



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

典型生态拦截措施水质净化效果研究

段四喜, 张磊, 杨芳, 沈仕洲, 倪喜云, 赵正雄, 于良君

引用本文:

段四喜, 张磊, 杨芳, 沈仕洲, 倪喜云, 赵正雄, 于良君. 典型生态拦截措施水质净化效果研究[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(3): 493–502.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0026>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

太湖地区河蟹"养殖-净化"复合系统氮磷循环模拟模型研究

朱冰莹, 董佳, 陆长婴, 施林林, 沈明星, 杨海水

农业资源与环境学报. 2017, 34(2): 134–144 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0252>

麦季农田流失养分植物拦截技术体系研究

刘红江, 郑建初, 孙国峰, 盛婧, 张岳芳, 郭智, 周炜, 陈留根

农业资源与环境学报. 2021, 38(4): 611–617 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0424>

不同季节生态沟净化养殖废水能力对比研究

吴华山, 赵慧, 黄红英, 徐跃定

农业资源与环境学报. 2018, 35(3): 245–250 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0262>

黄鸢尾对牛场养殖废水肥用过程中的耐受性研究

丁飞飞, 张克强, 渠清博, 赵芙, 杨鹏, 沈晨

农业资源与环境学报. 2019, 36(2): 214–220 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0224>

29种水生植物对农村生活污水净化能力研究

张倩妮, 陈永华, 杨皓然, 陈明利, 柳俊

农业资源与环境学报. 2019, 36(3): 392–402 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0235>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

段四喜, 张磊, 杨芳, 等. 典型生态拦截措施水质净化效果研究[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(3): 493–502.

DUAN S X, ZHANG L, YANG F, et al. Study on water purification effect of typical ecological interception measures[J]. *Journal of*

Agricultural Resources and Environment, 2022, 39(3): 493–502.



开放科学 OSID

典型生态拦截措施水质净化效果研究

段四喜^{1,2,3}, 张磊^{1,2,3}, 杨芳^{2,3}, 沈仕洲³, 倪喜云⁴, 赵正雄¹, 于良君^{2,5*}

(1. 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 2. 大理市农业环境保护监测站, 云南 大理 671000; 3. 国家农业环境大理观测实验站, 云南 大理 671004; 4. 大理州农业科学推广研究院, 云南 大理 671005; 5. 云南农业大学学报编辑部, 昆明 650201)

摘要:为探讨生态拦截系统对洱海流域农田尾水氮(N)、磷(P)和化学需氧量(COD)的去除效应,提高生态拦截系统对农业面源污染物的净化效果,研究了生态沟渠、表流库塘、潜流库塘、生态沟渠+表流库塘4种改建的生态拦截系统对水质净化效果的影响。结果表明,与进水口污染物浓度相比,经生态拦截系统净化后,各系统出水口污染物浓度均有所下降。4种生态拦截系统中生态沟渠+表流库塘系统对污染物总氮(TN)、总磷(TP)和COD的削减效果最好,平均削减率为59.66%、55.99%和38.33%,出流全年各月可用于各类型农田灌溉,且TN、TP和COD浓度全年分别有3个月、10个月和10个月可满足地表水环境质量标准中V类水质要求;潜流库塘系统削减效果次之,对TN、TP和COD的平均削减率为42.13%、31.31%和34.29%,出流全年各月可用于旱作回灌,全年有9个月可用于水作灌溉,TN、TP和COD浓度全年分别有10个月、6个月和2个月可达到地表IV类水质要求;生态沟渠系统和表流库塘系统削减能力相对较弱,对TN、TP、COD的平均削减率分别为40.59%、21.03%、25.25%和37.60%、27.69%、26.07%,但这2个系统出水全年可用于水作和旱作灌溉,其中生态沟渠系统出流TN浓度全年有4个月可达地表水V类标准,TP浓度全年有11个月可达到地表水IV类水质要求,表流库塘系统出流TN浓度全年有3个月可达地表水V类标准,TP浓度全年有11个月可达地表水IV类标准,COD浓度全年有3个月可达到地表V类水质要求。综合而言,改建的4个生态拦截系统对污染物的净化效果表现为生态沟渠+表流库塘>潜流库塘>表流库塘>生态沟渠。

关键词:生态拦截系统;削减率;水质;净化效果

中图分类号:X82

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2022)03-0493-10

doi: 10.13254/j.jare.2021.0026

Study on water purification effect of typical ecological interception measures

DUAN Sixi^{1,2,3}, ZHANG Lei^{1,2,3}, YANG Fang^{2,3}, SHEN Shizhou³, NI Xiyun⁴, ZHAO Zhengxiong¹, YU Liangjun^{2,5*}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. Dali Agricultural Environmental Protection Monitoring Station, Dali 671000, China; 3. Dali Observation and Experimental Station of National Agricultural Environment, Dali 671004, China; 4. Dali Academy of Agricultural Sciences, Dali 671005, China; 5. Editorial Department of Journal of Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: To improve the purification effect of an ecological interception system on agricultural non-point source pollutants, The ecological interception system's effect on the removal of nitrogen, phosphorus, and chemical oxygen demand (COD) in the farming tail water of the Erhai Lake basin was investigated. Here four reconstructed ecological interception systems' purification capabilities were studied, including an ecological ditch, a surface-flow pond, a subsurface flow constructed pond, and an ecological ditch+surface-flow pond. Results indicated that compared with the pollutant concentration in the inlet, the pollutant concentration in the outlet of the four systems decreased

收稿日期:2021-01-12 录用日期:2021-03-23

作者简介:段四喜(1986—),女,云南大理人,硕士研究生,助理研究员,农艺师,从事农业面源污染控制与治理方面的研究。

E-mail:447805725@qq.com

*通信作者:于良君 E-mail:896145239@qq.com

基金项目:云南省科技创新开放基金(2017HC015);云南省基础研究青年基金(2019FD120)

