

青藏高原人工草地土壤可溶性氮组分与植被生产力动态变化过程

刘攀^{1,3} 王文颖^{3*} 周华坤² 毛旭锋¹ 刘艳方³

¹青海师范大学地理科学学院, 西宁 810008; ²中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810008; ³青海师范大学生命科学院, 西宁 810008

摘要 氮作为人工草地最为重要的限制性因子, 在时间、空间上分布不均匀, 且在形态上存在差异, 与种植方式及地上净初级生产力(*ANPP*)存在相关关系。该研究以青海省同德牧场的无芒雀麦(*Bromus inermis*)、老芒麦(*Elymus sibiricus*)、垂穗披碱草(*E. nutans*)、西北羊茅(*Festuca ryloviana*)、中华羊茅(*F. sinensis*)、青海扁茎早熟禾(*Poa pratensis* var. *anceps* ‘Qinghai’)、冷地早熟禾(*P. crymophila*)、星星草(*Puccinellia tenuiflora*) 8种牧草单播人工草地为研究对象, 分析人工草地土壤可溶性氮库季节和年际动态变化过程及与*ANPP*之间的相互关系。该人工草地种植于2013年, 在2014–2016年(二龄、三龄和四龄)生长季6–9月测定土壤铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、可溶性有机氮(*SON*)和可溶性总氮(*STN*)含量, 每年9月初测定*ANPP*, 所有样地没有施肥, 每年9月中旬刈割, 留茬5 cm。研究发现: (1) 8种禾本科牧草的*ANPP*在329.67–794.67 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间, 其中垂穗披碱草为794.67 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 显著高于其他牧草。(2) 在二至四龄人工草地中, 土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、*SON*和*STN*含量均显著下降, 但 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量却显著增加。(3) 土壤可溶性氮以*SON*为主, 占*STN*的45.11%–88.76% (0–10 cm)和47.75%–88.18% (10–20 cm); 其次为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$, 占*STN*的5.81%–34.85% (0–10 cm)和6.08%–40.42% (10–20 cm); $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 最少仅3.41%–22.18% (0–10 cm)和3.09%–19.56% (10–20 cm)。(4) 非度量多维尺度分析(*NMDS*)结果显示, 随种植年限的增加, 不同禾本科牧草对0–10cm土壤可溶性氮影响趋于离散, 而对10–20 cm土壤的影响则相反, 且牧草对土壤可溶性氮含量的影响程度与土壤深度有关。(5) 相关性分析表明, 土壤*SON*、*STN*含量与人工草地*ANPP*呈正相关关系, 与无机氮(*IN*)含量呈负相关关系。综上所述, 三至四龄人工草地增施氮肥是维持草地生产力的关键因素。以上结果为更深入地了解青藏高原人工草地土壤可溶性氮动态变化及维持人工草地生产力和稳定性提供了科学依据。

关键词 人工草地; 土壤可溶性氮库; 土壤无机氮库; 青藏高原

刘攀, 王文颖, 周华坤, 毛旭锋, 刘艳方 (2021). 青藏高原人工草地土壤可溶性氮组分与植被生产力动态变化过程. 植物生态学报, 45, 00-00. DOI: 10.17521/cjpe.2020.0279

Dynamics of soil soluble nitrogen and plant productivity in artificial pastures on Qingzang Plateau

LIU Pan^{1,3}, WANG Wen-Ying^{3*}, ZHOU Hua-Kun², MAO Xu-Feng¹, and LIU Yan-Fang³

¹College of Geography Sciences, Qinghai Normal University, Xining 810008, China; ²Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008; and ³College of Life Sciences, Qinghai Normal University, Xining 810008, China

Abstract

Aims Nitrogen is the most limiting factor to artificial pastures. It is distributed unevenly in time and space, and has different forms, which are correlated with cultivation approaches and above-ground net primary productivity (*ANPP*). This study investigated the dynamics of soil nitrogen and productivity in artificial pastures of *Bromus inermis*, *Elymus sibiricus*, *E. nutans*, *Festuca ryloviana*, *F. sinensis*, *Poa pratensis*, *P. crymophila* and *Puccinellia tenuiflora* in pure speices cultivations in the Tongde farm of Qinghai Province. The dynamics of soil soluble nitrogen pools in each artificial pasture type and their relationships with *ANPP* were examined.

Methods The pastures were planted in 2013 without fertilizer application, and mowed to the level with 5 cm stubble in mid-September every year. The soil ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^-\text{-N}$), soluble organic nitrogen (*SON*) and soluble total nitrogen (*STN*) content were measured during growing seasons. *ANPP* was determined in September each year.

收稿日期Received: 2020-08-12 接受日期Accepted: 2020-11-22

基金项目: 国家自然科学基金(41761107)和第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0302)。Supported by the National Natural Science Foundation of China (41761107), and the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research (STEP) Program (2019QZKK0302).

* 通信作者Corresponding author (wangwy0106@163.com)

Important findings (1) The average ANPP across the eight pasture types ranged between 329.67–794.67 g·m⁻², with the ANPP of 794.67 g·m⁻² for the *E. nutans* significantly higher than other pasture types. (2) From the second to fourth year following planting, the content of soil NO₃⁻-N, SON and STN significantly decreased, but that of the NH₄⁺-N significantly increased. (3) SON accounted for the highest proportion of STN, varying between 45.11%–88.76% in the 0–10 cm soil layer and 47.75%–88.18% in the 10–20 cm soil layer, followed by NO₃⁻-N in ranges of 5.81%–34.85% (0–10 cm) and 6.08%–40.42% (10–20 cm), respectively; NH₄⁺-N had the least proportion at 3.41%–22.18% (0–10 cm) and 3.09%–19.56% (10–20 cm), respectively. (4) The non-metric multidimensional scale analysis (NMDS) shows that the temporal effect on soil soluble nitrogen content by different pasture types diverged for the 0–10 cm soil layer, but converged for the 10–20 cm soil layer, and that the effect of pasture types on soil soluble nitrogen content was related to soil depth. (5) Soil SON and STN contents were positively correlated with ANPP, and negatively with inorganic nitrogen content (IN). In summary, nitrogen fertilizer application is one of the key factors for maintaining the productivity of artificial pasture from three to four years. The above results provide a scientific basis for a more in-depth understanding of the dynamics of soil soluble nitrogen and the maintenance of productivity and stability of artificial pastures on the Qingzang Plateau.

Key words artificial pasture; soil soluble nitrogen pool; soil inorganic nitrogen pool; Qingzang Plateau

Liu P, Wang WY, Zhou HK, Mao XF, Liu YF (2021). Dynamics of soil soluble nitrogen and plant productivity in artificial pastures on Qingzang Plateau. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 45, 00-00. DOI: 10.17521/cjpe.2020.0279

青藏高原是我国主要的畜牧业基地,也是全球变化敏感区、生物多样性重点保护区和典型生态环境脆弱区(张中华等, 2018)。该区草地面积约为150万km², 占全国草地总面积的37.64%。退化草地面积约42.51万km², 占青藏高原草地总面积的28.34% (周华坤等, 2005; 周岐燃等, 2019)。其中“黑土型”退化草地面积约7.03万km², 占整个退化草地面积的16.54% (周华坤等, 2005)。多年研究表明: 重度退化草地恢复重建成人工草地是退化草地恢复的一种重要手段, 也是减轻天然草地放牧压力, 解决草畜季节不平衡的重要措施(王文颖等, 2016; 尚占环等, 2018), 目前人工草地优良禾本科牧草的筛选、建植技术等方面已有大量研究, 但禾本科牧草本身对土壤氮、磷营养需求方面的基础研究较为薄弱。尚不清楚土壤中除NH₄⁺-N和NO₃⁻-N外, 植物吸收利用的可溶性有机氮库大小及动态变化过程。这些禾本科牧草在吸收利用土壤无机氮的同时, 是否可以有效吸收土壤可溶性有机氮源。不同禾本科牧草在利用土壤氮限制性资源时, 是否在吸收形态、吸收时间和吸收空间上存在生态位分化? 回答这些科学问题, 首先要明确人工草地土壤无机氮库和可溶性有机氮库大小及动态变化特征。

