

秸秆残茬对低温潜沼性稻田土壤还原性物质含量及稻谷产量的影响

王红妮¹, 王学春^{2*}, 陶诗顺², 李 军³

(1. 西南科技大学成人网络教育学院, 四川 绵阳 621010; 2. 西南科技大学生命科学与工程学院, 四川 绵阳 621010;

3. 西北农林科技大学农学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 采用盆栽实验的方法, 研究了秸秆残茬对低温潜沼性稻田土壤氧化还原电位、土壤还原性物质总量、土壤 Fe^{2+} 含量及其稻谷产量的影响。研究表明:(1) 在低温潜沼性稻田中, 与无秸秆残茬田(T0)相比, 随着秸秆残茬量的增加(2.5 ~ 10.0 t·hm⁻²), T1, T2 和 T3 处理的土壤还原性物质总量增加 2.2 ~ 4.8 cmol·kg⁻¹; 土壤 Fe^{2+} 含量增加 10.8 ~ 40.8 mg·kg⁻¹, 土壤氧化还原电位降低 23.2 ~ 96.5 mV。其中, 当秸秆残茬量超过 5.0 t·hm⁻² 时, 秧苗移栽 - 返青期土壤 Fe^{2+} 含量增加 88.2 mg·kg⁻¹, 土壤氧化还原电位降低 196 mV, 不利于水稻生长。(2) 在低温潜沼性稻田中, 与无秸秆残茬田(T0)相比, 随着秸秆残茬量的增加(2.5 ~ 10.0 t·hm⁻²), T1, T2 和 T3 处理的稻谷产量降低 1 140 ~ 1 560 kg·hm⁻²; 当秸秆残茬量高于 5.0 t·hm⁻² 时, 稻谷千粒重降低 0.2 g, 结实率等显著降低 4.2%。

关键词: 秸秆残茬; 稻田; 低温潜沼; 还原性物质; 产量

中图分类号: S153; S511.01 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)03-0179-05

Effect of straw returning on soil reducing substance and rice grain yield in gleyed paddy field

WANG Hong-ni¹, WANG Xue-chun^{2*}, TAO Shi-shun², LI Jun³

(1. College of Adult and Online Education, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China;

2. School of Life Science and Technology, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China;

3. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The field experiment was carried out at Mianyang, Sichuan province. Redox potential, total reducing substance and Fe^{2+} content were measured for the soil treated with four levels of straw, with the aim of exploring the relation between soil properties and rice grain yield. Results are shown as follows. As compared with T0 treatment (control), total reduction of soil was increased by 2.2 ~ 4.8 cmol·kg⁻¹, Fe^{2+} content by 10.8 ~ 40.8 mg·kg⁻¹, while redox potential decreased by 23.2 ~ 96.5 mV, as the amount of straw increased from 2.5 to 10.0 t·hm⁻². Rice grain yield was reduced by 1 140 ~ 1 560 kg·hm⁻². Grain weight decreased by 0.2 g, filled grain rate by 4.2%, when more than 5.0 t·hm⁻² was incorporated into the paddy soil.

Keywords: straw residue; rice field; gleyed paddy soil; reducing substance; rice yield

作为主要粮食作物, 水稻播种面积占我国谷物播种面积的 26%, 总产占我国粮食总产的 43.6%, 为我国 50% 以上的人口提供主食^[1-2]。据世界粮农组织统计, 到本世纪中叶世界粮食需求量将增加 2 倍以上, 其中大部分要靠改造中低产田来完成^[3-4]。低温潜沼性稻田是我国南方稻区典型低产稻田之一, 据初步统计, 我国约有低温潜沼性稻田

346 万 hm², 占稻田面积的 15.07%, 占低产稻田面积的 44.2%, 已成为粮食平衡增产的主要障碍^[5-6]。这种稻田主要特征是“毒、闭、烂、瘠、冷”, 主要障碍因素是缺氧, 还原性物质 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 、 H_2S 和有机酸含量较高(Eh 通常在 100 mV 以下), 矿质元素如 P、K、Si 和 Zn 等供应不足, 土温和水温偏低(较正常稻田低 2℃ ~ 5℃)。这些因素都直接或间

