

青海高原地区绿肥毛叶苕子 腐解规律及养分释放特征

毛小红,李正鹏,严清彪,韩梅

(青海大学农林科学院,青海 西宁 810016)

摘要:为了解绿肥毛叶苕子(*Vicia Villosa* L.)在青海高原地区对土壤的培肥效果以及为农作物提供养分情况,在田间利用尼龙网袋法,研究毛叶苕子腐解特性和氮磷钾等养分释放规律。结果表明:绿肥毛叶苕子在翻压后50 d内腐解速度较快,腐解率达38%,后期腐解速度缓慢,在取样结束后,累积腐解率为86.39%;整个腐解过程中氮磷钾养分释放速率表现为氮>钾>磷,氮和钾的养分释放趋势存在一致性,在52 d内快速释放,养分释放率分别为56.54%、74.27%,后期释放速率缓慢,在腐解结束时,其养分累积腐解率达91.31%、99.04%;磷的释放速率缓慢,且波动性较大,在腐解周期内磷素含量呈上升趋势,取样结束后,累积腐解率为75.71%。绿肥毛叶苕子的干物质累积腐解率、养分累积释放率与腐解时间的关系可以通过线性函数和对数函数拟合。预测本试验处理可为后茬作物地块提供氮素172.80 kg·hm⁻²、磷素10.93 kg·hm⁻²、钾素139.63 kg·hm⁻²。

关键词:毛叶苕子;腐解特征;养分释放;青海高原

中图分类号:S142 文献标志码:A

Decomposition law and nutrient release characteristics of green manure *Vicia Villosa* L. in Qinghai Plateau

MAO Xiaohong, LI Zhengpeng, YAN Qingbiao, HAN Mei

(Academy of Agriculture and Forestry, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China)

Abstract: To determine the effect of green manure *Vicia Villosa* L. on soil fertility and provide nutrient resources for crops in Qinghai Plateau, the decomposition trends of *Vicia Villosa* L. and the nutrient release characteristics of nitrogen, phosphorus and potassium were studied with nylon mesh bags in the field. The results showed that the decomposition rate of green manure was 38% within 50 days after being turned over, and the decomposition rate was slow at the later stage. After sampling, the cumulative decomposition rate was 86.39%. In the whole decomposition process, the release rate all ranked as N>P>K, showing the same trend. The release rate of N and K was 56.54% and 74.27% in 52 days, respectively, while the release rate was slow in the later stage. At the end of decomposition, the cumulative decomposition rate of nutrients reached 91.31% and 99.04%. The release rate of phosphorus (P) was slow and fluctuating, and the content of phosphorus increased during the decomposition period. After sampling, the cumulative decomposition rate was 75.71%. The relationship between dry matter cumulative decomposition rate, nutrient cumulative release rate and decomposition time was fitted by linear function and logarithmic function. This experiment predicts that 172.80 kg·hm⁻² of nitrogen, 10.93 kg·hm⁻² of phosphorus and 139.63 kg·hm⁻² of potassium would be left in the field for the following crops.

Keywords: *Vicia Villosa* L.; decomposition characteristic; nutrient release; Qinghai Plateau

土壤养分难以被作物吸收利用以及寒、旱等气候特征是限制青藏高原地区农牧业发展的主要生态因子。基于近年来农业农村部化肥农药减施、有

机肥替代化肥等行动,为了最大程度保证农业生产高产、高效地运行,应以现代科学技术为手段,同时继承传统农业的精华部分,更加高效地发展农业生

产,深入探索作物对水分和养分的积累分配和转运规律、养分在土壤和其他介质中的累积和迁移转化规律、以及生态和人为因子影响作物吸收水分和养分的规律、不同类型作物对水分和养分的供应效应能力的影响等,对于响应国家化肥减施相关政策措施,为土壤培肥、作物增产以及肥料资源高效利用与管理提供理论参考,对应对多变的农业生产环境具有重要的意义。

肥饲兼用的绿肥作物地上部分分枝多、根系发达,还田后可将大量的微生物和酶翻压入土,从而促进微生物的活动,加速绿肥分解和转化,使土壤中的养分得以活化,利于作物吸收和利用。绿肥还田后能明显地提升土壤的理化性质;大量研究证据肯定了绿肥对地力的提升效果^[1-4]。绿肥经处理翻压后腐解矿化快,能及时、迅速地释放出养分供农作物吸收与利用,有学者利用¹⁵N 标记技术研究发现,植物前期的营养生长吸收的养分来自绿肥,绿肥作为优质生物有机肥源^[5],是减少化学投入、增加土壤有机物料的重要途径之一。研究表明,在不同的肥料养分综合管理条件下,作物吸收的氮素有 50%左右来自于土壤^[6]。绿肥氮与化肥氮对作物吸收而言是等效的^[7],绿肥作物来源的氮素在土壤中具有更长的滞留时间^[8],作物能从土壤中吸收比肥料来源更多的氮素^[9]。研究还表明,绿肥的应用可以增加土壤中养分的固定^[10],增加绿肥作物来源的养分是维持土壤微生物生态平衡,促进微生物固持养分,进而实现农田化肥减施增效和绿色发展的重要措施^[11],绿肥替代部分基施化肥对作物与种植田土壤肥力提升有积极作用^[12]。此外,在不合理施肥带来负面影响后,我们得出了一个结论,化肥配施绿肥对不利因素对生物量的降低有缓解作用^[13],化肥配施绿肥能够缓解甚至抵消其单独施用带来的

负面影响。目前,化肥养分的损失却远远高于绿肥养分的损失^[14],而绿肥在降低硝酸盐淋洗等养分损失方面具有较好的效果^[15],绿肥还田后,土壤溶液中硝酸盐浓度降低 38%~70%,总氮的损失降低约 18%~83%。国外学者研究表明,增加肥料养分在土壤中的滞留时间,能够促进作物的生长,增加产量、养分吸收量及肥料利用效率,从而降低了根层养分由于淋洗造成的损失^[16]。在过去,绿肥种植技术以肥饲利用为主要目的,现已不能满足新时代条件下的农业发展新要求。目前,绿肥作物服务于生态农业环境和农业生产的方式突破了原有的应用模式,在养分供应、培肥土壤、生物固氮、涵养水源等^[17]方面均体现了其为农田提供的有价值的生态系统服务功能。

在青海高原地区,绿肥翻压技术以及绿肥间作种植作物等已经取得突破,但对于绿肥翻压后腐解特性与养分释放规律的研究较少,绿肥养分释放结合轮作麦田养分吸收的研究较少。同时,作为五大牧区之一,选择毛叶苕子做绿肥腐解特性与养分释放规律的研究,以期对青海高原地区土壤培肥、牧草利用与评价、减施化肥以及农业的可持续发展提供参考,同时能预测绿肥翻压后为土壤提供的养分情况。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验设在西宁甘十里铺镇莫家泉湾(101.45E、36.43N),海拔为 2 300 m,气候冷凉,属高原大陆性半干旱气候。年平均气温 5.9℃,作物生长期为 220.2 d,日较差大,年平均降水量 367.5 mm,年均蒸发量为 1 729.8 mm。试验区土壤类型为栗钙土。图 1 为腐解期间试验地土壤水分含量和温度变化情况。

