新疆天山中段巴音布鲁克高山草地碳含量及其垂直分布

安尼瓦尔·买买提^{1,2} 杨元合¹ 郭兆迪¹ 方精云¹

(1 北京大学环境学院生态系, 北京大学地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

(2 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011)

摘 要 对新疆天山中段巴音布鲁克高山草地(高山草原和高山草甸)的生物量和土壤有机碳进行了测定。结果表明积分和分层两种估算方法得到的土壤有机碳含量没有显著差异,但积分算法的优势在于能推算不同深度的土壤有机碳含量,便于与以往的研究进行比较。高山草甸的生物量和土壤有机碳含量均大于高山草原;其地上生物量分别为 71.4 和 94.9 g C·m⁻²,地下生物量分别为 1 033.5 和 1 285.2 g C·m⁻²;1 m 深度的土壤有机碳含量分别为 25.7 和 38.8 kg·m⁻²。地上生物量呈现较为明显的垂直分布格局,即随着海拔的增加,地上生物量先呈增加趋势,但当海拔超过一定界限后生物量突然下降。土壤含水率是导致南坡(阳坡)土壤有机碳含量空间分异的重要因素,但北坡(阴坡)土壤有机碳含量还可能与地形、土壤质地等其它因素有关。两种高山草地(高山草原和高山草甸)的根系集中分布在 40 cm 以内,0~20 cm 根系分别占其总量的 76% 和 80%;土壤有机碳集中分布在 60 cm 以内,0~20 cm 土壤有机碳分别占其总量的 55% 和 49%。高山草原根系分布比高山草甸深,但较低的地下/地上比使得其有机碳分布比高山草甸浅。

关键词 高山草原 高山草甸 生物量 土壤有机碳

CARBON CONTENTS AND ITS VERTICAL DISTRIBUTION IN ALPINE GRASSLANDS IN BAYINBULAK, MIDDLE STRETCH OF THE TIANSHAN MOUNTAINS OF XINJIANG

MOHAMMAT Anwar^{1,2} YANG Yuan-He¹ GUO Zhao-Di¹ and FANG Jing-Yun¹

(1 Department of Ecology, College of Environmental Sciences, and Key Laboratory for Earth Surface Processes of the Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871, China)

(2 Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

Abstract Background and Aims Accurate estimates on the size of terrestrial organic carbon stocks are necessary for understanding their importance in regulating atmospheric CO₂ concentrations. In this paper, biomass and SOC contents in alpine grasslands (alpine steppe and alpine meadow) in Bayinbulak were estimated. In addition, the vertical distribution of belowground carbon was discussed. Our objectives were to (a) estimate biomass and SOC contents of two different alpine grasslands, (b) investigate the root distribution of two alpine grasslands, and (c) explore the vertical distribution of SOC of two alpine grasslands.

Methods SOC content was estimated by an improved method (integral arithmetic method). Based on continuous decrease of SOC density with soil depth, integral arithmetic method could estimate SOC content to a given soil depth.

Key Results There were significant differences in the biomass between the alpine steppe and alpine meadow; aboveground biomass of the alpine steppe was 71.4 g C·m⁻², whereas aboveground biomass of the alpine meadow was 94.9 g C·m⁻²; belowground biomass of the two alpine grasslands was 1 033.5 and 1 285.2 g C·m⁻², respectively. No significant differences were found between integral arithmetic and traditional methods of estimating SOC contents. SOC contents of the alpine meadow was higher than in the alpine steppe; SOC contents in the two alpine grasslands was 25.7 and 38.8 kg·m⁻², respectively. Most of the root biomass of the two alpine grasslands was in the upper 40 cm of the soil profile, while SOC was concentrated in the top 60 cm. The two alpine grasslands had different root distributions; the percentage of root biomass in the top 20 cm averaged 76%–80% for the alpine steppe and alpine meadow. Alpine meadows had a deeper root profile with

only 49% of the SOC in the upper 20 cm , whereas the alpine steppe had 55% of the total SOC in the top 20 cm.

Conclusions This study suggests that vegetation determines the vertical distribution of SOC through root : shoot ratio and its vertical root distribution.

