

高寒人工草地土壤可溶性有机氮库和无机氮库动态变化

王文颖¹, 李文全¹, 周华坤², 康清¹, 马晓玲³, 刘攀³, 王榛¹

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

3. 青海省高寒湿地省级重点实验室, 青海 西宁 810008

摘要:以青海省高寒区人工草地为研究对象,分析土壤可溶性有机氮库和无机氮库含量及其季节动态变化过程,确定牧草不同发育期土壤供氮能力,为研究高寒区人工牧草吸收土壤氮素提供依据。研究表明,(1)青海同德暗栗钙土种植禾本科牧草第1年土壤以硝态氮为主,占54%~59%,其次为可溶性有机氮,占22%~29%,铵态氮最低,仅占17%。1年人工草地土壤铵态氮含量随生长季延长逐渐增多,9月最高;土壤硝态氮在6月返青期最高,随生长季延长下降显著;土壤可溶性总氮和可溶性有机氮在返青期和枯黄期较高,生长旺盛期较低。(2)青海果洛州退化高寒草甸土种植禾本科牧草的人工草地土壤硝态氮和可溶性有机氮占优势,分别占49%和43%,铵态氮仅占8%。1年人工草地随生长季土壤铵态氮含量逐渐升高,9月最高;土壤硝态氮在7月初期最高,随生长季延长显著下降;土壤可溶性总氮和可溶性有机氮在生长季初期(7月)最高,随生长季延长而降低。表明高寒区人工草地土壤可溶性有机氮是植物可利用氮的重要组成成分,其含量仅次于硝态氮且远高于铵态氮。(3)与1年人工草地相比较,同德单播禾本科牧草生长3年后,土壤中植物可利用氮素迅速下降,尤其是硝态氮含量下降近80%,其次铵态氮下降近67%,可溶性总氮下降近60%~2.5倍,仅可溶性有机氮下降不显著。说明单播模式下人工草地土壤有效养分下降是人工草地生产力难以持续的主要原因。(4)在1年人工草地种植的不同牧草种类的土壤各类氮素均无显著差异;而在3年草地,冷地早熟禾(*Poa crymophila*)和星星草(*Puccinellia tenuiflora*)单播人工草地土壤表层硝态氮显著高于其他种单播人工草地,星星草和多叶老芒麦(*Elymus sibiricus*)单播人工草地土壤可溶性总氮显著高于其他种类人工草地。初步推断:种植不同牧草可对不同形态土壤氮素产生影响,暗示不同牧草对不同形态氮素的需求存在一定差异性。

关键词:高寒人工草地;土壤可溶性有机氮库;土壤无机氮库

DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2016.01.005

中图分类号: X144; S153.6

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906(2016)01-0030-06

引用格式: 王文颖,李文全,周华坤,康清,马晓玲,刘攀,王榛. 高寒人工草地土壤可溶性有机氮库和无机氮库动态变化[J]. 生态环境学报, 2016, 25(1): 30-35.

WANG Wenying, LI Wenquan, ZHOU Huakun, KANG Qin, MA Xiaolin, LIU Pan, WANG Zhen. Dynamics of Soil Dissolved Organic Nitrogen and Inorganic Nitrogen Pool in Alpine Artificial Grasslands [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(1): 30-35.

青藏高原是我国主要的畜牧业基地之一,草地面积约 $1.50 \times 10^6 \text{ km}^2$, 占全国草地总面积的 37.64%; 其中退化草地面积约为 $4.25 \times 10^5 \text{ km}^2$, 占全区可利用草地面积的 33%, 其中“黑土型”退化草地面积估计为 $7.03 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占全区退化草地面积的 16.54% (王启基等, 1997)。长期过度的放牧利用无疑是草地退化的主要原因,实现草畜平衡是遏制草地退化的基本途径。在草原畜牧业发展的不同阶段草畜平衡的具体内涵是不同的。第一个阶段是在自然生产力条件下草原放牧系统的草畜平衡,主要内容是天然草场的生产力与牲畜饲养量之间的平衡。第二阶段是在发展人工草地前提下的草畜

平衡,主要内容是适度建植人工草地,开展种草养畜与天然草场协调、合理利用,提高草畜平衡点。第三个阶段是营养平衡阶段,随着天然草原和人工草地潜力的不断发挥,在草畜的平衡关系中出现一个主要的制约因素即营养要素的平衡。草地土壤中大部分氮素来自大气氮沉降、豆科植物生物固氮、家畜粪便的再循环以及动植物残体的分解。随着草畜平衡点的不断提高,长期放牧使草地产出不断增加,从而导致土壤氮素水平不断下降,土壤氮素水平成为制约草地生产潜力的主要因素(曹广民等, 2004; 赵新全, 2011; Le Bauer et al., 2008)。

