

DOI: 10.5846/stxb201801310264

盛任, 万鲁河. 乌伊岭国家级自然保护区植被覆盖演变及其对气候突变的响应研究. 生态学报, 2019, 39(9): - .

Sheng R, Wan L H. Evolution of vegetation coverage and its response to abrupt climate change in the Wuyi Mountains National Nature Reserve. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(9): - .

乌伊岭国家级自然保护区植被覆盖演变及其对气候突变的响应研究

盛 任^{1,2}, 万鲁河^{1,2,*}

1. 哈尔滨师范大学地理科学学院, 哈尔滨 150025

2. 哈尔滨师范大学寒区地理环境监测与空间信息服务黑龙江省重点实验室, 哈尔滨 150025

摘要: 探究中国北方高纬度森林覆盖区植被演变受到气候因子变化乃至突变的影响, 选用 MODIS-NDVI 数据与 TM/ETM+ 数据, 结合 62 年的气象观测数据, 运用像元二分法模型、累计距平分析、Mann-Kendall 非参数检验、滑动 T 检验与相关性分析, 探讨了乌伊岭国家级自然保护区 1975—2016 年气候变化及其突变对植被覆盖的演化规律, 并对不同气候因子与植被覆盖类型的空间变化进行相关性分析。结果表明: (1) 乌伊岭保护区气候变化呈现暖干化发展的趋势。年均气温上升 (0.557°C/10a), 年均最低气温与冬季增温幅度最快, 秋季最慢。降水量年际变化较小 (-14.052 mm/10a), 季节性变化明显。经突变性检验, 1980—1995 年是气候增温减湿的突变时期。(2) 研究区植被生长季的 NDVI 为 0.673, 有植被覆盖的区域占 87.69%, 其中高等植被覆盖区所占比最大。(3) 气候突变时期, 生长季 NDVI 显著下降, 植被退化严重。低植被覆盖区无显著变化, 而高植被覆盖区开始逐渐退化为中等与中低等植被覆盖区。在空间上植被覆盖的退化状况主要由中心山地沿四周低山丘陵区累年逐渐降低。不同植被覆盖区域下降的幅度: 混交林 > 草地 > 针叶林 > 耕地 > 湿地。(4) 乌伊岭保护区年均最大 NDVI 与年均气温和年均降水量的相关系数分别为 0.261、0.068, 其中呈正相关区域占总面积 56.67% 和 42.79%, 在分布趋势上两者都表现出明显的空间差异性。而气温因子影响植被覆盖的空间范围与能力更强, 空间相关性更高, 也是影响植被退化的主导因素。

关键词: 气候变化; 突变分析; 植被覆盖度; NDVI; 相关性分析

Evolution of vegetation coverage and its response to abrupt climate change in the Wuyi Mountains National Nature Reserve

SHENG Ren^{1,2}, WAN Luhe^{1,2,*}

1 College of Geographical Science, Harbin Normal University, Harbin 150025, China

2 Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Geographical Environment Monitoring and Spatial Information Service in Cold Regions, Harbin Normal University, Harbin 150025, China

Abstract: To explore the influence of climatic factor changes and even mutations on vegetation evolution in high-latitude forest cover areas in northern China, we used MODIS-NDVI data and TM/ETM+ data, combined with a 62-year meteorological observation dataset, We analyzed these data using a pixel dichotomous model, cumulative anomaly analysis, a Mann-Kendall non-parametric test, sliding t-test, and correlation analysis. We discussed the evolution of climate change and its mutations on vegetation cover in the Wuyi Mountains National Nature Reserve from 1975 to 2016, as well as different climatic factors and vegetation cover types. The spatial variation was correlated. The results showed that: (1) Climate change in the Wuyi Mountains protected area exhibited a trend of warm and dry development. The annual average

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41671100)

收稿日期: 2018-01-31; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wanluhe@163.com

temperature increased ($0.557^{\circ}\text{C}/10\text{a}$), the annual average minimum temperature and winter temperature increased fastest, whereas the autumn increase was the slowest. The annual variation in precipitation was small ($-14.052\text{mm}/10\text{a}$); however, the seasonal variation was obvious. Through the mutation test, 1980—1995 was a period of sudden change in climate warming and dehumidification. (2) The NDVI of the vegetation growing season in the study area was 0.673, and the area covered by vegetation accounted for 87.69%, of which the highest vegetation coverage area accounted for the largest proportion. (3) During the abrupt climate change period, NDVI decreased significantly during the growing season, and vegetation degradation was severe. There was no significant change in the low vegetation coverage area, and the high vegetation coverage area began to gradually degenerate into medium and low-level vegetation coverage areas. The degradation of vegetation cover in space was mainly reduced in the central mountainous areas along the low hills and surrounding areas. The extent of decline in different vegetation coverage areas was as follows: mixed forest > grassland > coniferous forest > cultivated land > wetland. (4) The correlation coefficient between annual average maximum NDVI and annual average temperature and annual average precipitation in the Wuyi Mountains protected area was 0.261 and 0.068, respectively, and the positive correlation area accounted for 56.67% and 42.79% of the total area, respectively. Significant spatial differences were observed. The temperature factor affected the spatial extent and capacity of vegetation coverage, and had a higher spatial correlation, which was also the dominant factor affecting vegetation degradation.

Key Words: climate change; mutation analysis; vegetation coverage; NDVI; correlation analysis

全球性气候变化问题已经逐渐成为人类所关注的重要发展性问题^[1]。根据最新颁布的政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告指出,到 21 世纪末,气温将比 1850—1900 年间上升 1.5°C ^[2]。相比于全球气候变化,《第二次气候变化国家评估报告》^[3]指出:中国的升温趋势与全球基本保持一致,尤其近 50 年间显著增温($0.23^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)。伴随着全球变暖,北半球中纬度包括欧洲、中亚、北美大部及中国长江以北等地区的平均降水已增加^[4],但中国东北地区降水却呈现下降的趋势($-5.2\text{mm}/10\text{a}$)^[5]。由于气候因子的相互作用及周期性波动对植被的生长与分布将产生巨大的影响^[6],因此在全球气候变暖背景下,研究植被演化与气候变化之间的响应机制已经成为研究全球变化与陆地生态系统关系中的重中之重^[7],也对于揭示区域生态环境的植被演化过程具有重要的意义。

气候因子是驱动植被变化的主要因素,尤其是水热条件变化会直接影响到地表植被的生长及空间分布。归一化植被指数(NDVI)由于其算法精度高、误差较小的优势,被广泛应用于地域乃至全球植被变化的研究,与植被覆盖正相关分析的指数也是指示区域植被密度和长势的重要基准^[8]。目前,针对气候变化对植被生长及覆盖的研究,Thomas 等^[9]研究发现,在南美洲亚马逊河流域极端气候变化对植被覆盖的影响巨大,呈显著相关趋势。Wang 等^[10]与 Piao 等^[11]研究发现,在北美洲、亚欧大陆气候因子间相似的变化,却对其植被覆盖的空间相关性存在较大差异。

而迄今为止,相比于国外相关领域的研究^[12],国内植被演化及其对气候变化响应的研究多集中在中低纬度地带^[13-14],针对于北方高纬度地区森林植被覆盖区涉猎少,并且相对于国外探讨其不同地域气候突变状态下对植被覆盖动态变化特征的相关研究仍尚显薄弱。因此,研究乌伊岭自然保护区植被覆盖变化受不同气候因子变化乃至突变状态影响下的时空变化规律及其相关性关系,不仅有助于精确界定气候因子与植被演化之间的反馈机制,对区域气候突变所导致的农业灾害进行有效预警,也将对北半球高纬地区的生态环境建设与地方农林经济之间的协调可持续发展起到积极的指导作用。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

乌伊岭国家级自然保护区位于黑龙江省东北部($48^{\circ}33'—48^{\circ}50'N$, $129^{\circ}00'—129^{\circ}28'E$),小兴安岭顶部东

