

DOI: 10.5846/stxb201301250156

刘淑丽, 林丽, 郭小伟, 李婧, 欧阳经政, 杜岩功, 张法伟, 李以康, 曹广民. 青海省高寒草地土壤无机碳储量空间分异特征. 生态学报, 2014, 34(20): 5953-5961.

Liu S L, Lin L, Guo X W, Li J, Ouyang J Z, Du Y G, Zhang F W, Li Y K, Cao G M. The variation feature of soil inorganic carbon storage in alpine grassland in Qinghai province. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(20): 5953-5961.

青海省高寒草地土壤无机碳储量空间分异特征

刘淑丽^{1,2}, 林 丽¹, 郭小伟^{1,2}, 李 婧^{1,2}, 欧阳经政^{1,2}, 杜岩功¹,
张法伟¹, 李以康¹, 曹广民^{1,*}

(1. 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001; 2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要:以青海省主要高寒草地类型即温性草原、高寒草原、草甸草原以及高寒草甸为研究对象,进行其土壤无机碳(SIC)储量分异特征研究。结果表明,在取样剖面内四类草地 SIC 储量依次为温性草原>高寒草原>草甸草原>高寒草甸,其值分别为 16.51、16.48、3.37 kgC/m²和 0.12 kgC/m²,温性草原与高寒草原土壤是高寒草地无机碳的主要储蓄库。温性草原与高寒草原 50—100cm SIC 储量分别占 0—100cm 总储量的 60.2%和 51.8%,而草甸草原与高寒草甸 30—50cm SIC 储量分别占 0—50cm 总储量的 50.1%和 55.8%,说明土体下部是高寒草地无机碳储蓄的主要场所。四类草地 SIC 含量随土层深度的变化过程各异,其碳酸钙富集层与野外剖面调查所得碳酸钙盐酸泡沫液检验结果相吻合。SIC 储量与土壤容重和土壤 pH 均呈显著正相关关系,与地下生物量呈显著负相关关系。

关键词:高寒草地;无机碳;储量;分异特征

The variation feature of soil inorganic carbon storage in alpine grassland in Qinghai province

LIU Shuli^{1,2}, LIN Li¹, GUO Xiaowei^{1,2}, LI Jing^{1,2}, OUYANG Jingzheng^{1,2}, DU Yangong¹, ZHANG Fawei¹, LI Yikang¹, CAO Guangmin^{1,*}

1 Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract: The warm steppe, alpine steppe, alpine meadow steppe and alpine meadow are the main grassland types which widely distribute in Qinghai-Tibetan plateau. It's widely distribution and diverse development environments make it play an important role in the ecosystem; supporting regional economic development, guaranteeing water conservation of the plateau, maintaining biodiversity, fixation of carbon, etc. A quantitative survey of the variation feature of soil inorganic carbon (SIC) stored in warm steppe, alpine steppe, alpine meadow steppe and alpine meadow were carried out in Qinghai province. Results showed that the total storage of SIC in the four types grassland appeared to be warm steppe> alpine steppe> meadow steppe>alpine meadow, and the values were 16.51kgC/m², 16.48 kgC/m², 3.37 kgC/m² and 0.12 kgC/m², respectively. One-Way ANOVA analysis indicated that warm steppe, alpine steppe had a significant difference with alpine meadow steppe and alpine meadow ($P < 0.05$) while no significant difference between warm steppe and alpine steppe as well as alpine meadow steppe and alpine meadow ($P > 0.05$). The warm steppe and alpine steppe grassland are the main reserve pool of SIC in alpine grassland. The SIC stored in 50—100cm accounted separately for 60.2% and 51.8% of the total storage in 0—

基金项目:国家自然科学基金重点项目(41030105);中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050404)(固碳现状、速率、机制和潜力)项目

收稿日期:2013-01-25; **网络出版日期:**2014-03-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: caogm@nwipb.ac.cn

100cm profile of the warm steppe and alpine steppe, while in alpine meadow steppe and alpine meadow, it occupied 50.1% and 55.8% respectively of the 30—50cm in 0—50cm. Deep soil layer is the main place of SIC storing in alpine grassland. Soil depth has an important effect on SIC storage in alpine grassland. In 0—50cm depth of the soil, SIC storing in the four types grassland were 6.57 kgC/m², 7.95 kgC/m², 3.37 kgC/m² and 0.12 kgC/m², respectively. The change of SIC content with soil depth were different in the four types grassland. It increased with soil depth in warm steppe and alpine meadow steppe, but increased at first then decreased in alpine meadow steppe and alpine meadow. The calcium carbonate enrichment layer in the soil tallied with the foam examination by hydrochloric acid in the soil profile investigation. The calcium carbonate accumulate in the deep soil of steppe, but enrich rather shallow in meadow. SIC storage in the four types of grassland had a significantly positive correlation with soil bulk density and pH value but a significantly negative correlation with underground biomass. The SIC storage increased from south to north in the grassland of Qinghai province and the total SIC storage of the four types grassland reached 1.34 Pg in the profile. The SIC storage in the alpine meadow is very small and it mainly distributed in the south of Qinghai province. Warm steppe which has the largest SIC storage mainly distributed nearby the Qinghai Lake. Climate change and human activity may affect the capacity and distribution of the carbon storage which would bring the ecological risk to the inorganic carbon fixation.

