

# 氨化秸秆还田加快秸秆分解提高冬小麦产量和水分利用效率

余 坤<sup>1,2</sup>, 冯 浩<sup>1,3\*</sup>, 赵 英<sup>1,4</sup>, 董勤各<sup>1,3</sup>

(1.西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100;  
3.中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100; 4.西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100)

**摘 要:** 为探索一种能够加快秸秆分解速率和促进冬小麦生长的秸秆还田新措施, 2011—2014 年采用小区试验方法, 对比研究了秸秆覆盖(CK1)、秸秆翻压还田(CK2)、长秸秆氨化翻压还田(AS)和粉碎秸秆氨化翻压还田(PAS)4种秸秆还田方式对秸秆分解速率、土壤水分蓄积、冬小麦叶面积指数和地上部干物质积累、产量及水分利用效率的影响。结果表明, 秸秆还田 210 d 后, AS 处理秸秆残留量为 48.46%, 分别较 CK1 和 CK2 降低 24.31%和 13.68%; PAS 处理秸秆残留量为 41.84%, 分别较 CK1 和 CK2 降低 34.64%和 25.46%; 且氨化处理加快秸秆分解速率的效果主要体现在冬小麦生长前期。土壤呼吸与秸秆分解速率呈显著正相关关系, 相关系数为 0.67 ( $P<0.05$ ); AS 和 PAS 处理土壤呼吸速率在冬小麦生长前期分别较 CK1 增加 109.66%和 170.13%, 分别较 CK2 增加 34.55%和 73.36%。连续 3 a 冬小麦生长季, 氨化秸秆还田能显著( $P<0.05$ )提高冬小麦生长后期 0~100 cm 土壤蓄水量。粉碎并氨化秸秆(PAS)较未氨化秸秆还田(CK1、CK2)能显著( $P<0.05$ )提高冬小麦拔节期后叶面积指数, 促进地上部干物质质量的积累。AS 和 PAS 处理冬小麦 3 a 平均产量分别较 CK1 提高 6.13%和 9.53%, 分别较 CK2 提高 3.99%和 7.32%; 水分利用效率分别较 CK1 提高 5.03%和 8.73%, 分别较 CK2 提高 5.13%和 8.83%。其中, PAS 处理 3 a 平均水分利用效率较 AS 高。因此, 氨化并粉碎秸秆还田(PAS)能有效加快秸秆分解, 促进冬小麦生长, 提高产量和水分利用效率, 对于干旱、半干旱地区改良秸秆还田措施具有重要的实际意义和理论价值。

**关键词:** 秸秆; 分解; 作物; 土壤呼吸; 粉碎; 氨化; 产量; 水分利用效率

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.19.015

中图分类号: S512.1<sup>+</sup>1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-19-0103-09

余 坤, 冯 浩, 赵 英, 董勤各. 氨化秸秆还田加快秸秆分解提高冬小麦产量和水分利用效率[J]. 农业工程学报, 2015, 31(19): 103—111. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.19.015 http://www.tcsae.org

Yu Kun, Feng Hao, Zhao Ying, Dong Qin'ge. Ammoniated straw incorporation promoting straw decomposition and improving winter wheat yield and water use efficiency[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(19): 103—111. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.19.015 http://www.tcsae.org

## 0 引 言

秸秆还田能有效减少水分无效蒸发, 提高土壤持水能力和团聚体的稳定性, 改善土壤肥力, 促进土壤-作物系统营养元素循环平衡<sup>[1-2]</sup>, 是农业生产中提高作物生产潜力以及可持续性的重要技术措施之一。秸秆还田对作物生长发育的影响主要体现在 2 个方面, 一是秸秆施入土壤后在自身分解过程中释放出大量的营养元素, 直接影响作物的生长; 二是秸秆还田后能改变农田作物生长环境, 对作物的生长产生间接影响<sup>[3]</sup>。中国传统秸秆覆盖和秸秆翻压还田方式, 在秸秆资源利用方面存在诸多问题, 如秸秆分解缓慢, 秸秆自身的营养元素不能为当

季作物吸收利用; 秸秆在分解过程中, 土壤微生物消耗部分土壤氮素而发生与作物争氮现象以及诱发病虫害等问题<sup>[4]</sup>。

研究表明, 秸秆覆盖措施能有效降低土壤容重, 减少水分无效蒸发, 提高土壤水分的入渗能力。且在一定范围内秸秆覆盖量越大, 抑制蒸发效果也越好<sup>[5-6]</sup>, 秸秆覆盖能导致土壤表层温度降低, 使作物生育期推迟, 不利于作物的正常生长<sup>[7]</sup>。秸秆翻压还田后, 由于秸秆分解速度较慢, 不利于后季作物生根<sup>[8]</sup>。在秸秆腐解过程中, 土壤微生物大量繁殖, 与作物争夺养分, 能造成作物氮饥饿现象<sup>[9]</sup>。粉碎秸秆还田较长秸秆还田能显著改良土壤结构, 提高作物产量<sup>[10]</sup>; 且秸秆碳氮比越低, 改善土壤理化性质, 提高土壤水分含量的效果越明显, 从而对作物生长越有利<sup>[11-12]</sup>。秸秆还田配施适量氮肥能有效缓解土壤碳氮失衡问题, 显著提高冬小麦干物质积累, 进而提高籽粒产量<sup>[13]</sup>。综上, 研究虽然多, 但主要集中在秸秆还田量、埋深以及与无机肥料的混合配施方面, 而关于通过改变秸秆自身性质, 以最大限度地发挥秸秆还田综合效益方面研究较少。

在秸秆类饲料的加工贮藏时, 以液氨、尿素、碳氨

收稿日期: 2015-06-13 修订日期: 2015-09-10

基金项目: 国家 863 计划项目(2011AA100503, 2013AA102904); 高等学校学科创新引智计划(B12007)

作者简介: 余 坤, 男, 河南信阳人, 博士生, 主要从事农业水土资源利用与保护研究。杨凌 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 712100。

Email: yukun88@nwsuaf.edu.cn.

\*通信作者: 冯 浩, 男, 陕西延安人, 研究员, 博士生导师, 主要从事水土资源高效利用以及节水灌溉新技术、新方法和新材料研究。杨凌 中国科学院水利部水土保持研究所, 712100。Email: nercwsi@vip.sina.com

为氮源进行作物秸秆氨化处理, 可促使秸秆角质层外层的酯类化合物分解, 减少酸性洗涤纤维、半纤维素和木质素含量, 增加粗蛋白含量<sup>[14]</sup>, 进而作物秸秆的碳氮比随之降低。氨化秸秆施入土壤后, 能有效促进秸秆的分解, 降低土壤的蒸发强度<sup>[15]</sup>。

鉴于以上研究现状, 本文通过 3 a 的田间试验, 对比研究了长秸秆氨化翻压还田、粉碎秸秆氨化翻压还田与常规秸秆还田方式(秸秆覆盖和秸秆翻压还田)对秸秆分解速率、土壤呼吸、土壤蓄水量、冬小麦生长、产量和水分利用效率的影响, 旨在寻求一种最佳秸秆还田措施, 为提高秸秆还田综合效应提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

2011 年 10 月—2014 年 6 月在西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室灌溉试验站(108°24'E、34°20'N)进行 3 a 田间试验。该站, 海拔 521 m, 属暖温带季风半湿润气候区, 土壤为中壤土, 其砂粒: 粉粒: 黏粒质量比为 8:74:18。0~20 cm 土壤主要理化性状为: 平均土壤容重为 1.35 g/cm<sup>3</sup>, 田间持水率为 23%~25%, (质量含水率); 有机质、全氮分别为 11.17、0.95 g/kg; 速效磷、速效钾分别为 13.67、183.20 mg/kg。

