

DOI: 10.5846/stxb201410192053

张建亮, 刘方正, 崔国发. 长白山国家级自然保护区植被时空变化及其驱动因子. 生态学报, 2016, 36(12): - .
Zhang J L, Liu F Z, Cui G F. Spatio-temporal variation of vegetation and analysis of its driving factors in Changbai Mountain National Nature Reserve. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(12): - .

长白山国家级自然保护区植被时空变化及其驱动因子

张建亮^{1,2}, 刘方正^{1,2}, 崔国发^{1,*}

1 北京林业大学, 自然保护区学院, 北京 100083

2 环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042

摘要: 基于 MODIS NDVI 数据, 采用一元线性回归趋势分析和相关系数检验法对长白山国家级保护区 2000—2010 年间植被时空变化及其驱动因子进行研究。结果表明: 10a 来, 长白山国家级自然保护区中 88.95% 的植被保持稳定, 9.71% 的植被显著改善, 1.34% 的植被显著退化, 植被的总体保护效果较好。从植被变化的驱动因子来看, 气温对植被的影响略强于降雨的影响, 气温和降雨与植被变化的关系总体上都呈负相关, 但显著相关的面积均不足 8%, 10a 间气温和降雨对自然保护区内植被的影响总体有限。自然保护区内不同地形上的植被变化存在一定空间差异, 海拔 1 800 m 以上, 坡度 26°—35° 范围内的岳桦林和苔原植被出现较明显退化。自然保护区内规模日益扩大的旅游活动以及不合理的开发建设与部分植被的退化有一定关系。尽管自然保护区内植被显著退化的面积仅占 1.34%, 但必须引起管理部门的高度重视。据此, 提出三点建议以更有效地保护现有植被和恢复已退化植被, 为长白山国家级自然保护区的科学管理提供参考。

关键词: 植被; NDVI; 趋势分析; 自然保护区; 长白山

Spatio-temporal variation of vegetation and analysis of its driving factors in Changbai Mountain National Nature Reserve

ZHANG Jianliang^{1,2}, LIU Fangzheng^{1,2}, CUI Guofa^{1,*}

1 College of Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China

Abstract: Vegetation status reflects the quality of regional environment, and vegetation assessment plays a crucial role in the assessment of ecological changes. As the main component of nature reserves (NRs), vegetation provides an important habitat for wild plants and animal; thus, the vegetation status in NRs is closely related to the survival conditions of the wildlife. Furthermore, vegetation changes can reflect the interaction between natural and anthropogenic activities. Accordingly, analysis of vegetation changes and their magnitude can help to assess the efficacy of conservation in a nature reserve. At the same time, examining the vegetation changes and exploring their driving factors are of great importance for the conservation and management of NRs. Changbai Mountain National Nature Reserve (CMNR) is one of the earliest nature reserves established in China. Its biodiversity is high with 9 species of amphibians, 12 species of reptiles, 24 species of fish, 56 species of mammals, 230 species of birds, and 1255 species of insects. It is also home to 430 species of fungi, 200 species of lichens, 311 species of mosses and liverworts, 78 species of ferns, 11 species of gymnosperms, and 1325 species of angiosperms. This paper aimed to identify the extent of changes in vegetation cover between 2000 and 2010 in order to better protect the vegetation in CMNR. Based on the normalized difference vegetation index data provided by the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, we examined the temporal and spatial variation of vegetation and its driver

基金项目: 林业公益性行业科研专项经费项目(201104029); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(2015)

收稿日期: 2014-10-19; 网络出版日期: 2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fa6716@163.com

during the last 10 years, using methods of monadic linear regression trend analysis and correlation coefficient test. Results showed that in CMNR most of the vegetation, accounting for 88.95%, was stable in the past 10 years, 9.71% of the total area of vegetation improved significantly, and only 1.34% of vegetation degraded significantly, suggesting that the vegetation conservation in the reserve was successful overall. When considering the driving factors of vegetation variation, the proportion of vegetation that changed was significantly correlated with the temperature and it was slightly larger than the proportion of vegetation significantly affected by the precipitation, indicating that temperature have a slightly greater effect on vegetation than precipitation. Both factors were negatively correlated with vegetation changes, but the area with significant correlation for both factors was less than 8%. In general, the influence of temperature and precipitation on vegetation was limited. The change in vegetation cover in CMNR was different on different terrains, i. e., vegetation degradation was enhanced with the increase of altitude and slope. Especially, *Betula ermanii* forest and tundra distributed in the area more than 1800 m above sea level and within the scope of slope from 26 to 35° were degraded significantly. Beside the topography factors, growing tourism and unregulated development and construction have also affected the degradation of the part of vegetation in CMNR. Although only 1.34% of vegetation is degraded significantly in CMNR, great attention should be given by relevant administrative departments. Therefore, in order to protect the existing vegetation more effectively and restore the degraded vegetation, as well as provide references for scientific management of CMNR, we have provided three suggestions: (1) to build tundra protection facilities in touristic regions within the tundra in order to strictly limit the expansion of touristic activities; (2) to speed up restoration of the degraded *Betula ermanii* forest and tundra with artificial stimulation measures; and (3) to block or change the course of No. 302 provincial road crossing the nature reserve in southern slope.

Key Words: vegetation; normalized difference vegetation index; trend analysis; nature reserve; Changbai Mountain

植被与地质、地貌、气候、水文、土壤、动物和微生物共同构成了自然地理环境,是最能反映其他要素性质的指示者,很大程度上代表了区域生态环境的总体状况^[1]。植被能够有效调节全球碳平衡、降低温室气体浓度,在保持水土、维护地表生态系统平衡以及维持气候稳定等方面具有不可替代的作用^[2-4]。

我国自然保护区包括自然生态系统类、野生生物类和自然遗迹类三个类别^[5]。对于自然生态系统类和野生生物类自然保护区,植被是其主体。这两类自然保护区作为动植物的重要生境,植被的优劣与动植物的生存状况密切相关。植被变化体现了自然以及人类活动对环境的交互作用^[6]。研究自然保护区内的植被变化,探讨其驱动因素,对于自然保护区的保护和管理有着重要意义。

目前,利用遥感技术分析植被变化已较为普遍,植被指数是描述植被数量、质量的重要参数^[7],其中,归一化植被指数(NDVI)反映了植被吸收光合有效辐射比例,能很好地反映地表植被的繁茂程度,与植被覆盖度、叶面积指数、植被生产力等指标有较好的相关性^[8-9]。近年来,国内外学者应用 NDVI 对全球、区域的植被变化进行了大量实践研究^[10-18]。区域植被变化研究多采用高时间分辨率、低空间分辨率的遥感数据,如 SPOT-VEGETATION NDVI 数据、NOAA/AVHRR NDVI、GIMMS NDVI 数据等,而 MODIS NDVI 较以上数据,空间分辨率(250 m)有了很大提高,同时具备高时间分辨率,适用于在自然保护区尺度上研究植被的动态变化。由于自然保护区的植被变化反映了保护区的总体保护效果,决定了自然保护区保护功能的发挥程度,当前研究自然保护区植被变化成为保护区研究的重点内容。

