

青藏高原高寒矮嵩草草甸碳增汇潜力估测方法

曹广民^{1,2}, 龙瑞军^{1,*}, 张法伟², 李以康², 林 丽², 郭小伟², 韩道瑞², 李 婧²

(1. 甘肃农业大学, 兰州 730070; 2. 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001)

摘要:以广布于青藏高原的高寒矮嵩草草甸为研究对象,研究了草甸碳储存的场所、碳库容量随草甸演替的变化过程及其碳增汇潜力的空间分布格局,同时探讨了高寒草甸碳增汇潜力估测的困惑与解决方法。结果表明,高寒草甸生态系统碳增汇潜力空间分布格局差异极大,主要受到土层厚度和草地演化进程的影响。高寒草甸碳主要贮存于草毡表层,其增汇潜力在于退化草地草毡表层的恢复与重建。保持适宜厚度的草毡表层是协调高寒草甸生产与碳生态服务功能的关键。随着退化高寒草甸的恢复,土壤容重呈现下降趋势,计算其系统碳增汇潜力,需要用根土体积比进行土层深度的校正。高寒草甸具有较大的固碳潜力,但其潜力的发挥受到气候和草地恢复与管理措施的影响,比较漫长。

关键词:碳增汇潜力;高寒草甸;草毡表层;演替

A method to estimate carbon storage potential in alpine *Kobresia* meadows on the Qinghai-Tibetan Plateau

CAO Guangmin^{1,2}, LONG Ruijun^{1,*}, ZHANG Fawei², LI Yikang², LIN Li², GUO Xiaowei², HAN Daorui², LI Jing²

1 Gansu Agriculture University, Lanzhou 730070, China

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

Abstract: Alpine meadows widely distribute on the Qinghai-Tibetan Plateau and store a large amount of carbon (C) in soil. Since 70ths last century, a large area of alpine meadows have been suffering from degradation with increasing human activities (e.g. increasing grazing intensity) under climate change. There is a great potential of C storage for these large area of degenerated grassland if they are recovered in future. However, it is difficult to estimate the potential because of many uncertain factors. Base on our understanding about C processes occurred in the *Kobresia* meadows on the Plateau, this paper here used a time-space substitution method to investigate the location of C storage, the capacity of C storage at different stages during grassland succession and its spatial variability. And also assessed the method used for estimating the potential of C storage in alpine meadows.

Mattic epipedon (M. E) is a main storage horizon in soils, which is mainly consisted of dead roots and clay. Its thickness strongly controls the capacity of C storage in alpine meadows because of high C content in M. E. The thickness of M. E. increases normally with grassland degeneration succession. The degeneration succession of alpine meadows can be divided into seven stages: (1) *graminoid-Kobresia* community, (2) *K. humilis* community, (3) *K. pygmaea* community, (4) M. E. thickening of *K. pygmaea* community, (5) M. E. cracking of *K. pygmaea* community, (6) M. E denuding of *K. pygmaea* community, and (7) Forb-black soil land. Organic C storage in roots and clay of M. E. reaches a saturated level at the M. E denuding stage, but its collapse at this stage leads to a break of ecosystem stability. A half amount of stored C can be lost due to the loss of M. E. at the black-soil type stage.

Alpine meadows on the Qinghai-Tibetan Plateau are observed to be at different stages, i.e. M. E. thickening of *K. pygmaea* community in the northern part of the Plateau, M. E denuding of *K. pygmaea* community and black-soil type in the

基金项目: 国家自然科学基金项目(41030105); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-Q1-06)

收稿日期: 2010-03-29; 修订日期: 2010-11-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: longrj@lzu.edu.cn

three river region and *graminoid-Kobresia* community in the Qilian Mountain region. The thickness of M. E. is greater in both the three river region and the northern part of the Plateau than in the Qilian Mountain region. Therefore, the potential of C storage is in an order as follows: the three river region > the Qilian Mountain region > the Southern Tibetan plateau. This clearly indicates that the capacity of C storage depends on M. E. thickness and grassland succession stage, with significant spatial variability across the whole plateau.

Soil bulk density as an important factor in estimating the potential to store C shows a continuous decrease and thus leads to a feint of C loss with restoration of degraded grasslands because of raised soil depth by roots. This indicates that it should be corrected by the soil/root (volume) ratio when estimate C sequestration in soils.

