

厌氧(DUASB) + 好氧(HTO)工艺处理玉米深加工废水

孙自谦¹, 王祥清¹, 周新宇², 董 顶³, 马三剑¹

(1. 苏州科技大学 环保应用研究所, 江苏 苏州 215009; 2. 苏州科特环保股份有限公司, 江苏 苏州 215156; 3. 清华苏州环境创新研究院, 江苏 苏州 215163)

摘 要: 针对玉米深加工产业园来水种类多、水质复杂、有机物浓度高、可生化性较好、氨氮浓度高的特点,采用双层气箱式 UASB(DUASB) + 好氧高塔反应器(HTO)的工艺集中处理 11 000 m³/d 产业园综合废水,当进水 COD 为 5 000 ~ 8 000 mg/L、NH₃ - N 为 300 ~ 350 mg/L 时,处理后 COD、NH₃ - N 分别降至 200、20 mg/L 以下,达到《污水排入城镇下水道水质标准》(GB/T 31962—2015)。

关键词: 玉米深加工废水; 集中处理; DUASB; HTO

中图分类号: TU993 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000 - 4602(2018)24 - 0109 - 05

Treatment Project of Intensive Corn Processing Industrial Wastewater by DUASB and HTO Process

SUN Zi-qian¹, WANG Xiang-qing¹, ZHOU Xin-yu², DONG Ding³, MA San-jian¹

(1. *Institute of Environmental Protection Applied Technology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China*; 2. *Suzhou Kete Environmental Protection Co. Ltd., Suzhou 215156, China*; 3. *Research Institute for Environmental Innovation <Suzhou> Tsinghua, Suzhou 215163, China*)

Abstract: The double layer upflow anaerobic sludge blanket (DUASB) and aerobic high tower reactor (HTO) process was used to centrally treat the wastewater characterized as multiple influent types, complex composition, high organic matter concentration, good biodegradability and high ammonia-nitrogen concentration from an intensive corn processing industrial park. The treatment capacity of the project was 11 000 m³/d. The influent COD and NH₃ - N were 5 000 - 8 000 mg/L and 300 - 350 mg/L respectively, while the effluent COD and NH₃ - N were below 200 mg/L and 20 mg/L respectively, which met the *Wastewater Quality Standards for Discharge to Municipal Sewers* (GB/T 31962 - 2015).

Key words: intensive corn processing wastewater; centralized treatment; double payer upflow anaerobic sludge blanket; aerobic high tower reactor

1 工程概况

玉米深加工是指先期从玉米中提取淀粉,再经生物或化学多重加工,从而生产出各种工业产品,服务于食品发酵、医药工业、化学工业等行业^[1],因具有极高的经济价值,近年来发展迅速。玉米深加工行业往往是用水大户,因此产生大量的高浓度有机废水,对环境造成极大的压力。

安徽某玉米深加工产业园以玉米为原材料生产维生素、氨基酸等工业品,以及山梨醇、淀粉等中间品,废水产生量达 11 000 m³/d。从经济及技术可行性方面考虑,将所有废水分类收集,经过相应的预处理后集中在污水站处理,符合要求后排入下游园区污水处理厂。根据《污水排入城镇下水道水质标准》(GB/T 31962—2015)以及下游污水处理厂的处

理能力,确定该产业园废水水质及排放标准如表1所示。

表1 进水水质与排放标准

Tab.1 Influent quality and discharge standards

项目	COD/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	BOD ₅ /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	NH ₃ -N/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	SS/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	pH值	色度/倍
原水水质	5 000 ~ 8 000	2 500 ~ 4 000	290 ~ 310	600 ~ 800	4 ~ 7	375
排放标准	300	100	25	250	6.5 ~ 9.5	64

2 工艺流程及主要构筑物

2.1 工艺比选

由于原水有机物及氨氮浓度均较高,所以采用厌氧-好氧联用的方法对废水进行处理。厌氧部分采用双层气箱式 UASB (DUASB),工作原理如图1所示。DUASB 设有两层三相分离器与气箱,与传统的 UASB 相比,拥有更强的沼气收集能力,因此具有更好的气、液、固分离效果。DUASB 和 IC 反应器外形相似,但顶部不设气液分离装置,内部无内循环系统,从而减少了基建成本。

