

西双版纳区域植被碳储量时空演变特征

张修玉, 宋巍巍*, 许振成, 张恒军, 曾凡棠

环境保护部华南环境科学研究所, 广东 广州 510655

摘要: 科学评估区域植被碳储量时空演变对理解陆地碳循环具有重要的意义。对西双版纳 1988、1998 年与 2008 年 3 个时期植被碳储量时空演变特征进行了研究, 结果表明, 1) 1988—2008 年期间, 西双版纳植被总体碳储量与平均碳储量均为先下降后上升, 但 2008 年与 1998 年均低于 1988 年, 1988 年总体碳储量与平均碳储量分别高达 66 184 501.40 t 与 41.61 t·hm⁻²。2) 3 个时期 2 个自相关系数的数值 Moran I 与 Geary C 都在 0~1 之间, 碳储量分布格局由随机离散分布趋向于聚集分布; 2008 年 Moran I 最大, 说明 2008 年碳储量分布的空间自相关性最强。3) 3 个时期基台值较为接近 (1.002~1.045), 说明西双版纳植被碳储量的空间分布格局异质性强度相近, 其中, 1998 年碳储量异质性略强于其它时期。西双版纳区域植被碳储量时空演变的驱动机制主要是橡胶林等人工林大面积种植与紫茎泽兰等外来物种入侵导致的植被片段化。

关键词: 西双版纳; 植被碳储量; 时空演变

中图分类号: Q948

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2013) 07-1105-06

引用格式: 张修玉, 宋巍巍, 许振成, 张恒军, 曾凡棠. 西双版纳区域植被碳储量时空演变特征[J]. 生态环境学报, 2013, 22(7): 1105-1110.

ZHANG Xiuyu, SONG Weiwei, XU Zhencheng, ZHANG Hengjun, ZENG Fantang. Spatial-temporal evolution characteristic of regional vegetation carbon stock in Xishuangbanna [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(7): 1105-1110.

德班气候大会昭示着气候变暖问题已严重威胁到人类的生存和发展^[1]。全球变暖与陆地碳汇固存动态及其反馈效应密切相关, 植被作为大气 CO₂ 重要的碳汇, 其碳汇功能对碳收支平衡起着不可替代的作用^[2-5]。研究表明, 大面积的森林砍伐造成了 2.24 Pg·a⁻¹ (以 C 计) 的碳排放, 其中 94% 发生在热带亚热带地区, 森林面积减少尤其是热带雨林的破坏已成为继化石燃烧之后大气 CO₂ 浓度增加的第 2 大人为排放来源^[6-7]。近年来, 区域植被尤其热带雨林植被碳储量时空演变特征已成为碳循环领域的研究热点^[8-13]。

西双版纳作为我国唯一保存的一块热带雨林区, 也是地球北回归线上仅存的一片绿洲。然而过去 20 多年, 由于该地区天然林面积骤减与橡胶林面积剧增, 加上紫茎泽兰 (*Eupatorium adenophorum*) 等外来物种的入侵以及刀耕火种等原始的耕作/种植管理方式对自然植被的干扰日益加剧, 当地植被碳储量动态发生了改变。李红梅等^[14]与张修玉等^[15]分别利用森林清查资料估算了西双版纳森林植被碳储量及其增汇潜力, 但目前对整个区域植被碳储量时空演变特征还缺乏整体性探讨。因此, 本文利用 1988、1998 年与 2008 年 3 期 TM 影像, 通过大

气校正与地形校正, 对西双版纳区域植被碳储量 (生物量与碳储量之间的转换系数采用国际上公认的 0.5) 的时空演变进行了研究, 旨在为区域碳循环研究提供资料积累与技术借鉴。

1 研究地区概况

西双版纳位于北回归线以南, 地处内陆低纬区域内。终年太阳入射角度高, 投射到地面热量充足。东、西面分别受到北部湾、孟加拉湾海洋季风气候的影响, 因而湿度大, 降雨量充沛, 加上各种复杂地形配合, 造就了西双版纳独特的北热带季风气候。西双版纳原生地带性森林植被分为东南亚热带雨林 (印度—马来西亚雨林群系) 北缘类型和南亚热带常绿阔叶类型, 其中, 东南亚热带雨林北缘类型分为热带雨林和热带季雨林; 南亚热带常绿阔叶林类型又分为山地季风常绿阔叶林和南亚热带针叶阔叶混交林、针叶林。

