

开垦对高寒草甸土壤有机碳影响的初步研究

李月梅^{1,3,4}, 王跃思², 曹广民¹, 杜岩功¹

(1. 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001; 2. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029;
3. 青海省农林科学院土壤肥料研究所, 西宁 810016; 4. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站地区, 选择高寒草甸开垦后形成的一年生人工草地作为研究对象, 开垦年限分别为 0、1、11、16 和 20 年, 利用土壤有机碳密度分组法, 进行了 0~40cm 土层土壤有机碳及不同组分(轻组有机碳, 重组有机碳)含量及随开垦年限变化关系的研究。结果表明: 高寒草甸开垦后其土壤有机碳的变化主要发生在 0~10cm 土层, 土壤中 SOC、LFOC 和 HFOC 呈下降趋势, 至 20 年时分别下降了 10.5%、26.7%、8.1%, 主要原因为当地较为强烈的风蚀作用、耕作侵蚀和开垦加剧了表层(0~10cm)土壤有机质的氧化分解, 表层土壤中的粗有机物质在降水淋溶作用下, 在土体下部重新淀积。而 0~40 cm 土体内, SOC、LFOC 和 HFOC 略有增加, 开垦 20 年, 他们的累积速率分别为 $0.08 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ 、 $0.07 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ 、 $0.14 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ 。人工草地长期种植虽然没有改变高寒草甸作为碳汇的基本功能, 但却大大降低了其碳汇效应, 植物-土壤系统年固定碳量由未开垦前的 $7.38 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ 下降至 $6.89 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ 。

关键词: 开垦; 高寒草甸; 土壤有机碳; 轻组有机碳; 重组有机碳

中图分类号: S159; P467

1 引言

土地利用变化和化石燃料燃烧被认为是引起大气中 CO_2 增加的两个主要原因, 每年由于土地利用变化而排放到大气中的碳约为 $2\text{Gt}^{[1,2]}$ 。草地是陆地生态系统的主要类型, 碳储量高达 761 Pg C , 且约 90% 贮存在土壤中^[3-5]。至 1998 年全球已有约 660 Mhm^2 的草地被开垦成农田, 约占土地利用变化的 40%^[6]。许多研究表明, 天然草地被开垦后会造土壤碳储量的下降, 约损失原土壤中碳素总量的 30%~50%^[7-9]。

青藏高原是欧亚大陆最高最大的地貌单元, 对全球气候变化十分敏感, 有研究表明青藏高原草地土壤有机碳量约占全球土壤碳库的 2.4% 左右, 但其面积仅占全球陆地面积的 1.02%^[10], 研究青藏高原陆地碳的生物地球化学循环对全球变化的响应及反馈作用具有重要意义。有关青藏高原高寒草地对大气温室气体的贡献作用已有较多的研究报道^[11,12]; 而土地

收稿日期: 2005-04; 修订日期: 2005-08.

基金项目: 国家自然科学基金项目(40471133); 中国科学院知识创新工程重大项目——中国陆地和近海生态系统碳收支研究(KZCX1-SW-01); 中国科学院资源环境领域野外台站研究基金的支持。

作者简介: 李月梅(1974-), 女, 青海乐都人, 助理研究员, 在读硕士, 主要从事土壤生态方面的研究。通讯作者; E-mail: Caogm@mail.nwipb.ac.cn

利用变化对土壤碳库类型的影响作用如何,尚属空白。本研究以广布于青藏高原的高寒草甸为研究对象,探讨土地利用方式变化后和不同利用年限下,高寒矮嵩草草甸土壤有机碳组分的变化过程与趋势。

2 材料与方 法

2.1 自然概况

试验样地设置在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站(海北站)地区,地处青藏高原东北隅,祁连山北支冷龙岭东段南麓的大通河谷,37°29′~37°45′N,101°12′~101°23′E,海拔 3280m。属典型的高原大陆性气候,年平均气温-1.7℃,最暖的 7 月平均气温 9.8℃,最冷的 1 月平均气温-14.8℃,年平均降水量 618mm,降水主要集中于暖季的 5~9 月,占年降水量的 80%,植物生长季雨热同季。

