

抚仙湖流域植被覆盖的 时空演变规律

丁文荣*, 何文静, 彭晓红

云南师范大学地理学部, 云南 昆明

收稿日期: 2022年6月28日; 录用日期: 2022年8月1日; 发布日期: 2022年8月11日

摘要

为揭示上世纪70年代以来抚仙湖流域内植被覆盖的时空演变,以抚仙湖流域1988年~2018年的长序列旱季遥感影像为基础,采用“3S”技术、Sen's趋势分析、Mann-Kendall非参数检验和小波分析等方法,研究了流域内植被覆盖的时空演变规律,并分析了其影响因素。结果显示:1) 抚仙湖流域植被指数年际间波动较大,以0.012/10a的速率上升,2001年流域内植被覆盖发生了突变,5年为植被指数周期变化的第一主周期。2) 流域内植被覆盖增加区、减少区的面积为615.93 km²、218.85 km²,分别占陆地面积的73.78%、26.22%,增加区集中在山坡而减少区则集中于城镇建设区。3) 抚仙湖流域植被覆盖与海拔间存在正相关关系,1988年~2018年核心保护区、开发区、控制开发区和禁止开发区的变化值分别为0.016、-0.019、0.085和0.035;4) 流域内植被覆盖与地面坡度间表现为正相关关系,1988年至2018年[8°~15°]坡度范围内植被覆盖最高且增加了0.033,而[0°~8°]坡度范围内覆盖度最低且减少了0.004。本研究表明,抚仙湖流域内植被覆盖逐步提升,但空间变化上存在差异,这是人类活动的结果。

关键词

植被覆盖, 时间序列, 演变规律, 气候变化, 人类活动, 抚仙湖流域

Temporal and Spatial Evolution of Vegetation Cover in Fuxian Lake Basin, Yunnan Province

Wenrong Ding*, Wenjing He, Xiaohong Peng

Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

Received: Jun. 28th, 2022; accepted: Aug. 1st, 2022; published: Aug. 11th, 2022

*通讯作者。

Abstract

Objectives: In order to reveal the temporal and spatial evolution law of vegetation cover in Fuxian Lake Basin since the strengthening of protection and the implementation of overall protection in the 1970s. **Methods:** Based on the long-series dry season remote sensing images of Fuxian Lake Basin from 1988 to 2018, the temporal and spatial evolution law of vegetation cover in Fuxian Lake Basin is studied by using “3S” technology, Sen’s trend analysis, Mann Kendall nonparametric test and wavelet analysis. **Results:** The results showed that: 1) The vegetation index of Fuxian Lake Basin fluctuated greatly between years, the vegetation cover increased at a rate of 0.012/10a, in 2001 there is a sudden change of vegetation coverage in the basin, and 5-year is the first main period of vegetation index. 2) The areas of increased and decreased vegetation coverage in the basin are 615.93 km² and 218.85 km², accounting for 73.78% and 26.22% of the land area, respectively; the increased areas are concentrated in the hillside while the decreased areas are concentrated in the urban construction area. 3) There is a positive correlation between vegetation coverage and altitude in Fuxian Lake Basin, and the core protected areas, development areas, and development areas in 1988~2018. The change values of the controlled development zone and the forbidden development zone are 0.016, -0.019, 0.085 and 0.035, respectively. 4) There is a positive correlation between the vegetation coverage and the ground slope in the drainage basin. From 1988 to 2018, the vegetation coverage is the highest and increased by 0.033 in the [8°~15°] slope range, while the coverage is the lowest and decreased by 0.004 in the [0°~8°] slope range. **Conclusions:** This study shows that the vegetation cover in Fuxian Lake Basin has gradually increased, but there are differences in spatial change, which is the result of human activities.

Keywords

Vegetation Cover, Time Series, Evolution Regulation, Climate Change, Human Activity, Fuxian Lake Basin

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

植被是陆地生态系统的重要组成要素，植被覆盖度能够真实客观地反映植物进行光合作用面积的大小，以及植被生长的茂盛程度，表征了植被的不同生长状态和生长态势[1]。气候变化和人类活动是植被覆盖变化的重要驱动因素，自 20 世纪 80 年代以来，通过分析区域植被覆盖度演变进而研究气候变化和人类活动规律成为了重要的研究方法[2] [3] [4]。植被指数是地表植被覆盖的有效度量指标，在目前已经定义的多种植被指数中，归一化植被指数(NDVI)因其客观性、精确性和连续性而被广泛使用[5]。

