

DOI: 10.5846/stxb201401150114

黄国勤, 杨滨娟, 王淑彬, 黄小洋, 张兆飞, 姚珍, 黄禄星, 赵其国. 稻田实行保护性耕作对水稻产量、土壤理化及生物学性状的影响. 生态学报, 2015, 35(4): 1225-1234.

Huang G Q, Yang B J, Wang S B, Huang X Y, Zhang Z F, Yao Z, Huang L X, Zhao Q G. Effects of 8 years of conservational tillage on rice yield and soil physical, chemical and biological properties. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(4): 1225-1234.

稻田实行保护性耕作对水稻产量、土壤理化及生物学性状的影响

黄国勤^{1,*}, 杨滨娟¹, 王淑彬¹, 黄小洋¹, 张兆飞¹, 姚 珍¹, 黄禄星¹, 赵其国²

¹ 江西农业大学生态科学研究中心, 南昌 330045

² 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008

摘要: 在江西双季稻田进行长期田间定位试验, 分析了多年保护性耕作对水稻产量、土壤理化性状及生物学性状的影响。连续 8a 稻田保护性耕作处理的平均产量高于传统耕作 4.46%—8.79%, 各处理的有效穗数、每穗粒数和结实率均高于对照, 而各处理间穗长和千粒重差异不显著。实行稻田保护性耕作处理的土壤容重低于传统耕作 3.6%—5.6%, 而总孔隙度和毛管孔隙度分别高出传统耕作 1.6%—17.4%、2.4%—16.7%。与传统耕作相比, 连续 8a 保护性耕作显著提高了土壤有机质(2.9%—10.0%)、有效磷(4.8%—31.6%)、速效钾(9.7%—25.7%)。在 2005 年免耕+插秧的土壤真菌数量最多, 显著高于对照处理 51.6%, 免耕+抛秧在 2008 年达到最大, 显著高于对照处理 54.1%。2012 年免耕+抛秧、免耕+插秧显著高于对照 126.1%、121.1%; 另外, 各处理间过氧化氢酶、脲酶活性均差异不显著。8a 间土壤转化酶活性变化范围在 0.292—0.451 mg/g 之间, 其中 2005—2007、2012 年均免耕+抛秧达到最大, 与对照相比, 增加范围为 72.7%—137.7%, 且差异显著($P < 0.05$)。因此, 实行稻田保护性耕作是适合江南丘陵区双季稻区农业可持续发展的有效模式之一, 其中免耕+抛秧和免耕+插秧两种方式效果最为显著。

关键词: 长期定位试验; 保护性耕作; 水稻产量; 土壤性状; 稻田

Effects of 8 years of conservational tillage on rice yield and soil physical, chemical and biological properties

HUANG Guoqin^{1,*}, YANG Binjuan¹, WANG Shubin¹, HUANG Xiaoyang¹, ZHANG Zhaoifei¹, YAO Zhen¹, HUANG Luxing¹, ZHAO Qiguo²

¹ Research Center on Ecological Science, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China

² Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

Abstract: Conservation tillage is a key technology in the trend towards sustainable agriculture. The main targets of conservation tillage are to reduce soil erosion and protect the soil and the environment. Conservation tillage can be complemented by the use of a range of other cultivation techniques, including no-till cultivation techniques, the use of straw stubble technology and green covering technology. There are a number of current studies reporting on the effects of different tillage methods on crop yield and soil nutrients. There have been fewer comparisons of the effects of long-term application of conservation tillage on rice yield, soil physical, chemical and biological properties and interannual variability. Through research on trends in rice yield, soil physical and chemical properties and variation of soil biological activity under different tillage methods, this study explores the advantages of long-term application of conservation tillage on rice yield and soil

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2007BAD89B18-03, 2012BAD14B14-01)

收稿日期: 2014-01-15; 网络出版日期: 2014-09-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hgqjxc@sina.com

fertility in paddy fields. It provides theoretical support and a sound scientific basis for the rationalization and vigorous promotion of conservation tillage technology in paddy fields. We have comprehensively studied the effects of long-term application of conservation tillage on rice yield, soil fertility and biological activity. The study site is located in the southern hilly region in Jiangxi Province, China. The double-cropping experiment was conducted in a paddy field at Jiangxi Agricultural University between 2005 and 2012. The test comprised a total of four treatments: (1) conventional tillage + transplanting (CT + P), the traditional farming method; (2) conservation tillage treatment: conservation tillage + throwing (CT + T), the traditional method of plowing and throwing seedlings after flattening; (3) conservation tillage treatment: no-tillage + transplanting (NT + P), no tillage, with the herbicide applied to stubble before transplanting; (4) conservation tillage treatment: no tillage + throwing (NT + T), no tillage, with the herbicide applied to stubble before throwing. The results indicate that with conservational tillage, rice yield was significantly higher (4.5%—8.8%) than with conventional tillage. Yield components were also higher with conservation tillage than conventional tillage, but the differences in ear length and grain weight among all treatments were not significant. Implementation of conservation tillage decreased soil bulk density by 3.6%—5.6%, increased total porosity by 1.6%—17.4% and increased capillary porosity by 2.4%—16.7% when compared with conventional tillage. Significant increases in soil organic matter (2.9%—10.0%), available phosphorus (4.8%—31.6%) and available potassium (9.7%—25.7%) were also obtained under long-term conservation tillage treatments when compared with conventional tillage. The abundance of fungi in the no-tillage + planting treatments was significantly higher (51.6%) than in conventional tillage in 2005, while the abundance of fungi in the no-tillage + throwing treatments was significantly higher (54.1%) than in conventional tillage in 2008. The differences in the abundance of nitrifying bacteria among all treatments were not significant between 2005 and 2011. The abundance of nitrifying bacteria in the no-tillage + throwing and the no-tillage + planting treatments were significantly higher (126.1% and 121.1%, respectively) than conventional tillage in 2012. No significant differences were obtained for catalase or urease activity among all treatments. Invertase activity varied between 0.292 and 0.451 mg/g during the 8 years sampled. Invertase activity was significantly higher in the no-tillage + throwing treatments (72.7%—137.7%) than in conventional tillage for the years 2005—2007 and in 2012. The implementation of conservation tillage was an effective model for sustainable development of agriculture and was suitable for the southern hilly region. The no-tillage + throwing and no-tillage + planting treatments generated the most significant effects.

