

基于 Mann-Kendall 法的北黑高速沿线岛状冻土区 植被退化分析

曾旭婧¹, 邢艳秋^{1*}, 单 炜², 张 毅³, 王长青¹

(1. 东北林业大学 森林作业与环境研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 东北林业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040;
3. 四川农业大学 资源学院, 四川 成都 611130)

摘 要: 植被退化是影响陆地生态系统和气候变化的一个重要因素, 分析植被退化特征对植被生态治理与保护具有重要意义。应用 Mann-Kendall 法对 2000—2011 年岛状冻土区的植被退化过程及影响植被退化的驱动因素进行分析。结果表明, 植被退化区域占整个研究区面积的 15.05%, 其中严重退化区域比例占 1.42%, 其余 13.63% 为轻微退化; 退化区域主要分布于北黑高速路段两侧地区、东北部大河口林场外围区域及河漫滩周围的沼泽地; 降水量与植被指数表现为正相关性, 显著性 $P < 0.05$, 而气温显著性 $P > 0.05$, 说明降水量是植被生长的主导因子; 冻土退化产生地面渗水现象, 归一化植被指数骤降 0.26, 同时在 Mann-Kendall 趋势曲线中突变点发生于 2006 年; 岛状冻土退化伴随着土壤温度梯度发生显著的变化, 植物的水分传导性脆弱, 生长将受到抑制作用。研究结果可为高寒区生态系统的稳定发展和探寻水热条件变化规律提供空间数据支撑。

关键词: Mann-Kendall 检验; 岛状冻土; 植被退化; NDVI; Sen's 斜率估计

中图分类号: S771.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-7461(2017)02-0022-08

Vegetation Degradation Analysis in the Island-shaped Permafrost Areas along Bei'an-Heihe Expressway Based on the Mann-Kendall Test

ZENG Xu-jing¹, XING Yan-qiu^{1*}, SHAN Wei², ZHANG Yi³, WANG Chang-qing¹

(1. Center for Forest Operations and Environment, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040, China;
2. School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040, China;
3. College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu, Sichuan 611130, China)

Abstract: Vegetation degradation is a significant factor in ecological degradation, which directly affects terrestrial ecosystems and climate change. Analyzing the character of vegetation degradation is of importance for ecological management and protection. In this paper, Mann-Kendall test was used for discussing the trends of vegetation degradation and degraded factor from 2000 to 2011 island-shaped permafrost (ISP) zone in the high-latitude. The results showed that the area of degraded vegetation accounted for 15.05% of the total area, of which 1.42% was seriously degraded and 13.63% was slightly degraded. Vegetation degradation region was mainly in the both sides of highway from Heihe to Bei'an, peripheral region of the northeast of the Dahekou woodland and the surroundings of floodplain marshes. Precipitation was positively correlated with vegetation index ($P < 0.05$) and atmospheric temperature ($P > 0.05$), indicating that the precipitation was the dominant factor of vegetation growth. With the degradation of ISP, there existed a ground water seepage phenomenon, and the normalized vegetation index dropped 0.26. The mutation point occurred in the Mann-Kendall trend curve in 2006. Meanwhile, permafrost degradation along with the soil

收稿日期: 2016-10-25 修回日期: 2016-12-14

基金项目: 国家局级重点科研项目“多传感集成林木参数信息采集关键技术平台”。

作者简介: 曾旭婧, 女, 在读硕士, 研究方向: 林业遥感。E-mail: jingle1992@163.com

* 通信作者: 邢艳秋, 女, 教授, 博士生导师, 研究方向: 森工管理与林业信息工程。E-mail: yanqiuxing@nefu.edu.cn

temperature gradient had significant changes, and plant water conductivity became fragile, which inhibited vegetation growth. The results would provide spatial data support for the stable development of the ecosystem of alpine region and the exploration of hydrothermal condition variation.

Key words: Mann-Kendall test; island-shaped permafrost; vegetation degradation; NDVI; Sen's slope estimator

植被退化^[1],是指植被的萌发与生长受到物理或者化学环境的影响发生抑制的过程,主要表现为植被的衰退死亡。它是造成生态退化的一个重要影响因素,直接影响到陆地生态系统的碳循环^[2]、气候变化^[3]、水源涵养^[4]及生物多样性^[5]等。随着全球气温不断升高^[6],多年岛状冻土区内冻土开始退化,伴随着活动层厚度变薄,地表渗水,滑坡频发,分布范围缩小并消失的不可逆过程。冻土退化还直接影响到高寒区土壤层的水热环境,致使冻土区内的植被发生相应的演变,出现植被退化的趋势^[7]。因此研究多年岛状冻土区内植被退化对生态系统的稳定发展和探寻区域水热条件变化规律具有重要意义。

