

淹水深度对稻草还田土壤氧化还原状况的影响

宋春彦, 张艳科, 李一平, 王昆昆*, 丛日环, 鲁剑巍

(华中农业大学资源与环境学院 / 农业农村部长江中下游耕地保育重点实验室 /

华中农业大学微量元素研究中心, 湖北 武汉 430070)

摘要: 淹水条件下稻草还田影响稻田土壤氧化还原状况, 进而影响下季水稻的生长, 而不同淹水深度对土壤氧化还原状况影响程度及动态变化特征尚不明确。采用土柱培养模拟田间稻草全量还田, 设置 6 个淹水深度处理, 即淹水 0 (土壤浸润)、1、2、4、6 和 8 cm, 测定培养 28 d 内土壤 pH、电导率 (EC)、氧化还原电位 (Eh)、还原性物质总量、活性还原物质、 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 含量的动态变化, 旨在为秸秆还田下稻田灌溉管理提出科学依据。结果表明, 土壤 Eh 与淹水深度呈负相关, 与土壤浸润处理相比, 淹水 1 ~ 8 cm 时 Eh 降低 65.4% ~ 86.4%, 而淹水深度对 pH 值和 EC 的影响不大 (除浸润淹水时 EC 显著低于各淹水处理外)。各测定指标随还田培养天数的增加呈现动态变化: 其中土壤 pH 值在培养 7 d 内呈上升趋势, 培养 14 d 后不断下降至 28 d 时降至最低; 而 EC 值随着培养时间的增加不断上升, 以淹水 4 cm 时上升幅度最大 (上升 65.3%); 土壤 Eh 随着培养时间的推移而不断下降, 表明还原性不断增强, 在 7 ~ 14 d 降幅最大 (下降 40% 以上)。土壤还原性物质质量与淹水深度整体呈负相关, 淹水 4 ~ 8 cm 时土壤还原物质总量、活性还原物质及 Fe^{2+} 含量显著低于淹水 1 ~ 2 cm, 降幅分别为 31.1% ~ 49.5%、14.2% ~ 54.1%、26.3% ~ 37.3%。土壤浸润处理的各还原性物质随培养天数的增加逐渐上升, 而淹水 1 ~ 8 cm 处理则在培养 14 d 内先上升随后下降。研究表明, 稻草还田前期, 淹水深度维持在 4 ~ 6 cm 可有效缓解还原性物质积累。

关键词: 稻草还田; 淹水深度; 动态变化; 氧化还原电位; 还原性物质

20 世纪 90 年代以来, 我国广泛提倡秸秆还田战略, 通过秸秆还田可平衡土壤养分、提高地力水平、增强土壤保水保肥性能等^[1], 进而促进作物生长^[2]。然而, 秸秆还田带来的负面影响仍存在较大争议, 如改变土壤微生物群落组成^[3]、影响稻田水质^[4]、降低土壤 pH^[5]、增加还原物质积累等^[6]。长江中下游地区是我国水稻主产区之一, 尤其在双季稻种植区, 存在农时忙、茬口紧、秸秆量大等问题, 还田面临困难。国内外稻田灌溉技术研究表明, 灌排水管理对水稻生长起重要作用, 通过适当提高淹水深度可调节土壤温度, 降低高温对幼苗造成的不利影响^[7], 同时淹水处理下的厌氧、强还原条件可以提高稻草降解速率, 土壤可溶性有机物浸出和稻草腐解的离子释放速率,

导致电导率 (EC) 差异^[8]。在双季稻区, 早稻秸秆直接还田, 在高温、淹水条件下伴随着高氮施用, 稻草快速腐解, 打破土壤铁、锰、硫、氮平衡, 降低土壤的氧化还原电位 (Eh), Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 、 S^{2-} 等还原性物质迅速积累^[9]。土壤还原态的加剧对水稻根系会产生负面影响, 如降低前期水稻根系活力、影响根系泌氧能力、抑制分蘖的发生及生长^[10]。同时, 晚稻种植后, 幼苗发育期处于高温淹水条件, 传统漫灌措施导致水资源分布不均, 过度淹水对水稻幼苗的呼吸和光合作用产生不利影响。有研究表明, 水稻每穗粒数、结实率与淹水深度呈极显著负相关, 分蘖期没顶淹水 6 d、半淹水 9 d 降低约 50% 的产量^[11]。

