农业资源与环境学报 Journal of Agricultural Resources and Environment
2017年1月·第34卷·第1期:59-65 January 2017·Vol.34·No.1:59-65

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 Jing, CHEN Xi, WEI Jun-ling. Decomposition of Rice Straw and Corn Straw Under Aerobic and Anaerobic Conditions[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2017, 34(1): 59-65.

水稻秸秆和玉米秸秆在好气和厌氧条件下的腐解规律

王 景,陈 曦,魏俊岭*

(安徽农业大学资源与环境学院,安徽 合肥 230036)

摘 要:采用室内模拟培养的方法,研究了水稻秸秆和玉米秸秆在好气和厌氧条件下的腐解规律。结果表明:在0~3个月的培养时间内,水稻秸秆和玉米秸秆腐解较快,腐解率达55%以上。在好气培养条件下,水稻秸秆和玉米秸秆质量减少50%所需要的时间($t_{1/2}$)分别为59.2 d和52.9 d,而在厌氧培养条件下的$t_{1/2}$分别为72.6 d和79.9 d。水稻秸秆和玉米秸秆在好气培养条件下的碳释放速率常数k(0.61~0.6 月$^{-1}$)高于其在厌氧培养条件下的碳释放速率常数k(0.55~0.57 月$^{-1}$)。水稻秸秆和玉米秸秆在好气培养条件下的氮释放速率常数k(0.25~2.36 月$^{-1}$)也高于其在厌氧培养条件下的氮释放速率常数k(0.16~2.32 月$^{-1}$)。水稻秸秆和玉米秸秆中纤维素、半纤维素和木质素含量在好气培养条件下的减少速率高于其在厌氧培养条件下的减少速率。综上所述,好气培养条件有利于作物秸秆降解和营养物质的释放。

关键词:水稻秸秆;玉米秸秆;腐解特征;好气条件;厌氧条件

中图分类号:X71 **文献标志码**:A **文章编号**:2095-6819(2017)01-0059-07 doi:10.13254/j.jare.2016.0180

Decomposition of Rice Straw and Corn Straw Under Aerobic and Anaerobic Conditions

WANG Jing, CHEN Xi, WEI Jun-ling*

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

Abstract: Decomposition dynamics of rice straw and corn straw at aerobic and anaerobic condition were investigated under the simulated condition in the lab. Results showed that two stages, i.e. the rapid decomposition stage from 0 to 3 months, and the slow one between 3 and 12 months, of decomposition dynamics of rice straw and corn straw were found under anaerobic and aerobic incubation condition, and more than 55% of rice straw and corn mass was lost at the initial 3 months incubation period. The half times($t_{1/2}$) of rice straw and corn straw mass lost under aerobic condition were 59.2 d and 52.9 d, which were short than those(72.6 d and 79.9 d) under the anaerobic condition, respectively. Carbon release constants from rice straw and corn straw under aerobic condition were 0.61 and 0.60 per month, which were higher than those (0.55 and 0.57 per month) under anaerobic condition. The nitrogen release from crop straw followed the same rule as the carbon release from straw. The constants of nitrogen released from rice straw and corn straw under aerobic condition were 0.25 and 2.36 per month, which were higher than those(0.16 and 2.32 per month) under anaerobic condition. The losses of cellulose, hemicelluloses and lignin from rice straw and corn straw under aerobic condition were also higher than those under anaerobic condition. In summary, the aerobic environment increases decomposition and release of organic and inorganic substances from crop straw.

Keywords: rice straw; corn straw; decomposition character; aerobic condition; anaerobic condition

将作物籽粒收获后的秸秆归还到农田是增加土壤有机碳的重要途径。作物秸秆腐解过程中释放的氮、磷、钾及其他微量元素,可改善土壤养分状况,提高土壤肥力。秸秆还田还可改善土壤团聚体结构,提高耕性[1-3]。秸秆还田对土壤肥力及作物养分利用效率的影响成为当今研究的热点之一。

作物秸秆还田后的腐解过程既受到秸秆本身化学组成与结构影响[4],又受到环境因素影响[5]。土壤水分状况是作物秸秆腐解过程中最重要的影响因子,这是因为水分可影响土壤水气状况,高于或低于最适的

收稿日期:2016-08-03
基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0200107,2016YFD0300801)
作者简介:王 景(1985—),女,安徽萧县人,硕士研究生,主要从事养分资源高效利用研究。E-mail:wangjing1272@126.com
*通信作者:魏俊岭 E-mail: weij810@ahau.edu.cn

