

# 东北地区玉米秸秆还田培肥机理及相关技术研究进展

梁卫<sup>1</sup>, 袁静超<sup>2</sup>, 张洪喜<sup>2</sup>, 闫孝贡<sup>2</sup>, 刘剑钊<sup>2</sup>, 蔡红光<sup>2</sup>, 沙洪林<sup>2</sup>, 迟畅<sup>2</sup>, 任军<sup>2\*</sup>

(1. 吉林省科学技术厅 长春 130041; 2. 吉林省农业科学院 长春 130033)

**摘要:** 本文提出了我国东北地区玉米秸秆还田现状与存在问题, 从玉米秸秆还田腐解规律、玉米秸秆还田对土壤物理性状、土壤有机质(碳)、土壤微团聚体、土壤微生物的影响等方面, 总结了东北地区玉米秸秆还田培肥机理研究进展, 阐述了玉米秸秆还田对玉米生长发育的影响及玉米秸秆还田技术研究进展, 并提出了今后东北地区玉米秸秆还田领域的研究方向与重点。

**关键词:** 东北地区, 玉米秸秆, 还田技术

中图分类号: S141.4

文献标识码: A

文章编号: 1003-8701(2016)02-0044-06

## Research Progress on Mechanism and Related Technology of Corn Straw Returning in Northeast China

LIANG Wei<sup>1</sup>, YUAN Jingchao<sup>2</sup>, ZHANG Hongxi<sup>2</sup>, YAN Xiaogong<sup>2</sup>, LIU Jianzhao<sup>2</sup>, CAI Hongguang<sup>2</sup>, SHA Honglin<sup>2</sup>, CHI Chang<sup>2</sup>, REN Jun<sup>2\*</sup>

(1. Jilin Provincial Science & Technology Department, Changchun 130041; 2. Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** In this paper, the current situation and existing problems of maize straw returning in northeast China were put forward. The mechanism of maize straw returning was summarized from the following aspects including maize straw decomposing law, the effect of maize straw returning on soil physical properties, soil organic matter (carbon), soil micro-aggregates and soil microbes and the effect of maize straw returning on the maize growth were expounded, at the same time the area and emphasis on maize straw returning research were introduced in the future in North-east China.

**Key words:** Northeast china; Maize straw; Straw returning technique

中国是农业大国, 秸秆资源十分丰富, 有 6 亿 ~ 8 亿 t<sup>[1]</sup>。我国玉米秸秆分布呈现北方多、南方少的基本布局。东北区是我国最大的玉米产区, 玉米秸秆产量占全国 31%。其中, 黑龙江和吉林玉米秸秆产量分别占全国的 13.1% 和 11.3%<sup>[2]</sup>。我国玉米秸秆资源化利用率较低, 秸秆焚烧和废弃量较大, 对环境造成明显的污染。秸秆直接还田

比例总体较低, 且地域差异较大。华北地区是我国玉米秸秆直接还田比例最高的地区, 约有 31% 的玉米秸秆被直接还田<sup>[2]</sup>。

世界上农业发达的国家大都非常重视土地的用养结合和发展生态农业, 秸秆还田和农家肥占施肥总量的 2/3。在美国秸秆还田十分普遍, 据美国农业部统计, 美国每年生产的作物秸秆 4.5 亿 t, 秸秆还田量占秸秆生产量的 68%, 对保持土壤肥力起着十分重要的作用。英国秸秆直接还田量则占其生产量的 73%<sup>[3]</sup>。

目前, 东北玉米播种面积接近 1400 万 hm<sup>2</sup>, 据不完全统计, 玉米秸秆产量超过 9800 万 t, 东北玉米秸秆作燃料、饲料和秸秆还田的比例分别为 35.14%、30.18% 和 19.18%<sup>[4]</sup>。而在玉米秸秆还田

收稿日期: 2015-10-11

基金项目: 国家科技支撑课题(2011BAD16B10、2012BAD04B02、2013BAD07B02); 吉林省玉米产业技术体系项目(201202)

作者简介: 梁卫(1966-), 女, 研究员, 硕士, 主要从事科技档案工作。

通讯作者: 任军, 男, 博士, 研究员, E-mail: renjun557@163.com

中,立茬还田为主体,过腹还田亦有一定数量。由于受种种条件所限,玉米秸秆直接还田及堆腐还田难度较大,还田量亦较少。

几十年来,由于重用轻养导致东北黑土地有机质数量减少、质量下降,土壤肥力退化明显,土壤资源遭到严重破坏。从东北地区的自然条件与生产实际来分析,玉米秸秆是土壤增碳的主要资源与途径。因此,有必要了解玉米秸秆还田的现状与存在问题,明确原因与解决途径,为玉米秸秆还田提供支撑与保障。