归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)能够很好地反映植被生长情况,被广泛的用于植被退化研究中。国内外许多学者利用不同遥感卫星的 NDVI 数据集,采用不同趋势分析法^[8-10]对植被退化进行分析,并探讨气候^[11]、土壤理化性质^[12]及水文特征^[13]等因素对植被退化的响应。目前,植被退化在高寒冻土生态系统水热循环变化研究中越来越重要,尤其是典型岛状冻土区植被退化对土壤-植被-大气连续体的物质能量交换过程的影响^[14]。从植被退化时空变化角度,毛德华^[7]等利用趋势线分析方法对长时间序列下东北多年冻土区植被变化特征进行分析,结果表明植被退化与气候变化及土地利用有关。王青霞^[15]等运用一元线性回归斜率值探讨青藏高原高纬度连续冻土区植被变化趋势,并分析气候与植被变化的关系发现中等植被覆盖区与气象要素相关性较高。从植被退化与冻土层之间物质能量变化的角度,王俊峰^[16]等比较青藏高原沼泽草甸区局部退化与未退化植被区的土壤理化性质,分析得出植被退化造成冻土物理稳定性降低,养分流失严重。冻土区植被退化的时空变化过程及与冻土层之间物质能量变化过程都是研究热点,所以研究不连续的高纬度岛状冻土区植被退化范围,分析植被退化与岛状冻土退化之间联系,对于我国冻土区植被恢复重建及保护具有一定借鉴意义。

综上所述,本研究选取北黑高速沿线的岛状冻土区高寒植被为研究对象,基于 Mann-Kendall 法对 2000—2011 年共 12 a 的 TM 遥感影像、气象数据以及地面实测数据分析多年岛状冻土区的植被退

化过程,探讨影响植被退化的驱动因素,着重分析植被退化与冻土退化之间的关系,为生态退化背景下高寒地区植被生态治理与保护提供科学依据。

1 研究数据与研究方法

1.1 研究区概况

北黑高速沿线(图 1)位于小兴安岭东南部(127°17'31"—127°30'24"E, 49°20'57"—49°40'50"N),面积为 $4.05 \times 10^7 \text{ m}^2$,海拔为 210~330 m。地形属于河谷地段,主要分布有丘陵、漫岗、耕地、沼泽地等类型。气候属大陆性季风气候,年平均气温 $-2 \sim 1^\circ\text{C}$,年降雨量 500~600 mm,年日照 2 500 h,无霜期约为 90 d。主要的植被类型是森林植被(针阔混交林)和草甸植被(塔头草甸、泥炭苔藓)。植物优势种为白桦(*Betula platyphylla*)、椴树(*Tilia tuan*)、柞树(*Xylosma racemosum*)、落叶松(*Larix gmelinii*)、枫杨(*Pterocarya stenoptera*)。研究区处于高纬度多年冻土区与季节性冻土过渡地带,属于典型的岛状多年冻土,具有典型冰缘地貌,岛状冻土活动层厚度约为 1.8 m。受自然因素和人为因子的驱动下,区内出现大片间断分布的岛状多年冻土且正发生退化。

1.2 数据来源及处理

1.2.1 Landsat TM 遥感影像 美国地质勘探局(United States Geological Survey, USGS)发布的 Landsat TM 多光谱影像,时间分辨率为 16 d,空间分辨率为 $30 \times 30 \text{ m}$,数据采集时间为 2000 年 1 月—2011 年 11 月。利用 ENVI5.2 对 TM 数据进行辐射定标,大气校正等图像预处理,与其他数据相比, TM 数据具有时间和空间分辨率高的特点,适用于中小尺度范围内岛状冻土进行植被退化研究。选用 TM 影像的红波段(ρ_R)和近红外波段(ρ_{NIR})计算 NDVI,计算公式:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R} \quad (1)$$

采用最大值合成法(MVC)^[17]对每一个像元的 NDVI 值取全年时段内最大值,以进一步优化图像。

1.2.2 气象数据 来源于美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)的全球气象站提供每月气象站点数

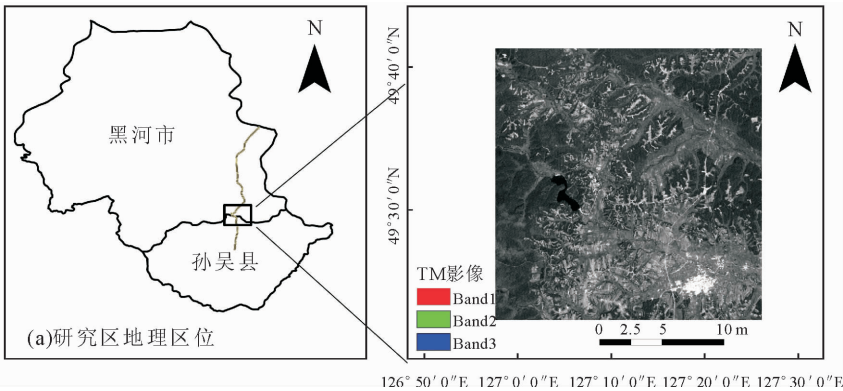


图 1 研究区域位置及 TM 影像

Fig. 1 The location of study area and the TM image

据集(<http://gis.ncdc.noaa.gov/map/viewer/>),选取 2000—2011 年研究区附近 7 个测站点的气温和降水量数据,采用克里金空间插值并做重采样,用于植被退化相关性分析。

1.2.3 地表覆盖数据 2010 年空间分辨率为 30 m 的地表覆盖数据 (<http://www.globallandcover.com/>),图幅号为 N52_45,研究区地类包括裸地、耕地、草地、灌木、林地、水体、人造地表,用于数据分析。

1.2.4 地面监测数据 采用温度传感器和湿度传感器对 161+400 段退化冻土区不同深度(0.5~6 m)的温度(℃)、水分(%)等环境因子进行监测,监测时间为 2009 年 11 月—2011 年 11 月,主要用于分析冻土退化后土壤垂直温度对植被退化的影响。

