

# 放牧干扰对高寒杜鹃灌丛草地地下养分库 化学计量特征的影响\*

魏巍 曹文侠\*\* 祁娟 张德罡 师尚礼

(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 兰州 730070)

**摘要** 采用室外取样与室内分析结合的方法对祁连山高寒杜鹃灌丛草地不同放牧干扰条件下土壤、根系养分化学计量比进行研究。结果表明: 1)植物群落地下生物量随土层深度增加而迅速减少, 60%~70%根系聚集于 0~10 cm 土层, 随放牧压力增加活根向土壤深层转移。2)总根系生物量及其 C、N、P 储量随牧压增加均下降, 重牧与轻牧相比 C、N、P 养分储量分别下降 26%、17%、27%; 表层单位质量活根 C 含量轻牧最高、N 含量中度放牧最高、P 含量重牧最高; 死根 N、P 变化与活根相反。3)随牧压增加土壤有机碳、全氮密度以及 N、P 速效养分均上升, 全磷含量相对稳定, 但表层全磷含量下降。数据分析得出, 休牧增加了根系生物量的同时, 表层土壤根系的 C/N、C/P 比值升高, N/P 比值降低。说明根系对土壤 C 积累及养分循环起重要作用, 而生长季休牧有利于高寒灌丛草地土壤养分保持, 这与高寒地区植物生长缓慢特性相适应。

**关键词** 高寒灌丛草甸 休牧 放牧干扰 地下养分库 化学计量比

**中图分类号:** S812.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2012)08-1024-06

## Influence of grazing disturbance on stoichiometric characteristics of alpine *Rhododendron* shrublands underground soil nutrient pool

WEI Wei, CAO Wen-Xia, QI Juan, ZHANG De-Gang, SHI Shang-Li

(College of Grassland Science, Gansu Agricultural University; Key Laboratory of Grassland Ecosystem of Ministry of Education; Sino-US Research Center for Sustainable Grassland and Livestock Management, Lanzhou 730070, China)

**Abstract** Alpine range is sensitive to global climate change and artificial disturbances and generally adapts to changes in external environment by adjustments in chemical elements. Research on belowground ecosystems is critical for ecological restoration. A combination of field and lab experiments was conducted to study the nutrients characteristics of soils, roots of alpine shrublands in Qilian Mountains under different grazing disturbances. The dynamics of root system phytocoenosis in alpine regions were also analyzed. The results showed that underground biomass of the plant community decreased with increasing soil depth. About 60%~70% of root biomass was concentrated in the 0~10 cm soil layer. Also with increasing grazing intensity, living roots penetrated deeper into the soil. Total root biomass along with carbon, nitrogen and phosphorus contents decreased with increasing grazing intensity. Compared with lightly grazed areas, C, N and P contents in heavily grazed areas decreased by 26%, 17% and 27%, respectively. Per unit mass surface living roots and carbon were highest in lightly grazed areas, nitrogen highest in medium grazed areas and phosphorus highest in heavily grazed areas. Variations in dead root N and P contents were inversely correlated to those in living root N and P contents. With increasing grazing intensity, soil organic carbon, total nitrogen, and available N and P increased. However, the content of total phosphorus remained relatively stable even though surface total phosphorus content decreased. Under non-grazing treatment, root biomass increased, C/N and C/P ratios increased both in surface soils and roots, and N/P ratio decreased, compared with grazing treatments. This implied that roots were vital elements for both soil carbon accumulation and nutrient cycle. Non-grazing in vegetation growth seasons facilitated plant recovery and better growth and high plant nutrient efficiency. Non-grazing during vegetation growth seasons was an effective way of promoting recovery of fragile alpine shrub for high ecological functions

\* 博士点基金项目(20106202120004)、草业生态系统重点实验室课题(CYZS-2011007)和现代农业产业技术体系项目(CARS-35)资助

\*\* 通讯作者: 曹文侠(1970—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事草地生态与资源方面的科研和教学工作。E-mail: caowx@gsau.edu.cn

魏巍(1986—), 硕士研究生, 主要从事草地生态研究工作。E-mail: weiweicc01@126.com

收稿日期: 2012-01-14 接受日期: 2012-03-07

and economic values.

