

DOI: 10.5846/stxb201407101407

姚平, 喻庆国, 陈先刚, 杨宇明. 气候变化对滇西北碧塔海流域景观演变的影响. 生态学报, 2016, 36(5): - .

Yao P, Yu Q G, Chen X G, Yang Y M. Landscape evolution characteristics of the Bita Lake watershed over northwestern Yunnan province under the background of climate changes. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(5): - .

## 气候变化对滇西北碧塔海流域景观演变的影响\*

姚平<sup>1</sup>, 喻庆国<sup>2</sup>, 陈先刚<sup>1,\*</sup>, 杨宇明<sup>3</sup>

1 西南林业大学环境科学与工程学院, 昆明 650224

2 西南林业大学/国家高原湿地研究中心, 昆明 650224

3 云南省林业科学院, 昆明 650201

**摘要:** 气候变化是景观演变的重要驱动力, 高海拔地带生态系统对气候变化的响应较为敏感和迅速。选择地处青藏高原东南缘, 受人为干扰相对较小的碧塔海流域为研究对象, 利用 1958—2011 年气象资料以及 1955、1974、1981、1994、2005 和 2011 年 6 个年代的景观类型面积, 采用气候倾向率估计、Mann-Kendall 突变检验方法和 Pearson 相关系数等统计方法, 研究了香格里拉县气候变化背景下碧塔海流域景观演变特征。结果表明: (1) 1958—2011 年来, 滇西北香格里拉县多年平均气温为 5.9℃, 多年平均活动积温为 2146.1℃, 多年平均年极端高温为 24.3℃, 多年平均年极端低温为 -18.6℃, 多年平均降水量为 631.7mm。气温、活动积温和年极端低温呈显著上升趋势, 近 54 年来气温平均上升了 1.94℃, 升温速率远高于云南和全国水平。年极端高温和降水量呈增加趋势, 但增加不明显。滇西北高原碧塔海流域背景气候呈现显著的变暖趋势。(2) 1955—2011 年来, 碧塔海流域自然景观演变规律为草甸和灌草丛向有林地演变, 气温、活动积温和年极端低温升高趋势与有林地景观面积的增加趋势大体一致, 与草甸和灌草丛变化趋势相反。(3) 气温、活动积温和年极端低温与碧塔海流域草甸、灌草丛和有林地的景观面积变化具有显著的相关性, 是流域景观演变的主导气候要素, 在草甸和灌草丛演变成有林地的过程中发挥着重要作用。极端高温和降水量对流域景观演变的作用相对较弱。

**关键词:** 气候变化; 碧塔海流域; 景观; 演变

## Landscape evolution characteristics of the Bita Lake watershed over northwestern Yunnan province under the background of climate changes

YAO Ping<sup>1</sup>, YU Qingguo<sup>2</sup>, CHEN Xiangang<sup>1,\*</sup>, YANG Yuming<sup>3</sup>

1 Department of Environmental Science and Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

2 Southwest Forestry University, National Plateau Wetlands Research Center, Kunming 650224, China

3 Yunnan Academy of Forestry, Kunming 650201, China

**Abstract:** Climate change is one of the major driving forces for landscape evolution. The ecosystem in high altitude area has the most sensitive and fast response to climate change. In this study, we focused on the Bita lake watershed of northwestern Yunnan located in the Shangri-la county and in the southeast margin of Three Rivers Parallel Area over Qinghai-Tibet plateau mountains. The study area with small anthropogenic interference, is the ideal area to identify the coupling relationship between climate change and landscape change. Based on the meteorological data from 1958 to 2011, and the landscape area indices of class level in the years of 1955, 1974, 1981, 1994, 2005, 2011, the characteristics of landscape evolution over the Bita lake watershed under the background of climate change were studied using climate tendency estimation method, Mann-Kendall mutation method and Pearson correlation coefficient method. The results were as follow:

**基金项目:** 云南省优势特色重点学科(生态学); 国家自然科学基金(U0933601); 云南玉溪森林生态系统定位研究站项目

**收稿日期:** 2014-07-10; **网络出版日期:** 2015- -

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ch-x-g@vip.sina.com

(1) The values of mean annual temperature, mean annual active accumulated temperature, mean annual extreme high temperature, mean annual extreme low temperature, average annual precipitation were 5.9°C, 2146.1°C, 24.3°C, -18.6°C and 631.7mm from 1958 to 2011, respectively. The temperature, active accumulated temperature and annual extreme low temperature increased significantly in the Shangri-La of northwestern Yunnan, while the increases of annual extreme high temperature and precipitation weren't significant. The average temperature was elevated about 1.94 °C from 1958 to 2011, and the increasing rate was much higher than that in Yunnan and China. Active accumulated temperature and annual extreme low temperature were shown to be significant warming mutation trend with an increase of 167.1°C and 3.4°C after the mutation in the years of 1988 and 1986, respectively. (2) The mechanism of landscape evolution was in a succession from meadow and scrub-grassland to forestland in the Bita lake watershed from 1955 to 2011. The rising trends of temperature, active accumulated temperature and annual extreme low temperature were consistent with the increasing trend of forestland landscape area, but were contrary to the decreasing trend of meadow and scrub-grassland landscape area. (3) Significant correlation was found between temperature, active accumulated temperature, annual extreme low temperature and natural landscape area of meadow, scrub-grassland and forestland from 1955 to 2011. When temperature, active accumulated temperature and annual extreme low temperature were increased quickly, the area of meadow and scrub-grassland was decreased, whereas the area of forestland was increased. Temperature, active accumulated temperature and annual extreme low temperature were the main driving factors of landscape evolution over the Bita lake watershed of northwestern Yunnan, while the ecological effects of annual extreme high temperature and precipitation on landscape evolution were relatively lesser. Climate warming was conducive to the growth of the watershed dominant tree, which played an important role in formation of a succession from meadow and irrigation grass to forestland in Bita lake watershed.

