

DOI: 10.5846/stxb201912222759

李丽纯,周广胜.武夷山国家公园森林植被对景区活动的响应.生态学报,2020,40(20):7267-7276.

Li L C, Zhou G S. Response of forest vegetation to scenic activities in Wuyishan National Park. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(20): 7267-7276.

武夷山国家公园森林植被对景区活动的响应

李丽纯^{1,2}, 周广胜^{3,*}

1 福建省灾害天气重点实验室, 福州 350001

2 福建省气象科学研究所, 福州 350001

3 中国气象科学研究院, 北京 100081

摘要:科学地规划游客的数量与时段已经成为当前国家公园迫切需要解决的问题。基于 2000—2018 年 MODIS 250 m NDVI 数据、土地覆盖/利用数据、90 m 高程 (DEM) 数据、地理信息数据和气象资料等, 分析研究了武夷山国家公园不同景区活动类型 (保护区、景区和过渡区) 森林植被的生长季、NDVI 年际变化趋势和脆弱性。结果表明: (1) 相对于保护区植被生长季 10 月份结束, 景区植被生长季结束期提前, 最早提前到 9 月份。 (2) 2000—2018 年气候变化和景区活动均带来植被指数的增加, 但景区活动影响大于气候变化影响。 (3) 景区活动加重森林植被的脆弱性, 其脆弱性程度呈景区>过渡区>保护区。 (4) 景区活动对森林植被呈负作用, 但正在发生的气候变暖和景区有效管理可在一定程度上补偿这一负作用。研究结果可为武夷山国家公园制定旅游时间和游客数量提供决策依据。

关键词:武夷山; 国家公园; 森林植被; 景区活动; 植被生长季; 脆弱性

Response of forest vegetation to scenic activities in Wuyishan National Park

LI Lichun^{1,2}, ZHOU Guangsheng^{3,*}

1 Fujian Key Laboratory of Severe Weather, Fuzhou 350001, China

2 Fujian Institute of Meteorological Science, Fuzhou 350001, China

3 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: The purpose of making a national park is to protect the country's important natural ecosystems, as well as the plants and animals that live there. Scientific planning of the quantity and travel time of tourists has become an urgent issue for national parks. Wuyishan National Park is composed of three areas: Wuyishan National Nature Reserve (BHQ), Wuyishan National Scenic Area (JQ), and areas in-between (GDQ). Based on the normalized difference vegetation index (NDVI) (250 m resolution) from 2000 to 2018, digital elevation model (DEM, 90 m resolution), land cover/usage data, geographic information data, and meteorological data, we estimated the length of growing season, interannual variability of NDVI, and Vulnerability of forest vegetation in the three types of areas (BHQ, JQ, GDQ) of Wuyishan National Park, and assessed the impact of human activities and climate change on the growth of forest vegetation. We set up 5 vegetation plots in each type of areas (BHQ, JQ, GDQ) under similar climatic conditions for the study. The results show that tourist activities shortened the growing season of forests. The growing season of JQ ends in September, one month earlier than that of BHQ, due to the change of vegetation types caused by tourist activities. Both climate change and tourist activities from 2000 to 2018 increased NDVI, while the impact of tourist activities was greater than that of climate change. The annual NDVI growth rate of JQ, GDQ, and BHQ was 0.046/10a, 0.032/10a, and 0.007/10a, respectively. The growing season mean temperature was found to be largely responsible for the change of forest vegetation, and an increase in temperature was

基金项目:国家重点研发计划 (2018YFA0606103); 福建省气象局开放式基金项目 (2020K04)

收稿日期:2019-12-22; **网络出版日期:**2020-08-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhousg@cma.gov.cn

beneficial to the vegetation growth. Tourist activities increased the Sensitivity of forest vegetation and reduced the Adaptability of forest vegetation, which in turn increased the Vulnerability of forest vegetation. As a result, the ranking of Sensitivity and Vulnerability for the three types of areas was $JQ > GDQ > BHQ$, while that of the Adaptability was $BHQ > GDQ > JQ$. Tourist activities degraded the structure and function of ecosystems, which showed greater vulnerability and instability. Part of the negative effect from tourist activity on the change of forest vegetation was offset by climate warming and effective tourism management. This study shed insights into the planning of travel time and quantity of tourists in Wuyishan National Park.

Key Words: Wuyishan; national park; forest vegetation; tourist activity; growing season; vulnerability

国家公园是指由国家批准设立并主导管理,边界清晰,以保护具有国家代表性的大面积自然生态系统为主要目的,实现自然资源科学保护和合理利用的特定陆地或海洋区域^[1]。建立国家公园体制的主要目标一是国家重要自然生态系统原真性、完整性得到有效保护,二是实现人与自然的和谐共生。如何科学规划游客的数量和旅游时段,实现保护与利用和谐统一,成为当前国家公园迫切需要解决的问题。了解旅游对主要生态系统的影响是解决这个问题的关键。

植被是陆地生态系统的核心部分,是气候要素、地貌、土壤和人类活动长期互相作用的结果^[2],对气候变化和人类活动十分敏感^[3-10]。归一化植被指数(NDVI, Normalized Difference Vegetation Index)与植被的许多参数密切相关,如光合作用、叶绿素密度、叶面积指数、植被覆盖度等,可反映植被生长状况和变化特征^[11],其数值的大小可以表征植被活动强弱^[12-13],时序变化可识别植被季节物候特征^[14-16]。基于遥感植被指数的长时间序列开展植被变化对气候变化、人类活动等要素的响应已有大量研究^[5-6,10,16-20],当前发展趋势是分离人类活动和气候变化对植被生长的影响。2010 年以来,有一些学者率先开展了相关研究^[7-10,17-21],主要方法有残差趋势法^[9-10]、数学模型法^[7-8]和变异系数法^[22]等。这些研究主要集中在评估人类活动对植被覆盖和植被生产力的影响方面,还没有研究人类活动对植被生长季和脆弱性的影响,制约着对人类活动影响的全面认识。