抚仙湖面积 216.6 km²、平均水深 95.2 m、蓄水量 206 × 108 m³，占据我国天然淡水湖泊 I 类淡水总量的 91.4%，是珠江源区第一大湖，也是我国最大的深水型淡水湖泊和重要的战略备用水源地。由此，保护抚仙湖成为了国家政策制定和科学研究的焦点问题。近年来，在遥感和地理信息技术的支持下，分别从局部乃至整个流域的土地利用、植被动态等方面开展了多角度的研究工作。首先，从土地利用方面来看，发现抚仙湖流域主要土地利用类型为耕地、林地、水域和未利用土地，除水域外其余各类土地面积均发生了较大变化，未利用土地不断减少，耕地先减少后增加，其余 5 种地类呈现逐年增加的态势[6] [7]

[8]。人类活动对土地利用格局的形成影响强烈，人口增加、经济发展和城市化是研究区土地利用变化、退化的重要因素[9] [10]。其次，从植被动态研究来看，抚仙湖流域自然植被集中分布的坡度区间主要在 $2^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 之间，旱地集中分布在海拔 2100 m 以下，不同植被覆盖区面积与坡度间存在密切关系，年际间植被覆盖度有显著差异[11] [12] [13]。然而，自上世纪 70 年代加大保护力度、实施整体保护以来，流域内植被覆盖的时空演变规律仍是亟需解决的难题。

自 2010 年开始，课题组开始关注本流域生态环境演变特征，系统获得了流域内自然地理及社会经济数据，为研究植被覆盖的时空演变奠定了了基础。鉴此，本研究以长序列卫星影像资料为基础，从时空变化角度分析抚仙湖流域植被覆盖动态规律，不仅有助于把握历史时期流域内的植被恢复效果，同时也将为《抚仙湖保护和开发利用总体规划(2018~2035)》的实施及流域内社会经济持续发展提供直接的科学支撑。

2. 研究区与数据

2.1. 研究区概况

抚仙湖流域位于云南高原中部($102^{\circ}39'\sim 103^{\circ}06'E$, $24^{\circ}13'N\sim 24^{\circ}47'N$)，面积 1084 km²，跨越了玉溪市的澄江、江川、华宁 3 县市，其中抚仙湖及其上游湖泊星云湖水面积分别为 216.6 km²、34.7 km²，陆地面积为 832.7 km²。流域内气候属亚热带高原季风气候，年平均气温 $15.6^{\circ}C\sim 23.8^{\circ}C$ ，极端最高气温 $33.7^{\circ}C$ ，极端最低气温 $-3.9^{\circ}C$ 。年降雨量 960~1250 mm，相对湿度 76%，全年日照总时数 2200 h， $\geq 10^{\circ}C$ 的活动积温 5200 $^{\circ}C$ 。土壤类型以红壤为主，地带性植被类型为亚热带常绿阔叶林，自然植被分布面积较大。

2.2. 数据来源与处理

本研究主要数据源为美国地质勘探局(<https://glovis.usgs.gov/>)网站获取的 Landsat4/5 TM、Landsat7 ETM+和 Landsat8 OLI 的 30 m 分辨率卫星数字产品，以云量 < 5%为标准筛选出 1988~2018 年旱季的遥感影像序列。在 ENVI/IDL 5.0 软件支持下完成影像的图像增强、辐射定标和大气校正，并进行植被指数 NDVI 值计算。然后在 ArcInfo Desktop10.3 中裁剪出研究区范围，提取 NDVI 属性值并分析时空变化。

流域内澄江气象站年均气温、年降水量数据来源于国家气象信息中心(<http://data.cma.cn>)，使用前对数据进行了统一的质量检验，包括界限值检验、气候极值检验和内部一致性分析。

2.3. 研究方法

时间序列分析是时空演变分析中的重点，本研究中植被覆盖的时间演变趋势分析采用了 Sen's 斜率法，该方法具有高效剔除干扰噪声的优良特性而被广泛采用。计算过程中，对于植被覆盖时间序列 $x_i = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ，Sen's 斜率的计算公式为[14]：

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right), \quad \forall j > i \quad (1)$$

式(1)中： β 为 Sen's 斜率，正值代表分析序列呈上升趋势，反之为减少趋势， $\beta * 10$ 为植被覆盖数据每 10a 的变化量；Median 为中值函数。

由于 Sen's 斜率法无法完成植被覆盖序列变化趋势的显著性检验和突变分析，故变化趋势的显著性判断、突变年份确定采用了非参数 Mann-Kendall 秩次检验法[15]。构造时间序列 X ，具 n 个样本量：

$$S_k = \sum_{i=0}^k r_i, \quad r_i = \begin{cases} 1, & x_i > x_j, j = 1, 2, \dots, i \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

秩序列 S_k 是第 i 时刻数值大于 j 时刻数值个数的累计数。时间序列随机独立的情况下, 统计量 UF_k 为:

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{Var(S_k)}}, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中, $E(S_k)$ 为均值、 $Var(S_k)$ 为方差。

X_1, X_2, \dots, X_n 相互独立, 相同连续分布, 计算公式如下:

$$E(S_k) = \frac{n(n-1)}{4}, \quad Var(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (4)$$

