

李庆魁,金夏明,单建明. 稻麦轮作系统中不同养分资源管理方式对水稻的影响[J]. 江苏农业科学,2017,45(19):161-165.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.19.036

稻麦轮作系统中不同养分资源管理方式对水稻的影响

李庆魁¹, 金夏明², 单建明¹

(1. 苏州农业职业技术学院,江苏苏州 215008; 2. 江苏省昆山市农业机械化技术推广站,江苏昆山 215300)

摘要:通过田间试验,采取不同的养分资源管理方式,包括不施氮肥(CK)、NPK 均施、NPK 均施+秸秆还田、NPK 均施+开花 1 周后控水,从轮作系统的角度运筹养分,探究稻麦轮作系统耕层水分与养分调控对地上部水稻生长的影响,进而提高水稻产量以及肥料利用效率。结果表明,水稻季秸秆还田处理较常规 NPK 处理产量提高 3.80%,成熟期的氮素积累量、生物量分别提高 3.41%、4.40%,氮肥农学利用率、吸收利用率、生理偏生产力、生理利用率则分别提高 9.61%、5.70%、3.80%、3.70%,说明秸秆还田能够促进作物对养分的吸收,提高氮素利用效率和作物产量;花后控水与常规 NPK 处理产量相当,但是花后控水处理下花前存储的干物质转运率增长 5.96 百分点,说明花后控水能够在不影响产量的情况下,减少灌溉次数,达到节约水资源的目的。因此,从水稻季来看,秸秆还田与花后控水可以作为提高稻麦轮作潜力的有效途径,但仍需继续从整个稻麦轮作周期进行进一步的研究。

关键词:水稻;养分管理;稻麦轮作;产量潜力;秸秆还田;花后控水

中图分类号: S511.06 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)19-0161-05

江苏省最主要的作物种植模式是稻麦轮作,这属于水旱轮作中常见的一种模式,水旱轮作是指在同一田块上交替种植水稻和旱地作物(如小麦、油菜、马铃薯等)的种植方式^[1]。水稻、小麦两大粮食作物对江苏省的粮食产量贡献达 85%,统计结果表明,我国水稻种植面积占世界水稻种植总面积的 20%左右,其中稻麦轮作面积高达 1 300 万 hm^2 ,总产占全国粮食产量的 1/4 以上^[2]。因此,研究养分资源在稻麦轮作系统中的高效利用是十分重要的。

然而,目前我国水旱轮作系统中存在诸多问题。首先,养分资源管理没有从整个水旱轮作系统的角度进行养分周年调配^[3]。水旱轮作系统的显著特征是土壤水分状况的季节性干湿交替以及由此引起的土壤物理、化学和生物学过程随作物季节的交替变化,而且形成了一个既不同于旱地又不同于湿地的特殊稻田生态系统^[4]。水旱轮作系统养分资源管理不同于以往仅仅针对单季作物的优化施肥,应该从轮作系统的角度来实施养分资源的优化配置和综合管理。但是如何在水旱轮作过程中协调水稻和旱地作物之间养分资源的周年调配、作物高产群体构建与养分调控、养分持续供应与环境保护之间的矛盾,在理论与实践一直未被解决^[5-7]。其次,不合理的耕作措施以及单一施用化肥等,引起土壤板结、土壤耕作层变浅,导致生产力下降。有研究认为,秸秆还田能够有效地改善土壤物理结构,培肥地力,还会缓解甚至避免因为焚烧秸秆而造成的资源浪费、环境污染以及对土壤生产力带来的破坏^[8]。但是秸秆还田对作物产量的影响会因为各地的农业因子不同而不同,需要从周年生产的角度去研究还田条件下

