

# 长期氮沉降和地上凋落物处理对半干旱区 沙质草地表层土壤碳氮组分的影响

詹瑾<sup>1,2</sup>, 丛安琪<sup>1,2</sup>, 李玉霖<sup>1</sup>, 连杰<sup>1</sup>,  
陈佳宁<sup>3</sup>, 王鹤松<sup>3</sup>, 程莉<sup>1,2</sup>, 宁志英<sup>1</sup>, 杨红玲<sup>1,2</sup>

(1.中国科学院西北生态环境资源研究院奈曼沙漠化研究站,兰州 730000;  
2.中国科学院大学,北京 100049;3.内蒙古民族大学农学院,内蒙古 通辽 028000)

**摘要:** 为揭示半干旱区沙质草地生态系统中表层土壤 C、N 组分对长期氮添加和地上凋落物处理的响应特征,以科尔沁沙地西南部国家野外科学观测研究站建立的长期(9 年)氮添加和凋落物处理样地为平台,测定并分析该样地表层土壤环境因子、铵态氮、硝态氮、总有机碳、不同碳氮组分。结果表明:(1)持续 9 年的氮添加和地上凋落物处理对表层土壤环境因子和不同碳氮组分无交互作用;(2)氮添加处理显著降低土壤 pH( $p < 0.01$ ),增加土壤中硝态氮的含量( $p < 0.05$ ),其增长幅度为 37.57%,并显著增加溶解性有机氮(DON)和易变活性氮(LON)的含量( $p < 0.01$ ,  $p < 0.05$ );(3)地上凋落物去除显著降低土壤总有机碳(TOC)、易变缓性碳(IOC)、微生物生物量碳(MBC)和微生物生物量氮(MBN)含量( $p < 0.05$ );(4)经过 9 年氮添加和地上凋落物处理,半干旱区沙质草地表层土壤中不同碳氮组分与土壤环境因子间相关性并不密切。即长期氮添加和地上凋落物处理会改变表层土壤不同碳、氮组分的含量,但并未显著改变各碳、氮组分的比值。研究结果为揭示长期氮添加和地上凋落物处理对半干旱区沙质草地土壤 C、N 贮存和预测未来土壤生物地球化学元素动态研究提供参考资料。

**关键词:** 土壤碳氮组分;地上凋落物;氮沉降;沙质草地

中图分类号:S714.8 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2023)04-0227-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2023.04.028

## Effects of Long-term Nitrogen Deposition and Aboveground Litter Treatment on Top Soil Carbon and Nitrogen Fractions in the Semi-arid Sandy Grassland

ZHAN Jin<sup>1,2</sup>, CONG Anqi<sup>1,2</sup>, LI Yulin<sup>1</sup>, LIAN Jie<sup>1</sup>, CHEN Jianing<sup>3</sup>,  
WANG Hesong<sup>3</sup>, CHENG Li<sup>1,2</sup>, NING Zhiying<sup>1</sup>, YANG Hongling<sup>1,2</sup>

(1.Naiman Desertification Research Station, Northwest Institute of Eco-environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;  
3.College of Agriculture, Inner Mongolia Minzu University, Tongliao, Inner Mongolia 028000)

**Abstract:** In order to reveal the response characteristics of surface soil carbon (C) and nitrogen (N) components to long-term addition of N and aboveground litter treatment in semi-arid sandy grassland ecosystem, a long-term (9-year) N addition and litter treatment sample plot established by the National Field Scientific Observation and Research Station in the southwest of Horqin Sandy Land was taken as the platform. The surface soil environmental factors, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, total organic carbon (TOC) and different C and N components were measured and analyzed. The results showed that: (1) There was no interaction between surface soil biochemical factors and different C and N properties during 9 years of N addition and aboveground litter treatment. (2) The N addition treatment significantly reduced soil pH ( $p < 0.01$ ), significantly increased soil nitrate nitrogen content ( $p < 0.05$ ) by 37.57%, and the contents of dissolved organic nitrogen (DON) and labile organic nitrogen (LON) were significantly increased ( $p < 0.01$ ,  $p < 0.05$ ). (3) The treatment of aboveground litter removal significantly reduced the contents of TOC, intermediate organic carbon (IOC), microbial biomass carbon (MBC) and microbial biomass

收稿日期:2022-11-17

资助项目:内蒙古自治区科技重大专项(2019ZD00704, 2021ZD0015);国家自然科学基金项目(32071845);中国科学院 A 类战略性先导科技专项(XDA23060404)

第一作者:詹瑾(1993-),女,在读博士研究生,主要从事干旱半干旱区恢复生态研究。E-mail:zhanjin20@mails.ucas.ac.cn

通信作者:李玉霖(1970-),男,研究员,博士研究生导师,主要从事寒旱区恢复生态研究。E-mail:liyulin@lzb.ac.cn

nitrogen (MBN) ( $p < 0.05$ ). (4) After 9 years of N addition and aboveground litter treatment, there was no close correlation between different C and N components and soil environmental factors in semi-arid sandy grassland. The above results showed that long-term addition of N and aboveground litter could change the contents of different C and N components in the surface soil, but did not significantly change the ratio of each C and N component. This study provides a reference for revealing the effects of long-term addition of N and aboveground litter treatment on soil C and N storage and predicting future soil biogeochemical element dynamics in sandy grassland in semi-arid region.