长白山自然保护区是我国建立最早、地位最重要的、以保护森林和野生动物为主的森林生态系统类型自然保护区。1980年,长白山自然保护区被联合国科教文组织纳入“人与生物圈计划”,成为“世界生物圈自然保护区网”成员。1986年,长白山自然保护区被国务院批准为“国家级森林和野生动物类型自然保护区”。本文利用时间序列 MODIS NDVI 数据,研究自然保护区植被时空动态,探讨其驱动因子,为长白山国家级自然保护区植被的保护以及保护区管理提供科学依据。

1 研究区域

长白山国家级保护区位于吉林省东南部安图县、抚松县与长白县的三县交界处,地理坐标为 $127^{\circ}42'55''$ — $128^{\circ}16'48''$ E, $41^{\circ}41'49''$ — $42^{\circ}25'18''$ N,总面积 19.6 万 hm^2 。自然保护区垂直高差近 2000 m,海拔介于 720 — 2691 m,地貌由下而上可明显分为熔岩台地、熔岩高原和火山锥体 3 个环状地带(图 1)。保护区属于温带湿润季风气候,总体特点是冬季漫长寒冷,夏季短暂温凉,春季风大干燥,秋季多雾凉爽。区内植物属长白山植物区系,植被随海拔梯度呈垂直变化,自下而上依次形成阔叶林、针阔混交林、针叶林、岳桦林及高山苔原 5 个植被分布带^[19-20]。由于地形、气候、生态系统的多样化特点,造就了该区丰富的生物多样性资源,保护区内拥有两栖类 9 种,爬行类 12 种,鱼类 24 种,哺乳类 56 种,鸟类 230 种和昆虫 1255 种^[21]。另外,还具有 430 种真菌,200 种地衣,311 种苔藓,78 种蕨类,11 种裸子植物和至少 1325 中被子植物^[22]。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

2.1.1 NDVI 数据

NDVI 数据采用 MODIS 中国 NDVI 产品,由国际科学数据镜像网站(<http://www.gscloud.cn>)提供。该数据集时间为 2000—2010 年,时间分辨率 1 天,空间分辨率 250 m。为了研究 2000—2010 年间长白山国家级自然保护区内植被的变化趋势,以植被生长最旺盛月份的

NDVI 为代表,分析近 10a 植被的动态变化。参考长白山地区年内不同月份 NDVI 动态变化的相关研究^[23],7—8 月植被生长最旺盛,提取每年 7—8 月的逐天 NDVI 数据,总计 682 景。利用自然保护区边界图批量裁剪生成自然保护区 NDVI 影像图。

2.1.2 植被类型数据

基于自然保护区森林资源调查小班资料,利用 ArcMAP 10.0 软件提取红松针阔混交林、云冷杉针叶林、长白落叶松林、岳桦林及苔原等自然保护区典型的植被类型。自然保护区植被类型空间分布图见 2。

2.1.3 气候数据

降雨和气温可以造成植被覆盖繁茂程度的年际波动,数据为 2000—2010 年 5—8 月中国 1km^2 栅格数据,利用 ArcMAP 栅格裁剪工具,获取自然保护区 2000—2010 年间的降雨和气温数据。由于植被生长对气候的响应存在一个明显的滞后过程^[24-25],同期的降雨与气温以及滞后 1 个月和滞后两个月的降雨和气温均对植被生长有影响^[26],因此选择 5—8 月的累积降雨量和平均气温作为影响该年份植被动态变化的气候因子,分析降雨和气温对植被变化的影响。

2.1.4 地形数据

地形数据为长白山国家级自然保护区高程 DEM、坡度、坡向栅格图。海拔以 200 m 为一个梯度,划分 7



图 1 长白山国家级自然保护区地貌图

Fig.1 Topography of Changbai Mountain National Nature Reserve

个梯度: I 梯度:—1 000 m; II 梯度:1 000—1 200 m; III 梯度:1 200—1 400 m; IV 梯度 1 400—1 600 m; V 梯度: 1 600—1 800 m; VI 梯度:1 800—2 000 m; VII 梯度:2 000 m。坡度分 6 个梯度: I 为平坡 (0° — 5°); II 为缓坡 (6° — 15°); III 为斜坡 (16° — 25°); IV 为陡坡 (26° — 35°); V 为急坡 (36°)。坡向采用 4 坡向法,以正北方向为 0° ,划分为: I: 阳坡 135° — 225° ; II 阴坡 0° — 45° , 315° — 360° ; III: 半阳坡 90° — 135° , 225° — 270° ; IV: 半阴坡 45° — 90° , 270° — 315° 。

2.1.5 人类活动干扰数据

人类活动干扰数据为长白山国家级自然保护区人类活动的空间图层。该数据基于 2012 年 ZY-1 02C HR 和 P/MS 的融合影像(空间分辨率 2.36m),结合实地调查资料,采用人工目视解译的方法获取^[27-28]。

2.2 数据处理

2.2.1 NDVI 数据处理

(1) NDVI 值合成

基于长白山国家级自然保护区 7—8 月逐日 MODIS NDVI 数据,通过最大合成法(Maximum Value Composite, MVC)生成植被 NDVI 值^[29-30]。MVC 法假设 NDVI 最大值的那一天天气是晴朗的,不受云层的影响,取这一天的 NDVI 值作为 NDVI 值可以有效地消除云、雾及太阳高度角的部分干扰。MVC 法借助 ArcMAP 10.0 空间分析工具模糊叠加功能实现。

(2) NDVI 变化趋势分析

采用一元线性回归趋势分析模拟每个栅格 NDVI 的变化,一元线性回归趋势分析定义为某时间段内 NDVI 年际变化的最小次方程的斜率^[31],该斜率反映植被在时间序列内的变化趋势,按公式(1)计算:

$$VG_{\text{slope}} = \frac{n \sum_{i=1}^n NDVI_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n NDVI_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中: VG_{slope} 为植被 NDVI 变化率,即 $NDVI_i$ 年变化趋势线的斜率; $NDVI_i$ 为第 i 年 NDVI 值; i 为年序列号。 $VG_{\text{slope}} > 0$ 说明植被覆盖程度增加,趋于改善,反之则植被的覆盖程度减少,趋于衰退。 VG_{slope} 值的大小则反映了植被改善或退化的程度。

(3) NDVI 变化趋势显著性检验

对回归方程斜率 VG_{slope} 利用相关系数 R 在 95% 的置信水平上做显著性检验,相关系数 R 按公式(2)计算:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (i - \bar{i}) (NDVI_i - \overline{NDVI_i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (i - \bar{i})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (NDVI_i - \overline{NDVI_i})^2}} \quad (2)$$