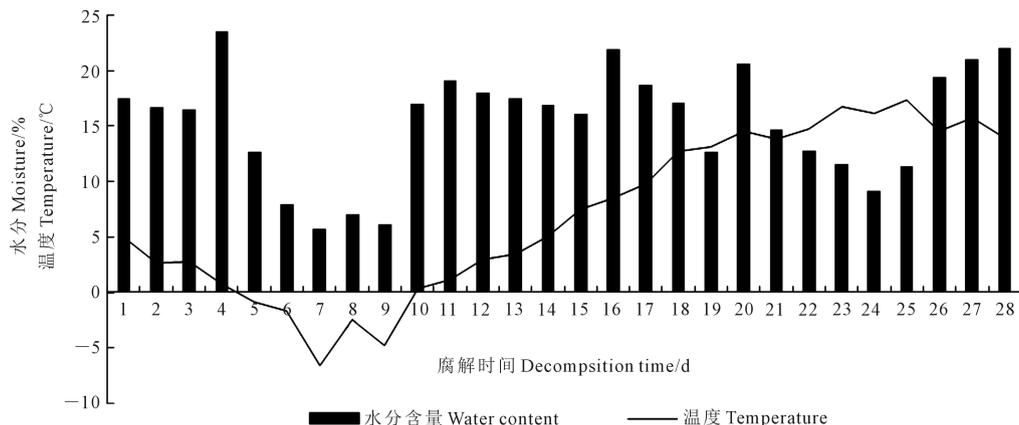


图 1 毛叶苕子腐解期间试验地水分含量和温度变化

Fig.1 Changes in moisture content and temperature of the test site during decomposition of *Vicia villosa* L.

1.2 试验材料

供试绿肥毛叶苕子品种为土库曼毛苕,2019年8月9日播种,于10月26日初花期取地上部分,长约30~40 cm。毛叶苕子初始含水率为84.23%,全氮、全磷和全钾含量分别为4.25%、0.31%、2.99%。

1.3 试验设计

采用田间尼龙网袋法,该方法操作简单、回收残余植株方便加上重复性强和成本低等优点。于2019年10月26日将毛叶苕子按鲜重130 g称量好后装入300目的尼龙网袋(长25 cm,宽14 cm)中封紧口,在田间开沟,深20 cm,将尼龙袋平铺于沟内,两个尼龙袋之间间隔30 cm左右,然后覆土。分别第1、7、14、28、38、52、67、77、87、139、150、157、165、172、182、188、200、210、230、238、251、259、272、280、290、297、304、311天取样,每次取样3袋,共取样28次。

腐解结束后将腐解残体在60℃下烘干称重,磨细并过筛,测定全氮、全磷和全钾含量。

1.4 测定方法与数据处理

采用国标分析方法测定毛叶苕子植株全氮、全磷和全钾含量。全氮采用凯氏定氮法测定,全磷采用氢氧化钠碱熔钼锑抗比色法测定,全钾采用火焰光度法测定。

土壤温度和含水率通过土壤墒情监测仪获得,温度和含水率数据采集自0~20 cm土层。

累积腐解量(mg)=初始植物干重-取样植株干重

累积腐解率(%)=(累积腐解量/初始植株干重)×100%

养分累积减少量(mg)=(开始时植株干重×开始时植株养分含量-取样植株干重×取样植株养分含量)

养分累积释放率(%)=养分累积减少量/(开始

时植株干重×开始时植株养分含量)×100%

腐解速率($\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$)=(翻压 n d 干物质质量-翻压 m d 干物质质量)/($m-n$)

养分累积释放率=(养分累积减少量/翻压前的养分总量)×100%

养分释放速率($\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$)=养分累积减少量/累积时间

试验数据的整理以及一元线性方程和对数方程的拟合用 Excel 2010 进行,方程为 $y=ax-b$ 、 $y=a\ln(x)-b$ 。其中, y 为累积腐解率或累计释放率, x 为腐解时间,图中腐解时间第 1 天代表埋袋第一天,即腐解 0 d 的数值,为未被腐解初始值, a 表征累积腐解率或养分累计释放率参数(%), b 表征绿肥毛叶苕子最易分解的干物质组分或最易释放的养分含量(%). 方差分析采用 SPSS 17.0 进行。

2 结果与分析

2.1 毛叶苕子干物质的腐解特性

在青海高原地区鲜明的气候环境条件下,翻压后的毛叶苕子在土壤微环境和外部气候环境等影响下呈现如图 2 所示的腐解规律。随着腐解时间的推进,累积腐解率呈逐渐增加的趋势,表现为前期快后期慢。毛叶苕子在翻压后的 50 d 内累积腐解量增加较快,腐解速率为 $149 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$,翻压 50 d 后腐解速率变缓,腐解速率为 $38 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$ 。结合表 1 得知,毛叶苕子在腐解 14 d 之后干物质累积腐解率开始呈现出明显的差异,腐解 28、52 d 时均与前期有明显差异,累积腐解率突破 50% 是在翻压 150 d 后。因该地区温度低、降水少,这两个生态因子限制了绿肥中易分解物质的腐解速率。在青海高原地区,绿肥毛叶苕子降解速度的阶段性不明显,没有明显的分界点和拐点,干物质在整个腐解历程中相对匀速腐解。在此可拟合累积腐解率与腐解时间

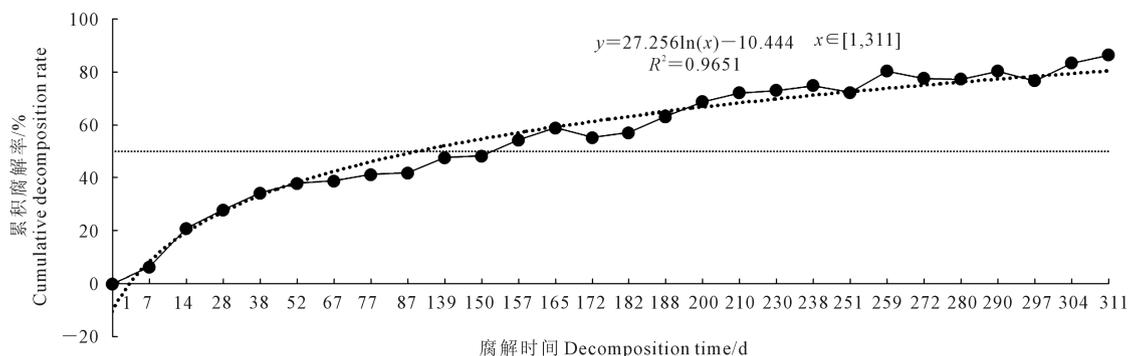


图 2 毛叶苕子干物质腐解规律

Fig.2 Decomposition rate of dry matter of *Vicia villosa* L.