**Keywords:** soil carbon and nitrogen fractions; aboveground litter; nitrogen deposition; sandy grassland

氮沉降是全球氮循环的重要组成部分,自 20 世纪 80 年代末 90 年代初,中国已成为全球第三大氮沉降区<sup>[1-2]</sup>。伴随着大气氮沉降的增加,存在于植被生长和土壤养分中不同程度的氮限制逐渐缓解,从而影响植物的生长,致使植物输送到土壤中凋落物的质与量发生改变<sup>[3]</sup>,改变土壤表层碳氮组分。凋落物作为陆地生态系统重要的碳库之一,其分解过程是连接地上和地下碳循环的重要养分释放途径<sup>[4]</sup>。而伴随着全球变化(例如 N 沉降)和人类活动,陆地生态系统的净初级生产力(NPP)发生变化,改变土壤中地上凋落物的输入<sup>[5-6]</sup>,从而影响碳循环。

土壤碳氮是评估土壤质量状况的重要指标<sup>[7]</sup>。土壤中碳含量的增加有利于加速土壤中的养分循环,改善土壤结构,改良土壤保持水分的能力;土壤中氮含量的改变主要通过影响整个生态系统的初级生产力,影响土壤养分结构及土壤碳含量;即土壤碳氮的改变对整个陆地生态系统的结构和功能具有重要的调控作用<sup>[8]</sup>。土壤碳氮组分溶解性强、易矿化分解、在土壤中周转快,是土壤中微生物主要吸收和利用的资源。其中活性有机碳组分比较容易分解和氧化,能更好地反映土壤质量变化和养分循环速率。比较之下,惰性有机碳相对比较稳定,在土壤中具有相对较长的停留时间。虽然不同的碳氮组分在土壤中所占比例较小,但其仍然是反映土壤质量和肥力特征的敏感性指标。鉴于此,在测定土壤有机碳和其余氮含量大组分的基础上,开展其活性有机碳氮、缓性碳氮和惰性碳氮组分的研究,对评价氮沉降和人类活动变化下土壤碳库和氮库的变化具有重要意义。

施氮促进植物生长,增加凋落物量。值得注意的是,当氮添加和凋落物协同作用时,对土壤中的碳氮组分产生怎样的影响?已有研究<sup>[9]</sup>表明,氮添加和凋落物增减提高华西雨屏区常绿阔叶林中土壤团聚体内的 C、N 含量;凋落物输入改善半干旱草原群落中土壤水分状况,而氮添加提高土壤养分含量<sup>[10]</sup>;长期地上叶凋落物输入处理和氮添加显著促进油松—辽东栎混交林表层土壤中不同物理(团聚体)和化学碳氮组分含量<sup>[11]</sup>。综上所述,虽然研究者已大量开展

氮添加和凋落物处理对土壤中的碳氮组分的研究工作,但很少有人对长期氮添加和地上凋落物处理对半干旱区沙质草地表层土壤碳氮组分变化进行研究。科尔沁沙地作为中国北方典型的半干旱区沙地,干氮沉降<sup>[12]</sup>较高,同时在过去的几十年中,受到人类干扰和气候变化的影响,此区域内约 80% 的土地发生沙化,使其已成为处于中国北方农牧交错带区域内沙漠化最严重的地区<sup>[13]</sup>。受土地沙漠化过程中强风作用,地表凋落物空间分布格局发生二次分配。鉴于此,本研究依靠科尔沁沙地西南部的国家野外科学观测研究站建立的长期(9 年)氮添加和地上凋落物处理样地为平台,研究半干旱区沙质草地表层土壤碳氮组分的影响,为进一步揭示长期氮添加和地上凋落物处理对半干旱区沙质草地土壤 C、N 贮存的影响,以及为土壤中化学元素动态预测提供基础参照。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

该研究区所在位置为科尔沁沙地西南部国家野外科学观测研究站(奈曼沙漠化研究站)( $42^{\circ}55'46''$ — $42^{\circ}56'10''$ N,  $120^{\circ}42'05''$ — $120^{\circ}42'15''$ E)附近的沙质草地。年平均气温  $6.4\sim 6.9$  °C,年平均降水量  $343\sim 451$  mm,生长季(5—9 月)降水占全年降水量的 75%。冬季和春季多为西北风,夏季多为西南风,年平均风速为  $3.5\sim 4.5$  m/s,大风天数占 20~60 天,春季经常发生沙尘暴(约 10~15 天)。受气候变化和人类活动的影响,该区域经历不同程度的沙漠化,使该区域的风沙地貌景观主要是以沙地、丘间低地、流动沙丘、半固定沙丘与固定沙丘为主<sup>[14]</sup>。受以上地貌景观的影响,该区域的植物在空间分布上表现为斑块化和异致性。多年生黄蒿(*Artemisia scoparia*)和白草(*Pennisetum flaccidum*)是沙质草地的优势种,一年生的沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)是流动沙丘的优势种,差不嘎蒿(*Artemisia halodendron*)和小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)等是半固定和固定沙丘的优势灌木<sup>[15]</sup>。

### 1.2 样地设置

研究样地为 1 块长期模拟氮添加、不同人类干扰方式和地上凋落物处理的随机区组控制试验样地(图

1)。将围封下的沙质草地划分为  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$  的小样方,共设置 60 个样方,其中共设置 6 个区组,每个区组设置 10 个试验小区,试验小区之间设置 1 m 的

缓冲带,以减弱样方边际效应。各区组内随机交互设置氮添加、地上凋落物处理、火烧、围栏排除小动物和对照等处理(共 10 个)。

105 CK	110 ND	205 NH	210 CKC	305 CKC	310 N	405 CKH	410 ND	505 CKD	510 CKH	605 NC	610 ND
104 CKH	109 NC	204 N	209 CK	304 NF	309 CKF	404 CK	409 CKD	504 CK	509 NH	604 CKC	609 N
103 CKF	108 CKC	203 ND	208 CKH	303 ND	308 NC	403 NF	408 CKF	503 CKF	508 CKC	603 NH	608 CKD
102 CKD	107 N	202 NC	207 NF	302 NH	307 CKH	402 N	407 CKC	502 NC	507 ND	602 NF	607 CK
101 NF	106 NH	201 CKF	206 CKD	301 CK	306 CKD	401 NH	406 NC	501 NF	506 N	601 CKH	606 CKF

注:CK 为对照;CKC 为地上凋落物去除;CKD 为地上凋落物加倍;CKF 为火烧;CKH 为围栏排除小动物;N 为施氮肥;NC 为氮肥+地上凋落物去除;ND 为氮肥+地上凋落物加倍;N 为氮肥+火烧;NH 为氮肥+围栏排除小动物。

