

青海高寒金露梅灌丛碳密度及其分配格局

杨路存^{1,2} 李长斌^{1,3} 宁 祎^{1,3} 聂秀青^{1,3} 徐文华^{1,2} 周国英^{1,2*}

¹中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810008; ²中国科学院藏药研究重点实验室, 西宁 810008; ³中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 灌丛面积增加引起的碳储量增加被认为是我国陆地生态系统碳储量增加的重要原因, 也是陆地生态系统碳汇研究中的一个不确定因素。为了揭示高寒灌丛的碳密度及其分配格局, 该文对青海省不同样地8个金露梅(*Potentilla fruticosa*)灌丛生态系统各组分的碳密度及分布特征进行了研究。结果表明: 金露梅灌丛的生物碳密度、凋落物碳密度、土壤有机碳密度和总碳密度分别为: 5 088.54、542.1、35 903.76和41 534.4 kg·hm⁻²。金露梅灌丛灌木层碳主要分配在根部(49.5%–56.1%), 灌木层碳密度占总生物量碳密度的68%以上。草本层碳也主要分配在根部(59.6%–75.1%), 草本层碳密度占总生物量碳密度的22.5%。金露梅灌丛的生物碳密度明显低于中国6种主要灌丛的平均值(10.88 t·hm⁻²)。在金露梅灌丛中, 土壤碳密度占有最大比例, 约占总碳密度的86.4%。

关键词 生物碳密度; 凋落物碳密度; 土壤有机碳密度; 总碳密度

引用格式: 杨路存, 李长斌, 宁祎, 聂秀青, 徐文华, 周国英 (2017). 青海省高寒金露梅灌丛碳密度及其分配格局. 植物生态学报, 41, 62–70. doi: 10.17521/cjpe.2016.0038

Carbon density and its spatial distribution in the *Potentilla fruticosa* dominated alpine shrub in Qinghai, China

YANG Lu-Cun^{1,2}, LI Chang-Bin^{1,3}, NING Yi^{1,3}, NIE Xiu-Qing^{1,3}, XU Wen-Hua^{1,2}, and ZHOU Guo-Ying^{1,2*}

¹Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China; ²Key Laboratory of Tibetan Medicine Research, Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China; and ³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

Aims Shrub recovery is recognized as an important cause of the increase of carbon stocks in China, and yet there are great uncertainties in the carbon sink capacities of shrubs. Our objectives were to estimate carbon density and its spatial distribution in alpine shrubs.

Methods Eight sites in *Potentilla fruticosa* dominated shrublands across Qinghai, China were investigated. Plant biomass and carbon content in leaves, branches and stems, and roots were measured to analyze the biomass allocation and carbon density.

Important findings Mean carbon densities in biological carbon, litter, soil and whole ecosystem of *P. fruticosa* shrublands were 5 088.54, 542.1, 35 903.76 and 41 534.4 kg·hm⁻², respectively. Carbon density in the shrub layer was more than 68% of the biological carbon density of the whole ecosystem and was mainly distributed in roots (49.5%–56.1%). Carbon density of the herbaceous layer was 22.5% of the biological carbon density of the whole ecosystem and was also mainly distributed in roots (59.6%–75.1%). The biological carbon density of *P. fruticosa* shrublands (5.08 t·hm⁻²) was lower than the average carbon density of shrub communities in China (10.88 t·hm⁻²). Soil carbon density contributed the largest proportion (86.4%) of total carbon density in *P. fruticosa* shrublands.

Key words biological carbon density; litter carbon density; soil organic carbon density; total carbon density

Citation: Yang LC, Li CB, Ning Y, Nie XQ, Xu WH, Zhou GY (2017). Carbon density and its spatial distribution in the *Potentilla fruticosa* dominated alpine shrub in Qinghai, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 41, 62–70. doi: 10.17521/cjpe.2016.0038

灌丛是陆地生态系统的重要组成部分(张笑鹤等, 2011), 具有种类繁多、分布广泛、生命力强、生产力高等特点(胡会峰等, 2006)。作为世界上灌丛

分布面积广泛的国家, 中国灌丛面积近 2×10^8 hm² (侯学煜, 1982), 占中国陆地总面积的1/5, 是全国现存森林面积的近2倍(胡会峰等, 2006)。近年来, 受气

收稿日期Received: 2016-01-19 接受日期Accepted: 2016-11-11

* 通信作者Author for correspondence (E-mail: zhougy@nwipb.ac.cn)

候变暖等因素影响, 高原地区的草地生态系统向灌丛生态系统演替(樊启顺等, 2005), 灌丛生态系统分布面积呈增加趋势(Sturm *et al.*, 2001; 于海英和许建初, 2009; 张笑鹤等, 2011)。由高寒灌丛面积增加引起的高寒植被碳储量增加, 被认为是我国陆地生态系统碳储量增加的重要原因(朴世龙等, 2010)。因此, 开展青藏高原地区灌丛碳密度研究, 对认识我国灌丛生态系统的碳储量现状具有重要的意义(高巧等, 2014)。

近年来, 国内外开展了大量有关高寒灌丛的研究, 但多数集中于群落结构、生物量、CO₂通量及土壤微生物方面(王启基等, 1991; 周华坤等, 2002; 王国荣等, 2006; 李英年等, 2006; 雷蕾等, 2011; 乔春连, 2011; 金铭等, 2012; 杨路存等, 2013), 然而, 对高寒灌丛植被碳密度的研究还较为缺乏。尽管胡会峰等(2006)估算了中国主要灌丛植被的碳储量, 同时, 高巧等(2014)对四川省甘孜藏族自治州高寒矮灌丛的碳密度进行了估算, 但是, 这些研究多局限于某种灌丛类型生物量测定, 缺少地下根系部分、凋落物和土壤碳库测定; 同时, 这些研究没有用不同物种不同器官的含碳率来计算灌丛植被的碳密度, 而是简单地通过乘以生物量与碳密度之间的转换系数来获取碳密度, 导致灌丛碳储量的估算还存在较大的不确定性。

金露梅(*Potentilla fruticosa*)灌丛是高寒落叶灌丛的典型代表, 广泛分布于青藏高原东部海拔3 200–4 500 m的山地阴坡、半阳坡、潮湿滩地及高海拔的山地阳坡, 对其生态系统的碳密度与分配格局进行研究有助于揭示其固碳功能和碳循环机理。本文以青海省天然金露梅灌丛生态系统为研究对象, 通过样地调查及生物量和含碳率的测定, 较准确地估算青海省金露梅灌丛生态系统的碳密度及碳密度的分配格局, 旨在为青海省和全国的灌木生态系统碳贮量和碳循环的研究提供基础数据, 并为持续增碳固碳的森林经营提供科学指导。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

