

不同装袋量下麦秆和毛叶苕子混合腐解特征

刘 婷¹, 宋明丹^{1, 2}, 韩 梅¹, 梁鑫宇¹, 李正鹏^{1*}

(1. 青海大学农林科学院, 青海 西宁 810016;

2. 国家农业环境西宁观测实验站, 青海 西宁 810016)

摘要: 掌握不同装袋量下麦秆、毛叶苕子混合的腐解过程, 对青海东部农业区秸秆还田和培肥土壤具有重要意义。通过尼龙袋填埋试验, 设置物料类型和装袋量两个因素, 完全随机组合共 9 个处理。物料类型设麦秆 (W)、毛叶苕子 (H)、混合物料 (WH) 3 个水平, 装袋量设 16、28、44 g 3 个水平, 研究 3 种物料类型在不同装袋量下的腐解特征。研究表明, 各处理下有机物料腐解呈现前期快-中期慢-后期加快的变化规律, 至腐解结束, 物料类型对累计腐解率有显著影响 ($P<0.05$), 麦秆、毛叶苕子、混合物料的累计腐解率平均为 45.27%、76.75%、62.25%, 表现为毛叶苕子 > 混合物料 > 麦秆。装袋量对累计腐解率有显著影响 ($P<0.05$), 装袋量分别为 16、28、44 g 时, 平均累计腐解率分别为 62.84%、63.32%、58.11%, 装袋量 28 g 下腐解最快。双库指数衰减模型能较好地拟合物料腐解过程中腐解残留率与积温的关系, 方程的决定系数均 >0.88 , 预测腐解残留率与实测腐解残留率的 MPE、RMSE、nRMSE 分别为 8%、2.47、7.85%。麦秆、毛叶苕子和混合物料的腐殖化系数平均分别为 54.05%、31.32%、41.90%。物料混合显著提高了干物质质量的易分解比例 ($P<0.01$), 装袋量为 16、28、44 g 时, 混合效应值分别提高了 13.27%、15.06%、8.61%, 装袋量为 28 g 时混合效应最高。物料混合显著提高了干物质易分解比例, 腐解速率加快。麦秆和毛叶苕子混合能加快物料的腐解, 当装袋量为 28 g 时 (相当于麦秆、毛叶苕子还田量分别为 5490、3393 kg · hm⁻²) 效果最好, 该研究结果可为青海东部农业区秸秆还田提供理论和技术指导。

关键词: 有机物料; 腐解规律; 双库指数衰减模型; 混合效应; 模型评价

作物秸秆是土壤养分的重要来源。我国农作物秸秆资源丰富, 2020 年主要农作物秸秆资源达 9 亿 t, 其中主要农作物 (小麦、玉米、水稻) 秸秆达 5 亿 t 左右^[1]; 近年来绿肥作为一种有机肥源被广泛利用, 其产量达 1 亿 t 左右^[2]。作物秸秆含有大量的氮、磷、钾养分以及木质素、纤维素、半纤维素、蛋白质等有机物质。在农业生产中, 作物秸秆作为重要的养分资源, 秸秆还田作为一种保护性耕作措施, 具有增加土壤养分、降低容重、改善土壤结构、培肥土壤^[3]、促进增产的作用, 还可以减少化肥用量, 缓解秸秆焚烧造成的污染问题^[4-5]。因此, 了解作物秸秆还田后的腐解过程对作物秸秆资

源的合理利用和培肥土壤具有重要意义。

有机物料的腐解是一个复杂的生化过程, 主要受气候、物料性质、土壤等因素综合调控^[6-7]。其中, 气候因素是影响有机物料腐解的主要因素, 研究表明有机物料的残留率与温度呈负相关, 有机物料的腐解速率随年均气温升高呈线性增长的趋势^[8-9]。Prescott^[10] 研究表明, 有机物料腐解最适的土壤含水量范围为 60% ~ 75%, 含水量过高或过低都会影响有机物料的腐解过程。此外, 有机物料的性质 (碳氮比以及木质素等含量) 也是影响有机物料腐解的主要因素^[11], 研究表明, 木质素含量低的有机物料还田后腐解率相对更高^[12]; 有机物料 C/N 为 25 时最有利于微生物利用分解, C/N 过高造成微生物与作物竞争氮素, C/N 过低造成有机物料养分无效损失^[13]。谢帅等^[14] 研究表明, 毛叶苕子 (C/N=11) 腐解 162 d 的累计腐解率为 81.83%, 而麦秆 (C/N=66) 为 51.65%。

