

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.18.014

# 某工业园区污水处理厂Bardenpho工艺设计与运行

杨海娇<sup>1,2,3</sup>, 马晓龙<sup>1,2,3</sup>, 李雨航<sup>1,2,3</sup>, 石坤冉<sup>1,2</sup>

(1. 善水博通<宁夏>环境科技有限公司, 宁夏 银川 750001; 2. 宁夏农村污水分散式治理与资源化利用<银川>技术创新中心, 宁夏 银川 750001; 3. 善水博通水污染防治模拟实验室, 宁夏 银川 750001)

**摘 要:** 宁夏某工业园区污水处理厂设计规模为15 000 m<sup>3</sup>/d,采用“多相催化氧化+水解酸化+五段式Bardenpho+磁混凝沉淀+预臭氧接触+曝气生物滤池+反硝化深床滤池+臭氧催化氧化”工艺。该污水厂采用各相关单元分布式并联建设运行的总体布局,可根据实际水质和水量灵活调整投运单元和超越单元,满足不同条件下污染物的去除需求和运行成本的有效把控。该污水厂自2022年11月正式运行以来,先后经历了冬季低温、进水低负荷等阶段,具有耐冲击负荷、处理效果好等特点,出水水质可达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准。

**关键词:** 工业废水处理; 五段式Bardenpho工艺; 磁混凝; 脱氮除磷; 臭氧催化氧化; 多相催化氧化

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)18-0080-05

## Design and Operation of Bardenpho Process in a Wastewater Treatment Plant in an Industrial Park

YANG Hai-jiao<sup>1,2,3</sup>, MA Xiao-long<sup>1,2,3</sup>, LI Yu-hang<sup>1,2,3</sup>, SHI Kun-ran<sup>1,2</sup>

(1. Shanshui Botong <Ningxia> Environmental Technology Co. Ltd., Yinchuan 750001, China;  
2. Ningxia Rural Sewage Decentralized Treatment and Resource Utilization <Yinchuan> Technology Innovation Center, Yinchuan 750001, China; 3. Shanshui Botong Water Environment Research Institute, Yinchuan 750001, China)

**Abstract:** A wastewater treatment plant located in an industrial park in Ningxia is designed at a scale of 15 000 m<sup>3</sup>/d and adopts the process of heterogeneous catalytic oxidation, hydrolytic acidification, five-stage Bardenpho, magnetic coagulation and precipitation, pre-ozonation, biological aerating filter, denitrification deep bed filter and ozone catalytic oxidation. The wastewater treatment plant employs the overall layout of distributed and parallel operation for all related units. This enables flexible adjustment of the operating units and transcendent units in accordance with the actual water quality and water quantity, thereby meeting the removal requirements of pollutants under various operating conditions and effectively controlling the operating cost. Since its official operation in November 2022, the wastewater treatment plant has undergone phases such as low temperature in winter and low influent load. It possesses the characteristics of shock load resistance and excellent treatment performance, and the

基金项目: 银川市中小企业创新发展专项(2022ZX045); 银川市基础条件建设项目(2023JCTJ07)

通信作者: 马晓龙 E-mail: XiaolongMa9@163.com

effluent quality can meet the first level A criteria specified in the *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002).

**Key words:** industrial wastewater treatment; five-stage Bardenpho process; magnetic coagulation; nitrogen and phosphorus removal; ozone catalytic oxidation; heterogeneous catalytic oxidation

宁夏某工业园区污水处理厂项目规划用地为6.002 hm<sup>2</sup>,设计规模为15 000 m<sup>3</sup>/d,主要接收园区的工业废水和生活污水,采用“多相催化氧化+水解酸化+五段式Bardenpho+磁混凝沉淀+预臭氧接触+曝气生物滤池+反硝化深床滤池+臭氧催化氧化”工艺,于2022年11月正式投入运行。该园区企业所属行业包括传统煤化工、精细化工、医药中间体、乙烯、电石专用焦、碳化硅、冶金建材等。

