耕作方式和秸秆还田对直播稻田土壤有机碳及水稻产量的影响

段华平，牛永志，卞新民

（南京农业大学 农学院，江苏 南京 210095）

摘　要：研究了直播稻田在不同耕作方式和秸秆还田下土壤有机碳（SOC）和水稻产量的变化。结果表明，秸秆还田能够显著增加 SOC 含量，耕作方式可显著影响土壤有机碳的垂直分布。SOC 含量与水稻籽粒产量存在显著的正相关关系（$R^2=0.712\ 9^{**}$，$n=6$），SOC 含量与土壤全氮（TSN）之间有显著的正相关性（$R^2=0.860\ 9^{**}$，$n=43$）。秸秆还田能够促进土壤有机碳的增加，稳定直播稻田系统的生产力，实现粮食安全和生态环境安全的双赢。

关键词：耕作方式；秸秆还田；土壤有机碳；水稻产量

文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2012)03-0023-05　　**中图分类号**：S34

Effects of Tillage Mode and Straw Return on Soil Organic Carbon and Rice Yield in Direct Seeding Rice Field

DUAN Hua-ping, NIU Yong-zhi, BIAN Xin-min

(*College of Agronomy, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu* 210095, *China*)

Abstract: Effects of tillage modes and straw return on soil organic carbon(SOC) and rice yield were studied in direct seeding rice field. Results showed that straw return significantly increased SOC contents, and soil tillage modes had significant effects on the vertical distribtion of SOC. There was a significant positive correlation between SOC content and rice yield($R^2=0.712\ 9^{**}$, $n=6$), and significant positive correlation between SOC and TSN($R^2=0.860\ 9^{**}$, $n=43$). These evidenced that straw return promoted SOC content, stabilized crop productivity in direct rice field, and achieved the win-win effect of grain safety and environmental safety.

Keywords: tillage mode; straw return; soil organic carbon; rice yield

土壤有机碳的库容巨大（1 400～1 500 Gt），其较小幅度的变化就可能影响到 CO_2 向大气的排放，以温室效应影响全球气候变化。人类不当利用下土壤碳库的损失可能是陆地失汇和大气碳库不断增加的原因之一[1-2]。水稻土作为一种特殊利用方式下形成的人为耕作土壤，具有较高的碳密度和较大的固碳潜力[3-4]。最近研究显示，近 20 a 来我国农田土壤有机碳（SOC）呈增长趋势，尤其是南方红壤丘陵地区和太湖地区更为明显[4-6]。在稻田生态系统中，土壤耕作和秸秆还田是广泛使用的人为管理措施，随着社会和生产的发展，秸秆还田的方式和数量都在不断变化，尤其是部分地区禁烧秸秆和留高茬直接还田技术的推广，使秸秆直接还田的数量不断增加。大量研究表明，采用少、免耕以及秸秆还田等保护性耕作措施可以有效增加土壤有机碳储量[2-3,7-8]。但也有研究认为，与传统翻耕相比，免耕通常增加的土壤有机碳主要集中在土壤表层几厘米深度，并不总是引起整个土体土壤有机碳的增加[9]。Yang 等[10]研究显示，长期免耕较翻耕提高了表层 0—10 cm 土壤有机碳，但降低了 10—20 cm 土壤有机碳含量。而免耕与翻耕处理下，20—30 cm 土壤有机碳含量差异不显著。Deen 等[11]通过长期试验，比较了加拿大免耕、犁耕和秸秆覆盖等不同耕作制度对土壤固碳的影响，表明不同耕作制度下土壤有机碳与耕作强度和深度有关。如果由耕作引起的秸秆分解转化的碳没有以 CO_2 的形式释放到大气中的话，秸秆还田量越多，被固存的有机碳就越多。

