

填闲作物腐解过程及其对后茬冬小麦产量的影响

李志鹏^{1,2}, 王 俊^{1,2}, 商雨晴^{1,2}, 张少宏^{1,2}

(1.西北大学城市与环境学院,陕西 西安 710127; 2.陕西省地表系统与环境承载力重点实验室,陕西 西安 710127)

摘 要:研究了渭北旱塬地区不同填闲作物(长武怀豆(S)、黑麦草(R)及两者 1:1 混合(M))翻压和氮肥水平(0、60、120 kg N·hm⁻²)双因素处理下,填闲作物的腐解规律、碳氮释放动态及对后茬冬小麦产量的影响,并对腐解速率与 Olsen 模型进行了拟合。结果表明:各填闲作物翻压后腐解规律及碳氮释放特征均表现为“前期快-中期慢-后期加快”,填闲作物腐解规律符合 Olsen 模型,在第 276 天各处理累积腐解率均达 70% 以上。在第 0~35 天,同一施肥处理下,累积腐解率和腐解速率均表现为 S>M>R($P<0.05$);第 35 天,S、M 和 R 各处理干物质累积腐解率分别达到 61.9%、55.5%和 47.5%;在 0~35 d,施氮对 S、M 的腐解影响不显著,对 R 影响显著,35 d 后氮肥效应逐渐减弱;填闲作物的腐解同时伴随其碳、氮的快速释放,在第 21 天,S、M 和 R 碳氮残留率分别达到 40%、50%和 60%左右。平均来看,S 的碳氮释放速率显著高于 R,与 M 无显著差异。与裸地对照相比,翻压填闲作物能够显著提高后茬冬小麦产量,其籽粒产量增加 10%~35% ($P<0.05$),其中翻压长武怀豆低氮处理和混合翻压低氮处理效果最佳。

关键字:填闲作物;腐解;冬小麦;产量

中图分类号:S551 **文献标志码:**A

Decomposition of cover crop residues in soils and its effects on winter wheat yield

LI Zhi-peng^{1,2}, WANG Jun^{1,2}, SHANG Yu-qing^{1,2}, ZHANG Shao-hong^{1,2}

(1. College of Urban and Environment science, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710127, China

2. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710127, China)

Abstract: The nylon mesh bag method was used to study the return of different cover crops (Changwu soyean (S), Ryegrass (R), and 1:1 Mixture (M)) residue and nitrogen (N) fertilizer level (0, 60, and 120 kg N·hm⁻²) in Weiwei dryland area under the two-factor treatments, the cover crop decomposition, the dynamics of carbon and nitrogen release, and the subsequent yield of winter wheat, and the decomposition rate were analyzed with the Olsen model. The results indicated that the decomposition and release characteristics of carbon (C) and N from each cover crop showed a characteristics of “pre-fast-intermediate slow-late acceleration”, and the decomposition of cover crops was following the Olsen model. On the 276th day, decomposition rates of all treatments were above 70%. In days of 0~35, under the same N treatment, the cumulative decomposition rate and the decomposition rate were in order of S>M>R ($P<0.05$). On the 35th day, the cumulative decomposition rate of dry matter in S, M, and R treatments reached 61.9%, 55.5%, and 47.5%, respectively. The application of N in 0~35 days enhanced the crop decomposition. The application of N to S and M did not impact the decomposition significantly but the effect on R was significant. After 35 days, the effect of N fertilizer was gradually weakened. The decomposition of the cover crops was accompanied by the rapid release of C and N, especially in the first 21 days, the residual ratio of C and N in S, M, and R reached 40%, 50%, and 60%, respectively. On average, the C-N release rate with

treatment S was significantly higher than that with treatment R, but not with that of treatment M. Compared with the fallow control, the tumbling return of cover crops significantly increased the yield of subsequent winter wheat, and the grain yield increased by 10%~35% ($P<0.05$), among which SN1 and MN1 had the best treatment effect.

Keywords: cover crops; decomposition; winter wheat; yield

在渭北旱塬农作区,主要粮食作物收获后有一段裸地休闲期(6~9月),该时期无任何作物覆盖,易导致土壤养分淋溶损失、有机质消耗、水土流失等。在农田休闲期种植填闲作物^[1],具有提高土壤肥力^[2]、促进微生物活性^[3]及降低养分淋溶^[4]、抑制杂草生长和病虫害^[5]等多种生态效益,近年来在世界范围内得到了大面积推广。在粮食生产系统中,填闲作物通常在生长一定时间后翻耕入土用作绿肥以补充土壤养分供应^[6-7]。大量研究结果表明,填闲作物翻田腐解后可释放大量碳氮,从而提高土壤碳氮含量^[8-9]。填闲作物作为重要的有机肥源,了解其腐解过程、碳氮释放规律是合理选择填闲作物管理措施的基础。填闲作物本身的 C/N 是影响其腐解的重要因素^[10],研究表明,低 C/N 的豆科填闲作物比高 C/N 的禾本科填闲作物具有更快的腐解速率^[11];同时施氮水平也是影响填闲作物腐解的另一重要因素,有研究表明,在一定范围内,随着施氮量的增加,作物残体腐解速率也随之增加^[12-13];不同填闲作物种类因其本身碳氮含量和腐解过程的不同,其碳氮释放过程也存在明显差异^[14-15]。

施用氮肥是渭北旱塬农作区实现作物增产的主要方式,氮肥的不合理施用引发了一系列环境问题。翻压填闲作物可以改善土壤氮素环境,能够有效减少化学氮肥的施用量,在氮素水平较低的情况下翻压填闲作物可提高作物产量^[16-19],因此选择合适的填闲作物和氮肥水平对该区生态农业的发展有着重要的意义。

