

DOI: 10.5846/stxb201906141259

刘立斌,周运超,程安云,王世杰,蔡先立,倪健.利用皆伐法估算黔中喀斯特森林地上生物量.生态学报,2020,40(13):4455-4461.

Liu L B, Zhou Y C, Cheng A Y, Wang S J, Cai X L, Ni J. Aboveground biomass estimate of a karst forest in central Guizhou Province, southwestern China based on direct harvest method. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(13): 4455-4461.

利用皆伐法估算黔中喀斯特森林地上生物量

刘立斌^{1,2}, 周运超^{2,3}, 程安云^{2,4}, 王世杰^{2,4}, 蔡先立^{2,4}, 倪健^{1,2,4,*}

1 浙江师范大学化学与生命科学学院, 金华 321004

2 中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站, 安顺 561000

3 贵州大学林学院, 贵阳 550025

4 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081

摘要:精确估算森林生物量对理解全球碳循环至关重要。已有的喀斯特森林地上生物量估算研究存在很高的不确定性,缺乏校准数据检验研究结果的精度。利用皆伐法,首次精确估算了我国西南贵州省中部喀斯特森林的地上生物量,并检验了已有生物量回归方程和平均标准木法对该喀斯特森林地上生物量的估算效果。该喀斯特森林的地上生物量为 122.81 Mg/hm²,胸径(D) ≥ 1 cm 的木本植物、 $D < 1$ cm 的木本植物和草本植物的地上生物量分别为 120.00、2.56、0.24 Mg/hm²。 D 在 10—30 cm 范围内的植株 (83.89 Mg/hm²) 是地上生物量的主要贡献者。4 个优势树种 (云南鼠刺 *Itea yunnanensis*、川钓樟 *Lindera pulcherrima*、猴樟 *Cinnamomum bodinieri* 和化香树 *Platycarya strobilacea* 的地上生物量为 103.03 Mg/hm², 占森林总地上生物量的 83.89%。干 (61.04 Mg/hm²) 和枝 (40.56 Mg/hm²) 的生物量远高于皮 (11.61 Mg/hm²) 和叶 (6.80 Mg/hm²)。在物种水平上,已有生物量回归方程 (误差 -56.10%—84.61%) 和平均标准木法 (误差 -36.43%—-5.14%) 对该喀斯特森林地上生物量的估算效果均较差。最后,建立了 5 个新的生物量回归方程。本研究可为我国西南喀斯特地区精确估算森林碳储量提供基础校验数据和方法指导。
关键词:地上生物量;皆伐法;生物量回归方程;喀斯特森林;碳储量

Aboveground biomass estimate of a karst forest in central Guizhou Province, southwestern China based on direct harvest method

LIU Libin^{1,2}, ZHOU Yunchao^{2,3}, CHENG Anyun^{2,4}, WANG Shijie^{2,4}, CAI Xianli^{2,4}, NI Jian^{1,2,4,*}

1 College of Chemistry and Life Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China

2 Puding Karst Ecosystem Research Station, Chinese Academy of Sciences, Anshun 561000, China

3 College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China

4 State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China

Abstract: Accurate estimate of forest biomass is essential to understand the global carbon cycle. Existing studies on aboveground biomass (AGB) estimate conducted in karst forests present high uncertainties, and no benchmarking and validation data can be used to evaluate their accuracy. In the present study, the AGB of a karst forest in central Guizhou Province, southwestern China, was accurately estimated for the first time on the basis of a clear cutting plot. The performances of existing allometric models and average standard tree method were also tested. The accurate AGB of the karst forest was 122.81 Mg/hm². Living woody individuals with diameter at breast height (D) ≥ 1 cm and $D < 1$ cm and herbs were 120.00 Mg/hm², 2.56 Mg/hm², and 0.24 Mg/hm², respectively. Individuals within 10—30 cm (83.89 Mg/hm²) D classes were the major AGB contributors. The four dominant species (*Itea yunnanensis*, *Lindera pulcherrima*, *Cinnamomum*

