

DOI: 10.20103/j.stxb.202311032395

耿浦耀, 王晓丽, 罗少辉, 周选博, 马源. 返青期休牧对三江源区土壤微生物量碳、氮和氮矿化的影响. 生态学报, 2024, 44(14): 6219-6231.

Geng P Y, Wang X L, Luo S H, Zhou X B, Ma Y. Effect of rest-grazing time during the regreen-up period on soil microbial biomass carbon, nitrogen and nitrogen mineralization in the three-river source region. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(14): 6219-6231.

# 返青期休牧对三江源区土壤微生物量碳、氮和氮矿化的影响

耿浦耀<sup>1</sup>, 王晓丽<sup>1,\*</sup>, 罗少辉<sup>2</sup>, 周选博<sup>3</sup>, 马 源<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 青海大学省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 西宁 810016

<sup>2</sup> 青海省气象局, 西宁 810012

<sup>3</sup> 青海大学畜牧兽医科学院, 西宁 810016

**摘要:** 返青期休牧措施可以有效提高高寒草甸生产力, 为了解其对氮矿化及微生物的影响。以玛沁县大武镇高寒草甸为试验样地, 设立 5 个休牧时间, 分别为 CK(放牧)、休牧 20d、30d、40d、50d, 在牧草生长季(5—9 月)研究了土壤微生物量和有效氮素的动态变化。结果表明: 土壤微生物量碳(SMBC)和土壤微生物量氮(SMBN)均随着休牧时间的增加而呈现上升趋势。SMBC 在生长初期(5 月、6 月)休牧 50d 处理下较 CK 分别增加了 22.49%、123.33%, 生长末期休牧 40d 处理下含量较高。5 月份 SMBN 在休牧 40d 下显著高于其他处理, 其余月份均在休牧 50d 处理下含量较高。土壤铵态氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )、硝态氮( $\text{NO}_3^-\text{-N}$ )在生长季呈现先升高后降低的趋势。多数情况下, 休牧 30d 土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量高于 CK 处理; 不同休牧时间对土壤  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量影响不明显。土壤氮矿化速率在不同月份间差异显著, 但总体上呈现休牧 30—40d 土壤氮矿化速率较高、CK 较低的趋势。因此, 在返青期对三江源区高寒草甸进行适当的休牧活动利于其有机氮的转化。

**关键词:** 返青期休牧; 高寒草甸; 氮矿化; 微生物量碳氮; 硝化速率; 氨化速率

## Effect of rest-grazing time during the regreen-up period on soil microbial biomass carbon, nitrogen and nitrogen mineralization in the three-river source region

GENG Puyao<sup>1</sup>, WANG Xiaoli<sup>1,\*</sup>, LUO Shaohui<sup>2</sup>, ZHOU Xuanbo<sup>3</sup>, MA Yuan<sup>3</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xining 810016, China

<sup>2</sup> Qinghai Provincial Meteorological Bureau, Xining 810012, China

<sup>3</sup> Academy of Animal Science and Veterinary, Qinghai University, Xining 810016, China

**Abstract:** Rest-grazing measures during the regreen-up period can effectively improve alpine grassland productivity, in order to understand their effects on nitrogen mineralisation and microorganisms. Using the alpine meadow in Dawu Township, Maqin County, as the experimental site, five rest-grazing times were set up, namely CK (grazing), 20 d, 30 d, 40 d and 50 d, and the dynamic changes of soil microbial biomass and available nitrogen were investigated in the forage growing season (May—September). The results showed that both soil microbial biomass carbon (SMBC, Soil Microbial Biomass Carbon) and soil microbial biomass nitrogen (SMBN, Soil Microbial Biomass Nitrogen) presented an upward trend with the increase of the rest-grazing time. The SMBC increased by 22.49% and 123.33% under 50 d of rest-grazing compared to CK at the early stage of growth (May and June), and the content was higher under 40 d of rest-grazing at the end of growth. The SMBN was significantly higher under 40 d of rest-grazing in May and higher under 50 d of rest-grazing in

**基金项目:** 国家自然科学基金(32260327); 中国科学院西部之光-西部青年学者项目; 青海省自然科学基金(2022-ZJ-979Q)

**收稿日期:** 2023-11-03; **网络出版日期:** 2024-05-11

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wxl.yu@163.com

the rest of the months. Soil ammonium nitrogen ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ) and nitrate nitrogen ( $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ) showed a trend of increasing and then decreasing in the growing season. In most cases, the soil  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  content was higher than that of the CK for 30 d of rest-grazing; the effect of different rest-grazing times on soil  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  content was not obvious. Soil N mineralisation rate varied significantly between months, but generally showed a trend of higher soil N mineralisation rate for 30—40 d of rest-grazing and lower for CK. Therefore, appropriate rest-grazing activities in the regreen-up period in alpine meadows of the three-river source region are conducive to the conversion of organic nitrogen.

**Key Words:** rest-grazing times during the regreen-up period; alpine meadows; nitrogen mineralization; microbial biomass carbon and nitrogen; nitrification rate; ammonification rate

草地约占我国土地面积的 42%, 具有极高的经济价值和生态效益, 在陆地生态系统中发挥着重要作用<sup>[1]</sup>。放牧是草地资源最主要的利用形式, 同时也是重要的干预因素<sup>[2]</sup>。近年来, 由于气候变化和人类的过度放牧, 近一半的草地生态系统都出现了不同程度的退化现象<sup>[3]</sup>。研究发现, 适宜的休牧可以改善草地生产力及群落结构, 进而改良草地生态系统, 利于其草地的恢复<sup>[4]</sup>。草地休牧后会使土壤养分状况发生改变, 对土壤微生物量的产生以及氮素的转化影响极大<sup>[5]</sup>。土壤微生物作为最敏感的响应指标, 土壤微生物量能够在能量循环和物质转化中起到关键作用, 其变化趋势可衡量土壤的肥力特性及生物活性, 是维持土壤质量的重要指标<sup>[6]</sup>。土壤氮矿化是氮循环的关键一环。有机氮矿化后形成的  $\text{NH}_4^+$  和  $\text{NO}_3^-$  是土壤微生物及植物氮素的主要来源<sup>[7]</sup>。以往的研究表明, 过度放牧会使土壤氮矿化速率降低<sup>[8-9]</sup>且随着放牧强度的增加而逐渐下降<sup>[10]</sup>, 而适当的休牧则可提高土壤氮矿化速率<sup>[11-12]</sup>。

在青藏高原地区, 高寒草甸牧草生长季一般是从 5 月初到 9 月底, 牧草在 5—7 月份开始返青<sup>[13]</sup>。返青期也是一年中最关键的休牧时期, 在此期间, 草地围栏封育可避免家畜采食、践踏, 同时使牧草充分萌芽、分蘖, 积累营养物质<sup>[14]</sup>。Fedrigo<sup>[15]</sup> 和 Mavromihalis<sup>[16]</sup> 在巴西和澳大利亚的研究结果都表明相比于其他季节返青期休牧更有利于草地恢复, 前期的研究结果也表明, 返青期休牧可有效提高高寒草甸植物生产力, 增加其多样性, 促进生产和生态的共赢<sup>[17]</sup>。徐松鹤等<sup>[18]</sup> 在锡林郭勒典型草原上所做的休牧实验也出现类似的结果。但目前对返青期休牧的研究主要集中于地上植被方面, 比如地上生物量、优势物种的光合特性等。关于返青期不同休牧措施对地下土壤的研究报道相对较少, 尤其是土壤微生物量、氮矿化方面。因此, 通过本研究不仅可以探讨返青期不同休牧时间对高寒草甸土壤微生物量和氮矿化的影响, 更能为精准设定休牧制度提供地下生态系统的基础数据, 进而为高寒草地的可持续利用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样地点概况

采样地点位于青海省三江源区域果洛州玛沁县大武镇 ( $36^\circ 27' 56.9''\text{N}$ ,  $100^\circ 13' 06.5''\text{E}$ ), 该区域气候属于大陆性高原气候。平均海拔 4200m, 年均温  $-0.5^\circ\text{C}$ , 1 月平均气温较低为  $-12.5^\circ\text{C}$ , 7 月平均气温较高为  $9.8^\circ\text{C}$ , 年降水量在 420—560mm, 雨量集中, 牧草返青期较迟, 年平均生长期为 150d, 无绝对无霜期, 日照时数充足。土壤为高山草甸土, 草地类型为高寒小嵩草草甸。建群种为线叶嵩草 (*Kobresia capillifolia*)、小嵩草 (*Kobresia parva*)、双柱头藨草 (*Scirpus distigmaticus*)、矮嵩草 (*Kobresia humilis*)、异针茅 (*Stipa aliena*)、垂穗披碱草 (*Elymus nutans*)、紫羊茅 (*Festuca rubra*) 等牧草。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 试验设计