Project supported: Science and Technology Innovation Open Fund of Yunnan Province (2017HC015); Youth Foundation for Basic Research of Yunnan Province (2019FD120)

after purification by the ecological interception system. The ecological ditch+surface-flow pond system achieved better results in reducing the total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and COD of pollutants, with average reduction rates of 59.66%, 55.99%, 38.33%, respectively. The outflow of this system could meet the irrigation needs for annual, monthly arming. The TN, TP, and COD concentrations increased to the class V of environmental quality standards. Additionally, the subsurface-flow pond system had the second-highest removal rate, with average reduction rates of 42.13%, 31.31%, 34.29%, respectively. The outflow could be used for dry farming irrigation every month of the year and water farming for nine months. The TN, TP, and COD concentrations in 10, 6, and 2 months of the year met the environmental quality standards' requirements on surface water, exceeding the class IV. The ecological ditch and the surface-flow pond systems' removal ability were relatively weak, with an average reduction rate of 40.59%, 21.03%, 25.25%, and 37.60%, 27.69%, 26.07%, respectively. Furthermore, the two systems could be used for dry and water farming irrigation all year round. For the ecological ditch system, the TN and TP outflow concentrations in 4 and 11 months of the whole year reached the class V and IV in the environmental quality standards' requirements of surface water. For the surface-flow pond system, the TN, TP, and COD concentrations in 3, 11, and 3 months of the year were more than the class V, IV, and V in the environmental quality standards' requirements of surface water, respectively. In summary, the average effectiveness of the four ecological interception systems modified in terms of pollutant purification was as follows: ecological ditch+surface-flow pond > subsurface flow constructed pond > surface-flow pond > ecological ditch.

Keywords: ecological interception system; reduction rate; water quality; purification

洱海是云南省大理白族自治州的生命源泉,具有供水、农灌、发电、调节气候、渔业、航运、旅游七大主要功能。近20年来,受各种因素的影响,入湖污染负荷量持续增加,洱海水质下降,生态环境遭到破坏^[1-2]。大量研究表明,流域内农田面源排放是洱海中氮(N)、磷(P)的主要来源之一^[3-4]。洱海流域现存有大量灌排沟渠和库塘,其水质状况与周边农田尾水的排放具有非常密切的关系,这些沟渠和库塘是地表水灌排和村庄供排水的水源^[5-7]。但由于其位于农田与水体的过渡带,能有效拦截农田排水产生的N、P和化学需氧量(COD)等农业面源污染物,沟渠和库塘已成为农业面源污染阻断的关键环节^[8-12]。

近几年,有关洱海流域生态沟渠的研究主要集中在不同种植类型^[7]、不同年份生态沟渠^[12]和农田灌排沟渠^[3,13]对水质净化的影响等方面。例如陈安强等^[7]的研究表明,不同种植类型对生态沟渠出水口径流N、P浓度的影响从大到小依次为菜地、稻田和苗木地;田昌等^[12]的研究表明,2016年和2017年生态沟渠对农田排水总氮(TN)平均拦截率为58.49%、47.61%,对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均拦截率为77.29%、69.72%。谢坤等^[13]的研究表明,生态沟渠农田入口、农田出口、村落出口等处生态沟渠的水质明显不同,昼夜节律变化明显。有关生态库塘的研究则主要集中在不同水生植物^[14-15]和生态植草^[16]对水质净化的影响等方面。例如,不同水生植物的库塘对TN的年均去除率表现为苕菜(83.1%)>芦苇(73.9%)>黑藻(73.3%)>无植物库塘(65.5%)^[15]。

但上述研究仅将生态沟渠或者库塘作为单一对

象进行研究,在洱海流域“田-村”景观单元交替分布模式中^[5],实际存在很多灌排水先流经生态沟渠后入库塘继续净化的情况。同时,洱海流域生态库塘包括表流生态库塘和潜流生态库塘,当前有关生态库塘的研究多涉及表流库塘,鲜有关于潜流生态库塘的研究报道。因此本研究将洱海流域主要的生态沟渠、表流库塘、潜流库塘和生态沟渠+表流库塘4种排灌系统进行改造提升(清淤疏浚、种植水生植物、生态植草植树等),分析经不同生态拦截系统后,N、P和COD浓度的变化特征,并探讨4种生态拦截系统对TN、TP和COD浓度的削减贡献率,以期为生态拦截工程设计和应用提供参考,提高灌排系统对农业面源污染物的拦截效果。

1 试验区概况与研究方法

1.1 试验区概况

试验地点位于云南省大理市湾桥镇(100°00'05"~100°09'08" E, 25°44'48"~25°49'22" N),面积63.8 km²,海拔1 980 m,地形西高东低,位于苍山与洱海之间的宽谷平坝区,属北亚热带高原季风气候,受西南季风影响,冬无严寒,夏无酷暑,年均气温15.5℃,年均降雨量1 080 mm,降雨主要集中在5—10月。

1.2 试验设计

在不影响农田沟渠和库塘正常灌排水功能的前提下,对现有沟渠和库塘进行改造提升。根据实际情况进行清淤疏浚,合理配置水生植物群落,适当配置水位调节闸门,在沟渠和库塘周边生态植草、放置生态多孔砖和种植经济林果等(表1),以延长沟渠和库

塘内的水力停留时间,削减农田排水中污染物含量。其中4种生态拦截系统沟壁和塘壁均为带孔预制板,孔内配置水生植物,沟底为土工沟底,配置水生植物群落。潜流库塘为水平潜流人工库塘,采用基质搭配与植物配置相结合的形式,系统分为进水区、滤料区和出水区,其中进水区和出水区搭配基质从下到上依次为石灰岩细碎石、砾石和火山岩,铺设厚度分别为0.4、0.25 m和1 m,各层铺设宽度均为5 m,铺设后在进水区和出水区填泥,并进行生态植草,滤料区(系统土工沟底)先铺设石灰岩细碎石填料层0.4 m,再用砾石铺设0.25 m。系统改造提升后,分别在进水口和出水口定时采集水样,测定进出水污染物浓度,分析污染净化效果,具体试验工程系统和试验措施见表2。

1.3 样品采集与分析方法

所有生态拦截系统工程建设于2019年8月完成,在监测期(2019年9月—2020年8月)内,每周于4个工程区的进水口、出水口采集水样各1次(2020年2月因受疫情影响未采集),计算经4生态拦截系统后污染物的去除率,计算方法见公式(1),主要分析指标

