



钱银飞,邵彩虹,梁喜欢,等.3种化学增氧剂对南方早稻产量形成的影响[J].江西农业大学学报,2026,48(1):23-31.
QIAN Y F,SHAO C H,LIANG X H,et al.Effects of three types of chemical oxygenators on growth and development of early rice[J].
Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2026,48(1):23-31.

3种化学增氧剂对南方早稻产量形成的影响

钱银飞,邵彩虹,梁喜欢,夏文建,关贤交,邱才飞,陈先茂,陈 金,
胡 娟,李秀秀,谢 江,邓国强,彭春瑞*

(江西省农业科学院 土壤肥料与资源环境研究所/农业部长江中下游作物生理生态与耕作重点实验室/国家红壤改良工程技术研究中心/农业农村部分酸化土改良与利用重点实验室/国家农业环境宜春观测实验站/耕地改良与质量提升江西省重点实验室/农业面源污染防控与废弃物综合利用江西省重点实验室,江西 南昌 330200)

摘要:【目的】考察3种化学增氧剂的增氧效能及其对南方早稻生长发育和产量形成的影响。【方法】利用盆栽试验,以淹水不添加增氧剂为对照(CK),系统研究了市场上常见3种化学增氧剂[过碳酸钠(T_1)、过氧化钙(T_2)、过氧化脲(T_3)]的增氧效能,以及其对早稻“中嘉早17”的生长发育及产量形成的影响。【结果】3种化学增氧剂都能提高土壤溶解氧(DO),但释氧量和释氧时长不一,副产物也存在差异,造成pH的差异,最终导致南方早稻的产量形成产生差异。3种增氧剂均能显著增加不定根的数量和体积,提高 α -NA根系活力,使水稻在成熟期保持较高的叶SPAD值。与CK相比, T_1 、 T_2 和 T_3 处理分别增产4.30%~5.32%、15.03%~18.10%和10.82%~12.46%。 T_1 虽增氧效果好,但却产生大量 H^+ ,导致水稻早期分蘖受到一定的抑制,影响了产量。而 T_2 和 T_3 均为促进作用,促进程度的差异导致增产幅度的差异。【结论】3种化学增氧剂的应用可改善土壤根际氧环境,提高水稻根系活力、延缓叶片的衰老,增加产量,其中过氧化钙效果最优,最适于在南方早稻生产上作为增氧所用。

关键词:增氧剂;早稻;溶解氧;根系活力;产量

中图分类号:S511.3[†] 文献标志码:A

文章编号:1000-2286(2026)01-0023-09

CSTR:32399.14.aauj.2026003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of three types of chemical oxygenators on growth and development of early rice

QIAN Yinfei, SHAO Caihong, LIANG Xihuan, XIA Wenjian, GUAN Xianjiao,
QIU Caifei, CHEN Xianmao, CHEN Jin, HU Juan, LI Xiuxiu,
XIE Jiang, DENG Guoqiang, PENG Chunrui*

收稿日期:2025-07-10 修回日期:2025-09-03 接受日期:2025-09-08

基金项目:国家自然科学基金项目(32360530)和江西省双千计划项目(S2021DQKJ0001)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(32360530)and Jiangxi Province's Double Thousand Plan(S2021DQKJ0001)

作者简介:钱银飞,副研究员,博士,orcid.org/0000-0002-0929-4063, qyftfs@163.com; *通信作者:彭春瑞,研究员,博士,主要从事水稻高产栽培研究,orcid.org/0000-0002-7911-5091, pcrfts@163.com。

©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND协议

(Soil and Fertilizer&Resources and Environmental Institute, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System for the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture, P. R. C/National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement/Jiangxi Irrigation Experiment Central Station Key Laboratory of Acidified Soil Amelioration and Utilization/Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System for the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs Jiangxi Province Key Laboratory of Arable Land Improvement and Quality Enhancement. National Agricultural Experimental Station for Agricultural Environment/Yichun, Jiangxi Provincial/Key Laboratory of Agricultural Non-point Source Pollution Control and Waste Comprehensive Utilization, Nanchang 330200, China)

Abstract: [Objective] To investigate the efficacy and the effects of different types of chemical oxygenators on the growth, development and yield formation of early rice in the south area of China. [Method] By using pot experiments and taking waterlogging without adding oxygenators as the control (CK), a systematic study was conducted to monitor the growth and development and yield formation of early rice “Zhongjiazao17” and the characteristics of three oxygenators [sodium percarbonate (T_1), calcium peroxide (T_2), and urea peroxide (T_3)]. [Result] All oxygenators can increase the dissolved oxygen (DO) in the soil, but oxygen amount and duration are different, and they are also different in by-products, resulting in differences in pH, ultimately leading to differences in the yield of early rice in the south. All oxygenators can significantly increase the number and volume of adventitious roots, enhance α -NA root viability, and maintain a relatively high leaf SPAD value in the maturity stage. Compared to the CK, T_1 , T_2 and T_3 increased grain yield by 4.30%–5.32%, 15.03%–18.10% and 10.82%–12.46% respectively. Although T_1 produced great amount of oxygenation, it generated a large amount of H^+ , which led to a certain inhibition of the tillering of early rice and reduced the yield. Both T_2 and T_3 have promoting effects, and the difference in the degree of promotion led to the difference of the yield. [Conclusion] In conclusion, three chemical oxygenators all can enrich the rhizosphere oxygen content, enhance the vitality of root, delay the senescence of leaves, and finally increase the yield. Among them, calcium peroxide has the best effect and is most suitable for the early rice in the south.