氮作为草地生态系统最为重要的营养物质, 不仅是植物有机体蛋白质和核酸的重要组成元素, 也是生态系统净初级生产力的限制因子(Stanley Harpole & Tilman, 2007; 卢蒙, 2009; Li *et al.*, 2019; Somers *et al.*, 2019)。在氮的转化过程中, 植物起着

非常重要的作用, 植物主要通过从土壤中吸收氮促进生物量的累积, 同时在生长过程中向外分解和释放氮, 但不同物种氮的吸收速率、凋落物质量以及单位面积生物量存在显著差异, 直接制约着氮在生态系统内部的转化(Lin *et al.*, 2016; 马玉寿等, 2016; Pang *et al.*, 2019)。

可溶性总氮(STN)是指土壤中可以溶于水或盐溶液的氮, 包括可溶性有机氮(SON)和无机氮(IN)。土壤SON主要包括氨基酸、尿素、多胺等, 土壤无机氮主要包括NH₄⁺-N和NO₃⁻-N等。土壤STN是植物可直接吸收利用最重要的氮组分(Murphy *et al.*, 2000)。另外, 在土壤速效氮为限制因子的生态系统中, 生活在同一群落中的不同植物种对不同化学形态的氮吸收存在显著差异。如McKane等(2002)在北极苔原生态系统的研究证明: 氮作为该生态系统的限制性因子, 苔原植物在吸收土壤氮的时间、土层深度或化学形态上产生分化而共存, 这种生态位分化减少了植物对土壤氮的竞争, 首次提出植物群落物种组成与资源利用形式划分有关。更重要的是: 随着环境和物种组成的变化, 植物对不同氮源的利用能力会发生改变(Lipson & Näsholm, 2001; Miller *et al.*, 2007; Lambers *et al.*, 2008; 黄菊莹等, 2018)。因此, 植物在获取氮营养中的多元化是对目前陆地氮循环理解的一种挑战(Lipson & Näsholm, 2001; Jones *et al.*, 2005; 方运霆等, 2020)。如果高寒禾本科牧草在氮利用上存在差异, 依据资源生态位分化程度越高、种间竞争越小的原则, 从氮营养角度出

发为筛选合理的牧草混播组合提供理论基础, 可为高寒人工草地生态系统的可持续发展模式提供科学依据。

因此, 本试验以青藏高原8种禾本科牧草建植的人工草地为研究对象, 于2014–2016年生长季6–9月测定土壤IN库和SON库大小并分析季节和年际动态变化特征, 明晰牧草ANPP与土壤可溶性氮库之间的相关性, 为深入了解高寒牧草有机营养特征、揭示高寒牧草对土壤氮的获取策略、加深高寒人工草地生态系统氮循环提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究地区自然地理概况

本试验研究地点位于青海省海南藏族自治州同德县牧草良种繁殖场(35.25° N, 100.65° E), 位于同德巴滩地区, 地势平坦开阔, 平均海拔3 280 m, 属高原大陆性气候, 年降水量429.8 mm, 年平均气温0.2 °C, 年积温(≥ 0 °C) 1 503.0 °C, 牧草生长季活动积温1 309 °C。原生植被为温性草原, 主要由芨芨草(*Achnatherum splendens*)、异针茅(*Stipa aliena*)、固沙草(*Orinus thoroldii*)、风毛菊(*Saussurea japonica*)、紫菀(*Aster tataricus*)等组成, 土壤类型为暗栗钙土。

1.2 样地选设

本试验人工草地试验样地于2013年建植, 包括8种禾本科牧草单播样地, 分别为无芒雀麦(*Bromus inermis*)、老芒麦(*Elymus sibiricus*)、垂穗披碱草(*E. nutans*)、西北羊茅(*Festuca ryloviana*)、中华羊茅(*F. sinensis*)、青海扁茎早熟禾(*Poa pratensis* var. *anceps* ‘Qinghai’)、冷地早熟禾(*P. crymophila*)、星星草(*Puccinellia tenuiflora*)。每种牧草4个重复样地, 共计32个小样地。每个样地面积为3 m × 4 m, 随机分布, 各样地之间间隔1.5 m。各样地无施肥措施, 人工草地牧草9月中旬刈割, 留茬5 cm。2014、2015和2016年分别代表二龄、三龄和四龄人工草地。

1.3 取样与分析

2014、2015和2016年8月底, 每个样地用收割法测定地上生物量, 随机设置5个0.5 m × 0.5 m的样方, 将样方中的植被沿地表剪下, 所有收获的植物样品在70 °C的恒温箱中烘48 h后称质量。

2014–2016年生长季6–9月分别取土壤样品, 每

个样地随机收集3个土核(直径为5.0 cm), 每个土核分为0–10和10–20 cm两部分。同一样地同一深度采集的土壤混合成一个样。收集的土壤立即带到同德实验室过2 mm土筛, 移出砾石和根系, 称取32 g土壤加入80 mL 0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄溶液, 振荡1 h后用定量滤纸(15–20 μm)过滤, 将提取液置于50 mL离心管中, 保存于–20 °C冰箱内。同时用铝盒分0–10和10–20 cm取约30 g土样在105 °C烘箱烘8 h, 测定土壤质量含水量。采用连续流动分析仪(FUTURA, Alliance Instruments, Frépillon, France)测定土壤浸提液NH₄⁺-N、NO₃⁻-N含量。土壤IN含量为NH₄⁺-N和NO₃⁻-N含量之和。土壤STN含量采用碱性过硫酸钾氧化法测定(萧玉端, 2012)。SON含量为STN含量与土壤IN含量之差(赵满兴等, 2019)。

1.4 统计与分析

通过方差分析(ANOVA)和最小显著差异(LSD)法分析各处理土壤可溶性氮含量的差异显著性。土壤氮组分含量表示为算术平均值±标准误。以上分析均在Microsoft Excel 2007和SPSS 17.0上完成, 由OriginPro 8制图, 由R Studio 3.6.1做非度量多维尺度分析(NMDS)。NMDS的方法通过计算Bray-Curtis距离来比较同一龄期4种氮组分的离散程度, 这种统计方法可以在多维尺度上描述不同的禾本科牧草对土壤可溶性氮的影响程度。

2 结果

2.1 人工草地ANPP年际动态变化特征

不同种类、不同龄级人工草地地上生物量结果见图1。除垂穗披碱草人工草地外, 其余人工草地均在三龄达到最大地上生物量。不同种类人工草地3年平均地上生物量表现为垂穗披碱草(794.67 g·m⁻²) > 老芒麦(666.33 g·m⁻²) > 无芒雀麦(468.00 g·m⁻²) > 中华羊茅(389.67 g·m⁻²) > 星星草(371.33 g·m⁻²) > 西北羊茅(341.33 g·m⁻²) > 冷地早熟禾(329.67 g·m⁻²) > 扁茎早熟禾(309.67 g·m⁻²)。三龄西北羊茅、中华羊茅和冷地早熟禾地上生物量显著高于二、四龄, 其他处理均无显著性差异。

2.2 人工草地土壤可溶性氮含量动态变化特征

不同牧草单播人工草地土壤可溶性氮含量季节和年际动态变化特征见图2和图3。8种禾本科牧草人工草地土壤NH₄⁺-N平均含量(3年)为2.10–2.53 mg·kg⁻¹

