

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.12.017

大型再生水厂精准脱氮系统设计应用

文鹏丽¹, 王佳伟^{1,2}, 李东辉², 张辉², 刘锐¹, 何政¹,
李鹏飞², 李彤¹, 张雪婷²

(1. 北京北排科技有限公司, 北京 100124; 2. 北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100044)

摘要: 针对某大型再生水厂出水总氮波动大、碳源投配率高的问题,搭建定制化精准脱氮系统,包括碳源投加精准控制及内回流自动控制两部分,协同实现生物系统脱氮优化。实际运行结果显示,在处理水量较2022年同期高出11.7%且波动增加15.2%的不利条件下,仍取得良好运行效果:出水TN稳定达标,TN去除率提高3.7%,去除率标准方差下降55.2%;二沉池出水硝态氮浓度变异系数下降35.8%,再生水出水TN浓度变异系数下降35.7%;生物池乙酸钠单位水量药耗下降12.6%,全厂去除TN的单位COD下降22.8%。由此可见,该系统可有效保障TN去除效能的稳定性,以及硝态氮、出水TN指标的稳定性,具有显著的节省碳源效果,可为建设污水处理绿色低碳标杆厂提供技术支撑。

关键词: 再生水厂; 脱氮; 精准控制; 碳源投加; 低碳

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)12-0109-06

Design and Application of a Precise Nitrogen Removal System in a Large-scale Reclaimed Water Plant

WEN Peng-li¹, WANG Jia-wei^{1,2}, LI Dong-hui², ZHANG Hui², LIU Kun¹,
HE Zheng¹, LI Peng-fei², LI Tong¹, ZHANG Xue-ting²

(1. Beijing Drainage Technology Co. Ltd., Beijing 100124, China; 2. Beijing Drainage Group Co. Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract: To address the issues of high effluent total nitrogen(TN) fluctuations and excessive carbon source dosages in a large-scale reclaimed water plant, a customized precision nitrogen removal system was developed. This system comprises two main components: precise control of carbon source dosing and automated internal reflux control, both aimed at optimizing the biological nitrogen removal process. Operational results demonstrated that, despite a 11.7% increase in treated water volume and a 15.2% rise in fluctuations compared to the same period in 2022, the system achieved stable TN effluent concentrations. The TN removal rate increased by 3.7%, while the standard deviation of TN removal rates decreased by 55.2%. Additionally, the coefficient of variation(CV) for nitrate nitrogen concentration in the secondary sedimentation tank decreased by 35.8%, and the CV for total effluent TN concentration decreased by 35.7%. The system also reduced sodium acetate consumption per unit of water by 12.6% and lowered the overall plant's COD consumption for TN removal by 22.8%. In summary, the precision

通信作者: 王佳伟 E-mail: wangjiawei@bdc.cn

nitrogen removal system effectively ensures stable TN removal efficiency and effluent quality while significantly reducing carbon source agent usage. This system provides a robust technical solution for building green and low-carbon benchmark water reclamation facilities.

Key words: reclaimed water plant; nitrogen removal; precise control; carbon source dosing; low-carbon

随着我国对环境保护的日益重视,对污水处理厂的出水排放标准亦更加严格。在国家“双碳”目标背景下,污水处理厂仍多采用传统粗放控制模式,出水水质波动大,运行能耗高,这与绿色低碳、节能减排的理念相悖。生态环境部、国家发展和改革委员会等部门于2022年6月、2023年12月先后印发《减污降碳协同增效实施方案》《关于推进污水处理减污降碳协同增效的实施意见》,对推动减污降碳协同增效作出部署,要求推进水环境治理协同控制,推进污水处理厂节能降耗,优化工艺流程,提高处理效率,并明确提出“推广建设智慧水务管理系统,开展全过程智能调控与优化,实现精准曝气与回流控制、泵站变频调控与负载匹配、数字计量精准加药等”。

在这一背景下,针对污水处理厂碳源投加及出水指标稳定控制的难题,开发了定制精准脱氮系统。以北京某大型再生水厂为例,深入分析系统运行后出水指标稳定性及碳源节省效果,为污水处理厂水质控制、实现降碳提供技术支撑。