2.2 试验样地

试验样地原生植被为寒冷中生、湿中生和旱中生多年生密丛短根茎地下芽嵩草属植物为建群种的植被类型。植被分布均匀,植株低矮、密集、覆盖度大,初级生产力低。土壤为草毡寒冻锥形土,洪积-冲积物(滩地)、坡积-残积(坡地)及古冰水沉积土壤母质,土层浅薄,有机质含量丰富。长期以来,随着人类生活需求的增加,天然草地被逐渐开垦为人工草地、农田,原生植被景观破碎化,人工草地、农田镶嵌分布,其中人工草地以种植一年生牧草(燕麦)为主,农田主要种植春油菜。本研究选择广泛分布于试验区平坦山地开垦年限为 1、11、16 和 20 年的高寒人工草地为研究对象,以样点附近未开垦的高寒草甸为对照。

2.3 采样方法

2004 年 9 月,在不同开垦年限(0、1、11、16 和 20 年)的地块中采用 S 形布点法,每个样地各布设 5 个取样点,采样深度为 40 cm,每 10cm 一层。同时用 100 cm³ 环刀测定各土层土壤容重。土样风干,过 2 mm 筛备用。

2.4 分析方法

土壤碳素用日本岛津公司生产的 TOC-5000A 有机碳分析仪进行测定,其中 TC、IC 燃烧温度分别为 900℃、250℃。土壤总有机碳、重组有机碳测定值由总碳(TC)减去无机碳(IC)得出,轻组有机碳则由 TC 直接得出。

2.4.1 土壤总有机碳(SOC)称取 0.01~0.02g 过 0.25mm 筛的土样,直接上机测定。

2.4.2 轻组有机碳(LFOC)称取过 2 mm 筛的土样 25 g 于 100 ml 离心管中,加入比重为 1.7g·ml⁻¹ 的 NaI 溶液,于 200 rpm 条件下振荡 1h,然后在 1000 × g 下离心 15 min,将浮在液面的轻组移至装有 0.45μm 尼龙滤纸的漏斗中抽气过滤,用 50 ml 0.01 M CaCl₂ 洗涤,再用蒸馏水洗后移到烧杯中,重复以上步骤提取两次后将所提轻组混合,在 60℃下烘干 72 h,称重。计算烘干样品质量占总土壤样品的比例。研细后过 60 目筛。

2.4.3 重组有机碳(HFOC)轻组提取后,离心管中的剩余物加蒸馏水重复洗涤数次,将离

心管中土样移到提前称重的烧杯中,60 μ 下烘干72 h,称重。研细过60目筛。

利用SOC、LFOC、HFOC的测定结果,结合土壤容重和采样深度,计算单位面积的土壤总有机碳、轻组有机碳、重组有机碳含量。

3 结果与分析

3.1 土壤总有机碳

天然高寒草甸开垦为人工草地后,经过20年的种植,0~40 cm土体中,土壤总有机碳(SOC)含量略有增加,由开垦前的94.38 t C·hm⁻²增加至95.89 t C·hm⁻²(图1),各土层(每层10 cm)SOC占整个40 cm土体SOC的比例分别为27.72%、30.51%、22.42%、19.36%。同时可以看出,SOC在土体中层次之间过渡比较明显,而天然草地与开垦草地的过度形式有所不同。天然高寒草甸中,随着土层深度的增加,SOC含量呈逐渐下降趋势;而开垦为人工草地后则表现为10~20 cm>0~10 cm>20~30 cm>30~40 cm。这与陈伏生对科尔沁沙地草甸土开垦后的研究结果相同^[13],主要是由于农田耕翻措施将表层(0~10 cm)植物残体翻入亚表层(10~20 cm),增加了地上生物量中碳素向土壤的输入所致。