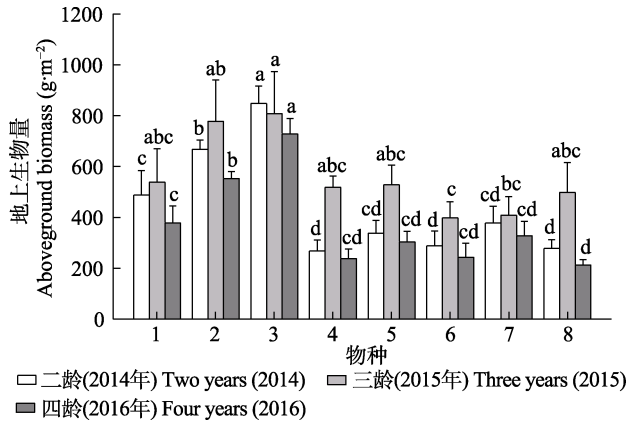


图1 青藏高原人工草地地上生物量动态变化特征(平均值+标准误)。1, 无芒雀麦; 2, 老芒麦; 3, 垂穗披碱草; 4, 西北羊茅; 5, 中华羊茅; 6, 青海扁茎早熟禾; 7, 星星草; 8, 冷地早熟禾。不同小写字母表示同一龄期不同物种地上生物量差异显著($p < 0.05$)。

Fig. 1 Dynamics of aboveground biomass in artificial pastures on Qingzang Plateau (mean + SE). 1, *Bromus inermis*; 2, *Elymus sibiricus*; 3, *E. nutans*; 4, *Festuca ryloviana*; 5, *Festuca sinensis*; 6, *Poa pratensis* var. *anceps* 'Qinghai'; 7, *Puccinellia tenuiflora*; 8, *Poa crymophila*. Different lowercase letters represent significant differences in aboveground biomass among different species of the same age ($p < 0.05$).

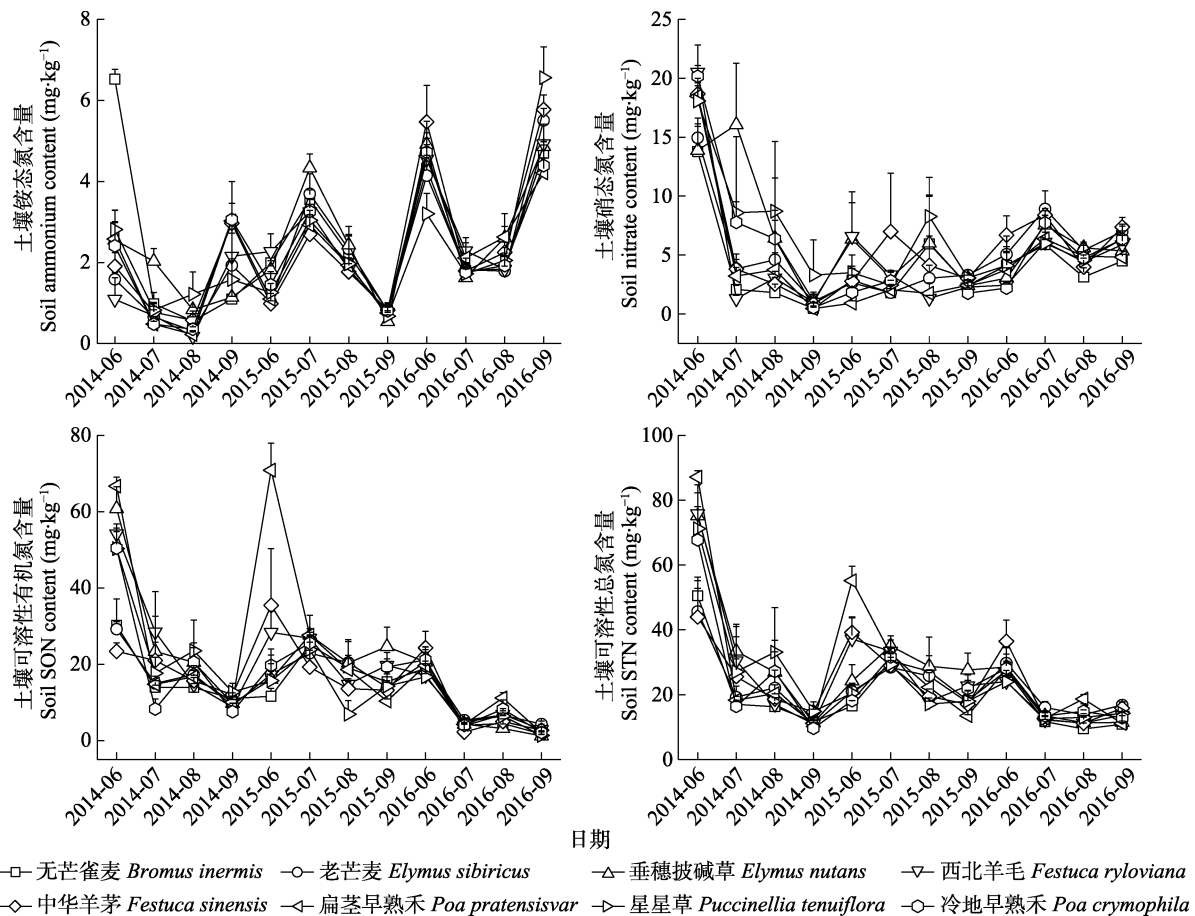


图2 青藏高原人工草地土壤可溶性氮动态变化特征(0-10 cm, 平均值+标准误)。

Fig. 2 Characteristics of the dynamics in soil soluble nitrogen in artificial pastures on Qingzang Plateau (0-10 cm, mean + SE). SON, soluble organic nitrogen; STN, soluble total nitrogen.

(0-10 cm)和0.11-6.27 mg·kg⁻¹ (10-20 cm), 各处理之间均无显著性差异。NO₃-N含量为3.96-6.73 mg·kg⁻¹ (0-10 cm)和4.99-8.45 mg·kg⁻¹ (10-20 cm), 其中中华羊茅(0-10 cm)和西北羊茅(10-20 cm)显著高于无芒雀麦处理组。SON含量为14.11-22.72 mg·kg⁻¹ (0-10 cm)和13.30-22.44 mg·kg⁻¹ (10-20 cm), 其中扁茎早熟禾(0-10cm)和西北羊茅(10-20 cm)显著高于无芒雀麦处理组。STN含量为20.13-27.72 mg·kg⁻¹ (0-10 cm)和20.18-33.35 mg·kg⁻¹ (10-20 cm), 其中无芒雀麦显著低于老芒麦(0-10 cm)和中华羊茅(10-20 cm)处理组。

二、三、四龄人工草地所有处理土壤NH₄⁺-N平均含量分别为1.55、1.90、3.40 mg·kg⁻¹ (0-10 cm)和1.92、1.67、2.84 mg·kg⁻¹ (10-20 cm), 呈增长趋势。相较于二龄, 四龄人工草地土壤NH₄⁺-N提高了119.35% (0-10 cm)和47.92% (10-20 cm)。土壤NO₃-N平均含量分别为7.32、3.29、5.40 mg·kg⁻¹ (0-10 cm)和14.98、3.16、4.93 mg·kg⁻¹ (10-20 cm),