1 项目背景

1.1 基本概况

该大型再生水厂处理规模为 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,分两期建设,一期和二期工程分别于1993年、1999年建成竣工通水,共包含4个系列,每个系列设计处理量为 $25 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。该厂于2018年进行污水区原位提标改造,改造后主体工艺为改良 A^2/O +反硝化生物滤池。

工艺流程如图1所示。

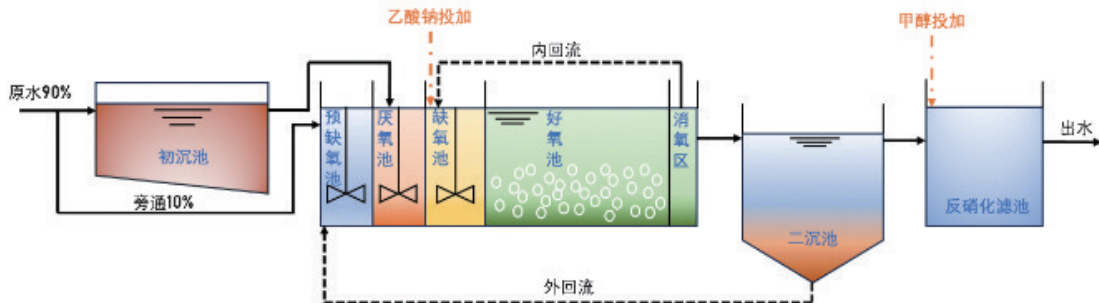


图1 再生水厂工艺流程

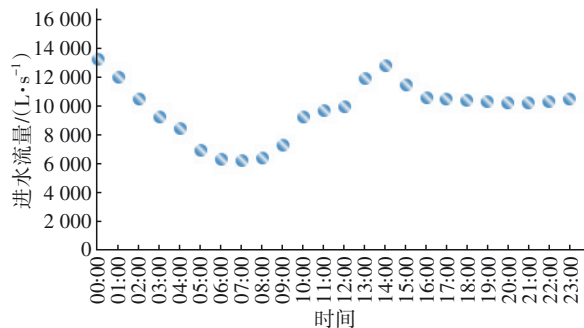
Fig.1 Process flow diagram of the reclaimed water plant

出水执行北京市《城镇污水处理厂水污染物排放标准》(DB 11/890—2012)的B标准,设计进水质:COD为400 mg/L, BOD_5 为200 mg/L,SS为320 mg/L,TN为57 mg/L,TP为6 mg/L,氨氮为40 mg/L。

1.2 存在问题

该再生水厂于2018年提标改造后已基本实现夏季“零碳源投加”^[1],但在冬季仍存在生物池出水总氮波动大,导致再生水脱氮压力大的问题,需通过投加碳源和内回流调控来保证出水水质稳定达标。该厂在生物池缺氧段和反硝化滤池两处设置外碳源投加装置,碳源分别采用乙酸钠和甲醇,加

药泵日常运行控制依据水量、水质变化核算确定。该厂进水水量和水质存在较大波动,某典型日24 h进水水量、水质变化情况见图2。



a. 进水量变化

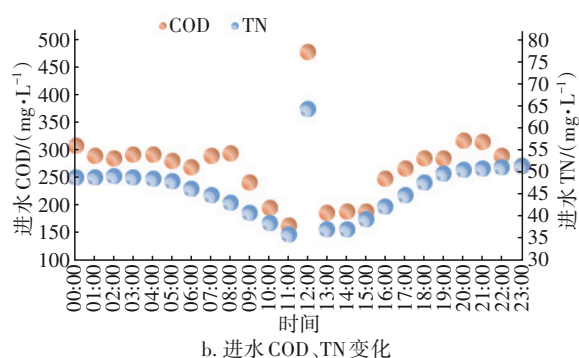


图2 进水流量和水质24 h变化曲线

Fig.2 Variation curve of inflow and influent quality for 24 h

其中,进水水量为6 173.4~13 246.6 L/s,平均值为(9 739.5±1 939.8) L/s;进水COD为164.3~480.4 mg/L,平均值为(272.9±61.9) mg/L;进水总氮为36.1~64.6 mg/L,平均值为(46.20±6.19) mg/L,由此可见,该厂进水水量及进水COD、TN波动非常明显。