的对数函数方程,为 $y = 27.256\ln(x) - 10.444, R^2 = 0.9651, x \in [1, 311]$ 。其中, y 为累积腐解率, x 为腐解时间, 参数 27.256 表征累积腐解率参数, 参数 10.444 表征绿肥毛叶苕子干物质最易分解的组分。

2.2 毛叶苕子腐解期氮、磷、钾养分含量变化

毛叶苕子鲜体在进行了 311 d 的翻压腐解后, 氮磷钾养分含量的变化如图 3 所示。全氮和全钾的变化趋势有着一致性, 随着翻压时间的延长, 养分逐渐释放, 含量逐渐降低, 前期释放快, 后期慢。释放快慢过渡的拐点大约在翻压后 50 d, 氮含量从初始的 4.25% 降为 2.98%, 钾的含量从初始的 2.98% 释放为 1.24%, 在翻压 50d 后养分释放缓慢。但两者从总体来看, 钾含量的变化趋势比较剧烈, 在短期内就得到了释放。磷含量的变化趋势与氮和钾不一致, 磷含量在翻压的周期内变化不剧烈, 含量反而有增加的趋势, 从翻压开始到翻压结束出现了富集的现象。

2.3 不同腐解时期毛叶苕子氮释放特征

全氮含量的变化和干物质的腐解特性有着一

致性。腐解开始时, 环境温度适宜、鲜体水分较充足, 氮素含量快速释放, 氮累积释放率逐步升高, 氮累积释放率的拐点在腐解 38 d 时, 毛叶苕子在 38 d 内腐解速度较快, 氮的养分释放速率为 $1\ 228\ \text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$, 累积释放率达 53.51%。在此对氮的累积释放率进行分段拟合, $0 \sim 38\ \text{d}$ 内氮累积释放率呈线性升高趋势, $y = 14.142x - 17.962, R^2 = 0.978, x \in [1, 38]$ (图 4), 14.142 表征氮养分累积释放率参数, 17.962 表征绿肥鲜体中氮最易释放的组分含量。结合表 2 可知, 氮累积释放率在腐解 14 d 后开始出现差异, 腐解 28、38 d 时均与前期存在显著差异, 腐解 238 d 后氮累积释放率无显著差异。腐解 38~150 d 时, 由于环境温度的降低和鲜体水分含量的损失, 养分累积释放率增加相对缓慢, 数值无显著差异, 养分释放速率为 $120.83\ \text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$ 。腐解 150 d 后, 氮累积释放率缓慢升高。腐解 38 d 至结束, 氮累积释放率可用对数方程 $y = 28.063\ln(x) - 1.4529, R^2 = 0.9677, x \in (38, 311]$ 进行拟合。 y 为累积释放率, x 为腐解时间, 28.063 为氮累积释放率参数, 1.4529 为毛叶苕

表 1 毛叶苕子腐解进程

Table 1 *Vicia Villosa* L. decay process

腐解时间 Decomposition time/d	干物质累积腐解率 Dry matter cumulative decomposition rate/%						
1	0.00±0.00o	77	41.41±0.44kl	182	57.22±3.17hi	259	80.24±4.32abcd
7	4.28±3.40o	87	42.00±2.29kl	188	63.35±1.53gh	272	77.59±2.81bcde
14	20.91±10.08n	139	47.66±4.68jk	200	68.76±0.97fg	280	77.23±0.54bcde
28	28.10±11.06m	150	48.44±7.17jk	210	72.03±4.78def	290	80.44±4.22abc
38	34.39±3.27lm	157	54.44±6.77ij	230	73.04±0.85cdef	297	76.57±5.02bcdf
52	37.95±1.32l	156	58.93±2.23hi	238	74.76±2.08cdef	304	83.37±3.01ab
67	38.83±2.05l	172	55.25±2.19ij	251	72.29±1.79def	311	86.39±2.73a

注: 不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

Note: Different letters represent significant difference at $P < 0.05$, the same below.

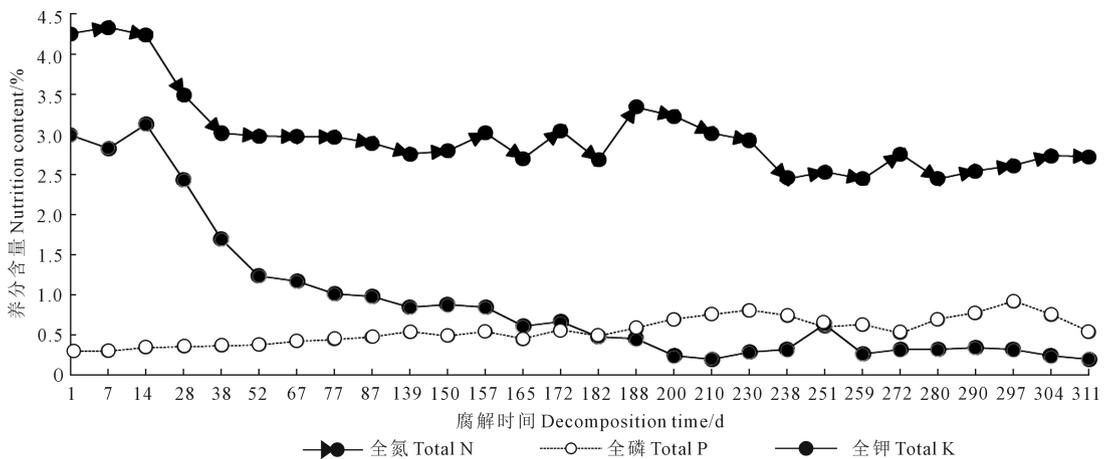


图 3 不同腐解时期毛叶苕子氮、磷、钾含量变化

Fig.3 Changes of nitrogen, phosphorus and potassium contents in *Vicia Villosa* L. at different decomposition stages

表 2 毛叶苕子腐解期间氮累积释放率方差分析

Table 2 Analysis of the variance of nitrogen cumulative release rate during the decay of *Vicia Villosa* L.

