

采煤沉陷区“纳米膜漂浮水稻”种植方法研究

傅宇航, 李小龙*, 周光, 陈永胜, 杨金香, 云宇, 王子强, 王彬, 褚晨皓

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2026年6月23日; 录用日期: 2026年7月23日; 发布日期: 2026年9月10日

摘要

针对采煤沉陷水域污染及传统浮床水稻栽培中基质养分易淋失、规模化布设稳定性不足等问题, 本研究提出纳米膜-漂浮水稻复合栽培模式, 以兼顾水域生态修复与失地复耕需求。研究构建6 m × 4 m标准化浮床单元, 由3块6 m × 1 m浮板通过不锈钢紧固件拼装, 并采用DN50 PE热熔管材围焊加固; 在种植杯底部铺设纳米核孔膜, 配合1 cm陶粒层和上层栽培基质, 形成“纳米膜阻渗-陶粒吸附-基质供养”的复合控水保肥结构。田间采用5个浮床单元连片布设, 并通过水泥锚墩六点锚固和之字形排列, 提高浮床抗风浪及适应水位波动的能力。同时, 配套集中育苗、无人机植保、诱虫灯防虫和叶面补肥等管护措施。结果表明, 该模式利用纳米膜透水阻肥特性及陶粒对氮、磷的吸附缓释作用, 可有效减少养分淋失, 降低水体总氮、总磷含量, 并提升溶解氧水平, 为采煤沉陷区水面复耕和水体生态修复提供了可行技术路径。

关键词

采煤沉陷积水区, 漂浮水稻, 氮磷吸附, 纳米膜模式, 水环境治理

Study on Planting Method of “Nano-Membrane Floating Rice” in Coal Mining Subsidence Areas

Yuhang Fu, Xiaolong Li*, Guang Zhou, Yongsheng Chen, Jinxiang Yang, Yu Yun, Ziqiang Wang, Bin Wang, Chenhao Chu

School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: June 23, 2026; accepted: July 23, 2026; published: September 10, 2026

*通讯作者。

文章引用: 傅宇航, 李小龙, 周光, 陈永胜, 杨金香, 云宇, 王子强, 王彬, 褚晨皓. 采煤沉陷区“纳米膜漂浮水稻”种植方法研究[J]. 矿山工程, 2026, 14(5): 1284-1292. DOI: 10.12677/me.2026.145127

Abstract

To address water pollution in coal-mining subsidence areas and the limitations of traditional floating-bed rice cultivation, including severe nutrient leaching from the substrate and insufficient stability for large-scale deployment, this study proposed a nano-membrane-floating rice cultivation system that integrates aquatic ecological restoration with reclaimed land production. A standardized floating-bed module measuring 6 m × 4 m was constructed using three 6 m × 1 m flotation boards assembled with stainless-steel fasteners and reinforced by DN50 PE hot-melt pipes. At the bottom of each planting cup, a nano-scale nuclear pore membrane was installed, together with a 1 cm ceramsite layer and an upper cultivation substrate, forming a composite water-retention and nutrient-preservation structure characterized by “membrane seepage control-ceramsite adsorption-substrate supply”. In the field, five modules were deployed in a contiguous pattern and anchored with a six-point cement mooring system in a zigzag arrangement to enhance resistance to wind and wave disturbances and water-level fluctuations. In addition, a management system including centralized seedling raising, UAV-based pest control, insect-trap lamps, and foliar fertilization was implemented. The results indicate that the proposed system, by combining the water-permeable but nutrient-retentive properties of the nano-membrane with the adsorption and slow-release effects of ceramsite on nitrogen and phosphorus, effectively reduced nutrient loss, lowered total nitrogen and total phosphorus concentrations in the water body, and increased dissolved oxygen levels. This approach provides a feasible technical pathway for both water-surface reclamation and aquatic ecological restoration in coal-mining subsidence areas.

