

土地利用方式对高寒草甸生态系统 土壤无机碳的影响

刘哲^{1,2}, 陈懂懂¹, 李奇¹, 赵亮¹, 徐世晓¹, 赵新全^{1,3}

(1. 中国科学院 西北高原生物研究所, 青海 西宁 810008;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院 成都生物研究所, 四川 成都 610041)

摘要: [目的] 探明土地利用方式对高寒草甸生态系统土壤无机碳含量及储量的影响, 为青藏高原区域碳增汇原理及草地管理实践提供科学支撑。[方法] 选取围栏封育地、自由放牧地、多年生人工草地、补播地及黑土滩型退化草地 5 类不同土地利用类型, 对无机碳的含量和储量、土壤主要理化性质的变化及其相关性进行比较分析。[结果] 在高寒草甸生态系统中, 无机碳含量较低且不同土地利用下土壤无机碳的储量(以 C 含量表示)有显著差异, 表现为多年生人工草地(3 381. 28 kg/hm²) > 围栏封育地(739. 27 kg/hm²) > 自由放牧地(712. 12 kg/hm²) > 补播地(647. 64 kg/hm²) > 黑土滩型退化草地(361. 26 kg/hm²)。不同土地利用类型草地的土壤 pH 值、容重和含水量差异显著。土壤无机碳与土壤容重和含水量分别为线性正相关和负相关关系, 与 pH 值为正相关关系, 当 pH 值 < 7 时, 无机碳含量很低, 基本保持不变; 当 pH 值 > 7 时, 表现为指数函数关系。[结论] 在高寒退化草地改良重建的技术与综合治理模式中, 黑土滩型退化草地上建植多年生人工草地的管理策略在无机碳固定方面较其他措施更加有效, 是维持草地碳汇功能的有效措施。

关键词: 无机碳; 土地利用; 高寒草甸; 土壤理化性质; 青藏高原

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)05-0073-07

中图分类号: Q148

文献参数: 刘哲, 陈懂懂, 李奇, 等. 土地利用方式对高寒草甸生态系统土壤无机碳的影响[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 073-079. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2016. 05. 020

Effects of Different Land Use Patterns on Soil Inorganic Carbon in Alpine Meadow Ecosystem

LIU Zhe^{1,2}, CHEN Dongdong¹, LI Qi¹, ZHAO Liang¹, XU Shixiao¹, ZHAO Xinquan^{1,3}

(1. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining,

Qinghai 810008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: [Objective] We aimed to understand the effects of different land use patterns on soil inorganic carbon (SIC) content and storage, in order to provide scientific support for regional carbon transfer principle and grassland management. [Methods] The content and storage of SIC and the main soil physicochemical properties are analyzed, in five different land use patterns including fencing grassland (WF), free grazing land (NG), perennial artificial grassland (RG), reseeding land (BB) and an extreme degradation meadow (HTT). [Results] In alpine meadow ecosystem, SIC content was low, and the SIC storages differed among different land use patterns: RG(3 381. 28 kg/hm²) > WF(739. 27 kg/hm²) > NG(712. 12 kg/hm²) > BB(647. 64 kg/hm²) > HTT(361. 26 kg/hm²). Soil pH value, bulk density and water content varied greatly among different land use types. SIC content showed a positive relation with soil bulk density while a negative relation with water content. When pH < 7, the SIC content was very low and remained constant, in contrast, when pH > 7, SIC

收稿日期: 2015-12-01

修回日期: 2016-01-14

资助项目: 青海省科技项目“基于植物功能性状的人工草地固碳牧草筛选”(2013-Z-941Q); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05070200); 国家科技支撑计划(2014BAC05B04); 中国科学院西北高原生物研究所知识创新工程领域前沿项目(2011)

第一作者: 刘哲(1989—), 男(汉族), 山东省邹平县人, 硕士研究生, 研究方向为高寒草地生态系统。E-mail: liuzhe2010@126.com。

通讯作者: 赵亮(1974—), 男(汉族), 青海省西宁市人, 副研究员, 主要从事生态系统碳循环研究。E-mail: lzhaol@nwipb.cas.cn。

content increased exponentially. [Conclusions] The planting perennial artificial grassland was more effective than other measures in terms of SIC sequestration and maintaining the function of carbon sink.