稻麦两季施氮量对水稻产量及其产量构成的影响以及是否会对整个轮作周年氮素矿化和循环有什么影响^[9]。

此外,近年来气候变化异常,季节性降水分配不均衡,因此灌溉水短缺也成为水旱轮作系统重要的限制因素,而水分对水稻来说是特别重要的限制因子^[10-11]。可见,提高水稻的水分利用效率,对应对气候变化具有重大的意义。目前国内研究较多的是水稻籽粒灌浆期土壤干旱对产量的影响。有结果表明,土壤干旱诱导的早衰导致籽粒灌浆期缩短,以致作物产量下降^[12]。但也有研究表明,作物籽粒灌浆期土壤适度干旱能够促进植株衰老,虽缩短灌浆持续期,但增大了籽粒灌浆速率^[13]。但从整个轮作系统角度出发,水稻灌浆期控水干旱对水稻产量和土壤氮素的影响以及对下茬小麦和整个系统生产力的影响须进一步研究。由于这些问题的存在,水旱轮作系统中水分、养分不合理投入引起的资源浪费与生态环境问题已经非常严重,并引起了社会各界的广泛关注。进一步发挥水旱轮作的生产潜力,实现水肥资源的高效利用、减轻其对环境的负面影响已成为我国农业可持续发展的重要一环。

本研究以稻麦轮作为对象,在深入认识水稻和小麦高产群体物质积累、养分需求及养分供应三大规律及其调控机理的基础上,通过田间试验,采取秸秆还田、花后控水等不同的养分资源管理方式,从水旱轮作条件下水分、养分状况周期性变化的角度摸清稻麦轮作系统作物高产和养分高效利用的主要限制因子,同时通过一套有效的监测体系来评价养分管理的实际效果,不断改进管理策略,实现作物高产与养分资源高效利用的同步,进而形成水旱轮作体系最佳养分管理技术。

1 材料与方法

1.1 试验地点和材料

试验于 2013 年 6 月开始在江苏省太湖地区农业科学研究所试验田进行。供试土壤为土壤肥力较高的黄泥土,耕层土壤基本理化性质:有机质含量为 23.6 g/kg,全氮含量为

收稿日期:2017-03-22

基金项目:江苏省苏州市产业技术创新专项(编号:SNG201630)。

作者简介:李庆魁(1977—),男,山东郓城人,硕士,讲师,主要从事作物栽培技术、植物营养等研究与技术推广工作。E-mail:1149032064@qq.com。

1.25 g/kg,速效钾含量为 152 mg/kg,速效磷含量为 8.4 mg/kg,pH 值为 6.7。供试水稻为江苏省常规早熟晚粳稻品种镇稻 11 号。

1.2 试验设计

试验采用随机区组排列设计。水稻季设 CK(不施氮肥)、常规 NPK 均施、常规 NPK 均施 + 秸秆还田、常规 NPK 均施 + 开花 1 周后控水 4 个处理,每个处理 4 次重复。其中秸秆还田处理中秸秆为半量还田,在移苗前对田块进行耕翻时,将秸秆切成小段翻埋入土壤中。花后控水处理开花 1 周后停止灌水。施肥种类为尿素、过磷酸钙和氯化钾。常规 NPK 均施处理施氮肥(尿素)240 kg/hm²,磷肥(过磷酸钙)60 kg/hm²,钾肥(氯化钾)90 kg/hm²。CK 处理除不施氮肥外,其余同常规 NPK 均施。氮肥按基肥、分蘖肥、穗肥、粒肥各占施氮总量的 30%、20%、25%、25% 分 4 次施用;磷肥作基肥 100% 1 次施入;钾肥则按 50% 基肥、50% 穗肥分 2 次施用。水稻移栽日期为 6 月 24 日,种植密度为 27.75 万穴/hm²,每穴定植 2 株,株行距为 25 cm × 13 cm。

1.3 栽培管理

本试验在整个生育期均采用高产高效管理模式进行,即在高效措施(充分利用土壤养分和环境养分基础上,合理施用化肥,减少肥料施用量 30%,降低化肥的损失,使肥料利用率提高 20%,同时减少化肥向环境的排放)基础上增加产量,在高产措施(充分保证作物生长阶段所需养分,在高产栽培措施下,充分挖掘并发挥水稻品种的产量潜力,提升水稻的产量空间,使水稻再高产)基础上寻求更高的肥料利用率,两方面措施相互结合,综合管理。

1.4 样品采集

水稻移栽前 1 d(6 月 23 日)采集 0~20 cm 表层土壤样品,以后分别在最大分蘖期(7 月 29 日)、拔节期(8 月 15 日)、孕穗期(8 月 28 日)、开花期(9 月 17 日)和成熟期(11 月 7 日)采集 0~20 cm 表层土壤样品,同时在每个小区采集水稻地上部植株样品 3 穴,以测定其生物量与氮素吸收积累量。采集的土壤样品在 4 ℃ 保存。植株样品于 105 ℃ 杀青 30 min,70 ℃ 烘干至恒重。植株成熟后测各小区预先划定的收获区范围内秸秆与籽粒的鲜质量,随机取样烘干,以折算产量和含氮量。

