

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.06.008

隽英华, 何志刚, 刘慧屿, 等. 秸秆还田与氮肥运筹对农田棕壤微生物生物量碳氮及酶活性的调控效应. 土壤, 2023, 55(6): 1223–1229.

## 秸秆还田与氮肥运筹对农田棕壤微生物生物量碳氮及酶活性的调控效应<sup>①</sup>

隽英华, 何志刚, 刘慧屿, 刘 艳, 陈 玥

(辽宁省农业科学院植物营养与环境资源研究所, 沈阳 110161)

**摘 要:** 如何有效运筹秸秆还田与氮肥施用, 研发高效节氮秸秆还田技术, 是目前东北地区农业生产中亟待解决的问题。基于田间定位试验, 研究了不同秸秆还田方式(秸秆不还田、秸秆粉碎翻压还田、秸秆堆腐旋耕还田)与施氮水平(180、210、240 kg/hm<sup>2</sup>, 以纯氮计)运筹对土壤微生物生物量碳、氮(MBC、MBN)和氮代谢关键酶活性的影响, 结果表明: 与秸秆不还田相比, 秸秆还田处理土壤 MBC、MBN 含量及 MBC/MBN 比值和脲酶活性均显著增加, 硝酸还原酶活性无规律性变化。随着生育期推进, 秸秆还田处理土壤 MBC 和 MBN 含量分别呈现单峰和双峰曲线变化, 脲酶和硝酸还原酶活性均呈波动式变化, 高峰期均出现在春玉米旺盛生长期(拔节期至灌浆期)。随着施氮水平增加, 秸秆还田处理土壤 MBC、MBN 含量均增加, MBC/MBN 比值降低, 而脲酶和硝酸还原酶活性变化行为因秸秆还田方式而异。在保证氮肥总量不变的前提下, 秸秆粉碎翻压还田配以 15% 氮肥后移能够增加土壤 MBC 和 MBN 含量, 降低 MBC/MBN 比值。综上, 在东北农业产区, 秸秆粉碎翻压还田 + 210 kg/hm<sup>2</sup> 氮肥 + 15% 氮肥后移的秸秆还田模式具有优化氮素管理、提高土壤肥力的潜力。

**关键词:** 秸秆还田; 氮肥运筹; 微生物生物量碳氮; 脲酶; 硝酸还原酶

中图分类号: S153 文献标志码: A

## Regulation Effects of Straw Returning and Nitrogen Application Management on Farmland Brown Soil Microbial Biomass and Enzyme Activities

JUAN Yinghua, HE Zhigang, LIU Huiyu, LIU Yan, CHEN Yue

(Institute of Plant Nutrition and Environmental Resources, Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 110161, China)

**Abstract:** How to effectively manage straw returning and nitrogen (N) application in order to develop the straw-returning technology with efficient N saving is an urgent problem to be solved in agriculture production of Northeast China. With a field positioning experiment, the effects of different straw returning methods (no returning; crushed-returning and ploughing, S; decomposed-returning and rotary tillage, DS) and N application rates (N 180, 210 and 240 kg/hm<sup>2</sup>) on soil microbial biomass carbon/nitrogen (MBC/MBN) and the key enzyme activities of N metabolism were investigated. The results showed that compared with no returning, soil MBC and MBN contents, MBC/MBN ratio and urease activity in all S and DS treatments increased significantly, but nitrate reductase activity changed irregularly. With the extension of maize growth period, soil MBC and MBN contents for S and DN treatments showed single peak curve and double peak curve respectively, and urease and nitrate reductase activities both changed with a fluctuating trend, and both reached peak points at spring maize exuberant growing period (jointing stage to filling stage). With increase of N application rate, both soil MBC and MBN contents for all S and DS treatments increased, MBC/MBN ratio decreased, and the changes of urease and nitrate reductase activities differed from returning methods. Under the condition of the same N application rate, S treatment with a 15% postponing of N fertilizer could increase soil MBC and MBN contents, and decrease MBC/MBN ratio. In conclusion, the technology of crushed returning ploughing with N 210 kg/hm<sup>2</sup> and a 15% postponing of N fertilizer has the potential to improve N management and enhance soil fertility in the agricultural producing areas of Northeast China.

**Key words:** Straw returning; Nitrogen application; Microbial biomass carbon and nitrogen; Urease; Nitrate reductase

①基金项目: 沈阳市科技计划项目(21-109-3-01)资助。

作者简介: 隽英华(1979—), 男, 山东莒南人, 博士, 研究员, 主要从事作物施肥与土壤氮素转化的生物化学调控研究。E-mail: juanyong\_001@sohu.com

作物秸秆作为一种可再生的生物质资源,富含多种矿质营养元素和有机物质,其综合利用对稳定农业生态平衡、缓解资源短缺、助推农业绿色可持续发展具有重要作用<sup>[1]</sup>。近年来,随着秸秆焚烧政策颁布和人们环保意识提高,秸秆大面积焚烧现象锐减,基本得到有效解决,但秸秆废弃仍较严重,大量秸秆废置于田间地头,不仅浪费资源,而且还会造成一定的环境污染<sup>[2]</sup>。随着机械化程度提高,秸秆还田作为提高土壤肥力和改善土壤生态环境的一项重要措施已得到广泛应用<sup>[3]</sup>。但秸秆腐解时间长、效果差等问题不仅限制了土壤肥力提升,还降低了农民秸秆还田积极性<sup>[4]</sup>,尤其在东北地区尤为突出。