Considering both biomass production and C ecological service, alpine meadows should be maintained at the stage of *graminoid-Kobresia* community or *K. humilis* community. A suitable thickness of M. E. is about 2.0–3.1 cm.

Key Words: carbon sequestration; alpine meadow; matic epipedon; succession

哥本哈根气候变化会议, 已经将气候变化这一纯粹的科学问题变成了一个政治、经济问题^[1], 同时也将中国推向了全球温室气体减排的前沿^[2]。在国际气候变化谈判中, 不同国家和国家集团为各自利益而进行的外交博弈呈愈演愈烈之势^[3], 研究低碳生产、扩大固碳能力的新技术^[4], 寻求用于削减本国承担温室气体减排义务国际谈判的新证据, 已经成为后哥本哈根时代各国科学界工作的重点内容之一^[5]。高寒草甸是青藏高原主要植被类型之一, 约占高原面积的 39%, 其自然生态系统具有丰富的碳储, 大面积退化高寒草甸的恢复, 具有巨大的碳增汇潜力。然而由于高寒草甸退化具有多途径、多状态、区域变异大的特点, 其碳增汇潜力的估测存在诸多值得商榷的技术问题。本文从青藏高原高寒草甸碳素贮存特征、退化现状、草地恢复的途径与时效等方面, 就高原高寒草甸生态系统碳增汇潜力的估测方法进行分析, 为准确评价青藏高原高寒草甸在全球气候变化中的作用, 建立国际认可的高寒草甸碳增汇潜力评估认证体系提供理论依据。

1 研究材料与方法

草地现状调查涉及到青海省三江源地区的黄南州、果洛州和玉树州及祁连山地区的海北州; 西藏自治区的藏北高原(图 1)。沿公路线进行调查, 大约每 100—150km 设置一个调查区。

重点研究区域设置于青海省三江源果洛州玛沁县、甘德县、达日县; 玉树州称多县、玉树县及祁连山地区的海北州门源县和祁连县。按照现实高寒草甸特征将其退化演替进程划分为禾草-矮嵩草群落、矮嵩草群落、小嵩草群落和杂类草-黑土滩 4 个时期。根据小嵩草群落时期草地草毡表层特征, 细分为草毡表层加厚、开裂与塌陷 3 个子时期^[6](表 1)。

区域调查内容包括草地所处演替时期、植被类型、优势群落组成、地表状况、草毡表层特征等因子。重点区域同时进行土壤草毡表层厚度, 分层地下生物量、容重、根土体积比的测定。并采集土壤与根系样品, 分析其碳素含量。

采用样线法调查, 在长约 6km、宽约 3km 的地段内, 布设 3 条样线, 每条样线上设置 6 个调查点。植物群落特征与地表状况调查采用 1m × 1m 的样方^[7-8]; 地下生物量采用 $\phi 6\text{cm}$ 根钻法^[9], 重复 18 次。草毡表层特征调查采用剖面调查^[10], 根土体积比采用容量法, 重复 6 次。碳素分析采用 TOC-5000A 有机碳分析仪进行测定。

2 研究结果

2.1 高寒矮嵩草草甸生态系统碳增汇潜力起计点的确定

青藏高原高寒草甸面积巨大, 正常高寒嵩草草甸 0—10cm 土壤有机质含量高达 12%—14%, 远高于农田和森林生态系统, 是地球生态系统碳素的重要贮蓄库。其生态系统净固定能力为 78.5—192.5 gC/(m²a)^[11], 而地上部分净生产力为 360—405 g/m² 左右, 折合固定碳量为 170.28—191.55 gC/(m²a), 与其系统年碳的固定量基本相当, 即其土壤系统碳基本处于平衡状态。在长期的超载放牧压力下, 高寒嵩草草甸发