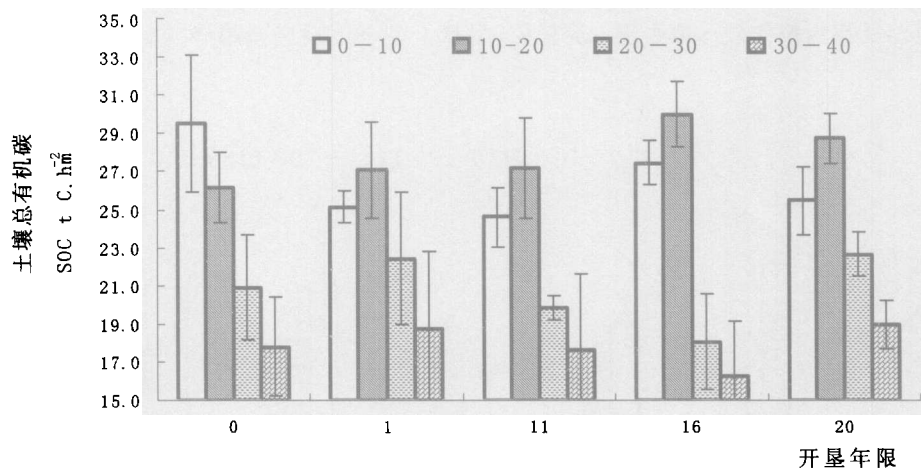


图1 不同开垦年限人工草地中土壤总有机碳含量

Fig.1 The contents of soil organic carbon in artificial grassland soil of chronosequences

高寒草甸开垦为人工草地后土壤表层(0~10 cm)SOC下降较为迅速,在1年内下降了14.7%,随着开垦年限的增加,下降趋势一直延续,只是下降的速率有所减缓,从1年内的4.33 t C·hm⁻²·yr⁻¹减小为20年内的0.20 t C·hm⁻²·yr⁻¹(图版I,图2)。严平^[14]等人应用¹³⁷Cs法对青藏高原土壤风蚀情况进行了测定,结果表明草地和旱作农田均表现为单一的风蚀过程,且青藏高原风蚀区土壤风蚀速度平均为47.59 t·hm⁻²·a⁻¹。本研究中表层有机碳下降,可能是由于当地较为强烈的风蚀作用;耕作措施使下层土壤不断翻至表层造成稀释,即耕作侵蚀;开垦加剧了表层SOC的氧化分解。

在 0~40 cm 土层,开垦初期 SOC 有一明显增加趋势,其后逐渐下降,至 20 年时表现为缓慢积累态势,其速率为 $0.08 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ (图版 I,图 3)。由此可得出,开垦主要使土壤表层(0~10cm)有机碳含量下降,但在整个根系分布区内并不完全表现出这种下降趋势。

3.2 土壤轻组有机碳

轻组(Light fraction, LF)的主要成分为动植物残体、菌丝体、孢子、单糖、多糖和半木质素,是介于动植物残体与腐殖质之间的一个中间碳库,有机碳含量和其它养分含量高于腐殖质^[15,16]。由于其对土地利用和管理措施较为敏感,成为评价土壤碳库变化的衡量指标^[17]。

天然高寒草甸开垦为人工草地后,经过 20 年的种植,0~40cm 土体中,LFOC 含量由未开垦前的 $6.51 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增加至 $7.94 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2}$ (图 4),各土层 LFOC 占整个 40cm 深度 LFOC 含量的比例分别为 46.72%、33.79%、12.10%、7.39%。在不同土层,由于人工扰动、根系分布和生物活动等因素不同,轻组有机碳(LFOC)在土壤剖面中的分布也不同。高寒草甸和人工草地中均表现为随着土层深度的增加,LFOC 含量呈逐渐下降趋势,即 $0\sim 10\text{cm} > 10\sim 20\text{cm} > 20\sim 30\text{cm} > 30\sim 40\text{cm}$ 。Janzen^[18]对三个不同地区土壤剖面中轻组有机质分布的研究表明,Indian Head、Melfort 和 Scott 地区表土(0~7.5cm)中轻组有机质含量分别为亚表土(7.5~15 cm)的 3.4、2.1 和 2.2 倍。魏朝富^[19]对紫色土的剖面进行了研究,结果显示绝大部分土壤剖面中轻组有机质的含量都为耕作层 > 犁底层 > 淀积层,呈从上到下逐渐递减趋势。此实验结果与此结论一致。

