

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.12.021

# 套子湾污水处理厂污水资源化运行探索与实践

高绪涛<sup>1</sup>, 沈煜<sup>2</sup>

(1. 烟台市城市排水服务中心, 山东 烟台 264013; 2. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300381)

**摘要:** 烟台套子湾污水处理厂一、二期工程总规模为 $35\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ ,出水水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准,在提高城市污水处理率和减少沿海污染物排放量方面发挥了重要作用。在保证出水水质稳定达标的前提下,该污水厂充分利用污水中的化学能实现厂内电力能源的部分自给;充分利用污水中蕴含的热能进行厂内供暖并向厂外居民小区提供热源,减少了化石能源的消耗;充分提高再生水利用率,节省了等量的自来水资源。工程实践证明,以上措施取得了污水资源化及节能减排的良好效果。

**关键词:** 污水资源化; 化学能; 热能; 再生水利用; 节能减排

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)12-0130-05

## Exploration and Practice of Wastewater Reclamation Operation in Taoziwan WWTP

GAO Xu-tao<sup>1</sup>, SHEN Yu<sup>2</sup>

(1. Yantai Urban Drainage Service Center, Yantai 264013, China; 2. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300381, China)

**Abstract:** The total capacity of the first and second stage of Yantai Taoziwan wastewater treatment plant (WWTP) is  $35\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ , and the effluent meets the first level A criteria of *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918—2002). It has played an important role in improving the urban sewage treatment rate and reducing coastal pollutant discharges. On the premise of ensuring stable and qualified effluent, this project fully utilizes the chemical energy in the sewage to achieve partial self-sufficiency of power energy in the factory. It fully utilizes the thermal energy contained in sewage for heating inside the factory and providing heat sources to residential areas outside the factory, so as to reduce the consumption of fossil fuels. It also fully improves the utilization rate of reclaimed water resources, thus to save an equal amount of tap water resources. These practices in this project have achieved good results in sewage reclamation, energy conservation and discharge reduction.

**Key words:** sewage reclamation; chemical energy; thermal energy; reclaimed water utilization; conserve energy and reduce discharge

我国经济高速发展对资源与环境提出了更高的要求,节能、低碳、资源化成为污水行业发展的新目标。

污水处理行业的碳排放水平约占总碳排放水平的1%~2%,为实现行业“碳达峰、碳中和”目标以及

通信作者: 沈煜 E-mail: pro\_07@126.com

满足建设面向未来污水处理厂的需要,污水处理行业碳减排技术的开发及碳中和路线图的搭建迫在眉睫<sup>[1]</sup>。烟台套子湾污水处理厂在这些方面进行了有益的探索和实践,通过沼气综合利用、光伏发电、精确曝气等措施实现了部分能源自给。采用水源热泵系统向厂内外供热,节约了大量化石能源并减少了本区域内相应的CO<sub>2</sub>排放。并将部分出水继续采用超滤+反渗透工艺深度处理后满足《城市污水再生利用 工业用水水质》(GB/T 19923—2005)各项指标要求,提供给万华工业园作为生产用水,节约了大量的淡水资源。国内外实践表明,污水中蕴含有有机碳、氮和磷等宝贵资源,对其加以有效转化,还可创造具有广泛市场用途和新价值的资源产品<sup>[2]</sup>。

## 1 套子湾污水处理厂概况

套子湾污水处理厂位于烟台市芝罘区套子湾南岸,汇水面积166.8 km<sup>2</sup>,目前设计处理能力为35×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d(一、二期工程),出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准,出水经压力管道排放到芝罘岛外海的排污混合区。全厂共分三期建设,包括一期工程(原有一期工程、一期扩建工程、一期升级改造工程)、二期工程、三期工程。其中一、二期工程已经稳定运行,三期工程为在建项目。