收稿日期：2011-06-02　　**修回日期**：2011-09-16

资助项目：公益性行业（农业）科研项目“太湖流域环境友好型农作制及其关键配套技术研究与示范”（200803028）

作者简介：段华平（1975—），男（汉族），湖南省茶陵县人，博士，主要从事农业生态和耕作制度研究。E-mail：dhp@njau.edu.cn。

通信作者：卞新民（1952—），男（汉族），江苏省东台市人，博士，教授，主要从事农业生态和耕作制度研究。E-mail：bjxlml@163.com。

直播水稻是近年来出现的一种轻型水稻栽培新模式，具有省工，高产和高效的优点，在浙江、江苏、广东等经济发达省份大面积推广应用，大有代替传统育秧和手工插秧水稻生产方式的趋势[12]。但是，关于耕作方式和秸秆还田对直播稻田土壤有机碳影响的研究鲜见报道。本文通过设置直播稻田不同耕作方式和秸秆还田量处理，以期阐明耕作方式和秸秆还田对直播稻田 SOC 含量、作物产量的影响以及提高 SOC 含量的措施。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验设 6 个处理。(1) 免耕无秸秆还田处理(NN)。冬小麦收获后，水稻采用免耕直播机播种，土壤无扰动。(2) 免耕秸秆还田处理(NNS)。冬小麦收获后，小麦秸秆全生物量还田，水稻采用免耕直播机播种，土壤无扰动。(3) 旋耕无秸秆还田处理(RR)。冬小麦收获后，水稻播种前旋耕深 8 cm。(4) 旋耕秸秆还田处理(RRs)。冬小麦收获后，小麦秸秆生物量全部还田，水稻播种前旋耕深 8 cm。(5) 翻耕无秸秆还田处理(DD)。冬小麦收获后，水稻播种前翻耕 20 cm。(6) 翻耕秸秆还田(DDs)。冬小麦收获后，小麦秸秆全生物量还田，水稻播种前翻耕 20 cm。试验采用随机区组排列，3 次重复。小区面积 30 m^2。

试验在南通市农业局水稻试验田进行(2004—2006 年)，供试土壤类型为潮土类。试验田实行水稻—小麦轮作种植，试验田土壤理化性状如表 1 所示。供试水稻品种为武粳 13 号，播种方式为机直播。各处理的施肥量和施肥方法相同，即氮肥、磷肥和钾肥用量分别为 150，90 和 180 kg/hm^2。氮肥采用分次施肥，基肥、蘖肥、穗肥分别占总施氮量的 60%，30%，10%。磷肥和钾肥作基肥一次性施入。水稻用稻麦条播机直播，播种量为 90 kg/hm^2。田间其他管理采用常规管理。

表 1 试验前研究区土壤的理化性状

容 重/(g·cm^{-3})	有机质/(g·kg^{-1})	全 氮/(g·kg^{-1})	速效氮/(mg·kg^{-1})	速效磷/(mg·kg^{-1})	速效钾/(mg·kg^{-1})	pH 值
1.37	18.70	1.30	92.67	6.51	57.78	7.80

1.2 测定内容与方法

2006 年底，水稻收割后用环刀法测 0—7，7—14，和 14—21 cm 土层的土壤容重。

水稻收割后按照 5 点取样法，分 0—7，7—14，14—21 cm 这 3 层取土壤样品，带回实验室风干后采用重铬酸钾容量法—外加热法测定有机质含量，采用半微量开氏法测定全氮含量。

水稻完熟期，在每个小区内采用 5 点取样法测产，分别得到各产量构成因子的平均值，再计算得到各处理平均理论产量。试验结束时将各小区单独收割，脱粒晒干得各小区实际产量。

