

耕作方式对还田稻草氮素释放及水稻氮素利用的影响

梁天锋¹, 徐世宏², 刘开强¹, 王殿君¹, 梁和¹, 董登峰¹, 韦善清¹, 莫润秀¹, 曾可¹, 江立庚¹

(¹广西大学农学院作物栽培学与耕作学重点实验室, 南宁 530005; ²广西农业技术推广总站, 南宁 530022)

摘要:【目的】探讨在免耕和常耕条件下, 还田稻草氮素释放特性和水稻氮素利用的差异。【方法】2006年和2007年晚稻, 在田间将稻草还田, 并在不同时期测定稻草中残留的氮素, 同时进行桶栽试验, 将¹⁵N标记稻草还田, 成熟期测定水稻积累的总氮素和¹⁵N丰度。【结果】稻草中残留的氮素随还田时间延长而下降, 但不同时间段下降的速度差异很大。还田后0~40 d, 稻草中残留的氮素下降约60%, 还田后40~100 d, 稻草中残留的氮素下降约10%。两种耕作方式下还田稻草含氮率均呈升高趋势。无论是干稻草还是湿稻草还田, 免耕条件下稻草氮素平均释放速率高于常耕。免耕方式下湿稻草的氮素释放速率较高, 常耕方式下干稻草氮素释放速率较高。【结论】无论还田稻草状态相同与否, 常耕水稻的氮素干物质生产效率和产量较免耕水稻高。免耕有利于还田稻草的氮素释放, 但水稻从还田稻草中吸收的氮素和氮素利用效率下降。

关键词: 水稻; 耕作方式; 免耕; 氮素利用

Influence of Tillage Patterns on Incorporated Straw Nitrogen Release and Nitrogen Utilization of Rice

LIANG Tian-feng¹, XU Shi-hong², LIU Kai-qiang¹, WANG Dian-jun¹, LIANG He¹, DONG Deng-feng¹, WEI Shan-qing¹, MO Run-xiu¹, ZENG Ke¹, JIANG Li-geng¹

(¹Key Laboratory of Crop Cultivation and Farming System, Agronomy College of Guangxi University, Nanning 530005; ²Guangxi Agricultural Technology Extension General Station, Nanning 530022)

Abstract: 【Objective】 The objective of this study was to investigate the difference of nitrogen release from incorporated rice straw and nitrogen utilization of rice under different tillage patterns. 【Method】 Rice straw was incorporated into field under no-tillage and conventional tillage in the late seasons of 2006 and 2007 and nitrogen contents in incorporated straw were measured at different growth stages after incorporation. At the same time, rice straw with ¹⁵N feed was incorporated into pot under no-tillage and conventional tillage, nitrogen and ¹⁵N uptake by rice plant were measured at maturity. 【Result】 Residual nitrogen amount in incorporated straw decreased and obvious differences were observed at different stages. The nitrogen loss in incorporated straw was about 60% during the 0-40 days and about 10% during the 40-100 days. However, the residual nitrogen content increased in two tillage patterns. Nitrogen in straw was more easily released under no-tillage than conventional tillage if the straw status was not considered. Nitrogen in wet incorporated straw was more easily released under no-tillage while dry straw under conventional tillage. 【Conclusion】 Great nitrogen dry matter production efficiency (NDMPE) and grain yield were observed under conventional tillage. No tillage was beneficial to straw nitrogen release, but nitrogen uptake from incorporated straw by rice plant and nitrogen use efficiency were decreased.

Key words: rice; tillage patterns; no-tillage; nitrogen utilization

0 引言

【研究意义】稻草还田是农田氮、磷、钾素和有

机质的重要来源之一, 稻草还田不仅能有效改善水稻生长环境, 促进水稻生长, 降低农业生产成本, 提高产量, 而且能有效降低稻草焚烧所造成的资源浪费和

收稿日期: 2008-11-21; 接受日期: 2009-03-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(30560066)、教育部重点项目(207086)、广西科学基金项目(桂科自0640020)、广西研究生科研创新计划项目(2006105930901M40)

作者简介: 梁天锋(1974—), 男, 河南永城人, 博士研究生, 研究方向为水稻生理生态。E-mail: tfliang06@126.com。通信作者江立庚(1965—), 男, 湖南沅江人, 教授, 博士, 研究方向为作物生理生态。Tel: 0771-3235235; E-mail: jiang@gxu.edu.cn