武夷山国家公园是我国首批十个开展国家公园体制试点区域之一,自 2017 年试点以来,国家公园规范化管理一直处于摸索阶段。园内有国家级自然保护区、风景名胜区和介于二者之间的过渡区,长期以来三个区域处于不同的景区活动类型影响下。其中,武夷山景区游客数从 1981 年的 5.9 万人次增加到 2017 年的 10.4 万,最高达到 13.7 万。游客数量增加和景观破碎化对景区生态环境产生了重要影响^[23-24]。然而,对不同景区活动类型影响下的森林变化敏感因子和人类活动影响研究,尚缺少相关报道。本研究试图以武夷山国家公园为研究区域,分析研究同一气候区内不同景区活动类型(旅游与管理的景区、过渡区、保护区)对森林植被生长季、归一化植被指数和脆弱性等森林变化敏感因子的影响,以丰富景区旅游对森林植被影响的认知,为科学地规划游客的数量与旅游时段提供决策依据。

1 研究地区与方法

1.1 研究区域概况

武夷山国家公园体制试点区位于福建省北部,周边分别与福建省武夷山市西北部、建阳市和邵武市北部、光泽县东南部、江西省铅山县南部毗邻,总面积 1001.41 km²,主体由福建武夷山国家自然保护区、武夷山风景名胜区和二者的过渡区 3 个部分组成,以下简称保护区(BHQ, Wuyishan National Nature Reserve)、景区(JQ, Wuyishan National Scenic Area)和过渡区(GDQ, Areas between Wuyishan National Nature Reserve and Wuyishan National Scenic Area)。保护区基本处于无旅游干扰状态;景区受旅游干扰和园区植被恢复管理影响,特别是在旅游旺季(五一、国庆、暑假和元旦)人流量大,影响显著;过渡区为原住民生活和生产的区域,拥有部分生态旅游人群,常年人流量比较稳定。为消除非气候要素、地形差异和土地覆盖类型改变导致的归一化植被指数波动,从武夷山国家公园 2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年土地利用覆盖数据中提取出森林类型在研

究时段一直未发生变化的区域作为研究对象。在中海拔地带的保护区、景区和过渡区选取同等数量(3类研究区中能选取的均匀样地最大数)的1 km×1 km样地,人工反复多次采点后确定每个研究区的代表性样地数为5,编号1—5(图1)。15个植被样地的年平均气温在18.7—18.8℃间,变率均为0.0377℃/a,年累积降水量在1900 mm左右,变率为13—14 mm/a,与武夷山站无显著差异,且直线距离小于50 km,可认为与武夷山站同属一气候区,因此采用武夷山站的气候要素值分析样地气候状况。

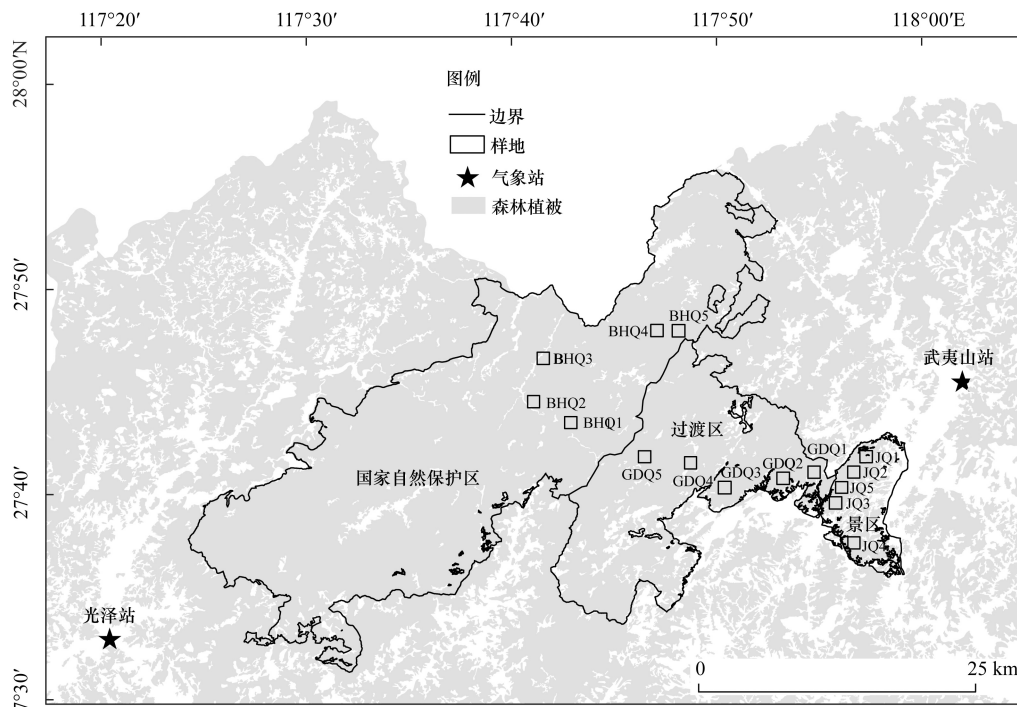


图1 武夷山国家公园15个植被样地位置图

Fig.1 Location map of the 15 vegetation plots in Wuyishan National Park

BHQ:武夷山国家自然保护区, Wuyishan National Nature Reserve; JQ:武夷山风景名胜区, Wuyishan National Scenic Area; GDQ:武夷山国家自然保护区和武夷山风景名胜区之间的过渡区, Areas between Wuyishan National Nature Reserve and Wuyishan National Scenic Area; BHQ1—BHQ5、JQ1—JQ5、GDQ1—GDQ5 依次为保护区、景区和过渡区的1号到5号森林植被样地