1.5 测定项目及方法

1.5.1 叶片 SPAD 值的测定 用叶绿素仪(SPAD520 型)测定植株新完全展开叶,在叶片的上部、中部、下部分别重复测 3~5 次,取平均值,每个小区重复测定 10 张叶,平均值即作为 SPAD 值。

1.5.2 地上部生物量 植株鲜样去根,用去离子水洗净,分茎、叶、穗(生长后期),105 ℃ 杀青 30 min,75 ℃ 烘干至恒重(约 72 h)后用百分之一天平称质量。

1.5.3 土壤矿质氮含量 新鲜土壤充分混匀过 2 mm 筛后用 0.01 mol/L 的 CaCl₂ 浸提,180 r/min 下振荡 60 min 后过滤,浸提液中的铵态氮和硝态氮用连续流动分析仪(CFAAA3, Bran & Luebbe Inc.)测定。同时,用烘干法测定土壤含水量,折算成每千克干土所含的铵态氮和硝态氮含量。

1.5.4 产量及产量构成因素 成熟期在每个小区随机调查 30 穴(株)植株的穗数,并随机选其中 3 株植株,测定每穗总

粒数、实粒数、饱粒千粒质量,并计算理论产量。实际产量测定样方为 5 m²。

1.5.5 干物质转运量

干物质转运量(DMT,kg/hm²)=花前干物质积累量-成熟时(秸秆+穗轴)干物质积累量;

干物质转运效率(DMTE)=干物质转移量/花前干物质积累量×100%。

1.5.6 植株吸氮量与氮素利用效率 成熟期植株样杀青烘干后粉碎,用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,得到待测液后,用连续流动分析仪(CFAAA3, Bran & Luebbe Inc.)测定待测液含氮量,计算植株含氮量,以估算各项氮素利用效率指标。同时根据单位面积地上部干物质质量计算可得植株地上部吸氮量。

氮素农学利用率(nitrogen agronomic efficiency, AEN)(kg/kg):施氮肥区与不施氮肥区稻谷产量之差与施氮水平的比值,即单位施氮量的产量增加量;氮肥吸收利用率(nitrogen recovery efficiency, REN)(%):施氮肥区与不施氮肥区地上部氮素积累量之差与施氮量的比值;氮肥偏生产力(partial factor productivity of applied nitrogen, PFPN)(kg/kg):单位面积植株籽粒产量与单位面积施氮量的比值;氮素生理利用率(nitrogen physiological efficiency, PEN)(kg/kg):作物因施用氮肥而增加的产量与相应的氮素积累量的增加量的比值;氮素收获指数(HI,nitrogen harvest index)为子粒氮素积累量与氮素累积总量的比值。

1.6 数据处理

数据用 Microsoft Office Excel 2010 和 SAS 软件(9.0 版本)进行 ANOVA 方差分析处理,并用 LSD 法对处理间进行差异显著性比较。

2 结果与分析

2.1 不同管理方式对水稻产量及地上部生物量的影响

2.1.1 不同管理方式对水稻产量的影响 与对照相比,NPK 均施的 3 种处理下水稻产量、产量构成(有效穗数、穗粒数)以及收获指数多显著增加(表 1),说明氮肥的施用对水稻生长有显著影响。但是,NPK 均施 3 种不同处理之间的水稻产量差异不显著。与常规 NPK 处理相比,秸秆还田处理下水稻产量增加 3.81%,花后控水处理则降低 0.49%。花后控水处理下水稻产量降低,说明开花灌浆期控水干旱会影响水稻产量。有研究表明,强势粒的灌浆一般要 2 周左右才能完成^[14],花后 1 周控水会导致籽粒灌浆期缩短。但是,控水可以增加水稻穗粒的结实率和提高收获指数。

