

# 种植方式变化下双季稻田氮素平衡及环境效应研究进展

才硕<sup>1</sup>, 时红<sup>1,2\*</sup>, 时元智<sup>3</sup>, 徐涛<sup>1</sup> (1. 江西省灌溉试验中心站, 江西省高效节水与面源污染防治重点实验室, 江西南昌 330201; 2. 东华理工大学, 江西南昌 330013; 3. 南京水利科学研究院, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210029)

**摘要** 随着农村劳动力转移以及水稻栽插机械化的发展, 传统的手工插秧方式正在被直播、抛秧和机械化插秧所替代, 种植方式的变化导致了水稻水肥需求与利用发生明显改变。为了深入研究不同种植方式对双季稻田氮素平衡及环境效应的影响, 在前人研究基础上, 阐述了不同水稻种植方式的技术特点以及稻田氮素输移、流失规律、平衡特征与环境效应等方面研究, 以为南方双季稻高效稳产栽培与可持续发展提供理论依据。

**关键词** 种植方式; 氮素平衡; 环境效应; 双季稻田

**中图分类号** S181.3 **文献标识码** A

**文章编号** 0517-6611(2020)17-0001-03

**doi:** 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.17.001



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

## Research Progress on Nitrogen Balance and Environmental Impact under the Change Planting Patterns in Double-cropping Paddy Fields

CAI Shuo<sup>1</sup>, SHI Hong<sup>1,2</sup>, SHI Yuan-zhi<sup>3</sup> et al (1. Jiangxi Key Laboratory of Agricultural Efficient Water-saving and Non-point Source Pollution Preventing, Jiangxi Central Station of Irrigation Experiment, Nanchang, Jiangxi 330201; 2. East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013; 3. State Key Laboratory of Hydrology-water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210029)

**Abstract** With the transfer of rural labor force to cities and the development of mechanization of rice planting, the traditional artificial transplanting seedlings are being replaced by direct seeding, throwing seedlings and mechanical transplanting, changes in planting patterns have led to significant changes in water-fertilizer demand and utilization of rice. In order to deeply study the influence of different planting patterns on the nitrogen balance and environmental effects in double-cropping paddy fields, based on previous studies, the technical characteristics of different rice planting methods, as well as studies on nitrogen transport, loss, balance characteristics, and environmental effects of paddy fields were comprehensively described. It is hoped to provide a certain theoretical basis for efficient and stable yield cultivation and sustainable development of double-season rice in the south.

**Key words** Planting pattern; Nitrogen balance; Environmental effect; Double-cropping paddy fields

双季稻是我国南方地区重要的农业生产模式, 种植“一年两熟”的双季稻对保障我国粮食安全、促进国民经济可持续发展具有重要作用。然而, 双季稻种植多采用“水肥高投入、粮食高产出”的管理模式, 用水用肥量大, 氮素利用率低且流失严重, 致使稻田在保障粮食产量的同时也造成氮素地表径流与淋失<sup>[1]</sup>、温室气体排放<sup>[2]</sup>及生态环境恶化等问题。

近年来, 随着农村劳动力向城市转移、土地流转以及农业机械化的发展, 水稻的种植方式发生了深刻变革, 传统的手工插秧正在被水稻直播、抛秧和机械化插秧所替代<sup>[3]</sup>。长期以来, 水肥调控以及耕作措施影响作物产量和养分吸收的研究主要是在手工插秧的稻田环境下建立的。然而, 随着抛秧、直播和机械化插秧等简化栽培技术普遍应用, 稻田的水肥管理方式也随之发生变化, 导致双季稻田氮素输入、输出和迁移转化特征存在差异性、复杂性和多变性。已有基于稻田手工插秧的研究成果, 已不能完全满足双季稻生产实际与技术要求, 急需对不同种植方式下稻田氮素农学效应和环境效应进行评价分析, 以确保双季稻生产的持续协调稳定发展。因此, 笔者探讨种植方式变化下双季稻田氮素输移、损失和平衡特征的研究进展, 以为双季稻生产的可持续发展提供

