

## 长期秸秆还田对白浆土物理性质及水稻产量的影响

王秋菊<sup>1</sup>, 常本超<sup>1</sup>, 张劲松<sup>1</sup>, 韩东来<sup>2</sup>, 隋玉刚<sup>2</sup>, 陈海龙<sup>2</sup>, 杨兴玉<sup>2</sup>, 王雪冬<sup>2</sup>,  
焦峰<sup>3</sup>, 新家宪<sup>4</sup>, 刘峰<sup>5</sup>

(<sup>1</sup>黑龙江省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所, 中国哈尔滨 150086; <sup>2</sup>黑龙江省农垦建三江管理局八五九农场, 中国佳木斯 156326; <sup>3</sup>黑龙江八一农垦大学, 中国大庆 163319; <sup>4</sup>日本 NICH 研究所, 日本札幌 079-01; <sup>5</sup>黑龙江省农业科学院科研处, 中国哈尔滨 150086)

**摘要:**【目的】明确长期秸秆还田对白浆土土壤物理性质及水稻产量的影响。【方法】开展秸秆还田长期定位试验。试验设置 4 个处理, 分别为对照 (CK), 单施秸秆 (S), 秸秆+化肥 (SNPK), 单施化肥 (NPK)。在 2005 年后连年处理, 并于试验处理前和 2010 年、2015 年试验处理期间调查土壤容重、硬度、孔隙、三相组成以及水稻产量。【结果】白浆土长期秸秆还田有利于水稻产量提高, 10 年产量平均, 秸秆还田配施肥料处理水稻产量比对照和秸秆单独还田处理增产 275.70% 和 133.23%, 比单施化肥处理增产 14.17%。秸秆还田处理水稻产量在还田第 5—10 年平均产量比第 1—5 年有增加趋势; 长期秸秆还田可以改善土壤物理性质, 降低土壤容重、硬度, 还田 10 年后, 秸秆还田配施化肥处理土壤容重低于化肥单施、秸秆单施及对照处理, SNPK 处理 0—20、20—30 cm 土层土壤容重与对照相比分别降低 6.34% 和 10.00%, 与还田 5 年后同类处理相比仍呈下降趋势; 秸秆还田配施化肥处理土壤硬度 10 年后在 10、20、30 cm 土层与处理前相比分别降低为 26.87%、5.68% 和 4.62%, 在 20—30 cm 土层与对照相比差异显著, 还田 10 年后与 5 年后相比有下降趋势, 其他处理变化不明显; 还田 5 年后, 秸秆还田配施化肥处理在 0—20、20—30、30—40 cm 土层土壤固相比例与对照相比分别下降 8.82%、8.36% 和 3.65%, 还田 10 年后分别下降 10.87%、10.61% 和 4.67%, 10 年后要比 5 年后下降幅度大, 秸秆还田配施化肥比秸秆单施和化肥单施处理下降幅度大; 长期秸秆还田可以增加土壤有效孔隙的数量, 在处理间和年限间差异极显著, 还田 10 年后, 在 0—20、20—30、30—40 cm 土层秸秆还田配施化肥土壤有效孔隙比对照增加 28.86%、63.85% 和 23.40%, 在 20—30 cm 和 30—40 cm 土层比化肥单施增加 12.55% 和 62.96%, 在 0—20、20—30、30—40 cm 土层比秸秆单施增加 19.68%、56.52% 和 24.46%; 与还田 5 年后相比, 土壤有效孔隙度均呈现增加的趋势。【结论】长期秸秆还田可以改善白浆土不良物理性状, 降低白浆层的容重、硬度, 增加土壤总孔隙度和有效孔隙的比例, 提高水稻产量。秸秆还田年限越长改善土壤不良物理性质效果越明显。单独进行秸秆还田改善土壤效果不明显, 秸秆还田配施肥料处理效果明显; 在不同处理上, 秸秆还田配施化肥处理既有改土效果, 又可提高水稻产量, 而单施化肥和单独秸秆还田均达不到此类效果。

**关键词:** 秸秆还田; 白浆土; 土壤特性; 有效孔隙; 容重; 产量

## Effects of Albic Soil Physical Properties and Rice Yields After Long-Term Straw Incorporation

WANG QiuJu<sup>1</sup>, CHANG BenChao<sup>1</sup>, ZHANG JinSong<sup>1</sup>, HAN DongLai<sup>2</sup>, SUI YuGang<sup>2</sup>, CHEN HaiLong<sup>2</sup>,  
YANG XingYu<sup>2</sup>, WANG XueDong<sup>2</sup>, JIAO Feng<sup>3</sup>, KEN Araya<sup>4</sup>, LIU Feng<sup>5</sup>

(<sup>1</sup>Institute of Soil Fertilizer and Environment Resources, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China;  
<sup>2</sup>The 859 Farm of Jiansanjiang Management Bureau, Jiamusi 156326, China; <sup>3</sup>Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing  
163319, China; <sup>4</sup>NICH Laboratory, Sapporo 079-01, Japan; <sup>5</sup>Management Department of Scientific Research of Heilongjiang  
Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China)

收稿日期: 2016-11-25; 接受日期: 2017-02-28

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFD0300902-05)、农业部公益性行业专项 (201503118-04)、黑龙江省博士后基金 (LBH-Z13189)、黑龙江省自然科学基金 (D2015005)、黑龙江省农业科学院创新工程 (2014JQ03)