Key words Alpine steppe , Alpine meadow , Biomass , Soil organic carbon

陆地生态系统碳库是估算陆地生态系统吸收和排放含碳气体的关键要素(Valentini *et al.* , 2000)。准确估算陆地生态系统碳库对于评估其碳通量大小、预测全球气候变化具有重要意义(Garnett *et al.* , 2001)。地面观测(Fang *et al.* , 2001 ; Pacala *et al.* , 2001 ; Goodale & Davidson , 2002)和遥感估算(Myneni *et al.* , 2001)的结果一致表明 , 北半球中高纬度的陆地生态系统是个重要的碳汇。作为陆地生态系统最大的有机碳库 , 土壤碳库的估算在全球(Post *et al.* , 1982 ; Batjes , 1996)、国家(Kern , 1994 ; Fang *et al.* , 1996 ; Wang *et al.* , 2003 ; Wu *et al.* , 2003)和区域(Li & Zhao , 2001)尺度上都有开展。但是 , 地面观测数据的缺乏和生态系统的异质性使得当前碳库估算结果仍具有很大不确定性(Garnett *et al.* , 2001)。

根系是连接生态系统地上与地下过程的纽带(Trumbore & Grandinski , 2003) , 准确认识其垂直分布对于理解和预测生态系统功能具有重要意义(Jackson *et al.* , 1996)。Jackson 等(1996)利用已经发表的 250 个根系研究结果 , 对比了不同生物群区和不同植被功能型根系的垂直分布。结果显示 , 苔原、北方森林和温带草地根系分布最浅 , 而荒漠和温带针叶林根系分布最深 ; 总体上 , 全球 10、20、40 cm 深的根系分别占总根系的 30%、50% 和 75%。随着地下生态学的兴起 , 根系周转率、根系垂直分布格局等根系参数的地理分异及其与控制因子(如温度、降水、土壤等) 的关系已成为根系生物地理学的重要内容(He *et al.* , 2004)。另一方面 , 土壤有机碳的垂直分布已成为生态学家关注的问题(Jobbágy & Jackson , 2000)。Jobbágy 和 Jackson (2000) 利用 3 个全球土壤数据库研究了土壤有机碳含量与气候、质地的关系 , 验证了植被类型是土壤有机碳垂直分布控制因子的假说。结果表明 , 随着土壤深度的增加 , 土壤有机碳含量与气候的关系逐渐减弱 , 而与质地的关系逐渐增强 ; 灌丛、草原和森林 0 ~ 20 cm 土壤有机碳分别占其总量的 33%、42% 和 50% , 即灌丛的有机碳分布最深 , 草原次之 , 森林最浅。

截止目前 , 国内学者在植被碳库(Fang *et al.* , 2001 ; Luo *et al.* , 2002 ; Li *et al.* , 2003 ; Ni , 2004 ; 朴世龙等 , 2004 ; Zhou *et al.* , 2002) 和土壤碳库

(Fang *et al.* , 1996 ; Li *et al.* , 2003 ; 王绍强和周成虎 , 1999 ; 王绍强等 , 2000 , 2003 ; Wang *et al.* , 2003 ; Wu *et al.* , 2003) 方面做了大量工作 , 但对于根系和土壤有机碳(Wang *et al.* , 2004) 的垂直分布研究甚少。位于天山腹地的巴音布鲁克草原是我国仅次于鄂尔多斯的第二大草原(王恺等 , 2003) , 准确估算其碳含量大小、了解其碳含量的垂直分布对我国草地碳循环研究具有重要的科学意义。本文利用实测的生物量和土壤有机碳数据 , 试图揭示 : 1) 积分和分层两种方法估算的土壤有机碳含量的差异 ; 2) 该地区两种草地类型(高山草原、高山草甸) 的碳含量是否存在差异 ; 3) 两种草地类型的根系垂直分布有何区别 ; 4) 两种草地类型的土壤有机碳垂直分布如何。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

本研究于 2004 年 7 ~ 8 月在中国科学院新疆生态与地理研究所巴音布鲁克草原生态系统定位研究站进行。地处 42°54' N , 83°43' E , 天山中段大尤尔都斯盆地。气候属典型的高寒气候 , 冷季漫长 , 暖季短暂 , 年均温 - 4.8 °C , 1 月最低温可达 - 48 °C , 7 月最高温可达 30.5 °C , 年降水量约 276.2 mm , 年蒸发量高达 1 022.9 ~ 1 247.5 mm , 全年积雪日达 150 ~ 180 d , 无绝对无霜期。植被类型多样 , 主要包括高山沼泽草甸、亚高山草原、亚高山草甸化草原、亚高山草原化草甸、亚高山草甸、高山草甸 , 相应的土壤类型为高山沼泽土、亚高山草原土、亚高山草甸化草原土、亚高山草原化草甸土、亚高山草甸土、高山草甸土(叶尔道来提等 , 1989)。

