

# 青海高寒区域金露梅灌丛草甸灌木和草本植物固碳量的比较

李红琴<sup>1,2</sup>, 宋成刚<sup>3</sup>, 张法伟<sup>1,2</sup>, 李英年<sup>1,2</sup> <sup>①</sup>

(1. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810001; 2. 中国科学院高原生物适应与进化重点实验室, 青海 西宁 810001;  
3. 青海省工程咨询中心, 青海 西宁 810001)

**摘要:** 以青海海北高寒区域金露梅 (*Potentilla fruticosa* Linn.) 灌丛草甸为研究对象, 分析了6月至9月金露梅灌丛草甸灌木和草本植物不同部位的生物碳量, 并据此对灌木及草本植物的年净初级生产碳量进行了比较。结果显示: 金露梅灌丛草甸灌木植物地上部和地下部不同层次的生物量和碳含量均有明显差异, 根据生物量所占比例确定其地上部和地下部的平均碳含量分别为0.50和0.48。依据不同月份灌丛冠面最大长度、最小宽度和最大高度, 采用方程“ $W_{ij} = e^{(a \ln(A \cdot B \cdot H) + b)}$ ”计算灌木地上当年新生生物碳量、地上多年累积生物碳量和地下多年累积生物碳量, 相关性均极显著 ( $P < 0.01$ ), 表明利用该方程评估金露梅灌丛草甸灌木不同部位的生物碳量是可行的。不同月份金露梅灌丛草甸灌木地上当年新生生物碳量、地上多年累积生物碳量和地下多年累积生物碳量分别为9.36~21.15、78.07~90.12和74.37~101.22  $g \cdot m^{-2}$ , 差异不明显; 其地上部和地下部净初级生产碳量分别为33.20和26.85  $g \cdot m^{-2}$ , 总计为60.05  $g \cdot m^{-2}$ 。金露梅灌丛草甸草本植物地上部和地下部净初级生产碳量分别为111.41和445.41  $g \cdot m^{-2}$ , 总计为556.82  $g \cdot m^{-2}$ 。如果根据草本和灌木占地面积78%和22%进行加权计算, 则金露梅灌丛草甸当年的总净初级生产碳量为447.53  $g \cdot m^{-2}$ , 其中灌木的净初级生产碳量仅占2.95%, 且金露梅灌丛草甸地下部与地上部净初级生产碳量的比值为3.75。研究结果显示: 青海高寒区域金露梅灌丛草甸以草本固碳为主, 且地下部净初级生产碳量明显高于其地上部。

**关键词:** 高寒区域; 金露梅灌丛草甸; 碳含量; 生物碳量; 净初级生产碳量

中图分类号: Q945.11; Q948 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2014)03-0001-07  
DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2014.03.01

**Comparison on fixed carbon amount of shrub and herb of *Potentilla fruticosa* shrub meadow in alpine region of Qinghai Province** LI Hongqin<sup>1,2</sup>, SONG Chenggang<sup>3</sup>, ZHANG Fawei<sup>1,2</sup>, LI Yingnian<sup>1,2</sup> <sup>①</sup> (1. Northwest Institute of Plateau Biology, the Chinese Academy of Sciences, Xi'ning 810001, China; 2. Key Laboratory of Adaptation and Evolution of Plateau Biota, the Chinese Academy of Sciences, Xi'ning 810001, China; 3. Qinghai Engineering Consulting Center, Xi'ning 810001, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2014, 23(3): 1-7

**Abstract:** Taking *Potentilla fruticosa* Linn. shrub meadow in alpine region of Qinghai Province as the research object, the biomass carbon content of different parts of shrub and herb in *P. fruticosa* shrub meadow from June to September was analyzed, and on this basis, the annual net primary carbon production (NPCP) of shrub and herb was also compared. The results show that there are obvious differences in biomass and carbon content of different layers in above- and under-ground parts of shrub in *P. fruticosa* shrub meadow, and according to the proportion of biomass, average carbon content of above- and under-ground parts is determined as 0.50 and 0.48, respectively. Based on the maximum length, minimum width and maximum height of canopy surface of shrub in different months, the newly biomass

收稿日期: 2013-11-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31070437; 31270523); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050601; XDA05050404); 国家重点基础研究发展计划“973”项目(2010CB833501-01-13)

