

三江源区土地利用方式对土壤氮素特征的影响

李亚娟¹, 王亚亚², 曹广民³, 龙瑞军², 姚拓¹

(1. 甘肃农业大学草业学院/草业生态系统教育部重点实验室/中美草地畜牧业可持续发展研究中心

/甘肃省草业工程实验室, 甘肃 兰州 730070;

2. 兰州大学草地农业科技学院, 甘肃 兰州 730020; 3. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810008)

摘要: 以三江源区曲麻莱县高寒草甸草原、退化高寒草甸草原、退化高寒草原和人工草地 4 种土地利用方式为研究对象, 研究了不同土地利用方式的土壤全氮、有效氮、铵态氮、硝态氮、无机氮总量及比例, 结果表明: 4 种土地利用方式土壤的氮素含量均处于较低水平, 在 0~10 cm 土层, 土壤全氮与有效氮含量表现出相似的规律性, 人工草地最高, 退化高寒草甸草原最低。与高寒草甸草原相比, 退化高寒草甸草原 0~10 cm 土层全氮和有效氮含量分别降低了 52.4% 和 76.2%, 而 10~40 cm 土层的全氮和有效氮含量却明显增加。对土壤铵态氮和硝态氮含量的研究结果进一步表明, 研究区域土壤中无机氮以硝态氮为主, 退化导致 0~10 cm 土层的铵态氮和硝态氮含量降低, 退化和人工种植均导致 0~10 cm 土层硝态氮含量明显降低, 而 10~20 cm 和 20~40 cm 土层的硝态氮含量明显升高, 且这两个土层之间差异不显著, 40~60 cm 土层又明显降低。因此, 退化和人工种植均导致土壤硝态氮沿土壤剖面淋溶下移, 并且淋溶主要发生在 0~40 cm 深度的土壤中。土壤无机氮总量与硝态氮表现出相似的规律性, 对土壤无机氮总量和比例的研究也表明退化加剧了土壤氮素的矿化过程。

关键词: 土地利用方式; 高寒草甸; 土壤全氮; 土壤有效氮; 土壤铵态氮; 土壤硝态氮

中图分类号: S153 **文献标志码:** A

Effect of land use patterns on soil nitrogen characteristics in Three-river Headwater Area

LI Ya-juan¹, Wang Ya-ya², CAO Guang-min³, LONG Rui-jun², YAO Tuo¹

(1. College of Pastoral Science, Gansu Agricultural University; Key Laboratory of Grassland Ecosystem,

Ministry of Education; Sino-U.S. Centers for Grazingland Ecosystem Sustainability, Lanzhou, Gansu Province 730070, China;

2. College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu Province 730020, China;

3. Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining, Qinghai Province 810008, China)

Abstract: Four land use patterns, i.e., alpine meadow steppe, degraded alpine meadow steppe, degraded alpine steppe and artificial grassland, were selected to study effect of land use patterns on the soil nitrogen characteristics. Soil total nitrogen, available nitrogen, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, total inorganic nitrogen (TIN) and its percentage were determined. The results showed that soil nitrogen content of four land use types were all at a lower level. Soil total and available nitrogen of four land use patterns changed similarly in 0~10 cm soil depth, and the artificial grassland was the highest, the degraded alpine meadow steppe was the lowest. Soil total and available nitrogen in 0~10 cm soil depth for the degraded alpine meadow steppe decreased 52.4% and 76.2% respectively, but those in 10~40 cm soil increased significantly compared with the alpine meadow steppe. The results of soil ammonium and nitrate nitrogen showed that nitrate nitrogen was the main inorganic nitrogen in soil. Degradation caused both ammonium nitrogen and nitrate nitrogen in 0~10 cm soil depth decreasing. Both degradation and artificial planting caused nitrate nitrogen decreased in 0~10 cm soil depth, but increased in 10~20 cm and 20~40 cm soil depth, and there was no significant difference between the two soil depth, while soil nitrate nitrogen decreased in 40~60 cm soil depth. There were no significant differences for both ammonium nitrogen and nitrate nitrogen in 40~60 cm soil among four land use patterns. Therefore, both

degradation and artificial planting caused nitrate nitrogen leaching down in soil profile, and the leaching mainly happened in 0 ~ 40 cm soil depth. Soil total inorganic nitrogen showed a similar trend with soil nitrate nitrogen. The results of total inorganic nitrogen content and the percentage showed that degradation process increased soil nitrogen mineralization.

