

# 我国典型农田土壤中有有机物料腐解特征及驱动因子

马想, 徐明岗, 赵惠丽, 段英华

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081)

**摘要:** 【目的】研究不同有机物料在我国典型农田土壤中的腐解残留率变化。结合气候、土壤等环境因素, 阐明秸秆和粪肥在我国农田土壤中的腐解特征及其主控因素, 为因地制宜的合理利用有机资源和培肥土壤提供科学依据。【方法】在“国家土壤肥力肥效监测基地”中的黑土、潮土和红壤实验站, 开展大田填埋试验。有机物料烘干后过 2 mm 筛, 置于 48  $\mu\text{m}$  孔径尼龙网袋后填埋在土壤中。共 4 种供试有机物料: 小麦秸秆 (WS)、玉米秸秆 (MS)、猪粪 (PM) 和牛粪 (CM)。根据各地温度差异, 分别在填埋后 49—360 d 内采样 6 次。通过分析腐解过程中有机碳含量的变化, 整合土壤积温与腐解残留率的相关关系, 采用 VPA (方差分解分析) 量化气候因子, 有机物料性质及土壤养分对不同有机物料腐解的相对贡献率。【结果】秸秆的腐殖化系数为 11%—39%, 粪肥的为 50%—57%, 秸秆腐解速率显著高于粪肥, 且南方红壤上腐解速率高于北方黑土。地积温方程可拟合有机物料腐解残留率变化, 由该方程可知, 秸秆和粪肥易分解碳库占比分别为 76% 和 43%, 稳定碳库分别为 17% 和 53%。但秸秆和粪肥易分解碳库的分解速率常数 ( $k$ ) 无显著差异, 其周转积温 ( $1/k$ ) 约为 1 400—2 000  $^{\circ}\text{C}$ 。物料性质是有机物料腐解的最主要影响因子, 贡献率为 28%; 其次是气候, 贡献率为 20%。秸秆腐解过程中主要影响因子为气候因子、有机物料性质和土壤因子三者的交互作用, 贡献率达 42.3%。粪肥腐解过程中主要影响因子为气候因子, 贡献率为 38.3%。【结论】秸秆腐解速率和其有机碳库中易分解碳库比例明显高于粪肥, 秸秆腐解受到气候、土壤和物料性质协同作用影响, 而粪肥则受气候因子影响最大。在田间秸秆还田时需结合当地水热条件确定还田时间和还田量, 粪肥则建议在还田前进行堆腐, 且注意施用时间。

**关键词:** 秸秆; 粪肥; 腐解残留率; 气候; 有机物料碳库

## Decomposition Characteristics and Driving Factors of Organic Materials in Typical Farmland Soils in China

MA Xiang, XU MingGang, ZHAO HuiLi, DUAN YingHua

(Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/National Engineering Laboratory for Improving of Arable Land, Beijing 100081)

**Abstract:** 【Objective】Understanding of the dynamics and mechanisms of organic materials in soil are essential for improving the utilization of organic wastes and developing nutrient management strategies in many intensive farming regions around the world. The objective of this study was to elucidate the decomposition characteristics of straw and manure in typical farmland soils in China. 【Method】The field experiment was conducted in three soils (Red soil, Aquic soil, and Black soil) at the “National Soil Fertility and Fertilizer Effects Long-term Monitoring Network” experimental station. Four organic materials (wheat straw (WS), maize straw (MS), pig manure (PM) and cattle manure (CM)) were dried and then packed separately into 48  $\mu\text{m}$ -mesh size nylon net bag. Each bag contained 20 g organic materials was cut into 2 mm pieces. Based on the temperature difference, each treatment was sampled 6 times within 49-360 days after landfill. We analyzed the change of organic carbon content with soil accumulated temperature and residual rate during decomposition to study the relative contribution of climate factors, organic material properties and soil nutrients

收稿日期: 2018-11-01; 接受日期: 2018-12-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41471247)、北京市自然科学基金 (6142018)、土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金 (Y412201405)

联系方式: 马想, E-mail: maxiang24@163.com. 通信作者段英华, Tel: 010-82108661; E-mail: duanyinghua@caas.cn

in the decomposition rate of different organic materials. 【Result】 Humification coefficient of straw and manure were 11%-39% and 50%-57%, respectively, suggesting faster decomposition of straw than manure. The organic labile decomposable carbon pool accounted for 76% and 43% at straw and manure, respectively, while recalcitrant carbon pool accounted for 17% and 53%, respectively. The decomposition rates constants ( $k$ ) of labile decomposable carbon pool were similar in straw and manure, with an accumulated turnover temperature ( $1/k$ ) of 1 400-2 000 $^{\circ}\text{C}$ . VPA (variance decomposition analysis) analysis showed that the nature of the organic material, contributing 28% to the variance, was the main influencing factor in its decomposition. Individually, the greatest contributor during the decomposition of straw was the combined interaction of climate, organic material properties and soil (42.3%). In contrast, the decomposition of manure was mainly controlled by the climate (38.3%). 【Conclusion】 The decomposition rate and proportion of labile decomposable carbon pool in straw were higher than that of manure. The decomposition of straw was influenced by the synergistic effect of climate, soil and material properties, while manure was influenced mainly by climate factors. It was critical to determine the returning time and returning amount of straw in the field in combination with the local hydrothermal conditions. Manure was recommended to be piled up along with proper timing of its application before returning to the field.

