

季诗域, 王旭东, 石思博, 等. 稻秆还田与化肥配施对稻茬麦田土壤肥力和小麦产量的影响[ J ]. 江苏农业学报, 2020, 36( 5 ): 1181-1188.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2020.05.015

# 稻秆还田与化肥配施对稻茬麦田土壤肥力和小麦产量的影响

季诗域<sup>1</sup>, 王旭东<sup>1</sup>, 石思博<sup>2</sup>, 陈文博<sup>1</sup>, 叶正钱<sup>1</sup>, 任泽涛<sup>1</sup>, 刘 璋<sup>1</sup>, 于振文<sup>3</sup>

(1. 浙江农林大学环境与资源学院/浙江省污染土壤修复重点实验室, 浙江 杭州 311300; 2. 南京农业大学资源与环境科学学院土壤生态实验室, 江苏 南京 210095; 3. 山东农业大学农学院, 山东 泰安 271001)

**摘要:** 在大田试验条件下, 以水稻秸秆为研究对象, 设置化肥水平( C ) 0、70%、100%, 秸秆还田水平( S ) 0、50%、100%, 共 9 个处理, 研究不同秸秆还田量与化肥配施对不同时期土壤养分及冬小麦产量的影响。结果表明: 在冬小麦的整个生育期内, 秸秆还田与化肥配施能明显提高土壤有机质、碱解氮、速效钾含量, 对土壤有效磷含量影响不大。其中处理 S<sub>100</sub>C<sub>70</sub> 对土壤有机质的积累效果最佳, 处理 S<sub>100</sub>C<sub>100</sub> 对提高土壤碱解氮含量的能力最强, 处理 S<sub>50</sub>C<sub>70</sub> 对提高土壤速效钾含量作用最大。在相同施肥水平下, 秸秆还田会提高产量, 但秸秆还田量并不是越大越好。在 C<sub>70</sub> 和 C<sub>100</sub> 水平下, 冬小麦的穗长、株高、穗粒数、千粒质量等产量构成要素随秸秆还田量的增加而增加。相关分析结果显示土壤速效钾含量对提高小麦产量及其构成要素具有至关重要的作用。运用主成分分析方法找出 3 个主成分, 综合得分排名第 1、第 2 的处理分别为处理 S<sub>50</sub>C<sub>100</sub> 与处理 S<sub>100</sub>C<sub>100</sub>, 因此在本试验条件下, 处理 S<sub>50</sub>C<sub>100</sub> 与处理 S<sub>100</sub>C<sub>100</sub> 可维持较高的土壤肥力且促进小麦增产, 实现废弃秸秆还田资源化合理利用。

**关键词:** 水稻秸秆; 稻茬麦地; 土壤肥力; 小麦产量

**中图分类号:** S512.1<sup>+</sup>10.61

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4440(2020)05-1181-08

## Effects of rice-straw returning to the field and fertilizer application on soil fertility and wheat yield in rice stubble wheat field

JI Shi-yu<sup>1</sup>, WANG Xu-dong<sup>1</sup>, SHI Si-bo<sup>2</sup>, CHEN Wen-bo<sup>1</sup>, YE Zheng-qian<sup>1</sup>, REN Ze-tao<sup>1</sup>, LIU Zhang<sup>1</sup>, YU Zhen-wen<sup>3</sup>

(1. College of Environmental and Resource Science, Zhejiang Agricultural and Forestry University/Zhejiang Provincial Key Laboratory of Contaminated Soil Remediation, Hangzhou 311300, China; 2. Soil Ecology Laboratory, College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 3. College of Agriculture, Shandong Agricultural University, Tai'an 271001, China)

**Abstract:** In this study, rice straw was used as the research object in field experiment. The fertilizer levels ( C ) were 0, 70% and 100%, and the straw returning levels ( S ) were 0, 50% and 100%. There were nine treatments. The effects of different combined application of straw and chemical fertilizers on soil nutrients and winter wheat yield in different

收稿日期: 2020-03-03

基金项目: 国家自然科学基金项目( 31601271 ); 浙江省自然科学基金项目( LY16D010010 )

作者简介: 季诗域( 1996- ), 女, 浙江衢州人, 硕士研究生, 主要从事土壤修复及农林废弃物资源化利用研究。( E-mail ) 1061386135@qq.com

通讯作者: 王旭东, ( E-mail ) wangxd@zafu.edu.cn

were studied. The results showed that the combined application of straw and chemical fertilizers could significantly increase the contents of soil organic matter, available nitrogen and available potassium, but had little effect on soil available phosphorus content during the whole growth period of winter wheat. Among them, treatment S<sub>100</sub>C<sub>70</sub> had the best accumulation effect on soil or-

ganic matter, treatment  $S_{100}C_{100}$  had the strongest ability to improve the content of soil available nitrogen, and treatment  $S_{50}C_{70}$  had the strongest effect on increasing soil available potassium content. Under the same fertilization level, straw returning would increase yield, but the amount of straw returning was not the higher the better. At  $C_{70}$  and  $C_{100}$  levels, the yield components of winter wheat, such as ear length, plant height, grain number per spike, and thousand-grain weight, increased with the increase of the amount of straw returning. Correlation analysis results showed that the content of soil available potassium played an important role in increasing wheat yield and its components. Three principal components were identified by principal component analysis, and the results indicated that the comprehensive score of the  $S_{50}C_{100}$  treatment was highest, and the second was  $S_{100}C_{100}$  treatment. Therefore, based on this experiment conditions, the  $S_{50}C_{100}$  treatment and the  $S_{100}C_{100}$  treatment can maintain high soil fertility, promote wheat yield, and realize rational utilization of waste straw.

