

DOI:10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0573

杨静,孙宗玖,董乙强.封育年限对伊犁绢蒿荒漠土壤有机氮组分的影响.草业科学,2017,34(9):1778-1786.

Yang J, Sun Z J, Dong Y Q. Effect of grazing exclusion length on soil organic nitrogen in *Seriphidium transiliense* desert. Pratacultural Science, 2017, 34(9): 1778-1786.

封育年限对伊犁绢蒿荒漠土壤 有机氮组分的影响

杨 静¹, 孙宗玖^{1,2}, 董乙强¹

(1.新疆农业大学草业与环境科学学院,新疆 乌鲁木齐 830052; 2.新疆草地资源与生态自治区重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要:为探究荒漠土壤有机氮组分对封育年限的响应规律,研究了不同封育年限(封育时间为 0、1、4 和 11 a)对中度退化伊犁绢蒿(*Seriphidium transiliense*)荒漠草地土壤全氮(total nitrogen, TN)、轻组氮(light fraction organic nitrogen, LFON)、颗粒氮(particulate organic nitrogen, PON)、微生物量氮(soil microbial biomass nitrogen, SMBN)及其分配比例的影响。结果表明,与封育 0 a 相比,其它封育年限 5—10、10—20、30—50 cm 土层的 TN 含量均显著降低($P < 0.05$),且 0—50 cm 土层 TN 含量随封育年限延长呈“降—升”趋势;封育 11 a, 0—5 cm 土层 PON 含量达到最高,而封育 4 a, 5—10 和 20—30 cm 土层 PON 分配比例显著增加;0—20 cm 土层 LFON 含量增加显著,且 0—5 cm 土层含量最高。0—50 cm 土层 SMBN 随封育年限增加呈“降—升”趋势,而封育 4 a, 5—10 和 20—30 cm 土层 SMBN 分配比例显著高于封育 0 a 和封育 1 a ($P < 0.05$);0—10 cm 土层 LFON 和 0—50 cm 土层 LFONR 与封育年限呈显著正相关。总之,短期封育(1~11 a)下,中度退化伊犁绢蒿荒漠土壤全氮含量仍未得到恢复,但促进了 LFON、PON、SMBN 及其分配比例的增加。

关键词:封育年限;伊犁绢蒿荒漠;土壤颗粒氮;轻组氮;微生物生物量氮

中图分类号:S153.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-0629(2017)09-1778-09*

Effects of grazing exclusion length on soil organic nitrogen in *Seriphidium transiliense* desert

Yang Jing¹, Sun Zong-jiu^{1,2}, Dong Yi-qiang¹

(1.College of Pratacultural and Environmental Science, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

2.Key Laboratory of Grassland Resources and Ecology of Xinjiang, Urumqi 830052, China)

Abstract: To explore the effects of different grazing exclusion lengths on soil organic nitrogen, we studied total soil nitrogen, particulate organic nitrogen, light fraction organic nitrogen, soil microbial biomass nitrogen and their distribution ratios in a moderately degraded *Seriphidium transiliense* desert. The influence of different grazing exclusion lengths on the percentage of soil organic nitrogen was researched using a control, one grazing-exclusion year, four grazing-exclusion years and eleven grazing-exclusion years. Compared with the control, the content of total soil nitrogen significantly decreased in 5—10, 10—20 and 30—50 cm of soil depth and the content of total nitrogen in 0—50 cm of soil depth appeared first to decrease then increased with the increase in grazing-exclusion years. The particulate organic nitrogen was highest in 0—5 cm of soil depth after eleven grazing-exclusion years, with a significant increase in the accumulation of particulate organic nitrogen distribution ratios in soil depths of 5—10 and 20—30 cm. Light fraction organic nitrogen significantly increased in 0—20 and

* 收稿日期:2016-11-15 接受日期:2017-01-03

基金项目:国家自然科学基金——不同退化蒿类荒漠土壤有机碳组及其碳氮特征对禁牧的响应(31260574)

第一作者:杨静(1989-),女,陕西宁强人,在读硕士生,主要从事草地资源与生态研究。E-mail:1252809698@qq.com

通信作者:孙宗玖(1975-),男,内蒙古敖汉人,教授,博导,博士,主要从事草地培育、管理及草种资源评价等方面的研究工作。

E-mail:nmszj@21cn.com

0–5 cm of soil depth, while it reached the highest after four grazing-exclusion years. The soil microbial biomass nitrogen appeared first to decrease then increased in 0–50 cm of soil depth. Comparing four grazing-exclusion years with the control and one grazing-exclusion year, soil microbial biomass nitrogen distribution ratio significantly increased in 5–10 cm and 20–30 cm of soil depth. Correlation among grazing-exclusion years with light fraction organic nitrogen in 0–10 cm of soil depth and light fraction organic nitrogen distribution ratio in 0–50 cm of soil depth was significantly positive. In conclusion, the content of total soil nitrogen was not recovered, but light fraction organic nitrogen, particulate organic nitrogen, soil microbial biomass nitrogen and their distribution ratios increased after short-term grazing exclusion (1~11 a) in moderately degraded *S. transiliense* desert.

Key words: grazing exclusion length; *Seriphidium transiliense* desert; soil particulate organic nitrogen; light fraction organic nitrogen; soil microbial biomass nitrogen

Corresponding author: Sun Zong-jiu E-mail:nmszj@21cn.com

草地生态系统作为陆地生态系统的最主要的类型之一,已成为受人类活动影响最严重的区域。中国拥有天然草地约为 4.00×10^8 hm², 90% 可利用草地呈现不同程度的退化^[1], 其中 20% 以上则是由过度放牧造成的^[2]。草地退化必然会引起草地生态系统功能衰退, 影响植被生产力及土壤有机质的分解和积累速率, 影响土壤碳氮储量和生态系统的碳氮循环^[3], 且草地退化引起草地土壤氮素流失, 因此, 土壤氮含量成为限制草地生产力最重要的因素之一。

