

文章编号: 1008-2786-(2015)6-249-08

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000125

基于 SPOT-VGT NDVI 的雅鲁藏布江流域 植被动态变化

陈 斌^{1,2}, 李海东^{1*}, 曹学章¹, 唐欢欢^{1,2}

(1. 环境保护部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042; 2. 南京信息工程大学遥感学院, 江苏 南京 210044)

摘 要: 基于 SPOT-VGT NDVI 数据集、数字高程模型(DEM) 和 1:100 万植被类型数据, 综合运用 GIS 空间分析与 Mann-Kendall 非参数趋势检验方法, 提取与分析了流域不同海拔梯度和植被类型的 1999—2013 年 NDVI 的年际和季节变化特征, 探讨了高海拔大流域 NDVI 变化与高程、植被类型的相关性。结果表明: 1. 不同海拔梯度近 15 a 的 NDVI 年际变化趋势与各植被类型的相似, 均呈显著增长状态。 <3 500 m 海拔梯度 NDVI 变化的增长速率最大。 7—9 月和 10—12 月 <4 500 m 海拔梯度 NDVI 的生长期较长。 2. 阔叶林和针叶林近 15 a 的 NDVI 增长速率较大, 灌草过渡、灌丛、草甸、草原、高山植被的增长速率较小。 1—3 月的灌丛、4—6 月的草甸和草原、7—9 月的阔叶林、灌草过渡、灌丛、草甸和高山植被、10—12 月的阔叶林、针叶林、灌草过渡、灌丛、草原和高山植被近 15 a 的 NDVI 变化均呈显著增长趋势。 3. 流域 NDVI 变化具有显著的海拔梯度性和植被垂直地带性。 <3 500 m 海拔梯度的 NDVI 变化主要受针叶林、阔叶林的影响, >3 500 m 海拔梯度的 NDVI 变化主要受针叶林、灌草过渡、灌丛、草甸、高山植被的影响。

关键词: NDVI; 海拔梯度; 年际变化; 季节变化; 青藏高原

中图分类号: Q948, X144

文献标志码: A

气候变暖已导致近 20 年来的中国植被活动在增强, 尤其是青藏高原的植被覆盖度普遍增加^[1-3]。植被作为生态系统最基本的组成部分, 不仅受区域气候、水文、海拔等生境条件的制约, 同时也影响着周围的生存环境^[4-6]。已有研究表明, 气温、降水、土壤等环境条件会随着高程的增加而发生显著变化, 不同海拔梯度形成不同的植被自然垂直带谱^[7-9]。垂直带谱的变化能反映高山地区的基本特征, 是揭示山地环境结构的基本模型方法^[10]。雅鲁藏布江是世界上海拔最高的大河, 流域内生态系统类型复杂, 稀有物种和特有生境丰富多样, 植被的垂

直地带性极为显著, 是研究青藏高原生物多样性分布与气候变化响应的代表性区域。目前, 已有报道集中在流域植被格局与 NDVI 空间分布^[11]、NDVI 动态变化及其与气候因子和高程的关系^[12-13], 以及受土地风沙化的影响等^[14], 这些研究成果对认识高海拔地区植被系统对气候变化的响应具有重要意义。

然而, 高海拔大流域不同海拔梯度 NDVI 的动态变化及其与高程、植被类型的关系尚不明晰, 阻碍了全球变化背景下大流域尺度生物多样性面临的气候变化风险评估与关键栖息地变化的适应性管理。为此, 本文以雅鲁藏布江流域为研究对象, 以

收稿日期(Received date): 2015-06-11; 修回日期(Accepted): 2015-09-30。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(41301611); 江苏省自然科学基金(BK20130103)。[This project was funded by the Natural Science Foundation of China (No. 41301611), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20130103).]

作者简介(Biography): 陈斌(1988-), 男, 江西万年人, 硕士研究生, 主要从事 3S 技术在生态环境监测中的应用研究。[Chen Bin (1988-), male, born in Wannian County, Jiangxi province, master, engaged in the application of 3S technologies in the eco-environmental monitoring.]