空气污染^[1-3]。研究耕作方式对还田稻草氮素释放和水稻氮素利用的影响，将有助于阐明不同耕作制度下稻草养分的利用特点。【前人研究进展】还田稻草对作物生长和发育的影响主要有两种途径，一是通过自身分解所释放的营养成分、化学物质等直接影响作物生长，二是通过影响作物生长的环境因子间接影响作物的生长。前人对还田稻草本身氮素释放及其被水稻吸收利用的研究较少，研究热点大都集中在稻草还田对土壤理化性状、养分转化、甲烷排放、土壤微生物活动等环境因子影响效应上^[4-14]。还田稻草的氮素释放与土壤微生物的活动密切相关，有研究证明稻草还田条件下土壤微生物活度呈现前期迅速增强、达到最大值，中期迅速下降，后期缓慢回升的变化趋势^[15]。Scowcroft 等^[16]研究表明，土壤微生物是无机氮的强烈竞争者，无论是 NH_4^+ 还是 NO_3^- ，在中短期都迅速被微生物固持而使植物无法利用。余冬立等^[1]研究认为，稻草还田配施减量氮肥可降低肥料成本，提高经济效益。稻草还田可分为稻草覆盖还田（面施）和稻草翻埋还田（深施）两种还田方式。在常规耕作条件下，稻草往往深施还田，在免耕条件下，稻草只能面施还田。稻草中氮素主要以有机物的形式存在，因此，稻草中的大部分氮素必须在稻草分解之后才能被水稻吸收利用。稻草面施还田时，稻草在氧气较充足条件下分解，稻草深施还田时，稻草在氧气相对较少条件下分解。由此推断，在不同还田方式下，稻草的氮素释放特性是不相同的。另一方面，面施稻草释放的养分主要处于土壤表层，与深施稻草释放的养分处于土壤深层不同。因此，面施稻草养分利用与深施稻草养分的利用理论上也存在差异，但目前还没有这方面的研究报道。【本研究切入点】本试验主要从还田稻草的分解与氮素养分的释放过程入手，来探讨不同耕作制度下稻草中氮素养分的释放与利用特性。【拟解决的关键问题】在免耕和常耕两种不同耕作制度下，研究还田稻草中氮素的释放特性及其被水稻植株吸收利用等方面存在的差异，以期对不同耕作制度下稻草资源的合理利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验时间、地点与材料

试验分为田间试验和桶栽试验两部分。田间试验分别于 2006 年晚季和 2007 年晚季在广西大学农学院教学实验基地进行，主要研究不同耕作方式下还田稻草的氮素释放特性，所用稻草为当年早稻成熟期脱粒

后的植株。2006 年试验田土壤的基本理化性质为：pH 6.15、有机质 $20.61 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、碱解氮 $115.30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全氮 $1.42 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效磷 $38.35 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $119.90 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。2007 年分别为 pH 6.65、有机质 $20.67 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、碱解氮 $117.29 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全氮 $1.57 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效磷 $35.91 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $124.76 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

桶栽试验与大田试验同时进行，主要通过 ^{15}N 示踪技术研究不同耕作方式下水稻对还田稻草氮素的利用特性。为获得 ^{15}N 标记稻草，2006 年和 2007 年早季在桶栽条件下分别用 ^{15}N 丰度为 20% 的硫酸铵喂饲水稻。标记硫酸铵分为基肥、分蘖肥、穗肥 3 次施入。当水稻成熟脱粒后，其稻草用于当年晚季试验。稻草的 ^{15}N 丰度分别为 7.69%（2006 年）和 8.46%（2007 年）。2006 年试验土壤基本理化性状为：pH 6.15、有机质 $20.66 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、碱解氮 $116.50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全氮 $1.51 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效磷 $36.41 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $122.73 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。2007 年晚稻桶栽试验土壤基本理化性状与 2007 年晚稻大田试验相同。

