

预处理—AOAO—UF—Fenton—混凝沉淀 处理餐厨废水

曹 猛

(大连市市政设计研究院有限责任公司, 辽宁大连 116011)

[摘要] 餐厨废水具有污染物浓度高、成分复杂、含油量高、有机物和氨氮浓度高等特点,处理难度大。以西南地区某餐厨垃圾处理厂为例,分析了该厂厌氧消化液脱水滤液的水质特点,选择适合的处理工艺。该厂污水处理站主要处理厌氧消化液脱水后的沼液及其他生产废水,处理规模为60 t/d。拟采用隔油+气浮+调节池+水解酸化+AOAO+外置UF系统+Fenton高级氧化+混凝沉淀工艺进行处理。对该工程的系统主要设计参数进行介绍,并分析工程运行情况和运行成本。结果表明,餐厨废水经处理后,最终出水的 COD_{Cr} 、 BOD_5 、SS、TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、动植物油平均分别为260、95、20、67、19、2、70 mg/L,系统出水水质可稳定达到纳管标准及与下游污水厂的协议标准要求。该工程经营成本为41.70元/t。碳源投加成本较高、超滤膜更换费用较高、工程规模较小等因素是其经营成本高于常规餐厨处理工程的主要原因。

[关键词] 沼液;餐厨垃圾;生化处理;深度处理

[中图分类号] TU992.3 **[文献标识码]** B **[文章编号]** 1005-829X(2022)12-0165-05

Treatment of kitchen wastewater by process of pretreatment-AOAO-UF-Fenton-coagulation sedimentation

CAO Meng

(Dalian Municipal Design and Research Institute Co., Ltd., Dalian 116011, China)

Abstract: Kitchen wastewater is characterized by high concentration of pollutants, complex composition, high oil content, high concentration of organic matter and ammonia nitrogen, and is difficult to treat. Taking a kitchen waste treatment plant in southwest China as an example, the water quality characteristics of anaerobic digestion dewatering filtrate of the plant were analyzed and a suitable treatment process was selected. The wastewater treatment station mainly treated biogas slurry and other production wastewater after anaerobic digestion dewatering, and the treatment scale is 60 t/d. Oil separation+air flotation+regulating tank+hydrolysis acidification+AOAO+external UF system+Fenton advanced oxidation+coagulation and sedimentation process was used for treatment. The main design parameters of the system were introduced and the project operation and cost were analyzed. The results show that effluent COD_{Cr} , BOD_5 , SS, TN, $\text{NH}_3\text{-N}$, TP, animal and vegetable oil were 260 mg/L, 95 mg/L, 20 mg/L, 67 mg/L, 19 mg/L, 2 mg/L, and 70 mg/L on average, respectively, after the treatment of the kitchen wastewater. And the effluent quality of the system could stably meet the requirements of the pipeline and agreement standard with the downstream wastewater plant. The operating cost of the project is RMB 41.70/t. High cost of carbon source, high cost of ultrafiltration membrane replacement and small project scale were the main reasons for its higher operating cost than the conventional kitchen treatment project.

Key words: biogas slurry; kitchen waste; biochemical treatment; advanced treatment

西南某县拟建设1座50 t/d的餐厨垃圾处理厂,对县域及周边乡镇的餐馆、机关学校食堂、农贸市场

等区域餐厨垃圾进行集中收运处置。该厂拟采用国内主流技术路线^[1]——预处理+中温厌氧消化+沼液

处理+沼气净化及综合利用的工艺。其中沼液废水来自厌氧消化液脱水后的滤液及餐厨车洗车废水,经厂内污水处理站处理达标后排放至下游污水处理厂进一步处理。餐厨垃圾沼液废水污染物浓度高、成分复杂,含油量、有机物、氨氮均较高,采用常规处理工艺处理较难达标^[2],因此应选择强化生化处理系统及深度处理工艺。

1 设计水质及工艺流程

1.1 设计进出水水质

该工程设计进水水质参照临近县市同类项目。出水水质按《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)中的三级标准(纳管标准)及下游污水处理厂与建设单位达成协议标准。具体设计进出水水质见表1。