1.2 野外采样

自盆地底部(海拔 2 460 m) 向两面山坡 , 海拔每升高 100 m 设置 1 个样地 , 直至草甸的分布上限(海拔 3 470 m) , 共设置 20 个样地。在每个样地 , 设置 1 个大样方(10 m × 10 m) , 在大样方四角及中心部位各设置 1 个小样方(1 m × 1 m) , 共计 5 个 , 调查每个小样方内出现的物种及其高度、盖度 , 并记录样地经纬度、海拔、坡度和坡向等。将 5 个小样方内植物地上部分全部剪下 , 除去粘附的土壤、砾石等杂质后

全部带回实验室分析。每个样地挖 1 个土壤剖面，利用环刀分层（0~10、10~20、20~30、30~40、40~50、50~60 cm）采集用于测定容重的土样，同时分层采集用于分析有机碳的土样。此外，在每处样地设置 1 个小样方（20 cm × 20 cm），用于测定地下生物量。将地上部分齐地面刈割后，每 10 cm 为 1 层采集地下生物量，共取 6 层；将带根的土块在河水中浸泡 1~2 d，然后将其放置于 100 目土壤筛中用水冲洗。

1.3 室内分析

地上生物量在 65 ℃ 条件下烘干至恒重，将野外处理过的根系在实验室内再次冲洗，然后在 65 ℃ 条件下烘干至恒重。在 105 ℃ 条件下土样烘干至恒重，并测定容重和其中 > 2 mm 的砾石含量；用于测定有机碳浓度的风干土样，四分法取样后挑去其中 > 2 mm 的砾石，并使其全部通过 2 mm 土壤筛，然后挑去其中的根系，最后利用 Retsch S100 球磨机粉碎，并使其全部通过 100 目土壤筛。采用重铬酸钾外加热氧化法测定土壤有机质浓度，同时测定土壤含水率（鲍士旦等，2000）。

1.4 数据处理

1.4.1 生物量

5 个小样方地上生物量求平均得到每个样地的地上生物量。在此基础上计算得到两种草地类型（高山草原、高山草甸）的地上生物量平均值和标准误。同时，利用样地的地下生物量计算得到两种草地类型的地下生物量平均值和标准误。本文使用转换系数（0.45）将生物量统一以碳（g C·m⁻²）的形式表示。

1.4.2 土壤有机碳

考虑到土壤有机碳含量随深度的垂直变化（Jobbágy & Jackson，2000），采用积分方法计算了每个土壤剖面的有机碳含量（kg C·m⁻²）。首先计算每层的有机碳含量（g·cm⁻³）（公式 1），在此基础上建立有机碳含量与深度的函数关系，并积分计算整个剖面的有机碳含量（式 2）。

$$SOCD_i = 0.58 \times \rho_i \times M_i \times (1 - C_i) / 10 \tag{1}$$

式中，0.58 为 Bemmelen 系数（将有机质浓度转化为有机碳浓度）， ρ_i ， M_i ， C_i 分别表示第 i 层土壤容重（g·cm⁻³）、有机质密度（%）、> 2 mm 的砾石含量（%）， $SOC D_i$ 为第 i 层土壤有机碳含量（g·cm⁻³）。

$$SOCC = \int_{h_{i-1}}^{h_i} SOCD(h) dh \times (h_i - 1) \tag{2}$$

式中， h 表示土壤深度（cm）， $SOC D(h)$ 为土壤有机碳含量与深度的函数关系， $SOCC$ 为土壤有机碳含

量（kg·m⁻²）。

为了和传统的分层算法比较，我们还采用分层方法计算了每个土壤剖面的有机碳含量（公式 3）。

$$SOCC = \sum_{i=1}^n 0.58 \times T_i \times \rho_i \times M_i \times (1 - C_i) / 10 \tag{3}$$

式中， n 为剖面层数，0.58 为 Bemmelen 系数（将有机质含量转化为有机碳含量）， T_i ， ρ_i ， M_i ， C_i 分别表示第 i 层土层厚度（cm）、土壤容重（g·cm⁻³）、有机质含量（%）、> 2 mm 的砾石含量（%）， $SOCC$ 为土壤有机碳含量（kg·m⁻²）（Wu *et al.*，2003）。

