

# 高寒草甸土壤可溶性有机氮库动态变化格局

张小静<sup>1</sup>, 王文颖<sup>1</sup>, 李文全<sup>1</sup>, 赵明德<sup>1</sup>, 王慧春<sup>1</sup>, 周华坤<sup>2</sup>, 刘攀<sup>1</sup>, 王榛<sup>1</sup>

1. 青海师范大学 生命与地理科学学院, 青海省高寒湿地省级重点实验室, 西宁 810008
2. 中国科学院 西北高原生物研究所, 西宁 810001

**摘要:** 以青海省3类典型高寒草甸为研究对象, 分析土壤可溶性有机氮库和土壤氨基酸库种类、质量分数及其季节动态变化过程, 确定牧草不同发育期土壤的供氮能力, 为进一步研究高寒草甸植物吸收土壤氮素奠定基础. 结果表明: 高寒草甸土壤中最占优势个体游离氨基酸是苯丙氨酸和天冬氨酸, 其次是亮氨酸、精氨酸、脯氨酸、组氨酸、谷氨酸、赖氨酸和甘氨酸, 它们占总游离氨基酸的80%~90%; 藏嵩草草甸生长季土壤总游离氨基酸态氮平均质量分数为 $6.90 \times 10^{-6}$ , 最高值出现在6月底. 矮嵩草草甸生长季土壤总游离氨基酸态氮平均质量分数为 $7.44 \times 10^{-6}$ , 随生长季土壤总游离氨基酸逐渐上升, 到5月底达到最大值, 随后逐渐下降. 退化矮嵩草草甸土壤总氨基酸态氮季节变化不显著, 平均质量分数为 $5.04 \times 10^{-6}$ ; 藏嵩草草甸土壤可溶性有机氮质量分数分别在4、9月初有2个高峰, 分别为 $1.711 \times 10^{-5}$ 、 $2.594 \times 10^{-5}$ , 6月底达到最低值, 仅为 $7.63 \times 10^{-6}$ ; 矮嵩草草甸土壤可溶性有机氮质量分数高峰分别在4月底和10月初, 分别为 $2.36 \times 10^{-5}$ 、 $2.036 \times 10^{-5}$ , 6月底达到最低( $1.1 \times 10^{-5}$ ); 退化矮嵩草草甸土壤可溶性有机氮质量分数季节动态与矮嵩草草甸相似, 最高值出现在4月底, 为 $1.582 \times 10^{-5}$ , 最低值出现在6月( $5.57 \times 10^{-6}$ ); 矮嵩草草甸土壤可溶性有机氮质量分数占土壤可溶性总氮的50.01%, 土壤铵态氮占可溶性总氮的49.99%. 土壤可溶性氨基酸态氮占土壤可溶性总氮的21.80%、占土壤可溶性有机氮的43.60%. 与土壤无机氮比较, 土壤可溶性有机氮库和可溶性氨基酸态氮库在高寒草甸土壤氮素中占有重要份额, 这也是高寒植物可利用氮素的重要组成成分.

**关键词:** 高寒草甸土; 土壤可溶性有机氮; 土壤游离氨基酸; 动态变化

中图分类号: Q142.3

文献标识码: A

文章编号: 0455-2059(2016)05-0623-05

DOI: 10.13885/j.issn.0455-2059.2016.05.009

## Dynamics of soil dissolved organic nitrogen in alpine meadow

Zhang Xiao-jing<sup>1</sup>, Wang Wen-ying<sup>1</sup>, Li Wen-quan<sup>1</sup>, Zhao Ming-de<sup>1</sup>,

Wang Hui-chun<sup>1</sup>, Zhou Hua-kun<sup>2</sup>, Liu Pan<sup>1</sup>, Wang Zhen<sup>1</sup>

1. Key Laboratory of Alpine Wetland of Qinghai Province, Department of Life and Geography Sciences, Qinghai Normal University, Xining 810008, China
2. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China

**Abstract:** The soil dissolved organic nitrogen (DON) content, soil amino acids species and their season dynamics were analyzed, and the soil N-supplying capacity of different time was determined on three type alpine meadows of Qinghai Province. This study would lay the foundation for alpine meadow plants to absorb soil nitrogen. The results showed that the most dominant free amino acids in alpine meadow were phenylalanine and