表 1 不同养分资源管理方式下水稻产量及产量构成

处理	有效穗数 (万/hm ²)	穗粒数 (粒/穗)	结实率 (%)	千粒质量 (g)	产量 (kg/hm ²)	HI (kg/kg)
CK	164b	117b	98.1a	29.21a	5 611b	0.52b
常规施肥	292a	137a	96.1b	25.87b	9 332a	0.55ab
花后控水	273a	137a	96.3b	25.63b	9 286a	0.58a
秸秆还田	280a	136a	94.4b	25.37b	9 688a	0.58a

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下表同。

2.1.2 不同管理方式对水稻地上部生物量的影响 与对照相比,在整个生育期内,NPK 均施的 3 种处理均能显著增加

水稻地上部生物量(图 1),在成熟期生物量增加幅度在 57.52%~64.46%之间,表明施用氮肥能促进水稻地上部生物量的积累。与常规 NPK 相比,秸秆还田处理下苗期地上部生物量较低,可能是因为秸秆腐蚀相对较慢,没有对水稻的地上部生物量的积累起到促进作用。有研究指出,秸秆还田后水稻生长要比无秸秆还田处理要慢些^[15]。随着生育期的推进,从拔节期开始秸秆还田处理地上部生物积累量迅速上升,在孕穗期增幅最大,并逐渐高于常规 NPK 处理。在水稻成熟期,秸秆还田处理下生物量提高 4.40%。因此秸秆还田有利于水稻地上部生物量的积累,而花后控水可能因水稻受到水分胁迫促进干物质转运,地上部生物量略低于常规 NPK 处理。

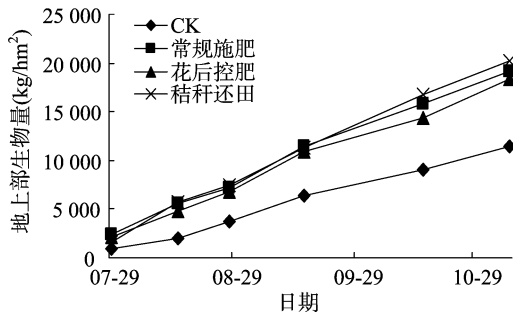


图1 不同管理方式下地上部生物量的变化

2.2 不同管理方式对水稻氮素利用率的影响

与常规 NPK 处理相比,秸秆还田处理下水稻氮素利用率的各项指标均有所提高(表 2),说明秸秆还田能够影响水稻对氮素的吸收与利用,有利于提高氮肥利用效率。与常规 NPK 处理相比,花后控水处理的氮肥吸收利用率降低 4.88%,这可能是由于控水使后期土壤中养分形态发生变化,植株氮素吸收量低于常规 NPK 处理所致,而氮肥生理利用率较高则可能与花后控水处理促使干物质转运增强有关。

表 2 不同管理方式下水稻氮素利用率

处理	氮肥农学利用率(kg/kg)	氮肥吸收利用率(%)	氮肥偏生产力(kg/kg)	氮肥生理利用率(kg/kg)
CK				
常规施肥	15.50a	51.25a	38.88a	30.24a
花后控水	15.31a	48.75a	38.69a	31.41a
秸秆还田	16.99a	54.17a	40.36a	31.36a

2.3 不同管理方式对土壤氮素养分含量的影响

2.3.1 不同管理方式对土壤铵态氮含量的影响 就整个生育期而言,土壤铵态氮含量表现为逐渐降低的趋势(图 2)。由于施肥主要集中在水稻生长前期,尿素在土壤中发生水解作用产生大量铵态氮,导致铵态氮含量高。拔节期和孕穗期施入拔节肥与孕穗肥后,土壤铵态氮含量出现 2 个高峰。而随着水稻生长速率加快,吸收氮量增加,土壤铵态氮含量持续降低,再加上水稻成熟前 1 周已停止灌水,土壤水分含量下降导致土壤中的铵态氮转化为硝态氮^[16-17],至水稻成熟期土壤铵态氮含量降到最低。

与对照相比,NPK 均施的 3 种处理下,在水稻各个生育阶段土壤中铵态氮含量均偏高。这说明氮肥的施入能显著影响土壤中的铵态氮含量。NPK 均施的 3 种处理对土壤中铵态氮含量的影响曲线基本趋于一致。与常规 NPK 相比,从整个生育期看,秸秆还田处理土壤中铵态氮含量略低,这可能由

