

doi: 10.7522/j.issn.1000-0240.2015.0006

Zhou Ting, Zhang Yinsheng, Gao Haifeng, et al. Relationship between vegetation index and ground surface temperature on the Tibetan Plateau alpine grassland[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(1): 58–69. [周婷, 张寅生, 高海峰, 等. 藏高原高寒草地植被指数变化与地表温度的相互关系[J]. 冰川冻土, 2015, 37(1): 58–69.]

## 青藏高原高寒草地植被指数变化 与地表温度的相互关系

周 婷<sup>1,3</sup>, 张寅生<sup>1,2\*</sup>, 高海峰<sup>1</sup>, 张 腾<sup>1,3</sup>, 马颖钊<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院 青藏高原研究所 环境变化与地表过程重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院 青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 为了解脆弱的高原生态环境对升温过程的响应, 利用 1982–2006 年国家标准地面气象站地表温度和 GIMMS-NDVI 数据集, 探讨了青藏高原高寒草地植被指数和地表温度的变化特征及其相互关系。结果表明: 1982–2006 年, 高寒草地 NDVI、地表温度整体均呈现增加趋势, 年均 NDVI、生长季 NDVI、年最大 NDVI ( $NDVI_{max}$ ) 与年均地表温度、生长季地表温度的上升趋势分别为  $0.007 (10a)^{-1}$ 、 $0.011 (10a)^{-1}$ 、 $0.007 (10a)^{-1}$  与  $0.60 ^\circ C \cdot (10a)^{-1}$ 、 $0.43 ^\circ C \cdot (10a)^{-1}$ ;  $NDVI_{max}$  与地表温度显著相关的地区达 70.49%。但是高原地形、气候、水文环境的空间差异性导致高寒草地 NDVI 与地表温度的相关关系十分复杂。  $NDVI_{max}$  与年均地表温度的相关性最为显著; 在返青期和枯萎期, NDVI 与地表温度均为显著正相关。不同的植被覆盖条件下, NDVI 对地表温度的响应不同: 植被覆盖差以及退化严重的地区,  $NDVI_{max}$  与地表温度呈负相关性; 反之,  $NDVI_{max}$  与地表温度主要表现为正相关。

**关键词:** 青藏高原; NDVI; 地表温度; 相互关系

**中图分类号:** S812.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2015)01-0058-12

### 0 引言

青藏高原素称地球的“第三极”, 海拔高、气候寒冷, 多年冻土分布广泛, 高寒草地为主要植被类型<sup>[1]</sup>。高海拔和地处中、低纬度的地理条件以及特殊的下垫面状态使青藏高原成了全球变化的敏感区域之一。其严酷的气候条件, 令环境因子常常处于脆弱的地表系统平衡的临界阈值状态。环境微小的波动会在生态系统中产生强烈响应, 导致林线波动、草场退化、湿地消失等<sup>[2]</sup>。

近百年来地球气候正经历着以全球变暖为主要特征的变化<sup>[3–4]</sup>, 作为对全球变暖的区域响应, 青藏高原升温明显, 近 20 a 来气温升高更为显著<sup>[5–7]</sup>。地表是地球和大气能量交换的界面, 随着

气温的不断上升, 地温也有着明显的响应<sup>[8–10]</sup>, 其变化在年代际和季节上表现的比较显著<sup>[9–12]</sup>。地表温度是大气与地表结合部的温度状况, 在土壤的所有物理、生物和微生物过程中扮演着重要的角色<sup>[13]</sup>, 对植物种子的萌芽、植株的生长发育有着重要影响。作为与植物生长息息相关的环境要素, 地表温度的变化在一定程度上会影响地表植被的变化。高寒草地植物及其群落对环境变化反应很敏感<sup>[14]</sup>, 主要通过覆盖度和生物量的变化来反映, 呈现出植被的年际变化和季节变化。NDVI(归一化植被指数)对植被的生长势和生长量非常敏感<sup>[15]</sup>, 能较准确地反映地表植被状况<sup>[16–17]</sup>, 并得到广泛应用。地表植被是连接土壤、大气和水分的自然“纽带”<sup>[18]</sup>, 对全球的能量平衡、生物化学循环、水循

收稿日期: 2014-08-13; 修订日期: 2014-12-27

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB03030200)资助

作者简介: 周婷(1990–), 女, 湖南岳阳人, 2012年毕业于兰州大学, 现为中国科学院青藏高原研究所读硕士研究生, 主要从事寒旱区地表水文过程的研究工作。E-mail: zhouting@itpcas.ac.cn

\* 通讯作者: 张寅生, E-mail: yszhang@itpcas.ac.cn.

环等起着调控作用<sup>[17]</sup>,对气候系统变化有着深远的影响,是影响全球生态变化的主要驱动因子.植被的变化也改变着土壤的特征<sup>[19]</sup>.研究表明<sup>[20-21]</sup>,地表温度不仅与气候关系密切,而且也受边界层(如植被、地表有机物质和雪层等)发生过程的调控.植被对浅层地温的影响很复杂<sup>[20-21]</sup>,植被可以吸收大部分的太阳辐射,能够阻止到达表土层辐射的 54%~65%<sup>[21]</sup>,极大地减少了进入土层使地温升高的热量;同时植被又能降低近地表风速,减少表土层水分蒸发及向大气放热的强度.

显然,植被和地表温度二者之间是相互影响的.在气候变暖条件下青藏高原高寒草地和冻土响应显著<sup>[22-24]</sup>,那么高寒草地植被与地表温度之间的相互关系如何?本文通过分析 1982-2006 年间青藏高原草地 NDVI 与地表温度实测数据,以期揭示在全球变暖的背景下青藏高原高寒草地植被指数与地表温度的变化规律以及二者的相互关系,为进一步研究青藏高原地区的生态水文提供依据,对改善该区脆弱的生态环境有重要的意义.

## 1 数据来源及研究方法

### 1.1 数据来源和处理

NDVI 数据源自全球总量建模与制图研究(global inventory monitoring and modeling studies, GIMMS)提供的全球 AVHRR NDVI 序列,用到的是 1982-2006 年的中国子区数据,时间分辨率为 15 d,空间分辨率为 8 km×8 km.该 NDVI 数据较

其他数据误差更小、精度更高,已广泛应用于全球及区域大尺度植被覆被变化的研究<sup>[25-26]</sup>.根据各气象站的经纬度在 ArcGIS 10.0 中提取各点站点所在象元每 15 d 的 NDVI 值,对每月两个 NDVI 值采用国际通用的最大合成法(maximum value composition, MVC)取最大值作为该月的 NDVI 值,建立各气象站 1982-2006 年月 NDVI 时间序列数据集.最大合成法可以进一步消除云、大气、太阳高度角等的部分干扰<sup>[17-27]</sup>,公式为:

$$NDVI_i = \max\{NDVI_{ij}\} \quad (1)$$

每年最大 NDVI 值( $NDVI_{\max}$ )按照下面的公式获得:

$$NDVI_{\max} = \max\{NDVI_i\} \quad (2)$$

式中:  $NDVI_i$  为第  $i$  月的 NDVI 值;  $NDVI_{ij}$  为第  $i$  月第  $j$  旬的 NDVI 值.

植被盖度( $F_{\text{cover}}$ )与 NDVI 之间有着极显著的线性相关关系,通常采用 NDVI 来估算区域植被盖度<sup>[28-29]</sup>,计算公式如下:

$$F_{\text{cover}} = \frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \quad (3)$$

式中:  $NDVI_v$  为纯草地 NDVI 值;  $NDVI_s$  为裸地 NDVI 值.根据草地植被已有的研究结果,本文取  $NDVI_v = 0.8$ <sup>[30]</sup>,  $NDVI_s = 0.05$ <sup>[31]</sup>.

