

不同还田方式对玉米秸秆腐解及土壤养分含量的影响

田平, 姜英, 孙悦, 马梓淇, 隋鹏祥, 梅楠, 齐华

引用本文:

田平, 姜英, 孙悦, 等. 不同还田方式对玉米秸秆腐解及土壤养分含量的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2019, 27(1): 100–108.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180551>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同作物秸秆在旱地和水田中的腐解特性及养分释放规律

Nutrient release patterns and decomposition characteristics of different crop straws in drylands and paddy fields

中国生态农业学报. 2017, 25(2): 188–199 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160748>

氮素形态对油菜秸秆腐解及养分释放规律的影响

Effects of nitrogen forms on decomposition and nutrient release of rapeseed straw

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(5): 717–725 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180810>

稻-油轮作下保护性耕作对土壤肥力的影响及评价

Effect of conservation tillage on soil fertility under rice–rape rotation system

中国生态农业学报. 2017, 25(11): 1604–1614 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170433>

黄土旱塬长期秸秆还田对土壤养分、酶活性及玉米产量的影响

Effects of long-term straw return on corn yield, soil nutrient contents and enzyme activities in dryland of the Loess Plateau, China

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(10): 1528–1536 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190235>

秸秆还田与旋耕对川中土壤物理性状及玉米机播质量的影响

Effect of straw return and rotary tillage on soil physical properties and mechanical sowing quality of maize in Central Sichuan

中国生态农业学报. 2017, 25(7): 1025–1033 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.161124>

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.180551

田平, 姜英, 孙悦, 马梓淇, 隋鹏祥, 梅楠, 齐华. 不同还田方式对玉米秸秆腐解及土壤养分含量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(1): 100-108

TIAN P, JIANG Y, SUN Y, MA Z Q, SUI P X, MEI N, QI H. Effect of straw return methods on maize straw decomposition and soil nutrients contents[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(1): 100-108

不同还田方式对玉米秸秆腐解及土壤养分含量的影响*

田平, 姜英, 孙悦, 马梓淇, 隋鹏祥, 梅楠, 齐华**

(沈阳农业大学农学院 沈阳 110866)

摘要: 通过土壤耕作和秸秆还田试验, 以玉米秸秆为研究对象, 探讨东北棕壤土区适宜的秸秆还田方式, 为秸秆资源的高效利用提供理论依据。在辽宁沈阳设置连续两年(2014—2015年)的田间定位试验, 采用尼龙网袋法研究免耕覆盖(NTS)、旋耕还田(RTS)和翻耕还田(PTS)3种秸秆还田方式下秸秆腐解率和碳氮磷钾养分释放率, 分析秸秆还田方式对耕层土壤养分含量的影响。结果表明, RTS和PTS秸秆腐解速率均表现为前期快、后期慢, 秸秆养分释放率均表现为钾>磷>碳>氮。NTS、RTS和PTS处理秸秆两年平均腐解率分别为38.8%、78.0%、65.9%, 两年平均碳释放率分别为56.5%、78.8%、69.4%, 氮释放率为16.7%、53.5%、38.8%, 磷释放率为81.3%、92.5%、89.8%, 钾释放率为92.0%、99.4%、98.9%。NTS处理秸秆腐解率及碳氮释放率与还田时间符合逻辑斯蒂曲线方程, RTS和PTS处理秸秆腐解率、碳氮释放率及3种还田方式秸秆磷钾释放率随还田时间变化符合米氏方程。秸秆还田有助于提高耕层土壤有机碳和全氮含量, RTS处理土壤全磷含量显著高于PTS处理($P<0.05$), 与NTS处理全磷含量差异不显著, 3种还田方式土壤全钾含量差异不显著。综合分析秸秆腐解和耕层土壤培肥效果, 东北棕壤土区建议玉米秸秆还田方式为旋耕秸秆还田。

关键词: 秸秆还田; 耕作方式; 秸秆腐解率; 养分释放; 土壤有机碳; 土壤养分

中图分类号: S341.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-6237(2019)01-0100-09

Effect of straw return methods on maize straw decomposition and soil nutrients contents*

TIAN Ping, JIANG Ying, SUN Yue, MA Ziqi, SUI Pengxiang, MEI Nan, QI Hua**

(College of Agronomy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: By investigating the impacts of tillage and straw return methods on maize straw decomposition, a suitable approach of returning maize straw to soil was explored for straw utilization with high soil efficiency in the brown soil area of northeastern China. A two-year (2014–2015) field experiment including no-tillage with straw mulch (NTS), straw incorporation through rotary tillage (RTS) and straw incorporation through plow tillage (PTS) treatments was conducted in Shenyang, Liaoning Province. Nylon bags containing straw 2–5 cm long were buried in different depths of soil according to tillage depth of different treatments (0 cm for NTS, 15 cm for RTS and 25 cm for PTS) in the study, and the decomposition of straws and release rates of carbon (C), nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) by maize straw, along with the effects of straw return on nutrients contents of the topsoil were tested. The results showed that straw decomposition rates were high at the early phase and slowed down at the later phase under both RTS

* 公益性行业(农业)科研专项经费项目(201503116)和国家重点研发计划项目(2016YFD0300103, 2016YFD0300801)资助

** 通信作者: 齐华, 主要研究方向为耕作制度原理与技术。E-mail: qihua10@163.com

田平, 研究方向为耕作制度原理与技术。E-mail: tianping23@163.com

收稿日期: 2018-06-12 接受日期: 2018-09-21

* This study was supported by the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest of China (201503116) and the National Key Research and Development Project of China (2016YFD0300103, 2016YFD0300801).