于在秸秆还田初期,秸秆的施入向土壤中投入大量的碳,促进微生物繁殖,出现与作物“争氮”的现象^[17-19],导致土壤中矿质氮被暂时固定。因此铵态氮含量要低于常规 NPK 处理。此外,由于试验田是第 1 年秸秆还田,土壤中没有形成固定的微生物群体,整个水稻生育期土壤氮素的固定与释放还不稳定。拔节期和水稻灌浆期秸秆还田处理较常规 NPK 处理铵态氮含量高,可能与这一阶段腐熟秸秆向土壤释放氮素有关。

与常规 NPK 相比,花后控水处理下土壤中铵态氮含量有所降低。这主要由于控水之后土壤水分含量降低,氮素形态发生改变,铵态氮转化为硝态氮。

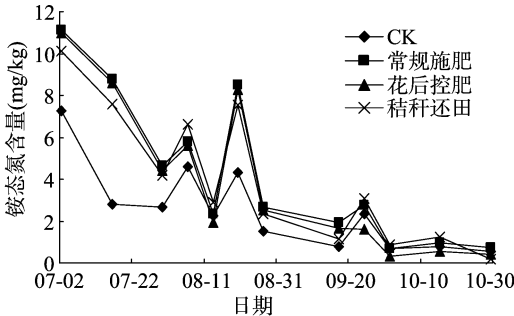


图2 不同管理方式下土壤铵态氮动态变化

2.3.2 不同管理方式对土壤硝态氮含量的影响 就整个生育期而言,土壤硝态氮含量表现为从分蘖期到拔节期略有降低,之后又开始升高,成熟期达到最高的变化趋势(图 3)。前期,土壤硝态氮含量较低,淹水条件下,水稻生育前期施入的尿素发生水解作用首先形成铵态氮,而硝化作用被强烈抑制,铵态氮成为水田中土壤无机氮的主要存在形态。到生育后期,土壤硝态氮含量逐渐上升,是孕穗前追施氮肥的缘故,且此时降水相对生育前期有所减少,土壤干旱促使大量铵态氮发生硝化作用形成硝态氮。到成熟期土壤硝态氮含量又进一步升高,是由于成熟前停止灌水,土壤水分含量降低促使铵态氮转化为硝态氮。与其他 3 种处理相比,花后控水在控水处理(9 月 24 日)之前,土壤中硝态氮含量的影响曲线趋势与其他处理基本相同。而在控水处理后,土壤中硝态氮含量呈明显上升趋势。这是由于控水之后导致水稻以黄酶作为主要的呼吸氧化酶^[20],从而促进对硝态氮的吸收,使干旱条件下水稻维持较高的氮素营养水平,促使土壤中大量的氮素发生硝化作用,以硝态氮的形式存在于土壤中。

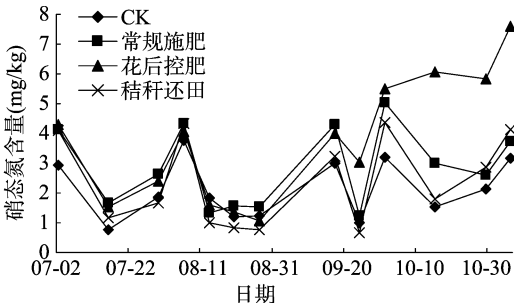


图3 不同养分资源管理方式下土壤硝态氮动态变化

2.4 不同管理方式对水稻生育期 SPAD 值及氮素积累量的影响

2.4.1 不同管理方式对 SPAD 值的影响 有研究指出,

SPAD 值与叶片氮素含量有很好的相关性^[21],在一定程度上可以作为诊断水稻对氮素需求状况的一个指标。与对照相比,NPK 均施的 3 个处理在各生育阶段测得的 SPAD 值均偏高(图 4)。由此可见施用氮肥对于维持作物较高的氮素营养具有重要作用。与常规 NPK 相比,秸秆还田处理下水稻生长后期 SPAD 值略高于常规 NPK 处理。这可能与后期秸秆分解释放一部分氮素有关。花后控水的 SPAD 值则要略低一点,这是由于 SPAD 值受到土壤水势的影响^[22],控水处理之后土壤表现干旱,水势下降,植株受到水分胁迫,对氮素养分的吸收受到抑制。