秸秆质量是影响秸秆还田后氮素矿化的重要因子,作物秸秆碳氮比(C/N)较高,还田后腐解需配施一定量的氮肥,否则容易造成对土壤氮素的固持而影响作物生长<sup>[5]</sup>。大量研究表明,秸秆还田配以补增氮肥可降低土壤 C/N,有利于促进微生物增殖及分解更多有机质,提高土壤有机碳和缓解土壤养分流失<sup>[6]</sup>,同时提高土壤微生物量碳氮和酶活性<sup>[7]</sup>。可见,秸秆还田与氮肥合理施用决定于有机肥施用和秸秆还田状况,以维持土壤-作物体系中氮素投入和输出平衡,从而保证土壤氮素的有效供给<sup>[8]</sup>。近年来,为了追求作物高产,农业生产中氮肥施用量越来越大,不仅增加了生产成本,还导致氮肥利用率降低、土壤养分失调、土壤物理性状变劣等问题的产生,进而制约了农业可持续发展<sup>[9]</sup>。因而,如何将秸秆还田与氮肥施用有机结合,更好地培肥土壤,提高农田生产力,是目前东北地区农业生产中值得研究的重要课题。

目前,关于秸秆还田下氮肥运筹研究多集中于作物产量、土壤肥力和微生物特性等方面<sup>[10]</sup>。而在不同土壤类型及气候条件下,秸秆还田配施氮肥调节 C/N 对土壤养分含量、微生物特性、酶活性和作物生长的影响不尽相同<sup>[7]</sup>。且关于东北地区秸秆还田后的最佳施氮量以及秸秆还田后土壤微生物、酶活性的响应特征的研究较少。为此,本研究在东北地区农田棕

壤上开展试验,研究了春玉米秸秆还田配以氮肥运筹对土壤微生物生物量碳氮及酶活性的影响,以揭示不同秸秆还田方式与氮肥运筹对秸秆降解和土壤养分转化的机制,为该地区秸秆还田条件下氮素优化管理和高效节氮秸秆还田技术研发提供数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于辽宁省铁岭市调兵山市晓南镇(42°21'30" N, 123°36'12" E),属于中温带亚湿润季风大陆性气候,四季分明,雨热同季,日照充足,昼夜温差大,年均温度 7.0 °C,年均日照总数为 2 700 h,4—9 月有效日照总数 1 700 h,年均降水量 500~600 mm,无霜期 148 d,≥10 °C 有效积温 3 200 °C。供试土壤为中等肥力棕壤,试验前采集 0~20 cm 土层土样测定基础理化性质<sup>[11]</sup>,结果见表 1。

### 1.2 试验设计及样品采集

田间试验采用裂区设计,主区为秸秆还田方式(秸秆不还田、秸秆粉碎翻压还田(始于 2017 年)、秸秆堆腐旋耕还田(始于 2019 年)),副区为氮肥用量(180、210、240 kg/hm<sup>2</sup>,以纯氮计,下同);磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)、钾(K<sub>2</sub>O)肥用量分别为 90、90 kg/hm<sup>2</sup>;在此基础上,共设置 8 个处理:①秸秆不还田 + 化肥 N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O = 210-90-90(N14);②秸秆粉碎翻压还田 + 化肥 N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O = 180-90-90(SN12);③秸秆粉碎翻压还田 + 化肥 N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O = 210-90-90(SN14);④秸秆粉碎翻压还田 + 化肥 N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O = 240-90-90(SN16);⑤秸秆粉碎翻压还田 + 化肥 N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O = 210-90-90,其中秋季秸秆还田时后移施氮 30 kg/hm<sup>2</sup>(SN14HY);⑥秸秆堆腐旋耕还田 + 化肥 N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O = 180-90-90(DSN12);⑦秸秆堆腐旋耕还田 + 化肥 N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O = 210-90-90(DSN14);⑧秸秆堆腐旋耕还田 + 化肥 N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O = 240-90-90(DSN16)。小区面积 36 m<sup>2</sup>(10 m × 3.6 m),每个处理 3 次重复,随机区组排列。

表 1 供试土壤理化性质

Table 1 Physicochemical properties of tested brown soil

土壤类型	pH	有机质(g/kg)	全氮(g/kg)	全磷(g/kg)	全钾(g/kg)	碱解氮(mg/kg)	有效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)
棕壤	5.30	16.42	1.15	0.45	20.10	86.16	18.94	129.00

秸秆粉碎翻压还田:玉米收获后全部秸秆粉碎(5~6 cm)并均匀抛撒于田间覆盖地表,基于土壤墒情,秋季择时选用液压旋转犁进行深翻作业(深度 30~35 cm),春季播种前选用液压旋耕机进行浅旋作业

(深度 10~12 cm),起垄镇压(垄距 60 cm)。秸秆堆腐旋耕还田:玉米收获时顺便将粉碎秸秆(8~15 cm)通过运输车置于田间地头,堆之成垛(堆高≥80 cm),喷洒质量比约 5‰ 的具有知识产权的耐低温秸秆腐