Keywords: land use patterns; alpine meadow; total soil nitrogen; available soil nitrogen; soil ammonium nitrogen; soil nitrate nitrogen

三江源区位于青海省青藏高原,高寒草甸草原是三江源区的主要草地类型,它不仅是高原畜牧业生产的物质基础,也是我国内陆及东亚地区重要的生态屏障^[1-3]。由于全球气候变暖和人类活动的影响,近年来,三江源区高寒草甸退化逐年加剧,中度以上退化草甸面积占可利用草甸面积的 50% ~ 60%,其中 40%以上已沦为次生裸地或几乎无利用价值的典型“黑土滩”退化草甸^[4-5]。高寒草甸草原为三江源区的原生草地类型,由于退化而变为退化高寒草甸草原,环境退化又促使气候干旱和蒸发量的上升,进而反过来加剧草场退化,退化高寒草甸草原演化为退化高寒草原^[6],由于畜牧业对饲草料的需求、极度退化草地的人工恢复等原因,人工草地在青藏高原也有广泛分布。最终引起当地土地利用方式的变化^[7],导致进入土壤中的肥料和植物残体的数量和性质各异^[8]。

土壤氮素是植物生长所需的重要元素之一,土壤的氮素含量是土壤氮素矿化与积累平衡的结果,而土壤水分管理、耕作方式等农艺措施的差异,也会影响土壤氮素的矿化、运输和植物的吸收与利用,从而造成土壤氮素特征的差异^[9]。土壤中能被植物直接利用的氮素主要是铵态氮和硝态氮,这两种形态的氮在土壤中的含量很少,主要来源于土壤有机氮的氨化和硝化,土地利用方式的变化通过影响土壤条件而对土壤氮素形态产生影响。人们对农田和林

地生态系统土壤的铵态氮和硝态氮已做了很多研究^[10-13],但是对草地生态系统的研究还比较少。本研究以三江源区高寒草甸草原、退化高寒草甸草原、退化高寒草原及人工草地四种利用方式草地为研究对象,研究利用方式变化对土壤全氮、有效氮以及无机氮形态的影响,揭示该地区利用方式变化对土壤氮素的生态意义,深入了解生态系统变化的内在原因,为当地草地资源的可持续利用和生态环境保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于三江源区的青海省曲麻莱县约改滩,海拔约 4 200 ~ 4 900 m,高原大陆性气候,多风少雨,干燥寒冷,太阳辐射强。年均温约 -2.6℃,无绝对无霜期,年降水量 385 mm。样地原生草地类型为高寒草甸草原,土壤类型为高山草原土,土层厚度 60 cm,质地为砂壤质。各样地基本概况见表 1。

1.2 土壤样品采集与处理

2015年8月在青海省曲麻莱县约改滩高寒草甸草原、退化高寒草甸草原、退化高寒草原及人工草地四种土地利用方式草地进行土壤样品的采集,每个样地随机选取 3 个采样点,样点均分布于滩地上(坡度 < 5°),用直径为 6 cm 的土钻分别对 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60 cm 深度的土壤取样,分层分别

表 1 曲麻莱不同利用方式高寒草地概况

Table 1 Grassland situation of the different land use patterns in Qumalai county

利用方式 Land use patters	地理位置 Geographic coordinates	海拔高度 Altitude/m	草地概况 Grassland condition
高寒草甸草原 Alpine meadow steppe	34°08'N, 95°51'E	4884	多为冬春牧场,放牧强度低,植被以小嵩草、紫花针茅、双叉细柄茅、火绒草二裂委陵菜、棘豆、黄芪、兔儿草、早熟禾、雪白委陵菜、细叶亚菊为主,总盖度 80%。
	34°08'N, 95°50'E	4886	
	34°08'N, 95°50'E	4888	
退化高寒草甸草原 Degraded alpine meadow steppe	34°08'N, 95°50'E	4270	处于草甸草原向草原转化进程,超载放牧下退化为沙地,草地植物有风毛菊、早熟禾、黄芪、棘豆、二裂委陵菜、蒲公英、高山唐蒿草、羊茅、双叉细柄茅、恰草、嵩草,植被盖度 20%。
	34°08'N, 95°50'E	4272	
	34°08'N, 95°50'E	4270	
退化高寒草原 Degraded alpine steppe	34°49'N, 95°0'E	4322	植物以双叉细柄茅为主,呈丛状分布,杂类草有百宝筋骨草、大唇马先蒿、蒲公英、细叶亚菊、黄芪、火绒草、二裂委陵菜,植被盖度 10%,剥蚀 90% ~ 95%。
	34°49'N, 95°0'E	4326	
	34°49'N, 95°0'E	4314	
人工草地 Artificial grassland	34°08'N, 95°48'E	4270	建植人工草地前为重度退化草原,2002 年建植垂穗披碱草人工草地,已严重退化,土壤表面有凋落物,植被盖度 < 30%,草高 45 cm,地表覆石约 65%。
	34°08'N, 95°48'E	4276	
	34°08'N, 95°48'E	4274	