## 1 玉米秸秆还田培肥机理研究进展

近年来,东北地区的科研单位在玉米秸秆还田领域开展了大量研究工作,主要包括:玉米秸秆还田腐解规律,玉米秸秆还田对土壤物理性状、土壤有机质(碳)、土壤微团聚体、土壤微生物及对玉米生长发育的影响,主要研究进展如下:

### (1) 玉米秸秆还田腐解规律

秸秆分解速度受土壤性质、气候等多种因素影响。高温条件下秸秆分解较快,积累相对较少,低温条件下腐殖化作用强,有利于有机质积累。灌溉有利于碳积累。随加入碳量增加,分解速度加快,碳残留量减少。弱碱性条件有利于秸秆分解<sup>[5]</sup>。随还田时间延长玉米秸秆分解率增加,经150 d腐解,秸秆组织和维管束均遭到破坏,秸秆腐解率大于根茬。土埋处理分解率大于露天处理,分解率分别为65.9%和48.9%<sup>[6-8]</sup>。有机物料分解速度与含碳化合物组分相关。有机物料C/N越高,其分解速率越快,残留量越少;粗纤维含量高,分解速度也快<sup>[9]</sup>。

红外光谱研究表明,随着玉米秸秆腐解,腐解产物脂族性降低,芳香性增强;同时,腐解物中C和H含量逐渐下降,而O和N含量逐渐增加。腐解后,30%~60%有机成分氧化为CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O。各成分含量变化最快时期在腐解后60 d内,阳离子交换量和腐殖酸的含量增加较快。C/N比值亦随腐解的进行而降低,而C/H比值则略有增加。N肥加入促进了玉米秸秆残体腐解<sup>[10,11]</sup>。

### (2) 玉米秸秆还田对土壤物理性状的影响

玉米秸秆还田对土壤物理性状具有明显的改善作用。秸秆还田区土壤总孔隙度增加5.1%~12.2%<sup>[12-13]</sup>。秸秆深还0~10 cm总孔隙度增加10.99%~16.37%;20~30 cm总孔隙度增加8.97%~34.16%<sup>[14-15]</sup>。大垄双行种植模式下秸秆还田形成的大孔隙不会影响玉米正常生长<sup>[16]</sup>。秸秆

还田土壤通气孔隙增加6.7%<sup>[12]</sup>,粉碎还田0~20 cm毛管孔隙降低,21~40 cm通气孔隙增加<sup>[17]</sup>。

秸秆直接还田土壤容重降低0.09~0.19 g/cm<sup>3</sup><sup>[13,18]</sup>。秸秆深还20~40 cm土层容重比0~20 cm土层降低幅度大,有利于改善深层土壤通透性<sup>[14,19]</sup>。秸秆还田土壤紧实度下降32%~46%<sup>[20]</sup>。随秸秆还田量增加土壤容重降低呈减少趋势<sup>[21]</sup>。秸秆直接还田对促进土壤孔隙度的作用大于秸秆肥<sup>[22]</sup>。

秸秆还田对土壤三相比有改善作用,秸秆还田对土壤改良的效果均好于有机肥处理<sup>[21]</sup>。秸秆还田区三相结构合理,特别是在20~40 cm优于现行耕法<sup>[24]</sup>。

秸秆还田可明显增强土壤持水能力,可为作物提供更多水分<sup>[13,17,24]</sup>。秸秆还田初期处于强吸水阶段,耕层断面呈现以秸秆为中心的低含水量曲面。随着秸秆腐解,土壤与秸秆之间的含水量趋近于平衡,秸秆腐熟后可持续向玉米根区供水。越接近秸秆深施处土壤含水量越大,反之越小<sup>[15,25-26]</sup>。随秸秆剂量增加,土壤含水量逐渐降低,不同深还剂量之间含水量相差8%~20%<sup>[16,21]</sup>,适量秸秆深还可提高土壤含水量,过量效果相反,这在半干旱区十分重要<sup>[28]</sup>。

玉米秸秆全覆盖免耕可显著降低耕层土壤温度<sup>[28]</sup>。秸秆深施还田土壤日平均温度明显高于裸地,而覆盖还田土壤日平均温度与裸地差异不显著,增加秸秆深施还田量可明显提高土壤温度,且与秸秆埋施点越近土壤温度越高<sup>[29]</sup>。

