

玉溪市碳收支动态时空演变格局

杨曦^{1,2} 李政辉^{1,3} 何志余¹ 邓成靖¹ 胡琴艳¹

1. 玉溪师范学院, 中国·云南 653100

2. 贵州师范大学, 中国·贵州 550025

3. 昆明理工大学, 中国·云南 650500

摘要: 为了能更加准确地依据碳收支平衡特征来实施相应的生态保护和经济发展策略, 本文以玉溪市的9个县域为单位, 根据碳收支核算结果进一步探讨了玉溪市碳收支平衡特征。结果表明: 20年间, 碳收支均处于增长趋势, 分别增加了1969.5万吨和1676.2万吨, 且碳排放均能被碳吸收抵消。对碳收支平衡特征进行讨论, 发现碳排放基尼系数在0.2-0.4, 碳排放经济贡献率在0.34-5.04之间, 碳生态承载数在0.1-11.8之间, 不同地区存在很大差异, 但就总体而言, 玉溪市碳供需比较合理, 经济贡献程度相对平衡, 且具有较高碳补偿率。

关键词: 碳收支; 碳抵消; 碳平衡特征; 玉溪市

Spatial and temporal evolution pattern of carbon budget dynamics in Yuxi city

Yang Xi^{1,2}, Li Zhenghui^{1,3}, He Zhiyu¹, Deng Chengjing¹, Hu Qinyan¹

1. Yuxi Teachers College, China Yunnan 653100

2. Guizhou Normal University, China Guizhou 550025

3. Kunming University of Science and Technology, China Yunnan 650500

Abstract: In order to implement the corresponding ecological protection and economic development strategies more accurately according to the characteristics of carbon balance, this paper further discusses the characteristics of carbon balance in Yuxi city based on the results of carbon balance accounting in 9 counties of Yuxi city. The results show that in the past 20 years, the carbon budget has been on the increase trend, increasing by 19.695 million tons and 16.762 million tons respectively, and carbon emissions can be offset by carbon absorption. The characteristics of carbon balance are discussed, and it is found that the Gini coefficient of carbon emission is 0.2-0.4, the economic contribution rate of carbon emission is 0.34-5.04, and the ecological carrying capacity of carbon is 0.1-11.8, which is quite different in different regions. However, On the whole, Yuxi City has a reasonable carbon supply and demand, a relatively balanced economic contribution and a high carbon compensation rate.

Keywords: Carbon budget; Carbon offset; Characteristics of carbon balance; Yuxi city

0 引言

气候变暖是全球面临的重大环境问题之一, 而温室气体累积是全球气候变暖最主要的驱动因素。化石燃料燃烧和工业生产是以CO₂为主的温室气体增长的主要原因。为积极应对气候变化挑战, 中国在第七十五届联合国大会上郑重提出“双碳”目标, 即“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值, 努力争取2060年前实现碳中和”。这一承诺标志着中国绿色低碳发展进入新阶段, 推动碳汇增强与减排协同并进。

碳中和是指通过植树造林、节能减排等方式抵消温室气体排放量来实现净零碳排放的目标。准确评估区域碳收

支情况及其碳汇潜力^[1], 是推动减排、增强碳汇功能以应对气候变化的重要基础^[2]。通过量化区域内碳排放量, 评估区域植被固碳能力, 权衡区域间发展差异, 可以为划分区域间碳责任提供精准依据。从而优化资源配置, 构建公平的碳指标分配与碳补偿机制。

当前, 不同尺度的碳动态研究已经全面开展, 但县域尺度的研究仍占少数。如从全球尺度估陆地生态系统碳源汇时空分异特征; 从国家尺度对我国植被生态系统固碳潜力进行预测^[3], 从区域尺度对青藏高原高区固碳现状与潜力进行评估, 或从省域尺度、城市尺度对全国各省、各市碳排放与碳汇进行对比。从县域尺度精细化解析区域碳汇

差异的研究数量较少^[4]。县域作为我国城乡社会经济运行的基础单元，是连接城市与乡村、统筹经济发展与生态保护的关键节点。基于县域尺度开展碳动态与碳潜力研究，对于构建精细化、差异化的减排体系具有不可替代的战略意义。