选择果洛州大武镇地势平坦的冬春草场进行返青期休牧试验, 多年以来, 该草场一直作为冬春草场使用, 该地返青期开始于 5 月 5 日—5 月 10 日, 家畜在 6 月 25 日—6 月 30 日转场至夏季牧场<sup>[19]</sup>。牧草在生长初

期,干物质含量呈上升趋势,每隔 10d 无氮浸出物及地下营养物质等的含量都会发生一定变化。因此,本文以 10d 为一个阶段,根据休牧结束时间一致(6 月 30 日),开始时间不同对样地进行了 5 个处理,依次为 CK(放牧)、休牧 20d(6 月 10 日—6 月 30 日)、休牧 30d、(5 月 30 日—6 月 30 日)休牧 40d(5 月 20 日—6 月 30 日)、休牧 50d(5 月 10 日—6 月 30 日),每个处理设置 3 块 20m×30m 的重复样地,共 15 块样地(表 1)。为了确保最佳的牧草利用效果,将对照 CK 的牧草利用率控制在 30%—50%之间,因此放牧强度被限制在 0.89—1.45 只/hm<sup>2</sup>之间,属于中轻度放牧利用。同时在 5 月 10 日到各休牧处理开始前也是中轻度放牧利用,但从 6 月 30 日—10 月 30 日,由于家畜已转至夏季和秋季牧场,此刻该草场处于休牧状态,是不被利用的。

表 1 返青期各处理的休牧和放牧时间

Table 1 Resting and grazing time of treatments during the regreen-up period

| 处理名称<br>Treatment          | 休牧时间<br>Rest-grazing time | 放牧时间<br>Grazing time | 样方面积<br>Area of plot | 备注<br>Note          |
|----------------------------|---------------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| 放牧 Graze                   | 6 月 30 日—10 月 30 日        | 5 月 10 日—6 月 30 日    | 20m×30m              | 6 月 30 日—10 月 30 日, |
| 休牧 20d 20d of rest-grazing | 6 月 10 日—6 月 30 日         | 5 月 10 日—6 月 10 日    | 20m×30m              | 该草场处于休牧状态,          |
| 休牧 30d 30d of rest-grazing | 5 月 30 日—6 月 30 日         | 5 月 10 日—5 月 30 日    | 20m×30m              | 不被利用。               |
| 休牧 40d 40d of rest-grazing | 5 月 20 日—6 月 30 日         | 5 月 10 日—5 月 20 日    | 20m×30m              |                     |
| 休牧 50d 50d of rest-grazing | 5 月 10 日—6 月 30 日         | 10 月 30 日—5 月 10 日   | 20m×30m              |                     |

### 1.2.2 试验样品采集及处理

于 2018 年在牧草生长季(5—9 月)按月份进行采样工作。每个样地上按照对角线法选择 5 个采样点,采集表层 0—15cm 的土壤样品,使用 3.5cm 直径的土钻进行采集。在采样前,为了避免外部环境对土壤特性的干扰,先将样地表面的凋落物清扫干净,尤其是牲畜的排泄物要坚决避开。首先使用 2 mm 的土筛对新鲜的土壤样品进行处理,剔除植物根系、石粒等杂质。然后分成两份,一份置于室内培养;另一份置于 4℃ 冰箱中保存中,使之保持鲜土状态,便于测定土壤微生物量碳氮。

### 1.2.3 测定指标及方法

土壤微生物量碳(SMBC)和土壤微生物量氮(SMBN)均采用氯仿熏蒸 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>提取法<sup>[20]</sup>,称取一份 5g 鲜土装入烧杯,并放入真空干燥器中,密封保存于室温下熏蒸 24h。熏蒸结束后,将烧杯中的熏蒸土样取出,每个烧杯的土样用 20mL 0.5mol/L 硫酸钾溶液进行浸提,震荡,离心过滤。另一份土壤样品不做熏蒸,直接进行硫酸钾提取,震荡,离心过滤。用总有机碳分析仪(TOC-VCPH/CPN, Shimadzu, Japan)和连续流动分析仪(Skalar San++, Skalar, Netherlands)分别测定 SMBC 和 SMBN 含量。SMBC =  $\Delta E_c / K_c$ , 其中  $\Delta E_c$  是熏蒸与未熏土壤微生物生物量碳含量差值,  $K_c$  为转换系数,取 0.45; SMBN =  $\Delta E_N / K_N$ , 其中  $\Delta E_N$  是熏蒸与未熏土壤微生物生物量氮含量差值,  $K_N$  为转换系数,取 0.54<sup>[21]</sup>。

由于该样地土壤温度低且深层石砾含量高,不适于采用顶盖 PVC 管法(野外)。因此,本研究采用室内培养法测定土壤铵态氮和硝态氮。将在 4℃ 保存的新鲜土壤 500g 放在 2L 的密闭培养罐避光培养,分别在培养的第 3d、7d、10d、14d、21d、28d 采集 50g 的土壤样品,称取其中的 10g 用 1mol/L 的 KCl 溶液进行浸提,最后使用全自动间断化学分析仪(Clever Chem 380)上机测定。将每个月不同阶段土壤铵态氮、硝态氮和有效氮简单累加计算便可得每个月累计铵态氮量、硝态氮量以及有效氮量。由此可得净氨化率、净硝化率及净氮矿化率。计算公式<sup>[22]</sup>如下:

$$\text{净氨化率} = (\text{培养后的氨态氮量} - \text{培养前的氨态氮量}) / \text{培养时间}$$

$$\text{净硝化率} = (\text{培养后的硝态氮量} - \text{培养前的硝态氮量}) / \text{培养时间}$$

$$\text{净氮矿化率} = (\text{培养后的无机氮量} - \text{培养前的无机氮量}) / \text{培养时间}$$

并在 7、8 月份进行地上生物量的调查及土壤温湿度等环境因子的测量。

### 1.3 数据处理和统计分析

文中数据均采用 SPSS 20.0 软件进行统计分析。对生长季(5—9 月)每个月各个处理下的土壤微生物量

碳和氮、净氨化率、净硝化率及净氮矿化速率等指标进行单因素方差分析 (one-way ANOVA), 多重比较使用 Duncan 法 ( $P<0.05$ )<sup>[22]</sup>。对生长季不同月份 (5 月—9 月) 不同休牧时间下的微生物量碳、微生物量氮及碳氮比、土壤铵态氮、硝态氮以及总有效氮量进行两因素重复测量方差分析 (two-ways repeated-measures ANOVA), 显著水平为  $P<0.001$ 。通过线性回归方法分析地上生物量、土壤温度及湿度对氮矿化速率的影响。使用 Origin 2021 进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 返青期不同休牧时间对土壤微生物量碳氮的影响

由表 2 可知, 返青期不同休牧时间对土壤微生物碳氮及其比例的影响表现不同, 其中土壤微生物量碳 (SMBC) 随着休牧时间的增加而呈现上升趋势。其中, 生长初期 SMBC 在休牧 50d 处理下最高且显著高于 CK 处理; 在生长中后期则是休牧 40d 较高。时间上, SMBC 在生长季表现出先降低后上升的趋势, 在生长末期达到最高。对土壤微生物量氮 (SMBN) 来说, 在生长季初期 (5 月份) 休牧 40d 处理下达到最高值且显著高于其余处理, 其余月份均是休牧 50d 处理下 SMBN 值较高。在生长季 SMBN 总体呈现出“低-高-低”的趋势。另外, 除 8 月份外, 不同返青期休牧时间下土壤微生物量碳氮比均存在显著差异。其中, 土壤微生物碳氮比在休牧 40d 处理下较高, 并且随着生长季的进行愈发明显。

两因素重复测量方差分析结果表明, SMBC、SMBN 以及 SMBC:MBN 在不同月份之间差异显著, SMBN 以及 SMBC:SMBN 在生长季不同月份和返青期不同休牧时间下有显著的交互作用 (表 3)。

