

# 造纸废水处理与沼气利用工程调试及运行

董 顶<sup>1,2</sup>, 田 兴<sup>3</sup>, 李宽峰<sup>4</sup>, 宋雅建<sup>4</sup>, 马三剑<sup>1</sup>

(1. 苏州科技大学 环保应用技术研究所, 江苏 苏州 215009; 2. 清华苏州环境创新研究院, 江苏 苏州 215000; 3. 苏州苏净环保工程有限公司, 江苏 苏州 215122; 4. 苏州科特环保股份有限公司, 江苏 苏州 215156)

**摘 要:** 采用物化+多级厌氧生物内循环反应器(MIC)+好氧活性污泥法处理废纸造纸废水,处理规模为10 000 m<sup>3</sup>/d,经预处理后COD约6 500 mg/L,BOD<sub>5</sub>约2 800 mg/L,再经过物化-生化处理后,出水水质满足《制浆造纸工业水污染物排放标准》(GB 3544—2008)。沼气产量为12 000 m<sup>3</sup>/d左右,作为燃料通入燃气锅炉,日产蒸汽80 m<sup>3</sup>/d左右,所产蒸汽供造纸车间利用,可降低生产成本,每年节省超过400万元的蒸汽费用。

**关键词:** 废纸造纸废水; 多级厌氧生物内循环反应器; 沼气利用

**中图分类号:** TU993 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)02-0086-05

## Commissioning of Papermaking Wastewater Treatment and Biogas Utilization Project

DONG Ding<sup>1,2</sup>, TIAN Xing<sup>3</sup>, LI Kuan-feng<sup>4</sup>, SONG Ya-jian<sup>4</sup>, MA San-jian<sup>1</sup>

(1. Institute of Environmental Protection Applied Technology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. Tsinghua Research Institute for Environmental Innovation < Suzhou >, Suzhou 215000, China; 3. Suzhou Sujing Environmental Engineering Co. Ltd., Suzhou 215122, China; 4. Suzhou Kete Environmental Protection Co. Ltd., Suzhou 215156, China)

**Abstract:** The combined process of physico-chemical + multiple internal circulation anaerobic biological reactor + aerobic activated sludge for regenerated papermaking wastewater treatment with the capacity of 10 000 m<sup>3</sup>/d was introduced. The COD and BOD<sub>5</sub> of pretreatment effluent were about 6 500 mg/L and 2 800 mg/L respectively. Then through physico-chemical and biochemical treatment, the final effluent could meet *Discharge Standard of Water Pollutants for Pulp and Paper Industry* (GB 3544 - 2008). About 12 000 m<sup>3</sup>/d of biogas was produced and sent into the gas boiler as fuel. Thus around 80 m<sup>3</sup>/d of steam was produced and provided to papermaking workshop. As a result, the production cost was reduced and could save over four million CHY of steam cost per year.

**Key words:** regenerated papermaking wastewater; multiple internal circulation anaerobic biological reactor; biogas utilization

### 1 工程概况

#### 1.1 水质和水量

随着造纸工业的迅速发展,造纸废水已成为重要的污染源之一。造纸行业具有耗水量大、回用量大的特点,导致造纸废水成分复杂难处理,如直接排

放,将造成水体的严重污染<sup>[1]</sup>。采用混凝沉淀-多级厌氧生物内循环反应器(MIC)-好氧活性污泥法处理废纸造纸废水,运行实践证明,该工艺运行稳定,处理效果良好,出水水质达到《制浆造纸工业水污染物排放标准》(GB 3544—2008)。

浙江嘉兴某纸厂是一家以废纸为生产原料专业生产高强度瓦楞纸、纱管纸的废纸造纸企业。现日产原纸 1 000 t 左右,生产废水经车间内部回用后排至废水处理站的废水量约为 8 000 ~ 10 000 m<sup>3</sup>/d。为响应国家节能减排清洁生产的号召,废水经处理后的回用率需达 85% 左右。因回用率高,使废水具有成分更加复杂、有机污染物浓度更高、营养成分不均衡、难处理等特点。经预处理后废水水质及排放标准见表 1。