田间试验和桶栽试验的水稻品种均为三系籼型杂交水稻金优 253，种子由广西大学支农种业有限公司提供。

1.2 试验设计

1.2.1 田间试验 根据耕作方式和稻草状态，设免耕湿稻草还田抛秧（NT-W）、免耕干稻草还田抛秧（NT-D）、常耕湿稻草还田抛秧（CT-W）和常耕干稻草还田抛秧（CT-D）4 个处理，3 次重复。当早稻成熟脱粒后，将稻草切断成 2~5 cm，充分混合后装入 $7 \text{ cm}\times 7 \text{ cm}$ 孔径为 20 目的尼龙网袋，每袋 5 g。如果是干稻草还田，则将装袋后的稻草晾晒 3 d，并经常翻动。稻草还田时间在水稻抛栽前 10 d 左右进行，还田量为 $6000 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 干稻草。采用塑盘湿润方式育秧，每穴播种 2 粒种子，当秧苗生长至 3~4 叶时选择均匀一致的健壮秧苗抛栽，抛栽密度为每公顷 30 万蔸。4 个处理按纯氮 $195 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、过磷酸钙 $450 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、氯化钾 $225 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 施用肥料。磷肥全部作基肥一次施用，氮肥按基肥 40%、分蘖肥 30%、穗肥 30% 比例施用，钾肥按基肥 60%、分蘖肥 40% 比例施用。其它管理措施按《广西免耕抛秧水稻栽培技术规程》进行。

小区长 3.90 m，宽 2.5 m，四周作高 30 cm、宽 20 cm 田基，田基盖塑料并入土 30 cm 以防肥水渗透，重复间留 50 cm 走道以便于田间操作和调查。水稻种植行距 0.25 m，在埋放还田稻草时，每排 15 袋，共 6 行。

1.2.2 桶栽试验 为更好的模拟田间试验条件,本试验设计了一套模拟田间渗漏的装置^[17-18](图1)。

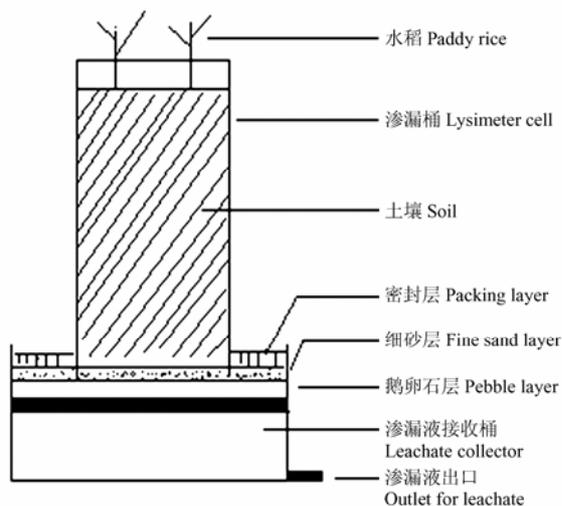


图1 田间渗漏模拟装置

Fig. 1 Simulator used for collection of the leakage

装入免耕土壤的方法:将渗漏桶垂直放置在田间自然土壤上面,用锋利小刀沿渗漏桶的外边缘小心切削渗漏桶周围的土壤,随着切削过程的推进,削成的圆柱形土柱比渗漏桶稍大时,小心将渗漏桶向下压入土中。桶的直径为30 cm,高度为50 cm,当土壤高度距桶端10 cm处时,即采土深度40 cm,把装好原状土壤的渗漏桶取出。然后在渗液接收桶上部装入鹅卵石和细砂,将装好田间原状土壤的渗漏桶置上。

按照大田试验方法设免耕湿稻草还田抛秧(N_T-W)、免耕干稻草还田抛秧(N_T-D)、常耕湿稻草还田抛秧(C_T-W)和常耕干稻草还田抛秧(C_T-D)4个处理,每处理3桶。按大田试验方法处理经过¹⁵N喂饲的稻草,每桶稻草还田量、抛栽秧苗数与施肥量根据大田试验,按照桶的横截面大小进行换算。其余各项管理与大田试验同步进行。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 田间试验 在稻草还田当天(0)、抛秧当天(稻草还田后10 d)、分蘖期(稻草还田后25 d)、拔节期(稻草还田后40 d)、抽穗期(稻草还田后55 d)、灌浆盛期(稻草还田后70 d)、成熟期(稻草还田后100 d)分别取样,每个小区每次取14袋左右。取回的稻草用自来水冲洗干净、75℃烘干、称重、粉碎,凯氏法消煮后,用纳氏试剂比色法测N。

1.3.2 桶栽试验 水稻成熟后,收集水稻全部植株,分根、茎、叶105℃杀青30 min后,75℃烘干、称重、粉碎,籽粒自然晒干,土壤按剖面取样,自然风干。植株和土壤样品全氮和¹⁵N丰度由河北省农林科学院遗传生理研究所测定。