稻田淹水深度影响水稻秧苗生长与分蘖, 陈惠哲等^[12]提出水稻苗期无水灌溉 (土壤湿润) 或浅水灌溉 (灌溉深度小于 2 cm) 可以提高根冠比, 降低淹水过深还原物质积累的毒害作用, 而 4 cm 以上深淹水条件则会抑制根系生长。水稻移栽后, 不同淹水深度会影响水稻根系的呼吸和吸水能力, 淹水深度过深, 土壤氧气含量下降, 影响水稻根系生

收稿日期: 2024-07-11; 录用日期: 2024-08-18

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFD1901100)。

作者简介: 宋春彦 (2001-), 在读硕士研究生, 主要从事作物养分管理的研究。E-mail: songchunyan@webmail.hzau.edu.cn。

通讯作者: 王昆昆, E-mail: wangkk@mail.hzau.edu.cn。

长发育,诱导黑根、黄根比例上升,而白根比例下降^[13]。史骏等^[14]提出,水稻苗期淹水深度在4 cm 以上时除草剂的效果优于4 cm 以下,4 cm 升至12 cm 时效果不显著,淹水5 cm 可达到保障正常分蘖、提高控草效果。因此,试验设置淹水深度0 (土壤浸润)、1、2、4、6 和8 cm 的6 个淹水梯度。稻草还田后水稻整个生育期内,还原物质积累变化已有学者进行探究,但关于稻草还田后,氧化还原状况在不同淹水深度条件下的响应情况研究较少,且在稻草快速腐解阶段对氧化还原状况的变化趋势研究鲜有报道。本研究采用土柱培养试验,针对不同淹水深度下稻草的快速腐解阶段,土壤氧化还原状况的动态变化规律特征进行探究,旨在为稻草还田后通过水分管理来调节土壤氧化还原状况提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2023 年9 月26 日至10 月26 日在华中农业大学试验基地(114° 21' N, 30° 28' E)进行,培养28 d 内日均温为15 ~ 20℃。

采用土柱培养试验,稻草还田量为6000 kg/hm²。供试土壤来自湖北省武穴市大金镇周梓村(115° 36' N, 29° 58' E) 0 ~ 20 cm 的土层,为第四纪红壤发育的水稻土,质地为粉砂壤土,土壤pH 值为5.10。供试稻草为土壤取样地的早稻收获秸秆,秸秆含水率为79%,新鲜秸秆剪成3 cm 冷冻保存。供试土壤风干后过5.0 mm 筛混匀。采用的土柱为直径12 cm、高30 cm 的圆柱形透明亚克力管。

1.2 试验设计

试验共设置6 个淹水深度处理,分别为淹水

0 (土壤浸润)、1、2、4、6 和8 cm。在土柱内装入2.5 kg 土样和32.0 g 新鲜秸秆,混匀后加水至设定淹水深度,每个处理3 组重复,培养时间为28 d,每天进行补水保证淹水深度。

1.3 样品的采集与指标测试

在第2、4、7、14、21 和28 d 采用DDS-608 型电导仪和DJS-1C 电导电极直接测定土壤EC^[15],采用HD-QX6550 智能便携式氧化还原电位仪(饱和甘汞电极)测定土壤Eh 和pH^[16]。

在第4、14 和28 d,使用直径25 mm 土钻采集三钻土柱内土壤样品,混匀后立即测定。采用硫酸铝浸提-重铬酸钾氧化法测定土壤还原性物质总量^[17],采用高锰酸钾滴定法测定活性还原物质含量^[17],采用邻菲罗啉比色法测定Fe²⁺ 含量^[17],采用高碘酸钾比色法测定Mn²⁺ 含量^[17]。