Key Words: long-term field experiment; conservational tillage; rice yield; soil properties; paddy field

可持续农业已成为世界农业的发展趋势,保护性耕作是可持续农业中的关键技术^[1]。保护性耕作是以减轻水土流失和保护土壤与环境为主要目标,采用保护性种植制度和配套栽培技术形成的一套完整的农田保护性耕作技术体系,如免耕栽培技术、秸秆残茬利用技术和绿色覆盖技术。王昌全^[2]等连续 8 a 不同免耕方式的试验结果表明,与翻耕相比,免耕在第 1 年产量基本持平,第 2 年免耕产量即开始增加,并随着免耕时间的增加而日趋明显。李继明^[3]等 26 a 长期施用绿肥定位试验结果表明,绿肥与化肥长期配合施用 26 a 水稻平均产量增产 64.5%,土壤有机质、全氮和全磷均有所积累,积累的量与有机肥种类有关。高菊生^[4]等连续 30 a 双季稻绿肥轮作定位试验表明,种植绿肥作物对提高水稻产量、增加土壤有机质和提高土壤有机质活性具有重要意义。余晓鹤^[5]研究结果显示,在免耕条件下,表层(0—5 cm)土壤的全 N、NH₄-N 明显增加,5—15 cm 则迅速下降,在土壤层次中发生明显差异。目前关于不同耕作方式对作物产量及土壤养分的研究较多,但对于综合探讨长期保护性耕作体系下水稻产量、土壤理化性状、生物学性状的年际变化以及各成分之间相关性的报道较少。通过研究不同耕作方式下水稻产量的变化趋势、土壤各理化性状及土壤生物活性的变化特征,探讨稻田长期实行保护性耕作在水稻产量和稻田土壤肥力等方面的优势效应,为合理调整和大力推广稻田保护性耕作技术提供理论支持和科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地基本概况

于 2005—2012 年在江西农业大学科技园实验田进行双季稻定位试验,试验基地年平均太阳总辐射量为 4.79×10^{13} J/hm²,年平均日照时数为 1 852 h,年日均温 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 的积温达 6 450 $^{\circ}\text{C}$,无霜期约 272 d,年均温为 17.6 $^{\circ}\text{C}$,年降水量 1 624 mm。供试土壤发育于第四纪的红黏土,为亚热带典型红壤分布区。试验前供试土壤基本性质(0—20 cm):pH5.40,有机质 26.32 g/kg,全氮 1.42 g/kg,有效磷 4.73 mg/kg,速效钾 34.05 mg/kg。

1.2 试验设计

试验共设 4 个处理:(1)传统耕作+插秧(对照,CT+P),即按传统方法耕田;(2)保护性耕作处理:传统耕作+抛秧(CT+T),即按传统方法耕田、整平后进行抛秧;(3)保护性耕作处理:免耕+插秧(NT+P),即不进行翻耕,插秧前用除草剂灭茬;(4)保护性耕作处理:免耕+抛秧(NT+T),即不进行翻耕,抛秧前用除草剂灭茬,共 4 个处理。每个处理 3 次重复,随机区组排列,共 12 个小区,每小区面积 33 m²(11 m $\times$ 3 m),小区间用高 30 cm 的水泥田埂隔开,独立排灌。每年各处理水稻品种不同,2005—2006 年早稻品种为株两优 02,晚稻为中优 253;2007—2009 年早稻品种为金优 213,晚稻为金优 284;2010 年早稻品种为金优 1176,晚稻中优 161;2011—2012 年早稻品种为淦鑫 203,晚稻为新香优 96。早稻在每年的 4 月中下旬移栽,7 月中旬收获,晚稻在 7 月下旬移栽,10 月下旬收获。各处理栽插密度为 29.4×10^4 蔸/hm²(移栽行株距为 20 $\times$ 17 cm,每蔸 2—3 株)。早、晚稻所用化肥为尿素(N46%),钙镁磷肥(P₂O₅12%),氯化钾(K₂O60%),周年 N、P₂O₅、K₂O 用量为 150、90、120 kg/hm²。氮肥早稻按基肥:分蘖肥:穗肥=6:3:1 施用,晚稻按基肥:分蘖肥:穗肥=5:3:2 施用。磷肥全部作基肥,一次性施入,钾肥按分蘖肥:穗肥=7:3 施用。基肥在插秧前一天施下,分蘖肥在水稻移栽后 5—7 d 时施用,穗肥在主茎幼穗长 1—2 cm 时施用。其它田间管理措施同一般大田栽培。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 水稻考种与测产

于水稻成熟期,在各小区普查 50 蔸作为有效穗计算的依据,然后用平均数法在各小区中随机选取有代表性的水稻植株 5 蔸,作为考种材料,清水漂洗去除空、秕粒晒干后用 1/100 分析天平测千粒重。并于成熟期用 1/10 天平测每小区实际产量(干重)。

