

# 茂兰退化喀斯特森林植被自然恢复中生态系统碳吸存特征

黄宗胜<sup>1</sup> 喻理飞<sup>2\*</sup> 符裕红<sup>3</sup> 杨 瑞<sup>4</sup>

<sup>1</sup>贵州大学建筑与城市规划学院, 贵阳 550025; <sup>2</sup>贵州大学生命科学学院, 贵阳 550025; <sup>3</sup>贵州师范学院化学与生命科学学院, 贵阳 550018; <sup>4</sup>贵州大学林学院, 贵阳 550025

**摘 要** 为了了解退化喀斯特森林自然恢复中生态系统碳吸存趋势, 采用空间代替时间的方法, 研究了茂兰退化喀斯特森林自然恢复中生态系统碳吸存特征。结果表明: 总体上植被生物量随恢复进程递增, 其中乔木层与其变化一致, 草本层、灌木层则相反; 喀斯特植被的地上与地下生物量之比较低, 尤其灌木层的地上与地下生物量之比最低; 加权平均含碳率随恢复进展递增; 随恢复进程, 植被乔木层碳密度递增, 草本层、灌木层碳密度递减; 总体上生态系统及其植被、土壤的碳密度由恢复早期(草本阶段、草灌阶段)经中期(灌木阶段、灌乔阶段)至后期(乔木阶段、顶极阶段)呈增加趋势, 而凋落物的相反。在贵州茂兰国家级自然保护区喀斯特森林的恢复进程中, 植被对生态系统碳库的影响最大, 尤其是木本植被, 而土壤的影响较小, 因此, 加强植被恢复对喀斯特地区生态系统碳汇具有极重要的意义。

**关键词** 碳吸存, 喀斯特森林生态系统, 自然恢复, 退化喀斯特森林, 碳密度

**引用格式:** 黄宗胜, 喻理飞, 符裕红, 杨瑞 (2015). 茂兰退化喀斯特森林植被自然恢复中生态系统碳吸存特征. 植物生态学报, 39, 554–564. doi: 10.17521/cjpe.2015.0053

## Characteristics of carbon sequestration during natural restoration of Maolan karst forest ecosystems

HUANG Zong-Sheng<sup>1</sup>, YU Li-Fei<sup>2\*</sup>, FU Yu-Hong<sup>3</sup>, and YANG Rui<sup>4</sup>

<sup>1</sup>City Planning and Architecture College of Guizhou University, Guiyang 550025, China; <sup>2</sup>College of Life Sciences, Guizhou University, Guiyang 550025, China; <sup>3</sup>School of Chemistry and Life Science, Guizhou Normal College, Guiyang 550018, China; and <sup>4</sup>Forestry College of Guizhou University, Guiyang 550025, China

### Abstract

**Aims** The objective of this study was to characterize the ecosystem carbon sequestration during natural restoration process of karst forest vegetation.

**Methods** We adopted the “space for time” approach to examine the pattern of carbon sequestration in karst forest ecosystems along the natural restoration process. Forest vegetation types representing six typical successional stages were selected and investigated, which include herb stage, herb to shrub stage, shrub stage, shrub to arbor stage, arbor stage, and climax stage. Twenty-four plots of 30 m × 30 m were established on sites of the six forest types, and samples of plants, litter and soil were collected in each plot.

**Important findings** The total vegetation biomass increased from 7.97 to 166.83 t·hm<sup>-2</sup> with advancement of restoration stages, corresponding to the trend of changes in biomass for the arbor layer (from 41.77 to 164.59 t·hm<sup>-2</sup>), but with declining biomass for the herb layer (from 8.45 t·hm<sup>-2</sup> at the herb to shrub stage to 0.68 t·hm<sup>-2</sup> at the climax stage) and the shrub layer (from 32.87 t·hm<sup>-2</sup> at the shrub stage to 1.56 t·hm<sup>-2</sup> at the climax stage). The ratio of above ground to belowground biomass in karst vegetation was relatively low (varying between 1.26 and 2.03), especially for the shrub layer (varying between 1.23 and 1.45). The weighted average carbon content increased from 36.76% to 48.74% with the process of restoration. In the process of the natural restoration, the carbon density in the arbor layer increased from 19.44 to 80.40 t·hm<sup>-2</sup>, but decreased from 3.19 t·hm<sup>-2</sup> at the herb to shrub stage to 0.23 t·hm<sup>-2</sup> at the climax stage in the herb layer and from 15.13 t·hm<sup>-2</sup> at the shrub stage to 0.69 t·hm<sup>-2</sup> at the climax stage in the shrub layer. The overall carbon density showed an increasing trend from the early stages (herb and herb to shrub stages), through the middle stages (shrubs and shrub to arbor stages), to the late

收稿日期Received: 2014-08-12 接受日期Accepted: 2015-05-20

\* 通讯作者Author for correspondence (E-mail: gdyulifei@163.com)

stages (arbor and climax stages) at levels of ecosystems (from 15.72 to 99.37 t·hm<sup>-2</sup>), vegetation (from 2.93 to 81.31 t·hm<sup>-2</sup>), and soil (from 8.26 to 18.80 t·hm<sup>-2</sup>), accompanied by a reduction in litter (from 4.97 to 1.53 t·hm<sup>-2</sup>). It can be concluded that vegetation, especially the component of woody plants, has the greatest influence on ecosystem carbon stocks during the recovery progress of karst forests, with little effects of soils. Therefore, it is important to facilitate the recovery of vegetation for enhancing karst ecosystem carbon sink.

**Key words** carbon sequestration, karst forest ecosystem, natural restoration, degraded karst forest, carbon density

**Citation:** Huang ZS, Yu LF, Fu YH, Yang R (2015). Characteristics of carbon sequestration during natural restoration of Maolan karst forest ecosystems. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 39, 554–564. doi: 10.17521/cjpe. 2015.0053

当前大气中CO<sub>2</sub>等温室气体的浓度正在逐年增高, 全球气候变暖已成为国际社会最关注的全球性环境问题, 对CO<sub>2</sub>吸收、固定和排放的研究也已成为全球变化研究的热点和前沿, 森林生态系统是陆地生态系统碳储库的主体, 在维护全球碳平衡方面具有重要作用, 有研究指出: 1995–2050年全球森林植被保存和吸收碳的潜力可达60–87 Pg C, 可以吸收同期经济正常发展情况下石化燃料排放碳的11%–15% (Dixon *et al.*, 1993, 1994; Körner, 2000; 方运霆等, 2003), 国内外许多学者围绕森林生态系统碳储量、碳循环等开展了广泛的研究(王绍强等, 1999; 周玉荣等, 2000; Fang *et al.*, 2001; 王效科等, 2001), 开展森林植被恢复中生态系统碳吸存研究具有重要意义。

近年来, 在喀斯特森林区分别以土壤(倪九派等, 2009; 黄宗胜等, 2013b)、植被(罗东辉等, 2010; 于维莲等, 2010; 董丹和倪健, 2011)为研究对象开展了相关研究, 以喀斯特森林生态系统为研究对象的研究较少, 主要有有人工幼林生态系统碳储量及其空间分布(田大伦等, 2011)、城市森林生物量及其碳吸存功能研究(王新凯, 2011), 而对退化喀斯特森林植被恢复中生态系统碳吸存的研究报道较少。然而在研究退化喀斯特生态系统恢复、生态系统服务功能评价、生态系统碳循环、生态系统碳库构成及变化等问题的时候, 往往要涉及生态系统恢复过程中植被生物量及生物量碳的构成与变化、生态系统碳密度的构成与变化、生态系统碳吸存特征等。鉴于此, 本文对喀斯特森林植被自然恢复中生态系统碳密度的变化、碳吸存特征进行了研究, 以揭示喀斯特森林植被自然恢复中植被生物量的构成与变化、生态系统碳库的构成与变化、生态系统固碳能力、为喀斯特生态系统碳库估算、生态服务功能评价以及植被恢复等提供参考依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