收稿日期: 2013-11-23

基金项目: 西南科技大学校博士基金项目(11zx7140); 四川省教育厅项目(13ZB0299); 国家“十二五”科技支撑计划重大项目(2011BAD16B05)

作者简介: 王红妮(1978—), 女, 陕西宝鸡人, 助教, 主要从事作物高产栽培研究。

* 通信作者: 王学春(1979—), 男, 山东威海人, 博士, 主要从事作物高产栽培及作物生产系统模拟与决策研究。

接地阻碍了水稻的正常生长发育,导致稻谷产量低而不稳;由于生育期延迟 5~7 d,进而影响了后茬作物的生产。因此,改造和挖掘南方稻区低温潜沼性低产稻田的生产潜力,已成为我国水稻生产中迫在眉睫的艰巨任务。

我国低温潜沼性稻田主要分布于四川、湖南、湖北和广东等省的丘陵沟槽地带或山荫树林间,四川盆地约有 $4.7 \times 10^5 \text{ hm}^2$,占水稻总播种面积的 22%~25%^[7-8]。由于光照不足,整个春季到初夏,低温潜沼性稻田水温 and 土温回升较慢,水稻前期生长缓慢,严重影响产量^[9-10]。近年,受秸秆禁烧政策及农村劳动力减少等因素影响,部分农民开始将秸秆散放于田间任其腐烂,来年整地后直接进行秧苗移栽。此措施虽对劳动力投入有所减少,却增加了稻田僵苗现象发生的概率,进一步降低了低温潜沼性稻田的稻谷产量。研究表明,低温潜沼性稻田稻谷产量较正常稻田低 $2.5 \sim 3.7 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,严重的要低 $4.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,增产空间巨大^[5-6]。深入研究秸秆残茬对低温潜沼性稻田的影响,对提高我国低产稻田稻谷产量具有重要意义。

本研究采用盆栽实验的方法,研究秸秆残茬对低温潜沼性稻田土壤还原性物质含量和稻谷产量的影响,为进一步改造和利用低温潜沼性稻田,提高低产稻田稻谷产量提供必要的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区域概况

绵阳市地处四川盆地中部,位于涪江中游,境内丘陵广布,平坝狭小,平均海拔 362 m,是四川盆地典型丘陵区之一;年均降水量 887.3~927.6 mm,年均气温 $16.7^\circ\text{C} \sim 17.4^\circ\text{C}$,年均日照时数 1300~1328 h,平均无霜期 283~300 d,属四川盆地亚热带湿润季风气候。主要粮食作物为水稻、玉米、油菜等,排灌条件较好的水田以油菜—水稻轮作两熟为主,旱地以玉米/甘薯—小麦轮作两年三熟为主,低温潜沼性稻田以一年一熟(水稻)为主。

1.2 试验设计

试验用盆上口直径 80 cm,下口直径 60 cm,深度 50 cm,底部密封。9月下旬稻谷收获后,将稻草秸秆风干,剪短 4~5 cm,分别称取 0、62.5、125 g 和 250 g(折合 0、2.5、5.0、10.0 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$,分别相当于稻田秸秆总量的 0%、25%、50% 和 100%)秸秆各 3 份。将低温潜沼性稻田土壤分层移入试验盆,并将 9 份秸秆随机放入不同试验盆,淹水并定期补水(水源为稻田上游山泉水),始终保持 1~2 cm 水层。自 9 月

开始每两个月取土样一次,测定土壤氧化还原电位、土壤还原性物质总量和土壤 Fe^{2+} 含量,分别采用去极化法(ORP 测定仪 FJA-4)、容量法(适用于还原性新鲜土样)和光度法(适用于还原性新鲜土样)测定。适时移栽秧苗,收获水稻,并进行室内考种测产。

