



# 农业资源与环境学报

中文核心期刊  
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

## 不同形态氮素对玉米秸秆腐解与养分释放的影响

石琳, 金梦灿, 单旭东, 高敏, 陈曦, 郜红建

引用本文:

石琳, 金梦灿, 单旭东, 等. 不同形态氮素对玉米秸秆腐解与养分释放的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(2): 277–285.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0086>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 水稻秸秆和玉米秸秆在好气和厌氧条件下的腐解规律

王景, 陈曦, 魏俊岭

农业资源与环境学报. 2017, 34(1): 59–65 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0180>

### 铵态氮源和碳源对土壤N<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>释放的影响

王琳, 周晓丽, 马银丽, 巨晓棠, 吉艳芝, 张丽娟

农业资源与环境学报. 2016, 33(1): 23–28 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0181>

### 聚天门冬氨酸尿素对水稻产量及田面水氮素变化的综合影响

王娜, 徐嘉翼, 张鑫, 隋世江, 叶鑫, 牛世伟

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 96–103 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0072>

### 秸秆还田与氮肥管理对稻田杂草群落和水稻产量的影响

陈浩, 张秀英, 吴玉红, 李厚华, 郝兴顺, 王艳龙, 王薇, 张春辉

农业资源与环境学报. 2018, 35(6): 500–507 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0074>

### 添加水稻秸秆对油菜(*Brassica napus* L.)幼苗生长的影响

余常兵, 胡威, 吕驰驰, 柯奇画, 李银水, 庞静

农业资源与环境学报. 2016, 33(3): 253–261 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0208>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

石琳, 金梦灿, 单旭东, 等. 不同形态氮素对玉米秸秆腐解与养分释放的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(2): 277-285.

SHI Lin, JIN Meng-can, SHAN Xu-dong, et al. Influences of different forms of nitrogen fertilizer on the decomposition and release of nutrients from corn straw residue[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(2): 277-285.



开放科学 OSID

## 不同形态氮素对玉米秸秆腐解与养分释放的影响

石琳, 金梦灿, 单旭东, 高敏, 陈曦, 郜红建\*

(农田生态保育与污染防控安徽省重点实验室, 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036)

**摘要:**为研究不同形态氮素对玉米秸秆腐解和养分释放的影响,采用尼龙网袋法进行室内堆腐试验,通过外源添加碳酸氢铵、硫酸铵、硝酸钙、尿素和谷氨酸等不同形态氮素调节玉米秸秆 C/N(25:1),以不添加氮素处理为对照(CK)。结果表明,随着培养时间的延长,添加不同形态氮素处理的玉米秸秆质量残留率逐渐降低,谷氨酸、硫酸铵和碳酸氢铵均能促进玉米秸秆的降解,其中谷氨酸对玉米秸秆的促腐作用最强,腐解速率常数达到  $2.8 \times 10^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。尿素对玉米秸秆腐解无明显影响,硝酸钙一定程度上减缓了玉米秸秆的腐解。玉米秸秆腐解过程中养分释放率呈钾>磷>氮的规律。随着培养时间的延长,添加不同形态氮素处理的玉米秸秆碳、氮、磷和钾素质量残留率逐渐降低。培养到 180 d 时,玉米秸秆残余物中碳、氮、磷和钾素残留质量分别是其初始质量的 16.9%~24.8%、21.57%~51.27%、22.72%~59.00% 和 24.86%~54.48%,其中谷氨酸对玉米秸秆碳、氮和钾素释放促进作用最强,其释放速率常数分别为  $1.37 \times 10^{-2}$ 、 $7.15 \times 10^{-3} \text{ d}^{-1}$  和  $5.62 \times 10^{-3} \text{ d}^{-1}$ ;而硫酸铵能够促进秸秆中磷的释放,其释放速率常数为  $7.94 \times 10^{-3} \text{ d}^{-1}$ ,高于 CK 处理( $7.54 \times 10^{-3} \text{ d}^{-1}$ )。研究表明,谷氨酸会提高玉米秸秆的腐解速率与碳、氮和钾素的释放,硫酸铵会提高玉米秸秆的腐解速率与碳、氮、磷素的释放,碳酸氢铵会提高玉米秸秆的腐解速率与氮素的释放,尿素和硝酸钙会促进碳、氮、钾养分的释放,谷氨酸和硫酸铵的促腐效应高于其他形态氮素处理。从还田秸秆快速腐解和养分释放及高效利用角度考虑,秸秆还田后施用谷氨酸和硫酸铵效果最佳。

**关键词:**氮素形态;玉米秸秆;腐解速率;养分释放

中图分类号:S141.4

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2021)02-0277-09

doi: 10.13254/j.jare.2020.0086

### Influences of different forms of nitrogen fertilizer on the decomposition and release of nutrients from corn straw residue

SHI Lin, JIN Meng-can, SHAN Xu-dong, GAO Min, CHEN Xi, GAO Hong-jian\*

(Anhui Province Key Laboratory of Farmland Conservation and Pollution Prevention, School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

**Abstract:** The effects of different forms of nitrogen fertilizer on decomposition and nutrients released from corn straw residue were simulated in the laboratory to determine how decomposition could be accelerated. There were six treatments of corn straw residues mixed with different forms of nitrogen including ammonium bicarbonate, ammonium sulfate, calcium nitrate, urea, glutamate, and CK. All treatments were conducted with the carbon-to-nitrogen ratio set to 25:1 in net bags in the laboratory. The residual mass of the corn straw slowly decreased with the incubation time throughout the 180-d incubation period. Nitrogen added as ammonium bicarbonate, ammonium sulfate, and glutamate accelerated the decomposition of corn straw, and the decomposition rate of corn straw with glutamate addition was higher than those of all other nitrogen forms at  $2.8 \times 10^{-2} \text{ d}^{-1}$ . Urea did not have a significant influence while calcium nitrate inhibited decomposition in a certain degree. The release of nitrogen, phosphorus, and potassium from corn straw residues followed the order potassium>

收稿日期:2020-03-02 录用日期:2020-05-15

作者简介:石琳(1996—),女,安徽安庆人,硕士研究生,从事植物营养研究。E-mail:1959723861@qq.com

\*通信作者:郜红建 E-mail:hjgao@ahau.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(41877099);国家重点研发计划项目(2018YFD0800301)