作者简介: 李红琴(1981—)女, 河南义马人, 博士, 主要从事全球变化生态学研究。

<sup>①</sup>通信作者 E-mail: ynlh@nwipb.cas.cn

carbon content at current year in above-ground part, the perennial accumulation biomass carbon contents in above- and under-ground parts of shrub were calculated by the equation " $W_{ij} = e^{(aln(A \cdot B \cdot H) + b)}$ ", with the extremely significant correlation ( $P < 0.01$ ), it means that it is feasible to evaluate biomass carbon content in different parts of shrub in *P. fruticosa* shrub meadow by this equation. The newly biomass carbon content at current year in above-ground part, the perennial accumulation biomass carbon contents in above- and under-ground parts of shrub in *P. fruticosa* shrub meadow among different months is 9.36 - 21.15, 78.07 - 90.12 and 74.37 - 101.22  $g \cdot m^{-2}$ , respectively, with no obvious difference. And NPCP in above- and under-ground parts of shrub is 33.20 and 26.85  $g \cdot m^{-2}$ , respectively, and total is 60.05  $g \cdot m^{-2}$ . NPCP in above- and under-ground parts of herb in *P. fruticosa* shrub meadow is 111.41 and 445.41  $g \cdot m^{-2}$ , respectively, and total is 556.82  $g \cdot m^{-2}$ . If weighted calculation is carried out according to occupied area of herb and shrub of 78% and 22%, respectively, total NPCP of *P. fruticosa* shrub meadow in current year is 447.53  $g \cdot m^{-2}$ , in which, NPCP of shrub accounts for only 2.95%, and the ratio of NPCP of under-ground part to that of above-ground part of *P. fruticosa* shrub meadow is 3.75. It is suggested that fixed carbon of herb is dominant in *P. fruticosa* shrub meadow in alpine region of Qinghai Province, and NPCP of under-ground part is obviously higher than that of above-ground part.

**Key words:** alpine region; *Potentilla fruticosa* Linn. shrub meadow; carbon content; biomass carbon content; net primary carbon production

金露梅 (*Potentilla fruticosa* Linn.) 广布于中国东北、华北、西北和西南的高山地区, 是寒温带多年生落叶灌木的典型代表种类之一, 在朝鲜、蒙古和俄罗斯的西伯利亚也有分布<sup>[1]</sup>。在青藏高原, 金露梅多分布在东部海拔 2 700 ~ 4 500 m 的山地阴坡、土壤湿度较高的平缓滩地以及地下水位较高的河谷阶地, 金露梅灌丛草甸的分布面积仅次于矮生嵩草 (*Kobresia humilis* (C. A. Mey. ex Trautv.) Sergiev.) 草甸, 其分布受纬度的限制, 并随纬度升高其分布高度上限有所下降, 具有明显的地带性分布规律。

青藏高原高寒区域金露梅灌丛草甸植物群落结构简单<sup>[2]</sup>、植物种类相对丰富、生产力较高, 是良好的夏季放牧草场。虽然目前对青藏高原金露梅灌丛草甸的生理生态特征以及生物生产力变化特征等方面有较多的研究报道<sup>[3-5]</sup>, 但因金露梅灌丛草甸植被为草本与灌木混交, 而灌木与乔木相似, 其根系和枝干生物量连年累积, 导致其地上部及地下部生物量的测定较困难, 并且难以估测当年发生光合作用时木本与草本各自的实际固碳能力。周华坤等<sup>[5]</sup>对金露梅灌丛的地下部净生物量进行了研究, 但研究对象是灌木和草本的混合体, 并未将灌木及草本的净初级生产量分开测定。

对青藏高原高寒区域金露梅灌丛草甸的灌木碳含量分布、地上部及地下部碳密度和净初级生产碳量、碳汇能力等方面进行研究, 是陆地生态系统固碳潜力评估的需要。为此, 作者以青海省海北金露梅灌

丛草甸为研究对象, 分别测定灌木与草本植物的生物量、碳含量及生物碳量, 再根据占地面积比例通过加权计算获得其地上部和地下部生物(碳)量及年净初级生产(碳)量, 以期为高寒草甸生态系统的研究提供基础数据。

## 1 研究区域自然概况和研究方法

### 1.1 研究区域自然概况

研究区域位于中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站(海北站), 地理坐标为北纬 37°37′、东经 101°19′, 海拔 3 200 m; 其东北 7 km 处为夏季放牧草场金露梅灌丛草甸, 地理坐标为北纬 37°40′、东经 101°20′。该区域具有明显的高原大陆性气候, 受高海拔条件的制约, 干湿季分明; 年平均气温约 -2 °C, 年降水量约 620 mm, 降水主要集中在 5 月至 9 月; 冷季寒冷、干燥、漫长, 暖季凉爽、湿润、短暂; 土壤为暗沃寒冻雏形土, 具有土壤发育年轻、土层浅薄、有机质含量丰富等特征<sup>[6]</sup>。

金露梅灌丛草甸一般由 2 层群落层组成: 上层为金露梅灌丛组成的灌木植物群落, 下部为禾草、莎草和杂草类为主的底层植物群落。金露梅灌丛株高为 30 ~ 60 cm, 最高可达 70 cm, 盖度可达 40%。受生境和灌木层高度和盖度的影响, 下部草本植物的种类组成和盖度等差异较大。调查地段草本层主要由 15 科 37 属 47 种植物组成, 草本层优势种有矮生嵩草、垂穗

