

长期开垦与放牧对内蒙古典型草原地下碳截存的影响

闫玉春^{1,2}, 唐海萍^{1,2*}, 常瑞英^{1,2}, 刘亮^{1,2}

(1. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学资源学院资源科学研究所, 北京 100875)

摘要:以围封 26 a 草地(E26)为对照,研究了内蒙古典型草原区长期开垦与放牧对土壤-植物根系系统碳截存的影响.结果表明,0~40 cm 土壤和根系中的 C 贮量, E26(7 307.59和950.32 g·m⁻²)≈连续放牧草地(LG)(7 834.01和 843.43 g·m⁻²)>开垦 35 a 耕地(LC)(4 537.04和 277.35 g·m⁻²). E26、LG 和 LC 中,0~40 cm 土壤贮存的 C 分别占各自土壤-根系系统 C 总贮量的 88.49%、90.28%和 94.24%.长期开垦完全破坏了草地原生的植被-土壤系统,造成严重的土壤风蚀;相对于 E26, LC 中 0~10 cm 和 10~20 cm 砂粒含量分别增加了 81%和 39%,0~40 cm 土层中根系生物量减少了 71%;长期开垦导致草地土壤及根系碳截存分别降低了 37.9%和 70.8%.因此,在草原地区,若将长期开垦的耕地恢复为天然草地,土壤和植物根系将会有较大的固碳潜力.放牧对该区土壤有机碳含量及根系生长的影响较小;但长期放牧样地土壤表层容重显著增加,预示目前放牧压力已达到或接近草地的承载阈值,应及时减小放牧压力以避免草地的进一步退化.

关键词:开垦;放牧;围封;典型草原;碳截存

中图分类号:X171.1 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2008)05-1388-06

Variation of Below-Ground Carbon Sequestration Under Long Term Cultivation and Grazing in the Typical Steppe of Nei Monggol in North China

YAN Yu-chun^{1,2}, TANG Hai-ping^{1,2}, CHANG Rui-ying^{1,2}, LIU Liang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Institute of Resources Science, College of Resources Science & Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Human activities have changed the earth surface mostly, which caused many environment issues now. We aimed to detect the process that human activities exert on ecosystem by investigating and analyzing the changes of plant community, especially underground soil and root carbon sequestration under long term cultivation and grazing in typical steppe area of Nei Monggol, North China. The carbon sequestration on the root and soil in three plots of typical steppe area: 26-year enclosure grassland (E26), continuous grazing grassland (LG) and 35-year cultivated tillage (LC) were measured. The carbon storage in the layer of 0-40 cm showed a trend that E26 (7 307.59 g·m⁻² and 950.32 g·m⁻²) ≈ LG (7 834.01 g·m⁻² and 843.43 g·m⁻²) > LC (4 537.04 g·m⁻² and 277.35 g·m⁻²), occupied 88.49%, 90.28% and 94.24% of total soil-root carbon respectively. The original composition structure of plant-soil system was completely destroyed by human cultivation, and it also led to sever soil erosion as well. The sand content in soil of LC at layers 0-10 cm, 10-20 cm were increasing by 81% and 39% compared to E26. On the other hand, the root biomass of LG at 0-40 cm decreased by 71%. Cultivation resulted in significant decrease of the carbon storages in soil and root. Therefore, the present cultivation should be ceased and the optimum measurements should be taken to make the tillage restore to natural grassland condition. Continuous grazing led to the significantly changes of the above-ground vegetation characteristics such as community height, coverage and biomass. While the changes of soil organic content and root biomass was not remarkable under grazing. However, the bulk density of surface soil (0-10 cm) exhibited significant increase in LG compared to E26, which indicated that the present grazing pressure have been reaching the threshold of grassland capacity. Therefore, the present grazing pressure should be decreased properly in order to avoid more serious degradation.

