

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.09.029

加气灌溉对麦秸秆还田后土壤还原性与水稻生长的影响

李江¹ 潘艳川¹ 缴锡云^{1,2} 胡伟钰¹ 刘永¹

(1. 河海大学农业科学与工程学院, 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098)

摘要: 为揭示添加微纳米气泡的加气灌溉对秸秆还田条件下稻麦轮作区水稻生长的影响,并提出合理进气量的加气灌溉方式,设置6个处理(无秸秆还田不加气灌溉(CK)、小麦秸秆还田不加气灌溉(ST)、小麦秸秆还田+进气量0.3 L/min 加气灌溉(SO1)、小麦秸秆还田+进气量0.5 L/min 加气灌溉(SO2)、小麦秸秆还田+进气量0.7 L/min 加气灌溉(SO3)和小麦秸秆还田+进气量0.9 L/min 加气灌溉(SO4))开展水稻盆栽试验,观测不同处理下的土壤还原性状况以及水稻生长规律。结果表明:秸秆还田会显著增强土壤的还原性状况,微纳米加气灌溉可以改善土壤还原性,且随着进气量的增加改善效果逐渐增强,当进气量为0.9 L/min 时,土壤活性还原性物质含量、Fe²⁺ 含量、Mn²⁺ 含量最高可降低48.66%、56.11%和42.76%;进气量在0.5~0.7 L/min 时的加气灌溉能够促进水稻的生长发育,缓解秸秆还田带来的水稻生长前期生长受到抑制的问题,促进水稻根系良好生长,利于水稻光合作用的有效性,促进干物质积累,从而提高水稻产量,微纳米加气灌溉处理较无秸秆还田以及秸秆还田不加气灌溉处理最高可增产19.7%。综合考虑添加微纳米气泡的加气灌溉对于改善秸秆还田后土壤的还原性以及水稻生长发育的影响,推荐使用溶解氧质量浓度为8.06 mg/L 的微纳米气泡水(SO3 处理)对稻麦轮作区秸秆还田后的水稻进行灌溉。

关键词: 水稻; 微纳米加气; 灌溉; 秸秆还田; 土壤还原性; 作物生长

中图分类号: S275 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)09-0250-10 OSID: 

Effects of Aerated Irrigation on Rice Growth and Soil Reducibility under Wheat Straw Returning Conditions

LI Jiang¹ PAN Yanchuan¹ JIAO Xiyun^{1,2} HU Weiyu¹ LIU Yong¹

(1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to reveal the effects of micro-nano aerated irrigation on rice growth under straw returning condition in wheat – rice rotation area and put forward the optimal aerated irrigation method, rice pot experiments were conducted and six experiment treatments were set up, i. e., no straw returning with no aeration irrigation treatment (CK), wheat straw returning with no aeration irrigation treatment (ST), wheat straw returning with 0.3 L/min air intake micro-nano aerated irrigation treatment (SO1), wheat straw returning with 0.5 L/min air intake micro-nano aerated irrigation treatment (SO2), wheat straw returning with 0.7 L/min air intake micro-nano aerated irrigation treatment (SO3), and wheat straw returning with 0.9 L/min air intake micro-nano aerated irrigation treatment (SO4). The soil reduction characteristics and rice growth under different treatments were observed. Results showed that straw returning could enhance the soil reducibility significantly. Micro-nano aerated irrigation could improve the soil reducibility, and the improvement effect would be enhanced gradually with the increase of air intake volume. When the air intake volume was 0.9 L/min, the contents of soil reductive organic matter, Fe²⁺ and Mn²⁺ could be reduced by 48.66%, 56.11% and 42.76%, respectively. Aerated irrigation with an air intake of 0.5 ~ 0.7 L/min could promote the growth and development of rice,

收稿日期: 2021-06-21 修回日期: 2021-07-21

基金项目: 江苏省自然科学基金青年项目(BK20200524)、国家自然科学基金项目(52009030)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(B210202120)

作者简介: 李江(1989—),女,教授,博士,主要从事农业高效用水研究,E-mail: lijia@hhu.edu.cn

通信作者: 缴锡云(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: xyjiao@hhu.edu.cn

alleviate the problem of the rice growth inhibition in the early stage caused by straw returning, and promote the growth of rice roots, which was conducive to rice photosynthesis, promoting the accumulation of dry matter, and thereby increasing the rice yield. The highest yield improvement could be reached 19.7% after aerated irrigation. Considering the effect of micro-nano aerated irrigation on soil reducibility and rice growth, micro-nano bubble water with dissolved oxygen concentration of 8.06 mg/L (SO₃ treatment) was recommended to irrigate rice under straw returning conditions in wheat-rice rotation areas.

Key words: rice; micro-nano aeration; irrigation; straw returning; soil reducibility; crop growth

0 引言

作物秸秆含有丰富的氮、磷、钾和有机质,施加到农田中可以提高土壤养分含量、调节土壤酸碱度。合理的秸秆还田方式可以改善土壤的水、肥、气、热等状况,优化农田环境、培育地力,提高作物品质与产量^[1-2],进而带来较高的生态、经济及社会效益,利于维持农业的可持续发展。近年来我国大力发展秸秆还田制度,然而南方水田区域秸秆还田后田面水发黑变臭、土壤还原性升高的问题频频发生。有研究发现稻田淹水环境造成的低氧胁迫加之秸秆还田的作用,会促使土壤中 H₂S、Fe²⁺、Mn²⁺ 等还原性物质累积而引起毒害,造成水稻根系发黑^[3]。土壤还原性物质含量反映了土壤的氧化还原状况,土壤长期处于较强的氧化还原状况,作物生长会受到危害^[4]。在我国南方稻麦轮作区,小麦收获后其秸秆会直接翻埋还至田中,而麦秸秆还田会致使土壤还原性物质升高,威胁淹水环境下的水稻生长发育^[5]。因此,对稻麦轮作区秸秆还田后淹灌水稻开展改善土壤还原性研究,对于维持水稻正常的生长发育具有重要意义。

微纳米气泡水中气泡的粒径为纳米级别,能够长期滞留于土壤和水体中,增加气体在水溶液中的溶解度,富集水中的活性氧。其吸附性能强,可以改善水体的淹水嫌气环境,为好氧菌落提供生存处所,从而缓解厌氧条件下氮磷物质的无序生成难题^[6]。与传统的加气技术相比,微纳米气泡水有利于减小水体的扰动进而减少不必要的气体挥发。近年来微纳米加气增氧技术被广泛地应用于水质处理^[7]、农业灌溉^[8-9]、地下水修复^[10]等方面。农业生产中加气灌溉可以有效改善土壤的通气条件,抑制土壤还原性物质的积累,为作物生长提供有益环境,提高作物产量与品质^[11-17]。针对秸秆还田后南方水田出现的土壤还原性物质增多、水稻根系呼吸减弱等现象,可以尝试使用微纳米加气增氧灌溉技术来缓解这一问题。本研究以稻麦轮作区小麦秸秆还田后的淹灌水稻为研究对象,开展盆栽试验研究不同进气量的微纳米加气灌溉处理条件下稻田土壤的还原性以及水稻的生长状况,探索微纳米加气灌溉技术对

