

鄱阳湖平原区农村水塘水体原位修复技术应用效果分析*

刘方平^{1,2} 姜成名^{1,2} 苏甜^{1,2} 时红^{1,2} 廖伟^{1,2}

(1.江西省灌溉试验中心站,江西 南昌 330201;

2.江西省农业高效节水与面源污染防治重点实验室,江西 南昌 330201)

摘要 针对鄱阳湖平原区农村水塘内源底泥污染和外源农村生产、生活排水污染,通过选用覆沙处理、落干曝晒处理及生物联合调控处理(即底栖动物三角帆蚌(*Hyriopsis cumingii*)+滤食性鱼类鳊鱼和鲢鱼+湿地植物花叶芦竹(*Arundo donax* var. *versicolor*))等原位修复技术进行研究,以期得到农村小水塘经济高效的原位修复技术。结果表明:(1)生物联合调控处理对水质净化的效果总体最佳,浊度、氨氮、TN和COD去除率最高值分别为68.18%、92.64%、79.85%和92.10%。(2)生物联合调控处理的TN去除率与DO呈显著负相关,TP去除率与DO呈显著负相关、与氮磷质量比(N/P)呈显著正相关,COD去除率与氨氮、碳氮质量比(C/N)均呈显著负相关。

关键词 鄱阳湖平原 农村水塘 原位修复技术 生物联合调控

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2020.08.015

Analysis on application effect of in-situ remediation technology of rural ponds in Poyang Lake Plain LIU Fangping^{1,2}, JIANG Chengming^{1,2}, SU Tian^{1,2}, SHI Hong^{1,2}, LIAO Wei^{1,2}. (1. Jiangxi Centre Station of Irrigation Experiment, Nanchang Jiangxi 330201; 2. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Agriculture High-efficiency Water-saving and Non-point Source Pollution Preventing and Controlling, Nanchang Jiangxi 330201)

Abstract: In view of the sediment pollution of rural ponds, rural production and living drainage in the Poyang Lake Plain, the in-situ remediation techniques such as sand-covering treatment, drying and sunning, and biological joint regulation techniques (benthic animals (*Hyriopsis cumingii*) + filtering-feeding fish (bighead carp and silver carp) + wetland plant (*Arundo donax* var. *versicolor*)) were selected for this study to acquire a cost-effective in-situ remediation technology for rural small ponds. The results showed that: (1) the biological joint regulation techniques had the best purification effect on rural ponds, and the removal rates of water turbidity, ammonia nitrogen, TN and COD could reach 68.18%, 92.64%, 79.85% and 92.10%, respectively. (2) For the biological joint regulation techniques, the TN removal rate was significantly negatively correlated with DO; the TP removal rate was significantly negatively correlated with DO and positively correlated with N/P; the COD removal rate was significantly negatively correlated with ammonia nitrogen and C/N.

Keywords: Poyang Lake Plain; rural ponds; in-situ remediation technology; biological joint regulation techniques

我国农村环境污染已超过工业和城市环境污染^[1]。农业生产中农药、化肥等的不合理和过量使用,畜禽粪便等农业废物的任意排放,以及生活污水的直接排放,造成河流和水塘严重污染^[2]。同时,底泥是自然水域的重要组成部分,适当条件下底泥中的污染物会释放出来,成为二次污染源,并且释放时间、途径和释放量具有不确定性^[3]。农村水污染导致农村饮水困难,影响村民居住环境,严重威胁农民的身心健康,已成为污染治理的重点。

国内外学者对河湖污染修复方法进行了大量研

究^[4-5],目前主要有物理、化学和生物3大类修复技术^[6-9]。但物理和化学修复对生态环境的破坏较大。随着生物技术和生物科学的不断发展,生物修复已成为治理水污染的热点,具有广阔的市场前景^[10-14]。

鄱阳湖平原区农村具有多水塘湿地系统,在农业发展中具有不可替代的作用和价值^[15-16]。然而,当前我国主要研究方向集中在城市湖泊^[17]和大中型湖库^[18],少有针对农村微小型水塘污染修复技术的研究。为此,通过选择鄱阳湖平原区农村水塘,进行原位修复模拟试验,以期得到不同修复方法下农