腐解时间 Decomposition time/d	氮累积释放率 Nitrogen cumulative release rate/%						
1	0.00±0.00n	77	59.15±1.50jk	182	72.88±6.53fgh	259	88.53±3.00abc
7	3.26±2.98n	87	60.62±3.29ijk	188	71.20±2.41gh	272	85.52±1.70abc
14	21.46±8.37m	139	66.24±0.21hij	200	76.32±1.11defg	280	86.90±1.40abc
28	40.49±14.12l	150	66.35±2.94hij	210	80.27±3.06cdef	290	88.30±2.50abc
38	53.61±0.91k	157	67.30±9.50hi	230	81.44±1.90bede	297	85.78±2.01abc
52	56.51±2.83k	156	74.03±2.19efgh	238	85.35±1.63abc	304	89.33±2.10ab
67	57.21±4.79k	172	67.95±2.70hi	251	83.50±2.30±abcd	311	91.39±1.23a

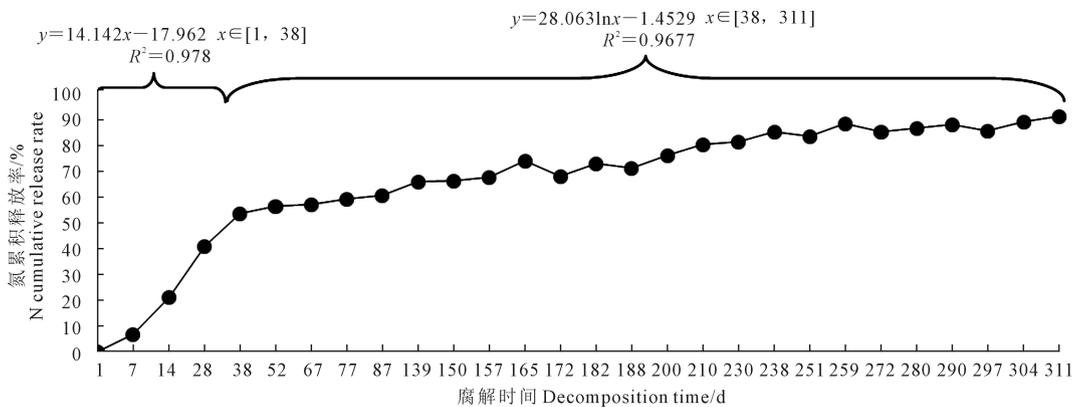


图 4 不同腐解时期毛叶苕子氮释放特征

Fig.4 Nitrogen release characteristics of *Vicia Villosa* L. in different decomposition stages

子鲜体内最易释放的组分。利用绿肥毛叶苕子的干物质量、氮素初始养分含量、绿肥毛叶苕子干物质的累积腐解率以及青海高原地区惯用绿肥翻压量 30 000 kg · hm⁻²等要素计算,翻压毛叶苕子可为后茬作物田提供氮素 172.80 kg · hm⁻²。

2.4 不同腐解时期毛叶苕子磷释放特征

磷的累积释放规律如图 5 所示,在整个翻压时期内,磷的累积释放率没有明显的拐点或阶段性。由表 3 可知,毛叶苕子在腐解 28 d 后磷素累积释放率出现显著差异,在翻压后 52 d 内,累积释放率持续增加至 22.12%,进入冬季,降水的减少和温度的下降,累积释放率有了下降的趋势,且在此期间累积释放率无显著差异,在腐解 139 d 时,累积释放率降为 6.86%。在腐解后期,气温回升加上降水的增加,磷的累积释放率又在动态变化中稳步升高,在腐解结束后达到 75.71%。在整个腐解历程中,磷的养分释放速率为 15.24 mg · d⁻¹。利用绿肥毛叶苕子的干物质量、磷素初始养分含量、绿肥毛叶苕子干物质的累积腐解率以及青海高原地区惯用绿肥翻压量 30 000 kg · hm⁻²等要素计算,翻压毛叶苕子可为后茬作物田提供磷素 10.93 kg · hm⁻²。

2.5 不同腐解时期毛叶苕子钾释放特征

钾的释放规律和氮类似,随着腐解时间的增长,钾的累积释放率呈现逐渐增加的趋势,并且钾释放迅速和彻底(图 6),在腐解 52 d 时存在明显的拐点,结合表 4 可知,毛叶苕子在腐解 7、14、28、38、52 d 时均与前期存在显著差异,腐解 188 d 后钾素累积释放率显示无明显差异。对钾累积释放率作分段拟合,腐解时间在 0~52 d 内,钾的累积释放率呈现线性增加趋势,释放规律可用一元线性方程 $y = 15.428x - 17.808, R^2 = 0.9934, x \in [1, 52]$ 进行拟合, y 为钾素累积释放率, x 为腐解时间,15.428 表征钾累积释放率参数,17.808 表征绿肥毛叶苕子鲜体中钾最易释放的组分。在腐解 52 d 时,累积释放率迅速增加至 74.27%,在 0~52 d 期间,钾的养分释放速率为 874.79 mg · d⁻¹。52 d 至腐解结束,钾的累积释放率增加相对缓慢,养分释放速率为 58.58 mg · d⁻¹。钾累积释放率与腐解时间的变化可用对数方程 $y = 31.047 \ln(x) + 5.1468, R^2 = 0.9203, x \in (52, 311]$ 拟合,其中, y 表示累积腐解率, x 为腐解时间,31.047 表征钾累积释放率参数,5.1468 表征绿肥毛叶苕子鲜体中钾最易释放的组分。在腐解结束时,养分已几乎释放完全,累积释放率高达 99.04%。利用绿

肥毛叶苕子的干物质量、钾素初始养分含量、绿肥毛叶苕子干物质的累积腐解率以及青海高原地区惯用

绿肥翻压量 30 000 kg · hm⁻²等要素计算,翻压毛叶苕子可为后茬作物田提供钾素 139.63 kg · hm⁻²。

表 3 毛叶苕子腐解期间磷累积释放率方差分析

Table 3 Analysis of the variance of phosphorus cumulative release rate during decay of *Vicia Villosa* L.

腐解时间 Decomposition time/d	磷累积释放率 Phosphorus cumulative release rate/%						
1	0.00±0.00l	77	14.19±3.58ijk	182	26.79±11.48fghi	259	59.59±8.67b
7	6.00±2.99kl	87	8.89±5.69jkl	188	37.09±3.62def	272	60.64±14.42b
14	5.56±0.39kl	139	11.89±6.63jkl	200	28.45±5.79fgh	280	48.04±11.29bcd
28	19.76±6.92ghij	150	15.32±5.13hijk	210	36.62±8.55def	290	51.23±2.93bc
38	20.11±7.41ghij	157	21.76±6.65ghij	230	28.53±3.00fgh	297	31.70±4.18efg
52	22.10±2.87ghij	156	39.36±12.24cdef	238	38.35±6.20cdef	304	58.74±8.93b
67	14.40±2.47ijk	172	21.79±11.15ghij	251	44.95±4.28cde	311	75.37±7.30a

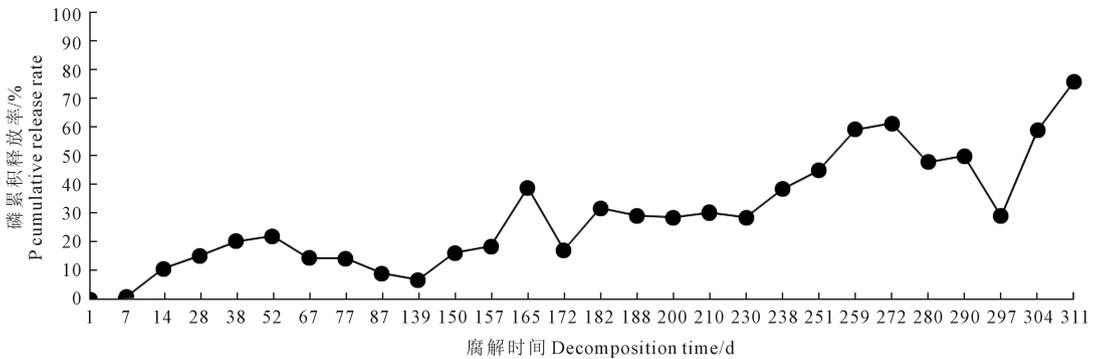


图 5 不同腐解时期毛叶苕子磷释放特征

Fig.5 Phosphorus release characteristics of *Vicia Villosa* L.in different decomposition stages

表 4 毛叶苕子腐解期间钾累积释放率方差分析

Table 4 Analysis of the variance of the cumulative release rate of potassium during decay of the *Vicia Villosa* L.

