

许明敏, 冯金侠, 陈卫平, 等. 秸秆集中沟埋还田对土壤氮素分布及微生物群落的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(10): 1960-1967.

XU Ming-min, FENG Jin-xia, CHEN Wei-ping, et al. Effects of ditch-buried straw return on nitrogen distribution and microbial community in the straw-soil interface[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(10): 1960-1967.

## 秸秆集中沟埋还田对土壤氮素分布及微生物群落的影响

许明敏<sup>1</sup>, 冯金侠<sup>2</sup>, 陈卫平<sup>2</sup>, 杨海水<sup>2</sup>, 刘建<sup>3</sup>, 卞新民<sup>2\*</sup>, 陆巍<sup>1\*</sup>

(1.南京农业大学生命科学学院, 南京 210095; 2.南京农业大学农学院, 南京 210095; 3.江苏沿江地区农业科学研究所, 江苏南通 226541)

**摘要:** 秸秆集中沟埋还田(DB-SR)是一种新型土壤耕作方式,能够形成特殊的“秸秆层”结构。通过研究秸秆层及其界面土壤的氮素含量和微生物群落结构,以期阐明秸秆层对土壤氮素分布以及微生物群落的影响。设置秸秆沟埋还田深度为20 cm、40 cm以及对照(秸秆不还田)3个处理,测定秸秆层及其界面土层( $\pm 5$  cm)的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量,分析微生物量碳(MBC)及群落结构特征。研究发现,“秸秆层”对氮素具有滞留作用,并能够持续60个月。在20 cm埋深下,秸秆层提高了其界面上下土层的MBC,但对多样性指数的影响不显著;在40 cm埋深下,水稻秸秆层界面土壤MBC随时间先减小后增大,多样性指数随时间延长而增加;小麦秸秆层界面土壤MBC随时间先增大后减小,多样性指数随时间先减小后增大。微生物群落碳源利用主成分分析表明,秸秆层微生物能很好地利用各类碳源,其界面土壤的微生物代谢活性也比CK处理有所提高。对应分析表明,小麦秸秆在20 cm埋深下, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 与界面土壤微生物群落具有相关性,MBC与秸秆层微生物群落显著相关;在40 cm埋深下, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和MBC与秸秆层微生物群落变异显著相关。综上可知,“秸秆层”能有效滞留氮素,减少土壤氮素淋失,增加土壤微生物群落功能多样性。

**关键词:** 秸秆沟埋还田; 秸秆层; 氮素分布; 土壤微生物

中图分类号: X712 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2016)10-1960-08 doi:10.11654/jaes.2016-0533

### Effects of ditch-buried straw return on nitrogen distribution and microbial community in the straw-soil interface

XU Ming-min<sup>1</sup>, FENG Jin-xia<sup>2</sup>, CHEN Wei-ping<sup>2</sup>, YANG Hai-shui<sup>2</sup>, LIU Jian<sup>3</sup>, BIAN Xin-min<sup>2\*</sup>, LU Wei<sup>1\*</sup>

(1. College of Life Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. College of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 3. Institute of Agricultural Science along Yangtze River in Jiangsu, Nantong 226541, China)

**Abstract:** Ditch-buried straw return (DB-SR) is a novel soil tillage practice which forms a special "straw layer" structure. In order to elaborate the role of straw layer on soil nitrogen distribution and microbial community, a field experiment was conducted under DB-SR with three burial depths (20 cm: DB-SR-20; 40 cm: DB-SR-40 and CK).  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ , microbial biomass carbon (MBC) and community level physiological profile (CLPP) were determined in the straw layer and its interface soil layers under different treatments. Results showed that the structure of "straw layer" had positive effect on nitrogen retentions. In DB-SR-20, the straw layer increased MBC at the interface of straw layer, but no significant effect was found for the functional diversity. In DB-SR-40, MBC decreased at first and then increased at the interface of rice straw layer, but the pattern was reversed for wheat straw layer. Microbial diversity index ( $H$ ) increased for rice straw but decreased at first and then increased for wheat straw layer over time. CLPP suggested that the microorganisms of straw layer could utilize various carbon sources, and their metabolic activity was higher than CK. In DB-SR-20 for wheat straws,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  were significantly related to variation of microbial community in the straw-soil interface, but MBC was correlated to the microbial community in the straw layers. In DB-SR-40,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  and MBC were significantly correlated to the variation of microbial communities in the straw layers. This study suggested that the "straw layer" could effectively increase soil N retention, and increase the functional diversity of soil microbial community.