1.4.3 根系和土壤有机碳的垂直分布

建立根系生物量与深度的函数关系，用于推算不同深度的根系生物量。为了定量表述根系和土壤有机碳的垂直分布情况，将土壤剖面划分为 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 5 个层次，并分别计算每层的根系生物量和土壤有机碳。同时，采用 0~20 cm 的根系生物量和土壤有机碳分别占其总量（1 m 深度）的百分比来表示根系和土壤有机碳的垂直分布，即 0~20 cm 占的比例越高，意味着根系或土壤有机碳分布越浅；反之越深。

2 结果与分析

2.1 不同方法估算的土壤有机碳含量差异

土壤有机碳含量不仅是统计土壤有机碳储量的重要参数，也是反映土壤特性的重要指标（金峰等，2001）。为了比较分层和积分两种土壤有机碳含量计算方法的差异，我们给出了分层和积分的土壤有机碳含量计算结果（图 1）。从图中可以看出，两种

图 1 分层和积分计算的土壤有机碳含量

Fig.1 Soil organic carbon content calculated by two methods
横轴为分层方法计算的有机碳含量，纵轴为积分方法计算的有机碳含量
Horizontal axis: organic carbon content calculated by layered method, vertical axis: organic carbon content calculated by integral method

算法得到的土壤有机碳含量没有显著差异。传统的分层算法将土壤剖面划分为若干层次,并分别计算各层的土壤有机碳含量,最后求和得到整个剖面的土壤有机碳含量(Wu *et al.*, 2003)。分层算法由于没有考虑到土壤有机碳含量随深度的垂直变化,无法估算特定深度的土壤有机碳含量。相反地,积分算法基于土壤有机碳含量和土壤深度的函数关系,能够估算任意深度的土壤有机碳含量。在积分算法中,一些学者主张分别建立土壤有机碳浓度和土壤容重与土壤深度的函数关系(金峰等, 2001),也有学者倾向于直接建立土壤有机碳含量与土壤深度的函数关系(Jobbágy & Jackson, 2000)。一方面,土壤容重与深度的函数关系往往并不显著;另一方面,曲线拟合存在残差,减少拟合次数可以提高估算精度。鉴于上述原因,我们直接建立了土壤碳含量与土壤深度的函数关系,并利用积分算法估算了土壤有机碳含量。分层和积分算法的对比表明,两种方法得到的土壤有机碳含量没有显著差异(图 1)。但积分算法的优势在于能推算不同深度的土壤有机碳含量,便于与以往的研究进行比较;其不足之处在于少数剖面土壤有机碳含量与深度的函数关系不显著,

只能分层计算。

2.2 不同草地类型碳含量的差异

表 1 给出了样地水平的生物量(地上、地下)和土壤有机碳含量(0~60 cm)。为了和其它研究结果对比,我们利用积分算法还计算了表层(0~30 cm)和 1 m 深度的土壤有机碳含量(表 1)。从表中可以看出,地上生物量最大的是位于盆地底部的高山沼泽草甸(143.4 g C·m⁻²),最小的是分布在南坡(阳坡)的亚高山草甸(47.2 g C·m⁻²)。地下生物量最大的是位于盆地底部的高山沼泽草甸(2 107.1 g C·m⁻²),最小的是分布在南坡(阳坡)的亚高山草原化草甸(752.6 g C·m⁻²)。土壤碳含量(0~100 cm)最大的是位于阳坡的亚高山草甸(50.2 kg·m⁻²),最小的是位于阳坡的亚高山草原(11.8 kg·m⁻²)。图 2 给出了地上生物量随海拔的变化趋势。从图 2 中可以看出,地上生物量呈现较为明显的垂直分布格局,即随着海拔的增加,地上生物量呈增加趋势,但是,海拔超过一定界限后生物量突然下降。为了解释不同样地土壤有机碳含量的空间分异,我们分析了土壤有机碳含量与土壤含水率的关系(图 3)。从图 3 中可以看出,南坡(阳坡)土壤有机碳含量与其含水

表 1 巴音布鲁克高山草地生物量和土壤有机碳含量
Table 1 Biomass and soil organic carbon content of alpine grassland in Bayinbulak

