

# 西藏雅鲁藏布江流域中段砂生槐灌丛生物量分配及碳密度

崔光帅<sup>1,2</sup> 张 林<sup>1\*</sup> 沈 维<sup>1</sup> 刘新圣<sup>3</sup> 王媛韬<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院高寒生态学与生物多样性重点实验室, 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101; <sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049; <sup>3</sup>九江学院旅游与国土资源学院, 江西九江 332005

**摘 要** 灌丛是生态系统碳密度估算中不可或缺的部分, 其面积的增加被认为是我国陆地生态系统碳密度增加的一个重要原因, 也是生态系统碳汇研究中最不确定的一个因素。该文采用相对生长法和收获法测定了西藏雅鲁藏布江中游18个砂生槐 (*Sophora moorcroftiana*) 灌丛样点的群落生物量, 并利用实测的各器官全碳含量估算了灌丛碳密度, 主要研究结果如下: 1) 灌木层植株盖度和生物量体积(盖度与高度的乘积)均能较好地预测各器官的生物量, 但盖度对地上部分各器官生物量的预测效果优于生物量体积; 2) 砂生槐灌丛群落平均总生物量为5.71 Mg·hm<sup>-2</sup>, 变化范围2.32–8.96 Mg·hm<sup>-2</sup>, 灌木层是群落总生物量的主体部分, 平均为4.08 Mg·hm<sup>-2</sup>, 占群落总生物量的71.45%; 就地上、地下生物量的分配而言, 无论是灌木层还是草本层, 分配到根系的生物量更多, 平均为地上部分的1.17倍, 其在灌木层和草本层分别为2.08和0.86 Mg·hm<sup>-2</sup>; 3) 灌丛平均碳密度为2.48 Mg·hm<sup>-2</sup>, 其空间分布表现为雅鲁藏布江中游西部地区较高, 东部地区较低。研究结果表明砂生槐生物量更多地分配到用于吸收水分和养分以及固定、支撑植物体的根系, 体现了砂生槐对雅鲁藏布江流域干旱河谷环境的适应。此外, 雅鲁藏布江中游东部地区灌丛群落碳密度低于西部, 主要与自然环境条件(东部海拔较低、气温较高、蒸散量较大, 进一步加剧干旱)和人类活动干扰有关。在未来气候变化背景下, 蒸散持续降低将有助于砂生槐灌丛碳密度的增加。

**关键词** 植物相对生长法; 生物量体积; 碳密度; 冠幅; 雅鲁藏布江中游

引用格式: 崔光帅, 张林, 沈维, 刘新圣, 王媛韬 (2017). 西藏雅鲁藏布江流域中段砂生槐灌丛生物量分配及碳密度. 植物生态学报, 41, 53–61. doi: 10.17521/cjpe.2016.0019

## Biomass allocation and carbon density of *Sophora moorcroftiana* shrublands in the middle reaches of Yarlung Zangbo River, Xizang, China

CUI Guang-Shuai<sup>1,2</sup>, ZHANG Lin<sup>1\*</sup>, SHEN Wei<sup>1</sup>, LIU Xin-Sheng<sup>3</sup>, and WANG Yuan-Tao<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Alpine Ecology and Biodiversity of Chinese Academy of Sciences, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; <sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; and <sup>3</sup>College of Tourism and Territorial Resources, Jiujiang University, Jiujiang, Jiangxi 332005, China

### Abstract

**Aims** The expansion of shrublands is considered as one of the key reasons leading to the increase of carbon density in terrestrial ecosystems in China. In the present study, our aims were to explore the biomass allocation and carbon density of *Sophora moorcroftiana* shrublands in Xizang.

**Methods** We sampled the biomass of *S. moorcroftiana* shrubs from 18 sites in the middle reaches of Yarlung Zangbo River, Xizang. Using concentrations of different organs, we estimated the carbon density of different layers in *S. moorcroftiana* shrublands.

**Important findings** The plant cover rather than biomass volume (the product of cover and height) provided the best fit for aboveground biomass. The average of the total biomass was 5.71 Mg·hm<sup>-2</sup>, ranging from 2.32 to 8.96 Mg·hm<sup>-2</sup>. The average biomass of shrub layer, the main component of shrub ecosystem, was 4.08 Mg·hm<sup>-2</sup>, accounting for 71% of the total biomass. The belowground biomass of shrub and herb layers was 2.08 and 0.86 Mg·hm<sup>-2</sup>, respectively, which was higher than the corresponding aboveground biomass. The average biomass carbon density was 2.48 Mg·hm<sup>-2</sup>. Shrub vegetation in the eastern part of the middle reaches has lower carbon density than that in the western part. The relatively high biomass allocation to roots to increase water and nutrient undertake as well as physical support for plants is an important strategy of *S. moorcroftiana* to cope with the arid

收稿日期Received: 2016-01-13 接受日期Accepted: 2016-05-09

\* 通信作者Author for correspondence (E-mail: zhanglin@itpcas.ac.cn)

environment on the Qinghai-Xizang Plateau. Moreover, the lower carbon density in the eastern part of the middle reaches might be due to the dry environment resulted from high temperature and evapotranspiration and enhanced human activities at low altitudes. The continuous decrease of evapotranspiration under scenarios of future climate change may lead to increase in carbon density in *S. moorcroftiana* shrublands.

**Key words** plant allometry; biomass volume; carbon density; crown breadth; middle reaches of Yarlung Zangbo River

**Citation:** Cui GS, Zhang L, Shen W, Liu XS, Wang YT (2017). Biomass allocation and carbon density of *Sophora moorcroftiana* shrublands in the middle reaches of Yarlung Zangbo River, Xizang, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 41, 53–61. doi: 10.17521/cjpe.2016.0019

作为生态系统最基本的特征指标, 生物量直接反映了生态系统生产力水平的高低(Keeling & Phillips, 2007), 同时作为衡量植被固碳能力的重要参数, 生物量的准确测定在碳循环与气候变化相关研究中的重要意义(Dai *et al.*, 2013)。碳密度是指单位土地面积的碳存储量, 是反映生态系统碳存储能力的重要指标之一, 作为估算生态系统碳储量和研究生态系统与大气碳交换的重要参数, 其准确估算是判定碳汇、制定缓解全球变化的合理政策措施的重要依据(吕超群和孙书存, 2004)。