基金项目:国家自然科学基金面上项目 (31870462); 国家重点研发计划项目 (2018YFC0507203, 2016YFC0502101, 2016YFC0502304); 浙江省自然科学基金/探索项目 Q(LQ20C030003)

收稿日期: 2019-06-14; 修订日期: 2020-01-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: nijian@zjnu.edu.cn

bodinieri and *Platycarya strobilacea*) with 103.03 Mg/hm² AGB accounted for 83.89% of the total forest AGB. Stem (61.04 Mg/hm²) and branch (40.56 Mg/hm²) exhibited much higher AGB than bark (11.61 Mg/hm²) and leaf (6.80 Mg/hm²). Both existing allometric models (bias: -56.10% to 84.61%) and average standard tree method (-36.43% to -5.14%) had low performances indicated by high bias when estimating AGB at species level. Finally, five new local allometric models were developed. These results provide benchmarking data and further guidance for accurate estimate of forest carbon stocks in karst geomorphologies in southwestern China.

Key Words: aboveground biomass; direct harvest method; allometric model; karst forest; carbon stock

森林约占全球陆地面积的 30.6%,是地球上最大的碳库,因此,精确估算森林生物量对理解点、区域和全球尺度碳循环以及量化碳汇意义重大^[1-5]。自 20 世纪 60—70 年代的国际生物学计划和人与生物圈计划,到最近的全球森林碳平衡再评估,众多研究方法,包括地面观测、遥感解译和模型模拟等被广泛用于森林生物量的估算^[3,6-9]。然而,传统的地面观测方法,如皆伐法、平均标准木法和生物量回归方程法,尤其是皆伐法,依然是估算森林生物量的最精确方法^[10-13]。精确估算的森林生物量数据亦是遥感解译和模型模拟法结果校验和不确定性分析的必需数据^[14-15]。

喀斯特是水对可溶性岩石(石灰岩、白云岩和石膏等)的溶蚀和改造作用而形成的一种特殊的地貌类型。在长期的化学风化和溶蚀作用下,喀斯特地貌在生态敏感度、环境容纳量和稳定性方面呈现其独有的特征^[16]。喀斯特地貌广泛分布于全球各地,共有面积 2200 万 km²,约覆盖全球陆地面积的 14.8%^[17]。其中,以贵州省、云南省和广西壮族自治区为中心的中国西南喀斯特地区是世界三大喀斯特集中分布区之一,杨汉奎和程仕泽^[18]、朱守谦等^[19]和喻理飞等^[20]利用各自建立的生物量回归方程估算了贵州南部茂兰国家级自然保护区内峰丛洼地型喀斯特原生林的地上生物量,并首次指出,相比于中国东部同纬度带的非喀斯特常绿阔叶林,喀斯特森林为低生物量森林。曾馥平等^[21]利用生物量回归方程估算了广西西北部环江峰林平原型喀斯特次生林的生物量,发现次生林生物量显著低于木伦国家级自然保护区内原生林的生物量。刘长成等^[22]、Liu 等^[23-24]和 Guo 等^[25]利用生物量回归方程和遥感解译的方法,估算了贵州中部普定县境内的高原型喀斯特次生林的地上生物量,结果表明普定高原型喀斯特次生林的地上生物量低于茂兰喀斯特原生林。钟银星等^[26]利用建立于非喀斯特森林的生物量回归方程和样方收获法对贵州北部印江槽谷型喀斯特地区不同植被的生物量进行了估算,发现该槽谷型喀斯特森林的生物量低于茂兰峰丛洼地型和普定高原型喀斯特森林的生物量。