本研究在贵州茂兰国家级自然保护区(25.15°–25.33° N, 107.87°–108.08° E)进行。保护区面积213 km<sup>2</sup>, 森林覆盖率87.3%, 地势西北高东南低, 最高海拔1 079 m, 最低海拔430 m, 平均海拔550–850 m, 山峰与洼地相对高差150–300 m。属中亚热带南部季风湿润气候, 年平均气温18.3 °C, ≥10 °C积温5 768 °C, 年降水量1 321 mm, 年平均相对湿度80%, 全年日照时间1 271 h。此地属裸露型喀斯特地貌。土壤以黑色石灰土为主, 上层浅薄且不连续, 剖面多为腐殖质-淋溶-母岩层(AF-D)构型、腐殖质-母岩层(A-D)构型, 地表水缺乏, 土体持水量较低, 土壤富钙和富盐基化, pH值6.15–8.00, 有机质含量75.5–380.0 g·kg<sup>-1</sup>。多数地段为中亚热带原生性喀斯特森林, 为常绿落叶阔叶混交林, 也有不同退化程度的演替群落, 现有维管束植物154科514属1 203种, 对喀斯特森林植被自然恢复的研究有很强的代表性(周政贤, 1987)。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 样地选择及依据

本研究区退化植被自然恢复过程分为草本阶段(C)、草灌阶段(CG)、灌丛灌木阶段(G)、灌乔过渡阶段(GQ)、乔木阶段(Q)和顶极阶段(D) 6个恢复阶段(喻理飞等, 1998, 2000)。分别于各阶段设置典型样地, 样地面积为30 m × 30 m, 4个重复, 共计24块。各恢复阶段样地土壤类型均为石灰土。样地的基本情况见表1。

#### 1.2.2 植被样地调查及样品收集处理

植被调查: 采用常规的群落学调查方法(董鸣, 1996), 在样地记录乔木植物种类、株数、枝下高、高度、胸径(3 cm以上的乔木, 每木检尺)、冠幅、盖

表1 各恢复阶段植被的基本概况

Table 1 Basic information of the vegetation at various restoration stages

恢复阶段 Restoration stage	坡度和海拔 Slope and elevation	坡向 Aspect	植被特征 Vegetation characteristics	优势种 Dominant species	岩石裸露率 Bare rock (%)	生境 Habitat
草本阶段 Herb stage	30°–40°, 840 m	NW	群落层次只有草本层, 高约1.0 m, 盖度达80%以上, 有极少数先锋树种, 地上覆盖有3–6 cm 枯枝落叶层。 The vertical structure of the community has an herb layer with height of 1.0 m and coverage of more than 80%. There are a handful of pioneer trees. The thickness of litter layer is 3–6 cm on the ground.	密毛蕨 <i>Pteridium revolutum</i> , 白茅 <i>Imperata cylindrical</i> var. <i>major</i> , 金丝草 <i>Pogonatherum crinitum</i> , 三毛草 <i>Trisetum bifidum</i>	77.52	土面、石缝、石沟 Earth flatland, crevice, gully
草灌阶段 Herb to shrub stage	30°–40°, 820 m	SW	群落层次一层, 由草本和灌木共同组成, 盖度达80%以上, 草本、灌木盖度约各占一半, 高度1.5–2.0 m, 地表有少量藤刺, 群落下覆盖有2–5 cm 枯枝落叶层。 The vertical structure of the community has only a single layer, which was dominated by shrubs and herbs. The mean height and coverage of community are 1.5–2.0 m and more than 80%, respectively. The coverage of community is about equally divided into shrub and herb. There are a small amount of thorns and ferns on the ground. The thickness of litter layer is 2–5 cm.	盐肤木 <i>Rhus chinensis</i> , 野牡丹 <i>Mlastoma candidum</i> , 腊莲绣球 <i>Hydrangea strigosa</i> , 算盘子 <i>Glochidion puberum</i> , 密毛蕨 <i>Pteridium revolutum</i> , 白茅 <i>Imperata cylindrical</i> var. <i>major</i> , 金丝草 <i>Pogonatherum crinitum</i>	75.61	土面、石缝、石沟 Earth flatland, crevice, gully
灌木阶段 Shrub stage	30°–40°, 820 m	SW	林分垂直结构单一, 无或有少量乔木, 主要以灌木层为主, 高度2.0–4.0 m, 覆盖度达80%以上, 地表有较多藤刺, 林下覆盖的枯枝落叶层2–4 cm。 The vertical structure of the stand is simple and dominated by the shrub layer, without tree layer or with a small amount of trees. The mean height and coverage of shrub layer are 2.0–4.0 m and more than 80%, respectively. There are a lot of thorns and ferns on the ground. The thickness of litter layer was 2–4 cm on forest-floor.	火棘 <i>Pyracantha fortuneana</i> , 南天竹 <i>Nandina domestica</i> , 香叶树 <i>Lindera communis</i> , 齿叶铁仔 <i>Myrsine semiserrata</i> , 齿叶黄皮 <i>Clausena dunniana</i> , 榔榆 <i>Ulmus parvifolia</i>	73.22	石面、石缝、土面、石沟 Rocky flatland, crevice, earth flatland, gully
灌乔阶段 Shrub to arbor stage	30°–40°, 820 m	SW	林分层次结构分化, 乔木层高7.0–12.0 m, 木本植物盖度达80%以上; 林下草本盖度较低, 地表有较多藤刺, 林下枯枝落叶层厚3–5 cm。 The stand structure is stratified with mean height of the tree layer varying between 7.0 and 12.0 m, and the coverage of woody plants at more than 80%. The coverage of herb layer is low. There are a lot of thorns and ferns on the ground. The thickness of litter layer is 3–5 cm on forest-floor.	圆果化香树 <i>Platy-carya longipes</i> , 香叶树 <i>Lindera communis</i> , 天峨槭 <i>Acer wang-chii</i> , 鸡仔木 <i>Sinoa-dina racemosa</i> , 川钓樟 <i>Lindera pulcherima</i> var. <i>hemsleyana</i> , 青冈 <i>Cyclobalanopsis glauca</i>	73.94	石面、石缝、土面、石沟 Rocky flatland, crevice, earth flatland, gully
乔木阶段 Arbor stage	30°–40°, 840 m	SW	层次结构分化明显, 乔木层、灌木层比较发达, 乔木层高14.0–18.0 m, 乔木层覆盖度达80%以上; 灌木层高2.0–3.0 m, 盖度10%, 地表有少量藤刺、蕨类、地衣苔藓等分布, 林下枯枝落叶层厚1–3 cm。 The stand structure is clearly stratified, with well-developed tree layer and shrub layer. The mean tree height and coverage of tree layer are 14.0–18.0 m and more than 80%, respectively. The shrub layer has a coverage of 10% and height of 2.0–3.0 m. The land is covered by a small amount of thorns, ferns, lichens and mosses, and the thickness of litter layer is 1–3 cm on forest-floor.	光皮楸木 <i>Swida wilsoniana</i> , 黔桂润楠 <i>Machilus chienkweien-sis</i> , 香叶树 <i>Lindera communis</i> , 翅荚香槐 <i>Cladrastis platycarpa</i> , 南酸枣 <i>Choerospon-dias axillaris</i> , 短萼海桐 <i>Pittosporum brevi-calyx</i>	72.81	土面、石面、石缝、石沟 Earth flatland, rocky flatland, crevice, gully
顶极阶段 Climax stage	30°–40°, 850 m	SW	层次结构完整, 乔木层、灌木层和草本层植物之间分化清晰, 以乔木林为主, 高15.0–20.0 m, 乔木层覆盖率达80%以上; 灌木层高4.0–7.0 m, 盖度10%–20%; 林下覆盖有1–3 cm 枯枝落叶层。 The stand structure is complete and clearly divided into tree layer, shrub layer and herb layer, with dominance of the tree layer. The mean tree height and coverage of the tree layer are 15.0–20.0 m and more than 80%, respectively. The height of shrub layer has a coverage of 10%–20% and height of 4.0–7.0 m. The thickness of litter layer is 1–3 cm on forest-floor.	光皮楸木 <i>Swida wilsoniana</i> , 短萼海桐 <i>Pittosporum brevi-calyx</i> , 多脉青冈 <i>Cyclobalanopsis mul-tiervis</i> , 天峨槭 <i>Acer wangchii</i> , 云贵鹅耳枥 <i>Carpinus pubescens</i> , 粗柄楠 <i>Phoebe cras-sipedicella</i>	71.20	石面、石缝、土面、石沟 Rocky flatland, crevice, earth flatland, gully