**Keywords:** ditch-buried straw returning; straw layer; nitrogen distribution; soil microorganisms

收稿日期: 2016-04-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(31400373); 南通市科技计划关键技术研究项目(MS22015040)

作者简介: 许明敏(1989—), 男, 江西赣县人, 硕士研究生。E-mail: 2013116030@njau.edu.cn

\* 通信作者: 卞新民 E-mail: bjxlm1@163.com; 陆巍 E-mail: luw@njau.edu.cn

秸秆还田一直是循环农业的研究热点。研究表明,秸秆还田能够有效改善农田土壤生态过程<sup>[1]</sup>。传统秸秆还田大多采取秸秆切碎后旋耕还田的方式,而这种还田方式会对作物产生不利影响<sup>[2]</sup>。例如,秸秆集中在土壤浅层,秸秆腐解导致微生物与作物根系竞争氮素,影响作物苗期生长<sup>[3]</sup>。因此,许多学者对此提出质疑,并积极探讨解决策略<sup>[4]</sup>。目前,已有研究者提出了“秸秆深还(CSDI)”,该还田方式在解决玉米秸秆难以处理的同时有效地改善了土壤状况<sup>[5-6]</sup>。

针对稻麦轮作区,本课题组提出了秸秆集中沟埋还田<sup>[7]</sup>。秸秆集中沟埋还田是一种将当季收获的作物秸秆以秸秆全量集中埋于占全田面积10%的深沟中,通过逐季轮换挖沟位置,实现全田渐进式深翻的新型土壤耕作技术。由于秸秆集中深埋,秸秆腐解速率迅速降低,一定时间内秸秆得以保留在土壤中,形成特殊“秸秆层”结构。秸秆的性质异于其邻近土层,有研究表明,秸秆对土壤氮素有较好的拦截效果<sup>[8]</sup>。因此,通过研究大田试验的秸秆层及其界面土层有效态氮素的分布情况,有助于理解在生产中秸秆层结构的实际作用。土壤微生物是土壤生态系统平衡的关键因素,对土壤中有有机物、养分的转化和循环起重要作用<sup>[9]</sup>,与作物生长也有很大联系<sup>[10]</sup>,输入的秸秆在腐解过程中对微生物群落结构、功能和演替变化规律起着重要调控作用<sup>[11]</sup>。因此,分析秸秆层际土壤微生物群落结构及功能,对理解集中沟埋还田影响土壤生态过程及阐明作物增产机理非常重要。

本文通过研究秸秆层及其界面土层的氮素分布和微生物群落结构的状况,阐明秸秆集中沟埋还田中“秸秆层”在土壤氮素分布方面的作用,以及土壤微生物群落对秸秆集中沟埋还田的响应情况。旨在为该新型秸秆还田技术提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验始于2008年11月,在南通市农科院试验田进行,试验开始的前茬作物为水稻。供试土壤类型为潮土,0~20 cm土壤主要理化性质:容重 $1.40 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,总孔隙度47.07%,毛管孔隙度40.46%,有机质 $20.45 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,总氮 $1.62 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,速效磷 $12.75 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,速效钾 $44.41 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,pH 7.5。

### 1.2 试验设计

设置三个处理:还田深度为20 cm(DB-SR-20)、40 cm(DB-SR-40)以及免耕不还田(CK),每个处理重复三次。小区面积为 $3 \text{ m}\times 6 \text{ m}$ ,每个小区设三条相同埋草沟,沟间距为2 m,沟宽0.2 m,沟长3 m。第1条埋草沟埋入2008年10月收获的水稻秸秆,第2条埋草沟埋入2009年6月收获的小麦秸秆,两条沟间距为1 m,埋草沟开挖及轮换次序如图1所示。当小区预定埋草沟全部埋完时,从第1条埋草沟重新开始,即完成一个周期(5年)。以当地水稻秸秆量 $10\,000 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,小麦秸秆量 $5\,000 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 为参照还田量,折算为水稻秸秆沟埋量为 $6 \text{ kg}\cdot\text{沟}^{-1}$ ,小麦 $3 \text{ kg}\cdot\text{沟}^{-1}$ 。覆土完毕,对全田地面进行浅旋(约5 cm)。试验采用稻麦两熟种植制度,水稻品种为南粳44,小麦品种为扬麦13。田间管理按当地常规生产管理。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 采样方法

于2014年6月小麦收获后,在试验区开挖剖面,每条埋草沟取样,以秸秆层为0参照,分别采集DB-SR-20和DB-SR-40的秸秆层及其上下0~5 cm土层样品;对照样品采自与DB-SR-20和DB-SR-40相同深度土层。每条埋草沟采集三个样品并混合,三次重