从以上研究不难看出,生物量回归方程法是估算喀斯特森林地上生物量的主要方法,一个不分物种的统一生物量回归方程常用来计算森林中所有物种的生物量^[18-21],甚至建立于非喀斯特森林的生物量回归方程亦直接用于估算喀斯特森林的地上生物量^[26]。这样的估算方法必定带来极大的误差。更重要的是,生物量回归方程法本身也存在较大的不确定性,例如,杨汉奎和程仕泽^[18]、朱守谦等^[19]和喻理飞等^[20]利用各自建立的生物量回归方程估算了茂兰喀斯特森林的地上生物量,而这些研究的结果差异极大,地上生物量变化从 87.43 Mg/hm²至 168.02 Mg/hm²;而遥感解译法更是以不确定性较大的生物量回归方程法的估算结果作为校验数据。因此,这些方法虽然能够简单快速地估算喀斯特森林的地上生物量,但是都存在很大的不确定性而精度存疑。皆伐法测得的生物量数据准确可靠,是作为真值对其他方法进行校验和比较的最佳选择,利用皆伐法精确估算喀斯特森林的生物量工作十分必要且紧迫。

本研究以黔中典型喀斯特常绿落叶阔叶混交林为研究对象,利用皆伐法精确估算了喀斯特森林的地上生物量,检验了平均标准木法和生物量回归方程法(已有生物量回归方程)的估算精度,并基于皆伐的样木数据建立了新的生物量回归方程。本研究可为喀斯特森林生物量的估算提供基础校验数据,并为未来喀斯特森林生物量的估算积累生物量回归方程。

1 材料与方 法

1.1 研究地概况

研究地为中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站的赵家田监测样地(105°46'55" E, 26°16'30" N, 1440 m),是高原型喀斯特地貌类型的典型代表^[27]。样地是在对整个流域踏查后选定的,能够代表当地的植被、土壤和喀斯特生境状况。气候类型为中亚热带季风湿润气候,据普定县气象站 1961—2013 年的观测记录,当地年平均气温和年平均降水量分别为 15.2 °C 和 1431 mm。

赵家田监测样地斜面面积 1000 m²(25 m×40 m),水平投影面积 819.15 m²(25 m×32.77 m),坡向为西南坡,平均坡度 35°。出露石灰岩在样地内随处可见,裸露率约为 50%。棕色石灰土是样地内主要土壤类型,土层较薄,仅有 44.76 cm(25 个挖掘土柱的平均深度),但土壤有机碳含量和其他土壤养分含量较高。样地内植被类型为处于次顶极阶段(林龄为 60 年)的常绿落叶阔叶混交林。乔木层高度 6—16 m,郁闭度 0.85,平均胸径(D)11.71 cm。常见乔木树种有云南鼠刺(*Itea yunnanensis*)、猴樟(*Cinnamomum bodinieri*)、川钓樟(*Lindera pulcherrima*)、短萼海桐(*Pittosporum brevicalyx*)和化香树(*Platycarya strobilacea*)^[28]。灌木层一般 1—2 m,优势种有薄叶鼠李(*Rhamnus leptophylla*)、异叶鼠李(*Rhamnus heterophylla*)、掌叶梁王茶(*Nothopanax delavayi*)和一些花椒属(*Zanthoxylum*)植物。优势草本植物包括黄鹌菜(*Youngia japonica*)、香附子(*Cyperus rotundus*)、光叶兔儿风(*Ainsliaea glabra*)和几种苔草属(*Carex*)植物。

1.2 地上生物量估算

于 2012 年夏季对赵家田监测样地进行皆伐。样地内所有植物用电锯或镰刀沿地面伐倒。记录所有植株的物种名, $D \geq 1$ cm 的植株记录胸径, $D < 1$ cm 的植株记录基径,所有植株均在伐倒后测量高度(H)。木本植物进一步分为干、皮、枝和叶 4 个部分,草本植物仅叶一个部分,并在野外测定各植株各部分的鲜重。每一植株各部分选择约 50 g 鲜重样品(若总重小于 50 g 则全部选择),带回实验室烘干(85 °C 的烘箱内烘 48 h)。计算各植株各部分的含水量,然后计算出每一植株地上部分的干重。样地总地上生物量则为样地内所有植物地上部分的干重之和。

