

人类活动对青藏高原高寒矮嵩草草甸碳过程的影响

林 丽, 曹广民* 李以康 张法伟 郭小伟 韩道瑞

(中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001)

摘要: 随着人类活动干扰(放牧)的增加, 青藏高原高寒矮嵩草甸的退化演替过程依次为禾草-矮嵩草群落、矮嵩草群落、小嵩草群落和杂类草-黑土滩 4 个阶。其中小嵩草群落又可划分为草毡表层加厚、开裂与塌陷 3 个子阶段。采用时空转换的方法, 研究了人类活动对青藏高原高寒矮嵩草草甸碳过程的影响。结果表明, 随着人类干扰强度的增加, 植物群落地上部分有机碳储量逐渐降低, 由禾草-矮嵩草群落的 $(134.7 \pm 17.3) \text{ gC/m}^2$ 逐渐降低到杂类草-黑土滩次生裸地 $(18.96 \pm 6.18) \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 。土壤、植物地下部分有机碳储量呈单峰曲线变化, 草毡表层开裂子阶段最高, 分别为 $(49.7 \pm 0.83) \text{ gC} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(3596.7 \pm 179.8) \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$; 杂类草-黑土滩阶段最低, 分别为 $(19.2 \pm 1.13) \text{ gC} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(121.6 \pm 6.1) \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 。受植物地下部贮碳的影响, 土壤-植被系统呈现逐渐降低的变化特征。随人类活动干扰的加强, 高寒嵩草草地植物有机碳地下/地上分配比发生巨大改变, 草地草毡表层厚度不高于 4.3 cm 是保证草地生产与生态服务功能双赢的重要指标。

关键词: 碳贮量; 高寒草甸; 退化演替阶段; 人类活动

Effects of human activities on organic carbon storage in the *Kobresia humilis* meadow ecosystem on the Tibetan Plateau

LIN Li, CAO Guangmin*, LI Yikang, ZHANG Fawei, GUO Xiaowei, HAN Daorui

Northwest Institute of Plateau Biology, the Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China

Abstract: The organic carbon (OC) storage in alpine *Kobresia* meadow (AME) ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau was studied using time and space steady method. As heavy human activity increasing, the degraded succession of vegetation community experience four stages such as: Gramineae grass + *Kobresia humilis*, *Kobresia humilis*, *Kobresia pygmaea* and Herb-black soil. And the *K. pygmaea* stage is further divided into thickening, cracking, and denudating sub-phases. The results showed that: (1) Carbon storage in aboveground biomass drop from $(134.7 \pm 7.1) \text{ gC m}^{-2}$ in Gramineae grass + *Kobresia humilis* stage to $(18.96 \pm 6.18) \text{ gC m}^{-2}$ in Herb-black soil stage. (2) Carbon storage in both soil and belowground biomass appear a single peak curve change, the maximum were and the minimum were $(49.7 \pm 0.83) \text{ gC/kg}$ and $(3596.7 \pm 179.8) \text{ gC m}^{-2}$ in the *K. pygmaea* stage, and the minimum were $(19.2 \pm 1.13) \text{ gC kg}^{-1}$ and $(121.6 \pm 6.1) \text{ gC m}^{-2}$ in Herb-black soil stage, respectively. (3) Carbon storage in soil-plant system was gradually decreasing by change of carbon distribution ration in below ground /above ground with human activity increasing. Keep a condign depth of mattic epipedon about 4cm, it can take account of grazing and ecology function for alpine meadow on the Qinghai-Tibetan plateau.