解菌剂,进行秸秆发酵,开春时适时进行翻垡,播种前利用机械均匀撒至地表,并选用液压旋耕机进行浅旋作业(深度10~12 cm),起垄镇压(垄距60 cm)。

供试肥料以普通复合肥为主,必要时配以单质肥料(尿素(含N 460 g/kg)、磷酸二铵(含N 180 g/kg,  $P_2O_5$  460 g/kg)、氯化钾(含  $K_2O$  600 g/kg)),除 SN14HY 处理秋季秸秆粉碎还田时后移施氮 30 kg/hm<sup>2</sup> 外,其余处理所有肥料在播种时一次性施入。供试玉米品种为铁研 58,种植模式为人工垄播,行距 60 cm,株距 28 cm,种植密度每公顷约 60 000 株。每年约 4 月下旬至 5 月上旬播种,9 月下旬至 10 月上旬收获。2021 年度 4 月 25 日播种,10 月 7 日收获。其余田间管理方式均一致,并与当地农时习惯相符。

土壤样品采集于 2021 年,自 4 月 25 日播种开始,每隔 15 d 利用土钻采集 0~20 cm 土层样品。每小区随机采取 5 点,并混匀为 1 个土样,去除土壤中植物残体等杂质,置于自封袋中带回实验室,存放于 4℃ 冰箱用于测定土壤微生物生物量和酶活性。

### 1.3 测定指标及方法

土壤微生物生物量碳、氮 (MBC、MBN) 采用氯仿熏蒸- $K_2SO_4$  浸提法测定<sup>[11]</sup>; 土壤脲酶活性采用苯酚-次氯酸钠比色法测定<sup>[12]</sup>,其活性以 12 h 后 1 kg 土壤中的  $NH_3-N$  的质量(mg)表示; 土壤硝酸还原酶活性采用  $KNO_3$  培养-KCl 浸提比色法测定<sup>[13]</sup>,其活性以 24 h 后 1 g 土壤中的  $NO_2^-N$  的质量( $\mu g$ )表示。

### 1.4 数据处理

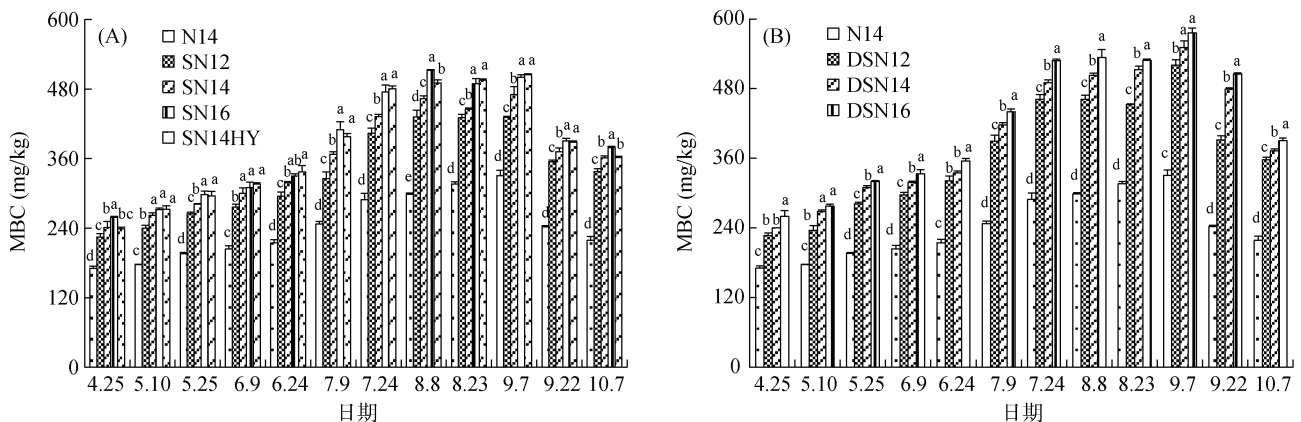
试验数据采用 WPS Office Excel 软件进行处理,采用 SPSS 19.0 软件进行统计分析,采用 Duncan's 法进行多重比较; 数值采用平均值  $\pm$  标准差的形式表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 秸秆还田与氮肥运筹交互下农田棕壤微生物生物量碳氮变化

秸秆还田配施氮肥处理土壤 MBC 含量为 170.72~575.95 mg/kg,其变化行为受生育时期、秸秆还田方式和施氮水平的多重制约(图 1)。与秸秆不还田(N14)处理相比,秸秆还田处理土壤 MBC 含量明显增加( $P<0.05$ )。随着生育期推进,秸秆还田处理土壤 MBC 含量先升高后降低,均于 8 月 8 日—9 月 7 日达到峰值,以 9 月 7 日的 DSN16 处理最高(575.95 mg/kg)。秸秆还田处理土壤 MBC 含量出现最高值的时间因运筹措施而异,除 SN12 和 SN16 处理在 8 月 8 日外,其余处理均在 9 月 7 日。秸秆还田处理土壤 MBC 含量随着施氮水平增加而增加,以施氮量 240 kg/hm<sup>2</sup> 时最高。秸秆还田处理土壤 MBC 含量随施氮水平的增加幅度受秸秆还田方式和生育时期的协同影响。秸秆粉碎翻压还田模式下,土壤 MBC 含量增加幅度为 10.04%~25.94%,平均为 14.92%; 秸秆堆腐旋耕还田模式下,土壤 MBC 含量增加幅度为 9.22%~28.88%,平均为 14.81%。与 SN14 处理相比,SN14HY 处理土壤 MBC 含量增加,平均增加幅度为 6.22%。