度、频度等, 灌木和草本植物种类、株数、盖度、频度等, 生境因子海拔高度、坡度、坡向、土壤类型、周围环境、人为干扰状况、起源等因素。生物量收集与测算: 草本、灌木层的生物量测算采用收获法, 乔木层采用相关生长法测算生物量(董鸣, 1996; 杨同辉等, 2007)。具体如下:

2011年8–10月在C (25.27° N, 108.02° E)、CG (25.27° N, 108.02° E)、G (25.30° N, 107.93° E)、GQ (25.30° N, 107.93° E)、Q (25.28° N, 107.93° E)和D阶段(25.21° N, 107.99° E) 24个样地中进行生物量的调查收集; 草本层每个样地内随机选取9个1 m × 1 m小样地, 应用收获法收集地上部分生物量和根系生物量, 草本层高度为 $H \leq 1.5$  m (即 $H \leq 1.5$  m的乔木和灌木的幼树都归并为草本层), 样品带回实验室后80 °C恒温烘干至恒定质量, 称取其质量, 并推算各个恢复阶段草本层每 $\text{hm}^2$ 的生物量。

灌木层高 $H > 1.5$  m、胸径 $D < 3$  cm, 每个样地内随机选取1个面积为5 m × 5 m的小样地, 对小样地进行常规群落学调查, 根据群落学调查所得数据(由于茂兰属于自然保护区不能采伐林木), 在保护区以外选取类似背景的样地, 并用收获法对选取的样地地上部分和地下部分进行收取, 收获时采用微爆破和大型挖掘机进行作业, 最后分别称量样地灌木的总鲜质量、地上部分和地下部分的鲜质量, 再取适量地上部分和地下部分样品, 置于80 °C烘箱内, 烘干至恒定质量, 分别求出各部分的干质量与鲜质量之比, 再计算出地上部分和地下部分的干质量, 并推算各个恢复阶段灌木层每 $\text{hm}^2$ 的生物量。

乔木层对GQ、Q和D阶段植被12个样地中的所有胸径 $D \geq 3$  cm树种进行各径级和平均径级的统计, 统计发现乔木树种胸径主要分布在6 cm、9 cm、12 cm三个径级中。因此选取分布在6 cm、9 cm、12 cm三个径级附近胸径的标准木各3株, 小于6 cm径级的标准木3株(3 cm、4 cm、5 cm径级各1株), 大于12 cm径级的标准木3株, 即14 cm、17 cm、20 cm径级附近标准木各1株(大于12 cm径级的在14 cm、17 cm、20 cm径级附近分布频数较高)。即共选取标准木15株, 15株标准木隶属于9个优势树种: 圆果化香树(*Platycarya longipes*)、香叶树(*Lindera communis*)、天峨槭(*Acer wangchii*)、青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)、光皮柞木(*Swida wilsoniana*)、翅荚香槐(*Cladrastis platycarpa*)、短萼海桐(*Pittosporum*

*brevicalyx*)、多脉青冈(*Cyclobalanopsis multiervis*)、云贵鹅耳枥(*Carpinus pubescens*)。依据样地中确定好的标准木相关测树学数据, 在保护区以外的相同地貌类似背景植被中选取同样物种相同测树学数据的标准木, 标准木选好后, 采用直接收获法对其进行采伐, 根系的收获是采用微爆破和大型挖掘机挖取的方式, 最后称取样木的总鲜质量和各部位的鲜质量, 再取适量枝、干、叶、根样品, 置于80 °C烘箱内, 烘干至恒定质量, 分别求出各部分的干质量与鲜质量的比, 再计算出枝、干、叶、根的干质量。因茂兰地区植被乔木层地上生物量研究基础较好, 尤其是朱守谦等(1995)采用相对生长法对茂兰自然保护区林木生物量进行了较精确的测定, 故对收获的标准木各器官进行回归分析, 回归方程(朱守谦等, 1995; 刘长成等, 2009)如下:

$$W = a(D^2H)^b$$

式中,  $W$ 为植株各部分的生物量,  $D$ 为胸径,  $H$ 为树高,  $a$ 和 $b$ 为回归常数。然后根据回归公式对植被乔木层生物量进行计算, 统计出植被乔木层的生物量。

### 1.2.3 植被有机碳指标测定与计算

对收获的样品利用四分法3次粉碎、100目过筛、取样, 于80 °C的烘箱中烘干至恒定质量, 进行含碳率的测定, 含碳率测定采用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ -硫酸外加热法(鲍士旦, 1999; 中国生态系统研究网络科学委员会, 2007)。每个演替阶段的乔、灌、草样品各测定了3个重复。加权平均含碳率为各部分(或器官)含碳率与其加权系数之积, 加权系数为各部分(或器官)生物量与整体生物量之比。碳储量即含碳率与其生物量相乘之积, 即碳储量。碳储量除以样地面积即为碳密度。

### 1.2.4 植被凋落物现存有机碳、土壤有机碳指标获取

凋落物现存有机碳储量和碳密度(黄宗胜等, 2013b)、土壤有机碳碳储量和碳密度用我们在同一样地2011年研究所得的数据(黄宗胜等, 2013a), 这些数据样品与植被碳储量、碳密度数据样品的采集时间基本一致。

### 1.2.5 生态系统有机碳相关指标计算

生态系统有机碳碳储量为样地内植被、凋落物现存量、土壤三者有机碳碳储量之和; 生态系统有机碳碳密度为样地内生态系统有机碳碳储量与样地面积之比; 生态系统有机碳碳吸存速率为生态系统

之间的碳储量之差除以其恢复时间之差, 各恢复阶段恢复时间见文献(安明态, 2008)。

1.3 数据处理

通过Excel、SPSS 17.0软件对数据进行统计分析。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同数据组间的差异, 显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果和分析

2.1 退化喀斯特森林自然恢复中植被生物量

2.1.1 植被乔木层相对生长关系回归模型

由表2可知: 乔木各部位的生物量( $W$ )与其胸径( $D$ )、树高( $H$ )的关系可用 $W = a(D^2H)^b$ 方程很好地拟合, 决定系数( $R^2$ )大于0.950, 达到极显著相关水平( $p < 0.001$ )。为了对这些生物量方程进行验证, 根据每木调查数据, 用朱守谦等(1995)所得林木生物量方程对本研究各样地的地上生物量进行估算, 其结果与本研究所得方程估算结果基本一致, 表明本研究的生物量方程基本可靠。

表2 乔木各部位质量(kg)( $W$ )与其胸径(cm)( $D$ )、树高(m)( $H$ )的关系方程  
Table 2 Equations for the relationships of the mass (kg) for different components of arbor ( $W$ ) with diameter (cm) at breast height ( $D$ ) and tree height (m)( $H$ )

乔木各部位 Component of arbor	方程 Equation	$R^2$	$p$
干 Stem	$W = 0.09120 (D^2H)^{0.816}$	0.988	<0.001
枝 Branch	$W = 0.01510 (D^2H)^{0.844}$	0.986	<0.001
叶 Leaf	$W = 0.01442 (D^2H)^{0.693}$	0.972	<0.001
地上 Aboveground	$W = 0.11749 (D^2H)^{0.814}$	0.989	<0.001
地下 Underground	$W = 0.03811 (D^2H)^{0.896}$	0.951	<0.001
总 Total	$W = 0.15524 (D^2H)^{0.841}$	0.987	<0.001

树高( $H$ ) 4.82–19.64 m, 胸径( $D$ ) 3.00–20.02 cm。  
Tree height ( $H$ ) 4.82–19.64 m, diameter at breast height ( $D$ ) 3.00–20.02 cm.

