

高寒草甸土壤有机碳储量及其垂直分布特征

陶 贞^{1,2}, 沈承德², 高全洲¹, 孙彦敏², 易惟熙², 李英年³

(1. 中山大学地理科学与规划学院, 广州 510275;
2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640;
3. 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001)

摘要: 青藏高原是全球变化的敏感区。高寒草甸草原是青藏高原上最主要的放牧利用草地资源之一。选择青藏高原东北隅海北站内具有代表性的高寒草甸土壤进行高分辨率采样, 测定土壤根系和有机碳含量。研究得出, 青藏高原高寒草甸土壤贮存有巨大的根系生物量(23544.60 kg ha⁻¹~27947 kg ha⁻¹) 和土壤有机碳(21.52 GtC); 自然土壤表层(0~10 cm) 储存了整个剖面土壤有机碳总量的 30%左右。比较发现, 高寒草甸土壤的有机碳平均贮存量(23.17 × 10⁴ kgCha⁻¹) (0~60 cm) 较相应深度的热带森林土壤、灌丛土壤和草地土壤的有机碳贮存量高约 1~5 倍多。在全球碳预算研究中, 青藏高原高寒草甸土壤有机碳库不可忽视。随着全球变暖, 表层土壤有机碳分解释放的 CO₂ 将增加。为了减少高寒草甸生态系统的碳排放, 应加强高寒草甸土壤地表覆被的保护, 合理种植深根系植物。这对减缓全球大气 CO₂ 浓度升高的速率以及可持续开发高寒草甸的生态服务功能都具有重要意义。

关键词: 青藏高原; 高寒草甸; 土壤有机碳; 全球碳库

1 引言

土壤圈是陆地生态系统中储量最大的碳库。土壤碳储量约是目前大气碳储量的 2 倍、植被碳储量的 3 倍^[1-3]。在陆地生态系统与大气交换的 CO₂ 中, 土壤有机质分解释放的 CO₂ 大约占 2/3^[4]。因此, 土壤碳库可视为大气 CO₂ 的重要源和汇^[5], 其储量的任何变化都将在很大程度上改变大气 CO₂ 浓度和影响全球碳平衡^[6, 7]。占地球陆地表面积 1.69% 的青藏高原拥有世界上海拔最高、面积最大而独特的生态系统, 土壤有机碳储量是全球土壤碳库(1500 Gt) 的 2.6 %^[8]或 2.4%^[9], 是全球变化的敏感区。高寒草甸草原是高原上最主要的放牧利用草地资源之一。迄今对高寒草甸土壤碳动力学的报导多侧重于土壤 CO₂ 排放及其碳平衡^[10-15], 高寒草甸土壤有机碳的储量报道较少且结论不尽一致^[8, 9, 16]。研究高寒草甸土壤有机碳库及其垂直分布的量变是了解高寒草甸生态系统土壤 - 大气间碳交换的先决条件, 有助于探讨减少人为碳排放、增加土壤碳贮存、延长土壤碳驻留时间等问题, 对认识青藏高原在全球碳预算中的作用和青藏高原土壤对全球变化的贡献与响应均有重要意义。

本文选择位于青藏高原东北隅的中国科学院海北高寒草甸生态系统定位研究站(简称海北站, 下同)内具有代表性的 4 个高寒草甸土壤剖面进行高分辨率采样, 测定土壤中植物根系和有机碳含量, 探讨高寒草甸土壤有机碳的储量及其垂直变化, 为青藏高原碳估算研究和生态环境建设及预测提供基础数据。

收稿日期: 2005-01-12; 修订日期: 2006-05-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(40231015; 40473002; 40471120); "985 工程"GIS 与遥感的地学应用科技创新平台(105203200400006) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.40231015; No.40473002; No.40471120; The '985 Project' of GIS and Remote Sensing for Geosciences from the Ministry of Education of China, No.105203200400006]

作者简介: 陶贞(1965-), 女, 博士, 主要从事土壤碳循环及全球变化研究。E-mail: taozhen@mail.sysu.edu.cn

2 研究区概况

海北站位于青藏高原的东北隅, 祁连山东段冷龙岭南麓, 大通河河谷西北部。地理位置为 $37^{\circ}29' \sim 37^{\circ}45'N$, $101^{\circ}12' \sim 101^{\circ}33'E$ (图 1)。站区内地势开阔, 多滩地和低丘, 海拔高度 3200~3600 m。气候寒冷而湿润, 年平均气温 $-1.7^{\circ}C$, 多年平均降水量 580 mm 左右; 年内无绝对无霜期, 相对无霜期 20d 左右。7 月份仍出现霜冻、结冰、降雪 (雨夹雪) 等天气现象。土壤属寒冻锥形土 (高山草甸土), 母质为洪积—冲积物、坡积残积物及古冰水沉积物。植被为高寒草甸和灌丛。属以天然放牧为主的纯牧区, 土壤基本保持自然状态。

我们于 2003 年 7 月在海北站区选择具有代表性的高寒灌丛草甸暗沃寒冻锥形土 (金露梅灌丛 (*Dasiphora fruticosa*) 草甸)、滩地矮高草 (*Kobresia humilis*) 草甸草毡寒冻锥形土和缓坡地矮高草草甸草毡寒冻锥形土 3 个自然高寒草甸土壤剖面 and 1 个人工种植的燕麦 (*Arrhenatherum elatius*) 草地土壤剖面 (1978 年以前是自然矮高草草甸, 1978 年开始种植优良牧草燕麦, 每年春季翻耕 20~30 cm 深, 5 月下旬播种、追施尿素、牛羊粪, 9 月中旬收割) 进行高分辨率采样 (图 1, 表 1)。矮高草草甸草毡寒冻锥形土剖面简称为 ASC 剖面, 滩地剖面为 ASC I、缓坡地剖面为 ASC II; 高寒灌丛草甸暗沃寒冻锥形土剖面简称为 JLM 剖面; 燕麦草地土壤剖面简称为 YMC 剖面。

