

青藏高原植被覆盖对水热条件年内变化的响应及其空间特征

丁明军^{1,2}, 张镱锂¹, 刘林山¹, 王兆锋¹, 杨续超¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 江西师范大学地理环境学院, 南昌 330008)

摘 要: 利用 1982–2000 年 NOAA/AVHRR 卫星的 NDVI 数据(时间分辨率旬, 空间分辨率 8 km×8 km), 结合同时期的气温和降水资料, 基于时滞互相关方法和 GIS 工具, 分析了青藏高原植被覆盖对水、热条件年内变化的时滞响应及其空间特征。结果如下: ①除高寒荒漠、森林外, 青藏高原植被 NDVI 与同期旬均温和旬降水相关性均呈高度正相关。其中, 中等覆盖度的植被受水、热影响表现更为强烈。②青藏高原植被 NDVI 对气温和降水有滞后效应, 且滞后水平存在空间差异, 高原北部(柴达木盆地、昆仑山北翼)和高原南部植被对降水、和温度的响应比较迟缓, 而高原中、东部地区植被对温度和降水的响应比较敏感。③不同植被类型对水热条件的响应程度也存在差异, 由高到低依次是草甸、草原、灌丛、高寒垫状植被、荒漠, 最后是森林。

关 键 词: 青藏高原; NDVI; 水热条件; 滞后效应; 相关性

气候变化对陆地地表生态系统的影响及其反馈是当前全球变化研究的主要内容, 而植被作为地表状况的重要表征, 是陆地地表生态系统的核心部分^[1], 因此植被和气候的关系也一直是全球变化研究的焦点之一^[2]。植被的时空变化是自然和人类活动相互作用的结果, 尤其是在人类活动影响日益剧烈的今天^[3], 在研究植被和气候关系时如何尽量减少人类对其干扰是一个必须重视的问题。

青藏高原是世界上少数几个范围广阔且受人类活动影响较少的区域之一, 在平均海拔超过 4000m, 面积约 256 万 km² 范围内, 人口只有 1200 万左右^[4]。与同纬度地区相比, 青藏高原特殊的自然环境导致其上的植被生态系统结构简单, 抗干扰能力较低, 生态系统极为脆弱, 这种生态特征可能造成一个直接后果便是地表植被覆盖对气候的变化比较敏感^[5–10]。这无疑为探讨自然状况下的植被对气候条件的响应提供了一个理想的研究区域。因此对青藏高原植被覆盖同降水、温度等气候条件关系的研究, 将有助于揭示植被覆盖对气候变化敏感性和反馈的规律, 同时也为理解青藏高原植被同气候的相互作用机制提供支持。

由于 NOAA/AVHRR 具有周期短、覆盖范围广、成本低、波段宽等优点, 尤其是根据植被反射波段计算得到的归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 是反映植被对光合有效辐射 (Photosynthetically Active Radiation, PAR) 吸收能力的一个较好指标^[17], 被广泛用于生物量、叶面积指数 (Leaf Area Index, LAI) 和植被生产力格局的估算^[18]。随着人类对全球气候变暖等问题的日益关注, 用 NDVI 来监测植被对气候变化的响应成为国内外研究的热点^[18–27]。但大多数工作都是基于年际关系的研究^[7–14], 从季节变化分析植被覆盖对水、热气候条件响应的研究较少。同时, 这些研究大多考虑的是零时滞情况, 而在一定程度上忽略了植被在接受气候影响的同时, 由于各种因子(土壤、养份等)对其的制约, 会产生一定的滞后效应^[7, 15–16, 19, 28, 29]。而植被这种变化又会反馈于气候, 加强或减缓气候的变化, 因此时滞分析将有助于认识气候与植被的相互关系并提高我们预测植被和气候变化的能力。

针对以上问题, 本文基于水、热气候条件及区域 NDVI 时间序列数据, 从高原面和植被类型差异等方面, 分别对季相变化下水、热条件同植被指数

收稿日期: 2009–08; 修订日期: 2010–01。

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2007BAC06B08); 国家重点基础研究发展计划 (2005CB422006); 国家自然科学基金项目 (40771206)。