2.1.2 自然恢复中植被生物量构成

表3显示: 植被草本层地上、地下生物量由恢复早期(C、CG), 经中期(G、GQ)至恢复后期(Q、D)呈递减趋势; 灌木层生物量除CG阶段外, 地上、地下生物量随恢复进展递减; 乔木层地上、地下生物量随恢复进展递增; 三层合计地上、地下及植被生物量均随恢复进展递增。恢复早期(C、CG)生物量层次分配中占优势的主要是草本层, 草本层生物量在C阶段占100%, 在CG阶段占81.17%。恢复中期(G、GQ)生物量层次分配中占优势的主要为: G阶段

灌木层占优势(95.89%), GQ阶段乔木层占优势(70.43%)。恢复后期(Q、D)生物量层次分配中占优势的主要是乔木层, Q阶段乔木层生物量占90.26%、D阶段乔木层生物量占98.66%。这说明恢复阶段不同生物量的构成也不同。

2.1.3 自然恢复中植被地上生物量与地下生物量之比

表4表明: 各垂直层间比较, 灌木层地上生物量与地下生物量之比最低, 乔木层居中, 草本层最高; 各恢复阶段间三层合计比较, 恢复早期(C、CG)地上生物量与地下生物量之比最高, 中期(G、GQ)最低。

2.2 退化喀斯特森林自然恢复中植被碳库特征

2.2.1 自然恢复中植被含碳率

表5表明: 总体上乔木层含碳率最高, 灌木层其次, 草本层最低; 草本层含碳率为31.63%–38.64%, 总体上小于40%, 地上部分含碳率在恢复前期大于地下部分, 恢复后期地上部分略小于地下部分; 灌木层含碳率为42.34%–46.68%, 变化幅度较小, G阶段、CG阶段最高, 地下部分与地上部分含碳率相差不大; 乔木层含碳率为42.13%–49.35%, 各器官含碳率最大的为干, 其次为根, 枝和叶最小且两者相差不大。加权平均含碳率随恢复进展递增, 变化范围为36.76%–48.74%。以上结果表明如采用国际常用的含碳率45%或50% (周玉荣等, 2000; 郑帷婕等, 2007)对喀斯特森林植被碳储量进行估测, 结果会有较大误差, 因此在喀斯特地区不宜使用50%或45%这种固定的转换系数。

2.2.2 自然恢复中植被碳密度

表6表明: 草本层和灌木层的碳密度由恢复早期(C、CG)经恢复中期(G、GQ)至恢复后期(Q、D)呈递减趋势, 乔木层和植被总碳密度则随恢复进展呈增加趋势。随恢复进展, 植被总碳密度呈累积趋势; 随恢复进展, 植被地下碳密度与植被碳密度之比, C、CG、G、GQ、Q、D阶段分别为32.18%、33.25%、43.77%、38.17%、37.38%、38.63%, 表明恢复早期地下碳密度比重较低, 中后期地下碳密度上升, 其中G阶段最高, 其后的GQ、Q、D阶段又有所下降, 反映出喀斯特区植被随恢复和生境改善有机碳的分配策略。

2.3 退化喀斯特森林自然恢复中生态系统碳库特征

表7显示: 生态系统碳密度以恢复早期(C、CG)最低, 中期(G、GQ)次之, 后期(Q、D)最高, 植被与

表3 不同恢复阶段植被生物量(t·hm<sup>-2</sup>)  
Table 3 Vegetation biomass at different restoration stages (t·hm<sup>-2</sup>)

恢复阶段 Restoration stage	草本层 Herb layer			灌木层 Shrub layer			乔木层 Arbor layer			植被 Vegetation		
	地上 Above-ground	地下 Below-ground	合计 Total	地上 Above-ground	地下 Below-ground	合计 Total	地上 Above-ground	地下 Below-ground	合计 Total	地上 Above-ground	地下 Below-ground	合计 Total
草本阶段 Herb stage	5.16 <sup>a</sup>	2.81 <sup>a</sup>	7.97 <sup>a</sup>	—	—	—	—	—	—	5.16 <sup>a</sup>	2.81 <sup>a</sup>	7.97 <sup>a</sup>
草灌阶段 Herb to shrub stage	5.82 <sup>b</sup>	2.63 <sup>b</sup>	8.45 <sup>b</sup>	1.16 <sup>a</sup>	0.80 <sup>a</sup>	1.96 <sup>a</sup>	—	—	—	6.98 <sup>b</sup>	3.43 <sup>b</sup>	10.41 <sup>b</sup>
灌木阶段 Shrub stage	0.89 <sup>c</sup>	0.52 <sup>c</sup>	1.41 <sup>c</sup>	18.13 <sup>b</sup>	14.74 <sup>b</sup>	32.87 <sup>b</sup>	—	—	—	19.02 <sup>c</sup>	15.26 <sup>c</sup>	34.28 <sup>c</sup>
灌乔阶段 Shrub to arbor stage	0.99 <sup>d</sup>	0.43 <sup>d</sup>	1.42 <sup>c</sup>	9.02 <sup>c</sup>	7.10 <sup>c</sup>	16.12 <sup>c</sup>	26.52 <sup>a</sup>	15.25 <sup>a</sup>	41.77 <sup>a</sup>	36.53 <sup>d</sup>	22.78 <sup>d</sup>	59.31 <sup>d</sup>
乔木阶段 Arbor stage	0.63 <sup>e</sup>	0.39 <sup>e</sup>	1.02 <sup>d</sup>	5.04 <sup>d</sup>	3.61 <sup>d</sup>	8.65 <sup>d</sup>	56.17 <sup>b</sup>	33.44 <sup>b</sup>	89.61 <sup>b</sup>	61.84 <sup>e</sup>	37.44 <sup>e</sup>	99.28 <sup>e</sup>
顶极阶段 Climax stage	0.41 <sup>f</sup>	0.27 <sup>f</sup>	0.68 <sup>e</sup>	0.88 <sup>e</sup>	0.68 <sup>e</sup>	1.56 <sup>e</sup>	101.58 <sup>c</sup>	63.01 <sup>c</sup>	164.59 <sup>c</sup>	102.87 <sup>f</sup>	63.96 <sup>f</sup>	166.83 <sup>f</sup>

同列不同小写字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。“—”表示在相对应的行的恢复阶段中没有列中的植被。  
Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at 0.05 level. “—” means that the specific plant type does not exist at the given stage of restoration.

表4 植被地上生物量与地下生物量之比  
Table 4 The ratio of aboveground biomass to below ground biomass of the vegetation

恢复阶段 Restoration stage	草本层 Herb layer	灌木层 Shrub layer	乔木层 Arbor layer	三层合计 Total of three layers
草本阶段 Herb stage	1.84 <sup>a</sup>	—	—	1.84 <sup>a</sup>
草灌阶段 Herb to shrub stage	2.21 <sup>b</sup>	1.45 <sup>a</sup>	—	2.03 <sup>b</sup>
灌木阶段 Shrub stage	1.71 <sup>c</sup>	1.23 <sup>b</sup>	—	1.26 <sup>c</sup>
灌乔阶段 Shrub to arbor stage	2.30 <sup>d</sup>	1.27 <sup>bc</sup>	1.74 <sup>a</sup>	1.60 <sup>d</sup>
乔木阶段 Arbor stage	1.63 <sup>e</sup>	1.39 <sup>d</sup>	1.68 <sup>a</sup>	1.65 <sup>d</sup>
顶极阶段 Climax stage	1.52 <sup>f</sup>	1.29 <sup>e</sup>	1.61 <sup>b</sup>	1.61 <sup>d</sup>

同列不同小写字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。“—”表示在相对应的行的恢复阶段中没有列中的植被。  
Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at 0.05 level. “—” means that the specific plant type does not exist at the given stage of restoration.