联系方式: 王秋菊, E-mail: bqjwang@126.com. 通信作者刘峰, E-mail: liufengjms@163.com

**Abstract: 【Objective】** This study investigated the effects of long-term rice (*Oryza sativa* L.) straw incorporation on the physical properties of albic soil and crop yield. **【Method】** The experiment included four treatments: (1) CK (no straw incorporation); (2) S (single application of straw); (3) SNPK (straw and N, P, K fertilizer); and (4) NPK (N, P, K fertilizer). In 2005, 2010, and 2015, after the fall harvest, undisturbed soil from different layers was obtained, and soil bulk density, hardness, porosity, three-phase composition and rice yield were analyzed. **【Result】** Rice average yield of ten years after SNPK treatment was 275.70% and 133.23% higher than that after CK and S treatment, and was 14.17% higher than that after NPK treatment, rice average yield of SNPK were higher in the 5-10 years than that of the same treatment in the 1-5 years. Long-term straw incorporation improved soil physical properties. After 10 years of SNPK treatment, soil bulk density of the 0-20 cm and 20-30 cm soil layers was reduced by 6.34% and 10.00% than CK, respectively, the trend was degressive than after 5 years; Soil hardness of the 10, 20, and 30 cm soil layers was reduced by 26.87%, 5.68%, and 4.62% after SNPK treatment than before treatment, respectively, the difference was significant between SNPK and CK in 20-30 cm layer, the trend of 10 year was degressive than that of 5 year, but not obvious, other treatment were not obvious degressive trend than CK; and the solid phase ratio of the 0-20, 20-30, and 30-40 cm soil layers was reduced by 10.87%, 10.61%, and 4.67% than CK, respectively. These values were lower than those noted after 5 years of straw incorporation. Furthermore, long-term straw incorporation increased the number of effective pores in the soil, and the difference was greatly significant between treatments and between years. After 10 years of treatment, the proportions of effective pores of the 0-20, 20-30, and 30-40 cm soil layers treated with SNPK were 28.86%, 63.85%, and 23.40% higher, respectively, than those treated with CK. The proportions of effective pores in the 0-20 and 20-30 cm soil layers in the SNPK treatment were 12.55% and 62.96% higher than those in the NPK treatment, the proportions of effective pores in the 0-20, 20-30, 30-40 cm soil layers in the SNPK treatment were 19.68%, 56.52% and 24.46% higher than those in the S treatment, the trend was increased than that after 5 years. Each soil layer showed increasing numbers of effective pores over time with SNPK treatment. Straw incorporation improved the quality of albic soil, however, its effects become apparent over the long term. **【Conclusion】** Long-term straw incorporation could improve soil physical properties, increased soil effective pore, decreased soil bulk density, and increased rice yield. Good results were obtained from straw incorporation and chemical fertilizer application. The effect of straw incorporation with fertilizer application on soil and rice was obvious than the treatment of single straw incorporation and single fertilizer application.

**Key words:** straw incorporation, albic soil, soil properties, effective pore size, soil bulk density, rice yield

## 0 引言

**【研究意义】**农作物秸秆是一种含碳丰富的能源物质,对保持和提高土壤肥力以及农业的可持续发展均有重要作用<sup>[1]</sup>。据调查,发达国家秸秆还田量在70%以上,发展中国家秸秆还田量较低,中国秸秆还田量平均在21.3%,东北地区秸秆还田量低于全国平均水平,为17.6%<sup>[2]</sup>,水田秸秆还田量不足5%。秸秆还田量低的原因:一方面是农村劳动力减少,农民为了抢农时,节约人力,经常的做法是将大量的农作物秸秆焚烧,导致资源浪费、环境污染,对土壤的生态系统造成不利的影响;另一方面是农民对秸秆还田的优势认识不足,秸秆还田短期见效慢,甚至操作不当影响下茬作物播种、插秧质量,这些均是导致本地区秸秆还田量低的主要因素<sup>[3]</sup>。**【前人研究进展】**国内外学者对秸秆还田与土壤酶活性<sup>[4]</sup>、土壤生物<sup>[5]</sup>、养分积累<sup>[6,7]</sup>、气体释放<sup>[8]</sup>等方面进行了相关研究,基本明确了秸秆还田对作物生长发育和产量形成的影响以及对改良土壤的重要作用<sup>[9-11]</sup>。**【本研究切入点】**目前,

关于秸秆方面的研究多集中在旱田作物,在水田土壤方面相关研究较少,尤其针对秸秆还田与土壤物理性质方面研究甚少,白浆土是黑龙江省主要种稻土壤,关于白浆土秸秆还田对土壤理化性质变化规律及效果缺乏相关研究。**【拟解决的关键问题】**本文采用长期定位试验,研究在白浆土上水稻秸秆长期还田对土壤物理性质及作物产量影响,明确水田秸秆长期还田对水田土壤质量的改善作用,以期水田秸秆还田的推广提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地点设在中国东北地区三江平原东北部饶河县859农场水稻田试验示范区(东经133°50′—134°33′,北纬47°18′—47°50′),全年平均气温为-3℃,降雨量为600 mm。本试验是长期定点试验,试验于2005年进行,供试土壤类型为白浆型水稻土(图1),剖面分为耕作层、白浆层、淀积层。白浆土典型特点是有白浆层,这是作物生长的障碍土层,此层养分含量低,

容重高、硬度大，通气、透水性差，土壤有效孔隙低，土壤具体性质见表 1。

## 1.2 试验设计

试验设 4 个处理：（1）CK（秸秆还田量为 0）；（2）S（单施秸秆 3 000 kg·hm<sup>-2</sup>）；（3）SNPK（秸秆 3 000 kg·hm<sup>-2</sup>+150 kg N·hm<sup>-2</sup>+75 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·hm<sup>-2</sup>+120 kg K<sub>2</sub>O·hm<sup>-2</sup>）；（4）NPK（150 kg N·hm<sup>-2</sup>+75 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·hm<sup>-2</sup>+120 kg K<sub>2</sub>O·hm<sup>-2</sup>），其中秸秆均为干重。每个处理重复 3 次，随机排列，小区面积为 200 m<sup>2</sup>（20 m×10 m），小区间用 30 cm 水泥埂隔开，单灌单排。试验所用氮肥为尿素（N 含量 46%），磷肥为磷酸二铵（N 含量 18%，P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量 46%），钾肥为硫酸钾（K<sub>2</sub>O 含量 50%）。50%氮肥，全部



图 1 白浆土剖面

Fig. 1 Profile of albic soil

表 1 土壤基本性质

Table 1 Basic characteristics of tested soil

土层 Soil layer (cm)	有机质 Organic matter (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total-N (g·kg <sup>-1</sup> )	全磷 Total-P (g·kg <sup>-1</sup> )	全钾 Total-K (g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮 Alkalizing-N (mg·kg <sup>-1</sup> )	有效磷 Avail-P (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Avail-K (mg·kg <sup>-1</sup> )	pH	容重 Bulk density (g·cm <sup>-3</sup> )
0-20	39.35	6.99	2.90	25.20	186.05	26.91	110.06	6.04	1.18
20-30	19.32	6.07	2.73	25.78	108.64	18.72	99.12	6.35	1.45
30-40	14.21	4.35	1.89	20.13	78.54	14.34	78.37	6.21	1.55

