

# 2000–2011年三江源区植被覆盖时空变化特征

刘宪锋<sup>1,2</sup>, 任志远<sup>1</sup>, 林志慧<sup>1</sup>, 刘焱序<sup>1</sup>, 张东海<sup>1</sup>

(1. 陕西师范大学旅游与环境学院, 西安 710062;

2. 北京师范大学资源学院, 北京 100875)

**摘要:** 基于MODIS-NDVI数据, 辅以线性趋势分析、Hurst指数及偏相关系数等方法, 本文从三个尺度分析了近12年三江源区植被覆盖时空变化特征、未来趋势及其驱动因素。结果表明: (1) 近12年三江源区植被覆盖呈现增加趋势, 增速为1.2%/10a, 其中长江源区、黄河源区植被均呈增加趋势, 而澜沧江源区植被呈下降趋势。(2) 三江源区植被覆盖具有显著的区域差异, 且NDVI频度呈现“双峰”结构。(3) 近12年三江源区植被覆盖呈增加趋势和减少趋势的面积分别占64.06%和35.94%, 且表现为源区北部增加、南部减少的空间格局。(4) 三江源区植被变化的反向特征显著, 植被变化由改善趋势转为退化趋势的区域主要分布在长江源区和黄河源区的北部, 而由退化趋势转为改善趋势的区域主要分布在澜沧江源区。(5) 三江源区植被对降水和潜在蒸散的响应存在时滞现象, 而对气温的响应不存在时滞现象。(6) 三江源区植被覆盖的增加主要归因于气候暖湿化以及生态保护工程的实施。

**关键词:** 植被覆盖; 时空变化; 未来趋势; 影响因素; 三江源区

## 1 引言

三江源区位于青海省南部, 是长江、黄河、澜沧江三大河流的源头地区, 素有“中国水塔”之称<sup>[1]</sup>, 该区域不仅是我国重要的生态屏障, 同时也是全球生态环境十分敏感和脆弱的地区之一<sup>[2]</sup>。IPCC第四次报告显示, 过去的100年中(1906-2005年), 全球地表平均温度上升了0.74 °C, 而过去的50年内升温0.65 °C, 后者升高速率几乎是前者的2倍<sup>[3]</sup>, 而我国在过去100年中, 气温升高0.5~0.8 °C, 降水的波动地区间差异显著<sup>[4]</sup>。全球气候变化已经对陆地生态系统造成显著影响<sup>[5-7]</sup>, 植被作为陆地生态系统的主体, 既是气候变化的承受者, 同时又对气候变化产生反馈作用, 在全球变化研究中起着“指示器”的作用<sup>[6-7]</sup>。研究表明, 在气候变暖背景下, 北半球植被活动显著增强<sup>[8]</sup>, 同样的植被变化趋势在中国也检测出来<sup>[9]</sup>。

近年来, 青藏高原被认为是气候变化的敏感区, 而地处青藏高原腹地的三江源地区对气候变化的响应同样非常敏感。在气候变化和人类活动的影响下, 近几十年来三江源区生态环境发生了显著变化, 主要表现在草地退化、湿地遭破坏、冰川退缩、水土流失日益严重等问题<sup>[1, 10]</sup>。植被作为表征生态环境变化的综合指示器, 研究植被时空变化及其对气候变化的响应一直是国内外全球变化研究的重要内容<sup>[11-12]</sup>。目前, 国内外学者在这方面做了大量的研究<sup>[1, 13-16]</sup>, 其中刘纪远<sup>[1]</sup>等对青海三江源地区草地退化的时空特征进行分析, 指出

收稿日期: 2012-12-12; 修订日期: 2013-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(41071057); 陕西师范大学中央高校基本科研专项基金(GK201101002) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41071057; Central College Basic Scientific Research Fund of Shaanxi Normal University, No.GK201101002]

作者简介: 刘宪锋(1986-), 男, 黑龙江鹤岗人, 硕士生, 主要从事资源环境遥感与GIS研究。

E-mail: liuxianfeng7987@163.com

通讯作者: 任志远(1953-), 男, 陕西兴平人, 教授, 博士生导师, 中国地理学会会员(S110000054M), 主要从事国土资源开发与生态环境评价研究。E-mail: renzhy@snnu.edu.cn

三江源区草地退化具有空间范围大、时间持续长的连续变化特征,且不同区域和地带有明显的不同;李辉霞<sup>[13]</sup>等探讨了三江源地区不同植被类型对气候变化的响应,并通过分离气候变化与人类活动对植被NDVI的贡献,定量评估生态工程的效果,得出气候要素和人类活动对植被NDVI的贡献分别为79.32%和20.68%;张镔铨<sup>[15]</sup>等探讨了三江源区1981-2001年植被指数的变化趋势及其空间分异特征;钱拴<sup>[16]</sup>等通过研究三江源地区生长季气候变化趋势及草地植被响应,得出三江源地区气候变化朝着有利于草地植被生长方向变化,并且1982年以来植被指数呈弱增加趋势,2004年以后草地植被好转趋势显著。

综上,以往研究着重于对植被变化时空特征进行分析,并从整体上探讨植被与气候因子的相关性,而关于三江源地区植被变化未来趋势尚不明确,且植被与气候相关性研究中多局限于气温和降水的关系。基于此,本文利用MODIS-NDVI数据,辅以一元回归分析、Hurst指数对三江源区植被的时空变化及未来趋势进行分析,以气温、降水及潜在蒸散作为影响植被变化的气候因子,并结合人类活动及生态保护工程对植被变化的影响因素进行分析。三江源区作为我国最大的自然保护区,定期评价其植被变化情况对区域生态环境保护和建设、保障源区和中下游地区的生态安全及维护社会经济可持续发展具有举足轻重的作用。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源及预处理

遥感数据为2000-2011年MOD13Q1数据,来源于美国国家航空航天局(NASA)的EOS/MODIS数据产品(<http://e4ftl01.cr.usgs.gov>),空间分辨率为250 m×250 m,时间分辨率为16d。由于MODIS/NDVI产品经过水、云、重气溶胶等处理,保证了数据质量,加之较高的空间分辨率,被广泛应用于区域植被覆盖变化研究。首先,使用MRT(MODIS Reprojection Tools)将下载的MODIS-NDVI进行格式和投影转换;然后,为消除异常值的影响,采用最大合成法(MVC)合成月NDVI数据,进而将月NDVI数据合成年最大NDVI影像;最后,利用研究区边界裁切NDVI数据,获得2000-2011年逐年及逐月NDVI影像。

气象数据为1980-2011年三江源区16个气象台站的逐日数据(包括:平均气温、最高气温、最低气温、相对湿度、日照时数、风速及降水量),来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)。

### 2.2 研究方法

**2.2.1 趋势分析** 一元线性回归分析能够模拟每个栅格的变化趋势,该方法是指在一定时间内,采用最小二乘法逐像元拟合年均NDVI的斜率,用以综合反映植被的时空格局演变特征<sup>[17]</sup>,计算公式为:

$$Slope = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times NDVI_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n NDVI_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left( \sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (1)$$