**Key Words:** climate change; the Bita lake watershed; landscape; evolution

据政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次报告指出,近 132 年(1880—2012 年)来地表平均温度增加了 0.85°C<sup>[1]</sup>,中国近百年来气候也发生了与全球气候变化总趋势基本一致的明显变化<sup>[2]</sup>。气候变化是景观演变的重要自然驱动力之一,植被的形成是植物对特定气候长期适应的结果<sup>[3]</sup>,气候变化中水、热条件的改变直接或间接地控制着各种生态过程和生态系统生产力,使植被类型改变,导致景观格局的变化<sup>[4-8]</sup>。由于高海拔地带的生态系统对气候变化的响应最为敏感和迅速<sup>[9-10]</sup>,气候变化对景观格局影响的研究日益受到关注。

地处云南省西北部(简称滇西北)高原的碧塔海是滇西湖群组成之一<sup>[11]</sup>,在区域独特的地质地貌和气候背景下,碧塔海流域发育了以湖泊、沼泽、沼泽化草甸、草甸、森林等为主的滇西北典型高原景观类型<sup>[12]</sup>。由于碧塔海地处金沙江流域中上游,且位于全球 34 个生物多样性热点地区之一的“中国西南山地”重要地带<sup>[13]</sup>,而备受关注。目前,对碧塔海景观空间格局<sup>[12]</sup>、湿地生态环境<sup>[14]</sup>、湿地植被<sup>[15]</sup>、群落演替<sup>[16]</sup>等方面已有相关研究,但对在气候变化背景下,碧塔海流域景观格局演变的研究尚未见报道。因此,本文针对低纬高原、人为干扰较小的滇西北碧塔海流域,开展气候变化背景下的景观演变研究,以期从景观层面为碧塔海流域的有效保护与合理利用,以及进一步研究低纬高原生态系统的变化规律和驱动因子提供科学依据。

## 1 研究区概况

碧塔海流域地处青藏高原东南缘横断山脉三江并流区东部,位于滇西北迪庆藏族自治州香格里拉县县城东侧(见图 1),距县城约 30 km,属于金沙江水系<sup>[11]</sup>。流域介于北纬 27°47'44"—27°51'19"和东经 99°57'15"—100°00'31"之间,面积 1945.0 hm<sup>2</sup>,其内最高海拔 3967 m,最低海拔 3538 m,高差 429 m<sup>[12]</sup>,为高海拔、低纬度地带<sup>[17]</sup>。流域由碧塔海湖泊水域、山间平缓谷地和湖泊汇水面山组成<sup>[18]</sup>。碧塔海是滇西北一个人为干扰较小的<sup>[11]</sup>、保存最为完整的封闭型高原淡水湖泊<sup>[19]</sup>,由于其汇水面山分布有茂密的长苞冷杉林、油麦吊云杉

林、川滇高山栎林等原始森林<sup>[20]</sup>,起到了极好的水土保持和水源涵养作用。碧塔海湖水补给稳定,湖面变化较小,水位较为稳定<sup>[11]</sup>。碧塔海流域是三江并流国家级风景名胜区、碧塔海省级自然保护区、三江并流世界自然遗产地、碧塔海国际重要湿地和香格里拉普达措国家公园的重要组成部分<sup>[12]</sup>。综上所述,该区是开展气候变化背景下景观自然演变研究的理想场所,具有重要的研究价值。

## 2 资料及方法

### 2.1 资料

碧塔海流域内没有长期气象观测资料,考虑到自然驱动因子常常是在较大的时空尺度上作用于景观格局<sup>[21]</sup>,本文旨在研究气候变化背景下碧塔海流域景观演变特征,因此采用距离碧塔海流域最近的国家基准气象站(香格里拉县气象观测站),自1958年建站至2011年来近54年的年平均气温、年活动积温、年极端高温、年极端低温、年降水量(文中简称为气温、活动积温、年极端高温、年极端低温和降水量)和日平均气温资料作为碧塔海流域的气候背景资料。植物通常在日平均温度上升到5℃的时候开始发育,文中活动积温为年内日平均气温稳定通过5℃期间的日平均气温之和<sup>[22]</sup>。

在本研究中,反映碧塔海流域景观演变的景观类型面积数据取自本文作者的前期研究成果,1955—2011年6个年代的景观类型面积数据和景观类型图参阅文献<sup>[12]</sup>,在本文中不再列出相关景观类型面积数据和附相关景观类型图。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 气候变化特征

(1)气候倾向率估计方法。气候要素的变化趋势一般用一次线性方程表示,即 $\hat{x} = a_1 t + a_0$ ,其中 $t = 1, 2, \dots, n$ 年, $\frac{dx}{dt} = a_1$ , $a_1 \times 10$ 称为气候倾向率,单位为某要素单位/10a<sup>[23]</sup>。利用气候倾向率估计方法,对滇西北香格里拉县各个气候要素逐年时间序列进行分析,找出20世纪50年代至今气候要素的总体变化趋势。