Key Words: carbon storage; alpine meadow; degraded succession stage; human activity

草地生态系统是陆地生态系统的重要组成部分, 草地碳贮量约占陆地生物区总碳贮量的 25%, 并在区域气候变化及全球碳循环中扮演着重要的角色^[1]。高寒嵩草草甸是青藏高原的主要植被类型, 约占高原面积

基金项目: 中国科学院知识创新重要方向性项目(KZCX2-YW-Q1-06); 国家自然科学基金项目(20970520)

收稿日期: 2009-07-29; 修订日期: 2009-11-09

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

的 49%^[1-3]。草毡表层是高寒矮草草甸独有的诊断特征,发育于土壤表层,由不同年龄的活根和保持原状的死根交织磐结而成,呈草毡状复合体,是土壤有机物质大量积存的植毡层和高寒草地植物根系的集结层次,约占土壤剖面植物根系总量的 65%,土壤有机质含量高达 10% 左右,是碳素贮积的重要部位^[4]。人类活动对高寒草甸的最大影响是超载放牧,其演替的主流方向是退化^[5-6]。随着高寒草地退化的加剧,草地植物-土壤系统中的有机碳分配特征将发生怎样的变化? 生态系统碳源/汇效应转化发生在哪个退化演替阶段? 直观且能表征草地退化程度的指标是什么? 其值在怎么样的范围内能保证草地生产、生态服务能力的双赢? 尚未有人作过系统研究,为此本研究进行了人类活动引起高寒矮草草甸碳库类型转化的探讨。

1 材料和方法

1.1 样地的选择

人类活动干扰下高寒矮草草甸退化演替系列依次为: 禾草-矮嵩草(*Kobresia humilis*) 群落、矮嵩草群落、小嵩草(*Kobrecia pygmaea*) 群落(包括小嵩草期、小嵩草草毡表层开裂期简称小嵩草开裂期和小嵩草草毡表层剥蚀期简称小嵩草剥蚀期)、杂类草-“黑土型”次生裸地^[7-8]。以青海果洛州、玉树州和海北州典型群落为研究对象,采用空间尺度代替时间尺度的方法,进行高寒矮草草甸退化演替系列有机碳储量特征的分析(表 1)。

表 1 研究样地植物群落及地境特征

Table 1 The characteristics of plant community and environment

演替阶段 Succession stage	研究区域 Study area	地理位置 Geographical position	代号 Label	样地概况 Plot general situation
禾草-矮嵩草群落 Gramineae grass- <i>Kobresia humilis</i> community	果洛州达日县满掌乡	33°16'N, 100°28'E, 海拔 3946m	HC	优势种为垂穗披碱草(<i>Elymus nutans</i>),早熟禾(<i>Poa</i> sp.)、紫羊茅(<i>Festuca rubra</i>); 植物群落总盖度为 92.7%, 地面较为平整, 几乎无鼠类活动, 草毡层厚度为 1.66cm
矮嵩草群落 <i>Kobresia humilis</i> community	海北州门源县皇城乡轻牧和中牧草地玉树藏族自治州巴塘乡矮嵩草草地	N37°39.732', E101°10.789', 海拔 3232m; N35°51.210', E96°59.656', 海拔 3907m	AS	优势种为矮嵩草(<i>Kobresia humilis</i>), 亚优势种为垂穗披碱草(<i>E. nutans</i>)、(<i>Poa</i> sp.)、紫羊茅(<i>F. rubra</i>) 等, 草地总盖度为 96.7%, 地面平整, 鼠类活动较少, 草毡层厚度为 2.13cm
小嵩草群落 <i>Kobrecia pygmaea</i> community	海北州门源县扣门子; 玉树藏族自治州巴塘乡小嵩草草甸	37°35.018'N, 101°16.578'E, 海拔 3280m; N35°51.210', E96°59.656', 海拔 3907m	XS1	优势种为小嵩草(<i>K. pygmaea</i>), 草地总盖度为 80.8%, 地表可见黑斑及裂缝, 表斑驳不平, 鼠类活动频繁, 草毡表层厚度约 3.0 cm 左右
小嵩草开裂期 Cracks in <i>Kobrecia pygmaea</i> community	海北州门源县皇城乡重牧草地; 海北州祁连县俄博重牧草地	N37°39.732', E101°10.789', 海拔 3232m; N37°56.561', E100°57.533', 海拔 3419m	XS2	优势种为小嵩草(<i>K. pygmaea</i>), 且小嵩草斑块占地面积为 85%, 其上死亡黑斑占 75%, 秃斑占 15%, 地面塌陷占 20%, 裂缝贯通宽约 2cm 左右, 土壤干燥, 可见鼠类活动新土丘, 草毡表层厚度约 4.3 cm 左右
小嵩草塌陷期 Collapse in <i>Kobrecia pygmaea</i> community	果洛州大武镇大武河对岸	34°28'N, 100°12'E, 海拔 3751m	XS3	由小嵩草草甸演变而来, 草毡表层被老化剥蚀地段。地表老化死亡草毡表层大部分呈死亡黑斑状, 其中黑斑面积占 10%—15%, 老化草皮总盖度占 80—90%, 草毡表层厚度约 17.5cm 左右
杂类草-“黑土滩” Forbs-“Black soil beach”	果洛州玛沁县大武乡大武河对岸	34°28'N, 100°12'E, 海拔 3751m	HZ	优势种多为杂类草如马先蒿(<i>Pedicularis</i> sp.)、细叶亚菊(<i>Ajania tenuifolia</i>) 等, 夏季草地总盖度为 46.3%, 无草毡表层, 且地表疏松, 鼠类活动猖獗, 冬季几乎无植被覆盖

