

刘现波,才 硕,时 红,等. 种植方式变化下双季稻田水氮流失与调控研究概述[J]. 江苏农业科学,2023,51(13):17-23.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.13.003

种植方式变化下双季稻田水氮流失与调控研究概述

刘现波¹, 才 硕², 时 红^{1,2}, 万绍媛²

(1. 东华理工大学,江西南昌 330013; 2. 江西省灌溉试验中心站,江西南昌 330201)

摘要:随着农村劳动力的转移和经济快速发展,我国双季稻种植方式已由传统精耕细作的手工栽插逐步向直播、抛秧、机械插秧等轻简化栽培方式转变,双季稻田的水氮需求和利用也因不同种植方式的技术特点而发生明显变化。为探究基于种植方式变化下双季稻田水氮利用与流失的变异特征,本文系统梳理了双季稻种植方式的演变和现状,比较了双季稻田水氮吸收利用效率、氮素径流和淋溶损失、氧化亚氮排放和氨挥发损失特征,总结了种植方式变化下节水灌溉、氮肥减施及有机物还田等措施对双季稻田水氮减排的影响。基于上述研究进展,现就多元种植方式下双季稻田氮素平衡与流失规律及调控措施进行展望:综合考虑双季稻田系统中的氮素输入、输出及盈余,开展基于种植方式变化下氮素平衡特征研究;并根据双季稻不同生育时期氮素平衡与流失规律进行水氮调控,制定高效的节水减氮水肥管理措施,为双季稻持续发展提供理论依据和研究基础。

关键词:双季稻田;种植方式;水氮流失;调控

中图分类号:S511.06 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)13-0017-07

水稻作为我国三大粮食作物之一,供养着 70% 以上的人口,在保障国家粮食安全方面发挥着重要作用。目前,我国水稻按照生长季节划分,主要有双季稻和单季稻 2 种,其中双季稻占比超过水稻总面积的 40%,江西省双季稻面积达 247.92 万 hm^2 ,占水稻种植面积的 72.5%^[1]。双季稻的高产出来

自于水肥的高投入,与单季稻相比,双季稻的水肥需求量更大,水氮流失更为严重,稻田产生的甲烷、二氧化碳和氧化亚氮更多,对环境产生的危害也更为显著^[2]。水和氮素是影响双季稻种植的重要因素,也是协调水稻生产和生态环境可持续发展的驱动因子,提高双季稻田水氮的科学管理对双季稻生产至关重要^[3]。

随着我国农业机械化程度的提高、农村青壮劳动力的输出以及种植面积的不断扩大,我国双季稻的种植方式已由传统的手工栽插逐渐转变为直播、抛秧和机械插秧等多种方式并存^[4-5]。水稻种植方式的转变,致使双季稻田氮素吸收利用和损失也发生了变化,现有的水肥调控理论与技术能否满足双季稻生产的需求? 双季稻田水氮流失又呈现什么

收稿日期:2023-03-05

基金项目:国家自然科学基金(编号:31960377);江西水利科技项目(编号:KT201430、KT201630);长江科学院开放研究基金(编号:CKWV2016400/KY)。

作者简介:刘现波(1995—),男,山东菏泽人,硕士研究生,从事农田水利与农业生态技术研究。E-mail:1787795965@qq.com。

通信作者:才 硕,博士,研究员,从事农田水利与农业生态技术研究。E-mail:caishuo0911@163.com。

OsWRKY5 enhances drought tolerance through abscisic acid signaling pathways[J]. *Plant Physiology*, 2022, 188(4):1900-1916.

[132] 于涌鲲,王丽芳,杜希华,等. *LeWRKY1* 基因的克隆及分析[J]. *植物生理学报*, 2010, 46(12):1225-1231.

[133] Wang L F, Yu Y K, Du X H, et al. Research on expression of *LeWRKY1* in tomato induced by jasmonic acid and other two factors[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2011, 12(8):1133-1135, 1138.

[134] Lindo L, Cardoza R E, Lorenzana A, et al. Identification of plant genes putatively involved in the perception of fungal ergosterol-squalene[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2020, 62(7):

927-947.

[135] 周 涛,王 娟,胡佳蕙,等. 番茄转录因子基因 *SlWRKY6* 的克隆与原核表达分析[J]. *西北植物学报*, 2020, 40(11):1824-1832.

[136] Zhao W H, Li Y H, Fan S Z, et al. The transcription factor *WRKY32* affects tomato fruit colour by regulating *YELLOW FRUITED-TOMATO 1*, a core component of ethylene signal transduction[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2021, 72(12):4269-4282.

[137] Wang Z R, Gao M, Li Y F, et al. *SlWRKY37* positively regulates jasmonic acid- and dark-induced leaf senescence in tomato[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2022, 73(18):6207-6225.