表5 不同恢复阶段中植被含碳率(%)  
Table 5 Vegetation carbon content at different restoration stages (%)

恢复阶段 Restoration stage	草本层 Herb layer		灌木层 Shrub layer		乔木层 Arbor layer				加权平均含碳率 The weighted average of carbon content
	地上 Aboveground	地下 Belowground	地上 Aboveground	地下 Belowground	干 Stem	枝 Branch	叶 Leaf	根 Root	
草本阶段 Herb stage	38.64 <sup>a</sup>	33.30 <sup>a</sup>	—	—	—	—	—	—	36.76 <sup>a</sup>
草灌阶段 Herb to shrub stage	37.61 <sup>b</sup>	38.06 <sup>b</sup>	43.25 <sup>a</sup>	42.34 <sup>a</sup>	—	—	—	—	38.71 <sup>b</sup>
灌木阶段 Shrub stage	34.32 <sup>c</sup>	31.63 <sup>c</sup>	46.68 <sup>b</sup>	45.26 <sup>b</sup>	—	—	—	—	45.51 <sup>c</sup>
灌乔阶段 Shrub to arbor stage	35.74 <sup>d</sup>	36.59 <sup>d</sup>	46.33 <sup>bc</sup>	46.17 <sup>b</sup>	47.98 <sup>a</sup>	44.23 <sup>a</sup>	45.68 <sup>a</sup>	46.53 <sup>a</sup>	46.55 <sup>d</sup>
顶极阶段 Arbor stage	33.68 <sup>ce</sup>	34.88 <sup>e</sup>	44.52 <sup>d</sup>	42.61 <sup>a</sup>	48.66 <sup>a</sup>	45.11 <sup>a</sup>	46.34 <sup>a</sup>	47.39 <sup>ab</sup>	47.24 <sup>e</sup>
顶极阶段 Climax stage	33.27 <sup>e</sup>	33.62 <sup>a</sup>	45.36 <sup>cd</sup>	43.22 <sup>a</sup>	49.35 <sup>a</sup>	46.81 <sup>b</sup>	42.13 <sup>b</sup>	49.26 <sup>b</sup>	48.74 <sup>f</sup>

同列不同小写字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。“—”表示在相对应的行的恢复阶段中没有列中的植被。  
Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at 0.05 level. “—” means that the specific plant type does not exist at the given stage of restoration.

之具有一致的变化规律,土壤碳密度也由恢复早期(C、CG)(8.26–10.71 t·hm<sup>-2</sup>)经中期(G、GQ) (12.36–17.60 t·hm<sup>-2</sup>)至后期(Q、D)(16.53–18.80 t·hm<sup>-2</sup>)呈上升趋势,但相对于植被碳密度(2.93–81.31 t·hm<sup>-2</sup>),土壤碳密度变幅(8.26–18.80 t·hm<sup>-2</sup>)不大,而凋落物碳密度随恢复进展递减。

2.4 退化喀斯特森林植被自然恢复中生态系统碳吸存速率

表8显示:生态系统碳吸存速率以CG至G、G至GQ、CG至GQ、GQ至Q较高,而C至CG、Q至D则较低,即生态系统碳吸存速率在恢复早期和恢复后期较低,恢复中期则较高,其中植被的碳吸存速率

表6 不同恢复阶段中植被碳密度(t·hm<sup>-2</sup>)  
Table 6 Vegetation carbon density at different restoration stages (t·hm<sup>-2</sup>)

恢复阶段 Restoration stage	草本层 Herb layer			灌木层 Shrub layer			乔木层 Arbor layer			植被 Vegetation		
	地上 Above-ground	地下 Below-ground	小计 Total	地上 Above-ground	地下 Below-ground	小计 Total	地上 Above-ground	地下 Below-ground	小计 Total	地上 Above-ground	地下 Below-ground	合计 Total
草本阶段 Herb stage	1.99 <sup>a</sup>	0.94 <sup>a</sup>	2.93 <sup>a</sup>	—	—	—	—	—	—	1.99 <sup>a</sup>	0.94 <sup>a</sup>	2.93 <sup>a</sup>
草灌阶段 Herb to shrub stage	2.19 <sup>b</sup>	1.00 <sup>b</sup>	3.19 <sup>b</sup>	0.50 <sup>a</sup>	0.34 <sup>a</sup>	0.84 <sup>a</sup>	—	—	—	2.69 <sup>b</sup>	1.34 <sup>b</sup>	4.03 <sup>b</sup>
灌木阶段 Shrub stage	0.31 <sup>c</sup>	0.16 <sup>c</sup>	0.47 <sup>c</sup>	8.46 <sup>b</sup>	6.67 <sup>b</sup>	15.13 <sup>b</sup>	—	—	—	8.77 <sup>c</sup>	6.83 <sup>c</sup>	15.60 <sup>c</sup>
灌乔阶段 Shrub to arbor stage	0.35 <sup>d</sup>	0.16 <sup>c</sup>	0.51 <sup>c</sup>	4.18 <sup>c</sup>	3.28 <sup>c</sup>	7.46 <sup>c</sup>	12.54 <sup>a</sup>	7.10 <sup>a</sup>	19.64 <sup>a</sup>	17.07 <sup>d</sup>	10.54 <sup>d</sup>	27.61 <sup>d</sup>
乔木阶段 Arbor stage	0.21 <sup>e</sup>	0.14 <sup>d</sup>	0.35 <sup>d</sup>	2.24 <sup>d</sup>	1.54 <sup>d</sup>	3.78 <sup>d</sup>	26.92 <sup>b</sup>	15.85 <sup>b</sup>	42.77 <sup>b</sup>	29.37 <sup>e</sup>	17.53 <sup>e</sup>	46.90 <sup>e</sup>
顶极阶段 Climax stage	0.14 <sup>f</sup>	0.09 <sup>e</sup>	0.23 <sup>e</sup>	0.40 <sup>e</sup>	0.29 <sup>e</sup>	0.69 <sup>e</sup>	49.36 <sup>c</sup>	31.03 <sup>c</sup>	80.40 <sup>c</sup>	49.90 <sup>f</sup>	31.41 <sup>f</sup>	81.31 <sup>f</sup>

同列不同小写字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。“—”表示在相对应的行的恢复阶段中没有列中的植被。  
Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at 0.05 level. “—” means that the specific plant type does not exist at the given stage of restoration.

表7 各恢复阶段生态系统碳密度(t·hm<sup>-2</sup>)  
Table 7 Ecosystems carbon density at different restoration stages (t·hm<sup>-2</sup>)

恢复阶段 Restoration stage	碳密度 Carbon density			生态系统 Ecosystems
	植被 Vegetation	凋落物 Litter	土壤 Soil	
草本阶段 Herb stage	2.93 <sup>a</sup>	4.97 <sup>a</sup>	10.71 <sup>a</sup>	18.61 <sup>a</sup>
草灌阶段 Herb to shrub stage	4.03 <sup>b</sup>	3.43 <sup>b</sup>	8.26 <sup>b</sup>	15.72 <sup>b</sup>
灌木阶段 Shrub stage	25.60 <sup>c</sup>	1.81 <sup>c</sup>	12.36 <sup>c</sup>	29.77 <sup>c</sup>
灌乔阶段 Shrub to arbor stage	27.61 <sup>d</sup>	1.88 <sup>d</sup>	17.60 <sup>d</sup>	47.09 <sup>d</sup>
乔木阶段 Arbor stage	46.90 <sup>e</sup>	1.64 <sup>e</sup>	18.80 <sup>e</sup>	67.34 <sup>e</sup>
顶极阶段 Climax stage	81.31 <sup>f</sup>	1.53 <sup>f</sup>	16.53 <sup>f</sup>	99.37 <sup>f</sup>

凋落物和土壤数据来自参考文献(黄宗胜等, 2013a, 2013b)。  
Data on litter and soil are from literature (Huang *et al.*, 2013a, 2013b).

