

长期围栏封育对天山中部草地土壤有机碳及微生物量碳的影响

李丽君¹, 朱新萍¹, 贾宏涛^{1*}, 赵成义², 胡玉昆², 苏建红¹

(1.新疆农业大学草业与环境科学学院, 乌鲁木齐 830052; 2.中科院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011)

摘要:以天山中部中科院巴音布鲁克草原生态观测站三种类型草地长期(26 a)围栏封育样地为研究对象,通过野外调查取样结合室内分析的方法,研究了长期(26 a)围栏封育对草地土壤有机碳和微生物量碳含量的影响,结果表明:(1)围栏外(自然放牧条件下),表层的土壤有机碳含量为高寒草甸(165.29 g·kg⁻¹)>高寒草甸草原(98.73 g·kg⁻¹)>高寒草原(83.54 g·kg⁻¹),微生物量碳含量依次为高寒草甸草原(181.70 mg·kg⁻¹)>高寒草甸(146.37 mg·kg⁻¹)>高寒草原(43.06 mg·kg⁻¹)。围栏封育后,高寒草甸、高寒草甸草原、高寒草原表层土壤有机碳含量分别提高了 11.37%、3.26%和 2.21%;高寒草甸草原和高寒草甸微生物量碳含量分别增长 2.89%和 12.04%,而高寒草原降低 40.36%。(2)从围栏内外土壤剖面来看,土壤有机碳、微生物量碳含量随着土壤深度的增加依次降低,微生物量也随土壤深度的增加呈现降低的趋势。(3)微生物量碳含量与土壤速效钾、全磷含量达到极显著负相关($P<0.01$),与速效磷含量达到极显著正相关($P<0.01$),与土壤有机碳、全氮、全钾含量呈显著正相关($P<0.05$)与土壤速效氮含量正相关,但不显著。

关键词:草原土壤;有机碳;微生物量碳;围栏封育;天山

中图分类号:S153.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2012)08-1554-06

Effect of Long-term Fencing and Grazing Exclusion on the Grassland Soil Organic and Microbial Carbons of Middle Tianshan Mountain

LI Li-jun¹, ZHU Xin-ping¹, JIA Hong-tao^{1*}, ZHAO Cheng-yi², HU Yu-kun², SU Jian-hong¹

(1. College of Pratacultural & Environmental Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

Abstract: Grassland degradation occurs due to the long-term heavy grazing. The most common rehabilitation methods include fencing, supplemental seeding, fertilizer application and etc. Three types of grassland fenced for long-term (26 years) grazing exclusion in Middle Tianshan Mountains was sampled for analyzing the long-term effect on both soil organic and microbial carbons. The analysis of organic carbon adopts conventional method; and we use Chloroform fumigation extraction-TOC method to measure microbial carbon to mainly analyze the soil samples in the soil profile and the surface soil. The results indicated that organic carbon content in subsoil outside the fence (under the condition of free grazing) in descending order is: alpine meadow (165.29 g·kg⁻¹) > alpine meadow steppe (98.73 g·kg⁻¹) > alpine steppe (83.54 g·kg⁻¹); whereas soil microbial carbon content: alpine meadow steppe (181.70 mg·kg⁻¹) > alpine meadow (146.37 mg·kg⁻¹) > alpine steppe (43.06 mg·kg⁻¹). With the treatment of fencing and grazing exclusion, organic carbon content in subsoil of alpine meadow, alpine meadow steppe and alpine steppe increased by 11.37%, 3.26% and 2.21% respectively; whereas microbial carbon content increased by 2.89% and 12.04% in alpine meadow steppe and alpine meadow respectively while decreased by 40.36% in alpine steppe. In terms of soil section inside and outside the fenced areas, soil organic carbon and microbial carbon contents both decreased with increase of soil depth, so did Cmic/Corg. Microbial carbon content showed a very significant negative correlation with available K and total P in soil ($P<0.01$), a very significant positive correlation with available P ($P<0.01$), a significant positive correlation with organic carbon, total N and total K in soil ($P<0.05$), and a positive correlation with available N in soil, but not significantly. With the analysis, this paper can provide basis for improving the grassland carbon sequestration potential and reforming degraded grassland.