特征?与传统的手工栽插有何异同?这些都需要进行系统深入的探究。目前,针对不同种植方式下稻田水分管理和氮素吸收利用的研究大多基于传统手工栽插方式开展的,其他种植方式下双季稻田水氮流失与调控系统性的研究。鉴于此,本文分析了不同种植方式的研究现状,总结了其演变特征、水氮利用效率、氮素损失和调控途径,提出了进一步研究的方向,以期双季稻的可持续发展提供理论依据和技术支撑。

1 双季稻种植方式变化特征

1.1 水稻种植方式的演变

水稻种植方式的发展与国家的技术发展、水稻规模大小、劳动力数量和社会经济情况等因素相关。其中,起决定性作用的是经济发展,国际上经济发达水稻生产国正在经历从手工栽插向机械栽种的转变^[6]。在全球水稻生产中,机械种植主要有 3 种方式,一是以韩国和日本为代表的机械插秧,占比 90% 以上。二是以日本为代表的机械抛秧,自 20 世纪 60 年代日本学者就开始研究水稻抛秧技术,70 年代开始研究水稻纸筒育苗抛秧栽培技术,后期又研制出塑料钵盘,1975 年研制出塑料育苗软盘,并将这种技术传入我国、印度等地,后因劳动力缺乏、注重综合效益,逐渐停止了对抛秧的研究,转而选择了插秧技术研究^[7]。三是以美国、澳大利亚、意大利等国家为代表的机械直播,美国水稻 80% 采用机械旱直播,20% 采用飞机撒播,澳大利亚水稻种植 80% 采用飞机撒播,意大利在 20 世纪 60 年代就已经全部实现机械化直播。此外,印度、泰国等亚洲国家也种有较大面积的直播稻,印度直播稻面积约占水稻总面积 30%,泰国约占 34%,且有持续增长趋势^[5-6,8]。

我国水稻种植历史悠久,长达 7 000 年,是世界栽培稻的起源地之一,因而种植方式也随着时代的更迭而发生转变,直播方式是我国祖先留下来的最原始、最古老的种植方式,一直保留沿用至今,但由于直播存在苗难全、易倒伏、杂草多等缺点,所以随着时代的发展逐渐采用手工栽插技术;我国于 20 世纪 70 年代后期开始进行水稻抛秧研究,20 世纪 80 年代吸收日本的相关经验,创造出适合我国水稻生产的抛秧技术,并结合我国实际情况,发展了旱抛秧工艺^[9]。20 世纪 90 年代以后我国大力发展机械移栽技术,尤其 2000 年以来,政府更加注重引进机

械移栽技术,并且提供补贴,因此现在我国目前主要的种植方式有手工栽插、直播、抛秧和机械插秧^[4,6,10-11]。我国手工插秧的比例由 2000 年的 80% 左右降到 2007 年的 50% 左右,2020 年,我国水稻的机播率已经达到 56.3%,且农业农村部提出到 2025 年,我国水稻种植机械化率达到 65% 左右^[12]。由此可见,我国采用手工栽插的比例正在稳步下降,现在我国正处于由传统的手工栽插到机械化插秧和直播的过渡时期,形成了手工栽插、抛秧、直播、机械插秧 4 种植方式并存的局面。

1.2 双季稻种植方式现状

我国稻区可分为 6 个稻作区和 16 个亚区^[13]。其中包含双季稻的稻区有 3 个,第一是华南双季稻稻作区,包括闽、粤、桂、滇的南部以及我国台湾省、海南省和南海诸岛全部;第二是华中双季稻稻作区,包括苏、沪、浙、皖、赣、湘、鄂、川 8 省(市)的全部或大部 and 陕、豫 2 个省南部。第三是西南高原单双季稻稻作区,主要包括云贵和青藏高原。其中华中双季稻稻作区是最大的稻作区,水稻面积占比约为 67%,也是我国双季稻的主要分布区域,其中浙江、安徽、福建、江西、湖南等南方 10 个省份,自 1949 年至 2011 年,双季稻面积占比均在 85% 以上,且大部分年份在 95% 以上^[14]。据统计,江西省 2021 年水稻种植面积为 341.92 万 hm^2 ,产量为 2 073.94 万 t,分别占全国水稻播种面积、总产量的 11.4%、9.7%^[15]。江西双季稻在全国水稻生产中发挥着十分重要的作用,早、晚稻因气候特征和品种生育期的影响,种植方式也存在较大差异。

由图 1 可知,江西省早、晚稻不同种植方式占比略有差异,早、晚稻手工栽插面积均呈递减趋势,早稻由 1990 年的 90% 多下降到 2019 年的不足 15%,晚稻从 1990 年的接近 100% 下降到 2019 年的 20% 左右。早、晚稻机械插秧和抛秧面积占比总体上随着年份的增加而稳步增长。早稻直播面积占比呈逐年上升的趋势,晚稻则先增长后下降再增长^[16]。种植方式的多元化发展势必会带来双季稻产量和稻田水氮利用率与排放流失等方面的变化。

