

引用格式: 尚二萍, 许尔琪. 黔桂喀斯特山地主要生态系统服务时空变化[J]. 资源科学, 2017, 39(10): 2000–2015. [Shang E P, Xu E Q. Temporal and spatial variation of main ecosystem services in Guizhou and Guangxi Karst Mountainous region[J]. Resources Science, 2017, 39(10): 2000–2015.] DOI: 10.18402/resci.2017.10.18

# 黔桂喀斯特山地主要生态系统服务时空变化

尚二萍<sup>1,2</sup>, 许尔琪<sup>1</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 黔桂喀斯特山地的生态系统服务评估是生态系统恢复、生态功能区划和建立生态补偿机制、保障国家生态安全的重大战略需求。本文在降水贮存量法、修正土壤流失方程RUSLE、植被固碳释氧等方法基础上, 基于实际径流小区实验数据, 修正或引入径流系数、降雨侵蚀力、石漠化因子、岩石风化固碳等参数模型, 定量评估1990–2015年包括水源涵养、水土保持和固碳释氧等3项主要生态系统服务的时空变化。研究结果表明: ①研究区水源涵养、水土保持、固碳量和释氧量的总量为630.15亿 $\text{m}^3/\text{a}$ 、189.02亿 $\text{t}/\text{a}$ 、6187.49万 $\text{t}/\text{a}$ 和16 002.18万 $\text{t}/\text{a}$ ; 单位量分别为2943.43  $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 、885.18 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 、2.89 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 和7.47 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ; ②水源涵养功能以低、较低等级为主, 分别占总面积的33.72%和20.55%; 水土保持能力以低、较低和极高等级为主, 分别占总面积的24.90%、20.90%和21.44%; 固碳释氧功能等级以较低、中等和较高等级为主, 分别占总面积的35.47%、29.83%和21.49%; ③林地对生态系统服务的贡献最大, 其水源涵养、水土保持和固碳释氧生态系统服务分别是耕地和草地的1.85与2.55倍, 1.70与1.03倍, 1.16与1.09倍; ④1990–2015年, 黔桂喀斯特山地水源涵养量、水土保持量和固碳释氧均呈现增加趋势: 对比1990–2000年和2000–2015年两个时段, 前一时段水源涵养量和水土保持量均呈下降趋势, 下降幅度分别为6.25%和3.45%; 后一时段水源涵养量、水土保持量、固碳量和释氧量均呈增加趋势, 增加幅度在2.65%~7.49%之间。

**关键词:** 黔桂喀斯特山地; 生态系统服务; 水源涵养; 水土保持; 固碳释氧; 岩石风化固碳

DOI: 10.18402/resci.2017.10.18

## 1 引言

生态系统服务研究是生态系统恢复、生态功能区划和建立生态补偿机制、保障国家生态安全的重大战略需求<sup>[1]</sup>, 加之全球气候变化和人为活动的加剧使其成为研究热点和难点<sup>[2–5]</sup>。以Costanza<sup>[6,7]</sup>、谢高地<sup>[8]</sup>、欧阳志云<sup>[9]</sup>等为代表的国内外学者从不同角度对生态系统服务的理论、评估等进行了系统研究, 但现有研究对生态系统服务估算的参数本地化还不足<sup>[1,10–13]</sup>, 且对喀斯特地区的时空变化研究相对较少。

喀斯特地区由于其特殊地质构造和岩性差异<sup>[14]</sup>, 易导致水土流失、河道淤积和自然灾害频发, 使生态系统服务受到破坏<sup>[15]</sup>, 在全球气候变化和更为突

出的用地竞争和矛盾下<sup>[16]</sup>, 水资源紧缺、水土流失和全球变暖问题成为亟待解决的问题<sup>[17,18]</sup>, 迫切需要研究生态系统服务的现状及变化趋势。目前关于喀斯特地区的相关研究相对较少<sup>[14,19–22]</sup>, 多以小尺度、单一时相、单一生态系统服务为主。如张斯屿等以县域, 胡晓以镇域评估了水土保持、水源涵养或碳存储功能等生态系统服务<sup>[23,24]</sup>; 王小琳、吴松等、许月卿等、韩明辰等以省域或流域为研究区, 但仅评估了单一生态系统服务<sup>[25–28]</sup>。此外, 以往研究中, 多采用降水贮存量法<sup>[26]</sup>、水量平衡法<sup>[29]</sup>、蓄水能量法<sup>[30]</sup>、影子工程法<sup>[31]</sup>和Invest模型<sup>[25]</sup>评估水源涵养<sup>[32]</sup>, 水土保持则使用修正土壤流失方程<sup>[27]</sup>和Invest模型<sup>[23]</sup>等, 固碳释氧多基于光合作用原理<sup>[28]</sup>或实测

收稿日期: 2017–08–21; 修订日期: 2017–09–14

基金项目: 国家自然科学基金项目(41601095); 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2015CB452702)。

作者简介: 尚二萍, 女, 河南焦作人, 博士生, 主要从事土地利用变化研究。E-mail: shangerping7@126.com

通讯作者: 许尔琪, E-mail: xueq@igsnrr.ac.cn

2017年10月

生物量含碳率<sup>[33]</sup>估算,上述方法多采用全国或者南方等的普遍性参数,未考虑喀斯特特殊背景的影响。如:降水贮存法中的产流比参数的经验系数赋值,忽略了空间差异性<sup>[26]</sup>;降雨侵蚀力R值多采用全国统一公式<sup>[34]</sup>;固碳释氧忽视岩石风化因素等<sup>[14]</sup>。

黔桂喀斯特山地既是中国生态危机地区<sup>[35]</sup>,也是长江与珠江上游的生态安全屏障<sup>[35]</sup>。自1990年来土地利用类型的相互转化剧烈<sup>[16]</sup>,本研究以黔桂喀斯特山地为例,基于实际径流小区实验数据,引入石漠化因子、岩石风化固碳等参数模型,定量评估1990-2015年主要生态系统服务(水源涵养、土壤保持和固碳释氧)物质质量时空变化,对促进西部生态安全及区域可持续发展具有重大研究意义。

## 2 研究区概况、数据来源与研究方法

### 2.1 研究区概况

本文选取的黔桂喀斯特山地范围(图1),主要参考中华人民共和国国家自然地图集<sup>[36]</sup>中的华南喀斯特地形图与亚洲喀斯特地形分布图。研究区处于22°8'54"N-28°12'27"N,104°18'27"E-110°20'40"E之间,土地面积约21.41万km<sup>2</sup>。多年平均年降水量在1178~1532mm之间。海拔范围为0~2848m,自西北向东南逐渐降低;地貌类型以中小山地为主,从中山丘陵逐步过渡到低山盆地;土壤类型主要有石灰土、黄壤和红壤;自然植被以阔叶林、亚热带落叶林和混交林为主,少量热带雨林和高山植被类型<sup>[16]</sup>。行政区划上包括贵州省中南部的9市和广西省中西部的7市。

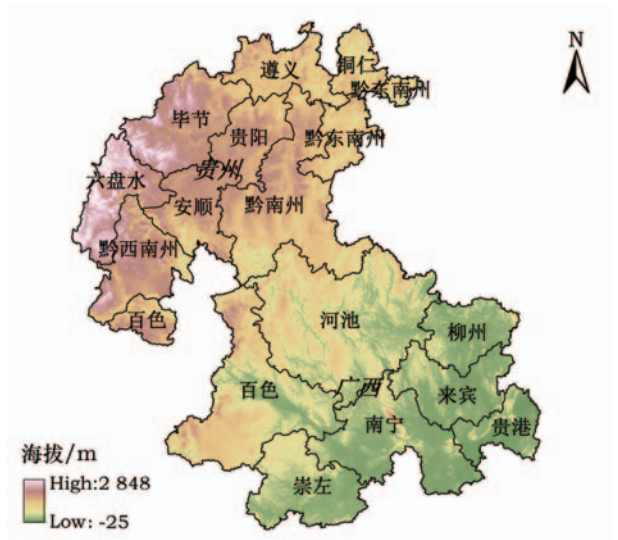


图1 黔桂喀斯特山地分布范围

Figure 1 Location and scope of Guizhou and Guangxi Karst Mountainous Region

### 2.2 数据来源

本文以1990年、2000年和2015年三期土地利用数据为基础,采用刘纪远等<sup>[37]</sup>构建的分类体系,定量评估1990-2015年包括水源涵养、土壤保持和固碳释氧等3项主要生态系统服务的时空变化。数据及来源详见表1,所有数据重采样为1km。

### 2.3 研究方法

#### 2.3.1 水源涵养服务

本文考虑黔桂喀斯特山地特色岩溶结构,采用经验性方法,基于实测数据修正降水贮存量法K因子,计算公式为:

$$Q = 10 \cdot A \cdot J \cdot R \quad (1)$$

表1 数据来源及概况

Table 1 Data source and description

数据类型	数据名称	格式	分辨率	来源
基础数据	土地利用图(1990年、2000年、2015年)	矢量	30m	中国科学院资源环境科学数据中心( <a href="http://www.resdc.cn/">http://www.resdc.cn/</a> ) <sup>[38]</sup>
	1979-2015年日降雨	矢量		中国气象数据共享网 <a href="http://www.esi.cn/metadata/page/index.html">http://www.esi.cn/metadata/page/index.html</a> <sup>[39]</sup>
水源涵养	径流深度数据	栅格	10km	中国科学院成都山地灾害与环境研究所数字山地与遥感应用中心”(Data support by IMHE-CAS) <sup>[40]</sup>
	多年平均径流系数	栅格	10km	《中华人民共和国国家自然地图集》
	DEM	栅格	30m	地理空间数据云 <a href="http://www.gscloud.cn/">http://www.gscloud.cn/</a> <sup>[41]</sup>
土壤保持	土壤质地1:100万	栅格	1km	寒区旱区科学数据中心,中国土壤特征数据集 <sup>[42]</sup>
	土壤有机质1:100万	矢量	1km	国家科技基础条件平台-国家地球系统科学数据共享平台( <a href="http://www.geodata.cn/">www.geodata.cn</a> ) <sup>[43]</sup>
	NDVI	栅格	1km	NASA 数据下载平台( <a href="https://lpdaac.usgs.gov/data_access/data_pool">https://lpdaac.usgs.gov/data_access/data_pool</a> ) <sup>[44]</sup>
固碳释氧	NPP数据	栅格	1km	MOD17 A3数据( <a href="https://lpdaac.usgs.gov/">https://lpdaac.usgs.gov/</a> ) <sup>[45]</sup>

$$J=J_0\cdot K \tag{2}$$

式中 $Q$ 为与裸地比较,森林、草地、农田等生态系统涵养水分的增加量( $\text{m}^3$ ); $A$ 为生态系统面积( $\text{hm}^2$ ); $J$ 为计算区产流降雨量( $\text{mm}$ ); $J_0$ 为年降雨量( $\text{mm}$ ); $K$ 为产流降雨量占降雨总量的比例; $R$ 为与裸地比较,生态系统减少径流的效益系数,来自已发表文献的经验数据<sup>[26]</sup>。