UF 和 UB 是按照标准正态分布的算法, 将时间序列 X 分布按照顺序和逆序排列之后得到的统计量。若 UF 值 > 0 , 呈上升趋势, 反之呈下降趋势。当 UF 超过的临界值 ± 1.96 时, 则通过了 95% 的置信度检验, 呈显著上升或下降趋势, 超过临界线的范围即为突变时间区域。若 UF 和 UB 在临界线之间出现交点, 交点所在时刻即为突变时刻。该点即为突变点。

而植被指数的多时间尺度特征则采用了复值 Morlet 小波分析方法[16]。该方法的基本数学思想是用一簇函数去表示或逼近一个信号或函数, 它通过一个基本小波函数的平移和伸缩得到。对于连续函数 $f(x)$ ($f(x) \in L^2(R)$), 其连续小波变换公式为:

$$W_{f(a,b)} = \langle f(x), \psi_{(a,b)}(x) \rangle = |a|^{-1/2} \int_{\mathbb{R}} f(x) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dx \quad (5)$$

式中, $W_{f(a,b)}$ 为连续小波变换系数, $\bar{\psi}(x)$ 为 $\psi(x)$ 的复共轭函数, a 反映的是函数的尺度, 为尺度因子, $a \in \mathbb{R}$ 且 $a \neq 0$ 。它不仅影响窗口在频率轴上的位置, 也影响窗口的形状, 而 b 反映的是它沿时间轴的平移位置以及相位延迟, 为时间平移因子, 表示与频率相关的伸缩。

3. 结果与分析

3.1. 植被指数时间演变

自 20 世纪 70 年代以来, 抚仙湖流域的保护治理逐步得到强化, 尤其是“九五”以来, 对抚仙湖的保护治理成为了国家和地方的重要任务。图 1(a) 为抚仙湖流域 1988~2018 年干季植被 NDVI 的变化趋势。从图中可以看出, 植被指数在年际间波动较大, 1998 年达 0.315 而 1995 年仅为 0.161, 极差为 0.154, 变差系数 Cv 值为 0.177。Sen's 斜率的 β 值为 0.0012, 表明流域内植被盖度呈现出上升的趋势, 其速率为 0.012/10a, 这是强化流域整体保护的效果。

从抚仙湖流域植被 NDVI 的 Mann-Kendall 检验的统计值来看(图 1(b)), 研究时段内正向 UF 曲线和逆向 UB 曲线波动变化, 两者间存在 9 个明显的交叉点, 表明流域内植被覆盖可能存在 9 次突变过程。此外, 从图 1(b) 中还可以看出, 在 2001 年前两者虽然有交叉, 但是 UB 曲线主要位于 UF 曲线之上, 而 2001 年后则 UB 曲线主要位于 UF 之上, 加之 2001 年的交叉点位于临界值 $-1.96 \sim 1.96$ 之间, 故可以确定 2001 年为流域内植被覆盖发生突变的年份。

图 2(a) 为抚仙湖流域植被 NDVI 序列的复值 Morlet 小波系数实部。从图中可以看出, 小波系数实部在不同时间尺度上的震荡差异显著, 在 5 年和 20 年时间尺度上周期性波动规律较为明显, 这在小波系数模值(图 2(b)) 中也可以得出同样的结论。在植被 NDVI 时序的小波方差图中(图略) 存在 2 个较为明显的峰值, 依次对应着 5 年和 20 年的时间尺度。其中, 最大峰值对应着 5 年的时间尺度, 表明 5 年左右的周期变化最强, 为植被变化的第一主周期, 20 年时间尺度为第二主周期。

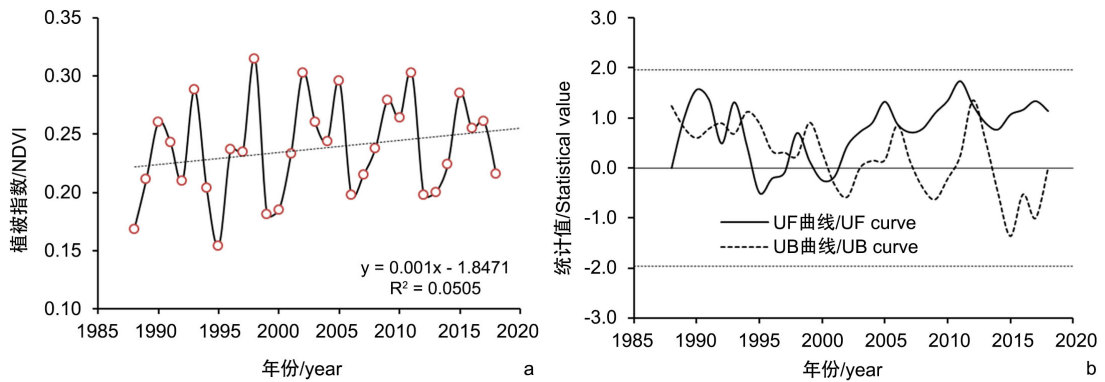


Figure 1. NDVI change trend of vegetation in Fuxian Lake Basin (a) and Mann-Kendall test (b)
图 1. 抚仙湖流域植被 NDVI 变化趋势(a)及 Mann-Kendall 检验(b)