装袋,用孔径 2 mm 土壤筛分出根系和土壤,新鲜土样用于氮素形态测定,同时将土壤样品风干,过 1 mm 和 0.25 mm 筛备用,过 1 mm 筛风干土样用于土壤有效氮含量的测定,过 0.25 mm 筛风干土样用于土壤全氮含量的测定。

1.3 测定方法

全氮和有效氮含量用风干土样测定,全氮采用半微量凯氏定氮法,有效氮采用碱解扩散吸收法^[14]。土壤铵态氮和硝态氮用 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ 提取,流动注射分析仪器测定^[15-16],仪器型号为 O. I. Analytical - FS3100。无机氮总量为铵态氮和硝态氮之和,无机氮比例 = (铵态氮 + 硝态氮)/有效氮。

所有试验数据均采用 Excel2003 计算整理,采用 SPSS17.0 进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 利用方式对土壤全氮及有效氮含量的影响

土壤全量养分是养分的库,是土壤养分的容量指标;而土壤有效养分是能够被作物吸收利用的养分,是土壤养分的强度指标,土壤全氮和有效氮对植物生长有着重要影响^[17]。不同利用方式草地土壤的全氮和有效氮含量见表 2。由表 2 可以看出,4 种利用方式土壤的全氮水平较低,除人工草地的 0 ~ 10 cm 土层外,全氮含量均在 $0.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下。在 0 ~ 10 cm 土层,土壤全氮含量的顺序为人工草地 > 高寒草甸草原 > 退化高寒草原 > 退化高寒草甸草原,相比高寒草甸草原,退化高寒草甸草原全氮含量降低了 52.4%,表明退化造成表层土壤氮素总量急剧下降,人工草地表层土壤的全氮水平为四种利用方式最高。而 10 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层全氮含量均表现出退化高寒草甸草原 > 人工草地 > 高寒草甸草原 > 退化高寒草原的顺序,40 ~ 60 cm 土层的有机碳和全氮含量在利用方式之间差异不显著 ($P > 0.05$)。

在 0 ~ 10 cm 土层,利用方式之间土壤有效氮含量与全氮表现出相似的规律性,即人工草地最高,退化高寒草甸草原最低。而在 10 ~ 20 cm 土层,土壤有效氮含量的顺序为退化高寒草甸草原 > 高寒草甸草原 > 人工草地 > 退化高寒草原,20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 土层均表现为退化高寒草甸草原 > 人工草地 > 高寒草甸草原 > 退化高寒草原。这表明退化后 10 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层土壤有效氮均高于 0 ~ 10 cm 土层,差异显著 ($P < 0.05$),尤其在退化高寒

草甸草原利用方式表现得更为严重,0 ~ 10 cm 土层有效氮含量极低,仅为 $14.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而 10 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层却分别高达 $121.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $84.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