表 1 研究样地的主要特征 (数据引自 [17,18])

Tab. 1 Major characteristics of the study plots (data from references [17,18])

剖面 标号	草地类型	建群种	地理位置	海拔 高度 (m)	土地类型	地上 生物量 ($kg/m^2 \cdot yr$)	利用 状况
ASC I	滩地矮高草草甸	矮高草	$37^{\circ}37'N, 101^{\circ}19'E$	3220	滩地	0.35	冬春季
ASC II	缓坡地矮高草草甸	矮高草		3230	半阳缓坡, 坡度 $5 \sim 7^{\circ}$		轻度自
JLM	金露梅灌丛草甸	金露梅	$37^{\circ}40'N, 101^{\circ}19'E$	3352	滩地	0.27	由放牧
YMC	燕麦草地	燕麦	$37^{\circ}37'N, 101^{\circ}19'E$	3220	滩地	2.31 (鲜)	割草

3 材料与方 法

3.1 样品采集

采取高分辨率垂直连续采样法, 采样深度为 100 cm, 0~30 cm 采样间隔为 2 cm, 30~60 cm 采样间隔为 5 cm, 60~80 cm 采样间隔为 10 cm, 80~100 cm 采样间隔为 20 cm。每个剖面共采集样品 24 个, 每个样品的重量为 1.5~2.0 kg。

3.2 实验室测量

3.2.1 土壤有机碳含量的测定 取适量风干的土壤样品, 用孔径 1 mm 的筛子滤去可见植物根系、植物碎屑和碎石; 在玛瑙钵中研磨均匀装入称量瓶, 放入烘箱, 在 $80^{\circ}C$ 下烘

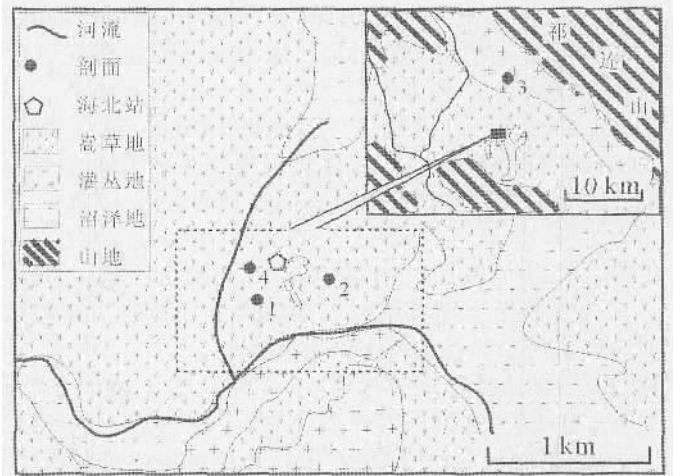


图 1 研究剖面位置图 (图中 1、2、3 和 4 分别代表 ASC I 剖面、ASC II 剖面、JLM 剖面 and YMC 剖面的位置)

Fig. 1 Schematic diagram of the studied profiles sites

干 24 h; 用电子天平 (AB104-N, Produced by Mettler-Toledo Group, $d = 0.0001$ g) 称取土壤样品 (大约 10~200 mg), 加 10% 的稀盐酸充分反应, 除去碳酸盐; 用蒸馏水反复洗涤样品至中性; 移入孔径大约 1.5 mm 的石英管, 烘干 (温度 80 °C); 加入适量氧化铜 (CuO) 和银丝, 在真空条件下燃烧 15 min (温度 800 °C), 经过多级冷阱 (酒精 + 液氮) 纯化, 读取样品产生的 CO₂ 量, 根据产生的 CO₂ 量计算出样品中 C 的百分含量^[19, 20]。每一层的土壤有机碳总量 TOC (kg ha⁻¹) 计算公式为^[20]:

$$\text{TOC} = 10^4 \times C_s \times h \times \rho \quad (1)$$

式中: C_s 为样品的 C 含量 (%), h 为土壤层厚度 (m), ρ 为土壤容重 (g cm⁻³)。

由于缺乏土壤容重的实测数据, 计算时, 选用亚高山草甸土、亚高山灌丛草甸土的平均容重值, 二者均为 1.20 g/cm³。

3.2.2 土壤根系含量的测定 采用孔径 1 mm 的筛子滤去可见植物根系, 用清水洗净、烘干 (70 °C)、称重得出根系含量^[21], 没有进一步分出当年根和往年根。