高于土壤的碳吸存速率。

3 讨论

3.1 退化喀斯特森林植被自然恢复中植被生物量特征

在喀斯特地区, 由于生境的复杂性, 植物生物量的获取非常困难, 本研究对草本层、灌木层植物采用收获法进行测定, 在前人研究的基础(杨汉奎和程世泽, 1991; 朱守谦等, 1995; 刘长成等, 2009)上对收获的样地标准木(优势树种)进行了回归模拟, 并以该回归方程对植被乔木层进行了估测, 测定结果较为可靠。

本研究C阶段地上与地下生物量均落入了罗东辉(2009)研究所得草本植被地上生物量4.76–7.36 t·hm<sup>-2</sup>、地下生物量2.63–4.65 t·hm<sup>-2</sup>的范围, G阶段也与其研究结果接近; 本研究GQ、Q、D阶段的植被地上生物量、乔木层生物量、灌木层生物量、草本

层生物量与杨汉奎和程世泽(1991)、朱守谦等(1995)、刘长成等(2009)、罗东辉等(2010)的研究结果一致或接近, 地下生物量与罗东辉等(2010)的研究结果接近, 说明喀斯特地区相同类型的森林植被的生物量构成基本一致。本研究中森林植被地上生物量36.53–102.87 t·hm<sup>-2</sup>与同地带的常绿阔叶林生物量相比较低, 如云南哀牢山木果石栎(*Lithocarpus xylocarpus*)林(348.70 t·hm<sup>-2</sup>) (邱学忠等, 1984)、福建中亚热带福建青冈(*Cyclobalanopsis chungii*)次生林(298.29 t·hm<sup>-2</sup>) (黄典忠, 2006)、福建武夷山丝栗栲(*Castanopsis fargesii*)林(237.28 t·hm<sup>-2</sup>) (林芳, 2006)、浙江天童常绿阔叶林(135.65 t·hm<sup>-2</sup>) (杨同辉等, 2007), D阶段总生物量(166.83 t·hm<sup>-2</sup>)也比亚热带常绿阔叶林总生物量(168.00–255.00 t·hm<sup>-2</sup>) (方精云等, 1996)、世界亚热带常绿阔叶林总生物量(356.00 t·hm<sup>-2</sup>) (Whittaker & Likens, 1973)低很多; 但是不同森林地下生物量的比较显示, 茂兰Q、D阶段地下生物量(37.44–63.96 t·hm<sup>-2</sup>)比其他地方高, 如比广西次生常绿阔叶林地下生物量(30.58 t·hm<sup>-2</sup>) (张林等, 2004)要高。这说明喀斯特地区森林植被属于偏低生物量的森林群落, 这可能是非地带性因素喀斯特生境所造成的。植物的地上生物量与地下生物量的比值反映了植物的生长策略, 属于植物生活史对策理论的核心论题之一(王亮等, 2010)。本研究所得植物地上生物量(包括叶、茎)与地下生物量的比值为1.23–2.30, 比全球森林茎生物量与根生物量的比值3.13–5.88、我国森林茎生物量与根生物量的比值2.78–5.88要低很多(黄玫等, 2006), 说明喀斯特森林

表8 自然恢复中生态系统碳吸存速率

Table 8 The carbon sequestration rate of ecosystem during natural restoration process

恢复阶段 Restoration stage	恢复时间 Restoration time (a)	碳吸存速率 Carbon sequestration rate ( $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )				
		始于草本阶段 From herb stage	始于草灌阶段 From herb to shrub stage	始于灌木阶段 From shrub stage	始于灌乔阶段 From shrub to arbor stage	始于乔木阶段 From arbor stage
草本阶段 Herb stage	5	—	—	—	—	—
草灌阶段 Herb to shrub stage	9	-0.72 (0.28, -0.39, -0.61)	—	—	—	—
灌木阶段 Shrub stage	15	1.12	2.34 (1.93, -0.27, 0.68)	—	—	—
灌乔阶段 Shrub to arbor stage	23	1.58	2.24	2.17 (1.50, 0.01, 0.66)	—	—
乔木阶段 Arbor stage	34	1.68	2.06	1.98	1.84 (1.75, -0.02, 0.11)	—
顶极阶段 Climax stage	103	0.82	0.89	0.79	0.65	0.46 (0.50, -0.01, -0.03)

括号内数据依次为植被、凋落物和土壤的碳吸存速率。凋落物和土壤数据来自参考文献(黄宗胜等, 2013a, 2013b)。

Values in brackets are for carbon sequestration rates of vegetation, litter and soil, respectively. Data on litter and soil are from literature (Huang *et al.*, 2013a, 2013b).

地下生物量在总体生物量中占有很大的比重, 反映了植物为适应喀斯特恶劣的环境、为地上部分提供足够的水分与养料, 采取了扩大根系生物量比例的策略, 其中灌木尤为突出。

### 3.2 退化喀斯特森林植被自然恢复中生态系统有机碳吸存特征及其对碳汇林营建的启示

植物碳储量的测定误差主要有植物生物量和含碳率两个方面的原因, 因此植物含碳率的准确测定可以提高植物碳储量的估测精度。本研究所得C、CG阶段草本植物地上部分含碳率与陆生草本植物平均含碳率(37.13%)(郑帷婕等, 2007)接近, 但其他恢复阶段草本层草本植物的含碳率低于此值; 本研究灌木层含碳率为42.34%–46.68%, 与陆生灌木植物平均含碳率(45.93%)(郑帷婕等, 2007)接近; 本研究乔木层植物各部位含碳率42.13%–49.35%, 与大尺度研究中通常采用的森林含碳率45%或50%也有一定差异。综上所述, 在喀斯特地区退化植被中, 由于灌木和草地占有较大比重, 在碳储量估测中不宜采用固定含碳率系数。

本研究显示退化喀斯特生态系统随自然恢复有机碳密度在C、CG、G、GQ、Q、D阶段依次为18.61  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、15.72  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、29.77  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、47.09  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、67.34  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、99.37  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 与同地带常绿、常绿落叶阔叶林(周玉荣等, 2000) 336.68  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、硬叶常绿阔叶林 309.16  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 相比明显偏低; 凋落物现存量碳密度(1.53–4.97  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ )随自然恢复呈减少趋势, 与鼎湖山(方运霆等, 2003)群落演替凋落物现存量碳密度变化规律一致, Q、D阶段(1.53–1.64  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ )与常绿、

常绿落叶阔叶林凋落物现存量碳密度(周玉荣等, 2000) 5.43  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 要低, 也低于中国森林生态系统中凋落物(周玉荣等, 2000)平均碳密度8.21  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ; 随着自然恢复, 土壤有机碳密度在C、CG、G、GQ、Q、D阶段依次为10.71  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、8.26  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、12.36  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、17.60  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、18.80  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、16.53  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ , Q、D阶段远远低于同地带常绿、常绿落叶阔叶林(周玉荣等, 2000) 257.57  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、硬叶常绿阔叶林205.23  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ; 然而本研究D阶段植被碳密度为81.31  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 尽管比鼎湖山(唐旭利等, 2003)常绿阔叶林植被碳密度89.75  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、湖南会同(宫超等, 2011)常绿阔叶林植被碳密度156.47  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 要小, 但比中国常绿、常绿落叶阔叶林植被(周玉荣等, 2000)平均碳密度73.68  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 要高, 与世界森林植被平均碳密度86.00  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 接近, 说明喀斯特地区D阶段植被碳密度处于中等略偏下的水平, 这主要是由于植被地下部分碳密度较高, 也进一步反映了尽管喀斯特地区植被较难恢复, 但一旦恢复到D阶段, 其碳汇效应也是可观的, 然而D阶段的植被在喀斯特地区所占的比重非常低(黄威廉等, 1988)。碳吸存速率可以表征生态系统同化 $\text{CO}_2$ 的能力, 这也是生态学家和决策者非常关注的问题。本研究显示退化喀斯特生态系统在自然恢复各阶段碳吸存速率为-0.72–2.34  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ , 其中G至GQ、Q、D阶段分别为2.17  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 、1.98  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 、0.79  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ , GQ至Q、D阶段分别为1.84  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 、0.65  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ , Q至D阶段为0.46  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ , 与湘西花垣县5–14年生柃木(*Alnus cremastogyne*)林(文仕知等, 2010)碳吸存速率



6. 26–7. 72  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 、海南尖峰岭热带雨林(李意德等, 1998)碳吸存速率 $8.62 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 、广东鼎湖山马尾松(*Pinus massoniana*)演变为混交林(方运霆等, 2003)平均碳吸存速率 $2.48 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 等都要低, 说明退化喀斯特森林生态系统自然恢复中的固碳能力比常态地貌森林生态系统要低, 这主要是由于喀斯特森林土壤碳吸存速率较低所导致的, 本研究中土壤在自然恢复各阶段间碳吸存速率仅为 $-0.61\sim-0.68 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ , 而植被为 $0.28\sim1.75 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ , 这也反映出喀斯特森林区土壤浅薄土壤存储有机碳非常困难。本研究区植被与土壤的碳储量比在C、CG、G、GQ、Q、D阶段依次为0.27、0.49、1.26、1.58、2.50、4.91, 而Dixon等(1994)研究得出森林生态系统的植被与土壤的碳储量比在纬度 $0^{\circ}\sim25^{\circ}$ 为0.95–1.25、纬度 $25^{\circ}\sim50^{\circ}$ 平均为0.84, 全球平均为0.46, 周玉荣等(2000)研究得出我国植被与土壤的碳储量比为0.19–0.95, 平均为0.36, 由此可见, 本研究区森林生态系统中植被碳库的贡献最大, 受自然恢复的影响较大, 尤其是木本植被, 而土壤碳库贡献较小, 受自然恢复的影响较小。因此相对常态地貌, 植被(尤其是木本植被)的恢复对喀斯特地区增汇具有极重要的意义, 对喀斯特地区碳汇林的营建有有益的启示作用。