和具体分析方法均选用国标测试方法^[17]。同时参照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)和《国家农田灌溉水质标准》(GB 5084—2005)对4个系统的污水处理效果进行综合评价。

$$r=(C_1-C_2)/C_1\times 100\%$$
 (1)

式中: r 为污染物(COD、TN和TP)的削减率; C_1 为系统或某污染物的进水浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; C_2 为经生态拦截系统后某污染物的出水浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

1.4 数据处理与分析

采用Microsoft Excel 2010软件进行数据处理,用SPSS 13.0软件进行差异性分析。

2 结果与分析

2.1 不同生态拦截系统对TN净化效果的影响

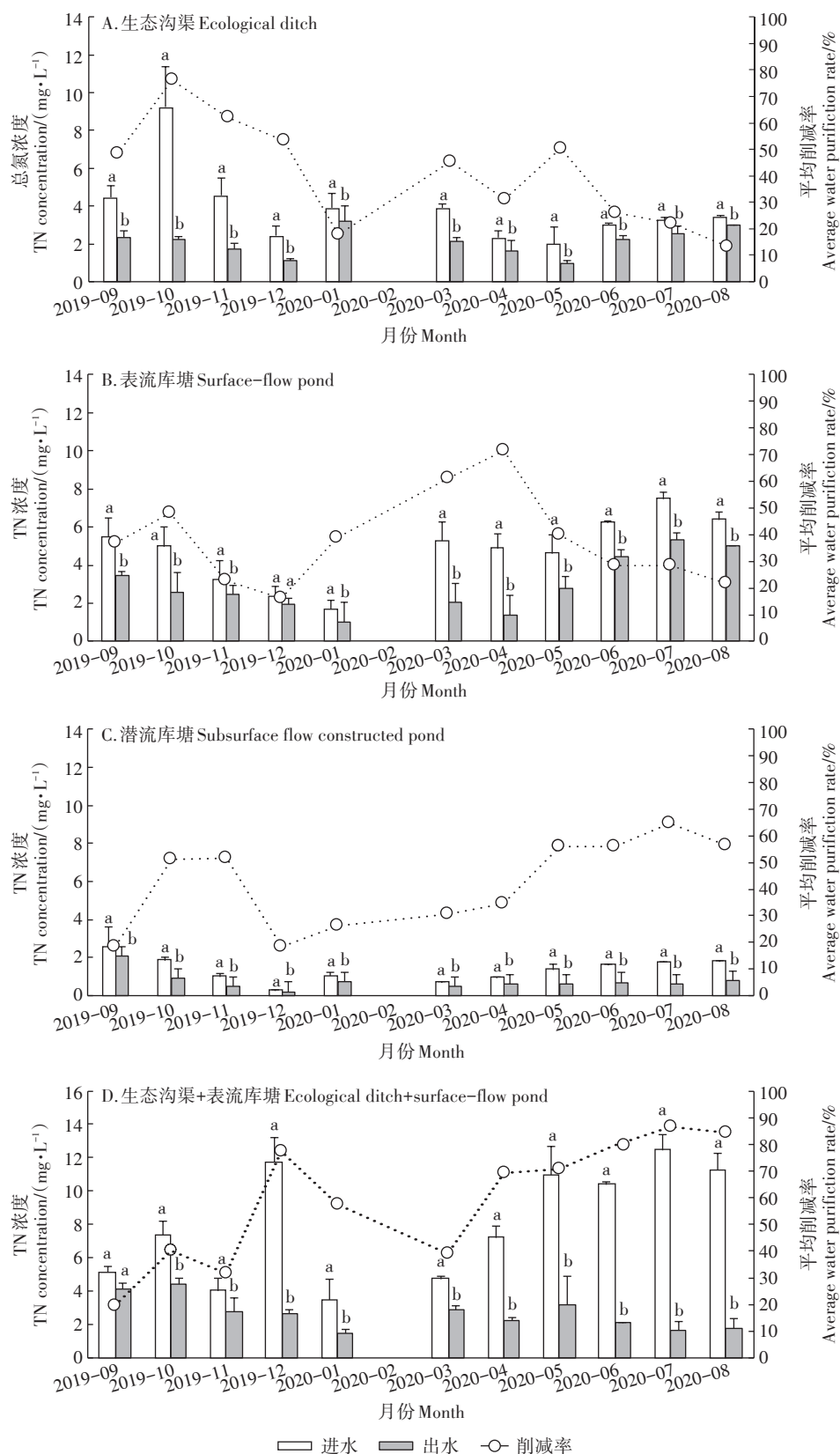
由图1可知,与进水口TN浓度相比,经生态拦截系统净化后,各系统各月出水口TN浓度均有所下降,绝大多数月份出水口TN浓度均显著低于进水口TN浓度。生态沟渠、表流库塘、潜流库塘和生态沟渠+表流库塘4种措施TN浓度变化范围分别为进水时

表1 植物种植方式
Table 1 Plant planting method

项目 Item	挺水植物 Emergent aquatic plant	浮水植物 Floating plant	沉水植物 Submerged plant	生态植草 Ecological planting grass	生态植树 Ecological planting tree
种类 Variety	再力花、美人蕉、茭白、菖蒲	浮萍、凤眼莲、睡莲	金鱼藻、狐尾藻、黑藻	波斯菊、混播缀花草种	垂柳、水杉
密度 Density	株行距0.5 m×0.5 m, 4丛·m ⁻² ,每丛3株	株行距5.0 m×5.0 m, 1丛·m ⁻² ,每丛7株	株行距1.0 m×1.0 m, 1丛·m ⁻² ,每丛10株	系统旁侧乔灌木林下种 植,10 g·m ⁻²	系统周围种植,株距 8 m

表2 生态拦截工程基本信息和采样点设置
Table 2 Basic ecological interception engineering information and sampling point setting

