

文章编号: 1008-2786-(2015)2-218-09

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000028

# 三江并流河源区植被覆盖度对气候要素的响应

潘学鹏<sup>1,2</sup> 吴喜芳<sup>2,3</sup> 沈彦俊<sup>2,\*</sup> 刘峰贵<sup>1</sup> 张存桂<sup>1</sup>

(1. 青海师范大学生命与地理科学学院, 青海 西宁 810008;

2. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, 河北 石家庄 050022;

3. 河北师范大学资源与环境科学学院, 石家庄 050024)

**摘 要:** 基于 AVHRR/NDVI 和 MODIS/NDVI 遥感数据, 通过拟合两种数据源延长 NDVI 时间序列来反演了三江并流河源区 1982—2012 年植被覆盖度空间格局的变化规律, 并结合气温和降水量数据, 从不同时空尺度上分析了植被覆盖变化趋势及其对气候变化的响应。结果表明: 1. 研究区植被覆盖度整体上随着热量梯度呈南高北低、东高西低的态势分布, 且海拔在 4 000 m 以下的区域植被覆盖度较高, 平均值在 0.68~0.75; 2. 研究期间, 植被覆盖度以 0.02/(10 a) 的变化率呈增加趋势, 海拔在 4 600 m 左右和低覆盖度的区域植被增加趋势显著, 显著增加区域面积占研究区总面积的 36.4%, 主要分布于沱沱河流域、怒江流域(除源头外)和研究区东南部等地区, 这些区域植被覆盖度平均值仅为 0.36; 3. 相对于降水量, 研究区的植被覆盖度与气温要素相关性更为显著, 特别是高原面上的植被覆盖度整体上与气温呈显著正相关关系, 显示了强烈的热量限制性生态类型的特点。

**关键词:** 三江并流河源区; 植被覆盖度; 气温; 降水; 相关性

**中图分类号:** Q142, Q948.112

**文献标志码:** A

全球气候变化与陆地生态系统响应(GCTE)是国际地圈生物圈计划(IGBP)的核心研究内容<sup>[1]</sup>, 得到了国际科学界和国际社会的高度关注。植被作为生态系统的主要组分, 是生态系统存在的基础, 也是联结土壤、大气和水分的自然“纽带”, 它在陆地表面的能量交换过程、生物地球化学循环过程和水文循环过程中扮演着重要的角色, 在全球变化研究中起着“指示器”作用<sup>[2]</sup>。植被覆盖与气候因子之间存在密切关系, 研究植被覆盖变化对气候变化的响应是气候变化研究的主要内容之一<sup>[3-4]</sup>。青藏高原是全球气候变化的“放大器”<sup>[5]</sup>, 也是亚洲众多河流发源<sup>[6-7]</sup>。植被变化对产水量的影响, 会使得本区和下游地区生态系统和农业生产受到威胁, 而江水源

区植被覆盖对气候变化响应更为敏感。因此, 在全球气候变化的背景下, 分析江河源区植被覆盖年际间的变化规律, 探讨气候要素的驱动作用, 对评价陆地系统的生态环境、调节生态过程具有重要的理论和实际意义。

近年来, 国内外在植被遥感监测与气候要素关系方面开展了大量研究工作<sup>[8-15]</sup>。在流域单元层面的研究中, Hou Peng 等<sup>[16]</sup>分析了中国内陆河流域植被指数对气候因子响应的区域分异规律, 发现了北部温带干旱草原和温带沙漠植被对降水和湿度变化较为敏感。吴云等<sup>[17]</sup>认为海河流域植被覆盖与当年 3—8 月的降水总量相关性较高。陈福军等<sup>[18]</sup>进一步研究发现, 海河流域的冷湿区植被指数与气

收稿日期(Received date): 2014-06-29; 修回日期(Accepted): 2014-11-15。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(41271123)。[The National Science Foundation of China(41271123).]

作者简介(Biography): 潘学鹏(1990-), 男, 海南省万宁市人, 硕士研究生, 主要研究方向为气候变化与生态水文。[Pan Xuepeng(1990-), male, born in Wanning, Hainan province, master candidate, major in climate change and Eco-hydrological. ] Phone: 13976462220, E-mail: panxuepeng0610@sina.cn

\* 通信作者(Corresponding author): 沈彦俊(1971-), 男, 河北省张家口市人, 博士, 研究员, 主要从事生态水文过程的研究。[Shen Yanjun(1971-), male, born in Zhangjiakou, Hebei province, doctor, professor, major in Eco-hydrological process. ] E-mail: yjshen@sjziam.ac.cn

温呈显著正相关关系,对降水变化不敏感;而在干燥区,植被指数与降水呈正相关关系,与气温呈显著负相关关系。李亚飞等<sup>[19]</sup>研究结果显示:澜沧江流域月平均归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation, *NDVI*)与气温、降水、相对湿度和日照时数关系密切,气温的升高有利于该流域生态环境的改善。李崇巍等<sup>[20]</sup>则认为岷江上游植被分布与海拔、温度相关性分布较高,与降水无明显相关性。唐红玉等<sup>[21]</sup>研究结果表明:三江源地区植被指数与气温关系密切,而降水并不是植被生长的限制因子。

已有研究中采用的遥感数据多从单个传感器获得的数据出发,时间序列较短,不能较好的反映植被覆盖度的变化过程。因此,本文通过对 NOAA/AVHRR 和 Terra/MODIS 重叠时段的 *NDVI* 数据进行拟合,延长了数据源的时间序列,获得了 1982—2012 年较长时间序列的 *NDVI* 数据,这能较好反映研究区植被覆盖度的变化过程。本文分析了三江并流河源区植被覆盖度对气候变化的响应,对区域植被生产力评估、生态系统服务价值转化和生物固碳过程等研究工作具有参考价值。