Keywords: oxygenator; early rice; dissolved oxygen; root activity; yield

【研究意义】水稻是全球最重要的粮食作物之一^[1], 不断提高水稻单产是保障粮食安全的永恒主题。水稻的生长受多种环境因素的影响, 其中氧气是关键因子之一。当水稻根区氧气供应不足时, 植株根系有氧呼吸受到影响或抑制, 能量代谢紊乱, 进而导致一系列的生理问题, 最终影响水稻的产量形成, 造成经济损失^[2-3]。南方早稻生长季节通常在4—7月, 受亚热带季风气候影响, 这个时间段主要是雨季, 全年60%以上的降雨主要集中在在这个时间段, 常造成早稻田持续淹水, 导致土壤缺氧, 影响水稻根系呼吸和养分吸收, 进而降低产量。因此保障早稻氧气的有效供给, 改善早稻生长发育状况, 已成为南方水稻生产上亟待解决的问题之一。间歇灌溉^[4]、干湿交替灌溉^[5]、厢沟灌溉^[6]、畦沟灌溉^[7]、微纳米气泡水灌溉^[8]、生物藻类增氧^[9]、化学增氧剂增氧^[10]等增氧措施均有利于提高水稻根际氧含量, 都取得了一定的研究进展。较之其他增氧措施, 化学增氧剂增氧更不易受天气和地形等的影响, 能直接或间接地增加稻田土壤中的氧气含量, 已经成为改善水稻生长的快速而有效手段。【前人研究进展】Yasuo等^[11]研究发现应用过氧化钙能提高直播水稻的环境温度, 促进水稻生根发芽。Toru等^[12]和Mei等^[13]研究发现应用过氧化钙能促进直播稻出苗和成苗。赵锋等^[14]研究表明, 应用过氧化钙和过氧化尿素两类化学增氧物质均能增加水体溶解氧和调节pH, 促进根系体积增大, 根系活力提高, 提高水稻的产量。胡继杰等^[15]应用过氧化钙增氧能有效改善稻田土壤氧化还原状况, 不仅显著提高水稻产量, 而且显著增强稻田氮的硝化而减少氮素损失, 从而提高水稻氮素积累量和氮素收获指数。同时, 他还认为增施过氧化钙有助于提高水稻叶片叶绿素含量、叶面积指数和光合作用能力, 并显著增加水稻干物质积累和产量^[16]。Wang等^[17]研究表明, 应用

过氧化钙可以改善稻田土壤 Eh,抑制甲烷菌活性并减少 CH₄排放,提高水稻产量。尤其在紫云英还田的情况下效果更佳。

【本研究切入点】化学增氧剂是否能有效改善南方早稻田淹渍水导致的土壤缺氧状况,改善水稻生长,目前仍缺乏相关报道。同时目前市场上化学增氧剂类型多样,且主要被应用于水产品养殖增氧方面,对其在水稻上的应用研究较少且大都集中在1种或2种增氧剂在水稻上的应用,类型较少,亟待开展更多类型增氧剂的相关研究。【拟解决的关键问题】本试验选用市面上最常见的3种类型化学增氧剂,系统研究其各自的增氧效能及其对早稻生长发育的影响差异,以期筛选出较为合适的化学增氧剂,为南方早稻生产增产增效和合理选用化学增氧剂提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 试验概况

试验于2023—2024年在江西省南昌市江西省农业科学院温网室(28°33'N,115°56'E)内进行。该区属于亚热带季风气候区,年平均气温17.8℃,无霜期89 d,年均降水量1662.5 mm,年均日照时数约1600 h。试验采用盆栽。盆栽所用塑料桶直径25 cm,高30 cm。每桶装土18 kg。试验土于早稻移栽前取自江西省宜春市高安市相城镇水稻田,土壤pH 5.51,有机质24.2 g/kg,全氮1.48 g/kg,碱解氮164 mg/kg,速效磷32.6 mg/kg,速效钾48.5 mg/kg。

1.2 供试材料

供试水稻品种分别为籼型超级早稻品种“中嘉早17”,由中国水稻所育成。化学增氧剂为过氧化钙(CaO₂,活性氧含量16%)、过碳酸钠(Na₂CO₃·3H₂O₂,活性氧含量13.6%)和过氧化脲[CO(NH₂)₂·H₂O₂,活性氧含量12%],均为固体,均采购自化工市场。