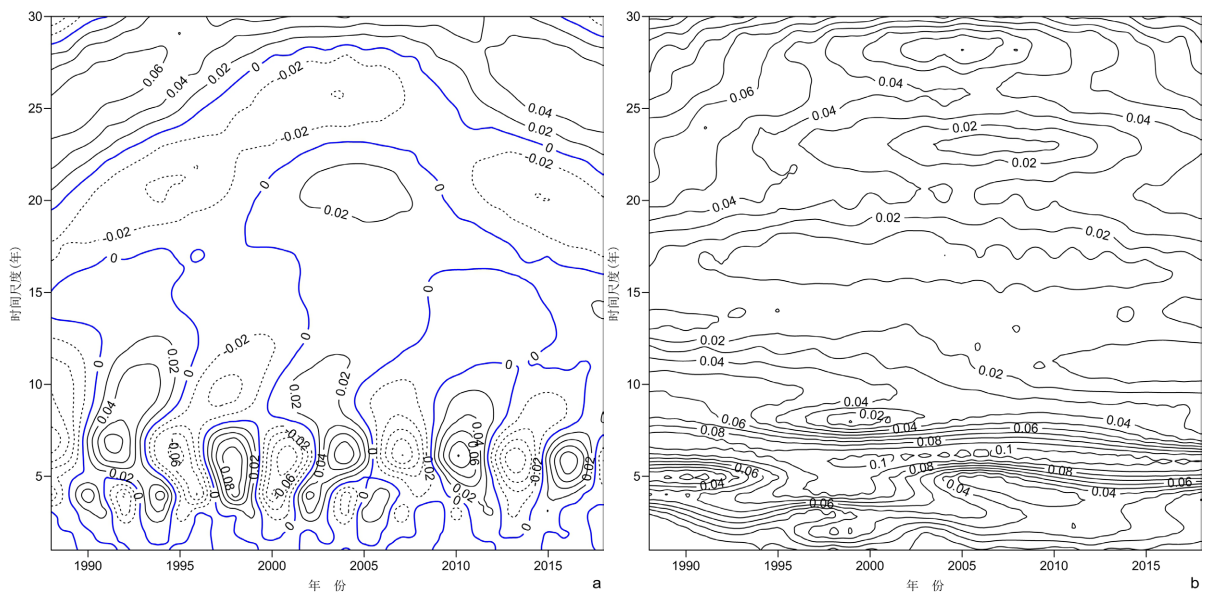


Figure 2. Real part (a) and modulus (b) of Morlet wavelet coefficients of NDVI series
图 2. 抚仙湖流域植被 NDVI 序列的 Morlet 小波系数实部(a)及模(b)

3.2. 植被覆盖空间变化

抚仙湖流域植被空间覆盖度差异较大,从图 3(a)中可以看出,以抚仙湖、星云湖水面为中心,植被的分布具有环状分布特征,流域北侧梁王山、西侧谷堆山、南侧狮子山和东侧大黑山等山脉上植被覆盖度较高,而湖面周边,尤其是澄江市、江川市驻地,植被覆盖度在整个流域中最低。从 1988~2018 年流域植被覆盖的空间变化来看(图 3(b)),植被覆盖增加区、减少区的面积为 615.93 km²、218.85 km²,分别占流域陆地面积的 73.78%、26.22%。此外,从图 3(b)也可以看出,研究时段内,植被覆盖增加的区域为自山脚至山岭的过渡区,而减少的区域则主要发生在城镇建设区,即澄江、江川市政府驻地及澄江市的龙街镇一带。

对于植被覆盖与海拔的关系,从图 4(a)中可以看出,两者间存在正相关关系,即随着海拔的升高,植被覆盖总体呈现上升的趋势。参照《抚仙湖流域禁止开发控制区规划(2006~2020)》,将抚仙湖流域环湖 110 m 范围内即从湖面至海拔 1735 m 划为核心保护区,1735~1770 m 划为开发区,1770~1980 m 和 1980~2820 m 分别划为控制开发区和禁止开发区。通过提取 1988 年~2018 年各海拔范围内植被 NDVI 变

化值后发现，核心保护区、开发区、控制开发区和禁止开发区的变化值分别为 0.016、-0.019、0.085 和 0.035，即除了开发区外，其余陆地范围的植被盖度都呈现出增加的趋势，其中控制开发区范围内植被 NDVI 增加最为明显。