Keywords

Coal Mining Subsidence Waterlogged Area, Floating Rice, Nitrogen and Phosphorus Adsorption, Nano-Membrane Mode, Water Environment Treatment

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

煤炭开采导致岩层与地表沉降,形成采煤沉陷水域,此类水体污染物主要为有机物和营养盐,易引发水体富营养化[1][2],破坏生态系统结构与功能,并造成土地资源损失,制约矿区可持续发展[3]。现有采煤沉陷区治理修复技术主要包括以地形重塑和植被恢复为主的物理修复[4]、蓄水供水为目标的水资源利用[5]、湿地构建为核心的生态修复[6]。这些治理修复模式普遍存在投入大、回报低、氮磷削减效率有限等问题,且未能实现水体多界面协同。

漂浮水稻种植采用“漂浮板 + 种植杯”模式,在为水稻提供生长空间的同时,可调控水体和沉积物中的氮、磷含量。作为少数可在水面环境中种植的主粮作物,水稻不仅能够改善水质,还有助于保障粮食安全[7]。漂浮水稻种植杯具和基质有一定孔隙度和透气性,可保障水稻根系正常呼吸,促进幼苗快速生长[8]。水稻对水中氮、磷具有显著吸收作用[9],可降低水体营养盐含量,在改善水质的同时增加粮食产出[10][11]。但现有技术仍存在两方面瓶颈:一是种植杯底部孔洞在长期浸泡条件下易导致基质随水流失,造成氮磷供给不足并影响水稻产量,同时可能引发沉陷区水体二次污染;二是标准化种植单元设计不足,且种植系统稳定性较差,限制了其规模化推广应用[12]。

本研究聚焦采煤沉陷区水体治理,研发纳米膜模式漂浮水稻种植方法,主要包括纳米膜与种植杯结构设计、水稻育苗及标准化种植单元构建等内容。纳米膜凭借小孔径形成局部渗透压,已广泛应用于特低渗油田注水开发[13],本研究利用该特性构建新型种植杯,既保证水能顺利进入种植杯中,又防止基质进入水体中造成二次污染,并结合标准化种植单元设计优化种植布局,可提升漂浮水稻系统的稳定性和水质调控效果。结果表明,该技术能够显著降低水体总氮(TN)和总磷(TP)浓度,对沉陷区水体污染具有较好的治理效果。该模式可有效利用采煤沉陷积水区等复杂水域,缓解农业对传统耕地的依赖,为粮食安全保障提供新路径[14] [15]。

2. 材料与方法

2.1. 研究区域概况

本研究选定的“漂浮水稻”种植试验区域,地处我国淮南市顾桥矿的采煤沉陷积水地带。该区域地势平缓,地面海拔处于 21~24 m 的范围,整体地势呈现出西高东低、北高南低的态势。其气候类型为大陆性暖温带半湿润季风气候,四季特征显著,一年中干湿与冷暖的变化幅度较大。该试验区的年平均气温为 16.4℃,年降水量能达到 1723.5 mm,降水主要集中在夏季,冬季的降水量则最少,且年平均无霜期在 215.5 天到 223 天之间,符合水稻生长特性。试验区位于沉陷积水区二号水域西南角岸边浅水区,划定水面面积为 50 亩,如图 1 所示。