1.3 研究方法

1.3.1 植被变化趋势分析 为了表征冻土区植被 NDVI 变化趋势,采用 Sen's 斜率估计^[18]进行斜率趋势拟合,如式(2)所示:

$$Q_{med} = mean(\frac{NDVI_j - NDVI_i}{j - i}) \forall j > i \quad (2)$$

式中, i 和 j 为时间序数; Q_{med} 表示植被变化趋势的斜率大小, $Q_{med} > 0$ 说明 NDVI 在 $j \sim i$ 年间的变化趋势是上升,反正则表现为下降。因为 Q_{med} 不存在为 0 的区间,将 Q_{med} 介于 $-0.000\ 5$ 与 $0.000\ 5$ 的范围定义为 0 的区间,即稳定不变的区间^[19]。

由于 2000—2011 年年最大 NDVI 数据受大气和云层的干扰较大,数据分布不完全服从正态分布。采用 Mann-Kendall 方法在当前的植被研究中能发挥其自身优势,它不但可以增强趋势结果的抗噪性,而且能在一定程度上提高检验结果的准确性^[20]。其统计量 S 计算公式:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \operatorname{sgn}(NDVI_j - NDVI_i) \quad (3)$$

式中, $\operatorname{sgn}(NDVI_j - NDVI_i)$ 为符号函数,如式(4)所示:

$$\operatorname{sgn}(NDVI_j - NDVI_i) = \begin{cases} +1, & NDVI_j - NDVI_i > 0 \\ 0, & NDVI_j - NDVI_i = 0 \\ -1, & NDVI_j - NDVI_i < 0 \end{cases} \quad (4)$$

趋势变化检验值 UF_k 判断,如式(5)所示:

$$UF_k = \frac{S - E(S)}{\sqrt{Var(S)}} \quad (5)$$

式中,趋势变化检验值 UF_k $E(S)$ 与 $Var(S)$ 为统计量 S 的均值和方差。 $UF_k > 0$ 表示植被处于上升趋势,反之则为下降。 UF_k 组成一条 UF 曲线,在置信区间($-0.05, 0.05$)内为没有明显的变化趋势,反之为明显变化趋势。将此方法引用到反序列中,计算逆序的秩序列检验值 UB_k ,与 UF_k 交点为长时间序列范围内植被退化的突变点。

1.3.2 NDVI 与气温和降水的相关分析 对 2000—2011 年岛状冻土区 12 a NDVI 数据与气温和降水进行逐栅格相关分析^[21],用相关系数探讨气象要素与植被生长之间的关系^[22],并对其空间特征进行分析,综合考虑气象要素对 NDVI 的影响。相关系数计算公式:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

式中, $r_{xy} > 0$ 时,表示气温(降水)与 NDVI 呈现正相关性; $r_{xy} < 0$ 是为负相关,系数越大其相关性越强。

2 结果与分析

2.1 植被覆盖时空分布特征

依据 Landsat TM 影像计算出 2000—2011 年最大 NDVI 值(图 2)。通过图 3 结果表明:在长时间序列下,研究区年 NDVI 介于 0.78~0.83 之间,且逐年呈现总体下降的趋势。从 2000—2003 年 NDVI 开始呈现下降趋势明显,从 0.82 下降至最低 0.78。至 2004 年 NDVI 出现上升趋势,但很快出现第 2 个下滑区间,即从 2004 年的 0.83 下滑至 2007