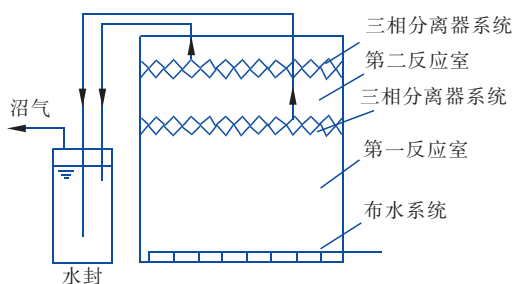


图1 DUASB 反应器工作原理

Fig.1 DUASB reactor working principle

好氧部分采用高塔反应器 (HTO)。HTO 相当于一个垂直的氧化沟,已经成功应用于多个工程,具有占地面积小、土建成本低、处理效果稳定的特点。

HTO 工作原理如图2所示。

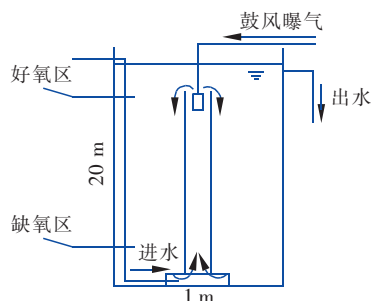


图2 HTO 工作原理

Fig.2 HTO reactor working principle

塔内设有循环管,由顶部贯穿至塔底,在底部设有开口,在循环管上部设有 1.5 m 长的曝气管。

通过设在曝气支管上的蝶阀和变频器控制风机的风量和风压,当开启曝气时,循环管内水体的含气量上升而使循环管内外水体产生密度差,使管内水位上升,管外水位下降,形成循环。HTO 顶部形成好氧区,底部形成缺氧区,在好氧区内好氧异养菌在氧气的作用下,将废水中有机物转化为 CO_2 和 H_2O ;硝化细菌与亚硝化细菌在好氧状态下将 $\text{NH}_3\text{-N}$ 转化为 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$,当废水与污泥的混合液在循环管外下降至塔底时,反硝化菌在缺氧状态下使 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 转化为 N_2 。泥水混合液在好氧-缺氧环境中不断循环,起到了生物选择器的作用,可有效遏制丝状菌的生长,防止污泥膨胀^[2]。

2.2 工艺流程

废水处理工艺流程见图3。

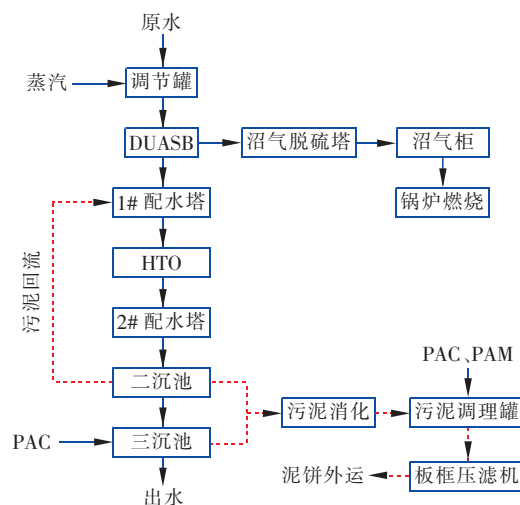


图3 废水处理工艺流程

Fig.3 Flow chart of wastewater treatment process

为了减少对生物处理的不利影响,产业园的高盐废水在进入污水处理站之前先经过 MVR (mechanical vapor recompression) 系统的预处理,降低其含盐量。预处理后的高盐废水与其他废水在调节罐内混合,进行水质、水量及温度的调节。经调节后的废水泵入 DUASB,进行厌氧生物降解,去除原水中部分有机物,并产生沼气。沼气先进入脱硫塔,去除

