

煤矿复垦区不同有机物料的分解特征

陈兵^{1,2}, 王小利^{1*}, 徐明岗^{2*}, 李然², 李建华³, 靳东升³, 段英华², 孙楠²

(1 贵州大学农学院, 贵州贵阳 550025; 2 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; 3 山西省农业科学院农业环境与资源研究所, 山西太原 030000)

摘要:【目的】研究不同有机物料在矿区复垦土壤中的分解速率及养分释放特征, 为合理利用有机资源培肥矿区复垦土壤提供科学依据。【方法】在山西黄土丘陵区矿区复垦长期试验点进行大田填埋分解试验。采用尼龙网袋法, 将供试的 4 种有机物料小麦秸秆、玉米秸秆、牛粪和猪粪烘干后过 2 mm 筛, 均按等有机碳量 (8 g) 称取后装入尼龙网袋埋入试验地 15 cm 深。在填埋后的第 12、23、55、218、280、365 天采样, 分析 4 种有机物料的干物质残留量和氮、磷、钾及半纤维素、纤维素、木质素含量, 计算 C/N 值和木质素 (Lignin)/N 值。

【结果】秸秆和粪肥在矿区复垦土壤中的分解速率均在第 12 天达到最大, 然后迅速下降, 分解第 365 天时, 小麦秸秆、玉米秸秆、牛粪和猪粪的质量残留率依次为 49.8%、55.1%、79.2% 和 54.0%, 有机碳残留率依次为 48.8%、53.4%、63.9% 和 51.8%。供试有机物料的养分释放率存在差异, 在最初分解的第 23 天, 玉米秸秆的氮、磷养分出现了明显富集, 氮、磷养分残留率分别达到了 131.0% 和 152.7%, 小麦秸秆、牛粪和猪粪的氮素残留率依次为 93.0%、81.3% 和 67.8%, 磷素的残留率依次为 92.5%、98.8% 和 84.3%, 分解第 365 天时, 小麦秸秆中养分释放速率大小表现为钾 > 磷 > 氮, 其他 3 个物料中养分释放速率大小均表现为钾 > 氮 > 磷。从整个分解过程来看, 玉米秸秆中氮素和磷素在矿区复垦土壤中表现出先富集再释放的模式, 其他 3 个物料中氮素和磷素均表现为直接释放模式。采用地积温方程能较好地拟合有机物料的分解过程, 由方程可知, 秸秆和粪肥的分解速率常数 (K) 大小顺序为猪粪 > 小麦秸秆 > 玉米秸秆 > 牛粪。有机物料的分解速率与养分和木质素等成分的含量相关, 全磷、半纤维素含量越高分解越快, 木质素含量、C/N 和 Lignin/N 越高分解越慢。【结论】秸秆和粪肥在山西矿区复垦土壤中的分解速率在填埋后第 12 天达到最大值, 之后分解速率减缓。与秸秆相比, 粪肥的有机碳残留率较高, 氮、磷养分释放快, 其中以牛粪的分解速率最慢, 有机碳残留率最高, 因此, 牛粪可作为矿区复垦土壤培肥的首选有机物料。

关键词: 有机物料; 分解残留率; 养分释放; 矿区复垦土壤

Decomposition characteristics of different organic materials in coal mine reclamation area

CHEN Bing^{1,2}, WANG Xiao-li^{1*}, XU Ming-gang^{2*}, LI Ran², LI Jian-hua³, JIN Dong-sheng³, DUAN Ying-hua², SUN Nan²
(1 College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/National Engineering Laboratory for Improving of Arable Land, Beijing 100081, China; 3 Institute of Agricultural Environment and Resources, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030000, China)

Abstract: 【Objectives】The decomposition processes and nutrient release characteristics of different organic materials were studied for the reasonable use of organic resources in the reclamation of soil in mining areas.

【Methods】There reclamation soil was located in loess hilly mining area, Shanxi Province. Four kinds of organic materials were used in a decomposing experiment, they were wheat straw (WS), maize straw (MS), cow manure (CM) and pig manure (PM). All the tested materials were air-dried and cut into 2 mm pieces. Each

收稿日期: 2019-11-29 接受日期: 2020-01-15

基金项目: 国家重点联合基金项目 (U1710255); 国家自然科学基金项目 (31860160)。

联系方式: 陈兵 E-mail: 916578728@qq.com

* 通信作者 王小利 E-mail: xlwang@gzu.edu.cn; 徐明岗 E-mail: xuminggang@caas.cn

material (containing 8 g of organic carbon) was loaded into a nylon net bag, then buried 15 cm deep into the soil, and 36 bags were prepared for each material. The sample bags were collected on the 12, 23, 55, 218, 280 and 365 days since buried, the dry matter residue and nutrient contents were measured. 【 **Results** 】 All the tested straws and manures decomposed rapidly in the first 12 days and then dropped rapidly. After 365 days' decomposition, the dry matter residual rates of WS, MS, CM and PM were 49.8%, 55.1%, 79.2% and 54.0%, organic carbon residual rates were 48.8%, 53.4%, 63.9% and 51.8%. The release of nutrients from straws and manures were varied. The N and P were enriched in the first 23 days, the residual rates of N and P in 23 days reached 131.0% and 152.7% in MS. The N residual rates of WS, CM and PM were 93.0%, 81.3% and 67.8%, and the P residual rates were 92.5%, 98.8% and 84.3%, respectively. After 365 days, the nutrient release rate in WS was $K > P > N$, and in MS, CM and PM were $K > N > P$. During the whole decomposition period, the N and P in the MS were enriched first, and then diluted, while in WS, CM and PM were continuously diluted. The order of decomposition rate constants (K) were $PM > WS > MS > CM$. The decomposition rates increased with the increase of P and hemicellulose contents, while decreased with the increase of lignin content, C/N and lignin/N. 【 **Conclusions** 】 The decomposition rates of straw and manure in reclaimed soil in Shanxi mining area reached the maximum on the 12th day and then slowed down. Compared with straw, manures have a higher organic carbon residual and a faster release of N and P. Cow manure has the lowest decomposition rate and the highest organic carbon residual rate, so it is preferred organic material for the fertilizing of reclaimed soil in mining areas.