一期工程于1994年开工建设,1998年10月投入运行,建成一级处理能力25×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d、二级生物处理及深度处理能力4×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d,二级处理采用AAO工艺,污泥处理采用厌氧消化后脱水的工艺。一期扩建工程于2007年开工建设,2008年8月投入运行,是在一期工程一级处理的基础上进行升级改造,扩建16×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d的二级生物处理能力,形成20×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d的二级处理规模,采用AAO工艺,同时对一期工程的生化处理、污泥消化和自控系统进行完善。一期升级改造工程于2017年7月开工建设,2018年7月投入运行,采用MBBR工艺+高效混凝沉淀+纤维滤池过滤工艺,将一期工程原有20×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d处理能力的出水水质由一级B标准提升至一级A标准,并采取低温季节切换厌氧池为缺氧反硝化池等措施进一步提高脱氮除磷效率。二期工程为半地下式污水处理厂,于2013年7月开工建设,2015年5月投入运行,处理能力为15×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d,采用MBR工

艺,出水水质执行一级A标准,污泥浓缩脱水后外运焚烧处置。

## 2 污水资源化及节能减排

### 2.1 污水化学能和太阳能的利用

参考国外运行经验,回收污水中的可再生能源,可减少化石能源的消耗和CO<sub>2</sub>的排放,达到全部或部分的能源中和<sup>[3]</sup>。利用生物方法实现污泥稳定、能源回收,无论从投资、运行,还是从减少二次污染来说,都是一种简单、经济、有效的方式。套子湾污水处理厂通过回收污水中的能量并优化处理单元运行来减少电能消耗。首先利用污泥消化池产生的沼气拖动沼气锅炉给消化池污泥加热,另外利用沼气发电,在沼气发电的同时回收发电过程产生的余热,充分利用沼气的剩余能量,提高沼气能量的利用率。

套子湾污水处理厂一期工程污泥处理流程见图1。

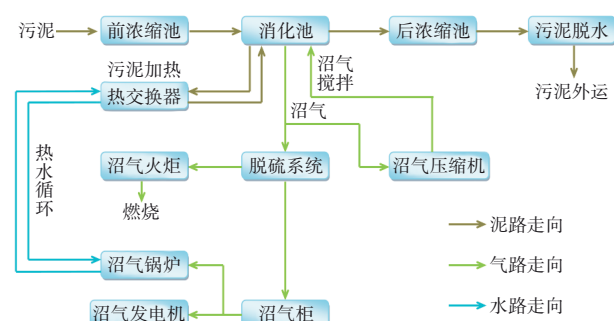


图1 套子湾污水处理厂一期工程污泥处理流程

Fig.1 Flow chart of sludge treatment system for phase I project of Taoziwan wastewater treatment plant

一期工程产生的污泥采用污泥前浓缩、一级中温厌氧消化、污泥后浓缩、机械脱水工艺进行处理。初沉污泥与剩余污泥经浓缩后厌氧消化产生的沼气通过污泥系统内部循环加以利用:除作为消化池污泥搅拌循环用气外,主要作为沼气锅炉和沼气发电机的燃料,沼气锅炉对污泥进行中温加热,电能就地并网使用,在实现能源回收的同时,使污泥稳定化和减量化,同时利用沼气发电机冷却水的余热补充加热消化污泥,使污泥中的化学能充分服务于自身生产。消化后的污泥经过浓缩后运至厂外焚烧处置。首先将一期工程产生的初沉污泥和剩余污泥进行浓缩,以减少剩余污泥的体积。浓缩前混合污泥含水率为98%~99%,浓缩后为95%~96%,污泥经浓缩后进入厌氧消化池。在35℃中温条件

下,污泥经厌氧消化产生沼气,其中 $\text{CH}_4$ 含量约为58%~62%。经厌氧消化后的污泥需要进一步降低含水率,经机械脱水后的污泥含水率一般为60%~80%,可运输至厂外污泥处置场。套子湾污水处理厂与山东清泉环保科技有限公司于2019年11月签订了污泥处置协议,将脱水后的污泥与煤按照一定比例在热电厂掺烧的方案进行污泥最终处置。