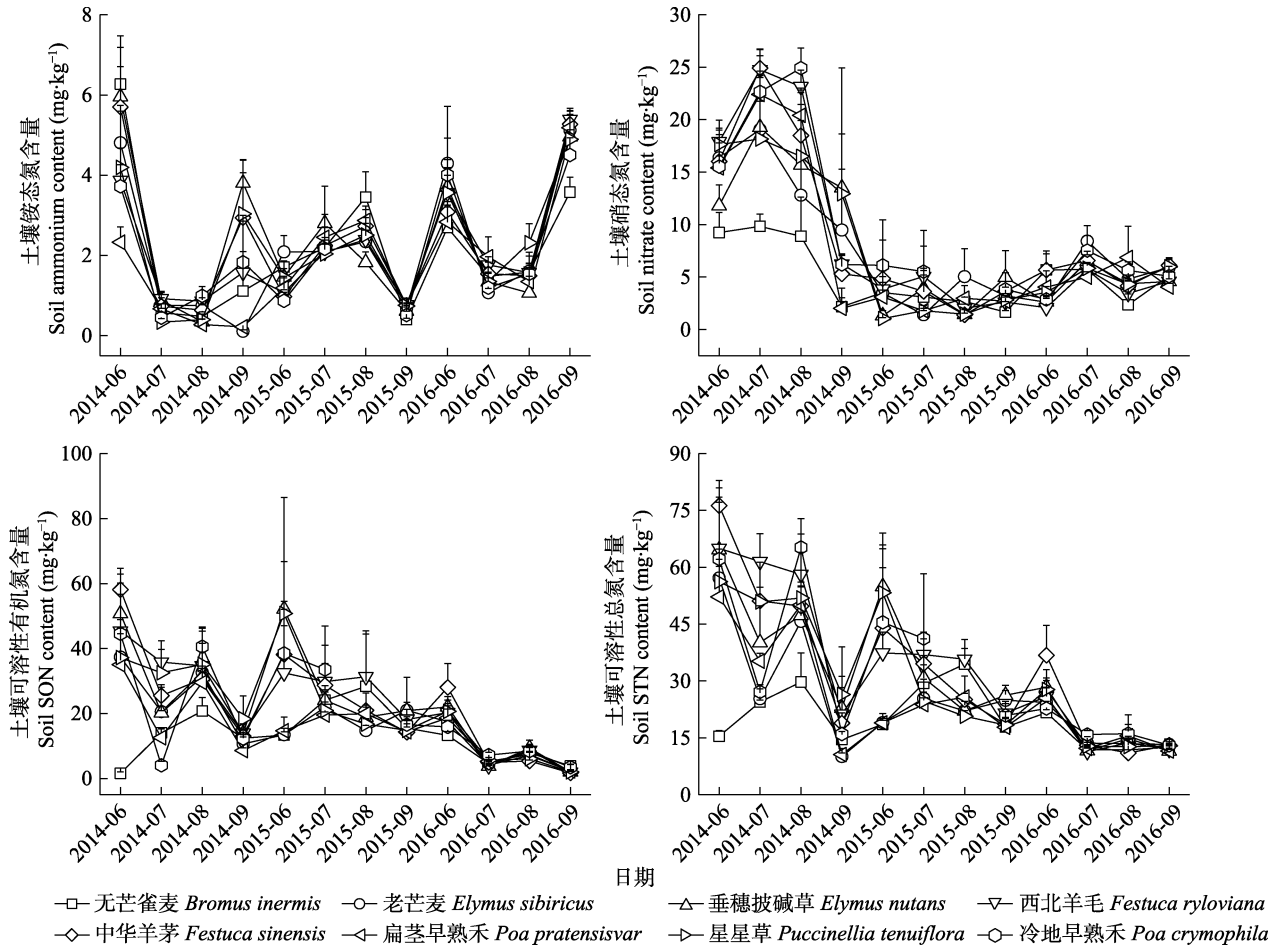


图3 青藏高原人工草地土壤可溶性氮动态变化特征(10–20 cm, 平均值+标准误)。

Fig. 3 Characteristics of the dynamics in soil soluble nitrogen in artificial pastures on Qingzang Plateau (10–20 cm, mean + SE). SON, soluble organic nitrogen; STN, soluble total nitrogen.

相较于二龄人工草地, 四龄人工草地土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量下降了26.23% (0–10 cm)和67.09% (10–20 cm); 土壤SON平均含量分别为22.86、21.23、8.18 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (0–10 cm)和26.05、24.12、8.60 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (10–20 cm), 相较于二龄人工草地, 四龄人工草地土壤SON含量下降64.22% (0–10 cm)和66.99% (10–20 cm); 土壤STN平均含量30.67、25.64、16.92 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (0–10 cm)和40.72、28.95、16.38 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (10–20 cm), 相较于二龄人工草地, 四龄人工草地土壤STN下降了44.83% (0–10 cm)和59.77% (10–20 cm)。从整体趋势上看, 随着种植年限的增加, 土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量呈上升趋势, 土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、SON和STN含量呈下降趋势, 深层土壤下降最为显著。

2.3 人工草地土壤可溶性氮组分占比

由表1可以看出, 在0–10 cm土层人工草地土壤可溶性氮以SON为主, 占STN的45.11%–88.76%; 其次为 $\text{NO}_3\text{-N}$ 占STN的5.81%–34.85%; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 最少

仅3.41%–22.18%。二龄和三龄人工草地土壤SON含量相较于IN含量, 占有绝对的优势; 而四龄人工草地土壤中IN与SON含量几乎持平。种植禾本科牧草对0–10 cm土层各可溶性氮组分占比存在一定的影响。四龄人工草地土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 占STN的17.34%–22.18%, 较前两年均有显著的提高, 其中西北羊茅草地土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量最高; 而前两年的土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量仅为3.41%–9.22%, 其中西北羊茅草地占比最低, 无芒雀麦草地占比最高。从纵向时间尺度分析, 种植禾本科牧草随着龄级增加, 土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 占比逐年增加; $\text{NO}_3\text{-N}$ 占比呈先下降后上升的趋势, 三龄人工草地最低, 四龄人工草地最高; 而土壤SON占比二龄和三龄人工草地均处于绝对优势, 在四龄人工草地SON占比下降。

在10–20 cm土层, 种植8种禾本科牧草后土壤可溶性氮同样以SON为主, 占STN的47.75%–88.18%; 其次为 $\text{NO}_3\text{-N}$ 占6.08%–40.42%; 铵态氮最

表1 青藏高原人工草地土壤无机氮(IN)与可溶性有机氮(SON)含量的比例
Table 1 Proportion of soil inorganic nitrogen (IN) and soluble organic nitrogen (SON) in artificial pastures on Qingzang Plateau

处理 Treatment	时间 Time (a)	0–10 cm 土层 0–10 cm soil layer				10–20 cm 土层 10–20 cm soil layer			
		铵态氮/ 可溶性总氮 NH ₄ ⁺ -N/STN (%)	硝态氮/ 可溶性总氮 NO ₃ ⁻ -N/STN (%)	无机氮/ 可溶性总氮 IN/STN (%)	可溶性有机氮/ 可溶性总氮 SON/STN (%)	铵态氮/ 可溶性总氮 NH ₄ ⁺ -N/STN (%)	硝态氮/ 可溶性总氮 NO ₃ ⁻ -N/STN (%)	无机氮/ 可溶性总氮 IN/STN (%)	可溶性有机氮/ 可溶性总氮 SON/STN (%)
无芒雀麦 <i>Bromus inermis</i>	2	8.53	18.83	27.36	72.64	10.62	34.97	45.59	54.41
	3	9.22	14.06	23.28	76.72	7.76	10.95	18.71	81.29
	4	21.31	29.70	51.01	48.99	16.16	32.65	48.80	51.20
老芒麦 <i>Elymus sibiricus</i>	2	4.11	25.46	29.58	70.42	4.02	30.94	34.96	65.04
	3	8.41	11.57	19.98	80.02	7.88	14.37	22.25	77.75
	4	17.34	34.52	51.85	48.15	18.68	33.57	52.25	47.75
垂穗披碱草 <i>E. nutans</i>	2	4.76	22.10	26.86	73.14	5.59	31.63	37.22	62.78
	3	7.9	15.45	23.35	76.65	4.99	8.68	13.66	86.34
	4	21.61	33.28	54.89	45.11	17.63	26.96	44.59	55.41
西北羊茅 <i>Festuca rylovi- ana</i>	2	3.41	21.63	25.03	74.97	3.69	34.93	38.61	61.39
	3	7.3	12.14	19.44	80.56	4.80	10.28	15.08	84.92
	4	22.18	30.79	52.98	47.02	19.56	25.19	44.75	55.25
中华羊茅 <i>F. sinensis</i>	2	5.91	28.37	34.28	65.72	4.87	33.10	37.97	62.03
	3	5.99	16.15	22.14	77.86	5.49	11.04	16.53	83.47
	4	20.13	34.85	54.98	45.02	15.41	30.43	45.85	54.15
青海扁茎早熟禾 <i>Poa pratensis</i> var. <i>anceps</i> 'Qinghai'	2	4.06	18.54	22.59	77.41	3.09	40.42	43.51	56.49
	3	5.42	5.81	11.24	88.76	8.43	12.23	20.66	79.34
	4	20.12	29.03	49.16	50.84	17.48	30.74	48.23	51.77
星星草 <i>Puccinellia tenuiflora</i>	2	4.33	27.73	32.06	67.94	4.32	33.36	37.68	62.32
	3	8.18	20.37	28.55	71.45	5.74	6.08	11.82	88.18
	4	21.18	32.90	54.09	45.91	18.33	29.73	48.07	51.93
冷地早熟禾 <i>Poa crymophila</i>	2	5.07	29.05	34.12	65.88	4.19	40.99	45.18	54.82
	3	7.70	8.96	16.65	83.35	3.29	14.35	17.65	82.35
	4	18.46	30.38	48.84	51.16	18.36	29.47	47.83	52.17

百分数为各处理下土壤IN和SON与可溶性总氮(STN)的比值, 且每一龄期比值均为取样期的平均值。
The ratios of soil IN and SON to soluble total nitrogen (STN) for each pasture type are shown as percentage, and the ratios for each age are the averages of the sampling period.