Key words: organic materials; fraction of carbon remaining; nutrient release; mine reclaimed soil

由于煤炭资源的大力开发利用, 导致矿区耕地造成了大面积的塌陷^[1], 塌陷后的土壤在复垦过程中扰动较大, 使得复垦后的土壤养分含量低及微生物数量少、活性差等, 致使土壤肥力低下^[2-3]。快速提高复垦土壤肥力最有效的方法就是施入外源养分^[4-5]。我国有机物料资源丰富, 2015 年产量约 57 亿 t, 其中畜禽粪尿约 38 亿 t, 养分资源量 (N、P₂O₅ 和 K₂O) 约为 5000 万 t^[6]; 秸秆约 7.2 亿 t, 养分资源量 (N、P₂O₅ 和 K₂O) 约为 2000 万 t^[7]。若能充分利用好这些有机物料, 既能快速提升土壤有机质含量, 培肥土壤^[8-9], 又同时解决了有机废弃物对环境的污染^[10]。因此, 研究不同有机物料的分解及养分释放特征对有机资源合理利用和矿区复垦土壤培肥具有重要的指导意义。

关于有机物料在土壤中的分解前人进行了大量研究, 如介晓磊等^[11]在暖温带区的砂土中添加 5 种有机物料的研究发现, 秸秆的腐解速率显著高于粪肥, 腐解速率大小表现为玉米秸秆 > 小麦秸秆 > 鸡粪 > 牛粪 > 猪粪; 李逢雨等^[12]在亚热带湿润气候区发现不同秸秆的腐解均呈先快后慢的特点; 马想等^[13]研究我国典型农田土壤中有机物料的腐解残留率变化发现, 粪肥残留率和其有机碳库中稳定碳库比例明显高于秸秆, 且其研究表明物料性质在有机物料腐解过程中的贡献率为 28%, 比气候因素的贡献率多 8%。前人对于有机物料的养分释放特征也进行了

大量研究, 如王允青等^[14]研究发现作物秸秆中不同养分释放速率大小表现为磷 > 氮 > 钾; 陈尚洪等^[15]研究认为, 作物秸秆腐解过程中不同养分的释放速率表现为钾 > 磷 > 氮。李昌明等^[16]研究认为秸秆在分解过程中的养分释放率为 $K > P \approx N$, 且氮、磷在释放过程中表现出了富集-释放模式, 钾为直接释放模式。目前, 有机物料在农田土壤中的分解研究已经积累了大量的文献资料, 但是在矿区复垦土壤中的分解研究相对比较少, 且物料还田后多集中在测定土壤有机碳、氮的变化^[17-18], 而对于纯有机物料在矿区复垦土壤中的分解速率和养分释放特征等问题尚不清楚。本研究以山西省襄垣县西山底村长期定位试验为平台, 采用尼龙网袋法进行为期一年的有机物料填埋分解试验, 分析小麦秸秆、玉米秸秆、牛粪、猪粪的分解速率及养分释放特征, 以期为合理利用有机资源培肥矿区复垦土壤提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料

试验设在山西省长治市襄垣县王桥镇西山底村, 位于东 113°00'、北纬 36°27', 该地区属暖温带大陆性季风气候, 年平均气温 9.5℃, 年均降水量 532.8 mm, 且降雨多集中在 7—9 月份, 年均蒸发量达 1768.1 mm, 无霜期约 169 天。供试土壤的基本理

化性质为：有机质 16.63 g/kg、全氮 0.87 g/kg、全磷 0.51 g/kg、有效磷 7.25 mg/kg、速效钾 155 mg/kg、pH 为 7.98。供试的材料全部采自于该区域，分别为小麦秸秆、玉米秸秆、牛粪（腐熟的）和猪粪（新鲜的），将每种有机物料风干后挑出杂物，确保每种物料的统一性。供试材料的初始养分含量见表 1。

1.2 试验设计

试验采用尼龙网袋法^[19]，尼龙网袋规格为长 25 cm、宽 15 cm，孔径为 38 μm。选取此孔径是因为它既有利于土壤微生物自由出入和隔绝土壤动物侵入，又可保持袋内透水透气的性能，使试验结果免受干扰，且分解条件较接近田间实际。4 种有机物料不调节碳氮比，不与土壤混合的方式可确保物料的统一性，以准确观测有机物料的分解残留状况。在 60℃ 下烘干，磨碎过 2 mm 筛后，直接按等有机碳量 8 g 装入尼龙网袋中（表 2），各处理均称 24 袋。于 2018 年 9 月 12 日埋入试验地中，填埋表土层深度 15 cm 处。并在试验地填埋 3 个地温仪（HOBOS-TMB-M006）实测土壤温度（图 1），填埋深度与尼龙网袋深度一致。在填埋试验区不种植作物，使其处于撂荒状态。试验分 6 次破坏性取样，根据试验区