应用实测降雨产流临界值(表2)和径流深度数据修正 $K$ 因子:以临近气象台站日降水数据修正TRMM逐日3小时降水量数据,累积一年中单次降雨量大于产流临界值的数值,并将单点产流降雨量占降雨总量的比例与多年均河川径流系数(表2)建立线性关系(图2),结合10 km径流深度数据(图3),得出其径流系数空间分布(图4),最终计算 $K$ 值分布(图5)。

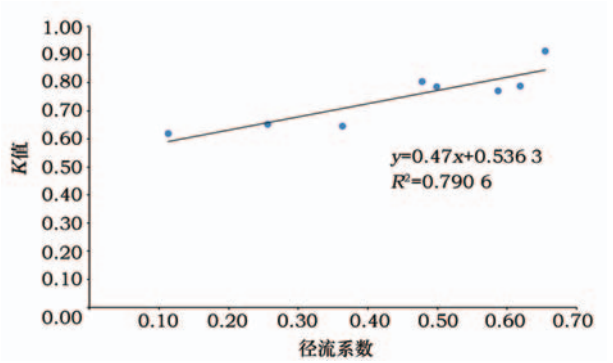


图2 径流系数和 $K$ 值线性关系

Figure 2 The linear relationship of runoff coefficient and  $K$  value

表2 降雨产流临界值					
Table 2 The critical value of rainfall runoff					
地点	经度	纬度	降雨产流 临界值/mm	径流 系数	$K$
云南会泽	103.4°E	26.5°N	22.30	0.36	0.64
云南澄江	102.8°E	24.6°N	10.00	0.26	0.65
广西里骆林区	110.1°E	25.9°N	8.00	0.62	0.79
广西漓江上游	110.5°E	25.9°N	4.30	0.65	0.91
福建南靖	117.0°E	24.7°N	10.00	0.59	0.77
广东佛山	113.0°E	23.1°N	11.00	0.48	0.80
广东鹤山试验站	112.9°E	22.7°N	15.90	0.50	0.78



图4 黔桂喀斯特山地多年均径流系数

Figure 4 Multi-year mean runoff coefficient in Guizhou and Guangxi Karst Mountainous Region

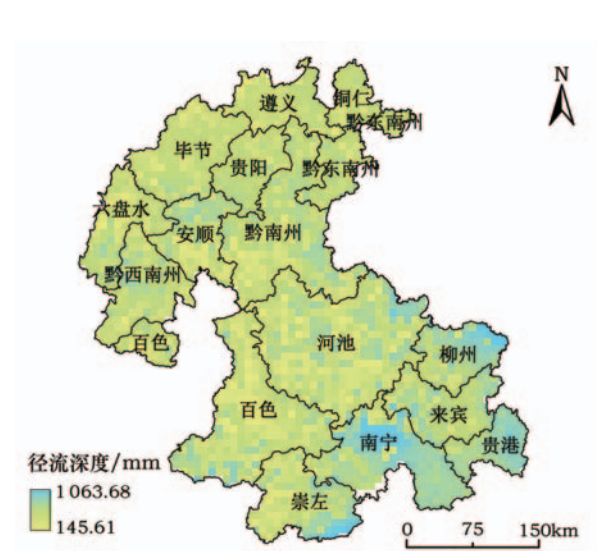


图3 多年均径流深度

Figure 3 Multi-annual runoff depth

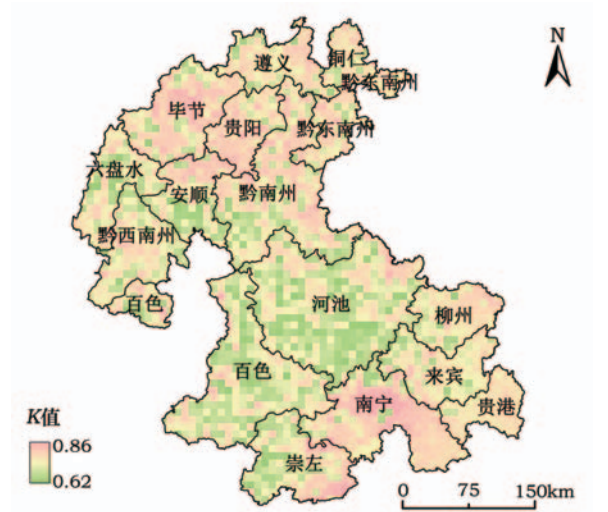


图5 黔桂喀斯特山地 $K$ 值空间分布

Figure 5 Distribution map of  $K$  value in Guizhou and Guangxi Karst Mountainous Region



2017年10月

### 2.3.2 土壤保持服务

黔桂喀斯特山地因其石漠化与特殊的地形等,加剧了土壤侵蚀过程的复杂性。直接采用修正土壤流失方程RUSLE<sup>[46]</sup>,估算易造成偏差。因此,本文引入石漠化因子,并结合实际径流小区实验数据进行修正。计算公式为:

$$USLE = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \cdot (1 - a) \quad (3)$$

式中  $USLE$  为年均土壤侵蚀量( $t/(hm^2 \cdot a)$ );  $R$  为降雨侵蚀力( $MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot a)$ );  $K$  为土壤可蚀性因子( $t \cdot hm^2 \cdot h/(MJ \cdot mm \cdot hm^2)$ );  $LS$  为坡度坡长因子;  $C$  为植被管理因子;  $P$  为水土保持措施(工程)因子;  $a$  为石漠化因子。

潜在土壤侵蚀量(RKLS)计算公式为:

$$RKLS = R \cdot K \cdot LS \cdot (1 - a) \quad (4)$$

则:

$$\text{土壤保持量} = RKLS - USLE \quad (5)$$

采用基于喀斯特地区的实验小区降雨过程资料及土壤流失资料得出的戴海伦等<sup>[47]</sup>降雨侵蚀力  $R$  简易算法,避免以往研究中通用方程的不适用性,公式如下:

$$R = \sum_{i=1}^{12} (2.035 4 P_i^{1.2159} + 45.564 9) \quad (6)$$

式中  $R$  为降雨侵蚀力因子( $MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot a)$ );  $P_i$  为月降水量( $mm$ )。

土壤可蚀性因子  $K$  主要采用广泛应用的Williams等提出的EPIC土壤可蚀性计算模型<sup>[48]</sup>,通过土壤颗粒组成数据和土壤有机碳数据进行计算。

当前基于DEM提取LS因子存在较大不确定性<sup>[49]</sup>,本文借鉴McCool对坡长因子<sup>[50]</sup>和刘宝元对坡度因子<sup>[51]</sup>的研究,修正Van Remotel等<sup>[52]</sup>根据RUSLE模型编写的AML代码,核心算法为:

$$L = \left( \frac{\gamma}{22.13} \right)^m \begin{cases} m = 0.5 & \theta \geq 9\% \\ m = 0.4 & 9\% > \theta \geq 3\% \\ m = 0.3 & 3\% > \theta \geq 1\% \\ m = 0.2 & 1\% > \theta \end{cases} \quad (7)$$

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03 & \theta < 9\% \\ 16.8 \sin \theta - 0.50 & 9\% \leq \theta \leq 18\% \\ 21.91 \sin \theta - 0.96 & \theta > 18\% \end{cases} \quad (8)$$

式中  $L$  为坡长因子;  $m$  为无量纲常数,取决于坡度百分比值( $\theta$ );  $S$  为坡度因子。

植被覆盖因子  $C$  因子是影响土壤侵蚀最敏感的因子<sup>[53]</sup>,本研究基于NDVI,采用蔡崇法的  $C$  因子法计算<sup>[54]</sup>。

水土保持措施工程因子  $P$ ,为采取水土保持措施与顺坡种植无相关措施的侵蚀量比值<sup>[54]</sup>。根据前人的研究<sup>[27, 53, 55-57]</sup>,结合当地土地利用分别赋值,黔桂喀斯特山地的裸岩基本上无土壤可侵蚀,  $P$  值被赋为0(表3)。

石漠化因子主要指裸露岩石与地块面积的比值,为0(裸岩)—1(无裸露岩石)之间的无量纲数。本文根据喀斯特地区前人的相关经验数据<sup>[58, 59]</sup>,结合不同土地利用类型的石漠化情况分别赋值(表4)。

### 2.3.3 固碳释氧服务

应用国家标准《森林生态系统服务功能评估规范》(LY/T1721-2008)<sup>[60]</sup>,植被固碳和释氧计算公式如下:

$$G_{\text{固碳}} = 1.63 R_{\text{碳}} \cdot AB_{\text{年}} \quad (9)$$

$$G_{\text{释氧}} = 1.19 AB_{\text{年}} \quad (10)$$

式中  $G_{\text{固碳}}$  为植被年固碳量( $t/a$ ); 1.63 为计算系数;  $R_{\text{碳}}$  为  $CO_2$  中碳的含量,为 27.27%,  $B_{\text{年}}$  为净生产力( $t/(hm^2 \cdot a)$ );  $A$  为面积( $hm^2$ );  $G_{\text{释氧}}$  为植被年释氧量( $t/a$ ); 1.19 为计算系数。

表3 黔桂喀斯特山地不同土地利用类型  $P$  值

Table 3 The  $P$  values of different Land use types in Guizhou and Guangxi Karst Mountainous Region

	水田	旱地	林地	草地	建设用地	水域	裸岩
$P$	0.01	0.40	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00

表4 黔桂喀斯特山地不同土地利用类型石漠化因子值

Table 4 The value of desertification factors of different land use types in Guizhou and Guangxi Karst Mountainous Region