## 1 研究区与研究方法

### 1.1 研究区概况

三江并流河源区位于青藏高原东南部(90°E ~ 102°E, 27°N ~ 36°N),怒江、澜沧江和金沙江的源头至三江并流区中段的流域(图1)。该区包含横断山区北部的高山峡谷区和高原面上的河源区,北部的河源区地形平缓、河谷开阔,是以高原面为主体自然地理区;南部的横断山区地形起伏较大、河谷纵切,是以高山峡谷为主体的自然地理单元<sup>[22-23]</sup>。研究区地形和气候系统较为复杂,地势起伏变化较大,大体上呈北高南低、西高东低,总地势自西北向东南倾斜,由南向北跨越亚热带、高原温带和高原亚寒带,并处于西南季风和东南季风的影响范围内,气候差异较大。降水和径流的分布也各不相同,水汽沿着横断山区河谷进入青藏高原腹部,而河谷由于焚风作用,使得降水和径流减少。存在明显的垂直分异。河源区冻土广布,而且是我国海洋性冰川的主要分布区之一<sup>[24]</sup>。

### 1.2 数据与方法

#### 1.2.1 数据来源与预处理

本研究使用了 NOAA/AVHRR 和 Terra/MODIS(<http://www.landcover.org/>)的两种 *NDVI* 数

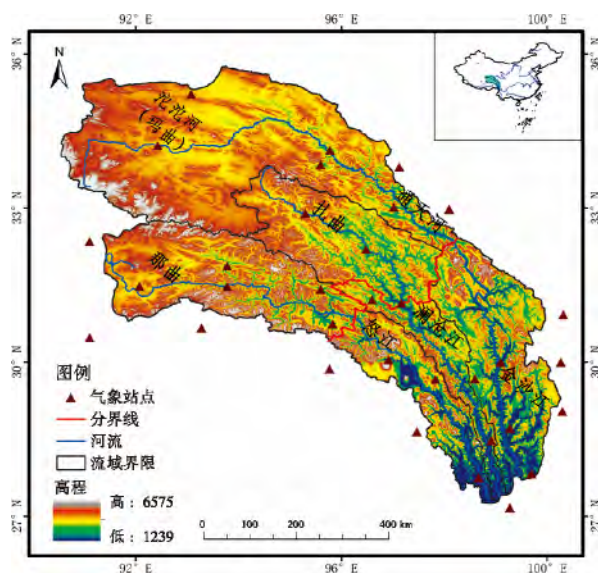


图1 三江并流河源区位置

Fig. 1 Location of the source regions of Three Parallel Rivers

据。AVHRR *NDVI* 是 1982—2006 年 8 km 分辨率的逐旬数据,采用最大值合成(MVC)<sup>[25]</sup>求出逐月最大 *NDVI*; MODIS *NDVI* 数据是 2000—2012 年 1 km 分辨率的逐月数据。由生长季(5—9 月)<sup>[26]</sup>的 *NDVI* 数据分别计算出逐年生长季平均 *NDVI*。

虽然两种数据采用不同的传感器,但是波谱范围基本相同,两种数据在光谱特征层次<sup>[27]</sup>、全球尺度<sup>[28]</sup>、区域尺度<sup>[29-31]</sup>的研究表明:时间序列变化具有很好的一致性,因此可以将长时间的 AVHRR *NDVI* 数据和 MODIS *NDVI* 数据进行拟合获得更长时间序列的 *NDVI* 数据集。针对两种数据集可能带来的误差问题,分别对 AVHRR 和 MODIS 两种数据的重叠年份 2000—2006 年生长季平均 *NDVI* 进行去水体处理后,将 AVHRR 数据重采样为 8 km 分辨率,分别对 2000—2006 年 AVHRR 和 MODIS 逐年生长季平均 *NDVI* 进行相关性分析,求得其相关系数为 0.77(2000 年)、0.78(2001 年)、0.80(2002 年)、0.76(2003 年)、0.80(2004 年)、0.75(2005 年)、0.77(2006 年),且均通过了 0.001 的置信度检验。基于以上分析结果,对 2000—2006 年的两种数据生长季 *NDVI* 平均值进行线性回归(图2),即以 MODIS 2000—2006 年生长季 *NDVI* 值为自变量,NOAA/AVHRR 2000—2006 年生长季 *NDVI* 平均值为因变量,得到二者回归方程,方程为:  $y = 0.5726x + 0.079$ ,其中样本个数为 7 285,相关系数  $r = 0.79$ 。利用二者的线性回归方程对 AVHRR *NDVI* 生长季平均 *NDVI* 数据进行插补延长,得到 1982—2012 年

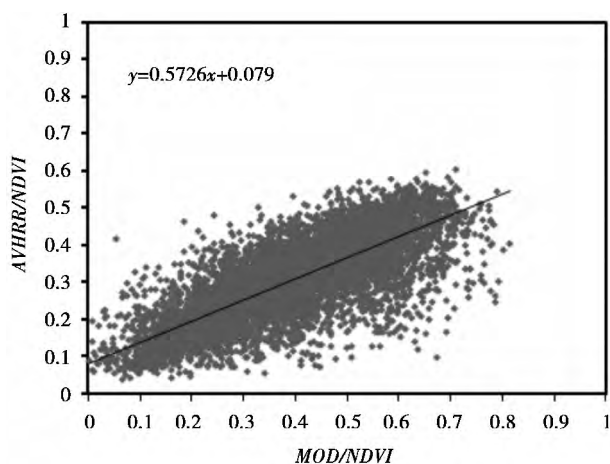


图2 1982—2012年MODIS和AVHRR NDVI数据拟合

Fig. 2 2000—2006 MODIS/ and AVHRR NDVI data fitting

完整时间序列生长季  $NDVI$  数据。对比了插补前和插补后研究区年生长季平均  $NDVI$  分布情况(图3)。插补后与插补前的  $NDVI$  值和趋势保持一致,所以  $NDVI$  插补结果在研究区可行。

气象数据由中国气象数据共享网(<http://cma.gov.cn/home.do>)提供,基于1982—2012年研究区境内及周边33个站点的气象数据。林忠辉等<sup>[32]</sup>对气象要素插值方法的对比研究表明,梯度距离平方反比法的插值效果更好。因此,本文选用梯度距离平方反比法对气温和降水量数据进行空间插值,得到分辨率8 km气象要素的空间数据。