磷肥和 60%的钾肥用于基肥施用；另外 50%氮肥作为追肥分两次施用，第 1 次在水稻分蘖期追施氮肥，第 2 次在水稻孕穗期追肥；钾肥一次追施，在水稻孕穗期与氮肥一起施用。每年水稻收获时秸秆直接粉碎抛撒于地表，然后用五铧犁翻耕到 20 cm 左右土层中，第二年水田进水前再旋耕 1—2 遍。

## 1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤样品采集及测定方法 分别于 2005 年、2010 年、2015 年秋季收获后按照土壤不同层次，用环刀取 0—20 cm（耕作层，Ap）、20—30 cm（犁底层，App），30—40 cm（白浆层，Aw）原状土。土壤容重用环刀田间分层取样烘干法测定（5.1cm）；土壤硬度采用 DIK-5521 硬度计田间直接测定；土壤三相组成采用 DIK-1150 三相测定仪测定田间取回自然状态下的土壤。土壤孔隙分布测定方法：采用砂柱和压力膜仪测定不同压力下土壤水分含量，得出土壤水分特征曲线，根据土壤水分特征曲线求得土壤孔隙当量直径（d=3/H），得出不同直径孔隙的水分含量，即土壤不同孔隙的分布。其中，d 为孔隙当量直径（mm），H 为水柱高度（cm）<sup>[12]</sup>。

1.3.2 产量测定 于每年秋季水稻成熟期，在各小区选取有代表性的水稻植株 10 穴作为考种材料，考察穗粒数、结实率、千粒重等产量构成因素，每个小区单打测产。

## 1.4 数据处理

运用 SPSS 系统软件处理和分析数据，进行差异显著性比较。

# 2 结果

## 2.1 秸秆还田对水稻产量的影响

从表 2 不同处理水稻产量来看，在第 1 个 5 年试验期间，秸秆还田配施化肥（SNPK）处理水稻 5 年平均产量高于单施化肥（NPK）、单施秸秆（S）处理及不施肥（CK）处理，且各处理间差异达到极显著水平（ $P<0.01$ ）；从第 1 个 5 年水稻平均产量看，产量顺序为 SNPK>NPK>S>CK，SNPK 处理水稻产量比 NPK 和 S 处理高 598.9 kg·hm<sup>-2</sup> 和 4261.1 kg·hm<sup>-2</sup>，其中 S 处理 5 年平均产量比 CK 高 999.9 kg·hm<sup>-2</sup>，差异达到极显著水平。第 2 个 5 年试验期间，不同处理水稻产量为 SNPK>NPK>S>CK，与第 1 个 5 年试验结果的趋势一致，但 SNPK 及 S 处理水稻产量与第

1 个 5 年相比有增加趋势, 而 NPK 处理和 CK 水稻产量低于第 1 个 5 年, 说明长期秸秆还田对水稻有增产作用。从 10 年产量平均来看, SNPK 处理水稻产量与 NPK 处理相比, 增产 14.17%, 与 S 处理相比, 增产 133.23%, 与 CK 相比, 增产 275.70%; 与 CK 相比, NPK 处理增产效果要高于 S 处理, 10 年平均增产 229.0%, 而 S 处理增产 61.09%。

## 2.2 秸秆还田对土壤容重、硬度的影响

从表 3、图 2 看出, 与试验前土壤物理性质相比, CK 由于连年耕作导致土壤容重、硬度增加。土壤容重在 2010 年调查中, 处理间差异虽未达到显著水平, 但均呈一定趋势变化。

耕作 5 年、10 年后, 对照处理的土壤容重与处理前 (表 1) 相比增加幅度分别为 1.29%—4.14% 和 0.65%—6.21%, 其中 20—30 cm 土层土壤容重增加幅度最大, 30—40 cm 土层容重增加幅度相对较小, 表

明连年耕作对土壤物理性质有影响; 与处理前相比, S 处理在 5 年后土壤容重没有增加, 10 年后有下降趋势, 与处理 5 年后相比下降幅度为 0.85%—1.38%; 与 CK 相比, S 处理 5 年后土壤容重下降 1.27%—3.97%, 10 年后下降 0.64%—7.14%, 以 20—30 cm 土层下降幅度最大。与处理前相比, SNPK 处理土壤容重在 5 年后和 10 年后均呈下降趋势, 随还田年限增加, 容重下降幅度增加, 以 20—30 cm 土层下降幅度大, 10 年后为 10.00%; 5 年后 SNPK 处理与 CK 相比降低幅度为 1.91%—7.95%, 10 年后降低幅度为 1.28%—14.93%。与处理前相比, NPK 处理土壤容重增加, 以 0—20、20—30 cm 土层最为明显, 5 年后土壤容重增加 0.85% 和 2.07%, 10 年后土壤容重增加幅度为 2.27% 和 3.69%, 处理 10 年后与 5 年后相比仍呈增加趋势; 在处理 5 年和 10 年后, NPK 处理土壤容重与对照相比下降, 但下降幅度小。

表 2 不同处理水稻产量

Table 2 Rice yield of different treatments

处理 Treatment	平均产量 Average value of yield (kg·hm <sup>-2</sup> )			增产 Increasing in yield (%)
	2006-2010	2011-2015	2006-2015	
CK	2012.5±96.5eE	1972.6±73.4dD	1992.55±89.2dD	—
S	3012.4±187.6dD	3407.1±203.1cC	3209.75±213.3cC	61.09
SNPK	7273.5±436.5aA	7698.4±502.3aA	7485.95±526.4aA	275.70
NPK	6674.6±412.5bB	6438.7±442.6bB	6556.65±476.3bB	229.06