氮作为维持生态系统结构和功能的重要元素, 禁牧与放牧草地上有 97% 的氮贮存于土壤中^[4], 其循环过程对生态系统的生产力、固碳潜力及稳定性都有着关键性的影响^[5]; 而颗粒有机氮 (particulate organic nitrogen, PON)、土壤轻组氮 (light fraction organic nitrogen, LFON)、土壤微生物生物量氮 (soil microbial biomass nitrogen, SMBN) 是土壤有机氮最活跃部分, 对认识土壤的稳定性、氮循环及对外界环境条件的敏感变化均具有重要意义^[6-8]。封育作为改善退化草地土壤结构和提高土壤养分的有效措施之一^[9-10], 以其低成本、操作简单和易推广的优势而被广泛使用。目前, 有关封育对退化草地土壤氮的研究相对较多, 主要集中在土壤全氮、速效氮总量的估算及分布^[11]、人类活动对土壤全氮的影响^[12]、土壤全氮含量与其理化特征、土地利用方式及植被特征等相关性分析^[13], 而对有机氮组分的研究相对较少, 如土壤颗粒氮、轻组氮^[14-15]、土壤微生物生物量氮^[12]等, 且多数研究仅限于封育与对照两个处理, 单个或 2~3 个氮组分的对比分析^[13-15], 而对不同封育年限下草地土壤氮组分的研究报道相对缺乏, 导致探讨封育对草地土壤质量内在演变机制存在一定的不足, 需要加强。因此, 本研究以新疆地区中度退化的伊犁绢蒿 (*Seriphidium tran-*

siliense) 荒漠草地为研究对象, 针对不同封育年限下土壤全氮、PON、LFON、SMBN 及其分配比例进行测算, 探讨其对封育年限的响应规律, 寻找封育后土壤中具有敏感效应的氮组分, 以期为预测封育后土壤质量早期变化提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于新疆天山北坡中段石河子市 ($44^{\circ}01' - 44^{\circ}20' N, 85^{\circ}45' - 85^{\circ}49' E$), 年均降水量 240.8 mm, 海拔 830 m, 年均温 7.9 °C, 全年中无霜期 206 d, 属温带大陆性干旱气候。该地区是典型的伊犁绢蒿荒漠草地, 土壤类型为荒漠灰钙土; 植被包括建群种伊犁绢蒿, 伴生种木地肤 (*Kochia prostrata*)、羊茅 (*Festuca ovina*)、新疆针茅 (*Stipa sareptana*)、短柱苔草 (*Carex turkestanica*)、角果藜 (*Ceratocarpus arenarius*)、猪毛菜 (*Salsola collina*) 等。在生产中, 该荒漠草地主要作为春秋牧场来利用。

1.2 试验设计

试验设计上采用完全随机, 在研究区内对 3 块地势平坦区域进行随机围栏封育, 各封育区面积均为 2 500 m², 且各封育区间相隔不足 50 m; 至 2014 年 9 月, 试验区分别达到封育 1 a、封育 4 a、封育 11 a; 封育前研究区的植被结构、群落组成、土壤类型及地形地貌等均基本相似。与此同时, 将封育区周边放牧区设为对照 (封育 0 a), 以绵羊为主的牲畜群常年进行传统放牧。

1.3 测定内容及方法

1.3.1 土样的采集及准备 试验区的土壤采样工作在 2014 年 9 月下旬进行, 各封育区及对照区均设置 3 个取样地段, 并在每个地段上随机布置 3 个 20 cm ×

20 cm 的土壤取样点,采用土壤剖面法,分别按 0—5、5—10、10—20、20—30 和 30—50 cm 分层取样,并将相同土层的样品进行混合,将混合样装入布袋中并做好标签,带回室内。将采回室内的土样分为 2 份,一份放置 4 °C 冰箱贮存,用于土壤微生物生物量氮的测定;另一份于室内挑拣出植物根系、石砾等较粗杂物后自然风干,用研钵磨碎混匀,过 2 mm 筛用于测定颗粒氮和轻组氮,过 0.25 mm 筛用以测定全氮。

1.3.2 测定方法 土壤全氮采用凯氏定氮法测定^[16];土壤颗粒组分以参考文献^[17]方法对颗粒组分进行收集;即称取 20.0 g 风干后过 2 mm 筛的土样置于 100 mL 的 5 g · L⁻¹六偏磷酸钠(NaPO₃)₆溶液内,使用振荡机进行充分振荡(90 r · min⁻¹, 18 h)后,将悬浊液过 53 μm 筛,冲洗干净,收集筛上物质,烘干(60 °C, 12 h),称重,即得土壤颗粒组分质量。

土壤轻组组分则采用参考文献^[18]方法;称取 25.0 g 过 2 mm 筛的风干土样,加入 50 mL 1.8 g · cm⁻³ NaI 重液,震荡(90 r · min⁻¹, 1 h)后,在 3 000 r · min⁻¹的速率离心 10 min,用砂芯漏斗对上清液进行抽滤,留在砂芯滤膜上的部分即为轻组组分,以上步骤重复 3 次后,将所收集部分烘干(55 °C, 16 h),称重即为轻组组分质量。

将获得的土壤颗粒组分和轻组组分用球磨仪磨细后过 0.25 mm 筛,采用碳氮元素分析仪(Elementar Analyzer 3000,意大利)进行颗粒氮含量和轻组氮含量的测定。

根据下列公式^[15]进行土壤颗粒氮含量及轻组氮含量的计算。

土壤颗粒(轻组)组分质量比 = 土壤颗粒(轻组)组分质量 / 供试土壤质量 × 100%;

土壤颗粒(轻组)氮含量 = 土壤颗粒(轻组)组分氮含量 × 土壤颗粒(轻组)组分质量比。

土壤微生物生物量氮采用参考文献^[19]方法测定,并根据公式^[20]计算:

土壤微生物生物量氮含量 = 5.0 × (熏蒸土壤微生物生物量氮含量 - 未熏蒸土壤微生物生物量氮含量)公式^[20]计算:

土壤颗粒(轻组、微生物生物量)氮分配比例 = 土壤颗粒(轻组、微生物生物量)氮含量 / 土壤全氮含量 × 100%。

1.4 数据分析

数据处理采用软件 SPSS 20.0 进行统计和分析,利用 One-way ANOVA 对不同封育年限伊犁绢蒿荒漠草地土壤有机氮及其活性组分进行方差分析;采用

Excel 2003 进行图表制作。

2 结果与分析

2.1 封育年限对土壤全氮的影响

随封育年限增加,0—30 cm 土层全氮含量均呈“先降再升”的变化,并在封育 4 a 时最低(图 1);与对照(封育 0 a)相比,其它封育年限 5—10、10—20、30—50 cm 土层的全氮含量均显著降低($P < 0.05$),分别降低了 31.19% ~ 46.55%、41.67% ~ 52.42% 和 46.24% ~ 58.55%。封育 11 a 后,各土层全氮含量较封育 0 a 减少了 6.80% ~ 57.17%。随土层的逐级加深,土壤全氮含量呈现降低趋势,相比 0—5 cm 土层,30—50 cm 土层在封育 0、1、4 和 11 a 全氮含量分别减少了 55.0%、76.8%、67.5% 和 79.3%。

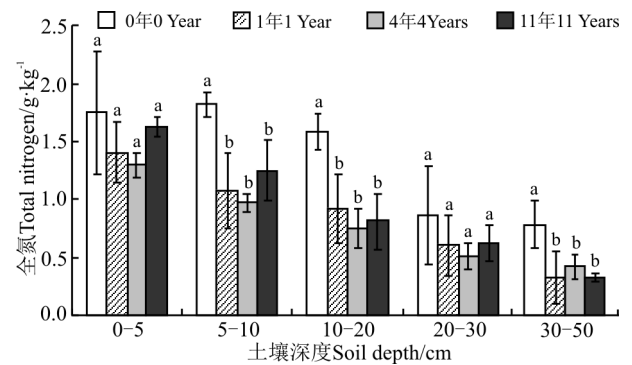


图 1 封育年限对伊犁绢蒿荒漠土壤全氮的影响

Fig. 1 Effect of enclosing year on total soil nitrogen

in *S. transiliense* desert

注:不同小写字母表示同一土层不同封育年限间差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters on the same soil layer indicate significant differences among different exclusions years at the 0.05 level; similarly for the following figures.

2.2 封育年限对土壤颗粒氮的影响

随封育年限增加,0—5 cm 土层 PON 含量呈“增—减—增”趋势,5—20 cm 土层呈“升—降”,20—30 cm 土层一直增加,而 30—50 cm 土层则呈“降—升—降”趋势,各封育处理间均差异不显著($P > 0.05$) (图 2)。0—5 cm 土层封育 0、1、4 和 11 a 的 PON 含量分别为 0.622、0.711、0.578、0.808 g · kg⁻¹,均高于 5—50 cm 各土层。

随封育年限增加,0—5 cm 土层颗粒氮分配比例(particulate organic nitrogen distribution ratio, PONR)呈“升—降—升”变化,且封育 1 a 最高,为 50.44%;5—50 cm 土层 PONR 均呈“升—降”变化,基本在封育 4 a 达到最高(图 2),且 5—10 和 20—30 cm

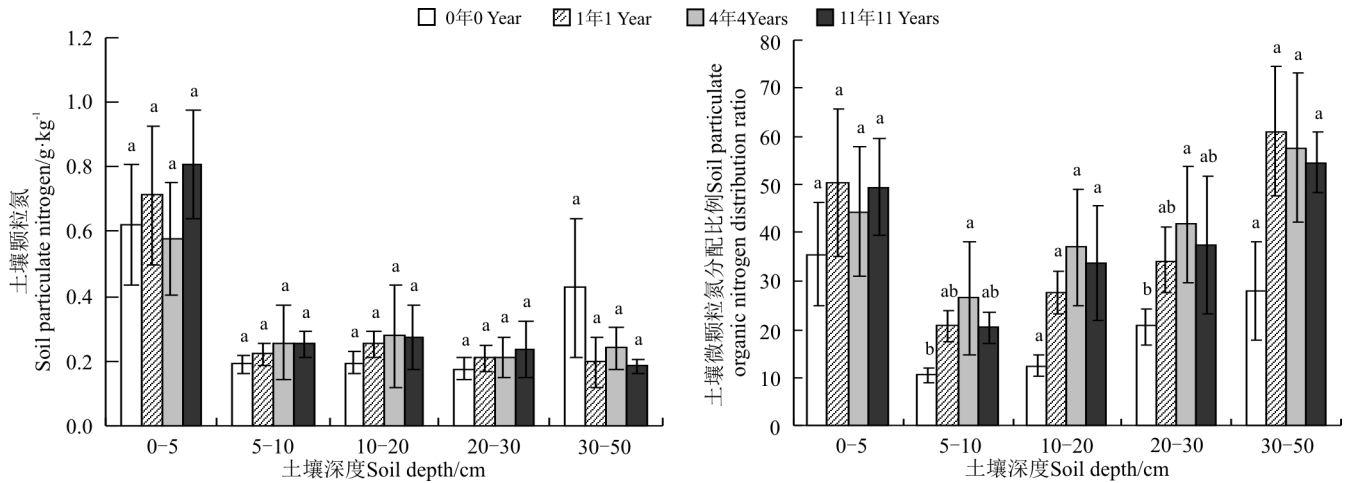


图 2 封育年限对伊犁绢蒿荒漠土壤颗粒氮的影响

Fig. 2 Effect of enclosing year on soil particulate organic nitrogen in *S. transiliense* desert

土层 PONR 封育 4 a 显著高于封育 0 a ($P < 0.05$), 分别达到 26.48%、41.68%; 0-5、30-50 cm 土层 PONR 在封育 1 a 最高, 分别为 50.44%、60.98%, 而 5-10、10-20 和 20-30 cm 则均在封育 4 a 最高。随土层深度的增加, PONR 呈“降-升”趋势, 且 5-10 cm 土层含量最低。