灌丛通常是指高度在3 m以内、茎干具有多个分枝且主干不明显的木本植物。在以往研究中, 灌丛常被当作介于森林和草地之间的一个过渡类型, 并没有受到足够的重视。在五年一次的中国森林资源清查工作中, 灌丛(灌木林)也只有一个简单的面积信息<sup>①</sup>。目前有关生物量和碳密度方面的研究, 灌丛远远滞后于森林和草地(胡会峰等, 2006)。随着全球气候变暖和人类活动的加强, 灌丛入侵草地、森林等问题越来越突出(Sturm *et al.*, 2001; Montane *et al.*, 2007), 草地向灌丛生态系统的演替加快, 进而增大灌丛分布面积, 这被认为是我国陆地生态系统碳储量增加的主要原因(王玲, 2009; 朴世龙等, 2010)。然而灌丛植被的碳汇能力是目前我国陆地生态系统碳汇研究中最不确定的一个因素(Piao *et al.*, 2009), 因此加强灌丛群落生物量和碳密度相关研究, 对于准确估算我国陆地生态系统碳汇功能和固碳潜力具有重要意义。

在西藏, 灌丛分布相当普遍, 几乎除羌塘高原西北部以外都有分布, 其面积达 $13 \times 10^6 \text{ hm}^2$ , 已经超过森林, 成为西藏陆地生态系统中分布面积仅次于草地的一个重要类型(中国科学院中国植被图编

辑委员会, 2001), 因此灌丛是西藏植被碳汇估算中不可或缺的组成部分。然而, 目前有关西藏灌丛生物量方面的研究鲜有报道(王启基等, 1991; 李英年等, 2006; 梁倍等, 2013), 涉及根系生物量的研究则更少见(高巧等, 2014)。西藏雅鲁藏布江(以下简称雅江)中游地区是西藏经济社会发展的核心区域, 而砂生槐(*Sophora moorcroftiana*)灌丛正是该区分布最广、最具代表性的灌丛类型, 其受人类活动的影响较大, 因此探索该区砂生槐灌丛群落的生物量现状及其分配规律对于指导当地生态建设具有现实意义。砂生槐灌丛主要分布在雅江流域中段的宽谷、两侧低山及拉萨河、年楚河等主要支流的宽谷内。作为典型的河谷灌丛, 砂生槐具有良好的防风固沙、涵养水源等重要生态作用(彭跃明, 1997)。以往研究主要集中在砂生槐的种群和群落结构、繁殖特性、固沙特性和物种多样性等方面(赵文智, 1998; 郭其强等, 2009; 李海东等, 2011; 王文娟等, 2011; 杨兆平等, 2011; 赵垦田等, 2013), 尚未见到有关群落生物量和碳密度方面的报道。本研究采用相对生长法对西藏雅江流域中游的砂生槐灌丛进行地上和地下不同器官的生物量调查, 利用样方法测定了草本植物和凋落物的生物量, 并结合实测的全碳含量对灌丛植被碳密度进行了详尽计算, 以期为准评价西藏灌丛生态系统碳收支和碳平衡提供基础数据, 为指导当地生态建设提供科学依据。

## 1 研究区域和方法

### 1.1 研究区概况

调查工作主要在西藏自治区的贡嘎县、扎囊县、南木林县、谢通门县、曲水县、日喀则市和拉萨市境内开展, 地处雅江流域中游的宽谷、两侧低山及拉萨河的宽谷, 海拔3 500–3 900 m, 气候温暖干燥, 年平均气温5–9 °C, 年降水量300–450 mm。地表多

<sup>①</sup> 森林资源管理司(2010). 全国森林资源统计——第七次全国森林资源清查.

风化碎石, 土壤以沙土为主。由于河谷中常有风成沙地或沙丘, 使喜干暖、抗风沙并耐贫瘠的砂生槐得以大量分布, 成为该区干暖河谷中最具代表性的灌丛植物。常形成成片的单优群落, 在固定、半固定沙丘及附近地区常与半灌木状的藏沙蒿 (*Artemisia wellbyi*) 形成共优种群落, 而在一些坡地上则与野丁香 (*Leptodermis potanini*) 形成共优种群落。其他常见的伴生物种有固沙草 (*Orinus thoroldii*)、毛瓣棘豆 (*Oxytropis sericopetala*)、白草 (*Pennisetum flaccidum*) 和小角柱花 (又叫小蓝雪花 *Ceratostigma minus*) 等。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 样点选择与样地设置

基于《1:1 000 000 中国植被图集》(中国科学院中国植被图编辑委员会, 2001), 我们于2011–2013年对该区砂生槐灌丛进行了实地调查。考虑到交通的可达性, 我们主要在公路沿线开展工作, 选取典型的砂生槐分布区进行调查, 样点的选择标准包括:

1) 群落总分布面积  $> 5 \text{ hm}^2$ , 2) 距公路 200 m 以上, 3) 原则上两样点间距离  $> 30 \text{ km}$ 。最后选择了 18 个砂生槐灌丛调查样点 (图 1)。

### 1.2.2 灌木层生物量估算

每个样点设置一个  $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$  的代表性样地, 在样地内沿其中一条对角线设置 3 个  $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$  的样方, 测量样方内每一株灌木的高度 ( $H$ ) 和冠幅 (包括长度和垂直于长轴的宽度), 将每丛灌木的垂直投影面积视为一个标准椭圆, 利用冠幅长、宽计算灌木投影面积 ( $C$ )。每个样点选取 3–5 株不同大小的标准株, 共获取 52 株标准株, 将每株标准株分枝、叶、根称取鲜质量, 取样后带回实验室, 在  $70^\circ \text{C}$  下烘干至恒质量 (48 h), 称取样品干质量数据。根据样品干料率以推算各器官干质量。分别采用线性、指数、对数及幂函数模型建立各器官生物量与调查因子 ( $H$ 、 $C$ ) 及其组合 (生物量体积,  $V = C \times H$ ) 的回归方程, 依据决定系数  $R^2$  的大小评价方程的优劣, 选出拟合度好且具有生物学意义的数学模型来最终描述