工程名称 Project name	工程措施 Engineering measure	工程地点 Project site	工程面积 Project area	坡度 Slope/ (°)	覆盖汇水面积 Covered water area/hm ²	进水量 Inflow flux (m ³ ·h ⁻¹)	水力停留 时间/d	年污水处 理量/m ³	污水来源 Sewage source	监测点位置	
										Position of monitoring point	
										进水口 Water inlet	出水口 Water outlet
生态沟渠 Ecological ditch	挺水植物 351 m ² , 生态 植草 468 m ²	南庄村	沟渠长 1 093 m, 底宽 1 m, 高 1.2 m, 水深 0.6 m	2.29	33.33	3.53	3.8	220	大田蔬菜种植污 水等	25°48' 37" N 100°07' 45" E	25°48' 38" N 100°08' 24" E
表流库塘 Surface-flow pond	挺水植物 225 m ² , 沉水植物 320 m ² , 生态植草 2 286.30 m ² , 植树 24 株	庆洞村	库塘面积 3 749 m ² , 长 72 m, 宽 52 m, 高 1.5 m, 水深 0.8 m	3.10	15.56	3.25	3.0	300	烤烟种植 污水等	25°46' 23" N 100°07' 09" E	25°46' 23" N 100°07' 10" E
潜流库塘 Subsurface flow constructed pond	挺水植物 260 m ² , 浮水植物 198 m ² , 生态植草 711 m ² , 植 树 33 株	030 乡道与大 丽路交界处	库塘面积 2 695 m ² , 长 74 m, 宽 38 m, 高 2.0 m, 水深 0.8 m	3.25	13.32	3.48	3.5	400	水稻和蚕豆种植 污水等	25°47' 56" N 100°08' 04" E	25°47' 54" N 100°08' 05" E
生态沟渠+表流库塘 Ecological ditch + surface-flow pond	生态沟渠: 挺水植物 70 m ² , 生态植草 312 m ² , 植树 24 株 表流库塘: 挺水植物 300 m ² , 沉水植物 350 m ² , 生态 植草 514 m ² , 植树 26 株	夏夜星空 花卉博览园	沟渠长 221 m, 宽 1 m, 生态沟 高 0.7 m, 水深 0.4 m; 库渠 2.30, 塘面积 1 595 m ² , 长 41 m, 宽 39 m, 高 1.2 m, 塘 3.00 水深 0.7 m		66.66	3.79	5.5	450	蔬菜和花卉种植 污水等	25°46' 47" N 100°07' 21" E	25°46' 46" N 100°07' 30" E



不同小写字母表示同月中进水口和出水口间差异达到显著水平 ($P<0.05$)。下同
Different lowercase letters indicate the significant difference between inlet and outlet in the same month ($P<0.05$). The same below

图1 不同生态拦截系统对总氮(TN)净化效果的影响

Figure 1 Purification effects of different ecological interception systems on the total nitrogen (TN)

1.98~9.24、1.68~7.47、0.69~2.52 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 3.47~12.46 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水时 0.98~3.20、1.03~5.35、0.48~2.06 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 1.47~4.41 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TN 削减率变化范围分别为 13.50%~76.08%、16.31%~71.52%、18.25%~64.77%、19.57%~86.59%。平均进水 TN 浓度由高到低为生态沟渠+表流库塘(8.06 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、表流库塘(4.77 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、生态沟渠(3.86 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、潜流库塘(1.35 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 但平均削减效果由大到小分别为生态沟渠+表流库塘(59.66%)、潜流库塘(42.13%)、生态沟渠(40.59%)、表流库塘(37.60%)。4个生态拦截系统各月削减率变幅均较大,且呈不同的削减趋势。4个措施的进水平均浓度分别为 9.24 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (10月)和 4.55 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (11月)、5.26 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (3月)和 4.88 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (4月)、1.36~1.79 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (5—8月)、10.40~12.46 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (12月和4—8月)时,系统对 TN 的净化效果较好,削减率分别为 76.08% 和 61.98%、61.22% 和 71.52%、55.88%~64.77%、69.25%~86.59%。

参照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002),生态沟渠出流 TN 浓度有 4 个月可以达到 V 类水质要求(4月、5月、11月和12月),2个月可以达到 IV 类水质要求(5月和12月);表流库塘有 3 个月可以达到 V 类水质要求(1月、4月和12月),2个月可以达到 IV 类水质要求(1月和4月);潜流库塘有 10 个月(9月除外)可以达到 IV 类水质要求;生态沟渠+表流库塘有 3 个月可以达到 V 类水质要求(1月、7月和8月),1个月可以达到 IV 类水质要求(1月)。

2.2 不同生态拦截系统对 TP 净化效果的影响

由图 2 可知,相比进水口 TP 浓度,经系统净化处理后,所有系统各月出水口 TP 浓度均有所下降,且绝大多数月份出水口 TP 浓度均显著低于进水口 TP 浓度。生态沟渠、表流库塘、潜流库塘和生态沟渠+表流库塘 4 个系统进水、出水 TP 浓度及削减率变化范围分别为 0.22~0.37、0.04~0.20、0.09~1.29、0.03~1.69 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 0.20~0.29、0.02~0.17、0.07~1.00、0.01~0.51 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 5.65%~34.31%、10.93%~52.48%、12.00%~50.07%、20.83%~84.82%。4种生态措施平均进水 TP 浓度由高到低依次是生态沟渠+表流库塘(0.84 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、潜流库塘(0.55 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、生态沟渠(0.29 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、表流库塘(0.12 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$),但对污染物的削减率由高到低分别为生态沟渠+表流库塘(55.99%)、潜流库塘(31.31%)、表流库塘(27.69%)、生态沟渠(21.03%)。削减率在 4 个生态拦截系统各月间波动较大,且呈不同的净化趋势。4个生态拦截系统的进

水平均浓度分别为 0.30 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (9月)和 0.34 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (10月)、0.04 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (12月)和 0.15 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (6月)、0.14 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (11月)和 1.14 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (4月)、0.03 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (10月)和 1.25~1.69 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (5—8月)时,对 TP 的拦截作用较强,各系统对应的削减率依次是 33.33% 和 34.31%、50.72% 和 52.48%、50.07% 和 45.88% 及 66.67%~84.82%。

经系统净化后,参照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002),4个系统中生态沟渠和表流库塘出流 TP 浓度各月均可达到 IV 类水质要求;潜流库塘出流有 6 个月(1月、3月和9—12月)可以达到 IV 类水质要求;生态沟渠+表流库塘出流有 10 个月(4月除外)和 7 个月(1月、3月、6月、8月、9月、10月和12月)可以达到 V 类和 IV 类水质标准。