**Key words** Alpine shrublands, Non-grazing, Grazing disturbance, Soil nutrient pool, Stoichiometric ratio

(Received Jan. 14, 2012; accepted Mar. 7, 2012)

近年来,随着人们对地下生态系统研究的深入,有关植被根系的文献也逐渐增多,但由于生长环境的差异、土壤条件的不确定、取样的局限性等因素造成地下根系与地上群落研究相比相对较少。根系的研究主要涉及根系的生长和分布<sup>[1]</sup>、根系生产和周转<sup>[2]</sup>、根系生产力<sup>[3]</sup>和根系动态以及根系与土壤环境的关系<sup>[4]</sup>等。随着生态化学计量学的发展,利用生态过程中化学元素的平衡关系,为研究C、N、P等元素在生态系统中的化学循环提供了一种综合方法<sup>[5]</sup>。He等<sup>[6]</sup>系统分析了中国草地植被叶片的N、P以及N/P的空间变异格局,同时针对几种不同生活型,比较了不同功能类群植物间的化学计量学特征差异。这些研究为认识我国草地植物的N、P化学计量特征提供了宝贵的资料。最近银晓瑞等<sup>[7]</sup>以内蒙古典型草原不同退化恢复阶段群落土壤建群和优势植被为研究对象,探索了典型草原植物叶片C、N、P化学计量学特征、植物与土壤的养分相关性以及N、P的养分限制作用。周鹏等<sup>[8]</sup>对温带草地优势植物各营养器官N、P元素的关联性进行研究,补充了小尺度研究草地个体之间、群落之间养分分配以及化学计量比关系的空白。

高寒地区作为环境变化的敏感区,植物群落自组织能力较差,更应该得到研究者重视。然而,对高寒草甸的研究仅局限在放牧干扰下的生物群落结构变化,土壤、根系养分周转的研究更是少之又少。本文通过对高寒灌丛草甸群落不同休牧条件下植物根系生物量及根系、土壤的C、N、P变化及化学计量比进行分析,试图揭示放牧干扰对植物根系、生境土壤化学计量比及限制性养分的关系,并对高寒草地的退化演替机理研究提供依据,进而为高寒天然草地的管理与恢复提供参考资料。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况与样地设置

试验区位于甘肃省天祝藏族自治县抓喜秀龙乡境内,属祁连山东段。地处北纬37°11′~37°13′,东经102°29′~102°33′。海拔2 950~4 300 m之间,全区气候寒冷潮湿,太阳辐射强烈。年均温-0.1℃,1月-18.3℃,7月12.7℃,>0℃积温1 380℃,年降水量416 mm,年蒸发量1 592 mm。无绝对无霜期,植物生长季为120~140 d。土层较薄,为40~80 cm,土壤显微碱性,有机质含量为100~160 g·kg<sup>-1</sup>。

植被分布受地形特征影响,不同坡向植被分异明显,半阳坡以草甸为主,阴坡、半阴坡以及海拔3 300 m以上地段均以杜鹃(*Rhododendron* spp.)灌丛为主,河谷则以柳(*Salix* spp.)灌丛为主。试验设在海拔3 050~3 150 m范围内的杜鹃灌丛草地,坡向西北,原属集体所有公共草地。试验前,每年6月中旬到8月中旬休牧,其余时间放牧的模式已延续10年以上,灌丛草地处于中度退化程度。于2003年8月选择相邻灌丛地设置围栏,处理样地实行全生长季休牧,枯草期不同强度利用,枯草期放牧强度分为轻度放牧(RG-2,面积6.67 hm<sup>2</sup>,放牧强度为1.67羊·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)、中度放牧(RG-1,面积20 hm<sup>2</sup>,放牧强度为3.49羊·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>);以公共草地作为对照样地(RG-0),延续传统重度放牧,除夏季休牧40~50 d外,其余时间进行连续放牧,放牧强度为3.58羊·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。

### 1.2 取样方法及测定

于2008年8月中旬采用土柱法在样地内随机挖取20 cm×20 cm×30 cm土柱。每个样地3次重复,每个土柱样方分3层,每层10 cm,用网袋法分离根系并根据外形、颜色、弹性及根皮来区分活根和死根,并挑除明显的灌木粗根、贮藏茎或根类。置于65℃恒温烘箱中烘至恒重,称干重。随后粉碎、过筛。与此同时,用土钻在每个样地取0~10 cm和0~20 cm土层的土样,5次重复混合装袋,分别随机取样3次,带回实验室自然风干。研磨后过筛,分出1 mm、0.25 mm两个粒级,供全量和速效养分的测定。