披碱草(*Elymus nutans* Griseb.)和异针茅(*Stipa aliena* Keng),次优势种有羊茅(*Festuca ovina* Linn.)和线叶嵩草(*Kobresia capillifolia* (Decne.) C. B. Clarke),伴生种有萎软紫菀(*Aster flaccidus* Bunge)、山地早熟禾(*Poa orinosa* Keng)、黄花棘豆(*Oxytropis ochrocephala* Bunge)、长毛风毛菊(*Saussurea superba* Anth)、麻花苳(*Gentiana straminea* Maxim.)、藏异燕麦(*Helictotrichon tibeticum* (Roshev.) Holub)、矮火绒草(*Leontopodium nanum* (Hook. f. et Thoms.) Hand. -Mazz.)、瑞苓草(*Saussurea nigrescens* Maxim.)和珠芽蓼(*Polygonum viviparum* Linn.)等;群落总盖度约为90%,草本叶层平均高度约8~16 cm<sup>[7]</sup>。

## 1.2 研究方法

1.2.1 灌木碳含量测定 2010年8月底挖掘高度40~60 cm的金露梅灌丛5丛,先收集所有当年的新生枝叶,然后收集地上0~10、10~20、20~30、30~40 cm和40 cm以上各层次的老枝条及地下0~10、10~20、20~30 cm和30 cm以下各层次的根系,并对根系进行清洗。所有样品经风干后捣碎并研磨成粉,即为灌木同一层次的5个重复样品,每个重复样品用四分法处理并收集约10 g样品,用于各层次碳含量的测定。参照文献[8]采用重铬酸钾-水合加热法测定碳含量。

1.2.2 灌木生物碳量测定 2010年5月在金露梅灌丛草甸中央随机选择1个位点,以正北方为准,顺时针旋转120°和240°,分别依正北方向(0°)、120°方向和240°方向延伸80 m,然后再以80 m处为基点在左侧划定面积10 m×10 m的样方,共划分出3个样方;对3个样方内所有(包括刚生长的单株)金露梅灌丛进行标记;调查时间为金露梅生长期的6月至9月每月15日前的3 d内。测定样方内所有标记的金露梅灌木冠面的最大长度、最小宽度和最大高度;每月获得1 162组数据,作为金露梅灌丛生物量统计的基本参数。

在测定上述参数的同时,在3个样方外挖掘最小(单株)至最大的金露梅灌木丛18丛;挖掘前测定金露梅冠面最大长度、最小宽度和最大高度;挖掘后用剪刀分别剪取金露梅当年新生枝叶以及地上部和地下部,分别装入纸袋后带回实验室;所有样品置于85℃恒温烘箱内处理至恒质量后称量干质量,其中,地下部烘干前用水冲洗干净。

根据前述灌木各层次的碳含量以及每月采集的

18丛金露梅灌木的地上多年累积生物量、地下多年累积生物量和地上当年新生生物量的测定结果估算其生物碳量,并建立回归方程。金露梅灌木地上多年累积生物碳量、地下多年累积生物碳量和地上当年新生生物碳量与灌丛冠面最大长度、最小宽度和最大高度的线性回归方程为 $W_{ij} = e^{(aln(A \cdot B \cdot H) + b)}$ ,式中:A、B和H分别为每丛金露梅灌丛冠面的最大长度、最小宽度和最大高度;a和b为回归系数; $W_{ij}$ ( $i = 1, 2, 3$ )分别为金露梅灌木地上多年累积生物碳量、地下多年累积生物碳量和地上当年新生生物碳量;j为月份。利用每月调查获得的1 162组基本参数分别计算当年新生枝叶、多年积累枝干和地下多年积累根系的单位面积生物碳量。

1.2.3 草本和枯落物生物碳量测定 2010年5月15日至10月15日,在每月的15日前后在上述设定的3个样方右侧分别划定1个面积8 m×8 m的观测区,在每个观测区灌木丛的丛间草地取样,每次均划定5个面积50 cm×50 cm的草本样方;先收集枯落物并装袋,再齐地面剪取植物地上部分装入纸袋;然后在同一样方内再随机划分面积25 cm×25 cm的二级样方3个,按0~10、10~20和20~40 cm层次垂直用铁铲和切刀分层取出土样,用筛子筛选出其中的植物根系并装入布袋,带回实验室并冲洗干净。

将收集的植物地上部和地下部样品分别置于85℃恒温烘箱中烘干至恒质量,称量并计算生物量。地上生物量年内最大值为地上年净初级生产量,也包含了8月份测定的枯落物的生物量;地下净初级生产量为季节变化过程中的现存最大生物量与最小生物量的差值。草本植被地上部和地下部碳含量引自文献[9],分别为0.45和0.40。