2.3 不同生态拦截系统对 COD 净化效果的影响

由图 3 可知,经生态拦截系统净化后,4个系统同一月份进水口 COD 浓度均显著低于出水口 COD 浓度。4个生态拦截系统 COD 进水浓度变化范围为 19.37~163.33、28.37~154.47、29.81~297.61 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 27.10~62.70 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水 COD 浓度波动范围是 19.07~116.74、20.00~112.62、25.28~172.00 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 19.10~41.60 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 削减率波动范围为 1.55%~44.78%、8.69%~49.01%、15.20%~49.15% 和 16.18%~62.83%。尽管平均进水 COD 浓度从大到小为潜流库塘(140.13 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、生态沟渠(92.22 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、表流库塘(83.92 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、生态沟渠+表流库塘(48.67 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$),但平均净化率从大到小顺序为生态沟渠+表流库塘(38.33%)、潜流库塘(34.29%)、表流库塘(26.07%)、生态沟渠(25.25%)。4个生态拦截系统各月净化效果波动均较大,且呈不同的削减趋势。4个系统进水平均浓度分别为 108.11 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (10月)、85.04 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (10月)、297.61 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (9月)和 116.18 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (10月)、55.36~56.64 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (5—7月)时,对 COD 的净化效果较好,削减率依次为 44.78%、49.01%、49.15% 和 48.89%、50.43%~62.83%。

参照《国家农田灌溉水质标准》(GB 5084—2005)和《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)COD 浓度限值,生态沟渠出水全年可用于水作和旱作灌溉,其中 9 个月(7月和8月除外)可用于加工、烹饪及去皮蔬菜灌溉,6个月(1月、4月和9—12月)可用于生食类蔬菜、瓜类和草本水果灌溉。表流库塘全年出水均可用于水作和旱作灌溉,其中 9 个月(7—8月除外)可用于蔬菜加工、烹饪及去皮蔬菜灌溉,7个月(1月、

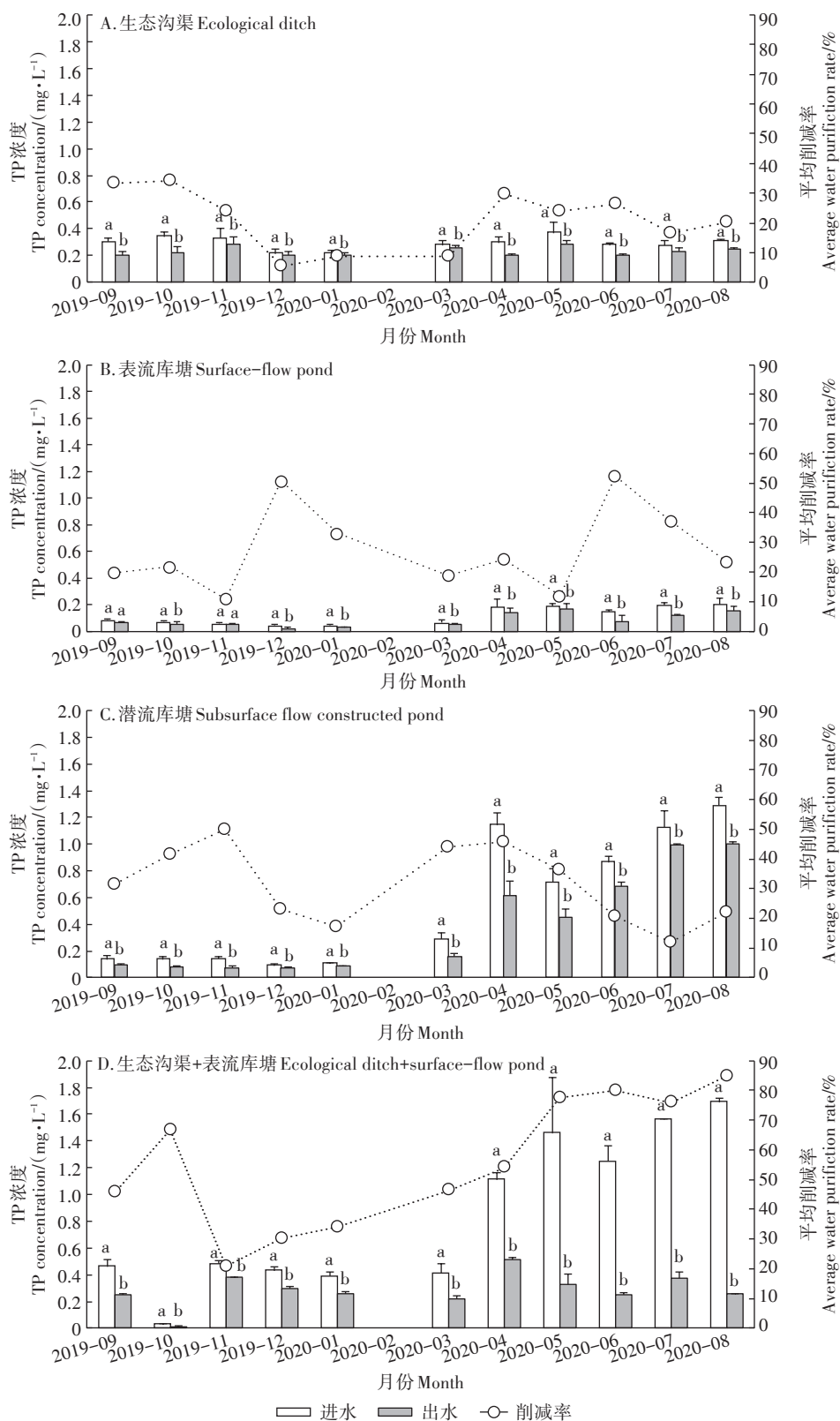


图2 不同生态拦截系统对总磷(TP)净化效果的影响

Figure 2 Purification effects of different ecological interception systems on the total phosphorus(TP)