H₂S 等有害物质,然后进入气柜,保证供气压力。压力稳定的沼气进入锅炉燃烧产生蒸汽,供各生产车间使用^[3]。废水经厌氧处理后,有机物去除率达80%以上,随后进入 HTO 进行剩余有机物及氨氮的降解。HTO 的 COD 去除率 >75%,氨氮去除率 >90%,出水氨氮 <30 mg/L。好氧处理出水经 2#配水塔进入二沉池进行泥水分离,部分污泥回流至 1#配水塔,从而回到 HTO 中以保证好氧反应器内的微生物量。剩余污泥泵入二沉池下部的污泥区,进行污泥消化。二沉池出水进入三沉池,进一步沉淀去除悬浮物。三沉池设有加药装置,可投加 PAC 等化学药剂进行深度处理,确保出水达标排放。

2.3 主要构筑物及设计参数

① DUASB。2 座,单座尺寸为 $\varnothing 20\text{ m} \times 20\text{ m}$,有效容积为 6 000 m³/座,容积负荷为 7 kgCOD/(m³·d),水力停留时间为 25 h,控制在中温(37±2)℃。在反应器底部均匀布置 16 套布水导流盘,可在无动力情况下,使进水水流呈旋流态上升,达到布水均匀,并且可使泥水在旋流上升的过程中更加充分地接触混合,使厌氧处理的效率进一步提高^[4]。在高度为 11~13 m 和 16~18 m 处分别设置两套由三相分离器和气箱组成的集气系统,通过沼气管与水封连接。主要设备:提升泵 4 台, $Q=200\text{ m}^3/\text{h}$, $H=280\text{ kPa}$, $N=30\text{ kW}$ 。

② HTO。6 座,单座尺寸为 $\varnothing 20\text{ m} \times 20\text{ m}$,有效容积为 5 500 m³/座,塔内设 310 根 PVC 导流筒,每个导流筒顶部伸有一根曝气软管,通过曝气支管与塔顶的曝气主管相连,设有蝶阀控制每根支管的流量,污泥浓度(MLSS)设计值为 3 000~3 500 mg/L。主要设备:磁悬浮变频离心浮风机 3 台,2 用 1 备,额定功率 300 kW,额定风量 220 m³/min,额定风压 70 kPa。

③ 二沉池。2 座,单座尺寸为 $\varnothing 20\text{ m} \times 18\text{ m}$,塔体为碳钢结构,上部为污泥沉淀池,高为 5 m,表面负荷为 0.76 m³/(m²·h),水力停留时间为 3 h;底部为污泥消化池,上部沉淀下来的污泥在刮吸泥机的作用下,回流到好氧塔或进入下部的污泥消化池。污泥消化池内接有蒸汽加热系统,在中温条件下消化分解污泥中的有机物质,达到污泥减量的目的。主要设备:污泥回流泵 4 台,3 用 1 备。主要参数: $Q=200\text{ m}^3/\text{h}$, $H=100\text{ kPa}$, $N=15\text{ kW}$ 。

④ 三沉池。1 座。尺寸为 $\varnothing 20\text{ m} \times 18\text{ m}$,结

构与二沉池基本一致,设有加药混合装置,根据需要投加 PAC、FeCl₃ 等化学药品,对二沉池出水进一步处理,确保废水达标排放。

3 调试与运行

3.1 DUASB 的调试

启动初期,向每座 DUASB 投加 600 t 颗粒污泥和 800 t 厌氧消化污泥。颗粒污泥来自河南某淀粉污水处理厂的 UASB 池,含水率为 80%;厌氧消化污泥来自安徽某酒精污水处理厂,VSS/SS 为 0.43,含水率为 80%。启动初期控制进水 COD <4 000 mg/L,容积负荷 <1.5 kgCOD/(m³·d),利用蒸汽对调节池内的水温进行调节,将 DUASB 进水水温控制在(37±2)℃。当 COD 去除率上升到 80%以上、出水 VFA <3 mmol/L 后,启动期结束,开始逐步提升容积负荷。