按以下方法计算氮素吸收与利用各指标:

稻草氮素回收效率(nitrogen recovery efficiency, NRE):水稻植株(各器官或全株)积累的还田稻草氮量占还田稻草总氮量的百分比。

稻草氮素残留率(straw residual nitrogen ratio, SRNR):还田后稻草中氮素残留量占稻草中原始氮素数量(即还田当天稻草中氮的数量)的百分比。

稻草含氮率(straw nitrogen content, SNC):稻草含氮量占稻草质量的百分比。

植株氮素积累总量(total nitrogen accumulation, TNA):成熟期植株(根、茎、叶和穗)氮素积累量的总和。

氮素干物质生产效率:(nitrogen dry matter production efficiency, NDMPE):植株干物质总量(含根)与植株氮素积累总量的比值。

氮素稻谷生产效率:(nitrogen grain production efficiency, NGPE):水稻籽粒产量与植株氮素积累总量的比值。

氮素收获指数(nitrogen harvest index, NHI):成熟期植株穗部氮素积累量占植株氮素积累总量百分比。

1.4 数据处理

数据采用DPS数据处理系统和Excel进行统计分析。文中表1、表2和表3为田间试验数据,表4和表5为桶栽试验数据。

2 结果与分析

2.1 不同耕作方式下还田稻草干物质变化特点

表1表明,稻草干物质重随还田时间的延长而下降,但不同时间段下降的速度差异很大。还田后0~40 d,稻草干物质重急剧下降,4个处理均降低70%左右;40~100 d,稻草干物质质量下降趋于平缓,4个处理均降低10%左右。无论是干稻草还田,还是湿稻草还田,总体上免耕方式下还田稻草干物质重下降速度较快,即耕作方式对稻草干物质分解有较大影响,以第100天稻草干重为例,免耕处理稻草干物质残留量均小于常耕处理,方差分析表明,同种稻草状态下,耕作方式间(除2007年N_T-D和C_T-D处理之间)差

异显著。同种耕作方式下，稻草状态对稻草干物质分解有一定的影响，但影响作用较小，无明显的规律性。同样以第 100 天稻草干重为例，2006 年稻草干物质残留量为 NT-D>NT-W，CT-D>CT-W，而 2007 年却又恰恰相反，方差分析也表明，同种耕作方式下，干、湿稻草处理间差异不显著。

2.2 不同耕作方式下还田稻草氮素残留率的变化

以还田当天稻草中氮素残留率为 100% 为基础，计算不同时期稻草中氮素的残留率（表 2）。结果表

明，不同处理氮素残留率变化趋势与干物质变化趋势基本相同，即还田稻草氮素残留量都呈现先急剧后平缓的下降趋势。还田后 0~40 d，4 个处理稻草氮素残留率下降了 60% 左右，还田后 40~100 d，氮素残留率在一定范围内波动，4 个处理平均下降了 10% 左右。从第 100 天的氮素残留率来看，免耕方式下干稻草氮素残留率略高，常耕方式下湿稻草氮素残留率略高，但处理间差异不显著。耕作方式间比较，除 2006 年干稻草还田外，一般表现为免耕方式下稻草氮素的残留

表 1 不同耕作方式下还田稻草干物质变化

Table 1 Changes of dry matter in residual incorporated straw under different tillage patterns (g)

年份 Year	处理 Treatment	稻草还田天数 Days after straw returning(d)						
		0	10	25	40	55	70	100
2006	NT-W	100	63.49a	38.58b	28.14b	27.00b	23.61a	20.94b
	NT-D	100	67.44a	41.13ab	28.82b	27.99b	24.29a	21.70b
	CT-W	100	64.54a	41.52ab	34.51a	31.29a	28.93a	24.89a
	CT-D	100	67.00a	46.41a	34.24a	28.92ab	28.88a	25.27a
2007	NT-W	100	58.79a	35.66b	25.36ab	19.46c	18.11bc	15.92b
	NT-D	100	54.07b	32.01b	20.79b	18.24c	14.46c	14.00b
	CT-W	100	58.81a	42.06a	30.58a	29.11a	22.94a	22.63a
	CT-D	100	58.97a	35.99b	29.42a	24.13b	19.52ab	18.77ab