表 1 预处理后废水水质与排放标准

Tab. 1 Wastewater quality after pre-treatment and discharge standards

项 目	pH 值	COD/ (mg · L <sup>-1</sup> )	BOD <sub>5</sub> / (mg · L <sup>-1</sup> )	SS/ (mg · L <sup>-1</sup> )
预处理后水质	6 ~ 8	6 500	2 800	2 000
排放标准	6 ~ 9	120	30	50

注: 表中数据为多次监测结果的平均值。

## 1.2 工艺选取

废纸造纸废水具有高 COD、低氮磷、难处理的特点,采用单纯的物化、好氧处理很难使出水水质达到排放标准,所以在好氧之前增加厌氧工艺,为后续好氧处理减轻压力。本工程的厌氧工艺选用作者所在团队自主研发的专利反应器——多级厌氧生物内循环反应器(MIC)<sup>[2]</sup>。MIC 反应器是在 UASB 反应器的基础上发展起来的第三代厌氧反应器,与 IC 反应器的结构大致相同,其独到之处在于:不需设 IC 附加塔(专用外循环装置),投资降低,出口沼气压力较 IC 反应器高,使其能直接通入锅炉燃烧,无需风机加压,进水 pH 值无需调节,运行成本降低。其结构原理如图 1 所示。

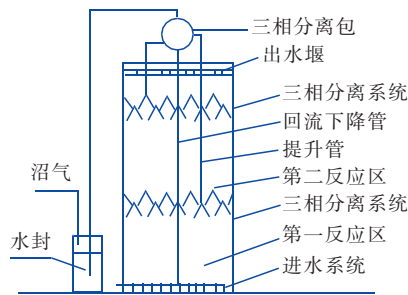


图 1 MIC 反应器工作原理

Fig. 1 MIC reactor working principle

MIC 可以看作由两个 UASB 反应器上下串联组成,上下两层集气罩将反应器分成了两个反应室,下部反应室处理刚进入的厌氧系统的废水,废水浓

度较高,为高负荷反应区,废水经下部反应室处理后浓度已较低,故上部反应室为低负荷反应区。上下两层集气罩收集的沼气分别由沼气提升管通入反应器顶部的三相分离包。分离的泥水混合物由下降管回流至反应器的底部。