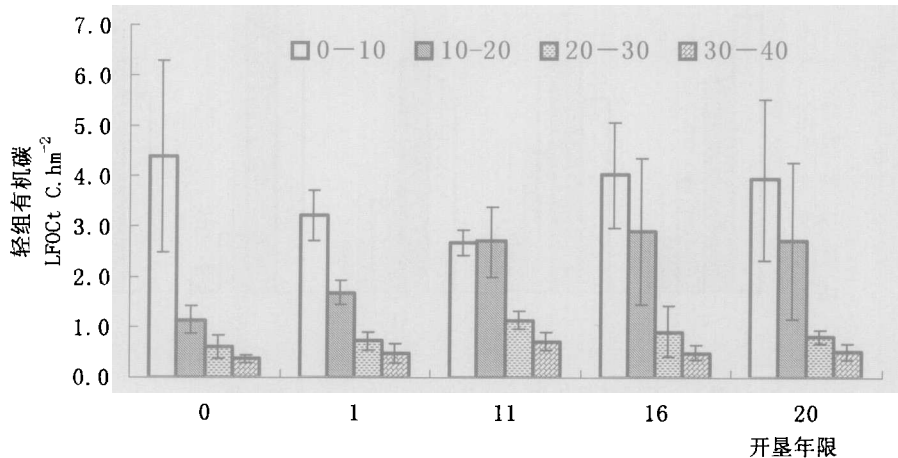


图 4 不同开垦年限人工草地中轻组有机碳含量

Fig.4 The contents of light fractin organic carbon in artificial grassland soil of chronosequences

高寒草甸在开垦后种植一年生牧草(燕麦)的情况下,随着种植年限的增加,表层(0~10 cm)土壤中 LFOC 下降速率逐渐降低,并趋于稳定,其下降速率开垦初期为 $1.17 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$, 20 年后的稳定降低速率为 $0.02 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ (图版 I,图 2)。Schlesinger^[20]的研究表明,草地开垦为农田后会造土壤碳素的损失,大量的碳损失发生在开垦后的最初几年,20 年后趋于稳定;Stenvensen^[21]的研究也表明了相同观点。但在本研究中,从 0~40cm 土体看,自 11 年起,土壤中 LFOC 呈增加趋势,至 20 年时累积速率保持在 $0.07 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ 的速率(图版

I, 图 3)。其原因尚待进一步研究。

3.3 土壤重组有机碳

重组有机碳(High fraction organic carbon, HFOC)为主要存在于有机-无机复合体中的有机质态碳,其含量一般占总有机质含量的 70~80%^[15],重组中的有机碳与不同粒级的矿物紧密结合,它受到的这种土壤物理保护使其较 LFOC 难以分解,因而 HFOC 比 LFOC 稳定。

高寒草甸被开垦后在长期种植人工牧草情况下重组有机碳(HFOC)含量有所增加。经过 20 年的种植作用,由未开垦前的 77.24 t C·hm⁻²增加至 80.02tC·hm⁻²。各土层 HFOC 占整个 40cm 深度 HFOC 含量的比例分别为 26.49%、29.46%、23.56%、20.49%。剖面垂直变化亦表现为 10~20cm>0~10cm >20~30cm >30~40cm(图 5)。

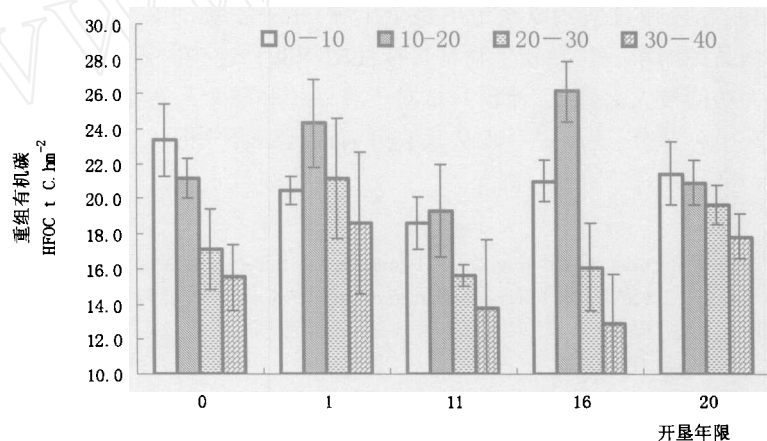


图 5 不同开垦年限人工草地中重组有机碳含量

Fig.5 The contents of heavy fraction organic carbon in artificial grassland soil of chronosequences