### 1.2 秸秆预处理及试验设计

基于冬小麦-夏玉米轮作条件下的长期定位试验, 以夏玉米秸秆作为试验用秸秆, 设粉末状(1 mm)和 50 mm 长 2 种处理。参考文献[11]进行秸秆氨化处理: 1) 调整秸秆 C/N 值为 25/1, 将占秸秆干质量 1.33% 的氮素和 4% 的 Ca(OH)<sub>2</sub> 溶于水中(溶液总质量为秸秆干质量的 30%); 2) 将溶液喷洒在秸秆上, 混合均匀, 用塑料袋密封, 在常温下(25℃)培养 6 d, 备用。

以传统秸秆覆盖和秸秆翻压还田为对照, 设 CK1、CK2、AS、PAS 4 种秸秆还田方式(见表 1), 各重复 3 次, 共 12 个小区, 随机区组排列。各小区均为南北走向, 面积为 20 m<sup>2</sup>, 周围布置 2 m 宽的作物保护带。

表 1 田间试验处理设计  
Table 1 Field experiment design

处理 Treatments	秸秆还田方式 Straw application methods
CK1	长秸秆(50 mm)覆盖还田
CK2	长秸秆(50 mm)翻压还田
AS	长秸秆(50 mm)氨化翻压还田
PAS	粉碎(1 mm)秸秆氨化翻压还田

### 1.3 田间管理

供试冬小麦品种为‘小偃 22’, 于 2011 年 10 月 19 日, 2012 年 10 月 15 日和 2013 年 10 月 16 日开始种植, 采用人工条播种植方式, 播种量 187.4 kg/hm<sup>2</sup>, 播种深度 5 cm, 行距 25 cm。于 2012 年 6 月 5 日, 2013 年 6 月 3 日和 2014 年 6 月 8 日收获, 3a 全生育期平均 233 d。由于生育期间气候干旱, 在第 1 个生长季, 分别于 2012 年 1 月 5 日和 2012 年 4 月 26 日对各小区灌越冬水和拔节水, 灌水量均为 90 mm; 在第 2 个生长季, 分别于 1 月 18 日

和 2013 年 4 月 12 日对各小区灌越冬水和拔节水, 灌水量均为 60 mm; 在第 3 个生长季, 由于后期雨水充足, 只在 2014 年 1 月 4 日对各小区灌越冬水, 灌水量均为 60 mm。各生长季秸秆还田量均为 4 500 kg/hm<sup>2</sup>; 各处理均施用 225 kg/hm<sup>2</sup> 尿素(46% N)和 112.5 kg/hm<sup>2</sup> 磷酸二铵(48% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)为基肥。播种前, 用旋耕机将基肥与预处理秸秆一次性翻入土壤耕层 0~15 cm 内, 之后不追肥。其他田间管理与一般大田相同。

### 1.4 测定项目及方法

#### 1) 秸秆分解速率

采用尼龙网袋法测定: 在 2013—2014 年生长季, 将供试作物秸秆进行预处理后, 放入长 15 cm、宽 10 cm 的尼龙网袋(0.85 mm)中, 每个处理用尼龙网袋装 20 g, 扎紧袋口, 重复 3 次。播种时, 覆盖处理是将装好秸秆的网袋放置在小区表层, 翻压处理是将网袋垂直埋入 0~15 cm 深土层中。自播种—作物收获期间, 每 30 d 取样 1 次。将取得的网袋用水洗净后放入烘箱中, 在 80℃ 条件下烘干, 利用质量损失法测定秸秆分解速率, kg/(hm<sup>2</sup>·d)。秸秆分解速率=(前次秸秆残留量-本次秸秆残留量)/2 次取样间隔时间。

#### 2) 土壤呼吸

采用动态闭合法测定: 在 2013—2014 年生长季, 利用美国 LICOR 公司生产的 Li-6400 便携式光合作用测定系统和 Li-6400-09 土壤呼吸室进行各处理小区土壤呼吸测定。为减少测定误差, 土壤叶室环刀提前几个小时插入土壤中 2 cm。各处理按三角分布重复测定 3 个样点, 每个样点测定 2 次循环, 取平均值作为最终土壤呼吸值。测定时间一般在上午 09:00—11:00。

#### 3) 土壤水分

播种后每 15 d 采用土钻法测定 1 次土壤含水率, g/g。播种前和收获后测定深度为 2 m。其他时间测定深度为 1 m。40 cm 以内每隔 10 cm 测定 1 次; >60 cm 每隔 20 cm 测定 1 次。

土壤蓄水量计算<sup>[16]</sup>:

$$W = \sum_{i=1}^n (\Delta\theta_i \times Z_i) \quad (1)$$

式中:  $W$  为土壤蓄水量, mm;  $\Delta\theta_i$  为土壤某一层体积含水量, m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>;  $Z_i$  为土壤层次厚度, mm;  $i$  为土壤层次, 共  $n$  层。

#### 4) 作物耗水量及水分利用效率的计算<sup>[17]</sup>:

$$ET = P_r + I + \Delta W + K \quad (2)$$

式中:  $ET$  为作物耗水量, mm;  $P_r$  为生育期降水量, mm;  $I$  为生育期灌溉量, mm;  $\Delta W$  为相邻 2 次取样 100 cm 内土层蓄水量, mm;  $K$  为时段内地下水的补给量, 由于试验田地下水埋深在 5 m 以下, 此处为 0。

作物收获时按小区计算产量, 根据冬小麦产量和生育期耗水量计算水分利用效率。

$$WUE = GY/ET \quad (3)$$

式中:  $WUE$  为水分利用效率, kg/(hm<sup>2</sup>·mm);  $GY$  为冬小麦籽粒产量, kg/hm<sup>2</sup>。

5) 生长要素

包括叶面积指数和地上部干物质质量。地上部干物质质量在冬小麦主要生育期各测定 1 次，测定方法为：每个小区取 5 株小麦样品称得鲜质量，在 105℃ 下杀青 1 h，然后在 75℃ 下烘 24 h 至恒质量，称得干质量。叶面积指数采用英国 Delta T 仪器公司生产的 SunScan 冠层分析仪测定，在冬小麦返青后各主要生育期测定 1 次。

6) 作物产量

收获时，选取各处理均匀一致有代表性的 1 m<sup>2</sup> 小麦进行测产，重复 3 次，折合成每公顷产量，kg/hm<sup>2</sup>。

7) 试验地气象资料

从西北农林科技大学灌溉试验站中获得逐日的气象资料。2011—2014 年冬小麦全生育期降水量及日均气温如图 1 所示。

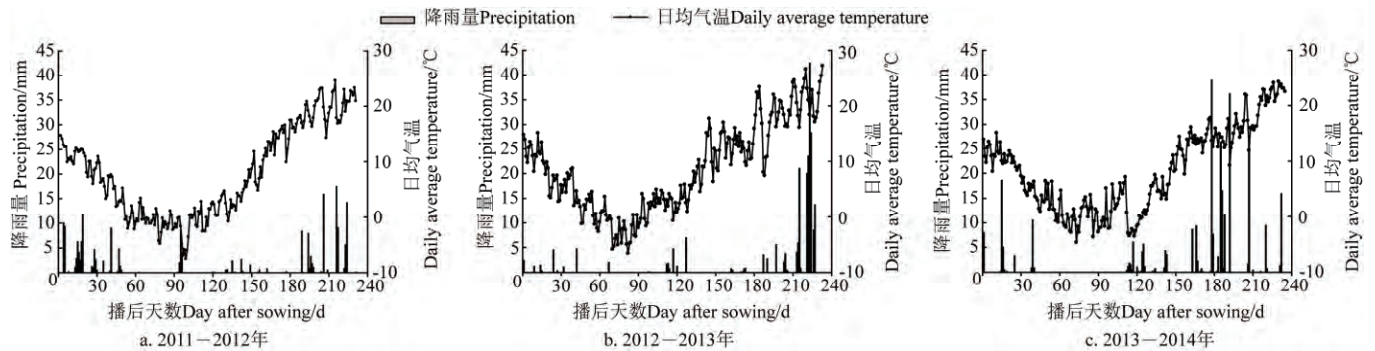


图 1 2011—2014 年冬小麦生育期气温与降雨分布

Fig.1 Distribution of rainfall and mean monthly temperatures in growing season of winter wheat from 2011 to 2014