1.2 采样方法

采样时间为 2008-08-11—2008-08-22 植物生长盛期。地上生物量采用标准收获法,样方面积为 $0.25\text{m} \times 0.25\text{m}$; 地下生物量采用根钻法($\Phi = 7\text{cm}$),以 10cm 为 1 层共 4 层,6 次重复,将根系筛出,洗净, 105°C 杀青后, 65°C 烘干至恒重,称重,粉碎后过 0.25mm 筛,保存作为分析测试样品; 地下根系筛分后的土壤作为土壤分析样品,风干,挑除杂物、石块,过 0.25mm 土壤分析筛后保存。

容重采用环刀法分层取样,每 10cm 为 1 层,共 4 层,在剖面每个层次中心部位取样,每样地 3 次重复。同期测定剖面草毡表层厚度。样地重复 3—5 次。

1.3 有机碳分析

植物和土壤样品有机碳分析应用日本岛津 TOC-5000A 总有机碳分析仪测定。

1.4 数据处理分析

植物地上部有机碳储量:

$$C_a = \sum_{i=1}^n (O_i \times S_i) \pm \text{SE}$$

式中 O_i 为第 i 个样方地上植物混合样有机碳含量, S_i 为第 i 个样方在整个样地中所占的百分比。

植物地下部有机碳分层储量:

$$C_b = \sum_{i=1}^n (O_i \times S_i) \pm \text{SE}$$

式中 O_i 为第 i 个样方地下植物根系混合样有机碳含量, S_i 为第 i 个样方在整个样地中所占的百分比。

土壤有机碳分层储量^[9]:

$$C_s = S \times H_i \times \rho_i \times C_i \pm \text{SE}$$

式中 S 为面积, H 为土壤深度, $i=1$ 代表 $0-10\text{cm}$ 、 $i=2$ 代表 $10-20\text{cm}$ 、 \dots 、 $i=4$ 代表 $30-40\text{cm}$, C_i 为该层次中有机碳的含量, ρ_i 代表土壤容重, SE 为标准误。

各演替时期植物有机碳和土壤有机碳为相应演替时期下各样地的平均值。

2 结果与分析

2.1 植物有机碳储量特征

2.1.1 植物地上部有机碳储量特征

随放牧强度的加强,地上生物量急剧下降,导致地上部植物有机碳储量降低。禾草矮嵩草群落最高 (134.7 ± 17.3) $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$, 黑土滩-杂类草群落最低 (18.96 ± 6.18) $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$, 且各群落差异显著 ($P < 0.05$)。小嵩草群落各子阶段地上有机碳储量亦有随放牧强度加重而降低,其中小嵩草群落期子阶段地上有机碳贮存量为 (60.4 ± 6.2) $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$, 不及禾草-矮嵩草群落的 $1/2$, 但显著高于小嵩草开裂期 (38.46 ± 3.44) $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 和小嵩草塌陷期 (36.35 ± 14.05) $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$; ($P < 0.05$), 而小嵩草开裂期和小嵩草塌陷期地上部分有机碳固定能力均不足禾草-矮嵩草群落的 $1/3$ (图 1)。