北段,地势中心高四周平缓,东北部地势最低,大体可以分为中部海拔较高的山地区、东北部低山丘陵区、西北与东南部较平缓的低矮山地这 3 个地带(图 1)。林区地处高纬,湖沼相连,沼泽湿地保存相对完好,针阔混交林和寒温带针叶林等植被覆盖区分布密集,达到 78% 以上。此外,各种鸟类、鱼类及各种国家重点保护动物等也分布其中,共同形成了具有典型性的北方高纬度、多种类、复合型湿地自然生态系统。其地属温带大陆性季风气候,常年受蒙古-西伯利亚高压控制,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,季节性差异显著。

1.2 数据来源及预处理

研究区 NDVI 数据来自美国国家航空航天局(NASA)全球监测与模型研究组(GIMMS)发布的 MOD13Q1L3 级产品,2000—2016 年合计 176 景数据。优先选取植被生长季(5—9 月),均值大于 0.1 像元的 NDVI 数据进行分析,采用最大值合成法得到月、年尺度的 MODIS-NDVI 数据集。对于 MODIS-NDVI 数据集缺省时段,应用美国地质勘探局(USGS)提供的 1975—2016 年的 TM/ETM+数据,进行图像处理及空间匹配(图 2),得到基于 TM/ETM+数据的 NDVI 数据集,目的在于对 MODIS-NDVI 数据集的缺省时段进行补充与匹配,提高区域统计以及输出结果的容错率,减小误差。进而设计算法,经几何投影矫正、辐射矫正、去云等进行统一处理,减少了云量、投影变换等因素的误差干扰,最终得到其相匹配于 MODIS-NDVI 数据与 TM/ETM+数据的植被覆盖变化的 NDVI 数据集。

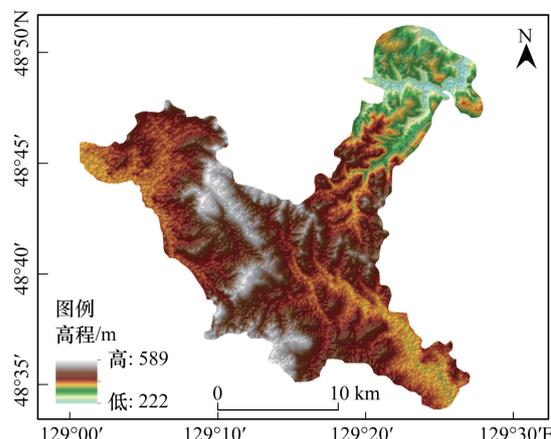


图 1 乌伊岭自然保护区 DEM 高程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of DEM elevation in the Wuyi Mountain Nature Reserve

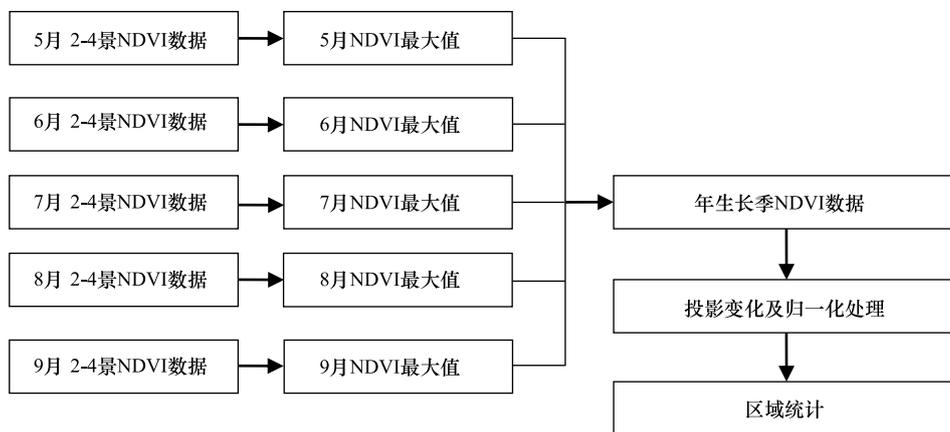


图 2 生长季植被覆盖指数处理流程

Fig.2 Growing Season vegetation coverage index process

为得到研究区实际土地地物的精确划分,获取了 2016—2017 年 5—9 月生长季地表植被与土样的实地采样数据并进行验证。研究区 DEM 数据来源于地理空间数据云 STRM 地形产品数据,空间分辨率为 90 m。

选用 1954—2016 年长时间序列气象数据均严格取自于国家气象局气象数据中心所发布的观测数据,包括小兴安岭地区及其范围内乌伊岭保护区的 17 个气象站点。对从 1954 年起各气象站点已有的最早实测数据,进行分析与突变性检验,增加分析样本容量,大幅减少了突变性检验的误差。个别缺测数据与临站进行线性回归比较插补,进而对站点间进行 Spearman 相关系数分析,结果在 0.85 以上,达到 99.9%的信度水平,校准了其长时序气象观测数据的代表性与连续性。

1.3 研究方法

1.3.1 基于 VFC 像元二分模型下的植被覆盖度趋势分析

归一化植被指数 NDVI, 是反映地表植被生长状态的重要指标因子, 定义为近红外波段 NIR 与可见光红光波段 R, 即反射率之差与反射率之和的比值:

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad (1)$$

并在像元二分模型的基础上进行分析:

$$VFC = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{soil}) \quad (2)$$

式中, $NDVI_{soil}$ 为裸土或无植被区域像元的 NDVI 值, $NDVI_{veg}$ 则表示完全被植被覆盖像元 (纯植被像元) 的 NDVI 值。计算公式为:

$$NDVI_{soil} = (VFC_{max} \times NDVI_{min} - VFC_{min} \times NDVI_{max}) / (VFC_{max} - VFC_{min}) \quad (3)$$

$$NDVI_{veg} = ((1 - VFC_{min}) \times NDVI_{max} - (1 - VFC_{max}) \times NDVI_{min}) / (VFC_{max} - VFC_{min})$$

根据实际植被覆盖度统计结果, 区域内可近似取 $VFC_{max} = 95\%$, $VFC_{min} = 5\%$, 公式 (1) 可变为:

$$VFC = (NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}) \quad (4)$$

式中, $NDVI_{max}$ 和 $NDVI_{min}$ 分别为区域内最大和最小的 NDVI 值。

并根据 FVC 模型结果, 结合实际将覆盖度划分为 5 个等级, 即低等级植被覆盖区 (0—0.2)、中低植被覆盖区 (0.2—0.4)、中等植被覆盖区 (0.4—0.6)、中高植被覆盖区 (0.6—0.8)、高等级植被覆盖区 (0.8—1.0)。通过 ArcGIS 10.1 平台, 计算生成覆盖度划分等级面积以及植被覆盖度空间变化趋势的统计结果。

1.3.2 累积距平法

累积距平法是处理与分析气象数据的常用的统计学方法之一, 可直观表示天气系统的变化趋势。由公式可以表示为:

$$y_i = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (5)$$

式中, x_i 代表第 i 年的平均气温或降水量, \bar{x} 代表 i 年的平均气温或降水量, y_i 代表第 i 年的气温或降水量累积距平值, 曲线的波动起伏可表示样本区间距平值的变化。

1.3.3 Mann-Kendall 非参数突变检验

曼-肯德尔法是世界气象组织推荐并广泛应用的非参数统计方法, 无须数据样本服从特定的规律, 检验范围广, 能区分其是否处于自然波动变化, 能客观表征样本序列的变化趋势, 明确突变发生时间、区域及其范围。统计量定义公式:

$$S = \sum_{a=1}^{n-1} \sum_{b=a+1}^n \text{sgn}(x_b - x_a) \quad (6)$$

式中, n 为平稳独立序列, s 为样本统计量, 则可得到标准统计量:

$$Z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{var}(s)}} & \left\{ \begin{array}{l} s > 0 \\ s = 0 \\ s < 0 \end{array} \right. \end{cases} \quad (7)$$

式中, 在 α 显著性区间内, 如果 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$ 成立, 则样本服从具有独立同分布的趋势分析。并且在 α 的置信水平下, 构造秩序列:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k = 2, 3, 4, \dots, n) \quad r_i = \begin{cases} 1, & x_i > x_j \\ 0, & x_i \leq x_j \end{cases} \quad (8)$$