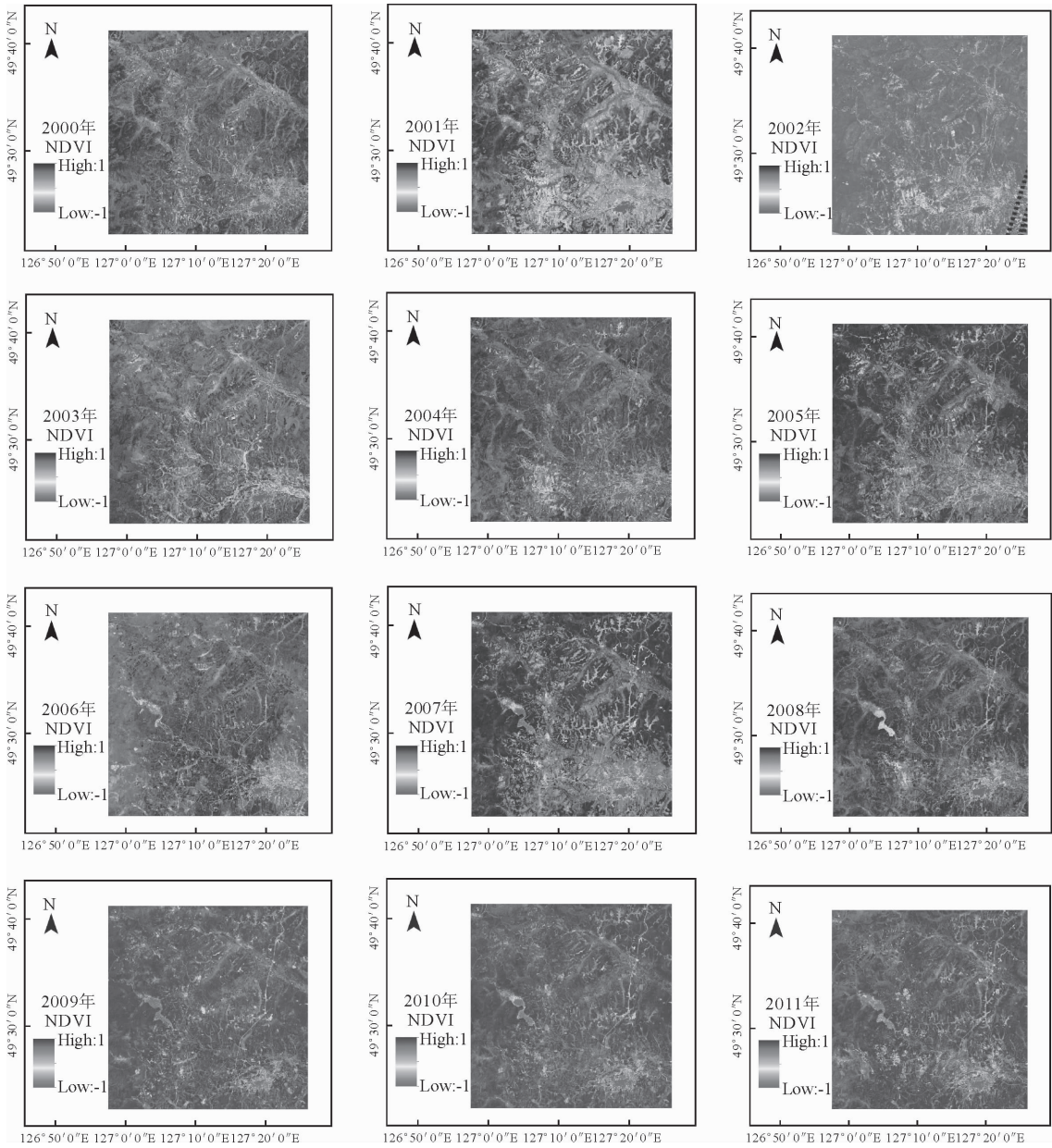


图 2 2000—2011 年 NDVI 空间分布

Fig. 2 Distribution of NDVI from 2000 to 2011

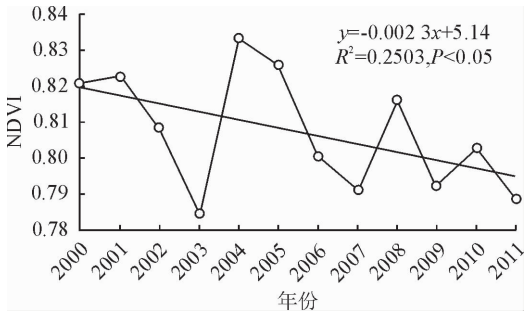


图 3 2000—2011 年 NDVI 年际变化

Fig. 3 Annual variation of NDVI from 2000 to 2011

年的 0.79。2007 年 NDVI 值出现低点,其原因是该地区出现严重干旱灾害直接影响植被生长。在 2007 年之后 NDVI 值波动幅度较小,但是趋势表现

仍为下降,说明该地区植被一直存在退化现象。

利用 12 a 年均 NDVI 数据,计算出 2000—2011 年平均 NDVI 空间分布特征(图 4)。整个区域 NDVI 表现出西部和东北部高,东南部低的趋势。西北及东北地区主要为森林,具有较高的 NDVI,而东南部为城镇居住地,NDVI 较低。NDVI<0.3 的主要为水体、道路及孙吴县城区;NDVI 0.3~0.5 为低植被覆盖区,主要位于南部水库下游的河漫滩的阶地,以塔头草和芨芨草等水生植被为主,也有少部分农作物耕作;NDVI 0.5~0.8 为中等植被覆盖区,集中在东部河谷地区,白桦树为主的疏林地;NDVI 值>0.8 的为高植被覆盖区,主要分布在西部及东北部大河口林场,以针阔混交林为主,主要树种为柞树、落叶松等。

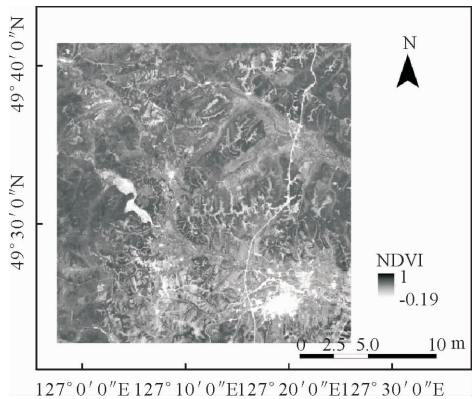


图 4 2000—2011 年平均 NDVI 空间分布

Fig. 4 Distribution map of average NDVI from 2000 to 2011

2.2 植被退化空间格局分析

将 Sen’s 斜率估计和 Mann-Kendall 检验结合起来,可以直观的反映 2000—2011 年北黑高速沿线植被退化空间分布状况。通过叠置分析,将北黑高速沿线路段的植被退化划分为 5 个等级:严重退化、轻微退化、稳定不变、轻微改善以及明显改善^[20]。结果表明,植被退化区域占整个研究区面积的 15.05%,其中严重退化区域比例占 1.42%,其余 13.63%为轻微退化;区域内植被稳定不变所占比例最大,达到 69.83%;改善区域与退化区域持平,占总面积的 15.12%(表 1)。