污泥系统主要设计参数:圆形辐流式前浓缩池2座,每座直径21 m,有效水深4 m。污泥总干固量49 500 kgDS/d,浓缩前污泥浓度22 kg/m<sup>3</sup>,浓缩前污泥量2 250 m<sup>3</sup>/d,浓缩后污泥浓度45 kg/m<sup>3</sup>,浓缩后污泥量1 100 m<sup>3</sup>/d,设计停留时间28 h。圆柱形消化池2座,每座直径30 m,池直壁高度15.75 m,池总高约24 m。每座消化池有效容积11 000 m<sup>3</sup>,采用沼气搅拌。消化前污泥干固量为49 500 kgDS/d,消化前污泥浓度45 kg/m<sup>3</sup>,消化前污泥量1 100 m<sup>3</sup>/d,消化后污泥干固量36 548 kgDS/d,消化后污泥浓度35 kg/m<sup>3</sup>,消化后污泥量1 044 m<sup>3</sup>/d,消化温度35℃,投配率5%,消化时间20 d,沼气产率为0.6 m<sup>3</sup>/kgVSS,沼气产量7 771 m<sup>3</sup>/d,进入后浓缩池的污泥包括消化后的污泥以及从初沉污泥泵井出泥管分流过来的实际运行超量部分的生污泥。圆形辐流式后浓缩池2座,每座直径21 m,有效水深4 m。污泥总干固量61 040 kgDS/d,浓缩前污泥浓度37 kg/m<sup>3</sup>,浓缩前污泥量1 650 m<sup>3</sup>/d,浓缩后污泥浓度50 kg/m<sup>3</sup>,浓缩后污泥量1 221 m<sup>3</sup>/d,设计停留时间40 h。污泥经过浓缩池后进入脱水机房。污泥总干固量61 040 kgDS/d,脱水前污泥量1 221 m<sup>3</sup>/d,脱水后污泥量305 m<sup>3</sup>/d(含水率80%),每日工作时间约16 h,设离心脱水机3台,单台处理量25 m<sup>3</sup>/h。消化池内沼气产量约为7 771 m<sup>3</sup>/d,其中65%用于拖动沼气锅炉,35%用于沼气发电, $\text{CH}_4$ 含量约60%, $\text{CH}_4$ 热值按35.9 MJ/m<sup>3</sup>计,则沼气锅炉产生的热能约为108 802 MJ/d,沼气的电能转化效率为2.10 kW·h/m<sup>3</sup>,沼气发电产生的电量约为208.48×10<sup>4</sup> kW·h/a。

本工程在厂内建设了分布式光伏发电项目,总装机容量约1 819.56 kW,采用单块功率为295 W的多晶硅光伏组件6 168块。该项目于2019年底开工建设,2020年6月并网发电,年均发电量约为235×10<sup>4</sup> kW·h/a,全部供应套子湾污水处理厂生产运行使用。

本工程在厂内实施了精确曝气系统。以套子

湾污水处理厂原有控制系统为基础,搭建具有针对性的精确曝气数学模型控制系统,与现场设备联动运行、动态实时调整曝气量,在满足运行需求的同时节省运行电耗。该项目于2022年投运后,一、二期工程整体耗电可减少约0.011 7 kW·h/m<sup>3</sup>,实际可节约用电约150×10<sup>4</sup> kW·h/a。电能平衡分析:一期工程20×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d运行电耗约为0.45 kW·h/m<sup>3</sup>,二期工程15×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d运行电耗约为0.61 kW·h/m<sup>3</sup>,一、二期工程总耗电量约为6 624.75×10<sup>4</sup> kW·h/a。沼气发电量约为208.48×10<sup>4</sup> kW·h/a、光伏发电量约为235×10<sup>4</sup> kW·h/a、精确曝气节电约150×10<sup>4</sup> kW·h/a,合计约593.48×10<sup>4</sup> kW·h/a。电力能源自给率约为8.96%。平均节约标准煤约729.98 t/a、减排CO<sub>2</sub>量约1 795.75 t/a,部分完成了厂内的能源自给。