2 不同种植方式下双季稻水氮利用效率研究

2.1 双季稻水分利用效率

种植方式的差异导致双季稻的需水量和水分管理有所不同,直播稻相对于抛秧、机械插秧、手工栽插而言,可以节省大量水分,一是直播稻前期灌

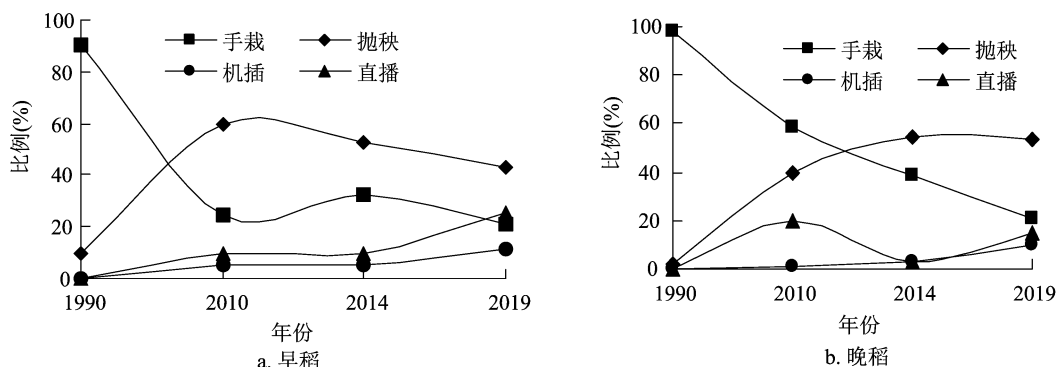


图1 江西早、晚稻种植方式面积占比

溉较少,田间也毋需水层,且直播稻无返青期,这相对于其他种植方式的双季稻减少了本田期的淹水时间,也减少双季稻田的渗漏、蒸发等途径的损失,而其他种植方式的双季稻本田期将从移栽到收割前保持淹水;二是除直播之外其他种植方式下的双季稻田在移栽前均需要对本田用水进行泡田,而直播稻在整田时需要的水分大大减少^[17]。由此,直播稻的水分利用效率大于其他种植方式条件的移栽稻。Tao 等指出干直播水稻的灌水量低于湿直播和传统移栽稻,同时,旱直播水稻得到了与传统移栽相近的粮食产量,用水量相近的湿直播产量则明显高于传统移栽,这表明 2 种直播水稻的水分利用率均高于移栽水稻^[18],这和彭少兵的研究结果^[19]类似,该研究结果表明双季稻直播因为没有育秧期,可以减少劳动力和水的投入。综上,前人对于水分管理的研究主要集中在直播稻和移栽稻,缺乏关于移栽稻中的机械插秧、手工栽插、抛秧等水分利用效率之间的研究,因而笔者认为在此基础上应进一步重点关注各移栽稻之间的水分利用效率比较,探究适合移栽稻的水分管理,为移栽稻的水分管理提供技术支持。

2.2 双季稻氮素利用效率

氮素是双季稻最重要的元素之一,在一定程度上,它决定着双季稻的产量,但过量的氮肥会造成资源浪费还会对环境产生更大的危害,因此要合理施用氮肥,在保证双季稻产量的同时提高氮素利用率。于飞等综合 2004—2014 年的数据,发现水稻氮肥利用率由施肥量 $< 60 \text{ kg/hm}^2$ 的 52.5% 降到施肥量 $> 240 \text{ kg/hm}^2$ 的 36.1%^[20],由此可以看出,在一定施肥量下,水稻氮肥的利用率会随着氮肥施用量的增加而降低,且我国的氮肥利用率平均较低,幅度波动较大。

不同种植方式下氮素利用效率也存在差异。樊鹏飞等指出传统手工栽插下,氮肥利用效率为 25.6% ~ 28.7%^[21];罗亢等指出直播双季稻的氮素利用率为 32.16% ~ 38.72%^[22];对于机插双季稻,王秀斌等和陈佳娜等指出氮素利用率分别为 22.16% ~ 44.68%、50.64% ~ 63.02%,他们得出的机插稻氮素利用率虽有所差异,但和直播稻一样高于传统手工栽插^[23-24]。王春雨等指出在不同种植方式下,机械插秧、直播、手工栽插的氮素利用率均为手工栽插 $>$ 机械插秧 $>$ 直播^[25-27]。Xu 等指出在早稻和晚稻中直播稻的氮素生理利用效率普遍低于手工栽插稻^[28],但陈志峰指出双季稻直播的氮素利用率显著高于移栽稻^[29]。综上,前人的研究结论大多集中在直播稻和机械插秧、手工栽插之中,且在氮素利用率上则有着不同的观点,缺乏对抛秧的研究,抛秧作为我国主要的种植方式之一,其氮素利用率和其他种植方式差异如何,笔者认为可以在前人研究的基础上进行深一步的研究,探究 4 种植方式下双季稻氮素利用率的差异。