**Project supported:** The National Natural Science Foundation of China (41877099); The National Key Research and Development Program of China (2018YFD0800301)

phosphorus>nitrogen for the different nitrogen treatments. The residual levels of carbon, nitrogen, phosphorus, and potassium in the corn straw residues decreased slowly with the increase of incubation time. After 180 d of incubation, the proportion of residual masses of carbon, nitrogen, phosphorus, and potassium were 16.9%~24.8%, 21.57%~51.27%, 22.72%~59.00%, and 24.86%~54.48%, respectively, of the initial mass in the corn straw residue. Nitrogen in glutamate was found to greatly promote the release of carbon, nitrogen, and potassium from corn straw residues at decomposition rates of  $1.37 \times 10^{-2} \text{ d}^{-1}$ ,  $7.15 \times 10^{-3} \text{ d}^{-1}$ , and  $5.62 \times 10^{-3} \text{ d}^{-1}$ , respectively. Ammonium sulfate accelerated the release of phosphorus from the corn straw residues, at a decomposition rate of  $7.94 \times 10^{-3} \text{ d}^{-1}$ , which was higher than that of CK ( $7.54 \times 10^{-3} \text{ d}^{-1}$ ). The addition of all different forms of nitrogen, except calcium nitrate, accelerated the decomposition of and release of carbon, nitrogen, phosphorus, and potassium from corn straw residues. Nitrogen in glutamate and ammonium sulfate had a greater impact on this than other forms of nitrogen. Based on the decomposition rate and the nutrients released and their utilization, glutamate and ammonium sulfate are the best candidates for use on corn straw residues after their return to agricultural fields.

**Keywords:** nitrogen forms, corn straw residue, decomposition rate, nutrient release

我国是农业大国,农作物秸秆资源丰富<sup>[1]</sup>,综合利用总量约为8.76亿t<sup>[2]</sup>。作为一种重要养分资源<sup>[3]</sup>,农作物秸秆含有大量有机质和植物生长所必需的氮、磷、钾及其他中微量元素<sup>[4]</sup>。秸秆还田是循环利用养分资源最有效的方式,不仅可以部分代替化肥、培肥地力<sup>[5]</sup>和提高作物产量,而且可促进养分资源循环利用和农业可持续发展。在农业生产中,农作物秸秆还田量大,微生物与作物争氮导致作物缺氮,不利于秸秆腐解和养分利用<sup>[6]</sup>。因此,加速秸秆腐解是秸秆养分循环利用的关键环节<sup>[7]</sup>。

秸秆腐解受秸秆自身化学组成、外界环境和微生物种群等多种因素的影响<sup>[8-10]</sup>。李昌明等<sup>[9]</sup>发现,秸秆氮素和磷素的释放与气候和土壤条件变化有关,而钾素释放则与秸秆本身属性有关。C/N是影响秸秆腐解的重要因素,一般认为秸秆腐解的最适C/N在20~30之间。李帆等<sup>[11]</sup>研究表明,当C/N为25时,秸秆腐解较快,而当C/N<20时,秸秆腐解变慢。王大庆等<sup>[12]</sup>利用回归模型分析得出,玉米秸秆降解最优C/N为20,纤维素降解率可达66.54%。赵聪等<sup>[13]</sup>发现,C/N为25时玉米秸秆的腐解率最高。Zhang等<sup>[14]</sup>研究表明,C/N为30的情况下,C和N的损耗最小。

由于秸秆本身C/N较高,玉米秸秆的C/N一般在50左右,外源添加氮素是调节秸秆C/N最常用的方法,但外源添加氮素对秸秆腐解的影响结果不一致。Li等<sup>[15]</sup>研究发现,碳与氮的分解紧密耦合,施尿素抑制了玉米秸秆的腐解。Knorr等<sup>[16]</sup>通过整合分析发现,外源氮素的添加抑制了木质素含量较高的凋落物的分解。卞景阳等<sup>[17]</sup>研究发现,施氮会促进秸秆的腐解。张学林等<sup>[18]</sup>研究发现,增施氮肥会抑制玉米秸秆的分解而促进小麦秸秆的分解。前人的研究多集中在土壤氮素和利用氮肥调节C/N对秸秆腐解的影

响<sup>[19]</sup>,而有关不同形态的氮素对秸秆腐解的影响还缺乏深入系统研究。

本研究利用尼龙网袋法进行室内模拟秸秆堆腐试验,通过添加不同形态氮素调节玉米秸秆C/N(25:1),探讨不同形态氮素对玉米秸秆腐解及氮磷钾等养分释放的影响,遴选能够促进作物秸秆腐解的最佳氮素形态,为加快秸秆腐解提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试土壤样品采集于安徽省宿州市埇桥区付湖新村安徽农业大学皖北综合试验站(东经117°15'33",北纬31°51'41"),为华北暖温带半湿润季风气候,年平均降雨量857.1 mm,土壤类型为砂姜黑土,有机质含量 $6.21 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全氮含量 $0.941 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,有效磷含量 $28.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效钾含量 $241 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,pH值7.2。选取玉米秸秆覆盖还田2年的0~20 cm表层土壤,将采集后的新鲜土壤去除植物根系、石块等,用四分法取出土样并过2 mm筛,存于-4℃冰箱备用(保存时间不超过1周)。将过筛后的新鲜土壤以水土比为5:1进行浸泡,每隔30 min用玻璃棒搅拌1次,每次搅拌5 min,浸泡2 h并静置后,取上清液,即为土壤悬液。土壤悬液全氮含量 $1.821 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,全磷含量 $0.21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,置于-4℃冰箱备用(保存时间不超过1周)。

供试玉米秸秆于2018年玉米籽粒收获时采集,自然风干后用粉碎机粉碎,先过10目网筛,再过100目网筛,取长度介于10~100目网筛的秸秆,混合均匀后备用。取少量粉碎秸秆于75℃烘干,用元素分析仪测定其碳和氮含量分别为 $421.98$ 、 $13.78 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;C/N为30.62。供试氮素为碳酸氢铵、硫酸铵、硝酸钙、尿素和谷氨酸,均由国药集团化学试剂有限公司生产。

## 1.2 试验设计

称取20 g粉碎的玉米秸秆于圆形塑料桶中,分别加入35 mL制备好的已经添加碳酸氢铵、硫酸铵、硝酸钙、尿素和谷氨酸的土壤悬液,搅拌均匀后再转移至300目的尼龙网带内(网袋长12 cm、宽10 cm),每个处理为24个尼龙网袋。试验共设置6个处理,分别为:碳酸氢铵、硫酸铵、硝酸钙、尿素、谷氨酸和无氮素添加(CK)。每个处理的秸秆C/N均为25:1,3个重复。将装有玉米秸秆的尼龙网袋分别放入25℃的恒温箱中,在秸秆培养的前15 d内,每3 d补水一次。在秸秆培养的15 d之后,每6 d补水一次。在玉米秸秆堆腐试验开始后的第1、7、15、30、60、90、120 d和180 d取样分析。