样地号 Plot No.	海拔(m) Altitude	坡向 Aspect	群落类型 Community type	生物量 Biomass (g C·m ⁻²)		土壤有机碳含量 (kg·m ⁻²) Soil organic carbon content		
				地上 Shoot	地下 Root	0 ~ 30 cm	0 ~ 60 cm	0 ~ 100 cm
P1	2 470	无 No	亚高山草原 ⁴⁾	58.1	871.3	13.5	19.2	22.1
P2	2 570	阳坡 ¹⁾	亚高山草原 ⁴⁾	60.4	1 006.6	12.3	15.0	15.7
P3	2 670	阳坡 ¹⁾	亚高山草原 ⁴⁾	65.6	1 020.7	9.7	11.4	11.8
P4	2 770	阳坡 ¹⁾	亚高山草原 ⁴⁾	70.3	893.2	12.0	15.7	16.7
P5	2 870	阳坡 ¹⁾	亚高山草原 ⁴⁾	74.2	777.4	9.8	12.1	
P6	2 970	阳坡 ¹⁾	亚高山草甸化草原 ⁵⁾	81.7	1 737.6	29.0	37.0	39.5
P7	3 070	阳坡 ¹⁾	亚高山草甸 ⁶⁾	89.4	1 369.6	27.1	40.3	50.2
P8	3 170	阳坡 ¹⁾	亚高山草甸 ⁶⁾	99.7	1 060.2	26.3	35.3	37.7
P9	3 270	阳坡 ¹⁾	亚高山草甸 ⁶⁾	107.1	1 172.8	21.8	32.1	39.4
P10	3 370	阳坡 ¹⁾	亚高山草甸 ⁶⁾	81.6	1 265.4	16.5	26.7	
P11	3 470	阳坡 ¹⁾	亚高山草甸 ⁶⁾	75.6	1 009.5	15.8	20.0	21.3
P12	2 570	阴坡 ²⁾	亚高山草甸化草原 ⁵⁾	89.7	928.0	25.4	38.3	48.4
P13	2 670	阴坡 ²⁾	亚高山草原化草甸 ⁷⁾	97.3	1 274.2	19.7	28.3	
P14	2 770	半阴坡 ³⁾	亚高山草原化草甸 ⁷⁾	94.8	752.6	30.6	35.1	36.1
P15	2 870	半阴坡 ³⁾	高山草甸 ⁸⁾	105.5	1 273.5	24.2	37.0	47.5
P16	2 970	半阴坡 ³⁾	高山草甸 ⁸⁾	118.4	1 531.1	19.1	25.4	27.7
P17	3 070	半阴坡 ³⁾	高山草甸 ⁸⁾	123.9	1 724.6	19.9	32.7	
P18	3 170	阴坡 ²⁾	亚高山草甸 ⁶⁾	49.5	1 289.9	27.1	39.2	45.6
P19	3 270	阴坡 ²⁾	亚高山草甸 ⁶⁾	47.2	876.5	22.8	34.6	44.0
P20	2 460	无 No	高山沼泽草甸 ⁹⁾	143.4	2 107.1	17.7	28.2	

1) Sun slope 2) Shade slope 3) Semi-shade slope 4) Subalpine steppe 5) Subalpine meadow steppe 6) Subalpine meadow 7) Subalpine steppe meadow 8) Alpine meadow 9) Alpine swamp meadow

图2 地上生物量沿海拔梯度的变化
Fig.2 Changes in aboveground biomass along an altitudinal gradient
A : 南坡 Southern slope B : 北坡 Northern slope

图3 土壤有机碳含量与土壤含水率的关系
Fig.3 Relationship between soil organic carbon content and soil moisture
A ,B : 同图2 See Fig.2

率显著正相关,土壤含水率能解释南坡(阳坡)土壤有机碳含量变异的66%。这意味着水分条件是导致南坡(阳坡)土壤有机碳含量空间差异的重要因素。然而,土壤含水率仅能解释北坡(阴坡)土壤有机碳含量变异的17%,这意味着北坡(阴坡)土壤有机碳含量还可能与地形、土壤质地等其它因素有关。

为了比较不同草地类型生物量和土壤有机碳含量的差异,我们将20个样地划分为两种草地类型(高山草原、高山草甸),并分别计算了每种类型的生物量和土壤有机碳含量(图4)。从图中可以看出,高山草甸的生物量和土壤有机碳含量均大于高山草原。两种高山草地的地上生物量分别为:高山草原($71.4 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$)、高山草甸($94.9 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$),均高于全国草地地上生物量平均值($44.1 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$) (朴世龙等,2004),这意味着高山草地在我国草地植被中

