 2.50 to 9.13 µg·m⁻²·s⁻¹, the absorption rate of NO_3^-N background concentration of each layer depth varied from 2.50 to 9.13 µg·m⁻²·s⁻¹, the absorption rate of NO_3^-N background concentration ranged from 0.12 to 0.40 m·s⁻¹, the entire overlying water of the pond absorbed and transformed nitrogen, and the nitrogen trapped in the bottom layer was constantly exchanged between the overlying water and sediment to perform nitrification and denitrification, and reduce nitrogen pollution

Keywords: pond; hydraulic retention; nitrogen retention; residence time distribution (RTD); TASCC method

收稿日期:2022-04-04 录用日期:2022-05-25

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (42071242); Project of Chongqing Science and Technology Bureau (cstc2021jxj10091); The Central Government Guided Local Funds for Science and Technology Development(2021000069)

作者简介:文雯(1997—),女,湖北恩施人,硕士研究生,从事小型水体对氮素循环影响研究。E-mail:961619730@qq.com *通信作者:吕明权 E-mail:lvmingquan@cigit.ac.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(42071242);重庆市科技局项目(cstc2021jxj10091);中央引导地方科技发展专项资金项目(2021000069)

以池塘为代表的小型水体是内陆水体的重要组成 部分,我国的小型水体(0.1~10 hm²)数量约510万个,占 所有内陆水体(不包括河流)数量的98.65%,占内陆水 体面积的17.85%^[1],在全国各地分布较广,集中分布在 地势低平、气候湿润、降水丰沛、地下水和地表水丰富的 大江大河中上游以及天然湿地集中的周边区域,其中, 川渝地区、长江流域中下游是中国塘库分布最为集中 的地区。小型水体相比于大型水体具有更强的生物地 球化学过程[2-3],目这些水体常分布于耕地和居住区周 围,具有拦截农业面源污染的重要作用。研究表明,小 型水体对水中营养盐的去除效果显著[4-7],尤其是对氮 素的去除。在降雨产流时,池塘能够减缓径流流速,拦 截悬浮物中携带的养分,在微生物的作用下经由再矿 化、硝化、反硝化及厌氧氨氧化等过程对氮素进行转化, 进而降低水中氮的浓度。反硝化和厌氧氨氧化是脱氮 过程中较为重要的两个环节,能够极大降低水环境中 的活性氮,缓解水体富营养化,促进水质进化^[8-9]。

目前,关于池塘对流域氮素拦截削减的贡献研究 较多^[3,10-11],大多数研究都把池塘当作黑箱处理,针对 整个池塘进行研究,根据对池塘进出口处以及底泥的 变化,分析池塘的拦截率,对比说明池塘内部发生的 系列转化,但并未清楚地揭示池塘内部在不同深度下 发生的反应^[12-14]。现有研究证明,水力负荷、水力停 留时间及水深直接影响塘库的微生境和氧含量分布, 进而影响氮的硝化、反硝化等过程,影响塘库对径流 污染物的截留、缓冲和存储^[15-16]。在塘库不同深度的 上覆水中,微生物、含氧量以及颗粒物浓度均不同,颗 粒物的含量对微生物的数量及生长发育都具有促进 作用,从而促进氮的转化^[17-18]。总之,现有的研究简 化了池塘径流拦截过程,难以深入剖析小水体对氮素 的滞留能力和氮素输移的精确模拟。

本研究以重庆市北碚区碑湾流域一池塘为例,通 过模拟径流和氮素脉冲添加试验,对池塘出口和上覆 水进行分层观测取样,利用水力停留时间分布(residence time distribution, RTD)和 TASCC(tracer additions for spiraling curve characterization)方法,分析每 一层的水力滞留及氮营养盐滞留情况,为后续塘库在 不同深度下进行氮的反硝化研究奠定基础,同时为小 型水体物质输移模型的开发提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验塘位于重庆市北碚区碑湾流域(106.607°E,

29.947°N),见图 1a,属亚热带季风性湿润气候,年 均温度 16~18 ℃,年均湿度 70%~80%,年均降水量 1 000~1 350 mm,四季分明,空气湿润,多雾少霜。试 验塘平均水深 1.26 m,水面平均宽度 20 m,底部为凹 槽状,底泥厚度约 0.52 m,面积约 835 m²,有效容积约 1 052 m³(图 1b)。试验塘塘内未进行鱼类养殖,其上 方是一口较大的池塘,可为试验塘提供来水,周围为 农业用地,多种植蔬菜、水稻等作物,有分散的居民住 宅,未建有工厂、小作坊等,塘周交通方便,便于实验 设备运输以及水样采集。塘边长有植物,但大多未接 触水面,塘中未分布水生植物。该试验塘大小深浅适 中,四周种植情况符合该流域大多数池塘种植情况, 具有代表性,且无其他化工污染,交通便利,有来水供 应,利于试验进行,因此选择此池塘进行野外试验。

