

污水处理系统的集成控制策略研究

樊立萍,袁德成

(沈阳化工学院信息工程学院,辽宁 沈阳 110142)

摘要 以实现河流水质目标为前提,充分利用河流纳污能力,根据不同环境与气候条件调节污水处理厂运行状况和排水管网的污水排放量,可有效保护河流生态质量。基于城市污水处理系统集成仿真平台,提出了 4 种以河流水质为目标的城市污水处理系统集成控制方案,通过对排水管网和污水处理厂的协调控制,实现了河流水质的改善。仿真结果验证了集成控制策略的有效性。

关键词 河流水质 城市污水系统 集成控制 仿真模型

中图分类号 X703 **文献标识码** A **文章编号** 1004-6933(2009)05-0065-05

Study on integrated control strategies for wastewater treatment system

FAN Li-ping, YUAN De-cheng

(School of Information Engineering, Shenyang Institute of Chemical Technology, Shenyang 110142, China)

Abstract The ecological quality of a receiving river can be effectively protected by realizing a target water quality and fully utilizing the assimilation capacity of the river, according to the environmental and atmospheric conditions regulating the operation of the wastewater treatment plant and the wastewater effluent from the sewage network to the river. With the help of the integrated simulation platform of the urban wastewater treatment system, four kinds of integrated control strategies for an urban wastewater treatment system are presented for a certain target river water quality. With cooperative control of the sewer system and the wastewater treatment plant of an example river system, river water quality can be improved. Simulations verify the effectiveness of the integrated control strategies.

Key words river water quality ; urban wastewater system ; integrated control ; simulation

在我国 600 多个建制市中,有 400 多个城市缺水,其中 100 多个城市为严重缺水。由于大量未经处理的污水直接排入江河湖海,全国有 50% 的河段受到污染,90% 以上城市附近水域污染严重,50% 以上湖泊水体富营养化,水污染已从支流向干流延伸、从城市向农村蔓延、从区域性向流域性发展、从地表向地下深入,水环境现状令人担忧。制定符合社会经济环境目标的水资源可持续发展战略,加强水资源保护、治理水污染、保护水环境,在满足人类需求的基础上维护生态系统平衡,成为亟待解决的问题。

作为水资源管理的重要组成部分,水污染控制在水环境质量改善中起着重要的作用。将整个污水

处理系统作为一个控制系统进行集成规划与控制,即根据河流水质要求,控制城市排水管网的组合污水溢流以及城市污水处理厂运行状况,可以在降低运行代价的同时实现水生态环境的改善。城市污水处理系统集成化管理是城市污水处理的发展趋势和实现城市可持续发展的有效途径^[1],也是建设信息化城市、构建城市信息资源系统一个不可缺少的重要组成部分。

城市污水处理系统由排水管网、污水处理厂和受纳河流 3 个子系统组成,如图 1 所示。城市生活污水、工业废水、降雨径流等经排水管网收集后,传输到污水处理厂,在污水处理厂被处理后排入受纳

基金项目 中国 - 保加利亚政府间科技合作项目 (12-11)
作者简介 樊立萍 (1965 —),女,山东淄博人,教授,博士,主要从事集成化城市水资源管理、电力电子与电气传动等方面的教学与研究工作。E-mail: flpsd@163.com

河流。当降雨量较大,超出排水管网的水力容量或污水处理厂的处理能力时,排水管网产生组合下水溢流(CSO),大量污水未经处理直接排入河流。

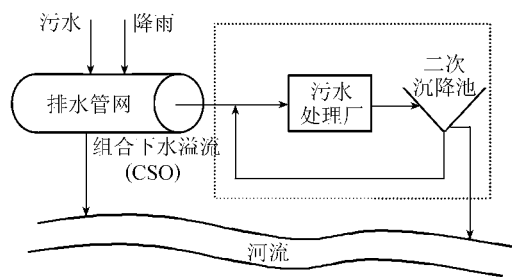


图1 城市污水处理系统

排水管网、污水处理厂和受纳河流之间存在相互关联。排水管网将污水输入污水处理厂,污水的变化数量与质量影响污水处理厂的处理效果;污水处理厂排放物不断排入河流,会对河流水质产生影响。组合下水溢流使河水污染物浓度增大,需氧量增大,导致河水氧浓度下降,直接影响河流水体质量。