土壤水分均会抑制土壤呼吸,淹水环境还会加剧土壤还原物质的积累,改变土壤微生物种群和数量,进而影响土壤有机碳矿化[6]。土壤水分还会影响微生物氧有效性和活性,进而调控微生物对有机物料的分解和利用[7]。

水稻和玉米等作物秸秆富含纤维素、半纤维素和木质素等含碳物质,还田后对土壤培肥机理虽已有研究,但有关作物秸秆在不同水分管理模式下,如好气条件和淹水(厌氧)的腐解特征差异说法不一。通常认为,淹水条件(厌氧)下有机物料的矿化低于好气条件[8]。但黄东迈等[9]的研究与此相反,认为淹水条件下有机物料的分解是以快速和高分解量为特征。Wang 等[10]的研究表明,环境因素对秸秆腐解的影响差异主要存在试验前期,而后随时间的延长而减小。因此,作物秸秆在好气和厌氧条件下的腐解过程及其机理尚不清楚,还有待于进一步研究。

本研究采用网袋培养方法,研究水稻秸秆和玉米秸秆在好气和厌氧培养条件下的质量与碳、氮含量变化及释放特征,分析秸秆中纤维素、半纤维素和木质素的含量随时间变化规律,明确水稻秸秆和玉米秸秆在好气和厌氧培养条件的腐解特征,以期为水稻秸秆和玉米秸秆的加速腐解提供科学依据。

1 材料与方法

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,属粘质粘土。土壤样品剔除植物根系和石砾后,部分新鲜土壤过 2 mm 网筛后,在 4 ℃下存放、备用。其余土壤风干后过 1 mm 网筛,其理化性质为:pH 6.25,有机质 10.2 g·kg^{-1},全氮 0.58 g·kg^{-1},碱解氮 42.3 mg·kg^{-1},速效钾 141 mg·kg^{-1},速效磷 6.35 mg·kg^{-1}。

1.2 供试秸秆

供试秸秆为玉米秸秆和水稻秸秆,分别于 2014 年 10 月采自安徽农业大学高新技术农业示范园。作物收获后采集地上部分,剪成 1 cm 长,50 ℃下烘干至恒重。供试秸秆的化学组成见表 1。

1.3 试验设计

水稻秸秆和玉米秸秆的腐解过程采用网袋培养法[10]。称取烘干后长度为 1 cm 的水稻秸秆和玉米秸秆15.00 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 ℃下恒温培养。

好气培养条件设置为保持土壤含水量为 75%田间最大持水量,厌氧培养条件设置为保持土壤淹水状态(土表层约 1 cm 水层)。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。培养至0、0.5、1、3、6、12 个月时,分别采集 3 个网袋的植株样品,测定水稻秸秆和玉米秸秆残留质量,碳、氮元素组成及纤维素、半纤维素、木质素含量。每个试验处理设置 3次重复。

1.4 分析方法

水稻秸秆和玉米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[11]的方法:有机碳含量采用重铬酸钾-浓 H_2SO_4 外加热法分析,全氮含量采用凯氏定氮法分析;纤维素、半纤维素和木质素含量采用范氏法[12]测定。

1.5 统计分析

秸秆腐解率(%)、秸秆质量减少量(g)随时间变化规律,秸秆碳、氮释放量及随时间变化规律参考文献[16-17]进行计算。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 结果与分析

2.1 秸秆质量减少量

在好气和厌氧培养条件下,水稻秸秆和玉米秸秆的质量减少量呈现初期(0~3 个月)变化较快,而后(3~12 个月)逐渐减缓的趋势(图 1)。即在 0~3 个月的培养时间内,水稻秸秆质量在好气和厌氧条件下分别减少 60.0%和55.9%,玉米秸秆质量分别减少

表 1 水稻秸秆和玉米秸秆的理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of rice straw and corn straw

秸秆类型 Straw types	有机碳 Organic C/g·kg^{-1}	全氮 Total N/g·kg^{-1}	全磷 Total P/g·kg^{-1}	全钾 Total K/g·kg^{-1}	C/N	纤维素 Cellulose/%	半纤维素 Hemicellulose/%	木质素 Lignin/%
水稻秸秆 Rice straw	328.63	8.61	1.69	19.18	38.19	35.88	33.26	11.48
玉米 秸秆 Corn straw	438.29	13.78	1.34	20.32	31.81	25.30	30.04	11.56

70.3%和 56.7%。在 3~12 个月的培养时间内,水稻秸秆和玉米秸秆的质量保持相对稳定,秸秆质量减少量呈现:水稻秸秆好气条件>玉米秸秆好气条件>玉米秸秆厌氧条件>水稻秸秆厌氧条件的规律。

