有机物料腐解过程中养分的释放特征及其影响因素

梁鑫宇1, 宋明丹1,2, 韩梅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:【目的】研究主要作物秸秆养分在土壤中的释放特征,为其合理利用提供科学依据。【方法】在青海农 业大学试验站开展有机物料土壤埋袋试验。供试有机物料为马铃薯秆、油菜秆、小麦秆和毛叶苕子,每种物料 称取 40.0 g 于尼龙网袋中,于 2021 年 3 月 30 日埋入 20 cm 深土壤中自然腐解。埋入土壤后的第 7、14、28、 42、72、117、162天采样,测定尼龙袋内有机物料干重、碳、氮、磷含量和纤维素、半纤维素、木质素含量, 计算物料养分残留率和释放率。【结果】至腐解结束(埋后162天),马铃薯秆、油菜秆、小麦秆和毛叶苕子的 碳残留率分别为 35.5%、42.2%、53.4%、14.7%。腐解过程中,马铃薯秆、小麦秆和毛叶苕子在埋后 0~7 天的 碳矿化率最大,油菜秆在埋后7~14天的碳矿化率最大。以双库指数积温模型拟合碳残留量随腐解时间的变 化, R²均在 0.90 以上。马铃薯秆、油菜秆、小麦秆、毛叶苕子的年腐殖化系数分别为 41%、34%、58%、 24%。在整个腐解过程中,小麦秆和毛叶苕子氮素、磷素表现为直接释放,马铃薯秆和油菜秆表现为淋溶-浓缩 一释放。腐解至162天,马铃薯秆、油菜秆、小麦秆和毛叶苕子氮素释放率分别为28.0%、10.2%、31.8%、 88.3%,磷素释放率分别为45.1%、33.9%、62.4%、71.4%;马铃薯秆、油菜秆和小麦秆磷释放率大于氮释放 率,而毛叶苕子的氮释放率大于磷释放率。通过多元逐步回归,有机物料初始碳含量、氮含量、C/P值可以解 释氮、磷养分释放的 82.5%~98.5%。【结论】有机物料初始碳、氮含量和碳/磷值显著影响着秸秆中氮素和磷 素的总释放量。马铃薯秆、油菜秆、小麦秆和毛叶苕子的年腐殖化系数分别达 41%、34%、58%、24%。毛叶苕 子的氮、磷释放速率快,总释放量高且在腐解过程中持续释放,因而可以替代部分化肥。马铃薯和油菜秆氮、 磷释放速率较低,且其释放在腐解过程中表现为淋溶一浓缩一释放过程,在腐解14~72 天对养分的富集会与微 生物竞争外界氮磷养分,因此,还田时需补充一定量的化肥来满足秸秆腐解对磷氮的需求。小麦秆还田后腐殖 化系数最高,氮、磷表现为直接释放,因而培肥土壤的效果最佳。

关键词:有机物料;碳残留率;养分释放;双库指数积温模型

Release characteristics and influencing factors of carbon, nitrogen, and phosphorus during decomposition of organic materials

LIANG Xin-yu¹, SONG Ming-dan^{1,2}, HAN Mei¹, LI Zheng-peng^{1*}

(1 Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China; 2 Xining Observation and Experiment Station of National Agricultural Environment, Xining, Qinghai 810016, China)

Abstract: [Objectives] We studied the nutrient release characteristics of different organic materials in soil to provide a scientific basis for the rational utilization of organic resources. **[Methods]** The straws of potato (*Solanum tuberosum* L.), rape (*Brassica napus* L.), wheat (*Triticum aestivum* L.) and hairy vetch (*Vicia villosa* Roth.) were loaded into nylon bags and incorporated in 0–20 cm chestnut soil for natural decomposition in Qinghai University. The nylon bags were sampled at 7, 14, 28, 42, 72, 117, and 162 days for determining C, N, and P content, residual straw biomass, and the amount and release rate of C, N, and P were calculated. Further, the relationship between material properties and C, N, and P release rate was quantitatively analyzed. **[Results]** By the end of the decomposition period (162 days), the C residue in the straws of potato, rape, wheat, and hairy vetch were 35.5%, 42.2%, 53.4%, and 14.7%, respectively. During the decomposition process, potato, wheat, and hairy