2 研究方法

2.1 遥感影像处理

2.1.1 DEM 数据预处理

本研究使用的地形数据为西双版纳 1:50 000 地形图矢量化后的 DEM, 为 DWG 格式, 将其转化成 img 栅格文件, 并重采样到 30 m 分辨率, 与 TM

基金项目: 环境保护部环保公益专项(201209038); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项资金项目(PM-zx021-201212-014)

作者简介: 张修玉(1979年生), 男, 博士, 研究方向为环境战略与生态管理。E-mail: zhangxiuyu@scies.org

*通信作者, E-mail: songweiwei@scies.org

收稿日期: 2013-01-23

影像分辨率一致。由于 DEM 反映的是高程信息,很难找到与遥感影像相一致的地物点来作为控制点。为了提高配准的精度,研究中利用 DEM 数据计算 $\cos \gamma$ (太阳直射光与坡面法线夹角的余弦)的空间分布,使用计算得到的阴影图来进行配准。交叉使用 ERDAS 9.0 软件、ArcGIS 9.0 软件进行 DEM 数据预处理。

$$\cos \gamma = \cos \theta_0 \cos \theta_s + \sin \theta_0 \sin \theta_s \cos(\Phi_0 - \Phi_s)$$

式中: $\cos \theta_s$ 是坡度角余弦; Φ_0 是太阳方位角; Φ_s 是象元方位角, $\cos \gamma$ 计算结果为负值时设定为 0。

太阳天顶角为太阳高度角的余角,太阳高度角和太阳方位角从影像头文件获得,山坡像元的坡度、坡向由 DEM 计算获得。

2.1.2 TM 影像数据预处理

1) 正射校正。正射校正是指借助 DEM,对影像中每个像元进行地形变形的校正,使影像符合正射投影的要求。本研究利用 Landsat ETM+正射影像与 1:50 000 的西双版纳 DEM 对影像进行正射校正。校正使用 ERDAS 预置的 Landsat 模型。本研究共采集地面控制点(GCP, Ground Control Point) 40 个,均匀地分布于整幅影像中,总的 Control Point RMS Error 控制在 0.5 个像元以内,并与手持 GPS 的地理坐标系相同。

2) 辐射标定。由遥感器的灵敏度特征引起的辐射畸变主要由其光学系统或光电转换系统的特征形成的,光电转换系统的灵敏性特征通常很重复,其校正一般是通过定期的地面测定值进行的。Landsat 5 和 7 系列的遥感器纠正是通过飞行前实地测量,预先测出了各个波段的辐射值和记录值之间的校正增益系数和校正偏移量。

遥感器光谱辐射定标时采用以下换算式计算辐射亮度值:

$$L = \text{Gain} \cdot \text{DN} + \text{Bais}$$

其中: DN 为像元灰度值; Gain 为增益; Bais 为偏移。

对于 Landsat 5, 上式可改写为:

$$L = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{255} \cdot \text{DN} + L_{\min}$$

其中: L_{\max} 和 L_{\min} 分别是像元灰度值最大(=255)和最小(=1)时的辐射亮度值。各波段的 L_{\max} 和 L_{\min} 取值如表 1。

2.2 AOD 反演

本研究采用地统计学中的克里金插值与一级黑体像元判定准则对相关大气辐射传输模型进行改进,结合 DEM 对经过正射校正、辐射标定预处理的影像进行 AOD 反演。交叉使用 ERDAS 9.0 的

表 1 Landsat 5 各波段的 L_{\max} 和 L_{\min} 值

Table 1 Value of L_{\max} and L_{\min} of Landsat 5

波段	1	2	3	4	5	7
L_{\max}	193.0	365.0	264.0	211.0	30.2	16.5
L_{\min}	-1.52	-2.84	-1.17	-1.51	-0.37	-0.15

SML 编程、Matlab 7.0 软件编程及 ArcGIS 9.0 软件进行 AOD 反演。

2.3 TM 影像大气校正

选用 4 种常用的黑体减法 DOS(Dark Object Subtraction)模型和本研究基于 AOD 反演的大气校正模型进行对比分析。交叉使用 ERDAS 9.0 的 SML 编程与 Matlab 7.0 软件编程进行大气校正。

2.4 地形校正

地形校正模型利用像元与其相邻的 8 个像元的高程信息计算其真实地表面积。将像元中心点与相邻的 8 个像元的中心点相互相连,形成 8 个三维三角形,三角形面积之和的 1/4 可近似模拟像元相应的地表面积。通过 Matlab 7.0 软件编程,基于研究区域 1:50 000 DEM 进行计算。