有机物料腐解是各因子共同作用的过程, 不同地区、土壤类型差异很大, 因此, 在不同地区研究

收稿日期: 2023-06-27; 录用日期: 2023-07-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32160759); 国家绿肥产业技术体系 (CARS-22)。

作者简介: 刘婷 (1997-), 在读硕士研究生, 研究方向为农业资源与环境。E-mail: 2290576254@qq.com。

通讯作者: 李正鹏, E-mail: lipengzheng131@163.com。

有机物料的腐解具有重要意义。青海东部农业区为高原大陆性半干旱气候,具有年均温低、年降水量少、昼夜温差大等特点。岳丹等^[15]在黄土高原的研究表明,玉米、小麦秸秆在 10、30、50、70 g 4 个还田量水平的腐解特征以玉米秸秆 26.23 g 或小麦秸秆 50 g 还田的腐解效果较好。目前关于秸秆还田腐解特征的研究已较多,主要集中在不同秸秆还田以及秸秆与耕作方式方面,不同的研究秸秆装袋量不同^[16-18],而对于不同的秸秆装袋量无法定量。因此,本研究通过尼龙袋填埋腐解试验,研究不同装袋量下麦秆、毛叶苕子及其混合物料的腐解过程,采用双库指数衰减模型量化腐解过程,采用物料混合效应值(RME)表征麦秆与毛叶苕子混合后的交互作用,进而掌握不同装袋量下有机物料的腐解过程,以期为该地区有机物料不同还田量提供理论依据和技术指导。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

腐解试验地点在青海省西宁市城北区青海大学农林科学院试验地(101°74'E, 36°56'N)进行,该区海拔 2314 m,属高原大陆性半干旱气候,年平均气温、年平均降水量、年均蒸发量分别为 5.9℃、367.5 mm、1729.8 mm^[19]。土壤为栗钙土,0~20 cm 耕层土壤有机碳 24.59 g·kg⁻¹,全氮 1.47 g·kg⁻¹,全磷 3.09 g·kg⁻¹,全钾 23.2 g·kg⁻¹,碱解氮 120.17 mg·kg⁻¹,有效磷 41.67 mg·kg⁻¹,速效钾 228.67 mg·kg⁻¹,pH 为 8.3。腐解期间的日平均气温和降水量如图 1 所示。

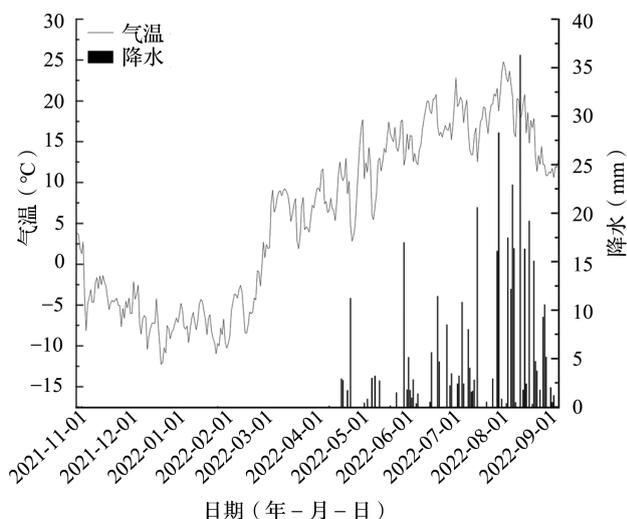


图 1 腐解期间日平均气温和降水量

1.2 试验设计

有机物料腐解采用尼龙袋填埋法,供试腐解材料为小麦秸秆(W)、毛叶苕子(H)两种物料,麦秆全碳含量为 47.27%、全氮含量为 0.72%,毛叶苕子全碳含量为 43.87%、全氮含量为 4.00%。秸秆来自 2021 年收获期样品,经风干晾晒,裁剪为 2 cm 左右,在 60℃下烘至恒重。

试验设计物料类型和装袋量 2 个因素,其中物料类型设置 3 个水平,分别为麦秆和毛叶苕子以及混合物料(WH),装袋量设置 3 个水平,分别为 16、28、44 g,两因素完全随机组合共 9 个处理,每个处理重复 3 次。按表 1 分别称取样品装入长 20 cm、宽 15 cm 的尼龙网袋(孔径 0.75 μm),埋入 20 cm 深土壤中,撂荒自然腐解。填埋时间为 2021 年 11 月 5 日,分别于填埋后的第 14、121、135、165、255、297 d 进行采样,各处理取出 3 个腐解袋带回实验室,用湿毛巾擦拭尼龙网袋表面,去除泥土和杂物,于 60℃下烘干至恒重,然后称量,研磨备用。