第一作者:刘方平,男,1977年生,硕士,教授级高级工程师,主要从事农田节水灌溉与面源污染防治研究。

* 江西省重点研发计划项目(No.20171BBH80018);江西省水利科技项目(No.KT201737)。

表 1 水塘湿地小区处理措施
Table 1 Treatment measures for different water ponds

处理	编号	处理措施	取样周期
对照	池 1	直接注水,作为空白对照	取原水,保存待测;水池注水后静置 1 d 取样测定,之后在第 3、7、10、13、17、19、21 天取样测定,每天 17:00 采样
覆沙处理	池 2	覆沙为当地清洁河沙,过 2 mm 筛后平铺入池中,厚度为 10 cm,之后再注水	
落干曝晒处理	池 3	底泥在自然光下曝晒 1 个月后再注水	
生物联合调控处理	池 4	底栖生物+鱼+挺水植物	

村水塘水环境指标变化规律,提出适宜农村微小型水塘的原位修复技术。

1 材料与方法

1.1 试验场地

试验在江西省灌溉试验中心站试验研究基地开展。基地位于江西省鄱阳湖平原区,地处江西省南昌县向塘镇高田村,地理位置为东经 116°、北纬 28°26',海拔 22.0 m,区内为典型的亚热带湿润季风性气候。基地内现配有小型湿地小区,面积 28.2 m²(4.7 m×6.0 m),均为一体化钢筋混凝土结构,边壁厚度 30 cm,以防止小区之间的渗水;各小区地表以下净深为 80 cm,底部无衬砌。

将池中原有底泥挖除 25 cm,将农村水塘取来的底泥覆上,并填平。试验用底泥取自鄱阳湖平原区某受污染农村水塘底泥,其营养成分指标具体为有机质 22.88 g/kg、全氮 1.36 g/kg、碱解氮 214.84 mg/kg、有效磷 181.29 mg/kg,pH=6.15。

1.2 试验处理设计

各处理详见表 1。其中,池 4 湿地小区放养的底栖生物为三角帆蚌(*Hyriopsis cumingii*),密度为 18 个/m³,平均质量约 150 g/个。为避免三角帆蚌外壳携带的藻类对试验造成误差,三角帆蚌均事先用板刷刷除附生的藻类,然后放在自来水中漂洗 1 d,后使用河水驯养 3 d。选取鳊鱼、鲢鱼等滤食性鱼类,每池分别放养 9、27 条,每条质量 200~300 g。挺水植物选取了花叶芦竹(*Arundo donax* var. *versicolor*),在湿地小区周边 1 m 内种植 4 排(间距为 20 cm)。各湿地所覆原水水深为 50 cm;原水为农田排水,氨氮、TN、TP、COD 分别为 1.320、2.269、0.063、52.73 mg/L,pH 为 6.80。

1.3 采样及测定方法

水样分两层采集,水面下 10 cm 的水样为上层水,距离底泥 10 cm 的水样为下层水。采用对角线 5 点采样法采集上、下层水样,立刻带回实验室放入冰箱中 4℃保存待测。

水质指标 pH、DO、浊度等在现场使用 YSI 多

参数水质分析仪、哈希浊度仪进行原位测定,TN、氨氮、TP、COD 等指标按照文献[19]检测。

1.4 数据处理

主要采用 SPSS17.0、WPS2019 等分析软件进行相关数据分析和图表绘制。

2 结果与讨论

2.1 水质指标变化规律

由图 1 可见,对照、覆沙处理、落干曝晒处理的浊度去除率总体上表现出相似的变化规律,呈现先降后升的趋势;生物联合调控处理浊度去除率呈不断上升的趋势,并在前 3 天快速上升,随后平缓上升。对照、覆沙处理、落干曝晒处理浊度去除率在前 3 天均为负值,其中覆沙处理在第 10 天、落干曝晒处理在第 13 天、对照在第 17 天时才变为正值,其主要原因是试验开始时注水扰动底泥所致;生物联合调控处理浊度去除率始终为正值,这主要是因为池内种植湿地植物较茂盛,根系发达,对注水有一定缓冲作用,有效防止了注水时底泥的扰动,并对水中悬浮颗粒有一定的吸附作用。总体来说,不同处理浊度去除率均随时间的延长而上升,并均在第 21 天达到最高值,且生物联合调控处理(68.18%)>覆沙处理(49.09%)>落干曝晒处理(28.64%)>对照(24.09%)。