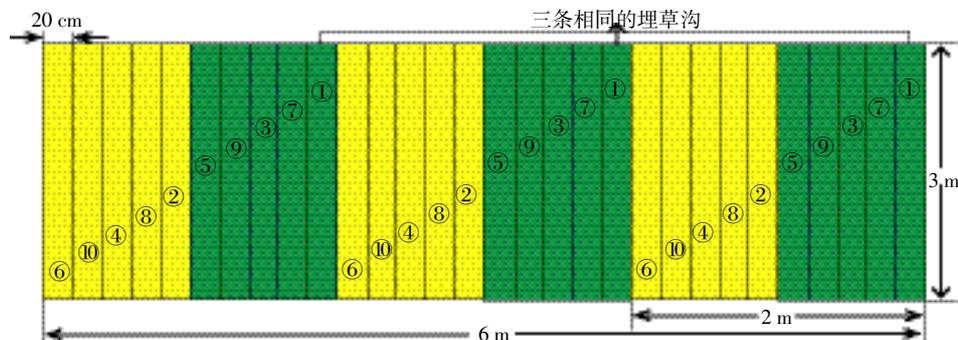


图1 小区埋草沟示意图

Figure 1 Straw ditch distribution in experimental plot

复。一部分鲜土存于4℃冰箱,用于土壤微生物群落分析;另一部分土样风干后测定土壤氮素。

### 1.3.2 测定方法

采用纳氏试剂比色法<sup>[12]</sup>测定 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,双波长分光光度法<sup>[13]</sup>测定 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 。选取埋入水稻秸秆6、30、54个月以及小麦秸秆12、36、60个月的埋草沟样品,用Biolog EcoPlate™法<sup>[14]</sup>分析微生物群落特征(秸秆层对照为生理盐水),氯仿熏蒸浸提法<sup>[15]</sup>测定MBC。

### 1.4 数据分析

实验数据用Microsoft Excel 2013进行整理,用SPSS 22以及R-3.3.0进行分析,用Origin 8.0绘制图表。本文图表中的误差线表示测定重复值的标准偏差,不同小写字母表示差异显著(单因素方差分析,LSD多重比较, $P<0.05$ )。

香农多样性指数( $H$ )按下式计算:

$$H = - \sum P_i \cdot \ln P_i$$

$P_i$  = 每个孔吸光度/所有吸光度之和<sup>[14]</sup>

将Biolog EcoPlate™中的31种碳源分为6类后,依据微生物对碳源的利用情况进行主成分分析(Principal component analysis, PCA),加入环境因子 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 和MBC进行对应分析(Correspondence analysis, CA)。其中PCA及CA均采用R语言的Vegan 2.3-5软件包<sup>[16]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤氮素分布情况

DB-SR-20处理的水稻秸秆层 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 含量随还田时间显著降低,42个月后其含量低于其界面土层,在DB-SR-40处理中也呈下降趋势,但其间有稳定的时期,54个月后仍高于其界面土壤层。在DB-SR-20处理中,秸秆层界面土层的 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 含量显著大于CK,界面以上最低也比CK高169.71%,界面以下最低比CK高181.26%;秸秆界面土层 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 含量随还田时间增加逐渐增加,还田54个月与6个月差异显著,界面上土层相差13.67%,界面下土层相差24.60%。在DB-SR-40处理中,不同时期秸秆界面上下土层之间无显著差异,与CK也无显著差异(图2a、图2b)。

小麦秸秆层 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 含量随还田时间波动变化,DB-SR-40处理比DB-SR-20处理高。在DB-SR-20处理中有三个时期低于界面土层,还田36个月时相差最大,比上下土层分别降低48.12%和44.43%;在

DB-SR-40处理中均显著高于界面土层,还田60个月时相差最小,比界面上下土层分别高225.81%和243.86%。不同时期秸秆界面土层之间的 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 含量无显著差异,DB-SR-20处理秸秆界面上土层最低比CK高出169.43%,下土层最低比CK高出157.89%,而DB-SR-40处理的秸秆界面土层 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 含量与CK差异不显著(图2c、图2d)。

水稻秸秆层 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 含量在DB-SR-20与DB-SR-40处理中随还田时间波动较大,均比其界面土层的高(图2e、图2f)。DB-SR-20处理各时期秸秆界面土层的 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 含量差异不显著,与CK也无显著差异;在DB-SR-40中,各时期秸秆界面上土层的 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 含量无显著差异,并且显著高于CK,但秸秆界面下土层在还田6个月时低于其他时期及CK。

综合看来,小麦秸秆层及其界面土层 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 含量在DB-SR-20和DB-SR-40处理中随深度依次降低(图2g、图2h)。DB-SR-20处理秸秆层的 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 含量随还田时间先增后减,还田12个月和60个月时低于其界面土层,中间时期介于上下土层之间;秸秆界面上土层在还田12个月时显著高于CK,其余时期与CK差异不显著,而下土层均显著高于CK;DB-SR-40处理中秸秆层与界面上土层的 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 含量随还田时间先减后增,且界面上土层均显著高于CK,秸秆界面下土层在还田12个月和36个月时显著高于CK,其余时期与CK无显著差异。

### 2.2 微生物群落

#### 2.2.1 微生物量碳(MBC)和香农多样性指数

水稻秸秆层际MBC和香农多样性指数如表1所示。DB-SR-20处理不同时期秸秆层MBC均比其界面土层高,还田6个月时界面上土层显著高于其他时期及CK;秸秆层与界面下土层的MBC均随时间显著减小,下土层显著大于CK。DB-SR-40处理的秸秆层与其界面上土层的MBC含量差异较小,均显著高于下土层;秸秆层MBC随还田时间先增后减,界面土层的变化规律相反,但显著高于CK。DB-SR-20和DB-SR-40处理各时期秸秆层的微生物多样性指数差异不显著,均高于其界面土层,DB-SR-20处理秸秆界面土层与CK无显著差异,DB-SR-40处理秸秆界面上土层在还田6个月时低于其他时期及CK,下土层均显著高于CK。

