

填料对地下渗滤系统污水处理效果的影响

汪宏¹, 严群^{2*}, 李建¹, 苏占荣³, 李森林³, 田帅⁴

(1. 中国市政工程西北设计研究院有限公司, 甘肃兰州 730000;

2. 江西理工大学土木与测绘工程学院, 江西赣州 341000;

3. 内蒙古博源控股集团有限公司, 内蒙古鄂尔多斯 017000;

4. 内蒙古博源银根水务有限公司, 内蒙古阿拉善 750300)

摘要:构建了2套地下渗滤系统,考察了土壤-煤渣分层装填(系统1)及土壤-煤渣-生物基质分层装填(系统2)在15 cm/d运行工况下的污水处理效果,分析填料对地下渗滤系统的影响。结果表明,运行稳定后,2系统对COD和TP的平均去除率均高于89%,对NH₄⁺-N的平均去除率均高于75%;系统1、2对TN平均去除率分别为60.55%、52.95%;分层装填生物基质可改善系统氧化还原环境,并释放有机物,补充反硝化所需碳源,有效提高系统脱氮效果。

关键词:地下渗滤系统;煤渣;分层装填;污水处理

中图分类号:X703

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)S2-0476-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.S2.083

Impact of filling materials on treatment effect of domestic sewage by subsurface infiltration system

WANG Hong¹, YAN Qun^{2*}, LI Jian¹, SU Zhan-rong³, LI Sen-lin³, TIAN Shuai⁴

(1. CSCEC AECOM Consultants Co., Ltd., Lanzhou 730000, China;

2. School of Civil and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology,

Ganzhou 341000, China; 3. Inner Mongolia Boyuan Holding Group Co., Ltd., Ordos 017000, China;

4. Inner Mongolia Boyuan Yingen Water Co., Ltd., Alxa 750300, China)

Abstract:Two subsurface infiltration systems are established in a small-scale experiment with soil, coal cinder and bio-substrate in delamination. S1 system is loaded with soil and coal cinder, and S2 system is loaded with soil, coal cinder and bio-substrate. The sewage treatment effect of two systems is evaluated under a hydraulic loading of 15 cm/d, and the impact of filling materials on subsurface infiltration system is analyzed. It is demonstrated that the removal rates of COD, TP in both systems exceed 89%, and that of ammoniacal nitrogen exceeds 75%. The removal rate of TN in S1 is 60.55% and 52.95% in S2. The layered filling of bio-substrate can improve the redox environment, release organic matter to replenish carbon source for the denitrification stage, and enhance the removal efficiency of TN.

Key words: subsurface infiltration system; coal cinder; layered filling; sewage treatment

作为自然净化结合人工工艺的污水就地处理技术,地下渗滤系统(SWIS)具有污水处理效果显著、投资成本低、管理方便等优点^[1-2],为农村分散式、小流量污水处理提供了有效途径,可切实解决农村污水治理难题。

填料是影响SWIS污水处理效果的重要因素^[3-5],Li等^[6]发现,与纯草甸棕壤填料相比,优化系统填料为65%草甸棕壤+30%煤渣+5%脱水污泥,在12.5 cm/d运行工况下,优化后系统中硝化菌和反硝化菌数量均会增加,对NH₄⁺-N及TN的去除率分别提高了26.8%、33.8%;张思等^[7]对比了分层与混合装填70%土壤+5%腐熟牛粪+25%粉煤灰填

料系统的污水处理效果,在10 cm/d运行工况下,填料分层装填后TN去除率提高了5%,混合装填系统对NH₄⁺-N去除率较分层装填系统提高了12%。

构建了2小试系统,系统1内分层装填土壤-煤渣-生物基质,系统2内分层装填土壤-煤渣,考察2系统在15 cm/d运行工况下的污水处理效果,探究优化填料成分及装填结构对地下渗滤系统污水处理效果的影响。

1 实验概况

1.1 装置概况

小试系统为硬质聚氯乙烯管(UPVC)内分层装

收稿日期:2025-02-20;修回日期:2025-08-13

作者简介:汪宏(1990-),男,硕士,工程师,注册公用设备工程师,研究方向为水处理及水污染控制,16074800532@qq.com;严群(1973-),女,博士,副教授,研究方向为污水渗滤处理技术及水污染控制,通讯联系人,yanqun8219893@163.com。