Keywords: grassland soil; organic carbon; microbial carbon; fencing; Tianshan Mountain

收稿日期:2012-01-06

基金项目:国家自然科学基金(40901155)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050405)和新疆土壤学重点学科资助

作者简介:李丽君(1987—),女,辽宁人,在读硕士研究生,主要从事土壤生态学相关研究工作。E-mail:lijun7226@126.com

* 通讯作者:贾宏涛 E-mail:hongtaojia@126.com

新疆是我国第三大草原省区,天然草地辽阔,地貌的多样性和特殊的气候条件形成了以荒漠为基带的草地垂直梯度分布模式。荒漠草地是新疆的主要草地^[1-4]。天山北坡山地草原是牧区重要的放牧场。近年来,由于超载过牧等不利影响,草甸草原和干草原退化严重,生态环境日趋恶化^[5-7]。对退化严重的草地是通过围栏封育将退化草地封闭一定时期,禁止放牧和割草,给牧草得到休养生息的机会,为植物充分生长发育创造条件。对于中度和轻度退化的草地,主要是实行休牧和轮牧的方式来调节草地的恢复^[8]。

土壤有机碳含量及其动态平衡是反映土壤质量和草地健康的重要指标,直接影响着土壤肥力和草地生产力^[9]。土壤微生物对土壤条件变化非常敏感,能在较短时间内发生大幅度变化,因而土壤微生物量碳(Mc)的多少及变化通常作为土壤质量演变的重要依据。Follett等^[10]研究发现,美国内布拉斯加州西部温带大陆性气候平原区土壤MC随耕作强度增加而降低。贾宇平^[11]对黄土高原小流域垂直方向SOC分布特征研究表明,流域内SOC总体随土层深度增加而减少,在0~80 cm内含量减少明显,80 cm以下变化不大。王琳^[12]等研究表明,贡嘎山东坡表层SOC和全氮含量随海拔升高有上升趋势。虽然国内外对不同土壤类型的SOC及MC进行了大量研究,但是目前对草地的研究主要集中在计算有机碳库、有机碳的转化及影响有机碳含量的因素等方面,对围栏封育后草地有机碳的变化及微生物量碳的研究甚少,特别是针对长期围栏草地的研究。本文选取中国科学院新疆巴音布鲁克草原生态站有26 a的围栏样地作为研究对象,研究长期围栏对草地有机碳含量及微生物量碳含量的影响,通过分析土壤有机碳含量及微生物量碳含量,为提升草地固碳潜力和改良退化草地提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

巴音布鲁克草原位于新疆巴音郭楞蒙古自治州和

静县西北,天山南麓,面积约 $2.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。年平均气温为 $-4.8 \text{ }^\circ\text{C}$,1月最低气温可达 $-48 \text{ }^\circ\text{C}$,7月最高气温为 $30.5 \text{ }^\circ\text{C}$,年平均降水量 276.2 mm ,年蒸发量高达 $1\,022.9 \sim 1\,247.5 \text{ mm}$,年日平均温度 $\geq 10 \text{ }^\circ\text{C}$ 的积温为 $227.2 \text{ }^\circ\text{C}$,仅为20 d,年日照为 $2466 \sim 2616 \text{ h}$,热能为 $1.34 \times 10^5 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,全年积雪日达 $150 \sim 180 \text{ d}$,无绝对无霜期,属典型的高寒气候。该区草场类型多而面积大,发育的草地类型有高寒草原、高寒草甸化草原、高寒草原化草甸、高寒草甸、山地灌丛草甸和沼泽化高寒草甸。该区高等植物有50个科160个属262个种。

1.2 方法

1.2.1 样品采集

选取中国科学院巴音布鲁克草原生态研究站已长达26 a的围栏封育样地作为研究对象。分别在三种类型围栏内外典型区域设置大样地,每个样地采用样线法,设置三个样方,为保护长期样地,在每个样地的围栏内外分别挖一个剖面。根据土壤发生层划分土壤层次,分层采集实验所用的土壤,装入布袋子,封口保鲜做好标记带回实验室。同时在生物量调查的三个样方内,采用多点打钻法采集土壤样品,采样深度根据剖面发生层深度进行。