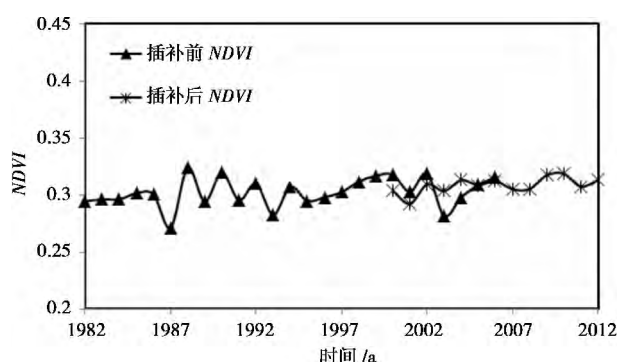


图3 插补结果检验

Fig. 3 Test for interpolation result

### 1.2.2 植被覆盖度的计算

植被覆盖度与  $NDVI$  数据之间存在显著的线性相关关系,通过建立二者之间的转化关系,直接提取植被覆盖度信息<sup>[33]</sup>。本文采用像元二分模型<sup>[33-35]</sup>进行估算植被覆盖度。像元二分模型是基于假设一个像元的  $NDVI$  信息可分为土壤和植被两部分。因此计算植被覆盖度  $fc$  的公式可表示为

$$fc = \frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \quad (1)$$

式中  $fc$  为植被覆盖度,  $NDVI_s$  为土壤部分的  $NDVI$  值,  $NDVI_v$  为植被覆盖部分的  $NDVI$  值。

$NDVI_s$  和  $NDVI_v$  的取值是像元二分模型应用的关键。对于纯裸地像元,  $NDVI_s$  理论上应该接近于0,且不随时间的变化而变化。但实际上由于大气条件、地表湿度以及太阳关照条件等因素的影响,  $NDVI_s$  不是一个定值,其变化范围一般为  $-0.1 \sim 0.2$ <sup>[36-37]</sup>。本文在 ArcGIS 中像元统计工具(Cell Statistics)分别对研究区1982—2012年生长季逐年平均  $NDVI$  求取其31 a间  $NDVI$  的最大值和  $NDVI$  的最小值,在 ENVI 的 Compute Statistics 窗口分别统计  $NDVI$  最大值和  $NDVI$  最小值的95%和5%为  $NDVI_v$  和  $NDVI_s$ ,求得  $NDVI_v = 0.54$ ,  $NDVI_s = 0.07$ 。在计算生长季平均植被覆盖度时,将小于  $NDVI_s$  的值赋予0,大于  $NDVI_v$  的值赋予1,在  $NDVI_s$  和  $NDVI_v$  之间的值用公式(1)计算,最后相加即得该年生长季平均植被覆盖度。

### 1.2.3 变差系数 $C_v$

采用变差系数  $C_v$  进行衡量植被覆盖度  $fc$  的年内变化差异程度,计算公式为

$$C_v = \frac{\sigma}{X} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - X)^2}}{X} \quad (2)$$

式中  $\sigma$  为标准差;  $X$  为31 a植被覆盖度平均值;  $X_i$  为第  $i$  年植被覆盖度。  $C_v$  值越大,表示该区植被覆盖度  $fc$  越不稳定,变异程度越大;反之亦然。

### 1.2.4 Mann-Kendall 非参数趋势检验

Mann-Kendall 非参数趋势检验法常用于水质、径流量、温度、降水等水文气象时间序列变化趋势的显著性检验<sup>[38]</sup>,主要是通过计算统计量  $\tau$ ,方差和标准化变量  $M$ ,来判断序列趋势是否显著。采用 Mann-Kendall 检验1982—2012年植被覆盖度变化趋势,计算公式为

$$M = \tau / \sigma \quad (3)$$

$$\tau = \frac{4S}{N(N-1)} - 1 \quad (4)$$

$$\sigma^2 = \frac{2(2N+5)}{9N(N-1)} \quad (5)$$

式中  $S$  为序列所有对偶观测值( $X_i, X_j, i < j$ 中  $X_i < X_j$ )出现的次数;  $N$  为序列长度,取  $\alpha = 0.05$  的显著水平,如果一时间序列在此置信水平下存在显著变化趋势,则  $|M| > M_{\alpha/2} = 1.96$ ,  $M$  值为正,表明具

有上升或增加趋势,  $M$  值为负, 则意味着下降或减少的趋势。

### 1.2.5 植被覆盖度与气象要素相关性分析

采用相关系数  $r$  来反映两个变量之间相关关系的密切程度, 其取值范围在  $(-1, 1)$  之间。当相关系数  $< 0$  时为负相关;  $> 0$  时为正相关; 等于 0 时为零相关。相关系数  $r$  的计算公式为

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

式中  $x, y$  分别为相关性分析中的两个变量。

本文分析中  $x$  为气温或降水;  $y$  为植被覆盖度。对研究区及周边的 33 个气象站点气温和降水数据进行空间插值后, 分别计算植被覆盖度与气温和降水的相关系数, 把相关系数通过 0.05 置信水平作为显著性检验的临界值, 将获得的相关系数值划分三个相关类型: 显著正相关、显著负相关和不显著相关。

## 2 结果分析

### 2.1 植被覆盖的空间格局

植被覆盖度对揭示地表植被变化, 分析和评价区域生态环境具有重要的现实意义, 尤其是地处青藏高原特殊环境下的三江并流河源区。对 1982—2012 年研究区逐年生长季植被覆盖度求取其平均植被覆盖度, 采用等间距划为 5 个等级<sup>[39-40]</sup>: 极低覆盖度 ( $0 \sim 0.2$ )、低覆盖度 ( $0.2 \sim 0.4$ )、中覆盖度 ( $0.4 \sim 0.6$ )、高覆盖度 ( $0.6 \sim 0.8$ )、极高覆盖度 ( $0.8 \sim 1$ )。研究区植被覆盖度的空间分布格局显示, 植被覆盖整体上呈南高北低、东高西低的特征 (图 4) 随海拔高低呈规律性分布。研究区 31 a 间平均植被覆盖度为 0.50, 其中南部平均植被覆盖度为 0.58, 比北部高 0.12。以流域单元来看, 澜沧江流域平均植被覆盖度最高, 达到 0.61; 金沙江流域次之, 为 0.47; 怒江流域最低, 仅有 0.45。