Liu 等^[24]利用建立于同一流域内和周边喀斯特地区的现有生物量回归方程估算了同一流域内林龄、生境和物种组成相似的一个喀斯特森林的地上生物量,本研究利用这些生物量回归方程计算赵家田监测样地内 $D \geq 1$ cm 的植株的地上生物量。 $D \geq 1$ cm 且个体数 ≥ 10 株的物种选择 3 株平均标准木(D 和 H 与平均值相近),其余个体数 < 10 株的物种当作一个物种处理,亦选择 3 株平均标准木,每个物种的地上生物量则为 3 株平均标准木的平均地上生物量乘以株数。单位面积生物量为单位水平投影面积下的生物量。

2 结果与分析

2.1 地上生物量及其分配

利用皆伐法估算的黔中喀斯特森林地上生物量为 122.81 Mg/hm²,其中 $D \geq 1$ cm 的木本植物、 $D < 1$ cm 的木本植物和草本植物的地上生物量分别为 120.00、2.56、0.24 Mg/hm²。 D 在 10—20 cm(44.86 Mg/hm²)和 20—30 cm(39.03 Mg/hm²)的木本植物占有较高的地上生物量,而 $D < 5$ cm、5—10 cm 和 > 30 cm 的木本植物的地上生物量较低。4 个优势树种,即云南鼠刺、川钓樟、猴樟和化香树的地上生物量为 103.03 Mg/hm²,占森林总地上生物量的 83.89%。干(61.04 Mg/hm²)和枝(40.56 Mg/hm²)的生物量远高于皮(11.61 Mg/hm²)和叶(6.80 Mg/hm²)。

2.2 生物量回归方程法和平均标准木法的估算精度检验

利用皆伐法估算的样地内 $D \geq 1$ cm 木本植物的地上生物量为 9.83 Mg。在样地水平上,已有的生物量回归方程和平均标准木法均低估了该喀斯特森林的地上生物量,前者精度略高于后者,但二者精度均尚可(表 1)。而在种水平上,平均标准木法可以较精确地估算部分物种(云南鼠刺和短萼海桐)的地上生物量;但已有

的生物量回归方程对所有物种地上生物量的估算效果均较差,误差高达-56.10%—84.61%(表1);植株 D 越大,已有生物量回归方程估算的地上生物量误差越大(图1)。利用已有的生物量回归方程估算的样地水平的地上生物量精度尚可的现象,是由各物种各植株地上生物量正负误差相抵造成的。

表1 生物量回归方程法和平均标准木法估算精度检验

物种/样地 Species/Plot	Table 1 Aboveground biomass (AGB) estimate performances of existing allometric models and average standard tree method				
	皆伐法	生物量回归方程		平均标准木法	
	Direct harvest	Existing allometric models		Average standard tree method	
	地上生物量	地上生物量	误差	地上生物量	误差
	AGB/Mg	AGB/Mg	Bias/%	AGB/Mg	Bias/%
猴樟 <i>C. bodinieri</i> + 川钓樟 <i>L. pulcherrima</i>	4.65	2.04	-56.10	3.58	-22.94
云南鼠刺 <i>I. yunnanensis</i>	2.71	3.36	23.61	2.57	-5.14
化香树 <i>P. strobilacea</i>	1.08	1.99	84.61	1.01	-5.89
短萼海桐 <i>P. brevicalyx</i>	0.24	0.14	-40.94	0.19	-23.11
其他物种 Other species	1.15	1.60	38.97	0.73	-36.42
样地 Plot	9.83	9.12	-7.18	8.09	-17.74