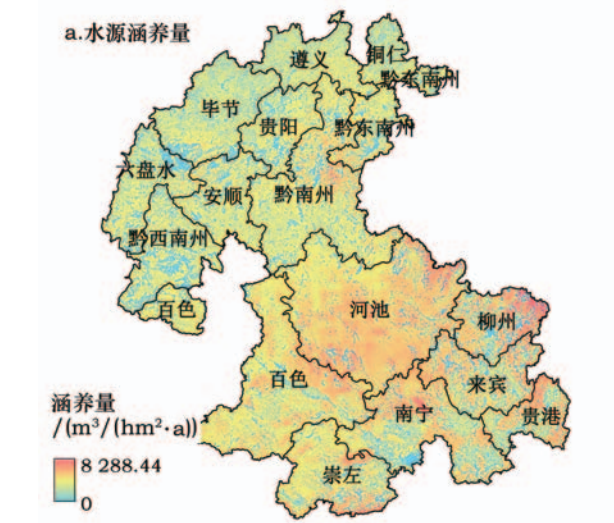
土地利用类型	水田	旱地	有林地	灌木林	疏林地	其他林地	草地	水域	建设用地	裸岩
石漠化因子	0.00	0.17	0.11	0.18	0.28	0.13	0.20	0.00	0.00	1.00

净生产力 ( $B_{\text{年}}$ ) 数据主要以广泛应用 MODIS NPP 数据<sup>[61, 62]</sup>代替(表 5), 为了保证数据来源的一致性和结果的可比性, 且因该数据目前仅更新至 2014 年, 故本文仅考虑 2000-2014 年时段的变化。

区别于常规方法, 黔桂喀斯特山地固碳功能中还包括岩石风化固碳, 采用 Amiotte 和 Probst 等基于地表径流和溶解元素的经验关系的简单模型<sup>[63, 64]</sup>, 即 GEM-CO<sub>2</sub> 模型估算岩溶作用消耗大气 CO<sub>2</sub> 的量。计算公式如下:

表 5 1990 年、2000 年和 2015 年黔桂喀斯特山地水源涵养总量和单位量统计

Table 5 Statistics results of total and per unit area of water conservation in Guizhou and Guangxi Karst Mountainous Region during 1990, 2000 and 2015			
	1990 年	2000 年	2015 年
总量/亿(m <sup>3</sup> /a)	625.31	586.21	630.15
单位量/(m <sup>3</sup> /(hm <sup>2</sup> ·a))	2 920.84	2 738.22	2 943.43



$$F_{\text{CO}_2} = \alpha \cdot Q \tag{11}$$

式中  $F_{\text{CO}_2}$  是 CO<sub>2</sub> 消耗量 (mmol/(km<sup>2</sup>·s));  $Q$  是岩石表面的水流量 (L/(km<sup>2</sup>·s)), 为降水量与蒸发量的差值;  $\alpha$  是经验系数, 因不同的岩石类型而不同, 黔桂喀斯特山地的岩石类型主要是碳酸盐类, 其系数为 1.586<sup>[63]</sup>。

### 3 结果及分析

#### 3.1 黔桂喀斯特山地水源涵养服务时空变化

2015 年, 水源涵养量空间分布差异明显(图 6a), 自北向南增加, 林地是最主要贡献者, 水源涵养量为 3851.63 m<sup>3</sup>/(hm<sup>2</sup>·a), 是耕地和草地的 1.85 倍和 2.55 倍。将标准化后的黔桂喀斯特山地水源涵养量分为低(0.00~0.30)、较低(0.30~0.40)、中(0.40~0.50)、较高(0.50~0.60)、高(0.60~1.00)5 个等级(表 6)。研究区水源涵养以低和较低等级为主(图 6b), 分别占总面积的 33.72% 和 20.55%, 主要分布在北部, 中部安顺与黔南州、黔西南州交界, 百色



图 6 2015 年黔桂喀斯特山地单位面积水源涵养量和水源涵养等级空间分布

Figure 6 Distribution of water conservation per unit area and water conservation grade in Guizhou and Guangxi Karst Mountainous Region in 2015

表 6 1990 年、2000 年和 2015 年黔桂喀斯特山地水源涵养功能分级统计

Table 6 Statistical grading of water conservation functions in Guizhou and Guangxi Karst Mountainous Region during 1990, 2000 and 2015 (km<sup>2</sup>, %)

水源涵养等级	水源涵养量标准	1990 年		2000 年		2015 年	
		面积	比例	面积	比例	面积	比例
低	<0.30	90 067	42.07	97 589	45.58	72 204	33.72
较低	0.30~0.40	47 524	22.20	54 489	25.45	43 988	20.55
中等	0.40~0.50	41 467	19.37	41 780	19.51	49 651	23.19
较高	0.50~0.60	17 753	8.29	16 772	7.83	34 090	15.92
高	0.60~1.00	17 293	8.08	3 475	1.62	14 171	6.62

2017年10月

以及崇左南部边界和来宾、贵港和柳州的中部地区。这些区域降水量(<1300mm)较少,植被覆盖率较低,多以耕地和草地分布为主。而较高和高等的面积相对较小,比例分别为15.92%和6.62%,主要分布在河池大部,百色、南宁、来宾交界,柳州东部,贵港北部及崇左南部。这些区域降水量相对较高(1800~2700 mm),生态系统减少径流的效益系数较高,加之林地比重大,植被覆盖率较高,使得截留率增大,水源涵养功能较高。

1990-2015年,黔桂喀斯特山地水源涵养量由625.31亿 $\text{m}^3/\text{a}$ 增长到630.15亿 $\text{m}^3/\text{a}$ ,增长了4.84亿 $\text{m}^3/\text{a}$ ;单位量从2920.84 $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 增长到2943.43 $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,增长比率为0.77%(表5);呈总体增加局部降低的空间变化趋势(图7a)。贵阳与黔东南交界,六盘水北部,河池中部及其与百色、南宁、来宾及柳州交界,柳州东北,崇左东南部,以及贵港东部的零星分布地区增加趋势显著(图7a)。中等和较高等级水源涵养量增长趋势较为显著,分别增加了19.39%和91.47%,但高等级水源涵养面积则下降了3162.80 $\text{km}^2$ (表6)。

两个时段(1990-2000年和2000-2015年)变化趋势相反,且前一时段变化幅度低于后一时段。1990-2000年,北增南减,总量下降了39.10亿 $\text{m}^3$ ,下降幅度为6.25%,水源涵养下降的面积占总面积的54.24%,显著下降的分布在广西崇左、百色西部和北部交界,以及河池西北,减少量在(1000~2000) $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 之间(图7b)。2000-2015年,北减南增,总量增长幅度高达7.49%。其中河池中西部,河池与南宁交界,百色南部,崇左,柳州东部增长幅度较大,增加量在1000.00 $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 以上,局部地区达

2000.00 $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 以上(图7c)。

### 3.2 黔桂喀斯特山地土壤保持服务时空变化

2015年,土壤保持能力呈现北低南高的空间分布趋势(图8b),林地对土壤保持能力的贡献是耕地和草地的1.70倍和1.03倍。按照表7的分级标准,研究区土壤保持低、较低和极高等级比重较大,占总面积的24.90%、20.90%和21.44%;中等、较高和高4个等级的面积相对较小,分别占总面积的9.21%~12.03%(表7)。高分值主要分布在中部河池与百色,六盘水与黔西南州(图8c)。这些区域多是有林地和植被覆盖度较高的草地类型,一定程度上增加了对降雨的截留范围和作用,同时也提高了植被根系对土壤的固结作用,降低了土壤的侵蚀作用,有利于土壤保持。

1990-2015年,黔桂喀斯特山地土壤保持量由186.51亿 $\text{t}/\text{a}$ 增加到189.50亿 $\text{t}/\text{a}$ ,单位量从871.20 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 增长到885.18 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ;呈总体增加局部降低的空间变化分布趋势(图9a,见第2007页)。低和较低等级面积下降显著,而中等和极高等级面积分别增加了207 $\text{km}^2$ 和1948 $\text{km}^2$ 。显著增加区域分布在河池南部,柳州东部,贵港西北,贵阳与遵义、黔东南州交界。

不同时段变化趋势相反,且1990-2000年的降低幅度(3.45%)低于2000-2015年的增加幅度(5.24%)。前一时段,土壤保持降低主要表现在低等级面积增加较大,而高与极高等级面积下降显著,其中百色西部边界,及其与河池交界,河池中部,崇左东北等区域降低趋势显著,降低量在1000.00 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 以上,个别降低量在2000.00 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 以上(图9b,见第2007页)。后一时段,高和

表7 1990年、2000年和2015年黔桂喀斯特山地土壤保持能力分级统计

Table 7 Statistical grading of soil retention capacity in Guizhou and Guangxi Karst Mountainous Region during 1990, 2000 and 2015

土壤保持等级	保持能力标准 /( $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ )	1990年		2000年		2015年	
		面积/ $\text{km}^2$	比例/%	面积/ $\text{km}^2$	比例/%	面积/ $\text{km}^2$	比例/%
低	50	54 654	25.53	55 283	25.82	53 312	24.90
较低	50~250	45 558	21.28	45 414	21.21	44 745	20.90
中	250~500	25 548	11.93	25 246	11.79	25 755	12.03
较高	500~1 000	24 667	11.52	26 170	12.22	24 661	11.52
高	1 000~1 500	19 716	9.21	19 382	9.05	19 722	9.21
极高	>1 500	43 943	20.53	42 590	19.89	45 890	21.44