在负荷提升阶段,每次的负荷提升不超过 15%,历时 40 d。DUASB 的容积负荷从 1.5 kgCOD/(m³·d)提升至 7 kgCOD/(m³·d),开始进入稳定运行阶段,此时厌氧系统进水 COD 在 6 000 mg/L 左右,出水 COD 稳定在 900~1 200 mg/L,去除率达 80%以上(见图 4)。

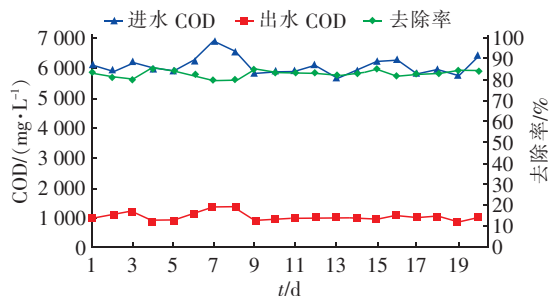


图4 DUASB 稳定运行阶段出水 COD 浓度与去除率

Fig. 4 COD removal rate and COD concentration during DUASB stabilization period

3.2 HTO 调试

由于生产初期废水水量较少,因此从经济方面考虑,先期调试运行 1#、2#HTO,待菌种驯化成功后,再通过污泥回流系统将驯化后的污泥投加到其他塔中,以实现后续投入使用的 HTO 的快速启动。

首先用清水对 HTO 进行试漏,并检验曝气系统是否正常。随后将部分原水和厌氧出水注入 HTO,控制塔内 COD 浓度在 2 500 mg/L 左右,然后向 1#、2#HTO 各投加 100 t 活性污泥,含水率为 85%。投加的好氧活性污泥来自安徽某城镇污水处理厂脱水

污泥。同时对 HTO 进行闷曝,持续 48 h。闷曝 2 d 后,塔内的 COD 浓度降至 1 000 mg/L 以下。由于接种污泥量较少,加上塔内 COD 浓度较高,导致 HTO 内的污泥 F/M 过高,好氧塔顶部水面出现大量白色泡沫。为防止泡沫飘落对污水厂周围交通造成影响,现场组织人员在塔顶喷洒少量消泡剂,结合喷淋等手段迅速消除泡沫。随后使厌氧出水进入 HTO,随着好氧塔内 SV_{30} 由 2% 迅速增长到 15%,好氧反应器上的泡沫也逐步消失。14 d 后好氧塔 SV_{30} 增长到 30%,出水 COD 浓度稳定在 400 mg/L 以内,异养型好氧菌的驯化取得初步成功。随着厌氧出水量的逐步提高,在 20 d 后 HTO 的容积负荷达到 $0.3 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,出水 COD 稳定在 300 mg/L 以下(见图 5)。

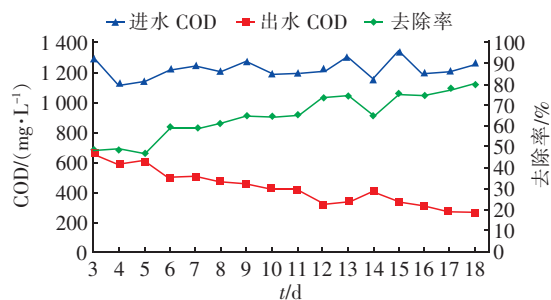


图5 HTO 启动阶段出水 COD 浓度与去除率

Fig. 5 COD removal rate and COD concentration during HTO start-up

调试初期由于泥龄较长,硝化细菌比以降解有机物为主的异养菌更难富集,在好氧反应器启动 20 d 后, $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率仍未有明显提升(见图 6)。

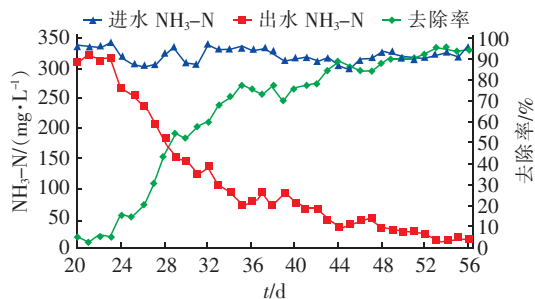


图6 HTO 启动阶段出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度与去除率

Fig. 6 $\text{NH}_3\text{-N}$ removal rate and $\text{NH}_3\text{-N}$ concentration during HTO start-up