1.3 试验设计

试验设4种处理:CK处理(对照,不施增氧剂);T₁处理为过碳酸钠处理;T₂处理为过氧化钙处理;T₃处理为过氧化脲处理。T₁~T₃处理均按每盆6 g增氧剂拌土同肥料一起施入。试验采用一次性施肥,于移栽前每桶施尿素3 g,氯化钾1.5 g,钙镁磷肥6 g。2年试验均采用水育秧培育壮秧,2023年于3月22日播种,4月22日移栽至塑料桶内,2024年于3月25日播种,4月25日移栽,移栽时选取长相基本一致的无病虫害的秧苗,以每桶3穴,每穴3苗,按三角形位置种植。试验分别于2023年7月15日和2024年7月17日收获。所有处理水稻生长期均处于有水层状态。全程采用量杯精确每次加水量,确保加水量一致。水稻成熟前一周断水直至收获。试验每处理15盆。其他管理措施按常规栽培要求实施。

1.4 测定内容与方法

1.4.1 溶解氧(DO)

于处理当日及每隔1 d采用便携式溶解氧测定仪(YSI550A,美国维塞YSI公司)测定溶液DO浓度,每个处理重复3次,直到测定值与背景值相近为止。

1.4.2 土壤pH

于水稻收获后采用电位法进行测定[m(土):m(水)=1:2.5,参考NY/T 1121.2—2006标准]。

1.4.3 叶绿素相对含量(SPAD值)

于分蘖期、拔节期、抽穗期和成熟期的09:00—11:00,采用叶绿素测定计(SPAD-502,日本美能达公司)测定剑叶SPAD值,每次测量最上部完全展开叶中部(除叶脉)的SPAD值,每个处理重复3次。

1.4.4 根系性状

于水稻齐穗期,以整盆为单位,每处理取3盆,用于测定根系性状。取样后装入70目的塑料网袋中,先用流水冲洗,然后用去离子水将根冲洗干净后进行测定。采用排水法测量根系体积,采用 α -萘胺法^[18]测定根系活力。

1.4.5 产量

收获前测定每盆的穗数,收获时每处理按其平均穗数各选取有代表性5盆进行取样、考种和测产。

1.5 数据处理

采用Excel 2019进行数据录入。统计分析采用SPSS 22.0进行,绘图软件采用SigmaPlot12.5进行。

2 结果与分析

2.1 溶解氧(DO)浓度变化

图1为水稻移栽后各处理桶面水溶液的溶解氧浓度(DO)的变化。CK处理的桶面水DO值比较稳定,一直维持在5.24 mg/L左右。 T_1 处理的土壤DO值移栽当日最大,达到18.43 mg/L,而随着移栽时间的增加表现急剧下降的趋势,2 d后基本与CK齐平。 T_2 处理的DO值表现为随着移栽时间的增加呈现先缓慢增加后缓慢下降的趋势,移栽后2 d达到峰值,为12.35 mg/L,后缓慢下降,直到16 d后才基本与CK齐平。 T_3 处理的DO变化曲线与 T_1 处理类似,于移栽当日达到峰值,为15.32 mg/L,到第4天时与CK基本齐平。

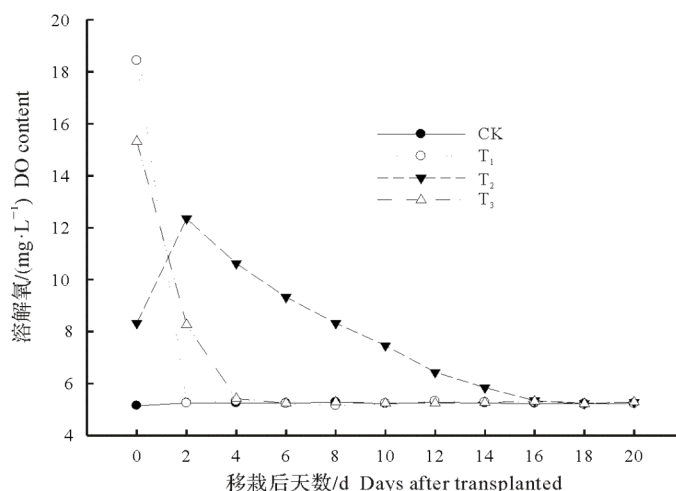
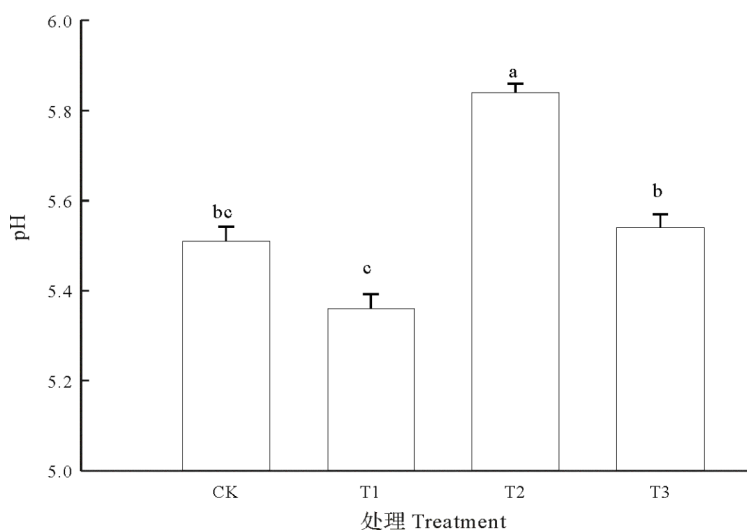


