

秸秆颗粒化高量还田快速提高土壤有机碳含量及小麦玉米产量

丛 萍, 李玉义, 高志娟, 王 婧, 张 莉, 逢焕成[※]

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘 要: 针对黄淮海地区秸秆还田难度大不利于土壤快速培肥的问题, 探讨秸秆颗粒化高量还田快速提高土壤有机碳的可行性。采用 2a 的田间定位试验, 设置秸秆不还田 (CK)、秸秆颗粒 12 000 kg/hm² (KL1)、秸秆颗粒 36 000 kg/hm² (KL3)、粉碎秸秆 12 000 kg/hm² (FS1)、粉碎秸秆 36 000 kg/hm² (FS3) 5 种用量 30~40 cm 还田处理, 研究了颗粒化秸秆高、低量还田对土壤有机碳、养分元素比例平衡以及小麦-玉米产量的影响。结果表明, 秸秆还田 2a 内对 >20~40、>40~60 cm 土层有机碳含量影响显著, 其中 FS1 提升幅度最低, 分别为 7.2% (>20~40 cm)、5.9% (>40~60 cm), KL3 提升幅度最高, 分别为 12.3% (>20~40 cm)、11.1% (>40~60 cm)。与粉碎还田相比, 秸秆颗粒化还田能在还田 1a 显著提高土壤有机碳含量, KL3 较 FS3 >20~40、>40~60 cm 土壤有机碳分别提高 1.7%、1.3%, KL1 较 FS1 >20~40、>40~60 cm 分别提高 0.8%、0.7%。另外, 高量还田具有大幅提高有机碳的优势, FS3 较 FS1 分别提高 >20~40 cm 土壤有机碳 1.7%~3.9%、>40~60 cm 土层有机碳 0.7%~3.8%, KL3 较 KL1 分别提高 >20~40 cm 有机碳 2.4%~4.7%、>40~60 cm 土层 1.3%~5.1%。秸秆颗粒高量还田 (KL3) 在各生长季均具有较高的有机碳累积速率, 且总体均值最高。秸秆颗粒化高量还田能在一定程度上提高土壤碳氮比 (RCN)、碳磷比 (RCP)、碳钾比 (RCK), 促使土壤养分比向高肥力方向转化。该试验中秸秆颗粒化高量还田连续 4 个生长季增产 4.57%、11.40%、10.87%、8.87%, 增产效果显著。综上可见, 秸秆颗粒 36 000 kg/hm² 深埋还田最有利于黄淮海地区土壤有机碳的提高, 在解决土壤“碳饥饿”等问题、保障农业可持续发展上具有重要意义。

关键词: 秸秆; 土壤; 有机碳; 颗粒化; 养分元素平衡; 产量

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.01.018

中图分类号: S512.1; S513 文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2019)-01-0148-09

丛 萍, 李玉义, 高志娟, 王 婧, 张 莉, 逢焕成. 秸秆颗粒化高量还田快速提高土壤有机碳含量及小麦玉米产量[J]. 农业工程学报, 2019, 35(1): 148—156. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.01.018 <http://www.tcsae.org>
Cong Ping, Li Yuyi, Gao Zhijuan, Wang Jing, Zhang Li, Pang Huancheng. High dosage of pelletized straw returning rapidly improving soil organic carbon content and wheat-maize yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(1): 148 — 156. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.01.018 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

土壤有机碳 (soil organic carbon, SOC) 占土壤有机质的 60%~80%, 是土壤的重要组成部分, 土壤有机碳含量每增加 1 g/kg 时, 华北地区夏玉米与冬小麦轮作产量可增加约 454 kg/hm²^[1], 其在土壤肥力、环境保护、农业可持续发展等方面均起着极其重要的作用^[2-3]。近些年来, 黄淮海平原潮土地区由于长期施用化肥, 加之土地重用轻养, 导致“碳饥饿”问题出现, 有机碳营养与其他养分比例失衡^[4]。许多研究表明, 秸秆还田是提升土壤有机碳的有效手段, 秸秆中含有 C、N、P、K 等营养元素, 施入到土壤中可以培肥土壤^[5], 最终提高作物产量。但是目前秸秆还田普遍采用 4 500~6 000 kg/hm² 的用量^[6], 仅能起到稳定土壤有机碳含量的作用, 对于体积大、数量

多, 腐解速率慢^[7]的玉米秸秆, 还田后不利于有机碳的快速积累, 因此亟需寻找秸秆还田提升有机碳的新途径。

国内外学者普遍认为加快秸秆的腐解速率是快速提高土壤有机碳的途径之一, 在秸秆还田的同时加入微生物腐熟剂, 或者通过堆沤的方式提高微生物数量, 从而加快秸秆腐烂以提高土壤有机碳^[8-9]; 再者, 提高秸秆粉碎程度也可以促进腐解^[10], 玉米秸秆以 5~8 cm 长的小段进行还田后更利于腐烂, 也易于覆盖^[7]。此外, 合理的增加秸秆还田量也是提高土壤有机碳的有效途径, 在大幅增加土壤有机碳^[11]的同时, 缓解秸秆焚烧带来的环境污染问题。但是这些还田方式大多操作不便, 还田方式不成熟, 或者秸秆与土壤结合性不好, 不利于快速增加土壤有机碳。

为提高秸秆腐解速率, 课题组前期研制了秸秆颗粒化产品, 将秸秆粉末挤压制成秸秆颗粒, 其堆积密度约为常规粉碎秸秆的 5 倍, 具有体积小、施用方便、与土壤接触性好的优点^[12], 为解决大量秸秆的消纳问题提供新的技术手段。前期的室内盆栽试验研究表明秸秆颗粒与粉碎秸秆相比可显著提高腐解速率, 尤其在快速腐解期可提高 31.68%, 培养结束后 C 和 N 的累积释放率也较粉碎秸秆提高 11.0 和 13.2 个百分点^[12], 此外, 微区试验

收稿日期: 2018-06-15 修订日期: 2018-11-23

基金项目: 国家重点研发计划 2016YFD0300804; 旱地保护性耕作及其农艺机械化作业技术 (2016-2020); 公益性行业 (农业) 科研专项 (201303130); 北方旱地合理耕层构建技术及其配套耕作机具研究与示范

作者简介: 丛 萍, 博士生, 从事土壤耕作与培肥技术研究。

Email: cpqdz@126.com

※通信作者: 逢焕成, 研究员, 博士, 从事合理耕层构建以及盐碱地改良利用。Email: panghuancheng@caas.ac.cn

也表明,当以 6 000 kg/hm² 进行浅耕还田时能较粉碎秸秆更快、更高地增加土壤有机质含量^[13],提高籽粒产量,具有较高的年均净收益。然而当下的旋耕模式使得秸秆还田量受限,许多研究表明,常规粉碎秸秆旋耕还田量在 50%^[14]或 75%左右^[15]时不影响作物出苗同时能较快增加土壤有机碳,也有研究表明全量还田对土壤有机碳提升幅度增大^[16]固碳效应增强^[17],但成倍增加秸秆用量对土壤的增碳培肥效果研究较少,对于极具增量还田潜力的秸秆颗粒新产品的培肥增产效果更是鲜有报道。鉴于此,本试验突破旋耕还田的制约,采用可消纳大量秸秆的深埋(40 cm)还田方式,将秸秆颗粒还田与常规粉碎秸秆还田进行比较,设置高、低 2 种用量,以秸秆不还田为对照(CK),研究秸秆高量还田对不同土层土壤有机碳的提升效果,并从 C 与 N、P、K 的比例变化上探究秸秆还田后对养分元素平衡的影响,为快速提高土壤有机碳提供科学指引,同时也为秸秆资源的高效利用找到新途径。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2014—2016 年在山东省德州市德城区黄河涯镇的德州市农业科学研究院试验园区(116°18'E、37°27'N)进行。该地区是典型的冬小麦—夏玉米一年两熟种植区,属于暖温带大陆性季风气候。年均气温 13.4℃,≥10℃的年均积温 4 621℃,无霜期 205 d,年降雨量 510 mm,主要集中在 7—9 月,试验期间降水量以及温度状况如图 1。供试土壤为黄潮土,肥力均匀,试验前 0~20 cm 土层土壤基础理化性质为:pH 值=7.76,有机质 12.96 g/kg,全氮 0.78 g/kg,碱解氮 40.65 mg/kg,有效磷 3.68 mg/kg,速效钾 128.38 mg/kg。