进水水量及水质波动大,导致人工调控加药泵、内回流泵的方式难以保证生物池总氮稳定控制,造成深度处理脱氮压力大,再生水出水水质不

稳定及碳源药剂投加量不合理等一系列问题^[2]。为此,该项目设计搭建精准脱氮系统,主要目的是控制出水氮浓度的稳定性,同时实现节省碳源消耗的效果。

2 精准脱氮系统建设

2.1 构建思路及目标

精准脱氮系统建设包括系统软件开发设计、水质在线监测布点设计及自控设备改造等主要内容。系统软件主要包括碳源投加控制及内回流控制两部分;水质在线监测布点设计,统筹考虑系统数据需求及在线监测仪的监测环境,选择最优位置;自控设备改造需实现流量计、水质在线监测仪、加药泵及内回流泵等监控功能。综上,精准脱氮系统基于生物脱氮机理,开发外碳源投加控制及内回流控制的综合模型,通过采集相关数据信号,将数据进行综合分析,根据自适应算法分析得出外碳源投加量及内回流量,并通过PID控制实现加药泵及内回流泵的自动调整。

系统构建思路如图3所示。

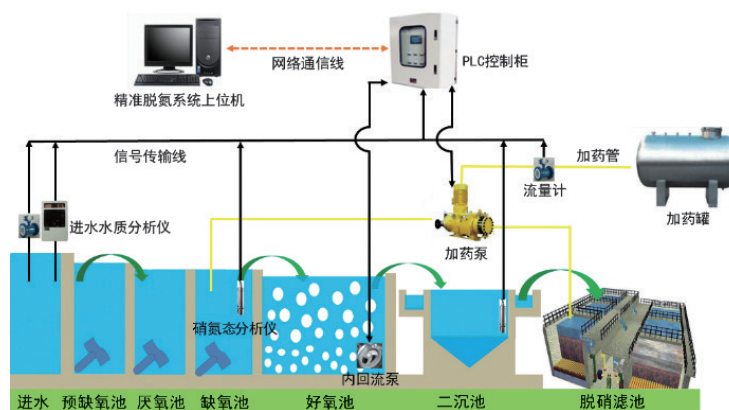


图3 精准脱氮系统示意

Fig.3 Precise nitrogen removal system diagram

基于精准脱氮系统模型,通过对进出水水质、过程水质及进水水量的综合分析,实现碳源投加量和内回流量依据水质、水量自动计算的功能,并通过PID实现碳源投加泵和内回流泵的自动调控,消除因人工控制导致的碳源投加量不足或过量投加以及出水水质波动大等问题,最终实现出水TN稳定控制及碳源消耗的降低。

2.2 控制策略

针对该厂运行工艺及运行特点,碳源投加控制系统具有4种控制模式,包括投配率模式、时间模

式、前馈模式及优化模式。前馈模式基于系统内嵌逻辑,通过对进水水量及进水水质数据的分析,计算得出碳源投加量,并通过PID控制实现碳源投加量的自动调整,其中,进水水质数据可以采用在线实时监测值或模拟水质数值;优化模式采用双重优化控制的策略,通过分析缺氧段硝态氮及生物池出水硝态氮的在线实时监测值与系统设计目标值的差值,基于内嵌逻辑,实现碳源投加量的自适应调控,该模式需要在线硝态氮监测仪反馈信号参与系统计算,因此要求配置在线硝态氮监测仪。该系统

结合该厂以系列为加药单元的运行特点进行仪表配置。

内回流控制系统同样设4种控制模式,包括内回流比模式、时间模式、前馈模式及优化模式。内回流比作为生物脱氮过程的关键参数,过高的内回流比例会导致缺氧环境中溶解氧浓度升高,抑制硝酸盐还原酶的合成和活性,影响反硝化效率^[3];反之,过低的内回流比例无法提供足够的硝酸盐来满足实际反硝化脱氮需求,同样会降低脱氮效率。基于上述原因,定制开发了内回流控制系统,内回流控制策略与碳源投加控制策略基本一致,根据进出水水质、过程水质等因素,完成内回流比的自动调控,与碳源投加控制系统协同实现生物系统脱氮优化。