1.2 资料来源和处理

研究所用数据包括2000—2018年MODIS 250 m NDVI逐月数据,为最大值合成法生成的逐月最大NDVI数据,像元值为放大10000倍的NDVI值,由国家卫星气象中心提供,资料已经过严格质量控制;2000年、2005年、2010年、2015年30 m分辨率土地利用/覆盖(LUCC, Land Use/Cover Change)专题数据,由国家卫星气象中心提供;武夷山国家公园矢量边界,由武夷山国家公园管理局提供;武夷山国家公园90 m分辨率DEM数据,由国家气象信息中心提供;武夷山国家公园周边10个国家气象站的温度、降水月值,由福建省气象局提供,采用反距离权重法插值到1 km×1 km。基于ArcGIS提取样地NDVI数据并统计样地年、月、生长季NDVI的平均值、最大值等数据。

1.3 研究方法

1.3.1 生长季

计算3类研究区15个样地2000—2018年逐月的NDVI像元平均值,绘制3类研究区15个样地的森林植被月NDVI的变化曲线,以植被生长光谱曲线出现明显拐点的时间(如NDVI下降至最低点和上升至最高点)综合判断生长季的起始时间和结束时间,分析不同景区活动类型对武夷山植被生长季的影响。

1.3.2 变化趋势率

将 3 类研究区的 NDVI 进行一元线性回归处理,回归方程斜率代表 NDVI 在研究时段的变化趋势,若斜率小于 0,说明该时段内植被呈减少趋势,反之则为增加趋势,计算如下:

$$y_{\text{NDVI}} = \frac{n \sum_{j=1}^n j x_j - \sum_{j=1}^n j \sum_{j=1}^n x_j}{n \sum_{j=1}^n j^2 - \left(\sum_{j=1}^n j \right)^2}$$

式中, y_{NDVI} 为 NDVI 的变化趋势(即斜率); n 为研究时段的年数; x_j 为第 j 年研究区样地的 NDVI 值。

1.3.3 NDVI 偏差

NDVI 偏差已经广泛应用于植被动态监测^[25],是 NDVI 实际值在其多年平均值上下浮动的量,可计算如下^[26]:

$$x'(k, m, y) = [x(k, m, y) - \bar{x}(k, m)]$$

长时间序列 NDVI 月平均值为:

$$\bar{x}(k, m) = \frac{1}{n} \sum_{y=1}^{y=n} x(k, m, y)$$

式中, $x(k, m, y)$ 为第 k 个像元第 y 年第 m 月的 NDVI 值。在此,采用年 NDVI 实际值与多年平均值差来反应植被的年变化,年 NDVI 值为一年 12 个月 NDVI 的平均值。

1.3.4 脆弱性

气候变化专门委员会(IPCC)在第三次评估报告中给出脆弱性的定义,即脆弱性为一个自然的或社会的系统容易遭受来自气候变化(包括气候变率和极端气候事件)持续危害的范围或程度,是系统内的气候变率特征、幅度和变化速率及其敏感性和适应能力的函数,用简单的数学形式可表达为:

$$V = S - A$$

式中, V 为系统的脆弱性; S 为系统的敏感性或敏感度,即系统对外界因子变化的响应程度; A 为系统的适应性(IPCC, 2001)。 V 越小,表示生态系统脆弱性越低,反之脆弱性高。

本研究采用生态系统脆弱性评估方法^[27-28],利用 NDVI 年最大值和平均值计算森林植被的适应性、敏感性和脆弱性。其中,敏感性 S 定义为植被在某一方面对外界环境变化的响应程度,以植被功能特征量的年际波动情况来表示:

$$S_0 = \frac{\sum_{i=1}^n |F_i - \bar{F}|}{\bar{F}}$$

$$S = \frac{S_0 - S_{0\min}}{S_{0\max} - S_{0\min}}$$

式中, F_i 表示第 i 年的年 NDVI, $\bar{F}$ 表示在研究时段内年 NDVI 的年平均值, $S_{0\max}$ 和 $S_{0\min}$ 分别为 S_0 的最大值和最小值, S 为 S_0 归一化处理结果, S 值越大,敏感性越高,为正向指标。

适应性表示植被的自适应能力,是植被应对外界环境变化,保持相对稳定状态的一种度量。采用年 NDVI 相对距平在一定时段内年际变化线性拟合趋势线的斜率来表示,变率变化趋势越小,表示系统越稳定,为逆向指标。因此还需对标准化后的斜率进行正向化处理:

$$y = A_0 x + b$$

$$A_0 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$A_{\text{nor}} = \frac{A_0 - A_{0\min}}{A_{0\max} - A_{0\min}}$$

$$A = 1 - A_{\text{nor}}$$

式中, y 为年 NDVI 的相对距平, 即 $(F_i - \bar{F}) / \bar{F}$; A_0 表示变率的变化趋势, 即植被的自适应能力, x 表示给定时间段内的年序, 同上, A_{nor} 为 A_0 归一化处理结果, A 为 A_{nor} 正向化处理结果。