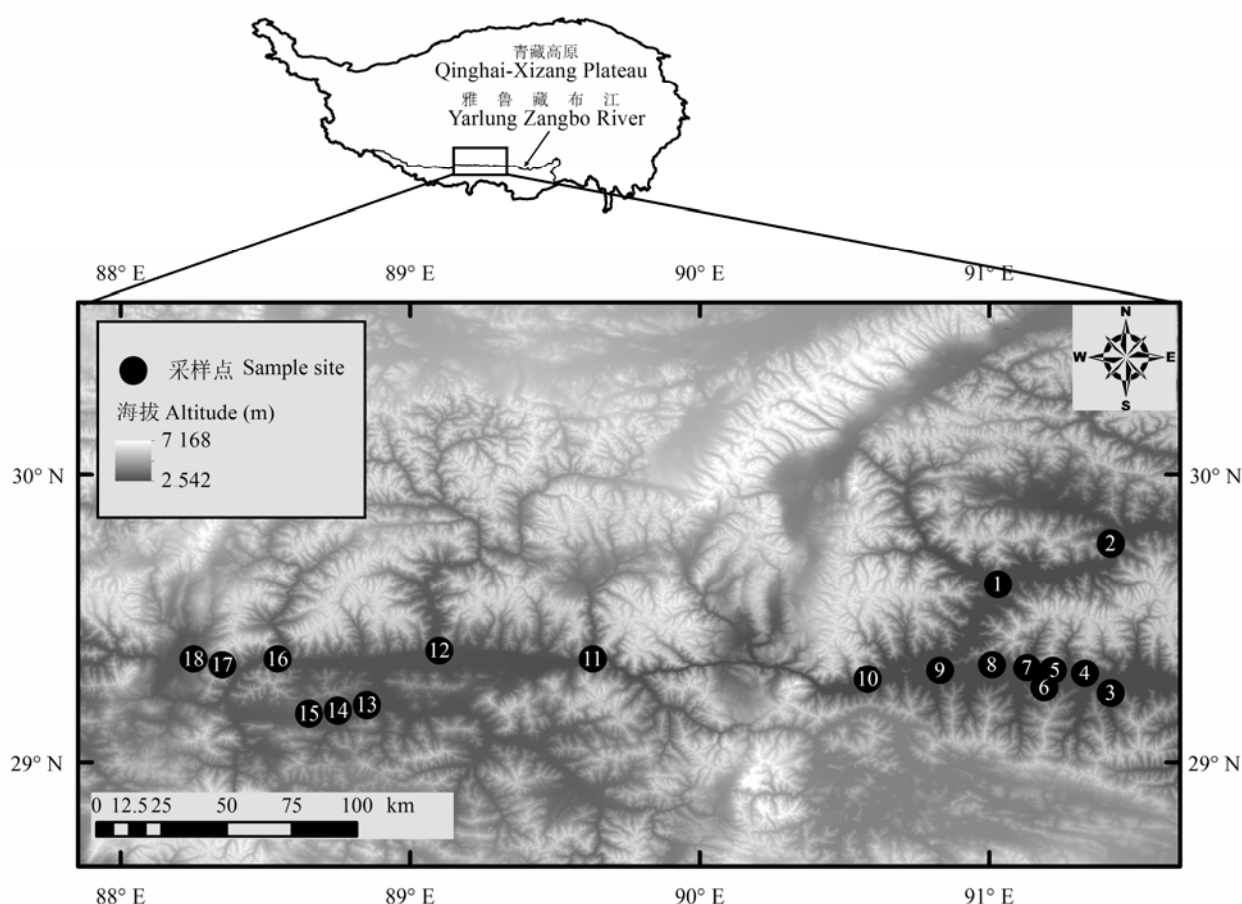


图1 砂生槐调查样点分布图。

Fig. 1 Distribution of sampled sites for *Sophora moorcroftiana* shrublands.



各器官生物量和各调查因子或其组合的关系,进而利用该关系模型估算调查样地内灌木层各器官生物量。

### 1.2.3 草本层、凋落物生物量估算

利用样方收获法估算草本层生物量,即在每个样方内选择1个50 cm × 50 cm的小样方,收获该样方中的所有草本,分别称取地上部分和地下部分鲜质量,取样带回室内,烘干至恒质量,通过样品干料率计算草本层地上与地下生物量。

凋落物生物量估算类似草本层生物量估算,在每个灌木样方内设置1个1 m × 1 m的样方作为凋落物生物量调查小样方,收集样方内的所有凋落物,称取鲜质量并取样带回室内,测定干料率后推算单位土地面积的凋落物量。

### 1.2.4 生物量碳密度估算及东、西部碳密度比较

利用各器官生物量和对应的实测全碳含量估算灌木层碳密度。所有样品均在植被与环境变化国家重点实验室进行全碳含量测定,测定方法为重铬酸钾-硫酸氧化法。

由于砂生槐灌丛具有在宽谷地带成片分布的特点,而拉萨与日喀则之间的高山峡谷正好将本研究中的雅江中游地带分割成东、西两个砂生槐灌丛较集中的宽谷区域,加之该区域具有西高东低的地势特征,大致可以90°E为界将18个采样点分划为东、西两部分,从而进一步比较不同区域砂生槐灌丛碳密度的差异。

## 2 结果和分析

### 2.1 砂生槐灌丛灌木层生物量

砂生槐灌木不同器官干质量均与调查因子显著相关(表1),就拟合方程而言,对数模型和指数模型的拟合效果较差( $R^2 = 0.35-0.65$ ),幂函数模型和线性模型拟合效果较好( $R^2 = 0.50-0.94$ ),而幂函数模型( $R^2 = 0.53-0.94$ )又优于线性模型( $R^2 = 0.50-0.90$ ),因此能更好地描述各器官干质量与调查因子的关系。比较不同器官的幂函数模型,发现植株冠幅( $R^2 = 0.86-0.94$ )或生物量体积( $R^2 = 0.82-0.92$ )对器官生物量的预测能力远高于植株高度( $R^2 = 0.53-0.75$ ),其中,冠幅能帮助我们更好地预测灌木的地上生物量,而生物量体积有助于我们更好地预测地下部分,因此,我们选用关系最好的3个模型—— $W_b = 0.0011C^{1.279}$ ,  $W_l = 0.003C^{1.039}$ ,  $W_r = 0.024V^{0.789}$ ,计算

样地中砂生槐灌木的生物量。

18个样点的估算结果表明,西藏雅江流域典型地段砂生槐灌丛灌木层平均总生物量为4.08  $Mg \cdot hm^{-2}$ ,变化范围在1.63–7.71  $Mg \cdot hm^{-2}$ ,其中,枝条的平均生物量为1.57  $Mg \cdot hm^{-2}$  (0.62–3.16  $Mg \cdot hm^{-2}$ ),占灌木层生物量的38.48%;叶的平均生物量为0.43  $Mg \cdot hm^{-2}$  (0.17–0.76  $Mg \cdot hm^{-2}$ ),占10.54%;根的平均生物量为2.08  $Mg \cdot hm^{-2}$  (0.84–4.12  $Mg \cdot hm^{-2}$ ),占50.98%(表2)。砂生槐灌木层地下与地上生物量之比为1.05。