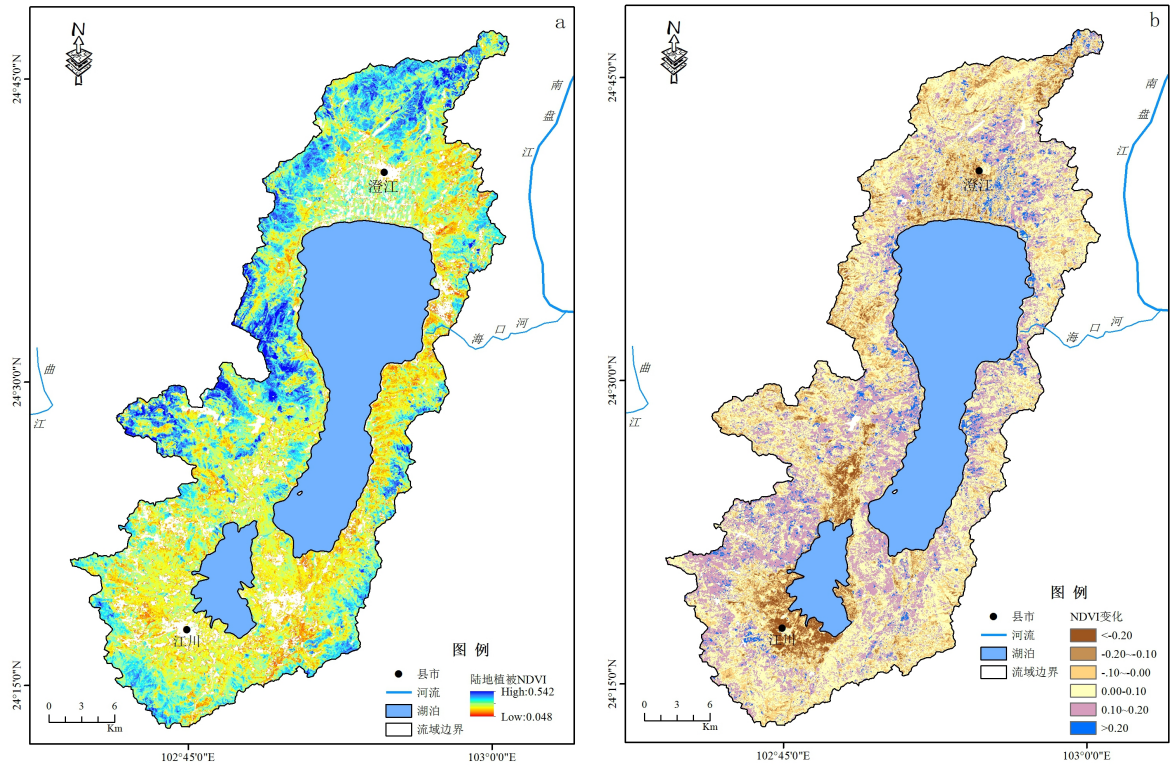


Figure 3. Spatial distribution (a) and change (b) of NDVI in Fuxian Lake Basin
图 3. 抚仙湖流域植被 NDVI 空间分布(a)及变化(b)

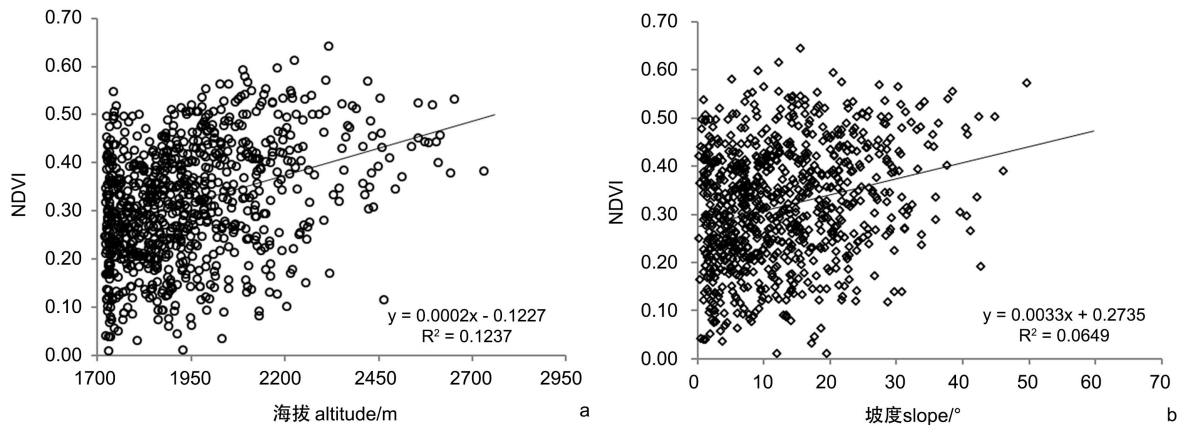


Figure 4. Relationship between NDVI and elevation (a) and slope (b) in Fuxian Lake Basin
图 4. 抚仙湖流域植被 NDVI 与海拔(a)及坡度(b)的关系