相关系数检验法是专门针对一元线性回归拟合使用的一种显著性检验法,其本质上和 F 检验法是一致的。

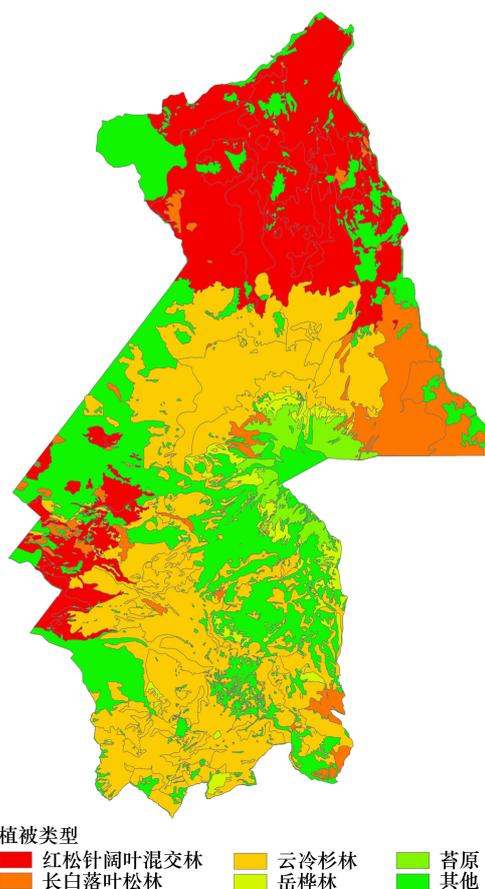


图 2 自然保护区植被类型空间分布图

Fig.2 Spatial distribution of vegetation in the nature reserve

的,数学上可以通过公式(3)推导获得^[32]:

$$F = (n - 2) \frac{U}{Q} = (n - 2) \frac{R^2}{1 - R^2} \quad (3)$$

式中, R 为相关系数; $NDVI_i$ 和 i 的含义同公式(1); F 为 F 检验的统计量; U 为回归平方和; Q 为残差平方和。

(4) NDVI 变化驱动分析

a. 年际间降雨和气温的动态变化采用一元线性回归趋势分析,方法与 NDVI 变化趋势分析相同。降雨、气温对植被的影响通过计算其与 NDVI 相关系数进行分析,利用相关系数检验法验证其相关显著性。

b. 不同海拔、坡度、坡向上 NDVI 的差异采用方差分析的多重比较法。具体分析过程如下:①将 VG_{slope} 栅格数据转换为矢量点图层,借助 ArcMAP 10.0 Toolbox 中“栅格转点”工具实现;②利用 VG_{slope} 点图层提取不同梯度的海拔、坡度和坡向值,借助 Toolbox 中“值提取至点”工具实现;③比较不同海拔、坡度、坡向上 NDVI 的差异显著性,借助 SPSS 软件采用 One-way ANOVA 的 LSD 方法分析。

c. 人类活动对植被的影响分析采用图形叠加法,即在 VG_{slope} 图层上叠加人工干扰图层,分析人类活动对植被变化的影响。

3 结果分析

对 2000—2010 年 10a 间长白山国家级自然保护区植被 NDVI 变化趋势的各像元 VG_{slope} 值进行统计分析,利用 SPSS 统计软件绘制 VG_{slope} 频数分布直方图(图 3)。统计结果表明, VG_{slope} 最大值 4.93,最小值 -9.81。经非参数 Kolmogorov-smirnov 检验($df = 6141, P < 0.05$),属于左偏态分布,峰值右移。从图 3 可知, VG_{slope} 值多集中在 -1—1 之间。

3.2 NDVI 变化趋势及空间分布特征

为了定量描述研究区植被动态变化的总体趋势,常将时间序列的 NDVI 拟合后的回归方程斜率 VG_{slope} 值划分等级,不同研究者在划分 VG_{slope} 值等级时界值有所不同,没有统一的划分标准^[3,33]。本文在对所有像元的 VG_{slope} 值经 SPSS 频数分布统计分析的基础上,划定 6 个等级定量分析自然保护区内植被变化状况。 VG_{slope} 界值的划分见表 1。 $VG_{slope} > 0$ 说明植被覆盖程度增加,生长状况良好,趋于改善,反之,植被覆盖程度减少,长势变差,趋于衰退。 VG_{slope} 绝对值的大小则反映了植被覆盖增加或减少的程度。

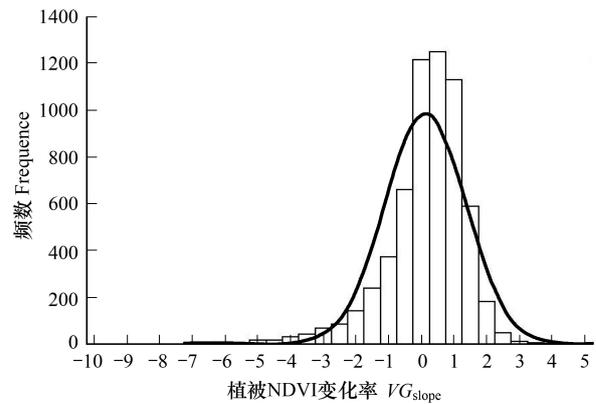


图 3 VG_{slope} 频数分布特征

Fig.3 Characteristic of frequency distribution of VG_{slope} value

表 1 自然保护区植被 NDVI 变化趋势的面积分配

Table 1 Area allocation of different change tendency of NDVI in the nature reserve

植被类型 Vegetation types	面积比例/% Area proportion					
	~ -5	-5~-3	-3~-1	-1—1	1—3	3—
所有植被 All vegetation	0.47	2.20	10.76	64.61	21.68	0.28
红松阔混交林 <i>Pinus koraiensis</i> coniferous and broadleaf mixed forest	0.03	0.19	4.17	65.03	30.06	0.52
长白落叶松林 <i>Larix olgensis</i> forest	0.00	1.16	4.36	65.03	29.04	0.42
云冷杉针叶林 <i>Picea-Abies</i> coniferous forest	0.60	2.03	11.74	60.04	25.59	0.00
岳桦林 <i>Betula ermanii</i> forest	1.85	8.30	25.09	57.12	7.63	0.00
苔原 Tundra	1.32	7.92	21.34	55.41	13.51	0.50

从表 1 可知,自然保护区内所有植被 VG_{slope} 值介于 -1—1 的面积占自然保护区总面积的 64.61%, $VG_{slope} >$

1 的植被面积占 21.96%。 $VG_{slope} < -1$ 的植被面积总计 13.43%,其中介于-3—-1 之间的植被比例较高,占 10.76%,介于-5—-3 之间的植被占 2.20%, $VG_{slope} < -5$ 的植被仅占 0.47%。从植被变化的空间分布来看,长白山国家级自然保护区内植被覆盖程度增加,趋于改善的植被多分布在北坡,植被覆盖程度减少,趋于退化的植被多集中在保护区的南坡,如长白山天池附近区域以及望天鹅、张草帽顶子一带(图 4)。