Chapin et al. (1993) 的研究第一次证明非菌根

基金项目: 国家自然科学基金项目(31260127); 教育部春晖计划(Z2009-1-81010); 教育部科学技术重点项目(209133)

作者简介: 王文颖(1973年生),女,教授,博士,从事草地生态学研究。E-mail: wangwy0106@163.com

收稿日期: 2015-06-04

维管植物嗜好吸收和利用有机氮, 研究报道生长在苔原的莎草科植物白毛羊胡子草 (*Eriophorum vaginatum*) 可以迅速吸收游离氨基酸, 它所吸收的氮至少有 60% 来自于氨基酸。随着研究手段的改进和研究内容的不断深入, 越来越多的证据表明: 植物根系不仅可以吸收土壤铵态氮、硝态氮等无机态氮, 还可以有效吸收利用土壤中分子量较小的可溶性有机氮如尿素、氨基酸、多胺等, 其中氨基酸是土壤可溶性有机氮的主要组成成分, 可溶性有机氮在植物所吸收的总氮中占有相当的比例 (Lipson et al., 2001a; Nasholm et al., 2009)。植物吸收的可溶性有机氮占植物吸收总氮量的 10%~100%, 这主要源于不同的植物和群落 (Chapin et al., 1993; Miller et al., 2002, 2003; Wang et al., 2012; Kielland, 1994; 王文颖等, 2014)。

多年的实践表明: 在高原水热条件较好的农牧交错地区和典型牧区草地严重退化的局部区域开展种草养畜, 用栽培驯化的禾本科牧草建立稳产、高产的人工草地, 是减缓天然草场放牧压力, 解决草畜季节不平衡矛盾的重要措施 (Le Bauer et al., 2008; 马玉寿等, 2002)。目前在“青海省天然草原退牧还草工程”等示范工程项目的支持下, 已累积建植人工、半人工草地 $1.67 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 。在人工草地建植过程中对优良禾本科牧草的筛选、建植技术和管理等诸多方面做了大量的投入和示范研究, 但是在对筛选栽培的禾本科牧草生长过程中, 土壤限制性营养元素氮动态及其土壤可溶性有机氮方面的基础研究稀缺, 而土壤氮素动态、供给量与人工草地可持续发展密切相关。因此, 本研究试图以青藏高原高寒区人工草地生态系统为研究背景, 以高寒禾本科牧草为研究对象, 分别在青海省同德牧草良种繁育场 (农牧交错区) 和青海省果洛玛沁县大武乡 (牧区严重退化草地) 研究不同时期建植的人工草地沿生长季土壤无机氮库和可溶性有机氮库动态变化特征及其不同牧草种类与土壤氮库之间的相关性, 为人工草地的可持续发展提供理论依据。

1 研究地区自然地理概况

本试验研究地点选在海南藏族自治州同德县境内的青海省牧草良种繁育场和青海省果洛藏族自治州境内的玛沁县大武乡。青海省同德县牧草良种繁育场, 地处北纬 $35^{\circ}00'09''$, 东经 $100^{\circ}00'09''$, 位于同德巴滩地区, 海拔 3 280 m, 年均降水量 429.8 mm, 年均温 0.2°C , 大于 0°C 的活动积温 $1\,503.0^{\circ}\text{C}$, 牧草生长季内的活动积温 $1\,309.0^{\circ}\text{C}$, 无绝对无霜期, 地势平坦。草地类型主要以温性草原为主, 土壤类型为暗栗钙土。青海省果洛州玛沁

县大武乡, 地处北纬 $34^{\circ}00'17''\sim 34^{\circ}00'25''$, 东经 $100^{\circ}00'26''\sim 100^{\circ}00'43''$ 。为一山间小盆地, 平均海拔 3 980 m。属高原寒冷气候类型, 年均气温 -2.6°C , $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 年积温 914.3°C , 日照时间 2 576.0 h, 年均降水量 513 mm。无绝对无霜期, 牧草生长期 110~130 d。原生植被类型是高山高草草甸, 土壤类型以高山草甸土为主。

2 材料与方法

2.1 样地选设

在同德牧草良种繁殖场选择 1 年单播人工草地和 3 年单播人工草地两类草地进行研究。1 年人工草地包括扁茎早熟禾 (*Poa pratensis* cv)、垂穗披碱草 (*Elymus nutans*)、中华羊茅 (*Festuca sinensis*) 和红豆草 (*Onobrychis viciaefolia* Scop) 等 4 种牧草, 单播实验小区共 12 个 (4 种 \times 3 个重复), 每个小区的面积为 $3 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ 。3 年人工草地包括种植扁茎早熟禾、冷地早熟禾、星星草、西北羊茅 (*Festuca ryloviana*)、中华羊茅、多叶老芒麦、垂穗披碱草、无芒雀麦 (*Bromus inermis*) 和红豆草等 9 种牧草, 单播实验小区共 27 个 (9 种 \times 3 个重复), 每个小区的面积为 $3 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 。