采用重铬酸钾容量法-外加热法(沙浴)测定有机质,H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>消煮后进行N、P元素的联合测定,全氮测定采用半微量凯氏法,速效氮测定采用碱解扩散法;全磷测定采用钼锑抗比色法,速效磷测定采用0.5 mol·L<sup>-1</sup> NaHCO<sub>3</sub>法<sup>[9]</sup>。

### 1.3 数据计算与分析

第j层土壤养分密度( $T_j$ , kg·m<sup>-3</sup>)采用以下公式计算:

$$T_j = (1 - \delta_j) \times C_j \times \rho_j \times d_j \quad (1)$$

式中, $\delta_j$ (%)为砾石的体积分数, $C_j$ (g·kg<sup>-1</sup>)为土壤单位质量养分含量, $\rho_j$ (g·cm<sup>-3</sup>)为第j层土壤的容重, $d_j$ (m)为第j层土层的厚度。

用式(1)计算时,由于砾石(粒径>2 mm)所占体积很小,因此不予考虑,单位质量C含量等于有机质含量乘以Bemmelen换算系数0.58<sup>[10]</sup>。

用 Excel 数据处理软件进行数据统计及相关数据分析, 通过 SPSS 16.0 统计分析软件进行相应单因素方差分析及相关分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同放牧强度下杜鹃灌丛草地地下生物量的总体特征

不同放牧强度下杜鹃灌丛草地地下生物量见图 1。同一样地随土层深度的增加根系生物量迅速减少, 0~10 cm 生物量占总生物量的 60%~70%。随放牧强度增加植物群落地下总生物量迅速降低(主要由于活根生物量降低所致); 0~10 cm 活根生物量的大小顺序为 RG-2>RG-1>RG-0, 分别占 0~30 cm 总活根的 82.52%、78.36%、66.74%, 表现出随牧压增加向深层转移的趋势。死根总量 RG-0 大于全生长季休牧地 RG-2 和 RG-1(其中 10~30 cm 死根相对含量较大), 差异显著( $P<0.05$ ), 0~10 cm 死根量随放牧增强呈现出增加的现象。

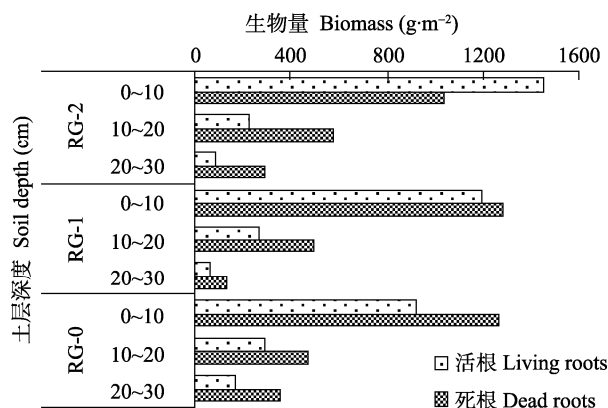


图 1 不同放牧强度下杜鹃灌丛草地根系生物量垂直分布特征

Fig. 1 Vertical distribution of underground biomass of *Rhododendron* shrublands under different grazing intensities

RG-2: 轻度放牧 Mild grazing (the grazing intensity is 1.67 sheep unit·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>); RG-1: 中度放牧 Moderate grazing (the grazing intensity is 3.49 sheep unit·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>); RG-0: 重度放牧 Severe grazing (the grazing intensity is 3.58 sheep unit·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>); 下同 The same below.