式中,*Slope*为变化趋势;*NDVI<sub>i</sub>*为第*i*年的NDVI值;*n*为研究时序;当*Slope* > 0时,表明NDVI呈增加趋势;当*Slope* < 0时,表明NDVI呈下降趋势。

**2.2.2 Hurst指数** 基于重标极差(R/S)分析方法的Hurst指数是定量描述时间序列信息长期依赖性的有效方法<sup>[19]</sup>,它最早是由英国水文学家Hurst提出<sup>[18]</sup>,其基本原理是<sup>[20]</sup>:

给定一时间序列{ $\xi(t)$ },  $t = 1, 2, \dots$ , 对于任意正整数 $\tau = 1$ , 定义均值序列:

$$\langle \xi \rangle_{\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \xi(t) \quad \tau = 1, 2, \dots \quad (2)$$

$$\text{累积离差: } X(t, \tau) = \sum_{u=1}^t (\xi(u) - \langle \xi \rangle_t) \quad 1 \leq t \leq \tau \quad (3)$$

$$\text{极差: } R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) \quad \tau = 1, 2, \dots \quad (4)$$

$$\text{标准差: } S(\tau) = \left[ \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (\xi(t) - \langle \xi \rangle_t)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \tau = 1, 2, \dots \quad (5)$$

若存在  $R/S \propto \tau^H$ , 则说明时间序列  $\{\xi(t)\}$ ,  $t = 1, 2, \dots$  存在 Hurst 现象, H 值称为 Hurst 指数, 其值可在双对数坐标系 ( $\ln \tau$ ,  $\ln R/S$ ) 中用最小二乘法拟合得到。Hurst 指数主要有 3 种形式: (1) 当  $0.5 < H < 1$  时, 表明该时间序列是一个持续性序列, 即未来变化趋势与过去趋势一致, 且 H 越接近于 1, 持续性越强; (2) 当  $H = 0.5$  时, 表明该时间序列为随机序列, 即未来变化趋势与过去趋势无关; (3) 当  $0 < H < 0.5$  时, 表明该时间序列具有反持续性, 即未来的变化趋势与过去趋势相反, 且 H 越接近于 0, 反持续性越强。

**2.2.3 潜在蒸散计算** 本文采用世界粮农组织 (FAO) 推荐的彭曼—蒙蒂斯模型 (Penman-Monteith, P-M) 计算潜在蒸散量, 该模型不仅考虑了空气动力学的湍流传输与能量平衡, 并且考虑了植被的生理特征, 在干旱和湿润地区的计算精度均较高, 是目前广泛应用的潜在蒸散计算模型<sup>[21]</sup>。计算公式为:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (6)$$

式中,  $ET_0$  为潜在蒸散量 (mm);  $\Delta$  为饱和水汽压曲线斜率 ( $\text{kPa}/^\circ\text{C}$ );  $R_n$  为净辐射 ( $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ );  $G$  为土壤热通量 ( $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ );  $\gamma$  为干湿表常数 ( $\text{kPa}/^\circ\text{C}$ );  $T$  为平均温度 ( $^\circ\text{C}$ );  $U_2$  为 2 m 高处风速 (m/s);  $e_s$  为饱和水汽压 (kPa);  $e_a$  为实际水汽压 (kPa)。

**2.2.4 偏相关分析** 地理系统是一个多要素构成的复杂巨系统, 系统中任何一个要素的变化必然影响到其他要素的变化, 而偏相关分析可以有效解决这个问题。它是指研究某一要素与另一要素的相关程度时, 将其他要素的影响视为常数的方法<sup>[22]</sup>。计算公式为:

$$r_{xy \cdot z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1 - r_{xz}^2)(1 - r_{yz}^2)}} \quad (7)$$

式中,  $r_{xyz}$  表示变量  $z$  固定后变量  $x$  与  $y$  的偏相关系数;  $r_{xy}$ 、 $r_{xz}$ 、 $r_{yz}$  分别  $x$  与  $y$ 、 $x$  与  $z$ 、 $y$  与  $z$  之间的相关系数。

其中, 相关系数计算公式为:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{12} (x_{ij} - \bar{x})(y_{ij} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{12} (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{12} (y_i - \bar{y})^2}} \quad (8)$$

式中,  $r_{xy}$  表示变量  $x$  与  $y$  的相关系数; 其值介于  $[-1, 1]$  区间。  $x_{ij}$  表示第  $i$  年第  $j$  月 NDVI 值;  $y_{ij}$  表示第  $i$  年第  $j$  月或  $(j - 1)$  月的月平均气温、月降水量和月潜在蒸散量;  $\bar{x}$  和  $\bar{y}$  分别表示 NDVI 和气温、降水、潜在蒸散的多年月平均值。

### 3 三江源区植被覆盖变化特征

#### 3.1 三江源区 NDVI 时间变化特征

**3.1.1 全区尺度** 2000-2011 年三江源区植被 NDVI 呈波动上升趋势, NDVI 值在 0.4214~0.4638 之间, 增速为 1.2%/10a, 未通过显著性检验 (图 1a)。近 12 年三江源区植被 NDVI 变化分为 8 个阶段, 即 4 个上升阶段和 4 个下降阶段, 并分别在 2001 年、2005 年、2007 年和

2010年出现波峰，而在2002年、2006年和2008年出现波谷。

**3.1.2 源区尺度** 长江源区植被NDVI变化趋势与研究区整体变化趋势一致，增速略高于全区，为1.7%/10a，但长江源区NDVI值最低，仅介于0.3282~0.3666之间(图1b)；黄河源区植被NDVI在波动中上升，增速为1.1%/10a，除2002年、2011年有较大下降趋势外，其余年份波动不大，且黄河源区植被NDVI较高，值域范围为0.5557~0.6173(图1c)；澜沧江源区植被NDVI呈下降趋势，降速为-0.7%/10a，其中2005-2006年下降趋势显著，最高值出现在2001年，而最低值出现在2006年(图1d)。

**3.1.3 县域尺度** 近12年三江源区县域植被NDVI变化表明：(1) 东部各县NDVI明显高于西部各县；(2) 植被NDVI变化趋势大致以34°N为界，以北各县植被NDVI呈增加趋势，其中兴海县、同德县以及泽库县增长趋势较大，增速分别为3.90%/10a、3.40%/10a和3.05%/10a；而以南各县则主要表现为植被退化趋势，其中囊谦县退化最为显著，降速为-1.67%/10a，其次为玉树县，降速为-0.94%/10a(图2)。

### 3.2 三江源区NDVI空间差异特征

**3.2.1 植被NDVI的基本特征** 为阐明三江源区植被NDVI的空间分布特征，图3给出了三江源区2000-2011年植被NDVI平均值空间分布图及频度分布图。三江源区植被NDVI由东南向西北逐渐减少(图3a)，低值区主要在玛多县和曲麻菜县的北部、治多县的中西部、杂多县西部及唐古拉镇，因为这些县主要分布在长