秸秆还田后水稻的生长环境及生长发育的影响规律,为制定适宜的微纳米加气灌溉制度提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计与材料

本试验于 2020 年 6—12 月在江苏省南京市河海大学节水园区内(31°54′57″N、118°46′37″E)开展。试验盆采用直径 56 cm、深 80 cm 的圆桶,圆桶四周密封,底部填有厚度 5 cm 的砂石反滤层,反滤层侧壁设有出水口,盆栽示意图如图 1 所示。试验共设 6 个处理(CK、ST、SO₁、SO₂、SO₃、SO₄),每个处理 3 次重复,见表 1。根据江苏省农民耕作习惯,将小麦秸秆以翻埋的形式与土壤进行混合施于土壤表层 0~20 cm 处,秸秆还田后向 SO 处理的盆栽内灌溉经微纳米加气设备处理形成的微纳米气泡水。水稻采用集中育秧后移栽的方式进行栽培,泡田期后每盆栽 5 穴,穴距和行距均为 15 cm,每穴 3 株;泡田水量为 12 cm,返青分蘖期保持 5 cm 的浅水层,泡田期开始保证 5 mm/d 的渗漏水量;泡田期施基肥 300 kg/hm²(复合肥, N、P、K 含量为 18%、18%、18%),返青期施尿素 150 kg/hm²(CO(NH₂)₂, 含氮量大于等于 46.4%),分蘖期施尿素 75 kg/hm²(CO(NH₂)₂, 含氮量大于等于 46.4%) 和穗肥 150 kg/hm²(CO(NH₂)₂, 含氮量大于等于 46.4%)。

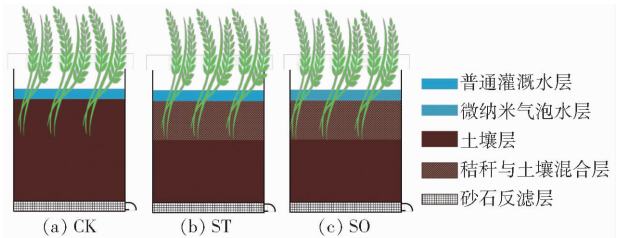


图 1 盆栽示意图

Fig. 1 Schematics of rice pot experiments

供试土壤为粉砂壤土,容重 1.2 g/cm³,pH 值 5.92,速效氮质量比 47.4 mg/kg、速效磷质量比 10.37 mg/kg、速效钾质量比 90 mg/kg。试验采用的秸秆为小麦秸秆,经风干、粉碎至 3~5 cm,其总氮质量比 3.8 g/kg、总磷质量比 0.66 g/kg。供试水稻为南粳 9108,5 月 30 日育秧、7 月 10 日移栽,其生育

表 1 试验处理

Tab.1 Details of different experiment treatments

处理	秸秆	微纳米气泡水生成参数		灌溉水溶解氧
	还田量/ (t·hm ⁻²)	进水量/ (L·min ⁻¹)	进气量/ (L·min ⁻¹)	质量浓度/ (mg·L ⁻¹)
CK	0	8	0	2.76
ST	7	8	0	2.76
SO1	7	8	0.3	7.68
SO2	7	8	0.5	7.71
SO3	7	8	0.7	8.06
SO4	7	8	0.9	8.62

注:灌溉水溶解氧质量浓度利用雷磁 DZB-718 型便携式多参数分析仪测定,所用方法为玻璃电极法。

期分为泡田期(7月2—10日)、返青期(7月11—29日)、分蘖期(7月30日—8月30日)、拔节期(8月31日—9月16日)、抽穗期(9月17—26日)、乳熟

表 2 试验测定项目与方法

Tab.2 Details of experiment measurements

测定项目		方法	参考标准/说明
土壤还原性物质	活性还原性物质含量	硫酸铝浸提-高锰酸钾滴定法(容量法)	F-HZ-DZ-TR-0160
	Fe ²⁺ 含量	0.5% 邻菲罗啉比色法	鲁如坤《土壤农业化学分析方法》
	Mn ²⁺ 含量	硫酸铝浸提-分光光度法	F-HZ-DZ-TR-0159
作物生长生理指标	株高	卷尺测定	自植株地面至植株顶端的高度
	SPAD	叶绿素仪测定	
	蒸腾速率	LI-6800 型便携式光合仪测定	
	净光合速率	LI-6800 型便携式光合仪测定	测定时间:无云或少云的晴天 09:30—10:30
	气孔导度	LI-6800 型便携式光合仪测定	部位:水稻最新展开叶中部分
	胞间 CO ₂ 浓度	LI-6800 型便携式光合仪测定	
	干物质量	干燥后称量	水稻地上部及根系
	产量	称量	

1.3 数据分析与处理

利用 Microsoft Excel 2019 软件对数据进行计算处理,利用 Microsoft Excel 2019、Microsoft PowerPoint 2019 与 Microsoft Visio 2013 软件进行绘图,采用 SPSS 22.0 软件进行单因素方差分析和相关性分析,采用 Duncan 方法进行显著性检验($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 微纳米加气灌溉对稻田土壤还原性物质的影响

2.1.1 活性还原性物质

各处理不同土层活性还原性物质含量(质量摩尔浓度)随水稻生长发育的动态变化如图 2a 所示,本盆栽试验土壤活性还原性物质含量在 0.05 ~ 19.55 cmol/kg 范围内。不同处理下各土层的活性还原性物质含量变化趋势总体一致,表现为随着时间的推移逐渐增大直至抽穗开花期后逐渐减小。水稻生育期内小麦秸秆还田不加气灌溉(ST)条件下的各土层活性还原性物质含量均高于相同时段内其

他处理的含量,且随着土层深度的加深,ST 与 CK 处理下的活性还原性物质含量最高值差异逐渐减小。可见秸秆还田对于深层土壤活性还原性物质的影响较小,对增加 0 ~ 20 cm 秸秆还田层土壤的活性还原性物质效果较为明显。微纳米加气灌溉处理(SO)相比于 ST 处理可降低土壤活性还原性物质含量,总体来看,随着进气量越大土壤活性还原性物质的降低效果越优,且各土层上 SO3 和 SO4 处理的土壤活性还原性物质含量差距较小,说明 0.7 L/min 和 0.9 L/min 进气量的微纳米加气灌溉对于麦秸秆还田后稻田土壤活性还原性物质的改善效果优于 0.3 L/min 和 0.5 L/min,且 0.7 L/min 和 0.9 L/min 差别不大。

1.2 测定项目与方法

本试验主要监测项目为土壤还原性物质以及作物生长生理指标。土壤还原性物质的监测深度为 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm;测定指标为:土壤活性还原性物质含量、土壤 Fe²⁺ 含量、土壤 Mn²⁺ 含量。水稻生长生理指标包括:株高、叶绿素含量(Soil and plant analyzer development, SPAD)、光合参数、穗数、穗粒数、千粒质量、结实率、干物质量及产量。各测定项目及其方法见表 2。