得到秩序列 S_k 是第 i 时刻大于第 j 时刻数值个数的累计个数。并在时间序列随机且独立条件下, 定义统计量 UF_k :

$$UF_k = \frac{[S_k - E(S_k)]}{\sqrt{var(S_k)}} \quad (k = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (9)$$

式中, UF_k 是按照时间序列 x 的正序计算的标准正态分布统计; 同理, 按照时间序列 x 的逆序, 重复上述过程计算, 得到 UB_k 。

1.3.4 滑动 T 检验

滑动 T 检验方法 (MTT 法) 是处理数据样本平均值的差异是否显著, 来检验在时间序列上是否存在突变区间。对于具有 n 个样本量的时间序列 X , 其定义统计量 t 为:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s \times \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (10)$$

式中, $s = \sqrt{\frac{n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$; 统计量 t 自由度服从 $v = n_1 + n_2 - 2$ 的分布。以滑动步长为 5 年统计检验, 对于 M-K 法而言, 引入滑动 T 检验是对其的验证与补充^[15]。

2 结果与分析

2.1 气候因子的变化特征与突变性检验分析

1954—2016 年乌伊岭自然保护区气温和降水量的年平均累积距平如图 3 所示, 表 1 为气温和降水量的四季与年际均值的气候倾向率统计结果。气温整体呈现增温, 年际降水量缓慢下降的变化趋势。其年均气温倾向率为 $0.557^\circ\text{C}/10\text{a}$ ($P < 0.0001$), 气温的季节性变化整体呈现升高趋势, 只是幅度略有不同, 冬季 ($0.692^\circ\text{C}/10\text{a}$) 与年均最低气温 ($0.7229^\circ\text{C}/10\text{a}$) 增温幅度最快, 秋季 ($0.264^\circ\text{C}/10\text{a}$) 最慢。乌伊岭年际降雨量整体呈现下降趋势, 不同年份之间年均降雨量差异较弱。倾向率约为 $-14.052 \text{ mm}/10\text{a}$ ($P < 0.0001$)。与气温的季节性整体升高趋势不同, 降水量在季节性较年际差异更加明显。降水量在秋季降幅最快 ($-12.168 \text{ mm}/10\text{a}$), 夏季却略微增长 ($0.446 \text{ mm}/10\text{a}$)。

表 1 1954—2016 年乌伊岭自然保护区气候影响因子倾向率统计结果

Table 1 Statistical results of climate impact factors in the Wuyi Mountain Nature Reserve from 1954 to 2016

时间尺度 Time scale	气温因子 Temperature			降水因子 Precipitation			
	一元线性方程	R	Sig	一元线性方程	R	Sig	
春 Spring	$y = 0.497x - 687.65$	0.67	0.0001	$y = 0.169x - 268.15$	0.08	0.0256	
夏 Summer	$y = 0.288x - 1403.20$	0.85	0.0001	$y = 0.446x + 166.97$	0.74	0.0001	
秋 Autumn	$y = 0.264x + 63.19$	0.16	0.0069	$y = -12.168x + 634.18$	0.76	0.0001	
冬 Winter	$y = 0.692x - 537.29$	0.86	0.0001	$y = 0.293x - 583.78$	0.84	0.0001	
年 Year	年均	$y = 0.577x - 1148.54$	0.64	0.0001	$y = -14.052x + 284.30$	0.86	0.0001
	年均最高	$y = 0.2543x - 432.88$	0.09	0.0124			
	年均最低	$y = 0.7229x - 1504.96$	0.36	0.0001			

乌伊岭自然保护区的气候环境在过去近 62 年以来经历突变, 尤其是气温的突变较为明显 (图 4)。在滑动 T 检验中, 自 1954 年来, 统计量 t 有突变检验水平区间分别为 1970—1995 年、1990—2000 年。且突变区间都是向正序列方向突变, 表明区间内年均气温是由冷变暖的波动变化; 再进行 Mann-Kendall 非参数检验中, 在 1980 年之前 UF 曲线在绝大多数时间段内小于 0, 且 UF 曲线在 1987 年起大大超过 α 显著性水平临界线, UF 曲线与 UB 曲线交点在 1990 年且大于显著性水平值, 说明自 1980 年气温开始变暖, 1987 年开始显著增温, 在 1990 年达到最大。结合两种检测方法结果分析得出: 乌伊岭自然保护区气温由冷到暖的转变时间出现在 1980—1990 年间。

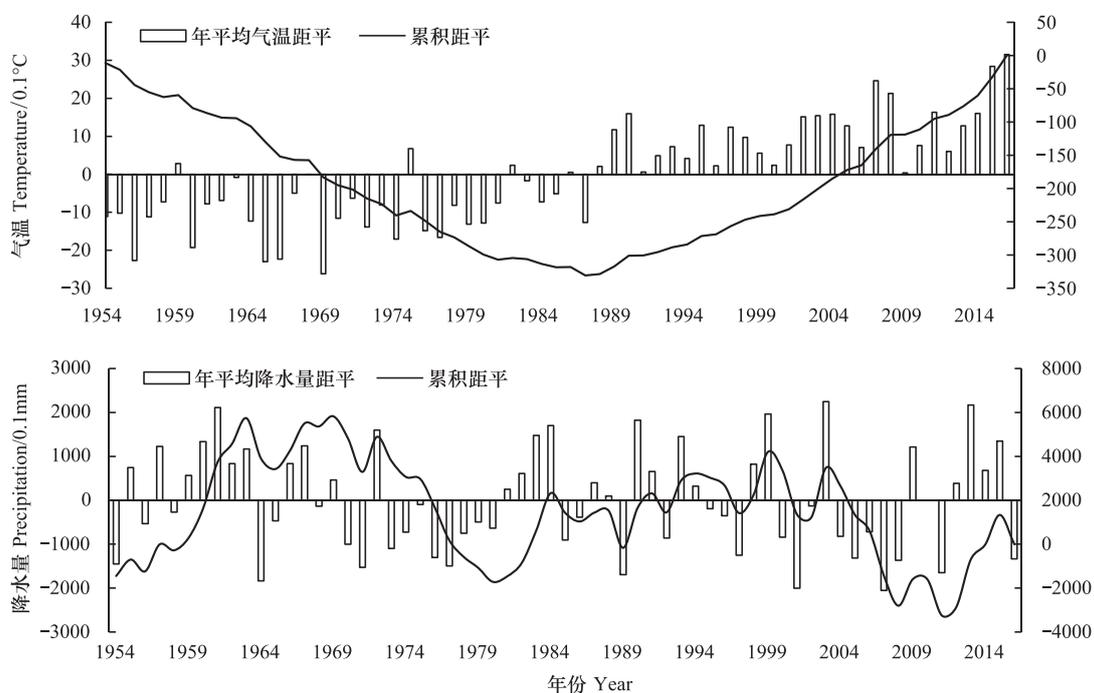


图3 乌伊岭自然保护区气温与降水量的累积距平变化

Fig.3 Cumulative distance variation of air temperature and precipitation in the Wuyi Mountain Nature Reserve

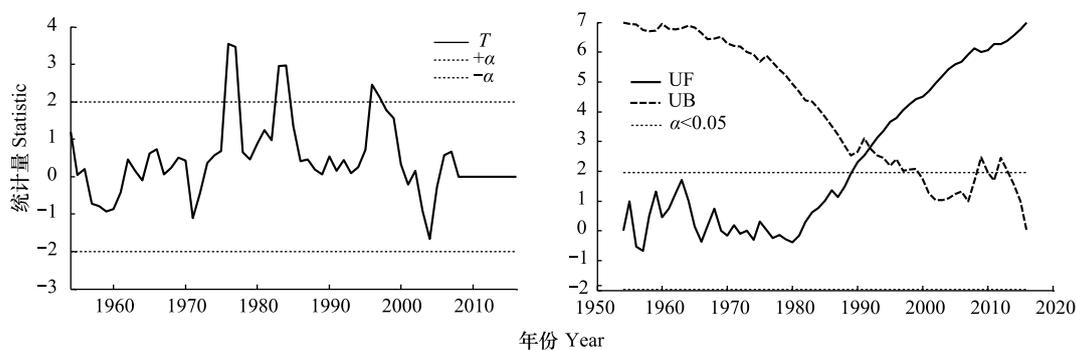


图4 乌伊岭自然保护区年均气温突变的滑动 T 检验与 Mann-Kendall 非参数检验

Fig.4 Slip T test and Mann-Kendall nonparametric test of annual mean temperature abrupt change in the Wuyi Mountain Nature Reserve
 α : 置信水平, The confidence level

