

三江源草地 GNDVI 年际波动及其沿海拔梯度敏感性分析

王向涛¹, 陈懂懂^{2*}

1. 西藏农牧学院, 西藏 林芝 860000; 2. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810008

摘要: 掌握三江源草地植被变化对草地恢复和生态建设工程具有重要的指导意义。以三江源草地生长季平均 NDVI (GNDVI) 为研究对象, 基于趋势分析和偏相关分析方法, 分析了三江源区 2000—2015 年高寒草地生长季 GNDVI 年际波动及其对海拔变化的敏感性, 旨在阐明三江源高寒草地年际波动及其在不同水热组合环境下的响应规律。研究表明: 自 2000 年以来, 三江源地区暖湿化和各类生态工程的实施使得三江源区高寒草地 GNDVI 表现出上升的趋势, 由于气候、植被生理生态过程等因素的影响, 三江源区高寒草地 GNDVI 存在较大的年际波动, 其中草甸区的年际波动对三江源全区草地 GNDVI 年际波动贡献度达 75.4%, 草原区仅有 24.6%; 三江源草地 GNDVI 多年均值随海拔的升高而降低, 而 GNDVI 的变化趋势随海拔的升高而升高。低海拔地区的草地占比虽小, 但其 GNDVI 的年际波动对三江源全区高寒草地年际波动的贡献度远大于高海拔地区; 无论三江源全区、草甸区还是草原区, 低海拔地区 GNDVI 的年际波动受降雨主导, 而温度的变化是高海拔地区 GNDVI 年际波动的主导因子。

关键词: 三江源; 草地; GNDVI; 年际波动; 海拔

DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2018.08.004

中图分类号: S812.29; X171.1

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2018) 08-1411-06

引用格式: 王向涛, 陈懂懂. 2018. 三江源草地 GNDVI 年际波动及其沿海拔梯度敏感性分析[J]. 生态环境学报, 27(8): 1411-1416.
WANG Xiangtao, CHEN Dongdong. 2018. Interannual variability of GNDVI and it's relationship with altitudinal in the Three-River Headwater Region [J]. Ecology and Environmental Sciences, 27(8): 1411-1416.

三江源地区 (Three-River Headwater Region, TRH) 属于气候变化的敏感区和生态脆弱带 (孙鸿烈, 1998), 广泛分布着高寒草甸、高寒草原等植被。近几十年来, 三江源地区气候变化明显, 年均温升高, 年降水量增加 (王根绪等, 2001), 生长季均温、降水和太阳辐射均呈增加趋势, 气候变化对植被的生长发育有显著的影响 (钱拴等, 2010)。归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 对气候变化响应敏感, 能准确反映植被覆盖度、生产力等生物性状的变化 (Prince, 1991), NDVI 的变化趋势可以用来评估植被覆盖的改善或退化情况 (Alcaraz-Segura et al., 2010), 在大尺度植被活动研究中被广泛应用 (Fang et al., 2004; 毕晓丽等, 2005)。有关三江源植被 NDVI 变化已有诸多研究, 研究内容主要集中在 NDVI 年际变化当量及其影响因子方面。如: 陈琼 (2010) 分析了 1999—2008 年三江源区生长季 NDVI 与气温和降水之间的关系, 发现温度是三江源区植被生长的主导因子。钱拴 (2010) 根据 NDVI 的变化趋势分析了三江源区植被变化, 发现 2004 年以来三

江源草地处于恢复状态。

虽然近 10 年来三江源地区生长季 NDVI (Growing Season NDVI, GNDVI) 表现出上升趋势, 但由于气候、干扰、植被的生理生态过程等方面的变化, GNDVI 年际间存在较大的波动, 即年际波动 (Interannual Variability, IAV) (Yuan et al., 2009), 而目前对三江源区 GNDVI 年际波动及其对不同水热因子组合的响应模式并不清楚。海拔梯度在较小的地理范围可以引起水热组合发生变化, 不同海拔梯度的植被动态可能差距巨大。因此, 本研究收集了 2000—2015 年 GNDVI 数据和气象数据, 分析了 GNDVI 的年际波动及其在不同海拔梯度上的敏感性, 探讨了不同海拔 GNDVI 年际波动与气候因子波动之间的关系, 旨在明确主导三江源高寒草地年际波动的区域, 了解不同水热组合环境下高寒植被波动对气候变化的响应规律, 为三江源生态环境建设提供科学依据。

