

毋海燕. 外置式生物反应器对水库原水中总氮去除的试验[J]. 净水技术, 2018, 37(7): 37-43.

Wu Haiyan. Experiment of external bioreactor for TN removal in raw water of reservoir [J]. Water Purification Technology, 2018, 37(7): 37-43.

外置式生物反应器对水库原水中总氮去除的试验

毋海燕

(上海同济环境工程科技有限公司, 上海 200092)

摘要 利用外置式生物反应器系统对水库 I 中水的原位总氮控制开展了试验研究。结果表明, 在适宜的水温下, 系统稳定运行 20 d 后, 水库中 TN 浓度由起始的 1.93 mg/L 降至 0.89 mg/L, TN 去除率达 53.9%, 水质由地表 V 类水标准迅速提升至 III 类水标准, TN 降解效果好, 时间短。台风后, 系统 TN 去除效果恶化的内外部主要原因调查分析表明, 水库库底排水破坏了水库水体的自然分层, 导致脱氮环境恶化, 降雨地表径流对水库 TN 也有一定输入, 同时底部排水带走了部分反硝化菌, 且低温时水库中微生物活性有所降低。该水库属于单季完全或不完全混合型, 水质完全混合期不利于 TN 的控制。底泥的扰动能够改善脱氮环境但对 TN 控制不利。实际运行中应尽量避免或调整以上不利因素以确保 TN 去除效果。

关键词 水库 外置式生物反应器 总氮去除 影响因素分析

中图分类号: TU991 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2018)07-0037-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2018.07.008

Experiment of External Bioreactor for TN Removal in Raw Water of Reservoir

Wu Haiyan

(Tongji Environment Engineering Science and Technology Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract In this study, a site test is carried out to investigate total nitrogen (TN) removal in situ by external bioreactor in the reservoir I. The results show that TN in the reservoir has been removed efficiently in warmer water after system's stable operation of 20 d and its concentration reduces from 1.93 mg/L to 0.89 mg/L with a TN removal rate of 53.9%, water quality is improved and complies with category III of *National Surface Water Quality Standards* (GB 3838—2002) compared with its raw water quality of category V. The primary cause of system deterioration after typhoon where TN removal efficiency decreased from internal and external origin is also explored and analyzed. The main results are that natural stratification of water quality in reservoir under different depth and water temperature is destroyed by human draining off water from the bottom of the reservoir, which leads to the deterioration of nitrogen removal condition. The surface runoff of rainfall has put a certain sum of TN to the reservoir. Meanwhile, some partial denitrification bacteria from reservoir sediment are carried out of the reservoir by drainage from the bottom of reservoir. In addition, the activity of biomass under lower water temperature decreases. The reservoir belongs to complete and incomplete mixing type in single season, and complete mixing of water in reservoir is unfavorable to the decrease of TN concentration. Finally, the influence of disturbance of sediment is not beneficial to control TN to a low level, but improves nitrogen removal environment. The above mentioned adverse factors ought to be avoided and adjusted to get better TN removal efficiency in the practical operation.

Keywords reservoir external bioreactor total nitrogen (TN) removal influencing factors analysis

水库是陆地生态系统水环境要素的重要组成

部分, 在区域社会经济发展和生态环境建设中举足轻重, 但随着城市化的进展和河道水系的污染, 我国水库的富营养化程度也越来越严重。根据《中国环境状况公报》^[1], 目前我国 28 个国控重点湖(库)中, 满足 II 类水质的 2 个, 占 7.1%; III 类的 6 个, 占 21.4%; IV 类的 4 个, 占 14.3%; V 类的 5 个, 占 17.9%; 劣 V 类的 11 个, 占 39.3%。在监测的 26

[收稿日期] 2018-03-07

[基金项目] 上海市高新技术企业资助项目: 舟山芦东水库原位脱氮工艺研发项目(TJHJ-2017-RD17)

[作者简介] 毋海燕(1977—), 女, 工程师, 研究方向为水污染控制, E-mail: jane9210@163.com。

[本文编辑] 孙丽华

个湖(库)中,重度富营养的 2 个,占 7.7%;中度富营养的 3 个,占 11.5%;轻度富营养的 9 个,占 34.6%。根据水利部中国水资源公报^[2],目前 TN 为我国水库主要超标项目之一。我国华东地区某市具有不同类型水库 200 余个,目前水质均呈现不均衡的富营养化状态,氮污染问题十分突出^[3]。对于湖库型水体,防治富营养化是普遍面临的突出问题^[4],尤其是对 TN 的控制。