表 1 植被退化趋势统计

Table 1 Statistics of vegetation degradation trend

NDVI 变化趋势	等级 划分	面积 百分比/%
$Q_{med} \leq -0.0005, UF_k < -1.96$	严重退化	1.42
$Q_{med} \leq -0.0005, -1.96 \leq UF_k \leq 1.96$	轻微退化	13.63
$-0.0005 < Q_{med} < 0.0005, -1.96 \leq UF_k \leq 1.96$	稳定不变	69.83
$Q_{med} \geq 0.0005, -1.96 \leq UF_k \leq 1.96$	轻微改善	14.89
$Q_{med} \geq 0.0005, UF_k > 1.96$	明显改善	0.23

利用地表覆盖类型图剔除水体和人造地表后,得到 2000—2011 年期间北黑高速沿线的植被退化趋势(图 5)。从图 5 中可得,植被整体上呈现下降趋势,退化区域分布不连续,未呈现规律性。严重退化区域受人类活动影响较大,主要集中在北黑高速路段两侧地区、孙吴县城郊区以及东北部地势低洼的河谷地带;轻微退化的地区主要集中在水库库区周围、河漫滩周围的沼泽地、营草沟西南部以及赵地营子;而轻微改善区域主要集中在西北部的王家湾、西岗、卧牛河及东北部大河口林场;明显改善区域与轻微改善区域伴随分布,在空间分布上表现一致。

2.3 植被退化因素分析

影响植被退化的因子主要分为 2 大类:自然因素和人为因素。研究区所处地理环境为高纬度高寒

区,存在多年岛状冻土,其立地条件复杂。依据研究区的特点本文主要探讨气象要素和下垫面情况对植被退化的影响。

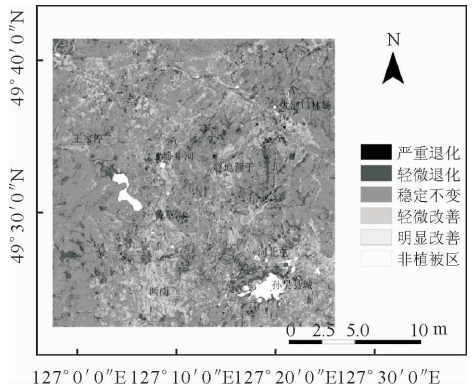


图 5 2000—2011 年植被退化趋势

Fig. 5 Map of vegetation degradation trend from 2000 to 2011

2.3.1 气象要素对植被退化影响 植被退化主要受水热环境因子的协同影响,大气降水和气温是影响区域内植被分布和长势的重要驱动因素。利用 12 a 最大 NDVI 与年降水量,年平均气温散点分布图反映其关系趋势(图 6)。降雨量与 NDVI 呈现正相关性, R^2 为 0.26;而气温与降水量呈现负相关性, R^2 为 0.01。从 R^2 对比而言,气温对 NDVI 的响应不及降水对 NDVI 的响应。同时从显著性分析来看,降水量与植被 NDVI 拟合后显著性 $P < 0.05$,而气温表现为不显著 $P > 0.05$,说明在气象要素中降水量是研究区内植被年最大 NDVI 的主控因子。

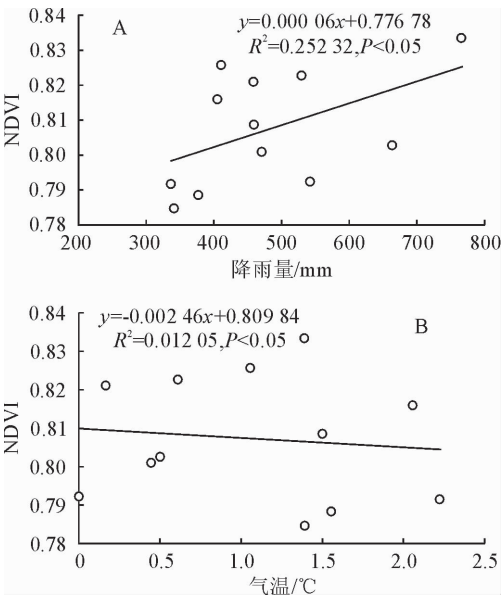


图 6 气象因子与 NDVI 散点图

Fig. 6 Scatter diagram of NDVI with meteorological factors

为进一步探究气象要素在空间范围内对植被退化的影响,分别对 12 a 间气温、降水数据进行逐栅

格相关性分析(图 7)。结果表明,气温与 NDVI(图 7a)在大空间范围内呈现正相关性(56.75%),高于负相关性(43.25%)。但显著性并不高,间接说明气温在该区域并不是影响植被生长的限制性因素。同时出现的负相关性区域,除了南部零星的人类活动干扰外,同时气温在垂直海拔上表现不同会对相关分析会出现干扰。降水量与年平均 NDVI 呈现正

相关性,所占面积比 63.05%,说明降水在一定程度上促进植物的生长。降水对植被呈现负相关性的区域达 36.95%,一方面,大多处于山脊坡度较大的区域(图 7b),地形因子干扰性强,降水并不能充分发挥正效应。另一方面,降水对植被生长虽有促进作用,只是在阈值范围内起作用,超过了阈值反而抑制生长。对比而言,降水在植被变化过程中占主导因素。