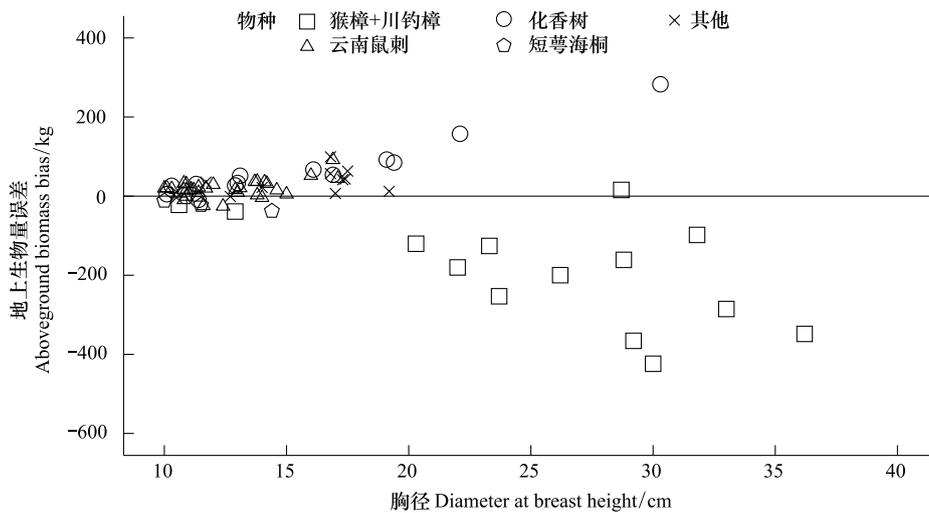


图1 已有生物量回归方程估算的植株 ($D \geq 10$ cm) 地上生物量误差(kg)

Fig.1 Aboveground biomass bias (kg) of woody plants ($D \geq 10$ cm) estimated by existing allometric models

纵坐标 0 值水平线为各植株利用皆伐法估算的地上生物量值

2.3 新生物量回归方程建立

建立物种地上生物量和胸径 (D) 或胸径的平方与高度的乘积 (D^2H) 之间的多种回归关系(指数、线性、对数、多项式和幂函数),通过筛选(R^2 值最大),获得了 5 个新的地上生物量回归方程(表 2)。猴樟和川钓樟属于同一科的植物,且植株形态与木材碳密度相似,这两个物种数据共同建立一个生物量回归方程。个体数较少的其余物种数据共同建立一个其余物种通用的生物量回归方程。

这些新建立的生物量回归方程能较准确地估算该喀斯特森林所有物种的地上生物量,误差仅在 -10.76%—0.00%。利用新构建的生物量回归方程计算的赵家田监测样地的地上生物量为 9.29 Mg,与皆伐法精确估算的结果相比,误差仅为 -5.51%。

3 讨论

生物量是森林生态系统的—个基本功能参数,是评价森林生态系统结构、功能和生态系统服务的基础指

标^[29-30]。因此,一直以来,科学家们高度重视森林生物量的估算,且世界各地各类型森林的生物量得到了广泛的调查^[4,29,31-32]。然而,仍然有少部分分布在偏远地区或特殊地貌上森林的生物量没有得到很好地了解,例如喀斯特森林,其生物量特征有待于进一步调查研究。在本研究中,利用皆伐法估算的黔中喀斯特森林的地上生物量为 122.81 Mg/hm²,虽然与刘长成等^[22]和 Liu 等^[24]利用生物量回归方程估算的结果(115.2 Mg/hm²和 137.7 Mg/hm²)相近,但不同方法皆有各自的优劣势。

表 2 地上生物量回归方程

Table 2 New local allometric models for aboveground biomass

物种 Species	胸径 (cm) 及样木数 DBH (cm) and sample NO.	回归方程 Regression models	R ²
猴樟 <i>C. bodinieri</i> + 川钓樟 <i>L. pulcherrima</i>	10.6 ≤ D ≤ 36.2 (n = 14)	W = 0.0153 (D ² H) ^{0.862}	0.852 **
云南鼠刺 <i>I. yunnanensis</i>	1.0 ≤ D ≤ 17.1 (n = 91)	W = 0.7247D ^{1.6437}	0.6383 **
化香树 <i>P. strobilacea</i>	4.5 ≤ D ≤ 30.3 (n = 22)	W = 0.0174 (D ² H) + 21.767	0.8619 **
短萼海桐 <i>P. brevicalyx</i>	3.8 ≤ D ≤ 14.4 (n = 10)	W = 0.7427D ² - 5.6027D + 17.85	0.996 **
其他物种 Other species	1.0 ≤ D ≤ 19.2 (n = 33)	W = 2.0739e ^{0.2301 D}	0.9124 **

W:地上生物量 Aboveground biomass (kg); D:胸径 Diameter at breast height (cm); H:高度 Height (m); ** : P < 0.01