表 2 土壤微生物碳氮及其比例对返青期不同休牧时间的响应

| 指标<br>Index             | 处理 T<br>reatment | 5 月<br>May   | 6 月<br>June  | 7 月<br>July  | 8 月<br>August  | 9 月<br>September |
|-------------------------|------------------|--------------|--------------|--------------|----------------|------------------|
| 土壤微生物量碳<br>SMBC/(mg/kg) | CK               | 109.66±1.7b  | 49.81±8.03d  | 23.99±1.61c  | 224.66±13.8b   | 543.45±36.1a     |
|                         | 20d              | 45.36±2.54d  | 53.83±3.42cd | 81.22±10.67b | 227.46±7.92b   | 697.58±48.22a    |
|                         | 30d              | 133.93±8.28a | 76.43±3.65bc | 39.22±4.34c  | 230.55±52.15b  | 582.45±67.47a    |
|                         | 40d              | 92.97±3.9c   | 89.91±6.72ab | 102.05±5.9a  | 338.69±10.05a  | 638.98±26.04a    |
|                         | 50d              | 134.32±3.95a | 111.24±13.5a | 68.5±1.46b   | 254.25±25.31ab | 598.7±76.64a     |
| 土壤微生物量氮<br>SMBN/(mg/kg) | CK               | 2.74±0.65b   | 6.37±0.21a   | 2.97±0.49a   | 5.06±0.54a     | 4.27±0.31a       |
|                         | 20d              | 2.11±0.32b   | 4.26±0.37a   | 2.58±0.44a   | 6.52±0.66a     | 4.54±0.85a       |
|                         | 30d              | 2.74±0.07b   | 4.28±0.39a   | 2.18±0.42a   | 6.68±0.79a     | 3.15±0.29b       |
|                         | 40d              | 5.73±0.99a   | 5.53±0.23a   | 3.13±0.51a   | 7.25±1.65a     | 1.46±0.12b       |
|                         | 50d              | 3.53±0.95b   | 6.66±1.47a   | 3.12±0.22a   | 7.25±1.29a     | 4.83±0.89a       |
| 土壤微生物量碳氮比<br>SMBC:SMBN  | CK               | 45.89±12.96a | 7.92±1.56b   | 8.54±1.58b   | 45.62±6.17a    | 127.53±4.72c     |
|                         | 20d              | 22.28±2.53b  | 12.7±0.49b   | 34.64±10.08a | 35.73±4.19a    | 160.04±17.69bc   |
|                         | 30d              | 48.91±3.02a  | 18.26±2.29a  | 20.69±7.16ab | 33.8±5.66a     | 184.14±9.54b     |
|                         | 40d              | 17.06±2.6b   | 16.22±0.7a   | 34.37±6a     | 51.38±10.27a   | 442.25±24.56a    |
|                         | 50d              | 43.96±11.4a  | 18.34±4.69a  | 22.15±1.61ab | 36.79±6.35a    | 128.55±17.25c    |

SMBC: 土壤微生物量碳 Soil microbial biomass carbon; SMBN: 土壤微生物量氮 Soil microbial biomass nitrogen; 不同小写字母代表土壤微生物量碳、氮及碳氮比在不同休牧处理间存在显著差异 ( $P<0.05$ )

表 3 处理与时间对土壤微生物碳氮及其比例的重复测量方差分析结果

| 指标 Index            | 时间 Time              | 处理 Treatment       | 时间×处理 Time×Treatment |
|---------------------|----------------------|--------------------|----------------------|
| 土壤微生物量碳 SMBC        | $F=23.747; P<0.001$  | $F=2.177; P=0.145$ | $F=2.342; P=0.048$   |
| 土壤微生物量氮 SMBN        | $F=41.001; P<0.001$  | $F=6.375; P=0.008$ | $F=9.453; P<0.001$   |
| 土壤微生物量碳氮比 SMBC:SMBN | $F=364.790; P<0.001$ | $F=5.326; P=0.015$ | $F=39.947; P<0.001$  |

$P<0.001$  表示该指标在 0.001 水平上差异显著

### 2.2 返青期不同休牧时间对高寒草甸土壤铵态氮、硝态氮的影响

由表 4 可知, 土壤铵态氮 ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )、硝态氮 ( $\text{NO}_3^+\text{-N}$ )、总有效氮含量在生长季都呈现出先升高后降低的趋



势。其中,返青期不同休牧时间对土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量变化的影响较大,出现了较为明显的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  波动,除 8 月份外每个月不同休牧时间下土壤的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量均有显著性差异 ( $P<0.05$ ),6、7、9 月份土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  均在休牧 30d 处理时含量最高。返青期不同休牧时间对土壤  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  和总有效氮含量变化的影响较小。

两因素重复测量方差分析结果表明,土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  以及总有效氮含量在不同月份间差异显著,但在不同处理间差异均不显著(表 5)。

表 4 土壤有效氮对返青期不同休牧时间的响应

Table 4 Response of soil available nitrogen to different rest-grazing times during the regreen-up period

| 指标<br>Index                              | 处理<br>Treatment | 5 月<br>May   | 6 月<br>June   | 7 月<br>July    | 8 月<br>August | 9 月<br>September |
|------------------------------------------|-----------------|--------------|---------------|----------------|---------------|------------------|
| 铵态氮/(mg/kg)<br>Ammonium nitrogen         | CK              | 25.8±1.7ab   | 51.53±1.26ab  | 142.70±14.49ab | 42.68±7.59a   | 29.60±1.53ab     |
|                                          | 20d             | 30.90±3.62a  | 46.23±5.05b   | 119.40±5.97b   | 34.28±0.86a   | 27.51±0.82ab     |
|                                          | 30d             | 20.38±2.45bc | 59.91±3.39a   | 147.93±3.93a   | 37.13±3.80a   | 30.17±1.32a      |
|                                          | 40d             | 20.40±1.03bc | 52.18±1.79ab  | 133.61±8.87ab  | 34.54±3.42a   | 27.67±0.32ab     |
|                                          | 50d             | 18.25±0.40c  | 50.12±6.11ab  | 136.67±2.09ab  | 38.92±1.84a   | 25.99±1.15b      |
| 硝态氮/(mg/kg)<br>Nitrate nitrogen          | CK              | 75.47±2.06ab | 70.35±22.86a  | 116.37±11.46a  | 75.74±4.35a   | 41.64±2.79a      |
|                                          | 20d             | 84.79±9.32a  | 44.84±5.85a   | 94.28±9.97a    | 75.70±3.72a   | 40.49±5.42a      |
|                                          | 30d             | 84.82±2.80a  | 46.90±6.62a   | 105.48±2.54a   | 74.73±1.41a   | 47.15±2.52a      |
|                                          | 40d             | 82.86±6.90a  | 53.16±3.57a   | 100.67±5.96a   | 74.31±2.22a   | 41.05±1.18a      |
|                                          | 50d             | 60.10±6.60b  | 48.97±2.64a   | 110.93±2.64a   | 83.56±2.07a   | 42.81±0.09a      |
| 总有效氮/(mg/kg)<br>Total available nitrogen | CK              | 101.26±3.58a | 121.89±22.48a | 259.07±25.84a  | 118.42±10.95a | 71.24±2.00a      |
|                                          | 20d             | 115.70±8.09a | 91.08±9.71a   | 213.68±15.52a  | 109.98±4.45a  | 68.00±5.87a      |
|                                          | 30d             | 105.19±0.70a | 106.80±3.23a  | 253.41±3.68a   | 111.86±3.90a  | 77.32±2.95a      |
|                                          | 40d             | 103.27±7.17a | 105.34±2.44a  | 234.29±14.22a  | 108.85±4.27a  | 68.72±1.22a      |
|                                          | 50d             | 78.36±6.96b  | 99.09±6.00a   | 247.60±2.79a   | 122.48±3.89a  | 68.80±1.24a      |

不同小写字母代表土壤铵态氮、硝态氮及总有效氮在不同休牧处理间存在显著差异 ( $P<0.05$ )

表 5 处理与时间对土壤有效氮的重复测量方差分析结果

Table 5 Repeated measurements ANOVA results for treatment and time on soil available nitrogen

| 指标 Index                      | 时间 Time              | 处理 Treatment       | 时间×处理 Time×Treatment |
|-------------------------------|----------------------|--------------------|----------------------|
| 铵态氮 Ammonium nitrogen         | $F=630.896; P<0.001$ | $F=1.320; P=0.328$ | $F=1.920; P=0.048$   |
| 硝态氮 Nitrate nitrogen          | $F=76.374; P<0.001$  | $F=0.590; P=0.578$ | $F=1.687; P=0.163$   |
| 总有效氮 Total available nitrogen | $F=355.156; P<0.001$ | $F=0.480; P=0.273$ | $F=2.073; P=0.111$   |