2 结果与分析

2.1 秸秆残茬对低温潜沼性稻田土壤氧化还原电位的影响

长期淹水条件下,秸秆残茬处理与非秸秆残茬处理的土壤氧化还原电位变化趋势一致,均随时间延长而降低(图 1)。与装盆时土壤氧化还原电位相比,9月水稻收获时,处理 T0、T1、T2 和 T3 的土壤氧化还原电位分别降低 234、286、398 mV 和 451 mV;秧苗移栽—返青期(4月下旬),处理 T0、T1、T2 和 T3 的土壤氧化还原电位分别为 -275、-316、-377 mV 和 -420 mV。

不同处理间土壤氧化还原电位差异显著,其中 T2、T3 均与 T0 间存在极显著差异,表明秸秆残茬对淹水稻田土壤氧化还原电位影响显著(图 1)。与 T0 相比,T1、T2 和 T3 的土壤氧化还原电位平均值分别降低 23.16 mV、65.16 mV 和 96.5 mV。秧苗移栽—返青期,T2、T3 的土壤氧化还原电位极显著低于 T0,与 T0 相比分别降低 147 mV 和 196 mV。

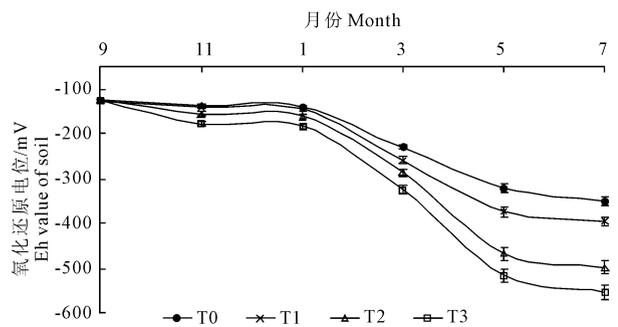


图 1 不同秸秆残茬量对低温潜沼性稻田土壤氧化还原电位的影响

Fig.1 Effect of straw residue on the soil redox potential of the gleyed paddy soil

2.2 秸秆残茬对低温潜沼性稻田土壤还原性物质总量的影响

长期淹水条件下,秸秆残茬处理与非秸秆残茬处理的土壤氧化还原性物质总量变化趋势一致,均随时间延长而增加(图 2)。与装盆时土壤还原性物质总量相比,9月水稻收获时,试验盆 T0、T1、T2 和 T3 的土壤还原性物质总量分别增加 13.4、17.3、

19.9 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 20.6 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$;秧苗移栽-返青期(4月下旬),试验盆 T0、T1、T2 和 T3 的土壤还原性物质总量分别为 15.5、19.7、21.4 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 23.1 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

不同处理间土壤还原性物质总量差异显著,其中 T2、T3 均与 T0 间存在极显著差异,表明秸秆残茬对淹水稻田土壤还原性物质总量影响显著(图 2)。与 T0 相比,T1、T2 和 T3 的土壤还原性物质总量平均值分别增加 2.2、3.8 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 4.8 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。秧苗移栽-返青期,T2、T3 的土壤还原性物质总量显著高于 T0,与 T0 相比分别增加 6.1 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 7.7 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

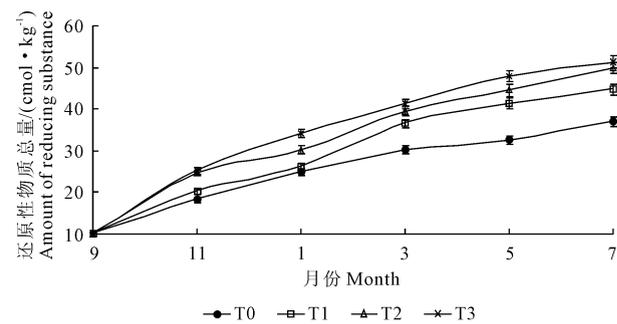


图 2 不同秸秆残茬量对低温潜沼性稻田土壤还原性物质总量的影响

Fig.2 Effect of straw residue on the amount of reducing substance in the gleyed paddy soil