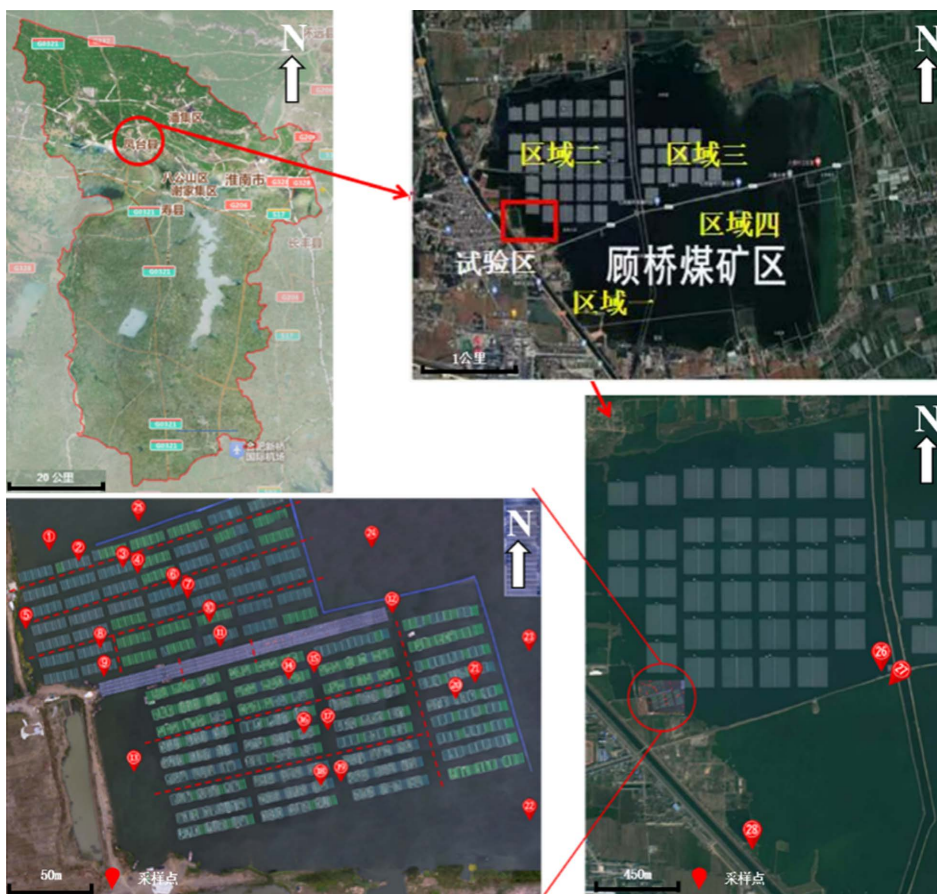


Figure 1. Location of rice cultivation experimental plot

图 1. 水稻种植试验区位置

2.2. 漂浮水稻概况

漂浮水稻是指在特定水域环境中,利用浮床、浮岛、漂浮板等技术手段将水稻种植在水面上使水稻悬浮于水中进行生长的一种新型种植模式[16],如图2所示。在构建上,通常采用泡沫聚乙烯或可降解材料制成浮板作为载体,并在风浪较大区域增设防浪设施,以保证系统稳定。每个种植单元一般采用“盆栽式”栽培,配比科学,并预先施入缓释肥以应对水体中养分易流失的问题。种植管理上,应选择株高中等、根系发达、具有较强支撑能力的水稻品种[17],先在岸边育苗,待秧苗适应后移栽入漂浮平台的定植杯内,再由小船牵引至水面固定;通过无人机、气象站、水质传感器等智能设备实现水肥一体化与精准追肥。目前该技术已在鱼塘生态化改造(如福建漳州、邵武的渔稻共生模式)以及富营养水体修复中得到应用,取得了显著成效。然而,漂浮水稻在推广中仍面临一些不足与挑战。技术方面,水面风浪易造成植株倒伏和浮板机械损伤,基质肥力易被水溶解带走而需频繁补充[18],专门适应漂浮种植的优良品种尚缺乏,浮床材料及设施建造维护成本较高。潜在风险方面,部分浮板材料(如泡沫塑料)老化破碎可能造成二次污染,种植系统可能改变水体光照和养分循环而对原有水生生态产生未知影响,稻成熟后若不及时将浮床和水稻植株搬离水体,植株衰老腐烂引起二次污染[19],且不同地点、不同模式的产量稳定性有待提升。漂浮水稻在解决耕地资源紧张和生态修复方面潜力巨大,但未来依然存在需改进之处,如改造生态浮床和挑选优势水稻品种,以进一步提高生态浮床种稻对富营养化水体的净化能力,以及“渔稻共生”标准化种养体系建设,以推动该技术从试验示范走向更广泛的市场化应用。



Figure 2. Field photograph of floating rice
图2. 漂浮水稻实景图

3. 结果与讨论

3.1. 种植杯构建

本方法中采用市面上常见的、底部开设1 cm小孔的种植杯,如图3所示,顶部开口直径16 cm,底部直径14 cm,高度14 cm。在底部粘上由重离子加速技术制作的纳米级核孔膜,其材质为PTFE聚四氟乙烯,标称孔径0.45 μm ,直径 $\Phi 50$ mm,如图4所示。上层再装填1 cm厚的陶粒,并在陶粒上层填充土壤基质,最后移栽秧苗。由于纳米膜孔径较小,可截留细菌、悬浮颗粒及大分子杂质[20],兼具阻隔性与渗透性,能够实现“透水不透肥”[14]。同时,陶粒对氮、磷等营养物质具有良好的吸附能力[21]。利用此类特性将种植杯内的营养组分与外界水隔离开来,水通过膜缓慢渗透进入基质中使得基质长期处于湿润环境,保障水稻生长具有充足的水环境;同时,膜具有一定截留营养组分的能力,并通过进一步添加陶粒吸附氮磷等营养组分,使得土壤基质中营养组分不易流失,可持续给水稻生长供能。因而,该模式通过陶粒吸附和膜材料能有效截留土壤基质中营养组分,并能保障水分上下通融。