近年来,许多学者已对渭北旱塬地区豆科作物的腐解特征及土壤培肥效果进行相关研究,但关于豆科与禾本科及两者混播在同一冬小麦生境下的

腐解过程及对后茬作物产量的研究涉及较少。豆科填闲作物具有固氮作用,能为后茬作物提供氮素;燕麦、黑麦草等禾本科填闲作物则具有增加土壤有机质含量、提高土壤抗侵蚀的能力^[20];豆科与禾本科混播可以减少农田氮素损失,提高作物产量^[21-22]。豆科、禾本科及两者混播还田翻压腐解对该区冬小麦产量有何影响还有待进一步探究。

本试验采用尼龙网袋法在不同氮肥管理措施下对豆科、禾本科及两者混播填闲作物的腐解、碳氮释放动态及后茬作物产量进行研究,旨在分析不同种类填闲作物在不同种植措施和施氮水平下翻压后腐解过程及碳氮释放规律,明确旱作农田合理的填闲种植方式和施氮水平,以达到提高土壤肥力和后茬作物产量的目的,为填闲作物在黄土高原地区的推广提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验在陕西省长武县中国科学院长武农业生态试验站(107°44'E,35°12'N)进行。该区地处黄土高原中南部渭北旱塬,属半湿润易旱区,海拔 1 220 m,多年平均降雨量为 584.2 mm,1957—2004 年间夏季休闲期(7—9月)平均降水量为 305 mm,冬小麦生育期内平均降水量为 281 mm。年平均气温 9.1℃,年日照时数 2 230 h,无霜期 171 d,属属温带半干旱半湿润大陆性季风气候,是典型的旱作雨养农业区。研究区地势平坦,为典型的黄土高原沟壑地貌。土壤为粘壤质黑垆土,pH 值为 8.4,土壤有机质含量约 10.5 g·kg⁻¹,土质疏松,质地均匀,土层深厚。布设试验前 0~40 cm 各土层土壤基础理化性质如表 1 所示。试验期间气温与降水量见图 1。

表 1 0~40 cm 土层土壤理化性质
Table 1 Initial physical and chemical properties in 0~40 cm soil layer

土层 Soil depth /cm	容重 Bulk density /(g·cm ⁻³)	有机碳 Organic C /(g·kg ⁻¹)	全氮 Total N /(g·kg ⁻¹)	碳氮比 C/N	有效磷 Olsen-P /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available-K /(mg·kg ⁻¹)	pH (2.5:1)	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N /(mg·kg ⁻¹)	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N /(mg·kg ⁻¹)
0~10	1.24	11.6	1.27	9.1	5.3	183.2	8.30	6.2	4.8
10~20	1.43	11.2	1.02	10.5	3.5	162.8	8.21	5.5	4.9
20~40	1.38	9.8	0.97	10.1	2.1	169.2	8.13	4.1	4.1

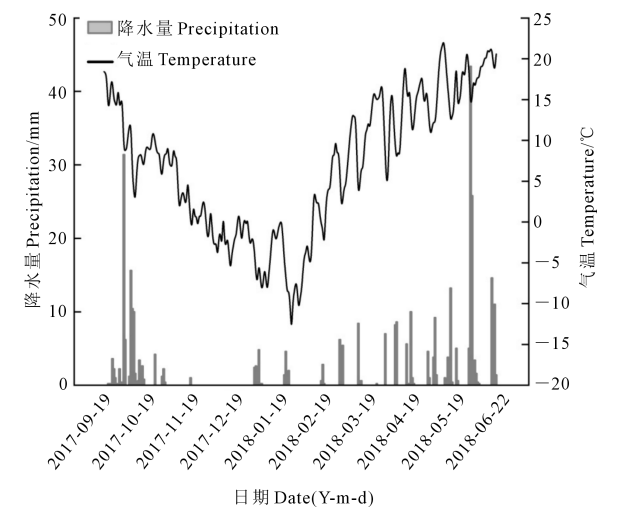


图 1 试验期间气温及降水量

Fig.1 Air temperature and precipitation during the study period

1.2 试验设计

冬小麦-填闲种植定位试验开始于 2016 年 9 月。试验设计采用填闲作物和氮肥双因素处理(表 2),填闲作物还田作为主处理因素,包括裸地对照(CK)、长武怀豆(S)、黑麦草(R)及长武怀豆与黑麦草混合(M);氮肥为副处理,设有 3 个施氮水平,即不施氮(N0:0 kg N·hm⁻²)、低氮(N1:60 kg N·hm⁻²)和高氮(N2:120 kg N·hm⁻²)。每个处理重复 3 次,随机布置在 36 个小区中,每个小区长 7 m、宽 4 m,小区间设有 0.5 m 的保护行。供试小麦品种为“长航一号”,于每年 9 月下旬播种,播量为 225 kg·hm⁻²,次年 6 月下旬收获。填闲作物于小麦收获后种植,设置裸地对照(CK),长武怀豆单播(播量为 82.5 kg·hm⁻²),黑麦草单播(播量为 50 kg·hm⁻²)和长武怀豆与黑麦草混播(播量为长武怀豆 41.25 kg·hm⁻²+黑麦草 25 kg·hm⁻²),每年生长至 9 月中旬时用碎草机粉碎后使用旋耕机翻耕入田,于 9 月下旬播种冬小麦。