由于污水处理行业特殊的‘非营利’性,该行业的控制与自动化(ICA)技术相对薄弱。一方面,传统的‘管末处理,达标排放’的污水处理方式仅限于处理能力有限的污水处理厂,而现有的污水处理厂由于成本等原因,很少装备自动化仪表与控制系统,往往很难满足日益严格的排污标准。另一方面,河流水质的变化是由物理传输与交换过程以及生物、生化或物理转化过程等多方面因素引起的,即使污水达标的排放河流中,也不能保证河流水质达标。根据河流纳污能力对污水排放进行有效控制,方可阻止河流水质的进一步恶化,改善水生态环境。欧盟各国在水框架指令驱动下对以河流生态为目标的集成水系统控制进行了大量研究^[2-4],国内近年来也逐渐有一些相关方面的探索^[5-6]。

本文探讨以河流水质为目标的城市排污系统的集成控制策略,重点考虑通过排水管网和污水处理厂的协调运行,减小降雨事件或其他突发污染量冲击事件造成污水处理厂处理率降低而引起的河流水质污染。

1 集成建模

1.1 系统描述

沈阳市汇水总面积 186.67 km²,服务人口 362 万,日均流量 138.67 万 m³。浑河全长 172.6 km,沈阳河段长 56.96 km,其中城市段东至东陵大桥,西至浑河大坝,全长 28.6 km,河道宽 250~600 m,设计流量 14.45 m³/s。笔者以该河流位于城区的浑河青年桥至工农桥的 5.7 km 中心河段为研究对象,该河段水深约 4 m,每天接纳约 50 万 t 污水。大量入流污水对河流造成了严重影响,该河段水体一直属于

劣 V 类水质,尤其夏季水体恶臭程度达到 V 级以上。据了解,浑河及其支流的污染程度在全国同类河流中是最严重的。2002 年起,沈阳市浑河治理工程全面展开,规划彻底净化浑河水质,使其最低达到 V 类地表水水质标准,使浑河真正成为具备灌溉、纳污、泄洪和景观能力的‘城市内河’。

笔者所研究的系统包括连接污水处理厂的长 21 km、管径 1.5 m 的截流管,日处理能力为 25 万 t 的污水处理厂和 5.7 km 的城区中心河段。河流城区河段水力特性采用级联水池模型描述,水质变化特性采用基于河流水质 1 号模型(RWQM1)的简化模型描述^[7]。排水管网的水力特性采用串联 CSTR 描述。综合考虑模型精度与仿真速度,经反复仿真校准,确定采用 10 个级联水池作为排水管网等效模型。

来自各个支路排水管网的污水经截流管截流后,一部分连续排入污水处理厂的储水池,另一部分直接连续排入受纳河流。污水处理厂采用 SBR(序批式反应器)工艺,日处理能力 25 万 t,处理后的污水排放城区河段。处理规模为粗格栅、进水泵房平均设计流量 50 万 m³/d,峰值流量为 110 万 m³/d;细格栅、沉沙池峰值流量为 55 万 m³/d,平均流量为 25 万 m³/d;二级处理、泥处理的处理规模为 25 万 m³/d。全厂共设三组 SBR 池,每组 3 个池。每座反应池的平面尺寸为 83.7 m×40.7 m,钢筋混凝土结构,水深 5.1~6.0 m,超高 0.5 m,9 个 SBR 反应池最大总容量为 18.4 万 t。

正常情况下(晴天),9 个 SBR 反应池同时进水、出水,处理周期为 8 h(厌氧 1.5 h、曝气 3.5 h、缺氧 1 h、沉淀 1 h、排放 1 h),每周期处理污水 8.4 万 t,每天处理 25 万 t。晴天时污水平均流量为 10 417 m³/h。雨天时,如果污水处理厂仍保持日处理 25 万 t 的运行现状,过量污水均通过溢流直接排放至城区河流,河流水质将受到严重的负面影响,甚至影响下游城市的供水。

1.2 仿真平台

本研究工作是在城市污水处理系统集成仿真平台上完成的。在分析国际水协会(IWA)工作组有关 Benchmark 协议的基础上,以国际水协会发布的河流水质 1 号模型(RWQM1)^[8]和标准活性污泥 2 号模型(ASM2d)^[9]以及基于 ASM3 的排水管网模型^[10]为基础,分别建立河流、污水处理厂和排水管网的仿真模型,然后考虑 3 个子系统间变量的匹配、信息流的传输等问题,建立关联各个子系统的转换与传输环节,实现 3 个子系统的信息集成与目标集成。该集成仿真平台在 MATLAB 仿真环境下搭建而成,能够模拟排水管网、SBR 污水处理厂和河流的动态特性