1.3.2 土壤理化性状的测定

于晚稻收获后采集 0—20 cm 土样(五点法)进行分析。土壤物理性状:土壤容重、土壤总孔隙度、毛管孔隙度采用环刀法测定,土壤总孔隙度=1-土壤容重/2.65,毛管孔隙度(%)=[(吸水后全筒土重-全筒烘干土重)/总体积] $\times$ 100;土壤吸湿水采用烘干法。土壤化学性状:土壤 pH 采用 pH 计测定,土壤有机质采用重铬酸钾法-浓硫酸外加热法测定,全氮采用半微量开氏定氮法,有效磷采用 NaHCO₃浸提-钼锑抗比色法,速效钾采用 NH₄OAc 浸提-火焰光度法。

1.3.3 土壤微生物数量及活度测定

于每年晚稻成熟期 10 月底采集土样,每小区 5 点取样并混匀为一个样品,置阴凉处风干后过 1 mm 筛,并置于 4 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱中保存。细菌、真菌、放线菌计数采用平板稀释涂布法。细菌培养用牛肉膏蛋白胨培养基,真菌用马丁氏培养基,放线菌用高氏 1 号培养基。具体测定方法参考文献^[6]。土壤过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定,脲酶活性采用苯酚-次氯酸钠比色法测定,转化酶采用 3,5-二硝基水杨酸比色法^[7]。土壤过氧化氢酶活性以单位土重的 0.05 mol/L 高锰酸钾毫克数表示,脲酶活性以 24 h 后 1 g 土壤中 NH₃-N 的毫克数表示,转化酶活性以 24 h 后 1 g 土壤中葡萄糖的毫克数表示。

1.4 数据处理

运用 Microsoft Excel 2010 处理数据,用 SPSS13.0 系统软件进行数据处理和统计分析,用 LSD(least significant difference test)进行样本平均数的差异显著性比较,用主成分分析(PCA)、Pearson 相关系数和逐步

线性回归进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 稻田保护性耕作对水稻产量及产量构成要素的影响

稻田保护性耕作显著提高了水稻产量(图1)。总体上看,2005—2012年连续8a保护性耕作各处理(CT+T、NT+P、NT+T)的平均产量均高于对照(CK,传统耕作),增加范围为4.5%—8.8%。另外,除了2010年NT+P处理产量达到最高以外,其它年份均是NT+T处理最高,与对照相比增产幅度为7.7%—11.4%。随着试验年份的推进,各处理水稻产量的差异也发生了明显的变化,均呈现逐渐增加的趋势,但各处理增加幅度略有不同,其中处理NT+P的增产幅度最大,为28.9%。这说明长期实行保护性耕作能够提高水稻产量,增加经济效益。

由表1可以看出,连续8a保护性耕作各处理的有效穗数、每穗粒数和结实率均高于对照(CK),而各处理间穗长和千粒重差异不显著。8a间保护性耕作处理(均值,下同)的有效穗数显著高于对照3.0%—11.6% ($P < 0.05$),2005—2008年以NT+T处理最大,高出其它处理2.3%—14.9%;NT+P处理在2009、2010、2012年达到最大,2011年则是CT+T处理最大,说明稻田保护性耕作总体上能促进水稻形成有效穗,从而影响产量。每穗粒数方面,与对照相比,8a间保护性耕作处理增加幅度为2.3%—8.2%,但仅在2006—2008、2010年与对照差异显著($P < 0.05$),2006—2008年表现为NT+T > NT+P > CT+T > CT+P;2010年表现为NT+T > CT+T > NT+P > CT+P。结实率方面,2005、2008年均是处理NT+T显著高于对照($P < 0.05$),增加幅度分别3.4%、3.6%,2010年则是处理NT+T显著高于对照。

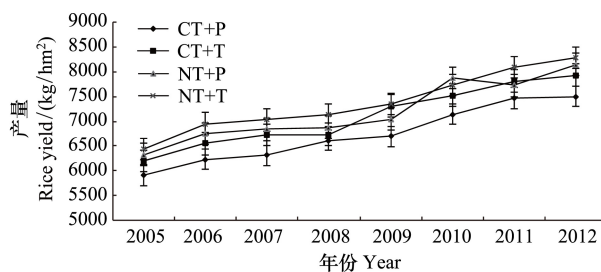


图1 稻田保护性耕作的水稻产量分析

Fig.1 Analysis of yield among conservative tillage treatments

CT+P: 传统耕作+插秧 Conventional tillage + transplanting; CT+T: 传统耕作+抛秧 Conservation tillage + throwing; NT+P: 免耕+插秧 No-tillage + transplanting; NT+T: 免耕+抛秧 No tillage + throwing

表1 稻田保护性耕作处理的水稻产量构成分析

Table 1 Analysis of yield components among conservative tillage treatments

年份 Tillage year	处理 Treatments	穗长/cm Ear length	有效穗数/($\times 10^4$ 穗/hm 2) Effective panicles	每穗粒数 Grain number per panicle	结实率/% Seed-setting rate	千粒重/(g/1000粒) 1000-grain weight
2005	CT+P	21.54a	288.10d	94.21b	73.30b	22.57a
	CT+T	21.67a	294.00c	95.89ab	74.37ab	22.93a
	NT+P	21.83a	323.40b	96.21a	73.40b	23.03a
	NT+T	21.69a	346.90a	97.71a	75.77a	23.97a
2006	CT+P	20.68a	294.19d	96.30d	74.35a	23.03a
	CT+T	21.07a	313.28c	98.60c	74.72a	23.17a
	NT+P	21.49a	318.26b	101.50b	74.88a	23.14a
	NT+T	21.28a	321.42a	105.70a	75.86a	23.67a
2007	CT+P	20.34b	265.33c	93.25b	79.65a	22.72a
	CT+T	21.40ab	269.18b	97.15a	80.23a	23.22a
	NT+P	21.28ab	275.71a	98.57a	81.46a	23.33a
	NT+T	22.56a	276.14a	98.86a	81.07a	23.51a
2008	CT+P	20.82a	284.98d	92.20c	77.07b	24.42a
	CT+T	21.50a	292.55b	96.92b	78.54ab	24.49a
	NT+P	21.18a	290.24c	98.17b	79.18a	24.55a
	NT+T	21.78a	297.53a	104.10a	79.86a	24.54a