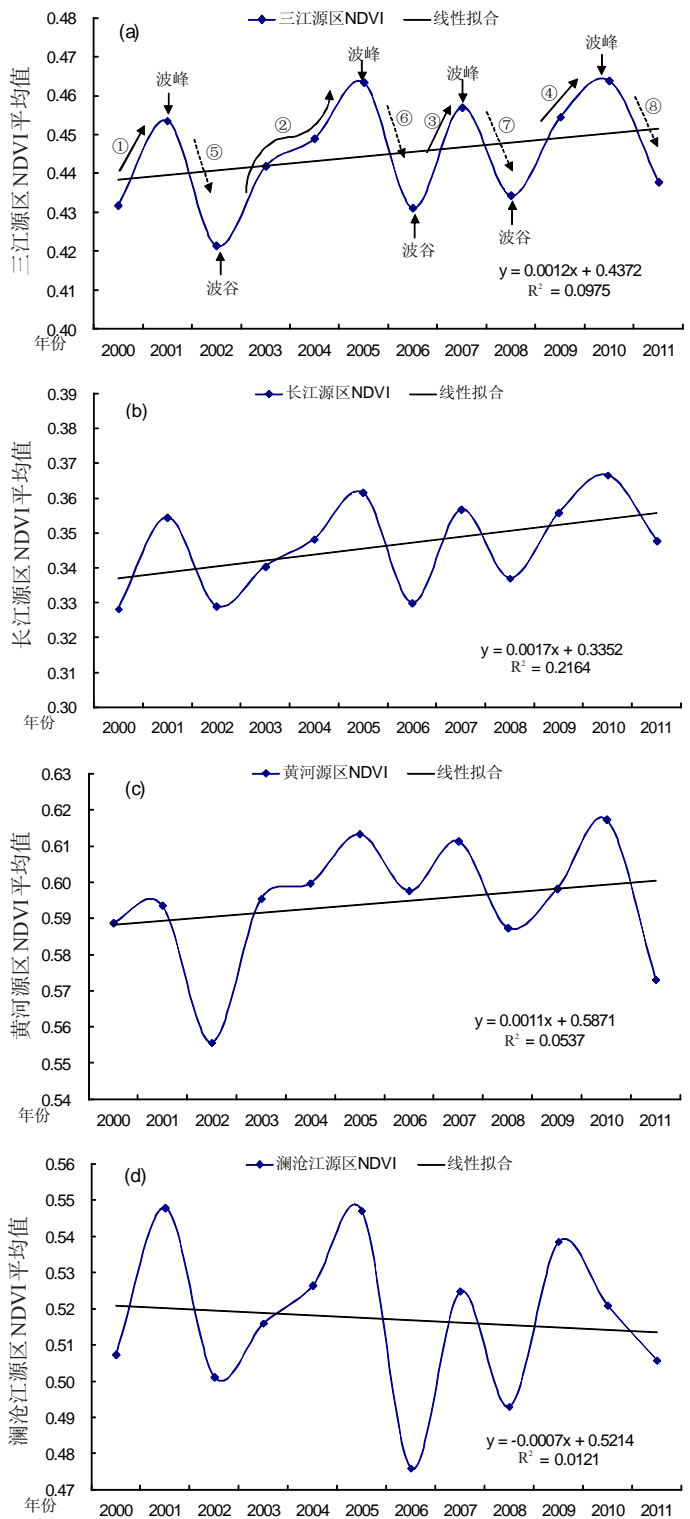


图1 三江源区植被NDVI年际变化  
 Fig. 1 Annual change of NDVI in the Three-River Headwater Region in recent 12 years



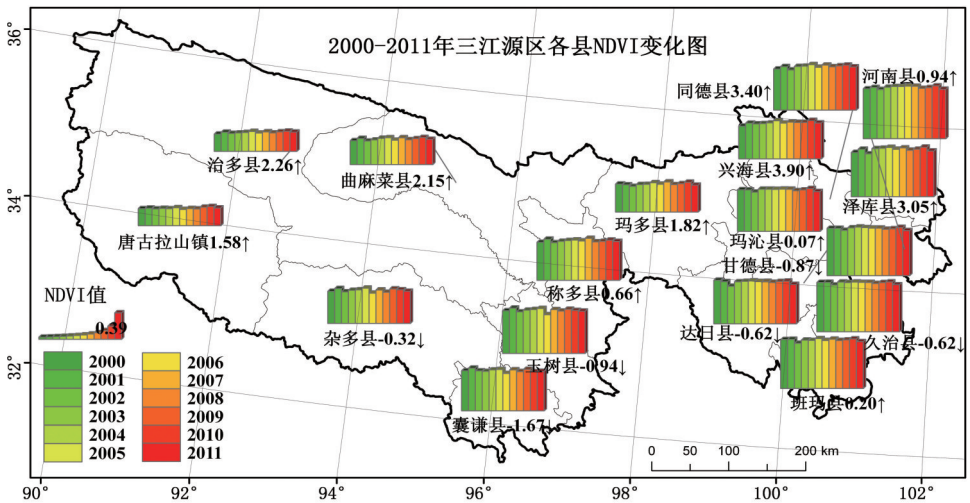


图2 三江源区各县NDVI年际变化 (%/10a)

Fig. 2 Annual change of NDVI in each county of the Three-River Headwater Region (%/10a)

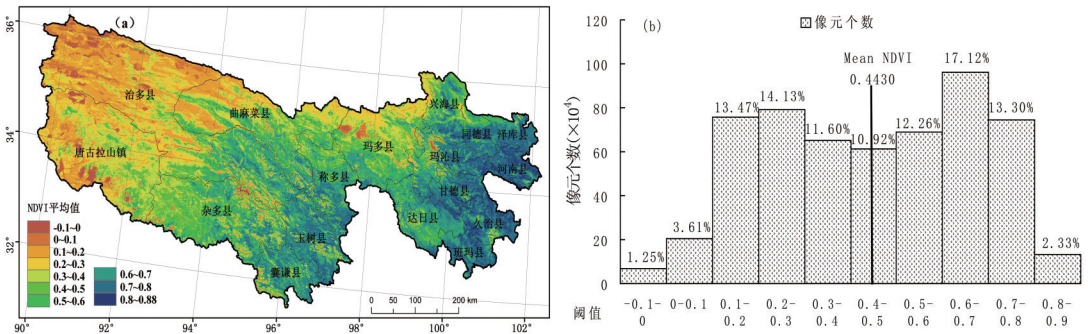


图3 三江源区NDVI空间分布 (a) 及频度分布 (b)

Fig. 3 Spatial distribution of NDVI (a) and its frequency distribution (b) in the Three-River Headwater Region