Key words: cultivation; grazing; enclosure; typical steppe; carbon sequestration

草地生态系统是陆地碳循环及碳截存的一个重要组成部分^[1].全球草地面积约为 3.42×10⁹ hm²,约占陆地面积的 40%^[2].我国草地面积近 4×10⁸ hm²,占全国陆地面积的 40.7%^[3].典型草原是温带内陆半干旱气候条件下形成的草地类型,该类草原占内蒙古天然草地总面积的 1/3(2.63×10⁷ hm²)^[3],但有关该区域碳贮量和分布的定量研究,特别是地下根系和土壤中的碳截存数据很少,影响了对不同管理和利用方式下草地生态系统碳动态及其生物化学过

程的深入理解.

开垦会导致草地碳截存的显著降低已被大量研究所证实^[4],而由于研究区环境条件与放牧强度的不确定性所导致的放牧管理和碳截存之间的关系还存在一些不一致的结论.地下碳截存对放牧和围封

收稿日期:2007-06-27;修订日期:2007-09-18

基金项目:国家自然科学基金项目(40571057)

作者简介:闫玉春(1979~),男,博士研究生,主要研究方向为退化草地生态系统恢复重建, E-mail: yyc@ires.cn

* 通讯联系人, E-mail: tanghp@bnu.edu.cn

的响应是一个较缓慢的过程,也可以说放牧在一定时间尺度内还不会影响到系统的地下碳截存^[5].有研究表明:在沙地、坡地及干旱环境条件下放牧容易导致土壤侵蚀,从而使有机碳含量较高的表层土壤流失而造成土壤碳损失^[6,7];当放牧对草地生产力和植被盖度无明显影响并且未引起土壤侵蚀时,不会造成土壤碳的损失,并且在大多数情况下会由于放牧家畜排泄物的输入和碳周转速率的提高而增加土壤的碳截存^[2,8].

本研究通过对内蒙古典型草原不同利用方式下,土壤与植物根系中的有机碳含量及其密度的测定,旨在揭示长期开垦与放牧对典型草原地下碳截存的影响及其机理,同时也有助于理解草地生态系统退化和恢复的机制.

1 材料与方法

1.1 研究区域

研究区位于内蒙古白音锡勒牧场(北纬43°26′~44°08′,东经116°04′~117°05′),面积为3.73×10⁵ hm².该区属温带内蒙古草原区典型草原栗钙土亚区,地带性植被为大针茅(*Stipa grandis*)+羊草(*Leymus chinensis*).本区属半干旱草原气候,冬季寒冷干燥,夏季较为温和湿润,3~5月常有大风,月平均风速达4.9 m·s⁻¹.年平均气温为-0.4℃,最冷月(1月)平均温度-22.3℃,极端最低温为-47.5℃,最热月(7月)平均温度18.8℃,≥10℃的积温为1597.9℃,持续112 d,无霜期约100 d,草原植物生长期约150 d.年降水量350 mm左右,集中于6~9月,占全年降水量的80%左右,降水量的季节和年际变化非常大^[9].

1.2 研究样地的选取

在研究区内,选择了相邻的、地形平坦一致的3类样地,分别是:①开垦35 a耕地(LC),耕种时无施肥措施,翻地深度约20 cm.该样地在2001年以前种植小麦(*Triticum aestivum*),2001年以后为紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、披碱草(*Elymus dahuricus*)、无芒雀麦(*Bromus inermis*)3种多年生牧草混播;②长期放牧样地(LG),2003年以前的放牧率较轻(羊<2只/hm²),2003年以后放牧率增加为羊3~4只/hm²;③围封26 a样地(E26),围封前为受干扰较小的原生群落.于2006-08 上旬进行植物与土壤取样.

1.3 取样与分析

在每个样地内,分别选择具有代表性的3个30 m×30 m的取样点.在每个取样点内随机选取12个

1 m×1 m样方,采用目测法确定群落总盖度,用直尺测量每种植物的平均高度.将其地上活体部分齐地面刈割存放于塑封袋中,将其立枯与凋落物分别收集于塑封袋中,带回实验室分别称量其鲜重.然后在65℃烘箱中烘干至恒重,称量其干重.