地积温累积速率，分别于填埋后的第 12、23、55、218、280、365 天进行采样。最后一次取样时间为 2019 年 9 月 18 日。取样品时，各处理均取出 4 袋。取完样品后，清理干净尼龙袋外面的泥土并称取重量，然后取部分残留物料样品在 60℃ 下烘干测定含水量。

1.3 测定项目及计算方法

有机碳采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法测定，氮磷钾采用浓硫酸-双氧水一次性消煮，用凯氏定氮法测定全氮含量，用钼锑抗比色法测定全磷含量，用火焰光度法测定全钾含量^[20]。采用范氏法^[21]测定纤维素、木质素和半纤维素含量。

有机物料分解残留率采用一级动力学方程进行模拟^[22]：

$$Ht = H_0 + H_1 e^{-Kt} \quad (1)$$

式中： Ht — t 积温条件下 ($0 > \text{℃}$) 有机物料残留率 (%)； H_0 — t 积温条件下不易分解的量 (%)； H_1 — t 积温条件下易分解的量 (%)； K —分解速率常数。

采用 Excel 2010 进行试验数据统计并作图，用 SPSS Statistics 17.0 软件进行数据的统计分析，并采用 Sigmaplot 12.5 进行方程拟合。

表 1 有机物料初始成分含量 (g/kg)

Table 1 Initial composition of the tested organic materials

有机物料 Organic material	有机碳 Organic C	全氮 Total N	全磷 Total P	全钾 Total K	半纤维素 Hemicellulose	纤维素 Cellulose	木质素 Lignin
小麦秸秆 Wheat straw	448.8 ± 12.11 a	6.08 ± 0.01 d	0.79 ± 0.01 c	22.92 ± 0.03 a	311.9 ± 2.06 a	388.15 ± 2.21 a	72.36 ± 0.15 a
玉米秸秆 Maize straw	440.8 ± 4.73 a	8.54 ± 0.08 c	0.67 ± 0.01 d	8.68 ± 0.01 d	298.2 ± 1.77 b	381.33 ± 5.89 b	57.25 ± 0.29 c
牛粪 Cow manure	225.2 ± 1.90 c	11.31 ± 0.06 b	2.38 ± 0.00 b	15.56 ± 0.02 c	102.0 ± 0.52 d	83.05 ± 0.35 c	59.74 ± 0.26 b
猪粪 Pig manure	299.7 ± 0.30 b	29.95 ± 0.39 a	19.92 ± 0.04 a	17.78 ± 0.01 b	226.8 ± 0.99 c	87.62 ± 0.65 c	22.47 ± 0.15 d

注 (Note)：同列数据后不同小写字母表示不同物料间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters in the same column indicate significant difference among different materials ($P < 0.05$).

表 2 有机物料养分含量及用量

Table 2 Nutrient content and application amount of organic materials

有机物料 Organic material	有机碳 (g/kg) Organic C	全氮 (g/kg) Total N	碳氮比 C/N	碳投入量 (g) C input	有机物料用量 (g/bag) Amount of organic material
小麦秸秆 Wheat straw	448.8	6.1	73.8	8.0	18.0
玉米秸秆 Maize straw	440.8	8.5	51.6	8.0	18.3
牛粪 Cow manure	225.2	11.3	19.9	8.0	36.0
猪粪 Pig manure	299.7	30.0	10.0	8.0	27.0

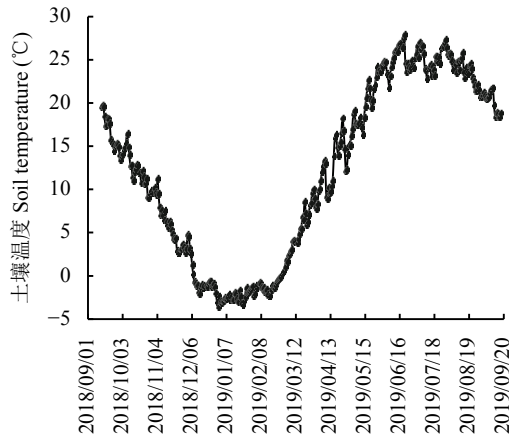


图1 有机物料腐解过程中的土壤温度变化

Fig. 1 Soil temperature changes during decomposition of organic materials

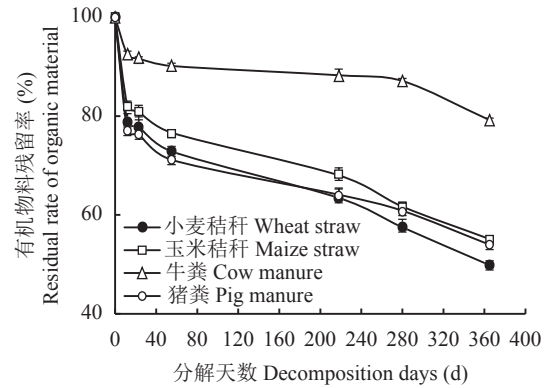


图2 有机物料质量残留率随分解时间的变化

Fig. 2 Change of residual rate of the tested organic materials with decomposition days

2 结果与分析

2.1 有机物料的分解特征

4种有机物料的质量残留率变化具有阶段性(图2)。在埋入土壤后的第12天,小麦秸秆、玉米秸秆、牛粪(腐熟的)和猪粪(新鲜的)的质量残留率分别为78.8%、82.1%、92.5%和77.1%,分解较快。其后的第12~218天内,各物料分解速率进入到缓慢阶段,第218天时,质量残留率分别为63.5%、68.0%、88.3%、64.1%。之后又开始加快分解,分解第365天时,小麦秸秆、玉米秸秆、牛粪和猪粪的质量残留率依次为49.8%、55.1%、79.2%和54.0%。其中牛粪的质量残留率最高,小麦秸秆的质量残留率最低;猪粪与牛粪的质量残留率差异显著($P < 0.05$)。

