

氮肥与促腐菌肥配施对寒地水稻 秸秆还田腐解效果及产量的影响

曹正男^{1,2} 赵振东¹ 胡博¹ 于涵¹ 宁晓海¹ 赵泽强¹ 曹立勇^{1,2}

(¹中国水稻研究所, 310006, 浙江杭州; ²宝清北方水稻研究中心, 155600, 黑龙江宝清)

摘要 采用大田小区试验, 在寒地水稻秸秆全量还田条件下, 研究了不同比例氮肥配施促腐菌肥对水稻秸秆翻埋还田腐解效果、水稻干物质积累及产量的影响。结果表明, 与对照相比, 喷施促腐菌肥显著提高了分蘖期根系干物质积累量和根冠比, 减缓了水稻生长初期秸秆还田对根系生长发育的抑制, 减氮 15% 处理较常规施氮处理显著提高了成熟期根系干物质积累量; 喷施促腐菌肥还显著提高了秸秆腐解率, 其中减氮 15% 处理在 120 d 累积腐解率最高, 为 72.35%, 增加了秸秆养分的释放, 有效缓解了氮肥减施对地上部分干物积累量和产量的影响。与常规施氮相比, 减氮 15% 处理显著增加了成熟期干物质积累量, 显著增产 4.1%; 减氮 30% 处理产量降低不显著。配施促腐菌肥可以通过提高地上部分和地下部分干物积累量、优化根冠比、提高秸秆腐解率、释放更多养分满足水稻后期营养生长, 促进秸秆高效利用和水稻高产。

关键词 寒地水稻; 秸秆还田; 腐解率; 氮肥; 促腐菌肥; 产量

水稻是我国主要的粮食作物之一, 黑龙江省是我国主要的粳稻生产区, 粳稻产量占全国 50% 以上。2021 年黑龙江省水稻种植面积为 386.7 万 hm^2 , 产量达 2913.7 万 t ^[1], 按照谷草比 1:1.1 计算, 秸秆量超过 3000 万 t , 输出量较大。秸秆作为农业生产中的有机副产品, 含有丰富的氮、磷、钾和微量元素及大量的木质素和纤维素等有机物, 可供植物生长利用^[2-3], 但秸秆化学组成中 70%~80% 为木质纤维素, 是天然的高分子聚合物^[4-5], 较难被微生物分解, 同时由于黑龙江地处高纬度地区, 气候冷凉, 秸秆腐解速度更为缓慢^[6], 多种因素导致大量的水稻秸秆被遗弃在田间地头, 不但严重浪费资源, 而且遗弃秸秆的不当处理也容易引起环境污染^[7], 严重制约了农业的循环发展。

近年来, 随着一系列政策文件的出台, 东北地区水稻秸秆直接还田的面积逐年增加, 实施开展适合东北地区秸秆还田的促腐技术与水稻生产应用研究对实现农业经济可持续发展和保障国家粮食安全具有重要意义。通常情况下, 水稻秸秆在土壤微生物的作用下腐解周期较长, 需要 2~3 年甚至更长时间^[8], 为了加快腐解速率, 可在秸秆还田的同时添加微生物促腐菌促进秸秆腐解, 但由于秸秆的

碳氮比 (C/N) 较大, 在水稻生长初期, 土壤中有有效氮被微生物固定, 造成争氮现象, 影响水稻中后期的生长发育。因此, 在施用促腐菌肥的同时需合理配施氮肥^[9-10]。本文利用中国水稻研究所北方水稻研究中心在 0~10 °C 低温下筛选的具有活性的促腐菌肥开展大田小区试验, 结合寒地水稻实际生产, 探求在秸秆翻埋条件下水稻氮肥高效利用的最适管理模式, 达到增产提质的效果, 为水稻绿色高产高效栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2023 年在中国水稻研究所北方水稻研究中心宝清试验基地 (132°15' E, 46°19' N) 进行。该试验地点属于寒地温带大陆性气候, 雨热同季, 年降水量 400~450 mm, 无霜期 140~145 d, 年均 10 °C 以上活动积温 2600 °C 左右, 一年一熟, 水稻连作, 土壤类型为典型黑土, 壤质黏土。供试耕层土壤理化性质为 pH 6.18、有机质 40.25 g/kg、全氮 2.31 g/kg、全磷 0.71 g/kg、全钾 17.14 g/kg、碱解氮 91.26 mg/kg、有效磷 21.72 mg/kg、速效钾 346.23 mg/kg。