Keywords: soil in organic carbon; land use patterns; alpine meadow; soil physicochemical properties; Qinghai-Tibetan Plateau

土壤无机碳(soil inorganic carbon, SIC)包括岩生性碳酸盐(lithogenic inorganic carbonate, LIC)和发生性碳酸盐(pedogenic inorganic carbonate, PIC)^[1]。一般所说的土壤无机碳主要是指土壤风化成土过程中形成的发生性碳酸盐矿物态碳,是半湿润到干旱地区土壤的一个重要组成部分^[2],约占全球总碳库的 38%,是陆地生态系统中除有机碳外的第 2 大碳库^[3]。无机碳在全球碳循环中扮演着重要角色,其储量的变化会对全球碳收支产生重要影响^[1],更有学者指出土壤无机碳库的研究可能是解释当前碳“失汇”问题的关键^[4]。因此,研究无机碳库对于精确估算土壤碳库的储量、动态及其对气候变化的影响意义重大^[5-7]。

目前,大多数研究集中在土壤理化性质(包括土壤 pH 值、容重、含水量及土壤氮、磷、钾等矿物元素)^[6-9]、气候因素(包括年均气温和年均降水等)^[1,10-11]、生物因素(包括生物量、酶活性等)^[12]对无机碳的影响。然而,较少报道涉及土地利用对无机碳含量、储量及特征的影响。土地利用通过不同物质的时空配置和循环,干扰和调整土壤生物化学循环过程,改变原有土壤的物质循环强度、总量和路径以及土壤生物的代谢活动,从而使土壤对作物的养分供应水平发生变化,并且导致土壤生物学质量的改变^[13]。土壤中碳的积累和损失主要都由土地利用改变引起的^[14]。研究发现,中国大约 51%的耕作区遭受无机碳流失,同时也有 10%的耕作土壤无机碳明显增加^[1]。此外,在农地、草地、林地、退耕地等不同土地利用类型中无机碳的含量特征均有较大差异^[2,10],说明人类土地利用活动会严重影响无机碳库^[1]。

青藏高原无机碳储量高达 15.19 Pg,占全国无机碳储量的 28.5%,说明青藏高原对中国陆地生态系统碳平衡有重大贡献^[11],所以在青藏高原上开展无机碳的相关研究意义重大。高寒草甸生态系统广泛分布于青藏高原东部及其周围山地,对气候变化极为敏感。在青藏高原,土地利用变化包括 2 个主要过程:一种是高寒草甸的自然恢复,另一种是高寒草甸转化为人工草地,以满足牲畜对饲草较高的要求^[15]。青藏高原区高寒草甸的主要利用方式人类活动主要为放牧,近几十年来由于过度放牧等不合理的草地利用方式造成了严重的草地退化。为实现退化草地的恢复,当地实施了围栏封育、补播、退耕(牧)还草、建

植人工植被等草地综合治理措施^[16]。为评价这些土地利用方式对无机碳特征的影响,本研究拟选取 5 种不同土地利用方式的样地,对土壤无机碳的含量、储量及其与土壤容重、含水量、pH 值间的相关性进行研究,希望对本区域不同土地利用方式下无机碳特征的变化提供科学认识,并为青藏高原区域碳增汇原理及草地管理实践提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于青海省果洛藏族自治州玛沁县,地处 98°48′—100°56′E,33°43′—35°16′N。该区属大陆性寒润性气候,平均海拔在 4 000 m 以上,年平均气温 -3.8~3.5℃,昼夜温差大。年降水量在 423~565 mm,多集中在 6—9 月。全年日照时间为 2 313~2 607 h,光辐射强。植被类型丰富,主要为高寒草甸类,是当地放牧利用的主要天然草场。物种多样,主要优势种有小嵩草(*Kobresia pygmaea*)、矮嵩草(*Kobresia humilis*)、线叶嵩草(*Kobresia capillifolia*)、针茅(*Stipa Purpurea*)、羊茅(*Festuca ovina*)、火绒草(*Leontopodium leontopodioides*)等。土壤类型以高山草甸土为主。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 于 2014 年 8 月在玛沁县大武滩选取了围栏封育地、自由放牧地、多年生人工草地、补播地及黑土滩型退化草地 5 类不同土地利用样地。围栏封育地、自由放牧地、多年生人工草地、补播地都是在黑土滩型退化草地的基础上经人工翻种后设置的,种植或补播的物种为垂穗披碱草(*Elymus nutans*),在样地设置初期进行施肥,其后均不施肥。围栏封育样地和多年生人工草地于 2002 年设置,其中围栏封育样地不进行任何放牧,无人干扰因素,多年生人工草地只进行冬季放牧;补播地是在黑土滩型退化草地上于 2011 年进行人工补播,其后的草地利用方式与人工建植草地相同;自由放牧地没有人为限制,全年放牧。黑土滩型退化草地属极度退化草地,植被以杂草类为主,鼠害严重。