1.4 数据处理与分析

采用Excel 2019 和SPSS 22.0 分析试验数据,采用Duncan (P<0.05) 多重检验进行均值比较,采用Origin 2021 绘图。

2 结果与分析

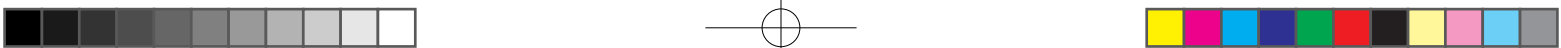
2.1 不同淹水深度土壤 pH 变化

由表1 可知,培养28 d 内,不同淹水深度(1 ~ 8 cm) 土壤pH 值差异不大,土壤浸润处理的pH 值在培养7 ~ 21 d 显著高于其他处理。随着培养时间增加,各处理土壤pH 值呈先升高后降低的趋势,培养第7 d 达到峰值,7 ~ 28 d 逐渐下降,其中土壤浸润处理的pH 值降幅最大,为27.0%。培养7 d 内,自来水的加入稀释了土壤中致酸离子的浓度,培养7 ~ 28 d,稻草腐解加剧了盐基离子的淋溶及土壤酸化。

表1 淹水深度与培养时间对 pH 值的影响

淹水深度 (cm)	2 d	4 d	7 d	14 d	21 d	28 d	平均值
0	6.61 ± 0.05ab	6.82 ± 0.11a	7.40 ± 0.07a	6.77 ± 0.07a	6.55 ± 0.04a	5.83 ± 0.01b	6.66
1	6.59 ± 0.12ab	6.79 ± 0.05a	6.89 ± 0.02bc	6.36 ± 0.03b	6.30 ± 0.01b	5.99 ± 0.02a	6.49
2	6.71 ± 0.03a	6.72 ± 0.03ab	6.99 ± 0.12b	6.40 ± 0.03b	6.29 ± 0.01b	5.97 ± 0.04a	6.51
4	6.34 ± 0.07c	6.68 ± 0.05ab	6.97 ± 0.03b	6.43 ± 0.08b	6.29 ± 0.02b	5.84 ± 0.02b	6.43
6	6.56 ± 0.02b	6.62 ± 0.08b	6.81 ± 0.03c	6.40 ± 0.05b	6.30 ± 0.01b	6.00 ± 0.03a	6.45
8	6.60 ± 0.03ab	6.46 ± 0.04c	6.85 ± 0.04bc	6.40 ± 0.03b	6.31 ± 0.05b	5.97 ± 0.04a	6.43

注:不同小写字母表示不同淹水深度间在P<0.05 水平差异显著。下同。



2.2 不同淹水深度 EC 值变化

培养 28 d 内 (表 2), 土壤浸润处理呈现出最低 EC 水平, 土壤浸润不利于稻草腐解和可溶性盐类释放, EC 显著低于其他淹水处理, 其他各淹水深度与

EC 未表现出明显的相关性。在培养前期, EC 值呈上升趋势, 表征稻草的快速腐解、离子释放和盐分积累过程。培养 7 ~ 28 d, 各处理 EC 值下降或缓慢上升, 淹水 2 ~ 8 cm 处理升幅较大, 达到 55.4% ~ 65.3%。

表 2 淹水深度与培养时间对电导率值的影响

淹水深度 (cm)	2 d ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	4 d ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	7 d ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	14 d ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	21 d ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	28 d ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	平均值 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
0	69.0 $\pm$ 5.0b	98.7 $\pm$ 7.4a	106.4 $\pm$ 8.4b	84.1 $\pm$ 19.1b	71.9 $\pm$ 8.9c	74.2 $\pm$ 4.0d	84.1
1	101.9 $\pm$ 14.0a	117.5 $\pm$ 6.5a	139.9 $\pm$ 7.7a	144.8 $\pm$ 6.9a	128.2 $\pm$ 3.6b	137.3 $\pm$ 5.5c	128.3
2	97.5 $\pm$ 15.0a	98.3 $\pm$ 18.4a	120.5 $\pm$ 8.4ab	157.7 $\pm$ 10.6a	140.3 $\pm$ 7.9ab	156.4 $\pm$ 4.4b	128.4
4	97.1 $\pm$ 4.5a	102.9 $\pm$ 5.5a	130.7 $\pm$ 1.9a	148.7 $\pm$ 12.3a	151.2 $\pm$ 7.4a	160.4 $\pm$ 1.3ab	131.8
6	99.3 $\pm$ 11.6a	99.9 $\pm$ 16.6a	121.9 $\pm$ 3.6ab	129.1 $\pm$ 14.9a	130.2 $\pm$ 5.1ab	154.3 $\pm$ 12.5b	122.4
8	108.8 $\pm$ 11.2a	108.2 $\pm$ 16.1a	130.8 $\pm$ 13.4a	138.5 $\pm$ 24.3a	126.9 $\pm$ 16.6b	173.0 $\pm$ 5.3a	131.0