1.3 计算方法

采用下列公式[13]求得表土(0—21 cm)碳密度：

$$D_{oc} = SOC \times \gamma \times H_i \times 10^{-1}$$

式中：D_{oc}——碳密度(t/hm^2)；SOC——有机碳含量(g/kg)；γ——土壤容重(g/cm^3)；H_i——土壤厚度(cm)。

2 结果与分析

2.1 不同处理土壤有机碳含量和分布

土壤有机碳含量分析结果(表 2)表明，秸秆还田显著增加土壤有机碳含量，土壤耕作显著影响土壤有机碳的垂直分布。

在相同土壤耕作方式下，秸秆还田处理比无秸秆还田处理 0—21 cm 层土壤有机碳含量分别高 12.85%(NNs)，17.47%(RRs)和 11.70%(DDs)，且 RR 与 RRs，DD 与 DDs 差异显著，但 NN 与 NNs 差异不显著。无秸秆处理 0—21 cm 土壤有机碳含量以 DD 最大，NN 最小，NN 与 DD 差异显著，但其余的相互之间差异不显著；秸秆还田处理 0—21 cm 层土壤有机碳含量以 DDs 最大，NNs 最小，与无秸秆还田处理规律一样。NNs 与 DDs，RRs 差异显著，RRs 与 DDs 差异不显著。这表明秸秆还田能够显著增加土壤有机碳含量，而在免耕条件下土壤有机碳较低，进行适当的耕作是增加耕层土壤有机碳含量的手段。其原因可能是 NNs 处理秸秆位于土壤表层和上层，微生物总量较大，土壤酶活性较强，秸秆被降解和再利用速度相对较快。

不同处理对土壤有机碳含量垂直分布影响显著，都存在土层 0—7 cm＞7—14 cm＞14—21 cm 的规律，但影响垂直分布的梯度差异大小不同。无秸秆处理中，0—7 cm 土层 SOC 含量以 NN 最大，DD 最小，相互之间差异不显著。但在 7—14 cm 和 14—21 cm 土层中出现了相反的现象，以 DD 最大，NN 最小。在 7—14 cm 土层中 SOC 含量相互差异不显著，在 14—21 cm 土层中 SOC 含量相互之间差异显著。可见，

SOC 含量垂直分布差异显著,且 NN 的梯度差异明显要大于 RR 和 DD。其原因在于随着耕作深度的增加,对土壤扰动程度增加,减少了土层之间的理化性质差异。而免耕则缺少这种作用机制。有秸秆处理基本出现了与无秸秆处理相似的规律,但有一个现象值得注意,那就是在 0—7 cm 土层中,SOC 含量 NNs< RRs,这可能与 NNs 处理秸秆位于土壤表层和上层,微生物总量较大,土壤酶活性较强,秸秆降解和再利用相对较快,而 RRs 处理秸秆有土层覆盖,减缓了这一进程。

表 2　不同处理土壤有机碳含量　　g/kg

土壤深度	NN	RR	DD	NNs	RRs	DDs
0—7 cm	17.48±1.42abc	16.46±1.21bc	15.74±1.56c	17.89±0.97ab	18.86±0.85a	16.41±1.07bc
7—14 cm	7.89±1.72c	9.11±1.17bc	9.83±0.73bc	8.87±1.44bc	11.34±1.74ab	12.93±1.78a
14—21 cm	2.88±0.21c	4.81±1.36b	7.52±0.30a	5.14±0.37b	5.12±0.08b	7.63±0.29a
0—21 cm	9.42±0.33d	10.13±0.50cd	11.03±0.77bc	10.63±0.92cd	11.90±0.58ab	12.32±0.91a

注:NN 为免耕无秸秆还田处理;NNS 为免耕秸秆还田处理;RR 为旋耕无秸秆还田处理;RRs 为旋耕秸秆还田处理;DD 为翻耕无秸秆还田处理;DDs 为翻耕秸秆还田处理。不同小写字母表示数值间差异显著($p<0.05$)。下同。

2.2　不同处理土壤有机碳密度变化

土壤有机碳密度研究结果(图 1)表明,秸秆还田能够增加土壤有机碳密度。在相同耕作方式下,秸秆还田处理比无秸秆还田处理 0—21 cm 土壤有机碳密度分别高 9.19%(NNs),9.41%(RRs)和 8.93%(DDs)。所有处理中,RRs 与 NN 差异显著,其余的相互之间差异不显著。无秸秆处理中,不同耕作方式对 0—21 cm 土壤有机碳密度的影响不显著,以 NN 处理最小,DD 处理居中,RR 处理最大。有秸秆处理出现了与无秸秆处理相同的规律。