表1 设计进出水水质

项目	COD _{Cr}	BOD ₅	SS	NH ₃ -N	TN	TP	动植物油
进水	≤15 000	≤8 000	≤8 000	≤3 000	≤5 000	≤500	≤1 500
出水	≤300	≤250	≤200	≤25	≤70	≤4	≤100

1.2 水质特点分析

(1)油脂含量高。从表1可以看出,进水中油脂达1 500 mg/L左右,根据已实施项目经验数据^[3],餐厨垃圾预处理中,除油效果较好的条件下,厌氧消化液脱水后沼液中的动植物油脂一般不会超过1 000 mg/L。从该项目所处地域饮食习惯分析,其餐饮垃圾中油脂含量较高,质量分数通常为5%~7%,高于其他城市(3%左右),因此入水油脂较高。为了降低后续生化处理负荷,拟在预处理工艺段中增加对应的除油措施。

(2)悬浮物较高,有机物去除难度大。餐厨沼液中仍含有大量的悬浮物,采用常规预处理工艺难以去除,需结合生化系统进行处置。此外,经过厌氧系统后,餐厨沼液中已经分解去除大部分易降解有机物,采用常规生物处理工艺难以去除难降解有机物,需要采用强化生物处理工艺保证SS、氨氮、COD_{Cr}等的去除^[2]。

(3)总磷高。入水总磷达500 mg/L,出水要求≤4 mg/L,去除率高达99.2%,单靠生物除磷无法保证去除效果,因此需辅助化学除磷措施。

(4)含盐量高。根据厌氧供货商提供的厌氧消化液指标,电导率高达20 000 μS/cm,在构筑物、工艺设

备及管道设计中要考虑对应的防腐措施。

(5)碳源不足,脱氮要求高。生物脱氮能力主要通过BOD₅/TN进行鉴别,反硝化细菌在分解有机物过程中同步进行反硝化作用^[4]。判别污水的生物脱氮性能需要足够碳源(即BOD₅)主要根据《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)中“污水中的五日生物需氧量与总凯氏氮之比宜大于4,即可认为污水有足够的碳源供反硝化细菌利用”^[5],但根据进水 $m(\text{BOD}_5):m(\text{TN})=1.60$,分析反硝化脱氮所需有机碳严重不足^[6],应考虑外加有机碳源以保证脱氮效果。

1.3 工艺流程的选择

该工程废水属于高浓度有机废水,厌氧消化沼液含油量较高,水质波动较大,因此应综合考虑采用除油效果好、抗冲击负荷能力强,对有机物去除率高的处理工艺^[7]。因此预处理段设置两级隔油池+凹涡气浮机,以保证动植物油脂的去除。考虑到污水处理量较小、水量水质波动较大,在隔油池及气浮池后设置调节池以调节水量及水质。对于总磷的去除,除了依托生物除磷外,在预处理段设置气浮措施能够进行化学除磷,在工艺段末端增设混凝沉淀处理构筑物,通过添加PAC+PAM化学除磷药剂,确保总磷的去除。

在选择生化处理段时,着重考虑脱氮效果好,对氨氮、COD等去除率高的处理工艺。根据国内沼液处理工程实践经验,生化段普遍采用两级AOAO+UF处理工艺,COD去除率可达92%以上,氨氮去除率可达98%^[8],但考虑到厌氧消化后沼液中仍可能存在大量难降解有机物,为保证出水稳定达标,系统在超滤系统后设置Fenton高级氧化工艺,确保难降解COD的去除。

AOAO—UF工艺段的超滤膜分为内置膜及外置膜。外置式超滤膜过滤精度高、通量大,能承受非常高的污泥浓度,采用错流过滤方式,膜管中不易堵塞,能够连续出水^[9]。外置膜在线清洗容易,且清洗频率低,能够节省运行过程中的费用、降低人工操作难度等^[10],因此,设计采用外置超滤膜系统作为膜生物反应器的膜系统。