在地上群落调查的相应位置,采用土钻法^[10],取地下0~40 cm层内根样,每10 cm取1个样.将样品中的土壤及沙粒等杂物洗净.将洗过后的根样在65℃烘箱中烘干至恒重,称量其干重.然后将样品粉碎,采用重铬酸钾氧化-外加热法测定其有机碳含量.

采用环刀法,在各样地每个取样点随机选取12个分点4层(0~10、10~20、20~30、30~40cm)取样,在实验室称量其湿重,在105℃烘箱中烘干至恒重,称量其干重.

采用土钻法,在各样地每个取样点随机选取12个分点4层(0~10、10~20、20~30、30~40 cm)取样.将样品均匀混合并带回实验室阴干备用.采用日本产SALD-3001激光粒度分析仪进行土壤粒度分析.有机碳含量测定用重铬酸钾氧化-外加热法.

1.4 数据分析

通过SPSS13.0软件采用单因素方差分析(ANOVA)检验3个样地在各项特征指标上的差异.用最小显著性差异方法(LSD)检验各样地间的差异显著性($p < 0.05$).用Origin6.1软件进行绘图.

2 结果与分析

2.1 长期开垦与放牧下地表植被与土壤理化特征

从表1可以看出,由于家畜的采食和践踏,放牧样地的群落高度、盖度及生物量在3个样地中均为最低($p < 0.05$).开垦样地与围封样地在活体生物量和群落高度上无显著差异,但由于每年秋季的收割,其立枯与凋落物量显著低于围封样地($p < 0.05$).围封样地在群落盖度上也显著高于开垦样地($p < 0.05$).

从土壤粒级分布看(表2),自由放牧与围封样地在30 cm以上均无显著差异,而在30~40 cm土层中的粘粒比重表现出显著差异,这可能与下层土壤本身存在一定异质性有关.总体上,自由放牧未对土壤的粒级分布产生显著影响.而开垦样地与其他2类样地在粒级分布上表现出显著差异($p < 0.05$),在表层土壤上,开垦样地相对于围封和放牧样地表现为土壤粘粉粒含量显著减少,而砂粒含量显著增加($p < 0.05$),如在开垦样地0~10 cm土层的砂粒含

表 1 3 类样地地表植被状况¹⁾

Table 1 Above-ground vegetation characteristics of three study sites						
样地	优势植物种	生物量/g·m ⁻²			高度/cm	盖度/%
		活体	立枯	凋落		
E26	大 针 茅 (<i>Stipa grandis</i>)、羊 草 (<i>Leymus chinensis</i>)、苔草 (<i>Carex duriuscula</i>)	121.08 ± 10.46a	103.08 ± 7.66a	79.69 ± 10.32a	26.59 ± 3.76a	68.33 ± 3.12a
LG	大 针 茅 (<i>Stipa grandis</i>)、苔 草 (<i>Carex duriuscula</i>)、羊草 (<i>Leymus chinensis</i>)	30.18 ± 1.67b	0.78 ± 0.78b	5.23 ± 1.28c	7.92 ± 0.87b	37.78 ± 2.52b
LC	2001 年前为小麦 (<i>Triticum aestivum</i>); 2001 年后为紫花苜蓿 (<i>Medicago sativa</i>)、无芒雀麦 (<i>Bromus inermis</i>)、披碱草 (<i>Elymus dahuricus</i>)	113.63 ± 18.75a	3.86 ± 2.22b	37.97 ± 5.40b	26.56 ± 4.22a	46.00 ± 5.10b

1)同一列内不同字母标识表示样地之间差异显著($p < 0.05$)

量(均值)相对于围封样地和放牧样地分别增加了 81% 和 83% .这主要是由于开垦引起严重的土壤风蚀所致.

开垦与放牧均显著影响了表层土壤容重(表 2).在 0 ~ 10 cm 土层中,放牧样地和开垦样地的土壤容重均显著高于围封样地,放牧样地显著低于开垦样地($p < 0.05$).在 10 ~ 20 cm 土层中,则表现为开垦样地土壤容重显著高于围封样地,而放牧样地与其他 2 类样地间差异均不显著.而 3 类样地在 20 ~ 30、30 ~ 40 cm 这 2 层内的土壤容重差异均不显著.以上结果表明,开垦相对于放牧对土壤容重的影响更为剧烈.

