

文章编号: 1008-2786-(2018)2-184-10

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000314

# 基于 NDVI 的黄河源区生长季植被时空变化 及其与气候因子的关系

史丹丹<sup>1,2</sup>, 杨涛<sup>3</sup>, 胡金明<sup>1\*</sup>, 顾治家<sup>4</sup>, 贾海锋<sup>5</sup>

(1. 云南大学 国际河流与生态安全研究院, 昆明 650091; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012;

3. 中国电建集团 西北勘测设计研究院有限公司, 西安 710065; 4. 北京师范大学 地理科学学部 100875;

5. 云南省环境科学研究院, 昆明 650034)

**摘 要:** 为掌握黄河源区植被变化趋势及其与气候因子的关系, 本研究利用 2000—2013 年 Terra/MODIS NDVI 数据和同期气温、降水资料, 通过一元线性回归分析、相关分析等方法, 对黄河源区生长季植被时空变化及其与气候因子进行关联分析。结果表明: 黄河源区多年平均生长季 NDVI 整体表现为由东南向西北递减。2000—2013 年, 黄河源区生长季 NDVI 呈波动上升趋势 ( $P < 0.01$ ); 生长季各期 NDVI 均在增加, 其中生长季初期 NDVI 增加较显著。近十几年 NDVI 无显著变化区域占黄河源植被覆盖区面积的 69.58%, 分布广泛; 极显著和显著增加区域占 28.88%, 集中在黄河源东北部、扎陵湖和鄂陵湖周围; 极显著和显著减少区域仅占 1.54%, 主要以小斑块状分布在扎陵湖、鄂陵湖以上源头区。生长季 NDVI 与气候因子显著正相关区域和 NDVI 增加区域高度一致, 意味着黄河源区暖湿化促进了植被生长, 而降水是影响黄河源区植被生长的主导因子。气温和降水对黄河源区植被生长影响的最大时间滞后效应约为 16 天或 32 天, 且气温对黄河源区植被生长的影响还具有显著的同期效应。

**关键词:** NDVI; 时空变化; 气候因子; 生长季; 黄河源区

**中图分类号:** TP79

**文献标志码:** A

归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 是反映植被生长状况的一个重要遥感参数<sup>[1]</sup>, 体现植被生物量和覆盖度, 对植被生长趋势的变化也非常敏感, 是气候变化下植被响应研究的有效指示因子<sup>[2]</sup>, 已经广泛应用于植被覆盖<sup>[3]</sup>、植被健康<sup>[4]</sup>、生物量<sup>[5]</sup>及物候<sup>[6-10]</sup>等方面的研究。全球变暖背景下, 青藏高原的植被-气候关系备受关注。有研究表明, 青藏高原暖湿化趋势下植被总体表现为改善趋势<sup>[11]</sup>, 尤其是高原东部或黄河源区增加趋势最显著<sup>[12-17]</sup>; 也有研究表明, 青藏高原生态问题严重<sup>[18]</sup>, 东部三江源区植被持续退化<sup>[19]</sup>。植被-气候关系的时空异质性可能是相关研究中结论分异的主要原因<sup>[9,20]</sup>。

黄河源区位于青藏高原东北部, 生态环境十分脆弱。近十几年黄河源区的植被究竟怎样变化? 尤其是变化明显的生长季植被在多大时空尺度上的变化趋势及其对气候因子的响应过程, 一直备受学者关注。本研究利用 2000—2013 年生长季 Terra/MODIS NDVI 数据产品和同期的降水、气温等资料, 基于线性回归分析、相关分析等方法, 探讨不同时间 (生长季、16 天) 和空间 (区域平均、像元) 尺度黄河源区 NDVI 变化趋势及其与气候因子 (气温、降水) 的关联, 对进一步了解全球变化下陆地生态系统的响应具有重要意义, 为区域植被-气候相互关系的定量研究提供参考。

**收稿日期** (Received date): 2017-12-06; **改回日期** (Accepted date): 2018-01-29

**基金项目** (Foundation item): 中国电建集团公司科技项目 (GW-KJ-2012-09); 国家重点研发计划项目 (2017YFC0505200)。[ Technical Project of Power Construction Group of China; National Key R&D Program of China (2017YFC0505200). ]

**作者简介** (Biography): 史丹丹 (1989-), 女, 山西晋城人, 硕士, 从事区域自然地理研究。[ SHI Dandan (1989-), female, M. Sc., major in study of regional physical geography. ] E-mail: shidd@craes.org.cn

\* **通讯作者** (Corresponding author): 胡金明 (1973-), 男, 安徽枞阳人, 博士, 教授, 从事区域自然地理研究。[ HU Jinming (1973-), male, Dr. & Professor, research on regional physical geography. ] E-mail: jhuyun@163.com

## 1 研究区概况

黄河源区是指黄河龙羊峡水电站以上的流域区,地理位置为  $32^{\circ}12' \sim 36^{\circ}36'N$ 、 $95^{\circ}54' \sim 103^{\circ}24'E$ ,面积约 13 万  $km^2$ 。黄河源区平均海拔约 4300 m,总体为西北高,东南低,发育有高山、峡谷、盆地、冰川等地貌类型,河流和湖泊相间。黄河源区气温整体为由东南向西北递减,东北角最高,西北部整体较低,最低值位于阿尼玛卿山;降水量也呈现东南向西北逐渐降低的趋势,降水量最高的地区位于东南部久治-玛曲-若尔盖-红原一带,最低的位于西部玛多和东北角恰卜恰,降水集中在夏季。受地形地貌和气候等耦合影响,黄河源区发育有大面积的高寒草甸,其次是高寒草原,高寒沼泽面积较小。因其地处东南季风和西南季风尾闾区,受夏季风进退和强度年际变化影响显著,黄河源区气候变化剧烈<sup>[21]</sup>,植被生长对气候变化尤其敏感<sup>[9]</sup>,是研究植被-气候关系的理想场所。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源与处理