## 1.3 测定方法

取样时,每个处理随机取3个尼龙网袋,于65℃下烘干至质量恒定,计算玉米秸秆残留率。烘干后的玉米秸秆分别测定其全氮、全磷、全钾、全碳含量。全碳和全氮采用元素分析仪(Elementar,德国)测定。秸秆采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 法进行消煮,消煮液用钼锑抗比色法测定秸秆样品中全磷的含量,用火焰分光光度计测定秸秆样品中的全钾含量<sup>[20]</sup>。

## 1.4 数据处理

$$\text{质量残留率}(\%) = m_t/m_0 \quad (1)$$

式中: $m_0$ 为玉米秸秆腐解前的初始质量; $m_t$ 为腐解时间为 $t$ 时秸秆剩余质量。

秸秆质量腐解规律用带常数项的一级衰减指数方程<sup>[21]</sup>进行拟合:

$$y = y_0 + a \times e^{-kt} \quad (2)$$

式中: $y_0$ 、 $a$ 和 $k$ 是常数; $y$ 为玉米秸秆质量残留率,%; $k$ 为腐解速率常数, $\text{d}^{-1}$ ,其数值大小表明秸秆腐解质量减少快慢; $t$ 为腐解时间,d; $a$ 为损失的量占初始量的比例; $y_0$ 为当 $t$ 无穷大时 $y$ 趋向的值。

$$\text{养分残留率}(\%) = (D_t \times m_t) / (D_0 \times m_0) \quad (3)$$

式中: $D_0$ 为初始秸秆的养分含量; $D_t$ 为腐解时间为 $t$ 时秸秆养分含量。其中, $t$ 时秸秆氮素质量=测出氮素质量-添加的氮素的质量。

秸秆养分释放规律用一级衰减指数方程计算<sup>[9]</sup>:

$$y_1 = b \times e^{-k_1 t} \quad (4)$$

式中: $y_1$ 为玉米秸秆养分残留率,%; $t$ 为腐解时间,d; $b$ 为衰减方程常数; $k_1$ 为养分释放速率常数, $\text{d}^{-1}$ 。

## 1.5 统计分析

本研究统计分析采用SPSS 19.0完成,显著性水平 $\alpha=0.05$ ,方差分析用于检测氮添加处理的影响,

Duncan法用于多重比较。Microsoft Excel 2010进行绘图处理,Origin 8.0进行方程拟合。

## 2 结果与分析

### 2.1 玉米秸秆残留质量变化

在添加不同外源氮的条件下,玉米秸秆质量残留率随培养时间延长呈现逐渐下降的趋势(图1),且在0~60 d下降较快,之后(60~180 d)逐渐减缓。外源添加谷氨酸处理的玉米秸秆质量残留率低于其他处理。培养至60 d时,外源添加谷氨酸和硫酸铵处理的玉米秸秆残留质量分别是其初始质量39.2%和47.9%,显著低于CK处理( $P<0.05$ );而外源添加碳酸氢铵、硝酸钙和尿素处理的玉米秸秆质量残留率与CK处理相比无显著差异。培养到180 d时,玉米秸秆残留质量是其初始添加质量的22.6%~34.1%,外源添加谷氨酸处理的玉米秸秆质量残留率为22.6%,显著低于CK处理( $P<0.05$ )。其余氮素处理的玉米秸秆质量残留率与CK相比无显著差异。这说明外源添加谷氨酸能够显著促进玉米秸秆的腐解。

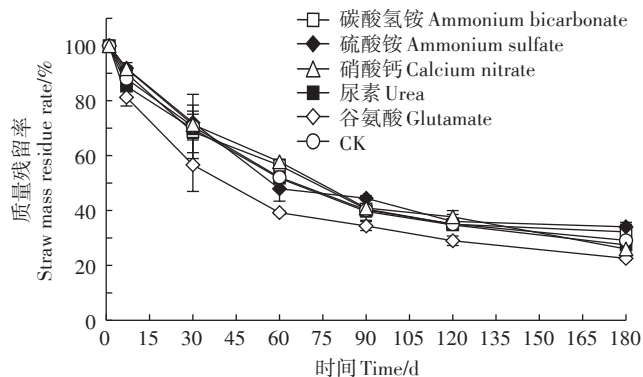


图1 玉米秸秆腐解质量残留特征

Figure 1 Residual characteristics of corn straw mass at different decomposition time

玉米秸秆腐解过程中质量残留率随时间的变化可以用衰减指数方程拟合(表1),拟合度均很高,决定系数 $R^2$ 为0.985~0.995。外源添加尿素和CK处理的玉米秸秆腐解速率常数均为 $1.7 \times 10^{-2} \text{ d}^{-1}$ ,说明外源添加尿素对玉米秸秆腐解无明显影响。外源添加谷氨酸处理的腐解速率常数最大,为 $2.8 \times 10^{-2} \text{ d}^{-1}$ ,其次为硫酸铵和碳酸氢铵,其腐解速率常数分别为 $2.1 \times 10^{-2} \text{ d}^{-1}$ 和 $1.8 \times 10^{-2} \text{ d}^{-1}$ ,均高于CK处理( $1.7 \times 10^{-2} \text{ d}^{-1}$ ),这说明外源添加谷氨酸、硫酸铵和碳酸氢铵均能促进玉米秸秆的降解。外源添加硝酸钙处理的玉米秸秆腐解速率常数最低,为 $1.4 \times 10^{-2} \text{ d}^{-1}$ ,低于CK处理,这

表1 玉米秸秆残留质量与腐解时间关系的拟合

Table 1 Fitting of the relationship between corn straw residual mass and decomposition time

| 处理 Treatments | $y_0$  | $a$    | $k/d^{-1}$           | $R^2$ | $P$   |
|---------------|--------|--------|----------------------|-------|-------|
| 碳酸氢铵          | 28.344 | 71.614 | $1.8 \times 10^{-2}$ | 0.990 | <0.01 |
| 硫酸铵           | 31.661 | 70.145 | $2.1 \times 10^{-2}$ | 0.990 | <0.01 |
| 硝酸钙           | 19.901 | 79.908 | $1.4 \times 10^{-2}$ | 0.993 | <0.01 |
| 尿素            | 24.282 | 73.657 | $1.7 \times 10^{-2}$ | 0.989 | <0.01 |
| 谷氨酸           | 25.342 | 73.217 | $2.8 \times 10^{-2}$ | 0.985 | <0.01 |
| CK            | 25.778 | 73.567 | $1.7 \times 10^{-2}$ | 0.995 | <0.01 |