秸秆还田配施氮肥处理土壤 MBN 含量为 12.95~44.55 mg/kg,其变化行为同样受生育时期、秸秆还田方式和施氮水平的多重制约(图 2)。与 N14 处理相比,秸秆还田处理土壤 MBN 含量明显增加( $P<0.05$ )。随着生育期推进,秸秆还田处理土壤 MBN 含量呈双峰曲线变化,于 7 月 9 日/7 月 24 日和 9 月 7 日达到峰值,以 9 月 7 日的 SN14HY 处理最高(44.55 mg/kg),其次为 9 月 7 日的 DSN16 处理(39.98 mg/kg)。秸秆



(A: 秸秆粉碎翻压还田试验, B: 秸秆堆腐旋耕还田试验; 图中不同小写字母表示同一日期不同处理间差异显著 ( $P<0.05$ ); 下同)

图 1 秸秆还田与氮肥运筹交互下土壤微生物生物量碳含量

Fig. 1 Soil MBC content under interaction of straw returning and nitrogen application management

还田处理土壤 MBN 含量出现峰值的时间因运筹措施而异: N14 和 SN12 处理在 7 月 9 日和 9 月 7 日, SN14、SN16、DSN12、DSN14 和 DSN16 处理则在 7 月 24 日和 9 月 7 日。秸秆还田处理土壤 MBN 含量随施氮水平增加而增加, 以施氮量 240 kg/hm<sup>2</sup> 时最高。秸秆还田处理土壤 MBN 含量随施氮水平的增加幅度受秸

秆还田方式和生育时期的协同影响。秸秆粉碎翻压还田模式下, 土壤 MBN 含量增加幅度为 6.17% ~ 135.60%, 平均为 46.68%; 秸秆堆腐旋耕还田模式下, 土壤 MBN 含量增加幅度为 17.98% ~ 80.28%, 平均为 44.71%。与 SN14 处理相比, SN14HY 处理土壤 MBN 含量增加, 增加幅度为 2.19% ~ 30.25%。

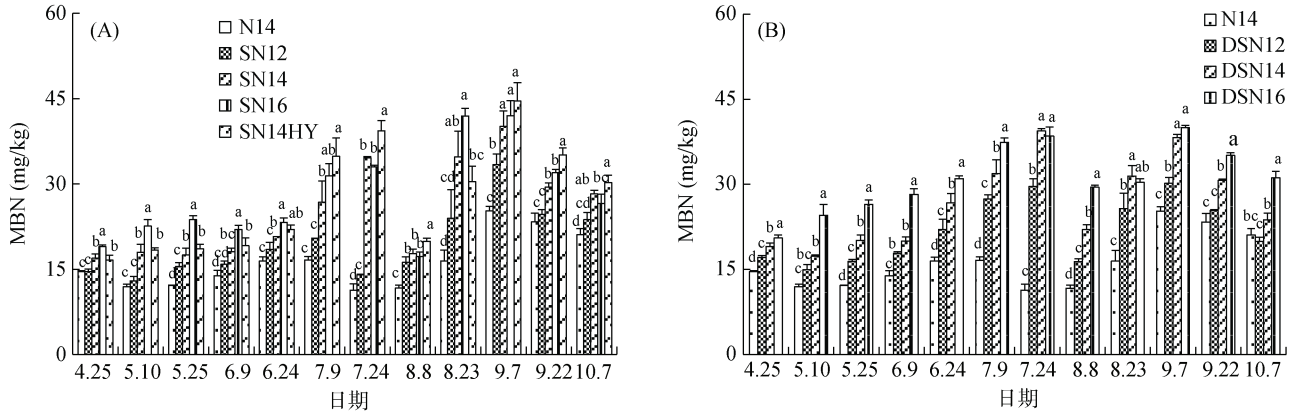


图 2 秸秆还田与氮肥运筹互动下土壤微生物量氮含量

Fig. 2 Soil MBN content under interaction of straw returning and nitrogen application management

秸秆还田配施氮肥处理土壤 MBC/MBN 比值为 10.40 ~ 29.83, 其变化行为受生育时期、秸秆还田方式和施氮水平的协同影响(图 3)。与 N14 处理相比, 秸秆还田处理土壤 MBC/MBN 比值明显增加( $P < 0.05$ )。随着生育期推进, 除 DSN16 处理呈现单峰(8 月 8 日)外, 其余秸秆还田处理土壤 MBC/MBN 比值总体均呈双峰曲线变化, 但出现峰值时间因运筹措施而异: N14 和 DSN12 处理在 5 月 25 日和 8 月 8 日, SN12 处理在 6

月 9 日和 7 月 24 日, SN14、SN14HY 和 DSN14 处理在 6 月 9 日和 8 月 8 日, SN16 处理在 6 月 24 日和 8 月 8 日。除秸秆粉碎翻压还田处理 8 月 8 日、秸秆堆腐旋耕还田处理 7 月 24 日和 8 月 23 日先降低后升高外, 其他秸秆还田处理土壤 MBC/MBN 比值均随施氮水平增加而降低, 以施氮量 240 kg/hm<sup>2</sup> 时最低。与 SN14 处理相比, 除 8 月 23 日升高外, SN14HY 处理土壤 MBC/MBN 比值总体呈降低趋势。

