

秸秆还田形态和还田量对水稻氮素积累 与转运及产量品质的影响

刘丽华¹, 秦 猛², 翟玲霞², 崔士泽¹, 李瑞松¹, 郑峻麒¹,
王檄铭¹, 李红宇¹, 姚 钦¹, 林晓影³, 郑桂萍¹

(1.黑龙江八一农垦大学农学院, 黑龙江 大庆 163319; 2.黑龙江省农业科学院克山分院,
黑龙江 齐齐哈尔 161000; 3.黑龙江省八五四农场, 黑龙江 密山 158300)

摘 要: 秸秆还田是目前广泛应用的秸秆处理方式, 但存在腐解效率低、易发生病虫害和释放有机酸等问题。汽爆膨化技术具有破坏秸秆纤维间聚合力, 增大秸秆比表面积, 使其更易被微生物降解、消灭秸秆自身携带的病虫害卵的作用。故采用膨化秸秆和常规秸秆两种形态还田, 于 2020—2021 年进行盆栽试验, 探究两种还田形态在不同还田量下对水稻氮素积累与转运、产量以及稻米品质的影响。以‘垦粳 8 号’水稻为供试材料, 秸秆不还田作为对照 (CK), 以当地秸秆还田 $7\ 500\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 为基准, 各还田形态分别设置 4 种还田量, 即 25%、50%、75% 和 100%, 共 9 个处理, 采用单因素完全随机设计。结果表明: 氮素积累量在齐穗期表现为膨化还田 > CK > 直接还田, 并随还田量的增加而降低, 25% 秸秆膨化还田 2 a 间较 CK 分别提高了 10.92% 和 11.66%, 秸秆直接还田较 CK 略有降低; 在成熟期, 25% 秸秆膨化还田处理地上部氮素积累最多, 2 a 间分别较 CK 增加 1.11% 和 10.54%, 75% 直接还田处理在 2020 年试验中较 CK 显著提高 4.99%, 在 2021 年 50% 直接还田处理最佳, 较 CK 增加了 8.51%。2 a 间秸秆还田均提高了水稻产量, 秸秆膨化还田表现为 25% 还田量处理增产效果最佳, 较 CK 分别增加 5.54% 和 8.93%; 秸秆直接还田以 75% 还田量处理增产效果最佳, 较 CK 分别增加 6.65% 和 9.14%; 2 a 间秸秆膨化还田处理和秸秆直接还田处理均改善了稻米的加工品质、营养品质和食味品质, 其中 25%、50% 秸秆膨化还田稻米的食味评分均高于同施用量下秸秆直接还田处理, 但各处理间差异未达显著水平。综上, 秸秆膨化还田量为 25% 的处理有利于水稻产量和品质的提高, 秸秆直接还田量为 75% 的处理次之。

关键词: 水稻; 秸秆还田; 氮素; 产量; 品质

中图分类号: S511 **文献标志码:** A

Effects of straw returning form and amount on nitrogen accumulation and translocation as well as yield and quality of rice

LIU Lihua¹, QIN Meng², ZHAI Lingxia², CUI Shize¹, LI Ruisong¹, ZHENG Junqi¹,
WANG Ximing¹, LI Hongyu¹, YAO Qin¹, LIN Xiaoying³, ZHENG Guiping¹

(1. Agricultural College, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163319, China;

2. Keshan Branch of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Qiqihar, Heilongjiang 161000, China;

3. Bawusi Farm of Heilongjiang Province, Mishan, Heilongjiang 158300, China)

Abstract: Straw returning to the field is a widely used straw treatment method at present. However, there are problems such as low decomposition efficiency, easy occurrence of pests and diseases, and release of organic acids. The steam explosion technology has an effect of destroying the cohesion between the straw fibers, increasing the specific surface area of the straw, making it easier to be degraded by microorganisms and eliminate the eggs of diseases and insects carried by the straw itself. In this study, two forms of straw returning to the field were used: extruded straw and conventional straw. A pot experiment was carried out in 2020 and 2021 to investigate effects of the

收稿日期: 2022-06-06

修回日期: 2022-08-27

基金项目: 中央支持地方高校改革发展资金人才培养项目 (2022010006); 黑龙江八一农垦大学博士启动基金项目 (101/2031011046); 大庆市指导性科技项目 (zd-2020-42)

作者简介: 刘丽华 (1979-), 女, 黑龙江绥化人, 副教授, 主要从事水稻高产优质栽培研究。E-mail: llh1979_2001@163.com

通信作者: 郑桂萍 (1960-), 女, 黑龙江密山人, 教授, 主要从事水稻栽培与技术研究。E-mail: dqzgp@163.com

two return methods on rice growth, yield, quality, nitrogen accumulation and translocation. A single-factor completely randomized design was adopted. The rice variety ‘Kenjing 8’ was used as the test material and with no straw returning to the field as the control (CK) and 7 500 kg · hm⁻² of local straw return to the field as the base. Four return rates for each return method of 25%, 50%, 75% and 100% were employed with a total of 9 treatments. The results show that nitrogen accumulation in the full heading stage was in the form of puffed straw return > CK > direct straw return, and decreased with the increase of returning amount. Compared with CK, the 25% puffed straw returning to the field increased by 10.92% and 11.66% respectively, and the direct straw return was slightly lower than that of CK. At the mature stage, 25% extruded straw returning to the field increased 1.11% and 10.54% compared with CK in two years, respectively, and 75% straw returning to the field significantly increased 4.99% compared with CK in 2020. The treatment of 50% of 2021 straw returning to field was the best, which increased 8.51% compared with CK. Compared with CK, the straw returning treatment increased the yield of rice. Under different returning rates, the puffed straw return rate was the highest at 25%, increasing by 5.54% and 8.93% respectively compared with CK in two years. The direct straw return was highest at 75%, increasing by 6.65% and 9.14% respectively compared with CK in the two years. The processing quality, nutritional quality and eating quality of rice were improved by straw extruding treatment and direct straw returning treatment during the two years. The taste scores of rice with 25% and 50% extruded straw return were higher than that of rice with the same amount of straw, but the difference was not significant. In conclusion, the treatment of 25% extruded straw returning to the field was beneficial to improvement of rice yield and quality followed by the treatment of 75% direct straw returning to the field. The study provides a theoretical and technical reference for high yield and good quality of rice.

Keywords: rice; straw returning; nitrogen; yield; quality

水稻(*Oryza sativa* L.)作为我国主要的粮食作物之一,在保障国家粮食安全中具有重要地位^[1-3]。随着育种和栽培技术的发展,水稻产量得到大幅提升的同时,秸秆数量也随之增多。目前我国已成为世界上秸秆年产量最高的国家之一,但秸秆利用率却有待提高^[4]。由于还田技术的不完善,收获后农户为了生产上的便利,将秸秆丢弃或焚烧,加重了环境污染和资源浪费^[5]。因此,如何高效利用秸秆现已成为社会关注的重点问题。现阶段,秸秆还田已成为我国广泛应用的秸秆处理方式之一^[6]。秸秆作为一类生物质资源,含有丰富的中、微量元素,还田后营养物质重新返还至土壤,供作物吸收和利用,可避免燃烧带来的环境污染^[7-8]。秸秆直接还田是目前最主要的还田方式,具有简单快捷、省时省力等优点,同时可以达到蓄水保墒和培肥地力的目的^[9]。东北地区土壤温度低,气候干燥,还田后秸秆腐解速率慢,如果还田过量,导致秸秆难以深翻覆盖到位,使水分流失、化感物质积累和病虫害加重,进而影响还田效果和作物出苗生长等一系列问题^[10-12]。故对秸秆进行有效的预处理具有一定的必要性,传统的预处理方法如机械加工、酸碱和生物处理等,虽然可以破坏秸秆的纤维结构,但存在周期长、污染大和效率低等问题^[13]。汽爆膨化技术(简称“膨化”)利用高温高压蒸汽,通过瞬间释