2 结果分析

2.1 植被生长季变化

计算 15 个样地多年的月平均 NDVI 值, 作年内生长变化曲线。3 类研究区 NDVI 的最低值均出现在 3—4 月(图 2), 景区 5 个植被样地(JQ1—JQ5)和过渡区邻近景区的 2 个样地(GDQ1、GDQ2)的 NDVI 最高值出现在 9 月, 保护区 5 个植被样地(BHQ1—BHQ5)和过渡区与其邻近的 3 个植被样地(GDQ3—GDQ5)出现在 10 月。可见, 相对于保护区植被生长季 10 月份结束, 景区植被生长季结束期提前到 9 月份。景区和过渡区中邻近景区的样地植被生长季为 4—9 月, 与全省尺度的植被生长季研究结果一致^[29]。由于 3 类研究区植被样地气候条件无差异, 说明景区植被生长季的主要影响因素为人类活动, 即景区活动导致植被生长季结束提前。

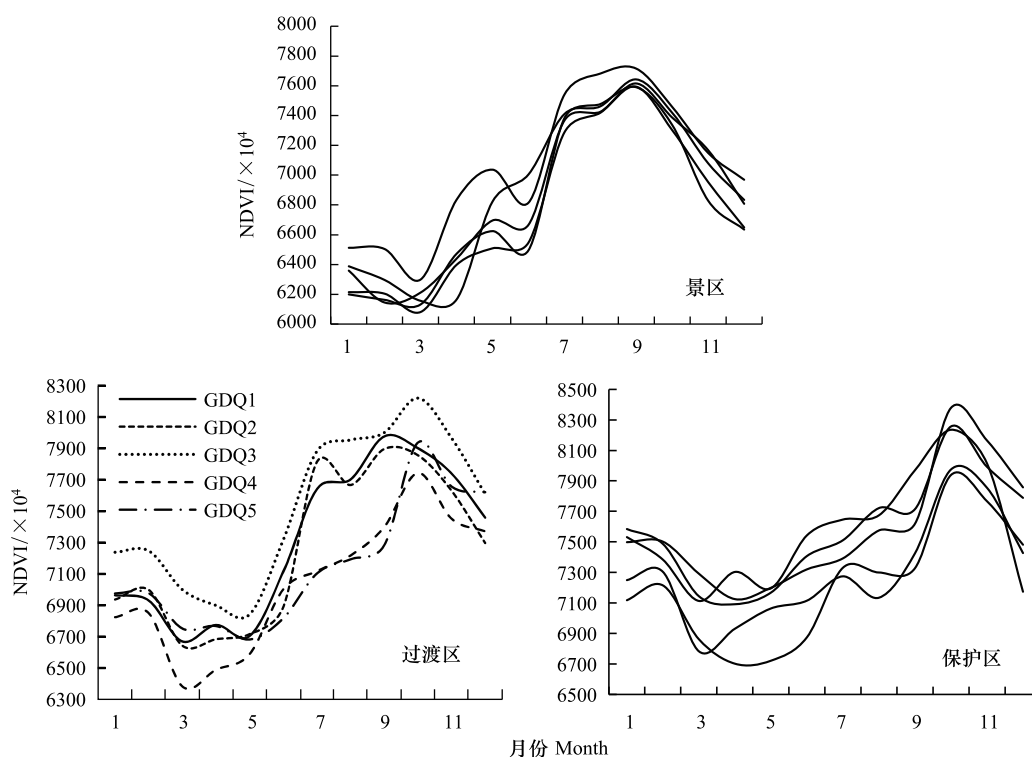


图 2 3 类研究区 NDVI 的年内变化趋势图

Fig.2 Intra-annual trend of NDVI in three types of researching areas

2.2 NDVI 的年际变化

3 类研究区的月、年、生长季、非生长季的 NDVI 平均值, 以及武夷山站的气温和降水随时间变化的线性回归结果表明(表 1), 受人类活动影响, 无论是生长季还是非生长季, 景区和过渡区植被 NDVI 均呈明显的上升趋势, 尤其非生长季上升趋势非常明显, 多数月份达到显著甚至极显著水平。全年 NDVI 景区平均增速为 0.046/10a, 过渡区为 0.032/10a, 景区增速略高于过渡区。保护区月 NDVI 增长除非生长季的 3 月和 11 月达到显著性水平外, 其余时段的 NDVI 增长并未达到显著性水平, 全年、生长季、非生长季的 NDVI 增长也都未达

到显著性水平。3类研究区生长旺期(5—8月)NDVI变化趋势均未达到显著性水平。从NDVI的绝对增长而言,人类活动对过渡区和风景名胜区的植被生长起到积极的作用,可能与长期以来的景观绿化工程和人工抚育有关;生长旺期上升不显著,可能与NDVI在植被生长旺盛期容易达到饱和有关^[30-31];非生长季森林NDVI因指数相对较低,不易达到饱和,能够较准确地反应植被的年际变化情况,与全年NDVI增长趋势一致,均呈显著上升趋势。