采用相关系数检验法对植被 VG_{slope} 变化趋势进行显著性检验(见表 2),没有显著变化的植被面积为 174 746.46 hm^2 ,占自然保护区总面积的 88.95%;显著改善的面积占自然保护区总面积的 9.71%;1.34%的植被显著退化。利用 VG_{slope} 变化趋势图与植被类型空间分布图叠加分析可知,红松针阔混交林、云冷杉林和长白落叶松林显著改善的面积比例均在 10% 以上;岳桦林有 4.90% 显著退化,面积 256.17 hm^2 ;苔原有 175.28 hm^2 显著退化,占苔原总面积的 3.24%。

3.3 NDVI 变化的驱动力分析

3.3.1 降雨对植被 NDVI 的影响

降雨是影响植被生长状况以及覆盖程度的重要气候因子之一。从 2000—2010 年时间序列的降雨趋势分析可知(图 5),长白山自然保护区降雨随时间的变化有递减的趋势,递减趋势斜率介于-24.5136—-5.1391 之间,递减的程度基本与等高线平行,即海拔越高,降雨减少的程度随之增加。

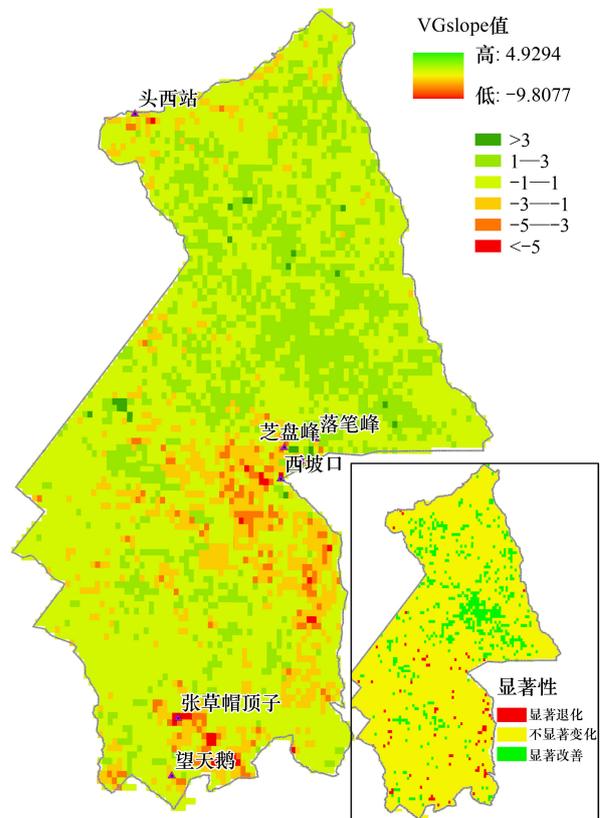


图 4 2000—2010 年 NDVI 变化趋势及显著性检验
Fig.4 The change tendency of NDVI and its significant test from 2000 to 2010

表 2 自然保护区植被 NDVI 变化显著性检验

Table 2 Significant test for the change of NDVI in CMBR

植被类型 Vegetation types	显著退化 Significant degradation		不显著变化 No significant change		显著改善 Significant improvement	
	面积 Area/ hm^2	占比 Proportion	面积 Area/ hm^2	占比 Proportion	面积 Area/ hm^2	占比 Proportion
	所有植被 All vegetation	2 637.83	1.34%	174 746.46	88.95%	19 080.71
红松针阔混交林 <i>Pinus koraiensis</i> coniferous and broadleaf mixed forest	60.43	0.12%	44 064.62	89.54%	5 087.18	10.34%
云冷杉针叶林 <i>Picea-Abies</i> coniferous forest	1 008.82	1.47%	58 622.40	85.69%	8 784.76	12.84%
长白落叶松林 <i>Larix olgensis</i> forest	125.76	0.83%	12 964.87	85.67%	2 042.93	13.50%
岳桦林 <i>Betula ermanii</i> forest	256.17	4.90%	4 834.69	92.55%	133.02	2.55%
苔原 Tundra	175.28	3.24%	4 862.23	89.90%	371.13	6.86%

从自然保护区的降雨与植被 NDVI 相关关系分析来看(表 3,图 6),降雨与植被 NDVI 的变化主要表现为负相关,负相关面积比例为 63.86%(表 3),但是其中有 59.98% 的面积不具有相关显著性($P \geq 0.10$),仅有 3.88%、1.57% 的面积分别在 0.10 和 0.05 两个水平上表现为显著负相关。另外,有 36.14% 的植被面积与降雨表现为正相关,其中仅有 1.43% 在 0.10 水平上具有正相关显著性,0.05 水平上仅有 0.61% 表现为显著正相关。

总体而言,植被 NDVI 变化与降雨的相关性较小,不显著相关的面积达到 94.69%,显著相关部分主要为负相关,降雨对植被的影响总体程度有限。

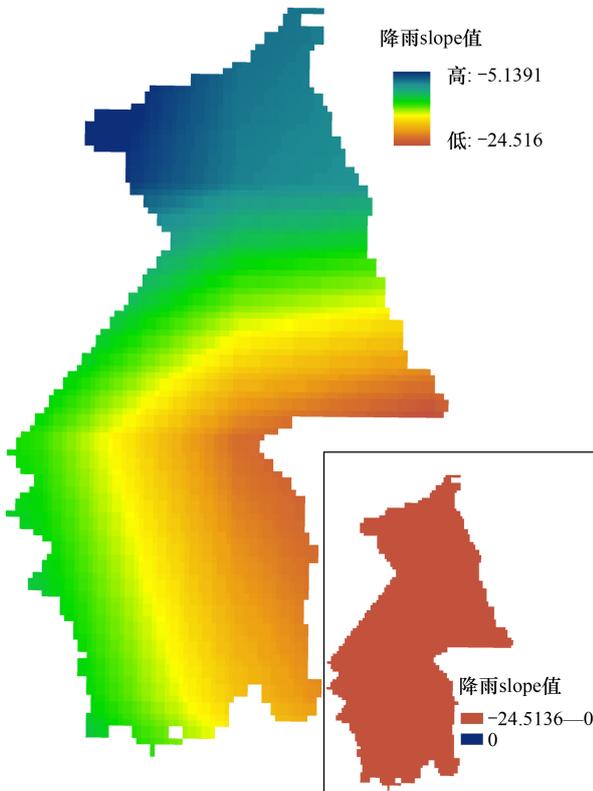


图 5 2000—2010 年 5—8 月累积降雨的变化趋势
Fig.5 The change tendency of cumulative precipitation from May to August between 2000 and 2010