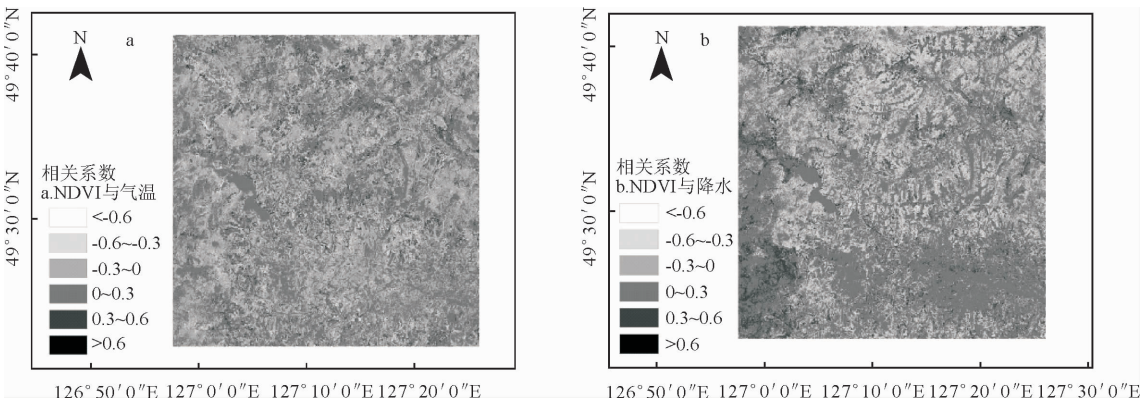


图 7 年平均 NDVI 与气温(a)、降水(b)相关性分析

Fig. 7 Correlations between annual mean NDVI and the corresponding temperature(a)and precipitation(b)

2.3.2 冻土退化对植被退化影响 冻土退化直接影响土壤环境中的温度梯度和水汽压梯度,改变植物表层土壤水热环境,从而导致植被的退化。从 TM 遥感图像同月份监测发现该区域出现冻土大面积退化现象(图 8)。从图 8 中得到冻土退化发生全过程:2000—2006 年属于冻土退化初级阶段,局部出现冻土融化;2006—2009 年属于退化积水阶段,能够直观地发现大面积水体出现;2009—2011 年处于退化末期,地表积水形成零星沼泽地,冻土层变薄地形发生形变,土壤颗粒度孔隙度发生变化,塔头草等水生植物开始生长。

2005 年植被处于增长阶段,在 2004 年植被增长幅度最大。 UF_k 统计量与 UB_k 统计量两者的交点发生在 2006 年,植被指数 NDVI 下降 0.26,植被退化过程一直持续至 2009 年,2011 年开始上升恢复。植被变化经历增长—退化—增长的过程,植被退化拐点发生在冻土退化地表渗水的阶段;植被退化幅度最大的时间段为 2006—2009 年,正好为冻土积水退化期,其中 2009 年 9 月植被退化表现最强烈,NDVI 值达到最低,大量地表渗水;冻土退化末期出现植被恢复现象,是沼泽地的形成改变了土壤理化条件,促使水生植被疯长。综上所述,植被退化是受冻土退化过程的影响,并改变了植被下垫面的水热环境。

冻土退化直接对浅层土壤温度产生影响,同时影响植被的生长过程。基于地面监测数据,形成冻土退化区冻结融化期间的地温等值线(图 10),图中显示该地区冻土层厚度约为 1.8 m,在 2010 年夏季地层深度为 2 m 温度 $T_{-2m} > 0^{\circ}\text{C}$,推测出冻土层变薄,出现在植被退化之后;而在 2011 年 $T_{-2m} < 0$,活动层已恢复厚度,此时植被已开始恢复;由于冻土退化的往复性,植被退化之后地温表现出曲率变化较大;在地表冻结的过程中,由于活动层底层土壤与顶层土壤均受到冻土融化吸热的影响,温度梯度变化导致水汽压梯度也受到影响,植被原有水热条件被改变,超过一定阈值将发生退化,严重时将出现 2009 年的大面积积水现象。

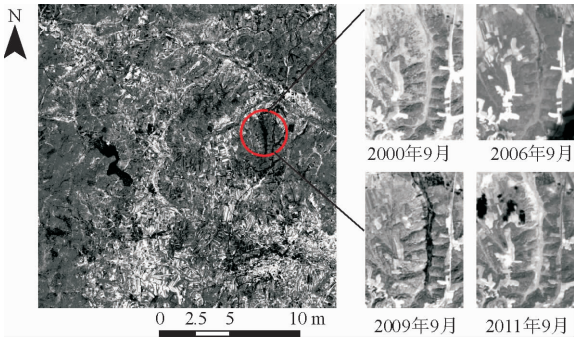


图 8 冻土退化位置示意图及融化图像(TM:543 波段)

Fig. 8 Location of permafrost degradation area and thawing image(TM:Band 543)

利用每年最大 NDVI 值变化对冻土退化区域进行 Mann-Kendall 趋势分析(图 9), UF_k 为趋势检验值, UB_k 为逆序的秩序列统计量,两者交点为植被退化突变点。结果表明,冻土退化区域从 2000—

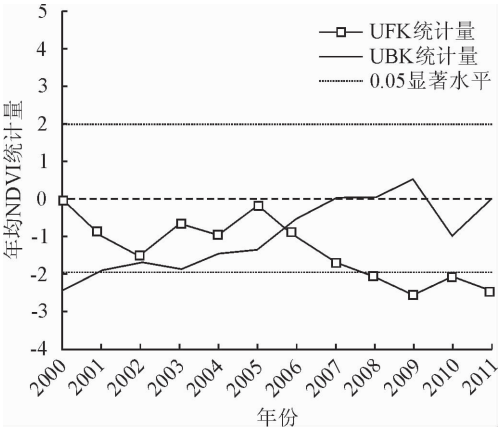


图9 冻土退化区域平均NDVI的Mann-Kendall趋势分析

Fig. 9 Mann-Kendall trend analysis of mean NDVI in the permafrost degradation area