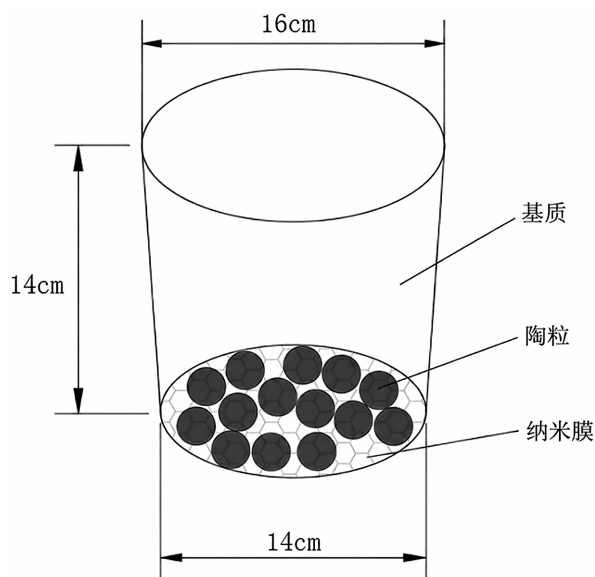


Figure 3. Schematic diagram of planting cup construction

图 3. 种植杯构建示意图

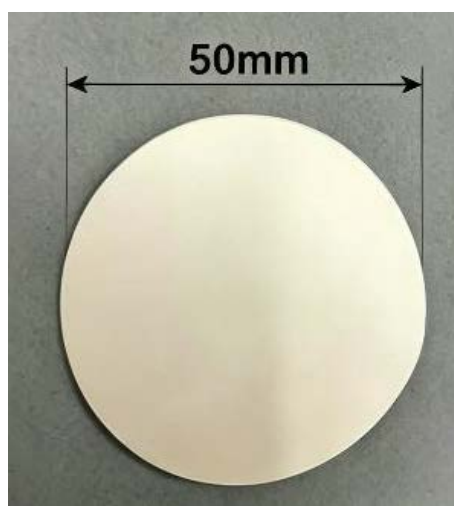


Figure 4. Photo of nano-membrane sample

图 4. 纳米膜实物图

本文漂浮水稻种植方法还包括整套育苗流程。首先将稻种置于药池中浸泡 8 h，随后将浸泡后的种子倒入桶中喷水清洗，再放入秧盘育秧播种机中完成浇水和出盘。出盘后，将秧盘错位堆放，并覆盖不透光塑料膜，在室内进行叠盘暗化处理 48 h [22]。待种子出芽后，将催芽托盘置于平坦地面育苗，每日浇水 2~3 次。育秧阶段易发生立枯病、恶苗病等病害，因此育苗期间每隔 4~5 d 喷施一次农药[23] [24]。

秧龄 20~25 d 为适宜移栽期，此时秧苗约 4~5 叶，根系健壮。移栽前施用送嫁肥及芸苔素等调节剂，有利于提高移栽成活率。移栽后及时灌水并保持水层，同时进行封闭除草；移栽后 7~10 d，秧苗活棵并开始分蘖。通过精选种子、种子消毒和药剂拌种，可提高出苗率并减少种传病害；采用穴盘育秧可保障移栽活棵，出苗后及时喷施杀虫剂和杀菌剂，以预防稻蓟马等虫害及恶苗病、立枯病等病害发生。图 5 为种植载体配置与养分控制构建图。

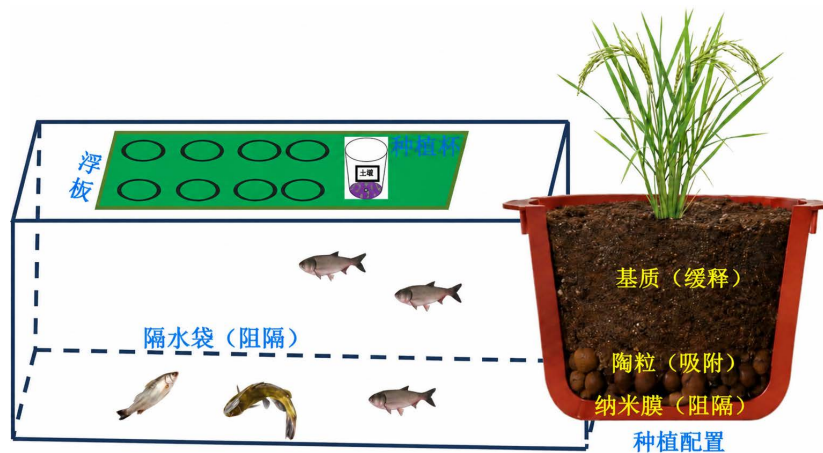


Figure 5. Planting substrate configuration & nutrient regulation
图 5. 种植载体配置与养分控制