填闲作物原位腐解实验(埋袋法^[23])于 2017 年 9 月至 2018 年 6 月期间进行。2017 年 9 月采集长势良好、色泽均匀的长武怀豆及黑麦草,65℃烘干 72 h,剪成 2~3 cm 的样段,称取 15 g(M 处理按 1:1 比例充分混合)装入 15 cm×20 cm、孔径 200 目的尼龙网袋中并封口。2017 年 9 月 19 日在填闲作物还田后埋入田,埋设深度 10 cm,水平放置,两个尼龙网袋之间距离 25 cm,尽量保持原来的土体结构翻埋入土,每个小区埋设 12 个袋子,重复 3 次。翻埋后立即均匀撒施不同水平氮肥,尼龙网袋上方土壤同时撒施,并施加磷肥(P₂O₅:90 kg·hm⁻²)。2017 年 10 月 3 日,填闲作物腐解两周后种植冬小麦。填闲作物地上部分初始养分含量见表 3。

表 2 试验处理描述

Table 2 Treatment design of the experiment

处理编号 Treatment No.	翻压处理 Buried treatment	施氮量 N Level /(kg N·hm ⁻²)
1	CKN0 裸地对照 Fallow control(CK)	0
2	CKN1 裸地对照 Fallow control(CK)	60
3	CKN2 裸地对照 Fallow control(CK)	120
4	SN0 长武怀豆 Changwu soybean(S)	0
5	SN1 长武怀豆 Changwu soybean(S)	60
6	SN2 长武怀豆 Changwu soybean(S)	120
7	MN0 长武怀豆+黑麦草 S and R mixed(M)	0
8	MN1 长武怀豆+黑麦草 S and R mixed(M)	60
9	MN2 长武怀豆+黑麦草 S and R mixed(M)	120
10	RN0 黑麦草 Ryegrass(R)	0
11	RN1 黑麦草 Ryegrass(R)	60
12	RN2 黑麦草 Ryegrass(R)	120

表 3 填闲作物地上部分初始养分含量

Table 3 The initial nutrient content in shoot of cover crops

填闲作物 Cover crops	有机碳 Organic C /(g·kg ⁻¹)	全氮 Total N /(g·kg ⁻¹)	碳氮比 C/N
长武怀豆(S) Changwu soybean	416.7	28.9	14.4
黑麦草(R) Ryegrass	273.0	11.1	24.6
长武怀豆+黑麦草(M) Changwu soybean+Ryegrass	343.7	20.1	17.1

1.3 样品处理与指标测定

1.3.1 样品处理与指标测定 本试验于 2017 年 9 月 19 日开始采样,2018 年 6 月 22 日即小麦收获前一天(276 d 后)最后一次取样,共 12 个取样时间(翻埋后第 0、7、14、21、28、35、49、77、119、175、245 天和 276 天)。取出尼龙网袋后去除表面的泥土、根系及其他杂质,取出植物残体并用蒸馏水洗净,在 65℃下烘干至恒重,测定腐解率。将烘干后的腐解残体粉碎研磨后过 0.15 mm 筛,采用 EA3000 型元素分析仪测定植株残体有机碳和全氮含量。于 2018 年 6 月 22 日,在每个小区中央收获 3 个面积为 1 m²样方小麦,用于估算产量。收获的小麦风干后,称量地上部分生物量,人工脱粒测定小麦籽粒产量,计算收获指数(收获指数=籽粒产量/地上部总生物量),并统计穗数、穗粒数,称量千粒重。

1.3.2 计算公式

填闲作物累积腐解率(%)=(M₀-M_t)/M₀×100%

式中,M_t为 t 时刻(腐解天数)填闲作物干物质量(g);M₀为初始干物质量(g)。

干物质分解速率(g·d⁻¹)=(M_t-M_{t+1})/(T_{t+1}-T_t)

式中,M_t为 t 时刻填闲作物干物质质量(g);T_t为 t 时刻的天数。

填闲作物平均腐解速率及养分释放速率(k)使

用埋袋法常用的由 Olson^[24]提出的单指数函数模型: $Y=Y_0e^{-kt}$ 计算。 Y 表示填闲作物 n 天后的干物质剩余量及养分剩余量; Y_0 代表初始填闲作物的干物质质量及养分含量; k 为平均腐解率及养分释放速率(k 值越大表示腐解越快,养分释放也越快), $k=\frac{\ln M_t/M_0}{-t}$, t 为腐解天数。半减期,即填闲作物分解一半的干物质质量及养分释放一半所用的时间,使用公式: $t^{1/2}=0.693/k$ 。养分残留率(%)=($C_t\times M_t$)/($C_0\times M_0$) $\times 100\%$,式中, C_t 为 t 时刻填闲作物养分浓度($g\cdot kg^{-1}$), M_t 为 t 时刻填闲作物干物质质量(kg)^[6]。

1.4 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 19.0 软件对数据进行处理分析,处理间差异的多重比较采用 Least-significant difference (LSD) 法完成,采用 Origin Pro 2018 制图。

2 结果与分析

2.1 填闲作物干物质腐解动态

填闲作物翻埋后,随着腐解时间的延长,各处理累积腐解率均呈现“前期腐解快-中期腐解慢-后期加快”的变化特征(图 2)。0~35 d(2017 年 9 月 19 日—10 月 24 日)为填闲作物的快速腐解期,累积腐解率为 45%~70%,释放速率约为 194~302 $mg\cdot d^{-1}$ (图 3);第 35~175 天(2017 年 10 月 24 日—2018