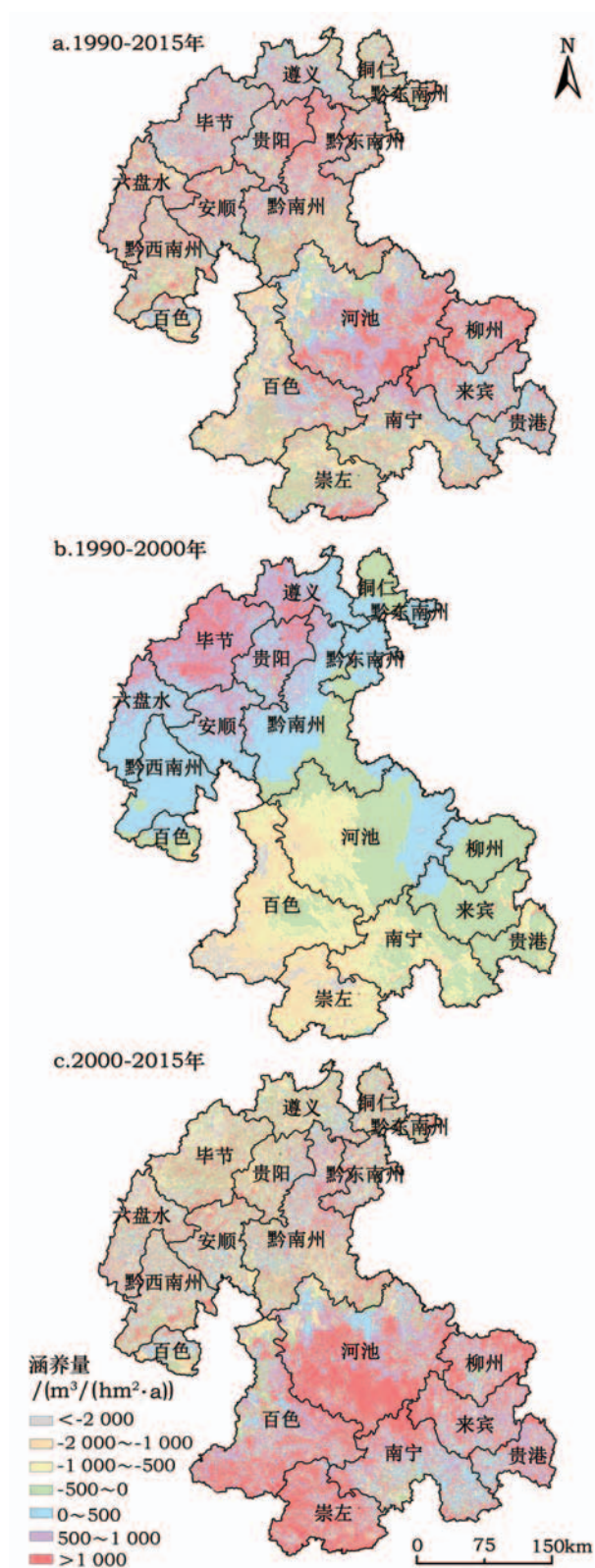


图7 1990–2015年黔桂喀斯特山地水源  
涵养量时空变化

Figure 7 Temporal and spatial variation of water conservation in  
Guizhou and Guangxi Karst Mountainous Region from 1990 to 2015

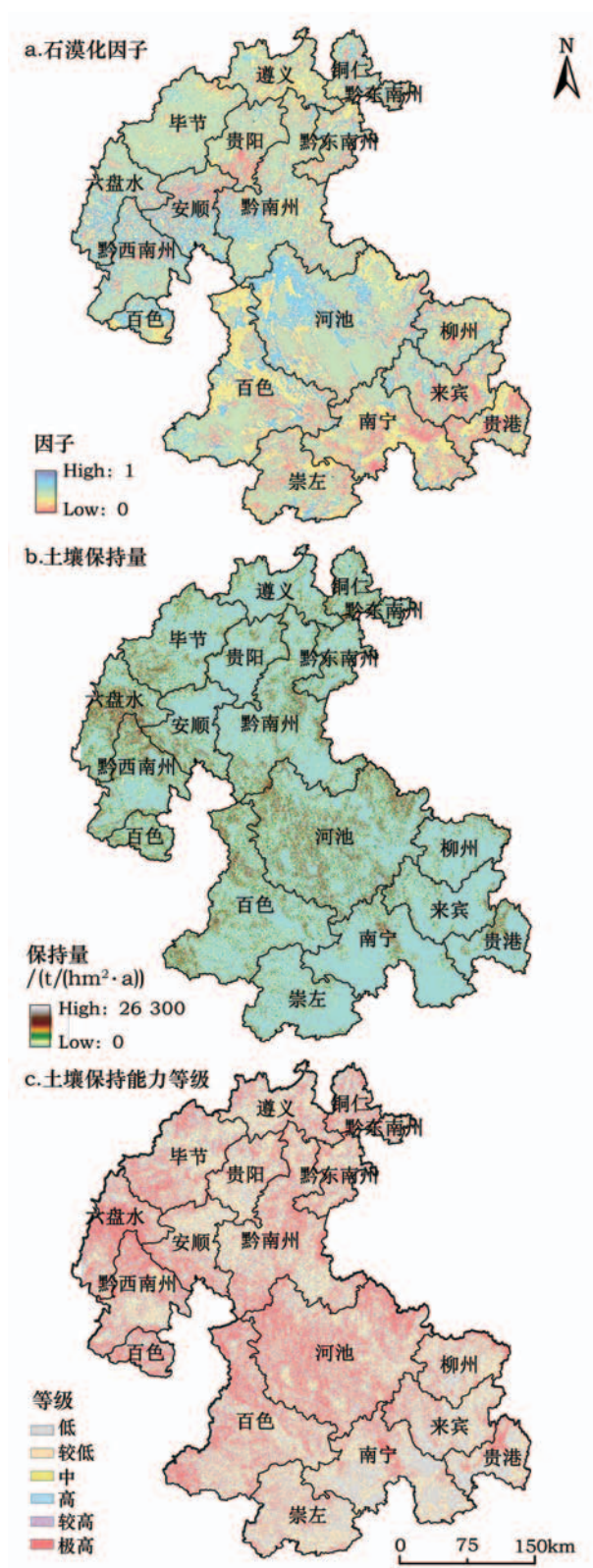


图8 2015年黔桂喀斯特山地土壤侵蚀因子和  
土壤保持量空间分布

Figure 8 Spatial distribution of soil retention and factors for soil erosion  
in Guizhou and Guangxi Karst Mountainous Region in 2015

极高等级面积增加了3640km<sup>2</sup>,低和较低等级面积下降都使保持量呈增加趋势,其中显著增加的分布在河池西南、及其与南宁交界,柳州东北,来宾西北,黔东南中部,百色西部,增加量在500t/(hm<sup>2</sup>·a)以上,个别在1000t/(hm<sup>2</sup>·a)以上(图9c)。

黔桂喀斯特山地的固碳量包含植被固碳和岩石风化固碳两部分,其中,植被固碳量约占总固碳量的94.99%(表8)。2014年,总固碳、植被固碳量与释氧量空间分布趋势相似(图10a、图10b和图10d),自北向南升高,林地的单位固碳量为 $3.08\text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,分别是耕地和草地的1.16倍和1.09倍;释氧量则是耕地和草地的1.17倍和1.10倍。研究区总固碳功能以较低、中等和较高等级为主(表9),分别占总面积的35.47%、29.83%和21.49%,主要分布在百色与河池北部;而在植被覆盖率较高的林草地较密集分布区域,如百色西北,南宁、贵港和崇左的零星区域,固碳能力等级高,但仅占总面积的6.55%。岩石风化固碳与植被固碳分布趋势不一致(图10c),高值主要分布在黔南州北部,黔东南州,河池东北,来宾、南宁与河池交界,崇左东部以及来宾与贵港交界,岩石风化固碳均在 $12.00\text{ t}/\text{km}^2$ 以上,尤其是来宾、贵港和崇左部分区域高达 $18.00\text{ t}/\text{km}^2$ 以上;该地区有较大面积的碳酸盐岩分布,同时温暖湿润的气候环境,加快了化学反映速率,有利于岩石的溶蚀风化。

a. 1990-2015年

变化量 / (t/(hm<sup>2</sup>·a))

High: 7 021.70

Low: 10 670.40

b. 1990-2000年

变化量 / (t/(hm<sup>2</sup>·a))

High: 7 795.30

Low: -10 670.40

c. 2000-2015年

变化量 / (t/(hm<sup>2</sup>·a))

High: 7 615.81

Low: -9 978.47

0 75 150km

<http://www.resci.cn>



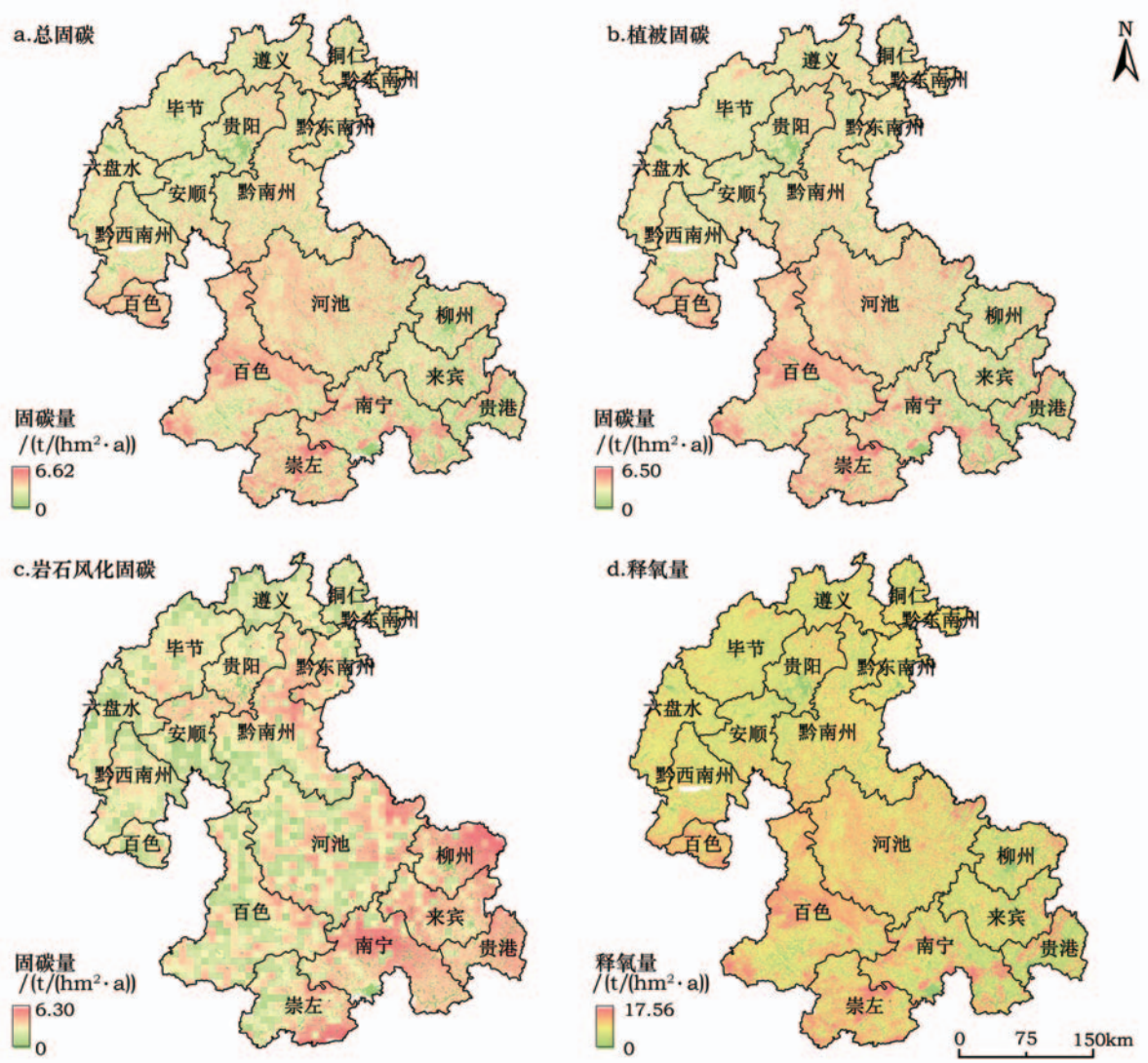


图 10 2014年黔桂喀斯特山地固碳释氧量空间分布

Figure 10 Spatial distribution of carbon fixation and oxygen release in Guizhou and Guangxi Karst Mountainous Region in 2014

