

# 秸秆还田条件下水分调控对水稻生长发育和稻田生态系统的影响研究

王斯文, 柏程瀚, 吉林爽, 刘亮, 马巍, 刘晓亮, 杨永志, 孙一楠, 郭万卿, 林喆, 侯林含, 侯立刚\*

(吉林省农业科学院水稻研究所, 吉林 公主岭 136100)

**摘要:** 水稻是我国最重要的粮食作物之一, 每年产生秸秆约2亿t。秸秆还田作为一项农业管理措施, 能够有效提高秸秆资源利用效率。然而, 在水稻生产过程中长期淹水的灌溉方式使土壤形成厌氧条件, 还原性物质积累不利于秸秆腐解, 影响水稻生育进程。本文总结了秸秆还田条件下水分调控对水稻生长发育、产量形成及稻田生态系统的影响, 讨论了现阶段将二者结合的必要性和未来的研究方向, 以期为秸秆高效还田与稻田水分管理提供理论基础和实践依据。

**关键词:** 秸秆还田; 水分调控; 土壤肥力; 秸秆促腐

中图分类号: S511

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2024)06-0001-06

## A Review of the Effects of Water Regulation under Straw Returning to Fields on Rice Growth, Yield and Field Ecosystem

WANG Siwen, BAI Chenghan, JI Linshuang, LIU Liang, MA Wei, LIU Xiaoliang, YANG Yongzhi, SUN Yi'nan, GUO Wanqing, LIN Zhe, HOU Linhan, HOU Ligang\*

(Rice Research Institute, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Gongzhuling 136100, China)

**Abstract:** Rice is one of the most important food crops in China, producing about 200 million tons of straw each year. Returning straw to the field as an agricultural management measure can improve the efficiency of straw resource utilization, effectively. However, during the process of rice production, long-term flooding irrigation causes anaerobic reducibility conditions in the soil, which is not conducive to straw decomposition and affects rice growth. Here, we summarize the effects of water regulation under straw return on rice growth and development, yield formation as well as field ecosystem, and discuss the necessity of studies at this stage and future research directions, aiming to provide a theoretical basis and practical basis for efficient straw return and rice field water management.

**Key words:** Straw return to the field; Water regulation; Soil fertility; Straw decomposition

我国每年种植业产生秸秆近7亿t, 其中水稻种植产生秸秆占29%, 约2亿t<sup>[1]</sup>。秸秆中含有作物生长必需的碳、氮、钾、磷等营养元素<sup>[2]</sup>, 但由于秸秆资源利用技术手段有限, 大部分农户选择将秸秆焚烧处理, 造成环境污染和资源浪费<sup>[3]</sup>。20世纪80年代, 我国广泛开展秸秆还田技术研究<sup>[4]</sup>。长期实践表明, 秸秆在土壤微生物作用下发生腐解, 释放的氮、磷、钾及多种营养物质<sup>[5-6]</sup>, 能够提

高土壤肥力<sup>[7]</sup>, 改善土壤结构<sup>[8]</sup>。秸秆还田作为一项农业管理措施, 能够显著提高秸秆资源利用效率。近年来, 秸秆还田技术广泛应用于我国水稻生产, 作为有机肥料来源, 有效提升水稻产量<sup>[9]</sup>。然而, 我国水稻种植以淹水灌溉方式为主<sup>[10]</sup>, 使土壤形成厌氧条件, 还原性物质积累不利于秸秆腐解<sup>[11-12]</sup>。且水稻生理需水只占水稻总用水量的35%<sup>[13]</sup>, 大部分水分以棵间蒸发及田间渗漏流失<sup>[14]</sup>。水分调控是以水稻不同生长发育阶段的水分需求为前提, 通过降低土壤水势, 减少棵间蒸发及土壤渗漏水, 达到节水的效果<sup>[15-16]</sup>。因此, 在水稻生产过程中进行水分调控不仅有利于水资源高效利用, 还能加快还田过程中秸秆腐解, 对于农业资源利用效率提升与农田环境优化具有重要

收稿日期: 2024-08-10

基金项目: 吉林省重点研发计划项目(20230202032NC)

作者简介: 王斯文(1993-), 女, 助理研究员, 博士, 主要从事作物逆境生理响应与遗传机制解析研究。

通信作者: 侯立刚, 男, 博士, 研究员, E-mail: houligang888@163.com

com

意义。本文总结了秸秆还田条件下水分调控对水稻生长发育、产量形成及稻田生态系统的影响,讨论了现阶段二者结合研究的必要性和未来的发展方向,以期对秸秆高效还田与稻田水分管理提供理论基础与实践依据。