他处理的含量,且随着土层深度的加深,ST 与 CK 处理下的活性还原性物质含量最高值差异逐渐减小。可见秸秆还田对于深层土壤活性还原性物质的影响较小,对增加 0 ~ 20 cm 秸秆还田层土壤的活性还原性物质效果较为明显。微纳米加气灌溉处理(SO)相比于 ST 处理可降低土壤活性还原性物质含量,总体来看,随着进气量越大土壤活性还原性物质的降低效果越优,且各土层上 SO3 和 SO4 处理的土壤活性还原性物质含量差距较小,说明 0.7 L/min 和 0.9 L/min 进气量的微纳米加气灌溉对于麦秸秆还田后稻田土壤活性还原性物质的改善效果优于 0.3 L/min 和 0.5 L/min,且 0.7 L/min 和 0.9 L/min 差别不大。

图 3a(图中不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$),下同)为生育期内不同土层上活性还原性物质的平均含量,结果显示 ST 处理下各土层的活性还原性物质含量均显著高于 CK 处理,而加气灌溉可以显著降低秸秆还田后土壤活性还原性物质含

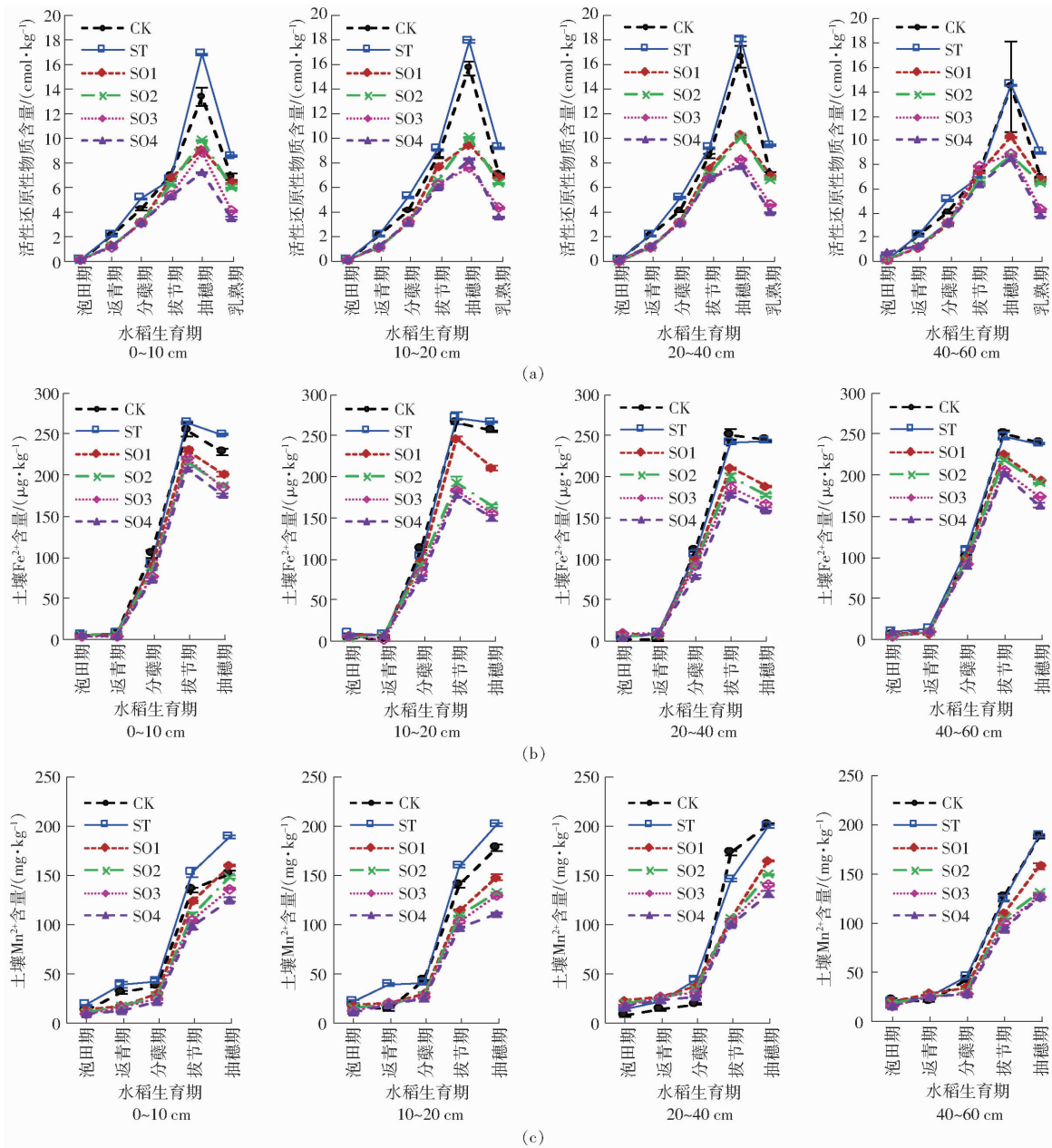


图 2 不同处理下不同土层土壤还原性物质含量变化曲线

Fig.2 Dynamic variations of reducing substances in different soil layers under various experiment treatments

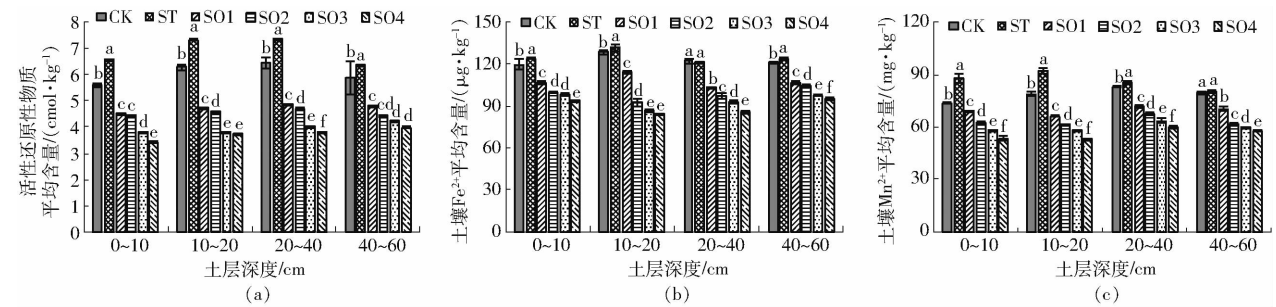


图 3 不同处理下不同土层土壤还原性物质平均含量

Fig.3 Mean values of reducing substances in different soil layers under various experiment treatments

量,并随着进气量的逐步增大,土壤活性还原性物质含量逐步降低,在 SO4 处理达到最低。SO4 处理下 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 土层活性还原性物质含量较 ST 处理分别降低 47.71%、

48.66%、46.17% 和 37.25%。在 0 ~ 10 cm 和 40 ~ 60 cm 土层下 SO1 与 SO2 处理对土壤活性还原性物质的影响差异不显著;除 40 ~ 60 cm 土层外,SO2 与 SO3 处理下的土壤活性还原性物质含量均具有显著