### 2.2 不同放牧强度下杜鹃灌丛草地根系 C、N、P 的储量

通过根系平均养分含量计算得出, 杜鹃灌丛草地根系 C、N、P 总储量分别介于 1 633.96~2 198.33 g·m<sup>-2</sup>、50.51~60.97 g·m<sup>-2</sup>、5.37~7.38 g·m<sup>-2</sup>。随放牧强度增加, 活、死根系养分总储量均表现出下降趋势, 且活根下降趋势更为明显。样地 RG-0 与 RG-2 相比 C 及 N、P 养分总储量分别下降 26%、17%、27%; 在同一样地内, 单位面积死根 C 及 N、P 总储量均高于活根, 值得一提的是, 牧压越大相差越大。分析不同休牧条件下相同土层根系 C 及 N、P 养分

含量(图 2), 在 0~10 cm 土层, 活根 C 含量 RG-0 样地显著低于 RG-2 ( $P<0.05$ ), N 含量 RG-1 显著高于 RG-2 和 RG-0 样地( $P<0.05$ ), P 含量 RG-0 样地最高; 死根 C、P 含量 RG-0 显著低于其他 2 个样地( $P<0.05$ ), N 含量 RG-1 样地最低。在 10~20 cm 土层, 活根 C 含量随牧压变化差异不显著, N 含量随牧压变化与表层一致, P 含量变化与表层趋势相反; 死根 C、N、P 均以 RG-0 样地为最低。另外, 同一样地下层 N 含量明显高于表层。

### 2.3 不同放牧强度下土壤有机碳及 N、P 养分密度变化

表 1 结果表明, 不同放牧强度下土壤有机碳、全氮、速效氮、全磷、速效磷密度分别介于 46.45~69.69 kg·m<sup>-3</sup>、3.56~5.16 kg·m<sup>-3</sup>、0.35~0.45 kg·m<sup>-3</sup>、0.77~1.41 kg·m<sup>-3</sup>、0.02~0.05 kg·m<sup>-3</sup>。随放牧强度增加土壤平均有机碳、全氮、速效氮、速效磷密度均呈上升趋势, 全磷保持相对稳定。0~10 cm 土层有机碳密度 RG-1 显著低于 RG-2、RG-0 样地( $P<0.05$ ); 全氮、速效氮、速效磷密度呈相同变化规律, 随放牧强度先升高后降低, 样地 RG-2 为最低; 随放牧强度增加全磷密度下降。10~20 cm 土层全氮、速效氮、速效磷密度表现为样地 RG-0 最高, 随放牧强度增加而增加。

相同放牧强度下随土层深度增加土壤全氮、全磷、速效氮密度升高, 有机碳、速效磷降低。分析表明土壤有机碳密度只与土壤全磷相关性不显著, 与全氮、速效氮、速效磷显著正相关; 土壤全氮与土壤速效氮显著正相关, 相关系数为 0.995; 土壤全磷与速效磷负相关但不显著, 相关系数为-0.549。

### 2.4 不同放牧强度下土壤根系 C/N、C/P、N/P 的变化

由表 2 可知, 由于活根 N、P 含量低于死根, 土壤 C 远低于根系 C 含量, 相同放牧强度下 C/N、C/P 比值大小顺序为活根>死根>土壤。土壤 N/P 高于根系(土壤 N/P 值为速效氮磷的比值)。0~10 cm 土层随牧压增加根系 C/N、C/P 比值降低, 表现出样地 RG-0 显著低于 RG-2 样地( $P<0.05$ ), 根系 N/P 比值随牧压增加升高, RG-0 显著高于 RG-2( $P<0.05$ ); 土壤 C/N 比值(N 为全量养分)总体呈下降趋势, 但 RG-0 有所上升, 可能是家畜排泄物增加土壤 N 含量所致, C/P 比值(P 为全量养分)下降, N/P 比值升高, 但差异均不显著( $P>0.05$ )。10~20 cm 土层根系 C/N 比值无明显差异, C/P 值样地 RG-2 显著低于其他两个样地( $P<0.05$ ), 根系及土壤 N/P 值与表层有相同变化趋势。由表 2 还可得出深层根系及土壤 N/P 值均高于表层, 是由于深层受放牧干扰较小, 速效磷含量相对较低所致。