收稿日期: 2022-09-26 接受日期: 2023-02-28

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)。

联系方式: 梁鑫宇 E-mail: 877150377@qq.com; * 通信作者 李正鹏 E-mail: lipengzheng131@163.com

vetch straw had the fastest C mineralization rate at 0-7 days, while rape straw had the fastest C mineralization rate at 7–14 days. The two-pool exponential accumulated temperature model fitted the C residual process well, with $R^2 > 2$ 0.90. The annual humification coefficients of potato, rape, wheat, and hairy vetch were 41%, 34%, 58%, and 24%, respectively. During decomposition, wheat straw and hairy vetch continually released N and P, while the N and P in potato and rape straw exhibited eluviation-concentration-release. At the end of the decomposition period (162 days), the total N released from potato, rape, wheat, and hairy vetch straws were 28.0%, 10.2%, 31.8%, and 88.3%, and the total P released was 45.1%, 33.9%, 62.4%, and 71.4%, respectively. The P release rate of potato, rape, and wheat straws was higher than the N release rate, while the N release rate in hairy vetch was higher than the P release rate. Multiple stepwise regression showed that the initial C and N content of the organic materials explained 98.5% of total N release, showing a positive effect, and the C/P ratio explained 82.5% of P release, showing an inhibition effect. [Conclusions] The initial C and N content and the C/P ratio of organic materials decide the total release of N and P from them. The humification coefficient of potato, rape, wheat, and vetch straws were 41%, 34%, 58%, and 24%. Hairy vetch has the fastest and direct N and P release in the decomposition process, so it can replace part of the fertilizer. The N and P release rates from potato and rape straws are low, and show a eluviation-concentration-release process during decomposition, they may compete with microorganisms for external N and P nutrients during 14-72 days of decomposition. Therefore, a certain amount of fertilizer should be applied if potato or rape straw is returned to field. Wheat straw has the highest coefficient of humification when returned to field, and most of the N and P is released directly, thus giving the best results in enriching soil.

Key words: organic material; residual carbon rate; nutrient release;

dual-sink index accumulated temperature model

秸秆是可再生的生物质资源,其中含有大量的 有机质和植物生长所必需的氮、磷、钾等营养元 素^[1]。秸秆还田后在土壤微生物作用下发生腐解,释 放出的碳、氮能够提高土壤有机质含量^[2-3],并改善 土壤有机质的性质^[4];释放的氮、磷、钾以及中微量 营养元素能够被作物吸收利用,从而达到提高作物 产量的效果^[3]。因此,秸秆还田是利用该资源最直接 有效的途径。

关于农作物秸秆还田后的腐解和养分释放规律前人已进行了大量研究,王金洲等^[6]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。有机物料中养分释放主要表现为3种模式: 直接释放、富集-释放、淋溶-富集-释放^[7]。曾莉等^[8] 研究发现秸秆中氮磷钾的最终释放率为钾>氮>磷, 且K在前两周几乎完全释放,而N、P在后期出现 负增长现象。土壤中微生物的分解控制着有机物料 的养分释放过程,影响因素包括有机物料的性质^[9]、 生物群落组成^[10]、土壤类型^[11]、气温和降水^[12]以及分 解时间等;其中物料性质(碳氮比和木质素含量 等)是决定腐解速率的重要因素^[6]。Nicolardot 等^[13]、 Wang 等^[14]研究表明,微生物分解有机物料的最优 C/N 为 25:1,因此C/N 高的有机物料腐解后,容易 造成高碳低氮的土壤环境,在腐解过程中微生物活 动容易受到限制,还会与农作物竞争氮素,导致腐 解初期土壤氮素缺乏,影响后茬作物生长。陈兵等[15] 研究发现物料的分解速率与氮磷和木质素含量相 关;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10%。在前人的研究中,已揭示了不 同有机物料种类和气候因子对养分释放的影响四,但 关于不同有机物料性质对不同时期腐解的定量关系 研究较少。因此,本研究采用尼龙网袋法,以青海 省东部农业区常见作物马铃薯、油菜、小麦的秸秆 及绿肥作物毛叶苕子为研究对象,探究不同有机物 料还田后碳氮磷释放特征,通过双库指数积温模型 拟合碳的残留过程,分析不同有机物料性质对 NP 养 分释放的影响,并通过多元逐步回归方法得到该地 区氮磷最终释放率方程,从而进一步明确不同有机 物料在青海高原的养分释放特征,以期为该地区有 机物料还田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 2230 m, 属高原大陆性干旱气候, 年平均气温 5.9℃, 年平均降水量 367.5 mm, 年均蒸发量 1729.8 m^[18]。 土壤为栗钙土, 0—20 cm 耕层土壤有机质 24.59 g/kg、 全氮 1.47 g/kg、全磷 3.09 g/kg、全钾 23.2 g/kg、碱 解氮 120.17 mg/kg、速效磷 41.67 mg/kg、速效钾 228.67 mg/kg、pH 为 8.3。