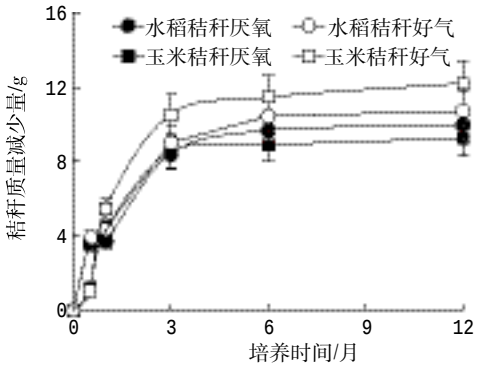


图 1 水稻秸秆和玉米秸秆质量减少量

Figure 1 Temporal reduction of rice straw and corn straw mass under aerobic and anaerobic conditions

水稻秸秆和玉米秸秆在好气条件下的质量减少量均高于其在厌氧条件下的质量减少量,且在培养至 6 个和 12 个月时达到差异显著性水平($P<0.05$)。一级动力学方程($y=y_0+a\cdot e^{-kt}$)的拟合结果表明(表 2),水稻秸秆在好气与厌氧条件的质量减少速率常数 k 分别为 0.60 月$^{-1}$和 0.56 月$^{-1}$,秸秆质量减少 50%所需时间分别为 59.20 d 和 72.55 d。玉米秸秆在好气与厌氧条件的质量减少速率常数 k 分别为 0.64 月$^{-1}$和 0.63 月$^{-1}$,秸秆质量减少 50%所需时间分别为 52.89 d 和 79.87 d,即水稻和玉米秸秆在好气条件下的质量减少量高于其在厌氧条件下质量减少量,即好气条件更有利于作物秸秆的降解。

2.2 秸秆碳的释放规律

水稻秸秆和玉米秸秆中的碳含量随培养时间延长,呈现初始(0~3 个月)减少速率较快,而后(3~12 个月)趋于平缓的规律,秸秆碳在好气条件下的减少量高于其在厌氧条件下的减少量(图 2)。在 0~3 个月的培养时间内,水稻秸秆碳在好气和厌氧条件的减少量分别为 66.0%和 58.6%,分别占其在整个培养期内(0~12 个月)碳减少总量的 78.8%和 76.3%。培养至 12 个月时,水稻秸秆碳的减少量分别为 83.8%和 76.9%。水稻秸秆碳在好气条件下的减少量始终高于其在厌氧条件下的减少量,但未达差异显著性水平($P>0.05$)。玉米秸秆碳的减少量与水稻秸秆相似,即在 0~3 个月的培养时间内,玉米秸秆碳在好气和厌氧条件下的减少量分别占其在整个培养期内(0~12 个月)碳减少总量的 87.89%和 81.25%,且在第 3 个月时达差异显著性水平($P<0.05$)。在 3~12 个月,玉米秸秆碳在好气和厌氧条件的减少量逐渐降低,且无显著差异($P>0.05$)。

水稻秸秆和玉米秸秆碳的减少过程均可用一级动力学方程拟合,且相关性较好($R^2>0.951$)(表 3)。在好气和厌氧条件,水稻秸秆碳的减少速率常数 k 分别为0.61 月$^{-1}$和 0.55 月$^{-1}$,碳含量减少 50%所需时间分

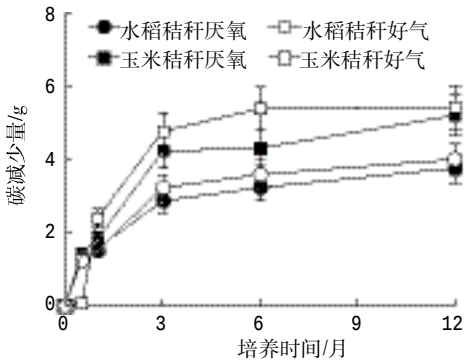


图 2 厌氧和好气条件水稻秸秆和玉米秸秆碳的质量减少量

Figure 2 Temporal reduction of carbon in rice straw and corn straw under aerobic and anaerobic conditions

表 2 好气和厌氧条件下秸秆质量残余量的依时拟合方程

Table 2 Time-dependent models of the straw mass reduction under aerobic and anaerobic condition

秸秆类型 Straw types	处理 Treatment	$y=y_0+a\cdot e^{-kt}$			
		y_0/g	a/g	k	R^2
水稻秸秆 Rice straw	厌氧 Anaerobic condition	4.991	9.744	0.561	0.982
	好气 Aerobic condition	4.292	10.400	0.596	0.987
玉米秸秆 Corn straw	厌氧 Anaerobic condition	5.632	9.889	0.626	0.980
	好气 Aerobic condition	2.855	12.845	0.637	0.975

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(g);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(g);y_0:当 t 无穷大时 y 趋向的值(g)。

Note: y_0, a and k are constants; R^2: Determination coefficient; y: Weight mass remaining at time t(g); k: Constant of decomposition rate calculated by the least-squares method; a: weight mass of wheat straw to loss(g); y_0: Asymptote value when t is ∝(g).