2.5 TM 影像分类

TM 影像经正射校正后具有较高的定位精度,本研究利用 Google Earth 已有的西双版纳高空间分辨影像结合实地调查获取 TM 影像的地物分类标志样本,使用 ERDAS 9.0 软件的分类型模块进行最大似然法监督分类,分类后进行人机交互解译处理。

3 结果与讨论

3.1 不同时期西双版纳区域植被碳储量演变特征

利用神经网络模型,分别输入对应的 1988、1998、2008 年 3 个时期的光谱信息,输出 3 种类型的植被生物量,将 3 种植被类型的生物量进行叠加,生成总的植被生物量空间分布图。3 个时期的区域植被生物量空间分布图如图 1~图 3。

参考中国科学院西双版纳李红梅^[14]对西双版纳土地利用的分类结果,计算 3 个时期西双版纳各种植被碳储量变化规律如表 2~表 4。从 1988—2008 年期间,总体碳储量、平均碳储量与大于 25 t·hm⁻² 碳储量等级方面,3 个指标均呈现为先下降后上升趋势,但 2008 年与 1998 年 2 个时期均低于 1988 年。

西双版纳傣族自治州在 1990 年之前,植被保护一直比较好。但随着经济的发展,当地从上个世纪末即 1990 年之后,开始大量种植橡胶林,导致部分自然植被遭到破坏,而且在种植橡胶林过程中,外来入侵物种紫茎泽兰大面积蔓延,导致当地总体生物量与平均生物量都有所下降^[14]。2003 年之



图 1 西双版纳 1988 年植被生物量空间分布图

Fig.1 Spatial distribution of vegetation biomass of Xishuangbanna in 1988

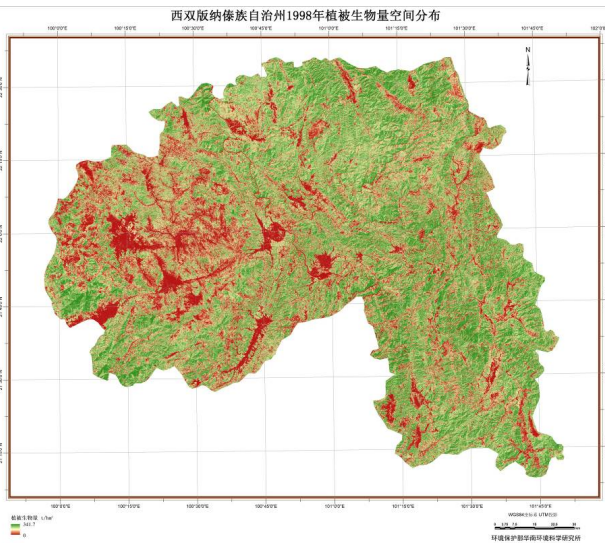


图 2 西双版纳 1998 年植被生物量空间分布图

Fig.2 Spatial distribution of vegetation biomass of Xishuangbanna in 1998

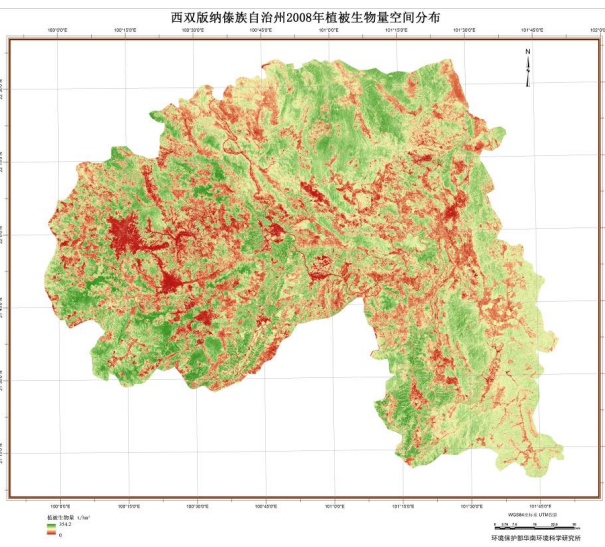


图 3 西双版纳 2008 年植被生物量空间分布图

Fig.3 Spatial distribution of vegetation biomass of Xishuangbanna in 2008

表 2 不同时期西双版纳不同植被类型面积与碳储量
Table 2 Area and carbon stock of different vegetation type of different period in Xishuangbanna