Key Words: alpine grassland; inorganic carbon; storage; heterogeneity

近年来,全球变化已备受人们的关注,大气中CO₂和其他温室气体增加导致的全球变暖已经引发了一系列的问题。据估计,自工业革命以来,全球排放的碳为(270±30)Pg^[1]。土壤碳库作为陆地生态系统中最大的碳库,与全球变化有着密不可分的关系^[2]。土壤碳库由有机碳和无机碳库共同组成,其含量的变化会严重影响全球碳预算^[3]。据估计,全球无机碳库约占总碳库的38%,是陆地生态系统中除有机碳的最大碳库^[4],中国土壤无机碳占土壤碳储量总量的54.5%^[5],在陆地生态系统碳循环中具有重要作用。有关陆地生态系统在地球碳循环中的作用,现有研究多关注于土壤总碳与有机碳储量、分布特征,影响有机碳的自然与人为因素^[6-7],而对土壤无机碳的关注甚少^[8],从而造成地球碳循环研究中一些环节的缺失。气候变化背景和人类活动干扰下,陆地生态系统土壤无机碳库的演变过程及其对地球碳循环过程的影响已经成为研究陆地生态系统与气候变化的主要内容之一。

高寒草地是青海省的主体植被之一,其分布区域广阔,发育环境多样,在维系区域经济发展、保障高原水源涵养、保持生物多样性、固持碳素等生态功能的发挥中具有十分重要作用^[9]。有关高寒草地对气候变化的贡献与反馈作用,有研究表明在气候和人类活动的共同影响下,有机碳库分配、积累及循环

转化模式已经发生了改变,对大气温室气体的源汇效应因草地类型与利用状态各异^[10-11],而对其土壤无机碳库的现状、演化过程及其在地球碳循环中的作用,尚少有研究涉及。其已经成为高寒草地在气候变化中作用研究的关键问题。

本研究选取高寒草地典型植被类型即温性草原、高寒草原、草甸草原和高寒草甸为研究对象,拟从其土壤无机碳含量及储量分异特征出发,探讨土壤物理性质及生物与土壤无机碳储量之间的相关关系,明晰青海省土壤无机碳的碳储现状及其空间分布特征,探讨高寒草地无机碳储量对气候和人类活动影响的响应关系。进而全面了解土壤碳储能力,为更加准确的进行全球碳预算提供数据基础,也为我国进行温室气体减排谈判提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 样地概况

研究区域位于青海省海南藏族自治州、海西蒙古族藏族自治州、黄南藏族自治州以及果洛藏族自治州的23个县,共86个样地。植被类型主要以温性草原、高寒草原、草甸草原、高寒草甸为主。利用种群特征进行欧式聚类分析,选择欧式距离最近的3个点作为每种草地类型的研究对象,选择了12个样地作为采样点(图1,表1)。