试验塘冬季水温5℃,水体背景浓度TN为1.22 mg·L⁻¹,NO₃-N为0.18 mg·L⁻¹,NH[‡]-N几乎为0,电导 率为422 μS·cm⁻¹,Cl⁻为1.23 mg·L⁻¹,底泥背景浓度 TN为2.81 g·kg⁻¹,NO₃-N为0.28 mg·kg⁻¹,NH[‡]-N为 7.40 mg·kg⁻¹。

1.2 试验方案

在所选定的试验塘,以NaCl作为保守型示踪剂, KNO₃作为添加营养盐,采用瞬时投加示踪剂的方式, 进行现场示踪试验,试验时间为2021年12月。从试 验塘的上塘出口放水,记录其起始水位线,待试验结 束关闭上塘的出水口后记录结束水位线。待水流稳 定后,利用试验塘的水将NaCl(使试验塘里面水中 NaCl浓度升高5 mg·L⁻¹,加入6.5 kg NaCl)和KNO₃(使 试验塘里面水中KNO₃浓度升高6 mg·L⁻¹,加入7.8 kg KNO₃)混合均匀,在试验塘的入水口处瞬时投放,投 放时间控制在15 s内。在投加药品前采集上塘出口 处、试验塘进出口以及每一层的背景水样,测定其电 导率、Cl⁻、NH₄-N、NO₃-N以及TN的背景浓度。

在距离试验塘进水口 2/3 处的中间位置(图 2a, 此处为该试验塘水最深的地方)布置分层采样装置, 该采样装置分设四层,如图 2b 所示,分别为 A(最底 层)、B、C、D。每隔 15 min 采集试验塘出口处 E 的水 样,以及用抽水泵抽取每层的水样,水样用塑料瓶 (500 mL)保存。采样时间间隔根据情况进行调整,保 证每层时间间隔一致。采用 MGG/KL-DCB 便携式流 速仪测定每层的流速,在试验进行的前、中、后期测量 每一层的流速,结果取三次测量值的平均值。

为获得较为完整的示踪剂浓度穿透曲线,采用现 场测定 Cl-和实验室测定营养盐浓度的试验方案。在









红色部分为底阀,安装在进水管管口处,以减少杂质流入,防止底泥进入,同时也防止塘水回流 The red part is the bottom valve, which is installed at the mouth of the water inlet pipe to reduce the inflow of impurities, to prevent the bottom mud from entering, and prevent the backflow of pond water

图2 试验装置安装位置(a)及试验塘分层情况剖面图(b)

Figure 2 Installation position of experimental device(a) and sectional view of stratification of test pond(b)

野外,采用多参数水质分析仪测定电导率。在实验室,每个样品原液的一部分用氯离子测定仪测定 Cl-浓度,一部分用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法(GB11894—1989)测定 TN;另一部分水样经过滤膜抽滤后用于测定 NHI-N及 NO3-N的浓度,分别以靛酚蓝比色法¹¹⁹¹和紫外分光光度法(HJ/T 346—2007)测定。

1.3 模型与方法

1.3.1 水力滞留

(1)数据标准化方法

在脉冲示踪试验中,由得到的瞬时电导率转换成 NaCl浓度,其浓度变化曲线相当于停留时间的分布 密度图(简称RTD曲线),数据标准化公式为^[20]:

 $N(t) = \frac{\left[E(t) - E_{W} \right] M_{\text{NaCl}} Q}{\left(\lambda_{1} + \lambda_{2} \right) m}$

式中:N(t)为标准化停留时间分布密度, h^{-1} ;E(t)为t时刻出水口处瞬时电导率, $S \cdot m^{-1}$; E_w 为进水口处电导 率(背景值), $S \cdot m^{-1}$; M_{NaCl} 为氯化钠摩尔质量, $g \cdot mol^{-1}$, 取 M_{NaCl} =58.5 $g \cdot mol^{-1}$; λ_1 为钠离子摩尔电导率, $S \cdot m^2 \cdot$ mol⁻¹, 取 λ_1 =5.01×10⁻³ $S \cdot m^2 \cdot mol^{-1}$; λ_2 为氯离子摩尔电 导率, $S \cdot m^2 \cdot mol^{-1}$, 取 λ_2 =7.63×10⁻³ $S \cdot m^2 \cdot mol^{-1}$;Q为进 水流量, $m^3 \cdot h^{-1}$;m为示踪剂加入总量, g_o

(2)水力停留时间

理想条件下,水流流经池塘时,其各个水流质点 往往都具有相同的停留时间,为表观停留时间*t*_n(h), 表达式为:

 $t_n = V/Q$

式中:V为池塘体积,m³;Q为进水流量,m³·h⁻¹。 实际情况下,水流会以不同的路径流经池塘,在

2279

同一时刻进入池塘的水会有不同的停留时间,其平均 停留时间*t*_m(h),表达式为:

$$t_{m} = \int_{0}^{\infty} N(t) t dt / \int_{0}^{\infty} N(t) dt$$

1.3.2 营养盐滞留

养分螺旋指标是对小流域养分滞留评估的重要 技术手段,是表征小河流水系统养分吸收和传输的重 要生态过程。TASCC方法是基于养分螺旋原理的主 要计算方法,为了使养分螺旋指标展现出动态变化过 程,该方法通过向小型水体瞬时投加一定量的添加营 养盐,从而来营造一个贯穿背景浓度值至饱和状态的 浓度变化范围。目前,TASCC方法广泛应用于溶解 性磷酸盐、硝态氮及铵态氮和吸收动力学模拟^[21]。

(1)添加硝态氮动态螺旋指标

 $S_{w-add-dyn} = -1/k_{w-add-dyn}$

 $V_{\text{f-add-dyn}}=Q/(W \times S_{\text{w-add-dyn}})$

 $U_{\text{add-dyn}} = V_{\text{f-add-dyn}} \times NO_{3}^{-} - N_{\text{add-dyn}}$

式中: $S_{w-add-dyn}$ 为添加NO₃-N动态吸收长度,m; $k_{w-add-dyn}$ 为NO₃-N动态综合衰减系数,m⁻¹; $V_{f-add-dyn}$ 为NO₃-N动态吸收速度,m·s⁻¹;Q为流量,m³·s⁻¹;W为水面宽度,m; $U_{add-dyn}$ 为NO₃-N动态吸收速率,g·m⁻²·s⁻¹; NO_3 - $N_{add-dyn}$ 为NO₃-N动态浓度,mg·L^{-1/22]}。

添加NO3-N动态综合衰减系数kw-add-dyn表达式为:

$$k_{\text{w-add-dyn}} = \frac{\ln \frac{NO_{\bar{3}} - N_{\text{ambcorr}}}{Cl_{\text{ambcorr}}^{-}} - \ln \frac{NO_{\bar{3}} - N_{\text{add}}}{Cl_{\text{add}}^{-}}}{L}$$

式中:NO₃-N_{ambcor}/Cl_{ambcor}为示踪剂扣除浓度背景后的 水样NO₃-N和Cl⁻浓度比值,无量纲;NO₃-N_{add}/Cl_{add}为 投加示踪剂混合溶液中NO₃-N和Cl⁻浓度比值,无量 纲;L为采样点离开投加点的距离,m。用于分析的水 样需满足NO₃-N_{ambcor}/Cl_{ambcor}<NO₃-N_{add}/Cl_{add}。

混合溶液中释放的NO₃-N仅在稀释扩散,不计转化、吸收等生物过程的情况下抵达下游任一点位的最大浓度NO₃-N_{cons}(保守性浓度,mg·L⁻¹),表达式为:

$$NO_{\overline{3}} - N_{\text{cons}} = Cl^{-} \times \frac{NO_{\overline{3}} - N_{\text{add}}}{Cl_{\text{add}}}$$

添加 NO₃-N 动态浓度 NO₃-N_{add-dyn}(mg·L⁻¹)表达 式为:

 $NO_{3}^{-}-N_{\text{add-dyn}}=\sqrt{NO_{3}^{-}-N_{\text{cons}} \times NO_{3}^{-}-N_{\text{add-obs}}}$ 式中: $NO_{3}^{-}-N_{\text{add-obs}}$ 为扣除背景浓度后水样 $NO_{3}^{-}-N$ 实测 浓度,mg·L⁻¹。

(2)硝态氮背景螺旋指标

以实测浓度与保守性浓度几何均值来表征集成 背景浓度和添加营养盐NO3-N总动态浓度NO3-Nut-dyn

(

 $NO_3^--N_{tot-dyn}=$

 $\sqrt{NO_3^{-} - N_{\text{tot-obs}} \times (NO_3^{-} - N_{\text{cons}} + NO_3^{-} - N_{\text{amb}})}$

式中: $NO_3^- - N_{tot-obs}$ 为未扣除背景浓度的样本 $NO_3^- - N$ 实测浓度, $mg \cdot L^{-1}$; $NO_3^- - N_{amb}$ 为 $NO_3^- - N$ 背景浓度, $mg \cdot L^{-1}$ 。

根据示踪试验获得各样本动态吸收长度 $S_{w-add-dyn}$ 为纵坐标,其对应的 $NO_3 - N_{tot-dyn}$ 计算值为横坐标,采 用线性回归分析,确定 $NO_3 - N$ 背景浓度对应的吸收 长度 $S_{w-amb}^{[23]}$ 。继续计算相应的吸收速率和吸收速度, 表达式分别为:

 $U_{\text{amb}} = Q \times NO_{3} - N_{\text{amb}} / (S_{\text{w-amb}} \times W)$

 $V_{\text{f-amb}} = U_{\text{amb}} / NO_3^- - N_{\text{amb}}$

式中: U_{amb} 为NO₃-N背景浓度吸收速率,g·m⁻²·s⁻¹; V_{f-amb} 为背景浓度吸收速度,m·s⁻¹。

(3)硝态氮总动态螺旋指标

综合考虑背景浓度和添加浓度影响之后,NO₃-N 总动态螺旋指标表达式为:

 $U_{\text{tot-dyn}} = U_{\text{amb}} + U_{\text{add-dyn}}$ $V_{\text{f-tot-dyn}} = U_{\text{tot-dyn}} / NO_3^- - N_{\text{tot-dyn}}$

式中: $U_{tot-dyn}$ 为NO₃-N总动态面积吸收速率,g·m⁻²·s⁻¹; $V_{t-tot-dyn}$ 为动态吸收速度,m·s^{-1[21]}。

2 结果与讨论

2.1 水力滞留分析

试验塘不同深度的停留时间分布密度(RTD)曲 线如图3所示,除了A层的曲线形状较为符合正态分 布,其他几层的曲线上下波动幅度大,甚至出现几个 峰值,因此无法使用本研究的评价参数对水力停留时 间及特征进行各层的对比分析。由于采样时间间隔



图3 试验塘各层及出口处停留时间分布密度曲线(RTD曲线)

Figure 3 Residence time distribution density(RTD) curves at each floor and outlet of the test pond

过大,未能捕捉到明显的峰值,无法拟合较好的数据 曲线,因而也不适用于肖海文的PFD+CSTRs模型^[24-25]、WERNER等^[26]的ZDM模型等,以及其他水力 特性评价方法^[20.27-29]来对滞留时间和特征进行具体计 算和分析。在此结合电导率和CF浓度对每层及出口 处进行分析来阐述各水力滞留的基本情况。

从图4、图5可以看出,试验塘不同深度的变化情况,除了A层的电导率和CF浓度变化明显,其次为B层的电导率稍有增加,其他两层以及出口处电导率和CF浓度的变化幅度较小。A、B、C、D层上下小范围波动,可能是在采样过程中,抽水泵在抽取底层水样时,将沉底的粒子搅动,引起各层的波动。A层的电导率以及CF浓度上升幅度大且出现峰值,B、C、D、E层均未出现峰值,存在三种可能,一是取样时间间隔太长,未取到B、C、D、E层峰值时的水样,B、C、D、E层比A层的峰值出现得早^[30];二是取样时间太短,B、C、D、E层比A层的峰值还未出现就被迫中止采样,B、C、D、E层比A

底层,上层流经的水里携带的溶质少,导致粒子浓度 变化小,B、C、D、E层则不会出现明显峰值^[31]。具体结 果还需进一步试验研究。

2.2 营养盐浓度分析

从图 6、图 7 中试验塘不同深度的 NO₃-N和TN的 浓度变化可知(试验塘 NH‡-N含量检测结果极少,几 乎为零,因此不对其进行分析),与电导率和氯离子浓 度变化情况相同,只有 A 层的变化明显,其次为 B 层, C、D、E 层在扰动的情况下出现轻微波动。A、B 层的 电导率、CI⁻、NO₃-N和TN浓度变化明显,而上层 C、D 层及出口处 E 各项均无明显变化,数值与背景值相差 很小。试验塘底层的营养盐浓度显著高于上层浓度, 且底层浓度居高不下,表明投入试验塘的大部分氮营 养盐从底层流过,并聚积在塘底,而上层只有水流流 过,携带的营养盐非常少。现有的研究表明,水体的 去氮区域,集中在底泥和上覆水的交界处,此处微生 物活性最强^[8,32],底层氮营养盐浓度高,氮素聚集多, 便于后续池塘对氮素的去除。











www.aer.org.cn



国 / 叫迦坡 D.U.U 広义山口义明芯烈仪芯剡水反支化 有机



对渤海的研究表明[33-35],当陆地雨水丰沛,入海的 径流量大时,携带着大量NO3-N入海的水流,在上覆水 与沉积物之间的间隙水存在一定浓度梯度的情况下, NO₃-N则优先向沉积物转移。经研究发现,NO₃-N与 沉积物的含水率呈正相关,说明河床底泥中的NO3-N 大多数从上覆水沉积而来,而不是来自沉积物本身 或是由铵态氮转化而成^[36]。吕晓霞等^[31,37]研究发现, NO₅-N大多数聚积在河床底泥表层的沉积物中并发 生还原反应。以上的研究都是针对大型水体来说明 氮素营养盐在河床沉积物中的聚积,而本研究的结果 与前面研究结果相一致,这表明在小型水体中,当进 人池塘的水体携带的氮营养盐浓度大于池塘本身的 氮浓度情况下,NO3-N易向沉积物沉积并聚集在塘 底,在降雨时,雨水冲刷周围农田,携带氮素进入到池 塘中并大量聚集在塘底发生硝化和反硝化等作用,部 分氮素从出口处直接流走。池塘能够拦截大量氮素 并将其进行转化,净化水质,减少农业非点源氮素污 沈[1,10]