说明外源添加硝酸钙一定程度上减缓了玉米秸秆的腐解。

## 2.2 玉米秸秆残留碳素变化

在添加不同外源氮的条件下,玉米秸秆中碳素残留率随着培养时间延长呈现逐渐降低的趋势(图2),且在0~60 d内下降较快,之后(60~180 d)逐渐减缓。外源添加谷氨酸处理的玉米秸秆碳素残留率低于其他处理。培养至60 d时,外源添加谷氨酸和硫酸铵处理的碳素残留质量分别是其初始质量的28.7%和34.7%,显著低于CK处理( $P<0.05$ );而外源添加碳酸氢铵、硝酸钙和尿素处理的碳素残留率与CK处理相比无显著差异。培养到180 d时,各处理玉米秸秆碳素残留质量是其初始质量的16.9%~24.8%,外源添加谷氨酸处理的碳素残留率为16.9%,显著低于添加硫酸铵处理( $P<0.05$ ),其余氮处理的碳素残留率与CK处理相比并无显著差异。这说明外源添加谷氨酸和硫酸铵能够显著提高玉米秸秆腐解前期碳素的释放,而对后期秸秆碳素释放无显著影响。

玉米秸秆腐解过程中碳素残留率随时间的变化可以用衰减指数方程拟合(表2),拟合度较好, $R^2$ 为

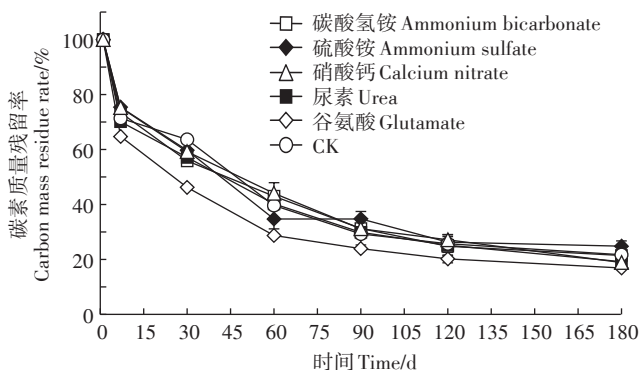


图2 玉米秸秆腐解碳素残留特征

Figure 2 Residual characteristics of corn straw carbon mass at different decomposition time

0.615~0.904。外源添加尿素和CK处理的玉米秸秆碳素释放速率常数均为 $8.2 \times 10^{-3} d^{-1}$ ,表明外源添加尿素对玉米秸秆碳素的释放无明显影响;外源添加谷氨酸处理的碳素释放速率常数最大,为 $1.37 \times 10^{-2} d^{-1}$ ,其次为硝酸钙和硫酸铵,其碳素释放速率常数分别为 $9.9 \times 10^{-3} d^{-1}$ 和 $8.3 \times 10^{-3} d^{-1}$ ,均高于CK处理,这说明外源添加谷氨酸、硝酸钙和硫酸铵均能促进玉米秸秆碳素的释放。外源添加碳酸氢铵处理玉米秸秆碳素释放速率常数为 $7.7 \times 10^{-3} d^{-1}$ ,低于CK处理,这说明外源添加碳酸氢铵在一定程度上减缓了玉米秸秆碳素的释放速率。

表2 玉米秸秆残留碳素与腐解时间关系的拟合

Table 2 Fitting of the relationship between corn straw residual carbon and decomposition time

| 处理 Treatments | $b$    | $k/d^{-1}$            | $R^2$ | $P$   |
|---------------|--------|-----------------------|-------|-------|
| 碳酸氢铵          | 82.405 | $7.7 \times 10^{-3}$  | 0.615 | <0.01 |
| 硫酸铵           | 84.270 | $8.3 \times 10^{-3}$  | 0.710 | <0.01 |
| 硝酸钙           | 87.996 | $9.9 \times 10^{-3}$  | 0.904 | <0.01 |
| 尿素            | 82.148 | $8.2 \times 10^{-3}$  | 0.653 | <0.01 |
| 谷氨酸           | 83.628 | $1.37 \times 10^{-2}$ | 0.821 | <0.01 |
| CK            | 83.919 | $8.2 \times 10^{-3}$  | 0.679 | <0.01 |

## 2.3 玉米秸秆残留氮素变化

在添加不同外源氮的条件下,玉米秸秆氮素残留率随着培养时间的延长总体呈现逐渐下降的趋势(图3),其中在0~7 d内快速释放,15~90 d缓慢释放,90~180 d又快速释放。30~90 d和120~180 d内,外源添加谷氨酸处理的玉米秸秆氮素残留率低于其他处理,而外源添加硫酸铵处理的玉米秸秆氮素残留率与CK

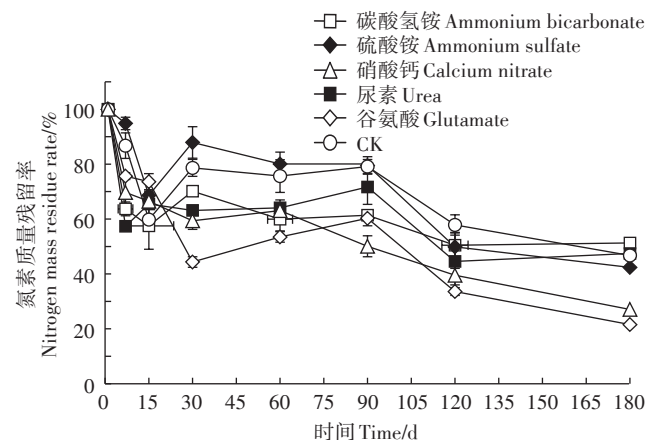


图3 玉米秸秆腐解氮素残留特征

Figure 3 Residual characteristics of corn straw nitrogen mass at different decomposition time

处理相比无显著差异。培养至第7 d时,外源添加尿素、碳酸氢铵、硝酸钙和谷氨酸处理的氮素残留质量分别是初始质量的57.4%、63.7%、69.7%和75.6%,显著低于CK处理( $P<0.05$ );而外源添加硫酸铵处理与CK相比差异不显著。培养至30 d时,外源添加碳酸氢铵、硝酸钙和尿素处理的氮素残留率分别为70.2%、59.4%和63.1%,显著低于CK处理( $P<0.05$ )。培养至90 d时,外源添加碳酸氢铵、硝酸钙、尿素和谷氨酸处理的氮素残留质量是其初始质量的61.4%、50.1%、71.7%和60.3%,显著低于CK处理( $P<0.05$ )。培养至180 d时,玉米秸秆残余物中氮素残留质量是其初始质量的21.6%~51.3%,外源添加硝酸钙和谷氨酸处理的氮素残留质量是其初始质量的27.08%和21.57%,显著低于CK处理( $P<0.05$ );外源添加尿素处理的氮素残留质量是初始质量的47.44%,显著高于CK处理( $P<0.05$ )。这说明外源添加谷氨酸能促进玉米秸秆中氮素的释放,而外源添加尿素会减缓玉米秸秆中氮素的释放速率。