## 1 工程设计

### 1.1 设计进、出水水质

根据实际调研,现状企业排放的废水水质成分复杂,含有挥发酚、硝基苯、苯酚等难生物降解的有毒有害污染物,主要水质特点为具有生物毒性、难降解有机物浓度偏高、可生化性差、无机物和总溶解性固体(TDS)含量较高。

鉴于现状污水处理厂进水中生活污水占比仅为10%,从污水处理厂安全稳定运行角度考虑,设计进水水质根据工业废水排放标准确定。污水处理厂出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准,污水厂出水排入下游再生水厂处理后回用。设计进、出水水质主要指标见表1。

表1 设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality

mg·L<sup>-1</sup>

项目	COD	BOD <sub>5</sub>	SS	TN	NH <sub>3</sub> -N	TP
进水	500	70	400	70	45	8.0
出水	50	10	10	15	5(8)	0.5
注: 括号外数值为水温≥12℃时的控制标准,括号内数值为水温<12℃时的控制标准。						

### 1.2 工艺选型

该污水处理厂的进水以工业废水为主,其中难降解有机污染物浓度较高,尤其含有大量的硝基苯,预处理单元需要设置多相催化氧化(铁碳微电解+Fenton氧化)及水解酸化工艺段对污水进行生物

解毒并提高其可生化性<sup>[1]</sup>。在铁碳微电解工艺中,铁屑和炭由于存在电极电位差而形成无数微原电池,此过程形成的电流可使大分子物质被分解为小分子中间体,使某些难降解物质变得易于生化处理<sup>[2]</sup>;微电解后污水中有大量Fe<sup>2+</sup>,可与补充添加的H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>迅速反应,生成的·OH氧化能力极强,能氧化分解硝基苯及其中间产物,从而达到降低污水生物毒性同时提高污水可生化性的作用。水解酸化和其他工艺组合可降低污水处理成本、提高处理效率,在兼性厌氧水解菌群的作用下,残余硝基苯可被还原为苯胺,大分子有机物可被转化为小分子有机物,从而进一步降低污水生物毒性、提高污水可生化性<sup>[3]</sup>。在此工艺段,对COD的去除率为27%~28%,对硝基苯类化合物的去除率为61%~65%。

二级生化处理采用五段式Bardenpho工艺,该工艺具有污泥浓度高、碳源利用充分、抗冲击负荷能力强等特点<sup>[4]</sup>,相较于传统AO工艺,该工艺增加了二级缺氧反应池和快速好氧反应池,同时在前端增加了厌氧反应池,可提高生物脱氮除磷效果。从工程投资和运行成本等方面考虑,五段式Bardenpho工艺比MBR工艺更有优势,与CASS和氧化沟工艺相比,具有运行设备少、耐冲击负荷、脱氮除磷效果好等优点。考虑到当地经济以及工业园区污水的不确定性,生物脱氮除磷工艺选择抗风险能力强的Bardenpho工艺,更能应对水质变化冲击。

经过二级生物处理后,难降解有机污染物仍需进一步强化去除,同时TN和TP仅靠二级生物处理也很难保证稳定达标,尤其是在水温低的情况下。因此,深度处理的重点是难降解COD、TN、TP以及色度的去除。综合考虑,采用磁混凝澄清池对SS和TP进行去除,通过预臭氧接触池+曝气生物滤池进一步去除难降解COD,利用反硝化深床滤池进一步强化去除TN,同时工艺末端增加臭氧催化氧化池,进一步保障出水难降解COD稳定达标。

另外,为杜绝偷排和超排现象,园区企业污水

收集管网采用“一企一管”设计,对来水水质、水量进行在线监测和监控,一旦水质超标,系统自动报警,同时关闭进水阀门。监测达到收纳标准后污水方可进入园区污水处理厂调节池。

### 1.3 工艺流程

污水处理厂工艺流程见图1。预处理主要截留

大块的悬浮或漂浮物,避免较大的砂粒等在生物池沉积,降低污水的生物毒性,并提高污水可生化性,同时去除一部分污染物;二级处理主要用于生物脱氮除磷;深度处理主要用于进一步去除难降解的COD、TN、TP;消毒处理则主要保证微生物指标稳定达标。