**Key words:** rice straw; rice stubble wheat field; soil fertility; wheat yield

中国是全球第一秸秆生产大国,每年生产秸秆约 $7\times 10^8$  t,占全球秸秆产量的1/3,其中水稻秸秆约占50%<sup>[1-2]</sup>。这些秸秆含有相当数量的碳、磷、钾、氮等营养元素,其所含的养分约占全国化肥使用量的25%<sup>[2-3]</sup>,是农业生产中重要的生物资源。浙江省气候适宜,土壤肥沃,农业发达,农作物秸秆数量巨大,秸秆年均产出量为 $1.0\times 10^7$  t<sup>[4]</sup>,然而却没有很好地被利用。因此在该区域开展秸秆还田,既能保护生态环境,又能提升土壤养分含量和土地生产力。

水稻秸秆还田可以为作物生长补充必需的营养元素,也会提升土壤养分含量<sup>[5-7]</sup>。张奇等研究发现水稻秸秆还田可以提高土壤氮素水平,改良土壤理化性状,且对土壤微生物生物量有显著影响<sup>[2]</sup>。成臣等研究发现水稻秸秆还田配合长期旋耕,可以提高土壤肥力和作物产量<sup>[8]</sup>。施用不同比例的化肥与水稻秸秆,可以提高作物的干物质积累速率,改善土壤养分,增加群体生物量<sup>[9-10]</sup>。

综上所述,以往研究多关注于同一土地类型下,水稻秸秆对土壤肥力和作物生长的影响,而对于土地利用方式转变如水旱轮作条件下,水稻秸秆还田与化肥配施的具体用量与比例方面还缺乏系统研究。

随着经济社会的发展,不同的土地利用转变越来越多,而不同的土地利用转变会直接影响到土壤养分的输入和输出,进而影响土壤养分储存量和作物的生长<sup>[11]</sup>。浙江省因为地形原因,农业生产方式多为散户、小农户经营,经常发生土地利用方式转变。在土地利用方式发生转变的背景下提高土地利用效率十分重要。为此,研究不同比例水稻秸秆与化肥配施对水旱轮作条件下土壤养分、冬小麦产量的影响,以期在水旱轮作下水稻秸秆资源化利用提供理论依据和技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点与供试材料

试验于2018年11月-2019年5月在浙江省杭州市临安区横塘村大田( $29^{\circ}56'N$ ,  $118^{\circ}51'E$ )进行。该地区平均海拔434.75 m,属于中亚热带季风气候区,年平均气温 $16^{\circ}C$ ,年平均日照时数2 000 h,年平均降水量1 613.9 mm,降水日158 d,全年无霜期237 d。试验地作物种植方式为:水稻-小麦轮作,一年两熟。供试土壤基本理化性质为:pH5.7,有机质含量25.4 g/kg,含水量27.3 g/kg,速效钾含量56.9 mg/kg,碱解氮含量152.2 mg/kg,有效磷含量5.1 mg/kg。供试秸秆为2018年10月份收获水稻后的水稻秸秆。供试小麦品种为扬麦15。2018年11月2日播种,2019年5月21日收获。

### 1.2 试验设计

设3个秸秆还田水平、3个化肥施用水平,双因素随机区组排列,9个处理,3次重复,共27个小区。秸秆还田量分别为0 kg/hm<sup>2</sup>、3 748 kg/hm<sup>2</sup>、7 496 kg/hm<sup>2</sup>,相对用量记为0(对照,  $S_0$ )、50% ( $S_{50}$ )、100% ( $S_{100}$ );化肥用量为常规施肥量的0 ( $C_0$ )、70% ( $C_{70}$ )、100% ( $C_{100}$ )。常规施肥量(100%)施肥方案为:基肥,复合肥(纯氮含量15%)375 kg/hm<sup>2</sup>;追肥,在拔节期追施尿素(含N46%)195 kg/hm<sup>2</sup>。各处理见表1。

小区面积25 m<sup>2</sup>(长5 m,宽5 m)。2018年10月下旬,水稻收获后,去掉水稻根茬并清理田面,以保证各小区秸秆使用量的准确性。水稻秸秆按用量平铺于各个小区中,而后进行机器翻压掩埋于20 cm土层,然后平整土地。于2018年11月2日播种冬小麦,田间管理同常规大田。

表 1 试验处理

Table 1 Experimental treatments

处理	秸秆相对用量 (%)	化肥相对用量 (%)
$S_0C_0$	0	0
$S_0C_{70}$	0	70
$S_0C_{100}$	0	100
$S_{50}C_0$	50	0
$S_{50}C_{70}$	50	70
$S_{50}C_{100}$	50	100
$S_{100}C_0$	100	0
$S_{100}C_{70}$	100	70
$S_{100}C_{100}$	100	100