江上游高寒草原地区、可可西里高寒荒漠草原地区及花石峡—扎陵湖高寒草原地区；而高值区主要分布在黄河源区的班玛县、久治县、甘德县、河南县、泽库县、同德县、兴海县南部以及玛沁县东部，原因是以上各县主要分布在湟水—黄河流域森林、温性草原地区、青南高原南部寒温带针叶林、高寒灌丛地区以及玉树高寒灌丛、高寒草甸地区等。三江源区植被NDVI呈现“双峰”结构(图3b)，NDVI平均值为0.4430，值域在0.1~0.8的像元所占比例达92.81%，其中0.1~0.3像元数所占比例为27.6%，0.6~0.8像元比例为30.42%，0.3~0.6像元数最多，比例为34.79%。

**3.2.2 植被NDVI变化的稳定性** 三江源区2000-2011年植被NDVI标准差介于0.001~0.42之间，整体表现为中部地区变化最剧烈，东部地区次之，西部地区变化最小。具体而言，除水体外，近12年植被NDVI变化明显的地区主要分布在囊谦县、杂多县东部、玉树县南部及曲麻莱、称多和治多县的交界处；而变化趋势较小的地区主要为研究区的西北部，包括治多县中西部、唐古拉山镇西北部以及曲麻莱的西北部等地区，其原因是这些地区多为荒漠地区，植被NDVI较低且年际变化不大。

### 3.3 三江源区NDVI趋势分析

**3.3.1 三江源区植被NDVI变化趋势** 基于一元回归模型，在像元尺度上分析了三江源区2000-2011年植被NDVI变化趋势，并对分析结果进行显著性检验，即分为极显著(显著水平0.01)、显著(显著水平0.05)、弱显著(显著水平0.1)和不显著四个变化等级(图5)。

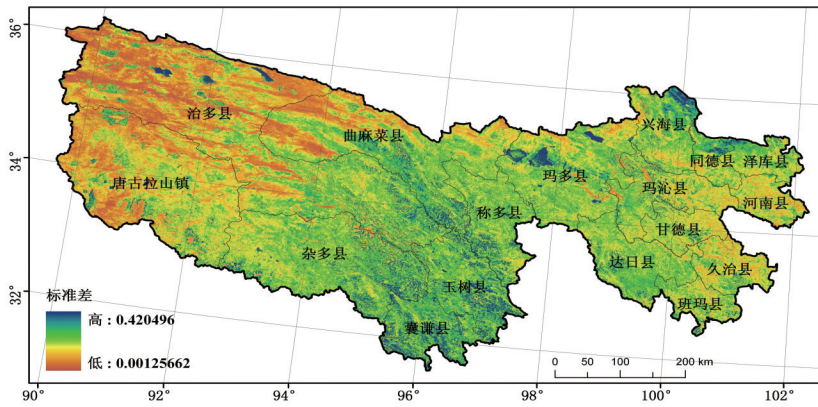


图4 近12年三江源地区植被变化稳定性

Fig. 4 Stability of vegetation change in the Three-River Headwater Region in recent 12 years

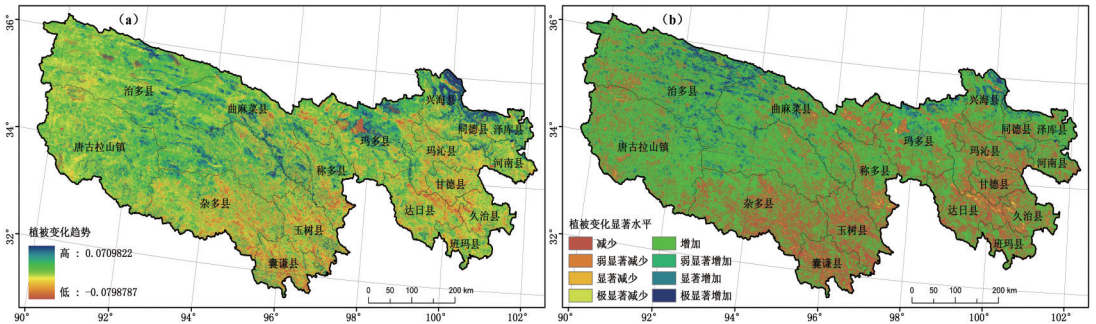


图5 近12年三江源地区植被变化趋势 (a) 及显著性 (b)

Fig. 5 Trend (a) and significant (b) of vegetation change in the Three-River Headwater Region

三江源区植被NDVI变化趋势的平均值为1.2%/10a, NDVI呈增加趋势的面积占64.06%, 其中极显著和显著增加面积占9.27%, 主要分布在治多县中部和北部、曲麻菜县的西北部以及玛多县和兴海县的北部; NDVI呈减少趋势的面积占35.94%, 其中澜沧江源区囊谦县、杂多县、玉树县和黄河源区玛沁县、甘德县、达日县、久治县出现较明显的植被退化现象(表1)。总体而言, 近12年三江源区植被NDVI变化趋势为: 北部强于南部、西部强于东部。

表1 三江源区植被NDVI变化面积及比例

Tab. 1 Areas and proportion of vegetation NDVI change in the Three-River Headwater Region

变化类型	像元数	面积(km <sup>2</sup> )	百分比(%)	累计百分比(%)
极显著增加	162756	10172.25	2.90	2.90
显著增加	357380	22336.25	6.37	9.27
弱显著增加	308727	19295.44	5.50	14.77
增加	2765663	172853.94	49.29	64.06
极显著减少	24119	1507.44	0.43	64.49
显著减少	72664	4541.50	1.29	65.78
弱显著减少	87708	5481.75	1.56	67.35
减少	1832409	114525.56	32.65	100

3.3.2 三江源区植被NDVI未来趋势

三江源区植被NDVI的Hurst指数平均值为0.5545 (0.1524~0.8222), 其中Hurst指数小于0.5的像元数占81.29%, 说明三江源区植被变化的反向特征显著; 而Hurst指数大于0.5的像元仅占18.71%, 且值域在0.4~0.5之间的像元数最多, 占43.16%。Hurst指数高值主要分布在治多县西北部、玛曲县以及泽库县和河南县交界处等地区, 说明这些地区植被变化具有同向特征, 即未来变化趋势与过去变化趋势一致; 而Hurst指数低值区主要在治多县东部、杂多县、玉树县、囊谦县北部及曲麻菜中部等地区, 说明这些地区的植被变化具有反向特征, 即未来变化趋势与过去变化趋势相反