放压力来破坏秸秆原有组分,使秸秆结构发生改变^[14],具有省时增效、减少化学试剂使用、改善秸秆生物质特性和提高腐解速率的特点,是很有发展前景的预处理技术^[15]。

秸秆还田过程中,改变秸秆形态可以增加秸秆与土壤的接触面积,加快有机物质的循环转化,增加土壤养分含量的积累,促进作物增产,提高经济效益^[16]。膨化预处理可以破坏生物质的层次结构,降低纤维素和半纤维素的聚合度,有利于微生物附着和消化酶作用^[17]。膨化处理后秸秆呈现粗糙、松散以及破碎的表面结构,可能因为在膨化过程中,秸秆在高温高压的共同作用下,纤维结构和部分低分子量物质被软化,纤维之间的连接开始减弱,高压蒸汽迅速从纤维缝隙中释放出来,破坏纤维素分子内的氢键,降低纤维间的连接,使纤维间断裂,彼此分离(图1)。秸秆炭化还田具有提高土壤碳库积累,减少温室气体排放,促进植物养分吸收,提高作物产量的作用^[18-19];秸秆颗粒化还田有利于土壤养分循环,维持土壤肥力,促进植物生长、生物量和养分含量的积累^[20];秸秆粉还田能降低土壤容重,增加土壤有机碳和全氮含量^[21]。

针对东北地区秸秆还田利用率低、效果不明显的现状,本研究采用膨化秸秆和常规秸秆两种形态还田,进行2 a试验,比较膨化秸秆与常规秸秆的还

田效果,研究并明确两种秸秆在不同还田量下对水稻氮素利用及产量品质的影响,为水稻高产优质栽培提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2020—2021 年在大庆市黑龙江八一农垦大学校内盆栽试验基地 (46.58°N、125.16°E) 进行,该地区属于温带季风气候,海拔 143 m,年日照时数 2 726 h,平均无霜期 166 d,年均气温4.2℃,夏季平均气温 23.2℃,年均降水量 427.5 mm,2020 年和 2021 年旬降水量、旬均气温如图 2 所示,试验土壤养分状况如表 1 所示。

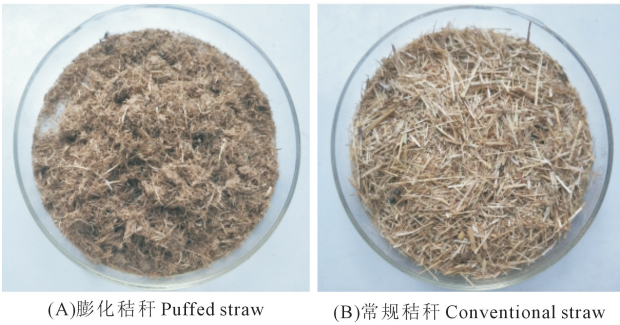


图 1 两种秸秆的宏观形态
Fig.1 Pictures of different straw macromorphology

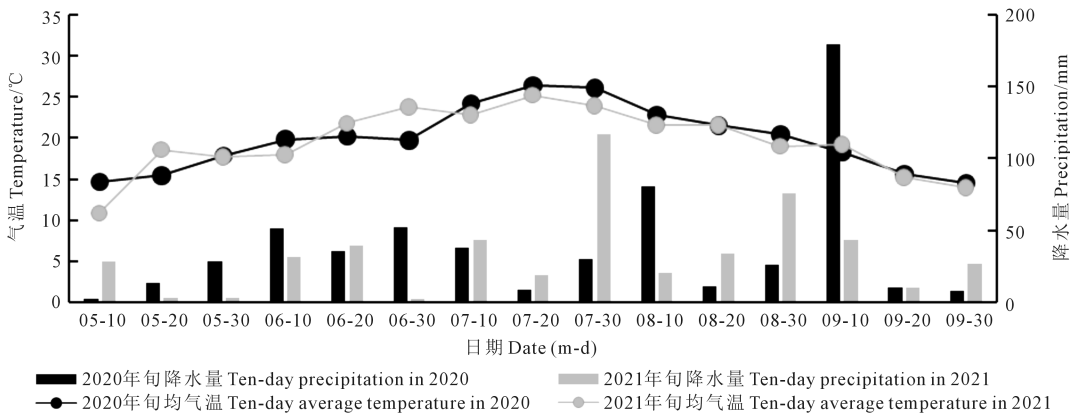


图 2 2020 年和 2021 年旬降水量、旬均气温情况
Fig.2 Ten-day precipitation and average temperature in 2020 and 2021

表 1 土壤基础养分状况
Table 1 Soil basic nutrient status

年份 Year	碱解氮 Available N /(mg · kg ⁻¹)	有效磷 Available P /(mg · kg ⁻¹)	速效钾 Available K /(mg · kg ⁻¹)	有机质 Organic matter /(g · kg ⁻¹)	pH
2020	134.80	20.81	72.05	27.91	6.69
2021	137.76	13.69	92.05	28.79	6.90

1.2 供试材料

供试水稻品种为‘垦粳 8 号’,主茎 13 片叶,株高约 94.3 cm,全生育期 142 d,≥10℃活动积温约 2 650℃。膨化秸秆来源于黑龙江稻乐农业科技有限公司,膨化秸秆制备流程如下:将水稻秸秆铡成 1~3 cm 小段→装入膨化加料箱中→螺旋输送到膨化器中→摩擦生热→水汽化→膨化器内压力增大至 1.0 MPa→瞬间释放喷出。供试肥料包括普通尿素 (N 含量 46.4%)、重过磷酸钙 (P₂O₅ 含量 46%) 和硫酸钾 (K₂O 含量 50%)。

1.3 试验设计

试验设计水稻秸秆膨化后还田 (膨化还田) 和

未膨化还田 (直接还田) 两种还田方式,以当地秸秆还田量 7 500 kg · hm⁻²为基准,分别设置 4 种还田比例,即 25%、50%、75% 和 100%,同时以秸秆不还田为对照 (CK),共 9 个处理 (如表 2 所示),采用单因素完全随机设计,通过盆栽进行试验,每盆 84 kg 土壤,在盆栽装土时将秸秆翻埋至土壤中,盆规格为长 80 cm×宽 60 cm×高 28 cm,每盆面积 0.48 m²。每处理 5 盆,每盆移栽 2 行,每行插植 8 穴,共计 16 穴,每穴 4 苗。插秧规格为行距 30 cm×穴距 10 cm。水稻于 2020 年 4 月 18 日播种,5 月 24 日移栽,9 月 27 日收获;2021 年 4 月 18 日播种,5 月 20 日移栽,9 月 20 日收获,生产管理模拟田间栽培措施。基肥分别施尿素、重过磷酸钙和硫酸钾 4.97、6.70、3.46 g · 盆⁻¹ (2020 年 5 月 18 日,2021 年 5 月 14 日);分蘖肥施尿素 3.72 g · 盆⁻¹ (2020 年 5 月 25 日,2021 年 5 月 28 日);调节肥施尿素 1.24 g · 盆⁻¹ (2020 年 6 月 30 日,2021 年 6 月 26 日);穗肥分别施尿素和硫酸钾 2.48 g · 盆⁻¹ 和 2.30 g · 盆⁻¹ (2020 年 7 月 17 日,2021 年 7 月 14 日)。

表 2 不同处理的秸秆还田方式与用量
Table 2 Ways and amounts of straw returning
to the field for different treatments