将研究区的高程数据划分为 4 个等级 ( $< 3\,000$  m、 $3\,000 \sim 4\,000$  m、 $4\,000 \sim 5\,000$  m 和  $> 5\,000$  m) 作为掩膜, 在 ENVI 中的统计窗口分别提取出 4 个等级所对应的研究区生长季平均植被覆盖度的值。研究区植被覆盖度的垂直梯度变化分布显示 (图 5), 海拔  $< 4\,000$  m 植被覆盖度相对较高, 平均值在  $0.68 \sim 0.75$ , 其中  $< 3\,000$  m 的区域植被覆盖度值分布较为分散, 其原因是该区位于研究区南部, 且分布

于高山峡谷两侧, 植被的垂直地带性特征显著, 且受人类活动干扰较大;  $3\,000 \sim 4\,000$  m 的区域位于高山峡谷向高原面的过渡带, 植被类型以山地森林、高山灌丛等为主, 植被覆盖度最好, 平均值高达 0.75。海拔  $> 5\,000$  m 的区域 50% 的植被覆盖度值分布较为集中, 植被覆盖度最低, 平均值仅为 0.31, 该区地表特征以冰缘地貌为主。海拔  $4\,000 \sim 5\,000$  m 的区域植被覆盖度值变化范围最大, 在  $0.01 \sim 0.96$ , 其原因是该区主要位于高原面上, 其面积最大, 且该区植被类型较为复杂。

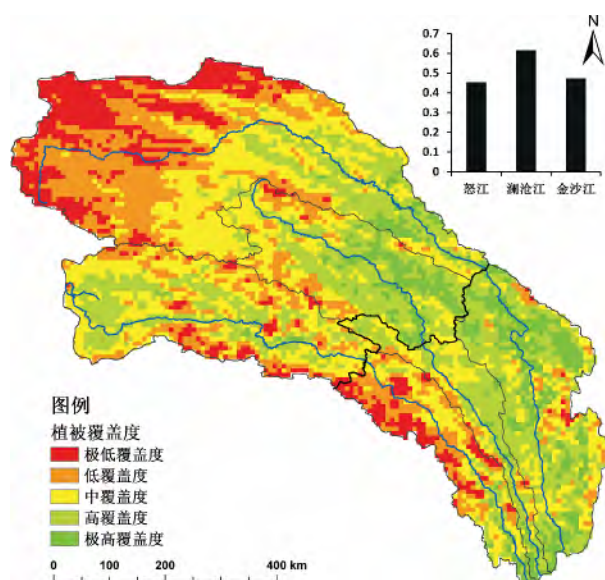


图 4 1982—2012 年三江并流河源区年生长季植被覆盖的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of growing season vegetation coverage in The Source Regions of Three Parallel Rivers during 1982—2012

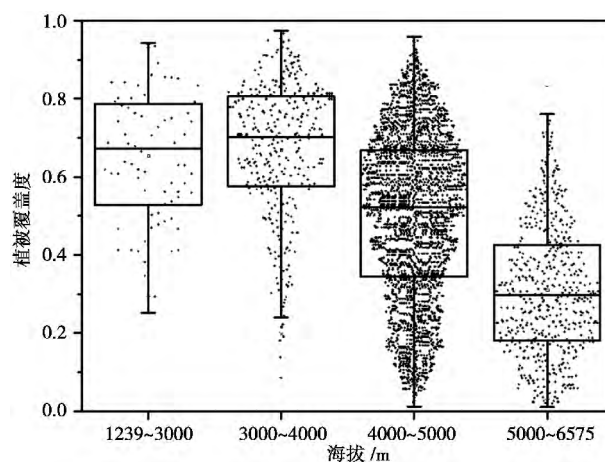


图 5 1982—2012 年三江并流河源区年生长季植被覆盖的垂直梯度变化

Fig. 5 Variation of growing season vegetation coverage with vertical gradient in The Source Regions of Three Parallel Rivers during 1982—2012



## 2.2 植被覆盖度的年际变化

植被覆盖度的年际变化趋势在一定程度上可以表征该区植被改善或退化的趋势。1982—2012 年研究区内生长季植被覆盖度年平均变化趋势显示总体以  $0.02/(10\text{ a})$  变化率呈增加趋势(图 6)。

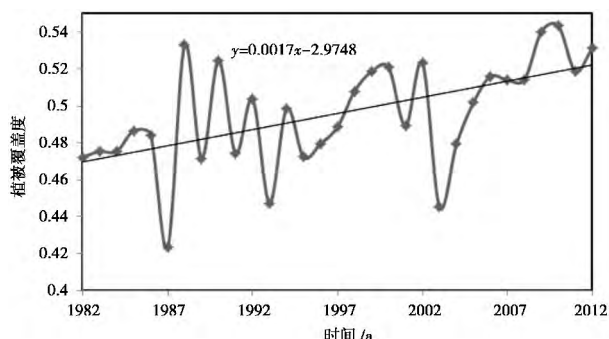


图 6 植被覆盖度年际变化趋势

Fig. 6 Interannual variation trend of vegetation coverage

进一步分析植被覆盖度变化趋势的空间分异,发现研究区植被覆盖度存在较大年际变异,变系数的平均值高达 0.23,且具有一定的垂直分布特征(图 7a)。其中沱沱河和怒江流域等地区植被覆盖度年际变异最为突出。变系数  $>0.25$  区域的平均海拔为 4 693 m,所对应的植被覆盖度平均值仅为 0.24,属低植被覆盖区。说明 1982—2012 年间海拔 4 700 m 左右低覆盖区域的年际变化较大。从流域来看,怒江流域的植被覆盖度变系数最大,为 0.29;金沙江流域和澜沧江流域分别为 0.23 和 0.15。