上述实验均在中国科学院广州地球化学研究所 ¹⁴C 实验室完成。

4 结果与讨论

4.1 土壤根系生物量的深度分布特征

温带地区的天然草原生态系统具有大量的含纤维根系, 是全球碳平衡预算中的重要碳汇^[22-16]。因此, 研究高寒草甸草原土壤根系生物量及其深度分布具有重要意义。

高寒草甸草原土壤根系含量随深度的分布特征是随深度增加根系含量逐渐减少 (图 2)。0~60 cm 贮存的根系生物量占整个剖面根系生物量的 91.5%~96.05%, 与草原生态系统中大约 90% 的根生物量和 SOC 贮存在 0~60 cm 的结论相一致^[27-29]。但是, 讨论的 4 个土壤剖面因地理位置不同、植被类型有别, 它们的土壤根系生物量及其随深度的变化特征不尽相同: 滩地矮嵩草草甸草毡寒冻锥形土根系生物量为 34121 kg ha⁻¹ (破碎的枯枝叶不易去除, 导致数值偏大), 缓坡地矮嵩草草甸草毡寒冻锥形土为 25745 kg ha⁻¹, 高寒灌丛草甸暗沃寒冻锥形土为 27947 kg ha⁻¹, 燕麦草土壤为 23544.60 kg ha⁻¹; ASC I 剖面、ASC II 剖面表层 (0~10 cm) 根系生物量占剖面根系总量的 67.29%~69.7%, 20 cm 以下根系量显著减少且随深度变化不明显; 相应深度 JLM 剖面根系生物量仅占剖面根系总量的 51.85%, 且随深度变化缓慢减少; YMC 剖面表层根系量较少, 仅占剖面根系总量的 43%, 表层以下至一定深度根系量较多。YMC 土壤根系量随深度的变化趋势与他人研究结果一致^[30]。由于金露梅灌丛的建群种金露梅的根茎较粗, 扎根较深, JLM 土壤根系生物量较高; 矮嵩草草甸多由禾本科植物组成, 其根系多为毛须根, 根茎不发达, 盘结在土壤表层, 根系分解速度较快, 导致根系生物量较低。

比较发现, 研究区 4 个土壤剖面根系生物量的垂直分布特征与北美大平原草原土壤根系生物量的深度分布趋势一致, 但是每一剖面的根系生物量明显高于北美大平原 (混合草原土壤为 12,170 kg ha⁻¹, 种植草地为 9750 kg ha⁻¹)^[21]。显然, 青藏高原高寒草甸土壤有显著的储藏根系生物量功能。

4.2 土壤有机碳储量及其垂直分布特征

土壤碳分为有机碳和无机碳 (以碳酸盐为主) 两类。由于土壤碳酸盐在全球碳循环中的作用不确定, 土壤碳动力学研究中很少考虑无机碳^[31]。土壤有机碳 (SOC) 库的变化主要受初级生产量的输入过程与分解过程的制约。本文 SOC 含量用 C% 来表示。研究区 4 个土壤剖面的有机碳含量均随深度增加而减少 (图 3)。其中 3 个自然土壤剖面 (ASC I 剖面、ASC II 剖面 and JLM 剖面) 表层 (0~10 cm) SOC 贮存量分别是 7.07×10^4 kgCha⁻¹ 或占整个剖面土壤有机碳总量的 32%、 8.16×10^4 kgCha⁻¹ 或 34%、 8.59×10^4 kgCha⁻¹ 或 28%;