1.2.2 测试方法

将每个土壤样品混匀后均分为两份,一份鲜样过2 mm的筛子挑去根系和石砾,保存于 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 的冰箱中,用于测定微生物量碳。另一部分土样风干后分别过1 mm和0.25 mm的筛子,用于测定土壤养分。

土壤总有机碳(SOC)采用重铬酸钾外加热法测定;碱解氮测定采用碱解扩散法;速效钾测定采用火焰光度计法;速效磷用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法;全氮采用开氏法;全磷采用钒钼黄比色法;全钾采用火焰光度法;土壤微生物量碳采用氯仿熏蒸提取-TOC法测定^[13-14]。

微生物熵=微生物量碳含量/有机碳含量

1.2.3 数据处理

所有试验数据采用SPSS17.0和Excel 2003等软件处理,用Duncan法对数据进行差异显著性分析。

表1 研究区草地类型基本情况

Table 1 Profile of grassland types in the region of interest

草地类型 Grassland types	主要建群 Main edificators	经纬度 Longitude and latitude	海拔/m Elevation
高寒草甸 Alpine meadow	细果苔草(<i>Carex stenocarpa</i>) + 线叶嵩草(<i>Kobresia capillifolia</i>)	E: $42^\circ 43' 18.7''\text{N}$; $83^\circ 42' 14.4''\text{E}$	2 592
高寒草甸草原 Alpine meadow steppe	线叶嵩草(<i>Kobresia capillifolia</i>) + 紫花针茅(<i>Stipa purpurea</i>)	E: $42^\circ 47' 22.1''\text{N}$; $83^\circ 42' 47.6''\text{E}$	2 507
高寒草原 Alpine steppe	紫花针茅(<i>Stipa purpurea</i>) + 羊茅(<i>Festuca ovina</i>)	E: $42^\circ 58' 48.0''\text{N}$; $83^\circ 42' 09.5''\text{E}$	2 477

2 结果与分析

2.1 长期围栏封育对土壤有机碳的影响

2.1.1 土壤表层有机碳

巴音布鲁克草原不同类型样地围栏内外表层有机碳含量见图1。围栏外有机碳含量依次为高寒草甸(165.29 g·kg⁻¹)>高寒草甸草原(98.73 g·kg⁻¹)>高寒草原(83.54 g·kg⁻¹)。围栏封育后,有机碳含量依次为高寒草甸(184.09 g·kg⁻¹)>高寒草甸草原(101.95 g·kg⁻¹)>高寒草原(85.39 g·kg⁻¹)。围栏内有机碳含量均比围栏外高。高寒草甸、高寒草甸草原和高寒草原有机碳含量分别增加11.37%、3.26%和2.21%。高寒草甸、高寒草甸草原、高寒草原表层有机碳含量存在显著差异($P<0.05$),高寒草甸围栏内和围栏外表层有机碳含量存在显著差异($P<0.05$),其余两种类型草地围栏内和围栏外表层有机碳含量差异不显著。

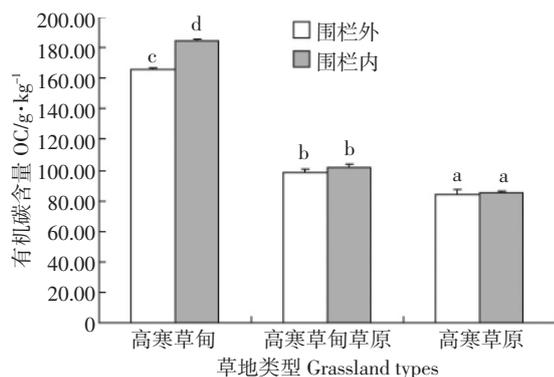


图1 不同草地类型围栏内外土壤表层有机碳含量

Figure 1 Organic carbon content in surface soil inside and outside of different types of grassland

2.1.2 土壤剖面有机碳特征

以高寒草原的剖面为例,围栏外土壤表层有机碳含量最高(图2),有机碳含量在8.36~83.54 g·kg⁻¹之间变化。随着土壤深度的增加有机碳含量呈降低趋势。围栏内有机碳含量变化趋势与围栏外相同。高寒草原围栏内有机碳含量最高为85.39 g·kg⁻¹,最低为7.64 g·kg⁻¹。土壤深度60 cm以后有机碳含量呈现稳定的趋势。草原上土壤的扰动较小,深度60 cm之后的有机碳含量可能是土壤自身演变形成的结果。