玉米秸秆腐解过程中氮素残留率随时间的变化可以用衰减指数方程拟合(表3),拟合度较好, $R^2$ 为0.579~0.895。外源添加谷氨酸处理的氮素释放速率常数最大,为 $7.15\times 10^{-3} \text{ d}^{-1}$ ,其次为硝酸钙、硫酸铵、碳酸氢铵和尿素,其氮素释放速率常数分别为 $6.12\times 10^{-3}$ 、 $4.51\times 10^{-3}$ 、 $4.24\times 10^{-3} \text{ d}^{-1}$ 和 $4.21\times 10^{-3} \text{ d}^{-1}$ ,均高于CK处理。这说明外源添加氮素均能促进玉米秸秆氮素的释放,其中谷氨酸促进作用最强。

## 2.4 玉米秸秆残留磷素分析

在添加不同外源氮的条件下,玉米秸秆磷素残留率随着培养时间的延长而呈现逐渐下降的趋势(图4),且在前30 d内下降较快,之后(30~180 d)逐渐减缓。在15~180 d,外源添加谷氨酸处理的玉米秸秆磷素残留率高于其他氮素处理。培养至30 d时,外源添加谷氨酸处理的磷素残留质量是初始质量的72.1%,

显著高于CK处理( $P<0.05$ );其余氮素处理与CK相比差异未达到显著水平( $P<0.05$ )。培养至180 d时,外源添加谷氨酸、硝酸钙和碳酸氢铵处理的玉米秸秆磷素残留质量是其初始质量的59.0%、47.1%和46.5%,显著高于CK处理( $P<0.05$ )。这说明外源添加谷氨酸、硝酸钙和碳酸氢铵会减缓玉米秸秆中磷素的释放速率。

玉米秸秆腐解过程中磷素残留率随时间的变化可以用衰减指数方程拟合(表4),拟合度较好, $R^2$ 为0.311~0.859。外源添加谷氨酸、碳酸氢铵、硝酸钙和尿素处理的磷素释放速率常数分别为 $2.72\times 10^{-3}$ 、 $4.43\times 10^{-3}$ 、 $5.08\times 10^{-3} \text{ d}^{-1}$ 和 $5.46\times 10^{-3} \text{ d}^{-1}$ ,均比CK处理低,说明外源添加谷氨酸、碳酸氢铵、硝酸钙和尿素均会在一定程度上减缓玉米秸秆磷素的释放。外源添加硫酸铵处理的磷素释放速率常数为 $7.94\times 10^{-3} \text{ d}^{-1}$ ,高于CK处理,这说明外源添加硫酸铵能促进玉米秸秆磷素的释放。

## 2.5 玉米秸秆残留钾素分析

在添加不同外源氮的条件下,玉米秸秆钾素残留率随着培养时间的延长呈现逐渐下降的趋势(图5),

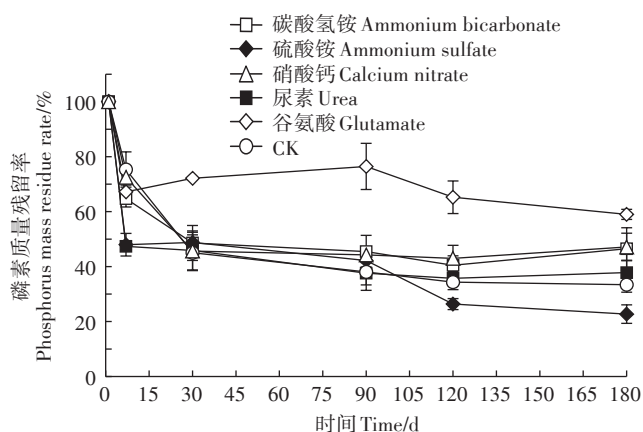


图4 玉米秸秆腐解磷素残留特征

Figure 4 Residual characteristics of corn straw phosphorus mass at different decomposition time

表3 玉米秸秆残留氮素与腐解时间关系的拟合

Table 3 Fitting of the relationship between corn straw residual nitrogen and decomposition time

| 处理 Treatments | $b$     | $k_1/\text{d}^{-1}$  | $R^2$ | $P$   |
|---------------|---------|----------------------|-------|-------|
| 碳酸氢铵          | 89.064  | $4.24\times 10^{-3}$ | 0.715 | <0.01 |
| 硫酸铵           | 101.078 | $4.51\times 10^{-3}$ | 0.895 | <0.01 |
| 硝酸钙           | 82.189  | $6.12\times 10^{-3}$ | 0.785 | <0.01 |
| 尿素            | 82.275  | $4.21\times 10^{-3}$ | 0.579 | <0.01 |
| 谷氨酸           | 88.694  | $7.15\times 10^{-3}$ | 0.863 | <0.01 |
| CK            | 94.166  | $3.59\times 10^{-3}$ | 0.849 | <0.01 |

表4 玉米秸秆残留磷素与腐解时间关系的拟合

Table 4 Fitting of the relationship between corn straw residual phosphorus and decomposition time

| 处理 Treatments | $b$    | $k_1/\text{d}^{-1}$  | $R^2$ | $P$   |
|---------------|--------|----------------------|-------|-------|
| 碳酸氢铵          | 84.497 | $4.43\times 10^{-3}$ | 0.647 | <0.01 |
| 硫酸铵           | 74.439 | $7.94\times 10^{-3}$ | 0.562 | <0.01 |
| 硝酸钙           | 86.294 | $5.08\times 10^{-3}$ | 0.675 | <0.01 |
| 尿素            | 70.100 | $5.46\times 10^{-3}$ | 0.311 | <0.01 |
| 谷氨酸           | 91.023 | $2.72\times 10^{-3}$ | 0.642 | <0.01 |
| CK            | 89.593 | $7.54\times 10^{-3}$ | 0.859 | <0.01 |

且在0~60 d内下降较快,而后(60~180 d)逐渐减缓。在0~60 d内,外源添加尿素处理的玉米秸秆钾素残留率低于其他氮素处理。培养至60 d时,外源添加碳酸氢铵处理的钾素残留质量是其初始质量的89.8%,显著高于CK处理( $P<0.05$ );外源添加尿素处理的钾素残留质量是其初始质量的60.8%,显著低于CK处理( $P<0.05$ );而其余氮素处理的玉米秸秆钾素残留量与CK处理之间差异不显著。培养至120 d时,外源添加碳酸氢铵、硫酸铵、硝酸钙和尿素处理的钾素残留质量是其初始质量的86.2%、72.6%、69.8%和65.4%,显著高于CK处理( $P<0.05$ )。培养至180 d时,玉米秸秆残余物中钾素残留质量是其初始质量的24.9%~54.5%。外源添加碳酸氢铵处理的钾素残留量是其初始质量的54.48%,显著高于CK处理( $P<0.05$ );其余氮素处理的钾素残留率与CK处理无显著差异。这说明外源添加碳酸氢铵会减缓玉米秸秆钾素的释放速率。