在果洛州玛沁县大武乡选择 1 年单播人工草地和 3 年混播人工草地两类草地进行研究。1 年人工草地包括扁茎早熟禾、垂穗披碱草、中华羊茅和红豆草等 4 种牧草, 单播实验小区共 12 个 (4 种 \times 3 个重复), 每个小区的面积为 $3 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ 。3 年混播人工草地是由垂穗披碱草、老芒麦、中华羊茅和草地早熟禾等 4 种牧草混播的人工草地, 实验中选取 3 个面积为 $3 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 的样地进行取样。所有试验小区在每年 9 月底刈割, 留茬 5~10 cm。

2.2 取样与分析

植物生长季 (6—9 月) 在每个小区分别随机收集 3 个 0~10 和 10~20 cm 深度的土核 (直径为 3.5 cm), 同一小区和同一深度采集的土壤混合成 1 个样品。同时用铝盒分 0~10 和 10~20 cm 层取大约 30 g 土样测定土壤含水量。收集的土样在野外即过 2 mm 筛, 移出砾石和根系后, 称取 20 g 土壤加入 100 mL $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ K}_2\text{SO}_4$ 溶液, 振荡 1 h 后使用定量滤纸 ($15\sim 20 \mu\text{m}$) 过滤, 滤液即刻在 NOVA60 多参数水质分析仪上用氨氮、硝氮测试试剂测定土壤铵态氮和硝态氮的含量。NOVA 多参数水质分析仪配合消解仪用总氮测试试剂测定土壤可溶性总氮含量。土壤可溶性有机氮含量等于土壤可溶性总氮减去土壤铵态氮和硝态氮之和。

2.3 统计与分析

各处理土壤铵态氮、硝态氮、可溶性总氮、可溶性有机氮浓度为 3 个重复样地的算术平均值。通

过一元方差分析(ANOVA, LSD)检验参数在各处理间差异显著性,以上分析均在SPSS 19.0统计软件上完成。

3 研究结果

3.1 同德1年人工草地土壤无机氮、可溶性总氮和可溶性有机氮含量季节动态

同德4种牧草1年人工草地土壤平均铵态氮、硝态氮、可溶性总氮、可溶性有机氮含量季节动态见表1。整个生长季6—9月,1年人工草地土壤铵态氮平均质量分数为13.97 mg·kg⁻¹(0~10 cm)和14.53 mg·kg⁻¹(10~20 cm);土壤硝态氮平均质量分数为45.14 mg·kg⁻¹(0~10 cm)和47.28 mg·kg⁻¹(10~20 cm);土壤可溶性总氮平均质量分数为83.03 mg·kg⁻¹(0~10 cm)和79.50 mg·kg⁻¹(10~20 cm);土壤可溶性有机氮平均质量分数为23.92 mg·kg⁻¹(0~10 cm)和17.34 mg·kg⁻¹(10~20 cm)。总体上,同德暗栗钙土种植禾本科牧草第1年土壤以硝态氮为主,占54%~59%;其次为可溶性有机氮,占22%~29%;铵态氮最少,仅占17%。

另外,同德1年人工草地土壤铵态氮含量随生长季延长逐渐增多,9月份达最高。土壤硝态氮在6月份返青期最高,随生长季延长显著下降。土壤可溶性总氮和可溶性有机氮在返青期和枯黄期较高,生长旺盛期较低。且不同土壤深度间土壤铵态氮、硝态氮、可溶性总氮、可溶性有机氮含量差异均不显著。

3.2 果洛1年人工草地土壤无机氮、可溶性总氮和可溶性有机氮含量季节动态

果洛1年人工草地土壤平均铵态氮、硝态氮、可溶性总氮、可溶性有机氮含量季节动态见表2。生长季1年人工草地土壤铵态氮平均质量分数为6.34 mg·kg⁻¹(0~10 cm)和6.74 mg·kg⁻¹(10~20 cm);