研究表明,汛期降雨引起的地表径流中的大量氮污染物会随地表径流向水体迁移进入水库^[5-6],因此控制其排入水体是控制水库 TN 的关键因素之一^[7]。除了降雨给水库带来外源性氮污染物外,水库水体中的微生物活动受气温影响也会影响氮污染物的浓度。而且,水库中水质在水温变化时,会呈现季节性热分层现象^[8-10],此时,水库水温、pH、溶解氧(DO)浓度等因分层会出现垂向差异^[11-13]。卢俊平等^[12]对水库富营养化的研究表明,TN 变化主要受温度影响,与 DO 含量基本无关;TN 浓度沿水深出现分层现象,表层和底层水体氮磷浓度高于中层水体,且 TN 在库底沉积物表层大量富集^[14-15]。

魏岚等^[15]研究发现,除了温度、DO、pH 以及水体扰动等因素,底泥自身性质也影响着氮释放。因此,了解水库季节分层相关理化特征及沉积物本身性质对控制水库 TN 具有重要意义。另外暴雨径流会破坏水库水体自然分层,增加内源污染的风险^[8],也需格外关注。

因此,本研究通过外置式生物反应器在水库现场开展试验,了解水库水生态环境变化规律的同时,考察外置式生物反应器对水库原水中 TN 的去除效果,在此基础上分析影响 TN 控制的关键因素,并阐明水库自然分层对 TN 去除的重要性以及水库水质的季节变化规律。最后,通过底泥扰动对水库 TN 去除的研究,了解底泥扰动对控制水库 TN 的影响。

1 试验部分

1.1 试验系统及机理

1.1.1 试验系统

本试验采用一个天然生物循环反应系统 - 外置式生物反应器系统,主要由反应器进水管路系统(图 1)、外置式生物反应器(图 2)以及水库 I 组成。

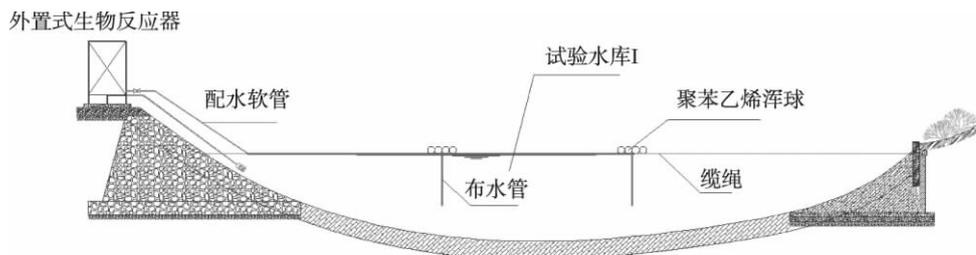


图 1 外置式生物反应器系统
Fig. 1 System of External Bioreactor

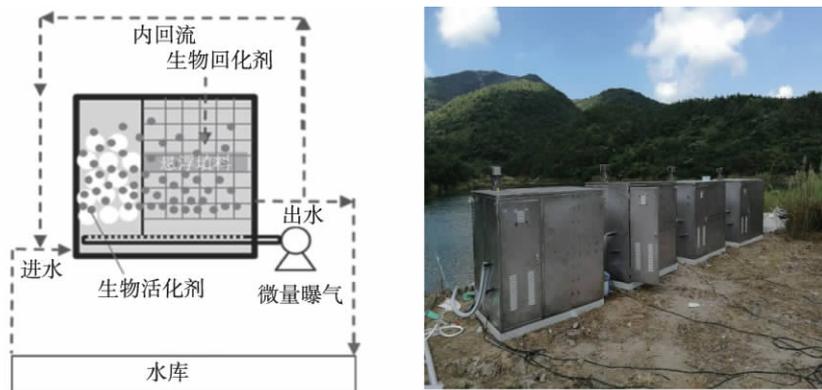


图 2 外置式生物反应器
Fig. 2 Diagram of External Bioreactor

试验水库位于低洼地,外置式生物反应器安装于水库 I 岸边,其进水口从水库表层取水,再经过外置式生物反应器将水通过配水软管及布水管排入水库底层。

1.1.2 试验装置作用机理

本系统主要通过小环境内循环生态法激活并强化水体中的本土微生物——反硝化菌群,用水体本身代替传统的生物反应器,重组、完善和优化水体微生物生态系统。同时,通过不断循环水,增强反硝化菌的脱氮能力,从而实现原位控制 TN 的目的。本试验过程无需接种污泥,试验装置作用机制如图 3 所示。