青海省位于青藏高原的东北部(31.65°–39.32° N, 89.58°–103.07° E), 东西长约1 200 km, 南北宽约800 km, 青海省土地总面积7 215.24 × 10⁴ hm²。其中林地面积634.00 × 10⁴ hm², 占8.79%; 森林面

积329.56 × 10⁴ hm², 占林地面积的51.98%, 森林覆盖率4.57%。燕山运动奠定地形复杂多样, 高山、丘陵、河谷、盆地交错分布, 平均海拔3 000 m以上, 属典型高原大陆性气候。年平均气温–3.7–6.0 °C, 年日照时间2 340–3 550 h, 年降水量16.7–776.1 mm (多为400 mm以下), 年蒸发量1 118.4–3 536.2 mm (董旭, 2009)。森林植被分布于96° E以东主要江河及其支流的河谷两岸, 森林分布海拔大多在2 500–4 200 m, 以寒温带常绿针叶林亚型为主, 其次为落叶林植被型(多为原始林破坏后的次生类型)。植被地域上跨青藏高原、温带荒漠和温带草原3个植被区, 具有高寒和早生的特点, 以寒温性常绿针叶林为主, 常见的针叶树种有云杉(*Picea* spp.)、圆柏(*Juniperus* spp.)等, 阔叶树种有杨树(*Populus* spp.)、桦木(*Betula* spp.)等, 灌木有金露梅(*Potentilla fruticosa*)、杜鹃(*Rhododendron* spp.)、锦鸡儿(*Caragana sinica*)、杯腺柳(*Salix cupularis*)等(董旭, 2009)。

1.2 研究方法

1.2.1 材料来源与样地设置

本研究于2011年7月至2014年7月先后在青海省境内共选取8块金露梅样地进行详细调查取样(样地概况见表1)。

每个样地设置3个大小为5 m × 5 m的样方, 3个样方的间距约10 m, 总计24个样方。在对每个样方内的灌木层物种进行每木调查的同时, 选择1个1 m × 1 m的代表性区域, 设置收获样方, 对地上生物量进行收割, 对地下生物量进行挖掘, 并分种称取根、茎、叶等器官的鲜质量。同时, 将优势种分种、分部分称鲜质量(根、茎、叶)并带回室内(分部分样品多于100 g取样100 g), 用烘干法在65 °C条件下烘干至恒质量, 并称取样品干质量。通过样品鲜质量与样品干质量的比值, 结合收获样方内各器官的鲜质量, 计算不同灌木物种不同器官的单位面积生物量(郝文芳等, 2008)。通过3个样方不同物种不同器官生物量平均值相加, 计算单位面积灌木层生物量。

同时, 在每个灌丛样方内, 设置1个1 m × 1 m的草本层收获样方, 采用与灌木层相同的处理方法, 按优势种和非优势种分别获取草本层地上部分、地下部分的鲜质量, 并取大约100 g作为样品带回室内, 采用与测定灌木层生物量相同的方法获取草本层生物量。

在每个灌丛样方外邻近样方的位置, 选取1个

表1 样地概况

Table 1 Basic information of the sampling plots

代码 Code	调查地区 Location	纬度 Latitude (N)	经度 Longitude (E)	海拔 Altitude (m)	平均盖度 Average coverage (%)	灌木物种组成 Composition of shrub species
Q1	青海门源 Menyuan, Qinghai	37.22°	101.24°	3 399	50	金露梅 <i>Potentilla fruticosa</i> , 山生柳 <i>Salix oritrepha</i> , 高山绣线菊 <i>Spiraea alpine</i> , 鬼箭锦鸡儿 <i>Caragana jubata</i>
Q2	青海祁连 Qilian, Qinghai	38.05°	100.21°	2 973	65	金露梅 <i>Potentilla fruticosa</i> , 山生柳 <i>Salix oritrepha</i> , 高山绣线菊 <i>Spiraea alpina</i>
Q3	青海玉树 Yushu, Qinghai	33.02°	96.50°	4 132	60	金露梅 <i>Potentilla fruticosa</i> , 山生柳 <i>Salix oritrepha</i> , 高山绣线菊 <i>Spiraea alpine</i> , 千里香杜鹃 <i>Rhododendron thymifolium</i>
Q4	青海刚察 Gangcha, Qinghai	37.25°	100.15°	3 614	60	金露梅 <i>Potentilla fruticosa</i>
Q5	青海天峻 Tianjun, Qinghai	37.31°	99.19°	3 567	65	金露梅 <i>Potentilla fruticosa</i> , 山生柳 <i>Salix oritrepha</i>
Q6	青海大通 Datong, Qinghai	37.29°	101.43°	2 959	80	金露梅 <i>Potentilla fruticosa</i> , 山生柳 <i>Salix oritrepha</i> , 沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>
Q7	青海兴海 Xinghai, Qinghai	35.85°	99.92°	3 579	65	金露梅 <i>Potentilla fruticosa</i>
Q8	青海贵南 Guinan, Qinghai	35.47°	100.74°	3 583	60	金露梅 <i>Potentilla fruticosa</i>

1 m × 1 m 的典型区域作为凋落物生物量调查小样方。

收集小样方内的全部地表凋落物, 称取鲜质量并取大约500 g样品(收获样方获取鲜质量不足500 g的, 在样方外进行收集补充)带回室内, 采用上述相同方法获取生物量。

每个样地挖取1个土壤剖面, 剖面规格为长1.5 m, 宽0.8 m, 深1 m, 分层测定土壤容重(烘干法), 同时在样地内用土钻分6层(0–10, 10–20, 20–30, 30–50, 50–70, 70–100 cm)钻取土样。

植物样品烘干至恒质量称量后用杯式粉碎机进行粗粉碎, 过10目筛混匀, 颗粒过大而未过筛的粗样品继续进行粗粉碎, 如此循环直到完全过筛(对于木质坚硬的灌木样品可先用木锤敲碎, 然后再进行粗粉碎)。随后用冷冻混合球磨仪磨碎, 将粗粉碎后的样品进行细粉碎, 过80–100目筛, 装袋标号, 用于碳浓度的测定。土壤样品风干, 然后挑选出粗根和砾石, 研磨并过2 mm筛。然后使用冷冻混合球磨仪磨碎, 过80–100目筛, 装袋标号, 测定其中的有机碳浓度。