(2)Mann-Kendall 突变检验方法(简称 M-K 方法)。该方法是一种非参数统计检验方法,其优点是不需要样本遵从一定分布,也不受少数异常值的影响,更适用于类型变量和顺序变量。其方法如下:对于具有  $n$  个样本量的时间序列  $x$ ,构造一秩序列:

$$s_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k = 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

其中, $r_k = \begin{cases} +1 & \text{当 } x_i > x_j \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$ , ( $j = 1, 2, \dots, i$ )。在时间序列随机独立的假定下,定义统计量:

$$UF_k = \frac{[s_k - E(s_k)]}{\sqrt{\text{var}(s_k)}} \quad (k = 2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

其中  $UF_1 = 0$ ,而  $E(s_k)$ 、 $\text{var}(s_k)$  是累计数  $s_k$  的均值和方差。在  $x_1, x_2, \dots, x_n$  相互独立且具有相同连续分布时,有

$$\begin{cases} E(s_k) = \frac{n(n-1)}{4} \\ \text{var}(s_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \end{cases} \quad (3)$$

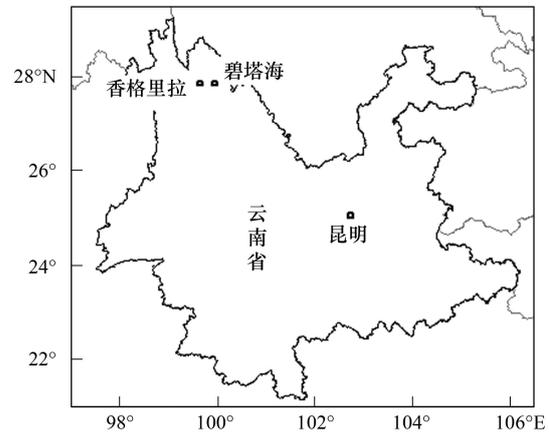


图1 碧塔海流域地理位置图

Fig. 1 The location of the study area of Bitai lake watershed

给定显著水平  $\alpha$ , 查正态分布表  $U_\alpha$ , 若  $|UF_i| > U_\alpha$ , 则表明序列存在明显的趋势变化。按时间序列的逆序, 重复上述过程, 使得  $UB_k = -UF_{n+1-k}$ ,  $k = n, n-1, \dots, 1, UB_1 = 0$ 。在计量曲线图中, 若  $UF_k$  或者  $UB_k$  的值大于 0, 则表明序列呈上升趋势; 小于 0 则表明呈下降趋势; 当它们超过信度曲线 ( $\pm U_\alpha$ ) 时, 表明上升或下降趋势显著。如果  $UF$ 、 $UB$  两条曲线相交的点位于信度曲线之间, 这点便是突变点的开始<sup>[24]</sup>。本文采用 M-K 突变检验方法分析并验证气候要素随时间变化的规律和突变特征。

### 2.2.2 气候要素与景观面积的相关性

皮尔逊 (Pearson) 相关系数是描述两个随机变量线性相关的统计量, 设有两列时间变量  $x = x_1, x_2, \dots, x_n$  和  $y = y_1, y_2, \dots, y_n$ ,  $n$  为样本容量, 相关系数的计算公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

Pearson 相关系数  $r$  的取值在  $-1.0$ — $1.0$  之间, 当  $r > 0$  时, 表明两变量呈正相关, 越接近  $1.0$ , 正相关越显著; 当  $r < 0$  时, 表明两变量呈负相关, 越接近  $-1.0$ , 负相关越显著; 当  $r = 0$  时, 表示两变量相互独立。据统计学大样本定理<sup>[25]</sup>, 样本量大于 30 才有统计意义, 由于景观类型面积样本容量较小, 用无偏相关系数对 Pearson 相关系数加以矫正, 无偏相关系数记为  $r^*$ , 计算公式为:

$$r^* = r \left[ 1 + \frac{1 - r^2}{2(n - 4)} \right] \quad (5)$$

最后利用  $t$  检验方法对矫正后的相关系数进行显著性检验<sup>[24]</sup>。采用无偏相关系数探讨气候要素与碧塔海流域各景观类型面积之间的相关性。本文采用 Matlab 7.01 软件进行计算分析。

## 3 结果与分析

### 3.1 背景气候变化特征

近 54 年来香格里拉县多年平均气温为  $5.9^\circ\text{C}$ ; 多年平均活动积温为  $2146.1^\circ\text{C}$ ; 多年平均年极端高温为  $24.3^\circ\text{C}$ , 且最高值出现在 2005 年和 2006 年, 达  $26.0^\circ\text{C}$ ; 多年平均年极端低温为  $-18.6^\circ\text{C}$ , 最低值出现在 1982 年, 低至  $-27.4^\circ\text{C}$ ; 多年平均降水量为  $631.7\text{mm}$ 。

利用气候倾向率估计方法对各气候因子的时间序列做线性倾向分析结果见图 2。从图 2 中可知香格里拉县各气候要素随时间变化的总趋势均为增加, 气温、活动积温、年极端高温、年极端低温和降水量的气候变化倾向率分别为  $0.36^\circ\text{C}/10\text{a}$ 、 $56.5^\circ\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.15^\circ\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.98^\circ\text{C}/10\text{a}$  和  $8.8\text{mm}/10\text{a}$ , 近 54 年来气温平均上升了约  $1.94^\circ\text{C}$ , 与全省和全国相比升温趋势一致, 气温升温幅度和升温速率均高于云南<sup>[26]</sup> 和全国<sup>[2]</sup> 的平均状况 (云南近 48 年平均上升了  $0.66^\circ\text{C}$ , 增温速率为  $0.14^\circ\text{C}/10\text{a}$ , 全国近 50 年来平均气温上升了  $1.3^\circ\text{C}$ , 增温速率为  $0.25^\circ\text{C}/10\text{a}$ ), 年极端高温上升了约  $0.81^\circ\text{C}$ , 年极端低温上升了约  $5.29^\circ\text{C}$ , 活动积温增加了  $305.1^\circ\text{C}$ , 降水量增加了约  $47.5\text{mm}$ 。