图1 不同增氧剂处理的溶解氧浓度动态变化(2023)

Fig.1 Dynamic changes of dissolved oxygen concentration of different oxygenators

2.2 土壤pH的影响

与CK相比, T_1 处理的pH值下降0.91%, T_2 的pH值上升5.99%,而 T_3 处理与CK处理的pH值相近(图2)。这可能与 T_1 和 T_2 处理的过氧化物溶解于水后,除了产生氧气外,还产生副产物有关。 T_1 处理过碳酸钠溶解于水,形成双氧水(H_2O_2)和碳酸钠(Na_2CO_3),双氧水分解除了形成氧气外,还易形成 H^+ ,呈酸性; T_2 处理形成的副产物 $Ca(OH)_2$ 呈较强的碱性,显著增加了土壤的pH值。而 T_3 处理生成的副产物尿素 $[CO(NH_2)_2]$ 则呈中性,对土壤pH影响不大。



小写字母表示LSD多重比较的显著性差异 $P<0.05$ 。

Small letter indicate statistically significant difference $P<0.05$ by LSD MRT.

图2 不同增氧剂处理的土壤pH(2023)

Fig.2 Soil pH of different oxygenators

2.3 对分蘖动态的影响

不同增氧剂处理的早稻分蘖呈先增加后减少的趋势,至45 d以后基本稳定(图3)。除了T₁处理的分蘖呈缓升缓降趋势,其余3个处理均表现为到达高峰苗后呈快速下降的态势。T₁处理在移栽后30 d达到峰值,其余处理均于移栽后33 d达到峰值。不同增氧剂处理的高峰苗表现为T₃处理最高,其次为T₂,再次为CK,最小为T₁。这表明较CK处理,T₂和T₃处理促进了水稻分蘖的发生,而T₁处理对分蘖的发生有一定的抑制作用。各处理的分蘖成穗率由高到低依次为T₁、T₂、CK和T₃,其中T₁的成穗率最高,达到了64.91%,远高于其他3个处理,这表明T₁处理有利于减少无效分蘖。

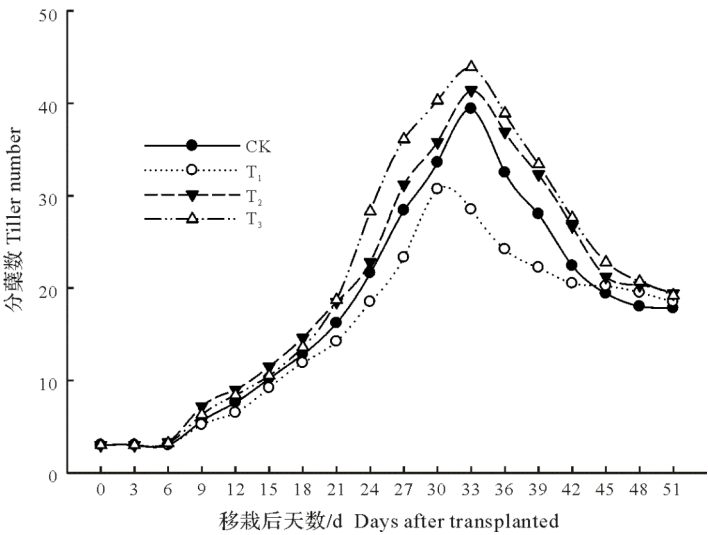
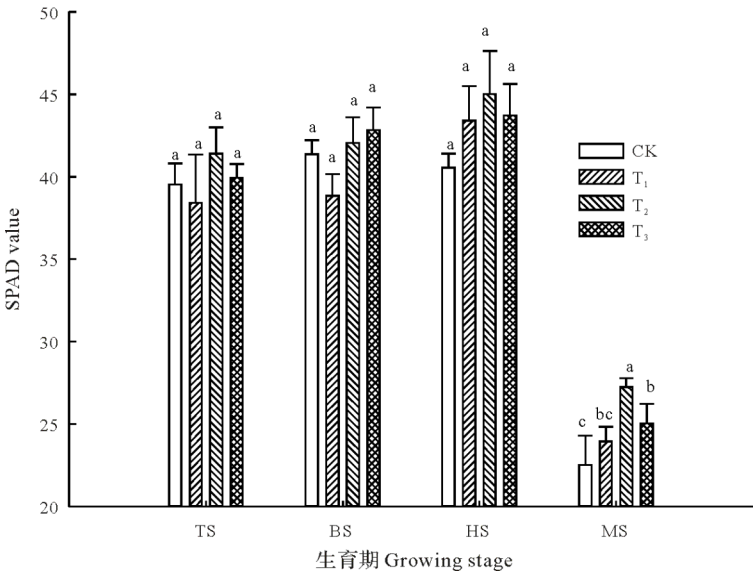