皆伐法破坏性较大,难以经常性操作,虽然它是估算森林生物量的最精确方法,但耗费大量人力物力,尤其在当前封山育林、保护森林的大背景下,利用皆伐法来估算森林生物量是难以实施的;但该方法的有限实施,可为我们提供更精确的森林生物量估算值,也能进一步提供更好的生物量回归方程,从而提高森林生物量的估算精度。但本研究中的皆伐法也存在一定的缺陷:一是样地面积相对较小,二是选取的用于测定植物含水量的样品量较小。因此,在条件允许的情况下,如果能够考虑皆伐更大面积的单个样地或多个样地,以及选取测定植物含水率的更多样品量,将进一步提高皆伐法的精确度。而平均标准木法对平均标准木的选择依赖极大,标准木选择具有较大的人为主观性,其代表性存在较多疑问。因此,生物量回归方程法仍然是估算森林生物量的最佳方法,且已被广泛应用^[29,33-36]。然而,本研究对比发现,在样地水平上,生物量回归方程法因正负误差抵消可巧合地较准确估算森林的地上生物量,但在物种水平上,利用生物量回归方程估算的所有物种的地上生物量均存在极大的误差;另外,基于一个样地建立的方程能否应用于其他样地或者其他森林类型的生物量估算,也存在较多不确定性。因此,生物量回归方程法虽然操作简单且精度有时尚可,但其推广仍然存在较多问题,建立基于植物功能型而非物种为单元的更加普适性的生物量回归方程仍然是未来发展的趋势。当然,使用多种方法可以提供更精确的森林生物量估算,同时也能比较发现各自的缺陷,削减估算的不确定性。

此外,对于喀斯特森林来说,其生物量研究起步较晚,积累的生物量回归方程较少,一个不分物种的统一生物量回归方程^[18-21]或少数几个物种的生物量回归方程^[22-23]常被用来估算喀斯特森林的生物量,这是远远不够的。因此,本研究为未来喀斯特森林生物量的估算积累了更多的生物量回归方程。

无论是利用皆伐法估算,还是利用地上生物量方程估算喀斯特森林的地上生物量^[22-25],以及利用土柱挖掘法和根系生物量回归方程估算其根系的生物量^[24,37],这些研究均表明,与我国同纬度带非喀斯特常绿阔叶林相比,喀斯特森林为低生物量森林^[38-41]。但不同喀斯特地貌上生长的喀斯特森林组成是有差异的,因此,将本研究(高原型喀斯特地貌)的生物量及其分配特征外推到中国西南其他类型喀斯特森林(如贵州南部的峰丛洼地型,贵州北部的槽谷型、广西北部的峰林平原型和云南东北部的断陷盆地型等^[27])是不可取的。因此,需要建立各自森林的生物量回归方程,或者,在不同地貌类型上皆伐更多的森林样地。然而,本文的研究方法和积累的生物量回归方程对其他类型喀斯特森林的生物量研究仍具有一定的参考意义,尤其是共有物种的生物量回归方程。而且,利用皆伐法精确估算喀斯特森林的生物量,不仅可以为其他生物量估算方法(生物量回归方程法、遥感解译和模型模拟)提供基础校验数据,亦能为喀斯特地区区域碳储量估算、植被恢复和石漠化缓解做出贡献。

4 结论

本研究首次利用皆伐法精确估算了我国西南喀斯特森林的地上生物量,并对生物量回归方程法和平均标准木法的估算效果进行了检验。该喀斯特森林的地上生物量为 122.81 Mg/hm^2 , 低于我国同纬度带非喀斯特森林的地上生物量。已有的生物量回归方程和平均标准木法估算喀斯特森林地上生物量的效果均较差。本研究建立了 5 个新的生物量回归方程。

参考文献 (References):