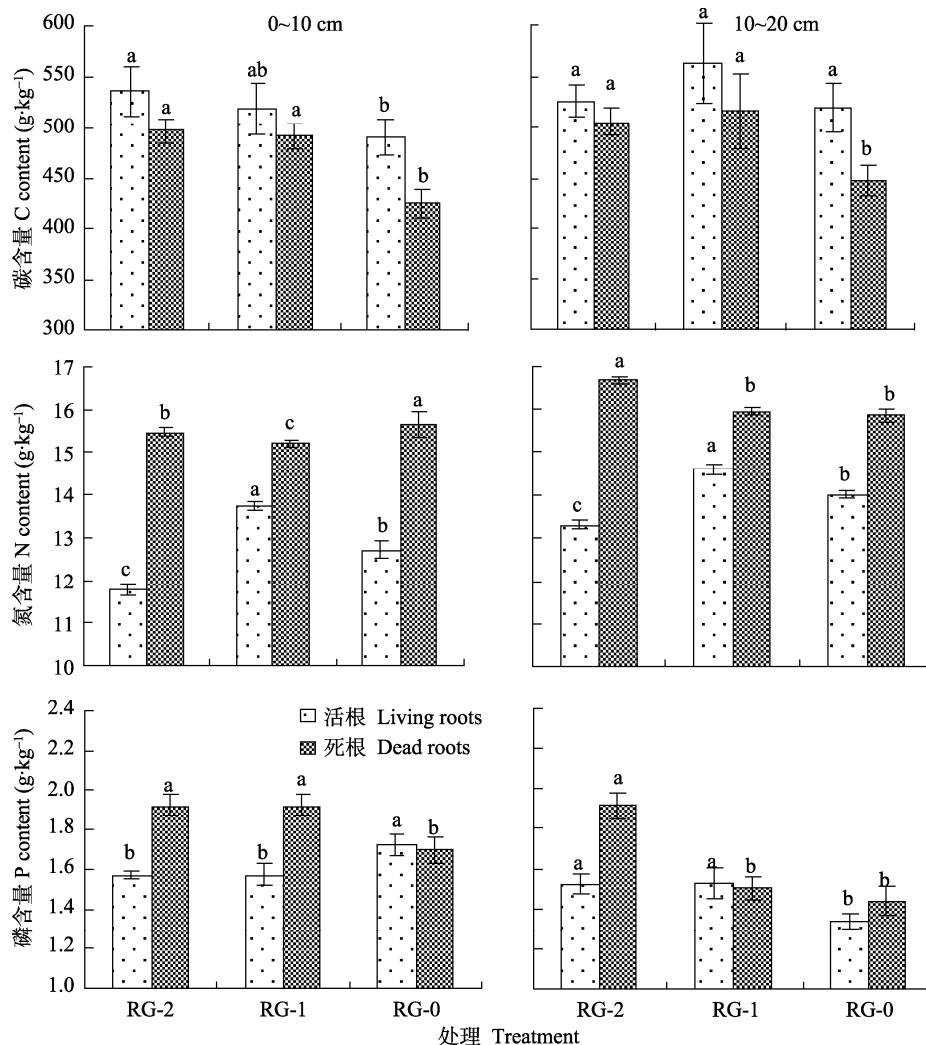


图 2 不同放牧强度下杜鹃灌丛草地根系养分变化

Fig. 2 Root nutrients changes of *Rhododendron* shrublands under different grazing intensities

不同小写字母表示处理间差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ , LSD) Different small letters show significant difference among treatments at the 0.05 level (LSD method). 下同 The same below.

表 1 不同放牧强度下土壤养分密度变化

Table 1 Soil nutrient density changes under different grazing intensities

处理 Treatment	土层 Soil layer (cm)	有机碳 Organic carbon (kg·m <sup>-3</sup> )	全氮 Total nitrogen (kg·m <sup>-3</sup> )	速效氮 Available nitrogen (g·m <sup>-3</sup> )	全磷 Total phosphorus (kg·m <sup>-3</sup> )	速效磷 Available phosphorus (g·m <sup>-3</sup> )
RG-2	0~10	65.81±1.83a	3.64±0.12b	360.91±17.30a	1.00±0.03a	35.81±1.32b
	10~20	48.71±2.47b	4.02±0.08b	384.78±32.48b	1.12±0.12a	24.03±3.79c
RG-1	0~10	61.28±1.32b	4.34±0.11a	377.40±11.64a	0.94±0.05a	44.45±0.74a
	10~20	59.84±3.20a	4.78±0.32a	434.28±8.17a	1.27±0.14a	31.48±1.45b
RG-0	0~10	67.15±2.53a	4.11±0.24a	374.13±5.38a	0.84±0.07b	41.26±4.37a
	10~20	56.83±4.33a	5.13±0.03a	435.15±16.94a	1.23±0.10a	36.75±1.38a

表 2 不同放牧强度下土壤及根系 C/N、C/P、N/P 的变化

Table 2 C/N, C/P and N/P changes of soil and root under different grazing intensities