## 1.3 工艺流程

工艺流程如图 2 所示。

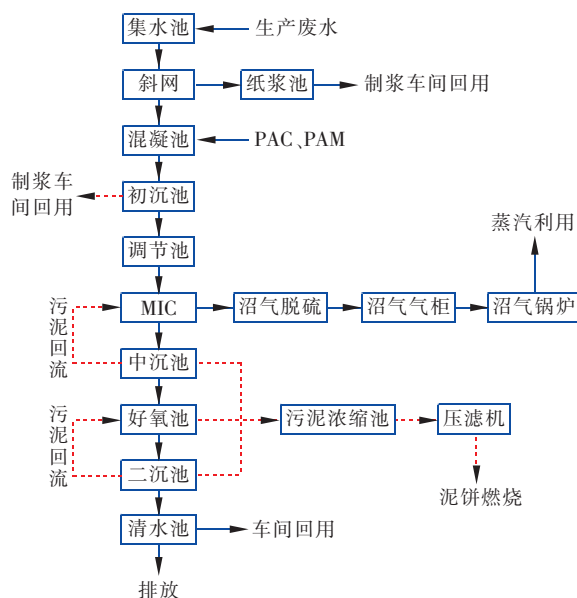


图 2 废水处理工艺流程

Fig. 2 Flow chart of wastewater treatment process

集水池中的造纸废水经水泵提升至斜网,将截留出的纸浆回用于制浆车间,出水进入混凝池反应,投加絮凝剂聚合氯化铝(PAC)和助凝剂聚丙烯酰胺(PAM)加速胶体、悬浮颗粒的絮凝沉降,接着出水到初沉池进行泥水分离。初沉池约 5 000 m<sup>3</sup>/d 水回用于制浆车间进行碎浆、洗浆,初沉池分离的污泥被泵入制浆车间回用,剩余约 5 000 m<sup>3</sup>/d 进入调节池进行水量、水质调节,在调节池投加尿素、生物磷补充生化处理需要的 N、P 营养元素,保证后续生化处理的营养配比 C : N : P = 200 : 5 : 1。然后废水进入 MIC 降解大部分有机物,厌氧出水的 COD 在 650 mg/L 左右,去除率达 90% 左右, MIC 容积负荷达 4 ~ 6 kgCOD/(m<sup>3</sup> · d)。厌氧出水进入中沉池,截留厌氧塔出水携带出来的活性污泥并回流,以保证塔内的微生物量,同时减轻后续好氧处理负担。中沉池出水进入好氧池,好氧池去除厌氧处理后剩余的大部分有机物质。好氧出水 COD 浓度为 95 mg/L 左右,去除率达 85%。好氧出水进入二沉池

进行固液分离,分离后约 $3\,500\text{ m}^3$ 水回用车间纸机网部,剩余 $1\,500\text{ m}^3$ 左右达标排放。厌氧产生的沼气先经过化学净化,去除大部分 $\text{H}_2\text{S}$ 和一部分的 $\text{CO}_2$ 、 $\text{NH}_3$ 等,然后进入稳压气柜,保证后续供气压力稳定。压力稳定的沼气进入沼气锅炉燃烧,产生的蒸汽直接供车间使用。

#### 1.4 主要构筑物及设计参数

##### ① 初沉池

初沉池一座,将废水进行沉淀,去除大部分悬浮固体,减少固体堆积。其尺寸为 $\varnothing 30\text{ m} \times 4.5\text{ m}$ ,表面负荷为 $0.60\text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,辐流式周边出水,半地上钢混结构。

##### ② 调节池

调节池一座,对来水进行水质水量调节,保证后续厌氧生物处理的稳定运行。其尺寸为 $20\text{ m} \times 10\text{ m} \times 2.5\text{ m}$ ,半地上钢混结构,内设蒸汽加热控温系统。

##### ③ MIC

MIC两座,尺寸为 $\varnothing 12\text{ m} \times 22.8\text{ m}$ ,总有效容积为 $5\,000\text{ m}^3$ 。水力停留时间为 $24\text{ h}$ ,容积负荷为 $6\text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,中温( $35 \pm 2$ ) $^\circ\text{C}$ 运行,污泥产率为 $0.05\text{ kgSS}/\text{kgCOD}$ ,甲烷产气率为 $0.5\text{ m}^3/\text{kgCOD}$ ,COD去除率为90%。采用碳钢结构,筒体内、外采用环氧树脂进行防腐,外层用保温棉进行保温。采用导流盘布水,沿着反应器底均匀分布12个,位于高程1 m处。此布水盘无需外置动力,水流自成分散旋流,辐射范围大,有较好的接触混合效果。在高程为13~15 m、19~21 m处分别设置两层集气罩。集气罩汇集气体经上升管进入分离包,分离包设置2个。每个分离包上设两根混合液上升管、一根下降管,上升管管径为 $\varnothing 159\text{ mm}$ ,下降管管径为 $\varnothing 377\text{ mm}$ 。

##### ④ 中间沉淀池

中间沉淀池两座,截留厌氧出水中携带的污泥并进行回流,保证厌氧系统中菌种的总量,同时减轻对后续好氧系统的压力。每座尺寸为 $\varnothing 12\text{ m} \times 12\text{ m}$ ,总有效容积为 $2\,500\text{ m}^3$ ,水力停留时间为 $12\text{ h}$ ,表面负荷为 $0.6 \sim 0.8\text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,整体碳钢结构,内外层环氧树脂防腐,外层用保温棉进行保温。

##### ⑤ 好氧曝气池

好氧池两座,对厌氧出水进一步处理,去除其未降解的有机污染物。每座尺寸为 $30\text{ m} \times 25\text{ m} \times 5$

m,钢混结构,地上式,总有效容积为 $7\,000\text{ m}^3$ ,水力停留时间为 $30\text{ h}$ 。容积负荷为 $0.8\text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,MLSS为 $10\,000\text{ mg/L}$ ,COD去除率为85%。好氧池总供气量为 $150\text{ m}^3/\text{min}$ ,风压为 $50\text{ kPa}$ 。DO值为 $1 \sim 3\text{ mg/L}$ 。