2.3 秸秆残茬对低温潜沼性稻田土壤 Fe^{2+} 含量的影响

长期淹水条件下,秸秆残茬处理与非秸秆残茬处理的土壤 Fe^{2+} 含量变化趋势一致,均随时间延长而增加(图 3)。与装盆时土壤 Fe^{2+} 含量相比,9 月水稻收获时,处理 T0、T1、T2 和 T3 的土壤 Fe^{2+} 含量分别增加 16.4、41.3、69 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 107.7 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;秧苗移栽-返青期(4月下旬),处理 T0、T1、T2 和 T3 的土壤 Fe^{2+} 含量分别为 60.2、78.5、100.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 130.3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

不同处理的土壤 Fe^{2+} 含量差异显著,其中 T2、T3 均与 T0 间存在极显著差异,表明秸秆残茬对淹水稻田土壤 Fe^{2+} 含量影响显著(图 3)。与 T0 相比,T1、T2 和 T3 的土壤 Fe^{2+} 含量平均值分别增加 10.8、23.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 40.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。秧苗移栽-返青期,T2、T3 的土壤 Fe^{2+} 含量显著高于 T0,与 T0 相比分别增加 53.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 88.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

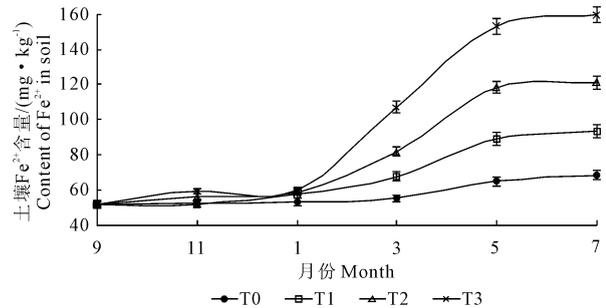


图 3 不同秸秆残茬量对低温潜沼性稻田土壤 Fe^{2+} 含量的影响

Fig.3 Effect of straw residue on the content of Fe^{2+} in the gleyed paddy soil

2.4 秸秆残茬对低温潜沼性稻田稻谷产量的影响

处理 T0、T1、T2 和 T3 的稻谷有效穗数和着粒数差异极显著,表明秸秆残茬对低温潜沼性稻田的稻谷有效穗数和着粒数有极显著影响,随着秸秆覆盖量的增加,水稻有效穗数和着粒数均显著降低(表 1)。T0 的成穗率、结实率、千粒重和生物量等产量性状均与 T1 的差异不显著,但 T1、T2 和 T3 间的成穗率、结实率、千粒重和生物量等产量性状差异极显著。表明当秸秆残茬低于 $5.0 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,秸秆残茬对水稻千粒重、结实率等产量性状影响不大;但在秸秆残茬高于 $5.0 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,随着秸秆残茬量的增加,水稻千粒重、结实率等产量性状显著降低。最终结果表明,在低温潜沼性稻田中,随着秸秆残茬量的增加,稻谷产量显著降低(表 1)。

表 1 不同秸秆残茬处理下低温潜沼性稻田稻谷产量性状比较

Table 1 Effect of straw residue on grain yield and yield component

处理 Treatment	有效穗 Effective panicle	成穗率/% Spike rate	着粒数 Grains per panicle	结实率/% Seed setting rate	千粒重/g Weight of 1000 grain	生物量/g Biomass per plant	产量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) Yield
T0	10.2A	50.3A	157.8A	71.6A	29.0A	139.3A	6060A
T1	9.8B	50.2A	141.2B	70.3A	29.0A	138.7A	4920B
T2	7.5C	46.5B	120.8C	68.2B	29.1AB	131.2B	4725C
T3	6.1D	44.3C	100.3D	67.4B	28.8B	121.7C	4500D