占有重要地位。两种高山草地的地下生物量分别为:高山草原为 $1\,033.5 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ 、高山草甸为 $1\,285.2 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ 。李英年等(2003)曾报道小嵩草高寒草甸、矮嵩草高寒草甸地下生物量分别为 819.5 、 $928.6 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ 。可以看出,我们的结果与李英年等(2003)的结果是可以比较的。两种高山草地的土壤有机碳含量($0 \sim 100 \text{ cm}$)分别为:高山草原($25.7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)、高山草甸($38.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$),均高于全国土壤有机碳含量的平均水平(高山草原土: $7.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$;高山草甸土: $9.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) (Wu *et al.*, 2003)。Garrett等(2001)在已经发表的NPP数据基础上,结合部分实测资料估算了英国沼泽生态系统碳库,并检验了基于清查资料估算的碳库准确性。结果显示,利用实测数据与基于清查资料估算的植被碳库接近,但土壤碳库相差较大。我们的结果显示,巴音布鲁

克高山草地土壤有机碳含量显著高于全国平均值。若用全国平均值来估算巴音布鲁克高山草地土壤有机碳库,势必会产生很大误差。此外,第二次全国土壤普查采样量不够大、分布不均匀(尤其是西部地区)使得当前土壤碳库的估算仍具有很大不确定性。

图4 巴音布鲁克高山草地地上生物量、地下生物量
和土壤有机碳含量

Fig.4 Aboveground biomass, belowground biomass and soil organic carbon
content of alpine grassland in Bayinbulak

2.3 不同草地类型根系和土壤有机碳的垂直分布

图5给出了两种高山草地(高山草原、高山草甸)根系和土壤有机碳的垂直分布。从图中可以看出,高山草原0~20 cm根系占其总量的76%,0~40 cm根系占其总量的93%;高山草甸0~20 cm根系占其总量的80%,0~40 cm根系占其总量的92%。可以看出,高山草地的根系集中分布在40 cm以上;并且,高山草原的根系比高山草甸分布更深。高山

草原0~20 cm土壤有机碳占其总量的55%,0~60 cm土壤有机碳占其总量的90%;高山草甸0~20 cm土壤有机碳占其总量的49%,0~60 cm土壤有机碳占其总量的87%。这意味着两种高山草地的有机碳集中分布在60 cm以上;并且,高山草甸的有机碳比高山草原分布更深。上述结果表明,两种草地类型根系和土壤有机碳的垂直分布不同,并且根系比土壤有机碳分布更浅,这与Jackson等(1996)、Jobbágy和Jackson(2000)在全球尺度上得出的结论一致。根系的垂直分布受植物生活型、气候以及土壤的控制(Schenk & Jackson, 2002)。高山草原比高山草甸根系分布更深(图5),这与Schenk和Jackson(2002)在全球尺度上得到的结果一致。Schenk和Jackson(2002)在全球尺度上的研究显示,沿着水分梯度,从草甸、普列利草原(Prairie)到半干旱草原,根系分布越来越深。植被类型是土壤有机碳垂直分布的控制因子,根系垂直分布和地下/地上比的差异决定了土壤有机碳垂直分布的差异(Jobbágy & Jackson, 2000)。虽然高山草原根系比高山草甸分布更深,但其有机碳却比高山草甸分布更浅(图5)。已有的研究表明,高山草原的地下/地上比(4.25)小于高山草甸(7.92)(李文华和周兴民,1998)。不难理解,尽管高山草原根系分布更深,但较低的地下/地上比使其有机碳分布较浅。我们的结果还显示,两种草地类型根系比土壤有机碳分布更浅,这与Jobbágy和Jackson(2000)在全球尺度上得到的结果一致。导致根系比土壤有机碳分布更浅的可能原因有:1)有机碳周转率随深度增加而下降,使得深层有机碳积累;2)淋溶作用使得表层有机碳向下转移;3)土壤有机体的垂直混合作用使得表层有机碳在下层富集(Jobbágy & Jackson, 2000)。

3 结 论

通过对新疆天山中段巴音布鲁克高山草地生物量和土壤有机碳含量的研究,得出如下结论:

1) 基于样地水平的生物量分析表明,随着海拔的增加,地上生物量呈增加趋势。但是,海拔超过一定界限后生物量突然下降。基于样地水平的土壤有机碳含量分析表明,土壤含水率能解释南坡(阳坡)土壤有机碳含量变异的66%。这意味着水分条件是导致南坡(阳坡)土壤有机碳含量空间差异的重要因素。然而,土壤含水率仅能解释北坡(阴坡)土壤有机碳含量变异的17%,这意味着北坡(阴坡)土壤有机碳含量还可能与地形、土壤质地等其它因素有