腐解时间 Decomposition time/d	钾累积释放率 Potassium cumulative release rate/%						
1	0.00±0.00m	77	80.06±0.27h	182	93.22±0.56bc	259	98.22±0.64ab
7	14.81±3.84l	87	81.02±0.63gh	188	94.48±1.19abc	272	97.58±1.12ab
14	18.16±2.2l	139	85.63±0.93efg	200	97.53±0.49ab	280	97.59±0.72ab
28	43.99±10.78k	150	85.00±3.14fg	210	98.03±0.34ab	290	97.70±1.19ab
38	62.69±4.64j	157	87.39±4.50def	230	97.40±0.08ab	297	97.39±1.53ab
52	74.29±0.82i	156	91.66±1.06cd	238	97.35±0.70ab	304	98.60±0.96ab
67	76.18±1.56hi	172	90.14±1.68cde	251	94.19±4.68abc	311	99.04±0.19a

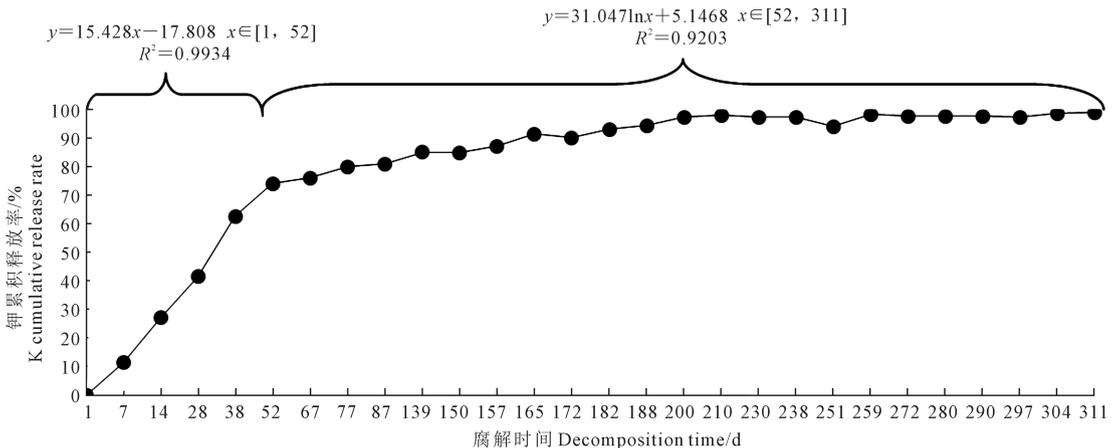


图 6 不同腐解时期毛叶苕子钾释放特征

Fig.6 Potassium release characteristics of *Vicia Villosa* L.in different decomposition stages

3 讨论

3.1 毛叶苕子的腐解特性

根据腐解周期为 311 d 的绿肥毛叶苕子腐解试验,可将 0~50 d 视为绿肥毛叶苕子的相对快速分解期,50~240 d 为中速分解期,240~311d 为低速分解期。整个腐解期内,干物质腐解规律呈现对数函数动态变化,其累积腐解量(y)和腐解时间(x)可用方程 $y = 27.256\ln(x) - 10.444$, $R^2 = 0.9651$ 表示。不同地区腐解规律存在显著差异,薄晶晶等^[18]对长武怀豆和黑麦草做了历时 300 d 的腐解及碳氮养分释放规律的研究,发现不同种类绿肥干物质的腐解规律具有一致性,主要分为 3 个阶段,即 0~105 d 为快速上升时期,缓慢增加时期介于 105~238 d,238~281 d 为中低速增长时期。有学者研究表明秸秆腐解时间一般在 20 周内完成,但其腐解完成时间与腐解特性与多种生态因子有关,如绿肥所处生育时期。陈宁等^[19]研究得出处于开花期的绿肥是最适宜的翻压时期;绿肥本身化学组成、翻压深度,吕丽霞等^[20]在陕西延安进行 0、10、25 cm 3 个不同深度处理下果园绿肥的腐解特性研究发现,10 cm 的翻压深度有利于氮磷钾的释放,残留量少;地块施肥条件,与不施化学肥料的地块相比,施入一定量的化肥有利于加快腐解进程^[21];鲜嫩程度和配施方式,有学者提出各种绿肥混合紫云英后腐解加快^[22];另外还与一些物理措施有关,如还田方式,与覆盖地表相比,翻压地下腐解速度快,累积腐解率比前者高 20 个百分点^[23];李忠义等^[24]在进行小麦和油菜秸秆的腐解试验时发现,腐解速度由快到慢为水泡>露天>土埋,但也有研究者^[25]得出土埋>水淹>覆盖。植株鲜体内的含氮量、C/N、绿肥翻压量以及土壤温度、水分^[26]、通气性和微生物等环境条件密切相关。梁军等^[27]在湖南长沙利用光叶苕子、箭筈豌豆、紫云英、黑麦草以及紫花苜蓿等 5 种绿肥做 120 多天的还田腐解动态试验得出,0~12 d 为绿肥鲜体的快速分解期,12~50 d 为中速分解期,50 d 以后为低速分解期,黑麦草和箭筈豌豆以 3:1 混合翻压处理释放率最高。李帅等^[28]在山东省研究冬牧 70 压青的腐解及养分动态变化时得出,0~30 d 为快速分解期,30 d 后为缓慢腐解期。贾戊禹等^[29]在广东省连州市对多花黑麦草进行腐解规律及养分释放动态研究时也得到了同样的结果,翻压前 30 d 为绿肥的快速分解期。

与上述研究结果相比,青海高原地区绿肥的腐解进程比较漫长,源于该区具有鲜明的地域性,青

海高原地区属于高原大陆性温凉半干旱气候,直接影响绿肥鲜体的分解。在腐解前期,植株体内的养分含量较高,另外,温度相对较高,土壤微生物喜欢高温高湿的环境,这样的环境有利于土壤微生物的活动和酶活力的提升^[24],加之初始养分较充足,为微生物提供了丰富的营养物质,微生物活动相对剧烈,毛叶苕子腐解矿化快^[24]。腐解 50 d 后,环境温度逐渐下降,加上植株体内养分的耗竭,微生物活动强度下降,腐解速率变缓。除此之外,腐解速率呈现如上所述的趋势也源于毛叶苕子鲜体植株腐解初期有容易分解的可溶性有机物,如糖、氨基酸类和有机酸类等物质,腐解后期残留植株为难以分解的纤维素、木质素类物质^[30]。