表 1 具体试验设计

处理	初始(g·袋 ⁻¹)	麦秆(g)	毛叶苕子(g)	碳氮比
W16	16	16	—	66
H16	16	—	16	11
WH16	16	10.18	5.82	24
W28	28	28	—	66
H28	28	—	28	11
WH28	28	17.82	10.18	24
W44	44	44	—	66
H44	44	—	44	11
WH44	44	28	16	24

1.3 测定指标与方法

土壤理化性质测定方法参考《土壤农化分析》^[20];采用烘干法测定秸秆干物质质量;腐解期间的温度降水数据来自距试验地 100 m 处的小型智能生态站(东方智感科技股份有限公司,天圻)。土壤温度和土壤湿度来自试验地埋设的土壤水分温度自动监测设备(东方智感科技股份有限公司,智墙)。

1.4 数据处理方法

不同时期各物料腐解残留率计算方法如下:

$$R_t = 1 - \frac{M_0 - M_t}{M_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中, R_t 代表物料腐解第 t 天的残留率 (%); M_0 代表物料初始质量 (g); M_t 代表腐解第 t 天的物料质量 (g)。

干物质质量腐解残留率采用改进的双库指数衰减模型^[9, 21]来表征, 公式如下:

$$W(t) = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \quad (2)$$

式中, $W(t)$ 为腐解第 t 天的腐解残留率; a 、 b 分别为易分解部分、难分解部分比例, $a+b=1$; k 为易分解部分的分解速率常数, $1/k$ 为易分解部分的平均周转积温。

模型模拟能力评价指标选择平均偏差 (MPE)、均方根误差 (RMSE) 和标准化均方根误差 (nRMSE) 3 个指标进行表征^[22]。其计算公式如下:

$$MPE = \sum_{i=1}^n \left(\frac{s_i - m_i}{m_i} \right) \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(s_i - m_i)^2}{n}} \quad (4)$$

$$nRMSE = \frac{RMSE}{M} \quad (5)$$

式中, s_i 为模拟值; m_i 为观测值; M 为实测平均值; n 为样本总数。nRMSE 取值范围为 0 ~ 1, 可以用来比较不同指标的模拟效果。判断标准一般为: nRMSE < 10% 为极好, 10% < nRMSE < 20% 为好, 20% < nRMSE < 30% 为中等, nRMSE > 30% 为差^[23]。

采用物料混合效应值 (RME) 表征麦秆与毛叶苕子混合后是否产生混合效应^[24-25], 计算公式如下:

$$EXP = \sum_{i=1}^s R_i \cdot W_i \quad (6)$$

$$REM = (OBS - EXP) / EXP \quad (7)$$

式中, EXP 为混合物料混合效应指标的预测值, OBS 为混合物料混合效应指标的实测值, R_i 为 i 物料单独腐解各项指标的实测值, W_i 为 i 物料在混合物料中的比例, s 为物料种类数量。RME > 0 表示混合物料中麦秆和毛叶苕子存在协同效应, RME < 0 则表示存在拮抗效应, 绝对值的大小表明混合效应的强弱。

试验数据采用 Excel 2019 进行整理, 用 SPSS 25.0 进行数据分析, 用 Origin 2022 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 有机物料累计腐解率

随腐解时间的推移, 各处理的累计腐解率逐

渐增大, 累计腐解率的增长均表现为快速 - 平稳 - 缓慢的特点 (图 2)。腐解第 165 d, W16、W28、W44、H16、H28、H44、WH16、WH28、WH44 处理的累计腐解率分别为 16.39%、14.10%、11.78%、48.16%、52.25%、50.80%、30.85%、31.48%、29.52%, 麦秆的累计腐解率随装袋量的增加有降低的趋势 ($P < 0.05$), W28 处理较 W16 处理显著降低 13.97%, W44 处理较 W28 处理显著降低 16.45%; 毛叶苕子的累计腐解率随装袋量的增加呈先增加后降低的趋势 ($P < 0.05$), H28 较 H16、H44 处理分别提高 8.49%、2.85%; 混合物料的累计腐解率随装袋量的增加呈先增加后降低的趋势 ($P < 0.05$), 与 W28 处理相比, WH16、WH44 处理分别低 2.00%、6.27%。至腐解结束, W16、W28、W44、H16、H28、H44、WH16、WH28、WH44 处理的累计腐解率分别为 47.69%、46.64%、41.49%、76.56%、77.01%、76.67%、64.27%、66.31%、56.16%, 有机物料的累计腐解率表现为毛叶苕子 > 混合物料 > 麦秆。