从土壤有机碳含量看(表 2),围封与放牧样地之间无显著差异,而开垦样地在 30 cm 以上土层中

的土壤有机碳含量均显著低于其他 2 类样地($p < 0.05$).尤其在土壤表层(0 ~ 10 cm),其有机碳含量均值相对于围封与放牧样地分别减少 49% 和 42% .因此开垦不仅对土壤的物理性状造成了显著影响,同时也显著影响了土壤有机碳含量.开垦样地土壤有机碳含量的减少主要是由于其表层养分含量较高的细颗粒被吹蚀所致.回归分析表明土壤有机碳含量与土壤粘粉粒含量呈显著的线性正相关,其线性拟合方程为:

$$y_{\text{soc}} = 0.3345x_{(\text{clay+silt})} - 2.5736 \quad (1)$$

$$(p < 0.0001, R = 0.7945, N = 36)$$

从方程(1)可以得出,典型草原土壤粘粉粒含量每被吹蚀 1%,即土壤中砂粒含量每增加 1%,土壤有机碳含量会降低 0.3345 g·kg⁻¹.

表 2 3 类样地土壤理化特征¹⁾

Table 2 Soil physical and chemical characteristics of three study sites						
土层/cm	样地	土壤粒级分布/%			容重/g·cm ⁻³	有机碳/g·kg ⁻¹
		粘粒(< 0.002 mm)	粉粒(0.002 ~ 0.05 mm)	砂粒(> 0.05 mm)		
0 ~ 10	E26	11.52 ± 1.00a	50.71 ± 0.78a	37.76 ± 1.07b	1.20 ± 0.03c	21.55 ± 1.63a
	LG	12.33 ± 0.27a	50.44 ± 1.11a	37.23 ± 1.37b	1.31 ± 0.02b	18.87 ± 2.05a
	LC	7.27 ± 0.51b	24.55 ± 3.04b	68.18 ± 3.53a	1.43 ± 0.05a	10.95 ± 1.11b
10 ~ 20	E26	10.29 ± 0.46a	43.32 ± 1.18a	46.39 ± 1.21b	1.31 ± 0.04b	14.46 ± 0.62a
	LG	11.18 ± 0.84a	42.79 ± 1.69a	46.03 ± 2.22b	1.39 ± 0.02ab	16.10 ± 1.34a
	LC	8.87 ± 1.36a	27.21 ± 3.47b	63.92 ± 4.26a	1.44 ± 0.02a	10.61 ± 0.89b
20 ~ 30	E26	9.31 ± 0.84a	26.92 ± 1.81a	63.78 ± 1.25a	1.36 ± 0.04a	10.79 ± 1.08a
	LG	8.65 ± 0.50a	29.76 ± 1.55a	61.59 ± 2.03a	1.44 ± 0.03a	10.42 ± 0.86a
	LC	10.95 ± 0.73a	30.82 ± 2.11a	58.23 ± 2.59a	1.37 ± 0.04a	7.25 ± 0.74b
30 ~ 40	E26	7.18 ± 0.13c	22.64 ± 0.60b	70.18 ± 0.63a	1.34 ± 0.06a	9.40 ± 0.77a
	LG	9.64 ± 0.30a	28.39 ± 3.84ab	61.97 ± 4.15ab	1.47 ± 0.03a	8.39 ± 1.49a
	LC	8.53 ± 0.19b	31.92 ± 0.90a	59.55 ± 1.04b	1.42 ± 0.04a	6.02 ± 0.38a

1)各土层下数字后的不同字母表示样地之间差异显著($p < 0.05$)