3.2 毛叶苕子的养分释放规律

本试验研究表明,绿肥毛叶苕子的养分释放速率排序为氮>钾>磷,这与其他地区的研究结果不同。刘佳等^[31]在江西省抚州市对二月兰进行腐解及养分释放特征研究得出,各种养分释放顺序为钾>氮>磷。宋莉等^[22]在湖北武汉做油菜和紫云英绿肥及其不同比例配施还田研究时得出钾>磷>氮,崔志强等^[32]在果园绿肥的腐解研究中也发现了同样的腐解规律。邓小华等^[33]在研究 4 种绿肥在湘西烟田中的腐解和养分释放动态中得出,养分累积释放率排序为氮>磷>钾。同样,这与绿肥所处生育时期、绿肥种类、绿肥本身化学组成、翻压深度、地块施肥条件、鲜嫩程度、配施方式、还田方式、C/N、绿肥翻压量以及土壤温度、水分、植株鲜体内的含氮量、土壤的通气性和微生物等环境条件密切相关。刘新红等^[34]在湖南长沙对甘蓝型、芥菜型和白菜型 3 种油菜绿肥做养分释放规律的研究发现,在氮释放方面表现为芥菜型>甘蓝型>白菜型,而在磷释放方面 3 种养分的释放速率没有明显的差异性。另外,养分释放特性与转化规律还与绿肥的粉碎程度有很大的关系,吴凯等^[35]研究粉碎程度对籽粒苋养分释放与转化的影响,发现粉碎程度越细,对土壤无机氮含量的提升有积极作用,粉碎程度粗则能促进土壤速效钾含量的提升。

氮素是各种农作物完成整个生长史不可缺少的大量元素,由此,在实际的农业生产过程中,根据农作物具体生育期特殊的养分需求规律,可以确定绿肥毛叶苕子翻压的时期,保证在作物进行营养生长或生殖生长的过程中,绿肥来源的养分能持续供应。本研究中,氮素在翻压后的 40 d 内养分释放较大。

在本试验中,磷在腐解周期内养分含量呈现增

加趋势,但干物质在大量减少,因此磷累积释放量依然在增加,说明磷素仍然在向土壤介质转移,这可能与养分稀释规律有关,即养分会从浓度高的介质向浓度低的介质转移。牟小翎等^[36]对两种绿肥进行腐解及养分释放特征的研究时也发现磷素含量在腐解前 60 多天内呈上升趋势,但与本试验不同的是磷含量在后期又开始下降。在此过程中,绿肥作物翻压后富集了周围土壤中的磷素养分,同时又向土壤介质中输送了一部分,但在此不能确定毛叶苕子富集的磷属于哪一种形态,若为易被作物吸收利用的速效态,则在后期有可能进行释放^[37],使之不断地向后茬作物输送,匹配作物不同生育期的营养需求。在实际的农业生产中,可以配施种植其他种属的绿肥作物,如十字花科的绿肥,十字花科绿肥根系分泌的有机酸类物质具有一定的解磷功能。在释放其他养分的同时,可以分解转化毛叶苕子鲜体内的磷,使土壤中的有机态养分被活化,利于作物吸收和利用。^[38]

在氮磷钾 3 种养分释放规律中,与其他地区研究结果相比,钾的释放特征存在差异,钾素在短期内得到释放,这与宁东峰等^[39]的研究结果相似,释放率达 90%。多数研究表明,钾素的释放速率快于氮和磷,但本试验中氮素释放快于钾素,这源于绿肥毛叶苕子中的钾以离子的形式存在于细胞和鲜体各个组织中,容易在水溶液环境下释放,因此,青海高原地区降水的匮乏成为了钾素释放的限制因子,氮释放速率最快,磷的释放速率慢,磷以有机态形式存在,在物理作用下不易分解^[28]。由此,在农业生产过程中,针对需钾较多的作物其需求量较大的生育期应在绿肥翻压后的 52 d 内,在此期间内养分释放较大,且彻底。水分作为养分物质传输的介质,在翻压时应保证供应充足的水分,不影响绿肥毛叶苕子养分的释放和后茬作物对养分的吸收,确保绿肥资源的高效利用与管理。

本试验基于绿肥翻压减施化肥定位试验,每年 8 月初种植绿肥毛叶苕子,10 月初花期时将毛叶苕子翻压入土,次年春播种小麦,在此农事措施下,在小麦的整个生育期内就能源源不断地吸收来自鲜体绿肥中的养分。在其他地区,尤其在高温高湿环境下,因为温度和水分的原因养分在短期内释放完全,甚至流失,使之不能得到充分的利用,发挥不出其本身的价值。在青海高原地区,突出的优势在于,土壤微生物系统和外界气候环境决定了绿肥体内养分释放的速率相对较缓,腐解历程漫长,这一突出优势即保证了后茬作物能够持续地吸收绿肥

来源的养分,又能使养分不会快速流失。

4 结 论

通过对青海高原地区绿肥毛叶苕子的腐解特性和养分释放规律的研究发现,经过 311 d 的腐解过程,毛叶苕子的累积腐解率达到 86.39%,毛叶苕子干物质的腐解进程可用对数函数方程 $y = 27.256 \ln(x) - 10.444$, $R^2 = 0.9651$, $x \in [1, 311]$ 拟合,根据方程可预测出,毛叶苕子鲜体腐解完全需要 400 d。

氮磷钾的养分释放速率表现为氮>钾>磷,其累积释放率分别达 91.31%、75.71%、99.04%,根据青海高原地区的绿肥翻压量 $30\ 000\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 计算,绿肥翻压当年,可向后茬作物田提供氮素 $172.80\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、磷素 $10.93\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、钾素 $139.63\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

致谢:感谢在试验过程中提供帮助的宋明丹老师及白璐、李明娟、陈子英、谢帅和张鑫鹏同学;感谢国家绿肥产业体系西宁综合试验站的老师及工作人员。

参 考 文 献:

- [1] 敖文,温三明,尹显高.绿肥翻压还田对土壤理化性状的影响[J].基层农技推广,2018,6(5):33-35.
AO W, WEN S M, YIN X G. Effects of returning green manure to soil under pressure on soil physical and chemical properties[J]. Primary Agricultural Technology Extension, 2018, 6(5): 33-35.
- [2] 杨旭燕,何文寿.绿肥油菜翻压还田对土壤肥力及玉米产量的影响试验[J].吉林农业,2019,(3):56-57.
YANG X Y, HE W S. Effect of returning green manure rape to field on soil fertility and maize yield[J]. Agriculture of Jilin, 2019, (3): 56-57.
- [3] 张达斌.黄土高原地区种植豆科绿肥协调土壤水分和氮素供应的效应及机理[D].杨凌:西北农林科技大学,2016.
ZHANG D B. Effects of leguminous green manure on soil water and nitrogen supply and its mechanism in the Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2016.
- [4] 杨璐,曹卫东,白金顺,等.翻压二月兰对玉米干物质积累和养分吸收及土壤养分的影响[J].华北农学报,2014,29(1):183-189.
YANG L, CAO W D, BAI J S, et al. Effects of February orchid application on dry matter accumulation and nutrient uptake in maize and soil nutrient status[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2014, 29(1): 183-189.
- [5] 吕鹏超,梁斌,隋方功,等.不同绿肥秸秆养分释放规律的研究[J].作物杂志,2015,(4):130-134.
LV P C, LIANG B, SUI F G, et al. Research on the releasing law of nutrients in different green manure straws[J]. Crops, 2015, (4): 130-134.
- [6] TONITTO C, DAVID M B, DRINKWATER L E. Replacing bare fallows with cover crops in fertilizer-intensive cropping systems; a meta-analysis of crop yield and N dynamics[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2006,112(1):58-72.