土层 Soil layer (cm)	处理 Treatment	C/N			C/P			N/P		
		活根 Living roots	死根 Dead roots	土壤 Soil	活根 Living roots	死根 Dead roots	土壤 Soil	活根 Living roots	死根 Dead roots	土壤 Soil
0~10	RG-2	45.5±1.3a	32.8±1.1a	18.1±0.6a	341.9±15.6a	262.0±6.2a	70.3±2.2a	7.5±0.2b	7.2±0.2c	10.1±0.6a
	RG-1	38.1±2.7b	32.3±2.2a	12.1±0.6c	318.5±11.9a	241.8±9.1b	65.7±2.4a	7.7±0.5b	8.1±0.1b	9.1±0.8a
	RG-0	37.9±1.2b	27.8±0.9b	14.1±1.2b	285.3±13.2b	239.3±13.8b	65.0±4.3a	9.1±0.5a	9.3±0.4a	9.5±1.2a
10~20	RG-2	37.2±3.6a	30.5±1.4a	16.3±0.9a	334.6±11.7b	271.3±17.5b	47.2±4.3a	8.7±0.6b	8.7±0.6b	16.0±0.4a
	RG-1	37.8±1.4a	32.6±3.3a	12.5±0.3b	361.4±7.1a	337.4±26.6a	43.4±5.8a	9.5±0.7ab	10.7±0.2a	13.8±1.7b
	RG-0	37.2±1.9a	28.6±0.9a	11.1±0.7c	377.5±10.5a	310.4±19.2ab	46.3±3.6a	10.4±0.3a	11.0±0.5a	11.8±0.6b

### 3 讨论

#### 3.1 放牧强度对高寒灌丛地下生物量的影响

放牧作为一种人为干扰因子,一方面家畜对植物的采食改变植物的形态与功能,另一方面动物的践踏、粪便的排放改变土壤结构营养状况,影响根系对营养元素的吸收,进而改变植物的营养组成。本试验测定高寒杜鹃灌丛草地随土层深度增加根系生物量降低,根系60%~70%集中在表层,不同放牧强度在一定程度上改变群落地下植物量的垂直分布。0~10 cm土层总活根量顺序为RG-2>RG-1>RG-0,说明生长季休牧增加了表土层活根量。多数研究报道,随着放牧强度增加,根系生物量向表层积聚<sup>[11-13]</sup>,但本研究随牧压增大并无表聚现象反而向深层转移,可能由于羊频繁践踏,表层土壤结构紧密与干燥所致。

#### 3.2 放牧对地下养分库的影响

土壤是生态系统中植物与环境相互作用的载体,承载养分保持传递等功能,决定生态系统的结构、功能及生产力水平。由于草地类型和环境条件的复杂性,放牧对根系的影响也不尽相同。但多数研究表明,放牧干扰可降低植物组织的C、N、P储量<sup>[14-15]</sup>。本试验中放牧使根系C及N、P养分总储量显著下降。从单位质量根系养分分析,放牧显著降低了0~10 cm根系活、死根的C含量,活根N含量随牧压增加先升高后降低,呈单峰变化,表明中度干扰可以增加活根系N的积累。另外,由于根系吸收较多P,供根系补偿性生长,使得在重牧条件下0~10 cm活根系P含量最高,该样地死根系P含量较低,是由微生物分解作用较快所致。10~20 cm受放牧干扰较小,根系分解较慢,土壤有机碳相对稳定,从而导致活根系P含量较低。但通过对重牧样地和中度放牧样地对比分析表明,随放牧强度增加,土壤深层根系养分含量也会逐渐受到影响。此外研究发现,死根一般为直径较小、N含量较高的细根,与Pregitzer等<sup>[16]</sup>的研究结果一致。

放牧干扰在影响根系的同时,也通过影响土壤结构、土壤含水量等决定着土壤养分含量变化。王长庭等<sup>[17]</sup>对高寒小嵩草草甸研究表明,放牧强度的增大造成土壤有机碳、全氮、速效氮储量显著降低,P储量保持相对稳定。本试验结果表明,高寒地区根系大量聚集在0~10 cm,造成相同放牧条件0~10 cm土层有机碳密度高于深层。该区夏季降雨量相对充足,养分向下淋溶,及深层温度相对高于表层,微生物活动强烈,土壤N积累增加,是造成全氮养分