2.3 营养盐滞留情况分析

图 8 为 NO₃-N、Cl⁻浓度穿透曲线以及 NO₃-N:Cl⁻ 比值随时间的变化过程。可以看出大多数水样能满 足 NO₃-N_{ambcor}/Cl⁻ambcor</sub><NO₃-N_{add}/Cl⁻add</sub>(背景浓度),由 于采样点位于距离试验塘进水口 2/3 处,距离药品投 加点距离相对较长,A、B、C 三层均能够充分混合,D 层由于水流流速过快,导致营养盐混合效果差,满足 条件的水样不足。

以 Sw-abb-dyn 为 y 轴, 以 NO₃-N_{tot-dyn} 为 x 轴进行线性 拟合, A、B、C 层的拟合结果如图 9 所示, 所有结果均 在 95% 的置信区间。这三层的拟合效果较好, 将拟 合的曲线延伸至纵坐标轴, 与之相交得到的截距即为 NO₃-N背景浓度对应的吸收长度 Sw-amb。

数据结果显示,对比Sw-amb值:A层<B层<C层,对 比V_{F-amb}、U_{amb}值,A层>B层>C层,表明池塘底层的营养 盐滞留能力强于上层。由对营养盐滞留的影响因素 研究结果可知^[21,38-39],水流流速及研究区的地貌特征 都是养分滞留的重要影响因素,流速与滞留能力强弱







呈负相关,地貌特征与养分滞留能力强弱显著相关。 A、B、C层和D层的流速分别为0.072、0.075、0.090 m· s⁻¹和0.150 m·s⁻¹。从该试验塘的地貌特征来看,其底 部为一个凹槽,A层为试验塘的最底层,靠近凹槽,水 流速度较于其他层来说相对缓慢,水面宽度大,有利 于营养盐沉积,因而A层的营养盐滞留能力好。试验 塘上层距离凹槽较远,且流速相对较快,继而上层营



图 9 试验塘 A、B、C 层 S_{w-add-dyn}-NO₃-N_{tot-dyn} 拟合关系曲线 Figure 8 S_{w-add-dyn}-NO₃-N_{tot-dyn} fitting curve of A, B and C layers in the test pond

养盐的滞留能力要弱于底层。

WU等^[32]、ZHANG等^[40]对沉积物研究发现,滞留 在底层沉积物中的氮素,一部分为暂时性滞留,能够 通过再悬浮和矿化作用重新释放到上覆水体,另一部 分滞留在沉积物中。夏星辉等^[18]、李素珍等^[41]对悬浮 泥沙研究表明,氮素从沉积物扩散进入上覆水,在悬 浮泥沙作用下发生强烈的硝化反硝化等作用。结合 本试验结果分析,各层的U_{amb}(NO₃-N背景浓度吸收 速率)为2.50~9.13 μg·m⁻²·s⁻¹, V_{f-amb}(NO₃-N背景浓度 吸收速度)为0.12~0.40 m·s⁻¹,在试验塘上覆水中对 硝态氮进行吸收转化。池塘等小型水体,氮素进入水

www.aer.org.cn

13 <u>2284</u>

农业环境科学学报 第41卷第10期

体后,大部分滞留在底层,上层的滞留能力弱,因而在 上覆水中发生氮转化的氮素主要来源于沉积物中滞 留的氮素,上覆水-沉积物不断交换氮素,对氮素进 行转化,以达到净化水质的目的。

本研究最小的 Sw-amb 值为 56.135 m, 而试验塘长约 40 m, 表明该试验塘不能将硝态氮在塘里完全截留净 化。提高池塘等小型水体的净化能力, 可实施的有效 措施有:在来水汇入前, 合理设置前置库或拦截箱系统 来去除冲刷沉积物, 或利用排水沟渠对来水进行预先 的调蓄净化,减缓池塘淤积,降低池塘入流中的氮浓度, 提高池塘净化效率^[42-44];适当种植水生植物, 水生植物 不但能利用其根系促进底泥的硝化反硝化作用, 同时 通过自身的吸收作用从水层和底泥中吸收氮, 从而促 进氮的截留净化, 减少池塘底泥中的氮浓度^[45-46]。