表 2 不同利用方式土壤全氮和有效氮含量

Table 2 Soil total N and available N content of different land use patterns

利用方式 Land use patterns	土层 Soil depth /cm	土壤全氮 Soil total N /($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	土壤有效氮 Soil available N /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
高寒草甸草原 Alpine meadow steppe	0 ~ 10	$0.21 \pm 0.01\text{bB}$	$62.7 \pm 3.9\text{bA}$
	10 ~ 20	$0.31 \pm 0.02\text{bA}$	$61.7 \pm 5.2\text{bA}$
	20 ~ 40	$0.21 \pm 0.03\text{dC}$	$34.3 \pm 3.5\text{cB}$
	40 ~ 60	$0.12 \pm 0.01\text{aC}$	$28.5 \pm 3.0\text{bB}$
退化高寒草甸草原 Degraded alpine meadow steppe	0 ~ 10	$0.10 \pm 0.01\text{cC}$	$14.9 \pm 3.1\text{dD}$
	10 ~ 20	$0.48 \pm 0.02\text{aA}$	$121.0 \pm 10.1\text{aA}$
	20 ~ 40	$0.45 \pm 0.02\text{aB}$	$84.5 \pm 4.0\text{aB}$
	40 ~ 60	$0.11 \pm 0.02\text{aC}$	$65.2 \pm 4.7\text{aC}$
退化高寒草原 Degraded alpine steppe	0 ~ 10	$0.19 \pm 0.01\text{bB}$	$30.1 \pm 2.5\text{cB}$
	10 ~ 20	$0.15 \pm 0.01\text{cC}$	$43.7 \pm 4.6\text{cA}$
	20 ~ 40	$0.23 \pm 0.01\text{cA}$	$19.6 \pm 2.3\text{dC}$
	40 ~ 60	$0.16 \pm 0.01\text{aC}$	$14.0 \pm 1.8\text{cC}$
人工草地 Artificial grassland	0 ~ 10	$0.63 \pm 0.03\text{aA}$	$94.7 \pm 8.0\text{aA}$
	10 ~ 20	$0.40 \pm 0.03\text{aB}$	$74.0 \pm 6.3\text{bB}$
	20 ~ 40	$0.22 \pm 0.01\text{bC}$	$58.8 \pm 2.8\text{bC}$
	40 ~ 60	$0.17 \pm 0.01\text{aC}$	$29.4 \pm 3.1\text{bD}$

注:表中数据为平均值 ± 标准差;小写字母不同者表示不同土地利用方式之间差异显著 ($P < 0.05$),大写字母不同者表示相同土地利用方式不同土层之间差异显著 ($P < 0.05$);下同。

Notes: The data represent mean ± standard deviation. Different small letters indicate significant difference at the 0.05 level among different land use patterns, and different capital letters indicate significant difference at the 0.05 level among different soil depth of the same land use pattern. the same as below.

2.2 利用方式对土壤铵态氮和硝态氮含量的影响

氮素主要以有机态存在于土壤中,但无机氮是植物根系可以直接吸收利用的主要形态,土壤无机态氮有铵态氮 (NH_4^+) 和硝态氮 (NO_3^-) 两种形态,其含量决定了土壤氮素的供应水平^[18]。土地利用方式的变化可导致土壤物理化学性质发生变化,从而影响土壤铵态氮和硝态氮的含量水平,研究表明不同利用方式草地土壤的铵态氮和硝态氮含量明显不同(图 1、图 2)。

由图 1 可以看出,4 种利用方式土壤的铵态氮含量均较低,人工草地 0 ~ 10 cm 铵态氮最高,为 $1.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,退化高寒草原 40 ~ 60 cm 最低,仅为 $0.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。0 ~ 10 cm 土层土壤铵态氮含量的高

低顺序为人工草地 > 高寒草甸草原 > 退化高寒草甸草原 > 退化高寒草原,表明退化后表层土壤的铵态氮含量降低,人工种植表层土壤的铵态氮含量升高,10~20 cm和20~40 cm土层的铵态氮含量的高低顺序均为退化高寒草甸草原 > 高寒草甸草原 > 人工草地 > 退化高寒草原,退化高寒草甸草原的铵态氮含量最高,退化高寒草原的铵态氮含量最低。表明人工种植仅表层土壤的铵态氮升高,而使10 cm以下土层的铵态氮降低。40~60 cm土层的铵态氮含量在利用方式之间差异不显著($P > 0.05$)。4种利用方式土壤的铵态氮均表现出沿土壤剖面深度向下逐渐降低的趋势。