采用 M-K 方法对香格里拉县各气候要素的变化规律和突变特征进行检验结果见图 3。结果发现气温 M-K 计量曲线中 (图 3a), 1979 年以前  $UF$  值小于零, 1979 年以后大于零, 1988 年通过  $\alpha=0.05$  的信度检验, 表明 1958—2011 年间, 1979 年以前气温有所下降, 但趋势不明显, 1979 年以后气温呈上升趋势, 且 1988 年以后上升趋势极为显著。香格里拉县活动积温的 M-K 计量曲线中 (图 3b), 1981 年之前  $UF$  值小于零, 1981 年以后  $UF$  值大于零, 1993 年通过  $\alpha=0.05$  的信度检验,  $UF$  和  $UB$  的交点出现在 1988 和 1990 年, 表明活动积温在 1980 年以后为上升趋势, 且上升和突变趋势显著, 突变开始的时间大致为 1988 年左右。年极端高温 M-K 计量曲线中 (图 3c), 1976 年以后  $UF$  值大于零, 在近 54 年中上升趋势未通过  $\alpha=0.05$  的信度检验, 表明年极端高温在 1976 年以后为上升趋势, 但上升趋势不明显。年极端低温 M-K 计量曲线中 (图 3d), 1958 年以来  $UF$

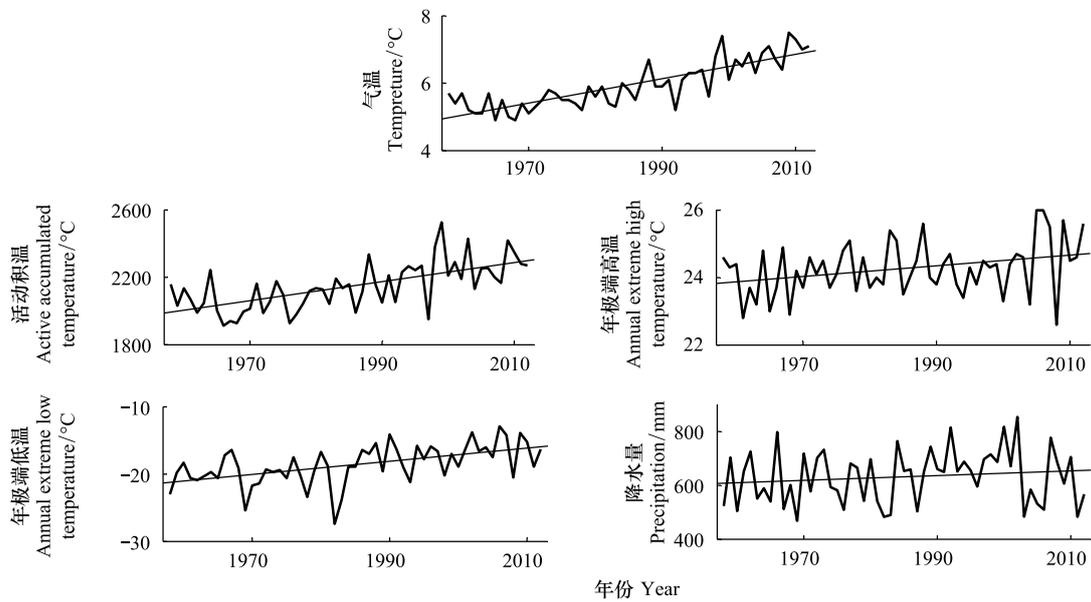


图 2 1958—2011 年滇西北香格里拉县气候要素变化趋势

Fig. 2 The trend of climate elements over Shangri-La County of northwestern Yunnan from 1958 to 2011

(a)气温;(b)活动积温;(c)年极端高温;(d)年极端低温;(e)降水量;直线:线性倾向拟合线

值均大零,1990 年通过  $\alpha=0.05$  的信度检验,UF 和 UB 的交点出现在 1986 年,表明年极端低温自 1958 年以来主要为升高趋势,突变开始的时间为 1986 年,且上升和突变趋势显著。1989 年以前降水量的 UF 曲线在零线附近摆动,在 1989 年之后均位于零线以上,表明降水量在 20 世纪 80 年代以后有所增加,但增加趋势不明显(图 3e)。