同列平均值后的字母不同表示达 5% 显著差异。下同

Values followed by different letters within a row represent significant difference at 0.05 level. The same as below

表 2 不同耕作方式下稻草氮素残留率变化

Table 2 Changes of straw residual nitrogen ratio under different tillage patterns (%)

年份 Year	处理 Treatment	稻草还田天数 Days after straw returning(d)						
		0	10	25	40	55	70	100
2006	NT-W	100	55.60a	39.46a	37.80b	38.84a	40.16a	33.84a
	NT-D	100	58.88a	37.37a	30.82c	43.50a	36.75a	34.95a
	CT-W	100	55.64a	46.70a	43.57a	43.13a	43.11a	37.31a
	CT-D	100	60.15a	45.72a	40.55ab	36.48a	33.44a	30.67a
2007	NT-W	100	70.44b	48.48a	30.66a	25.33a	22.31a	18.99a
	NT-D	100	93.48a	68.52a	29.72a	25.29a	22.92a	20.49a
	CT-W	100	65.32b	63.94a	27.07a	27.62a	24.82a	26.92a
	CT-D	100	76.75ab	55.78a	29.59a	24.74a	17.17a	25.31a

率较低。

2.3 不同耕作方式下还田稻草含氮率和氮素释放速率变化

根据表 1 和表 2 可知稻草含氮率随时间的动态变化，结果表明，不同耕作方式和稻草状态下，稻草含

氮率随还田时间的推迟和稻草的分解呈升高的趋势。稻草还田 100 d 即水稻成熟时，NT-W、NT-D、CT-W、CT-D 这 4 个处理稻草含氮率分别比还田当天增加 0.67%、0.67%、0.46%、0.20%（2006）和 0.15%、0.38%、0.15%、0.28%（2007）。表 3 列出了还田后 0、40 和

100 d 稻草的含氮率。耕作方式间比较, 除 2006 年干稻草还田外, 免耕稻田稻草的含氮率较高。在相同耕作方式下, 干稻草的含氮率较高, 但处理间差异并不显著。

表 3 还表明, 还田后 0~40 d, 稻草氮素释放速率在每天 13.08%~16.03% 小幅度变动, 还田后 40~100 d, 稻草氮素释放速率在每天 0~1.87% 大幅度变化。这表明, 还田后 0~40 d, 稻草氮素释放速率高而稳定, 还田后 40~100 d, 稻草氮素释放慢而不稳定。从 0~100 d 稻草氮素平均释放速率来看, 免耕方式下稻草氮素释放速率高于常耕 (除 2006 年 CT-D 外)。免耕方式下湿稻草氮素释放速率较高, 而常耕方式下干稻草氮素释放速率较高。方差分析表明, 在 0~100 d 氮素释放速率处理间差异不显著。

2.4 不同耕作方式下水稻植株氮素积累总量及其来源

由表 4 可以看出, 免耕水稻的氮素积累总量小于常耕水稻。相同耕作方式下, 还田稻草状态对水稻氮

素的积累影响无明显的规律性, 处理间差异亦不显著。将水稻植株吸收的氮素分解为土壤+肥料、稻草两部分, 则水稻植株从土壤和肥料中吸收的氮素占积累总量的 95.63%~97.84%, 来自稻草的氮素仅占 2.16%~4.36%。耕作方式间比较, 免耕水稻对稻草氮素的积累量小于常耕水稻, 稻草氮素的回收率较低, 处理间差异不显著。在相同耕作状态下, 水稻对湿稻草氮素的积累量和回收率高于干稻草, 处理间差异亦不显著。

2.5 不同耕作方式下水稻的氮素利用效率

表 5 表明, 常耕水稻氮素干物质生产效率和稻谷产量较高。相同耕作方式下, 湿稻草还田有利于免耕水稻氮素干物质生产效率的提高, 干稻草还田有利于常耕水稻氮素干物质生产效率的提高。除 2007 年 NT-W 和 NT-D 外, 干稻草有利于免耕水稻产量的提高, 湿稻草有利于常耕水稻产量的提高, 但处理间差异不显著。氮素稻谷生产效率年际间无明显的规律性。总体上, 免耕有利于氮素收获指数的提高, 干稻草还

表 3 不同耕作方式下稻草含氮率和氮素释放速率变化

Table 3 Changes of nitrogen content and release rate of incorporated straw under different tillage patterns