理论依据。

### 1 水稻种植方式研究现状

手工插秧、抛秧、直播和机械化插秧是目前双季稻生产的主要种植方式。直播稻是将干种子或催芽后的种子通过手工或机械的方式直接播种于本田当中的水稻种植技术, 与传统移栽稻相比, 省去了育秧与秧田管理、移栽与移栽前泡田等生产环节, 可大幅减少劳动力和生产成本, 直播稻省工、省力、简化且发展较为迅速<sup>[4]</sup>, 但本田生长期延长, 且水肥管理方式与移栽稻差异较大。手工插秧、抛秧和机械化插秧均需要育秧移栽, 育秧能够缩短本田生育期, 提高复种指数, 但移栽对育秧方法和栽插质量具有特定要求。不同种植方式有其特定的水分管理特性, 直播稻播种时可采用水直播, 也可旱直播, 播种后则需要保持田面无水以确保出苗, 收割前则需要提早断水防止倒伏; 抛秧和机械化插秧在移栽时均要求田面保持浅水层以避免秧苗漂浮, 机械化插秧后干湿交替促早发, 抛秧移栽后需浅水灌溉以利于水稻立苗; 手工插秧则要求浅水插秧, 深水活棵。可见, 不同种植方式具有各自的技术特点和技术效果, 不同的水分管理方式也导致了肥料吸收利用与流失的时空差异。

水稻种植方式的变革引起了众多学者的密切关注, 针对水稻不同种植方式进行了大量研究和评价, 但研究主要集中在水稻生长发育<sup>[5]</sup>、产量及经济效益<sup>[6]</sup>、微生物种群<sup>[7]</sup>以及病虫害发生特点<sup>[8-9]</sup>等方面。上述研究普遍认为, 不同种植方式水稻生育期不同, 水稻所处的温光环境条件各异, 从而使水稻生长发育、产量水平存在一定差异。但对不同种植

**基金项目** 国家自然科学基金项目(31960377); 江西水利科技项目(KT201628, KT201630); 长江科学院开放研究基金资助项目(CKWV2016400/KY)。

**作者简介** 才硕(1982—), 男, 吉林四平人, 副研究员, 博士, 从事作物高产理论与技术及高效节水灌溉技术研究。\*通信作者, 高级工程师, 博士, 从事农业面源防治与农业高效节水研究。

**收稿日期** 2020-03-05

方式下稻田养分,特别是氮素迁移转化规律的研究相对较少,且仅局限于氮素利用效率<sup>[10]</sup>与温室气体排放<sup>[11-14]</sup>。目前,对于不同种植方式下稻田氮素输移、流失问题缺少系统性研究。因此,开展不同水稻种植方式下稻田氮素利用与流失特征差异及评价研究,阐明氮素的平衡特征,对评价双季稻不同种植方式的环境效应具有重要价值。

## 2 不同种植方式下稻田氮素平衡研究

氮是水稻最重要的营养元素之一,稻田氮素循环是农田生态系统中养分循环的一个重要组成部分。氮素在稻田系统循环过程中存在动态的交换和转移,氮素输移变化对系统氮素循环和平衡产生极大的影响<sup>[15-16]</sup>。氮素平衡是指在一定系统内氮素输入和输出之间的转化和平衡,稻田生态系统中氮的输入主要包括氮肥投入、生物固氮、灌溉水带入、大气干湿沉降氮等,氮的输出主要包括作物吸收、淋失与径流损失以及气态损失。稻田系统氮素在转化过程的各个环节,随时通过各种途径逃逸系统,发生损失。一般认为,稻田氮素损失过程主要包括通过地表径流和渗漏水携带土壤中的溶解态氮移出稻田,土壤氮挥发和反硝化作用以及作物生长过程中向大气释放的各种含氮气态化合物。不同形式的氮素损失造成了土壤、大气、湖泊富营养化以及地下水污染等环境污染问题。