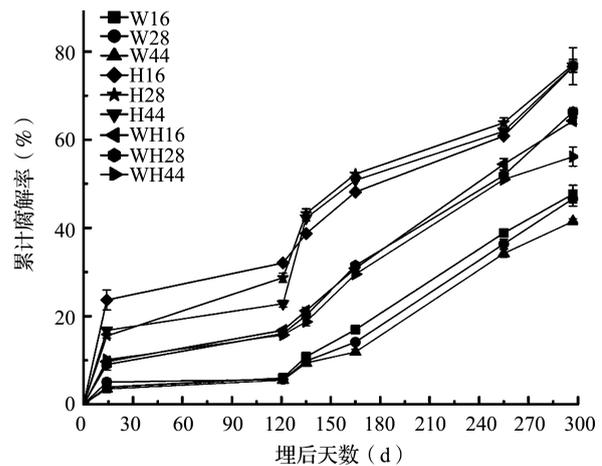


图 2 有机物料累计腐解率

2.2 有机物料阶段腐解速率

各处理的阶段腐解速率变化如图 3 所示, 各处理的阶段腐解速率均表现出先下降再升高再下降的趋势, 毛叶苕子、混合物料腐解速率在 0 ~ 14 d 达最大, 分别平均为 1.33、0.69 % · d⁻¹, 麦秆腐解速率在 122 ~ 135 d 达最大, 为 0.31 % · d⁻¹。W16、W28、W44、H16、H28、H44、WH16、WH28、WH44 处理的腐解速率 0 ~ 14 d 分别为 0.28、0.36、0.25、1.69、1.11、1.20、0.69、0.65、0.72 % · d⁻¹, 表现为毛叶苕子 > 混合物料 > 麦秆。

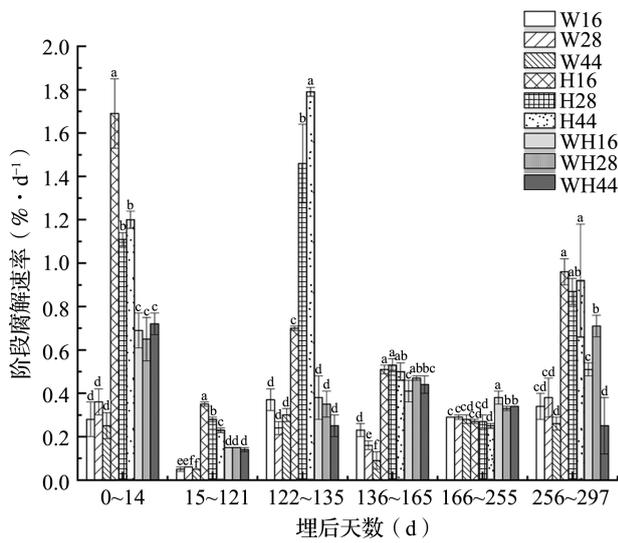


图3 有机物料阶段腐解速率

注: 不同小写字母表示处理间差异有统计学意义 ($P < 0.05$)。

2.3 有机物料与积温的定量关系

将年积温带入双库衰减模型可以得到各处理腐解残留率的拟合值, 将实测值与拟合值进行比较 (图4), 可以看出不同处理有机物料腐解残留率的所有点都在对角线上下波动, MPE、RMSE、nRMSE 分别为 8%、2.47、7.85%, 总体模拟结果较好。

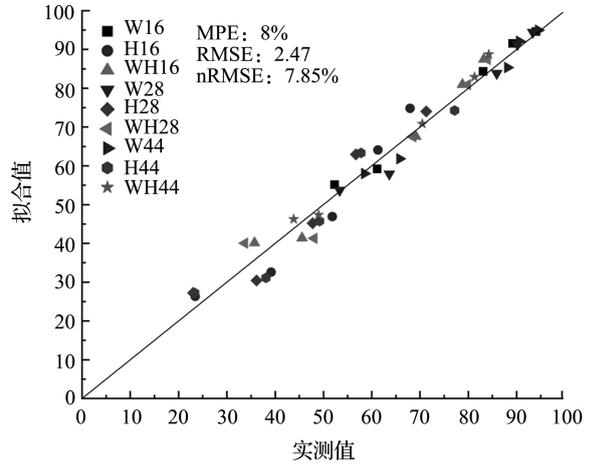


图4 不同处理干物质质量残留率拟合值与预测值的关系

由表2可以看出, 双库指数衰减模型可以拟合物料腐解残留率, 方程的决定系数均 > 0.88 。当积温达 $2514.63\text{ }^\circ\text{C}$ 时 (即试验 297 d 时), 麦秆易分解和难分解部分各占 50% 左右, 易分解部分的平均周转积温为 $1000\text{ }^\circ\text{C}$; 毛叶苕子易分解部分的比例接近 70%, 平均周转积温为 $250\text{ }^\circ\text{C}$, 绿肥的易分解部分比麦秆高约 40%, 平均周转积温低约 $750\text{ }^\circ\text{C}$; 混合物料的易分解部分占总质量的 55% 以上, 平均周转积温为 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 。