适当的土壤扰动有利于耕层土壤有机碳密度的增加。在 6 个处理中,以 RRs 处理的土壤有机碳密度最高,在旋耕、翻耕、免耕 3 种耕作方式中,旋耕对土壤扰动适中,翻耕对土壤扰动最大,免耕不对土壤扰动。总之,秸秆还田并对土壤进行适当的扰动有利于耕层土壤有机碳密度的增加。

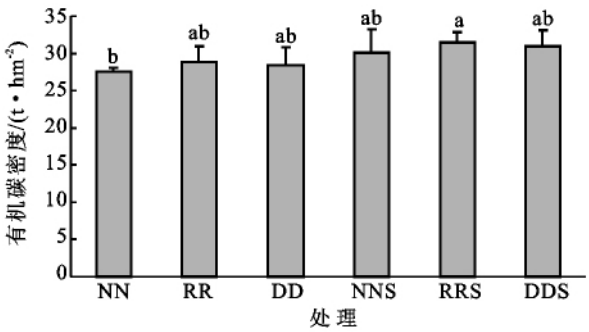


图 1　不同处理下耕层土壤有机碳密度

2.3　不同处理对水稻产量的影响

产量及其构成因素调查结果(表 3)显示,实际产量存在一定差异性,DDs,DD 处理的实际产量与 NN 处理有 5%水平上的差异显著性,但所有的产量构成因素和理论产量之间差异均不显著。

表 3　不同处理下水稻的产量及其构成因素

处理	有效穗数/10^6 hm^2	穗粒数	结实率/%	千粒重/g	理论产量/(kg·hm^{-2})	实际产量/(kg·hm^{-2})
NN	2.81a	102.5a	84.6a	26.52a	6 462.1a	7 199.49b
RR	3.21a	99.4a	85.1a	26.95a	7 317.8a	7 817.86ab
DD	3.38a	101.9a	85.3a	26.71a	7 847.2a	9 029.86a
NNs	2.88a	101.3a	84.9a	26.68a	6 608.4a	7 956.95ab
RRs	3.31a	96.8a	85.7a	27.02a	7 419.4a	8 269.56ab
DDs	3.39a	100.9a	86.4a	27.01a	7 982.3a	9 116.28a

秸秆还田对水稻有效穗数、穗粒数、结实率、千粒重和产量均产生一定的影响。秸秆还田增加有效穗数,提高结实率和增加千粒重,不利于穗粒数的增加,但其差异性均不显著。不同土壤耕作方式下秸秆还田处理比无秸秆还田处理有效穗数分别增加 2.49%(NNs),3.12%(RRs),0.30%(DDs),结实率提高了 0.35%(NNs),0.71%(RRs),1.29%(DDs),千粒重增加了 0.60%(NNs),0.26%(RRs),1.12%(DDs),

穗粒数减少了 1.18%(NNs),2.69%(RRs),0.98%(DDs)。秸秆还田处理理论产量和实际产量均有所提高,相同土壤耕作下,秸秆还田处理理论产量分别增加了 2.26%(NNs),1.39%(RRs)和 1.72%(DDs),但均没有达到显著水平,以 DDS 处理理论产量最高;实际产量增加了 10.52%(NNs),5.78%(RRs)和 0.96%(DDs),实际产量也是 DDs 处理最高,与理论产量相吻合。

不同处理对产量构成因素和产量均有一定影响。无秸秆处理中,有效穗数和结实率皆以 DD 处理最大,分别为 3.38×10^6 hm^2 和 85.3%;NN 处理最小,分别为 2.81×10^6 hm^2 和 84.6%。无秸秆处理穗粒数和千粒重的最大值和最小值分别为 102.5 粒(NN)和99.4粒(RR),26.95 g(RR)和 26.52 g(NN)。在无秸秆处理中,DD 处理的理论产量和实际产量均最大,均以 NN 处理最小,DD 处理的实际产量与 NN 处理有 5%水平上的差异显著性。秸秆还田处理与无秸秆处理具有相似的规律。可见在直播稻田生态系统中,适当的耕作比少免耕能够增加有效穗数和结实率,增加稻作产量。