年份 Year	处理 Treatment	稻草含氮率 Straw nitrogen content rate (%)			氮素释放速率 Nitrogen release rate (%/d)		
		0	40 d	100 d	0-40 d	40-100 d	0-100 d
2006	NT-W	0.93	1.25a	1.50a	14.41b	0.61a	6.13a
	NT-D	0.93	1.00c	1.50a	16.03a	0.00a	6.03a
	CT-W	0.93	1.17ab	1.39a	13.08c	0.97a	5.81a
	CT-D	0.93	1.10bc	1.13a	13.78ba	1.53a	6.43a
2007	NT-W	0.82	0.99ab	0.97a	14.22a	1.87a	6.59a
	NT-D	0.82	1.17a	1.20a	14.31a	1.51a	6.46a
	CT-W	0.82	0.72b	0.97a	14.89a	0.00a	5.96a
	CT-D	0.82	0.82b	1.10a	14.46a	0.53a	6.04a

表 4 不同耕作方式下水稻的氮素积累量及其来源

Table 4 Nitrogen accumulation and source of rice under different tillage patterns

年份 Year	处理 Treatment	植株氮素积累总量		土壤+肥料		稻草		稻草氮素回收率 NRE
		Total TNA		TNA from soil+fertilizer		TNA from straw		
		(g/pot)	%	(g/pot)	%	(g/pot)	%	
2006	NT-W	1.90a	100	1.82a	95.65a	0.08287a	4.35a	26.44a
	NT-D	1.86a	100	1.78a	95.83a	0.07766a	4.17a	24.36a
	CT-W	2.07a	100	1.98a	95.64a	0.09047a	4.36a	27.20a
	CT-D	2.01a	100	1.93a	95.88a	0.08271a	4.12a	26.01a
2007	NT-W	1.36b	100	1.32a	97.29a	0.03714a	2.71a	16.02a
	NT-D	1.45ab	100	1.42a	97.46a	0.03675a	2.54a	15.85a
	CT-W	1.54a	100	1.51a	97.84a	0.03296a	2.16a	14.22a
	CT-D	1.55a	100	1.51a	97.29a	0.04219a	2.71a	18.19a

表 5 不同耕作方式下水稻的氮素利用效率

Table 5 Nitrogen utilization efficiency of rice under different tillage patterns

年份 Year	处理 Treatment	氮素干物质生产效率 NDMPE (g·g ⁻¹)	氮素稻谷生产效率 NGPE (g·g ⁻¹)	氮素收获指数 NHI (%)	产量 Yield (g/pot)
2006	NT-W	68.60a	68.51a	64.94a	130.32a
	NT-D	67.77a	73.45a	68.16a	135.83a
	CT-W	70.53a	66.47a	64.10a	137.40a
	CT-D	71.15a	68.21a	65.10a	136.48a
2007	NT-W	72.60a	83.98a	68.15a	114.00b
	NT-D	65.53b	78.04b	70.26a	113.35b
	CT-W	73.33a	84.81a	69.27a	130.59a
	CT-D	74.01a	82.31a	69.95a	127.89a

田比湿稻草还田更有利于提高氮素收获指数。

3 讨论

还田稻草的分解与养分释放受气候、生态环境、土壤微生物等多种因素的影响，还田稻草氮素残留率以稻草还田后 40 d 为界点，40 d 之前，呈急剧下降趋势，而 40 d 之后，下降趋势趋缓，甚至个别时期氮素残留率出现不正常的上升现象，这可能与微生物的活动有关。在稻草还田之初，稻草为微生物提供了丰富的碳源，Mary 等^[19]研究表明，在每公顷施 8 000 kg 秸秆后，微生物在施氮情况下固定的矿质氮比不施氮情况下增加一倍左右，此时施入稻田的基肥，又满足了微生物对氮素的需求，所以微生物活动异常活跃，有利于还田稻草氮素等养分的释放。在稻草还田的第 40 天左右，恰是稻田进行晒田的时间段，晒田改变了微生物原来的生活环境，可能会造成微生物的死亡，微生物固持的肥料氮素和土壤氮素可能会因为微生物的死亡而残留在稻草中，从而造成还田稻草氮素残留率的不规则上升。针对这种情况，若要完全探明稻草氮素残留率的变化规律，最好采用同位素标记稻草示踪法在田间生态条件下进行动态研究，以区分外界来源氮素。