Key words: straw; manure; fraction of carbon remaining; climate; carbon pool

## 0 引言

【研究意义】秸秆和粪肥是农田土壤有机碳的重要来源<sup>[1]</sup>。我国农作物秸秆和粪肥资源丰富, 2015 年秸秆资源量达 7.2 亿吨, 其中玉米秸秆和小麦秸秆占比达 49%<sup>[2]</sup>; 粪肥资源量达 38 亿吨, 其中猪粪和牛粪占比达 84%<sup>[3]</sup>。若能将这些有机物料充分利用, 则可以有效增加土壤有机质含量, 培肥土壤, 改善土壤物理及生物性状, 提高作物产量, 并且能够缓解我国土壤氮、磷、钾比例失调的问题, 减少化肥的施用量, 缓解秸秆焚烧造成的环境污染等问题<sup>[4-5]</sup>。因此, 了解主要有机物料还田后的腐解过程及驱动因素, 对有机资源的合理利用、培肥土壤和减缓温室效应具有重要的指导意义。【前人研究进展】有机物料在土壤中的腐解是复杂的生物化学过程, 受气候、有机物料性质、土壤和管理措施等要素的综合调控<sup>[6]</sup>。其中, 气候被认为是有机物料分解的决定性因素<sup>[7]</sup>, 平均气温与有机物料腐解速率常数呈线性正相关<sup>[8-10]</sup>。另外, 物料性质(碳氮比和木质素含量等)也是决定腐解速率的重要因素<sup>[9]</sup>, 如张红等<sup>[11]</sup>在垆土上的研究表现大豆秸秆(C/N=15)在 90 d 腐解残留率为 64%, 而玉米秸秆(C/N=36)为 79%。同位素标记试验也发现木质素等难分解物质较糖类周转时间更长<sup>[12]</sup>。此外, 有研究结果表明腐解速率与土壤养分含量呈显著正相关关系, 即养分含量丰富的土壤腐解速率较快<sup>[13]</sup>, 因此土壤理化性状也会影响腐解速率。这些研究在有机物料腐解的驱动机制上取得了一定的进展, 但单一影响因子并不能很好的解释物料腐解残留率在区域间的差异, 如玉米秸秆在广州赤红壤中一年的分解率为 68.1%<sup>[14]</sup>, 在郑州砂土中一年的分解率为 80.1%<sup>[15]</sup>,

而在哈尔滨黑土中的一年的分解率为 65.8%<sup>[16]</sup>, 其中赤红壤有机碳(SOC)含量为 2.9  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 砂土为 4.4  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 黑土为 21.3  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ <sup>[14-16]</sup>。因此, 需要综合分析气候、土壤养分等因子对有机物料腐解残留率的贡献及其在区域间的差异, 进而全面揭示有机物料腐解的驱动机制。

【本研究切入点】WANG 等<sup>[9]</sup>采用方差分解法(VPA)研究了秸秆在不同土壤中的腐解情况, 发现气候和秸秆类型在前期对腐解速度的影响明显, 后期逐渐减弱。然而, 作为农田有机质的重要来源, 碳氮比小但木质素含量较高的粪肥, 其腐解特征与主控因素和秸秆是不是相同, 对于因地制宜地合理施用粪肥和实行秸秆还田具有重要意义, 亟需进行深入分析。且土壤温度较气温对微生物的影响更大<sup>[17]</sup>, 通过地积温方程可更好拟合腐解过程。【拟解决的关键问题】本研究在黑土、潮土和红壤上开展为期一年的有机物料腐解试验, 分析了小麦秸秆、玉米秸秆、猪粪和牛粪腐解残留率及周围土壤养分的动态变化, 结合试验过程中地积温和累积降水量等气候因子, 旨在: (1) 阐明不同有机物料腐解残留率在区域间的差异, 及其与地积温的关系; (2) 评价气候、物料性质和土壤因子对有机物料腐解的相对贡献。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验点概况

于 2012 年 11 月至 2013 年 11 月, 分别在吉林省公主岭“国家黑土肥力肥效监测基地”(124 $^{\circ}$ 48' E、43 $^{\circ}$ 30' N), 河南省郑州现代农业开发基地“国家潮土肥力肥效监测基地”(113 $^{\circ}$ 40' E、35 $^{\circ}$ 50' N)和湖南省祁阳县“国家红壤肥力肥效监测基地”(111 $^{\circ}$ 52' E、26 $^{\circ}$ 45' N)进行。吉林公主岭试验点土壤为第四纪

黄土状沉降物母质发育的黑土，海拔高度为 150—222 m，年平均温度 5—6℃，有效积温 2 600—3 000℃，年降雨量 450—600 mm，年蒸发量 1 200—1 600 mm，年均日照时数 2 500—2 700 h，属温带季风气候。河南郑州试验点土壤为黄河冲积物母至发育的轻质壤土，海拔高度约为 125 m，年平均温度 14.5℃，≥10.0℃的积温 5 169℃，年均降雨量 615.1 mm，年蒸发量 1 450

mm，年均日照时数 2 324 h，属暖温带大陆性季风型气候。湖南祁阳试验点土壤为第四纪红土母质发育的普通红壤，海拔高度约为 120 m，年平均温度 18.0℃，≥10.0℃的积温 5 600℃，年均降雨量 1 250 mm，年蒸发量 1 470 mm，无霜期约为 300 d，年日照时数 1 610—1 620 h，属大陆性中亚热带季风湿润气候。试验土壤基础性质见表 1。

表 1 供试土壤基础性质  
Table 1 Soil properties at field experiment sites

指标 Indicators	有机碳 SOC (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 TN (g·kg <sup>-1</sup> )	全磷 TP (g·kg <sup>-1</sup> )	全钾 TK (g·kg <sup>-1</sup> )	速效磷 AP (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾 AK (g·kg <sup>-1</sup> )	pH
黑土 Black soil	15.1	1.31	0.60	24.0	6.95	0.11	7.85
潮土 Fluvo-aquic soil	6.10	0.79	0.71	23.7	38.60	0.15	7.92
红壤 Red soil	10.04	1.10	0.92	15.6	23.80	0.12	5.25

1.2 试验设计

试验采用尼龙袋填埋法。有机物料分别为：小麦秸秆（WS）、玉米秸秆（MS）、猪粪（PM）和牛粪（CM），各试验点物料相同，均采自郑州试验点，其中粪肥未堆腐，由新鲜畜禽粪便直接风干。各物料在 60℃下烘干，过 2 mm 筛，均称取 20 g，装入长 25 cm，宽 15 cm，孔径为 48 μm 的尼龙袋中。尼龙袋分别于 2012 年 11 月 11—14 日在各试验点进行填埋；填埋深度约 15 cm，各处理均 24 袋。尼龙袋填埋后，根据各试验点位土壤质地等物理性状，计算浇水量使 20 cm 深度土层土壤含水量达到最大田间持水量的 80%，其他时间无灌溉，试验地承受自然降水。填埋区不种植作物，试验期间为撂荒状态。有机物料的碳氮含量见表 2。