收稿日期: 2015-06-29 修回日期: 2015-08-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(31260127); 国家重点研发计划项目(2016YFC0501906); 教育部春晖计划项目(Z2009-1-81010); 教育部科学技术重点项目(209133); 青海省自然科学基金项目(2016-ZJ-913)

作者简介: 王文颖(1973-), 女, 青海湟源人, 教授, 博士, e-mail: wangwy0106@163.com, 研究方向为草地生态系统碳氮循环, 通信联系人.

aspartic acid, followed by leucine, arginine, proline, histidine, glutamic acid, lysine and glycine, which make up 80%-90% of total free amino acid content. The average concentration of total free amino acids nitrogen was  $6.90 \times 10^{-6}$  dry soil for *Kobresia tibetica* meadow, reaching maximum at the end of June, and  $7.44 \times 10^{-6}$  dry soil for *Kobresia humilis* meadow, reaching maximum at the end of May, then gradually decrease with growth season. The total amino acids nitrogen content of degraded *Kobresia humilis* meadow soil varies not phenomenally with seasons, whose average concentration was  $5.04 \times 10^{-6}$ .  $w(\text{DON})$  of *Kobresia tibetica* meadow had two peaks of  $1.711 \times 10^{-5}$  and  $2.594 \times 10^{-5}$  mg/kg, respectively in early April and September, and had the minimum, only  $7.63 \times 10^{-6}$  at the end of June.  $w(\text{DON})$  of *Kobresia humilis* meadow has two peaks value,  $2.36 \times 10^{-5}$  and  $2.036 \times 10^{-5}$ , respectively by the end of April and in early October, reaching the minimum, only  $1.1 \times 10^{-5}$ , at the end of June.  $w(\text{DON})$  of degraded *Kobresia humilis* meadow soil seasonal dynamic was as similar as *Kobresia humilis* meadow, the highest value was  $1.582 \times 10^{-5}$  that appeared in the end of April, and the lowest value in the end of June was only  $5.57 \times 10^{-6}$ .  $w(\text{DON})$  of *Kobresia humilis* meadows accounted for 50.01% of soil total dissolved nitrogen, soil  $\text{NH}_4\text{-N}$  accounted for 49.99% of soil total dissolved nitrogen. Soil dissolved amino acids-N accounted for 21.80% of soil total dissolved nitrogen, soil dissolved amino acids-N accounted for 43.60% of DON in the soil. Research results showed that compared with soil inorganic nitrogen, DON and dissolved amino acids nitrogen occupied an important share in the alpine meadow soil, it was an important component of soil nitrogen which could be absorbed by alpine plants.

**Key words:** alpine meadow soil; dissolved organic nitrogen; free amino acid; dynamics change

高寒草甸是青藏高原广泛分布的主要植被类型之一,据粗略测算,青藏高原的高寒草甸面积有  $7.0 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 约占青藏高原可利用草场的 50%。高寒草甸不仅为当地居民的生活和社会生产提供物质基础,还具有其他任何手段都不能代替的调节气候、涵养水源、保持水土、改善环境等多种生态功能,在维持自然界的生态平衡中,起着十分重要的作用。

在高寒草甸、苔原及北方森林生态系统中,植物每年摄取的氮量远高于土壤氮净矿化量<sup>[1-4]</sup>。Chapin 等<sup>[5]</sup>的研究第一次证明非菌根维管植物嗜好吸收和利用可溶性有机氮,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,它吸收的氮至少有 60% 来自于氨基酸。目前,随着研究手段的改进和研究内容的不断深入,越来越多的研究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土壤可溶性有机氮(dissolved organic nitrogen, DON)如尿素、氨基酸、多胺等,其中氨基酸是 DON 的主要组成成分,有机氮在植物所吸收的总氮中占有相当的比例<sup>[6-7]</sup>。植物吸收的有机氮占吸收总氮量的 10%~100%,这主要归因于不同的植物和群落<sup>[5, 8-13]</sup>。

嵩草草甸土壤中氮素营养是草场生产力的重要限制因子之一,该类土壤中 95% 以上的氮以有机态氮形态出现,无机氮仅占土壤全氮的 1% 左右<sup>[14-16]</sup>。在高寒草甸,植物对土壤无机氮吸收方面的研究较多,但对 DON 库(特别是氨基酸库)及其高寒植物对土壤有机氮的利用性方面的研究很