### 2.2 草本层生物量及凋落物量

砂生槐灌丛群落的草本层平均生物量为1.53  $Mg \cdot hm^{-2}$ ,变化范围在0.61–4.92  $Mg \cdot hm^{-2}$ 。其中,地上部分平均生物量为0.67  $Mg \cdot hm^{-2}$  (0.53–2.93  $Mg \cdot hm^{-2}$ ),占草本层总生物量的43.79%;地下部分为0.86  $Mg \cdot hm^{-2}$ ,占56.21%,且变异较大,最低仅为0.08  $Mg \cdot hm^{-2}$ ,最高可达2.81  $Mg \cdot hm^{-2}$ (表3)。总体来看,地下部分生物量略高于地上部分,但差异并不显著( $p > 0.05$ )。平均凋落物量为0.1  $Mg \cdot hm^{-2}$ ,变化范围在0.08–0.27  $Mg \cdot hm^{-2}$ 。

### 2.3 砂生槐灌丛群落总生物量及碳密度

西藏雅江流域中段砂生槐灌丛群落平均总生物量为5.71  $Mg \cdot hm^{-2}$ ,变化范围在2.32–8.96  $Mg \cdot hm^{-2}$ ,其中灌木层平均为4.08  $Mg \cdot hm^{-2}$ ,占群落总生物量的71.45%;草本层为1.53  $Mg \cdot hm^{-2}$ ,占26.80%;凋落物量仅为0.1  $Mg \cdot hm^{-2}$ ,占1.75%。进一步分析群落地上生物量与地下生物量的关系,发现二者显著正相关(图2),表明利用地上生物量的测定数据估算研究区范围内的砂生槐灌丛植被的地下生物量是可行的。

砂生槐灌丛各部分实测的平均全碳含量分别为:枝47.02%,叶44.92%,根45.93%,草本地上部分36.37%,草本地下部分33.79%,凋落物43.49%。利用这些实测的不同器官全碳含量数据,结合各样点生物量计算出砂生槐灌丛平均碳密度为2.48  $Mg \cdot hm^{-2}$ ,变化范围在1.03–3.90  $Mg \cdot hm^{-2}$ ,其中,灌木层、草本层和凋落物碳密度分别为1.88  $Mg \cdot hm^{-2}$ 、0.55  $Mg \cdot hm^{-2}$ 和0.05  $Mg \cdot hm^{-2}$ (图3)。灌木层各器官碳密度所占比例分别是:枝39.89%,叶10.11%,根50.00%,碳密度主要集中在根和枝,二者占89.89%。各部分碳密度大小顺序为灌木层根>灌木层枝>灌木层叶>草本层地下部分>草本层地上部

表1 砂生槐灌丛各器官生物量回归模型  
Table 1 Allometric functions for the biomass of different organs of *Sophora moorcroftiana*

模型 Model	器官 Organ	植株高度 Plant height (cm)		树冠投影面积 Crown projection area (cm <sup>2</sup> )		生物量体积 Biomass volume (cm <sup>3</sup> )	
		回归方程 Regression equation	决定系数 Coefficient of determination (R <sup>2</sup> )	回归方程 Regression equation	决定系数 Coefficient of determination (R <sup>2</sup> )	回归方程 Regression equation	决定系数 Coefficient of determination (R <sup>2</sup> )
线性模型 Linear model	枝 Branch	$W_b = 19.21H - 317.6$	0.56	$W_b = 0.022C - 40.86$	0.89	$W_b = 0.0009V + 79.98$	0.83
	叶 Leaf	$W_l = 5.41H - 91.10$	0.50	$W_l = 0.006C - 5.95$	0.69	$W_l = 0.0003V + 18.96$	0.78
	根 Root	$W_r = 23.69H - 389.38$	0.61	$W_r = 0.025C - 5.27$	0.82	$W_r = 0.0011V + 125.47$	0.80
	地上部分 Aboveground	$W_a = 24.63H - 408.70$	0.58	$W_a = 0.028C - 46.81$	0.90	$W_a = 0.0012V + 98.94$	0.87
	总生物量 Total biomass	$W_t = 45.47H - 728.58$	0.60	$W_t = 0.051C - 40.63$	0.89	$W_t = 0.0022V + 224.32$	0.86
对数模型 Logarithm model	枝 Branch	$W_b = 547.73\ln H - 1519.40$	0.44	$W_b = 250\ln C - 1920.30$	0.55	$W_b = 187.5\ln V - 1775.10$	0.56
	叶 Leaf	$W_l = 145.97\ln H - 401.71$	0.35	$W_l = 64.62\ln C - 490.61$	0.41	$W_l = 48.87\ln V - 457.58$	0.43
	根 Root	$W_r = 457.85\ln H - 1817.50$	0.47	$W_r = 289.76\ln C - 2214.10$	0.53	$W_r = 220.28\ln V - 2076.30$	0.56
	地上部分 Aboveground	$W_a = 693.69\ln H - 1921.10$	0.44	$W_a = 314.62\ln C - 2410.9$	0.55	$W_a = 236.37\ln V - 2232.7$	0.56
	总生物量 Total biomass	$W_t = 1298\ln H - 3578.50$	0.47	$W_t = 575.63\ln C - 4378.2$	0.56	$W_t = 435.1\ln V - 4081.5$	0.58
指数模型 Exponential model	枝 Branch	$W_b = 8.3174e^{0.075H}$	0.56	$W_b = 32.188e^{7E-05C}$	0.59	$W_b = 52.298e^{3E-06V}$	0.40
	叶 Leaf	$W_l = 4.5053e^{0.061H}$	0.50	$W_l = 13.075e^{6E-05C}$	0.55	$W_l = 19.174e^{2E-06V}$	0.41
	根 Root	$W_r = 17.132e^{0.068H}$	0.65	$W_r = 64.966e^{6E-05C}$	0.56	$W_r = 95.376e^{2E-06V}$	0.41
	地上部分 Aboveground	$W_a = 13.073e^{0.071H}$	0.56	$W_a = 46.723e^{7E-05C}$	0.60	$W_a = 73.903e^{2E-06V}$	0.42
	总生物量 Total biomass	$W_t = 29.69e^{0.070H}$	0.60	$W_t = 109.07e^{6E-05C}$	0.58	$W_t = 166.32e^{2E-06V}$	0.41
幂函数模型 Power function model	枝 Branch	$W_b = 0.0183H^{2.565}$	0.63	$W_b = 0.0011C^{1.279}$	0.94	$W_b = 0.0028V^{0.938}$	0.92
	叶 Leaf	$W_l = 0.0408H^{1.999}$	0.53	$W_l = 0.003C^{1.039}$	0.86	$W_l = 0.0074V^{0.754}$	0.82
	根 Root	$W_r = 0.0694H^{2.313}$	0.75	$W_r = 0.0135C^{1.046}$	0.87	$W_r = 0.0237V^{0.789}$	0.91
	地上部分 Aboveground	$W_a = 0.0418H^{2.415}$	0.62	$W_a = 0.0027C^{1.211}$	0.94	$W_a = 0.007V^{0.886}$	0.92
	总生物量 Total biomass	$W_t = 0.0979H^{2.391}$	0.69	$W_t = 0.0112C^{1.138}$	0.93	$W_t = 0.0241V^{0.844}$	0.93