年 3 月 13 日)为缓慢腐解时期,腐解速率维持在 14.6 $mg\cdot d^{-1}$ 左右;175~276 d(2018 年 3 月 13 日—6 月 22 日)腐解速率加快,累积腐解率为 71.1%~89.6%,腐解速率约为 30~50 $mg\cdot d^{-1}$ 。S、M 和 R 的腐解速率在第 7 天和第 28 天出现峰值,之后各填闲作物腐解速率趋于平稳(图 3)。

在 0~35 d,同一施氮处理下,累积腐解率和腐解速率均呈现 S>M>R 的特点。第 35 天时,N0 下,S 的累积腐解率与 M 无显著差异($P>0.05$)、S 较 R 提高 53.1%($P<0.05$),M 较 R 提高 40.1%($P<0.05$);N1 下,S 的累积腐解率与 M 无显著差异($P>0.05$)、S 较 R 提高 18.7%($P<0.05$),M 较 R 提高 12.4%($P<0.05$);N2 下,S、M、R 的累积腐解率无显著差异($P>0.05$)。

2.2 氮素添加对填闲作物残体腐解的影响

各填闲作物累积腐解率在不同施氮处理下表现为 N2>N1>N0,第 35 天,N0、N1、N2 处理平均累积腐解率分别为 59.5%、64.3%和 68.8%。第 35 天时,S 处理下的累积腐解率,N1、N2 较 N0 分别提高了 2.4%和 3.6%($P>0.05$);M 处理下的累积腐解率,N1、N2 较 N0 分别提高了 4.2%和 9.3%($P>0.05$);R 处理下的累积腐解率,N1、N2 较 N0 分别提高了 29.0%和 46.6%($P<0.05$)。施氮对 R 的腐解有显著影响,施氮量越高腐解越快;在 0~35 d 施氮加快了 S 和 M 的腐解,但影响不显著,35 d 后氮肥效应逐渐减弱。

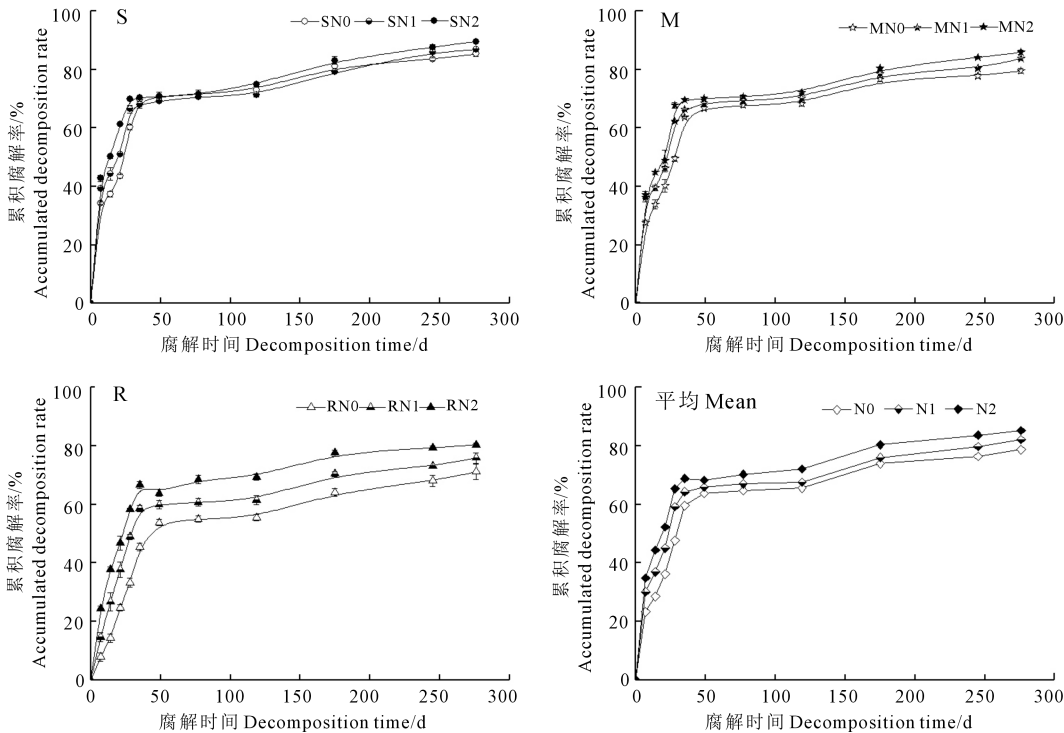


图 2 不同处理下填闲作物干物质累积腐解率

Fig.2 Accumulated decomposition rate of cover crop residues under different treatments