### 1.3 测定项目及分析方法

分别于分蘖期(1月13日)、拔节期(3月23日)、成熟期(5月21日)采集土壤样品,每个小区用五点法取0~20 cm 耕层土样混合,测定指标为碱解氮、有效磷、速效钾、有机质、pH,均用常规分析方法测定<sup>[12]</sup>。植物样品于2019年5月21日收获后,测定株高、穗长等产量构成因素,并按照小区计算产量。

采用 Excel 2010 软件和 SPSS17.0 软件进行方差分析和 Duncan's 显著性检验,比较不同处理间在  $P<0.05$  水平的显著性差异,采用 OriginPro8.0 软件绘制柱状图。采用 SPSS17.0 软件进行主成分分析、相关性分析、交互分析,并绘制主成分分析图。采用 R3.6.1 软件的 corplot 函数包进行统计分析,绘制相关矩阵图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同秸秆还田量与化肥配施对土壤基本理化性质的影响

由图 1 可知,在小麦的 3 个生育时期中,土壤有机质、碱解氮、速效钾含量总体呈现先上升后下降的趋势并在拔节期达到最高值,土壤有效磷含量呈现先下降后升高趋势并在成熟期达到最高值,土壤 pH 值在成熟期达到最大但无明显变化规律。

在分蘖期的所有处理中,处理  $S_0C_{100}$  的碱解氮和有效磷含量最高,处理  $S_{100}C_0$  的 pH 值最高,处理  $S_{100}C_{70}$  的有机质含量最高,处理  $S_{100}C_{100}$  的速效钾含量最高。在拔节期的所有处理中,处理  $S_{100}C_0$  的 pH 值最高,处理  $S_{100}C_{70}$  的有机质含量最高,处理  $S_{100}C_{100}$  的碱解氮、有效磷含量最高。在成熟期的所有

处理中,处理  $S_{50}C_{100}$  的碱解氮含量最高,处理  $S_{100}C_{70}$  的有机质和速效钾含量最高,处理  $S_{100}C_{100}$  的有效磷含量、pH 值最大。综上所述,土壤养分在分蘖期处理  $S_0C_{100}$  最佳,拔节期处理  $S_{100}C_{100}$  最佳,成熟期处理  $S_{100}C_{70}$  和  $S_{100}C_{100}$  最佳。

在同一时期内  $S_{50}$  和  $S_{100}$  水平下,施化肥会提高土壤有机质含量,但并不是施肥量越多越好,在  $C_{70}$  水平下土壤有机质含量达到最大,  $C_{100}$  水平下不如单施秸秆;在同一时期内,与对照相比,单施秸秆、单施化肥、秸秆与化肥配施都会提高土壤有机质含量。在  $C_{70}$ 、 $C_{100}$  水平下,各处理的土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量在不同时期有不同变化规律。分蘖期时,碱解氮含量随秸秆还田量增加而降低,有效磷含量无明显变化规律,速效钾含量随秸秆还田量增加而增加;拔节期时,碱解氮含量随秸秆还田量增加而增加,有效磷含量无明显变化规律,速效钾含量因秸秆还田而有所提高;成熟期时碱解氮、有效磷、速效钾含量均随秸秆还田量增加而增加。就提高土壤速效钾的效果而言,秸秆还田与化肥配施效果最佳,优于单施秸秆、单施化肥。秸秆还田会略微提高土壤 pH 值,但秸秆还田量的多少与 pH 值的变化没有明显规律。