$P<0.001$  表示该指标在 0.001 水平上差异显著

### 2.3 返青期不同休牧时间对高寒草甸土壤净氮矿化率的影响

如图 1 所示,5 月份返青期不同休牧时间下土壤氨化速率在培养第 0—3 天、第 7—10 天、第 10—21 天以及第 21—28 天下差异均显著,其中,第 10—21 天、第 21—28 天在休牧 40d 时氨化速率最高且显著高于 CK 处理。土壤硝化速率在培养前期休牧 40d 时较高,并且随着培养时间的增加持续上升,在第 21—28 天达到最高值,且各处理间差异显著,休牧 20d、30d、40d 显著高于休牧 50d,但与 CK 处理间差异不大。土壤净氮矿化速率与土壤硝化速率趋于一致。

如图 2 所示,6 月份返青期不同休牧时间下土壤氨化速率在培养第 3—7 天、第 7—10 天以及第 10—14 天下差异均显著,且在第 3—7 天较高,其中休牧 30d、40d 均显著高于 CK 处理。土壤硝化速率在各处理间无显著性差异,在第 21—28 天速率较高,其中休牧 20d、30d、40d 显著高于休牧 50d,但与 CK 处理之间差异不显著。土壤净氮矿化速率在培养第 3—7 天、第 7—10 天以及第 14—21 天下差异显著,且在第 3—7 天较高,尤其是休牧 30d ( $8.94 \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ )、休牧 40d ( $8.08 \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ) 显著高于 CK 处理 ( $4.34 \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ )。

如图 3 所示,7 月份不同培养阶段的土壤氨化速率在返青期不同休牧时间下均有显著性差异,且在第 3—7 天较高,尤其在休牧 30d ( $10.64 \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ) 和休牧 50d ( $10.42 \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ) 处理下显著高于 CK ( $7.79 \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ )

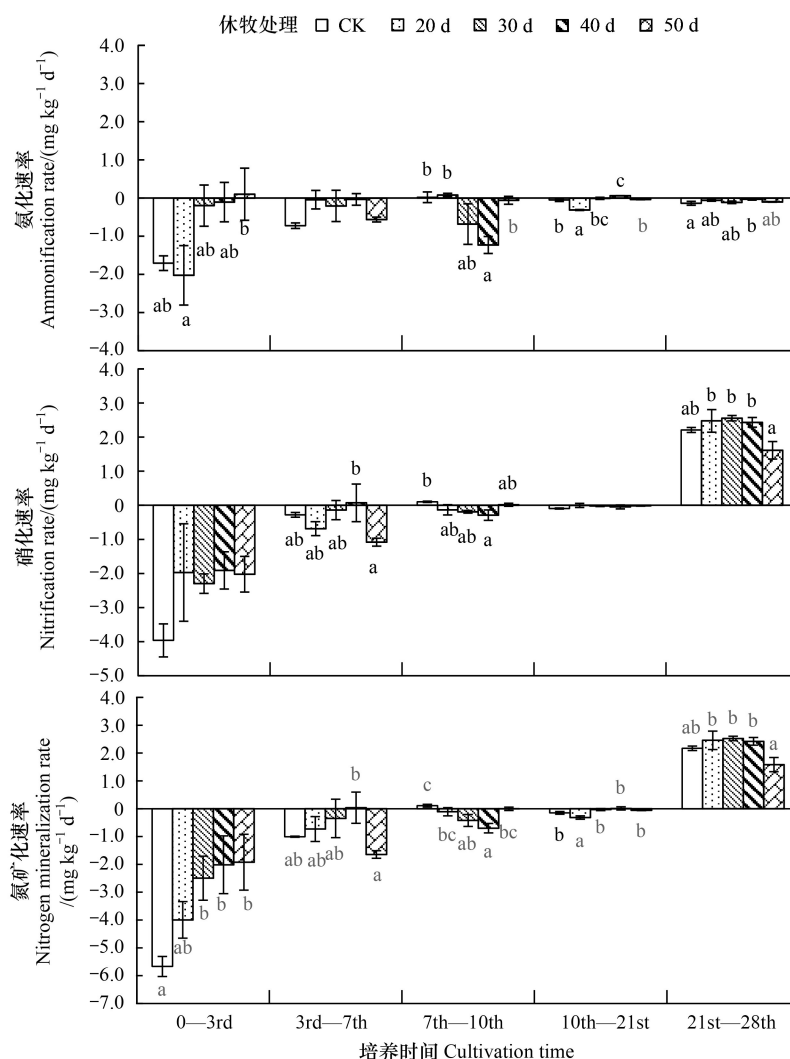


图 1 返青期不同休牧时间下土壤氮矿化速率(5 月份)

Fig.1 Soil nitrogen mineralization rates at different rest-grazing times during the regreen-up period (May)

不同小写字母代表土壤氨化速率、硝化速率及氮矿化速率在不同休牧处理间存在显著差异 ( $P < 0.05$ )

处理。土壤硝化速率同氨化速率一样,也是在不同培养阶段差异均显著,整体上呈现先降低后升高的趋势,在培养 0—3rd 时 CK 较高,到后期第 21—28 天时休牧 50d 处理较高。土壤净氮矿化速率在培养前期不同处理间差异显著,且在第 3—7 天较高,尤其是休牧 30d、40d 和 50d,分别为 ( $11.2 \text{ mg kg}^{-1} \text{d}^{-1}$ )、( $13.66 \text{ mg kg}^{-1} \text{d}^{-1}$ )、( $13.15 \text{ mg kg}^{-1} \text{d}^{-1}$ ) 显著高于其他处理。

如图 4 所示,8 月份不同处理下土壤氨化速率在培养的第 7—10 天及第 10—14 天下差异显著,分别在休牧 30d 和休牧 50d 的情况下较高。土壤硝化速率随着培养时间的增加呈下降趋势且不同培养阶段下各处理间差异均不显著,在培养第 3—7 天及第 21—28 天时,分别在休牧 50d 和休牧 30d 处理下土壤硝化速率最高。土壤净氮矿化速率与土壤硝化速率的变化趋于一致,在各个处理间差异也不显著。

如图 5 所示,9 月份土壤氨化速率随着培养时间的增加呈上升趋势且不同培养阶段间差异均不显著,培养的第 0—3 天在休牧 40d 处理下显著高于其他处理,在第 3—7 天氨化速率也是在休牧 40d 处理下较高。返青期不同休牧时间下土壤硝化速率在各培养阶段下差异也不显著,在第 21—28 天阶段,休牧 40d 处理显著高于 CK 处理。土壤净氮矿化速率在培养前期 0—3rd 时休牧处理显著高于 CK 处理,尤其是休牧 40d。