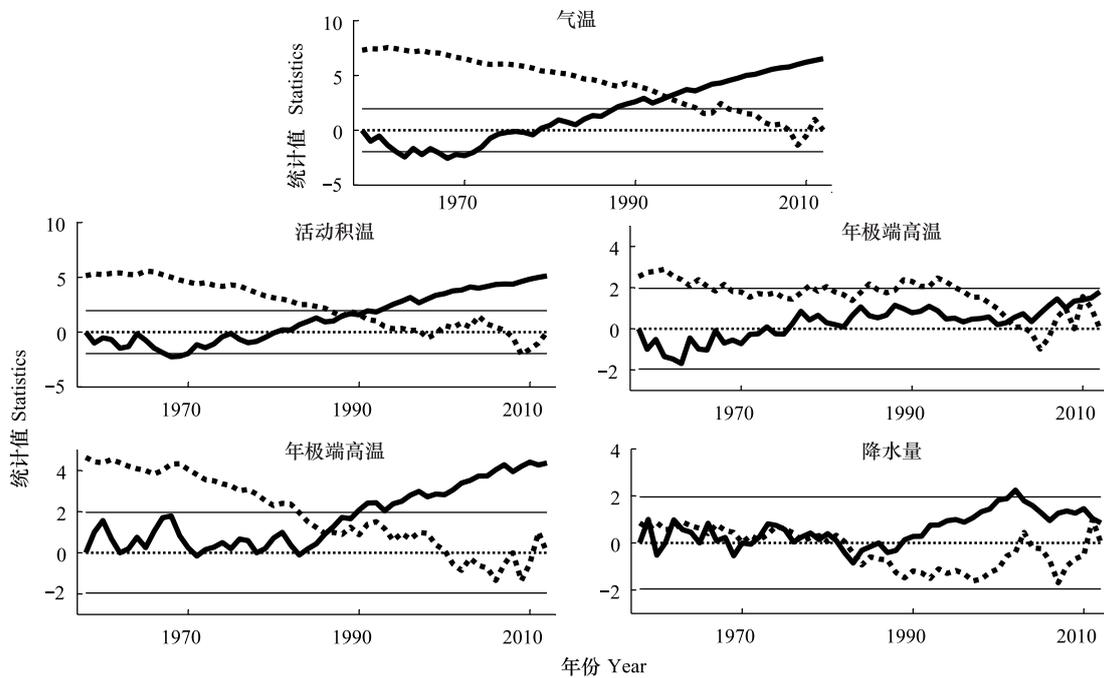


图 3 1958—2011 年滇西北香格里拉县气候要素 M-K 突变检验

Fig. 3 The M-K mutation test of climate elements over Shangri-La County of northwestern Yunnan from 1958 to 2011

(a)气温;(b)活动积温;(c)年极端高温;(d)年极端低温;(e)降水量;粗实线:UF;粗虚线:UB;细实线:检验临界值;点虚线:零值线

M-K 方法检验表明滇西北香格里拉县活动积温在 1988 年附近存在显著的突变趋势,突变前 1958—1988 年的多年平均活动积温为 2072.6℃,突变后 1989—2011 年的多年平均活动积温为 2239.7℃,突变前后平均上升了 167.1℃。年极端低温突变开始的时间为 1986 年,突变前 1958—1986 年的多年平均年极端低温为-20.2℃,突变后 1987—2011 年的多年平均年极端低温为-16.8℃,平均上升了 3.4℃,香格里拉县年极端低温突变的时间与全国年极端低温显著升高的时间基本一致<sup>[27]</sup>。

综上所述,1958—2011 年近 54 年来滇西北香格里拉县气温、活动积温和年极端低温大体上呈显著上升趋势,活动积温和年极端低温突变趋势显著,年极端高温和降水量稍有上升或增加,但上升或增加趋势不明显。滇西北碧塔海流域背景气候具有明显的变暖趋势。

### 3.2 景观面积变化特征

碧塔海流域景观类型有湖泊水域、沼泽、沼泽化草甸、草甸、有林地、寒温性稀树灌草丛(简称灌草丛)和公路,其中有林地为本流域的优势景观类型。1955—2011 年,除湖泊水域、沼泽和沼泽化草甸没有变化,草甸和灌草丛分别减少了 11.08 hm<sup>2</sup> 和 135.19 hm<sup>2</sup>;有林地增加了 118.24 hm<sup>2</sup>,由草甸和灌草丛转变而来;公路自 2005 年开始修建,增加了 28.03 hm<sup>2</sup>,由草甸、灌草丛和有林地转变而成。总体上流域景观演变表现出以自然驱动力为主,人为驱动力为辅的景观演变驱动力格局<sup>[12]</sup>。

选取碧塔海流域内景观类型发生变化的草甸、有林地、灌草丛和公路景观面积进行距平标准化,以便在同一水平上分析其随时间的变化趋势(图 4)。从图 4 可知,1955—2011 年近 56 年来草甸和灌草丛的景观面积随时间推移一直呈减少的趋势,1955—2005 年间有林地的景观面积随时间推移大体上一直呈增加的趋势,2005—2011 年间,因修建公路使草甸、灌草丛和有林地被占用,有林地的景观面积有所下降。

### 3.3 景观演变与气候要素的相关性

景观演变是自然驱动因子和人为驱动因子共同作用的结果<sup>[28]</sup>,自然驱动因子包括气候、地质、地貌、地形、土壤、水文和生物作用。1955—2011 年的 56 年间,碧塔海流域的地质、地貌、地形、土壤等自然因子基本没有变化,也没有发生过自然灾害,且人为干扰较小<sup>[12]</sup>,

气候则呈现显著的变化趋势,这必然会导致景观格局发生变化,在景观类型层面直接表现为植被群落演替,这主要由于群落总是朝向与当地生境(包括气候)保持协调和平衡的方向演替。也就是说,气候是碧塔海流域自然景观类型演变的主要自然驱动因子。