本文采用美国地质勘探局(USGS)发布的

2000—2013 年 Terra /MODIS NDVI 最大合成数据(MOD13Q1, <http://glovis.usgs.gov/>),时间分辨率为 16d,空间分辨率为 250m。根据已有研究<sup>[7]</sup>,黄河源区 4 月下旬或 5 月上旬植被开始返青,10 月上旬开始枯萎,生长季结束。因此,本研究获取 NDVI 数据的年内时间起始和结束节点分别为 4 月初(DOY<sup>①</sup>97)和 10 月末(DOY289),每年 13 期<sup>②</sup>,2000—2013 年共获取黄河源区 182 期 NDVI 影像。该数据已经过辐射校正、几何校正、大气校正等预处理,而且通过国际通用的最大值合成法(MVC)处理,尽量降低各要素(云、水体、冰雪、大气等)对影像的影响程度<sup>[22-23]</sup>。利用 Modis Reprojection Tool(MRT)对 NDVI 数据进行投影变换(投影至 Albers Equal Area 坐标系)和影像裁剪<sup>[24-25]</sup>。根据相关研究<sup>[7,26-28]</sup>和研究区域的情况,将 NDVI 年平均值  $\geq 0.1$  视为有植被区域,在数据处理过程中,提取  $NDVI \geq 0.1$  像元进行生长季的植被变化研究。

气象数据引自中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>),为黄河源区及周边时间序列较完整的 39 个气象站点 2000—2013 年的日气温、日降水监测数据。黄河源区内的气象站主要有恰卜恰、兴海、贵南、河南、果洛、玛多、达日、玛曲、久治、若尔盖、红原等,其中同德、泽库和中心站因气象资料时间序列不完整被剔除。依据气象

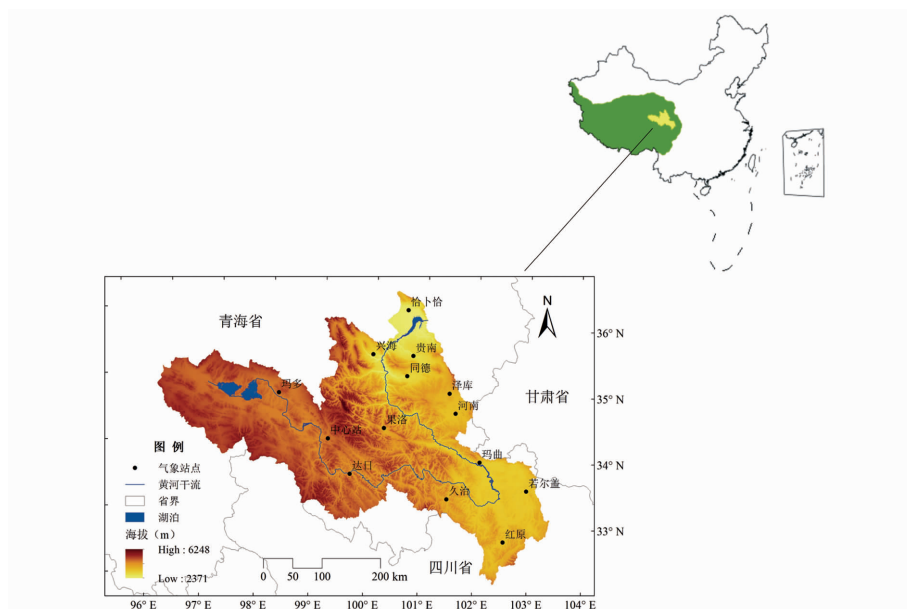


图1 黄河源区示意图

Fig.1 Sketch map of the Yellow River Source Region (YRSR)

① DOY 全称为 Day of Year,即一年中相隔 16 天所在的日期,同儒略日 Julian Day

② 每一个 16 天尺度 NDVI 影像称为 1 期 NDVI 影像

学上气温取平均值、降水采用累积值的常用记录方式,本文分别计算气温和降水与 NDVI 对应时间尺度(16 天或生长季)的统计值,其中气温为时段平均值,降水量为时段累积值。

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 生长季的界定

根据区域生长季界定的常用方法,将 2000—2013 年 4—10 月影像逐期(DOY97, DOY113, ..., DOY289)进行多年平均合成,生成 4—10 月各期的多年(2000—2013)平均 NDVI 影像。利用 NDVI 变化率  $k$  计算公式<sup>[7]</sup>,计算得到黄河源各期平均 NDVI 变化率  $k$ ,各期 NDVI 变化率计算到第 12 期(DOY273)为止,如图 2 所示。区域多年平均 NDVI 最大和最小变化率分别发生在 DOY145 和 DOY273。因此,本研究将 DOY145 对应的一年中第 145~160 天近似界定为区域多年平均植被生长季的“开始期”(记为生长季第 1 期),即 5 月 24 日至 6 月 9 日(闰年)或 5 月 25 日至 6 月 10 日(平年);将 DOY273 对应的一年中第 273~288 天近似界定为区域多年平均植被生长季的“结束期”(记为生长季第 9 期),即 9 月 29 日至 10 月 15 日(闰年)或 9 月 30 日至 10 月 16 日(平年)。

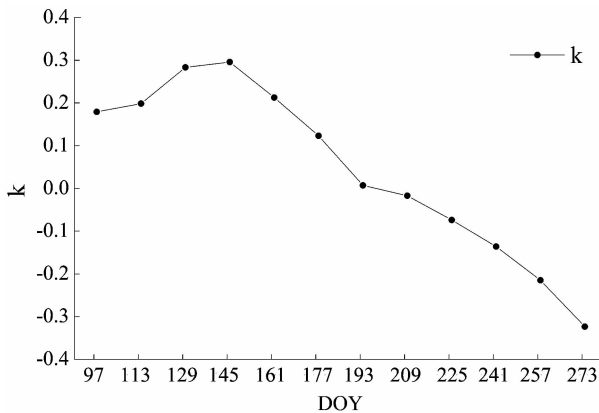


图 2 黄河源区多年(2000—2013)平均生长季 NDVI 变化率

Fig. 2 Changing rates of multi-year (2000—2013) averaged NDVI in YRSR

### 2.2.2 NDVI 变化趋势分析

一元线性回归常用于计算区域内的每个像元(栅格)NDVI 在一定时间序列的变化趋势<sup>[29-31]</sup>。本研究也采用一元线性回归公式计算,计算 2000—2013 年间黄河源区每个像元的生长季 NDVI 的变化趋势,即得到黄河源区每个像元的 NDVI 年际间的变化率<sup>[29-33]</sup>。一元线性回归计算公式为:

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

其中:变量  $i$  为 1~ $n$  年( $n=14$ )的年序号; $NDVI_i$  表示第  $i$  年的 NDVI 值; $slope$  是斜率,代表 2000—2013 年 NDVI 变化趋势, $slope > 0$  说明 NDVI 在 14 年间呈增加趋势,反之若  $slope < 0$  说明 14 年间 NDVI 呈下降趋势。

进一步采用 NDVI 时间序列相关分析,对黄河源区每一像元生长季平均 NDVI 年际变化率的显著性水平加以检验,相关系数记为  $R$ ,其计算公式如下:

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

其中, $i$  表示 1~ $n$  ( $n=14$ ),即代表 2000—2013 年; $NDVI_i$  表示第  $i$  年生长季平均 NDVI,  $\overline{NDVI}$  表示  $NDVI_i$  均值,  $\bar{i} = (n+1)/2$ 。根据相关系数检验表将生长季 NDVI 年际变化率划分为 5 个等级:极显著减少( $R < 0, P \leq 0.01$ ),显著减少( $R < 0, 0.01 < P \leq 0.05$ ),无显著变化( $P > 0.05$ ),显著增加( $R > 0, 0.01 < P \leq 0.05$ ),极显著增加( $R > 0, P \leq 0.01$ )<sup>[34]</sup>。

### 2.2.3 NDVI 变化与气候因子关联分析

#### (1) 生长季尺度上的关联

利用 ArcGIS10.2 对黄河源区生长季气温、降水进行协同克里金插值,然后基于像元尺度将 2000—2013 年黄河源区生长季平均 NDVI 与气候因子作相关分析,得到生长季像元尺度上植被与气温、降水的关系,相关系数记为  $R$ ,公式如下:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (NDVI_i - \overline{NDVI})(x_i - \bar{x})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (NDVI_i - \overline{NDVI})^2 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \quad (式 3)$$

其中,对黄河源区任一特定像元, $NDVI_i$ 、 $x_i$  分别代表该像元第  $i$  年( $i=2000, 2001, \dots, 2013$ )的 NDVI 值和气候因子(气温或降水量)值, $\overline{NDVI}$ 、 $\bar{x}$  分别为该像元生长季的 NDVI 和气候因子(气温或降水量)的多年平均值。相关程度定义如下 5 个等级:极显著负相关( $R < 0, P \leq 0.01$ ),显著负相关( $R < 0, 0.01 < P \leq 0.05$ ),不显著相关( $P > 0.05$ ),显著正相

关( $R > 0, 0.01 < P \leq 0.05$ ), 极显著正相关( $R > 0, P \leq 0.01$ )。

利用插值得到的黄河源区逐年生长季气温和降水栅格数据, 计算黄河源区区域平均逐年生长季均温  $T_i$ 、逐年生长季累积降水  $P_i$ , 进而计算黄河源区逐年生长季  $NDVI_i$  ( $i = 2000, 2001, \dots, 2013$ ) 与相应  $T_i$ 、 $P_i$  的相关系数和偏相关系数, 得到黄河源区区域尺度上的生长季植被与气温、降水的关系。

### (2) 16 天尺度上的关联

计算黄河源区区域平均的生长季逐期多年 (2000—2013) 平均  $NDVI_j$  ( $j = 1, 2, \dots, 9$ ); 同理, 计算黄河源区相应的区域平均生长季逐期多年平均气温  $T_j$ 、降水  $P_j$ , 进而对  $NDVI_j \sim T_j$ 、 $NDVI_j \sim P_j$  进行相关分析, 得到黄河源区区域平均的生长季同期 16 天尺度上的 NDVI 与气温、降水的相关系数, 记为  $R_0$ 、 $R_{\rho 0}$  (其中 0 表示同期)。在 16 天尺度上, 将气温序列  $T_j$  和降水序列  $P_j$  分别向前推 1、2、3、4、5、6 期, 分别得到  $T_{j-1}$ 、 $P_{j-1}$ ;  $\dots$ ;  $T_{j-6}$ 、 $P_{j-6}$ 。再分别计算  $NDVI_j$  与  $T_{j-1}$ 、 $P_{j-1}$  的相关系数, 记为  $R_{0-1}$ 、 $R_{\rho 0-1}$ , 得到 16 天尺度上的生长季 NDVI 与前 1 期气温、降水的关系。以此类推, 分别得出  $R_{0-2}$ 、 $R_{\rho 0-2}$ ;  $\dots$ ;  $R_{0-6}$ 、 $R_{\rho 0-6}$ , 从而得到 16 天尺度上区域平均的植被对气温、降水的滞后响应关系。

## 3 结果与讨论

### 3.1 生长季 NDVI 空间分异及变化趋势

#### 3.1.1 多年平均生长季 NDVI 空间分异

图 3(左) 显示, 黄河源区生长季 NDVI 具有显著的区域差异, 整体表现为由东南向西北递减, 说明

该区域植被生物量和覆盖度由东南向西北逐渐降低。根据相关研究<sup>[27]</sup> 和黄河源区 NDVI 的取值范围: NDVI 多年平均值  $\geq 0.1$  视为有植被区域; NDVI 多年平均值  $> 0.3$  视为植被较好区域。图 3(右) 表明, 黄河源区 NDVI 频度呈现“单峰”结构, NDVI 像元集中分布。绝大多数像元 NDVI 在 0.5 ~ 0.7 之间, 且该类像元所占比例为 46.52%; NDVI 在 0.3 ~ 0.5 之间的像元占比为 27.51%; NDVI 在 0.1 ~ 0.3 之间 (植被生长较差) 的像元占比为 15.83%; NDVI 在 0.7 ~ 0.9 之间的像元数最少, 仅占 10.14%。一般而言, 森林、灌丛 NDVI 较大, 草甸次之, 草原较小。黄河源区植被类型以高寒草甸为主、高寒草原次之, 灌丛和林地面积最小<sup>[19]</sup>, 因此, NDVI 分布频度能反映出黄河源区实际的植被类型及其面积的基本特征。总体来看, 2000—2013 年黄河源区植被总体上状况良好。

#### 3.1.2 生长季 NDVI 变化的空间分异

图 4(左) 显示, 2000—2013 时段: NDVI 增加 ( $slope > 0$ ) 的区域主要集中在黄河源区东北部和西北部, 东南部有零星分布; NDVI 下降 ( $slope < 0$ ) 的区域在黄河源区西北、东南以及南部地区均有分布, 主要以极小斑块或斑点状呈现。由此可见, 黄河源区植被改善区域主要位于研究区东北部和西北部, 植被退化面积积极小。

从图 4(右) 和表 1 来看, 2000—2013 年黄河源区: NDVI 无显著变化区域占黄河源植被覆盖区面积的 69.58%, 源区各个地区均有分布。NDVI 极显著、显著增加区域约占源区面积的 28.88%, 二者一般毗邻分布, 集中在黄河源区东北部、西北部的扎陵湖和鄂陵湖周围, 源区东南部也有零星分布。NDVI