还田方式 Returning method	处理 Treatment	还田比例 Returning proportion/%	秸秆量/(g·盆 ⁻¹) Straw amount /(g·pot ⁻¹)
秸秆不还田 Returning no straw to the field	CK	0	0
	P1	25	90
膨化还田 Returning extruded straw to field	P2	50	180
	P3	75	270
	P4	100	360
直接还田 Returning conventional straw to field	S1	25	90
	S2	50	180
	S3	75	270
	S4	100	360

1.4 测定项目及方法

1.4.1 植株氮素积累与转运 将分蘖期、齐穗期和成熟期样品分为叶片、茎鞘、穗,将样品置于烘箱 105℃杀青 30 min,80℃烘干至恒重后,粉碎后过 0.20 mm 孔径筛,消煮,采用全自动凯氏定氮仪(Kjeltec™ 8400,福斯华(北京)科贸有限公司,丹麦)测定氮,并按以下方法计算氮素积累与转运^[22]。计算公式如下:

氮素积累量(g·m⁻²)=地上部各器官(叶片、茎鞘、穗)干重×地上部(叶片、茎鞘、穗)含氮率

氮素转运量(g·m⁻²)=齐穗期某器官(叶片、茎鞘)氮素积累量-成熟期该器官(叶片、茎鞘)氮素积累量

氮素转运率(%)=叶片(茎鞘)氮素转运量/齐穗期叶片(茎鞘)氮素积累量×100%

氮素转运贡献率(%)=氮素转运量/成熟期穗部氮素积累量×100%

成熟期氮素分配比例(%)=地上部(叶片、茎鞘、穗)含氮率/成熟期植株地上部各器官氮素积累量的总和×100%

1.4.2 产量及其构成因素 水稻成熟期各处理按平均穗数取代表性植株 6 穴,在阴凉通风处干燥后,分为茎鞘和穗,穗部用于考察产量构成要素(穗数、穗粒数、结实率和千粒重),计算理论产量。

1.4.3 品质 水稻收获后脱粒,自然阴干 3 个月,待理化性质稳定后,每处理称取 3 份,每份 200 g,按《优质稻谷 (GB/T 17891—2017)》标准测定稻米品质。

加工品质:采用实验砬谷机 (FC-2K, YAMAMOTO 公司,日本)加工成糙米,计算糙米率;采用实验碾米机 (VP-32,山本公司,日本)加工成精米,采用谷粒分析仪 (ES-1000,静冈机械株式会社,日本)判别整精米,计算精米率和整精米率。

外观品质:采用 ES-1000 便携式品质分析仪测定垩白粒率和垩白度;营养品质:采用近红外谷物分析仪 (FOSS 1241,瑞典福斯公司,瑞典)测定稻米的蛋白含量和直链淀粉含量;食味品质:采用米饭食味计 (STA1A,佐竹公司,日本)测定米饭的食味评分。

糙米率(%)=糙米重/稻谷重×100%
精米率(%)=精米重/稻谷重×100%
整精米率(%)=精米率×(1-碎米率)

1.5 数据处理

采用 Excel 2010 软件对数据进行处理并作图,采用 SPSS 17.0 软件进行 Duncan 差异显著性检验 (P<0.05)。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田形态和还田量对氮素积累、转运与分配的影响

2.1.1 地上部氮素积累 由图 3 可知,在 2 a 试验中,水稻分蘖期地上部氮素积累量表现为 CK>秸秆还田,且两种还田方式均随还田量的增加呈明显降低趋势,究其原因认为是秸秆在腐解过程中,微生物与植株对土壤氮素的竞争所致;齐穗期膨化还田以 P1 处理地上部氮素积累最多,2 a 间分别较 CK 显著提高 10.92%和11.66%,直接还田以 S1、S2 处理氮素积累量最多;成熟期膨化还田以 P1 处理地上部氮素积累最多,在 2 a 间分别较 CK 增加 1.11%和 10.54%,直接还田 S3 处理在 2020 年试验中较 CK 显著提高 4.99%,在 2021 年直接还田以 S2 处理最佳,较 CK 增加了 8.51%。

2.1.2 各器官氮素转运 由表 3 可知,2 a 间不同处理下水稻的氮素运转量、运转率和贡献率均表现为叶>茎,膨化还田后水稻的叶片转运量、转运率和贡献率均以 P1 处理最高,其中 2020 年增长效果明显,分别较 CK 增加了 18.34%、3.52%和31.65%,而直接还田表现为 S1 处理总体效果最佳;2020 年膨化还田后水稻的茎鞘转运量、转运率和贡献率表现为 P1>P2>P3>P4,与 CK 相比,P1 处理分别提高了 10.70%、6.94%和 9.56%,直接还田表现为 S1>S2>

S4>S3,其中 S1 处理的氮素转运率较 CK 提高了 4.41%;2021 年膨化还田水稻的茎鞘转运量、转运率和贡献率均以 P4 处理最高,较 CK 分别提高 45.90%、45.15%和 50.44%,且膨化还田水稻的茎鞘

转运量、转运率和贡献率均随还田量的增加而提高,直接还田水稻茎鞘中氮素转运量、转运率和贡献率均以 S3 处理较高,其中转运率、贡献率较 CK 分别提高 26.37%和 3.81%。