大写字母 A、B、C、D 表示在 0.01 水平差异显著, 小写字母 a、b、c、d 表示在 0.05 水平差异显著。下同

Uppercase letters represent significant difference at 0.01 level, lowercase letters represent significant difference at 0.05 level. The same as below

表 3 不同处理土壤容重

Table 3 Soil bulk density of different treatments

年份 Year	处理 Treatment	容重 Soil bulk density (g·cm <sup>-3</sup> )			变异幅度 Change range (%)		
		0-20 cm	20-30 cm	30-40 cm	0-20 cm	20-30 cm	30-40 cm
2010	CK	1.21±0.03aA	1.51±0.05aA	1.57±0.07aA	2.54±0.12	4.14±0.08	1.29±0.04
	S	1.18±0.02aA	1.45±0.04aA	1.55±0.05aA	0.00±0	0.00±0	0.00±0
	SNPK	1.16±0.02aA	1.39±0.03aA	1.54±0.04aA	-1.69±0.11	-4.14±0.34	-0.65±0.04
	NPK	1.19±0.03aA	1.48±0.04aA	1.55±0.05aA	0.85±0.04	2.07±0.12	0.00±0
2015	CK	1.23±0.03aA	1.54±0.04aA	1.56±0.04aA	4.24±0.14	6.21±0.33	0.65±0.03
	S	1.17±0.02bAB	1.43±0.04aA	1.55±0.03aA	-0.85±0.04	-1.38±0.05	0.00±0
	SNPK	1.11±0.01cB	1.31±0.03aA	1.54±0.03aA	-6.34±0.35	-10.00±0.42	-0.42±0.02
	NPK	1.21±0.02abA	1.50±0.04aA	1.55±0.02aA	2.27±0.21	3.69±0.32	-0.21±0.01
年限间 F 值 ( $F_{0.05,4,60}/F_{0.01,8,86}$ ) Annual interval F value		1.61	0.57	0.02			

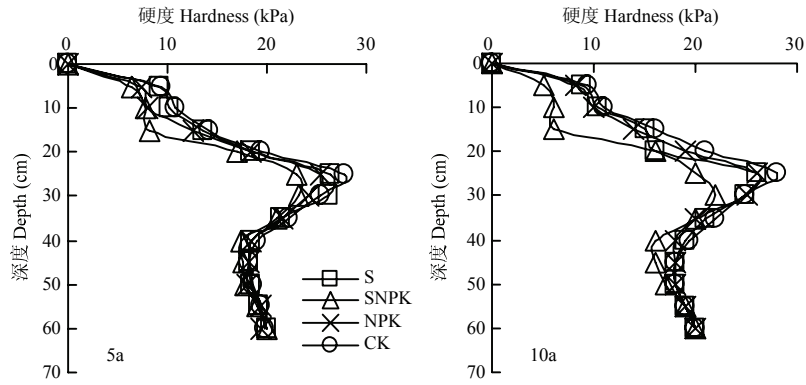


图 2 不同处理土壤硬度

Fig. 2 Soil hardness of different treatments

土壤硬度在 2010 年和 2015 年 (5a 和 10a), 各对应处理差异不显著, 但呈一定变化趋势。与还田前土壤硬度相比, SNPK 处理在还田 5 年和 10 年后土壤硬度均呈下降趋势 (图 2), 还田 5 年后, 与处理前相比 SNPK 处理降低 10、20、30 cm 土层土壤硬度分别为 7.46%、3.41%和 2.94% (图 3); 还田 10 年后降低土壤硬度分别为 26.87%、5.68%和 4.62%; S 处理仅在还田 10 年后有降低 20—30 cm 土层硬度的效果, NPK 处理则使土壤硬度增加。从表 4 看出, S 和 NPK 处理在土壤硬度上差异不显著, 对照处理土壤硬度最高, SNPK 处理土壤硬度在 5 年和 10 年后均表现最低, 其中 10 年后在 20—30 cm 土层与 CK 差异达到显著水平。

2.3 秸秆还田对土壤三相的影响

从图 4 土壤三相组成来看, SNPK 处理与对照相

表 4 土壤硬度方差分析

Table 4 Variance analysis of soil hardness

年份 Year	处理 Treatment	土层 Soil layer		
		10 cm	20 cm	30 cm
2010	CK	10.8±2.50aA	19.4±1.80aA	25.3±1.5aA
	S	10.2±1.90aA	18.3±0.70aA	26.2±2.40aA
	SNPK	7.8±0.50aA	17±0.60aA	23.1±0.70aA
	NPK	7.9±0.90aA	18.4±0.80aA	24.2±0.40aA
2015	CK	11±0.20aA	21±1.60aA	25±0.30aA
	S	10.3±0.1aAB	16±2.30bA	25±1.20aA
	SNPK	6±1.80aAB	16±1.00bA	22±1.10bA
	NPK	10±0.8bB	19±0.60abA	25.1±0.90aA
年限间 F 值 ( $F_{0.05,4,60}/F_{0.01,8,86}$ )		0.07	0.26	0.87
Annual interval F value				