表 2 供试有机物料碳氮含量  
Table 2 Carbon and nitrogen content in various organic matter

有机物料 Organic matters	有机碳 Organic carbon (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total nitrogen (g·kg <sup>-1</sup> )	碳氮比 C/N
小麦秸秆 Wheat straw	396.3	6.23	63.00
玉米秸秆 Maize straw	396.6	7.47	53.10
猪粪 Pig manure	233.4	20.32	11.49
牛粪 Cattle manure	293.5	23.43	12.53

每个试验点在填埋区内随机埋两个地温仪（HOBO S-TMB-M006），地温仪填埋深度与尼龙袋一致，地温仪每小时记录一次土壤温度（T1…T24），日平均温度为 24 h 气温平均值。每 3 个月收集一次地温仪，导出温度数据后再次埋入土壤。

1.3 样品采集与分析

各试验点均为 6 次破坏性取样。由于尼龙袋填埋后黑土地区温度较低，因此其第一次采样时间较晚。根据各地积温累积速率，黑土在 129、181、222、256、300 和 365 d 采样；潮土在 49、120、186、227、300 和 365 d 采样；红壤在 49、151、212、255、304 和 365 d 采样。最后一次采样时间分别为：黑土 2013 年 11 月 14 号、潮土 2013 年 11 月 11 号、红壤 2013 年 11 月 11 号。

采样时，每个处理均取出 4 袋。采样后，将尼龙袋外面的泥土擦拭干净后称重，测定含水率，然后将样品风干、研磨备用。含水率采用烘干法测定，有机质采用重铬酸钾容量法测定，全氮采用硫酸-双氧水消煮，凯氏定氮法测定<sup>[18]</sup>。

1.4 计算方法及公式

各有机物料在不同时期的残留率计算方法如下：

$$R_t = [(C_t \times W_t) / (C_0 \times W_0)] \times 100\% \tag{1}$$

式中， $R_t$  为腐解  $t$  天残留率（%）； $C_t$  和  $W_t$  分别表示腐解  $t$  天时物料的有机碳含量（g·kg<sup>-1</sup>）和剩余物料重量（kg）； $C_0$  和  $W_0$  为初始加入的物料有机碳量（g·kg<sup>-1</sup>）和物料重量（kg）。

有机物料在一年内经微生物分解合成作用，形成

腐殖质的多少，可反映当地气候和土壤环境条件下，有机肥施用后土壤有机质的累积速率和土壤培肥的效果<sup>[19]</sup>。腐殖化系数通常用来表征有机物的腐解程度，式（1）中， $t=365$  时即为腐殖化系数。

日平均土壤温度：

$$T_m = (t_1 + t_2 + \dots + t_{24}) / 24 \quad (2)$$

式中， $T_m$  为土壤每天的平均温度（℃）， $t_n$  分别为一天内 24 时刻的土壤温度（℃）。

地积温的计算方法：

$$AT = (T_1 + T_2 + \dots + T_n) \quad (3)$$

式中， $AT$  为地积温， $n$  为腐解天数， $T_m$  为土壤日平均温度（℃），其中仅计算大于 0℃ 的土壤温度。

一般有机物料腐解残留率在一年内的变化可由单指数积温方程模型来模拟<sup>[17]</sup>：

$$R_t = R_0 + R_1 e^{-kx} \quad (4)$$

式中， $X$  为试验开始至各取样时间的土壤积温（℃）， $R_t$  为腐解残留率， $R_0$  和  $R_1$  可分别表征稳定有机碳库和易分解有机碳库占总有机碳库的比例。 $k$  为腐解速率常数，则  $1/k$  为易分解碳库的平均周转积温。

试验数据采用 Excel 2013 进行统计，数据分析采用 SPSS 22 和 R 软件分析，作图采用 Sigmaplot 12.5。

## 2 结果

### 2.1 有机物料腐解残留率动态变化

小麦秸秆（WS）、玉米秸秆（MS）、猪粪（PM）和牛粪（CM）四种有机物料在黑土、潮土和红壤的腐解残留率随时间的变化如图 1 所示。各有机物料腐

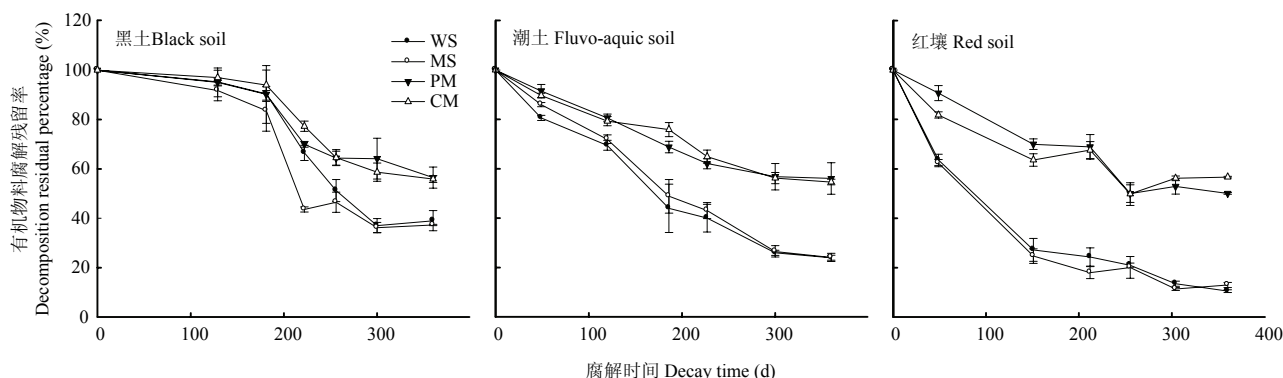
解残留率均随时间延长逐渐降低。在黑土上，腐解的前 180 d 有机物料的腐解残留率变化不大，约为 90%。180—300 d 秸秆腐解残留率从 90% 降至 40%，粪肥腐解残留率从 95% 降至 55%，300—360 d 各有机物料腐解残留率基本保持稳定。在前 180 d 内各有机物料之间腐解残留率均未表现出显著的差异，但 180 d 后秸秆类腐解率显著高于粪肥；在 180—212 d 腐解速率表现为  $CM > PM$ ， $WS > MS$ 。