## 1 秸秆还田条件下水分调控对水稻群体质量的影响

秸秆还田对水稻的生长发育表现出先抑制后促进的作用。水稻生长前期秸秆未完全腐熟,土壤微生物与水稻根系“争氮”,同时释放大量有机酸抑制分蘖盛期水稻根系生长<sup>[12]</sup>,导致分蘖发生较晚、水稻的叶面积指数(LAI)和叶龄均有一定程度降低<sup>[17]</sup>。随着秸秆腐熟,秸秆中的养分逐渐释放,水稻发育至抽穗期时分蘖数量与LAI增加,植株的光合能力增强,有利于地上部干物质的积累,根系活力提高加速养分吸收<sup>[18]</sup>,促进植株生长发育。土壤水分含量是影响秸秆腐解的重要因素,适宜的土壤水分含量通过增强土壤胞外酶活性提高秸秆腐解速率<sup>[19]</sup>。秸秆的腐解率随土壤含水量呈先增后减的趋势,含水量达60%时秸秆腐解率最高<sup>[20]</sup>。同时,适当的水分调控不仅能减缓茎蘖消亡,增加有效分蘖,还能促进水稻根系发育,提高根系活力<sup>[21]</sup>。秸秆还田条件下水分调控通过改善土壤水分条件,积极影响水稻的茎蘖动态,提高群体质量和产量潜力。

水稻的穗部性状是群体质量另一重要指标<sup>[22]</sup>,与产量密切相关。穗部性状主要包括穗粒数、结实率、千粒重、一次枝梗数、一次枝梗粒数、二次枝梗数和二次枝梗粒数<sup>[23]</sup>。研究表明,秸秆还田对水稻一次枝梗及千粒重的影响并不显著<sup>[10]</sup>,主要增加二次枝梗数、穗粒数及结实率<sup>[24-25]</sup>。且不同的土壤类型,秸秆还田均能不同程度地增加颖花数<sup>[26]</sup>。穗分化期是水稻穗部形态建成的关键时期,也是水稻生长发育的水分敏感期。当生长水势低于-20 kPa时易发生颖花退化<sup>[27]</sup>,当受到重度水分胁迫时(-30 kPa),水稻有效穗数、实粒数及千粒重均会减少<sup>[28]</sup>,并随着水势的降低而显著降低<sup>[29]</sup>。而轻度干旱胁迫(-8~-10 kPa)相较淹水灌溉水稻穗数虽略微下降,但穗粒数和结实率均有显著提高<sup>[30-31]</sup>。因此,在秸秆还田条件下,于水稻关键生育期进行水分调控,将有利于穗部形态发育和群体质量提升。

## 2 秸秆还田条件下水分调控对水稻生理指标的影响

### 2.1 秸秆还田条件下水分调控对水稻光合作用的影响

水稻功能叶片的光合作用是水稻产量的重要保证<sup>[32]</sup>。秸秆还田能够在一定程度上增加水稻叶片气孔导度,提高蒸腾速率及CO<sub>2</sub>供应能力<sup>[33]</sup>,促进叶片内光合色素生成<sup>[34]</sup>,延长绿叶的功能期<sup>[35]</sup>。由于秸秆腐解过程中植株与土壤微生物“争氮”抑制水稻根系生长<sup>[12]</sup>,不利于养分吸收,往往在拔节期<sup>[36]</sup>、齐穗期和灌浆前期表现为抑制光合作用进行<sup>[37]</sup>。通过增强氮肥运筹可以改善中后期土壤氮素供应不足的问题,有效解决秸秆还田前期水稻生长滞后、发育迟缓问题。此外,在水稻生产过程中,水分调控与光合作用息息相关。适度的水分胁迫能够提高水稻植株的净光合速率及蒸腾速率<sup>[38-39]</sup>,重度干旱胁迫则会使叶片卷曲受光面积大大减少,气孔关闭,CO<sub>2</sub>难以进出<sup>[40]</sup>,净光合速率<sup>[41]</sup>及蒸腾速率下降<sup>[42]</sup>。而在相同施氮水平下,秸秆及其堆肥、沼渣还田相较于不还田,均能显著提高叶片的光合速率<sup>[43-44]</sup>。综上,秸秆还田能够在一定程度上缓解由于水分胁迫导致的水稻功能叶片光合抑制问题,而在秸秆还田条件下进行水分调控将有利于促进水稻的光合作用。