作者简介: 曹正男, 研究方向为寒地稻作技术, E-mail: caozhengnan@caas.cn

曹立勇为通信作者, 研究方向为水稻遗传育种, E-mail: caoliyong@caas.cn

基金项目: 中国农业科学院北方农牧业技术创新中心项目 (BFGJ2023001); 中国农业科学院创新工程项目 (CAAS-ASTIP-2023-CNRR1)

收稿日期: 2024-02-18; 修回日期: 2024-03-14; 网络出版日期: 2024-04-04

1.2 试验材料

供试水稻品种为龙粳 31，促腐菌肥由宝清利彼乐农业科技有限公司提供，主要包含枯草芽孢杆菌、多粘类芽孢杆菌、地衣芽孢菌和木霉真菌等，型剂为水剂。

1.3 试验设计

试验设 5 个处理，分别为常规施氮（T1）、氮肥减量 15%+促腐菌肥（T2）、氮肥减量 30%+促腐菌肥（T3）、氮肥减量 45%+促腐菌肥（T4）和不施氮肥（CK），每个处理 3 个重复，共 15 个小区，每个小区面积 40 m²，各小区单独排灌，田埂用防水薄膜隔离防渗，四周设保护行。促腐菌肥用量为 7.5 L/hm²，稀释 50 倍后均匀喷施，整个生育期喷施 3 次，分别在插秧前、返青期和孕穗期。秋天收集由抛洒器粉碎后的秸秆，长度较长的剪短至 5 cm 左右，将水稻秸秆 50 g（干基）与稻田土 1 kg 混拌均匀装入尼龙网袋（40 目）中，试验小区秸秆还田是将上茬水稻秸秆粉碎后深翻全量还田；每个处理 12 个尼龙网袋，垂直埋入到土壤耕层 10~15 cm，每次随机取样 3 个，共取样 4 次，分别在插秧后 30、60、90 和 120 d 取样。试验于 2023 年 4 月 17 播种育秧，5 月 23 日移栽插秧，10 月 5 日收获。

常规施肥水平下氮肥（纯氮）用量为 133 kg/hm²，按基肥：返青肥：蘖肥：穗肥=4:1:3:2 比例施入；磷肥（过磷酸钙）用量为 P₂O₅ 46 kg/hm²，作基肥一次性施入；钾肥（氯化钾）用量为 K₂O 90 kg/hm²，按基肥：穗肥=1:1 比例施入。所有处理的磷肥和钾肥均等量施用。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 秸秆腐解率 每次秸秆取样后，尼龙网袋浸泡后分别清洗秸秆，洗净后 60 °C 烘干，并与初始干重对比，计算秸秆的腐解率。

秸秆累积腐解率（A，%）=（秸秆初始质量-阶段剩余秸秆质量）/秸秆初始质量×100；

秸秆腐解速率[V，g/(g·a)]=Y×(W_i-W_n)/(W₀×T)，式中，Y 代表 365 d，用“a”表示；W_i 为第 i 天取样秸秆重量（g）；W_n 为第 n 天取样秸秆重量（g）；T 为第 n 天与第 i 天时间间隔（d）。

1.4.2 干物质质量和根冠比 于分蘖盛期、齐穗期和成熟期按平均茎蘖数采集生长一致的 3 穴水稻植株，每穴以水稻植株为中心挖去长、宽、深均为 20 cm 的土块，装入 40 目尼龙网袋中，用清

水冲洗后，留下根样品，地上部分分茎鞘、叶和穗（齐穗期和成熟期）后，105 °C 杀青 1 h，75 °C 烘干至恒重，分别称重，计算地上部、地下部干质量和根冠比。

1.4.3 产量及其构成因素 成熟期随机调查 20 穴水稻植株的有效穗数，再按平均有效穗数选取 3 穴，考察每穗粒数、瘪粒数和千粒重等性状。收获时每个小区去边行，实收 4.8 m²，重复 3 次，脱粒后称重，并测定含水量，根据 14.5% 含水量换算成单位面积产量。