### (3) 玉米秸秆还田对土壤有机质(碳)的影响

玉米秸秆还田可明显提高土壤有机质含量。玉米秸秆还田量为11.4 t/hm<sup>2</sup>,可使风沙有机质在10年内由1.97%提高到3.0%<sup>[9]</sup>。秸秆深还可明显增加亚表层土壤有机碳的含量,对表层土壤有机碳含量影响不显著<sup>[30]</sup>,秸秆过量还田土壤有机质增长比率降低,适量的深层秸秆直接还田对提高土壤有机质具有重大意义<sup>[19,31]</sup>。秸秆覆盖还田对土壤有机碳积累量影响不明显<sup>[32]</sup>。秋季与春季还田对土壤有机质数量和品质影响不明显<sup>[33]</sup>。秸秆还田量与土壤有机质为极显著正相关<sup>[34]</sup>。秸秆还田可提高土壤水溶性有机碳和热水溶性有机碳含量<sup>[35]</sup>。

秸秆还田后,胡敏酸(HA)含量增高,缩合度和芳香度下降,氧化程度下降,分子量变小,结构趋于简单化和年轻化;土壤中富里酸(FA)的羧基含量减少,芳香碳含量下降,FA氧化程度降低,芳香度显著下降,FA分子结构向更为简单化方向发展,有利于提高有机质活性和改善肥力<sup>[36-40]</sup>。还

田初期,FA形成速度大于HA,随时间延长,FA转化为HA或相互转化<sup>[41]</sup>。随秸秆还田年限的增加,土壤腐殖化程度提高<sup>[30]</sup>。同时,土壤松结合态、联结合态和紧结合态腐殖质含量增加,稳结合态腐殖质含量下降,土壤微生物生物量C与土壤微生物生物量N显著提高<sup>[42]</sup>,利用逆仿真方法和校正的参数,氮磷钾+秸秆还田处理有机质含量为最佳<sup>[43]</sup>。

#### (4) 玉米秸秆还田对土壤微团聚体的影响

添加玉米秸秆促进了土壤团聚作用。秸秆还田提高了各级团聚体内有机碳含量,且显著提高大团聚体中有机碳对土壤有机碳的贡献率,降低了微团聚体中有机碳对土壤有机碳的贡献率<sup>[44]</sup>。添加玉米秸秆后,大团聚体含量明显增高,2~0.25 mm和>2 mm粒级成为优势粒级,其全碳含量为10.15~25.74 g/kg,并随秸秆用量增加逐渐增加<sup>[40]</sup>。土壤有机碳、氮贮量随着团聚体粒径的增大而增加<sup>[45]</sup>。玉米秸秆和化肥配施使各粒级全碳含量增加,分子脂族性增强,结构变简单<sup>[46]</sup>。土壤中添加4%玉米秸秆和根系,降低了粒径0.05~0.02 mm和0.02~0.002 mm微团聚体含量,增加了<0.002 mm及>0.25 mm团聚体含量。添加秸秆粉末对土壤微团聚体含量影响最为明显<sup>[47]</sup>。稳定同位素碳标记研究表明,添加玉米秸秆后,促进了>2000 μm水稳性团聚体的形成,土壤结构明显得到改善<sup>[48]</sup>。

#### (5) 玉米秸秆还田对土壤化学性质的影响

玉米秸秆还田改善了土壤养分供应水平与化学缓冲性能。玉米秸秆还田后,氮、磷、钾释放率分别为51.1%~67.7%、76.0%~89.8%、76.9%~91.7%,释放趋势是钾>磷>氮<sup>[8]</sup>。土壤全量及速效养分含量均随秸秆还田量增加呈上升趋势<sup>[49]</sup>。

秸秆还田后,土壤全氮、全磷、全钾呈增加趋势<sup>[31-32]</sup>,随还田量增大土壤全氮和无机氮明显增大,全氮提高0.7%~14.4%<sup>[50-51]</sup>。单施钾肥或秸秆还田均难以维持土壤钾素平衡,秸秆还田结合施钾肥可使土壤保持动态平衡<sup>[52]</sup>。

秸秆还田使土壤表层碱解氮、速效磷和速效钾含量均有不同程度的增加,随土层深度增加而降低<sup>[31,53]</sup>。0~20 cm土壤速效氮提高5.47%~14.66%,速效磷提高1.33%~1.42%,速效钾提高1.77%~5.31%;20~40 cm速效氮提高6.15%~30.82%,速效磷提高1.74%~2.98%,速效钾提高4.3%~13.98%<sup>[19]</sup>。