图 5 巴音布鲁克高山草地根系 (A、B) 和土壤有机碳 (C、D) 的垂直分布
Fig.5 Vertical distribution of root (A, B) and soil organic carbon (C, D) of alpine grassland in Bayinbulak

关。

2) 基于草地类型的生物量和土壤有机碳含量分析表明,高山草甸的生物量和土壤有机碳含量均大于高山草原。两种高山草地的地上生物量分别是:高山草原为 $71.4 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ 、高山草甸为 $94.9 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ 。两种高山草地的地下生物量分别为:高山草原为 $1\,033.5 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ 、高山草甸为 $1\,285.2 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ 。积分和分层两种估算方法得到的土壤有机碳含量没有显著差异;两种高山草地(高山草原、高山草甸)1 m 深度的土壤有机碳含量分别为 25.7 、 $38.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

3) 两种高山草地(高山草原、高山草甸)的根系集中分布在 40 cm 以内,土壤有机碳集中分布在 60 cm 以内;0~20 cm 根系分别占其总量的 76% 和 80%, 0~20 cm 土壤有机碳分别占其总量的 55% 和 49%。高山草原比高山草甸根系分布更深,这与 Schenk 和 Jackson(2002)在全球尺度上得出的结论一致。尽管高山草原根系分布更深,但较低的地下/地上比使其有机碳分布较浅。此外,两种草地类型根系比土壤有机碳分布更浅,这与 Jobbágy 和 Jackson(2000)在全球尺度上得到的结果一致。

参 考 文 献

Bao SD(鲍士旦), Jiang RF(江荣风), Yang CG(杨超光), Xu GH(徐国华), Han XR(韩晓日) (2000). *Soil and Agricultural Chemistry Analysis* (土壤农化分析). China Agriculture Press, Beijing. (in Chinese)

Batjes NH (1996). Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 47, 151 – 163.

Erdawlat (叶尔道来提), Merey (麦来), Adil (阿得勒) (1989). Analysis on environmental condition and suitable utilization of grassland in Bayinbulak. *Arid Zone Research* (干旱区研究), 6(Suppl.), 5 – 21. (in Chinese)

Fang JY, Chen AP, Peng CH, Zhao SQ, Ci LJ (2001). Changes in forest biomass carbon density in China between 1949 and 1998. *Science*, 292, 2320 – 2322.

Fang JY, Liu GH, Xu SL (1996). Soil carbon pool in China and its global significance. *Journal of Environmental Sciences*, 8, 249 – 254.

Garnett MH, Ineson P, Stevenson AC, Howard DC (2001). Terrestrial organic carbon density in a British moorland. *Global Change Biology*, 7, 375 – 388.

Goodale CL, Davidson EA (2002). Uncertain sinks in the shrubs. *Nature*, 418, 593 – 594.

He JS, Wang ZQ, Fang JY (2004). Issues and prospects of below-ground ecology with special reference to global climate change.