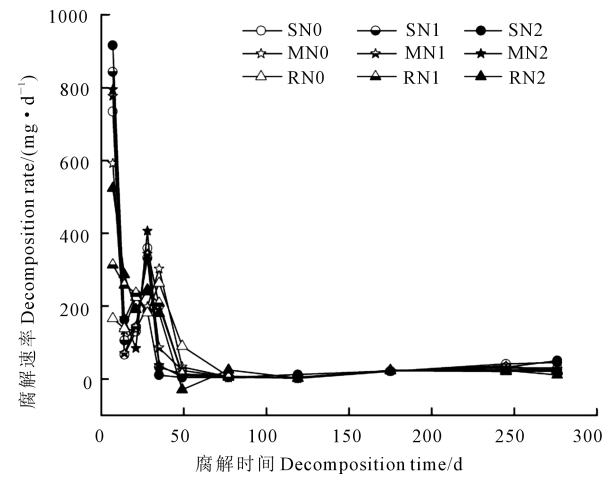


图 3 不同处理下填闲作物干物质腐解速率

Fig.3 Decomposition rate of cover crops with different treatments

表 4 不同填闲作物处理下土壤中的腐解残留率/%

Table 4 Crop residue remaining ratio of different treatments in soil

处理 Treatment	腐解时间 Decomposition time/d										
	7	14	21	28	35	49	77	119	175	245	276
SN0	65.7	62.6	56.5	39.8	30.4	29.4	28.4	27.1	18.9	16.5	14.6
SN1	60.6	55.7	49.1	33.6	32.1	30.8	29.4	28.8	20.9	14.1	13.2
SN2	57.2	49.7	38.8	30.1	29.6	29.3	28.5	25.2	16.9	12.3	10.4
MN0	72.4	66.1	59.8	50.5	36.4	33.3	32.2	31.8	23.4	22.3	20.5
MN1	63.7	60.4	53.7	37.7	33.7	31.5	30.6	29.9	21.5	19.6	16.3
MN2	62.9	55.1	51.2	32.2	30.5	30.0	29.3	28.0	19.6	15.9	14.1
RN0	92.2	85.8	75.3	66.8	54.6	46.2	45.0	44.5	36.0	32.0	28.9
RN1	85.4	73.3	62.3	51.1	41.4	40.2	39.2	38.6	29.6	27.0	24.2
RN2	75.6	62.2	53.3	41.8	33.4	36.1	31.5	30.8	22.5	20.8	19.7

表 5 不同填闲作物残体 Olsen 模型和半衰期

Table 5 Half-life ($T_{0.5}$) and Olsen's model in different cover crops treatments ($n=12$)

处理 Treatments	k	$t^{1/2}/d$	R^2	Olsen 模型
SN0	0.0329	21.0	0.814 **	$Y=15e^{-0.0329t}$
SN1	0.0390	17.8	0.880 **	$Y=15e^{-0.0390t}$
SN2	0.0428	16.2	0.929 **	$Y=15e^{-0.0390t}$
MN0	0.0244	28.4	0.862 **	$Y=15e^{-0.0244t}$
MN1	0.0348	19.9	0.860 **	$Y=15e^{-0.0348t}$
MN2	0.0404	17.1	0.864 **	$Y=15e^{-0.0404t}$
RN0	0.0144	48.2	0.545 *	$Y=15e^{-0.0144t}$
RN1	0.0240	28.9	0.696 *	$Y=15e^{-0.0240t}$
RN2	0.0311	22.3	0.868 **	$Y=15e^{-0.0244t}$

注：* 表示在 0.05 水平上显著；** 表示在 0.01 水平上显著。

Note: * means significant at 0.05 level; ** means significant at 0.01 level.

2.4 填闲作物残体碳、氮养分的释放及 C/N 变化

试验结果显示,碳素的释放速率表现为:S>M>R,各处理下碳素的释放与各填闲作物腐解规律基本一致(图 5)。填闲作物翻压后的 0~35 d 碳素迅速释放,至 35 d 时,N0 下 S、M、R 碳残留率分别为

2.3 不同处理下填闲作物残体腐解残留率的变化

为进一步比较不同填闲作物处理腐解速率,使用 Olsen 模型计算得到的腐解常数 k 并与残体腐解残留率数据(表 4)进行拟合检验,并由此模型推算各处理残体腐解 50% 时所需时间 $t^{1/2}$ (d)。由结果可知,各处理均达到显著相关水平(表 5),说明该地区的填闲作物残体腐解动态适合 Olsen 单指数函数模型: $Y=Y_0e^{-kt}$ 。腐解常数 k 越大腐解速率越快,可知各填闲作物腐解速率表现为:S>M>R(表 4),长武怀豆的高氮处理(SN2)腐解最快,其次是混合还田处理(M),黑麦草的无氮处理(RN0)腐解最慢。各处理半衰期的顺序与之相反:S 腐解一半平均需要 18.3 d,M 需要 21.8 d,R 则需要 33 d。

42.6%、40.2%、46.7%;N1 下 S、M、R 残留率分别为 38.9%、38.7%、43.3%;N2 下 S、M、R 残留率分别为 33.9%、36.5%、41.5%。35~175 d 碳素释放基本停滞,碳素残留率维持在 31.2%~45.1%之间,175 d 至试验结束时略有增加。氮肥水平对碳素释放影响不显著。

填闲作物翻压后的 0~21 d 氮素迅速释放,至 21 d 时,N0 处理下 S、M、R 氮残留率分别为 54.6%、69.9%、88.6%;N1 处理下 S、M、R 氮残留率分别为 47.7%、57.2%、80.1%;N2 处理下 S、M、R 氮残留率分别为 49.6%、68.1%、74.4%。与 R 相比,S 和 M 氮残留率分别下降了 37.8% 和 19.8% ($P<0.05$)。SN1 和 SN2 氮残留率较 SN0 分别降低 12.6% 和 9.2%;MN1 和 MN2 较 MN0 氮残留率降低 18.1% 和 2.6%;RN1 和 RN2 较 RN0 分别降低 9.6% 和 16.0%。21~175 d,各处理氮素释放缓慢氮素残留率维持在 42.7%~68.9%之间,175 d 至试验结束氮素释放速率稍有增加。整体而言,不论施氮与否,除第 276 天外,翻压 S 和 M 的氮残留率显著低于 R 处理($P<0.05$),表明影响氮释放主要与填闲作物本身氮含量