性差异;0~10 cm 和 20~40 cm 下,SO3 和 SO4 处理对土壤活性还原性物质影响的差异较为显著。

2.1.2 土壤 Fe²⁺

各土层 Fe²⁺ 含量随水稻生长发育动态变化趋势见图 2b,生育期内土壤 Fe²⁺ 含量(质量比)在 1~272 μg/kg 之间变化。不同处理下各土层 Fe²⁺ 含量均呈现出先上升后下降的趋势,土壤 Fe²⁺ 含量最高值出现在水稻拔节期。CK 和 ST 处理对比显示,生育期内 ST 处理下 0~20 cm 土层的土壤 Fe²⁺ 含量均高于 CK 处理;20~60 cm 土层的土壤 Fe²⁺ 含量在泡田期、返青期、分蘖期与抽穗期内 ST 处理高于 CK 处理,而拔节期 CK 处理下的土壤 Fe²⁺ 含量略高于 ST 处理;可见秸秆还田后还田层的土壤 Fe²⁺ 含量会明显增多。加气灌溉处理下各土层 Fe²⁺ 含量均会明显低于不加气灌溉处理,且随着进气量的不断增大各层土壤 Fe²⁺ 含量不断降低,说明进气量越大土壤 Fe²⁺ 含量越低。生育期内各土层 Fe²⁺ 平均含量如图 3b 所示,除 20~40 cm 外,秸秆还田处理(ST)会显著提高土壤 Fe²⁺ 含量;加气灌溉处理(SO)下各土层中 Fe²⁺ 含量均显著低于不加气灌溉处理,随着进气量的逐步增大各层土壤 Fe²⁺ 平均含量逐步减小;SO4 处理较 ST 处理的 Fe²⁺ 平均含量在 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 土层分别降低了 32.65%、56.11%、41.71% 和 30.35%。0~10 cm 土层 Fe²⁺ 含量在 SO2 与 SO3 处理下的变化不显著;10~20 cm 土层 SO3 与 SO4 处理对土壤 Fe²⁺ 含量影响的差异不显著;20~60 cm 土层,土壤 Fe²⁺ 含量在不同加气处理下的变化均具有显著性差异。

2.1.3 土壤 Mn²⁺

不同处理各土层 Mn²⁺ 含量动态变化趋势总体一致(图 2c),随着时间的推移各土层 Mn²⁺ 含量不断升高,尤以自水稻分蘖期后增长较快,各处理生育期内土壤 Mn²⁺ 含量(质量比)在 8~201 mg/kg 范围。全生育期内 ST 处理条件下秸秆还田层(0~20 cm)的土壤 Mn²⁺ 含量高于其他处理,加气处理可以降低该层各生育阶段内的土壤 Mn²⁺ 含量;20~40 cm 土

层内,CK 处理下土壤 Mn²⁺ 含量在水稻生育前期低于其他处理,而在水稻生育后期该土层内土壤 Mn²⁺ 含量高于其他处理;40~60 cm 土层内,CK 与 ST 处理下土壤 Mn²⁺ 含量的差异不大,SO 处理下土壤 Mn²⁺ 含量低于 ST 与 CK 处理。由图 2c 可知,加气灌溉可以降低土壤 Mn²⁺ 含量,尤其是在水稻生育后期这种降低效果较为显著。生育期内各土层 Mn²⁺ 平均含量如图 3c 所示,除 40~60 cm 土层 CK 处理与 ST 处理对于土壤 Mn²⁺ 含量的影响变化不显著外,同一土层内各处理下的土壤 Mn²⁺ 平均含量均具有显著性差异。不同处理下,生育期内各土层中 Mn²⁺ 平均含量由大到小依次为 ST 处理、CK 处理、SO1 处理、SO2 处理、SO3 处理、SO4 处理。说明随进气量的逐步增大各土层 Mn²⁺ 含量逐渐降低,SO4 处理与 ST 处理相比,0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 土层中土壤 Mn²⁺ 平均含量分别降低了 39.30%、42.76%、29.67% 和 28.03%。

2.2 微纳米加气灌溉对水稻生长指标的影响

不同时间段各处理下水稻株高生长动态变化见图 4a,各处理下水稻株高动态表现出相同的趋势,均随着时间的推移不断增大,并在后期趋于稳定水平。CK 处理与 ST 处理下株高生长的变化没有显著性差异,整个生育期内 SO3 和 SO4 处理会偶尔对株高的生长有抑制作用,但在生育后期各处理下水稻株高并无显著性差异,成熟后本试验的水稻株高在 86 cm 左右。图 4b 为水稻茎蘖数的动态变化,在水稻生长前期 CK、ST、SO1、SO2、SO3 处理下水稻茎蘖数差异不显著,水稻生长后期 ST 处理下的茎蘖数显著低于 CK 处理,但在水稻生长末期(乳熟期)SO1、SO2、SO3 处理可以提高秸秆还田后的水稻茎蘖数,SO2 处理下最终茎蘖数最多,但与 SO1 和 SO3 处理的差异不显著;整个生育期内 SO4 处理下水稻茎蘖数明显低于其余处理。SPAD 是表示植物叶片叶绿素含量相对值的一个无量纲数值,SPAD 越大表示叶绿素含量越高,图 4c 为不同生育阶段各处理下水稻剑叶 SPAD,生育期内本试验中水稻剑叶 SPAD 在 44~52 之间,SPAD 在水稻抽穗期时最高、

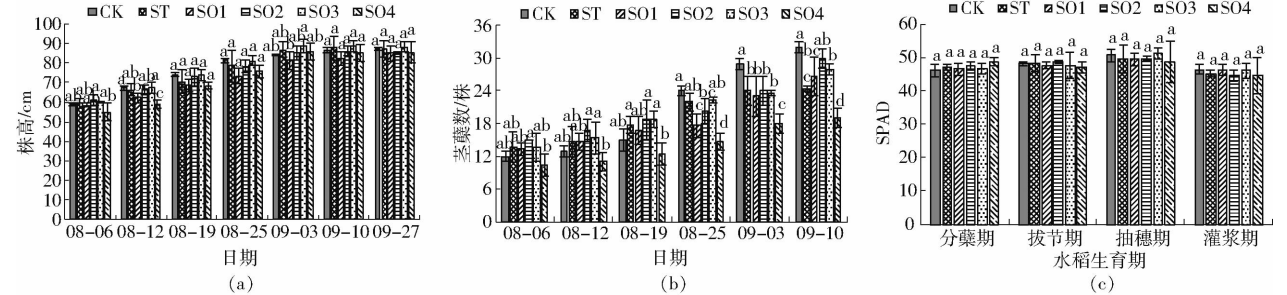


图 4 不同阶段不同处理下水稻株高、茎蘖数以及 SPAD

Fig.4 Plant heights, tillers number and SPAD of rice under various experiment treatments

乳熟期时最低,各处理对 SPAD 的影响不显著。

2.3 微纳米加气灌溉对水稻光合作用的影响

2.3.1 气孔导度

图 5a 为不同处理下水稻在各生育阶段的气孔导度,相较于无秸秆还田处理(CK),各个秸秆还田处理均能增加水稻在所有生育阶段内的气孔导度。除灌浆期 SO4 处理外,各秸秆还田处理在全生育期内与 CK 处理的差异均呈显著性水平。同时,ST、SO2、SO3 和 SO4 处理下水稻气孔导度均随时间的推移逐渐降低,而 CK 与 SO1 处理下的水稻气孔导