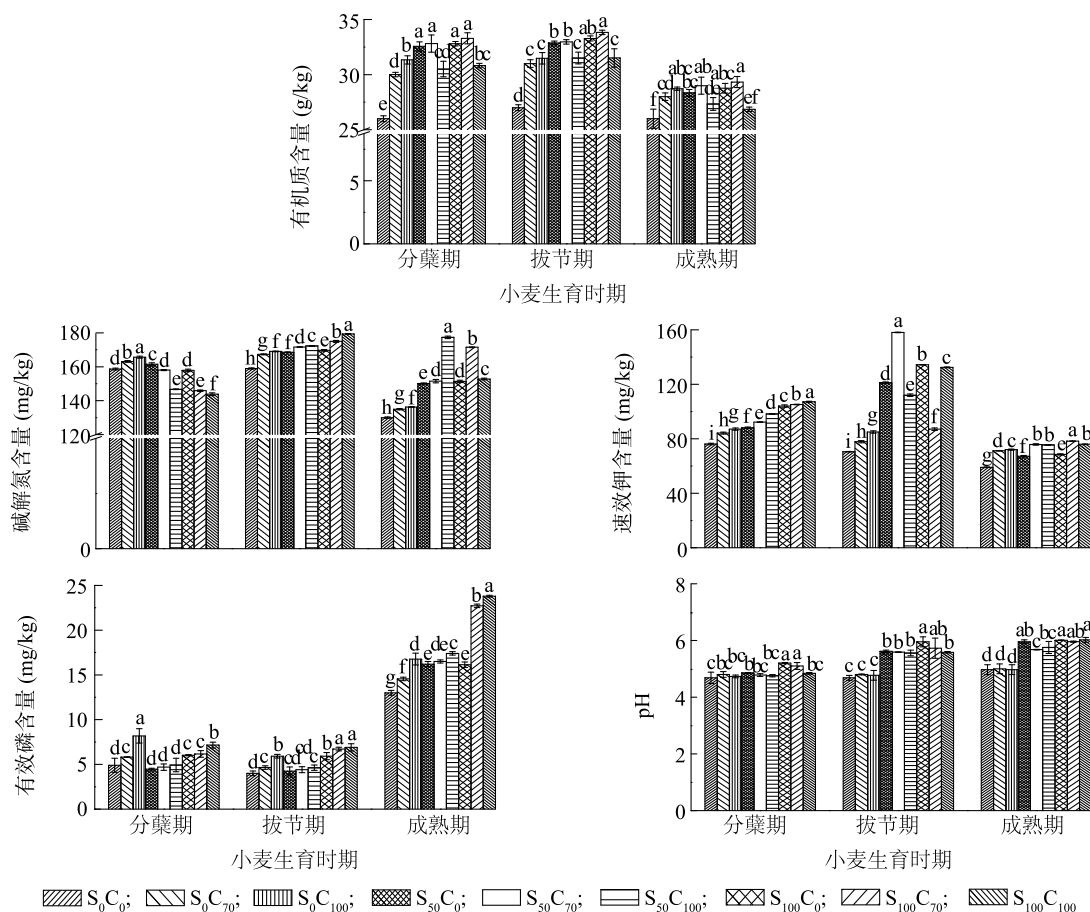
### 2.2 不同秸秆还田量与化肥配施对小麦产量及其构成要素的影响

经 Duncan's 单因素方差分析可知,处理  $S_{100}C_{100}$  产量最高,处理  $S_0C_0$  产量最低;在  $C_{100}$  水平下,产量随着秸秆还田量的增多而提高。在  $C_{70}$ 、 $C_0$  水平下,各处理的产量在还田量为  $S_{50}$  时最高,  $S_0$  最低;各处理中,产量较高的有处理  $S_{100}C_{100}$ 、 $S_{50}C_{100}$ ,且它们高于处理  $S_0C_{100}$ 、 $S_0C_{70}$ 、 $S_{100}C_0$ 、 $S_{50}C_0$ ,这说明对于提高小麦产量,秸秆还田与化肥配施优于单独施化肥或者秸秆还田。

由表 2 可知,不同处理对小麦的产量构成要素也产生了一定的影响。各处理的千粒质量存在差异,  $S_{100}$ 、 $S_{50}$  水平下的各处理与  $S_0$  水平下的各处理差异显著。在同一施肥水平下,不同秸秆还田量对千粒质量的影响没有明显规律。各处理的穗长、株高存在差异,在相同施肥水平下,秸秆还田与秸秆不还田之间、不同秸秆还田量之间的差异都不显著。各处理的穗粒数存在差异,在  $C_0$  水平下,处理  $S_{50}C_0$ 、 $S_{100}C_0$  显著高于处理  $S_0C_0$ 。在  $C_{70}$  和  $C_{100}$  水平下,随秸秆还田量的增加,冬小麦的千粒质量、穗长、株高、穗粒数均增加。就千粒质量、穗长、株高、穗粒数增加的效果而言,秸

秆与化肥配施优于单独施化肥或秸秆还田。各处理的成穗数存在差异,在  $C_0$ 、 $C_{70}$  水平下秸秆还田与秸秆不还田之间差异不显著,在  $C_{100}$  水平下秸秆还田与秸秆不还田之间、不同秸秆还田量之间差异显著。在同一施肥量下,冬小麦的成穗数随秸秆还田量的增加而增加。就提高小麦成穗数的效果而言,秸秆还田与化肥配施优于单独施化肥或秸秆还田。各处理的经济

系数存在差异,在同一施肥量下,秸秆还田与秸秆不还田之间、不同秸秆还田量之间差异不显著。在  $C_0$  水平下,经济系数随秸秆还田量增加而增加。在  $C_{70}$ 、 $C_{100}$  的水平下,水稻秸秆还田能够提高小麦经济系数,但并不是秸秆还田量越大越好。就提高小麦经济系数的效果而言,秸秆还田与化肥配施优于单独施化肥或秸秆还田<sup>[13]</sup>。



各处理见表 1。同一生育期内不同字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 1 不同小麦生育时期不同秸秆还田量与化肥配施处理的土壤理化性质

Fig.1 Physical and chemical properties of soils in different combined treatments of straw and fertilizer in different wheat growth periods

### 2.3 小麦产量及其构成要素与土壤养分因子的主成分分析和交互相关分析

对小麦产量等要素与土壤养分因子的数据进行主成分分析和交互相关分析(图 2)。主成分分析(Principal component analysis, PCA),是把各变量之间互相关联的复杂关系进行简化分析的方法,它能反映出不同处理的差异状况。在本试验中,对各处理的因子进行主成分分析,第 1 主成分 PC1 的方差贡献率为 57.45%,第 2 主成分 PC2 的方差贡献率为 19.52%,第 3 主成分 PC3 的方差贡献率为 15.14%,三者之和为