图 1 模拟人类干扰样地布置示意

依据研究目标,只选择有氮添加和地上凋落物处理的小区在 2014 年初至 2022 年 10 月开展试验。具体处理为:对于氮添加处理区(N),基于 6—7 月为降雨较多且植物生长旺盛期,选择在每年 6—7 月人工添加氮素。在大量的模拟氮沉降试验中,已有研究<sup>[16]</sup>均是基于扩大 2~4 倍的研究区域氮沉降量所实行。科尔沁沙地区的多年氮沉降水平为  $1\sim 3\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ <sup>[17]</sup>,本研究以尿素( $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ )(含氮质量分数为 46%)为氮源对样地进行 1 年 1 次氮添加量为  $10\text{ g}/\text{m}^2$  处理;即通过计算所知每个氮添加小区( $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ )添加 2 174 g 的尿素,在 6—7 月中小雨之前均匀地撒在小区。在每年 11 月实施改变地上凋落物输入处理,地上凋落物去除(CKC)是指割除每个地上凋落物去除区( $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ )的地上部分,并清除散落在该小区的地表凋落物;地上凋落物加倍(CKD)是指均匀地将地上凋落物去除区(CKC)割除下的凋落物及收集的处于该区域的地表凋落物转移到地上凋落物加倍区,同时鉴于该区域春秋多风,为防止吹散凋落物,对地上凋落物加倍(CKD)区进行遮阳网遮罩,在 4 月中旬撤出遮阳网。对照处理(CK)为沙质草地自然状态下的试验小区,不做任何处理。

### 1.3 样品采集与测定

土壤样品采集于 2022 年 9 月,在每个试验样方内,使用直径为 2.5 cm 的土钻,采用 5 点法在取土区进行 0—10 cm 取样,取样后混合均匀,人工清除土样中的根和有机碎屑后,一分为二。一份装入无菌袋,置于装有冰袋的冷藏箱内,低温运回实验室,储存在  $4\text{ }^\circ\text{C}$  恒温冰箱中,对其中的土壤微生物生物量碳(MBC)和氮(MBN)通过氯仿熏蒸—浸提法<sup>[18]</sup>进行测定;另一份装入自封袋,带回实验室,经过自然风干后,过 2 mm 筛后用

于土壤理化性质分析,具体方法参照《土壤农化分析》<sup>[19]</sup>。即通过烘干称重法测定土壤含水量(SWC%);环刀法测定土壤容重(BD);雷磁 pH 计测定土壤 pH(水土比 2.5:1);雷磁电导仪测定土壤电导率(EC)(水土比 5:1);重铬酸钾—浓硫酸高温外加热氧化法测定土壤总有机碳含量(TOC);土壤铵态氮( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ )和硝态氮( $\text{NO}_3^- - \text{N}$ )采用连续流动分析仪测定;土壤溶解性有机碳和氮(DOC 和 DON)采用 TOC 分析仪测定;土壤化学碳氮组分测定采用 2 步酸解法<sup>[20]</sup>,主要测定水解液中易变(活性)碳、氮的含量(LOC/LON);易变(缓性)碳、氮的含量(IOC/ION);顽固性(惰性)碳氮的含量(ROC/RON)。

### 1.4 数据处理

通过 Excel 2019 软件进行数据初步的汇总处理,使用 SPSS 22.0 软件进行统计检验,Origin 2021 软件对数据进行作图。本研究采用双因素方差分析,检验氮添加和凋落物处理对表层土壤环境因子和不同碳氮组分的影响。采用单因素方差分析检验不同凋落物处理水平对各响应变量的影响,采用独立样本  $T$  检验检验 N 添加水平对各响应变量的影响,当  $p < 0.05$  时,单因素方差和独立样本  $T$  检验分析结果有显著差异。并通过 Pearson 相关系数来评价半干旱区沙质草地表层土壤中不同的碳、氮组分与土壤环境因子间的相关性。