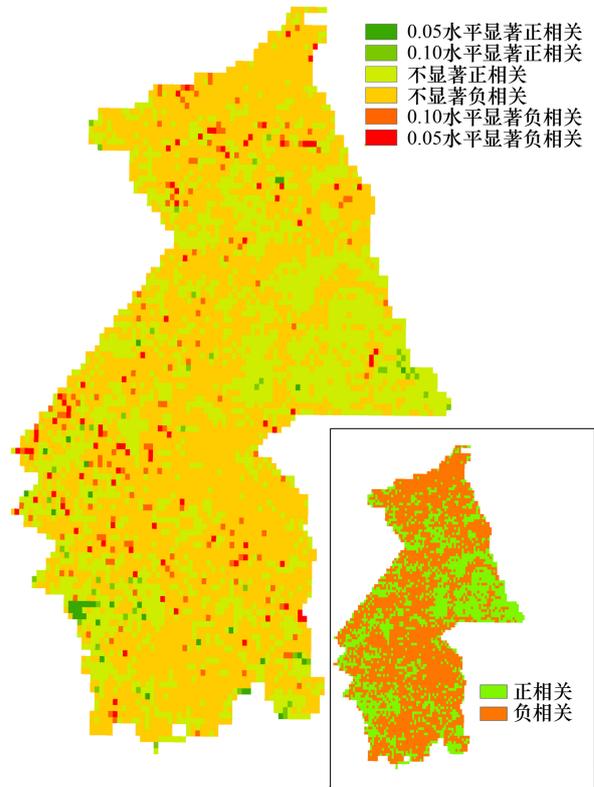


图 6 2000—2010 年 NDVI 与降雨的相关关系
Fig.6 The correlation between NDVI and precipitation from 2000 to 2010

表 3 气候因子与植被 NDVI 的相关性

Table 3 The correlation between climatic factors and NDVI

气候因子 climate factors	相关性 Correlation	面积比例 Area proportion	显著水平 Significant level	面积比例 Area proportion
降雨 Precipitation	正相关	36.14%	$P \geq 0.10$	34.71%
			$P < 0.10$	1.43%
			$P < 0.05$	0.61%
气温 Temperature	负相关	63.86%	$P \geq 0.10$	59.98%
			$P < 0.10$	3.88%
	正相关	26.84%	$P < 0.05$	1.57%
			$P \geq 0.10$	26.40%
			$P < 0.10$	0.44%
负相关	正相关	73.16%	$P < 0.05$	0.27%
			$P \geq 0.10$	66.55%
			$P < 0.10$	6.61%
			$P < 0.05$	2.72%

显著水平为 0.10 和 0.05, $P < 0.10$ 表示 0.10 水平上显著相关; $P < 0.05$ 表示在 0.05 水平上显著相关; $P \geq 0.10$ 表示不存在显著相关性

3.3.2 气温对植被 NDVI 的影响

气温是影响植被状况的又一重要的气候因子。从 2000—2010 年时间序列的气温数据趋势分析可知(图

7), 长白山国家级自然保护区气温总体上变化不大, 10a 来 5—8 月平均气温较为稳定或呈略微的递减趋势, 递减斜率在 $-0.0218-0$ 之间, 只在保护区最南部一定面积的呈现微弱增加趋势, 增加斜率为 $0-0.0020$ 。

气温的时空变化会对植被的动态产生一定影响, 从自然保护区的气温与植被 NDVI 相关关系分析来看 (表 3, 图 8), 气温对植被 NDVI 的影响主要表现为负相关, 负相关的面积比例达 73.16% (表 3), 其中有 66.55% 的面积在 0.10 水平上不具有相关显著性 ($P \geq 0.10$), 仅有 6.61% 在 0.10 水平上具有相关显著性, 0.05 水平上表现显著负相关的面积仅占 2.72%。另外, 有 26.84% 的植被与降雨表现为正相关, 其中仅有 1.43% 在 0.10 水平上具有正相关显著性, 0.05 水平上仅有 0.61% 表现为显著正相关。总体而言, 气温的变化及其时空分异对植被 NDVI 变化造成一定影响, 主要表现为负相关, 但由于负相关显著性面积比例仅为 6.61%, 这种影响总体程度有限。

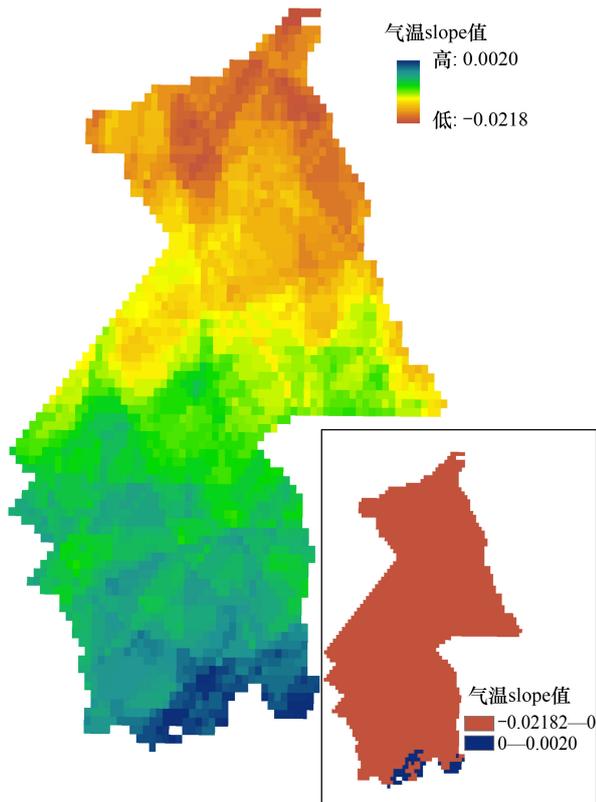


图 7 2000—2010 年 5—8 月平均气温的变化趋势

Fig.7 The change tendency of average temperature from May to August between 2000 and 2010