作者简介: 丁明军 (1979–), 男, 湖北谷城人, 副教授, 主要从事生物地理学、土地利用/覆被变化及其效应研究。

E-mail: dingmingjun1128@163.com

通讯作者: 张镱锂, 研究员, 主要从事生物地理学与综合自然地理学。E-mail: zhangyl@igsnrr.ac.cn

的相关性进行分析,以期对青藏高原植被活动与气候因素之间的关系有更深一步的了解,为气候变化背景下该地区自然资源的合理利用和保护提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 数据

研究中所用的植被指数 NDVI 来自美国 NASA 的 1982–2000 年 10 天最大合成 (MVC) 的 NOAA/AVHRR 数据产品,空间分辨率为 8 km。其中 1994 年缺少 9–12 月,因此在本研究中 1994 年数据没有参与运算。

青藏高原旬均温、降水空间插值数据 (1981–2000)来自陶波博士后出站报告^[30],为了与 NDVI 时序数据保持一致,时间分辨率采用旬(ten-day),空间分辨率为 8 km×8 km。

此外,1:100 万植被数据从中国科学院中国植被图编辑委员会编纂的《中国植被图》(2001)数字化获得。

1.2 数据处理

根据获取的站点气象数据和面上插值数据,计算各气象站点及高原面上 1982–2000 年的旬平均降水(Ten-day Precipitation, TP)和旬均温(Ten-day mean Temperature, TT)。

AVHRR NDVI 产品是古德投影的栅格文件,在 PCI 软件中转成 Albers 投影,研究区范围来自张镱铨等研究成果^[31],利用 ArcGIS 软件中的 Gridclip 命令切出研究区域植被指数的时间序列数据。由于植被冠层随着时间的推移变化较小,因此一年中植被的 NDVI 值变化应该是连续的、平滑的。然而,由于云的影响,数据传输错误,大气纠正不彻底等造成 NDVI 存在着许多噪音,导致数据波动。目前,进行类似处理的方法较多^[32–34]。本文中主要采用了三点平滑法进行了处理^[35]。基于处理的数据,计算青藏高原 18 年各旬的 NDVI 平均值(TN)。

1.3 研究方法

目前研究滞后效应比较常用的方法就是时滞互相关法。其计算公式如下:假定地表系统的两个时间序列 x_t 和 y_t 对任何时滞 k 都相关,则互相关系

数的公式为:

$$r_k(x,y)=\frac{\hat{C}_k(x,y)}{\hat{\sigma}_x \hat{\sigma}_{y+k}}$$

式中样本的协方差 $\hat{C}_k(x,y)$ 和均方差 $\hat{\sigma}_x, \hat{\sigma}_y$ 的计算公式如下:

$$\begin{cases} C_k=\frac{1}{n-k}\sum_{t=1}^{n-k}(x_t-\overline{x_t})(y_{t+k}-\overline{y_{t+k}}) \\ \hat{\sigma}_x=\left[\frac{1}{n-k}\sum_{t=1}^{n-k}(x_t-\overline{x_t})^2\right]^{1/2} \\ \hat{\sigma}_{y+k}=\left[\frac{1}{n-k}\sum_{t=1}^{n-k}(y_{t+k}-\overline{y_{t+k}})^2\right]^{1/2} \end{cases}$$

式中均值为:

$$\overline{x_t}=\frac{1}{n-k}\sum_{t=1}^{n-k}x_t \quad \overline{y_{t+k}}=\frac{1}{n-k}\sum_{t=1}^{n-k}y_{t+k}$$

式中: n 为序列 x_t, y_t 的样本数; $k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 。经验表明,时滞 k 的绝对值应小于 $(n/4)$ 或 $(n-10)$ 。由于本研究是探讨年内关系, n 为旬, 故 $n=36, n/4=9, n-10=20$, 选择 $k=9$ 。