少。本研究的主要目的是了解高寒草甸在整个生长季 DON 库和土壤氨基酸库种类、质量分数及其季节动态变化过程,确定牧草不同发育期土壤的供氮能力,为进一步研究高寒草甸植物吸收土壤氮素奠定基础。

## 1 研究区自然地理概况

本研究在中国科学院高寒草甸生态系统开放实验站(简称定位站)进行,该站位于青藏高原的东北隅,祁连山东段北支冷龙岭的南坡,大通河河谷的西北部,地处  $37^{\circ}29' \sim 37^{\circ}45' \text{ N}$ ,  $101^{\circ}12' \sim 101^{\circ}23' \text{ E}$ , 冷龙岭与大坂山耸立于定位站的南北两侧,是世界海拔最高的草甸类型实验站。山地平均海拔 4 000 m, 站区内以滩地和丘陵低山为主,平均海拔 3 200 m。定位站年平均气温为  $-1.7^{\circ} \text{ C}$ , 最高气温为  $23.7^{\circ} \text{ C}$ , 最低气温为  $-37.1^{\circ} \text{ C}$ 。年降水量 580 mm, 其中 80% 的降水集中在植物生长季。年平均日照时数为 2 462.7 h, 年总辐射为  $585.5 \text{ kJ/cm}^2$ 。植被类型主要有矮嵩草草甸、藏嵩草草甸和金露梅灌丛,主要土壤类型为高山草甸土、高山沼泽土和高山灌丛草甸土。土壤特点为发育年轻、土层薄,具有 10~15 cm 厚的坚韧的草结皮层,  $\text{pH} = 7 \sim 8$ 。土壤有机质质量分数高,总氮、总磷和钾的储量较丰富。

## 2 材料与方法

### 2.1 样地选设

本研究选择了 3 类高寒草甸: 藏嵩草草甸、矮嵩草草甸、退化矮嵩草草甸,同时记录每个样地经

纬度、海拔高度、植被覆盖度、优势种等生态因子。

### 2.2 取样与分析

分析3类草甸2014年4-10月土壤游离氨基酸及其DON动态变化。取样时间分别为: 4月13日、4月27日、5月31日、6月30日、8月2日、9月1日、10月2日。每个草甸类型设置3个10 m×10 m的重复样地, 共计9个样地。每次取样时每个样地随机收集0~10 cm深度的10个土核(直径为3.5 cm), 同一样地采集的土壤混合成一个样品。同时用铝盒采集0~10 cm层土样测定土壤含水量。收集的土样在野外过5 mm筛, 移出砾石和根系后放入冰盒运回实验室后4 °C冷藏。土壤浸提液提取方法如下: 每个土样(等同于干土60 g) 在300 mL 0.5 mol/L K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液中震荡1 h, 静置0.5 h后过滤, 滤液冷冻待分析。反相高效液相色谱仪测定滤液中游离氨基酸(free amino acids, FAA)的种类与质量分数, 用凯式定氮仪(FOSS 2400)测定滤液中的可溶性总氮(dissolved total nitrogen, DTN)质量分数, 用流动注射分析系统测定滤液中的铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)质量分数, DTN和铵态氮质量分数之差则为w(DON)。

### 2.3 统计与分析

不同草甸类型土壤总游离氨基酸质量分数、w(DON)为3个重复样地的算术平均值。通过单因素方差分析检验参数在各草甸类型间差异的显著性, 以上分析均在SPSS 11.0统计软件上完成。

## 3 研究结果

### 3.1 高寒藏嵩草草甸、矮嵩草草甸和退化矮嵩草草甸土壤FAA种类

高寒藏嵩草草甸、矮嵩草草甸和退化矮嵩草草甸土壤浸提液有17种FAA: 天冬氨酸、丝氨酸、谷氨酸、甘氨酸、组氨酸、精氨酸、苏氨酸、丙氨酸、脯氨酸、半胱氨酸、酪氨酸、缬氨酸、甲硫氨酸、赖氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸(表1)。3类草甸土壤中最占优势个体FAA均为苯丙氨酸和天冬氨酸, 其次是亮氨酸、精氨酸、脯氨酸、组氨酸、谷氨酸、赖氨酸和甘氨酸, 这些氨基酸占总游离氨基酸总量的80%~90%。