及它们之间的关联关系^[11]。

1.3 仿真运行

由于缺乏准确的径流数据,选择国际水协会提供的污水输入文件作为排水管网的进水输入^[12]。晴天情况下的河流水质变化情况如图 2 所示,其中,图 2(a)为河流中溶解氧质量浓度变化曲线,图 2(b)为氨氮质量浓度变化曲线,以下各图中(a)、(b)意义同此。周期性运行的 SBR 污水处理厂在排放出水时会导致河流水质略有下降,但总体影响不大。

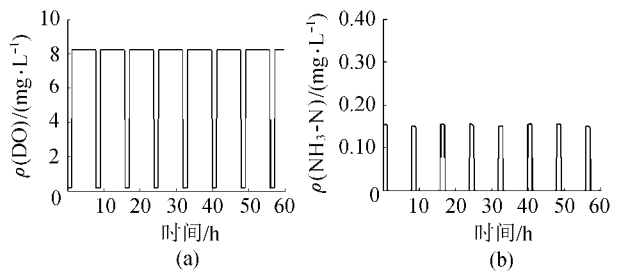


图 2 干燥天气情况下河流水质情况

考虑连续降雨两天的情况。根据国际水协会工作组提供的降雨数据,在连续两天的降雨事件中,污水平均流量为 35417 m³/h。如果污水处理厂保持日处理 25 万 t 的运行现状,剩余 60 万 t 污水以 25000 m³/h 的平均流量直接排放河流。对应这种运行状况的河流水质变化情况如图 3 所示。在降雨的两(对应图中 12~60 h),河流水质明显下降。

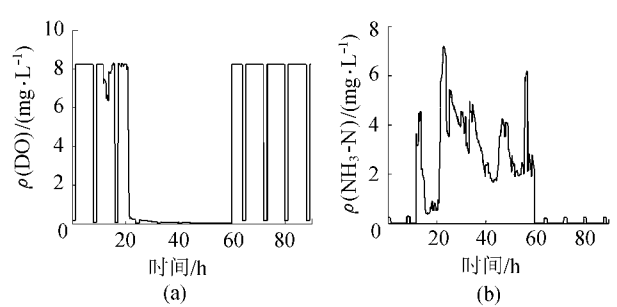


图 3 降雨期间河流水质情况

2 集成控制策略

集成控制的基本思路是根据河流自净能力与整个污水处理系统的实时运行状况,充分利用排水管网的管内存储能力和污水处理厂的最大处理能力,最大限度地减少污水向河流的直接排放。

2.1 控制策略 1 污水处理厂过载运行

在降雨期间,控制 SBR 污水处理厂过载运行至 2.2DWF(干燥天气流量)。从该污水处理厂设计能力看,按每天处理 25 万 t 运行时,沉沙池及 SBR 生化反应池仍具有每天 30 万 t 的处理余量,因此可通过过载运行增加雨季处理量,减少直接排放的污水量。SBR 反应池的最大过载倍数为 2.2 DWF。因

此,当雨污水流量小于 2.2DWF 时,通过进水泵房提升到沉沙池的污水,经过沉沙后可通过配水井全部进入 SBR 反应池进行二级处理。在这种情况下,不会发生组合下水溢流,河流水质不会因降雨事件的发生而明显恶化。由于污水处理厂出水排放量增大,在污水处理厂排水期间,河流中溶解氧浓度下降更快,氨氮、磷等污染物浓度与晴天比略有上升,但仍能完全满足河流水质要求,如图 4 所示。

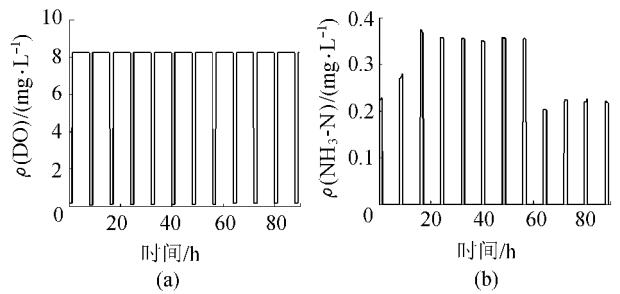


图 4 控制策略 1 对应的河流水质变化情况

2.2 控制策略 2 污水处理厂过载 + 管内存储

当雨污水流量超过 2.2DWF 时,SBR 污水处理厂的二级处理能力已经无法满足对全部污水进行处理的要求。在这种情况下,可充分利用排水管网的管内存储能力,根据污水处理厂的处理能力控制排水管网溢流阀和截流阀的运行,尽可能多地将管内污水引入污水处理厂,减少污水直接排放量。