** Corresponding author, E-mail: qihua10@163.com

Received Jun. 12, 2018; accepted Sep. 21, 2018

and PTS treatments, with the order of nutrients release rates in all treatments of $K > P > C > N$. The mean decomposition rates of straw in both years were 38.8%, 78.0% and 65.9% respectively for NTS, RTS and PTS treatments. Nutrients release rates of returned straws under NTS, RTS and PTS treatments were respectively 56.5%, 78.8% and 69.4% for C, 16.7%, 53.5% and 38.8% for N, 81.3%, 92.5% and 89.8% for P, and 92.0%, 99.4% and 98.9% for K. The tendency for straw decomposition and C and N release under NTS treatment fitted well with Logistic function, but those of RTS and PTS treatments fitted Michaelis-Menten function. Moreover, K and P nutrients release of all the three treatments changed according to the Michaelis-Menten functions. Straw return enhanced organic carbon and total nitrogen contents of the topsoil. Then total soil P content of RTS treatment was significantly higher than that of PTS ($P < 0.05$). However, there was no significant difference in total soil P content between RTS and NTS treatments, and in total soil K content for all the treatments. Based on comprehensive analysis from straw decomposition characteristics and fertility, straw incorporation through rotary tillage was the suitable approach for maize straw return in brown soil areas in Northeast China.

Keywords: Straw returning; Tillage method; Straw decomposition rate; Nutrient release; Soil organic carbon; Soil nutrient

中国是世界第一秸秆大国, 秸秆总量占全球的 17.3%^[1], 现年产量已突破 9 亿 t^[2], 2013 年全国玉米 (*Zea mays*) 秸秆总产量为 2.4 亿 t, 居各类农作物产量之首^[3]。农作物秸秆作为一类生物质资源, 含有丰富的氮磷钾元素却没有得到合理的利用, 大量的秸秆被焚烧、丢弃, 不仅造成了资源浪费, 还严重污染环境, 现已成为社会关注的热点问题。东北地区制约秸秆还田一个重要因素就是秸秆腐解慢的问题。

前人对秸秆腐解进行了大量研究, 得出秸秆腐解均呈前期快、后期慢的变化规律^[4-6]。作物秸秆种类、碳氮比、干湿程度以及土壤温度、降水条件都会影响作物秸秆在土壤中的腐解率和养分变化^[7]。江晓东等^[8]研究 4 种耕作方式下玉米秸秆腐解规律, 结果表明秸秆腐解与温度具有显著的正相关性。张宇等^[9]研究发现, 不同耕作方式下玉米秸秆腐解与相应层次的土壤含水量具有显著的正相关关系。张红等^[10]研究发现, 不同秸秆处理的腐解残留率与土壤微生物群落的优势度呈显著负相关, 微生物群落一定程度上影响了秸秆分解的速率。随着腐解的进行, 秸秆中养分逐渐释放。大量研究结果表明, 秸秆中养分累计释放率为钾>磷>碳>氮^[11-12]; 但也有研究表明^[13], 作物秸秆腐解过程中磷的释放率最大, 其次是氮钾。不同作物秸秆的累计腐解率及养分释放率差异较大, 这可能与秸秆内部结构、养分含量、外界环境及还田方式不同有关。

秸秆还田是土壤培肥的重要途径^[14-16]。矫丽娜等^[17]研究结果表明, 增加秸秆还田深度, 有利于土壤有机碳的积累; 成臣等^[18]研究秸秆还田条件下, 土壤有机碳、全氮、速效钾和有效磷均呈增加的趋势。前人在不同种植方式下研究秸秆腐解, 并已经取得大量可靠的结果, 其中以不同的作物及不同还田量处理下秸秆的腐解研究较多, 而不同还田方式下秸秆腐解特征的研究较少, 且将秸秆腐解进行定

量化分析的结果少见报道。针对以上问题, 本文通过设置免耕覆盖、旋耕和翻耕 3 种秸秆还田方式, 研究秸秆腐解率、养分释放率及对土壤养分含量的影响, 揭示不同还田方式下秸秆腐解及土壤养分变化的差异, 为提高东北棕壤区秸秆资源利用率提供理论依据, 同时提出适宜东北棕壤土区的秸秆还田方式。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2014—2015 年连续两年在沈阳农业大学试验基地进行。供试土壤为棕壤土。耕层土壤有机碳含量 $9.79 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全氮 $1.05 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全磷 $0.85 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全钾 $10.58 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, pH 5.77。玉米品种为‘郑单 958’, 分别于 2014 年 5 月 22 日和 2015 年 5 月 13 日播种, 播种时一次性施入氮肥 $225 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 磷肥 $75 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 钾肥 $180 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。试验地前茬作物为玉米, 耕作方式为平作秸秆不还田。试验年份降雨及温度监测数据见图 1, 2014 年月平均温度 9.4 , 降雨量 362.9 mm , 5—6 月份降雨量占全年降雨量 53.7%; 2015 年月平均温度 9.0 , 降雨量 558.3 mm , 5—6 月份降雨量占全年降雨量 41.4%。两年月平均温度相近, 但 2015 年较 2014 年降雨量增加 195.4 mm 。

1.2 试验设计

试验设免耕秸秆覆盖还田(NTS)、旋耕秸秆还田(RTS)和翻耕秸秆还田(PTS)3 个处理, 3 次重复, 秸秆还田量为 $6000 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。分别于 2014 年、2015 年春季进行土壤耕作和秸秆还田处理, 利用尼龙网袋法研究秸秆腐解特征。还田所用秸秆粉碎长度约 2~5 cm, 秸秆基本性质见表 1。秸秆还田处理前称取 36 g 烘干秸秆装入 150 目尼龙网袋(20 cm×30 cm)中, 在秸秆还田作业时置于田间, 3 次重复。田间网袋布设依据不同还田方式机械作业深度确定, 旋耕、翻耕