样品有机碳采用重铬酸钾氧化法测定(鲁如坤, 1999), 具体做法: 对以上各实验样品进行3次粉碎法制样, 每次测3个平行样, 对测定结果取平均值作为一个样本数, 测量精度为0.01%, 误差为±0.2%。用公式(样品含碳率=样品碳含量/样品干质量×100%)计算样品的含碳率。

1.2.2 灌木层、草本层、凋落物层的碳密度

灌木层叶、枝、根的生物量通过样品鲜质量与干质量率的乘积计算, 换算后乘以灌木盖度而得到

群落水平的生物量, 进而换算成每 hm^2 生物量, 再乘以各器官相应碳含量, 即为灌木层叶、枝、根每 hm^2 的碳贮量。

草本层、凋落物层每 hm^2 的碳贮量计算方法同上。

金露梅灌丛生态系统碳密度为相应各层次每 hm^2 碳贮量之和。

1.2.3 土壤有机碳密度

土壤剖面有机碳密度的计算模型如下:

$$SOCD = \sum (1 - \theta_i) \times \rho_i \times C_i \times T_i / 100 \quad (\text{Veldkamp, 1994})$$

式中, $SOCD$ 为土壤剖面有机碳密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$); θ_i 为第 i 层砾石含量(体积%); ρ_i 为第 i 层土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); C_i 为第 i 层土壤有机碳含量($\text{C g} \cdot \text{kg}^{-1}$); T_i 为第 i 层土层厚度(cm)。

数据用Excel 2003和SPSS 18.0软件进行统计分析。在SPSS 18.0中, 采用GLM中Univariate ANOVA分析各处理因素对所测变量的影响。其中, 样地位置作为固定因素, 生物量、含碳率、碳密度作为随机因素。用Duncan法比较各青海省不同样地金露梅生物量、含碳率、碳密度间的差异, 显著水平为 $\alpha = 0.05$ 。

3 结果和分析

3.1 金露梅灌丛生物量大小及其分布

由表2可得, 青海省不同样地金露梅灌丛灌木层的生物量介于5 952.05–12 023.80 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间, 平均为8 361.92 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。金露梅灌丛灌木层各器官生物量大小排序为: 根>枝>叶。青海省不同样地金露梅灌丛草本层的生物量差异较大, 介于1 075.41–

表2 青海不同样地金露梅灌丛各组分生物量(平均值±标准误差) (kg·hm⁻²)

Table 2 Biomass of the *Potentilla fruticosa* shrub ecosystem in different sampling sites in Qinghai (mean ± SE) (kg·hm⁻²)

层次/器官 Layer/organ	样地 Sampling site								平均 Average	
	青海门源 Menyuan, Qinghai	青海祁连 Qilian, Qinghai	青海玉树 Yushu, Qinghai	青海刚察 Gangcha, Qinghai	青海天峻 Tianjun, Qinghai	青海大通 Datong, Qinghai	青海兴海 Xinghai, Qinghai	青海贵南 Guinan, Qinghai		
灌木层 Shrub layer	叶 Leaf	391.81 ± 42.45 ^a	665.50 ± 41.65 ^b	598.030 ± 23.65 ^{ab}	753.39 ± 90.58 ^b	425.65 ± 68.75 ^a	1 065.54 ± 91.63 ^c	580.96 ± 45.58 ^{ab}	1 057.52 ± 98.76 ^c	692.30 ± 53.89
	枝 Branch	2 677.35 ± 478.95 ^{abc}	3 083.58 ± 468.43 ^{abc}	4 527.30 ± 1014.2 ^c	3 548.54 ± 135.69 ^{abc}	2 313.81 ± 445.49 ^{ab}	2 055.72 ± 446.22 ^a	2 206.73 ± 119.62 ^a	4 198.33 ± 864.11 ^{bc}	3 076.43 ± 248.61
	根 Root	3 405.82 ± 822.31 ^a	4 745.91 ± 831.42 ^{abc}	5 538.02 ± 235.86 ^{bc}	5 715.92 ± 675.68 ^{bc}	3 212.59 ± 852.82 ^a	4 119.84 ± 605.00 ^{ab}	3 239.50 ± 178.57 ^a	6 767.94 ± 599.21 ^c	4 593.19 ± 321.39
	合计 Total	6 474.98 ± 1231.8 ^a	8 494.99 ± 1 205.1 ^{ab}	10 663.36 ± 897.24 ^{bc}	10 017.85 ± 900.44 ^{bc}	5 952.05 ± 918.99 ^a	7 241.10 ± 1060.2 ^{ab}	6 027.10 ± 302.16 ^a	12 023.80 ± 1 536.0 ^c	8 361.92 ± 549.46
草本层 Herb layer	叶 Leaf	406.21 ± 64.50 ^a	762.57 ± 115.41 ^{ab}	1 534.51 ± 292.50 ^b	834.52 ± 48.88 ^{ab}	1 402.72 ± 684.49 ^b	340.36 ± 119.32 ^a	683.52 ± 128.13 ^{ab}	727.74 ± 58.50 ^{ab}	836.52 ± 116.46
	根 Root	1 438.43 ± 388.53 ^a	1 761.69 ± 45.60 ^{ab}	9 852.47 ± 2 780.3 ^c	5 486.23 ± 1 915.2 ^b	5 494.34 ± 1 125.2 ^b	735.05 ± 264.70 ^a	1 274.49 ± 155.68 ^a	1 612.09 ± 253.11 ^{ab}	3 274.15 ± 753.52
	合计 Total	1 844.64 ± 441.05 ^a	2 524.26 ± 160.98 ^{ab}	11 386.98 ± 2 973.4 ^d	6 320.75 ± 1 964.0 ^{bc}	6 897.06 ± 1 710.5 ^c	1 075.41 ± 380.29 ^a	1 958.01 ± 277.09 ^{ab}	2 339.83 ± 285.17 ^{ab}	4 293.37 ± 838.27
	凋落物层 Litter layer	1 352.4 ± 149.86 ^{bc}	1 653.93 ± 42.58 ^c	2 846.63 ± 504.94 ^d	826.93 ± 19.22 ^{ab}	1 122.5 ± 143.50 ^{bc}	897.57 ± 116.48 ^{ab}	907.57 ± 97.57 ^{ab}	365.77 ± 65.34 ^a	1 246.66 ± 158.05
生物层 Biological layer	9 672.02 ± 1 635.3 ^{ab}	12 673.18 ± 1 319.4 ^{ab}	24 896.97 ± 4 321.5 ^c	17 165.53 ± 2 217.8 ^b	13 971.61 ± 2 643.3 ^{ab}	9 214.08 ± 1184.5 ^a	9 202.41 ± 647.34 ^a	14 729.4 ± 1 364.9 ^{ab}	13 940.65 ± 1 222.3	

不同小写字母表示不同样地间差异显著($p < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant differences between sampling sites ($p < 0.05$).