图3 不同增氧剂处理早稻分蘖动态(2023)

Fig.3 Tillering dynamics of early rice of different oxygenators

2.4 对早稻剑叶SPAD值的影响

不同增氧剂处理的剑叶SPAD值见图4。剑叶SPAD值随生育进程的变化表现为随生育进程的推进,呈先上升后下降趋势,在抽穗期达到最大,成熟期最小。各增氧剂处理的剑叶SPAD值在抽穗及以前各生育期差异较小,未达显著水平。成熟期由大到小则依次为T₂、T₃、T₁和CK,差异达显著水平。



TS、BS、HS、MS 分别代表分蘖期、拔节期、抽穗期和成熟期。小写字母表示 LSD 多重比较的显著性差异 $P<0.05$ 。

TS, BS, HS and MS respectively represent the tillering stage, booting stage, heading stage and maturity stage.

Small letter indicate statistically significant difference $P<0.05$ by LSD MRT.

图4 不同增氧剂对早稻剑叶SPAD值的影响(2023)

Fig.4 Flag leaf SPAD value of different oxygenators

2.5 对根系特征的影响

不同增氧剂对齐穗期早稻根系特征的影响见表 1, 2 年的试验结果较为一致, 均表现为各增氧剂处理较未施增氧剂处理的不定根数、最长根长、根干物重、根体积和 α -NA 根系活力有所增加, 其中以 T_2 处理的增幅最大, 2023 年分别较 CK 增加了 58.78%、19.60%、64.36%、60.39% 和 23.24%。2024 年分别较 CK 增加了 21.74%、17.66%、32.54%、41.85% 和 19.22%。其次为 T_3 , 再次为 T_1 。 T_1 处理的不定根数、最长根长、根干物重、根体积和 α -NA 根系活力均显著小于 T_2 和 T_3 处理。而 T_2 和 T_3 除了最长根长的差异达到显著水平外, 其中各指标差异未达显著水平, 2 年均表现为如此。

表 1 不同增氧剂处理早稻齐穗期根系特征

Tab.1 Root traits of the early rice of different oxygenators at the full-heading stage

年份 Year	处理 Treatment	不定根数 Number of adventitious roots	最长根长/cm The longest root length	根干物重/(g·pot ⁻¹) Root dry matter	根体积/(cm ³ ·pot ⁻¹) Root volume	α -NA 根系活力/ ($\mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$) α -NA oxidation
2023	CK	142±4.0 ^c	31.5±0.9 ^c	5.26±0.33 ^c	55.87±0.46 ^c	51.28±0.62 ^b
	T_1	202±13.0 ^b	30.5±0.7 ^c	7.99±0.31 ^b	81.36±2.95 ^b	59.70±3.40 ^a
	T_2	226±11.0 ^a	37.6±1.3 ^a	8.64±0.20 ^a	89.60±0.77 ^a	63.20±3.12 ^a
	T_3	222±3.0 ^a	35.9±1.3 ^b	8.47±0.16 ^a	87.92±1.69 ^a	61.75±2.22 ^a
2024	CK	207±5.6 ^c	30.4±0.9 ^c	6.73±0.10 ^b	72.38±1.97 ^b	51.71±1.65 ^b
	T_1	223±8.0 ^b	32.2±0.6 ^{bc}	7.28±0.13 ^b	91.92±4.02 ^a	53.96±3.82 ^b
	T_2	252±13.3 ^a	35.8±3.0 ^a	8.92±0.20 ^a	102.67±4.76 ^a	61.65±2.74 ^a
	T_3	246±9.5 ^a	34.8±1.4 ^{ab}	8.72±0.45 ^a	98.38±7.98 ^a	60.77±2.26 ^a

小写字母表示 LSD 多重比较的显著性差异 $P<0.05$ 。

Small letter indicate statistically significant difference $P<0.05$ by LSD MRT.

2.6 对产量及其构成的影响

由表 2 可知, 不同增氧剂处理的 2 年的产量表现趋于一致, 由大到小均依次为 T_2 、 T_3 、 T_1 和 CK。2023 年不同增氧剂 T_1 、 T_2 和 T_3 处理比未施用增氧剂处理分别增产 2.29, 8.02, 5.77 g/pot, 增产率分别为 4.30%、15.03% 和 10.82%。2024 年不同增氧剂 T_1 、 T_2 和 T_3 处理分别比未施用增氧剂处理增产 2.47, 8.39, 5.78 g/pot, 增产率分别为 5.32%、18.10% 和 12.46%。从产量构成因素来看, 较未施增氧剂处理, 各施用增氧剂处理增加了产量的各构成因素。2 年试验中, T_2 处理的有效穗数、每穗粒数、结实率和千粒质量均最高, 其次为 T_3 处理, 再次为 T_1 处理。各产量因素中以穗数和每穗粒数受增氧剂影响较大, 差异达到了显著水平, 而结实率和千粒质量受影响较小, 差异未达显著水平。