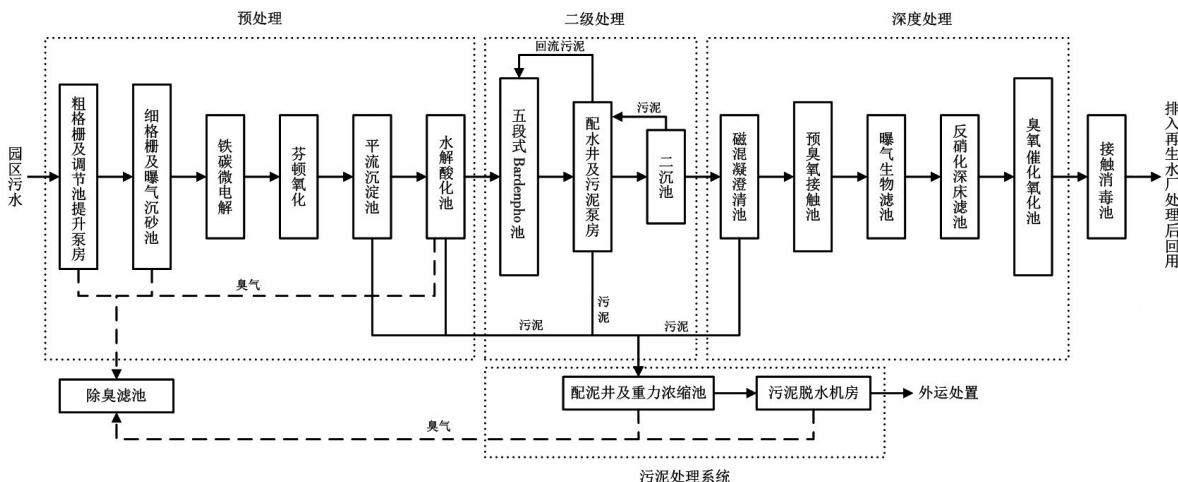


图1 工业园区污水处理厂工艺流程

Fig.1 Process flow of industrial park wastewater treatment plant

### 1.4 主要构筑物设计

#### 1.4.1 多相催化氧化系统

多相催化氧化系统分为12个单元并联运行,平均每个单元的处理流量为 $52 \text{ m}^3/\text{h}$ 。其中,pH调节池1座,尺寸 $L \times B \times H = 28 \text{ m} \times 7.8 \text{ m} \times 4.5 \text{ m}$ ,设计有效水力停留时间(HRT)为1 h;电化学氧化塔24座,尺寸为 $\varnothing 4.2 \text{ m} \times 7.5 \text{ m}$ ,设计有效停留时间为1 h;催化氧化塔12座,尺寸为 $\varnothing 4.2 \text{ m} \times 7.5 \text{ m}$ ,设计有效停留时间为1 h;沉淀池3座,尺寸 $L \times B \times H = 32 \text{ m} \times 12.4 \text{ m} \times 4.2 \text{ m}$ ,设计表面负荷为 $0.95 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

多相催化氧化系统投加浓度为27%的双氧水,双氧水加药泵与进水流量计联动,根据进水量自动变频调节加药量,通过调节药品浓度匹配所需加药量。多相催化氧化系统产生的污泥经平流沉淀池排至污泥槽,再经螺杆泵排至污泥浓缩池。污泥浓缩池和污泥脱水设施均采用污水站已有的设施。

#### 1.4.2 水解酸化池

水解酸化池2座共8格,单格流量为 $1875 \text{ m}^3/\text{d}$ ,平均时流量为 $78.13 \text{ m}^3/\text{h}$ ,设计HRT为36 h;采用半地下式钢筋混凝土结构,单格池体尺寸 $L \times B \times H = 19.0 \text{ m} \times 18.5 \text{ m} \times 8.5 \text{ m}$ ,有效水深为8.0 m。混合液回流泵9台, $Q = 180 \text{ m}^3/\text{h}$ , $H = 60 \text{ kPa}$ , $N = 5.5 \text{ kW}$ ,8用