地表温度(0 cm 地温)数据来自于国家气象信息中心的中国地面气候资料日值数据集,时间序列为 1951 年 1 月 1 日-2010 年 12 月 31 日.针对研究区域内基本气象站点的数据,利用 Matlab 7.0 软

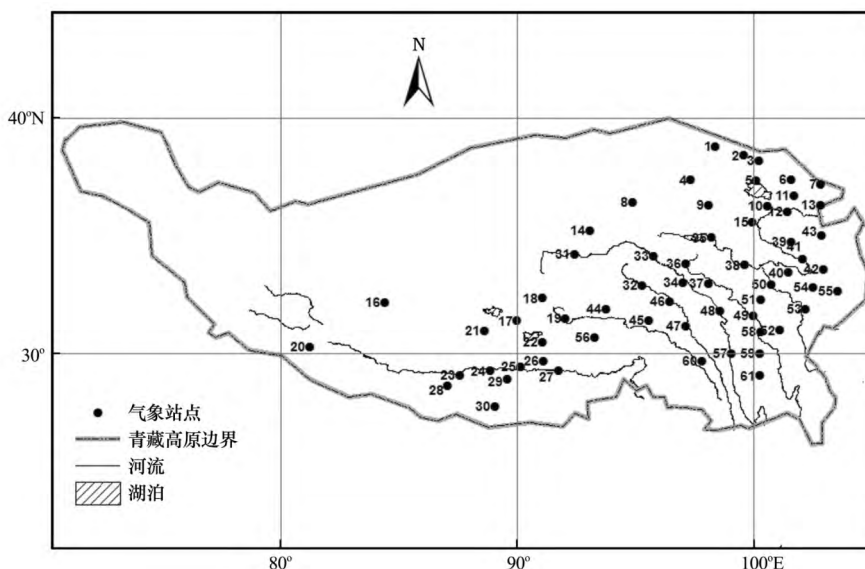


图 1 61 个气象站点的分布

Fig. 1 Map showing the location of the 61 meteorological stations

件提取出 1982 – 2006 年的地表温度数据，并求出各站点每年各月的地表温度的平均值。

1.2 研究方法

将由建站时间、记录不全等因素限制的地表温度严重缺失的站点剔除，甄选出分布在草地区域的站点，最终得到 61 个符合要求的站点(图 1)。本研究基于这 61 个站点的 NDVI 和地表温度数据，依据表 1 所示不同时间尺度 NDVI 值以及响应的地表温度展开分析研究。

表 1 不同时间尺度 NDVI 值以及响应的地表温度  
Table 1 NDVI values , vegetation changing rates and GST at different time scales

NDVI	植被变化过程	地表温度
生长季(年)最大	年际植被	生长季(年)平均
返青期	返青速率	返青期平均
生长期	—	生长期平均
枯萎期	枯萎速率	枯萎期平均

本研究运用的分析方法为时间序列分析、回归分析与相关分析，这些分析方法广泛应用于分析植被覆盖变化特征<sup>[32-35]</sup>和 NDVI 与气候要素的关系<sup>[36-43]</sup>。进行时间序列分析准确有效地认知植被覆盖、地表温度的时间变化规律；采用回归分析探索 NDVI、地表温度的变化趋势；运用相关分析详细地研究植被指数与地表温度之间的相互关系。分

析处理在 Excel 2007 和 SPSS 20.0 中完成。

2 结果

2.1 NDVI 变化特征

2.1.1 NDVI 季节分布与空间分布

青藏高原高寒草地植被生长呈现单峰型，年最大值出现在 8 月(图 2a)。NDVI 从 5 月初开始明显增加，经历一个快速上升阶段，到 8 月达到最大值，然后开始下降，经历 9 – 10 月的快速下降，至 11 月 NDVI 值已经降低到 5 月明显增加前的水平。由此可知青藏高原高寒草地植被生长的季节性：生长季为 5 – 10 月，5 月为返青期、6 – 8 月为生长期、9 – 10 月为枯萎(凋谢)期。

多年平均 NDVI 能够表征区域植被覆被的整体状况。图 2(b) ~ (d) 反映了研究区生长季不同站点的植被覆盖程度，NDVI 值越高，站点所在区域植被覆盖越好。整体上看，表征植被覆盖特征的 NDVI 值从东南向西北地区递减，东部植被覆盖明显高于西部，高原东北角植被覆盖状况良好。

2.1.2 NDVI 年际变化及趋势

通过对 NDVI 时间序列数据进行分析，结果表明：1982 – 2006 年，青藏高原高寒草地植被覆盖状况正经历一个逐年变好的过程，年均 NDVI 波动上升，呈先急剧增大后缓慢增大的显著趋势( $P < 0.001$ )，为  $0.007 (10a)^{-1}$ (图 3a)；在生长季，NDVI

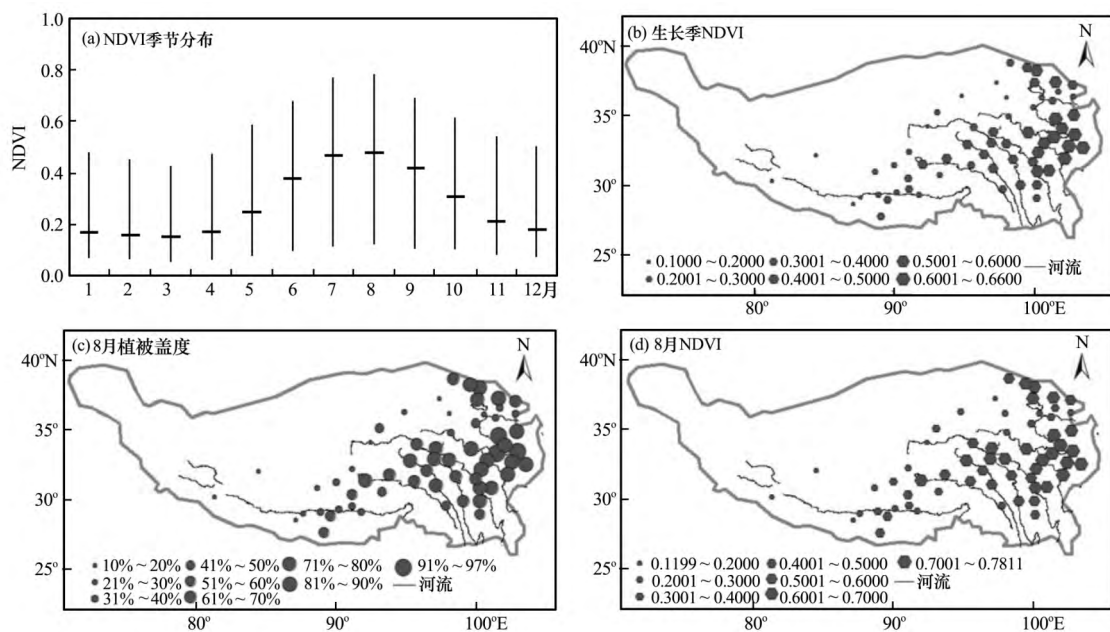


图 2 青藏高原高寒草地 NDVI 季节分布(a)与生长季 NDVI(b)、8 月植被盖度(c)和 8 月 NDVI(d) 空间分布  
Fig.2 Monthly variation of NDVI (a) and spatial distributions of the growing season NDVI (b) , vegetation coverage in August (c) and NDVI in August (d) on alpine grassland of the Tibetan Plateau

亦波动上升, 增大趋势显著 ( $P < 0.001$ ), 达到  $0.011 (10a)^{-1}$  (图 3b), 与已有研究结果<sup>[34 39 44-45]</sup> 变化趋势一致. 在生长季植被生长的不同时期, NDVI 的数值大小、上升趋势、波动幅度均有差异 (图 3c). 从数值上看, 生长期的 NDVI 最大, 枯萎期次之, 返青期最小. 从上升趋势上看, 返青期、生长期和枯萎期 NDVI 增大趋势分别为  $0.005 (10a)^{-1}$  ( $P > 0.1$ )、 $0.015 (10a)^{-1}$  ( $P = 0.001$ )、 $0.008 (10a)^{-1}$  ( $P = 0.035$ ), 即生长期增大趋势最大, 达到 0.01 的显著水平, 枯萎期次之, 达到 0.05 的显著水平, 返青期增大趋势不明显, 没有通过 0.1 的显著水平. 从波动幅度上看, 返青期 NDVI 波动较大, 在 1998 年出现高峰 NDVI 值, 之后 NDVI 值逐渐下降到 2001 年的低谷 NDVI 值, 最大值 (1998 年、0.270) 与最小值 (1982 年、0.188) 之

差为 0.082; 生长期波动幅度较小, 处于稳定上升状态; 枯萎期波动幅度最小, 曲线比较平缓.