表 8 2000 年和 2014 年黔桂喀斯特山地固碳释氧统计

Table 8 Statistical of carbon fixation and oxygen release in Guizhou and Guangxi Karst Mountainous Region in 2000 and 2014

	2014 年				2000 年			
	植被固碳	岩石风化固碳	总固碳	释氧量	植被固碳	岩石风化固碳	总固碳	释氧量
单位量/(t/(hm <sup>2</sup> ·a))	2.76	0.13	2.89	7.47	2.72	0.08	2.75	7.28
总量/(万 t/a)	5 916.75	270.87	6 187.49	16 002.18	5 821.41	165.27	5 986.68	15 589.70

表 9 2000 年和 2014 年黔桂喀斯特山地总固碳功能分级统计

Table 9 Statistical grading of carbon fixation functions in Guizhou and Guangxi Karst Mountainous Region in 2000 and 2014

总固碳等级	固碳能力标准	2000 年		2014 年	
		面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%
低	<0.30	21 331.93	9.96	14 251.80	6.66
较低	0.30~0.40	84 678.91	39.55	75 945.17	35.47
中	0.40~0.50	53 918.10	25.19	63 851.45	29.83
较高	0.50~0.60	41 579.82	19.42	46 006.99	21.49
高	0.60~1.00	12 576.25	5.87	14 029.58	6.55

2017年10月

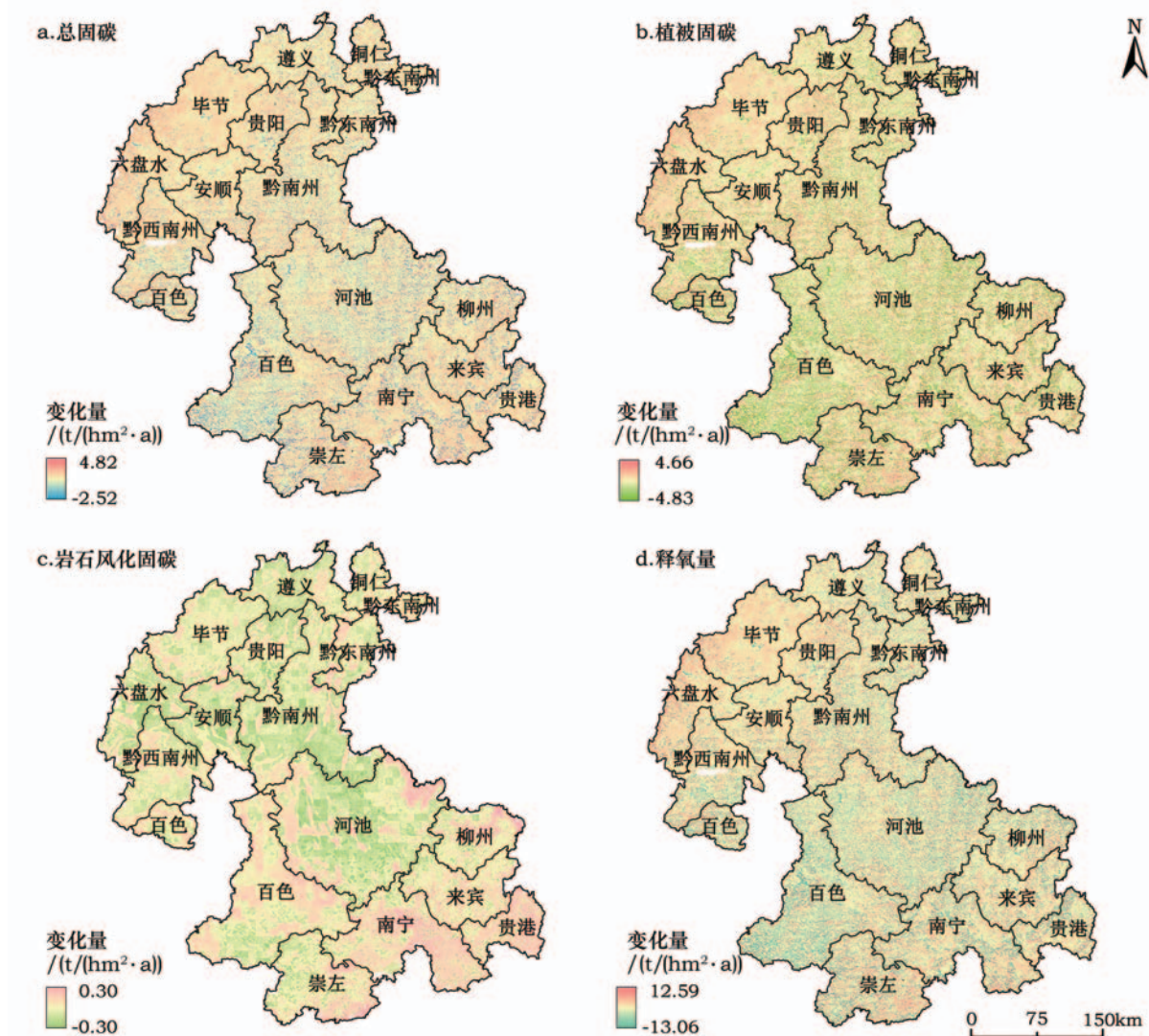


图 11 2000–2014 年黔桂喀斯特山地区单位面积固碳量和释氧量时空变化

Figure 11 Temporal and spatial variation of carbon fixation and oxygen release in Guizhou and Guangxi Karst Mountainous Region from 2000 to 2014

集中在东南部、百色北部(图 11c),增加量在(0.10~0.20) $t/(hm^2 \cdot a)$ 之间,个别区域达 $0.30t/(hm^2 \cdot a)$ 。

## 4 讨论

### 4.1 生态系统服务变化的解释

黔桂喀斯特山地水源涵养量的降低与土地利用类型变化密切相关(图 12a 和图 12b)。1990-2000 年,涵养量降低的主要原因之一是林地和草地面积的大幅度下降,林地和草地分别减少了 $225.82 km^2$ 和 $79.74 km^2$ ,导致植被覆盖度降低,对降水的截留作用降低,使得单位面积水源涵养量大幅度下降;2000-2015 年水源涵养量增加,除降雨量呈显著增加以外,还归因于林地面积增加了 $773.88 km^2$ ,加大了对降水的截留作用,提高了区域水源涵养能力。

土壤保持量的变化与各土壤侵蚀因子密切相关。1990-2000 年,植被覆盖度较高的林地和草地减少,增加了土壤侵蚀;加之降雨侵蚀力的降低,潜在土壤侵蚀量降低,使得总体上研究区土壤保持量略有降低。2000-2015 年,耕地和草地转为建设用地和林地,建设用地增加了区域非渗透表面的面积,林地增加了植被覆盖度,皆降低了土壤侵蚀风险;此外,研究区的降雨侵蚀力显著增加,而土地利用变化的面积不足研究区总面积的 $0.8\%$ ,对土壤保持的影响低于降雨侵蚀力的影响,多个因子综合使得研究区土壤保持量略有增加。

### 4.2 与其他研究结果的比较

由于当前少有喀斯特地区 2015 年生态系统服



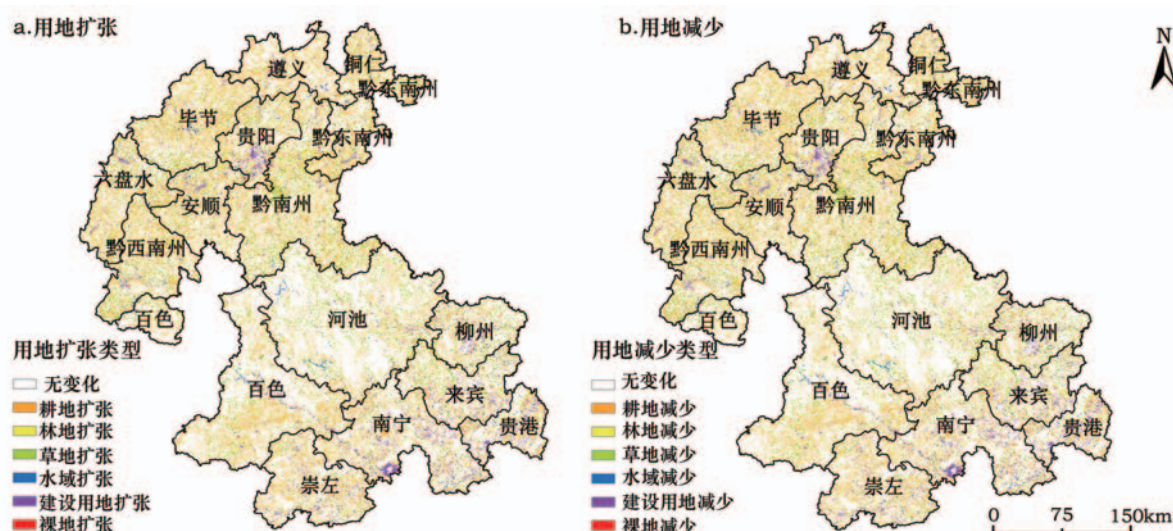


图12 1990–2015年黔桂喀斯特山地土地利用变化

Figure 12 Land use change in Guizhou and Guangxi Karst Mountainous Region from 1990 to 2015

务的研究,故本文主要与2010年的相关研究做对比分析。本文估算的水源涵养量和土壤保持量,均略高于全国生态系统服务十年环评估算的结果<sup>[65, 66]</sup>,但均属一个数量级。其中,水源涵养量高的主要原因之一是2015年研究区的年降水量远高于十年环评期间的降雨量。