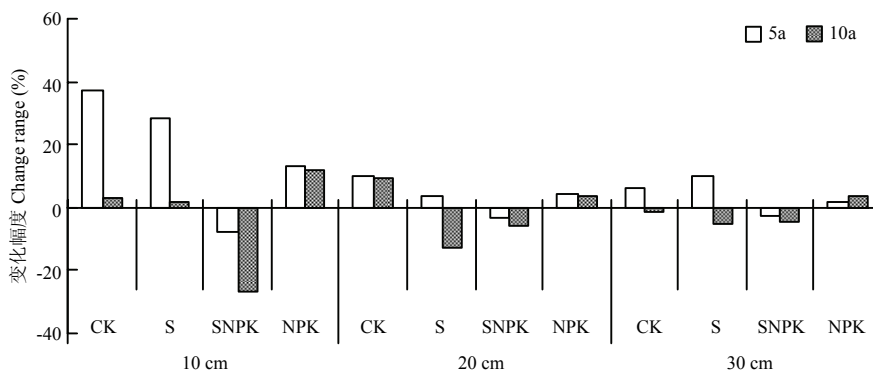


图 3 土壤硬度变化幅度

Fig. 3 Change range of soil hardness

比, 土壤固相比比例降低幅度大于 S 和 NPK 与对照相比降低的幅度, SNPK、S 和 NPK 处理土壤液相和气相比比例与对照相比增加; 还田 5 年后, SNPK 处理土壤 0—20、20—30、30—40 cm 土层土壤固相比比例较 CK 分别下降 8.82%、8.36% 和 3.65%, 还田 10 年后, 土壤固相比比例较 CK 分别下降 10.87%、10.61% 和 4.67%, 与 CK 相比, 还田 10 年后要比 5 年后下降幅度大; S 处理土壤固相比比例与 CK 相比, 5 年后在 0—20、20—30、30—40 cm 土层分别下降 1.15%、2.96%、3.07%, 10 年后分别下降 2.91%、5.52%、5.80%, 下降幅度超过还田 5 年与对照相比下降的幅度; NPK 处理土壤固相比比例与 CK 相比, 5 年后在 0—20、20—30、30—40 cm 土层分别下降 6.25%、4.97%、2.04%, 10 年后分别下降 6.44%、1.53%、3.59%。3 个处理与对照相比均可使土壤固相比比例下降, 但只有 SNPK 处理对降低土壤固相比比例效果最好, 其不同土层间下降幅度存在差异, 土壤固相比比例随着土层深度的增加下降幅度逐渐减小, 0—20 cm, 20—30 cm 土层随年限增加, 下降幅度增大。

#### 2.4 秸秆还田对土壤孔隙组成的影响

土壤孔隙分级组成是根据土壤水分特征曲线转换计算得出。孔隙分级参照姚贤良<sup>[14]</sup>的方法, 孔隙的当量直径  $>0.05$  mm 的孔隙称为重力水孔隙, 通常情况下不能长时间储存水分, 可以视为是土壤内排水的通道。直径  $0.0002—0.05$  mm 的孔隙, 为总有效储水孔隙, 孔隙中水分可被植物吸收利用,  $<0.0002$  mm 的孔隙称为无效孔隙, 孔隙中的水分一般情况下不能被作物所利用。

从表 5 不同处理土壤孔隙组成来看, NPK 处理土壤孔隙分布量随着孔隙直径的减小而增加,  $<0.0002$  mm 直径的无效孔隙占有比例比其他 3 个处理高。从表 6 看出, 长期秸秆还田可以增加土壤有效孔隙的数量及有效孔隙比例, 降低无效孔隙, 而且随还田时间延长, 在 0—20、20—30 cm 土层处理间和年限间差异达到极显著水平。还田 5 年后, SNPK 处理土壤 0—20、20—30、30—40 cm 有效孔隙分别为 9.64%、8.44% 和 5.67%, 分别比对照高出 13.9%、50.44% 和 20.63%; 与 NPK 处理相比, 在 20—30 cm 和 30—40 cm 土层土壤有效孔隙增加 16.89% 和 32.47%; 与 S 处理相比, 在 0—20、20—30、30—40 cm 土层分别增加 13.01%、48.07% 和 22.99%。随秸秆还田年限的延长,

SNPK 处理各土层土壤有效孔隙度均呈现增加的趋势, 还田 10 年后, 0—20、20—30、30—40 cm 土层有效孔隙分别为 10.58%、9.11% 和 5.80%, 比 CK 增加 28.86%、63.85% 和 23.40%; 在 20—30 cm 和 30—40 cm 土层比 NPK 处理增加 12.55% 和 62.96%; 与 S 处理相比, 在 0—20、20—30、30—40 cm 土层分别增加 19.68%、56.52% 和 24.46%。NPK 处理 10