1 研究区简介

三江源区位于青海省南部、青藏高原的腹地, 是长江、黄河和澜沧江的发源地, 被誉为“中华水

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41761008); 青海省自然科学基金项目 (2017-JZ-939Q)

作者简介: 王向涛 (1983 年生), 男, 讲师, 研究方向为草地生态及牧草种质资源。E-mail: wxt_11@163.com

*通信作者: 陈懂懂 (1982 年生), 女, 工程师, 博士, 研究方向为土壤生态学。E-mail: chendd@nwpib

收稿日期: 2017-09-21

塔”，也是生物多样性较高、生态环境较为脆弱和敏感的地区（图 1）。地理位置介于东经 89°24′~102°23′和北纬 31°39′~36°16′之间，平均海拔 4 000 m 以上，东与甘肃、四川两省相邻，西部和南部与西藏自治区接壤。行政区包括玉树藏族自治州（曲麻莱县、治多县、称多县、囊谦县、杂多县、玉树县）、果洛藏族自治州（玛多县、玛沁县、甘德县、达日县、久治县、班玛县）及海南州的同德县、兴海县，黄南州的泽库县、河南县及格尔木市的唐古拉乡，总面积约为 $36.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。研究区为典型的高原大陆性气候，冷热两季交替，干湿分明，气温年较差小、日较差大，太阳辐射强烈、四季区分不明显。三江源地区拥有天然草地面积 $20.3 \times 10^4 \text{ hm}^2$ （徐新良等，2008），主要植物种类有莎草科嵩草属（*Kobresia* Willd.）、苔草属（*Carex* L.）和禾本科披碱草属（*Elymus* L.）等。

2 数据来源和研究方法

2.1 数据来源和处理

2.1.1 NDVI 数据

遥感数据为 NASA 提供的 MODIS（Moderate Resolution Image Spectroradiometer）NDVI 数据产品（MOD13A2），时间分辨率为月，空间分辨率为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ ，时间尺度为 2000 年 1 月 1 日—2015 年 12 月 31 日。

2.1.2 气象数据

气象数据来源于中国气象科学共享数据网，采用 ANUSPLIN 4.2 插值软件对其中 30 个气象站点的月均温、月降水数进行插值，分辨率为 1 km ，使用三江源地区矢量边界裁剪气象栅格数据。

ANUSPLIN 插值方法是基于光滑薄板样条法开发的，适用于气象因子在时间序列上的插值（刘志红等，2008）。本研究插值的气象数据来自以往研究数据，相关性分析结果表明插值数据与观测值之间呈极显著相关（李猛等，2016）。

2.1.3 其他数据

1:100 万中国植被图集、分辨率为 1 km 的三江源区 DEM 数据以及三江源地区的边界矢量图。

2.2 研究方法

2.2.1 变化趋势计算

本研究采取线性趋势线模拟三江源地区 GNDVI 在时间尺度上的变化方向和变化强度，即最小二乘方拟合曲线。计算公式为：

$$S_{\text{NDVI}} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times x_i) - \sum_{i=1}^n i \cdot \sum_{i=1}^n x_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中， S_{NDVI} 为回归趋势斜率， S_{NDVI} 为正值，说明 2000—2015 年 ANPP 呈增长趋势， S_{ANPP} 为零或负值说明 ANPP 保持不变或呈减少趋势； n 为监测时间长度； x_i 表示栅格在第 i 年的数据值。