92.11%,可以代表系统内的所有信息。由图 2A 可见各处理分布离散,说明各处理之间差异较大,秸秆还田对土壤理化性质和小麦产量影响较大。不同秸秆还田与化肥配施各处理在 3 个主成分上的得分情况详见表 3。不同处理的土壤理化性质综合得分由大到小排列为  $S_{50}C_{100}$ 、 $S_{100}C_{100}$ 、 $S_{100}C_{70}$ 、 $S_0C_{100}$ 、 $S_{50}C_{70}$ 、 $S_0C_{70}$ 、 $S_{100}C_0$ 、 $S_{50}C_0$ 、 $S_0C_0$ 。处理  $S_{50}C_{100}$  的土壤养分及作物产量的水平最高,而处理  $S_0C_0$  最低。这说明秸秆还田能够提高土壤养分,改善土壤理化性质,以及促进作物生长,其中秸秆还田与化肥配施的效果最好。

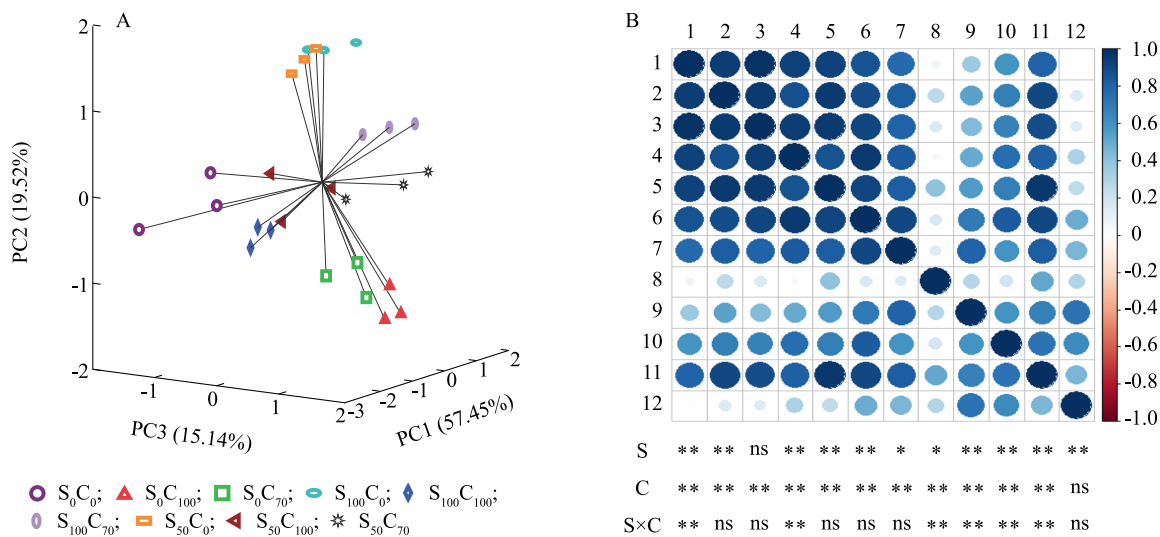


表2 不同秸秆还田量与化肥配施处理对小麦产量及其构成因素的影响

Table 2 Effects of different combined application of straw and fertilizer on wheat yield and its component factors

处理	产量 (kg/hm <sup>2</sup> )	株高 (cm)	穗长 (cm)	穗数 (×10 <sup>4</sup> , 1 hm <sup>2</sup> )	每穗粒数	千粒质量 (g)	经济系数
S <sub>0</sub> C <sub>0</sub>	794.44i	49.67c	6.92c	179.92f	28.83d	33.57g	0.33c
S <sub>0</sub> C <sub>70</sub>	1 927.13f	55.00b	8.50b	205.72d	50.22b	35.97de	0.36bc
S <sub>0</sub> C <sub>100</sub>	2 398.80c	58.83a	8.73ab	209.58cd	53.67ab	36.53cd	0.38bc
S <sub>50</sub> C <sub>0</sub>	901.59g	50.23c	7.14c	183.51ef	38.56c	35.13f	0.35bc
S <sub>50</sub> C <sub>70</sub>	2 027.35d	58.33a	8.63ab	214.22cd	53.56ab	36.75c	0.40ab
S <sub>50</sub> C <sub>100</sub>	2 460.49b	59.60a	8.98ab	229.11b	56.33a	38.53ab	0.45a
S <sub>100</sub> C <sub>0</sub>	869.41h	51.08c	7.42c	190.07e	40.78c	35.60ef	0.37bc
S <sub>100</sub> C <sub>70</sub>	2 009.70e	60.28a	8.75ab	216.27c	57.17a	37.97b	0.40ab
S <sub>100</sub> C <sub>100</sub>	2 689.19a	59.57a	9.41a	248.43a	56.67a	39.15a	0.41ab