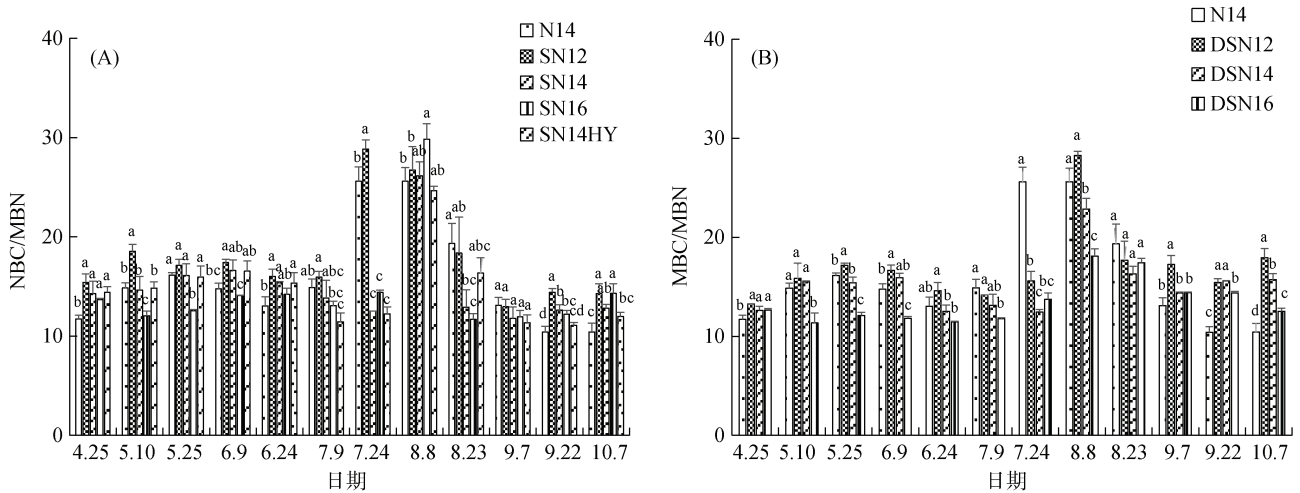


图 3 秸秆还田与氮肥运筹互动下土壤 MBC/MBN 比值

Fig. 3 Soil MBC/MBN ratio under interaction of straw returning and nitrogen application management

## 2.2 秸秆还田与氮肥运筹互动下农田棕壤氮代谢关键酶活性变化

秸秆还田配施氮肥处理土壤脲酶活性为 NH<sub>3</sub>-N

1 359.00 ~ 2 802.40 mg/(kg 干土·12 h), 其变化行为受生育时期、秸秆还田方式和施氮水平的协同影响(图 4)。与 N14 处理相比, 除个别处理个别日期外, 秸秆



还田处理土壤脲酶活性总体呈增加趋势。随着生育期推进, 秸秆还田处理土壤脲酶活性呈波动式变化, 但达到最高值时间因运筹措施而异: N14 处理在 9 月 7 日, SN12 和 DSN12 处理在 8 月 8 日, SN14、SN16 和 SN14HY 处理在 8 月 23 日, DSN14 处理在 5 月 10 日, DSN16 处理在 5 月 25 日, 说明秸秆堆腐旋耕还田能够提高春玉米生育前期土壤脲酶活性, 而秸秆粉碎翻压还田能够提高生育中后期土壤脲酶活性。秸秆粉碎翻压还田模式下, 除 8 月 8 日先增加后降低和 10 月 7 日先降低后增加外, 其余处理土壤脲酶活性均随施氮水平增加而增加; 秸秆堆腐旋耕还田模式下, 除 8 月 8 日降低和 6 月 9 日先降低后增加外, 其余处理土壤脲酶活性随施氮水平增加均呈现增加或先增加后降低的趋势。与 SN14 处理相比, 除 5 月 25 日、8 月 23 日、9 月 22 日和 10 月 7 日增加外, SN14HY 处理其余时期土壤脲酶活性均呈降低趋势。

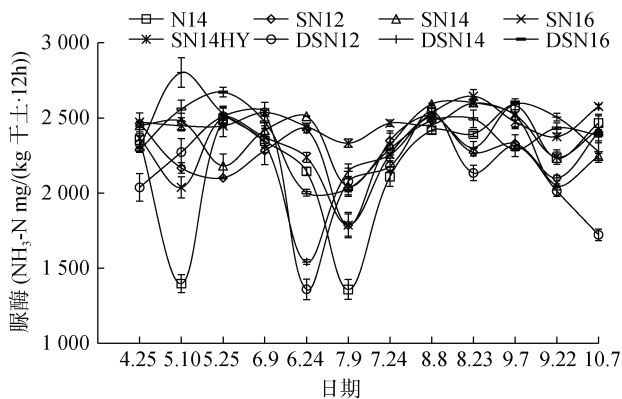


图4 秸秆还田与氮肥运筹互作下土壤脲酶活性

Fig. 4 Soil urease activity under interaction of straw returning and nitrogen application management