3 运行结果及分析

该系统于2023年11月完成安装调试,自12月5日启动运行,至12月31日系统处于连续运行状态。2023年12月及2022年同期的处理水量如图4所示。从图4可以看出,2023年12月处理水量为 $(86.75 \pm 2.73) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,2022年12月为 $(77.63 \pm 2.37) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。2023年12月日均处理水量较同期高出 $9.12 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,标准方差值高出 $0.36 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。上述数据表明,2023年12月较2022年同期而言,日均处理水量提高11.7%,波动幅度提高15.2%。在此水量大且波动大的情况下,对再生水厂的运行结果进行比较分析,结果表明该系统运行后污染物去除效能、出水指标稳定性及碳源消耗均呈现明显优势。

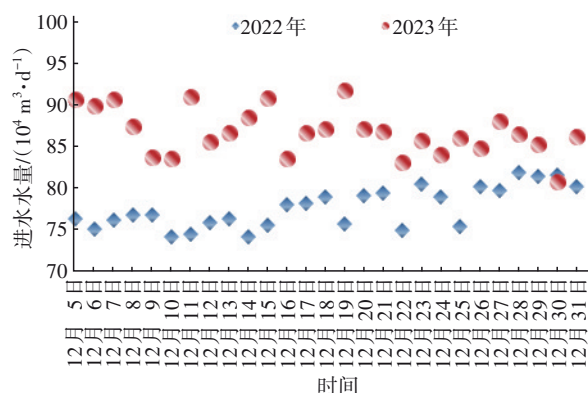


图4 精准脱氮系统运行前后处理水量对比

Fig.4 Comparison of treated water quantity before and after operation of precise nitrogen removal system

3.1 TN去除效能分析

2023年12月精准脱氮系统运行后,进水TN均值为49.56 mg/L,进水BOD₅/TN为4.40,二沉池出

水硝态氮均值为14.98 mg/L,再生水出水TN均值为11.92 mg/L;2022年同期进水TN均值为44.79 mg/L,进水BOD₅/TN为4.81,二沉池出水硝态氮均值为14.85 mg/L,再生水出水TN均值为11.43 mg/L。由此可见,采用精准脱氮系统后,在进水TN浓度较2022年同期高出10.6%且进水BOD₅/TN较同期低0.41的情况下,二沉池出水硝态氮和再生水出水TN与2022年同期基本一致,且再生水出水TN稳定达到DB 11/890—2012的B标准。同时,精准脱氮系统运行后,TN去除率达到 $(75.60 \pm 2.93)\%$,较2022年同期 $(72.90 \pm 6.54)\%$ 提高2.7个百分点,增幅约3.7%;标准方差较2022年同期下降3.61%,降幅约55.2%。

综上,采用精准脱氮系统后,在处理水量较2022年同期高出11.7%且波动增加15.2%,进水TN浓度较同期高10.6%,进水BOD₅/TN较同期低0.41的情况下,二沉池出水硝态氮和再生水出水TN与2022年同期基本一致,且再生水出水TN稳定达到DB 11/890—2012的B标准;同时,TN去除率增幅3.7%,去除率标准方差下降55.2%。上述运行结果表明,采用精准脱氮系统提高了生物系统抗水力冲击负荷的能力和TN去除率,有效保障了TN去除效能的稳定性。

3.2 出水指标稳定性分析

苑宏英等^[4]使用变异系数对污水处理厂出水指标的稳定性进行分析。变异系数是原始数据标准方差与平均值的比值,消除了测量尺度与量纲的影响,能够客观地反映数据离散程度的绝对值^[5],变异系数越小,表明一组样本的离散程度越小。从二沉池出水水质及再生水厂总出水水质两方面出发,采用变异系数对精准脱氮系统运行前后水质的稳定性进行分析,结果如表1所示。

表1 精准脱氮系统运行前后出水指标稳定性的对比

Tab.1 Stability comparison of effluent index before and after operation of precise nitrogen removal system