利用一级动力学方程拟合4种有机物料的质量残留率与土壤积温的变化关系,小麦秸秆、玉米秸秆和猪粪拟合度达到极显著水平($P < 0.01$),牛粪达到显著水平。4种有机物料的分解速率常数从高到低依次为猪粪>小麦秸秆>玉米秸秆>牛粪,达到平

衡值时的物料质量残留率牛粪>猪粪>玉米秸秆>小麦秸秆(表3)。

2.2 有机物料碳、氮、磷和钾养分的释放

4种有机物料碳释放与物料质量残留率变化规律相似,分解第365天时,小麦、玉米秸秆有机碳的残留率分别为48.8%和53.4%,猪粪有机碳残留率为51.8%,而牛粪有机碳残留率高达63.9%,明显高于秸秆和猪粪。玉米秸秆氮、磷养分的释放滞后于碳素的释放,因而其含量在腐解初期表现出先增加后降低的过程,而小麦秸秆、牛粪和猪粪氮、磷养分的释放与碳的释放基本同步。钾素的释放快于碳的释放,4种物料的钾含量在分解第23天急剧下降,之后下降减缓(图3)。分解第23天时,玉米秸秆氮、磷养分含量为前一段的131.0%和152.7%,小麦秸秆、牛粪和猪粪氮、磷养分含量依次为前一段的93.0%和92.5%、81.3%和98.8%、67.8%和84.3%;钾素释放速率最快,小麦秸秆、玉米秸秆、牛粪和猪粪钾素残留率分别为12.7%、22.2%、50.5%、17.5%,此时4种物料的养分释放速率大小表现为钾>氮>磷。超过第23天后,钾素释放速率均减慢,基本保持平稳状态,玉米秸秆氮、磷养分

表3 有机物料质量残留率与积温的拟合参数

Table 3 Fitting parameters of mass residual rate and accumulated temperature of organic materials

有机物料 Organic material	拟合方程 Equation	K	R^2	P
小麦秸秆 Wheat straw	$y = 52.56 + 44.09e^{(-0.0012x)}$	0.0012	0.95	0.001
玉米秸秆 Maize straw	$y = 56.92 + 40.13e^{(-0.0011x)}$	0.0011	0.96	0.001
牛粪 Cow manure	$y = 79.72 + 17.40e^{(-0.0006x)}$	0.0006	0.87	0.016
猪粪 Pig manure	$y = 57.99 + 39.50e^{(-0.0018x)}$	0.0018	0.95	0.003

注 (Note): K —分解速率常数 Decay rate constant; R^2 —方程拟合优度 The goodness of fitting of the equation.

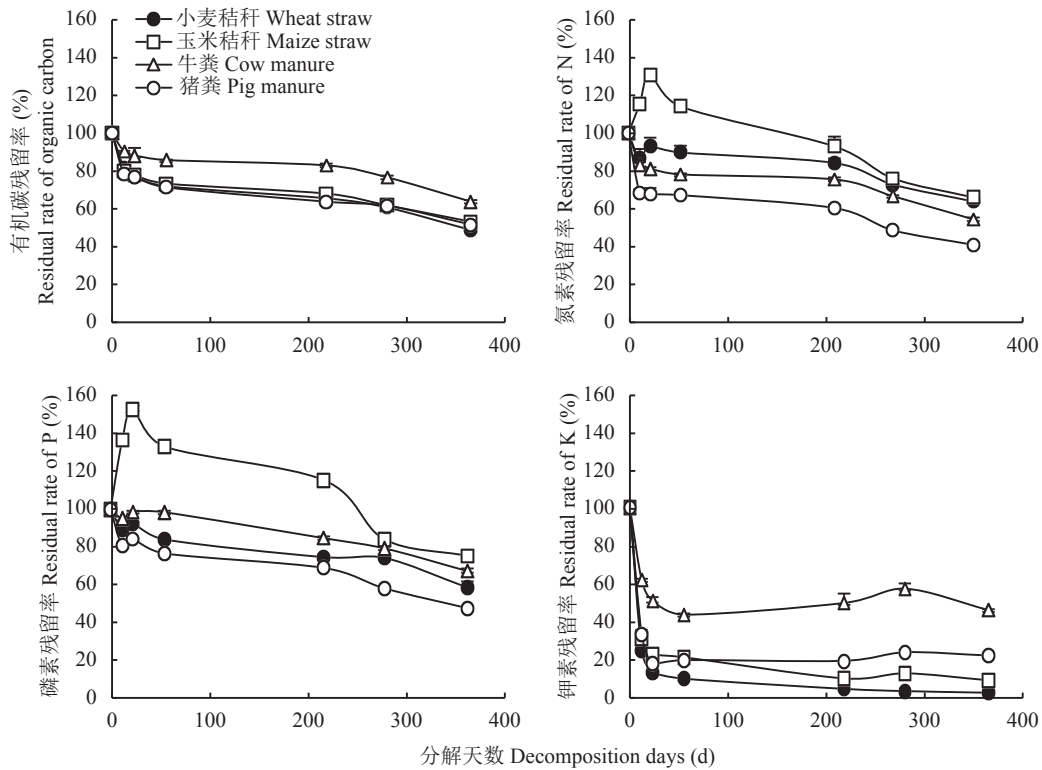


图3 有机物料碳、氮、磷和钾素残留率随分解时间的变化

Fig. 3 Changes of organic C, N, P and K residual rate of organic materials with decomposition days