1.5 资料统计与分析

用 SPSS15.0 进行统计分析，采用 Duncan 新复极差法进行显著性检验，SigmaPlot 11.0 软件绘制图表。

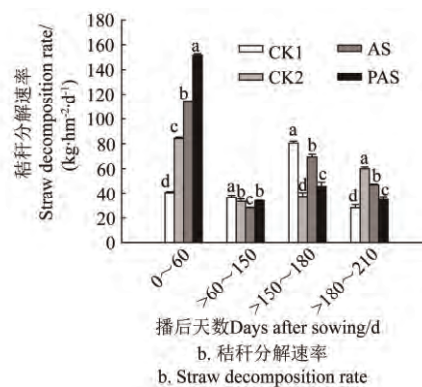
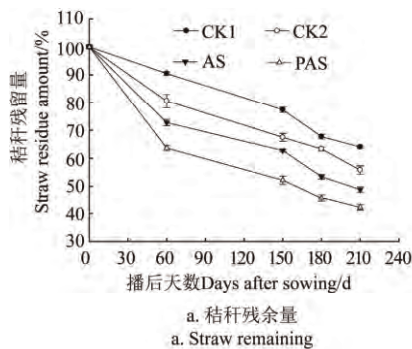
2 结果与分析

2.1 不同处理对秸秆分解的影响

2.1.1 不同处理对秸秆分解率的影响

2013—2014 年生长季各处理秸秆分解残留量及其分

解速率如图 2 所示。由图 2a 可知，在整个试验过程中，AS 和 PAS 处理秸秆残留量均显著低于 CK1 和 CK2 ( $P < 0.05$ )。第 210 天各处理秸秆残留量依次为：PAS < AS < CK2 < CK1，AS 处理秸秆残留量为 48.46%，分别较 CK1 和 CK2 降低 24.31% 和 13.68%；PAS 处理残留量为 41.84%，分别较 CK1 和 CK2 降低 34.64% 和 25.46%。表明氨化措施能有效促进秸秆的分解，结合粉碎措施后效果更加显著。



注：CK1，长秸秆（50 mm）覆盖还田；CK2，长秸秆（50 mm）翻压还田；AS，长秸秆（50 mm）氨化翻压还田；PAS，粉碎秸秆（1 mm）氨化翻压还田；数据为 3 个重复的平均值；柱形图上的不同字母分别表示差异达 5% 显著水平；下同。

Note: CK1, long straw (50 mm) mulching; CK2, long straw (50 mm) turned over into soil; AS, long and ammoniated straw (50 mm) turned over into soil; PAS, powdered and ammoniated straw (1 mm) turned over into soil; Data in figures are means of 3 replicates; Different letters indicate significant difference at 5% level; Same as below.

图 2 不同处理秸秆残留量和秸秆分解速率

Fig.2 Amount of straw residue over time and straw decomposition rate in different treatments

就冬小麦不同生长阶段而言，各处理秸秆分解速率均有较大的差异（图 2b）。在作物生长前期（0~60 d）CK2、AS 和 PAS 处理秸秆在施入土壤后分解速率均高于其他阶段，秸秆分解速率大小依次为 PAS > AS > CK2 > CK1。其中，AS 和 PAS 处理的秸秆分解速率分别较 CK1 高 181.81% 和 272.86%，分别较 CK2 高 36.02% 和 79.97%。在冬小麦越冬期（60~150 d）各处理（CK1 除外）秸秆分解速率均低于其他阶段，这可能是由于越冬期气温较低，土壤微生物

活性较低，导致秸秆分解速率较慢。在拔节-抽穗期（150~180 d），各处理秸秆分解速率依次为 CK1 > AS > PAS > CK2。而在冬小麦生长后期（180~210 d）CK2 处理秸秆分解速率最高，CK1 最低。由分析结果可知，氨化秸秆还田后在作物生长前期秸秆分解速率较快，而秸秆分解能释放大量的氮、磷、钾等营养元素，有利于作物苗期的生长<sup>[18]</sup>。

2.1.2 不同处理对土壤呼吸的影响

2013—2014 年生长季各处理在冬小麦不同生育阶段土

壤呼吸的变化见表 2。由表 2 可知,各处理土壤呼吸成明显的季节变化。不同处理土壤呼吸速率最大值出现的时期也不同。在苗期,AS 和 PAS 处理土壤呼吸速率分别为 3.32 和 4.28  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ , 分别较 CK1 增加 109.66% 和 170.13%, 分别较 CK2 增加 34.55% 和 73.36%; 在越冬期,各处理土壤呼吸速率较其他时期均为最小。这可能与该时期气温较低,导致土壤微生物活性较低有关。在拔节期,各处理土壤呼吸速率较越冬期高。AS 和 PAS 处理土壤呼吸速率显著 ( $P<0.05$ ) 高于 CK1 和 CK2, AS 和 PAS 处理间差异不显著 ( $P>0.05$ )。在抽穗期,CK1 处理土壤呼吸速率最大,CK2 处理土壤呼吸速率最小; 在成熟期,CK2 处理土壤呼吸速率最大,CK1 最小,且处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

表 2 2013—2014 年各处理对冬小麦不同生长阶段土壤呼吸速率的影响

Table 2 Effects of different treatments on soil respiration during different growing stages of winter wheat in 2013-2014

处理 Treatment	$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$				
	出苗 Emergence	越冬 Wintering	拔节 Jointing	抽穗 Heading	成熟 Maturity
CK1	1.58±0.32d	0.54±0.01c	2.20±0.09b	4.08±0.15a	2.32±0.11d
CK2	2.47±0.21c	0.50±0.12c	2.40±0.12b	2.50±0.01c	4.02±0.11a
AS	3.32±0.11b	0.62±0.03b	2.69±0.03a	3.55±0.08b	3.36±0.09b
PAS	4.28±0.07a	0.75±0.02a	2.70±0.02a	2.66±0.08c	2.62±0.11c

注: 不同字母表示差异达显著水平 ( $P<0.05$ ), 下同。

Note: Different letters in same column indicate significant difference among treatments at 0.05 level; Same as below.