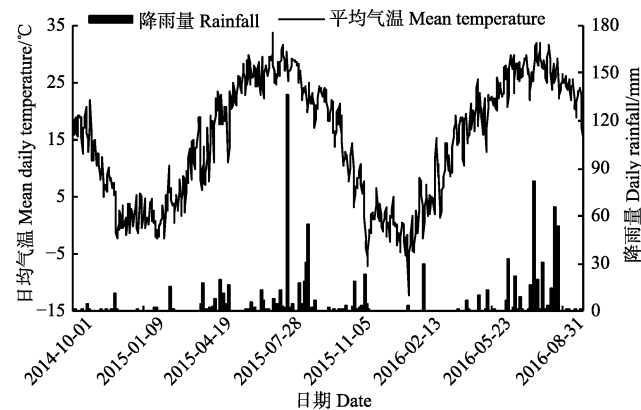


图 1 试验期间日平均降雨量和日平均气温(2014—2016 年)

Fig.1 Daily average rainfall and daily average temperature during test

1.2 试验材料

粉碎秸秆收集于 2014 年冬小麦以及夏玉米收获后的地上部分,自然风干后,一部分用 9CFZ-680 型粉碎机粉碎至 6~10 cm,贮存于干燥室作为粉碎秸秆;另一部分风干的小麦及玉米秸秆按照质量比 1:1 混合,再用 HC-2000 型粉碎机研磨过 2 mm 筛,随后添加 30%~35% 的蒸馏水搅拌均匀,经过 FTHBCX350 型饲料颗粒机常温挤压,制得直径 4 mm、长度为 4~6 cm 的棒状圆柱体,

冷却风干后存放于干燥室作为小麦+玉米秸秆颗粒。粉碎秸秆和秸秆颗粒的堆积密度分别为 26.44 和 242.93 kg/m³。

1.3 试验设计

研究采用微区试验,微区土池于 2013 年 10 月 5 日开始修建,前茬玉米收获后,清除地上所有秸秆和根茬,每个微区四周挖深 40 cm、宽 10 cm 的沟槽,放置 300 cm×6 cm×55 cm(长×宽×高)的水泥板,其内侧铺设 2 层塑料薄膜,“U”钉固定在水泥板上,小区间隔 50 cm,防止小区相互影响,微区面积 9 m²(3 m×3 m)。试验布置于 2014 年 10 月冬小麦播种前进行,首先将微区内 0~20、>20~40 cm 土层分别人工挖出,再将收集起来的小麦及玉米秸秆以 1:1 的比例混匀,一次性还于土池内,具体试验处理以及用量如表 1 所示,最后将挖出的土壤按土层移回池内,以此实现 40 cm 深埋还田处理,试验期间不再进行任何秸秆还田,其中对照采用秸秆不还田(CK)处理。

表 1 不同处理的秸秆还田方式与用量

Table 1 Method and dosage of straw returning in different treatments

处理 Treatment	还田方式 Way of straw returning	秸秆用量 Straw dosage/(kg·hm ⁻²)
CK	秸秆不还田	0
KL1	小麦+玉米秸秆颗粒	12 000
KL3	小麦+玉米秸秆颗粒	36 000
FS1	小麦+玉米秸秆粉碎	12 000
FS3	小麦+玉米秸秆粉碎	36 000

试验时间为 2014 年 11 月冬小麦播种至 2016 年 9 月夏玉米收获,共 2 a 4 季。微区秸秆深埋布置完毕后,每个小区均匀撒施等量基肥,纯 N、P₂O₅、K₂O 分别为 105、120 和 105 kg/hm²,用铁锨混匀各小区 0~15 cm 土层土壤,耙平地表,灌水 750 m³/hm²。供试小麦品种为济麦 22,于 2014 年 11 月 7 日人工点播,行距 20 cm,播量 225 kg/hm²,拔节期追施纯 N 69 kg/hm²,灌水 750 m³/hm²。夏玉米品种为郑单 958,行距 60 cm,株距 20 cm,种植密度为 90 000 株/hm²,施用控释肥 750 kg/hm²,NPK 比例为 28:6:6,大口期追施尿素 300 kg/hm²,在播种后、大口期进行 2 次灌溉,每次灌水量 750 m³/hm²。其他管理措施同当地常规种植。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 土壤有机碳及养分含量测定

分别于 2015 年、2016 年冬小麦、夏玉米成熟期,按照对角线法用不锈钢土钻分别采取 0~20、>20~40、>40~60 cm 土层的土样,剔除可见的掉落物和根系后,风干过筛,进行土壤理化指标的测定,其中,土壤有机质采用重铬酸钾外加热法测定;全氮采用半微量凯氏法测定;碱解氮采用扩散法测定;有效磷采用钼锑抗比色法;速效钾采用火焰光度计法^[18]。

1.4.2 作物测产

小麦玉米测产采用实打实收方式,各小区人工收获,脱粒风干,记录产量。

1.5 数据分析

利用 Excel 2016 和 SAS 9.2 软件进行方差分析及

Pearson 相关分析, 用 LSD 法进行多重比较 ($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤有机碳含量的提升作用

2.1.1 秸秆还田对土壤有机碳含量的影响

表 2 为秸秆还田 2a 不同处理下 3 个土层 SOC 的变化情况。比较发现, 秸秆还田后对 0~20 cm SOC 影响较小, 仅在第 2 年末秸秆还田处理使得 SOC 显著提高, 这与有机碳在土壤中的缓慢扩散有关。秸秆还田处理下 >20~40、>40~60 cm 土层 SOC 显著高于秸秆不还田处理, 且随着时间延长秸秆还田处理与 CK 间的差异逐渐增大, 从 >20~40 cm 土层看, 在 2015 年 6 月 FS1 较 CK 差异不显著, 而 KL3 增幅最大, 为 5.6% ($P<0.05$), 而到 2016 年 10 月, FS1 增幅 7.2% ($P<0.05$), KL3 增幅 12.3% ($P<0.05$); 从 >40~60 cm 土层看, 同样表现为 FS1 在第 1 季差异不显著, 而 KL3 增幅最大, 为 2.8% ($P<0.05$), 还田 2a 后 FS1 则较 CK 增加 5.9% ($P<0.05$), KL3 为 11.1% ($P<0.05$), 这表明秸秆还田后随着时间的增加有机碳逐渐积累, 而秸秆不还田的土壤因缺少碳源补充使得土壤

有机碳只矿化消耗而不累积增加, 最终造成二者土壤有机碳含量差异逐渐增大。此外, 与 CK 相比, >20~40 cm 土壤有机碳的增幅高于 >40~60 cm, 这可能因为与有机碳积累相关的土壤微生物随土层加深而减少^[19]。