## 2.4 地上生物量、土壤温湿度对氮矿化速率的影响

由图 6 可得,土壤温度与氮矿化速率存在显著正相关,而地上生物量与氮矿化速率呈微弱正相关,土壤湿

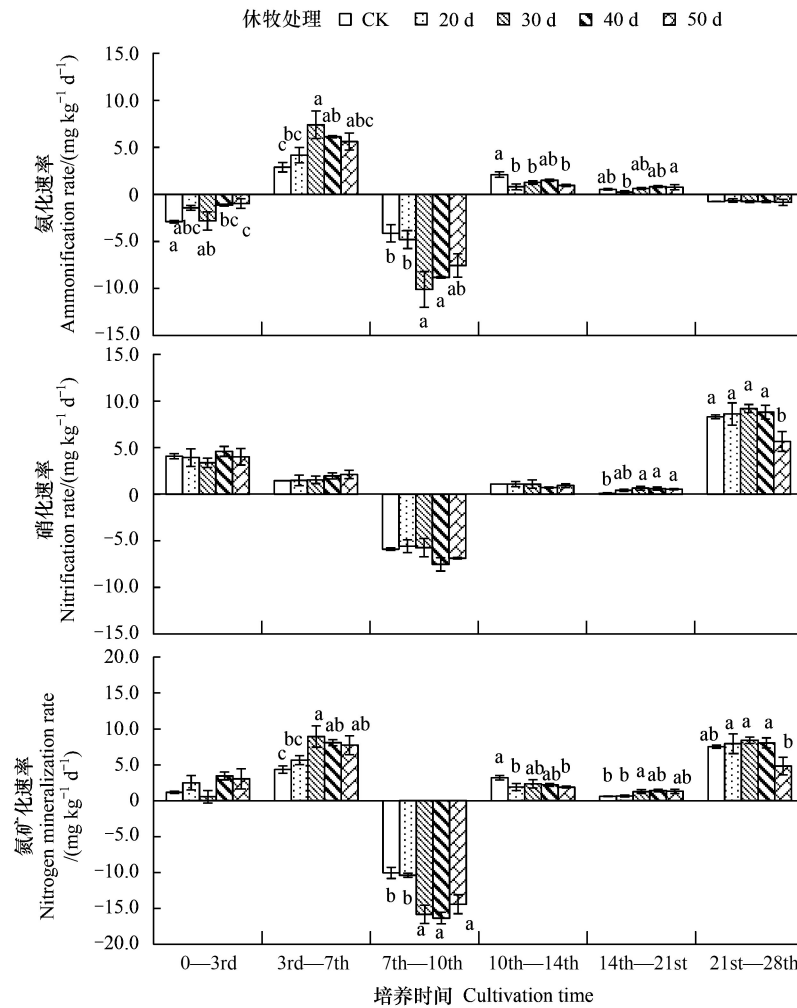


图 2 返青期不同休牧时间下土壤氮矿化速率(6 月份)

Fig.2 Soil nitrogen mineralization rates at different rest-grazing times during the regreen-up period (June)

不同小写字母代表土壤氨化速率、硝化速率及氮矿化速率在不同休牧处理间存在显著差异 ( $P < 0.05$ )

度则与其存在负相关。根据逐步回归分析方法建立解释模型,从表 6 中可以看出,其逐步回归方程为: $Y = -10.884 + 0.777X$  ( $Y$  表示氮矿化速率,  $X$  表示土壤温度)。

表 6 系数检验  
Table 6 Coefficient test

| 模型<br>Model           | 未标准化系数<br>Unnormalization factor   |                        | 标准化系数<br>Normalization factor | $t$ 统计量<br>$t$ -statistic | 显著性<br>Distinctiveness | B 的 95.0%置信区间<br>95.0% confidence interval for B |                   |
|-----------------------|------------------------------------|------------------------|-------------------------------|---------------------------|------------------------|--------------------------------------------------|-------------------|
|                       | B( 回归系数)<br>Regression coefficient | 标准错误<br>Standard error | $\beta$                       |                           |                        | 下限<br>Lower limit                                | 上限<br>Upper limit |
|                       |                                    |                        |                               |                           |                        |                                                  |                   |
| 常量 Constant           | -10.884                            | 3.767                  |                               | -2.889                    | 0.007                  | -18.600                                          | -3.168            |
| 土壤温度 Soil temperature | 0.777                              | 0.266                  | 0.483                         | 2.921                     | 0.007                  | 0.232                                            | 1.321             |

### 3 讨论

#### 3.1 土壤微生物量碳氮对返青期不同休牧时间的响应

土壤微生物生物量能够及时地反映出土壤营养物质的变化、微生物群落的结构和功能特征以及由于植物

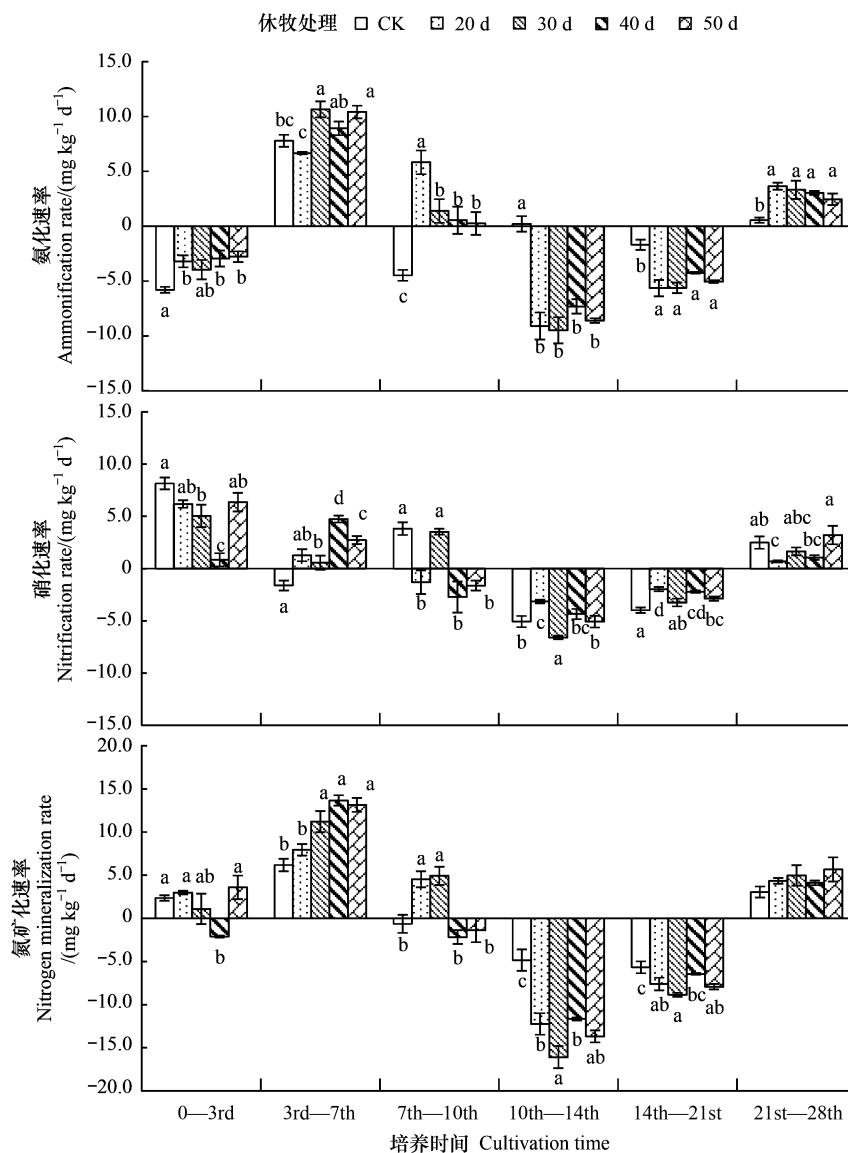


图3 返青期不同休牧时间下土壤氮矿化速率(7月份)

Fig.3 Soil nitrogen mineralization rates at different rest-grazing times during the regreen-up period (July)

不同小写字母代表土壤氨化速率、硝化速率及氮矿化速率在不同休牧处理间存在显著差异 ( $P < 0.05$ )

根际活动所引起的一系列土壤微生物活性的变化<sup>[23]</sup>,这些变化更能反映出微生物在土壤中的真实含量和潜在效用<sup>[24]</sup>。通常来说,适度的休牧会使土壤微生物量增加<sup>[25]</sup>。本试验中,土壤微生物量碳、氮含量随着休牧时间的增加而呈现上升趋势,这与王启兰等在青海海北开展的放牧对高寒草甸土壤微生物量的影响结果一致<sup>[26]</sup>。本研究的结果表明:土壤微生物量碳在返青期较高,盛草期降低,生长末期又上升,可能是返青期后随着气温的逐渐上升,土壤微生物数量和活性随之提高,更多的残留物和可溶性有机物被利用,此外返青期后根系分泌物的增加也为其提供了来源。而当牧草进入生长旺期,需从土壤中摄取大量的营养物质来满足自身生长,从而限制了土壤微生物对养分的利用。而在生长末期,随着根系的衰老、枯落物的凋零,增加了土壤碳源的输入,从而引起微生物量的增加。土壤微生物量氮在生长季波动幅度较大,呈现出“低-高-低”的变化趋势,生长中期温度高,为微生物的活动提供了适宜的环境,加速了氮的矿化作用,而在初期和末期由于气温较低,氮转化能力也较弱。土壤微生物量是土壤有机质中最活跃,也是最容易发生变化的部分,对土壤环境因子较为敏感<sup>[27]</sup>。