土壤硝态氮平均质量分数为40.36 mg·kg⁻¹(0~10 cm)和35.22 mg·kg⁻¹(10~20 cm);土壤可溶性总氮平均质量分数为81.60 mg·kg⁻¹(0~10 cm)和71.71 mg·kg⁻¹(10~20 cm);土壤可溶性有机氮平均质量分数为34.91 mg·kg⁻¹(0~10 cm)和29.74 mg·kg⁻¹(10~20 cm)。总体上,果洛退化高寒草甸土种植禾本科牧草第1年土壤以硝态氮和可溶性有机氮为主,分别占49%和43%;铵态氮最低,仅占8%。可以看出,高山草甸土中可溶性有机氮是土壤可溶性氮中重要成分,其含量仅次于硝态氮且远高于铵态氮,尤其在生长季初期可溶性有机氮含量要高于土壤硝态氮。

另外,果洛1年人工草地土壤铵态氮含量随生长季逐渐增多,到9月份最高。土壤硝态氮在7月初期最高,随生长季延长而显著下降。土壤可溶性总氮和可溶性有机氮在7月初最高,随后逐渐降低。不同土壤深度间土壤硝态氮、可溶性总氮、可溶性有机氮含量在生长季初期差异显著,8、9月份不同土壤层间各类氮含量差异均不显著。

3.3 同德、果洛1年人工草地与3年人工草地土壤氮含量分析

以8月土壤氮素含量为依据,比较同德1年和3年人工草地土壤铵态氮、硝态氮、可溶性总氮和可溶性有机氮含量,结果见表3。与1年人工草地相比较,单播禾本科牧草生长3年后,土壤中各类植物可利用的氮素迅速下降,尤其是硝态氮含量下降近80%,其次铵态氮下降近67%,可溶性总氮下降近60%,仅可溶性有机氮下降不显著。由此可见,单播人工草地土壤有效养分下降是人工草地生产力难以持续的主要原因。

果洛1年和3年人工草地土壤铵态氮、硝态氮、可溶性总氮和可溶性有机氮含量比较结果见表4。

表1 同德1年人工草地土壤铵态氮、硝态氮、可溶性总氮、可溶性有机氮含量季节动态

Table 1 seasonal dynamics of soil NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, soluble total N, soluble organic N content in Tongde artificial grasslands

时间	w(铵态氮)/(mg·kg ⁻¹)		w(硝态氮)/(mg·kg ⁻¹)		w(可溶性总氮)/(mg·kg ⁻¹)		w(可溶性有机氮)/(mg·kg ⁻¹)	
	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm
6月	8.45(1.03)	7.78(0.73)	70.67(5.92)	53.72(5.37)	107.91(6.50)	84.46(8.16)	28.61(3.21)	22.60(2.68)
7月	12.03(2.68)	15.51(3.19)	37.97(7.74)	46.67(4.24)	67.21(9.29)	78.61(6.24)	17.23(5.78)	16.47(5.82)
8月	15.83(2.01)	16.67(2.36)	40.56(2.62)	48.12(10.21)	72.55(8.81)	73.50(9.81)	16.28(6.08)	8.64(3.24)
9月	19.56(3.87)	18.16(2.46)	31.36(3.05)	40.62(5.08)	84.65(5.34)	81.42(6.26)	33.55(3.08)	21.64(2.05)
平均	13.97	14.53	45.14	47.28	83.08	79.50	23.92	17.34

括号内为标准误

表2 果洛1年人工草地土壤铵态氮、硝态氮、可溶性总氮、可溶性有机氮含量季节动态

Table 2 seasonal dynamics of soil NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, soluble total N, soluble organic N content in Guoluo artificial grasslands

时间	w(铵态氮)/(mg·kg ⁻¹)		w(硝态氮)/(mg·kg ⁻¹)		w(可溶性总氮)/(mg·kg ⁻¹)		w(可溶性有机氮)/(mg·kg ⁻¹)	
	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm
7月	2.20(0.45)	3.63(0.55)	47.40(5.30)	32.13(2.45)	106.83(7.71)	70.67(5.89)	57.23(7.23)	34.90(4.75)
8月	6.69(0.59)	7.02(0.77)	44.57(3.15)	47.52(2.91)	77.68(2.36)	83.39(5.93)	26.41(3.83)	28.86(4.77)
9月	10.14(1.49)	9.58(1.37)	29.11(1.74)	26.02(1.85)	60.28(3.52)	61.07(4.22)	21.09(2.46)	25.47(3.05)
平均	6.34	6.74	40.36	35.22	81.60	71.71	34.91	29.74

括号内为标准误

表3 同德1年和3年人工草地土壤铵态氮、硝态氮、可溶性总氮，可溶性有机氮含量比较

Table 3 The comparison of soil NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, soluble total N, soluble organic N content of one and three year's artificial grasslands in Tongde