* 通信作者(Corresponding author): 李海东(1984-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为气候变化风险评估与应对、土地退化与矿山生态恢复。[Li Haidong (1984-), male, Ph. D, associate professor, mainly engaged in risk assessment and addressing, land degradation and mine ecological protection.] E-mail: lihd2020@163.com

1999—2013 年流域尺度 *NDVI* 随海拔梯度、植被类型的年际和季节变化特征,探究植被类型与格局变化对不同海拔梯度 *NDVI* 变化的潜在影响,

1 研究区概况

雅鲁藏布江发源于喜马拉雅山脉北麓海拔约 5 750 m 的杰马央宗冰川,流域面积 $24.2 \times 10^4 \text{ km}^2$,涉及西藏自治区 41 个县(市),位于 $28^\circ 00' \sim 31^\circ 16' \text{ N}$ $82^\circ 00' \sim 97^\circ 07' \text{ E}$ 。流域地势西部高,东部低,南北高,中间低。在高空西风带和印度洋暖湿气流影响下,上下游气候条件各异,下游峡谷地区为亚热带湿润气候;中游地区属高原温带季风半干旱气候区;上游谷地为温带草原气候^[14-16]。上游地区因为受环流形势和水汽条件的限制,无暴雨产生,年降水量较小;中游河谷在米拉山的屏障作用下,潮湿的水汽难以抵达上游地区,气候的大陆性加强;下游穿行于高山峡谷,江水在南迦巴瓦峰附近骤然由东流折向南流、再转向西南流,形成了世界上罕见的马蹄形大河^[15]在我国巴昔卡出境进入印度。南迦巴瓦地区为世界植被垂直分布最精彩的地方。

流域海拔范围为 150 ~ 8 000 多 m,平均海拔 4 000 m 以上,生态格局随海拔梯度的垂直差异性显著。复杂多样的气候条件和丰富的生物多样性,造就了极其显著的流域植被分布的垂直地带性^[11,17]。上游谷底属于高寒草原和草甸,中游广大河谷区属于喜温的半干旱草原和落叶阔叶灌丛草原,下游逐渐过渡为复杂多样的森林植被和高山带

植被类型(图 1)。

2 材料与方法

2.1 数据

包括植被覆盖(*NDVI*)数据、高程数据、植被类型数据。其中 *NDVI* 数据为 1999—2013 年的 SPOT_VGT *NDVI* 来源于全球 SPOT_VGT *NDVI* 数据免费分发网站(<http://www.vgt.vito.be>)。高程数据为由 ASTER GDEM 制作的 30 m 空间分辨率的雅鲁藏布江流域数字高程模型(DEM)。植被类型数据来源于《中华人民共和国植被图(1:100 万)》的电子数据库。

2.2 研究方法

1. *NDVI* 数据预处理。使用 ENVI5.0 软件将 10 d 的旬数据合成月数据,通过 Layer Stacking 功能,把一年 12 个月的 *NDVI* 数据叠加为年数据集,用雅鲁藏布江流域边界进行区域裁切,得到 1999—2013 年流域 *NDVI* 年数据集,通过公式 $DN = (NDVI + 0.1) / 0.004$ 将 *DN* 值转换为 *NDVI* 值。

2. 海拔梯度的裁剪。基于流域 DEM 数据,通过 ArcGIS9.3 软件的空间分析功能,以 500 m 为间隔,将流域裁剪为多个海拔梯度(图 2),其中 4 500 ~ 5 000 m 和 5 000 ~ 5 500 m 的面积最大(分别为 78 493 km^2 和 71 154 km^2),占流域总面积的 31.7% 和 28.8%。鉴于 <2 000 m、2 000 ~ 2 500 m、2 500 ~ 3 000 m 和 3 000 ~ 3 500 m 的占流域总面积的比例均 <4% (均 < $0.9 \times 10^4 \text{ km}^2$),故将 4 者合并为 <