2.3 封育年限对土壤轻组氮的影响

随封育年限增加, 0-10 cm 土层 LFON 含量呈增加趋势, 与封育 0 a 比, 0-5 和 5-10 cm 土层 LFON 分别增加了 3.18%~33.92%、43.50%~86.37% (图 3); 10-50 cm 土层则呈“升-降”趋势, 封育 1 a 或封育 4 a 达到最高。封育后 0-20 cm 各土层 LFON 均显著高于封育 0 a ($P < 0.05$); 随土层深度增加, LFON 基本呈降低趋势, 0-5 cm 土层最高, 均高于 $0.42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 5-10 cm 土层出现大幅降低, 降幅为 44.27%~64.42%, 其余各土层间降幅较小。

0-50 cm 土层轻组氮分配比例 (light fraction organic nitrogen distribution ratio, LFONR) 随封育年限延长呈“升-降”趋势, 且 0-20 cm 土层封育 1、4、11 a, 20-30 cm 土层封育 4 a, 30-50 cm 土层封育 1、11 a 均显著高于封育 0 a ($P < 0.05$) (图 3)。随土层深度增加, LFONR 呈“降-升”趋势, 且在 5-10 或 10-20 cm 土层最低。

2.4 封育年限对土壤微生物生物量氮的影响

随封育年限增加, 0-5 和 10-20 cm 土层 SMBN 含量呈“降-升”趋势, 且 0-5 cm 土层封育 11 a 最高 ($102.81 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 显著高于封育 1 a ($P < 0.05$) (图 4); 5-10 和 20-50 cm 土层呈现波动变化; 5-10 和 20-30 cm 土层微生物生物量氮分配比例 (soil microbial biomass nitrogen distribution ratio, SMBNR) 随封育年限增加呈“升-降”趋势, 封育 4 a 最高, 且显著高于封育 0、1 a ($P < 0.05$), 而 0-5、10-20 和 30-50

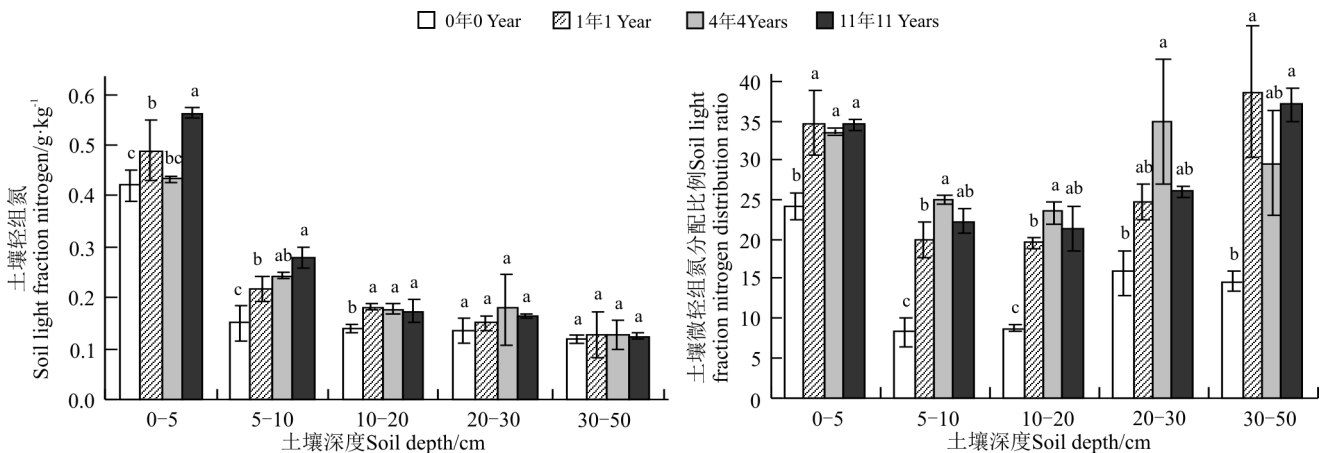


图 3 封育年限对伊犁绢蒿荒漠土壤轻组氮的影响

Fig. 3 Effect of enclosing year on soil light fraction organic nitrogen in *S. transiliense* desert

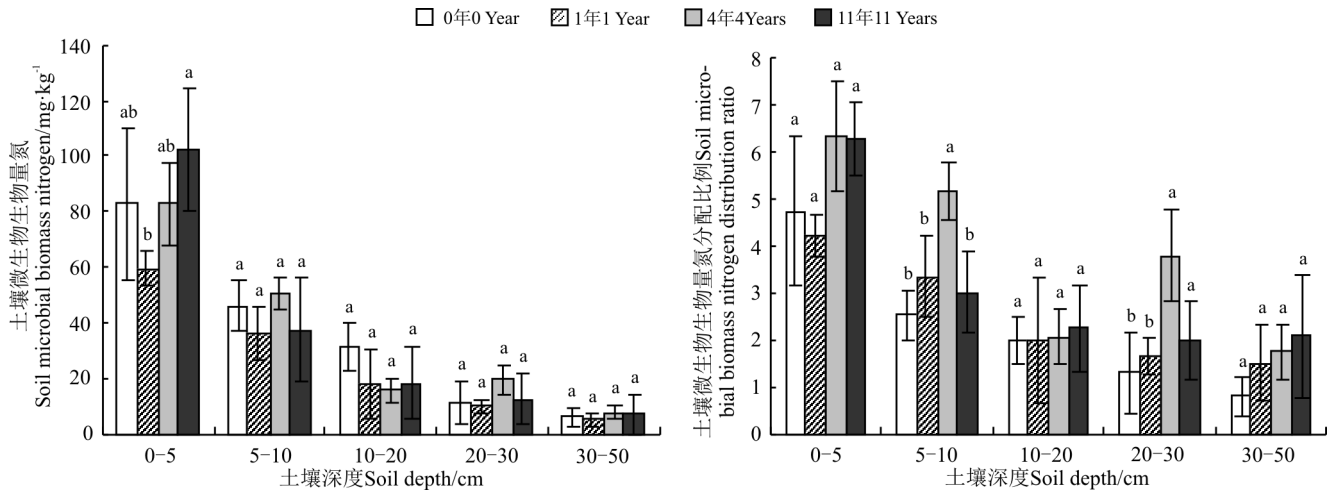


图 4 封育年限对伊犁绢蒿荒漠土壤微生物生物量氮的影响

Fig. 4 Effect of enclosing year on soil microbial biomass nitrogen in *S. transiliense* desert

cm 土层 SMBNR 各处理间差异不显著 ($P > 0.05$)。从垂直分布看, SMBN 含量随土层深度增加基本呈降低趋势, 且主要集中在 0—5 cm 土壤表层。