### 2.1.3 NDVI<sub>max</sub> 年际变化及趋势

年最大 NDVI (NDVI<sub>max</sub>) 能表征植被的最终生物量. 25 a 间青藏高原高寒草地 NDVI<sub>max</sub> 波动幅度较大, 整体呈上升趋势, 为  $0.007 (10a)^{-1}$ , 多年平均 NDVI<sub>max</sub> 为 0.517 (图 4a). 尽管整体上升, 但空间差异显著, 不同站点 NDVI<sub>max</sub> 的变化趋势不一致: NDVI<sub>max</sub> 主体增大, 局部地区减小明显, 主要为高原东北部祁连山、共和盆地, 中部江河源地区, 西北部阿里地区以及川西地区 (图 4b), 与已有研究结果相吻合<sup>[39 44-45]</sup>. 结合图 2 一起分析可知, 植被覆盖状况越好的地区, NDVI<sub>max</sub> 的增大趋势越小, 部分植被覆盖状况好的地区如祁连山、澜沧江及怒江的源头地区、川西地区, NDVI<sub>max</sub> 的变化趋势为负增长.

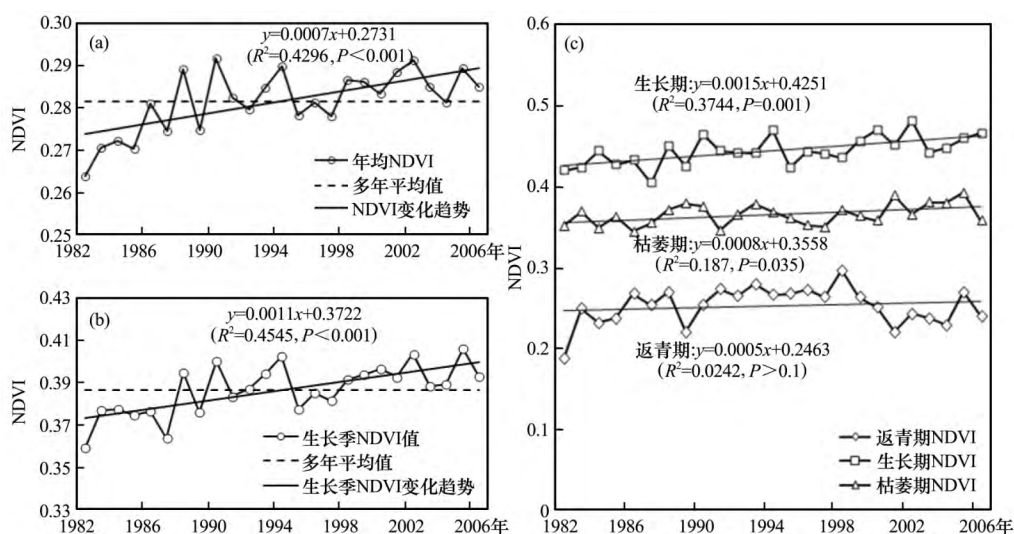


图 3 青藏高原高寒草地年均 NDVI (a)、生长季 NDVI (b) 和生长季不同时期 NDVI (c) 的年际变化  
Fig.3 Annual variations of annual mean NDVI (a), growing season NDVI (b) and different periods of the growing season NDVI (c) on alpine grassland of the Tibetan Plateau

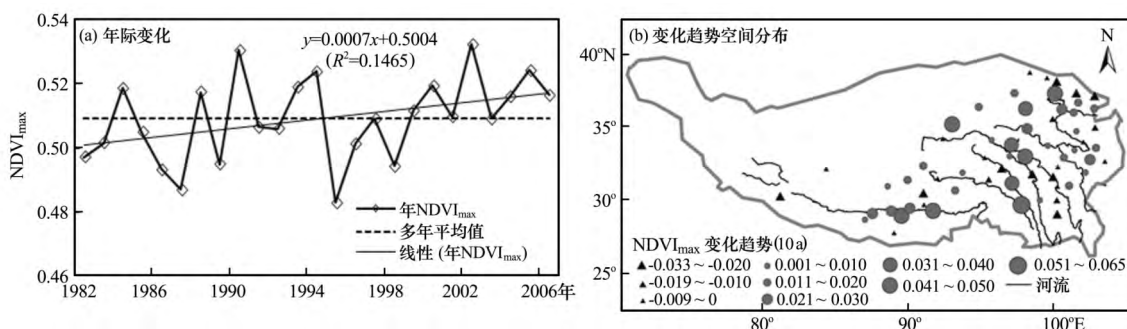


图 4 青藏高原高寒草地年 NDVI<sub>max</sub> 值年际变化 (a) 及变化趋势空间分布 (b)  
Fig.4 Annual variation of annual maximum NDVI (a) and spatial distribution of its changing trend (b) on alpine grassland of the Tibetan Plateau

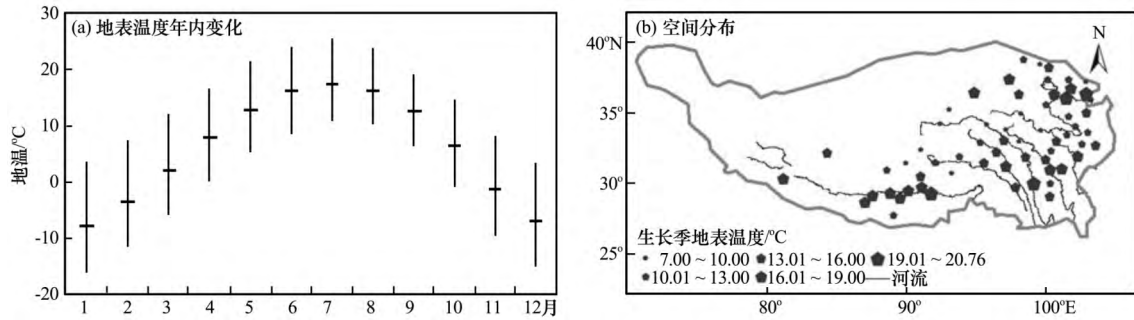


图5 青藏高原高寒草地地表温度年内变化 (a) 和生长季地温空间分布 (b)

Fig.5 Monthly variation of GST (a) and spatial distribution of GST in the growing season (b) on alpine grassland of the Tibetan Plateau