度从分蘖期升高至拔节期达到最大后开始逐渐降低。秸秆还田条件下,分蘖期与抽穗期 SO1 处理下的水稻气孔导度与其他处理下的气孔导度具有显著性差异;拔节期各处理之间没有显著性差异;灌浆期 SO4 处理与其他处理具有显著性差异。对比各加气灌溉处理可以发现,在分蘖期和抽穗期进气量自 0.3 L/min 增大到 0.7 L/min 时水稻气孔导度逐渐增大,0.9 L/min 进气量下气孔导度开始降低;拔节期在 0.9 L/min 进气量下的水稻气孔导度最大;灌浆期水稻气孔导度的最大值出现在进气量为

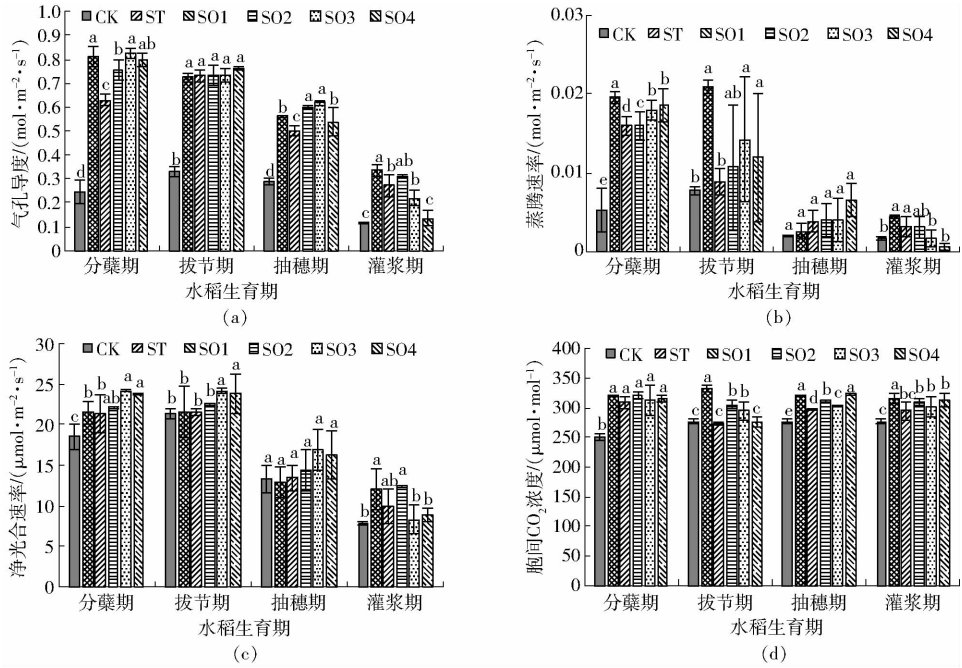


图 5 不同生育期水稻气孔导度、蒸腾速率、净光合速率以及胞间 CO₂ 浓度
Fig.5 Stomatal conductance, transpiration rate, photosynthetic rate and intercellular CO₂ concentration during crop growth period under different experiment treatments

0.5 L/min 处理;说明不同时期进气量对于水稻气孔导度的影响不一致。

2.3.2 蒸腾速率

水稻不同生育阶段各处理下的蒸腾速率如图 5b 所示,与气孔导度结果一致,ST 处理下水稻蒸腾速率远高于 CK 处理,说明秸秆还田加速了水稻的蒸腾作用。CK 处理与 ST 处理下水稻拔节期的蒸腾速率最高,而 SO 处理下水稻分蘖期的蒸腾速率高于其他时期。除抽穗期外,秸秆还田后加气灌溉会降低水稻的蒸腾速率,尤其是在分蘖期各个加气灌溉处理(SO)与不加气处理(ST)的蒸腾速率差异均具有显著性,可见加气灌溉降低了分蘖期水稻的蒸腾速率;拔节期 ST 处理与 SO1 处理的水稻蒸腾速率差异显著;灌浆期 ST、SO3、SO4 处理之间的水稻蒸腾速率具有显著性差异。本试验结果显示,虽然微纳米加气灌溉降低了秸秆还田后水稻的蒸腾速率,但仍高于 CK 处理下的水稻蒸腾速率。

2.3.3 净光合速率

图 5c 为不同生育阶段各处理下的水稻净光合速率。秸秆还田后(ST 处理)水稻在分蘖期与灌浆期的净光合速率较 CK 处理显著提高,而拔节期与抽穗期 CK 处理与 ST 处理下净光合速率没有显著性差异。在秸秆还田条件下,加气灌溉处理(SO)的水稻在分蘖期、拔节期和抽穗期光合速率均高于不加气灌溉处理(ST),且在水稻分蘖期和拔节期 SO3、SO4 处理与 ST 处理的差异呈显著性水平。随着进气量从 0 L/min 增长至 0.7 L/min,水稻在分蘖期、拔节期和抽穗期光合速率逐渐提高,同时进气量为 0.9 L/min(SO4 处理)和 0.7 L/min(SO3 处理)时水稻在各个生育阶段的光合速率差异性很小。SO3 处理下的水稻在分蘖期、拔节期和抽穗期光合速率均高于同时期其他处理下的光合速率,其较 ST 处理分别高 11.2%、11%、23.28%,较 CK 处理分别高 23.54%、11.42%、21.48%;SO2 处理下的水稻在

灌浆期的光合速率高于其他处理,较 ST、CK 处理分别高 2.89% 和 36.76%。

2.3.4 胞间 CO₂ 浓度

不同处理水稻各生育阶段胞间 CO₂ 浓度如图 5d 所示。各时期 ST 处理下水稻胞间 CO₂ 浓度均高于同时期其他处理,且均显著高于 CK 处理;加气灌溉(SO 处理)下的水稻胞间 CO₂ 浓度低于未加气灌溉(ST 处理),但仍高于秸秆未还田条件(CK 处理)。不加气灌溉处理(CK 和 ST 处理)水稻胞间 CO₂ 浓度在拔节期达到最大值,而加气灌溉处理(SO 处理)于拔节期达到最小值,结合图 5c 可知,加气灌溉处理下水稻在拔节期光合作用最为强烈,因此期间的胞间 CO₂ 浓度最低。对比进气量对水稻胞间 CO₂ 浓度的影响,总体来说进气量对于胞间 CO₂ 浓度没有显著性差异,仅在抽穗期各个加气灌溉处理间具有显著性差异,此处理下水稻胞间 CO₂ 浓度最高的为 SO4 处理,较浓度最低的 SO1 处理高

7.94%。

2.4 微纳米加气灌溉对水稻干物质及产量的影响

收获后水稻地上干物质质量在 47.97~51.8 g/单穴之间,根系干物质含量在 38.78%~52.12% 之间(表 3);CK 处理与 ST 处理下干物质质量的差异性并不显著。本试验中 SO1、SO2、SO3 处理下水稻的地上干物质质量高于不加气处理(CK、ST 处理),而 SO4 处理下的地上干物质质量最低;SO 处理下水稻根系干物质含量高于 ST 处理,并且在 SO3、SO4 处理下与 ST 处理的根系干物质含量具有显著性差异。各处理下水稻产量及其构成(表 3)表明,CK 与 ST 处理对水稻产量的影响不显著;SO 处理的穗数低于 ST 与 CK 处理;但是 SO 处理会提升水稻的穗粒数、千粒质量、结实率以及产量,并且 SO2、SO3 处理下具有显著提升作用;本试验中水稻在 SO3 处理下的产量最高,其较 CK、ST 处理可分别增产 19.7% 和 19.4%。

