

## 好气和厌氧条件下小麦秸秆的腐解特征研究

王景 陈曦 张雅洁 郜红建\*

(安徽农业大学 资源与环境学院, 合肥 230036)

**摘要** 采用网袋培养法,研究在好气和厌氧条件,小麦秸秆腐解过程中碳、氮释放及纤维素、半纤维素和木质素的变化规律。结果表明:小麦秸秆在好气和厌氧条件的残留质量、碳和氮残留量均随培养时间的延长而降低,且呈前期(0~3个月)降解较快,而后(3~12个月)逐渐减缓的趋势。用一级动力学方程  $y=y_0+a \cdot e^{-kt}$  对小麦秸秆在好气和厌氧条件的残留质量随时间变化进行拟合(决定系数  $R^2$  均大于 0.957),质量腐解半衰期分别为 72.8 和 121.9 d,腐解速率常数( $k$ )分别为 0.022 0 和 0.014 0/d。在好气条件,小麦秸秆中碳和氮元素释放速率常数分别是其在厌氧条件的 1.79 和 1.67 倍,小麦秸秆中碳和氮元素的释放率分别是其在厌氧条件的 4.39 和 1.40 倍,且在培养至 1 个月时处理之间呈显著性差异( $P<0.05$ )。小麦秸秆中的纤维素、半纤维素和木质素残留量均随培养时间延长总体呈下降趋势。以上结果表明,好气条件更有利于小麦秸秆碳氮元素的释放及纤维素、半纤维素和木质素的降解,从而更有利于小麦秸秆的降解。

**关键词** 小麦秸秆;好气;厌氧;腐解特征;拟合方程

中图分类号 S 158

文章编号 1007-4333(2015)03-0161-08

文献标志码 A

## Characteristic of wheat straw decomposition under aerobic and anaerobic condition in soil

WANG Jing, CHEN Xi, ZHANG Ya-jie, GAO Hong-jian\*

(School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

**Abstract** Net bag method was applied to determine the chemical composition (carbon, nitrogen mineralization, the residual quantities of cellulose, hemicellulose and lignin) during wheat straw decomposition process under aerobic and anaerobic condition in soil. Results showed that the residual mass, carbon and nitrogen of wheat straw sharply declined in the first 3 months, and then slowly decreased from 3 to 12 months incubation period. The decomposition of wheat residues mineralization could be quantitatively described by the first-order kinetics equation (the determination coefficient  $R^2 > 0.957$ ). Half-lives ( $t_{1/2}$ ) of wheat straw mass decomposition under aerobic and anaerobic conditions were 72.8 and 122.0 days, respectively, and the decomposition rate constants ( $k$ ) of wheat straw mass were 0.022 0 and 0.014 0/d, under aerobic and anaerobic conditions respectively. The decomposition rate constants ( $k$ ) of straw-C and straw-N in wheat straw under aerobic conditions were 1.79 and 1.67 times higher than those under anaerobic conditions, and the biggest variations were found at the end of the first month. Cellulose, hemicellulose and lignin residues in wheat straw were gradually increased during the whole incubation period. These results indicated that the straw decomposition under aerobic condition were higher than that in the anaerobic condition.

**Key words** wheat straw; aerobic; anaerobic; decomposition character; fitting equation

收稿日期: 2014-07-02

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2013BAD07B08, 2012BAD20B05, 2012BAD04B09); 国家自然科学基金项目(31328020)

第一作者: 王景, 硕士研究生, E-mail: wangjing1272@126.com

通讯作者: 郜红建, 教授, 从事养分资源高效利用研究, E-mail: hjgao@ahau.edu.cn

我国作物秸秆资源丰富,年产高达亿吨以上,若将这些作物秸秆直接或间接施入农田,可使秸秆中丰富的碳、氮等营养元素归还于土壤<sup>[1]</sup>。作物秸秆还田可改善土壤团聚体结构,有利于氮、磷和钾等营养元素在土壤中的贮存,同时可降低土壤容重,改善土壤板结状况,明显提高土壤有机碳含量<sup>[2]</sup>和作物产量<sup>[3]</sup>,对维持土壤生产力具有重要作用<sup>[4]</sup>。

作物秸秆还田后的腐解过程是影响土壤结构和土壤肥力的关键因素<sup>[5]</sup>。作物秸秆在农田土壤中的腐解矿化是在微生物的参与下进行的,既与作物秸秆本身的物质组成有关,同时受到土壤温度、水分和pH等环境因素的影响<sup>[6]</sup>。土壤水分状况是作物秸秆腐解过程中最重要的影响因子,因为土壤水分可影响微生物数量及活性,调控微生物氧的可利用性,并可能通过破坏有机质结构为微生物提供可利用的含碳物质<sup>[7]</sup>。Eric等<sup>[8]</sup>认为,水分会影响土壤水气状况,超过或低于最适的土壤水分均会抑制土壤呼吸,淹水条件下会加剧土壤还原物质的积累,改变土壤微生物种群和数量的变化<sup>[9]</sup>,进而影响土壤有机碳矿化。