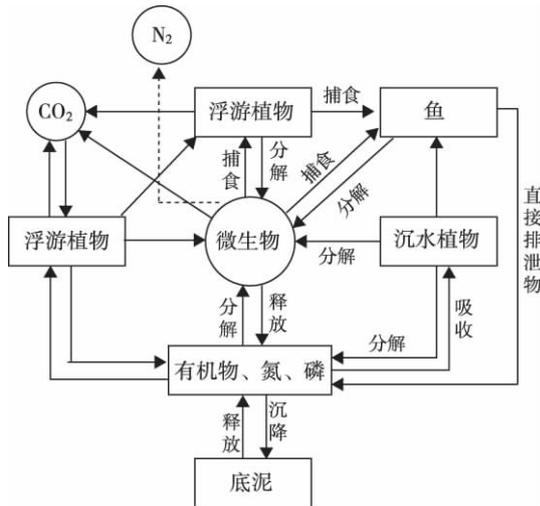


图 3 外置式生物反应器作用机制
Fig. 3 Mechanism of External Bioreactor

1.2 试验水库概况及水质

1.2.1 试验水库概况

试验水库 I 满水时占地面积为 3 万 m²,水面基本呈三角形分布,满水时最大水深约 10 m;平时水库占地面积约 2 万 m²,水库水深约 9 m,库容高峰时约 21 万 m³,平时约 15 万 m³。

水库 II 位于水库 I 的下游,与水库 I 为同一水系,均为具备典型水质污染特征的水源地。

1.2.2 试验水库原水水质分析

试验前水库 I 和水库 II 的原水水质检测数据如表 1 所示。由表 1 可知,参照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002),水库 I 除了 TN 指标,其他指标均为 II 类,而 TN 严重超标(主要为硝态氮);水库 II 中 COD、TN 和氨氮(NH₄⁺-N)基本属于 IV 类。

由此可见,水库的主要污染为 NH₄⁺-N、TN 超标。

表 1 试验水库原水水质检测数据
Tab. 1 Data of Raw Water Quality of Reservoir I and II

检测项目	水库 I	水库 I	水库 I	水库 II	水库 II	水库 II
COD _{Cr} /(mg·L ⁻¹)	10.4	11.6	10.8	20.8	15.6	21.0
TN/(mg·L ⁻¹)	1.89	1.94	1.96	1.05	1.13	1.08
NH ₄ ⁺ -N/(mg·L ⁻¹)	0.183	0.191	0.206	0.498	0.668	0.575
硝酸盐氮/(mg·L ⁻¹)	1.63	1.66	1.65	0.65	0.80	0.70
亚硝酸盐氮/(mg·L ⁻¹)	0.055	0.055	0.055	0.054	0.054	0.054
TP/(mg·L ⁻¹)	0.02	0.02	ND	0.03	0.03	0.02