2.1.2 不同秸秆形态对土壤有机碳的影响

对相同用量不同秸秆处理方式进行比较可以看出 (表 2), 当还田量为 36 000 kg/hm² 时, 颗粒还田 >20~40 cm 土层 SOC 在 4 个生长季分别高于粉碎还田 1.3%、1.7% ($P<0.05$)、1.6%、1.0%, >40~60 cm 土层下分别高于粉碎还田 0.9%、1.3%、2.2% ($P<0.05$)、1.1%; 以 12 000 kg/hm² 还田时, 颗粒处理的 SOC 含量最高较粉碎处理增加 0.8% (>20~40 cm)、0.7% (>40~60 cm), 但差异不显著。与粉碎秸秆相比较, 颗粒高量还田对 SOC 提升幅度表现为先升高后降低, 且在第 2、3 个生长季与 FS3 差异显著, 这表明秸秆颗粒能在还田后迅速表现出对有机碳的提升作用, 粉碎秸秆还田则需经过较长时间腐解才能积累相当量的有机碳。当秸秆还田量低时, 供腐解微生物利用的碳源少, 秸秆腐解期随之缩短, 因此 KL1 的 SOC 含量仅在还田 1a 内高于 FS1。

表 2 不同处理下各生长季土壤有机碳含量及有机碳增长率

Table 2 Soil organic carbon content (SOC) and its increasing rate under different treatments in four growing seasons

土层 Soil layer/ cm	处理 Treatments	2015 年 6 月小麦季 Jun-2015 Wheat season		2015 年 10 月玉米季 Oct-2015 Maize season		2016 年 6 月小麦季 Jun-2016 Wheat season		2016 年 10 月玉米季 Oct-2016 Maize season	
		SOC/(g·kg ⁻¹)	SOC 增长率 SOC increasing rate/%	SOC/(g·kg ⁻¹)	SOC 增长率 SOC increasing rate/%	SOC/(g·kg ⁻¹)	SOC 增长率 SOC increasing rate/%	SOC/(g·kg ⁻¹)	SOC 增长率 SOC increasing rate/%
0~20	CK	7.96±0.03a	—	7.99±0.04a	—	7.96±0.04b	—	7.91±0.04b	—
	KL1	7.97±0.03a	0.14	7.99±0.03a	0.09	8.01±0.04ab	0.66	8.00±0.03a	1.18
	KL3	7.97±0.05a	0.13	8.02±0.02a	0.45	8.04±0.02a	1.09	8.06±0.03a	1.90
	FS1	7.96±0.04a	0.02	8.00±0.07a	0.18	8.01±0.04ab	0.71	8.01±0.03a	1.22
	FS3	7.97±0.05a	0.05	8.00±0.02a	0.21	8.06±0.04a	1.25	8.07±0.04a	2.03
>20~40	CK	5.73±0.08c	—	5.68±0.11c	—	5.61±0.08c	—	5.56±0.12c	—
	KL1	5.91±0.08ab	3.18	6.00±0.13b	5.53	5.96±0.10b	6.25	5.97±0.08b	7.36
	KL3	6.05±0.07a	5.61	6.15±0.05a	8.19	6.24±0.08a	11.24	6.25±0.12a	12.28
	FS1	5.85±0.04bc	2.06	5.95±0.11b	4.78	5.98±0.08b	6.64	5.96±0.10b	7.22
	FS3	5.97±0.05ab	4.23	6.05±0.06b	6.40	6.14±0.07a	9.50	6.19±0.05a	11.21
>40~60	CK	4.42±0.06a	—	4.36±0.03c	—	4.32±0.04d	—	4.27±0.06c	—
	KL1	4.48±0.03a	1.50	4.55±0.03ab	4.31	4.53±0.03c	4.71	4.52±0.03b	5.75
	KL3	4.54±0.03a	2.75	4.61±0.05a	5.69	4.70±0.04a	8.69	4.75±0.04a	11.09
	FS1	4.45±0.04a	0.68	4.52±0.03b	3.58	4.53±0.04c	4.86	4.53±0.04b	5.95
	FS3	4.50±0.04a	1.89	4.55±0.06ab	4.38	4.60±0.03b	6.42	4.70±0.07a	10.04

注: 小写字母代表同一土层不同处理间进行差异比较, 差异分析在 $P<0.05$ 的显著性水平, 下同。

Note: Lowercase letters represent differences between treatments in the same soil layer at level of 0.05. The same below.

2.1.3 不同秸秆用量对土壤有机碳的影响

当秸秆处理方式相同时, 比较不同用量对 SOC 的影响可以看出 (表 2), 在 >20~40 cm 土层, FS3 的 SOC 含量在 4 个生长季较 FS1 分别提高 2.1%、1.7%、2.7% ($P<0.05$)、3.9% ($P<0.05$), >40~60 cm 土层分别提高 1.1%、0.7%、1.5% ($P<0.05$)、3.8% ($P<0.05$); 而 KL3 在 >20~40 cm 土层 SOC 分别高于 KL1 处理 2.4%、2.5% ($P<0.05$)、4.7% ($P<0.05$)、4.7% ($P<0.05$), >40~60 cm 土层提高 1.3%、1.3%、3.8% ($P<0.05$)、5.1% ($P<0.05$), 这表明秸秆处理方式相同时, 增大用量可以显著提高 SOC, 且增幅随着还田时间逐渐增大, 这可能是因为低量还田所投入的碳源少, 后期有机碳累积量低, 而高量

处理由于秸秆量大, 微生物需要较长时间腐解, 促使有机碳不断积累。由此可见, 一次性秸秆高量还田后可在 2a 内使土壤有机碳持续增长, 兼具省时省力、培肥土壤的双重优点。

2.1.4 不同处理对土壤有机碳累积速率的影响

表 3 为 5 个处理下 >20~40、>40~60 cm 土层 SOC 在 4 个生长季的累积速率, 由表 3 可见从 2014 年 10 月到 2015 年 6 月 >20~40、>40~60 cm SOC 的累积速率 KL3 最高, FS3、KL1、FS1 次之, 均显著高于 CK, 可见用秸秆颗粒高量还田后的第 1 个生长季即表现出 SOC 的迅速累积; 从 2015 年 6 月到 2015 年 10 月各秸秆还田处理的 SOC 累积速率均显著高于 CK ($P<0.05$), 各秸秆

还田处理的 SOC 累积速率进入平稳上升期; 从 2015 年 10 月到 2016 年 6 月的 SOC 累积速率表现为 $>20\sim40$ cm 土层 FS3 与 KL3 最高, FS1 次之, 均显著高于 KL1 与 CK, $>40\sim60$ cm 土层 KL3、FS3、FS1 显著高于 KL1 与 CK, 表明该阶段随着腐殖化程度加深, 高量还田下有机碳的长期积累效应开始凸显; 从 2016 年 6 月到 2016 年 10 月的 SOC 累积速率表现为 $>20\sim40$ cm 土层 FS3 最高 ($P<0.05$), $>40\sim60$ cm 土层 FS3 与 KL3 显著性最高 ($P<0.05$), 表明粉碎秸秆腐解的滞后性使其在后期能积累一定量的有机碳。从 4 个生长季各处理的 SOC 平均累积速率来看, 各土层均以 KL3 最大, 且高量还田显著高于低量, 说明试验期间有机碳的累积速率受秸秆用量影响更大。

2.2 不同处理下土壤 SOC 与 TN、TP、TK 比例关系

土壤内部碳氮磷钾养分元素的化学计量比也是反映土体内养分循环的主要指标^[16], 秸秆还田后 SOC 大量增加, 会对养分元素比例平衡造成影响。通过对不同处理

下各生长季的土壤碳氮比 (R_{CN})、碳磷比 (R_{CP})、碳钾比 (R_{CK}) 的比较分析如图 2 所示。

表 3 不同处理下土壤有机碳的累积速率
Table 3 Soil organic carbon accumulation rate under different treatments