### 2.2 秸秆还田条件下水分调控对水稻抗氧化系统的影响

秸秆还田结合适宜的水分调控能够显著提升水稻多种抗氧化酶活性<sup>[45]</sup>。且秸秆分解释放的有机质和微量元素能够诱发水稻生成抗坏血酸(ASA)、还原性谷胱甘肽(GSH)等非酶抗氧化分子,这些生物大分子与抗氧化酶协同作用,形成更全面的抗氧化防御体系,进一步提高水稻的抗氧化防御能力<sup>[46]</sup>。而当水分调控不当(过度湿润或干燥)时,秸秆分解过程中氧气消耗会导致土壤缺氧或氧化应激,进而引起水稻体内活性氧(ROS)的累积<sup>[47]</sup>。研究表明,适宜的水分条件会保持相对稳定的土壤含氧量,从而在水稻机体内维持适当的ROS平衡,有效减少膜脂过氧化产物丙二醛(MDA)生成,增强细胞膜的稳定性和完整性,降低氧化应激对细胞膜的损害<sup>[48]</sup>。因此,在秸秆还田条件下,合理的水分调控有助于水稻抗氧化酶系统保持活性,减缓ROS的过量积累,减轻膜脂过氧化的危害,提高水稻的抗氧化能力和耐逆性,从而保护机体细胞正常的生理功能。

### 2.3 秸秆还田条件下水分调控对水稻根系生理活性的影响

在秸秆还田条件下,水分调控能够优化水稻根

系的生长环境<sup>[49]</sup>,对水稻根系的生长发育具有积极作用<sup>[50]</sup>。一方面,水分调控使土壤结构疏松、通气性良好,进一步促进秸秆分解和养分释放,有利于根系对氮、磷、钾等元素及水分的吸收,提升水稻的生长潜力<sup>[44]</sup>。另一方面,水分调控促进根系向下生长,增加根系总量和长度,显著提高根系活力,从而增强水稻对深层水分和养分的吸收能力<sup>[51]</sup>,使根系更能适应环境变化<sup>[52]</sup>。研究表明,良好的土壤水分条件能保持根系细胞膨压,促进细胞代谢和呼吸作用进行,增强根系的抗逆性,减轻逆境影响<sup>[53]</sup>。此外,秸秆还田与水分调控相结合,促进了根系分泌物的释放及根际微生物的活性,形成有益的根际微环境,进一步提升根系的吸收能力、增强抗逆性<sup>[54]</sup>。综上所述,秸秆还田结合水分调控,通过改善土壤理化环境增强了根系功能,进而为水稻生长发育和产量形成提供了良好基础。

### 3 秸秆还田条件下水分调控对水稻产量形成的影响

20世纪70年代,我国开展了大量水稻水分调控研究,以灌水深度和土壤含水率为灌溉指标,构建了“薄浅湿晒”模式、间歇灌溉、控制灌溉和湿润灌溉等多种水稻水分调控模式<sup>[55]</sup>。王伟等<sup>[56]</sup>研究发现,在秸秆还田条件下浅湿灌溉(水稻分蘖期,田面建立2~3 cm浅水层;拔节孕穗期,逐渐降低水层至田面露出;抽穗扬花期,根据土壤墒情,适时灌溉;灌浆结实期,保持土壤水分饱和)有利于提高水稻的群体质量,同时显著提高了水稻有效穗数及千粒重。周龙艳<sup>[57]</sup>研究发现,在秸秆还田条件下,干湿交替灌溉(水稻生育期内保持浅水层,直至落干后再灌水,循环往复)较常规灌溉(返青至分蘖前期深水灌溉,分蘖后期晒田,拔节至乳熟期保持水层,黄熟期自然落干)提高了茎蘖数、有效穗数及穗粒数,并显著提高了产量。秸秆还田条件下水分调控对产量的影响主要体现在生育前、中期增加水稻茎蘖数,在生育后期增加灌水量提高分蘖成穗率<sup>[58]</sup>。合理的水分管理不仅在关键生育期使水稻获得充足的水分<sup>[59]</sup>,还能够增加土壤透气性,加快还田秸秆腐解,减少秸秆还田产生的有害物质,多重因素相互协调,彼此作用,促进水稻产量提升。