续表

年份 Tillage year	处理 Treatments	穗长/cm Ear length	有效穗数/($\times 10^4$ 穗/ hm^2) Effective panicles	每穗粒数 Grain number per panicle	结实率/% Seed-setting rate	千粒重/(g/1000粒) 1000-grain weight
2009	CT+P	20.56a	385.14c	97.93b	79.04ab	26.97a
	CT+T	21.46a	391.02b	98.94b	80.72a	28.73a
	NT+P	20.99a	415.88a	99.50b	79.54ab	27.57a
	NT+T	21.26a	389.90b	102.09a	78.33b	28.27a
2010	CT+P	20.54a	398.37c	124.29c	79.66c	25.72a
	CT+T	21.67a	421.89b	129.66ab	79.84c	26.01a
	NT+P	21.69a	445.41a	129.16b	84.63a	26.66a
	NT+T	20.68a	420.42b	131.31a	82.58b	25.91a
2011	CT+P	20.49b	396.90d	125.93b	81.34c	25.82a
	CT+T	23.28a	449.82a	126.44b	83.84ab	26.79a
	NT+P	21.40ab	416.01c	127.62b	82.03bc	26.34a
	NT+T	21.28b	426.30b	135.88a	84.02a	26.82a
2012	CT+P	20.56b	349.55d	121.66c	83.61b	26.13a
	CT+T	22.50a	365.99b	124.25b	87.37a	27.91a
	NT+P	21.78ab	419.33a	122.67bc	86.92a	27.26a
	NT+T	20.82ab	352.49c	128.36a	84.09b	26.62a

表中数据为平均值;同列不同的小写字母表示不同处理同一年份差异达 5%显著水平 ($P < 0.05$)

2.2 稻田保护性耕作对土壤理化性状的影响

从表 2 可以看出,连续 8a 实行稻田保护性耕作各处理的土壤容重均低于对照(CK),而总孔隙度和毛管孔隙度均高于对照,这有利于土壤中水、肥、气、热的流通和贮存,有利于水稻根系的穿插和水稻的生长发育。土壤容重方面,8a 间低于对照 3.6%—5.6%,而总孔隙度的增加幅度为 1.6%—17.4%,毛管孔隙度为 2.4%—16.7%。因此,采用保护性耕作能起到调控土壤物理性质的作用。另外,整体来看,随着试验时间的延长,各处理稻田表层土壤的容重有逐渐提高的趋势,较 2005 年增加 0.16 g/cm^3 ,增加幅度为 14.6%,而稻田表层土壤的总孔隙度和毛管孔隙度有所降低,较 2005 年降低幅度分别为 19.1%和 18.7%。由此可见,长期耕作后容易导致土壤板结,需要及时翻耕土壤,增加土壤中养分的积累。

表 2 稻田保护性耕作对土壤理化性状的影响

Table 2 The influence of conservational tillage on soil physical and chemical properties

耕作年份 Tillage year	处理 Treatments	土壤物理性状 Soil physical properties			土壤化学性状 Soil chemical properties				
		SB	TP	CP	pH	OM	TN	AP	AK
2005	CT+P	1.15a	53.97d	51.26d	5.61a	28.61b	1.35b	19.43b	34.72b
	CT+T	1.14a	58.24c	56.74c	5.69a	28.73b	1.45b	21.14b	34.98b
	NT+P	1.09a	64.52b	60.33b	5.58a	29.68ab	1.90a	27.13a	44.61a
	NT+T	1.07a	67.32a	62.42a	5.71a	31.08a	1.93a	27.63a	45.19a
2006	CT+P	1.18a	53.40a	50.62b	5.61a	29.22b	1.46a	26.11c	34.56c
	CT+T	1.16a	54.30b	50.93b	5.70a	30.19ab	1.53a	27.50c	35.77c
	NT+P	1.13a	56.70b	52.14ab	5.67a	30.87ab	1.60a	29.41b	40.18b
	NT+T	1.12a	56.94b	53.79a	5.73a	32.01a	1.71a	35.89a	44.15a
2007	CT+P	1.20a	53.10b	49.98b	5.63a	28.30b	1.45a	22.04c	34.65b
	CT+T	1.19a	53.34b	51.22b	5.69a	28.73b	1.85a	25.09b	42.68a
	NT+P	1.15a	55.82a	53.66a	5.68a	29.94ab	2.07a	28.39a	43.61a
	NT+T	1.13a	55.64a	53.90a	5.71a	31.25a	2.19a	28.39a	44.34a
2008	CT+P	1.23a	52.76b	48.86c	5.34a	27.36b	1.52a	19.50c	35.10b
	CT+T	1.21a	53.03b	50.33bc	5.36a	27.88ab	1.55a	20.64c	35.30b