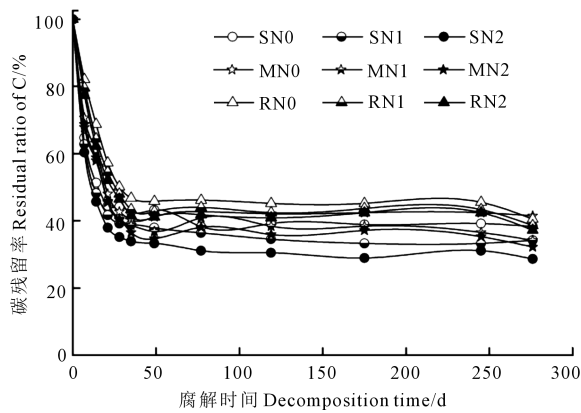


图 4 填闲作物腐解残体中碳残留率的变化

Fig.4 Changes of C in cover crop residues

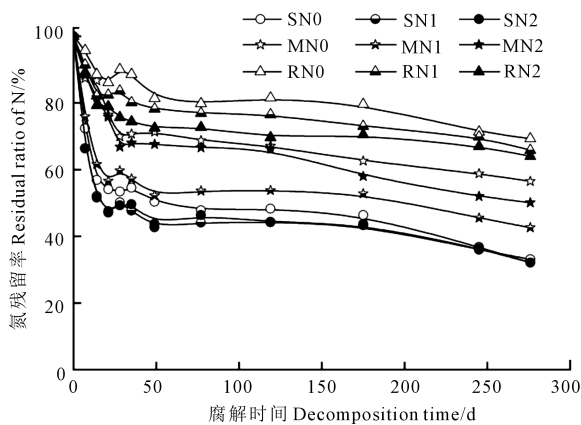


图 5 填闲作物腐解残体中氮残留率的变化

Fig.5 Changes of N in cover crop residues

有关,施氮促进了氮素释放。R 氮元素释放缓慢,其释放速度随施氮量的增加而增加;M 氮素释放速率仅次于 S,施氮促进了填闲作物氮素的释放。

试验期间,填闲作物 C/N 变化明显(图 6),随着填闲作物的腐解,各处理的 C/N 不断降低,0~21 d 下降速率最快,21 d 后缓慢增长,后趋于平稳。施氮处理的 C/N 下降速率高于不施氮处理,且下降速率 $N2>N1$ 。从动态变化来看,N0 下,S 的 C/N 从试验开始的 14.4 降低到 9.7;R 从最初的 24.6 下降到 18.7;M 的 C/N 从 17.1 减少到 10.1。而 SN1 降至 7.4,SN2 降至 7.1;RN1 降低至 17.3,RN2 降至 15.6。MN1 降至 9.8,MN2 降至 8.4。由此可见,填闲作物的腐解也是其 C/N 不断下降的过程,且氮肥的施入一定程度上加速了 C/N 的下降。

2.5 填闲作物腐解对小麦产量的影响

由表 6 可以看出,与裸地对照(CK)相比,种植并翻压填闲作物各处理下小麦籽粒产量、生物量、收获指数、穗数、穗粒数、千粒重均有所提高。其中与 CK 相比 R、M、S 的籽粒产量分别提高了 9.8%、32.7%、35.4%;生物量分别提高了 12.5%、21.2%、

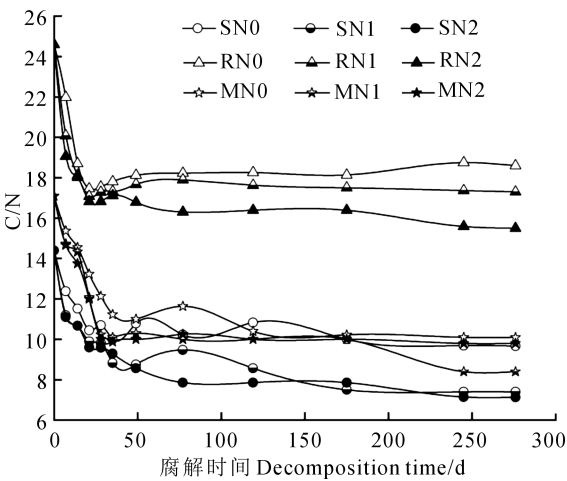


图 6 填闲作物腐解残体中 C/N 的变化

Fig.6 Changes of C/N in cover crop residues

27.8%;收获指数分别提高了 1.4%、7.7%、11.4%;穗数分别提高了 2.7%、22.0%、24.2%;穗粒数分别提高了 2.0%、5.8%、15.6%;穗粒数分别提高了 11.2%、24.5%、31.2%。各施氮及填闲作物翻压处理对冬小麦收获指数影响不显著($P>0.05$)。与 N0 相比,施加低氮(N1)与高氮(N2)处理下,冬小麦生物量、籽粒产量、穗数、穗粒数及千粒重均呈现显著性差异($P<0.05$);与 CK 相比,S 和 M 处理下,冬小麦生物量、籽粒产量、穗数、及千粒重均呈现显著性差异($P<0.05$);与 CK 相比,翻压黑麦草(R)处理下冬小麦产量各指标均无差异($P>0.05$)。施氮、填闲作物类型对除收获指数外其他产量指标均具有显著影响,且两者对冬小麦穗数及穗粒数具有极显著性交互作用($P<0.001$)。