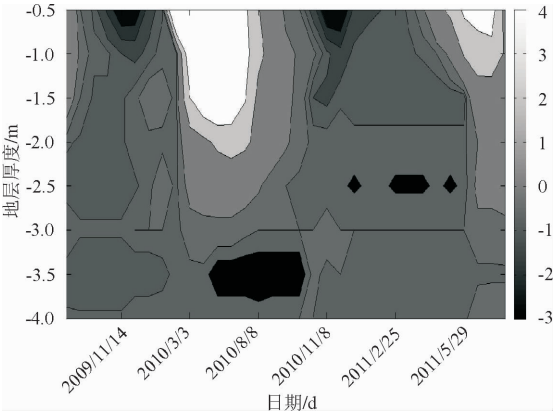


图10 植被退化区冻土热力

Fig. 10 Thermal regimes map of island-shaped permafrost in degraded vegetation region

同时,植被退化与冻土退化过程相互作用。从图10可看出,在地层0.5 cm处,出现2次低温周期,后者明显冻结时间更加长,说明植被恢复后地表的冻结时长变长。通过日平均气温统计得2009年与2010年气温冻融天数相差15 d,图9中两者地表冻结天数相差21 d。因为植被退化反而加速地表能量交换,使得地表冻结时长变短,差值变大,冻土稳定性变弱容易发生退化。

3 结论与讨论

利用2000—2011年的TM遥感影像,基于Mann-Kendall法对北黑高速沿线多年岛状冻土区植被退化情况及其影响因子进行分析。研究结果表明,在长时间序列下,研究区植被指数呈现逐年总体下降的趋势;通过Mann-Kendall法分析得植被退化区域占整个研究区面积的15.05%,且植被退化区域分布不连续,主要在北黑高速路段两侧地区、大河口林场外围区以及东北部地势低洼的河谷等地区植被退化严重;降水与区域多年冻土退化也从不同方面影响植被退化。

在大时空尺度下高纬度寒区,植被退化过程缓慢,影响因素复杂。通过定量分析降水在植被变化过程中占主导因素,这与该地区的大陆性季风气候对植被的影响一致;冻土退化过程与植被退化过程呈现统一性,由于冻土退化的反复性,植被退化区域地温曲率变化较大,冻土退化伴随着土壤温度梯度、水汽梯度发生显著的变化,植物水分传导性脆弱,生长将受到抑制作用,这与王俊峰^[16]等对冻土退化植被区水热条件变化的研究一致。同时植被退化也反作用于冻土退化过程,使冻土稳定性变弱容易发生退化。本研究结果能够直观反映北黑高速沿线岛状冻土区植被变化趋势,但仍存在一定的局限性。在未来的研究中,可以针对不同植被类型,就人类活动和降水、冻土退化对植被生长影响的滞后性等对植被退化造成的影响做进一步的定量分析。

参考文献:

[1] 李新平,赵娟,安雁. 植被退化评价研究展望 [J]. 世界林业研究, 2012, 25(2): 29-33.
LI X P, ZHAO J, AN Y. Prospect of evaluation study on vegetation degradation [J]. World Forestry Research, 2012, 25(2): 29-33. (in Chinese)

[2] 李广泳,姜翠红,程滔,等. 青海湖流域植被物候格局时空动态变化及其与植被退化的关系 [J]. 草业学报, 2016, 25(1): 22-32.
LI G Y, JIANG C H, CHENG T, et al. Spatial-temporal variation of vegetation phenology and their relationships with vegetation degradation in a Qinghai Lake watershed [J]. Acta Prataculturae sinica, 2016, 25(1): 22-32. (in Chinese)

[3] 任国玉,初子莹,周雅清,等. 中国气温变化研究最新进展 [J]. 气候与环境研究, 2005, 10(4): 701-716.
REN G Y, CHU Z Y, ZHOU Y Q, et al. Recent progresses in studies of regional temperature changes in China [J]. Climatic and Environmental Research, 2005, 10(4): 701-716. (in Chinese)

[4] 徐涵秋,何慧,黄绍霖. 福建省长汀县河田水土流失区植被覆盖度变化及其热环境效应 [J]. 生态学报, 2013, 33(10): 2954-2963.
XU H Q, HE H, HUANG S L. Analysis of fractional vegetation cover change and its impact on thermal environment in the Hetian basinal area of county Changting, Fujian province, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(10): 2954-2963. (in Chinese)

[5] 王合云,郭建英,董智, et al. 退化程度对大针茅草原植物群落结构特征及物种多样性的影响 [J]. 干旱区资源与环境, 2016, 3(3): 106-111.
WANG H Y, GUO J Y, DONG Z, et al. Effect of degradation on the community structure and plant species diversity of stipa grandis steppe [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 3(3): 106-111. (in Chinese)

[6] 王澄海,靳双龙,施红霞. 未来50 a中国地区冻土面积分布变

化 [J]. 冰川冻土, 2014, 36(1): 1-8.

WANG C H, JIN S L, SHI H X. Area change of the frozen ground in China in the next 50 years [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(1): 1-8. (in Chinese)

[7] 毛德华, 王宗明, 宋开山, 等. 东北多年冻土区植被 NDVI 变化及其对气候变化和土地覆被变化的响应 [J]. 中国环境科学, 2011, 31(2): 283-292.