3 不同种植方式下双季稻田氮素损失研究

3.1 不同种植方式下双季稻田氮素径流和淋溶损失研究

径流流失是农田养分流失的主要途径,并且我国南方双季稻区的降水频次和强度高,稻田径流量大,易造成氮磷养分径流流失^[30]。不同种植方式具有不同的播种方式、水分管理,会造成径流和淋溶损失的差异,因而需要关注不同种植方式下双季稻氮素径流和淋溶的损失。杨振宇等指出径流损失中总氮、硝氮、氨氮浓度机械插秧均小于直播^[31],乔月等指出径流损失量直播稻 $>$ 机插稻^[32],Zhang 等研究认为与传统移栽稻相比,直播稻生育前期氮素

径流损失显著增加,氮素吸收降低,氮肥利用率下降^[33]。前人研究中可以看出,直播稻相对传统移栽稻径流和淋溶损失较大,且其中氮素浓度较高,这是因为直播前期的水分管理和移栽稻差异较大。前人研究大多数集中在直播稻和移栽稻之间,具体对于机插稻、手工栽插、抛秧等之间的研究较少,这 3 种植方式间的径流和淋溶量多少及氮素浓度大小缺乏系统性的研究,因此关于不同种植方式之间径流和淋溶损失的比较还需进一步研究。

3.2 不同种植方式下双季稻田氧化亚氮的排放

氧化亚氮是三大温室气体之一,对全球变暖有重要的贡献作用,主要来源于人类活动,且施用无机氮肥产生的氧化亚氮占人类活动的 44%,土壤中氧化亚氮主要由硝化作用和反硝化作用产生,稻田中厌氧环境会促进反硝化作用增加氧化亚氮的排放,而这正是大气中氧化亚氮的主要排放源^[34-35]。所以研究不同种植方式下双季稻田氧化亚氮排放可以为减少温室气体排放提供理论支撑,减缓全球变暖的脚步。

不同水氮管理可以影响氧化亚氮的产生,因此不同种植方式产生的氧化亚氮存在差异。熊超等指出在整个生育期氧化亚氮通量高产抛秧 > 高产移栽^[36],但谭雪明等指出高产移栽 > 高产抛秧^[37],与熊超等的研究结果相反。林芳等指出不同种植方式氧化亚氮排放通量大小为直播 > 抛秧 > 机械插秧 > 手工栽插^[38],张岳芳等指出机械直播的氧化亚氮累积排放量显著大于机械插秧和手工栽插,机械插秧较手工栽插略有增加^[39]。由前人研究可知,总体上,直播稻的氧化亚氮排放量大于移栽稻,抛秧、机械插秧和手工栽插之间的氧化亚氮排放量存在不同结论,因此可以在前人的研究基础上,着重研究各移栽稻之间的氧化亚氮排放量差异。

3.3 不同种植方式下双季稻田氮挥发

氮挥发是农业土壤氮素损失的主要途径之一,尤其是化学氮肥的施用,使得双季稻田的氮挥发损失严重,氮挥发的氮量占化肥氮量的 1% ~ 47%^[40-42]。但在不同种植方式下的研究较少,在双季稻田中,不同种植方式下的氮挥发存在差异,杨振宇等指出在减氮 10% 条件下直播稻的氮挥发大于机插稻^[31],乔月等指出氮挥发损失量直播稻大于机插稻^[32]。前人的研究均指出直播稻的氮挥发大于机插稻,对于手工栽插和抛秧的氮挥发则缺乏研究,且 4 种植方式之间的差异也未可知,针对此现