### 4 秸秆还田条件下水分调控对稻田生态系统的影响

#### 4.1 水分调控对还田秸秆腐解的影响

秸秆腐解是物理、化学、生物因素共同作用的复

杂过程<sup>[60]</sup>,土壤水分是影响秸秆腐解的决定性因素之一<sup>[61]</sup>。土壤水分含量过低时,土壤微生物活性受限,秸秆腐解速率减慢<sup>[62]</sup>。而水分过高则会导致土壤透气性差,抑制好氧微生物的活动,降低腐解效率<sup>[63]</sup>。在适宜的土壤水分条件下(田间持水量的70%~80%),微生物活力较高,且有充足的氧气供应,为秸秆的有机质分解提供了良好的条件<sup>[64]</sup>。李奇辰等<sup>[65]</sup>通过监测土壤与环境的CO<sub>2</sub>浓度变化,发现秸秆的含水率在5%~45%与其腐解速率呈线性关系,且水分变化会导致不同类型的微生物在分解过程中占主导地位<sup>[64]</sup>。王景等<sup>[66]</sup>认为好氧环境更有利于微生物的呼吸作用,加速秸秆腐解;在厌氧条件下,秸秆腐解过程中会积累大量木质素酚羟基,这类物质能够固定土壤中的无机氮,降低无机氮的生物有效性,进而减缓秸秆腐解速率。李泽毅等<sup>[67]</sup>研究发现,土壤透气性较差时,秸秆腐解速率与厌氧微生物的活性高度相关,且秸秆腐解速率缓慢。此外,适宜的水分条件可以促进土壤中可溶性物质的扩散,使分解产物在土壤中分布更均匀,加速秸秆的腐解过程<sup>[68]</sup>。综上,土壤水分在秸秆腐解过程中具有关键调控作用,适宜的水分条件使多样化的微生物群落共同参与秸秆分解<sup>[69]</sup>,提高秸秆腐解速率。

#### 4.2 秸秆还田条件下水分调控对稻田土壤肥力的影响

秸秆还田能够为土壤微生物提供丰富的有机物,水分调控则有助于维持适宜土壤微生物代谢的环境条件<sup>[70]</sup>。水分过多或过少都会抑制土壤微生物的活性,而适当的水分条件能够为微生物提供更适宜的生存环境<sup>[71]</sup>,提高微生物在有机物分解、氮素固定和磷钾转化的效率<sup>[72]</sup>。微生物分解土壤中的有机物,并通过自身代谢产生大量有机酸、氨基酸和糖类等小分子物质<sup>[73]</sup>,进一步诱导土壤酶的活性,加速有机物的转化和养分循环<sup>[74]</sup>。在这一过程中,土壤微生物既是催化剂也是参与者,通过分解有机物释放出养分,供给植物吸收利用,形成了一个良性的循环系统<sup>[75]</sup>。同时,合理的水分调控使秸秆在土壤中吸水膨胀,增大与土壤接触面积<sup>[76]</sup>,促进微生物对养分的释放和转化,有效增加土壤有机质含量<sup>[77]</sup>。而有机质能够促进土壤颗粒的结合,增加土壤团粒结构,降低土壤容重,增强土壤孔隙度和通气性<sup>[78]</sup>,显著提高土壤保水能力及增墒效果<sup>[79-80]</sup>。秸秆还田结合水分调控对土壤的影响是多方面的,能够有效改善土壤的物理、化学和生物特性,提升土壤的生产力,实现土壤健康可持续利用。

### 4.3 秸秆还田条件下水分调控对稻田温室气体排放的影响

秸秆还田能够通过影响土壤碳氮平衡增加稻田温室气体排放<sup>[81]</sup>。二氧化碳(CO<sub>2</sub>)、甲烷(CH<sub>4</sub>)和氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)是秸秆还田条件下稻田温室气体排放的主要构成组分,而控制农田温室效应关键在于控制CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的排放<sup>[82]</sup>。淹水灌溉会为土壤中的甲烷菌提供厌氧环境,相较于秸秆不还田,CH<sub>4</sub>的排放量增加了110%<sup>[83]</sup>。当土壤含水率为28%时甲烷氧化速率最高<sup>[84]</sup>。因此,在水稻生育期内适当排干可有效减少CH<sub>4</sub>的排放。李成芳等<sup>[85]</sup>在秸秆还田条件下采用浅水灌溉,增加了稻田的透气性,土壤中甲烷氧化菌大量繁殖,相较于淹水灌溉CH<sub>4</sub>的排放量显著下降。由于N<sub>2</sub>O的产生依赖好氧环境的硝化作用,其与稻田中CH<sub>4</sub>的排放量呈此消彼长的趋势<sup>[86]</sup>。彭永红等<sup>[87]</sup>研究发现,在秸秆还田过程中,利用水分调控影响土壤透气性及NO<sub>3</sub><sup>-</sup>与NH<sub>4</sub><sup>+</sup>含量,进而影响土壤中的硝化作用及反硝化作用,可以实现N<sub>2</sub>O的调控。邹建文等<sup>[88]</sup>研究发现,常规灌溉下稻田的N<sub>2</sub>O排放量较淹水灌溉显著降低。综上所述,适宜的水分可以促进土壤微生物对氮素的有效转化,降低N<sub>2</sub>O的产生。秸秆还田条件下水分调控过程是复杂的,通过影响土壤的物理性质、微生物群落组成等多因素,调节CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的产生,实现更为有效的温室气体减排,有利于农业的可持续发展。