表 2 不同类型增氧剂对早稻产量及其构成的影响

Tab.2 Yield and yield components of early rice under different oxygenators treatments

年份 Year	处理 Treatment	穗数 Panicles	每穗颖花数 Glumes flowers	结实率/% Filled grain rate	千粒质量/g 1000-grain wt	实际产量/g Grain yield
2023	CK	17.8±0.2 ^b	139.2±2.0 ^c	86.6±1.7 ^a	26.1±0.5 ^a	53.34±2.43 ^{Bc}
	T_1	18.5±0.6 ^{ab}	141.4±1.6 ^{bc}	87.0±1.3 ^a	26.2±0.1 ^a	55.63±2.59 ^{ABbc}
	T_2	19.4±0.6 ^a	146.4±0.6 ^a	87.7±2.4 ^a	26.2±0.1 ^a	61.36±4.40 ^{Aa}
	T_3	19.2±0.4 ^a	144.4±2.9 ^{ab}	87.2±4.0 ^a	26.2±0.1 ^a	59.12±3.30 ^{ABab}
2024	CK	19.4±0.8 ^b	140.3±2.1 ^c	69.8±1.0 ^a	26.5±0.2 ^a	46.37±2.31 ^{Bbc}
	T_1	19.6±0.4 ^{ab}	144.4±2.1 ^b	70.3±1.7 ^a	26.5±0.3 ^a	48.84±3.04 ^{ABbc}
	T_2	20.8±1.3 ^a	151.1±1.0 ^a	70.8±1.5 ^a	26.6±0.5 ^a	54.76±3.48 ^{Aa}
	T_3	20.5±0.5 ^{ab}	146.1±2.0 ^b	70.6±1.2 ^a	26.6±0.6 ^a	52.15±1.65 ^{ABab}

大、小写字母分别表示 LSD 多重比较的显著性差异 $P<0.01$ 和 $P<0.05$ 。

Big letter and small letter indicate statistically significant difference $P<0.01$ and $P<0.05$ separately by LSD MRT.

3 讨论

3.1 不同类型增氧剂的增氧效能

施用化学增氧剂是一种快捷有效的土壤增氧方式。目前市场上销售的化学增氧剂类型多样,但主要成分以过碳酸钠、过氧化脲和过氧化钙为主^[19]。本试验中这3种类型增氧剂均能快速释放氧气,但释放氧气量和释放氧气时长不同。 T_1 处理的过碳酸钠增氧速度最快,放氧量大,但易分解,增氧持续时间短,仅2 d就结束。而 T_2 处理过氧化钙增氧速度最慢,但持续时间长,在16 d左右仍高于CK未施增氧剂处理。而 T_3 处理过氧化脲处于两者之间,持续时间为4~8 d。这和储为贤^[20]对增氧剂的介绍一致。不同增氧剂释氧量和释氧时长可能与不同增氧剂在水中的溶解速度有关,过碳酸钠易溶于水,而过氧化钙则微溶于水,过氧化脲处于两者之间。在实际应用中,可以按照不同的需求选择适合的增氧剂,如果需要快速大量增氧可以选择过碳酸钠。如果需要缓慢持续增氧,可选择过氧化钙和过氧化脲。也可以通过研发缓控释增氧剂^[10,21]等延缓溶氧速度,达到持续增氧,提高氧气高效利用的目的。

3.2 不同类型增氧剂对水稻产量形成的影响

水稻需要有良好的土壤氧气条件才能健康生长^[2],本试验也证明了这一点。本试验中对照常规淹水处理由于一直处于淹水状态,土壤通透性不足,氧气供给不足,水稻生长状况不良,最终产量不及增氧剂处理。本研究结果显示,3种类型增氧剂对早稻“中嘉早17”均有一定的增产作用,增幅为4.30%~18.10%,增产幅度大小主要取决于有效穗和每穗粒数的差异,结实率和千粒质量的影响相对较小。本试验同时发现利用增氧剂增氧有利于提高水稻的不定根数量和根体积,增强根系活力,延缓叶片的衰老,最终提高产量。这与前人的研究结果^[11-13,22-24]一致。同时本研究也发现不同的增氧剂与水反应产生氧气之外的副产物造成了水稻产量形成的差异。本研究中 T_1 过碳酸钠处理抑制了水稻早期茎蘖的发生,减少了最高分蘖数。这可能与过碳酸钠负载的 H_2O_2 较多,与水反应产生较多的 H^+ ,过多 H^+ 造成的副作用超过了增氧的正作用,从而抑制了茎蘖的发生。 T_2 处理过氧化钙缓慢释氧的同时还能释放 OH^- ,中和土壤中 H^+ ,提高土壤pH,减少土壤酸化的危害;同时还能释放热量,增加土壤和水体的温度^[11],减轻南方早稻生长前期低温对水稻生长的不利影响;此外还能增加土壤中 Ca^{2+} ,促进水稻生长发育,最终提高产量。 T_3 过氧化脲处理次之,除增加氧气的同时,还增加了尿素供给,增加了水稻的养分供给,产量增加也比较显著。本研究结果表明使用过氧化钙处理增产最多,效果最好,但本试验在南方偏酸性土壤中开展,相关结论在碱性土壤中的适用性有待进一步研究。