矮嵩草草甸和藏嵩草草甸土壤FAA总质量浓度分别为12.144、11.162 mg/L, 退化矮嵩草草甸土中FAA质量浓度仅为8.692 mg/L(表1)。另外, 矮嵩草草甸绝大部分FAA质量浓度显著高于退化矮嵩草草甸。除丙氨酸、缬氨酸外, 矮嵩草草甸和藏嵩草草甸土壤FAA之间差异不显著。

表1 不同类型草甸土壤FAA种类及其质量浓度  
Table 1 Free amino acid species and concentration in different type meadows mg/L

氨基酸种类	藏嵩草草甸	矮嵩草草甸	退化矮嵩草草甸
天冬氨酸	2.180(0.144) <sup>a</sup>	2.074(0.228) <sup>a</sup>	1.853(0.196) <sup>a</sup>
丝氨酸	0.182(0.031) <sup>ab</sup>	0.258(0.061) <sup>a</sup>	0.129(0.023) <sup>b</sup>
谷氨酸	0.409(0.045) <sup>ab</sup>	0.586(0.103) <sup>a</sup>	0.331(0.038) <sup>b</sup>
甘氨酸	0.279(0.032) <sup>ab</sup>	0.327(0.044) <sup>a</sup>	0.174(0.021) <sup>b</sup>
组氨酸	0.376(0.041) <sup>ab</sup>	0.519(0.089) <sup>a</sup>	0.240(0.029) <sup>b</sup>
精氨酸	0.709(0.104) <sup>a</sup>	0.765(0.113) <sup>a</sup>	0.411(0.060) <sup>b</sup>
苏氨酸	0.276(0.030) <sup>ab</sup>	0.359(0.065) <sup>a</sup>	0.171(0.034) <sup>b</sup>
丙氨酸	0.154(0.022) <sup>a</sup>	0.103(0.014) <sup>b</sup>	0.095(0.016) <sup>b</sup>
脯氨酸	0.437(0.058) <sup>a</sup>	0.568(0.083) <sup>a</sup>	0.241(0.044) <sup>b</sup>
半胱氨酸	0.398(0.066) <sup>a</sup>	0.417(0.068) <sup>a</sup>	0.179(0.027) <sup>b</sup>
酪氨酸	0.122(0.008) <sup>a</sup>	0.094(0.013) <sup>ab</sup>	0.079(0.018) <sup>b</sup>
缬氨酸	0.136(0.027) <sup>a</sup>	0.081(0.012) <sup>b</sup>	0.074(0.013) <sup>b</sup>
甲硫氨酸	0.417(0.065) <sup>a</sup>	0.391(0.064) <sup>a</sup>	0.216(0.020) <sup>b</sup>
赖氨酸	0.269(0.044) <sup>a</sup>	0.265(0.047) <sup>ab</sup>	0.117(0.017) <sup>b</sup>
异亮氨酸	0.192(0.039) <sup>a</sup>	0.417(0.038) <sup>a</sup>	0.130(0.032) <sup>a</sup>
亮氨酸	1.028(0.144) <sup>ab</sup>	1.197(0.167) <sup>a</sup>	0.735(0.112) <sup>b</sup>
苯丙氨酸	3.607(0.123) <sup>a</sup>	3.723(0.581) <sup>a</sup>	3.511(0.239) <sup>a</sup>

a、b表示不同草地类型间为差异显著, 括号内数字是标准误差, P=0.05。

### 3.2 高寒藏嵩草草甸、矮嵩草草甸和退化矮嵩草草甸土壤总氨基酸态氮和w(DON)季节动态

高寒藏嵩草草甸、矮嵩草草甸和退化矮嵩草草甸土壤总游离氨基酸态氮质量分数存在差异。藏嵩草草甸整个生长季总游离氨基酸态氮平均质量分数为6.90×10<sup>-6</sup>, 变化范围为5.47×10<sup>-6</sup>~8.29×10<sup>-6</sup>, 最高值出现在6月30日左右(图1)。矮嵩草草甸生