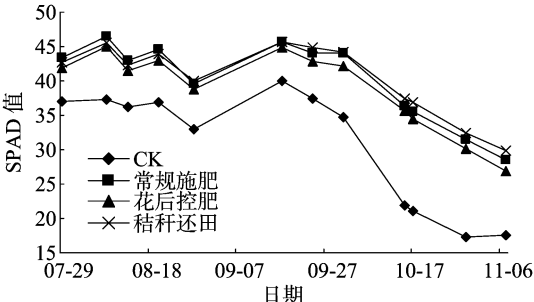


图4 不同管理方式下水稻 SPAD 值的变化

2.4.2 不同管理方式对氮素积累量的影响 与对照相比,在整个生育期内,NPK 均施的 3 种处理增加了水稻的氮素积累量(图 5),在成熟期氮素积累量增长幅度在 105.43% ~ 117.12% 之间,说明氮肥的施入能够显著提高水稻对氮素的吸收与累积,促进作物生长。花后控水处理下植株氮素积累量与常规 NPK 处理在各生育阶段基本保持一致。而秸秆还田在生育前期水稻植株氮素积累量略低,但是随着生育期的

延长,拔节期、开花期高于常规 NPK 处理,成熟期秸秆还田处理下氮素积累量提高 3.41%。

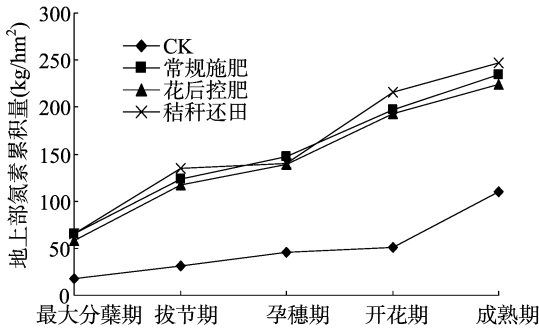


图5 不同养分资源管理方式下氮素积累量的变化

2.5 不同管理方式对孕穗前水稻茎鞘物质转运的影响

与对照相比,NPK 均施的 3 种处理下孕穗前水稻茎鞘物质转运量及转运率有明显增长(表 3)。这表明氮肥的施用能提高水稻花后干物质积累量对产量的贡献率,而降低花前储存物质对产量的贡献率。与常规 NPK 相比,花后控水处理下孕穗前茎鞘储存物质的运转率增长 5.96 百分点,说明花后控水能够提高干物质向籽粒中的分配比率,使运转效率提高^[23]。这是由于在花后水分亏缺条件下,开花授粉后叶片制造的光和产物降低,水稻灌浆物质中来自花后光合产物的比例减少,而来自孕穗前茎、鞘中贮藏物质的比例增加^[24],因此导致转运量与运转率的提高。与常规 NPK 相比,秸秆还田处理下孕穗前茎鞘储存物质转运率减少 5.53 百分点,这可能是由于生长后期秸秆腐熟向土壤释放氮素营养,促进水稻花后干物质的累积,降低花前储存干物质的转运。

表 3 不同处理孕穗前水稻茎鞘物质的转运量

处理	产量 (kg/hm ²)	孕穗前茎鞘储存物质转运量 (kg/hm ²)	孕穗前茎鞘储存物质转运率 (%)	孕穗前茎鞘储存物质转运量对产量的贡献率 (%)
CK	5 610	22.83	37.48	37.64
常规施肥	9 330	26.10	30.02	25.87
花后控水	9 284	31.28	35.98	31.16
秸秆还田	9 687	21.15	24.49	20.20

3 讨论

3.1 秸秆还田对水稻生长的影响

本研究结果表明,与常规 NPK 处理相比,秸秆还田后不仅可以增加水稻产量,而且可以提高氮肥利用效率。其原因主要有 3 个方面。首先,秸秆还田能够改善土壤的物理性状,如提高土壤保墒能力,调节耕层土壤温度,改善土壤物理结构,增加作物根际透气性等,为作物生长创造良好的环境^[25]。其次,土壤微生物量在土壤生态系统可以作为判断土壤肥力的一个指标。秸秆施入土壤后,秸秆碳被分解为有机质并被微生物所吸收成为其有机体的一部分,提高了土壤有机碳的积累,同时土壤微生物量增长,提高土壤肥力水平^[26],为水稻生长提供良好的养分供应环境。最后,大量的碳源为微生物提供丰富的能源物质,促进秸秆分解释放矿物氮,使土壤氮素得到更新和补偿,提升土壤的氮素水平^[27]。