2.5 封育年限与土壤各氮组分间的相关分析

相关分析表明(表 1), 在 0—5、5—10 cm 土层, 封育年限与 LFON 呈极显著 ($P < 0.01$) 正相关关系, 与

0—50 cm 土层 LFONR、PONR 呈极显著或显著 ($P < 0.05$) 正相关关系, 而与 10—50 cm 土层其余指标相关不显著 ($P > 0.05$)。说明 0—10 cm 土层 LFON 及 0—50 cm 土层 LFONR、PONR 对封育年限响应较为敏感, 且封育时间越长越利于其含量的积累。

表 1 封育年限与伊犁绢蒿荒漠土壤不同指标的相关性

Table 1 Correlation between enclosing year and different index on soil in *S. transiliense* desert

土层深度 Soil depth/cm	TN	LFON	LFONR	PON	PONR	SMBN	SMBNR
0—5	0.026	0.738**	0.500	0.344	0.263	0.545	0.525
5—10	-0.274	0.806**	0.565	0.350	0.293	-0.155	0.038
10—20	-0.522	0.336	0.552	0.256	0.436	-0.292	0.122
20—30	-0.195	0.254	0.288	0.348	0.393	0.113	0.171
30—50	-0.448	0.081	0.426	-0.322	0.326	0.130	0.347
0—50	-0.170	0.156	0.348**	0.057	0.260*	0.057	0.161

注: TN, 土壤全氮; LFON, 轻组有机氮; LFONR, 轻组有机氮分配比例; PON, 颗粒有机氮; PONR, 颗粒有机氮分配比例; SMBN, 土壤微生物生物量氮; SMBNR, 土壤微生物生物量氮分配比例。* 表示相关性显著 ($P < 0.05$), ** 表示相关性极显著 ($P < 0.01$)。

Note: TN, soil total nitrogen; LFOC, light fraction organic nitrogen; LFONR, light fraction organic nitrogen distribution ratio; PON, particulate organic nitrogen; PONR, particulate organic nitrogen distribution ratio; SMBN, soil microbial biomass nitrogen; SMBNR, soil microbial biomass nitrogen distribution ratio. ** and * indicate significant correlation at 0.01 and 0.05 levels, respectively.

3 讨论

3.1 土壤全氮对封育年限的响应

土壤全氮作为衡量土壤肥力的主要指标之一, 反映土壤氮素的基础肥力^[21], 是影响草地植物群落组成及多样性的关键生态因子^[22], 同时温度、降水量、土壤特性、土地利用方式、植被特征及人类干扰程度等均会

对其含量产生较大影响^[13]。如封育 7 a 的科尔沁退化草甸草地^[12] 土壤 TN 含量增加, 但不显著; 封育 10 a 的祁连山东段灌丛草甸^[23] 及封育 3 年的新疆蒿类荒漠^[24] 土壤 TN 显著增加; 但在坎特伯雷高原研究发现围封对草地土壤氮含量影响较小^[25]。本研究中, 随封育年限增加, 中度退化的伊犁绢蒿荒漠 0—50 cm 土层 TN 含量呈“降—升”趋势, 与李强等^[26] 认为围封后总

氮储量先降低后增加的结果相一致;至封育 11 a 各土层 TN 与对照相比仍呈现降低,但高于封育 4 a 处理;可能是由于封育后伊犁绢蒿荒漠草地一年生草本植物角果藜 (*Ceratocarpus arenarius*) 和猪毛菜 (*Salsola collina*) 增多,根系生长加速,对全氮吸收量增大,到封育中期,多年生伊犁绢蒿和木地肤生长需吸收土壤氮素,但地上凋落物有机质腐殖化程度较弱,不能及时补充土壤所需,致使封育初期全氮降低;而封育后期土壤全氮增加,可能是由于退化草地围封后期,草地群落结构优化,回归土壤的凋落物增加,根系周转向土壤输入营养,改善了土壤环境^[27],同时受土壤质地、植被类型封育年限本身以及研究区水热条件等综合因素的影响^[28],也使得全氮含量发生不稳定变化。

3.2 土壤颗粒氮对封育年限的响应

颗粒氮 (PON) 是土壤有机氮中的非稳定性部分,对认识土壤氮稳定性具有重要意义^[8],土壤 PONR 则反映了土壤中具有非保护结构有机质的相对数量^[29],且比例越高,土壤中氮素不稳定部分及易分解氮素则越多^[30]。本研究发现,随封育年限增加,0—20 cm 土层 PON 含量基本呈“升—降”趋势,20—30 cm 土层一直增加,30—50 cm 则呈“降—升—降”趋势^[31]。0—50 cm 土壤 PONR 含量的变化趋势与 PON 含量变化基本相同。随土层深度的增加,PONR 呈“降—升”趋势,且 5—10 cm 土层最低。出现这一结果,可能是由于封育使得地表凋落物增多,土壤上层颗粒物含量增加;至封育后期,植被生长恢复后,自身所需促进了对土壤养分的吸收和利用^[32],使得颗粒氮含量降低;也可能是由于不同封育年限植被组成类型、根的形态和构型的不同,导致根系在土壤中的分布范围不同而对土壤养分的吸收效率有差异^[32]。同时,封育后蒿类半灌木地上部分恢复生长,根系吸收氮素增加,土壤有机氮不断转化为植被生长所需无机氮,使得土壤深层颗粒有机质减少;当封育时间延长,植物残体进入土壤,提高了土壤颗粒有机氮的分配比例^[33],促使颗粒氮含量增加;5—10 cm 土层较低比例,则可能与土壤有机质中非物理结合组分及土壤孔隙度较小有关^[34]。

3.3 土壤轻组氮对封育年限的响应

土壤轻组有机质 (LFOM) 是指土壤中小于一定密度 ($1.6 \sim 2.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) 的、相对新鲜且分解程度较轻的有机残体所组成的有机质,其组成成分易于降解,且缺乏土壤矿物的保护,能够体现对外界环境变化的“敏感性”^[35]。在土壤中,轻组组分虽只占土壤质量的一小部分,但轻组氮浓度明显高于全土氮浓度^[15],且土壤轻组氮能够在全土碳氮变化之前,反映土壤的微小