状,可以着重研究手工栽插、抛秧及 4 种植方式间的氮挥发差异,探明不同种植方式的氮挥发差异规律。

4 种植方式变化下双季稻田水氮减排调控研究

4.1 节水灌溉

我国是世界 13 个水资源贫乏国家之一,且农业灌溉用水量,水分利用率低^[43]。为缓解水资源匮乏对水稻生产的压力,国内外学者研究了水稻生育期的需水供水规律,探究在不同灌溉方式下不同种植方式双季稻水氮积累及减排效果。周文涛等指出在节水条件下,生育期晚稻的氮素积累量机械插秧 > 手工栽插,抛秧 > 手工栽插^[44]。成臣等指出传统移栽稻的氧化亚氮周年累积排放量间歇灌溉比淹水灌溉增加 10.2% ~ 60.9%,且氧化亚氮排放主要集中在水分的干湿交替阶段^[45]。王利民等指出在节水灌溉下,总氮、氨氮、硝氮分别减少 31.5%、29.9%、31.2%,氮肥的流失率降低了 31.7%,在水分的干湿交替阶段有利于土壤微生物固氮从而减少氮素径流流失^[46]。黄东风等指出,在 3 年径流试验中双季稻田节水灌溉相比淹水灌溉总氮、硝氮、氨氮的年流失量分别减少了 16.4%、18.6%、29.8%^[47]。上述学者的研究表明,在对水量进行调控的情况下均不同程度减少了氮素径流排放,提高了氮肥利用率,但会增加氧化亚氮排放量。前人在节水灌溉条件下也研究了抛秧、机械插秧和手工栽插之间的氮肥利用率,但其中缺乏对直播的研究,更缺乏综合评价直播、抛秧、机械插秧和手工栽插在双季稻种植上的差异。且大部分研究针对氮素径流损失,笔者认为可以在此基础上运用¹⁵N 示踪技术开展双季稻田在不同种植方式的氮素流失途径研究,探究不同灌溉条件下不同种植方式氮素的迁移规律,通过测定植株、土壤及水体中的¹⁵N 丰度来选择合适的灌溉和种植方式进行双季稻培育。

4.2 氮肥减施

增施化肥是提高水稻产量最直接的方式,但过多的增施氮肥则会造成更多氮肥浪费。王秀斌等指出早、晚稻均在 60 kg/hm² 为基础上随氮肥用量增加,氮肥的利用率呈逐渐降低趋势^[48],且吕伟生等指出,在早、晚稻施氮量分别超过 180、195 kg/hm² 时植株吸氮量增加不显著^[49],由此可知,过量施用氮肥会造成氮肥的浪费,且经济效益不明显。罗亢等指出在同一直播密度下,机直播双

季稻氮素吸收利用率和氮素农学利用率随施氮量的增加而下降,并且氮肥利用率均随施氮量的增加而不断降低^[22]。由此可知,当肥料用量超过农民惯用施肥量(180 kg/hm²),带来的植株吸氮量、经济效益并不明显,且造成更多的肥料浪费。

在现有基础上,为了平衡产量和氮素利用率,大量研究人员研究在氮肥减施条件下水稻的产量、氮素吸收、氮素损失等特征。陈志峰指出在直播双季稻中,周年施氮量为我国平均施氮量的 70% 时,周年产量约为我国平均产量的 2.36 倍,而且在优化氮肥管理下还可以提高氮素利用率^[29]。王利民等也指出在习惯施肥减氮 10% 下,移栽早稻和晚稻的植株吸氮量分别增加 3.8% 和 6.9%,氮肥利用率分别增加 11.9% 和 18.3%^[46]。杨振宇等指出在减氮 10% 的条件下,直播稻的氮挥发积累量显著小于正常施肥,稻田田面水氮素浓度下降了 18.74% ~ 27.04%,由此可见,直播稻和移栽稻均在减氮条件下氮素利用率增加,损失率下降^[31]。经过总结分析前人的研究,在农民惯用氮肥(180 kg/hm²)的条件下减施来进行优化,不同种植方式下的双季稻可以降低氮素损失率。但前人的研究大多集中在直播稻、机插稻、手工栽插,对于抛秧研究较少,而且不同种植方式间氮素利用率孰高孰低也缺乏整体的研究,因此可以在前人的基础上更进一步,在现有施肥条件下进行优化探究不同种植方式下双季稻的氮素利用率。

4.3 有机物还田

为了减少温室气体排放,减轻对环境的危害,部分地区开始采用秸秆、紫云英、动物粪便等有机物还田^[50-53]。Wang 等指出有机肥显著降低了水稻中水溶性无机氮的淋溶损失,同时改善了影响氮淋失的土壤表面物理和电化学性质^[54],姜利红等指出相比单施化肥,在有机物料替代 20% 氮肥下能够降低径流水中全氮、氨态氮、硝态氮含量,表明有机代替部分无机肥条件下能够减少氮素径流和淋溶损失^[55]。李桂花等指出早、晚稻在有机无机配施条件下氮肥农学利用率和表观利用率略有增加^[56],廖萍等指出秸秆还田显著提高双季稻产量和氮素吸收^[57],谭力彰等指出在有机肥、无机肥配施下早、晚稻氮肥吸收利用率分别比单施无机肥高 1.63% ~ 9.46%、3.57% ~ 9.46%^[58],李超等指出在同一施氮水平下,有机肥部分替代化学氮肥基施能在一定程度上提高双季稻后期氮素积累量,提高结实

率^[59]。上述 4 名学者的研究均表明在有机肥替代部分无机肥条件下可以提高氮素吸收和利用率,减少氮肥损失。但裴鹏刚等指出在水稻生育前期秸秆还田处理下的吸氮量低于秸秆不还田处理,生育后期的水稻氮素积累总量在秸秆还田与不还田无显著差异^[60],这与前人研究略有冲突。