玉溪市境内具有的哀牢山等重要的森林生态资源与抚仙湖等水资源战略储备库，形成典型的“山-湖”碳汇格局，具有独特的研究价值。作为滇中城市群的核心生态屏障，其低碳发展经验具有重要示范意义。本文通过整合2000-2020年多源遥感数据，对玉溪市碳收支状况特征进行研究。(1)分析研究期间玉溪市县域尺度上的碳收支动态，揭示碳平衡时空演变规律；(2)基于碳排放基尼系数、碳排放经济贡献度和碳生态承载度进一步分析了玉溪市的碳收支平衡特征。研究成果可为同类地区的低碳发展规划提供科学依据，也为完善区域碳收支理论方法体系提供案例支撑。

1 研究区概况

玉溪市位于云南省的中部(23° 19' ~24° 53' N, 101° 16' ~103° 09' E)，总面积约15000km²，包括2个市辖区、4个县、3个民族自治县。地处云贵高原西缘，地势西北高，东南低，山地、峡谷、高原、盆地交错分布，山区面积占90.6%，境内有哀牢山等山脉，以及中国最大的深水型淡水湖泊抚仙湖，拥有多种类型的自然资源。

2 研究方法与数据来源

2.1 数据来源与处理

NPP数据来源于美国国家航空航天局(NASA)提供的MOD17A3数据(<https://search.earthdata.nasa.gov/search>)。2000-2020年云南省碳排放数据来源于云南省统计年鉴。2000-2011年的DMSP/OLS夜间灯光数据(<https://www.ngdc.noaa.gov/eog/dmsp.html>)与2012-2020年的NPP-VIIRS夜间灯光数据(<https://www.ngdc.noaa.gov/eog/viirs/index.html>)均来自美国国家海洋和大气管理局(NOAA)国家地球物理数据中心。夜间灯光数据校正方式见参考文献^[5]。

2.2 数据来源研究方法

2.2.1 碳吸收量核算方法

基于NASA提供的MOD17A3数据，从陆地植被净初级生产力(NPP)的角度，计算玉溪市县域尺度的碳吸收量，计算方法如下^[6]：

$$S_c = NPP \times 1.63 \times \frac{12}{44} \quad (1)$$

其中式中的 S_c 为固碳量，1.63为NPP转为CO₂的系

数 $\frac{12}{44}$ ，为CO₂转为碳的系数。

2.2.2 碳排放量核算方法

云南省2000-2020年间的碳排放量由云南省主要能源消费统计数据计算得出。利用校正后的DMSP/OLS和NPP/VIIRS夜间灯光数据与云南省碳排放数据建立线性关系，再利用粒子群优化反向传播(PSO-BP)算法反演玉溪市2000-2020年间各县的碳排放数据。

2.2.3 碳抵消效应核算方法

使用碳吸收量与碳排放量的差值评估玉溪市各县碳抵消效应。计算方法如下：

$$OE = S_c - E_c \quad (2)$$

其中， OE 代表碳吸收量对碳排放量的抵消效应(单位：万吨)。 S_c 代表各县的碳吸收量(单位：万吨)， E_c 代表各县的碳排放量(单位：万吨)。

2.2.4 碳收支平衡特征分析

运用碳排放基尼系数衡量区域的碳排放空间差异。基尼系数一般在0~1之间，基尼系数越大，代表区域间碳排放差异越大，一般以0.4作为“警戒线”。

碳排放的经济贡献系数(ECC)从经济发展的角度衡量各县碳排放量的差异性。公式如下：

$$ECC = \frac{G_i}{G} \div \frac{C_i}{C} \quad (3)$$

式中： G_i 与 C_i 为各县的GDP和碳排放量； G 与 C 为玉溪市总体GDP与总碳排放量。若 $ECC > 1$ ，则表明县域单元的经济贡献率大于碳排放的贡献率；反之，若 $ECC < 1$ ，则表明县域单元的经济贡献率小于碳排放的贡献率。

碳生态承载系数(ESC)可以从碳收支角度来衡量区域碳吸收能力大小，公式如下：

$$ESC = \frac{CA_i}{CA} \div \frac{C_i}{C} \quad (4)$$

式中： CA_i 与 C_i 为各县域单元碳吸收量与碳排放量； CA 与 C 为玉溪市总碳吸收量与总碳排放量。若 $ESC > 1$ ，则表明县域单元的碳吸收贡献率大于碳排放的贡献率，说明该县具有较高碳补偿率；反之，若 $ESC < 1$ ，则表明该县域单元的碳排放贡献率大于碳吸收的贡献率，说明其碳补偿率相对较低。