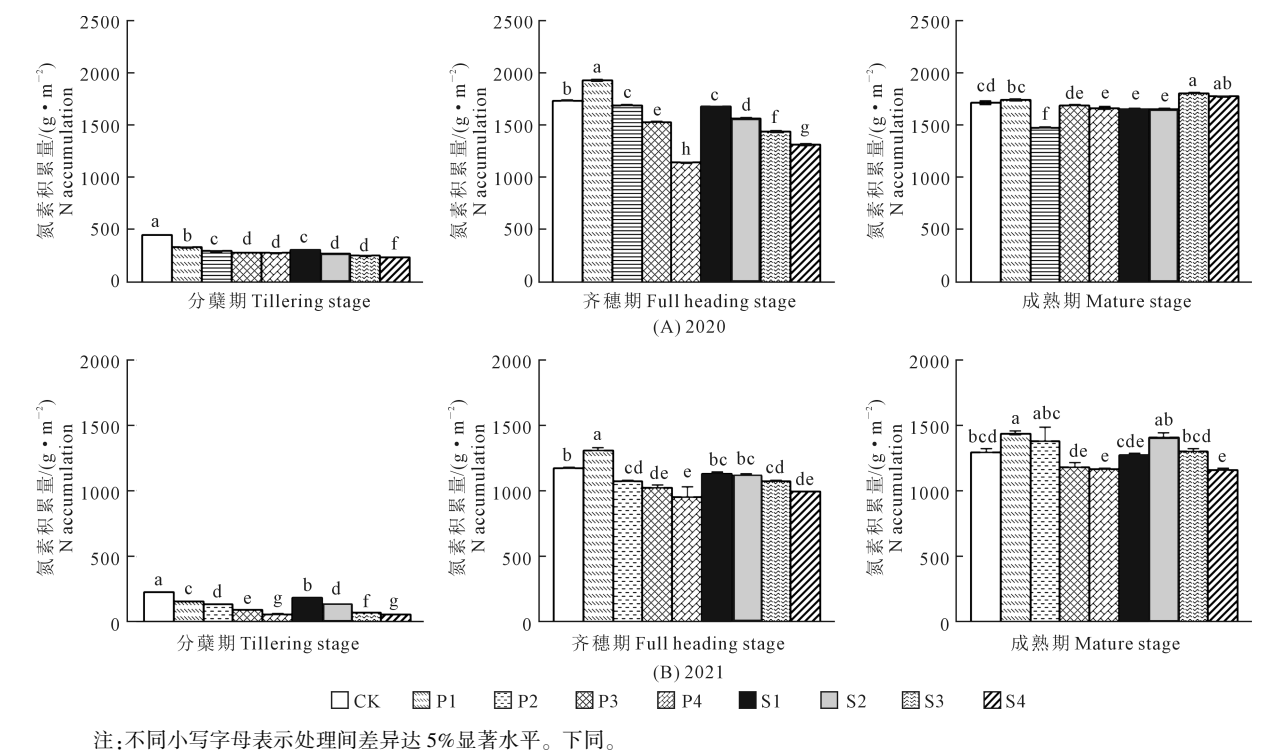


图 3 水稻地上部氮素积累量的比较

Fig.3 Comparison of nitrogen accumulation in rice shoot

表 3 水稻茎鞘、叶片氮素转运的比较

Table 3 Comparison of nitrogen transport in stem sheath and leaf of rice

年份 Year	处理 Treatment	氮素转运量/($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) N transports		氮素转运率/% Apparent N transport rate		氮素贡献率/% Contribution rate of N transport	
		叶片 Leaf	茎鞘 Stem-sheath	叶片 Leaf	茎鞘 Stem-sheath	叶片 Leaf	茎鞘 Stem-sheath
2020	CK	623.27c	351.96b	78.64c	52.86bc	50.37d	28.44b
	P1	737.59a	389.63a	81.41a	56.53a	66.31a	31.16a
	P2	691.26b	284.64d	79.59b	50.75cd	58.97b	27.29b
	P3	573.28d	276.31de	77.43de	48.32d	46.74e	22.53c
	P4	458.62g	104.99h	75.25g	29.14g	36.66g	8.39e
	S1	626.60c	327.30c	78.07cd	55.19ab	52.28c	27.29b
	S2	610.94c	254.31e	76.71ef	48.00d	50.77d	21.13c
	S3	514.28f	135.65g	74.66g	32.96f	37.93g	10.01e
	S4	542.28e	193.31f	76.51f	39.92e	41.21f	14.68d
2021	CK	516.28a	142.32b	77.76a	28.02a	65.79a	18.12b
	P1	425.29b	42.00e	74.18b	9.53f	49.75bc	4.92f
	P2	415.63b	82.33cd	71.65c	20.37de	45.31de	8.98de
	P3	341.63de	86.32cd	71.80c	23.03d	45.86cd	11.57cd
	P4	314.64e	207.65a	67.22e	40.67a	41.27e	27.26a
	S1	412.96b	98.99c	72.67bc	22.84de	52.72b	12.65c
	S2	398.96bc	45.00e	72.07c	10.75f	47.56cd	5.12f
	S3	416.29b	141.32b	73.06bc	35.41b	53.01b	18.81b
	S4	369.63cd	67.99de	69.66d	18.73e	43.69de	8.02e

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异达 5%显著水平,下同。

Note: The different lowercase letters in the same column represent the significant difference at $P<0.05$. The same below.

2.1.3 水稻成熟期各器官氮素分配 如表 4 所示,水稻成熟期各器官中的氮素积累量及分配比例均表现为穗>茎鞘>叶片。就氮素积累量来看,膨化还田 P1 处理总体效果最佳,与 CK 相比,可显著提高水稻叶片和茎鞘中氮素积累量,增幅为 1.90%~14.00%;直接还田水稻的茎鞘、叶片和穗的氮素分别以 S4、S1 和 S3 处理积累最多,且 S2 处理在 2021 年试验中茎鞘、叶片和穗的积累量分别较 CK 显著提高了 1.65%、9.26%和 11.55%;就氮素在各器官中分配比例来看,与 CK 相比,两种还田方式均使氮素在茎鞘中分配比例呈下降趋势,2 a 间膨化还田水稻的茎鞘氮素比例以 P1 处理占比最高,明显高于其他处理,且 2 a 间较 CK 分别增加 2.52%和 1.96%,

直接还田以 S2 处理茎鞘中氮素分配比例最高;2020 年叶片的氮素分配比例随还田量增加呈降低趋势,膨化还田和直接还田分别以 P1 和 S1 处理占比最多,较 CK 分别提高 10.47%和 16.86%,P4 和 S3 处理的穗部氮素分配比例明显高于其他处理,分别较 CK 显著增加 4.98%和 4.38%;2021 年膨化还田和直接还田分别以 P4 和 S3 处理叶片的氮素占比最高,较 CK 增加 14.24%和 11.60%,膨化还田和直接还田的穗部氮素积累分别以 P2 和 S4 处理所占比例最高。

2.2 秸秆还田形态和还田量对水稻产量及构成因素的影响

由表 5 可知,2020 年和 2021 年两种还田形态下水稻产量均较对照有所提高,膨化还田以 P1 处理

表 4 水稻成熟期氮素在各器官中的分配
Table 4 Distribution of nitrogen in various organs of rice at maturity

年份 Year	处理 Treatment	茎鞘 Stem-sheath		叶片 Leaf		穗 Panicle	
		积累量/(g·m ⁻²)	比例/%	积累量/(g·m ⁻²)	比例/%	积累量/(g·m ⁻²)	比例/%
		Accumulation	Proportion	Accumulation	Proportion	Accumulation	Proportion
2020	CK	298.97b	18.24a	169.32bc	9.84d	1237.21cd	71.93d
	P1	304.64a	18.70a	188.98a	10.87b	1250.54c	71.92d
	P2	275.97c	17.20b	157.98d	10.69bc	1042.23e	70.61e
	P3	295.30b	17.49b	166.98c	9.89d	1226.21cd	72.62c
	P4	254.97d	15.38e	150.98e	9.10f	1251.21c	75.51a
	S1	265.64c	16.05d	190.31a	11.50a	1198.88d	72.45cd
	S2	275.31c	16.68c	171.65bc	10.40c	1203.55d	72.92c
	S3	275.64c	15.26e	174.65b	9.67de	1355.53a	75.08a
	S4	290.97b	16.40cd	166.65c	9.39ef	1316.20b	74.21b
2021	CK	364.63b	28.07a	147.65c	11.38ab	784.92c	60.55c
	P1	410.63a	28.62a	168.32a	11.74ab	854.91b	59.64c
	P2	321.63cd	23.25bc	144.65cd	10.63b	917.57a	66.11a
	P3	286.30de	24.48bc	133.65d	11.49ab	745.26c	64.03ab
	P4	264.64e	22.41c	153.32bc	13.00a	762.26c	64.59ab
	S1	333.97bc	26.25ab	154.65bc	12.17ab	782.92c	61.58bc
	S2	370.63b	26.27ab	161.32ab	11.47ab	875.58ab	62.26bc
	S3	257.97e	22.27c	146.99c	12.70a	752.26c	65.03ab
	S4	294.30cde	22.60c	160.98ab	12.37a	845.92b	65.04ab