3.2. 种植单元搭建

纳米膜种植模式的基本组成单元为标准化设计的浮板种植单元，其平面尺寸为 $6\text{ m} \times 4\text{ m}$ 。每个基本单元由三条规格为 $6\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的浮板条平行排列构成，相邻浮板条之间的净间距设置为 0.5 m 。这一间距设计既保证了水稻植株获得充足的光照和通风条件，又便于后期人工维护与无人机植保作业。

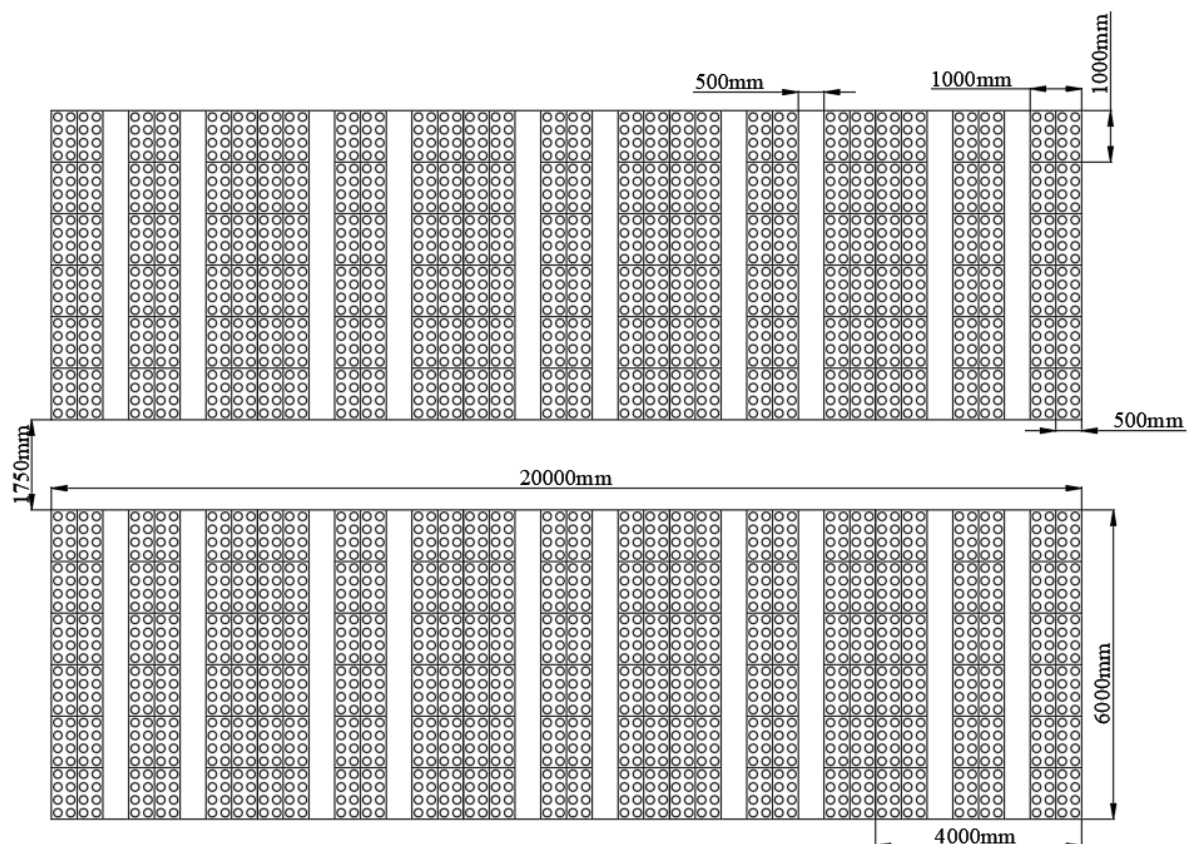


Figure 6. Schematic diagram of planting unit construction
图 6. 种植单元构建示意图

每条 6 m × 1 m 的浮板条由 12 块尺寸为 100 cm × 50 cm × 5 cm 的聚乙烯浮板块首尾拼接而成。相邻浮板块之间采用 8 mm 直径的不锈钢螺丝与螺母进行刚性连接, 确保浮板条在长期漂浮使用中不发生横向错位或散架。不锈钢材质具有良好的耐水腐蚀性能, 能够适应采煤沉陷区水域的弱酸或中性水质环境。由此, 每个完整的 6 m × 4 m 种植单元共包含浮板块 36 块(3 条 × 12 块/条), 并承载种植杯 288 个。

为克服天气及人为因素造成水面状况变化对种植单元的破坏, 增强整个种植单元的结构整体性与抗水流冲击能力, 在每个基本单元的四周均与 DN50 规格的 PE 管通过尼龙绳进行绑定。尼龙绳具有高强度、耐水浸泡和抗紫外线老化的特点, 能够长期保持可靠的绑扎力。