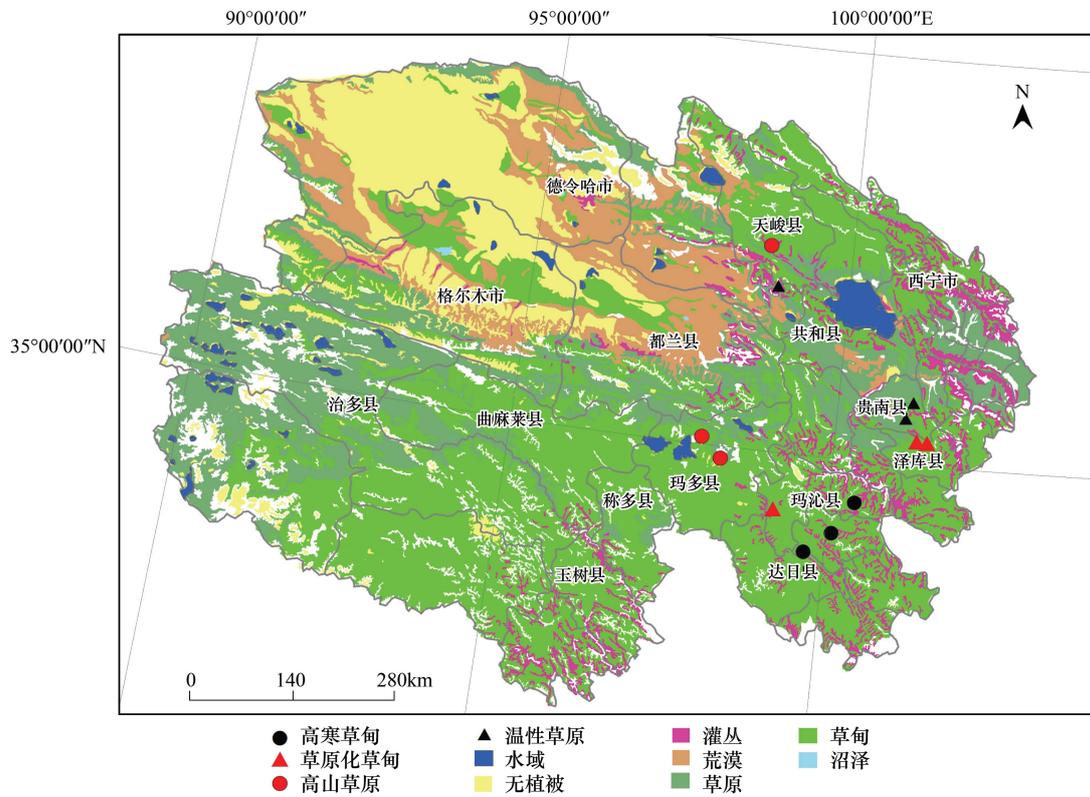


图 1 采样点分布图

Fig.1 The distribution of sampling points

表 1 研究样地地理位置及植被特征

Table 1 The geographical position and the characteristics of plant

草地类型 Grassland type	研究地点 Study area	地理位置 Geographical position	植被概况 The characteristics of plant
温性草原 Warm steppe (WS)	青海省贵南县过马营东 3km; 青海省贵南县黄沙头北 10km; 青海省海西州天峻县关角山	101°10.112'E, 35°46.331'N, 3366 m 101°04.293'E, 35°34.163'N, 3426 m 98°52.567'E, 37°02.438'N, 3380 m	芨芨草温性草原, 优势种为芨芨草 (<i>Achnatherum splendens</i>)、冰草 (<i>Agropyron cristatum</i>), 杂类草有棘豆 (<i>oxytropis</i>)、紫菀 (<i>Tatarian Aster Root</i>) 等, 盖度在 65%—80%, 原生植被生长良好
高寒草原 Alpine steppe (AS)	青海省果洛州玛多县鄂陵湖乡; 青海省果洛州玛多县东 5km; 青海省海西州天峻县野马岭	97°57.886'E, 35°05'641'N, 4265 m 98°17.233'E, 34°51'065'N, 4228 m 98°41.841'E, 37°31.639'N, 3642 m	高寒禾草草原, 以禾本科为优势种, 盖度 20%, 有双叉细柄茅 (<i>Ptilagrostis dichotoma Keng ex Tzvel.</i>)、线叶嵩草 (<i>Kobresia capillifolia</i>), 盖度 50%—70%, 地表完整, 没有鼠类活动, 原生植被比较完整
草甸草原 Alpine Meadow steppe (AMS)	青海省泽库县和日乡同德林南 30km; 青海省泽库县和日乡同德林南 30km; 青海省果洛州玛沁县优云乡北 3km	101°16.321'E, 35°17.526'N, 3580 m 101°16.172'E, 35°17.321'N, 3580 m 99°10.573'E, 34°18.168'N, 4219 m	嵩草草原化草甸, 以嵩草属植物为绝对优势, 早熟禾 (<i>PoaannualL.</i>)、火绒草 (<i>Leontopodium alpinum</i>) 为主要植被, 盖度 50% 左右。草毡表层厚 12cm, 剥蚀深度 20cm, 有死亡斑
高寒草甸 Alpine Meadow (AM)	青海省果洛州玛沁县黑土山顶; 青海省果洛州甘德县清镇乡阿尔沟寺村; 青海省达日县城北 10km 三岔口	100°24.213'E, 34°28.418'N, 4328m 100°05.644'E, 34°04.621'N, 4292m 99°42.160'E, 33°48.826'N, 3974 m	小嵩草草甸, 以小嵩草 (<i>kobrecia pygmaea</i>) 为绝对优势, 盖度 50%—70%。出现老化死亡黑斑, 草毡表层加厚, 未见剥蚀与鼠类活动痕迹, 植被生长较好

1.2 研究方法

2011年7月—8月进行了区域调查及野外采样。

(1) 植被群落特征 采用样带调查法,在样地内选择能够代表整个样地草地植被、地形及土壤等特征的地段,按一定方向设置100m样线,每隔10m布设一个样方,样方面积为高寒草甸0.5m×0.5m,其他类型草地1m×1m,调查内容包括优势植物种群、盖度。

(2) 生物量 地上生物量采用标准收获法,在群落调查样方内进行。地下生物量采用土钻(Φ=6cm)法,温性草原和高寒草原取样深度为0—5—10—20—30—50—70—100cm,草甸草原与高寒草甸土层较薄,仅能取到50cm。每5钻混合为1个样品,5次重复。

(3) 土壤样品 同根系采样法,取样后置于布袋内,风干后,挑出根系,过2mm筛以作为无机碳分析样品。

(4) 土壤容重 采用环刀法,环刀容积100cm³,采样深度分别为0—5—10—20—30—50—70—100cm,草甸草原与高寒草甸到50cm。5次重复。

无机碳含量测定采用气量法进行,仪器为Eijkel Kamp calcimemer(德国),重复2次。

1.3 无机碳储量计算

土壤无机碳(SIC)储量采用分层累计求和计算方法^[12]:

$$SIC = \sum_{i=1}^n SIC_i \times D_i \times H_i$$

式中,SIC为土壤无机碳储量(kg/m²);*i*为第*i*层土壤;*n*为土层数目;SIC_{*i*}为第*i*层土壤无机碳含量(g/kg);*D_i*为第*i*层土壤容重(g/cm³);*H_i*为第*i*层土层厚度(cm)。

无机碳含量(SIC_{*i*}):

$$SIC_i = 1000 \times \frac{M_2(V_1 - V_3)}{M_1(V_2 - V_3)} \times \frac{12}{100}$$

式中,SIC_{*i*}为第*i*层土壤无机碳含量(g/kg);*M₁*为样品质量(g);*M₂*为标准品质量(g);*V₁*为样品产生CO₂体积(mL);*V₂*为标准品产生CO₂体积(mL);*V₃*为空白产生CO₂体积(mL)。

1.4 数据处理

采用EXCEL2010进行土壤无机碳数据的整理,

SPASS13.0进行单因素方差分析(One Way ANOVA)并进行不同土层土壤无机碳的差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同类型高寒草地土壤无机碳储量分异特征

在取样剖面内,四类草地SIC储量差异很大,SIC总储量表现为温性草原>高寒草原>草甸草原>高寒草甸,其值分别为16.51、16.48、3.37 kgC/m²和0.12 kgC/m²(图2)。统计检验结果表明,温性草原、高寒草原与草甸草原、高寒草甸间SIC储量均呈现显著性差异(*P*<0.05),而温性草原与高寒草原间、草甸草原与高寒草甸间均无显著性差异(*P*>0.05)。

温性草原与高寒草原50—100cm SIC储量分别占0—100cm总储量的60.2%和51.8%。而草甸草原与高寒草甸30—50cm SIC储量分别占0—50cm总储量的50.1%和55.8%。可初步判断深层土壤是高寒草地无机碳储蓄的主要场所。