稻田氮素平衡受到施肥和耕作等农事活动的影响。不同的种植方式需要不同的水肥管理方式,可以形成不同的环境条件,不同的种植方式水稻生育期也不同,导致水稻的氮素循环和平衡也可能存在差异。在传统手工插秧方式下,李庆远<sup>[17]</sup>研究认为,氮素投入稻田后,水稻回收 20.9%~28.0%,土壤残留占 11.2%~29.5%,各类损失占 27%~67.7%;汪庆兵等<sup>[18]</sup>研究发现,水稻吸收的仅为 25%~50%,土壤残留的 10%~35%,剩余的部分则随氨挥发、淋失或反硝化损失到环境中。在抛秧方式下,王淳等<sup>[19]</sup>研究表明,早晚稻氮素回收率为 34.3%~47.6%,土壤残留率为 9.1%~35.5%,土壤的表观回收率为 35.4%~58.6%,表观损失率为 32.3%~49.2%,氨挥发的损失率为 29.3%~52.3%, $N_2O$  损失率为 0.3%~1.0%。抛秧模式下水稻的氮素利用率比手工插秧模式有较大幅度的提高。可见,通过栽培措施来调节稻田氮素循环过程以及氮素收支平衡状况,对于提高水稻对氮素的回收率、减少氮素损失、减轻环境压力、保障农业可持续发展具有重要意义。然而,目前还缺少对直播和机械插秧方式下双季稻田氮素循环的系统研究,且不同种植方式下稻田氮素循环是否存在差异,不同移栽(手工插秧、机械插秧、抛秧)方式下秧田期间氮素利用与损失情况,这些都值得深入研究。

## 3 不同种植方式下稻田氮素环境效应

### 3.1 不同种植方式下稻田氮素吸收利用

氮素吸收利用不仅决定水稻的生长发育和产量形成,还直接影响稻田周边的生态环境。目前,部分发达国家稻田氮素吸收利用率可达 50%以上,而我国水稻生产中氮肥平均利用率为 30%~35%<sup>[20]</sup>。不同种植方式因水管理、氮肥运筹、栽培方式等不同,水稻氮素吸收利用效率也不同。厉波等<sup>[21]</sup>研究表明,

不同种植方式下水稻植株氮累积量表现为直播>机械插秧>手工插秧,刘利等<sup>[22]</sup>研究认为拔节期氮素累积量直播低于机械插秧和手工插秧,抽穗期则为机械插秧<直播<手工插秧,成熟期表现为直播显著高于机械插秧和手工插秧,而霍中洋等<sup>[10]</sup>和王春雨等<sup>[23]</sup>研究则认为,抽穗期和成熟期水稻植株氮素累积量均以手工插秧最高,机械插秧次之,直播最低。刘利等<sup>[22]</sup>研究发现,水稻稻稻谷生产效率和氮收获指数表现为机械插秧>手栽>直播,而王春雨等<sup>[23]</sup>则认为水稻氮素农艺利用率和氮收获指数以手工插秧最高,而氮稻谷生产效率表现为机械插秧优于直播和手工插秧,霍中洋等<sup>[10]</sup>研究表明,手工插秧、机械插秧和直播 3 种植方式水稻的氮素吸收利用率分别为 44.49%、39.00%和 31.41%。可见,关于水稻不同种植方式氮素吸收与利用的相关研究存在一定差异,特别是多元化种植下双季稻氮素吸收与利用还有待进一步研究,以期实现氮肥合理施用提高氮素利用率,从而为双季稻的高产高效栽培提供理论和实践依据。

## 3.2 不同种植方式下稻田氮素损失

### 3.2.1 不同种植方式下稻田径流与淋溶损失。

农田地表径流流失和淋溶损失是导致农业面源污染的主要原因。农业种植活动导致氮素随地表径流流失以及从土壤剖面上淋失,成为地表水富营养化以及地下水污染的主要原因<sup>[24-25]</sup>。稻田环境有其自身的特殊性,即土壤表面存在动态蓄水体,而土壤表层下存在稳定的犁底层,稻田田面水的多变性和犁底层的低渗透性对水和溶质的运动有一定的影响<sup>[26-27]</sup>。研究表明,农田氮素流失与作物种类、种植方式密切相关<sup>[28]</sup>,原因可能是对水分需求和根系发育的不同造成的<sup>[29-30]</sup>。基于稻田半自然半人工干预(烤田)和干湿交替条件,不同的水稻种植方式也可能造成不同的氮素流失特性<sup>[31]</sup>。陆敏<sup>[32]</sup>研究表明,直播稻氮素径流流失量占施肥量的 0.19%~0.34%,淋溶流失量仅占当季施肥量的 0.12%~0.69%,而黄沈发等<sup>[33]</sup>则认为直播稻田氮素总流失量占稻季化肥用量的 13.23%;张岳芳等<sup>[34]</sup>研究认为,直播稻氮素地表径流量明显高于手工插秧,而机械插秧比直播更有利于控制稻田氮素径流流失,Zhang 等<sup>[35]</sup>研究认为直播较手工插秧和机械插秧增加了氮素的径流损失量。综合前人的研究可知,已有研究多以单季稻为主,且研究结果也存在一定差异,有必要进一步研究,特别是基于不同种植方式下双季稻田氮素径流和淋溶的变化规律有待深入探讨。