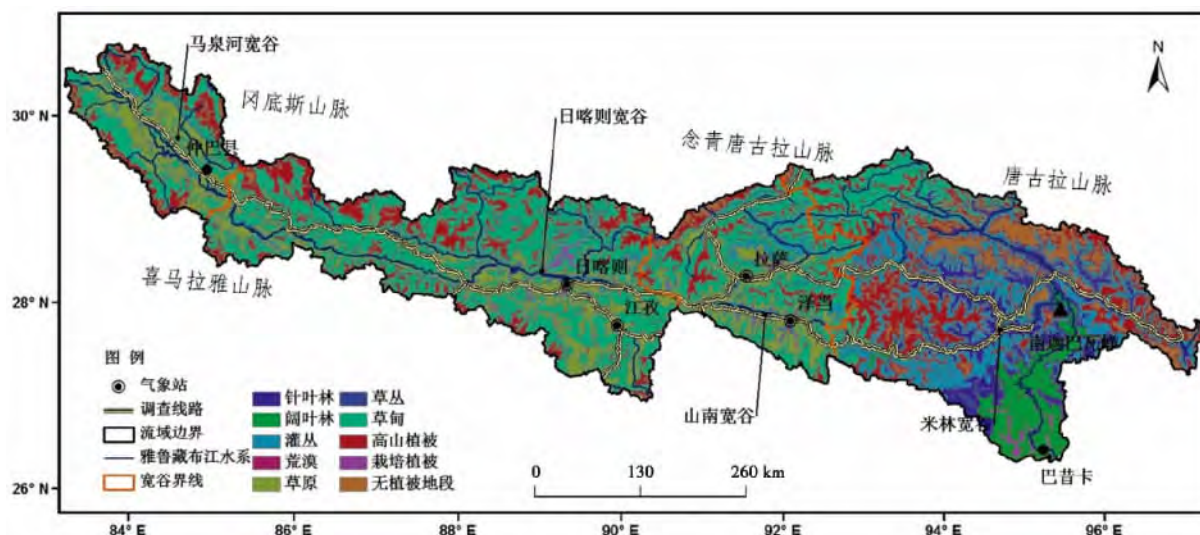


图 1 雅鲁藏布江流域主要植被类型的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of main vegetation types in the Yarlung Zangbo River basin

3 500 m, 占流域总面积的 9.3%。

3. 不同海拔梯度的 NDVI 提取。利用 6 个海拔梯度作为矢量掩膜, 对 1999—2013 年流域 NDVI 年数据集进行切割, 获取不同海拔梯度近 15 a 的 NDVI 数据集。分别提取不同季节(1—3 月、4—6 月, 7—9 月和 10—12 月, 其中 7—9 月为植被生长季)的 NDVI 均值, 同时计算出全年(1—12 月)的 NDVI 均值。共获取 1999—2013 年 6 个海拔梯度、每年 5 个(4 个季节、1 个年的 NDVI 均值), 共计 450 个 NDVI 数据。

4. 不同植被类型的 NDVI 提取。根据《中华人民共和国植被图》将植被类型划分为植被型组、植被型、群系和群丛 4 个层次。为匹配 NDVI 数据, 保证数据精度, 按植被型组和垂直带谱^[17]把流域内植被划分为 9 个植被类型(分别为针叶林、阔叶林、灌丛、灌草过渡、荒漠、草原、草丛、草甸、高山植被), 其中, 灌草过渡主要是禾草、藁草、高寒草原与亚高山各种灌丛的交错组合。由于荒漠和草丛面积较小(其面积之和 < 流域面积的 5%), 为了提高准确性, 将其一并划归为草原; 湖泊积雪和栽培植物在本文中未予以考虑, 共获取 7 个植被类型(占流域总面积的比例分别为 6.98%、4.48%、5.77%、17.04%、7.24%、33.49%、19.24%)^[11]的矢量数据, 并将其作为掩膜, 分别提取不同季节和全年的 NDVI 均值。共获取 1999—2013 年 7 个植被类型、每年 5 个 NDVI 均值数据, 共计 525 个 NDVI 数据。