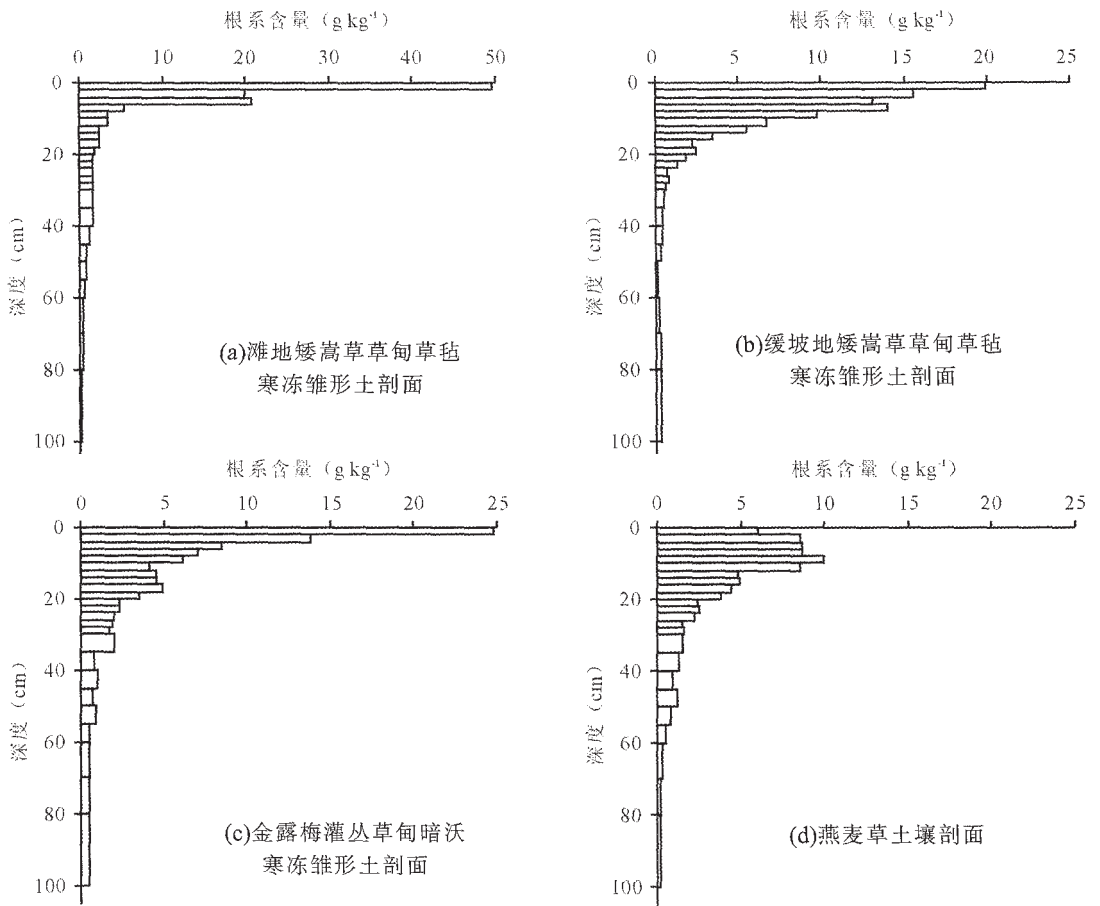


图2 海北站土壤根系含量的深度分布

Fig. 2 Roots content distribution with depth of soils at the Haibei Station

而YMC剖面只有 $5.29 \times 10^4 \text{ kgCha}^{-1}$ 或 17%; 10 cm 以下 ASC I 剖面的 SOC 含量少于 YMC 剖面的相应值, 这是由浅根系的矮嵩草转变为较深根系的燕麦草所致, ASC I 剖面的根系生物量主要集中在土壤表层, 10 cm 以下迅速减少, 而燕麦草土壤表层根系生物量较少, 10~40 cm 根系生物量较多 (图 2)。

环境因子制约 SOC 的贮存。海北站不同环境条件下 SOC 的贮存量有显著差异: 滩地矮嵩草草甸草毡寒冻锥形土 SOC 的贮存量为 $22.12 \times 10^4 \text{ kgCha}^{-1}$, 缓坡地矮嵩草草甸草毡寒冻锥形土为 $24.32 \times 10^4 \text{ kgCha}^{-1}$, 高寒灌丛草甸暗沃寒冻锥形土为 $30.75 \times 10^4 \text{ kgCha}^{-1}$, 燕麦草土壤为 $30.24 \times 10^4 \text{ kgCha}^{-1}$ (图 4), 其中高寒灌丛草甸暗沃寒冻锥形土的 SOC 贮存量最高。这是高寒灌丛草甸土壤根系生物量较高和所在地海拔较高、土壤温度较低 (0~20 cm 整层年平均温度 $1.83 \text{ }^\circ\text{C}$)、土壤湿度较大 (年平均 30%)、冻结时间较长、SOC 分解缓慢等因素综合作用的结果; 而滩地矮嵩草草甸草毡寒冻锥形土地温较高 (0~20 cm 整层年平均温度 $3.15 \text{ }^\circ\text{C}$)、土壤湿度较低 (年平均 28%)^[10]、冻结时间较短、SOC 分解较快, 导致滩地矮嵩草草甸草毡寒冻锥形土 SOC 贮存量较低; 燕麦草土壤表层以下根系生物量较多, SOC 分解缓慢, 翻埋的未分解牛羊粪等共同作用使得燕麦草土壤 SOC 贮存量大于滩地矮嵩草草甸草毡寒冻锥形土壤 SOC 贮存量。