乌伊岭自然保护区年均降水量突变形式呈现起伏变化(图5)。在滑动 T 检验中,自 1954 年来,突变检验水平区间在多个时段内显著变化,其集中在 1970—2004 年间。而进行 Mann-Kendall 非参数检验,除 1970 年的交点外,自 1982 年起到 1995 年,UF 曲线与 UB 曲线开始发生有多个交点,且交点与 UF 曲线始终小于 0。结合两种检测方法结果分析得出:乌伊岭自然保护区降水量自 1970 年附近有一段丰雨期,其气候波动变化剧烈的区间在 1982—1995 年之间,降水量呈现波动下降的趋势。

最后,结合上述年均气温和降水量的突变性分析结果得出:1980—1995 年间是气候因子活跃时期,该时期为气候暖干化特征的突变时期。

基于乌伊岭自然保护区近 62 年来气象观测数据的突变性检验,分析突变前后时期气候影响因子倾向率统计结果(表 2),研究区在突变前(1954—1980 年),气温仍呈现负增长的状态且整体均温偏低,年际倾向率 $-0.0087^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ($0 < P < 0.05$),气温的季节性变化整体呈现下降的趋势,春季 ($-0.082^{\circ}\text{C}/10\text{a}$) 降温幅度最快,冬季 ($0.264^{\circ}\text{C}/10\text{a}$) 最慢;降水量整体呈现逐年减少趋势,不同年份年均降雨量差异大,气候倾向率约为

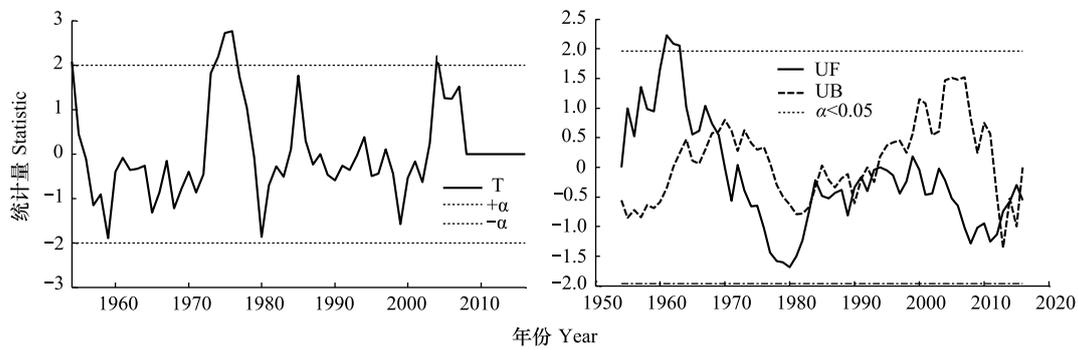


图5 乌伊岭自然保护区年均降水量突变的滑动 T 检验与 Mann-Kendall 非参数检验

Fig.5 Slip T test and Mann-Kendall nonparametric test of annual precipitation variation in the Wuyi Mountain Nature Reserve

-10.206 mm/10a ($P < 0.01$), 季节性差异不明显。而在突变后 (1995—2016 年), 气温呈现迅猛增长且整体数值偏高, 年际倾向率 $0.6209^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ($P < 0.01$), 气温季节性变化整体呈现上升趋势, 冬季 ($0.608^{\circ}\text{C}/10\text{a}$) 降温幅度最快, 秋季 ($0.608^{\circ}\text{C}/10\text{a}$) 最慢; 而年际降水量在突变后进一步下降 ($-12.768 \text{ mm}/10\text{a}$), 且在季节性差异更为明显, 降水量在春季减少最快 ($-11.173 \text{ mm}/10\text{a}$), 夏季最慢 ($0.446 \text{ mm}/10\text{a}$)。

表 2 突变前后时期气候影响因子倾向率统计结果

Table 2 Statistical Results of Climate Impact Factor Tendency before and after Mutation

时间尺度 Time scale	突变前 Before mutation				突变后 After mutation			
	气温倾向率 /($^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)	相关系数	降水量倾向率 /($\text{mm}/10\text{a}$)	相关系数	气温倾向率 /($^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)	相关系数	降水量倾向率 /($\text{mm}/10\text{a}$)	相关系数
春 Spring	-0.082	0.23 *	-9.681	0.42 *	0.485	0.33 **	-11.173	0.62 **
夏 Summer	-0.038	0.17 **	-5.331	0.26 **	0.517	0.71 **	-0.781	0.01 *
秋 Autumn	-0.064	0.27 **	-6.318	0.01 *	0.472	0.47 **	-10.685	0.37 **
冬 Winter	-0.002	0.01	-5.752	0.18 **	0.608	0.13 **	-6.761	0.01 *
年 Year	-0.0087	0.01 *	-10.206	0.32 **	0.6209	0.24 **	-12.768	0.62 **

* 为相关显著 ($0 < P < 0.05$), ** 为相关极显著 ($P < 0.01$)

2.2 乌伊岭保护区植被覆盖的空间分布与变化趋势

由乌伊岭自然保护区年均 NDVI 指数分级分析 (表 3), 研究区年平均植被生长季的 NDVI 为 0.673, 有植被覆盖的区域 ($\text{NDVI} \geq 0.1$) 占研究区总面积的 87.69%, 无植被覆盖区仅占总面积的 12.31%, 其中高植被覆盖度区域 ($\text{NDVI} \geq 0.8$) 所占的面积比最大为 23.54%。

表 3 乌伊岭自然保护区年均 NDVI 指数分级

Table 3 Annual average NDVI index grading of the Wuyi Mountain Nature Reserve

NDVI	面积百分比 Area percentage/%	NDVI	面积百分比 Area percentage/%
<0.1	12.31	$0.4 \leq \text{NDVI} < 0.6$	22.13
$0.1 \leq \text{NDVI} < 0.2$	15.33	$0.6 \leq \text{NDVI} < 0.8$	15.47
$0.2 \leq \text{NDVI} < 0.4$	11.22	≥ 0.8	23.54

结合乌伊岭自然保护区植被年均 NDVI 的空间分布 (图 6) 与土地植被覆盖类型 (图 7) 可知。研究区中部山地的主要植被覆盖类型为针叶林与以红松为主的针阔叶混交林, 植被生长季 NDVI 较高, 森林茂盛。北部山地及西北部山丘地区植被覆盖类型为草地, 草地的覆盖面积与 NDVI 变化较大, 根据实地采样结果, 其北部大部分草地是由高植被覆盖区遭到破坏退化形成, 其空间分布受季节性水热条件影响大。乌伊岭地区东北大部分及南部地区分布大片湿地, 湿地植被分布广泛, NDVI 值较高。西北部区域是农田主要分布区, 经实地考察, 其在生长季时段主要种植作物为玉米和黄豆, 但由于农作物受到人类活动影响较大, 因此其年均 NDVI

波动较大。

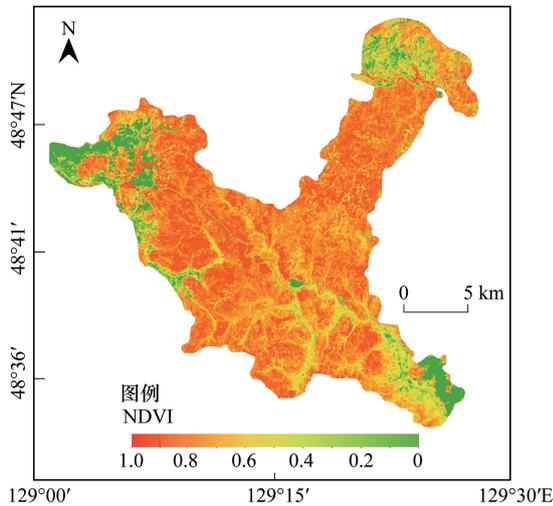


图6 乌伊岭自然保护区 NDVI 空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of NDVI in the Wuyi Mountain Nature Reserve