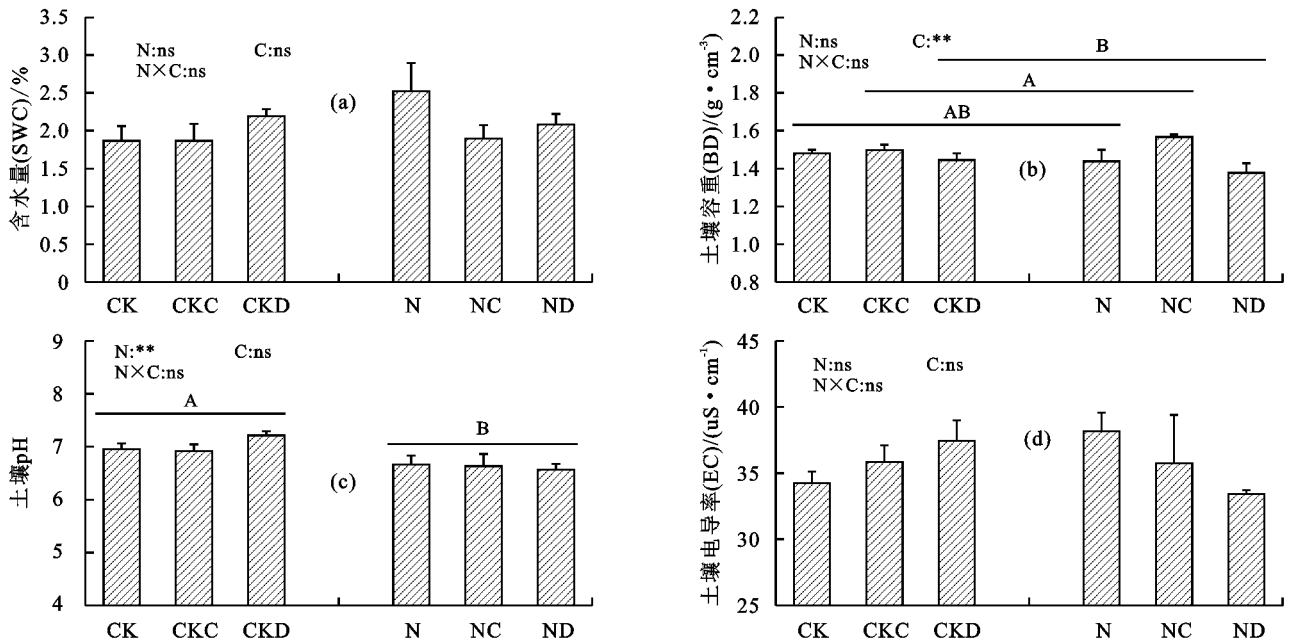
## 2 结果与分析

### 2.1 土壤环境因子的响应特征

由图 2 可知,持续 9 年的氮添加和地上凋落物处理对半干旱区沙质草地土壤含水量、容重、pH 和电导率无显著交互作用。其中,与不添加氮相比,氮添加处理显著降低土壤 pH( $p < 0.01$ ),其降低幅度为 5.82%,即持续 9 年的氮添加处理使得半干旱区沙质草地土壤酸化,

使其 pH 从 7.03 降至 6.62。地上凋落物处理对土壤容重有显著影响 ( $p < 0.01$ ), 与地上凋落物去除相比, 地上凋落物加倍显著降低土壤容重, 使其从  $153.16 \text{ g/cm}^3$  降

至  $141.75 \text{ g/cm}^3$ , 即随着地上凋落物加倍处理在时间序列上的累积, 增加表层土壤中有机质的含量, 使其密度降低, 土壤容重降低。



注: ns 表示  $p > 0.1$ ; # 表示  $p < 0.1$ ; \* 表示  $p < 0.05$ ; \*\* 表示  $p < 0.01$ ; \*\*\* 表示  $p < 0.001$ ; N 表示氮添加处理下的差异显著性分析; C 表示地上凋落物处理下的差异显著性分析; N×C 表示氮添加处理和地上凋落物处理间交互作用下的差异显著性分析; 柱状图中的字母表示不同氮添加和地上凋落物处理间各指标的多重比较结果, 不同小写字母表示不同地上凋落物处理间的差异显著 ( $p < 0.05$ ); 不同大写字母代表不同氮添加处理或地上凋落物处理间的差异显著 ( $p < 0.05$ )。下同。

图 2 2014—2022 年氮添加和地上凋落物处理对土壤含水量、容重、pH 和电导率的影响

## 2.2 土壤中铵态氮、硝态氮和总有机碳的响应特征

由图 3 可知, 持续 9 年的氮添加和地上凋落物处理对半干旱区沙质草地土壤铵态氮、硝态氮和总有机碳含量无显著交互作用。其中, 与不添加氮相比, 土壤中硝态氮的含量在氮添加处理下显著增加 ( $p < 0.05$ ), 使其从  $1.95 \text{ mg/kg}$  增至  $2.68 \text{ mg/kg}$ , 增长 37.57%。与自然生境相比, 地上凋落物去除显著降低土壤中硝态氮的含量 ( $p < 0.05$ ), 使其从  $2.61 \text{ mg/kg}$  降至  $1.56 \text{ mg/kg}$ 。

地上凋落物处理对土壤总有机碳含量有显著影响 ( $p < 0.01$ ), 与自然生境相比, 地上凋落物去除显著将其降低 22.70%; 在氮添加处理下, 土壤有机碳含量在地上凋落物去除下显著降低 ( $p < 0.05$ ), 使其从  $5.58 \text{ mg/kg}$  降至  $3.96 \text{ mg/kg}$ 。即半干旱区沙质草地以沙土为主, 表层土壤中有机质的主要来源是以地上凋落物输入为主, 地上凋落物去除, 消减对土壤碳源的输入, 使得土壤有机碳减少。

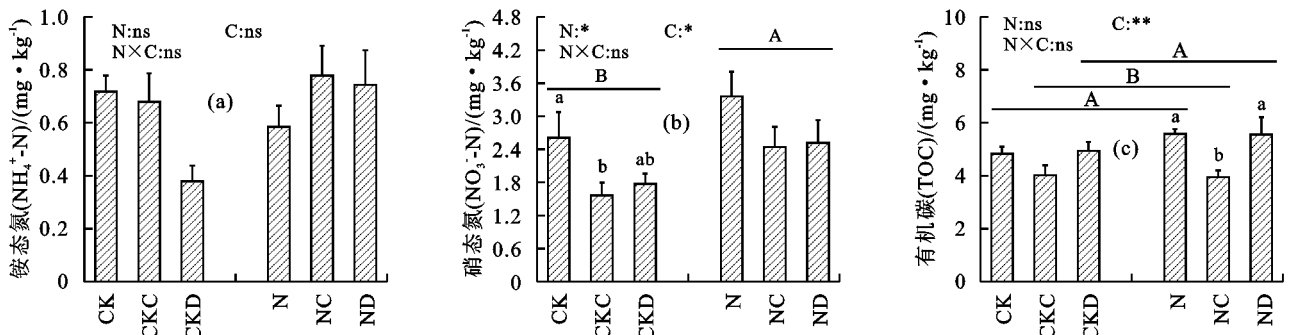


图 3 2014—2022 年氮添加和地上凋落物处理对土壤铵态氮、硝态氮和有机碳含量的影响

## 2.3 土壤中不同碳氮组分的响应特征

由图 4 可知, 持续 9 年氮添加和地上凋落物处理对半干旱区沙质草地土壤中的不同碳氮组分及其比值无显著交互作用。其中, 与不添加氮相比, 氮添加处理显著增加了土壤中溶解性有机氮 (DON) 和易变活性氮 (LON) 的含量 ( $p < 0.01$ ,  $p < 0.05$ ), 溶解性有机氮 (DON)