小麦秸秆层际MBC和香农多样性指数如表1所示。DB-SR-20处理秸秆层与其界面土层的MBC随还田时间变化显著,秸秆层与界面上土层先减后增,

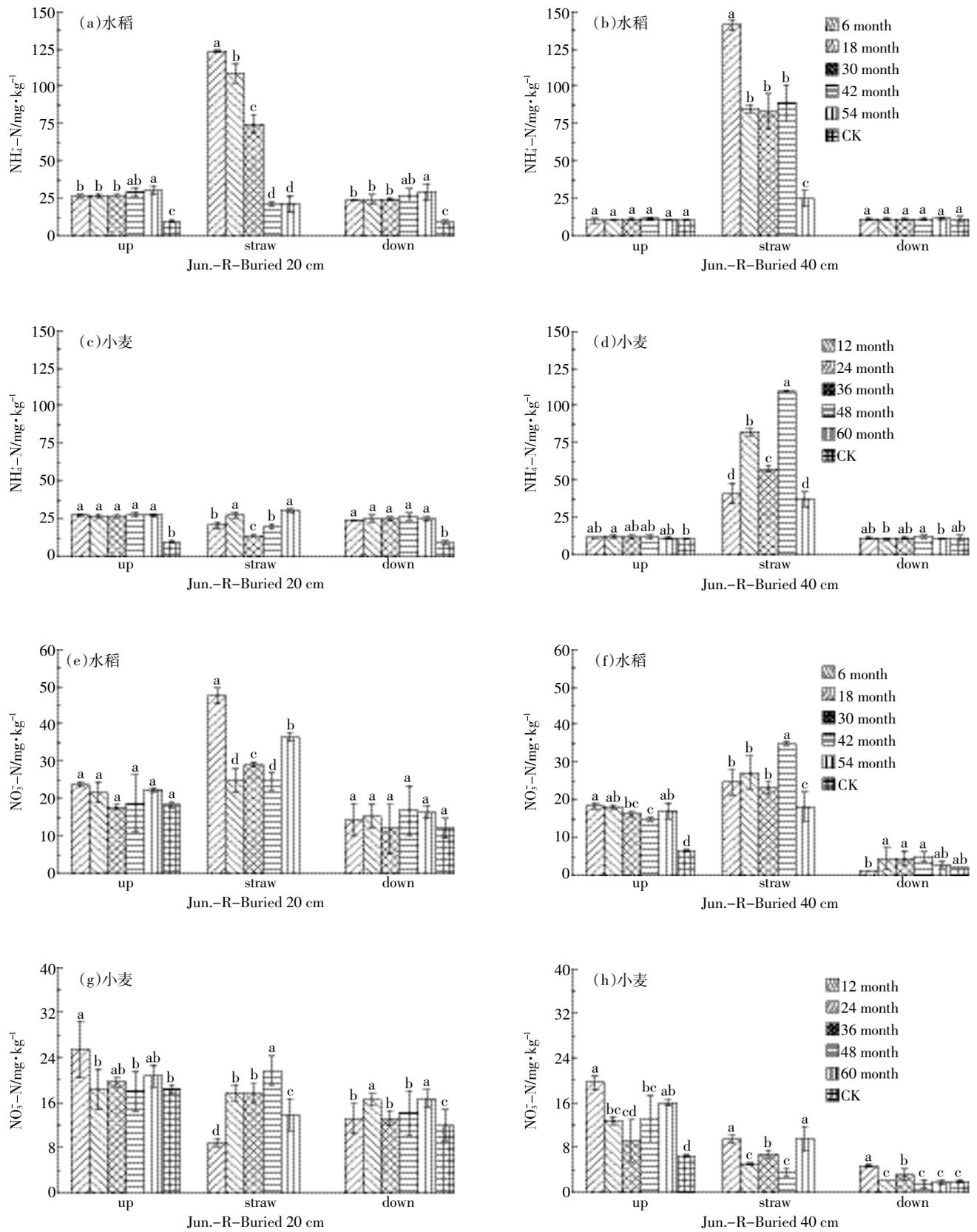


图2 不同时期水稻(a-b、e-f)和小麦(c-d、g-h)秸秆层及其界面土层的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  与  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量

Figure 2  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  in the straw layer of rice(a-b、e-f) and wheat(c-d、g-h) as well as their neighbor soil layers under DB-SR-20 and DB-SR-40 with different decomposing time

界面下土层变化规律相反,均显著高于CK;DB-SR-40处理秸秆层的MBC随还田时间显著增加,界面土层的MBC随还田时间先增后减,均显著高于CK。DB-SR-20和DB-SR-40处理各时期秸秆层的微生物多样性指数差异不显著,均高于其界面土层。DB-SR-20处理各时期秸秆界面土层的微生物多样性指数无显著变异,与CK亦无显著差异;DB-SR-40处理秸秆界面土层的微生物多样性指数随还田时间先减后增,变化显著,还田36个月时界面土层微生物多样性指数显著低于CK,在还田60个月后恢复到对照水平。