##### ⑥ 二沉池

二沉池一座,截留好氧系统出水携带的悬浮固体,污泥进行回流,保证好氧微生物量。其尺寸为 $\varnothing 24\text{ m} \times 4.5\text{ m}$ ,水力停留时间为 $8.5\text{ h}$ 。表面负荷为 $0.4 \sim 0.6\text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。辐流式周边出水,半地上钢混结构。

##### ⑦ 污泥浓缩池

污泥浓缩池一座,将好氧和厌氧污泥进行沉淀浓缩,上清液回流至调节池。其尺寸为 $\varnothing 10\text{ m} \times 8\text{ m}$ 。碳钢结构,环氧树脂防腐。

##### ⑧ 沼气净化系统

沼气净化系统用来脱除沼气中的硫化氢,采用湿法脱硫工艺,主要包括2座脱硫塔,将沼气中的硫化氢与碱液反应富集到液体中,达到脱硫的目的。其尺寸为 $\varnothing 1.5\text{ m} \times 16\text{ m}$ ,不锈钢结构。

##### ⑨ 蒸汽锅炉

蒸汽锅炉一座,以沼气为燃料,将水加热成蒸汽供车间使用。尺寸规格为 $5\text{ m} \times 2.2\text{ m} \times 2.5\text{ m}$ ,额定蒸发量为 $4\text{ m}^3/\text{h}$ ,额定蒸汽压力为 $1.25\text{ MPa}$ ,设计热效率为90%。

## 2 调试和运行

### 2.1 MIC的调试与运行<sup>[3]</sup>

接种污泥采用厌氧消化污泥和颗粒污泥,絮状污泥来自生活污水厂经过厌氧消化并压缩的剩余污泥,颗粒污泥来自周边正在运行的造纸废水厌氧塔。每座厌氧塔投加含水率为80%的厌氧消化泥50 t,含水率为85%的颗粒污泥200 t,共加泥250 t。进水采用厌氧出水与调节池出水混合,启动初期控制进水浓度在 $5\,000\text{ mg/L}$ 以下,容积负荷 $<2\text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。当COD去除率上升到80%以上,开始增加容积负荷。

当容积负荷升至 $2\text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 时,开始以 $0.5\text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 增加容积负荷。此时原水不经稀释直接进入厌氧系统,历时30 d,容积负荷从 $2\text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 增至 $5\text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。在负荷提升期,进水已完全为调节池出水,不再与厌氧出水相混合。COD浓度已提升到 $6\,000\text{ mg/L}$ 以上,虽然

进水 COD 波动较大,但出水 COD 基本稳定在 1 500 mg/L 以下,在个别情况下,随着进水 COD 的迅速上升,COD 去除率明显下降,出水 COD 也有较明显的升高。

经过两个月的调试,已将全部生产废水 5 000 m<sup>3</sup>/d 通入厌氧系统中。进水容积负荷稳定在 5~6 kgCOD/(m<sup>3</sup>·d)。出水 COD 浓度基本稳定,后期出水 COD 浓度在 650 mg/L 左右,处理效率不断提高,最终处理效率稳定在 90% 左右,达到设计要求。

稳定运行期进、出水 COD 与去除率的变化情况如图 3 所示。

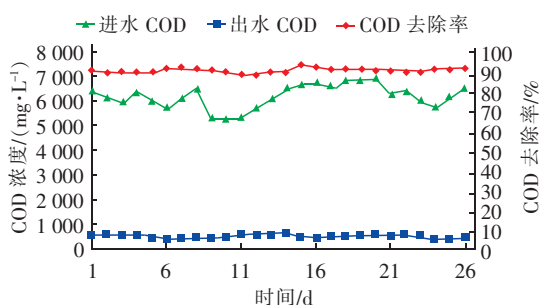


图 3 稳定运行期进、出水 COD 浓度与去除率

Fig. 3 COD removal rate and COD of influent and effluent during stabilization period