C, 树冠投影面积; H, 植株高度; V, 生物量体积。W<sub>b</sub>、W<sub>l</sub>、W<sub>r</sub>分别为枝、叶、根干质量。  
C, crown projection area; H, plant height; V, biomass volume. W<sub>b</sub>, W<sub>l</sub> and W<sub>r</sub> represent the dry mass of branches, leaves and roots, respectively.

分>凋落物。

进一步比较东、西部样点碳密度的差异,发现西部地区砂生槐灌木层碳密度显著高于东部( $p < 0.05$ , 表4),草本层和凋落物则表现为东部>西部,但差异不显著( $p > 0.05$ , 表4)。

### 3 讨论

#### 3.1 砂生槐灌丛对高原干旱河谷环境的适应

青藏高原由于海拔高、辐射强、温度低,除了东南部较湿润,高原大部分地区都具干旱半干旱气候特点,因此高原灌丛通常较低矮、个体之间冠层不连续,为典型的离散型灌丛。本研究中砂生槐灌

丛属于干旱河谷灌丛,其群落地上部分生物量(不含凋落物)介于1.4–6.9 Mg·hm<sup>-2</sup>,平均为3.53 Mg·hm<sup>-2</sup>,与青藏高原东缘的岷江干旱河谷灌丛地上生物量相当(1.4–4.8 Mg·hm<sup>-2</sup>; 刘国华等, 2003; 王勇军等, 2010),略高于青海海北高寒金露梅灌丛(1.5–2.6 Mg·hm<sup>-2</sup>; 王启基等, 1991; 李英年等, 2006)。目前有关高原灌丛根系生物量的报道很少,本研究中砂生槐灌丛根系生物量在0.8–4.1 Mg·hm<sup>-2</sup>之间,平均为2.1 Mg·hm<sup>-2</sup>,高于青海海北高寒金露梅灌丛(1.5 Mg·hm<sup>-2</sup>; 李英年等, 2006)和四川甘孜州高寒柳灌丛和杜鹃灌丛(1.3–1.8 Mg·hm<sup>-2</sup>; 高巧等, 2014),这与砂生槐的深根系特点以及对干旱河

表2 砂生槐灌丛灌木层生物量(平均值±标准误差)  
Table 2 Biomass (mean ± SE, Mg·hm<sup>-2</sup>) of the shrub layer of *Sophora moorcroftiana* communities

样点 Plot No.	地上部分生物量 Aboveground biomass			根生物量 Root biomass	合计 Total
	枝 Branch	叶 Leaf	小计 Total		
1	0.62 ± 0.17	0.17 ± 0.04	0.79	0.84 ± 0.16	1.63
2	1.07 ± 0.17	0.32 ± 0.04	1.39	1.28 ± 0.06	2.67
3	0.62 ± 0.17	0.22 ± 0.03	0.84	1.03 ± 0.07	1.87
4	1.46 ± 0.18	0.37 ± 0.04	1.84	1.66 ± 0.19	3.50
5	0.72 ± 0.09	0.19 ± 0.02	0.90	1.00 ± 0.06	1.90
6	1.07 ± 0.04	0.39 ± 0.02	1.46	2.14 ± 0.19	3.60
7	1.34 ± 0.21	0.33 ± 0.04	1.67	1.71 ± 0.30	3.38
8	1.58 ± 0.28	0.41 ± 0.08	2.00	1.75 ± 0.24	3.74
9	1.63 ± 0.32	0.41 ± 0.08	2.03	1.92 ± 0.52	3.95
10	1.59 ± 0.55	0.40 ± 0.10	1.99	2.17 ± 0.66	4.16
11	2.07 ± 0.25	0.76 ± 0.08	2.83	3.06 ± 0.47	5.89
12	1.74 ± 0.14	0.48 ± 0.04	2.22	2.32 ± 0.18	4.55
13	1.30 ± 0.32	0.35 ± 0.06	1.65	1.78 ± 0.33	3.43
14	2.17 ± 0.09	0.64 ± 0.02	2.81	3.21 ± 0.02	6.02
15	2.92 ± 0.55	0.67 ± 0.10	3.59	4.12 ± 0.90	7.71
16	3.16 ± 0.37	0.71 ± 0.05	3.87	3.35 ± 0.38	7.21
17	1.03 ± 0.13	0.31 ± 0.03	1.34	1.05 ± 0.15	2.39
18	2.20 ± 0.38	0.57 ± 0.10	2.77	2.98 ± 0.60	5.75
平均 Mean	1.57 ± 0.17	0.43 ± 0.04	2.00	2.08 ± 0.22	4.08

表3 砂生槐灌丛群落草本层及凋落物生物量(平均值±标准误差)  
Table 3 Biomass (mean ± SE, Mg·hm<sup>-2</sup>) of the herb layer and litterfall of *Sophora moorcroftiana* communities