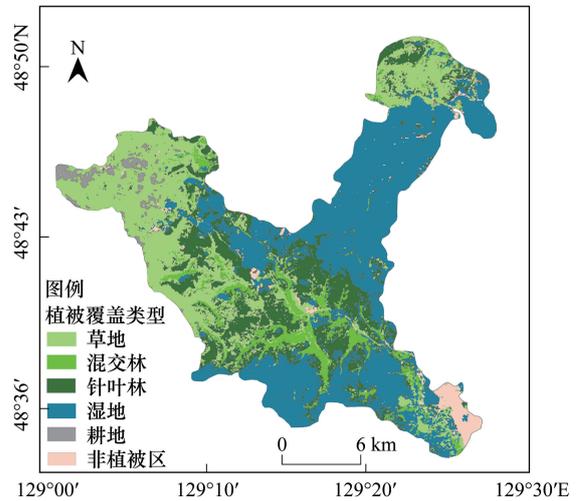


图7 乌伊岭自然保护区土地植被的覆盖类型

Fig. 7 Coverage types of land vegetation in the Wuyi Mountain Nature Reserve

2.3 气候因子与植被覆盖状况的关系

2.3.1 气候突变时期植被覆盖动态变化特征

由保护区突变前后植被覆盖度的动态变化(图8)及覆盖度像元统计量变化与面积百分比(图9)可知,在气候突变前,研究区整体表现气温降低、降水下降的变化趋势($-0.0087^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $-10.206\text{ mm}/10\text{a}$),乌伊岭整体表现 NDVI 大于 0.6 为主的中高级植被覆盖趋势,高植被覆盖区域($\text{NDVI} \geq 0.8$)由中部到东北部依次上升,已占总面积比的 50.76%,而低植被覆盖区域($\text{NDVI} \leq 0.2$)集中在西北与东南部耕地区与居民地,仅占总面积比的 10.75%。在气候突变过程中,研究区整体呈现气温急剧升高,降水进一步下降的暖干化趋势($0.6209^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $-12.768\text{ mm}/10\text{a}$),整体以中低、低等级的植被覆盖区域($0.2 \leq \text{NDVI} \leq 0.6$)为主,由中心海拔高的山地向四周地势比较低平的丘陵区辐散下降,可占总面积比的 53.85%,高植被覆盖区域仅仅在中部偏东北方向的湿地区仍保持较高的植被覆盖,但只占总面积比的 22.17%。在乌伊岭自然保护区气候突变时期,受气候暖干化突变影响植被覆盖度开始显著下降,其不同植被覆盖区域下降的幅度比:混交林>草地>针叶林>耕地>湿地。

研究区植被覆盖受气候暖干化突变影响(图8),NDVI 由原来的 0.8273 下降到 0.6739,植被覆盖度整体显著下降。各等级植被覆盖区突变前后面积变化状况:高等>中高等>中等>中高等>低等。低植被覆盖区突变前后无显著变化,中低与中等植被覆盖区突变后覆盖分别由 5.23%、9.53%上升到 27.54%、26.31%,覆盖面积显著增大。而中高等与高植被覆盖区呈现显著下降趋势,尤其是高植被覆盖区像元统计量与总面积比相比于其他植被覆盖区下降最为显著(50.76%下降到 22%)。高植被覆盖区控制的大部分范围逐渐退化为中等与中低等植被覆盖区。不同等级植被覆盖区由突变前的中心森林茂盛植被长势密集的山地,变为突变后沿四周边界覆盖度迅速下降的趋势,研究区植被退化的状况十分严重。

2.3.2 气候突变时期与整体变化时期植被的覆盖特征比较

与 1975—2016 年乌伊岭保护区植被年均 NDVI 空间覆盖演化过程相联系,从植被覆盖类型上看,在气候突变时期,湿地所占面积最大为 16541.77 hm^2 (39.32%),耕地占地面积最低为 4783.31 hm^2 (11.37%),而在气候整体变化时期,湿地与草地所占面积最大(24.03%、23.45%),耕地与混交林占地面积最低(16.18%、16.79%)。比较气候突变期与气候整体变化时期的由年均 NDVI 空间覆盖变化可知(表4),突变时期其各种

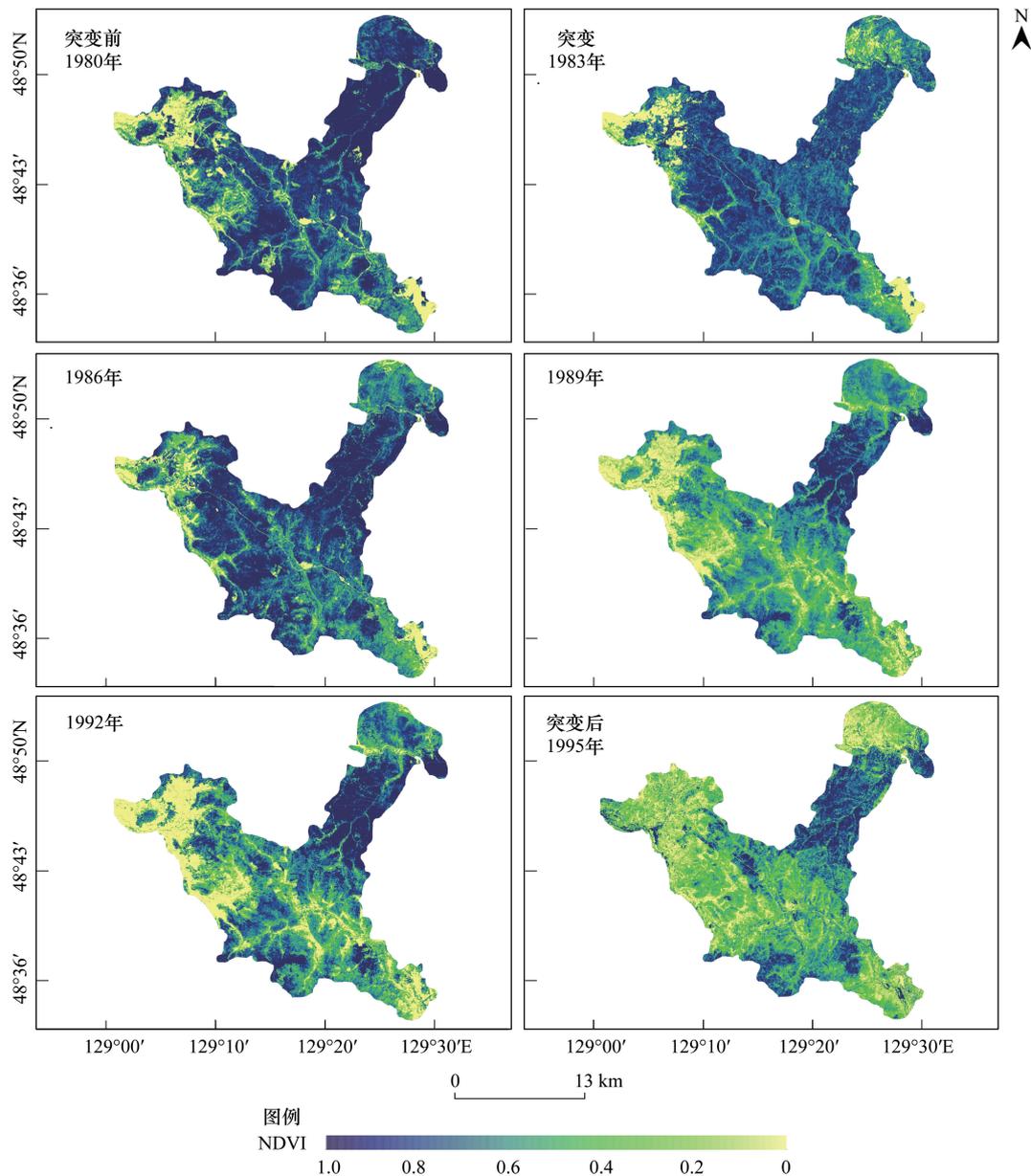


图 8 研究区气候突变期前后生长期最大 NDVI 空间分布动态变化过程

Fig.8 The dynamic process of maximum NDVI spatial distribution in the growing season before and after the climate change period in the research area