项目	二沉池出水硝态氮		再生水厂出水TN	
	运行前	运行后	运行前	运行后
平均值/(mg·L ⁻¹)	14.85	14.98	11.43	11.92
最小值/(mg·L ⁻¹)	10.12	11.96	9.12	10.30
最大值/(mg·L ⁻¹)	19.88	17.51	13.50	13.00
标准方差/(mg·L ⁻¹)	2.41	1.55	1.12	0.75
变异系数	0.162	0.104	0.098	0.063

水质变化趋势如图5所示。

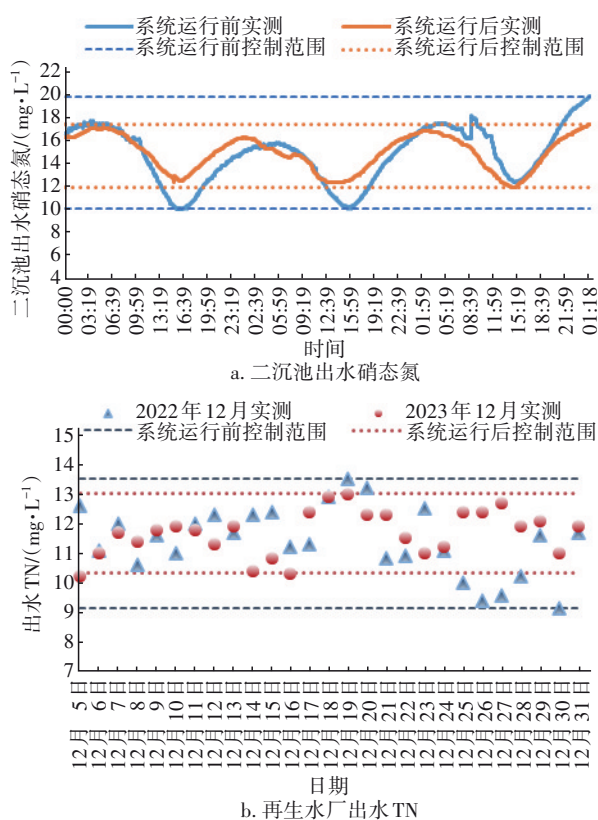


图5 精准脱氮系统运行前后水质指标稳定性对比

Fig.5 Stability comparison of effluent quality before and after operation of precise nitrogen removal system

2023年12月精准脱氮系统运行后,二沉池出水硝态氮控制在11.96~17.51 mg/L,均值为(14.98±1.55) mg/L,变异系数为0.104;该系统运行前,二沉池出水硝态氮控制在10.12~19.88 mg/L,均值为(14.85±2.41) mg/L,变异系数为0.162。分析上述数据可以看出,二沉池出水硝态氮标准方差下降0.86 mg/L,降幅约35.7%,变异系数下降0.058,降幅约35.8%。

2023年12月精准脱氮系统运行后,再生水厂出水TN控制在10.30~13.00 mg/L,均值为(11.92±0.75) mg/L,变异系数为0.063;2022年同期,再生水厂出水TN控制在9.12~13.50 mg/L,均值为(11.43±1.12) mg/L,变异系数为0.098。分析上述数据可以看出,再生水厂出水TN标准方差下降0.37 mg/L,降幅约33.0%,变异系数下降0.035,降幅约35.7%。

综上,精准脱氮系统运行后,在2023年处理水量较2022年同期高出11.7%且波动增加15.2%的情况下,二沉池出水硝态氮浓度标准方差下降

35.7%,变异系数下降35.8%,再生水厂出水TN浓度标准方差下降33.0%,变异系数下降35.7%。上述运行结果显示,二沉池出水硝态氮及再生水厂出水TN稳定性均显著提高,表明该系统可有效保障硝态氮、出水TN指标稳定性。

3.3 碳源药耗分析

对精准脱氮系统运行前后生物池乙酸钠单位水量药耗及全厂去除TN的单位COD情况进行比较分析。

① 乙酸钠单位水量药耗

计算公式:乙酸钠单位水量药耗=4个系列乙酸钠药剂累计加药量×药剂有效含量/总进水流量。由上述数据分析可知,2023年12月进水BOD₅/TN较2022年同期降低0.41,在此前提下,该系统碳源消耗显著降低。2023年12月乙酸钠单位水量药耗日均值为23.98 mg/L,2022年同期为27.44 mg/L,下降12.6%。