武夷山气象站全年、生长季和非生长季平均气温呈不显著上升趋势(表1)。3类研究区年NDVI偏差与全年、生长季、非生长季的平均气温、累积降水距平值的Pearson相关分析表明,过渡区、保护区的NDVI偏差与生长季的平均气温距平呈显著正相关,相关系数分别为0.497和0.506($P<0.05$),景区NDVI偏差与全年、生长季和非生长季平均气温距平的相关未达到显著性水平;3类研究区NDVI偏差与全年、生长季和非生长季的累积降水距平均无显著相关(表2)。也就是说,在无人活动影响状态下,影响国家公园植被生长的主要气象因子为生长季平均气温,气候变暖有利于植被指数增加;一定程度人类活动影响(过渡区)对植被生长影响较小,植被变化与气温变化亦显著相关;景区因影响植被生长的因素除气象因子外,还存在较多不确定要素,人类活动影响下主要影响因素发生转变,导致植被变化与气象因子变化无明显相关性。

表1 2000—2018年NDVI和气象要素的线性变化趋势

Table 1 Linear trends of NDVI and meteorological factors from 2000 to 2018

时间 Time	K_{JQ}	K_{GDQ}	K_{BHQ}	K_T	K_P
1月 Jan	80 **	20	17	0.024	-2.068
2月 Feb	85 **	40 **	-4	-0.045	-0.772
3月 Mar	42	44 *	43 *	0.020	4.342
4月 Apr	35 *	56 *	32	0.031	-3.32
5月 May	52	73	23	0.021	7.99
6月 Jun	-37	-7	-59	0.019	3.44
7月 Jul	29	5	-34	-0.014	-0.78
8月 Aug	31	-11	-1	0.031	-1.32
9月 Sep	48 **	30 *	-9	0.057	2.64
10月 Oct	47 *	30	-4	0.035	-2.36
11月 Nov	66 *	31 *	31 **	0.066	2.65
12月 Dec	74 **	76 **	60	-0.15	1.35
全年 Yearly	46 **	32 **	7	0.021	14.44
生长季 Growing season	26 *	25 *	-9	0.023/0.024	1.29/8.93
非生长季 Non-growing season	66 **	42 **	29	0.016/0.012	3.15/5.51

K_{JQ} : 景区NDVI年际变化趋势率, Interannual trend rate of NDVI in Wuyishan national scenic area; K_{GDQ} : 过渡区NDVI年际变化趋势率, Interannual trend rate of NDVI in the area between Wuyishan national nature reserve and Wuyishan national scenic area; K_{BHQ} : 保护区NDVI变化趋势率, Interannual trend rate of NDVI in Wuyishan national nature reserve; K_T : 武夷山站平均气温年际变化趋势率, Interannual trend rate of mean temperature at Wuyishan station; K_P : 武夷山站累积降水年际变化趋势率, Interannual trend rate of accumulated precipitation at Wuyishan station; * 表示NDVI年际变化达到显著性水平($P<0.05$); ** 表示NDVI年际变化达到极显著水平($P<0.01$);生长季 K_T 、 K_P 前后2个值各对应4—9月和4—10月的要素年际变化趋势率,非生长季与生长季相对应

表2 研究区NDVI偏差和气象要素的相关分析

Table 2 Correlation analysis between NDVI deviation and meteorological factors in researching areas

要素 Factors	时间 Time	相关系数及显著性 Correlation coefficient and significant		
		NDVI 偏差(JQ) NDVI deviation(JQ)	NDVI 偏差(GDQ) NDVI deviation(GDQ)	NDVI 偏差(BHQ) NDVI deviation(BHQ)
平均气温距平 Mean temperature anomaly	全年	0.427	0.231	0.326
	生长季	0.407	0.497 *	0.506 *
	非生长季	0.126	-0.113	-0.030
降水距平 Precipitation anomaly	全年	-0.154	-0.317	-0.059
	生长季	-0.181	-0.310	-0.055
	非生长季	0.002	-0.071	-0.069

* 表示两个要素在 $P<0.05$ 水平相关显著

2.3 对植被脆弱性的影响

基于 NDVI 月时间序列构建 15 个研究样地 NDVI 年最大值、NDVI 年平均值的时间序列。其中,NDVI 年最大值为一年中 12 个月 NDVI 的最大值,可反映植被一年的最好生长状态;NDVI 年平均值为一年中 12 个月的 NDVI 平均值,可反映植被全年的生产力水平。基于 15 个研究样地 NDVI 年平均值和年最大值计算植被敏感性、适应性和脆弱性指数(表 3)。从单个样地指数值看,景区植被的敏感性和脆弱性明显高于过渡区和保护区,适应性低于保护区和过渡区,保护区和过渡区部分样地的 3 个指数比较近。从总体上,森林植被敏感性和脆弱性为保护区<过渡区<景区,适应性为景区<过渡区<保护区;保护区、景区、过渡区的适应性均为正值。保护区森林植被对外界环境敏感度较低,自我调节能力较强,脆弱性低;相反,景区植被对外界环境敏感度较高,脆弱性高,可能与长期受人类活动影响有关;过渡区介于保护区和景区之间,敏感性、适应性和脆弱性均介于二者之间。在气候变暖背景下,3 类研究区植被对气候变化的适应性指数为正值,说明植被对气候变化仍具有自我调控和恢复的能力,但景区部分样地的适应性已经接近 0 值,这表明植被可能逐步失去自行调控和恢复的能力。

表 3 3 类研究区样地森林植被敏感性、适应性和脆弱性指数
Table 3 Sensitivity, Adaptability and Vulnerability indexes for the forest vegetation plots in the three types of researching areas