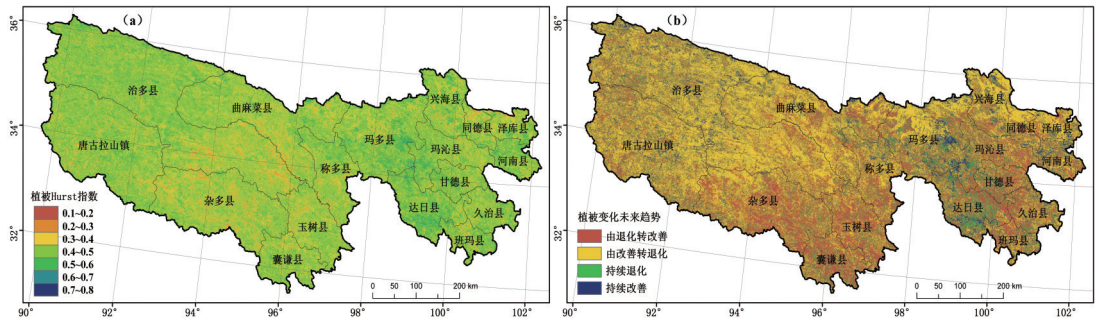


图6 三江源区植被 Hurst 指数 (a) 及未来趋势 (b)

Fig. 6 Hurst index (a) and future trend (b) of vegetation in the Three-River Headwater Region

(图6a)。

将一元回归分析的 Slope 与 Hurst 指数分析结果图进行叠加分析, 得出植被未来变化趋势图 (图6b)。从整体上来看, 长江源区植被 NDVI 未来趋势将由改善转为退化; 澜沧江源区则主要由退化转为改善; 而黄河源区北部由改善转为退化, 中部由退化转为改善, 持续改善和持续退化地区主要分布在玛多县、达日县和河南县等地。

## 4 三江源区 NDVI 影响因素分析

### 4.1 三江源区 NDVI 与气候因子的相关性

为保证数据的准确性及研究结果的可信度, 植被 NDVI 变化对气候因子的响应采用逐站点进行偏相关分析的方法, 具体做法为: 根据研究区气象站点位置, 利用 ArcGIS 提取各个气象站点周边 ( $3 \times 3 \text{ km}^2$ ) 年 NDVI 和月 NDVI 平均值, 作为该站点的 NDVI 值, 进而与各个站点的年平均和月平均气温、降水量及潜在蒸散量进行偏相关分析。

以年为时间单位, 分别计算各站点 NDVI 与气温、降水及潜在蒸散的偏相关系数, 其中 NDVI 与降水的偏相关系数均为正值, 且呈增加趋势; NDVI 与气温的偏相关系数在正负之间波动, 且呈下降趋势; NDVI 与潜在蒸散的偏相关系数大部分为负值 (图7a)。

在空间上, NDVI 与气温的偏相关系数较大的区域在治多县的东南部、称多县、囊谦县和同德县等地, 而负相关区域主要为治多县和曲麻莱县的交界处以及兴海县等地; NDVI 与降水偏相关系数高值区在黄河源区北部的同德县和泽库县等地, 且负相关区域全部位于黄河源区内; NDVI 与潜在蒸散偏相关系数, 除五道梁站和河南站外, 其余地区均为负相关, 且负的高值区主要分布在唐古拉山镇、玛多县、囊谦县和班玛县等地, 说明随着潜在蒸散量的增加, 植被生长会受到抑制作用。

以月份为时间尺度进行逐站点偏相关分析, 研究表明: NDVI 与当月气温的偏相关系数均明显大于与前一月气温的偏相关系数 (图7b); 除黄河源区的同仁和河南外, 其余站点 NDVI 与当月降水偏相关系数均小于与前一月降水的相关系数 (图7c), 说明三江源区植被 NDVI 对降水的响应存在时滞, 而对气温的响应不存在时滞现象, 与宋冬梅<sup>[23]</sup>等人研究结论一致。

NDVI 与潜在蒸散的偏相关系数主要表现为: NDVI 与当月潜在蒸散呈负相关, 而与前一月潜在蒸散呈正相关, 作者进一步分析了 NDVI 与太阳总辐射的偏相关系数, 发现 NDVI 对太阳总辐射同样具有时滞现象, 因此, 可以认为 NDVI 对潜在蒸散的时滞效应实质上是太阳总辐射的时滞效应。

### 4.2 三江源区气候变化趋势

1980-2011年三江源区气温呈上升趋势 (图8a), 增速为  $0.786^\circ\text{C}/10\text{a}$  ( $p < 0.01$ )。M-K 检



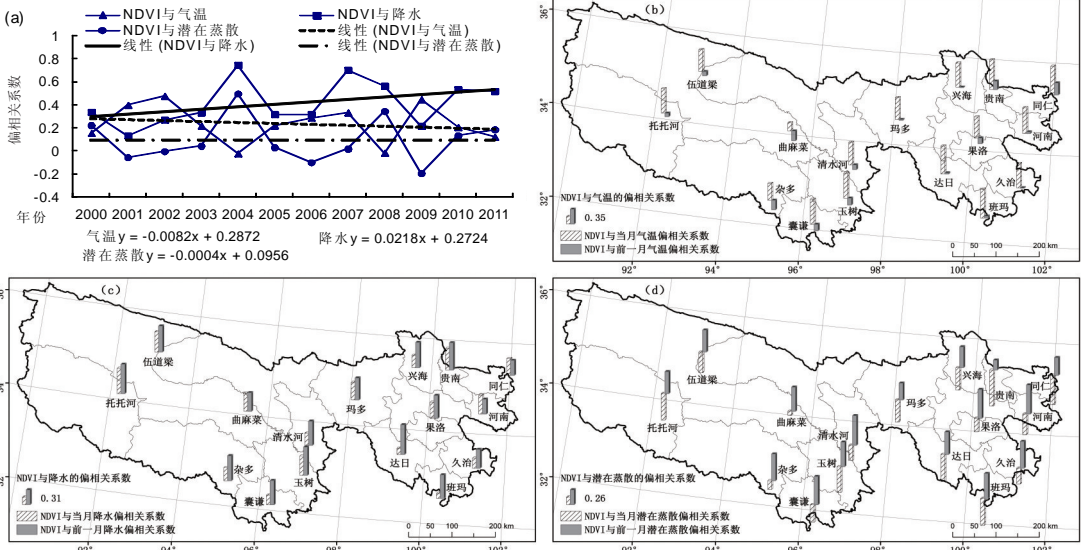


图7 三江源区NDVI与气候因子的偏相关系数

Fig. 7 Partial correlation coefficients of NDVI and climate factors in the Three-River Headwater Region

验结果表明：近12年三江源区气温发生突变（信度值为0.05），且突变时间位于1998年前后，与易湘生<sup>[10]</sup>等研究结果一致。除贵南站外，其余站点气温均发生显著变化，且88%的站点发生突变，突变年份主要集中在20世纪末和21世纪初，说明这一时期气温上升最为显著（图8b）。

1980-2011年三江源区降水呈微弱上升趋势（图9a），增速为2.77 mm/10a，与李珊珊研究结果一致<sup>[24]</sup>，而2000年之后降水增加显著，增速为103.9 mm/10a ( $p < 0.05$ )。其中2005年和2010年降水出现高值，与NDVI高值年份一致，说明三江源区植被生长受降水量影响较大。另据M-K检验，近12年三江源区降水发生突变（信度值为0.05），突变时间在2007年左右。逐站点分析表明：降水减少站点主要分布在源区南部，