类型	1988 年		1998 年		2008 年	
	面积/hm ²	碳储量/t	面积/hm ²	碳储量/t	面积/hm ²	碳储量/t
草地	63 096	311 378.76	53 536	264 200.16	67 238	331 819.53
园地	76 480	906 288.00	233 264	2764 178.40	412 823.30	4 891 956.11
灌木林	237 088	2 342 429.44	351 808	3475 863.04	77 288.6	763 611.37
针叶林	51 624	1939 513.68	49 712	1 867 679.84	62 305.8	2 340 828.91
阔叶林	1 093 664	58 587 580.50	879 520	47 115 886.40	928 969.6	4 976 490.17
竹林	68 832	2 097 311.04	22 944	699 103.68	42 158.90	1 284 581.69

表 3 西双版纳植被不同时期总体碳储量与平均碳储量
Table 3 Total and average vegetation carbon stock of different period in Xishuangbanna

年份	1988	1998	2008
总体碳储量/t	66 184 501.40	56 186 911.50	59 377 699.05
平均碳储量/(t·hm ⁻²)	41.61	35.32	37.33

表 4 西双版纳植被碳储量分组统计结果(%)
Table 4 Vegetation carbon result of grouping statistics of different period in Xishuangbanna

年份	碳储量等级/(t·hm ⁻²)		
	B<25	25≤B<50	B≥50
1988	11.84	3.79	34.38
1998	20.07	2.32	27.62
2008	17.52	3.28	29.20

后,随着政府对自然生态保护力度的加大,原有自然植被得到较好保护的同时,人工林也生长较快,导致总体植被生物量与平均生物量都有所上升^[15]。这无疑很好的解释了本研究中碳储量的变化趋势。

3.2 西双版纳区域植被碳储量空间自相关性分析

西双版纳植被碳储量的空间自相关系数计算结果如表 5。3 个时期 2 个自相关系数的数值 Moran I 与 Greary C 都在 0~1 之间,且 Moran's I 较接近 1, Greary's C 较接近 0,即研究区植被碳储量都存在较强的正自相关性。2008 年 Moran I 最大,表明 2008 年碳储量分布的空间自相关性最强;而 1988—2008 年 Moran I 指数逐渐增大、Greary C 指数逐渐减小则表明研究区的碳储量分布格局由随机离散分布趋向于聚集分布。究其原因,主要是 1990 年之前,植被大都处于自然分布状态,所以,随机离散分布比较突出,随着橡胶林等人工植被的大面积种植,聚集分布特征逐渐得到体现。

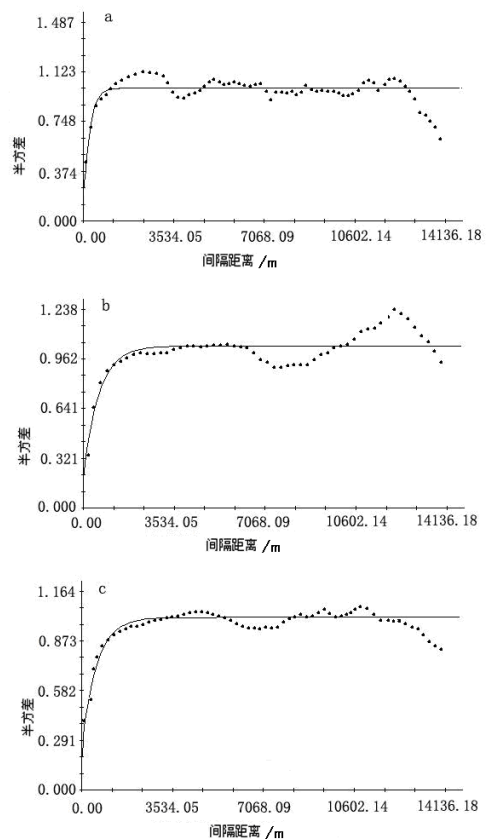
表 5 不同时期西双版纳植被碳储量分布的空间自相关系数
Table 5 Spatial autocorrelation coefficient of vegetation carbon stock of different period in Xishuangbanna