在潮土上，有机物料腐解 50 d 时残留率变化不大，约为 85%，至 300 d 时秸秆腐解残留率为 30% 左右，粪肥腐解残留率为 45% 左右，之后各有机物料腐解残留率均保持相对稳定状态。在腐解过程中秸秆腐解速率显著高于粪肥；但在粪肥之间，PM 与 CM 在 360 d 内均无显著性差异；秸秆之间，WS 腐解速率在 150 d 之前显著低于 MS，150 d 后无显著差异。

在红壤上，WS 和 MS 表现为前 150 d 快速腐解，150—360 d 缓慢腐解，其在 50 d 时腐解残留率为 60%，至 150 d 时残留率为 25% 左右，360 d 残留率为 11%。PM 和 CM 在 50 d 时腐解残留率为 80%—90%，至 255 d 时腐解残留率为 45%—50%，之后基本保持稳定。秸秆和粪肥在红壤的腐解速率表现出明显的差异，整个腐解时期秸秆腐解速率均显著高于粪肥。

### 2.2 有机物料腐殖化系数

由表 3 可知，秸秆的腐殖化系数为 11%—39%，粪肥的腐殖化系数显著高于秸秆，为 50%—57%。黑土和潮土中，无论是秸秆之间还是粪肥之间，其腐殖化系数均无显著差异；而在红壤上 4 种物料之间均有



WS、MS、PM、CM 分别为小麦秸秆，玉米秸秆，猪粪和牛粪。下同  
WS, MS, PM, CM represents wheat straw, maize straw, pig manure and cattle manure, respectively. The same as below

图 1 不同腐解时间有机物料残留变化

Fig. 1 Dynamic change of organic matter residual under different decay time

表 3 有机物料腐殖化系数

Table 3 Humification coefficient of organic materials (%)

处理 Treatments		小麦秸秆 WS	玉米秸秆 MS	猪粪 PM	牛粪 CM
公历年 1 calendar year	黑土 Black soil	39.03±4.06Ab	37.30±0.25Ab	56.50±4.30Aa	55.93±1.35Aa
	潮土 Fluvo-aquic soil	28.59±0.97Bb	24.12±1.64Bb	56.07±6.41ABa	54.66±1.15Aa
	红壤 Red soil	10.50±0.58Cd	12.98±1.09Cc	50.07±0.37Bb	56.67±0.32Aa
积温年 1 thermal year		25.5	24	57.4	57.8

数据后大写字母表示同一有机物料在 3 个区域腐殖化系数差异显著性 ( $P<0.05$ ) (纵向比较); 数据后小写字母表示同一地区 4 种有机物料间差异显著性 ( $P<0.05$ ) (横向比较)

The uppercase letters after the data indicate the significant difference in the humification coefficient of the same organic material in the three regions ( $P<0.05$ ) (vertical comparison); the lowercase letters after the data indicate the significant difference between the four organic materials in the same region ( $P<0.05$ ) (horizontal comparison)

显著性差异, 表现为:  $CM>PM>MS>WS$ 。总的来说, 秸秆的腐殖化系数均在黑土上最高, 潮土其次, 红壤最低。牛粪腐殖化系数则在 3 种土壤间无显著差异; 猪粪腐殖化系数表现为黑土上显著高于红壤。

2.3 有机物料腐解残留率与积温的定量关系

由图 2 可知, 积温 (地积温) 方程能较好的拟合腐解过程, 决定系数达 90% 以上, 且均达显著水平 ( $P<0.01$ )。由该图可见, 至地积温 7 500℃ (祁阳年积

温) 时, 秸秆残留率约为 20%, 粪肥约为 50%。平均来说, 地积温每增加 1 000℃ 秸秆和粪肥腐解残留率分别降低约 11% 和 7%。可见, 与粪肥相比, 秸秆腐解对积温的响应更灵敏。

由积温和腐解残留的拟合方程 (图 2)  $R_t = R_0 + R_1 e^{-kx}$  可知, 添加小麦秸秆、玉米秸秆、猪粪和牛粪的土壤中, 稳定碳库的比例 ( $R_0$ ) 分别为 16.1%、17.8%、51.6% 和 54.4%, 易分解碳库比例 ( $R_1$ ) 分别为 77.7%、74.3%、43.4% 和 42.5%。秸秆易分