2.2 长期围栏封育对高寒草原土壤微生物量碳的影响

2.2.1 表层土壤微生物量碳

长期围栏封育对表层微生物量碳的影响如图3所示。围栏外表层微生物量碳含量最高的为高寒草甸草原(181.7 mg·kg⁻¹),最低的为高寒草原(43.06 mg·

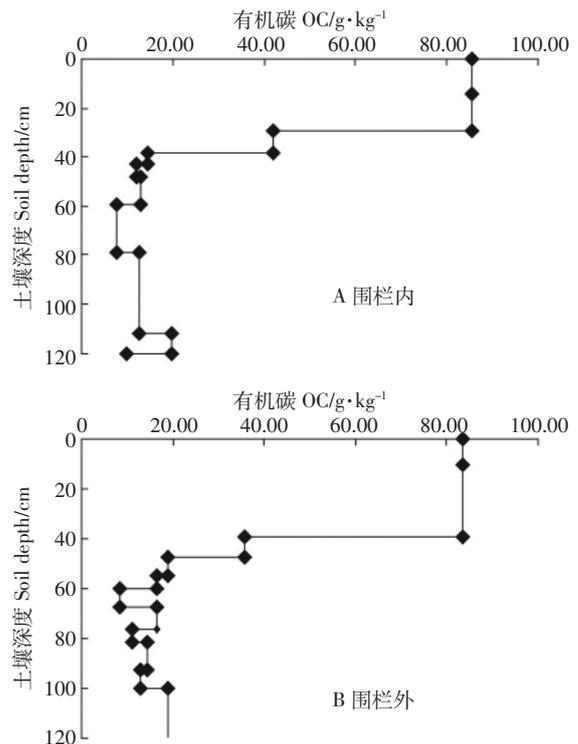


图2 高寒草原围栏内外土壤有机碳垂直变化

Figure 2 Vertical variation of soil organic carbon inside and outside of fencing in alpine grassland

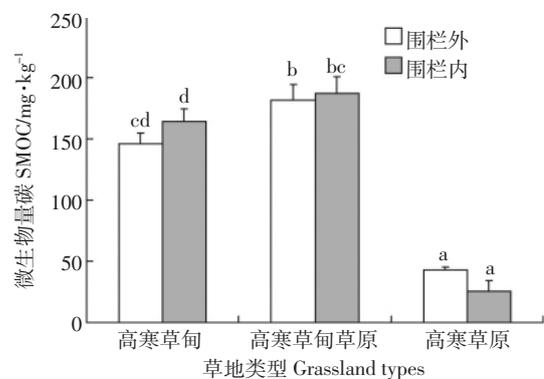


图3 不同草地类型围栏内外土壤表层微生物量碳含量

Figure 3 Microbial carbon content in surface soil inside and outside of fencing of different types of grassland

kg⁻¹)。围栏封育后,微生物量碳含量除高寒草原外均增加。高寒草甸草原和高寒草甸微生物量碳含量分别增长了2.89%、12.04%,高寒草原降低了40.36%。围栏封育显著提高了表层土壤有机碳的含量,而对微生物量碳含量的影响表现不一致。三种不同类型草地表层微生物量碳含量存在显著差异($P<0.05$),高寒草原围栏内外微生物量碳含量差异不显著,其余两种类型草地围栏内和围栏外微生物量碳含量存在显著差异($P<0.05$)。

2.2.2 土壤微生物量碳剖面特征

土壤微生物量的变化主要受环境条件、植物生长、放牧强度、土壤深度及其它因素的综合影响^[15]。随着土壤的深度变化,土壤质地粗细及凋落物积累和输入不同,从而导致土壤微生物所得到的碳源不同,所以土壤微生物量碳含量在剖面呈现出一定的差异(图 4),围栏外土壤表层的微生物量碳含量最高为 43.06 mg·kg⁻¹,随着土壤深度的增加,微生物量碳含量逐渐递减。围栏后,土壤表层的微生物量碳含量最高为 25.68 mg·kg⁻¹,微生物量碳含量的变化趋势与围栏外基本相同。