### 3.2.2 不同种植方式下稻田氨挥发。

氨挥发是农田氮素气态损失的主要途径之一。我国稻田氨挥发损失占施氮量的 9%~40%<sup>[36]</sup>,南方双季稻田氨挥发损失高达 43.7%<sup>[37]</sup>,稻田挥发氨通过大气干湿沉降进入地表水体,加剧水体富营养化,对生态环境造成一定的影响。氮肥种类、氮肥运筹方式、田间温度、灌溉排水等均是农田氨挥发的影响因素,但目前研究主要集中在施肥因素<sup>[38-39]</sup>和耕作制度<sup>[40]</sup>方面,且针对双季稻田氨挥发损失的研究结果差异较大。吴萍萍等<sup>[41]</sup>研究表明,传统手工插秧方式下双季早、晚稻稻田氨挥发损失率分别为 4.5%~15.3%、16.9%~32.8%。李菊梅等<sup>[42]</sup>在单

施尿素条件下进行的双季稻田氮挥发试验表明,早、晚氮挥发损失率分别为 41.4% 和 39.9%。朱坚等<sup>[37]</sup> 针对典型双季稻田基施碳酸氢铵和尿素的氮挥发损失进行了试验,结果认为早、晚稻氮挥发损失率分别为 39.8% 和 46.9%。可见,稻田氮挥发逐渐成为研究热点,而基于不同种植方式下双季稻田氮挥发研究鲜有报道。

**3.2.3 不同种植方式下稻田 N<sub>2</sub>O 排放。**土壤氮素通过硝化-反硝化作用产生的 N<sub>2</sub>O 是导致全球变暖的三大温室气体之一,其单分子全球增温潜势是 CO<sub>2</sub> 的 296 倍。大气中 90% 的 N<sub>2</sub>O 来自地表生物源,农田土壤是全球最主要的 N<sub>2</sub>O 排放源,我国农业土壤每年由于过分依赖化学氮肥构成了农田 N<sub>2</sub>O 排放量占排放总量的 40%,其中稻田排放的 N<sub>2</sub>O 占农田总排放量的 7%~11%。因此研究稻田 N<sub>2</sub>O 排放对减少农田温室气体排放和减缓全球气候变暖具有重要意义。

作物种类、种植方式、水管理、氮肥运筹等农艺措施是影响稻田 N<sub>2</sub>O 排放的重要因素<sup>[43-45]</sup>,而水氮管理在调控稻田 N<sub>2</sub>O 排放过程中起关键作用。水稻不同种植方式由于水管理和氮肥运筹不同,其对稻田 N<sub>2</sub>O 排放的影响可能存在差异。马永跃<sup>[46]</sup> 和林芳等<sup>[11]</sup> 研究表明,不同水稻种植方式下双季稻田 N<sub>2</sub>O 排放通量为手工插秧<机械插秧<抛秧<直播。上述研究虽然对不同种植方式下双季稻田 N<sub>2</sub>O 的排放通量进行了比较,但直播稻与移栽稻的差异有多大,产生差异的机理是什么,以及不同生育阶段对全生育期的贡献情况等一系列问题有待阐明。因此,探明稻田生态系统的氮平衡及其变化规律和调控机制对提高和改善科学种植方式具有重要的指导意义。