续表

耕作年份 Tillage year	处理 Treatments	土壤物理性状 Soil physical properties			土壤化学性状 Soil chemical properties				
		SB	TP	CP	pH	OM	TN	AP	AK
2009	NT+P	1.18a	55.01a	52.11ab	5.69a	29.66a	1.97a	27.63a	45.01a
	NT+T	1.16a	55.67a	53.03a	5.73a	29.71a	2.05a	25.47b	44.80a
	CT+P	1.25a	50.69b	48.05b	5.19a	30.50b	1.94a	17.94c	43.20c
	CT+T	1.21a	51.88ab	48.84ab	5.20a	31.75b	2.05a	18.36c	45.36b
2010	NT+P	1.17a	52.63a	50.04a	5.32a	32.30b	2.19a	22.93b	49.51a
	NT+T	1.16a	52.93a	50.72a	5.56a	34.70a	2.31a	25.31a	50.25a
	CT+P	1.26a	50.07b	47.43a	5.11a	30.80b	1.07a	17.98c	32.57c
	CT+T	1.24a	51.22ab	48.20a	5.14a	34.80a	1.50a	19.25bc	36.86b
2011	NT+P	1.18a	51.76ab	48.65a	5.15a	31.80b	2.58a	20.26b	38.40b
	NT+T	1.17a	51.98a	48.88a	5.18a	35.00a	2.62a	25.60a	42.26a
	CT+P	1.28a	49.82a	46.65a	4.90a	32.00b	1.81a	19.37a	43.19c
	CT+T	1.25a	50.20a	47.03a	4.95a	35.00a	2.03a	20.13a	44.37c
2012	NT+P	1.21a	50.88a	48.22a	4.95a	36.20a	2.41a	20.27a	47.20b
	NT+T	1.19a	51.27a	48.45a	5.04a	31.50b	2.67a	20.52a	55.36a
	CT+P	1.33a	48.78a	45.73b	4.76a	34.72a	2.31a	20.12d	39.50b
	CT+T	1.31a	49.12a	46.07b	4.94a	35.34a	2.55a	22.75c	40.50b
8a 平均值	NT+P	1.24a	49.23a	47.48ab	4.92a	36.45a	2.62a	25.12b	41.25b
	NT+T	1.22a	50.33a	48.24a	4.96a	35.39a	2.59a	31.55a	48.25a
8a 平均值		1.19	53.52	50.63	5.36	31.61	1.96	23.71	41.80

表中数据为平均值;同列不同的小写字母表示不同处理同一年份差异达 5% 显著水平 ($P < 0.05$); SB: 土壤容重 Soil bulk (g/cm^3); TP: 总孔隙度 Total porosity/%; CP: 毛管孔隙度 Capillary porosity/%; OM: 有机质 Organic matter (g/kg); TN: 全氮 Total nitrogen (g/kg); AP: 有效磷 Available phosphorus (mg/kg); AK: 速效钾 Available potassium (mg/kg)

另外由表 2 可知,与对照相比,连续 8a 稻田保护性耕作处理提高了土壤有机质、有效磷、速效钾含量,其中土壤 pH、全氮差异不显著。连续 8a 保护性耕作处理土壤有机质均高于对照,增加范围 2.9%—10.0%,其中 2005—2010 年均是 NT+T 处理最大,高于其它处理 5.0%—10.1%,NT+P 处理在 2011—2012 年达到最大,高于其它处理 10.3%、3.7%。8a 间保护性耕作处理土壤有效磷含量均高于对照,提高幅度为 4.8%—31.6%,这说明保护性耕作能促进有效磷的提高,有利于改变土壤中的速效养分,使土壤的形状朝有利于水稻生长的方向改善。与对照相比,连续 8a 保护性耕作处理的速效钾含量增加了 9.70%—25.67%,且除了 2008 年 NT+P 处理达到最大以外,其余年份均是 NT+T 效果最好,高于其它处理 10.0%—23.2%。

2.3 稻田保护性耕作对土壤生物学性状的影响

由表 3 可以看出,土壤真菌方面在 2005 年处理 NT+P 处理数量最多,与对照相比增加了 51.6%,且差异显著 ($P < 0.05$),CT+T 处理在 2008 年达到最大,显著高于对照处理 54.1%。2005—2011 年连续 7a 间各处理的硝化细菌数量差异不显著,仅在 2012 年处理 NT+T、NT+P 显著高于对照 126.1%、121.1%,增加幅度较大,但各处理间细菌、放线菌均差异不显著。另外由表 3 还可以看出,各处理间过氧化氢酶、脲酶活性均差异不显著。8a 间土壤转化酶活性变化范围在 0.292—0.451 mg/g 之间,其中 2005—2007、2012 年均是处理 NT+T 达到最大,与对照相比,分别依次增加了 105.2%、82.6%、137.7%、72.7%,且差异显著 ($P < 0.05$)。

2.4 水稻产量、土壤理化性状、生物学性状的相关性

水稻产量、产量各构成要素与土壤理化性状、生物学性状相关性分析(表 4)可以看出,水稻产量与土壤容重、pH、有机质、全氮、硝化细菌呈极显著相关 ($P < 0.01$),与总孔隙度、毛管孔隙度、速效钾、放线菌显著相关 ($P < 0.05$),而与有效磷、细菌、真菌、过氧化氢酶、脲酶、转化酶相关不显著 ($P > 0.05$)。在产量构成要素中,穗长与真菌、过氧化氢酶极显著相关;有效穗数与土壤容重显著负相关,与总孔隙度、毛管孔隙度极显著相关,与 pH、全氮、硝化细菌显著相关;每穗粒数与土壤容重显著负相关,与 pH、有机质、全氮、速效钾、放线菌极显著相关,与总孔隙度、毛管孔隙度、细菌、硝化细菌显著相关;结实率与土壤容重呈极显著负相关,与 pH、有机质、全氮、硝化细菌极显著相关,与总孔隙度、毛管孔隙度、速效钾、真菌、放线菌显著相关;千粒重与土壤容重

表 3 稻田保护性耕作对土壤微生物数量和酶活性的影响

Table 3 Effects of paddy field conservation tillage on abundance of soil microorganisms and enzyme activities