- [7] MACHOLDT J, STYCZEN M E, MACDONALD A, et al. Long-term analysis from a cropping system perspective: yield stability, environmental adaptability, and production risk of winter barley[J]. *European Journal of Agronomy*, 2020, 117: 126056.
- [8] LI F D, REN J, WIMMER S, et al. Incentive mechanism for promoting farmers to plant green manure in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 267: 122197.
- [9] CONDIM E X, DOS SANTOS FERREIRA B H, REIS L K, et al. Growth, flowering and fruiting of *Campomanesia adamantium* (Cambess) O. Berg intercropped with green manure species in agroforestry systems[J]. *Agroforestry Systems*, 2021, 95: 1261-1273.
- [10] PIOTROWSKA-DŁUGOSZ A, WILCZEWSKI E. Influence of field pea (*Pisum sativum* L.) as catch crop cultivated for green manure on soil phosphorus and P-cycling enzyme activity[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2020, 66(11): 1570-1582.
- [11] 张颖睿.紫云英与氮肥配施比例对水稻生长和氮素吸收利用的影响[D].南昌:江西农业大学,2018.
- ZHANG Y R. Effect of application ratio of Chinese milk vetch and nitrogen fertilizer on growth and nitrogen absorption of rice[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2018.
- [12] 刘思超.不同混作方式绿肥替代部分基施化学氮肥对双季稻产量形成及土壤特性的影响[D].长沙:湖南农业大学,2018.
- LIU S C. Effects of substitution of green manure under different mixed cropping modes to basal chemical N fertilizer on yield formation characters of double cropping rice and soil characteristics[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2018.
- [13] 李梦瑶,蒋湘艳,金海如.AM 真菌共生系统中硝态氮吸收转运途径及对寄主生长的作用[J].土壤学报,2020,57(6):1483-1491.
- LI M Y, JIANG X Y, JIN H R. Modes of uptake and translocation of NO_3^- affecting growth of host plants in arbuscular mycorrhizal symbiosis[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(6): 1483-1491.
- [14] SONG H J, LEE J H, CANATOY R C, et al. Strong mitigation of greenhouse gas emission impact via aerobic short pre-digestion of green manure amended soils during rice cropping[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 761: 143193.
- [15] HOOKER K V, COXON C E, HACKETT R, et al. Evaluation of cover crop and reduced cultivation for reducing nitrate leaching in Ireland[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2008, 37(1): 138-145.
- [16] ZOTARELLI L, SCHOLBERG J M, DUKES M D, et al. Fertilizer residence time affects nitrogen uptake efficiency and growth of sweet corn[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2008, 37(3): 1271-1278.
- [17] 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 the Arid Areas*, 2018, 36(6): 104-109.
- [18] 薄晶晶,王俊,付鑫.两种绿肥腐解及其碳氮养分释放动态特征[J].生态科学,2019,38(6):37-45.
- BO J J, WANG J, FU X. Decomposition and carbon nitrogen nutrient releases of two green manures[J]. *Ecological Science*, 2019, 38(6): 37-45.
- [19] 陈宁,高玲,刘国道,等.热带豆科绿肥腐解特性探究[J].热带作物学报,2016,37(8):1470-1475.
- CHEN N, GAO L, LIU G D, et al. Decomposing characteristics of green manure of tropical Leguminosae plants[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2016, 37(8): 1470-1475.
- [20] 吕丽霞,王维,王秀荣,等.渭北苹果园绿肥不同深度翻压腐解及养分释放规律[J].果树学报,2018,35(5):586-595.
- LU L X, WANG W, WANG X R, et al. Release of nutrients during the decomposition of green manure in different levels of the soil in an apple orchard in Weibei highland[J]. *Journal of Fruit Science*, 2018, 35(5): 586-595.
- [21] 黄晶,高菊生,张杨珠,等.紫云英还田后不同施肥下的腐解及土壤供钾特征[J].中国土壤与肥料,2016,(1):83-88.
- HUANG J, GAO J S, ZHANG Y Z, et al. Dynamics of Chinese milk vetch decomposition in paddy field under different fertilization and the supply ability of soil potassium[J]. *Soil and Fertilizer Science in China*, 2016, (1): 83-88.
- [22] 宋莉,韩上,鲁剑巍,等.油菜秸秆、紫云英绿肥及其不同比例配施还田的腐解及养分释放规律研究[J].中国土壤与肥料,2015,(3):100-104.
- SONG L, HAN S, LU J W, et al. Study on characteristics of decomposing and nutrients releasing of different proportional mixture of rape straw and Chinese milk vetch in rice field[J]. *Soil and Fertilizer Science in China*, 2015(3): 100-104.
- [23] 曾进,吴吕奇,游璐,等.籽粒苋绿肥在油茶林下的腐解及养分释放规律研究[J].西南林业大学学报(自然科学),2017,37(4):97-102.
- ZENG J, WU L Q, YOU L, et al. Regularities of decomposition and nutrients release of *Amaranthus hypochondriacus* green manure under woodland of *camellia oleifera*[J]. *Journal of Southwest Forestry University(Natural Sciences)*, 2017, 37(4): 97-102.
- [24] 李忠义,张静静,蒙炎成,等.绿肥还田腐解特征及培肥地力研究进展[J].江苏农业科学,2017,45(22):14-18.
- LI Z Y, ZHANG J J, MENG Y C, et al. Research progress on decomposition characteristics of green manure and soil fertility improvement[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(22): 14-18.
- [25] 李忠义,唐红琴,蒙炎成,等.不同还田方式下拉巴豆秸秆腐解及养分释放特征[J].中国土壤与肥料,2017,(2):130-135.
- LI Z Y, TANG H Q, MENG Y C, et al. Characteristics of decomposition and nutrients release of *Dolichos lablab* straw under different incorporation methods[J]. *Soil and Fertilizer Science in China*, 2017, (2): 130-135.
- [26] 杨文亭,王晓维,徐健程,等.施氮量和土壤含水量对红壤区黑麦草腐解和氮素释放的影响[J].生态学杂志,2018,37(9):2589-2595.
- YANG W T, WANG X W, XU J C, et al. Effects of Nitrogen application rates and soil water contents on ryegrass decomposition and nitrogen release in red soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(9): 2589-2595.
- [27] 梁军.不同绿肥还田腐解动态及其对土壤养分的影响[D].长沙:湖南农业大学,2018.
- LIANG J. Disintegration dynamics of different green manures and their effects on soil nutrients [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2018.
- [28] 李帅,王艳,贾龙,等.山东省冬闲农田种植冬牧 70 压青后腐解及养分动态[J].生态环境学报,2019,28(11):2239-2244.
- LI S, WANG Y, JIA L, et al. Dynamics of nutrients and decomposition of Dongmu 70 cultivated in winter fallow period in Shandong province [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2019, 28(11):