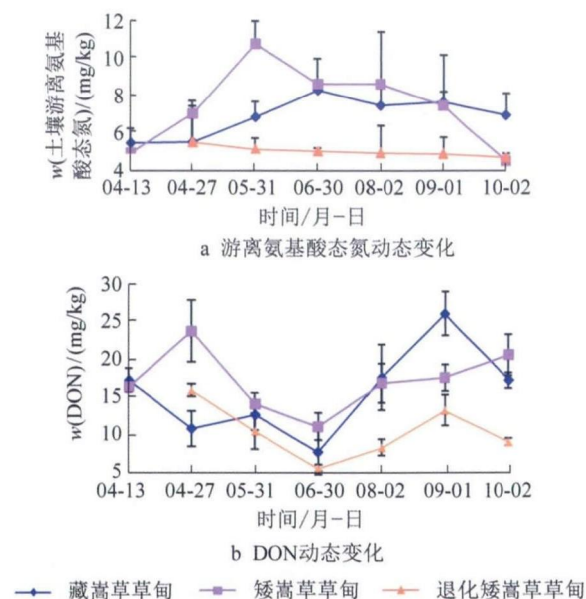


图1 高寒草甸土壤游离氨基酸态氮及其DON动态变化

Fig. 1 Concentration of free amino acids and dissolved organic nitrogen along season changes in alpine meadow soils

长季总游离氨基酸态氮平均质量分数为  $7.44 \times 10^{-6}$ , 变化范围为  $4.50 \times 10^{-6} \sim 1.082 \times 10^{-5}$ . 季节动态变化显著, 随生长季的开始, 总游离氨基酸逐渐上升, 于5月31日左右达到最大值, 随后逐渐下降, 在10月初达到最低值. 退化矮嵩草草甸土壤总氨基酸态氮季节变化不显著, 平均质量分数为  $5.04 \times 10^{-6}$ .

高寒藏嵩草草甸、矮嵩草草甸和退化矮嵩草草甸 DON 季节动态均表现为双峰曲线(图1). 藏嵩草草甸  $w(\text{DON})$  分别在4月初和9月初有2个高峰, 分别为  $1.711 \times 10^{-5}$ 、 $2.594 \times 10^{-5}$ , 在植物生长最旺盛的季节(6月底-7月初)达到最低值( $7.63 \times 10^{-6}$ ). 矮嵩草草甸  $w(\text{DON})$  高峰分别在4月底和10月初, 分别为  $2.36 \times 10^{-5}$ 、 $2.036 \times 10^{-5}$ , 6月底7月初达到最低值( $1.1 \times 10^{-5}$ ). 退化矮嵩草草甸  $w(\text{DON})$  季节动态与矮嵩草草甸相似, 但比原生矮嵩草草甸低, 最高值出现在4月27日( $1.582 \times 10^{-5}$ ), 最低值出现在6月底( $5.57 \times 10^{-6}$ ).

### 3.3 高寒草甸土壤可利用性氮形态之间的相互关系

高寒草甸土壤可利用性氮形态之间的相互关系见表2. 矮嵩草草甸土壤 DTN 中铵态氮和 DON 近乎各占一半, 而 DTN 中氨基酸态氮占 21.80%, DON 中氨基酸态氮占 43.60%. 藏嵩草草甸土壤 DON 占 DTN 的 39.28%, 铵态氮占 DTN 的 60.74%.

表2 高寒草甸土壤可利用性氮素之间相互关系  
Table 2 Relationship between different nitrogen forms on alpine meadow

类型	氨基酸态氮	$w(\text{DON})$	$w(\text{DTN})$	$w(\text{NH}_4^+)$
藏嵩草草甸	6.90	15.52	39.51	24.00
矮嵩草草甸	7.44	17.07	34.13	17.06
退化矮嵩草草甸	5.04	10.38	25.99	15.60

矮嵩草草甸退化后土壤  $w(\text{DTN})$ 、 $w(\text{DON})$  显著下降. 从比值看, 退化草地中 DON 占 DTN 的 39.93%, 铵态氮占 DTN 的 60.02%. 表明矮嵩草草甸退化导致土壤中可溶性氮以无机的铵态氮为主要成分, 同时 DTN 中 DON 降低, 也说明草甸退化导致土壤中有有机氮的矿化作用显著加强.

## 4 讨论

### 4.1 DON 的形态

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 DON 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 DON, 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, 一般都是将这个有机氮库与无机氮库做比较<sup>[17]</sup>.