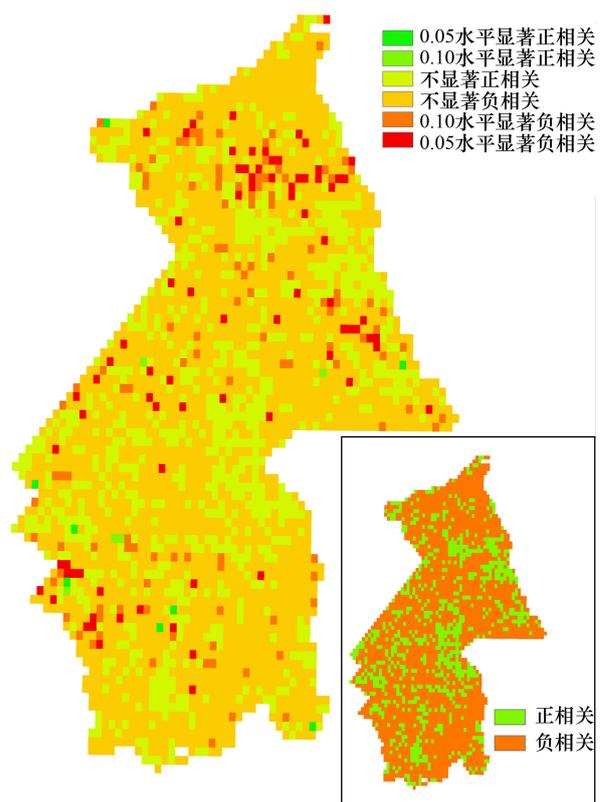


图 8 2000—2010 年 NDVI 与气温的相关关系

Fig.8 The correlation between NDVI and temperature from 2000 to 2010

3.3.3 不同地形上植被 NDVI 变化的差异

基于地形因子海拔、坡向和坡度划分的不同等级, 比较 NDVI 动态变化的拟合斜率 VG_{slope} 的差异 (图 9)。不同梯度的海拔、坡向和坡度上, VG_{slope} 存在明显的差异。总体上, VG_{slope} 随着海拔的升高有减小趋势。在不同坡向上植被 VG_{slope} 值表现为: 阴坡 > 半阴坡 > 半阳坡 > 阳坡。 VG_{slope} 值在不同坡度上的变化与海拔梯度上的变化类似, 坡度在 IV 梯度 (35°) 以内, 表现为 VG_{slope} 值随着坡度的增加而减小, 坡度在 36° 以上 VG_{slope} 明显增加, 但 VG_{slope} 在第 V 梯度与第 III 梯度上无显著差异。

3.3.4 植被 NDVI 变化与人类活动的关系

长白山天池是自然保护区中旅游活动最为集中的区域, 在环绕天池的苔原植被中有 3.24% 面积的植被覆盖程度减少, 出现显著性退化 (表 2), 主要分布在天池的西部以及西北一带, 如西坡口区域 (图 10)。天池南

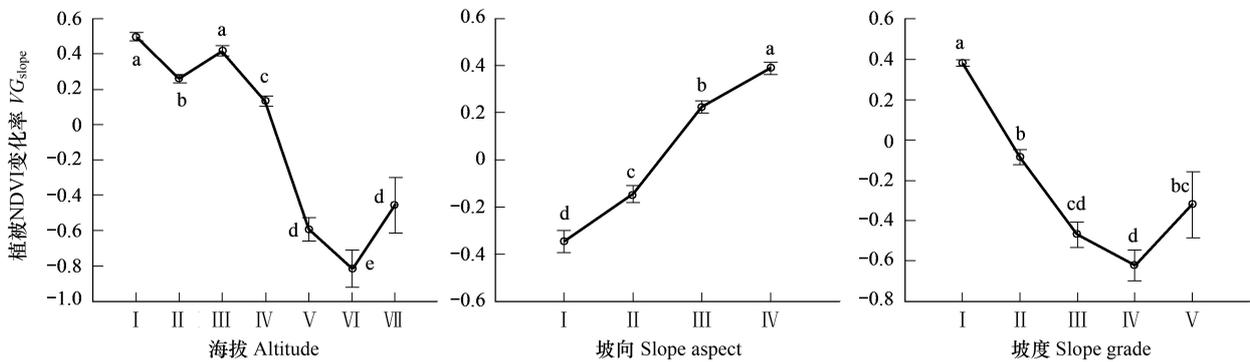


图 9 不同海拔、坡度和坡向上 VG_{slope} 的差异及变化趋势

Fig.9 Difference of VG_{slope} and its change tendency in different gradient of altitude, slope aspect and slope grade

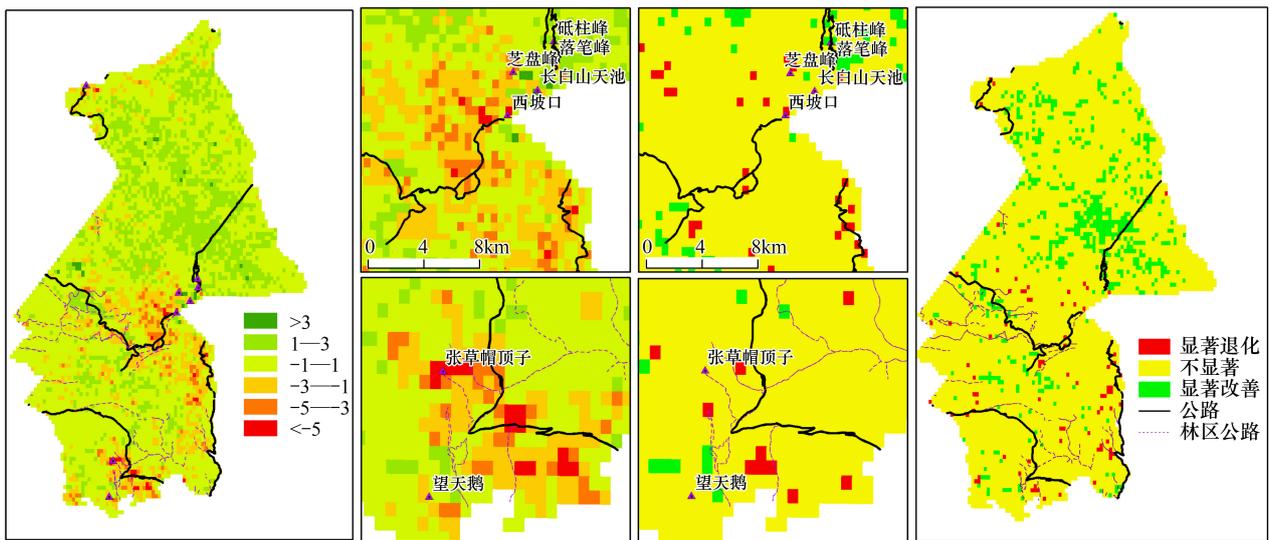


图 10 自然保护区人类活动对植被 NDVI 变化的影响

Fig.10 Influence of human disturbance to the vegetation NDVI change

坡旅游公路沿线岳桦林、苔原植被出现一定面积退化(10C),部分达到了显著水平(图 10D)。自然保护区南坡张草帽顶子区域植被有一定面积退化,植被主要是云冷杉林、岳桦林,(图 10E),退化植被部分达到显著水平(图 10F)。

4 讨论

2000—2010 年 10a 来长白山国家级自然保护区中 88.95%的植被保持稳定,没有发生显著变化。9.71%的植被覆盖程度有明显的增加趋势,显著改善,有 1.34%的植被显著退化。总体而言,自然保护区内植被覆盖程度和生长状况稳定或增加,植被趋于改善,保护区的植被保护效果总体较好。

本文采取了一年 中 植 被 生 长 最 为 旺 盛 的 7—8 月 份 的 NDVI 代 表 当 年 的 植 被 状 况,分 析 自 然 保 护 区 植 被 在 2000—2010 年 10 年 间 的 动 态 变 化。考 虑 到 植 被 生 长 对 气 候 响 应 的 滞 后 效 应,综 合 了 同 期 和 滞 后 两 个 月 的 降 雨 与 气 温 因 素,即 5—8 月 的 累 积 降 雨 和 平 均 气 温 来 分 析 气 候 对 植 被 变 化 的 影 响。从 降 雨 与 植 被 变 化 相 关 性 分 析 来 看,降 雨 对 植 被 的 变 化 影 响 总 体 程 度 有 限 或 者 表 现 为 略 微 负 相 关,这 与 东 北 地 区 相 关 研 究 结 果 一 致^[26,34]。主 要 原 因 为 2000—2010 年 5—8 月 份 的 累 积 降 雨 虽 然 有 一 定 程 度 减 少 趋 势,但 由 于 累 积 降 水 量 本 身 较 高,均 达 到 650mm 以 上,降 雨 并 不 能 成 为 植 被 生 长 的 限 制 因 素,总 体 上 降 雨 对 植 被 变 化 的 影 响 并 不 大。不