11 386.98 kg·hm⁻²之间, 平均为4 293.37 kg·hm⁻²。草本层地下部分生物量明显大于地上部分。青海省不同样地金露梅灌丛凋落物层的生物量介于365.77–2 846.63 kg·hm⁻²之间, 平均为1 246.66 kg·hm⁻²。

青海省不同样地金露梅灌丛群落平均生物量大小排序为: 灌木层(60.26%) > 草本层(30.80%) > 凋落物层(8.94%), 且灌木层生物量所占比例明显高于草本层和凋落物层。

3.2 金露梅灌丛植被各组分、凋落物及土壤层有机碳含量

青海省不同样地金露梅灌丛平均含碳率分别为45.12%、44.86%、44.44%、44.02%、44.16%、45.04%、44.53%、45.15%, 不同样地间灌木层平均含碳率差异不显著($p > 0.05$)。灌木各器官平均含碳率存在差异, 表现为枝(45.26%) > 叶(45.15%) > 根(43.69%)

草本层、凋落物层含碳率分别为34.6%和43.0%, 均低于灌木层含碳率。青海省不同样地草本各器官的含碳率在31.0%–39.5%之间。

土壤(0–100 cm)含碳率介于0.79%–12.29%之间(表3)。青海省不同样地表层0–10 cm土壤含碳率均高于其他深层土壤, 且随土层深度增加含碳率逐渐减小, 具有明显的垂直分布特征。

3.3 金露梅灌丛植被、凋落物及土壤层碳密度及分配格局

由表4和图1可得, 青海省不同样地金露梅灌丛

表3 青海各样地金露梅灌丛土壤含碳率(%)

Table 3 Soil carbon contents of the *Potentilla fruticosa* shrublands in different sampling sites in Qinghai (%)

样地 Sampling site	土层 Soil layer (cm)						合计 Total
	0–10	10–20	20–30	30–50	50–70	70–100	
Q1	9.98	8.02	8.54	3.36	1.60	0.79	32.29
Q2	9.86	9.19	6.63	3.05	3.71	1.03	33.47
Q3	9.78	7.00	5.71	4.38	3.83	3.69	34.39
Q4	9.03	6.81	5.80	3.49	3.19	2.52	30.84
Q5	9.42	6.18	5.66	1.71	1.73	2.44	27.14
Q6	3.55	5.06	6.68	5.53	4.07	–	24.89
Q7	12.29	5.50	4.13	4.43	4.72	4.59	35.66
Q8	8.31	6.70	3.27	2.83	2.70	2.58	26.39
平均 Average	9.03	6.81	5.80	3.60	3.19	2.52	30.63

–, 在取土样时70–100 cm的土壤由于砾石的原因未取到。样地代码见表1。
–, 70–100 cm of soil was not obtained for the reason of gravel. Sampling site see Table 1.

灌木层碳密度存在显著差异(图1), 碳密度大小依次为: Q6 > Q3 > Q4 > Q2 > Q7 > Q1 > Q8 > Q5, 平均为3 698.6 kg·hm⁻²。青海省不同样地金露梅灌丛灌木层碳主要分配在根部(49.5%–56.1%)。灌木地上部分(叶+枝)碳密度占灌木层碳密度的比例依次为: Q3 > Q1 > Q5 > Q8 > Q6 > Q2 > Q4 > Q7。灌木层碳密度占各生态系统生物层碳密度的68%以上, 占各生态系统碳密度的比例分别为Q3 (2.54%) > Q6 (1.28%) > Q2 (1.1%) > Q5 (0.96%) > Q1 (0.86%) > Q8 (0.51%)。

青海省不同样地金露梅灌丛草本层碳密度差异

表4 青海各样地金露梅灌丛生态系统各组分碳密度及分配格局(平均值±标准误差)
Table 4 Density and distribution pattern of carbon in the *Potentilla fruticosa* shrub ecosystem in different sampling sites in Qinghai (mean ± SE)

Layer/organ	碳含量																碳密度的分配格局							
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8
灌木层 Shrub layer	45.6	44.9	45.2	44.8	44.4	46.2	45.0	45.5	178.7	299.0	270.3	336.8	190.0	488.7	479.5	264.4	6.2	7.9	5.8	7.7	7.3	9.2	15.0	9.7
叶 Leaf	19.3 ^a	20.7 ^b	12.7 ^{ab}	39.3 ^b	32.9 ^a	42.3 ^c																		
枝 Branch	45.9	45.1	46.3	44.6	45.0	45.8	45.0	44.8	1231.2	1392.1	2096.0	1583.4	1046.7	1919.6	925.1	990.0	42.4	36.6	44.7	36.3	39.9	36.3	28.9	36.4
根 Root	43.8	44.6	41.8	42.7	43.0	42.4	43.6	45.1	1495.6	2115.4	2319.2	2442.3	1383.7	2880.5	1798.1	1462.5	51.5	55.6	49.5	56.0	52.8	54.5	56.1	53.8
总计 Total	45.1	44.9	44.4	44.2	44.2	44.8	44.5	45.2	363.9 ^{ab}	373.6 ^{abc}	143.9 ^{abc}	301.2 ^{bc}	369.4 ^a	307.6 ^c	271.9 ^{ab}	90.6 ^{ab}	70.4	70.6	46.8	66.6	50.8	87.8	75.5	76.7
草本层 Herb layer	39.3	39.7	35.3	33.3	35.9	45.3	34.5	35.0	2905.5	3806.5	4685.5	4362.5	2620.4	5288.8	3202.7	2716.9	24.9	32.8	13.2	14.6	25.8	40.4	37.7	36.3
叶 Leaf	23.4 ^a	54.5 ^{ab}	92.12 ^b	11.8 ^{ab}	25.4 ^b	42.6 ^c																		
根 Root	35.6	36.0	35.7	28.7	27.4	33.7	30.4	28.2	485.1	613.0	3534.6	1550.2	1508.8	194.1	393.3	435.5	75.1	67.2	86.8	85.4	74.2	59.6	62.3	63.7
总计 Total	37.4	37.8	35.5	31.0	31.6	39.5	32.5	31.6	645.8	912.8	4070.6	1815.6	2034.2	326.2	630.8	683.5	15.7	16.9	40.7	27.7	39.4	5.4	14.9	19.3
凋落物层 Litter layer	40.6	40.4	43.5	44.7	45.2	45.4	45.0	39.0	573.3	672.7	1256.4	370.0	507.1	406.0	408.4	142.9	13.9	12.5	12.5	5.7	9.8	6.7	9.6	4.0
生物层 Biological layer	41.0	41.0	41.1	40.0	40.3	43.2	40.7	38.5	4124.6	5392	10012.5	6548.1	8	6021	4241.9	3543.3	10.9	13.7	28.9	14.5	16.2	12.9	10.6	6.3
土壤层 Soil layer	5.38	5.58	6.00	5.14	4.52	4.98	5.14	4.40	33557.79	33900.04	24587.61	38766.43	26797.94	40569.36	35903.76	53147.14	89.1	86.3	71.1	85.5	83.8	87.1	89.4	93.7
生态系统 Ecosystem	8631.5 ^{ab}	7429.6 ^{ab}	6219.6 ^a	4678.3 ^{ab}	3824.6 ^a	5170.5 ^b	3876.9 ^{ab}	7231.9 ^c	37682.39	39292.04	34600.11	45314.53	31959.64	46590.36	40145.66	56690.44								