根据污水处理厂工艺情况及河流水质要求,该实时控制的操作如下:当污水流量为基本流量(正常干燥天气流量 DWF)时,截流阀完全打开,溢流阀关闭,保证所有污水全部进入污水处理厂进行处理。降雨事件开始时,保持截流阀打开、溢流阀关闭的状态,对组合下水溢流(CSO)进行管内存储,等待污水处理厂处理,使进入污水处理厂的污水流量最大(2.2DWF)。当截流管达到其最大容量时,溢流门打开,将超出截流管容量的污水旁路直接排放至受纳河流。当降雨高峰过后,重新关闭溢流门存储 CSO。一旦污水处理厂有能力处理这些污水,截流门立即重新打开,将这些存储污水输送至污水处理厂进行处理。

连接污水处理厂的截流管总长度 21 km,管径 1.5 m。溢流门根据截流管的水位检测进行控制。当水位计检测到截流管的水位到达 1.4 m(考虑一定安全裕量)时,溢流门打开,将多余污水直接排入河流。如果 SBR 的运行周期仍保持 8 h 不变,在过载 2.2 倍的情况下,污水处理厂每天处理 55 万 t,剩余污水的平均排污流量为 12500 m³/h,大约经 3 h 充满截流管,随后溢流阀打开溢流 5 h。SBR 处理完一个批次后,截流管出口控制门打开,将管内污水全部送入 SBR。该控制策略下的排污系统引起的河流水质

变化情况仿真结果如图 5 所示。由于存在污水溢流,在降雨期间河流水质仍有所下降,但与图 3 所示基本运行策略比,不论是溶解氧指标还是氨氮、磷等指标,通过 SBR 过载与管内存储都已有明显改善。

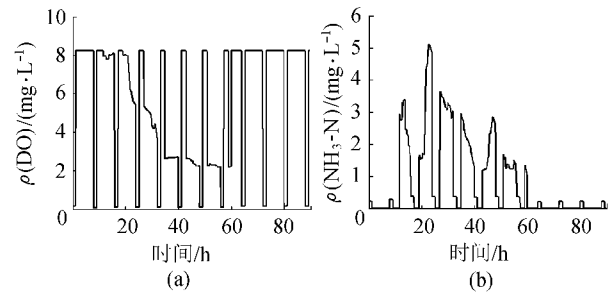


图 5 控制策略 2 对应的河流水质变化情况

2.3 控制策略 3 污水处理周期调节 + 管内存储

SBR 污水处理过程是一种周期性运行工艺。降雨期间,污水处理厂运行压力增大,可将 SBR 污水处理工艺的周期适当缩短,如由 8h 调节为 6h (厌氧 1.75h,好氧 2.25h,缺氧 1h,沉淀 0.5h,排放 0.5h),则每天处理量可达到 75 万 t,剩余污水则通过截流管完全截留存储直至污水处理厂处理,处理率可达到 100%。这种控制策略下的仿真运行结果如图 6 所示。由于所有污水均经过污水处理厂二级处理,虽污水厂出水指标略有下降,但河流水质在降雨期间不会发生严重恶化。

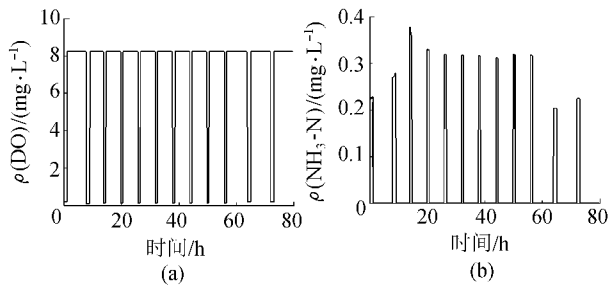


图 6 控制策略 3 对应的河流水质变化情况

2.4 控制策略 4 管内存储 + 曝气控制

降雨期间,由于污水排放量大,即使所有污水均经过处理,排污期间也会引起河流中溶解氧及其他指标的恶化。针对这种情况,在原过载控制与管内存储的基础上,增加排污期间的河流曝气控制。采用开关量控制,在 SBR 排放期间,通过曝气设备提高河流复氧系数;而在非排放期间停止曝气,保持河流自身复氧能力。仿真运行结果如图 7 所示。从图 7 中可看出,SBR 排污引起的氨浓度上升明显减少,溶解氧质量浓度也符合河流水质要求(大于 3 mg/L)。