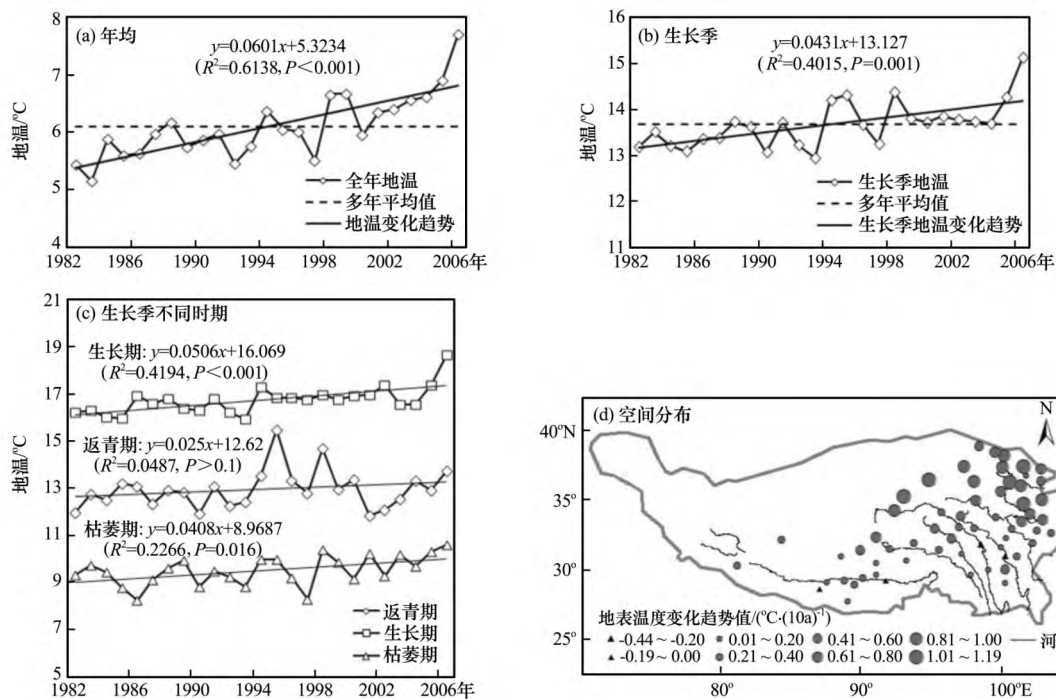


图6 青藏高原高寒草地年均 (a)、生长季 (b)、生长季不同时期 (c) 地表温度的年际变化以及生长季地表温度变化趋势的空间分布 (d)

Fig.6 Annual variations of GST of annual mean (a), in growing season (b) and its different periods (c) and spatial distribution of the growing season GST variations (d) on alpine grassland of the Tibetan Plateau

## 2.2 地表温度变化特征

### 2.2.1 地表温度季节分布与空间分布

从图 5 (a) 可知青藏高原高寒草地 1982 – 2006 年 0 cm 地温的季节分布特征: 地表温度年内变化呈单峰型, 年最高温、最低温分别出现在 7 月和 1 月, 1 – 7 月升温较缓, 7 – 12 月降温迅速. 图 5 (b) 为研究区生长季地表温度 25 a 来平均状况的空间分布: 不同站点地温差异显著, 高原北部海拔较低区域地温明显高于周边地区, 高原南部、东南部的河谷地区地温明显偏高.

### 2.2.2 地表温度年际变化及趋势

作为气候变暖的响应, 1982 – 2006 年间青藏高原高寒草地地表温度年均升温幅度很大, 递增倾向率为  $0.60\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$  ( $P < 0.001$ ), 尤其是 2000 年以来, 年均地表温度处于持续上升状态, 在 2001 – 2006 年间均高于多年平均值  $6.11\text{ }^{\circ}\text{C}$  (图 6a). 在生长季, 地表温度递增倾向率为  $0.43\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$  ( $P = 0.01$ ), 升温趋势较全年平均地温小 (图 6b). 在生长季的不同时期, 地表温度的波动上升存在差异 (图 6c), 从数值上看, 生长期的地表温

度最大,返青期次之,枯萎期最小。从上升趋势上看,返青期、生长期和枯萎期地表温度的递增倾向率分别为  $0.25\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$  ( $P > 0.1$ )、 $0.51\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$  ( $P < 0.001$ ) 和  $0.41\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$  ( $P = 0.016$ ),即生长期上升趋势最大,达到 0.01 的显著水平,枯萎期上升趋势次之,达到 0.05 的显著水平,返青期上升趋势不明显,没有通过 0.1 的显著水平。从波动幅度上看,返青期地表温度波动较大,在 1995 年和 1998 年出现异常的高地温,分别为  $15.48\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $14.59\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,在 2001 年又出现异常的低地温( $11.83\text{ }^{\circ}\text{C}$ );枯萎期波动幅度次之;生长期波动幅度最小,曲线比较平缓,处于稳定上升状态。

图 6(d) 给出了 1982–2006 年青藏高原高寒草地地表温度的变化趋势,结果显示绝大多数站点地表温度上升显著,空间差异明显,高原北部升温明显高于南部,从西南向东北升温趋势逐渐变大。结合图 5(b) 可知,高原中部和东南部地表温度高的地区,升温趋势较小,局部呈现降温趋势,与文献 [12] 研究结果一致。

## 2.3 NDVI 与地表温度的关系

### 2.3.1 NDVI<sub>max</sub> 年际变化影响因子探讨

NDVI<sub>max</sub>、地表温度年际变化如此显著,借助

相关分析获得二者之间的相关性,用以探讨 NDVI<sub>max</sub> 年际变化主要受制于哪一时期的地表温度。年均地温、生长季地温、返青期地温、生长期地温和枯萎期地温分别代表全年(1–12 月)、生长季(5–10 月)、返青期(5 月)、生长期(6–8 月)和枯萎期(9–10 月)的平均地表温度状况。从图 7 中可知,NDVI<sub>max</sub> 与年均地温的相关性显著,呈正相关的站点多于负相关,且显著水平更高,可推断年均地表温度的升高有利于青藏高原高寒草地的 NDVI<sub>max</sub> 的增大(图 7a 和 f)。NDVI<sub>max</sub> 与生长季、返青期、生长期地温的相关性更趋负相关,返青期负相关尤其明显,成显著负相关的站点较多,共 15 个站点,占 24.59%(图 7b、c 和 d),这可以从两个角度分析:一方面,生长季、生长期,尤其返青期地温的升高,使植物发育速率加快,导致高寒草地植物的成熟提早,实际生长期缩短,限制了干物质积累,导致 NDVI<sub>max</sub> 减小<sup>[46]</sup>;另一方面,高寒草地植被状况变好,削弱太阳辐射对地表的辐射加热作用,在一定程度上抑制了草地植物生长期间地表温度更大程度地升高,这与金会军等<sup>[21]</sup>的研究结果相吻合,即在青藏高原暖季植被对地表冷却作用较大。NDVI<sub>max</sub> 与枯萎期地温的相关性更趋正相关(图 7e 和 f),即在高原部分地区 NDVI<sub>max</sub> 的增大可