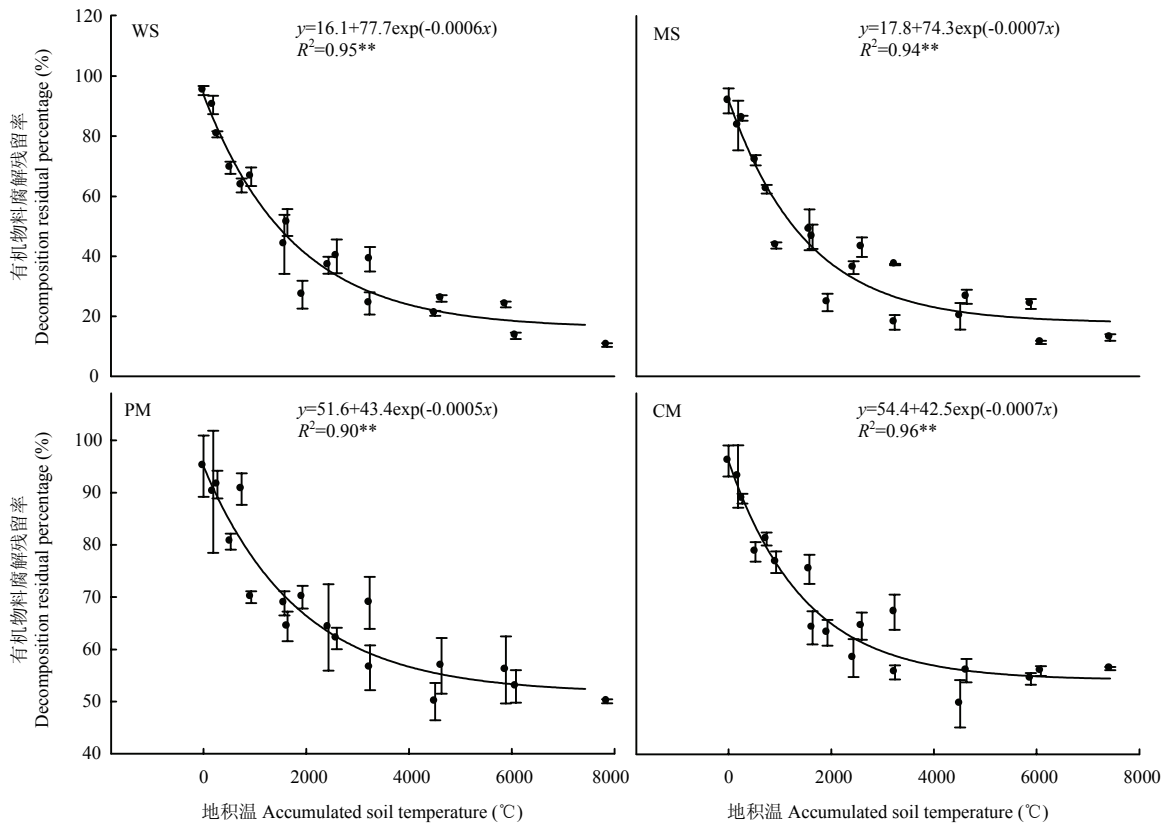


图 2 有机物料腐解残留率地积温拟合曲线

Fig. 2 The cumulative soil temperature fitting curve of organic material decay rate



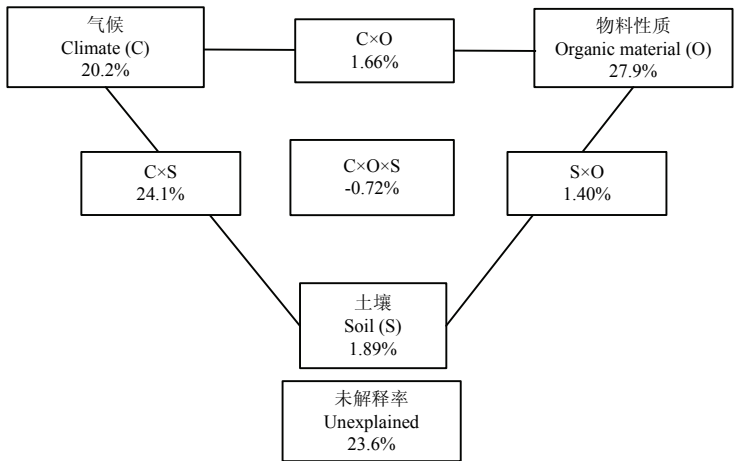
解有机碳库腐解速率常数  $k$ （平均为  $0.00065^{\circ}\text{C}^{-1}$ ）与粪肥（平均为  $0.00060^{\circ}\text{C}^{-1}$ ）差异不大。4 种有机物料易分解碳库的平均周转积温 ( $1/k$ ) 为  $1\,400\text{--}2\,000^{\circ}\text{C}$ ，即易分解碳库在积温达  $1\,400\text{--}2\,000^{\circ}\text{C}$  时即可完成转化。

地积温方程将不同区域的有机物料腐解残留率动态变化进行较好的拟合，所以通过该方程可以得到有机物料的积温残留率，并在一定程度上消除区域的差异，用以表征物料性质对残留率的影响。当大于  $0^{\circ}\text{C}$  积温达  $3\,652.5^{\circ}\text{C}$  即为一个积温年<sup>[8]</sup>。本文将  $3\,652.5^{\circ}\text{C}$  代入图 2 中各物料的积温方程，可得到各有机物料的积温年腐殖化系数，WS、MS、CM 和 PM 的积温年腐殖化系数分别为 25.5%、24.0%、

57.4%和 57.8%（表 3）。

**2.4 腐解残留率影响因素贡献率**

**2.4.1 气候、物料性质和土壤因子对有机物料腐解的影响** 通过方差分解分析（VPA）进一步分析有机物料腐解的驱动因子。将秸秆和粪肥综合分析，结果表明各因子及其交互作用对有机物料腐解的总贡献率达 76.4%（图 3），其中气候因子，物料性质和土壤因子对有机物料腐解的贡献率分别为 20.2%、27.9%和 1.89%。气候因子与土壤因子的交互作用（ $C\times S$ ）贡献率较高，为 24.1%；气候因子和物料性质的交互作用（ $C\times O$ ）和物料性质与土壤因子的交互作用（ $S\times O$ ）贡献率分别为 1.66%和 1.40%。



C 表示气候因子，O 表示有机物料性质，S 表示土壤因子；其中气候因子包括：地积温和累积降水；物料性质包括：有机物料碳，有机物料氮和有机物料含水率；土壤因子包括：土壤含水率，土壤有机碳，土壤全氮和土壤可溶性碳。下同  
C=climate condition, O=organic matter properties, S=soil characters; Climate condition include Accumulated temperature and Accumulated precipitation; Organic matter properties include Organic matter carbon, Organic matter nitrogen and Organic matter moisture; Soil characters include Soil moisture, Soil organic carbon, Soil total nitrogen and soil dissolved carbon. The same as below

图 3 各因子对有机物料腐解的贡献率

Fig. 3 The relative contribution of different types of factors to organic materials decomposition

**2.4.2 各因素对不同类型物料腐解的贡献率** 将 4 种有机物料按性质分为秸秆和粪肥后，对腐解残留率进行方差分解分析，分别阐明了各因子对秸秆和粪肥腐解速率的贡献。气候、物料和土壤因子对秸秆和粪肥腐解残留率变化总解释率分别为 88.2%和 82.1%。

对于秸秆腐解来说，3 个因子的交互作用（ $C\times S\times O$ ）贡献率最高，为 42.3%；其次是气候与物料性质的交互作用（ $C\times O$ ），为 20.4%；再者是气候和土壤性质的交互作用（ $C\times S$ ），为 12.1%；单一因子贡

献率均较低。对于粪肥腐解来说，气候因子的贡献率最高，为 38.3%；其次是气候与物料性质的交互作用（ $C\times O$ ），为 15.7%；再者是土壤性质，其贡献率为 12.9%（表 4）。