PE 管的四个角部在安装时需通过 230℃ 高温进行热熔焊接, 形成一个封闭的矩形管腔框架。该热熔焊接工艺使 PE 管在角部融为一体, 杜绝了传统直角接头可能产生的渗水或松脱问题, 从而显著提升浮板种植单元的整体浮力和抗扭刚度。在实际应用中, 这一 PE 管框架不仅起到加固作用, 还为后续多个种植单元之间的串联拼接提供了标准的连接接口。种植单元构建如图 6 所示。

3.3. 水面固定与田间管理

在漂浮水稻-纳米膜模式构建过程中, 将 5 个规格为 6 m × 4 m 的浮板种植单元通过尼龙绳连接, 形成组合式种植单元, 并整体推入水中。随后在岸边将已装填基质的种植杯完成秧苗移栽, 并依次放入种植单元的各个种植孔内。待种植杯全部安置完成后, 利用船只牵引至预设水域, 并通过投放水泥锚块进行固定。针对采煤沉陷区水域可能存在的风浪、水流以及水位波动等因素, 本研究采用水泥墩沉桩的方式进行锚定。所述种植单元水面固定在种植单元的四个角和中间位置共抛掷 6 块水泥块进行固定, 如图 7 所示。水泥锚块尺寸与重量的确定基于现场评估与测试结果。一方面, 50 kg 锚块可提供足够重力, 以抵抗风浪作用下漂浮单元的水平漂移和垂向起伏; 另一方面, 该重量仍处于人工搬运和小型船只作业的可操作范围内, 无需大型起重设备, 便于现场施工与布设。锚定作业时, 采用“之”字形绑扎方式将绳索与水泥墩连接, 绳索预留长度根据采煤沉陷区水体历年最高、最低水位确定。该绑扎方式在汛期水位高度上升时保证构建单元稳定, 保障其位置不随水位变化而变化。