表 1 重点研究区域

地点 Sites	地理坐标 Geographic coordinates	海拔/m Elevation	演替阶段 Evolution stage	植被特征 Vegetation features
青海省达日县满掌乡南 5km	N33°15.608', E100°28.025'	3946		一般分为上下两层,上层以异针茅、羊茅、紫羊茅等为优势,并有垂穗披碱草、藏异燕麦、冷地早熟禾等。下层草本以矮嵩草为优势,伴生种类主要有美丽风毛菊、钉柱委陵菜、矮火绒草等。植被盖度达 80% 以上。退化草地经人工恢复重建后,大约 16—20a 也可演替到该阶段
青海省果洛州玛沁县大武乡	N34°27.865', E100°12.373'	3751	禾草-嵩草群落	
青海省门源县风匣口无名滩	N37°36.588', E101°18.618'	3212		
青海省门源县扣门子	N37°35.018', E101°16.578'	3280		
青海省门源县门源风匣口	N37°36.612', E101°18.479'	3196	矮嵩草群落	处于矮嵩草群落向小嵩草群落的过渡期,以矮嵩草群落为绝对优势,草地出现大量小嵩草斑块,占到地表 45%—50%,斑块直径小于 10cm,未见鼠丘及鼠类活动
青海省门源县皇城乡桌子掌	N37°39.732', E101°10.789'	3232		
青海省祁连县俄博乡	N37°56.342', E100°57.875'	3428		
青海省门源县皇城乡桌子掌	N37°40.051', E101°10.661'	3255	小嵩草群落	以小嵩草为绝对优势,地表出现小嵩草黑斑较多,直径 15—20cm 左右,没有死亡黑斑和菌斑,未见鼠类活动,草皮完好,未见裂缝、剥蚀与塌陷
青海省达日县窝塞乡	N33°34.411', E99°54.251'	4086		
青海省祁连县俄博乡	N37°56.342', E100°57.875'	3428	小嵩草群落 毡表层加厚期	小嵩草群落,占到地表的 60%—70%,小嵩草地段地表黑斑十分强烈,占 40%—50% 左右,但没有出现塌陷、剥蚀现象。小嵩草斑块直径约 20—30cm,退化黑斑面积占 75%,未发现秃斑
青海省门源县扣门子	N37°35.018', E101°16.578'	3280		
青海省玉树州玉树县巴塘滩	N35°51.210', E96°59.656'	3907		
青海省玉树州称多县清水河镇	N33°49.789', E97°09.645'	4426	小嵩草群落 毡表层开裂期	纯粹小嵩草草甸,小嵩草盖度 40%,黑斑 70%—80%。裂缝长约 2m,宽约 2cm,深度达 5—7cm,无剥蚀坑,黑斑上以火绒草为主,黑斑上菌斑很小,且不连片,点状
青海省果洛州玛沁县仇云乡	N34°26.087', E99°12.185'	4321		
青海省达日县窝塞乡	N33°34.411', E99°54.251'	4086		
青海省果洛州玛沁县大武乡	N34°27.865', E100°12.373'	3751	小嵩草群落 毡表层剥蚀、塌陷期	处于小嵩草群落斑块状退化剥蚀阶段,剥蚀度 65%—70%,小嵩死亡黑斑占残留草皮的 40%,地表裂缝较多,草毡表层发生破碎,均不连片,多被分割为 20—2—1.5cm 不规则大小的斑块,为剥蚀型退化草地。残余草皮以小嵩草为优势,大量死亡黑斑,在残余草皮基部四周,布满了鼠洞
青海省果洛州达日县满掌山	N33°22.723', E100°14.324'	4302		
青海省果洛州甘德、达日交界	N33°53.342', E99°49.049'	4233		
青海省果洛州甘德县城西 8km	N33°55.562', E99°51.752'	4233		
青海省果洛州安拉山垭台	N34°01.142', E99°58.906'	4235		
青海省果洛州军牧场	N34°22.003', E100°29.612'	3739	杂类草-黑土型 次生草地	原生小嵩草群落退化为杂类草黑土型次生裸地,植被为托吾、铁线莲、大黄,原生植被为小嵩草草甸,现原生植被占 20%,呈斑块状,鼠类土丘覆盖 80% 左右
青海省门源县风匣口无名滩北滩	N37°36.978', E101°17.755'	3212		