样点 Plot No.	草本层 Herb layer			凋落物 Litterfall	合计 Total
	地上 Aboveground	地下 Underground	小计 Total		
1	0.53 ± 0.36	0.08 ± 0.02	0.61	0.08 ± 0.07	0.69
2	2.93 ± 0.76	1.16 ± 0.43	4.09	0.03 ± 0.01	4.12
3	0.62 ± 0.17	0.50 ± 0.18	1.12	0.27 ± 0.12	1.39
4	0.25 ± 0.15	0.17 ± 0.12	0.42	0.11 ± 0.04	0.53
5	0.40 ± 0.05	0.53 ± 0.20	0.93	0.20 ± 0.08	1.13
6	1.02 ± 0.91	0.81 ± 0.54	1.83	0.18 ± 0.10	2.01
7	0.40 ± 0.05	0.53 ± 0.20	0.93	0.10 ± 0.05	1.03
8	0.76 ± 0.02	0.98 ± 0.37	1.74	0.05 ± 0.01	1.79
9	2.11 ± 0.41	2.81 ± 0.30	4.92	0.09 ± 0.02	5.01
10	0.27 ± 0.07	0.13 ± 0.05	0.40	0.05 ± 0.01	0.45
11	0.13 ± 0.06	0.35 ± 0.13	0.48	0.17 ± 0.07	0.65
12	0.81 ± 0.17	1.07 ± 0.18	1.88	0.02 ± 0.00	1.90
13	0.17 ± 0.02	0.27 ± 0.02	0.44	0.07 ± 0.02	0.51
14	0.33 ± 0.11	2.17 ± 0.96	2.50	0.15 ± 0.08	2.65
15	0.14 ± 0.07	0.63 ± 0.36	0.78	0.15 ± 0.03	0.92
16	0.26 ± 0.10	0.75 ± 0.14	1.01	0.02 ± 0.01	1.03
17	0.25 ± 0.05	0.44 ± 0.06	0.70	0.07 ± 0.02	0.76
18	0.70 ± 0.22	2.09 ± 0.47	2.79	0.04 ± 0.01	2.83
平均 Mean	0.67 ± 0.17	0.86 ± 0.18	1.53	0.10 ± 0.02	1.63

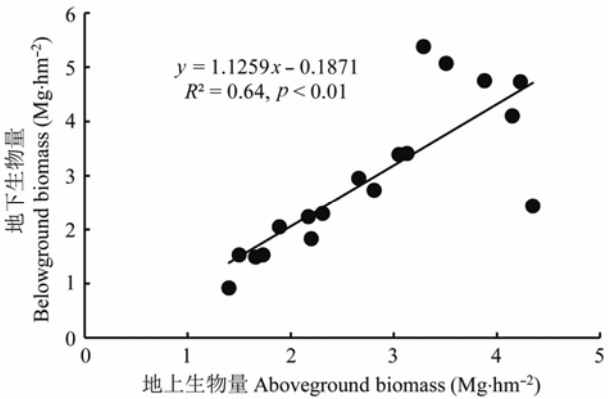


图2 砂生槐灌丛地上部分与地下部分生物量关系。  
Fig. 2 The relationship between aboveground and belowground biomass of *Sophora moorcroftiana* communities.

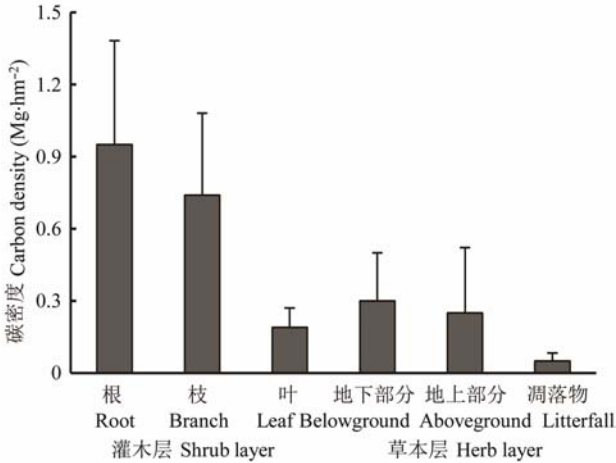


图3 砂生槐灌丛碳密度分布(平均值±标准误差)。  
Fig. 3 The distribution of carbon density (mean ± SE, Mg·hm<sup>-2</sup>) within *Sophora moorcroftiana* shrubs.

谷环境的适应有关。砂生槐为典型深根系物种,主根平均深入地下3 m,侧根在距地表0.7–1.5 m出现,根幅大,平均为1.9 × 2.3 m<sup>2</sup> (彭跃明, 1997; 孙旭, 2010)。从砂生槐器官生物量的分配来看,根生物量占比超过一半,使得平均根冠比达1.05,从植被总体生物量的分配来看,地下与地上生物量的关系斜率甚至达1.13 (图2),即干旱地区植物把更多生物量分配到用于吸收水分和养分以及固定、支撑植物体的根系,而不是地上部分的光合器官,这些特点使砂生槐灌丛具有很强的防风固沙作用,也体现了这一植被类型对河谷干旱环境的适应。

本研究中砂生槐灌丛植被平均碳密度为2.48 Mg·hm<sup>-2</sup>,与付达夫(2014)针对本研究物种灌丛碳密度估算结果(约2.5 Mg·hm<sup>-2</sup>)一致,但远低于胡会峰等(2006)估算的中国主要灌丛植被平均碳密度

表4 雅江流域中段砂生槐灌丛碳密度东西部差异  
Table 4 Difference of carbon density ( $\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) between east and west regions of *Sophora moorcroftiana* shrublands in the middle reaches of Yarlung Zangbo River

区域 Region	平均海拔 Mean altitude (m)	灌木层盖度 Coverage of shrub layer (%)	灌木层 Shrub layer	草本层 Herb layer	凋落物 Litterfall	合计 Total
东部 Eastern	3 625	23.00 <sup>a</sup>	1.40 <sup>a</sup>	0.62 <sup>a</sup>	0.053 <sup>a</sup>	2.07 <sup>a</sup>
西部 Western	3 900	39.88 <sup>b</sup>	2.49 <sup>b</sup>	0.46 <sup>a</sup>	0.039 <sup>a</sup>	2.98 <sup>b</sup>

同列不同小写字母表示在0.05水平差异显著。  
Different letters within a column indicate significant difference at the level of  $\alpha = 0.05$ .

表5 碳密度不同估算方法的误差比较( $\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )  
Table 5 Comparisons of errors between different methods for the estimation of carbon density ( $\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )

方法 Method	灌木层碳密度 Carbon density for shrub layer				草本层碳密度 Carbon density for herb layer			凋落物碳密度 Carbon density for litterfall	合计 Total
	枝 Branch	叶 Leaf	根 Root	小计 Total	地上 Aboveground	地下 Belowground	小计 Total		
实测法 Actual measurement	0.74	0.19	0.95	1.88	0.25	0.30	0.54	0.047	2.48
换算系数0.5 Conversion factor 0.5	0.79	0.21	1.04	2.04	0.34	0.43	0.77	0.051	2.85
(误差 Error %)	(6.8)	(10.5)	(9.5)	(8.5)	(36.0)	(43.3)	(42.6)	(8.5)	(14.9)
换算系数0.45 Conversion factor 0.45	0.71	0.19	0.93	1.83	0.30	0.39	0.69	0.046	2.57
(误差 Error %)	(4.1)	(0.0)	(2.1)	(2.7)	(20.0)	(30.0)	(27.8)	(2.1)	(3.6)