少3.09%–19.56%。三龄人工草地土壤SON含量, 占绝对优势; 而二龄和四龄人工草地则相反(老麦芒除外)。四龄人工草地土壤NH₄⁺-N占STN的15.41%–19.56%, 其中西北羊茅土壤NH₄⁺-N占比最高, 较前两年显著提高。从纵向时间角度分析, 种植禾本科牧草随着时间年限增加, 土壤NH₄⁺-N占比逐年增加; NO₃⁻-N占比呈先下降后上升的趋势; 而土壤SON占比在二龄时处于绝对优势。

2.4 种植不同禾本科牧草对土壤可溶性氮的影响

种植不同禾本科牧草对土壤可溶性氮含量的影响如图4所示。NMDS结果显示, 其压力系数在各个年份分析中均小于0.2, 这说明其结果真实可靠。人工草地从二到四龄, 随着种植年限的增加, 0–10 cm 土层4种土壤可溶性氮含量之间的差距越来越大,

表明种植不同禾本科牧草对表层土壤可溶性氮含量的影响随着种植年限的增加趋于不同。在10–20 cm 土层, 随着种植年限的增加, 4种可溶性氮含量差距越来越小, 表明种植不同禾本科牧草对10–20 cm 土层土壤可溶性氮含量的影响趋于一致。种植不同禾本科牧草对土壤(0–10和10–20 cm)可溶性氮含量存在差异, 说明种植不同牧草对土壤可溶性氮含量的影响程度与土壤深度有关。

2.5 人工草地土壤可溶性氮组分与牧草ANPP相关性分析

人工草地土壤可溶性氮组分含量与牧草ANPP相关性见表2。在0–10 cm 土层中, 西北羊茅、冷地早熟禾土壤NO₃⁻-N含量与ANPP呈显著负相关关系。而在10–20 cm 土层中, 无芒雀麦和冷地早熟禾人工

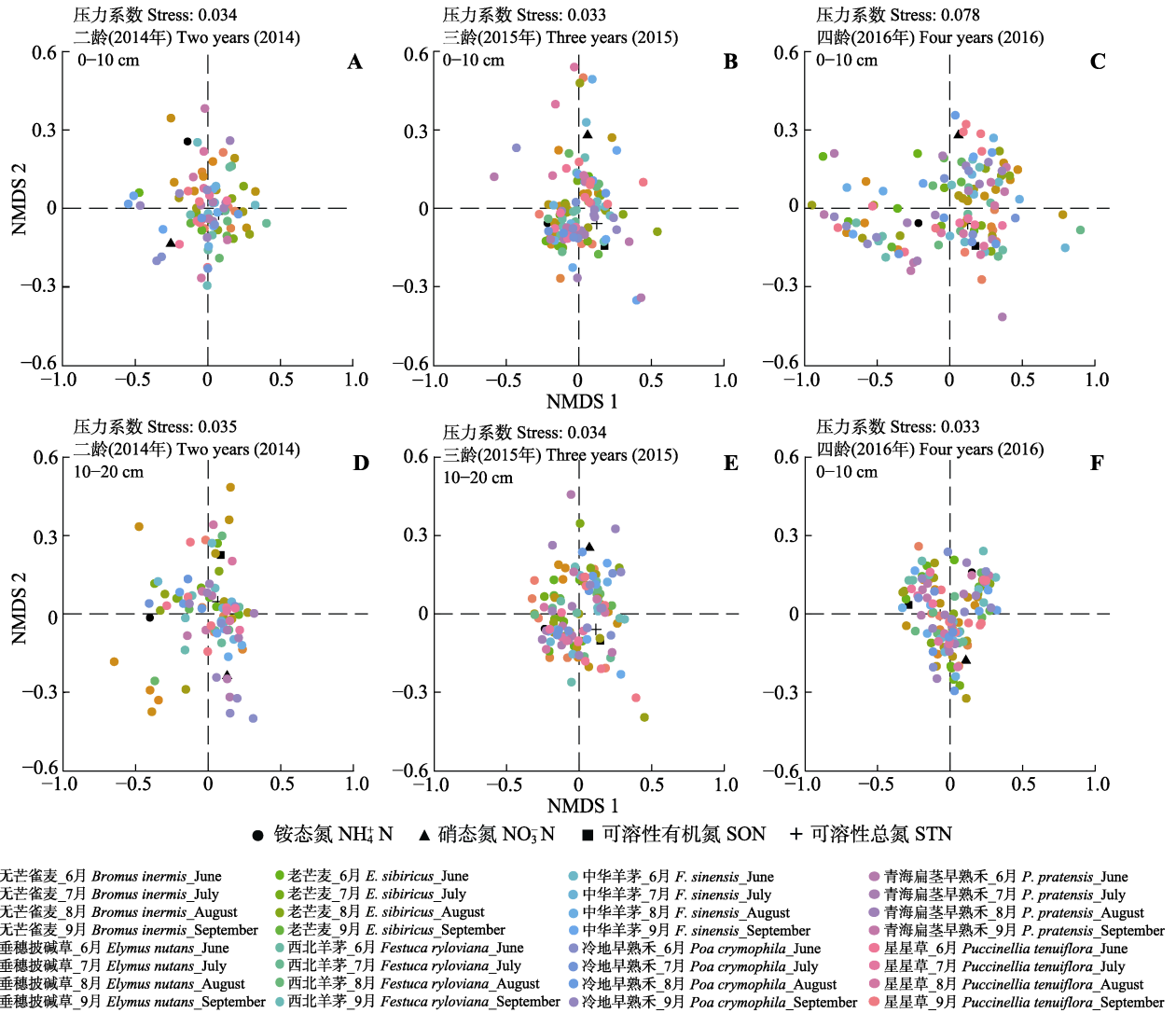


图4 青藏高原人工草地种植不同禾本科牧草对土壤可溶性氮含量的影响。NMDS, 非度量多维尺度分析。

Fig. 4 Effect of planting different grasses on soil soluble nitrogen contents in Qingzang Plateau. SON, soluble organic nitrogen; STN, soluble total nitrogen. NMDS, non-metric multidimensional scaling.