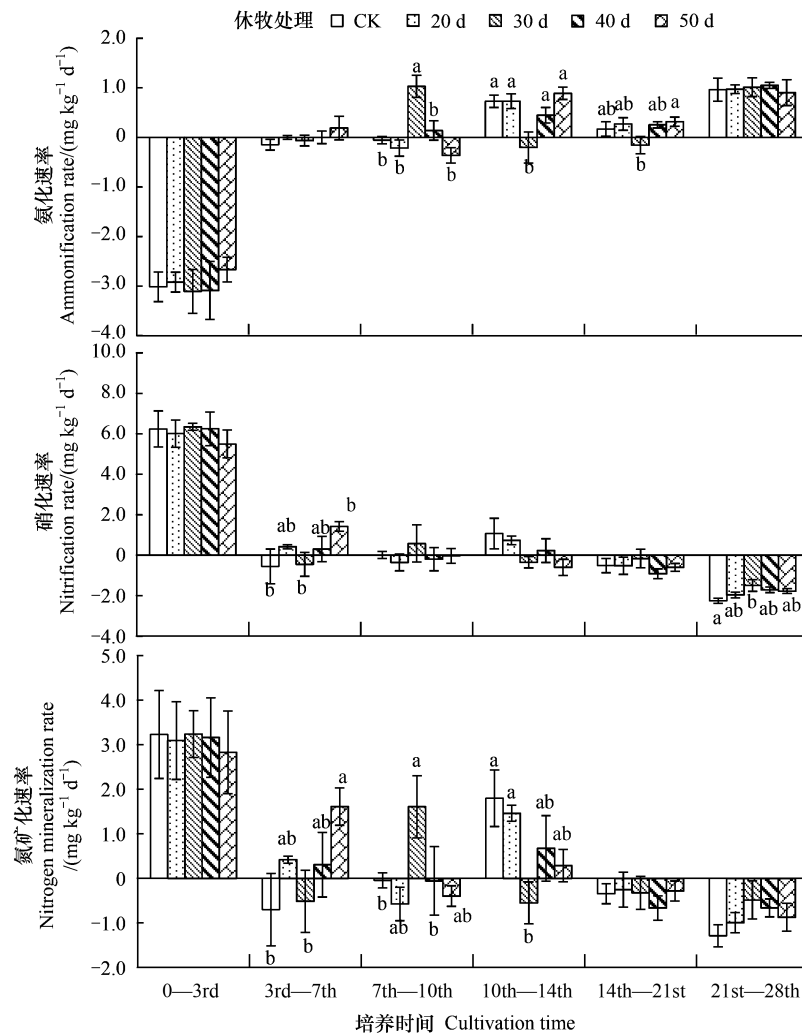


图 4 返青期不同休牧时间下土壤氮矿化速率(8月份)

Fig.4 Soil nitrogen mineralization rates at different rest-grazing times during the regreen-up period (August)

不同小写字母代表土壤氨化速率、硝化速率及氮矿化速率在不同休牧处理间存在显著差异 ( $P < 0.05$ )

### 3.2 土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 对返青期不同休牧时间的响应

土壤中的有机氮在微生物的作用下转化为便于植物吸收利用的有效氮<sup>[28]</sup>,其主要形态为  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ <sup>[29]</sup>。放牧活动直接影响土壤中氮素的存在形式和转化过程<sup>[30]</sup>。本研究中,返青期不同休牧时间对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量影响显著,休牧 30d 处理在生长季大部分时间都较高。研究表明,适度的放牧会使土壤理化性质发生改变,提高氮转化微生物的活性及数量,促进有机氮向  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  转化<sup>[31]</sup>。而过度放牧会使土壤紧实,容重上升,通气性降低,影响有机质的矿化<sup>[32]</sup>。另外,土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量在不同放牧处理下均呈现相同的时间变化:在 5、6 月份略微降低,7 月份升高,8、9 月份又降低。生长中后期  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量降低可能是由于植被的吸收利用以及土壤水分的不断消耗引起硝化细菌活性的增加,从而促进好氧微生物将  $\text{NH}_4^+$  氧化为  $\text{NO}_3^-$ <sup>[33]</sup>。此外还发现,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量在有效氮中占 60% 以上,说明此地有效氮的主要成分是  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ,这与赵宁等<sup>[30]</sup>在高原地区的研究结果一致。

### 3.3 土壤氮矿化对返青期不同休牧时间的响应

土壤氮矿化作用是氮素内循环的关键一环,对氮素的可利用强度起着决定性作用<sup>[34]</sup>。放牧活动通过影响群落结构、土壤基质和微生物组成从而对整个生态系统的能量流动和物质循环造成影响<sup>[35]</sup>。在本研究中,

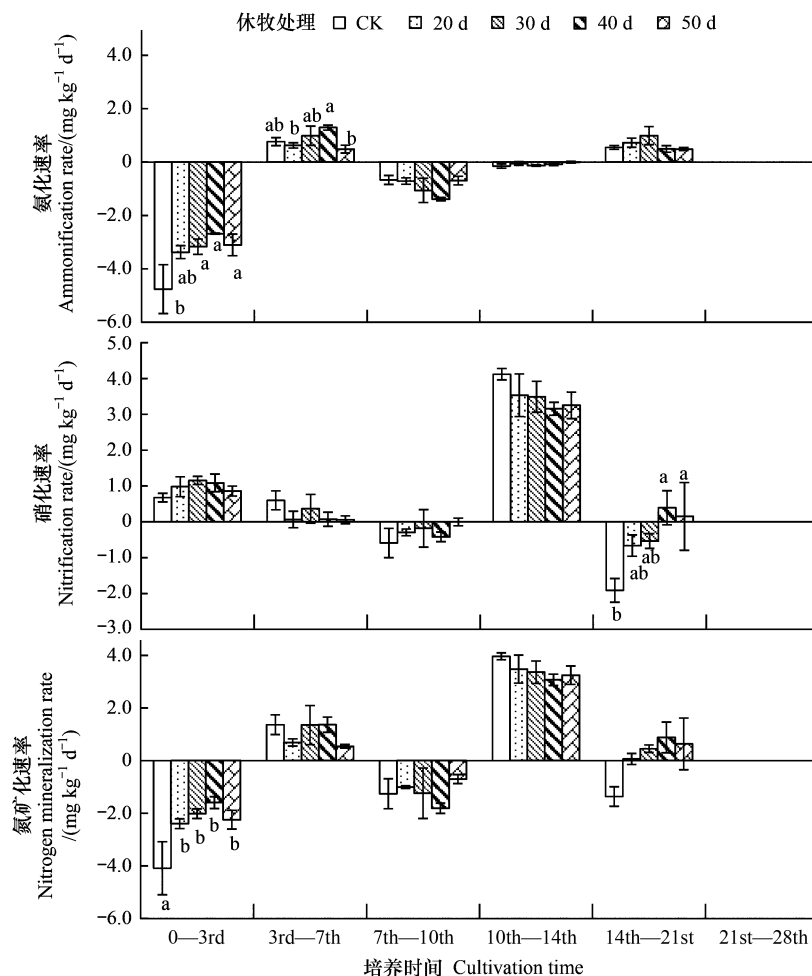


图5 返青期不同休牧时间下土壤氮矿化速率(9月份)

Fig.5 Soil nitrogen mineralization rates at different rest-grazing times during the regreen-up period (September)

不同小写字母代表土壤氨化速率、硝化速率及氮矿化速率在不同休牧处理间存在显著差异 ( $P < 0.05$ )

土壤氮矿化速率在返青期不同休牧时间下差异不显著,但总体上表现在休牧 30d—40d 土壤氮矿化速率较高、对照处理下较低,表明适度休牧有利于土壤氮素的转化。适当休牧进行轻度放牧行为,通过分解家畜的粪尿<sup>[36]</sup>以及对根际微生物的刺激<sup>[37]</sup>,使植物与土壤中的微生物群落结构发生变化<sup>[38—39]</sup>,碳分泌物增加,提高了土壤矿化能力,有益于轻度放牧区氮素的转化<sup>[40—41]</sup>。

另外,本研究中硝化速率与氮矿化速率变化趋于一致,这说明硝化作用在土壤氮矿化过程中起主导作用,前人的研究发现草地土壤氮矿化速率受硝化作用的影响显著<sup>[42]</sup>。王学霞等<sup>[43]</sup>、程雷星等<sup>[44]</sup>分别在研究门源县、海北州高寒草甸土壤氮矿化时也有类似发现。一方面,由于家畜尿素水解的滞后性导致其排入土壤后,大部分通过硝化作用转化为硝态氮<sup>[45]</sup>;另一方面,尽管氮素的矿化起始于异养微生物对铵根离子的释放,但铵化过程中,铵根离子既容易被植物吸收和固着,也容易转化为硝酸根离子<sup>[46]</sup>。