从植被覆盖与地面坡度的关系来看，在图 4(b)中可以看出，整体上两者间同样表现为正相关关系，随着坡度的增加，植被覆盖呈现上升的趋势。为分析不同坡度植被覆盖的变化特征，将抚仙湖流域陆地地区划分为自[0°~8°]至[35°~90°]的 5 个等级，然后提取不同坡度植被覆盖均值及变化情况，结果见表 1。

Table 1. NDVI characteristics of vegetation with different slopes in Fuxian lake basin from 1998 to 2018
表 1. 抚仙湖流域 1998~2018 年不同坡度植被 NDVI 变化特征

	坡度 Slopes				
	[0°~8°)	[8°~15°)	[15°~25°)	[25°~35°)	[35°~90°)
面积 Area/km ²	327.87	229.58	190.87	65.00	19.38
1988 年 NDVI	0.174	0.205	0.224	0.232	0.226
2018 年 NDVI	0.207	0.214	0.226	0.228	0.226
变化状况 Change status	0.033	0.009	0.002	-0.004	0

从表 1 中可以清晰地看出, 抚仙湖流域坡度在[0°~8°)的陆地面积达 327.87 km², 占总陆地面积的 39.37%, 而坡度在[35°~90°)的陆地面积 19.38 km², 仅占流域内陆地面积的 2.33%。不同坡度陆域植被覆盖的差别不明显, 无论是 1988 年还是 2018 年, 均为[8°~15°)坡度范围内植被覆盖最高而[0°~8°)范围内覆盖度最低。统计各等级坡度内植被覆盖的变化后发现, 自 1988 年至 2018 年, [8°~15°)坡度范围内植被覆盖增加了 0.033, 而[0°~8°)坡度范围内则减少了 0.004。

4. 讨论

流域植被覆盖的时空变化影响因素众多, 可以梳理为自然和人为影响方面。短时间尺度上自然因素特别是气温与降水变化是导致植被覆盖变化的重要因子, 而长时间尺度上人类活动尤其是土地利用转型对植被覆盖的影响却更明显[17]。

4.1. 气候因子与植被时间演变

已有研究表明, 气候对植被覆盖的影响主要表现为对植被生长期年内韵律的控制方面[18]。图 5(a)为抚仙湖流域控制站澄江 1988~2018 年年均温变化图, 由图可知, 近 30 年来流域年均气温为 16.8°C, 波动于 16.1°C~17.9°C 之间, 研究时段内气温变化趋势不明显。年均降雨量为 944.5 mm, 自 1988 年以来, 降水量呈现出微弱减少的趋势, 其中最大值为 1994 年达 1362.2 mm, 最小值为 2011 年仅为 550.6 mm (图 5(b))。流域植被覆盖与年均气温、年降水量的变化趋势存在明显差异, 表明植被覆盖长期的增加趋势并非气候因素直接导致。

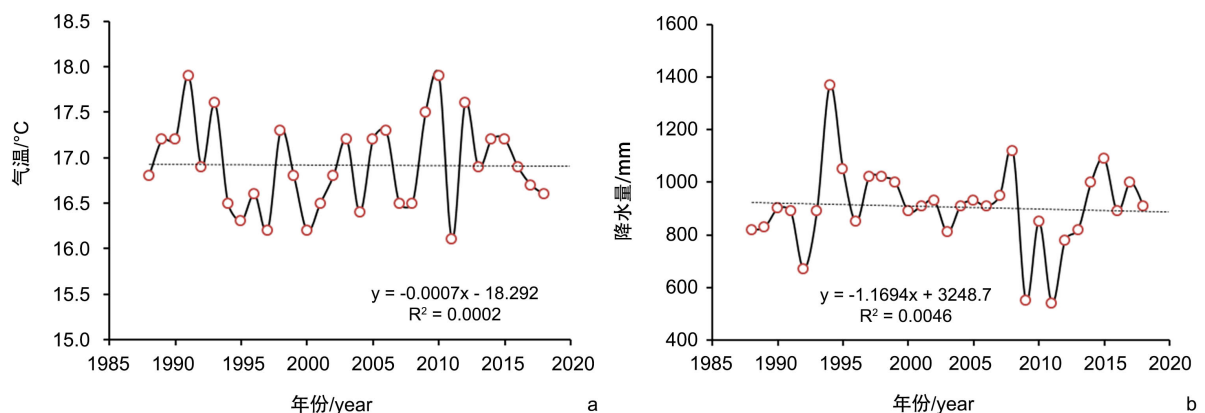


Figure 5. Variation characteristics of temperature (a) and precipitation (b) at Chengjiang station