2.2.2 年际波动计算

GNDVI 的年际波动采取去趋势化法，计算公式为：

$$\text{IAV} = Y_t - y_t \quad (2)$$

$$y_t = a + b \times t \quad (3)$$

式中，IAV 是 GNDVI 去趋势化后的年际波动； t 为时间； y_t 是 GNDVI 的拟合值； a 为拟合常数； b

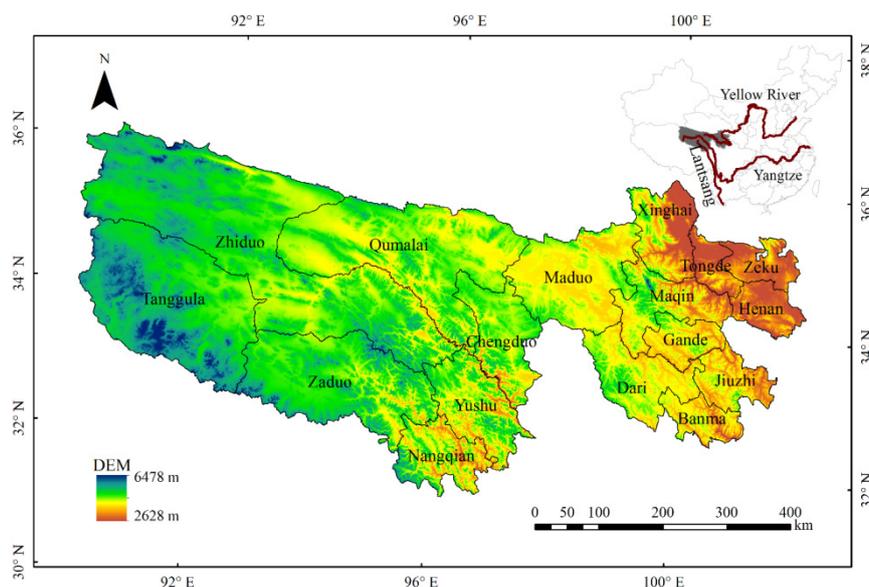


图 1 三江源地理位置

Fig. 1 Location of study area

为 GNDVI 的年际变率； Y_i 为 GNDVI 的实际值。

2.2.3 相对贡献度计算

首先计算不同植被类型 GNDVI 的年际波动对整个三江源区草地 GNDVI 年际波动的相对贡献度，再分析不同海拔梯度上 GNDVI 的年际波动对三江源区草地 GNDVI 的年际波动的贡献度 (Ahlström et al., 2015; Fu et al., 2017)。计算公式为：

$$f_i = \frac{\sum_t \frac{x_{it} | X_i}{X_i}}{\sum_t X_i} \quad (4)$$

式中， x_{it} 是第 i 个区域在 t 年 GNDVI 的年际波

动值； $X_i = \sum_i x_{it}$ 。

2.2.4 偏相关分析法

为排除相关分析时其他气象要素对第一气象要素的影响，结合各因子之间的相关系数，计算了各气象因子在时间序列上的偏相关系数。本研究对三江源全区、草甸区和草原区的 GNDVI 的年际波动与气象因子（年均温度，年总降水量）的年际波动的偏相关系数进行了计算。计算公式为：

$$r_{xyz} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1-r_{xy}^2)(1-r_{yz}^2)}} \quad (5)$$

式中， x 、 y 、 z 分别代表 GNDVI、年均温和年降水的年际波动值； r_{xyz} 为将要素 z 固定后要素 x 与 y 之间的偏相关系数； r_{xy} 、 r_{xz} 、 r_{yz} 为要素 x 与 y 、 x 与 z 、 y 与 z 之间的相关系数。

3 结果分析

3.1 GNDVI 年际波动特征

从变化趋势来看，2000—2015 年整个三江源地区 (Three Headwater Region, TRH) 草地 GNDVI

呈波动上升趋势 (图 2a)，增加趋势并不显著 ($R^2=0.20, P>0.05$)，每年可增加 0.001 5，多年平均值为 0.357；对于草甸地区和草原地区来说，2000—2015 年三江源草地 GNDVI 同样表现为波动上升 (图 2b)，草甸地区的增加幅度 ($0.001 5 a^{-1}$) 大于草原地区 ($0.000 4 a^{-1}$)，多年平均值分别为 0.428、0.124。