## 5 展望

近年来,已有报道分别从秸秆还田和水分调控的角度分析了不同处理对水稻生长、产量和品质的影响。然而,秸秆还田条件下水稻的水分需求规律以及水分管理对水稻生长发育和产量形成的调控机制认知受限。

### 5.1 秸秆还田条件下水稻的水分需求规律不明确

秸秆还田可能通过提高土壤保水能力、改良土壤结构影响水稻的水分需求,但具体调控机制还不明确。还田秸秆对土壤水分的影响呈现动态变化趋势,如何在不同生育期调控水分供给、匹配秸秆还田后的水分需求变化是当前研究的空白。

### 5.2 关键生育期水分胁迫对水稻的影响研究不足

在秸秆还田条件下,不同生育期水稻对水分胁迫的敏感程度及其调节途径尚不清晰。水稻在各个生长发育阶段对水分的需求不同,分蘖期和孕穗期对水分胁迫尤为敏感。在水分胁迫敏感期,秸秆还田过程如何影响水稻根系的水分吸收

和转运仍需要进一步研究。

### 5.3 穗部形态建成机制相关研究较少

水分胁迫会显著影响水稻穗部性状,如降低穗长、颖花数和结实率等。然而,在秸秆还田条件下,水分调控对穗部发育的影响尚无定论。现有研究对穗部性状与水分供给的关系认识有限,尤其是在水分胁迫条件下,秸秆还田如何通过调节土壤水分来促进穗部形态建成是亟待探讨的研究方向。

### 5.4 激素和代谢途径的调控研究缺乏系统性

水稻穗部发育受多种激素和代谢途径的调节,而水分胁迫条件下的激素(如脱落酸、赤霉素)变化与秸秆还田带来的土壤微环境变化如何协同影响水稻穗部的发育,目前还缺乏系统的研究。

### 5.5 土壤有机质的增加与肥力提升

秸秆腐解过程中释放的养分与水分需求呈现复杂的动态变化,如何在不同水分条件下实现肥力的长效提升是亟待解决的问题。尤其是在水分胁迫条件下,如何保障秸秆分解过程中养分的有效释放,避免养分流失,是提高土壤肥力的关键。同时,秸秆还田后土壤微生物群落的变化直接影响养分循环和土壤肥力。水分调控如何优化秸秆还田后的微生物活性,提高养分的转化率,提升土壤肥力,是当前研究的热点和难点。

### 5.6 减排潜力评估不足

秸秆还田能够减少秸秆焚烧带来的碳排放,但在水分调控过程中,不同的灌溉和排水管理方式会对温室气体排放产生不同的影响。尤其是当土壤水分过度积累时,CH<sub>4</sub>排放会显著增加,N<sub>2</sub>O排放则受到抑制,二者呈现此消彼长的趋势。因此,在秸秆还田条件下,如何在保证水稻产量的同时,通过水分管理减少温室气体排放,成为未来秸秆还田研究中必须考虑的重要环节。

### 参考文献:

- [1] 吕智超,孙日丹,洪小丽,等.吉林省农作物秸秆资源现状及利用对策[J].东北农业科学,2024,49(4):62-65.
- [2] 周鸣铮.土壤肥力概论[M].杭州:浙江科学技术出版社,1985:118-154.
- [3] 丛宏斌,姚宗路,赵立欣,等.中国农作物秸秆资源分布及其产业体系与利用路径[J].农业工程学报,2019,35(22):132-140.
- [4] 杨文钰,王兰英.作物秸秆还田的现状与展望[J].四川农业大学学报,1999,17(2):211-216.
- [5] 闫雷,李思莹,孟庆峰,等.秸秆还田与有机肥对黑土区土壤团聚性的影响[J].东北农业大学学报,2019,50(12):