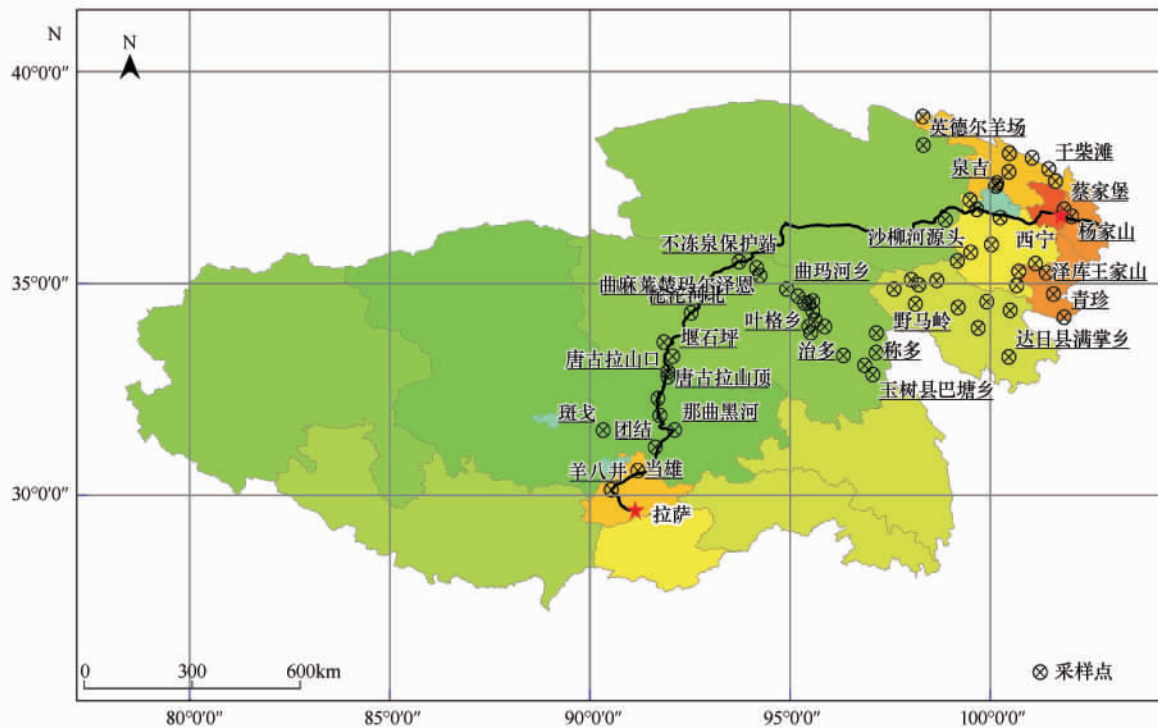


图1 区域调查点

Fig. 1 Surveying plots in research region

生退化,其退化的顶极阶段为杂类草-“黑土型”次生裸地,占到已退化高寒草甸的40%—50%,此时草地已经逆转成为大气温室气体的排放源,其对大气碳的排放量为 $39.7-42.5 \text{ gC}/(\text{m}^2 \text{ a})$ 。高寒草地碳增汇的潜力主要来源于退化草地恢复后其土壤系统对大气碳的固定作用,因此将杂类草-“黑土型”次生裸地确定为高寒矮嵩草草甸生态系统碳增汇潜力的起计点比较妥当。

2.2 高寒嵩草草甸生态系统适宜碳容

土壤系统是高寒草甸碳的主要贮存场所,包括土壤和植物根系2个部分。土壤碳储量决定于土壤碳的含量和土层的深度;根系碳储量决定于根系碳含量和现存生物量。

青藏高原土壤总体来说,发育年轻,土层浅薄,由于发育基质和所处地形部位的不同,厚度差异极大,在10—80cm不等,多在30—40cm左右,土层深度达1m的高寒草甸极为罕见。高寒草甸土壤碳素含量与草地所处演替阶段有关,处于小嵩草群落时期土壤碳素含量最高,基本达到其土壤碳的饱和点,0—10cm为 $(134.8 \pm 7.9) \text{ g/kg}$,0—40cm土层平均为 $(84.6 \pm 34.8) \text{ g/kg}$ (表2)。

表2 高寒草甸不同演替阶段的土壤有机质含量/(g/kg)

Table 2 Soil organic matters during different evolution in alpine meadow

深度/cm Depth	禾草-矮嵩草群落 Gaminoid-Kobresia	矮嵩草群落 Kobresia humilis	小嵩草群落 Kobresia pygmaea	杂类草次生裸地 Black-soil type
0—10	66.5 ± 6.5	78.3 ± 3.1	134.8 ± 7.9	46.08 ± 4.8
10—20	31.2 ± 3.1	58.2 ± 8.9	94.7 ± 7.6	39.05 ± 7.1
20—30	25.0 ± 2.7	—	66.3 ± 5.3	30.8 ± 6.7
30—40	22.6 ± 2.7	—	42.5 ± 2.2	22.5 ± 3.5

高寒草甸植物根系分布于土壤0—40cm土层,0—20cm土层根系量约占剖面的85%左右^[12]。草毡表层^[13-14]是高寒草甸植物根系聚集层,青藏高原的许多地区,草毡表层之下就为基岩层,草毡表层对植物根系