3 讨论

3.1 有机物料腐解速率的区域差异

从图 1 可见，秸秆的腐解速率明显高于粪肥，且差异在温度较高的红壤地区更为明显。但是，玉米秸

表 4 气候、物料和土壤因子对秸秆和粪肥腐解贡献率

Table 4 The contribution rate of climate, organic matter properties and soil characters to the decomposition of straw and manure

因子 Category	秸秆 Straw		粪肥 Manure	
	解释率 Contribution (%)	显著性 <i>P</i> -value	解释率 Contribution (%)	显著性 <i>P</i> -value
气候 Climate (C)	6.5	0.001	38.3	0.001
物料 Organic material (O)	2.8	0.001	5.4	0.001
土壤 Soil (S)	1.7	0.036	12.9	0.001
交互作用 Interaction				
C×O	20.4		15.7	
C×S	12.1		0.6	
S×O	2.1		2.3	
C×S×O	42.3		6.9	
Total	88.2	0.001	82.1	0.001

秆和小麦秸秆之间、猪粪和牛粪之间的腐解速率差异不大。从表 3 可以看出, 秸秆的腐殖化系数为 10%—39%, 而粪肥的为 50%以上, 说明秸秆较粪肥更容易腐解, 且在我国南方较北方腐解更快。王金洲等<sup>[6]</sup>的研究也发现, 玉米秸秆在华南地区腐解一年残留率为 26%, 而在东北地区为 39%; 猪粪在华南地区腐解一年的残留率为 36%, 在东北地区为 38%。不同物料之间腐解速率不同, 主要是由于秸秆和粪肥之间物料性质存在巨大差异。本试验中秸秆木质素含量(平均为 5.9%)约为粪肥木质素含量(平均为 10.4%)的 1/2; 而不同区域腐解速率的差异则与积温存在较大差异有关, 红壤区和黑土区土壤年积温约为 7 500℃和 3 500℃。

有机物料腐解残留率随腐解时间的延长逐渐降低, 但腐解残留率并不是呈直线下降趋势。除黑土外, 其他土壤均呈现前期分解快, 后期分解慢的趋势。张丽娟等<sup>[19]</sup>发现有机物料在栗钙土中前 3 个月分解较快, 之后分解速率逐渐变慢。匡恩俊等<sup>[20]</sup>研究发现大豆秸秆在东北黑土还田后前 2 个月平均分解率为 26.4%, 3—5 月平均分解率为 1.7%。本研究中, 3 个试验点上, 快速腐解过渡到缓慢腐解的时间差异较大。这主要是由于试验开始时, 3 个试验点温度有较大差异, 还田后 2 个月内红壤地温约为 10℃, 潮土地温约为 6℃, 黑土地温低于 0℃。土壤温度会减弱微生物活性, 进而降低腐解速率<sup>[21]</sup>, 故红壤有机物料快速腐解阶段迅速出现, 而黑土有机物料前期腐解率低, 快速腐解阶段滞后。

3.2 不同有机物料间的腐解速率差异

前人研究表明, 同一物料腐殖化系数在区域间差

异显著, 由低到高依次为华北~华南<西北~东北, 分布区域与区域的热量梯度基本一致<sup>[6]</sup>。CAI 等<sup>[17]</sup>的研究表明利用积温代替腐解时间, 可消除区域间气候的差异, 综合不同区域的有机物料腐解残留率变化, 研究物料性质对腐解残留率变化的影响。本研究通过分析地积温与腐解速率的关系, 一定程度上消除了不同区域间气温的差异, 综合得出了小麦秸秆、玉米秸秆、猪粪和牛粪的腐殖化系数分别为 25.5%、24%、57.4%和 57.8%(表 3), 说明猪粪和牛粪在土壤培肥上优于玉米秸秆和小麦秸秆。

在有机物料短期腐解过程中(小于 5 年), 单指数积温方程可很好的拟合腐解残留率变化<sup>[9,22]</sup>, 且其系数可分别表征易分解有机碳库和稳定碳库的占比及易分解有机碳库的转化积温。本研究结果表明, 秸秆和粪肥易分解碳库占比分别为 76%和 43%, 稳定碳库分别为 17%和 53%。由于秸秆的易分解碳库含量较高, 而易分解碳库主要包括多糖、有机酸、氨基酸等易分解有机化合物, 可被微生物优先分解, 且碳源和养分充足可刺激微生物活性和数量, 进而促进有机物料腐解<sup>[23-24]</sup>。这就从碳库活性角度解释了为何秸秆腐解较有机肥更快。

有研究表明, 物料化学组成中, 木质素和芳香碳含量高的低质量有机物料, 与难分解化合物含量低的高质量有机物料相比, 其腐解残留率更高<sup>[25-26]</sup>, 且木质素等稳定化合物, 需要数十年才可被分解<sup>[12]</sup>。难分解化合物的含量与有机物料在一年后的腐解残留率相关。本试验中秸秆木质素含量(平均为 5.9%)约为粪肥的(平均为 10.4%)的 1/2。与积温方程得到小麦秸秆和玉米秸秆稳定碳库占比呈正相关, 但单指数模型并不

能给出稳定碳库的周转积温,这是因为腐解时间较短,不能观察到稳定碳库的周转过程,这也是我们要进行长期有机物料腐解监测的原因之一。

### 3.3 有机物料腐解的驱动因素

前人研究表明,在华东地区腐解残留率大致为绿肥<秸秆<根茬~有机肥<sup>[27]</sup>,在东北地区秸秆和有机肥腐解残留率接近<sup>[28]</sup>,而在西北不同物料类型间腐解残留率差异不显著<sup>[6]</sup>。本研究也发现,秸秆较粪肥腐解更快,且各物料在南方红壤上腐解速率明显高于北方黑土(表3),说明有机物料腐解受物料类型、气候和土壤等多因素的影响。王宏燕等<sup>[29]</sup>在黑土上的研究表明地积温和降水均可有效预测腐解残留率,因此可将土壤积温和累积降雨作为气候因子的表征。本研究通过综合气候因子、土壤和物料性质进行方差分解分析(VPA),计算气候、土壤和物料性质对腐解的贡献率,其中物料性质是影响有机物料腐解的主要因子,贡献率达28%。王金洲等<sup>[6]</sup>对秸秆、根茬和绿肥等多种物料综合分析也表明,物料性质(Lignin/N)是影响腐解的主要因子,但该研究中物料性质的贡献率仅12%,远低于本研究的28%。这可能是由于其结果基于大量文献收集,包括了耕作类型、物料类型、气候区域等因素,且均为腐解一年后的数据,而本结果基于3个气候及土壤类型区的填埋试验,一年内6次采样获得的物料腐解率。