但是本研究中水稻的增产幅度较低,可能是由于本试验

为第 1 年秸秆还田,土壤结构并未得到有效改善,且土壤中没有形成固定的微生物群体,故而对水稻生长的影响不显著。众多研究表明,长期秸秆还田对水稻确有明显的增产作用^[8,28-29]。

总之秸秆还田具有良好的土壤效应、生物效应和农田生态效应,有利于提高氮素利用率和促进水稻生长发育,为水稻的高产、稳产打下了良好基础。

3.2 花后控水对水稻生长的影响

本研究结果表明,花后控水主要通过改变土壤水分含量及养分状况,对水稻的生长产生影响。首先,控水处理会通过改变氮素形态而提高土壤中硝态氮含量。尽管氮素形态很大程度上会影响植物对其的吸收与利用,但由于开花期之后水稻对氮素养分吸收较少,土壤硝态氮含量的提高对于水稻的最终产量无明显影响。并且,土壤中含有大量的硝态氮,能够为喜硝作物生长前期提供足够的氮素营养,这可能有利于稻麦轮作体系中的后茬小麦的生长。其次,控水会导致水分胁迫

迫,影响水稻正常生长。有研究指出,籽粒的形成与花前积累在茎鞘内干物质的再流转有着很密切的关系,而水稻干物质的转运在很大程度上受土壤水分的影响^[30]。从本研究结果看,花后控水处理下,茎鞘内干物质转运量对产量的贡献比例明显高于常规 NPK 处理,符合了前人关于适宜水分胁迫具有促进水稻茎鞘内贮藏物质向穗部转运效应的结论^[31-32]。水分胁迫条件下花前茎鞘内储存的干物质转运量及转运效率的提高,实质上是水稻自身应对逆境的一种补偿效应现象^[33]。即当外界环境胁迫使花后光合产物积累受限时,花前储存在茎鞘的干物质就作为选择性缓冲碳库以满足水稻生长的需求。与干物质相似,适宜的水分胁迫可以提高营养器官中氮的转运率^[34],动员水稻花前叶片和茎鞘中储存的氮素参与再分配和再利用,减少水稻营养器官中氮的滞留,有利于提高氮素利用效率。因此在保证水稻产量的前提下,进行适宜的水分胁迫是提高水稻氮素利用率,同时减少灌溉次数、节约水资源的有效管理方式,更可能是一种有利于维持稻麦轮作周年生产力的有效途径。

参考文献:

- [1] 刘巽浩. 耕作学[M]. 北京:中国农业出版社,1996:23-46.
- [2] 章秀福,王丹英,方福平,等. 中国粮食安全和水稻生产[J]. 农业现代化研究,2005,26(2):85-88.
- [3] 范明生. 水旱轮作系统养分资源综合管理研究[D]. 北京:中国农业大学,2005.
- [4] 刘金山. 水旱轮作区土壤养分循环及其肥力质量评价与作物施肥效应研究[D]. 武汉:华中农业大学,2011.
- [5] Timsina J, Connor D J. Productivity and management of rice - wheat cropping systems: issues and challenges[J]. Field Crops Research, 2001, 69(2): 93-132.
- [6] Liu X J, Wang J C, Lu S H, et al. Effects of non - flooded mulching cultivation on crop yield, nutrient uptake and nutrient balance in rice - wheat cropping systems[J]. Field Crops Research, 2003, 83(3): 297-311.
- [7] 李庆逵. 中国水稻土[M]. 北京:科学出版社,1992.
- [8] 洪春来,魏幼璋,黄锦法,等. 秸秆全量直接还田对土壤肥力及农田生态环境的影响研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2003,29(6):627-633.
- [9] 马永良,师宏奎,张书奎,等. 玉米秸秆整株全量还田土壤理化性状的变化及其对后茬小麦生长的影响[J]. 中国农业大学学报,2003,8(增刊1):42-46.
- [10] 薛全义,荆宇,华玉凡. 略论我国早稻的生产及发展[J]. 辽宁农业职业技术学院学报,2002,4(2):5-7.
- [11] Cheng W D, Zhao G P, Wang Y J, et al. Rice cultivation for water - saving and high - efficiency in Zhejiang Province[J]. Res Agric Modern, 2000, 21(3): 197-200.
- [12] Xu Z Z, Yu Z W, Zhang Y L. The effects of soil moisture on grain starch synthesis and accumulation of winter wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2003, 29: 595-600.
- [13] Yang J, Zhang J, Wang Z, et al. Activities of key enzymes in sucrose - to - starch conversion in wheat grains subjected to water deficit during grain filling[J]. Plant Physiology, 2004, 135(3): 1621-1629.
- [14] 郑秋珍. 不同生育阶段干旱胁迫下的水稻产量效应[J]. 河北农业科学, 2004, 8(3): 83-85.
- [15] 李凤博. 不同耕作方式下秸秆还田对直播田生态环境的影响[D]. 南京:南京农业大学,2008:54.
- [16] 张富国. 不同种稻方式对稻麦轮作系统土壤氮和微生物特征的影响[D]. 南京:南京农业大学,2009.
- [17] 余冬立,王凯荣,谢小立,等. 基于稻草还田的氮肥优化管理研究[J]. 农业环境科学学报,2006,25(6):1547-1553.
- [18] 江永红,宇振荣,马永良. 秸秆还田对农田生态系统及作物生长的影响[J]. 土壤通报,2001,32(5):209-213.
- [19] 刘天学,纪秀娥. 焚烧秸秆对土壤有机质和微生物的影响研究[J]. 土壤,2003,35(4):347-348.
- [20] 陈书强,李金峰,郑桂萍. 水分胁迫对水稻生长发育影响的研究进展[J]. 垦殖与稻作,2004(5):12-15.
- [21] 张金恒,王珂,王人潮. 叶绿素计 SPAD-502 在水稻氮素营养诊断中的应用[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2003,31(2):177-180.
- [22] 程建平,曹凑贵,蔡明历,等. 水分胁迫与氮素营养对水稻生理特性的影响[C]//中国作物学会 2007 年学术年会论文集. 咸阳:中国作物学会,2007.
- [23] 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.
- [24] 吴娜,刘吉利,徐洪海,等. 花后水分亏缺对水稻回交后代干物质积累与分配及产量性状的影响[J]. 中国农学通报,2006,22(6):182-185.
- [25] 刘芳,张长生,陈爱武,等. 秸秆还田技术研究及应用进展[J]. 作物杂志,2012(2):18-23.
- [26] Li J, Zhao B Q, Li X Y, et al. Effects of long - term combined application of organic and mineral fertilizers on microbial biomass, soil enzyme activities and soil fertility[J]. Agricultural Sciences in China, 2008, 7(3): 336-343.
- [27] 张海燕,肖延华,张旭东,等. 土壤微生物量作为土壤肥力指标的探讨[J]. 土壤通报,2006,37(3):422-425.
- [28] 吴登,黄世乃,李明灌,等. 稻草还田免耕抛秧的增产效果及节水效应[J]. 杂交水稻,2006,21(增刊1):109-112.
- [29] 李孝勇,武际,朱宏斌,等. 秸秆还田对作物产量及土壤养分的影响[J]. 安徽农业科学,2003,31(5):870-871.
- [30] 唐玉霞,孟春香,贾树龙,等. 不同碳氮比肥料组合对肥料氮生物固定、释放及小麦生长的影响[J]. 中国生态农业学报,2007,15(2):37-40.
- [31] 王志琴,杨建昌,朱庆森. 土壤水分对水稻光合速率与物质运转的影响[J]. 中国水稻科学,1996,10(4):235-240.
- [32] 李华,王冬吟,朱德峰. 土壤水分状况对水稻物质积累和产量的影响[J]. 贵州农业科学,2008,36(1):104-105.
- [33] 胡钧铭,江立庚,丁成泉,等. 水稻花后物质流转研究进展[J]. 作物杂志,2010(2):1-6.
- [34] 王绍华,曹卫星,丁艳锋,等. 水氮互作对水稻氮吸收与利用的影响[J]. 中国农业科学,2004,37(4):497-501.