图 5. 抚仙湖流域澄江站气温(a)及降水(b)变化特征

此外,利用 Morlet 小波进行澄江站 1988~2018 年平均气温、年降水量数据变换,提取小波系数实部后可知:研究时段内年均气温在 5、25 年时间尺度上的周期性最显著,振荡具有全域性特征(图 6(a)),而年降雨量在 5、20 年时间尺度上最强烈,具有全域性振荡特征(图 6(b))。与同期流域植被覆盖的周期性进行对比后可以确定,气候因素尤其是年降水量的变化是植被覆盖产生周期性波动的原因。

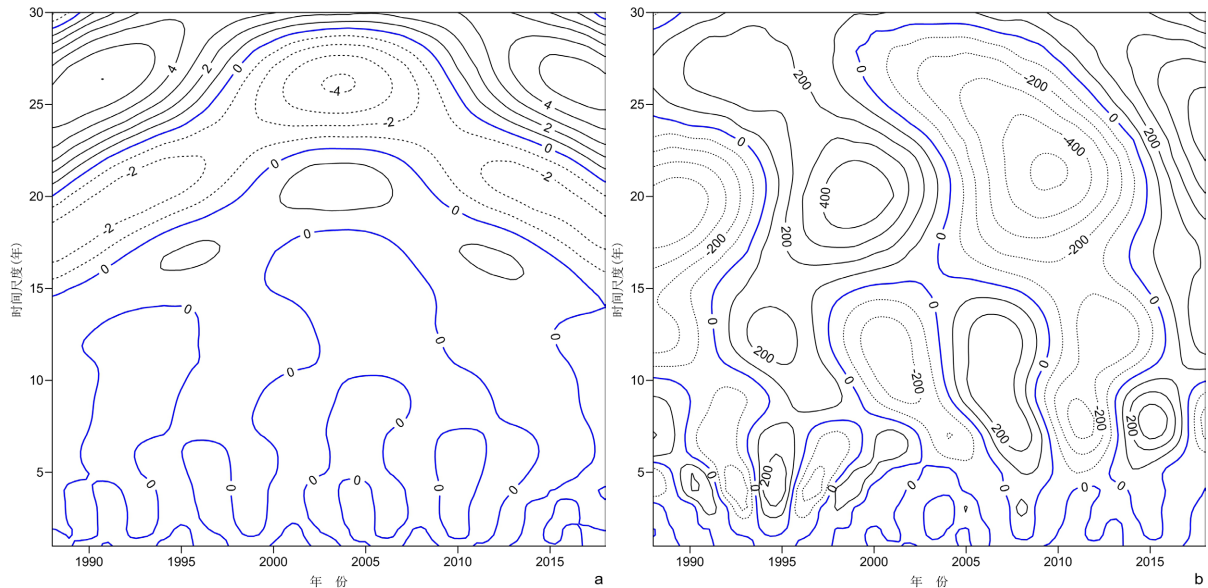


Figure 6. Real part of Morlet wavelet coefficients of temperature (a) and precipitation (b) in Fuxian Lake Basin

图 6. 抚仙湖流域气温(a)与降水(b)的 Morlet 小波系数实部

4.2. 人类活动与植被空间分布

人类活动影响日益剧烈的今天,植被覆盖变化深刻地反映了人类活动的特征。人类活动对植被的影响分为正面作用(如江河源石漠化区治理等生态工程)和负面影响(如城市扩展、森林破坏等),其中退耕还林还草工程对区域生态环境的恢复和改善起到了巨大作用[19]。对于抚仙湖流域,早在 1993 年云南省就出台了《云南省抚仙湖管理条例》,随后于 2002 年全面启动实施国家退耕还林工程,2007 年《云南省抚仙湖保护条例》正式施行,抚仙湖也由依法管理步入了依法保护阶段。2012 年,澄江县被列为国家石漠化综合治理试点县。这一系列水源地管理保护、石漠化综合治理工程的系统实施,极大促进了流域植被的恢复。至今,澄江县已累计完成人工造林 31.3 km²、封山育林 78.4 km²。正是这些工程的实施,使流域植被得以恢复,植被覆盖逐年增加。

5. 结论与展望

本研究探究了抚仙湖流域植被覆盖的时空演变规律及其影响因素。研究发现:

- 1) 1988~2018 年抚仙湖流域植被指数以 0.012/10a 的速率上升,2001 年为流域内植被覆盖发生了突变,植被指数存在 5 年和 20 年时间尺度上的周期性波动,其中 5 年为时间尺度变化的第一主周期。
- 2) 植被覆盖增加区、减少区的面积分别为 615.93 km²、218.85 km²,增加区集中在山坡,而减少的区域则主要发生在城镇建设区。
- 3) 植被覆盖与海拔、坡度间存在正相关关系,随着海拔的升高植被覆盖总体呈现上升的趋势。
- 4) 植被覆盖周期性变化主要是降水变化的控制,而趋势变化则是人为活动的结果。