此外,估算的广西土壤保持单位量  $889.67t/(hm^2 \cdot a)$ ,略高于十年环评  $700.77t/(hm^2 \cdot a)$ ,这一方面是2015年降雨量高于十年环评的年降雨数据,另一方面降雨侵蚀力模型的不同导致的差异。估算的贵州土壤侵蚀模数  $10.37t/(hm^2 \cdot a)$ ,也略高于孙德亮等利用RUSLE模型估算的贵州省2010年土壤侵蚀模数为  $8.80t/(hm^2 \cdot a)$ <sup>[67]</sup>,一方面是因为其采用的适用于中国南方地区而非喀斯特地区的降雨侵蚀力模型,同时本研究的2015年降雨又高于2010年,降雨侵蚀力增加,导致侵蚀模数较高;另一方面,本研究正处于贵州省石漠化相对严重区域,土壤侵蚀重于全省。

黔桂喀斯特山地固碳量主要考虑的是植被固碳和岩石风化固碳,不包含相对稳定的土壤碳库,这也是估算的广西单位面积固碳量  $3.03t/(hm^2 \cdot a)$ ,和贵州单位面积固碳量  $2.73t/(hm^2 \cdot a)$ ,略低于王兵等<sup>[68]</sup>估算的广西森林固碳  $3.52t/(hm^2 \cdot a)$ 和刘晓等<sup>[31]</sup>估算的贵州森林固碳  $2.77t/(hm^2 \cdot a)$ 的主要原因,但岩石风化固碳的影响及数据来源的不同,使其结果

高于同样未估算土壤碳库的杨帆等<sup>[69]</sup>基于森林清查数据估算的贵州南部森林固碳  $1.95t/(hm^2 \cdot a)$ 。

## 5 结论

本文在降水贮存量法、修正土壤流失方程RUSLE、植被固碳释氧等方法基础上,基于实际径流小区实验数据,修正或引入径流系数、降雨侵蚀力、石漠化因子、岩石风化固碳等参数模型,对1990-2015年黔桂喀斯特山地水源涵养、土壤保持和固碳释氧量的时空变化进行分析,结果表明:

(1)黔桂喀斯特山地水源涵养、土壤保持、固碳量和释氧量的总量为  $630.15$  亿  $m^3/a$ 、 $189.02$  亿  $t/a$ 、 $6187.49$  万  $t/a$  和  $16\ 002.18$  万  $t/a$ ;单位量分别为  $2943.43m^3/(hm^2 \cdot a)$ 、 $885.18t/(hm^2 \cdot a)$ 、 $2.89t/(hm^2 \cdot a)$  和  $7.47t/(hm^2 \cdot a)$ 。林地对生态系统服务的贡献最大。水源涵养量自北向南增加,以低、较低等级为主,分别占总面积的  $33.72\%$  和  $20.55\%$ 。土壤保持量以低、较低和极高等级为主,分别占总面积的  $24.90\%$ 、 $20.90\%$  和  $21.44\%$ 。固碳量和释氧量空间分布趋势一致,自北向南升高,以较低、中等和较高等级为主,分别占总面积的  $35.47\%$ 、 $29.83\%$  和  $21.49\%$ ,高分值主要百色西北,南宁、贵港和崇左的零星区域。

(2)1990-2015年,黔桂喀斯特山地水源涵养量、土壤保持量和固碳释氧等主要生态系统服务均呈现增加趋势。1990-2000年和2000-2015年两个

2017年10月

时段变化趋势相反。前一时段水源涵养量和土壤保持量均呈下降趋势,分别下降了39.10亿 $\text{m}^3$ 和6.43亿 $\text{t}$ ,降低幅度为6.25%和3.45%;后一时段三项主要生态系统服务均呈增加趋势,其中水源涵养量、土壤保持量、固碳量和释氧量分别增加了43.93亿 $\text{m}^3/\text{a}$ 、9.29亿 $\text{t}/\text{a}$ 、200.81万 $\text{t}/\text{a}$ 和412.48万 $\text{t}/\text{a}$ ,增加幅度为7.49%、5.24%、3.35%和2.65%。

(3)未来城市发展过程中,应考虑土地利用变化对生态系统服务的影响,合理配置耕地、林地和草地的空间布局,对陡坡耕地坚决实行退耕还林政策,加大林、草地的保护措施,避免建设用地的盲目扩张,以提高黔桂喀斯特山地的生态系统服务价值,更好地发挥其对长江与珠江上游的生态安全屏障作用。

### 参考文献(References):

- [1] 傅伯杰,吕一河,高光耀. 中国主要陆地生态系统服务与生态安全研究的重要进展[J]. 自然杂志, 2012, 34(5): 261-272. [Fu B J, Lv Y H, Gao G Y. Major research progress on the ecosystem service and ecological safety of the terrestrial ecosystems in China[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2012, 34(5): 261-272.]
- [2] Laforteza R, Chen J. The provision of ecosystem services in response to global change: evidences and applications[J]. *Environmental Research*, 2016, 147: 576-579.
- [3] Song W, Deng X Z. Land-use/land-cover change and ecosystem service provision in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 576: 705-719.
- [4] Runtz R K, Bryan B A, DEE L E, et al. Incorporating climate change into ecosystem service assessments and decisions: a review[J]. *Glob Change Biol*, 2017, 23(1): 28-41.
- [5] Hao R F, Yu D Y, Liu Y P, et al. Impacts of changes in climate and landscape pattern on ecosystem services[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 579: 718-728.
- [6] Costanza R, Arge D, Groot D. The value of ecosystem service and nature capital in the world[J]. *Nature*, 1997, 387(15): 235-260.
- [7] Costanza R, De Groot R, Sutton P, et al. Changes in the global value of ecosystem services[J]. *Global Environmental Change*, 2014, 26(1): 152-158.
- [8] 谢高地,张彩霞,张昌顺,等. 中国生态系统服务的价值[J]. 资源科学, 2015, 37(9): 1740-1746. [Xie G D, Zhang C X, Zhang C S, et al. The value of ecosystem services in China[J]. *Resources Science*, 2015, 37(9): 1740-1746.]
- [9] 欧阳志云,王效科,苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J]. 生态学报, 1999, 19(5): 19-25. [Ouyang Z Y, Wang X K, Miao H. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological-economic values[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(5): 19-25.]
- [10] 李文华,张彪,谢高地. 中国生态系统服务研究的回顾与展望[J]. 自然资源学报, 2009, 24(1): 1-10. [Li W H, Zhang B, Xie G D. Research on ecosystem services in China: progress and perspectives[J]. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(1): 1-10.]
- [11] 杨旭,沈珍,闵水发,等. 生态系统服务研究进展[J]. 中国农学通报, 2015, 31(35): 133-138. [Yang X, Shen Z, Min S F, et al. Ecosystem services: a review[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(35): 133-138.]
- [12] Zhao Z, Wu X, Zhang Y, et al. Assessment of changes in the value of ecosystem services in the Koshi River Basin, central high Himalayas based on land cover changes and the CA-Markov model[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2017, 8(1): 67-76.
- [13] 戴尔阜,黄宇,赵东升. 草地土壤固碳潜力研究进展[J]. 生态学报, 2015, 35(12): 3908-3918. [Dai E F, Huang Y, Zhao D S. Review on soil carbon sequestration potential in grassland ecosystems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(12): 3908-3918.]
- [14] 宋贤威,高扬,温学发,等. 中国喀斯特关键带岩石风化碳汇评估及其生态服务功能[J]. 地理学报, 2016, 71(11): 1926-1938. [Song X W, Gao Y, Wen X F, et al. Rock-weathering-related carbon sinks and associated ecosystem service functions in the karst critical zone in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(11): 1926-1938.]
- [15] 黄秋昊,蔡运龙,王秀春. 我国西南部喀斯特地区石漠化研究进展[J]. 自然灾害学报, 2007, 16(2): 106-111. [Huang Q H, Cai Y L, Wang X C. Progress of research on rocky desertification in karst areas of southwestern China[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2007, 16(2): 106-111.]
- [16] 许尔琪,张红旗. 喀斯特山地土地利用变化的垂直分布特征[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(12): 1693-1702. [Xu E Q, Zhang H Q. Vertical distribution of land use in karst mountainous region[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(12): 1693-1702.]
- [17] 徐慧文,谢强,杨渺,等. 生态系统主要服务功能及评价方法研究述评[J]. 四川环境, 2013, 32(S1): 18-23. [Xu H W, Xie Q, Yang M, et al. Overview of the studies on ecosystem services and evaluation methods[J]. *Sichuan Environment*, 2013, 32(S1): 18-23.]
- [18] Fan H, Huang Y, Yuan Y, et al. Carbon cycling of forest ecosystems in response to global nitrogen deposition: a review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7): 2997-3009.
- [19] 张明阳,王克林,刘会玉,等. 喀斯特生态系统服务价值时空分