土壤氨基酸仅一小部分以个体氨基酸的形式溶解在土壤溶液中, 这一部分也叫“游离氨基酸”. 土壤提取液和孔隙水中有多种类型的氨基酸, 尽管有些碱性氨基酸(如赖氨酸、精氨酸、组氨酸)和中性氨基酸(如丙氨酸、丝氨酸、谷氨酰氨、亮氨酸)的浓度有时也很高, 但一般来说甘氨酸、天冬氨酸、谷氨酸是土壤溶液中最常见的氨基酸<sup>[6]</sup>. 高山草甸土土壤孔隙水中氨基酸浓度为  $13 \sim 158 \mu\text{mol/L}$ , 甘氨酸(中性)为主要成分, 亚高山沼泽地土壤孔隙水中氨基酸浓度为  $15 \sim 20 \mu\text{mol/L}$ , 天冬氨酸为主要成分, 这些土壤中的高浓度氨基酸主要来自土壤蛋白酶对土壤蛋白质的水解作用<sup>[18]</sup>. 本研究结果显示高寒草甸土中占优势的游离氨基酸为苯丙氨酸和天冬氨酸, 其次是亮氨酸、精氨酸、脯氨酸、组氨酸、谷氨酸、赖氨酸和甘氨酸, 与其他研究结果基本一致. 但需指出苯丙氨酸是高寒草甸土中一类优势的游离氨基酸, 而这种氨基酸在其他生态系统中很少涉及或报道.

### 4.2 土壤中游离氨基酸的来源及其浓度

土壤中的氨基酸主要来源于微生物、动植物及其代谢产物等. 土壤溶液中的自由氨基酸, 它们或者是土壤有机质的降解产物, 或者是植物根细胞的溶解物或溢泌物, 土壤中的微生物和动物也能分泌一些氨基酸到土壤溶液中. 土壤有机质的分解是氨基酸的直接来源, 这些有机质包括土壤固有的有机质和外部加入的有机肥料(动植物残体)<sup>[19-20]</sup>.

氨基酸产生的数量大小主要取决于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, 而蛋白水解作用是这个步骤的限制因素. 底物无限、温度适宜时测得的潜在蛋白水解率比净氮矿化率大好几个数量级. 在科罗拉多高山草甸模拟自然条件下的两项研究测定了蛋白水解速率, 结果表明该系统每年蛋白水解率为  $42 \sim 109 \mu\text{g/g}^{19, 18}$ , 这个值比该系统总氮矿化率高一点, 比净氮矿化率高许多<sup>[21]</sup>. 目前多项研究公布的土壤蛋白水解率一般为  $0.1 \sim 4.0 \mu\text{mol/g}$ . 这些结果表明在大多数生态系统中, 氨基酸态氮通流量比植物氮需求高, 但大多数氨基酸被微生物量固定或被土壤颗粒吸附.

Lipson 等<sup>[6]</sup>的研究显示不同生态系统中土壤提取液氨基酸态氮质量分数为  $4.0 \times 10^{-8} \sim 2.4 \times 10^{-5}$ , 而土壤孔隙水中氨基酸质量分数高达  $1.58 \times 10^{-4}$ . Weintraub<sup>[22]</sup> 研究湿苔原水提取土壤溶液中游离氨基酸质量分数为  $2.0 \times 10^{-6} \sim 8.0 \times 10^{-6}$ , 而无机氮质量分数仅为  $5.0 \times 10^{-7} \sim 1.1 \times 10^{-6}$ . 杨绒等<sup>[23]</sup>测定了黄土高原地区不同生态系统中  $w(\text{DON})$  和游离氨基酸质量分数, 结果表明黑垆土、红油土和淋溶褐土中平均  $w(\text{DON})$  分别为  $2.475 \times 10^{-5}$ 、 $3.91 \times 10^{-5}$ 、 $4.18 \times 10^{-5}$ , 分别占 DTN 的 51.25%、68.28%、68.57%. 本研究结果显示藏嵩草草甸整个生长季总游离氨基酸态氮平均质量分数为  $6.9 \times 10^{-6}$ , 整个生长季变化范围为  $5.47 \times 10^{-6} \sim 8.29 \times 10^{-6}$ . 矮嵩草草甸土壤总游离氨基酸态氮平均质量分数为  $7.44 \times 10^{-5}$ , 变化范围为  $4.5 \times 10^{-6} \sim 1.082 \times 10^{-5}$ . 退化矮嵩草草甸土壤总氨基酸态氮季节变化不显著, 平均质量分数为  $5.04 \times 10^{-6}$ . 3 类草甸中土壤 DON 占 DTN 的 39%~50%, DON 中氨基酸态氮占 44%~48%. 研究结果证明与土壤无机氮比较, DON 库和可溶性氨基酸态氮库在高寒草甸土壤氮素中占有重要份额, 也是研究植物对土壤氮素吸收组分中不可或缺的重要组成部分.