小麦和玉米等作物的秸秆含有纤维素、半纤维素和木质素等含碳物质,还田后对土壤肥力的影响虽已有研究,但有关作物秸秆在好气和厌氧条件的腐解特征说法不一,作物秸秆还田后碳、氮含量及纤维素、半纤维素等化学组分含量的变化规律尚不明确,有待于进一步研究。通常认为淹水条件有机物料的矿化低于好气条件<sup>[10]</sup>,但黄东迈等<sup>[11]</sup>的研究与此相反,认为淹水条件有机物料的分解是以快速和高分解量为特征;Wang等<sup>[12]</sup>的研究表明,环境因素对秸秆腐解的影响差异主要存在于试验前期,而后随着时间的延长而减小。

本研究拟采用网袋培养方法,研究小麦秸秆在好气和厌氧条件的质量残留量与碳、氮含量变化及释放特征,分析小麦秸秆中纤维素、半纤维素和木质素含量随时间的变化规律,明确小麦秸秆在好气和厌氧条件的腐解特征,以期为探明小麦秸秆矿化降解速率,科学利用作物秸秆提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

#### 1.1.1 供试土壤及前处理

供试土壤(0~20 cm)采集于安徽农业大学高新技术农业示范园。土壤类型为黄褐土,属黏质黏

土。土壤样品剔除植物根系和石砾后,风干,过1 mm网筛,土壤理化性质为:pH 6.15,有机质11.42 g/kg,全氮0.52 g/kg,碱解氮41.62 mg/kg,速效钾122.13 mg/kg,速效磷6.35 mg/kg。其余新鲜土壤过2 mm网筛后,在4℃下存放、备用。

#### 1.1.2 供试小麦秸秆

小麦秸秆于2013年6月采自安徽农业大学高新技术农业示范园。小麦收割后剪掉麦穗,剩余部分在50℃烘干至恒重,剪成长1 cm段。小麦秸秆的化学组成为:有机碳479.78 g/kg,全氮8.85 g/kg,全磷2.23 g/kg,全钾9.84 g/kg,C/N为54.2,纤维素、半纤维素和木质素初始含量分别为38.1%、25.4%和10.1%。

## 1.2 方法

### 1.2.1 试验设计

小麦秸秆的腐解过程采用网袋培养法<sup>[12]</sup>。称取烘干后长度为1 cm的小麦秸秆6.00 g,放入孔径为0.15 mm(100目),长、宽为20 cm×20 cm的尼龙袋,封口后,放入长、宽和高为30 cm×30 cm×30 cm的培养箱中。培养箱底部先铺3 cm厚的土壤,把尼龙网袋竖直均匀放置在培养箱中,网袋周围用土壤填充后并在网袋上方覆盖3 cm厚的土壤,于30℃恒温培养。培养时,在每个培养盆中添加CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub> 1.07 g/kg,以调整小麦秸秆腐解过程中C/N比。

好气条件保持土壤含水量为75%的田间持水量,土壤氧化还原电位保持在(375±126) mV。厌氧条件保持土壤淹水状态(土表层约1 cm水层),土壤氧化还原电位保持在(168±73) mV。每3 d用称重差减法补充去离子水,以保持土壤含水量相对恒定。试验进行后立即从不同的培养箱内随机取出3个尼龙网袋,作为培养至第0个月的3个重复样品。之后按同样的采样方法,分别于培养至0.5、1、3、6和12个月进行采样,测定小麦秸秆残留质量、碳、氮元素组成及纤维素、半纤维素和木质素含量。

### 1.2.2 仪器及药品

乙二胺四乙酸二钠(Ethylenediamine tetraacetic acid disodium salt, Na<sub>2</sub>-EDTA)购自美国Amersco公司,十二烷基硫酸钠(Sodium dodecyl sulfate,分析纯)、乙二醇乙醚(2-ethoxyethanol,分析纯)和十六烷三甲基溴化铵(Cetyl trimethyl ammonium bromide,分析纯)均购自德国Sigma公司,其他药品购自国药集团化学试剂有限公司。