对 1982—2012 年研究区植被覆盖度变化趋势进行显著性检验(通过 0.05 置信水平),分析表明:31 a 间研究区的植被覆盖度总体上以不显著变化趋势为主(图 7b)。植被覆盖度显著增加面积占总面积的 36.4%,主要分布于沱沱河流域、怒江流域和研究区的东南部等地区,所对应的平均海拔为 4 613 m,平均植被覆盖度仅为 0.36,植被类型主要以高寒草原、草甸为主。说明近 31 a 间海拔在 4 600 m 左右的低覆盖度区域植被以显著增加趋势为主。植被覆盖度显著减少区域的面积占研究区总面积的 10.3%,较集中分布于怒江源头、澜沧江源头和研究区中部部分地区。其中怒江源头和澜沧江源头植被显著退化现象的分析结果与前人研究成果保持了较好的一致性<sup>[41-48]</sup>。

## 2.3 植被覆盖度与气候要素的相关关系

### 2.3.1 研究区气温和降水量的变化特征

区域植被的变化很大程度反映了水热条件的改变,研究区生长季的气温和降水量年际变化趋势如图 8 所示。31 年间研究区生长季气温和降水量分别以  $0.59^\circ\text{C}/(10\text{ a})$  和  $37.96\text{ mm}/(10\text{ a})$  的速率均呈上升趋势。

### 2.3.2 生长季植被覆盖度对气温和降水量的响应

为分析研究区植被覆盖度对气温和降水量的响应,本文采用相关系数逐像元计算 1982—2012 年生长季植被覆盖度与生长季气温、降水的相关系数,在置信水平 0.05 水平上评价其显著性。分析表明:生长季植被覆盖与气温关系较为显著(图 9a),而与降

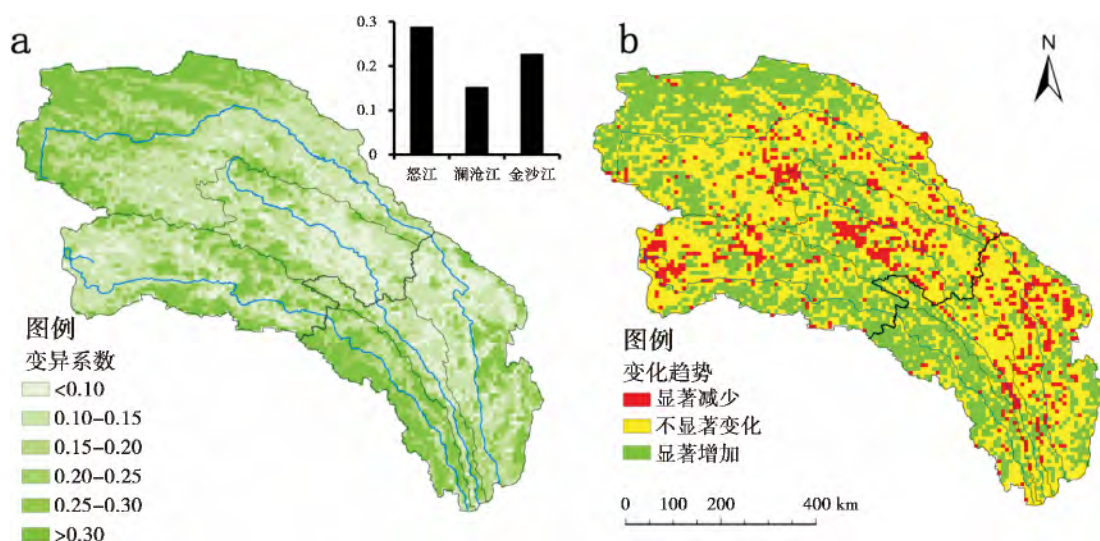


图 7 1982—2012 年植被覆盖度变系数(a) 和变化趋势(b)

Fig. 7 Variation coefficient (a) and trends (b) of vegetation coverage during 1982—2012

水整体上呈不显著相关关系(图9b)。在河源区,降水量不会限制该区植被的生长,而气温是控制或影响该区植被生长最重要的条件之一,这与杨建平等人<sup>[42]</sup>研究结果在大部分地区保持了较好的一致性。

与生长季气温呈显著正相关的地区主要分布于沱沱河流域、怒江流域(除源头外)、澜沧江源头和研究区东南部等地区(图9a),基于《1:400万中国冰川冻土沙漠图》发现,该区分布有高原不连续冻土、高原岛状多年冻土、山地多年冻土和海洋性冰川。生长季增温将导致研究区冰川冻土融水增加,因此该区植被的生长更多受到低温的影响。显著正相关所对应平均海拔为4593 m,且该海拔区间植被覆盖与降水整体呈不显著相关关系。这说明海拔4600 m左右,低温是该区域植被生长的限制因子,

而生长季增温效应导致该区融水增加,为植被的生长同时提供水热条件。与生长季气温呈显著负相关面积占研究区总面积的9.76%,零星分布于怒江源头、研究区中部等地区。

### 3 结论

三江并流河源区植被覆盖度与海拔之间存在较好的相关性:植被覆盖度随着地形,呈南高北低,东高西低的态势分布。且海拔在4000 m以下的地区植被覆盖度较好,平均值在0.65~0.75。31 a间研究区植被覆盖度以0.02/10 a的变化率呈增加趋势,植被覆盖度显著增加面积占研究区总面积的36.4%,主要分布于沱沱河流域、怒江流域(除源头

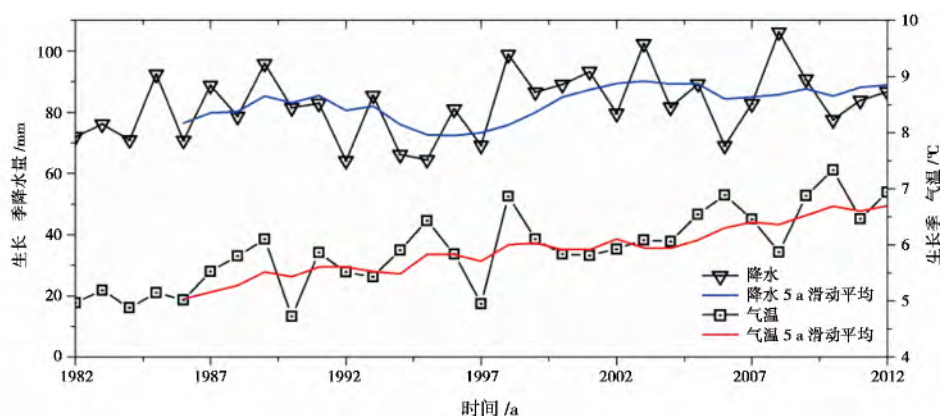


图8 1982—2012年三江并流河源区气温和降水变化趋势

Fig. 8 Trends of temperature and precipitation in the source regions of three parallel rivers during 1982—2012