2.3 长期围栏封育对微生物熵的影响

如图 5 所示,围栏外,微生物熵随着土壤深度的增加呈现下降趋势,55~60 cm 以后下降比较明显。围栏内的变化趋势与围栏外基本相同,48~59 cm 以后下降明显。围栏内和围栏外土壤表层的微生物熵最高。

2.4 土壤微生物量碳与土壤有机碳及养分的相关性

根据土壤样品分析值,得到微生物量碳含量与土壤有机碳含量、土壤速效钾含量、土壤速效氮含量的相关关系矩阵(表 2)。微生物量碳含量与土壤速效

钾、全磷含量达到极显著负相关($P<0.01$),与速效磷达到极显著正相关($P<0.01$),与土壤有机碳、全氮、全钾含量呈显著正相关($P<0.05$)与土壤速效氮含量正相关,但不显著。

3 讨论

三种类型草地土壤表层有机碳含量为高寒草甸>高寒草甸草原>高寒草原,随着海拔的不断升高,土壤有机碳含量呈逐渐增大的趋势,这与前人^[16-17]的研究一致。围栏后,围栏内有机碳含量高于围栏外,主要因为受动物啃食践踏的频率比较少,碳源的积累和输入比较多,分解生成的有机碳多,由此可见,围栏封育可以提高有机碳的含量。围栏封育后,表层微生物量碳含量依次为高寒草甸草原>高寒草甸>高寒草原,与有机碳含量变化趋势不同。微生物量碳含量除高寒草原外,高寒草甸草原和高寒草甸微生物量碳含量均有所增加,围栏封育显著提高了表层土壤有机碳的含量,而对微生物量碳含量的影响表现不一致,可能是由于自然和人为因素共同造成的,还需要进一步研究。