5. NDVI 变化趋势检验。运用 Mann-Kendall 非参数趋势检验法(简称 M-K 检验)进行近 15 a

不同海拔梯度、植被类型 NDVI 变化的显著性检验, Z 的绝对值 ≥ 1.28、1.64 和 2.32 时, 分别表示通过了信度 90%、95% 和 99% 的显著性检验^[18]。

6. 不同海拔梯度 NDVI 变化与植被类型的相关性分析。利用 SPSS18.0 软件, 对近 1999—2013 年不同海拔梯度、植被类型 NDVI 年平均值进行 Pearson 相关分析, 其中海拔梯度 6 组、植被类型 7 组, 共涉及 630 个 NDVI 数据。

3 结果与分析

3.1 不同海拔梯度 NDVI 的年际与季节变化

由图 3(a) 和图 3(f) 可见, 近 15 a 雅鲁藏布江流域各海拔梯度的 NDVI 年际变化均呈波动式显著增长趋势($Z > 1.64$, 通过 95% 以上的显著性检验)。不同海拔梯度近 15 a NDVI 均值的大小顺序为 < 3 500 m (NDVI 为 0.62, 下同)、3 500 ~ 4 000 m (0.25)、4 000 ~ 4 500 m (0.21)、4 500 ~ 5 000 m (0.16)、5 000 ~ 5 500 m (0.11) 和 > 5 500 m (0.06), 表现为海拔越高, NDVI 越低, 反之, 海拔越低, NDVI 越高, NDVI 随高程的增大而减小(表 1)。从不同海拔梯度近 15 a 的 NDVI 年际变化来看, < 3 500 m 海拔梯度 NDVI 的增长速率最大, 拟合方程为 $y = 0.0042x + 0.59$ ($R^2 = 0.4287$); > 3 500 m 海拔梯度 NDVI 的增长速率总体减小趋势, 以 3 500 ~ 4 000 m 的较大, 拟合方程为 $y = 0.0022x + 0.2331$ ($R^2 = 0.4055$), 该海拔梯度 NDVI 的增长速率明显 < 3 500 m 的 0.004 2/a。流域 NDVI 的增长速率总体表现为随高程增大而减小、随 NDVI 的增大而减小(表 1)。

表 1 1999—2013 年不同海拔梯度近 15 年 NDVI 的均值
Tab. 1 Statistical average values of interannual and seasonal mean NDVI in different altitudinal gradients from 1999 to 2013

海拔梯度 /m	全年	季节			
		1—3 月	4—6 月	7—9 月	10—12 月
< 3 500	0.624 0	0.581 6	0.570 1	0.565 2	0.714 5
3 500 ~ 4 000	0.251 0	0.180 8	0.211 1	0.328 0	0.284 1
4 000 ~ 4 500	0.211 6	0.146 1	0.169 9	0.305 6	0.224 8
4 500 ~ 5 000	0.159 2	0.099 9	0.127 4	0.251 4	0.158 1
5 000 ~ 5 500	0.108 5	0.067 9	0.087 0	0.175 2	0.103 7
> 5 500	0.056 5	0.039 6	0.050 4	0.075 9	0.059 9

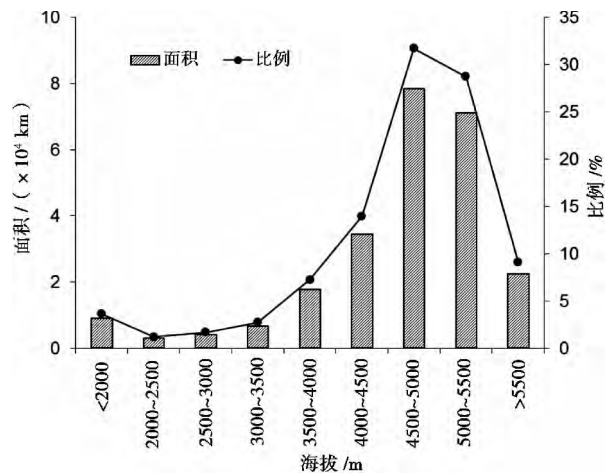


图 2 雅鲁藏布江流域不同海拔梯度的面积和比例
Fig. 2 Area and proportion of different altitudinal gradients in the Yarlung Zangbo River basin