碳储量具有决定作用。草毡表层的中植物根系碳的储贮容量不是恒定的,随着高寒草甸的演替而变化(图 2)。高寒草甸草毡表层厚度在处于小嵩草群落草毡表层剥蚀期最大,平均为(14.67 ± 3.4) cm,而其碳素储量最高时期在小嵩草群落草毡表层开裂期,为(7662.43 ± 123.78) Cg/m²。

从高寒草甸碳的生态服务功能来讲,处于小嵩草群落草毡表层开裂期其服务功能最强,然而,此时草地草毡表层大部分处于死亡状态,草地处于濒临崩溃的节点,草地稳定性几乎全部丧失。为协调高寒草甸生产生态功能,将高寒草甸生态系统控制于禾草-矮嵩草群落或矮嵩草群落阶段是其适宜碳容管理的节点,即高寒草甸适宜碳容管理的上限点,其草毡表层厚度在 2.0—3.1cm 左右为宜。

2.3 青藏高原高寒草甸碳增汇潜力的估测方法

陆地生态系统碳素储量的计算,一般都是采用土壤含碳量与土壤容重和土体体积的乘积作为其碳的贮量。退化高寒草甸恢复过程中,土壤碳素含量逐渐增加,植物根系碳素储量由于根系数量的不断累积而亦呈现累积过程,然而随着植物根系的增加,土壤容重呈现急剧的下降趋势(图 3)。处于杂类草黑土型次生裸地阶段土壤容重一般在 1.1—1.2g/cm³ 左右,而正常高寒草甸土壤比重在 0.7—0.5 g/cm³。土壤重量基数的巨大改变,按照常规方法进行估测时,草地的恢复土壤系统固碳容量反而会呈现逐渐减小的趋势。

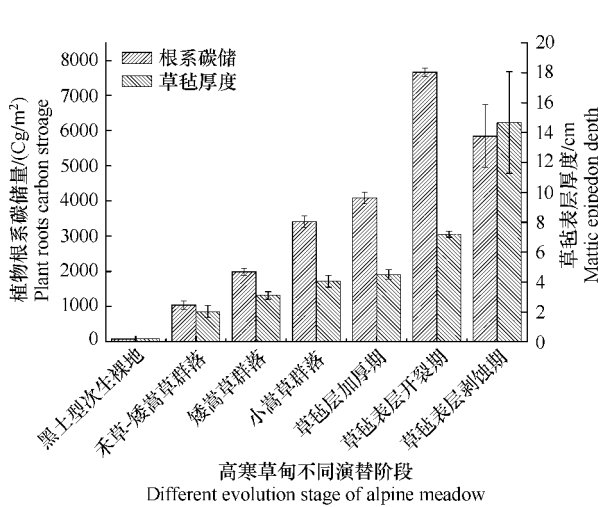


图 2 不同演替阶段高寒草甸草毡表层与根系碳储

Fig. 2 Depths of matric epipedon and plant roots carbon storage during different evolution stage in alpine meadow

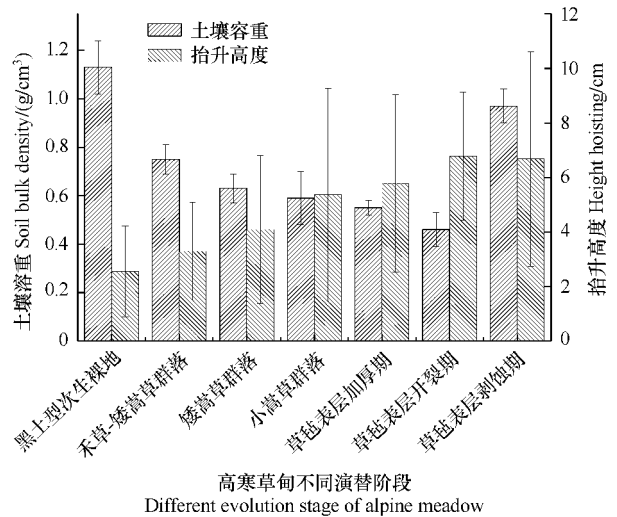


图 3 高寒草甸演替中的 0—10cm 土壤容重和土层抬升高度

Fig. 3 Soil bulk density and height hoisting in 0—10cm depth during evolution in alpine meadow