开始释放, 分解第 365 天时, 玉米秸秆、牛粪和猪粪氮、磷养分残留率依次为 66.0% 和 75.4%、54.5% 和 67.4%、40.9% 和 47.8%, 而全钾残留率依次为 1.8%、45.5% 和 21.4%, 3 种有机物料养分释放速率大小顺序为钾 > 氮 > 磷, 小麦秸秆氮、磷和钾养分残留率分别为 63.9% 和 58.6% 和 8.4%, 小麦秸秆的养分释放速率大小顺序为钾 > 磷 > 氮。

2.3 有机物料木质素、纤维素、半纤维素含量随分解时间的变化

4 种有机物料的半纤维素、纤维素和木质素含量均随分解时间的延长而逐渐降低。分解第 55 天时, 小麦秸秆、玉米秸秆、牛粪和猪粪半纤维素分解了 30.2%、31.3%、11.9% 和 29.9%, 纤维素分解了 25.5%、27.4%、10.9% 和 17.3%, 而木质素仅分解了 14.7%、12.3%、8.6% 和 15.2%, 表明木质素的分解滞后于半纤维素和纤维素。第 55 天后, 牛粪半纤维素和木质素分解速率显著低于秸秆和猪粪, 秸秆纤维素的分解速率显著高于粪肥。分解第 365 天时, 小麦秸秆、玉米秸秆、牛粪和猪粪半纤维素残留率依次为 35.8%、39.9%、67.1% 和 40.1%, 纤维素残留率依次为 37.9%、42.6%、70.7% 和 50.4%, 木质素残留率依次为 60.9%、63.6%、74.5% 和

60.6%, 表明 4 种有机物料的 3 种组分分解速率表现为半纤维素 > 纤维素 > 木质素 (图 4)。

2.4 有机物料 C/N 值和 Lignin/N 随分解时间的变化

从图 5 可见, 秸秆和粪肥的 C/N 和 Lignin/N 值变化不尽相同。在分解第 23 天时, 小麦秸秆的 C/N 值从 73.8 下降到 62.0, 玉米秸秆的 C/N 从 51.6 下降 30.7, 下降速度明显, 分解 23 天后, 小麦秸秆的 C/N 下降速度平缓, 玉米秸秆 C/N 反而有上升趋势。由于牛粪和猪粪的初始 C/N 值不高, 因而变化趋势不明显。小麦秸秆和猪粪的 Lignin/N 值变化趋势相似, 随分解时间延长呈现出先升高后降低再升高现象。牛粪和玉米的 Lignin/N 值随分解时间延长呈先下降后上升的趋势, 这可能与有机物料木质素与氮素在不同时期的分解速率密切相关。

2.5 有机物料分解速率与成分的相关性分析

分析 4 种有机物料分解速率与初始成分的关系, Pearson 检验结果 (表 4) 表明, 有机物料的分解速率与初始的氮、磷含量成正相关, 与初始木质素含量成负相关。不同分解时期的养分质量指标对有机物料分解速率的影响有所不同, 分解前期 (0~12 天或 0~23 天) 分解速率与全磷、半纤维素含

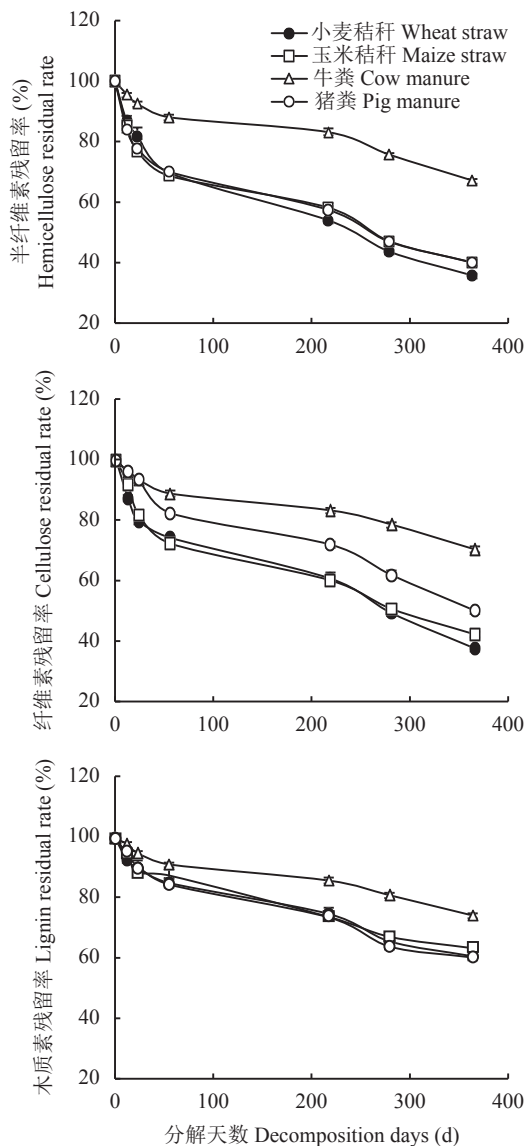


图4 有机物料中纤维素、半纤维素和木质素残留率随时间的变化

Fig. 4 Changes of cellulose, hemicellulose and lignin residual rate of organic materials with decomposition days