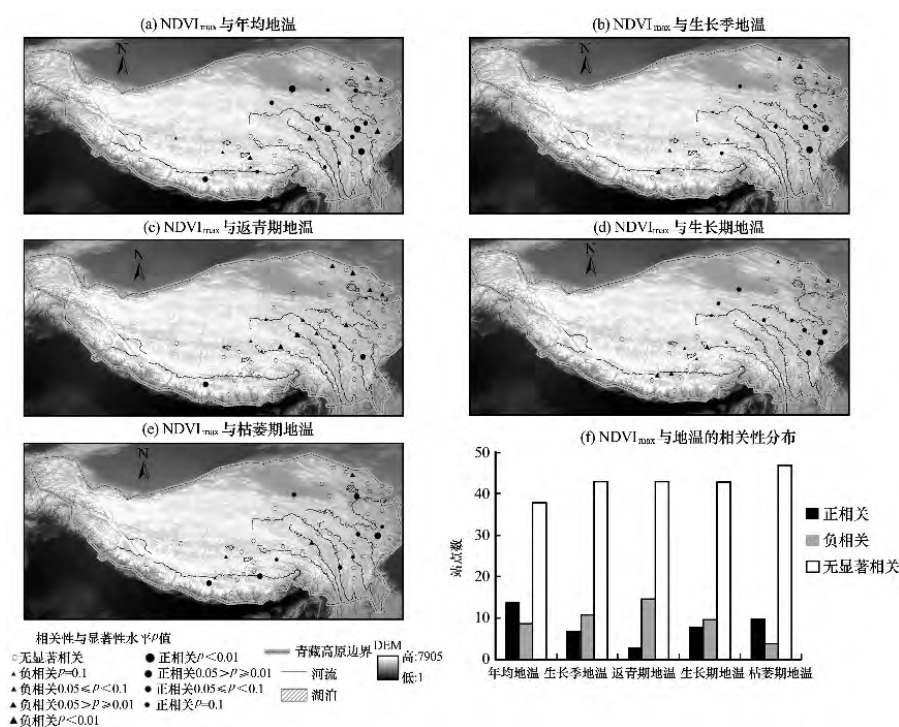


图 7 NDVI<sub>max</sub> 值与年均地温 (a)、生长季地温 (b)、返青期地温 (c)、生长期地温 (d) 和枯萎期地温 (e) 的相关性以及不同时间尺度上 NDVI<sub>max</sub> 值与地表温度相关性统计图 (f)

Fig. 7 Correlations between maximal NDVI and GST with different time scales: annual mean (a), growing season (b), reviving period (c), growing period (d), withering period (e) and correlation analysis chart (f)

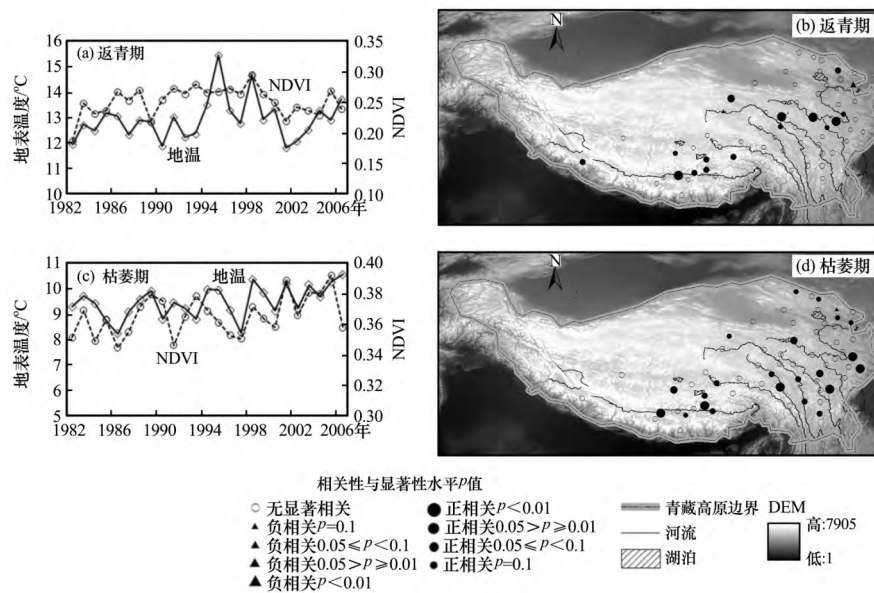


图8 返青期 NDVI 与地表温度年际变化 (a) 和相关性空间分布 (b); 枯萎期 NDVI 与地表温度年际变化 (c) 和相关性空间分布 (d)

Fig. 8 Annual variations of NDVI and GST (a) and spatial distribution of correlations (b) in reviving period; annual variations of NDVI and ground surface temperature (c) and spatial distribution of correlations (d) in withering period

以促进枯萎期地温的升高.

研究区域中有 70.49% 的地区 (43 个站点)  $NDVI_{max}$  与不同时期的地表温度呈现不同显著程度的相关性, 其中  $NDVI_{max}$  与年均地温显著相关的站点明显多于其他时期地温, 且相关的显著程度也更高. 由此可知,  $NDVI_{max}$  的年际变化在更大程度上取决于全年地温的变化, 除了在牧草生长期间, 植被与地温相互影响, 非生长季地温的变化对  $NDVI_{max}$  发生年际波动也有一定的贡献.

### 2.3.2 返青期 NDVI 与地温关系

在返青期, 青藏高原高寒草地 NDVI、地表温度的年际变化规律相似, 二者均无显著上升趋势, 但波动明显. 地温为峰值时, NDVI 达峰值; 反之, 地温为谷值时, NDVI 降为谷值. 二者呈较显著的正相关, 相关系数为 0.4491, 通过 0.05 的显著水平 (图 8a). 从图 8(b) 中可知, 研究区域中 27.87% 的地区 (17 个站点) NDVI 与地表温度具有不可忽视的相关关系, 主要分布于高原中部、西南部, 其中 24.59% 的地区 (15 个站点) 为正相关, 表明这些地区返青期地表温度变化可以影响植被返青速率, 地温升高则提高植被返青速率, 促使当期 NDVI 值增大, 反之亦然. 而高原东南部地区二者无显著相关性.

### 2.3.3 枯萎期 NDVI 与地温关系

由图 8(c) 给出的枯萎期 NDVI、地表温度年际变化规律可知: 二者均波动上升, 上升趋势明显, 几乎同步发生变化, 呈显著的正相关关系, 相关系数为 0.5012, 通过 0.01 的显著水平. 在枯萎期, 青藏高原高寒草地遍布 36.07% 的地区 (22 个站点) NDVI 与地表温度呈正相关关系, 空间差异不明显 (图 8d). NDVI 与地表温度相互影响表明: 一方面, 地表温度的升高减缓了植被枯萎速率, 使得该期地表能更长时间的保持较大的 NDVI; 另一方面, NDVI 的增大意味着植被覆盖状况变好, 能更好的降低近地表风速, 减少表土层水分蒸发及向大气放热的强度, 对地表起到保温效果.

## 3 讨论

植被 NDVI 的变化是气候综合因素的影响结果, 前人<sup>[39-45]</sup>对草地 NDVI 与气温、降水气候因子的关系做了大量研究: 青藏高原草地春季 NDVI 的增加是由春季温度上升所致, 高寒草地 (高寒草甸和高寒草原) 夏季 NDVI 的增加是夏季温度和春季降水共同作用的结果<sup>[39]</sup>; 在年际和季节尺度上, 植被生长主要与温度和降水的累积效应有关<sup>[45]</sup>; 降水通过影响土壤水分有效性, 进而影响植被生长<sup>[47]</sup>, 温度通过生物地球化学反馈影响养分有效性, 进而



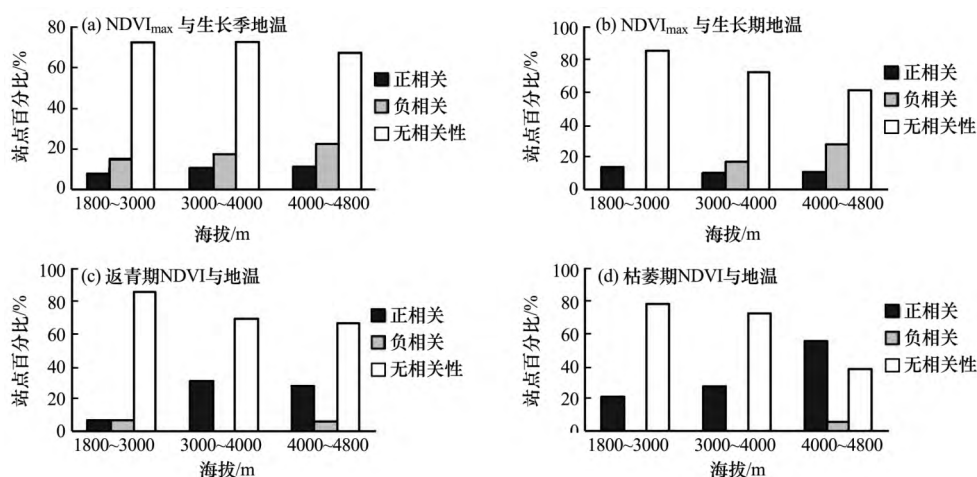


图9 不同海拔高度 NDVI 与地温呈不同相关性(正相关、负相关或无相关性)的站点比重

Fig. 9 The percentage of stations for different correlations (positive, negative or no) between NDVI and GST at different altitudes