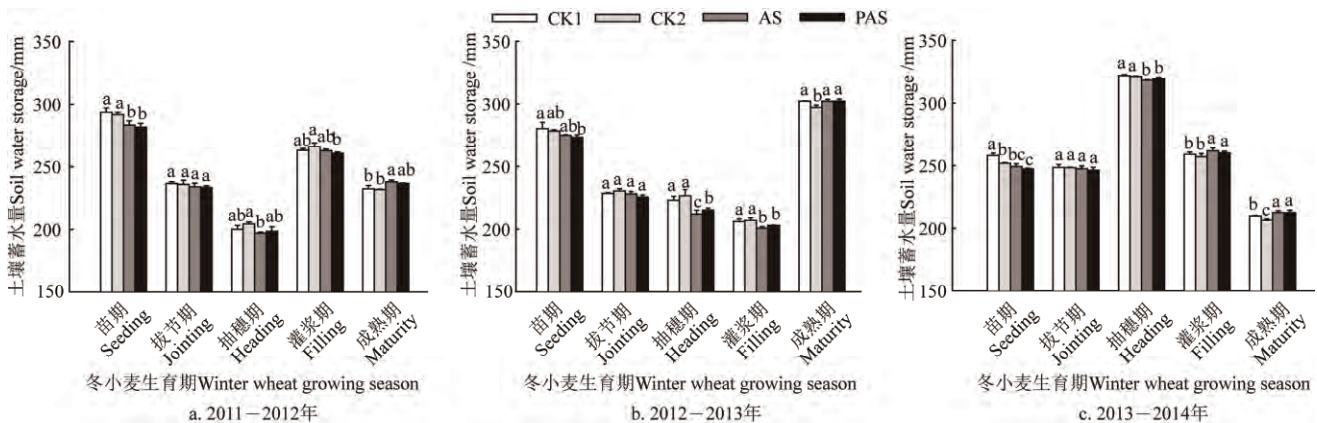


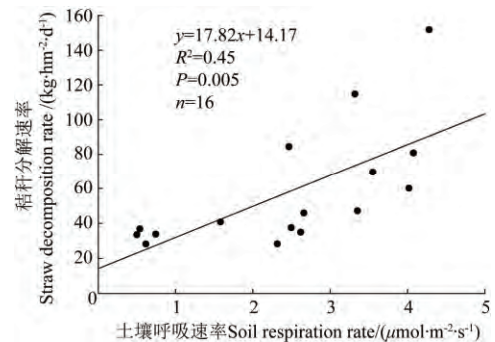
图 4 连续 3 个生长季冬小麦生育期 0~100 cm 土壤蓄水量变化

Fig.4 Changes of soil water storage in 0-100 cm in winter wheat period in 2011-2014

由图 4 可知,在苗期,AS 和 PAS 处理 0~100 cm 土壤蓄水量均较低,3a 平均蓄水量分别为 269.1 和 267.3 mm,较 CK1 分别低 8.1 和 9.9 mm,较 CK2 分别低 4.9 和 6.7 mm,且差异显著 ( $P<0.05$ )。其原因可能是氮化秸秆还田后分解速率较快,秸秆分解过程中消耗水分较多。拔节期,小麦进入快速生长阶段,土壤水分消耗较快且降雨不足,导致土壤蓄水量逐渐降低,但处理间无显著性差异 ( $P>0.05$ )。抽穗期,AS 和 PAS 处理 3a 平均蓄水量分别为 242.6 和 244.6 mm,较 CK1 分别降低 6.0 和 3.9 mm,较 CK2 分别降低 8.4 和 6.3 mm,且差异显著 ( $P<0.05$ )。这可能是由于该时期土壤水分的消耗主要来自于作物蒸腾作用,AS 和 PAS 处理冬小麦长势较好,蒸腾耗水较多,导致土壤蓄水量较低。在 2011—

### 2.1.3 秸秆分解速率与土壤呼吸的关系

2013—2014 年秸秆分解速率与土壤呼吸速率呈显著线性 ( $P<0.01$ ) 正相关 (图 3)。各处理土壤呼吸速率均值为 2.46  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ , 在 0.50~4.28  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$  变化。



注:  $R^2$  为决定系数;  $n$  为数据点数。

Note:  $R^2$  is determination coefficient;  $n$  is data points.

图 3 2013—2014 年秸秆分解速率与土壤呼吸的关系

Fig.3 Relationship between soil respiration and straw decomposition rate in 2013-2014

### 2.2 不同处理对 0~100 cm 土壤剖面水分含量的影响

连续 3 个生长季,由于不同时期降雨量、气温、土壤蒸发和作物耗水量的不同,各处理 0~100 cm 土壤蓄水量在冬小麦不同生长阶段变化也不同 (图 4)。

2012 和 2012—2013 年灌浆期,AS 和 PAS 处理 0~100 cm 土壤蓄水量较 CK1 和 CK2 低,在 2013—2014 年灌浆期较 CK1 和 CK2 高。这可能是在前 2 个生长季灌浆期,由于自然降水不足,冬小麦生殖生长速率加快,氮化秸秆还田处理的冬小麦生长较好,耗水加大,导致土壤蓄水量较低。而在 2013—2014 年生长季灌浆期,自然降雨较多,氮化秸秆施入土壤能有效改善土壤结构,提高土壤持水能力<sup>[19]</sup>,综合表现为土壤蓄水量有所增加。成熟期,AS 和 PAS 处理 3a 平均蓄水量分别为 251.0 和 250.6 mm,较 CK1 分别增加 2.7 和 2.3 mm,较 CK2 分别增加 5.8 和 5.4 mm,且差异显著 ( $P<0.05$ )。说明氮化秸秆还田在冬小麦生长后期能够显著 ( $P<0.05$ ) 提高土壤蓄水量。这可能是该时期冬小麦生长基本结束,耗水较少,氮化秸秆还



田较未氮化秸秆能显著 ( $P < 0.05$ ) 改善土壤结构, 有效提高土壤的持水能力<sup>[20]</sup>, 进而提高 0~100 cm 土壤蓄水量。

### 2.3 不同处理对冬小麦生长的影响

#### 2.3.1 不同处理对冬小麦叶面积指数的影响

作物叶片是进行光合作用的主要器官, 而 LAI 是影响光合速率的重要因子, 其大小直接影响了干物质积累量, 进而决定着产量的高低<sup>[21]</sup>。2013—2014 年生长季各处理冬小麦 LAI 变化见表 3。由表 3 可知, 不同处理的 LAI 在整个生育期的变化趋势基本相同, 均呈抛物线形。即在拔节期时, 冬小麦进入快速生长阶段, 生长速率加快, LAI 逐渐增大; 灌浆期时, LAI 达到最大值; 灌浆期以后, 随着叶片的衰老, LAI 随之降低。

表 3 2013—2014 年各处理对冬小麦叶面积指数的影响  
Table 3 Impact of different treatment on leaf area index of winter wheat in 2013—2014

处理 Treatments	m <sup>2</sup> ·m <sup>-2</sup>			
	拔节期 Jointing	抽穗期 Heading	灌浆期 Filling	成熟期 Maturity
CK1	1.70±0.11c	3.40±0.10b	4.67±0.06b	2.47±0.15b
CK2	1.86±0.20bc	3.60±0.17b	4.77±0.11b	2.58±0.13b
AS	1.91±0.09b	3.97±0.23a	5.03±0.06a	2.80±0.13a
PAS	2.14±0.21a	4.03±0.15a	5.13±0.06a	2.83±0.19a

各处理间, 在拔节期, PAS 处理 LAI 最高, 分别较 CK1、CK2 和 AS 增加 26.14%, 15.57% 和 12.21%, 且差异显著 ( $P < 0.05$ ); 拔节期之后 (抽穗-成熟期), 各处理 LAI 大小依次为 PAS > AS > CK2 > CK1, 其中, AS 和 PAS 处理 LAI 显著 ( $P < 0.05$ ) 高于 CK1 和 CK2, 但 CK1 和 CK2 处理间以及 AS 和 PAS 处理间差异不显著 ( $P > 0.05$ )。由此可知, 氮化秸秆还田较传统秸秆还田方式能有效提高冬小麦各生