1.3 样品采集及检测方法

1.3.1 水库现场概况及采样点

水库现场概况如图 4 所示。

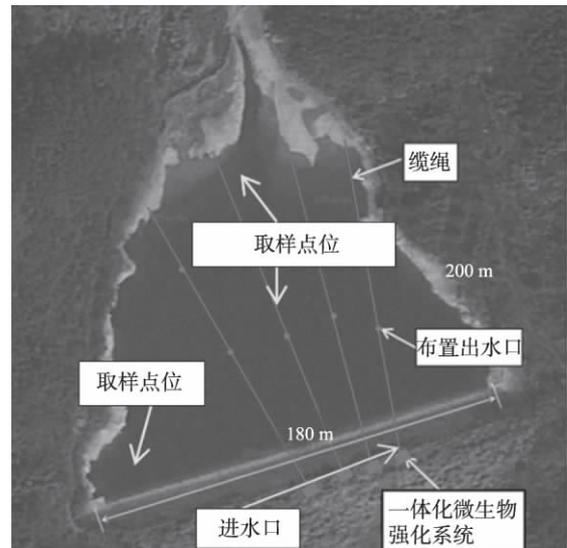


图 4 水库 I 现场概况
Fig. 4 On-Site Overview of Reservoir I

由图 1、图 4 可知,水库 I 现场安装 4 套外置式生物反应系统,通过软管连接每套外置式生物反应器的进水和出水,每套系统具有 1 个进水口,2 个出水口,4 套系统共计 4 个进水口,4 条缆绳,8 个出水口(系统进出水流量均为 200 mL/h)。沿缆绳软管下方连接不锈钢配重管,即通过不锈钢管自重使布水绳索固定、不被风带走,从而保证布水点位置不移动,并保证出水口在水库底部。

样品采集点为沿着缆绳出水垂直管水深方向不同深度取水样,取样深度约为 0.5、2、4、6、8 m 等。

1.3.2 样品检测及试验方法

DO、水温、pH 采用便携式检测仪现场检测;

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、TN 等指标均采用《水和废水监测分析方法(第四版)》^[16]进行检测,水样实验室冷藏保存后直接测定。试验中的数据均以平行样的平均值表示。

水库自然分层状态对 TN 控制的影响。试验方法:水库 I 中选取具有代表性的 3 个点位,每个点位沿水深方向取不同深度的 5 个测点(距离表层 0.5、2、4、6 m 和 8 m)分别取水样。测定每个样品的温度、DO、pH、TN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 。

库底排水对底泥扰动以及对水库 TN 控制的影响。试验方法:用彼得抓斗分别取三个点的同一深度底层泥样各 500 mL,混合均匀后(1500 mL)分别装入 1.5 L 的容量瓶,分别为与纯净水混合(2 个,平行样),与表层水混合(2 个,平行样),与底层水混合(2 个,平行样),与底层水混合同时加碳源乙酸钠(2 个,平行样);碳源的投加量,按照 4~6 mg/L 投加;8 个装有样品的瓶子密封后,分别按照装填顺序,人工摇动混合 1~3 h 后开启;用超滤器分离 8 个混合液的上清液,分别检测其温度、DO、pH、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 TN。

2 结果与讨论

2.1 外置式生物反应器对水库 TN 的控制

TN 控制外置式生物反应器经安装和调试,系统稳定运行后 20 d,试验水质随时间变化如图 5 所示。

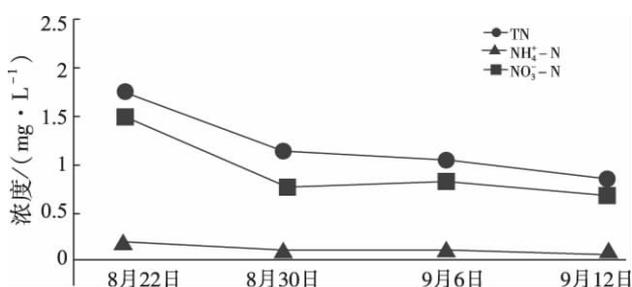


图5 TN 控制试验中水质随时间变化

Fig. 5 Variation of Water Quality with Reaction Time in Test of TN Control

由图 5 可知:在外置式生物反应器系统稳定运行后的 20 d 内,水库中的 TN 呈明显下降趋势,TN 浓度由初始 1.93 mg/L 降至 0.89 mg/L,去除率达 53.89%,水质由地表 V 类水标准迅速提升至 III 类水标准; $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 跟 TN 基本呈相同下降趋势,其浓度由 1.65 mg/L 降至 0.74 mg/L;由 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 降解曲线可知,虽然 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度呈下降趋势,但下降趋

势较 TN 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 更平稳, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度由 0.19 mg/L 降至 0.07 mg/L,一直保持 II 类水标准。

综上所述,本技术在温度适宜、微生物活性未受限时,对水库 TN 的控制效果比较显著,去除率高于 50%,可将水库水质从地表 V 类水标准提升至 III 类水标准。本系统对 TN 的去除主要以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的形式去除,最佳运行时间为 20 d,治理周期短、见效快。