玉米秸秆腐解过程中钾素残留率随时间的变化可以用衰减指数方程拟合(表5),拟合度很高, $R^2$ 为0.858~0.949。外源添加谷氨酸、硝酸钙和尿素处理的钾素释放速率常数分别为 $5.62\times 10^{-3}$ 、 $5.60\times 10^{-3}$  d $^{-1}$

和 $4.92\times 10^{-3}$  d $^{-1}$ ,均高于CK处理,这说明外源添加谷氨酸、硝酸钙和尿素均能促进玉米秸秆钾素的释放;外源添加碳酸氢铵和硫酸铵处理的钾素释放速率常数分别为 $3.04\times 10^{-3}$  d $^{-1}$ 和 $3.94\times 10^{-3}$  d $^{-1}$ ,均低于CK处理,这说明外源添加碳酸氢铵和硫酸铵会在一定程度上减缓玉米秸秆中钾素的释放速率。

### 3 讨论

#### 3.1 不同形态氮素对玉米秸秆腐解的影响

本研究结果表明,外源添加谷氨酸、硫酸铵和碳酸氢铵能促进玉米秸秆的降解和养分释放,这和前人的研究结果一致。丁雪丽等<sup>[22]</sup>研究发现,硫酸铵对玉米秸秆腐解有促进作用,且添加的硫酸铵越多秸秆腐解越快;李晓韦等<sup>[23]</sup>研究发现,施用有机氮会促进油菜秸秆的腐解。这可能是因为外源添加谷氨酸和硫酸铵可以影响微生物群落结构和生物酶活性,进而促进了作物秸秆腐解。添加氮素提高了好气性纤维素分解微生物的活性与数量<sup>[24]</sup>,主要是提高了细菌的数量和丰度,而细菌群落中纤维素降解菌丰度与秸秆中纤维素和半纤维素的分解、代谢呈正相关<sup>[25]</sup>。Keeler等<sup>[26]</sup>认为,氮对凋落物中纤维素降解酶和聚磷酶的活性有促进作用,氮的添加还可刺激微生物活性,增加对磷和碳的需求,导致碳和磷获取酶的能力增加。朱远芃等<sup>[27]</sup>的研究表明,氮肥通过提高中性木聚糖酶和 $\beta$ -葡萄糖苷酶等水解酶的活性促进秸秆腐解。

本研究结果还表明,外源添加有机氮(谷氨酸)对玉米秸秆腐解的促进作用高于无机氮(如硫酸铵等),可能是在添加谷氨酸等有机氮时,不仅调节了秸秆的C/N,而且直接为微生物提供了有机氮源,增加了微生物群落结构多样性和数量,促进微生物分泌生物酶,进而加快玉米秸秆的腐解。微生物结构聚合物主要由氨基糖构成,外源添加的有机氮可能是微生物合成蛋白质聚合物的主要来源<sup>[28]</sup>。耿丽平等<sup>[29]</sup>发现,有机氮产酶量高于无机氮。张悦等<sup>[30]</sup>发现,纤维素降解菌对硫酸铵和有机氮(蛋白胨)的利用率相对较高,所产酶活力较强,显著促进玉米秸秆腐解。

#### 3.2 外源氮对秸秆养分释放的影响

本研究表明,在腐解过程中玉米秸秆养分释放率为钾>磷>氮,添加外源氮促进了秸秆中碳、氮、钾的释放,而抑制了磷素的释放。碳、氮释放规律与腐解规律相似,这可能是因为秸秆中的碳、氮养分是微生物繁殖所需的能源,微生物所需的碳、氮养分随着秸秆腐解而增加<sup>[30-31]</sup>,而钾在玉米秸秆中主要以离子形

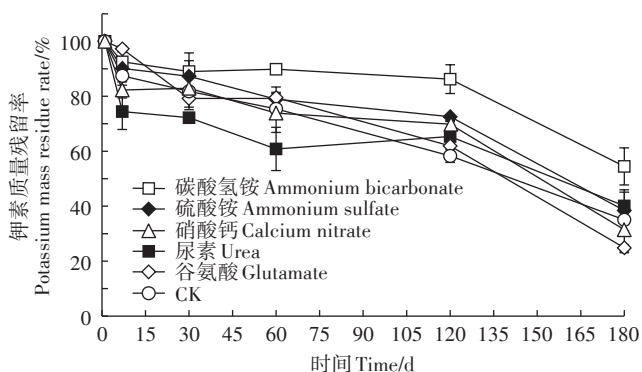


图5 玉米秸秆腐解钾素残留特征

Figure 5 Residual characteristics of corn straw potassium mass at different decomposition time

表5 玉米秸秆残留钾素与腐解时间关系的拟合

Table 5 Fitting of the relationship between corn straw residual potassium and decomposition time

| 处理 Treatments | <i>b</i> | <i>k<sub>d</sub></i> /d $^{-1}$ | <i>R</i> <sup>2</sup> | <i>P</i> |
|---------------|----------|---------------------------------|-----------------------|----------|
| 碳酸氢铵          | 99.065   | $3.04\times 10^{-3}$            | 0.910                 | <0.01    |
| 硫酸铵           | 98.287   | $3.94\times 10^{-3}$            | 0.858                 | <0.01    |
| 硝酸钙           | 95.631   | $5.60\times 10^{-3}$            | 0.917                 | <0.01    |
| 尿素            | 87.117   | $4.92\times 10^{-3}$            | 0.780                 | <0.01    |
| 谷氨酸           | 101.244  | $5.62\times 10^{-3}$            | 0.889                 | <0.01    |
| CK            | 96.475   | $4.87\times 10^{-3}$            | 0.949                 | <0.01    |

态存在,钾离子随秸秆腐解而逐渐释放<sup>[32]</sup>,谷氨酸和硫酸铵促进了秸秆腐解,进而加速了秸秆中碳素、氮素和钾离子释放。而秸秆中磷以有机磷和无机磷形态存在,秸秆在被微生物矿化分解过程中,释放出一定数量的可被微生物和植物吸收利用的有效磷成分,随着培养时间延长,秸秆释放的有效磷可参与有机物的再合成(腐殖化作用),或者被微生物同化为微生物生物量磷,仍以有机态磷形式存在<sup>[33]</sup>。同时秸秆腐解残留物对游离有效磷的吸附固定作用,也可使秸秆释放的有效磷转化为缓效磷或无效态磷赋存于秸秆表面<sup>[34]</sup>。微生物在秸秆腐解过程中可利用有机磷矿化获取磷素来维持自身生命代谢<sup>[35]</sup>。Dai等<sup>[36]</sup>发现,氮素的输入降低微生物磷吸收转运基因和解磷基因的丰度,削弱关键磷素转化基因之间的联系,并降低放线菌、 $\gamma$ -变形杆菌、 $\alpha$ -变形杆菌等解磷微生物的丰度,减少了秸秆磷素的释放。细菌是分泌磷酸酶的主要微生物,氮素添加抑制了磷酸酶的活性,进而降低了秸秆磷素释放,提高了秸秆中磷素的残留率<sup>[37]</sup>。Wang等<sup>[38]</sup>研究发现,施氮会显著降低酸性磷酸酶的活性,导致秸秆中磷素释放减少。