影响植被生长<sup>[48]</sup>。但是对于地表温度这一因子探讨的较少,本研究明确了 NDVI 与地表温度的相关关系,不同时间尺度上相互关系不同: NDVI<sub>max</sub> 与年均地表温度相关性最强,主要呈正相关,与生长季、返青期、生长期地温呈负相关关系;在返青期和枯萎期,NDVI 与地表温度均呈显著正相关( $r = 0.4491$ ,  $P = 0.05$ ;  $r = 0.5012$ ,  $P = 0.01$ )。

NDVI 与地表温度相互关系的空间差异性十分复杂。高原海拔较低地区,二者无显著相关关系;高原东部,二者呈显著正相关的地区较多;高原东北部,二者呈显著负相关;研究区域中部、西南部地区,NDVI<sub>max</sub> 与地表温度呈显著负相关,而返青期 NDVI 与地表温度呈显著正相关。这可能源自于高原地形、气候、水文环境等的空间差异性,更值得关注的是植被状况的空间差异性对 NDVI 与地表温度相互关系的影响,在此进行讨论。

(1) 海拔是重要的地形因素。研究区域内 61 个站点分布的海拔范围为 1 814 ~ 4 800 m,高差约为 3 000 m。图 9 给出了不同海拔高度 NDVI 与地表温度的相关差异,随着海拔升高,NDVI 与地表温度呈显著正或负相关的站点越多。由此可知,海拔越高,NDVI 与地表温度相互影响越明显。赵玉萍等<sup>[49]</sup>在海拔 4 000 m 以上的藏北高原草地生态系统 NDVI 与气候因子的相关关系研究中表明,温度是较降水更显著影响草地 NDVI 变化的因子。基于此,笔者认为在研究高海拔地区生态系统植被变化时,地表温度是一个应引起重视的因子。

(2) 研究区植被状况的空间差异显著。已

有<sup>[34, 39, 45, 50]</sup>的研究结果表明,青藏高原表征植被覆盖特征的 NDVI 值从东南向西北地区递减,即由高原水热组合条件较好的区域向水热组合条件较差的区域减小,植被覆盖状况逐渐变差;响应气候变化,高原植被状况主体变好,局部恶化,显著降低和显著增加面积的比率为 0.31<sup>[44]</sup>。本研究对 NDVI 空间分布与变化趋势的分析结果与之一致,从东南向西北,NDVI 逐渐降低;1982 - 2006 年 25 a 间研究区 NDVI 值主体增大,局部地区即高原东北部祁连山、共和盆地,江河源地区以及川西地区 NDVI 值显著减小,植被退化严重。从 NDVI<sub>max</sub> 与地表温度相关性的空间分布看,高原西南部植被覆盖差的地区,二者呈负相关关系,同时高原东北部、江河源头植被覆盖好,但退化严重的地区,呈显著负相关关系;而高原东部植被覆盖好且 NDVI 增大的地区,呈显著正相关。由此可知,NDVI<sub>max</sub> 与地表温度的相关性受植被状况空间差异影响较大,一方面受制于植被覆盖水平,植被覆盖差,二者为负相关;另一方面,受制于植被变化状态,植被退化,二者为负相关。返青期 NDVI 与地表温度相互关系的空间差异表现为高原东南部植被覆盖好的地区二者无相关性。此外,枯萎期 NDVI 与地表温度相关性的空间差异不明显。

## 4 结论

本文采用时间序列分析、回归分析和相关分析法对青藏高原高寒草地 NDVI、地表温度在 1982 - 2006 年间的变化规律以及二者之间的关系进行了



初步探索,得到以下结论:

(1) 在 1982–2006 年间,NDVI 和地表温度在区域水平上均显著波动上升,年均 NDVI、生长季 NDVI、NDVI<sub>max</sub> 与年均地温、生长季地温上升趋势分别为  $0.007 (10a)^{-1}$ 、 $0.011 (10a)^{-1}$ 、 $0.007 (10a)^{-1}$  与  $0.60 ^\circ C \cdot (10a)^{-1}$ 、 $0.43 ^\circ C \cdot (10a)^{-1}$ 。NDVI<sub>max</sub> 整体呈增加趋势,局部地区明显下降;植被覆盖越好,NDVI<sub>max</sub> 的增加趋势越小,部分地区为负增长。地表温度上升显著,从西南向东北增温趋势逐渐变大,高地温区增温趋势较小,局部呈降温趋势。

(2) NDVI 与地表温度的相关关系十分复杂,研究区域 70.49% 的地区 NDVI<sub>max</sub> 与地表温度显著相关,与年均地温的相关性最强,多数地区呈正相关关系。返青期地温与当期 NDVI 呈正相关,与当年 NDVI<sub>max</sub> 呈负相关关系,即返青期地温的上升加快了植物发育速率,导致草地植物的成熟提早,实际生长期缩短,限制了干物质积累,导致 NDVI<sub>max</sub> 减小。枯萎期 NDVI 与地表温度呈正相关。

(3) 受海拔、植被状况等影响,NDVI 与地表温度的相互关系空间差异显著。海拔越高,NDVI 与地表温度相互影响越明显。植被覆盖差以及植被退化严重的地区,NDVI<sub>max</sub> 与地表温度呈负相关关系;植被覆盖好的地区,NDVI<sub>max</sub> 与地表温度主要呈正相关关系,返青期 NDVI 与地表温度则无显著相关性。