由于碧塔海流域遥感数据始于 1955 年,而气候要素在 1958 年才有最早的观测记录,故以离 1955 年最近连续 3 年(1958、1959 和 1960 年)的气候要素平均值代替 1955 年缺测的气候资料,其它时段则采用同期 1974、1981、1994、2004 和 2011 年的气候资料与碧塔海流域自然景观类型(草甸、有林地、灌草丛)面积进行相关分析(见表 1),筛选影响景观演变的主导气候要素。

碧塔海流域景观类型面积与气候要素的无偏相关系数表(表 1)中加粗的相关系数值均通过显著性检验,近年来气候因子与碧塔海流域有变化的自然景观类型草甸、有林地、灌草丛之间存在以下关系:

草甸和灌草丛面积与气温、活动积温和年极端低温呈显著的负相关,而有林地面积与气温、活动积温和年极端低温呈显著的正相关,表明当气温、活动积温或年极端低温上升(降低)时,草甸和灌草丛的面积减小(增加),而有林地的面积增加(减小)。草甸和灌草丛景观面积与年极端高温呈负相关,与降水量呈正相关,而有林地景观面积与年极端高温呈正相关,与降水量呈负相关,但相关性都不明显。

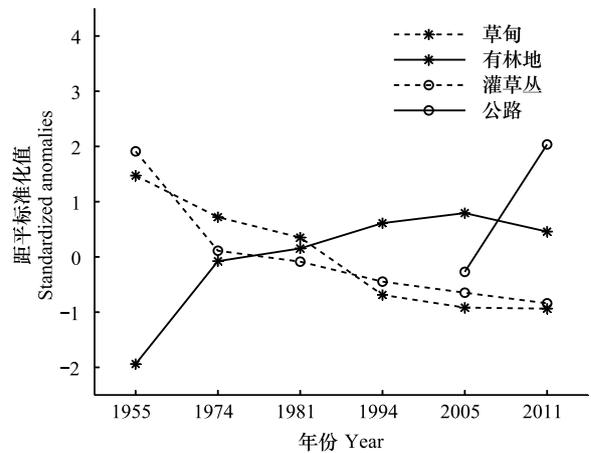


图 4 滇西北碧塔海流域景观面积距平标准化序列  
Fig. 4 The standardized anomalies sequence of landscape area over Bita lake watershed of northwestern Yunnan

表 1 碧塔海流域景观类型面积与气候要素的无偏相关系数

Table 1 The coefficients between climate factors and landscape area in Bita lake watershed

景观类型 Landscape types	气象要素 Climate factors				
	气温 Temperature	活动积温 Active accumulated temperature	年极端高温 Annual extreme high temperature	年极端低温 Annual extreme low temperature	降水量 Precipitation
草甸 Meadow	-0.960 ***	-0.960 ***	-0.427	-0.822 **	0.190
有林地 Forestland	0.794 *	0.850 **	0.200	0.824 **	-0.066
灌草丛 Scrub-grassland	-0.852 **	-0.883 **	-0.216	-0.743 *	0.227

\* , \*\* , \*\*\* 分别为通过  $\alpha = 0.1, 0.05, 0.01$  的显著  $t$  检验。

根据前文 3.1 的分析结果可知,1958—2011 年香格里拉县气温总体呈上升趋势(图 2a),1958—1979 年气温有所下降(图 3a),这主要是受到香格里拉县 1958 年才有气候观测资料的限制,难以确知 1958 年以前的气候变化情况。据万云霞等的研究,香格里拉县所处的云南纵向岭谷区的气温,存在明显冷、暖位相交替的年代际变化特征,在 1901—2002 年近百年来总体呈现增温趋势<sup>[29]</sup>。结合万云霞等的研究以及图 2a 和图 3a 可推知,1901 年以来香格里拉县的气温在百年时间尺度上总体呈现增温趋势。对照图 2、图 3 和图 4,香格里拉县的气温、活动积温和年极端低温随时间大体呈明显上升趋势,与有林地面积随时间明显增加的趋势是一致的,而与草甸和灌草丛面积随时间明显减少的趋势相反。这也充分说明气温、活动积温和年极端低温在有林地增加,以及草甸、灌草丛减少中起着重要作用。

以上分析表明,近 56 年来,气温、活动积温和年极端低温与碧塔海流域草甸、灌草丛和有林地面积关系密切,降水量和年极端高温与流域景观面积相关性较弱,气温、活动积温和年极端低温是影响碧塔海流域自然景观类型演变的主导气候要素。

气温对高海拔地区树木的生长具有重要的作用<sup>[5]</sup>,碧塔海流域有林地的主要植被类型为冷杉、云杉、高山栎林等<sup>[20]</sup>,已有研究发现长期增温使高海拔地区冷杉和云杉幼苗的光合作用增强,有利于促进幼苗的生长和生物量的积累<sup>[7,30-31]</sup>;其次增温能延长植物的生长季<sup>[32]</sup>,加快土壤有机质的分解速率和养分的可利用性,间接促进树木生长<sup>[33]</sup>。热量是影响树木生长发育的重要气候因子之一,树木光合作用的下限温度一般为 5℃<sup>[34]</sup>,对于受低温限制的高寒生态系统,较短的生长期是限制植物生物量生产的关键因素之一<sup>[35]</sup>,活动积温升高意味着植物生长期的延长<sup>[36]</sup>,有利于树木的生长发育。碧塔海流域背景气候相对较寒冷(多年平均年极端低温为-18.6℃,最低值低至-27.4℃),长期适应高寒等环境的土壤微生物,在温度稍微升高时,其生物活动便会急剧加强<sup>[37]</sup>,使土壤中酶活性升高<sup>[38]</sup>,有利于凋落物和土壤有机物的分解、转换和养分元素的释放,提高森林土壤肥力<sup>[39]</sup>,年极端低温升高可能通过增强土壤生物活性、土壤养分循环等方式,间接影响树木的生长。气温和活动积温的升高,有利于流域树种的生长、发育,有利于流域内草甸和灌草丛向有林地的演变。