年份 Tillage year	处理 Treatments	微生物数量 Micro-organisms				酶活性 Enzyme activities/(mg/g)		
		细菌 Bacteria (10 ⁷ CFU/g)	真菌 Fungi/ (10 ⁵ CFU/g)	放线菌 Actinomyces/ (10 ⁶ CFU/g)	硝化细菌 Nitrifying bacteria/ (10 ⁵ CFU/g)	过氧化氢酶 Catalase	脲酶 Urease	转化酶 Invertase
2005	CT+P	0.41a	0.62b	0.82a	0.85a	0.638a	0.192a	0.194b
	CT+T	1.02a	0.75ab	0.85a	1.11a	0.829a	0.225a	0.305ab
	NT+P	1.40a	0.94a	0.91a	1.08a	0.948a	0.240a	0.352ab
	NT+T	1.63a	0.66ab	0.97a	1.20a	1.003a	0.251a	0.398a
2006	CT+P	0.55a	0.56a	0.71a	0.76a	0.631a	0.174a	0.298b
	CT+T	0.89a	0.97a	0.93a	1.17a	0.648a	0.259a	0.359ab
	NT+P	1.12a	1.18a	0.76a	2.21a	1.038a	0.277a	0.517a
	NT+T	1.76a	1.63a	1.03a	1.35a	1.427a	0.231a	0.544a
2007	CT+P	0.75a	0.68a	0.72a	0.81a	0.567a	0.151b	0.255b
	CT+T	0.94a	1.06a	0.96a	1.32a	0.699a	0.179b	0.421ab
	NT+P	1.22a	1.64a	1.13a	1.59a	0.786a	0.217ab	0.521a
	NT+T	1.61a	1.33a	1.25a	1.21a	1.210a	0.381a	0.606a
2008	CT+P	0.77a	0.61b	0.66a	0.69a	0.766a	0.133a	0.221a
	CT+T	0.82a	0.94a	0.84a	1.82a	0.745a	0.133a	0.283a
	NT+P	1.13a	0.93a	1.05a	2.15a	0.748a	0.138a	0.292a
	NT+T	1.23a	0.68b	1.36a	2.04a	0.780a	0.144a	0.372a
2009	CT+P	0.93a	0.65a	0.88a	1.43a	0.808a	0.119a	0.278a
	CT+T	1.17a	0.93a	1.28a	2.28a	0.820a	0.133a	0.286a
	NT+P	1.54a	0.82a	1.32a	2.47a	0.850a	0.140a	0.303a
	NT+T	1.56a	1.07a	1.02a	1.47a	0.904a	0.142a	0.383a
2010	CT+P	1.50a	0.79a	1.24a	1.22a	0.799a	0.140a	0.192a
	CT+T	1.88a	0.93a	1.45a	1.48a	0.805a	0.204a	0.271a
	NT+P	1.97a	0.94a	1.89a	2.19a	0.873a	0.235a	0.314a
	NT+T	2.75a	1.16a	1.98a	3.02a	0.940a	0.251a	0.373a
2011	CT+P	1.63b	0.97a	1.61a	1.57a	1.001a	0.212a	0.237a
	CT+T	1.95b	1.01a	1.69a	1.75a	1.055a	0.219a	0.278a
	NT+P	2.83ab	1.29a	1.82a	2.69a	1.070a	0.237a	0.354a
	NT+T	3.85a	1.45a	1.88a	2.74a	1.114a	0.263a	0.373a
2012	CT+P	1.75b	0.96a	2.34a	1.61b	0.967a	0.202a	0.275b
	CT+T	2.30ab	1.05a	2.75a	1.99ab	1.149a	0.226a	0.376ab
	NT+P	3.80a	1.53a	2.94a	3.56a	1.057a	0.236a	0.392ab
	NT+T	2.67ab	1.91a	3.20a	3.64a	1.177a	0.250a	0.475a

表中数据为平均值;同列不同的小写字母表示不同处理同一年份差异达 5%显著水平 ($P < 0.05$)

显著负相关,与总孔隙度、毛管孔隙度、有效磷、硝化细菌显著相关。综上,通过采取一定的农田管理措施提高土壤理化性状、生物学性状,能够促进水稻生长发育、增加水稻产量,而保护性耕作对于有效提高土壤养分和增加土壤活性方面发挥着重要的作用。

表 4 水稻产量、产量各构成因素与土壤性状之间的相关性

Table 4 Correlation matrix between rice yield, its components and soil properties

项目 Stems	SB	TP	CP	pH	OM	TN	AP	AK	BA	FU	AC	NB	CA	UA	IA
RY	-1.00**	0.98*	0.98*	1.00**	0.99**	1.00**	0.79	0.98*	0.94	0.57	0.97*	1.00**	0.57	0.12	0.54
EL	-0.48	0.36	0.35	0.58	0.65	0.6	0.08	0.69	0.79	1.00**	0.73	0.48	1.00**	0.77	0.41
EP	-0.99*	1.00**	1.00**	0.96*	0.93	0.95*	0.92	0.91	0.83	0.35	0.89	0.99*	0.35	0.36	0.73
NP	-0.98*	0.95*	0.95*	1.00**	1.00**	1.00**	0.73	1.00**	0.97*	0.65	0.99**	0.98*	0.65	0.02	0.45
SR	-0.99**	0.97*	0.97*	1.00**	0.99**	1.00**	0.77	0.99*	0.95*	0.6	0.98*	0.99**	0.6	0.09	0.51
GW	-0.96*	0.98*	0.99*	0.91	0.87	0.9	0.96*	0.84	0.75	0.22	0.82	0.95*	0.22	0.48	0.82

* 为显著相关($P < 0.05$), ** 为极显著相关($P < 0.01$); RY 水稻产量: Rice yield; EL 穗长: Ear length; EP 有效穗数: Effective panicles;