在进行高寒草甸碳增汇潜力估测时,需要考虑植被恢复后,地下根系数量增加而导致的抬升作用,需要用土壤根土体积比来进行土壤深度的校正。如杂类草黑土型次生裸地恢复到矮嵩草群落阶段时,0—10cm 土层抬升了(4.09 ± 2.72) cm,10—20cm 抬升了(1.79 ± 0.94) cm(图 3),计算其碳增汇潜力时,就应该将恢复后的地表 15.88cm 土层当做原来的 10cm 土层,来计算其碳增汇强度。

2.4 青藏高原高寒草甸主要分布区草地碳增汇潜力的时空分布格局

现实的青藏高原高寒草甸可分为禾草-矮嵩草群落、矮嵩草群落、小嵩草群落、小嵩草群落草毡表层加厚、小嵩草群落草毡表层开裂、小嵩草群落草毡表层塌陷和杂类草-黑土型次生裸地 7 种发育阶段。

本研究所调查区域中,青海省黄南州为草原草甸分布地区,原生草地禾本科成分较多,土壤草毡表层厚度小于 2cm,这类草地在该区域现面积不足 30%。大部分草地演替为小嵩草群落,滩地地带草地草毡表层剥蚀面积达到 75% 以上,形成大面积杂类草-黑土型次生裸地。山坡地段草地多处于小嵩草群落草毡表层剥蚀期,剥蚀面积达到 40%—45%。草毡表层均在 17cm 以上,相对于典型高山嵩草草甸,其草毡表层致密性较低,结构较为松散,紧实度差。该区草地土层深度在 60cm 左右,其碳增汇的潜力很大。

三江源黄河区域的青海省果洛州玛沁县、达日县、甘德县,为典型的高寒草甸分布区,草地均处于小嵩草群落草毡表层剥蚀期,滩地地段草地草毡表层消亡面积达70%—95%,土层多在60—80cm。山坡地段草毡表层剥蚀面积在60%左右,土层厚度约15cm。玛多县的野马岭至查拉坪一带,高寒草甸多数为高寒湿地旱化形成的高寒嵩草草甸,草毡表层厚度在20cm左右,剥蚀面积达40%—60%,土层厚度在40cm左右,山坡地段草地比较完好。该区域大面积杂类草黑土型次生裸地或剥蚀型次生裸地的存在,是未来高寒草甸碳增汇潜力发挥的主要场所。

三江源长江区域的青海省玉树州称多县、玉树县和治多县,亦为典型的高寒草甸,滩地地带草地大部分处于小嵩草群落草毡表层加厚期,剥蚀较轻,草毡表层厚度在5—12cm左右。土层浅薄,约为20—30cm,草毡表层下就为基岩层,砾质性强,质地坚硬。在山地地段,草毡表层剥蚀较为严重,剥蚀面积约20%—30%左右。曲麻来县城约改滩为草原草甸分布区,可明显看到草甸草原向草原的演替,草甸成分呈现明显减少的趋势,草毡表层呈现斑块分布,厚度不足2cm,土层厚度不足20cm,基本没有发生剥蚀;而在其西部地区,高寒草甸发育于山地阴坡,草地处于小嵩草群落草毡表层剥蚀期,草毡表层厚度12cm左右,剥蚀面积达80%。该区域高寒草甸碳增汇的潜力主要在山地地段,其潜力由于土层的浅薄和面积较小而微弱。

西藏自治区藏北高原的安多县高寒草甸处于矮嵩草群落时期,草地草毡表层厚度约3cm左右,那曲、班戈县草地处于小嵩草群落草毡表层极度加厚期,草毡表层厚度在5—6cm左右。该区草地土层厚度在20cm左右,草毡表层比较完整,未发生剥蚀。其草地管理以保持现有高寒草甸碳储为主,增汇潜力较弱。

3 讨论

在现今青藏高原高寒草甸中,处于小嵩草群落阶段的高寒草甸,特别是处于草毡表层极度加厚期的草甸,占高原面上高寒草甸的40%—60%,它所贮蓄的碳量极为丰富,这类草地如果任其发展,虽可大大增加系统的碳储,但会很快造成系统的崩溃,进而逆变为碳源。如果减轻其放牧强度,草甸植被逐步恢复,现有草毡表层将逐渐变薄,进行高寒草甸碳增汇潜力估测需要考虑其碳素的流向与强度。对于退化高寒草甸,地表残留了大量的老化草毡表层斑块,随着草地的恢复,这些斑块亦将会逐渐收缩,其所含碳素的流向,亦会成为碳汇潜力估测需要商榷的问题。进行区域高寒草甸碳增汇潜力估测,针对青藏高原地形破碎化,草地景观斑块化格局多样,土层厚度差异大,微气候影响较为强烈的特点,进行适宜调查样点的设置方法、样点数与代表性面积大小的确定,与碳汇潜力估测方法,是今后高寒草甸碳增汇潜力研究的重点。