- 58-67.
- [ 6 ] 谭德水,金继运,黄绍文,等.灌淤土区长期施钾对作物产量与养分及土壤钾素的长期效应研究[J].中国生态农业学报,2009,17(4):625-629.
- [ 7 ] 郝翔翔,杨春葆,苑亚茹,等.连续秸秆还田对黑土团聚体中有机碳含量及土壤肥力的影响[J].中国农学通报,2013,29(35):263-269.
- [ 8 ] 余坤,冯浩,王增丽,等.氮化秸秆还田改善土壤结构增加冬小麦产量[J].农业工程学报,2014,30(15):33-39.
- [ 9 ] 张巩固,王宇先,刘玉涛,等.秸秆还田和增施氮肥对寒地水稻产量的影响[J].黑龙江农业科学,2023,46(1):8-12.
- [ 10 ] 钱晓晴,沈其荣,徐勇,等.不同水分管理方式下水稻的水分利用效率与产量[J].应用生态学报,2003,14(3):16-22.
- [ 11 ] 兰海青,李先国,张婷,等.木质素的生物降解及其对陆源有机碳指示作用的影响[J].海洋湖沼通报,2012,34(1):123-129.
- [ 12 ] 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.
- [ 13 ] 吴良欢,祝增荣,梁永超,等.水稻覆膜旱作节水节肥高产栽培技术[J].浙江农业大学学报,1999,24(1):43-44.
- [ 14 ] 李佳怡,姜浩,李温哲,等.抗旱保水剂对水稻旱作抗旱性及产量的影响[J].东北农业科学,2023,48(3):1-5.
- [ 15 ] 石敏.施肥与灌溉对黑土区稻田氮素迁移转化特征的影响研究[D].北京:北京林业大学,2015:13-14.
- [ 16 ] 张好,王迪,张强,等.吉林省水稻产业发展存在的问题及对策[J].东北农业科学,2024,49(4):80-85.
- [ 17 ] 徐国伟.种植方式、秸秆还田与实地氮肥管理对水稻产量与品质的影响及其生理的研究[D].扬州:扬州大学,2007.
- [ 18 ] Mack M C, Schuur E A G, Bret-Harte M S, et al. Ecosystem carbon storage in arctic tundra reduced by long-term nutrient fertilization[J]. Nature, 2004, 431(7): 440-443.
- [ 19 ] 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, 2016,21(6):82-88.
- [ 20 ] 石祖梁,王飞,王久臣,等.我国农作物秸秆资源利用特征、技术模式及发展建议[J].中国农业科技导报,2019,21(5):8-16.
- [ 21 ] 茆智,崔远来,董斌,等.水稻高效节水与持续高产的灌排技术[J].水利水电技术,2002,32(2):65-67.
- [ 22 ] 凌启鸿,张洪程,蔡建中,等.水稻高产群体质量及其优化控制探讨[J].中国农业科学,1993,26(6):1-11.
- [ 23 ] 王鹤璎,郭晓红,马艳,等.水条播下水稻生长发育、产量及经济效益分析[J].东北农业科学,2022,47(3):42-46.
- [ 24 ] 吴立鹏,张士荣,娄金华,等.秸秆还田与优化施肥对稻田土壤碳氮含量及产量的影响[J].华北农学报,2019,34(4):158-166.
- [ 25 ] 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.
- [ 26 ] 解文孝,李建国,刘军,等.不同土壤背景下秸秆全量还田对水稻产量及稻米品质的影响[J].中国稻米,2021,27(2):73-76,88.
- [ 27 ] 朱庆森,邱泽森,姜长鉴,等.水稻各生育期不同土壤水分对产量的影响[J].中国农业科学,1994,26(6):15-22.