1冷备;排泥泵2台, $Q = 95 \text{ m}^3/\text{h}$ , $H = 120 \text{ kPa}$ , $N = 5.5 \text{ kW}$ ,1用1备。

#### 1.4.3 五段式Bardenpho生物反应池

五段式Bardenpho生物反应池主体布局为1座2组并联,采用半地下式钢筋混凝土结构,生物反应池容积如下:预缺氧区为 $344 \text{ m}^3$ 、厌氧区为 $1032 \text{ m}^3$ 、缺氧区1为 $8574 \text{ m}^3$ 、好氧区1为 $9538 \text{ m}^3$ 、缺氧区2为 $1375 \text{ m}^3$ 、好氧区2为 $1719 \text{ m}^3$ ,池体总尺寸 $L \times B \times H = 78.5 \text{ m} \times 49.1 \text{ m} \times 7.9 \text{ m}$ ,有效水深为6.5 m。平均污泥浓度(MLSS)为 $4.0 \text{ g/L}$ ;总HRT为33 h,其中预缺氧区为0.5 h、厌氧区为1.5 h、缺氧区1为12.5 h、好氧区1为11.1 h、缺氧区2为2 h、好氧区2为2.5 h;污泥负荷为 $0.032 \text{ kgBOD}_5/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$ ,总泥龄为27.6 d,污泥回流比为100%;生物池配有潜水搅拌机12台,曝气盘1350套(单个曝气器工作气量为 $3.8 \text{ m}^3/\text{h}$ )。

#### 1.4.4 二沉池

二沉池分为2座,采用钢筋混凝土结构,池体直径为24 m、高为4.94 m;单座安装 $\varnothing 26 \text{ m}$ 半桥式中心传动单管吸泥机1台,将池底沉泥刮至中心集泥斗后静压排至污泥泵房。沉淀时间为3.1 h,最大表面负荷为 $0.8 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。



#### 1.4.5 磁混凝澄清池

磁混凝澄清池1座2组,采用半地下式钢筋混凝土结构,尺寸 $L \times B \times H = 15.6 \text{ m} \times 13.6 \text{ m} \times 4.8 \text{ m}$ ;每组磁混凝澄清池设置3座反应池、1座沉淀池、2套磁粉回收系统。沉淀池采用上方下圆单泥斗形式,内径为7.0 m,并设置斜管,附设配套刮泥机;单个反应池的反应时间约为2~3 min,在反应池中污泥与磁粉形成密实的絮体,之后进入沉淀池。沉淀池平均表面负荷约为 $15 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,峰值流量下的表面负荷约为 $21.41 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

#### 1.4.6 预臭氧接触池

在磁混凝澄清池后端设置预臭氧接触池,主要由臭氧发生器和气水接触设备组成。预臭氧接触池为半地下式钢筋混凝土结构,尺寸 $L \times B \times H = 18.7 \text{ m} \times 12.4 \text{ m} \times 6.55 \text{ m}$ ;催化氧化药剂投加泵2台,变频控制,二次扩散投加装置3套;高效催化药剂投加装置2套,臭氧尾气破坏器2套。

#### 1.4.7 曝气生物滤池

曝气生物滤池1座,采用钢筋混凝土结构,8组并联,每组4级串联,池体尺寸 $L \times B \times H = 48.8 \text{ m} \times 20 \text{ m} \times 7.3 \text{ m}$ (平均有效水深为6.0 m);填料容积负荷为 $0.56 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \text{ 填料} \cdot \text{d})$ ,水力负荷为 $3.47 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,滤速为3.47 m/h;罗茨鼓风机1用1备,曝气风量为 $31.25 \text{ m}^3/\text{min}$ 。填料为有机惰性材料,呈长方体状(边长为20~30 mm),填料层高度为3.5 m。