与此同时,发现在生长季中,土壤氮矿化速率在不同月份间差异显著。在生长初期和末期净氮矿化速率较低而在生长中期显著升高,这种鲜明的季节变化与土壤温度的季节动态密切相关,在一定范围内,土壤温度与氮矿化速率呈正相关关系<sup>[47]</sup>。本研究中,土壤氮矿化速率在 8 月份较高,也表明较高的温度条件对氮周转更有利。Liu 等的研究也证明,随着气候条件的季节性变化,放牧对土壤氮矿化作用的影响也存在着显著的季节性差异<sup>[48]</sup>。湿度对土壤氮矿化也有重要影响。本研究发现两者间存在负相关。湿度过高时,土壤孔隙被水填满,加之家畜的踩踏,氧气含量较低,给厌氧菌提供了良好的环境,反硝化作用增强,造成部分氮素的损

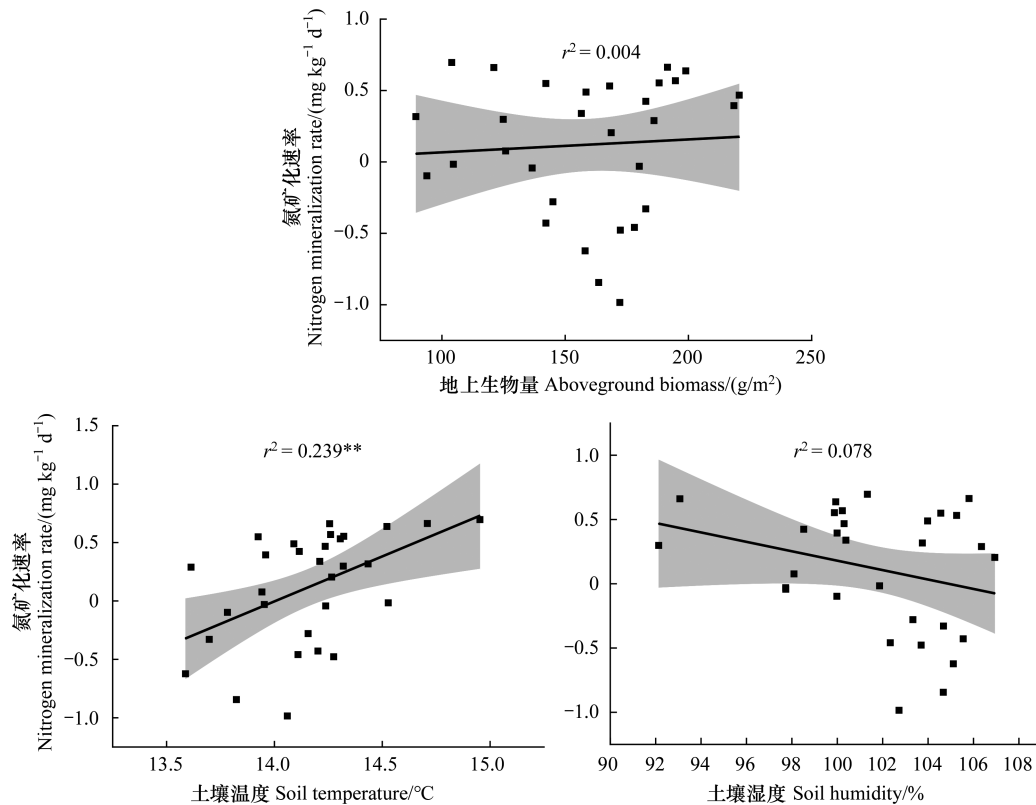


图6 地上生物量、土壤温湿度对氮矿化速率的影响

Fig.6 Effect of aboveground biomass, soil temperature and moisture on nitrogen mineralisation rates

$r^2$ 表示拟合优度, $r$ 值后标注“\* \*”表示在0.01检验水平上相关性显著;阴影区域:95%置信带

失<sup>[49]</sup>。氮矿化速率与土壤温度的关系显著大于土壤湿度,说明在此地区温度是决定氮矿化速率的主要环境因子。除此之外,土壤氮矿化速率与地上生物量之间具有微弱的正向线性关系,且地上生物量在休牧处理中含量较高,也从侧面说明适度地利用草地资源有利于物种多样性的增加,随着物种多样性的增加,氮素受淋溶损失减少,氮素利用更完全也更高效<sup>[50]</sup>。

#### 4 结论

返青期不同休牧时间对高寒草甸土壤微生物量的影响不同,在休牧40d和休牧50d处理下较高,且休牧时间的增加促进了土壤微生物量的积累;土壤 $\text{NO}_3^-$ -N受返青期不同休牧时间的影响较小,而土壤 $\text{NH}_4^+$ -N则在休牧30d处理下较高。对于土壤氮矿化来说,更受气候条件的影响,但不同月份间也均在休牧30—40d处理下较高。可见,在返青期对高寒草甸进行适当的休牧有利于其草地资源的恢复与演替。前期的放牧活动为土壤微生物提供了来源,而后期的休牧又为土壤微生物的繁殖和生长提供了足够的时间。

#### 参考文献 (References):

- [1] 刘玉祯,孙彩彩,刘文亨,杨晓霞,冯斌,时光,张雪,李彩弟,杨增增,高婕,张小芳,俞畅,张春平,董全民. 高寒草地植物群落关键种对不同放牧家畜组合放牧的响应. 生态学报, 2022, 42(18): 7529-7540.
- [2] 张杨建,朱军涛,沈若楠,王荔. 放牧对草地生态系统影响的研究进展. 植物生态学报, 2020, 44(5): 553-564.
- [3] 费璇,锁才序,向双. 青藏东缘高寒草甸植物群落结构及功能群特征对长期季节放牧的响应. 草地学报, 2022, 30(8): 1954-1963.
- [4] 张雅娟,樊江文,李愈哲,项潇智,张海燕,王穗子. 短期围栏封育后再利用对草地植物群落的影响. 生态学报, 2023, 43(8): 3295-3306.