从年际波动来看，三江源区 GNDVI 的年际波动与三江源草甸 GNDVI 和草原 GNDVI 均存在显著相关关系 (图 2b) ($R^2=0.99, P<0.001$)，而草甸地区 GNDVI 的年际波动对三江源全区草地 GNDVI 的年际波动的相对贡献度为 75.4%，草原地区的相对贡献度仅有 24.6%。

3.2 GNDVI 年际波动与海拔之间的关系

高寒草地 GNDVI 的年际波动存在显著的空间差异，本文从整个三江源和不同植被区的空间尺度对高寒草地 GNDVI 的年际波动与海拔之间的关系进行了分析。

3.2.1 三江源区草地 GNDVI 年际波动与海拔之间的关系

三江源区高寒草地 GNDVI 的分布与海拔之间存在显著的规律性变化 (图 3a)。随着海拔的上升，GNDVI 表现为先增加后下降，在海拔为 3 800~4 000 m 时 GNDVI 达到最大值 (0.595)。从年际变化趋势看，各海拔均表现出增加的趋势，而其随海拔的变化与 GNDVI 随海拔的变化完全相反，表现为先降低后增加，相对中低海拔地区而言，高海拔的 GNDVI 的变化幅度更大。

各海拔的 GNDVI 的年际波动对高寒草地 GNDVI 年际波动的相对贡献度存在显著性差异 (图 3b)，随着海拔的上升，相对贡献度表现出显著下降趋势。低海拔地区的高寒草地虽然面积较小，但其年际波动大，决定了整个高寒草地的年际波动。

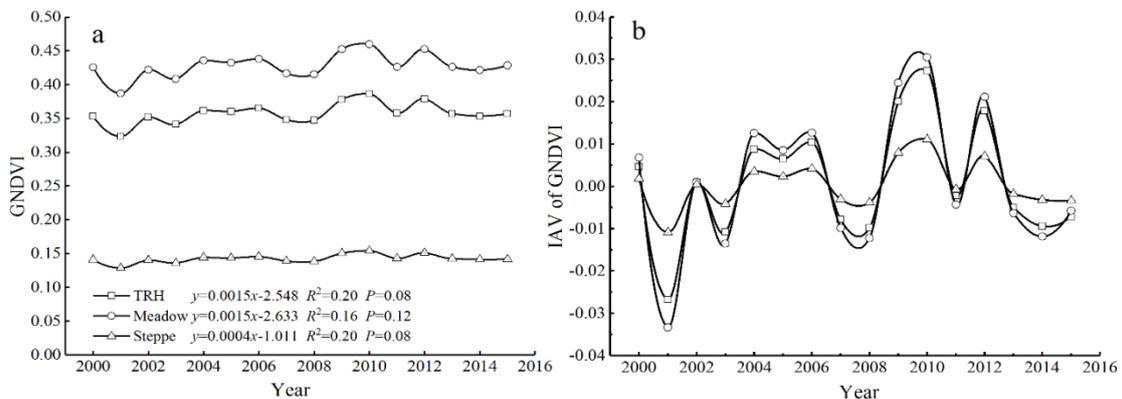


图 2 2000—2015 年三江源地区草地 GNDVI (a) 变化趋势和 (b) 年际波动
Fig. 2 Trends (a) and interannual variability (b) of grassland GNDVI in the Three-River Headwater Region