表 3 不同处理收获后水稻干物质质量及产量
Tab.3 Dry matter and yield of rice under different experiment treatments

处理	地上干物质质量/ (g·单穴 ⁻¹)	根系干物质 含量/%	产量及其构成				
			穗数/ (万穗·hm ⁻²)	穗粒数/ (粒·穗 ⁻¹)	千粒质量/g	结实率/%	产量/(t·hm ⁻²)
CK	(48.60±3.25) ^a	(38.78±3.39) ^b	(385.9±4.4) ^a	(102.6±7.06) ^b	(24.11±0.37) ^b	(83.56±0.40) ^b	(7.97±0.51) ^b
ST	(49.50±1.71) ^a	(39.54±7.50) ^b	(385.9±3.5) ^a	(100.7±8.06) ^b	(24.58±0.30) ^b	(83.64±0.17) ^b	(7.99±0.31) ^b
SO1	(49.87±1.69) ^a	(43.92±0.81) ^b	(385.9±4.6) ^a	(103.0±3.60) ^b	(25.58±0.03) ^b	(84.94±0.92) ^a	(8.54±0.82) ^b
SO2	(51.03±1.85) ^a	(47.09±2.52) ^{ab}	(365.6±3.5) ^b	(111.7±4.70) ^a	(26.82±1.02) ^a	(84.68±0.75) ^{ab}	(9.27±0.38) ^a
SO3	(51.80±5.80) ^a	(52.12±1.43) ^a	(365.6±7.0) ^b	(114.0±11.50) ^a	(26.78±0.19) ^a	(85.51±0.53) ^a	(9.54±0.12) ^a
SO4	(47.97±0.72) ^a	(47.40±0.81) ^a	(385.9±1.7) ^a	(102.3±4.17) ^b	(24.83±0.95) ^b	(84.35±0.76) ^b	(8.27±0.48) ^b

注:同一列数据后不同字母表示各处理间差异显著(P<0.05)。

3 讨论

稻田土壤长期处于淹水环境下会造成土壤氧气不足,加之秸秆还田后秸秆在土壤中发生腐解会消耗土壤中的氧气,再度提高土壤的还原性^[18]。本研究发现秸秆还田后水稻各土层的土壤还原性物质会显著升高,这与 WANG 等^[19] 研究结果一致。而微纳米加气灌溉对于降低土壤活性还原性物质含量具有显著效果,这是由于加气灌溉为土壤提供了充足的氧气,改变了土壤长期处于厌氧环境的状况^[20],从而抑制了土壤活性还原性物质的产生。水溶性 Fe²⁺、Mn²⁺ 是土壤中活性较高的有毒还原性物质^[21-22],本研究结果显示秸秆还田会显著提高土壤中 Fe²⁺、Mn²⁺ 含量,原因可能为秸秆在还田层通过消耗土壤中的氧气进行分解,造成了土壤长期处于厌氧条件,给 Fe²⁺、Mn²⁺ 的累积创造了条件,且秸秆还田致使稻田土壤氧化还原电位降低,在低氧化还

原电位环境下,土壤中的铁以二价态形式大量溶解于土壤溶液中,致使土壤 Fe²⁺ 含量增多^[23],而加气增氧灌溉使得土壤厌氧环境有所改善,从而抑制土壤 Fe²⁺、Mn²⁺ 的累积^[24],进而降低了土壤 Fe²⁺、Mn²⁺ 含量。

水稻株高以及茎蘖数受作物基因、激素以及环境等因素影响^[25],本研究发现秸秆还田以及加气灌溉对水稻株高生长的影响不大,本盆栽试验的水稻株高在收获前为 84~89 cm,与相同研究区水稻盆栽试验收获时的株高^[26] 一致。秸秆还田处理下的水稻在其生长后期茎蘖数低于 CK 处理,这是由于秸秆还田会在一定程度上抑制水稻的分蘖,降低水稻分蘖速度,且产生无效分蘖^[27]。0.3~0.7 L/min 的微纳米加气灌溉可以改善秸秆还田耕作方式下水稻生长后期分蘖受抑制的现象,而在进气量 0.9 L/min 的加气灌溉条件下水稻分蘖也会因秸秆还田而造成抑制,可见进气量过高时对水稻进行加气灌溉会使

得茎蘖数在一定程度上减少,原因可能是为水稻输送的化学氧过多而达到氧饱和,对作物造成了氧伤害从而降低了分蘖速度和茎蘖数。秸秆还田以及加气灌溉对于水稻 SPAD 的影响不大,这是因为叶绿素的载体叶绿体,其数量、形状和大小主要与植物种类以及生长环境有关^[28],而秸秆还田以及加气灌溉并不影响水稻的叶绿体。

光合作用是植物形成干物质的基础^[29],水稻产量 90% 来自叶片的光合作用^[30],光照、水分和养分是影响作物光合速率的重要因素。本研究发现,秸秆还田条件下水稻的气孔导度、蒸腾速率、净光合速率、胞间 CO_2 浓度都会有所提高,说明秸秆还田至土壤中对于作物光合作用具有正面效应,这与前人研究结论^[31-32]一致。而加气灌溉条件下水稻的气孔导度、蒸腾速率、净光合速率、胞间 CO_2 浓度相对于没有加气灌溉的秸秆还田作用下略有降低,但各指标值仍高于无秸秆还田处理。可以发现秸秆还田有利于水稻蒸腾速率的提升,利于水稻蒸腾作用的发生。本研究结果显示,水稻生育期内气孔导度、净光合速率和蒸腾速率随时间变化规律整体一致,均为生育前期较高,抽穗、灌浆期较低。秸秆还田条件下不同加气处理对于水稻光合作用的影响在水稻各生育期表现不一致,但是整体来看进气量 0.5、0.7 L/min 下的微纳米灌溉对于水稻光合作用具有正面效应。

根系是作物与外界环境发生物质、能量与信息交换的重要器官,而土壤物理、化学和生物学特性以及施肥等因素均可直接影响根系生长、分布与功能,从而影响植株地上器官的生长发育和形态组成,最终影响作物产量^[33]。本试验结果显示,微纳米加气灌溉可以促进水稻根系干物质的累积,这是由于加气灌溉优化了水稻根际土壤的通气环境,促进了根系的生长。然而进气量过大亦会导致土体环境的氧含量过高,对水稻根系细胞产生一定程度的氧伤害;如进气量达到 0.9 L/min 时水稻根系干物质含量会有所降低,说明过高的进气量对于水稻根系干物质累积无法达到最佳的效果。受根系的影响,本试验中水稻地上干物质累积的结果与地下干物质结果一致,均为进气量 0.7 L/min 对于其累积效果最佳,而进气量 0.9 L/min 相对于 0.7 L/min 容易造成轻微的氧伤害使得地上干物质质量降低,但是加气灌溉条件下干物质质量整体高于没有加气灌溉处理。