4.3 土壤有机碳储量的比较

比较发现, 研究区土壤的 SOC 贮存量显著大于内蒙古草原土壤的相应值 (图 4)。这

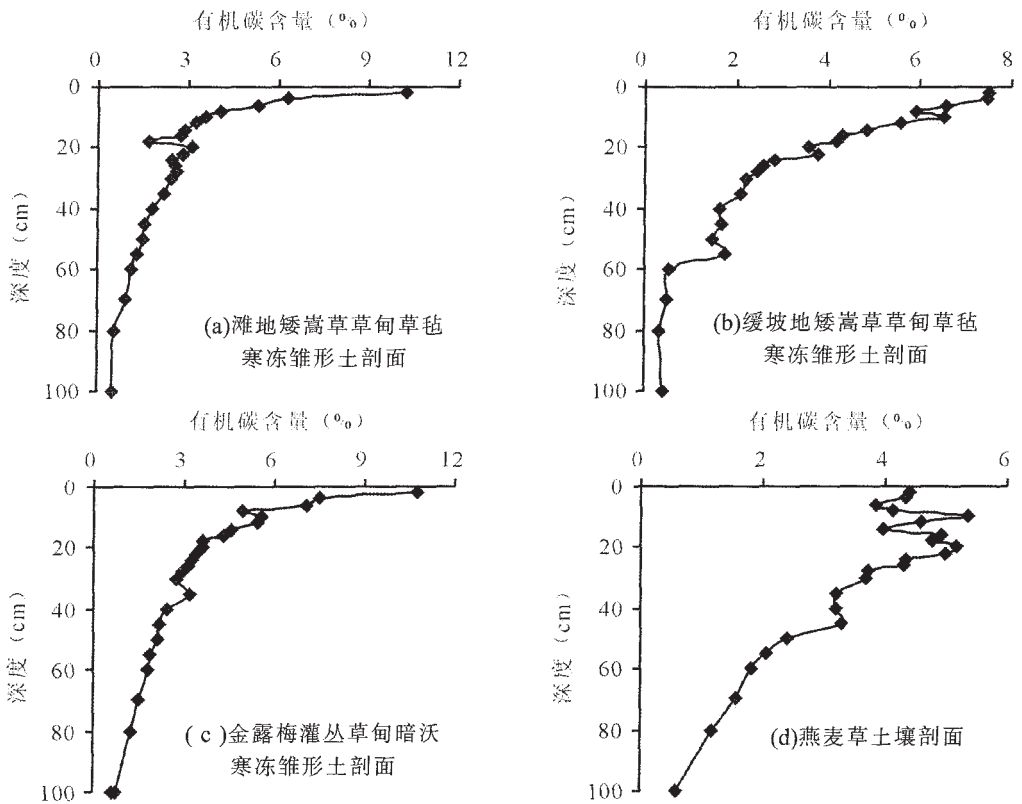


图3 海北站土壤有机碳含量随深度的变化

Fig. 3 Soil organic carbon content distribution with depth at the Haibei Station

是海北站区海拔高，年平均温度较低，土壤相对湿度较大，土壤冻结时间长等自然地理环境有利于土壤有机质的积累；而内蒙古地区干而暖的自然地理环境则促使SOC分解所致。与热带森林、灌丛和草地土壤SOC贮存量比较，高寒草甸土壤0-60 cm，SOC贮存量变化于 $19.07 \times 10^4 \text{ kgCha}^{-1}$ ~ $25.68 \times 10^4 \text{ kgCha}^{-1}$ 之间，平均值为 $23.17 \times 10^4 \text{ kgCha}^{-1}$ ，较相应深度的热带森林土壤 ($11.51 \times 10^4 \text{ kgCha}^{-1}$ ~ $12.45 \times 10^4 \text{ kgCha}^{-1}$)、灌丛土壤 ($3.61 \times 10^4 \text{ kgCha}^{-1}$) 和草地土壤 ($10.27 \times 10^4 \text{ kgCha}^{-1}$) (25年前为热带雨林，森林砍伐后种植热带牧草) 的SOC

贮存量高大约1~5倍多。而且研究区土壤有机碳含量的深度分布特征(图3)与热带森林、灌丛和草地土壤也不同(图5、图6)，相应深度SOC含量较大。进一步证实了青藏高原高寒草甸土壤碳库在中国乃至全球土壤碳库中都占有十分重要的地位。

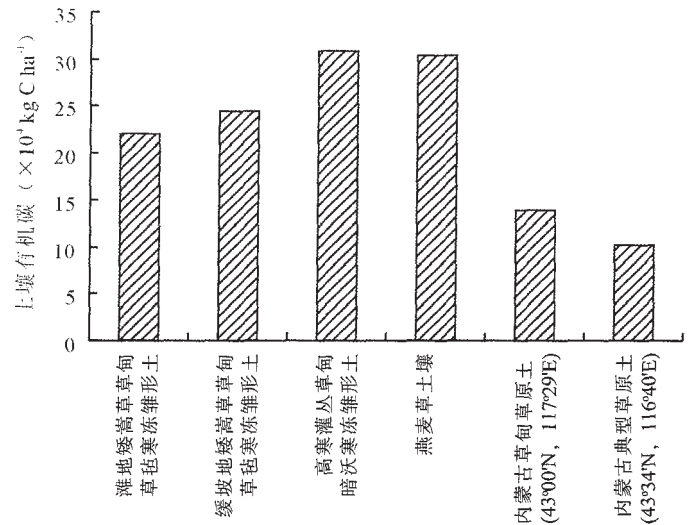


图4 不同植被土壤土壤有机碳(1m)比较

Fig. 4 Comparison of SOC (1 m) in different vegetation soils

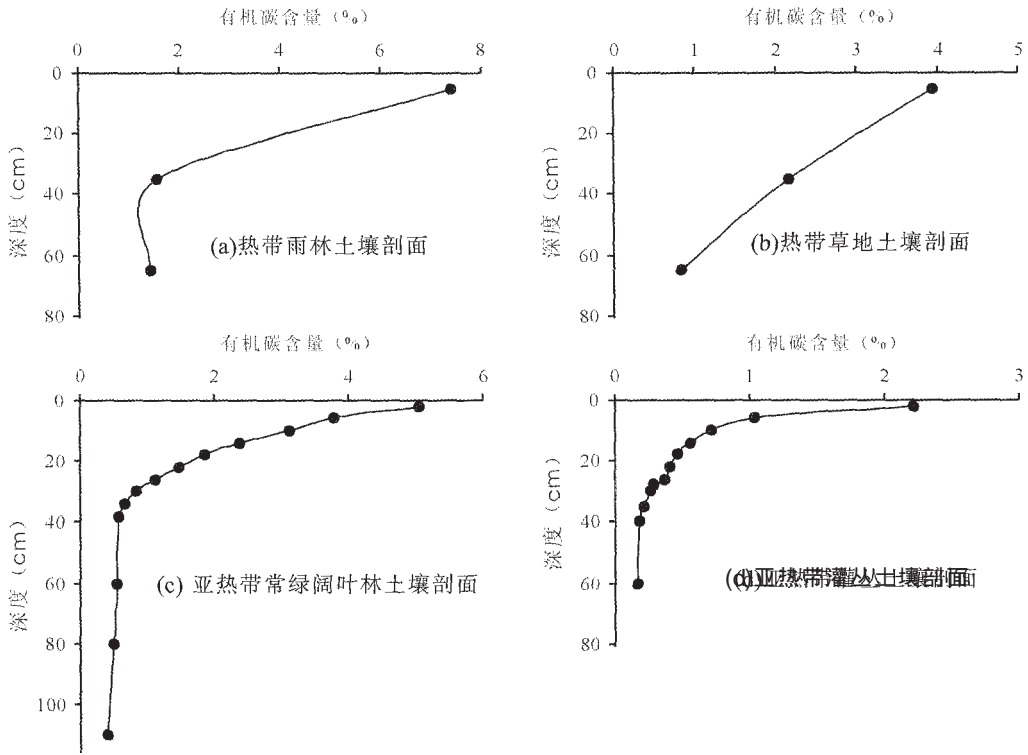


图5 热带不同植被土壤有机碳含量随深度的变化 (数据引自[20, 32])

Fig. 5 Soil organic carbon content distribution in different vegetation soils in the Tropics (data from references [20, 32])