#### 4 结论与展望

当前,我国水稻生产正处于转型时期,面对农村有效劳动力短缺、水稻生产成本不断增加、全球气候变暖、水资源短缺等问题,通过转变水稻种植方式,提高复种指数来提高水稻生产效益,由“向单季要产量”转为“向系统要产量”,更有利于减少对生态环境的影响<sup>[47-48]</sup>。以往的研究不能全面揭示双季稻田氮素循环特性因种植方式改变而发生的变化,无法准确阐明不同种植方式所产生的环境效应。

(1) 双季稻田农学效应与环境效应评价。目前针对双季稻种植方式的研究主要集中在高产栽培技术及其氮素利用效率方面,而对手工插秧、抛秧、直播和机械插秧等不同种植方式下稻田氮素迁移转化规律的研究相对较少,有必要深入研究现状水肥管理条件下不同种植方式对双季稻产量形成的氮素基础及其农学效应和环境效应,这对科学评价不同水稻种植方式的经济效益和环境效益具有重要意义。

(2) 双季稻田氮素输移规律与平衡特征。<sup>15</sup>N 示踪技术已在氮素吸收、分配以及氮肥去向等方面得到广泛应用,可利用<sup>15</sup>N 同位素示踪法及农田系统氮素质量平衡法等研究稻田生态系统中氮素输移过程,分析种植方式对双季稻植株体氮素吸收利用以及种植季稻田土壤氮素残留、地表径流和淋溶、NH<sub>3</sub> 挥发和 N<sub>2</sub>O 排放的影响,明确不同种植方式下双季稻不同生育期稻田系统氮素在土壤-作物-水体-大气中输

移规律,探明肥料<sup>15</sup>N 各主要输出途径间的耦合关系,阐明不同种植方式下双季稻种植季稻田的氮素输移规律与平衡特征,以便掌握稻田氮素利用与损失的重要途径以及防治氮素流失的关键时期。

(3) 稻田氮损失与环境效应的协同机制及其调控。研究双季稻秧苗期和大田期不同的水管理对不同种植方式双季稻田氮素输移特征的影响,明确关键时期和主要氮素损失途径的水-种植方式-氮素特征的协同效应,探明不同种植方式稻田氮素减排的环境调控机制,探索出针对不同种植方式氮素农学效应和环境效应协调促进的水分调控措施,有利于减轻双季稻种植所产生的面源污染和温室效应等环境风险。

#### 参考文献

- [1] 张子璐,刘峰,侯庭钰.我国稻田氮磷流失现状及影响因素研究进展[J].应用生态学报,2019,30(10):3292-3302.
- [2] 彭术,张文钊,侯海军,等.氮肥减量深施对双季稻产量和氧化亚氮排放的影响[J].生态学杂志,2019,38(1):153-160.
- [3] 耿兴业.水稻高产栽培探讨[J].现代农业科技,2019(8):31,33.
- [4] 黄廖君,郝雪,颜辉辉.水稻直播高产栽培技术[J].广西农学报,2019,34(1):16-19.
- [5] ULLAH H,MOHAMMADI A,DATTA A. Growth, yield and water productivity of selected lowland Thai rice varieties under different cultivation methods and alternate wetting and drying irrigation[J]. Annals of applied biology, 2018, 173(3): 302-312.
- [6] 韩娟英. 甬优 538 不同栽培方式的产量和效益比较[J]. 中国稻米, 2018, 24(2): 100-101.
- [7] 张文锋,时红,才硕,等. 不同灌溉和栽培方式对红壤性水稻土微生物群落结构及多样性的影响[J]. 江西农业学报, 2018, 30(3): 11-16.
- [8] 徐志红,李俊凯. 不同栽培方式稻田杂草发生特点及防控措施[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2016, 13(33): 1-3.
- [9] 吕亮,张舒,常向前,等. 栽培模式对水稻主要害虫种群发生动态的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35(4): 93-96.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 杭晓宁. 稻作方式和秸秆还田对稻麦产量和温室气体排放的影响研究[D]. 南京:南京农业大学, 2015.
- [13] 张岳芳,陈留根,张传胜,等. 水稻机械化播栽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.
- [14] 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.
- [15] JU X T, KOU C L, ZHANG F S, et al. Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination: Comparison among three intensive cropping systems on the North China Plain [J]. Environmental pollution, 2006, 143(1): 117-125.
- [16] HE C E, WANG X, LIU X J, et al. Total nitrogen deposition at key growing stages of maize and wheat as affected by pot surface area and crop variety [J]. Plant soil, 2011, 339: 137-145.
- [17] 李庆逵. 中国水稻土[M]. 北京:科学出版社, 1992: 311-329.
- [18] 汪庆兵, 张建锋, 陈光才. 基于<sup>15</sup>N 示踪技术的植物-土壤系统氮循环研究进展[J]. 热带亚热带植物学报, 2013, 21(5): 479-488.
- [19] 王淳, 周卫, 李祖章, 等. 不同施氮量下双季稻连作体系土壤氮挥发损失研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 349-358.
- [20] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259-273.
- [21] 厉波, 曹当阳. 不同种植方式对黔东南水稻土壤养分及产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(5): 64-67.
- [22] 刘利, 雷小龙, 黄光忠, 等. 机械化播栽对杂交稻氮素积累分配及碳氮比的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 831-844.
- [23] 王春雨, 余华清, 何艳, 等. 播栽方式与施氮量对杂交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.
- [24] SHAN L N, HE Y F, CHEN J, et al. Nitrogen surface runoff losses from a Chinese cabbage field under different nitrogen treatments in the Taihu Lake Basin, China [J]. Agric Water Manage, 2015, 159: 255-263.