#### 参考文献 (References):

- [1] Editorial Board of the Vegetation Atlas of China, Chinese Academy of Sciences. Vegetation atlas of China [M]. Beijing: Science Press, 2001. [中国科学院中国植被图编辑委员会. 中国植被图集[M]. 北京: 科学出版社, 2001.]
- [2] Zheng Du, Yao Tandong. Uplifting of Tibetan Plateau with its environmental effects [M]. Beijing: Science Press, 2004: 1–564. [郑度, 姚檀栋. 青藏高原隆升与环境效应[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 1–564.]
- [3] IPCC. Climate change 2007: the physical science basis: Report of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 2007.
- [4] Shen Yongping. Key results from summary for policymakers of IPCC WGI AR4 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(1): 156. [沈永平. IPCC WGI 第四次评估报告关于全球气候变化的科学要点[J]. 冰川冻土, 2007, 29(1): 156.]
- [5] Wang Pengling, Tang Guoli, Cao Lijuan, et al. Surface air temperature variability and its relationship with altitude & latitude over the Tibetan Plateau in 1981–2010 [J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis, 2012, 8(5): 313–319. [王朋岭, 唐国利, 曹丽娟, 等. 1981–2010 年青藏高原地区气温变化与高程及纬度的关系[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(5): 313–319.]
- [6] Liu Xiaodong, Cheng Zhigang, Yan Libin, et al. Elevation dependency of recent and future minimum surface air temperature trends in the Tibetan Plateau and its surroundings [J]. Global and Planetary Change, 2009, 68(3): 164–174.
- [7] Sun Yanhua, Huang Xiaodong, Wang Wei, et al. Spatiotemporal changes of snow cover and snow water equivalent in the Tibetan Plateau during 2003–2010 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(6): 1337–1344. [孙燕华, 黄晓东, 王玮, 等. 2003–2010 年青藏高原积雪及雪水当量的时空变化[J]. 冰川冻土, 2014, 36(6): 1337–1344.]
- [8] Li Chao. Ground temperature of Qinghai-Xizang Plateau and precipitation of flood seasons [J]. Journal of Chengdu Institute of Meteorology, 1995, 10(2): 175–181. [李超. 青藏高原 0.8 m 地温异常与我国汛期降水的关系[J]. 成都气象学院学报, 1995, 10(2): 175–181.]
- [9] Du Jun, Hu Jun, Luobo Ciren, et al. Response of shallow geotemperature to climatic change over Tibet from 1971 to 2005 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(5): 745–751. [杜军, 胡军, 罗布次仁, 等. 西藏浅层地温对气候变暖的响应[J]. 冰川冻土, 2008, 30(5): 745–751.]
- [10] Zhang Huanping, Zhang Zhanfeng, Wang Qingchun, et al. Variation characteristics of shallow soil temperature in Qinghai Province in last 40 years [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2013, 34(2): 146–152. [张焕平, 张占峰, 汪青春, 等. 近 40 年青海浅层地温的变化特征[J]. 中国农业气象, 2013, 34(2): 146–152.]
- [11] Pan Weidong, Yu Shaoshui, Jia Haifeng, et al. Variation of the ground temperature field in permafrost regions along the Qinghai-Tibetan Railway [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(6): 774–779. [潘卫东, 余绍水, 贾海峰, 等. 青藏铁路沿线多年冻土区地温场变化规律[J]. 冰川冻土, 2002, 24(6): 774–779.]
- [12] Li Dongliang, Zhong Hailing, Wu Qinghai, et al. Analysis on change of surface temperature over Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology, 2005, 24(3): 291–298. [李栋梁, 钟海玲, 吴青柏, 等. 青藏高原地表温度的变化分析[J]. 高原气象, 2005, 24(3): 291–298.]
- [13] Zhang T, Barry R G, Gilichinsky D, et al. An amplified signal of climatic change in soil temperatures during the last century at Irkutsk, Russia [J]. Climatic Change, 2001, 49(1/2): 41–76.
- [14] Li Hongqin, Li Yingnian, Zhang Fawei, et al. Variations of production and water use efficiency of the vegetation in alpine meadow [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(2): 475–482. [李红琴, 李英年, 张法伟, 等. 高寒草甸植被生产量年际变化及水分利用率状况[J]. 冰川冻土, 2013, 35(2): 475–482.]
- [15] Li Chunhui, Yang Zhifeng. Spatio-temporal changes of NDVI and their relations with precipitation and runoff in the Yellow River basin [J]. Geographical Research, 2004, 23(6): 753–759. [李春晖, 杨志峰. 黄河流域 NDVI 时空变化及其与降水/径流关系[J]. 地理研究, 2004, 23(6): 753–759.]
- [16] Sellers P J, Meeson B W, Hall F G, et al. Remote sensing of the land surface for studies of global change: models-algorithms-experiments [J]. Remote Sensing of Environment, 1995, 51(1): 3–26.
- [17] Piao Shilong, Fang Jingyun. Seasonal changes in vegetation activity in response climate changes in China between 1982 to 1999

- [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(1): 119–125. [朴世龙, 方精云. 1982–1999 年我国陆地植被活动对气候变化响应的季节差异[J]. *地理学报*, 2003, 58(1): 119–125.]
- [18] Sun Hongyu, Wang Changyao, Niu Zheng, *et al.* Analysis of the vegetation cover change and the relationship between NDVI and environmental factors by using NOAA time series data[J]. *Journal of Remote Sensing*, 1998, 2(3): 204–210. [孙红雨, 王常耀, 牛铮, 等. 中国植被覆盖变化及其与气候因子关系: 基于 NOAA 时间序列数据[J]. *遥感学报*, 1998, 2(3): 204–210.]
- [19] Luo Yayong, Meng Qingtao, Zhang Jinghui, *et al.* Species diversity and biomass in relation to soil properties of alpine meadow in the eastern Tibetan Plateau in different degradation stages[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(5): 1298–1305. [罗亚勇, 孟庆涛, 张静辉, 等. 青藏高原东缘高寒草甸退化过程中植物群落物种多样性、生产力与土壤特性的关系[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(5): 1298–1305.]
- [20] Wang Shaoling, Ding Yongjian, Zhao Lin, *et al.* The influence of local factor on surface layer ground temperature in Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Plateau Meteorology*, 2002(1): 85–89. [王绍令, 丁永建, 赵林, 等. 青藏高原局地因素对近地表层地温的影响[J]. *高原气象*, 2002(1): 85–89.]
- [21] Jin Huijun, Sun Liping, Wang Shaoling, *et al.* Dual influences of local environmental variables on ground temperatures on the interior-eastern Qinghai-Tibet Plateau (I): Vegetation and snow cover[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(4): 535–545. [金会军, 孙立平, 王绍令, 等. 青藏高原中、东部局地因素对地温的双重影响(I): 植被和雪盖[J]. *冰川冻土*, 2008, 30(4): 535–545.]
- [22] Cheng G D, Wu T H. Responses of permafrost to climate change and their environmental significance, Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(F2). doi: 10.1029/2006JF000631.
- [23] Lin Lin, Jin Huijun, Luo Dongliang, *et al.* Preliminary study on major features of alpine vegetation in the Source Area of the Yellow River (SAYR) [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(1): 230–236. [林琳, 金会军, 罗栋梁, 等. 黄河源区高寒植被主要特征初探[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(1): 230–236.]
- [24] Liu Minghao, Sun Zhizhong, Niu Fujun, *et al.* Variation characteristics of the permafrost along the Qinghai-Tibet Railway under the background of climate change[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(5): 1122–1130. [刘明浩, 孙志忠, 牛富俊, 等. 气候变化背景下青藏铁路沿线多年冻土变化特征研究[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(5): 1122–1130.]
- [25] Kobayashi H, Dye D G. Atmospheric conditions for monitoring the long-term vegetation dynamics in the Amazon using normalized difference vegetation index[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 97(4): 519–525.
- [26] Goetz S J, Fiske G J, Bunn A G. Using satellite time-series data sets to analyze fire disturbance and forest recovery across Canada [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 101(3): 352–365.
- [27] Holben B N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(11): 1417–1434.
- [28] Wittich K P, Hansing O. Area-averaged vegetative cover fraction estimated from satellite data[J]. *International Journal of Biometeorology*, 1995, 38(4): 209–215.
- [29] Chen Yunhao, Li Xiaobing, Shi Peijun, *et al.* Estimating vegetation coverage change using remote sensing data in Haidian District, Beijing [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2001, 25(5): 588–593. [陈云浩, 李晓兵, 史培军, 等. 北京海淀区植被覆盖的遥感动态研究[J]. *植物生态学报*, 2001, 25(5): 588–593.]
- [30] Liu Yujie, Yang Zhongdong. The principle and algorithm of MODIS remote sensing data[M]. Beijing: Science Press, 2001: 229–301. [刘玉洁, 杨忠东. MODIS 遥感数据的原理及算法[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 229–301.]
- [31] Mao Fei, Zhang Yanghong, Hou Yingyu. Dynamic assessment of grassland degradation in Naqu of northern Tibet [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(2): 278–284. [毛飞, 张艳红, 侯英雨. 藏北那曲地区草地退化动态评价[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(2): 278–284.]
- [32] Fang Jingyun, Piao Shilong, He Jinsheng, *et al.* Vegetation of China invigorated in last 20 years [J]. *Science in China (Series C)*, 2003, 33(6): 554–565. [方精云, 朴世龙, 贺金生, 等. 近 20 年来中国植被活动在增强[J]. *中国科学(C 辑)*, 2003, 33(6): 554–565.]
- [33] Hou Yingyu, Zhang Jiahua, He Yanbo. Intra and inter-annual variation patterns of NDVI in Tibet based on AVHRR remote sensing data [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(11): 1273–1276. [侯英雨, 张佳华, 何延波. 利用遥感信息研究西藏地区主要植被年内和年际变化规律[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(11): 1273–1276.]
- [34] Liang Sihai, Chen Jiang, Jin Xiaomei, *et al.* Regularity of vegetation coverage changes in the Tibetan Plateau over the last 21 years [J]. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(1): 33–40. [梁四海, 陈江, 金晓媚, 等. 近 21 年青藏高原植被覆盖变化规律[J]. *地球科学进展*, 2007, 22(1): 33–40.]
- [35] Xu Xingkui, Chen Hong, Levy J K. Spatiotemporal vegetation cover variations in the Qinghai-Tibet Plateau under global climate change [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(6): 915–922. [徐兴奎, 陈红, Levy J K. 气候变暖背景下青藏高原植被覆盖特征的时空变化及其成因分析[J]. *科学通报*, 2008, 53(4): 456–462.]
- [36] Ji L, Peters A J. Lag and seasonality considerations in evaluating AVHRR NDVI response to precipitation [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2005, 71(9): 1053–1061.
- [37] Ding M J, Zhang Y L, Liu L S, *et al.* The relationship between NDVI and precipitation on the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2007, 17(3): 259–268.
- [38] Hua W, Fan G Z, Zhou D W, *et al.* Preliminary analysis on the relationships between Tibetan Plateau NDVI change and its surface heat source and precipitation of China [J]. *Science in China (Series D)*, 2008, 51(5): 677–685.
- [39] Yang Yuanhe, Piao Shilong. Variations in grassland vegetation cover in relation to climatic factors on the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(1): 1–8. [杨元合, 朴世龙. 青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系[J]. *植物生态学报*, 2006, 30(1): 1–8.]
- [40] Mao Fei, Lu Zhiguang, Zhang Jiahua, *et al.* Relations between AVHRR NDVI and climate factors in northern Tibet in recent 20 years [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(8): 3198–3205. [毛飞, 卢志光, 张佳华, 等. 近 20 年藏北地区 AVHRR NDVI 与气候因子的关系[J]. *生态学报*, 2007, 27(8): 3198–3205.]
- [41] Chuduo. Seasonal changes of vegetation cover in Lhasa area based on NOAA AVHRR NDVI [J]. *Plateau Meteorology*, 2003, 22(S1): 145–151. [陈多. 基于 NOAA AVHRR NDVI