2.3 不同淹水深度土壤 Eh 变化

培养 28 d 内 (表 3), Eh 与淹水深度整体呈负相关, 土壤浸润处理 Eh 显著高于淹水 1 ~ 8 cm 处理。随着培养时间增加, 各处理 Eh 呈先升高后降低的趋

势, 培养第 4 d 达到峰值, 培养 7 ~ 14 d 降幅最大, 为 41.5% ~ 148.1%, 在此阶段, 氧化态物质向还原态转化增强, 还原性物质迅速积累, 培养 14 ~ 28 d, 降幅逐渐减小, 淹水 4 cm 处理呈现小幅度上升趋势。

表 3 淹水深度与培养时间对氧化还原电位的影响

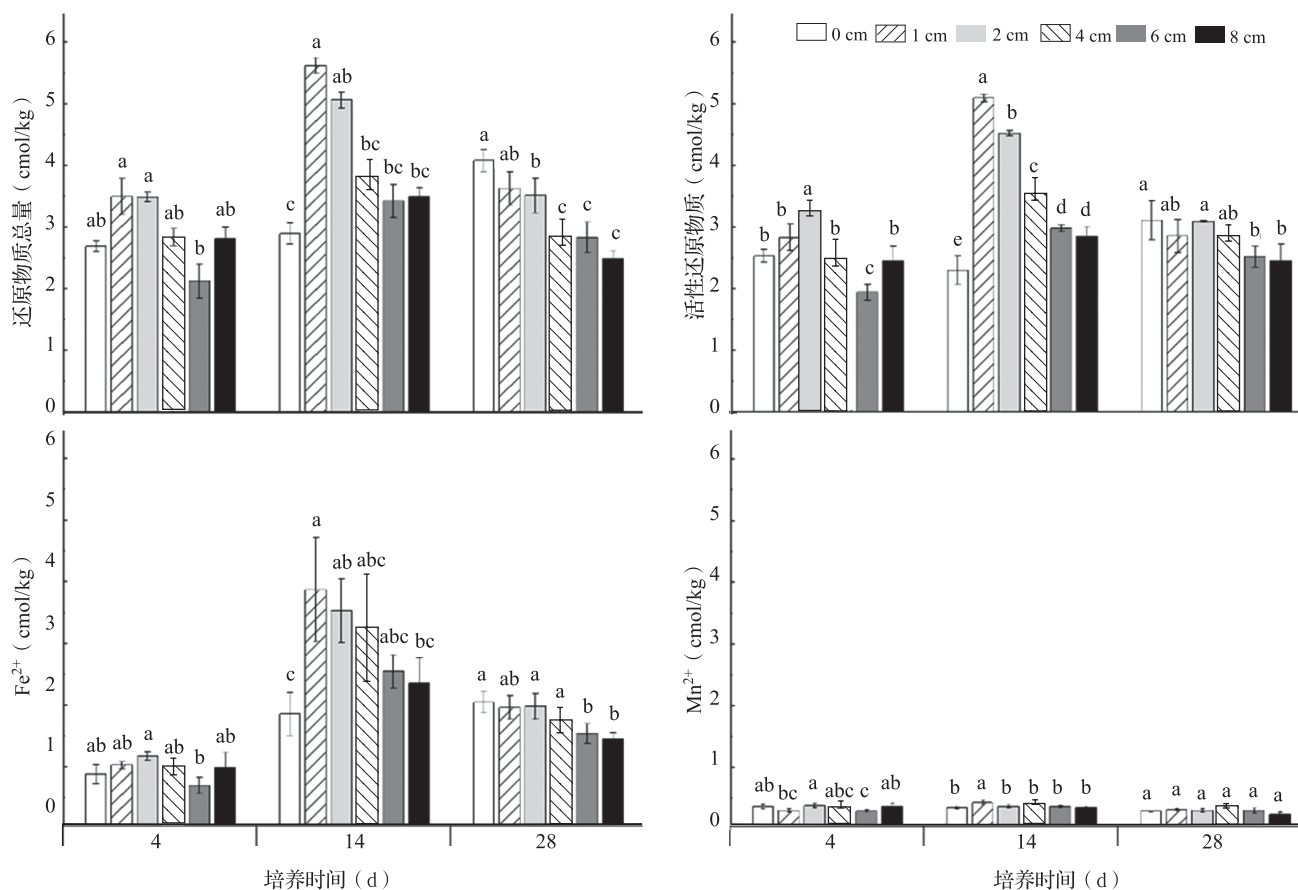
淹水深度 (cm)	2 d (mV)	4 d (mV)	7 d (mV)	14 d (mV)	21 d (mV)	28 d (mV)	平均值 (mV)
0	-29.67 $\pm$ 6.1a	-31.6 $\pm$ 1.8a	-30.3 $\pm$ 2.2a	-75.1 $\pm$ 6.9a	-100.0 $\pm$ 3.8a	-113.4 $\pm$ 4.1a	-63.3
1	-67.07 $\pm$ 6.5b	-65.1 $\pm$ 5.1b	-95.2 $\pm$ 4.1b	-134.7 $\pm$ 12.8b	-122.6 $\pm$ 8.3b	-143.8 $\pm$ 8.5b	-104.7
2	-67.10 $\pm$ 3.2b	-63.0 $\pm$ 7.7b	-94.3 $\pm$ 6.9b	-144.1 $\pm$ 0.7b	-142.9 $\pm$ 1.1c	-146.1 $\pm$ 0.8b	-109.6
4	-76.53 $\pm$ 4.9bc	-75.2 $\pm$ 8.2b	-96.8 $\pm$ 1.9b	-146.5 $\pm$ 5.4b	-148.9 $\pm$ 2.6cd	-147.4 $\pm$ 1.0b	-115.2
6	-86.83 $\pm$ 2.2c	-74.6 $\pm$ 4.1b	-93.5 $\pm$ 2.9b	-142.1 $\pm$ 5.1b	-148.5 $\pm$ 3.7cd	-152.1 $\pm$ 3.9bc	-116.3
8	-85.70 $\pm$ 2.3c	-69.0 $\pm$ 1.7b	-91.4 $\pm$ 1.3b	-147.9 $\pm$ 3.7b	-155.1 $\pm$ 0.9d	-159.4 $\pm$ 0.4c	-118.1