## 2.2 好氧曝气池的调试与运行

向好氧池中投加 100 t 接种污泥,首先连续曝气 3 d,第 4 天开始引进 MIC 出水,以低负荷运行,调试采用逐渐增大进水量的方法,按照 1 000、2 000、3 000、4 000、5 000 m<sup>3</sup>/d 逐步提高进水量。每次增大进水量后,在 COD 去除率稳定在 70% 以上即再一次增大进水量直到设计进水规模。经过 30 d 的提高负荷期,处理系统达到设计水量。好氧池经过两个月的稳定运行,COD 去除率达到 85% 左右,符合设计要求。工程处理效果见表 2。

表 2 工程处理效果

Tab. 2 Engineering treatment effect mg·L<sup>-1</sup>

项目	MIC 反应器出水	好氧池出水	排放口
COD	650	95	92
BOD <sub>5</sub>	225	20	18

注:表中数据为多次监测结果的平均值。

## 2.3 沼气利用系统的运行效果

### 2.3.1 沼气净化系统

该系统采用湿式氧化法去除 H<sub>2</sub>S,用 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 溶液作吸收介质,同时加入专门用作沼气脱硫的催化剂,净化系统处理气量为 800 m<sup>3</sup>/h。运行期间主要

依靠测定净化后气体 H<sub>2</sub>S 浓度来判断是否投加碱(液)。催化剂采取连续投加的方式(滴加量约 200~300 g/d),每天检验一次脱硫后 H<sub>2</sub>S 的浓度,每小时检测一次贫液 pH 值(维持在 8.3~8.5 之间),然后确定加碱量。运行结果表明,H<sub>2</sub>S 去除率 ≥ 99.50%,脱硫后 H<sub>2</sub>S 含量 < 20 mg/m<sup>3</sup>,符合沼气作为燃料燃烧的要求。

### 2.3.2 沼气柜的启动

沼气储柜一方面可以解决产气和用气之间不平衡的供需矛盾,另一方面可以调节和控制厌氧反应器的沼气出口压力,以满足沼气进入沼气锅炉燃烧器的压力要求。检查不漏气之后开始向气柜通气,通气时检查浮罩与导轨是否有良好的接触,可通过移动平衡块来调整平衡。通气前气柜压力为零,通气稳定后气柜压力为 5 kPa,钟罩升至最高点,自动放空。该压力已满足沼气锅炉燃烧要求,准备进行锅炉点火。

### 2.3.3 沼气锅炉运行

锅炉经过水压试验、煮炉、调整安全阀等准备工作后,开始正常启动运行,沼气锅炉正常运行后,沼气产量基本能满足沼气锅炉的全天运行。正常运行后的锅炉蒸汽产量如图 4 所示。

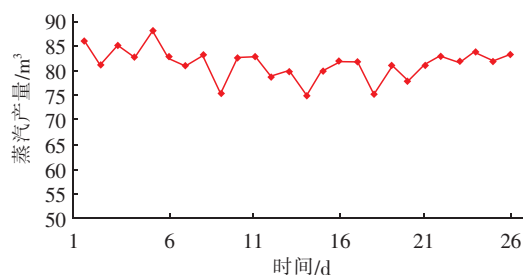


图 4 蒸汽日产量

Fig. 4 Variable steam output

由图 4 可以看出,沼气锅炉日产生蒸汽量有一定的波动,这主要是因为进水 COD 浓度的变化导致沼气产量的变化,从而使得蒸汽产量发生变化,但总体来看日产生蒸汽量基本维持在 80 m<sup>3</sup> 左右,蒸汽出气压力基本稳定在 0.8 MPa 以上。经计算 1 m<sup>3</sup> 蒸汽消耗 144.2 m<sup>3</sup> 沼气。沼气锅炉以现月均产生蒸汽量为 2 400 m<sup>3</sup> 计算,蒸汽价格以 140 元/m<sup>3</sup> 计,则产生的经济效益 ≥ 400 万元/a。