2.5 低温潜沼性稻田秸秆残茬量与稻谷产量、土壤还原性物质间的相关性

低温潜沼性稻田稻谷产量与秸秆覆盖量呈显著负相关,相关系数为 -0.84 ;与土壤氧化还原电位呈显著正相关,相关系数为 0.89 ;与土壤 Fe^{2+} 含量呈显著负相关,相关系数为 -0.87 ;与土壤还原性物质总量呈极显著负相关,相关系数为 -0.96 (表 2)。表明,采取合理措施减少低温潜沼性稻田秸秆还田量,降低土壤还原性物质总量、提高土壤氧化还原电

位能有效提高低温潜沼性稻田稻谷产量。秸秆覆盖量与土壤还原性物质总量呈极显著正相关,相关系数为 0.94 ;与土壤 Fe^{2+} 含量呈极显著正相关,相关系数为 0.99 ;与土壤氧化还原电位呈极显著负相关,相关系数为 -0.97 (表 2)。表明,适当减少秸秆残茬量,可有效降低土壤中 Fe^{2+} 等还原性物质的含量,提高土壤氧化还原电位,进而提高低温潜沼性稻田稻谷产量。

表 2 低温潜沼性稻田秸秆残茬与土壤还原性物质、稻谷产量间的相关性分析

Table 2 Relationships among straw residue, reducing substance and yield of the gleyed paddy soil

项目 Item	稻谷产量 /($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) Yield	秸秆残茬量 /($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$) Straw stubble amount	土壤氧化 还原电位/mv Eh value	土壤 Fe^{2+} 含量/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) Soil Fe^{2+} content	土壤还原性物质 总量/($\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$) Reducing substance amount
稻谷产量 Yield/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	1				
秸秆残茬量/($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$) Straw stubble amount	-0.84^*	1			
土壤氧化还原电位/mV Eh value	0.89^*	-0.97^{**}	1		
土壤 Fe^{2+} 含量/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) Soil Fe^{2+} content	-0.87^*	0.99^{**}	-0.99^{**}	1	
土壤还原性物质总量/($\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$) Reducing substance amount	-0.96^{**}	0.94^{**}	-0.98^{**}	0.96^{**}	1

3 讨论与结论

3.1 讨论

早在 20 世纪 50 年代末 60 年代初,于天仁等就对稻田的土壤氧化还原电位过程进行了深入研究,多数研究结果认为,土壤还原性物质含量(尤其是土壤 Fe^{2+} 含量)增加是稻田土壤氧化还原电位降低的主要原因^[11-12]。我国南方稻区有 300 多万 hm^2 的稻田处于低洼湿地或丘陵低谷,其土壤发生了潜育化,且土壤温度较低,水稻秧苗移栽后很容易发生坐蕈现象^[5-6]。20 世纪 70~80 年代,不少地区改进灌溉方式,如采用湿润浇灌和分蘖期晒、晾田等措施;改革栽培与耕作方式,如半旱式栽培模式、稻田综合利用模式和水稻迟栽技术模式等;增加肥料投入,如适当增施磷、钾、锌以及暖性肥料、石灰等措施^[13-15]。这在一定程度上缓解了低温潜沼性逆境对水稻生长的影响。自 20 世纪 90 年代开始,大量农民进城务工,对稻田管理趋于粗放,近年来随着秸秆还田技术的推行^[16-17],一些农户为了省时省力,直接将秸秆铺(堆)放于稻田任其腐烂。本研究表明,低温潜沼性稻田中随着秸秆残茬量的增加,土壤还原性物质总量和土壤 Fe^{2+} 含量显著增加,稻谷产量却显著降低。