3 对比分析

从几种控制方案的仿真实施情况看,当发生降雨事件时,只有根据河流水质要求对城市污水处理系统实施集成控制,充分利用排水管网的管内存储

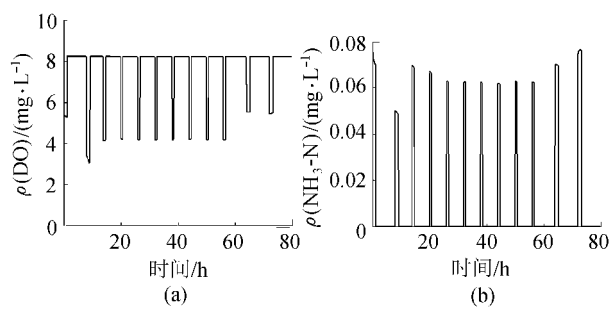


图 7 控制策略 4 对应的河流水质变化情况

与污水处理厂的过载能力尽可能减少污水直接排放量,方可使河流水质最大限度地免受降雨事件带来的水质污染。单纯利用污水处理厂的过载能力减小污水直接排放量因受污水处理厂处理能力限制,在降雨量较大时,所起作用有限,管内存储 + SBR 过载的控制方案可进一步提高污水处理率,进而减少直接排放量,但在降雨量较大时,可能仍然存在 CSO,对河流仍会造成污染;SBR 过载 + 管内存储 + 曝气控制方案既可最大程度提高污水处理率,又可控制河流水质指标维持在容许范围内,是降雨期间保护河流水质的更好方案。

4 结 语

在集成建模基础上,构造以河流水质为目标的排污管网与污水处理厂的实时控制策略,能够在实施排污的同时满足河流水质的最佳状态。不同控制策略的仿真研究证明了集成控制策略的有效性与可行性,为工程实践提供了理论依据。进一步的研究将结合进水情况与河流水质要求,对污水处理厂、排污管网进行基于最优化理论与动态优化技术的实时优化控制,实现更好的运行状况,达到更好的水质指标。

我国属于水资源短缺、污染严重、治理又落后的国家。根据河流水质与生态要求,将城市污水系统作为一个整体进行集成规划与设计,把控制延伸到城市排水管网内,对河流水质调节与城市污水处理厂的运行指标实行集中 - 分布式监控和管理,建立以流域生态优化为目标的集成监控系统,代表了污水处理和回用的未来发展方向,对于实现城市可持续发展、构建和谐社会具有重大意义,有前瞻性和重大的工程价值,应用前景乐观。

参考文献：

[1] HARREMÖS P. Integrated urban drainage, status and perspectives[J]. Water Science & Technology,2002,45(3) : 1-10.

[2] MEIRLAEN J, Van ASSEL J, VANROLLEGHEM P A. Real-time control of integrated urban wastewater system using simultaneously simulation surrogate models [J]. Water

Science & Technology,2002,45(3) :109-116.

[3] RAUCH W, BERTRAND-KRAJEWSK J L. Mathematical modeling of integrated urban drainage systems [J]. Water Science & Technology, 2002,45(3) 81-94.

[4] CLEMENT L,THAS O,VANROLLEGHEM P A,et al. Spatio-temporal statistical models for river monitoring networks[J]. Water Science & Technology,2006,53(1) 9-15.

[5] 孟伟,苏一兵,郑丙辉. 中国流域水污染现状与控制策略的探讨[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2004,2(4) 242-246.

[6] 李嘉,张建高. 论水污染协同控制的基本原则[J]. 水力学报, 2002(1) 1-5.

[7] 樊立萍,于海斌,袁德成. 河流水质模型(RWQM1)介绍及应用分析[J]. 水资源保护,2005,21(4) 4-7.