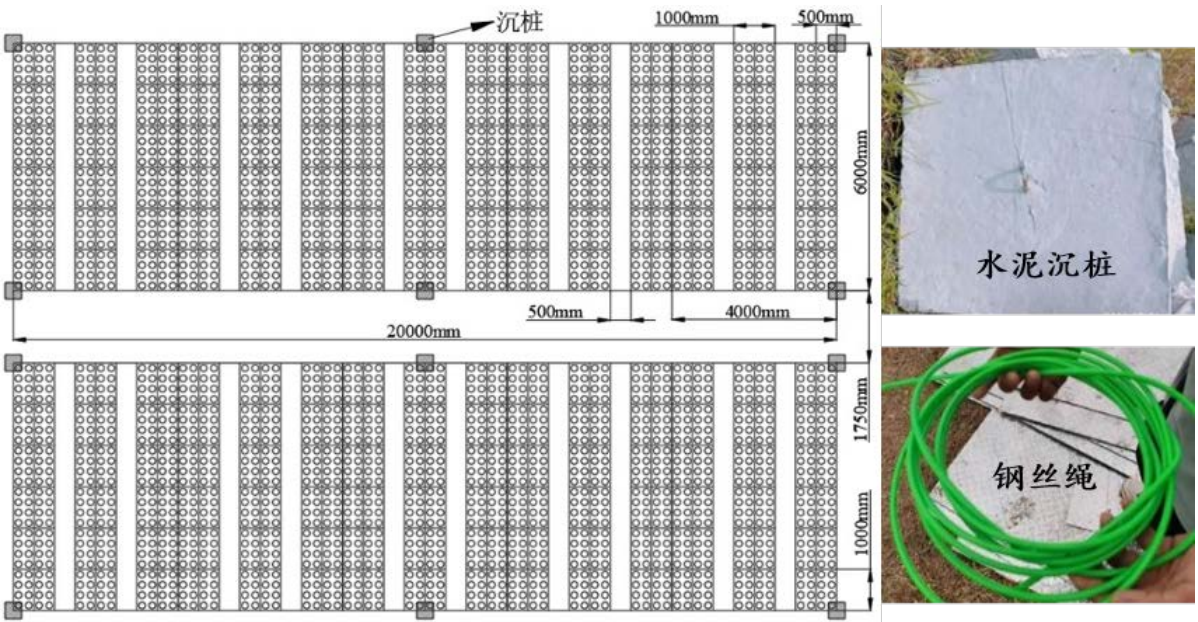


Figure 7. Schematic diagram of planting unit fixation
图 7. 种植单元固定示意图

对于水稻田间管理,分为杂草管理与病虫害防控。根据杂草类型,及时进行化学防控。一般杂草防控次数2次为宜,需要注意部分农药使用时需要加入助长剂和水稻秧苗的保护剂,尽量避免秧苗药害发生。施药方式可以根据草害发生的面积采用无人机喷施。水稻病虫害防控以物理预防(昆虫性诱导灯)为主,化学防控为辅。分蘖期于“漂浮水稻”种植的前期,此时水稻根系未能生长入水面,养分主要依靠种植杯内基质提供。在水稻生长拔节期喷施一次叶面肥,后期不再进行追肥[16],无需多次施肥。这也保证了该方法不会对水体造成二次污染。水稻分蘖期、孕穗期和抽穗期长势,有针对性地通过无人机喷施叶面肥、生长调节剂等,促进分蘖、穗粒发育。结合SYM模型,以及多源遥感数据与其他监测技术(如无人机、水质在线监测系统)[18],及时检验、分析水样[25],未来可进一步完善综合监测体系。

4. 结论

本研究构建了由漂浮种植单元、纳米级核孔膜种植杯和浮板-水泥桩固定结构组成的漂浮水稻耦合种植技术体系,为采煤沉陷区水面农业利用及富营养化水体生态治理提供了新的技术路径。主要结论如下:(1)采用重离子加速技术制备的纳米级核孔膜,可有效阻隔种植杯内基质扩散到外部水体,使水分经膜孔缓慢渗入并维持基质湿润;同时阻留部分营养组分、减少养分流失,从而为漂浮水稻在浅水区稳定生长提供水分和养分保障。(2)基质中添加陶粒可吸附氮、磷等营养元素,降低养分淋失,利用纳米膜截留与陶粒吸附协同作用,可延长水分和养分在种植杯内的保持时间,提高水稻养分利用效率,并减少盆内基质对外部水体的二次污染风险。(3)通过浮板与水泥桩组合固定,可增强漂浮种植单元在风浪扰动下的稳定性,减少漂移、倾斜和位移,提高其对采煤沉陷浅水区复杂水面环境的适应性,为规模化应用提供工程基础。

基金项目

2025 大学生创新训练项目(202510361086)、(S202510361180);安徽省高潜水位矿区水土资源综合利用与生态保护工程实验室重点项目(2023-WSREPMA-01);空间信息获取与应用安徽省联合共建学科重点实验室 2024 年度开放基金(2024 tLxykjxx04)。