不同耕作方式和还田稻草状态下还田稻草含氮率都呈升高的趋势，这种现象可能有两个方面的原因，一方面是与稻草成分分解速度不同步有关，除氮素外，水稻植株还含有磷、钾、硅及纤维素、半纤维素、木质素等，纵然氮素的绝对含量是下降趋势，但由于其它成分可能有更快的下降趋势，会造成其含氮率有上升的趋势。另一方面是“再积聚”过程，这种过程可能有两种情况，一是随稻草分解时间的推移，导致还田稻草呈“疏松多孔”结构的增加，易于吸附土壤中

或稻草已释放的氮素。二是前文所述的微生物固持的肥料氮素和土壤氮素可能残留在稻草中。

研究发现，免耕有利于湿稻草氮素释放速率的提高，常耕有利于干稻草氮素释放速率的提高。其原因亦可能与土壤中微生物的活动有关。免耕条件下，土壤微生物的主要活跃区间在土壤的表面。谭周进等^[15]的研究，土壤微生物的数量及活度，在晚稻生长前期大量增加和提高，而干稻草需在稻草湿润以后，才能被微生物分解。本研究表明，在水稻生长的前期，恰是还田稻草分解最快的时期，免耕条件下还田干稻草可能错过了这一分解的有利时机。常耕条件下，土壤微生物的活跃区间在 0~20 cm 的耕作层，分布较为均匀，不同状态稻草分解速度的差异可能与厌氧微生物的数量与活度有关，需要进一步深入研究。

4 结论

- 4.1 稻草中氮素残留量随还田时间延长而下降，但不同时间段下降的速度差异很大。还田后 0~40 d，稻草氮素残留率急剧下降，随后的 40~100 d，下降趋于平缓。然而，稻草含氮率却随还田时间延长呈升高的趋势；
- 4.2 免耕方式下稻草氮素平均释放速率高于常耕。免耕有利于湿稻草氮素释放速率的提高，常耕有利于干稻草氮素释放速率的提高；
- 4.3 免耕水稻从还田稻草中吸收的氮素比常耕的少，且其氮素干物质生产效率和产量较低。

References

- [1] 余冬立, 王凯荣, 谢小立, 陈敏, 林蕴华. 稻草还田的土壤肥力与产量效应研究. 中国生态农业学报, 2008, 16 (1): 100-104.
- She D L, Wang K R, Xie X L, Chen M, Lin Y H. Impact of incorporation of rice straw into the soil on soil fertility and yield.

- Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16 (1): 100-104. (in Chinese)
- [2] Polthance A, Tre-loges V, Promsena K. Effect of rice straw management and organic fertilizer application on growth and yield of dry direct-seeded rice. *Paddy Water Environment*, 2008, (6): 237-241.
- [3] 李竹松, 彭晚桂, 汤海涛, 张一杨. 稻草覆盖免耕栽培晚稻的生态效应研究. *湖南农业科学*, 2002, (5): 30-32.
- Li Z S, Peng W G, Tang H T, Zhang Y Y. The study on ecological effect of late - rice paddy field under No - tillage and rice straw manure, *Hunan Agricultural Sciences*, 2002, (5): 30-32. (in Chinese)
- [4] 叶文培, 谢小立, 王凯荣, 李志国. 不同时期秸秆还田对水稻生长发育及产量的影响. *中国水稻科学*, 2008, 22 (1): 65-70.
- Ye W P, Xie X L, Wang K R, Li Z G. Effects of rice straw manuring in different periods on growth and yield of rice. *Chinese Journal of Rice Science*, 2008, 22 (1): 65-70. (in Chinese)
- [5] 肖小平, 汤海涛, 纪雄辉. 稻草还田模式对稻田土壤速效氮、钾含量及晚稻生长的影响. *作物学报*, 2008, 34(8): 1464-1469.
- Xiao X P, Tang H T, Ji X H. Effect of patterns of straw returning to field on contents of available N, K in soil and the later rice growth. *Acta Agronomic Sinica*, 2008, 34(8): 1464-1469. (in Chinese)
- [6] 彭娜, 王开峰, 王凯荣, 谢小立. 不同水分管理下施用稻草对土壤有机酸和养分有效性的影响. *土壤通报*, 2007, 38(5): 857-862.
- Peng N, Wang K F, Wang K R, Xie X L. Effects of rice straw incorporation on accumulation of organic acids and nutrients availability under different water regimes. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(5): 857-862. (in Chinese)
- [7] 陈苇, 卢婉芳, 段彬伍, Wassmann R, Lantin R S. 稻草还田对晚稻田甲烷排放的影响. *土壤学报*, 2002, 39(2): 170-176.
- Chen W, Lu W F, Duan B W, Wassmann R, Lantin R S. Effect of rice straw manure on methane emission in late-rice paddy fields. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(2): 170-176. (in Chinese)
- [8] Murasea J, Matsui Y, Kato M, Sugimoto A, Kimura M. Incorporation of ^{13}C -labeled rice-straw-derived carbon into microbial communities in submerged rice field soil and percolating water. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, (38): 3483-3491.
- [9] Olivier C D, William R H. Decomposition of rice straw and microbial carbon use efficiency under different soil temperatures and moistures. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(11-12): 1773-1785.
- [10] Nakamura A, Tun C C, Asakawa S. Microbial community responsible for the decomposition of rice straw in a paddy field: estimation by phospholipids fatty acid analysis. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, 38: 288-295.
- [11] 邱孝焯, 蔡元呈, 林勇, 张辉. 稻草还田对红壤性水稻土肥力的影响. *中国农学通报*, 2006, 22(1): 188-191.
- Qiu X X, Cai Y C, Lin Y, Zhang H. Effect of returning field of straws on the red soil fertility of ripe. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(1): 188-191. (in Chinese)
- [12] 廖先琴, 周卫军, 何电源. ^{15}N 标记羊粪和稻草还田氮素的转化和效应研究. *土壤学报*, 1995, 32(3): 292-299.
- Liao X L, Zhou W J, He D Y. Comparison of N transformation and its effect on rice yield between direct application of ^{15}N -labelled rice straw and application of goat feces after feeding goat with rice straw. *Acta Pedologica Sinica*, 1995, 32(3): 292-298 (in Chinese)
- [13] Li X Y, Wang Q F, Xu F L. Effect of returning application of straw on soil K, P, Zn adsorption-desorption and their availability. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2000, 19(3): 227-232.
- [14] 徐勇, 沈其荣, 钟增涛, 陈湘淮. 化学处理和微生物混合培养对水稻秸秆腐解和组分变化的影响. *中国农业科学*, 2003, 36(1): 59-65.
- Xu Y, Shen Q R, Zhong Z T, Chen X H. Effect of chemical treatment and microbial incubation on the decomposition and component changes of rice (*Oryza sativa* L.) straw. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(1): 59-65. (in Chinese)
- [15] 谭周进, 李倩, 陈冬林, 周清明, 肖启明, 李建国. 稻草还田对晚稻土微生物及酶活性的影响. *生态学报*, 2006, 26(10): 3385-3392.
- Tan Z J, Li Q, Chen D L, Zhou Q M, Xiao Q M, Li J G. On the effect of rice-straw returned to the field on microbes and enzyme activity in paddy soil. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(10): 3385-3392. (in Chinese)
- [16] Scowcroft P G, Haraguchi J E, Hue N V. Reforestation and topography affect mountain soil properties, nitrogen pools, and nitrogen transformations in Hawaii. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68 (3): 959-968.
- [17] 郑圣先, 刘德林, 聂军, 戴平安, 肖剑. 控释氮肥在淹水稻田土壤上的去向及利用率, 植物营养与肥料学报, 2004, 10 (2): 137-142.
- Zheng S X, Liu D L, Nie J, Dai P A, Xiao J. Fate and recovery efficiency of controlled release nitrogen fertilizer in flooding paddy soil. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10 (2): 137-142. (in Chinese)
- [18] 刘德林, 聂军, 肖剑. ^{15}N 标记水稻控释氮肥对提高氮素利用效率的研究. *激光生物学报*, 2002, 11(2): 87-92.
- Liu D L, Nie J, Xiao J. Study on ^{15}N labeled rice controlled release fertilizer in increasing nitrogen utilization efficiency. *Acta Laser Biology Sinica*, 2002, 11(2): 87-92. (in Chinese)
- [19] Mary B, Recous S, Darwis D, Robin D. Interactions between decomposition of plant residues and nitrogen cycling in soil. *Plant and Soil*, 1996, 181: 71-82.

(责任编辑 郭银巧)