[8] REICHERT P,BORCHARDT D,HENZE M,et al. River water

quality model(RWQM1) :II. biochemical process equations [J]. Water Science & Technology,2001,43(5) 11-30.

[9] HENZE M,GUJER W,MINO T,et al. Activated sludge model no. 2d,ASM2d[J]. Water Science & Technology,1999,39(1) 165-182.

[10] HUISMAN J L,KREBS P,GUJER W. Integral and unified model for the sewer and wastewater treatment plant focusing on transformations [J]. Water Science & Technology,2003,47(12) 65-71.

[11] 樊立萍,于海斌,袁德成. 集成化城市污水系统的建模与仿真[C]//全球化制造高级论坛暨 21 世纪仿真技术研讨会论文集. 贵阳 :世界图书出版社,2004 304-308.

[12] PONS M N. Benchmark 1 :influent[ED/OL]. [2004-05-07]. <http://www.ensic.u-nancy.fr/COSTWWTP>

(收稿日期 2008-05-14 编辑 高渭文)

(上接第 60 页)

水平,其中PD、TC、ET和 F 方程的拟合效果达到极显著水平。在磷的释放过程中,并不只是通过一个简单的表面交换反应,而涉及不同的反应。每一个动力学方程都能解释磷的释放过程中所涉及的某一方面,因此磷的释放动力学可以用一种以上曲线方程进行很好的拟合^[7]。

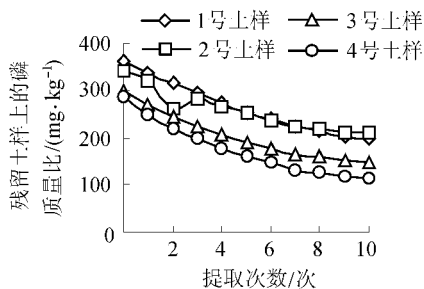


图 8 各土样吸附 $\rho = 5 \text{ mg/L}$ 磷后的再释放

表 4 土壤吸附大量磷后释磷动力学公式比较

土 样 号	相关系数 r				
	F	S	PD	TC	ET
	$\ln Q = \ln A + Bt$	$1/Q = 1/A + Bt$	$Q = A + Bt^{1/2}$	$\ln Q = \ln A + B \ln t$	$Q = A + B \ln t$
1	0.918	0.792	0.998	0.995	0.984
2	0.920	0.808	0.995	0.995	0.984
3	0.910	0.803	0.996	0.993	0.992
4	0.907	0.806	0.994	0.992	0.993

3 结 论

土壤释磷是一个受多种因素综合作用的复杂过程。笔者模拟不同环境因子下土壤磷的释放,通过土壤吸附大量磷后,考查了土壤所固定磷的再释放情况。

a. 土壤磷的释放在 24 h 后已基本平衡,但要达

到完全平衡需要更长的时间,而且释磷量非常有限。释磷动力学可以用 Elovich 公式与双常数速率公式进行很好的拟合。

b. 水体 pH 值升高有利于土壤中磷的释放,水体中 NO_3^- 的存在抑制了磷的释放。温度升高,土壤中磷的释放量随之增大,扰动状态下释磷量是静止状态下释磷量的近 3 倍。好氧状态下,土壤中磷的释放受到抑制。

c. 土壤中磷释放也取决于磷的形态分布,可溶性磷和铁磷是土壤释磷的主要形态,铝磷与有机磷也不可忽视。

d. 土壤吸附大量磷后的再释放是缓慢的。

参考文献：

[1] 漆辉. 受淹土壤中磷的释放研究[J]. 绵阳经济技术高等专科学校学报,2000,17(2) :19.

[2] 石孝洪. 三峡水库消落区土壤磷素释放与富营养化[J]. 土壤肥料,2004(1) 40.

[3] 焦念志. 关于沉积物释磷问题的研究[J]. 海洋湖泽通报,1989(2) 80.

[4] 董浩平,姚琪. 水体沉积物磷释放及控制[J]. 水资源保护,2004(6) 20.

[5] 尹大强,覃秋荣,阎航. 环境因子对五里湖沉积物磷释放的影响[J]. 湖泊科学,1994,6(3) 240.

[6] 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.

[7] 李寿田,周健民,王火焰,等. 太湖水稻土中磷的固定和释放特性的研究[J]. 安徽农业大学学报,2003,30(2) : 123-127.

(收稿日期 2009-01-03 编辑 高渭文)