3 结论

(1)试验塘底层的营养盐浓度显著高于上层,塘 底的营养盐滞留能力强于上层。对于池塘等小型水 体,氮素进入水体后,大部分沉积并滞留在底层,滞留 在底层的氮素一部分在沉积物中进行氮转化,一部分 进入上覆水中发生硝化反硝化等作用。小型水体能 够拦截滞留大量氮素,在上覆水-沉积物中交换并转 化,降低水体中的氮浓度,减少对周围水环境的污染。

(2)在背景浓度条件下,试验塘NO₃-N背景浓度 的吸收长度低于试验塘的长度,该试验塘的NO₃-N 滞留净化能力相对较差。对于不能完全截留净化污 染物的小型水体,可采取设置排水沟、前置库或拦截 箱系统,种植水生植物,优化自身结构设计等措施来 提高净化能力。池塘等小型水体的槽道地貌特征影 响营养盐拦截滞留,凹槽有利于营养盐的滞留,越靠 近底层水流流速越慢,离凹槽越近其滞留能力越强, 日后塘库设计时,可适当增加底层的凹槽面积来提高 小型水体截留净化能力。

参考文献:

- [1] 吕明权, 吴胜军, 马茂华, 等. 中国小型水体空间分布特征及影响因素[J]. 中国科学:地球科学, 2022, doi: 10. 1360/SSTe-2021-0151.
 LÜ M Q, WU S J, MA M H, et al. Spatial distribution and influencing factors of small water bodies in China[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2022, doi: 10. 1360/SSTe-2021-0151.
- [2] MARTON J M, CREED I F, LEWIS D B, et al. Geographically isolated wetlands are important biogeochemical reactors on the landscape[J]. *Bioscience*, 2015, 65(4):408-418.
- [3] CHENG F Y, BASU N B. Biogeochemical hotspots: Role of small water bodies in landscape nutrient processing[J]. Water Resources Research,

- [4] 王晓玲,李建生,李松敏,等. 生态塘对稻田降雨径流中氮磷的拦截效应研究[J]. 水利学报, 2017, 48(3):291-298. WANG X L, LI J S, LI S M, et al. Effects of ecological ponds on nitrogen and phosphorus interception in runoff from paddy fields[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(3):291-298.
- [5] 吴军, 崔远来, 赵树君, 等. 塘堰湿地对农田排水氮磷净化效果试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(2):167-172. WU J, CUI Y L, ZHAO S J, et al. Experimental study on nitrogen and phosphorus removal from farmland drainage in Tangyan wetland[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(2):167-172.
- [6] MA L, HE F, SUN J, et al. Remediation effect of pond-ditch circulation on rural wastewater in southern China[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 77:363-372.
- [7] 潘乐, 茆智, 董斌, 等. 塘堰湿地减少农田面源污染的试验研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4):130-135. PAN L, MAO Z, DONG B, et al. Study on the effect of soil moisture on soil pollution in Tangyan wetland[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(4):130-135.
- [8] 常永凯. 滨海潮滩湿地脱氮过程与影响机制研究[D]. 上海:华东师范大学, 2021:27-38. CHANG Y K. Study on nitrogen removal in coastal tidal flat wetland[D]. Shanghai: East China Normal University, 2021:27-38.
- [9] 申雅莉. 典型农业源头流域塘库水体氮磷含量与温室气体排放的时空特征研究[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2021:20-28. SHEN Y L. Spatiotemporal characteristics of nitrogen and phosphorus contents and greenhouse gas emissions in typical agricultural headwaters
 [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2021:20-28.
- [10] SCHMADEL N M, HARVEY J W, SCHWARZ G E, et al. Small ponds in headwater catchments are a dominant influence on regional nutrient and sediment budgets[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(16):9669–9677.
- [11] 聂小飞,李恒鹏,李新艳. 巢湖典型子流域上下游水塘对暴雨径流 氮磷去除效率比较[J]. 湖泊科学, 2012, 24(1):89-95. NIE X F, LI H P, LI X Y. Comparison of nitrogen and phosphorus removal efficiency of upstream and downstream ponds in typical sub-basins of Chaohu Lake[J]. Journal of Lake Sciences, 2012, 24(1):89-95.
- [12] LI R, XU D, YIN Q. Effects of channel morphology on nitrate retention in a headwater agricultural stream in Lake Chaohu Basin, China
 [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26 (11): 10651–10661.
- [13] RUNKEL R L. On the use of rhodamine WT for the characterization of stream hydrodynamics and transient storage[J]. Water Resources Research, 2015, 51(8):6125-6142.
- [14] 李如忠,杨继伟,钱靖,等.合肥城郊典型源头溪流不同渠道形态的氮磷滞留特征[J].环境科学,2014,35(9):3365-3372. LI R Z, YANG J W, QIAN J, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus retention in different channels of typical source streams in the suburbs of Hefei[J]. Environmental Science, 2014, 35(9):3365-3372.
- [15] 李丹, 郑丙辉, 储昭升, 等. 多塘湿地对降雨径流的截留特点[J]. 环

2022年10月 文雯,等:池塘水力停留时间和氮素分层滞留能力分析

境科学研究, 2022, 35(7):1605-1614. LID, ZHENG B H, CHU Z S, et al. Interception characteristics of rainfall and runoff in multipond wetland[J]. *Research of Environmental Science*, 2022, 35(7): 1605-1614.