填填料,管尺寸为:高度 $H=100\text{ cm}$,直径 $\varnothing=20\text{ cm}$ 。实验中,以体积比 $V_{\text{干化污泥}}:V_{\text{煤渣}}=1:6$ 充分混合后作为生物基质^[1]。系统取样口为塑料可拆卸式螺母及螺帽,仅取样时打开取样,平时关闭。关闭后封闭性良好。2 系统填料成分及装填结构如表 1 所示。2 小试系统填料装填如图 1 所示,取样口设置如图 2 所示。

表 1 小试系统填料一览表

系统名称	小试系统净尺寸/cm	填料层厚度/cm	填料成分及装填结构
系统 1	$\varnothing * H=20 * 100$	95	土壤-煤渣-生物基质分层装填:由上至下依次为 5 cm 砂、5 cm 红壤、20 cm 煤渣、40 cm 生物基质、20 cm 红壤、5 cm 砂 ^[1]
系统 2	$\varnothing * H=20 * 100$	95	土壤-煤渣分层装填:由上至下依次为 5 cm 砂、5 cm 红壤、60 cm 煤渣、20 cm 红壤、5 cm 砂 ^[1]

注:实验所用土壤、煤渣、干化污泥均经自然干化后过 2 mm 筛。

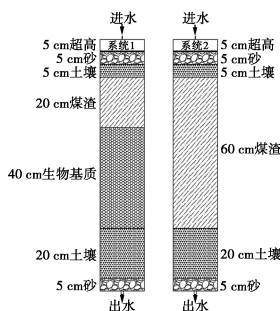


图 1 小试系统装填结构示意图

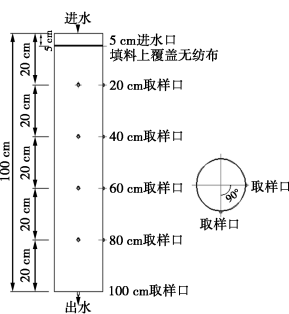


图 2 小试系统取样口示意

1.2 实验方法

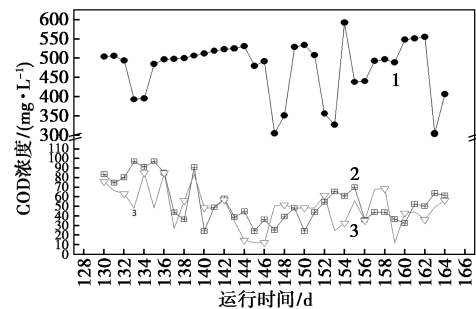
试验用水为模拟生活污水,实验期间,污水 COD、TN、TP、 NH_4^+-N 浓度分别为 304.76~555.57、29.20~46.72、8.37~16.27、23.54~51.60 mg/L。水质检测项目包括有机物(COD)、总磷(TP)、总氮(TN)、氨氮(NH_4^+-N),测定方法参照《水和废水监

测分析方法》(第四版)^[8]。

2 结果与讨论

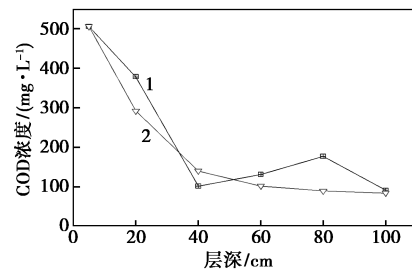
2.1 COD 去除效果

在进水 COD 平均浓度为 474.00 mg/L 的条件下,2 系统对 COD 去除效果见图 3(a);在当日进水 COD 浓度为 506.67 mg/L 时,系统内 COD 浓度在填料层深上变化规律见图 3(b)。



1—进水;2—系统 1 出水;3—系统 2 出水

(a) COD 去除效果



1—系统 1;2—系统 2

(b) COD 沿程变化

图 3 2 系统 COD 去除效果与沿程变化

由图 3(a)可知,运行稳定后,系统 1、2 的 COD 平均去除率为 89.18%、90.0%,平均出水浓度为 49.45、45.76 mg/L;在图 3(b)中,2 系统内 COD 浓度随填料深度增加而降低,在 40 cm 及以上层深处填料中累计去除 70%~80% 有机物。其中,20 cm 层深处,系统 1、2 的 COD 累计去除率分别为 25.26%、45.36%,此时 COD 浓度分别为 378.66、292.06 mg/L;40 cm 层深处,系统 1、2 的 COD 累计去除率分别为 80.0%、72.43%,此时 COD 浓度分别为 101.33、139.68 mg/L。