各处理见表1。不同小写字母表示各处理在0.05水平差异显著。



A图中,各处理见表1。B图中,1:产量;2:株高;3:穗长;4:穗数;5:每穗粒数;6:千粒质量;7:经济系数;8:有机质;9:碱解氮;10:有效磷;11:速效钾;12:pH;C:化肥;S:秸秆;S×C:秸秆化肥配施。样本数( $n$ )=27。ns表示不相关,\*表示显著相关( $P<0.05$ ),\*\*表示极显著相关( $P<0.01$ )。圆圈越大、颜色越深表示相关系数值越大,蓝色代表正相关,红色代表负相关。

图2 小麦产量构成因素与土壤理化性质的主成分分析(a)与交互相关分析(b)

Fig.2 Principal component analysis (a) and interaction and correlation analysis (b) of wheat yield component factors and physical and chemical properties of soils

由图2B可知,小麦产量与土壤速效养分含量均呈正相关关系,产量趋势与养分趋势相同。小麦产量与土壤速效钾含量极显著相关;小麦成穗数与土壤有效磷含量显著相关,与土壤速效钾含量极显著相关;小麦穗粒数、穗长、株高都分别与土壤有效磷和土壤速效钾含量存在显著相关和极显著相关关

系;小麦经济系数与土壤碱解氮含量显著相关,与土壤速效钾含量极显著相关;小麦千粒质量与土壤碱解氮含量显著相关,与土壤有效磷和速效钾含量极显著相关。总体看来,土壤速效钾含量对于提高小麦产量及其构成要素具有至关重要的作用。而土壤有机质含量、碱解氮含量、pH等指标与小麦产量及

构成要素的相关性不是很大。为了反映秸秆与化肥这2个要素对不同处理的交互影响,进行交互分析。交互分析结果(图2B)显示,单独秸秆还田和单施化肥以及其二者的交互作用对土壤养分、小麦产量及其构成要素均有显著或极显著影响( $P<0.05$ )。除穗长外,单独秸秆还田对其余各项指标均有显著或极显著影响( $P<0.05$ )。除pH外,单施化肥对其余各项指标均有显著或极显著影响( $P<0.05$ )。秸秆还田与化肥配施对土壤有机质、碱解氮、有效磷、速效钾、小麦产量、成穗数有极显著影响。整体看来,秸秆还田与化肥配施对土壤养分的互作效应要强于对小麦产量构成要素的互作效应。

表3 不同秸秆还田量与化肥配施处理的主成分得分及综合得分  
Table 3 Principal component scores and comprehensive scores of different straw returning and chemical fertilizer treatments

处理	第1主成分 (PC1)	第2主成分 (PC2)	第3主成分 (PC3)	综合 得分	排序
S <sub>0</sub> C <sub>0</sub>	125.315	26.801	-12.418	81.799	9
S <sub>0</sub> C <sub>70</sub>	172.306	11.088	1.370	110.045	6
S <sub>0</sub> C <sub>100</sub>	190.135	5.633	7.872	121.078	4
S <sub>50</sub> C <sub>0</sub>	143.844	31.324	-16.100	93.709	8
S <sub>50</sub> C <sub>70</sub>	186.459	14.238	-1.511	119.066	5
S <sub>50</sub> C <sub>100</sub>	212.355	14.089	-1.926	135.118	1
S <sub>100</sub> C <sub>0</sub>	143.996	32.044	-16.805	93.840	7
S <sub>100</sub> C <sub>70</sub>	198.464	22.726	-8.085	127.271	3
S <sub>100</sub> C <sub>100</sub>	211.656	7.674	4.072	134.309	2

### 3 讨论

本研究分析了不同秸秆还田量与化肥配施对不同小麦生育时期土壤肥力的影响,结果显示各处理的土壤有机质、碱解氮、速效钾含量均在拔节期最高,这与前人的研究结果并不完全一致<sup>[14]</sup>,这可能是由于不同试验地的土壤肥力状况存在差异。该结果说明秸秆还田与化肥配施主要在拔节期发挥作用。这是因为还田的秸秆在分蘖期没有完全腐解,而到了拔节期,秸秆中富含的营养元素被释放出来,导致土壤养分含量显著上升,之后又因为作物的吸收而导致成熟期的土壤养分含量下降。