- [ 28 ] 郭晓红,郑桂萍,殷大伟,等.结实前水分供应对寒地水稻灌浆动态和产量的影响[J].水土保持通报,2012,32(4):86-91.
- [ 29 ] 邵玺文,张瑞珍,齐春艳,等.拔节孕穗期水分胁迫对水稻生长发育及产量的影响[J].吉林农业大学学报,2004,26(3):237-241.
- [ 30 ] 张羽,曹春瑞,刘丽华,等.土壤水势下限对寒地水稻穗部性状和产量的影响[J].中国种业,2013,32(5):55-58.
- [ 31 ] 吕艳东,郑桂萍,郭晓红,等.控水灌溉对寒地水稻物质生产及灌浆动态和产量的影响[J].干旱地区农业研究,2011,29(5):120-127.
- [ 32 ] 翟虎渠,曹树青,万建民,等.超高产杂交稻灌浆期光合功能与产量的关系[J].中国科学(C辑:生命科学),2002,7(3):211-217.
- [ 33 ] 唐志敏,刘军,刘建国.秸秆还田对长期连作棉花光合速率及叶绿素荧光的影响[J].石河子大学学报(自然科学版),2012,30(3):302-307.
- [ 34 ] Rashid M A,Zhang X Y,Andersen M N,et al.Can mulching of maize straw complement deficit irrigation to improve water use efficiency and productivity of winter wheat in North China Plain? [J]. Agricultural Water Management, 2019, 213(1): 11.
- [ 35 ] 梁继旺,吴良章.水稻秸秆还田对土壤性状和水稻产量的影响[J].农业与技术,2019,39(5):116-117.
- [ 36 ] 李思平,丁效东,曾路生,等.秸秆还田与化肥减施对水稻生长指标及光合参数的影响[J].水土保持学报,2020,34(2):208-215.
- [ 37 ] 李春寿,叶胜海,陈炎忠,等.高产粳稻品种的产量构成因素分析[J].浙江农业学报,2005,17(4):177-181.
- [ 38 ] 杨佳鹤,何进宇,刘飞杨,等.不同土壤水分对植物光合作用的影响研究进展[J].节水灌溉,2023,48(11):39-46.
- [ 39 ] 王唯道,刘小军,田永超,等.不同土壤水分处理对水稻光合特性及产量的影响[J].生态学报,2012,32(22):7053-7060.
- [ 40 ] 张桂清,李锋,蒋水元,等.两种土壤含水率下匙羹藤的光合及水分利用率的初步研究[J].广西植物,2007,27(3):508-512.
- [ 41 ] 薛菁芳,陈书强.土壤水分胁迫对寒地水稻部分生理特性的影响[J].黑龙江农业科学,2016,39(2):9-14.
- [ 42 ] 杨晓龙,程建平,汪本福,等.灌浆期干旱胁迫对水稻生理性状和产量的影响[J].中国水稻科学,2021,35(1):38-46.
- [ 43 ] 葛立立.有机物料还田与实地氮肥管理对水稻产量与品质的影响[D].扬州:扬州大学,2013.
- [ 44 ] 裴鹏刚,张均华,朱练峰,等.秸秆还田耦合施氮水平对水稻光合特性、氮素吸收及产量形成的影响[J].中国水稻科学,2015,29(3):282-290.
- [ 45 ] Baxter A, Mittler R, Suzuki N. ROS as key players in plant stress signalling[J]. Journal of experimental botany, 2014, 65(5): 1229-1240.
- [ 46 ] 张素瑜,王和洲,杨明达,等.水分与玉米秸秆还田对小麦根系生长和水分利用效率的影响[J].中国农业科学,2016,49(13):2484-2496.