作物产量是农业生产活动中的主要考虑因素^[34],本研究结果显示秸秆还田有利于提升水稻产

量,这与何艳等^[35]研究结论一致。本试验发现适宜进气量的加气灌溉能够使得秸秆还田带来的增产效果更优,也与 SANG 等^[36]的研究结果一致。加气灌溉使得水稻穗粒数、千粒质量、结实率及产量得到提高,且进气量自 0.3 L/min 增大至 0.7 L/min 水稻产量也逐步增加;而进气量达到 0.9 L/min 时,水稻产量有所降低,其产量在加气灌溉处理之间为最低,说明 0.9 L/min 进气量对于提升水稻产量的效果有限,其原因可能是 0.9 L/min 进气量提供给水稻生长的氧气量超过了水稻的负荷,削弱了加气灌溉的增产效果,这也与本研究得到的 0.9 L/min 进气量对于水稻分蘖、光合作用及干物质积累的效果不佳的结论一致。

由以上讨论分析可知,秸秆还田后土壤还原性升高,可以利用微纳米加气灌溉来降低土壤的还原性,并且水稻也可以充分利用微纳米气泡水中的氧气促进其根系生长与光合作用,进而提升干物质与产量的累积;但进气量过大亦会造成氧气质量浓度过高,而抑制水稻的生长发育,这与周云鹏等^[37]对微纳米加气灌溉条件下水培蔬菜生长发育的研究结论一致。因此,本研究综合考虑秸秆还田条件下水稻土壤的还原性以及作物生长,建议所使用的最佳微纳米进气量为 0.7 L/min (溶解氧质量浓度为 8.06 mg/L)。值得注意的是,本文结论是基于 2020 年一季水稻生长数据所得,年际间气象因素的变化可能会对水稻生长造成影响,但是盆栽试验为探索性基础试验,本文的试验结论可作为后续相关研究的参考。后续可将研究尺度从盆栽拓展为大田试验,以便为微纳米加气灌溉技术应用于稻麦轮作区小麦秸秆还田后水稻生长提供实践支撑。

4 结束语

加气灌溉能够显著改善秸秆还田后稻田土壤的还原环境,且随着进气量的逐步增大,土壤活性还原性物质含量、 Fe^{2+} 含量、 Mn^{2+} 含量逐渐降低;适宜进气量的微纳米加气灌溉能够促进水稻的生长发育,缓解秸秆还田带来的水稻生长前期生长受到抑制的问题,促进水稻根系生长,利于水稻干物质积累及光合作用,从而提高水稻产量;本试验条件下,进气量 0.7 L/min 的微纳米加气灌溉(溶解氧质量浓度为 8.06 mg/L 的微纳米气泡水)对于稻麦轮作区小麦秸秆还田后,农田土壤的还原性状况以及水稻生长发育的改善效果最优。

参 考 文 献

- [1] 张忠学,李铁成,齐智娟,等. 控制灌溉下秸秆还田对稻田土壤氮素组成的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2019,

- 50(11): 229–238.
ZHANG Zhongxue, LI Tiecheng, QI Zhijuan, et al. Effects of straw returning on nitrogen composition in paddy soil under controlled irrigation [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 229–238. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191126&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.026. (in Chinese)
- [2] 房焕, 李奕, 周虎, 等. 稻麦轮作区秸秆还田对水稻土结构的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 297–302.
FANG Huan, LI Yi, ZHOU Hu, et al. Effects of straw incorporation on paddy soil structure in rice-wheat rotation system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 297–302. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180434&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.034. (in Chinese)
- [3] 王红妮, 王学春, 黄晶, 等. 秸秆还田对土壤还原性和水稻根系生长及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(20): 116–126.
WANG Hongni, WANG Xuechun, HUANG Jing, et al. Effect of straw incorporated into soil on reducibility in soil and root system and yield of rice [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(20): 116–126. (in Chinese)
- [4] 田玉聪, 冯香诏, 高珍珍, 等. 稻虾共作模式不同水稻播期土壤还原性物质含量及经济效益分析[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(11): 57–61.
TIAN Yucong, FENG Xiangzhao, GAO Zhenzhen, et al. Analysis of soil reducing substance content and economic effect in different sowing times of integrated rice-crayfish system [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2020, 59(11): 57–61. (in Chinese)
- [5] 韩玉玲. 玉稻轮作下秸秆全量还田对土壤培肥及钾肥减施效应的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.
HAN Yuling. Effects of straw returning on soil fertility and potassium fertilizer reduction in maize-rice cropping system [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [6] 陈慧, 李亮, 蔡焕杰, 等. 加气条件下土壤 N_2O 排放对硝化/反硝化细菌数量的响应[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 303–311.
CHEN Hui, LI Liang, CAI Huanjie, et al. Response of soil N_2O fluxes to soil nitrifying and denitrifying bacteria under aerated irrigation [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 303–311. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180435&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.035. (in Chinese)
- [7] WANG H, ZHANG L. Research on the nitrogen removal efficiency and mechanism of deep subsurface wastewater infiltration systems by fine bubble aeration[J]. Ecological Engineering, 2017, 107: 33–40.
- [8] 李云开, 宋鹏, 周博. 再生水滴灌系统灌水器堵塞的微生物学机理及控制方法研究[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 98–107.
LI Yunkai, SONG Peng, ZHOU Bo. Microbiology mechanism and controlling methods for emitter clogging in the reclaimed water drip irrigation system [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(15): 98–107. (in Chinese)
- [9] BARAM S, EVANS J, BEREZKIN A, et al. Irrigation with treated wastewater containing nanobubbles to aerate soils and reduce nitrous oxide emissions[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 280: 124509.
- [10] 魏婕, 蒋毓婷, 李军, 等. 微纳米气泡特征及其在环境治理中的应用[J]. 环境工程, 2018, 36(10): 75–79.
WEI Jie, JIANG Yuting, LI Jun, et al. Characteristics of micro-nano bubble and its application in environmental treatment [J]. Environmental Engineering, 2018, 36(10): 75–79. (in Chinese)
- [11] OUYANG Z, TIAN J, YAN X, et al. Effects of different concentrations of dissolved oxygen on the growth, photosynthesis, yield and quality of greenhouse tomatoes and changes in soil microorganisms[J]. Agricultural Water Management, 2021, 245: 106579.
- [12] DU Y, ZHANG Q, CUI B, et al. Aerated irrigation improves tomato yield and nitrogen use efficiency while reducing nitrogen application rate[J]. Agricultural Water Management, 2020, 235: 106152.
- [13] PENDERGAST L, BHATTARAI S, MIDMORE D. Evaluation of aerated subsurface drip irrigation on yield, dry weight partitioning and water use efficiency of a broad-acre chickpea (*Cicer arietinum*, L.) in a vertosol[J]. Agricultural Water Management, 2019, 217(4): 38–46.
- [14] 赵丰云, 郁松林, 孙军利, 等. 加气灌溉对温室葡萄生长及不同形态氮素吸收利用影响[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 228–234.
ZHAO Fengyun, YU Songlin, SUN Junli, et al. Effect of rhizosphere aeration on growth and absorption, distribution and utilization of NH_4^+-N and $NO_3^- -N$ of red globe grape seedling [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 228–234. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180128&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.028. (in Chinese)
- [15] 朱艳, 蔡焕杰, 宋利兵, 等. 加气灌溉对番茄植株生长、产量和果实品质的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 199–211.
ZHU Yan, CAI Huanjie, SONG Libing, et al. Impacts of oxygation on plant growth, yield and fruit quality of tomato [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 199–211. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170823&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.023. (in Chinese)
- [16] 朱艳, 蔡焕杰, 陈慧, 等. 加气灌溉对土壤中主要微生物数量的影响[J]. 节水灌溉, 2016(8): 65–69.
ZHU Yan, CAI Huanjie, CHEN Hui, et al. Impacts of aerated irrigation on number of soil major microorganism [J]. Water Saving Irrigation, 2016(8): 65–69. (in Chinese)
- [17] 杜娅丹, 张倩, 崔冰晶, 等. 加气灌溉水氮互作对温室芹菜地 N_2O 排放的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(16): 127–134.
DU Yadan, ZHANG Qian, CUI Bingjing, et al. Effects of water and nitrogen coupling on soil N_2O emission characteristics of greenhouse celery field under aerated irrigation [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(16): 127–134. (in Chinese)
- [18] 金鑫, 蔡林运, 李刚华, 等. 小麦秸秆全量还田对水稻生长及稻田氧化还原物质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2013(5): 80–85.