2.4 不同淹水深度土壤还原物质质量的变化

由图 1 可知, 培养 28 d 内, 除浸润处理外, 还原物质总量与淹水深度整体呈负相关。淹水深度对还原物质总量的影响差异主要表现为淹水 1 ~ 2 cm 时, 还原物质总量平均高于 4 cmol/kg; 淹水 4 cm 时, 为 3 ~ 4 cmol/kg; 淹水 6 ~ 8 cm 时, 低于 3 cmol/kg。随着培养时间的增加, 土壤浸润处理的还原物质总量呈现逐渐上升的趋势, 增幅为 51.8%, 培养 28 d 时显著高于其他处理。各淹水深度处理 (1 ~ 8 cm) 的还原物质总量呈先上升后下降的趋势。

活性还原物质占还原物质总量的比例较大 (76.3% ~ 99.7%), 不同淹水深度的土壤活性还

原物质变化趋势与还原物质总量变化趋势基本一致。 Fe^{2+} 是主要的活性还原物质, 在培养第 4 d 占活性还原物质的比例较小, 为 34.7% ~ 40.4%; 培养第 14 d, Fe^{3+} 向 Fe^{2+} 迅速转化, Fe^{2+} 占活性还原物质的 75.9% ~ 90.1%。不同淹水深度的土壤 Fe^{2+} 积累量变化趋势与还原物质总量、活性还原物质的趋势一致。随着培养时间的增加, 土壤浸润处理的 Fe^{2+} 积累量逐渐增大, 其他各处理活性还原物质变化趋势与还原物质总量、活性还原物质变化趋势一致, 呈现先上升后下降的变化趋势。另外, Mn^{2+} 积累量少, 变幅小, 在培养第 4 d, 各个淹水深度处理间差异显著, 培养 28 d 各处理积累量低于 0.5 cmol/kg。