植被类型对高寒草地土壤无机碳储量具有重要影响。0—50cm土层内,四类草地SIC储量表现出高寒草原>温性草原>草甸草原>高寒草甸,其值分别为6.57、7.95、3.37、0.12 kgC/m²(图2),统计检验表明,草原与草甸、草甸草原与高寒草甸SIC储量间均呈现极显著差异(*P*<0.01),而温性草原与高寒草原储量无显著差异(*P*>0.05)。在各层中,除了0—5cm和30—50cm温性草原和高寒草原SIC储量无显著性差异(*P*>0.05),其余层四类草原相互之间均达到差异极显著(*P*<0.01)。

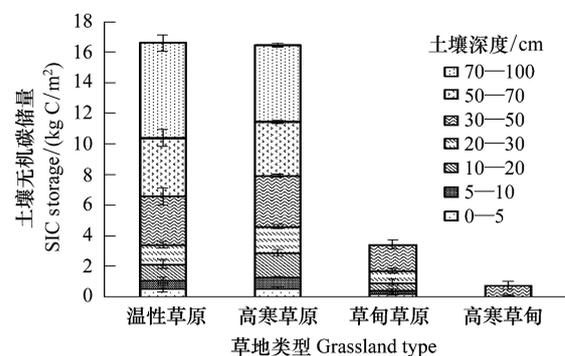


图2 不同草地SIC储量分异特征

Fig.2 The variation of SIC storage of different grassland

2.2 高寒草地土壤无机碳含量分层分异特征

如图3所示,四类草地SIC含量随土层深度的变化过程各异。温性草原和草甸草原SIC含量随着

土层深度的增加基本呈增加趋势,其 SIC 含量分别在 30—50cm (110.17 ± 10.85 g/kg) 和 20—30cm (50.45 ± 5.09 g/kg) 会出现突增。高寒草原与高寒草甸 SIC 含量随土层深度的变化相似,呈现先增加后减小的趋势,其最大值分别出现在 20—30cm (116.59 ± 9.90 g/kg) 和 10—20cm (1.79 ± 0.18 g/kg)。根据四类草地各层 SIC 含量的变化,可以将温性草原分为 0—20cm、20—50cm、50—100cm 3 个

主要土层,高寒草原分为 0—10cm、10—30cm、30—100cm,草甸草原分为 0—5cm、5—20cm、20—50cm,高寒草甸分为 0—10cm、10—20cm、20—50cm 3 个主要土层,这样的分层将会为以后的进一步研究提供方便。四类草地 SIC 含量的最大值所在层即碳酸钙富集层与野外土壤剖面调查碳酸钙盐酸泡沫检验观测结果相吻合。可知,草原的碳酸钙会在更深层富集,而草甸的富集层较浅。

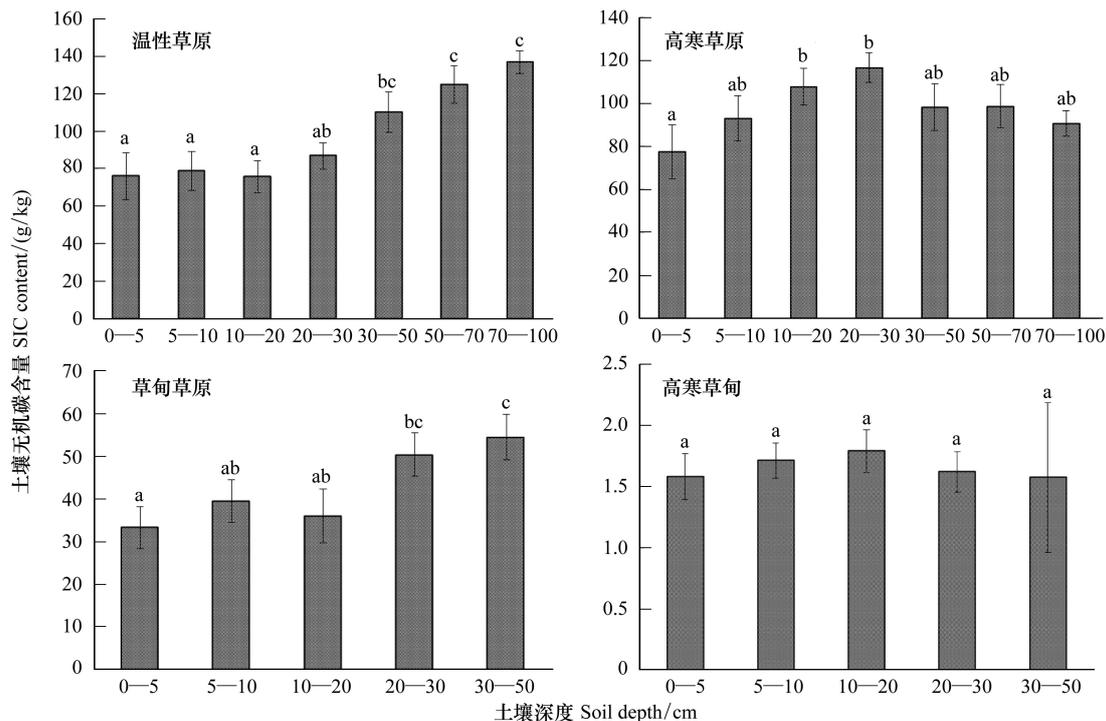


图 3 SIC 含量的垂直分异特征

Fig.3 The vertical differentiation of SIC content

2.3 影响土壤无机碳储量因子分析

如图 4 所示,四类草地中,除温性草原土壤容重与 SIC 储量呈现显著指数正相关关系,其余都呈现线性正相关关系,且均达到极显著 ($P < 0.01$)。高寒草原、草甸草原和高寒草甸线性相关的斜率分别为 3.52、2.12、0.04,意味着在这 3 类草地上,土壤容重提高 1 g/cm^3 ,SIC 储量相应提高的量分别为 3.52、2.12、0.04 kgC/m^2 。