秸秆还田配施氮肥处理土壤硝酸还原酶活性为  $\text{NO}_2\text{-N}$   $0.05 \sim 2.36 \mu\text{g}/(\text{g}$  干土 $\cdot 24 \text{h})$ , 其变化行为受生育时期、秸秆还田方式和施氮水平的协同影响(图 5)。与 N14 处理相比, 秸秆还田处理土壤硝酸还原酶活性无规律性变化。随着生育期推进, 秸秆还田处理土壤硝酸还原酶活性呈波动式变化, 但出现最高值时间因运筹措施而异: N14 处理在 5 月 10 日, DSN16 处理在 9 月 7 日, 其余处理均在 7 月 24 日。秸秆粉碎翻压还田模式下, 除 5 月 25 日、7 月 9 日和 10 月 7 日降低外, 其余处理土壤硝酸还原酶活性均随施氮水平增加而增加; 秸秆堆腐旋耕还田模式下, 除 7 月 24 日降低外, 其余处理土壤硝酸还原酶活性随施氮水平增加呈现增加或先增加后降低的趋势。与 SN14 处理相比, 除 7 月 9 日、7 月 24 日和 10 月 7 日降低

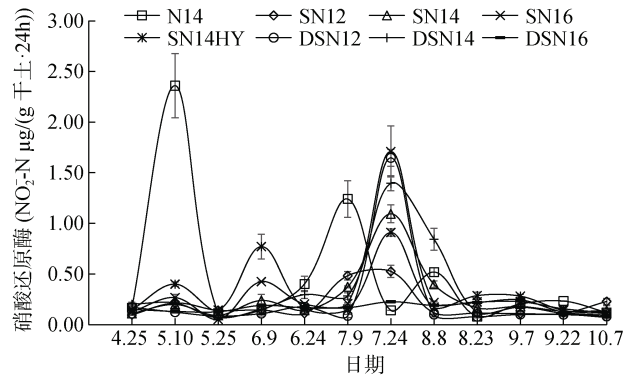


图5 秸秆还田与氮肥运筹互作下土壤硝酸还原酶活性

Fig. 5 Soil nitrate reductase activity under interaction of straw returning and nitrogen application management

外, SN14HY 处理其余时期土壤硝酸还原酶活性均呈增加趋势。

### 3 讨论

#### 3.1 秸秆还田与氮肥运筹对土壤微生物生物量碳氮的影响

秸秆还田配施氮肥是实现秸秆高效资源化、加速秸秆分解与养分释放、平衡土壤碳氮收支及培肥增产的有效措施<sup>[14]</sup>, 在旱作雨养区持续施用化肥的春玉米农田, 秸秆还田对土壤的影响更加显著<sup>[15]</sup>。本研究中, 秸秆还田处理 0~20 cm 土层 MBC、MBN 含量均高于秸秆不还田处理(图 1、图 2), 这与 Zhao 等<sup>[16]</sup>的研究结果相同。秸秆养分是提高土壤有机碳的重要来源, 外源碳的持续输入能够激发土壤微生物活性, 加强微生物矿化和固定过程, 促进秸秆中碳氮在土壤中的积累<sup>[17]</sup>。在质地为壤黏土的辽北旱地农田, 秸秆还田使土壤通气性增加, 加速了土壤微生物呼吸作用, 使土壤微生物生物量提高<sup>[18]</sup>。本研究还表明, 不同秸秆还田方式对土壤微生物生物量的影响存在差异, 总体看来, 秸秆堆腐旋耕还田有利于增加土壤 MBC 含量, 而秸秆粉碎翻压还田有利于增加土壤 MBN 含量(图 1、图 2), 这主要因为秸秆堆腐加速了秸秆腐解, 促进更多秸秆降解为小分子有机质, 且春季还田后旋耕主要是将秸秆混合于表层土壤, 温度高, 通气性好, 进一步加快了秸秆降解, 使土壤微生物所需的物质和能源增加, 极大地促进微生物活性, 同化进程加强, 从而使 MBC 增多<sup>[19]</sup>; 秸秆粉碎翻压还田主要在秋季玉米收获后进行, 大量粉碎秸秆输入土壤, 增加了土壤中的有机物料, 氧气充沛的土壤条件加速其分解, 有利于氮素固存, 使 MBN 含量增加<sup>[15]</sup>。

玉米根系分泌物及残体是影响土壤微生物的重

要因素<sup>[20]</sup>。本研究发现,随着生育时期推进,秸秆还田处理土壤 MBC 和 MBN 含量分别呈现单峰和双峰的变化趋势,出现峰值时间均在春玉米旺盛生长期(拔节期至灌浆期)(图 1、图 2),这与刘子刚等<sup>[15]</sup>的研究结果相同。玉米营养旺盛生长期根系活力增加,根系分泌物为土壤微生物提供丰富的能量和源料,同时根系能够为微生物提供载体,优化土壤微生物生存环境,促进微生物新陈代谢,进而提高土壤微生物生物量<sup>[21]</sup>。氮素运移和调控直接决定还田秸秆的分解和养分释放速率<sup>[22]</sup>。研究表明,在秸秆还田条件下,一方面作物生育前期土壤中秸秆会争夺部分活性氮素;另一方面随着土壤微生物对秸秆的逐步分解,秸秆养分逐渐释放可以供作物吸收利用<sup>[23]</sup>。本研究表明,秸秆还田处理土壤 MBC、MBN 含量均随施氮水平增加而增加,以施氮量 240 kg/hm<sup>2</sup> 时最佳(图 1、图 2),这与侯贤清等<sup>[22]</sup>的研究结果相近。究其原因可能是秸秆还田配施适量氮肥更有利于调整土壤 C/N,进而促进微生物增殖及分解更多有机质,为微生物提供充足碳源,进一步促进微生物繁殖,从而增加土壤微生物量<sup>[24]</sup>。