样地 Plots	NDVI 年最大值 Annual maximum value of NDVI			NDVI 年平均值 Annual mean value of NDVI		
	敏感性 Sensitivity	适应性 Adaptability	脆弱性 Vulnerability	敏感性 Sensitivity	适应性 Adaptability	脆弱性 Vulnerability
JQ1	0.79	0.13	0.66	0.87	0.00	0.87
JQ2	1.00	0.00	1.00	1.00	0.14	0.86
JQ3	0.72	0.35	0.37	0.79	0.19	0.60
JQ4	0.83	0.06	0.77	0.87	0.13	0.74
JQ5	0.63	0.25	0.38	0.87	0.11	0.76
GDQ1	0.38	0.65	-0.27	0.21	0.56	-0.35
GDQ2	0.44	0.35	0.08	0.55	0.23	0.32
GDQ3	0.12	0.90	-0.77	0.14	0.57	-0.44
GDQ4	0.50	0.31	0.18	0.46	0.27	0.19
GDQ5	0.28	0.56	-0.29	0.25	0.47	-0.22
BHQ1	0.08	0.83	-0.75	0.28	0.67	-0.40
BHQ2	0.16	1.00	-0.84	0.38	1.10	-0.72
BHQ3	0.67	0.88	-0.21	0.16	0.89	-0.73
BHQ4	0.12	0.85	-0.73	0.02	0.83	-0.81
BHQ5	0.00	0.96	-0.96	0.00	1.01	-1.01

3 结论与讨论

本研究基于 2000—2018 年 MODIS 250 m NDVI 数据、土地覆盖/利用数据、地理信息数据、地理高程数据和气象资料,分析研究了武夷山国家公园不同景区活动类型(保护区、过渡区和景区)森林植被的生长季、年际变化趋势和脆弱性。

(1) 景区活动导致植被生长季结束提前。

保护区植被生长季于 10 月结束,而景区植被生长季提前至 9 月结束。尽管景区和过渡区所选植被样地的气候特征与保护区相似,但受人类活动影响,植被类型发生了明显改变,优势植被不再是常绿阔叶林(原生植被),植被生长季因此发生明显变化。据了解,3 类研究区中,保护区内保存着较好的原生植被,地带性植被特征分布明显,中低海拔以常绿阔叶林为主,景区受人类活动影响,常绿阔叶树种已经支离破碎,植被以马尾松和杉木林为主,过渡区介于二者之间,植被以阔叶林、毛竹林为主,茶树为辅。本文认为,导致 3 类研究区植

被生长季变化的主因是景区活动导致的植被类型和组成的改变。土地利用/覆被变化(LUCC)是最具人类特征活动的形式,人类在生产、生活及其他方式中改变土地利用方式,会直接影响植物光合作用和呼吸作用^[27,32],进而影响植被生产力。研究表明,在土地利用类型不变的情况下,植被类型和组成的改变也会直接影响植物生长要素的变化。

植被生长季受气候变化和人类活动的双重影响,已经有众多学者开展了气候变化对生长季的影响研究,并已发现植被生长季的开始和结束与气候变暖密切相关^[14,16]。本研究基于月尺度 NDVI 数据对 3 类研究区森林植被的平均生长季进行分析,初步阐明人类活动对植被生长季的影响,但尚未对气候变化导致的生长季变化进行研究。尽管 3 类研究区气候特征具有一致性,但不同植物物种的物候期对于气候变化的响应不尽相同^[33],研究生长季对气候变化的响应可为气候变化背景下景区管理和规划提供决策参考。同时,人类活动除了景观工程等直接影响外,可能还会引起小气候、土壤微生物等环境要素的变化^[34-35],目前所采用的气候资料为国家气象站插值后的资料,尚无法反映人类活动导致的小气候环境变化。要了解景区活动对研究区小气候环境的影响及小气候变化带来的植被生长变化,还需要精细化、高密度的小气候观测试验支持。

(2) 气候变化和人类活动均使得武夷山森林植被指数增加,人类活动对植被指数增长的影响大于气候变化影响。

本研究中 2000—2018 年景区和过渡区的人类活动带来植被指数的显著增加,保护区生长季气温的增加伴随植被指数的不显著上升,可见人类活动对植被指数增长的影响大于气候变化。在生态保护大背景下,国家实施的天保工程和退耕还林还草等工程已经给很多地方植被增长带来积极影响,包括新疆^[6]、黄土高原^[9]、三江源^[10]、秦岭^[20]等地,有些区域人类活动贡献大于气候变化贡献,也有一些区域气候变化贡献大于人类活动贡献。景区活动对植被的影响大体可以分为二类,一是直接影响,如通过景观工程、生产灌溉等提高植被覆盖,对植被指数的增加具有最直接的效果;二是间接影响,即景观工程与游客活动造成土壤、大气、水、生物多样性等的变化,进而影响植被的生长,这类影响将干扰生态系统的健康。尽管本研究在选取研究对象时已经剔除土地利用类型变化可能造成的干扰,但受遥感影像分辨率影响,对小面积的土地绿化仍无法剔除,更无法反映植被类型和组成变化导致的植被生长要素的变化。景区植被指数增加可能与景区的人工造林、景观工程、人工抚育等积极活动有关,过渡区植被指数增加可能与茶树种植、耕作管理等有关。景区活动带来的生态系统中土壤、大气、环境变化如何影响植被生长还需要进一步研究实现。

关于人类活动对植被变化的影响研究,目前仍主要集中在人类活动对植被覆盖和植被生产力的影响方面^[8-10],尚缺少结合植被潜在风险(如脆弱性)、植被群落结构等的影响评估,还不能系统反映人类活动对植被生长的贡献。就武夷山国家公园而言,在某些区域还存在盲目种植茶树的现象,导致了局地植被类型的单一化,植被覆盖和植被生产力表面上增加,但是与原生植被相比,抵御自然灾害和水土保持的能力却大幅下降。要准确评估人类活动对植被生长的贡献,需要充分考虑植被群落结构、抵御自然灾害的能力、生长状况等,建立一套统一、可操作性强的指标体系和方法。