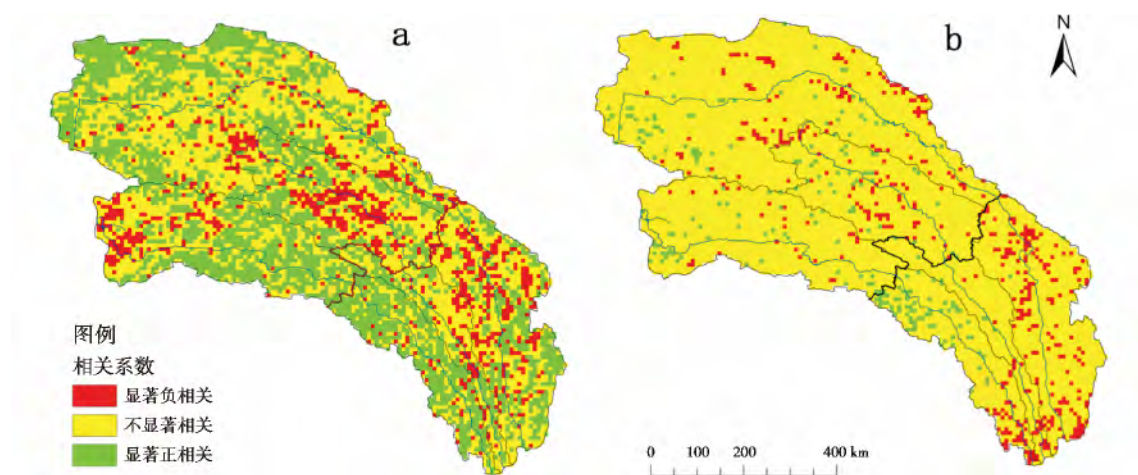


图9 1982—2012年三江并流河源区植被覆盖度与气候要素的相关性  
与生长季气温的相关性(a);与生长季降水相关性(b)

Fig. 9 Correlation between vegetation and climate factors in The Source Regions of Three Parallel Rivers during 1982—2012  
(a. with growing season temperature; b. with growing season precipitation)

外)和研究区东南部等地区,该区植被类型主要以高寒草甸、草原为主,植被覆盖度较低,仅为 0.36,这说明该河源区低覆盖植被增加趋势显著。

在河源区,降水量不会限制植被的生长,而气温是控制或影响植被生长最重要的条件之一。与生长季气温显著正相关关系的区域主要分布于沱沱河、怒江流域、澜沧江源头和东南部等地区,这些地区海拔在 4 600 m 左右,且以冰川冻土广布为主要特征,随着全球变暖,气温升高,冰川冻土融水同时为该区的植被生长提供水热条件。

另外,由于研究区特殊的地理环境,交通不便,导致气象站点偏少,这给研究中的气象数据插值带来一定影响。而 8 km 的 *NDVI* 数据空间分辨率较粗,不能较好的反映研究区植被的生长状况,相关性分析受到一定影响,有待今后进一步研究。