自动定氮仪(KDN-103F型)购自上海纤检仪器有限公司。

### 1.3 含量测定

小麦秸秆的残留质量采用称重法分析;秸秆碳和氮含量参照鲍士旦<sup>[13]</sup>的方法:有机碳含量采用重铬酸钾-浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 外加热法分析,全氮含量采用开氏消煮半微量定氮法分析;纤维、半纤维素和木质素含量采用范氏法<sup>[14]</sup>测定。

### 1.4 数据分析

#### 1.4.1 小麦秸秆质量变化及模型拟合分析

$$\begin{aligned} \text{秸秆残留率}/\% &= \text{培养结束时秸秆质量}(g) / \\ &\quad \text{初始培养时秸秆质量}(g) \times 100 \\ \text{秸秆腐解率}/\% &= (\text{初始培养时秸秆质量}(g) - \\ &\quad \text{培养结束时秸秆质量}(g)) / \\ &\quad \text{初始培养时秸秆质量}(g) \times 100 \end{aligned}$$

小麦秸秆质量残留率随时间变化关系用指数方程  $y = y_0 + a \cdot e^{-kt}$  拟合。式中: $y$  表示某时刻小麦秸秆残留质量占初始质量的比例; $k$  为腐解速率常数,其数值大小表明小麦秸秆腐解质量减少快慢; $a$  是小麦秸秆的损失量占初始量的比例; $y_0$  表示当  $t$  无穷大时  $y$  趋向的值。

#### 1.4.2 小麦秸秆碳、氮变化及模型拟合分析

小麦秸秆碳释放量(g) =  $(C_0 \cdot M_0 - C_t \cdot M_t) \cdot 10^{-3}$ 。式中: $C_0$  为初始培养时小麦秸秆碳含量, g/kg; $M_0$  为初始培养时小麦秸秆质量, g; $C_t$  为培养结束时小麦秸秆碳含量, g/kg; $M_t$  为培养结束时小麦秸秆质量, g。

小麦秸秆氮释放量(mg) =  $(N_0 \cdot M_0 \cdot 10^{-3} - N_t \cdot M_t \cdot 10^{-3}) \cdot 10^3$ 。式中: $N_0$  为初始培养时小麦秸秆氮含量, g/kg; $M_0$  为初始培养时小麦秸秆质量, g; $N_t$  为培养结束时小麦秸秆氮含量, g/kg; $M_t$  为培养结束时小麦秸秆质量, g。

小麦秸秆的碳释放量随时间变化关系用一级动力学方程  $C_t = C_0 \cdot (1 - e^{-k_0t})$  拟合<sup>[15]</sup>。其中  $C_0$  和  $k_0$  是常数; $R^2$  为决定系数; $C_t$  为某时刻秸秆累积矿化碳量, g; $k$  为碳矿化速率常数; $C_0$  为碳素的矿化潜力,即所能释放的最大值; $t$  为培养时间, d。

小麦秸秆氮释放量随时间变化关系运用一级反应模型(One-pool)和带常数项的一级反应模型(Special)进行模拟<sup>[16]</sup>。

一级反应模型(One-pool):

$$N_t = N_0(1 - e^{-k_0t}) \quad (1)$$

式中: $N_t$  为某时刻秸秆累积矿化氮量, mg; $k$  为氮矿化速率常数(/d); $N_0$  为氮素的矿化潜力, mg; $t$  为培养时间, d。

带常数项的一级反应模型(Special):

$$N_t = N_a(1 - e^{-k_a t}) + C_r t \quad (2)$$

式中: $N_a$  和  $k_a$  分别为易矿化部分的矿化势, mg 和一级反应速率常数, d; $C_r$  表示缓慢矿化部分的矿化常数, mg/d。其他符号意义同方程(1)。

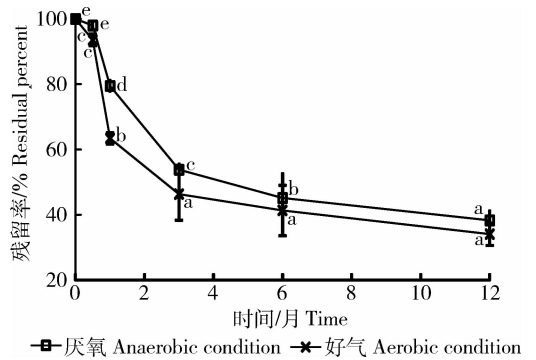
#### 1.4.3 统计分析

利用 Excel 2010 软件对数据进行处理统计并作图,利用 SPSS 18.0 软件对数据进行方差分析和非线性回归分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 好气及厌氧条件小麦秸秆残留质量变化

随着培养时间的延长,小麦秸秆在好气和厌氧条件的残留率均呈降低趋势,且呈前期降解速率较快,后期降解速率较慢的趋势,即在 0~3 个月内,小麦秸秆的腐解速度较快,好气和厌氧条件的残留率分别占整个培养时间内腐解总量的 74.9% 和 81.4%;在 3~6 个月内小麦秸秆的腐解速度减缓,6~12 个月小麦秸秆的腐解趋于稳定(图 1)。



误差棒为标准误,不同小写字母表示 5% 水平差异显著。下同。 Error bars are for standard error, the different small letters show significant difference at 5% level. The same as following figures.