由于 SOC 对气候、土地覆被和土地利用等变化的响应在时间和数量上的复杂性以及缺乏可靠的土壤资料, 至今对全球和我国陆地土壤碳库的估算结果仍具有很大的不确定性 (表2)。不同研究者对我国陆地土壤碳库的估算结果差异较大, 是由于他们计算时所采用的基础资料来源不同导致同一土壤理化性质不同、土壤面积差异、土壤剖面个数相差较多、土壤深度不统一、计算方法有别等因素所致。

根据讨论的 4 个土壤剖面的 SOC 含量, 计算得出海北站高寒草甸土壤平均有机碳贮存量约为 $26.86 \times 10^4 \text{ kgCha}^{-1}$ 。按照高寒草甸面积约占青藏高原各类草地面积 ($1.6027 \times 10^8 \text{ ha}$)^[9] 的 50% 计算, 青藏高原高寒草甸 SOC 贮存量达 21.52 GtC。王根绪等对青藏高原草甸土壤的有机碳含量测算结果得出高寒草甸 SOC 贮存量为 21.29 GtC (65 cm)^[9],

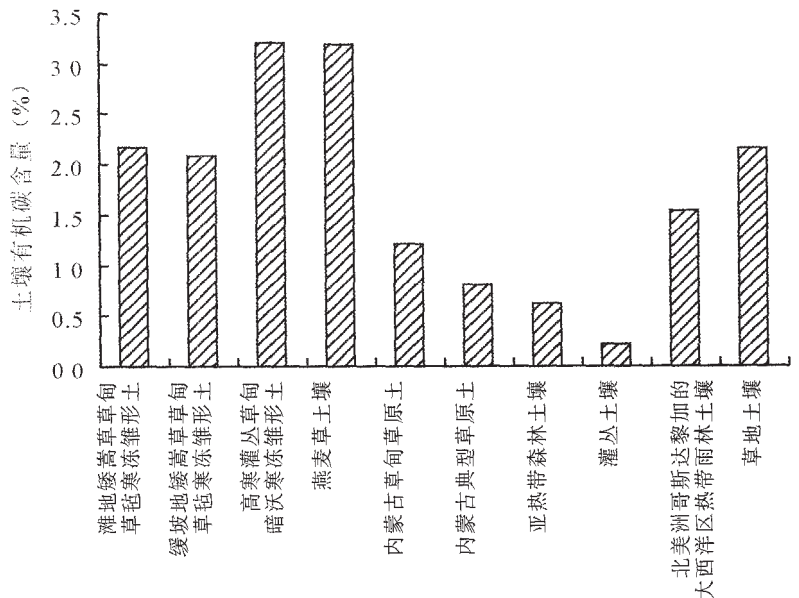


图6 不同地区 SOC 含量的比较 (30~35cm)

Fig. 6 Comparison of SOC content in different study areas (30~35cm)

表 2 全球及中国陆地土壤碳储量估算 (Gt C)

Tab. 2 Estimates of soil carbon storage both of the globe and China

全球	作者 (时间)	中国	作者 (时间)
1500 (1m)	Adams et al. (1990); Anderson (1992); Eswaran et al. (1993); Batjes (1996)	185.70	方精云等 (1996)
1373.2	Foley (1995)	92.40	王绍强等 (2000)
1537.9	King et al (1995)	82.65	李克让等 (2003)
1300	Post et al (1990)	119.75	Ni. J (2001)

二者仅差 1.09%。青藏高原高寒草甸 SOC 贮存量占我国土壤有机碳总储量 (185.7 Gt) 的 10.12%，相当于全球土壤碳库 (1500 GtC) 的 1.25%。而高寒草甸面积仅占全国陆地面积的 7.29%，是全球陆地面积的 0.47%。可见，在全球碳预算研究中，青藏高原高寒草甸 SOC 库不可忽视。高寒草甸是晚新生代青藏高原隆升后，在高寒气候条件下演生的独特的天然植被类型之一。随着全球变暖，表层土壤有机碳分解释放的 CO₂ 将会增加。因此，保护青藏高原脆弱的高寒草甸生态系统及其土壤地表覆被，合理种植深根系植物，对驻留高原土壤碳、减少土壤碳排放、降低全球大气 CO₂ 浓度升高的速度以及可持续开发高寒草甸的生态服务功能都具有重要意义。

5 结论

(1) 高寒草甸土壤有巨大的根系生物量 (23544.60 kg ha⁻¹~27947 kg ha⁻¹)，地下生物量大约是地上生物量的 3~5 倍。土壤根系生物量主要集中在近表层，0~10cm 的根系贮存量大约占剖面根系总量的 51%~67%，20 cm 以下根系量显著减少。燕麦草土壤表层根系量较少，表层以下至一定深度根系量较多。

(2) 青藏高原高寒的气候环境对 SOC 的驻留有积极作用。高寒草甸 SOC 贮存量达 21.52 GtC。植被类型和海拔高度制约土壤有机碳的储量。研究区不同环境条件下土壤有机碳的储量从大到小依次是：高寒灌丛草甸暗沃寒冻锥形土 (30.75 × 10⁴ kgC ha⁻¹) > 燕麦草土壤 (30.24 × 10⁴ kgC ha⁻¹) > 缓坡地嵩草草甸草毡寒冻锥形土 (24.32 × 10⁴ kgC ha⁻¹) > 滩地嵩草草甸草毡寒冻锥形土 (22.12 × 10⁴ kgC ha⁻¹)。