- [1] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, Houghton R A, Trexler M C, Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystem. *Science*, 1994, 263(5144): 185-190.
- [2] Kindermann G E, McCallum I, Obersteiner M. A global forest growing stock, biomass and carbon map based on FAO statistics. *Silva Fennica*, 2008, 42(3): 387-396.
- [3] Pan Y D, Birdsey R A, Fang J Y, Houghton R, Kauppi P E, Kurz W A, Phillips O L, Shvidenko A, Lewis S L, Canadell J G, Ciais P, Jackson R B, Pacala S W, McGuire A D, Piao S L, Rautiainen A, Sitch S, Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 2011, 333(6045): 988-993.
- [4] Pan Y D, Birdsey R A, Phillips O L, Jackson R B. The structure, distribution, and biomass of the world's forests. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2013, 44: 593-622.
- [5] FAO. Global Forest Resources Assessment 2015. How are the World's Forests Changing? Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2015.
- [6] Landsberg J J, Waring R H. A generalized model of forest productivity using simplified concepts of radiation-used efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management*, 1997, 95(3): 209-228.
- [7] Malhi Y, Phillips O L, Lloyd J, Baker T, Wright J, Almeida S, Arroyo I, Frederiksen T, Grace J, Higuchi N, Killeen T, Laurance W F, Leão C, Lewis S, Meir P, Monteagudo A, Neill D, Núñez V P, Panfil S N, Patiño S, Pitman N, Quesada C A, Ruelas-Ll A, Salomão R, Saleska S, Silva N, Silveira M, Sombroek W G, Valencia R, Vásquez Martínez R, Vieira I C G, Vinceti B. An international network to monitor the structure, composition and dynamics of Amazonian forests (RAINFOR). *Journal of Vegetation Science*, 2002, 13: 439-450.
- [8] Saatchi S S, Harris N L, Brown S, Lefsky M, Mitchard E T, Salas W, Zutta B R, Buermann W, Lewis S L, Hagen S, Petrova S, White L, Silman M, Morel A. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *PNAS*, 2011, 108(24): 9899-9904.
- [9] Ningthoujam R K, Joshi P K, Roy P S. Retrieval of forest biomass for tropical deciduous mixed forest using ALOS PALSAR mosaic imagery and field plot data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, 69: 206-216.
- [10] Baskerville G L. Estimation of dry weight of tree components and total standing crop in conifer stands. *Ecology*, 1965, 46: 867-869.
- [11] 李意德, 曾庆波, 吴仲民, 杜志鹄, 周光益, 陈步峰, 张振才, 陈焕强. 尖峰岭热带山地雨林生物量的初步研究. *植物生态学与地植物学学报*, 1992, 16(4): 293-300.
- [12] Ketterings Q M, Coe R, van Noordwijk M, Ambagau Y, Palm C A. Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting aboveground biomass in mixed secondary forests. *Forest Ecology and Management*, 2001, 146: 199-209.
- [13] 罗云建, 王效科, 张小全, 逯非. 中国森林生态系统生物量及其分配研究. 北京: 中国林业出版社, 2013.
- [14] Scurlock J M O, Cramer W, Olson R J, Parton W J, Prince S D. Terrestrial NPP: Towards a consistent data set for global model evaluation. *Ecological Applications*, 1999, 9(3): 913-919.
- [15] Ni J. Net primary productivity in forests of China: Scaling-up of national inventory data and comparison with model predictions. *Forest Ecology and Management*, 2003, 187: 485-495.
- [16] 王世杰, 李阳兵, 李瑞玲. 喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理. *第四纪研究*, 2003, 23(6): 657-666.
- [17] Jiang Z C, Lian Y Q, Qin X Q. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration. *Earth-Science Reviews*, 2014, 132: 1-12.
- [18] 杨汉奎, 程仕泽. 贵州茂兰喀斯特森林群落生物量研究. *生态学报*, 1991, 11(4): 307-312.
- [19] 朱守谦, 魏鲁明, 陈正仁, 张从贵. 茂兰喀斯特森林生物量构成初步研究. *植物生态学报*, 1995, 19(4): 358-367.
- [20] 喻理飞, 朱守谦, 叶镜中, 魏鲁明, 陈正仁. 退化喀斯特森林自然恢复过程中群落动态研究. *林业科学*, 2002, 38(1): 1-7.
- [21] 曾馥平, 彭晚霞, 宋同清, 王克林, 吴海勇, 宋希娟, 曾昭霞. 桂西北喀斯特人为干扰区植被自然恢复 22 年后群落特征. *生态学报*, 2007, 27(12): 5110-5119.