1.5 数据处理

采用 Excel 2013 进行数据整理并作图，用 SPSS 20.0 软件进行数据统计分析和方差分析。

2 结果与分析

2.1 促腐菌肥与减施氮肥对水稻秸秆还田效果的影响

2.1.1 水稻不同生育期秸秆累积腐解率变化 秸秆腐解率是测量水稻秸秆腐解效果的重要方法之一，秸秆腐解百分率的大小可以直接反映出秸秆腐熟效果^[1]。如表 1 所示，在水稻生长的不同阶段，秸秆均有一定腐解量，累积腐解率随着时间的推移呈增加趋势；相邻阶段水稻秸秆累积腐解率前期增加较快，后期增加较慢，且秸秆累积腐解率增加的幅度均表现为 T2>T3>T4>T1>CK。在 4 个阶段中，施用促腐菌肥的 3 个处理秸秆累积腐解率均显著高于未施用的 2 个处理，且均表现为 T2>T3>T4>T1>CK；在施用促腐菌肥的条件下，累积腐解率随着氮肥施用量的减少而减小，其中 T2 在 120 d 累积腐解率最高，达到了 72.35%，分别比 T1 和 CK 提高了 38.26% 和 63.51%。

表 1 水稻秸秆腐熟过程中的累积腐解率

Table 1 Cumulative decomposition rate of rice straw during the maturation process %

处理 Treatment	累积腐解率 Cumulative decomposition rate			
	30 d	60 d	90 d	120 d
T1	22.35±0.90c	37.32±0.89c	47.36±1.35d	52.33±1.37d
T2	28.02±0.86a	46.57±2.36a	60.55±1.08a	72.35±1.79a
T3	27.12±1.17a	44.14±0.52a	56.80±1.39b	66.68±1.29b
T4	24.27±0.32b	41.08±0.71b	51.93±1.85c	61.70±0.78c
CK	20.35±0.90d	33.07±1.45d	41.48±0.82e	44.25±0.96e

同列数据后不同字母表示处理间有显著性差异（P<0.05）。下同。Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at the P<0.05 level. The same below.

2.1.2 水稻不同生育期秸秆腐解速率变化 从图 1

可以看出，随着水稻秸秆还田时间的延长，各处理秸秆腐解速率均呈现由快到慢的趋势，且在同一还田时段内表现为 T2>T3>T4>T1>CK，在 0~30 d 还田时段内腐解速率最快，施促腐菌肥处理平均腐解速率为 3.22 g/(g·a)，未施促腐菌肥处理平均腐解速率为 2.59 g/(g·a)；在 90~120 d 还田时段内腐解速率最慢，施促腐菌肥处理平均腐解速率为 1.25 g/(g·a)，未施促腐菌肥处理平均腐解速率为 0.42 g/(g·a)，比施用促腐菌肥处理的的平均腐

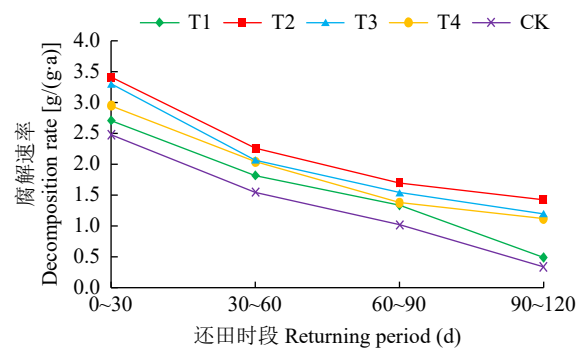


图 1 不同时段内水稻秸秆的腐解速率
Fig.1 Decomposition rate of rice straw in different periods

解速率低 197.62%。
2.2 促腐菌肥与减施氮肥对水稻干物质积累及根冠比的影响

2.2.1 对水稻地上部各器官干物质积累的影响 从表 2 可知，各个处理间水稻茎鞘和叶片的干物质积累量从分蘖期到成熟期均呈现先增加后降低的趋势，穗干物质积累量从齐穗期到成熟期增加幅度明显，各个器官的总积累量从分蘖期到成熟期呈不断增加的趋势。