MBC/MBN 比值可反映土壤微生物群落结构信息,其显著变化可以表明微生物群落结构变化,直接影响着土壤微生物生物量的高低<sup>[25]</sup>。一般认为,细菌的 C/N 在 5:1 左右,放线菌在 6:1 左右,而真菌在 10:1 左右<sup>[26]</sup>。本研究中,秸秆不还田(N14)处理土壤 MBC/MBN 比值较大,维持在 10.40~25.60(图 3),说明农田棕壤微生物群落以真菌为主。同时,MBC/MBN 比值还可以反映土壤氮素的供应能力,其比值较小时土壤氮素的生物有效性较高,表明土壤氮素利用率高<sup>[27]</sup>。本研究表明,与秸秆不还田(N14)处理相比,秸秆还田处理土壤 MBC/MBN 比值明显增加(图 3),这与还田秸秆为土壤微生物提供了充足碳源,进而调节土壤 C/N 有关。总体来看,秸秆还田处理土壤 MBC/MBN 比值随施氮水平增加呈降低趋势(图 3),这是因为外源氮素的输入提高了可利用氮素,促进了土壤氮素的矿化作用,从而对土壤微生物区系有明显的促进作用<sup>[28]</sup>。秸秆粉碎翻压还田模式下适量氮肥后移能够降低土壤 MBC/MBN 比值(图 3),这是因为在保证氮肥总量不变的前提下,适量氮肥后移至秸秆粉碎翻压还田时施用,可以协调秸秆腐解对氮素的需求,优化氮素供应<sup>[5]</sup>。

### 3.2 秸秆还田与氮肥运筹对土壤氮代谢关键酶活性的影响

土壤酶作为一个敏感指标,能够反映土壤质量在

时间序列或各种不同条件下的变化,其活性受到施肥种类、施肥量、作物种类、环境条件等因子的影响<sup>[29]</sup>。本研究结果表明,与秸秆不还田(N14)处理相比,秸秆还田处理土壤脲酶活性总体呈增加趋势,而硝酸还原酶活性无规律性变化(图 4、图 5),这与侯贤清等<sup>[22]</sup>的研究结果相似。秸秆还田处理土壤脲酶和硝酸还原酶活性随施氮水平增加的变化行为因还田方式而异:秸秆粉碎翻压还田模式下总体呈增加趋势,秸秆堆腐旋耕还田模式下总体呈增加或先增加后降低的趋势(图 4、图 5),这是因为在秸秆还田条件下,土壤 C/N 调控在适宜的范围内有利于提高微生物量及其活性,进一步提高土壤酶在内的分泌物数量,从而提高土壤酶活性<sup>[7]</sup>。同时,与秸秆粉碎翻压还田相比,秸秆堆腐旋耕还田由于还田时秸秆腐解程度更高,且春季还田后旋耕主要是将秸秆混合于表层土壤,温度高,通气性好,进一步加快了秸秆降解,使春玉米生长前期土壤微生物所需的能源物质增加,诱导微生物分泌的酶增加,酶活性增强,而随着秸秆进一步降解,可利用能源物质逐渐减少,微生物生长逐渐衰退,酶活性降低<sup>[24]</sup>。

本研究表明,随着生育期推进,秸秆还田处理土壤脲酶和硝酸还原酶活性均呈波动式变化,虽然出现峰值时间因秸秆还田与氮肥运筹方式而异,但总体均出现于春玉米旺盛生长期(图 4、图 5)。这是因为玉米旺盛生长期根系活力增加,根系分泌物为土壤微生物及酶活性提供丰富的能量和源料,同时根系能够为酶提供载体,优化土壤微生物生存环境,促进微生物新陈代谢,进而提高土壤酶活性<sup>[20-21]</sup>。周文新等<sup>[30]</sup>研究表明,秸秆还田有利于土壤微生物群落结构和功能改善,显著提高了土壤微生物群落代谢能力和功能多样性。但对于秸秆还田配施氮肥改善土壤酶和微生物群落的机理,以及秸秆还田腐解的最优 C/N 仍需继续试验探究。

## 4 结论

秸秆还田配施氮肥显著影响农田棕壤微生物生物量和酶活性,其作用行为受秸秆还田方式、施氮水平和生育时期的多重制约。两种秸秆还田方式配以施氮均能提高土壤 MBC、MBN 含量及其比值和脲酶活性。秸秆还田处理土壤 MBC、MBN 含量及其比值、脲酶和硝酸盐还原酶活性随生育时期变化行为不同,但高峰期均出现在春玉米旺盛生长期(拔节期至灌浆期)。在保证氮肥总量不变前提下,15% 氮肥后移至秸秆粉碎还田时施用,通过优化土壤 C/N,明显提升