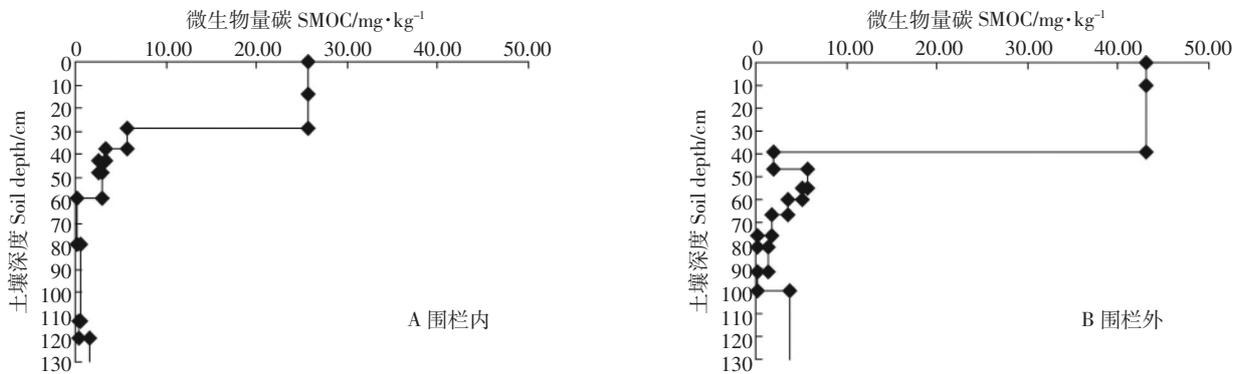


图 4 高寒草原土壤微生物量碳含量变化

Figure 4 Microbial carbon content variation in soil of alpine grassland

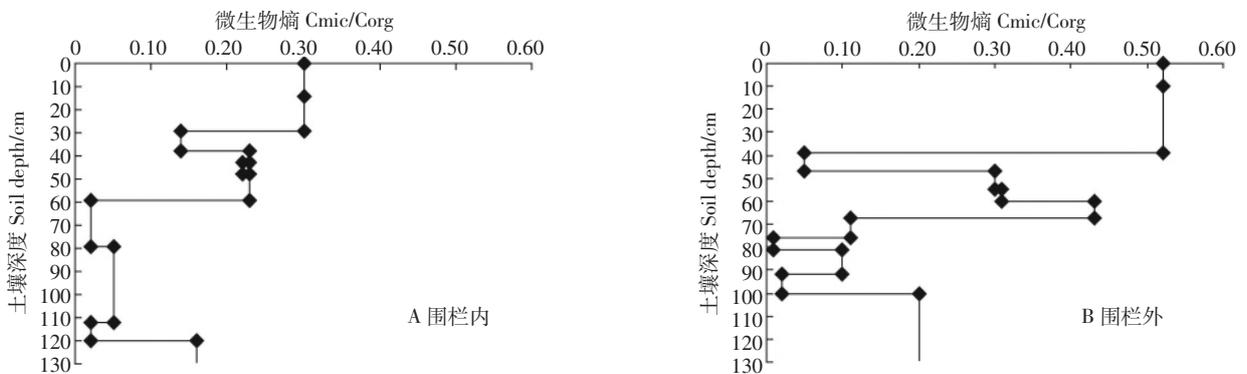


图 5 高寒草原微生物熵变化

Figure 5 Variation of C_{mic}/C_{org} in alpine grassland

表2 高寒草原微生物量碳与土壤养分含量的相关关系矩阵

Table 2 Correlation matrix of microbial carbon and soil nutrient content in alpine grassland

	微生物量碳 SMOC	有机碳 OC	速效氮 AN	速效钾 AK	速效磷 AP	全氮 TN	全钾 TK	全磷 TP
微生物量碳 SMOC	1							
有机碳 OC	0.481*	1						
速效氮 AN	0.419	0.174	1					
速效钾 AK	-0.862**	-0.745**	-0.235	1				
速效磷 AP	0.610**	0.401	-0.208	-0.615**	1			
全氮 TN	0.504*	0.201	0.152	-0.440	0.042	1		
全钾 TK	0.579*	0.065	-0.299	-0.511*	0.608**	0.485*	1	
全磷 TP	-0.954**	-0.470*	-0.435	0.811**	-0.520*	-0.589*	-0.592**	1

*表示显著性水平 $P<0.05$, **表示显著性水平 $P<0.01$, 样品数 $n=18$ 。

微生物量碳与土壤有机碳含量在土壤剖面上均随着深度的增加而降低。主要因为草本植物的地上部分生长量大,为土壤微生物提供了大量凋落物,而且草本植物的根系发达,密集于表层,根系分泌物和衰亡的根,在分解后产生较多的有机碳^[18],而随着土壤深度的增加,凋落物积累变少,土壤中可分解成有机碳的物质变少,因而有机碳的含量降低。表层能源物质及良好的生存环境,为微生物提供利用的碳源多,因此分解产生的微生物量碳多。随着深度的增加,碳的来源少,微生物数量少,所以微生物量碳就少。因此,土壤有机碳含量和微生物量碳含量可同时作为衡量土壤肥力和土壤质量变化的重要指标^[3]。

围栏封育对有机碳含量、微生物量碳含量及养分均有影响。围栏内受动物啃食践踏的频率比较少,碳源的积累和输入比较多,分解生成的有机碳多,因而有机碳含量较高。由此可见,围栏封育可以提高有机碳的含量,增加土壤肥力。随着深度的增加围栏内微生物量碳含量的变化比较平缓,因为围栏时间很长,土壤受外界的扰动小,所以围栏内微生物量碳的变化是在没有外界动物干扰的条件下形成的。微生物熵受土壤微生物量碳与土壤有机碳含量的影响,对于土壤质量的变化具有重要的指示意义。本研究中围栏内微生物熵的变化比围栏外平缓,围栏封育后受外界条件的干扰较小,而且围栏的时间很长,所以微生物熵的变化没有围栏外的剧烈。刘忠宽等^[19]研究认为由于封育后,维持土壤养分或植被空间格局的匀质化条件消失,造成土壤养分的空间异质性呈不同程度的增大趋势。王思成等^[20]对半干旱黄土丘陵区不同植被恢复方式下土壤理化性质的研究认为,封禁自然恢复可以提高土壤有机质、碱解氮和速效钾的含量^[21]。而在本研究中,微生物量碳、土壤有机碳及土壤养分等的含量在围栏封育后均有不同程度的增加,说明围封

对土壤肥力有一定改善。巴音布鲁克草原围栏样地经过长时间的围栏封育后,土壤有机碳含量及微生物量碳含量有所变化,同时地上和地下生物量、群落盖度的增加,引起草地生态系统发生变化,促进了土壤有机质的形成,改善了土壤肥力,增加了土壤有机碳的截存,引起草地的初级生产力的提高,进而使生态系统呈现良性循环^[22]。