### 2.2.2 微生物的群落主成分分析及其与 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 和MBC的相关性

水稻秸秆层与其界面土层的微生物群落存在显著分异。秸秆层样点分布在PC1正方向,DB-SR-20处理的样点随还田时间在PC2方向变化显著(图3a),而DB-SR-40处理的样点相对集中(图3b);两个埋深处理的秸秆界面土层的样点都主要分布在PC1负方向且较为集中。各类碳源在PC1和PC2上的贡献得分(表2)表明秸秆层的微生物均能较好地利用各类碳源,其中DB-SR-20处理的秸秆层微生物对各类碳源的利用偏好随还田时间发生了显著变化,由开始的糖类转为氨基酸类,最后恢复平衡。界面土层微生物代谢活性要弱于秸秆层微生物,但均强于CK,对碳源的利用偏好也无显著的变化。微生物群落与N素以及MBC的对应分析发现,在DB-SR-20与DB-SR-40处理中, $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 和MBC均与秸秆层微生物群落有较强的相关性, $\text{NO}_3^--\text{N}$ 的作用最大,与界面

土层的微生物群落负相关,并且与CK距离最远。

小麦秸秆层与其界面土层的微生物群落也分异显著。秸秆层样点在PC1正方向,分布特点也是随还田时间的变化样点在DB-SR-20处理中比DB-SR-40处理分异更大;不同的是,DB-SR-20处理中小麦秸秆层微生物样点随还田时间的延长逐渐从PC2正方向移至负方向(图3c)。碳源在PC1和PC2上的贡献得分说明,小麦秸秆层微生物在初期偏向于利用糖类,后随还田时间的延长逐渐转变为其他类的碳源。界面土层的样点主要集中在负方向,微生物群落的代谢活性比CK强,在成分坐标系中无显著分异。微生物群落与MBC以及土壤环境中的N素对应分析发现;在DB-SR-20处理中,MBC与秸秆层微生物群落对应相关,N素与界面土层的群落对应相关;在DB-SR-40处理中,秸秆层微生物群落与 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 和MBC均对应相关,还田时间较短的与 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 有较强的对应关系,而界面土层微生物群落与MBC及N素负相关。

### 3 讨论

研究发现,集中沟埋还田的“秸秆层”结构,具有以下功能:一是能够较长时间地滞留氮素,减少土壤氮素淋失;二是能够改变土壤微生物群落结构,增加微生物群落的功能多样性。

首先,秸秆层能滞留土壤中的有效态N素,但水稻与小麦秸秆层的滞留效果不同。水稻秸秆层在DB-SR-20和DB-SR-40处理中对 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 都有

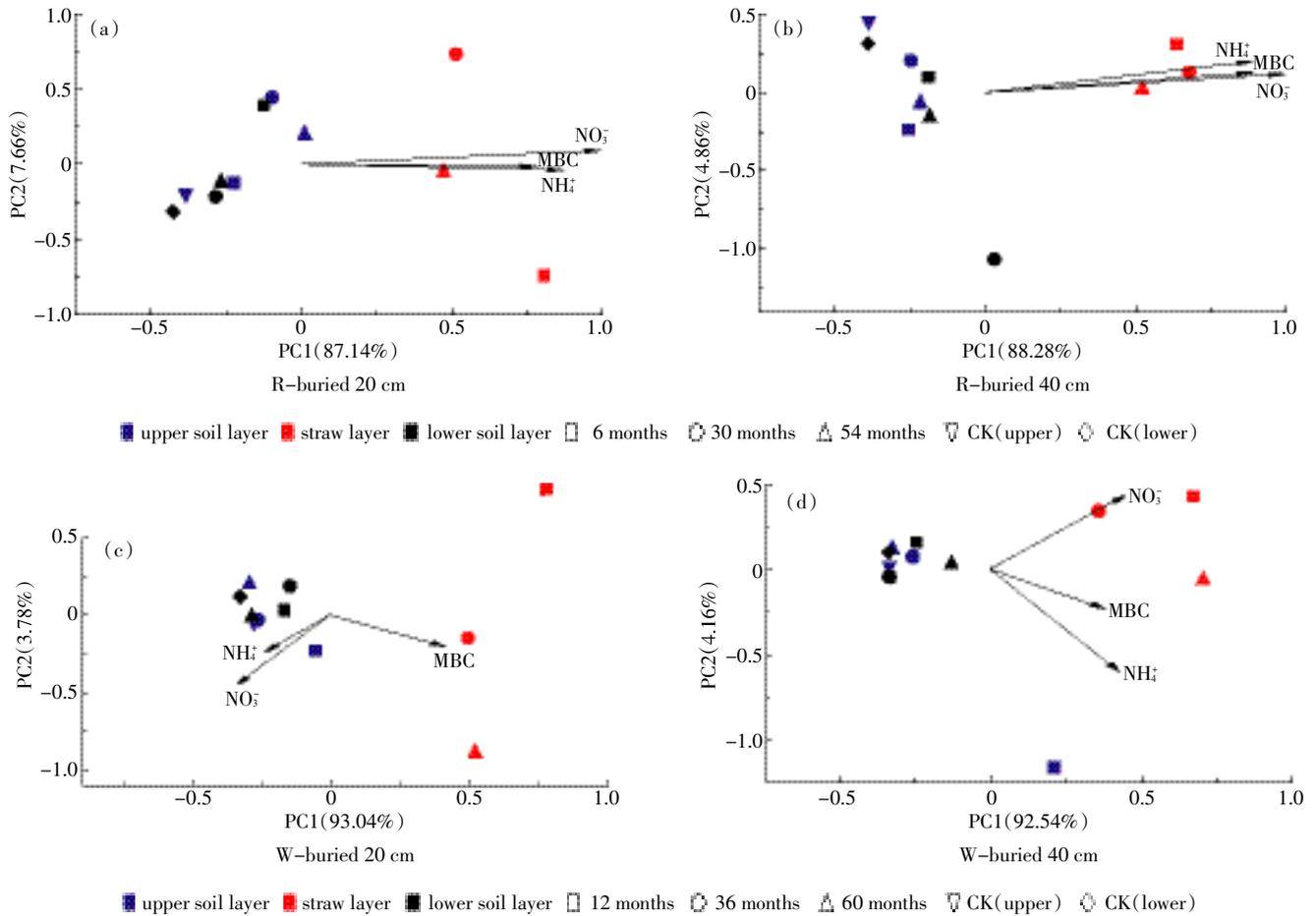
表1 不同时期秸秆层及其界面土层的微生物量碳(MBC)、香农多样性指数(H)