草地土壤SON和STN含量与ANPP呈显著正相关关系; 中华羊茅人工草地土壤 NH_4^+N 含量与ANPP呈显著负相关关系。

3 讨论

3.1 人工草地与土壤可溶性氮

本研究结果表明, 人工草地随龄级增加土壤 NH_4^+N 含量上升, 而土壤 NO_3^-N 、SON和STN含量显著下降, 该结果与王启兰等(2010)的研究结果一致。其原因主要是人工草地牧草刈割导致大量氮输出该系统, 同时没有动物粪便和肥料的输入, 导致植物可利用氮水平下降(Smolander & Kitunen, 2002)。王文颖等(2016)研究表明, 青藏高原高寒草地种植禾本科牧草对土壤可溶性氮含量产生一定的影响, 三

龄人工草地, 冷地早熟禾和星星草单播人工草地土壤表层 NO_3^-N 含量显著高于其他种单播人工草地, 星星草和多叶老芒麦单播人工草地土壤STN含量显著高于其他种类人工草地。在本研究中, 种植8种禾本科牧草人工草地土壤 NH_4^+N 含量在 $2.10\text{--}2.53\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (0-10 cm)和 $1.97\text{--}2.41\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (10-20 cm)之间, 并无显著性差异; 土壤 NO_3^-N 含量在 $3.96\text{--}6.73\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (0-10 cm)和 $5.10\text{--}9.68\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (10-20 cm)之间, 含量相差近1倍, 种植星星草和冷地早熟禾土壤中 NO_3^-N 含量最高, 无芒雀麦最低。因此, 种植不同禾本科牧草对土壤 NO_3^-N 含量具有一定影响。此外, 土壤SON含量也因种植不同禾本科牧草而产生差异, 扁茎早熟禾人工草地土壤SON含量显著高于无芒雀麦。这可能由于土壤SON主要来源于土壤有机

表2 青藏高原人工草地种植禾本科牧草土壤氮组分与地上净初级生产力(ANPP)相关性分析

Table 2 Correlation analysis of soil nitrogen components and aboveground biomass in artificial pastures on Qingzang Plateau

处理 Treatment	指标 Variable	0–10 cm	10–20 cm
无芒雀麦 <i>Bromus inermis</i>	NH ₄ ⁺ -N	-0.485	-0.170
	NO ₃ ⁻ -N	0.010	0.068
	SON	0.392	0.676*
	STN	0.403	0.681*
老芒麦 <i>Elymus sibiricus</i>	NH ₄ ⁺ -N	-0.259	-0.444
	NO ₃ ⁻ -N	-0.328	0.067
	SON	0.347	0.459
	STN	0.231	0.328
垂穗披碱草 <i>E. nutans</i>	NH ₄ ⁺ -N	-0.436	0.239
	NO ₃ ⁻ -N	0.190	0.096
	SON	0.224	0.360
	STN	0.219	0.331
西北羊茅 <i>Festuca ryloviana</i>	NH ₄ ⁺ -N	-0.414	-0.516
	NO ₃ ⁻ -N	-0.636*	-0.450
	SON	0.377	0.111
	STN	0.218	-0.098
中华羊茅 <i>F. sinensis</i>	NH ₄ ⁺ -N	-0.449	-0.676*
	NO ₃ ⁻ -N	-0.453	-0.184
	SON	0.526	0.277
	STN	0.347	0.114
青海扁茎早熟禾 <i>Poa pratensis</i> var. <i>anceps</i> 'Qinghai'	NH ₄ ⁺ -N	-0.293	-0.134
	NO ₃ ⁻ -N	-0.531	-0.266
	SON	0.460	0.017
	STN	0.338	-0.155
星星草 <i>Puccinellia tenuiflora</i>	NH ₄ ⁺ -N	-0.241	-0.257
	NO ₃ ⁻ -N	-0.052	0.113
	SON	0.146	0.216
	STN	0.083	0.200
冷地早熟禾 <i>Poa crymophila</i>	NH ₄ ⁺ -N	-0.494	-0.548
	NO ₃ ⁻ -N	-0.831*	0.177
	SON	0.350	0.828**
	STN	0.091	0.694*

第3列为0–10 cm土层各处理土壤可溶性氮含量与地上生物量的相关系数; 第4列为10–20 cm土层各处理土壤可溶性氮含量与地上生物量的相关系数。*, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$; $n = 96$ 。NH₄⁺-N, 铵态氮; NO₃⁻-N, 硝态氮; SON, 可溶性有机氮; STN, 可溶性总氮。
The third column shows the correlation coefficients between the soluble nitrogen contents in the 0–10 cm soil layer and the above-ground biomass; the fourth column shows the correlation coefficients between the soluble nitrogen contents in the 10–20 cm soil layer and the above-ground biomass. *, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$; $n = 96$. SON, soluble organic nitrogen; STN, soluble total nitrogen.

物质的降解、植物根系细胞的溶解和溢泌物以及土壤微生物和动物分泌物, 因此种植不同的禾本科牧草对于根际微域环境产生改变导致土壤SON含量产生差异(崔晓阳, 2007; 蔡瑜如等, 2014)。

3.2 人工草地与土壤可溶性氮组分占比

本研究表明, 人工草地土壤可溶性氮以SON为主, 占STN的45.02%–88.76% (0–10 cm)和47.75%–88.18% (10–20 cm)。由此可以得出, 土壤SON库在人工草地生态系统中占有重要地位。土壤中的含氮有机物主要为蛋白质、核酸、肽聚糖、几丁质和水溶性的氨基酸、氨基糖、尿素等。这些物质大多为不溶性有机氮, 植物不能直接吸收利用, 只能吸收分子量小的尿素、氨基酸、多胺等。氨基酸是土壤SON的主要组成部分。土壤氨基酸含量一方面取决于土壤胞外酶特别是蛋白水解酶的活性和土壤微生物由于细胞分解而释放氨基酸的大小, 另一方面取决于根系分泌物的种类和大小。由于不同的禾本科牧草其根系形态、深度和分泌物存在差异, 导致土壤SON含量存在差异(丁威等, 2020)。人工草地土壤IN占STN含量的11.24%–54.89% (0–10 cm)和11.83%–52.25% (10–20 cm)。NH₄⁺-N和NO₃⁻-N含量分别占STN含量的5.42%–21.61% (0–10 cm)和3.09%–19.56% (10–20 cm)、8.96%–33.28% (0–10 cm)和6.08%–40.99% (10–20 cm), NO₃⁻-N在IN中占有重要地位。温性草原降水量少, 土壤含水量低, 硝化作用强, 造成土壤NO₃⁻-N累积(马志良等, 2018)。李亚娟等(2017)通过研究三江源区土地利用方式对土壤氮特征的影响发现, 人工草地土壤无机氮以NO₃⁻-N为主, 土壤NO₃⁻-N是NH₄⁺-N含量的2倍, 研究结果较为一致。总体来看, 人工草地土壤可溶性氮中SON占重要份额, 是人工草地土壤氮循环中不可或缺的组分。

3.3 禾本科牧草与可溶性氮的关系

本研究结果表明, 西北羊茅和冷地早熟禾地上生物量与表层土壤NO₃⁻-N含量呈显著负相关关系, 三龄时ANPP最高, 土壤NO₃⁻-N含量占比最低。原因是两种牧草对硝酸盐具有明显的吸收偏好(Wang et al., 2012)。因此, 根据土壤氮形态及含量特征, 对于不同龄级人工草地, 适量追加氮肥以弥补土壤流失的氮, 进而满足牧草生长对可溶性氮的需求, 提高牧草生产力, 维持人工草地的可持续利用和稳定性(张玉玲等, 2013; 罗亲普等, 2016)。

大多数研究表明, 天然氮沉降及添加固氮菌均显著提高禾本科牧草生物量, 进而促进禾本科人工草地生态系统呼吸(王肖已等, 2020)。选择一种高产低碳的禾本科种植管理方式是青藏高原可持续发展

的关键(仁增旺姆等, 2018)。因此, 提高禾本科牧草的产量对发展藏族地区农业经济具有重大意义。乔丽青(2014)发现内蒙古典型草地氮添加会促进人工草地的碳汇功能。本研究结果显示, 随着人工草地龄级的增加, 土壤STN含量显著下降, 禾本科牧草的地上生物量减少, 从而导致人工草地的碳汇功能降低。

NMDS结果显示, 随着人工草地龄级增加, 0–10 cm土层土壤可溶性氮组分含量的响应趋势在时间梯度上趋于离散, 而对10–20 cm土层的影响则相反。表明土壤深度对种植禾本科牧草的土壤可溶性氮含量产生影响。原因可能是人工草地禾本科牧草根系多集中在0–10 cm土层, 根系分泌物与土壤微生物大多集中在表层土壤(谢开云等, 2020), 从而导致土壤4种氮含量随着种植年限增加表现出明显的趋异性。