草地类型	w(铵态氮)/(mg·kg ⁻¹)		w(硝态氮)/(mg·kg ⁻¹)		w(可溶性总氮)/(mg·kg ⁻¹)		w(可溶性有机氮)/(mg·kg ⁻¹)	
	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm
1年	15.83(2.01)	16.67(2.36)	40.56(2.62)	48.12(10.21)	72.55(8.81)	73.50(9.81)	16.28(6.08)	8.64(3.24)
3年	5.22(1.03)	6.50(0.97)	8.13(1.63)	9.43(3.51)	29.67(2.78)	24.44(4.44)	16.37(3.68)	10.28(5.53)

8月份数据；括号内为标准误

表4 果洛1年和3年人工草地土壤铵态氮、硝态氮、可溶性总氮，可溶性有机氮含量比较

Table 4 The comparison of soil NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, soluble total N, soluble organic N content of one and three year's artificial grasslands in Guoluo

草地类型	w(铵态氮)/(mg·kg ⁻¹)		w(硝态氮)/(mg·kg ⁻¹)		w(可溶性总氮)/(mg·kg ⁻¹)		w(可溶性有机氮)/(mg·kg ⁻¹)	
	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm
1年	6.69(0.59)	7.02(0.77)	44.57(3.15)	47.52(2.91)	77.68(2.36)	83.39(5.93)	26.41(3.83)	28.86(4.77)
3年	10.87(2.37)	7.25(1.50)	24.63(3.62)	22.63(0.38)	63.75(3.75)	53.75(3.75)	24.25(9.75)	23.87(1.87)

8月份数据；括号内为标准误

与1年单播人工草地相比较，3年后土壤硝态氮含量下降了近50%，土壤可溶性总氮下降近20%，土壤铵态氮和可溶性有机氮没有显著变化。可以看出，人工草地随着生长期延长，土壤中硝态氮明显下降，其他氮素下降不显著。果洛与同德相比较，人工草地生长3年后，同德人工草地氮素下降远高于果洛。其原因一方面在于两者土壤类型不同，土壤氮素代谢途径存在差异；另一方面与果洛3年人工草地为混播草地，而同德3年人工草地为单播草地有关系。

3.4 不同牧草种类与土壤氮素之间的关系

1年和3年单播人工草地不同牧草种类对土壤氮素的影响结果见表5。从表5可以看出：在1年人工草地，扁茎早熟禾、红豆草、垂穗披碱草和中华羊茅的人工草地土壤4类氮素均没有显著差异。在3年人工草地，9种不同牧草的人工草地土壤铵态氮没有显著差异 ($P>0.05$)，而冷地早熟禾和星星草人工草地土壤表层硝态氮显著高于其他牧草人工草地，星星草和多叶老芒麦人工草地土壤可溶性总氮显著高于其他种类人工草地，多叶老芒麦人工草地土壤可溶性有机氮显著高于扁茎早熟禾和冷地早熟禾人工草地。初步推断，种植不同牧草可

对土壤氮素产生一定的影响，暗示不同牧草对不同类型氮素的需求存在一定差异性。

4 讨论与结论

4.1 土壤可溶性有机氮库

土壤中的含氮有机物主要为蛋白质、多肽、核酸、肽聚糖、几丁质和水溶性的氨基酸、氨基糖和尿素等。这些物质大多属于不溶性有机氮，不溶性有机氮和土壤溶液中分子量大的可溶性有机氮均不能被植物直接吸收利用，植物根系仅能利用分子量较小的可溶性有机氮如尿素、氨基酸、多胺等，氨基酸是该组分的主要组成成分。因此，在评估植物可利用氮研究中，一般都将整个有机氮库与无机氮库做比较 (Jones et al., 2005)。

Lipson et al. (2001b) 综述表明不同生态系统中土壤提取液氨基酸态氮质量分数在 0.04~24 mg·kg⁻¹，而土壤孔隙水中氨基酸质量分数高达 158 mg·kg⁻¹。Weintraub (2004) 研究湿苔原水提取土壤溶液中游离氨基酸浓度，得出其质量分数 2~8 mg·kg⁻¹，而无机氮仅 0.5~1.1 mg·kg⁻¹。杨绒等 (2007) 测定了黄土高原地区不同生态系统土壤中可溶性有机氮和游离氨基酸含量，结果表明，黑垆土、红油土和淋溶褐土中可溶性有机氮平均质量分数分

表5 1年和3年单播人工草地不同牧草种类对土壤氮素的影响

Table 5 The effect of different plant species on soil N content in one and three year's artificial grasslands