## 参考文献

- [1] Nadelhoffer K J, Giblin A E, Shaver G R, et al. Effects of temperature and substrate quality on element mineralization in six arctic soils[J]. *Ecology*, 1991, 72(1): 242-253.
- [2] Fisk M C, Schmidt S K, Seastedt T R. Topographic patterns of production and nitrogen cycling in alpine tundra[J]. *Ecology*, 1998, 79(2): 2253-2266.
- [3] Kaye J, Hart S C. Competition for nitrogen between plants and soil microorganisms[J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 1997, 12: 139-143.
- [4] 曹广民, 吴琴, 李东, 等. 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*, 2004, 23(6): 25-28.
- [5] Chapin F S III, Moilanen L, Kielland K. Preferential usage of organic nitrogen for growth by a non-mycorrhizal sedge[J]. *Nature*, 1993, 361: 150-152.
- [6] Lipson D, Nasholm T. The unexpected versatility of plants: organic nitrogen use and availability in terrestrial ecosystems[J]. *Oecologia*, 2001, 128: 305-316.
- [7] Nasholm T, Kielland K, Ganeteg U. Uptake of organic nitrogen by plants[J]. *New Phytologist*, 2009, 182: 31-48.
- [8] Kielland K. Amino acid absorption by arctic plants: implications for plant nutrient and nitrogen cycling[J]. *Ecology*, 1994, 75(3): 2373-2383.
- [9] Lipson D A, Raab T K, Schmidt S K, et al. An empirical model of amino acid transformations in an alpine soil[J]. *Soil Biology Biochemistry*, 2001, 33(2): 189-198.
- [10] Miller A, Bowman W D. Variation in nitrogen-15 natural abundance and nitrogen uptake traits among co-occurring alpine species: do species partition by nitrogen form? [J]. *Oecologia*, 2002, 130: 609-616.
- [11] Miller A E, Bowman W D. Alpine plants show species-level difference in the uptake of organic and inorganic nitrogen[J]. *Plant and Soil*, 2003, 250: 283-292.
- [12] Wang Wen-ying, Ma Yong-gui, Xu Jin, et al. 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*, 2012, 55(10): 1688-1695.
- [13] 王文颖, 周华坤, 杨莉, 等. 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*, 2014, 29(2): 249-255.
- [14] 周兴民. 中国嵩草草甸[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [15] 孙小妹, 肖美玲, 师瑞玲, 等. 营养元素添加对青藏高原亚高寒草甸物种多度分布格局的影响[J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2014, 50(6): 853-859.
- [16] 刘旻霞, 王刚, 盛红梅. 高寒草甸阳坡-阴坡梯度上环境因子特征及其与地上生物量和物种丰富度的关系[J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2013, 49(1): 76-81.
- [17] Jones D L, Healey J R, Willett V B, et al. Dissolved organic nitrogen uptake by plants-an important N uptake pathway[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37: 413-423.
- [18] Raab T K, Lipson D A, Monson R K. Soil amino acid utilization among species of cyperaceae: plant and soil processes[J]. *Ecology*, 1999, 80(7): 2408-2419.
- [19] 马林. 植物对氨基酸的吸收和利用[J]. *西南科技大学学报*, 2004, 19(1): 102-106.
- [20] 王文颖, 刘俊英. 植物吸收利用有机氮营养研究进展[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(5): 1223-1228.
- [21] Fisk C, Schmidt S K. Nitrogen mineralization and microbial biomass nitrogen dynamics in three alpine tundra communities[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1995, 59: 1036-1043.
- [22] Weintraub M N. Nutrient dynamics in the Arctic Tundra of Alaska[D]. Ann Arbor: ProQuest Information and Learning Company, 2004.
- [23] 杨绒, 严德翼, 周建斌. 黄土高原不同类型土壤 DON[J]. *生态学报*, 2007, 27(4): 1397-1403.

(责任编辑: 王春燕)