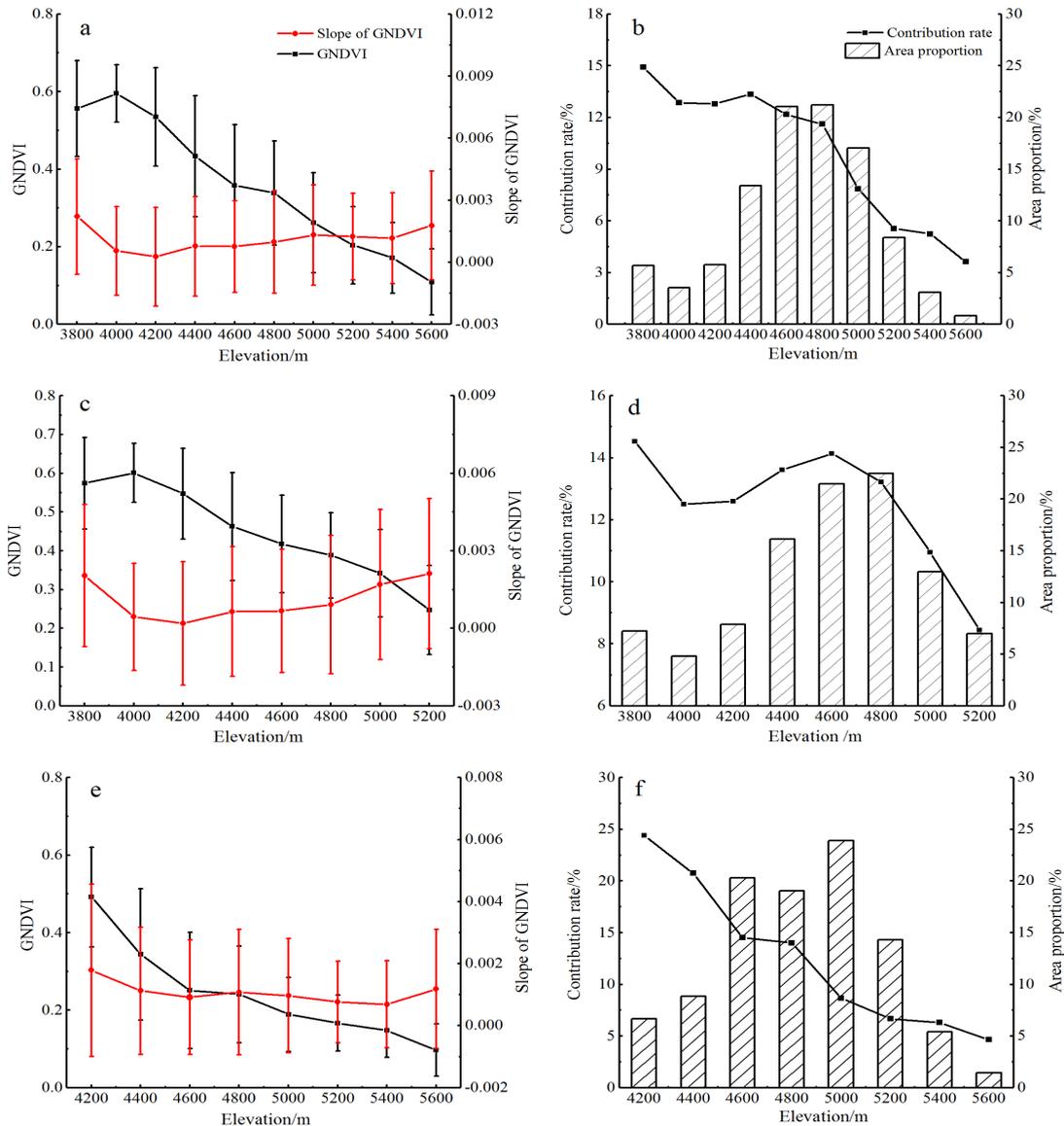


图 3 2000—2015 年三江源区 (a, b)、草甸区 (c, d) 和草原区 (e, f) GNDVI 的年际波动沿海拔变化格局
 Fig. 3 Changes of trend and IAV with different elevations in the THR region (a, b), meadow region (c, d) and steppe region (e, f)