不同小写字母表示样地间差异显著 ($p < 0.05$)。Q1–Q8同表1。对于碳密度的数据: 白色表示各自灌木层或草本层的比例; 黑色表示占生物层的比例; 阴影部分表示占生态系统的比例。
Different lowercase letters indicate significant differences between sampling sites. Q1–Q8 see Table 1. For the data of carbon density: white type indicate occupying percentage out of the shrub layer or the herb layer; boldface indicate occupying percentage out of the biological layer; dash area indicate occupying percentage out of ecosystem.

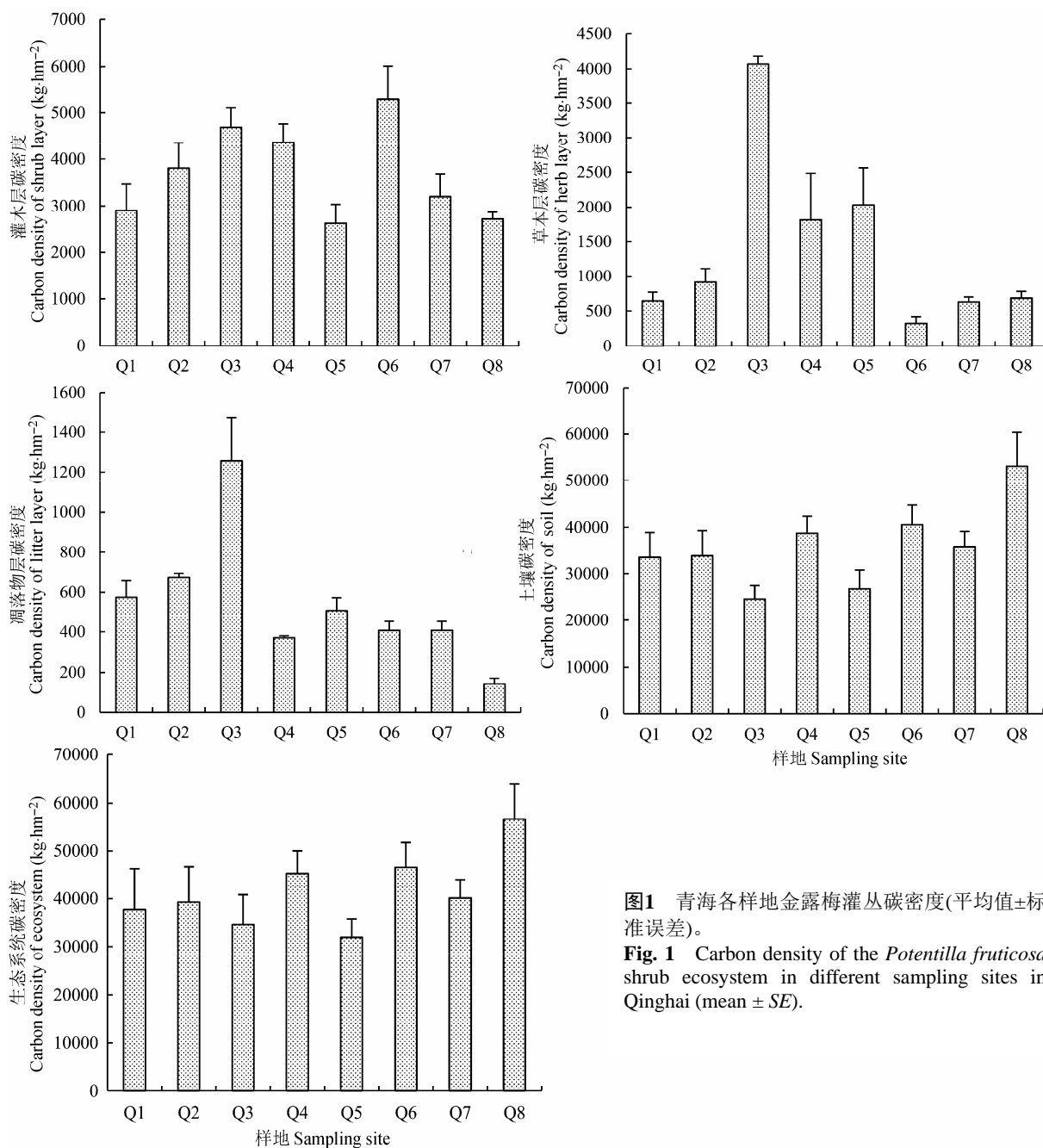


图1 青海各样地金露梅灌丛碳密度(平均值±标准误差)。

Fig. 1 Carbon density of the *Potentilla fruticosa* shrub ecosystem in different sampling sites in Qinghai (mean ± SE).