3 结果与讨论

3.1 玉溪市碳收支时空分布

3.1.1 玉溪市碳吸收时空分布

2000-2020年玉溪市碳吸收量总体处于波动式的增长趋势，从2000年的29970.4万吨增长至2020年的31939.9万吨。峨山县、新平县和澄江市是碳吸收的主要贡献者，

三者每年的碳吸收基本大于 5000 万吨，特别是澄江市，碳吸收量增长迅速，发生了量级上的变化，到 2017 年后可以达到 8000 万吨。元江哈尼族彝族傣族自治县以及红塔区是碳吸收较少，但在二十年间都实现了从百万吨到千万吨的飞跃。江川区、华宁县、通海县和易门县四个县区又以易门县和华宁县居多。

玉溪市碳吸收空间格局呈现显著的区域异质性特征，表现为“西高东低，北高南低”的分布模式。2000—2020 年期间，碳吸收量超过 3000 万吨的县区仅有新平、峨山、澄江和易门，该 4 县为玉溪市碳吸收核心区，其碳吸收总量由 2000 年的 22675.4 万吨（占全市 75.7%）增至 2020 年的 23816.8 万吨（占比 74.7%）。尽管绝对量增长 1141.4 万吨，但相对占比下降 1 个百分点，反映其余县区碳汇能力提升速率加快，碳吸收量从 7295.0 万吨增至 8123.1 万吨，相当于 8.2 万吨 / 县区 / 年，与核心区共同推动全市碳汇能力持续增强。

3.1.2 玉溪市碳排放时空分布

2000—2020 年玉溪市碳排放量总体呈现“先快速增长，后缓慢降低”的趋势，最大值出现在 2012 年。在快速增长的 2000—2012 年阶段，碳排放从 2000 年的 518.6 万吨增加至 2012 年的 2920.2 万吨，增长了近 5 倍，平均每年的增长率为 200 万吨。2012 年后碳排放开始逐步且缓慢地降低，2020 年达 2194.8 万吨，实现了平均每年减少 90 万吨的碳排放。

红塔区的碳排放明显高于其他县区一个数量级的量，甚至在 2012 年之前红塔区一个区的碳排放量都是大于其他所有县区的碳排放量之和，2012 年后红塔区的碳排放出现了较明显的减少。这 20 年间，澄江市、新平县、元江县和通海县的碳排放增长量达数百万吨，但江川区、华宁县和峨山县的增长量仅达数十万吨。

玉溪市的碳排放量各个区县都有一定差异，其中红塔区的碳排放最大，呈现以红塔区为中心的单核心结构，且 20 年间均保持该特征。2000 年玉溪市的碳排放较少，大部分的城市都小于 80 万吨，其中易门县仅有 12.3 万吨，仅有红塔区碳排放量达到 322.6 万吨，占整个玉溪市的 62.2%。2005 年和 2010 年又是比较快的增长，红塔区的碳排放从百万吨上升至千万吨，同时其他县区也开始突破百万吨，到 2010 年仅有华宁县未突破过百万吨的碳排放。2015 年和 2020 年玉溪市的碳排放有减少，一方面是红塔区仍然处于千万吨的排放量，但较 2010 年有很大降低，占比也从 2000 年的 62.2% 分布降低至 2015 年的 44.5% 和

2020 年的 45.8%；江川区和易门县均降低了一个数量级，从百万吨下降至数十万吨。从平均每年碳排放增长看，20 年的年平均增长量基本小于 10 万吨，最小的是华宁县仅 2.2 万吨 / 年，澄江市达 13.4 万吨 / 年，碳排放从最初的 32.3 万吨到 2020 年达到 300.5 万吨。

3.1.3 玉溪市碳抵消时空分布

碳抵消量核算结果（图 1）显示，2000—2020 年间玉溪市碳抵消动态呈现显著时空异质性特征。尽管玉溪市整体的碳排放量在研究期间总体上有上升，然而碳排放总量仅占碳吸收总量的 20% 左右，其碳排放量均能全部被碳吸收抵消掉。