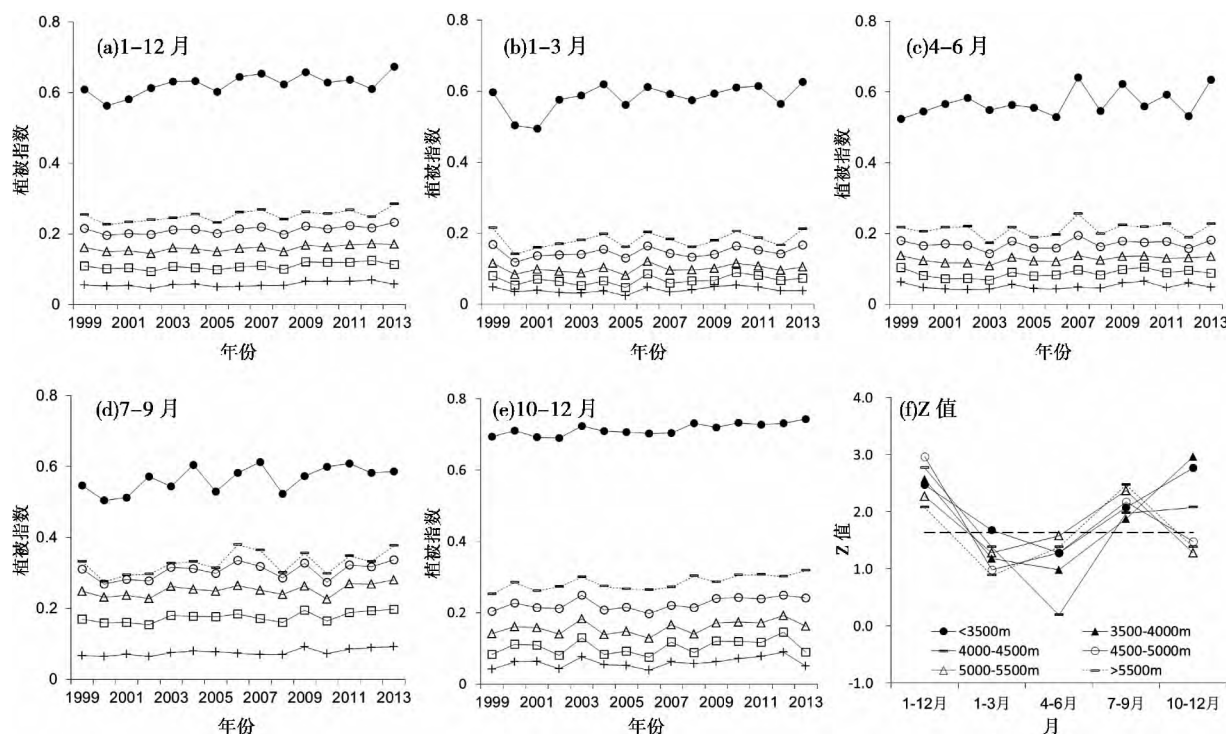


图3 1999—2013年不同海拔梯度NDVI的年际(a)、季节变化(b~e)和M-K检验的Z值(f)

Fig. 3 Change of interannual (a) and seasonal (b~e) mean NDVI in different altitudinal gradients from 1999 to 2013, and the value of Z from the Mann-Kendall non-parametric test (f)

就季节变化而言,1—3月<3500m海拔梯度、7—9月各海拔梯度、10—12月<4500m海拔梯度近15a的NDVI增长趋势显著(Z 值>1.64),1—3月>3500m海拔梯度、4—6月各海拔梯度的NDVI增长趋势则均不显著(Z 值<1.64)(图3(b~d)和图3(f))。其中,7—9月和10—12月<4500m海拔梯度两个季节的NDVI同时具有显著增长趋势。可以看出,<3500m海拔梯度有1—3月、7—9月和10—12月,3500~4500m海拔梯度有7—9月和10—12月,>4500m海拔梯度仅有7—9月的NDVI呈显著增长趋势,表明随着流域高程增大,植被的生长期在逐渐缩短。