了土壤碳氮固存效果。综合考虑秸秆还田方式、微生物生物量碳氮、氮代谢关键酶活性和氮肥运筹等因子,在本试验条件下,秸秆粉碎翻压还田 + 210 kg/hm<sup>2</sup> 氮肥 + 15% 氮肥后移至秸秆还田时施用的管理模式在东北农业产区较易推广应用,可以提高土壤碳氮固存,改善土壤质量,降低农业机械的运营成本,对于促进东北旱地农业可持续发展具有重要意义。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Hu N J, Wang B J, Gu Z H, et al. Effects of different straw returning modes on greenhouse gas emissions and crop yields in a rice-wheat rotation system[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 223: 115–122.
- [3] 张静,温晓霞,廖允成,等. 不同玉米秸秆还田量对土壤肥力及冬小麦产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3): 612–619.
- [4] 王威,唐蛟,殷金忠,等. 秸秆全量还田配施沼液对砂姜黑土水稳性团聚体及结合有机碳的影响[J]. 土壤, 2023, 55(1): 53–61.
- [5] 高日平,赵沛义,韩云飞,等. 秸秆还田与氮肥运筹对土壤水碳氮耦合及作物产量的影响[J]. 土壤, 2021, 53(5): 952–960.
- [6] Bennett A E, Grussu D, Kam J, et al. Plant lignin content altered by soil microbial community[J]. *The New Phytologist*, 2015, 206(1): 166–174.
- [7] 李涛,何春娥,葛晓颖,等. 秸秆还田施氮调节碳氮比对土壤无机氮、酶活性及作物产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(12): 1633–1642.
- [8] 巨晓棠,谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 783–795.
- [9] 高永祥,李若尘,张民,等. 秸秆还田配施控释掺混尿素对玉米产量和土壤肥力的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1507–1519.
- [10] 韩新忠,朱利群,杨敏芳,等. 不同小麦秸秆还田量对水稻生长、土壤微生物生物量及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(11): 2192–2199.
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [12] 关松阴. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [13] Kandeler E, Eder G, Sobotik M. Microbial biomass, N mineralization, and the activities of various enzymes in relation to nitrate leaching and root distribution in a slurry-amended grassland[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1994, 18(1): 7–12.
- [14] 杨滨娟,钱海燕,黄国勤,等. 秸秆还田及其研究进展[J]. 农学学报, 2012, 2(5): 1–4, 28.
- [15] 刘子刚,卢海博,赵海超,等. 旱作区春玉米秸秆还田方式对土壤微生物量碳氮磷及酶活性的影响[J]. 西北农业学报, 2022, 31(2): 183–192.
- [16] Zhao S C, Li K J, Zhou W, et al. Changes in soil microbial community, enzyme activities and organic matter fractions under long-term straw return in north-central China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 216: 82–88.
- [17] Liu X, Zhou F, Hu G Q, et al. Dynamic contribution of microbial residues to soil organic matter accumulation influenced by maize straw mulching[J]. *Geoderma*, 2019, 333: 35–42.
- [18] Bulgarelli D, Schlaeppi K, Spaepen S, et al. Structure and functions of the bacterial microbiota of plants[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2013, 64: 807–838.
- [19] Zhao S C, Qiu S J, Xu X P, et al. Change in straw decomposition rate and soil microbial community composition after straw addition in different long-term fertilization soils[J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, 138: 123–133.
- [20] 刘霜,张心昱. 不同植物根际土壤碳氮水解酶活性热点区的空间分布特征[J]. 生态学报, 2020, 40(13): 4462–4469.
- [21] Zuber S M, Villamil M B. Meta-analysis approach to assess effect of tillage on microbial biomass and enzyme activities[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 97: 176–187.
- [22] 侯贤清,李荣,吴鹏年,等. 秸秆还田配施氮肥对土壤碳氮含量与玉米生长的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 238–246.
- [23] 蒋永梅,师尚礼,田永亮,等. 高寒草地不同退化程度下土壤微生物及土壤酶活性变化特征[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 244–249.
- [24] 刘骁蓓,涂仕华,孙锡发,等. 秸秆还田与施肥对稻田土壤微生物生物量及固氮菌群落结构的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(17): 5210–5218.
- [25] 房焕,李奕,周虎,等. 稻麦轮作区秸秆还田对水稻土结构的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 297–302.
- [26] 郭策,赵兴敏,王楠,等. 秸秆还田配施氮肥对黑钙土有机碳及微生物量碳氮的影响[J]. 河南农业大学学报, 2022, 56(1): 21–30.
- [27] 王丽娜,罗久富,杨梅香,等. 氮添加对退化高寒草地土壤微生物量碳氮的影响[J]. 草业学报, 2019, 28(7): 38–48.
- [28] 代迪,字洪标,杨有芳,等. 高寒草甸土壤微生物功能多样性对氮肥添加的响应[J]. 水土保持研究, 2018, 25(2): 137–144.
- [29] 庞荔丹,孟婷婷,张宇飞,等. 玉米秸秆配氮还田对土壤酶活性、微生物量碳含量及土壤呼吸量的影响[J]. 作物杂志, 2017(1): 107–112.
- [30] 周文新,陈冬林,卜毓坚,等. 稻草还田对土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 环境科学学报, 2008, 28(2): 326–330.