有研究表明将不同有机物料腐解过程综合分析和各物料单独分析时,主控因子不一致<sup>[6]</sup>。本研究中,从单因子来看,主控秸秆腐解的是气候,其贡献率为6.5%,但是其仍低于气候与土壤、物料的交互作用及3者之间的交互作用(12%、20%和42%),说明气候因子虽然是秸秆腐解的主控因子,但其腐解是各因子协同作用的过程,秸秆腐解在不同土壤及生态气候区差异非常大,因此在各地实行秸秆还田时需因地制宜,结合土壤因子及水热条件来确定还田时间和秸秆还田量,研制推广适宜该地区秸秆腐解的还田技术措施。对于粪肥来说,其气候因素的贡献率非常高,达到了38%,表明粪肥腐解过程中首要考虑的是气候条件,这可能是因为粪肥中难分解化合物含量较高,腐解过程需较长的积温累积过程,于是温度成为粪肥腐解的主要限制因素。因此在粪肥还田时建议先进行堆腐,一方面可以通过堆腐过程的高温杀灭病原菌;另一方面也可以通过堆腐形成一个积温的快速累积过程,加快粪肥的腐解,减少粪肥还田后对土壤酶情的影响。

本研究中,土壤因素对秸秆和粪肥腐解贡献率均不高,这主要是因为土壤并未与物料直接接触,土壤养分对微生物腐解过程中养分的补偿作用受到限制,秸秆残茬与土壤形成有机-无机复合体的保护机制也被忽略,这在一定程度上降低了土壤对腐解的贡献率。另外,尼龙袋在一定程度上降低了植物和土壤动物对有机物料腐解的影响,这也是土壤贡献率较低的原因之一。如果将有机物料与土壤充分混匀,土壤物理组成、微生物群落结构等均会影响有机物料的分解,其不同物料腐解的贡献率如何,将会是我们接下来的研究重点。

## 4 结论

秸秆较粪肥腐解更快,且在红壤上最快,黑土上最慢。秸秆的腐殖化系数在区域间差异较大,为11%—39%;而粪肥差异不大,为50%—57%。土壤积温方程可较好拟合黑土、潮土和红壤中有机物料的腐解过程,方程可将有机物料分为易分解碳库和稳定碳库,秸秆和粪肥易分解碳库占比约为76%和43%,难分解碳库占比分别约为17%和53%,难分解物质决定了物料腐解一年的残留率。总的来说,物料性质是有机物料腐解的主要影响因子。对秸秆来说,其腐解主要由气候、土壤和物料性质协同驱动;而粪肥则主要受气候条件影响。

## References

- [1] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [2] 宋大利, 侯胜鹏, 王秀斌, 梁国庆, 周卫. 中国秸秆养分资源数量及替代化肥潜力. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(1): 1-21.  
SONG D L, HOU S P, WANG X B, LANG G Q, ZHOU W. Nutrient resource quantity of crop straw and its potential of substituting. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(1): 1-21. (in Chinese)
- [3] 牛新胜, 巨晓棠. 我国有机肥料资源及利用. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6): 1462-1479.  
NIU X S, JU X T. Organic fertilizer resources and utilization in China. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(6): 1462-1479. (in Chinese)
- [4] 黄运湘, 王改兰, 冯跃华, 张杨珠, 段建南. 长期定位试验条件下红壤性水稻土有机质的变化. *土壤通报*, 2005(2): 181-184.  
HANG Y X, WANG G L, FENG Y H, ZHANG Y Z, DUAN J X. Changes of organic matter in paddy soil derived from red soil in a long-term located experiment. *Chinese Journal of Soil Science*,