的增长幅度为 62.70%, 易变活性氮 (LON) 从  $160.44 \text{ mg/kg}$  增至  $177.59 \text{ mg/kg}$ , 即持续 9 年的氮添加处理显著增加土壤中活性氮组分 (DON 和 LON); 氮添加将土壤中溶解性碳氮比 (DOC/N) 从 15.44 显著降至 11.46 ( $p < 0.05$ ), 并显著降低土壤中微生物量碳 (MBC) 的含量 ( $p < 0.05$ ), 使其从  $26.82 \text{ mg/kg}$  减至  $16.52 \text{ mg/kg}$ 。

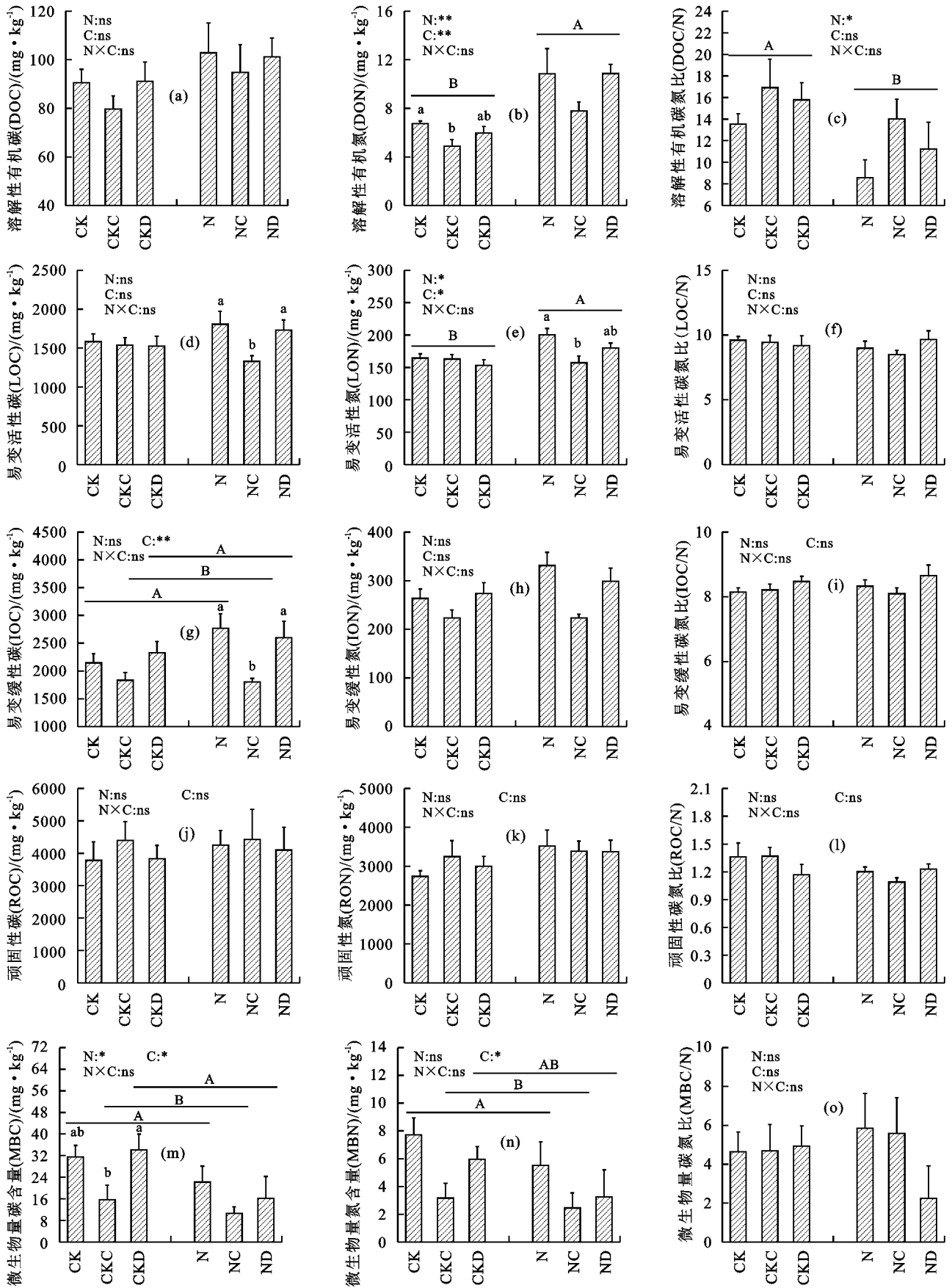


图 4 2014—2022 年氮添加和地上凋落物处理对土壤不同碳氮组分的影响

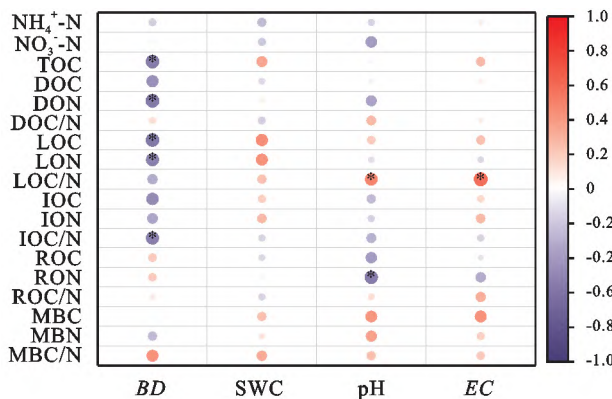
而在氮添加处理下,地上凋落物去除(CKC)显著降低土壤中易变活性炭(LOC)和氮(LON)的含量( $p < 0.05$ ),其降低幅度分别为 26.56%和 21.54%。

在无氮添加处理下,地上凋落物加倍(CKD)处理较地上凋落物去除(CKC)显著增加土壤微生物碳(MBC)含量( $p < 0.05$ );与 CK 相比,地上凋落物去除(CKC)显