(3) 青藏高原高寒草甸土壤有机碳平均贮存量 (23.17 × 10⁴ kgC ha⁻¹) (0~60 cm) 较相应深度的热带森林土壤、灌丛土壤和草地土壤的有机碳贮存量高约 1~5 倍多，在全球碳预算研究中不可忽视。

(4) 自然土壤表层 (0~10 cm) 储存了整个剖面 SOC 总量的 30% 左右。随着全球变暖，表层土壤有机碳分解释放的 CO₂ 将会增加。因此，保护青藏高原脆弱的高寒草甸生态系统，加强高寒草甸土壤地表覆被的保护，合理种植深根系植物，对驻留高原土壤碳、减少土壤碳排放、降低全球大气 CO₂ 浓度升高的速度以及可持续开发高寒草甸的生态服务功能都具有重要意义。

参考文献 (References)

- [1] Schlesinger W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils. *Nature*, 1990, 348, 232-234.
- [2] Schlesinger W H. An overview of the C cycle. In: Lal R, Kimble J, Levin E et al. (eds.), *Soils and Global Change*. CRC Press, Inc. 1995. 9-26.
- [3] Kimble L R J, Stewart B A. World soils as a source or sink for radiatively-active gases. In: Lal R, Kimble J, Levin E et al. (eds.), *Soils and Global Change*. CRC Press, Inc., 1995. 1-7.
- [4] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J et al. Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 1982, 298: 156-159.
- [5] Trumbore S E. Potential responses of soil organic carbon to global environmental change. In: *Proceedings of the National Academy Science*, 1997, 94: 8284-8291.

- [6] Trumbore S, Chadwick O A, Amundson R. Rapid exchange between soil carbon and atmospheric carbon dioxide driven by temperature change. *Science*, 1996, 272: 393-396.
- [7] Jenkinson D S, Adams D E, Wild A. Model estimates of CO₂ emissions from soil in response to global warming. *Nature*, 1991, 351: 304-306.
- [8] Fang Jingyun, Liu Guohua, Xu Songling. Carbon pool of terrestrial ecosystem in China. In: Wang Gengchen, Wen Yupu (eds.), *Monitoring of Greenhouse Gas Concentration and Emission and Relevant Processes*. Beijing: China Environmental Science Press, 1996. 109-128. [方精云, 刘国华, 徐高岭. 中国陆地生态系统的碳库. 见: 王庚辰, 温玉璞 (eds.), *温室气体浓度和排放监测及相关过程*. 北京: 中国环境科学出版社, 1996. 109-128.]
- [9] Wang Genxu, Cheng Guodong, Shen Yongping. Soil organic carbon pool of grasslands on the Tibetan Plateau and its global implication. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(6): 693-700. [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.]
- [10] Liu Yunfen, Ouyang Hua, Cao Guangmin et al. Soil carbon emission from ecosystems of eastern Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(2): 152-160. [刘允芬, 欧阳华, 曹广民等. 青藏高原东部生态系统土壤碳排放. *自然资源学报*, 2001, 16(2): 152-160.]
- [11] Pei Zhiyong, Ouyang Hua, Zhou Caiping. A study on carbon fluxes from alpine grassland ecosystem on Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(2): 231-236. [裴志永, 欧阳华, 周才平. 青藏高原高寒草原碳排放及其迁移过程研究. *生态学报*, 2003, 23(2): 231-236.]
- [12] Liu Yunfen, Ouyang Hua, Zhang Xianzhou et al. Carbon balance in agro-ecosystem in Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(5): 636-642. [刘允芬, 欧阳华, 张宪洲等. 青藏高原农田生态系统碳平衡. *土壤学报*, 2002, 39(5): 636-642.]
- [13] Zhang X Z, Shi P L, Liu Y F, et al. Experimental study on soil CO₂ emission in the alpine grassland ecosystem on Tibetan Plateau. *Science in China (Series D)*, 2005, 48(suppl. 1): 218-224.
- [14] Zhang Jinxia, Cao Guangmin, Zhou Dangwei et al. Diel and seasonal changes of carbon dioxide emission from mollic-cryic cambisols on degraded grassland. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(1): 32-39. [张金霞, 曹广民, 周党卫等. 退化草地暗沃寒冻雏形土 CO₂ 释放的日变化和季节动态. *土壤学报*, 2001, 38(1): 32-39.]
- [15] Cao Guangmin, Li Yingnian, Zhang Jinxia et al. Values of carbon dioxide emission from different land use patterns of alpine meadow. *Environmental Sciences*, 2001, 22(6): 14-19. [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.]
- [16] Wang Shaoqiang, Zhou Chenghu. Estimating soil carbon reservoir of terrestrial ecosystem in China. *Geographical Research*, 1999, 18(4): 349-356. [王绍强, 周成虎. 中国陆地土壤有机碳库的估算. *地理研究*, 1999, 18(4): 349-356.]
- [17] Zhang Yaosheng, Zhou Xingmin, Wang Qiji. A preliminary analysis of production performance of oat (*Avena sativa*) at alpine meadow pasture. *Acta Agrestia Sinica*, 1998, 16(2): 115-123. [张耀生, 周兴民, 王启基. 高寒牧区燕麦生产性能的初步分析. *草地学报*, 1998, 16(2): 115-123.]
- [18] Li Yingnian, Wang Qinxue, Gu Song et al. Integrated monitoring of alpine vegetation types and its primary production. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(1): 40-48. [李英年, 王勤学, 古松等. 高寒植被类型及其植物生产力的监测. *地理学报*, 2004, 59(1): 40-48.]
- [19] Wang Y, Amundson Ronald. The impact of land use change on C turnover in soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, 13(1): 47-57.
- [20] Veldkamp E. Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1994, 58: 175-180.
- [21] Frank A B. Carbon dioxide fluxes over a grazed prairie and seeded pasture in the Northern Great Plains. *Environmental Pollution*, 2002, 116: 397-403.
- [22] Rastetter E B, McKane R B, Shaver G R. Changes in C storage by terrestrial ecosystems: how C-N interactions restrict responses to CO₂ and temperature. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1992, 64: 327-344.
- [23] Gifford R M. The global carbon cycle. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1994, 21: 1-15.
- [24] Schimel D S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Global Change Biol.*, 1995, 1: 77-91.
- [25] Keeling C D, Chin J F S, Whorf T P. Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO₂ measurements. *Nature*, 1996, 382: 146-149.
- [26] Fan S, Gloor M, Mahlman J et al. A large terrestrial carbon sink in North America implied by atmospheric and oceanic carbon dioxide data and models. *Science*, 1998, 282: 442-446.
- [27] Weaver J E, Hougen V H, Weldon M D. Relation of root distribution to organic matter in prairie soil. *The Botanical Gazette*, 1935, 96(3): 389-420.
- [28] Gill R A. Biotic controls over the depth distribution of soil organic matter. Doctoral Dissertation in Ecology. Colorado State University, Fort Collins, CO., 1998.