2.2 外界环境变化对水库 TN 控制的影响

9 月 13 日~10 月 19 日,由于“莫兰蒂”号和“鲶鱼”号台风接连登陆,大面积降雨及地表径流引起水库水位急速上涨,基于防洪要求,水库 I 进行了库底排水。台风前后,TN 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 随时间变化如图 6 所示。

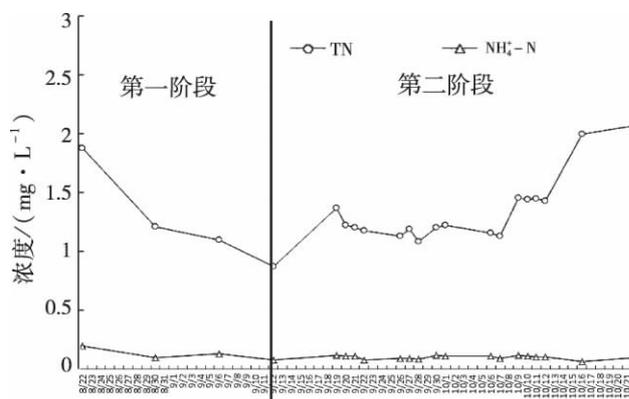


图6 台风前后水库 TN 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 随时间变化趋势图

Fig. 6 Trend of TN and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ with Operation Time in Reservoir I before and after Typhoon

由图 6 可知:受台风影响水库库底排水(第二阶段)后,TN 随时间变化较台风前(第一阶段)出现了连续波动,且在 9 月 19 日出现明显反弹,TN 浓度由 0.89 mg/L 升至 1.41 mg/L,此后的 20 d 内,TN 浓度随运行时间延长呈现缓慢下降的趋势,说明系统受到了库底排水的影响,但仍具有一定的 TN 去除作用;随后 TN 浓度再次反弹至 1.49 mg/L,并在 10 月 22 日达到最高值 2.15 mg/L,甚至超过了试验前的水库 TN 浓度。由此可见,水库库底排水严重影响了水库 TN 的控制,加之,相比第一阶段水温降低,微生物活性受到一定影响,因此系统的 TN 处理效果下降。同时,台风带来的降雨量及地表径流对水库中 TN 浓度有一定的输入贡献,这在此后的试验中已得到证实。在库底排水后, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度随

时间变化不大,表明水库中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除受台风影响较小。

为进一步探究台风带来的大量降雨对水库氮素的影响,对水库 I 水面降雨及地表径流中氮素浓度进行了检测,检测数据如表 2 所示。

表 2 水库 I 水面降雨与地表径流氮素数据
Tab.2 Data of Nitrogen in Ground Surface Runoff and Water Surface Rainfall

	TN $/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\text{NO}_3^- - \text{N}$ $/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ $/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
1#雨水	0.36	0.18	0.04
2#雨水	0.34	0.19	0.027
3#小溪流	1.65	1.30	0.081
4#大溪流	2.51	2.09	0.159
5#村庄径流	2.71	2.21	0.306
6#桥下径流	2.38	1.84	0.078
7#山坡径流	2.80	2.55	0.164

由表 2 可知,相较于垂直降水,地表径流中 TN 浓度较高,是水库水体 TN 污染的主要来源。

综上所述,台风后该系统对 TN 控制效果明显下降,主要原因为台风引起的大量地表径流使水库 TN 浓度急剧上升;同时,水库库底排水可能破坏了水库水质的自然分层状态;另外,温度降低引起微生物活性降低也可能是原因之一。

2.3 水库底部排水对水库水质分层状态及 TN 控制的影响

为进一步确认水库底部排水对水库水质分层状态及 TN 控制的影响,对经过底部排水后的水库 I 进行分层采样,分层采样及检测数据如图 7 所示。

由图 7 可知:无论水温约 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 或是 $10.0\text{ }^\circ\text{C}$,随水深增加,水库 I 中温度、DO 和 pH 变化幅度均较小;TN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 规律相同,且变化幅度极小。水温 $10.0\text{ }^\circ\text{C}$ 时,氮污染物的浓度几乎不变,说明温度降低,微生物活性下降,脱氮效果更差。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 一直保持较低水平,说明库底排水对水体中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度基本无影响。