有机无机肥混施下早、晚稻的氮素利用率也存在差异。聂鑫等也指出在常规施肥条件下减氮 20% 并加紫云英翻压,早稻和晚稻均显著提高了水稻氮素积累量,早稻的氮素农学利用率减小,晚稻则显著提高了氮素农学利用率^[61]。陈静蕊等也指出早稻和晚稻的氮素利用率不同,但和聂鑫的结果相反,早稻季氮素利用率增加,晚稻季无显著差异^[62]。由此可见,绿肥还田可以有效提高氮素利用率,但是早稻和晚稻却存在差异,需要更进一步的研究。在不同种植方式下,氮素利用率和氮素损失也存在差异,张岳芳等指出在麦秸还田下机械直播、机械插秧、手工栽插均比不还田减少氧化亚氮排放,且机械直播排放量显著大于机械栽插和手工栽插^[39]。综上,在秸秆、紫云英或动物粪便等有机肥还田条件下,双季稻的氮素损失有所减少,但也有少部分研究表明无显著差异,且早、晚稻规律存在差异。不同种植方式下双季稻的氮素积累量有所增加,氮素利用效率均有不同程度的提升,能减少氮的淋溶损失、氧化亚氮等温室气体的排放,在产量不变甚至增加的情况下有机肥代替部分无机肥可以减少氮素损失,减少对环境的污染,但关于抛秧前人的研究较少,缺乏详细的研究,下一步可以针对不同种植方式在有机肥还田的条件下研究氮素迁移规律。

5 存在问题与展望

本研究通过对手工栽插、机械插秧、直播、抛秧 4 种植植方式的发展、现状、水氮利用、损失与调控的总结分析,探讨了不同种植方式下双季稻的氮素吸收、氮素损失在氮肥减施、有机无机肥料混施、节水灌溉条件下存在的差异。综合前人的研究成果可知,以往针对不同种植方式下氮素利用和流失的研究大多集中某一种或 2 ~ 3 种植植方式上,但系统比较 4 种方式的研究相对较少。此外,针对不同种植方式下双季稻田氮素调控的研究鲜有报道。因此,针对未来研究方向提出以下 2 个想法:

(1) 不同种植方式的氮素平衡特征。已有研究

大多针对不同种植方式间的氮素利用率或某一氮素损失途径,忽略了稻田系统中的氮素平衡研究,即在稻田系统中的氮素输入、输出和盈余。目前,研究氮素平衡最常见的方法是 ^{15}N 同位素标记法,将 ^{15}N 肥料施入土壤,通过追踪 ^{15}N 标记的肥料去向,探明氮素在稻田系统的去向,采用这种方式可以说明 ^{15}N 标记肥料与系统各组分的相互作用和影响,明确稻田在不同生育期中氮素分配及土壤残留。因此,可利用 ^{15}N 同位素示踪技术探究氮素迁移情况,分析不同种植方式下氮素分配规律,探明双季稻田氮素去向,掌握双季稻田不同生育期氮素平衡特征。

(2)不同种植方式的水氮减排调控研究。近年来,节水灌溉、氮肥减施、有机物还田等发展较快,这些措施均能在一定程度上减少氮肥的损失,减轻对环境的危害。目前,这些措施的研究在手工栽插上已经较为成熟,且早、晚稻均有涉及。我国南方地区早、晚稻种植方式、环境条件不一,早稻季雨水多,晚稻季雨水少,由此造成的早、晚稻主要氮素损失形态也存在差异。针对上述问题,可以在早、晚稻季选用不同的水氮减排措施,以达到节水减排的效果。通过研究不同水氮减排措施下双季稻的水氮流失特征,探明不同生育时期的水氮损失特征,为双季稻节水减排和可持续发展提供理论依据和研究基础。

参考文献:

- [1] Yuan S, Nie L X, Wang F, et al. Agronomic performance of inbred and hybrid rice cultivars under simplified and reduced - input practices[J]. *Field Crops Research*, 2017, 210: 129 - 135.
- [2] 王向一. 我国双季稻区域温室气体排放模拟研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2019: 28 - 31.
- [3] 才 硕, 时 红, 时元智, 等. 种植方式变化下双季稻田氮素平衡及环境效应研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2020, 48(17): 1 - 3, 7.
- [4] Zhang Y P, Zhu D F, Xiong H, et al. Development and transition of rice planting in China[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2012, 13(6): 1270 - 1276.
- [5] 罗锡文, 王在满, 曾 山, 等. 水稻机械化直播技术研究进展[J]. *华南农业大学学报*, 2019, 40(5): 1 - 13.
- [6] 王 洋, 张祖立, 张亚双, 等. 国内外水稻直播种植发展概况[J]. *农机化研究*, 2007, 29(1): 48 - 50.
- [7] 夏倩倩, 张文毅, 纪 要, 等. 我国机械抛秧技术与装备的研究现状及趋势[J]. *中国农机化学报*, 2019, 40(6): 201 - 208.
- [8] 章秀福, 朱德峰. 中国直播稻生产现状与前景展望[J]. *中国稻米*, 1996, 2(5): 1 - 4.
- [9] 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 等. 中国抛秧稻作技术体系及其特征[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(1): 43 - 52.
- [10] 张洪程, 龚金龙. 中国水稻种植机械化高产农艺研究现状及发展探讨[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(7): 1273 - 1289.
- [11] 徐金兰, 李武权, 顾莉娟, 等. 直播水稻发展概况及研究进展[J]. *安徽农学通报*, 2012, 18(22): 17 - 18.
- [12] 颜 旭. 水稻生产机械化如何实现均衡发展? [N]. *农民日报*, 2022 - 06 - 10(6).
- [13] 周立三. 中国农业区划的理论与实践[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1993: 257.
- [14] 杨万江, 王 绎. 我国双季稻区复种变化及影响因素分析: 基于 10 个水稻主产省的实证研究[J]. *农村经济*, 2013(11): 24 - 28.
- [15] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2008.
- [16] 潘晓华, 李木英, 曾勇军, 等. 江西双季稻主要种植方式及其配套栽培对策[J]. *江西农业大学学报*, 2013, 35(1): 1 - 6.
- [17] 陶 冶. 不同种植方式下水稻产量、水氮利用效率及稻田温室气体排放比较研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016: 1 - 3.
- [18] Tao Y, Chen Q, Peng S B, et al. Lower global warming potential and higher yield of wet direct - seeded rice in Central China[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2016, 36(2): 24.
- [19] 彭少兵. 对转型时期水稻生产的战略思考[J]. *中国科学(生命科学)*, 2014, 44(8): 845 - 850.
- [20] 于 飞, 施卫明. 近 10 年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析[J]. *土壤学报*, 2015, 52(6): 1311 - 1324.
- [21] 樊鹏飞, 刘伟民, 田 昌, 等. 南方典型双季稻田氮素吸收及平衡[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(3): 259 - 267.
- [22] 罗 亢, 曾勇军, 石庆华, 等. 施氮量和密度对机直播双季稻产量与氮素利用率的影响研究[J]. *核农学报*, 2021, 35(12): 2850 - 2859.
- [23] 王秀斌, 徐新朋, 孙静文, 等. 氮肥运筹对机插双季稻产量、氮肥利用率及经济效益的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(5): 1167 - 1176.
- [24] 陈佳娜, 曹放波, 谢小兵, 等. 机插条件下低氮密植栽培对“早晚兼用”双季稻产量和氮素吸收利用的影响[J]. *作物学报*, 2016, 42(8): 1176 - 1187.
- [25] 王春雨, 余华清, 何 艳, 等. 播栽方式与施氮量对杂交籼稻氮肥利用特征及产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(12): 1792 - 1801.
- [26] 霍中洋, 李 杰, 张洪程, 等. 不同种植方式下水稻氮素吸收利用的特性[J]. *作物学报*, 2012, 38(10): 1908 - 1919.
- [27] 李 杰. 不同种植方式水稻群体生产力与生态生理特征的研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2011: 137 - 138.
- [28] Xu L, Yuan S, Wang X Y, et al. Comparison of yield performance between direct - seeded and transplanted double - season rice using ultrashort - duration varieties in central China[J]. *The Crop Journal*, 2022, 10(2): 515 - 523.
- [29] 陈志峰. 直播双季稻氮肥运筹研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018: 50 - 51.
- [30] 时 红, 才 硕, 孙占学, 等. 种植方式对稻田水肥利用及环境