( $10.88 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )及付达夫(2014)估算的西藏灌木林碳密度( $8.53 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ), 也低于四川甘孜州高寒矮灌丛( $3.20 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ), 这与砂生槐灌丛所处生境以及群落盖度较低有关——在干旱的河谷地带, 为减少对水分和(或)养分资源的竞争, 砂生槐种群具有较强的自疏作用, 个体间距较大, 导致植被冠层不连续, 灌木层盖度在12%–53%之间, 平均仅为30.5%, 明显低于四川甘孜州高寒矮灌丛(22%–85%, 高巧等, 2014)。砂生槐灌丛群落碳密度在研究区东部与西部存在显著差异, 这是由于东、西部灌丛盖度存在差异所致, 即西部地区植被盖度明显高于东部(表4), 究其原因, 主要与东、西部的自然环境(尤其是海拔)以及人为干扰强度的差异有关。研究区东部平均海拔较西部低200–300 m, 因此平均气温高1–2  $^{\circ}\text{C}$ , 而年降水量略低或相近, 导致东部地区蒸发量相对较高, 因此焚风效应(过山气流在背风坡下沉而变得干热)形成的干旱河谷气候在研究区东部比在西部更明显, 这与杨志刚等(2013)利用Penman-Monteith模型计算的雅江流域潜在蒸散量结果一致, 即潜在蒸散量在位于雅江中游东部的泽当明显高于西部的日喀则(杨志刚等, 2013)。显然, 东部地区较高的蒸散量加剧了河谷的干旱化程度, 进一步限制了该区砂生槐灌丛植被盖度的增加。因此, 深入探究不同器官生物量分配与气候、土壤因子的关系, 将有助于揭示砂生槐灌丛的地理分异机制。此外, 研究区东部地区人口

密度更大, 人类活动和放牧干扰强度较大, 牲畜践踏和啃食对砂生槐灌丛的生长和繁殖均具有不可忽视的作用, 这可能也是导致研究区东部植被盖度较低的原因之一。在未来气候变化背景下, 如果蒸散持续降低(吴绍洪等, 2005; Yin *et al.*, 2013), 将有助于砂生槐灌丛生物量和碳密度的增加, 这无疑对于雅江流域水土保持和防风固沙等生态工程具有重要指导意义。

3.2 碳密度不同估算方法的误差比较

目前有关碳密度的研究大部分采用平均碳密度方法(胡会峰等, 2006; 付达夫, 2014; 李亚男等, 2014), 即碳密度等于生物量乘以换算系数0.5或0.45。然而不同物种、不同器官之间的碳含量是存在差异的, 且碳含量通常达不到50% (宋永昌, 2001), 用平均碳密度法势必会高估生态系统碳密度。本研究通过实测不同器官全碳含量, 结合植被生物量计算了灌丛植被碳密度, 与利用换算系数的估算方法相比, 也发现以0.5为换算系数的估算结果比实际结果偏高, 总体高约15%, 其中灌木层偏高6%–11%, 草本层偏高36%–44% (表5)。以0.45作为换算系数的总体估算结果与实际结果较接近(偏高3.6%), 表现为灌木层略微偏低(0–4%), 草本层偏高(20%–30%)(表5)。综上所述, 在区域尺度上估算西藏雅江流域砂生槐灌丛群落碳密度时, 可以考虑用0.45作为碳含量的换算系数。



**基金项目** 中国科学院战略性先导科技专项(XDA-05050303)、国家自然科学基金(41471039)、中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB3-08-02)。

## 参考文献

- Dai L, Jia J, Yu D, Lewis BJ, Zhou L, Zhou W, Zhao W, Jiang L (2013). Effects of climate change on biomass carbon sequestration in old-growth forest ecosystems on Changbai Mountain in Northeast China. *Forest Ecology and Management*, 300, 106–116.
- Fu DF (2014). Shrub wood carbon reserve estimation in Tibet Autonomous Region. *Central South Forest Inventory and Planning*, 33, 4–7. (in Chinese with English abstract) [付达夫 (2014). 西藏自治区灌木林碳储量估算. 中南林业调查规划, 33, 4–7.]
- Gao Q, Yang XC, Yin CY, Liu Q (2014). Estimation of biomass allocation and carbon density in alpine dwarf shrubs in Ganzi Zangzu Autonomous Prefecture of Sichuan Province, China. *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.]
- Guo QQ, Luo DQ, Fang JP, Ren DZ, Wang ZH, Fu JF (2009). Research status, utilization and protection measures of *Sophora moorcroftiana* in Tibet. *Journal of Northwest Forestry University*, 24, 98–101. (in Chinese with English abstract) [郭其强, 罗大庆, 方江平, 仁德智, 王贞红, 傅军锋 (2009). 西藏砂生槐的研究现状及其利用与保护对策. 西北林学院学报, 24, 98–101.]
- 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.]
- Keeling HC, Phillips OL (2007). The global relationship between forest productivity and biomass. *Global Ecology and Biogeography*, 16, 618–631.
- Li HD, Shen WS, She GH, Sun M, Yuan L, Lin NF (2011). Population structure and point pattern of *Sophora moorcroftiana* in Tibet. *Journal of Desert Research*, 31, 1443–1448. (in Chinese with English abstract) [李海东, 沈渭寿, 余光辉, 孙明, 袁磊, 林乃峰 (2011). 西藏砂生槐种群结构与点格局分析. 中国沙漠, 31, 1443–1448.]
- 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, Zang FW, Zhao XQ (2006). Estimation of biomass and annual turnover quantities of *Potentilla fruticosa* shrub. *Acta Agrestia Sinica*, 14, 72–76. (in Chinese with English abstract) [李英年, 赵亮, 王勤学, 杜明远, 古松, 徐世晓, 张发伟, 赵新全 (2006). 高寒金露梅灌丛生物量及年周转量. 草地学报, 14, 72–76.]
- Liang B, Di L, Zhao CY, Peng SZ, Peng HH, Wang C (2013). Spatial distribution of aboveground biomass of shrubs in Tianlaoshi catchment of the Qilian Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25, 367–373. (in Chinese with English abstract) [梁倍, 邸利, 赵传燕, 彭守璋, 彭焕华, 王超 (2013). 祁连山天老池流域灌丛地上生物量空间分布. 应用生态学报, 25, 367–373.]
- Liu GH, Zhang JY, Zhang YX, Zhou JY, Guan WB, Ma KM, Fu BJ (2003). Distribution regulation of aboveground biomass of three main shrub types in the dry valley of Minjiang River. *Journal of Mountain Science*, 21, 24–32. (in Chinese with English abstract) [刘国华, 张洁瑜, 张育新, 周建云, 关文彬, 马克明, 傅伯杰 (2003). 岷江干旱河谷三种主要灌丛地上生物量的分布规律. 山地学报, 21, 24–32.]
- Lü CQ, Sun SC (2004). A review on the distribution patterns of carbon density in density in terrestrial ecosystems. *Acta Phytocologica Sinica*, 28, 692–703. (in Chinese with English abstract) [吕超群, 孙书存 (2004). 陆地生态系统碳密度格局研究概述. 植物生态学报, 28, 692–703.]
- Montane F, Rovira P, Casals P (2007). Shrub encroachment into mesic mountain grasslands in the Iberian peninsula: Effects of plant quality and temperature on soil C and N stocks. *Global Biogeochemical Cycles*, 21, 1–10.
- Peng YM (1997). Study on sand fixation effect of *Sophora moorcroftiana* in Yaluzangbu river middle valley, Tibet. *Forestry Science and Technology*, 22, 6–8. (in Chinese with English abstract) [彭跃明 (1997). 西藏雅鲁藏布江中部流域砂生槐固沙作用研究. 林业科技, 22, 6–8.]
- Piao SL, Fang JY, Ciais P, Peylin P, Huang Y, Sitch S, Wang T (2009). The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 458, 1009–1014.
- Piao SL, Fang JY, Huang Y (2010). The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *China Basic Science*, 12, 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, 20–22.]
- Song YC (2001). *Vegetation Ecology*. East China Normal University Press, Shanghai. 353–422. (in Chinese) [宋永昌 (2001). 植被生态学. 华东师范大学出版社, 上海. 353–422.]
- Sturm M, Racine C, Tape K (2001). Increasing shrub abundance in the Arctic. *Nature*, 411, 546–547.