综上分析,项目最终选定预处理—AOAO—UF—Fenton—混凝沉淀工艺,工艺流程见图1。

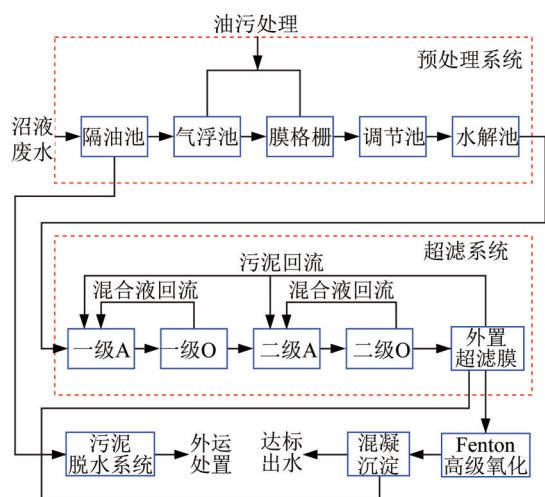


图1 污水处理工艺流程

Fig. 1 Technological process of wastewater treatment

2 主要处理单元工艺设计

2.1 预处理系统

预处理系统包括隔油池、气浮池、转鼓膜格栅、调节池及水解酸化池。

(1)隔油池。隔油池设置两级除油,池体尺寸为 $6.5\text{ m}\times 2.5\text{ m}\times 4.0\text{ m}$,有效水深 3 m ,水平流速为 $2\sim 4\text{ mm/s}$ 。

(2)气浮池。气浮系统采用气浮一体化设备,处理量为 $5\text{ m}^3/\text{h}$,设备前端的曝气段设有1个曝气室、1个进水口、2个絮凝剂加药口(调试后选择其中一个加药口加药)。设备后端设有1个出水口,侧面设有1个排渣口,1个底部泥斗排泥放空口。设备沿水流方向的水面出口一侧设有刮渣“斜岸”,具有浓缩、富集和撇渣的作用。刮渣板将浮渣刮至螺旋出渣槽而排出。设备出水区设有可调节高度的溢流堰板,便于调节控制水位和停机前升高水位刮除浮渣。设备出水自流排放。气浮出水后,经过转鼓膜格栅进一步去除悬浮杂质,膜格栅孔径 1 mm ,转鼓膜格栅位于调试池上方安装。

(3)调节池及水解酸化池。调节池尺寸为 $6.5\text{ m}\times 5.3\text{ m}\times 6.0\text{ m}$,有效水深 5 m ,停留时间为 2.8 d ;水解酸化池尺寸为 $8.5\text{ m}\times 3.5\text{ m}\times 6.0\text{ m}$,有效水深 5 m ,停留时间为 2.5 d 。水解池内部水流呈推流式,池内设置弹性立体填料,其截面积为 45 m^2 , $L=2.5\text{ m}$, $D=150\text{ mm}$ 。水解酸化池主要起到减小有机物分子质量,将复杂有机物部分分解为丁酸、乙酸等小分子有机酸,有利于后续

好氧段处理的作用。另外考虑到沼液中含盐量较高,有一定腐蚀作用,工程所有污水处理构筑物内部均采用内衬玻璃钢防腐材料^[11]。

2.2 超滤系统

超滤系统(UF)工艺由一级AO硝化反硝化、二级AO强化硝化反硝化、外置式超滤膜装置三部分组成。

(1)AOAO池。生化进水池中废水提升进入二级A/O系统。首先进入一级A池(缺氧池),在缺氧条件下反硝化菌利用污水中的有机碳将硝酸盐还原为氮气,在脱氮的同时降低了有机负荷,并补充了后续硝化反应的碱度,同时部分悬浮污染物被吸附并分解,提高了污水的可生化性,随后污水通过推流进入一级O池(好氧池),在好氧条件下残余的有机物被进一步降解,同时硝化菌将污水中的氨氮氧化为硝酸盐氮和亚硝酸盐氮,通过回流泵将硝态氮回流至前段A池进行脱氮。为了增强沼液处理系统的总氮去除效果,增加二级硝化反硝化系统,在二级反硝化池中投加碳源,以保证反硝化所需碳源,出水进入二级硝化池中,将多余碳源去除。该工程碳源选择葡萄糖(纯度90%),投加量为 450.60 kg/d 。二级O池出水进入外置超滤膜系统,系统污泥从超滤回流至一级A池和二级A池,污泥回流量为 $20\text{ m}^3/\text{h}$,内回流分别从一级O池回流至一级A池,二级O池回流至二级A池,硝化液回流量分别为 40 、 $20\text{ m}^3/\text{h}$ 。