3.2.2 不同植被类型 GNDVI 年际波动与海拔之间的关系

不同植被类型 GNDVI 年际波动的海拔敏感性存在差异性。就高寒草甸而言, GNDVI 表现为先增加后减少的变化(图 3c), 在 4000 m 开始出现转折, GNDVI 的年际变化趋势则表现出相反的变化, 年际变化趋势在 4200 m 以下表现为下降趋势, 在 4200 m 以上表现为增加趋势。草甸植被各海拔 GNDVI 的年际波动对整个草甸植被的年际波动的贡献度表现为先降低后增加再降低的变化(图 3d), 3800 m 以下区域的年际波动对草甸植被 GNDVI 的年际波动贡献度最大, 为 14.53%。

随着海拔的增加, 高寒草原 GNDVI 表现出显著减少趋势(图 3e), 而变化趋势随着海拔的变化

未表现出明显的变化。草原植被 GNDVI 的年际波动对整个草甸植被的年际波动的贡献度随着海拔的增加而降低(图 3f), 4400 m 以下区域虽然只占据整个草原区域的 15.5%, 该区域的 GNDVI 年际波动对整个草原区域 GNDVI 年际波动的贡献度达 45.2%。

3.3 不同海拔梯度 GNDVI 年际波动与气候因子之间的关系

表 1 所示为三江源地区不同海拔梯度 GNDVI 年际波动与同区域年均温度和年降水年际波动之间的偏相关关系。对于三江源高寒植被而言, 决定不同海拔 GNDVI 年际波动的气候因子并不相同, 4800 m 以下区域 GNDVI 的年际波动由降雨波动决定, 且表现出正相关关系; 海拔介于 4800 m 和 5400

表 1 不同海拔梯度 GNDVI 的年际波动与年均温和年降水的关系
Table 1 Correlation between GNDVI and mean annual temperature, mean annual precipitation with different elevations in the Three Headwater River region

Elevation/m	TRH		Meadow		Steppe	
	<i>t</i>	<i>P</i>	<i>t</i>	<i>P</i>	<i>t</i>	<i>P</i>
3 800	-0.06	0.44	-0.05	0.42	-	-
4 000	0.07	0.21	0.06	0.20	-	-
4 200	0.19	0.25	0.19	0.24	0.05	0.41
4 400	0.23	0.37	0.24	0.35	0.19	0.41
4 600	0.34	0.43	0.31	0.41	0.39	0.46
4 800	0.42	0.44	0.41	0.41	0.45	0.48
5 000	0.47	0.40	0.47	0.34	0.39	0.40
5 200	0.44	0.30	0.44	0.10	0.29	0.31
5 400	0.42	0.08	-	-	0.36	0.10
5 600	0.41	-0.44	-	-	0.40	-0.38

t: 年均温度波动 IAV of mean annual temperature; *P*: 年降水量波动 IAV of mean annual precipitation

m 之间区域 GNDVI 的年际波动与温度年际波动的偏相关系数大于与降雨年际波动的偏相关系数,说明温度是控制该区域 GNDVI 年际波动的主导因子;当海拔高于 5 400 之后,降雨波动再次成为主导因子,但与 GNDVI 年际波动之间呈负相关关系。

高寒草甸和高寒草原 GNDVI 年际波动在不同海拔上与温度和降水年际波动的偏相关性存在类似的空间分布,均表现为低海拔地区为降雨波动主导,高海拔地区为温度波动主导,但两者转折点并不相同,草甸植被的转折点为 4 800 m,而草原植被的转折点为 5 400 m。