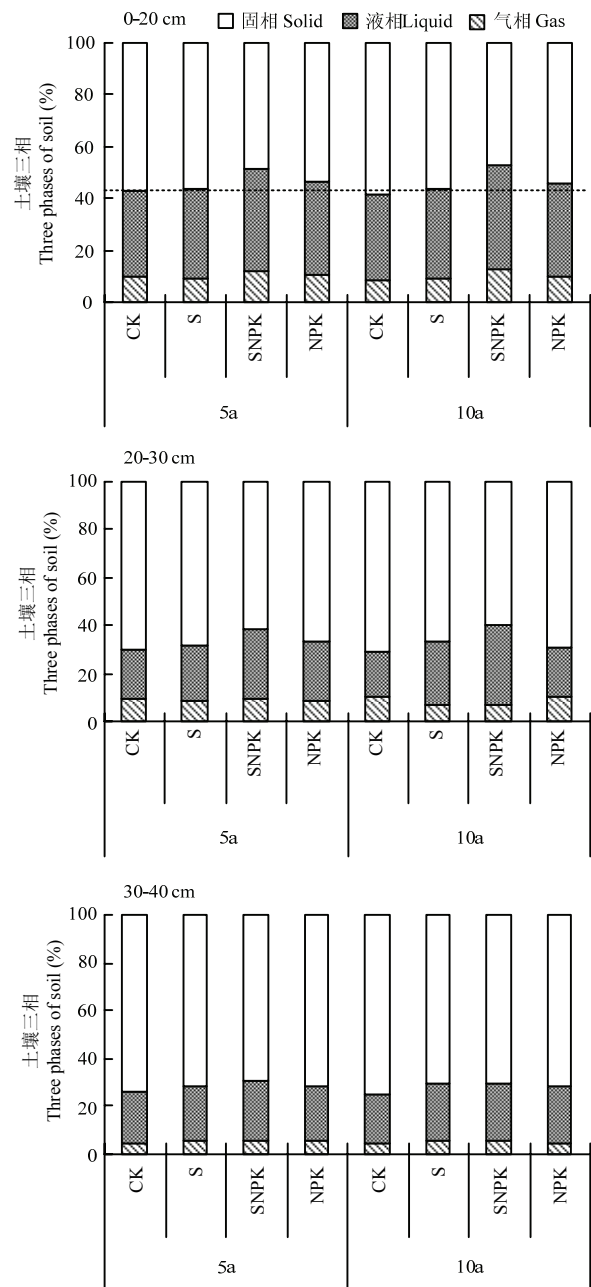


图 4 不同处理土壤三相组成

Fig. 4 Soil three phases of different treatments



表 5 不同处理土壤孔隙组成

Table 5 Soil pore distribution of different treatments

年份 Year	处理 Treatment	土层 Soil layer (cm)	孔隙分级 Pore classification(%)				
			>0.05 mm	0.005-0.05 mm	0.0005-0.005 mm	0.0002-0.0005 mm	<0.0002 mm
2010	CK	0-20	3.21±0.22	2.13±0.14	2.97±0.24	3.36±0.33	31.35±2.23
		20-30	1.23±0.06	1.31±0.04	2.21±0.15	2.09±0.17	27.42±1.98
		30-40	0.43±0.03	0.56±0.02	1.69±0.12	2.45±0.15	27.39±1.68
	S	0-20	3.02±0.21	2.14±0.11	2.98±0.25	3.41±0.24	31.22±2.02
		20-30	1.01±0.03	1.28±0.12	2.23±0.18	2.19±0.13	29.24±2.14
		30-40	0.81±0.03	0.62±0.03	1.73±0.13	2.26±0.16	28.11±1.96
	SNPK	0-20	3.56±0.25	2.18±0.11	3.77±0.31	3.69±0.32	32.35±2.47
		20-30	2.79±0.18	2.21±0.12	3.77±0.28	2.46±0.21	32.69±2.35
		30-40	0.93±0.05	0.96±0.09	2.08±0.16	2.63±0.21	30.66±2.75
	NPK	0-20	3.49±0.23	2.74±0.16	3.73±0.28	3.61±0.27	34.17±2.68
		20-30	1.43±0.11	1.02±0.04	2.87±0.22	3.33±0.24	31.22±2.22
		30-40	0.85±0.04	0.46±0.01	1.68±0.15	2.14±0.18	29.23±2.11
2015	CK	0-20	3.11±0.15	2.02±0.11	2.95±0.21	3.24±0.23	31.21±2.36
		20-30	1.21±0.05	1.29±0.07	2.24±0.17	2.03±0.13	27.23±1.97
		30-40	0.45±0.03	0.53±0.03	1.76±0.11	2.41±0.16	27.29±1.68
	S	0-20	3.32±0.14	2.39±0.13	3.02±0.22	3.43±0.32	31.88±2.34
		20-30	1.26±0.06	1.35±0.08	2.26±0.19	2.21±0.12	30.24±2.19
		30-40	0.98±0.04	0.64±0.02	1.77±0.14	2.25±0.16	28.07±1.56
	SNPK	0-20	3.29±0.23	2.73±0.21	4.08±0.29	3.77±0.35	33.88±2.57
		20-30	2.73±0.17	2.46±0.18	3.93±0.27	2.73±0.22	34.86±2.43
		30-40	1.13±0.10	0.82±0.04	2.43±0.18	2.55±0.17	30.58±2.06
	NPK	0-20	2.93±0.19	1.89±0.11	3.99±0.32	3.52±0.31	34.17±2.64
		20-30	1.29±0.12	0.32±0.02	1.81±0.11	3.46±0.28	32.09±2.01
		30-40	0.89±0.04	0.31±0.01	1.64±0.12	2.29±0.11	28.83±1.58

表 6 土壤孔隙方差分析

Table 6 Variance analysis of soil pore

年份 Year	处理 Treatment	总孔隙度 Total pore (%)			有效孔隙 Effective pore (%)		
		0-20 cm	20-30 cm	30-40 cm	0-20 cm	20-30 cm	30-40 cm
2010	CK	43.02±3.32cC	34.26±2.68dD	32.52±2.64dD	8.46±0.33bB	5.61±0.34bB	4.70±0.42bB
	S	42.77±3.48cC	35.95±3.03cC	33.53±2.59cC	8.53±0.27bB	5.70±0.22bB	4.61±0.24bB
	SNPK	45.55±3.67bB	43.92±3.45aA	37.26±2.88aA	9.64±0.32aAB	8.44±0.24aA	5.67±0.21aA
	NPK	47.74±3.76aA	39.87±2.34bB	34.36±2.45bB	10.08±0.42aA	7.22±0.24cC	4.28±0.26cC
2015	CK	42.53±3.22dD	34.00±2.78dD	32.44±2.86cC	8.21±0.31cB	5.56±0.17bB	4.70±0.15bB
	S	44.04±3.02cB	37.32±2.97cC	33.71±2.25bB	8.84±0.33bcB	5.82±0.18bB	4.66±0.12bB
	SNPK	47.75±3.79aA	46.40±3.67aA	37.51±2.77aA	10.58±0.46aA	9.11±0.43aA	5.80±0.23aA
	NPK	46.50±3.34bA	38.97±3.13bB	33.97±2.44bB	9.40±0.34bAB	5.59±0.27bB	4.25±0.24cC
年限间 <i>F</i> 值 Annual interval <i>F</i> value		15.06**	15.12**	0.01	10.05**	213.02**	3.08
		<i>(F</i> <sub>0.05,4,60</sub> / <i>F</i> <sub>0.01,8,86</sub> )					

\*表示在 0.05 水平上显著, \*\*表示在 0.01 水平上显著 \* means significant at 0.05 level, \*\* means significant at 0.01 level

年后土壤有效孔隙与 5 年前相比下降, 在 0—20、20—30、30—40 cm 土层分别降低 6.75%、22.58%、0.70%, 有效孔隙比例整体低于 SNPK 处理, 但高于 S 处理。秸秆还田可以增加土壤有效孔隙, 提高土壤水分利用率, 其中秸秆还田配施化肥处理对土壤总孔隙度、有效孔隙影响最大, 单施秸秆效果不明显, 在对各土层影响效果看出, 秸秆还田对耕层和犁底层影响效果显著。