Table 1 Microbial biomass carbon(MBC) and Shannon diversity index(H) in straw layer and its neighbor soil layers under DB-SR-20 and DB-SR-40 with different decomposing time

秸秆/土层 Straw/Soil layers	还田时间/月 Ditch-buried time/month	水稻 Rice				小麦 Wheat			
		DB-SR-20		DB-SR-40		DB-SR-20		DB-SR-40	
		MBC/mg·kg <sup>-1</sup>	H	MBC/mg·kg <sup>-1</sup>	H	MBC/mg·kg <sup>-1</sup>	H	MBC/mg·kg <sup>-1</sup>	H
上土层 Upper soil layer	稻 6/麦 12	160.814a	2.003a	76.804a	1.735b	154.727b	2.020a	50.755b	2.298a
	稻 30/麦 36	140.653b	2.116a	54.330b	1.880ab	146.270c	1.862a	73.164a	1.689c
	稻 54/麦 60	139.379b	2.115a	71.339a	2.513a	159.423a	1.590a	51.172b	1.921bc
	CK	138.476b	1.939a	35.429c	1.995ab	154.618b	1.939a	34.861c	1.995b
秸秆层 Straw layer	稻 6/麦 12	197.945a	3.157a	72.615c	3.170a	161.874b	3.096a	61.680c	3.063a
	稻 30/麦 36	148.351b	3.044a	77.936a	3.067a	155.936c	3.045a	70.672b	2.873a
	稻 54/麦 60	137.907c	3.000a	74.871b	2.998a	180.394a	2.905a	85.747a	3.054a
	稻 6/麦 12	110.145a	2.414a	39.002b	2.151ab	51.010c	1.971a	29.847b	1.715a
下土层 Lower soil layer	稻 30/麦 36	82.483b	2.022a	34.326c	2.242a	84.608a	2.157a	31.998a	0.721b
	稻 54/麦 60	55.760c	1.935a	46.227a	2.326a	55.934b	1.938a	29.428b	2.013a
	CK	39.609d	2.171a	17.167d	1.678b	37.420d	2.171a	16.446c	1.678a

较强的滞留效果, 小麦秸秆层只在 DB-SR-40 处理中对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  滞留效果较强, 而对  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  几乎没有滞留作用。可能原因如下: 第一, 本试验埋草沟集中的秸秆量 10 倍于常规还田, 秸秆层具有很大的比表面积, 对氮素可能有强烈的吸附作用<sup>[17-18]</sup>, 能大量吸附耕层土

壤中下渗的氮素; 第二, 小麦秸秆本身带负电荷<sup>[19]</sup>, 静电作用力可能促进了秸秆层对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的吸附, 同时可以解释小麦秸秆层对  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的滞留效果较弱。从时间角度来看, 随着秸秆的腐解, 秸秆层的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量逐渐降低, 但其界面土层仍显著高于 CK, 而水稻秸



(a), (b) 为水稻秸秆 20 cm、40 cm 埋深处理, (c)、(d) 为小麦秸秆 20 cm、40 cm 埋深处理

(a), (b) indicates the rice straw in DB-SR-20 and DB-SR-40; (c), (d) indicates the wheat straw in DB-SR-20 and DB-SR-40

图 3 水稻秸秆层和界面土层微生物群落主成分分析及其与 N、MBC 的对应分析

Figure 3 PCA of microbial community in straw layer and its neighbor soil layers, and CA of microbial community to N and MBC