2.1.2 植物地下部有机碳储量特征

随放牧强度的加大, $0-40\text{cm}$ 范围内植物地下部有机碳分层储量及总储量特征均呈现单峰曲线变化,其峰值出现在小嵩草群落,且小嵩草群落内各子阶段均高于其他演替时期,但受到彼此根系含量的不同,其有机碳储量略有不同。

植物地下部有机碳分层储量特征表明,小嵩草群落各子阶段 $0-40\text{cm}$ 各层地下植物有机碳储量彼此差

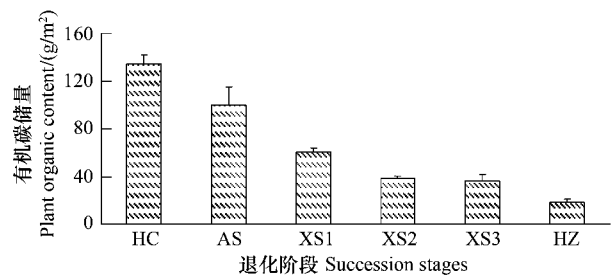


图 1 不同退化阶段植物地上碳储量

Fig. 1 Plant organic content up ground in different succession stages

异不显著,但显著高于同层次其他群落($P < 0.05$)。以小嵩草开裂期子阶段为例,其地下部植物有机碳各层含量为禾草-矮嵩草群落的 8.3 倍—6.9 倍,从矮嵩草群落到小嵩草群落地下植物有机碳急剧增加,其增幅自表层向下依次为 1364.9 、 320.1 、 80.1 、 $26.7 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$,远高于退化起始阶段的禾草-矮嵩草群落到矮嵩草群落的增加量(684.1 、 104.1 、 26.0 、 $8.7 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$);而小嵩草开裂期子阶段(地下部植物有机碳含量的最高点)为黑土滩-杂类草群落的 25.6—30.5 倍。因此,小嵩草群落到杂类草-“黑土滩”时期植物地下有机碳含量急剧下降。

地下部植物总有机碳特征表明,随放牧强度的加大,小嵩草群落仍具有较高的有机碳储量,且显著高于其他群落($P < 0.05$)。其小嵩草群落期、小嵩草开裂期和小嵩草塌陷期各子阶段植物地下有机碳储量依次是禾草-矮嵩草群落的 6.8、8.0 倍和 7.4 倍,是黑土滩-杂类草群落的 25.2、29.6 倍和 27.1 倍(图 2)。

2.1.3 植物地下/地上有机碳储量比

放牧强度明显改变了植物群落有机碳的地上/地下分配比,随着放牧压力的增大,草地植物群落植物有机碳先迅速向地下转移,导致从禾草时期到小嵩草开裂期和塌陷期地下/地上有机碳比值达到最大,为 91:1—94:1,而“黑土滩”杂类草时期又降到了 6:1,而呈单峰曲线变化(图 3)。

植物地下部有机碳在不同土壤层次中的分配比具有明显的分层特征。0—10cm 最高,均达到 80% 左右,而随着土壤层次的加深,有机碳含量逐渐降低。但其在各层次之间的分配略有不同,如小嵩草群落子阶段地下部有机碳含量有向深层积累的趋势,即其表层 0—10cm 植物有机碳含量比例同其他时期相比最低,占总有机碳含量的 78.7%,而 10—20cm 和 >20—30cm 该比例分别为 16.0% 和 4.0% 均高于其他演替时期。而其他演替时期则明显受到放牧压力的影响,而表现为随放牧压力的增强而呈单峰曲线变化(图 4)。