表层(0~10cm)土壤中 HFOC 随着开垦年限的增加呈递减趋势,下降速率由最初的 2.92 tC·hm⁻²·yr⁻¹降至 20 年后的 0.09 tC·hm⁻²·yr⁻¹(图版 I, 图 2)。而在整个 0~40cm 土体,HFOC 变化规律则与 SOC 表现一致,在开垦初期均有一明显增加趋势(图版 I, 图 3),其机理尚需进一步研究。相对于 LFOC,对 HFOC 的研究一直较少,武天云^[22]对开垦为农田的黄绵土和灰褐土与北美大草原进行了研究,结果表明 HFOC 随土壤开垦年代的增加而逐渐减少,其损失规模和程度与总有机碳(SOC)相似。我们的研究结果与此结论相反。

4 讨论

不合理的土地利用会导致土壤有机碳的损失^[9],而引起土壤碳库的最初变化的主要是易分解、矿化的活性部分(活性碳)^[23]。土壤中有机碳的稳定主要通过化学过程、生化整合和物理保护三种方式而实现,其中物理保护是稳定土壤有机碳的重要机制之一^[24]。因此,针对土壤有机碳的不同物理组分进行研究,才能准确评价土地利用变化对土壤有机碳的影响。

众多研究表明开垦会导致自然植被土壤有机碳含量迅速下降^[7-9],而大量碳损失发生在

开垦后的最初几年,20年后趋于稳定^[20]。但也有研究表明草地土地利用方式改变后,土壤有机碳贮量会有所增加^[13]。其损失的碳素一部分通过微生物对有机物的分解作用,以CO₂、CH₄等含碳温室气体排放于大气中,另一部分通过降水淋溶进入地下水体,最终造成土壤碳库库容的降低,从而对大气温室效应造成正反馈作用。高寒草甸开垦后,虽然表层(0~10cm)SOC、LFOC和HFOC有不同程度的下降,但40cm土体内的土壤有机碳贮量仍在缓慢增加,即天然高寒草甸开垦后,不仅可以大幅度提高草地单位面积生产力,也不会造成土壤碳库类型的改变,仍为大气含碳温室气体的汇。

人工草地相对于天然高寒草甸而言,土壤有机碳总量以每年0.08tC·hm⁻²·yr⁻¹的速率在增加,其植株和根系年固定碳量仅为6.81tC·hm⁻²·yr⁻¹,而高寒草甸高达7.38tC·hm⁻²·yr⁻¹。虽然长期种植人工草地可使土壤中有有机碳保持在一定水平,但由于人工草地的地上生物量要远高于高寒草甸,相应通过刈割收获带出整个土壤-植物系统的C量明显增多;此外,人工草地中种植牧草品种的单一化导致了物种多样性的降低,这些因素使得天然高寒草甸土壤作为碳汇的巨大功能被大大降低。评价开垦对土壤系统和整个高寒草甸生态系统的影响,土壤有机碳只是其中一部分,还须进一步从其它方面进行综合分析。