年份	Moran I	Greary C
1988	0.7236	0.2318
1998	0.7747	0.2009
2008	0.8020	0.1978

3.3 西双版纳区域植被碳储量空间异质性分析

由于原始数据的非正态分布会使半方差图产生畸变,严重时甚至会掩盖其固有的结构。因此,进行半变异函数分析之前首先对生物量数据进行正态性检验。结果表明西双版纳 3 个时期的植被碳储量数据均不符合正态分布,经对数转换后符合正态分布。然后在 GS+3.1(Gamma Design Software)软件下利用半变异函数进行空间异质性分析,由残差 RSS 选择最优拟合模型,依据模型参数,块金值、基台值、有效变程、和空间变异比等,分析空间格局的强度、尺度及空间结构的组成。

碳储量分布格局的半方差图如图 4(其中 a、b、



其中 a、b、c 分别表示 1988、1998 年与 2008 年

图 4 不同时期西双版纳植被碳储量分布格局半方差
Fig.4 Semivariance of vegetation carbon stock distribution pattern of different period in Xishuangbanna

表 6 西双版纳不同时期植被碳储量变异函数模型拟合参数

Table 6 Fitting parameter of semivariogram model of vegetation carbon stock of different period in Xishuangbanna

年份	模型类型	块金值	基台值	(块金值/基台值)%	变程/m
1988	指数模型	0.249	1.002	0.249	810
1998	指数模型	0.214	1.045	0.205	1816
2008	指数模型	0.189	1.012	0.187	1998

c 分别表示 1988、1998 年与 2008 年), 半变异函数拟合参数如表 6。3 个时期的半变异函数都可拟合成理想的理论模型, 表现为相关系数较大, 残差较小, 均属于指数模型, 形状上为有基台的平稳曲线; 自相关范围最小为 810 m, 表明对植被碳储量空间变异的确定需要在较大的尺度上进行分析。

3 个时期的基台值较为接近 (1.002~1.045), 说明 3 个时期西双版纳植被碳储量的空间分布格局异质性强度相近, 1998 年碳储量异质性略强于其他时期。3 个时期的碳储量半变函数均检测到一定的块金效应, 除估算误差外, 还可能存在一定的外部因素 (如砍伐、种植、管理、火烧) 等人为活动影响着碳储量分布的异质性, 这些效应主要体现在取样尺度 (30 m) 以内小尺度上。

从结构因素的角度来看, 空间结构比 $C/(C_0 + C)$ 表明系统变量空间相关的程度, 如果比值大于 75%, 说明系统具有强烈的空间相关性; 如果比例在 25% 与 75% 之间, 表明系统具有中等相关性; 小于 25% 说明系统空间相关性很弱。3 个时期的空间结构比均大于 75%, 属于高度相关, 表明空间自相关因素是碳储量空间异质性的主要因素, 碳储量格局内在因子 (如物种、气候、地形、土壤类型等) 起主要作用, 体现在 30 ~ 1 000 m 左右的中等尺度上。1988—2008 年碳储量随机部分引起的变异比重呈减少趋势 (24.9% ~ 18.9%)。空间结构比呈增加趋势 (75.1% ~ 81.1%), 即引起空间异质性的随机因素所占比重减少, 自相关因素 (物种、气候、地形、土壤类型等) 内在因子所起作用增强, 这种结果与近年来政府逐步重视生态保护、封山育林保持一致。

尺度是空间异质性的一个重要方面, 依赖尺度的自相关, 而不是连续的自相关是一个普遍生态现象。分析碳储量空间相关的范围 (A_0) 表明, 西双版纳森林植被碳储量表现为较大尺度的格局, 1988—2008 年相关尺度为增加趋势 (810 ~ 1998 m), 这种相关尺度与植被群落中物种和个体之间的距离有关, 而且这种相关尺度的变化可能受到阔叶林在较大尺度上具有自相关这种空间格局的影响。

4 结论

1) 不同时期西双版纳区域植被碳储量演变特

征。1988—2008 年期间, 总体碳储量与平均碳储量以及大于 25 t·hm⁻² 等级方面, 3 个指标均呈现为先下降后上升趋势, 但 2008 年与 1998 年 2 个时期均低于 1988 年。

2) 西双版纳区域植被碳储量空间自相关性分析。3 个时期中 2008 年 Moran I 最大, 表明 2008 年碳储量分布的空间自相关性最强; 而 1988—2008 年 Moran I 指数逐渐增大、Greary C 指数逐渐减小则表明研究区的碳储量分布格局由随机离散分布趋向于聚集分布。

3) 西双版纳区域植被碳储量空间异质性分析。3 个时期西双版纳植被碳储量的空间分布格局异质性强度相近, 且 1998 年碳储量异质性略强于其他时期。3 个时期的空间自相关因素是碳储量空间异质性的主要因素, 碳储量格局的内在因子 (如物种、气候、地形、土壤类型等) 起主要作用。