NP 每穗粒数: Grain number per panicle; SR 结实率: Seed-setting rate; GW 千粒重: 1000-grain weight; SB 土壤容重: Soil bulk; TP 总孔隙度: Total porosity; CP 毛管孔隙度: Capillary porosity; OM 有机质: organic matter; TN 全氮: Total nitrogen; AP 有效磷: Available phosphorus; AK 速效钾: Available potassium; BA 细菌: Bacteria; FU 真菌: Fungi; AC 放线菌: Actinomycetes; NB 硝化细菌: Nitrifying bacteria; CA 过氧化氢酶: Catalase activities; UA 脲酶: Urease activities; IA 转化酶: Invertase activities

3 讨论

3.1 多年稻田保护性耕作体系下的土壤性质变化

土壤氮、磷、钾元素是表征土壤肥力(健康)的重要指标,在提供作物生长所需的养分、改善土壤结构、增加土壤保水保肥性能以及缓冲性能等方面发挥着重要作用^[8-9]。徐阳春^[10]等连续 14 a 的水旱轮作免耕试验表明,长期免耕和施肥造成土壤养分的表层富集,0—5 cm 土层有机碳、全氮、速效氮含量显著增加,而 5—10 cm 和 10—20 cm 土层则明显低于传统耕作。这是因为稻田免耕土壤没有经过人为的干扰松动,肥料施在土壤表层,难于下渗到亚表层和底土层,因而有利于土壤养分在表土层富集^[11-12]。本研究结果也表明,与传统耕作相比,连续 8a 稻田保护性耕作处理提高了土壤有机质(2.9%—10.0%)、有效磷(4.8%—31.6%)、速效钾(9.7%—25.7%),且以免耕+抛秧和免耕+插秧效果最为显著。姚珍^[8]等研究表明,与传统耕作相比,秸秆覆盖可使土壤总孔隙度增加 0.3%—2.0%,容重降低 0.02—0.06 g/cm³。本研究与上述结果一致,实行稻田保护性耕作土壤容重低于传统耕作 3.6%—5.6%,而总孔隙度和毛管孔隙度分别高出传统耕作 1.6%—17.4%、2.4%—16.7%。而吴建富^[13]等研究表明,稻田免耕(1a),有利于改善土壤物理性状,随着免耕时间(2a)的延长,稻田表层土壤容重开始增加,非毛管孔隙度较翻耕处理下降 18.7%—23.3%;免耕 3 a,稻田土壤容重较翻耕增加更明显,增幅达 8.10%。说明稻田免耕 2 a 后土壤开始板结,本研究结果也表明随着试验时间的延长,稻田表层土壤容重较 2005 年增加了 14.6%,总孔隙度和毛管孔隙度降低了 19.1%和 18.7%。总体上,多年稻田保护性耕作有利于改变土壤中的速效养分,促进土壤中养分的积累和吸收,使土壤朝有利于水稻生长的方向改善。

土壤微生物推动着土壤的物质转化和能量流动,它可以代表土壤中物质代谢的旺盛程度,是土壤肥力的一个重要指标^[14-15]。保护性耕作可以增加土壤某些微生物数量和活性。殷士学^[16]经过 7 a 的试验结果显示,砂壤土上免耕土壤中的微生物数量明显高于传统耕作。李华兴^[17]等研究结果表明免耕土壤中的放线菌和真菌数量减少,而细菌数量增加,酶活性增强。张星杰等^[18-19]研究发现在全生育期保护性耕作处理土壤微生物细菌、放线菌、真菌和纤维素分解菌数量分别比传统耕作提高 41.9%、470.1%、67.9%和 65.7%。本试验研究结果表明,2012 年处理免耕+抛秧、免耕+插秧的硝化细菌数量显著高于对照 126.1%、121.1%,增加幅度较大,但各处理间细菌、放线菌均差异不显著。另外 2005—2007、2012 年土壤转化酶活性均是处理免耕+抛秧达到最大,显著高于对照 72.7%—137.7%,但各处理在过氧化氢酶、脲酶活性均差异不显著。因此,免耕后水稻根茬丰富的有机质含量可以促使细菌和真菌大量繁殖,能够有效促进土壤中营养元素的转化,有利于水稻的吸收和生长^[20]。

3.2 产量与土壤性质关系

水稻产量和稻米品质受品种遗传因素影响,也与土壤肥力、气温等环境条件关系密切。王秋菊^[21]通过探讨土壤性状影响水稻稻米产量及品质指标形成的机理,结果表明水稻产量因土壤肥力水平不同而差异显著。水稻产量与土壤有机质、全氮、碱解氮含量呈显著正相关关系,而与土壤有效磷、速效钾含量相关关系不显著。刘淑霞等^[22]分析不同耕作施肥措施下土壤速效养分和作物产量的变化规律及其相互关系,表明速效钾的含量对作物产量的影响相对较大,而土壤中碱解氮的含量对作物产量的影响相对较小。本研究结果表明,水稻产量与土壤容重、pH、有机质、全氮、硝化细菌呈极显著相关,与总孔隙度、毛管孔隙度、速效钾、放线菌显著相关($P<0.05$),而与有效磷、细菌、真菌、过氧化氢酶、脲酶、转化酶相关不显著。

随着我国现代农业的发展,省工、省力、轻简、环境友好型技术越来越受到欢迎和重视,“中央一号”文件连续多年将保护性耕作技术列为重要的可持续技术加以推广^[23],基于保护性耕作对作物产量及土壤肥力状况和微生物的积极效益,长期稻田保护性耕作是适合江南丘陵区双季稻区农业可持续发展的有效模式之一,其中免耕+抛秧和免耕+插秧两种方式效果最为显著。但南方部分地区耕地规模小,机械化水平低,且作物产量高,秸秆量大,保护性耕作秸秆处理技术难度较大,上述原因导致保护性耕作难以大范围推广与应用。