1.2 试验设计

供试尼龙网袋长 20 cm、宽 15 cm, 孔径 0.75 µm。 供试有机物料为马铃薯秆、油菜秆、小麦秆和毛叶 苕子共 4 种,样品均来自 2020 年收获后的作物,其 有机组成及养分含量见表 1。有机物料风干晾晒后, 剪为 2 cm 左右小段,烘至恒重,称取 40 g 样品装入 尼龙网袋中,于 2021 年 3 月 30 日埋入 20 cm 深土 壤中,进行撂荒处理,自然腐解,每个物料处理重 复 21 次。

1.3 测定指标与方法

分别于填埋后的第7、14、28、42、72、117、 162 天进行采样。每个处理分别取出3个尼龙网袋带 回实验室,用湿毛巾轻擦尼龙网袋表面,去除表面 泥土和杂物,于60℃下烘干至恒重,然后称量,研磨 备用。采用烘干法测定秸秆干物质量,植株碳氮磷含 量分别采用重铬酸钾容量--外加热法、半微量凯氏定氮 法和钼锑抗比色法测定;使用 ANKOM 2000i 全自动 纤维分析仪测定纤维素、半纤维素和木质素含量^[19]。

1.4 数据处理方法

不同物料腐解过程中的碳残留率和养分累积释 放率计算方法如下:

$$RC_{t} = [(C_{t} \times M_{t})/(C_{0} \times M_{0})] \times 100\%$$
(1)

$$RN_t = [1 - (N_t \times M_t) / (N_0 \times M_0)] \times 100\%$$
(2)

$$RP_{t} = [1 - (P_{t} \times M_{t})/(P_{0} \times M_{0})] \times 100\%$$
(3)

式中: RC,代表物料腐解第 t 天的 C 残留率 (%);

*RN*_{*i*}、*RP*_{*i*}分别代表物料腐解第 *t* 天的 N、P 累积释放 率 (%); *M*₀ 代表物料初始质量 (g); *M*_{*i*}代表腐解第 *t* 天的物料质量 (g); *C*₀、*N*₀、*P*₀分别为物料初始的 C、N、P 含量 (%); *C*_{*i*}、*N*_{*i*}、*P*_{*i*}分别为腐解第 *t* 天时 物料的 C、N、P 含量 (%)。

每个采样时期的地积温为[20]:

$$GDD_n = \sum_{i=1}^n \left[\left(TMIN_i + TMAX_i \right) / 2 \right]$$
(4)

式中: GDD_n 代表埋后第 n 天的地积温, i=1,2,3,…,n为尼龙网袋埋后天数, *TMAX*、*TMIN*分别为 日土壤最高温度和日土壤最低温度。仅计算大于 0℃的土壤积温。

有机物料腐解过程的碳残留率用双库指数积温 方程来模拟^[1]:

$$R_t = R_0 + R_1 e^{-kx} \tag{5}$$

式中: R_i 为碳残留率, R_0 和 R_1 分别表示有机物料中 稳定有机碳组分和易分解有机碳组分占总碳组分的 比例, $R_0+R_1=1^{[22]}$ 。x为试验开始至各取样时间的土壤 积温(°C), k为腐解速率常数。

腐殖化系数通常用来表征物料在土壤中腐解一 年内碳的残留率, *x* 等于该地区一年的积温,代入方 程 (5) 即可得到不同有机物料腐殖化系数。

氮磷养分富集系数[23]计算方法如下:

$$EF_N = N_t / N_0 \tag{6}$$

$$EF_P = P_t / P_0 \tag{7}$$

式中: *EF_N、EF_p*分别为N、P 养分富集系数,*N_t*、 *P_t*分别为腐解第*t*天时物料的N、P 含量(%);*N*₀、 *P*₀分别为物料初始的N、P 含量(%)。

有机物料腐解 N、P 最终释放率与初始物料性质 之间的关系采用逐步回归法进行分析。

试验数据采用 Excel 2019 进行整理,使用 SPSS 25.0 进行方差分析 (ANOVA), LSD 法进行多重比较,用 Origin 2021 进行绘图以及方程拟合。

	表 1 供试有机物料初始理化性质
Table 1	Initial physicochemical properties of the tested organic materials

有机物料	纤维素 (%)	半纤维素 (%)	木质素 (%)	全碳 (%)	全氮 (%)	全磷 (%)	碳/氮	碳/磷	氮/磷	木质素/氮	木质素/磷
Organic material	Cellulose	Hemicellulose	Lignin	Total C	Total N	Total P	C/N	C/P	N/P	Lignin/N	Lignin/P
马铃薯秆 Potato straw	29.92 c	10.69 c	11.47 b	40.79 a	1.21 b	0.14 c	34:1 b	299:1 a	9:1 a	9:1 c	78:1 a
油菜秆 Rape straw	37.53 b	17.53 b	10.27 b	39.61 a	0.75 c	0.14 c	53:1 a	282:1 a	5:1 c	14:1 b	73:1 a
小麦秆 Wheat straw	38.47 a	27.89 a	21.68 a	47.27 a	0.72 c	0.28 b	66:1 a	167:1 b	3:1 d	30:1 a	77:1 a
毛叶苕子 Hairy vetch	14.33 d	6.20 d	2.40 c	43.87 a	4.00 a	0.56 a	11:1 c	80:1 c	7:1 b	1:1 d	4:1 b

注:同列数字后不同字母表示不同有机物料间差异显著 (P<0.05)。

Note: Values followed by different letters in the same column denote significant difference among different organic materials (P<0.05).