## 参考文献 (References)

- [1] Walker B H, Steffen W L. IGBP Science No. 1: A synthesis of GCTE and related research [R]. Stockholm: IGBP, 1997: 1–24
- [2] Sun Hongyu, Wang Changyao, Niu Zheng, et al. Analysis of vegetation cover change and the relationship between *NDVI* and environmental factors by using NOAA time series data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 1998, 2(2): 204–210 [孙红雨, 王长耀, 牛铮, 等. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系——基于 NOAA 时间序列数据分析 [J]. *遥感学报*, 1998, 2(3): 204–210]
- [3] Steffen W. The IGBP terrestrial transects: Tools for resource management and global change research at the regional scale [R]. Towards Sustainable Management in the Kalahari Region: Some Essential Background and Critical Issues, 2000: 1–12
- [4] Ringrose S, Matheson W, Wolski P, et al. Vegetation cover trends along the Botswana Kalahari transect [J]. *Journal of Arid Environments*, 2003, 54(2): 297–317
- [5] Pan Baotian, Li Jijun. Qinghai–Tibetan Plateau: A driver and amplifier of the global climatic change III. The effects of the uplift of Qinghai–Tibetan Plateau on climatic change [J]. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 1996, 32(1): 108–115 [潘保田, 李吉均. 青藏高原: 全球气候变化的驱动力与放大器: III. 青藏高原隆起对气候变化的影响 [J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 1996, 32(1): 108–115]
- [6] Immerzeel W W, Stoorvogel J, Antle J. Can payments for ecosystem services secure the water tower of Tibet? [J]. *Agricultural Systems*, 2008, 96(1): 52–63
- [7] Immerzeel W W, Van Beek L P, Bierkens M F. Climate change will affect the Asian water towers [J]. *Science*, 2010, 328(5984): 1382–1385
- [8] Nicholson S E, Davenport M, Malo A R. A comparison of the vegetation response to rainfall in the Sahel and East Africa, using normalized difference vegetation index from NOAA AVHRR [J]. *Climatic Change*, 1990, 17(2–3): 209–241
- [9] Zhao Maosheng, Fu Congbin, Yan Xiaodong, et al. Study on the relationship between different ecosystems and climate in China using NOAA/AVHRR data [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(3): 287–296 [赵茂盛, 符淦斌, 延晓冬, 等. 应用遥感数据研究中中国植被生态系统与气候的关系 [J]. *地理学报*, 2001, 56(3): 287–296]
- [10] Piao Shilong, Fang Jingyun. Seasonal change in vegetation activity in response to climate change in China between 1982 and 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]
- [11] Anyamba A, Tucker C. Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA–AVHRR *NDVI* data from 1981–2003 [J]. *Journal of Arid Environments*, 2005, 63(3): 596–614
- [12] Ma Mingguo, Wang Jian, Wang Xuemei. Advance in the inter-annual variability vegetation and its relation to climate based on remote sensing [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(3): 421–431 [马明国, 王建, 王雪梅. 基于遥感的植被年际变化及其与气候关系研究进展 [J]. *遥感学报*, 2006, 10(3): 421–431]
- [13] Ding Mingjun, Zhang Yili, Liu Linshan, et al. Seasonal time lag response of *NDVI* to temperature and precipitation change and its spatial characteristics in Tibetan Plateau [J]. *Progress in Geography*, 2010, 10(4): 507–512 [丁明军, 张镔铿, 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 [J]. *地理科学进展*, 2010, 29(4): 507–512]
- [14] Mu Shaojie, Li Jianlong, Chen Yizhao, et al. Spatial differences of variations of vegetation coverage in the Inner Mongolia during 2001–2010 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(9): 1255–1268 [穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 等. 2001–2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征 [J]. *地理学报*, 2012, 67(9): 1255–1268]
- [15] Liu Junhui, Gao Jixi, Wang Wenjie. Variations of vegetation coverage and its relations to global climate changes on the Tibetan plateau during 1981–2005 [J]. *Mountain Research*, 2013, 31(2): 234–242 [刘军会, 高吉喜, 王文杰. 青藏高原植被覆盖变化及其与气候变化的关系 [J]. *山地学报*, 2013, 31(2): 234–242]
- [16] Hou Peng, Wang Qiao, Cao Guangzheng, et al. Sensitivity analyses of different vegetations responding to climate change in inland river basin of China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, 22(3): 387–406
- [17] Wu Yun, Zeng Yuan, Zhao Yan, et al. Monitoring and dynamic analysis of fractional vegetation cover in the Hai river basin based on MODIS data [J]. *Resources Science*, 2010, 32(7): 1417–1424 [吴云, 曾源, 赵炎, 等. 基于 MODIS 数据的海河流域植被覆盖度估算及动态变化分析 [J]. 2010, 32(7): 1417–1424]
- [18] Chen Fujun, Shen Yanjun, Hu Qiaoli, et al. Responses of *NDVI* to climate change in the Hai Basin [J]. *Journal Remote Sensing*, 2011, 15(2): 401–414 [陈福军, 沈彦俊, 胡乔利, 等. 海河流域 *NDVI* 对气候变化的响应研究 [J]. *遥感学报*, 2011, 15(2): 401–414]
- [19] Li Yafei, Liu Gaohuan. Characteristics of vegetation cover changes in Lantsang basin based on MODIS vegetation index products

- (MOD13) [J]. *Resources Science*, 2012, 34(7): 1214–1221 [李亚飞, 刘高焕. 澜沧江流域植被覆盖变化特征及其与气候因子的关系 [J]. *资源学报*, 2012, 34(7): 1214–1221]
- [20] Li Chongwei, Liu Lijuan, Sun Pengsen, et al. A study on the relationship between vegetation pattern and environment in the upstream of Minjiang river [J]. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2005, 41(4): 404–409 [李崇巍, 刘丽娟, 孙鹏森, 等. 岷江上游植被格局与环境关系的研究 [J]. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2005, 41(4): 404–409]
- [21] Tang Hongyu, Xiao Fengjing, Zhang Qiang, et al. Vegetation change and its response to climate change in Three – River Source Region [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2(4): 177–180 [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 [J]. *气候变化研究进展*, 2006, 2(4): 177–180]
- [22] Zhend Du, Zhang Rongzu, Yang Qinye. On the natural zonation in the Qinghai – Xizang Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1979, 34(1): 1–11 [郑度, 张荣祖, 杨勤业. 试论青藏高原的自然地带 [J]. *地理学报*, 1979, 34(1): 1–11]
- [23] Zheng Du. A study on the physico-geographical regional system of the Tibetan Plateau. *Science in China: Ser. D*, 1999, 26(4): 336–341 [郑度. 青藏高原自然地域系统研究 [J]. *中国科学: D 辑*, 1996, 26(4): 336–341]
- [24] Xiong Yi, Li Xiuyun, Wang Yuzhi, et al. Hydrologic regionalization of the Hengduan Mountainous Region [J]. *Mountain Research*, 1989, 7(1): 29–37 [熊怡, 李秀云, 王玉枝, 等. 横断山区水文区划 [J]. *山地学报*, 1989, 7(1): 29–37]
- [25] Holben B N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(11): 1417–1434
- [26] Wang Min, Zhou Caiping, Wu Liang, et al. Aridity pattern of Tibetan Plateau and its influential factors in 2001–2010 [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2012, 8(5): 320–326 [王敏, 周才平, 吴良, 等. 2001–2010 年青藏高原干湿格局及其影响因素分析 [J]. *气候变化研究进展*, 2012, 8(5): 320–326]
- [27] Gitelson A A, Kaufman Y J. MODIS NDVI optimization to fit the AVHRR data series—Spectral considerations [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 66(3): 343–350
- [28] Brown M E, Pinzón J E, Didan K, et al. Evaluation of the consistency of long-term NDVI time series derived from AVHRR, SPOT – Vegetation, SeaWiFS, MODIS, and Landsat ETM+ sensors [J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2006, 44(7): 1787–1793
- [29] Yan Xiaoyu, Dong Wenjie, He Yong. analysis of the suitability from different remote sensing data on the monitoring of vegetation change in Ruergai Marsh [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2008, 23(3): 300–4 [严晓瑜, 董文杰, 何勇. 不同传感器数据在若尔盖湿地植被变化监测应用中的适宜性分析 [J]. *遥感技术与应用*, 2008, 23(3): 300–304]
- [30] Hao Chengyuan, Ma Chunyan, Zhu Zongze. Comparison of vegetation indices from AVHRR and MODIS in seasonal information [J]. *Geography and Geo-Information Science* 2009, 25(6): 30–33 [郝成元, 马春艳, 朱宗泽. 基于 NOAA/AVHRR 和 Terra/MODIS 数据的植被指数季节信息比较 [J]. *地理与地理信息科学*, 2009, 25(6): 30–33]
- [31] Chen Yanli, Longbuju, Pan Xuebiao, et al. Differences between MODIS NDVI and AVHRR NDVI in monitoring grasslands change [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2011, 15(4): 831–845 [陈燕丽, 龙步菊, 潘学标, 等. MODIS NDVI 和 AVHRR NDVI 对草原植被变化监测差异 [J]. *遥感学报*, 2011, 15(4): 831–845]
- [32] Lin Zhonghui, Mo Xinggou, Li Hongxuan, Comparison of three spatial interpolation methods for climate variables in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(1): 47–56 [林忠辉, 莫兴国, 李宏轩. 中国陆地区域气象要素空间插值 [J]. *地理学报*, 2002, 57(1): 47–56]
- [33] Gutman G., Ignatov A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(8): 1533–1543
- [34] Leprieur C, Verstraete M M, Pinty B. Evaluation of the performance of various vegetation indices to retrieve vegetation cover from AVHRR data [J]. *Remote Sensing Reviews*, 1994, 10(4): 265–284
- [35] Chen Jin, Chen Yunhao, He Chunyang, et al. Sub-pixel Model for Vegetation Fraction Estimation based on Land Cover Classification [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2001, 5(6): 416–422 [陈晋, 陈云浩, 何春阳, 等. 基于土地覆盖分类的植被覆盖率估算亚像元模型与应用 [J]. *遥感学报*, 2001, 5(6): 416–422]
- [36] Carlson T N, Ripley D A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 62(3): 241–252
- [37] Rundquist B C. The influence of canopy green vegetation fraction on spectral measurements over native tallgrass prairie [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(1): 129–135
- [38] Wei fengying. The technology of modern climatic statistics diagnosis and prediction [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 5–1, 69–72 [魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 2007: 5–1, 69–72]
- [39] Li Miaomiao, Wu Bingfang, Yan Changzhen et al. Estimation of vegetation fraction in the upper basin of Miyun reservoir by remote sensing [J]. *Resource Science*, 2004, 26(4): 153–159 [李苗苗, 吴炳方, 颜长珍, et al. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算 [J]. *资源科学*, 2004, 26(4): 153–159]
- [40] Cai Tiju, Ju Cunyong, Yao Yuefeng. Quantitative estimation of vegetation coverage in Mu Us sandy land based on RS and GIS [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(12): 2301–2305 [蔡体久, 琚存勇, 姚月峰. 基于 RS 和 GIS 的毛乌素沙地植被盖度定量估测 [J]. *应用生态学报*, 2005, 16(12): 2301–2305]
- [41] Gao Qingzhu, Li Yue, Lin Erda, et al. Temporal and spatial distribution of grassland degradation in Northern Tibet [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(6): 965–973 [高清竹, 李玉娥, 林而达. 藏北地区草地退化的时空分布特征 [J]. *地理学报*, 2005,