土层 Soil layer/ cm	处理 Treatments	有机碳累积速率 Soil organic carbon accumulation rate/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$)				
		2015 年 6 月 Jun-2015	2015 年 10 月 Oct-2015	2016 年 6 月 Jun-2016	2016 年 10 月 Oct-2016	平均 Average
$>20\sim40$	CK	-0.072c	-0.135b	-0.114c	-0.133c	-0.113
	KL1	0.202b	0.262a	-0.060c	0.044b	0.112
	KL3	0.410a	0.297a	0.134a	0.024b	0.216
	FS1	0.106b	0.325a	0.038b	-0.046b	0.105
	FS3	0.291b	0.231a	0.138a	0.143a	0.201
$>40\sim60$	CK	-0.028c	-0.160b	-0.060b	-0.151d	-0.111
	KL1	0.071b	0.205a	-0.036b	-0.025c	0.043
	KL3	0.154a	0.220a	0.132a	0.142b	0.151
	FS1	0.017b	0.218a	0.022a	-0.020c	0.048
	FS3	0.097b	0.163a	0.070a	0.304a	0.147

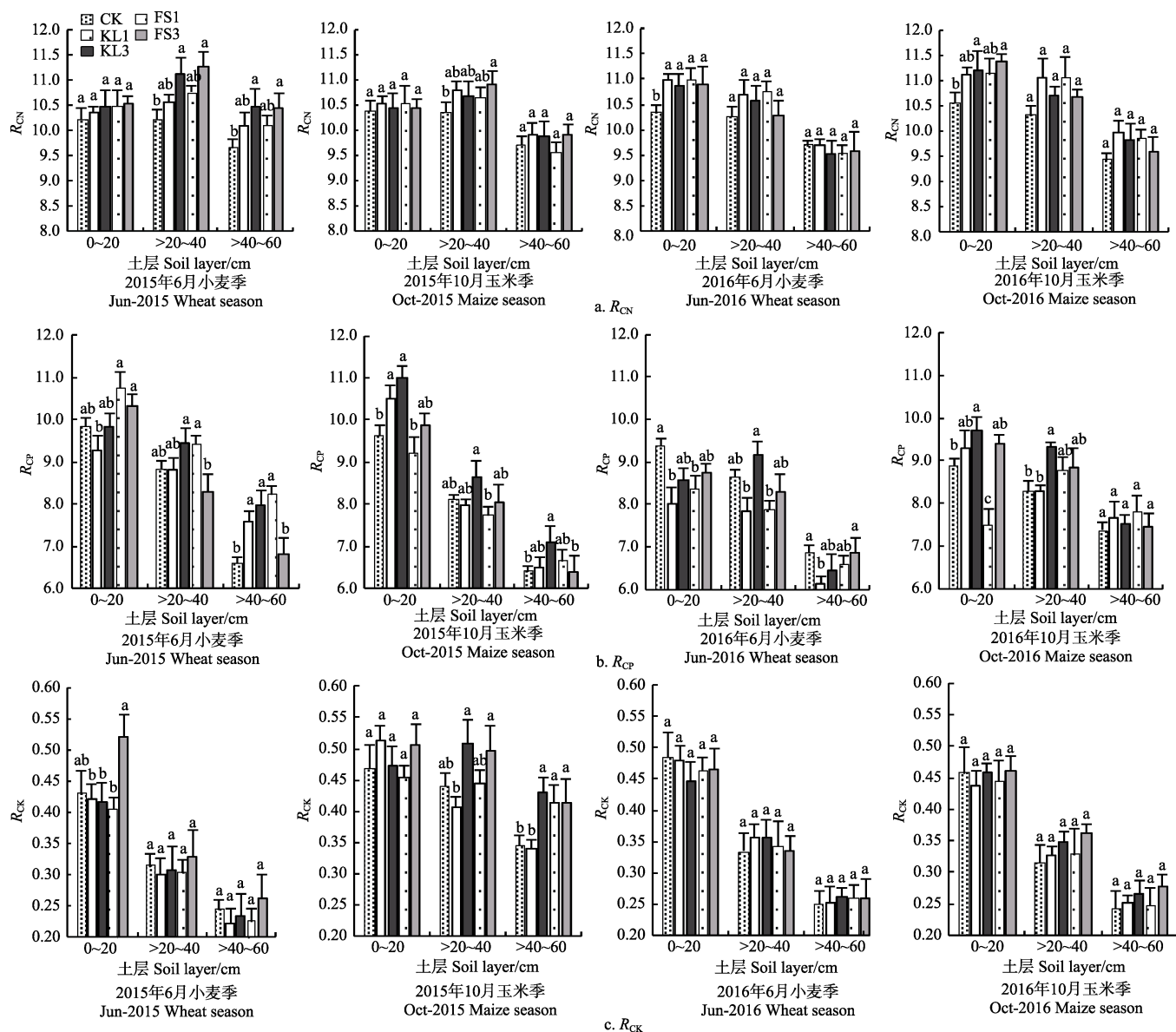


图 2 不同生长季碳氮比 (R_{CN})、碳磷比 (R_{CP})、碳钾比 (R_{CK}) 在 3 个土层的分布

Fig.2 Distribution of C/N(R_{CN}),C/P(R_{CP}) and C/K (R_{CK}) in 3 soil layers under different growing seasons

2.2.1 R_{CN} 变化

2015 年 6 月秸秆还田对 $>20\sim40$ 、 $>40\sim60$ cm 土层影响显著, 其中高量还田较 CK 显著提高土壤 R_{CN} 9.8% ($P<0.05$) 左右, 低量还田与 CK 差异不显著, 高、低量之间亦无显著差异; 2015 年 10 月秸秆还田对 $0\sim20$ 、 $>40\sim60$ cm 土层 R_{CN} 无显著影响, 仅 $>20\sim40$ cm FS3 处理的 R_{CN} 显著高于 CK 5.5% ($P<0.05$); 2016 年 6 月各处理对 R_{CN} 影响均不显著; 2016 年 10 月除 FS3 处理在 $>40\sim60$ cm 土层与 CK 差异不显著外, 各秸秆还田处理的 R_{CN} 均显著高于 CK ($P<0.05$)。可见, 秸秆还田初期土壤 R_{CN} 变化较大且提高显著, 随着还田时间的延长, 各处理 R_{CN} 较 CK 无显著差异, 这可能与该阶段氮元素的大幅提升有关, 到还田第 2 年末, R_{CN} 又开始显著增加, 这与秸秆完全腐解后有机碳的大幅积累有关。

2.2.2 R_{CP} 变化

2015 年 6 月 $0\sim20$ cm 土层 R_{CP} 表现为 FS3、FS1 显著高于 KL1, 但均与 CK 无显著性差异; $>20\sim40$ cm 土层则表现为 KL3、FS1 处理的 R_{CP} 最高, 显著高于 R_{CP} 最低的 FS3 处理 ($P<0.05$), 但二者与 CK 均无显著差异; $>40\sim60$ cm 土层 KL1、KL3、FS1 处理的 R_{CP} 显著高于 CK 与 FS3 ($P<0.05$), 可见在还田初期 KL3 与 FS1 对土壤 R_{CP} 有显著调节作用。2015 年 10 月 $0\sim20$ cm 土层 R_{CP} 仅 KL1、KL3 处理显著高于 CK ($P<0.05$), $>40\sim60$ cm 土层则是 KL3 的 R_{CP} 显著高于 CK 与 FS3 ($P<0.05$), 可见该段时期内 KL3 处理土壤 R_{CP} 仍较高。到 2016 年 6 月秸秆还田处理使得 3 个土层的 R_{CP} 小幅降低, KL3 处理对 $>20\sim40$ cm 土层的 R_{CP} 虽有 6.3% 的提高但差异不显著。2016 年 10 月仅 KL3 处理 $0\sim20$ 、 $>20\sim40$ cm 的 R_{CP} 显著高于 CK 9.2%、12.3% ($P<0.05$)。由此可见, KL3 处理在各生长季均有利于 R_{CP} 的提高, 且随还田时间的延长, R_{CP} 也经历了升高降低再升高的过程, 这可能与秸秆还田后增加了磷的有效性促进作物对磷素的吸收有关。