降水量和极端高温对碧塔海流域景观演变的作用相对较弱,主要原因是近年来降水量有所增加,但增加趋势不明显,且碧塔海湖泊水域面积没有发生变化<sup>[12]</sup>,碧塔海四周分布有郁郁葱葱的原始森林<sup>[20]</sup>,其森林水源涵养和水土保持功能较好,气温升高能引起湖泊水体温度的升高,导致蒸发量增大,使空气湿度增大,使得降水量对流域植被的生态促进作用有限。另外,由于流域气候背景的年极端高温值并不高(多年平均年极端高温为 24.3℃,近 54 年来最高为 26℃),升高趋势不明显,对流域植被的生长发育影响不大。

#### 4 结论与讨论

(1) 近 54 年来地处低纬度、高海拔的滇西北香格里拉县气温上升了约 1.94℃,升温速率为 0.36℃/10a,上升趋势远高于全国水平。活动积温和年极端低温增温和突变趋势明显,并分别于 1988 和 1986 年附近产生突变,突变前后活动积温平均增加了 167.1℃,年极端低温上升了 3.4℃。年极端高温和降水量稍有上升或增加,

但上升或增加趋势不明显。滇西北高原碧塔海流域背景气候呈现显著的变暖趋势,且变暖程度远高于全国水平。

(2)在 1955—2011 年 56 年间,碧塔海流域内自然景观演变规律为草甸和灌草丛向有林地演变,且有林地景观面积随时间的增加趋势与气温、活动积温和年极端低温随时间的上升趋势大体一致,草甸和灌草丛景观面积随时间的变化特征则与气温、活动积温和年极端低温的变化趋势相反。

(3)气温、活动积温和年极端低温与碧塔海流域草甸、灌草丛和有林地的景观面积变化具有显著的相关性,是碧塔海流域自然景观演变的主导气候要素,降水量和极端高温的驱动作用相对较弱。气温、活动积温和年极端低温在草甸和灌草丛演变成有林地的过程中发挥着重要作用。

(4)景观演变是一个极为复杂的过程,受自然驱动因子和人为驱动因子共同的影响。1955—2011 年在碧塔海流域人为驱动因子主要为两方面因素,其一为碧塔海流域周边藏民 56 年间的持续性放牧习俗,由于没有出现放牧现象,放牧没有造成流域内景观格局的变化;其二为道路建设,其对流域景观格局演变的影响表现为 2005—2011 年间,因修建公路使草甸、灌草丛和有林地被占用,三类景观面积均有所减小,因此道路建设是碧塔海流域景观演变的主要人为驱动因子<sup>[12]</sup>。综上所述,在气候变化的背景下,近 56 年来气候变化是碧塔海流域自然景观格局演变的重要驱动力,人为驱动因子的作用相对较弱。

(5)据 IPCC 第五次评估报告,与 1986—2005 年相比,2016—2035 年全球平均地表温度将升高 0.3—0.7℃,2081—2100 年将升高 0.3—4.8℃<sup>[1]</sup>。据此,滇西北碧塔海流域的背景气候可能将进一步变暖,未来变暖趋势是否会导致流域其它景观类型之间的相互演变,以及气候要素影响景观类型演变的具体过程,都是值得继续研究的内容。另外,植被覆盖类型的改变,将会改变地表反照率、表面粗糙度、土壤湿度等地表属性,影响地表与大气间的水、热交换过程,从而影响气候变化,也即碧塔海流域景观格局的演变与局地气候变化之间的正、负反馈机制也是以后需要进一步研究的内容。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2013: The Physical Science Basis: The Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [ 2 ] 丁一汇,任国玉. 中国气候变化科学概论. 北京:气象出版社,2008:61-86.
- [ 3 ] 张新时. 研究全球变化的植被-气候分类系统. 第四纪研究,1993,13(2):157-169.
- [ 4 ] Allen C D, Breshears D D. Drought-induced shift of a forest-woodland ecotone: rapid landscape response to climate variation. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1998, 95(25):14839-14842.
- [ 5 ] Kömer C, Paulsen J. A world-wide study of high altitude treeline temperatures. Journal of Biogeography, 2004, 31(5):713-732.
- [ 6 ] 刘国华,傅伯杰. 全球气候变化对森林生态系统的影响. 自然资源学报,2001,16(1):71-78.
- [ 7 ] Yin H J, Liu Q, Lai T. Warming effects on growth and physiology in the seedlings of the two conifers *Picea asperata* and *Abies faxoniana* under two contrasting light conditions. Ecological Research, 2008, 23(2):459-469.
- [ 8 ] 李杰,胡金明,董云霞,袁寒. 1994—2006 年滇西北纳帕海流域及其湿地景观变化研究. 山地学报,2010,28(2):247-256.
- [ 9 ] Jorgenson M T, Racine C H, Walters J C, Osterkamp T E. Permafrost degradation and ecological changes associated with a warming climate in central Alaska. Climate Change, 2001, 48(4):551-579.
- [ 10 ] Nelson F E, Aniamovand O A, Shiklomanov N I. Climate change and hazard zonation in the circum-arctic permafrost regions. Natural Hazards, 2002, 26(3):203-225.
- [ 11 ] 杨岚,李恒,杨晓君. 云南湿地. 北京:中国林业出版社,2010:23-23,34-40.
- [ 12 ] 喻庆国,董跃宇,杨宇明,刘朝蓬,袁磊,李昊民. 滇西北碧塔海流域景观演变规律及其驱动因子. 西北林学院学报,2014,29(4):160-168.
- [ 13 ] Mittermeier R A, Gil P R, Hofman M, Pilgrim J, Brooks T, Mittermeier C G, Lamoreux J, da Fonseca G A B, Seligmann P A, Ford H. Hotspots Revisited: Earth's Biologically Richest and Most Endangered Terrestrial Ecoregions. USA, Chicago: The University of Chicago Press, 2005:3-78.
- [ 14 ] 唐明艳,杨永兴. 旅游干扰下滇西北高原湖滨湿地植被及土壤变化特征. 应用生态学报,2014,25(5):1283-1292.
- [ 15 ] 尹五元,杜凡,张大才. 碧塔海自然保护区珍稀保护植物研究. 西南林学院学报,2004,24(1):20-22.
- [ 16 ] 韩大勇,杨永兴,杨杨. 滇西北高原碧塔海湖滨沼泽植物群落分布与演替. 生态学报,2013,33(4):2236-2247.