著降低土壤中溶解性有机氮(DON)的含量,使其从6.73 mg/kg 下降为 4.88 mg/kg。与不改变地上凋落物处理相比,地上凋落物去除(CKC)显著降低土壤中易变缓性碳(IOC)、微生物量碳(MBC)和微生物氮(MBN)含量( $p < 0.01$ ,  $p < 0.05$ ,  $p < 0.05$ ),使易变缓性碳(IOC)从 2 458.09 mg/kg 降至 1 818.76 mg/kg,使微生物碳(MBC)从 24.70 mg/kg 降至 13.12 mg/kg,使微生物氮(MBN)从 6.74 mg/kg 降至 2.81 mg/kg。且在氮添加处理下,地上凋落物去除(CKC)显著降低土壤中易变缓性碳(IOC)的含量( $p < 0.05$ ),其降低幅度为 34.87%。即地上凋落物去除,使得表层土壤养分减少,削弱表层土壤涵养水源和截流作用,使得土壤中总有机碳和化学碳组分减少,同时降低土壤微生物活性,使其微生物碳(MBC)和微生物氮(MBN)含量降低。

#### 2.4 土壤中不同碳氮组分与环境因子间的相关性分析

由图 5 可知, Pearson 相关性分析表明, 经过持续 9 年氮添加和地上凋落物处理, 半干旱区沙质草地土壤中的不同碳氮组分与土壤环境因子间相关性并不密切。其中主要是土壤容重(BD)与有机碳(TOC)、溶解性有机氮(DON)、易变活性炭(LOC)、易变活性氮(LON)及易变缓性碳氮比(IOC/N)呈现显著负相关( $p < 0.05$ ); 土壤 pH 与易变活性碳氮比(LOC/N)呈显著正相关( $p < 0.05$ ), 与顽固性氮(ROCN)呈显著负相关( $p < 0.05$ ); 土壤电导率(EC)与易变活性碳氮比(LOC/N)呈显著正相关( $p < 0.05$ )。土壤含水量(SWC)与不同碳氮组分无显著相关关系。



注: \* 表示  $p < 0.05$ 。

图 5 不同碳氮组分与土壤环境因子间的相关性分析

### 3 讨论

氮沉降作为大气中活性氮化合物, 通过降雨、降尘等途径降落到地表, 可对质控土壤质量的理化性质产生影响。已有研究<sup>[21]</sup>表明, 植被的生长受土壤理化性质改变的影响, 且地下微生物和其参与的碳、氮等循环也受到土壤理化性质的调控。通过整合分析对草地生态系统中氮添加处理结果表明, 不同梯

度的氮添加均会引起土壤酸化; 土壤 pH 在氮添加量大于 5 g/(m<sup>2</sup> · a) 时显著降低; 当试验时间大于 3 年时, 土壤 pH 在以尿素为氮源的模拟试验中显著降低<sup>[22]</sup>。本研究以尿素[CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>]为氮源对半干旱区沙质草地进行持续 9 年每年 1 次氮添加量为 10 g/m<sup>2</sup> 的处理, 研究结果表明, 氮添加较显著降低土壤 pH( $p < 0.01$ ), 使其从 7.03 降至 6.62, 引起土壤 pH 降低的主要原因是 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 的硝化作用。半干旱区沙质草地降雨较少, 在对其进行长时间序列上的氮添加处理后, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 部分被土壤胶体和植物吸附或吸收, 部分被土壤中的硝化细菌通过硝化作用转化为 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, 并释放出 H<sup>+</sup>, 从而增加土壤中硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N) 的含量, 致使土壤 pH 下降<sup>[23]</sup>。本研究表明, 氮添加处理显著增加土壤中硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N) 的含量( $p < 0.05$ ), 其增长幅度为 37.57%。

氮沉降的过饱和和使得土壤 pH 降低, 而土壤 pH 是影响土壤碳、氮、磷循环的关键性环境因子<sup>[24]</sup>, 因此氮沉降对土壤中主要养分元素产生直接或间接的影响。本研究中, 氮添加处理显著增加土壤中溶解性有机氮(DON) ( $p < 0.01$ ) 和易变活性氮(LON) 的含量( $p < 0.05$ ), 使得土壤中溶解性碳氮比(DOC/N) 从 15.44 显著降至 11.46( $p < 0.05$ ), 并显著降低土壤中微生物量碳(MBC) 的含量( $p < 0.05$ )。有研究<sup>[25]</sup>表明, 土壤中碳、氮的来源与消耗决定其含量的变化, 本研究中氮添加缓解半干旱区沙质草地植被生长过程中的氮素限制性, 提高其光合速率, 促进生长, 使得进入到土壤中的枯枝落叶和根系分泌物的量增加, 从而增加土壤中水溶性碳氮含量<sup>[25]</sup>, 即持续 9 年的氮添加处理显著增加土壤中活性氮组分(DON 和 LON)。化学计量分解理论假说及微生物经济分配理论<sup>[26-27]</sup>表明, 在可供微生物利用的氮含量增加时, 微生物通过增加对有效碳的吸收来维持自身的碳氮比<sup>[28]</sup>, 即氮添加后, 土壤中活性氮组分增加, 土壤微生物为满足自身生长需要的碳加大对有机碳的分解, 从而使得土壤中溶解性碳氮比(DOC/N) 显著降低。有研究<sup>[25]</sup>表明, 氮添加促进地上部分生物量的增加, 使得地上部分凋落物向土壤的输入增加, 为土壤微生物活动提供充足的碳源和氮源, 从而增加土壤微生物生物量。而本研究中氮添加显著降低土壤中微生物量碳(MBC) 的含量( $p < 0.05$ ), 这主要是因为长期氮素持续添加导致土壤酸化引发“铝毒效应”, 从而抑制微生物的活动, 使得土壤中微生物生物量碳含量降低。这与在华北落叶松人工林和毛竹林中进行高浓度施氮处理时, 抑制土壤微生物生物量碳氮的结果一致<sup>[25, 29]</sup>。