2 结果与分析

2.1 有机物料碳残留率变化

由图 1 可以看出,4 种有机物料碳残留率均随腐 解时间的延长逐渐降低,腐解前期(埋后 0~48 天), 毛叶苕子的腐解最快,油菜秆最慢。腐解第 7 天, 毛叶苕子有机碳残留率只有 49.5%,显著低于马铃薯 秆、油菜秆和小麦秆,腐解第 14 天,油菜秆的有机 碳残留率仍高达 93.0%,显著高于马铃薯秆、小麦秆 和毛叶苕子,腐解 48 天时各处理的碳残留率表现为 油菜秆>马铃薯秆>小麦秆>毛叶苕子。腐解结束时 (埋后 162 天)表现为小麦秆(53.4%)>油菜秆(42.2%)> 马铃薯秆(35.5%)>毛叶苕子(14.7%),小麦秆碳残留 率显著高于其他处理,而毛叶苕子有机碳残留率显 著低于其他处理。

随腐解进程的推进,各处理碳矿化率整体表现 出下降的趋势。马铃薯秆、小麦秆、毛叶苕子快速 腐解期均为埋后 0~7 天,其碳矿化速率分别为 321.4、661.2、1265.4 mg/d,毛叶苕子显著高于马铃 薯秆、小麦秆 (P<0.05)。油菜秆快速腐解期在埋后 7~14 天,碳矿化速率为 160.1 mg/d。至腐解结束, 马铃薯秆、油菜秆、小麦秆和毛叶苕子的平均碳矿 化速率分别为 34.4、39.5、2.7 和 2.9 mg/d。

2.2 有机物料碳残留率与积温的定量关系

period; NS indicates no significant difference.

双库指数积温方程能较好地拟合不同有机物料 碳腐解残留率,决定系数均大于 0.90 (表 2)。当积温 达 2494℃时(即试验 162 天时),马铃薯秆碳残留率 约为 40.8%,油菜秆约为 33.8%,小麦秆约为 58.1%,毛叶苕子约为 23.8%。计算的油菜秆碳残留 率低于实际测定,其他3种有机物料的计算值高于 实测值。

马铃薯秆、油菜秆、小麦秆和毛叶苕子的稳定 碳组分所占比例(*R*₀)中小麦秆最高,油菜秆最低; 易分解碳组分所占比例(*R*₁)中油菜秆最高,小麦秆 最低;易分解有机碳组分腐解速率常数(*k*)中毛叶苕 子最高,油菜秆最低;处理间差异达显著水平。

本地区1年内大于0℃积温约为3215.6℃,代 入表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,马铃薯秆、油菜秆、小麦秆和 毛叶苕子的腐殖化系数分别41%、34%、58%和24%。

2.3 有机物料氮、磷养分富集系数的变化

马铃薯秆和油菜秆氮富集系数随腐解时间的延 长呈逐渐升高的趋势(图 2),至腐解结束,马铃薯秆 和油菜秆氮富集系数分别由初始的 0.81、1.04 增加至 1.90、2.20。小麦秆氮富集系数随腐解时间的 延长呈先降低后升高的趋势,由初始的 0.98 升高至 1.41。毛叶苕子氮富集系数随腐解时间的延长呈先降 低后趋于平稳的趋势,至腐解结束,毛叶苕子氮富 集系数由初始的 0.81 降低至 0.65。整个腐解过程中 油菜秆氮富集系数最高,毛叶苕子最低,除埋后 7、 14 天外,其他时间段油菜秆氮富集系数均显著高于 其他处理;毛叶苕子氮富集系数均显著低于其他处理。

马铃薯秆和油菜秆磷富集系数呈先增加后趋于 平稳的趋势(图 2),分别由初始的0.73、0.96增加到 1.45、1.62。小麦秆磷富集系数呈先降低后趋于平稳 的趋势,至腐解结束,磷富集系数由初始的0.82降 低至0.78。毛叶苕子磷富集系数呈逐渐升高趋势, 至腐解结束,磷富集系数由初始的0.70升高至



图 1 有机物料碳残留率和矿化速率



注: 柱上不同小写字母表示同一时期内不同有机物料间在 0.05 水平差异显著; NS 表示无显著差异。 Note: Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among different organic materials at the 0.05 level during the same