3 讨论

3.1 不同填闲作物腐解过程的差异

本研究中,各填闲作物翻压处理腐解速率表现为“前期快-中期慢-后期加快”的特点。前期腐解迅速的原因在于,9—10 月份该地区降水及光热充足,微生物活性较强,填闲作物翻埋后在刚开始一些小分子和水溶性有机化合物如多糖、氨基酸、有机酸等易被微生物分解,增加了土壤中的底物供给,为微生物的繁殖提供了大量的养分及能源^[25];而到中期残体中的大分子物质,如纤维素、半纤维素和木质素等难分解物质所占比例不断上升,随着温度的降低,小麦进入越冬期,各处理腐解速率及养分释放均进入缓慢阶段^[26];在腐解后期随气温的升高、小麦的生长,腐解过程又进入另一个阶段,这与 Ferreira 等^[27]研究结果一致。Olsen 模型计算结果进一步验证了三种填闲作物腐解率 $S>M>R$ 。

表 6 不同填闲作物处理对冬小麦产量的影响
Table 6 The influence of different cover crop decomposition on yield of winter wheat

填闲作物 Cover crop	施氮 Nitrogen	籽粒产量 Yield /(kg·hm ⁻²)	生物量 Biomass/ (kg·hm ⁻²)	收获指数 Harvesting index/%	穗数 Spike numbers /(×10 ⁴ ·hm ⁻²)	穗粒数 Kernels per spike	千粒重 1000-kernel weight/g
CK	N0	2986	7039	42.4	287.7	26.3	25.8
	N1	4238	9260	45.7	413.7	30.2	35.2
	N2	4563	10053	45.4	482.0	32.0	38.1
R	N0	3893	9460	41.9	363.7	29.7	34.3
	N1	4230	9557	44.2	390.0	30.0	35.7
	N2	4823	10633	45.6	386.7	30.5	40.0
M	N0	4393	9490	46.6	469.0	26.3	36.2
	N1	5753	11377	50.5	528.7	35.2	43.4
	N2	5493	11083	49.8	445.3	32.1	43.8
S	N0	4833	10510	46.0	443.0	32.3	40.1
	N1	6038	11670	51.8	583.3	36.9	46.9
	N2	5087	11510	44.2	444.3	33.2	42.9
LSD (0.05)		759.4	379.9	3.6	36.4	1.1	3.4
填闲作物均值 Means of cover crop	CK	3929b	8784c	43.9a	394.4b	29.5b	33.0b
	R	4316b	9883bc	44.5a	405.1b	30.1b	36.7b
	M	5213a	10650ab	47.3a	481a	31.2b	41.1a
	S	5319a	11230a	48.9a	490a	34.1a	43.3a
施氮均值 Means of nitrogen	N0	4026b	9124b	44.2a	390.8b	28.7b	34.0b
	N1	4992a	10466a	46.2a	458.3a	32.0a	40.3a
	N2	5065a	10820a	48.1a	478.9a	33.1a	41.2a
	填闲作物(Cc)						
	Cover crop	* * *	* * *	NS	* * *	* * *	* * *
显著性	施氮(N)						
Significance	Nitrogen	* * *	* * *	NS	* * *	* * *	* * *
	填闲作物× 施氮(Cc×N)	NS	NS	NS	* * *	* * *	NS

注：* * * 表示在 0.001 水平上显著。不同小写字母 a,b,c 表示不施氮处理下不同填闲种植处理间达到显著差异性($P<0.001$)。NS 表示无差异性。

Note: * * * means significance at 0.001 levels. Different lowercase letters a, b, c indicate significant difference between different cover cropping treatments under different N application ($P<0.001$). NS means not significant.

填闲作物腐解及养分释放受到土壤及水热等多方面因素的影响,其中自身的 C/N 也决定着植株残体的腐解速率^[10]。本文不同处理之间腐解速率表现为 S>M>R,由此可见 C/N 越低腐解速率越快。Heal 的研究发现植物残体 C/N 低于 20 时其腐解速率及养分释放速率变得极为迅速,本研究中长武怀豆与混合处理残体腐解率均大于黑麦草处理,且当黑麦草 C/N 降到 20 以下(14 d 后)之后其腐解速率也在不断加快,这与 Heal 等^[28]的研究结果一致。

3.2 施氮对填闲作物残体腐解的影响

研究结果显示,氮肥的施入促进了填闲作物的腐解,施氮处理对 R 的腐解影响最为明显,而对 S、M 影响不显著。其原因可能是禾本科的黑麦草翻埋后大量能源物质(碳源)会刺激微生物迅速活动,导致有效氮被微生物固持^[29],而施氮减轻了有效氮被微生物的固持、提高了土壤微生物的分解代谢能力,从而加速了残体的腐解。在腐解的后期施氮处理对填闲作物的腐解基本无影响,原因可能是在试

验后期,冬小麦的生长消耗了氮素及氮的淋溶损失导致了氮肥效应逐渐减弱。

3.3 填闲作物残体碳、氮养分的释放

在本研究中,残体的碳、氮养分在最初的 21 d 迅速释放,S 和 M 残体的碳、氮养分释放速率快,R 释放缓慢。这与牟小翎等^[30]、Poffenbarger 等^[31] 研究结果一致。原因可能是本研究中等量的 S 与 M 残体初始的含氮量高于 R,且 S 本身具有较强的固氮能力,翻压后氮素释放迅速;R 本身含氮量低,在腐解后期出现了固氮的情况,影响作物吸收^[31]。在腐解前期碳氮释放量最多,为小麦出苗提供了充足养分,但该时期小麦养分需求量小,大量养分未被利用储存在土壤中为随后分蘖期小麦提供养分,冬小麦进入越冬期后苗基本停止生长,养分需求更少,返青期后填闲作物腐解为之后各生育期小麦提供养分,作物生长吸收碳氮的最佳时期。