作业深度分别为15 cm、25 cm。免耕覆盖秸秆还田处理将网袋平铺在地表,旋耕秸秆还田处理将网袋

倾斜平铺于0~15 cm土层,翻耕秸秆还田处理将秸秆堆积在网袋底部,埋入25 cm土层处。

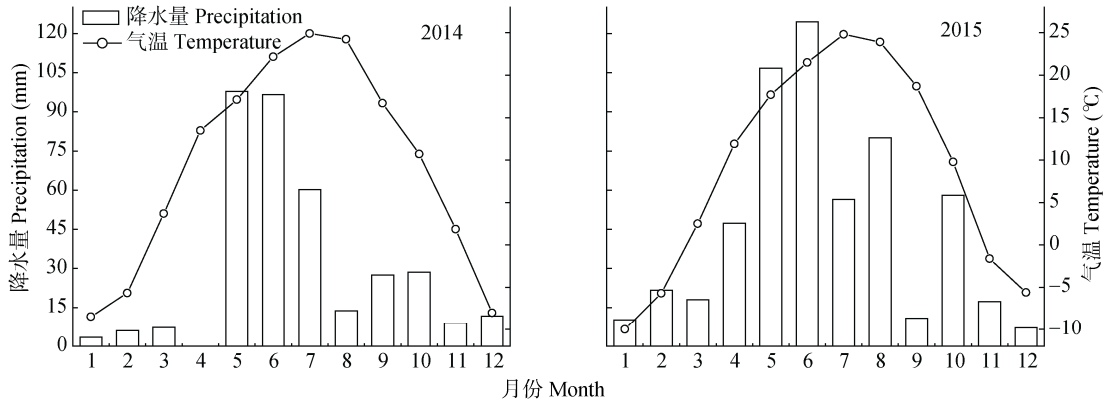


图 1 2014—2015 年试验区降水量及温度动态变化

Fig. 1 Changes of precipitation and temperature of the experiment site in 2014–2015

表 1 供试秸秆基本性质

Table 1 Basic properties of the tested straw samples

年份 Year	碳 Carbon (g·kg ⁻¹)	氮 Nitrogen (g·kg ⁻¹)	磷 Phosphorus (g·kg ⁻¹)	钾 Potassium (g·kg ⁻¹)	碳氮比 C/N
2014	395.1	8.95	0.90	12.5	44.14
2015	343.7	8.33	0.50	13.0	41.25

1.3 测定项目与方法

网袋秸秆自还田后每 30 d 取 1 次样,每次取 3 袋为 3 次重复,玉米生长期共取样 5 次。取样后将样品洗净、置于烘箱内 70 °C 烘干至恒重。采用重铬酸钾容量法-外加热法测定秸秆全碳含量;秸秆经浓硫酸-过氧化氢消煮后,全自动凯氏定氮仪(FOSS)测定全氮含量;钼锑抗比色法测定全磷含量;火焰光度计法测定全钾含量。于玉米收获后利用直径 5 cm 的土钻采集土壤样品,取样深度为 0~15 cm 和 15~25 cm,共 2 层,3 次重复。土壤样品室内风干后磨细通过 100 目筛。有机碳含量采用重铬酸钾容量法-外加热法测定;土壤样品经浓硫酸-硫酸铜-硫酸钾消煮后,全自动凯氏定氮仪(FOSS)测定全氮含量;土壤样品经氢氧化钠熔融,钼锑抗比色法测定全磷含量,火焰光度计法测定全钾含量^[19]。秸秆腐解率、养分释放率分别利用方程(1)、(2)计算^[20]。

$$\text{腐解率}(\%) = (M_0 - M_t) \times 100\% / M_0 \quad (1)$$

$$\text{养分释放率}(\%) = (M_0 \times C_0 - M_t \times C_t) \times 100\% / (M_0 \times C_0) \quad (2)$$

式中: M_0 为加入秸秆干重(g); M_t 为腐解时间为 t 时的秸秆干重(g); t 为腐解时间(d); C_0 为秸秆原始养分含量, C_t 为腐解时间为 t 时秸秆养分含量。

通过秸秆腐解率及碳、氮、磷、钾释放率与还田时间分别利用方程(3)、(4)进行回归分析。

$$Y = b_0 / \left[1 + e^{(b_1 - b_2 \times D)} \right] \quad (3)$$

$$Y = b_0 \times D / (D + b_1) \times 100\% \quad (4)$$

式中: $Y(\%)$ 为秸秆腐解率(碳、氮、磷、钾释放率), D 为还田后时间(d), b_0 、 b_1 、 b_2 均为方程参数。

1.4 数据处理与分析

运用 Microsoft Excel 2010 和 Origin 8.0 对数据进行分析及作图,运用 DPS 对秸秆腐解率、碳、氮、磷、钾养分释放率随时间变化进行方程模拟,采用最小显著法(LSD)检验试验数据的差异显著性水平($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同还田方式的秸秆腐解率与碳释放率

由秸秆腐解率变化趋势可以看出(图2),RTS处理腐解率高于PTS和NTS,两年趋势一致。NTS处理秸秆腐解率0~60 d 为2014年高于2015年,60~150 d 为2014年低于2015年,当年最终腐解率分别为34.4%和43.2%,2015年秸秆累计腐解率高于2014年20.4%。RTS和PTS处理2014年、2015年快速腐解期均为0~30 d,30~150 d 为缓慢腐解期,30 d 时RTS和PTS处理秸秆腐解率2014年为50.8%和34.6%,2015年为54.3%和39.9%,150 d 时RTS和PTS处理秸秆腐解率2014年为80.4%和71.7%,2015年为75.6%和60.1%,RTS和PTS处理2014年秸秆累计腐解率高于2015年6.0%和16.2%。至试验结束,3种还田方式下,在2014年和

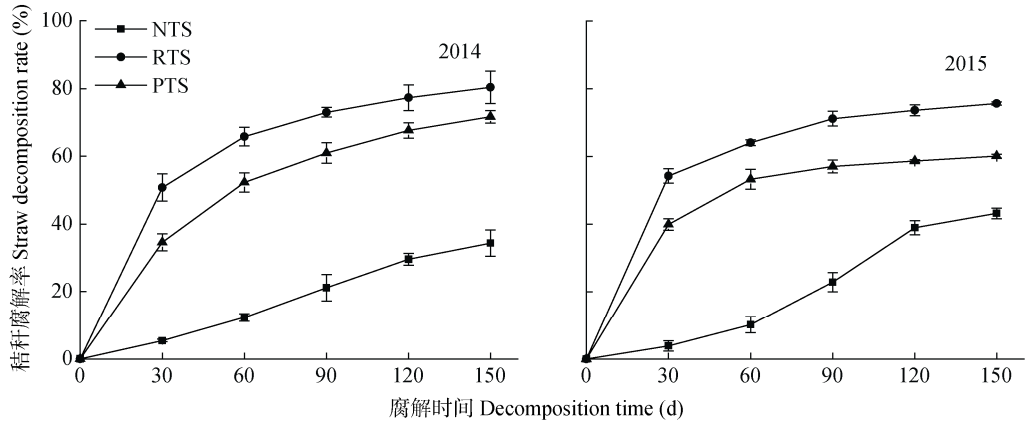


图 2 不同还田方式玉米秸秆腐解率

Fig. 2 Decomposition rates of maize straw under different straw-returning methods