#### 1.4.8 反硝化深床滤池

反硝化深床滤池1座,采用框架/钢筋混凝土结构,尺寸 $L \times B \times H = 14.4 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 7.3 \text{ m}$ ,共有4格滤池,单排布置,每格过滤面积为 $35.38 \text{ m}^2$ ;设计滤速为5.89 m/h;混合搅拌机1台,潜水搅拌机2台,反冲洗水泵2台(1用1备),污水提升泵2台(1用1备),反冲洗罗茨风机2台(1用1备),螺杆式空压机2台(1用1备)。

#### 1.4.9 臭氧催化氧化池

臭氧高级催化氧化池1座,采用半地下式钢筋混凝土结构,尺寸 $L \times B \times H = 23.9 \text{ m} \times 15.2 \text{ m} \times 9 \text{ m}$ ,有效水深为5.1 m;臭氧设计投加量为90 kg/h。

#### 1.4.10 接触消毒池

接触消毒池1座,采用钢筋混凝土结构,尺寸 $B \times L \times H = 18.7 \text{ m} \times 12.4 \text{ m} \times 6.55 \text{ m}$ ,有效水深为5.1 m。利用巴氏计量槽对出厂水进行计量。

#### 1.4.11 污泥浓缩池及脱水间

污泥浓缩池1座,尺寸 $B \times L \times H = 12 \text{ m} \times 7 \text{ m} \times 7 \text{ m}$ ,设中心传动刮泥机1台,污泥固体负荷为 $40 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ;污泥浓缩时间 $\geq 12 \text{ h}$ 。脱水间1座,建筑面积为 $610.39 \text{ m}^2$ ,采用框架结构,板框压滤机2台(1用1备),脱水后泥饼含水率 $< 60\%$ 。

### 2 运行效果与分析

#### 2.1 低负荷运行效果

该污水处理厂运行后,进水负荷较低,平均进水量为 $3600 \text{ m}^3/\text{d}$ ,进水COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP浓度范围分别为39.75~289.45、2.52~12.05、11.52~34.10、0.12~1.17 mg/L,平均浓度分别为69.9、6.4、21.1、0.48 mg/L,其中COD仅达到设计进水浓度的20%。为了提高处理系统的负荷,通过污水处理系统单组/多组运行或间歇运行的方式,即:运行2组多相催化氧化系统(共12组)、1组或2组平流沉淀池、1组水解酸化池(共8组)、1组生物反应池(共2组)。同时,将内回流比调整为200%~300%, $\text{SV}_{30}$ 保持在55%,MLSS控制在 $3500 \text{ mg/L}$ 左右,好氧段DO控制在 $4 \text{ mg/L}$ 左右,池内水温为 $18^\circ\text{C}$ 左右。此阶段出水COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP浓度范围分别为5.4~28.78、0.24~2.77、2.54~11.3、0.03~0.21 mg/L,平均浓度分别为20.8、0.82、6.65、0.14 mg/L。可以看出,虽然此阶段进水浓度较低,但通过改变各工艺单元运行方式、调整运行参数,出水水质控制较为平稳,达到了GB 18918—2002的一级A标准,运行效果较好。

#### 2.2 低温运行效果

冬季和初春阶段生物池的水温较低,这会抑制活性污泥中微生物的活性和生长代谢,导致生物处理效率低下。为此,该工程在水解酸化池前端设置蒸汽盘管,以提升生物处理系统水温,保证微生物活性与污染物去除效果。此阶段进水COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN浓度范围分别为53.55~434.61、2.36~46.91、8.56~100.28 mg/L,平均浓度分别为130.73、12.55、31.2 mg/L。可以看出,低温运行期间进水水质波动较大,但五段式Bardenpho工艺具有较强的抗冲击负荷能力,且采用一系列深度处理工艺,有针对性地去除特定污染物,保证最终出水水质能够满足GB 18918—2002的一级A标准。此阶段出水COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TN浓度范围分别为5.4~42.03、0.57~

3.18、2.54~10.22 mg/L, 平均浓度分别为23.5、1.64、6.85 mg/L, 平均去除率分别为82%、87%、78%, 在低温情况下系统对各污染物仍有较好的去除效果。