2.2 长期开垦与放牧对地下碳截存的影响

2.2.1 长期开垦与放牧对地下根量及其碳截存的影响

图 1(A)表明,各样地根量均呈现出由表层向下递减的趋势,如在围封样地 0 ~ 10 cm 土层根量为

1 343.91 g·m⁻²,而 30 ~ 40 cm 土层则降低到 205.63 g·m⁻²,仅为 0 ~ 10 cm 土层根量的 15% .放牧样地的地下各层根量与围封样地之间均无显著差异($p < 0.05$),说明目前的放牧压力对地下根系生长未产生显著影响.在开垦样地,由于其表层土壤和原生植被

根系完全被破坏,使其地下根的密度锐减,其地下各层根量均显著低于围封样地和放牧样地($p < 0.05$).围封样地、放牧样地和开垦样地地下 0~40 cm 总根量分别为2 608.23、2330.29 和 761.51 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$.其中围封样地与放牧样地之间差异不显著($p > 0.05$),而开垦样地地下根量则显著低于其他 2 类样地($p < 0.05$).

由图 1(B)可知,围封、放牧和开垦样地根系中

有机碳含量分别为 364.35、361.94 和 364.22 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,差异均不显著($p > 0.05$).因此 3 类样地地下根碳截存量主要取决于其根量的多少,其比较结果与地下根量的比较结果相同.从图 2(A)可以看出,围封与放牧样地的地下 0~40 cm 根碳截存无显著差异,分别为 950.32 和 843.43 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$.开垦样地的地下 0~40 cm 根碳截存仅为 277.35 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,显著低于其他 2 类样地($p < 0.05$),分别占围封样地和放

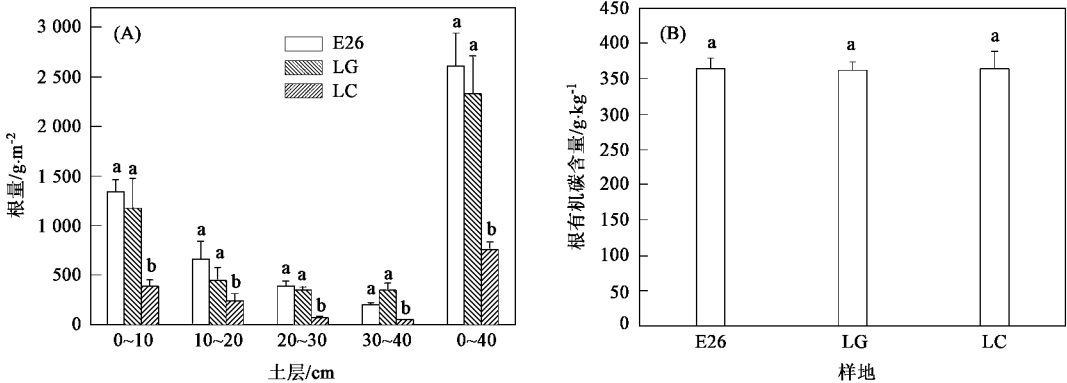


图 1 3 类样地地下各层根量(A)及各样地根中有机碳含量(B)

Fig.1 Root biomass of each soil layer and organic carbon content in the root of three study sites

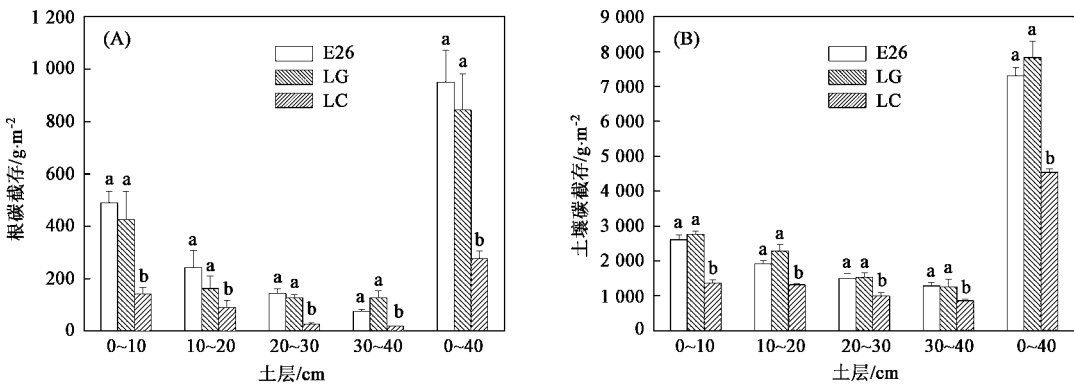


图 2 3 类样地地下各层根碳截存(A)及土壤碳截存(B)

Fig.2 Carbon storages in the root and soil of each layer in three study sites

牧样地的 29%和 33%.