密度10~20 cm土层高于表层的原因。而P养分密度深层高于表层更多是由家畜采食输出土壤循环系统所致<sup>[18]</sup>。总体来看放牧增加了土壤总碳储量,也增加了土壤养分密度,放牧使得表层根系分解加快,土壤有机碳密度升高,各种微生物活动增强,土壤全氮、速效氮养分增加。家畜的频繁采食,引起土壤中表层P的各组分向速效磷成分转移量增大,植物吸收后,输出系统,从而使土壤中表层全磷下降、速效磷上升。综上表明,放牧增加了高寒灌丛草地土壤N、P储量,提高了N、P有效性,看似提高了土壤肥力,但仔细分析由于杜鹃灌丛草地多位于阴坡、半阴坡,水分携带有效养分淋溶离开土壤,会造成养分缺失。所以可以得出,生长季休牧有利于高寒灌丛草地土壤养分保持,更适应高寒地区植物的生长缓慢特性。

#### 3.3 放牧强度对高寒灌丛养分化学计量特征的影响

土壤C/N、C/P通常反映有机质的分解与积累,N、P的富集和有效程度,一定范围内作为土壤肥力的指标,并影响植物体的养分积累与分配<sup>[19]</sup>。C/N、C/P越低,N、P矿化速率越高。本试验表明,放牧强度增加造成土壤0~10 cm的C/N、C/P值降低。分析原因一方面由于放牧改变土壤物理性质及微生物生存环境,增加N、P的矿化。另一方面,家畜排泄物含有大量N、P元素,增强微生物活性,N、P矿化作用加强。再者家畜践踏地下死根含量升高,也是提高土壤养分含量的一个重要原因。土壤N、P养分的增加有利于土壤微生物活动,使得有机碳分解速率加快,造成土壤C/N、C/P值随牧压增加而下降。但RG-0样地0~10 cm土层C/N值略高于RG-1样地,可能由于家畜作用强烈、N养分流失相对较多引起。有研究发现生长速率较快的植物体由于核糖体合成蛋白质支持快速生长,转录RNA需要更多的P,使得植物通常有较低的C/N和C/P<sup>[20]</sup>。也有研究提出C/N、C/P越高植物分解速率越慢<sup>[21]</sup>。本试验说明,放牧强度的增加使得地上生物量遭到采食的机会也增加,植物为了躲避采食,地下根系生长加快,根系合成有机质需要消耗大量N、P,造成0~10 cm土层土壤、活、死根系C/N、C/P比随牧压增加而降低,10~20 cm土层放牧干扰较小,活、死根系C/N比差异不明显;但放牧改变土壤结构造成养分向下淋溶并在深层聚集增加,使得土壤C/N比降低;而C/P比的增加更多是由深层活根系生物量增加、P养分稀释引起。

植物的N/P值反映了土壤养分的有效性<sup>[22]</sup>,用

来表征植物受 N、P 养分的限制格局<sup>[23]</sup>。研究显示, 植物  $N/P < 14$  表明 N 素较大程度限制了植物生长, 而  $N/P > 16$  则反映植被生产力受 P 素的限制更为强烈, 介于两者中间表明受到 N、P 元素的共同限制作用<sup>[24]</sup>。本研究结果说明天祝高寒灌丛草地受 N 养分限制。Reich 等<sup>[25]</sup>研究得出温度升高 N/P 值上升。本试验分析得出, 放牧造成根系养分由 N 的限制向 P 限制转变。

高寒地区气候恶劣, 植物生长缓慢, 其养分含量相对稳定, 研究表明该地区受到外界干扰后, 其生态适应能力和补偿能力较差。首先从植物种类及土壤养分开始改变, 养分流失积累到一定程度, 造成该区域植被退化, 水土流失。高寒灌丛是我国西北重要的生态屏障, 但由于其特殊的生长环境, 极易受到破坏。本研究结果表明, 在高寒地区生长季休牧可以使植物在生长期得到很好恢复和生长, 有效保持植物养分。因此, 针对该地区, 生长季休牧可以对该生态脆弱区进行合理保护和可持续利用, 进而更好地发挥高寒灌丛的生态价值和经济价值。