参考文献

- [1] 程晓静,王兴明,储昭霞,等.淮南典型矿区不同塌陷年龄沉陷塘水中微量元素浓度特征及健康风险[J].水土保持通报,2022,42(2):74-81+88.
- [2] 林志,万阳,徐梅,等.淮南迪沟采煤沉陷区湖泊后生浮游动物群落结构及其影响因子[J].湖泊科学,2018,30(1):171-182.
- [3] 徐季雄,胡晓东,吴苏舒,等.江苏省典型省管湖泊富营养化现状[J].江苏水利,2024(11):26-29+33.
- [4] 杨国彬,李峰,孙莉.论黑龙江省煤矿废弃地植被恢复与重建[J].防护林科技,2016(9):84-85.
- [5] 陈小凤,章启兵,王振龙.采煤沉陷区水资源综合利用研究与水生态修复方案[J].中国农村水利水电,2014(2):6-8+12.
- [6] 张地伟,韩金伟.采煤沉陷区水土资源评价及生态修复技术实践研究[J].煤炭技术,2024,43(6):120-124.
- [7] 祖晓光,杨炳坤,刘铁钢,等.池塘种稻对养殖水体氮、磷去除效果及对鱼类生长的影响[J].中国农学通报,2024,40(24):151-157.
- [8] 许跃奇,张明哲,李俊营,等.新型增氧漂浮育苗盘对烟苗生长发育及生理生化指标的影响[J].贵州农业科学,2025,53(3):1-9.
- [9] 江苏徐淮地区淮阴农业科学研究所.一种安全环保型机插水稻漂浮育秧方法[P].中国,202210711451.0.2023-05-12.
- [10] 陈晓辉,韦可民,刘旭,等.漂浮水稻种植对沉陷区水体环境的影响研究[J].安徽理工大学学报(自然科学版),2024,44(6):71-80.

-
- [11] 蒋阳阳, 荣朝振, 吴明林, 等. 水稻浮床对养殖池塘水质净化效果研究[J]. 安徽农业科学, 2024, 52(12): 96-100+104.
- [12] 袁亮, 张世文, 王世森, 等. 采煤沉陷水面水稻种植创新实践与未来研究重点[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2024, 44(6): 1-14.
- [13] 谢雄, 穆连兵, 杨勇, 等. 纳米膜滤水技术在海上特低渗油田高效注水开发中的应用[J]. 石油化工应用, 2025, 44(2): 76-79.
- [14] Srivastava, A., Chun, S., Ko, S., Kim, J., Ahn, C. and Oh, H. (2017) Floating Rice-Culture System for Nutrient Remediation and Feed Production in a Eutrophic Lake. *Journal of Environmental Management*, **203**, 342-348. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.08.006>
- [15] Wang, W., Wang, Y., Sun, L., Zheng, Y. and Zhao, J. (2020) Research and Application Status of Ecological Floating Bed in Eutrophic Landscape Water Restoration. *Science of the Total Environment*, **704**, Article ID: 135434. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135434>
- [16] 李小龙, 云宇, 张世文, 等. 采煤沉陷区“漂浮水稻”生长特征及健康风险评价[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2025, 45(4): 9-18.
- [17] 张世文, 李艺茹, 方吴云, 等. 适宜水面浮板种植的水稻品种筛选[J]. 农业科技通讯, 2025(9): 56-60.
- [18] 郎建, 李小龙, 张世文, 等. 基于机器学习的采煤沉陷区水体富营养化监测[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2024, 44(6): 99-108.
- [19] 孙志萍, 秦琳, 刘耀斌, 等. 水稻对富营养化水体生态修复效应及其研究进展[J]. 中国水稻科学, 2018, 32(5): 509-518.
- [20] Zhao, S., Cai, X., Wang, J., Li, D., Zhao, S., Yu, X., *et al.* (2021) Three Types of Passivators on the Stabilization of Exogenous Lead-Contaminated Soil with Different Particle Sizes. *Scientific Reports*, **11**, Article No. 22542. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01685-6>
- [21] Szablińska-Piernik, J., Lahuta, L.B., Stałanowska, K. and Horbowicz, M. (2022) The Imbibition of Pea (*Pisum sativum* L.) Seeds in Silver Nitrate Reduces Seed Germination, Seedlings Development and Their Metabolic Profile. *Plants*, **11**, Article No. 1877. <https://doi.org/10.3390/plants11141877>
- [22] 赵青松, 狄霖, 胡锁军, 等. 叠盘暗化催芽处理对水稻秧苗素质的影响[J]. 中国稻米, 2016, 22(5): 71-73.
- [23] 徐海燕. 水稻恶苗病的特征特性及防治措施[J]. 河南农业, 2025(1): 66.
- [24] 宣国灿, 周宇杰, 骆琴, 等. 4种药剂预防水稻恶苗病和立枯病的效果[J]. 浙江农业科学, 2021, 62(10): 2044-2045.
- [25] 李小龙, 陈永胜, 张世文, 等. 水样储存时间对“漂浮水稻”种植区水质检测影响[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2024, 44(6): 56-63.