NTS: 免耕秸秆覆盖还田; RTS: 旋耕秸秆还田; PTS: 翻耕秸秆还田。NTS: no tillage with straw mulching; RTS: straw incorporation through rotary tillage; PTS: straw incorporation through plow tillage.

2015年, RTS处理秸秆腐解率较PTS、NTS处理分别增加10.8%、57.2%和20.5%、42.9%。

秸秆碳释放率(图3)与秸秆腐解率变化趋势相同, 2014年NTS处理0~60 d秸秆全碳释放率较高, 60 d时碳释放率为48.2%, 至试验结束碳释放率为57.5%; 2015年NTS处理60~120 d秸秆全碳释放率较高, 时间迟于2014年, 120 d时碳释放率为52.8%, 至试验结束碳释放率为55.4%, 两年最终秸秆碳释放率接近。RTS、

PTS还田方式秸秆碳快速释放期均为0~30 d, 且两年规律一致, 2014年RTS、PTS在30 d时碳释放率分别为59.1%和38.7%, 至试验结束, 秸秆碳释放率分别为81.3%和77.2%; 2015年RTS、PTS在30 d时碳释放率分别为54.8%和36.2%, 至试验结束, 秸秆碳释放率分别为77.8%和66.8%。至试验结束, 3种还田方式下, 在2014年和2015年, RTS处理秸秆全碳释放率较PTS、NTS处理分别增加5.0%、29.2%和14.1%、28.8%。

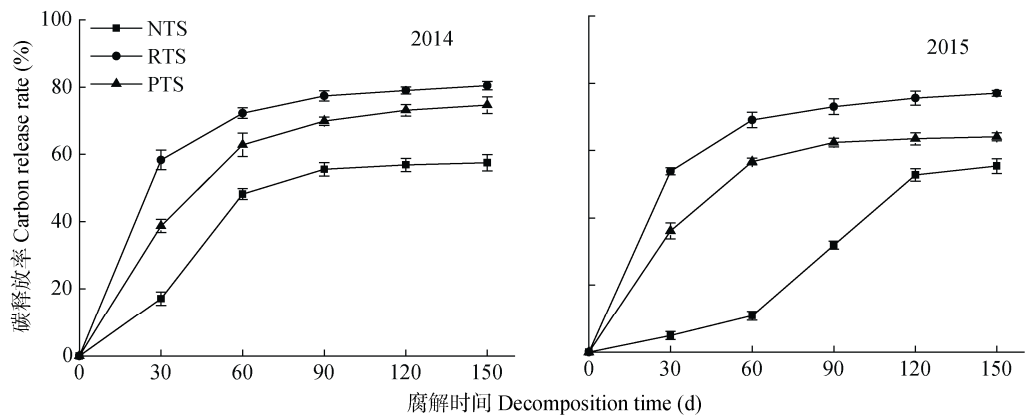


图 3 不同还田方式玉米秸秆碳释放率

Fig. 3 Carbon release rates of maize straw under different straw-returning methods

NTS: 免耕秸秆覆盖还田; RTS: 旋耕秸秆还田; PTS: 翻耕秸秆还田。NTS: no tillage with straw mulching; RTS: straw incorporation through rotary tillage; PTS: straw incorporation through plow tillage.

2.2 不同还田方式的秸秆氮、磷和钾释放率

由不同还田方式秸秆中氮释放率(图4)可以看出, 3种还田方式下秸秆氮释放率两年趋势一致。秸秆全氮释放率RTS高于PTS和NTS, 2014年3种还田方式秸秆全氮无明显快速释放期, 至试验结束NTS、RTS、PTS还田方式秸秆全氮释放率分别为8.3%、55.6%、39.6%; 2015年NTS还田方式全氮释放率变化趋势与

2014年一致, 至试验结束全氮释放率为24.5%, 较2014年增加66.2%, RTS、PTS还田方式0~30 d为全氮快速释放期, 释放率分别为41.9%、34.3%, 至试验结束全氮释放率分别为53.9%、39.5%, 两年最终秸秆氮释放率接近。至试验结束, 3种还田方式下, 在2014年和2015年, RTS处理秸秆全氮释放率较PTS、NTS处理分别增加28.7%、85.1%和26.8%、54.7%。

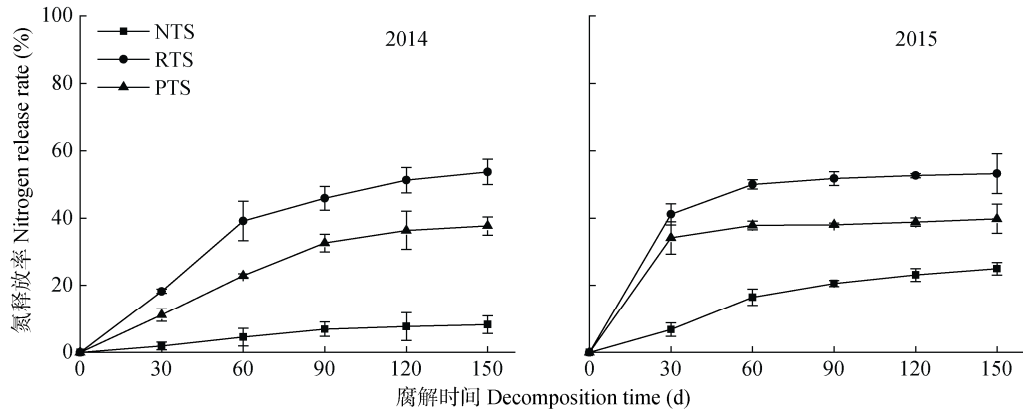


图 4 不同还田方式玉米秸秆氮释放率

Fig. 4 Nitrogen release rates of maize straw under different straw-returning methods

NTS: 免耕秸秆覆盖还田; RTS: 旋耕秸秆还田; PTS: 翻耕秸秆还田。NTS: no tillage with straw mulching; RTS: straw incorporation through rotary tillage; PTS: straw incorporation through plow tillage.