2 装置均有良好的 COD 去除效果,系统 1 的 COD 去除效果略低于系统 2,主要为:①系统 2 内填料以煤渣为主,具有表面积大、不规则多孔结构等构造特点^[9-10],污水流经时,会形成适宜的固液气三相,可促进微生物生长及污水有机物处理效果^[11];②系统 1 在 40~80 cm 层深分层装填生物基质,在

污水流经该层时,生物基质释放有机物,使出水 COD 浓度偏高。

2.2 总磷去除效果

在进水 TP 平均浓度为 12.22 mg/L 的条件下,2 系统对 TP 去除效果见图 4(a);在当日进水 TP 浓度为 9.26 mg/L 时,系统内 TP 浓度在填料层深上变化规律见图 4(b)。

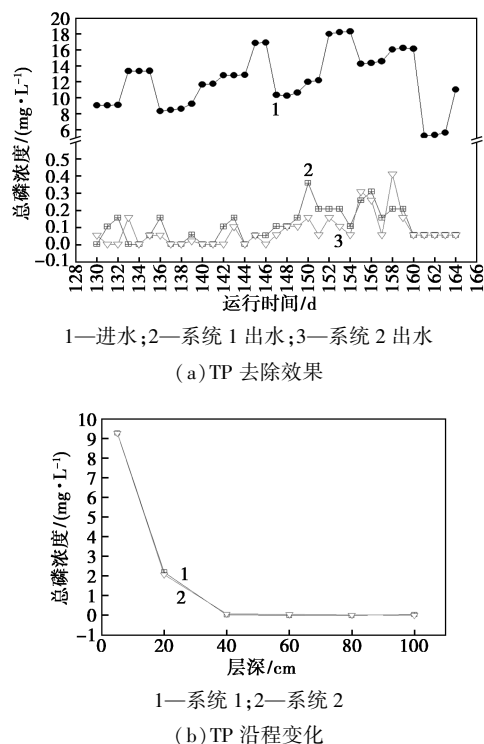


图 4 2 系统 TP 去除效果与沿程变化

由图 4(a)可知,运行稳定后,系统 1、系统 2 的 TP 平均去除率分别为 99.09%、99.34%,平均出水浓度分别为 0.11、0.08 mg/L;在图 4(b)中,2 系统内 TP 浓度随填料层深增加而降低,与 COD 去除规律类似,在 40 cm 及以上层深处填料中可累计去除 99% 的 TP。其中,20 cm 层深处,系统 1、2 的 TP 累计去除率分别为 76.12%、77.44%,此时 TP 浓度分别为 2.21、2.09 mg/L;40 cm 层深处,系统 1、2 的 TP 累计去除率分别为 99.53%、99.09%,此时 COD 浓度分别为 0.04、0.08 mg/L。

系统对 TP 的去除主要依赖于填料吸附作用^[1,12-13],煤渣对磷的吸附能力较强,且含有大量的 Ca²⁺、Al³⁺ 等离子,加之表面积较大,孔隙率高^[14-15],故 2 系统保持了较高的 TP 去除水平。