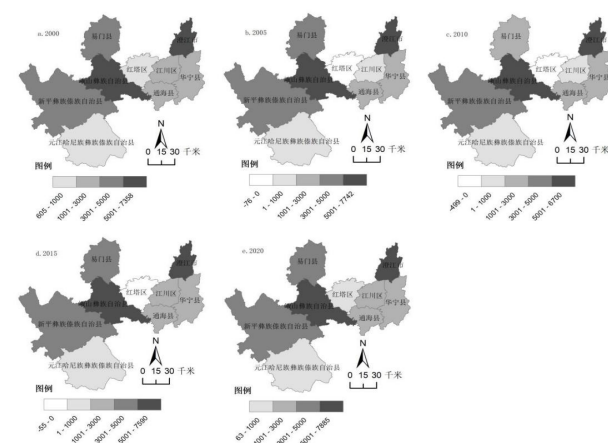


图 1 2000—2020 年玉溪市碳抵消变化(万吨)

在 2000—2020 年期间，玉溪市的碳吸收对碳排放的抵消效果呈现“先波动降低，后缓慢增加”趋势，最小值出现在 2010 年为 24914 万吨。碳抵消量由 2000 年的 29451.7 万吨上升至 2020 年 29745.0 万吨，平均年增长量为 14.7 万吨，整体呈现缓慢增长趋势。

2000—2020 年期内，玉溪市碳吸收总量完全可以抵消碳排放总量，但是不同县区也表现出其差异性（图 2），且存在负值区域。碳抵消效应为负值的城市仅出现于玉溪市市中心红塔区，并且可以看出 2005 年到 2010 年碳固存量无法抵消碳排放量，且碳赤字值在增大，表明城市在快速的发展阶段；2010 年到 2015 年碳抵消量逐渐增加，到 2020 年时市区环境治理措施已见成效，其碳固存量与碳排放量已经基本持平，甚至出现碳盈余。峨山县、新平县和澄江市碳抵消量一直处于较高值或高值，三者也是玉溪市碳收入的主要贡献者，峨山县和澄江市碳抵消效应均能保持在 6000 万吨以上，新平县也能保持 4500 万吨以上，都是较高的值。其余县区基本处于中低值状态，其数值可大致排序为易门县、华宁县、通海县、江川区、元江县，依

次递减。

3.2 玉溪市碳收支平衡特征分析

3.2.1 碳排放基尼系数

玉溪市 2000—2020 年碳排放基尼系数的计算结果表明,研究期间玉溪市碳排放基尼系数平均值为 0.27,且各年度系数值稳定维持在 0.2—0.4 的合理区间。这一结果表明,玉溪市县域单元间的碳排放空间分布呈现出良好的均衡性特征,各区域的碳源汇配置相对合理,符合区域协调发展的要求。

研究期间,碳排放基尼系数逐渐减小,说明了玉溪市各县域的碳排放空间差异在逐渐缩小,从侧面也反映出各县域在逐步发展,从起初的碳排放存在一定差异,到后期的不断减少差异,从这一特征来看,整个玉溪市的碳供需配置是基本合理的。

3.2.2 碳排放经济贡献度

碳排放经济贡献系数用以衡量碳排放对社会经济效益的贡献程度。2000—2020 年玉溪市年平均碳排放经济贡献系数为 1.2,表明碳排放与社会经济效益的贡献程度相对平衡。总的来说,2000—2020 年期间,碳排放经济贡献系数增大,从 2000 年的 0.83 增大到 2020 年的 1.25,增大了约原来的 42%。具体来说,红塔区、新平县和峨山县的碳排放经济贡献率几乎等于 1,其偏差基本不超过 0.2,是碳排放经济贡献率比较平衡且稳定的地区,年平均贡献率为 1.0;其次华宁县和易门县的碳排放经济贡献率是最大的,年平均贡献可达 1.9,易门县从 2013 年之后都可以达到 2 以上,最大为 3.2,华宁县也总体值较高,除 2000 年外均大于 1,最大值可达 5.0,表明资源利用效率较高;2010—2020 年碳排放经济贡献率小于 1 占主要的县域单元主要是澄江市和元江县,表明碳排放贡献率大于经济贡献率,表明其未能产生足够经济效益,但两者在 2005—2008

年其贡献率大于 1,说明期间存在资源利用不断提高的状态。

玉溪市的碳排放经济贡献率从最初的仅有四个县域达到大于 1 的状态,到最后仅有元江县和澄江市未达到 1 的结果,就说明碳排放产生了足够的经济效益,碳排放的增加也带动了经济的发展。