量显著正相关, 分解速率与木质素含量显著负相关; 分解后期, 分解速率与氮、磷含量呈显著正相关, 分解速率与木质素、C/N 值、Lignin/N 值呈显著负相关。

3 讨论

在本研究条件下, 4 种有机物料在矿区复垦土壤的分解速率均表现为初期快、后期缓慢, 与前人的结果^[23-24]相似。秸秆和粪肥在前 12 天的分解速率较快, 主要原因是初始有机物料中易分解物质较多, 如氨基酸、有机酸、多糖等可溶性有机物质以及无机养分, 提供了微生物代谢活动所需的大量能源和

养分, 且此阶段, 日平均土壤温度均在 10℃ 以上, 有利于微生物活动。第 12 天后, 有机物料中难溶性有机物质半纤维素、纤维素和木质素等开始被分解, 分解速率有所下降(图 4), 且土壤温度也快速降低, 40~200 天内每日平均土壤温度处于 10℃ 以下, 低温致使微生物活动降低, 进一步减缓了对物料的分解。分解到 218 天后, 正好是全年中降雨量最集中和温度最高的时候。此时的微生物活性最高, 所以有机物料又进入下一个快速分解阶段。表 3 的结果显示, 除牛粪外有机物料的分解过程与积温的拟合优度达到 95% 以上。因此, 在初期有机物料中的易分解有机物分解后, 较难利用有机碳的分解速率主要受到土壤积温的影响。

除积温外, 有机物料的性质也影响着物料的分解速率。在本试验条件下, 秸秆和粪肥的分解速率常数表现为猪粪 > 小麦秸秆 > 玉米秸秆 > 牛粪, 有机碳残留率为牛粪 > 玉米秸秆 > 猪粪 > 小麦秸秆, 与部分学者的结论^[11, 13, 25]不太一致, 王金洲等^[25]研究不同有机物料的有机碳残留率, 结果总体呈有机肥 ≈ 根茬 > 秸秆 > 绿肥; 而马想等^[13]认为秸秆在我国典型农田土壤中的腐解速率显著高于新鲜粪肥, 出现这些差异的原因与物料中木质素的含量或 Lignin/N 值等有关。研究表明, 木质素的含量或 Lignin/N 值低, 有利于有机物料分解; 反之, 抑制有机物料分解^[26], 相比小麦秸秆、玉米秸秆和牛粪来看, 猪粪的初始木质素含量最低和氮含量最高(表 1), Lignin/N 值也是 4 种有机物料中最低的(图 5), 所以, 这也是猪粪能在分解初期比秸秆和牛粪分解的快的原因。

有机物料的分解往往伴随着养分的释放, 在一定程度上也影响着有机物料的分解速率。分解第 365 天时, 小麦秸秆的养分释放速率大小表现为钾 > 磷 > 氮, 玉米秸秆、牛粪和猪粪的养分释放速率大小总体表现为钾 > 氮 > 磷(图 3), 前人^[15, 27]研究有机物料养分释放也出现过类似 P > N 或 N > P 的不同结论。养分的释放快慢与它在物料中存在的形态有关, 钾素主要以离子态或水溶性盐类存在于有机物料中, 因此释放速率较快^[28], 氮、磷主要以有机态的形式存在^[29], 需要微生物活动才能分解释放。唐仕珊等^[30]和 Polyakova 等^[31]认为 N 和 P 含量能显著影响微生物代谢活性, N 和 P 含量越高, 微生物代谢活性就越强, 繁殖就越快, 有机物料的分解速率也随之加快。因此, 在试验地土壤养分缺乏, 微生物活性低的情况下, 养分含量高的猪粪能够快速满足微生物代谢所需要的能量, 所以在初期分解速率最快(图 2)。另外, 玉米秸秆氮、磷养分在初期出现富集

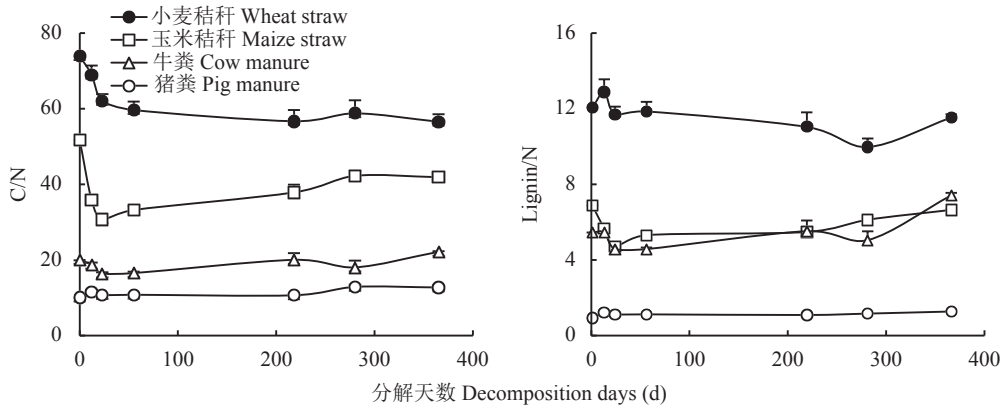


图 5 有机物料腐解过程中 C/N 和 lignin/N 值随时间的变化
Fig. 5 Changes of C/N and lignin/N of the organic materials with decomposition days

表 4 分解速率 (K_{j-365}) 与有机物料成分含量 (X_j) 的相关性分析

Table 4 The correlation between decomposition rate (K_{j-365}) and the contents of components in organic materials (X_j)