表2 不同有机物料质量拟合参数

物料类型	装袋量 (g)	处理	a (%)	b (%)	k ($\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	1/k ($\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	R ²	腐殖化系数 (%)
W	16	W16	48.823h	51.177b	0.001c	1000c	0.984	53.55
	28	W28	50.369g	49.631c	0.001c	1000c	0.973	52.08
	44	W44	45.699i	54.301a	0.001c	1000c	0.984	56.53
H	16	H16	67.482c	32.518g	0.004a	250a	0.882	32.52
	28	H28	69.627a	30.373i	0.004a	250a	0.917	30.37
	44	H44	68.934b	31.066h	0.004a	250a	0.899	31.07
WH	16	WH16	60.256e	39.744e	0.002b	500b	0.953	39.89
	28	WH28	60.346d	39.654f	0.002b	500b	0.946	39.80
	44	WH44	54.116f	45.884d	0.002b	500b	0.952	46.01

双因素方差分析

物料类型 (T)	**	**	NS	*
装袋量 (C)	**	**	NS	NS
T × C	**	**	NS	NS

注: 不同小写字母表示处理间差异有统计学意义 ($P < 0.05$)。下同。* 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$, ns 表示 $P > 0.05$ 。

麦秆、毛叶苕子、混合物料的易分解部分所占比例 (a%) 中毛叶苕子最高, 麦秆最低; 难分解部分所占比例 (b%) 中麦秆最高, 毛叶苕子最低; 易分解部分腐解速率常数 (k) 中毛叶苕子最高,

麦秆最低; 各处理间差异均达显著水平。

本试验地一年内 $> 0\text{ }^\circ\text{C}$ 积温约为 $3022.71\text{ }^\circ\text{C}$, 代入公式 (2) 中各有机物料的积温方程, 可以得到各有机物料的腐殖化系数, 麦秆的腐殖化系数约为

50%，毛叶苕子的腐殖化系数约为 30%，混合物料的腐殖化系数约为 40%。

双因素方差分析结果表明，不同装袋量和物料类型及二者的交互作用对易、难分解比例的影响均达到极显著水平 ($P < 0.01$) (表 3)，物料类型对平均周转积温的影响达到显著差异，其余均差异不显著。

表 3 麦秆和毛叶苕子混合效应分析

处理	a (%)			1/k (°C)		
	OBS	EXP	RME	OBS	EXP	RME
WH16	60.26	53.20	0.19b	500.00	333.33	0.5a
WH28	60.35	52.45	0.21a	500.00	500.00	0.0b
WH44	54.12	49.83	0.11c	500.00	500.00	0.0b

2.4 有机物料混合效应分析

由表 3 可知，有机物料混合后有提高干物质质量易分解比例的趋势。物料混合处理干质量易分解比例的观测值比预测值显著提高了 8% ~ 15%，物料混合效应值均 > 0 ，说明物料混合具有协同效应，WH16、WH28、WH44 处理的混合效应值中 WH28 处理最大，显著高于 WH16、WH44 处理，分别高 9.50%、47.62%。物料混合有提高平均周转积温的趋势。W16 处理平均周转积温的观测值比预测值显著提高了 50.15%，W16 处理的混合效应值 > 0 ，其余均差异不显著。

3 讨论

3.1 不同有机物料还田腐解规律

本研究麦秆、毛叶苕子、混合物料腐解规律均呈现前期快 - 中期慢 - 后期加快的特点，0 ~ 14 d 为快速腐解期，15 ~ 122 d 为慢速腐解期，123 ~ 297 d 为加快腐解期，这与 Ferreira 等^[26]的研究结果一致。这可能的原因是腐解前期，秸秆富含的一部分氨基酸和多糖等可溶性有机物通过土壤微生物、动物活动及淋溶作用迅速降低，释放矿质养分的同时秸秆质量迅速降低；随着腐解时间的推进，进入慢速腐解期，此时期处于越冬期，降水少、温度低，发生冻融作用，土壤微生物活性弱，降低了可溶性有机物的转化，导致腐解速率减慢；随着腐解的进行，进入加速腐解时期，此时期温度升高，降水增加，土壤微生物活性增强，剩余的可溶性有机物加速腐解，导致秸秆中难分解物质（纤