与 T1 处理相比，T2 处理对分蘖期、齐穗期和成熟期水稻茎鞘、叶片、穗干物质积累量和比例均无显著影响，仅在成熟期各器官总积累量显著高于 T1 处理；T3 处理分蘖期茎鞘干物质积累量显著低于 T1 处理，其他时期的各器官干物质积累量和比例均无显著差异；T4 处理显著降低了分蘖期、齐穗期和成熟期水稻茎鞘、叶片和穗干物质积累量。可见，减氮 15%喷施促腐菌肥可显著增加水稻地上部干物质积累量，但减氮 30%和 45%喷施促腐菌肥则显著降低了水稻地上部干物质积累量。

表 2 水稻主要生育期各器官干物质积累量及其比例
Table 2 Dry matter accumulation and its ratio in each organ of rice at main growth stages

生育时期 Growth stage	处理 Treatment	茎鞘 Stem-sheath		叶片 Leaf		穗 Panicle		总干物质 积累量 Total dry matter (kg/hm ²)
		干物质积累量 Dry matter accumulation (kg/hm ²)	比例 Ratio (%)	干物质积累量 Dry matter accumulation (kg/hm ²)	比例 Ratio (%)	干物质积累量 Dry matter accumulation (kg/hm ²)	比例 Ratio (%)	
分蘖期 Tillering	T1	2537.81a	54.34ab	2131.30a	45.66bc	—	—	4669.10a
	T2	2420.38ab	53.59bc	2095.11a	46.41ab	—	—	4515.49a
	T3	2332.50b	53.70bc	2011.12b	46.30ab	—	—	4343.62b
	T4	2087.75c	52.79c	1866.91c	47.21a	—	—	3954.66c
	CK	2011.01c	55.12a	1637.34d	44.88c	—	—	3648.35d
齐穗期 Heading	T1	6596.52a	55.27a	3296.72a	27.62b	2042.04ab	17.11ab	11 935.28a
	T2	6524.28a	54.48a	3295.60a	27.52b	2155.72a	18.00a	11 975.60a
	T3	6398.28a	55.96a	3182.20a	27.86b	1851.64bc	16.18bc	11 432.12a
	T4	5470.08b	55.25a	2751.06b	27.80b	1678.32c	16.95ab	9899.40b
	CK	3709.84c	55.37a	1963.36c	29.31a	1027.01d	15.32c	6700.21c
成熟期 Maturity	T1	5247.94ab	27.32a	2707.31a	14.09c	11 255.23ab	58.60a	19 210.47b
	T2	5307.75a	27.03a	2758.42a	14.05c	11 568.72a	58.93a	19 634.88a
	T3	4964.57b	26.79a	2646.96ab	14.29c	10 918.81b	58.92a	18 530.33b
	T4	4446.48c	28.02a	2445.43b	15.39b	8989.25c	56.59b	15 881.15c
	CK	3149.39d	28.37a	1848.45c	16.64a	6101.51d	54.99c	11 099.35d

2.2.2 对水稻地下部干物质积累量和根冠比的影响 从表 3 可知，群体的根系干物质积累量从分蘖期到成熟期呈现先增后减的趋势，齐穗期达到最高值，根冠比则从分蘖期到成熟期逐渐降低。与 T1 处理相比，T2 处理显著提高了分蘖期、齐穗期和成熟期根系干物质积累量及分蘖期根冠

比；T3 处理显著提高了齐穗期根系干物质积累量及分蘖期和齐穗期根冠比；T4 处理显著提高了分蘖期、齐穗期和成熟期根冠比，表明在一定减施氮肥用量范围内，喷施促腐菌肥可促进分蘖期到成熟期根系干物质积累量的增加，能有效减缓水稻后期根系衰老。

表 3 水稻主要生育期根系干物质积累量和根冠比
Table 3 Root dry matter accumulation and root-shoot ratio of rice at main growth stages