综上,整个水库几乎处于完全混合状态,说明水库库底排水后水质分层状态基本消失,且经过长时期运行非常难以恢复。该类型水库属于单季完全或不完全混合型,在春夏交接季直至秋末冬初,均能保持分层状态;此后分层状态逐渐减弱甚至消失,呈现完全或不完全混合,水库水质趋于均质。

水质完全混合期不利于 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的还原,因而导致了 TN 去除效果明显下降。

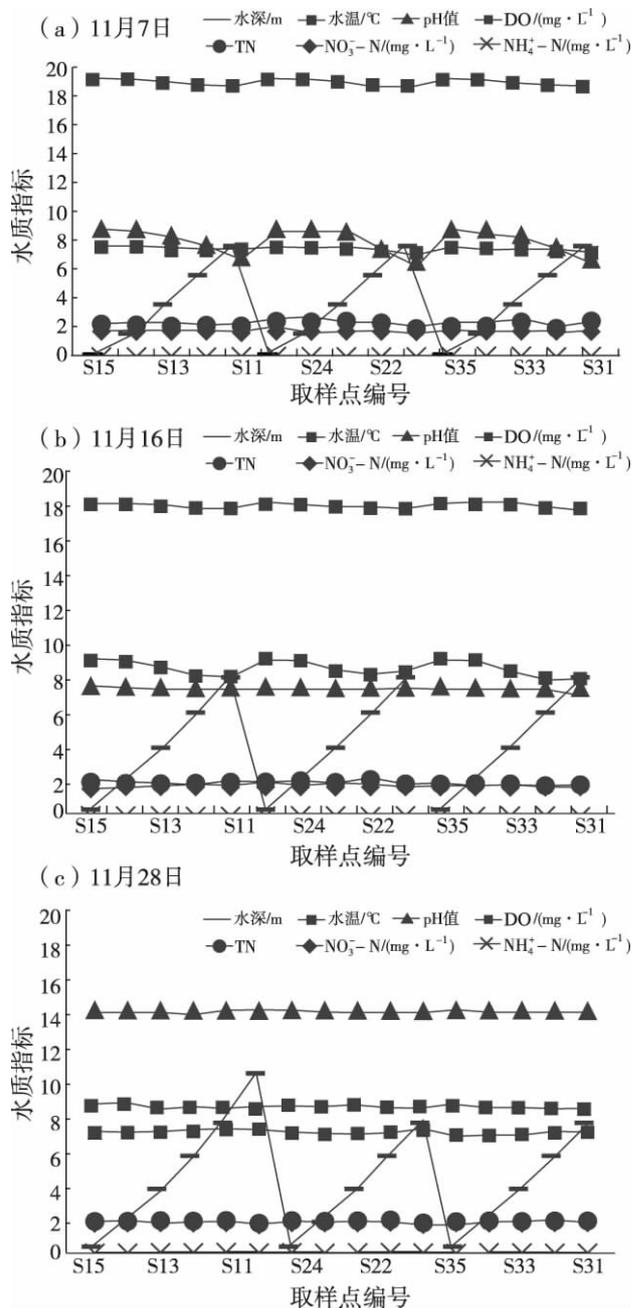


图 7 水库底部排水后分层采样数据变化图

Fig. 7 Variation of Indexes by Stratified Sampling Collection after Drainage from the Bottom of Reservoir

为证实水库水质自然分层状态破坏的主要原因是水库库底排水,作为对比,对水库 II (与水库 I 有相同的水质及外部环境,受台风影响但未进行底部排水) 进行了分层采样数据分析,如图 8 所示。