同的树种对水分存在一定的适应性,如红松和长白落叶松虽然均为长白山地区喜光性较强的树种,红松对土壤水分要求较高,过干和过湿的土壤均对红松的生长不利,而长白落叶松对土壤的适应性较强,有一定耐干旱和耐水湿能力。从降雨与植被变化相关显著性分析可知(如图6),降雨与植被显著负相关的区域主要分布在自然保护区北坡和西坡的红松针阔混交林区,这表明在2000—2010年间长白山自然保护区降雨量相对于红松针阔混交林而言维持在一个较高水平,降雨量的适度减少反而对红松针阔混交林的生长有利,而由于长白落叶松对土壤水分存在一定的耐受性,所以在长白落叶松分布区域降雨与植被变化的相关性多数表现为不显著相关。

长白山国家级自然保护区内2000—2010年间5—8月平均气温表现出基本稳定或呈略微的下降趋势。从气温与植被变化显著相关的面积比例来看,气温对植被变化的影响程度略强于降雨,与罗玲、李晓兵等的相关研究结果相吻合^[26,35]。这表明相对降雨而言,保护区内小范围温度的波动可能对植被的影响更为敏感。由于长白山地区红松、云冷杉、长白落叶松等树种均喜凉爽气候,夏季温度的小幅度的下降可能对部分植被的生长更为有利。但从总体上来看,5—8月份的平均气温对植被变化的总体影响程度有限,0.10显著水平上不存在显著相关的面积比例也达到92.95%。相关研究结果表明^[34]:春季温度与植被变化正相关,因为春季温度的升高,对于当期植物发芽、展叶等生长活动有利。然而,夏季表现为不相关或相关不显著,就夏季7—8月而言,植被生长已经达到旺盛期,气温的波动对植被生长的总体影响并不大。

自然保护区内不同的地形和地貌上植被的变化存在差异,低海拔和坡度较小区域,植被覆盖程度呈增加趋势,趋于改善。随着海拔和坡度的增加,植被覆盖下降的面积逐渐增多,在1800 m以上,坡度26°—35°的范围内,植被退化较为集中,尤其是岳桦林和苔原植被较为明显。一方面由于该区域植被处于长白山火山锥体上,坡度大,土壤母质由火山碎屑和碱性粗面岩构成,土壤疏松,土层非常薄,加之冷而多强风的气候特征,致使该区植被较为脆弱。另一方面也可能与人类活动的有关,自然保护区内旅游开发活动,包括旅游公路、停车场的修建及其他旅游设施的建设,本身会造成植被覆盖程度减少,加之水土流失、游人踩踏等因素,附近区域的植被也很容易退化,并且退化后很难恢复。

天池以西及西北方向苔原植被的退化,除受海拔和坡度等地形因子影响外,可能与旅游活动有一定关系。这一区域是游人活动的集中区域,并且在2009年之前这里还曾存在过一条从长白山北坡到西坡的高山苔原穿越路线。2008年前后,为了进一步满足旅游需求,新建了长白山南坡旅游路线,旅游公路穿插于高山岳桦林带和苔原带,不但破坏了大面积的岳桦林和苔原植被,造成植被覆盖减少(图10C、D),而且很容易造成滑坡和水土流失问题,引起公路两侧植被的进一步退化。早期有研究表明,在长白山北坡海拔2590 m的高山公路一侧,1983年植被覆盖度为30%,植物种7种,到1996年植物覆盖率下降至10%,种数下降为5种,时隔13年的时间,植物群落结构和盖度发生了明显的变化^[36]。另外,在自然保护区南坡302省道张草帽顶子一带岳桦林、云冷杉林的退化现象(图10E、F),也很可能与人类活动的影响有关,因为这一区域除了车流量较大的省道公路外,还分布着密集的林区公路,公路很可能成为人类活动对植被造成干扰的通道。

尽管长白山国家级自然保护区内植被总体上保持稳定或趋于改善,但仍然有1.34%植被的覆盖程度明显减少,趋于退化,面积达2637.83 hm²,须引起管理部门的重视。据此,提出以下三点建议:第一,在旅游活动区增设苔原防护设施,严格限制游人活动范围。由于高山苔原带植被所受威胁主要来自游人的践踏和不合理的开发建设,为了有效保护这些珍奇的植被,必须加强对游客的管理,严格限制游人的活动范围,要在广泛宣传教育和警示的前提下,苔原植被易受踩踏区域增设一定的防护设施,尤其是在环绕天池西坡和南坡苔原植被的敏感地带。第二,人工采取措施加快南坡旅游公路两侧退化岳桦林和苔原的恢复。由于南坡通往天池旅游公路的修建,致使公路沿线植被破坏,尤其是在海拔较高、坡度较大的岳桦林和苔原带。要使由于修建公路两侧破坏的植被恢复到原始植被至少需要200—300年^[37-38],加之这一区域自然条件严酷(土层薄、风力大等因素),植被很难恢复,所以采取人工促进植被恢复促使则十分必要。第三,封闭或改建南坡横穿自然保护区的302省道公路。随着交通运输业的快速发展,该公路运输车辆逐年增多,对保护区的影响越来越大,不但破

坏了动植物生境,也给周边的植被及动物带来了不安全的因素。

本文还存在不足和有待完善之处。由于气候对植被的影响属于长期过程,而 MODIS NDVI 数据最早于 2000 年接收,本文获取的 NDVI 数据时间跨度仅为 10 年,研究结果仅反映自然保护区 2000—2010 年间降雨与气温对植被的影响,短时期内气候因素对植被的影响可能还存在一定不确定性。本文以夏季 7—8 月植被生长最旺盛月份的 NDVI 为代表,研究 2000—2010 年植被年季间的动态变化,分析了气候对植被年季变化的影响,然而同一年内不同季节植被对气候的响应会有所不同,由于数据获取原因,没能进一步分析气候对植被同一年内不同季节的影响。因此,一方面,将 MODIS 与其他中分辨率的遥感数据结合,利用多源遥感数据扩展研究时间尺度,另一方面,进一步收集每年内不同季节 NDVI 数据和相应的气候数据,把植被年季与年内变化分析相结合,将更能反映气候因素对长白山地区植被的影响。

参考文献 (References):