1.2.4 草本与灌木混交生物量的估算 金露梅灌丛草甸是由灌木和草本植物构成,为此,其单位面积的总生物量按灌木和草本植物占据地表面积进行估算。在面积10 m×10 m的3个样方内,测量和计算灌木丛基部占据的地表面积,并分别计算草本与灌木占地面积的百分比,再依据所占比例加权估算出灌木与草本混交植被的总生物量。

分别根据地上部和地下部含碳量将草本和灌木生物量换算为生物碳量。其中灌木地上部和地下部平均碳含量来源于本研究的测定结果;而丛间草本植被地上部和地下部碳含量引自文献[9],分别为0.45和0.40。

## 2 结果和分析

### 2.1 金露梅灌丛草甸灌木植物不同层次生物量的分配状况

金露梅灌丛草甸灌木地上部和地下部不同层次生物量所占的比例见表 1。由表 1 可见:在金露梅灌丛草甸灌木群落的地上部中,10~20 cm 层次的枝干生物量所占比例最大,达 34%;其次为 0~10 cm 层次的枝干,其生物量所占比例为 32%;20 cm 以上各层次枝干的生物量所占比例依次减少。

由于高寒灌丛草甸土层较薄,根系主要分布在浅层区域。因而,在金露梅灌丛草甸灌木群落的地下部中 0~10 cm 层次根系的生物量所占比例最高,达 53%;随地下部层次加深根系生物量所占比例依次减少,10~20 cm 层次根系的生物量所占比例为 37%,20~30 cm 层次的仅占 8%;而深度大于 30 cm 的层次中根系分布很少,所占比例仅为 2%。

表 1 金露梅灌丛草甸灌木地上部和地下部各层次生物量的分配比例  
Table 1 Percentage of biomass distribution in different layers of above- and under-ground parts of shrub in *Potentilla fruticosa* Linn. shrub meadow

层次 Layer	百分比/% Percentage
地上部 Above-ground part	
40 cm 以上层次的枝干 Limb in higher than 40 cm layer	3
30~40 cm 层次的枝干 Limb in 30-40 cm layer	9
20~30 cm 层次的枝干 Limb in 20-30 cm layer	22
10~20 cm 层次的枝干 Limb in 10-20 cm layer	34
0~10 cm 层次的枝干 Limb in 0-10 cm layer	32
地下部 Under-ground part	
0~10 cm 层次的根系 Root in 0-10 cm layer	53
10~20 cm 层次的根系 Root in 10-20 cm layer	37
20~30 cm 层次的根系 Root in 20-30 cm layer	8
30 cm 以下层次的根系 Root in deeper than 30 cm	2

### 2.2 金露梅灌丛草甸灌木植物不同层次碳含量比较

金露梅灌丛草甸灌木植物地上部和地下部不同层次的碳含量见表 2。由表 2 可见:金露梅灌丛灌木植物地上部 0~30 cm 层次的碳含量较高,平均接近 50%;30 cm 以上层次的老枝干和当年新生枝叶的碳含量略低,均为 49%。地下部碳含量在 47.09% 和 48.48% 之间波动,平均为 48%。因金露梅灌丛灌木植物 90% 的生物量主要分布在地上部 0~30 cm 层次和地下部 0~20 cm 层次,故其地上部和地下部的平均碳含量分别确定为 0.50 和 0.48。这种分布特点与

表 2 金露梅灌丛草甸灌木地上部和地下部不同层次的碳含量  
Table 2 Carbon content in different layers of above- and under-ground parts of shrub in *Potentilla fruticosa* Linn. shrub meadow

层次 Layer	碳含量/% Carbon content
新生叶片 New leaf	48.59
新生枝干 New limb	49.31
地上部 Above-ground part	
40 cm 以上层次的枝干 Limb in higher than 40 cm layer	49.19
30~40 cm 层次的枝干 Limb in 30-40 cm layer	49.28
20~30 cm 层次的枝干 Limb in 20-30 cm layer	49.63
10~20 cm 层次的枝干 Limb in 10-20 cm layer	50.26
0~10 cm 层次的枝干 Limb in 0-10 cm layer	49.92
地下部 Under-ground part	
0~10 cm 层次的根系 Root in 0-10 cm layer	47.26
10~20 cm 层次的根系 Root in 10-20 cm layer	47.50
20~30 cm 层次的根系 Root in 20-30 cm layer	47.09
30 cm 以下层次的根系 Root in deeper than 30 cm	48.48