图 5 显示,四类草地 SIC 储量与 pH 呈显著的直线相关关系 ($P < 0.05$),SIC 储量随 pH 的升高而增加。

如图 6 所示,四类草地 SIC 储量与地下生物量

存在显著的负相关关系 ($P < 0.05$)。温性草原与 SIC 储量的相关性最小 ($R^2 = 0.19, P < 0.01$),其余 3 种草地 SIC 储量与地下生物量呈中等相关 ($R^2 = 0.38 - 0.53, P < 0.05$)。四类草地中温性草原植被的根系分布较深,0—20cm 表层分布少,仅占 0—50cm 内地下生物量总量的 49.9%,而其他 3 种草地类型 0—20cm 地下生物量占 0—50cm 的 88% 以上。

3 讨论

3.1 青海省土壤无机碳储量的空间分异特征

中国土壤无机碳储量从东向西增加,从北向南减少^[3]。青海省土壤无机碳储量从南向北增加,高

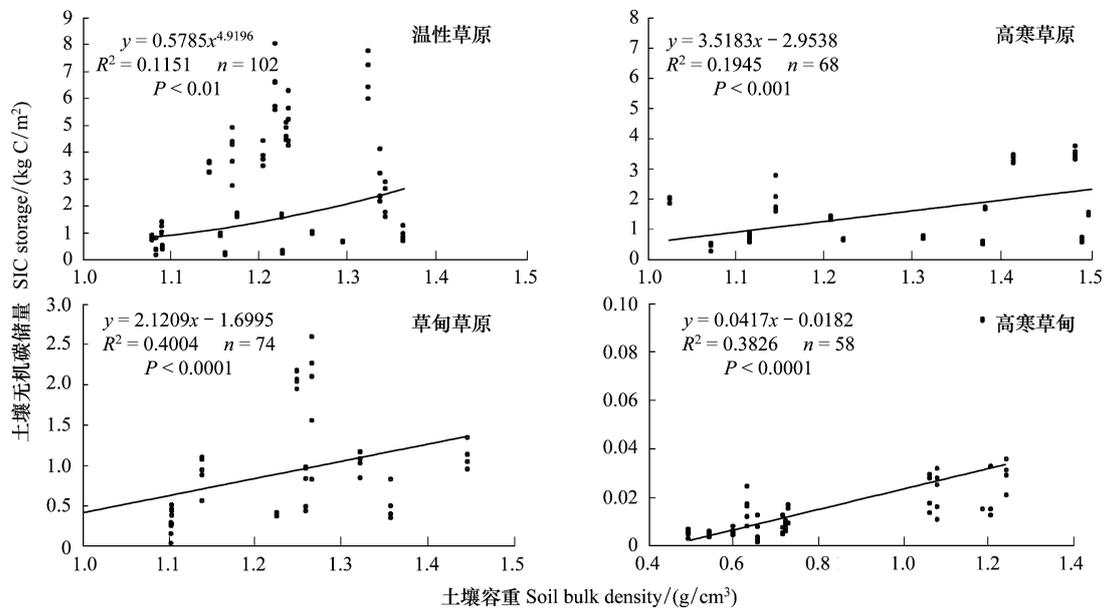


图4 SIC 储量与容重的相关关系

Fig.4 The correlation between SIC storage and soil bulk density

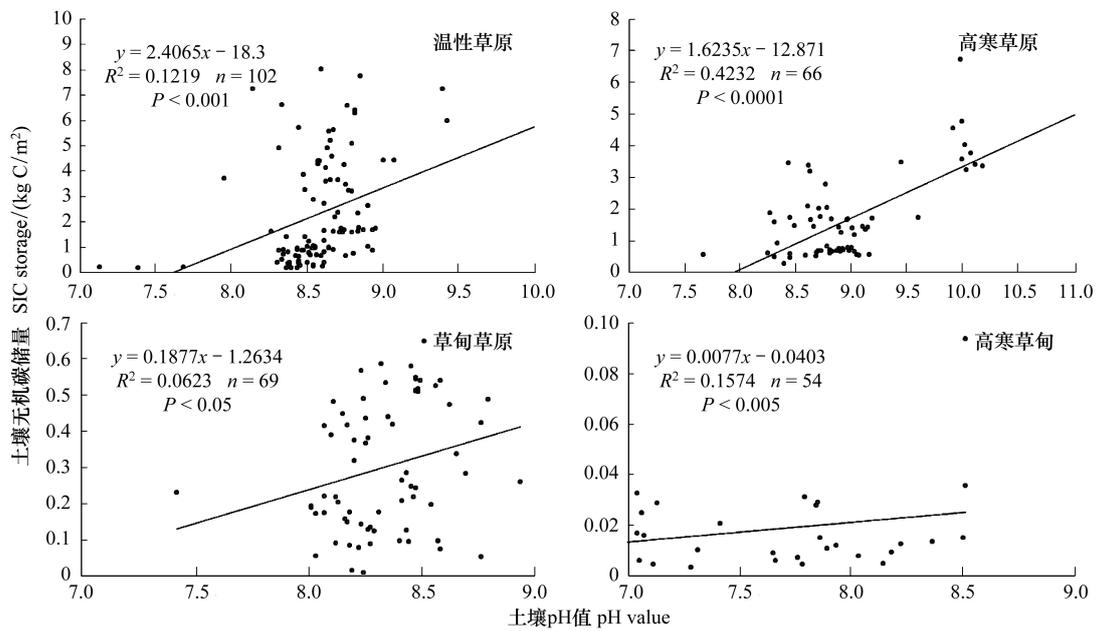


图5 SIC 储量土壤与 pH 值的相关关系

Fig.5 The correlation between SIC storage and pH value

寒草甸主要分布于青海省南部的玉树藏族自治州和果洛藏族自治州,其土壤无机碳储量很小。温性草原主要分布于青海湖附近,其碳储量最大。这种分布主要受气候条件和土壤母质的影响,玉树藏族自治州和果洛藏族自治州降水量较大,年平均降水量分别在 480mm 和 540mm 左右^[13],而无机碳的富集以淋溶为主,大量的降水会使土壤无机碳在淋溶作