- [47] 吕美蓉,李增嘉,张涛,等.少免耕与秸秆还田对极端土壤水分及冬小麦产量的影响[J].农业工程学报,2010,26(1):41-46.
- [48] 彭仁义.硫化氢参与一氧化氮诱导的增强玉米根尖细胞水涝耐受性的研究[D].兰州:兰州大学,2016.
- [49] 叶旭波,冶会锋,马童杰,等.不同旱直播方式对水稻根系形态特征及产量的影响[J].东北农业科学,2024,49(3):5-12.
- [50] 张武益,朱利群,王伟,等.不同灌溉方式和秸秆还田对水稻生长的影响[J].作物杂志,2014,30(2):113-118.
- [51] 王冀川,徐雅丽,高山,等.滴灌小麦根系生理特性及其空间分布[J].西北农业学报,2012,21(5):65-70.
- [52] 廖荣伟,刘晶淼,白月明,等.华北平原冬小麦根系在土壤中的分布研究[J].气象与环境学报,2014,30(5):83-89.
- [53] 牛晓丽.作物根系对局部供应水氮的响应及其生理机制[D].杨凌:西北农林科技大学,2016.
- [54] 张宇杰.水氮耦合协同优化秸秆腐解与水稻根系形态及土壤理化性质的研究[D].雅安:四川农业大学,2021:29-30.
- [55] 茆智,韦凤年,邵自平,等.节水潜力分析要考虑尺度效应[J].中国水利,2005,40(15):14-15.
- [56] 王伟,朱利群,王文博,等.秸秆还田地不同水氮条件对水稻产量及土壤肥力的影响[J].水土保持通报,2015,35(4):43-48.
- [57] 周龙艳.秸秆还田与灌溉模式对超级粳稻产量、养分吸收及稻米品质的影响[D].扬州:扬州大学,2016.
- [58] 赵宏亮,王麒,孙羽,等.秸秆还田下灌溉方式对水稻产量及水分利用率的影响[J].核农学报,2018,32(5):959-969.
- [59] 窦超银,李祥瑞,孙一迪,等.不同灌溉模式下生物炭施用量对水稻生长和产量的影响[J].灌溉排水学报,2024,49(12):1-9.
- [60] 李强,窦森,焦云飞,等.不同秸秆还田模式对黑土物理性质及玉米产量的影响[J].东北农业科学,2022,47(4):52-56,69.
- [61] 侯淑艳,窦森,刘建新,等.温度对玉米秸秆腐解期间腐殖质消长动态的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2016,44(4):87-92.
- [62] 葛耀相.秸秆还田对土壤养分平衡和小麦氮素利用的影响及其生态基础[D].南京:南京农业大学,2014.
- [63] 莫淑勋,凌云霄,俞金洲,等.猪粪、紫云英、稻草分解过程中氮磷转化的初步研究[J].土壤通报,1979,10(5):21-26.
- [64] 杨首尔.潮土中小麦秸秆腐解残留率测定方法比较[J].河南农业科学,2005,34(12):61-63.
- [65] 李奇辰,霍丽丽,姚宗路,等.基于CO<sub>2</sub>排放量检测的秸秆腐解动态监测系统研究[J].农业机械学报,2024,55(10):399-409.
- [66] 王景,陈曦,魏俊岭.水稻秸秆和玉米秸秆在好气和厌氧条件下的腐解规律[J].农业资源与环境学报,2017,34(1):59-65.
- [67] 李泽毅,马玉洁,付鑫,等.秸秆还田方式配施氮肥对玉米秸秆腐解特征及土壤有机碳的影响[J].中国土壤与肥料,2024,54(11):1-14.
- [68] 周桂香,陈林,张丛志,等.温度水分对秸秆降解微生物群落功能多样性影响[J].土壤,2015,47(5):911-918.
- [69] 刘泽鑫,王钊,张晶晶.秸秆生物炭还田对盐碱地土壤特性影响的研究[J].南方农机,2024,55(20):35-38.
- [70] 程伟.秸秆还田条件下不同灌溉方式对半干旱区土壤有机碳库的影响及其生物学机制[D].长春:吉林农业大学,2024:16-17.
- [71] 葛选良,钱春荣,张锋,等.不同秸秆还田模式玉米产量和耕层土壤物理特性的研究[J].东北农业科学,2022,47(3):88-93.
- [72] 马馨怡,高威,李颜,等.基于细胞水平高通量测序的土壤水分对活性微生物的影响研究[J].生态学报,2024,44(16):7160-7171.
- [73] 孟祥宇,冉成,李金平,等.秸秆还田对东北黑土稻区土壤养分及水稻产量的影响[J].东北农业科学,2023,48(2):64-67,89.
- [74] 吴建峰,林先贵.土壤微生物在促进植物生长方面的作用[J].土壤,2003,33(1):18-21.
- [75] 蒋婧,宋明华.植物与土壤微生物在调控生态系统养分循环中的作用[J].植物生态学报,2010,34(8):979-988.
- [76] 张莉,李玉义,逢焕成,等.玉米秸秆颗粒还田对土壤有机碳含量和作物产量的影响[J].农业资源与环境学报,2019,36(2):160-168.
- [77] 杨钊,尚建明,陈玉梁.长期秸秆还田对土壤理化特性及微生物数量的影响[J].甘肃农业科技,2019,50(1):13-20.
- [78] 张久明,迟凤琴,宿庆瑞,等.不同耕作方式对瘠薄型黑土区土壤结构的影响[J].玉米科学,2013,21(5):104-108.
- [79] 李玉梅.秸秆预处理对土壤水肥因子及作物产量的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [80] 左玉萍,贾志宽.秸秆分解土壤水分适宜区间及临界值[J].西北农业学报,2003,12(3):73-75.
- [81] 周胜,张鲜鲜,王从,等.水分和秸秆管理减排稻田温室气体研究与展望[J].农业环境科学学报,2020,39(4):852-862.
- [82] 廖松婷,王忠波,张忠学,等.稻田温室气体排放研究综述[J].农机化研究,2014,36(10):6-11.
- [83] Liu C, Lu M, Cui J, et al. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: a meta-analysis[J]. Global change biology,2014,20(5):1366-1381.
- [84] 颜晓元,施书莲,杜丽娟,等.水分状况对水田土壤N<sub>2</sub>O排放的影响[J].土壤学报,2000,40(4):482-489.
- [85] 李成芳,寇志奎,张枝盛,等.秸秆还田对免耕稻田温室气体排放及土壤有机碳固定的影响[J].农业环境科学学报,2011,30(11):2362-2367.
- [86] 张杏雨,李思宇,余锋,等.作物秸秆还田对稻田温室气体排放效应的研究进展[J].杂交水稻,2021,36(5):1-7.
- [87] 彭永红,陈永根,宋照亮,等.沼液施用对潮土氧化亚氮排放通量的影响[J].浙江农林大学学报,2012,29(6):954-959.
- [88] 邹建文,黄耀,宗良纲,等.稻田灌溉和秸秆施用对后季麦田N<sub>2</sub>O排放的影响[J].中国农业科学,2003,43(4):409-414.

(责任编辑:范杰英)