表 3 好气和厌氧条件下秸秆碳释放量的依时拟合方程

Table 3 Time-dependent models of carbon reduction in rice straw and corn straw under aerobic and anaerobic condition

秸秆类型 Straw types	处理 Treatment	$C_t=C_\theta(1-e^{-k_\theta t})$		
		C_θ/g	k_θ	R^2
水稻秸秆 Rice straw	厌氧 Anaerobic condition	3.504	0.545	0.973
	好气 Aerobic condition	3.800	0.611	0.970
玉米秸秆 Corn straw	厌氧 Anaerobic condition	4.934	0.565	0.978
	好气 Aerobic condition	5.646	0.610	0.951

注:C_θ 和 k_θ 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:利用非线性最小二乘法求得的碳矿化速率常数;C_θ:碳素的矿化潜力,即所能释放的最大值(g)。

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

别为 57.67 d 和 65.77 d。玉米秸秆碳的减少速率常数 k 分别为 0.61 月$^{-1}$ 和 0.57 月$^{-1}$,碳的含量减少 50%所需时间分别为 42.7 d 和 50.6 d。秸秆碳释放速率常数呈现:水稻秸秆-好气条件>玉米秸秆-好气条件>玉米秸秆-厌氧条件>水稻秸秆-厌氧条件的规律。这说明好气条件下有利于秸秆碳的释放。

2.3 秸秆氮的释放规律

水稻秸秆氮在 0~6 个月的培养时间内下降速率较快,在 6~12 个月内下降速率减缓(图 3)。在 0~6 个月的培养时间内,水稻秸秆氮在好气和厌氧条件下的减少量达 44.5%和 56.2%,分别占其整个培养期内秸秆氮减少总量的 67.1%和 77.9%。培养至 12 个月时,水稻秸秆氮在好气和厌氧条件下的减少率分别为 72.2%和 66.4%。在 1~12 个月的培养时间内,水稻秸秆氮在好气条件下的释放量始终高于其在厌氧条件下的释放量,且在 3~6 个月内达到差异显著性水平($P<0.05$)。而玉米秸秆氮在 0~1 个月的培养时间内下降速率较快,在 1~12 个月内下降速率减缓(图 3)。在 0~1 个月内的培养时间内,玉米秸秆氮在好气和厌氧条件下的减少量分别占其整个培养时间内秸秆氮减少总量的 76.7%和 76.2%,而后缓慢下降。培养至 12 个月,玉米秸秆氮在厌氧和好气条件下的减少率分别为 74.2%和 71.4%。在整个培养时间内,玉米秸秆氮的释放量和释放率均高于水稻秸秆。

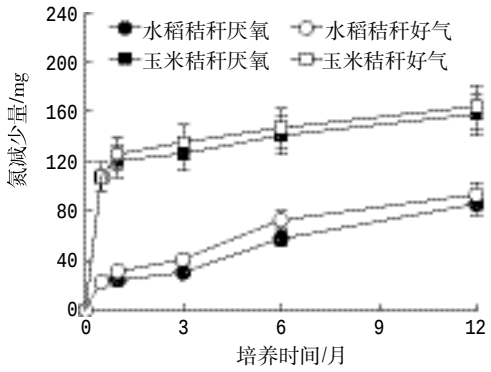


图 3 厌氧和好气条件水稻秸秆和玉米秸秆氮的质量减少量

Figure 3 Temporal reduction of N in rice straw and corn straw under aerobic and anaerobic condition

水稻秸秆和玉米秸秆氮的减少规律均可用一级反应模型(One-pool)进行拟合,相关性较好($R^2>0.900$)(表4)。在 One-pool 模型中,水稻秸秆氮在好气条件下的释放速率常数 k(0.25 月$^{-1}$)高于其在厌氧条件的 k(0.16 月$^{-1}$)值,秸秆氮含量减少 50%所需时间分别为202 d 和 136 d。玉米秸秆氮在好气和厌氧条件下的释放速率常数 k 分别为 2.4 月$^{-1}$ 和 2.3 月$^{-1}$,秸秆氮含量减少 50%所需时间分别为 18 d 和 20 d。秸秆氮释放速率常数依次为:玉米秸秆好气条件>玉米秸秆厌氧条件>水稻秸秆好气条件>水稻秸秆厌氧条件。这说明在相同培养条件下,玉米秸秆氮比水稻秸秆氮更容易释放。