关于秸秆还田对耕层土壤铵态氮、硝态氮含量的影响,存在不同的研究结论。王宏燕等人研

究表明,秸秆还田增加了土壤硝态氮含量,可减少氮素挥发损失<sup>[18]</sup>;孙占祥等人研究表明,随秸秆还田量增加,耕层土壤铵态氮、硝态氮含量下降,具有较好的生态效应<sup>[33]</sup>。

玉米秸秆还田对全硫影响不大,无机硫提高9.4%~10.9%,易分解有机硫提高41.4%~44.8%,可矿化硫提高36.3%~39.8%,使土壤硫素出现净积累<sup>[54]</sup>。

秸秆深还田后,土壤胡敏酸阳离子交换量升高,土壤pH值降低,且随土层深度的增加pH值逐渐增大<sup>[20,39,49]</sup>。

#### (6) 玉米秸秆还田对土壤微生物的影响

玉米秸秆施入土壤后,土壤微生物群落数量基本上呈现出先升后降并逐渐趋于平稳趋势。除固氮菌外,秋季微生物各群落数量与春、夏相比相对较高。除硝化细菌数量随秸秆剂量增加变化不显著外,细菌、真菌、放线菌、自生固氮菌、纤维素分解菌群落数量均随秸秆施入量的增加而增加,在秸秆施入量为800 kg/亩时,上述微生物群落数量均达到最大<sup>[55]</sup>。

秸秆还田明显增加土壤微生物数量。细菌增幅最大,细菌表现为优势菌,放线菌居中,真菌最少。秸秆腐熟后施入比秸秆直接还田更有利于微生物数量的增加,促进了土壤肥力的提高。秸秆还田后土壤脲酶和过氧化氢酶活性提高,对脲酶的影响大于过氧化氢酶,施腐熟秸秆对酶活性的提高更为显著。秸秆还田提高了土壤中微生物数量和土壤酶活性,从而提高了土壤养分转化的效率<sup>[56]</sup>。

玉米秸秆对土壤真菌数量的影响大于对细菌数量的影响,细菌与真菌数量比(B/F)由1.42降低到1.25。使土壤微生物区系由细菌型向真菌型转化的趋势<sup>[57]</sup>。

低温菌剂处理秸秆较常温菌剂显著提高了土壤微生物数量、土壤酶活性及微生物碳、氮含量。施菌剂能显著提高土壤微生物量以及碳、氮含量,且施加低温菌剂处理在提高土壤微生物量方面优于常温菌剂<sup>[58]</sup>,还田秸秆分解促进了微生物C和N的转换<sup>[59]</sup>。

## 2 玉米秸秆还田对玉米生长发育的影响

玉米秸秆还田可明显促进玉米生长发育。玉米秸秆还田可明显提高玉米叶面积与叶绿素含量,有利于作物根系的伸展,玉米净光合速率提高0.94%~52.04%,促进了干物质积累,作物产量

的增加<sup>[14,21,50]</sup>。蒸腾速率下降50%以上<sup>[20]</sup>。鲜秸秆还田对玉米株高、叶面积和产量构成因子的促进作用高于腐熟还田<sup>[60]</sup>。秸秆深层还田扎根深度增加5~10 cm,根系分布空间扩大6 000~154 500 cm<sup>3</sup>;秸秆深层还田的次生根数目明显增多,秸秆深松还田促进根系集中分布区下移至21~30 cm<sup>[61]</sup>。

玉米秸秆还田促进了叶片和茎秆对氮、磷、钾的吸收积累。玉米生育期叶片氮、磷、钾积累分别增加4.4%~23%、9.7%~26%和5.1%~18.3%,叶片氮积累增加高于磷和钾。茎秆氮、磷、钾分别增加5%~30%、25%~45%、12.4%~43.8%;茎秆磷积累增加高于氮和钾,为子粒形成提供了充足的养分<sup>[62]</sup>。在施氮、磷肥的基础上,秸秆还田并结合施钾的交互增产作用高于单纯秸秆还田或施钾肥<sup>[52]</sup>。同位素研究表明,施入秸秆后肥料利用率明显增加,植株全N量平均增加9.04%,植株吸收全P量提高14.9%<sup>[63]</sup>。

秸秆还田对后产量有明显增加趋势。随还田年限增加,增产趋势逐年提高,秸秆还田3年,增产率4.7%~8.5%,施入过多秸秆产量增长率降低<sup>[19]</sup>。秸秆不同还田方式对玉米产量的影响各异。高茬还田提高11.2%,粉碎还田提高11.0%,覆盖还田提高13.1%<sup>[17]</sup>。秸秆深层还田玉米产量提高18.16%,差异显著<sup>[61]</sup>。