**基金项目** “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAC02B02)、贵州省应用基础重大项目(黔科合JZ字(2014)2002, 2009)、贵州省社会发展攻关项目(黔科合SY字(2012)3012)、贵州省农业攻关项目(黔科合NY(2013)3055)和贵州大学人才引进项目(贵大人基合字(2013)02)。

## 参考文献

- An MT (2008). *Community Structure and Forest Health Assessment in Natural Restoration of Maolan Degraded Karst Vegetation*. Master degree dissertation, Guizhou University, Guiyang. (in Chinese with English abstract) [安明态 (2008). 茂兰喀斯特植被恢复过程群落结构与健康评价. 硕士学位论文, 贵州大学, 贵阳.]
- Bao SD (1999). *Agricultural Chemistry Analysis of Soil*. 3rd edn. China Agriculture Press, Beijing. (in Chinese) [鲍士旦 (1999). 土壤农化分析(第三版). 中国农业出版社, 北京.]
- Dixon RK, Winjum JK, Schroeder PE (1993). Conservation and sequestration of carbon: The potential of forest and agroforest management practices. *Global Environmental Change*, 2, 159–173.
- Dixon RK, Solomon AM, Brown S, Houghton RA, Trexler MC, Wisniewski J (1994). Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 263, 185–190.
- Dong D, Ni J (2011). Modeling changes of net primary productivity of karst vegetation in southwestern China using the CASA model. *Acta Ecologica Sinica*, 31, 1855–1866. (in Chinese with English abstract) [董丹, 倪健 (2011). 利用CASA模型模拟西南喀斯特植被净第一性生产力. 生态学报, 31, 1855–1866.]
- Dong M (1996). *Investigation and Analysis of the Terrestrial Biological Community*. Standards Press of China, Beijing. (in Chinese) [董鸣 (1996). 陆地生物群落调查观测与分析. 中国标准出版社, 北京.]
- Fang JY, Chen AP, Peng CH, Zhao SQ, Ci LJ (2001). Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 292, 2320–2322.
- Fang JY, Liu GH, Xu SL (1996). Biomass and net production of forest vegetation in China. *Acta Ecologica Sinica*, 16, 497–508. (in Chinese with English abstract) [方精云, 刘国华, 徐嵩龄 (1996). 我国森林植被的生物量和净生产量. 生态学报, 16, 497–508.]
- Fang YT, Mo JM, Peng SL, Li DJ (2003). Role of forest succession on carbon sequestration of forest ecosystems in lower subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 23, 1685–1694. (in Chinese with English abstract) [方运霆, 莫江明, 彭少麟, 李德军 (2003). 森林演替在南亚热带森林生态系统碳吸存中的作用. 生态学报, 23, 1685–1694.]
- Gong C, Wang SL, Zeng ZQ, Deng SJ, Chen JP, Long KS (2011). Carbon storage and its distribution pattern of evergreen broad-leaved forests at different succession stages in mid-subtropical China. *Chinese Journal of Ecology*, 30, 1935–1941. (in Chinese with English abstract) [宫超, 汪思龙, 曾掌权, 邓仕坚, 陈建平, 龙康寿 (2011). 中亚热带常绿阔叶林不同演替阶段碳储量与格局特征. 生态学杂志, 30, 1935–1941.]
- Huang DZ (2006). Biomass characteristics of secondary forest community of *Cyclobalanopsis chungii* in the lower Minjiang River. *Protection Forest Science and Technology*, (1), 16–18. (in Chinese with English abstract) [黄典忠 (2006). 闽江下游福建青冈次生林群落的生物量特征. 防护林科技, (1), 16–18.]
- Huang M, Ji JJ, Cao MK, Li KR (2006). Modeling study of vegetation shoot and root biomass in China. *Acta Ecologica Sinica*, 26, 4156–4163. (in Chinese with English abstract) [黄玫, 季劲钧, 曹明奎, 李克让 (2006). 中国区域植被地上与地下生物量模拟. 生态学报, 26, 4156–4163.]
- Huang WL, Tu YL, Yang L (1988). *Guizhou Vegetation*. Guizhou People's Publishing House, Guiyang. (in

- Chinese) [黄威廉, 屠玉麟, 杨龙 (1988). 贵州植被. 贵州人民出版社, 贵阳.]
- Huang ZS, Fu YH, Yu LF (2013a). Characteristic evolution of soil organic carbon pool with the process of natural restoration of karst forest vegetation. *Acta Pedologica Sinica*, 50, 306–314. (in Chinese with English abstract) [黄宗胜, 符裕红, 喻理飞 (2013a). 喀斯特森林植被自然恢复过程中土壤有机碳库特征演化. 土壤学报, 50, 306–314.]
- Huang ZS, Fu YH, Yu LF (2013b). Evolution of litterfall accumulation and the characteristics of its carbon pool in the process of natural restoration of karst forest vegetation. *Forest Research*, 26, 8–14. (in Chinese with English abstract) [黄宗胜, 符裕红, 喻理飞 (2013b). 喀斯特森林植被自然恢复中凋落物现存量及其碳库特征演化. 林业科学研究, 26, 8–14.]
- Körner C (2000). Biosphere responses to CO<sub>2</sub> enrichment. *Ecological Application*, 10, 1590–1619.
- Li YD, Wu ZM, Zeng QB, Zhou GY, Chen BF, Fang JY (1998). Estimation of community productivity and net CO<sub>2</sub> accumulation of a tropical mountain rain forest in Jianfengling, Hainan Island, China. *Acta Phytocologica Sinica*, 22, 127–134. (in Chinese with English abstract) [李意德, 吴仲民, 曾庆波, 周光益, 陈步锋, 方精云 (1998). 尖峰岭热带山地雨林群落生产和二氧化碳同化净增量的初步研究. 植物生态学报, 22, 127–134.]
- Lin F (2006). Biomass characteristics and allocation of *Castanopsis fargesii* natural stand in Wuyishan Mountains. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 28(1), 74–77. (in Chinese with English abstract). [林芳 (2006). 武夷山丝栗栲天然林群落的生物量及其分配规律. 江西农业大学学报, 28(1), 74–77.]
- Liu CC, Wei YF, Liu YG, Guo K (2009). Biomass of canopy and shrub layers of karst forests in Puding, Guizhou, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 33, 698–705. (in Chinese with English abstract) [刘长成, 魏亚芬, 刘玉国, 郭柯 (2009). 贵州普定喀斯特次生林乔灌层地上生物量. 植物生态学报, 33, 698–705.]
- Luo DH (2009). *Biomass and Net Primary Productivity in Different Successional Stages of Karst Vegetation in Maolan, Guizhou Province, SW China*. Master degree dissertation, East China Normal University, Shanghai. (in Chinese with English abstract) [罗东辉 (2009). 贵州茂兰喀斯特植被不同演替阶段的生物量与净初级生产力. 硕士学位论文文, 华东师范大学, 上海.]
- Luo DH, Xia J, Yuan JW, Zhang ZH, Zhu JD, Ni J (2010). Root biomass of karst vegetation in a mountainous area of southwestern China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 34, 611–618. (in Chinese with English abstract) [罗东辉, 夏婧, 袁婧薇, 张忠华, 祝介东, 倪健 (2010). 我国西南山地喀斯特植被的根系生物量初探. 植物生态学报, 34, 611–618.]
- Ni JP, Yuan DX, Xie DT, Wei CF (2009). Estimation of soil organic carbon storage and the characteristic of carbon spatial distributions in karst area, Chongqing, China. *Acta Ecologica Sinica*, 29, 6292–6301. (in Chinese with English abstract) [倪九派, 袁道先, 谢德体, 魏朝富 (2009). 重庆岩溶区土壤有机碳库的估算及其空间分布特征. 生态学报, 29, 6292–6301.]
- Protocols for Standard Biological Observation and Measurement in Terrestrial Ecosystems Editorial Board (2007). *Protocols for Standard Biological Observation and Measurement in Terrestrial Ecosystems*. China Environmental Sciences Press, Beijing. (in Chinese) [中国生态系统研究网络科学委员会 (2007). 陆地生态系统生物观测规范. 中国环境科学出版社, 北京.]
- Qiu XZ, Xie SC, Jin GF (1984). A preliminary study on biomass of *Lithocarpus xylocarpus* forest in Xujiaba region, Ailao Mountains, Yunnan. *Acta Botanica Yunnanica*, 6, 85–92. (in Chinese with English abstract) [邱学忠, 谢寿昌, 荆桂芬 (1984). 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, 6, 85–92.]
- Tang XL, Zhou GY, Wen DZ, Zhang DQ, Yan JH (2003). Distribution of carbon storage in a lower subtropical monsoon evergreen broad-leaved forest in Dinghushan Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 23, 90–97. (in Chinese with English abstract) [唐旭利, 周国逸, 温达志, 张德强, 闫俊华 (2003). 鼎湖山南亚热带季风常绿阔叶林植被C贮量分布. 生态学报, 23, 90–97.]
- Tian DL, Wang XK, Fang X, Yan WD, Ning XB, Wang GJ (2011). Carbon storage and spatial distribution in different vegetation restoration patterns in karst area, Guizhou Province. *Scientia Silvae Sinicae*, 47(9), 7–14. (in Chinese with English abstract) [田大伦, 王新凯, 方晰, 闫文德, 宁晓波, 王光军 (2011). 喀斯特地区不同植被恢复模式幼林生态系统碳储量及其空间分布. 林业科学, 47(9), 7–14.]
- Wang L, Niu KC, Yang YH, Zhou P (2010). Patterns of above- and below-ground biomass allocation in China's grasslands: Evidence from individual-level observations. *Science China: Life Sciences*, 53, 851–857. (in Chinese) [王亮, 牛克昌, 杨元合, 周鹏 (2010). 中国草地生物量地上-地下分配格局: 基于个体水平的研究. 中国科学: 生命科学, 40, 642–649.]
- Wang SQ, Zhou CH, Luo CW (1999). Studying carbon storage spatial distribution of terrestrial natural vegetation in China. *Progress in Geography*, 18, 238–244. (in Chinese with English abstract) [王绍强, 周成虎, 罗承文 (1999). 中国陆地自然植被碳量空间分布特征探讨. 地理科学进展, 18, 238–244.]
- Wang XK (2011). *Study of Biomass and Carbon Sequestration*