分解天数 (d) Decomposition days	氮含量 N content	磷含量 P content	半纤维素含量 Hemicellulose content	纤维素含量 Cellulose content	木质素含量 Lignin content	碳/氮 C/N	木质素/氮 Lignin/N
0	0.748**	0.687**	0.443	0.085	-0.729**	-0.195	-0.418
12	0.482	0.515*	0.549**	-0.049	-0.400**	-0.013	-0.186
23	0.384	0.578*	0.675**	0.295	-0.263	0.175	-0.029
55	0.009	0.358	0.851**	0.492**	-0.04	0.325	0.101
218	0.379	0.347	-0.070	-0.284	-0.123	-0.128	0.006
280	0.589*	0.648**	-0.024	-0.344	-0.507**	-0.356*	-0.367*

注 (Note): K_{j-365} —从分解第 j 天到第 365 天的分解速率 The decomposition rate from j^{th} day to the 365th day; X_j —分解第 j 天有机物料化学成分含量或成分比值 The content of a component or the lignin/N and C/N of organic materials at the j^{th} day of decomposition. *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$.

现象,可能与试验地区少雨、土壤养分含量低从而限制微生物活性有关^[32]。Ozalp 等^[33]和 Gessner 等^[34]认为枯落物在分解过程中 N、P 含量有明显的上升趋势可能与微生物活动有关。王瑾等^[35]研究表明养分释放速率与初始养分含量有关,认为凋落物中起始浓度低的元素易于发生富集或者是富集量较大,浓度高的元素能够满足微生物代谢活性的需求,所以富集量一般较小或直接释放。玉米秸秆氮、磷养分是 4 种物料中较少的,可能是出现富集-释放模式的原因 (表 1)。另一方面,也可能是土壤中的氮、磷养分迁移至尼龙网袋中被玉米秸秆吸附^[36],造成玉米秸秆出现氮、磷富集现象。

本研究对有机物料分解速率与成分含量进行相关性分析发现,有机物料的分解速率与初始全氮、全磷养分成正相关,与初始木质素成负相关,说明初始氮、磷养分高的猪粪容易分解,木质素含量高的牛粪相对稳定,不易分解,有机物料在分解过程

中各种成分含量及比值呈变化状态,使得不同时期的有机物料质量的制约因子也可能不同^[37]。本研究前期分解速率与磷、半纤维素含量成正相关,后期与木质素含量、C/N、Lignin/N 呈显著负相关。说明有机物料在矿区复垦土壤中,在分解前期全磷、半纤维素是良好的预测指标,但就长期的分解来看,木质素含量则是较好的预测指标。

4 结论

秸秆和粪肥在山西矿区复垦土壤中的分解过程均表现为初期快速、后期缓慢的特点。分解第 365 天时,小麦和玉米秸秆有机碳的残留率为 48.8%~53.4%,猪粪有机碳残留率为 51.8%,而牛粪有机碳残留率高达 63.9%,明显高于秸秆和猪粪。从养分残留率看,小麦、玉米秸秆全氮残留率分别为 63.9% 和 66.0%,全磷残留率分别为 58.6% 和 75.4%,而全钾残留率仅分别为 1.8% 和 8.4%。牛粪

和猪粪全氮残留率分别为 54.5% 和 40.9%, 全磷残留率分别为 67.4% 和 47.8%, 而全钾残留率分别为 45.5% 和 21.4%, 牛粪全钾残留率明显高于秸秆。因此, 在矿区复垦土壤中适当增加牛粪的施用, 有利于土壤中有机碳和氮磷钾养分的累积。

参考文献:

- [1] 卞正富. 国内外煤矿区土地复垦研究综述[J]. *中国土地科学*, 2000, (1): 6-11.
Bian Z F. Review of land reclamation research in coal mining areas at home and abroad[J]. *China Land Science*, 2000, (1): 6-11.
- [2] 钱奎梅, 王丽萍, 李江. 矿区复垦土壤的微生物活性变化[J]. *生态与农村环境学报*, 2011, 27(6): 59-63.
Qian K Y, Wang L P, Li J. Variation of microbial activity in reclaimed soil in mining area[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2011, 27(6): 59-63.
- [3] 李智兰. 矿区复垦对土壤养分和酶活性以及微生物数量的影响[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(2): 6-13.
Li Z L. Soil nutrients enzyme activity and microbe quantity in reclaimed soil in mining area[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(2): 6-13.
- [4] 陆太伟, 蔡岸冬, 徐明岗, 等. 施用有机肥提升不同土壤团聚体有机碳含量的差异性[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(10): 2183-2193.
Lu T W, Cai A D, Xu M G, et al. Variation in sequestration of organic carbon associated with differently sized aggregates after organic manure application[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(10): 2183-2193.
- [5] 郭振, 王小利, 段建军, 等. 长期施肥对黄壤性水稻土有机碳矿化的影响[J]. *土壤学报*, 2018, 55(1): 225-235.
Guo Z, Wang X L, Duan J J, et al. Long-term fertilization and mineralization of soil organic carbon in paddy soil from yellow earth[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(1): 225-235.
- [6] 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.
Niu X S, Ju X T. Organic fertilizer resources and utilization in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(6): 1462-1479.
- [7] 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.
Song D L, Hou S P, Wang X B, et al. Nutrient resource quantity of crop straw and its potential of substituting[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(1): 1-21.
- [8] 邵满娇, 窦森, 谢祖彬, 等. 碳量玉米秸秆及其腐解、炭化材料还田对黑土腐殖质的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(10): 2202-2209.
Shao M J, Dou S, Xie Z B. Effects of corn straw and its humified and carbonized materials applying to the black soil with an equal mass of carbon on soil humus[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(10): 2202-2209.
- [9] 任凤玲, 张旭博, 孙楠, 等. 施用有机肥对中国农田土壤微生物量影响的整合分析[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(1): 119-128.
Ren F L, Zhang X B, Sun N, et al. A Meta-analysis of manure application impact on soil microbial biomass across China's croplands[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(1): 119-128.
- [10] 李飞跃, 汪建飞. 中国粮食作物秸秆焚烧碳排放量及转化生物炭固碳量的估算[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(14): 1-7.
Li F Y, Wang J F. Estimation of carbon emission from burning and carbon sequestration from biochar producing using crop straw in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(14): 1-7.
- [11] 介晓磊, 寇太记, 刘芳, 等. 有机物料在砂土中不同时间段的腐解状况研究[J]. *河南农业大学学报*, 2006, (3): 266-269.
Jie X L, Kou T J, Liu F, et al. The study on decomposition law of organic material during different time in sandy soil[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2006, (3): 266-269.
- [12] 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]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2009, 15(2): 374-380.
- [13] 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.
Ma X, Xu M G, Zhao H L, et al. Decomposition characteristics and driving factors of organic materials in typical farmland soils in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(9): 1564-1573.
- [14] 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 in corporation methods[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(3): 607-610.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 高继伟, 谢英荷, 李廷亮, 等. 不同施肥措施对矿区复垦土壤活性有机碳的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(5): 6-12.
Gao J W, Xie Y H, Li T L, et al. Effects of different fertilizations on organic carbon activity following remediation of a coal tailing[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(5): 6-12.
- [18] 刘靓, 邵春花, 张强, 等. 有机物料输入对矿区复垦土壤特性的影响[J]. *山西农业科学*, 2016, 44(12): 1805-1809.
Liu L, Gao C H, Zhang Q, et al. Effects of organic material input on reclaimed soil characteristics in mining area[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2016, 44(12): 1805-1809.
- [19] 林心雄, 吴顺龄, 车玉琴. 干旱和半干旱地区测定有机物分解速率的尼龙网袋法[J]. *土壤*, 1992, 24(6): 315-318.
Lin X X, Wu S L, Che Y Q. The study of nylon mesh bag method to

- measure the decomposition rate of organic matter in arid and semiarid region[J]. *Soil Science*, 1992, 24(6): 315–318.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.108–110.
Boa S D. Analysis of soil agro-chemistry [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.108–110.
- [21] Van Soest P J. Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. II. A rapid method for the determination of fiber and lignin[J]. *Journal-Association of Official Analytical Chemists*, 1963, 49: 546–551.
- [22] 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.
- [23] 代文才, 高明, 兰木岭, 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.
- [24] 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.
- [25] 王金洲, 卢昌艾, 徐明岗, 等. 中国农田土壤中有有机物料腐解特征的整合分析[J]. *土壤学报*, 2016, (1): 16–27.
Wang J Z, Lu C A, Xu M G, *et al.* Decomposition of organic materials in cropland soils across China: A Meta-analysis[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, (1): 16–27.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] Bragazza L, Siffi C, Iacumin P, *et al.* Mass loss and nutrient release during litter decay in peatland: The role of microbial adaptability to litter chemistry[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39(1): 257–267.
- [29] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(6): 272–276.
- [30] 唐仕姗, 杨万勤, 殷睿, 等. 中国森林生态系统凋落叶分解速率的分布特征及其控制因子[J]. *植物生态学报*, 2014, 38(6): 529–539.
Tang S S, Yang W Q, Yin R, *et al.* Spatial characteristics in decomposition rate of foliar litter and controlling factors in Chinese forest ecosystems[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, 38(6): 529–539.
- [31] Polyakova O, Billor N. Impact of deciduous tree species on litterfall quality, decomposition rates and nutrient circulation in pine stands[J]. *Forest Ecology and Management*, 2007, 253: 11–18.
- [32] Berger T W, Duboc O, Djukic I, *et al.* Decomposition of beech (*Fagus sylvatica*) and pine (*Pinus nigra*) litter along an Alpine elevation gradient: Decay and nutrient release[J]. *Geoderma*, 2015, 251/252: 91–104.
- [33] Ozalp M, Conner W H, Lockaby B G. Above-ground productivity and litter decomposition in a tidal freshwater forested wetland on Bull Island, SC, USA[J]. *Forest Ecology Management*, 2007, 245(1/3): 31–43.
- [34] Gessner M O. Breakdown and nutrient dynamics of submerged phragmites shoots in the littoral zone of a temperate hard water lake[J]. *Aquatic Botany*, 2000, 66(1): 9–20.
- [35] 王瑾, 黄建辉. 暖温带地区主要树种叶片凋落物分解过程中主要元素释放的比较[J]. *植物生态学报*, 2001, 25(3): 375–380.
Wang J, Huang J H. Comparison of major nutrient release patterns in leaf litter decomposition in warm temperate zone of China[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25(3): 375–380.
- [36] 赵娜, 赵护兵, 鱼昌为, 等. 旱地豆科绿肥腐解及养分释放动态研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(5): 1179–1187.
Zhao N, Zhao H B, Yu C W, *et al.* Nutrient releases of leguminous green manures in rainfed lands[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2011, 17(5): 1179–1187.
- [37] Taylor B R, Parkinson D, Parsons W J F. Nitrogen and lignin content as predictors of litter decay rates: a microcosm test[J]. *Ecology*, 1989, 70(1): 97–104.