用下向下迁移,因此高寒草甸 0—50cm 土壤无机碳含量很小。青海湖盆地年均降水量为 362mm^[13],相对较小,淋溶作用也小,土壤无机碳主要分布于表层土壤中,在 1m 内土壤中无机碳含量很高。根据野外调查观测结果,温性草原土层较厚,100cm 以下为母质,而高寒草甸 50cm 左右就到到达母质层。青海省大面积存在的碳酸盐母质和钙积层造成该地区 SIC

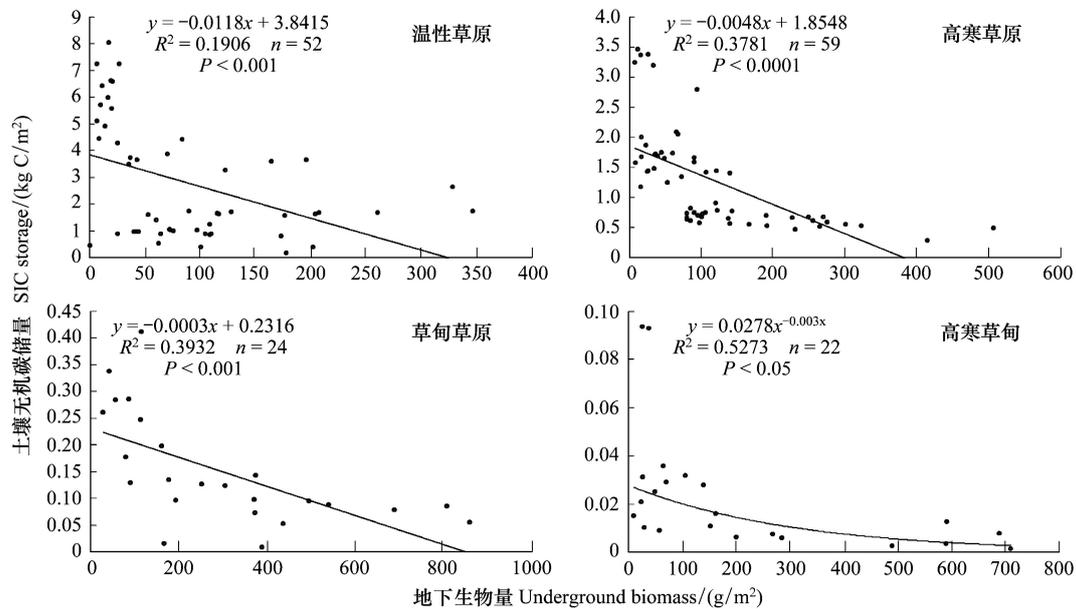


图 6 SIC 储量与地下生物量的相关关系

Fig.6 The correlation between SIC storage and underground biomass

储量较大。

青海天然草场面积为 3645 万 hm^2 , 其中可利用草场面积 3160 万 hm^2 , 占草场总面积的 86.7%^[14]。温性草原、高寒草原、草甸草原、高寒草甸是高寒草地的主体, 其中温性草原和高寒草原 0—100cm SIC 储量分别为 16.51、16.48 kgC/m^2 , 其面积分别占青海省草地总面积的 5.82% 和 16%^[14], 0—100cm SIC 总储量达 1.31Pg。草甸草原与高寒草甸 0—50cm SIC 储量分别为 3.37 kgC/m^2 和 0.12 kgC/m^2 , 高寒草甸是青海省面积最大、分布最广的一类草地, 面积为 2400 万 hm^2 , 占全省总面积的 63.81%^[14], 草甸草原与高寒草甸 0—50cm 储存的土壤无机碳达 0.03 Pg。据此推算青海省 4 种草地类型在取样剖面内无机碳储量为 1.34 Pg。温性草原和高寒草原是青海省高寒草地的主要储蓄库。青海省温性草原与高寒草原土壤无机碳密度是长江三角洲地区 0—100cm 无机碳密度均值 (4.9 kgC/m^2) 的 3 倍多^[15], 远高于东部农区, 与上述研究结果相符。青海省这四类草地取样剖面内土壤无机碳总储量 (1.34 Pg) 占全国总土壤无机碳量 (53.3±6.3) PgC ^[3] 的 2.5% 左右, 是全国总无机碳库的重要组成部分。