青藏高原高寒草甸面积巨大,土壤系统碳储容量高,在地球系统碳循环中具有重要的作用。高寒草甸碳容大小与草毡表层的存亡和发育状况密切相关,在高寒草甸退化演替的特定时段内草毡表层碳容随退化程度的增加而加大。但从生产角度来说,这会影响到系统的稳定性。因此对于高寒草甸生态系统碳的生态效应估测应与其生产效应结合起来,存在一个适宜碳容管理的问题^[15]。现今有关退化高寒草甸的研究中,杂类草黑土型次生裸地发生才认为草地发生了退化^[16-17],很少有人将处于高寒小嵩草群落时期,特别处于草毡表层加厚至开裂时期的高寒草甸认为是草地发生了退化,以杂类草黑土型次生裸地作为标准,得出高寒草甸具有巨大碳的增汇潜力。只有从高寒草甸碳循环的过程出发,充分了解草地生态系统碳的流动途径、方向、时效,明晰退化高寒草甸恢复过程中可能造成的碳增汇负效应的内容、实质、过程与强度,才可能为进行高寒草甸碳增汇潜力的实施选择适宜的措施。

高寒草甸以土壤系统碳储存为主,草毡表层是土壤系统碳的重要储积场所,人类活动引起高寒草甸碳储量的变化过程主要是草毡表层所储存的碳。其地上部分光合作用产物所固定的碳随着放牧作用而被消耗,在高寒畜牧业中其流转周期为1—4a,会随着人类对动物产品的消耗及家畜粪便作为燃料的燃烧而重新返回到大气,在碳固定潜力估测中,可忽略不计。

高寒草甸之高寒性、敏感性、脆弱性造就了世界性的生态系统修复、维系与管理难题。退化高寒草甸的恢复进程受到草甸所处退化阶段、恢复措施、管理方式和气候因素等的制约。处于杂类草—黑土型或剥蚀型阶段的退化草地,采用自然恢复几乎没有可能,需要数十年至百年时间,而采用人工重建恢复,系统达到稳定也需

要约 20a 的时间, 其后期保护管理是关键。高寒草甸具有巨大的碳的增汇潜力, 但其增汇的过程十分漫长而艰难^[18]。

References:

- [1] Ding Z L , Duan X N , Ge Q S , Zhang Z Q. Control of atmospheric CO₂ concentration by 2050: An allocation on the emission rights of different countries. *Science in China Series D-Earth Science* , 2009 , 39(8) : 1009-1027.
- [2] Gurney K R. Global change: China at the carbon crossroads. *Nature* , 2009 , 458(7241) : 977-979.
- [3] Ge Q S , Fang X Q. Analysis of the factors and countermeasures for scientifically coping with of climate change. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences* , 2010 , 25(1) : 32-40.
- [4] Gilfillan S , Lollar B S , Holland G , Blagburn D , Stevens S , Schoell M , Cassidy M , Ding Z , Zhou Z , Lacrampe-Couloume G. Solubility trapping in formation water as dominant CO₂ sink in natural gas fields. *Nature* , 2009 , 458(7238) : 614-618.
- [5] Liu Y H , Ge Q S , He F N , Cheng B B. Countermeasures against international pressure of reducing CO₂ emissions and analysis on china's potential of CO₂ emission reduction. *Acta Geographica Sinica* , 2008 , 63(7) : 675-682.
- [6] Cao G M , Du Y G , Liang D Y , Wang Q L , Wang C T. Character of passive-active degradation process and its mechanism in alpine kobresia meadow. *Journal of Mountain Science* , 2007 , 25(006) : 641-648.
- [7] Du Y G , Cao G M , Wang Q L , Wang C T. Effect of grazing on surface character and soil physical property in alpine meadow. *Journal of Mountain Science* , 2007 , 25(003) : 338-343.
- [8] Liu G S , Jiang N H , Zhang L D. *Soil Physical and Chemical Analysis Description of Soil Profiles*. Beijing: China Standard Press , 1996.
- [9] Ren J Z. *Research Method of Pratacultural Science*. Beijing: China Agriculture Press , 1998.
- [10] Bao X K , Cao G M , Gao Y X. The environment and mechanism of mattic epipedon. *Acta Pedologica Sinica* , 1995 , 32(1) : 45-52.
- [11] Zhao L , Li Y N , Zhao X Q , Xu S X , Tang Y H , Yu G R , Gu S , Du M Y , Wang Q X. Comparative study of the net exchange of CO₂ in 3 types of vegetation ecosystems on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin* , 2005 , 50(16) : 1767-1774.
- [12] Zhou X M. *China Kobresia Meadow*. Beijing: Science Press , 2001.
- [13] Kaiser K , Miehe G , Barthelmes A , Ehrmann O , Scharf A , Schult M , Schlüt F , Adamczyk S , Frenzel B. Turf-bearing topsoils on the central Tibetan Plateau , China: pedology , botany , geochronology. *Catena* , 2008 , 73(3) : 300-311.
- [14] Bao X K , Gao Y X. The main character and differentiating indicator of mattic epipedon. *New theory of China soil classification*. Beijing: Science Press , 1994.
- [15] Lin L , Li Y K , Zhang F W , Liang D Y , Wang X , Cao G M. The influence of human activity on alpine meadow carbon process in Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica* , 2010.
- [16] Cheng Q G. Grassland deterioration in the source region of the Yangtze-Yellow rivers and integrated control of the ecological environment. *Acta Prataculturae Sinica* , 2007 , 16(001) : 10-15.
- [17] Ma Y S , Shang Z H , Shi J J , Dong Q M , Wang Y L , Yang S H. Studies on communities diversity and their structure of "black-soil-land" degraded grassland in the headwater of Yellow River. *Pratacultural Science* , 2006 , 23(012) : 6-11.
- [18] Cao G M , Long R J. The bottleneck and its resolutions to the natural recovery of black soil type degraded grassland in the Three River Source Region. *Acta Agrectir Sinica* , 2009(1) : 4-9.

参考文献:

- [1] 丁仲礼, 段晓男, 葛全胜, 张志强. 2050 年大气 CO₂ 浓度控制: 各国排放权计算. *中国科学: D 辑*, 2009, 39(8): 1009-1027.
- [3] 葛全胜, 方修琦. 科学应对气候变化的若干因素及减排对策分析. *中国科学院院刊*, 2010, 25(1): 32-40.
- [5] 刘燕华, 葛全胜, 何凡能, 程邦波. 应对国际 CO₂ 减排压力的途径及我国减排潜力分析. *地理学报*, 2008, 63(7): 675-682.
- [6] 曹广民, 杜岩功, 梁东营, 王启兰, 王长庭. 高寒矮蒿草甸的被动与主动退化分异特征及其发生机理. *山地学报*, 2007, 25(006): 641-648.
- [7] 杜岩功, 曹广民, 王启兰, 王长庭. 放牧对高寒草甸地表特征和土壤物理性状的影响. *山地学报*, 2007, 25(003): 338-343.
- [8] 刘光崧, 蒋能慧, 张连第. *土壤理化分析与剖面描述*. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [9] 任继周. *草业科学研究方法*. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [10] 鲍新奎, 曹广民, 高以信. 草毡表层的形成环境和发生机理. *土壤学报*, 1995, 32(1): 45-52.
- [12] 周兴民. *中国高草草甸*. 北京: 科学出版社, 2001.
- [14] 鲍新奎, 高以信. 草毡表层主要特征及鉴别指标. *中国土壤系统分类新论*. 北京: 科学出版社, 1994.
- [15] 林丽, 李以康, 张法伟, 梁东营, 王溪, 曹广民. 人类活动对青藏高原高寒矮蒿草甸碳过程的影响. *生态学报*, 2010.
- [16] 陈全功. 江河源区草地退化与生态环境的综合治理. *草业学报*, 2007, 16(1): 10-15.
- [17] 马玉寿, 尚占环, 施建军, 董全民, 王彦龙, 杨时海. 黄河源区“黑土滩”退化草地群落类型多样性及其群落结构研究. *草业科学*, 2006, 23(012): 6-11.
- [18] 曹广民, 龙瑞军. 三江源区“黑土滩”型退化草地自然恢复的瓶颈及解决途径. *草地学报*, 2009(001): 4-9.