植被覆盖类型的 NDVI 空间变化与样地实际面积的变化范围远远高于气候整体变化时期,突变期混交林年均 NDVI 空间变化呈下降的趋势($| -2.251\% | > | -0.196\% |$)、草地上升的趋势($1.493\% > 0.268\%$)最强,且针叶林、耕地、湿地等区域的变化幅度远远大于 1975—2016 年植被覆盖的整体变幅($| -0.387\% | > | -0.064\% |$ 、 $0.031\% > 0.0008\%$ 、 $| -0.016\% | > | -0.003\% |$),湿地区基本收到的干扰最弱(-0.016%)。通过比较分析,在 1980—1995 年气候突变时期逐年累积植被覆盖退化的速率远远大于 1975—2016 年气候因子整体变化时期的速率。

2.3.3 植被覆盖度变化与气候因子的相关性分析

根据乌伊岭自然保护区年均最大 NDVI 与年均温和年均降水的相关性空间分布结果(图 10)。在 1975—2016 年间,乌伊岭保护区年均最大 NDVI 与年均气温的相关系数为 0.261,与年均降水量的相关系数为 0.068。

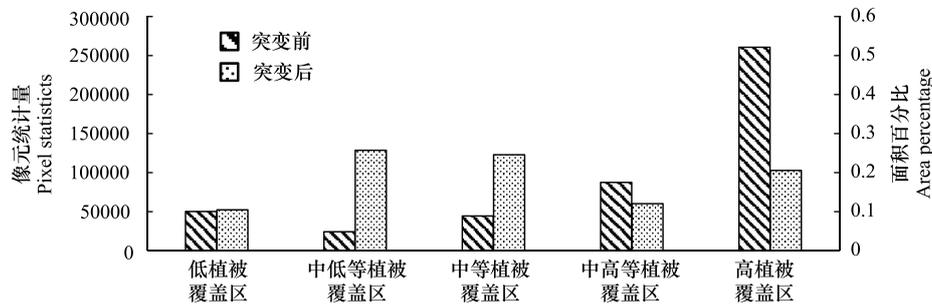


图9 乌伊岭自然保护区突变前后时期各等级植被覆盖区年均像元计量与面积百分比变化

Fig.9 The annual average pixel count and area percentage change of vegetation cover in each grade in the period before and after the Wuyi Mountain Reserve

其中呈正相关的像元分别占总像元面积的 56.67%和 42.79%。

表 4 气候突变时期与整体变化时期的逐年植被覆盖状况变化的统计分析

Table 4 Statistical analysis on the change of annual vegetation cover in the climate change period and the period of the whole change

类型 Genre	气候突变变化时期(1980—1995) Mutation climatic change period				气候整体变化时期(1975—2016) All climate change period			
	逐年像元 统计量均值	年均面积 百分比/%	年均 NDVI 覆盖变化/%	实际变化 面积/hm ²	逐年像元 统计量均值	年均面积 百分比/%	年均 NDVI 覆盖变化/%	实际变化 面积/hm ²
	混交林 Mixed forest	81757	17.49	-2.251	7358.49	78514	16.79	-0.196
针叶林 Coniferous forest	73962	15.82	-0.387	6658.07	81203	17.37	-0.064	7307.49
草地 Grassland	64340	13.76	1.493	5792.56	112324	24.03	0.268	10109.32
湿地 Wetlands	183779	39.32	-0.016	16541.77	109638	23.45	-0.003	9865.32
耕地 Arable land	53161	11.37	0.031	4783.31	75637	16.18	0.0008	6806.86
研究区 Research area	467440	100	-	42069.6	467440	100	-	42039.6

由乌伊岭保护区年均最大 NDVI 与年均温空间相关性分析可知(图 10a),负相关及相关性较低的区域主要集中在西北部山地区,土地覆盖类型主要为耕地、居民区、大部分草地及其由草地与混交林开垦的农田,受人类活动的影响较高,占总面积比的 43.33%。而呈现正相关性(0—0.469)的地区主要集中在东北部及南部的低山丘陵区,其主要植被覆盖类型为湿地,少部分为混交林、针叶林与草地。研究区由不同的土地植被覆盖

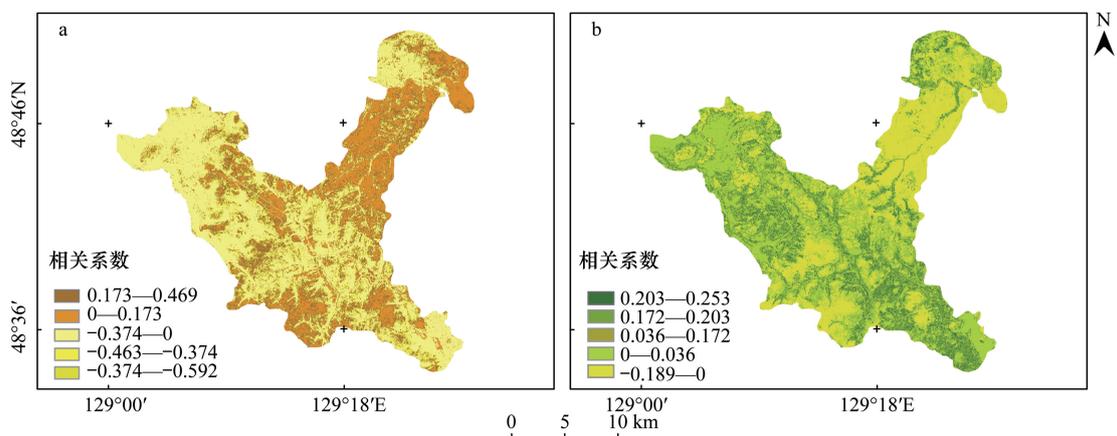


图 10 乌伊岭自然保护区年均最大 NDVI 与气温 (a)、降水量 (b) 相关系数的空间分布

Fig.10 Spatial distribution of the correlation between the maximum annual NDVI and the temperature (a) and the precipitation (b) in the Wuyi Mountain Reserve

类型,其年均气温的空间相关性差异明显。由年均最大 NDVI 与年均降水量空间相关性分析可知(图 10b),与气温的空间相关性相反,正相关及正相关性较强地区主要集中在混交林、针叶林等地区,由于累年降雨量的不断减少,导致混交林、草地以及针叶林等区域的 NDVI 值不断降低,植被覆盖范围逐年下降。而呈现相关性较弱甚至负相关地区主要为沼泽湿地地区,其湿地植被长势相对稳定。

3 讨论

3.1 研究区气候变化趋势与突变特征

乌伊岭国家级自然保护区整体气温呈上升、降雨量缓慢下降的趋势与北半球^[16]、中国东北^[17]呈现的气候波动变化的总趋势基本相同,1980—1995 年间气候增温减湿的突变时期较北半球高纬地区^[18]、中国东北部^[19]气候暖干化突变研究所呈现的时序基本保持一致。而这种极端气候事件与近百年来全球性气候变暖有着密不可分的影响与联系^[1-2,20]。

值得注意的是,对于近 62 年来乌伊岭自然保护区年际均温的整体上升,其年均最低气温显著增温的贡献尤为重要;究其原因,可能是由于乌伊岭地区地表植被的逐年退化,裸土与中低植被区比例上升,所导致夜间地物的长波辐射显著上升,造成大气逆辐射的增强,最后致使乌伊岭地区夜间异常增温现象的加剧。

3.2 气候因子变化及突变对植被覆盖状况的影响

气候因子的不断变化深刻影响着植被覆盖度的空间变化,而植被生长季年、月 NDVI 值可以准确的反映出地区性植被覆盖的变化特征^[21-22]。乌伊岭自然保护区近年来气候呈现暖干化发展趋势,其对生长季植被空间的演化及分布造成了巨大的变化;其高纬度地区植被生长季 NDVI 显著减少的结果与北半球高纬地区^[23]、亚洲北部地区^[24]以及其他研究^[25-26]得出的结论基本保持一致。