处理 Treatment	根系干物质积累量 Root dry matter accumulation (kg/hm ²)			根冠比 Root-shoot ratio		
	分蘖期 Tillering	齐穗期 Heading	成熟期 Maturity	分蘖期 Tillering	齐穗期 Heading	成熟期 Maturity
T1	1139.89b	2177.88bc	1470.26bc	0.24c	0.18d	0.08c
T2	1292.46a	2396.17a	1682.60a	0.29ab	0.20cd	0.09bc
T3	1249.04ab	2288.33ab	1569.60ab	0.29ab	0.21bc	0.08bc
T4	1213.87ab	2128.87c	1423.61c	0.31c	0.22bc	0.09b
CK	965.73c	1625.32d	1282.47d	0.27bc	0.24a	0.12a

2.3 促腐菌肥与减施氮肥对水稻产量的影响

由表 4 可知，与未喷施促腐菌肥（T1 和 CK）处理相比，喷施促腐菌肥的 3 个处理皆显著提高了结实率，且这 3 个处理水稻的实测产量随着氮肥施用量的减少而显著降低，将施用促腐菌肥 3 个处理的施氮量和产量进行回归分析，得到回归方程 $y=-1.19x^2+273.24x-5940.40$ （ $133\geq x\geq 73$ ），式中， y 为产量（kg/hm²）， x 为施氮量（kg/hm²），可从

该模型中根据 T1 处理的实际产量预测出施用促腐菌肥的条件下减氮量不超过 27%时，与 T1 处理相比不降低水稻产量。其中，T2 处理产量最高，较 T1 处理显著增产 4.14%，该处理产量的提升主要通过增加有效穗数、穗粒数和结实率实现，尤其是结实率增加显著。但随减氮水平增加，有效穗数和穗粒数逐渐降低，进而影响水稻产量，如 T4 处理的产量比 T1 处理降低了 18.07%（ $P<0.05$ ）。

表 4 不同处理水稻产量及产量因子构成
Table 4 Grain yield and yield components of rice in different treatments

处理 Treatment	有效穗数 Number of effective panicles (×10 ⁴ /hm ²)	千粒重 1000-grain weight (g)	每穗粒数 Grains per panicle	结实率 Seed-setting rate (%)	产量 Yield (kg/hm ²)
T1	479.64±14.33a	26.12±0.17a	89.38±3.27ab	94.46±1.08b	9396.83±158.57b
T2	483.84±14.03a	26.10±0.06a	90.93±2.66a	96.69±1.27a	9785.73±148.67a
T3	451.92±12.43b	26.27±0.13a	87.09±3.84ab	97.21±0.30a	9214.30±85.81b
T4	412.44±18.91c	26.38±0.19a	83.47±3.97b	97.40±0.79a	7698.40±153.07c
CK	346.92±13.88d	26.31±0.12a	63.24±4.74c	95.97±0.97ab	5055.53±158.57d

3 讨论

3.1 促腐菌肥对寒地水稻秸秆腐解效果及土壤养分的影响

秸秆还田是合理利用秸秆资源最简单实用的方法之一，也是保护黑土地地力的有效措施，目前为东北区域主要推行的技术。前人^[12-13]研究认为，长期科学合理的秸秆还田可以提高土壤质量状况，增强土壤活性，提升土壤供肥能力，增加作物产量。张丽霞等^[14]研究表明，在东北地区玉米和水稻秸秆还田过程中田间有机物料腐熟剂不仅可以提高秸秆还田技术效果，还可以提高土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量。土壤酶活性与土壤肥力密切相关，解媛媛等^[15]发现，秸秆还田配施微生物菌剂可以提高土壤中蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶和多酚氧化酶活性，进而提高土壤肥力。自然界中，许多细菌、放线菌和真菌可以通过分泌纤维素分解酶和木质素分解酶，从而使秸秆降解，但以中、高温微生物居多，不适合东北稻区应用，因此