- [16] 徐海顺, 蔡永立, 张秋卓. 自然坑塘对夏季降雨径流污染的截流净 化效果[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(3):105-110, 189. XUHS, CAIYL, ZHANGQZ. Effect of natural pit on runoff pollution interception and purification in summer[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 36(3):105-110, 189.
- [17] 张学青, 夏星辉, 杨志峰.水体颗粒物对有机氮转化的影响[J].环 境科学, 2007, 28(9):1954-1959. ZHANG X Q, XIA X H, YANG Z F. Effects of particulate matter on organic nitrogen conversion in water[J]. Environmental Science, 2007, 28(9):1954-1959.
- [18] 夏星辉, 王君峰, 张翎, 等. 黄河泥沙对氮迁移转化的影响及环境 效应[J]. 水利学报, 2020, 51(9):1138-1148. XIA X H, WANG J F, ZHANG L, et al. Effects of sediment on nitrogen transfer and its environmental effects in the Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(9):1138-1148.
- [19] 中国土壤学会. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技 出版社, 1999:127-130. Chinese Soil Society. Methods of soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999:127-130.
- [20] 殷楠, 王静文, 彭秋怡, 等. 折流人工湿地模拟装置的水力特性研究[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(11):5-9, 14. YIN N, WANG J W, PENG Q Y, et al. Hydraulic characteristics of a baffle constructed wetland simulator[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39 (11):5-9, 14.
- [21] 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. LI R Z, YIN Q H, GAO S D, et al. Dynamic characteristics and correlation analysis of nitrate nitrogen absorption in agricultural drainage ditches [J]. Environmental Science, 2018, 39(5):2174-2183.
- [22] 李如忠, 董玉红, 钱靖. 基于TASCC 的典型农田溪流氨氮滞留及吸收动力学模拟[J]. 中国环境科学, 2015, 35(5):1502-1510. LI R Z, DONG Y H, QIAN J. Dynamic simulation of ammonia nitrogen retention and absorption in a typical farmland stream based on TASCC [J]. China Environmental Science, 2015, 35(5):1502-1510.
- [23] 许大强.基于TASCC的源头溪流氮磷滞留特征及耦合吸收效应 模拟[D]. 合肥:合肥工业大学, 2019:15-35. XU D Q. Simulation of nitrogen and phosphorus retention characteristics and coupling absorption effect in source streams based on TASCC[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019:15-35.
- [24] 肖海文, 翟俊, 邓荣森, 等. 人工湿地水力停留时间分布模拟[J]. 环境科学学报, 2012, 32(12): 2998-3005. XIAO H W, ZHAI J, DENG R S, et al. Simulation of hydraulic residence time distribution in constructed wetland[J]. Acta Scientiae Environmenta Sinica, 2012, 32(12): 2998-3005.
- [25] 肖海文, 翟俊, 邓荣森, 等. 冲击负荷下水平潜流人工湿地水流规 律研究[J]. 环境科学学报, 2011, 31(4):731-737. XIAO H W, ZHAI J, DENG R S, et al. Research on flow pattern of horizontal subsurface constructed wetland under impact load[J]. Acta Scientiae Cir-

cumstae, 2011, 31(4):731-737.