育期叶面积指数, 粉碎后还田效果更好。

#### 2.3.2 不同处理对冬小麦地上部干物质质量的影响

2013—2014 年生长季各处理冬小麦不同生育期地上部干物质质量变化见表 4。由表 4 可知, 在整个生育期, CK1 处理冬小麦地上部干物质质量均为最低, 这可能是由于秸秆覆盖后发生的低温效应推迟了冬小麦的生育期, 影响了冬小麦干物质质量的积累<sup>[7]</sup>。PAS 处理冬小麦地上部干物质质量在各个生育阶段均显著 ( $P < 0.05$ ) 高于 CK1 和 CK2。这可能是 PAS 处理冬小麦叶面积指数在各个生育阶段均较高, 光合作用较强, 冬小麦积累的干物质质量也较多。PAS 处理冬小麦地上部干物质质量在各个生育阶段均略高于 AS, 但处理间差异不显著 ( $P > 0.05$ )。在冬小麦成熟期, AS 和 PAS 处理冬小麦地上部干物质质量分别为 1602.72 和 1644.16 g/m<sup>2</sup>, 分别较 CK1 提高 7.02% 和 9.78%, 分别较 CK2 提高 5.52% 和 8.25%。由此可知, 氮化秸秆还田能促进冬小麦的生长, 有利于冬小麦各生育阶段干物质的积累以及生长后期干物质向籽粒的转化, 进而为提高作物产量及水分利用效率打下基础。

#### 2.3.3 不同处理对冬小麦产量及水分利用效率的影响

连续 3 个生长季各处理冬小麦籽粒产量, 耗水量 (ET) 及水分利用效率 (WUE) 变化如表 5 所示。由表 5 可知, AS 和 PAS 处理冬小麦 3 a 平均产量显著 ( $P < 0.05$ ) 高于 CK1 和 CK2, 分别较 CK1 提高 6.13% 和 9.53%, 分别较 CK2 提高 3.99% 和 7.32%。PAS 处理与 AS 相比虽有增产趋势但籽粒产量差异不显著 ( $P > 0.05$ )。由此可知, 氮化秸秆还田较传统秸秆还田能显著 ( $P < 0.05$ ) 提高冬小麦产量, 但秸秆粉碎程度对冬小麦产量影响不明显。

表 4 2013—2014 年各处理冬小麦地上部干物质质量

Table 4 Aboveground biomass of winter wheat under different treatments in 2013—2014

处理 Treatments	g·m <sup>-2</sup>				
	苗期 Seeding	拔节期 Jointing	抽穗期 Heading	灌浆期 Filling	成熟期 Maturity
CK1	40.41±1.86 b	618.05±28.57 b	1170.59±8.08 c	1562.40±67.67 c	1497.63±16.62 b
CK2	41.53±0.74 b	633.92±27.16 b	1232.75±4.66 b	1620.64±56.28 bc	1518.91±53.09 b
AS	44.33±1.78 a	681.15±18.78 a	1291.92±32.15 a	1717.33±44.84 ab	1602.72±34.78 a
PAS	45.17±1.32a	708.03±9.53 a	1315.25±30.80 a	1788.45±57.88 a	1644.16±41.15 a

表 5 不同处理对冬小麦产量、作物耗水量及水分利用效率的影响

Table 5 Effects of different treatments on grain yield, evapotranspiration (ET) and water use efficiency (WUE) of winter wheat

处理 Treatments	2011—2012 年			2012—2013 年			2013—2014 年		
	产量 Yield/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	ET/mm	WUE/ (kg·hm <sup>-2</sup> ·mm <sup>-1</sup> )	产量 Yield/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	ET/mm	WUE/ (kg·hm <sup>-2</sup> ·mm <sup>-1</sup> )	产量 Yield/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	ET/mm	WUE/ (kg·hm <sup>-2</sup> ·mm <sup>-1</sup> )
CK1	8276±34b	382.4±1.9b	21.64±0.18b	7425±144b	334.4±0.8c	22.19±0.68c	7385±152b	381.7±0.8b	19.34±0.37c
CK2	8563±93b	391.5±0.9a	21.87±0.20b	7505±101b	343.2±1.0a	21.87±0.35c	7495±169b	386.6±0.6a	19.38±0.46c
AS	9096±158a	385.2±1.1b	23.54±0.46a	7652±149ab	340.3±0.6b	22.49±0.47b	7782±211a	382.7±1.0b	20.33±0.49b
PAS	9027±161a	386.8±0.7b	23.34±0.45a	8273±115a	338.4±1.2b	24.45±0.32a	7987±28a	381.8±1.4b	20.91±0.11a

不同处理冬小麦 3 a 平均 ET 大小依次为 CK2 > AS > PAS > CK1。表明秸秆覆盖降低冬小麦耗水量效果最好, 氮化秸秆还田较秸秆直接翻压还田能有效减少冬小麦耗水量。这可能是在冬小麦生长前期, 秸秆覆盖阻碍了土壤水分向大气逸散的通道, 减少了土壤的无效耗水;

氮化秸秆还田后, 能较快的改善土壤结构, 提高土壤持水能力。不同处理冬小麦水分利用效率与产量呈现相似的趋势。AS 和 PAS 处理冬小麦 3 a 平均 WUE 显著 ( $P < 0.05$ ) 高于 CK1 和 CK2, 分别较 CK1 提高 5.03% 和 8.73%, 分别较 CK2 提高 5.13% 和 8.83%, 且差异显著 ( $P$

<0.05)。PAS 处理 3 a 平均 WUE 较 AS 高 ( $P < 0.05$ )。表明氮化秸秆还田能够提高作物水分利用效率, 粉碎后效果更加显著 ( $P < 0.05$ )。

### 3 讨论

#### 3.1 秸秆还田方式对秸秆分解的影响

作物秸秆在土壤中分解是在微生物和土壤酶参与下的矿化和腐殖化过程<sup>[22]</sup>, 秸秆分解后能改良土壤, 提高土壤肥力, 但如果还田的秸秆当年不能充分分解, 其累计效应不利于播种和作物生长。秸秆分解速率受自身物质构成、土壤理化性质和秸秆埋深等因素的影响<sup>[23]</sup>。通过田间管理措施提高秸秆分解速率, 这对作物的生长较为有利, 主要措施包括在作物休闲期进行秸秆还田, 以保证秸秆与土壤的充分接触<sup>[24]</sup>; 适时灌溉, 以保持适宜的农田土壤水分<sup>[25]</sup>; 向农田土壤中施入足量的氮素, 避免高 C/N 的秸秆还田后对土壤微生物生长的抑制<sup>[26]</sup>; 将秸秆粉碎后还田, 以增大秸秆与土壤的接触面积, 提高微生物活动的表面积<sup>[27]</sup>。土壤微生物主要集中在 0~10 cm 的土壤中, 秸秆还田措施在 0~10 cm 土层的土壤微生物较常规耕作为高<sup>[28]</sup>。作物秸秆 C/N 越低, 施入土壤后在前期分解越容易, CO<sub>2</sub> 的累计释放和土壤碳、氮的增加效果也相对越明显<sup>[29]</sup>。本试验中, CK2 处理秸秆残留量在冬小麦成熟期较 CK1 降低了 12.31%, 表明秸秆翻入土壤中比秸秆覆盖在表层腐解速率快, 这与李新举等研究结果一致<sup>[30]</sup>。氮化秸秆还田后在冬小麦生长前期 (0~60 d) 秸秆分解速率和土壤呼吸速率均显著高于传统秸秆还田方式, 分析原因可能是氮化措施, 降低了酸性洗涤纤维、半纤维素和木质素含量, 同时提高了粗蛋白含量, 使得秸秆 C/N 降低, 缓解了土壤碳氮比失衡<sup>[14]</sup>, 有利于土壤微生物活动和生长繁殖, 促进秸秆的快速分解 (图 2b), 土壤呼吸速率也随之增加。这与前人的研究结果一致。在越冬期 (60~150 d), 各处理秸秆分解速率均较低, 这可能与该阶段土壤温度较低, 抑制了微生物活性有关。秸秆中的半纤维素和纤维素具有较强的抗分解能力, 秸秆经过一段时间腐解, 其含量大量降低, 而木质素抗分解能力最强, 随着其他成分的矿质化分解, 其含量有所增加, 秸秆腐解速率降低<sup>[22]</sup>。本试验中, 氮化秸秆分解速率在抽穗-灌浆期低于秸秆覆盖处理, 在灌浆-成熟期低于秸秆直接翻压还田处理。这与王旭东等<sup>[22]</sup>研究结果类似。