不同季节各海拔梯度近15aNDVI大小顺序与全年的变化趋势相似,亦表现为NDVI随高程的增大而减小(表1),流域NDVI变化具有显著的垂直梯度性。<3500m海拔梯度以10—12月的NDVI最大(0.71),1—3月(0.58)次之,7—9月(0.57)和4—6月(0.57)几乎相等,仅有10—12月的NDVI高于1—12月(0.62);>3500m各海拔梯度的NDVI均以7—9月最大,10—12月次之,4—6月和1—3月较小。由图3(f)和表1可见,>3500m各海拔梯度不同季节NDVI变化的显著性与其对应海拔梯

度的NDVI大小关系密切,在NDVI较大的季节,例如7—9月和10—12月,NDVI更易表现出显著增长趋势,该季节NDVI的增长对全年NDVI增加的贡献较大。

3.2 不同植被类型NDVI的年际与季节变化

由图4(a)和图4(f)可见,近15a雅鲁藏布江流域各植被类型NDVI的年际变化趋势与不同海拔梯度的相似,亦均呈显著增长趋势(Z >1.64)。不同植被类型近15aNDVI均值的大小顺序为阔叶林(0.57)>针叶林(0.36)>灌草过渡(0.22)>灌丛(0.21)>草甸(0.15)>草原(0.14)>高山植被(0.09),表现为分布于低海拔的阔叶林、针叶林NDVI较高,高海拔的草甸、草山和高山植被NDVI较低,最高的阔叶林NDVI是高山植被的6.3倍。从不同植被类型近15a的NDVI年际变化来看,阔叶林和针叶林的增长速率较大,拟合方程分别为 $y = 0.0057x + 0.523$ ($R^2 = 0.5063$), $y = 0.0036x + 0.3283$ ($R^2 = 0.282$),灌草过渡、灌丛、草甸、草原、高山植被的增长速率均较小。总体来讲,不同植被类型NDVI的增长速率与其NDVI大小呈正相关趋势(表2)。