维素、木质素）所占比例增大，土壤中的微生物及动物活动受限，活性降低，与腐解前期相比，腐解速率缓慢^[27-29]。相较于武际等^[30]的研究，本研究腐解时间长，可能的原因是青海地区年平均温度为 5.9℃，年平均降水量为 367.5 mm，温度相对较低，降水较少，微生物活性减弱，不利于秸秆腐解^[31]。

有机物料的碳氮比 (C/N) 是影响有机物料腐解的重要因素，有机物料的 C/N 为 25:1 时，有利于微生物分解利用，进而促进有机物料的分解，C/N 过高或过低均不利于有机物料的腐解。本研究结果表明，混合物料的 C/N 为 24:1，毛叶苕子的 C/N 为 11:1，麦秆的 C/N 为 66:1，不同的腐解时期累计腐解率均表现为毛叶苕子 $>$ 混合物料 $>$ 麦秆，这与前人的研究结果不同^[13]，可能的原因是土壤微生物更倾向利用土壤中的无机氮源，而有机物料腐解释放有机氮源，不利于微生物的利用，导致腐解缓慢。有研究表明，添加尿素有利于有机物料的腐解^[32]。

3.2 不同装袋量下秸秆腐解规律

有研究表明，秸秆还田量与腐解率呈现负相关^[30]。胡宏祥等^[33]研究表明，油菜秸秆随秸秆还田量增加，腐解速率降低，表现为全量还田的秸秆腐解速率 $<$ 2/3 量还田秸秆腐解速率 $<$ 1/2 量还田秸秆腐解速率 $<$ 1/3 量还田秸秆腐解速率。周东兴等^[34]的研究结果表明秸秆还田量为 60 g 时，秸秆累积腐解率最高，达到 56.05%，且养分释放最快，而秸秆还田量为 20 g 腐解最慢。本研究中，麦秆的累计腐解率随还田量的增加有降低的趋势；毛叶苕子、混合物料的累计腐解率随还田量的增加先升高后降低，可能的原因是相对于麦秆，毛叶苕子含有的易分解物质（如糖类、氨基酸等）较多，前期快速腐解，至腐解后期，还田量过少导致微生物可利用碳源减少，腐解速率慢；还田量过多导致单位接触面积少或达到微生物腐解秸秆的上限^[15]，微生物利用不充分，腐解速率慢。

3.3 有机物料腐解的数学模拟及模型评价

双库指数衰减模型可以很好地拟合腐解残留率的变化，其系数可以较好地表征易分解物质所占比例及难分解物质所占比例的转化积温。本研究结果表明，麦秆、毛叶苕子、混合物料的易分解物质所占比例分别约为 50%、70%、55%。表现为毛叶苕子 $>$ 混合物料 $>$ 麦秆，可能是一方面毛叶苕子易分解物质主要包括的氨基酸、多糖、有机酸等物质

的比例高,更有利于微生物利用,进而促进有机物料腐解;另一方面本试验中毛叶苕子的木质素含量为2.40%,麦秆的木质素含量为21.68%,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^[11, 35],且木质素等稳定化合物需要数十年才可被分解^[36],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。本研究中模型对于不同装袋量下有机物料腐解残留率模拟较准确,模拟偏差基本控制在10%以内,nRMSE低于10%。因此,只有更好地理解模型的能力和局限性,才能更合理地使用模型^[37]。

4 结论

本研究通过尼龙网带填埋法研究了小麦秸秆、毛叶苕子及其混合物料的腐解规律,所得主要结论如下:

(1) 各处理有机物料的腐解呈现前期快-中期慢-后期加快的变化规律,腐解第0~14 d为快速腐解期,15~122 d为慢速腐解期,123~297 d为加快腐解期,不同腐解时期累计腐解率均表现为毛叶苕子>混合物料>麦秆。毛叶苕子、混合物料的累计腐解率随装袋量的增加先升高后降低,麦秆的累计腐解率随装袋量的增加有逐渐降低的趋势。至腐解结束,麦秆、毛叶苕子、混合物料的累计腐解率平均分别为45.27%、76.75%、62.25%。

(2) 双库指数衰减模型能较好地模拟物料腐解过程中腐解残留率与积温的关系,方程的决定系数均>0.88。麦秆的腐殖化系数约为50%,毛叶苕子的腐殖化系数约为30%,混合物料的腐殖化系数约为40%。预测腐解残留率与实测腐解残留率的MPE、RMSE、nRMSE分别为8%、2.47%、7.85%。

(3) 麦秆和毛叶苕子混合显著提高了干物质易分解比例,WH16、WH28、WH44处理3种混合物料分别比预测值提高了13.27%、15.06%、8.61%。麦秆与毛叶苕子混合具有协同效应,表现为WH28>WH16>WH44。

参考文献:

[1] 宋大利,侯胜鹏,王秀斌,等. 中国秸秆养分资源数量及替代化肥潜力[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 1-21.
[2] 牛新胜,巨晓棠. 我国有机肥料资源及利用[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1462-1479.