参考文献

- [1] Post W M, T H Peng, W R Emanuel, A W King & D L DeAngelis. The global carbon cycle, *Am. Sci.*, 1990, 78.
- [2] Berner R A. Atmospheric carbon dioxide levels over Phanerozoic time, *Science*, 1990, 249, 1382.
- [3] Adams J M, Faire H, Faire-Richard L, et al. Increases in terrestrial carbon storage from the last glacial maximum to the present. *Nature*, 1990, 348:711~714.
- [4] Atjay G L, Ketner P & Duvigaud P. Terrestrial primary production and phytomass. In: Bolin, B, E T, degens & S. Kempeeds. *The global carbon cycle scope*. Chichester: John Wiley & Sons. 1979, 129~182.
- [5] Iwaki H. Matter Production of Terrestrial Plant Communities II, Grasslands. *Kyoritū*, 1973, 32~45.
- [6] 周广胜, 王玉辉, 蒋延玲等. 陆地生态系统类型转变与碳循环. *植物生态学报*, 2002, 26(2):250~254.
- [7] Tiessen H J, Steward W B, & Bettany J R. Cultivation effects on the amount and concentration of carbon, nitrogen and phosphorus in grassland soil. *Agronomy Journal*, 1982, 74:831.
- [8] Aguilar R, Kelly E F & Heil R D. Effects of cultivation on soils in northern Great Plains rangeland. *Soil Science Society of America Journal*, 1988, 52:1081~1085.
- [9] Davidson E A & Ackerman I L. Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously un-tilled soils. *Bio-geochemistry*, 1993, 20:161~193.
- [10] 王根绪, 程国栋, 沈永平. 青藏高原草地土壤有机碳库及其全球意义. *冰川冻土*, 2002, 24(6): 693~700.
- [11] 张金霞, 曹广民, 周党卫等. 放牧强度对高寒灌丛草甸土壤CO₂释放速率的影响. *草地学报*, 2001, 9(3):183~190.
- [12] 曹广民, 李英年, 张金霞等. 高寒草甸不同土地利用格局土壤CO₂的释放量. *环境科学*, 2001, 22(6):14~19.
- [13] 陈伏生, 曾德慧, 陈广生等. 开垦对草甸土有机碳的影响. *土壤通报*, 2004, 35(4): 413~419.
- [14] 严平, 董光荣, 张信宝等. ¹³⁷Cs法测定青藏高原土壤风蚀的初步结果. *科学通报*, 2000, 45(2):199~204.
- [15] Christensen, B.T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. *Adv. Soil Sci*, 1992, 20: 2~90.
- [16] Christensen, B.T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. *European J. Soil Sci*, 2001, 52: 345~353.
- [17] Janzen H H. Soil organic matter characteristics after long term cropping to various spring wheat rotations. *Can. J. Soil Sci*. 1987, 67:845~856.
- [18] 张金波, 宋长春. 土地利用方式对土壤碳库影响的敏感性评价指标. *生态环境*, 2003, 12(4):500~504.
- [19] 魏朝富, 谢德体, 陈世正. 紫色水稻土有机无机复合与土粒团聚的关系. *土壤学报*, 1996, 33(1):70~77.
- [20] Schlesinger W H. An overview of global carbon cycle. In: Lai R. et al (eds). *Soils and Global Change*. CRC press, Inc. Bo-

- ca Raton, Florida, 1995, 9~25.
- [21] Stenvensen F J. Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reaction. New York: John Wiley and sons, Inc. 1994, 1~24.
- [22] 武天云, Jeff J.Schoenau, 李凤民 等. 耕作对黄土高原和北美大草原三种典型农业土壤有机碳的影响. 应用生态学报, 2003, 14(12):2213~2218.
- [23] Blair G J and Lefroy R D B. Soil C fractions based on their degree of oxidation and the development of a C management index for agricultural systems . Aust. J. Agri. Res., 1995,46:1459~1466.
- [24] Christensen B T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. European Journal of Soil Science, 2001. 52: 345~353.

Preliminary Research of Effect of Cultivation on Soil Organic Carbon in Alpine Meadow

LI Yuemei^{1,3,4}, WANG Yuesi², CAO Guangming¹, DU Yangong¹

(1. Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Science, Xining 810001;

2. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029;

3. Soil and Fertilizer Institute, Qinghai Academy of Agricultural and Forestry Science;

4. Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100039)

Abstract: This paper studies the effects of alpine meadow cultivated on soil organic carbon (SOC) using soil physical fraction to understand the stability of SOC at Haibei research station zone, CAS. The SOC contents and its fraction in soil physical fraction (light fraction organic carbon (LFOC) and Heavy fraction organic carbon (HFOC)) in 0~40cm soil depth were investigated. The law of soil organic carbon changed with the cultivation year is studied synchronously. The artificial grassland was selected by different cultivation year (0, 1, 11, 16, 20 yr) after alpine meadow had been cultivated. The results showed that SOC, LFOC and HFOC only decreased in 0~10cm, and respectively, lost 10.97 %, 7.75 % and 7.4 % with 20 years of cultivation, which was mainly caused by wind erosion, tillage erosion and soil organic matter decomposition in 0~10cm after cultivation. The gross organic matter in 0~10cm leached with the rainwater to deposit in deeper horizon of soils. SOC, LFOC and HFOC increased in 0~40 cm soil depth, respectively, with the rate of $0.08 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$, $0.07 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ and $0.14 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ after conversion of alpine meadow to artificial grassland for 20 years. Furthermore, the results indicated that conversion of alpine meadow to artificial grassland did not affect the carbon sink function of alpine meadow, but the storage of carbon-fixed in the soil-plant systems decreased obviously compared to the alpine meadows: the rate ranged from $7.38 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ to $6.89 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$.