2.3 氨氮去除效果

在进水 NH₄⁺-N 平均浓度为 30.46 mg/L 的条件下,2 系统对 NH₄⁺-N 去除效果见图 5(a);在当日进

水 NH₄⁺-N 浓度为 51.60 mg/L 时,系统内 NH₄⁺-N 浓度在填料层深上变化规律见图 5(b)。

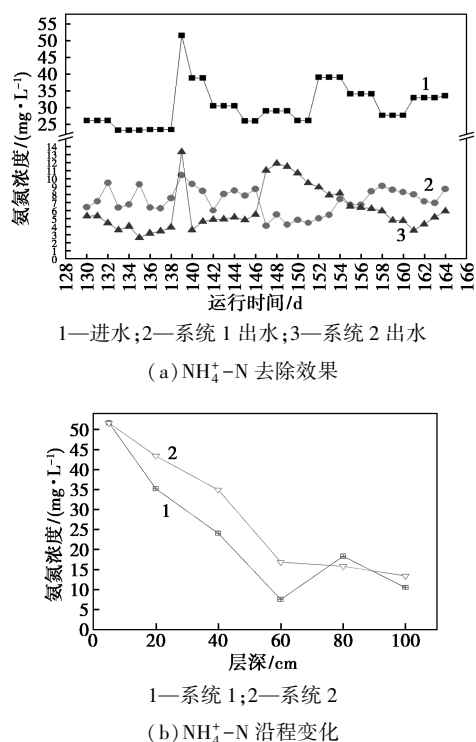


图 5 2 装置 NH₄⁺-N 去除效果与沿程变化

由图 5(a)可知,运行稳定后,系统 1、系统 2 的 NH₄⁺-N 平均去除率分别为 75.48%、79.54%,平均出水浓度分别为 7.26、6.21 mg/L。分层装填生物基质系统对提高 NH₄⁺-N 去除率不显著;在图 5(b)中,2 系统内 NH₄⁺-N 浓度随填料层深增加而降低,在 60 cm 及以上层深处填料中可累计去除 65%~85% 的 NH₄⁺-N。其中,在 20 cm 层深处,系统 1、2 对 NH₄⁺-N 去除率分别为 31.81%、15.91%,此时 NH₄⁺-N 浓度分别为 35.19、43.39 mg/L;40 cm 层深处,系统 1、2 对 NH₄⁺-N 去除率分别为 53.37%、32.34%,此时 NH₄⁺-N 浓度分别为 24.06、34.92 mg/L;60 cm 层深处,系统 1、2 的 NH₄⁺-N 去除率分别为 85.5%、67.39%,此时 NH₄⁺-N 浓度分别为 7.48、16.83 mg/L。系统 1 内 NH₄⁺-N 浓度在 60~100 cm 层深处先升高后降低,这表明系统 1 在 60~100 cm 层深处形成氧化还原微环境,为系统脱氮创造良好条件。

系统复氧能力是影响 NH₄⁺-N 去除效果的最主要因素^[16-17],随着运行时间及填料层深的增加,系统内溶解氧含量逐步下降,系统 2 内主要分层装填煤渣,孔隙内可存留溶解氧,且装置 20~40 cm 层深处,因填料在 15 cm/d 工况下运行时,该层深填料处于非饱水状态,为系统提供复氧条件,故系统 2 内以

氧化环境为主;在20~40 cm层深处,系统1内亦装填煤渣填料,该层深处,以氧化环境为主;在40~80 cm层深处,系统1装填生物基质,渗透性能较煤渣低,复氧能力较弱,会形成氧化还原微环境;在60 cm层深处, NH_4^+-N 浓度最低,硝化作用明显,60~100 cm层深, NH_4^+-N 浓度先升高后降低,表明氨化及硝化作用在该层均存在。系统1在35~75 cm层高分层装填生物基质可改善装置内氧化还原环境,促进脱氮效果。

2.4 总氮去除效果

在进水 TN 平均浓度为 36.34 mg/L 的条件下,2 系统对 TN 去除效果见图 6(a);在当日进水 TN 浓度为 56.61 mg/L 时,系统内 TN 浓度在填料层深上变化规律见图 6(b)。

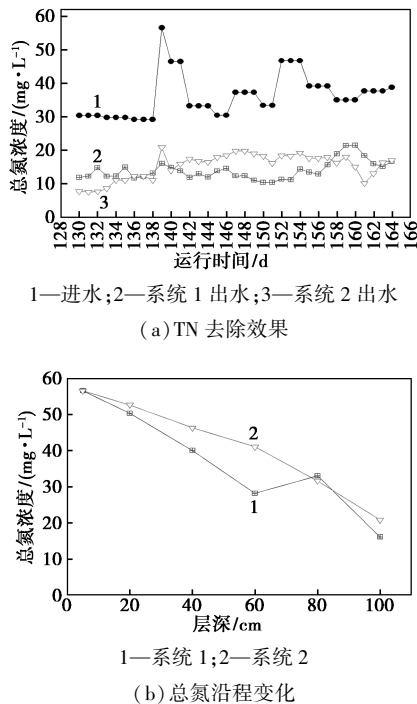


图6 2系统TN去除效果与总氮沿程变化

由图6(a)可知,运行稳定后,系统1、系统2对TN平均去除率分别为60.55%、52.95%,平均出水浓度分别为14.14、17.00 mg/L。图6(b)中,2系统内TN浓度随填料深度增加有降低趋势;在100 cm层深处,2系统出水TN浓度均达到最低,分别为16.11、20.86 mg/L。系统1内TN去除主要在40~60 cm层深及80~100 cm层深处。其中,在40 cm层深处,TN累计去除率为27.46%,TN浓度为41.06 mg/L;在60 cm层深处,TN累计去除率为50.14%,TN浓度为28.23 mg/L;在80 cm层深处,TN累计去除率为38.07%,TN浓度为35.06 mg/L;