[3] 田慎重,郭洪海,董晓霞,等. 耕作方式转变和秸秆还田对土壤活性有机碳的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(S2): 39-45.
[4] 黄运湘,王改兰,冯跃华,等. 长期定位试验条件下红壤性水稻土有机质的变化[J]. 土壤通报, 2005, 36(2): 181-184.
[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[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(4): 416-419.
[6] Cai A, Liang G, Zhang X, et al. Long-term straw decomposition in agro-ecosystems described by a unified three-exponentiation equation with thermal time [J]. Science of the Total Environment, 2018, 636: 699-708.
[7] Frøseth R B, Bleken M A. Effect of low temperature and soil type on the decomposition rate of soil organic carbon and clover leaves, and related priming effect [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 80: 156-166.
[8] Zhang D, Hui D, Luo Y, et al. Rates of litter decomposition in terrestrial ecosystems: global patterns and controlling factors [J]. Journal of Plant Ecology, 2008, 1(2): 85-93.
[9] 马想,徐明岗,赵惠丽,等. 我国典型农田土壤中有有机物料腐解特征及驱动因子[J]. 中国农业科学, 2019, 52(9): 1564-1573.
[10] Prescott C E. Litter decomposition: what controls it and how can we alter it to sequester more carbon in forest soils? [J]. Biogeochemistry, 2010, 101: 133-149.
[11] Wang X, Sun B, Mao J, 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.
[12] Carvalho A M, Bustamante M M C, Alcântara F A D E, et al. Characterization by solid-state CPMAS ¹³C NMR spectroscopy of decomposing plant residues in conventional and no-tillage systems in Central Brazil [J]. Soil and Tillage Research, 2009, 102(1): 144-150.
[13] 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.
[14] 谢帅,梁鑫宇,宋明丹,等. 青海高原小麦秸秆-毛叶苕子混合腐解特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(4): 754-762.
[15] 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.
[16] 王娜,李萍,宗毓铮,等. 不同还田方式下北方旱作小麦秸秆腐解规律研究[J]. 核农学报, 2020, 34(7): 1613-1619.
[17] 李正鹏,宋明丹,李飞,等. 青藏高原小麦秸秆和箭筈豌豆混合腐解规律和养分释放特征[J]. 农业工程学报, 2021, 37(11): 104-111.
[18] 张志毅,何剑,范先鹏,等. 稻麦轮作制还田秸秆腐解和

- 养分释放特征 [J]. 中国土壤与肥料, 2022 (8): 221-230.
- [19] 韩梅, 胥婷婷, 曹卫东. 青海高原长期复种绿肥毛叶苕子对土壤供氮能力的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36 (6): 104-109.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30-34.
- [21] Zhang Y, Zheng X, Xu X, et al. Straw return promoted the simultaneous elimination of sulfamethoxazole and related antibiotic resistance genes in the paddy soil [J]. Science of The Total Environment, 2022, 806: 150525.
- [22] Liu H L, Yang J Y, Drury C F, et al. Using the DSSAT-CERES-Maize model to simulate crop yield and nitrogen cycling in fields under long-term continuous maize production [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2011, 89 (3): 313-328.
- [23] Jamieson P D, Porter J R, Goudriaan J, et al. A comparison of the models AFRCWHEAT2, CERES-Wheat, Sirius, SUCROS2 and SWHEAT with measurements from wheat grown under drought [J]. Field Crops Research, 1998, 55 (1): 23-44.
- [24] Hoorens B, Aerts R, Stroetenga M. Does initial litter chemistry explain litter mixture effects on decomposition? [J]. Oecologia, 2003, 137: 578-586.
- [25] Zhou G, Cao W, Bai J, et al. Non-additive responses of soil C and N to rice straw and hairy vetch (*Vicia villosa* Roth L.) mixtures in a paddy soil [J]. Plant and Soil, 2019, 436: 229-244.
- [26] Ferreira P A A, Girotto E, Trentin G, et al. Biomass decomposition and nutrient release from black oat and hairy vetch residues deposited in a vineyard [J]. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 2014, 38: 1621-1632.
- [27] Tveit A, Schwacke R, Svenning M M, et al. Organic carbon transformations in high-Arctic peat soils: key functions and microorganisms [J]. The ISME Journal, 2013, 7 (2): 299-311.
- [28] Purahong W, Kapturska D, Pecyna M J, et al. Effects of forest management practices in temperate beech forests on bacterial and fungal communities involved in leaf litter degradation [J]. Microbial Ecology, 2015, 69: 905-913.
- [29] Preston C M, Nault J R, Trofymow J A, et al. Chemical changes during 6 years of decomposition of 11 litters in some Canadian forest sites. Part 1. Elemental composition, tannins, phenolics, and proximate fractions [J]. Ecosystems, 2009, 12: 1053-1077.
- [30] 武际, 郭熙盛, 鲁剑巍, 等. 不同水稻栽培模式下小麦秸秆腐解特征及对土壤生物学特性和养分状况的影响 [J]. 生态学报, 2013, 33 (2): 565-575.
- [31] Feng X, Simpson M J. Temperature and substrate controls on microbial phospholipid fatty acid composition during incubation of grassland soils contrasting in organic matter quality [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2009, 41 (4): 804-812.
- [32] 李晓韦, 韩上, 雷之萌, 等. 氮素形态对油菜秸秆腐解及养分释放规律的影响 [J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2019, 27 (5): 717-725.
- [33] 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.
- [34] 周东兴, 王广栋, 邬欣慧, 等. 不同还田量对秸秆养分释放规律及微生物功能多样性的影响 [J]. 土壤通报, 2018, 49 (4): 848-855.
- [35] Preston C M, Bhatti J S, Flanagan L B, et al. Stocks, chemistry, and sensitivity to climate change of dead organic matter along the Canadian boreal forest transect case study [J]. Climatic Change, 2006, 74 (1-3): 223-251.
- [36] Schmidt M W I, Torn M S, Abiven S, et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property [J]. Nature, 2011, 478 (7367): 49-56.
- [37] 宋明丹. 基于气象不确定性的关中冬小麦产量预测和水氮管理优化 [D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2017.