2 植被对气候变化的响应分析

2.1 高原面特征分析

TT 与 TN 的最大互相关系数及影响时效具有显著的区域差异 (图 1a^①,图 1b)。川西藏东山地针叶林带、阿里山地半荒漠荒漠地带 TT 与 TN 的相关程度最高,相关系数达到 0.9 以上;果洛那曲高寒灌丛草甸地带、青东祁连山地草原地带、羌塘高寒草原地带、藏南山地灌丛草原地带、昆仑高寒荒漠地带、昆仑北翼山地荒漠地带一些地区 TT 与 TN 最大互相关系数在 0.70~0.90 之间;柴达木山地荒漠地区 TT 与 TN 最大互相关系数小于 0.35, 没有通过显著性检验。从滞后的时间来看,滞后 0~2 旬的地区主要分布在青东祁连山地草原地带、青南高寒草甸草原地带、果洛那曲高寒灌丛草甸地带;羌塘高寒草原地带东部地区、川西藏东山地针叶林带北部地区、藏南山地灌丛草原地带、昆仑北翼山地荒漠地带、阿里山地半荒漠荒漠地带滞后时间大致在 3~6 旬;柴达木山地荒漠地带、东喜马拉雅南翼

①图中的自然地带界线是青藏高原综合自然区划图^[36]中各带的界线,各地带性名称如下:IC1 青南 高寒草甸草原地带;IC2 羌塘 高寒草原地带;ID1 昆仑 高寒荒漠地带;IID2 柴达木 山地荒漠地带;IID3 昆仑北翼 山地荒漠地带;IIC1 藏南 山地灌丛草原地带;IIC2 青东祁连 山地草原地带;I-IAB1 川西藏东 山地针叶林带;IB1 果洛那曲 高寒灌丛草甸地带;IID1 阿里 山地半荒漠、荒漠地带;0A1 东喜马拉雅南翼 山地常绿阔叶林带。

山地常绿阔叶林带、昆仑高寒荒漠地带北部地区以及川西藏东针叶林地带南部地区滞后时间最长,滞后时间为7~9旬。

从TP与TN的最大互相关系数及影响时效的空间分布图(图2a,图2b)来看。青南高寒草甸草原地带、果洛那曲高寒灌丛草甸地带、青东祁连山地草原地带、羌塘高寒草原地带大部分地区、藏南山地灌丛草原地带、川西藏东山地针叶林带北部等区域TP与TN的相关系数高达0.90;阿里山地半荒漠荒漠地带、东喜马拉雅南翼山地常绿阔叶林带、昆仑高寒荒漠地带、昆仑北翼山地荒漠地带大部分地区最大互相关系数介于0.7~0.9之间;而在柴达木山地荒漠地带的核心地带最大互相关系数小于0.35。从影响的时效来看,滞后0~2旬的地区主要

分布在青东祁连山地草原地带、青南高寒草甸草原地带、果洛那曲高寒灌丛草甸地带、羌塘高寒草原地带东部地区、川西藏东山地针叶林带北部地区;藏南山地灌丛草原地带、昆仑北翼山地荒漠地带、阿里山地半荒漠荒漠地带滞后时间大致在3~6旬;柴达木山地荒漠地带、东喜马拉雅南翼山地常绿阔叶林带、昆仑高寒荒漠地带滞后时间最长,滞后时间为7~9旬。

通过比较4幅图可以发现,中等覆盖条件下的植被受气候影响表现更为强烈,如中、东部草甸、草原地区植被。相对于温度来说,植被对降水的响应更为敏感些,这与李本纲等^[37]的结论不一致,可能是由于青藏高原地域特殊性造成这一后果,具体原因有待进一步分析;而在高覆盖或低覆盖的北部、