3.2.3 碳生态承载状态

2000—2020 年玉溪市年平均碳生态承载系数为 2.5, $ESC > 1$,则表明县域单元的碳吸收贡献率大于碳排放的贡献率,说明具有较高碳补偿率。总的来说,其碳生态承载系数有降低的趋势,从 2000 年 2.8 的平均碳生态承载下降到 2020 年的 1.8,减少了原来的 35.7%,说明玉溪市的碳供需错配平衡在降低。研究期间尽管红塔区碳生态承载系数均小于 0.01,具有较低的碳汇能力与较高的碳排放强度,但其值也有一定增长趋势,只是未来还需不断调整和提高。江川区、通海县和元江县碳生态承载系数均小于 1,其年平均碳生态承载系数分别为 0.85、0.79 和 0.48,碳排放比例也大于碳吸收比例,但比红塔区的碳供需错配程度要优越很多。华宁县、易门县、峨山县和澄江市的碳生态承载系数大于 1,碳排放比例小于碳吸收比例,具有较高的碳汇能力与较低的碳排放强度,其中,华宁县和澄江市基本稳定在 2—3 区间;易门县、峨山县和新平县表现出波动式的降低,但总体依然大于 1,易门县和峨山县可达到 3 以上。这表明玉溪市的经济发展加快,碳排放量较 2000 年增加较多,且仍然存在碳汇潜力。

4 结语

本文从县域尺度分析玉溪市碳收支时空演变格局,并探讨了碳收支平衡关系特征,为经济建设和生态修复提供科学支撑。结果表明、总体上,在 2000—2020 年期间,碳收支均处于增长趋势。空间上,玉溪市的碳吸收量主要呈现“西高东低,北高南低”的特征,碳排放呈现以红塔区为中心的核单核结构。玉溪市的碳吸收量能够完全抵消碳排放量,有很强的碳汇能力。

玉溪市碳排放基尼系数均位于 0.2—0.4,县域单元间碳排放量处于相对平衡状态,各县域单元碳供需比较平均且合理;多年平均碳排放经济贡献系数为 1.2, $ECC > 1$,说明经济贡献程度相对平衡;多年平均碳生态承载系数为 2.5, $ESC > 1$,表明县域单元的碳吸收贡献率大于碳排放的贡献率,说明具有较高碳补偿率。

各县域单元也会存在一定差异,应因地制宜地制定相应政策,为实现“碳达峰”“碳中和”目标而奋进。

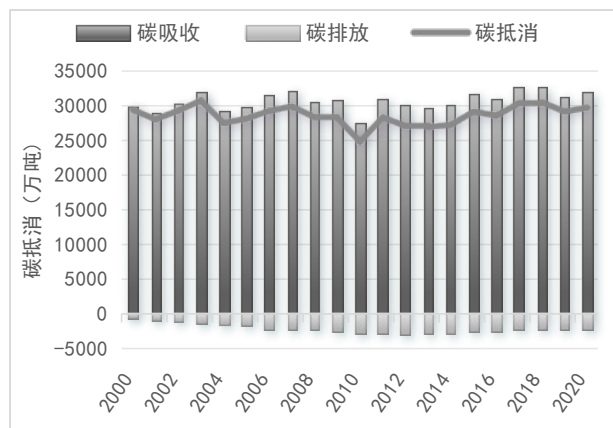


图2 2000—2020年前玉溪市碳抵消量空间分布(万吨)

参考文献:

- [1] 李亮,王映雪. 云南省森林碳汇能力及经济价值分析[J]. 中国集体经济, 2011, (24): 24-5.
- [2] 万华伟,李灏欣,高吉喜,et al. 我国植被生态系统固碳能力提升潜力空间格局研究 [J]. 生态学报, 2022, 42(21): 8568-80.
- [3] 李奇,朱建华,冯源,et al. 中国森林乔木林碳储量及其固碳潜力预测[J]. 气候变化研究进展,2018,14(03): 287-94.
- [4] 张赫,彭千芮,王睿,et al. 中国县域碳汇时空格局及影响因素[J]. 生态学报,2020,40(24):8988-98.
- [5] 杜海波,魏伟,张学渊,et al. 黄河流域能源消费碳排放时空格局演变及影响因素——基于 DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 夜间灯光数据[J]. 地理研究, 2021, 40(07): 2051-65.
- [6] 欧阳志云,朱春全,杨广斌,et al. 生态系统生产总值核算:概念、核算方法与案例研究[J]. 生态学报,2013, 33(21):6747-61.

基金项目:大学生创新创业训练项目(S202211390008)。

作者简介:杨曦(2001—),女,拉祜族,云南普洱人,研究生学历,研究方向:土壤有机碳。