对低温促腐菌的发掘意义重大^[16-17]。秸秆分解是一个复杂的过程，根据它的化学组成可分为易矿化有机物分解、半纤维素分解、纤维素分解和木质素分解，这个过程需要多种微生物的参与，单一的微生物种类不能完成秸秆降解^[18-19]，青格尔等^[20]研究表明，以生态条件与目标菌系相近的常年秸秆还田土壤作为菌源筛选材料，可以提高筛选效率及应用效果，其研制的低温菌系 GF-20 富含降解纤维素、半纤维素和木质素菌属，在低温 10℃条件下降解 30 d，秸秆降解率可达 30%。王继莲等^[21]筛选出一株枯草芽孢杆菌，可在 10℃生长、繁殖并分泌产生纤维素酶。张楠等^[22]研究发现，以酵母菌和枯草芽孢杆菌为主的寒地水稻秸秆腐熟剂，当季可使翻埋条件下水稻秸秆失重率达 57.26%。本研究中的应用的商品菌种包括木霉属、芽孢杆菌属等低温菌系，在低温条件下能够分解纤维素、半纤维素、木质素及其他芳香类化合物^[23]，减施氮肥 15%配施促腐菌肥的处理累积腐解率在 120 d 时最高，达到 72.35%，翻埋条件下效果优于张楠等^[22]的结果。

本试验中, 秸秆腐解率的计算是通过将粉碎后的秸秆与稻田土混匀后, 装入尼龙网袋埋入耕层中, 但尼龙网袋的存在一定程度上限制了土壤与秸秆的混合, 影响了微生物的交换与空气的流动, 且按照单位面积核算, 秸秆与稻田土的比例要大于大田, 不能完全模拟大田翻埋情况, 因此推测, 大田中施用促腐菌肥时秸秆的腐解率可能更高, 效果更好。

3.2 促腐菌肥对水稻秸秆还田后水稻干物质积累量及产量的影响

水稻干物质是光合产物在植株不同器官积累与分配的结果, 而氮素是作物干物质积累的基础, 且在一定施氮量范围内, 干物质积累量随着施氮量的减少而降低, 水稻抽穗前干物质主要积累在茎鞘和叶片, 而成熟期干物质主要积累在穗部^[24-25]。本试验表明, 水稻分蘖期至齐穗期和齐穗期至成熟期 2 个阶段干物质积累量最大, 施用促腐菌肥处理在分蘖期和成熟期叶片干物质积累比例皆高于未施促腐菌肥处理, 而茎鞘比例与叶片比例呈相反趋势。在各时期总干物质积累量中, 减氮 30% 配施促腐菌肥处理在齐穗期和成熟期总干物质积累量与常规施氮处理相比差异不显著; 减氮 15% 配施促腐菌肥处理干物质积累量在成熟期显著高于常规施氮处理, 这可能是由于促腐菌肥的作用导致后期秸秆腐解程度更高, 释放养分更多, 有效缓解了氮肥减量对地上部分干物质积累量的影响。前人^[26]研究表明, 水稻秸秆翻埋还田条件下, 抑制分蘖期根系生长, 有利于拔节期至成熟期根系的生长, 本研究中, 根系生长发育趋势相同, 但喷施促腐菌肥的 3 个处理显著提高了分蘖根系干物质积累量及根冠比, 减缓了秸秆还田前期对根系生长发育的抑制, 成熟期减氮 15% 处理根系的干物质质量和根冠比均高于常规施氮处理, 库大源足, 更有利于产量的积累^[27]。

水稻产量是干物质积累、分配、运输与转运的结果, 关于促腐菌肥的田间施用对作物产量的影响已有大量报道^[28-31]。杨晓东等^[28]研究表明, 连续秸秆还田配施腐熟剂能加速秸秆腐解, 有利用土壤养分积累和水稻产量的提高。杜丑新等^[29]研究发现, 早稻秸秆还田添加促腐菌肥可以促进早稻秸秆腐解, 有效提高晚稻的穗粒数、结实率和千粒重, 增加晚稻产量。江敏等^[30]在双季稻双直播模式下试验也得出, 促腐菌肥配施合理氮肥可以提高晚稻的

有效穗数和结实率, 从而提高产量。然而, 也有研究^[31]认为, 施用促腐菌肥可以促进秸秆腐解, 但不能显著增加产量。因此, 在区域气候、秸秆种类及土壤状况等条件不同时, 促腐菌肥的施用应有所差别。本研究中喷施促腐菌肥显著提高了中后期秸秆的腐解率, 促进了秸秆养分的释放, 提高后期干物质积累量, 增加了有效穗数、穗粒数和结实率, 尤其是结实率增加显著, 从而实现产量的增加。