图 1 小麦秸秆质量残留率随时间变化  
Fig. 1 Temporal variation of wheat straw weight residual percent

小麦秸秆在好气条件的质量残留率低于其在厌氧条件的质量残留率(图 1),小麦秸秆在好气条件的腐解率比其在厌氧条件下下降 3.8%~16.1%。培养至 1 个月时,小麦秸秆在好气条件的累积腐解率为 36.6%,其在厌氧条件的累积腐解率为 20.5%,达到

差异显著性水平 ( $P < 0.05$ )。随着培养时间的延长,小麦秸秆在好气和厌氧条件的腐解率差异逐渐减小,至12个月时,分别为65.9%和61.7%,未达差异显著性水平 ( $P > 0.05$ )。一级动力学方程 ( $y =$

$y_0 + a \cdot e^{-kt}$ ) 的拟合结果表明(表1),小麦秸秆在好气和厌氧条件的腐解速率常数  $k$  分别为 0.022 0 和 0.014 0 /d,腐解一半时所需时间分别为 72.8 和 121.9 d,即好气条件更有利于小麦秸秆的腐解。

表1 小麦秸秆质量残留及培养时间关系的拟合

Table 1 Regression models of wheat residual weights and incubation time

处理 Treatments	$y = y_0 + a \cdot e^{-kt}$			
	$y_0$	$a$	$k$	$R^2$
好气 Aerobic condition	36.7	66.2	0.022 0	0.957
厌氧 Anaerobic condition	38.6	65.2	0.014 0	0.980

注:  $y_0$ 、 $a$  和  $k$  是常数;  $R^2$  为决定系数;  $y$ : 某时刻秸秆残留质量占初始质量的比例;  $k$ : 腐解速率常数, 其数值大小表明秸秆腐解质量减少快慢;  $a$ : 损失的量占初始量的比例;  $y_0$ : 当  $t$  无穷大时  $y$  趋向的值。

Note:  $y_0$ ,  $a$  and  $b$  are constants;  $R^2$ : Determination coefficient;  $y$ : Weight percent of initial mass remaining at time  $t$ ;  $k$ : Constant of decomposition rate calculated by the least-squares method;  $a$ : Percent of initial mass of wheat straw to loss;  $y_0$ : Asymptote value when it is  $\infty$ .

## 2.2 小麦秸秆腐解过程中碳的释放特征

随着培养时间的延长,小麦秸秆中碳的释放量呈现先逐渐增大,此后趋于稳定的趋势(图2)。在培养的前3个月内,小麦秸秆中的碳在好气和厌氧条件的释放较快,分别占初始含碳量的57.1%和47.9%,小麦秸秆中的碳在好气条件释放量高于其在厌氧条件释放量。3~6个月释放减缓,培养至12个月时,小麦秸秆碳的释放趋于稳定,其在好气和厌氧条件累积释放量分别为初始碳含量的72.5%和72.5%。

用一级动力学方程  $C_t = C_0(1 - e^{-k_0t})$  方程对小麦秸秆碳的释放过程进行拟合,相关性较好 ( $R^2 > 0.953$ ) (表2)。在好气和厌氧条件,小麦秸秆碳的释放速率常数  $k$  分别为 0.015 2 和 0.008 5 /d,说明小麦秸秆中的碳在好气条件的释放速率高于其在厌

氧条件的释放速率,小麦秸秆碳释放一半时所需时间分别为 72.8 和 115.0 d。

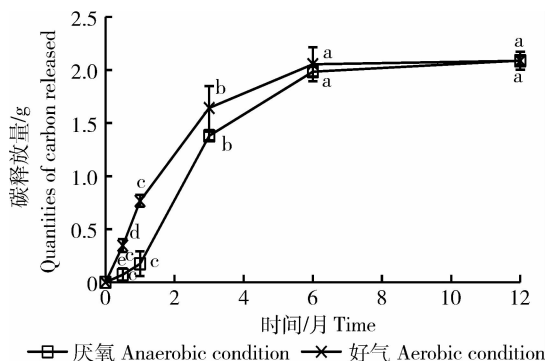


图2 小麦秸秆碳释放量随时间变化

Fig. 2 Temporal variation of organic carbon released from wheat straw

表2 小麦秸秆碳释放量与时间关系的拟合

Table 2 Regression models of carbon released from the wheat straw and the incubation time