研究区由于受到气候暖干化趋势的影响,不同的植被覆盖类型其年均 NDVI 值域范围也不尽相同。混交林、针叶林等植被生长季年均 NDVI 值受到年际气候因子变化的影响较大,而草地的覆盖范围受季节性水热条件影响进而收缩或扩张^[27]。尤其在耕地区,由于近年来人类活动导致种植玉米和黄豆的农田不断开垦,要注意根据实地采样,来界定玉米和黄豆等作物植被 NDVI 范围,以排除无关因素的干扰。而在突变前后,能保持其原有覆盖度的东北部分地区集中分布了乌伊岭保护区 75% 以上的沼泽湿地,该地区保持其自身植被覆盖度稳定的能力可能与沼泽湿地在涵养调控水源、调节局部气候环境、保持自身生物多样性等方面^[28]的功绩有着密切的联系。

气候增温减湿的突变时期,整体植被生长季 NDVI 显著下降,高植被覆盖区大部分范围逐渐退化为中等、中低等植被覆盖区,森林茂盛植被覆盖密集的山地开始沿四周覆盖度迅速下降,这种气候突变加速区域植被退化状况的现象与 Lloret^[29]及 Walther^[30]等对于极端天气事件所影响植被生长覆盖的分析相一致,极端气候事件对植被造成的影响受到了国内外学者的广泛关注与研究^[31-32]。针对极端气候事件去进一步分析不同种类因素如碳循环作用^[33]、土壤自身物化特性(有机质组分、团聚体稳定性及疏水性)^[34],对研究区植被生长覆盖所造成的综合性影响,这还需要进行进一步的探讨与研究。

3.3 植被覆盖空间变化与气候因子相关性

植被覆盖状况与气候因子有着密不可分的联系,相较于传统地统计分析中,研究高分数据像元的小样本作为统计单元能精确反应植被覆盖和气候因子的空间相关性特征^[2,35]。与降水因子相比,乌伊岭自然保护区植被生长季年均 NDVI 与气温因子呈现显著的正相关关系;气温因子是影响研究区植被 NDVI 的主导因素,此结论与 Gottfried^[36]与 Xu^[37]等研究结果相一致。

气温因子是主要影响研究区植被空间覆盖状况的成因是多角度的,植被覆盖变化对气温变化的反应更为敏感^[38]。研究区常年受蒙古-西伯利亚高压控制,地处高纬,冬期较长。因此,在植被生长季前后,乌伊岭冬季的冰雪融水以及结冰期水域的冻融补充作用,使得植被生长所受水分条件的制约较小。并且研究区隶属北半球高纬度多年冻土区,冻土对热状态很不稳定,对外界环境因素改变极为敏感^[39]。因此,随着气温显著上

升,使得多年冻土开始缓慢退化,致使深层土壤营养物质能被植物利用,冻土层中的碳开始极易释放到大气中^[40],在客观上有利于植物在生长季的正常发育与光合作用^[41]。但值得警惕的是,虽然这种气候变化所导致的冻土退化为植被提供了营养物质与二氧化碳,但从长期来讲,这种变化过程中所带来的生态系统初级生产力和土地承载力变化下的消极作用^[34],其危害会大大超过土壤营养物质与二氧化碳本身对光合作用所直接带来的积极作用^[42],从而开始对植被正常的发育生长与生态系统的自我调节功能带来一系列负面的影响。

此外,除了气候因子的作用,人类活动也是影响植被覆盖度变化的重要驱动因素^[43]。由于本文选取的乌伊岭国家级自然保护区是人类活动较少,人为因素干扰弱的地区,因此并没有针对性讨论人类活动因子的影响。但近年来,随着城市化进程的发展,人类活动已越来越成为影响植被覆盖度变化的重要驱动因素。因此,对于如何多角度、多层次的讨论气候变化与人类活动对植被覆盖变化的影响,构建“气候—植被—人类活动”的动态研究机制,将会对地域性植被演化的研究起到促进作用,并对于建设区域生态的可持续发展工作也有着积极意义。

4 结论

本文基于 MODIS-NDVI 和 TM/ETM+遥感数据,结合近 62 年的气象观测数据,运用像元二分法模型、累计距平分析、Mann-Kendall 非参数检验、滑动 T 检验、相关性分析,揭示了乌伊岭自然保护区 1975—2016 年气候因子变化与植被覆盖的演化规律,结论如下:

(1) 气温显著上升,降水呈现下降的变化趋势,气温的年际间变化较强,降雨量的季节性差异明显。研究区整体气候变化呈现暖干化发展的趋势,1980—1995 年是气候因子增温减湿趋向最活跃的突变时期。

(2) 研究区年均植被生长季 NDVI 值为 0.673,有植被覆盖的区域占总面积的 87.69%。其中高等植被覆盖区所占的面积比最大,不同土地植被覆盖类型其植被覆盖度具有显著的空间差异性,草地空间分布受季节性水热条件影响较大,而分布广泛的沼泽湿地区植被覆盖变化则相对稳定。

(3) 在气候增温减湿的突变时期,植被覆盖度显著下降,各等级植被覆盖区突变前后面积变化状况:高等>中等>中高等>低等,高植被覆盖区逐渐退化为中等与中低等植被覆盖区,由中心高海拔山地向四周低地势地区辐散下降。受气候突变影响其不同植被覆盖类型的降幅:混交林>草地>针叶林>耕地>湿地。在 1980—1995 年气候突变时期植被覆盖退化的速率远远大于 1975—2016 年气候整体变化时期的速率,土地植被覆盖空间变化最为显著,退化最严重。

(4) 研究区年均最大 NDVI 与气温因子和降水因子的相关性分析中都表现出明显的空间差异性,在不同种类植被覆盖类型上其空间相关性均展现出不同的变化特征。无论在气候整体变化还是突变时期,气温因子的空间相关性均高于降水因子,即气温是影响植被覆盖变化的主导因素,也是导致乌伊岭自然保护区植被退化的主要影响因子。

致谢:感谢中国科学院地理科学与资源研究所吴文祥老师及其学生对实验的启发与帮助,感谢哈尔滨师范大学杨旭老师对实验的帮助,特此致谢。

参考文献 (References):

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Working Group II Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2014: 1-12.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 2-6.
- [3] 《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第二次气候变化国家评估报告.北京:科学出版社, 2011.
- [4] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth

- Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013; 3-8.
- [5] 姜晓艳,刘树华,马明敏,张菁,宋军.东北地区近百年降水时间序列变化规律的小波分析.地理研究,2009,28(02):354-362.
- [6] Zhao M S, Running S W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. *Science*, 2010, 329 (5994): 940-943.
- [7] Walker B, Steffen W, Canadell J, Ingram J. *The Terrestrial Biosphere and Global Change: Implications for Natural and Managed Ecosystems*. Stockholm, Sweden: Cambridge University Press, 1997.
- [8] Raich J W, Tufekciogul A. Vegetation and soil respiration: correlations and controls. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 71-90.
- [9] Hilker T, Lyapustin A I, Tucker C J, Hall F G, Myneni R B, Wang Y J, Bi J, de Moura Y M, Sellers P J. Vegetation dynamics and rainfall sensitivity of the Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(45): 16041-16046.
- [10] Wang X H, Piao S L, Ciais P, Li J S, Friedlingstein P, Koven C, Chen A P. Spring temperature change and its implication in the change of vegetation growth in North America from 1982 to 2006. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108 (4): 1240-1245.
- [11] Piao S L, Wang X H, Ciais P, Zhu B, Wang T, Liu J. Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006. *Global Change Biology*, 2011, 17(10): 3228-3239.
- [12] Cheng H. Abrupt climate change: debate or action. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(18): 1997-2002.
- [13] 阿多, 赵文吉, 宫兆宁, 张敏, 范云豹. 1981—2013 华北平原气候时空变化及其对植被覆盖度的影响. *生态学报*, 2017, 37(2): 576-592.
- [14] 邓兴耀, 刘洋, 刘志辉, 姚俊强. 中国西北干旱区蒸散发时空动态特征. *生态学报*, 2017, 37(9): 2994-3008.
- [15] 魏凤英. *现代气候统计诊断与预测技术(第二版)*. 北京: 气象出版社, 2007.
- [16] He F, Shakun J D, Clark P U, Carlson A E, Liu Z Y, Otto-Bliesner B L, Kutzbach J E. Northern Hemisphere forcing of Southern Hemisphere climate during the last deglaciation. *Nature*, 2013, 494(7435): 81-85.
- [17] 周秀杰, 王凤玲, 吴玉影, 那济海, 潘华盛, 王勇. 近 60 年来黑龙江省与东北及全国气温变化特点分析. *自然灾害学报*, 2013, 22(2): 124-129.
- [18] Andersen K K, Azuma N, Barnola J M, Bigler M, Biscaye P, Caillon N, Chappellaz J, Clausen H B, Dahl-Jensen D, Fischer H, Flückiger J, Fritzsche D, Fujii Y, Goto-Azuma K, Grönvold K, Gundestrup N S, Hansson M, Huber C, Hvidberg C S, Johnsen S J, Jonsell U, Jouzel J, Kipfstuhl S, Landais A, Leuenberger M, Lorrain R, Masson-Delmotte V, Miller H, Motoyama H, Narita H, Popp T, Rasmussen S O, Raynaud D, Rothlisberger R, Ruth U, Samyn D, Schwander J, Shoji H, Siggard-Andersen M L, Steffensen J P, Stocker T, Sveinbjörnsdóttir A E, Svensson A, Takata M, Tison J L, Thorsteinsson T, Watanabe O, Wilhelms F, White J W C. High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period. *Nature*, 2004, 431(7005): 147-151.
- [19] 贺伟, 布仁仓, 刘宏娟, 熊在平, 胡远满. 气候变化对东北沼泽湿地潜在分布的影响. *生态学报*, 2013, 33(19): 6314-6319.
- [20] Cattiaux J, Vautard R, Cassou C, Yiou P, Masson - Delmotte Y V, Codron F. Winter 2010 in Europe: a cold extreme in a warming climate. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(20): L20704.
- [21] Rodriguez-Iturbe I. Ecohydrology: A hydrologic perspective of climate-soil-vegetation dynamics. *Water Resources Research*, 2000, 36(1): 3-9.
- [22] Tucker C J, Pinzon J E, Brown M E, Slayback D A, Pak E W, Mahoney R, Vermote E F, El Saleous N. An extended AVHRR 8 - km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(20): 4485-4498.
- [23] Jeong S J, Ho C H, Gim H J, Brown M E. Phenology shifts at start vs. end of growing season in temperate vegetation over the Northern Hemisphere for the period 1982-2008. *Global Change Biology*, 2011, 17(7): 2385-2399.
- [24] Song X, Saito G, Kodama M, Sawada H. Early detection system of drought in East Asia using NDVI from NOAA/AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(16): 3105-3111.
- [25] Wilson N R, Norman L M. Analysis of vegetation recovery surrounding a restored wetland using the normalized difference infrared index (NDII) and normalized difference vegetation index (NDVI). *International Journal of Remote Sensing*, 2018, 39(10): 3243-3274.
- [26] Gamon J A, Kovalchuck O, Wong C Y S, Harris A, Garrity S R. Monitoring seasonal and diurnal changes in photosynthetic pigments with automated PRI and NDVI sensors. *Biogeosciences*, 2015, 12(13): 4149-4159.
- [27] Shen M G, Tang Y H, Chen J, Zhu X L, Zheng Y H. Influences of temperature and precipitation before the growing season on spring phenology in grasslands of the central and eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(12): 1711-1722.
- [28] McLaughlin D L, Cohen M J. Realizing ecosystem services: wetland hydrologic function along a gradient of ecosystem condition. *Ecological Applications*, 2013, 23(7): 1619-1631.
- [29] Lloret F, Escudero A, Iriondo J M, Martínez - Vilalta J, Valladares F. Extreme climatic events and vegetation: the role of stabilizing processes. *Global Change Biology*, 2012, 18(3): 797-805.
- [30] Walther G R, Post E, Convey P, Menzel A, Parmesan C, Beebee T J C, Fromentin J M, Hoegh-Guldberg O, Bairlein F. Ecological responses to

- recent climate change. *Nature*, 2002, 416(6879): 389-395.
- [31] Cinelli F, Picchi C, Saggese A, et al. Assessment and management of vegetation and green areas to prevent damage caused by extreme weather events. 2018;9-41.
- [32] 殷刚, 孟现勇, 王浩, 胡增运, 孙志群. 1982-2012 年中亚地区植被时空变化特征及其与气候变化的相关分析. *生态学报*, 2017, 37(9): 3149-3163.
- [33] Reichstein M, Bahn M, Ciais P, Frank D, Mahecha M D, Seneviratne S I, Zscheischler J, Beer C, Buchmann N, Frank D C, Papale D, Rammig A, Smith P, Thonicke K, van der Velde M, Vicca S, Walz A, Wattenbach M. Climate extremes and the carbon cycle. *Nature*, 2013, 500(7462): 287-295.
- [34] Schmidt M W I, Torn M S, Abiven S, Dittmar T, Guggenberger G, Janssens I A, Kleber M, Kögel-Knabner I, Lehmann J, Manning D A C, Nannipieri P, Rasse D P, Weiner S, Trumbore S E. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, 2011, 478(7367): 49-56.
- [35] Richardson A D, Keenan T F, Migliavacca M, Ryu Y, Sonnentag O, Toomey M. Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 169: 156-173.
- [36] Gottfried M, Pauli H, Futschik A, Akhalkatsi M, Barančok P, Alonso J L B, Coldea G, Dick J, Erschbamer B, Calzado M R F, Kazakis G, Krajčiči J, Larsson P, Mallaun M, Michelsen O, Moiseev D, Moiseev P, Molau U, Merzouki A, Nagy L, Nakhutsrishvili G, Pedersen B, Pelino G, Puscas M, Rossi G, Stanisci A, Theurillat J P, Tomaselli M, Villar L, Vittoz P, Vogiatzakis I, Grabherr G. Continent-wide response of mountain vegetation to climate change. *Nature Climate Change*, 2012, 2(2): 111-115.
- [37] Xu L, Myneni R B, Chapin III F S, Callaghan T V, Pinzon J E, Tucker C J, Zhu Z, Bi J, Ciais P, Tømmervik H, Euskirchen E S, Forbes B C, Piao S L, Anderson A T, Ganguly S, Nemani R R, Goetz S J, Beck P A S, Bunn A G, Cao C, Stroeve J C. Temperature and vegetation seasonality diminishment over northern lands. *Nature Climate Change*, 2013, 3(6): 581-586.
- [38] Park H S, Sohn B J. Recent trends in changes of vegetation over East Asia coupled with temperature and rainfall variations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, 115(D14): D14101.
- [39] 马巍, 王大雁. 深土冻土力学的研究现状与思考. *岩土工程学报*, 2012, 34(6): 1123-1130.
- [40] Hugelius G, Tarnocai C, Broll G, Canadell J G, Kuhry P, Swanson D K. The Northern Circumpolar Soil Carbon Database: spatially distributed datasets of soil coverage and soil carbon storage in the northern permafrost regions. *Earth System Science Data*, 2013, 5(1): 3-13.
- [41] Stendel M, Christensen J H. Impact of global warming on permafrost conditions in a coupled GCM. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(13): 1632.
- [42] Cramer W, Bondeau A, Woodward F I, Prentice I C, Betts R A, Brovkin V, Cox P M, Fisher V, Foley J A, Friend A D. Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change: results from six dynamic global vegetation models. *Global Change Biology*, 2001, 7(4): 357-373.
- [43] Brandt M, Hiernaux P, Tagesson T, Verger A, Rasmussen K, Diouf A A, Mbow C, Mougin E, Fensholt R. Woody plant cover estimation in drylands from Earth Observation based seasonal metrics. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 172: 28-38.