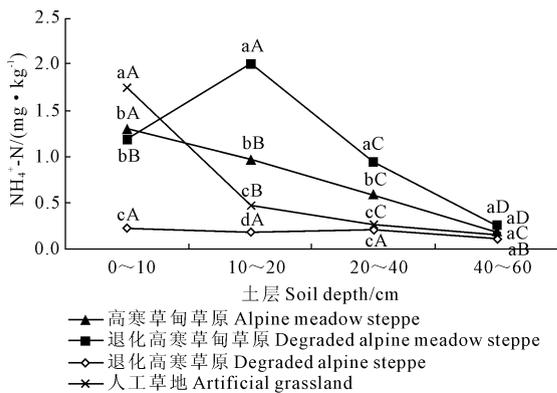


图1 利用方式对土壤铵态氮含量的影响

Fig. 1 Effect of different land use patterns on soil $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ content

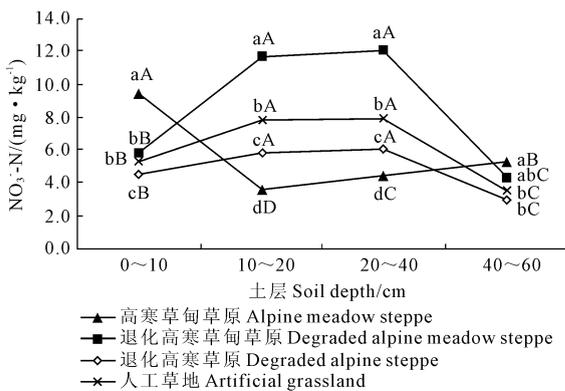


图2 利用方式对土壤硝态氮含量的影响

Fig. 2 Effect of different land use patterns on soil $\text{NO}_3^- - \text{N}$ content

注:图1、图2中不同小写字母表示不同利用方式之间差异显著($P < 0.05$),不同大写字母表示相同利用方式不同土层之间差异显著($P < 0.05$)。

Note: The data represent mean \pm standard deviation. Different small letters indicate significant difference at the 0.05 level among different land use patterns, and different capital letters indicate significant difference at the 0.05 level among different soil depth of the same land use pattern.

由图2可以看出,除高寒草甸草原外,其它3种利用方式土壤的硝态氮含量均表现出沿土壤剖面深

度向下先升高后降低的趋势。0~10 cm土层土壤硝态氮含量的高低顺序为:高寒草甸草原 > 退化高寒草甸草原 > 人工草地 > 退化高寒草原,表明退化和人工种植后表层土壤的硝态氮含量均降低。10~20 cm和20~40 cm土层的硝态氮含量的高低顺序均为:退化高寒草甸草原 > 人工草地 > 退化高寒草原 > 高寒草甸草原,说明退化和人工种植后下层土壤的硝态氮含量明显升高。因此,退化和人工种植均导致表层土壤的硝态氮含量下降而下层土壤的升高,并且10~20 cm和20~40 cm土层之间硝态氮含量没有显著差异,说明退化和人工种植后导致土壤的硝态氮淋溶加剧,尤其是退化高寒草甸草原10~20 cm和20~40 cm土层的硝态氮含量分别是0~10 cm的2.0倍和2.1倍。高寒草甸草原出0~10 cm土层的硝态氮含量显著高于下层土壤。

2.3 利用方式对土壤无机氮总量及比例的影响

土壤无机氮是植物直接吸收利用的地下氮素资源,无机氮总量决定着土壤氮素供应的强度水平,不同利用方式土壤的无机氮总量及无机氮占有有效氮的比例见表3。由表3可以看出,4种利用方式土壤无机氮总量与硝态氮的规律性基本一致,2种退化草地和人工草地0~10 cm土层无机氮总量均明显降低,而10~20 cm和20~40 cm土层明显升高,40~60 cm土层又明显下降。0~10 cm土层退化高寒草甸草原无机氮的比例最高,为47.2%,即有效氮中无机氮占到近一半的比例,10~20、20~40 cm和40~60 cm土层退化高寒草原无机氮的比例均最高,分别为13.8%、31.9%和22.4%,说明退化加剧了土壤氮素的无机化。人工草地整个剖面无机氮的比例均较低。