2.2.2 长期开垦与放牧对土壤碳截存的影响

土壤碳截存量由土壤有机碳含量与土壤容重决定,尽管 3 类样地的土壤容重存在显著差异,但由于其变化幅度相对较小,有机碳含量的变化幅度相对较大.因此 3 类样地土壤碳截存与土壤有机碳含量呈现相同的变化趋势.图 2(B)表明,围封样地与放牧样地各层土壤碳截存均无显著差异,二者各层土壤碳截存均显著高于开垦样地($p < 0.05$).开垦样地地下 0~40 cm 土壤碳截存最低,仅为 4 537.04

$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,相对于围封和放牧样地分别降低了 38%和 42%.

2.2.3 地下碳截存总量及在土壤、根系中的分配

由表 3 可以看出,围封与放牧样地地下各层碳截存均无显著差异,二者地下各层碳截存均显著高于开垦样地($p < 0.05$).从地下 0~40 cm 碳截存总量看,开垦样地的地下碳截存为 4 814.39 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,显著低于围封和放牧样地($p < 0.05$),分别是围封和放牧样地的 58%和 55%.且 3 类样地地下碳截存主要分布在土壤中,围封、放牧和开垦样地土壤碳截存分

表 3 3 类样地地下碳截存总量及在土壤与根系中的分配¹⁾

土层/cm	地下碳截存总量/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$			S/R/%		
	E26	LG	LC	E26	LG	LC
0 ~ 10	3105.63 ± 160.63a	3195.46 ± 170.42a	1514.42 ± 69.99b	84.23/15.77	86.66/13.34	90.64/9.36
10 ~ 20	2165.32 ± 41.67a	2442.86 ± 204.05a	1405.84 ± 61.59b	88.82/11.18	93.35/6.65	93.66/6.34
20 ~ 30	1633.47 ± 150.95a	1655.87 ± 126.05a	1020.54 ± 97.42b	91.21/8.79	92.30/7.70	97.35/2.65
30 ~ 40	1353.48 ± 101.28a	1383.26 ± 205.47a	873.60 ± 54.64b	94.46/5.54	90.82/9.18	97.79/2.21
0 ~ 40	8257.91 ± 107.15a	8677.44 ± 562.73a	4814.39 ± 129.88b	88.49/11.51	90.28/9.72	94.24/5.76

1) S/R 表示土壤碳截存占地下碳截存比例/根碳截存占地下碳截存比例;不同土层下数字后的不同字母表示样地之间差异显著($p < 0.05$)

别占各自地下碳截存总量的 88.49%、90.28% 和 94.24%。

3 讨论

3.1 长期开垦对典型草原地下碳截存的影响

典型草原开垦 35 a 后,地下 0 ~ 40 cm 土壤碳截存比围封样地降低了 37.9%,这与前人在北美大平原及美国中西部地区的研究结论一致,即草地开垦为农田后会损失掉原来土壤中碳素总量的 30% ~ 50%^[4, 11, 12]。开垦使土壤中的有机质充分暴露在空气中,土壤温度和湿度条件得到改善,从而极大地促进了土壤呼吸作用,加速了土壤有机质的分解^[11];开垦会加速土壤风蚀,土壤表层有机碳含量较高的细颗粒被吹蚀后导致土壤有机碳的大量损失。本研究得出:典型草原土壤砂粒含量与土壤有机碳含量呈显著负相关;土壤中砂粒含量每增加 1%,其土壤有机碳含量将降低 $0.334\ 5\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。开垦样地的地下根量比围封样地降低了 71%,这不仅直接影响到地下根系中的碳截存量,同时也严重影响到根系碳素向土壤中的输入量;开垦样地地表立枯和凋落物分别降低了 96% 和 52%,减少了地上植被碳素向土壤中的输入量。前人研究也表明多年生牧草被作物取代后使初级生产固定的碳素向土壤中的分配比例降低(生物量的地下与地上比例降低)^[13]。