本研究成果将为《抚仙湖保护和开发利用总体规划(2018~2035)》的实施及珠江源区水源地管理提供

直接的科学支撑。由于数据局限,本研究对植被覆盖时空变化的影响因素探讨局限在定性分析对比,下一步可以通过建立量化模型,定量揭示不同要素的贡献率。

基金项目

国家自然科学基金项目(41761105)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (41761105)。

参考文献

- [1] 张琨, 吕一河, 傅伯杰, 尹礼唱, 于丹丹. 黄土高原植被覆盖变化对生态系统服务影响及其阈值[J]. 地理学报, 2020, 75(5): 949-960.
- [2] Nemani, R., Keeling, C.D., Hashimoto, H., Willian, M.J., Stephen, C.P., Compton, J.T., Ranga, B.M. and Steven, W.R. (2003) Climate-Driven Increases in Global Terrestrial Net Primary Production from 1982 to 1999. *Sciences*, **300**, 1560-1563. <https://doi.org/10.1126/science.1082750>
- [3] Peng, S.S., Piao, S.L., Philippe, C., Myneni, R.B., Chen, A.P., Chevallier, F.D.R., Dolman, A.J., Janssens, I.A., Peñuelas, J., Zhang, G.X., Vicca, S., Wan, S.Q., Wang, S.P. and Zeng, H. (2013) Asymmetric Effects of Daytime and Night-Time Warming on Northern Hemisphere Vegetation. *Nature*, **501**, 88-92. <https://doi.org/10.1038/nature12434>
- [4] 焦珂伟, 高江波, 吴绍洪, 侯文娟. 植被活动对气候变化的响应过程研究进展[J]. 生态学报, 2018, 38(6): 2229-2238.
- [5] 丁玥, 阿布都热合曼·哈力克, 陈香月, 木卡达斯·阿不都热合曼. 和田地区植被覆盖变化及气候因子驱动分析[J]. 生态学报, 2020, 40(4): 1258-1268.
- [6] 尹娟, 柳德江, 赵敏慧, 阳利永. 2000-2014年抚仙湖流域土地利用动态变化研究[J]. 中国农学通报, 2018, 34(4): 101-107.
- [7] 刘娇, 张超, 余哲修, 陈都都. 基于 Landsat 影像的抚仙湖流域土地利用变化及预测研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2020, 40(3): 131-138.
- [8] 赵筱青, 苗培培, 普军伟, 李思楠, 王茜, 谭琨, 卢飞飞, 易琦. 抚仙湖流域土地利用变化及其生态系统生产总值影响[J]. 水土保持研究, 2020, 27(2): 291-299.
- [9] 李思楠, 赵筱青, 谭琨, 苗培培, 普军伟, 卢飞飞, 王茜. 基于 GIS 的抚仙湖流域土地利用时空变化研究[J]. 人民长江, 2019, 50(6): 63-69+87.
- [10] 杨超, 王金亮, 李石华, 王丽霞, 马骊驰, 潘继亚, 高帆, 刘广杰. 抚仙湖流域土地退化动态遥感监测研究[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(2): 388-396.
- [11] 孔维琳, 王余舟, 向伶, 王崇云, 和兆荣, 杨树华. 抚仙湖流域植被景观格局分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2012, 34(4): 468-475.
- [12] 李石华, 金宝轩, 周峻松, 王金亮, 彭双云. 抚仙湖流域植被覆盖度时空分异及其与坡度的关系[J]. 地域研究与开发, 2017, 36(3): 165-170.
- [13] 杨海兰, 柳德江, 王泉, 吴利, 王涛. 抚仙湖绿充风景区植被覆盖变化研究[J]. 测绘地理信息, 2019, 44(5): 29-32.
- [14] Sen, P.K. (1968) Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, **39**, 1379-1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- [15] Mann, H.B. (1945) Nonparametric Test against Trend. *Econometrica*, **13**, 245-259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- [16] 王文圣, 丁晶, 李跃清. 水文小波分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [17] 安如, 徐晓峰, 杨仁敏. 三江源区植被 NDVI 对区域气候的时滞效应分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2014, 37(2): 1-5.
- [18] Zhang, J., Fang, S.B. and Liu, H.H. (2022) Estimation of Alpine Grassland Above-Ground Biomass and Its Response to Climate on the Qinghai-Tibet Plateau during 2001 to 2019. *Global Ecology and Conservation*, **35**, Article ID: e02065. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2022.e02065>
- [19] 刘宪锋, 潘耀忠, 朱秀芳, 李双双. 2000-2014年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因[J]. 地理学报, 2015, 70(5): 705-716.