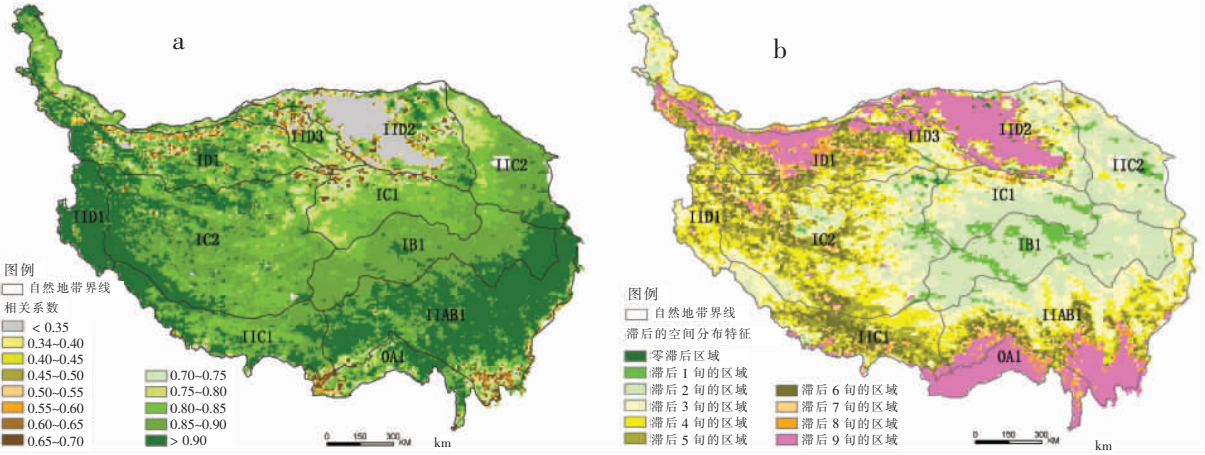


图1 TN与TT最大互相关系数及滞后时间的空间分布格局(a.最大互相关系数;b.滞后时间)
Fig.1 The spatial distribution pattern of the biggest co-correlation and lag-time between TN and TT (a. the biggest co-correlation; b. lag-time)

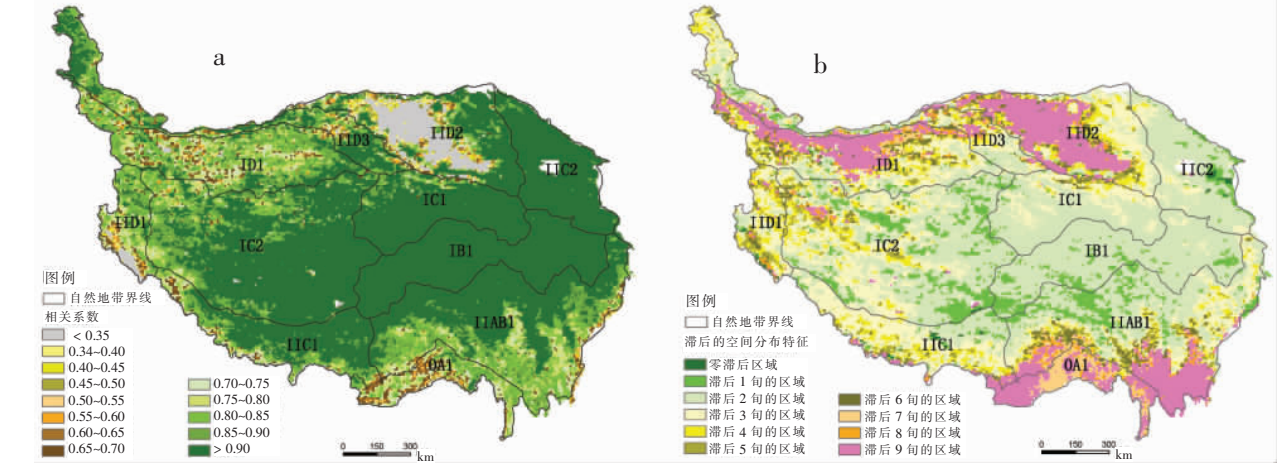


图2 TN与TP最大互相关系数及滞后时间的空间分布格局
Fig.2 The spatial distribution pattern of the biggest co-correlation and lag-time between TN and TP (a.最大互相关系数;b.滞后时间) (a. the biggest co-correlation; b. lag-time)

西部和东南部,植被与水热条件关系相对较弱。

2.2 植被类型分析

植被类型不仅影响 NDVI 与水、热因子的相关程度,也影响 NDVI 对水、热因子的响应时间(图 3)。从相关系数看,除森林类型外,各植被类型降水与植被的相关程度要好于均温;均温与不同植被类型的相关系数大小排序是:草甸>灌丛>高寒垫状植被>草原>林地>荒漠,说明均温对草甸地区植被影响最大,而对荒漠植被和森林植被影响较弱。降水与不同植被类型的相关系数大小排序是:草甸>草原>高寒垫状植被>灌丛>荒漠>林地,说明降水对草甸地区的植被影响也是最大的,而对森林和荒漠植被影响较弱;从滞后时间来看,对均温的滞后时间长短排序是:林地>荒漠>高寒垫状植被=灌丛>草原>草甸,说明草甸地区植被对升温响应最快,林地最迟。对降水的滞后时间长短排序是:林地>荒漠>草原=高寒垫状植被=灌丛=高寒草原>草甸,说明草甸地区植被对降水的响应最快,而森林地区植被对降水的响应较为缓慢。李本纲等指出,就自然植被而言,降水与 NDVI 的相关趋势为草本植被大于灌木植被,灌木植被大于乔木植被^[37];李霞等研究得出中国北方草原降水和气温变化对植被 NDVI 的影响程度从大到小依次为草甸草原、典型草原、荒漠草原,即由东到西,相关性逐渐减少^[38]。本文结论与以往的研究结果有较好的一致性。