草地类型	w(铵态氮)/(mg·kg ⁻¹)		w(硝态氮)/(mg·kg ⁻¹)		w(可溶性总氮)/(mg·kg ⁻¹)		w(可溶性有机氮)/(mg·kg ⁻¹)	
	0~10cm	10~20cm	0~10 cm	10~20cm	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm
1年扁茎早熟禾	15.83a	15.83a	31.42ab	51.08a	63.33b	68.33a	16.08ab	1.42a
1年红豆草	15.84a	17.50a	50.08a	45.00ab	82.50a	79.17a	22.50ab	16.67a
1年垂穗披碱草	16.81a	16.24a	45.70a	54.68a	68.00ab	81.67a	10.06ab	8.06a
1年中华羊茅	14.86a	17.10a	35.42ab	41.58ab	77.10ab	65.33a	16.58ab	9.15a
3年冷地早熟禾	6.25b	7.75b	14.00c	20.37bc	23.75c	22.50b	3.50b	-5.63a
3年星星草	3.50b	6.87b	15.75c	11.37c	47.50b	26.25b	28.25ab	8.00a
3年扁茎早熟禾	6.87b	6.00b	5.75d	12.00c	21.25c	26.25b	8.62b	8.25a
3年西北羊茅	6.00b	9.50b	4.00d	5.62c	27.50c	21.25b	17.50ab	6.12a
3年中华羊茅	4.25b	6.50b	5.12d	6.75c	26.25c	25.00b	16.87ab	11.75a
3年多叶老芒麦	5.25b	4.25b	6.62d	5.87c	50.00b	23.75b	38.13a	13.62a
3年垂穗披碱草	7.00b	6.62b	6.25d	5.25c	25.00c	31.25b	11.75ab	19.37a
3年无芒雀麦	1.62b	5.00b	8.12cd	5.87c	21.25c	17.50b	11.50ab	6.62a
3年红豆草	6.25b	6.00b	7.50cd	11.75c	25.00c	26.25b	11.25ab	8.50a

同一列不同字母间差异显著 ($P<0.05$)

别为 24.75、39.10 和 41.80 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，分别占可溶性总氮的 51.25%、68.28% 和 68.57%。本研究结果表明，同德暗栗钙土种植禾本科牧草第 1 年土壤表层铵态氮平均质量分数为 13.97 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，土壤硝态氮平均质量分数为 45.14 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，土壤可溶性有机氮平均质量分数为 23.92 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ；果洛退化高寒草甸土种植禾本科牧草第 1 年表层铵态氮平均质量分数为 6.34 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，土壤硝态氮平均质量分数为 40.36 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，土壤可溶性有机氮平均质量分数为 34.91 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。由此证明，与土壤无机氮比较，土壤可溶性有机氮库在青藏高原土壤氮素中占有重要份额，是研究植物对土壤氮素吸收组分中不可或缺的重要组成成分。

4.2 高寒人工草地土壤无机氮库和土壤可溶性有机氮库动态

王启兰等(2010)研究了不同植被恢复年限的高寒人工草地的土壤理化性状和土壤酶活性变化特征，结果表明，随着种植年限的增加土壤总氮和速效氮前 9 年呈现逐渐下降的趋势，而种植达 14 年的人工草地土壤氮素又有增加的趋势，且与植被生产力呈正相关。冯瑞章等(2007)的研究结果表明，2 年、4 年和 6 年人工草地土壤速效氮质量分数分别为 30.89、18.29 和 20.72 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。他们认为草地-土壤系统物质循环强度与人工草地生物量产出呈正相关，要求人工草地土壤具有较高的供肥能力。张耀生等(2003)的研究发现，青海海北高寒草地生态系统国家野外科学观测研究站的高山草甸土壤中除了钾素含量较为丰富外，氮素和磷素都较为缺乏。根据土壤养分含量基本特征，在老芒麦人工草地施用氮肥、磷肥和氮磷肥配施的试验研究证明，施肥可有效补充土壤对植物的有效养分供给，促进牧草个体发育，获得较高的种子产量与生物产量，维持草地多年持续利用。总之，有不少学者关注高寒人工草地的土壤养分动态变化过程，但目前还没有查阅到有关土壤可溶性氮素方面的研究报道。本研究结果表明，青海同德单播禾本科牧草生长 3 年后，土壤中硝态氮含量下降近 80% 倍，铵态氮下降近 67% 倍，可溶性总氮下降近 60% 倍，但土壤可溶性有机氮下降不显著。与青海果洛 1 年人工草地相比较，3 年后土壤硝态氮含量下降近 50%，土壤可溶性总氮下降近 20%，土壤铵态氮和可溶性有机氮没有显著变化。