1.2.2 测定方法 在每种土地利用类型草地上设置约 50 m × 50 m 的重复样地 4~6 个,在每块样地中随机选取 5 个 50 cm × 50 cm 的样方(表 1)。进行样地植被群落特征调查,记录每个样方中出现的物种,

用物种总数代表样地的物种丰富度。目测植被的总盖度和每一物种的分盖度,并对每一物种分别选取长势相同的成熟植株3~5株测量其高度。齐地面刈割地上生物量,在65℃烘箱中烘至恒重,用电子天平(max=2 000 g, d=0.01 g)称量其干重。

分别采用5点取样法按照0—10,10—20,20—30的间隔取0—30 cm土壤样品及容重。土壤样品混合均匀,利用四分法取适当土样,经过去杂、风干、过筛(2 mm)等处理后,利用气量法(荷兰Eijkel Kamp Calcimeter)进行无机碳含量的测定,每个样品重复测定2次。有机碳含量采用重铬酸钾法。土壤含水量及pH值分别利用烘干法及电位法测得。

1.2.3 无机碳含量及储量的计算

(1) 无机碳含量(SIC_i):

$$SIC_i = 1\ 000 \times \frac{M_2(V_1 - V_3)}{M_1(V_2 - V_3)} \times \frac{12}{100} \quad (1)$$

式中:SIC_i——第*i*层土壤无机碳含量(g/kg); M₁——样品质量(g); M₂——标准品质量(g); V₁——样品产生CO₂体积(ml); V₂——标准品产生CO₂体积(ml); V₃——空白产生CO₂体积(ml)。下同。

(2) 无机碳储量(SIC)^[11]:

$$SIC = \sum_{i=1}^n T_i \times BD_i \times SIC_i \times (1 - C_i/100)/100 \quad (2)$$

式中:SIC——土壤无机碳储量(kg/m²); T_i——第*i*层土层厚度(cm); BD_i——第*i*层土壤容重(g/cm³);

C_i——直径大于2 mm砾石的比例(%)。下同。

1.2.4 数据处理 利用SPSS 16.0对不同土地利用方式下的土壤无机碳、容重、pH值、含水量数据进行单因素方差分析(one-way ANOVA)并用LSD法进行多重比较;变量间的回归关系利用曲线估计(curve estimation)进行拟合。利用Kaleida Graph 4.0进行作图。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用类型草地的群落特征

不同土地利用类型草地的植物群落特征存在显著差异(表1)。主要优势种包括:西伯利亚蓼(*Polygonum sibiricum*)、鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina*)、长毛风毛菊(*Saussurea hieracioides*)、大花嵩草(*Kobresia macrantha*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、冷地早熟禾(*Poa crymophila*)、羊茅(*F. ovina*)。

围栏封育地、补播地和多年生人工草地的优势种为垂穗披碱草、冷地早熟禾等可食牧草,其可食牧草占地上生物量的比重较大;自由放牧草地进行自由放牧活动,对可食牧草的利用大,可食牧草与不可食杂草分别占地上生物量的一半,并且放牧因素的存在也促进了物种的多样性(17种);黑土滩型退化草地的地上生物量虽然较大,但全部为牲畜不可食用的杂草。

表1 研究样地植物群落特征(平均值±标准差)

土地利用方式	可食牧草/(g·m ⁻²)	不可食杂草/(g·m ⁻²)	地上生物量/(g·m ⁻²)	盖度/%	物种丰富度	主要优势种
黑土滩	0.00±0.00 ^a (0.00%)	223.76±73.85 ^a (100.00%)	223.76±73.85 ^a	53.33±11.79 ^a	11.00±2.45 ^{ab}	西伯利亚蓼
自由放牧	108.17±41.47 ^b (52.01%)	99.81±23.28 ^b (47.99%)	207.98±61.15 ^a	91.00±9.19 ^c	17.00±3.69 ^c	鹅绒委陵菜、长毛风毛菊、大花嵩草
围栏封育	175.40±15.93 ^c (88.66%)	22.44±6.37 ^b (11.34%)	197.84±22.15 ^a	78.75±7.50 ^{bc}	12.25±2.22 ^b	垂穗披碱草、冷地早熟禾
补播地	241.40±47.46 ^d (97.43%)	6.37±1.82 ^b (2.57%)	247.77±50.54 ^a	58.33±12.11 ^a	8.17±1.47 ^a	冷地早熟禾、羊茅
多年生人工草地	120.77±58.33 ^{bc} (75.92%)	38.31±19.58 ^b (24.08%)	159.08±72.77 ^a	63.33±18.07 ^{ab}	15.83±2.93 ^c	垂穗披碱草、冷地早熟禾