- [17] 和丽忠. 香格里拉年鉴 2010. 昆明: 云南科技出版社, 2010: 49-49.
- [18] 董跃宇, 喻庆国, 刘朝蓬, 余红忠, 赵建林. 基于最佳空间粒度的碧塔海流域景观格局分析. 西部林业科学, 2013, 42(3): 45-53.
- [19] 杨学光. 香格里拉县林业志. 昆明: 云南民族出版社, 2006: 128-128.
- [20] 刘德隅, 刘中天, 钱德仁, 汤家生, 王建皓, 高平龙, 施蔚云. 云南自然保护区. 北京: 中国林业出版社, 1989: 260-268.
- [21] 郭程轩, 徐颂军. 基于 3S 与模型方法的湿地景观动态变化研究述评. 地理与地理信息科学, 2007, 23(5): 86-90.
- [22] 贺庆棠, 陆佩玲. 气象学(第 3 版). 北京: 中国林业出版社, 2010: 84-86, 263-265.
- [23] Jones P D. Hemispheric surface air temperature variations; recent trends and an update to 1987. *Journal of Climate*, 1988, 1(6): 654-660.
- [24] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术(第 2 版). 北京: 气象出版社, 2007: 18-19, 30-31, 63-66.
- [25] 王梓坤. 概率论基础及其应用. 北京: 科学出版社, 1976.
- [26] 段旭, 陶云. 云南近 50 年来的气候变化. 热带气象学报, 2012, 28(2): 243-250.
- [27] 陈隆勋, 朱文琴, 王文, 周秀骥, 李维亮. 中国近 45 年来气候变化的研究. 气象学报, 1998, 56(6): 257-271.
- [28] 李传哲, 于福亮, 刘佳. 分水后黑河干流中游地区景观动态变化及驱动力. 生态学报, 2009, 29(11): 5832-5842.
- [29] 万云霞, 张万诚, 肖子牛. 近百年云南纵向岭谷区气温的时空变化特征. 自然灾害学报, 2009, 18(5): 183-188.
- [30] 杨兵, 王进闯, 张远彬. 长期模拟增温对岷江冷杉幼苗生长与生物量分配的影响. 生态学报, 2010, 30(21): 5994-6000.
- [31] Wang J H, Duan B L, Zhang Y B. Effects of experimental warming on growth, biomass allocation, and needle chemistry of *Abies faxoniana* in even-aged monospecific stands. *Plant Ecology*, 2012, 213(1): 47-55.
- [32] Bronson D R, Gower S T, Myron T, Van Herk I. Effect of ecosystem warming on boreal black spruce bud burst and shoot growth. *Global Change Biology*, 2009, 15(6): 1534-1543.
- [33] Strömgren M, Linder S. Effects of nutrition and soil warming on stemwood production in a boreal Norway spruce stand. *Global Change Biology*, 2002, 8(12): 1194-1204.
- [34] 吉林林业学校, 四川林业学校, 陕西农林学校. 森林学. 北京: 中国林业出版社, 1981.
- [35] Gugerli F, Bauert M R. Growth and reproduction of *Polygonum viviparum* show weak responses to experimentally increased temperature at a Swiss alpine site. *Botanica Helvetica*, 2001, 111(2): 169-180.
- [36] 徐兴奎, 王小桃, 金晓青. 中国区域 1960—2000 年活动积温年代变化和地表植被的适应性调整. 生态学报, 2009, 29(11): 6042-6050.
- [37] 赵亮, 徐世晓, 李英年, 唐艳鸿, 赵新全, 古松, 杜明远, 于贵瑞. 青藏高原矮嵩草草甸和金露梅灌丛草甸 CO<sub>2</sub> 通量变化与环境因子的关系. 西北植物学报, 2006, 26(1): 133-142.
- [38] Dilly O, Munch J C. Microbial biomass content, basal respiration and enzyme activities during the course of decomposition of leaf litter in a black alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) forest. *Soil Biology & Biochemistry*, 1996, 28(8): 1073-1081.
- [39] 杨万勤, 王开运. 森林土壤酶的研究进展. 林业科学, 2004, 40(2): 152-159.