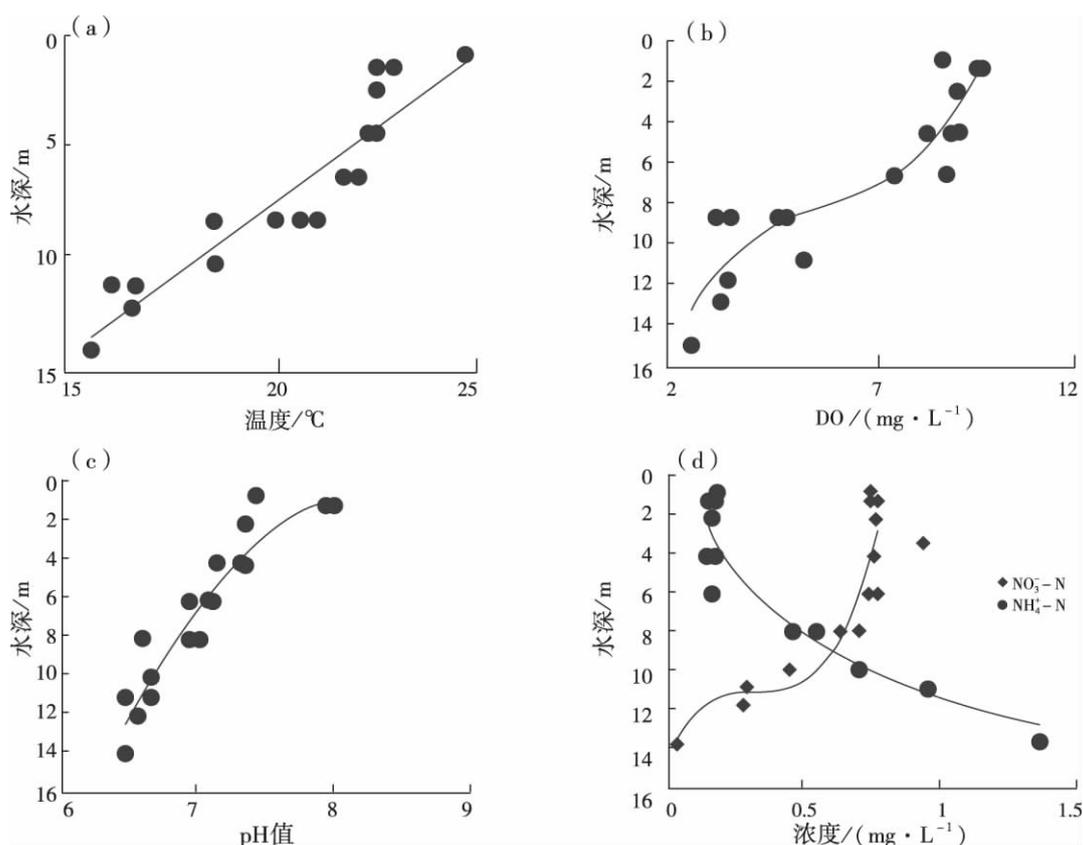


图8 水库II检测数据随水深的变化

Fig. 8 Variation of Data with Water Depth in Reservoir II

由图8可知,温度、DO和pH等随水深从表层到底层呈现明显下降趋势, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度逐渐增加,而 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 则呈现相反的趋势。由此可见,水库II虽然也受到台风引起的地表径流影响,但底部水质分层状态显著,这主要是因为水库II未受到底部排水的影响。

综上所述:水库底部人为排水致使TN控制效果不理想,主要原因是水库底部排水致使水体基本处于完全混合状态,底部缺氧环境消失;同时底部排水带走了部分底泥中的反硝化菌, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 还原作用受限,从而引起TN削减量下降。除此以外,由于试验时处于冬季,环境温度低于水温,水体缺乏混合动力梯度,短期内难以恢复自然分层状态,水体中的微生物活性降低也是影响因素之一。

2.4 水库库底排水对底泥的扰动及水库TN控制的影响

为了迅速恢复水库中的缺氧环境,提升TN去除效果,研究底泥扰动对水库TN控制的影响,试验

数据如表3所示。

表3 泥水混合水样检测数据
Tab.3 Simulation Test Data of Mixed Samples of Reservoir Sediment and Water

水质指标	底泥 + 纯水	底泥 + 表层水	底泥 + 底层水	底泥 + 底层水 + 碳源
$\text{NO}_3^- - \text{N}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0.17	1.78	1.99	1.35
$\text{NH}_4^+ - \text{N}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	2.26	2.16	1.25	2.32
$\text{NO}_2^- - \text{N}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0.07	0.13	0.11	0.12
$\text{TN}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	2.54	4.12	3.38	3.82
$\text{DO}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0.04	0.04	0.02	0.02
pH值	5.92	5.86	5.92	5.65