处理 Treatments	$C_t = C_0(1 - e^{-k_0t})$		
	$C_0$	$k_0$	$R^2$
好气 Aerobic condition	2.15	0.015 2	0.996
厌氧 Anaerobic condition	2.31	0.008 5	0.953

注:  $C_0$  和  $k_0$  是常数;  $R^2$  为决定系数;  $C_t$ : 某时刻秸秆累积矿化碳量 (g);  $k_0$ : 利用非线性最小二乘法求得的碳矿化速率常数;  $C_0$ : 碳素的矿化潜力, 即所能释放的最大值。

Note:  $C_0$  and  $k_0$  are constants;  $R^2$ : Determination coefficient;  $C_t$ : Organic carbon released from wheat straw at time  $t$ ;  $k$ : Constant of carbon decomposition rate calculated by the least-squares method;  $C_0$ : Carbon mineralization potentials.

在相同培养时间内(0~6 个月),小麦秸秆中的碳在厌氧条件的释放量比好气条件低 3.4%~79.2%。培养至 1 个月时,小麦秸秆中的碳在好气和厌氧条件的累积释放量分别为 0.766 和 0.174 g,达差异显著性水平( $P < 0.05$ )。在 1~12 个月的培养时间内,小麦秸秆中的碳在好气条件的释放量始终高于其在厌氧条件释放量,但培养到 12 个月时,小麦秸秆中的碳在好气和厌氧条件的释放量未达到差异显著性水平(图 2),小麦秸秆中的碳在厌氧和好气条件的矿化量大致相当,这说明环境因素对秸秆腐解的影响差异主要存在于腐解前期,此后随着时间的延长而减小<sup>[12]</sup>。

### 2.3 小麦秸秆腐解过程中氮的释放特征

随着培养时间的延长,小麦秸秆氮累积释放量呈先升高后趋于稳定的规律(图 3)。在前 3 个月内,小麦秸秆中的氮释放较快,释放量为整个培养期内释放总量的 73.4%~86.2%,且小麦秸秆中的氮在好气条件的释放量高于其在厌氧条件的释放量。培养至 12 个月时,小麦秸秆中的氮在厌氧条件的累积矿化量略高于其在好气条件的累积矿化量,但未达到差异显著性水平。这可能与厌氧条件有利于氮的反硝化作用,小麦秸秆中的氮可能被矿化成铵态氮释放出去有关<sup>[16]</sup>。

用一级反应模型(One-pool)和带常数项的一级反应模型(Special)对小麦秸秆中氮的释放过程进行

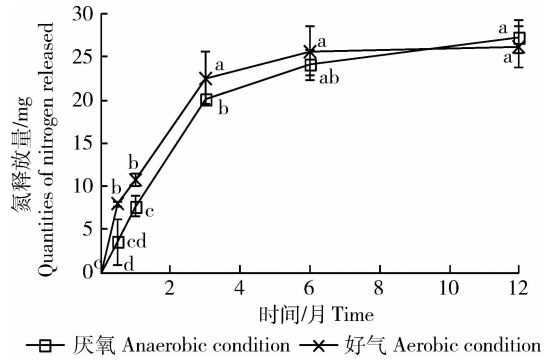


图 3 小麦秸秆氮释放量随时间变化

Fig. 3 Temporal variation of nitrogen released from wheat straw

拟合(表 3),相关性均较好( $R^2 > 0.993$ )。在 One-pool 模型中,小麦秸秆中的氮在好气条件的释放速率常数  $k$  (0.020 0 /d) 高于其在厌氧条件的  $k$  值 (0.012 0 /d),矿化势  $N_0$  (26.4) 则低于其在厌氧条件的  $N_0$  (27.7)。这说明小麦秸秆中的氮在好气条件的释放速度高于其在厌氧条件释放速度,短期内的好气条件有利于小麦秸秆中氮的矿化和释放<sup>[11]</sup>。在带常数项的一级反应模型(Special)中,小麦秸秆中氮的缓慢矿化部分的矿化常数  $C_r$  值在好气和厌氧条件均为负值,绝对值较小,在  $-0.005 \sim -0.003$ ,这表明小麦秸秆矿化的氮几乎全部来源于易矿化氮<sup>[16]</sup>。

表 3 小麦秸秆氮释放量与时间关系的拟合

Table 3 Regression models of carbon released from wheat straw and incubation time