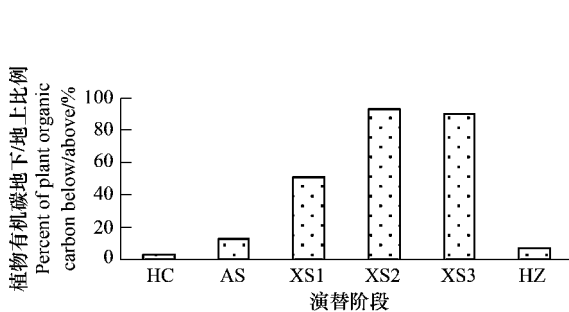


图3 植物有机碳地下/地上比

Fig. 3 Carbon distribution ration in below ground/above ground

2.2 土壤有机碳储量特征

2.2.1 土壤有机碳含量特征

随放牧强度的加大,土壤有机碳分层及总体含量均先升高而后下降。其中表层 0—10cm 小嵩草开裂期最高,达到 $84.9 \text{ gC} \cdot \text{kg}^{-1}$,黑土滩-杂类草时期最低,为 $7.4 \text{ gC} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。10—20cm 和 20—30cm 均在小嵩草群落期子阶段最高,而 30—40cm 则表现为自禾草-矮嵩草时期开始不断下降,到黑土滩-杂类草时期达到最低。而 0—40cm 有机碳平均含量由禾草-矮嵩草群落的(46.4 ± 1.18) $\text{gC} \cdot \text{kg}^{-1}$ 升高到小嵩草开裂期的(49.7 ± 0.83) $\text{gC} \cdot \text{kg}^{-1}$,达到演替过程最高值,之后显著下降到杂类草-黑土滩的(19.2 ± 1.13) $\text{gC} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 5)。

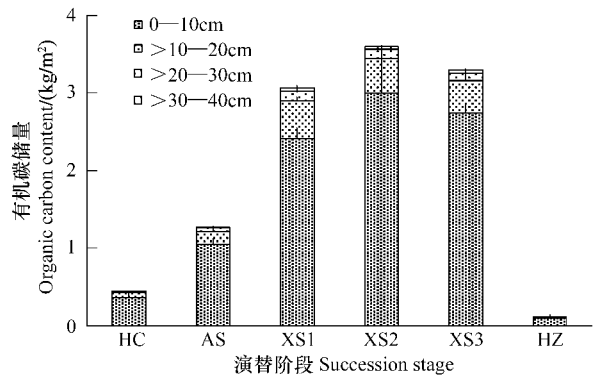


图2 不同演替阶段植物根系有机碳分层储量特征

Fig. 2 Plant root organic carbon content in different succession stage

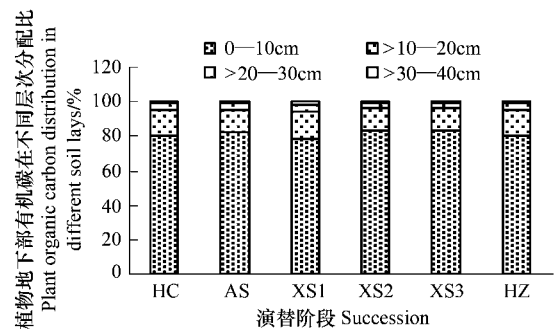


图4 植物地下部有机碳在不同层次间的分配比

Fig. 4 Carbon distribution in different soil layers

2.2.2 土壤有机碳储量特征

随放牧强度的加大,土壤分层及总体有机碳储量趋势略有不同,即表层土壤(0—10cm)有机碳密度禾草-矮高草群落最高,达 $7441.1 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$,矮高草群落开始有所升高,到小高草开裂期达到第2个小高峰 $6634.1 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$,而后急剧降低到黑土滩-杂类草群落的 $840.2 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$,而其他层次均表现为随放牧强度增加而逐渐降低(图6)。

土壤有机碳总储量则表现为禾草-矮高草群落最高,0—40cm有机碳总储量为 $21590.4 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$,且随放牧强度的加剧逐渐降低,到黑土滩-杂类草群落最低($9446.4 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$)(图6)。