3 讨 论

3.1 土壤有机碳含量与有机物质输入和作物产量的关系

已有研究表明,土壤碳增加可主要归结于我国农业发展中在提高产量下农作物秸秆等有机物质的还田输入增加[14]。本研究证实了在直播稻田中,秸秆还田和根茬还田可以提高土壤有机碳含量。本研究中,秸秆还田处理比无秸秆还田处理稻田土壤有机碳含量平均提高了 14.01%,耕层(0—21 cm)土壤碳密度平均提高了 9.18%。在耕作方式上,采用适当的土壤耕作可以促进 SOC 含量的增加,提高耕层有机碳密度。因为土壤耕作通过适当的机械力量扰动土壤耕作层,调节土壤水分、空气、温度和养分,为作物的生长发育提供适宜的土壤环境。秸秆还田后通过土壤耕作可以充分混合作物秸秆与土壤,促进秸秆分解转化,减少有机碳以 CO_2 的形式释放到大气中去。进一步对水稻籽粒产量与土壤有机碳含量的分析表明,不同耕作处理下土壤有机碳含量与稻作产量存在显著的正相关关系(图 2)。可见,作物产量的差异直接影响着进入土壤的有机物数量。土壤碳的积累首先与作物残茬输入碳有关。作物产量提高,残茬还田可以提高土壤有机碳含量,反之,作物残茬的输入碳可以改善土壤理化性状,增加作物产量,为我国的粮食安全提供保证。

3.2 影响土壤有机碳含量的土壤全氮因素

土壤有机碳(SOC)和全氮(TSN)是土壤肥力的重要因子。在农业生态系统中,碳氮循环并不是相互孤立的过程,它们相互依赖,紧密联系。最近几年来,全球变化研究中结予了陆地生态系统氮循环对碳循环的影响极大的关注。例如 Hu 等[15]认为自然或森林生态系统中 N 素对碳固定与收集有一定的限制作用。Nadelhoffer 等[16]利用^{15}N 示踪法分析评价了 6 种欧洲森林和 3 种北美森林中 N 沉降水平提高下温带森林碳固定的潜力,结果认为,N 沉降促进森林碳固定,但并不是北纬度地区碳固定的最主要因素。潘根兴等[14]通过对太湖地区黄泥土肥料长期试验研究指出,稻田土壤中有机碳的积累往往伴随着 N 素积累现象。

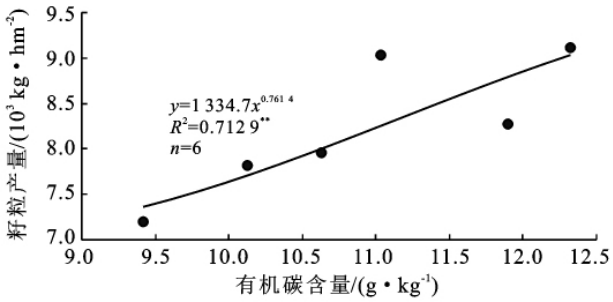


图 2 有机碳含量与水稻产量的关系

利用 6 个处理共 43 个样本的总氮和有机碳值,建立了土壤全氮与有机碳含量之间的线性回归方程(图 3)。统计分析显示,土壤有机碳含量与全氮含量之间有极显著的相关性,揭示出土壤氮水平对土壤有机碳有正效应。

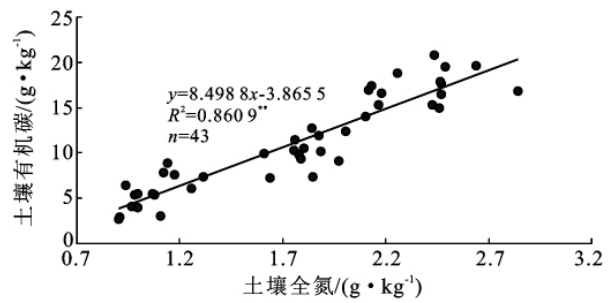


图 3 土壤有机碳与全氮的关系

在农业生产中,通过秸秆还田,增施有机肥来提高土壤碳的盈余量,保持农田系统碳的良性循环,实现一方面碳循环速度加快,另一方面又保持土壤碳的净增,这样使每年有较多的有机质发生矿化,产生大量氮素去供给作物生长。在此基础之上合理施加氮肥,从而实现资源的高效利用。