- [22] 刘长成, 魏雅芬, 刘玉国, 郭柯. 贵州普定喀斯特次生林乔灌层地上生物量. 植物生态学报, 2009, 33(4): 698-705.
- [23] Liu Y G, Liu C C, Wang S J, Guo K, Yang J, Zhang X S, Li G Q. Organic carbon storage in four ecosystem types in the karst region of southwestern China. PLoS ONE, 2013, 8(2): e56443.
- [24] Liu L B, Wu Y Y, Hu G, Zhang Z H, Cheng A Y, Wang S J, Ni J. Biomass of karst evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest in central Guizhou province, southwestern China: a comprehensive inventory of a 2 ha plot. Silva Fennica, 2016, 50(3): 1492.
- [25] Guo Y M, Ni J, Liu L B, Wu Y Y, Guo C Z, Xu X, Zhong Q L. Estimating aboveground biomass using Pléiades satellite image in a karst watershed of Guizhou Province, Southwestern China. Journal of Mountain Science, 2018, 15(5): 1020-1034.
- [26] 钟银星, 周运超, 李祖驹. 印江槽谷型喀斯特地区植被碳储量及固碳潜力研究. 地球与环境, 2014, 42(1): 82-89.
- [27] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 岩溶地区石漠化综合治理规划大纲(2006-2015年). 北京, 2008.
- [28] 陈谦海. 贵州植物志. 贵阳: 贵州科技出版社, 1982-2004.
- [29] Leith H, Whittaker R H. Primary Productivity of the Biosphere. Berlin: Springer-Verlag, 1975.
- [30] West P W. Tree and Forest Measurement: 2nd edition. Berlin: Springer, 2009, 190.
- [31] Duvigneaud P. Ecology and Conservation (4): Productivity of Forest Ecosystems. Paris: UNESCO, 1971, 4: 707.
- [32] Cannell M G R. World Forest Biomass and Primary Production Data. London: Academic Press, 1982, 391.
- [33] Ogawa H. Principle and methods of estimating primary production in forests. In: Shidei, T.; Kora, T. (eds). Primary productivity of Japanese forests: Productivity of terrestrial communities. Tokyo: University of Tokyo Press, 1977, 29-38.
- [34] Brown S, Lugo A E. The storage and production of organic matter in tropical forests and their role in the global carbon cycle. Biotropica, 1982, 14: 161-187.
- [35] Gower S T, Kucharik C J, Norman J M. Direct and indirect estimation of leaf area index, f_{APAR} , and net primary production of terrestrial ecosystems - a real or imaginary problem? Remote Sensing of Environment, 1999, 70(1): 29-51.
- [36] Brown S. Measuring carbon in forests: Current status and future challenges. Environmental Pollution, 2001, 116: 363-372.
- [37] 刘立斌, 钟巧连, 倪健. 基于生物量回归方程估算黔中喀斯特常绿落叶阔叶混交林木本植物的根系生物量. 生态学报, 2018, 38(24): 8726-8732.
- [38] 邱学忠, 谢寿昌, 荆桂芬. 云南哀牢山徐家坝地区木果石栎林生物量的初步研究. 云南植物研究, 1984, 6(1): 85-92.
- [39] 陈章和, 张宏达, 王伯荪, 张志权. 广东黑石顶常绿阔叶林生物量及其分配. 植物生态学与地植物学学报, 1993, 17(4): 289-298.
- [40] 黄典忠. 闽江下游福建青冈次生林群落的生物量特征. 防护林科技, 2006, (1): 16-18.
- [41] Yang T H, Song K, Da L J, Li X P, Wu J P. The biomass and aboveground net primary productivity of *Schima superba-Castanopsis carlesii* forest in east China. Science China Life Science, 2010, 53(7): 811-821.