4 结论

(1)在本试验条件下稻田保护性耕作显著提高了水稻产量,8a 间保护性耕作处理的平均产量高于传统耕作 4.5%—8.8%,各处理的有效穗数、每穗粒数和结实率均高于对照,而穗长和千粒重差异不显著。

(2)连续 8a 实行稻田保护性耕作处理的土壤容重低于传统耕作 3.6%—5.6%,而总孔隙度和毛管孔隙度分别高出传统耕作 1.6%—17.4%、2.4%—16.7%。与传统耕作相比,连续 8a 保护性耕作处理提高了土壤有机质(2.9%—10.0%)、有效磷(4.8%—31.6%)、速效钾(9.7%—25.7%)。

(3)在 2005 年免耕+插秧的土壤真菌数量最多,显著高于对照处理 51.6%,免耕+抛秧在 2008 年达到最大,显著高于对照处理 54.1%。2012 年免耕+抛秧、免耕+插秧显著高于对照 126.1%、121.1%。8a 间土壤转化酶活性变化范围在 0.292—0.451 mg/g 之间,其中 2005—2007、2012 年均免耕+抛秧达到最大,显著高于对照处理 72.7%—137.7%。

参考文献(References):

- [1] 邹应斌,黄见良,屠乃美,李合松,黄升平,张杨珠. “旺壮重”栽培对双季杂交稻产量形成及生理特性的影响. 作物学报, 2001, 27(3): 343-350.
- [2] 王昌全,魏成明,李廷强,孙凤琼. 不同免耕方式对作物产量和土壤理化性状的影响. 四川农业大学学报, 2001, 19(2): 152-154, 187-187.
- [3] 李继明,黄庆海,袁天佑,曹金华,余喜初. 长期施用绿肥对红壤稻田水稻产量和土壤养分的影响. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 563-570.
- [4] 高菊生,曹卫东,李冬初,徐明岗,曾希柏,聂军,张文菊. 长期双季稻绿肥轮作对水稻产量及稻田土壤有机质的影响. 生态学报, 2011, 31(16): 4542-4548.
- [5] 余晓鹤,黄东迈. 土壤表层管理对部分土壤化学性质的影响. 土壤通报, 1990, (4): 158-161.
- [6] 中国科学院南京土壤研究所微生物室. 土壤微生物研究法. 北京: 科学出版社, 1985: 59-63.
- [7] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986: 27-30.
- [8] 姚珍. 保护性耕作对水稻生长和稻田环境质量的影响[D]. 南昌: 江西农业大学, 2007.
- [9] 徐玲,张杨珠,周卫军,周清,曾希柏,夏海鳌. 不同施肥结构下稻田产量及土壤有机质和氮素营养的变化. 农业现代化研究, 2006, 27(2): 153-156.
- [10] 徐阳春,沈其荣,雷宝坤,储国良,王全洪. 水旱轮作下长期免耕和施用有机肥对土壤某些肥力性状的影响. 应用生态学报, 2000, 11(4): 549-552.
- [11] 刘怀珍,黄庆,李康活,陆秀明,程永盛,付华,刘军. 水稻连续免耕抛秧对土壤理化性状的影响初报. 广东农业科学, 2000, (5): 8-11.
- [12] 江泽普,黄绍民,韦广泼,陈伯伦,蒙炎成,苏天明,李振经. 不同连作免耕稻田土壤肥力变化与综合评价. 西南农业学报, 2007, 20

(6): 1250-1254.

- [13] 吴建富, 潘晓华, 石庆华, 漆英雪, 刘宗发, 胡金和. 水稻连续免耕抛栽对土壤理化和生物学性状的影响. 土壤学报, 2009, 46(6): 1132-1139.
- [14] 徐琪, 杨林章, 董元华. 中国稻田生态系统. 北京: 中国农业出版社, 1998: 158-170.
- [15] 张鼎华, 叶章发, 范必有, 危廷林. 抚育间伐对人工林土壤肥力的影响. 应用生态学报, 2001, 12(5): 672-676.
- [16] 殷士学, 宋明芝, 封克. 免耕法对土壤微生物和生物活性的影响. 土壤学报, 1992, 29(4): 370-376.
- [17] 李华兴, 卢维盛, 刘远金, 张新明, 陈喜崇, 李永锋, 霍锦添. 不同耕作方法对水稻生长和土壤生态的影响. 应用生态学报, 2001, 12(4): 553-556.
- [18] 樊晓刚, 金轲, 李兆君, 荣向农. 不同施肥和耕作制度下土壤微生物多样性研究进展. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3): 744-751.
- [19] 张星杰, 刘景辉, 李立军, 王智功, 王林, 苏顺和. 保护性耕作对旱作玉米土壤微生物和酶活性的影响. 玉米科学, 2008, 16(1): 91-95, 100-100.
- [20] 倪国荣, 涂国全, 魏赛金, 吴建富, 石庆华, 潘晓华. 稻草还田配施催腐菌剂对晚稻根际土壤微生物与酶活性及产量的影响. 农业环境科学学报, 2012, 31(1): 149-154.
- [21] 王秋菊. 黑龙江地区土壤肥力和积温对水稻产量、品质影响研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2012.
- [22] 刘淑霞, 刘景双, 赵明东, 王金达, 于君宝, 丛晓明. 土壤活性有机碳与养分有效性及作物产量的关系. 吉林农业大学学报, 2003, 25(5): 539-543.
- [23] 高旺盛. 中国保护性耕作制. 北京: 中国农业大学出版社, 2011.