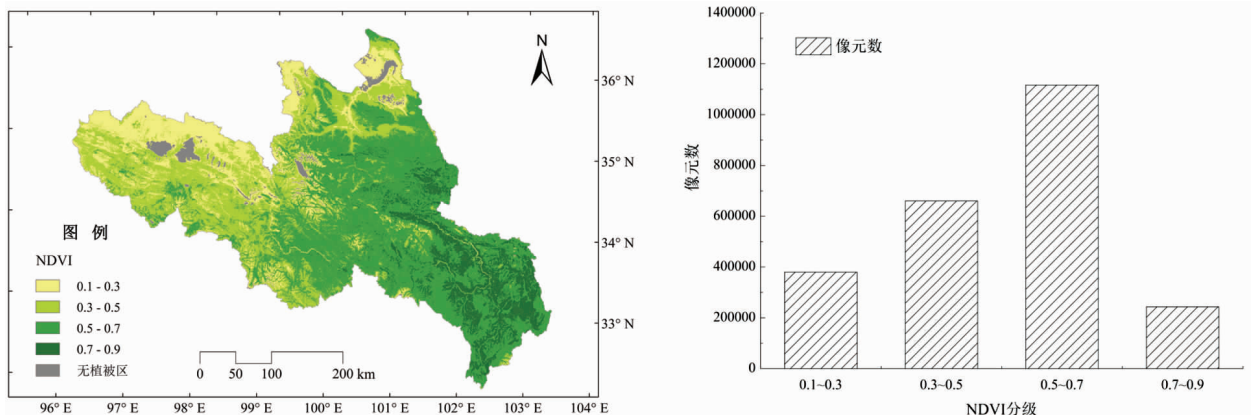


图 3 黄河源区多年 (2000—2013) 平均生长季 NDVI 空间分异 (左) 及其频度分布 (右)

Fig. 3 Spatial variation of multi-year (2000—2013) averaged growing-season NDVI (left) and its frequency distribution (right) in YRSR



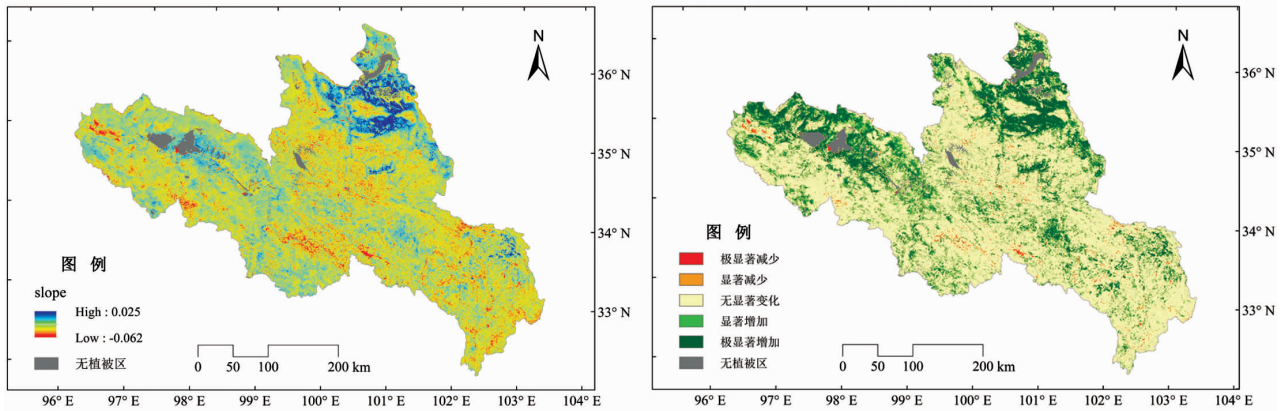


图4 黄河源区 2000—2013 年 NDVI 空间变化趋势(左)及显著性检验(右)

Fig.4 Spatial trend of NDVI (left) and its significance test (right) during 2000—2013 in YRSR

极显著、显著减少区域仅占 1.54%,除了扎陵湖、鄂陵湖以上源头区及南部部分地区分布着一些小斑块之外,其它地区基本呈点状分布。由此可见,本研究时段黄河源区植被生长总体呈改善趋势。

表 1 黄河源区 2000—2013 年 NDVI 变化趋势统计表

Table 1 The statistics of NDVI changing trend during 2000—2013 in YRSR

变化趋势	面积/km <sup>2</sup>	面积百分比/%
极显著减少	793.97	0.62
显著减少	1185.45	0.92
无显著变化	89 618.71	69.58
显著增加	17 327.62	13.45
极显著增加	19 879.43	15.43

### 3.2 区域平均生长季 NDVI 的时序变化

年际变化(图 5 左):2000—2013 年,黄河源区区域尺度生长季 NDVI 在 2003 年 NDVI 值最小,2012 年 NDVI 值最大,整体呈波动上升趋势( $P < 0.01$ ),表明本研究时段黄河源区植被生长状况明

显变好。2000—2003 年 NDVI 低于 14 年 NDVI 平均值,从 2004 年起,绝大多数年份 NDVI 高于 14 年 NDVI 平均水平。

年内变化(图 5 右):黄河源区区域尺度多年(2000—2013)平均生长季 NDVI 年内最大值出现在 7 月底(DOY209),最小值出现在 5 月末至 6 月初(DOY145)。NDVI 先增加后减少,增加的速率较快,减少的速率相对较缓慢。生长季初期 NDVI 较末期低,表明植被生长初期的生物量和覆盖度均较低,而衰减时期由于生长季前期生物量的积累,植被生物量和覆盖度相对较高。斜率 *slope* 从第 1 期到第 9 期整体呈下降趋势,但基本在 0 以上,表明 2000—2013 年以来生长季各期 NDVI 均在增加,但从生长季初期到末期增加的幅度逐渐减小,至植被衰减期 NDVI 增加幅度极小,甚至开始减少。