- 的西藏拉萨地区植被季节变化[J]. 高原气象, 2003, 22 (S1): 145-151.]
- [42] Fan Guangzhou, Zhou Dingwen, Liu Yaqin, *et al.* Relationship between NDVI change in winter on the Tibetan Plateau and summer precipitation of China [J]. *Progress in Natural Science*, 2007, 17(12): 1657-1664. [范广洲, 周定文, 刘雅勤, 等. 青藏高原冬季 NDVI 变化与我国夏季降水的关系[J]. 自然科学进展, 2007, 17(12): 1657-1664.]
- [43] Liu Yaqin, Fan Guangzhou, Zhou Dingwen, *et al.* Variability of NDVI in winter and spring on the Tibetan Plateau and their relationship with summer precipitation[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2007, 65(6): 959-967. [刘雅勤, 范广洲, 周定文, 等. 青藏高原冬、春植被归一化指数变化特征及其与高原夏季降水的联系[J]. 气象学报, 2007, 65(6): 959-967.]
- [44] Ding Mingjun, Zhang Yili, Liu Linshan, *et al.* Temporal and spatial distribution of grassland coverage change in Tibetan Plateau since 1982 [J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(12): 2114-2122. [丁明军, 张颖锂, 刘林山, 等. 1982-2009 年青藏高原草地覆盖度时空变化特征[J]. 自然资源学报, 2010, 25(12): 2114-2122.]
- [45] Wang Qingxia, Lü Shihua, Bao Yan, *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. [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.]
- [46] Li Yingnian, Zhao Liang, Zhao Xinquan, *et al.* Effects of a 5-years mimic temperature increase to the structure and productivity of *Kobresia humilis* meadow [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2004, 12(3): 236-239. [李英年, 赵亮, 赵新全, 等. 5 年模拟增温后矮嵩草草甸群落结构及生产量的变化[J]. 草地学报, 2004, 12(3): 236-239.]
- [47] Jobbagy E G, Sala O E, Paruelo J M. Patterns and controls of primary production in the Patagonian steppe: A remote sensing approach [J]. *Ecology*, 2002, 83(2): 307-319.
- [48] Zhou L M, Kaufmann R K, Tian Y, *et al.* Relation between interannual variations in satellite measures of northern forest greenness and climate between 1982 and 1999 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108 (D1). doi: 10.1029/2002JD002510.
- [49] Zhao Yuping, Zhang Xianzhou, Wang Jingsheng, *et al.* Correlation analysis between NDVI and climatic factors of grassland ecosystems in the northern Tibetan Plateau from 1982 to 2003 [J]. *Resources Science*, 2009, 31(11): 1988-1998. [赵玉萍, 张宪洲, 王景升, 等. 1982 年至 2003 年藏北高原草地生态系统 NDVI 与气候因子的相关分析[J]. 资源科学, 2009, 31(11): 1988-1998.]
- [50] Zhang Geli, Ouyang Hua, Zhang Xianzhou, *et al.* Vegetation change and its responses to climatic variation based on eco-geographical regions of Tibetan Plateau [J]. *Geographical Research*, 2010, 29(11): 2004-2016. [张戈丽, 欧阳华, 张宪洲, 等. 基于生态地理分区的青藏高原植被覆被变化及其对气候变化的响应[J]. 地理研究, 2010, 29(11): 2004-2016.]

## Relationship between vegetation index and ground surface temperature on the Tibetan Plateau alpine grassland

ZHOU Ting<sup>1,3</sup>, ZHANG Yinsheng<sup>1,2</sup>, GAO Haifeng<sup>1</sup>, ZHANG Teng<sup>1,3</sup>, MA Yingzhao<sup>1,3</sup>

( 1. Key Laboratory of Tibetan Environmental Changes and the Land Surface Processes, Institute of Tibetan Plateau, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Chinese Academy of Sciences Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** To improve the understanding on response mechanism of the vulnerable ecological system on the Tibetan Plateau to the climatic change, relationship between alpine grassland vegetation index and ground surface temperature from 1982 to 2006 is investigated over the Tibetan Plateau. The data resources are ground surface temperature (GST) data from meteorological stations and relative cell NDVI values quoted from the GIMMS NDVI database. Employing regression analysis method, correlations between alpine grassland NDVI and GST by various time-scale and the annual changes both of them are focused on. The results show that both of alpine grassland NDVI and GST showed positive trend from 1982 to 2006 overall the plateau. The trend of annual mean NDVI, NDVI in growing season, maximum NDVI and annual mean GST, GST in growing season were 0.007, 0.011, 0.007 per decade and 0.60, 0.43 degrees Celsius per decade, respectively. The area of maximum NDVI associated with GST accounted for 70.49%. However, spacial heterogeneity in topography, climatic condition and hydrological condition led the complexity in the impact of GST to the growth of grass. The correlation between maximum NDVI and annual mean GST was found to be most significant; in reviving and withering period, NDVI and GST were significantly positively correlated. The correlation of the maximum NDVI to the GST clearly depended on bio-coverage: they briefly negative correlated for poor vegetation cover or degrading regions; but positive for the good vegetation cover.

**Key words:** Tibetan Plateau; NDVI; ground surface temperature (GST); relationship