秸秆施入土壤后的分解状况与土壤呼吸有重要关系。土壤微生物呼吸是土壤呼吸的主要组成部分, 土壤微生物的数量和活性与秸秆分解速率关系密切, 因此土壤呼吸可以较好表征秸秆分解状况<sup>[31]</sup>。一般认为, 秸秆还田能促进土壤中 CO<sub>2</sub> 的释放<sup>[32]</sup>。张赛等<sup>[33]</sup>研究结果表明, 秸秆覆盖条件下的地表呼吸会过早的受到抑制, 二氧化碳排放量低于裸地对照。张晓雨等<sup>[34]</sup>研究了秸秆添加腐熟剂后还田对土壤呼吸作用的影响, 指出秸秆添加腐熟剂处理能在前期明显增强土壤呼吸

速率, 但在后期土壤呼吸速率低于秸秆处理。本研究中, 不同处理秸秆分解速率与土壤呼吸呈显著正相关关系 (图 3)。由此可见, 土壤微生物对秸秆的分解速率具有显著影响, 氮化秸秆在冬小麦前期分解速率高于传统秸秆还田, 也在一定程度上反映出氮化秸秆还田后土壤微生物的活性较强, 这与 Angers 等<sup>[27]</sup>的研究结果一致。

#### 3.2 秸秆还田方式对土壤水分的影响

秸秆覆盖具有有效抑制水分蒸发和保持土壤水分的作用<sup>[35]</sup>, 随着秸秆覆盖量的增加, 表层土壤水分含量也越高。本研究中秸秆覆盖处理较其他处理在作物生长前期表现出较强的蓄水保墒优势 (图 4)。拔节期之前秸秆覆盖能有效抑制土壤无效蒸发, 提高土壤保水能力, 随着植株的生长, 自身冠层和植被覆盖度不断增加, 秸秆覆盖对表层土壤水分含量的影响变小, 这与王兆伟等<sup>[36]</sup>研究结论基本一致。也有研究认为, 秸秆还田对土壤水分状况的影响具有双重性<sup>[37]</sup>, 在秸秆施入土壤初期, 秸秆腐解过程中需要消耗大量的水分, 不利于作物前期的生长; 腐解高峰期结束后, 秸秆还田具有明显的蓄水保墒能力。本研究中, 氮化秸秆处理 0~100 cm 土壤蓄水量在冬小麦苗期较低, 而在灌浆期后表现出较好的蓄水保墒能力, 这与前人研究结果一致。这可能是由于氮化秸秆施入土壤后在作物生长前期秸秆分解速率较快, 耗水较多, 后期有效改善了土壤结构, 增加了土壤水分的渗透性, 提高了土壤持水与供水能力<sup>[20]</sup>。

#### 3.3 秸秆还田方式对冬小麦生长及产量的影响

秸秆还田能够提高作物生育后期叶面积指数, 延缓作物生长后期叶片叶绿素的降解和光和作用的下降<sup>[38-39]</sup>。但秸秆覆盖后发生的低温效应不利于作物的正常生长, 可造成作物减产<sup>[7]</sup>。Limon-Ortega 等<sup>[40]</sup>研究发现当土壤肥力较低或氮肥施用不合理时, 秸秆翻压还田会对作物生长产生不利影响, 甚至导致减产, 但当土壤肥力较高或是氮肥施用合理时, 则会促进作物生长, 提高产量。本试验采用秸秆氮化措施调节秸秆 C/N, 缓解土壤碳氮比失衡, 促进秸秆的快速分解。本研究表明, 氮化秸秆还田较传统秸秆还田能增加冬小麦叶面积指数和促进地上部干物质的累积, 减少水分消耗, 提高产量和水分利用效率。原因可能有 2 个方面: 一是氮化秸秆施入土壤后分解速率较快, 分解过程释放大量的营养元素, 有利于冬小麦的生长; 二是氮化秸秆还田刺激了微生物活动和生长繁殖, 这需消耗一部分氮素, 而氮化秸秆还田后能降低土壤中的 C/N, 缓解微生物与作物争夺氮素的问题。

本研究是长期定位试验, 由于试验年限较短, 秸秆分解过程中土壤微生物的变化和土壤有机碳的分解速率等还不是很清楚, 有待进一步长期深入的研究。

### 4 结论

1) 氮化秸秆还田能有效促进秸秆的分解, 在冬小麦生长前期 (0~60 d) 秸秆分解速率较秸秆覆盖和秸秆直接翻压还田分别高 181.81% 和 36.02%, 氮化秸秆粉碎

后还田效果更加显著, 较秸秆覆盖和秸秆直接翻压还田分别高 272.86% 和 79.97%。

2) 秸秆覆盖在作物生长前期具有明显的蓄水保墒能力, 能有效降低冬小麦生育期内总耗水量。AS 和 PAS 处理在冬小麦生长后期能显著提高 0~100 cm 土层的土壤蓄水量, 其成熟期 3 a 平均蓄水量较秸秆覆盖分别增加了 2.7 和 2.3 mm, 较秸秆直接翻压还田分别增加了 5.8 和 5.4 mm。

3) 氨化秸秆还田较秸秆覆盖和秸秆直接翻压还田能增加冬小麦叶面积指数, 促进地上部干物质积累, 提高冬小麦水分利用效率和产量。而且, 氨化并粉碎秸秆还田提高作物产量和水分利用效率作用效果最为显著, 其 3 a 平均产量分别较秸秆覆盖和秸秆直接翻压还田提高了 9.53% 和 7.32%, 3 a 平均水分利用效率分别较秸秆覆盖和秸秆直接翻压还田提高了 8.73% 和 8.83%。