参考文献:

- [1] HU Y, CARLOS R M. Chinese energy and climate policies after Durban: Save the Kyoto Protocol[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(5): 3243-3250.
- [2] LUN F, LI W H, LIU Y. Complete forest carbon cycle and budget in China, 1999—2008[J]. *Forest Ecology and Management*, 2012, 264(15): 81-89.
- [3] WOODALL C W, Heath L S, Smith J E. National inventories of down and dead woody material forest carbon stocks in the United States: Challenges and opportunities[J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 256:221-228.
- [4] WOODBURY P B, SMITH J E, HEATH L S. Carbon sequestration in the U.S. forest sector from 1990 to 2010[J]. *Forest Ecology and Management*, 2007, 241:14-27.
- [5] PIAO S L, FANG J Y, CIAIS P. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China[J]. *Nature*, 2009, 458:1009-1013.
- [6] MATAMALA R, Gonzalez-MELER M A, JASTROW J D, et al. Impacts of fine root turnover on forest NPP and soil C sequestration potential[J]. *Science*, 2003, 302:1385-1387.
- [7] HOUGHTON R A. Magnitude, distribution and causes of terrestrial carbon sinks and some implications for policy[J]. *Climate Policy*, 2002, 2: 71-88.
- [8] THOMPSON A J A, KOLKAB R K. Soil Carbon Storage Estimation in a Forested Watershed using Quantitative Soil-Landscape Modeling[J]. *Soil Science Society of America*, 2005, 69:1086-1093.
- [9] YADAVA V, MALANSONB G P, BEKELEC E. Modeling

- watershed-scale sequestration of soil organic carbon for carbon credit programs[J]. *Applied Geography*, 2009, 29(4): 488-500.
- [10] SHRESTHA B M, SINGH B R. Soil and vegetation carbon pools in a mountainous watershed of Nepal[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2008, 81:179-191.
- [11] 张亮, 林文欢, 王正, 等. 广东省森林植被碳储量空间分布格局[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(6): 1295-1299.
- [12] 张修玉, 许振成, 曾凡棠, 等. 珠江三角洲森林生态系统碳密度分配及其储量动态特征[J]. *中国环境科学*, 2011, 31: 69-77.
- [13] 孙艳玲, 郭鹏. 1982—2006年华北植被覆盖变化及其与气候变化的关系[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(1): 7-12.
- [14] 李红梅, 马友鑫, 郭宗峰, 等. 西双版纳森林植被的碳储量及影响因素分析[J]. *福建林学院学报*, 2005, 25(4):368-372.
- [15] 张修玉, 许振成, 王俊能, 等. 西双版纳森林植被碳储量动态与增汇潜力研究[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(3): 397-402.

Spatial-temporal evolution characteristic of regional vegetation carbon stock in Xishuangbanna

ZHANG Xiuyu, SONG Weiwei*, XU Zhencheng, ZHANG Hengjun, ZENG Fantang

South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655, China

Abstract: To evaluate Spatial-temporal evolution characteristic of regional vegetation carbon stock is of great significance to terrestrial carbon cycle. This paper studied spatial-temporal evolution characteristic of regional vegetation carbon stock of Xishuangbanna in the year of 1988, 1998 and 2008, and the results showed that, 1) in the period of 1988—2008, total vegetation carbon stock and average carbon stock of Xishuangbanna were all from descend to ascend, while 2008 and 1998 were all lower than that of 1988, in which total vegetation carbon stock and average carbon stock were as high as 66 184 501.40 t and the 41.61 t·hm⁻² respectively. 2) The three period two autocorrelation coefficients of Moran I and Geary C were at 0-1, and distribution pattern of carbon stock presented the tendency from stochastic discrete distribution to aggregated distribution. Spatial autocorrelation of carbon stock distribution in 2008 was the highest during the three period, 3) Strength of spatial heterogeneity of vegetation carbon stock of the three period in Xishuangbanna was as near as dammit(1.002-1.045), and heterogeneity of vegetation carbon stock in 1998 was slightly stronger than that of the other periods. Therefore, the driving mechanism of Xishuangbanna region vegetation carbon storage of temporal and spatial evolution was mainly vegetation fragmentation caused by rubber forest plantations planted in large area of and invasive species such as *Eupatorium adenophorum*.

Key words: Xishuangbanna; vegetation carbon stock; spatial-temporal evolution