植物中净生产力的 90% 以上均是以凋落物形式返回地表, 其中通过分解作用进入土壤有机碳的占地

上净生产力的50%以上<sup>[30-31]</sup>。即凋落物作为半干旱区沙质草地生态系统的重要组成部分,伴随着气候变化和人类活动下凋落物的改变必将影响半干旱区沙质草地表层土壤的环境和碳组分。

已有研究<sup>[32]</sup>表明,土壤容重间接影响植物生长、土壤透水通气性和根系活力。本研究中持续9年的地上凋落物处理对土壤容重有显著影响( $p < 0.01$ ),与地上凋落物去除相比,地上凋落物加倍显著降低土壤容重。这主要是因为地表凋落物去除,使得土壤板结,容重加大<sup>[33]</sup>,而地上凋落物加倍增加土壤中有机的含量,表层土壤密实度降低,从而使得土壤容重降低。已有研究<sup>[34]</sup>表明,地表凋落物去除降低土壤有机碳含量,地表凋落物的增加改善土壤理化条件,利于微生物活动,从而促进土壤有机碳的输入。本研究中,与不改变地上凋落物相比,持续9年的地上凋落物去除显著降低土壤总有机碳(TOC)含量、易变缓性碳(IOC)和微生物氮(MBN)含量( $p < 0.01$ ,  $p < 0.05$ ,  $p < 0.01$ );无氮添加处理下,地上凋落物去除也显著降低土壤中硝态氮( $\text{NO}_3^- - \text{N}$ )、总有机碳(TOC)和溶解性有机氮(DON)的含量( $p < 0.05$ );而地上凋落物加倍较地上凋落物去除显著增加土壤微生物碳(MBC)含量( $p < 0.05$ )。且在氮添加处理下,地上凋落物去除显著降低土壤有机碳(TOC)、易变活性炭(LOC)、易变活性氮(LON)和易变缓性碳(IOC)含量( $p < 0.05$ )。这主要是因为半干旱区沙质草地中,土壤以沙土为主,表层土壤有机质的主要来源以地上凋落物为主,地上凋落物去除,土壤养分减少,消减土壤碳源的输入,使得土壤中总有机碳和化学碳组分减少;同时凋落物的去除,使其对表层土壤涵养水源和截流作用减弱,同时大降雨带走表层土壤部分养分,导致土壤有机碳及其化学碳组分减少<sup>[35-36]</sup>。当减少土壤表层的碳源输入时,微生物在获取碳源时,通过硝化过程将土壤中铵态氮转变为硝态氮,并更进一步通过反硝化作用减少土壤中的氮含量,使得土壤中硝态氮( $\text{NO}_3^- - \text{N}$ )、溶解性有机氮(DON)和易变活性氮(LON)的含量降低<sup>[37]</sup>。有研究<sup>[38]</sup>表明,去除凋落物后不利于微生物繁殖,而0—10 cm土层作为土壤微生物比较活跃部分,在地上凋落物去除后其活性降低,分解作用减弱,使得其微生物氮(MBN)含量降低。而在地上凋落物加倍处理下,土壤碳源输入增多,微生物分解有效碳源能力增强,其微生物碳(MBC)含量相比较地上凋落物去除增加。

本研究中,一个值得注意的现象是,持续9年的氮添加和地上凋落物处理2因素对半干旱区沙质草地表层土壤环境因子和所有的碳氮组分并未表现出显著的交互作用;其地上凋落物加倍处理对半干旱区

沙质草地表层土壤环境因子和所有的碳氮组分与不改变地上凋落物处理相比均不存在差异显著性。而凋落物可分为地上和地下2部分,本研究只考虑对地上凋落物输入进行处理,未考虑到地下根系碳源输入的影响。有研究<sup>[39]</sup>表明,相比较地上凋落物碳源输入,地下根系碳源能够滞留时间长且分解缓慢,更加利于土壤碳含量增加,鉴于此在后期的研究中应加强对地下根系碳源的研究。

## 4 结论

在半干旱区沙质草地持续9年的氮添加和地上凋落物处理对表层土壤中的不同碳氮组分不存在交互作用,除氮添加处理显著降低溶解性碳氮比(DOC/N)外,氮添加和地上凋落物处理并没有显著改变表层土壤各组分的C:N比值。氮添加处理显著降低土壤pH,对表层土壤中的氮组分产生显著影响,其显著提高土壤中的硝态氮( $\text{NO}_3^- - \text{N}$ )、溶解性有机氮(DON)和易变活性氮(LON)的含量。地上凋落物处理中地上凋落物去除对表层土壤碳氮组分影响显著,其显著降低土壤总有机碳(TOC)含量、易变缓性碳含量(IOC)、微生物生物量碳(MBC)含量和微生物生物量氮(MBN)含量。建议在后期的研究中加入对地下根系碳源的考量。

### 参考文献:

- [1] Liu X J, Duan L, Mo J M, et al. Nitrogen deposition and its ecological impact in China: An overview[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(10): 2251-2264.
- [2] Goulding K W T, Bailey N J, Bradbury N J, et al. Nitrogen deposition and its contribution to nitrogen cycling and associated soil processes[J]. *New Phytologist*, 1998, 139(1): 49-58.
- [3] Norby R J, Warren J M, Iversen C M, et al.  $\text{CO}_2$  enhancement of forest productivity constrained by limited nitrogen availability[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(45): 19368-19373.
- [4] Nie Y X, Wang M C, Zhang W, et al. Ammonium nitrogen content is a dominant predictor of bacterial community composition in an acidic forest soil with exogenous nitrogen enrichment[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 624: 407-415.
- [5] Fang J, Yu G R, Liu L L, et al. Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4015-4020.
- [6] Le Bauer D S, Treseder K K. Nitrogen limitation of net primary productivity in terrestrial ecosystems is globally distributed[J]. *Ecology*, 2008, 89(2): 371-379.
- [7] Muqaddas B, Zhou X, Lewis T, et al. Long-term frequent prescribed fire decreases surface soil carbon and nitrogen pools in a wet sclerophyll forest of southeast