注:括号中数值为可食牧草(不可食杂草)占地上生物量的比值;相同字母表示处理间差异不显著(*p*>0.05)。下同。

2.2 不同土地利用类型土壤理化性质的变化

围栏封育地、自由放牧地、多年生人工草地、补播地及黑土滩型退化草地的各土层的土壤容重有显著差异,并表现了随土层加深逐渐增大的规律(表2)。

在3层土壤剖面中,补播地的土壤容重均表现最大值,且显著大于其他4类土地利用类型,说明人工补播的过程改变了原先的土壤结构,使土壤质地变得紧实;同时围栏封育地、多年生人工草地及黑土滩型退化草地在3层土壤剖面中均没有显著差异。自由

放牧地在0—10 cm表现了最小值,但在20—30 cm显著大于其他类型土地,说明表层土壤(0—20 cm)受到其他因素的干扰而变得疏松。

5类不同土地利用方式草地的土壤pH值随土层的加深而变大。黑土滩型退化草地的土壤pH值在0—30 cm剖面均表现最小值,说明黑土滩土壤酸化程度较为严重;而多年生人工草地的土壤pH值显著大于其他4类草地,说明人工建植多年生草地12 a后改变了原先土壤的酸碱环境。围栏封育地、自由放

牧地、补播地及黑土滩型退化草地在表层土壤(0—20 cm)pH 值没有显著差异,但在 20—30 cm 土层分异较为明显,且围栏封育地显著大于黑土滩及补播地。

表 2 不同土地利用方式不同土层土壤容重、pH 值和含水量的变化特征(平均值±标准差)

土壤指标	土地利用方式	土层深度/cm		
		0—10	10—20	20—30
土壤容重/ (g·m ⁻³)	黑土滩	0.84±0.10 ^{ac}	1.01±0.10 ^a	1.08±0.16 ^a
	自由放牧	0.83±0.20 ^c	1.09±0.13 ^a	1.15±0.22 ^{ab}
	围栏封育	0.84±0.07 ^{ac}	1.04±0.03 ^a	1.05±0.14 ^a
	补播地	1.16±0.07 ^b	1.28±0.09 ^b	1.30±0.13 ^b
	多年生人工草地	1.01±0.12 ^{ab}	1.07±0.13 ^a	1.02±0.09 ^a
土壤 pH 值	黑土滩	5.98±0.17 ^a	6.00±0.13 ^a	6.26±0.22 ^a
	自由放牧	6.19±0.47 ^{ab}	6.51±0.58 ^a	6.89±0.42 ^{bc}
	围栏封育	6.28±0.12 ^{ab}	6.55±0.19 ^a	7.29±0.09 ^{cd}
	补播地	6.48±0.68 ^{ab}	6.60±0.65 ^a	6.69±0.59 ^{ab}
	多年生人工草地	6.68±0.16 ^b	7.28±0.19 ^b	7.55±0.06 ^d
土壤含水量/%	黑土滩	28.00±1.41 ^{ab}	26.75±0.96 ^{ab}	26.25±0.96 ^b
	自由放牧	48.17±10.80 ^c	40.50±8.29 ^c	31.00±3.03 ^c
	围栏封育	35.00±2.16 ^b	30.00±2.00 ^b	32.25±1.26 ^c
	补播地	25.83±2.32 ^a	23.50±2.59 ^a	20.33±1.63 ^a
	多年生人工草地	28.33±1.21 ^{ab}	27.17±1.17 ^{ab}	24.67±0.82 ^b

土壤含水量在 5 类不同土地利用类型草地中均表现随土层的加深而减小的规律,且同一土层的含水量在不同土地利用方式间具有显著差异。自由放牧地的土壤含水量在各土层都显著大于其他利用类型草地。补播地土壤含水量最小,且在 20—30 cm 土层显著小于黑土滩型退化草地。围栏封育地与多年生人工草地含水量在表层土壤(0—20 cm)没有显著性差异,但在 20—30 cm 土层围栏封育地显著大于多年生人工草地。