2.4 秸秆纤维素、半纤维素和木质素含量变化规律

在好气和厌氧条件下,水稻秸秆和玉米秸秆中的半纤维素、纤维素的含量随培养时间延长均呈下降的趋势(图 4)。在厌氧条件,水稻秸秆中的半纤维素和纤维素含量在 0~1 个月的培养时间内分别降低了 64.2%和 31.9%;培养至 12 个月时,水稻秸秆中的半纤维素和纤维素含量分别减少了 91.1%和 89.9%。玉米秸秆中的半纤维素含量在 0~1 个月的培养时间内减少了 68.0%,而纤维素含量无显著变化;培养至 12 个月时,玉米秸秆中的半纤维素和纤维素含量分别减少了 86.2%和 83.2%。在好气条件,水稻秸秆和玉米秸秆中的半纤维素和纤维素降解速率均高于其在厌氧条件下的降解速率。水稻秸秆中的半纤维素和纤维素含量在好气条件下 0~1 个月的培养时间内分别降低了73.1%和 33.4%,分别比其在厌氧条件下的降解速率高 8.9%和 1.5%。培养至 12 个月时,好气条件下

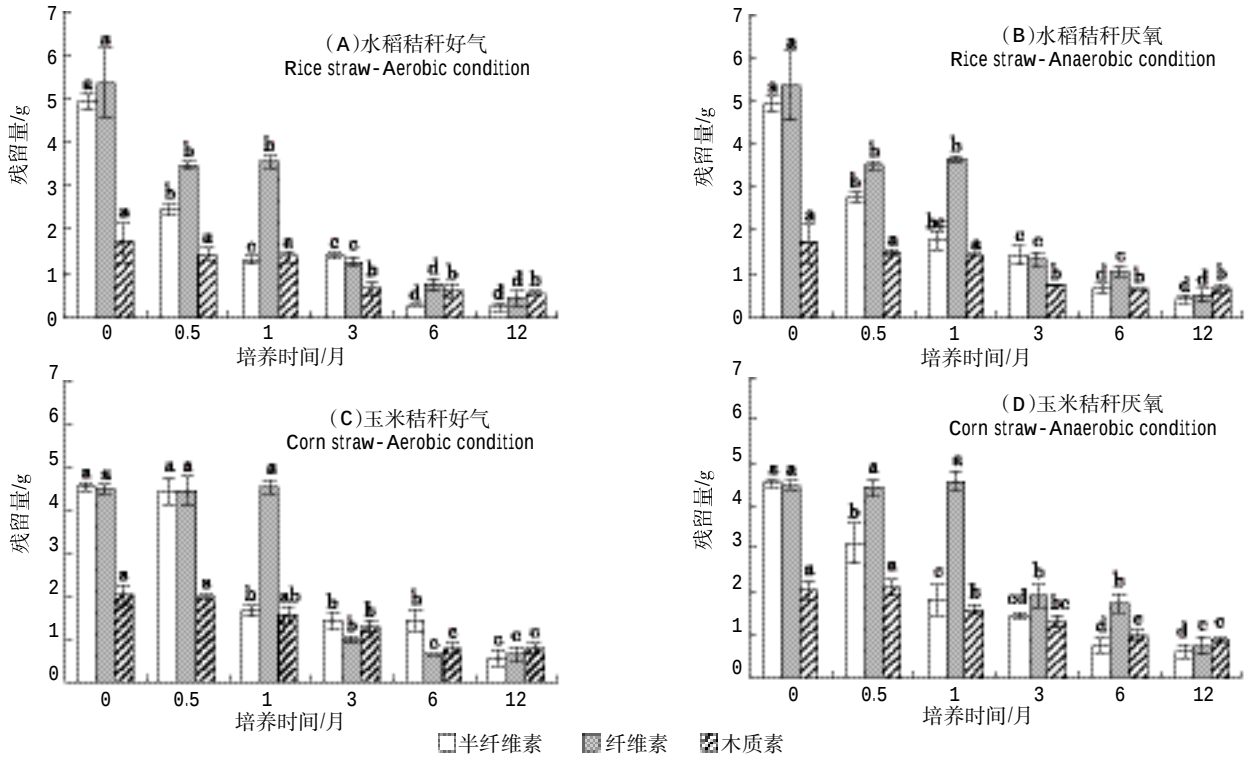
表 4 好气和厌氧条件下秸秆氮释放量的依时拟合方程

Table 4 Time-dependent models of nitrogen reduction in rice straw and corn straw under aerobic and anaerobic condition