2.2.3 R_{CK} 变化

4 个生长季各处理 R_{CK} 均与 CK 差异不显著, 仅 2015 年 10 月 KL3 与 FS3 处理的 R_{CK} 显著性水平最高, 这可能与秸秆钾含量较高有关。综上可见, 秸秆还田对土壤 R_{CN} 、 R_{CP} 影响较显著, 还田处理可提高土壤 R_{CN} , 标志土壤肥力的提升; KL3 处理更能促进碳、磷之间的平衡。

2.3 不同处理对作物实际产量的影响

由表 4 可以看出, 秸秆高量还田的作物产量显著高于低量还田, 产量增幅约是低量还田的 2~3 倍; 秸秆颗粒还田下作物产量要高于粉碎秸秆还田, 还田前期, 粉碎秸秆还田出现减产, 随着生长季的延长, 增幅差距逐渐缩小, 表明当秸秆还田量一致时, 还田时间越长, 对产量的影响差异越小。KL3 处理下显著提高作物产量, 2 个小麦季分别增产 4.57%、10.87%, 2 个玉米季分别增产 11.40%、8.87%, 4 个生长季产量均值最高。

2.4 各指标的相关性分析

对 4 个生长季的作物产量与土壤有机碳 (SOC)、土壤全氮 (soil total nitrogen, STN)、全磷 (soil total phosphorus, STP)、全钾 (soil total potassium, STK)、 R_{CN} 、 R_{CP} 、 R_{CK} 各指标进行相关性分析 (表 5), 作物产量

与其他养分指标以及元素间比例均成正相关关系, 其中与 SOC 有极显著正相关, 与 STN 以及 R_{CK} 有显著正相关, 这说明在养分指标中 SOC 与 STN 对产量的形成有较明显作用, R_{CN} 、 R_{CP} 、 R_{CK} 均与产量有正相关关系, 这与 SOC 的明显提高有关。此外土壤养分含量与其比例关系间亦有相关性, SOC 与 STN 极显著正相关, 与 STP 显著正相关, STN 与 STP 极显著正相关, 与 R_{CP} 显著负相关, STP 与 R_{CP} 极显著负相关, STK 与 R_{CK} 极显著负相关, 由此看出, STN、STP、STK 养分间互成正相关关系, 而 STN、STP、STK 分别与 R_{CN} 、 R_{CP} 、 R_{CK} 成负相关关系, 这表明各养分的增长具有协调性, 秸秆还田后在形成土壤有机碳的同时也刺激了原有土壤有机质的矿化, 使得各养分均有增加, 但由于秸秆含碳量显著高于其他养分元素含量, 对有机碳含量增幅影响更大, 使得 R_{CN} 、 R_{CP} 、 R_{CK} 升高。

表 4 不同处理下的小麦-玉米产量
Table 4 Yield of wheat and corn under different treatments

生长季 Stages	处理 Treatments	产量 Yield/(t·hm ⁻²)	增产 Yield increase/%
2015 年 6 月 小麦季 Jun-2015 Wheat season	CK	5.80±0.11a	—
	KL1	5.86±0.16a	1.07
	KL3	6.06±0.08a	4.57
	FS1	5.71±0.10a	-1.44
	FS3	5.48±0.09b	-5.46
2015 年 10 月 玉米季 Oct-2015 Maize season	CK	9.62±0.15c	—
	KL1	10.06±0.20b	4.66
	KL3	10.71±0.21a	11.40
	FS1	10.08±0.15b	4.80
	FS3	10.56±0.18a	9.76
2016 年 6 月 小麦季 Jun-2016 Wheat season	CK	5.25±0.15c	—
	KL1	5.59±0.11b	6.41
	KL3	5.82±0.18a	10.87
	FS1	5.55±0.08b	5.56
	FS3	5.69±0.22a	8.31
2016 年 10 月 玉米季 Oct-2015 Maize season	CK	10.72±0.14c	—
	KL1	11.15±0.12b	3.98
	KL3	11.67±0.17a	8.87
	FS1	11.11±0.06b	3.58
	FS3	11.48±0.07a	7.05
平均 Average	CK	7.85	—
	KL1	8.17	4.06
	KL3	8.57	9.19
	FS1	8.11	3.36
	FS3	8.30	5.78

表 5 土壤养分含量与作物产量的相关性分析
Table 5 Pearson's correlation analysis between soil nutrient content and crop yield

	SOC	STN	STP	STK	R_{CN}	R_{CP}	R_{CK}	产量 Yield
SOC	1							
STN	0.699**	1						
STP	0.543*	0.662**	1					
STK	0.171	0.105	0.366	1				
R_{CN}	0.180	-0.295	-0.256	-0.132	1			
R_{CP}	-0.257	-0.550*	-0.949**	-0.347	0.356	1		
R_{CK}	0.510	0.299	0.047	-0.760**	0.235	0.124	1	
产量 Yield	0.897**	0.523*	0.215	0.068	0.394	0.080	0.526*	1

注: STN 为土壤全氮, STP 为土壤全磷, STK 为土壤全钾。**代表相关程度在 $P<0.01$ 显著性水平, *代表相关程度在 $P<0.05$ 显著性水平。

Note: STN is soil total nitrogen, STP is soil total phosphorus, STK is soil total potassium. **means the significant correlation at $P<0.01$, * means the significant correlation at $P<0.05$.

3 讨 论

3.1 秸秆颗粒高量还田对土壤有机碳的快速提升作用

玉米、小麦秸秆约含有 40%~50% 的碳元素, 是土壤有机碳的重要来源^[20]。本研究表明, 秸秆还田后使土壤有机碳在 6.14~6.35 g/kg 间缓慢提升, 而不进行秸秆还田时土壤有机碳每年约以 0.08 g/kg 速率下降, 其中, 秸秆颗粒化高量还田的有机碳的增幅以及平均有机碳累积速率最高, 表明秸秆颗粒化还田方式能在短期内加快有机碳的形成, 这与秸秆处理方式以及还田用量均有关系。

秸秆颗粒化还田由于秸秆粉碎化程度加大从而加快腐解速率, 在短期内生成更多有机碳。玉米秸秆表皮组织主要是硅细胞和木栓细胞, 含有较多微生物难以分解的硅化物和蜡质^[21], 而秸秆在颗粒化的过程中破坏了秸秆的原始组织结构, 将难分解的纤维素、半纤维素、木质素等人为断链, 使之与土壤的接触面积大大增加, 利于微生物附着腐解^[22-23], 从而加快腐解过程, 在相同时间内形成更多腐殖质, 这是有机质产生的重要环节。这与 Koullas 等^[10]的观点相一致, 他认为提高秸秆的粉碎程度可以促进腐解, 朱玉芹等^[7]也指出将秸秆切成 5~8 cm 的小段比 10~20 cm 的大段粉碎秸秆更加容易腐解, 且易于施用, 分布较均匀。但徐萌等^[24]并不认为秸秆高量还田后在前期能够大幅提高土壤有机碳, 她指出大量秸秆还田后改变了微生物环境, 不利于有机碳形成, 本研究秸秆颗粒化还田在第 1 个小麦季就表现出对有机碳的显著提升, 除与物理粉碎有关外, 还可能与施用的秸秆中有一半是易腐解的小麦秸秆有关。