显著($p < 0.05$)(图1), 大小依次为: Q3 > Q5 > Q4 > Q2 > Q8 > Q1 > Q7 > Q6, 平均为1 389.9 kg·hm⁻²。草本层碳主要分配在根部(59.6%–75.1%)。

由表4和图1可知, 青海省不同样地金露梅灌丛凋落物层碳密度差异显著($p < 0.05$), 碳密度大小依次为: Q3 > Q2 > Q1 > Q5 > Q7 > Q6 > Q4 > Q8, 平均为542.1 kg·hm⁻²。

青海省不同样地金露梅灌丛土壤有机碳密度存在显著差异($p < 0.05$)(图1), 大小依次为: Q8 > Q6 > Q4 > Q7 > Q2 > Q1 > Q5 > Q3, 土壤层有机碳密度平均为35 903.76 kg·hm⁻²。土壤层有机碳密度占生

态系统碳密度的比例分别为: Q8 (93.7%) > Q7 (89.4%) > Q1 (89.1%) > Q6 (87.1%) > Q2 (86.3%) > Q4 (85.5%) > Q5 (83.8%) > Q3 (71.1%)。由以上结果可以看出, 土壤层是碳贮存最丰富的组分, 是灌木林生态系统多年甚至多代有机质积累的结果, 是长期稳定存在的部分。

青海省不同样地金露梅灌丛生态系统碳密度差异显著($p < 0.05$)表现为: Q8 (56 690.44 kg·hm⁻²) > Q6 (46 590.36 kg·hm⁻²) > Q4 (45 314.53 k kg·hm⁻²) > Q7 (40 145.66 kg·hm⁻²) > Q2 (39 292.04 kg·hm⁻²) > Q1 (37 682.39 kg·hm⁻²) > Q3 (34 600.11 kg·hm⁻²)

> Q5 (31 959.64 kg·hm⁻²), 平均为41 534.40 kg·hm⁻²。金露梅灌丛生态系统碳密度空间分布序列为: 土壤层>植被层>凋落物层。

4 讨论

4.1 金露梅灌丛生物量

青海省不同样地金露梅灌丛的生物量间存在显著差异, 这可能与不同样地的立地条件有关。此外, 本研究中金露梅灌丛生物量的平均值为13 940.65 kg·hm⁻², 与赵串串等(2013)的研究(平均值为6 766.4 kg·hm⁻²)相比生物量偏大, 这可能是因为在本研究中金露梅灌丛的生物量包括灌木层(8 361.92 kg·hm⁻²)、草本层(4 293.37 kg·hm⁻²)和凋落物层(1 246.66 kg·hm⁻²), 而在赵串串等(2013)的研究中, 金露梅灌丛的生物量只包含灌木层的生物量。本研究中, 金露梅灌丛草本层和凋落物层的生物量分别占总生物量的30.88%和8.97%, 合计占金露梅生态系统总生物量的39.85%, 说明金露梅灌丛草本层和凋落物层对金露梅灌丛生态系统生物量有一定的贡献。目前灌丛碳贮量的研究往往忽略了灌木下草本层和凋落物层的生物量(赵串串等, 2013; 刘华等, 2015), 这在一定程度上低估了灌丛生态系统的碳贮量, 如果忽略这部分, 将造成灌丛生态系统碳贮量估算的不准确。

4.2 金露梅灌丛有机碳含量

青海省金露梅灌丛灌木层平均含碳率为44.66%, 金露梅各器官含碳率在44.2%–45.22%之间, 这与田勇燕等(2011)的研究结果一致, 即植物含碳率因物种和器官的不同而存在差异, 其变幅为47%–59%。因此, 如果计算碳密度的时候都以0.5作为转换系数, 获得的灌丛群落碳密度会比实际值偏高或偏低。为了能进一步精确估算不同生态系统中的植被碳储量, 进行植被生态系统含碳率的测定是非常必要的。

青海省金露梅灌丛生态系统土壤剖面(0–100 cm)有机碳含量分别为: 9.03%、6.81%、5.80%、3.60%、3.19%、2.52%, 说明随土层深度增加土壤含碳率下降, 具有明显的垂直分布特征, 这与任丽娜(2012)等、杨玉姣等(2014)的研究结果一致。此外, 不同土层有机碳含量分别占土壤有机碳(0–100 cm)总含量的29.47%、22.22%、18.94%、11.74%、10.43%、8.23%, 说明虽然表层土壤的有机碳积累较多, 但

是深层土壤碳库也有一定的贡献, 若忽略深层土壤碳库的贡献, 则会使得整体的土壤碳密度偏低, 因此在土壤碳密度的估算中, 必须考虑深层土壤碳库的储量(Jobbagy & Jackson, 2000)。

4.3 金露梅灌丛碳密度及分配格局

本研究中, 金露梅灌丛灌木林的生物碳密度为5.09 t·hm⁻², 金露梅灌丛灌木林的生物碳密度明显低于冀北山地土庄绣线菊(*Spiraea pubescens*)灌丛(5.91 t·hm⁻², 李亚男等, 2014)和榛(*Corylus heterophylla*)灌丛的生物碳密度(12.81 t·hm⁻², 李亚男等, 2014), 也低于胡会峰等(2006)在全国尺度上灌丛生物碳密度的评估(10.88 t·hm⁻²)。潘红丽等(2009)的研究显示, 高海拔地区植物为抵御寒冷、平衡渗透压, 细胞中的非结构性碳(non-structural C)及总碳含量更高, 然而, 作为高寒的金露梅灌丛其生物碳密度较低, 可能与以下两个原因有关: (1)金露梅灌丛的生物量较小。与其他高寒灌丛相比, 金露梅灌丛的生物量偏小(山生柳(*Salix oritrepha*): 23 566.54 kg·hm⁻²; 千里香杜鹃(*Rhododendron thymifolium*): 18 530.09 kg·hm⁻²; 鲜卑花(*Sibiraea laevigata*): 26 172.22 kg·hm⁻²; 金露梅: 8 361.92 kg·hm⁻²); (2)与干扰有关。金露梅灌丛主要分布在山坡的基部, 受人类活动的干扰较为频繁, 因为干扰频度越高, 植被则始终处于生长的初始状态, 从而导致地上生物量的积累也越低, 生物量较小(王启基等, 1991)。

在金露梅灌丛中, 土壤有机碳密度占有最大比重, 为总碳密度的86.4%。与森林和高寒草地比较, 金露梅灌丛的土壤有机碳密度(35.9 t·hm⁻²)虽然低于森林土壤的平均碳密度(123.3 t·hm⁻²)(李江, 2008), 也低于青藏高原高寒草地1 m深平均有机碳密度(65 t·hm⁻²)(Yang *et al.*, 2008), 但其分别达到森林与草地碳密度的29.12%和55.23%, 进一步证实了青藏高原高寒灌丛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。