- 60(6):965–973]
- [42] Yang Jianping, Ding Yongjian, Chen Rensheng. NDVI reflection of alpine vegetation changes in the sources of the Yangtze and Yellow Rivers [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(3): 467–478 [杨建平, 丁永建, 陈仁升. 长江黄河源区高寒植被变化的 NDVI 记录 [J]. *地理学报*, 2005, 60(3): 467–478]
- [43] Ding M, Zhang Y, Liu L, et al. The relationship between NDVI and precipitation on the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2007, 17(3): 259–268
- [44] Zhang Yili, Ding Mingjun, Zhang Wei, et al. Spatial characteristic of vegetation change in the source regions of the Yangtze River, Yellow River and Lancang River in China [J]. *geographical research*, 2007, 26(3): 500–507 [张钰铨, 丁明军, 张玮, 等. 三江源地区植被指数下降趋势的空间特征及其地理背景 [J]. *地理研究*, 2007, 26(3): 500–507]
- [45] Liu Jiyuan, Xu Xinliang, Shao Quanqin, 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 [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]
- [46] 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, 等. 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]
- [47] Zhong L, Ma Y, Salama M S, et al. Assessment of vegetation dynamics and their response to variations in precipitation and temperature in the Tibetan Plateau [J]. *Climatic Change*, 2010, 103(3–4): 519–535
- [48] 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, 张钰铨, 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]

## Responses of Vegetation Coverage Changes to Climate Factors in the Source Regions of Three Parallel Rivers

PAN Xuepeng<sup>1 2</sup>, WU Xifang<sup>2 3</sup>, SHEN Yanjun<sup>2</sup>, LIU Fenggui<sup>1</sup>, ZHANG Cungui<sup>1</sup>

(1. College of Biologic Geographic Sciences, Qinghai Normal University, Xining 810008, China;

2. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China;

3. College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China)

**Abstract:** The spatial pattern and trend of vegetation coverage during the period 1982—2012 in the source regions where three rivers flowing parallelly (Three Parallel Rivers region) are obtained and discussed based on the normalized difference vegetation index (NDVI) data from Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) and Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). Combined with the temperature and precipitation data, the responses of vegetation cover to the climate change are also presented. The results showed that: 1) The spatial distribution of vegetation coverage were higher in the south and east, and lower in the north and west along with the spatial pattern of heat in Three Parallel Rivers region, and it was higher below the altitude of 4 000 m in the region. 2) During the study period, the vegetation coverage presented an increasing trend with a rate of 0.002/(10 a) in Three Parallel Rivers region. Areas with altitude about 4 600 m or low vegetation coverage showed obvious increase trend. The area with significant increase trend occupies 36.4% of the study area and mainly distributes in Tuotuo River basin, Nujiang basin (except the area of headwater) and the southeast of the study area. 3) Vegetation coverage in the study area has a more significant correlation with temperature compared with precipitation. In particular, vegetation coverage on plateau showed a significantly positive correlation with temperature, which exhibited a strong thermal limitation.

**Key Words:** the source regions of Three Parallel Rivers; vegetation coverage; precipitation; temperature; correlation