UF系统能将污泥质量浓度提高到 $8\ 000\sim 15\ 000\text{ mg/L}$,强化了生物处理效果,提高对有机物、氨氮、总氮的去除效果。膜系统污泥回流至A池保证一定的污泥浓度。

两级AO生化池与预处理构筑物合建,生化处理部分为一组矩形钢筋混凝土池,池体尺寸为 $22.1\text{ m}\times 8.5\text{ m}\times 6.0\text{ m}$,有效水深 5.0 m ,其中一级A池有效池容 300 m^3 ,一级O池有效池容 425 m^3 ,二级A池有效池容 80 m^3 ,二级O池有效池容 80 m^3 ,总有效池容为 885 m^3 ,总停留时间为 322 h 。主要设计参数:设计水温 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 、单位污泥脱氮速率(以 NO_3^--N 计) $0.07\text{ kg}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ 、单位污泥硝化负荷(以 NH_4^+-N 计) $0.03\text{ kg}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ 、单位COD产泥系数(以SS计) $0.16\text{ kg}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ 、污泥COD负荷(以COD计) $0.18\text{ kg}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ 、总氮负荷 $0.034\text{ kg}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ 、混合液回流比 $5\sim 15$ 倍、污泥回流比 $8\sim 10$ 倍、平均MLSS $12\ 000\text{ mg/L}$ 、剩余污泥量(以绝干污泥计) 118 kg/d 、总停留时间 322 h 、气水比 $313:1$ 。

(2)外置超滤膜装置。超滤膜为外置错流管式超滤膜,孔径为30 nm,膜管内滤速为3~4 m/s,设计膜通量为60 L/(m²·h),设计膜面积为46 m²。超滤膜设置在膜处理车间内,车间占地面积为12.7 m×8.6 m,主要分为膜设备区、泵组区域、在线清洗区域。

2.3 Fenton 高级氧化

Fenton 高级氧化作为项目的深度处理安保措施,主要对难降解有机物继续深化处理,确保水质能够达到达标排放。在酸性环境中,H₂O₂在Fe²⁺存在下生成强氧化性的羟基自由基(·OH),并引发产生更多的活性氧,以实现有机物的降解。Fenton 高级氧化系统主要装置由Fenton反应塔、酸碱加药装置、过氧化氢加药装置、硫酸亚铁加药装置组成。酸碱加药分别采用质量分数(下同)为50%的硫酸和10%氢氧化钠。

设备主要参数:Fenton反应塔1座,尺寸为D 2.5 m×3.5 m,塔体采用碳钢衬塑材质,搅拌桨叶采用钢衬塑材质;酸碱加药装置各1套,包含1 m³加药箱,上侧带搅拌电机,加药泵采用隔膜计量泵,Q=20 L/h,H=10 m;过氧化氢加药装置包含3 m³加药箱,上侧带搅拌电机,加药泵采用隔膜计量泵,Q=2 000 L/h,H=10 m;硫酸亚铁加药装置包含1 m³加药箱,上侧带搅拌电机,加药泵采用隔膜计量泵,Q=200 L/h,H=50 m。

2.4 混凝沉淀池

混凝沉淀池是水处理工艺去除SS和化学除磷的主要处理工艺,也是Fenton高级氧化的组合部分。混凝过程通过向水中投加药剂(通常为混凝剂PAC及助凝剂PAM),使水中难以沉淀的颗粒互相聚合而形成胶体,并与水体中的杂质结合形成更大的絮凝体。絮凝体不仅能吸附悬浮物,还能吸附部分细菌和溶解性物质。絮凝体通过吸附,体积增大而下沉。

该工程混凝池采用混合池和絮凝池组合,组合尺寸为1.8 m×4.1 m×4 m,其中混合池和絮凝池分别设置机械搅拌机,投加药剂为PAC+PAM,投药装置平均速度梯度为300 s⁻¹,混合时间为110 s,絮凝池絮凝时间为20 min。沉淀池采用斜管沉淀池,尺寸为1.80 m×1.85 m×6 m,上升流速控制在6~10 mm/s。