3种还田方式秸秆全磷释放率均为2014年高于2015年(图5), 且快速释放期均为0~30 d。2014年30 d时NTS、RTS、PTS还田方式秸秆全磷释放率为82.6%、89.0%、81.0%, 至试验结束释放率达84.5%、95.5%、90.5%; 2015年30 d时NTS、RTS、PTS还田

方式秸秆全磷释放率为72.0%、86.7%、85.2%, 至试验结束释放率分别达74.0%、89.5%、87.3%。3种还田方式下, 在2014年和2015年, RTS处理秸秆全磷释放率较PTS、NTS处理分别增加5.0%、11.5%和2.5%、17.3%。

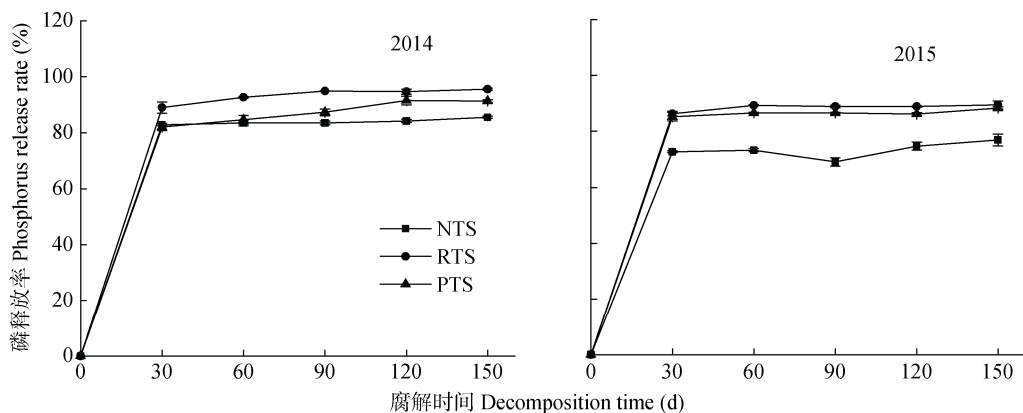


图 5 不同还田方式玉米秸秆磷释放率

Fig. 5 Phosphorus release rates of maize straw under different straw-returning methods

NTS: 免耕秸秆覆盖还田; RTS: 旋耕秸秆还田; PTS: 翻耕秸秆还田。NTS: no tillage with straw mulching; RTS: straw incorporation through rotary tillage; PTS: straw incorporation through plow tillage.

3种还田方式秸秆全钾释放率两年趋势相同(图6), 快速释放期均为0~30 d, 且2015年全钾释放率高于2014年。2014年30 d时NTS、RTS、PTS还田方式秸秆全钾释放率为86.8%、97.3%、84.6%, 至试验结束释放率达89.4%、99.7%、95.4%; 2015年30 d时NTS、RTS、PTS还田方式秸秆全钾释放率为88.0%、99.3%、98.9%, 至试验结束释放率达92.3%、99.3%、99.6%。2014年RTS全钾释放率高于PTS, 但2015年两处理结果相近。

2.3 不同还田方式的秸秆腐解及养分释放规律

还田方式间的秸秆腐解及养分释放随还田时间变化规律不尽相同。NTS秸秆腐解率及碳、氮释放

率与还田时间符合Logistic曲线方程(方程3); 不同还田方式的秸秆磷、钾释放率及RTS、PTS两个处理的秸秆腐解率及碳和氮释放率, 随还田时间变化规律则均符合Michaelis-Menten方程(方程4)。上述模拟方程均拟合良好(表2), 且降雨量差异明显的两年试验结果呈高度一致性, 真实反映了该区域不同还田方式秸秆腐解及养分释放随还田后时间变化的一般规律。

2.4 不同还田方式的土壤养分含量

由不同还田方式下土壤养分含量(表3)可以看出, 2015年土壤有机碳、全氮含量与2014年相比呈增加趋势, 而土壤全磷、全钾含量两年结果差异不明显。

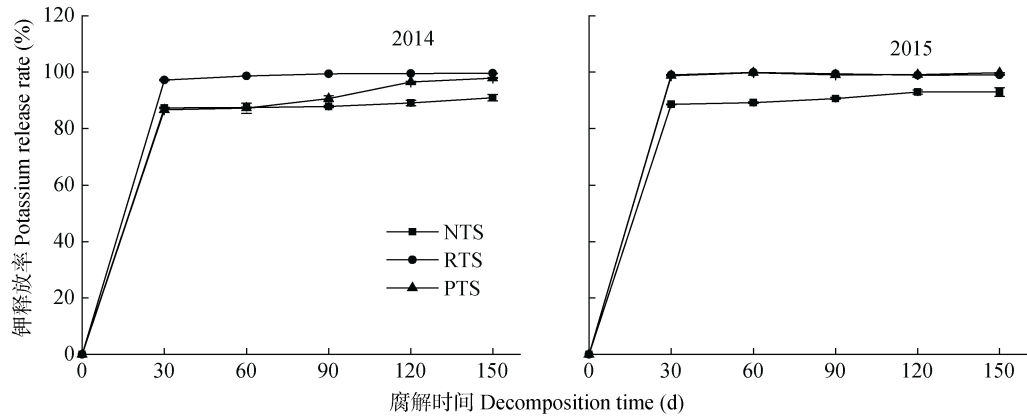


图 6 不同还田方式玉米秸秆钾释放率

Fig. 6 Potassium release rates of maize straw under different straw-returning methods

NTS: 免耕秸秆覆盖还田; RTS: 旋耕秸秆还田; PTS: 翻耕秸秆还田。NTS: no tillage with straw mulching; RTS: straw incorporation through rotary tillage; PTS: straw incorporation through plow tillage.