通过与已有的研究结果比较发现, 本研究的金露梅灌丛的总碳密度(41.53 t·hm⁻²)低于仪律北(2012)研究中青海乐都与湟源金露梅灌丛的总碳密度(62.34 t·hm⁻², 63.01 t·hm⁻²), 也显著低于该地区常见森林的碳密度(161.2 t·hm⁻²)。但是金露梅灌丛总碳密度达到青杨(*Populus cathayana*)总碳密度的25.8%, 这说明尽管灌丛的碳密度低于多数的森林, 但其仍能维持一定规模的碳库。因此, 在进行区域生

态系统碳密度评估时, 灌丛应被考虑在内。但是, 近年来有关森林植被碳汇功能评估的研究大部分都没有涉及灌丛(康文星等, 2009), 这就使得区域水平上碳储量的评估结果偏低。因此, 加强灌丛碳储量的研究对于正确认识中国森林的碳汇具有重要意义。

基金项目 中国科学院战略性先导科技专项(XDA-0505030304)、科技基础性工作专项(2015FY1103-0001)和国家科技支撑计划项目(2014BAC05B01)。

致谢 感谢中国科学院西北高原生物研究所张连、赵明玲在室内样品处理工作中给予的帮助。

参考文献

- Dong X (2009). Evaluation of forest resources in Qinghai Province. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 37, 5727–5728, 5751. (in Chinese with English abstract) [董旭 (2009). 青海省森林资源评价. 安徽农业科学, 37, 5727–5728, 5751.]
- Fan QS, Sha ZJ, Cao GC, Cao SK (2005). Assessment of ecology and environments on climate changing of Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Salt Lake Research*, 13(1), 12–18. (in Chinese with English abstract) [樊启顺, 沙占江, 曹广超, 曹生奎 (2005). 气候变化对青藏高原生态环境的影响评价. 盐湖研究, 13(1), 12–18.]
- Gao Q, Yang XC, Yin CY, Liu Q (2014). Estimation of biomass allocation and carbon density in alpine dwarf shrubs in Garzê Zangzu Autonomous Prefecture of Sichuan Province, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 38, 355–365. (in Chinese with English abstract) [高巧, 阳小成, 尹春英, 刘庆 (2014). 四川省甘孜藏族自治州高寒矮灌丛生物量分配及其碳密度的估算. 植物生态学报, 38, 355–365.]
- Hao WF, Chen CG, Liang ZS, Ma L (2008). Research advances in vegetation biomass. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 36, 175–182. (in Chinese with English abstract) [郝文芳, 陈存根, 梁宗锁, 马丽 (2008). 植被生物量的研究进展. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 36, 175–182.]
- Hou XY (1982). *Vegetation Map of the People's Republic of China*. China Map Press, Beijing. (in Chinese) [侯学煜 (1982). 中华人民共和国植被图. 中国地图出版社, 北京.]
- Hu HF, Wang ZH, Liu GH, Fu BJ (2006). Vegetation carbon storage of major shrublands in China. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 30, 539–544. (in Chinese with English abstract) [胡会峰, 王志恒, 刘国华, 傅伯杰 (2006). 中国主要灌丛植被碳储量. 植物生态学报, 30, 539–544.]
- Jin M, Li Y, Wang SL, Zhang XL, Lei L (2012). Alpine shrubs biomass and its distribution characteristics in Qilian Mountains. *Arid Land Geography*, 35, 952–959. (in Chinese with English abstract) [金铭, 李毅, 王顺利, 张学龙, 雷蕾 (2012). 祁连山高山灌丛生物量及其分配特征. 干旱区地理, 35, 952–959.]
- Jobbagy EG, Jackson RB (2000). The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 10, 423–426.
- Kang WX, Tian Z, He JN, Cui SS (2009). Carbon cycle in ten kinds of forest ecosystem in Guangzhou City. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 20, 2917–2924. (in Chinese with English abstract) [康文星, 田徽, 何介南, 崔莎莎 (2009). 广州市十种森林生态系统的碳循环. 应用生态学报, 20, 2917–2924.]
- Lei L, Liu XD, Wang SL, Li Y, Zhang XL (2011). Assignment rule of alpine shrubs biomass and its relationships to environmental factors in Qilian Mountains. *Ecology and Environmental Sciences*, 20, 1602–1607. (in Chinese with English abstract) [雷蕾, 刘贤德, 王顺利, 李毅, 张学龙 (2011). 祁连山高山灌丛生物量分配规律及其与环境因子的关系. 生态环境学报, 20, 1602–1607.]
- Li J (2008). *Study on Soil Carbon Stock and Its Spatial Distribution, Influence Factors in the Forest of China*. Master degree dissertation, Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan. 18–21. (in Chinese with English abstract) [李江 (2008). 中国主要森林群落林下土壤有机碳储量格局及其影响因子研究. 硕士学位论文, 四川农业大学, 四川雅安. 18–21.]
- Li YN, Yu XF, Xu ZQ, Liu LL, Yao WX, Wang L (2014). Carbon density characteristics of two typical shrub communities in the northern mountain region of Hebei. *Scientia Silvae Sinicae*, 50(6), 28–33. (in Chinese with English abstract) [李亚男, 虞晓凡, 许中旗, 刘乐乐, 姚卫星, 王丽 (2014). 冀北山地2种典型灌丛的碳密度特征. 林业科学, 50(6), 28–33.]
- Li YN, Zhao L, Wang QX, Du MY, Gu S, Xu SX, Zhang FQ, Zhao XQ (2006). Estimation of biomass and annual turnover quantities of *Potentilla fruticosa* shrub. *Acta Agrestia Sinica*, 14(1), 72–76. (in Chinese with English abstract) [李英年, 赵亮, 王勤学, 杜明远, 古松, 徐世晓, 张发起, 赵新全 (2006). 高寒金露梅灌丛生物量及年周转量. 草地学报, 14(1), 72–76.]
- Liu H, Dong L, Abula A, Li PJ, Jia RQ, Wang WY (2015). Value of carbon sequestration of *Tamarix* in the midstream of the Tarim River. *Acta Agriculturae Universitatis Ji-angxiensis*, 37, 484–489. (in Chinese with English abstract) [刘华, 董玲, 艾吉尔·阿不拉, 李丕军, 贾瑞琪, 王文月 (2015). 塔里木河中游怪柳灌丛碳储量及其价值评估. 江西农业大学学报, 37, 484–489.]
- Lu RK (1999). *Analysis of Soil Agrochemistry*. China Agriculture Sciencetech Press, Beijing. (in Chinese) [鲁如坤 (1999). 土壤农业化学分析方法. 中国农业科技出版社, 北京.]
- Pan HL, Li MH, Cai XH, Wu J, Du Z, Liu XL (2009).