表 2 各类碳源在 PC1 和 PC2 的得分

Table 2 Scores of carbon source in the PC1 and PC2

碳源 Carbon source	水稻 Rice				小麦 Wheat			
	DB-SR-20		DB-SR-40		DB-SR-20		DB-SR-40	
	PC1 (87.14%)	PC2 (7.66%)	PC1 (88.28%)	PC2 (4.86%)	PC1 (93.04%)	PC2 (3.78%)	PC1 (92.54%)	PC2 (4.16%)
糖类 Carbohydrate	0.588	-0.246	0.609	0.168	0.429	0.183	0.261	0.130
氨基酸类 Amino acids	0.545	0.235	0.544	-0.038	0.601	-0.096	0.672	-0.007
脂类 Ester	0.365	0.070	0.411	-0.097	0.437	-0.062	0.491	0.076
醇类 Alcohols	0.458	-0.014	0.441	-0.196	0.387	-0.051	0.453	-0.148
胺类 Amines	0.475	-0.073	0.454	0.037	0.529	0.098	0.561	-0.115
羧酸类 Carboxylic acids	0.515	0.062	0.501	0.055	0.574	-0.045	0.558	0.116

秆层的  $\text{NO}_3^-$ -N 含量波动中能维持较高水平,表明秸秆层的氮素滞留作用至少能持续一个耕作周期。鉴于秸秆层对土壤中氮素分布的积极作用,有必要深入探讨秸秆集中沟埋还田在生产上的氮肥运筹问题。

其次,秸秆层能显著提高其界面土层的 MBC,对微生物多样性指数的影响差异较大。DB-SR-20 处理的秸秆层对界面土层微生物多样性指数的影响较小,与 CK 无显著差异,而 DB-SR-40 处理的秸秆层对界面土层微生物多样性指数的影响较大,且随还田时间变化显著。微生物碳源利用主成分分析表明,秸秆层微生物代谢活性较强,也显著提高了其界面土层微生物的代谢活性。对应分析表明,N 素和 MBC 与秸秆层微生物对应相关,与界面土层相关性弱;小麦与水稻秸秆不同,在 20 cm 埋深下,N 素与界面土层微生物群落有相关性,40 cm 埋深下,N 素和 MBC 与秸秆层对应相关,其中  $\text{NO}_3^-$ -N 作用较显著。主要可能原因如下:第一,相对于 CK 处理,秸秆本身提供了充足的碳源,加上秸秆层对 N 素等营养物质的滞留,使秸秆层及其界面土壤微生物活性显著增强;第二,本课题组吴俊松等<sup>[20]</sup>研究表明,挖沟深翻以及秸秆层结构增加了土壤孔隙度,这能改善土壤通气状况,使土壤微生物活动增强,在 40 cm 埋深情况下这种作用尤为显著;第三,水稻与小麦秸秆性质的差异(如 C/N 值、Si 含量)能显著影响微生物对利用碳源种类的选择,但其中的具体机制还有待进一步研究。因此,集中沟埋还田条件下秸秆层对土壤微生物群落变化的影响,需结合其他手段开展更多的研究。

总之,秸秆集中沟埋还田对土壤生态过程具有较好的改良效应,为稻麦两熟制秸秆的有效处理提供了有益参考。然而,该技术的推广应用需要配套机械,但是,目前相关机械还未成型。因此,未来研究工作需要集中精力研发集秸秆捡拾、开沟、埋草、覆土于一体的该型技术的配套机械。

#### 4 结论

(1)“秸秆层”对氮素具有滞留作用,且这种滞留作用至少能维持一个耕作周期。水稻与小麦秸秆层的滞留能力不同,水稻秸秆在埋深 20 cm 和 40 cm 条件下对  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 均有较强的滞留效果,而小麦秸秆在埋深 40 cm 条件下对  $\text{NO}_3^-$ -N 的滞留作用较弱,对  $\text{NH}_4^+$ -N 滞留效果较强。

(2)秸秆层能够提高 MBC 与微生物多样性指数。在 20 cm 埋深下,秸秆界面土层 MBC 显著提高,但微

生物多样性指数变化不显著;在 40 cm 埋深下,秸秆层对界面土层土壤微生物的影响具有滞后性,水稻秸秆界面土层 MBC 随时间先减小后增大,微生物多样性指数随时间增加而增加,小麦秸秆界面土层 MBC 随时间先增大后减小,而微生物多样性指数随时间先减小后增大。

(3)秸秆层微生物能够很好地利用各类碳源,显著增强土壤微生物的代谢活性。还田初期秸秆层微生物偏向于利用糖类,后期对各类碳源利用均衡。N 素和 MBC 与水稻秸秆层微生物对应相关性较强,与界面土层相关性较弱。小麦秸秆 20 cm 埋深下,N 素与界面土层微生物群落有相关性;40 cm 埋深下,N 素和 MBC 与秸秆层对应相关,其中  $\text{NO}_3^-$ -N 作用关键。