同时,因为 HTO 启动初期污泥浓度较低,好氧反应器内的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度较高,过高的凯氏氮污泥负荷也抑制了硝化细菌的生长^[5]。第 22 天开始向

好氧塔进水中加入少量的酸,控制好氧塔 pH 值 < 9 ,以减少在高 pH 值下好氧塔内产生大量的游离氨对于硝化反应的不利影响^[6]。控制塔内温度在 15°C 以上,顶部好氧区溶解氧为 $2 \sim 4 \text{ mg/L}$,同时加大污泥回流量保证污泥龄在 30 d 以上,以满足硝化细菌的最适宜生长环境要求。

在实施一系列措施后,HTO 启动第 24 天出水氨氮开始出现明显下降, $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率提升到 20% 以上,与此同时,好氧反应器的 pH 值由 8 下降到 7.5 左右,硝化细菌的富集开始初见规模。第 38 天好氧塔出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 降到 $70 \sim 80 \text{ mg/L}$ 、去除率达到 75% 左右时, $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率开始停止上升,同时好氧塔内 pH 值由 7.5 降至 5.5 以下。据此判断为反硝化反应所需的碳源不够,过量的 NO_3^- 、 NO_2^- 累积导致 pH 值下降,硝化反应受到抑制,氨氮去除率无法继续提高,过低的 pH 值也抑制了好氧异养菌的生长。因此开始从调节罐超越部分废水至好氧反应器,适当增加进水 BOD_5 浓度,提高 C/N 值,控制进水 COD $> 1\,200 \text{ mg/L}$ 。经过 4 d 的调整,HTO 启动的第 46 天,1#好氧塔的出水氨氮开始降至 50 mg/L 以内,pH 值上升至 7 以上。经过污泥回流系统的交换,2#好氧塔的氨氮去除率也提高到 85% 以上。第 52 天,各好氧塔出水氨氮下降至 20 mg/L 以内,出水 COD 下降至 200 mg/L 以内,pH 值稳定在 7.0 ~ 7.5 之间, SV_{30} 稳定在 30% ~ 40%,进入稳定运行阶段。随着水量逐渐增加,先期投入使用的 2 座 HTO 的有机负荷达到 $0.4 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 后,陆续启动剩下的 4 座 HTO,通过污泥回流系统的交换,其他的好氧反应器都在一周内完成快速启动。

3.3 运行效果及经济分析

① 运行效果

本工程稳定运行后半年的平均处理效果如表 2 所示。

表2 稳定运行期的处理效果

Tab. 2 Treatment effect during stable operation

项目	DUASB		HTO 及二沉池出水	三沉池出水
	进水	出水		
COD/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	6 189	1 111	178	167
BOD/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	3 210	465	87	84
$\text{NH}_3\text{-N}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	307	328	17.19	15.18
SS/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	652	499	294	61
pH 值	5 ~ 7	7 ~ 8	7 ~ 8	7 ~ 8
色度/倍	276	256	97	56

② 经济分析

本工程处理玉米深加工废水 $11\ 000\ \text{m}^3/\text{d}$, 运行费用包括人工费、药剂费、设备检修费、电费等。人工费按污水处理站配备 18 人、工资为 3 500 元/(月·人)计, 得出人工费为 75.6 万元/a ($0.19\ \text{元}/\text{m}^3$)。酸碱、PAC、PAM 等药剂费为 118.8 万元/a ($0.3\ \text{元}/\text{m}^3$)。本工程总装机功率为 889 kW, 运行功率为 605.65 kW, 电价为 $0.8\ \text{元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$, 电耗为 $14\ 535.6\ \text{kW}\cdot\text{h}/\text{d}$, 则电费为 11 628.48 元/d ($1.06\ \text{元}/\text{m}^3$)。经计算, 运行成本为 $1.55\ \text{元}/\text{m}^3$ 。