## 2.2 污水中热能的提取

污水中蕴涵着丰富的低品位热能资源,约为污水中有机物化学能的10倍。利用污水源热泵对出水进行冷/热交换,可实现污水处理厂冬季供暖和夏季制冷的能源自给。若对全部出水进行热能提取,则可满足污水处理厂内部供热/制冷和附近小区的采暖需求。污水源热泵回收污水中热能的能效水平较高,相比于电力制冷和制热的传统方式,可大幅降低社会碳排放水平,促进全社会碳减排。集中利用出水热能可形成规模,便于市政供热统一规划利用,并充分发挥日后纳入碳排放交易机制下的碳额结算优势<sup>[4]</sup>。

烟台市热力有限公司所辖祥和锅炉房是芝罘区西部、北部的集中供热热源点。祥和锅炉房现有4台70 MW燃煤热水锅炉,额定供热能力约为520×10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>建筑面积,现已供热530×10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>,基本处于满负荷运行状态。随着中心城区建设规模快速发展,预计最近2~3年内有约250×10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>建筑需并入祥和热网,祥和锅炉房现有供热能力已无法满足日益增长的供热需求。受国家能源结构调整及煤炭消费总量压减政策等因素影响,目前祥和锅炉房继续扩建燃煤锅炉难度很大。

因此,利用污水源热泵(见图2)从污水中高效提取热量,在稳定供暖的同时降低用电量,可实现污水热能的开发利用。水源热泵采用套子湾污水处理厂处理后排海的尾水作为水源,进行热能转移及品位提升,制取出低温热水,经末端循环泵输送进入采暖系统为建筑供暖。水源经热泵机组换热



后,温度降低约7℃。现排海泵房的稳定运行水量约 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,供热站一期工程最大需水量约 $6.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。一期排海泵房的水量可以满足一期供热的需求。远期污水量不足的部分可采用再生水作为水源。污水在整个换热过程中均为闭式循环,不会对原水水质产生不利影响,且由于水源均取自整个污水处理流程的最末端,故其对污水处理工艺亦无影响。根据实际运行数据,冬季污水的供水温度可按12℃设计。

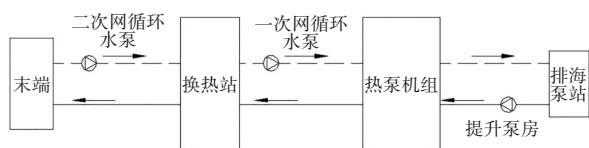


图2 水源热泵系统工艺流程

Fig.2 Flow chart of water source heat pump system

本供热项目一期工程供暖面积约为 $68.7 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。设计供回水温度约45/35℃。住宅小区热指标按照 $40 \text{ W}/\text{m}^2$ 设计,总热负荷约为27 470 kW(即约27.47 MW)。供热小区距离污水处理厂较近,且相对集中,可采用集中能源站方式进行供暖设计。供热项目二期工程住宅小区热指标按照 $40 \text{ W}/\text{m}^2$ 设计,设计供回水温度约55/40℃。总供热面积约为 $171 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,总热负荷约为68.4 MW。

根据最大热负荷及水源热泵机组选型,一期机组冬季COP约为4.5,二期机组冬季COP约为4,则冬季供热系统一期吸热量约21.36 MW,二期吸热量约51.3 MW,总吸热量为72.66 MW。本项目一期所需污水量约 $6.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,二期约 $15.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,共计 $21.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