表 2 不同还田方式玉米秸秆腐解率及养分释放率曲线特征参数

Table 2 Characteristic parameters of straw decomposition rates and nutrient release rates of maize straw under different straw-returning methods

Y	处理 Treatment	2014				2015			
		b_0	b_1	b_2	$R^2 (n = 6)$	b_0	b_1	b_2	$R^2 (n = 6)$
腐解率 Straw decomposition rate	NTS	37.796	2.979	0.037	0.995 7	46.446	4.088	0.046	0.996 9
	RTS	93.857	25.528	—	1.000 0	83.913	16.927	—	0.999 7
	PTS	97.504	53.406	—	0.999 8	69.271	20.614	—	0.997 9
碳释放率 Carbon release rate	NTS	56.861	3.517	0.088	0.998 8	58.033	4.865	0.057	0.995 8
	RTS	89.661	15.497	—	0.999 3	86.964	17.609	—	0.999 1
	PTS	97.112	38.798	—	0.991 0	80.749	31.283	—	0.988 0
氮释放率 Nitrogen release rate	NTS	8.193	2.827	0.051	0.994 3	23.872	2.700	0.057	0.987 6
	RTS	88.203	87.782	—	0.985 0	58.111	11.611	—	0.998 6
	PTS	76.472	139.161	—	0.992 7	41.081	5.950	—	0.999 5
磷释放率 Phosphorus release rate	NTS	85.044	0.888	—	0.999 7	77.506	3.809	—	0.999 2
	RTS	97.367	2.842	—	1.000 0	90.268	1.252	—	0.999 8
	PTS	93.150	4.539	—	0.998 3	87.900	1.003	—	0.999 7
钾释放率 Potassium release rate	NTS	90.088	1.144	—	0.999 8	93.442	1.873	—	0.999 3
	RTS	100.306	0.942	—	1.000 0	99.490	0.133	—	0.999 9
	PTS	98.472	4.911	—	0.994 9	99.920	0.384	—	1.000 0

NTS: 免耕秸秆覆盖还田; RTS: 旋耕秸秆还田; PTS: 翻耕秸秆还田。NTS: no tillage with straw mulching; RTS: straw incorporation through rotary tillage; PTS: straw incorporation through plow tillage.

表 3 不同秸秆还田方式下不同深度土壤养分含量

Table 3 Nutrients contents of different soil layers under different straw-returning methods $g \cdot kg^{-1}$

年份 Year	处理 Treatment	有机碳 Organic carbon		全氮 Total nitrogen		全磷 Total phosphorus		全钾 Total potassium	
		0-15 cm	15-25 cm	0-15 cm	15-25 cm	0-15 cm	15-25 cm	0-15 cm	15-25 cm
2014	NTS	10.64±0.15b	10.40±0.05b	1.03±0.04b	1.02±0.01b	0.90±0.01ab	0.84±0.07ab	10.57±0.21a	10.79±0.01a
	RTS	12.29±0.17a	9.81±0.07c	1.25±0.04a	1.02±0.01b	0.93±0.02a	0.89±0.02a	10.87±0.19a	10.78±0.32a
	PTS	9.94±0.27c	11.64±0.18a	1.00±0.02b	1.12±0.04a	0.86±0.03b	0.81±0.02b	10.38±0.56a	10.48±0.39a
2015	NTS	10.65±0.47b	10.67±0.09b	1.21±0.02b	1.03±0.10b	0.87±0.03ab	0.88±0.01a	10.88±0.39a	10.79±0.33a
	RTS	12.30±0.34a	10.15±0.42b	1.43±0.05a	1.08±0.08b	0.92±0.03a	0.87±0.02ab	11.08±0.20a	10.98±0.40a
	PTS	11.80±0.33a	12.62±0.20a	1.11±0.02c	1.27±0.10a	0.85±0.05b	0.83±0.04b	10.69±0.68a	10.68±0.51a

NTS: 免耕秸秆覆盖还田; RTS: 旋耕秸秆还田; PTS: 翻耕秸秆还田。不同小写字母表示不同还田方式间差异显著 ($P < 0.05$)。NTS: no tillage with straw mulching; RTS: straw incorporation through rotary tillage; PTS: straw incorporation through plow tillage. Different lowercase letters indicate significant difference among different straw-returning methods at $P < 0.05$.

RTS处理显著提高0~15 cm土壤有机碳和全氮含量, 2014年RTS处理较PTS和NTS处理0~15 cm有机碳含量显著提高19.1%和13.4%, 全氮含量提高20.0%和17.6%; 2015年RTS处理较PTS和NTS处理0~15 cm有机碳含量显著提高4.1%和13.4%, 全氮含量提高22.4%和15.4%。PTS处理显著提高15~25 cm土壤有机碳和全氮含量, 2014年PTS处理较RTS和NTS处理15~25 cm有机碳含量显著提高15.7%和10.7%, 全氮含量提高8.9%和8.9%; 2015年PTS处理较RTS和NTS处理15~25 cm有机碳含量显著提高19.6%和15.5%, 全氮含量提高15.0%和18.9%。土壤0~15 cm和15~25 cm土层全磷含量RTS处理显著高于PTS, 2014年RTS处理较PTS处理0~15 cm全磷含量高7.5%, 15~25 cm高9.0%; 2015年RTS处理较PTS处理0~15 cm全磷含量高7.6%, 15~25 cm高4.6%, 而RTS处理土壤全磷含量与NTS间差异不显著, 各处理间全钾含量差异不显著。