处理 Treatments	一级反应模型 One-pool			带常数项的一级反应模型 Special			
	$N_0$	$k_0$	$R^2$	$N_a$	$k_a$	$C_r$	$R^2$
好气 Aerobic Condition	26.4	0.020 0	0.995	27.3	0.011 0	-0.005	0.993
厌氧 Anaerobic Condition	27.7	0.012 0	0.993	29.6	0.019 0	-0.003	0.995

注:一级反应模型: $N_t = N_0(1 - e^{-k_0t})$ ;  $N_0$  和  $k_0$ : 常数;  $R^2$ : 决定系数;  $N_t$ : 某时刻小麦秸秆累积矿化氮量(mg);  $k$ : 氮矿化速率常数;  $N_0$ : 氮素的矿化潜力。带常数项的一级反应模型: $N_t = N_a(1 - e^{-k_a t}) + C_r t$ ;  $N_a$  和  $k_a$ : 易矿化部分的矿化势和一级反应速率;  $C_r$  表示缓慢矿化部分的矿化速率。

Note: One-pool model:  $N_0$  and  $k_0$  are constants;  $R^2$ : Determination coefficient;  $N_t$ : Nitrogen released at time  $t$ ;  $K_0$ : Constant of nitrogen decomposition rate calculated by the least-squares method;  $N_0$ : Nitrogen mineralization potentials. Special model:  $N_a$ : Nitrogen mineralization potentials of the more stable N pool;  $k_a$ : Constant of the more stable N decomposition rate;  $C_r$ : Rate constant of mineralization of the more stable N pool.

## 2.4 小麦秸秆腐解过程中纤维素、半纤维素和木质素的变化规律

在好气和厌氧条件下,小麦秸秆中纤维素和半纤维素的残留量随培养时间的延长均呈下降的趋势。在好气条件,培养至1个月时,小麦秸秆中纤维素和半纤维素的腐解率分别是其在厌氧条件腐解率的3.32和3.25倍,且均呈显著性差异( $P < 0.05$ );培养至12个月时,小麦秸秆中纤维素和半纤维素残留量降解率分别为88.8%和98.1%(图4)。在厌氧条件,小麦秸秆中纤维素和半纤维素残留量在前期(0~3个月内)降解较快,降解量分别占初始量的51.0%和58.9%,此后(3~6个月)降解速率减缓,培养至12个月时,小麦秸秆中纤维素和半纤维素残留量降解率分别为87.1%和97.6%(图5)。好气条件小麦秸秆纤维素和半纤维素的腐解率始终高于其在厌氧条件的腐解率。

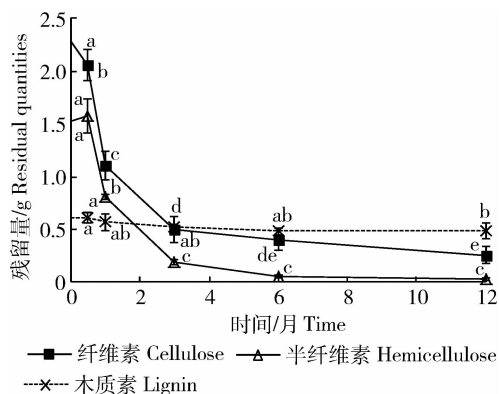


图4 好气条件下秸秆化学组分变化

Fig. 4 Temporal variation of cellulose, hemicellulose and lignin in wheat straw under aerobic condition

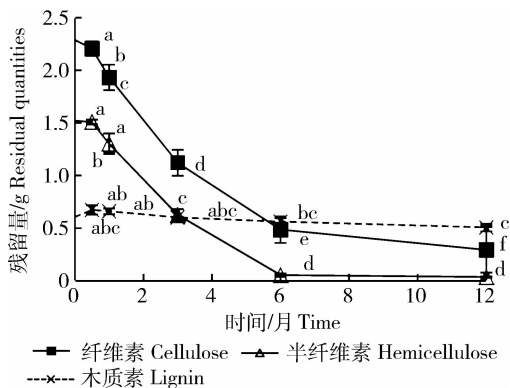


图5 厌氧条件下秸秆化学组分变化

Fig. 5 Temporal variation of cellulose, hemicellulose and lignin in wheat straw under anaerobic condition

在好气和厌氧条件,小麦秸秆的木质素残留量在培养至第1个月时均有所升高,可能是残体分解过程中的中间产物与木质素相互作用的结果<sup>[17]</sup>,培养至1个月后呈下降趋势,至12个月结束时,好气和厌氧条件的小麦秸秆木质素残留量分别为0.421和0.506 g,腐解量分别为初始量(0.606 g)的30.6%和16.6%,且好气条件的小麦秸秆木质素残留量低于厌氧条件。