2.3 不同土地利用无机碳的含量及储量变化

高寒草甸生态系统的土层无机碳(SIC)含量较低,在土壤总碳中的比重不到 5%,土壤碳 95%以上由有机碳构成(表 3)。在不同土层,5 类不同土地利用类型草地的 SIC 含量各异(图 1)。自由放牧地、围栏封育地与多年生人工草地 SIC 含量随着土层深度的增加而升高,且在 20—30 cm 土层围栏封育地(0.49 g/kg)与多年生人工草地(2.73 g/kg)会出现突增的现象;而黑土滩型退化草地与补播地在取样剖面上没有显著变化。在 0—10 cm 土层,围栏封育的 SIC 含量(0.05 g/kg)显著小于自由放牧地(0.16 g/kg)和补播地(0.17 g/kg),而与黑土滩型退化草地(0.11 g/kg)、多年生人工草地(0.11 g/kg)没有显著差异。在 10—20,20—30 cm 土层,多年生人工草地的 SIC 含量(分别为 0.42,0.89 g/kg)显著大于其他利用类型草地,但其他 4 类利用类型草地间没有显著差异。

表 3 不同土地利用类型草地 0—30 cm 土层无机碳(SIC)、有机碳(SOC)及总碳(STC)的含量变化

土地利用类型	SIC/ (g·kg ⁻¹)	SOC/ (g·kg ⁻¹)	STC/ (g·kg ⁻¹)	SIC/STC	SOC/STC
黑土滩	0.12	33.82	33.94	0.36%	99.64%
自由放牧	0.39	90.67	91.06	0.43%	99.57%
围栏封育	0.24	61.41	61.65	0.40%	99.60%
补播地	0.89	26.51	27.40	3.25%	96.75%
多年生人工草地	0.96	46.54	47.51	2.03%	97.97%

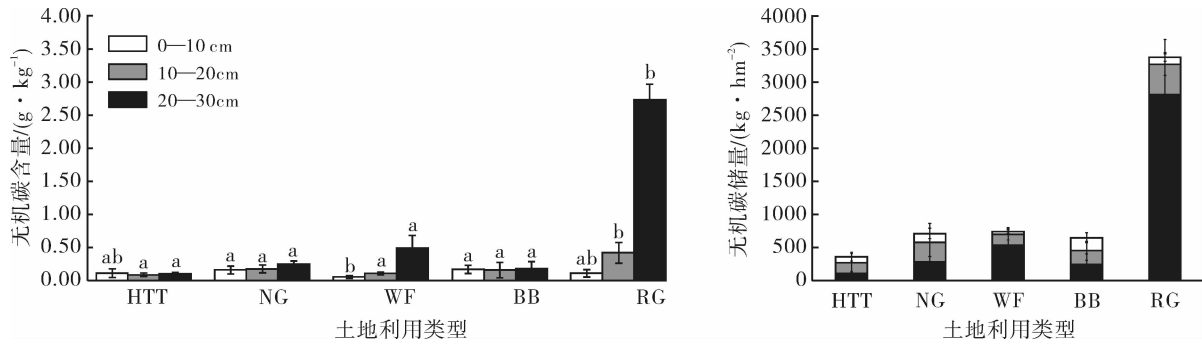
在取样剖面内,5 类不同土地利用类型草地的 SIC 储量有显著差异,表现为:人工建植草地>围栏封育地>自由放牧地>补播地>黑土滩型退化草地,其值分别为 3 381.28,739.27,712.12,647.64 和 361.26 kg/hm²(图 1)。统计结果表明,自由放牧地、围栏封育地、补播地及黑土滩型退化草地间 SIC 储量没有显著差异,而多年生人工草地 SIC 储量显著大于其他 4 类土地利用类型草地。

2.4 无机碳含量与土壤理化性质的相关关系

土壤 pH 值与 SIC 之间有正相关关系,但是在不同的酸碱范围内这一关系具体表现不同(图 2)。从图 2 中可以看出,当 pH 值<7 时,SIC 含量很低(小于 1 g/kg),随着 pH 值的增大变化很小,pH 值因素仅对 SIC 含量变化有 7%的影响;而当 pH 值>7 时,SIC 与 pH 值间表现出指数正相关关系,pH 值因素