4.3 高寒草地植物对土壤氮素的吸收及对高寒人工草地建设的启示

近些年，北方森林生态系统和极地苔原生态系统中有机氮营养及氮循环问题引起了人们广泛的关注。土壤无机氮和可溶性有机氮都是这些生态系

统的重要环节，互为源汇，植物吸收有机氮及其潜在的生态价值毋庸置疑。在高寒高草草甸的实验结果也表明，高寒草甸中共存的植物种在吸收土壤不同形态氮素的能力上存在差异(Wang et al., 2012; Xu et al., 2004)，而且禾本科植物在土壤氮素吸收上也有区别，如早熟禾对硝态氮、铵态氮和有机态氮(甘氨酸和天冬氨酸)吸收比例分别为 25.4%，25.1% 和 39.6%，垂穗披碱草吸收比例分别为 47.8%，22.1% 和 30.2%，而异针茅吸收比例分别为 59.6%，14.4% 和 26.1%(Wang et al., 2012)。因此，生态系统中对植物氮吸收的研究不能仅限于硝态氮和铵态氮，更需要从铵态氮、硝态氮形成的上一个环节可溶性有机氮这个视角来探讨。

以往高寒草甸植被恢复与重建工作以草地封育、补播、施肥、灭杂等技术措施为主，牧草筛选多以产草量、越冬率和种子成熟率作为筛选指标，混播组合试验主要以上繁草/下繁草搭配为主要措施，以种植 2~3 年的产草量为标准，筛选出最佳混播组合，这种筛选方式忽略了植物间的相互作用和营养生态特征。从目前的研究结果看，上述这些结果证实土壤氮素为限制因子的生态系统植物不仅吸收无机氮，还可以有效利用可溶性有机氮源特别是氨基酸，不同的植物种在氮素吸收形态、时间和空间上存在多样化特点。而且，这种多元化的氮素获取策略与植物本身根系结构、菌根结构有密切关系。那么，在严重退化的高寒草甸上重建人工草地的过程中，引入具有不同途径获得限制性营养元素的牧草，将它们组合起来恢复退化草地不仅能够从可利用的营养库部分获得它们各自所需要的营养，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，在高寒草甸植被恢复过程中，既要筛选出适宜当地生态环境的当家草种，还要通过植物营养学的研究找出适于搭配的草种组合，这才是恢复、重建退化草地植被和维持其稳定性的根本。

参考文献:

- CHAPIN FS III, MOILANEN L, KIELLAND K. 1993. Preferential usage of organic nitrogen for growth by a non-mycorrhizal sedge [J]. *Nature*, 361: 150-152.
- JONES D L, HEALEY J R, WILLETT V B, et al. 2005. Dissolved organic nitrogen uptake by plants-an important N uptake pathway [J]. *Soil Biology & biochemistry*, 37(3): 413-423.
- KIELLAND K. 1994. Amino acid absorption by arctic plants: implications for plant nutrient and nitrogen cycling [J]. *Ecology*, 75(8): 2373-2383.
- LE BAUER D S, TRESEDER K K. 2008. Nitrogen limitation of net primary production in terrestrial ecosystems is globally distributed [J]. *Ecology*, 89(2): 371-379.
- LIPSON D A, NASHOLM T. 2001b. The unexpected versatility of plants: organic nitrogen use and availability in terrestrial ecosystems [J].