本文还发现不同植被类型对水、热的响应时间不同,主要表现在高寒草甸和高寒草原对水、热因子响应时间较为迅速,而乔木和荒漠植被响应较为缓慢,这与李本纲等^[37]对中国北方草地植被的研究

结论类似。植被对气候变化响应的滞后期与植物瞬时发生的生理调整时间无关,而与生物地球化学循环的调解时间尺度一致^[38],对于高原地区植被来说,微生物调解 N、P 循环后,降水才能促进植被生长。而不同植被类型养分的吸收能力有差异,这很可能使得不同植被类型 NDVI 对降水或气温等气候因子的滞后时间存在差异,为了证明这一推论还需要进行基于地面定点观测的专门研究。

3 结论与讨论

3.1 结论

植被覆盖和水热条件的关系是描述陆表过程的重要参数,而二者之间的关系又是全球变化研究的重要内容。本研究以青藏高原自然植被对气温、降水的响应关系为主线,通过高原面和植被类型两个层面分析了水热条件的季向变化同旬 NDVI 变化之间的相关关系,这将有助于我们更加深入的认识植被对气候变化的响应及反馈。

本研究的主要结论如下:

(1) 除高寒荒漠植被、森林植被外,青藏高原植被 NDVI 与同期旬均温和旬降水相关性均呈高度正相关,其中中等覆盖度的植被受水、热影响表现的更为强烈,如中、东部的草甸、草原植被。

(2) 青藏高原植被 NDVI 对气温和降水有滞后效应,且滞后水平存在空间差异,高原北部(柴达木盆地、昆仑山北翼)和高原南部植被对降水、和温度的响应比较迟缓,而高寒中、东部地区植被对温度和降水的响应比较敏感。

(3) 不同的植被类型对水热条件的响应程度由高到低依次是草甸、草原、灌丛、高寒垫状植被、荒漠,最后是森林。

3.2 讨论

由于青藏高原特殊的地理环境,交通不便,导致气象站点偏少。这给本研究中的插值数据带来一定影响,不可能完全描述该地水热条件真实分布;另外,由于数据的局限性,研究中所用的 1:100 万植被图虽然是高原目前最为详尽的植被分布图,但其反映的是潜在植被,而非实际植被。因此本研究相关结论只是植被覆盖对水热条件变化响应的基本趋势规律,其详实特征有待地面资料进一步完善。

本研究使用 NOAA/AVHRR 卫星 8 km 的

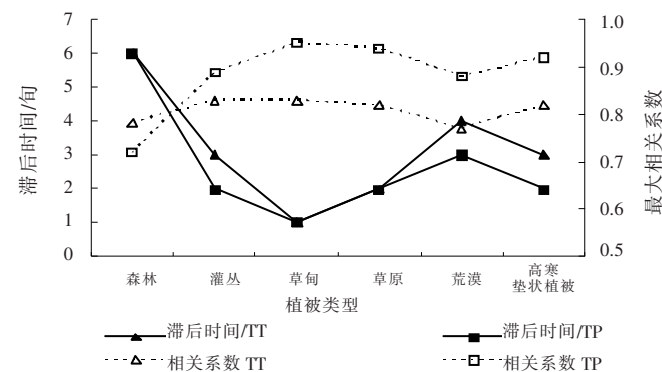


图 3 不同植被类型上 TN 与 TP、TT 最大互相关系数及滞后时间变化特征

Fig.3 The biggest correlation co-efficient and lag time between TN and TP,TT among the different vegetation type