3.2 长期放牧对典型草原地下碳截存的影响

过度放牧是造成草地退化的根本原因。过度放牧可使草地初级生产固定碳素的能力降低,并且由于家畜的采食而减少了碳素由植物凋落物向土壤中的输入;过度放牧通过促进草地土壤的呼吸作用从而加速碳素由土壤向大气的释放^[14]。而本研究结果表明长期放牧(26 a)主要对典型草原地表植被特征产生显著影响,对地下碳截存影响不显著。如放牧样地相对于围封样地活体生物量降低了 75%;由于家畜的采食和践踏导致长期放牧样地凋落物量与立枯量甚微;长期放牧样地在群落盖度和群落高度上分

别下降了 45% 和 70%,但是地下根量及土壤有机碳含量则相对稳定;长期放牧样地与围封样地的地下根碳截存和土壤碳截存均无显著差异。相关研究也得出类似结论,如对内蒙古锡林河流域羊草草原的研究结果表明,40 a 间过度放牧使草地表层土壤(0 ~ 20 cm)中碳的贮量降低了 12.14%,表明这种变化是较缓慢的,其效应出现的时间阈值至少在 20 a 以上^[15]。对于植被系统而言,地下根系变化也滞后于地上植被特征的变化,只有干扰在强度和时间上达到一定阈值时才会产生显著变化^[16]。此外,土壤与植被具有完全不同的属性,在草地退化过程中则表现为土壤退化滞后于植被退化,这一结论也被许多研究所证实^[6, 17],并将土壤的这种特性称为“土壤稳定性”^[18]。以上原因综合导致了长期放牧引起地上植被特征的显著变化,而地下碳截存的变化则不明显。从另一个角度看,围封 26 a 样地相对于放牧样地也并未表现出地下碳截存增加的结果,这主要是由于排除家畜放牧的长期围封使植物碳向土壤碳的再循环受到限制,截存的大部分碳只是以凋落物和立枯的形式积存在土壤表面,对土壤有机碳库的贡献相对较小,而且随着围封时间的增加,凋落物在地表的积累也影响土壤温度和土壤水分,进而影响植物残体和凋落物的分解速率,因此影响到碳和养分的循环^[1]。但从土壤表层容重来看,长期放牧导致了土壤表层容重的显著增加,土壤容重的增加是草地生态系统退化的早期预警指标,因为容重的变化会进一步导致土壤水分入渗和保持、孔隙分布等影响植物生长的其他土壤性状的改变^[19]。说明目前放牧压力尽管还没有明显影响到地下土壤有机碳含量和地下根系的生长,但是也已经接近或达到草地承载阈值。因此应及时减轻放牧压力,以避免导致进一步严重的草地退化。

4 结论

(1)内蒙古典型草原区围封 26 a 的大针茅 + 羊

草群系中,0~40 cm 土壤和根系中 C 贮量大小为 7 307.59 g·m⁻²和 950.32 g·m⁻²,多年连续放牧的大针茅群系 0~40 cm 土壤和根系中碳贮量大小分别是 7 834.01 g·m⁻²和 843.43 g·m⁻²,开垦 35 a 的耕地为 4 537.04 g·m⁻²和 277.35 g·m⁻²;0~40 cm 土壤贮存的 C 分别占各自土壤-根系系统 C 总贮量的 88.49%、90.28%和 94.24%。

(2)开垦导致表层土壤风蚀,开垦样地 0~10 cm 土层的砂粒含量比围封样地和放牧样地分别增加 81%和 83%。土壤有机碳含量与土壤粘粉粒含量呈显著的线性正相关,典型草原群落土壤粘粉粒含量每被吹蚀 1%,即土壤中砂粒含量每增加 1%,土壤有机碳含量会降低 0.334 5 g·kg⁻¹。