不少学者的研究也证实了增加秸秆用量可提高土壤有机碳含量, 钟杭等^[25]研究秸秆连续 2a 还田后, 全量与半量还田分别较秸秆不还田提升土壤有机质 7.09%、5.87%, 路文涛等^[26]进行了 3a 的秸秆还田试验发现秸秆以 13 500 kg/hm² 还田要较 4 500 kg/hm² 还田大幅提高土壤总有机碳含量, 徐萌等^[24]研究发现 3~5 cm 的粉碎秸秆以 18 000 kg/hm² 还田时能更显著地提高土壤有机质以及全氮含量, 这与本研究的增幅效果近似。这主要是因为秸秆的碳氮比 (65~85) 较高, 土壤的碳氮比 (10~12) 偏低, 将含碳量低的土壤有机碳和含氮量低的植物残体混合时使碳氮比接近于适宜微生物生长的碳氮比, 能加快秸秆的分解^[27], 产生更多腐殖物质, 从而提高土壤有机质含量^[28-29]。然而, 表 2 表明秸秆还田所增加的有机碳量并不与秸秆增量成相同倍数关系增加, 有机碳的增幅比总是低于秸秆用量比值 3, 原因在于秸秆腐解速率不会随着秸秆用量提高而无限变大, 当秸秆还田量超过一定限度时秸秆腐解速率开始降低, 这主要受土壤微生物与土壤氮素限制, 微生物在分解秸秆时需摄取土壤中的氮素以满足自身碳氮比 (25:1)^[30], 当土壤中氮素不足时, 微生物同化作用受限, 不能大量增殖, 对秸秆的腐解速率降低。

不少专家还认为, 秸秆还田量存在阈值问题, 大量秸秆还田造成土壤虚而不实, 不利于作物扎根以及出苗^[31-32], 也有可能打破微生物平衡, 降低秸秆腐解速率。由

此看来, 以往运用高量秸秆还田提升有机碳的主要限制因素有 2 点, 一是常规粉碎秸秆多采用旋耕还田, 还田深度浅, 影响作物出苗率, 二是大量秸秆腐解缓慢, 对土壤本身微生物结构造成影响, 使土壤养分失衡。而本研究中的秸秆颗粒化高量还田恰好解决了以上 2 点问题, 秸秆颗粒体积约是相同质量粉碎秸秆的 1/50, 且与土壤结合性好, 浅施也不会影响作物出苗, 而粉碎秸秆进行高量还田时建议采用深埋方式, 再者, 前人已证实秸秆颗粒的腐解速率显著高于粉碎秸秆^[12], 这在一定程度上缩短了微生物的腐解过程, 有利于有机碳的快速形成。

3.2 秸秆颗粒高量还田对土壤养分比例的影响

近些年化肥的过量施用造成土壤养分不均衡发展, “碳短板”现象存在。小麦、玉米秸秆作为高碳源有机物质 (R_{CN} 约为 65~85) 施入到土壤中, 会对土壤氮、磷、钾等养分元素平衡造成影响^[33-34]。本研究同样发现施入高量秸秆后土壤 R_{CN} 、 R_{CP} 、 R_{CK} 有一定程度提高, 其中, 土壤 R_{CN} 由原来 10.0 上升为 11.0, 表明土壤肥力提升。一般而言, 土壤较适宜的 R_{CN} 在 15~25, 此时有机质供肥条件优越, 而在本研究中土壤 R_{CN} 低于该范围, 在一定程度上利于有机质的积累^[30]。此外, 秸秆的施入促进了微生物对氮素的有效利用, 避免了氮素流失, 这对于土壤地下水硝酸盐污染以及大气 N_2O 温室效应的缓解均具有重要意义。从土壤 R_{CP} 来看, KL3 处理在各生长季均能大幅度提升土壤 R_{CP} , 但波动范围仅在 8~11, 虽较 CK 处理有提高但该比值仍然偏低, 这与长期施肥导致土壤本身存留的较多磷素有关, 另一方面微生物对有机质的分解也促进了土壤有效磷的增加^[35]。从 R_{CK} 的变化来看, 秸秆还田在第 1 年对 R_{CK} 影响较大, 但与 CK 无显著差异, 这主要是因为秸秆中 80% 钾元素以离子状态存在^[36], 还田后很容易被分解释放, 从而增加土壤钾含量, 使得 R_{CN} 并无显著差异。综上可见, 秸秆高量还田短期内可引起土壤碳元素的增加, 从而提高 C 与 N、P、K 的比值。

3.3 秸秆颗粒化还田对作物产量的影响

本研究中新型秸秆颗粒化还田具有较好增产效果, 第 1 个生长季即表现出显著提高冬小麦产量, 而粉碎秸秆则出现减产, 是因为大量粉碎秸秆的施入对微生物群落结构扰动较大^[37], 微生物同化秸秆所需的氮素受限, 腐解变慢, 不利于养分的循环与释放^[24]。这与张静等^[11]、刘义国等^[38]的研究所得结论相似, 即在秸秆还田前期, 作物产量并非随着秸秆还田量的增加而增加。本研究中, 作物产量的提升与 SOC、STN、 R_{CK} 的增加有显著正相关关系 (表 5), 许多研究也表明作物产量与土壤有机质、氮磷钾等养分含量有较好的相关性^[13,39], 有机碳的提高使得土壤供肥能力变得优越^[40], 其他养分元素得到有效利用, 从而提高作物产量。值得指出的是, 影响作物产量的因素很多^[40-41], 本文仅从秸秆颗粒化还田快速提升土壤有机碳等养分的角度进行分析, 其他原因仍需进一步探究。

4 结 论

1) 秸秆深埋还田可显著提高土壤 >20~40、>40~

60 cm 土层有机碳含量, 还田 2 a 以颗粒高量还田提升幅度最高, 为 12.3% (>20~40 cm)、11.1% (>40~60 cm) ($P<0.05$)。

2) 颗粒高量还田 1 周年较粉碎高量还田提高土壤有机碳 1.7% (>20~40 cm)、1.3% (>40~60 cm), 颗粒低量较粉碎低量还田提高 0.8% (>20~40 cm)、0.7% (>40~60 cm), 秸秆颗粒还田表现出快速提升土壤有机碳效应。

3) 高量还田下土壤有机碳增幅显著, 粉碎秸秆高量还田较低量还田增幅高达 3.9% (>20~40 cm) 和 3.8% (>40~60 cm) ($P<0.05$), 秸秆颗粒高量还田较低量还田增幅高达 4.7% (>20~40 cm) 和 5.1% (>40~60 cm) ($P<0.05$), 且颗粒高量还田有机碳累积速率最高。

4) 颗粒高量还田最利于协调土壤碳、氮、磷、钾间的比例关系, 且增产效果较好, 4 个生长季分别增产 4.57%、11.40%、10.87%、8.87% ($P<0.05$)。

综上所述, 秸秆颗粒化高量还田在快速、大幅提高土壤有机碳, 以及提高有机碳累积速率、协调养分比例、提高作物产量方面均具有显著优势, 且试验期内未出现秸秆高量还田所引发的安全问题, 表明高量还田的可行性。这种新型还田方式也为有效利用秸秆解决土壤“碳饥饿”问题提供了研究思路, 但是高效化的秸秆用量标准仍需进一步研究。

[参 考 文 献]