## 参考文献

- [1] 中国科学院《中国植物志》编辑委员会. 中国植物志: 第 21 卷[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [2] 黄桂龙, 毛立仁, 刘玉凤, 等. 胡桃楸的经济价值及栽培技术[J]. 辽宁林业科技, 2010(3): 52-53, 56.
- [3] 沈广志, 邹桂华, 梁婷, 等. 胡桃楸的化学成分研究进展[J]. 中国实验方剂学杂志, 2015, 21(17): 219-224.
- [4] 赵丽娜, 刘汇, 孙道磊, 等. 胡桃楸不同药用部位的抗氧化活性比较[J]. 长春中医药大学学报, 2018, 34(1): 26-28.
- [5] 汪向升, 张咏莉. 胡桃楸的化学成分分析及其抗肿瘤活性概述[J]. 热带医学杂志, 2013, 13(1): 122-125.
- [6] 于雪, 胡文忠, 金黎明, 等. 胡桃楸不同部位的活性物质及药用价值研究进展[J]. 食品工业科技, 2016, 37(21): 368-371, 376.
- [7] 王添敏, 徐士钊, 俞文婕, 等. 胡桃楸的形态学研究[J]. 中华中医药学刊, 2018, 36(3): 675-677.
- [8] 王秀华. 胡桃楸雌雄异熟性的初步研究[J]. 植物研究, 2001, 21(3): 388-391.
- [9] 刘晶晶, 毛霞, 李晓春, 等. 雌雄异型异熟植物的开花机制研究进展[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2016, 40(1): 147-154.
- [10] 张丽杰, 果冲, 秦柏婷, 等. 胡桃楸开花物候特性及花粉生活力[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(5): 4-8.
- [11] 吴榜华, 张伟森, 张德志, 等. 中国长白山区胡桃楸种质资源的调查研究[J]. 吉林林学院学报, 1991, 7(1): 1-8.
- [12] 宋佳兴, 李吉, 果冲, 等. 辽东山区胡桃楸种质资源果实变异类型的筛选[J]. 分子植物育种, 2017, 15(9): 3798-3802.
- [13] 王东娜. 胡桃楸天然种群遗传多样性和遗传结构的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.
- [14] 王宇. 东北地区胡桃楸遗传多样性 SRAP 研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2007.
- [15] 刘巨钊. 基于物种分布模型的胡桃楸遗传多样性分析以及胡桃楸黄酮类天然产物的虚拟筛选[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2015.
- [16] 褚宪丽, 朱航勇, 张含国, 等. 胡桃楸种源家系变异与选择[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(11): 5-6, 14.
- [17] 张含国, 邓继峰, 张磊, 等. 胡桃楸种源家系变异规律及家系选择研究[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(2): 91-95.
- [18] 曾栋, 张海啸, 张含国, 等. 胡桃楸果实及种子变异规律分析[J]. 林业科技通讯, 2016(3): 3-7.
- [19] 张海啸, 李爱清, 张含国, 等. 胡桃楸种实性状变异规律及优良单株选择[J]. 东北林业大学学报, 2017, 45(3): 1-7.
- [20] 张桂芹, 胡振生, 姚盛智. 东北高寒林区胡桃楸种间杂交试验初报[J]. 林业实用技术, 2013(10): 34-35.
- [21] 刘宏伟, 王国义, 孙美欧. 胡桃楸杂交育种试验初报[J]. 中国林副特产, 2014(4): 25-26.
- [22] 邹建军, 赵云, 杨晶, 等. 胡桃楸播种育苗技术[J]. 林业实用技术, 2014(9): 88-89.
- [23] 陈永鹏, 慕国忠. 胡桃楸直播造林的初步实验[J]. 黑龙江科技信息, 2015(10): 280.
- [24] 陈文山. 谈胡桃楸育苗造林技术[J]. 农村实用科技信息, 2014(10): 41.
- [25] 宋刚, 祁永会. 胡桃楸嫩枝扦插繁殖技术[J]. 农民致富之友, 2019(13): 209.
- [26] 葛文志, 刘志玲, 张海峰, 等. 胡桃楸嫩枝扦插繁殖影响因子研究[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(31): 191-192.
- [27] 葛文志, 祁永会, 刘建明, 等. 胡桃楸嫩枝扦插繁殖技术[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(23): 143-146.
- [28] 于言洁. 胡桃楸嫩枝扦插繁育技术[J]. 吉林林业科技, 2012, 41(4): 44-45.
- [29] 聂维良. 胡桃楸嫁接育苗技术的研究[J]. 林业科技通讯, 2000(8): 40-41.
- [30] 肖玉璞, 刘宏伟, 张淑华. 胡桃楸嫁接试验初报[J]. 中国林副特产, 2015(6): 47-48.
- [31] 林士杰, 张大伟, 杨辉, 等. 长白山区胡桃楸芽接技术研究[J]. 吉林林业科技, 2016, 45(1): 13-15, 27.
- [32] 王彦清, 吴克贤, 张泉. 胡桃楸体细胞胚胎发生的研究[J]. 林业科技, 2000(2): 8-9.
- [33] 姜思佳. 胡桃楸体胚发生及胚性细胞悬浮体系的建立[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.
- [34] 赵舒野. 胡桃楸体胚发生过程中生理生化特性的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.
- [35] 邓正正. 胡桃楸体细胞胚诱导的初步研究[J]. 辽宁林业科技, 2015(3): 22-23, 58.
- [36] 张建瑛, 殷东生, 葛文志, 等. 外植体预处理对胡桃楸成熟胚不定芽的诱导[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(2): 21-24.
- [37] 张建瑛, 祁永会, 吕跃东, 等. 胡桃楸腋芽再生体系研究[J]. 植物研究, 2015, 35(1): 22-26.
- [38] 王杨洋, 于海洋. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [39] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [40] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [41] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [42] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [43] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [44] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [45] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [46] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [47] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [48] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [49] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [50] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [51] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [52] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [53] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [54] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [55] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [56] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [57] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [58] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [59] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [60] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [61] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [62] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [63] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [64] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [65] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [66] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [67] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [68] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [69] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [70] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [71] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [72] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [73] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [74] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [75] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [76] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [77] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [78] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [79] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [80] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [81] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [82] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [83] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [84] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [85] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [86] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [87] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [88] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [89] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [90] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [91] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [92] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [93] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [94] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [95] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [96] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [97] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [98] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [99] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.
- [100] 王杨洋, 于海洋, 等. 胡桃楸组织培养技术研究[J]. 防护林科技, 2017(12): 13-14.