有关森林碳含量的分布特征<sup>[10-11]</sup>基本一致,但也存在一定的差异。

### 2.3 金露梅灌丛草甸灌木生物碳量估算方程的建立与检验

不同时间金露梅灌丛草甸灌木植物地上多年累积生物碳量、地下多年累积生物碳量和地上当年新生生物碳量与灌丛冠面最大长度、最小宽度和最大高度的回归分析结果见表 3。由表 3 可见:6 月至 9 月金露梅灌丛灌木不同部位的生物碳量与灌丛冠面最大长度、最小宽度和最大高度的相关系数均在 0.845 1 以上,均达到极显著 ( $P < 0.01$ ) 水平。因此,采用金露梅灌丛冠面最大长度、最小宽度和最大高度的测定值估测其地上部和地下部的多年累积生物碳量以及地上当年新增的生物碳量是可行的。

### 2.4 金露梅灌丛草甸灌木生物碳量和净初级生产碳量及分配状况

根据表 3 的回归方程,估算得到 6 月至 9 月各月份金露梅灌丛草甸灌木当年新生生物碳量、地上多年累积生物碳量及地下多年累积生物碳量,结果见表 4。在 6 月初以前几乎没有新生枝叶,随生长发育推进 6 月中旬后地上部新生枝叶生物量逐渐积累;由于金露梅具有开花早、成熟早、衰老早的生理生态特征,导致 6 月 15 日至 7 月 15 日期间新生枝叶生物量迅速增加;但由于其生长发育周期较短,花后短期内部分花果凋落,同时其叶片也受环境因子的干扰而凋落,因而 7 月 15 日以后花果及叶片的凋落导致金露梅灌丛草甸灌木地上当年新生生物碳量略有下降。

表 3 不同月份金露梅灌丛草甸灌木不同部位生物碳量的回归分析<sup>1)</sup>

Table 3 Regression analysis of biomass carbon content in different parts of shrub in *Potentilla fruticosa* Linn. shrub meadow at different months<sup>1)</sup>

采样日期 Sampling date (MM-DD)	地上多年累积生物碳量 Perennial accumulation biomass carbon content in above-ground part		地下多年累积生物碳量 Perennial accumulation biomass carbon content in under-ground part		地上当年新生生物碳量 Newly biomass carbon content at current year in above-ground part	
	回归方程 Regression equation	<i>r</i>	回归方程 Regression equation	<i>r</i>	回归方程 Regression equation	<i>r</i>
06-15	$W_{AA} = e^{(0.2991 \ln(A \cdot B \cdot H) - 1.1599)}$	0.951 6 **	$W_{BA} = e^{(0.2894 \ln(A \cdot B \cdot H) - 1.1285)}$	0.926 7 **	$W_{NAB} = e^{(0.2912 \ln(A \cdot B \cdot H) - 2.1318)}$	0.966 7 **
07-15	$W_{AA} = e^{(0.4089 \ln(A \cdot B \cdot H) - 2.4415)}$	0.960 1 **	$W_{BA} = e^{(0.3182 \ln(A \cdot B \cdot H) - 1.4890)}$	0.857 7 **	$W_{NAB} = e^{(0.3246 \ln(A \cdot B \cdot H) - 2.1208)}$	0.900 3 **
08-15	$W_{AA} = e^{(0.4840 \ln(A \cdot B \cdot H) - 3.2975)}$	0.913 3 **	$W_{BA} = e^{(0.4265 \ln(A \cdot B \cdot H) - 2.7335)}$	0.893 2 **	$W_{NAB} = e^{(0.3751 \ln(A \cdot B \cdot H) - 2.7202)}$	0.936 8 **
09-15	$W_{AA} = e^{(0.3422 \ln(A \cdot B \cdot H) - 1.6696)}$	0.926 3 **	$W_{BA} = e^{(0.4000 \ln(A \cdot B \cdot H) - 2.3093)}$	0.925 9 **	$W_{NAB} = e^{(0.2641 \ln(A \cdot B \cdot H) - 1.5512)}$	0.845 1 **

<sup>1)</sup> *W*: 生物碳量 Biomass carbon content; *A*: 冠面最大长度 The maximum length of the canopy surface; *B*: 冠面最小宽度 The minimum width of the canopy surface; *H*: 冠面最大高度 The maximum height of the canopy surface. \*\* :  $P < 0.01$ ,  $n = 18$ .

表 4 不同月份金露梅灌丛草甸灌木不同部位生物碳量的比较<sup>1)</sup>

Table 4 Comparison on biomass carbon content in different parts of *Potentilla fruticosa* Linn. shrub meadow at different months<sup>1)</sup>

采样日期 Sampling date (MM-DD)	$C_N/g \cdot m^{-2}$	$C_A/g \cdot m^{-2}$	$C_U/g \cdot m^{-2}$	R/%
06-15	9.36	78.07	76.51	0.91
07-15	21.15	80.39	74.37	0.76
08-15	20.74	90.12	80.77	0.76
09-15	17.08	79.22	101.22	1.09

<sup>1)</sup>  $C_N$ : 地上当年新生生物碳量 Newly biomass carbon content at current year in above-ground part;  $C_A$ : 地上多年累积生物碳量 Perennial accumulation biomass carbon content in above-ground part;  $C_U$ : 地下多年累积生物碳量 Perennial accumulation biomass carbon content in under-ground part; R: 地下部和地上部生物碳量的比值 Ratio of biomass carbon content in under-ground part to that in above-ground part.