3月、4月和9—12月)可用于生食类蔬菜、瓜类和草本水果灌溉,3个月(3月、9月和11月)和2个月(3月和

9月)可达到地表水Ⅴ类和Ⅳ类水质要求。潜流库塘出水全年可用于旱作灌溉,9个月(1—7月和10—12

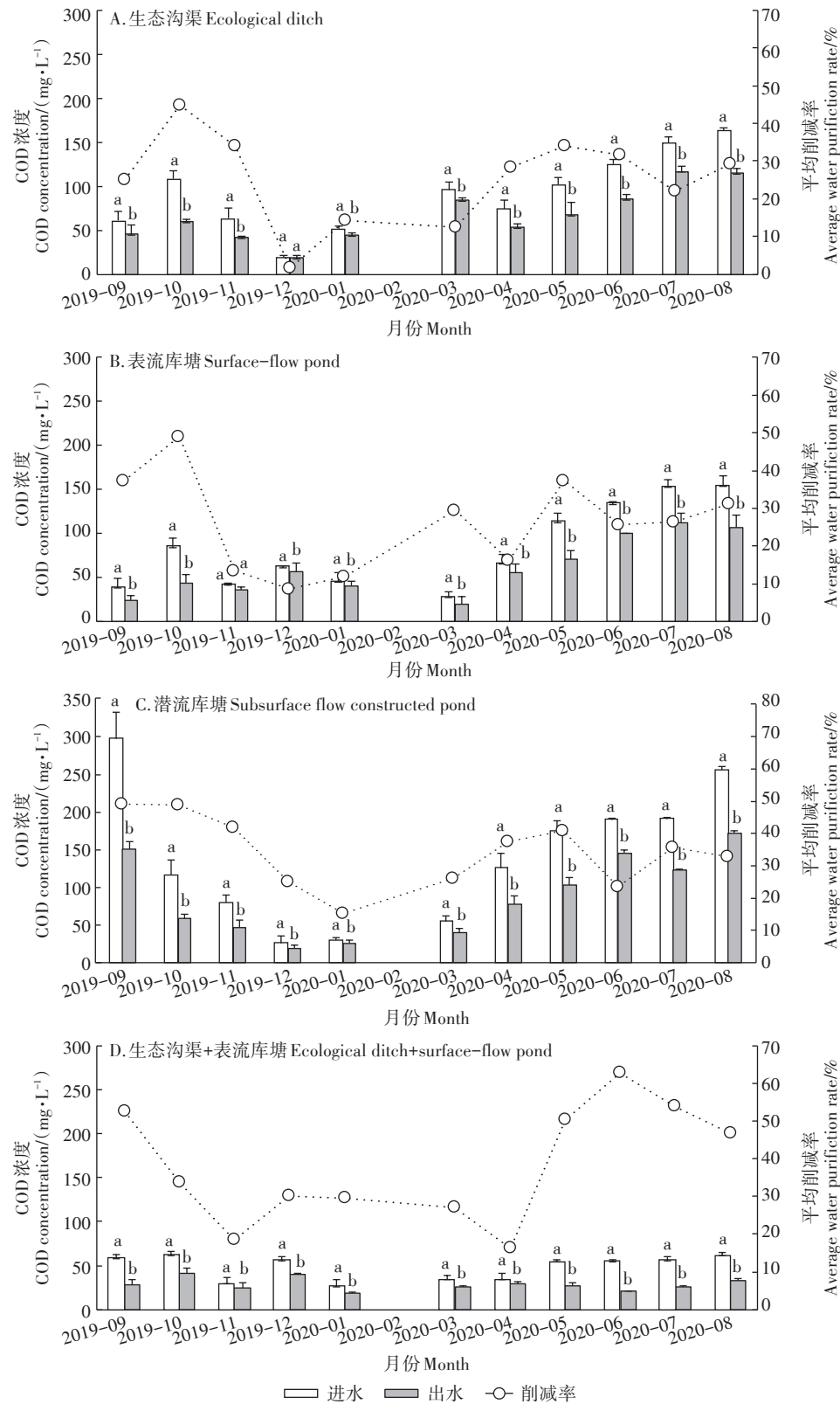


图3 不同生态拦截系统对化学需氧量(COD)净化效果的影响

Figure 3 Purification effects of different ecological interception systems on the chemical oxygen demand (COD)

月)可用于水作灌溉,6个月(1—4月和10—12月)可用于加工、烹饪及去皮蔬菜灌溉,5个月(1月、3月和10—12月)可用于生食类蔬菜、瓜类和草本水果灌溉,2个月(1月和12月)可达到地表水Ⅳ类水质标准。

生态沟渠+表流库塘出水全年可用于各类型农田灌溉,10个月(10月除外)和8个月(8月、10月和12月除外)可达到地表水Ⅴ类和Ⅳ类水质标准。

3 讨论

3.1 不同生态拦截系统削减率差异分析

生态拦截系统是一种特殊的湿地生态系统,具有排灌功能和良好的景观效果,其内部环境条件能够使植物和微生物等维持较好的生物稳定性,从而达到净化水质的目的^[18-20]。本试验条件下,4种生态拦截系统中净化效率最佳的为生态沟渠+表流库塘,这是因为与其他3个系统相比,生态沟渠+表流库塘不仅极大提升了水力停留时间(水力停留时间分别是生态沟渠、表流库塘、潜流库塘的1.44、1.83、1.57倍),而且还使水生植物存量更大(水生植物面积分别是生态沟渠、表流库塘、潜流库塘的2.94、1.89、2.25倍),加上系统维护良好,使削减净化效率进一步加强^[21]。因此,在具体应用其他3个系统时,需定时对系统进行维护,如定期清淤疏浚、采收水生植物、去除死亡根系等。本研究中生态沟渠+表流库塘系统对TN和TP的平均削减率为59.66%和55.99%,与朱金格等^[21]在太湖水源区研究的TN和TP平均去除率(59.60%和51.69%)较接近,这进一步证明生态沟渠+表流库塘系统应用性较广,可为洱海流域农田尾水的处理提供参考。

有研究表明,潜流人工湿地对COD的去除率为64%~82%^[22],本研究结果却显示,潜流库塘对COD的削减率仅在15.20%~49.15%,平均削减率仅为34.29%。这可能与本研究所选潜流人工湿地运行时间较久有关,相关基质的物理吸附及化学反应(络合作用)达到一定限度,导致对COD的去除效果逐渐降低^[23-24];另外当基质吸附达到饱和时,基质中吸附的污染物可能会释放进入水体,使湿地对COD去除效率进一步降低^[21],因此在实际应用潜流人工湿地时应注意选择合适基质粒径和级配以及优化潜流人工湿地工艺等。