3.2 高寒草甸无机碳固定面临的生态风险分析

高寒草地无机碳固定的生态风险主要由气候变化和人类活动引起。

气候变化已成为人类所面临的最严重的问题之一。青藏高原是陆地生态系统中最高最大的地貌单元, 是中国乃至全球气候变化的启动区。近 30a 来, 青藏高原气温和降水均呈不同程度的上升趋势^[16]。研究表明, SIC 储量与年平均气温呈正相关关系, 与年平均降水量呈负相关关系^[17]。假设青海省到 2100 年增温在 2.4—3.2°C, 降水增加 50—200mm^[18], 那么在这种假设下, 青海省植被分布的垂直带将发生迁移, 有向西移动的趋势, 这种迁移会造成土壤无机碳分布的变化。而且气温的增加会使无机碳储量增加, 而降水的增加又会使无机碳储量减小, 土壤无机碳最终会发生怎样的变化, 仍是一个值得研究和探讨的问题。降水的增加亦会增加碳酸钙向下淋溶, 表层土壤无机碳减小, 从而影响 SIC 储量的垂直分布。有研究表明, 土壤系统内部会发生 SOC 向 SIC 的转移, 主要是通过反应“ $\text{SOC}-\text{CO}_2(\text{g})-\text{CO}_2(\text{aq})-\text{HCO}_3^-(\text{aq})-\text{CaCO}_3(\text{s})$ ”形成次生碳酸盐^[19]。气温升高可能会使这种转移加快, 土壤无机碳含量增加。这些将为高寒草地碳储能力的维持和全球气候的变化预测增加更多的不可确定因素, 应进行更深一步的研究。气候变化变化下会影响植被类型的分布, 在分析气候变化对高寒草甸分布影响中, 如果同时考虑土壤因素对高寒草甸分布影响, 可以推断, 气候变化下高寒草甸分布将极大减小^[20]。高寒草甸 0—

40cm 为根系活动层,有机碳储量达 15.77 kgC/m²^[21],占土壤碳储量的 99%,无机碳的储量较小。高寒草甸面积的减小可能会使无机碳的储量增加。

植被现状是自然和人类活动交互作用的结果,在气候影响相同或近似的条件下,人类活动对植被的影响成为主要因素^[10]。

人类活动对高寒草地的主要影响是放牧,其演替的主流方向是退化。其原因很可能是生物、土壤与草地退化的协同演化过程,它可能同时改变土壤有机碳和无机碳的储量及行为特征。自 20 世纪 70 年代以来,草场退化过程加剧,沼泽草甸化、草甸草原化和草原荒漠化在部分地区表现明显,高寒草地进一步退化,降低了草地的初级生产力和土壤有机质^[20],生物作用(植物、微生物)对草地碳储能力的贡献极大,这种改变会使有机碳与无机碳的配比发生变化,直接或间接改变土壤无机碳的水平分布特征。人类的过度放牧一方面会造成表层土壤结构被破坏,土壤粗骨性增强^[22]导致土壤容重增加,进而增加 SIC 储量。而且过度放牧会严重破坏高寒草地草皮层,进而发生草皮层的剥蚀,使底土裸露,表层土壤无机碳增加。另一方面使土壤 pH 值升高,土壤盐碱化程度加重^[23],SIC 储量增加。而且随着退化程度的加重,植物会发生退化,根系生物量的降低,根系分泌的酸性物质对无机碳的淋溶也会相应减小^[24],无机碳储量会增加。人类活动会造成 SIC 储量的增加,但严重降低了土壤有机碳储量^[10],因此放牧强度增加对土壤碳容影响尚需进一步的研究。

气候变化和人类活动都将会影响高寒草地无机碳储量的能力与分布特征。从而给无机碳的固定带来生态风险。

4 结论

取样剖面内,四类高寒草地 SIC 总储量表现出温性草原>高寒草原>草甸草原>高寒草甸的分异特征,其值分别为 16.51、16.48、3.37 kgC/m² 和 0.12kgC/m²。温性草原与高寒草原土壤是高寒草地无机碳的主要储蓄库。温性草原与高寒草原 50—100cm SIC 储量分别占 0—100cm 总储量的 60.2% 和 51.8%,而草甸草原与高寒草甸 30—50cm SIC 储量分别占 0—50cm 总储量的 50.1% 和 55.8%,深层土壤是高寒草地无机碳储蓄的主要场所。随土层深度

的增加,其 SIC 含量变化过程各异,但均与野外土壤剖面调查碳酸钙盐酸泡沫检验观测结果相吻合。高寒草地 SIC 储量与土壤容重和 pH 呈显著的正相关关系,与地下生物量之间呈显著负相关关系。

References:

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 2004, 123(1/2): 1-22.
- [2] Boddy E, Hill P W, Farrar J, Jones D L. Fast turnover of low molecular weight components of the dissolved organic carbon pool of temperate grassland field soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(4): 827-835.
- [3] Wu H B, Guo Z T, Gao Q, Peng C H. Distribution of soil inorganic carbon storage and its changes due to agricultural land use activity in China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 129(4): 413-421.
- [4] Wang H R, Yang Z F. Research progress on soil inorganic carbon. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39 (35): 21735-21739.
- [5] Pan G X. Study on carbon reservoir in soils of China. *Bulletin of Science and Technology*, 1999, 15(5): 330-332.
- [6] Singh S K, Singh A K, Sharma B K, Tarafdar J C. Carbon stock and organic carbon dynamics in soils of Rajasthan, India. *Journal of Arid Environments*, 2007, 68(3): 408-421.
- [7] Berhongaray G, Alvarez R, De Paepe J, Caride C, Cantet R. Land use effects on soil carbon in the Argentine Pampas. *Geoderma*, 2013, 192: 97-110.
- [8] Li G T, Zhang C L, Zhang H J. Soil inorganic carbon pool changed in long-term fertilization experiments in north China plain // Gilkes R J, Prakongkep N, eds. *The 19th World Congress of Soil Science: Soil Solutions for a Changing World*. Brisbane: CDROM, 2010: 220-223.
- [9] Sun H L, Zheng D, Yao T D, Zhang Y L. The protection and construction of the national ecological security shelter zone on Tibet Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(1): 3-12.
- [10] Lin L, Cao G M, Li Y K, Zhang F W, Guo X W, Han D R. Effects of human activities on organic carbon storage in the *Kobresia humilis* meadow ecosystem on the Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(15): 4012-4018.
- [11] Li Y M, Cao G M, Xu R H. Effects of different land use modes on organic carbon and its component in alpine meadow soil. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(14): 5951-5953.
- [12] Zhang F W, Han D R, Guo X W, Li Y K, Cao G M. Response of potential carbon sequestration capacity to different land use patterns in *Achnatherum splendens* grassland in Qinghai-Tibetan plateau. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2011, 31 (9): 1866-1872.
- [13] Zhang X, Li J, Yao X J, Sun M P. Characteristics of precipitation

variation and the abrupt change over Qinghai in recent 45 years. *Journal of Arid land Resources and Environment*, 2012, 26(5): 7-12.