在100 cm层深处,TN累计去除率为71.58%,TN浓度为16.09 mg/L。系统2内TN去除主要在80~100 cm层深。其中,在80 cm层深处,TN累计去除率为44.06%,TN浓度为31.67 mg/L;在100 cm层深处,TN累计去除率为63.14%,TN浓度为20.87 mg/L

影响SWIS脱氮效果因素较多,其中,系统内氧化还原环境和污水中碳氮比(C/N)为主要因素^[1,18-19],随系统运行周期增加,填料颗粒间孔隙会减小,导致填料整体渗透性降低,系统复氧能力逐步减小,沿层深方向会形成局部好氧-厌氧交替微环境。另外,系统运行时,在40 cm及以上层深填料已去除70%~80%的COD,污水中的有机物含量不足,污水C/N较低,抑制了反硝化反应,致使脱氮效果欠佳。

系统1较系统2的TN平均去除率提高了7.6%,分析原因:①2系统内装填煤渣填料的渗透性好,污水流经40 cm及以上层深填料时,停留时间相对较短,在40 cm及以上层深内为非饱水状态,该层填料有一定的复氧能力,故2系统内0~40 cm层深内均以氧化环境为主;随着层深及运行周期的增加,系统复氧能力变差,在40 cm以下层深会逐渐形成局部还原环境,这有利于总氮的去除;②结合填料装填结构,系统2内75 cm层深以上为煤渣层,系统1内35 cm层深以上为煤渣层,35~75 cm层深为生物基质,渗透性低于煤渣,系统1内局部还原环境优于系统2;③分析有机物沿程变化,系统1、系统2在60 cm层深处C/N分别为4.26、2.47,表明分层装填生物基质优化填料结构层后,系统2在40~80 cm层深会释放有机物,提高污水C/N,促进了系统对TN的去除。

综上所述,以煤渣为主要填料分层装填的地下渗滤系统均有良好的COD、TP、 NH_4^+-N 去除效果,对TN去除效果较上述指标欠佳。可通过优化系统填料配比及结构,分层装填生物基质,既能改善装置内氧化还原环境,使得系统内硝化和反硝化反应顺利进行,又能为释放有机物,补充污水反硝化碳源^[1,19],可有效提高系统对TN的去除效果,同时,系统仍保持了较高好的COD、TP和 NH_4^+-N 的去除水平。

3 结论

(1)在15 cm/d工况下,2装置均能稳定运行并有较好的污水处理效果,在平均进水浓度较高时,2

系统对 COD、TP 的平均去除率均高于 89%，对 NH_4^+-N 的平均去除率均高于 75%；对 TN 去除效果较其他指标欠佳，系统 1、系统 2 对 TN 平均去除率分别为 60.55%、52.95%。

(2) 优化系统填料配比及结构，在系统 35~75 cm 层深处分层装填生物基质可提高系统对 TN 的去除效果。优化填料后能改善系统内部氧化还原微环境、释放有机物、补充污水反硝化碳源。同时系统仍保持了对 COD、TP 和 NH_4^+-N 的去除效果。

(3) 基于实际考虑，本实验有一定指导意义。其一，2 系统在 15 cm/d 运行工况均能稳定运行且对污水处理效果较好，在实际应用时，与 6.6 cm/d 相比^[20]，可减少占地面积，节约征地成本；其二，在 35~75 cm 层深分层装填生物基质可提高污水 C/N、改善系统氧化还原环境，与分流进水提高污水 C/N^[21] 工况处理效果相当，且方便运行管理，提升了系统在实际工程中的应用。