MAO D H, WANG Z M, SONG K S, *et al.* The vegetation NDVI variation and its responses to climate change and LUCC from 1982 to 2006 year in Northeast permafrost region [J]. China Environmental Science, 2011, 31(2): 283-292. (in Chinese)

[8] DETSCH F, OTTE I, APPELHANS T, *et al.* Seasonal and long-term vegetation dynamics from 1-km GIMMS-based NDVI time series at Mt. Kilimanjaro, Tanzania [J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 178: 70-78.

[9] LIU X, ZHU X, PAN Y, *et al.* Vegetation dynamics in Qinling-Daba Mountains in relation to climate factors between 2000 and 2014 [J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(1): 45-58.

[10] 李广宇, 陈爽, 余成, 等. 长三角地区植被退化的空间格局及影响因素分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(4): 572-577.

LI G Y, CHEN S, YU C, *et al.* Diminished vegetation greenness in Yangtze River delta due to rapid unplanned urbanization [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(4): 572-577. (in Chinese)

[11] 王丝丝, 于兴修, 刘正佳. 沂蒙山区植被 NDVI 的时空特征及其对水热条件的响应 [J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(1): 61-68.

WANG S S, YU X X, LIU Z J. Spatiotemporal patterns of NDVI and its responses to temperature and precipitation over Yimeng mountainous area [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2014, 29(1): 61-68. (in Chinese)

[12] 王一博, 吴青柏, 牛富俊. 长江源北麓河流域多年冻土区热融湖塘形成对高寒草甸土壤环境的影响 [J]. 冰川冻土, 2011(3): 659-667

WANG Y B, WU Q B, NIU F J. The impact of thermokarst lake formation on soil environment of alpine meadow in permafrost regions in Beiluhe Basin of the Tibetan Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011(3): 659-667. (in Chinese)

[13] 文晶, 王一博, 高泽永, 等. 北麓河流域多年冻土区退化草甸的土壤水文特征分析 [J]. 冰川冻土, 2013, 35(4): 929-937.

WEN J, WANG Y B, GAO Z Y, *et al.* Soil hydrological characteristics of the degrading meadow in permafrost regions in the Beiluhe river basin [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(4): 929-937. (in Chinese)

[14] 尤全刚, 薛炯, 彭飞, 等. 高寒草甸草地退化对土壤水热性质的影响及其环境效应 [J]. 中国沙漠, 2015, 35(5): 1183-1192.

YOU Q G, XUE X, PENG F, *et al.* Alpine meadow degradation effect on soil thermal and hydraulic properties and its environmental impacts [J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(5): 1183-1192. (in Chinese)

[15] 王青霞, 吕世华, 鲍艳, 等. 青藏高原不同时间尺度植被变化特征及其与气候因子的关系分析 [J]. 高原气象, 2014, 33(2): 301-312.

WANG Q X, LV S H, BAO Y, *et al.* Characteristics of vegetation change and its relationship with climate factors in different time-scales on Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology, 2014, 33(2): 301-312. (in Chinese)

[16] 王俊峰, 吴青柏. 青藏高原沼泽草甸区植被退化对浅层寒冻土壤环境的影响 [J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2011, 47(6): 39-45.

WANG J F, WU B Q. Influences of the vegetaion degradation on the shallow cryic soil environment in the wet meadow areas on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2011, 47(6): 39-45. (in Chinese)

[17] HOLBEN B N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data [J]. International Journal of Remote Sensing, 1986, 7(11): 1417-34.

[18] 汤旭光, 李恒鹏, 聂小飞, 等. 应用 MODIS 数据监测千岛湖流域植被覆盖动态 (2001—2013 年) [J]. 湖泊科学, 2015, 27(3): 511-518.

TANG X G, LI H P, NIE X F, *et al.* Vegetation dynamical status in the Lake Qiandao drainage basin using time-series MODIS data (2001—2013) [J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(3): 511-518. (in Chinese)

[19] 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 等. 2000-2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化 [J]. 生态学报, 2013, 24: 7798-7806.

YAN L H, JIANG W G, SHEN W M, *et al.* The spatio-temporal variations of vegetation cover in the Yellow River Basin from 2000 to 2010 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 24: 7798-7806. (in Chinese)

[20] 罗倩, 刘晓暄, 苏伟. 基于 Mann-Kendall 的北方农牧交错带植被时空变化分析 [J]. 湖北农业科学, 2015, 54(23): 5891-5895.

LUO Q, LIU X X, SU W. Vegetation spatial and temporal variation analysis based on the Mann-Kendall patterns in the agricultural-pastoral areas [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2015, 54(23): 5891-5895. (in Chinese)

[21] 陈言, 刘翔, 王薇, 等. 基于长时间序列影像的关中地区植被时空变化分析 [J]. 西北林学院学报, 2014, 29(2): 54-60.

CHEN Y, LIU X, WANG W, *et al.* Spatio-temporal variation of vegetation in Guanzhong region using long-time serial images [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(2): 54-60. (in Chinese)

[22] 凌威, 王新杰, 武文昊, 等. 1990—2014 年新疆卡山保护区植被覆盖度时空变化特征 [J]. 西北林学院学报, 2016, 31(4): 227-232.

LING W, WANG X J, WU W H, *et al.* Spatial differences of the variations of vegetation coverage in Mt. Kalamaili Ungulate Nature Reserve during 1990—2014 [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(4): 227-232. (in Chinese)