Key words: cultivation; alpine meadow; soil organic carbon; light fraction; heavy fraction organic carbon

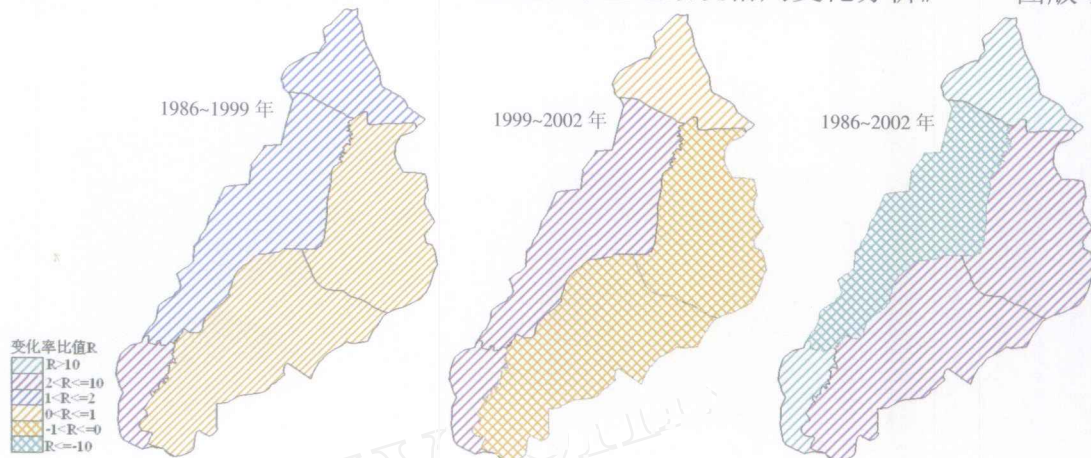


图7 各地区中沼泽湿地面积相对变化率与总的沼泽湿地面积相对变化率的比值

Fig.7 Ratios of the relative change rate of marsh area in every district and the relative change rate of total marsh area

李月梅等：开垦对高寒草甸土壤有机碳影响的初步研究

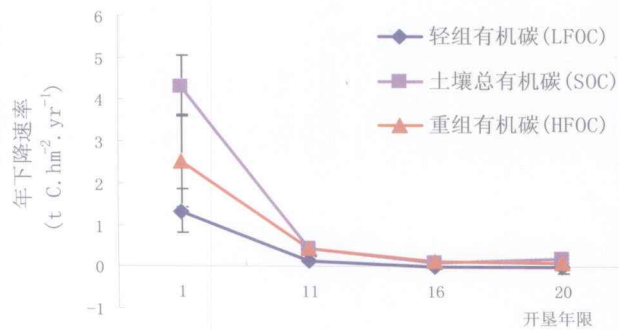


图2 0~10cm 土层不同开垦年限人工草地中土壤有机碳年下降速率

Fig.2 Soil organic carbon decrease rate in soil (0~10cm) of chronosequences in artificial grassland

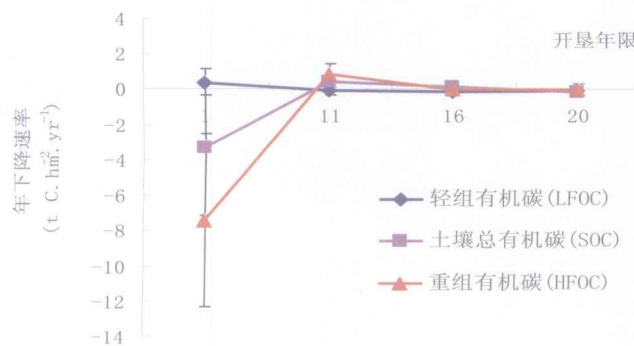


图3 0~40cm 土层不同开垦年限人工草地中土壤有机碳年下降速率

Fig.3 Soil organic carbon decrease rate in soil (0~40cm) of chronosequences in artificial grassland