### 3.3 不同形态氮肥的经济成本

目前硫酸铵市场价约500元 $\cdot$ t<sup>-1</sup>,碳酸氢铵市场价约700元 $\cdot$ t<sup>-1</sup>,尿素市场价约1750元 $\cdot$ t<sup>-1</sup>,聚谷氨酸氮肥市场价约2000元 $\cdot$ t<sup>-1</sup>,硝酸铵市场价约1800元 $\cdot$ t<sup>-1</sup>;每亩(667 m<sup>2</sup>)玉米秸秆量约为0.47 t,需要添加氮素为 $1.24 \times 10^{-3}$  t<sup>[7]</sup>。每亩(667 m<sup>2</sup>)地玉米秸秆C/N调节为25:1需要添加硫酸铵、碳酸氢铵、尿素、聚谷氨酸和硝酸铵的成本分别约为0.62、0.87、2.17、2.48元和2.23元。因此,硫酸铵不仅能加速秸秆腐解速率,还能降低经济成本。

## 4 结论

(1)谷氨酸、硫酸铵、碳酸氢铵会促进玉米秸秆的腐解,尿素对玉米秸秆腐解无明显影响,硝酸钙会减缓玉米秸秆的腐解。

(2)玉米秸秆腐解过程中,谷氨酸、尿素、硝酸钙会促进碳、氮、钾养分的释放,但会减缓磷素的释放;硫酸铵会促进碳、氮、磷养分的释放,但会减缓钾素的释放;碳酸氢铵会促进氮素的释放,但会减缓碳、磷、钾养分的释放。

(3)谷氨酸对玉米秸秆腐解的促进作用强于硫酸铵和其他无机氮。从加快玉米秸秆腐解速率角度考虑,谷氨酸是最佳氮源;从加快玉米秸秆腐解速率和

投入成本两方面综合考虑,硫酸铵是最佳氮源。

### 参考文献:

- [1] 郭冬生, 黄春红. 近10年来中国农作物秸秆资源量的时空分布与利用模式[J]. 西南农业学报, 2016, 29(4): 948-954. GUO Dong-sheng, HUANG Chun-hong. Spatial and temporal distribution of crop straw resources in past 10 years in China and its use pattern[J]. *South-west China Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 29(4): 948-954.
- [2] 霍丽丽, 赵立欣, 孟海波, 等. 中国农作物秸秆综合利用潜力研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(13): 218-224. HUO Li-li, ZHAO Li-xin, MENG Hai-bo, et al. Study on straw multi-use potential in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(13): 218-224.
- [3] 崔明, 赵立欣, 田宜水, 等. 中国主要农作物秸秆资源能源化利用分析评价[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 291-296. CUI Ming, ZHAO Li-xin, TIAN Yi-shui, et al. Analysis and evaluation on energy utilization of main crop straw resources in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(12): 291-296.
- [4] 张红, 曹莹菲, 徐温新, 等. 植物秸秆腐解特性与微生物群落变化的响应[J]. 土壤学报, 2019, 56(6): 1482-1492. ZHANG Hong, CAO Ying-fei, XU Wen-xin, et al. Decomposition of plant straws and accompanying variation of microbial communities[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(6): 1482-1492.
- [5] 史奕, 张璐, 鲁彩艳, 等. 不同有机物料在潮棕壤中有机碳分解进程[J]. 生态环境, 2003(1): 56-58. SHI Yi, ZHANG Lu, LU Cai-yan, et al. Decomposition process of organic carbon of different organic materials in meadow brown soil[J]. *Ecology and Environment*, 2003(1): 56-58.
- [6] 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 Ting-miao, WANG Zhao-hui, HOU Yang-yi, et al. Effects of nitrogen application 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.
- [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 Da-li, HOU Sheng-peng, WANG Xiu-bin, 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] 尹静, 刘悦秋, 于峰, 等. 一株木质素降解菌的筛选鉴定及其在堆肥中的应用[J]. 中国土壤与肥料, 2019(3): 179-185. YIN Jing, LIU Yue-qiu, YU Feng, et al. Screening and identification of a lignin-degrading bacterium and its application in composting[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019(3): 179-185.
- [9] 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 Chang-ming, WANG Xiao-yue, SUN Bo. 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.