- [1] 邱建军, 王立刚, 李虎, 等. 农田土壤有机碳含量对作物产量影响的模拟研究[J]. 中国农业科学, 2009, 42(1): 154—161.
Qiu Jianjun, Wang Ligang, Li Hu, et al. Modeling the impacts of soil organic carbon content of croplands on crop yields in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(1): 154—161. (in Chinese with English abstract)
- [2] 李长生. 土壤碳储量减少: 中国农业之隐患: 中美农业生态系统碳循环对比研究[J]. 第四纪研究, 2000, 20(4): 345—350.
Li Changsheng. Loss of soil carbon threatens Chinese agriculture: A comparison on agro-ecosystem carbon pool in China and the U. S[J]. Quaternary Sciences, 2000, 20(4): 345—350. (in Chinese with English abstract)
- [3] 苏永中, 赵哈林. 土壤有机碳储量、影响因素及其环境效应研究进展[J]. 中国沙漠, 2002, 22(3): 220—228.
Su Yongzhong, Zhao Halin. Advances in researches on soil organic carbon storages, affecting factors and its environmental effects[J]. Journal of Desert Research, 2002, 22(3): 220—228. (in Chinese with English abstract)
- [4] 赵金花, 张丛志, 张佳宝. 激发式秸秆深还田对土壤养分和冬小麦产量的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(2): 438—449.
Zhao Jinhua, Zhang Congzhi, Zhang Jiabao. Effect of straw returning via deep burial coupled with application of fertilizer as primer on soil nutrients and winter wheat yield[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(2): 438—449. (in Chinese with English abstract)
- [5] Beare M H, Wilson P E, Fraser P M. Management effects on barley straw decomposition, nitrogen release and crop production[J]. Soil Science Society of American Journal, 2002, 66: 848—856.
- [6] 何生宝. 农作物秸秆还田的可持续发展探讨[J]. 农业机械, 2001(1): 41.
He Shengbao. The research of sustainable development of crop straw-returning[J]. Farm Machinery, 2001(1): 41. (in Chinese with English abstract)
- [7] 朱玉芹, 岳玉兰. 玉米秸秆还田培肥地力研究综述[J]. 玉米科学, 2004(3): 106—108.
Zhu Yuqin, Yue Yulan. A review on improvement of soil fertility by corn straw returning[J]. Journal of Maize Sciences, 2004(3): 106—108. (in Chinese with English abstract)
- [8] Sun Y, Cheng J. Hydrolysis of lingo cellulosic materials for ethanol production: A review[J]. Bioresource Technology, 2002, 83(1): 1—11.
- [9] 常娟, 卢敏, 尹清强, 等. 秸秆资源预处理研究进展[J]. 中国农学通报, 2012, 28(11): 1—8.
Chang Juan, Lu Min, Yin Qingqiang, et al. Progress of research on pretreatment of corn stover[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(11): 1—8. (in Chinese with English abstract)
- [10] Koullas D P, Christakopoulos P, Kekos D, et al. Correlating the effect of pretreatment on the enzymatic hydrolysis of straw[J]. Biotechnology and Bioengineering, 1992, 39(1): 113—116.
- [11] 张静, 温晓霞, 廖允成, 等. 不同秸秆还田量对土壤肥力以及冬小麦产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3): 612—619.
Zhang Jing, Wen Xiaoxia, Liao Yuncheng, et al. Effect of different amount of maize straw returning on soil fertility and yield of winter wheat[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(3): 612—619. (in Chinese with English abstract)
- [12] 王婧, 张莉, 逢焕成, 等. 秸秆颗粒化还田加速腐解速率提高培肥效果[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 177—183.
Wang Jing, Zhang Li, Pang Huancheng, et al. Returning granulated straw for accelerating decomposition rate and improving soil fertility[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Translations of the CSAE), 2017, 33(6): 177—183. (in Chinese with English abstract)
- [13] 张莉, 王婧, 逢焕成, 等. 秸秆颗粒还田对土壤养分和冬小麦产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(12): 1770—1778.
Zhang Li, Wang Jing, Pang Huancheng, et al. Effects of granulated straw incorporation on soil nutrient contents and grain yield of winter wheat[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(12): 1770—1778. (in Chinese with English abstract)
- [14] 韩新忠, 朱利群, 杨敏芳, 等. 不同小麦秸秆还田量对水稻生长、土壤微生物生物量及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(11): 2192—2199.
Han Xinzhong, Zhu Liqun, Yang Minfang, et al. Effects of different amount of wheat straw returning on rice growth, soil microbial biomass and enzyme activity[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(11): 2192—2199. (in Chinese with English abstract)
- [15] 郭静, 周可金, 刘芳, 等. 小麦秸秆还田量和还田方式对砂姜黑土地玉米生长发育的影响[J]. 浙江农业学报, 2017, 29(4): 521—527.

- Guo Jing, Zhou Kejin, Liu Fang, et al. Effects of returning amount and manner of wheat straw on maize growth in lime concretion black soil field[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2017, 29(4): 521—527. (in Chinese with English abstract)
- [16] 徐蒋来, 胡乃娟, 朱利群. 周年秸秆还田量对麦田土壤养分及产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2016, 36(2): 215—222.
- Xu Jianglai, Hu Naijuan, Zhu Liquan. Effect of amount of annual straw returning on soil nutrients and yield in winter wheat field[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(2): 215—222. (in Chinese with English abstract)
- [17] Lou Y L, Xu M G, Wang W, et al. Return rate of straw residue affects soil organic C sequestration by chemical fertilization[J]. *Soil & Tillage Research*, 2011, 113(1): 70—73.
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [19] 贺纪正, 葛源. 土壤微生物生物地理学研究进展[J]. *生态学报*, 2008(11): 5571—5582.
- He Jizheng, Ge Yuan. Recent advances in soil microbial biogeography[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008(11): 5571—5582. (in Chinese with English abstract)
- [20] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(5): 526—535.
- Pan Jianling, Dai Wanan, Shang Zhanhuan, et al. Review of research progress on the influence and mechanism of field straw residue incorporation on soil organic matter and nitrogen availability[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(5): 526—535. (in Chinese with English abstract)
- [21] 徐广印, 沈胜强, 胡建军, 等. 秸秆冷态压缩成型微观结构变化的实验研究[J]. *太阳能学报*, 2010, 31(3): 273—278.
- Xu Guangyin, Shen Shengqiang, Hu Jianjun, et al. Experimental study on the micro structure changes in the process of cold molding with straw[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2010, 31(3): 273—278. (in Chinese with English abstract)
- [22] Giacomini S J, Recous S, Mary B, et al. Simulating the effects of N availability, straw particle size and location in soil on C and N mineralization[J]. *Plant & Soil*, 2007, 301(1/2): 289—301.
- [23] Fruit L, Recous S, Richard G. Plant Residue Decomposition: Effect of Soil Porosity and Particle Size[M]//Effect of Mineral-Organic-Microorganism Interactions on Soil and Freshwater Environments, Springer U S, 1999: 189—196.
- [24] 徐萌, 张玉龙, 黄毅, 等. 秸秆还田对半干旱区农田土壤养分含量及玉米光合作用的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(4): 153—156.
- Xu Meng, Zhang Yulong, Huang Yi, et al. Effects of returning straw to field on soil nutrient content and corn photosynthesis in semiarid region[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(4): 153—156. (in Chinese with English abstract)
- [25] 钟杭, 张勇勇, 林潮澜, 等. 麦稻秸秆全量整草免耕还田方法和效果[J]. *土壤肥料*, 2003(3): 34—37.
- Zhong Hang, Zhang Yongyong, Lin Chaolan, et al. Means of all wheat and rice straw application without chopping and cultivation and its effect on crop yield and soil fertility[J]. *Soils and Fertilizers*, 2003(3): 34—37. (in Chinese with English abstract)
- [26] 路文涛, 贾志宽, 张鹏, 等. 秸秆还田对宁南旱作农田土壤活性有机碳及酶活性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(3): 522—528.
- Lu Wentao, Jia Zhikuan, Zhang Peng, et al. Effects of straw returning on soil labile organic carbon and enzyme activity in semi-arid areas of southern Ningxia, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(3): 522—528. (in Chinese with English abstract)
- [27] Parnas H. A theoretical explanation of the priming effect based on microbial growth with two limiting substrates[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1976, 8(2): 139—144.
- [28] 朱培立, 王志明, 黄东迈, 等. 无机氮对土壤中有机碳矿化影响的探讨[J]. *土壤学报*, 2001, 38(4): 457—463.
- Zhu Peili, Wang Zhiming, Huang Dongmai, et al. Effect of inorganic nitrogen on mineralization of organic carbon (14C+12C) soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(4): 457—463. (in Chinese with English abstract)
- [29] Heitkamp F, Wendland M, Offenberger K, et al. Implications of input estimation, residue quality and carbon saturation on the predictive power of the Rothamsted Carbon Model[J]. *Geoderma*, 2012, 170: 168—175.
- [30] 高寒, 王宏燕, 李传宝, 等. 玉米秸秆不同腐解处理还田对黑土碳氮比的影响研究[J]. *土壤通报*, 2013, 44(6): 1392—1397.
- Gao Han, Wang Hongyan, Li Chuanbao, et al. Effects of different maize straw returning modes on C/N ratios in Molliso[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(6): 1392—1397. (in Chinese with English abstract)
- [31] 李少昆, 王克如, 冯聚凯, 等. 玉米秸秆还田与不同耕作方式下影响小麦出苗的因素[J]. *作物学报*, 2006, 32(3): 463—465.
- Li Shaokun, Wang Keru, Feng Jukai, et al. Factors affecting seeding emergence in winter under different tillage patterns with maize stalk mulching returned to the field[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(3): 463—465. (in Chinese with English abstract)
- [32] 赵聚宝, 梅旭荣, 薛军红, 等. 秸秆覆盖对旱地作物水分利用效率的影响[J]. *中国农业科学*, 1996, 29(2): 59—66.
- Zhao Jubao, Mei Xurong, Xue Junhong, et al. The effect of straw mulch on crop water use efficiency in dryland[J]. *Scientific Agricultura Sinica*, 1996, 29(2): 59—66. (in Chinese with English abstract)
- [33] 任军, 郭金瑞, 边秀芝, 等. 土壤有机碳研究进展[J]. *中国土壤与肥料*, 2009(6): 1—7, 27.
- Ren Jun, Guo Jinrui, Bian Xiuzhi, et al. The research progress on soil organic carbon[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2009(6): 1—7, 27. (in Chinese with English abstract)
- [34] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2008, 28(8): 3937—3947.
- Wang Shaoqiang, Yu Guirui. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8): 3937—3947. (in Chinese with English abstract)
- [35] 王建林, 钟志明, 王忠红, 等. 青藏高原高寒草原生态系统土壤碳磷比的分布特征[J]. *草业学报*, 2014, 23(2): 9—19.