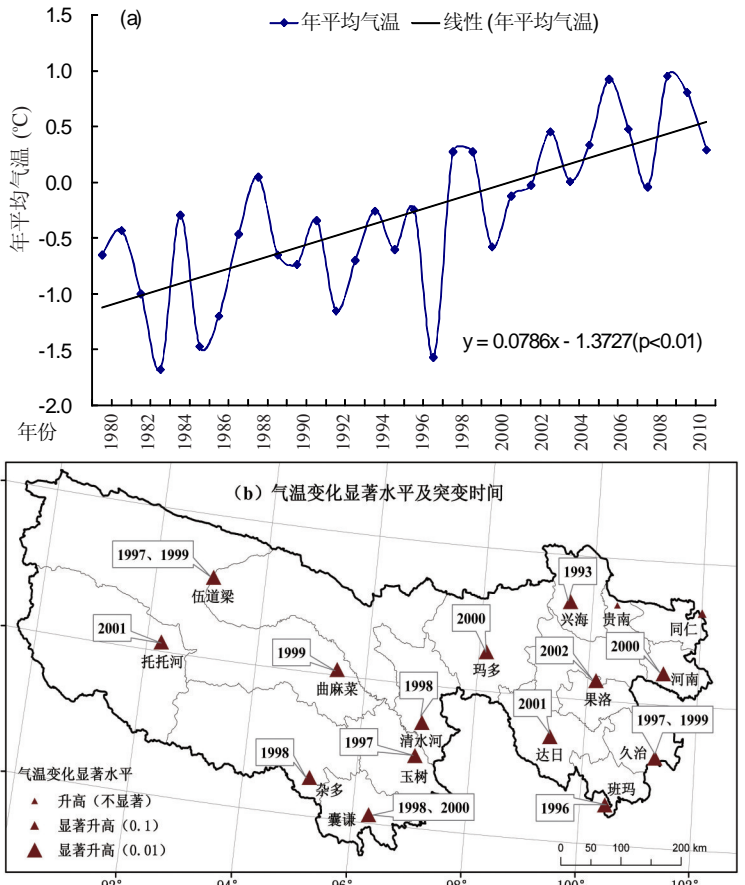


图8 三江源区气温变化趋势 (a) 及突变特征 (b) 分析

Fig. 8 Analysis of temperature change trend (a) and mutation characteristic (b) in the Three-River Headwater Region



除囊谦、玉树、同仁及班玛外,其余站点均发生突变,突变时间主要为80年代初期和21世纪初期(图9b)。

1980-2011年三江源区潜在蒸散呈微弱上升趋势(图10a),增速为7.70 mm/10a(图10a)。自20世纪90年代中期以来,气温的显著上升,导致潜在蒸散不断增加,在降水量微弱增加背景下,三江源区暖湿化趋势将有所减弱,与徐维新<sup>[25]</sup>等研究结论一致。逐站点分析表明:三江源区南部站点蒸散变化更为显著,且除托托河和同仁外,其余站点均发生突变,突变年份与降水突变年份具有相似规律(图10b)。

### 4.3 三江源区人类影响因素分析

植被覆盖变化是气候变化和人类活动共同作用的结果,尤其是人类活动影响日益剧烈的今天,植被覆盖变化深刻地记录了人类活动的烙印<sup>[12]</sup>。

畜牧业是三江源地区的主要产业,牲畜存栏数的剧增是人类活动影响的重要方面。本文分析了牲畜存栏数与植被NDVI的关系图(图11),2000-2009年牲畜存栏数量呈下降趋势,2005年之后下降趋势显著,与三江源生态保护与建设工程实施年份一致,说明生态恢复工程取得较明显效果;而2000-2009年植被NDVI呈上升趋势,说明牲畜存栏数量的下降与暖湿气候背景的叠加有利于植被的恢复。

值得注意的是:2006-2009年虽牲畜存栏数量处于较低水平,但是植被NDVI各年仍波动较大,说明近年来植被NDVI的波动主要归因于气候变化的影响。

## 5 结论与讨论

### 5.1 结论

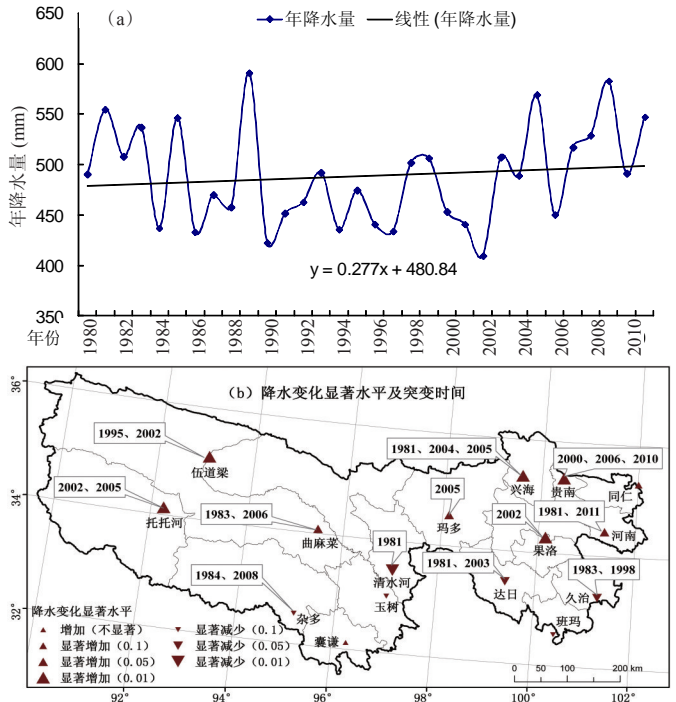


图9 三江源区降水变化趋势 (a) 及突变特征 (b) 分析  
Fig. 9 Analysis of precipitation change trend (a) and mutation characteristic (b) in the Three-River Headwater Region

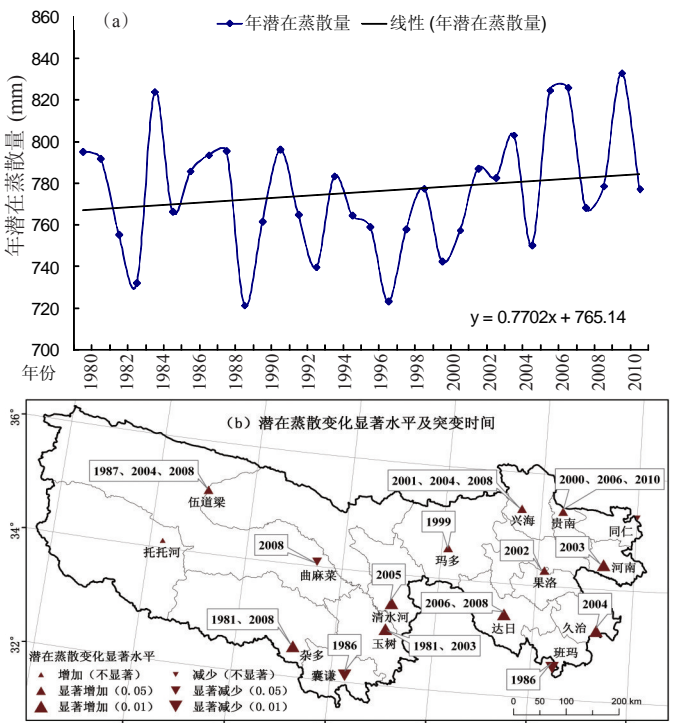


图10 三江源区潜在蒸散变化趋势 (a) 及突变特征 (b) 分析  
Fig. 10 Analysis of potential evaporation change trend (a) and mutation characteristic (b) in the Three-River Headwater Region