3.4 填闲作物腐解对冬小麦产量的影响

种植并翻压夏季填闲作物可以增加后茬作物

的产量^[32]。小麦的产量与绿肥作物翻压时间、翻压总量、养分释放量等有着密切的关系。诸多研究认为,填闲作物翻压时期应选择在其产量及养分含量最高时进行。本研究翻压长武怀豆为结荚期,黑麦草为盛花期,该时期填闲作物植株木质化程度低,植株较鲜嫩,翻压后腐解矿化快,能及时地释放养分供后茬冬小麦吸收利用;张久东、Shah 等研究发现绿肥翻压生物量越高,其后茬作物产量及养分吸收量也越大^[33-34];填闲作物翻压量增大土壤中的微生物量也相应增大,土壤中微生物活性增强,土壤的肥力也随之提高;填闲作物翻压量越大其在土壤中的养分释放量也越多,能更好地为后茬冬小麦提供养分。在各处理中 SN1 及 MN1 与 CK 相比小麦增产最多。SN1 高产原因:S 氮含量高,配以 N1 处理使其腐解速率增加,与 SN2 处理相比 SN1 养分释放慢,但释放量相差不大,SN1 养分释放与冬小麦养分需求保持了同步;氮素过快释放会被过早地淋溶和反硝化作用消耗,不利于作物的利用。MN1 高产的原因:在豆科与禾本科混播生长期,豆科固定的氮素会向禾本科转移,有研究发现在豆科与禾本科间作系统中,豆科体内有 2.2% 的氮直接转移给禾本科作物,促进禾本科作物的生长使其翻压生物量增加^[35],为后茬冬小麦提供了充足的养分。因此选择合理的翻压方式有利于冬小麦的增产。本研究只对各填闲作物地上部分做了腐解规律的研究,但未对根部进行研究,并且缺少生长期间的固氮效应研究,有研究表明根部的腐解也是填闲作物腐解养分释放的重要来源^[36],因此可能会过高估计了填闲作物翻压对冬小麦的增产效应。

4 结 论

本研究结果表明,在渭北旱塬旱作冬小麦生境下各填闲作物翻压处理腐解特征及碳、氮释放表现为“前期快-中期慢-后期加快”的特点,试验结束的第 276 天,S、M 及 R 各处理的累积腐解率均达到 7% 以上;0~35 d 不同填闲作物腐解速率表现为:S>M>R。该地区填闲作物腐解规律符合 Olsen 模型;0~35 d 内氮素的添加促进了填闲作物残体的腐解,35 d 后氮肥效应减弱;氮释放速率高于碳释放速率,填闲作物的初始 C/N 影响其腐解速率,表现为低 C/N 填闲作物腐解快于高 C/N 填闲作物;与裸地对照相比翻压填闲作物能够显著提高后茬冬小麦产量,但并非施氮越多产量就越高,腐解速率及养分释放与冬小麦养分吸收保持同步时增产效应最佳,

其中以 SN1 及 MN1 处理为最佳翻压处理组合。因此选择单播长武怀豆或者长武怀豆与黑麦草混播并翻压更适合作为该地区可持续农业的管理措施。

参 考 文 献:

[1] Pound B, Anderson S, Gundel S. Species for Niches: When and for Whom Are Cover Crops Appropriate? [J]. Mountain Research & Development, 1999, 19(4):307-312.

[2] Li X, Sørensen P, Li F, et al. Quantifying biological nitrogen fixation of different catch crops, and residual effects of roots and tops on nitrogen uptake in barley using in-situ 15 N labelling[J]. Plant & Soil, 2015, 395(1-2):273-287.

[3] Mackie K A, Schmidt H P, Müller T, et al. Cover crops influence soil microorganisms and phytoextraction of copper from a moderately contaminated vineyard[J]. Science of the Total Environment, 2014, 500-501:34-43.

[4] Constantin J, Bas C L, Justes E. Large-scale assessment of optimal emergence and destruction dates for cover crops to reduce nitrate leaching in temperate conditions using the STICS soil - crop model [J]. European Journal of Agronomy, 2015, 69:75-87.

[5] Yeganehpour F, Salmasi S Z, Abedi G, et al. Effects of cover crops and weed management on corn yield[J]. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2015, 14(2):178-181.

[6] 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.

[7] 张达斌, 姚鹏伟, 李婧, 等. 豆科绿肥及施氮量对旱地麦田土壤主要肥力性状的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(7):2272-2281.

[8] 杜威, 王紫泉, 和文祥, 等. 豆科绿肥对渭北旱塬土壤养分及生态化学计量学特征影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(4):999-1008.

[9] 代文才, 高明, 兰木铃, 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.

[10] Ibewiro B, Sanginga N, Vanlauwe B, et al. Nitrogen contributions from decomposing cover crop residues to maize in a tropical derived savanna.[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2000, 57(2):131-140.

[11] Xu S, Liu L L, Sayer E J. Variability of above-ground litter inputs alters soil physicochemical and biological processes: a meta-analysis of litter fall-manipulation experiments [J]. Biogeosciences, 2013, 10:7423-7433.

[12] Sainju UM, Whitehead WF, Singh BP. Bi-culture legume-cereal cover crops for enhanced biomass yield and carbon and nitrogen[J]. Agron J, 2005, 97:1403-1412.

[13] Ishaque W, Mahmood T, Riaz M A, et al. Short-term effects of tillage and residue management practices on dry matter yield and fate of 15 N-urea in a continuous maize cropping system under subtropical conditions[J]. Soil & Tillage Research, 2018, 182:78-85.

[14] 蔡苗, 周建斌, 韩昇昌. 不同施氮量下玉米根茬分解及对土壤有机碳的影响[J]. 西北农业学报, 2017, 26(10):1559-1568.