对 SIC 含量变化解释了 79%,说明在碱性环境条件下土壤 SIC 含量随 pH 值的增大以指数函数形式增

加。土壤中 SIC 的主要成分为碳酸钙,这一关系与碳酸钙在酸碱条件下的化学反应是吻合的。



注:HTT 为黑土滩; NG 为自由放牧; WF 为围栏封育; BB 为补播地; RG 为多年生人工草地

图 1 不同土地利用方式无机碳含量和储量的变化特征

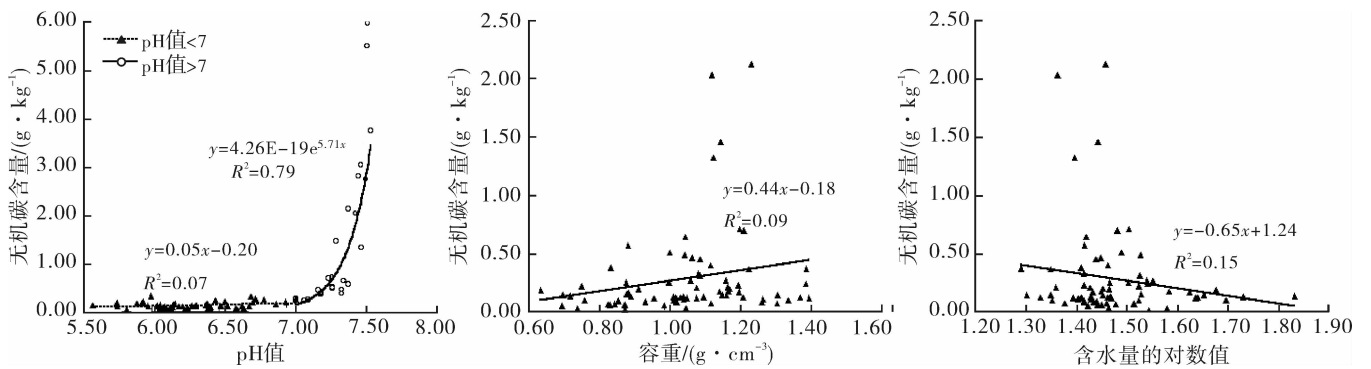


图 2 无机碳含量与土壤 pH 值、容重及含水量的关系

SIC 与土壤容重呈现线性正相关关系(图 2),与土壤含水量呈现线性负相关关系(图 2),其线性相关的斜率为 0.04, -0.65,意味着在高寒草甸生态系统中土壤容重每增加 1 g/cm³,SIC 含量升高 0.04 g/kg;土壤含水量的对数值每降低 1 个单位,SIC 含量减少 0.65 g/kg。

3 讨论

为研究高寒草甸生态系统不同土地利用方式对无机碳特征的影响,本研究选取了围栏封育地、自由放牧地、多年生人工草地、补播地及黑土滩型退化草地 5 类不同土地利用样地。结果表明,不同土地利用对 SIC 的含量、储量及土壤理化性质均有显著影响。总体而言,高寒草甸生态系统的 SIC 储量较低(表 3),与现有的研究结果一致^[6,10-11]。

3.1 SIC 与土壤理化性质的关系

土壤中发生性碳酸盐含量的动态变化可以截留或者释放大气 CO₂,进而影响土壤库 CO₂的源汇效应。土壤理化性质对 SIC 有显著影响。研究发现,土壤无机碳与土壤全氮、碱解氮、速效磷、Fe₂O₃,

P₂O₅均是负相关关系^[8]。对于土壤容重对 SIC 的影响,本研究结果与目前大多数报道结果一致,均是正相关关系^[8]。但也有报道指出 SIC 随土壤容重的增大而降低^[9]或者两者无关^[6],这可能是由于取样深度及研究区域不同造成的。

在众多影响 SIC 的因素中,pH 值是影响无机碳空间分异特征最重要的变量^[6]。目前绝大多数研究指出,SIC 含量随 pH 值的增大而升高^[7-8],本文研究结果与其类似。同时,本研究指出当 pH 值<7 时,SIC 含量很低,基本保持不变,pH 值对 SIC 含量变化的解释率很小;当 pH 值>7 时,SIC 随 pH 值的增大以指数函数形式增加,pH 值因素对 SIC 的变化可达 79%。

3.2 不同土地利用方式对 SIC 的影响

土地耕作方式和管理措施(包括施肥和灌溉)可能会改变土壤的物理、化学、生物性质及微气候,对无机碳的含量和储量产生影响。通过对中国华北平原长期不同施肥条件下 4 个试验样地的研究表明,施肥系统对无机碳库的大小、无机碳剖面分布、活性的比例和次生性碳酸盐都有较大影响^[17-18]。一方面,施

肥会导致土壤无机碳储量降低,这可能是因为施肥导致土壤酸化^[19],增加 SIC 的淋溶与流失速度^[20]。另一方面,施肥可能增加 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的含量,从而导致 SIC 增加^[20]。所以,施肥对土壤无机碳的影响还有待于进一步研究。另外,农业灌溉措施可以增加土壤无机碳储量^[21],这可能是因为灌溉导致植物生产力提高^[1],植物的呼吸作用及有机质的降解增强,使得 CO_2 分压升高^[20] 利于 SIC 的形成,同时灌溉可以通过刺激微生物、植被及其根部的活性来促进干旱耕地中碳酸钙的形成^[17]。在我们的试验中,围栏封育地、自由放牧地、多年生人工草地、补播地均是在黑土滩型退化草地基础上经过翻耕、施肥、撒种(垂穗披碱草)过程建立的,建立后均没有进行施肥和灌溉,所以施肥和灌溉因素不是造成 5 类不同土地利用类型草地土壤无机碳差异的原因。