4 结论

(1) 围封后三种类型草地有机碳含量依次为高寒草甸>高寒草甸草原>高寒草原;微生物量碳含量依次为高寒草甸草原>高寒草甸>高寒草原。

(2) 围栏封育后,表层土壤有机碳含量均增加,三种类型草地表层有机碳、微生物量碳含量,随着土壤深度的增加,呈降低趋势。

(3) 微生物量碳含量与土壤速效钾、全磷含量达到极显著负相关($P<0.01$),与速效磷达到极显著正相关($P<0.01$),与土壤有机碳、全氮、全钾含量呈显著正相关($P<0.05$)与土壤速效氮含量正相关,但不显著。

参考文献:

- [1] 刘长娥,许鹏,安沙舟. 土质温性荒漠草地植物生育节律分析[J]. 新疆农业科学, 2006, 43(1): 11-15.
LIU Chang-e, XU Peng, AN Sha-zhou. Analysis on plant developmental rhythm on desert grassland with warm soid properties[J]. *Xinjiang Agricultural Science*, 2006, 43(1): 11-15.
- [2] 刘长娥,许鹏,安沙舟,等. 天山北坡山地草甸牧草生产量结构的研究[J]. 草业科学, 2004, 21(6): 11-12.
LIU Chang-e, XU Peng, AN Sha-zhou, et al. Biomass structure of mountain meadow forage on the northern slopes of the Tianshan Mountains[J]. *Pratacultural Science*, 2004, 21(6): 11-12.
- [3] 刘长娥,许鹏,安沙舟,等. 天山北坡低山草地复合体植物群落重要值差异分析[J]. 四川草原, 2004(10): 3-5.
LIU Chang-e, XU Peng, AN Sha-zhou, et al. Analysis on Important