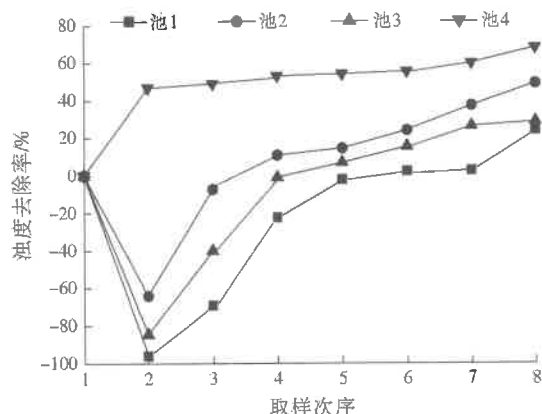


图 1 不同湿地小区水体浊度去除率的变化
Fig.1 Changes of turbidity removal rate in different water ponds

由图 2 可见,对照氨氮去除率先略升,第 7 天达到较高值(13.18%),随后快速下降,第 13 天达到最

低值(-56.59%),说明其间有氨氮的释放,接着呈上升趋势,至第21天达到最高值(15.38%)。覆沙处理氨氮去除率总体呈缓慢上升的趋势,但第17天有个小幅下降,第19天达到最高值(44.70%)。落干曝晒处理氨氮去除率呈现波动变化趋势,前3天和第10天前变化剧烈。生物联合调控处理氨氮去除率总体呈平缓上升趋势,前3天呈快速上升趋势,并在第21天达到最高值(92.64%)。各处理不同时期氨氮去除率均为正值(除对照外),总体表现为生物联合调控处理>覆沙处理>落干曝晒处理>对照。

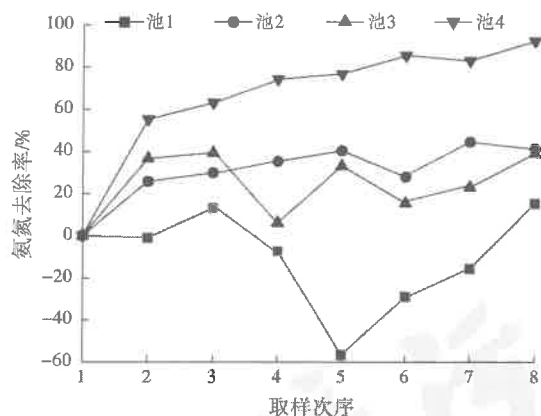


图2 不同湿地小区水体氨氮去除率的变化规律
Fig.2 Changes of ammonia nitrogen removal rate in different water ponds

由图3可见,对照、覆沙处理、落干曝晒处理TN去除率总体上表现出相似的变化规律,呈现波动变化趋势。对照TN去除率先略上升,随后下降至第10天变为负值,至第19天转为正值,并略有上升,第21天仅为5.31%。覆沙处理和落干曝晒处理TN去除率均先呈快速上升趋势,分别达最高值52.33%和54.88%,随后总体降低。生物联合调控处理TN去除率总体呈平缓上升趋势,但在前3天呈