### 3 讨论

秸秆还田一直是农业上备受关注的问题, 相关研究表明, 秸秆还田有改善土壤结构, 提高土壤养分, 增加作物产量的作用<sup>[15-16]</sup>。但秸秆还田也存在不利因素, 影响土壤整地、播种质量, 秸秆分解过程存在与作物争肥现象, 导致当季作物产量下降<sup>[17]</sup>。因此, 秸秆还田是一项需要长期试验与调查研究的内容。目前在旱田中秸秆还田研究较多, 在水田中秸秆还田的研究比较少, 尤其国家禁止秸秆焚烧的政策出台后, 更使秸秆问题成为焦点, 在水田土壤中, 秸秆还田对土壤、水稻的影响更需要长期、定位研究。前人研究证实, 秸秆还田可以增加土壤有机质、全氮含量, 提高土壤地力水平和供肥能力<sup>[18-19]</sup>, 多数研究只是短期结果, 且在土壤物理性状方面研究较少。本研究从土壤物理性质开展研究, 明确长期秸秆还田可以降低土壤容重、硬度, 降低土壤固相、提高土壤有效孔隙的比率, 促进土壤通气、透水性, 提高水稻对土壤水分的吸收。秸秆还田对耕层和犁底层土壤改善效果明显, 传统观点认为, 犁底层越硬、越厚, 越有利于水田土壤保水、防渗漏, 但是这是针对漏水、漏肥的砂性土壤。白浆土是一种特殊土壤, 由于成土原因, 它的白浆层坚硬、质密、养分含量低, 是作物生长的障碍土层, 阻止水稻根系下扎, 导致水稻根系生存环境变小, 限制根系生长及其对土壤中养分的吸收, 影响作物生长发育<sup>[20]</sup>。在深翻作业下秸秆还田后, 可以使秸秆混合在 0—30 cm 土层中, 秸秆腐解过程中可以改善土壤的不良性质, 长期还田不仅降低土层硬度和容重, 还可改善白浆层土壤结构, 增加土壤大孔隙数量及有效孔隙数量和比例, 增加土壤的通气性, 这在旱田研究中得到证实<sup>[21]</sup>。同时, 连年产量调查说明, 长期秸秆还田并与速效肥料混合施用, 可提高作物产量, 且还田时间越长, 效果越好<sup>[22-23]</sup>。单独秸秆还田与

常规施用化肥的处理相比会使作物产量降低<sup>[24]</sup>, 因为秸秆在分解过程中微生物活动需要养分的供应, 土壤中的养分因要同时供应作物生育和微生物活动的需求, 会导致作物从土壤中吸收的养分减少, 导致水稻产量低<sup>[25]</sup>; 长期施用化肥, 虽然可以保证水稻稳产, 但对土壤没有改善作用, 而且会使土壤板结、土壤性质恶化<sup>[26-27]</sup>。本文通过长期施用秸秆, 明确了秸秆与化肥配施对改善土壤不良物理性质有重要作用。因此, 要使土壤长期可持续利用, 应合理实施秸秆还田, 注重秸秆还田的长期效果。

### 4 结论

4.1 白浆土长期秸秆还田有利于提高水稻产量, 10 年产量平均, 水稻产量顺序为秸秆还田配施化肥处理 > 化肥处理 > 秸秆单施 > 对照, 秸秆还田配施化肥比其他 3 个处理分别增产 14.17%、133.23% 和 275.70%。

4.2 白浆土长期秸秆还田可以降低土壤容重、硬度, 还田 10 年后, 秸秆还田配施化肥处理土壤容重低于化肥单施、秸秆单施及对照处理, 0—30 cm 土层土壤容重与对照相比降低 6.34%—10.00%; 土壤硬度与容重趋势一致, 还田 10 年后, 秸秆还田配施化肥处理在 20—30 cm 土层与对照相比差异达到显著水平, 土壤硬度与还田 5 年后相比有下降趋势。

4.3 长期秸秆还田可以降低土壤固相比例, 还田 5 年后, 秸秆还田配施化肥处理比对照下降 3.65%—8.82%, 还田 10 年后下降 4.67%—10.87%。

4.4 长期秸秆还田可以增加土壤总孔隙和有效孔隙的数量, 还田 10 年后, 0—40 cm 土层秸秆还田配施化肥处理土壤有效孔隙比对照增加 23.40%—63.85%, 与单施秸秆相比增加 19.68%—56.52%, 与化肥单施处理相比, 在 20—40 cm 土层有效孔隙增加 12.55%—62.96%; 在 0—30 cm 土层, 土壤总孔隙度和有效孔隙度各处理间差异极显著, 年限间差异极显著, 与还田 5 年后相比, 土壤有效孔隙度均呈现增加的趋势。

### References

- [1] 周江明, 徐大连, 薛才余. 稻草还田综合效益研究. 中国农学通报, 2002, 18(4): 35-37.  
ZHOU J M, XU D L, XUE C Y. Study of comprehensive utilization efficiency of returning rice straw to field. *Chinese Agriculture Science*