基于 MODIS-NDVI 数据, 辅以一元线性回归、Hurst 指数及偏相关分析方法, 从三个尺度分析了近 12 年三江源区植被变化趋势及其驱动因素。本文主要得出以下结论:

(1) 近 12 年三江源全区、长江源区、黄河源区 NDVI 均呈增加趋势, 其中长江源区增速最快, 而澜沧江源区 NDVI 呈下降趋势。东部各县 NDVI 显著高于西部各县, 且 NDVI 变化趋势大致以 34°N 为界, 以北各县呈增加趋势, 而以南各县则主要表现为退化趋势。

(2) 三江源区植被 NDVI 具有显著的区域差异, 整体表现为由东南向西北逐渐减少, 且 NDVI 频度呈现“双峰”结构。近 12 年 NDVI 变化明显的地区在囊谦县、杂多县东部、玉树县南部、以及曲麻菜、称多和治多县的交界处; 而三江源区西北部变化趋势较小。

(3) 近 12 年三江源区植被 NDVI 变化趋势的平均值为 1.2%/10a, NDVI 呈增加趋势的面积占 64.06%, 其中极显著和显著增加面积占 9.27%; NDVI 呈减少趋势的面积占 35.94%, 其中澜沧江源区 NDVI 出现了较明显的退化现象。

(4) Hurst 分析表明三江源区植被变化的反向特征显著, 植被 NDVI 变化由改善趋势转为退化趋势的区域主要分布在长江源区和黄河源区的北部, 而由退化趋势转为改善趋势的区域主要分布在澜沧江源区。

(5) 近 32 年三江源区气温上升趋势显著, 降水和潜在蒸散呈弱增加趋势, 且植被 NDVI 对降水和潜在蒸散的响应存在时滞现象, 而对气温的响应不存在时滞现象。三江源区 NDVI 受气温影响均较大, 而受降水影响则由东南向西北逐渐增大。

(6) 植被覆盖变化是气候变化和人类活动共同作用的结果, 气候暖湿化背景下, 加之人类活动的正向影响, 如“三江源自然保护区”等一系列生态保护工程的实施, 三江源区生态环境将进一步好转。

## 5.2 讨论

研究表明, 近 12 年来三江源区气温和降水均呈增加趋势, 因此三江源区气候将进入暖湿化时期, 有利于植被恢复建设, 与邵全琴等人研究结果一致<sup>[2]</sup>。而气温的升高被认为是三江源植被覆盖增加的主要因素<sup>[26]</sup>, 另外, 2005 年初国家批准的三江源自然保护区生态保护和建设规划也涉及了退牧还草、重点湿地保护、生态移民等重大工程, 因此, 在目前气候和人类活动双重有利条件下, 三江源区生态环境将进一步恢复。然而, 由于气温上升趋势显著高于降水, 因此, 可以预测, 随着气温的进一步升高, 潜在蒸散量也随之增加, 将促使三江源区呈现暖干化趋势, 进而抑制植被的生长。

## 参考文献 (References)

- [1] Liu Jiuyan, Xu Xinliang, Shao Quanqin. The spatial and temporal characteristics of grassland degradation in the Three-river Headwaters Region in Qinghai Province. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(4): 364-376. [刘纪元, 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. *地理学报*, 2008, 63(4): 364-376.]
- [2] Shao Quanqin, Zhao Zhiping, Liu Jiuyan 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. *Geographical Research*, 2010, 29(8): 1439-1451. [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. *地理研究*, 2010, 29(8): 1439-1451.]

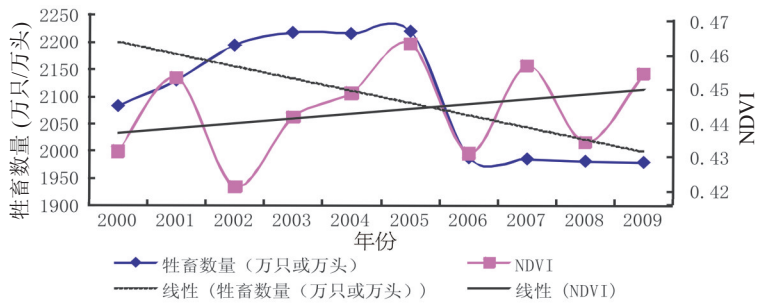


图 11 三江源区 NDVI 与牲畜数量变化图

Fig. 11 Change of NDVI and livestock quantity in the Three-River Headwater Region