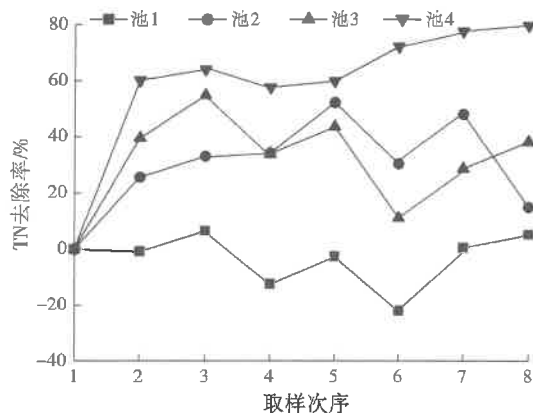


图3 不同湿地小区水体TN去除率的变化
Fig.3 Changes of TN removal rate in different water ponds

快速上升趋势,并在第21天达到最高值(79.85%)。各处理不同时期TN去除率均为正值(除对照外),总体表现出生物联合调控处理>落干曝晒处理>覆沙处理>对照。

由图4可见,不同处理COD去除率总体呈现相似的变化规律,除落干曝晒处理在第7~10天有个下降过程外,其余时期均呈上升趋势。对照和覆沙处理COD去除率在前3天呈快速上升趋势,随后缓慢上升,到第21天达最高值,分别为87.23%和64.12%;落干曝晒处理和生物联合调控处理COD去除率均在前7天呈快速上升趋势,其后落干曝晒处理呈先降后升趋势,生物联合调控处理呈缓慢上升趋势,落干曝晒处理和生物联合调控处理均在第21天达到最高值,分别为92.22%和92.10%。COD去除率总体表现出生物联合调控处理>落干曝晒处理>对照>覆沙处理。

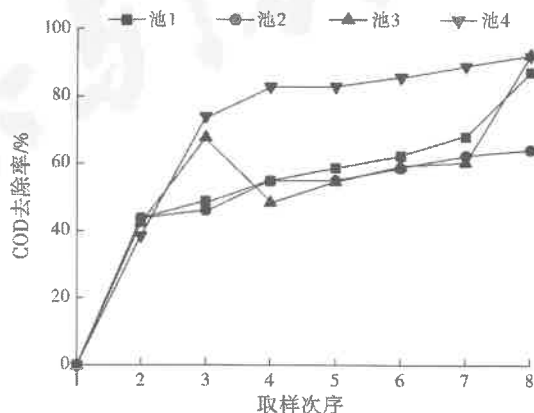


图4 不同湿地小区水体COD去除率的变化
Fig.4 Changes of COD removal rate in different water ponds

由图5可见,对照、覆沙处理、落干曝晒处理TP去除率总体表现出相似的变化规律,呈现先降后升的趋势,均在第10或13天达到最低值,分别为

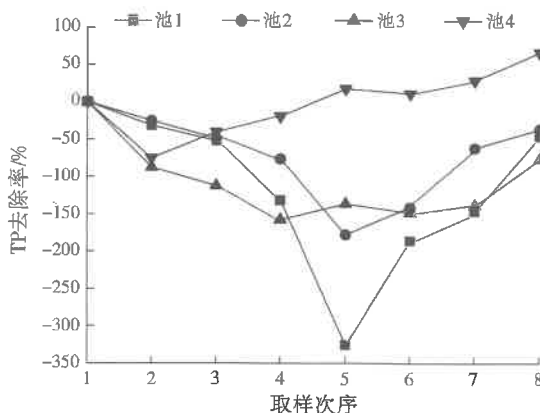


图5 不同湿地小区水体TP去除率的变化
Fig.5 Changes of TP removal rate in different water ponds

-325.40%、-177.78%、-157.94%，整个取样监测阶段 TP 去除率均为负值，说明磷的释放特别明显。生物联合调控处理 TP 去除率呈先下降后缓慢上升的趋势，第 3 天达到最低值(-75.21%)，第 13 天转为正值，第 21 天达到最高值(66.13%)，整个过程是一个磷的释放和吸收转化净化并行的过程，前期表现为磷的释放占主导，后期以磷的吸收转化净化占主导。TP 去除率总体表现为生物联合调控处理>覆沙处理>落干曝晒处理>对照。

综上所述，生物联合调控处理对水质净化的效果总体最佳，浊度、氨氮、TN 和 COD 去除率随时间延长总体呈上升趋势，并且均在前期有一个快速去除的过程，去除率最高值均在第 21 天，分别为 68.18%、92.64%、79.85%和 92.10%；TP 去除率刚好相反，前期较快下降，后期缓慢上升。总体来说，生物联合调控处理对水体水质指标均有逐渐改善的趋势，这主要是因为湿地植物的生长会吸收底泥或水中的一部分营养成分，阻断底泥与水体的直接交换，抑制底泥中营养物质的释放^[20-22]。覆沙处理对浊度、氨氮和 TP 均有较好的去除率，但对 TN、COD 去除率相对较低，其可能原因是覆沙处理能有效减少水下底泥的扰动，从而减少底泥的扬起，以及由此造成的底泥氨氮和 TP 的释放，但覆沙也会阻隔底泥中微生物在水体中的活动，并且细沙较底泥不利于微生物的附着栖息生长繁殖，从而降低微生物对 COD 的降解。落干曝晒处理对水体中 TN 和 COD 有较好的去除率，但水体中 DO 也快速地降低，其可能是落干曝晒期间，底泥中一些好氧微生物大量繁殖，待覆水后，短期内加速了水体中 DO 的消耗。