综上, 氨化秸秆粉碎后还田为最佳秸秆还田方式。结果可为干旱半干旱地区提高秸秆还田综合效益和农业生产潜力提供指导。

#### [参 考 文 献]

- [1] 江永红, 宇振荣. 秸秆还田对农田生态系统及作物生长的影响[J]. 土壤通报, 2001, 32(5): 209—213.  
Jiang Yonghong, Yu Zhenrong. The effect of stubble return on agro-ecological system and crop growth[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2001, 32(5): 209—213. (in Chinese with English abstract)
- [2] 李娟, 赵秉强, 李秀英, 等. 长期有机无机肥料配施对土壤微生物学特性及土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(1): 144—152.  
Li Juan, Zhao Bingqiang, Li Xiuying, et al. Effects of long-term combined application of organic and mineral fertilizers on soil microbiological properties and soil fertility[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(1): 144—152. (in Chinese with English abstract)
- [3] 梁天锋, 徐世宏, 刘开强, 等. 耕作方式对还田稻草氮素释放及水稻氮素利用的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(10): 3564—3570.  
Liang Tianfeng, Xu Shihong, Liu Kaiqiang, et al. Influence of tillage patterns on incorporated straw nitrogen release and nitrogen utilization of rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(10): 3564—3570. (in Chinese with English abstract)
- [4] 刘芳, 张长生, 陈爱武, 等. 秸秆还田技术研究及应用进展[J]. 作物杂志, 2012(2): 18—23.  
Liu Fang, Zhang Changsheng, Chen Aiwu, et al. Technology research and application prospect of straw returning[J]. Crops, 2012(2): 18—23. (in Chinese with English abstract)
- [5] Spaccini R, Piccolo A, Haberhauer G, et al. Decomposition of maize straw in three European soils as revealed by DRIFT spectra of soil particle fractions[J]. Geoderma, 2001, 99(3): 245—260.
- [6] Sonnleitner R, Lorbeer E, Schinner F. Effects of straw, vegetable oil and whey on physical and microbiological properties of a chernozem[J]. Applied Soil Ecology, 2003, 22(3): 195—204.
- [7] Sarkar S, Paramanick M, Goswami S B. Soil temperature, water use and yield of yellow sarson (*Brassica napus* L. var. *glaucua*) in relation to tillage intensity and mulch management under rainfed lowland ecosystem in eastern India[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 93(1): 94—101.
- [8] 李培培, 张冬冬, 王小娟, 等. 促分解菌剂对还田玉米秸秆的分解效果及土壤微生物的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(9): 2847—2854.  
Li Peipei, Zhang Dongdong, Wang Xiaojuan, et al. Effects of microbial inoculants on soil microbial diversity and degrading process of corn straw returned to field[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(9): 2847—2854. (in Chinese with English abstract)
- [9] Wang J, Bakken L R. Competition for nitrogen during decomposition of plant residues in soil: effect of spatial placement of N-rich and N-poor plant residues[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1997, 29(2): 153—162.
- [10] Cabiles D M, Angeles O R, Johnson-Beebout SE, et al. Faster residue decomposition of brittle stem rice mutant due to finer breakage during threshing[J]. Soil and Tillage Research, 2008, 98(2): 211—216.
- [11] 余坤, 冯浩, 王增丽, 等. 氨化秸秆还田改善土壤结构增加冬小麦产量[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 165—173.  
Yu Kun, Feng Hao, Wang Zengli, et al. Ammoniated straw improving soil structure and winter wheat yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(15): 165—173. (in Chinese with English abstract)
- [12] Kaewpradit W, Toomsan B, Cadisch G, et al. Mixing groundnut residues and rice straw to improve rice yield and N use efficiency[J]. Field Crops Research, 2009, 110(2): 130—138.
- [13] 陈金, 唐玉海, 尹燕桦, 等. 秸秆还田条件下适量施氮对冬小麦氮素利用及产量的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(1): 160—167.  
Chen Jin, Tang Yuhai, Yin Yanping, et al. Effects of straw returning plus nitrogen fertilizer on nitrogen utilization and grain yield in winter wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(1): 160—167. (in Chinese with English abstract)
- [14] 毛华明, 朱仁俊, 冯仰廉. 饲喂复合化学处理大麦秸秆颗粒对泌乳牛生产性能的影响[J]. 云南农业大学学报, 1999, 14(2): 167—170.  
Mao Huaming, Zhu Renjun, Feng Yanglian. Effects on the performances of holstein cows fed pelleted barley straw treated with urea and calcium hydroxide[J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 1999, 14(2): 167—170. (in Chinese with English abstract)
- [15] 王增丽, 王珍, 冯浩. 预处理秸秆对土壤蒸发及秸秆分解率的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(9): 816—821.  
Wang Zengli, Wang Zhen, Feng Hao. Effects of pretreated straws on soil evaporation and straw decomposition rate[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(9): 816—821. (in Chinese with English abstract)
- [16] 韩丽娜, 丁静, 韩清芳, 等. 黄土高原区草粮(油)翻耕轮作的土壤水分及作物产量效应[J]. 农业工程学报, 2012, 28(24): 129—137.  
Han Li'na, Ding Jing, Han Qingfang, et al. Effects of alfalfa-grain (oil) crop plowing rotation on soil moisture and crop yield in Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(24): 129—137. (in Chinese with English abstract)

- [17] 陈林, 杨新国, 翟德苹, 等. 柠条秸秆和地膜覆盖对土壤水分和玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 108—116.  
Chen Lin, Yang Xinguo, Zhai Deping, et al. Effects of mulching with Caragana powder and plastic film on soil water and maize yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(2): 108—116. (in Chinese with English abstract)
- [18] 高利伟, 马林, 张卫峰, 等. 中国作物秸秆养分资源数量估算及其利用状况[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 173—179.  
Gao Liwei, Ma lin, Zhang Weifeng, et al. Estimation of nutrient resource quantity of crop straw and its utilization situation in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(7): 173—179. (in Chinese with English abstract)
- [19] 王珍, 冯浩. 秸秆不同还田方式对土壤入渗特性及持水能力的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 75—80.  
Wang Zhen, Feng Hao. Effect of straw-incorporation on soil infiltration characteristics and soil water holding capacity[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(4): 75—80. (in Chinese with English abstract)
- [20] 王珍, 冯浩, 吴淑芳. 秸秆不同还田方式对土壤低吸力段持水能力及蒸发特性的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(3): 533—539.  
Wang Zhen, Feng Hao, Wu Shufang, et al. Effects of different straw-incorporation methods on soil water retention capacity and evaporation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(3): 533—539. (in Chinese with English abstract)
- [21] 徐英, 周明耀, 薛亚锋. 水稻叶面积指数和产量的空间变异性及关系研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(5): 10—14.  
Xu Ying, Zhou Mingyao, Xue Yafeng. Spatial variability and relationships of rice leaf area index and yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(5): 10—14. (in Chinese with English abstract)
- [22] 王旭东, 陈鲜妮, 王彩霞, 等. 农田不同肥力条件下玉米秸秆腐解效果[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 252—257.  
Wang Xudong, Chen Xianni, Wang Caixia, et al. Decomposition of corn stalk in cropland with different fertility[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(10): 252—257. (in Chinese with English abstract)
- [23] 江晓东, 迟淑筠, 王芸, 等. 少免耕对小麦/玉米农田玉米还田秸秆腐解的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 247—251.  
Jiang Xiaodong, Chi Shuyun, Wang Yun, et al. Effect of less tillage and no-tillage patterns on decomposition of returned maize straw in wheat/maize system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(10): 247—251. (in Chinese with English abstract)
- [24] Henriksen T M, Breland T A. Carbon mineralization, fungal and bacterial growth, and enzyme activities as affected by contact between crop residues and soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, 35(1): 41—48.
- [25] Devevre OC, Horwath WR. Decomposition of rice straw and microbial carbon use efficiency under different soil temperatures and moistures[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(11): 1773—1785.
- [26] Debnath M, Sinha N. Effect of different C/N ratios and microbial culture inoculations on decomposition of rice straw[J]. Environment and Ecology Kalyani, 1993, 11(1): 1—6.
- [27] Angers DA, Recous S. Decomposition of wheat straw and rye residues as affected by particle size[J]. Plant and Soil, 1997, 189(2): 197—203.
- [28] 王芸, 李增嘉, 韩宾, 等. 保护性耕作对土壤微生物量及活性的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(8): 3384—3390.  
Wang Yun, Li Zengjia, Han Bin, et al. Effects of conservation tillage on soil microbial biomass and activity[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(8): 3384—3390. (in Chinese with English abstract)
- [29] 南雄雄, 田霄鸿, 张琳, 等. 小麦和玉米秸秆腐解特点及对土壤中碳、氮含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3): 626—633.  
Nan Xiongiong, Tian Xiaohong, Zhang Ling, et al. Decomposition characteristics of maize and wheat straw and their effects on soil carbon and nitrogen contents[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(3): 626—633. (in Chinese with English abstract)
- [30] 李新举, 张志国, 李贻学. 土壤深度对还田秸秆腐解速度的影响[J]. 土壤学报, 2001, 38(1): 135—138.  
Li Xinju, Zhang Zhiguo, Li Yixue. Effects of soil depth on decay speed of straw[J]. Acta Pedologica Sinica, 2001, 38(1): 135—138. (in Chinese with English abstract)
- [31] Kuzyakov Y, Cheng W. Photosynthesis controls of rhizosphere respiration and organic matter decomposition[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33(14): 1915—1925.
- [32] Bono A, Alvarez R, Buschiazzo DE, et al. Tillage effects on soil carbon balance in a semiarid agroecosystem[J]. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72(4): 1140—1149.
- [33] 张赛, 张晓雨, 王龙昌, 等. 西南丘陵区保护性耕作下小麦农田土壤呼吸及影响因素分析[J]. 环境科学, 2013, 34(7): 2815—2820.  
Zhang Sai, Zhang Xiaoyu, Wanglongchang, et al. Analysis of soil respiration and influence factors in wheat farmland under conservation tillage in southwest hilly region[J]. Environmental Science, 2013, 34(7): 2815—2820. (in Chinese with English abstract)
- [34] 张晓雨. 秸秆还田腐解特征及其对土壤环境和小麦生长的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2014: 29—37.
- [35] 蔡太义, 贾志宽, 孟蕾, 等. 渭北旱塬不同秸秆覆盖量对土壤水分和春玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 43—48.  
Cai Taiyi, Jia Zhikuan, Meng Lei, et al. Effects of different rates of straw mulch on soil moisture and yield of spring maize in Weibei Highland area of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(3): 43—48. (in Chinese with English abstract)
- [36] 王兆伟, 郝卫平, 龚道枝, 等. 秸秆覆盖量对农田土壤水分和温度动态的影响[J]. 中国农业气象, 2010, 31(2): 244—250.  
Wang Zhaowei, Hao Weiping, Gong Daozhi, et al. Effect of straw mulch amount on dynamic changes of soil moisture and temperature in farmland[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2010, 31(2): 244—250. (in Chinese with English abstract)
- [37] 吴菲. 玉米秸秆连续多年还田对土壤理化性状和作物生长的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2005: 12—15.