3 设计总结及关键问题分析

(1)两级隔油+气浮池组合工艺对于油脂的去除十分关键,在预处理过程中应尽可能提高油脂去除率,降低后续污水处理中油脂去除负荷。

(2)超滤系统中外置膜的膜通量大、污泥浓度高、易清洗且不易堵塞,处理效果较好,在沼液废水处理中应用广泛,但外置膜更换成本较内置膜略高,因此在要求运行成本较低的工程中应斟酌选用。

(3)多级AO脱氮过程中,碳源投加量较大,造成整体运行成本增加,考虑到餐厨垃圾预处理后且进入厌氧系统前的浆液能分流一部分作为补充碳源,会大大降低运行成本。此项措施已在国内个别餐厨垃圾处理工程中应用,效果待进一步考证,以确定是否值得推广应用。

(4)沼液废水的含盐量较高,对于有明确地标要求的地区,应提前做好调研,是否对出水含盐量有处理要求。同时在水处理构筑物、工艺设备和管道的设计中,应重点考虑防腐材质的选用。

(5)Fenton 高级氧化系统主要为超滤后续的安保处理措施,当厌氧处理后的沼液水质较好时,多级AO—超滤处理系统一般能够满足出水要求,此时Fenton 高级氧化系统可进行超越,节省运行成本。

(6)整个系统设计应考虑一定的余量,以保证非洲猪瘟发生或者进料超负荷时,沼液处理系统的处理能力仍能满足要求。

4 运行效果与成本分析

4.1 实际运行效果

该工程经过2个多月的调试,出水水质稳定达标,运行期间进出水水质见表2。

表2 进出水水质

Table 2 Influent and effluent quality							mg/L
项目	COD _{Cr}	BOD ₅	SS	TN	NH ₃ -N	TP	动植物油
平均进水	13 950	7 631	6 120	5090	3 750	277	1 280
预处理平均出水	12 552	7220	3 200	4850	3030	39	70
超滤平均出水	273	96	28	67	19	15	—
最终平均出水	260	95	20	67	19	2	—
出水标准	≤300	≤250	≤200	≤70	≤25	≤4	≤100

4.2 工程成本分析

该工程沼液处理部分总投资470万元,其中工艺设备投资为350万元。经测算年处理污水量2.19万t,年直接经营费用为91.33万元,药剂成本分析见表3。

另有膜更换维修费,每5 a更换1次,每次费用160 000元,折合水处理费用为1.46元/t;自来水按2.9元/t计,用量为0.15万t/a,折合水处理费用为0.20元/t;电费按0.57元/(kW·h)计,使用量68.33万kW·h/a,折合

表3 药剂成本分析

Table 3 Cost analysis

项目	投加质量浓度/(mg·L ⁻¹)	药剂价格/(元·t ⁻¹)	能耗/(元·t ⁻¹)	处理单价/(元·t ⁻¹)
葡萄糖(90%)	7 510.00	1 500	164.47	11.27
硫酸(50%)	52.97	360	1.16	0.02
氢氧化钠(10%)	170.00	1 300	3.72	0.22
气浮用PAC	70.00	800	1.53	0.06
气浮用PAM	10.00	10 000	0.22	0.10
混凝用PAC	260.00	800	5.69	0.21
混凝用PAM	10.00	10 000	0.22	0.10
污泥脱水用PAM	25.60	10 000	0.56	0.26
柠檬酸(99%)	100.00	4 300	2.19	0.43
次氯酸钠(10%)	10.00	1 200	0.22	0.01

水处理费用为17.79元/t;人员共3人,每人工资按7万元/a计,折合水处理费用为9.59元/t。合计单位水处理费用为41.70元。

以上经营成本较其他餐厨厂沼液处理经营成本偏高,原因分析如下:

(1)进水水质较差,进水TN高达5 000 mg/L,TP为500 mg/L,BOD₅为8 000 mg/L,油脂高达1 500 mg/L,反硝化碳源严重不足,需要外加大量碳源,除磷除油时PAC投加量较常规水厂投加量多,导致成本偏高;

(2)外置超滤膜存在保养更换费用,折单价为1.46元/t,成本高于其他采用内置膜系统处理工艺的吨水成本;