- [14] Zhang G S, Fu Y, Yang Q, Liu B K, Li P. Characteristic of spatial distribution and climate zone of natural grassland types in Qinghai. *Practaculture Science*, 2009, 26(1): 23-29.
- [15] Xu N Z, Zhang T L, Wang X X, Liu H Y, Lang X H. The research on soil inorganic carbon pool in Yangtze river delta. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, 18(11): 1038-1044.
- [16] Feng S, Tang M C, Wang D M. New evidence for the Qinghai-Xizang (Tibet) plateau as a pilot region of climatic fluctuation in China. *Bulletin of Science*, 1998, 43(20): 1745-1749.
- [17] Mi N, Wang S Q, Liu J Y, Yu G R, Zhang W J, Jobbúgy E. Soil inorganic carbon storage pattern in China. *Global Change Biology*, 2008, 14(10): 2380-2387.
- [18] Zhou L S. The preliminary outlook of the influence on the ecological environment Long-term climate change trend of Qinghai province. *Qinghai Meteorological*, 2001, (2): 2-13.
- [19] Lü X M, Zheng D. Impacts of global change on the alpine meadow ecosystem in the source region of the Yangtze river. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2006, 15(5): 603-607.
- [20] Han D R, Cao G M, Guo X W, Zhang F W, Li Y K, Lin L, Li J, Tang Y H, Gu S. The potential of carbon sink in alpine meadow ecosystem on the Qinghai Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(24): 7408-7417.
- [21] Zhang L, Sun X Y, Cao J X, Gao C D, Zhang Y X. Research progress of Soil Organic Carbon transfer to soil inorganic carbonates in forest and grassland soil in northwest arid areas. *Journal of Northwest Forestry University*, 2010, 25(2): 40-44.
- [22] Qiao Y P, Wang Z Q, Duan Z H. Effects of different land-use types on soil carbon and nitrogen contents in the northern region of Qinghai Lake. *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, 18(6): 105-112.
- [23] Gao Y Z, Han X G, Wang S P. The effects of grazing on grassland soils. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(4): 790-797.
- [24] Zhu L X, Zhang J E, Liu W G. Review of studies on interactions between root exudates and rhizospheric microorganisms. *Ecology and Environment*, 2003, 12(1): 102-105.

参考文献:

- [4] 王海荣, 杨忠芳. 土壤无机碳研究进展. *安徽农业科学*, 2011, 39(35): 21735-21739.
- [5] 潘根兴. 中国土壤有机碳和无机碳库量研究. *科技通报*, 1999, 15(5): 330-332.
- [9] 孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 张德镒. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设. *地理学报*, 2012, 67(1): 3-12.
- [10] 林丽, 曹广民, 李以康, 张法伟, 郭小伟, 韩道瑞. 人类活动对青藏高原高寒矮嵩草甸碳过程的影响. *生态学报*, 2010, 30(15): 4012-4018.
- [11] 李月梅, 曹广民, 徐仁海. 土地利用方式对高寒草甸土壤有机碳及其组分的影响. *安徽农业科学*, 2008, 36(14): 5951-5953.
- [12] 张法伟, 韩道瑞, 郭小伟, 李以康, 曹广民. 青藏高原芨芨草型温性草原不同土地利用方式的理论碳增汇潜力比较. *西北植物学报*, 2011, 31(9): 1866-1872.
- [13] 张晓, 李净, 姚晓军, 孙美平. 近45年青海省降水时空变化特征及突变分析. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(5): 7-12.
- [14] 张国胜, 伏洋, 杨琼, 刘宝康, 李甫. 青海省天然草地类型空间分布特征及气候分区. *草业科学*, 2009, 26(1): 23-29.
- [15] 许乃政, 张桃林, 王兴祥, 刘红樱, 梁晓红. 长江三角洲地区土壤无机碳库研究. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(11): 1038-1044.
- [16] 冯松, 汤懋苍, 王冬梅. 青藏高原是我国气候变化启动区的新证据. *科学通报*, 1998, 43(6): 633-636.
- [18] 周陆生. 青海省长期气候变化趋势及其对生态环境可能影响的初步展望. *青海气象*, 2001, (2): 2-13.
- [19] 吕新苗, 郑度. 气候变化对长江源地区高寒草甸生态系统的影响. *长江流域资源与环境*, 2006, 15(5): 603-607.
- [20] 韩道瑞, 曹广民, 郭小伟, 张法伟, 李以康, 林丽, 李婧, 唐艳鸿, 古松. 青藏高原高寒草甸生态系统碳增汇潜力. *生态学报*, 2011, 31(24): 7408-7417.
- [21] 张林, 孙向阳, 曹吉鑫, 高程达, 张月鲜. 西北干旱区森林和草原SOC向SIC转移的研究进展. *西北林学院学报*, 2010, 25(2): 40-44.
- [22] 乔有明, 王振群, 段中华. 青海湖北岸土地利用方式对土壤碳氮含量的影响. *草业学报*, 2009, 18(6): 105-112.
- [23] 高英志, 韩兴国, 汪诗平. 放牧对草原土壤的影响. *生态学报*, 2004, 24(4): 790-797.
- [24] 朱丽霞, 章家恩, 刘文高. 根系分泌物与根际微生物相互作用研究综述. *生态环境*, 2003, 12(1): 102-105.