整秆深还处理产量最高,增产24.7%,不同秸秆还田方式增产排序为:整秆深还>过腹还田>春旋还田>秋旋还田。春旋与过腹还田分别增产7%和16%<sup>[64]</sup>。

在替代无机氮条件下,玉米秸秆表施10年后,增产效果逐渐显现,秸秆表施具有长期累积效应,秸秆还田代替部分无机氮可以达到相同产量<sup>[32]</sup>。

鲜秸秆还田对产量构成因子具有促进作用,半量秸秆还田对玉米产量的作用与腐熟猪粪的作用相当,半量鲜秸秆还田比腐熟还田更有利于玉米产量的形成和肥力的提升<sup>[60]</sup>。

### 3 玉米秸秆还田技术研究进展

东北玉米秸秆还田的主要途径包括立茬还田、直接还田、过腹还田、堆腐还田及炭化还田。许多学者开展了大量研究工作,取得了明显进展,提出了一系列适用的技术模式。

大量研究表明,玉米立茬还田具有较好的效果。吉林省农业科学院学者经长期研究,提出了宽窄行立茬还田耕作法,既将65 cm的均匀垄改为宽行(90 cm)的深松带和窄行(40 cm)的苗带,

交替轮换种植,获得了较好的保土保水培肥及增产增收效果<sup>[17,23,28]</sup>。

玉米秸秆直接还田是最受关注的还田方式,特别是秸秆深层还田已成为最近研究的热点。玉米秸秆直接还田按秸秆还田数量分为全量还田和部分还田,按秸秆处理方式分为整秆还田和粉碎还田,按秸秆还田部位分为覆盖还田和翻埋还田。

玉米秸秆与畜禽粪便混合施用还田具有较好的培肥效果与环境效应。选用鸡粪和玉米秸秆为堆肥原料,研究了添加的复合菌剂在堆肥过程中对温度、pH值、EC、氮素及碳氮比等理化指标的影响,复合菌剂能够迅速提高发酵体的温度,使温度超过65℃,能加快有机物料的分解速度,碳氮比降低速率提高11.1%,促进了堆肥的腐熟、稳定。添加的复合菌剂有利于鸡粪和玉米秸秆的发酵腐熟,对堆肥生产具有指导意义<sup>[65]</sup>。

从常年堆放秸秆垛下面的土壤及腐烂的秸秆中筛选出具有高活性酶活的霉菌,对玉米秸秆具有较高的降解能力,降解率高达52.4%,初步判定为唐氏木霉<sup>[66]</sup>。

玉米秸秆炭化还田是近年来研究热点。生物炭以其良好的解剖结构和理化性质,广泛的材料来源和广阔的产业化发展前景,成为当今农业、能源与环境等领域的研究热点<sup>[67]</sup>。生物炭及其肥料化产品(炭基肥料)不但可以保持生物炭改良土壤的功能,还可促进作物生长和增产,有利于生物炭农用效益的提升<sup>[68]</sup>。生物炭可作为土壤改良剂、肥料缓释载体及碳封存剂<sup>[69]</sup>。

## 4 东北地区秸秆还田存在的问题及解决途径

### (1) 玉米秸秆还田现状与存在问题

据统计,2010年我国约有3 899万t玉米秸秆被直接还田,占玉米秸秆资源总量的17.6%。华北是我国玉米秸秆直接还田比例最高的地区,约有31%的玉米秸秆被直接还田。而东北是我国最大的玉米产区,但东北地区玉米秸秆直接还田比例仅为11.2%,远低于全国平均水平,而吉林省玉米主产区,绝大多数农户是将玉米叶在田间焚烧掉,玉米秆收集后放在家中用作冬季烧炕取暖、做饭燃料。玉米秸秆直接还田比例最低的地区是青藏高原区和蒙新区,秸秆还田比例不足10%<sup>[2]</sup>。

目前,东北地区玉米秸秆还田量小。东北玉米秸秆还田的主要途径包括立茬还田、过腹还

田、直接还田与堆腐还田4种。直接还田依据秸秆状态分整秆还田与粉碎还田;依据还田位置分为覆盖还田与翻埋还田<sup>[3]</sup>。

由于东北地区气候条件及机械条件所限,导致玉米秸秆直接还田难度较大,限制了玉米秸秆还田的推广与应用。东北地区地处温带季风气候区,冬季气温低、春季干旱,大量的玉米秸秆直接还田后,由于整个冬季无法进行腐解,秸秆还田质量较差,粉碎抛撒不均匀,增加耕地整地难度,严重影响播种和出苗质量<sup>[4]</sup>。