金露梅灌丛草甸灌木地上多年累积生物碳量和地下多年累积生物碳量自 6 月 15 日开始逐渐增加,其中地上部多年累积生物碳量在 8 月 15 日达最大;9 月份以后,受外界低温影响(日气温最低可达  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下,日均气温在  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下),大量的光合产物向地下部运转并供给根系的生长发育,地下部的生物碳量随之增加,并为越冬和翌年生长储备物质及能量。地上部生物碳量转移至地下并使地下部的生物碳量增加,表现出地上部与地下部生物碳量具有明显的互补性<sup>[11]</sup>。

金露梅灌丛草甸灌木地上当年新生生物碳量、地上多年累积生物碳量和地下多年累积生物碳量均较低,在 6 月至 9 月分别为  $9.36 \sim 21.15$ 、 $78.07 \sim 90.12$  和  $74.37 \sim 101.22\text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。若将地上当年新生生物碳量年最高值视为新生枝叶年净初级生产碳量、地上多年累积生物碳量和地下多年累积生物碳量的最高值与最低值间的差值分别代表多年枝干和根系的净初级生产碳量,三者之和为金露梅灌丛草甸灌木的当

年净初级生产碳量,那么,金露梅灌丛草甸灌木新生枝叶、地上多年积累枝干和地下多年积累根系的净初级生产碳量分别为  $21.15$ 、 $12.05$  和  $26.85\text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ,净初级生产碳量总计为  $60.05\text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。金露梅灌丛草甸灌木生物碳量的这种变化反映出在较长时间尺度上(几十年或上百年)灌丛生长变化缓慢的特点,也证实了在几十年的时间尺度上金露梅灌丛高度几乎没有变化的表现现象。因而,金露梅灌丛草甸灌木的当年净初级生产碳量很低。

金露梅灌丛草甸灌木地下部生物碳量与地上部生物碳量(包括新生枝叶)的比值在 8 月最低、9 月最高,6 月、7 月、8 月和 9 月这一比值分别为  $0.875$ 、 $0.732$ 、 $0.729$  和  $1.051$ ,呈现出一定的季节变化特点。新生枝叶的生物碳量在生长前期(6 月)积累缓慢;在 7 月份至 8 月份生长加快导致地上部生物碳量增大,而同期为使植物体摄取更多的水、热、光等资源则地下部需要消耗更多的能量,导致地下部与地上部生物碳量的比值明显降低;进入 9 月份以后,外界环境条件趋劣,地上部能量转入地下部从而导致地下部与地上部生物碳量的比值增大。金露梅灌丛草甸灌木不同部位生物碳量的这种变化过程导致能量流动和营养物质迁移互补,这一规律与自然状况下其他植被类型有相似之处<sup>[12]</sup>。而灌木地下部与地上部净初级生产碳量的比值为  $0.809$ ,表明金露梅灌丛草甸灌木植物的地上部净初级生产碳量比地下部仅高约 20%。

### 2.5 金露梅灌丛草甸草本植物年净初级生产碳量及分配状况

2010 年金露梅灌丛草甸草本植物的地上部净初级生产碳量为  $111.41\text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ (包含 8 月底枯落物的净初级生产碳量  $7.33\text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ )、地下部净初级生产碳量为  $445.41\text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ,总和为  $556.82\text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ,其地下

部与地上部净初级生产碳量的比值为 3.998,表明草本植物地下部净初级生产碳量明显高于地上部。与金露梅灌丛草甸灌木植物相比,其草本植物的现存碳量和净初级生产碳量均明显提高,而且草本植物地下部的净初级生产碳量比地上部高达近 4 倍。

## 2.6 金露梅灌丛草甸植物年净初级生产碳量及分配状况

综合分析结果表明:金露梅灌丛草甸灌木植物基部和草本植被的占地面积分别为 22% 和 78%,而其灌木植物地上部和地下部净初级生产碳量的总和为  $60.05 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ,草本植物地上部和地下部净初级生产碳量的总和(包括枯落物)为  $556.82 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ;如果分别按占地面积比例进行加权计算,金露梅灌丛草甸植被总的净初级生产碳量为  $447.53 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ,显示金露梅灌丛草甸的净初级生产碳量中灌木植物所占比例较低。上百年来其灌木植物的景观变化不大,从景观上也证实了这一结果。