近几十年来,过度放牧等人类不合理的草地利用造成了高寒草地生态系统的严重退化。为了遏制草地退化,人们一直在探索高寒退化草地改良重建的技术与综合治理模式,这些技术主要有:草地复壮技术(包括围栏封育,划破草皮,草地松耙,退化草地综合复壮技术等),草地补播改良技术,毒杂草防除技术,草地防风固沙技术,建植人工草地模式等,这些技术和模式在一定程度上改变了草地原有的利用格局^[22]。草地生态系统土壤营养元素含量受土壤利用方式和土壤管理策略的影响^[23]。本文研究结果表明,在黑土滩型退化草地上进行围栏封育、补播及建植人工草地的草地恢复措施会对土壤容重、pH 值和含水量产生不同的影响(表 1—3),其中多年生人工草地的土壤 pH 值显著大于其他土地利用类型且 pH 值与 SIC 具有指数正相关关系(图 2),所以其 SIC 储量最大;而围栏封育和补播措施并没有明显改变 SIC 的储量,SIC 储量虽较黑土滩型退化草地有所增加,但与自由放牧地的 SIC 储量无异。所以,本文结果说明在黑土滩型退化草地上建植人工草地在 SIC 的固定方面较其他措施更加有效。

3.3 对高寒草甸生态系统土地管理实践的建议

草地是土地利用变化最频繁的生态系统,其面积大、分布广,在全球碳收支中起着十分重要的作用^[24]。土地利用变化是影响土壤碳储量的主要人为因素,准确掌握不同利用方式下土壤碳积累及汇/源功能转换特征,对预测土壤碳排放量趋势有着很重要的意义^[25]。因此,寻找陆地碳汇、探索增汇措施便成为生态学、生物地球化学、全球变化等领域的研究热点^[26]。

黑土滩退化草地属于极度退化草地,一般采取建

植多年生人工草地措施,研究表明围封建植 6 a 人工草地可使土壤有机碳比黑土滩退化草地增加 89.8% 左右;建植期为 2,3,4,7 和 10 a 的垂穗披碱草人工植被土壤有机碳含量分别比黑土滩型退化草地增加了 69.85%,67.02%,32.24%,48.63% 和 111.42%^[16]。本文结果表明,建植 12 a 的人工草地、自由放牧地、围栏封育 12 a 草地、补播地 SIC 储量分别比黑土滩型退化草地增加了 650%,125%,75% 和 50%;与自由放牧地相比,建植 12 a 的人工草地 SIC 储量增加 233%,而围栏封育 12 a 草地和补播地分别降低 22% 和 23%。以上结果进一步明确在黑土滩型退化草地上建植多年生人工草地的管理策略是维持草地碳汇功能的有效措施。

4 结论

在高寒草甸生态系统中,土壤无机碳的含量较低(小于 1 g/kg),且土地利用方式对其土壤理化性质、无机碳的含量及储量有显著影响。SIC 与 pH 值正相关,当 pH 值 < 7 时,SIC 含量很低,基本保持不变,pH 值对 SIC 含量变化的解释率很小;当 pH 值 > 7 时,SIC 随 pH 值的增大指数增加,pH 值因素对 SIC 的变化可达 79%;SIC 与土壤容重呈现线性正相关关系,与土壤含水量有线性负相关关系。5 类不同土地利用高寒草甸的无机碳储量表现为:多年生人工草地 > 围栏封育地 > 自由放牧地 > 补播地 > 黑土滩型退化草地,其值分别为 3 381.28,739.27,712.12,647.64 和 361.26 kg/hm²,说明在高寒退化草地改良重建的技术与综合治理模式在黑土滩型退化草地上建植多年生人工草地在 SIC 固定方面较其他措施更加有效。

[参 考 文 献]