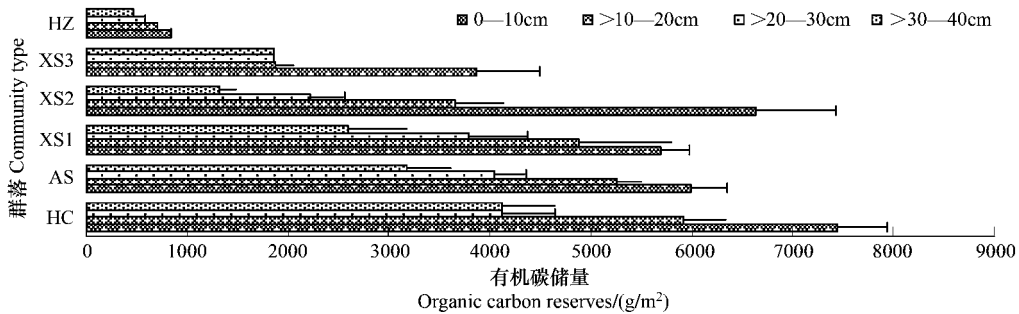


图6 土壤有机碳储量
Fig. 6 Soil organic reserves

2.3 土壤-植物系统有机碳储量特征

随放牧退化演替的进行,土壤-植物系统(即土壤和植物地上和地下部有机碳总和)有机碳密度呈现不同程度的下降,其中黑土滩杂类草群落最低,达 $4573.1 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$,且显著低于其它任何群落 ($P < 0.05$),小高草群落期同矮高草群落和小高草开裂期群落均差异不显著,此外小高草群落期同禾草-矮高草群落和黑土滩-杂类草群落之间均差异显著,小高草群落期有机碳密度在数量上带有明显的过渡性,是连接矮高草群落和小高草开裂期群落的中间群落。草地退化过程具有渐变特征(图7)。

3 讨论

土地利用格局变化引起碳库的损失,是造成气候变暖的重要原因^[7,10]。高寒草地是一个巨大的天然有机碳储存库^[11]。人类活动的干扰改变了草地中碳在不同界面间的分配和其在不同退化时期的演变过程,同时该演变过程同草毡表层的变化具有一定的相关性,即随着草地退化程度的增加,草地根系先增加,到小高草群落达到最高值,同时草毡表层厚度逐渐达到最高,而后随着草毡表层的剥蚀,根系逐渐减少到杂类草-“黑土滩”时期达到最低^[7,10,12]。该变化规律表现为根系增多,草毡表层加厚,单位土体有机碳含量增加,但本研究数据表明,土壤有机碳和植物-土壤系统有机碳储量并没有表现出同草毡表层、根系含量以及土壤有机质含量之间的协同变化性,而是随草地退化程度的加深而逐渐减小。海尔蒙特试验表明,植物生长过程中对土壤的消耗量极其少,在地面没有剥蚀的条件下,植物地下土壤是不会随着植物群落的生长而大量减少的,那么土壤