- Wang Jianlin, Zhong Zhiming, Wang Zhonghong, et al. Soil C/P distribution characteristics of alpine steppe ecosystems in the Qinhai-Tibetan Plateau[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(2): 9–19. (in Chinese with English abstract)
- [36] 李继福, 任涛, 鲁剑巍, 等. 水稻秸秆钾与化肥钾释放与分布特征模拟研究[J]. *土壤*, 2013, 45(6): 1017–1022.
- Li Jifu, Ren Tao, Lu Jianwei, et al. Study on characteristics of release and distribution of rice straw potassium and chemical potassium by lab simulation[J]. *Soils*, 2013, 45(6): 1017–1022. (in Chinese with English abstract)
- [37] Bhoyar S, Kakad G, Hadole S S, et al. Studies on decomposition of soybean stover and wheat straw by lignocellulolytic fungi. [J]. *Indian Journal of Agricultural Biochemistry*, 2007, 20(1): 7–11.
- [38] 刘义国, 刘永红, 刘洪军, 等. 秸秆还田量对土壤理化性状及小麦产量的影响[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(3): 131–135.
- Liu Yiguo, Liu Yonghong, Liu Hongjun, et al. Effects of straw returning amount on soil physical and chemical properties and yield of wheat[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(3): 131–135. (in Chinese with English abstract)
- [39] 魏猛, 张爱君, 诸葛玉平, 等. 长期不同施肥对黄潮土区冬小麦产量及土壤养分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(2): 304–312.
- Wei Meng, Zhang Aijun, Zhuhe Yuping, et al. Effect of different long-term fertilization on winter wheat yield and soil nutrient contents in yellow fluvo-aquic soil area[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(2): 304–312. (in Chinese with English abstract)
- [40] Agegnehu G, Nelson P N, Bird M I. Crop yield, plant nutrient uptake and soil physicochemical properties under organic soil amendments and nitrogen fertilization on Nitisols[J]. *Soil & Tillage Research*, 2016, 160: 1–13.
- [41] 韩霜. 土壤、施肥及气候因素对作物产量贡献的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2012.
- Han Shuang. Research about the Contribution of Soil, Fertilization and Climate Factors to Crop Production[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2012. (in Chinese with English abstract)

High dosage of pelletized straw returning rapidly improving soil organic carbon content and wheat-maize yield

Cong Ping, Li Yuyi, Gao Zhijuan, Wang Jing, Zhang Li, Pang Huancheng*

(Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: There is a large straw production in the wheat-maize rotation system of Huang-Huai-Hai Plain in China, which increases the difficulty of straw utilization so that soil fertility cannot be effectively supplemented and the environmental pollution caused by straw burning is aggravated. In view of the difficulty of the large straw returning which is not conducive to rapidly improve soil fertility, the pelletized straw returning was created, which made the same area of farmland hold more straw. But it is unclear that if increasing the amount of pelletized straw has a positive effect on soil organic carbon (SOC) content. Therefore, the aim of this article was to explore the effects of the high and low straw return dosages on SOC content, SOC accumulation rate and soil nutrient elements ratio in 0–20, >20–40 and >40–60 cm soil layer and the yield of wheat-maize during the two-year trial period. Five kinds of straw managements were treated by 2-year field location test, including non-straw returning (CK), 12 000 kg/hm² pelletized straw returning (KL1), 36 000 kg/hm² pelletized straw returning (KL3), 12 000 kg/hm² chopped straw returning (FS1), and 36 000 kg/hm² chopped straw returning (FS3). Each straw treatment was a mixture of half wheat straw and half corn straw. The results showed that the SOC_s in >20–40 and >40–60 cm soil layers were significantly affected by the 2-year straw returning. Among the four straw returning treatments, FS1 had the lowest increase, which was only 7.2% in >20–40 cm soil layer and 5.9% in >40–60 cm soil layer higher than that of CK, however, KL3 had the highest increase, which was 12.3% in >20–40 cm soil layer and 11.1% in >40–60 cm soil layer higher than that of CK. Compared with the chopped straw returning treatment, the pelletized straw returning treatment rapidly increased SOC content, which manifested that SOC content of KL3 was 1.7% in >20–40 cm soil layer and 1.3% in >40–60 cm soil layer higher than that of FS3 after 1-year straw returning, and SOC content of KL1 was 0.8% in >20–40 cm soil layer and 0.7% in >40–60 cm soil layer higher than that of FS1 after 1-year straw returning. In addition, high dosage straw returning had the advantage of improving SOC content greatly. Compared with the low dosage straw returning, FS3 increased SOC content by 1.7%–3.9% in >20–40 cm soil layer and 0.7%–3.8% in >40–60 cm soil layer, and KL3 increased SOC content by 2.4%–4.7% in >20–40 cm soil layer and 1.3%–5.1% in >40–60 cm soil layer. KL3 also had the higher SOC accumulation rate in each growing season, and the overall mean value was the highest among the five treatments. What's more, KL3 improved soil carbon-nitrogen ratio (R_{CN}), carbon-phosphorus ratio (R_{CP}) and carbon-potassium ratio (R_{CK}) to a certain extent, which indicated that high dosage pelletized straw returning promoted soil nutrient conversion to a higher fertility direction. In this experiment, KL3 significantly increased the wheat yield by 4.57% and 10.87%, the maize yield by 11.40% and 8.87%, respectively in the 2-year trial period. In a conclusion, 36 000 kg/hm² pelletized straw deep returning is the most beneficial to promote the SOC in the Huang-Huai-Hai Plain, which has a great significance in solving the problem of soil "carbon starvation" and ensuring the sustainable development of agriculture.

Keywords: straw; soils; organic carbon; pelletized; nutrient element balance; yield