- Oecologia, 128(3): 305-316.
- LIPSON D A, RAAB T K, SCHMIDT S K. et al. 2001a. An empirical model of amino acid transformations in an alpine soil [J]. *Soil Biology Biochemistry*, 33(2): 189-198.
- MILLER A E, BOWMAN W D. 2002. Variation in nitrogen-15 natural abundance and nitrogen uptake traits among co-occurring alpine species: do species partition by nitrogen form [J]. *Oecologia*, 130(4): 609-616.
- MILLER A E, BOWMAN W D. 2003. Alpine plants show species-level difference in the uptake of organic and inorganic nitrogen [J]. *Plant and Soil*, 250(2): 283-292.
- NASHOLM T, KIELLAND K, GANETEG U. 2009. Uptake of organic nitrogen by plants [J]. *New Phytologist*, 182(1): 31-48.
- WANG W Y, MA Y G, XU J, et al. 2012. The uptake diversity of soil nitrogen nutrients by main plant species in alpine *Kobresia humilis* meadow on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 55(10): 1688-1695.
- WEINTRAUB M N. 2004. Nutrient dynamics in the arctic tundra of Alaska [D]. Ann Arbor, MI: University of California.
- XU X L, OUYANG H, CAO G M, et al. 2004. Uptake of organic nitrogen by eight dominant plant species in *Kobresia* meadows [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 69(1): 5-10.
- 曹广民, 吴琴, 李东, 等. 2004. 土壤-牧草氮素供需状况变化对高寒草甸植被演替与草地退化的影响[J]. *生态学杂志*, 23(6): 25-28.
- 冯瑞章, 周万海, 龙瑞军, 等. 2007. 江河源区不同建植期人工草地土壤养分及微生物量磷及磷酸酶活性研究[J]. *草业学报*, 16(6): 1-6.
- 马玉寿, 郎百宁, 李青云, 等. 2002. 江河源区高寒草甸退化草地恢复与重建技术研究[J]. *草业科学*, 19(12): 1-5.
- 王启基, 景增春, 王文颖, 等. 1997. 青藏高原高寒草甸草地资源环境及可持续发展研究[J]. *青海草业*, 6(3): 1-11.
- 王启兰, 王长庭, 刘伟, 等. 2010. 江河源区人工草地植物群落和土壤酶活性变化[J]. *应用与环境生物学报*, 16(5): 662-666.
- 王文颖, 周华坤, 杨莉, 等. 2014. 高寒藏嵩草草甸植物对土壤氮素利用的多元化特征[J]. *自然资源学报*, 29(2): 249-255.
- 杨绒, 严德翼, 周建斌. 2007. 黄土高原不同类型土壤可溶性有机氮[J]. *生态学报*, 27(4): 1397-1403.
- 张耀生, 赵新全, 黄德清. 2003. 青藏高寒牧区多年生人工草地持续利用的研究[J]. *草业学报*, 12(3): 22-27.
- 赵新全. 2011. 三江源区退化草地生态系统恢复与可持续管理[M]. 北京: 科学出版社.

Dynamics of Soil Dissolved Organic Nitrogen and Inorganic Nitrogen Pool in Alpine Artificial Grasslands

WANG Wenyong¹, LI Wenquan¹, ZHOU Huakun², KANG Qin¹, MA Xiaolin³, LIU Pan³, WANG Zhen¹

1. Department of Life and Geography Sciences, Qinghai Normal University, Qinghai 810008, China;

2. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Qinghai 810001, China;

3. The key lab of alpine wetland of Qinghai Province, Qinghai 810008, China

Abstract: This research was carried on alpine artificial grasslands in Qinghai Province. The soil dissolved organic nitrogen, soil inorganic nitrogen content and their season dynamics were analyzed, and the soil N-supplying capacity of different time was determined. This study will lay the foundation for alpine artificial grassland plants to absorb soil nitrogen. The results showed, (1) For dark chestnut soil of one year's artificial grassland in Tongde County, soil $\text{NO}_3\text{-N}$ was most dominant and account for 54%~59% of the soil dissolved total nitrogen. The second was soil dissolved organic nitrogen and account for 22%~29%. The third is soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and only account for 17%. Soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ content was increasing with growth season and up to maximum in September. Soil $\text{NO}_3\text{-N}$ was maximum in June and was decreasing with growth season. Soil dissolved total nitrogen and dissolved organic nitrogen was higher in turning green period and withering period than in thriving period. (2) For degraded alpine meadow soil of one year's artificial grassland in Guoluo County, soil $\text{NO}_3\text{-N}$ and dissolved organic nitrogen were dominant and account for 49% and 43% of the soil dissolved total nitrogen respectively. soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ only account for 8%. The season dynamics of soil $\text{NO}_3\text{-N}$ and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in Guoluo County was similar with Tongde County. Soil dissolved total nitrogen and dissolved organic nitrogen was higher in July then was decreasing with growth season. So the dissolved organic nitrogen was a important compoant in alpine meadow soil, and its content was next to soil $\text{NO}_3\text{-N}$ and far higher than $\text{NH}_4^+\text{-N}$. (3) Compared with one year's artificial grassland, soil available nitrogen was falling rapidly in three year's artificial grassland. Such as soil $\text{NO}_3\text{-N}$ content decreased nearly 80%, soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ decreased nearly 67%. Only there was no significant decline for soil dissolved organic nitrogen content. So, The decline of soil available nutrient was main reason for decline of artificial grassland productivity. (4) There was no significant difference for nitrogen content of different type among one year's artificial grasslands with different forages. But in three year's artificial grasslands, soil $\text{NO}_3\text{-N}$ content seeded *Poa crymophila* and *Puccinellia tenuiflora* was significant higher than that seeded other forages, and soil dissolved total nitrogen content seeded *Puccinellia tenuiflora* and *Elymus sibiricus* grasslands was significant higher than that seeded other forages. Therefore, plant species seeded would impact on soil nitrogen and different forage had difference for soil nitrogen requirement.

Key words: alpine artificial grasslands; soil dissolved organic nitrogen; soil inorganic nitrogen