4 结论

与常规施氮相比, 喷施促腐菌肥显著提高了水稻秸秆累积腐解率和腐解速率, 促进了根系生长, 增加了秸秆养分释放, 降低了氮肥减量对水稻干物质积累及产量的影响, 且在减施氮肥 15% 的条件下显著提高了水稻成熟期干物质积累量和产量。

参考文献

- [1] 国家统计局. 2023 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2023.
- [2] 柴如山, 安之冬, 马超, 等. 我国主要粮食作物秸秆钾养分资源量及还田替代钾肥潜力. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(2): 201-211.
- [3] 宋大利, 侯胜鹏, 王秀斌, 等. 中国秸秆养分资源数量及替代化肥潜力. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 1-21.
- [4] Rehman N, Miranda G I M, Rosa L M S, et al. Cellulose and nanocellulose from maize straw: an insight on the crystal properties. Journal of Polymers and the Environment, 2014, 22(2): 252-259.
- [5] 韩亚. 黑土区玉米秸秆腐解特征及其改土效果的研究. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- [6] 谭可菲, 王麒, 刘传增, 等. 黑龙江西部地区水稻秸秆腐解特征研究. 中国稻米, 2018, 24(4): 96-98.
- [7] Li L J, Wang Y, Zhang Q, et al. Wheat straw burning and its associated impacts on Beijing air quality. Science in China Series D: Earth Sciences, 2008, 51(3): 403-414.
- [8] 张经廷, 张丽华, 吕丽华, 等. 还田作物秸秆腐解及其养分释放特征概述. 核农学报, 2018, 32(11): 2274-2280.
- [9] Kuzakov Y. Priming effects: Interactions between living and dead organic matter. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(9): 1363-1371.
- [10] 罗嘉润, 宋文杰, 刘伟, 等. 秸秆还田配施氮肥早期对水稻生长、土壤性质及微生物多样性的影响. 农业生物技术学报, 2023, 31(10): 2019-2034.
- [11] 武际, 郭熙盛, 王允青, 等. 不同水稻栽培模式和秸秆还田方式下的油菜、小麦秸秆腐解特征. 中国农业科学, 2011, 44(16): 3351-3360.
- [12] 葛选良, 钱春荣, 李梁, 等. 秸秆还田配合施肥措施对玉米产量及耕层土壤质量的影响. 中国土壤与肥料, 2021(1): 131-136.
- [13] Chandra R, Takeuchi H, Hasegawa T. Methane production from lignocellulosic agricultural crop wastes: A review in context to second generation of biofuel production. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(3): 1462-1476.
- [14] 张丽霞, 王俊文, 王立春, 等. 有机物料腐熟剂在东北农作物