铁是植物必需营养元素之一,在一定浓度范围内土壤 Fe^{2+} 含量有促进氮素吸收和同化的作用,只有当土壤 Fe^{2+} 含量浓度达到一定值时才对植物有害^[18-19]。冯双华等^[20]的研究表明,水培条件下土壤 Fe^{2+} 含量浓度达到 $80\sim 120\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,水稻生长开始受到影响。本研究表明,秸秆残茬量对低温潜沼性稻田土壤 Fe^{2+} 含量影响显著(尤其是在 3 月以后),其中在秧苗移栽-返青期(4 月底 5 月初),T3、T4 两个处理的土壤 Fe^{2+} 含量均超过 $80\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,不利于水稻及时返青且容易导致坐蕈现象发生。李阳生,李达模等^[21-22]认为土壤 Fe^{2+} 含量浓度达到 $160\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,水稻前期生长较差,后期几乎停止生长。本研究表明,土壤 Fe^{2+} 含量与稻谷产量呈显著负相关,当土壤 Fe^{2+} 含量浓度超过 $80\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时(T1、T2 和 T3)稻谷的成穗率、生物量均受到的显著影响。因此,当低温潜沼性稻田秸秆残茬量超过 $5.0\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,水稻产量和生物量均显著降低。

Castro^[23]研究结果认为,淹水土壤中的氧化还原电位与土壤有机质含量间存在着显著的负相关性。于天仁、李松华等^[11]的研究结果表明,淹水条件下土壤有机质的增加,将导致土壤氧化还原电位的迅速降低。本研究表明,低温潜沼性稻田中秸秆残茬量与稻谷产量呈显著负相关,与土壤氧化还原

电位间呈极显著负相关,与还原性物质总量呈显著正相关;秸秆残茬量增加,低温潜沼性稻田氧化还原电位显著降低,尤其是在秧苗移栽-返青期。在低温潜沼性稻田中增加秸秆残留量,会显著增加稻田土壤还原性物质总量,不利于水稻生长,降低稻谷产量。浙江农业大学红壤调查研究组研究结果认为强烈的还原条件使水稻根系对钾的吸收严重受阻,施用钾肥可以减轻毒害症状,有利于稻根新生^[24-25]。因此,今后在低温潜沼性稻田中适当增加钾肥用量,可降低秸秆残茬量增加对水稻生长的负面影响。

3.2 结论

在低温潜沼性稻田中,秸秆残茬量与土壤还原性物质总量间的相关系数为0.94,与土壤 Fe^{2+} 含量呈间的相关系数为0.99,与土壤氧化还原电位间的相关系数为-0.97;随着秸秆残茬量的增加,稻田土壤还原性物质总量和土壤 Fe^{2+} 含量增加,土壤氧化还原电位降低。当秸秆残茬量超过 $5.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,秧苗移栽-返青期稻田的土壤 Fe^{2+} 含量显著增加,土壤氧化还原电位显著降低,不利于水稻生长。

在低温潜沼性稻田中,秸秆残茬量与稻谷产量间的相关系数为-0.84,随着秸秆残茬量的增加,稻谷产量显著降低;当秸秆残茬量高于 $5.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,随着秸秆残茬量的增加,稻谷千粒重、结实率等显著降低。

致谢:感谢所有参与本项目实验的研究生、本科生,并感谢审稿人在稿件完成过程中所提出的宝贵意见。

参考文献:

[1] 牛乔丽.我国粮食主产区主要粮食作物生产能力区域比较优势分析[J].当代经济,2013,(9):76-78.

[2] 杨杰.水稻耐冷性遗传研究及低温胁迫相关基因 *Osdhn2* 的功能分析[D].南京:南京农业大学,2008.

[3] 宋广树,孙忠富,孙蕾,等.东北中部地区水稻不同生育时期低温处理下生理变化及耐冷性比较[J].生态学报,2011,31(13):3788-3795.

[4] 赵秀琴,张婷,王文生,等.水稻低温胁迫不同时间的代谢物谱图分析[J].作物学报,2013,39(4):720-726.