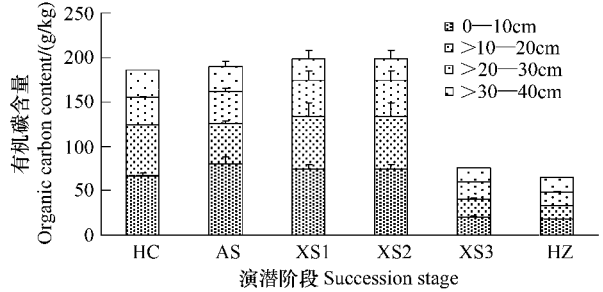


图5 土壤有机碳含量
Fig. 5 Soil organic carbon content

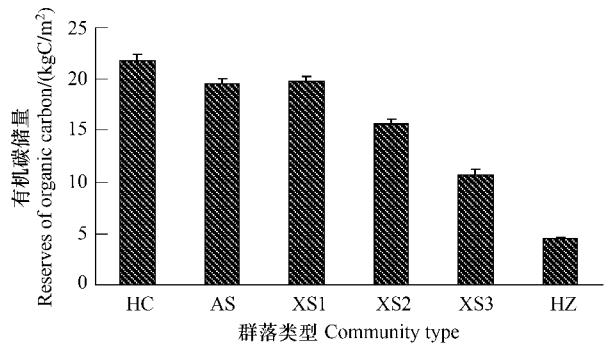


图7 土壤-植物有机碳储量
Fig. 7 Resdrves of organic carbon in the plant-soil system

中单位质量的有机碳和土壤中的植物有机碳均增加的前提条件下,草地植物-土壤系统有机碳储量是不会减少的,研究结果似乎彼此矛盾。解释该现象唯一的方法就是土量和土壤有机碳含量均未大量减少,而植物有机碳储量的增加是通过抬升地面高度而完成的。这也许是研究区域小嵩草草甸会出现地表斑驳不平和裂缝的原因之一。而研究过程中出现数据之间的矛盾只能说明现在通用的有机碳储量的计算方法对该区生境发生变化而引起各元素的变化不能很好的估计而至。如何选择一种符合该类草地个性的有机碳库计算方法还有待于进一步研究。

土壤草毡层是连接土壤-植物系统的重要纽带,也是表征草地退化与否的重要指标^[7-8]。当人类干扰强度影响较低时草地处于禾草-矮嵩草群落,草毡表层厚度只有 1.66cm,当人类干扰加强时禾草退缩,形成矮嵩草群落^[13],草毡表层增加至 2.13cm 左右;当人类干扰进一步加强草地将进入小嵩草群落,草毡表层将沿着其小嵩草群落的各子阶段由 3.0cm 经 4.3cm 最终达到 17.5cm,草地根系量高,草地呈现斑块状隆起,在雨水等外力的作用下极易被剥蚀,底土外露,必然形成杂类草-“黑土滩”型草地。当草地退化为杂类草-“黑土滩”型草地后,草地有机碳固定能力严重弱化,原有的有机碳迅速分解,草地将由碳汇转化成为碳源。由于其地上植物量少,尤其是草地的使用价值急剧降低,也不能维持正常的草地生产服务能力^[7,10,14]。并且由小嵩草塌陷期退化成杂类草“黑土滩”次生裸地过程中附加的人类干扰强度已经达到草地承载能力的极限,此时即使终止人类活动(自然恢复),退化也是不可避免的^[7]。

青藏高原严重退化的杂类草-“黑土滩”退化草地有 703.19 万 hm^2 ,占全区退化草地的 16.54%,占到青藏高原草地总面积的 1/9^[15],如果人类对大面积的矮嵩草草地继续加大干扰强度,最终使其成为杂类草-“黑土滩”次生裸地,将对北半球中高纬度地区的碳储量产生深远且不可预知的影响。因此,适宜的控制人类活动强度,保持草毡表层厚度不高于 4.3cm 是维持现阶段高寒草地生产能力和生态能力双赢的重要指标。至于如何控制人类活动强度以保持草地生产生态功能双赢仍需进一步研究。

4 结论

人类活动是造成青藏高原矮嵩草草甸退化的主要原因之一,草地退化的表现特征为草毡表层先加厚而后消失殆尽,且放牧压力加大可以改变有机碳在植物土壤各界面的分配比例,使得植物地面有机碳固定能力减弱,地下植物有机碳固定能力急剧增加,当草地地下植物有机碳增加到 $(3596.7 \pm 726.8) \text{ gC/m}^2$ 时,植物地下有机碳固定量达到饱和,沿地面裂缝发生剥蚀,草地必然退化成杂类草-黑土滩型草地,从而导致草地由碳汇转化成碳源。小嵩草群落期是草地退化的关键时期,草毡表层厚度具有指示草地退化程度能力,保持小嵩草群落草毡表层厚度小于 4.3cm 是保证草地不发生碳汇转化的关键段。解决上述问题要求控制人类活动强度,使草地草毡表层厚度不高于 4.3cm,至于如何量化人类活动干扰强度指标,还需进一步研究。

References:

- [1] Mooney H A. Terrestrial Global Productivity, Past, Present, Future. San Diego: Academic Press, 2001: 429-449.
- [2] Carte A J, Scholes R J. Spatial Global Database of Soil Properties. IGBP Global Soil Data Task CD-ROM. International Geosphere-Biosphere Programme(IGBP) Data Information Systems. Toulouse, France 2000.
- [3] DeFries R S, Field C B, Fung I, Gollatz, Bounoua L. Combining satellite data and biogeochemical models to estimate global effects of human-induced land cover change on carbon emissions and primary productivity. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, 13: 803-815.
- [4] Bao X K, Gao Y X. Characteristics of mattic epipedon and its identification indexes//Series of research on Chinese soil system. New Discussions on Classification of Chinese Soil Classification System. Beijing: Science Press, 1994: 302-309.
- [5] Long R J, Dong S K, Hu Z Z. Grassland degradation and ecological restoration in Western China. *Grassland and Turf*, 2005, (6): 3-7.
- [6] Zhao X Q, Zhou X M. Ecological basis of alpine meadow ecosystem management in Tibet: haibei alpine meadow ecosystem re-search station. *A Journal of the Human Environment*, 1999, 28(8): 642-647.
- [7] 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(6): 641-648.
- [8] 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 Agrestia Sinica*, 2009, 17(1): 4-9.
- [9] Huang C Y. *Agrology*. Beijing: China Agricultural Press, 2005: 5: 67.
- [10] Li Y M, Cao G M, Wang Y S. Effects of reclamation on soil organic carbon in Haibei alpine meadow. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(8): 911-915.
- [11] Liu M C, Li D Q, Wen Y M. The Values of CO₂ fixation and O₂ release by vegetation ecosystem in Sanjiangyuan region. *Ecology and Environment*, 2006, 15(3): 594-597.
- [12] Wang J F. Changes of the swamp and alpine meadow ecosystems and its carbon balance in the head-water region of the Yangtze River: response to the global warming. *Lanzhou University*, 2008: 3-23.
- [13] Zhou H K, Zhou L, Liu W, Wang Q J, Zhao W, Zhou Y Y. The influence of fencing on degraded *Kobresia humilis* meadows and non-degraded. *Grassland of China*, 2003, 25(5): 15-22.
- [14] Ma Y S, Lang B N, Li Q Y, Shi J J, Dong Q M. Study on rehabilitating and rebuilding technologies for degenerated alpine meadow in the Changjiang and Yellow River source region. *Pratacultural Science*, 2002, 19(9): 1-4.
- [15] Li X L. Natural factors and formative mechanism of "Black Beach" formed on grassland in Qinghai Tibetan Plateau. *Pratacultural Science*, 2002, 19(1): 20-22.

参考文献:

- [4] 鲍新奎, 高以信. 草毡表层主要特征及鉴别指标 // 《中国土壤系统分类研究丛书》编委会编. 中国土壤系统分类新论. 北京: 科学出版社, 1994: 302-309.
- [5] 龙瑞军, 董世奎, 胡自治. 西部草地退化的原因分析与生态恢复措施探讨. *草原与草坪* 2005, (6): 3-7.
- [9] 黄昌勇. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2005: 67.
- [10] 李月梅, 曹广民, 王跃思. 开垦对海北高寒草甸土壤有机碳的影响. *生态学杂志* 2006, 25(8): 911-915.
- [11] 刘敏超, 李迪强, 温琰茂. 三江源区植被固定 CO₂ 释放 O₂ 功能评价. *生态环境* 2006, 15(3): 594-597.
- [12] 王俊峰. 长江源区沼泽与高寒草甸生态系统变化及其碳平衡对全球气候变化的响应. 兰州大学, 2008: 1-25.
- [13] 周华坤, 周立, 刘伟, 王启基, 赵伟, 周彦艳. 封育措施对退化与未退化矮蒿草草甸的影响. *中国草地* 2003, 25(5): 15-22.
- [14] 马玉寿, 郎百宁, 李青云, 施建军, 董全民. 江河源区高寒草甸退化草地恢复与重建技术研究. *草业科学* 2002, 19(9): 1-4.
- [15] 李希来. 青藏高原“黑土滩”形成的自然因素与生物学机制. *草业科学* 2002, 19(1): 20-22.