- JIN Xin, CAI Linyun, LI Ganghua, et al. Effects of all wheat crop straw application on rice growth and redox substance in rice fields [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2013(5): 80–85. (in Chinese)
- [19] WANG H, YANG G, WANG X, et al. Oilseed rape straw returning changes soil reducibility and affects the root and yield of rice in the rape-rice rotation field at Sichuan Basin area of China[J/OL]. Agronomy Journal, 2020. DOI:10.1002/agj2.20408.
- [20] 朱艳,蔡焕杰,宋利兵,等. 加气灌溉下气候因子和土壤参数对土壤呼吸的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 223–232.
- ZHU Yan, CAI Huanjie, SONG Libing, et al. Effects of climatic factors and soil parameters on soil respiration under oxygation conditions [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 223–232. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161227&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.027. (in Chinese)
- [21] 于晓莉,傅友强,甘海华,等. 干湿交替对作物根际特征及铁膜形成的影响研究进展[J]. 土壤, 2016, 48(2): 225–234.
- YU Xiaoli, FU Youqiang, GAN Haihua, et al. Impacts of drying-wetting cycles on changes of rhizosphere characteristic and the formation of iron plaque: a review [J]. Soils, 2016, 48(2): 225–234. (in Chinese)
- [22] 陈远其,陈章,李志贤,等. 锰污染土壤修复研究现状与展望[J]. 生态环境学报, 2017, 26(8): 1451–1456.
- CHEN Yuanqi, CHEN Zhang, LI Zhixian, et al. A review and perspective on remediation of manganese contaminated soil research [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(8): 1451–1456. (in Chinese)
- [23] 黄晶,王学春,邹正鸿,等. 小麦秸秆翻埋还田对水稻秧苗生长及土壤性状的影响[J]. 四川农业大学学报, 2016, 34(3): 276–281.
- HUANG Jing, WANG Xuechun, ZHI Zhenghong, et al. Effect of wheat straw residue incorporation on characteristics of rice seedling growth and soil properties [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2016, 34(3): 276–281. (in Chinese)
- [24] HAQUE K, EBERBACH P, WESTON L, et al. Variable impact of rice (*Oryza sativa*) on soil metal reduction and availability of pore water Fe^{2+} and Mn^{2+} throughout the growth period[J]. Chemistry and Ecology, 2016, 32(2): 1–19.
- [25] LIAO Z, YU H, DUAN J, et al. SLR1 inhibits MOC1 degradation to coordinate tiller number and plant height in rice[J]. Nature Communications, 2019, 10: 2738.
- [26] 严定春. 不同栽培方式下水稻形态发生比较研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(31): 15158–15161.
- YAN Dingchun. Comparative study of rice morphogenesis with different cultivation methods [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(31): 15158–15161. (in Chinese)
- [27] 金鑫. 秸秆还田对稻田土壤还原性物质和水稻生长的影响[D]. 南京:南京农业大学, 2013.
- JIN Xin. Effects of straw application on rice growth and redox substance in rice fields [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [28] 刘进. 三个水稻叶绿素代谢相关基因的鉴定与功能分析[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2016.
- LIU Jin. Characterization and mapping of three chlorophyll metabolism related genes in rice [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [29] 张强强. 水稻气孔导度和光合作用在不同光环境下的响应差异与机理[D]. 武汉:华中农业大学, 2020.
- ZHANG Qiangqiang. Studies on the mechanisms of the responses of stomatal conductance and photosynthesis to different light environments in *Oryza* [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [30] 彭金凤,刘婷婷,许桂玲,等. 超级杂交稻叶片光合特性、光合氮素利用效率和产量对不同施氮量的响应[J]. 中国稻米, 2021, 27(3): 30–36.
- PENG Jinfeng, LIU Tingting, XU Guiling, et al. Response characteristics of leaf photosynthetic characteristics, photosynthetic nitrogen use efficiency and yield of super hybrid rice to different nitrogen application rates [J]. China Rice, 2021, 27(3): 30–36. (in Chinese)
- [31] 徐莹莹,王俊河,刘玉涛,等. 秸秆还田方式对半干旱区春玉米生长特性、产量及水分利用效率的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(21): 128–132.
- [32] 朱鸿杰,闫晓明,何成芳,等. 秸秆还田条件下农田系统碳循环研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, 23(2): 344–351.
- ZHU Hongjie, YAN Xiaoming, HE Chengfang, et al. Effect of returning straw on soil carbon cycle in cropland ecosystem [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(2): 344–351. (in Chinese)
- [33] HUANG J, HU T, YASIR M, et al. Root growth dynamics and yield responses of rice (*Oryza sativa* L.) under drought-flood abrupt alternating conditions[J]. Environmental and Experimental Botany, 2019, 157(6): 11–25.
- [34] 杨培岭,王瑜,任树梅,等. 咸淡水交替灌溉下土壤水盐分布与玉米吸水规律研究[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 273–281.
- YANG Peiling, WANG Yu, REN Shumei, et al. Soil moisture and saline distribution characteristics and maize stem water uptake under alternate irrigation between saline water and groundwater [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 273–281. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200629&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.029. (in Chinese)
- [35] 何艳,严田蓉,郭长春,等. 秸秆还田与栽插方式对水稻根系生长及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(7): 105–114.
- HE Yan, YAN Tianrong, GUO Changchun, et al. Effect of methods of straw returning and planting on root growth and rice yield [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(7): 105–114. (in Chinese)
- [36] SANG H, JIAO X, WANG S, et al. Effects of micro-nano bubble aerated irrigation and nitrogen fertilizer level on tillering, nitrogen uptake and utilization of early rice[J]. Plant Soil & Environment, 2018, 64(7): 297–302.
- [37] 周云鹏,徐飞鹏,刘秀娟,等. 微纳米气泡加氧灌溉对水培蔬菜生长与品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(8): 98–100.
- ZHOU Yunpeng, XU Feipeng, LIU Xiujuan, et al. Influence of micro bubble oxygen irrigation on vegetable growth and quality effect [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(8): 98–100. (in Chinese)