② 全厂去除TN的单位COD

计算方式:全厂去除TN的单位COD=(进水COD-出水COD+乙酸钠单位水量药耗×乙酸钠COD当量+甲醇单位水量药耗×甲醇COD当量)/(进水TN-出水TN)。2023年12月全厂去除TN的单位COD为13.14 kgCOD/kgTN,2022年同期为17.02 kgCOD/kgTN,同比下降22.8%。

综上,精准脱氮系统运行后,在2023年处理水量较2022年同期高出11.7%且波动增加15.2%,进水BOD₅/TN较同期降低0.41的前提下,生物池乙酸钠单位水量药耗下降12.6%,全厂去除TN的单位COD下降22.8%。上述运行结果表明,该精准脱氮系统具有显著的节省药耗能力。

4 结论

基于某大型再生水厂的运行特点及运行需求,定制开发了精准脱氮系统,解决了因人工控制弊端所导致的出水水质不稳定、碳源消耗较高的难题。该系统运行后,在2023年处理水量较2022年同期高出11.7%且波动增加15.2%的前提下,仍取得良好运行效果。

① 在进水TN较2022年同期高10.6%,且进水BOD₅/TN较同期降低0.41的情况下,二沉池出水硝态氮和再生水厂出水TN与2022年同期基本一致,且再生水出水TN稳定达到DB 11/890—2012的

B标准;同时,TN去除率提高3.7%,去除率标准方差下降55.2%,表明生物系统抗水力冲击负荷能力和TN去除率有所提升,有效保障了TN去除效能的稳定性。

② 二沉池出水硝态氮浓度变异系数下降35.8%,再生水厂出水TN浓度变异系数下降35.7%,表明该系统可有效保障硝态氮、出水TN指标的稳定性。

③ 在2023年进水BOD₅/TN较2022年同期降低0.41的前提下,生物池乙酸钠单位水量药耗下降12.6%,全厂去除TN的单位COD下降22.8%,表明该系统具有显著的节省碳源能力。

参考文献:

- [1] 李鹏飞,蒋奇海,张志渊,等.高碑店再生水厂升级改造及运行优化[J].给水排水,2019,45(8):13-17.
LI Pengfei, JIANG Qihai, ZHANG Zhiyuan, *et al.* Upgrading reconstruction and operation optimizing of Gaobeidian reclaimed water plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45 (8) : 13-17 (in Chinese).
- [2] 赵子豪.城镇污水处理厂稳定脱氮智能控制研究[D].杭州:浙江大学,2021.
ZHAO Zihao. Study on Intelligent Control for Stable Nitrogen Removal of Municipal Wastewater Treatment Plant [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021 (in Chinese).
- [3] 王佳伟,周军,甘一萍,等.溶解氧对A²/O工艺脱氮

除磷效果的影响及解决方法[J].给水排水,2009,35(1):35-37.

WANG Jiawei, ZHOU Jun, GAN Yiping, *et al.* Effects and resolutions of dissolved oxygen on denitrification and dephosphorization of A²/O process [J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 35 (1) : 35-37 (in Chinese).

- [4] 苑宏英,韩嘉玮,张小亚,等.典型工艺污水处理厂出水水质达标率与稳定性分析[J].天津城建大学学报,2020,26(4):290-295.

YUAN Hongying, HAN Jiawei, ZHANG Xiaoya, *et al.* Quality standard rate and stability analysis of water quality standards for the effluent from typical process sewage treatment plants [J]. Journal of Tianjin Chengjian University, 2020, 26 (4) : 290-295 (in Chinese).

- [5] 王文森.变异系数——一个衡量离散程度简单而有用的统计指标[J].中国统计,2007(6):41-42.

WANG Wensen. Coefficient of variation—a simple and useful statistical index to measure the degree of dispersion [J]. China Statistics, 2007 (6) : 41-42 (in Chinese).

作者简介:文鹏丽(1988—),女,山西吕梁人,硕士,中级工程师,主要研究方向为污水处理厂智能化控制关键技术及其工程实践。

E-mail:wpl198819@163.com

收稿日期:2024-08-02

修回日期:2024-10-12

(编辑:衣春敏)

强化依法治水,携手共护母亲河