Characteristics of mixed decay of wheat straw and hairy vetch under different bagging volumes

LIU Ting¹, SONG Ming-dan^{1, 2}, HAN Mei¹, LIANG Xin-yu¹, LI Zheng-peng^{1*} (1. College of Agricultural and Forestry Sciences, Qinghai University, Xining Qinghai 810016; 2. National Agricultural Environment Observation Experiment Station, Xining Qinghai 810016)

Abstract: It is important to grasp the decomposition process of wheat straw and hairy vetch mixed under different bag filling amounts for straw return and soil fertilization in the agricultural area of eastern Qinghai. In this study, two factors, material type and bagging volume were set up by nylon bagging experiment with a total of nine treatments in completely randomized combinations. The decomposition characteristics of the three material types at different bagging levels were investigated at three levels. The three material types were straw (W), hairy camelina (H) and their mixed material (WH), and three bagging level were 16, 28 and 44 g. The results showed that the decomposition of organic materials under each treatment showed a change pattern of fast in the early stage-slow in the middle stage-and faster in the late stage, and the material type had a significant effect on the cumulative decomposition rate until the end of decomposition ($P < 0.05$), and the cumulative decomposition rates of wheat straw, hairy vetch and mixed materials were 45.27%, 76.75% and 62.25% on average, respectively, showing that hairy vetch > mixed materials > straw. The bagging volume had a significant effect on the cumulative decay rate ($P < 0.05$), with the average cumulative decay rates of 62.84%, 63.32% and 58.11% at bagging

volumes of 16, 28 and 44 g, respectively, with the fastest decay at bagging volume of 28 g. The two-bank exponential decay model could better fit the relationship between the decay residue rate and the accumulated temperature during material decay, and the coefficients of determination of the equations were all greater than 0.88. The MPE, RMSE and nRMSE of the predicted and measured decay residue rates were 8%, 2.47 and 7.85%, respectively. The average humification coefficients of wheat straw, hairy vetch and mixture were 54.05%, 31.32% and 41.90%, respectively. Material mixing significantly increased the percentage of easy decomposition of dry matter mass ($P < 0.01$), and the values of mixing effect increased by 13.27%, 15.06% and 8.61% at bagging volumes of 16, 28 and 44 g, respectively, with the highest mixing effect at bagging volume of 28 g. The material mixing significantly increased the percentage of dry matter easy to decompose, and the decomposition rate was accelerated. The mixing of wheat straw and hairy vetch accelerated the decomposition of materials, and the best effect was achieved when the bagging volume was 28 g (equivalent to 5490 and 3393 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ of wheat straw and hairy vetch returned to the field, respectively). The results could provide theoretical and technical guidance for straw return to the field in the agricultural area of eastern Qinghai.

Key words: organic material; decay pattern; double reservoir exponential decay model; mixed effect; model evaluation