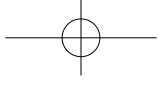
图1 不同淹水深度水稻土还原物质总量、活性还原物质、Fe²⁺、Mn²⁺含量注: 不同小写字母代表数据间差异显著 ($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 淹水深度对土壤 pH、EC、Eh 的影响

淹水深度对土壤 pH、EC 未表现出规律性差异, 在稻草腐解 28 d 内, pH 变化趋势整体为下降趋势, 表明淹水条件下秸秆腐解前期盐基离子淋溶, 存在加剧土壤酸化的风险, EC 随着培养时间的增加呈现出先上升后下降或缓慢上升的变化趋势。尹英杰等^[18]研究结果也表明, 稻草腐解导致无机盐离子浓度增加, 故前期 EC 上升, 后期下降或缓慢上升, 与氨挥发等途径有关。土壤内的电子传递通过影响土壤组分的表面电荷, 改变其对溶质的吸附和土壤金属的形态, 进而对金属-有机物络合反应、沉淀-溶解反应、氧化-还原反应等造成影响^[19], 不同淹水深度条件下, 稻草腐解电子转移反应存在差异, 从而导致 Eh 的差异, 水分通过影响氧供给、土壤微生物活性以及微生物演替过程影响稻草腐

解^[20]。1 ~ 2 cm 的浅淹水条件下氧含量高, 好氧腐解时间长, 消耗单位氧气更多, 还原态物质低于深淹水处理, 深淹水状态下, 厌氧腐解时间长, 还原态物质快速积累, 土壤氧化还原状况改变, Eh 值是表征土壤氧化还原状况的强度指标^[21], 同时反映土壤通气状况, 因此呈现出淹水越深, Eh 越小, 且浸润处理 Eh 显著高于其他淹水处理, 这表明土壤氧化还原强度对厌氧环境极其敏感。稻草快速腐解阶段为前两周, 伴随高温淹水环境, 微生物活性增大, 优势菌群由好氧微生物转变为厌氧微生物, 整体消耗氧气增多, 同时随着腐解时间的增加, 藻类滋生, 水质产生变化^[22]。培养 7 ~ 14 d, 各淹水深度处理的 Eh 降幅显著, 这与黄正等^[23]研究结果一致, 此阶段为离子交换剧烈阶段, 还原态物质积累增多。浸润处理土壤 Eh 维持在相对高水平的弱还原状态, 透气性较好, 但水稻移栽后, 浸润处理无法抵抗高温环境对水稻秧苗的损伤, 因此, 应适当增加淹



水深度,起到降温、耐旱的作用。

3.2 淹水深度对土壤还原性物质的影响

水分可以控制土壤中的溶解氧扩散,影响好氧微生物活性,缺水影响微生物活性及数量,长期深淹水造成的厌氧环境会抑制微生物活性,不同淹水深度影响土壤、水体含氧量,改变稻田土壤 Eh,进而影响还原物质积累状况^[23]。土壤还原物质质量表征氧化还原状况的数量指标,稻草还田后,加剧还原物质产生,厌氧淹水处理供氧不足。稻草腐解前期,淹水加速还原物质积累,淹水 1 ~ 2 cm 时,积累量达到最大,且 14 d 内增幅最大;腐解后期部分还原性物质向氧化态转化,还原物质含量降低,而浸润处理在稻草腐解 28 d 内还原性物质持续增加,表征氧化态物质向还原态物质持续转化的过程。仇美华等^[24]研究表明,持水率高的土壤,在秸秆腐解前期,腐解率显著高于持水率低的土壤,尤其是稻草腐解 14 d 内对纤维素的腐解率显著高于低持水率处理,这为本研究的结果提供支撑。 Fe^{2+} 的积累量变化趋势与还原物质总量基本一致, Fe^{2+} 是主要的活性还原物质,前期积累量少,随腐解时间的增加,迅速积累后缓慢降低。铁是电子转移反应的理想辅助因子,在秸秆腐解过程中, Fe^{2+} 为电子受体, Fe^{3+} 为电子供体,在低 pH 土壤环境中, Fe^{3+} 向 Fe^{2+} 转化,有效态的 Fe^{2+} 被植株过量吸收会影响细胞代谢^[25]。培养 14 d 时 Fe^{2+} 含量表征出显著性差异,淹水 4 cm 及以上土壤内 Fe^{2+} 含量显著低于其他处理。锰是地壳中丰度仅次于铁的最常见的过度金属元素, Mn^{2+} 过量易对植株产生毒害,试验所测 Mn^{2+} 含量少,处理间差异不大,可能与试验土样 pH 较高有关,在酸化土壤中,植株生长受到 Mn^{2+} 、 Al^{3+} 、 H^{+} 等限制,但试验用水 pH 约为 7,提高土壤 pH,弱酸性土壤对可交换性 Mn^{2+} 影响较小^[26]。综上所述,淹水深度可以改变稻田土壤 Eh,影响还原物质积累。秸秆还田腐解前期保证田面水 4 ~ 6 cm 的深度较为适宜,可达到降低还原物质积累的效果。