3.4 恢复与发展人工草地的建议

目前, 青海省筛选出了20余种适合青藏高原环境的当家牧草品种, 如: 垂穗披碱草、短芒老芒麦、草地早熟禾、碱茅和星星草等(尚占环等, 2018; 张文浩等, 2018), 这些牧草品种在推动人工草地建设和严重退化草地重建方面发挥了重要的作用, 但忽视了每种牧草的基本营养需求特征和土壤限制性元素供给动态特征。引入具有不同途径获得限制性营养元素的牧草, 将它们组合起来建植人工草地, 不仅从可利用的营养库部分获得各自所需要的营养, 还能使总的营养吸收随着物种多样性的增加而增大, 从而使植物群落生产力持续稳定。因此, 在人工草地建植过程中, 既要筛选出适宜当地生态环境的当家草种, 也要从植物营养学角度找出适于搭配的草种组合, 以维持其稳定性和功能性。

4 结论

青藏高原人工草地随龄级增加, ANPP呈下降趋势, 尤其是四龄人工草地, 所有单播草地ANPP均显著下降。二、三、四龄人工草地土壤STN平均含量分别为30.67、25.64、16.92 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (0–10 cm)和40.72、28.95、16.38 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (10–20 cm), 与二龄草地比较, 四龄草地土壤STN下降了44.83%(0–10 cm)和59.77%(10–20 cm)。相关分析表明, 人工草地土壤SON、STN含量与ANPP呈显著正相关关系。因此人工草地三至四龄是草地生产力和土壤氮营养的转

折期, 适当补充氮肥可有效维持高寒人工草地生产力和稳定性。另外, 土壤SON库在高寒人工草地生态系统中具有重要的地位, 占土壤STN含量的45.11%–88.76%, 是评估高寒草地生态系统氮循环不可或缺的氮组分。

参考文献

- Cai YR, Fu H, Lu LF, Wang J (2014). Research progress on the uptake of organic nitrogen by terrestrial plants. *Pratacul-tural Science*, 31, 1357-1366. [蔡瑜如, 傅华, 陆丽芳, 王静 (2014). 陆地生态系统植物吸收有机氮的研究进展. 草业科学, 31, 1357-1366.]
- Cui XY (2007). Organic nitrogen use by plants and its significance in some natural ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 27, 3500-3512. [崔晓阳 (2007). 植物对有机氮源的利用及其在自然生态系统中的意义. 生态学报, 27, 3500-3512.]
- Ding W, Wang YB, Xiang GH, Chi YG, Lu SB, Zheng SX (2020). Effects of *Caragana microphylla* encroachment on community structure and ecosystem function of a typical steppe. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 44, 33-43. [丁威, 王玉冰, 向官海, 迟永刚, 鲁顺保, 郑淑霞 (2020). 小叶锦鸡儿灌丛化对典型草原群落结构与生态系统功能的影响. 植物生态学报, 44, 33-43.]
- Fang YT, Liu DW, Zhu FF, Tu Y, Li SL, Huang SN, Quan Z, Wang A (2020). Applications of nitrogen stable isotope techniques in the study of nitrogen cycling in terrestrial ecosystems. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 44, 373-383. [方运霆, 刘冬伟, 朱飞飞, 图影, 李善龙, 黄韶楠, 全智, 王焱 (2020). 氮稳定同位素技术在陆地生态系统氮循环研究中的应用. 植物生态学报, 44, 373-383.]
- Huang JY, Yu HL, Liu JL, Ma F, Han L (2018). Effects of precipitation levels on the C:N:P stoichiometry in plants, microbes, and soils in a desert steppe in China. *Acta Ecologica Sinica*, 38, 5362-5373. [黄菊莹, 余海龙, 刘吉利, 马飞, 韩磊 (2018). 控雨对荒漠草原植物、微生物和土壤C、N、P化学计量特征的影响. 生态学报, 38, 5362-5373.]
- Jones DL, Healey JR, Willett VB, Farrar JF, Hodge A (2005). Dissolved organic nitrogen uptake by plants—An important N uptake pathway? *Soil Biology & Biochemistry*, 37, 413-423.
- Lambers H, Raven JA, Shaver GR, Smith SE (2008). Plant nutrient-acquisition strategies change with soil age. *Trends in Ecology & Evolution*, 23, 95-103.
- Li JP, Ma HB, Xie YZ, Wang KB, Qiu KY (2019). Deep soil C and N pools in long-term fenced and overgrazed temperate grasslands in northwest China. *Scientific Reports*, 9, 16088. DOI: 10.1038/s41598-019-52631-6.
- Li YJ, Wang YY, Cao GM, Long RJ, Yao T (2017). Effect of land use patterns on soil nitrogen characteristics in Three-river Headwater Area. *Agricultural Research in the*