3 讨论与结论

土壤氮素含量是土壤肥力的重要指标,本研究表明研究区域土壤全氮和有效氮水平均处于较低水平,而利用方式变化主要导致表层土壤的全氮和有效氮含量显著变化,退化使表层土壤的全氮和有效氮含量明显降低,这与已有的研究结果一致^[19-21],但也有研究表明草地退化对有效养分的影响与退化程度有关,重度退化条件土壤有效养分会升高^[22]。人工草地表层土壤的全氮和有效氮含量明显高于其它土地利用方式,但是整体来看人工草地的土壤养分含量依然处于低水平,而人工草地表层土壤无机氮总量却低于高寒草甸草原,无机氮占有有效氮的比例也是4种利用方式中最低,仅为7.4%,这可能是由于人工草地中凋落物较多所导致,凋落物增加了

表 3 不同利用方式高寒草地土壤无机氮总量及比例/(mg·kg⁻¹,%)
Table 3 Soil total inorganic N and its proportion under different land use patterns

利用方式 Land use patterns	0~10 cm		10~20 cm		20~40 cm		40~60 cm	
	无机氮总量 Total inorganic N	比例 Percentage						
高寒草甸草原 Alpine meadow steppe	10.7±0.2aA	17.1	4.5±0.2dC	7.35	8.0±0.3bB	23.4	5.4±0.6C	18.9
退化高寒草甸草原 Degraded alpine meadow steppe	7.0±0.1bB	47.2	13.7±0.8aA	11.3	13.0±0.7aA	15.8	4.6±0.2C	7.1
退化高寒草原 Degraded alpine steppe	4.7±0.2cB	15.7	6.0±0.2cA	13.8	6.3±0.3cA	31.9	3.1±0.1C	22.4
人工草地 Artificial grassland	7.0±0.5bB	7.4	8.3±0.6bA	11.1	8.2±0.2 bA	13.9	3.7±0.3	12.5

土壤中的有机质,从而提高了全氮和有效氮含量,但对无机氮却没有贡献,这也可能是人工草地开始退化的原因之一,即土壤的营养物质水平不足以支持植物的生长。顾梦鹤等^[23]在甘南草原的研究认为施肥可以维护人工草地的生产力和稳定性,因此,对于本研究区域草地退化防治以及人工草地的可持续管理,建议进行土壤养分的补给及可持续的土壤养分管理。

从无机氮形态来看,本研究结果显示,4种利用方式的铵态氮含量均较低,而硝态氮含量较高,这与已有的旱地土壤研究结果一致^[24],利用方式对铵态氮的影响没有一致的规律性,而对土壤硝态氮含量的影响较大,这主要是因为旱地土壤无机态氮主要以硝态氮为主。退化和人工种植均导致0~10 cm土层的硝态氮含量降低,并且导致硝态氮向10~40 cm土层淋溶加剧,这可能是由于退化后草地植被减少,土壤持水能力变差,加之硝态氮是阴离子,土壤胶体对其吸附量很小,所以向土壤下层迁移明显。人工草地硝态氮的淋溶可能是由于表层土壤较强的扰动作用而变得较为疏松所致,笔者在该区域土壤容重的研究结果也发现人工草地0~10 cm土层的土壤容重明显降低^[25]。李荣等^[26]的研究结果表明,在土壤剖面的垂直方向土壤铵态氮和硝态氮含量均随土壤深度的增加而减小,与本研究并不一致。但是,从无机氮总量来看,退化和人工种植均导致表层土壤的无机氮总量降低,这与颜淑云^[27]等的研究结果一致。本研究发现退化导致无机氮占有氮的比例增加,表明退化加剧了土壤氮素的矿化和周转过程,陈懂懂^[28]的研究也表明高强度放牧下草地土壤氮素周转加快,而关于草地退化加剧土壤氮素周转的内在机制还有待进一步研究。

参 考 文 献:

- [1] 孙海松. 青海高寒草地资源及其永续利用[J]. 草业科学, 1998, 15(3):1-3.
- [2] 谢敖云, 柴沙驼. 高山草甸草地牧草产量及其营养变化规律[J]. 青海畜牧兽医杂志, 1996, 26(2): 8-10.
- [3] 王启基, 来德珍, 景增春, 等. 三江源区资源与生态环境现状及可持续发展[J]. 兰州大学学报自然科学版, 2005, 41(4): 50-55.
- [4] 曹广民, 杜岩功, 梁东营, 等. 高寒高草草甸的被动与主动退化分异特征及其发生机理[J]. 山地学报, 2007, 25(6): 641-648.
- [5] 李希来. 高寒草甸草地与其退化产物—“黑土滩”生物多样性和群落特征的初步研究[J]. 草业科学, 1996, 13(2): 21-23.
- [6] 严作良, 周华坤, 刘 伟, 等. 江河源区草地退化状况及成因[J]. 中国草地, 2003, 25(1): 73-78.
- [7] 孙志高, 刘景双, 李新华. 三江平原不同土地利用方式下土壤氮库的变化特征[J]. 农业系统科学与综合研究, 2008, 24(3): 270-274.
- [8] 李晓东, 魏 龙, 张永超, 等. 土地利用方式对陇中黄土高原土壤理化性状的影响[J]. 草业学报, 2009, 18(4): 103-110.
- [9] 杜明新, 张丽静, 梁坤伦, 等. 高寒沙化草地不同灌木根际与非根际土壤氮素、有机碳含量特征[J]. 中国草地学报, 2011, 33(4): 18-23.
- [10] 陈金泉, 赵 忠, 李玉新. 不同类型沙棘人工林对土壤氮矿化速率的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(3): 616-621.
- [11] 巴 奇, 李 科, 姬洪刚, 等. 土壤有机碳和氮素的变化过程研究概况[J]. 环境保护与循环经济, 2008, 28(11): 49-51.
- [12] 卢 雯, 邱 雷, 丁 辉, 等. 密度调控对女贞人工林土壤铵态氮和硝态氮季节变化的影响[J]. 西南林业大学学报, 2014, 34(2): 1-7, 24.
- [13] 许翠清, 陈立新, 颜永强, 等. 温带森林土壤铵态氮、硝态氮季节动态特征[J]. 东北林业大学学报, 2008, 36(1): 19-21.
- [14] 鲍士旦. 土壤矿化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005: 15-40.
- [15] Best E X. An automated method for determining nitrate-N in soil extracts[J]. Queensland Agricultural Journal, 1976, 33: 161-165.
- [16] Crooke W M, Simpson W. Determination of ammonium in Kjeldahl extracts of crops by an automated procedure[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1971, 22: 9-10.
- [17] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 778-

783.

- [18] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003: 192-203.
- [19] 李亚娟, 曹广民, 龙瑞军. 青海省海北州不同利用方式草地土壤基本理化性状研究[J]. 草地学报, 2012, 20(6): 1039-1043.
- [20] 伍星, 李辉霞, 傅伯杰, 等. 三江源地区高寒草地不同退化程度土壤特征研究[J]. 中国草地学报, 2013, 35(3): 77-84.
- [21] 魏卫东, 李希来. 三江源区不同退化程度高寒草地土壤特征分析[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(6): 1102-1106.
- [22] 张生楹, 张德罡, 柳小妮, 等. 东祁连山不同退化程度高寒草甸土壤养分特征研究[J]. 草业科学, 2012, 29(7): 1028-1032.
- [23] 顾梦鹤, 王涛, 杜国祯. 施肥对高寒地区多年生人工草地生产力及稳定性的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2010, 46(6): 59-63.
- [24] 苗艳芳, 李生秀, 扶艳艳, 等. 旱地土壤铵态氮和硝态氮累积特征及其与小麦产量的关系[J]. 应用生态学报, 2014, 25(4): 1013-1021.
- [25] 李亚娟. 青藏高原高寒草地土地利用格局变化的响应[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2013.
- [26] 李荣, 何兴东, 张宁, 等. 沙丘固定过程中土壤铵态氮和硝态氮的时空变化[J]. 土壤学报, 2010, 47(2): 295-302.
- [27] 颜淑云, 周志宇, 秦彧, 等. 玛曲高寒草地不同利用方式下土壤氮素含量特征[J]. 草业学报, 2010, 19(2): 153-159.
- [28] 陈懂懂, 孙大帅, 张世虎, 等. 青藏高原东缘高寒草甸土壤氮矿化初探[J]. 草地学报, 2011, 19(3): 420-424.