- [5] 曲艳, 宋倩, 杨合龙, 赵坤, 赵敏, 刘玉玲, 王德平, 戎郁萍. 呼伦贝尔草原不同利用方式对土壤微生物群落结构的影响. 草地学报, 2021, 29(8): 1621-1627.
- [6] 陈杯满. 环境土壤学. 2 版. 北京: 科学出版社, 2010: 1-103.
- [7] 周才平, 欧阳华. 温度和湿度对长白山两种林型下土壤氮矿化的影响. 应用生态学报, 2001, 12(4): 505-508.
- [8] 韩梦琪, 潘占磊, 靳宇曦, 秦洁, 李江文, 王忠武, 韩国栋. 短花针茅荒漠草原土壤氮素矿化对载畜率的响应. 草业学报, 2017, 26(9): 27-35.
- [9] 朱辉, 王燕, 王云英, 许庆民, 杜岩功. Meta 分析中国不同类型草地放牧强度对土壤氮素矿化作用的影响. 草原与草坪, 2021, 41(5): 80-86.
- [10] Holst J, Liu C Y, Brüggemann N, Butterbach-Bahl K, Zheng X H, Wang Y S, Han S H, Yao Z S, Yue J, Han X G. Microbial N turnover and N<sub>2</sub>O/NO/NO<sub>2</sub> fluxes in semi-arid grassland of inner Mongolia. *Ecosystems*, 2007, 10(4): 623-634.
- [11] Hoogendoorn C J, Newton P C D, Devantier B P, Rolle B A, Theobald P W, Lloyd-West C M. Grazing intensity and micro-topographical effects on some nitrogen and carbon pools and fluxes in sheep-grazed hill country in New Zealand. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 217: 22-32.
- [12] 王芳芳, 徐欢, 李婷, 伍星. 放牧对草地土壤氮素循环关键过程的影响与机制研究进展. 应用生态学报, 2019, 30(10): 3277-3284.
- [13] 马玉寿, 李世雄, 王彦龙, 孙小弟, 景美玲, 李松阳, 李林栖, 王晓丽. 返青期休牧对退化高寒草甸植被的影响. 草地学报, 2017, 25(2): 290-295.
- [14] 王晓丽, 温军, 马玉寿, 王彦龙, 施建军, 周华坤. 不同返青休牧期土壤微生物碳代谢特征及其影响因素研究. 生态环境学报, 2020, 29(5): 961-970.
- [15] Fedrigo J K, Ataíde P F, Filho J A, Oliveira L V, Jaurena M, Laca E A, Overbeck G E, Nabinger C. Temporary grazing exclusion promotes rapid recovery of species richness and productivity in a long-term overgrazed Campos grassland. *Restoration Ecology*, 2018, 26(4): 677-685.
- [16] Mavromihalis J A, Dorrough J, Clark S G, Turner V, Moxham C. Manipulating livestock grazing to enhance native plant diversity and cover in native grasslands. *The Rangeland Journal*, 2013, 35(1): 95.
- [17] 李林栖, 马玉寿, 李世雄, 王晓丽, 王彦龙, 景美玲, 李松阳, 年勇, 韩海龙. 返青期休牧对祁连山区中度退化草原化草甸草地的影响. 草业科学, 2017, 34(10): 2016-2023.
- [18] 徐松鹤, 陈宇浩. 休牧对锡林郭勒典型草原土壤养分和植物群落特征的影响. 水土保持研究, 2018, 25(4): 15-21.
- [19] 周选博, 王晓丽, 马玉寿, 王彦龙, 罗少辉, 谢乐乐. 返青期休牧措施下高寒草甸主要植物种群的生态位变化特征. 生态环境学报, 2022, 31(8): 1547-1555.
- [20] 张贾宇, 余婷, 鄂晓伟, 唐罗忠, 田野. 杨树人工林幼林阶段林下植被管理对土壤微生物生物量碳、氮酶活性的影响. 生态学报, 2021, 41(24): 9898-9909.
- [21] 黄施楚, 郑裕雄, 杨智杰, 张雅婷, 陈娟. 林龄和根际对杉木林土壤 DOM 和微生物生物量碳氮的影响. 亚热带资源与环境学报, 2023, 18(1): 63-70.
- [22] 高珊, 尹航, 傅民杰, 吴明根, 董闯, 李龙. 冻融循环对温带 3 种林型下土壤微生物量碳、氮和氮矿化的影响. 生态学报, 2018, 38(21): 7859-7869.
- [23] 高艳娜, 戚志伟, 仲启铨, 樊同, 李沙沙, 王开运, 朱红雨, 周婷南. 长期模拟升温对崇明东滩湿地土壤微生物生物量的影响. 生态学报, 2018, 38(2): 711-720.
- [24] 刘秉儒. 贺兰山东坡典型植物群落土壤微生物量碳、氮沿海拔梯度的变化特征. 生态环境学报, 2010, 19(4): 883-888.
- [25] 韦应莉, 曹文侠, 李建宏, 张爱梅, 李小龙. 不同放牧与围封高寒灌丛草地土壤微生物群落结构 PLFA 分析. 生态学报, 2018, 38(13): 4897-4908.
- [26] 王启兰, 王长庭, 杜岩功, 曹广民. 放牧对高寒嵩草草甸土壤微生物量碳的影响及其与土壤环境的关系. 草业学报, 2008, 17(2): 39-46.
- [27] 任佐华, 张于光, 李迪强, 肖启明, 蔡重阳. 三江源地区高寒草原土壤微生物活性和微生物量. 生态学报, 2011, 31(11): 3232-3238.
- [28] 邹亚丽, 韩方虎, 耿丽英, 沈禹颖. 温度和湿度对紫花苜蓿土壤氮矿化的影响. 草业学报, 2010, 19(4): 101-107.
- [29] 孟盈, 薛敬意, 沙丽清, 唐建维. 西双版纳不同热带森林下土壤铵态氮和硝态氮动态研究. 植物生态学报, 2001, 25(1): 99-104.
- [30] 赵宁, 张洪轩, 王若梦, 杨满业, 张艳, 赵小宁, 于贵瑞, 何念鹏. 放牧对若尔盖高寒草甸土壤氮矿化及其温度敏感性的影响. 生态学报, 2014, 34(15): 4234-4241.
- [31] 高雪峰, 武春燕, 韩国栋. 放牧对典型草原土壤中几种生态因子影响的研究. 干旱区资源与环境, 2010, 24(4): 130-133.
- [32] 刘楠, 张英俊. 放牧对典型草原土壤有机碳及全氮的影响. 草业科学, 2010, 27(4): 11-14.
- [33] 李志丽, 王红梅, 赵亚楠, 周玉蓉. 荒漠草原灌丛引入过程中土壤氮矿化的季节动态及其影响因素. 应用生态学报, 2023, 34(8): 2161-2170.
- [34] 张秀月, 付岩梅, 刘楠, 冯富娟. 原始红松林退化演替后土壤氮矿化特征变化. 生态学报, 2019, 39(10): 3566-3574.

- [35] 王永宏, 田黎明, 艾鹭, 陈仕勇, 泽让东科. 短期牦牛放牧强度对川西北高原高寒草甸土壤细菌群落的影响. 生态学报, 2022, 42(4): 1549-1559.
- [36] An H, Li G Q. Effects of grazing on carbon and nitrogen in plants and soils in a semiarid desert grassland, China. Journal of Arid Land, 2015, 7(3): 341-349.
- [37] Devi T I, Yadava P S, Garkoti S C. Cattle grazing influences soil microbial biomass in sub-tropical grassland ecosystems at Nambol, Manipur, northeast India. Tropical Ecology, 2014, 55(2): 195-206.
- [38] Risch A C, Schotz M, Vandegehuchte M L, Van Der Putten W H, Duyts H, Raschein U, Gwiazdowicz D J, Busse M D, Page-dumroese D S, Zimmermann S. Aboveground vertebrate and invertebrate herbivore impact on net N mineralization in subalpine grasslands. Ecology, 2015, 96(12): 3312-3322.
- [39] Lima H N, Dubeux J C, dos Santos M V, de Mello A C, Lira M A, Cunha M V. Decomposition of cattle dung on grazed signalgrass (*Brachiaria decumbens* Stapf) pastures in monoculture or intercropped with tree legumes. African Journal of Range & Forage Science, 2016, 33(2): 119-126.
- [40] Zhang X L, Wang Q B, Li L H, Han X G. Seasonal variations in nitrogen mineralization under three land use types in a grassland landscape. Acta Oecologica, 2008, 34(3): 322-330.
- [41] Bardgett R D, Wardle D A. Herbivore-mediated linkages between aboveground and belowground communities. Ecology, 2003, 84(9): 2258-2268.
- [42] 单玉梅, 温超, 常虹, 张璞进, 晔蕾罕, 木兰, 王常慧, 黄建辉, 白永飞, 孙海莲, 陈海军. 不同放牧强度下荒漠草原土壤氮矿化季节性动态研究. 生态环境学报, 2019, 28(4): 723-731.
- [43] 王学霞, 董世魁, 高清竹, 张勇, 胡国铮, 罗文蓉. 青藏高原退化高寒草地土壤氮矿化特征以及影响因素研究. 草业学报, 2018, 27(6): 1-9.
- [44] 程雷星, 陈克龙, 罗彩云, 曹生奎, 王记明. 高寒草地不同利用方式对植被生物量和土壤氮矿化的影响. 草原与草坪, 2014, 34(5): 1-5.
- [45] Holland J N, Cheng W X, Crossley D A. Herbivore-induced changes in plant carbon allocation: assessment of below-ground C fluxes using carbon-14. Oecologia, 1996, 107(1): 87-94.
- [46] 王常慧. 内蒙古温带典型草原土壤净氮矿化作用[D]. 北京: 中国科学院研究生院(植物研究所), 2005.
- [47] Gómez-Rey M X, Couto-Vázquez A, González-Prieto S J. Nitrogen transformation rates and nutrient availability under conventional plough and conservation tillage. Soil and Tillage Research, 2012, 124: 144-152.
- [48] Liu T Z, Nan Z B, Hou F J. Grazing intensity effects on soil nitrogen mineralization in semi-arid grassland on the Loess Plateau of Northern China. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2011, 91(1): 67-75.
- [49] 杜薇, 孙楠, 周古月, 武山梅, 聂成, 李悦, 刘颖慧. 温湿度对不同管理方式高寒草甸土壤氮矿化的影响. 草原与草坪, 2018, 38(4): 1-11.
- [50] Naeem S, Thompson L J, Lawler S P, Lawton J H, Woodfin R M. Declining biodiversity can alter the performance of ecosystems. Nature, 1994, 368: 734-737.