参考文献

- [1] 汪宏. 生物基质强化地下渗滤系统脱氮效果及机理研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2016.
- [2] 汪宏, 严群, 张越, 等. 分层填料地下渗滤系统生活污水处理研究[J]. 现代化工, 2016, 36(8): 158-161.
- [3] 董会平, 张昱. 填料对地下渗滤系统处理效果影响研究[J]. 环境科学与管理, 2022, 47(9): 105-107.
- [4] 周子琳, 严群, 丁越, 等. 生物基质对煤渣改良地下渗滤系统脱氮效果的影响[J]. 环境污染与防治, 2020, 42(8): 996-998.
- [5] 王士满, 王鑫, 王洪, 等. 地下渗滤系统基质组配及脱氮效果[J]. 中国给水排水, 2017, 33(17): 89-92.
- [6] Li Y H, Li H B, Wang H, *et al.* Comparison of the treatment performance of bio substrate based and meadow brown soil based subsurface infiltration systems for domestic wastewater treatment[J]. Water Science & Technology, 2013, 63(7): 506-513.
- [7] 张思, 宁国辉, 杨峥峥, 等. 复合填料土壤渗滤系统处理农村生活污水的效果[J]. 环境工程学报, 2014, 8(11): 4625-4630.
- [8] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境出版社, 2002: 210-281.
- [9] 张天永, 王智超, 姜爽, 等. 煤渣在水处理方面的研究应用进展[J]. 现代化工, 2018, 38(3): 1-6.
- [10] 严群, 张越, 汪宏, 等. 煤渣及生物基质渗滤系统强化脱氮研究[J]. 现代化工, 2017, 37(5): 150-153.
- [11] Zhang J, Huang X, Liu C, *et al.* Nitrogen removal enhanced by intermittent operation in a subsurface wastewater infiltration system[J]. Ecology Engineer, 2005, 25(4): 419-428.
- [12] 刘精今, 李小明, 杨麒. 煤渣吸附性能及在废水处理中的应用[J]. 工业用水与废水, 2003, 34(1): 12-15.
- [13] 刘晋, 李晓东, 刘冉, 等. 地下渗滤系统生物基质组成及优化[J]. 环境保护与循环经济, 2016, 36(6): 42-44.
- [14] 郑鹏. 地下渗滤系统处理污水的效果及工程应用研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
- [15] 杨健, 严群, 吴一馨, 等. 不同填料渗滤系统净化生活污水的效果比较[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009, 37(11): 1502-1507.
- [16] 张建, 黄霞, 魏杰, 等. 地下渗滤污水处理系统的氮磷去除机理[J]. 中国环境科学, 2002, 22(5): 438-441.
- [17] Hednark A, Scholz M, Aronsson P, *et al.* Comparison of planted soil infiltration systems for treatment of log yard runoff[J]. Water Environ Res, 2010, 82: 666-669.
- [18] Ji G D, Zhi W, Tan Y F, *et al.* Association of nitrogen micro-cycle functional genes in subsurface wastewater in-filtration systems[J]. Ecol Eng, 2012, 44: 269-277.
- [19] 严群, 汪宏, 卢艳秋, 等. 生物基质强化地下渗滤系统脱氮效果的研究[J]. 中国给水排水, 2017, 33(19): 96-99.
- [20] USEPA. Onsite wastewater treatment systems manual[M]. Washington: USEPA, 2002.
- [21] 张宇智. 进水碳源和运行参数对地下渗滤系统的影响研究[D]. 沈阳: 沈阳师范大学, 2022. ■

优科植保获认定“零碳工厂”

近日, 扬农化工所属优科植保获得北京绿色交易所碳中和认证, 标志着其在全生命周期内实现资源高效利用、能源清洁替代和生产流程低碳化智能化, 成为 2024 年度“零碳”排放生产基地。

近年来, 优科植保聚焦“智造升级绿色赋能”发展导向, 高效利用清洁能源, 深挖节能降碳潜力, 积极创建“零碳工厂”。依据工厂实际运营情况, 企业通过加强重点耗

能车间和设备的能耗异常分析, 及时更换高耗能低效率电机设备、淘汰高碳能源, 有效减少能源浪费, 实现二氧化碳减排近百吨。通过打造“零碳工厂”, 扬农优科 2024 年产量提升 15%, 吨产品二氧化碳排放量降低 20.28%。

未来, 优科植保将持续促进能源低碳化和高效利用, 科学规划生产全流程碳管理, 构建全方位、多层次的碳达峰碳中和体系。

(扬农化工)