## (2)解决途径

近10年来,许多学者在东北地区玉米秸秆还田技术领域开展了大量研究工作,研究了在玉米秸秆还田过程中的腐解规律以及秸秆还田对土壤有机质(腐殖质)特性、土壤理化性质、对玉米生长发育及产量性状的影响。同时,研究了不同还田方式对土壤肥力及作物产量的影响,为玉米秸秆还田技术模式的构建提供了理论与技术支撑。

虽然东北气候条件不利于秸秆直接还田,但玉米秸秆还田是集土壤增碳培肥、固碳减排为一体的技术措施,是现代农业的必然选择,其发展方向是规模化经营模式下的玉米秸秆直接还田。今后,研究工作的重点是如何实现玉米稳产增产条件下的玉米秸秆直接还田,目标是实现深层增碳。主要研究领域是在大型农机配套前提下,玉米秸秆直接还田条件下的播种技术、杂草防控技术、养分调控技术、深层增碳技术等。同时,应与合理耕层构造的构建技术相结合,培育高产土壤。

## 参考文献:

- [ 1 ] 彭春艳,罗怀良,孔 静.中国作物秸秆资源量估算与利用状况研究进展[J].中国农业资源与区划,2014,35(3):14-20.
- [ 2 ] 吕开宇,仇焕广,白军飞,等.中国玉米秸秆直接还田的现状与发展[J].中国人口·资源与环境,2013,23(3):171-176.
- [ 3 ] 李万良,刘武仁.玉米秸秆还田技术研究现状及发展趋势[J].吉林农业科学,2007,32(3):32-34.
- [ 4 ] 王如芳,张吉旺,董树亭,等.我国玉米主产区秸秆资源利用现状及其效果[J].应用生态学报,2011,22(6):1504-1510.
- [ 5 ] 匡恩俊,迟凤琴,张久明,等.不同条件下有机物料在黑土中分解规律的研究[J].中国农学通报,2010,26(7):152-155.
- [ 6 ] 匡恩俊,迟凤琴,宿庆瑞,等.三江平原地区不同有机物料腐解规律的研究[J].中国生态农业学报,2010,18(4):736-741.
- [ 7 ] 迟凤琴,匡恩俊,宿庆瑞,等.不同还田方式下有机物料有机碳分解规律研究[J].东北农业大学学报,2010,41(2):60-65.
- [ 8 ] 匡恩俊,迟凤琴,宿庆瑞,等.不同还田方式下玉米秸秆腐解规律的研究[J].玉米科学,2012,20(2):99-101,106.
- [ 9 ] 迟凤琴.有机物料在风沙土中的腐解规律及土壤有机质调控的研究[J].黑龙江农业科学,1999(5):1-4.
- [ 10 ] 吴景贵,席时权,曾广赋,等.玉米秸秆腐解过程的红外光谱研究[J].土壤学报,1999,36(1):91-99.
- [ 11 ] 吴景贵,陈丽荣,王明辉,等.玉米植株残体腐解过程的化学分析[J].吉林农业大学学报,2000,22(3):61-66,77.
- [ 12 ] 孙洪德,李 军,尚惠贤,等.黑土肥力和肥料效益定位监测研究Ⅱ.黑土玉米秸秆还田效果的研究[J].吉林农业科学,1992(3):40-42.
- [ 13 ] 武志杰,张海军,许广山,等.玉米秸秆还田培肥土壤的效果[J].应用生态学报,2002,13(5):539-542.
- [ 14 ] 王喜艳,窦 森,张恒明,等.玉米秸秆持水深埋对辽西瘠薄耕地土壤养分及玉米产量的影响[J].西北农业学报,2014,23(5):76-81.
- [ 15 ] 邹洪涛,王胜楠,闫洪亮,等.秸秆深还田对东北半干旱区土壤结构及水分特征影响[J].干旱地区农业研究,2014,32(2):52-60.
- [ 16 ] 黄 毅,邹洪涛,闫洪亮,等.玉米秸秆深还剂量对土壤水分的影响[J].水土保持研究,2013,20(4):61-63.
- [ 17 ] 刘武仁,边少锋,郑金玉,等.玉米秸秆还田方法试验研究初报[J].吉林农业科学,2002,27(6):38-40.
- [ 18 ] 赵 伟,陈雅君,王宏燕,等.不同秸秆还田方式对黑土土壤氮素和物理性状的影响[J].玉米科学,2012,20(6):98-102.
- [ 19 ] 王喜艳,张亚文,冯 燕,等.玉米秸秆深层还田技术对土壤肥力和玉米产量的影响研究[J].干旱地区农业研究,2013,31(6):103-107.
- [ 20 ] 张久明,迟凤琴,宿庆瑞,等.不同有机物料还田对土壤结构与玉米光合速率的影响[J].农业资源与环境学报,2014,31(1):56-61.
- [ 21 ] 钱凤魁,黄 毅,董婷婷,等.不同秸秆还田量对旱地土壤水肥和玉米生长与产量的影响[J].干旱地区农业研究,2014,32(2):61-65.
- [ 22 ] 侯志研,杜桂娟,孙占祥,等.玉米秸秆还田培肥效果的研究[J].杂粮作物,2004,24(3):166-167.
- [ 23 ] 刘武仁,郑金玉,罗 洋,等.秸秆循环还田土壤环境效应变化研究[J].吉林农业科学,2015,40(1):32-36.
- [ 24 ] 王胜楠,邹洪涛,张玉龙,等.秸秆集中深还田对土壤水分特性及有机碳组分的影响[J].水土保持学报,2015,29(1):154-158.
- [ 25 ] 孔德刚,张 帅,常晓慧,等.坡耕地中秸秆深施蓄水效果的试验研究[J].东北农业大学学报,2011,42(2):48-53.
- [ 26 ] 张 帅,孔德刚,常晓慧,等.秸秆深施对土壤蓄水能力的影响[J].东北农业大学学报,2010,41(6):127-129.
- [ 27 ] 邹洪涛,马迎波,徐 萌,等.辽西半干旱区秸秆深还田对土壤含水量、容重及玉米产量的影响[J].沈阳农业大学学报,2012,43(4):494-497.
- [ 28 ] 董 智,解宏图,张立军,等.东北玉米带秸秆覆盖免耕对土壤性状的影响[J].玉米科学,2013,21(5):100-103,108.
- [ 29 ] 常晓慧,孔德刚,井上光弘,等.秸秆还田方式对春播期土壤温度的影响[J].东北农业大学学报,2011,42(5):117-120.
- [ 30 ] 邹洪涛,关 松,凌 尧,等.秸秆还田不同年限对土壤腐殖质组分的影响[J].土壤通报,2013,44(6):1398-1402.