## 3 结论

采用物化 + 厌氧 MIC + 好氧活性污泥法处理 10 000 m<sup>3</sup>/d 造纸废水,工程运行结果表明,在控制



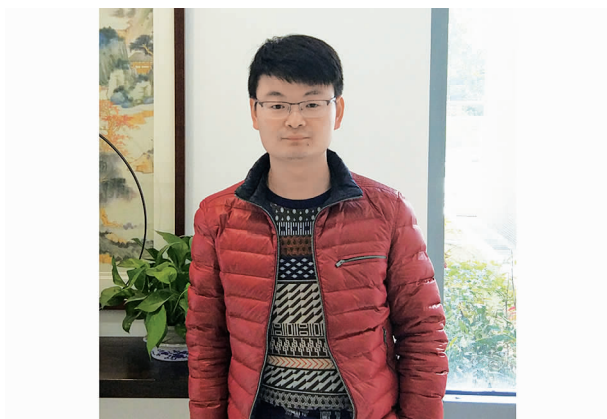
厌氧反应器温度在 $(35 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、 $\text{HRT} = 24\text{ h}$ 的情况下,好氧反应器控制溶解氧在 $1 \sim 3\text{ mg/L}$ 、 $\text{HRT} = 30\text{ h}$ 的情况下,出水 $\text{COD}$ 、 $\text{BOD}_5$ 分别为 $95$ 、 $20\text{ mg/L}$ ,符合《制浆造纸工业水污染物排放标准》(GB 3544—2008)。

该工程增设沼气净化利用系统,解决 $\text{H}_2\text{S}$ 腐蚀管道的问题,沼气产量为 $12\,000\text{ m}^3/\text{d}$ 左右,所产沼气通过锅炉燃烧可产蒸汽 $80\text{ m}^3/\text{d}$ 左右,在产生良好环境效益的同时具有良好的经济效益。该工程可为同行业废水处理设计、调试与运行提供参考,对我国的废水处理及能源利用具有一定的借鉴意义。

#### 参考文献:

- [1] 贺延龄. 废纸造纸工业节水和零排放技术[J]. 中国环保产业,2006,(7):30-33.
- [2] 马三剑,吴建华,刘锋,等. 多级内循环(MIC)厌氧反应器的开发应用[J]. 中国沼气,2002,20(4):24-27.
- [3] 徐富,吴建华,刘锋,等. 酒精废水处理高效厌氧技术

——MIC反应器[J]. 酿酒科技,2006,(10):104-107.



作者简介:董顶(1991-),男,江苏徐州人,硕士研究生,研究方向为污水处理与回用技术。

E-mail: dongding147369@163.com

收稿日期:2017-05-29

(上接第75页)

并配以花坛、草地、活水水景、休闲场所,将地面层打造成活水景观绿化公园,美化周边环境。

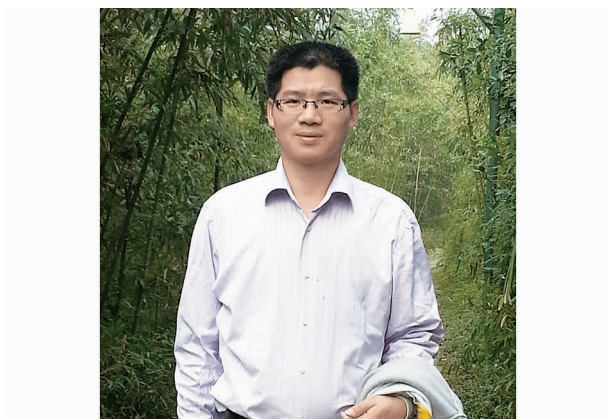
#### 5 结语

① 门头沟第二再生水厂采用 $\text{A}^2\text{O} - \text{AO}/\text{MBR}$  + 臭氧催化氧化工艺,出水水质达到北京市地方标准《城镇污水处理厂水污染物排放标准》(DB 11/890—2012)的A标准。

② 主体构筑物采用地下集约布置,地面为活水景观绿化公园,有效解决了城市再生水处理厂与周边环境要求的矛盾。

#### 参考文献:

- [1] Judd S, Judd C. 膜生物反应器水和污水处理的原理与应用[M]. 陈福泰,黄霞,译. 北京:科学出版社,2009.



作者简介:刘议安(1975-),男,湖南岳阳人,硕士,高级工程师,从事排水工程设计工作。

E-mail: 756443977@qq.com

收稿日期:2017-09-13