变化^[36]。有研究^[15]认为,轻度放牧有助于轻组氮的积累;但陈银萍等^[37]研究发现,沙漠化草地围封后,轻组氮储量较长期放牧地增加 164.00%,且围封恢复草地 0—10 cm 土层轻组氮含量最高。本研究发现,随封育年限增加,5—10 cm 土层轻组氮含量持续增长,且增幅最大,10—50 cm 土层呈“增加—降低”趋势,并在封育前期或封育中期较高;封育后 0—20 cm 土层 LFON 均显著增加,但封育年限对 20—50 cm 土层影响不显著;0—50 cm 土层 LFONR 随封育年限增加基本呈“升—降”趋势;但随土层深度逐渐增加,LFONR 呈“降—升”趋势,且 LFONR 在 5—10 和 10—20 cm 土层较低。退化荒漠草地围封后,表层地下生物量较底层积累快,而到 10—50 cm 土层,植被返还的轻组氮高于深层根系所需;随封育年限增加,根系增多,地下生物量所需轻组氮高于地表腐殖层所转化的量,再加上根系周围水分增加,致使土壤孔隙度减小,轻组氮也随之降低;也可能是由于较多的凋落物与细根积累在土壤表层,所以其表层轻组有机组分较下层丰富^[15]。

3.4 土壤微生物生物量氮对封育年限的响应

土壤微生物生物量氮 (SMBN) 是土壤有机氮组中最活跃的部分,对外界环境条件变化十分敏感^[8]。石羊河下游次生草地植被恢复 31 a 的过程中,植被类型减少,土壤微生物生物量氮呈“波动式下降—波动式上升—稳定”的趋势^[38]。也有研究发现,退化草地经 5 a 围封后,土壤微生物量氮含量显著高于自由放牧地,且 0—10、10—20 cm 土层分别显著提高了 30.50%、44.14%^[39]。本研究发现,随封育年限增加,0—5、10—20 cm 土层 SMBN 含量均呈“降—升”的趋势;0—5 cm 土层 SMBN 含量封育 11 a 显著高于封育 1 a, SMBNR 仅在 5—10、20—30 cm 土层,呈“增—降”趋势,封育 4 a 达到最大值。封育 4 a、封育 11 a 的 SMBN 随着土壤深度的加深,呈“降—升”趋势,表层最高。这可能是由于围封初期,地表枯落物阻隔了地表通气量和水分的下渗,给分布于表层的土壤微生物提供了适宜的活动环境,土壤微生物的量增加,所以 0—5、10—20 cm 土层 SMBN 含量降低;而封育 4 a 时,土壤水热条件最为适宜微生物的繁殖和生长,而后便随地表植被的蒸腾和根系对氮素的吸收使得微生物可利用 SMBN 的量减少,随之微生物的量也降低;由于封育年限增加,全氮呈降低趋势,而土壤微生物生物量氮与全氮间呈正相关关系^[40],致使 SMBN 随之减少;当微生物活动减弱后,封育年限继续延长,又促使了 SMBN 的积累,含量增加;随着封育年限的延长,微生物与其可利用的氮又进行能量的循环交换,所以

SMBN 在较小的时间尺度里可以指示土壤质量变化,这也证实了土壤微生物量活性改善,退化草地得到了一定的恢复作用^[41]。

4 结论

1) 封育后 0—50 cm 各土层全氮含量呈现降低,其中 5—20 和 30—50 cm 土层分别显著降低 31.19%~52.42% 和 46.24%~58.55% ($P < 0.05$),且至封育 11 a 土壤全氮仍未得以恢复。

2) 封育对 0—50 cm 土层颗粒氮含量影响不显著 ($P > 0.05$),但封育 4 a 处理显著增加了 5—10 和 20—30 cm 土层颗粒氮分配比例 ($P < 0.05$),且 5—10 cm

土层颗粒氮分配比例最小。

3) 封育后 0—50 cm 土层轻组氮含量及其分配比例均呈增加趋势,且 0—20 cm 土层轻组氮含量、0—50 cm 土层轻组氮分配比例增加。

4) 封育 11 a 后 0—5 cm 土层微生物生物量氮含量最高 ($102.81 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),显著高于封育 1 a 处理 ($P < 0.05$),而 5—10 和 20—30 cm 土层微生物生物量氮分配比例在封育 4 a 最高,显著高于对照及封育 1 a ($P < 0.05$)。

5) 0—10 cm 土层轻组氮含量及 0—50 cm 土层轻组氮分配比例、颗粒氮分配比例对封育响应敏感,且封育时间越长越利于其含量的积累或所占比重的增加。

参考文献 References:

- [1] 蒲宁宁.放牧强度对昭苏草甸草原土壤有机碳组分及其碳、氮特征的影响.乌鲁木齐:新疆农业大学硕士学位论文,2013.
Pu N N. Influence of grazing intensity on the soil organic carbon fractions and the carbon, nitrogen characteristic of meadow steppe in Zhaosu. Master Thesis. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [2] 钟华平,樊江文,于贵瑞,韩彬.草地生态系统碳蓄积的研究进展.草业科学,2005,22(1):4-11.
Zhong H P, Fan J W, Yu G R, Han B. The research progress of carbon storage in grassland ecosystem. Pratacultural Science, 2005, 22(1): 4-11. (in Chinese)
- [3] Lal R, Fausey N R, Eckert D J. Land use and soil management effects of emissions of radiatively active gases from two soils in Ohio. Soil Management and Greenhouse Effect. Florida: CRC Press, 1995: 41-59.
- [4] Qiu L P, Wei X R, Zhang X C, Chen J M. Ecosystem carbon and nitrogen accumulation after grazing exclusion semiarid grassland. PLoS One, 2013, 8(1): e55433-e55440.
- [5] Reich P B, Hobbie S E, Lee T, Ellsworth D S, West J B, Tilman D, Knops J M H, Naeem S, Trost J. Nitrogen limitation constrains sustainability of ecosystem response to CO_2 . Nature, 2006, 440: 922-925.
- [6] Christensen B T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. European Journal of Soil Science, 2001, 52: 345-353.
- [7] Janzen H H, Campbell C A, Brandt S A, Lafond G P, Townley-Smith L. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(6): 1799-1805.
- [8] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法.北京:中国农业科技出版社,2000.
Lu R K. Analysis Method of Soil Agricultural Chemical. Beijing: China Agriculture Science and Technology Press, 2000. (in Chinese)
- [9] 赵勇钢,赵世伟,华娟,张扬.半干旱典型草原区封育草地土壤结构特征研究.草地学报,2009,17(1):106-112.
Zhao Y G, Zhao S W, Hua J, Zhang Y. Soil structural properties of enclosed steppe in the semiarid area. Acta Agrestia Sinica, 2009, 17(1): 106-112. (in Chinese)
- [10] 李建平,谢应忠.封育对黄土高原天然草地深层土壤碳、氮储量的影响.草业科学,2016,33(10):1981-1988.
Li J P, Xie Y Z. Effect of natural grassland enclosure on carbon and nitrogen storage in deep soil in the Loess Plateau of China. Pratacultural Science, 2016, 33(10): 1981-1988. (in Chinese)
- [11] 高超,张月学,陈积山,邸桂俐,潘多锋,王建丽,康昕彤,张强,钟鹏.松嫩平原苜蓿和羊草栽培草地土壤氮素动态分析.草业科学,2015,32(4):501-507.
Gao C, Zhang Y X, Chen J S, Di G L, Pan D F, Wang J L, Kang X T, Zhang Q, Zhong P. Analysis of soil nitrogen dynamics of *Medicago sativa* and *Leymus chinensis* pasture in the Songnen Plain. Pratacultural Science, 2015, 32(4): 501-507. (in Chinese)
- [12] 曹成有,邵建飞,蒋德明,崔振波.围栏封育对重度退化草地土壤养分和生物活性的影响.东北大学学报:自然科学版,2011,32(3):427-430,451.
Cao C Y, Shao J F, Jiang D M, Cui Z B. Effects of fence enclosure on soil nutrients and biological activities in highly degraded

- grasslands. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2011, 32(3): 427-430, 451. (in Chinese)
- [13] 董乙强, 孙宗玖, 安沙舟, 杨静. 禁牧对中度退化伊犁绢蒿荒漠草地土壤养分的影响. 草业科学, 2016, 33(8): 1460-1468.
Dong Y Q, Sun Z J, An S Z, Yang J. Effect of grazing exclusion on soil nutrition in moderate degraded desert grassland of *Seriphidium transiliense*. Pratacultural Science, 2016, 33(8): 1460-1468. (in Chinese)
- [14] 孙宗玖, 李培英, 杨合龙, 张向向. 短期放牧对昭苏草甸草原土壤轻组及颗粒碳氮的影响. 水土保持学报, 2014, 28(5): 147-152.
Sun Z J, Li P Y, Yang H L, Zhang X X. Effects of short-period grazing on soil light fraction and particulate carbon and nitrogen in Zhaosu meadow steppe. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(5): 147-152. (in Chinese)
- [15] 王合云, 董智, 郭建英, 李红丽, 李锦荣, 陈新闯. 不同放牧强度对大针茅草原土壤全土及轻组碳氮储量的影响. 水土保持学报, 2015, 29(6): 101-106, 207.
Wang H Y, Dong Z, Guo J Y, Li H L, Li J R, Chen X C. Effects of different grazing intensities on total and light fraction organic carbon and nitrogen storages of soil in *Stipa grandis* steppe. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(6): 101-106, 207. (in Chinese)
- [16] 杨静, 孙宗玖, 杨合龙, 董乙强. 封育年限对蒿类荒漠土壤有机碳组分及其碳、氮特征的影响. 草业科学, 2016, 33(4): 564-572.
Yang J, Sun Z J, Yang H L, Dong Y Q. Effects of enclosure period on carbon and nitrogen characteristics and components of soil organic carbon in *Artemisia* desert. Pratacultural Science, 2016, 33(4): 564-572. (in Chinese)
- [17] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. Soil Science Society of America, 1992, 56(3): 777-783.
- [18] 张金波, 宋长春, 杨文燕. 三江平原沼泽湿地开垦对表土有机碳组分的影响. 土壤学报, 2005, 42(5): 857-859.
Zhang J B, Song C C, Yang W Y. Effect of cultivation on organic carbon composition in a histosol in the Sanjiang plain, China. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(5): 857-859. (in Chinese)
- [19] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 肖和艾. 土壤微生物生物量测定方法及其应用. 北京: 气象出版社, 2006: 54-78.
Wu J S, Lin Q M, Huang Q Y, Xiao H A. The determination Method of Soil Microbial Biomass and its Application, Beijing: China Meteorological Press, 2006: 54-78. (in Chinese)
- [20] Joergense R G, Brookes P C. Ninhydrin-reactive nitrogen measurements of microbial biomass in 0.5M K₂SO₄ soil extracts. Soil Biology Biochemical, 1990, 22(8): 1023-1027.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 39-40.
Bao S D. Analysis of Soil Agrochemical. Third edition, Beijing: China Agriculture Press, 2000: 39-40. (in Chinese)
- [22] 杨丽霞, 陈少锋, 安娟娟, 赵发珠, 韩新辉, 冯永忠, 杨改河, 任广鑫. 陕北黄土丘陵区不同植被类型群落多样性与土壤有机质、全氮关系研究. 草地学报, 2014, 22(2): 291-298.
Yang L X, Chen S F, An J J, Zhao F Z, Han X H, Feng Y Z, Yang G H, Ren G X. Relationships among community diversity and soil organic matter, total nitrogen under different vegetation types in the gully region of loess region. Acta Agrestia Sinica, 2014, 22(2): 291-298. (in Chinese)
- [23] 曹静娟. 祁连山草地管理方式变化对土壤有机碳、氮库的影响. 兰州: 甘肃农业大学硕士学位论文, 2010.
Cao J J. Effects of grassland ganagement changes on soil organic carbon and nitrogen pools in the Qilian mountains. Master Thesis. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2010. (in Chinese)
- [24] 孙宗玖, 安沙舟, 段娇娇. 围栏封育对新疆蒿类荒漠草地植被及土壤养分的影响. 干旱区研究, 2009, 26(6): 877-882.
Sun Z J, An S Z, Duan J J. Effect of enclosure on vegetation and soil nutrient of sagebrush desert grassland in Xinjiang. Arid Zone Research, 2009, 26(6): 877-882. (in Chinese)
- [25] Basher L R, Lynn I H. Soil changes associated with the cessation of grazing at two sites in the Canterbury high country. New Zealand Journal of Ecology, 1996, 20: 179-189.
- [26] 李强, 宋彦涛, 周道玮, 王敏玲, 陈笑莹. 围封和放牧对退化盐碱草地土壤碳、氮、磷储量的影响. 草业科学, 2014, 31(10): 1811-1819.
Li Q, Song Y T, Zhou D W, Wang M L, Chen X Y. Effects of fencing and grazing on soil carbon, nitrogen, phosphorus storage in degraded alkali-saline grassland. Pratacultural Science, 2014, 31(10): 1811-1819. (in Chinese)
- [27] 单贵莲, 徐柱, 宁发, 焦燕. 围封年限对典型草原植被与土壤特征的影响. 草业学报, 2009, 18(2): 3-10.
Shan G L, Xu Z, Ning F, Jiao Y. Influence of seasonal enclosure on plant and soil characteristics in typical steppe. Acta Pratacultural Sinica, 2009, 18(2): 3-10. (in Chinese)
- [28] 苗娟, 周传艳, 李世杰, 闫俊华. 不同林龄云南松林土壤有机碳和全氮积累特征. 应用生态学报, 2014, 25(3): 625-631.