2.2 影响营养物质去除率变化的因子

为探明不同湿地处理营养物质去除率与相关因子的关系，主要对 TN 去除率与 DO、pH、水温、TP

去除率与 DO、pH、水温、氮磷质量比(N/P)，COD 去除率与氨氮、pH、水温日变差(ΔT)、碳氮质量比(C/N)、N/P 进行相关性分析。结果见表 2 至表 4。各因子对 TN 去除率的影响顺序：对照中水温>pH>DO；覆沙处理中水温>DO>pH；落干曝晒处理中 DO>水温>pH；生物联合调控处理中 DO>水温>pH。各因子对 TP 去除率的影响顺序：对照中 N/P>pH>水温>DO；覆沙处理中 N/P>水温>pH>DO；落干曝晒处理中水温>pH>N/P>DO；生物联合调控处理中 DO>N/P>水温>pH。各因子对 COD 去除率的影响顺序：对照中 C/N> ΔT >pH>N/P>氨氮；覆沙处理中氨氮>pH>C/N> ΔT >N/P；落干曝晒处理中 C/N>pH> ΔT >氨氮>N/P；生物联合调控处理中 C/N>氨氮>N/P>pH> ΔT 。生物联合调控处理的 TN 去除率与 DO 呈显著负相关；对照的 TN 去除率与水温呈显著正相关；其他处理与各因子相关性不显著。生物联合调控处理的 TP 去除率与 DO 呈显著负相关、与 N/P 呈显著正相关；对照和覆沙处理的 TP 去除率均与 N/P 呈显著正相关；其他处理与各因子相关性不显著。生物联合调控处理的 COD 去除率与氨氮、C/N 均呈显著负相关；对照、落干曝晒处理的 COD 去除率均与 C/N 呈显著负相关；其他处理与各因子相关性不显著。

表 2 TN 去除率与各因子相关性分析¹⁾

Table 2 Correlation analysis between TN removal rate and related factors

编号	DO	pH	水温
池 1	-0.356	0.558	0.773 *
池 2	-0.362	-0.166	-0.384
池 3	-0.589	-0.118	0.454
池 4	-0.769 *	0.282	0.444

注：¹⁾ * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关；* * 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。表 3 和表 4 同。

表 3 TP 去除率与各因子相关性分析

Table 3 Correlation analysis between TP removal rate and related factors

编号	DO	pH	水温	N/P
池 1	-0.420	0.742	-0.463	0.948 * *
池 2	0.309	0.356	-0.603	0.882 * *
池 3	-0.192	0.609	-0.700	0.297
池 4	-0.907 * *	-0.182	-0.421	0.811 *

表 4 COD 去除率与各因子相关性分析

Table 4 Correlation analysis between COD removal rate and related factors

编号	氨氮	pH	ΔT	C/N	N/P
池 1	-0.115	-0.408	0.575	-0.971 * *	-0.138
池 2	-0.738	-0.642	0.469	-0.565	-0.205
池 3	-0.422	-0.559	0.487	-0.894 * *	0.256
池 4	-0.879 * *	0.293	0.268	-0.979 * *	0.600

3 结 语

(1) 生物联合调控处理对水质净化的效果总体最佳,浊度、氨氮、TN 和 COD 去除率随时间延长总体呈上升趋势,最高值均出现在第 21 天,分别为 68.18%、92.64%、79.85% 和 92.10%;TP 去除率刚好相反,前期较快下降,后期缓慢上升。