- [29] Reeder J D, Schuman G E. Influence of livestock grazing on C sequestration in semi-arid mixed-grass and short-grass rangelands. *Environmental Pollution*, 2002, 116: 457-463.
- [30] Wang Y. The impact of land use change on C turnover in soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, 13(1): 47-57.
- [31] Becker-Heidmann P, Andresen O, Kalmar D et al. Carbon dynamics in vertisols as revealed by high-resolution sampling. *Radiocarbon*, 2002, 44(1): 63-73.
- [32] Chen Q Q, Sun Y M, Shen C D et al. Organic matter turnover rates and CO₂ flux from organic matter decomposition of mountain soil profiles in the subtropical area, south China. *Catena*, 2002, 49: 217-229.
- [33] Adams J M, Faure H, Faure-Denard L et al. Increases interterrestrial carbon storage from the Last Glacial Maximum to the present. *Nature*, 1990, 348: 711-714.
- [34] Anderson J M. Responses of soils to climate change. *Adv. Ecol. Res.*, 1992, 22: 163-210.
- [35] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *Eur. J. Soil Sci.*, 1996, 47: 151-163.
- [36] Eswaran H, van den Berg E, Reich P. Organic carbon in soils of the world. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1993, 57: 192-194.
- [37] Wang Shaoqiang, Zhou Chenghu, Li Kerang et al. Analysis on spatial distribution characteristics of soil organic carbon reservoir in China. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(5): 533-544. [王绍强, 周成虎, 李克让等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析. *地理学报*, 2000, 55(5): 533-544.]
- [38] Li Kerang, Wang Shaoqiang, Cao Mingkui. Vegetation and soil carbon storage in China. *Science in China (Series D)*, 2004, 47(1): 49-57.
- [39] Ni J. Carbon storage in terrestrial ecosystems of China. *Climatic Change*, 2001, 49(3): 339-358.
- [40] Post W M, Peng T H, Emanuel W R et al. The global carbon cycle. *American Scientist*, 1990, 78: 310-326.
- [41] Foley J A. An equilibrium model of the terrestrial carbon budget. *Tellus*, 1995, 47(B): 310-319.
- [42] King A W, Emanuel W R, Wullschlegel S D et al. A search of the missing carbon sink: a model of terrestrial biospheric response to landuse change and atmospheric CO₂. *Tellus*, 1995, 47(B): 501-519.

Soil Organic Carbon Storage and Vertical Distribution of Alpine Meadow on the Tibetan Plateau

TAO Zhen^{1,2}, SHEN Chengde², GAO Quanzhou¹, SUN Yanmin², YI Weixi², LI Yingnian³

(1. School of Geography and Planning, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China;

2. Guangzhou Institute of Geochemistry, CAS, Guangzhou 510640, China;

3. Northwest Institute of Plateau Biology, CAS, Xining 810001, China)

Abstract: The alpine meadow ecosystem is one of the important grassland resources for grazing on the Tibetan Plateau. High-resolution sampling, measurement of roots contents and organic carbon contents of selected soil in Haibei Station were made in an attempt to detect the soil organic carbon storage and vertical distribution of the alpine meadow in the northeast Tibetan Plateau. The results show that considerable magnitude roots biomass (23544.60 kg ha⁻¹-27947 kg ha⁻¹) and organic carbon (21.52 GtC) have been stored in soils of the alpine meadow. Some 30% of total soil organic carbon of natural soil profiles has been stored in the upper horizons (upper 10 cm). Comparison suggests that soil organic carbon storage (23.17 × 10⁴ kg C ha⁻¹) (0-60 cm) is 2-6 folds of that of forest soil, shrub soil and pasture soil in the Tropics. Soil organic carbon pool of the alpine meadow is ignorable in the carbon budget both of the globe and China. With the global warming, it is important to protect flimsy alpine meadow ecosystem on the Tibetan Plateau, not to disturb the soil cover of alpine meadow, and to introduce feasibly deep-rooted plants for storing much more soil organic carbon, for decreasing CO₂ emitting from the soils, for slowing down CO₂ concentration rising rate of the atmosphere, and for sustainable developing ecotype services of the alpine meadow.

Key words: alpine meadow; soil organic carbon; global change; global carbon budget