- [38] 赵四申, 张西群, 贾素梅, 等. 玉米秸秆整株还田对小麦生长发育及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(1): 145—147.  
Zhao si shen, Zhang Xiqun, Jia Sumei, et al. Influence of returning whole corn stalk into soil on wheat growth and its yield[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2003, 11(1): 145—147. (in Chinese with English abstract)
- [39] 高茂盛, 廖允成, 吴清丽, 等. 麦秸翻压还田对隔茬冬小麦旗叶抗性的生理效应[J]. 生态学报, 2007, 27(10): 4197—4202.  
Gao Maosheng, Liao Yuncheng, Wu Qingli, et al. Physiological effects of ploughing wheat straw under soil on flag-leaf resistance of winter wheat under wheat-summer corn rotation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(10): 4197—4202. (in Chinese with English abstract)
- [40] Limonortega A, Sayre KD, Francis CA. Wheat and maize yields in response to straw management and nitrogen under a bed planting system[J]. Agronomy Journal, 2000, 92(2): 295—302.

## Ammoniated straw incorporation promoting straw decomposition and improving winter wheat yield and water use efficiency

Yu Kun<sup>1,2</sup>, Feng Hao<sup>1,3\*</sup>, Zhao Ying<sup>1,4</sup>, Dong Qin'ge<sup>1,3</sup>

(1. Chinese National Academy of Water-saving Agriculture in Arid Region, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. College of Water Resource and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

3. Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China;

4. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** Straw is often incorporated into field by covering on soil surface or being plowed into soil in China, which may cause problems such as competition of nutrients between soil microbes and crop because of slow decomposition of straw, and frequent occurrence of pests and diseases when crop straw is applied into soil, thereby negatively affecting the crop yield. An appropriate method may solve the problems above. The objectives of this study were to select an efficient straw incorporation method that could accelerate the decomposition rate of crop straw and promote the growth of winter wheat in semi-arid region of Shaanxi, China. To achieve these goals, a 3-year field experiment was carried out in the year of 2011—2014 at the Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Area sponsored by Ministry of Education (34°18'N, 108°04'E), at Northwest A & F University. Using summer maize straw harvested last season, two control treatments were designed including long straw returning by covering soil (CK1), and long straw plowed into soil (CK2). In comparison, another two straw treatments were long-ammoniated straw plowed into soil (AS) and powdered-ammoniated straw plowed into soil (PAS). The straw decomposition rate, soil respiration, leaf area index (LAI) and aboveground biomass of winter wheat were measured during different growth stage in the growing seasons of 2013-2014. Soil water of 0-100 cm depth during different growth stages and winter wheat yield under different treatments in the growing season of 2011-2014 were measured. Results showed that compared with the CK1 and CK2, the straw left in soils with the treatment AS was significantly ( $P<0.05$ ) decreased by 24.31% and 13.68%, respectively, and the remaining with the treatment PAS was significantly ( $P<0.05$ ) decreased by 34.64% and 25.46%, respectively. And the treatment of ammoniated straw accelerated the decomposition rate mainly in the early growth stage of winter wheat. The correlation coefficient between soil respiration and straw decomposition rate was 0.67 ( $P<0.01$ ); Soil respiration rate of the treatment AS and PAS was significantly ( $P<0.05$ ) higher than that of CK1 and CK2 in the early winter wheat growth stage, which was increased by 109.66% and 170.13%, respectively, compared with CK1, and by 34.55% and 73.36%, respectively, compared with CK2. The variation tendency of soil water of 0-100 cm depth in three-consecutive growing seasons during different growth stages was almost consistent. The treatment of ammoniated straw had higher soil water storage at the late growth stage of winter wheat. The treatment PAS could significantly ( $P<0.05$ ) improve the winter wheat LAI, and promoted the accumulation of aboveground biomass. And at the mature stage of winter wheat, the aboveground biomass for the treatment PAS was significantly ( $P<0.05$ ) increased 7.02% and 9.78%, respectively, compared with CK1, and by 5.52% and 8.25%, respectively, compared with CK2. The three-year mean winter wheat yields with AS and PAS was higher than that of conventional straw incorporation, which was significantly ( $P<0.05$ ) increased 6.13% and 9.53%, respectively, compared with CK1 and by 3.99% and 7.32%, respectively, compared with CK2. However, the difference of grain yield between PAS and AS was not significantly ( $P>0.05$ ). The three-year mean water use efficiency (WUE) with AS and PAS was significantly ( $P<0.05$ ) increased by 5.03% and 8.73%, respectively, compared with CK1, and by 5.13% and 8.83%, respectively, compared with CK2. And the three-year mean WUE of the treatment PAS was higher than that of the treatment AS. Comparably, the treatment of PAS was the best among the four treatments in accelerating the straw decomposition, promoting the growth of winter wheat, and increasing winter wheat yield and water use efficiency, which could be an effective straw incorporation measure for winter wheat cultivation in the arid and semi arid area.

**Key words:** straw; decomposition; crops; soils respiration; powder; ammoniation, yield; water use efficiency