- Sun X (2010). *Study on Community Structure and Biomass of Xizang Sophora moorcroftiana*. Master degree dissertation, Agricultural and Animal Husbandry College of Tibet University, Linzhi, Xizang. (in Chinese with English abstract) [孙旭 (2010). 西藏砂生槐群落结构与生物量研究. 硕士学位论文, 西藏大学农牧学院, 西藏林芝.]
- The Editorial Committee of Vegetation Map of China, Chinese Academy of Sciences (2001). *1:1 000 000 Vegetation Atlas of China*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [中国科学院中国植被图编辑委员会 (2001). 1:1 000 000 中国植被图集. 科学出版社, 北京.]
- Wang L (2009). *Study of Biomass and Its Models of Main Shrub Community Type in Northwest Sichuan*. Master degree dissertation, Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan. (in Chinese with English abstract) [王玲 (2009). 川西北地区主要灌丛类型生物量及其模型研究. 硕士学位论文, 四川农业大学, 四川雅安.]
- Wang QJ, Zhou XM, Zhang YQ, Zhao XQ (1991). Structure characteristics and biomass of *Potentilla frolicosa* shrub in Qinghai Plateau. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 11, 333–340. (in Chinese with English abstract) [王启基, 周兴民, 张堰青, 赵新全 (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.]
- Wang WJ, He DH, Tang XQ, Gong WF (2011). Effects of different temperature and sand burial depths on seed germination seedling growth of *Sophora moorcroftiana*. *Journal of Desert Research*, 31, 1437–1442. (in Chinese with English abstract) [王文娟, 贺达汉, 唐小琴, 巩文峰 (2011). 不同温度和沙埋深度对砂生槐种子萌发及幼苗生长的影响. 中国沙漠, 31, 1437–1442.]
- Wang YJ, Huang CD, Zhang J, Yang WQ, Wang XS (2010). Species diversity, biomass and their relationship of shrub-beries in an arid valley of the Minjiang River. *Arid Zone Research*, 27, 567–572. (in Chinese with English abstract) [王勇军, 黄从德, 张健, 杨万勤, 王宪帅 (2010). 岷江干旱河谷灌丛物种多样性、生物量及其关系. 干旱区研究, 27, 567–572.]
- Wu SH, Yin YH, Zheng D, Yang QY (2005). Climate changes in the Tibetan Plateau during the last three decades. *Acta Geographica Sinica*, 60, 3–11. (in Chinese with English abstract) [吴绍洪, 尹云鹤, 郑度, 杨勤业 (2005). 青藏高原近30年气候变化趋势. 地理学报, 60, 3–11.]
- Yang ZG, Tang XP, Lu HY, Ma PF, Hong JC (2013). The changes of potential evapotranspiration over Yarlung Zangbo River Basin during 1961–2010. *Acta Geographica Sinica*, 68, 1263–1268. (in Chinese with English abstract) [杨志刚, 唐小萍, 路红亚, 马鹏飞, 洪建昌 (2013). 近50年雅鲁藏布江流域潜在蒸散量的变化特征. 地理学报, 68, 1263–1268.]
- Yang ZP, Shen WS, Sun M, Sun J, Li HD (2011). Structural characteristics of *Sophora moorcroftiana* community on wind-sandy land in middle reaches of Yaluzangbu River. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 21, 1121–1126. (in Chinese with English abstract) [杨兆平, 沈渭寿, 孙明, 孙俊, 李海东 (2011). 雅鲁藏布江中游河谷风沙化土地砂生槐群落结构特征. 应用生态学报, 21, 1121–1126.]
- Yin YH, Wu SH, Zhao DS (2013). Past and future spatiotemporal changes in evapotranspiration and effective moisture on the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 118, 10850–10860.
- Zhao KT, Yang XL, Ma HP, Zhang XJ (2013). Analyses on community characteristics and soil microorganism dynamics during ecological restoration of *Sophora moorcroftiana* in the semi-arid valley of Lhasa. *Scientia Silvae Sinicae*, 49(2), 15–20. (in Chinese with English abstract) [赵垦田, 杨小林, 马和平, 张新军 (2013). 拉萨半干旱河谷砂生槐灌丛生态恢复过程的群落特征与土壤微生物动态分析. 林业科学, 49(2), 15–20.]
- Zhao WZ (1998). A preliminary study on the arenaceous adaptability of *Sophora moorcroftiana*. *Acta Phytoecologica Sinica*, 22, 379–384. (in Chinese with English abstract) [赵文智 (1998). 砂生槐沙生适应性初步研究. 植物生态学报, 22, 379–384.]

责任编辑: 谢宗强 责任编辑: 王 蔚



植物生态学报官网



微信订阅号  
期刊及学科  
相关信息发布



微信服务号  
稿件状态查询  
全文检索浏览