- [1] 张新时. 中国植被及其地理格局——中华人民共和国植被图(1: 1 000 000)说明书. 北京: 地质出版社, 2007.
- [2] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳储量. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2003, 33(1): 72-80.
- [3] 张月丛, 赵志强, 李双成, 孟宪锋. 基于 SPOT NDVI 的华北北部地表植被覆盖变化趋势. 地理研究, 2008, 27(4): 745-754.
- [4] 戴声佩, 张勃, 王海军, 王亚敏, 李丹, 王兴梅. 1999-2007 年祁连山区植被指数时空变化. 干旱区研究, 2010, 27(4): 585-591.
- [5] 国家环境保护局. GB/T 14529-93 自然保护区类型与级别划分原则. 北京: 国家标准出版社, 1993.
- [6] 信忠保, 许炯信, 郑伟. 气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2007, 37(11): 1504-1514.
- [7] 周才平, 欧阳华, 王勤学, 渡边正孝, 孙青强. 青藏高原主要生态系统净初级生产力的估算. 地理学报, 2004, 59(1): 74-79.
- [8] Asrar G, Kanemasu E T, Yoshida M. Estimates of leaf area index from spectral reflectance of wheat under different cultural practices and solar angle. *Remote Sensing of Environment*, 1985, 17(1): 1-11.
- [9] 陈利军, 刘高焕, 冯险峰. 遥感在植被净第一性生产力研究中的应用. 生态学杂志, 2002, 21(2): 53-57.
- [10] Tucker C J, Townshend J R G, Golf T E. African land-cover classification using satellite data. *Science*, 1985, 227(4685): 369-375.
- [11] Tucker C J, Newcomb W W, Dregne H E. AVHRR data sets for determination of desert spatial extent. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15(17): 3547-3565.
- [12] Senay G B, Elliott R L. Combining VHRR-NDVI and land use data to describe temporal and spatial dynamics of vegetation. *Forest Ecology and Management*, 2000, 128(1/2): 83-91.
- [13] 朴世龙, 方精云. 最近 18 年来中国植被覆盖的动态变化. 第四纪研究, 2001, 21(4): 294-301.
- [14] 马明国, 董立新, 王雪梅. 过去 21a 中国西北植被覆盖动态监测与模拟. 冰川冻土, 2003, 25(2): 232-236.
- [15] 方精云, 朴世龙, 贺金生, 马文红. 近 20 年来中国植被活动在增强. 中国科学(C 辑), 2003, 33(6): 554-565.
- [16] Herrmann S M, Anyamba A, Tucker C J. Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate. *Global Environmental Change*, 2005, 15(4): 394-404.
- [17] 宋怡, 马明国. 基于 SPOT VEGETATION 数据的中国西北植被覆盖变化分析. 中国沙漠, 2007, 27(1): 89-93.
- [18] 张东海, 任志远, 王晓峰, 白江涛, 刘宪锋, 冯雪铭. 基于 MODIS 的陕西黄土高原植被覆盖度变化特征及其驱动分析. 生态与农村环境学报, 2013, 29(1): 29-35.
- [19] Yang X, Xu M. Biodiversity conservation in Changbai Mountain Biosphere Reserve, northeastern China: status, problem, and strategy. *Biodiversity and Conservation*, 2003, 12(5): 883-903.
- [20] Tang L N, Shao G F, Piao Z J, Dai L M, Jenkins M A, Wang S X, Wu G, Wu J G, Zhao J Z. Forest degradation deepens around and within protected areas in East Asia. *Biological Conservation*, 2010, 143(5): 1295-1298.
- [21] Tang L N, Li A X, Shao G F. Landscape-level forest ecosystem conservation on Changbai Mountain, China and North Korea (DPRK). *Mountain Research and Development*, 2011, 31(2): 169-175.
- [22] 王绍先. 长白山保护开发区生物资源. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2007.
- [23] 刘志锋, 南颖, 胡浩, 董叶辉, 杨易, 周鹏, 吉喆. 2000-2008 年长白山地区植被覆盖变化特征. 西北植物学报, 2010, 30(2): 391-398.
- [24] Hielkema J U, Prince S D, Astle W L. Rainfall and vegetation monitoring in the Savanna Zone of the Sudan using the NOAA AVHRR. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(11): 1499-1513.
- [25] 李小燕, 任志远, 张翀. 汉江流域 NDVI 与水热指数时空变化及相关性分析. 地理学报, 2013, 32(9): 1623-1633.
- [26] 罗玲, 王宗明, 宋开山, 张柏, 刘殿伟, 任春颖, 张素梅. 1982-2003 年中国东北地区不同类型植被 NDVI 与气候因子的关系研究. 西北植物学报, 2009, 29(4): 800-808.

- [27] Zhang J L, Liu F Z, Cui G F. The efficacy of landscape-level conservation in Changbai Mountain biosphere reserve, China. *PLoS One*, 2014, 9(4): e95081.
- [28] 张建亮. 吉林长白山国家级自然保护区保护成效研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014: 24-25.
- [29] Hope A S, Boynton W L, Stow D A, Douglas D C. Interannual growth dynamics of vegetation in the Kuparuk River watershed, Alaska based on the Normalized Difference Vegetation Index. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(17): 3413-3425.
- [30] Stow D, Hope A, McGuire D, Verbyla D, Gamon J, Huemmrich F, Houston S, Racine C, Sturm, M, Tape K, Hinzmani L, Yoshikawai K, Tweedie C, Noyle B, Silapaswan C, Douglas D, Griffith B, Jia G, Epstein H, Walker D, Daeschner S, Petersen A, Zhou L, Myneni R. Remote sensing of vegetation and land cover change in Arctic Tundra Ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(3): 281-308.
- [31] Stow D, Daeschner S, Hope A, Douglas D, Petersen R, Myneni L, Zhou L, Oechel W. Variability of the seasonally integrated normalized difference vegetation index across the north slope of Alaska in the 1990s. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(5): 1111-1117.
- [32] 高守义, 刘廷福. 一元线性回归相关系数显著性检验. *林业勘查设计*, 1981, (1): 34-34.
- [33] 刘爽, 宫鹏. 2000-2010 年中国地表植被绿度变化. *科学通报*, 2012, 57(16): 1423-1434.
- [34] 王宏, 李霞, 李晓兵, 喻锋, 余弘倩, 杨华. 中国东北森林气象因子与 NDVI 的相关关系. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2015, 41(4): 425-430.
- [35] 李晓兵, 史培军. 中国典型植被类型 NDVI 动态变化与气温、降水变化的敏感性分析. *植物生态学报*, 2000, 24(3): 379-382.
- [36] 朱颜明, 王宁. 长白山自然保护区旅游资源开发的生态环境影响及其保护. *山地学报*, 1999, 17(4): 353-357.
- [37] Olander L P, Scatena F N, Silver W L. Impacts of disturbance initiated by road construction in a subtropical cloud forest in the Luquillo experimental forest, Puerto Rico. *Forest Ecology and Management*, 1998, 109(1/3): 33-49.
- [38] 李月辉, 胡远满, 李秀珍, 肖笃宁. 道路生态研究进展. *应用生态学报*, 2003, 14(3): 447-452.