### 3.3 生长季 NDVI 与气候因子的关联

#### 3.3.1 生长季尺度上的关联

图 6 显示,2000—2013 年黄河源区生长季植被与气候因子多表现为显著正相关或不显著相关,显著负相关区域面积积极小,呈零星斑点状分布。从图

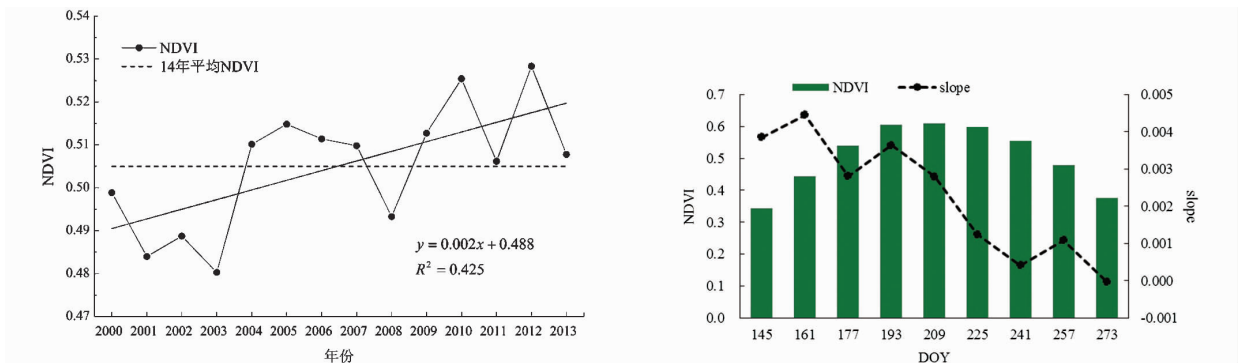


图5 黄河源区区域平均生长季 NDVI 年际和年内变化(左:年际变化;右:年内变化)

Fig.5 Inter-annual (left) and intra-annual (right) changing trends of growing-season NDVI in YRSR

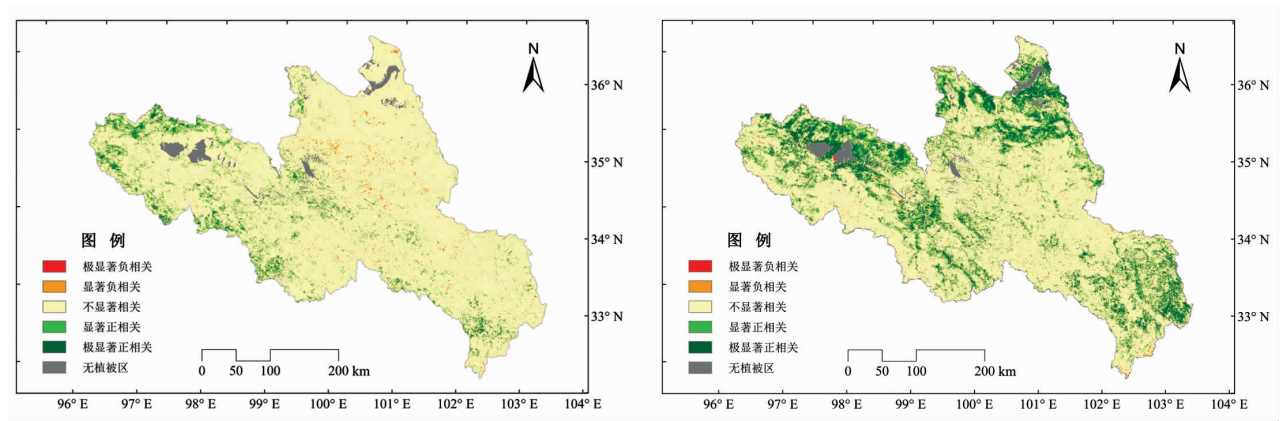


图6 黄河源区多年(2000—2013)平均生长季NDVI与气温(左)和降水(右)的相关性空间分异

Fig. 6 The spatial variation of correlation between multi-year (2000—2013) averaged growing-season NDVI and temperature (left) and precipitation (right) in YRSR

6(左)可以看出,2000—2013年,生长季NDVI与气温极显著和显著正相关的区域主要位于黄河源区西北部和东南部零星区域;NDVI与气温极显著和显著负相关的区域主要位于源区北部一些点状斑块。从图6(右)得知,NDVI与降水极显著和显著正相关的区域主要位于源区东北部,以及西北部和东南部地区;NDVI与降水极显著和显著负相关区域主要分布在西北部个别地区,且面积极小,呈斑点状分布。由此可见,黄河源区生长季NDVI与降水呈显著和极显著相关区域的面积明显高于生长季NDVI与气温呈显著和极显著相关区域的面积,说明黄河源区植被生长受降水影响较大。

表2 黄河源区生长季NDVI与气温、降水的相关系数及偏相关系数

Table 2 The correlation coefficient and partial correlation coefficient between growing-season NDVI and temperature and precipitation in YRSR

相关系数		偏相关系数	
NDVI ~ T	0.38	NDVI ~ T/P	0.26
NDVI ~ P	0.59 *	NDVI ~ P/T	0.54

注: \* 表示在  $P < 0.05$  水平上显著相关,  $n = 14$

由表2来看,黄河源区区域尺度上的生长季NDVI与降水呈显著相关,与气温相关性不显著且相关系数较低,表明黄河源区植被生长受降水影响较大。NDVI与气温、降水的偏相关系数同样表现为与降水相关系数较高,与气温相关性相关系数较低。由此可见,黄河源区植被生长对降水的响应程度较高,降水是影响黄河源区植被生长的主导因子。

3.3.2 16天尺度上的关联

表3给出了黄河源区16天尺度NDVI与同期

(0)和前期(之前1~6期)气温和降水的相关关系。

表3 黄河源区16天尺度NDVI与同期和前期气候因子相关系数

Table 3 The correlation coefficients between NDVI and climate factors in YRSR

NDVI ~ T		NDVI ~ P	
$R_{t0}$	0.80 **	$R_{p0}$	0.52
$R_{t0-1}$	0.98 **	$R_{p0-1}$	0.80 **
$R_{t0-2}$	0.73 **	$R_{p0-2}$	0.80 **
$R_{t0-3}$	0.44	$R_{p0-3}$	0.60
$R_{t0-4}$	0.30	$R_{p0-4}$	0.43
$R_{t0-5}$	0.24	$R_{p0-5}$	0.16
$R_{t0-6}$	0.21	$R_{p0-6}$	-0.12

注:0表示同期16天,0-1,0-2,⋯,0-6分别表示之前的1,2,⋯,6期(之前16天,之前32天,⋯,之前96天), $R_{p0-1} = 0.802$ , $R_{p0-2} = 0.800$ , \*\* 极显著相关, $n = 9$ 。

黄河源区生长季NDVI与同期、前一期、前二期的平均气温都呈极显著相关,而且与前一期平均气温的相关系数( $R_{t0-1}$ )最高,说明黄河源区生长季每一期NDVI受同期、前一期、前二期的平均气温的极显著影响,特别是前一期平均气温的影响最大。同时,黄河源区生长季每一期NDVI与前三期至前六期的平均气温都未表现出显著相关性,意味着生长季每一期NDVI受更早时段(超过32天)平均气温的影响不显著。这表明,黄河源区植被生长受同期和此前32天平均气温的极显著影响,这同时也意味着黄河源区气温对植被生长影响的最大时间滞后效应约为32天。