3 讨论

连续2年的试验结果表明, 旋耕和翻耕还田秸秆腐解表现前期快后期慢的特征, 与多数研究结果一致^[4-6,21]。3种还田方式下, 旋耕秸秆还田处理秸秆累计腐解率显著高于翻耕秸秆还田和免耕秸秆还田, 其土壤环境有利于秸秆的腐解, 且土壤处理秸秆组织结构的破坏程度大于露天处理^[22], 这与秸秆翻埋比覆盖腐解速度快的研究结果一致^[23]。免耕秸秆还田处理, 秸秆暴露在空气中, 缺乏与土壤和水分的充分接触, 土壤酶和微生物活性较低, 秸秆的腐解强度较小。旋耕秸秆还田处理, 秸秆与土壤充分混拌, 土壤通气透水性好, 0~20 cm温度高于免耕覆盖^[8], 有利于土壤微生物对秸秆的分解活动, 从而促进了秸秆的腐解。王景等^[24]采用室内模拟培养的方法, 研究了水稻(*Oryza sativa*)和玉米秸秆在好气和厌氧条件下的腐解状况, 结果表明好气培养条件有利于作物秸秆降解和营养物质的释放。本文翻耕秸秆还田处理下, 由于单位土体秸秆密度较高, 且集中分布于25 cm土层处, 其腐解条件趋于嫌气状况, 故其秸秆腐解率低于旋耕秸秆还田处理。2014年免耕秸秆还田处理秸秆腐解率低于2015年, 这可能与2015年降水量高于2014年有关, 免耕条件下秸秆在地表, 吸收更多的水分以利于腐解, 旋耕和翻耕秸秆还田处理秸秆腐解率为2014年高于2015年, 分析认为旋耕和翻耕条件下秸秆放置在土壤中, 较高的土壤水分条件不利于秸秆腐解。

随着腐解的进行, 秸秆中养分逐渐释放, 秸秆

中养分的释放规律与秸秆腐解率相同, 均为旋耕还田养分释放率高于翻耕还田和免耕覆盖还田。不同还田方式下玉米秸秆养分释放率均表现为钾>磷>碳>氮, 至试验结束, 秸秆中有56.4%~81.3%的碳、8.3%~55.6%的氮、74.0%~95.5%的磷、89.4%~99.7%的钾被释放出来, 养分的释放与其在秸秆中的存在状态有关^[6]: 秸秆中钾以离子态存在, 易于分解释放; 60%以上的磷以离子态存在, 其他部分以有机态形式为主, 但根系分泌的有机酸能够促进磷元素的分解和释放; 碳氮主要以难溶的有机态存在, 在自然状态下分解较慢, 释放率低。除养分的存在状态以外, 气候和土壤条件主导了氮磷元素的释放, 而在腐解后期(2~3 a), 土壤生物因子对秸秆养分释放起到了主导作用^[25]。随着腐解的进行, 玉米秸秆全钾释放率达到90%以上, 适当减少钾肥施入量或钾肥施入时间后移^[5,26], 是提高资源利用效率的最佳耕作方式。

秸秆还田促进团粒结构形成, 提高土壤水稳性团聚体含量, 改善土壤通透性和保肥保水性^[27], 旋耕秸秆还田和翻耕秸秆还田, 增加了表层土壤有机碳和全氮含量^[28], 支持本文研究结果。旋耕和翻耕还田秸秆全磷释放率差异不明显, 但旋耕还田耕层土壤全磷含量显著高于翻耕还田, 土壤全磷含量与秸秆全磷释放的关系还需进一步深入研究, 各处理秸秆全钾释放趋势相同, 但土壤全钾含量差异不显著。

4 结论

本试验中, 旋耕秸秆还田处理秸秆腐解率显著高于翻耕秸秆还田和免耕覆盖还田。秸秆中养分释放率表现为钾>磷>碳>氮, 且旋耕还田处理有99%以上的钾素释放, 玉米应减少钾肥施用量或施用时间后移, 提高钾肥利用效率。旋耕秸秆还田可提高耕层土壤有机碳、全氮、全磷含量, 而各处理间全钾含量差异不显著。因此从还田秸秆腐解情况及土壤培肥效果分析, 在东北棕壤土区旋耕秸秆还田是适宜的还田模式。

参考文献 References

- [1] 毕于运, 王亚静, 高春雨. 中国主要秸秆资源数量及其区域分布[J]. 农机化研究, 2010, 32(3): 1-7
BI Y Y, WANG Y J, GAO C Y. Straw resource quantity and its regional distribution in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(3): 1-7
- [2] 刘晓永, 李书田. 中国秸秆养分资源及还田的时空分布特征[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 1-19