研究发现,秸秆还田提高了土壤有机质、速效

钾、碱解氮含量,这与其他研究者在江苏乌栅土农田进行的秸秆还田研究结果一致<sup>[15-18]</sup>。与文献[15]~[17]以及[19]、[20]报道的研究结果不同的是,本试验中秸秆还田对有效磷的影响不大,这可能是由于不同试验之间存在气候、土壤类型、秸秆还田量、耕作方式等差异。秸秆还田对土壤有效磷含量的影响不大,可能是因为秸秆中磷素含量较少,也可能是因为土地利用方式的转变<sup>[11]</sup>。本试验中土壤有效磷含量较低,而秸秆还田对土壤有效磷的影响不大,因此在今后秸秆还田时应注意磷肥的施用。在本研究中,小麦生育前期处理S<sub>0</sub>C<sub>100</sub>的土壤养分含量最高,而小麦生育后期处理S<sub>100</sub>C<sub>100</sub>和处理S<sub>100</sub>C<sub>70</sub>土壤理化性质最佳,这说明秸秆还田能有效提高土壤肥力,且秸秆还田与化肥配施最佳。这是因为化肥是速效养分,它能在小麦生育早期很快释放出来,而秸秆耐分解,属于缓释肥,其养分在小麦生育后期才慢慢释放出来。此外,本研究发现在分蘖期,土壤碱解氮含量随秸秆还田量增加而降低,碱解氮含量最低的处理是S<sub>100</sub>C<sub>100</sub>,说明秸秆还田在前期不利于土壤碱解氮的增加。这是因为土地利用方式转变影响了土壤氮素的输入和输出,从而影响了土壤碱解氮含量<sup>[11]</sup>,还因为在该时期大量水稻秸秆为微生物提供了大量的碳源,导致其生命活动旺盛,从而消耗大量的有效态氮素用于合成细胞体,因而降低了土壤碱解氮含量。刘淑云等通过分析不同土壤类型下小麦产量与土壤养分之间的关系,发现土壤有效磷含量对小麦产量的影响最大<sup>[21]</sup>。本研究经相关分析发现土壤速效钾含量对于提高小麦产量及其构成要素的作用最大。这是因为水稻秸秆中有丰富的钾素(约占1.5%),对提高土壤速效钾含量有重要作用<sup>[22]</sup>。秸秆还田可能是通过提高土壤速效钾含量来促进酶活性的增加,最终达到增产效果<sup>[23-24]</sup>。秸秆还田可以提高某些土壤养分的含量,但关于这部分养分在土壤中的稳定性等问题还有待进一步探讨。

众多研究结果表明水稻秸秆还田除了改善土壤理化性质<sup>[25-27]</sup>之外,还会对小麦的产量及其构成要素产生影响。白娜玲等通过研究全量秸秆还田与减氮措施对稻麦轮作的影响,发现水稻秸秆还田有助于小麦产量、株高、有效穗数、穗粒数和千粒质量的提高<sup>[28-32]</sup>,但有学者认为水稻秸秆还田对小麦产量的影响会因地区和土壤类型而异<sup>[33-34]</sup>。本试验中,

在相同施肥水平下, 秸秆还田提高了小麦产量, 但并不是还田量越大越好, 且水稻秸秆还田与化肥配施优于单独施化肥或秸秆还田。其中, 处理  $S_{100}C_{100}$  的小麦产量最高, 这可能与该处理在拔节期、成熟期的土壤养分状况最佳有关。秸秆还田与化肥配施增产效果最优可能是因为该肥力下秸秆腐熟较快, 避开了土壤微生物与小麦之间的养分竞争, 同时水稻秸秆腐熟后的养分释放又为小麦的生长发育提供了充足的养分, 尤其是土壤速效钾含量的提高促进了小麦产量的提高。秸秆还田对冬小麦的产量构成要素也产生了一定的影响。在同一施肥水平下, 冬小麦的穗长、株高、穗粒数、千粒质量、成穗数随秸秆还田量的增加而增加。小麦经济系数的提高是秸秆还田的另一个作用, 但并不是还田的量越大越好。总体来看, 就小麦的产量构成要素而言, 秸秆还田与化肥配施的处理最佳, 这可能与这些处理的土壤养分含量最高有关。

综上所述, 合理的水稻秸秆还田量和施肥量能够有效地改善土壤养分状况, 提高小麦产量。在本试验条件下, 增效作用最明显的均为秸秆还田与化肥配施的处理(处理  $S_{50}C_{100}$  和处理  $S_{100}C_{100}$ ), 这说明秸秆还田量  $3\ 748\ \text{kg}/\text{hm}^2$  (或  $7\ 496\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ) 与化肥(纯氮含量 15% 的复合肥)用量  $375\ \text{kg}/\text{hm}^2$  是比较适宜的秸秆还田与化肥配施比例, 这为该地区在水旱轮作条件下水稻秸秆资源循环利用提供了科学依据。