(3) 景区活动加重了森林植被的脆弱性,植被对气候变化的适应性下降。

脆弱性是指由于系统对系统内外扰动的敏感性以及缺乏应对能力从而使系统的结构和功能容易发生改变的一种属性,这种属性在系统受到扰动和压力时就会显现出来^[36]。扰动与系统的相互作用会使脆弱性增大或缩小,是系统脆弱性发生的驱动因素^[36]。保护区属自然生态系统,对无机环境具有深刻的适应,具有自行调控和不断更新的能力^[2]。在武夷山国家公园内,景区的较强人类活动和过渡区的较弱人类活动对森林植被生长的影响在脆弱性上得到体现,人类活动强弱直接决定了森林植被脆弱性的强弱。与气候变化相比,人为干扰对全球植被变化造成的破坏更大,植被遭受人为干扰和气候变化的区域是生态脆弱区^[37],人类活动使生态系统的结构、功能发生退化,表现出更大的脆弱性和不稳定性^[38],已有研究说明人类活动对植被变化带来的不利影响是显而易见的,与本文结论一致。

本研究基于 NDVI 进行武夷山国家公园森林植被脆弱性评价,在一定程度上能反映森林植被的健康状

况,但考虑到植被的复杂性和气候变化的不确定性,未来研究中可能要加入更多的评估指标,建立更为适用的评估模型,以准确、全面评估植被的脆弱性。

(4) 景区活动对植被有负作用,气候变暖和人类积极活动在一定程度上可抵消这一负作用。

植被增加不等同于植被健康。研究发现,尽管景区植被指数增加趋势明显高于保护区和过渡区,但其脆弱性和适应性均显著低于保护区,一旦有极端气象灾害发生,植被所遭遇的风险将显而易见。传统的森林健康评价因子包括蓄积量、生物量、郁闭度、面积等^[39],可以从遥感影像中提取植被指数、叶面积指数、光合有效辐射等信息反映出来,故归一化植被指数只能反映植被健康的某一方面。本研究表明,武夷山国家公园森林 NDVI 增加,与全球、全球干旱区、欧亚大陆以及中国东部沿海等不同空间尺度上关于植被 NDVI 变化趋势的研究结果相一致^[40]。影响武夷山国家公园植被生长的主要气象因子为生长季平均气温,气候变暖有利于该区域植被的生长,与王晓利等^[40]的研究结果一致。气候变暖和人类积极活动有利于国家公园植被指数的增加,能够一定程度上缓解景区活动带来的不利影响。因此,需要科学制定旅游时间和游客数量,合理规划景观工程,确保植被物质循环和能量交换有序进行,增强森林植被应对自然灾害的能力。

参考文献 (References):

- [1] 中共中央办公厅, 国务院办公厅. 建立国家公园体制总体方案. (2017-09-26) [2020-01-06]. http://www.gov.cn/zhengce/2017-09/26/content_5227713.htm.
- [2] 周广胜, 何奇瑾, 殷晓洁. 中国植被/陆地生态系统对气候变化的适应性与脆弱性. 北京: 气象出版社, 2015: 35-38.
- [3] 孙红雨, 王长耀, 牛铮, 布和敖斯尔, 李兵. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系——基于 NOAA 时间序列数据分析. 遥感学报, 1998, 2(3): 204-210.
- [4] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, Asrar G, Nemani R R. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 1997, 386(6626): 698-702.
- [5] 刘家福, 马帅, 李帅, 任春颖, 毛德华, 张柏. 1982—2016 年东北黑土区植被 NDVI 动态及其对气候变化的响应. 生态学报, 2018, 38(21): 7647-7657.
- [6] 杜加强, 贾尔恒, 阿哈提, 赵晨曦, 方广玲, 阴俊齐, 香宝, 袁新杰, 房世峰. 1982—2012 年新疆植被 NDVI 的动态变化及其对气候变化和人类活动的响应. 应用生态学报, 2015, 26(12): 3567-3578.
- [7] Ren H R, Zhou G S. Measuring the impacts of anthropogenic activities on Inner Mongolian temperate grassland. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(9): 2942-2950, doi: 10.1002/ldr.3055.
- [8] 张珺, 任鸿瑞. 人类活动对锡林郭勒盟草原净初级生产力的影响研究. 自然资源学报, 2017, 32(7): 1125-1133.
- [9] 易浪, 任志远, 张翀, 刘雯. 黄土高原植被覆盖变化与气候和人类活动的关系. 资源科学, 2014, 36(1): 166-174.
- [10] 李辉霞, 刘国华, 傅伯杰. 基于 NDVI 的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究. 生态学报, 2011, 31(19): 5495-5504.
- [11] 范德芹, 赵学胜, 朱文泉, 郑周涛. 植物物候遥感监测精度影响因素研究综述. 地理科学进展, 2016, 35(3): 304-319.
- [12] Gao J B, Jiao K W, Wu S H, Ma D Y, Zhao D S, Yin Y H, Dai E F. Past and future effects of climate change on spatially heterogeneous vegetation activity in China. *Earth's Future*, 2017, 5(7): 679-692.
- [13] Fang J Y, Tang Y H, Son Y. Why are East Asian ecosystems important for carbon cycle research. *Science China Life Sciences*, 2010, 53(7): 753-756.
- [14] Wang G C, Huang Y, Wei Y R, Zhang W, Li T T, Zhang Q. Inner Mongolian grassland plant phenological changes and their climatic drivers. *Science of the Total Environment*, 2019, 683: 1-8, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.125.
- [15] Liu Q, Fu Y H, Zeng Z Z, Huang M T, Li X R, Piao S L. Temperature, precipitation, and insolation effects on autumn vegetation phenology in temperate China. *Global Change Biology*, 2016, 22(2): 644-655, doi: 10.1111/gcb.13081.
- [16] 马新萍, 白红英, 贺映娜, 秦进. 基于 NDVI 的秦岭山地植被遥感物候及其与气温的响应关系——以陕西境内为例. 地理科学, 2015, 35(12): 1616-1621.
- [17] Shen B, Fang S B, Li G. Vegetation coverage changes and their response to meteorological variables from 2000 to 2009 in Naqu, Tibet, China. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2014, 40(1): 67-74.
- [18] Fang S B, Zhang X S. Control of vegetation distribution: climate, geological substrate, and geomorphic factors. A case study of grassland in Ordos, Inner Mongolia, China. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2013, 39(2): 167-174.
- [19] 沈斌, 房世波, 余卫国. 2016. NDVI 与气候因子关系在不同时间尺度上的结果差异. 遥感学报, 20(3): 481-490.