## 3 讨论和结论

在金露梅灌丛草甸的实际净初级生产碳量中,灌木及草本植物所占比例各不相同,因而,金露梅灌丛草甸生物量测定既要包含灌木部分也要涉及草本部分。在本研究中,作者首先分别测定金露梅灌丛草甸灌木和草本植被的生物量,然后采用收获法与样线法相结合的方法估算草本和灌木的生物碳量;在测定灌木基部与草本植物实际占地面积的基础上,采用加权法计算金露梅灌丛草甸灌木及草本的单位面积生物量,并用周转法计算地下部净初级生产量(并换算为碳密度)。虽然通过这一研究过程获得的研究结果的合理性尚有待商榷,但采用这种方法至少对金露梅灌丛草甸植被生物量及净初级生产碳量的估算有一定意义。

因测定方法、灌丛种类及地理位置不同,加之本研究涉及了灌丛草甸的年净初级生产量这一指标,因此,所获得的结果与胡会峰等<sup>[13]</sup>的研究结果有一定差异。本研究结果表明:金露梅灌丛草甸植被的总净初级生产碳量为  $447.53 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ,比位于海拔稍低的平缓滩地上的矮生嵩草草甸的地上部和地下部总净初级生产碳量<sup>[14]</sup>降低了 19.36%。从草本植被看,金露梅灌丛草甸草本植物地下部与地上部净初级生产碳量的比值(3.998)均高于矮生嵩草草甸(2.138),

差异幅度为 1.860。若根据灌木与草本群落占地面积的比例计算净初级生产碳量,金露梅灌丛草甸植被地下部与地上部净初级生产碳量的比值为 3.75。由于本研究区位于海拔 3 358 m 的金露梅灌丛草甸区,海拔比矮生嵩草草甸区(海拔 3 190 m)略高,而年平均气温比矮生嵩草草甸区低约  $0.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,温度偏低则有利于植被地下部生物量的积累而限制地上部生物量的积累,导致金露梅灌丛草甸地下部与地上部净初级生产碳量的比值偏高。李英年等<sup>[15]</sup>2003 年对同一区域的金露梅灌丛生物量进行了研究,但未对植物的碳含量进行测定,仅采用经验值计算固碳量。而在本研究中,作者对金露梅灌丛生物量进行测定并分析了草本及灌木不同部位的碳含量,在此基础上根据不同部位生物量的比例计算出金露梅灌丛的碳含量,提升了结果的可靠性。

在金露梅灌丛草甸植被的总净初级生产碳量( $447.53 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ )中,灌木群落的净初级生产碳量( $13.21 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ )所占比例很低,仅为 2.95%,而草本植被净初级生产碳量占 97.05%,表明金露梅灌丛草甸植被通过地表绿色植物光合作用所生产的总净初级生产碳量主要以草本植物固碳为主,木本植物的固碳量很低。同样,从 8 月份测定的现存生物碳量也可印证这一结果。8 月份金露梅灌丛草甸灌木地上部和地下部现存碳量分别为  $110.87$  和  $80.77 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ,同期草本植物地上部和地下部现存碳量分别为  $104.08$  和  $1 144.74 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ,若根据灌木和草本植物的占地面积进行加权换算,其灌木所占的现存生物碳量也很低。

徐冰等<sup>[16]</sup>对 2000 年至 2050 年中国森林生物量碳库进行了研究,认为中国森林具有林龄小、平均碳密度低、人工林面积大的特点,具有很高的固碳潜力。而位于高寒区的金露梅灌丛草甸灌木群落因生长缓慢,从多年景观上看总处于低矮且每年变化不大的状况,其光合固碳能力并不高。方精云等<sup>[17]</sup>认为:虽然中国学者在草地碳库及其动态变化方面已开展了很多研究,但目前仍缺乏对中国草地生态系统碳库及其动态变化特征的全面认识;不同研究者得出的中国草地生物量碳密度(单位面积生物量)差异较大,变幅为  $215.8 \sim 348.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ,平均值为  $300.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。因而,准确评估包括金露梅灌丛草甸在内的草地生态系统植物碳库及其年际变化,对揭示草地在中国陆地生态系统碳循环中的作用以及合理利用有限的草地资

源有极为重要的意义;其中,开展灌丛草甸植被生物量的研究、掌握每年的光合产生净初级生产碳量也十分重要。

虽然金露梅灌丛草甸灌木群落的总净初级生产碳量仅为  $60.05 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 丛间草本植被的总净初级生产碳量为  $556.82 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 但根据占地面积加权计算获得的金露梅灌丛草甸的总净初级生产碳量为  $447.53 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 更接近于同一区域矮生嵩草草甸的净初级生产碳量, 只是因海拔相对较高、热量条件较差、植物物种数量相对较少而生产碳量稍低。通过上述研究, 可以得出以下结论:

1) 对不同月份金露梅灌丛草甸灌木植物不同部位生物碳量与灌丛冠面最大长度、最小宽度和最大高度的线性回归方程进行显著性检验, 相关系数均在 0.845 1 以上, 均达极显著水平 ( $P < 0.01$ ,  $n = 18$ ), 表明利用方程 “ $W_{ij} = e^{(\ln(A \cdot B \cdot H) + b)}$ ” 评估金露梅灌丛草甸灌木各部位的生物碳量是可行的。

2) 金露梅灌丛草甸灌木不同部位碳含量差异较大, 其中, 地上多年累积及新生枝干碳含量均为 0.50, 地下根系碳含量为 0.48。

3) 金露梅灌丛草甸灌木地上多年累积生物碳量、地下多年累积生物碳量以及地上当年新生生物碳量均呈季节变化但不甚明显。不论是当年新生枝叶还是多年累积枝叶及多年累积根系的净初级生产碳量均较低, 其中, 地上部和地下部净初级生产碳量分别为  $33.20$  和  $26.85 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 总和为  $60.05 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 地下部与地上部净初级生产碳量的比值为 0.809。

4) 根据金露梅灌丛草甸草本和灌木占地面积 78% 和 22% 进行加权计算, 金露梅灌丛草甸当年的总净初级生产碳量为  $447.53 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。考虑灌木与草本占地面积的差异, 其地下部与地上部净初级生产碳量比例应为 3.75, 表明金露梅灌丛草甸植被的净初级生产碳量主要储存在地下。灌木的净初级生产碳量所占比例很低, 仅为 2.95%, 表明青海高寒区域金露梅灌丛草甸植被主要以草本固碳为主。

#### 参考文献:

- [1] 李文华, 周兴民. 青藏高原生态系统及优化利用模式 [M]. 广州: 广东科学技术出版社, 1998.
- [2] 周兴民, 王质彬, 杜庆. 青海植被 [M]. 西宁: 青海人民出版社, 1987.
- [3] 周华坤, 赵新全, 汪诗平, 等. 青藏高原高寒灌丛植被对长期放牧强度试验的响应特征 [J]. 西北植物学报, 2008, 28 (10): 2080 - 2093.
- [4] 王启基, 周兴民, 张堰青, 等. 青藏高原金露梅灌丛的结构特征及其生物量 [J]. 西北植物学报, 1991, 11 (4): 333 - 340.
- [5] 周华坤, 周立, 赵新全, 等. 金露梅灌丛地下生物量形成规律的研究 [J]. 草业学报, 2002, 11 (2): 59 - 65.
- [6] 李英年, 赵新全, 曹广民, 等. 海北高寒草甸生态系统定位站气候、植被生产力背景的分析 [J]. 高原气象, 2004, 23 (4): 558 - 567.
- [7] 于贵瑞, 孙晓敏. 中国陆地生态系统碳通量观测技术及时空变化特征 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [8] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1998.
- [9] 张金霞, 曹广民, 周党卫, 等. 高寒矮嵩草草甸大气-土壤-植被-动物系统碳素储量及碳素循环 [J]. 生态学报, 2003, 23 (4): 627 - 634.
- [10] 黄从德, 张健, 杨万勤, 等. 四川省及重庆地区森林植被碳储量动态 [J]. 生态学报, 2008, 28 (3): 966 - 975.
- [11] 马钦彦, 陈遐林, 王娟, 等. 华北主要森林类型建群种的含碳率分析 [J]. 北京林业大学学报, 2002, 24 (5/6): 96 - 100.
- [12] 方运霆, 莫江明, 彭少麟, 等. 森林演替在南亚热带森林生态系统碳吸存中的作用 [J]. 生态学报, 2003, 23 (9): 1685 - 1694.
- [13] 胡会峰, 王志恒, 刘国华, 等. 中国主要灌丛植被碳储量 [J]. 植物生态学报, 2006, 30 (4): 539 - 544.
- [14] 李红琴, 李英年, 张法伟, 等. 高寒草甸植被生产量年际变化及水分利用率状况 [J]. 冰川冻土, 2013, 35 (2): 475 - 482.
- [15] 李英年, 赵亮, 王勤学, 等. 高寒金露梅灌丛生物量及年周转量 [J]. 草地学报, 2006, 14 (1): 72 - 76.
- [16] 徐冰, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 2000—2050 年中国森林生物量碳库: 基于生物量密度与林龄关系的预测 [J]. 中国科学: 生命科学, 2010 (07): 587 - 594.
- [17] 方精云, 杨元合, 马文红, 等. 中国草地生态系统碳库及其变化 [J]. 中国科学: 生命科学, 2010 (07): 566 - 576.

(责任编辑: 惠红, 佟金凤)