4 结论

利用化学增氧剂进行稻田增氧能快速增加早稻根际氧含量,降低淹水胁迫对早稻生长造成的不利影响,促进早稻根系的生长和发育,延缓叶片衰老,提升产量各构成因子,最终提高产量,其中以过氧化钙增氧效果最佳,在增氧的同时还能释放 OH^- 来中和土壤pH,释放热量减轻早稻生长前期低温的不利影响,此外还能增加土壤中 Ca^{2+} ,最终增产15.03%~18.10%,可作为南方早稻高产栽培的推荐增氧措施。

致谢:江西省农业科学院基础研究与人才培养专项(JXSNKYJCRC202214)和江西省重点实验室项目(2024SSY04211、2024SSY04221)同时对本研究给予了资助,谨致谢意!

参考文献 References:

- [1] FUKAGAWA N K, ZISKA L H. Rice: importance for global nutrition. [J]. Journal of nutritional science and vitaminology, 2019, 65(Sup): 2-3.
- [2] SHOTARO T, SHIN Y, KEITA G, et al. Oxygen consumption and transportation in rice roots are highly dependent on leaf area and root dry weight ratio [J]. Rhizosphere, 2023, 25: 100644.
- [3] XU C M, CHEN L P, CHEN S, et al. Effects of rhizosphere oxygen concentration on root physiological characteristics and anatomical structure at the tillering stage of rice [J]. Annals of applied biology, 2020, 177(1): 61-73.
- [4] 李远华, 张祖莲, 赵长友, 等. 水稻间歇灌溉的节水增产机理研究 [J]. 中国农村水利水电, 1998(11): 12-15.

- LI Y H, ZHANG Z L, ZHAO C Y, et al. Mechanism of water-saving and yield-raising of the intermittent submerged irrigation for rice[J]. China rural water and hydropower, 1998(11): 12-15.
- [5] 褚光, 展明飞, 朱宽宇, 等. 干湿交替灌溉对水稻产量与水分利用效率的影响[J]. 作物学报, 2016, 42(7): 1026-1036.
- CHU G, ZHANG M F, ZHU K Y, et al. Effects of alternate wetting and drying irrigation on yield and water use efficiency of rice[J]. Acta agronomica Sinica, 2016, 42(7): 1026-1036.
- [6] 王梦影. 长江中游固定厢沟直播稻节水灌溉技术及效应研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.
- WANG M Y. Effects of water saving irrigation technique with bed-furrow bases on seeding rice in the middle reaches of Yangtze River[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016.
- [7] 张自常, 李鸿伟, 陈婷婷, 等. 畦沟灌溉和干湿交替灌溉对水稻产量与品质的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(24): 4988-4998.
- ZHANG Z C, LI H W, CHEN T T, et al. Effect of furrow irrigation and alternate wetting and drying irrigation on grain yield and quality of rice[J]. Scientia agricultura Sinica, 2011, 44(24): 4988-4998.
- [8] QIAN Y F, GUAN X J, SHAO C H, et al. Effects of different concentrations of Micro-nano bubbles on grain yield and nitrogen absorption and utilization of double cropping rice in south China[J]. Agronomy, 2022, 12(9): 2196.
- [9] 王红强, 李宝宏, 张东令, 等. 藻类的生物控制技术研究进展[J]. 安全与环境工程, 2013, 20(5): 38-41.
- WANG H Q, LI B H, ZHANG D L, et al. Research advance in biological techniques for controlling algae growth[J]. Safety and environmental engineering, 2013, 20(5): 38-41.
- [10] 潘珍, 齐鹏, 徐祥玉, 等. 不同增氧剂释氧对潜育化土壤还原性物质的消减效果[J]. 热带农业工程, 2024, 48(2): 20-27.
- PAN Z, QI P, XU X Y, et al. Reduction effect of different oxygen producers on oxygen releasing in reducing substances of gleyed soil[J]. Tropical agricultural engineering, 2024, 48(2): 20-27.
- [11] YASUO O, JUSTICE N. Effect of seed coating with calcium peroxide of germination under submerged condition in rice plant[J]. Crop science society of Japan, 1989(4): 535-536.
- [12] TORU S, SACHIO M. Seedling emergence and establishment under drained conditions in rice direct-sown into puddled and leveled soil "effect of calcium peroxide seed coating and sowing depth"[J]. Plant production science, 2002, 5(1): 71-76.
- [13] MEI J H, WANG W Q, PENG S B, et al. Seed pelleting with calcium peroxide improves crop establishment of direct-seeded rice under waterlogging conditions.[J]. Scientific reports, 2017, 7(1/2/3/4): 4878.
- [14] 赵锋, 王丹英, 徐春梅, 等. 根际增氧模式的水稻形态、生理及产量响应特征[J]. 作物学报, 2010, 36(2): 303-312.
- ZHAO F, WANG D Y, XU C M, et al. Response of morphological, physiological and yield characteristics of rice (*Oryza sativa* L.) to different oxygen-increasing patterns in rhizosphere[J]. Acta agronomica Sinica, 2010, 36(2): 303-312.
- [15] 胡继杰, 朱练峰, 胡志华, 等. 土壤增氧方式对其氮素转化和水稻氮素利用及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 167-174.
- HU J J, ZHU L F, HU Z H, et al. Effects of soil aeration methods on soil nitrogen transformation, rice nitrogen utilization and yield[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2017, 33(1): 167-174.
- [16] 胡继杰, 朱练峰, 钟楚, 等. 增氧模式对水稻光合特性及产量的影响[J]. 中国水稻科学, 2017, 31(3): 278-287.
- HU J J, ZHU L F, ZHONG C, et al. Effects of aeration methods on photosynthetic characteristics and yield of rice[J]. Chinese journal of rice science, 2017, 31(3): 278-287.
- [17] WANG Y, SU Z D, WANG J J, et al. Application of calcium peroxide for methane mitigation in paddy fields: effects of milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) incorporation[J]. Agriculture, 2025, 15(5): 520.
- [18] 乔富廉. 植物生理学试验分析测定技术[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2002
- QIAO F L. Plant physiology experimental analysis and determination techniques [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2002.
- [19] 张栋粥. 不同类型增氧剂对水直播稻发芽和幼苗生长的影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2023.
- ZHANG D Z. Effects of different types of oxygenators on germination and seedling growth in water direct seeded rice system [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2023.
- [20] 储为贤. 增氧剂的种类及使用方法[J]. 现代农业科技, 2010(5): 268.
- CHU W X. Types and usage methods of oxygenators[J]. Modern agricultural science and technology, 2010(5): 268.
- [21] 宋雨蒙. 无土栽培模式下复合增氧剂的研制及建兰营养液配方的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2023.