秸秆种类 Straw types	处理 Treatment	$N_t=N_\theta(1-e^{-k_\theta t})$		
		N_θ/mg	k_θ	R^2
水稻秸秆 Rice straw	厌氧 Anaerobic condition	99.011	0.157	0.915
	好气 Aerobic condition	95.928	0.247	0.938
玉米秸秆 Corn straw	厌氧 Anaerobic condition	140.136	2.318	0.960
	好气 Aerobic condition	147.733	2.361	0.900

注:一级反应模型:$N_t=N_\theta(1-e^{-k_\theta t})$;$N_\theta$ 和 k_θ:常数;R^2:决定系数;N_t:某时刻秸秆累积矿化氮量(mg);k:氮矿化速率常数;N_θ:氮素的矿化潜力(mg)。

Note: One-pool model: N_θ and k_θ are constants; R^2: Determination coefficient; N_t: Nitrogen released at time t(mg); k: Constant of nitrogen decomposition rate calculated by the least-squares method; N_θ: Nitrogen mineralization potentials(mg).



图中不同小写字母表示纤维素、半纤维素和木质素含量在不同培养时间内差异显著($P<0.05$)

Different letters indicate the significant differences($P<0.05$) of cellulose, hemicellulose and lignin contents at different incubation periods

图 4 水稻秸秆和玉米秸秆中纤维素、半纤维素和木质素组分含量变化

Figure 4 Temporal variation of straw cellulose, hemicellulose and lignin under aerobic and anaerobic condition

水稻秸秆中的半纤维素和纤维素含量分别减少了 95.1%和 91.3%，分别比其在厌氧条件下的降解速率高 4.0%和 1.4%。

在好气和厌氧培养条件,水稻秸秆和玉米秸秆中的木质素含量随培养时间延长均呈下降趋势,两种秸秆的木质素含量在好气培养条件下的下降速率高于其在厌氧培养条件下的下降速率。在好气条件下培养至 12 个月时,水稻秸秆和玉米秸秆中的木质素含量在 0.57 g 和 0.78 g,分别比初始培养时木质素含量下降了 66%和 61%;而在厌氧条件下培养至 12 个月时,水稻秸秆和玉米秸秆中的木质素含量在 0.64 g 和0.90 g,分别比初始培养时木质素含量下降了 63%和56%。

3　讨论

作物秸秆还田是秸秆养分归还土壤的主要方式,作物秸秆腐解过程中释放的养分元素,对于提高土壤肥力、改善土壤团聚体结构、提高耕性等方面具有重要作用[1-2]。研究秸秆腐解的主要方法包括土壤直接培养法、砂滤管法和网袋法[16]。土壤直接培养法是把作物秸秆直接与土壤混合培养，接近生产实际状况,但存在腐解后的秸秆与土壤结合紧密,很难分离,对于研究作物秸秆养分释放过程及规律较难。砂滤管法是

把作物秸秆放入砂滤管,埋在土壤中进行培养。这种方法的优点在于砂滤管具有很好的透水透气性,也可避免外界环境因素的干扰,但是影响了管内外的水分移动,产生滞后效应[16-17]。网袋法是把作物秸秆放入一定孔径大小的网袋,再埋在土壤中进行培养。由于网袋孔径较大,土壤水分和微生物可以自由进出,土壤水分状况更接近田间实际情况,加之操作方便,被学者普遍采用[18]。但也存在网袋内秸秆团聚在一起不能与土壤紧密接触等问题,使得测定结果与真实状况有一定差异[19]。