## 参考文献

- [1] 韦兰英. 黄土高原不同演替阶段草地植被细根分布及其生态特征研究[D]. 陕西: 西北农林科技大学, 2007
- [2] 杨成德, 陈秀蓉, 龙瑞军, 等. 东祁连山不同高寒草地型牧草返青期土壤碳分布特征[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(6): 1111-1116
- [3] 吴伊波, 崔晓勇. 草地植物根系碳储量和碳流转对  $CO_2$  浓度升高的响应[J]. 生态学报, 2009, 29(1): 378-388
- [4] 李鹏, 赵忠, 李占斌, 等. 植被根系与生态环境相互作用机制研究进展[J]. 西北林学院学报, 2002, 17(2): 26-32
- [5] 贺金生, 韩兴国. 生态化学计量学: 探索从个体到生态系统的统一化理论[J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 2-6
- [6] He J S, Wang L, Flynn D F B, et al. Leaf nitrogen: Phosphorus stoichiometry across Chinese grassland biomes[J]. *Oecologia*, 2008, 155(2): 301-310
- [7] 银晓瑞, 梁存柱, 王立新, 等. 内蒙古典型草原不同恢复演替阶段植物养分化学计量学[J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 39-47
- [8] 周鹏, 耿燕, 马文红, 等. 温带草地主要优势植物不同器官间功能性状的关联[J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 7-16
- [9] 南京农业大学. 土壤农化分析[M]. 北京: 农业出版社, 1996: 29-82
- [10] 邵月红, 潘剑君, 许信旺, 等. 浅谈土壤有机碳密度及储量的估算方法[J]. 土壤通报, 2006, 37(5): 1007-1011
- [11] 王艳芬, 汪诗平. 不同放牧率对内蒙古典型草原地下生物量的影响[J]. 草地学报, 1999(3): 198-203
- [12] 侯扶江, 肖金玉, 南志标. 黄土高原退耕地的生态恢复[J]. 应用生态学报, 2002, 13(8): 923-929
- [13] Greenwood K L, Hutchinson K J. Root characteristics of temperate pasture in New South Wales after grazing at three stocking rates for 30 years[J]. *Grass and Forage Science*, 1999, 53(2): 120-128
- [14] 高永恒. 不同放牧强度下高山草甸生态系统碳氮分布格局和循环过程研究[D]. 成都: 中国科学院研究生院成都生物研究所, 2007
- [15] 董晓玉, 傅华, 李旭东, 等. 放牧与围封对黄土高原典型草原植物生物量及其碳氮磷贮量的影响[J]. 草业学报, 2010, 19(2): 175-182
- [16] Pregitzer K S, DeForest J L, Burton A J, et al. Fine root architecture of nine North American trees[J]. *Ecological Monographs*, 2002, 72(2): 293-309
- [17] 王长庭, 龙瑞军, 王启兰, 等. 放牧扰动下高寒草甸植物多样性、生产力对土壤养分条件变化的响应[J]. 生态学报, 2008, 28(9): 4144-4152
- [18] 姚爱兴, 王培, 夏景新, 等. 不同放牧强度下奶牛对多年生黑麦草/白三叶草地土壤特性的影响[J]. 草地学报, 1995, 3(3): 181-189
- [19] Leriche H, Le Roux X, Desnoyers F, et al. Grass response to clipping in an African savanna: Testing the grazing optimization hypothesis[J]. *Ecological Applications*, 2003, 13(5): 1346-1354
- [20] Elser J J, Acharya K, Kyle M, et al. Growth rate-stoichiometry couplings in diverse biota[J]. *Ecology Letters*, 2003, 6(10): 936-943
- [21] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3938-3947
- [22] Hobbie S E, Gough L. Foliar and soil nutrients in tundra on glacial landscapes of contrasting ages in northern Alaska[J]. *Oecologia*, 2002, 131(3): 453-462
- [23] Wardle D A, Walker L R, Bardgett R D. Ecosystem properties and forest decline in contrasting long-term chronosequences[J]. *Science*, 2004, 305(5683): 509-513
- [24] Drenovsky R E, Richards J H. Critical N : P values: Predicting nutrient deficiencies in desert shrublands[J]. *Plant and Soil*, 2004, 259(1/2): 59-69
- [25] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude[J]. *Proc Natl Acad Sci*, 2004, 101(30): 11001-11006