- Miao J, Zhou C Y, Li S J, Yan J H. Accumulation of soil organic carbon and total nitrogen in *Pinus yunnanensis* forests at different age stages. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(3): 625-631. (in Chinese)
- [29] Camberdella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen dynamics of soil organic matter fractions from cultivated grassland soils. *Soil Science Society of American Journal*, 1994, 58: 123-130.
- [30] Hassink J. Decomposition rate constants of size and density fractions of soil organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, 1995, 59: 1631-1635.
- [31] 吴建国, 艾丽. 土壤颗粒组分中氮含量及其与海拔和植被的关系. *林业科学*, 2008, 44(6): 10-19.
Wu J G, Ai L. Nitrogen content in soil particulate fraction and its relationship to the elevation and the vegetation. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(6): 10-19. (in Chinese)
- [32] 郑云玲. 封育对典型草原牧草及土壤养分的恢复效应. 呼和浩特: 内蒙古农业大学硕士学位论文, 2008.
Zheng Y L. Recovery effects of forages and soil nutrients in typical steppe by means of closed fencing. Master Thesis. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2008. (in Chinese)
- [33] 姬强. 土壤颗粒态有机碳及其活性对不同耕作措施的影响. 杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2012.
Ji Q. Responses of soil particulate organic carbon and its activity to different tillage practices. Master Thesis. Yangling: Northwest Agriculture & Forestry University, 2012. (in Chinese)
- [34] Gregorich E G, Beare M H, McKim U F, Skjemstad J O. Chemical and biological characteristics of physically uncomplexed organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70: 967-974.
- [35] Six J, Conant R T, Paul E A. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 2002, 241: 151-176.
- [36] 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜. 杉木纯林与常绿阔叶林土壤活性有机碳库的比较. *北京林业大学学报*, 2006, 28(5): 1-6.
Wang Q K, Wang S L, Feng Z W. Comparison of active soil organic carbon pool between Chinese fir plantations and evergreen broadleaved forests. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28(5): 1-6. (in Chinese)
- [37] 陈银萍, 李玉强, 赵学勇, 罗永清, 尚雯. 放牧与围封对沙漠化草地土壤轻组及全土碳氮储量的影响. *水土保持学报*, 2010, 24(4): 182-186.
Chen Y P, Li Y Q, Zhao X Y, Luo Y Q, Shang W. Light fraction and total organic carbon and nitrogen stores in desertified sandy grassland soil as affected by grazing and livestock exclusion. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(4): 182-186. (in Chinese)
- [38] 王理德, 柴晓虹, 姚拓, 王多泽, 徐先英, 孙广正, 陈龙, 张涛. 石羊河下游绿洲边缘次生草地自然恢复过程及微生物特性的研究. *草原与草坪*, 2015, 35(6): 14-21.
Wang L D, Chai X H, Yao T, Wang D Z, Xu X Y, Sun G Z, Chen L, Zhang T. Studying on vegetation restoration and soil microbial characteristics on secondary grassland in the doestream of Shiyang River. *Grassland and Turf*, 2015, 35(6): 14-21. (in Chinese)
- [39] 牛得草, 江世高, 秦燕, 张宝林, 曹格图, 傅华. 围封与放牧对土壤微生物和酶活性的影响. *草业科学*, 2013, 30(4): 528-534.
Niu D C, Jiang S G, Qin Y, Zhang B L, Cao G T, Fu H. Effects of grazing and fencing on soil microorganisms and enzymes activities. *Pratacultural Science*, 2013, 30(4): 528-534. (in Chinese)
- [40] 吴永华, 钟芳. 利用方式对兰州南部山区林草地土壤特性的影响. *草业科学*, 2014, 31(5): 803-810.
Wu Y H, Zhong F. Effects of utilization types on soil properties of forest-grassland in Lanzhou South Region. *Pratacultural Science*, 2014, 31(5): 803-810. (in Chinese)
- [41] 姬万忠, 王庆华. 补播对天祝高寒退化草地植被和土壤理化性质的影响. *草业科学*, 2016, 33(5): 886-890.
Ji W Z, Wang Q H. Effect of over-seeding on plant community and soil physical and chemical properties of degraded grassland in Tianzhu County. *Pratacultural Science*, 2016, 33(5): 886-890. (in Chinese)

(责任编辑 苟燕妮)