作物秸秆还田后的降解过程受诸多因素的影响,水分和通气状况是其中的主要影响因素[18-19]。在我国的小麦-水稻和小麦-玉米两熟制轮作区,水稻秸秆和玉米秸秆还田后,黄淮海及以南地区以种植小麦为主,土壤通气状况良好,呈好气状态;而在我国部分地区,水稻秸秆和玉米秸秆还田后灌水泡田,土壤处于淹水条件,呈厌氧状态。研究表明,合适的水分含量和通气状况均可加速作物秸秆的腐解过程,这可能与土壤水分含量和通气状况可调节土壤微生物代谢,进而影响作物秸秆降解有关[18-19]。本文采用网袋培养法,研究作物秸秆在好气和厌氧环境中的腐解规律。结果表明,水稻和玉米秸秆质量在厌氧和好气培养条件下均呈现初始(0~3 个月)下降速率较快,而后(3~12 个月)逐渐减缓的趋势,与前人[18-20]的研究结果一致。这可能是因为秸秆中含有大量的易溶解可溶性有机物(如多糖、氨基酸、有机酸等)和无机矿质养分很快释放到土壤中,为微生物提供了生长代谢所需的碳源(能源)和养分,微生物数量增多,活性增强,加速了秸秆腐解矿化和 CO_2 的释放;随着腐解的进行,秸秆中易腐解组分逐渐减少,难降解组分逐渐积累,降低了微生物活性,秸秆腐解速率也随之变慢[19, 21]。秸秆残留物中木质素/碳水化合物或氮含量的比值也是影响作物秸秆降解的重要因素,木质素/碳水化合物或木质素/氮比值低,有利于秸秆降解;反之,抑制作物秸秆降解[22]。本研究中,随着玉米秸秆和水稻秸秆的降解,秸秆中含有的碳水化合物由于降解速率快,氮释放速率也快,其含量逐步降低,而木质素较难降解,其相对含量升高,提高了木质素/碳水化合物或木质素/氮的比值,降解速率降低。

水稻秸秆和玉米秸秆质量、碳含量、氮含量、纤维素、半纤维素和木质素含量在好气条件下的下降速率均高于其在厌氧条件下的下降速率。例如,水稻秸秆中碳和氮的释放速率常数在好气培养条件下分别为 0.61 月$^{-1}$ 和 0.25 月$^{-1}$,而其在厌氧条件下的释放速率常数分别为 0.55 月$^{-1}$ 和 0.16 月$^{-1}$。这说明好气环境更有利于作物秸秆降解和碳、氮等物质的释放。可能的原因是: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[23]和秸秆降解;而厌氧条件抑制土壤中好气微生物的活性,降低微生物的呼吸强度,导致秸秆有机碳的分解速率较低[24]。在厌氧条件下,作物秸秆中的木质素等难降解组分(如芳环碳 aromatic C 和烷基碳 alkyl C 官能团等)相对含量增加,减少了微生物对难矿化碳源的利用,降低了秸秆降解速率[25-26]。秸秆在厌氧条件下降解残留物中含有较多的木质素酚羟基,可能与土壤中的无机氮(NH_4^+)结合,形成有机结合态氮(苯胺),固定了土壤无机氮含量,降低了土壤氮的生物有效性,进一步降低了作物秸秆残留物的降解[25]。

4 结论

水稻秸秆和玉米秸秆在好气培养条件下的质量减少量高于其在厌氧培养条件下的质量减少量;碳/氮释放速率好气培养条件高于其在厌氧培养条件下的碳/氮释放速率;秸秆中的纤维素、半纤维素和木质素的减少量好气培养条件均高于其在厌氧条件下的纤维素、半纤维素和木质素的减少量。好气培养条件更加有利于水稻和玉米秸秆的腐解、碳和氮释放以及纤维素、半纤维素和木质素的分解。

参考文献:

[1] 把余玲, 田霄鸿, 万 丹, 等. 玉米植株不同部位还田土壤活性碳、氮的动态变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(5): 1166-1173.
BA Yu-ling, TIAN Xiao-hong, WAN Dan, et al. Labile carbon and nitrogen dynamic changes in soils incorporated with different parts of maize plants[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(5): 1166-1173. (in Chinese)

[2] 刘禹池, 曾祥忠, 冯文强, 等. 稻-油轮作下长期秸秆还田与施肥对作物产量和土壤理化性状的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(6): 1450-1459.
LIU Yu-chi, ZENG Xiang-zhong, FENG Wen-qiang, et al. Effects of long-term straw mulch and fertilization on crop yields and soil physical and chemical properties under rice-rapeseed rotation[J]. Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(6): 1450-1459. (in Chinese)

[3] 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 Xiong-xiong, TIAN Xiao-hong, ZHANG Lin, et al. Decomposition characteristics of maize and wheat straw andtheir effects on soil carbon and nitrogen contents[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(3): 626-633. (in Chinese)

[4] 赵 聪, 曹莹菲, 刘 克, 等. 室内模拟条件下玉米秸秆的分解特征及物质组成变化[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(4): 183-186.