(2) 生物联合调控处理的 TN 去除率与 DO 呈显著负相关;对照的 TN 去除率与水温呈显著正相关;其他处理与各因子相关性不显著。生物联合调控处理的 TP 去除率与 DO 呈显著负相关、与 N/P 呈显著正相关;对照、覆沙处理的 TP 去除率均与 N/P 呈显著正相关;其他处理与各因子相关性不显著。生物联合调控处理的 COD 去除率与氨氮、C/N 均呈显著负相关;对照、落干曝晒处理的 COD 去除率均与 C/N 呈显著负相关;其他处理与各因子相关性不显著。

(3) 为提高农村水塘对水污染净化效果,可对农村水塘进行生物联合调控处理,合理控制 C/N;对于底泥淤塞严重、营养盐含量高的水塘,可进行适当清淤,并在岸边淤泥较深处进行河沙覆盖;控制水体适宜的 N/P;具有排水条件的水塘可选取雨水少的季节进行适当晒塘。

参考文献:

- [1] 周爱萍.我国农村水污染现状及防治措施[J].安徽农业科学,2009,37(9):4345-4346,4348.
- [2] 黄文任,吴延根,舒金华.中国主要湖泊水库的水环境问题与防治建议[J].湖泊科学,1998,10(3):83-89.
- [3] 朱兰保,盛蒂.污染底泥原位覆盖控制技术进展[J].重庆文理学院学报(自然科学版),2011,30(3):38-41.
- [4] 曲久辉.我国水体复合污染与控制[J].科学对社会的影响,2000(1):36-40.
- [5] PERELO L W. Review: in situ and bioremediation of organic pollutants in aquatic sediments[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 177(1/2/3): 81-89.
- [6] GHOSH U, LUTHY R G, CORNELISSEN G, et al. In-situ sorbent amendments; a new direction in contaminated sediment management[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(4): 1163-1168.
- [7] 陈玉成.污染环境生物修复工程[M].北京:化学工业出版社,2003.
- [8] MUCHA Z, WÓJCIK W, JÓŹWIAKOWSKI K, et al. Long-term operation of Kickuth-type constructed wetland applied to municipal wastewater treatment in temperate climate[J]. Environmental Technology, 2018, 39(9): 1133-1143.
- [9] QUALLS R G, HEYVAERT A C. Accretion of nutrients and sediment by a constructed stormwater treatment wetland in the Lake Tahoe Basin[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2017, 53(6): 1495-1512.
- [10] 陈鸣钊,丁训静,徐京怀.用生态环境再改变理论研究湖泊富营养化治理方法[J].水科学进展,2003,14(3):323-327.
- [11] 顾宗廉.中国富营养化湖泊的生物修复[J].农村生态环境,2002,18(1):42-45.
- [12] 陈华林,陈英旭.污染底泥修复技术进展[J].农业环境保护,2002,21(2):179-182.
- [13] 胡春华,濮培民,王国祥,等.冬季净化湖水的效果与机理[J].中国环境科学,1999,19(6):561-565.
- [14] 周正,周颖辉.我国农村水污染现状及防治方法[J].北方环境,2011,23(6):97-99.
- [15] 李玉凤,刘红玉,皋鹏飞,等.农村多水塘系统水环境过程研究进展[J].生态学报,2016,36(9):2482-2489.
- [16] 毛战坡,王世岩,周晓玲,等.六岔河流域多水塘-沟渠系统中土壤养分空间变异特征研究[J].水利学报,2011,42(4):425-430.
- [17] 张永航,李梅,杜莹.观山湖湿地公园水体中氮磷分布及富营养评价[J].安徽农业科学,2018,46(2):60-62.
- [18] 孟庆庆,李博.二龙山水库水体富营养化状况监测与分析[J].黑龙江环境通报,2013,37(3):15-17.
- [19] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002.
- [20] 童昌华,杨肖娥,濮培民.水生植物控制湖泊底泥营养盐释放的效果与机理[J].农业环境科学学报,2003,22(6):673-676.
- [21] 童昌华,杨肖娥,濮培民.富营养化水体的水生植物净化试验研究[J].应用生态学报,2004,15(8):1447-1450.
- [22] 吴振斌,邱东茹,贺锋,等.水生植物对富营养化水体水质净化作用研究[J].武汉植物学研究,2001,19(4):299-303.

编辑:黄 苇 (收稿日期:2019-09-25)