(3)典型草原开垦 35 a 后,其土壤和根系有机碳截存比围封草地分别降低了 37.9%和 70.8%。

(4)连续放牧导致地表植被特征发生明显变化,活体生物量比围封样地降低了 75%,凋落物量与立枯量很少,群落盖度和群落高度比围封样地分别下降了 45%和 70%;连续放牧对群落地下根系及土壤碳截存量影响不显著。

参考文献:

[1] Reeder J D, Schuman G E. Influence of livestock grazing on C sequestration in semi-arid mixed grass and short - grass rangelands [J]. Environmental Pollution, 2002, **116**: 457-463.

[2] Conant R T, Paustian K. Potential soil sequestration in overgrazed grassland ecosystems [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2002, **16** (4): 1143-1151.

[3] 内蒙古草地资源编委会. 内蒙古草地资源[M]. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1990. 150-151.

[4] Lal R. Soil carbon dynamics in cropland and rangeland [J]. Environmental Pollution, 2002, **116**: 353-362.

[5] Nosoetto M D, Jobbagy E G, Paruelo J M. Carbon sequestration in semi-arid rangelands: Comparison of *Pinus ponderosa* plantations and grazing exclusion in NW Patagonia [J]. Journal of Arid

Environments, 2006, **67**: 142-156.

[6] Su Y Z, Li Y L, Cui J Y, *et al.* Influences of continuous grazing and livestock exclusion on soil properties in a degraded sandy grassland, Inner Mongolia, northern China [J]. Catena, 2005, **59**: 267-278.

[7] Wolde M, Veldkamp E, Mitiku H. Effectiveness of exclosures to restore degraded soils as a result of overgrazing in Tigray, Ethiopia [J]. J Arid Environ, 2007, **69**: 270-284.

[8] 苏永中, 赵哈林. 持续放牧和围封对科尔沁退化沙地草地碳截存的影响[J]. 环境科学, 2003, **24**(4): 23-28.

[9] 姜恕. 中国科学院内蒙古草原生态系统定位站的建立和研究工作概述[A]. 见: 草原生态系统研究(第一集)[M]. 北京: 科学出版社, 1985. 1-10.

[10] 张华, 伏乾科, 李锋瑞. 退化沙质草地自然恢复过程中土壤-植物系统的变化特征[J]. 水土保持通报, 2003, **23**(6): 1-6.

[11] Aguilar R, Kelly E F, Heil R D. Effects of cultivation on soils in northern Great Plains rangeland [J]. Soil Science Society of America Journal, 1988, **52**: 1081-1085.

[12] Davidson E A, Ackerman I L. Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soils [J]. Biogeochemistry, 1993, **20**: 161-193.

[13] Anderson D W, Coleman D C. The dynamics of organic matter in grassland soils [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1985, **40**: 211-216.

[14] 李凌浩, 刘先华, 陈佐忠. 内蒙古锡林河流域羊草草原生态系统碳素循环研究[J]. 植物学报, 1998, **40**(10): 955-961.

[15] 李凌浩. 土地利用变化对草原生态系统土壤碳贮量的影响[J]. 植物生态学报, 1998, **22**(4): 300-302.

[16] 刘建军, 浦野忠朗, 鞠子茂, 等. 放牧对草原生态系统地下生产力及生物量的影响[J]. 西北植物学报, 2005, **25**(1): 88-93.

[17] Alder P B, Lauenroth W K. Livestock exclusion increases the spatial heterogeneity of vegetation in Colorado short grass steppe [J]. Applied Vegetation Science, 2000, **3**: 213-222.

[18] 李绍良, 陈有君, 关世英, 等. 土壤退化与草地退化关系的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2002, **16**(1): 92-95.

[19] Rubio J L, Bochet E. Desertification indicators as diagnosis criteria for desertification risk assessment in Europe [J]. Journal of Arid Environments, 1998, **39**: 113-120.