(上接第 129 页)

表明随着植物叶片水势的降低, 植物叶片光合器官遭受破坏和活性降低, 光合速率下降从气孔限制逐渐向叶肉细胞光合活性限制进行转变, 也就是向非气孔限制的转变^[14-15]。本试验 150 min PEG 模拟水分胁迫过程中荧光诱导动力学参数的变化趋势较复杂, 气孔导度 0 ~ 30 min 缓慢下降和 30 ~ 60 min 快速下降引起胞间 CO₂ 浓度、净光合速率和蒸腾速率的下降, 以及各荧光参数的降低, 此阶段主要是气孔限制起主要作用。60 ~ 120 min 气孔导度缓慢下降, RuBP 羧化酶活性和羧化效率呈现下降趋势, 胞间 CO₂ 浓度开始上升, 非光化学猝灭仍然是上升趋势, 其它光合荧光参数持续降低。这暗示此阶段光合作用的下降不全部是由气孔关闭引起的, 叶肉细胞光合活性降低的非气孔限制也开始起作用。120 min 后, 非光化学猝灭表现出下降趋势, RuBP 羧化酶活性出现快速下降趋势, 胞间 CO₂ 浓度保持上升趋势, 其他光合荧光参数持续降低, 暗示光合器官与功能受到破坏, 非气孔限制成为光合作用的主要限制因素。本研究也证明了轻度水分胁迫初期气孔限制起主要作用, 长时间或者严重胁迫是以非气孔限制为主。因此, 气孔限制和非气孔限制对光合作用的影响取决于水分胁迫的时间和程度。

参考文献:

- [1] Teng K Q, Li J Z, Liu L, et al. Exogenous ABA induces drought tolerance in upland rice: the role of chloroplast and ABA biosynthesis-related gene expression on photosystem II during PEG stress[J]. Acta Physiol Plant, 2014, 36: 2219-2227.
- [2] 薛崧, 汪沛洪, 许大全, 等. 水分胁迫对冬小麦 CO₂ 同化作用的影响[J]. 植物生理学报, 1991, 18(1): 1-7.
- [3] 赵丽英, 邓西平, 山仑. 渗透胁迫对小麦幼苗叶绿素荧光参数的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(7): 1261-1264.
- [4] Shao R X, Xin L F, Zheng H F, et al. Changes in chloroplast ultrastructure in leaves of drought-stressed maize inbred lines[J]. Photosynthetica, 2016, 54(1): 74-80.
- [5] 卢从明, 张其德, 匡延云. 水分胁迫对小麦光系统 II 的影响[J]. 植物学报, 1994, 36(2): 93-98.
- [6] 王仁雷, 华春, 刘友良. 盐胁迫对水稻光合作用的影响[J]. 南京农业大学学报, 2002, 25(4): 11-14.
- [7] 高俊凤. 植物生理学试验指导[M]. 高等教育出版社, 2006.
- [8] 卢从明, 张其德, 匡延云. 水分胁迫对小麦叶绿体激发能分配的光系统 II 原初光能转化效率的影响[J]. 生物物理学报, 1995, 11(1): 82-86.
- [9] Li J Z, Chen Y P, Teng K Q, et al. Rice leaf heterogeneity in chlorophyll fluorescence parameters under short-term osmotic stress[J]. Biol Plantarum, 2015, 59: 187-192.
- [10] Zhang H, Ni Z, Chen Q, et al. Proteomic responses of drought-tolerant and drought-sensitive cotton varieties to drought stress[J]. Mol Genet Genomics, 2016: 1-11.
- [11] Earl H J. Stomatal and non-stomatal restrictions to carbon assimilation in soybean (*Glycine max*) lines differing in water use efficiency[J]. Environ Exp Bot, 2002, 48(3): 237-246.
- [12] Cornic G. Drought stress inhibits photosynthesis by decreasing stomatal aperture-not by affecting ATP synthesis[J]. Trends Plant Sci, 2000, 5(5): 187-188.
- [13] Parry M A J, Andralojc P J, Khan S, et al. Rubisco activity: effects of drought stress[J]. Ann Bot, 2002, 89(7): 833-839.
- [14] Ramalho J C, Zlatev Z S, Leitão A E, et al. Moderate water stress causes different stomatal and non-stomatal changes in the photosynthetic functioning of *Phaseolus vulgaris* L. genotypes[J]. Plant Biol, 2014, 16(1): 133-146.
- [15] Campos H, Trejo C, Peña-Valdivia C B, et al. Stomatal and non-stomatal limitations of bell pepper (*Capsicum annuum* L.) plants under water stress and re-watering: Delayed restoration of photosynthesis during recovery[J]. Environ Exp Bot, 2014, 98: 56-64.