- [31] 宫亮, 孙文涛, 王聪翔, 等. 玉米秸秆还田对土壤肥力的影响[J]. 玉米科学, 2008, 16(2): 122-124, 130.
- [32] 高洪军, 彭畅, 张秀芝, 等. 长期秸秆还田对黑土碳氮及玉米产量变化的影响[J]. 玉米科学, 2011, 19(6): 105-107, 111.
- [33] 颜丽, 宋杨, 贺靖, 等. 玉米秸秆还田时间和还田方式对土壤肥力和作物产量的影响[J]. 土壤通报, 2004, 35(2): 143-148.
- [34] 高金虎, 孙占祥, 冯良山, 等. 秸秆与氮肥配施对辽西旱区土壤酶活性与土壤养分的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(4): 677-681.
- [35] 郑立臣, 解宏图, 张威, 等. 秸秆不同还田方式对土壤中溶解性有机碳的影响[J]. 生态环境, 2006, 15(1): 80-83.
- [36] 窦森. 土壤有机培肥后胡敏酸结构特征变化规律的探讨[J]. 土壤学报, 1992, 29(2): 199-207.
- [37] 吴景贵, 王明辉, 姜亦梅, 等. 玉米秸秆还田后土壤胡敏酸变化的谱学研究[J]. 中国农业科学, 2005, 38(7): 1394-1400.
- [38] 吴景贵, 王明辉, 姜亦梅, 等. 施用玉米植株残体对土壤富里酸组成、结构及其变化的影响[J]. 土壤学报, 2006, 43(1): 133-142.
- [39] 吴景贵, 席时权, 姜岩, 等. 玉米植株残体还田后土壤胡敏酸理化性质变化的动态研究[J]. 中国农业科学, 1999, 32(1): 63-68.
- [40] 仇建飞, 窦森, 邵晨, 等. 添加玉米秸秆培养对土壤团聚体胡敏酸数量和结构特征的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(4): 781-787.
- [41] 窦森, 张晋京, Lichtfouse E, 等. 用 $\delta^{13}\text{C}$ 方法研究玉米秸秆分解期间土壤有机质数量动态变化[J]. 土壤学报, 2003, 40(3): 328-334.
- [42] 吴景贵, 王明辉, 姜亦梅, 等. 玉米植株残体培肥土壤的研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(2): 300-305.
- [43] Minggang G. Xu, Jinzhou Z. Wang, Chang' ai A. Lu. Soil Organic Carbon Sequestration Under Long-Term Manure and Straw Fertilization in North and Northeast China by Roth C Model Simulation[J]. Functions of Natural Organic Matter in Changing Environment, 2012(2): 407-412.
- [44] 郝翔, 杨春葆, 苑亚茹, 等. 连续秸秆还田对黑土团聚体中有机碳含量及土壤肥力的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(35): 263-269.
- [45] 关松, 窦森, 胡永哲, 等. 添加玉米秸秆对黑土团聚体碳氮分布的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 187-191.
- [46] 李凯, 窦森. 玉米秸秆和化肥配施对团聚体中胡敏酸数量和红外光谱的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2009, 31(3): 273-278.
- [47] 殷程程, 李志洪, 矫丽娜, 等. 秸秆还田室内培养对土壤微团聚体的影响试验[J]. 安徽农学通报, 2014, 20(10): 50-53.
- [48] 顾鑫, 安婷婷, 李双异, 等.  $\delta^{13}\text{C}$ 法研究秸秆添加对棕壤团聚体有机碳的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 243-247, 312.
- [49] 郑洪兵, 郑金玉, 罗洋, 等. 玉米秸秆粉碎不同量级还田对土壤养分的影响[J]. 吉林农业科学, 2014, 39(5): 38-42.