ZHAO Cong, CAO Ying-fei, LIU Ke, et al. Characteristics of decomposition and variation of material composition of corn straw in laboratory simulation experiment[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(4): 183-186. (in Chinese)

[5] 王晓玥, 蒋瑀霁, 隋跃宇, 等. 田间条件下小麦和玉米秸秆腐解过程中微生物群落的变化—BIOLOG 分析 [J]. 土壤学报, 2012, 49(5): 1003-1011.
WANG Xiao-yue, JIANG Yu-ji, SUI Yue-yu, et al. Changes of microbial communities during decomposition of wheat and maize straw: Analysis by BIOLOG[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(5): 1003-1011. (in Chinese)

[6] 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.
LAN Hai-qing, LI Xian-guo, ZHANG Ting, et al. Biodegradation of lignin and its effects on the use of lignin as a biomarker of terrestrial organic carbon input[J]. Transaction of Oceanology and Limnology, 2012 (1): 123-129. (in Chinese)

[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] 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.

[9] 黄东迈, 朱培立, 王志明, 等. 旱地和水田有机碳分解速率的探讨与质疑[J]. 土壤学报, 1998, 35(4): 482-492.
HUANG Dong-mai, ZHU Pei-li, WANG Zhi-ming, et al. A study and question on the decomposition rate of organic carbon under upland and submerged soil conditions[J]. Acta Pedologica Sinica, 1998, 35(4): 482-492. (in Chinese)

[10] 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.

[11] 鲍士旦. 土壤与农化分析(第 2 版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010: 25-114.
BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis (Second edition) [M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2010: 25-114. (in Chinese)

[12] 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]. Journal of Association of Official Agricultural Chemists, 1963, 46(5): 829-839.

[13] 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.
ZHANG Wei, WANG Zi-fang, WANG Hui, et al. Organic carbon mineralization affected by water content andplant residues in purple paddy soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(6): 1013-1019. (in Chinese)

[14] 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.
ZHANG Yu-ling, DANG Xiu-li, YU Na, et al. Nitrogen mineralization and simulation of paddy soil under different long-term fertilization in liaohe plain region[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39 (4): 761-765. (in Chinese)

[15] 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.
WU Jing-gui, CHEN Li-rong, WANG Ming-hui, et al. Chemical analysis of corn plant residues during decomposition[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2000, 22(3): 61-66. (in Chinese)

[16] 郑　丹. 不同条件下作物秸秆养分释放规律的研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学硕士学位论文, 2012.
ZHENG Dan. The nutrient releasing regularity of crop stalks under different conditions[D]. Harbin: The Master's Thesis of Northeast Agricultural University, 2012. (in Chinese)

[17] 车玉萍, 林心雄, 程励励, 等. 用 ^{14}C 示踪法研究植物残体在田间的分解速率[J]. 土壤, 1993, 25(3): 159-164.
CHE Yu-ping, LIN Xin-xiong, CHENG Li-li, et al. Study on the decomposition rate of plant residues in field by ^{14}C labeled method[J]. Soils, 1993, 25(3): 159-164. (in Chinese)

[18] 王　景, 陈　曦, 张雅洁, 等. 好气和厌氧条件下小麦秸秆的腐解特征研究[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(3): 161-168.
WANG Jing, CHEN Xi, ZHANG Ya-jie, et al. Characteristic of wheat straw decomposition under aerobic and anaerobic condition in soil[J]. Journal of China Agricultural University, 2015, 20(3): 161-168. (in Chinese)

[19] 王　景, 魏俊岭, 章力干, 等. 厌氧和好气条件下油菜秸秆腐解的红外光谱特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(7): 892-899.
WANG Jing, WEI Jun-ling, ZHANG Li-gan, et al. FTIR characteristic of rapeseed straw decomposition under anaerobic and aerobic conditions[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(7): 892-899. (in Chinese)

[20] 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 Feng-yu, SUN Xi-fa, FENG Wen-qiang, et al. Nutrient release patterns and decomposing rates of wheat and rapeseed straw[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(2): 374-380. (in Chinese)

[21] 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.
KUANG En-jun, CHI Feng-qin, SU Qing-rui, et al. Decomposition characteristics of maize straws under different returning methods[J]. Journal of Maize Sciences, 2012, 20(2): 99-101. (in Chinese)

[22] Johnson J M F, Barbour N W, Weyers S L. Chemical composition of crop biomass impacts its decomposition[J]. Soil Science Society of America Journal, 2007, 71: 155-162.

[23] 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.

[24] 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.

[25] 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

[26] Gao H J, Chen X, Wei J L, et al. Decomposition dynamics and changes in chemical composition of wheat straw residue under anaerobic and aerobic conditions[J]. PLoS ONE, 2016, 11(7): e0158172. doi:10.1371/journal.pone.0158172.