- 秸秆还田上的应用. 东北农业科学, 2018, 43(6): 5-8.
- [15] 解媛媛, 谷洁, 高华, 等. 微生物菌剂酶制剂化肥不同配比对秸秆还田后土壤酶活性的影响. 水土保持研究, 2010, 17(2): 233-238.
- [16] 孙建平, 刘雅辉, 马佳, 等. 冀东稻区基于低温复合菌系 HT20 的秸秆腐解因素研究. 西北农业学报, 2021, 30(9): 1418-1426.
- [17] 董桂军, 陈兴良, 于洪娇, 等. 寒区长期秸秆全量还田对水稻土理化特性的影响. 土壤与作物, 2019, 8(3): 251-257.
- [18] Alexander T, Rainer S, M M S, et al. Organic carbon transformations in high-Arctic peat soils: key functions and microorganisms. The ISME Journal, 2013, 7(2): 299-311.
- [19] 姚云柯, 周卫, 孙建光, 等. 田间条件下不同促腐菌对水稻秸秆腐解及胞外酶活性的影响. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(11): 2070-2080.
- [20] 青格尔, 于晓芳, 高聚林, 等. 玉米秸秆低温降解复合菌系降解能力及微生物组成研究. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(11): 1753-1765.
- [21] 王继莲, 陈芸, 李明源, 等. 产低温纤维素酶菌株的分离鉴定及产酶特征研究. 江西农业大学学报, 2019, 41(2): 356-364.
- [22] 张楠, 刘杰, 于洪久, 等. 寒地水稻秸秆腐熟剂对水稻秸秆翻埋还田的腐熟效果及土壤养分含量的影响. 黑龙江农业科学, 2020(11): 34-37.
- [23] 萨如拉, 高聚林, 于晓芳, 等. 玉米秸秆低温降解复合菌系的筛选. 中国农业科学, 2013, 46(19): 4082-4090.
- [24] 邓飞, 王丽, 刘利, 等. 不同生态条件下栽培方式对水稻干物质生产和产量的影响. 作物学报, 2012, 38(10): 1930-1942.
- [25] 刘梦红, 李红宇, 杜俊, 等. 秸秆还田与粪肥增氮对寒地水稻产量和氮素吸收利用的影响. 中国农业大学学报, 2023, 28(9): 49-59.
- [26] 何艳, 严田蓉, 郭长春, 等. 秸秆还田与栽培方式对水稻根系生长及产量的影响. 农业工程学报, 2019, 35(7): 105-114.
- [27] 褚光, 徐冉, 陈松, 等. 优化栽培模式对水稻根-冠生长特性、水氮利用效率和产量的影响. 中国水稻科学, 2021, 35(6): 586-594.
- [28] 杨晓东, 刘燕, 徐建军, 等. 连续秸秆还田配施腐熟剂对土壤理化性状及水稻产量的影响. 安徽农业科学, 2016, 44(26): 83-84, 88.
- [29] 杜丑新, 肖云山, 丁平, 等. 早稻秸秆还田添加腐熟剂对晚稻产量及土壤养分的影响. 安徽农业科学, 2016, 44(29): 121-122.
- [30] 江敏, 何爱斌, 孙会娟, 等. 双季稻双直播模式不同早稻秸秆还田方式下氮肥运筹对晚稻生长发育和土壤理化性质的影响. 作物杂志, 2024(3): 100-108.
- [31] 李继福, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 麦秆还田配施不同腐熟剂对水稻产量、秸秆腐解和土壤养分的影响. 中国农学通报, 2013, 29(35): 270-276.

Effects of Nitrogen Fertilizer and Promoting Rot Bacteria Fertilizer on Decomposition Effect of Returning Rice Straw to Field and Yield in Cold Regions

Cao Zhengnan^{1,2}, Zhao Zhendong¹, Hu Bo¹, Yu Han¹, Ning Xiaohai¹, Zhao Zeqiang¹, Cao Liyong^{1,2}

(¹China National Rice Research Institute, Hangzhou 310006, Zhejiang, China;

²Baoqing Northern Rice Research Center, Baoqing 155600, Heilongjiang, China)

Abstract A field experiment was conducted to examine the effects of nitrogen fertilizer and rot bacteria fertilizer on the decomposition effect of rice straws, dry matter accumulation and yield of rice with total return of rice straws to the field in cold regions. The results showed that, compared with the control, the spraying promoting rot bacteria fertilizer significantly improved the root dry matter accumulation and root-shoot ratio, slowed down the inhibition of root growth and development caused by straw returning in the early stage of rice growth, and the 15% nitrogen reduction significantly increased the root dry matter accumulation in the mature period compared with the conventional nitrogen treatment. The spraying promoting rot bacteria fertilizer also significantly improved the straw decomposition rate, with the highest cumulative decomposition rate reaching 72.35% in the treatment of 15% nitrogen reduction after 120 days, which increased the release of straw nutrients and effectively alleviated the effect of nitrogen fertilizer reduction on the dry matter accumulation and yield in the aboveground parts. Compared with conventional nitrogen application, 15% nitrogen reduction treatment significantly increased the amount of dry matter accumulation in the mature period by 4.1%; the 30% nitrogen reduction treatment didn't significant reduced yield. This study showed that the applying promoting rot bacteria fertilizer could improve the dry matter accumulation in both aboveground and underground parts, optimize the root-shoot ratio, improve the decomposition rate of straws, release more nutrients to meet the nutritional growth of rice in the later stage, and promote the efficient utilization of straws and the high yield of rice.

Key words Rice in cold region; Straw returning to field; Decomposition rate; Nitrogen fertilizer; Promoting rot bacteria fertilizer; Yield