由表3可知,混合后溶解氧迅速降低至约0.03 mg/L,说明混合液中微生物作用明显,消耗大量DO,有助于反硝化脱氮。经混合后的上清液中氨氮浓度高于2.26 mg/L,说明底泥中含有较多 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 释放到水中,增加了TN。由此可知,底泥与水混合可迅速降低水中DO,有助于反硝化脱氮,但鉴于混合后底泥会释放较多 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,这对TN控制不利。综合可知,底泥的扰动对控制TN不利。

3 结论

采用外置式生物反应器系统对水库中的 TN 进行原位控制,并对内外部影响因素进行了分析,主要结论如下。

(1) 在水库水质自然分层状态下,外置式生物反应器系统在水温适宜时运行 20 d 后,水库中 TN 去除率可达 50% 以上, TN 从地表 V 类水标准提升到 III 类水标准,治理时间短、见效快、稳定性好。

(2) 系统 TN 去除效果下降的主要原因为地表径流对水库 TN 的输入,同时水库库底人为排水导致水质分层状态消失,造成脱氮环境破坏;低温时微生物活性降低也是原因之一;底泥的扰动也不利于 TN 控制。

(3) 我国华东等四季分明的地区,水库属于单季完全或不完全混合型,在春夏交接季直至秋末冬初,水库保持分层状态,此后分层状态逐渐减弱甚至消失,呈现完全或不完全混合,水库水质趋于均匀。水质完全混合期不利于 TN 的控制。

(4) 系统实际运行中,为保证 TN 去除效果,应避免从水库底部排水或在水体水质分层未消失之前,使 TN 控制达到预期效果。

参考文献

[1] 中华人民共和国环境保护部. 2016 中国环境公报 [R]. 2017-06-05.
[2] 中华人民共和国水利部. 2016 年中国水资源公报 [R]. 2017-07-11.
[3] 吴琼,崔树彬,罗欢,等. 大气湿沉降对河道型水源水库富营养化贡献数模研究 [J]. 人民珠江,2014,35(5):8-11.

[4] 马乐宽,赵康平,赵越,等. 库型水体总氮总量控制目标的区域分配研究 [J]. 环境污染与防治,2015,37(3):54-57.
[5] SHRESTHA R R, DIBIKE Y B, PROWSE T D. Modeling of climate-induced hydrological changes in Lake Winnipeg watershed [J]. Journal of Great Lakes Research, 2012, 38(3): 83-94.
[6] 串丽敏,赵同科,安志装,等. 土壤硝态氮淋溶及氮素利用研究进展 [J]. 中国农学报,2010,26(11):200-205.
[7] BARNES R T, RAYMOND P A. Land-use controls on sources and processing of nitrate in small watersheds: Insights from dual isotopic analysis [J]. Ecological Applications, 2010, 20(7): 1961-1978.
[8] 曾康,黄延林,马卫星,等. 金盆水库汛期高浊水径流的潜入及热分层水体水质相应 [J]. 中国环境科学, 2015, 35(9): 2778-2786.
[9] WEI L, DINGGUO J, TAO C. Effects of Flood on Thermal Structure of a Stratified Reservoir [J]. Procedia Environmental Sciences, 2011(10): 1811-1817.
[10] 吴志旭,刘明亮,兰佳,等. 新安江水库(千岛湖)湖泊区夏季热分层期间垂向理化及浮游植物特征 [J]. 湖泊科学, 2012, 24(3): 460-465.
[11] JONES J R, KNOWLTON M F, OBRECHT D V, et al. Temperature and oxygen in Missouri Reservoirs [J]. Lake and Reservoir Management, 2011, 27(2): 173-182.
[12] 卢俊平,刘延玺,马太玲,等. 沙源区水库氮磷营养盐时空分布与相关性分析 [J]. 人民黄河, 2015, 37(4): 81-84.
[13] KERR J G, BURFORD M, OLLEY J, et al. Nitrogen and phosphorous storage in contrasting reaches of a sub-tropical river system [J]. Water Air Soil Pollution, 2011, 217(1-4): 523-534.
[14] 苟婷,李思阳,许振成,等. 高州水库沉积物中总氮与总磷的分布特征研究 [J]. 环境科学与管理, 2014, 39(7): 31-35.
[15] 魏岚,刘传平,邹献中,等. 广东省不同水库底泥理化性质对内源氮磷释放影响 [J]. 生态环境学报, 2012, 21(7): 1304-1310.
[16] 国家环境保护总局. 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: 80-491.