黄河源区生长季NDVI与前一期、前二期的降

水呈极显著相关,说明黄河源区生长季每一期 NDVI 受前一期、前二期降水的极显著影响。黄河源区生长季 NDVI 与前三期至前六期的降水都未表现出显著相关性,意味着生长季每一期 NDVI 受更早时段(超过 32 天)降水的影响不显著。这表明,黄河源区植被生长主要受前 32 天降水的极显著影响,降水对植被生长影响的最大时间滞后效应也表现为 32 天。但明显不同的是,同期降水与 NDVI 不显著相关,说明植被生长受同期降水影响较小,对降水变化不敏感。

有学者将生长季 NDVI 与气候因子最大相关系数所对应的时间定义为 NDVI 响应于气候变化的滞后期<sup>[35-36]</sup>,按照这一定义,黄河源区生长季 NDVI 对气候因子的响应存在 16 天的滞后期( $R_{t0-1}$ 、 $R_{p0-1}$  最大)。但从相关性( $R_{t0-2}$ 、 $R_{p0-2}$ )来看,前二期(此前 16~32 天)的平均气温、累积降水仍然有着极显著的影响。

### 3.4 讨论

黄河源区 NDVI 整体表现为由东南向西北递减,该区植被类型以高寒草甸为主、高寒草原次之,灌丛和林地面积最小<sup>[19,37]</sup>,NDVI 分布频度和实际植被类型及其面积基本符合。黄河源区 NDVI 显著增加区域主要位于东北部、西北部,显著减少地区则分布在西北角及南部一些零星区域,这与刘宪锋等<sup>[16]</sup>在三江源区研究中相应区域的结论相吻合。

2005 年以来,黄河源区进入多雨期,气候明显暖湿化,尤其是 2012 年降水量达到最大值<sup>[38]</sup>。2000—2013 年黄河源 NDVI 呈增加趋势,可见暖湿化的气候变化趋势有利于黄河源区植被生长,与康悦等<sup>[15]</sup>、徐浩杰等<sup>[33]</sup>在黄河源区的研究结果一致。此外,三江源生态保护与建设工程对黄河源区的植被生长和恢复也产生较直接和显著的影响,植被的增加趋势是以气候因素为主的气候暖湿化与保护工程的叠加效应<sup>[39]</sup>。

从 2000—2013 年时段来看,在生长季尺度上,黄河源区植被生长与降水呈显著正相关,与气温呈不显著正相关(表 2)。而且,黄河源区 NDVI 极显著和显著增加区域(图 4 右)、NDVI 与降水极显著和显著正相关区域(图 6 右),两者都位于黄河源区东北部和西北部,在空间上高度一致。黄河源区东北部和西北部都是相对干旱的区域,水分是该区植被生长的限制性因子,降水增加有利于这两个区域植被的生长,从而带来 NDVI 显著增加。相关研究也认为降水是黄河源区植被生长的主导因子<sup>[41]</sup>,当

然气温(升高)也将对黄河源区植被生长产生重要的影响(表 3),尤其是黄河源区东南部水分条件相对较好的区域,气温的升高必然有利于植被生长。

本研究还发现,黄河源区生长季各期 NDVI 和同期、前一期(前 16 天)、前二期(前 32 天)的平均气温呈极显著正相关,和前一期、前二期的累积降水呈极显著正相关(表 3)。由此可知,如果生长季开始期(本研究为 DOY145)之前 16 天、之前 32 天的平均气温和累积降水同时增加(耦合效应),很可能会带来生长季开始期 NDVI 的显著增长甚至是生长季开始期的提前。气温和降水对植被生长影响的最大时间滞后效应约为 16 天(按最大相关系数)或 32 天(表 3),这与 Wang 等<sup>[42]</sup>、安如等<sup>[43]</sup>关于区域植被-气候关系的研究结论具有一定的对应关系。植被生长(NDVI)与同期气温极显著相关,但与同期降水并未达到显著性相关。这表明气温对黄河源区植被生长的影响既具有极显著的同期效应,又具有极显著的 16 天、32 天的时间滞后效应,而降水对黄河源区植被生长的影响主要表现为极显著的 16 天、32 天的时间滞后效应。

## 4 结论

(1)黄河源区多年平均(2000—2013)生长季开始期为 5 月下旬(DOY145),结束期为 10 月中旬(DOY273),生长季 NDVI 整体表现为由东南向西北递减。

(2)黄河源区 NDVI 无显著变化区域占黄河源植被覆盖区面积的 69.58%,并呈广泛分布。NDVI 呈极显著和显著增加区域约占源区面积的 28.88%,集中在黄河源区东北部、西北部的扎陵湖和鄂陵湖周围,源区东南部也有零星分布。NDVI 极显著和显著减少区域仅占 1.54%。本研究时段黄河源区植被生长总体呈改善趋势。

(3)2000—2013 年,黄河源区生长季 NDVI 总体上呈波动上升趋势( $P < 0.01$ ),植被生长状况明显变好;生长季各期 NDVI 均在增加,其中生长季初期 NDVI 增加较显著。

(4)2000—2013 年,黄河源区生长季 NDVI 与气候因子多表现为显著正相关或无显著相关关系,显著负相关区域面积积极小且呈零星状分布。NDVI 与气温极显著和显著正相关区域位于黄河源区西北部和东南部部分区域,与气温极显著和显著负相关的区域主要位于黄河源区北部。NDVI 与降水呈极

显著和显著正相关区域主要位于黄河源区的西北部、东南部和东北角,与降水呈极显著和显著负相关的区域主要分布在黄河源区西北部且面积极小。降水是影响黄河源区植被生长的主导因子。