表 5 产量及其构成因素的比较
Table 5 Comparison of yield and its components

年份 Year	处理 Treatment	穗数/(穗·m ⁻²) Number of panicles	穗粒数/(粒·穗 ⁻¹) Grains per panicle	结实率/% Seed setting rate	千粒重/g 1000-grain weight	产量 Yield/(g·m ⁻²)
2020	CK	410.96b	138.74a	90.75ab	22.12a	1143.55b
	P1	438.96ab	138.80a	94.10a	20.99ab	1206.88a
	P2	433.29b	134.03a	94.57a	21.01ab	1149.89b
	P3	427.62b	140.76a	93.18ab	21.15ab	1182.55ab
	P4	422.29b	134.83a	93.22ab	22.10a	1175.88ab
	S1	433.29b	138.60a	93.06ab	20.61ab	1149.55b
	S2	426.62b	138.86a	90.73ab	21.37ab	1148.55b
	S3	472.29a	130.88a	92.70ab	21.28b	1219.54a
	S4	433.29b	142.44a	89.42b	21.99a	1212.21a
2021	CK	433.29a	83.25f	95.69ab	23.03a	795.25b
	P1	399.96b	95.25de	97.03a	23.44a	866.25a
	P2	366.63c	99.48cde	97.05a	23.11a	817.92ab
	P3	333.30d	103.97bcd	96.12ab	23.27a	774.59b
	P4	333.30d	110.76ab	96.97a	23.07a	825.58ab
	S1	405.63b	90.95ef	95.60ab	23.36a	823.92ab
	S2	333.30d	105.75abc	95.89ab	23.26a	822.92ab
	S3	399.96b	95.15de	96.82ab	23.49a	867.91a
	S4	327.63d	113.78a	95.34b	23.16a	786.59b

最高,较 CK 分别增加了 5.54% 和 8.93%;直接还田以 S3 处理最高,2 a 间产量较 CK 分别增加了6.65% 和 9.14%;从产量的构成因素来看,2020 年两种还田形态各个处理的每平方米穗数均较对照提高,其中 S3 处理每平方米穗数最多(472.29 穗·m⁻²),P1 处理次之;2021 年各个还田处理每平方米穗数均较 CK 显著降低;穗粒数 2 a 间均以 S4 处理最多,较 CK 平均提高了 19.65%,但各处理间差异未达显著水平;结实率以 P2 处理最高,2 a 间较 CK 分别提高了 4.21% 和 1.42%,P1 处理次之;P4 处理有利于 2020 年千粒重的提高,S3 处理在 2021 千粒重最高,P1 处理次之,但处理间无显著差异。

2.3 秸秆还田形态和还田量对稻米品质的影响

2.3.1 稻米加工品质 如表 6 可知,2 a 间稻米的加工品质均表现为秸秆还田>CK。其中 2020 年膨化还田糙米率表现为 P2>P1>P4>P3,直接还田表现为 S1>S4>S2>S3,总体以 S1 处理最高,并显著高于 CK;膨化还田精米率以 P2 处理最高(74.60%),显

著高于其他处理,直接还田精米率以 S1 处理最高(73.65%),显著高于 CK 和 S3 处理;膨化还田 P2 处理整精米率最高,较 CK 提高了 1.70%,直接还田 S4 处理整精米率最高,显著高于其他处理,较 CK 显著提高了 3.36%;2021 年膨化还田和直接还田的糙米率、精米率分别以 P2、S3 处理最佳,且二者均显著高于 CK、P1 处理;膨化还田的整精米率表现为 P3>P4>P2>P1,直接还田的整精米率表现为 S4>S3>S1>S2,其中 P3 和 S4 处理整精米率分别较 CK 提高 6.04% 和 9.58%,且 S4 处理显著高于其他处理。

2.3.2 稻米外观品质 如表 7 可知,2020 年垩白粒率和垩白度除 P4 处理外均表现为秸秆还田>CK,但在 2021 年略有不同,表现为 CK>直接还田>膨化还田,且 2 a 间膨化还田和直接还田稻米的垩白粒率、垩白度均以 100% 还田量最低,较 CK 相比,2 a 间均以膨化还田 P4 处理总体降低效果最明显,表明高还田量利于改善稻米的外观品质。

表 6 稻米加工品质的比较

Table 6 Comparison of rice processing quality

处理 Treatment	2020			2021		
	糙米率/%	精米率/%	整精米率/%	糙米率/%	精米率/%	整精米率/%
	Brown rice rate	Milled rice rate	Head rice rate	Brown rice rate	Milled rice rate	Head rice rate
CK	81.94b	72.78e	64.22b	79.09c	72.07c	58.79d
P1	82.28ab	73.78bc	64.78b	79.38bc	72.45bc	60.06c
P2	82.42ab	74.60a	65.31b	79.91a	73.24a	60.36c
P3	82.14ab	74.03b	64.72b	79.56abc	72.67ab	62.34b
P4	82.15ab	73.88bc	65.17b	79.74ab	73.06a	62.05b
S1	82.44a	73.65bc	65.24b	79.97a	73.12a	63.12b
S2	82.22ab	73.43cd	65.11b	79.91a	73.01a	62.70b
S3	82.00ab	72.93de	65.29b	79.99a	73.16a	64.28a
S4	82.33ab	73.47cd	66.38a	79.88ab	73.11a	64.42a

表 7 稻米外观品质的比较

Table 7 Comparison of rice appearance quality

处理 Treatment	2020		2021	
	垩白粒率/%	垩白度/%	垩白粒率/%	垩白度/%
	Chalkiness rate	Chalkiness degree	Chalkiness rate	Chalkiness degree
CK	5.17d	2.93d	0.53c	0.32bc
P1	6.42cd	3.63cd	1.15a	0.62a
P2	8.15b	4.70b	0.45cd	0.23cde
P3	7.08bc	4.12bc	0.35d	0.22de
P4	3.70e	2.05e	0.33d	0.20e
S1	8.12b	4.82b	0.78b	0.37b
S2	9.85a	5.68a	0.55c	0.30bcd
S3	9.83a	6.13a	0.72b	0.35b
S4	6.42cd	3.82c	0.48cd	0.25ede

2.3.3 稻米营养品质 如图 4 可知,2 a 间稻米蛋白质含量均以 S4 处理最低,还田量较低的处理(25%和 50%)中,膨化还田较直接还田更有利于降低蛋白质含量,改善食味,但在还田量较高的处理(75%和 100%)中,较 CK 相比,两种秸秆还田处理的蛋白质含量更容易降低;2 a 间直链淀粉含量均以直接还田 S1 处理最低,2020 年 S1 处理显著低于 P1、P2、S2、S4 处理,2021 年 S1 处理显著低于 CK、P3、S2 处理。

2.3.4 稻米食味品质 由表 8 可知,较 CK 相比,2 a 间秸秆还田处理均提高了稻米的食味评分,表现为膨化还田>直接还田,其中,膨化还田处理间表现为 P2>P4>P1>P3,2 a 间均以 P2 处理食味评分最高,