## 3 讨论

### 3.1 好气及厌氧条件对小麦秸秆腐解的影响

有关作物秸秆在好气和厌氧条件的腐解特征说法不一。张薇等<sup>[15]</sup>研究结果显示,好气条件土壤有机碳累积矿化量显著高于厌氧条件,黄东迈<sup>[11]</sup>的研究发现,淹水条件有机物料的分解是以快速和高分解量为特征。本试验结果表明小麦秸秆腐解呈前期(0~3个月)快后期缓慢(6~12个月)的趋势,这可能是因为:在培养初期(0~3个月),小麦秸秆中易溶解的可溶性有机物,如多糖、氨基酸和有机酸等以及无机养分很快释放到土壤中,为微生物提供大量的碳源(能源)和养分,微生物数量增多,活性增强,加速秸秆腐解矿化;随着腐解的进行,小麦秸秆中易溶解的可溶性有机物逐渐减少,微生物活性降低,小麦秸秆腐解速率也随之变慢<sup>[18]</sup>。在第1~6个月培养期内,好气条件的小麦秸秆腐解速率大于其在厌氧条件的腐解速率,即好气条件更有利于小麦秸秆的腐解,这可能是因为:在好气条件,土壤大小孔隙比例适中,含有充足的氧气和水分,有利于微生物呼吸<sup>[8]</sup>,消耗更多的有机质为微生物活动提供能量。而培养至12个月结束时,2种处理的小麦秸秆累积腐解率趋于一致。

### 3.2 好气及厌氧条件小麦秸秆碳和氮的释放差异

本试验分别对在好气和厌氧条件小麦秸秆氮释放量随时间的变化进行模拟,拟合性均较好( $R^2 > 0.953$ ),好气条件碳释放速率常数 $k(0.0152/d)$ 高于厌氧条件的碳释放速率常数 $k(0.0085/d)$ ,说明好气条件更有利于小麦秸秆碳释放,且小麦秸秆中碳的释放呈前期(0~3个月)快,后期(6~12个月)缓慢的趋势,可以大致认为:在培养初期,小麦秸秆中易分解碳组分易于被生物利用而快速分解;随着培养时间延长,秸秆中易分解碳消耗殆尽,难分解碳开始矿化,表现出秸秆碳释放减缓的趋势<sup>[19]</sup>。前期(0~6个月)内好气条件碳释放量始终高于其在厌

氧条件的释放量(图2),可能因为厌氧条件抑制土壤中好氧微生物的活性,降低微生物的呼吸强度,导致秸秆有机碳的分解速率较低<sup>[10]</sup>,培养到12个月时,小麦秸秆中的碳在厌氧和好气条件的矿化量大致相当,说明只要环境适宜,作物秸秆在淹水条件的分解量仍可以与好气条件相当,此结果与黄东迈等<sup>[11]</sup>的研究结果类似。

张玉玲等<sup>[16]</sup>运用一级反应模型(One-pool)和带常数项的一级反应模型(Special)对氮矿化过程进行模拟,认为运用Special模型可更好地预测长期淹水培养条件有机氮素矿化。本试验也运用一级反应模型(One-pool)和带常数项的一级反应模型(Special)对小麦秸秆氮释放量随时间的变化分别进行模拟,拟合性均较好( $R^2 > 0.995$ ),小麦秸秆氮素矿化符合Special模型特征,主要来源于易矿化氮部分。虽然前期小麦秸秆的氮释放表现出在好气条件大于其在厌氧条件的释放量,但在培养至12个月时,在厌氧条件的氮释放量略高于其在好气条件,表现出好气和厌氧条件的小麦秸秆腐解差异变小。

好气和厌氧条件小麦秸秆的残留质量变化和碳、氮释放在后期趋于一致,Wang等<sup>[12]</sup>的研究得到类似结果,验证了在培养初期养分状况充足的情况下,水分是影响微生物活性的主要因素,随着培养时间延长和养分的消耗,水分对微生物的影响慢慢减小。