(5)气温和降水对黄河源区植被生长影响的最大时间滞后效应约为 16 天或 32 天,且气温对黄河源区植被生长的影响还具有极显著的同期效应。

## 参考文献 (References)

- [1] TUCKER C J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation[J]. *Remote sensing of Environment*, 1979, **8** (2): 127–150.
- [2] LINDERHOLM H W. Growing season changes in the last century [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, **137**(1): 1–14.
- [3] 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. [YANG Yuanhe, PIAO Shilong, et al. Variations in grassland vegetation cover in relation to climate factors on the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2006, **30**(1): 1–8]
- [4] DE Keersmaecker W, LHERMITTE S, TITS L, et al. A model quantifying global vegetation resistance and resilience to short-term climate anomalies and their relationship with vegetation cover[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2015, **24**(5): 539–548.
- [5] ZHANG Y L, QI W, ZHOU C P, et al. Spatial and temporal variability in the net primary production of alpine grassland on the Tibetan Plateau since 1982[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, **24**(2): 269–287.
- [6] JENKINS J P, BRASWELL B H, FROLKING S E, et al. Detecting and predicting spatial and interannual patterns of temperate forest springtime phenology in the eastern US[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, **29**(24): 54–1–54–4.
- [7] PIAO S L, FANG J Y, ZHOU L M, et al. Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation [J]. *Global Change Biology*, 2006, **12**(4): 672–685.
- [8] YU H Y, LUEDELING E, Xu J C. Winter and spring warming result in delayed spring phenology on the Tibetan Plateau [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, **107**(51): 22151–22156.
- [9] SHEN M G, TANG Y H, CHEN J, et al. Influences of temperature and precipitation before the growing season on spring phenology in grasslands of the central and eastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, **151**(12): 1711–1722.
- [10] CONG N, WANG T, NAN H J, et al. Changes in satellite-derived spring vegetation green-up date and its linkage to climate in China from 1982 to 2010: a multimethod analysis [J]. *Global Change Biology*, 2013, **19**(3): 881–891.
- [11] PIAO S. L., CUI M, CHEN A, et al. Altitude and temperature dependence of change in the spring vegetation green-up date from 1982 to 2006 in the Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, **151**(12): 1599–1608.
- [12] DING M J, ZHANG Y L, SUN X M, et al. Spatiotemporal variation in alpine grassland phenology in the Qinghai-Tibetan Plateau from 1999 to 2009 [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, **58**(3): 396–405.
- [13] 陈琼,周强,张海峰,等. 三江源地区基于植被生长季的 NDVI 对气候因子响应的差异性研究[J]. *生态环境学报*, 2010, **19** (6): 1284–1289. [CHEN Qiong, ZHOU Qiang, ZHANG Haifeng, et al. Spatial disparity of NDVI response in vegetation growing season to climate change in the Three-River headwaters region[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, **19**(6): 1284–1289]
- [14] 邵全琴,赵志平,刘纪元,等. 近 30 年来三江源地区土地覆被与宏观生态变化特征[J]. *地理研究*, 2010, **29**(8): 1439–1451. [SHAO Quanqing, ZHAO Zhiping, LIU Jiyuan, et al. The characteristics of land cover and macroscopical ecology changes in the source region of three rivers on Qinghai-Tibet Plateau during last 30 years[J]. *Geographical Research*, 2010, **29**(8): 1439–1451]
- [15] 康悦,李振朝,田辉,等. 黄河源区植被变化趋势及其对气候变化的响应过程研究[J]. *气候与环境研究*, 2011, **16**(4): 505–512. [KANG Yue, LI Zhengchao, TIAN Hui, et al. Trend of vegetation evaluation and its responses to climate change over the source region of the Yellow River[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2011, **16**(4): 505–512]
- [16] 刘宪锋,任志远,林志慧,等. 2000—2011 年三江源区植被覆盖时空变化特征[J]. *地理学报*, 2013, **68**(7): 897–908. [LIU Xianfeng, REN Zhiyuan, LIN Zhihui, et al. The spatial-temporal changes of vegetation coverage in the Three-River Headwater Region in recent 12 years[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, **68** (7): 897–908]
- [17] 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 Qingxia, LV 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]
- [18] DONG Q M, ZHAO X Q, WU G L et al. A review of formation mechanism and restoration measures of “black-soil-type” degraded grassland in the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Environment Earth Science*, 2013, **70**(5): 2359–2370.
- [19] 刘纪远,徐新良,邵全琴. 近 30 年来青海三江源地区草地退化的时空特征[J]. *地理学报*, 2008, **63**(4): 364–376. [LIU Jiyuan, XU Xinliang, SHAO Quanqin, et al. The spatial and temporal characteristics of grassland degradation in the Three-River headwaters region in Qinghai Province [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, **63**(4): 364–376]
- [20] 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[J]. *生态学报*, 2011, **31** (19): 5495–5504. [LI Huixia, LIU Guohua, FU Bojie, et al. Response of vegetation to climate change and human activity based on NDVI in the Three-River Head waters region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(19): 5495–5504]
- [21] 李林,李凤霞,郭安红,等. 近 43 年来“三江源”地区气候变化趋势及其突变研究[J]. *自然资源学报*, 2006, **21**(1): 79–85. [LI Lin, LI Fengxia, GUO Anhong, et al. Study on the climate change trend and its catastrophe over “Sanjiangyuan” region in