Table 2 Fitting parameters of carbon residue rate and accumulated temperature in the organic materials								
有机物料 Organic material	拟合方程 Fit equation	R_{0} (%)	R_1 (%)	k	R^2	HFc (%)		
马铃薯秆 Potato straw	$y=40.78+59.22e^{(-0.00229x)}$	40.78±1.46 b	59.22±2.60 c	0.00229±0.0001 c	0.928	41		
油菜秆 Rape straw	$y=11.79+88.21e^{(-0.00043x)}$	11.79±1.67 d	88.21±3.73 a	0.00043±0.0001 c	0.991	34		
小麦秆 Wheat straw	$y=58.06+41.94e^{(-0.01803x)}$	58.06±0.71 a	41.94±0.47 d	0.01803±0.0015 b	0.921	58		
毛叶苕子 Hairy vetch	$y=23.83+76.17e^{(-0.02213x)}$	23.83±0.70 c	76.17±0.95 b	0.02213±0.0007 a	0.907	24		

表 2 有机物料碳残留率与积温的拟合参数

注: R₀—有机物料中稳定有机碳组分, R₁—有机物料中易分解有机碳组分, k—腐解速率常数, R²—方程拟合优度; HFc—腐殖化系数。同 列数据后不同小写字母表示不同有机物料间差异显著 (P<0.05)。

Note: R_0 — Stable organic C components in organic materials; R_1 — Easily decomposed organic C components in organic materials; k — Decomposition rate constant; R^2 — Goodness of fit of the equation; HFc—Humification coefficient. Values followed by different letters in the same column denote significant difference among different organic materials (P<0.05).



图 2 不同有机物料氮、磷富集系数

Fig. 2 Nitrogen and phosphorus enrichment factors of the organic materials

注: 柱上不同小写字母表示同一时期内不同有机物料富集系数间差异显著 (P<0.05)。 Note: Different lowercase letters above the bars indicate significant difference of enrichment factor among different organic materials during the same period (P<0.05).

1.59。整个腐解过程中,油菜秆磷富集系数最高,小 麦秆最低。

整体来看,不同有机物料氮、磷富集系数变化 不尽相同。油菜秆氮、磷富集系数均为最高;马铃 薯秆氮、磷富集系数在腐解过程中分别平均达 1.34和1.12,整体变化较小;小麦秆氮富集系数在 腐解过程中平均达1.07,磷富集系数仅为0.74;相 反毛叶苕子氮富集系数在整个腐解过程中均低于 1.0,磷富集系数平均达1.04。

2.4 有机物料氮、磷养分的释放特征

在整个腐解过程中,小麦秆和毛叶苕子氮素为 持续释放,马铃薯秆和油菜秆表现为淋溶一浓缩 一释放(图3)。腐解28~72天,油菜秆氮素累积释 放率为-5.1%~-21.4%,呈现负增长现象,表明油菜 秆腐解前期利用了包括土壤氮在内的外界氮素。至 腐解结束,马铃薯秆、油菜秆、小麦秆和毛叶苕子 的氮素累积释放率分别为28.0%、10.2%、31.8%、 88.3%,油菜秆的氮素累积释放率最低,毛叶苕子的 氮素累积释放率显著高于其他处理(P<0.05)。

小麦秆和毛叶苕子磷素在整个腐解过程中表现 为持续释放,马铃薯秆和油菜秆表现为淋溶一浓缩 一释放(图 3)。至腐解结束,马铃薯秆、油菜秆、小 麦秆和毛叶苕子磷素累积释放率分别为45.1%、 33.9%、62.4%、71.4%,马铃薯秆和油菜秆的磷素累 积释放率较低,小麦秆和毛叶苕子的磷素累积释放 率较高。腐解14~72 天,油菜秆磷素累积释放率为 -1.8%~-12.4%,呈现负增长现象,表明腐解前期油 菜秆腐解利用了外界的磷素,有与作物争夺磷养分 的可能。

4种有机物料氮素、磷素累积释放率均随腐解时间的延长逐渐升高,试验结束时,不同有机物料中 氮素、磷素的累积释放率均表现为毛叶苕子>小麦秆> 马铃薯秆>油菜秆,马铃薯秆、油菜秆和小麦秆均表 现出磷>氮;毛叶苕子表现出氮>磷。





2.5 有机物料氮、磷总释放率与物料性质之间的 关系

选择 11 个自变量,分别为有机物料 C (X1)、N (X2)、P (X3)、纤维素 (X4)、半纤维素 (X5)、木质素 (X6)、C/N (X7)、C/P (X8)、N/P (X9)、木质素/N (X10)、木质素/P (X11)进行逐步回归分析,结果显 示,影响氮素总释放率的主要因子是 C (X1)和 N (X2)含量,二者均为促进因子,方程决定系数 R² 为 0.985。影响磷素最终释放率的主要因子是 C/P (X8), C/P 为抑制因子,方程决定系数 R² 为 0.825 (表 3)。