- on Urban Forests in Karst Landform. PhD dissertation, Central South University of Forestry and Technology, Changsha. (in Chinese) [王新凯 (2011). 喀斯特城市森林生物量及其碳吸存功能研究. 博士学位论文, 中南林业科技大学, 长沙.]
- Wang XK, Feng ZW, Ouyang ZY (2001). Vegetation carbon storage and density of forest ecosystems in China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 12, 13–16. (in Chinese with English abstract) [王效科, 冯宗炜, 欧阳志云 (2001). 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究. 应用生态学报, 12, 13–16.]
- Wen SZ, Tian DL, Yang LL, Fang X (2010). Carbon density carbon stock and carbon sequestration in *Alnus cremastogyne* plantation. *Scientia Silvae Sinicae*, 46(6), 15–21. (in Chinese with English abstract) [文仕知, 田大伦, 杨丽丽, 方晰 (2010). 桤木人工林的碳密度、碳库及碳吸存特征. 林业科学, 46(6), 15–21.]
- Whittaker RH, Likens GE (1973). Carbon in the Biota. In: Woodwell GM, Pecan EV eds. *Carbon and the Biosphere*. United States Atomic Energy Commission, Springfield, USA. 281–302.
- Yang HK, Cheng SZ (1991). Study on biomass of the karst forest community in Maolan, Guizhou Province. *Acta Ecologica Sinica*, 11, 307–312. (in Chinese with English abstract) [杨汉奎, 程世泽 (1991). 贵州茂兰喀斯特森林群落生物量研究. 生态学报, 11, 307–311.]
- Yang TH, Da LJ, Li XP (2007). Biomass of evergreen broad-leaved forest in Tiantong National Forest Park, Zhejiang Province (II): Aboveground biomass and its allocation pattern. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 24, 389–395. (in Chinese with English abstract) [杨同辉, 达良俊, 李修鹏 (2007). 浙江天童国家森林公园常绿阔叶林生物量研究(II): 群落生物量及其分配规律. 浙江林学院学报, 24, 389–395.]
- Yu LF, Zhu SQ, Wei LM, Chen ZR, Xiong ZB (1998). Study on the natural restoration process of degraded karst communities—Successional sere. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 17(2), 71–77. (in Chinese with English abstract) [喻理飞, 朱守谦, 魏鲁明, 陈正仁, 熊志斌 (1998). 退化喀斯特群落自然恢复过程研究—自然恢复演替系列. 山地农业生物学报, 17(2), 71–77.]
- Yu LF, Zhu SQ, Ye JZ, Wei LM, Chen ZR (2000). A study on evaluation of natural restoration for degraded karst forest. *Scientia Silvae Sinicae*, 36(6), 12–19. (in Chinese with English abstract) [喻理飞, 朱守谦, 叶镜中, 魏鲁明, 陈正仁 (2000). 退化喀斯特森林自然恢复评价研究. 林业科学, 36(6), 12–19.]
- Yu WL, Dong D, Ni J (2010). Comparisons of biomass and net primary productivity of karst and non-karst forests in mountainous areas, Southwestern China. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 5(2), 25–30. (in Chinese with English abstract) [于维莲, 董丹, 倪健 (2010). 中国西南山地喀斯特与非喀斯特森林的生物量与生产力比较. 亚热带资源与环境学报, 5(2), 25–30.]
- Zhang L, Luo TX, Deng KM, Dai Q, Huang Y, Jiang ZF, Tao MY, Zeng KY (2004). Biomass and net primary productivity of secondary evergreen broad-leaved forest in Huangmian Forest Farm, Guangxi. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 15, 2029–2033. (in Chinese with English abstract) [张林, 罗天祥, 邓坤枚, 戴强, 黄永, 蒋正富, 陶明友, 曾开益 (2004). 广西黄冕林场次生常绿阔叶林生物量及净第一性生产力. 应用生态学报, 15, 2029–2033.]
- Zheng WJ, Bao WK, Gu B, He X, Leng L (2007). Carbon concentration and its characteristics in terrestrial higher plants. *Chinese Journal of Ecology*, 26, 307–313. (in Chinese with English abstract) [郑帷婕, 包维楷, 辜彬, 何晓, 冷俐 (2007). 陆生高等植物碳含量及其特点. 生态学杂志, 26, 307–313.]
- Zhou YR, Yu ZL, Zhao SD (2000). Carbon storage and budget of major Chinese forest types. *Acta Phytocologica Sinica*, 24, 518–522. (in Chinese with English abstract) [周玉荣, 于振良, 赵士洞 (2000). 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡. 植物生态学报, 24, 518–522.]
- Zhou ZX (1987). *Scientific Survey of the Maolan Karst Forest*. Guizhou People's Publishing House, Guiyang. (in Chinese) [周政贤 (1987). 茂兰喀斯特森林科学考察集. 贵州人民出版社, 贵阳.]
- Zhu SQ, Wei LM, Chen ZR, Zhang CG (1995). A preliminary study on biomass components of karst forest in Maolan of Guizhou Province, China. *Acta Phytocologica Sinica*, 19, 358–367. (in Chinese with English abstract) [朱守谦, 魏鲁明, 陈正仁, 张从贵 (1995). 茂兰喀斯特森林生物量构成初步研究. 植物生态学报, 19, 358–367.]

责任编辑: 王襄平 责任编辑: 王 葳