- 异及其与环境因子的关系[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1): 189-197. [Zhang M Y, Wang K L, Liu H Y, et al. Spatio-temporal variation of karst ecosystem service value and its correlation with ambient environmental factors[J]. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2010, 18(1): 189-197.]
- [20] 赵海兵, 安裕伦, 夏品华, 等. 基于GIS的喀斯特流域土壤侵蚀模数估算-以贵阳麦西河流域为例[J]. 水土保持研究, 2011, 18(5): 99-103. [Zhao H B, An Y L, Xia P H, et al. Estimate of soil erosion modulus of the watershed in karst region gis-based: a case study of Maixi river basin in Guiyang[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2011, 18(5): 99-103.]
- [21] 吴光梅, 熊康宁, 陈沛, 等. 喀斯特石漠化生态系统服务价值研究[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2012, 30(3): 25-30. [Wu G M, Xiong K N, Chen H, et al. Research on the service value of karst rocky desertification ecosystem[J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2012, 30(3): 25-30.]
- [22] 赵国梁, 胡业翠. 基于CLUE-S模型的广西喀斯特山区生态系统服务价值变化研究[J]. 水土保持研究, 2014, 21(6): 198-203. [Zhao G L, Hu Y C. Study on ecosystem service value changes based on clue-s models in guangxi karst mountainous area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(6): 198-203.]
- [23] 张斯屿, 白晓永, 王世杰, 等. 基于InVEST模型的典型石漠化地区生态系统服务评估-以晴隆县为例[J]. 地球环境学报, 2014, (5): 328-338. [Zhang S Y, Bai X Y, Wang S J, et al. Ecosystem services evaluation of typical rocky desertification areas based on InVEST model- a case study at Qinglong Country, Guizhou Province[J]. *Journal of Earth Environment*, 2014, (5): 328-338.]
- [24] 胡晓. 川南喀斯特石漠化小流域不同土地覆被生态系统服务功能研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2014. [Hu X. Ecosystem Services of Different Land Cover Types Ecosystems in Karst Small Watershed, Southern Sichuan[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2014.]
- [25] 王小琳. 基于InVEST模型的贵州省水源涵养功能研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2016. [Wang X L. Modelling Water Conservation Function Based on the InVEST Model: Case Studies in Guizhou[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2016.]
- [26] 吴松, 安裕伦, 李远艳, 等. 2000-2010年贵州省生态系统水源涵养功能变化特征[J]. 环保科技, 2016, 22(2): 1-6. [Wu S, An Y L, Li Y Y, et al. Characteristics of variation of water conservation in Guizhou Province from 2000 to 2010[J]. *Environmental Protection Science and Technology*, 2016, 22(2): 1-6.]
- [27] 许月卿, 邵晓梅. 基于GIS和RUSLE的土壤侵蚀量计算-以贵州省猫跳河流域为例[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(4): 67-71. [Xu Y Q, Shao X M. Estimation of soil erosion supported by gis and rusle: a case study of Maotiaohe Watershed, Guizhou province[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28(4): 67-71.]
- [28] 韩明臣, 梁玉莲. 基于连清数据的广西森林碳储量动态变化研究[J]. 林业资源管理, 2015, (6): 111-116. [Han M C, Liang Y L. Study on changes in forest biomass carbon storage based on forest inventory data in Guangxi[J]. *Forest Resources Management*, 2015, (6): 111-116.]
- [29] 张彪, 李文华, 谢高地, 等. 北京市森林生态系统的水源涵养功能[J]. 生态学报, 2008, 28(11): 5619-5624. [Zhang B, Li W H, Xie G D, et al. Characteristics of water conservation of forest ecosystem in Beijing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(11): 5619-5624.]
- [30] 刘璐璐, 曹巍, 邵全琴. 南北盘江森林生态系统水源涵养功能评价[J]. 地理科学, 2016, 36(4): 603-611. [Liu L L, Cao W, Shao Q Q. Water conservation function of forest ecosystem in the Southern and Northern Pan River Watershed[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(4): 603-611.]
- [31] 刘晓, 郭颖, 徐海, 等. 贵州省森林生态系统服务功能的价值评估[J]. 贵州农业科学, 2014, 42(12): 60-65. [Liu X, Guo Y, Xu H, et al. Assessment of forest ecosystem service function value in guizhou[J]. *Guizhou Agricultural Science*, 2014, 42(12): 60-65.]
- [32] 张彪, 李文华, 谢高地, 等. 森林生态系统的水源涵养功能及其计量方法[J]. 生态学杂志, 2009, 28(3): 529-534. [Zhang B, Li W H, Xie G D, et al. Water conservation function and its measurement methods of forest ecosystem[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(3): 529-534.]
- [33] 李默然, 丁贵杰. 贵州黔东南主要森林类型碳储量研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(7): 119-124. [Li M R, Ding G J. Study on carbon storage of main forest types in southeast part of Guizhou province[J]. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2013, 33(7): 119-124.]
- [34] 苏永. 基于GIS技术和USLE模型的环江县土壤侵蚀研究[D]. 桂林: 广西师范学院, 2013. [Su Y. Research on Soil Erosion in Huanjiang County Based on GIS and the USLE Model[D]. Guilin: Guangxi Teachers Education University, 2013.]
- [35] 石玉林, 张红旗, 许尔琪. 中国陆地生态环境安全分区综合评价[J]. 中国工程科学, 2015, 17(8): 62-69. [Shi Y L, Zhang H Q, Xu E Q. Comprehensive evaluation on ecological and environmental security in terrestrial ecosystems in China[J]. *Engineering Sciences*, 2015, 17(8): 62-69.]
- [36] 廖克. 中华人民共和国国家自然地图集[M]. 北京: 中国地图出版社, 1999. [Liao K. The National Natural Atlas of the People's Republic of China[M]. Beijing: Sinomap press, 1999.]
- [37] 刘纪远, 张增祥, 庄大方. 20世纪90年代中国土地利用变化时

2017年10月

- 空特征及其成因分析[J]. 地理研究, 2003, 22(1): 1-12. [Liu J Y, Zhang Z X, Zhuang D F. A study on the spatial - temporal dynamic changes of land- use and driving forces analyses of China in the 1990s[J]. *Geographical Research*, 2003, 22(1): 1-12.]
- [38] 中国科学院资源环境科学数据中心. 土地利用数据(1990、2000、2015) [EB/OL]. [2017- 09- 14]. <http://www.resdc.cn/>. [Data Center for Resources and Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences. Land Use Dataset (1990、2000、2015)[EB/OL]. [2017-09-14]. <http://www.resdc.cn/>]
- [39] 中国气象数据共享网. 中国地面气候资料日值数据集(1979-2016) [EB/OL]. [2017- 09- 14]. <http://www.escience.gov.cn/metdata/page/index.html>. [China Meteorological Data Service Center. Dataset Of Daily Surface Observation Values In Individual Years (1976- 2016) [EB/OL]. [2017- 09- 14] . <http://www.escience.gov.cn/metdata/page/index.html>.]
- [40] 中国科学院成都山地灾害与环境研究所数字山地与遥感应用中心. 黔桂喀斯特山地 10km 分辨率年地表径流深数据集 [EB/OL]. [2017-09-14] . <http://www.imde.ac.cn/>. [The Institute of Mountain Hazards and Environment (IMHE) - Chinese Academy of Sciences (CAS). QGSD\_RunoffDepth\_KST\_Year\_10kmDataset[ EB/OL]. [2017- 09- 14]. <http://www.imde.ac.cn/>]
- [41] 中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云. SRTM DEM 数据 [EB/OL]. [2017- 09- 14]. <http://www.gscloud.cn/>. [International Scientific & Technical Data Mirror Site, Computer Network Information Center, Chinese Academy of Sciences. SRTM DEM Dataset [EB/OL]. [2017- 09- 14]. <http://www.gscloud.cn/>]
- [42] 寒区旱区科学数据中心. 中国土壤特征数据集 [EB/OL]. [2017- 09- 14]. <http://westdc.westgis.ac.cn/>. [Cold and Arid Regions Science Data Center at Lanzhou. Soil Particle- size Distribution Dataset (2011) [EB/OL]. [2017- 09- 14]. <http://westdc.westgis.ac.cn/>]
- [43] 国家科技基础条件平台-国家地球系统科学数据共享平台. 土壤有机质数据 [EB/OL].[2017-09-14]. <http://www.geodata.cn>. [National Earth System Science Data Sharing Infrastructure, National Science & Technology Infrastructure of China. Soil organic matter dataset[EB/OL].2017- 09- 14]. <http://www.geodata.cn>.]
- [44] Didan K. MOD13A3 MODIS/Terra Vegetation Indices Monthly L3 Global 1km SIN Grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC [EB/OL]. [2017-09-14]. <https://doi.org/10.5067/modis/mod13a3.006>.
- [45] N T S G./MODIS Net Primary Production Yearly L4 Global 1km. University of Montana [EB/OL]. [2017- 09- 14]. <https://lpdaac.usgs.gov>.
- [46] Renard K G, Foster G, Weesies G, *et al.* Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) [M]. Washington, DC : United States Department of Agriculture, 1997.
- [47] 戴海伦, 苑爽, 张科利, 等. 贵州省降雨侵蚀力时空变化特征研究[J]. 水土保持研究, 2013, 20(1): 37-41. [Dai H L, Yuan S, Zhang K L, *et al.* Study on the spatiotemporal distribution of rainfall erosivity in Guizhou province[J]. *Research of Soil and Conservation*, 2013, 20(1): 37-41.]
- [48] Williams J, Arnold J. A system of erosion-sediment yield models [J]. *Soil technology*, 1997, 11(1): 43-55.
- [49] 秦伟, 朱清科, 张岩. 通用土壤流失方程中的坡长因子研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2010, 8(2): 117-124. [Qin W, Zhu Q K, Zhang Y. Advance in researches on slop length factor in Universal Soil Loss Equation[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2010, 8(2): 117-124.]
- [50] Mccool D, Foster G, Mutchler C, *et al.* Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation[J]. *Transactions of the Asae*, 1989, 30(5): 1387-1396.
- [51] Liu B, Nearing M, Risse L. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes[J]. *Transactions of the Asae*, 1994, 37(6): 1835-1840.
- [52] Van Remortel R D, Hamilton M E, Hickey R J. Estimating the LS factor for RUSLE through iterative slope length processing of digital elevation data within ArcInfo grid[J]. *Cartography*, 2001, 30(1): 27-35.
- [53] 孙文义, 邵全琴, 刘纪远. 黄土高原不同生态系统水土保持服务功能评价[J]. 自然资源学报, 2014, 29(3): 365-376. [Sun W Y, Shao Q Q, Liu J Y. Assessment of soil conservation function of the ecosystem services on the Loess Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(3): 365-376.]
- [54] 蔡崇法, 丁树文. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(2): 19- 24. [Cai C F, Ding S W. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in Small Watershed[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14(2): 19-24.]
- [55] 陈龙, 谢高地, 张昌顺, 等. 澜沧江流域土壤侵蚀的空间分布特征[J]. 资源科学, 2012, 34(7): 1240-1247. [Chen L, Xie G D, Zhang C S, *et al.* Spatial distribution characteristics of soil erosion in Lancang River Basin[J]. *Resources Science*, 2012, 34(7): 1240-1247.]
- [56] 陈思旭, 杨小唤, 肖林林, 等. 基于 RUSLE 模型的南方丘陵区土壤侵蚀研究[J]. 资源科学, 2014, 36(6): 1288-1297. [Chen S X, Yang X H, Xiao L L, *et al.* Study of soil erosion in the southern hillside area of China based on RUSLE Model[J]. *Resources Science*, 2014, 36(6): 1288-1297.]