3 讨论

本研究中,马铃薯秆、油菜秆、小麦秆和毛叶 苕子在土壤中腐解碳残留率表现出前期快速下降、 后期缓慢下降的特征,这与前人^[24-25]研究结果相一 致。有机物料碳腐解过程中,碳腐解速率可以从碳 库活性的角度用单指数累积温度方程拟合碳残留率 的变化来解释^[26]。Cai等^[21]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。本研究通过 地积温方程能较好地拟合有机物料腐解碳的残留率 过程,决定系数达 90% 以上,易分解碳组分所占比 例中油菜秆和毛叶苕子最高,而易分解碳组分主要 包括多糖、有机酸、氨基酸等易分解有机化合物, 可以被微生物优先分解,且有足够的碳源和营养物 质提升微生物的活性和数量,从而促进有机物料的 腐解^[27-28];但其易分解碳组分平均周转天数差别很 大,分别为2315、45天,说明毛叶苕子在前期几乎 腐解完全,虽然油菜秆的易分解碳组分比例也很 高,但由于自身 C/N 较高,含有更多难分解的纤维 素、木质素等,且微生物在分解代谢过程中,还会 产生一些难分解的中间产物,所以整个腐解过程较 毛叶苕子缓慢得多,这就从碳组分活性的观点解释 了毛叶苕子较其他秸秆腐解更快的原因。

有机物料腐解过程中会伴随着养分的释放,不同有机物料养分累积释放率与其自身性质、形态和存在位置有关^[29]。本研究中,不同有机物料氮、磷累积释放率表现不同,马铃薯秆、油菜秆和小麦秆表现为磷>氮;毛叶苕子表现出氮>磷,前人^[28,30]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。马铃薯秆、油菜秆和小麦秆氮素释放率低于磷素释放率,这可能是因为 C/N 较高,碳源丰富,而氮源相对匮乏,微生物通过吸收土壤和肥料中的氮素来满足自身需求及物料的矿化分解,从而使土壤

表 3 有机物料氮、磷总释放率与各指标初始含量的逐步回归方程

Table 3 Stepwise regression equation of the final release rate of N, P and the initial content of each index

•		•	
ın	the	organic	materials

模型 Model	变量 Variable	标准化系数 Standardized coefficient	逐步回归方程 Stepwise regression equation	R^2
氮释放模型 Release model of N	X1	0.266	$Y_1 = -106.28 + 2.62x_1 + 19.98x_2$	0.985
	X2	0.923		
磷释放模型 Release model of P	X8	-0.908	$Y2=84.90-0.15x_{s}$	0.825

注: X1-碳含量; X2--氮含量; X8--C/P; Y1--氮素总释放率; Y2--磷素总释放率。

Note: X1-C content; X2-N content; X8-C/P ratio; Y1- The final release rates of N; Y2-The final release rate of P.

和肥料中的氮素进入秸秆被吸附,导致马铃薯秆、 油菜秆和小麦秆氮素释放率降低[24]:毛叶苕子氮素释 放率高于磷素释放率的原因可能是毛叶苕子氮素含 量较高,能够快速满足微生物代谢的需要,因此毛 叶苕子可以作为有机肥料持续有效地为土壤提供氮 素,马铃薯秆和油菜秆还田时可以适量追施氮肥, 具体哪种施氮水平更有利于土壤养分的稳定,仍需 要选择不同养分含量的马铃薯和油菜品种开展深入 研究来确定。也有研究指出低 C/P 较高 C/P 作物残 体的磷释放率更快^[31],本研究中毛叶苕子 C/P 最低, 其磷素释放率较其他秸秆快。唐仕珊等^[32]和 Polyakova 等^[33]认为N和P含量对微生物代谢活动影响很大, N 和 P 的含量越高,微生物的代谢活动越强,繁殖 就越快,有机物料的分解速度也越快。本研究中毛 叶苕子 N、P 养分含量最高,能够满足微生物代谢所 需,所以毛叶苕子在腐解初期较其他秸秆腐解得快 (图 3)。另外,马铃薯秆和油菜秆在腐解前期(埋后 14~72 天)出现 N、P 富集现象,可能与低温少雨限 制了微生物代谢活性有关[17,34]。王瑾等[35]研究表明养 分释放速率与初始养分含量有关,认为凋落物中初 始浓度较低的元素易发生富集或者是富集量较大, 浓度较高的元素能够满足微生物代谢所需,所以富 集量一般较小或直接释放。另一方面,也可能是秸 秆将周围土壤中的氮、磷养分吸附至尼龙网袋内, 从而造成氮磷富集的现象130。有研究表明植物富集系 数大小主要取决于植物对营养元素的需要强度的。本 研究不同有机物料对氮、磷元素的富集系数有明显 差异,这可能是不同有机物料养分含量不同所致。 因此有机物料初始养分含量制约着养分释放率和养 分富集系数。