- 2239-2244.
- [29] 贾戊禹,程俊康,朱碧岩,等.粤北山区多花黑麦草腐解规律及养分释放动态[J].草学,2020,(1):14-18,25.
JIA X Y, CHENG J K, ZHU B Y, et al. Decomposition characteristics and nutrient release dynamics of Italian ryegrass in the mountainous areas of northern Guangdong[J]. Pratacultural Science, 2020,(1): 14-18, 25.
- [30] 李增强,王建红,张贤.绿肥腐解及养分释放过程研究进展[J].中国土壤与肥料,2017,(4):8-16.
LI Z Q, WANG J H, ZHANG X. A review on the research of decomposition and nutrients release of green manure[J]. Soil and Fertilizer Science in China, 2017(4): 8-16.
- [31] 刘佳,陈信友,张杰,等.绿肥作物二月兰腐解及养分释放特征研究[J].中国草地学报,2013,35(6):58-63.
LIU J, CHEN X Y, ZHANG J, et al. Study on characteristics of decomposition and nutrients release of winter green manure crop *Orychophragmus violaceus* in North China[J]. Chinese Journal of Grassland, 2013, 35(6): 58-63.
- [32] 崔志强.绿肥—苹果间作系统氮素的吸收、分配及绿肥的腐解规律研究[D].泰安:山东农业大学,2014.
CUI Z Q. Study on N absorption, allocation and green manures decomposition regularity in green manure-apple intercropping system [D]. Taian: Shangdong Agricultural University, 2014.
- [33] 邓小华,罗伟,周米良,等.绿肥在湘西烟田中的腐解和养分释放动态[J].烟草科技,2015,48(6):13-18.
DENG X H, LUO W, ZHOU M L, et al. Dynamics of decomposition and nutrient release of green manures in tobacco fields in Xiangxi[J]. Tobacco Science & Technology, 2015, 48(6): 13-18.
- [34] 刘新红,周兴,邓力超,等.油菜绿肥的腐解特征及养分释放对土壤肥力的影响[J].湖南农业科学,2020,(5):31-36.
LIU X H, ZHOU X, DENG L C, et al. Decomposition characteristics of rape green manure and effect of nutrient release on soil fertility[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2020,(5): 31-36.
- [35] 吴凯,刘继坤,王晓萌,等.不同粉碎程度对绿肥籽粒宽腐解过程中氮、钾释放与转化的影响[J].土壤通报,2019,50(1):124-130.
WU K, LIU J K, WANG X M, et al. Release and transformation of nitrogen and potassium during the decomposition of *Amaranthus hypochondriacus* with different grinding degrees [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(1): 124-130.
- [36] 牟小翎,董浩,夏光利,等.两种不同绿肥作物的腐解及养分释放特征研究[J].山东农业科学,2015,47(9):94-97.
MU X L, DONG H, XIA G L, et al. Study on decomposing and nutrient releasing characteristics of two kinds of green manure crops[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2015, 47(9): 94-97.
- [37] 刘哲辉.油菜的生物熏蒸用于作物土传病害防治的研究[C]//作物多熟种植与国家粮油安全高峰论坛论文集.哈尔滨:中国作物学会,2015:237-243.
LIU Z H. Study on bio-fumigation of rape for controlling soil-borne diseases of crops [C]//Proceedings of the Summit Forum on Crop Multiple Cropping and National Grain and Oil Security. Harbin: The Crop Science Society of China, 2015: 237-243.
- [38] ZASADA I A, MEYER S L F, MORRA M J. Brassicaceous seed meals as soil amendments to suppress the plant-parasitic nematodes *Pratylenchus penetrans* and *Meloidogyne incognita*[J]. The Journal of Nematology, 2009, 41(3): 221-227.
- [39] 宁东峰,马卫萍,孙文彦,等.华北地区棉田翻压冬绿肥腐解及养分释放规律研究[J].华北农学报,2011,26(6):164-167.
NING D F, MA W P, SUN W Y, et al. Study on regulars of decomposition and nutrients releasing of green manure ploughed in cotton field in north plain of China[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2011, 26(6): 164-167.

(上接第 192 页)

- [49] 吴建平,韩新辉,许亚东,等.黄土丘陵区不同植被类型下土壤与微生物 C、N、P 化学计量特征研究[J].草地学报,2016,24(4):783-792.
WU J P, HAN X H, XU Y D, et al. Ecological stoichiometry of soil and soil microbial biomass C, N, P under grain-to-green program in loess hilly region [J]. Acta Agrestia Sinica, 2016, 24(4): 783-792.
- [50] 陶韦,武嘉文,刘长发,等.翘碱蓬生态化学计量内稳性对模拟氮磷沉降的响应[J].水生态学杂志,2017,38(4):18-26.
TAO W, WU J W, LIU C F, et al. Response of stoichiometric homeostasis and allometric scaling in halophyte *Suaeda heteroptera* kitag. to simulated nitrogen and phosphorus deposition [J]. Journal of Hydroecology, 2017, 38(4): 18-26.
- [51] 周正虎,王传宽.微生物对分解底物碳氮磷化学计量的响应和调节机制[J].植物生态学报,2016,40(6):620-630.
ZHOU Z H, WANG C K. Responses and regulation mechanisms of microbial decomposers to substrate carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40(6): 620-630.
- [52] YU Q, CHEN Q S, ELSER J J, et al. Linking stoichiometric homeostasis with ecosystem structure, functioning and stability [J]. Ecology Letters, 2010, 13(11): 1390-1399.
- [53] 杨羽,夏品华,林陶,等.贵州草海湿地不同水位梯度土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量比分布特征[J].湖泊科学,2020,32(1):164-172.
YANG Y, XIA P H, LIN T, et al. Spatial distribution of soil carbon, nitrogen and phosphorus concentrations and their ecological stoichiometry along a water gradient in Caohai wetland, Guizhou Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(1): 164-172.
- [54] 李明军,喻理飞,杜明凤,等.不同林龄杉木人工林植物—凋落叶—土壤 C、N、P 化学计量特征及互作关系[J].生态学报,2018,38(21):7772-7781.
LI M J, YU L F, DU M F, et al. C, N, and P stoichiometry and their interaction with plants, litter, and soil in a *Cunninghamia lanceolata* plantation with different ages [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(21): 7772-7781.