- Arid Areas*, 35, 272-277. [李亚娟, 王亚亚, 曹广民, 龙瑞军, 姚拓 (2017). 三江源区土地利用方式对土壤氮素特征的影响. 干旱地区农业研究, 35, 272-277.]
- Lin L, Zhu B, Chen C, Zhang Z, Wang QB, He JS (2016). Precipitation overrides warming in mediating soil nitrogen pools in an alpine grassland ecosystem on the Tibetan Plateau. *Scientific Reports*, 6, 31438. DOI: 10.1038/srep31438.
- Lipson D, Näsholm T (2001). The unexpected versatility of plants: organic nitrogen use and availability in terrestrial ecosystems. *Oecologia*, 128, 305-316.
- Lu M (2009). *The Effects of Nitrogen Additions on Ecosystem Carbon and Nitrogen Cycles: a Meta-analysis*. PhD dissertation, Fudan University, Shanghai. 2-3. [卢蒙 (2009). 氮输入对生态系统碳、氮循环的影响: 整合分析. 博士学位论文, 复旦大学, 上海. 2-3.]
- Luo QP, Gong JR, Xu S, Baoyin T, Wang YH, Zhai ZW, Pan Y, Liu M, Yang LL (2016). Effects of N and P additions on net nitrogen mineralization in temperate typical grasslands in Nei Mongol, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40, 480-492. [罗亲普, 龚吉蕊, 徐沙, 宝音陶格涛, 王忆慧, 翟占伟, 潘琰, 刘敏, 杨丽丽 (2016). 氮磷添加对内蒙古温带典型草原净氮矿化的影响. 植物生态学报, 40, 480-492.]
- Ma YS, Zhou HK, Shao XQ, Zhao ZZ, Zhao L, Dong SK, Wang XL (2016). Recovery techniques and demonstration of degraded alpine ecosystems in the source region of three rivers. *Acta Ecologica Sinica*, 36, 7078-7082. [马玉寿, 周华坤, 邵新庆, 赵之重, 赵亮, 董世魁, 王晓丽 (2016). 三江源区退化高寒生态系统恢复技术与示范. 生态学报, 36, 7078-7082.]
- Ma ZL, Zhao WQ, Zhao CZ, Liu M, Zhu P, Liu Q (2018). Responses of soil inorganic nitrogen to increased temperature and plant removal during the growing season in a *Sibiraea angustata* scrub ecosystem of eastern Qinghai-Xizang Plateau. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 86-94. [马志良, 赵文强, 赵春章, 刘美, 朱攀, 刘庆 (2018). 青藏高原东缘窄叶鲜卑花灌丛生长季土壤无机氮对增温和植物去除的响应. 植物生态学报, 42, 86-94.]
- McKane RB, Johnson LC, Shaver GR, Nadelhoffer KJ, Rastetter EB, Fry B, Giblin AE, Kielland K, Kwiatkowski BL, Laundre JA, Murray G (2002). Resource-based niches provide a basis for plant species diversity and dominance in arctic tundra. *Nature*, 415, 68-71.
- Miller AE, Bowman WD, Suding KN (2007). Plant uptake of inorganic and organic nitrogen: neighbor identity matters. *Ecology*, 88, 1832-1840.
- Murphy DV, MacDonald AJ, Stockdale EA, Goulding KWT, Fortune S, Gaunt JL, Poulton PR, Wakefield JA, Webster CP, Wilmer WS (2000). Soluble organic nitrogen in agricultural soils. *Biology and Fertility of Soils*, 30, 374-387.
- Pang Z, Jiang LL, Wang SP, Xu XL, Rui YC, Zhang ZH, Luo CY, Wang YF (2019). Differential response to warming of the uptake of nitrogen by plant species in non-degraded and degraded alpine grasslands. *Journal of Soil and Sediments*, 19, 2212-2221.
- Qiao LQ (2014). *Effect of Water and Nitrogen Additions on Ecosystem Carbon Exchanges in a Grazing Ecosystem of Inner Mongolia Steppe*. Master degree dissertation, Inner Mongolia University, Hohhot. 10-16. [乔丽青 (2014). 水氮添加对内蒙古典型草原放牧生态系统碳交换的影响. 硕士学位论文, 内蒙古大学, 呼和浩特. 10-16.]
- Renzeng-Wangmu, Jiang LL, Jia SG (2018). Analysis of the influence of nitrogen and phosphorus addition on the ecological function of barley artificial grassland production. *Plateau Science Research*, 2, 7-13. [仁增旺姆, 姜丽丽, 贾书刚 (2018). 氮磷添加对青稞人工草地生产生态功能的影响分析. 高原科学研究, 2, 7-13.]
- Shang ZH, Dong QM, Shi JJ, Zhou HK, Dong SK, Shao XQ, Li SX, Wang YL, Ma YS, Ding LM, Cao GM, Long RJ (2018). Research progress in recent ten years of ecological restoration for “black soil land” degraded grassland on Tibetan Plateau—Concurrently discuss of ecological restoration in Sanjiangyuan Region. *Acta Agrestia Sinica*, 26, 1-21. [尚占环, 董全民, 施建军, 周华坤, 董世魁, 邵新庆, 李世雄, 王彦龙, 马玉寿, 丁路明, 曹广民, 龙瑞军 (2018). 青藏高原“黑土滩”退化草地及其生态恢复近10年研究进展——兼论三江源生态恢复问题. 草地学报, 26, 1-21.]
- Smolander A, Kitunen V (2002). Soil microbial activities and characteristics of dissolved organic C and N in relation to tree species. *Soil Biology & Biochemistry*, 34, 651-660.
- Somers C, Girkin NT, Rippey B, Lanigan GJ, Richards KG (2019). The effects of urine nitrogen application rate on nitrogen transformations in grassland soils. *The Journal of Agricultural Science*, 157, 515-522.
- Stanley Harpole W, Tilman D (2007). Grassland species loss resulting from reduced niche dimension. *Nature*, 446, 791-793.
- Wang QL, Wang CT, Liu W, Cao GM, Long RJ (2010). Changes in plant communities and soil enzyme activities of artificial grasslands in headwater areas of the Yangtze and Yellow Rivers. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 16, 662-666. [王启兰, 王长庭, 刘伟, 曹广民, 龙瑞军 (2010). 江河源区人工草地植物群落和土壤酶活性变化. 应用与环境生物学报, 16, 662-666.]
- Wang WY, Li WQ, Zhou HK, Kang Q, Ma XL, Liu P, Wang Z (2016). Dynamics of soil dissolved organic nitrogen and inorganic nitrogen pool in alpine artificial grasslands. *Ecology and Environmental Sciences*, 25, 30-35. [王文颖, 李文全, 周华坤, 康清, 马晓玲, 刘攀, 王榛 (2016). 高寒人工草地土壤可溶性有机氮库和无机氮库动态变化. 生态环境学报, 25, 30-35.]
- Wang WY, Ma YG, Xu J, Wang HC, Zhu JF, Zhou HK (2012). The uptake diversity of soil nitrogen nutrients by main plant species in *Kobresia humilis* alpine meadow on the Qinghai-Tibet Plateau. *Science China Earth Sciences*, 55, 1688-1695.
- Wang XY, Yao HY, Li X (2020). Research progress in soil ecosystem responses to nitrogen deposition in grasslands. *Journal of Wuhan Institute of Technology*, 42, 276-281.

- [王肖己, 姚槐应, 李杏 (2020). 草地土壤生态系统对氮沉降响应的研究进展. 武汉工程大学学报, 42, 276-281.]
- Xiao YD (2012). Alkaline potassium persulfate digestion UV spectrophotometric method for determination of total nitrogen in water by the method. *Guangdong Chemical Industry*, 39(4), 165-166. [萧玉端 (2012). 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定水中总氮的方法探讨. 广东化工, 39(4), 165-166.]
- Xie KY, Wang YX, Wan JC, Zhang SZ, Sui XQ, Zhao Y, Zhang B (2020). Mechanisms and factors affecting nitrogen transfer in mixed legume/grass swards: a review. *Acta Prataculturae Sinica*, 29, 157-170. [谢开云, 王玉祥, 万江春, 张树振, 隋晓青, 赵云, 张博 (2020). 混播草地中豆科/禾本科牧草氮转移机理及其影响因素. 草业学报, 29, 157-170.]
- Zhang WH, Hou LY, Yang J, Song SH, Mao XT, Zhang QQ, Bai WM, Pan QM, Zhou QP (2018). Establishment and management of alfalfa pasture in cold regions of China. *Chinese Science Bulletin*, 63, 1651-1663. [张文浩, 侯龙鱼, 杨杰, 宋世环, 毛小涛, 张强强, 白文明, 潘庆民, 周青平 (2018). 高寒地区苜蓿人工草地建植技术. 科学通报, 63, 1651-1663.]
- Zhang YL, Chen WF, Yu N, Fu SF, Zhang YL, Zou HT (2013). Long-term effects of different land use patterns on mineralizing characteristic of soil organic nitrogen. *Chinese Journal of Soil Science*, 44, 52-56. [张玉玲, 陈温福, 虞娜, 付时丰, 张玉龙, 邹洪涛 (2013). 不同利用方式下土壤有机氮素矿化特征的研究. 土壤通报, 44, 52-56.]
- Zhang ZH, Zhou HK, Zhao XQ, Yao BQ, Ma Z, Dong QM, Zhang ZH, Wang WY, Yang YW (2018). Relationship between biodiversity and ecosystem functioning in alpine meadows of the Qinghai-Tibet Plateau. *Biodiversity Science*, 26, 111-129. [张中华, 周华坤, 赵新全, 姚步青, 马真, 董全民, 张振华, 王文颖, 杨元武 (2018). 青藏高原高寒草地生物多样性与生态系统功能的关系. 生物多样性, 26, 111-129.]
- Zhao MX, Bai EL, Liu H, Cao YY, Wang WQ, Xing YY (2019). Seasonal variation of soil soluble nitrogen fractions in plantation in Loess Hilly region. *Journal of Soil and Water Conservation*, 33, 258-263. [赵满兴, 白二磊, 刘慧, 曹阳阳, 王文强, 邢英英 (2019). 黄土丘陵区人工林土壤可溶性氮组分季节变化. 水土保持学报, 33, 258-263.]
- Zhou HK, Zhao XQ, Zhou L, Liu W, Li YN, Tang YH (2005). A study on correlations between vegetation degradation and soil degradation in the "Alpine Meadow" of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Prataculturae Sinica*, 14(3), 31-40. [周华坤, 赵新全, 周立, 刘伟, 李英年, 唐艳鸿 (2005). 青藏高原高寒草甸的植被退化与土壤退化特征研究. 草业学报, 14(3), 31-40.]
- Zhou QR, Tian LH, Zhou QP, Wang JT, Chen YJ, Chen SY (2019). Analysis on the relationship between grassland area and forage-livestock balance in Qinghai-Tibet Plateau. *Chinese Journal of Grassland*, 41, 110-117. [周岐燃, 田莉华, 周青平, 王加亭, 陈有军, 陈仕勇 (2019). 青藏高原牧户经营草地面积与其草畜平衡关系分析. 中国草地学报, 41, 110-117.]

责任编辑: 白 娥 编辑: 赵 航