- Chinese Science Bulletin*, 49, 1891 – 1899.
- Jackson RB, Canadell J, Ehleringer JR, Mooney HA, Sala OE, Schulze ED (1996). A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia*, 108, 389 – 411.
- Jin F (金峰), Yang H (杨浩), Cai ZC (蔡祖聪), Zhao QG (赵其国) (2001). Calculation of density and reserve of organic carbon in soils. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 8, 522 – 528. (in Chinese with English abstract)
- Jobbágy EG, Jackson RB (2000). The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 10, 423 – 436.
- Kern JS (1994). Spatial patterns of soil organic carbon in the contiguous United States. *Soil Science Society of America Journal*, 59, 1134 – 1141.
- Li KR, Wang SQ, Cao MK (2003). Vegetation and soil carbon density in China. *Science in China*, Series D, 33, 72 – 80.
- Li WH (李文华), Zhou XM (周兴民) (1998). *Ecosystems of Qinghai-Xizang(Tibetan) Plateau and Approach for Their Sustainable Management* (青藏高原生态系统及优化利用模式). Guangdong Science & Technology Press, Guangzhou. (in Chinese)
- Li YN (李英年), Zhao XQ (赵新全), Wang QX (王勤学), Gu S (古松), Du MY (杜明远), Tomomichi K (加藤知道), Wang QL (王启兰), Zhao L (赵亮) (2003). The comparison of community biomass and environmental condition of five vegetation types in alpine meadow of Haibei, Qinghai Province. *Journal of Mountain Science* (山地学报), 21, 257 – 264. (in Chinese with English abstract)
- Li Z, Zhao QG (2001). Organic carbon content and distribution in soils under different land uses in tropical and subtropical China. *Plant and Soil*, 231, 175 – 185.
- Luo TX, Li WH, Zhu HZ (2002). Estimated biomass and productivity of natural vegetation on the Tibetan Plateau. *Ecological Applications*, 12, 980 – 997.
- Myneni RB, Dong J, Tucker CJ, Kaufmann RK, Kauppi PE, Liski J, Zhou L, Alexeyev V, Hughes MK (2001). A large carbon sink in the woody biomass of Northern forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 98, 14784 – 14789.
- Ni J (2004). Forage yield-based carbon density in grasslands of China. *Climatic Change*, 67, 237 – 246.
- Pacala SW, Hurtt GC, Baker D, Peylin P, Houghton RA, Birdsey RA, Heath L, Sundquist ET, Stallard RF, Ciais P, Moorcroft P, Caspersen JP, Shevliakova E, Moore B, Kohlmaier G, Holland E, Gloor M, Harmon ME, Fan SM, Sarmiento JL, Goodale CL, Schimel D, Field CB (2001). Consistent land- and atmosphere-based U.S. carbon sink estimates. *Science*, 292, 2316 – 2320.
- Piao SL (朴世龙), Fang JY (方精云), He JS (贺金生), Xiao Y (肖玉) (2004). Spatial distribution of grassland biomass in China. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 28, 491 – 498. (in Chinese with English abstract)
- Post WM, Emanuel WR, Zinke PJ, Stangenberger AG (1982). Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 298, 156 – 159.
- Schenk HJ, Jackson RB (2002). The biogeography of roots. *Ecological Monographs*, 72, 311 – 328.
- Trumbore SE, Grandinski JB (2003). The secret lives of roots. *Science*, 302, 1344 – 1345.
- Valentini R, Matteucci G, Dolman AJ, Schulze ED, Rebmann C, Moors EJ, Granier A, Gross P, Jensen NO, Pilegaard K, Lindroth A, Grelle A, Bernhofer C, Grunwald T, Aubinet M, Ceulemans R, Kowalski AS, Vesala T, Rannik U, Berbigier P, Loustau D, Guomundsson J, Thorgeirsson H, Ibrom A, Morgenstern K, Clement R, Moncrieff J, Montagnani L, Minerbi S, Jarvis PG (2000). Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature*, 404, 861 – 865.
- Wang K (王恺), Ma JZ (马建章), Zhang GL (张观礼), Liu YK (刘玉凯), Song CS (宋朝枢) (2003). *National Nature Reserve in China* (中国国家级自然保护区). Anhui Science & Technology Press, Hefei. (in Chinese)
- Wang SQ (王绍强), Liu JY (刘纪远), Yu GR (于贵瑞) (2003). Error analysis of estimating terrestrial soil organic carbon density in China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 14, 797 – 802. (in Chinese with English abstract)
- Wang SQ (王绍强), Zhou CH (周成虎) (1999). Estimating soil carbon reservoir of terrestrial ecosystem in China. *Geographical Research* (地理研究), 18, 349 – 356. (in Chinese with English abstract)
- Wang SQ (王绍强), Zhou CH (周成虎), Li KR (李克让), Zhu SL (朱松丽), Huang FH (黄方红) (2000). Analysis on spatial distribution characteristics of soil organic carbon reservoir in China. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 55, 533 – 544. (in Chinese with English abstract)
- Wang SQ, Huang M, Shao XM, Mickler RA, Li KR, Ji JJ (2004). Vertical distribution of soil organic carbon in China. *Environmental Management*, 33 (Suppl.), doi: 10.1007/s00267-003-9130-5.
- Wang SQ, Tian HQ, Liu JY, Pan SF (2003). Pattern and change of soil organic carbon density in China: 1960s – 1980s. *Tellus*, 55B, 416 – 427.
- Wu HB, Guo ZT, Peng CH (2003). Distribution and storage of soil organic carbon in China. *Global Biogeochemical Cycles*, 17, doi: 10.1029/2001GB001844.
- Zhou GS, Wang YH, Jiang YL, Yang ZY (2002). Estimating biomass and net primary production from forest inventory data: a case study of China's *Larix* forests. *Forest Ecology and Management*, 169, 149 – 157.