- [10] 蔡立群, 牛怡, 罗珠珠, 等. 秸秆促腐还田土壤养分及微生物量的动态变化[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(9): 1047-1056. CAI Li-qun, NIU Yi, LUO Zhu-zhu, et al. Dynamic characteristics of soil nutrients and soil microbial biomass of field-returned straws at different decay accretion conditions[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(9): 1047-1056.
- [11] 李帆, 王静, 武际, 等. 尿素硝酸铵调节碳氮比促进小麦秸秆堆肥腐熟[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(5): 832-840. LI Fan, WANG Jing, WU Ji, et al. Fast production of wheat straw aerobic compost through regulating C/N ratio with urea ammonium nitrate solution[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(5): 832-840.
- [12] 王大庆, 安蒙龙, 王洪波, 等. 生态因子对玉米秸秆降解特性影响研究[J]. 绿色科技, 2016(12): 53-55. WANG Da-qing, AN Meng-long, WANG Hong-bo, et al. Effects of ecological factors on the degradation of corn straw[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2016(12): 53-55.
- [13] 赵聪, 曹莹菲, 刘克, 等. 室内模拟条件下玉米秸秆的分解特征及物质组成变化[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(4): 183-186. ZHAO Cong, CAO Ying-fei, LIU Ke, et al. Characteristics of decomposition and variation of material composition of corn straw in laboratory simulation experiment[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(4): 183-186.
- [14] Zhang W M, Yu C, Wang X, et al. Increased abundance of nitrogen transforming bacteria by higher C/N ratio reduces the total losses of N and C in chicken manure and corn stover mix composting[J]. *Biore-source Technology*, 2020, 297: 122410.
- [15] Li X G, Jia B, Lv J T, et al. Nitrogen fertilization decreases the decomposition of soil organic matter and plant residues in planted soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 112: 47-55.
- [16] Knorr M, Frey S D, Curtis A P S. Nitrogen additions and litter decomposition: A meta-analysis[J]. *Ecology*, 2005, 86(12): 3252-3257.
- [17] 卞景阳, 刘琳帅, 孙兴荣, 等. 施氮对寒地粳稻还田秸秆腐解及养分释放的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2019, 31(5): 22-28. BIAN Jing-yang, LIU Lin-shuai, SUN Xing-rong, et al. Effect of nitrogen application on straw decomposition and nutrient release of japonica rice in cold region[J]. *Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University*, 2019, 31(5): 22-28.
- [18] 张学林, 周亚男, 李晓立, 等. 氮肥对室内和大田条件下作物秸秆分解和养分释放的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(10): 1746-1760. ZHANG Xue-lin, ZHOU Ya-nan, LI Xiao-li, et al. Effects of nitrogen fertilizer on crop residue decomposition and nutrient release under lab incubation and field conditions[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(10): 1746-1760.
- [19] Ogunniyi J E, Guo C H, Tian X H, et al. The effects of three mineral nitrogen sources and zinc on maize and wheat straw decomposition and soil organic carbon[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(12): 2768-2777.
- [20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. LU Ru-kun. Chemical analysis of soil agriculture[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [21] 王景, 陈曦, 张雅洁, 等. 好气和厌氧条件下小麦秸秆的腐解特征研究[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(3): 161-168. WANG Jing, CHEN Xi, ZHANG Ya-jie, et al. Characteristic of wheat straw decomposition under aerobic and anaerobic condition in soil[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2015, 20(3): 161-168.
- [22] 丁雪丽, 何红波, 李小波, 等. 不同供氮水平对玉米秸秆降解初期碳素矿化及微生物量的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(4): 784-788. DING Xue-li, HE Hong-bo, LI Xiao-bo, et al. Effect of nitrogen level on carbon mineralization and microbial biomass during initial decomposition of maize straw[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(4): 784-788.
- [23] 李晓韦, 韩上, 雷之萌, 等. 氮素形态对油菜秸秆腐解及养分释放规律的影响[J]. 中国生态农业学报, 2019, 27(5): 717-725. LI Xiao-wei, HAN Shang, LEI Zhi-meng, et al. Effects of nitrogen forms on decomposition and nutrient release of rapeseed straw[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(5): 717-725.
- [24] 汤树德. 作物秸秆直接还田的土壤生物学效应[J]. 土壤学报, 1980, 17(2): 172-181. TANG Shu-de. The biological effect of turning over of straws into soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1980, 17(2): 172-181.
- [25] 赵一全, 马茹霞, 李家威, 等. 玉米秸秆厌氧发酵过程中添加氮素对微生物群落和沼气产量的影响[J]. 中国沼气, 2018, 36(5): 66-72. ZHAO Yi-quan, MA Ru-xia, LI Jia-wei, et al. Effects of nitrogen addition on biogas production and microbial community in corn straw anaerobic digestion system[J]. *China Biogas*, 2018, 36(5): 66-72.
- [26] Keeler B L, Hobbie S E, Kellogg L E. Effects of long-term nitrogen addition on microbial enzyme activity in eight forested and grassland sites: Implications for litter and soil organic matter decomposition[J]. *Ecosystems*, 2009, 12(1): 1-15.
- [27] 朱远芄, 金梦灿, 马超, 等. 外源氮肥和腐熟剂对小麦秸秆腐解的影响[J]. 生态环境学报, 2019, 28(3): 612-619. ZHU Yuan-peng, JIN Meng-can, MA Chao, et al. Impacts of exogenous nitrogen and effective microorganism on the decomposition of wheat straw residues[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(3): 612-619.
- [28] Gillespie A W, Diochon A, Ma B L, et al. Nitrogen input quality changes the biochemical composition of soil organic matter stabilized in the fine fraction: A long-term study[J]. *Biogeochemistry*, 2014, 117(2/3): 337-350.
- [29] 耿丽平, 陆秀君, 赵全利, 等. 草酸青霉菌产酶条件优化及其秸秆腐解能力[J]. 农业工程学报, 2014, 30(3): 170-179. GENG Li-ping, LU Xiu-jun, ZHAO Quan-li, et al. Optimization of enzyme-production conditions of *Penicillium oxalicum* and its ability for decomposition of stalks[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(3): 170-179.
- [30] 张悦, 季静, 关春峰, 等. 秸秆纤维素降解菌的筛选及其产酶特性研究[J]. 纤维素科学与技术, 2018, 26(4): 28-38. ZHANG Yue, JI Jing, GUAN Chun-feng, et al. Screening of straw-degrading strains and their enzyme-producing conditions[J]. *Journal of Cellulose Science and Technology*, 2018, 26(4): 28-38.
- [31] 南雄雄, 田霄鸿, 张琳, 等. 小麦和玉米秸秆腐解特点及对土壤中碳、氮含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3): 626-

633. NAN Xiong-xiong, TIAN Xiao-hong, ZHANG Lin, et al. Decomposition characteristics of maize and wheat straw and their effects on soil carbon and nitrogen contents[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(3):626-633.
- [32] 武际, 郭熙盛, 王允青, 等. 不同水稻栽培模式和秸秆还田方式下的油菜、小麦秸秆腐解特征[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(16):3351-3360. WU Ji, GUO Xi-sheng, WANG Yun-qing, et al. Decomposition characteristics of rapeseed and wheat straws under different rice cultivations and straw mulching models[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(16):3351-3360.
- [33] 王楠, 姚凯, 赵志伟, 等. 氮素不同形态对比对白浆土养分性状的调控[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(21):301-304. WANG Nan, YAO Kai, ZHAO Zhi-yi, et al. Regulation of different forms of nitrogen ratio on nutrient properties of albic soil[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(21):301-304.
- [34] 代文才, 高明, 兰木羚, 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 Wen-cai, GAO Ming, LAN Mu-ling, 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.
- [35] Ragot S A, Kertesz M A, Meszaros É, et al. Soil *phoD* and *phoX* alkaline phosphatase gene diversity responds to multiple environmental factors[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2016, 93(1):fw212.
- [36] Dai Z M, Liu G F, Chen H H, et al. Long-term nutrient inputs shift soil microbial functional profiles of phosphorus cycling in diverse agroecosystems[J]. *The ISME Journal*, 2020, 14:757-770.
- [37] Deng M F, Liu L L, Sun Z Z, et al. Increased phosphate uptake but not resorption alleviates phosphorus deficiency induced by nitrogen deposition in temperate *Larix principis-rupprechtii* plantations[J]. *New Phytologist*, 2016, 212(4):1019-1029.
- [38] Wang R Z, Filley T R, Xu Z W, et al. Coupled response of soil carbon and nitrogen pools and enzyme activities to nitrogen and water addition in a semi-arid grassland of Inner Mongolia[J]. *Plant Soil*, 2014, 381:323-336.