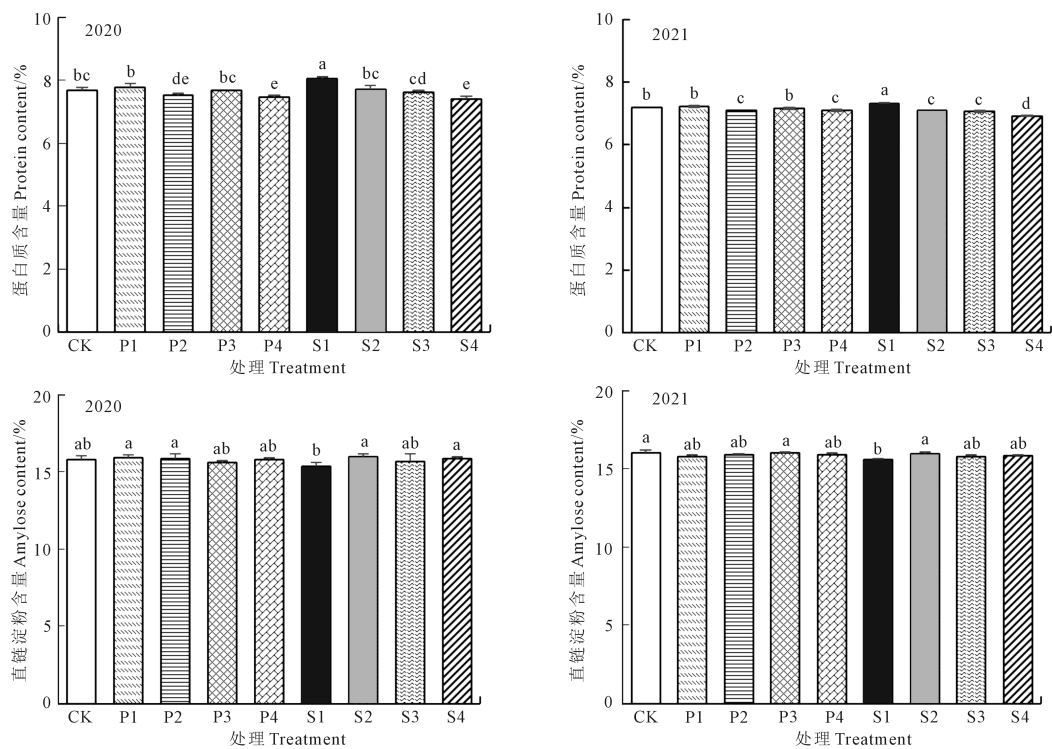


图 4 稻米营养品质的比较
Fig.4 Comparison of nutritional quality of rice

表 8 稻米食味品质的比较
Table 8 Comparison of rice eating quality

年份 Year	处理 Treatment	香气 Aroma	光泽 Gloss	完整性 Completeness	味道 Taste	口感 Texture	食味评分 Taste score
2020	CK	7.29bc	7.03b	7.40a	7.76b	6.95c	75.52a
	P1	7.28c	7.10b	7.24b	7.82ab	6.93c	76.36a
	P2	7.41a	7.39a	7.30ab	7.93a	7.25ab	76.97a
	P3	7.25c	7.04b	7.32ab	7.77b	6.98c	76.31a
	P4	7.31abc	7.19ab	7.32ab	7.82ab	7.14abc	76.73a
	S1	7.32abc	7.06b	7.40a	7.76b	7.01c	75.58a
	S2	7.34abc	7.08b	7.36ab	7.75b	7.04bc	75.75a
	S3	7.34abc	7.19ab	7.34ab	7.85ab	7.09abc	76.26a
	S4	7.39ab	7.36a	7.32ab	7.89a	7.27a	76.71a
2021	CK	7.22c	7.45c	7.31a	7.85b	7.65a	80.73a
	P1	7.32ab	7.68ab	7.20b	7.98a	7.73a	81.42a
	P2	7.38a	7.65abc	7.23ab	8.01a	7.69a	81.71a
	P3	7.35a	7.71ab	7.23ab	8.00a	7.77a	81.08a
	P4	7.34a	7.77a	7.18b	7.98a	7.78a	81.44a
	S1	7.24bc	7.52bc	7.22ab	7.89b	7.64a	81.24a
	S2	7.36a	7.67ab	7.26ab	8.03a	7.69a	81.29a
	S3	7.36a	7.67ab	7.24ab	8.04a	7.66a	81.29a
	S4	7.37a	7.71ab	7.21b	8.06a	7.66a	81.53a

分别为 76.97 分和 81.71 分; 直接还田处理间表现为 S4>S3>S2>S1, 2 a 间均以 S4 处理食味评分最高, 分别为 76.71 分和 81.53 分。由此可见, 较 CK 和直接还田相比, 膨化还田更有利于稻米食味品质的改善。

3 讨 论

3.1 秸秆还田形态和还田量对水稻氮素积累、转运与分配的影响

氮素是植物体内多种化合物的物质基础, 其供应状况与植物体内各种物质及能量的转化密切相

关^[22]。前人研究表明^[23], 秸秆还田使水稻生育前期的氮素积累量呈降低趋势, 一方面是因为秸秆养分释放较慢, 另一方面是由于秸秆的高碳氮比导致土壤微生物在作物生育前期与植株争夺氮素。孔丽丽等^[24]研究发现, 秸秆还田增加了水稻生育中后期的氮素积累量, 促进氮素向籽粒的转运, 具有提高水稻产量和氮素利用效率的双重作用。秸秆还田前期不利于植株氮素积累, 在生育后期可以促使土壤微生物活性和数量的增加^[25], 提高土壤的供氮能力, 利于植株对氮素的吸收和积累^[26]。本试验结

果与前人研究结果基本一致,膨化还田更利于提高水稻的氮素吸收和利用,植株中氮素的转运主要以叶片为主,茎鞘和叶片积累的氮素不断向生殖器官转移,不同还田量之间以 P1 处理叶片的氮素转运量最高,2 a 间氮素转运率分别为 81.41% 和 74.18%,叶片对籽粒总氮贡献率 2 a 间分别为 66.31% 和 49.75%,且膨化还田 P1 和 P4 处理有利于提高茎鞘氮素的转运量,氮素转运率为 56.53% 和 40.67%,茎鞘对籽粒总氮贡献率为 33.16% 和 27.26%;成熟期氮素积累主要集中在籽粒部分,膨化还田以 P4 和 P2 处理最佳,高于 CK 和直接还田,分配比例达 75.51% 和 66.11%,其他非籽粒部分的氮素分配比例表现为茎鞘>叶片。表明膨化还田可以快速供给土壤氮素,提高植株氮素的积累,促进蛋白质转化为糖类物质,为水稻生长提供充足养分,促使营养器官积累的氮素向穗部转移,直接影响水稻产量。

3.2 秸秆还田形态和还田量对水稻产量的影响

前人在秸秆还田对作物产量的影响方面进行了大量研究,李录久等^[27]研究发现,秸秆还田后水稻每穗粒数明显增多,结实率提高,千粒重有所增长,最终提高了籽粒产量。汪军等^[28]研究认为,较秸秆不还田相比,秸秆还田有利于后期籽粒灌浆结实,促进穗粒数的增加,结实率、千粒重有所提高,增加经济效益。2 a 的研究结果表明,秸秆膨化还田有利于穗粒数和结实率的增加,且产量有所提高,与前人结果基本一致,但只有 P2 处理达到显著水平,原因可能是北方土壤温度低,秸秆腐解速度慢,营养并未完全释放,可以尝试多年连续还田条件下进一步研究。另外,2021 年较 2020 年的穗粒数和产量明显降低,可能是由于 2021 年 7 月中下旬(水稻减数分裂期)降水较多,气温较低影响了穗粒数所致(见图 2)。

3.3 秸秆还田形态和还田量对稻米品质的影响

刘鸿飞^[29]研究发现,秸秆还田在促进植株养分积累的同时,降低稻米的垩白粒率、垩白度和直链淀粉含量,提高稻米的淀粉峰值粘度、崩解值和胶稠度,改善了稻米品质。王国骄等^[30]研究发现,秸秆还田不会显著影响水稻产量,但利于提高稻米食味评分,改善稻米蒸煮食味品质。本研究结果表明,较 CK 相比,秸秆还田提高了稻米的糙米率、精米率和整精米率,改善了稻米加工品质,其中直接还田的糙米率和整精米率优于膨化还田,膨化还田精米率优于直接还田,膨化还田更有利于降低稻米的垩白粒率和垩白度,其中 100% 还田量下的垩白粒率与垩白度均低于 CK 和其他还田处理,但 2021

年的垩白粒率与垩白度均明显低于 2020 年,可能是由于年际气候差异所致,有待进一步研究;在 25% 和 50% 还田量下,膨化还田较直接还田更有利于降低稻米蛋白质含量,两种秸秆还田处理 75% 和 100% 还田量的蛋白质含量较 CK 更容易降低;膨化还田的食味评分优于直接还田,总体以 P2 处理最高,可能是秸秆还田改善了水稻生育后期的营养状况和生理活性,从而提高群体的光合生产能力,利于光合产物直接运往穗部,促进穗部的物质合成与积累,使稻米品质得到改善,与袁玲等^[31]研究认为的还田后秸秆中的营养物质在微生物的作用下完全分解和矿化、易被水稻所转化吸收,从而促进矿质营养元素向籽粒库的转移和积累的结论相一致,表明膨化后秸秆还田在保证产量的同时,可以提高稻米的品质。