旬 NDVI 数据,数据的时间分辨率较粗,敏感性分析可能受到一些影响。同时由于青藏高原气候、地形等环境因素复杂,导致 NDVI 数据噪音比较多。本研究虽然进行了一些相关处理,但仍免不了有些缺陷,还有待完善。另外,本研究仅考虑了植被覆盖对水热条件的敏感性,今后还可以分析生长季的开始和结束时间及生长季长度等对水热条件季节性变化的敏感性。

致谢:在数据处理过程中得到中国科学院地理科学与资源研究所陶波博士的帮助,王秀红和朱会义老师对本文提出过宝贵的修改意见,在此一并致谢。

参考文献

- [1] 吴征镒,等. 中国植被. 北京: 科学出版社, 1980: 1375.
- [2] 张井勇, 董文杰, 叶笃正, 等. 中国植被覆盖对夏季气候影响的新证据. 科学通报, 2003, 48(1): 91–95.
- [3] 信忠保, 许炯心, 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, 2007, 37(11): 1504–1514.
- [4] 张德铨, 张玮, 摆万奇, 等. 青藏高原统计数据分折: 以人口为例. 地理科学进展, 2005, 24(1): 11–21.
- [5] 牛亚菲. 青藏高原生态环境问题研究. 地理科学进展, 1999, 18(2): 163–171.
- [6] 莫申国, 张百平, 程维明, 等. 青藏高原的主要环境效应. 地理科学进展, 2004, 23(2): 88–96.
- [7] 李晓兵, 王瑛, 李克让. NDVI 对江水季节性和年际变化的敏感性. 地理学报, 2000, 55(增刊): 82–89.
- [8] 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. 地理学报, 2003, 58 (1): 119–125.
- [9] 张远东, 徐应涛, 顾峰雪, 等. 荒漠绿洲 NDVI 与气候、水文因子的相关分析. 植物生态学报, 2003, 27 (6): 816–821.
- [10] 刘德义, 傅宁, 范锦龙. 近 20 年天津地区植被变化及其对气候变化的响应. 生态环境, 2008, 17(2): 798–801.
- [11] 唐红玉, 肖凤劲, 张强, 等. 三江源区植被变化及其对气候变化的响应. 气候变化研究进展, 2006, 2(4): 177–180.
- [12] Ding M J, Zhang Y L, Liu L S, et al. The relationship between NDVI and precipitation on the Tibetan Plateau. Journal of Geographical Sciences, 2007, 17(3): 259–268.
- [13] 李震, 阎福礼, 范湘涛. 中国西北地区 NDVI 变化及其与温度和降水的关系. 遥感学报, 2005, 9(3): 308–313.
- [14] 信忠保, 许炯心. 黄土高原地区植被覆盖时空演变对气候的响应. 自然科学进展, 2007, 17(6): 770–778.
- [15] 张学霞, 葛全胜, 郑景云. 北京地区气候变化和植被的关系: 基于遥感数据和物候资料的分析. 植物生态学报, 2004, 21(1): 1–8.
- [16] 张文江, 高志强. 青藏高原中东部植被覆盖对水热条件的响应研究. 地理科学进展, 2005, 24(5): 13–22.
- [17] Asrar G, Fuchs M, Kanemasu E, et al. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. Agronomy Journal, 1984, 76 (2): 300–306.
- [18] Pettorelli N, Vik J, Mysterud A, et al. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. Trends in Ecology & Evolution, 2005, 20 (9): 503–510.
- [19] Braswell B H, Schimel D S, Linder E, et al. The response of global terrestrial ecosystems to interannual temperature variability. Science, 1997, 278: 870–872.
- [20] Foley J, Prentice I, Ramankutty N, et al. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. Global Biogeochemical Cycles, 1996, 10(4): 603–628.
- [21] Ichii K, Kawabata A, Yamaguchi Y. Global correlation analysis for NDVI and climatic variables and NDVI trends: 1982–1990. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(18): 3873–3878.
- [22] Piao S, Mohammad A, Fang J, et al. NDVI-based increase in growth of temperate grasslands and its responses to climate changes in China. Global Environmental Change, 2006, 16(4): 340–348.
- [23] Wang J, Price K, Rich P. Spatial patterns of NDVI in response to precipitation and temperature in the central Great Plains. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(18): 3827–3844.
- [24] Yang L, Wylie B K, Tieszen L L, et al. An analysis of relationships among climate forcing and time-integrated NDVI of grasslands over the US Northern and Central Great Plains: A bridge between spectral observations and agrometeorological crop models. Remote Sensing of Environment, 1998, 65(1): 25–37.
- [25] 陈云浩, 李晓兵, 史培军. 1983–1992 年中国陆地 NDVI 变化的气候因子驱动分析. 植物生态学报, 2001, 25(6): 716–720.
- [26] 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.
- [27] 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. 植物生态学报, 2006, 30(1): 1–8.
- [28] Potter C S, Brooks V. Global analysis of empirical relations between annual climate and seasonality of NDVI. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19: 2921–2948.
- [29] 周兴民. 中国嵩草草甸. 北京: 科学出版社, 2001.
- [30] 陶波. 气候变化驱动的中国陆地生态系统碳收支格局初步研究. 中国科学院地理科学与资源研究所博士后研究