- [1] Wu Haibin, Guo Zhengtang, Gao Qiong, et al. Distribution of soil inorganic carbon storage and its changes due to agricultural land use activity in China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2009, 129(4): 413-421.
- [2] 杨黎芳,李贵桐,赵小蓉. 栗钙土不同土地利用方式下有机碳和无机碳剖面分布特征[J]. 生态环境,2007,16(1):158-162.
- [3] 王海荣,杨忠芳. 土壤无机碳研究进展[J]. 安徽农业科学,2011,35(39):21735-21739.
- [4] Rozhkov V, Wagner V, Kogut B, et al. Soil carbon estimates and soil carbon map for Russia[R]. Laxenburg: International Institute for Applied Systems Analysis, 1996.
- [5] Sleutel S, Neve S, Hofman G. Estimates of carbon

- stock changes in Belgian cropland[J]. *Soil Use and Management*, 2003,19(2):166-171.
- [6] Shi Y, Baumann F, Ma Yaoming, et al. Organic and inorganic carbon in the topsoil of the Mongolian and Tibetan grasslands: Pattern, control and implications[J]. *Biogeosciences Discussions*, 2012,9(2):1869-1898.
- [7] Yang Yuanhe, Fang Jingyun, Ji Chengjun, et al. Widespread decreases in topsoil inorganic carbon stocks across China's grasslands during 1980s—2000s [J]. *Global Change Biology*, 2012,18(12):3672-3680.
- [8] 祖元刚,李冉,王文杰,等.我国东北土壤有机碳、无机碳含量与土壤理化性质的相关性[J]. *生态学报*,2011,31(18):5207-5216.
- [9] 张雪妮,吕光辉,贡璐,等.新疆艾比湖湿地自然保护区不同土壤类型无机碳分布特征[J]. *中国沙漠*,2013,33(4):1084-1090.
- [10] Mi Na, Wang Shaoqiang, Liu Jiyan, et al. Soil inorganic carbon storage pattern in China [J]. *Global Change Biology*, 2008,14(10):2380-2387.
- [11] Yang Yuanhe, Fang Jingyun, Ji Chengjun, et al. Soil inorganic carbon stock in the Tibetan alpine grasslands [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010,24(4). doi: 10.1029/2010.GB003804.
- [12] 张豪.吉林西部水稻生长期土壤有机碳和无机碳变化规律及影响因素研究[D].长春:吉林大学,2014.
- [13] Kong Xiangbin, Zhang Fengrong, Wei Qi, et al. Influence of land use change on soil nutrients in an intensive agricultural region of North China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2006,88(1):85-94.
- [14] Caspersen J P, Pacala S W, Jenkins J C, et al. Contributions of land-use history to carbon accumulation in US forests[J]. *Science*, 2000,290(5494):1148-1151.
- [15] Zhao Liang, Chen Dongdong, Zhao Na, et al. Responses of carbon transfer, partitioning, and residence time to land use in the plant-soil system of an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2015,51(7):781-790.
- [16] 赵亮,李奇,陈懂懂,等.三江源区高寒草地碳流失原因,增汇原理及管理实践[J]. *第四纪研究*,2014,34(4):795-802.
- [17] Goddard M A, Mikhailova E A, Post C J, et al. Atmospheric Mg^{2+} wet deposition within the continental United States and implications for soil inorganic carbon sequestration[J]. *Tellus Series B: Chemical and Physical Meteorology*, 2007,59(1):50-56.
- [18] Li Guitong, Zhang Chenglei, Zhang Hongjie. Soil inorganic carbon pool changed in long-term fertilization experiments in North China plain[C]//The 19th World Congress of Soil Science: Soil Solutions for a Changing World. Brisbane: CDRM, 2010:220-223.
- [19] 王莲莲.长期不同施肥和管理措施对塿土有机、无机碳库的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2013.
- [20] Lal R, Kimble J M, Eswaran H, et al. Global climate change and pedogenic carbonates [M]. Boca Raton: CRC Press, 2000:1-14.
- [21] Entry J A, Sojka R, Shewmaker G E. Irrigation increases inorganic carbon in agricultural soils[J]. *Environmental Management*, 2004,33(1):309-317.
- [22] 张登山.长江源区土地沙漠化防治对策与措施[J]. *青海草业*,2000,9(4):15-17.
- [23] Liao J, Boutton T, Jastrow J. Storage and dynamics of carbon and nitrogen in soil physical fractions following woody plant invasion of grassland[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006,38(11):3184-3196.
- [24] 周广胜.全球碳循环[M].北京:气象出版社,2003.
- [25] Wu Ronggui, Tiessen H. Effect of land use on soil degradation in alpine grassland soil, China [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002,66(5):1648-1655.
- [26] 于贵瑞,孙晓敏.中国陆地生态系统碳通量观测技术及时空变化特征研究[M].北京:科学出版社,2008.