- LIU X Y, LI S T. Temporal and spatial distribution characteristics of crop straw nutrient resources and returning to farmland in China[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(21): 1-19
- [3] 左旭, 王红彦, 王亚静, 等. 中国玉米秸秆资源量估算及其自然适宜性评价[J]. 中国农业资源与区划, 2015, 36(6): 5-10
- ZUO X, WANG H Y, WANG Y J, et al. Estimation and suitability evaluation of corn straw resources in China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2015, 36(6): 5-10
- [4] 李逢雨, 孙锡发, 冯文强, 等. 麦秆、油菜秆还田腐解速率及养分释放规律研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(2): 374-380
- LI F Y, SUN X F, FENG W Q, et al. Nutrient release patterns and decomposing rates of wheat and rapeseed straw[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(2): 374-380
- [5] 武际, 郭熙盛, 王允青, 等. 不同水稻栽培模式和秸秆还田方式下的油菜、小麦秸秆腐解特征[J]. 中国农业科学, 2011, 44(16): 3351-3360
- WU J, GUO X S, WANG Y Q, et al. Decomposition characteristics of rapeseed and wheat straws under different rice cultivations and straw mulching models[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(16): 3351-3360
- [6] 徐健程, 王晓维, 朱晓芳, 等. 不同绿肥种植模式下玉米秸秆腐解特征研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 48-58
- XU J C, WANG X W, ZHU X F, et al. Study on decomposition of maize straw under different green manure cropping patterns[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2016, 22(1): 48-58
- [7] 曹莹菲, 张红, 刘克, 等. 不同处理方式的作物秸秆田间腐解特性研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 212-219
- CAO Y F, ZHANG H, LIU K, et al. Decomposition characteristics of crop residues among different agricultural treatments[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 212-219
- [8] 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 X D, CHI S Y, WANG Y, et al. Effect of less tillage and no-tillage patterns on decomposition of returned maize straw in wheat/maize system[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(10): 247-251
- [9] 张宇, 陈阜, 张海林, 等. 耕作方式对玉米秸秆腐解影响的研究[J]. 玉米科学, 2009, 17(6): 68-73
- ZHANG Y, CHEN F, ZHANG H L, et al. Tillage effects of decomposed ratio on corn straw[J]. Journal of Maize Sciences, 2009, 17(6): 68-73
- [10] 张红, 吕家珑, 曹莹菲, 等. 不同植物秸秆腐解特性与土壤微生物功能多样性研究[J]. 土壤学报, 2014, 51(4): 743-752
- ZHANG H, LYU J L, CAO Y F, et al. Decomposition characteristics of different plant straws and soil microbial functional diversity[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(4): 743-752
- [11] 岳丹, 蔡立群, 齐鹏, 等. 小麦和玉米秸秆不同还田量下腐解特征及其养分释放规律[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(3): 80-85
- YUE D, CAI L Q, QI P, et al. The decomposition characteristics and nutrient release laws of wheat and corn straws under different straw-returned amount[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(3): 80-85
- [12] 戴志刚, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 不同作物还田秸秆的养分释放特征试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 272-276
- DAI Z G, LU J W, LI X K, et al. Nutrient release characteristic of different crop straws manure[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(6): 272-276
- [13] 王允青, 郭熙盛. 不同还田方式作物秸秆腐解特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(3): 607-610
- WANG Y Q, GUO X S. Decomposition characteristics of crop-stalk under different incorporation methods[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(3): 607-610
- [14] 庞宏伟, 陈金, 唐玉海, 等. 玉米秸秆还田方式和氮肥处理对土壤理化性质及冬小麦产量的影响[J]. 作物学报, 2016, 42(11): 1689-1699
- PANG D W, CHEN J, TANG Y H, et al. Effect of returning methods of maize straw and nitrogen treatments on soil physicochemical property and yield of winter wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2016, 42(11): 1689-1699
- [15] YOU D B, TIAN P, SUI P X, et al. Short-term effects of tillage and residue on spring maize yield through regulating root-shoot ratio in Northeast China[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 13314
- [16] 胡宏祥, 程燕, 马友华, 等. 油菜秸秆还田腐解变化特征及其培肥土壤的作用[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(3): 297-302
- HU H X, CHENG Y, MA Y H, et al. Decomposition characteristics of returned rapeseed straw in soil and effects on soil fertility[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(3): 297-302
- [17] 矫丽娜, 李志洪, 殷程程, 等. 高量秸秆不同深度还田对黑土有机质组成和酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(3): 665-672
- JIAO L N, LI Z H, YIN C C, et al. Effect of incorporation of crop straw on composition of soil organic matter and enzyme activity in black soil relative to depth and rate of the incorporation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(3): 665-672
- [18] 成臣, 汪建军, 程慧煌, 等. 秸秆还田与耕作方式对双季稻产量及土壤肥力质量的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(1): 247-257
- CHENG C, WANG J J, CHENG H H, et al. Effects of straw returning and tillage system on crop yield and soil fertility quality in paddy field under double-cropping-rice system[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(1): 247-257
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30-34
- BAO S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 30-34
- [20] 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 X D, CHEN X N, WANG C X, et al. Decomposition

- of corn stalk in cropland with different fertility[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(10): 252-257
- [21] 代文才, 高明, 兰木羚, 等. 不同作物秸秆在旱地和水田中的腐解特性及养分释放规律[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(2): 188-199
- DAI W C, GAO M, LAN M L, et al. Nutrient release patterns and decomposition characteristics of different crop straws in drylands and paddy fields[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(2): 188-199
- [22] 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
- KUANG E J, CHI F Q, SU Q R, et al. Decomposition regularity of organic materials in Sanjiang Plain region[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(4): 736-741
- [23] 刘世平, 陈文林, 聂新涛, 等. 麦稻两熟地区不同埋深对还田秸秆腐解进程的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(6): 1049-1053
- LIU S P, CHEN W L, NIE X T, et al. Effect of embedding depth on decomposition course of crop residues in rice-wheat system[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(6): 1049-1053
- [24] 王景, 陈曦, 魏俊岭. 水稻秸秆和玉米秸秆在好气和厌氧条件下的腐解规律[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(1): 59-65
- WANG J, CHEN X, WEI J L. Decomposition of rice straw and corn straw under aerobic and anaerobic conditions[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2017, 34(1): 59-65
- [25] 李昌明, 王晓玥, 孙波. 不同气候和土壤条件下秸秆腐解过程中养分的释放特征及其影响因素[J]. 土壤学报, 2017, 54(5): 1206-1217
- LI C M, WANG X Y, SUN B. Characteristics of nutrient release and its affecting factors during plant residue decomposition under different climate and soil conditions[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(5): 1206-1217
- [26] 傅伟, 刘坤平, 陈洪松, 等. 秸秆还田替代化学钾肥对喀斯特峰丛洼地春玉米产量及土壤钾素的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(12): 1823-1831
- FU W, LIU K P, CHEN H S, et al. Spring maize yield and soil potassium balance under replacement of potassium with straw in karst peak-cluster depression[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(12): 1823-1831
- [27] 陈尚洪, 朱钟麟, 吴婕, 等. 紫色土丘陵区秸秆还田的腐解特征及对土壤肥力的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 141-144
- CHEN S H, ZHU Z L, WU J, et al. Decomposition characteristics of straw return to soil and its effect on soil fertility in purple hilly region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(6): 141-144
- [28] 隋鹏祥, 张心昱, 温学发, 等. 耕作方式和秸秆还田对棕壤土壤养分和酶活性的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35(8): 2038-2045
- SUI P X, ZHANG X Y, WEN X F, et al. Effects of tillage and straw management on nutrient contents and enzyme activities of brown soil[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(8): 2038-2045