- [3] IPCC. Summary for Policymakers of Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [4] Yin Yunhe, Wu Shaohong, Chen Gang et al. Attribution analyses of potential evapotranspiration changes in China since the 1960s. *Theoretical Applied Climatology*, 2010, 101: 19-28.
- [5] Zhao Xia, Tan Kun, Zhao Shuqing et al. Changing climate affects vegetation growth in the arid region of the northwestern China. *Journal of Arid Environments*, 2011, 75: 946-952.
- [6] Liu Xianfeng, Ren Zhiyuan. Vegetation coverage change and its relationship with climate factors in Northwest China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(10): 1954-1963. [刘宪锋, 任志远. 西北地区植被覆盖变化及其与气候因子的关系. *中国农业科学*, 2012, 45(10): 1954-1963.]
- [7] Cui Linli, Shi Jun, Yang Yinming et al. Ten-day response of vegetation NDVI to the variations of temperature and precipitation in eastern China. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(7): 850-860. [崔林丽, 史军, 杨引明等. 中国东部植被NDVI对气温和降水的旬响应特征. *地理学报*, 2009, 64(7): 850-860.]
- [8] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 1997, 386(6626): 698-702.
- [9] Fang Jingyun, Piao Shilong. Vegetation of China invigorated in last 20 years. *Science in China: Series C*, 2003, 33(6): 554-565. [方精云, 朴世龙. 近20年来中国植被活动在增强. *中国科学: C辑*, 2003, 33(6): 554-565.]
- [10] Yi Xiangsheng, Yin Yanyu, Li Guosheng et al. Temperature variation in recent 50 years in the Three-River Headwaters Region of Qinghai Province. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(11): 1451-1465. [易湘生, 尹衍雨, 李国胜等. 青海三江源地区近50年来的气温变化. *地理学报*, 2011, 66(11): 1451-1465.]
- [11] Zhang Geli, Xu Xingliang, Zhou Caiping et al. Responses of vegetation changes to climatic variations in Hulun Buir Grassland in past 30 years. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(1): 47-58. [张戈丽, 徐兴良, 周才平等. 近30年来呼伦贝尔地区草地植被变化对气候变化的响应. *地理学报*, 2011, 66(1): 47-58.]
- [12] Xin Zhongbao, Xu Jiongxin, Zheng Wei. Response of vegetation cover change to climate change and human activities in Loess Plateau. *Science in China: Series D*, 2007, 37(11): 1504-1514. [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: 地球科学*, 2007, 37(11): 1504-1514.]
- [13] Li Huixia, Liu Guohua, Fu Bojie. Response of vegetation to climate change and human activity based on NDVI in the Three-River Headwaters Region. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(19): 5495-5504. [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. *生态学报*, 2011, 31(19): 5495-5504.]
- [14] Piao Shilong, Mohammad A, Fang Jingyun et al. NDVI-based increase in growth of temperate grasslands and its responses to climate changes in China. *Global Environmental Change*, 2006, 16(14): 340-348.
- [15] 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. *Geographical Research*, 2007, 26(3): 500-507. [张懿锂, 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. *地理研究*, 2007, 26(3): 500-507.]
- [16] Quan Shuan, Fu Yang, Pan F F. Climate change trend in growing season and the response to grassland in the three-river headwaters. *Science in China: Series D*, 2010, 40(10): 1439-1445. [钱拴, 伏洋, PAN F F. 三江源地区生长季气候变化趋势及草地植被响应. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40(10): 1439-1445.]
- [17] Song Yi, Ma Mingguo. Variation of AVHRR NDVI and its relationship with climate in Chinese arid and cold regions. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(3): 499-506. [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. *遥感学报*, 2008, 12(3): 499-506.]
- [18] Zhang Chong, Ren Zhiyuan. Temporal and spatial differences and its trends in vegetation cover change over the Loess Plateau. *Resources Science*, 2011, 33(11): 2143-2149. [张翀, 任志远. 黄土高原地区植被覆盖变化的时空差异及未来趋势. *资源科学*, 2011, 33(11): 2143-2149.]
- [19] Li Shuangshuang, Yan Junping, Wan Jia. The spatial-temporal changes of vegetation restoration on Loess Plateau in Shaanxi-Gansu-Ningxia region. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(7): 960-970. [李双双, 延军平, 万佳. 近10年陕甘宁黄土高原区植被覆盖时空变化特征. *地理学报*, 2012, 67(7): 960-970.]
- [20] Jiang Tianhan, Deng Liantang. Some problems in estimating a Hurst Exponent: A case study of applications to climatic change. *Scientia Geographica Sinica*, 2004, 24(2): 177-182. [江田汉, 邓莲堂. Hurst指数估计中存在的若干问题——以在气候变化研究中的应用为例. *地理科学*, 2004, 24(2): 177-182.]
- [21] Allen R G, Pereira L S, Raes D et al. *Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. Rome: United Nations Food and Agriculture Organization, 1998.
- [22] Xu Jianhua. *Mathematical Method in Modern Geography*. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2002: 37-41. [徐建华. *现代地理学中的数学方法*. 2版. 北京: 高等教育出版, 2002: 37-41.]
- [23] Song Dongmei, Zhang Qian, Yang Xiuchun et al. Spatial and temporal characteristics of MODIS vegetation index in



- the source region of three rivers on Qinghai-Tibet Plateau in China. *Geographical Research*, 2011, 30(11): 2067-2075. [宋冬梅, 张茜, 杨秀春 等. 三江源区MODIS植被指数时空分布特征. *地理研究*, 2011, 30(11): 2067-2075.]
- [24] Li Shanshan, Zhang Mingjun, Wang Baolong et al. Spatial difference of precipitation variation in Three-river headwaters region of China in recent 51 years. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(10): 2635-2643. [李珊珊, 张明军, 汪宝龙 等. 近51年来三江源区降水变化的空间差异. *生态学杂志*, 2012, 31(10): 2635-2643.]
- [25] Xu Weixin, Gu Song, Su Wenjiang et al. Spatial pattern and its variations of aridity/humidity during 1971-2010 in Three-River Source Region on the Qinghai-Tibet Plateau. *Arid Land Geography*, 2012, 35(1): 46-55. [徐维新, 古松, 苏文将 等. 1971-2010年三江源地区干湿状况变化的空间特征. *干旱区地理*, 2012, 35(1): 46-55.]
- [26] Fan Jiangwen, Shao Quanqin, Liu Jiuyan et al. Assessment of effects of climate change and grazing activity on grassland yield in the Three Rivers Headwaters Region of Qinghai-Tibet Plateau. *China. Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 170: 571-584.

## The spatial-temporal changes of vegetation coverage in the Three-River Headwater Region in recent 12 years

LIU Xianfeng<sup>1,2</sup>, REN Zhiyuan<sup>1</sup>, LIN Zhihui<sup>1</sup>, LIU Yanxu<sup>1</sup>, ZHANG Donghai<sup>1</sup>

(1. College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China

2. College of Resources Science & Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** The Three-River Headwater Region is the source areas of the Yangtze River, the Yellow River, and the Lancang River. The region is not only of key importance to the ecological security of China. Due to climate change and human activities, ecological degradation occurred in this region. Therefore, "The nature reserve of Three-River Source Regions" was established, and "The project of ecological protection and construction for the Three-River Headwater Nature Reserve" was implemented by Chinese government. This study, based on MODIS-NDVI and climate data, aims to analyze the spatial-temporal changes of vegetation coverage and its driving factors in the Three-River Headwater Region between 2000 and 2011 from three dimensions. Linear regression, Hurst index and partial correlation analysis were employed. The results showed that: (1) In the past 12 years (2000-2011), the NDVI of the study area increased, with a linear tendency being 1.2%/10a, of which the Yangtze and the Yellow river source regions presented an increasing trend, while the Lancang River source region showed a decreasing trend. (2) Vegetation coverage presented an obvious spatial difference in the Three-River Headwater Region, and NDVI frequency was featured by a bimodal structure. (3) The vegetation coverage improved area was larger than the degraded area, being 64.06% and 35.94% respectively in the 12 years, and presented an increase pattern in the north and a decrease one in the south. (4) The reverse characteristic of vegetation coverage change is significant. In future, the degradation trends will be mainly found in the Yangtze River Basin and north of the Yellow River, while the improving trend areas are mainly distributed in the Lancang River Basin. (5) The response of vegetation coverage to precipitation and potential evapotranspiration has time lag, while the temperature does not have. (6) The increased vegetation coverage is mainly attributed to the warm-wet climate change and the implementation of the ecological protection project.

**Key words:** vegetation coverage; spatial-temporal change; future trend; influencing factors; the Three-River Headwater Region