4 结 论

2 a 试验结果表明,与对照相比,25% 秸秆膨化还田处理能提高齐穗期和成熟期植株中氮素的积累,并促进营养器官中的氮素向籽粒转运,提高转运率,增加了氮素对籽粒的贡献率,提高了氮素利用效率。2 a 间两种秸秆还田形态均较对照提高了水稻产量,秸秆膨化还田表现为 25% 还田量处理增产效果最佳,产量较 CK 分别增加了 5.54% 和 8.93%;秸秆直接还田以 75% 还田量处理增产效果最佳,较 CK 分别增加了 6.65% 和 9.14%;秸秆膨化还田和秸秆直接还田增产的主要原因是穗粒数和结实率的增加。2 a 试验说明了秸秆膨化还田和秸秆直接还田处理均改善了稻米的加工品质、营养品质和食味品质,但各处理间差异未达显著水平。从水稻高产优质的角度分析,秸秆膨化还田量为 25% 的处理有利于水稻产量和品质的提高,秸秆直接还田量为 75% 的处理次之。

参 考 文 献:

- [1] 王晓煜,杨晓光,吕硕,等. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响Ⅺ. 气候变暖对黑龙江寒地水稻安全种植区域和冷害风险的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(10): 1859-1871.
WANG X Y, YANG X G, LYU S, et al. The possible effects of global warming on cropping systems in China Ⅺ. The possible effects of climate warming on geographical shift in safe planting area of rice in cold areas and the risk analysis of chilling damage[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(10): 1859-1871.
- [2] 李洪亮,孙玉友,侯国强,等. 寒地粳稻产量及其主要构成性状间的关系[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(3): 107-112.
LI H L, SUN Y Y, HOU G Q, et al. Relationship between yield and main components of Japonica rice in cold region[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(3): 107-112.
- [3] VAN WART J, KERSEBAUM K C, PENG S B, et al. Estimating crop yield potential at regional to national scales[J]. Field Crops Research,

- 2013, 143: 34-43.
- [4] 伍佳, 王忍, 吕广动, 等. 不同秸秆还田方式对水稻产量及土壤养分的影响[J]. 华北农学报, 2019, 34(6): 177-183.
WU J, WANG R, LYU G D, et al. Effects of different straw returning ways on rice yield and soil nutrients[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2019, 34(6): 177-183.
- [5] SHI T T, LIU Y Q, ZHANG L B, et al. Burning in agricultural landscapes: an emerging natural and human issue in China[J]. Landscape Ecology, 2014, 29(10): 1785-1798.
- [6] 邓亚鹏, 孙池涛, 张俊鹏, 等. 秸秆覆盖条件下滨海盐渍土蒸发对近地层微气候变化影响的模拟研究[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(2): 202-210.
DENG Y P, SUN C T, ZHANG J P, et al. Simulation of the effects of straw mulching on the micro-climate and soil evaporation of coastal saline soil[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(2): 202-210.
- [7] 田平, 姜英, 孙悦, 等. 不同还田方式对玉米秸秆腐解及土壤养分含量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2019, 27(1): 100-108.
TIAN P, JIANG Y, SUN Y, et al. Effect of straw return methods on maize straw decomposition and soil nutrients contents[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(1): 100-108.
- [8] 王永栋, 武均, 蔡立群, 等. 秸秆还田量对陇中旱作麦田土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(2): 232-239, 249.
WANG Y D, WU J, CAI L Q, et al. Effects of straw returning amount on stability of soil aggregates and organic carbon content in dryland wheat field of the Loess Plateau[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(2): 232-239, 249.
- [9] 余坤, 冯浩, 李正鹏, 等. 秸秆还田对农田土壤水分与冬小麦耗水特征的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 116-123.
YU K, FENG H, LI Z P, et al. Effects of different pretreated straw on soil water content and water consumption characteristics of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 116-123.
- [10] 王金武, 唐汉, 王金峰. 东北地区作物秸秆资源综合利用现状与发展分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 1-21.
WANG J W, TANG H, WANG J F. Comprehensive utilization status and development analysis of crop straw resource in Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 1-21.
- [11] 顾美英, 唐光木, 葛春辉, 等. 不同秸秆还田方式对和田风沙土土壤微生物多样性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(4): 489-498.
GU M Y, TANG G M, GE C H, et al. Effects of straw incorporation modes on microbial activity and functional diversity in sandy soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(4): 489-498.
- [12] 钱玉婷, 张应鹏, 杜静, 等. 江苏省秸秆综合利用途径利弊分析及收储运对策研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(22): 154-160.
QIAN Y T, ZHANG Y P, DU J, et al. Advantages and disadvantages analysis of comprehensive utilization of straw in Jiangsu Province and countermeasure suggestions for collection-storage-transportation system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(22): 154-160.
- [13] 焦翔翔, 靳红燕, 王明明. 我国秸秆沼气预处理技术的研究及应用进展[J]. 中国沼气, 2011, 29(1): 29-33, 39.
JIAO X X, JIN H Y, WANG M M. Research progress of straw pretreatment for anaerobic fermentation producing biogas in China[J]. China Biogas, 2011, 29(1): 29-33, 39.
- [14] KAAR W E, GUTIERREZ C V, KINOSHITA C M. Steam explosion of sugarcane bagasse as a pretreatment for conversion to ethanol[J]. Biomass and Bioenergy, 1998, 14(3): 277-287.
- [15] 王莹, 蒋建新, 宋先亮. 蒸汽爆破预处理木质纤维素及其生物转化研究进展[J]. 生物质化学工程, 2006, 40(6): 37-42.
WANG K, JIANG J X, SONG X L. Research progress on the steam explosion pretreatment of the lignocellulose and its bioconversion[J]. Biomass Chemical Engineering, 2006, 40(6): 37-42.
- [16] 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.
ZHANG L, LI Y Y, PANG H C, et al. Effects of granulated maize straw incorporation on soil organic carbon contents and grain yield[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2019, 36(2): 160-168.
- [17] 任天宝, 徐桂转, 马孝琴, 等. 蒸汽爆破对玉米秸秆理化特性的影响[J]. 高压物理学报, 2012, 26(2): 227-234.
REN T B, XU G Z, MA X Q, et al. Influence of steam explosion on physical-chemical characteristic of corn stalk[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2012, 26(2): 227-234.
- [18] 张璐, 董达, 平帆, 等. 逐年全量秸秆炭化还田对水稻产量和土壤养分的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(10): 2319-2326.
ZHANG L, DONG D, PING F, et al. The effects of successive whole-dose biochar application on rice yield and soil nutrient concentrations[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(10): 2319-2326.
- [19] 刘美玲, 刘悦, 陈婷婷, 等. 水稻秸秆生物炭对江汉平原麦区小麦养分吸收和产量的影响[J]. 中国农学通报, 2021, 37(15): 7-13.
LIU M L, LIU Y, CHEN T T, et al. Rice straw biochar: effects on nutrient absorption and yield of wheat in Jiangnan plain[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(15): 7-13.
- [20] 范庭, 刘娜, 张霞, 等. 不同配料颗粒秸秆施用对土壤速效养分及小麦生长的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(6): 84-90, 120.
FAN T, LIU N, ZHANG X, et al. Effects of application of granular straw with different ingredients on available plant nutrients in soil and wheat growth[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(6): 84-90, 120.
- [21] 王月宁, 冯朋博, 李荣, 等. 不同秸秆还田方式对宁夏扬黄灌区土壤性质及玉米生长的影响[J]. 西南农业学报, 2019, 32(11): 2607-2614.
WANG Y N, FENG P B, LI R, et al. Effects of different straw returning methods on soil properties and corn growth in Yanghuang irrigation area of Ningxia[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2019, 32(11): 2607-2614.
- [22] 姜红芳, 兰宇辰, 王鹤璎, 等. 氮肥运筹对苏打盐碱地水稻养分积累、转运及分配的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020, (5): 45-55.
JIANG H F, LAN Y C, WANG H Y, et al. Effects of nitrogen fertilizer applications on nutrient accumulation, translocation and distribution of rice in saline-alkali soil[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2020, (5): 45-55.
- [23] 王婉秋, 李仕培, 李辉, 等. 川东北麦秆还田对水稻氮素吸收转运的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017, (3): 10-14.
WANG W Q, LI S P, LI H, et al. Effect of wheat straw residue application on N uptake and transformation of rice in Northeast Sichuan[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2017, (3): 10-14.
- [24] 孔丽丽, 侯云鹏, 尹彩侠, 等. 秸秆还田下寒地水稻实现高产高