### 3.3 好气及厌氧条件小麦秸秆化学组分的腐解差异

本试验所用秸秆的纤维素、半纤维素和木质素初始总含量约73.6%,是主要的碳源。本研究表明确,小麦秸秆纤维素、半纤维素和木质素的残留量整体呈下降趋势,且好气条件的降解率均高于厌氧条件,这表明好气条件更有利于小麦秸秆的腐解。秸秆纤维素和半纤维素含量在培养初期略有升高,造成这种现象的原因可能是半纤维素和纤维素具有一定的稳定性和抗分解能力,而淀粉、蔗糖、低聚糖、果糖和氨基酸等水溶性组分较易分解,造成纤维素和半纤维素百分含量相对升高,同时小麦秸秆中矿物元素K、Na、Ca和Mg含量大量下降也可能导致此结果<sup>[20-21]</sup>。木质素是一种顽固性难分解组分,本研究结果表明厌氧条件小麦秸秆木质素残留量高于好气条件。Olk等<sup>[22]</sup>认为厌氧条件会促进酚醛-木质素残留物的积累,并与土壤氮共价结合形成更加稳定的物质。

## 4 结 论

1)小麦秸秆的残留质量随培养时间延长呈下降趋势,且前期(0~3个月)下降幅度大,中期(3~6个月)缓慢下降,后期(6~12个月)趋于稳定的规律。好气条件小麦秸秆的质量残留率低于其在厌氧条件的质量残留率。

2)小麦秸秆的碳、氮残留量随培养时间延长呈下降趋势,且呈前期(0~3个月)释放较快,后期(3~12个月)释放缓慢的规律。小麦秸秆的碳、氮释放符合一级动力学方程,决定系数 $R^2$ 均在0.953以上。好气条件有利于小麦秸秆的碳、氮的释放。

3)在好气和厌氧条件,小麦秸秆中的纤维素、半纤维素和木质素残留量总体均随培养时间延长逐渐降低;且好气条件更有利于纤维素、半纤维素和木质素的降解。

## 参 考 文 献

- [1] 卢秉林,王文丽,李娟,等. 小麦秸秆添加量对羊粪高温堆肥腐熟进程的影响[J]. 中国农业大学学报, 2010, 15(2): 30-34
- [2] 李涵,张鹏,贾志宽,等. 渭北旱塬区秸秆覆盖还田对土壤团聚体特征的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(2): 27-33
- [3] Qiu S J, Pei Q P, Li L, et al. Effects of applied urea and straw on various nitrogen fractions in two Chinese paddy soils with differing clay mineralogy[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2012, 48(2): 161-172
- [4] 沈学善,李金才,屈会娟,等. 砂姜黑土区秸秆还田对玉米生育及水分利用效率的影响[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(2): 28-33
- [5] 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
- [6] Sun B, Wang X Y, Wang F, et al. Assessing the relative effects of geographic location and soil type on microbial communities associated with straw decomposition [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2013, 79(11): 3327-3335
- [7] Tulina A S, Semenov V M, Rozanova L N, et al. Influence of moisture on the stability of soil organic matter and plant residues[J]. *Eurasian Soil Science*, 2009, 42(11): 1241-1248
- [8] Eric A D, Louis V V, Henrique C J, et al. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 53-69
- [9] 兰海青,李先国,张婷,等. 木质素的生物降解及其对陆源有机碳指示作用的影响[J]. 海洋湖沼通报, 2012 (1): 123-129
- [10] Olivier C D, William R H. Decomposition of rice straw and microbial carbon use efficiency under different soil

- temperatures and moistures[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000,32(11):1773-1785
- [11] 黄东迈. 黄东迈文选[M]. 北京:中国农业出版社,2004:86-90
- [12] Wang X Y, Sun B, Mao J D, et al. Structural convergence of maize and wheat straw during two-year decomposition under different climate conditions [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012,46(13):7159-7165
- [13] 鲍士旦. 土壤与农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社, 2010:25-114
- [14] Van Soest P J. Use of detergent in the analysis of fibrous feeds. II. A rapid method for the determination of fiber and lignin[J]. *J Assoc Off Ana Chem*, 1963,46(5):829-839
- [15] 张薇,王子芳,王辉,等. 土壤水分和植物残体对紫色水稻土有机碳矿化的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007,13(6):1013-1019
- [16] 张玉玲,党秀丽,虞娜,等. 辽河平原地区长期施肥水稻土氮素矿化及其模拟的研究[J]. *土壤通报*, 2008,39(4):761-765
- [17] 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
- [18] 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
- [19] 陈兴丽,周建斌,刘建亮,等. 不同施肥处理对玉米秸秆碳氮比及其矿化特性的影响[J]. *应用生态学报*, 2009,20(2):314-319
- [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
- [21] 杨曾奖,曾杰,徐大平,等. 森林枯枝落叶分解及其影响因素[J]. *生态环境*, 2007,16(2):649-654
- [22] Olk D C, Cassman K G, Schmidt R K, et al. Chemical stabilization of soil organic nitrogen by phenolic lignin residues in anaerobic agroecosystems[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006,38(11):3303-3312

责任编辑:袁文业