以一期工程供热项目为例:一期工程系统设备选型根据热源侧供回水温度12/5℃、使用侧供回水温度47/37℃进行修正。常规机组设计制热工况:使用侧出水温度47℃,热源侧进水温度12℃,设备制热量约10.58 MW,制热功率1.94 MW。高温机组设计制热工况:使用侧出水温度55℃,热源侧进水温度12℃,设备制热量约为10 MW,制热功率2.5 MW。选用2台常规离心式水源热泵机组、1台高温离心式水源热泵机组。根据设备运行参数,计算得一期工程系统的总供热量约30 MW,装机总功率约7 252 kW(常规热泵机组2台, $P=1\,947 \text{ kW} \times 2=3\,894 \text{ kW}$ ;高温热泵机组1台, $P=2\,530 \text{ kW}$ ;末端循环泵2台, $P=250 \text{ kW} \times 2=500 \text{ kW}$ ;污水提升泵2台,

$P=164 \text{ kW} \times 2=328 \text{ kW}$ ,合计7 252 kW),综合能效系数约4.14。按照年供热140 d计,平均负荷系数取0.75,年耗电量约为18 275 040 kW·h/a。按照 $1 \text{ kW} \cdot \text{h}=0.123 \text{ kg}$ 标煤计,一期工程供热项目年耗标煤量 $G_1=\text{年耗电量} \times 0.123=18\,275\,040 \times 0.123=2\,247 \text{ t}$ ;按市政集中供热系统统计,年耗标煤量 $G_2=27\,470/29\,308 \times 0.75 \times 3.6 \times 24 \times 140=8\,503 \text{ t}$ ;与市政集中供热系统相比,此供热项目每年节约标煤量约为 $G=G_1-G_2=6\,256 \text{ t}$ 。同理,二期工程供热项目每年节能量为15 650 t标煤,所以一、二期工程供热项目每年节能量约为21 906 t标准煤,相当于每年减少 $\text{CO}_2$ 排放量约53 888 t。

此外,套子湾污水处理厂内的水源热泵参数如下:一期工程设有水源热泵2台(1用1备),单台制冷量为668 kW,制冷功率109.4 kW;单台供热量729 kW,制热功率147.2 kW。二期工程设有水源热泵2台(满负荷运行),单台制冷量171 kW,制冷功率31 kW;单台制热量195 kW,制热功率39 kW。一、二期工程每年节能量合计约为380.55 t标准煤,相当于每年减少 $\text{CO}_2$ 排放量约936.15 t。

综合厂区内外的数据,水源热泵系统每年合计节能量约为22 286 t标准煤,相当于每年减少 $\text{CO}_2$ 排放量约为54 825 t。

### 2.3 污水再生资源化利用

据统计,目前国内城市供水中50%~80%为工业用水,而工业用水中80%是水质要求不高的冷却水。如果将污水再生处理回用,就可以替代等量的自来水量,在未增加淡水资源总量的情况下,相当于增加了等量的城市供水量。与地表水资源相比,再生水资源具有不受气候影响、水源可靠、保证率高、能连续供水、水质稳定、经济环保、减少废水排放等优势。再生水回用技术运用的意义在于开辟了第二水源,能大量节约有限的淡水资源,使水资源得到高效可持续利用。烟台市属缺水型城市,城市供水水源主要依赖门楼水库以及部分地下水,市区枯水年份的水资源量约为 $3.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,特枯年份水资源量为 $1.34 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。2020年市区城市公共供水量 $1.57 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,城市污水处理量 $1.48 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。套子湾污水厂再生水回用工程是烟台市首个大规模用于工业企业的城市污水再生回用工程,2020年市区市政再生水利用达到35.8%,满足国家《关于进一步加强城市规划建设管理工作的若干意见》文