4 结论

稻草还田下,不同淹水深度对土壤氧化还原状况的影响差异显著,淹水深度与 Eh、还原物质总量、活性还原物质、 Fe^{2+} 含量整体呈负相关。在稻草还田前期,通过调节淹水深度可以避免还原性

物质的过量积累,控制田面水在 4 ~ 6 cm 的深度,可显著降低还原物质总量、活性还原物质、 Fe^{2+} 含量。

参考文献:

- [1] Suriyagoda L, De Costa W, Lambers H. LaGrowth and phosphorus nutrition of rice when inorganic fertiliser application is partly replaced by straw under varying moisture availability in sandy and clay soils [J]. *Plant and Soil*, 2014, 384 (1-2): 53-68.
- [2] Shi J, Li S, Tian X. Integrated crop residue and subsoiling management strategies influence soil quality and agricultural sustainability [J]. *Agronomy Journal*, 2021, 113 (1): 537-549.
- [3] Zhao S, Li K, Zhou W, et al. Changes in soil microbial community, enzyme activities and organic matter fractions under long-term straw return in north-central China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 216: 82-88.
- [4] 孙国峰, 孙仁华, 周炜, 等. 长期秸秆还田对水稻产量与田面水环境的影响 [J]. *中国稻米*, 2023, 29 (5): 57-61.
- [5] Liang F, Li B, Vogt R D, et al. Straw return exacerbates soil acidification in major Chinese croplands [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 198: 107176.
- [6] 李学垣, 韩德乾. 绿肥压青后水稻生育期间土壤中还原性物质的动态变化 [J]. *土壤学报*, 1966, 14 (1): 59-64.
- [7] Humphreys E, Eberbach P L, Katupitiya A, et al. Growth, yield and water productivity of zero till wheat as affected by rice straw mulch and irrigation schedule [J]. *Field Crops Research*, 2011, 121 (2): 209-225.
- [8] 李阳生, 李绍清. 淹涝胁迫对水稻生育后期的生理特性和产量性状的影响 [J]. *武汉植物学研究*, 2000, 18 (2): 117-122.
- [9] Atsuko U, Nobuo K, Katsuji U. Role of anaerobic bacteria in biological soil disinfection for elimination of soil-borne plant pathogens in agriculture [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2018, 102: 6309-6318.
- [10] 周晚来, 易永健, 屠乃美, 等. 根际增氧对水稻根系形态和生理影响的研究进展 [J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26 (3): 367-376.
- [11] 周永进, 王斌, 许有尊, 等. 孕穗期淹水胁迫对早稻生长发育及产量的影响 [J]. *中国稻米*, 2013, 19 (4): 86-90.
- [12] 陈惠哲, 朱德峰, 林贤青, 等. 秧田灌水深度对水稻秧苗生长影响研究 [J]. *灌溉排水学报*, 2005 (6): 53-55.
- [13] 李开江, 石鹤付, 史健, 等. 分蘖期淹水对水稻生长发育和产量的影响 [J]. *安徽农学通报*, 2007, 13 (20): 64-65, 12.
- [14] 史骏, 林林志, 陈宏宇, 等. 控水深度对土壤处理除草剂控草效应及‘甬优 1540’水稻苗期分蘖的影响 [J]. *中国农学通报*, 2023, 39 (22): 138-143.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2008: 64-226.