- [20] 邓晨晖, 白红英, 高山, 刘荣娟, 马新萍, 黄晓月, 孟清. 秦岭植被覆盖时空变化及其对气候变化与人类活动的双重响应. 自然资源学报, 2018, 33(3): 425-438.
- [21] 王钊, 彭艳, 权文婷, 何慧娟, 李登科. 秦岭森林物候时空分布特征及对水热条件的响应. 干旱区地理, 2019, 42(5): 1049-1058.
- [22] 李传华, 赵军, 师银芳, 胡秀芳. 基于变异系数的植被 NPP 人为影响定量研究——以石羊河流域为例. 生态学报, 2016, 36(13): 4034-4044.
- [23] 游巍斌, 何东进, 巫丽芸, 詹仕华, 洪伟, 游惠明, 陈炳容, 俞建安. 武夷山风景名胜区风景廊道时空分异特征及其生态影响. 应用与环境生物学报, 2011, 17(6): 782-790.
- [24] 游巍斌, 何东进, 詹仕华, 洪伟, 巫丽芸, 王英姿, 陈炳容, 俞建安, 范圣锋. 武夷山风景名胜区旅游影响及植被景观特征与地理因子的相关分析. 四川农业大学学报, 2011, 29(1): 35-39, 68-68.
- [25] 马明国, 王建, 王雪梅. 基于遥感的植被年际变化及其与气候关系研究进展. 遥感学报, 2006, 10(3): 421-431.
- [26] Myneni R B, Tucker C J, Asrar G, Keeling C D. Interannual variations in satellite-sensed vegetation index data from 1981 to 1991. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1998, 103(D6): 6145-6160.
- [27] 於琰, 曹明奎, 陶波, 李克让, 董文杰, 刘洪滨, 刘长友. 基于潜在植被的中国陆地生态系统对气候变化的脆弱性定量评价. 植物生态学报, 2008, 32(3): 521-530.
- [28] 王春雨, 王军邦, 孙晓芳, 王猛, 王绍强, 崔惠娟. 孟印地区农田生产力脆弱性变化及气候影响机制——基于 1982-2015 年 GIMMS3g 植被指数. 生态学报, 2019, 39(21): 7793-7804.
- [29] 汪琴. 福建省 NDVI 变化特征及对气象因子的响应[D]. 福州: 福建农林大学, 2015.
- [30] 陈燕丽, 罗永明, 莫伟华, 莫建飞, 黄永璘, 丁美花. MODIS NDVI 与 MODIS EVI 对气候因子响应差异. 自然资源学报, 2014, 29(10): 1802-1811.
- [31] 李红军, 郑力, 雷玉平, 李春强, 周戡. 基于 EOS/MODIS 数据的 NDVI 与 EVI 比较研究. 地理科学进展, 2007, 26(1): 26-32.
- [32] 李金珂, 杨玉婷, 张会茹, 黄铝文, 高义民. 秦巴山区近 15 年植被 NPP 时空演变特征及自然与人为因子解析. 生态学报, 2019, 39(22): 8504-8515.
- [33] 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.
- [34] 王业宁, 孙然好, 陈利顶. 人为热计算方法的研究综述. 应用生态学报, 2016, 27(6): 2024-2030.
- [35] 孙权, 朱文. 旅游开发对城市土壤和生态环境的影响. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2019, 50(6): 1065-1070.
- [36] 李鹤, 张平宇, 程叶青. 脆弱性的概念及其评价方法. 地理科学进展, 2008, 27(2): 18-25.
- [37] Zhang X L, Huang X R. Human disturbance caused stronger influences on global vegetation change than climate change. PeerJ, 2019, 7: e7763, doi: 10.7717/peerj.7763.
- [38] 万洪秀, 孙占东, 王润. 博斯腾湖湿地生态脆弱性评价研究. 干旱区地理, 2006, 29(2): 248-254.
- [39] 张根涛, 叶绍明, 蒋桂娟. 遥感技术在森林健康研究中的应用. 广西民族大学学报: 自然科学版, 2018, 24(2): 98-101, 109-109.
- [40] 王晓利, 侯西勇. 1982—2014 年中国沿海地区归一化植被指数(NDVI)变化及其对极端气候的响应. 地理研究, 2019, 38(4): 807-821.