[5] 柴娟娟,廖敏,徐培智,等.我国主要低产水稻冷浸田养分障碍因子特征分析[J].水土保持学报,2012,26(4):284-288.

[6] 曾燕,黄敏,蒋鹏,等.冷浸田条件下不同类型品种的表现和高产栽培方式研究[J].作物研究,2010,24(3):140-144.

[7] 王国莉,郭振飞.水稻耐冷机理的研究进展[J].惠州学院学报(自然科学版),2004,2(3):8-12.

[8] 孙园园,孙永健,秦俭,等.四川不同稻作生态区安全播种期变化及其空间分布[J].中国农业气象,2013,34(1):58-63.

[9] 邓化冰,车芳璐,肖应辉,等.开花期低温胁迫对水稻花粉性状及剑叶理化特性的影响[J].应用生态学报,2011,22(1):66-72.

[10] 王国莉,郭振飞.低温对水稻不同耐冷品种幼苗光合速率和叶绿素荧光参数的影响[J].中国水稻科学,2005,19(4):381-383.

[11] 于天仁,李松华.水稻土中氧化还原过程的研究 I.影响氧化还原电位的条件[J].土壤学报,1957,5(1):97-110.

[12] 袁大刚,谭海燕,程伟丽,等.川西漂洗水稻土亚铁时空分布对土地利用/覆被变化的响应[J].水土保持学报,2012,26(1):128-135.

[13] 董稳军,徐培智,张仁陟,等.土壤改良剂对冷浸田土壤特性和水稻群体质量的影响[J].中国生态农业学报,2013,21(7):810-816.

[14] 陈琨,秦鱼生,喻华,等.不同耕作方式和施肥处理低温潜沼性稻田土温、水稻生长和产量的影响[J].西南农业学报,2012,25(5):1738-1741.

[15] 赵娜.炉渣施用对稻田土壤 pH、Eh 和盐度影响的有效性分析[C]//中国地理学会.地理学核心问题与主线——中国地理学会 2011 年学术年会暨中国科学院新疆生态与地理研究所建所五十年庆典论文摘要集.北京:中国科学技术出版社,2011:40.

[16] 许仁良.麦秸还田对水稻产量、品质及环境效应的影响[D].扬州:扬州大学,2010.

[17] 郝建华,丁艳锋,王强盛,等.麦秸还田对水稻群体质量和土壤特性的影响[J].南京农业大学学报,2010,33(3):13-18.

[18] 易维洁,曲东,王庆.碳源和淹水时间对水稻土微生物 $\text{Fe}(\text{III})$ 还原能力的影响[J].应用生态学报,2010,21(12):3133-3140.

[19] 蔡妙珍,林咸永,罗安程,等.过量 Fe^{2+} 对水稻生长和某些生理性状的影响[J].植物营养与肥料学报,2002,8(1):96-99.

[20] 冯双华,贾凌辉,苏以荣.不同浓度亚铁培养液对水稻生长发育及产量构成的影响[J].农业现代化研究,1992,13(6):361-365.

[21] 李阳生,李达模,周建林,等.水稻耐不良土壤因子胁迫品种改良的现状和展望[J].中国水稻科学,2000,14(2):44-48.

[22] 唐建军,李达模.水稻(抗)潜育性水稻土的生理生态机制及其品种间的差异[C]//中国生态学会青年研究会,中国科学院生态环境研究中心系统生态室.青年生态学者论丛(一).北京:中国科学技术出版社,1991:195-196.

[23] Ponnampetura F N, Castro R U. Redox systems in submerged soils [J]. Trans Int Congr Soil Sci 8th Congress (Bucharest), 1964, (3): 379-385.

[24] 浙江农业大学红壤调查研究组.浙江省红壤性水田的钾肥施用问题[J].土壤,1978,5(3):78-81.

[25] 于天仁,刘毓南.水稻土中氧化还原过程的研究 III.氧化还原条件对水稻生长的影响[J].土壤学报,1957,5(4):292-304.