### 3 技术经济分析

#### 3.1 工程造价

主要构筑物工程造价初设概算: 建筑费用约为13 683万元, 设备费用约为9 151万元, 安装费用约为3 554万元, 其他费用约为3 348万元, 总计约为29 736万元。

#### 3.2 运行费用

低负荷运行期间的电费、药剂费、污泥处理费所产生的平均吨水处理成本: 电费0.350元/m<sup>3</sup>, 药剂费2.222元/m<sup>3</sup>, 污泥处理费0.024元/m<sup>3</sup>, 总计为2.596元/m<sup>3</sup>。此为低负荷且进水浓度较低时的吨水运行成本, 随着负荷与进水浓度的升高, 吨水处理成本可能有上涨趋势。

### 4 结论

① 某工业园区污水处理厂的进水以工业废水为主, 采用“多相催化氧化+水解酸化+五段式Bardenpho+磁混凝沉淀+预臭氧接触+曝气生物滤池+反硝化深床滤池+臭氧催化氧化”处理工艺。污水厂采用各相关单元分布式并联建设运行的总体布局, 可根据实际水质和水量灵活调整投运单元和超越单元。在低水温及低负荷运行工况下, 该污水处理厂具有耐冲击负荷、可切换调控、稳定去除各污染物的特点, 出水水质可全面达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准, 对于工业园区废水处理具有很好的示范意义和推广价值。

② 在低负荷时, 多相催化氧化系统可根据实际情况调整为单组运行或多组并联运行, 降低运行成本并实现灵活切换; 两组生化系统仅运行一组, 并且独特的五段式Bardenpho工艺可为生化反应池的调整提供缓冲及补救余地; 磁混凝工艺可在更短时间内去除SS和TP, 而且磁粉可回收重复利用, 有效节省混凝剂投加量, 降低运行成本; 臭氧催化氧化工艺是使出水难降解COD达标的保障性措施, 可根据实际水质调整臭氧投加量以把控成本; 水解酸化池、曝气生物滤池、反硝化深床滤池等工段均采

用分段并联式建设和中央集控分级独立运行相耦合, 可根据实际工况切换运行工段或运行组数, 确保工艺平稳、水质达标、节能降耗。

### 参考文献:

- [1] 涂保华, 黄鑫, 张晟, 等. Fenton/生化组合工艺降解农药中间废水苯系物[J]. 中国给水排水, 2018, 34(20): 96-100.  
TU Baohua, HUANG Xin, ZHANG Sheng, et al. Degradation of benzene series in pesticide intermediates wastewater by Fenton oxidation/biochemical process[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(20): 96-100 (in Chinese).
- [2] 颜勇, 张佳男, 林涛, 等. 铁碳微电解/BAF预处理农村微污染原水[J]. 中国给水排水, 2018, 34(23): 50-53.  
YAN Yong, ZHANG Jianan, LIN Tao, et al. Pretreatment of micro-polluted source water in rural areas by combined process of iron-carbon micro-electrolysis and biological aerated filter [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(23): 50-53 (in Chinese).
- [3] 胡邦, 杨艳坤, 张鑫, 等. 化工园区工业污水“分类分质”处理工艺系统设计[J]. 中国给水排水, 2023, 39(6): 66-70.  
HU Bang, YANG Yankun, ZHANG Xin, et al. Design of industrial wastewater treatment system in chemical industrial park based on classification and quality [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(6): 66-70 (in Chinese).
- [4] 张月, 王阳, 张宏伟, 等. 阳泉市污水处理二期工程BARDENPHO工艺设计和运行[J]. 中国给水排水, 2020, 36(16): 64-68.  
ZHANG Yue, WANG Yang, ZHANG Hongwei, et al. Design and operation of BARDENPHO process in phase II project of Yangquan Wastewater Treatment Plant [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(16): 64-68 (in Chinese).

作者简介: 杨海娇(1988—), 女, 宁夏银川人, 硕士, 工程师, 主要从事水环境领域的污水处理、流域治理、水资源评估等工作。

E-mail: yhj0801@126.com

收稿日期: 2023-06-13

修回日期: 2023-11-24

(编辑: 刘贵春)