4 结 论

直播稻田中,秸秆还田能够显著增加土壤有机碳含量,土壤耕作方式显著影响土壤有机碳的垂直分布。秸秆还田有利于耕作层土壤有机碳密度的增加。适当的土壤耕作比免耕能够增加稻作产量,但相互之间差异不显著。这可能与试验时限有关,进行长期定位试验可以不断完善相关结论。不同耕作方式和秸秆还田处理下,土壤有机碳含量与水稻籽粒产量存在明显正相关性,秸秆归还和作物根茬还田是促进土壤有机碳含量和增加作物产量的重要因素。土壤有机碳含量与全氮之间有极显著的正相关性,作物秸秆还田后,可以增加土壤中碳氮的积累,从而实现资源的高效利用。

[参 考 文 献]

[1] Lal R, Griffin M, Apt J, et al. Managing Soil Carbon [J]. Science, 2004,16(4):304-393.

[2] 孙国峰,徐尚起,张海林,等. 轮耕对双季稻田耕层土壤有机碳储量的影响[J]. 中国农业科学,2010,43(18):3776-3783.

[3] 潘根兴,赵其国. 我国农田土壤碳库演变研究:全球变化和国家粮食安全[J]. 地球科学进展,2005,20(4):384-393.

[4] 李昌新,黄山,彭现宪,等. 南方红壤稻田与旱地土壤有机碳及其组分的特征差异[J]. 农业环境科学学报,2009,28(3):606-611.

[5] Huang Y, Sun W J. Tendency of SOC change in cropland soils of China over the last 20 years[J]. Chinese Science Bulletin, 2006,51(15):1785-1803.

[6] 李忠佩,吴大付. 红壤水稻土有机碳库的平衡值确定及固碳潜力分析[J]. 土壤学报,2006,43(1):46-52.

[7] 王成已,潘根兴,田有国. 保护性耕作下农田表土有机碳含量变化特征分析:基于中国农业生态系统长期试验资料[J]. 农业环境科学学报,2009,28(12):2464-2475.

[8] 张海林,孙国峰,陈继康,等. 保护性耕作对农田碳效应影响研究进展[J]. 中国农业科学,2009,42(12):4275-4281.

[9] 张国盛,Chan K Y, Li G D,等. 长期保护性耕作方式对农田表层土壤性质的影响[J]. 生态学报,2008,28(6):2722-2728.

[10] Yang X M, Drury C F, Reynolds W D, et al. Impacts of long-termand recently imposed tillage practices on the vertical distribution of soil organic carbon[J]. Soil and Tillage Research, 2008,100:120-124.

[11] Deen W, Kataki P K. Carbon sequestration in a long-term conventional versus conservation tillage experiment [J]. Soil & Tillage Research, 2003,74(2):143-150.

[12] 冯跃华,邹应斌,王淑红,等. 免耕对土壤理化性状和直播稻生长及产量形成的影响[J]. 作物研究,2004(3):137-140.

[13] Song Guohan, Li Liangqing, Pan Zhenxing, et al. Topsoil organic carbon storage of China and its loss by cultivation[J]. Biogeochemistry, 2005,74(3):47-62.

[14] 潘根兴, 周萍,张旭辉,等. 不同施肥对水稻土作物碳同化与土壤碳固定的影响:以太湖地区黄泥土肥料长期试验为例[J]. 生态学报,2006,26(11):3704-3710.

[15] Hu S, Chapin F S, Firestone M K, et al. Nitrogen limitation of microbial decomposition in a grassland under elevated CO_2[J]. Nature, 2001,409(11):188-191.

[16] Nadelhoffer K J, Emmett B A, Gundersen P, et al. Nitrogen deposition makes a minor contribution to carbon sequestration in temperate forests[J]. Nature, 1998, 398(11):145-148.