- 2005(2): 181-184. (in Chinese)
- [5] 倪进治, 徐建民, 谢正苗. 有机肥料施用后潮土中活性有机质组分的动态变化. 农业环境科学学报, 2003(4): 416-419.
- NI J Z, XU J M, XIE Z M. Dynamic of active organic matter fractions in fluvio-aquic soil after application of organic fertilizers. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003(4): 416-419. (in Chinese)
- [6] 王金洲, 卢昌艾, 张文菊, 冯固, 王秀君, 徐明岗. 中国农田土壤有机物料腐解特征的整合分析. 土壤学报, 2016(1): 16-27.
- WANG J Z, LU C A, ZHANG W J, FENG G, WANG X J, XU M G. Decomposition of organic materials in cropland soils across China: A meta-analysis. *Acta Pedologica Sinica*, 2016(1): 16-27. (in Chinese)
- [7] VITOUSEK P M, TURNER D R, PARTON W J. Litter decomposition on the Mauna Loa Environmental Matrix, Hawai'i: Patterns, mechanisms, and models. *Ecology*, 1994, 75(2): 418-429.
- [8] GREGORICH E G, JANZEN H, ELLERT B H, HELGASON B L, QIAN B, ZEBARTH B J, ANGERS D A, BEYAERT R P, DRURY C F, DUGUID S D, MAY W E, MCCONKEY B G, DYCK M F. Litter decay controlled by temperature, not soil properties, affecting future soil carbon. *Global Change Biology*, 2017, 23(4): 1725-1734.
- [9] WANG X, SUN B, MAO J, SUI Y, CAO X. Structural convergence of maize and wheat straw during two-year decomposition under different climate conditions. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(13): 7159-7165.
- [10] ZHANG D, HUI D, LUO Y, ZHOU G. Rates of litter decomposition in terrestrial ecosystems: global patterns and controlling factors. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 1(2): 85-93.
- [11] 张红, 吕家珑, 曹莹菲, 徐温新. 不同植物秸秆腐解特性与土壤微生物功能多样性研究. 土壤学报, 2014(4): 743-752.
- ZHANG H, LV J L, CAO Y F, XU W X. Decomposition characteristics of different plant straws and soil microbial functional diversity. *Acta Pedologica Sinica*, 2014(4): 743-752. (in Chinese)
- [12] SCHMIDT M W I, TORN M S, ABIVEN S, DITTMAR T, GUGGENBERGER G, JANSSENS I A, KLEBER M, KÖGEL-KNABNER I, LEHMANN J, MANNING D A C, NANNIPIERI P, RASSE D P, WEINER S, TRUMBORE S E. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, 2011, 478(7367): 49-56.
- [13] GE X, ZENG L, XIAO W, HUANG Z, GENG X, TAN B. Effect of litter substrate quality and soil nutrients on forest litter decomposition: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(2): 102-108.
- [14] 程汝饱. 秸秆粪肥在赤红壤中的矿化研究. 热带亚热带土壤科学, 1994(2): 83-89.
- CHENG R B. Study on humification and mineralization of different kinds of stalk-dung fertilizers in latored soil. *Tropical and Subtropical Soil Science*, 1994(2): 83-89. (in Chinese)
- [15] 介晓磊, 寇太记, 刘芳, 化党领, 刘世亮, 谭金芳, 朱建国, 董县中, 李有田. 有机物料在砂土中不同时间段的腐解状况研究. 河南农业大学学报, 2006(3): 266-269.
- JIE X L, KOU T J, LIU F, HUA D L, LIU S L, TAN J F, ZHU J G, DONG X Z, LI S T. The study on decomposition law of organic material during different time in study soil. *Journal of Henan Agricultural University*, 2006(3): 266-269. (in Chinese)
- [16] 迟凤琴, 宿庆瑞, 王鹤桥. 不同有机物料在黑土中的腐解及土壤有机质平衡的研究. 土壤通报, 1996(3): 124-125.
- CHI F Q, SU Q R, WANG H Q. Study on decomposition of different organic materials in black soil and soil organic matter balance. *Chinese Journal of Soil Science*, 1996(3): 124-125. (in Chinese)
- [17] CAI A, LIANG G, ZHANG X, ZHANG W, LI L, RUI Y, XU M, LUO Y. Long-term straw decomposition in agro-ecosystems described by a unified three-exponentiation equation with thermal time. *Science of the Total Environment*, 2018, 636: 699-708.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000: 108-110.
- BAO S D. *Analysis of Soil Agrochemical*. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 108-110. (in Chinese)
- [19] 张丽娟, 刘树庆, 张金柱, 李彦慧. 冀西北栗钙土有机物料的腐解特征. 华北农学报, 2000, 15(增刊): 69-75.
- ZHANG L J, LIU S Q, ZHANG J Z, LI Y H. Decomposition characteristics of organic manure in chestnut soil and the control of soil organic matters. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2000, 15(Suppl.): 69-75. (in Chinese)
- [20] 匡恩俊. 不同还田方式下大豆秸秆腐解特征研究. 大豆科学, 2010(3): 479-482.
- KUANG E J. Study on decomposition characteristics of soybean straw under different returning modes. *Soybean Science*, 2010(3): 479-482. (in Chinese)
- [21] 姬兴杰, 杨颖颖, 熊淑萍, 李春明, 马新明, 刘晓迎. 不同肥料对土壤微生物数量及全氮时空变化的影响. 中国生态农业学报, 2008(3): 576-582.
- JI X J, YANG Y Y, XIONG S P, LI C M, MA X M, LIU X Y. Effects of different fertilizers on soil microbial quantity and total nitrogen spatial and temporal changes. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008(3): 576-582. (in Chinese)
- [22] WANG C, HAN G, JIA Y, FENG X, TIAN X. Insight into the temperature sensitivity of forest litter decomposition and soil enzymes in subtropical forest in China. *Journal of Plant Ecology*, 2012, 5(3): 279-286.

- [23] 李逢雨, 孙锡发, 冯文强, 秦鱼生, 王昌全, 涂仕华. 麦秆、油菜秆还田腐解速率及养分释放规律研究. 植物营养与肥料学报, 2009(2): 374-380.
- LI F Y, SUN X F, FENG W Q, QIN Y S, WANG C Q, TU S H. Nutrient release patterns and decomposing rates of wheat and rapeseed straw. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2009(2): 374-380. (in Chinese)
- [24] 王允青, 郭熙盛. 不同还田方式作物秸秆腐解特征研究. 中国生态农业学报, 2008,16(3): 607-610.
- WANG Y Q, GUO X S. Study on characteristics of decomposition of crop straw in different returning fields. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008,16(3): 607-610. (in Chinese)
- [25] PRESTON C M, BHATTI J S, FLANAGAN L B, NORRIS C. Stocks, chemistry, and sensitivity to climate change of dead organic matter along the canadian boreal forest transect case study. *Climatic Change*, 2006, 74(1/3): 223-251.
- [26] CARVALHO A, BUSTAMANTE M, ALCANTARA F, RESCK I, LEMOS S. Characterization by solid-state CPMAS  $^{13}\text{C}$  NMR spectroscopy of decomposing plant residues in conventional and no-tillage systems in Central Brazil. *Soil and Tillage Research*, 2009, 102(1): 144-150.
- [27] 李忠佩, 林心雄, 车玉萍. 中国东部主要农田土壤有机碳库的平衡与趋势分析. 土壤学报, 2002(3): 351-360.
- LI Z P, LIN X X, CHE Y P. Analysis for the balance of organic carbon pools and their tendency in typical arable soils of eastern China. *Acta Pedologica Sinica*, 2002(3): 351-360. (in Chinese)
- [28] 孟凯, 王德录, 张兴义, 隋跃宇, 刘鸿翔, 韩晓增, 张璐, 沈善敏. 黑土有机质分解、积累及其变化规律. 土壤与环境, 2002(1): 42-46.
- MENG K, WANG D L, ZHANG X Y, SUI Y Y, LIU H X, HAN X Z, ZHANG L, SHEN S M. Decomposition, accumulation and their variant pattern of organic matter in black soil area. *Soil and Environmental Sciences*, 2002(1): 42-46. (in Chinese)
- [29] 王宏燕, 彭驰, 侯中田. 降水和地积温对有机肥腐解的动态分析. 东北农业大学学报, 1996(1): 20-25.
- WANG H Y, PENG C, HOU Z T. The effect of rainfall and accumulated temperature of soil on the dynamic humification of munure. *Journal of Northeast Agricultural University*, 1996(1): 20-25. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)