(上接第 3 页)

- [25] ZHANG Q W, LIU D H, CHENG S H, et al. Combined effects of runoff and soil erodibility on available nitrogen losses from sloping farmland affected by agricultural practices[J]. Agric Water Manage, 2016, 176: 1-8.
- [26] PATIL M D, DAS B S, BHADORIA P B S. A simple bund plugging technique for improving water productivity in wetland rice[J]. Soil Tillage Res, 2011, 112(1): 66-75.
- [27] TAN X Z, SHAO D G, GU W Q, et al. Field analysis of water and nitrogen fate in lowland paddy fields under different water managements using HYDRUS-1D[J]. Agricultural water management, 2015, 150: 67-80.
- [28] 左海军, 张奇, 徐力刚. 农田氮素淋溶损失影响因素及防治对策研究[J]. 环境污染与防治, 2008, 30(12): 83-89.
- [29] TAFTEH A, SEPASKHAH A R. Application of HYDRUS-1D model for simulating water and nitrate leaching from continuous and alternate furrow irrigated rapeseed and maize fields[J]. Agric Water Manage, 2012, 113: 19-29.
- [30] DASH C J, SARANGI A, SINGH D K, et al. Prediction of root zone water and nitrogen balance in an irrigated rice field using a simulation model[J]. Paddy Water Environ, 2015, 13: 281-290.
- [31] BRAR H S, BHULLAR M S. Nutrient uptake by direct seeded rice and associated weeds as influenced by sowing date, variety and weed control[J]. Indian J Agric Res, 2013, 47(4): 353-358.
- [32] 陆敏. 水旱轮作农田系统氮素循环与水环境效应[D]. 上海: 华东师范大学, 2007.
- [33] 黄沈发, 沈根祥, 唐浩, 等. 上海郊区稻田氮素流失研究[J]. 环境污染与防治, 2005(9): 651-654.
- [34] 张岳芳, 郭智, 刘红江, 等. 水稻直播增加稻季氮素径流损失[C]//张岳芳. 中国农业学会耕作制度分会 2018 年度学术年会论文集摘要集. 哈尔滨: 中国农业学会耕作制度分会, 2018.
- [35] 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.
- [36] FAN X H, SONG Y S, LIN D X, et al. Ammonia volatilization losses and <sup>15</sup>N balance from urea applied to rice on a paddy soil[J]. J Environ Sci, 2006, 18(2): 299-303.
- [37] 朱坚, 石丽红, 田发祥, 等. 湖南典型双季稻田氨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.
- [38] 朱坚, 石丽红, 田发祥, 等. 典型双季稻田基施碳酸氢铵和尿素的氨挥发损失研究[J]. 中国土壤与肥料, 2015(2): 83-88.
- [39] 田昌, 周旋, 谢桂先, 等. 控释尿素减施对双季稻田氨挥发损失和氮肥利用率的影响[J]. 中国水稻科学, 2018, 32(4): 387-397.
- [40] 时亚文. 双季稻不同栽培模式氨挥发与温室气体排放研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2012.
- [41] 吴萍萍, 刘金剑, 杨秀霞, 等. 不同施肥制度对红壤地区双季稻田氨挥发影响[J]. 中国水稻科学, 2009, 23(1): 85-93.
- [42] 李菊梅, 李冬初, 徐明岗, 等. 红壤双季稻田不同施肥下的氨挥发损失及其影响因素[J]. 生态环境, 2008, 17(4): 1610-1613.
- [43] SMITH P, MARTINO D, CAI Z C, et al. Greenhouse gas mitigation in agriculture[J]. Philosophical transactions of the royal society B, 2008, 363(1492): 789-813.
- [44] SUN L Y, MA Y C, LI B, et al. Nitrogen fertilizer in combination with an ameliorant mitigated yield-scaled greenhouse gas emissions from a coastal saline rice field in southeastern China[J]. Environmental science and pollution research, 2018, 25(16): 15896-15908.
- [45] ZHOU W, LIN J H, TANG Q, et al. Indirect N<sub>2</sub>O emissions from groundwater under high nitrogen-load farmland in eastern China[J]. Environmental pollution, 2019, 248: 238-246.
- [46] 马永跃. 品系、施肥和栽培方式对福州平原稻田甲烷和氧化亚氮通量的影响[D]. 福州: 福建师范大学, 2013.
- [47] 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.
- [48] 彭少兵. 转型时期杂交水稻的困境与出路[J]. 作物学报, 2016, 42(3): 313-319.