## 参考文献:

- [1] 曹稳根, 高贵珍, 方雪梅, 等. 新型户用下吸式秸秆气化炉的研究与应用[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(30): 13328-13329.
- [2] 张奇, 陈桀, 陈效民, 等. 不同深度秸秆还田对黄棕壤氮素和微生物生物量碳氮的影响[J]. 水土保持通报, 2019, 39(2): 56-61.
- [3] 刘骅, 林英华, 王西和, 等. 长期配施秸秆对灰漠土质量的影响[J]. 生态环境, 2007, 16(5): 1492-1497.
- [4] 朱丽君, 王光宇, 张耀兰, 等. 长三角地区农作物秸秆资源量的时空分布特点[J]. 贵州农业科学, 2017, 45(4): 138-142.
- [5] 范如芹, 周运来, 李赟, 等. 秸秆发酵还田提升土壤腐殖质含量与品质[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(5): 1095-1101.
- [6] 董林林, 王海侯, 陆长婴, 等. 秸秆还田量和类型对土壤氮及氮组分构成的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1143-1150.
- [7] CHEN J H, GONG Y Z, WANG S Q, et al. To burn or return crop residue on croplands? An integrated analysis of crop residue management in China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 662: 1141-1150.
- [8] 成臣, 汪建军, 程慧煌, 等. 秸秆还田与耕作方式对双季稻产量及土壤肥力质量的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(1): 247-257.
- [9] 杨滨娟, 黄国勤, 徐宁, 等. 秸秆还田配施不同比例化肥对晚稻产量及土壤养分的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(13): 3779-3787.
- [10] ZHAO X L, WANG H Y, LU D J, et al. The effects of straw return on potassium fertilization rate and time in the rice-wheat rotation[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2019, 65(2): 176-182.
- [11] 王文颖, 王启基, 王刚. 高寒草甸土地退化及其恢复重建对土壤碳氮含量的影响[J]. 生态环境, 2006, 15(2): 362-366.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 1-495.
- [13] 关小康, 王静丽, 刘影, 等. 轮耕秸秆还田促进冬小麦干物质积累提高水氮利用效率[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3): 280-288.
- [14] 季星桐. 灌水与秸秆还田共同作用对土壤理化性状和小麦生长的影响研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2017.
- [15] 汪军, 王德建, 张刚, 等. 连续全量秸秆还田与氮肥用量对农田土壤养分的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 40-44.
- [16] 陈丽, 马贤超, 田宝庚, 等. 耕作方式与秸秆还田对土壤肥力的影响[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(10): 64-66.
- [17] IQBAL M T, ORTAS I, AHMED I A M, et al. Rice straw biochar amended soil improves wheat productivity and accumulated phosphorus in grain[J]. Journal of Plant Nutrition, 2019, 42(14): 1605-1623.
- [18] ZHAO X L, YUAN G Y, WANG H Y, et al. Effects of full straw incorporation on soil fertility and crop yield in Rice-Wheat rotation for silty clay loamy cropland[J]. Agronomy-basel, 2019, 9(3): 1-12.
- [19] 吴玉红, 郝兴顺, 田霄鸿, 等. 秸秆还田与化肥减量配施对稻茬麦土壤养分、酶活性及产量影响[J]. 西南农业学报, 2018, 31(5): 998-1005.
- [20] TIAN Z W, GE Y X, ZHU Q, et al. Soil nitrogen balance and nitrogen utilization of winter wheat affected by straw management and nitrogen application in the Yangtze river basin of China[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2019, 65(1): 1-15.
- [21] 刘淑云, 王丽丽, 张晓艳. 山东诸城不同类型土壤养分变化趋势及其与小麦产量关系的模拟研究[J]. 山东农业科学, 2014, 46(5): 77-81.
- [22] 李继福. 秸秆还田供钾效果与调控土壤供钾的机制研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.
- [23] 申佳艳, 李小英, 袁勇, 等. 纳板河保护区不同季节常绿阔叶林土壤酶活性与养分关系研究[J]. 中国农学通报, 2018, 34(7): 90-95.
- [24] SHARMA S, DHALIWAL S S. Effect of sewage sludge and rice

- straw compost on yield, micronutrient availability and soil quality under Rice-Wheat system[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2019, 50(16): 1943-1954.
- [25] 陈浩,张秀英,郝兴顺,等. 秸秆还田对农田环境多重影响研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(5): 21-24.
- [26] 高天平,张春,刘文涛,等. 秸秆还田方式与灌溉量对土壤碳水环境和玉米产量的影响[J]. *山东农业科学*, 2019, 51(6): 108-112.
- [27] 范如芹,周运来,李赞,等. 秸秆发酵还田提升土壤腐殖质含量与品质[J]. *江苏农业学报*, 2019, 35(5): 1095-1101.
- [28] 白娜玲,吕卫光,郑宪清,等. 秸秆全量还田条件下减量施氮与碳氮调控对稻麦轮作系统的影响[J]. *上海农业学报*, 2019, 35(3): 63-70.
- [29] 李贵,王晓琳,张朝贤,等. 水稻秸秆还田结合炔草酯对禾本科杂草和小麦生长发育的影响[J]. *植物保护学报*, 2015, 42(1): 130-137.
- [30] HU N J, WANG B J, GU Z H, et al. Effects of different straw re-
- turning modes on greenhouse gas emissions and crop yields in a rice-wheat rotation system[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2016, 223(1): 115-122.
- [31] YANG H S, ZHAI S L, LI Y F, et al. Waterlogging reduction and wheat yield increase through long-term ditch-buried straw return in a rice-wheat rotation system[J]. *Field Crops Research*, 2017, 209(1): 189-197.
- [32] YANG H S, XU M M, KOIDE R T, et al. Effects of ditch-buried straw return on water percolation, nitrogen leaching and crop yields in a rice-wheat rotation system[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2016, 96(4): 1141-1149.
- [33] 朱冰莹,马娜娜,余德贵. 稻麦两熟系统产量对秸秆还田的响应:基于Meta分析[J]. *南京农业大学学报*, 2017, 40(3): 376-385.
- [34] 郑继成,张刚,王德建,等. 稻麦轮作下秸秆还田对稻麦产量和稻田可溶性有机碳含量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2019, 27(3): 431-440.

(责任编辑:张震林)