- Bulletin*, 2002, 18(4): 7-10. (in Chinese)
- [2] 王如芳, 张吉旺, 董树亭, 刘鹏. 我国玉米主产区秸秆资源利用现状及其效果. *应用生态学报*, 2011, 22(6): 1504-1510.
- WANG R F, ZHANG J W, DONG S T, LIU P. Present situation of maize straw resource utilization and its effect in main maize production regions of China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(6): 1504-1510. (in Chinese)
- [3] 戴飞, 韩正晟, 张克平, 胡靖明, 冯永忠, 张锋伟. 我国机械化秸秆还田联合作业机的现状与发展. *中国农机化*, 2011(6): 42-45, 37.
- DAI F, HAN Z S, ZHANG K P, HU J M, FENG Y Z, ZHANG F W. Development present situation of straw returned combined machine used in China. *Chinese Agricultural Mechanization*, 2011(6): 42-45, 37. (in Chinese)
- [4] ZHAO S C, LI K J, ZHOU W, QIU S J, HUAGN S W, HE P. Changes in soil microbial community, enzyme activities and organic matter fractions under long-term straw return in north-central China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2016, 216: 82-88.
- [5] GU Y F, ZHANG T, CHE H, LU X, DU Y Q. Influence of returning corn straw to soil on soil nematode communities in winter wheat. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(2): 52-56.
- [6] 赵士诚, 曹彩云, 李科江, 仇少君, 周卫, 何萍. 长期秸秆还田对华北潮土肥力、氮库组分及作物产量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(6): 1441-1449.
- ZHAO S C, CAO C Y, LI K J, QIU S J, ZHOU W, HE P. Effects of long-term straw return on soil fertility, N pool fractions and crop yields on a fluvo-aquic soil in North China. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(6): 1441-1449. (in Chinese)
- [7] 谢佳贵, 侯云鹏, 尹彩侠, 孔丽丽, 秦裕波, 李前, 王立春. 施钾和秸秆还田对春玉米产量、养分吸收及土壤钾素平衡的影响. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(5): 1110-1118.
- XIE J G, HOU Y P, YIN C X, KONG L L, QIN Y B, LI Q, WANG L C. Effect of potassium application and straw returning on spring maize yield, nutrient absorption and soil potassium balance. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(5): 1110-1118. (in Chinese)
- [8] SHAN J, YAN X Y. Effects of crop residue returning on nitrous oxide emissions in agricultural soils. *Atmospheric Environment*, 2013, 71(3): 170-175.
- [9] BAI Y L, WANG L, LU Y L, YANG L P, ZHOU L P, NI L, CHEGN M F. Effects of long-term full straw return on yield and potassium response in wheat-maize rotation. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(12): 2467-2476.
- [10] WANG X H, YANG H S, LIU J, WU J S, CHEN W P, WU J. Effects of ditch-buried straw return on soil organic carbon and rice yields in a rice-wheat rotation system. *Catena*, 2015, 127: 56-63.
- [11] ZHENG L, WU W L, WEI Y P, HU K L. Effects of straw return and regional factors on spatio-temporal variability of soil organic matter in a high-yielding area of northern China. *Soil & Tillage Research*, 2015, 145: 78-86.
- [12] 翁德衡. 土壤物理性测定法. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1979.
- WENG D H. *Determination of Soil Physical Properties*. Chongqing: Chongqing Branch of Science and Technology Literature Press, 1979. (in Chinese)
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- BAO S D. *Soil Agro-Chemical Analysis*. Beijing: China Agriculture Press, 2005. (in Chinese)
- [14] 姚贤良. 土壤结构的肥力意义. *土壤学报*, 1965, 13(1): 111-120.
- YAO X L. Fertility significance of soil structure. *Acta Pedologica Sinica*, 1965, 13(1): 111-120. (in Chinese)
- [15] YANG H S, YANG B, DAI Y J, XU M M, ROGER T, KOIDE, WANG X H, LIU J, BIAN X M. Soil nitrogen retention is increased by ditch-buried straw return in a rice-wheat rotation system. *European Journal of Agronomy*, 2015, 69: 52-58.
- [16] 王小华. “秸秆集中沟埋还田”新型耕作技术土壤理化性状和有机碳研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
- WANG X H. The study of a new tillage technology with “ditch-buried straw return” on soil physicochemical characteristics and organic carbon[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [17] NIU L A, HAO J M, ZHANG B Z, NIU X S. Influences of long-term fertilizer and tillage management on soil fertility of the North China Plain. *Pedosphere*, 2011, 21(6): 813-820.
- [18] SUI Y H, GAO J P, LIU C H, ZHANG W, LAN Y. Interactive effects of straw-derived biochar and N fertilization on soil C storage and rice productivity in rice paddies of Northeast China. *Science of the Total Environment*, 2016, 544: 203-210.
- [19] SHU R, DANG F, ZHONG H. Effects of incorporating differently-treated rice straw on phytoavailability of methylmercury in soil. *Chemosphere*, 2016, 145: 457-463.
- [20] 殷大伟. 生物炭改良白浆土的初步研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2013.
- YIN D W. Preliminary study on the improvement of albic soil by

- using biochar[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [21] 匡恩俊, 刘峰, 贾会彬, 张玉龙. 心土培肥改良白浆土的研究 I 白浆土心土培肥的效果. 土壤通报, 2008, 34(5): 1106-1109.
- KUANG E J, LIU F, JIA H B, ZHANG Y L. Study on subsoil amendment of Baijiang soil. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 34(5): 1106-1109. (in Chinese)
- [22] GIL S F, TRASAR C C, LEIROS M C, SEOANE S. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37(5): 877-887.
- [23] 周运来, 张振华, 范如芹, 钱晓晴, 罗佳, 卢信, 刘宇峰, 刘丽珠. 秸秆还田方式对水稻田土壤理化性质及水稻产量的影响. 江苏农业学报, 2016, 32(4): 786-790.
- ZHOU Y L, ZHANG Z H, FAN R Q, QIAN X Q, LUO J, LU X, LIU Y F, LIU L Z. Effects of straw-returning modes on paddy soil properties and rice yield. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 32(4): 786-790. (in Chinese)
- [24] 李录久, 王家嘉, 吴萍萍, 黄宽厚, 蒋荫锡. 秸秆还田下氮肥运筹对白土田水稻产量和氮吸收利用的影响. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 254-262.
- LI L J, WANG J J, WU P P, HUANG K H, JIANG Y X. Effect of different nitrogen application on rice yield and N uptake of white soil under wheat straw turnover. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(1): 254-262. (in Chinese)
- [25] KANAZAWA S, FILIP Z. Distribution of microorganisms, total biomass, and enzyme activities in different particles of brown soil. *Microbial Ecology*, 1986, 12(2): 205-215.
- [26] 龚伟, 颜晓元, 王景燕. 长期施肥对土壤肥力的影响. 土壤, 2011, 43(3): 336-342.
- GONG W, YAN X Y, WANG J Y. Effect of long-term fertilization on soil fertility. *Soils*, 2011, 43(3): 336-342. (in Chinese)
- [27] 孟红旗, 刘景, 徐明岗, 吕家珑, 周宝库, 彭畅, 石孝均, 黄庆海, 王伯仁. 长期施肥下我国典型农田耕层土壤的 pH 演变. 土壤学报, 2013, 50(6): 1109-1116.
- MENG H Q, LIU J, XU M G, LÜ J L, ZHOU B K, PENG C, SHI X J, HUANG Q H, WANG B R. Evolution of pH in topsoils of typical Chinese croplands under long-term fertilization. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(6): 1109-1116. (in Chinese)

(责任编辑 杨鑫浩)