有机物料自身 C/N、C/P、多酚类物质和木质素 含量及其与氮含量的比值是控制有机物料腐解和养 分释放的重要因素^[7]。Parton等^[38]研究发现凋落物中 氮素含量是控制其氮素释放模式的首要因素。本研 究发现有机物料碳、氮含量和 C/P 分别控制了氮素 和磷素的最终释放过程。与前人^[7]的研究有些差异, 可能是没有将土壤养分和气候等条件结合进去,只 单一地考虑了物料性质对养分释放的影响,因此需 要进一步研究有机物料与土壤养分、气候和物料性 质对秸秆养分释放的交互作用。

4 结论

有机物料的初始碳、氮含量和碳磷比显著影响 了氮素和磷素的总释放量。马铃薯秆、油菜秆、小 麦秆和毛叶苕子的年腐殖化系数分别达 41%、34%、 58%、24%。毛叶苕子的氮素、磷素释放速率快,总 养分释放量高,且在腐解过程中持续释放,因而可 以替代部分化肥。马铃薯秆和油菜秆氮、磷释放速 率较低,在腐解过程中其释放表现为淋溶一浓缩一 释放过程,在埋后 14~72 天内对养分的富集会与微 生物竞争外界氮磷养分,因此,还田时需补充一定 量的化肥来满足秸秆腐解对磷氮的需求。小麦秆还 田后腐殖化系数最高,氮素、磷素表现为直接释 放,因而培肥土壤的效果最佳。

参考文献:

- 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[J]. 土壤学报, 2014, 51(4): 743–752.
 Zhang H, Lü J L, Cao Y F, Xu W X. Decomposition characteristics of different plant straws and soil microbial functional diversity[J].
 Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(4): 743–752.
- [2] 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.
 Huang Y X, Wang G L, Feng Y H, *et al.* Changes of organic matter in paddy soil derived from red soil in a long-term located experiment[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(2): 181–184.
- [3] 张夫道, Fokin A D. 作物秸秆碳在土壤中分解和转化规律的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1994, (1): 27–38.
 Zhang F D, Fokin A D. Decomposition and transformation of ¹⁴C traced straw in soils[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 1994, (1): 27–38.
- [4] 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.
 Ni J Z, Xu J M, Xie Z M. Dynamic of active organic matter fractions in fluvo-aquic soil after application of organic fertilizers[J]. Journal of Agro-environmental Science, 2003, 22(4): 416–419.
- [5] 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.
- [6] 王金洲, 卢昌艾, 徐明岗, 等. 中国农田土壤中有机物料腐解特征的 整合分析[J]. 土壤学报, 2016, 53(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, 53(1): 16–27.
- [7] 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.
- [8] 曾莉,张鑫,张水清,等.不同施氮量下潮土中小麦秸秆腐解特性及 其养分释放和结构变化特征[J]. 植物营养与肥料学报,2020,26(9): 1565–1577.

Zeng L, Zhang X, Zhang S Q, *et al.* Characteristics of decomposition, nutrient release and structure change of wheat straw in fluvo-aquic soil under different nitrogen application rates[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(9): 1565–1577.