- Responses of growth and ecophysiology of plants to altitude. *Ecology and Environmental Sciences*, 18, 722–730. (in Chinese with English abstract) [潘红丽, 李迈和, 蔡小虎, 吴杰, 杜忠, 刘兴良 (2009). 海拔梯度上的植物生长与生理生态特性. *生态环境学报*, 18, 722–730.]
- Piao SL, Fang JY, Huang Y (2010). The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *China Basic Science*, 12(2), 20–22. (in Chinese with English abstract) [朴世龙, 方精云, 黄耀 (2010). 中国陆地生态系统碳收支. *中国基础科学*, 12(2), 20–22.]
- Qiao CL, Li JM, Wang JH, Ge SD, Zhao L, Xu SX (2011). Annual carbon dioxide flux variations of alpine shrub ecosystem in the Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Agrestia Sinica*, 19, 910–916. (in Chinese with English abstract) [乔春连, 李婧梅, 王基恒, 葛世栋, 赵亮, 徐世晓 (2011). 青藏高原高寒灌丛生态系统CO₂通量年变化特征研究. *草地学报*, 19, 910–916.]
- Ren LN, Wang HY, Ding GD, Gao GL, Liu L (2012). Effects of *Larix principis-rupprechtii* plantation density control on soil organic carbon and nutrients characteristics. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 26(4), 138–143. (in Chinese with English abstract) [任丽娜, 王海燕, 丁国栋, 高广磊, 刘玲 (2012). 密度调控对华北落叶松人工林土壤有机碳及养分特征的影响. *干旱区资源与环境*, 26(4), 138–143.]
- Sturm M, Racine C, Tape K (2001). Increasing shrub abundance in the Arctic. *Nature*, 411, 546–547.
- Tian YY, Qin F, Yan H, Guo WH, Guan QW (2011). Carbon content rate in the common woody plants of China. *Journal of Anhui Agriculture Science*, 39, 16166–16169. (in Chinese with English abstract) [田勇燕, 秦飞, 言华, 郭伟红, 关庆伟 (2011). 我国常见木本植物的含碳率. *安徽农业科学*, 39, 16166–16169.]
- Veldkamp E (1994). Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation. *Soil Science Society of American Journal*, 58, 175–180.
- Wang GR, Chen XR, Han YZ, Yang CD, Xu CL (2006). Photosynthetic characteristics of three species of *Liriope*. *Grassland and Turf*, (3), 27–34. (in Chinese with English abstract) [王国荣, 陈秀荣, 韩玉竹, 杨成德, 徐长林 (2006). 东祁连山高寒灌丛土壤微生物的分布特征. *草原与草坪*, (3), 27–34.]
- Wang QJ, Zhou XM, Zhang YQ, Zhao XQ (1991). Structure characteristics and biomass of *Potentilla fruticosa* shrub in Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Botanic Boreali-Occidentalia Sinica*, 11, 333–340. (in Chinese with English abstract) [王启基, 周兴民, 张堰青, 赵兴全 (1991). 青藏高原金露梅灌丛的结构特征及其生物量. *西北植物学报*, 11, 333–340.]
- Yang LC, Zhong ZB, Liu HC, Song WZ, Xu WH, Zhou GY, Nie XM (2013). Community characteristics of alpine shrub *Salix oritrepha*. *Bulletin of Botanical Research*, 33, 653–658. (in Chinese with English abstract) [杨路存, 钟泽兵, 刘何春, 宋文珠, 徐文华, 周国英, 聂学敏 (2013). 高寒山生柳灌丛的群落特征研究. *植物研究*, 33, 653–658.]
- Yang YH, Fang JY, Tang YH, Ji CJ, Zheng CY, He JS, Zhu B (2008). Storage, patterns and controls of soil organic carbon in the Tibetan grasslands. *Global Change Biology*, 14, 1592–1599.
- Yang YJ, Chen YM, Cao Y (2014). Carbon density and distribution of *Pinus tabulaeformis* plantation ecosystem in Hilly Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 2128–2136. (in Chinese with English abstract) [杨玉姣, 陈云明, 曹扬 (2014). 黄土丘陵区油松人工林生态系统碳密度及其分配. *生态学报*, 34, 2128–2136.]
- Yi LB (2012). *Research and Assessment of Forest Carbon Potential in Qinghai*. Master degree dissertation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi. 5–52. (in Chinese with English abstract) [仪律北 (2012). 青海森林碳汇潜力分析与评估. 硕士学位论文, 西北农林科技大学, 陕西杨凌. 51–52.]
- Yu HY, Xu JC (2009). Effects of climate change on vegetations on Qinghai-Tibet Plateau: A review. *Chinese Journal of Ecology*, 28, 747–754. (in Chinese with English abstract) [于海英, 许建初 (2009). 气候变化对青藏高原植被影响研究综述. *生态学杂志*, 28, 747–754.]
- Zhang XH, Zhang YD, Gu FX, Liu SR (2011). Dynamics of shrubs normalized difference vegetation index and its correlations with climatic factors in Southwest China. *Chinese Journal of Ecology*, 30, 2577–2583. (in Chinese with English abstract) [张笑鹤, 张远东, 顾峰雪, 刘世荣 (2011). 西南地区灌丛归一化植被指数动态及其与气候因子的相关性. *生态学杂志*, 30, 2577–2583.]
- Zhao CC, Liu L, Yang JJ, Dong X (2013). Study on the biomass of *Potentilla fruticosa* forest in Qinghai loess hilly region. *Guangdong Agricultural Sciences*, (5), 179–182. (in Chinese with English abstract) [赵串串, 刘龙, 杨晶晶, 董旭 (2013). 青海黄土丘陵区金露梅灌丛生物量的研究. *广东农业科学*, (5), 179–182.]
- Zhou HK, Zhou L, Zhao XQ, Shen ZX, Li YN, Zhou XM, Yan ZL, Liu W (2002). Study of formation pattern of below-ground biomass in *Potentilla fruticosa* shrub. *Acta Prataculturae Sinica*, 11(2), 59–65. (in Chinese with English abstract) [周华坤, 周立, 赵新全, 沈振西, 李英年, 周兴民, 严作良, 刘伟 (2002). 金露梅灌丛地下生物量形成规律的研究. *草业学报*, 11(2), 59–65.]

特邀编委: 刘 庆 责任编辑: 李 敏