4 讨论与结论

4.1 讨论

2000—2015 年三江源地区增温增水,在保证足够水分的同时,为植被的生长提供了更多的能量(吴珊珊等,2016)。此外,本世纪初至今,为遏制并恢复三江源地区退化的生态系统,在三江源地区实施了一系列生态工程,如退耕还草、草蓄平衡管理政策等。在气候暖湿化和生态建设工程的耦合作用下,三江源地区植被恢复明显,三江源区 GNDVI、草甸 GNDVI 和草原 GNDVI 均表现为增加趋势。同时由于气候变化、植被生理生态过程等因素的影响,三江源地区 GNDVI 的增加存在较大的年际波动。本研究对三江源草甸区和草原区 GNDVI 年际波动进行对比分析发现,草甸植被的年际波动决定了过去 16 年三江源区 GNDVI 的年际波动,其贡献度达 75.4%,草原区域对三江源区年际波动的贡献度仅有 24.6%,说明草甸地区 GNDVI 的年际波动远大于草原地区 GNDVI 的年际波动。水热条件随海拔升高表现出明显的变化(Körner, 2007),低海拔地区在三江源地区占比虽小,但由于水热组合较

为理想,更有利于高寒草地植被生长,存在较大的 GNDVI。同时,由于降雨和温度在低海拔地区存在较大的年际波动,高寒草地 GNDVI 同样存在较大的年际波动,对全区 GNDVI 的年际波动的贡献度远大于高海拔地区。随着海拔的增加,水热组合不利于植被的生长,但水条件年际波动小,故三江源区草地 GNDVI 及其年际波动均小于低海拔地区。

植被生长受光、温、水等环境因子的综合作用影响,并且会受到某一关键因子的限制。三江源是气候变化的敏感区和脆弱区,温度和降水的变化可能会导致生产力的改变,而不同海拔梯度上水热组合存在较大的差异,从而导致限制植被生产的关键因子随海拔梯度的变化而产生变化。三江源低海拔地区植被年际波动主要受降水波动的控制,主要是因为低海拔地区在低降水时往往会出现干旱胁迫,同时较高的温度引起蒸散作用的加强可进一步加剧水分胁迫,使得降雨量成为限制低海拔区域植被生长的主导因子(Wang et al., 2013; Webb et al., 1983)。然而,就三江源高海拔地区植被而言,低温会限制植被水分和营养元素的供应,同时会显著降低叶片同化 CO₂ 的日总量,从而限制植被的生长(Luo et al., 2009)。

4.2 结论

(1) 自 2000 以来,三江源生长季 NDVI (GNDVI) 呈上升趋势,同时存在较大的年际波动,其中草甸区 GNDVI 的年际波动对三江源全区的 GNDVI 的年际波动具有主导作用。

(2) 低海拔地区 GNDVI 的年际波动对三江源全区高寒草地年际波动具有主导作用。

(3) 无论是三江源全区、草甸区还是草原区,低海拔地区 GNDVI 的年际波动主要受降雨波动的影响,而高海拔地区 GNDVI 的年际波动主要受温度波动的影响。

参考文献:

- AHLSTRÖM A, RAUPACH M R, SCHURGERS G, et al. 2015. Carbon cycle. The dominant role of semi-arid ecosystems in the trend and variability of the land CO₂ sink [J]. *Science*, 348(6237): 895-899.
- ALCARAZ-SEGURA D, CHUVIECO E, EPSTEIN H E, et al. 2010. Debating the greening vs. browning of the North American boreal forest: differences between satellite datasets [J]. *Global Change Biology*, 16(2): 760-770.
- FANG J Y, PIAO S L, HE J S, et al. 2004. Increasing terrestrial vegetation activity in China, 1982—1999 [J]. *Science in China. Series C, Life Sciences*, 47(3): 229-240.
- FU Z, DONG J, ZHOU Y, et al. 2017. Long term trend and interannual variability of land carbon uptake—the attribution and processes [J]. *Environmental Research Letters*, DOI: 10.1088/1748-9326/aa5685.
- KÖRNER C. 2007. The use of 'altitude' in ecological research [J]. *Trends in*