4 结果与讨论

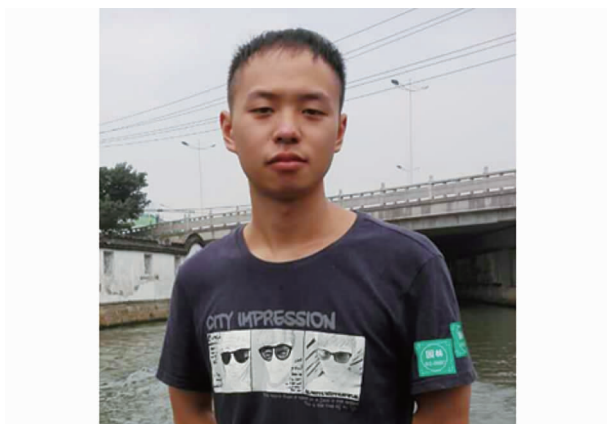
① 采用 DUASB + HTO 工艺处理 $11\ 000\ \text{m}^3/\text{d}$ 的玉米深加工废水, DUASB 的 COD 去除率达 80% 以上, HTO 的 COD 去除率达 80% 以上, 氨氮去除率为 95% 左右, 出水水质满足《污水排入城镇下水道水质标准》(GB/T 31962—2015)。

② 好氧反应器运行过程中, 好氧区与缺氧区之间循环良好, 反硝化反应产生的碱度补充了硝化反应消耗的碱度, 可维持好氧系统 pH 值稳定在 7 以上, 不需要外部投加碱液; 同时采用气提的方式实现泥水混合液在塔内的循环, 也节约了能源。

③ 针对原水氨氮较高、水质变化大的特点, 采用高塔式好氧工艺, 出水水质稳定, 并且大大节约了占地面积与土建成本。

参考文献:

- [1] 尤新. 玉米深加工发展主要成就、存在问题及今后发展方针[J]. 粮食加工, 2009, 34(4): 12-16.
You Xin. Main achievements, existing problems and future development policy of maize deep processing development[J]. Grain Processing, 2009, 34(4): 12-16 (in Chinese).
- [2] 姜栋, 刘锋, 陆成栋, 等. 气升环流反应器处理高氨氮豆制品废水[J]. 中国给水排水, 2014, 30(6): 58-61.
Jiang Dong, Liu Feng, Lu Chengdong, et al. Air-lift loop reactor for treatment of high ammonia soybean wastewater[J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(6): 58-61 (in Chinese).
- [3] 董顶, 田兴, 马志丹, 等. 小麦淀粉废水处理与沼气利用工程实例[J]. 给水排水, 2015, 41(11): 60-63.
Dong Ding, Tian Xing, Ma Zhidan, et al. Commissioning of wheat starch wastewater treatment and biogas utilization project[J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 41(11): 60-63 (in Chinese).
- [4] 王立越, 宋雯静, 尹文娟, 等. MIC + HTO 工艺处理高甲醇含量废水工程实例[J]. 水处理技术, 2017, 43(6): 135-138.
Wang Liyue, Song Wenjing, Yin Wenjuan, et al. Project case of high methanol containing wastewater treatment by MIC + HTO process[J]. Technology of Water Treatment, 2017, 43(6): 135-138 (in Chinese).
- [5] 王晓莲, 彭永臻. A^2/O 法污水生物脱氮除磷处理技术应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
Wang Xiaolian, Peng Yongzhen. Application of Biological Nitrogen and Phosphorus Removal in Wastewater by A^2/O Method[M]. Beijing: Science Press, 2008 (in Chinese).
- [6] 张亮, 张树军, 彭永臻. 污水处理中游离氨对硝化作用抑制影响研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(2): 75-79.
Zhang Liang, Zhang Shujun, Peng Yongzhen. Review of study on the effects of free ammonia inhibitions on nitrifying bacteria in wastewater treatment[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(2): 75-79 (in Chinese).



作者简介: 孙自谦(1994—), 男, 湖北襄阳人, 硕士研究生, 研究方向为污水处理与回用。

E-mail: 1036824973@qq.com

收稿日期: 2018-04-20