- [9] Talbot J M, Treseder K K. Interactions among lignin, cellulose, and nitrogen drive litter chemistry-decay relationships[J]. Ecology, 2012, 93(2): 354.
- [10] Cleveland C C, Reed S C, Keller A B, et al. Litter quality versus soil microbial community controls over decomposition: A quantitative analysis[J]. Oecologia, 2014, 174(1): 283–294.
- [11] Vesterdal L. Influence of soil type on mass loss and nutrient release from decomposing foliage litter of beech and Norway spruce[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1999, 29(1): 95–105.
- [12] Aerts R. leaf litter chemistry and leaf litter decomposition in terrestrial ecosystems: A triangular relationship[J]. Oikos, 1997, 79(3): 439–449.
- [13] Nicolardot B, Recous S, Mary B. Simulation of C and N miner alisation during crop residue decomposition: A simple dynamic model based on the C:N ratio of the residues[J]. Plant and Soil, 2001, 228(1): 83–103.
- [14] Wang W J, Baldock J A, Dalal R C, et al. Decomposition dynamics of plant materials in relation to nitrogen availability and biochemistry determined by NMR and wet-chemical analysis[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2004, 36(12): 2045–2058.
- [15] 陈兵, 王小利, 徐明岗, 等. 煤矿复垦区不同有机物料的分解特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(6): 1126–1134. Chen B, Wang X L, Xu M G, *et al.* Decomposition characteristics of different organic materials in coal mine reclamation area[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(6): 1126–1134.
- [16] Schmidt M W I, Torn M S, Abiven S, et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property[J]. Nature, 2011, 478: 49–56.
- [17] Berger T W, Duboc O, Djukic I, et al. Decomposition of beech (Fagus sylvatica) and pine (Pinu snigra) litter along an alpine elevation gradient: Decay and nutrient release[J]. Geoderma, 2015, 251/252: 92–104.
- [18] 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.
 Han M, Xu T T, Cao W D. Effects of long-term green manure hairy vetch on soil nitrogen supply on the Qinghai Plateau[J]. Agricultural Research in Arid Areas, 2018, 36(6): 104–109.
- [19] 李泽民, 王本琢, 王洪敏, 等. 不同方法测定饲料中木质素(ADL)含量的研究[J]. 山东畜牧兽医, 2019, 40(12): 21–22.
 Li Z M, Wang B Z, Wang H M, *et al.* Study on the determination of lignin (ADL) content in feed by different methods[J]. Shandong Journal of Animal Science and Veterinary Medicine, 2019, 40(12): 21–22.
- [20] 宋明丹,李正鹏, 冯浩. 不同水氮水平冬小麦干物质积累特征及产量效应[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 119–126. Song M D, Li Z P, Feng H. Effets of irrigation and nitrogen regimes on dry matter dynamic accumulation and yield of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(2): 119–126.

- [21] Cai A D, Liang G P, Zhang X B, 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.
- [22] 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. Li Z P, Song M D, Li F, et al. Decomposition and nutrient release characteristics of co-incorporated wheat straw and common vetch in Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(11): 104–111.
- [23] 郭新送, 宋付朋, 高杨, 等. 模拟降雨下3种类型土壤坡面的泥沙流 失特征及其养分富集效应[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 23–28.
 Guo X S, Song F P, Gao Y, *et al.* Characteristics of lost sediment and its nutrient enriched effect on three types soil slope under simulated rainfall[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(3): 23–28.
- [24] 黄婷苗, 王朝辉, 侯仰毅, 等. 施氮对关中还田玉米秸秆腐解和养分释放特征的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(7): 2261–2268.
 Huang T M, Wang Z H, Hou Y Y, *et al.* Effects of nitrogen fertilization on decomposition and nutrient release of returned maize straw in Guanzhong Plain, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(7): 2261–2268.
- [25] 潘福霞, 鲁剑巍, 刘威, 等. 三种不同绿肥的腐解和养分释放特征研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 216–223.
 Pan F X, Lu J W, Liu W, *et al.* Study on characteristics of decomposing and nutrients releasing of three kinds of green manure crops[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2011, 17(1): 216–223.
- [26] Wang C, Han G, Jia Y, *et al.* Insight into the temperature sensitivity of forest litter decomposition and soil enzymes in subtropical forest in China[J]. Journal of Plant Ecology, 2012, 5(3): 279–286.
- [27] 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 incorporation methods[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(3): 607-610.
- [28] 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.
- [29] 谢帅,梁鑫宇,李正鹏,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.
 Xie S, Liang X Y, Li Z P, *et al.* Characteristics of mixed decay of wheat straw-hairy vetch on the Qinghai Plateau[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(4): 754-762.
- [30] 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 strawreturned amount[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(3): 80–85.
- [31] Ji D, Ding F, Dijkstra F A, *et al.* Crop residue decomposition and nutrient release are independently affected by nitrogen fertilization,

plastic film mulching, and residue type[J]. European Journal of Agronomy, 2022, 138: 126535.

- [32] 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.
- [33] Polyakova O, Billor N. Impact of deciduous tree species on itterfall quality, decomposition rates and nutrient circulation in pine stands[J]. Forest Ecology and Management, 2007, 253: 11–18.
- [34] Liu S, Wang F, Xue K, et al. The interactive effects of soil transplant into colder regions and cropping on soil microbiology and biogeochemistry[J]. Environmental Microbiology, 2015, 17(3): 566–576.
- [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]. Chinese Journal of Plant Ecology, 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] 赵春梅, 曹建华, 李晓波, 等. 橡胶树对土壤中营养元素的富集能力[J]. 广东农业科学, 2014, 41(22): 57–60.
 Zhao C M, Cao J H, Li X B, *et al.* Enrichment capability of nutrient elements in soil of rubber tree[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2014, 41(22): 57–60.
- [38] Parton W, Silver W L, Burke I C, et al. Global-scale similarities in nitrogen release patterns during long-term decomposition[J]. Science, 2007, 315: 361–364.