- Value of Phytocoenosis of Low-elevation grassland in northern slope of Tianshan[J]. *Journal of Sichuan Grassland*, 2004, (10): 3-5.
- [4] 刘长娥, 许鹏, 安沙舟. 新疆天山北坡山地草原植物生育节律分析[J]. *中国草地学报*, 2006, 28(1): 18-21.
LIU Chang-e, XU Peng, AN Sha-zhou. Study on the growing rhymes of plants of grassland in northern slope of Tianshan Mountain [J]. *Chinese Grassland Journal*, 2006, 28(1): 18-21.
- [5] 张东杰, 都耀庭. 禁牧封育对退化草地的改良效果[J]. *草原与草坪*, 2006(4): 52-54.
ZHANG Dong-jie, DU Yao-ting. The improvement effect of enclosure and grazing prohibition on the back of degraded grassland[J]. *Grassland and Lawn*, 2006(4): 52-54.
- [6] 崔恒心, 张江玲, 阿斯亚, 等. 新疆草地的生态功能及其治理对策[C]. 21世纪草业科学展望: 国际草业学术大会论文集. 北京: 中国农业出版社, 2001: 289-290.
CUI Heng-xin, ZHANG Jiang-ling, A Si-ya, et al. Grassland ecological function and controlling countermeasure in Xinjiang[C]. Beijing: China Agriculture Press, 2001: 289-290.
- [7] 赵万羽, 李建龙, 齐家国, 等. 新疆草地生态安全问题、现状与对策分析[J]. *干旱区研究*, 2005, 22(1): 44-50.
ZHAO Wan-yu, LI Jian-long, QI Jia-guo, et al. Analysis on the problems and actuality of the steppe ecological security in Xinjiang and the solving measures[J]. *Arid Zone Research*, 2005, 22(1): 44-50.
- [8] 李赞, 贾宏涛, 方光新, 等. 围栏封育对新疆亚高山草甸土壤夏季CO₂日排放的影响[J]. *干旱区地理*, 2008, 31(6): 892-896.
LI YUN, JIA Hong-tao, FANG Guang-xin, et al. Effects of fence on daily variation of CO₂ flux from the soil in subalpine meadow of Xinjiang[J]. *Arid Land Geography*, 2008, 31(6): 892-896.
- [9] Doran J W, Jones A J, Arshad M A, et al. Determinants of soil quality and health. Soil quality and soil erosion[M]. CRC Press, 1999, 17-36.
- [10] Follett R F, Schimel D S. The effect of tillage practices on microbial biomass dynamics[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53: 1091-1096.
- [11] 贾宇平, 马义娟. 黄土高原小流域土壤总碳分布与储量研究[J]. *水土保持通报*, 2005, 25(5): 17-24.
JIA Yu-ping, MA Yi-juan. Spatial distribution and reserve of soil total carbon in small watershed in Loess Plateau[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2005, 25(5): 17-24.
- [12] 王琳, 欧阳华, 周才平, 等. 贡嘎山东坡土壤有机质及氮素分布特征[J]. *地理学报*, 2004, 59(4): 1012-1020.
WANG Lin, OUYANG Hua, ZHOU Cai-ping, et al. Distribute characteristics of soil organic in alter and nitrogen on the eastern slope of Mt. Gongga[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(4): 1012-1020.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 56-58.
- [14] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006: 54-61.
WU Jin-shui, LIN Qi-mei, HUANG Xiao-yun, et al. Soil microbial biomass measurement method and application[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006: 54-61.
- [15] 王长庭, 龙瑞军, 王启兰, 等. 三江源区高寒草甸不同退化演替阶段土壤有机碳和微生物量碳的变化[J]. *应用与环境生物学报*, 2008, 14(2): 225-230.
WANG Chang-ting, LONG Rui-jun, WANG Qi-lan et al. Changes in soil organic carbon and microbial biomass carbon at different degradation successional stages of alpine meadows in the headwater region of three rivers in China[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2008, 14(2): 225-230.
- [16] Post W M, Izaurralde R C, Mann L K, et al. Monitoring and verifying changes of organic carbon in soil[J]. *Climatic Change*, 2001, 51: 73-99.
- [17] 范永刚, 胡玉昆, 李凯辉, 等. 巴音布鲁克主要草地类型表层土壤有机碳特征及其影响因素的研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(8): 179-184.
FAN Yong-gang, HU Yu-kun, LI Kai-hui, et al. Organic carbon content in major grassland types in Bayinbulak[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008, 22(8): 179-184.
- [18] 刘秉儒. 贺兰山东坡典型植物群落土壤微生物量碳、氮沿海拔梯度的变化特征[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(4): 883-888.
LIU Bing-ru. Changes in soil microbial biomass carbon and nitrogen under typical plant communities along an altitudinal gradient in east side of Helan Mountain[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(4): 883-888.
- [19] 刘忠宽, 汪诗平, 陈佐忠, 等. 不同放牧强度草原休牧后土壤养分和植物群落变化特征[J]. *生态学报*, 2006, 26(6): 2048-2056.
LIU Zhong-kuan, WANG Shi-ping, CHEN Zuo-zhong, et al. Properties of soil nutrients and plant community after rest grazing in Inner Mongolia steppe[J]. *China Acta Ecological Sinica*, 2006, 26(6): 2048-2056.
- [20] 王思成, 王月玲, 许浩, 等. 半干旱黄土丘陵区不同植被恢复方式下土壤理化特性及相关分析[J]. *西北农业学报*, 2009, 18(1): 295-299.
WANG Si-cheng, WANG Yue-ling, XU Hao et al. Soil physical-chemistry characteristic and correlation analysis of different vegetation restoration modes in semiarid hilly and gully region[J]. *Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2009, 18(1): 295-299.
- [21] 范燕敏, 武红旗, 靳瑰丽, 等. 封育对荒漠退化草地土壤主要养分的影响初探[J]. *草业科学*, 2011, 28(8): 1416-1419.
FAN Yan-min, WU Hong-qi, JIN Gui-li, et al. A tentative study of influences of fencing on soil nutrients of degradation desert grassland[J]. *Pratacultural Science*, 2011, 28(8): 1416-1419.
- [22] 孙宗玖, 安沙舟, 马金昌. 围栏封育对草原植被及多样性的影响[J]. *干旱区研究*, 2007, 24(5): 669-674.
SUN Zong-jiu, AN Sha-zhou, MA Jin-chang. Effect of fencing on vegetation and diversity of steppe in the middle section of northern slope of the Tianshan Mountains, China[J]. *Arid Zone Research*, 2007, 24(5): 669-674.