- Ecology & Evolution, 22(11): 569-574.
- LUO T X, ZHANG L, ZHU H Z, et al. 2009. Correlations between net primary productivity and foliar carbon isotope ratio across a Tibetan ecosystem transect [J]. *Ecography*, 32(3): 526-538.
- PRINCE S D. 1991. A model of regional primary production for use with coarse resolution satellite data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 12(6): 1313-1330.
- WANG Z, LUO T, LI R, et al. 2013. Causes for the unimodal pattern of biomass and productivity in alpine grasslands along a large altitudinal gradient in semi-arid regions [J]. *Journal of Vegetation Science*, 24(1): 189-201.
- WEBB W L, LAUENROTH W K, SZAREK S R, et al. 1983. Primary Production and Abiotic Controls in Forests, Grasslands, and Desert Ecosystems in the United States [J]. *Ecology*, 64(1): 134-151.
- YUAN W P, LUO Y, RICHARDSON A D, et al. 2009. Latitudinal patterns of magnitude and interannual variability in net ecosystem exchange regulated by biological and environmental variables [J]. *Global Change Biology*, 15(12): 2905-2920.
- 毕晓丽, 王辉, 葛剑平. 2005. 植被归一化指数 (NDVI) 及气候因子相关起伏型时间序列变化分析[J]. *应用生态学报*, 16(2): 284-288.
- 陈琼, 周强, 张海峰. 2010. 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*, 19(06): 1284-1289.
- 李猛, 何永涛, 付刚, 等. 2016. 基于 TEM 模型的三江源草畜平衡分析 [J]. *生态环境学报*, 25(12): 1915-1921.
- 刘志红, TIM R. MCVICAR, LI L T, 等. 2008. 基于 ANUSPLIN 的时间序列气象要素空间插值[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 36(10): 227-234.
- 钱拴, 伏洋, PAN F F. 2010. 三江源地区生长季气候变化趋势及草地植被响应[J]. *中国科学: 地球科学*, 40(10): 1439-1445.
- 孙鸿烈. 1998. 青藏高原形成演化与发展[M]. 广州: 广东科技出版社.
- 王根绪, 李琪, 程国栋, 等. 2001. 40a 来江河源区的气候变化特征及其生态环境效应[J]. *冰川冻土*, (04): 346-352.
- 吴珊珊, 姚治君, 姜丽光, 等. 2016. 基于 MODIS 的长江源植被 NPP 时空变化特征及其水文效应[J]. *自然资源学报*, 31(1): 39-51.
- 徐新良, 刘纪远, 邵全琴, 等. 2008. 30 年来青海三江源生态系统格局和空间结构动态变化[J]. *地理研究*, 27(4): 829-838.

Interannual Variability of GNDVI and It's Relationship with Altitudinal in the Three-River Headwater Region

WANG Xiangtao¹, CHEN Dongdong²

1. XiZang Agriculture and Animal Husbandry College, Linzhi 860000, China;

2. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Science, Xining 810008, China

Abstract: Mastering the change of grassland vegetation in Three-River Headwater Region has important guiding significance for grassland restoration and ecological construction project. This study analyzed the linear trend and inter-annual variation of GNDVI with altitudinal gradient in the Three-River Headwater (TRH) Region from 2000 to 2015, the purpose of which is to clarify the interannual fluctuation of alpine grassland in TRH Region and its responses to different hydrothermal combination. The GNDVI showed an increasing trend with large inter-annual variation (IAV) due to climate factors and biological processes of vegetation. The meadow determined the IAV of TRH GNDVI rather than the steppe, and the relative contribution of meadow and steppe to the IAV of TRH GNDVI was 75.4% and 24.6%, respectively. The annual mean value of GNDVI in TRH Region decreased with elevation, while the trend of GNDVI increased with elevation. Different elevations in the TRH region, meadow area and steppe area had differential relative contributions to the IAV of GNDVI, The relative contribution of GNDVI inter-annual variations in the low-altitudinal area was much greater than that in the high-altitudinal area. The IAV of GNDVI in low-altitude areas was dominated by precipitation, while that in high-altitude areas was dominated by temperature in the TRH region.

Key words: Three-River Headwater; grassland; GNDVI; trend; interannual variation