件要求,可有效缓解旱季门楼水库蓄水严重不足的问题,同时为万华工业园百万吨大乙烯建设及烟台发电厂等项目提供用水,降低了工业企业的运行费用。

套子湾污水处理厂供万华工业园再生水项目规划总规模  $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 主要向万华工业园和华能烟台发电有限公司及管道沿线企事业单位提供优质稳定的再生水。再生水进水来源为套子湾污水处理厂出水, 基于进水水质特点和出水使用要求, 采用超滤+反渗透再生水回用处理工艺。建成后出水水质优于《城市污水再生利用 工业用水水质》(GB/T 19923—2005) 各项指标要求, 实际出水浊度平均值为 0.3 NTU, TDS 平均值为 110 mg/L。按照万华工业园对再生水水质的要求, 还有一些指标需在再生水处理厂加以去除, 如总硬度、碱度、溶解性固体、氯离子浓度、铁、锰等。再生水项目运行至今, 已供应再生水约  $9\,900 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。再生水回用工程设计进、出水水质见表1。

表1 再生水回用工程设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality of reclaimed water engineering

项目	SS/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	COD <sub>Mn</sub> / ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	粪大肠菌 群/(个·L <sup>-1</sup> )	TDS/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )
设计进水	8.0	50	5	10 <sup>3</sup>	515
设计出水	≤1.0	≤2.0	≤0.5	≤500	120

### 3 结语

在污水处理领域探索切实可行的资源与能源回收方式是污水处理领域的重要发展方向,也是实现污水处理行业碳减排运行的前提条件。烟台套子湾污水处理厂利用污泥厌氧消化产沼气回用于消化系统加热以及热电联产和余温热能利用等技术实现了能源的回收利用,还利用太阳能光伏板产电,并通过精确曝气系统减少电能消耗,总体社会效益和经济效益显著。通过采取多种措施,套子湾污水处理厂年均节约标准煤(包括沼气综合利用、光伏发电、精确曝气、水源热泵向厂内外供热)约 24 034 t,减排 CO<sub>2</sub> 约 59 123 t。此外,污水再生利用

达到规划规模后可节约  $7\,300 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$  的淡水资源。实践表明,该厂污水资源化和能源化成效显著并达到国内领先水平,这也为我国污水处理厂向能源自给型及碳中和的方向发展提供了有益的技术思路和实践经验。

### 参考文献:

- [1] 宋新新,林甲,刘杰,等. 面向未来的污水处理厂关键技术研发与工程实践专栏序言[J]. 环境科学学报, 2022, 42(4): 1-6.  
SONG Xinxin, LIN Jia, LIU Jie, *et al.* The R & D and practice of key technologies for sewage treatment plants facing the future [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(4): 1-6(in Chinese).
- [2] 王旭,刘玉,罗雨莉,等. 基于高附加值产品的废水资源化技术发展趋势与应用展望[J]. 环境工程学报, 2020, 14(8): 2011-2019.  
WANG Xu, LIU Yu, LUO Yuli, *et al.* Trends, perspective and prospects on valorization of pollutants from wastewater into marketable products [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(8): 2011-2019(in Chinese).
- [3] 郝晓地,张益宁,李季,等. 污水处理能源中和与碳中和案例分析[J]. 中国给水排水, 2021, 37(20): 1-8.  
HAO Xiaodi, ZHANG Yining, LI Ji, *et al.* Case analysis of energy neutrality and carbon neutrality for wastewater treatment [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(20): 1-8(in Chinese).
- [4] 郝晓地,饶志峰,李爽,等. 污水余温热能蕴含着潜在碳交易额[J]. 中国给水排水, 2021, 37(12): 7-13.  
HAO Xiaodi, RAO Zhifeng, LI Shuang, *et al.* Potential carbon trading volume of thermal energy contained in wastewater [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(12): 7-13(in Chinese).

作者简介:高绪涛(1980—),男,山东烟台人,大学,高级工程师,研究方向为污水处理工艺技术。

E-mail: pro\_07@126.com

收稿日期: 2023-04-11

修回日期: 2023-04-21

(编辑:衣春敏)