- [57] 傅世锋, 查轩. 基于 GIS 和 USLE 的东圳库区土壤侵蚀量预测研究[J]. 地球信息科学, 2008, 10(3): 390-395. [Fu S F, Zha X. Study on predicting soil erosion in dongzhen watershed based on GIS and USLE[J]. *Geo-Information Science*, 2008, 10(3): 390-395.]
- [58] 高峰. 基于 GIS 和 CSLE 的区域土壤侵蚀定量评价研究[D]. 桂林: 广西师范学院, 2014. [Gao F. Regional Quantitative Assessment of Soil Erosion based on GIS and CSLE Model[D]. Guilin: Guangxi Teachers Education University, 2014.]
- [59] 袁克勤. 基于 GIS 岩溶山地小流域土壤侵蚀量计算[D]. 重庆: 西南大学, 2009. [Yuan K Q. Estimation of Soil Erosion in Small Washed of Karst Upland Based on GIS [D]. Chongqing: Southwest University, 2009.]
- [60] 王兵, 杨锋伟, 郭浩. 森林生态系统服务功能评估规范(LY/T 1721-2008)[M]. 北京: 中国标准出版社, 2008. [Wang B, Yang F W, Guo H. Specifications for Assessment of Forest Ecosystem Services in China (LY/T 1721-2008) [M]. Beijing: China Standard Press, 2008.]
- [61] 程春晓, 徐宗学, 王志慧, 等. 2001-2010 年东北三省植被净初级生产力模拟与时空变化分析[J]. 资源科学, 2014, 36(11): 2401-2412. [Cheng C X, Xu Z X, Wang Z H, et al. Temporal-spatial change simulation and analysis of net primary productivity in northeast China from 2001 to 2010[J]. *Resources Science*, 2014, 36(11): 2401-2412.]
- [62] 王新闯, 王世东, 张合兵. 基于 MOD17A3 的河南省 NPP 时空格局[J]. 生态学杂志, 2013, 32(10): 2797-2805. [Wang X C, Wang S D, Zhang H B. Spatiotemporal pattern of vegetation net primary productivity in Henan Province of China based on MOD17A3[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(10): 2797-2805.]
- [63] Suchet A P, Probst J L. Flux de CO<sub>2</sub> consommé par altération chimique continentale: Influences du drainage et de la lithologie=CO<sub>2</sub> flux consumed by chemical weathering of continents: influences of drainage and lithology[J]. *Comptes-rendus De L'Académie Des Sciences De Paris-série II, Mécanique, Physique, Chimie, Astronomie*, 1993, 317(S1): 615-622.
- [64] 邱冬生, 庄大方, 胡云锋, 等. 中国岩石风化作用所致的碳汇能力估算[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2004, 29(2): 177-182. [Qiu D S, Zhuang D F, Hu Y F, et al. Estimation of carbon sink capacity caused by rock weathering in China[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2004, 29(2): 177-182.]
- [65] 中国生态系统评估与生态安全数据库. 全国水源涵养功能[EB/OL]. [2017-09-14]. [http://www.ecosystem.csdb.cn/ecogj/tpcclasses\\_detail.jsp?id=411C06AF63ABAB6664AA23B4673CB27B](http://www.ecosystem.csdb.cn/ecogj/tpcclasses_detail.jsp?id=411C06AF63ABAB6664AA23B4673CB27B). [China's ecosystem assessment and ecological security pattern database. National water conservation function[EB/OL]. [2017-09-14]. [http://www.ecosystem.csdb.cn/ecogj/tpcclasses\\_detail.jsp?id=411C06AF63ABAB6664AA23B4673CB27B](http://www.ecosystem.csdb.cn/ecogj/tpcclasses_detail.jsp?id=411C06AF63ABAB6664AA23B4673CB27B).]
- [66] 中国生态系统评估与生态安全数据库. 全国土壤保持功能[EB/OL]. [2017-09-14]. [http://www.ecosystem.csdb.cn/ecogj/tpcclasses\\_detail.jsp?id=4DCC016FEE12E999644FFD6D68E0641E](http://www.ecosystem.csdb.cn/ecogj/tpcclasses_detail.jsp?id=4DCC016FEE12E999644FFD6D68E0641E). [China's ecosystem assessment and ecological security pattern database. National soil conservation function[EB/OL]. [2017-09-14]. [http://www.ecosystem.csdb.cn/ecogj/tpcclasses\\_detail.jsp?id=4DCC016FEE12E999644FFD6D68E0641E](http://www.ecosystem.csdb.cn/ecogj/tpcclasses_detail.jsp?id=4DCC016FEE12E999644FFD6D68E0641E).]
- [67] 孙德亮, 赵卫权, 李威, 等. 基于 GIS 与 RUSLE 模型的喀斯特地区土壤侵蚀研究-以贵州省为例[J]. 水土保持通报, 2016, 36(3): 271-276. [Sun D L, Zhao W Q, Li W, et al. Research on soil erosion in karst area based on GIS and RUSLE model-a case study in Guizhou Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 36(3): 271-276.]
- [68] 王兵, 魏江生, 俞社保, 等. 广西壮族自治区森林生态系统服务功能研究[J]. 广西植物, 2013, 33(1): 46-51. [Wang B, Wei J S, Yu S B, et al. Research on forest ecosystem services in Guangxi Zhuang autonomous region[J]. *Guihaia*, 2013, 33(1): 46-51.]
- [69] 杨帆, 黄麟, 邵全琴, 等. 2010 年贵州省南部森林生态系统固碳释氧服务功能价值评估[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2015, 33(3): 05-11. [Yang F, Huang L, Shao Q Q, et al. Assessment of forest ecosystem carbon fixation and oxygen release services in the south of Guizhou province in 2010[J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2015, 33(3): 05-11.]

# Temporal and spatial variation of main ecosystem services in Guizhou and Guangxi Karst Mountainous region

SHANG Erping<sup>1,2</sup>, XU Erqi<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The ecosystem service assessment of Guizhou and Guangxi karst mountainous region is a major strategic requirement of ecological system restoration, ecological function zoning and the establishment of ecological compensation mechanism to guarantee national ecological security in China. Here we calculated main ecosystem services by pulling rainfall erosivity based on experimental data of actual runoff area, rocky desertification factor and rock-weathering-related carbon sinks into the precipitation storage method, revised universal soil loss equation and carbon sequestration equation. Temporal and spatial changes across the three major ecosystem service functions, including water conservation, soil conservation, and carbon sequestration from 1990 to 2015 were estimated. We found that the total amount of water conservation, soil conservation, carbon sequestration and oxygen release was 63.015 billion m<sup>3</sup>/year, 16.492 billion tons, 61.8749 million tons/year and 160.0218 million tons/year; the unit amount was 294.34m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, 77.037t/(hm<sup>2</sup> · a), 2.89t/hm<sup>2</sup> and 7.47t/hm<sup>2</sup>, respectively. The proportion of low and lower water conservation were 33.72% and 20.55%; the proportion of low, lower of the soil conservation were 49.91% and 31.21%; the proportion of lower, middle and high carbon fixation and oxygen release were 35.47%, 29.83% and 21.49%. The contribution of karst forest land to water conservation, soil conservation and carbon fixation services is biggest. The proportion of water conservation, soil conservation and carbon fixation of forest land, cultivated land and grassland was 1:1.85:2.55, 1:1.64:1.02 and 1:1.16:1.09. From 1990 to 2015, main ecosystem services such as water conservation, soil retention and carbon fixation all increased. From 1990 to 2000 and 2000 to 2015, the trend of water conservation and soil retention in the previous period was opposite and the variation range was between 6.25 and 13.70%. Water conservation in the latter period and carbon sequestration showed an increasing trend of 2.865%~7.493%.

**Key words:** Guizhou and Guangxi Karst Mountain region; ecosystem services; water conservation; soil conservation; carbon fixation and oxygen release; rock-weathering-related carbon sinks

## 《资源科学》投稿须知

### 1. 投稿要求

(1)本刊设立18个栏目编排文章,各栏目的详细说明可阅读网站([www.resci.cn](http://www.resci.cn))“简介”中的“栏目设置”部分,所投稿件选题应符合相应栏目的要求。

(2)文稿题目限定在25个汉字内;篇幅一般不超过8个版面页,并附300字左右的中文摘要及4~8个关键词,摘要应涵盖文章的研究目的、方法、主要论点和结论;英文摘要和中文摘要相对应,正文不多于300个单词。

(3)文章编写格式按照国家标准GB7713-87(《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》)的规定,采用阿拉伯数字分级编号。图形、图例、表格、参考文献、量和单位等的使用在本刊网站“作者”栏中有详细介绍,请作者投稿前参照本刊最新已发表文章统一规范。

(4)本刊实行网上投稿(网址:<http://www.resci.cn>,要求Word97-2003文本,大小不超过2M),不接受纸质稿件,个别上网确有困难的作者可通过Email([zykx@igsrr.ac.cn](mailto:zykx@igsrr.ac.cn))或寄送光盘投稿(通信地址:北京市朝阳区大屯路甲11号,《资源科学》编辑部收,邮政编码100101)。

### 2. 审稿

本刊实行“编辑部初审—同行专家评审—责任编委复审—主编终审”的审稿制度。

初审重点是查新、查重和审查数据,以及选题和写作是否达到本刊基本要求(初审通过后即发审稿费通知)。

评审重点是鉴定文稿的学术质量和价值,采用国际惯用的双向匿名审稿制。

复审主要是对有异议或者评审意见分歧的文稿进行重审,并检查作者修改是否恰当。

终审根据近期稿源情况,综合考虑多种因素,决定稿件采用与否,并对拟采用的稿件进行排队和处理。

每个阶段审稿一般在30个工作日(法定节假日顺延)内完成,超出预定时限(以网上设定为准),作者可以在通知编辑部撤稿后将稿件转投其他期刊。

### 3. 发表与版权

(1)文章发表。通过主编终审的稿件经编校后首先制作成电子文档在本刊网站发布,并按照规定收取版面费等费用,收费后随即编入最近一期书版正式发表,并同时在本刊网站及相关网站刊出。编校过程中有可能依照相关法律法规或专业要求对原稿的文字及图、表外观做适当修改,如作者不同意对原稿做任何修改,必须以书面形式函告编辑部。

文稿一旦刊出,作者要承担文章内容及其影响的责任。

(2)版权。文章发表后作者拥有该文的著作权,第一作者为其著作权人代表。

文稿刊出后,该文不得以同种文字在其他期刊再次发表(含纸质、光盘、网络等各种介质、媒体),汇编个人作品(含网页)或文集使用该文及其版式须注明出处。

论文一经录用,《资源科学》编辑部同时享有论文的数字化复制权、发行权、汇编权及信息网络传播权。如果作者不同意其文以电子媒介传播,必须在来稿时声明。

文稿刊用后酌致稿酬(其中包含网络版稿酬),并赠送当期杂志3册。