- Queensland, Australia[J]. Science of the Total Environment, 2015, 536: 39-47.
- [8] Li J P, Ma H B, Xie Y Z, et al. Deep soil C and N pools in long-term fenced and overgrazed temperate grasslands in Northwest China[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 16088-16099.
- [9] 吕思扬, 宋思意, 黎蕴洁, 等. 氮添加和凋落物增减对华西雨屏区常绿阔叶林土壤团聚体及其碳氮的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(1): 277-287.
- [10] 嘎玛达尔基, 杨泽, 等. 凋落物输入变化和氮添加对半干旱草原群落生产力及功能群组成的影响[J]. 植物生态学报, 2020, 44(8): 791-806.
- [11] 郭晓伟, 张雨雪, 张潇, 等. 长期地上凋落物处理和氮添加对油松—辽东栎混交林表层土壤碳氮组分的影响[J]. 环境科学学报, 2020, 40(7): 2589-2598.
- [12] Lue C Q, Tian H Q. Spatial and temporal patterns of nitrogen deposition in China: Synthesis of observational data [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2007, 112(22): D22S05.
- [13] Li Y Q, Zhou X H, Brandle J R, et al. Temporal progress in improving carbon and nitrogen storage by grazing enclosure practice in a degraded land area of China's Horqin Sandy Grassland[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2012, 159: 55-61.
- [14] 赵哈林, 大黑俊哉, 李玉霖, 等. 人类放牧活动与气候变化对科尔沁沙质草地植物多样性的影响[J]. 草业学报, 2008, 17(5): 1-8.
- [15] Zuo X A, Zhao X Y, Zhao H L, et al. Scale dependent effects of environmental factors on vegetation pattern and composition in Horqin Sandy Land, Northern China[J]. Geoderma, 2012, 173: 1-9.
- [16] Zhang J B, Li Q, Wu J S, et al. Effects of nitrogen deposition and biochar amendment on soil respiration in a *Torreya grandis* orchard[J]. Geoderma, 2019, 355: e113918.
- [17] 郑丹楠, 王雪松, 谢绍东, 等. 2010 年中国大气氮沉降特征分析[J]. 中国环境科学, 2014, 34(5): 1089-1097.
- [18] Joergensen R G. The fumigation-extraction method to estimate soil microbial biomass: Calibration of the  $k_{EC}$  value[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1996, 28(1): 25-31.
- [19] 鲍士旦, 秦怀英, 劳家桢. 土壤农化分析[M]. 中国: 农业出版社, 1988.
- [20] Xu G, Chen J, Berninger F, et al. Labile, recalcitrant, microbial carbon and nitrogen and the microbial community composition at two *Abies faxoniana* forest elevations under elevated temperatures [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 91: 1-13.
- [21] 涂玉, 尤业明, 孙建新. 油松—辽东栎混交林地表凋落物与氮添加对土壤微生物生物量碳、氮及其活性的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(9): 2325-2331.
- [22] 田沐雨, 于春甲, 汪景宽, 等. 氮添加对草地生态系统土壤 pH、磷含量和磷酸酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(9): 2985-2992.
- [23] 李焕茹, 朱莹, 田纪辉, 等. 碳氮添加对草地土壤有机碳氮磷含量及相关酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(8): 2470-2476.
- [24] 周晓兵, 张元明. 干旱半干旱区氮沉降生态效应研究进展[J]. 生态学报, 2009, 29(7): 3835-3845.
- [25] 陈向峰, 刘娟, 姜培坤, 等. 模拟氮沉降对毛竹林土壤生化特性和酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5): 277-284.
- [26] 聂二旗, 张心昱, 郑国砥, 等. 氮磷添加对杉木林土壤碳氮矿化速率及酶动力学特征的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(2): 615-623.
- [27] Stone M M, Weiss M S, Goodale C L, et al. Temperature sensitivity of soil enzyme kinetics under N-fertilization in two temperate forests[J]. Global Change Biology, 2012, 18: 1173-1184.
- [28] 朱文会, 杨欣桐, 王夏晖, 等. 外源添加对黄河流域典型湿地土壤矿化及硝化的影响[J]. 化工学报, 2020, 71(11): 5278-5285.
- [29] 李素新, 覃志杰, 刘泰瑞, 等. 模拟氮沉降对华北落叶松人工林土壤微生物碳和微生物氮的动态影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 268-274.
- [30] 牛喜妹, 李佳南, 王平, 等. 羊草地上不同性状凋落物分解对土壤碳组分的影响[J]. 环境生态学, 2022, 4(9): 54-60.
- [31] 田思惠, 柳鑫, 金宝成, 等. 三工河流域琵琶柴群落凋落物对土壤有机碳固定的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(14): 5339-5347.
- [32] 陈秀平. 咸宁地区土壤物理因素对杉木生长的影响分析[J]. 中南林业调查规划, 2011, 30(3): 68-71.
- [33] 舒学平. 不同林地清理方式对杉木林土壤容重和速效养分含量的影响[J]. 防护林科技, 2013(8): 18-19.
- [34] 龚伟, 胡庭兴, 王景燕, 等. 川南天然常绿阔叶林人工更新后枯落物对土壤的影响[J]. 林业科学, 2007, 43(7): 112-119.
- [35] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(1): 99-105.
- [36] 周广胜, 王玉辉, 蒋延玲, 等. 陆地生态系统类型转变与碳循环[J]. 植物生态学报, 2002, 26(2): 250-254.
- [37] 张海龙, 武润琴, 李佳佳, 等. 根系分泌物 C : N 对刺槐林地土壤理化特征和土壤呼吸的影响[J]. 应用生态学报, 2022, 33(4): 949-956.
- [38] Gude A, Kandeler E, Gleixner G. Input related microbial carbon dynamic of soil organic matter in particle size fractions[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 47(2): e209.
- [39] Sokol N W, Kuebbing S E, Karlsen-Ayala E, et al. Evidence for the primacy of living root inputs, not root or shoot litter, in forming soil organic carbon[J]. New Phytologist, 2019, 221(1): 233-246.