- 效应的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(17):229-235.
- [31] 杨振宇,罗功文,赵 杭,等. 种植方式对稻田氮挥发及氮磷流失风险的影响[J]. 农业环境科学学报,2021,40(7):1529-1537.
- [32] 乔 月,朱建强,吴启侠,等. 不同氮肥对不同种植方式稻田径流氮流失与氮挥发的影响[J]. 灌溉排水学报,2021,40(2):32-41.
- [33] Zhang Y F, Liu H J, Guo Z, et al. Direct-seeded rice increases nitrogen runoff losses in southeastern China [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 251: 149-157.
- [34] 朱永官,王晓辉,杨小茹,等. 农田土壤 N_2O 产生的关键微生物过程及减排措施[J]. 环境科学,2014,35(2):792-800.
- [35] Liu B B, Mørkved P T, Frostegård Å, et al. Denitrification gene pools, transcription and kinetics of NO , N_2O and N_2 production as affected by soil pH[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2010, 72(3): 407-417.
- [36] 熊 超. 不同栽培模式下双季稻产量形成特点与温室气体排放差异的初步研究[D]. 南昌:江西农业大学,2012:20-23.
- [37] 谭雪明,黄 山,熊 超,等. 不同栽培模式对稻田甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. 江苏农业科学,2013,41(12):341-344.
- [38] 林 芳,王 纯,王维奇,等. 栽培方式对福州平原稻田氧化亚氮减排的研究[J]. 实验技术与管理,2014,31(6):58-62.
- [39] 张岳芳,陈留根,张传胜,等. 水稻机械化播种对稻田甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. 农业工程学报,2015,31(14):232-241.
- [40] Fillery I R P, Vlek P L G. Reappraisal of the significance of ammonia volatilization as an N loss mechanism in flooded rice fields [J]. Fertilizer Research, 1986, 9(1): 79-98.
- [41] Roelcke M, Li S X, Tian X H, et al. In situ comparisons of ammonia volatilization from N fertilizers in Chinese loess soils [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, 62(1): 73-88.
- [42] 朱 坚,石丽红,田发祥,等. 湖南典型双季稻田氮挥发对施氮量的响应研究[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(5):1129-1138.
- [42] 罗文兵,孟小军,李亚龙,等. 南方地区水稻节水灌溉的综合效应研究进展[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(4):145-151.
- [44] 周文涛,龙文飞,戴 炜,等. 节水条件下不同种植方式对晚稻氮素吸收积累的影响[J]. 华北农学报,2019,34(3):147-154.
- [45] 成 臣,杨秀霞,汪建军,等. 秸秆还田条件下灌溉方式对双季稻产量及农田温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报,2018,37(1):186-195.
- [46] 王利民,黄东风,张秉涯,等. 不同水肥耦合下双季稻氮磷吸收、利用与流失差异[J]. 应用生态学报,2022,33(4):1037-1044.
- [47] 黄东风,李卫华,王利民,等. 水肥管理措施对水稻产量、养分吸收及稻田氮磷流失的影响[J]. 水土保持学报,2013,27(2):62-66.
- [48] 王秀斌,徐新朋,孙 刚,等. 氮肥用量对双季稻产量和氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(6):1279-1286.
- [49] 吕伟生,曾勇军,石庆华,等. 合理氮肥运筹提高双季机插稻产量及氮肥利用率[J]. 水土保持学报,2018,32(6):259-268.
- [50] 胡启良,杨滨娟,刘 宁,等. 绿肥混播下不同施氮量对水稻产量、土壤碳氮和微生物群落的影响[J]. 华中农业大学学报,2022,41(6):16-26.
- [51] 王兴为,王志成. 秸秆还田与深施氮肥对水稻叶片生理特征、氮素利用及产量的影响[J/OL]. 中国稻米,2022. (2022-09-08)[2023-01-06]. <https://kns.cnki-net.webvpn.ecut.edu.cn/kcms/detail/33.1201.S.20220907.1728.002.html>.
- [52] 曹卫东,包兴国,徐昌旭,等. 中国绿肥科研60年回顾与未来展望[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(6):1450-1461.
- [53] 杨宏伟,王小利,龙大勇,等. 秸秆和生物炭还田对稻田土壤有机碳及其矿化的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(11):226-232.
- [54] Wang Q, Wen J, Wen Y J, et al. Alteration of soil-surface electrochemical properties by organic fertilization to reduce dissolved inorganic nitrogen leaching in paddy fields [J]. Soil and Tillage Research, 2021, 209: 104956.
- [55] 姜利红,谭力彰,田 昌,等. 不同施肥对双季稻田径流氮磷流失特征的影响[J]. 水土保持学报,2017,31(6):33-38,45.
- [56] 李桂花,张雪凌,周吉祥,等. 长期秸秆还田下有机无机配施及微量元素和缓释肥的施用对双季稻产量和肥料利用率的影响[J]. 中国土壤与肥料,2021(6):149-155.
- [57] 廖 萍. 施石灰对双季稻系统氮素循环的影响及其作用机制[D]. 南昌:江西农业大学,2020:25-27.
- [58] 谭力彰,黎炜彬,黄思怡,等. 长期有机无机肥配施对双季稻产量及氮肥利用率的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2018,44(2):188-192.
- [59] 李 超,刘思超,杨 晶,等. 不同有机肥部分替代基施化学氮肥对双季稻生长发育及产量的影响[J]. 南方农业学报,2018,49(6):1102-1110.
- [60] 裴鹏刚,张均华,朱达峰,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.
- [61] 裴 鑫,鲁艳红,廖育林,等. 氮钾减施下紫云英翻压量对双季稻产量及氮素利用的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2021,47(6):684-691.
- [62] 陈静蕊,蔡文婧,王少先,等. 化肥减量配合紫云英还田对双季稻产量及氮肥利用率的影响[J]. 水土保持学报,2019,33(6):280-287.