- recent 43 years[J]. *Journal of Natural Resources*, 2006, **21**(1): 79–85]
- [22] HOLBEN B. N., Characterization of maximum value composites from temporal. AVHRR data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, **7**(11): 1417–1434.
- [23] TUCKER C J, NEWCOMB W W, DREGNE H E. AVHRR datasets for determination of desert spatial extent[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, **15**(17): 3547–3565.
- [24] 樊辉,何大明. 基于 MODIS EVI 时序数据的云南高原山地森林物候特征识别[J]. *山地学报*, 2012, **30**(1): 16–23. [FAN Hui, HE Daming, et al. Identifying phenological characteristics of highland and mountain forests in Yunnan using MODIS EVI time-series data[J]. *Mountain Research*, 2012, **30**(1): 16–23]
- [25] 张晓克,鲁旭阳,王小丹. 2000—2010 年藏北申扎县植被 NDVI 时空变化与气候因子的关系[J]. *山地学报*, 2014, **32**(4): 475–480. [ZHANG Xiaoke, LU Xuyang, WANG Xiaodan, et al. The spatial and temporal variation of NDVI and its relationships to climatic factors in northern Tibet over the period of 2000—2010 [J]. *Mountain Research*, 2014, **32**(4): 475–480]
- [26] ZHOU L, TUCKER C J, KAUFMANN R K, et al. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, **106**(D17): 20069–20083.
- [27] FLETCHER R S, ESCOBAR D E, SKARIA M. Evaluating airborne normalized difference vegetation index imagery for citrus orchard surveys[J]. *HortTechnology*, 2004, **14**(1): 91–94.
- [28] FANG J, PIAO S, HE J, et al. Increasing terrestrial vegetation activity in China, 1982—1999[J]. *Science in China Series C: Life Sciences*, 2004, **47**(3): 229–240.
- [29] STOW D, DAESCHNER S, HOPE A, et al. Variability of the seasonally integrated normalized difference vegetation index across the north slope of Alaska in the 1990s[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, **24**(5): 1111–1117.
- [30] ZHANG G L, ZHANG Y J, DONG J W, et al. Green-up dates in the Tibetan Plateau have continuously advanced from 1982 to 2011 [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, **110**(11): 4309–4314.
- [31] 宋怡,马明国. 基于 GIMMS AVHRR NDVI 数据的中国寒旱区植被动态及其与气候因子的关系[J]. *遥感学报*, 2008, **12**(3): 499–506. [SONG Yi, MA Mingguo, et al. Variation of AVHRR NDVI and its relationship with climate in Chinese arid and cold regions[J]. *Journal of Remote Sensing*. 2008, **12**(3): 499–506]
- [32] 侯光雷,张洪岩,郭聘. 长白山区植被生长季 NDVI 时空变化及其对气候因子敏感性[J]. *地理科学进展*, 2012, **31**(3): 285–292. [HOU Guanglei, ZHANG Hongyan, GUO Dan, et al. Spatial-temporal variation of NDVI in the growing season and its sensitivity to climatic factors in Changbai Mountains[J]. *Progress in Geography*, 2012, **31**(3): 285–292]
- [33] 徐浩杰,杨太保,曾彪. 黄河源区植被生长季 NDVI 时空特征及其对气候变化的响应[J]. *生态环境学报*, 2012, **21**(7): 1205–1210. [XU Haojie, YANG Taibao, ZENG Biao, et al. Spatial-temporal variation of growing-season NDVI and its responses to climate change over the source region of the Yellow River[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, **21**(7): 1205–1210]
- [34] GAO Q. Z., LI Y, WAN Y, et al. Dynamics of alpine grassland NPP and its response to climate change in Northern Tibet [J]. *Climatic Change*, 2009, **97**(3–4): 515–528.
- [35] 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[J]. *植物生态学报*, 2007, **31**(6): 1054–1062. [LI Xia, LI Xiaobing, CHEN Yunhao, et al. Temporal responses of vegetation to climate variables in temperate steppe of northern China[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2007, **31**(6): 1054–1062]
- [36] 张景华,封志明,姜鲁光,等. 澜沧江流域 NDVI 与气候因子的相关性分析[J]. *自然资源学报*, 2015, **30**(9): 1425–1435. [ZHANG Jinghua, FENG Zhiming, JIANG Luguang, et al. Analysis of the Correlation between NDVI and Climate Factors in the Lancang River Basin[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, **30**(9): 1425–1435]
- [37] 杜际增,王根绪,李元寿. 近 45 年长江黄河源区高寒草地退化特征及成因分析[J]. *草业学报*, 2015, **24**(6): 5–15. [DU Jizeng, WANG Genxu, LI Yuanshou, et al. Rate and causes of degradation of alpine grassland in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers during the last 45 years[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, **24**(6): 5–15]
- [38] 蓝永超,鲁承阳,喇承芳,等. 黄河源区气候向暖湿转变的观测事实及其水文响应[J]. *冰川冻土*, 2013, **35**(4): 920–928. [LAN Yongchao, LU Chenyang, LA Chengfang, et al. The fact of climate shift to warm-humid in the source regions of the Yellow River and its hydrologic response[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, **35**(4): 920–928]
- [39] 邵全琴,樊江文,刘纪远,等. 三江源生态保护和建设一期工程生态成效评估[J]. *地理学报*, 2016, **71**(1): 3–20. [SHAO Quanqin, FAN Jiangwen, LIU Jiyuan, et al. Assessment on the effects of the first-stage ecological conservation and restoration project in Sanjiangyuan region[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, **71**(1): 3–20]
- [40] SHEN M, ZHANG G, CONG N, et al. Increasing altitudinal gradient of spring vegetation phenology during the last decade on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 189–190: 71–80.
- [41] 张艳芳,吴春玲,张宏运,等. 黄河源区植被指数与干旱指数时空变化特征[J]. *山地学报*, 2017(2): 142–150. [ZHANG Yanfang, WU Chunling, ZHANG Hongyun, et al. Dependency relationship between NDVI and SPEI for spatial-temporal variations in the source areas of the Yellow River[J]. *Mountain Research*, 2017(2): 142–150]
- [42] WANGJ, RICH P M, PRICE K P. Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, **24**(11): 2345–2364.
- [43] 安如,徐晓峰,杨仁敏. 三江源区植被 NDVI 对区域气候的时滞效应分析[J]. *测绘与空间地理信息*, 2014, **37**(2): 1–5. [AN Ru, XU Xiaofeng, YANG Renmin. Time-lag effect of vegetation NDVI on regional climate in “Three River Source” region [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2014, **37**(2): 1–5]

## Spatio-temporal variation of NDVI-based vegetation during the growing-season and its relation with climatic factors in the Yellow River Source Region

SHI Dandan<sup>1,2</sup>, YANG Tao<sup>3</sup>, HU Jinming<sup>1\*</sup>, GU Zhijia<sup>4</sup>, JIA Haifeng<sup>5</sup>

(1. *Institute of International Rivers and Eco-security, Yunnan University, Kunming 650500;*

2. *Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012;*

3. *Northwest Engineering Corporation Limited, Power Construction Group of China, Xian 710065;*

4. *Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875;*

5. *Yunnan Institute of Environmental Science, Kunming 650034*)

**Abstract:** Through using Terra/MODIS NDVI data products and corresponding temperature and precipitation data during the period of 2000—2013, this study was to explore the spatio-temporal variation of vegetation during growing-season and its correlation with climatic factors in YRSR by linear regression analysis and correlation analysis. The results showed that multi-year averaged NDVI in YRSR during growing season presented significant regional variation, decreasing from southeast to northwest. The increasing trend of NDVI indicated YRSR vegetation tended to be improving during 2000—2013 ( $P < 0.01$ ). Regions with insignificant NDVI changes were distributed widely in and covered 69.58% of the area of YRSR. Regions with significant NDVI increase covered 28.88% of the area of YRSR and concentrated in the northeastern YRSR and the area around Zaling and Eling lakes. Regions with significant NDVI decrease only covered 1.54% of the area of YRSR and distributed patchily in the upstream areas of Zaling and Eling lakes. Regions with significantly positive relationship between NDVI and climate factors during growing season concided with regions with increasing NDVI, which indicated the warming and the wetting promoted vegetation growth in YRSR, and precipitation was a dominant driving factor. The maximum time lag periods of both temperature and precipitation affecting vegetation growth in YRSR were 16 or 32 days, but temperature had significantly same period effect upon the vegetation growth in YRSR.

**Key words:** NDVI; spatio-temporal variation; climate factors; growing-season; the Yellow River Source Region