- [26] WERNER T M, KADLEC R H. Wetland residence time distribution modeling[J]. *Ecological Engineering*, 2000, 15(1):77–90.
- [27] BODIN H, PERSSON J, ENGLUND J E, et al. Influence of residence time analyses on estimates of wetland hydraulics and pollutant removal[J]. Journal of Hydrology, 2013, 501:1–12.
- [28] GUO C, CUI Y, DONG B, et al. Tracer study of the hydraulic performance of constructed wetlands planted with three different aquatic plant species[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 102:433-442.
- [29] 刘叶双, 贾艾晨. NaCl示踪剂测定人工湿地水力停留时间的试验 研究[J]. 东北水利水, 2018, 36(3):53-56, 72. LIU Y S, JIA A C. Determination of hydraulic residence time in constructed wetland using NaCl tracer[J]. Northeast Water Resources and Hydropower, 2018, 36(3):53-56, 72.
- [30] 胡韧, 熊江霞, 韩博平. 具有短水力滞留的小型富营养化水库浮游 植物群落结构与动态[J]. 生态环境, 2008, 17(4):1319-1326. HU R, XIONG J X, HAN B P. Community structure and dynamics of phytoplankton in small eutrophication reservoir with short hydraulic retention[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(4):1319-1326.
- [31] 吕晓霞, 宋金明. 海洋沉积物中氮的形态及其生态学意义[J]. 海洋科学集刊, 2003, 45:101-111. LÜ X X, SONG J M. Nitrogen forms in marine sediments and their ecological significance[J]. Marine Science Bulletin, 2003, 45:101-111.
- [32] WU Z, LIU Y, LIANG Z, et al. Internal cycling, not external loading, decides the nutrient limitation in eutrophic lake: A dynamic model with temporal Bayesian hierarchical inference[J]. Water Research, 2017, 116:231-240.
- [33] 宋金明, 马红波, 吕晓霞, 等. 渤海沉积物氮的生物地球化学功能
 [J]. 海洋科学集刊, 2003, 45:86-100. SONG J M, MA H B, LÜ X X, et al. Biogeochemical functions of nitrogen in sediments from Bohai Sea[J]. Bulletin of Marine Sciences, 2003, 45:86-100.
- [34] 马红波, 宋金明, 吕晓霞, 等. 渤海沉积物中氮的形态及其在循环中的作用[J]. 地球化学, 2003, 32(1):48-54. MA H B, SONG J M, LÜ X X, et al. Nitrogen forms in sediments of Bohai Sea and their role in circulation[J]. *Geochimica*, 2003, 32(1):48-54.
- [35] ZHENG G X, SONG J M, SUN Y M, et al. Characteristics of nitrogen forms in the surface sediments of southwestern Nansha Trough, South China Sea[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2008, 26 (3):280–288.
- [36] 延霜.水体-沉积物界面氮迁移转化的生物化学过程[D].西安:西 安建筑科技大学, 2010:59-66. YAN S. Biochemical processes of nitrogen migration and transformation at the water-sediment interface [D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology, 2010: 59-66.
- [37] LÜ X X, SONG J M, LI X G, et al. Characteristics of nitrogen forms in the southern Huanghai Sea surface sediments[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2004, 23(3):473–482.
- [38] 李如忠, 董玉红, 钱靖, 等. 合肥地区不同类型源头溪流暂态存储 能力及氮磷滞留特征[J]. 环境科学学报, 2015, 35(1):128-136.
 LI R Z, DONG Y H, QIAN J, et al. Transient storage capacity and nitrogen and phosphorus retention characteristics of different sources

www.aer.org.cn

1GR 2286

农业环境科学学报 第41卷第10期

and streams in Hefei area[J]. Acta Scientiae Circumstancae, 2015, 35 (1):128-136.

- [39] 李如忠, 丁贵珍, 徐晶晶, 等. 巢湖十五里河源头段暂态储存特征 分析[J]. 水利学报, 2014, 45(6):631-640. LI R Z, DING G Z, XU J J, et al. Analysis of transient storage characteristics in the headstream of Shiwuli River in Chaohu Lake[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(6):631-640.
- [40] ZHANG L, WANG S, XU Y, et al. Molecular characterization of lake sediment WEON by fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry and its environmental implications[J]. Water Research, 2016, 106:196-203.
- [41] 李素珍, 夏星辉, 张菊, 等. 不同河流水体颗粒物对硝化过程的影响[J]. 环境化学, 2007(4):419-424. LISZ, XIAXH, ZHANGJ, et al. Effect of particulate matter in different rivers on nitrification process[J]. Environmental Chemistry, 2007(4):419-424.
- [42] 夏霆,郭岩.自然沟塘系统对有机农业面源污染的削减效果研究
 [J]. 广东农业科学, 2010, 37(12):155-157. XIA T, GUO Y. Effects of natural ditch-pond system on organic agricultural non-point source pollution reduction[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2010,

37(12):155-157.

- [43] KARPUZCU M E, STRINGFELLOW W T. Kinetics of nitrate removal in wetlands receiving agricultural drainage[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 42:295–303.
- [44] 罗纨,朱金城,贾忠华,等.排水沟塘分布特性及与农田水力联系 对水质净化能力的影响[J].农业工程学报,2017,33(10):161-167. LUO W, ZHU J C, JIA Z H, et al. Distribution characteristics of drainage ditch and pond and its relationship with farmland hydraulic power on water purification capacity[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(10):161-167.
- [45] 徐红灯, 席北斗, 王京刚, 等. 水生植物对农田排水沟渠中氮、磷的 截留效应[J]. 环境科学研究, 2007, 20(2):84-88. XU H D, XI B D, WANG J G, et al. Interception effect of aquatic plants on NITRO-GEN and phosphorus in farmland drainage ditch[J]. *Research of Environmental Science*, 2007, 20(2):84-88.
- [46] GILL S L, SPURLOCK F C, GOH K S, et al. Vegetated ditches as a management practice in irrigated alfalfa[J]. *Environmental Monitoring* and Assessment, 2008, 144(1/2/3):261-267.

(责任编辑:叶飞)