(3)由于该工程处理规模较小,不能形成规模效益,导致吨水电耗偏大。

5 结论

采用预处理—AOAO—外置UF—Fenton高级氧化—混凝沉淀工艺处理餐厨沼液废水,出水稳定达到《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)中的三级标准及与协议标准要求,对于西南区域同类水质特性的餐厨沼液处理具有一定参考价值。

参考文献

- [1] 文斐. 我国餐厨垃圾处理工艺技术路线选择与分析[J]. 环境与发展, 2020, 32(9): 107.
WEN Fei. Selection and analysis of food waste treatment process in China[J]. Environment and Development, 2020, 32(9): 107.
- [2] 耿震, 王罕. 餐厨废弃物厌氧消化沼液处理工艺设计[J]. 中国给水排水, 2019, 35(22): 62-65.

GENG Zhen, WANG Han. Process design of anaerobic digestion biogas slurry treatment for kitchen waste [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(22): 62-65.

- [3] 陈冠益. 餐厨垃圾废物资源综合利用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2018: 20-24.
CHEN Guanyi. Comprehensive utilization of kitchen garbage waste resources[M]. Beijing: Chemical Industrial Press, 2018: 20-24.
- [4] 巩有奎, 贾文振, 彭永臻. 不同碳源反硝化过程NO₂⁻及N₂O积累特性[J]. 工业水处理, 2019, 39(9): 28-32.
GONG Youkui, JIA Wenzhen, PENG Yongzhen. Effect of carbon sources on nitrite and N₂O accumulation during denitrification process[J]. Industrial Water Treatment, 2019, 39(9): 28-32.
- [5] 住房和城乡建设部. 室外排水设计标准: GB 50014—2021[S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.
- [6] 刘轩, 王艳兵, 牛奕娜, 等. 污水处理工程设计中碳源投加计算方法及应用实例[J]. 广东化工, 2013, 40(11): 141-142.
LIU Xuan, WANG Yanbing, NIU Yi'na, et al. Calculation methodology of the addition of carbon sources and its application in the design of sewage treatment engineering[J]. Guangdong Chemical Industry, 2013, 40(11): 141-142.
- [7] 汤萌萌, 张亚琳, 丁西明, 等. 预处理/MBR/臭氧高级氧化工艺处理餐厨垃圾废水[J]. 中国给水排水, 2017, 33(22): 71-73.
TANG Mengmeng, ZHANG Yalin, DING Ximing, et al. Treatment of kitchen wastewater with pretreatment unit/MBR/ozon-based advanced oxidation process[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(22): 71-73.
- [8] 罗威威, 孙廷岳, 黄春华. 预处理/厌氧/MBR/RO工艺处理垃圾焚烧渗滤液[J]. 工业水处理, 2021, 41(7): 148-151.
LUO Weiwei, SUN Tingyue, HUANG Chunhua. Treatment leachate from MSW incineration with pretreatment/anaerobic/MBR/RO [J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(7): 148-151.
- [9] 宋欣欣, 闵海华, 丁西明. 预处理+两级A/O+UF+Fenton+BAF处理餐厨沼液[J]. 中国给水排水, 2021, 37(8): 143-148.
SONG Xinxin, MIN Haihua, DING Ximing. Treatment of food waste biogas slurry by process of pretreatment, two-stage A/O, UF, Fenton advanced oxidation and BAF [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(8): 143-148.
- [10] 杨曦, 李亚峰, 陈昱奇, 等. 厌氧+A/O—MBR+NF+RO工艺在餐厨垃圾渗滤液处理中的应用[J]. 现代化工, 2018, 38(5): 112-115.
YANG Xi, LI Yafeng, CHEN Yuqi, et al. Application of anaerobic+A/O—MBR+NF+RO in treating with kitchen waste leachate [J]. Modern Chemical Industry, 2018, 38(5): 112-115.
- [11] 住房和城乡建设部. 工业建筑防腐蚀设计标准: GB/T 50046—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.

[作者简介] 曹猛(1986—), 硕士, 高级工程师。电话: 15566840369, E-mail: dlszy_caomeng@126.com。

[收稿日期] 2022-11-07(修改稿)