- [16] 彭显龙, 董强, 张辰, 等. 不同土壤条件下秸秆还田量对土壤还原性物质及水稻生长的影响 [J]. 中国水稻科学, 2024, 38 (2): 198–210.
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 146–159.
- [18] 尹英杰, 商建英. 农作物秸秆腐解规律及其可溶性有机质特征 [J/OL]. 土壤学报, 1–15 [2025-03-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.p.20240623.1345.002.html>.
- [19] Adriano D C. Trace elements in terrestrial environments (2nd edition) [M]. New York: Springer-Verlag, 2001: 29–59.
- [20] Xu Y, Zhan M, Cao C, et al. Effects of irrigation management during the rice growing season on soil organic carbon pools [J]. Plant and Soil, 2017, 421: 337–351.
- [21] 于天仁. 水稻土的物理化学 [M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [22] 张志毅, 何剑, 范先鹏, 等. 稻麦轮作制还田秸秆腐解和养分释放特征 [J]. 中国土壤与肥料, 2022 (8): 221–230.
- [23] 黄正, 尹明玄, 张荣萍, 等. 秸秆还田和施氮对水稻前期植株性状和土壤 Eh 值的影响 [J]. 杂交水稻, 2022, 37 (2): 94–99.
- [24] 仇美华, 朱乾, 范新会, 等. 高温条件下土壤持水率对辣椒秸秆还田腐解效果及土壤性状的影响 [J]. 北方园艺, 2024 (5): 82–89.
- [25] Fageria N K, Santos A B, Barbosa F M P, et al. Iron toxicity in lowland rice [J]. Journal of Plant Nutrition, 2008, 31 (9): 1676–1697.
- [26] Kidd P S, Proctor J. Effects of aluminium on the growth and mineral composition of *Betula pendula* Roth [J]. Journal of Experimental Botany, 2000, 51: 1057–1066.

Effects of flooding depth on soil redox character of rice straw returning system

SONG Chun-yan, ZHANG Yan-ke, LI Yi-ping, WANG Kun-kun*, CONG Ri-huan, LU Jian-wei (College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University/Key Laboratory of Arable Land Conservation Middle and Lower Reaches of Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Microelement Research Center, Huazhong Agricultural University, Wuhan Hubei 430070)

Abstract: Straw returning has an effect on the rice soil redox character and the growth of crop in the next season under different flooding depths, while the influence degree and dynamic change characteristics are still unclear. The total amount of straw returning was simulated by the soil column culture experiment, and six depths treatments were set up, including 0 (infiltration), 1, 2, 4, 6 and 8 cm. The dynamic changes of soil pH, conductivity (EC), redox potential (Eh), total reducing material, active reducing material, Fe^{2+} and Mn^{2+} contents during 28 days of cultivation were measured, aiming to provide a scientific basis for irrigation management of rice fields under straw returning. The results showed that soil Eh was negatively correlated with flooding depth, and decreased by 65.4%–86.4% when flooded at 1–8 cm, compared with soil infiltration treatment, while flooding depth had little effect on pH value and EC (except that the EC was significantly lower than that of each flooding treatment). The indexes showed dynamic changes with the increase of the incubation days. The soil pH value showed an upward trend within 7 days of incubation, and continued to decrease after 14 days of incubation until reaching its lowest point at 28 days. The EC value was increased with the increase of incubation time, and the largest increase was 65.3% when the water was flooded at 4 cm. Soil Eh was decreased with the incubation time, indicating that the reducibility was increasing, with the largest decrease (more than 40%) at 7–14 days. The total amount of soil reducing material, active reducing material and Fe^{2+} content of flooding 1–2 cm treatments were significantly lower than those of flooding 4–8 cm treatments, and the decreases were 31.1%–49.5%, 14.2%–54.1% and 26.3%–37.3%, respectively. The reducing compounds in the soil infiltration treatment increased gradually with the increase of incubation days, while the flooding 1–8 cm treatments increased and then decreased after 14 days of incubation. The results showed that maintaining the flooding depth at 4–6 cm in the early stage of rice straw returning could effectively alleviate the accumulation of reducing substances.

Key words: straw returning; depth of flooding; dynamic change; redox potential; reducing material