- SONG Y M.Study on preparation of compound oxygenator and formula of nutrient solution of *C. ensifolium* under soilless culture mode[D].Beijing:Beijing Forestry University,2023.
- [22] 胡志华,朱练峰,林育炯,等.根部增氧模式对水稻产量与氮素利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2016,22(6):1503-1512.
- HU Z H,ZHU L F,LIN Y J,et al.Effect of root aeration methods on rice yield and nitrogen utilization[J].Journal of plant nutrition and fertilizers,2016,22(6):1503-1512.
- [23] 赵锋,张卫建,章秀福,等.稻田增氧模式对水稻籽粒灌浆的影响[J].中国水稻科学,2011,25(6):605-612.
- ZHAO F,ZHANG W J,ZHANG X F,et al.Effects of oxygen-increasing patterns in paddy fields on rice grain-filling[J].Chinese journal of rice science,2011,25(6):605-612.
- [24] 赵锋,王丹英,徐春梅,等.水稻对过氧化尿素用量的响应特征[J].中国稻米,2010,16(1):4-8.
- ZHAO F,WANG D Y,XU C M,et al.Response characteristics of rice to the dosage of peroxide urea[J].China rice,2010,16(1):4-8.

(责任编辑:张前锋)



第一作者简介:钱银飞,副研究员,博士。中国微米纳米技术协会高级会员、江西省生态学会理事。主要从事作物栽培生理生态与农业面源污染防治的研究工作。主持国家自然科学基金、江西省自然科学基金、国家重点研发计划任务、国家科技支撑计划子课题等项目 10 余项。发表论文 80 余篇(其中第一或通讯作者 30 余篇,高被引 2 篇),主编论著 1 部,参编 3 部。作为主要完成人获省部级一等奖 2 项,二等奖 2 项,授权国家发明专利 5 项,地方标准 8 项,软件著作权 2 项。曾入选《中国博士后 30 周年成果萃要》,为国家自然科学基金委同行评议专家、中国知网智库专家、维普资讯专家、全国十余省市科技项目评审专家,Frontiers in plant science、生态与农村环境学报等期刊的审稿人。



通信作者简介:彭春瑞,研究员,博士。中国农业绿色发展研究会理事、江西省生态学会副理事长、南昌市农村专业技术协会副理事长。一直从事作物栽培与农业生态方面的研究与推广工作,主持省部级以上课题 30 多项,获国家科技进步奖二等奖 2 项、省部级一等奖 3 项、二等奖 6 项;发表论文 160 多篇,出版论著 15 部;制定地方标准 10 个;获国家发明专利 3 项;获江西省突出贡献人才、江西省主要学科与技术带头人培养对象、江西省新世纪百千万人才工程人选、江西省优势创新团队领军人才、江西省赣鄱英才 555 工程领军人才、江西省青年科学家、江西省直机关“五一”劳动奖章等称号,享受国务院政府特殊津贴。