刘福兴等^[8]和田昌等^[12]的研究表明生态沟渠对TN、TP的平均去除率均超过50%,本研究表明生态沟渠对TN、TP的平均削减率为40.59%、21.03%。这是因为刘福兴等^[8]和田昌等^[12]研究的生态沟渠观察期较短,仅为20 d和5个月,加上所研究的生态沟渠长度不同,配备的水生植物也各异等,导致以往研究与本研究削减效果存在差异。本研究结果还表明表流库

塘对TN的平均削减率仅为37.60%,但张俊朋等^[16]的研究表明表流库塘对TN平均去除率在70%以上,这可能是因为张俊朋等^[16]的研究系统本底值很低,进水为自来水,植物种类配备单一,本研究中进水为农田尾水,本底值较高,配备植物也较多。

本研究证实,2019年9—10月,除生态沟渠+表流库塘COD削减率下降外,其他系统TN、TP和COD削减率均逐月上升,这是因为其他系统水生植物2019年8月种植后,9月和10月正好处于旺盛生长期,植物吸收污染物能力较强,微生物活动频繁,加速了水体污染物的分解^[25-26]。生态沟渠+表流库塘2019年9—10月COD削减率逐月下降的原因,则可能与该系统运行之初(2019年9月)即达到较高的削减率(52.62%)有关,但具体原因有待进一步研究分析。4个系统TN、TP和COD削减率均在11月、12月或1月出现削减率较低的情况,这可能是由于此3个月温度较低,植物枯萎死亡,微生物活动降低,导致生态拦截系统削减率下降^[27-28]。

3.2 不同生态拦截系统出水水质差异分析

经生态拦截措施净化后,出流TN、TP和COD浓度较低的系统分别为潜流库塘、表流库塘和生态沟渠+表流库塘,可能是因为3个系统对应的进水口TN、TP和COD浓度较低,加上3个系统水面面积、水容量和水生植物面积也较大,致使污染物拦截能力更强,因此出水口污染物浓度更低,水质更好。

本研究对4种生态拦截系统削减效果进行了比较,表明生态沟渠+表流库塘削减效果较好,可进一步推广应用。今后需进一步研究典型生态拦截措施相同单位面积、单位时间内负荷削减率的异同,以更全面掌握生态拦截系统对农业面源污染物的净化效果。

4 结论

(1)本研究改建的4个生态拦截系统对水体污染物TN、TP和COD均具有较强的净化作用。4个系统对污染物TN、TP和COD的平均削减率由高到低依次为生态沟渠+表流库塘(59.66%、55.99%和38.33%)、潜流库塘(42.13%、31.31%和34.29%)、表流库塘(37.60%、27.69%、26.07%)、生态沟渠(40.59%、21.03%、25.25%)。生态沟渠和生态沟渠+表流库塘进水浓度较高时,系统对污染物的削减效果较好,潜流库塘和表流库塘进水浓度与系统对污染物削减效果间相关性不强。

(2)参照《国家农田灌溉水质标准》(GB 5084—2005)和《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002),生态沟渠和表流库塘出水全年可用于水作和旱作灌溉,生态沟渠出流TN浓度有4个月达到Ⅴ类水质要求,TP浓度有11个月达到Ⅳ类水质要求;表流库塘出流TN浓度有3个月达到Ⅴ类水质要求,TP浓度有11个月达到Ⅳ类水质要求,COD浓度有3个月可达到Ⅴ类水质要求;潜流库塘出水全年各月可用于旱作灌溉,9个月可用于水作灌溉,TN、TP和COD浓度分别有10个月、6个月和2个月可达到Ⅳ类水质要求;生态沟渠+表流库塘出水全年各月可用于各类型农田灌溉,TN、TP和COD浓度分别有3个月、10个月和10个月可达到Ⅴ类水质要求。

参考文献:

- [1] 代丹,葛俊,胡小贞,等.洱海西部入湖河流白鹤溪主要污染物时空变化特征分析[J].环境工程技术学报,2019,9(2):159-166. DAI D, GE J, HU X Z, et al. Temporal and spatial variation of main pollutants in Baihexi River, the western inflow river of Erhai Lake[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, 9(2): 159-166.
- [2] ZHONG S Z, GENG Y, QIAN Y Y, et al. Analyzing ecosystem services of freshwater lakes and their driving forces: The case of Erhai Lake, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2019, 26(10): 10219-10229.
- [3] 项颂,吴越,吕兴菊,等.洱海流域农业面源污染空间分布特征及分类控制策略[J].环境科学研究,2020,33(11):2474-2483. XIANG S, WU Y, LÜ X J, et al. Characteristics and spatial distribution of agricultural non-point source pollution in Erhai Lake basin and its classified control strategy[J]. 2020, 33(11): 2474-2483.
- [4] 陈学凯.湖泊流域非点源污染分区精细化模拟与多级优先控制区识别——以洱海为例[D].北京:中国水利水电科学研究院,2019. CHEN X K. Refined simulation of non-point-source pollution and identifying multilevel priority management areas at the watershed scale: A case study of Lake Erhai[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydro-power Research, 2019.
- [5] 谢坤,吴凡,罗元,等.洱海农田生产/生活景观区交替分布及昼夜节律对丰水期沟渠水质影响[J].农业环境科学学报,2018,37(11):2427-2433. XIE K, WU F, LUO Y, et al. Alternating distribution of farmland and inhabited landscapes in Erhai Lake and the influence of circadian rhythm on the water quality of a ditch during flood[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(11): 2427-2433.
- [6] 金春玲,高思佳,叶碧碧,等.洱海西部雨季地表径流氮磷污染特征及受土地利用类型的影响[J].环境科学研究,2018,31(11):1891-1899. JIN C L, GAO S J, YE B B, et al. Nitrogen and phosphorus pollution characteristics of surface runoff and the impacts of land use on runoff water quality in rainy season in the western Erhai Lake basin[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(11): 1891-1899.
- [7] 陈安强,雷宝坤,刘宏斌,等.洱海近岸不同种植类型农田沟渠径流氮磷流失特征[J].生态与农村环境学报,2017,33(8):697-705. CHEN A Q, LEI B K, LIU H B, et al. Characteristics of N and P losses from ditch runoff in farmlands different in planting patterns off shore of Lake Erhai[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, 33(8): 697-705.
- [8] 刘福兴,陈桂发,付子斌,等.不同构造生态沟渠的农田面源污染物处理能力及其实际应用效果[J].生态与农村环境学报,2019,35(6):787-794. LIU F X, CHEN G F, FU Z S, et al. Comparison on effects of practical application of ecological ditches with different construction in treating agricultural non-point pollutants[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(6): 787-794.
- [9] WU X, WU H, YE J Y. Purification effects of two eco-ditch systems on Chinese soft-shelled turtle greenhouse culture wastewater pollution[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21(8): 5610-5618.
- [10] 肖雨涵.多级生态库塘-湿地对低污染水体中氮磷去除效果的研究[D].苏州:苏州科技大学,2019. XIAO Y H. Removal of nitrogen and phosphorus in low-polluted water by multi-stage pond-wetland [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2019.
- [11] 肖雨涵,庞燕,项颂,等.多级生态库塘对低污染水体的净化[J].环境工程学报,2018,12(10):2998-3004. XIAO Y H, PANG Y, XIANG S, et al. Purification of multi-stage pond on low-polluted water[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2018, 12(10): 2998-3004.
- [12] 田昌,陈敏,周旋,等.生态沟渠对小流域农田排水中氮磷的拦截效果研究[J].中国土壤与肥料,2020(4):186-191. TIAN C, CHEN M, ZHOU X, et al. Effects of ecological ditch on interception of nitrogen and phosphorus in farmland drainage in small watershed [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(4): 186-191.
- [13] 谢坤,罗元,冯弋洋,等.改进灰色模式识别模型评价洱海雨季灌排沟渠水质[J].农业工程学报,2019,35(23):234-241. XIE K, LUO Y, FENG Y Y, et al. Water quality evaluation of Erhai drainage ditch based on improved grey-mode identification model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(23): 234-241.
- [14] 孟文娜.洱海北部河口人工经济植物湿地对低污染水的净化技术研究[D].上海:上海交通大学,2013. MENG W N. Studies on the treatment of slightly polluted river water using constructed wetland with economic plants at the estuary of Luoshijiang River in the north of the Lake Erhai[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [15] 张闻涛.洱海缓冲带对农业径流中氮磷的去除效果及机理分析[D].北京:北京科技大学,2015. ZHANG W T. Effect and mechanism of nitrogen and phosphorus removal from agricultural runoff by the buffer zone of Erhai Lake[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2015.
- [16] 张俊朋,陆铁峰,国晓春,等.表面流湿地去除洱海缓冲带低污染水氮模拟研究[J].环境工程技术学报,2018,8(5):488-494. ZHANG J P, LU T F, GUO X C, et al. Nitrogen removal of simulated low-polluted water of Lake Erhai buffer zone by surface-flow wetland [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2018, 8(5): 488-494.

- [17] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 701–705. State Environmental Protection Administration. Methods for monitoring and analysis of water and wastewater[M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 701–705.
- [18] 张树楠, 肖润林, 刘锋, 等. 生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应[J]. 环境科学, 2015, 36(12): 4516–4522. ZHANG S N, XIAO R L, LIU F, et al. Interception effect of vegetated drainage ditch on nitrogen and phosphorus from drainage ditches[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(12): 4516–4522.
- [19] WANG J L, CHEN G F, ZOU G Y, et al. Comparative on plant stoichiometry response to agricultural non-point source pollution in different types of ecological ditches[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(1): 647–658.
- [20] 游海林, 吴永明, 刘丽贞, 等. 生态沟渠对农村小流域面源污染物的拦截效应研究[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(4): 130–138. YOU H L, WU Y M, LIU L Z, et al. Intercepting Effect of ecological ditch on non-point source pollution in small rural watersheds[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 43(4): 130–138.
- [21] 朱金格, 张晓姣, 刘鑫, 等. 生态沟-湿地系统对农田排水氮磷的去除效应[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(2): 405–411. ZHU J G, ZHANG X J, LIU X, et al. Removal of nitrogen and phosphorus from farmland drainage by ecological ditch-wetland system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(2): 405–411.
- [22] 颜秉斐, 肖书虎, 廖纯刚, 等. 潜流人工湿地长效运行脱氮研究进展[J]. 环境工程技术学报, 2019, 9(3): 239–244. YAN B F, XIAO S H, LIAO C G, et al. Research progress of long-term nitrogen removal in subsurface flow constructed wetlands[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, 9(3): 239–244.
- [23] CHRISTOS S A, VASSILIOS A T. Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands[J]. *Ecological Engineering*, 2007, 29(2): 173–191.
- [24] 刘文杰, 许兴原, 何欢. 4种湿地植物对人工湿地净化生活污水的影响比较[J]. 环境工程学报, 2016, 10(11): 6313–6319. LIU W J, XU X Y, HE H. Comparison of treatment performances of simulated urban sewage in constructed wetlands planted with four types of wetland plant[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(11): 6313–6319.
- [25] 唐金艳. 水生植物腐烂分解对水质的影响[D]. 南京: 南京大学, 2013. TANG J Y. Effect of aquatic plants during their decay and decomposition on water quality[D]. Nanjing: Nanjing University, 2013.
- [26] 魏佳明, 崔丽娟, 李伟, 等. 低温状态下潜流湿地的氮磷去除效果[J]. 生态科学, 2017, 36(1): 43–47. WEI J M, CUI L J, LI W, et al. Nitrogen and phosphorus removal effect in subsurface constructed wetland under low temperature condition[J]. *Ecological Science*, 2017, 36(1): 43–47.
- [27] ZHU J G, HU W P, HU L M, et al. Variation in the efficiency of nutrient removal in a pilot-scale natural wetland[J]. *Wetlands*, 2012, 32: 311–319.
- [28] HU L M, HU W P, DENG J C, et al. Nutrient removal in wetlands with different macrophyte structures in eastern Lake Taihu, China[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36, 1725–1732.