- 工作报告, 2005.
- [31] 张懿铨, 李炳元. 论青藏高原范围与面积. 地理研究, 2002, 21(1): 1–8.
- [32] Viovy N, Arino O, Belward A S. The best index slope extraction (BISE): A method for reducing noise in NDVI time series. *Int. J. Rem. Sens.* 1992, 13 (8): 1585–1590.
- [33] Roerink G, Menenti M, Verhoef W. Reconstructing cloud-free NDVI composites using Fourier analysis of time series. *Int. J. Rem. Sens.* 2000, 21 (9): 1911–1917.
- [34] Chappell A, Seaquist J W, Eklundh L. Improving the estimation of noise from NOAA AVHRR NDVI for Africa using geo-statistics. *Int. J. Rem. Sens.* 2001, 22(6): 1067–1080.
- [35] 陈效述, 胡冰, 喻蓉. 中国东部温带植被生长季节的空间外推估计. 生态学报, 2007, 21(1): 66–74.
- [36] 郑度. 青藏高原自然地域系统研究. 中国科学:D 辑, 1996, 26(4): 336–341.
- [37] 李本纲, 陶澍. AVHRR NDVI 与气候因子的相关分析. 生态学报, 2000, 20(5): 898–902.
- [38] 李霞, 李晓兵, 陈云浩, 等. 中国北方草原植被对气象因子的时滞响应. 植物生态学报, 2007, 31(6): 1054–1062.

Seasonal Time Lag Response of NDVI to Temperature and Precipitation Change and Its Spatial Characteristics in Tibetan Plateau

DING Mingjun^{1,2}, ZHANG Yili¹, LIU Linshan¹, WANG Zhaofeng¹, YANG Xuchao¹

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China)

Abstract: Today, human activities become more and more intense. How to minimize human disturbance is very important in the study of the relationship between vegetation and climate. The Tibetan Plateau, as one of the few extensive regions escaped from human disturbance, provides an ideal site for studies on the response of natural vegetation cover to water/thermal conditions. Based on the trend surface of TN (short for time series of ten-day NDVI), TP (short for time series of ten-day rainfall) and TT (short for time series of ten-day temperature), which all are multi-year means, ARCGIS9.2 software and lag cross-correlation method are used to analyze the temporal and spatial characteristics of the relationships between water/thermal climate elements and vegetation cover. The main results are as follows: (1) Except high-cold desert vegetation and forest vegetation, the TN has very good correlation with TT and TP on the Tibetan Plateau, especially in the areas with a vegetation cover of moderate density, such as meadow and grassland. (2) NDVI has a hysteresis effect towards temperature and precipitation and in the northern part (Qaidam Basin and the north of Kunlun Mountains) and southern part of the Tibetan Plateau, the vegetation responds to the water/thermal changes slowly, but in the middle and east parts of the Tibetan Plateau, the vegetation responds to the water/thermal changes quickly; (3) Different vegetation types respond to water/thermal condition differently. The descending order of the responding degree for each vegetation type is: alpine cold meadow, alpine cold grassland, alpine cold brush, periglacial cushion vegetation, desert, and forest.

Key words: Tibetan Plateau; NDVI; water/thermal conditions; hysteresis effect; correlation

本文引用格式:

丁明军, 张懿铨, 刘林山, 等. 青藏高原植被覆盖对水热条件年内变化的响应及其空间特征. 地理科学进展, 2010, 29(4): 507–512.