- [50] 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.
- [51] 李文超, 刘丽君, 郭茜茜, 等. 玉米秸秆还田对白浆土氮素含量的影响[J]. 耕作与栽培, 2013(1): 15-16.
- [52] 谢佳贵, 侯云鹏, 尹彩侠, 等. 施钾和秸秆还田对春玉米产量、养分吸收及土壤钾素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5): 1110-1118.
- [53] 张彬, 何红波, 赵晓霞, 等. 秸秆还田量对免耕黑土速效养分和玉米产量的影响[J]. 玉米科学, 2010, 18(2): 81-84.
- [54] 颜丽, 关连珠, 祝凤春. 玉米秸秆配施化肥对土壤钾、硫养分的调节作用[J]. 土壤通报, 1994, 25(7): 61-63.
- [55] 孙军德, 王美美, 张若溪, 等. 玉米秸秆还田对土壤微生物群落数量的影响[J]. 农业科技与装备, 2012, (4): 8-10.
- [56] 刘佳斌, 李传宝, 王宏燕. 秸秆还田不同处理方式对黑土微生物数量和土壤酶活性的影响[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(9): 5285-5287.
- [57] 崔俊涛, 窦森, 张伟, 等. 玉米秸秆对土壤微生物性质的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2005, 27(4): 424-428.
- [58] 赵伟, 潘延欣, 靳雯然, 等. 低温菌剂降解秸秆还田对东北黑土微生物活性的影响[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(17): 4020-4024.
- [59] Xueli Ding, Xudong Zhang, Hongbo He. Dynamics of soil amino sugar pools during decomposition processes of corn residues as affected by inorganic N addition [J]. Journal of Soils and Sediments, 2010, 10(4): 758-766.
- [60] 刘志华, 盖兆雪, 李晓梅, 等. 秸秆还田对玉米产量形成及土壤肥力的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2014(7): 42-45.
- [61] 黄毅, 毕素艳, 邹洪涛, 等. 秸秆深层还田对玉米根系及产量的影响[J]. 玉米科学, 2013, 21(5): 109-112.
- [62] 陈振武, 李真, 王岩, 等. 大垄深耕整秆深还田对耐密玉米氮磷钾积累分配的影响[J]. 玉米科学, 2012, 20(2): 115-118.
- [63] 刘莉. 玉米秸秆还田效果的同位素示踪研究[J]. 辽宁农业科学, 1997(6): 26-29.
- [64] 王静, 黄毅. 辽西旱农区秸秆还田保水效果及对玉米生长的影响[J]. 山西农业科学, 2012, 40(2): 113-116.
- [65] 王玉军, 窦森, 崔俊涛, 等. 复合菌剂对农业废弃物堆肥过程中理化指标变化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(5): 1354-1358.
- [66] 迟畅, 王昱, 李洋, 等. 秸秆纤维素降解菌的分离及筛选初探[J]. 吉林农业科学, 2013, 38(4): 88-90.
- [67] 陈温福, 张伟明, 孟军. 农用生物炭研究进展与前景[J]. 中国农业科学, 2013, 46(16): 3324-3333.
- [68] 高海英, 何绪生, 陈心想, 等. 生物炭及炭基硝酸铵肥料对土壤化学性质及作物产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(10): 1948-1955.
- [69] 何绪生, 耿增超, 余雕, 等. 生物炭生产与农用的意义及国内外动态[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 1-7.

(责任编辑:王昱)