氮肥利用率的氮肥运筹模式[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(7): 1282-1293.

KONG L L, HOU Y P, YIN C X, et al. Nitrogen fertilizer management for high nitrogen utilization efficiency and rice yield under straw incorporation in a cold region[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(7): 1282-1293.

[25] 赵颖, 周枫, 罗佳琳, 等. 水稻秸秆还田配施肥料对小麦产量和氮素利用的影响[J]. 土壤, 2021, 53(5): 937-944.

ZHAO Y, ZHOU F, LUO J L, et al. Effects of rice straw returning combined with fertilizer application on yield and nitrogen utilization of wheat[J]. Soils, 2021, 53(5): 937-944.

[26] 郭萍, 王子豪, 刘斌祥, 等. 不同覆盖方式下减氮对玉米生长与氮素吸收、运转和分配的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021, (1): 229-239.

GUO P, WANG Z H, LIU B X, et al. Effects of different decreased-nitrogen and mulching patterns on growth of maize and nitrogen uptake, translocation and distribution[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2021, (1): 229-239.

[27] 李录久, 吴萍萍, 王家嘉, 等. 不同秸秆还田量对水稻产量和土壤肥力的影响[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(10): 43-45.

LI L J, WU P P, WANG J J, et al. Effect of different rate of straw returned to field on rice yield and soil phi-chemical properties[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2020, 48(10): 43-45.

[28] 汪军, 王德建, 张刚. 太湖地区稻麦轮作体系下秸秆还田配施氮肥对水稻产量及经济效益的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(2): 265-270.

WANG J, WANG D J, ZHANG G. Effects of different N-fertilizer rates with straw incorporation on rice yield and economic benefit of rice-wheat rotation system in Taihu Lake region[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(2): 265-270.

[29] 刘鸿飞. 麦秸还田对水稻产量形成和温室气体排放的影响以及肥水处理效应[D]. 扬州: 扬州大学, 2018.

LIU H F. Effects of wheat straw application on yield formation in rice and greenhouse gas emission and effects of fertilizer and water management[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2018.

[30] 王国骄, 宋鹏, 杨振中, 等. 秸秆还田对水稻光合物质生产特征、稻米品质和土壤养分的影响[J]. 作物杂志, 2021, (4): 67-72.

WANG G J, SONG P, YANG Z Z, et al. Effects of straw returning on photosynthetic matter production characteristics, quality of rice and soil nutrients[J]. Crops, 2021, (4): 67-72.

[31] 袁玲, 张宣, 杨静, 等. 不同栽培方式和秸秆还田对水稻产量和营养品质的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(2): 350-359.

YUAN L, ZHANG X, YANG J, et al. Effects of different cultivation methods and straw incorporation on grain yield and nutrition quality of rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(2): 350-359.



(上接第 201 页)

[25] 张宇, 蒋代华, 黄金兰, 等. 粉垄耕作对赤红壤团聚体粒级分布和稳定性的影响[J]. 生态学杂志, 2021, 40(12): 3922-3932.

ZHANG Y, JIANG D H, HUANG J L, et al. Effect of deep vertically rotary tillage on particle size distribution and stability of latosolic red soil aggregates[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(12): 3922-3932.

[26] 苗芳芳, 勉有明, 普雪可, 等. 耕作覆盖对宁南旱区土壤团粒结构及马铃薯水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(11): 2366-2376.

MIAO F F, MIAN Y M, PU X K, et al. Effects of tillage with mulching on soil aggregate structure and water use efficiency of potato in dry-farming area of southern Ningxia[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(11): 2366-2376.

[27] 聂胜委, 张玉亭, 汤丰收, 等. 粉垄耕作对潮土冬小麦生长及产量的影响初探[J]. 河南农业科学, 2015, 44(2): 19-21, 43.

NIE S W, ZHANG Y T, TANG F S, et al. Effects of smashing ridge tillage on growth and yield of winter wheat in fluvo-aquic soil region[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2015, 44(2): 19-21, 43.

[28] 李轶冰, 逢焕成, 李华, 等. 粉垄耕作对黄淮海北部春玉米籽粒灌浆及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(14): 3055-3064.

LI Y B, PANG H C, LI H, et al. Effects of deep vertically rotary tillage on grain filling and yield of spring maize in North Huang-Huai-Hai region[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(14): 3055-3064.

[29] 王斌, 何文寿, 耿世杰. 粉垄耕作对土壤水分利用效率和马铃薯产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(21): 93-96.

WANG B, HE W S, GENG S J. Effects of deep vertically rotary tillage on soil water use efficiency and potato yield[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(21): 93-96.

[30] 蒋发辉, 高磊, 韦本辉, 等. 粉垄耕作对红壤理化性质及红薯产量的影响[J]. 土壤, 2020, 52(3): 588-596.

JIANG F H, GAO L, WEI B H, et al. Impact of Fenlong tillage on soil physiochemical properties and sweet potato yield in dryland red soil[J]. Soils, 2020, 52(3): 588-596.

[31] 邓小华, 王新月, 杨红武, 等. 粉垄耕作深度对烤烟生长和物质积累及烟叶产质量的影响[J]. 中国烟草科学, 2020, 41(5): 28-35.

DENG X H, WANG X Y, YANG H W, et al. Effects of smashing ridge tillage on growth, dry matter accumulation, output and quality of flue-cured tobacco[J]. Chinese Tobacco Science, 2020, 41(5): 28-35.

[32] 魏亚萍, 王璞, 陈才良. 关于玉米粒重的研究[J]. 植物学通报, 2004, 21(1): 37-43.

WEI Y P, WANG P, CHEN C L. Studies on the grain weight in maize[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2004, 21(1): 37-43.

[33] 张雯, 衣莹, 侯立白. 辽西地区垄作保护性耕作方式对玉米产量效应的影响研究[J]. 玉米科学, 2007, 15(5): 96-99, 103.

ZHANG W, YI Y, HOU L B. Influences of different cultivation patterns under ridge plowing on maize yield effect in western dryable area of Liaoning Province[J]. Journal of Maize Sciences, 2007, 15(5): 96-99, 103.

[34] 蒲境, 史东梅, 娄义宝, 等. 不同耕作深度对红壤坡耕地耕层土壤特性的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(5): 8-14.

PU J, SHI D M, LOU Y B, et al. Effect of different tillage depth on soil properties of ploughing layer in slope cultivated land of red soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(5): 8-14.