#### 参考文献:

- [1] Arcand M M, Knight J D, Farrell R E. Differentiating between the supply of N to wheat from above and belowground residues of preceding crops of pea and canola[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, 50(4):563-570.
- [2] Rao D N, Mikkelsen D S. Effect of rice straw incorporation on rice plant growth and nutrition[J]. *Agronomy Journal*, 1976, 68(5):752-755.
- [3] 郝建华,丁艳锋,王强盛,等. 麦秸还田对水稻群体质量和土壤特性的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2010, 33(3):13-18.  
HAO Jian-hua, DING Yan-feng, WANG Qiang-sheng, et al. Effect of wheat crop straw application on the quality of rice population and soil properties[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2010, 33(3):13-18.
- [4] 蒋 向. 玉米秸秆还田对土壤理化性状与小麦根系发育和功能的影响[D]. 郑州:河南农业大学, 2012:39-47.  
JIANG Xiang. Effects of returning maize stalks into field on soil physical and chemical properties and root and development function in wheat (*Triticum aestivum* L.)[D]. Zhengzhou:Henan Agricultural University, 2012:39-47.
- [5] 朱 姝, 窦 森, 关 松, 等. 秸秆深还对土壤团聚体中胡敏素结构特征的影响[J]. *土壤学报*, 2016, 53(1):127-136.  
ZHU Shu, DOU Sen, GUAN Song, et al. Effect of corn stover deep incorporation on composition of humin in soil aggregates[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(1):127-136.
- [6] 窦 森, 陈 光, 关 松, 等. 秸秆焚烧的原因与秸秆深还技术模式研究[J]. *吉林农业大学学报*, 2016(5):1-8.  
DOU Sen, CHEN Guang, GUAN Song, et al. Why burning of corn stover in fields and technical models studies of it's deep incorporation to sub-soil[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2016(5):1-8.
- [7] 南京农业大学. 秸秆全量还田的方法: 中国, CN101911867B[P]. 2012-05-23.  
Nanjing Agriculture University. A method of total straw returning: China, CN101911867B[P]. 2012-05-23.
- [8] 陶宝瑞, 邵丽萍, 扶明英, 等. 秸秆集中掩埋还田对麦田土壤氮磷流失的影响[J]. *土壤通报*, 2013, 44(4):945-951.

- TAO Bao-rui, SHAO Li-ping, FU Ming-ying, et al. Effects of the straw concentrated buried return on nitrogen and phosphorus leaching in wheat fields[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(4):945-951.
- [9] Zelles L. Fatty acid patterns of phospholipids and lipopolysaccharides in the characterisation of microbial communities in soil: A review[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 29(29):111-129.
- [10] O'donnell A G, Seasman M, Macrae A, et al. Plants and fertilisers as drivers of change in microbial community structure and function in soils[J]. *Plant and Soil*, 2001, 232(1):135-145.
- [11] Peng C, Lai S, Luo X, et al. Effects of long term rice straw application on the microbial communities of rapeseed rhizosphere in a paddy-upland rotation system[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 557-558:231-239.
- [12] 弓晓峰, 张静, 张振辉, 等. 纳氏试剂比色法测定土壤铵态氮的研究[J]. *环境科学与技术*, 2006, 29(1):43-44, 117.  
GONG Xiao-feng, ZHANG Jing, ZHANG Zhen-hui, et al. Measurement of  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  in soil with nessler's reagent colorimetry[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 29(1):43-44, 117.
- [13] 黄玉芳, 叶优良, 杨素勤. 双波长分光光度法测定土壤硝态氮的可行性研究[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(2):43-45.  
HUANG Yu-fang, YE You-liang, YANG Su-qin. Feasibility of  $\text{NO}_3^--\text{N}$  Determination by Dual Wavelength Spectrophotometric Method[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(2):43-45.
- [14] Gryta A, Frac M, Oszust K. The application of the Biolog Ecoplate approach in ecotoxicological evaluation of dairy sewage sludge[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2014, 174(4):1434-1443.
- [15] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京:气象出版社, 2006:54-60.  
WU Jin-shui, LIN Qi-mei, HUANG Qiao-yun, et al. Method and application of determination of soil microbial biomass[M]. Beijing: Meteorology Press, 2006:54-60.
- [16] Borcard D, Gillet F, Legendre P. Numerical ecology with R[M]. New York: Springer Science & Business Media, 2011:117-140.
- [17] 刘玮晶, 刘焯, 高晓荔, 等. 外源生物质炭对土壤中铵态氮素滞留效应的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(5):962-968.  
LIU Wei-jing, LIU Ye, GAO Xiao-li, et al. Effects of biomass charcoals on retention of ammonium nitrogen in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(5):962-968.
- [18] Lehmann J, Silva J P D, Steiner C, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological anthrosol and a ferralsol of the central Amazon basin: Fertilizer, manure and charcoal amendments[J]. *Plant & Soil*, 2003, 249(2):343-357.
- [19] 王宇, 高宝玉, 岳文文, 等. 改性玉米秸秆对水中磷酸根的吸附动力学研究[J]. *环境科学*, 2008, 29(3):703-708.  
WANG Yu, GAO Bao-yu, YUE Wen-wen, et al. Adsorption kinetics of phosphate from aqueous solutions onto modified corn residue[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(3):703-708.
- [20] 吴俊松, 刘建, 刘晓菲, 等. 稻麦秸秆集中沟埋还田对麦田土壤物理性质的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(7):2066-2075.  
WU Jun-song, LIU Jian, LIU Xiao-fei, et al. Effects of rice and wheat straw ditch-buried returning on soil physical properties of wheat field[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(7):2066-2075.