就季节变化而言,1—3月的灌丛、4—6月的草

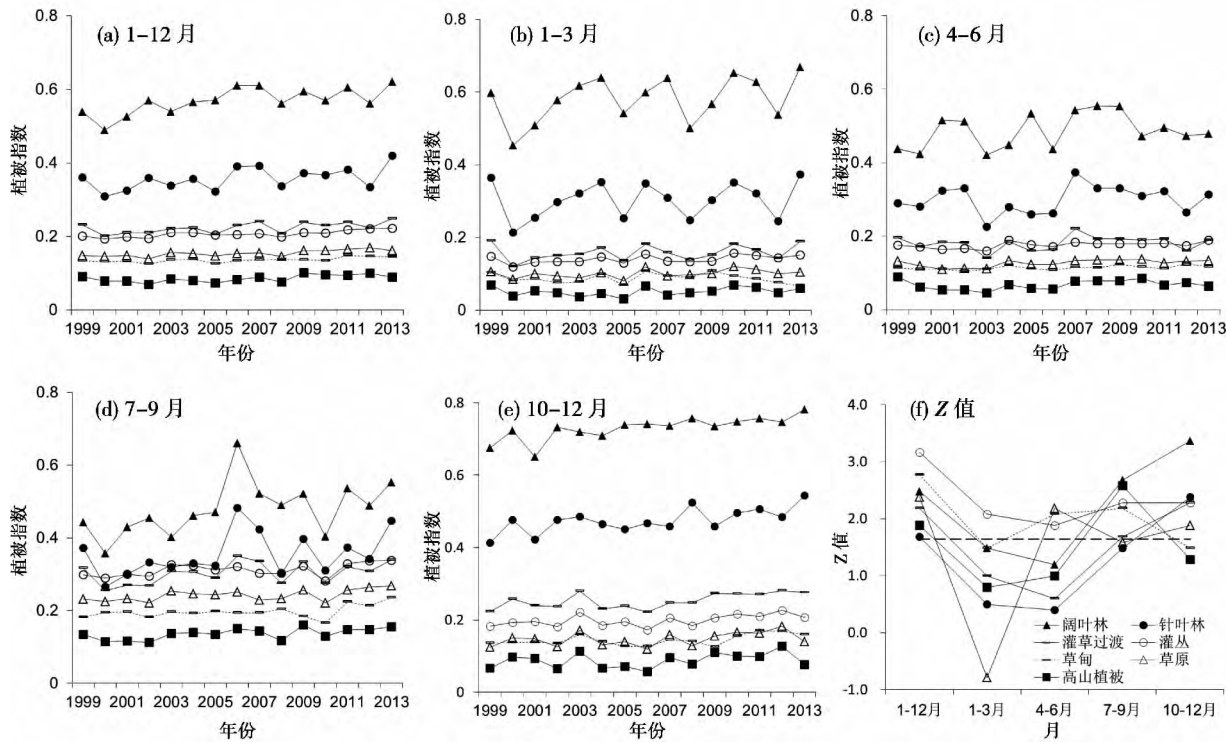


图 4 1999—2013 年不同植被类型 *NDVI* 的年际 (a)、季节变化 (b~e) 和 M - K 检验的 Z 值 (f)
Fig. 4 Change of interannual (a) and seasonal (b~e) mean *NDVI* of different vegetation types from 1999 to 2013 ,
and the value of Z from the Mann - Kendall non-parametric test (f)

甸和草原、7—9 月除针叶林和草原外的各植被类型、10—12 月除草甸和高山植被外的各植被类型近 15 a 的 *NDVI* 增长趋势显著 ($Z > 1.64$) ,1—3 月的阔叶林、针叶林、灌草过渡、草原、草甸和高山植被 , 4—6 月的阔叶林、针叶林、灌草过渡、灌丛和高山植被 7—9 月的针叶林和草原 ,10—12 月的草甸和高山植被的增长趋势则均不显著 ($Z < 1.64$) [图 4 (b) ~ (d) 和图 4 (f)]。其中 ,4—6 月和 7—9 月的草甸 ,7—9 月和 10—12 月的阔叶林、灌草过渡和灌丛 均存在两个季节的 *NDVI* 同时具有显著增长趋势; 灌丛在 7—9 月、10—12 月和 1—3 月三个季节呈连续显著增长趋势。可以看出 ,阔叶林、灌草过渡、灌丛、草甸的生长期较长 ,有利于生长量的累积。此外 ,针叶林在 10—12 月、草原在 4—6 月和 10—12 月、高山植被在 7—9 月呈显著增长趋势 ,生长期较短或不连续 ,这可能与该植被类型所在的海拔梯度、气候条件和生物学特性有关^[11, 17-18]。

不同季节各植被类型近 15 a 的 *NDVI* 均值大小顺序与 1—12 月的变化趋势相似 (表 2) ,均与流域内植被的垂直地带性分布和高程关系密切。阔叶林和针叶林均以 10—12 月的 *NDVI* 最大 (分别为

0.73、0.48) ,不同的是 ,阔叶林以 1—3 月 (0.58) 较大 ,1—3 月和 10—12 月的 *NDVI* 高于 1—12 月 (0.57) ;针叶林则以 7—9 月 (0.35) 较大 ,但仅有 10—12 月的 *NDVI* 高于 1—12 月。灌草过渡、灌丛、草甸、草原和高山植被的 *NDVI* 均以 7—9 月最大 ,10—12 月次之 ,4—6 月和 1—3 月较小。由图 4 (f) 和表 2 可见 ,7—9 月和 10—12 月各植被类型的显著性水平较高 ,与该季节的 *NDVI* 均值较大有很好的对应关系 ,亦表现为 7—9 月和 10—12 月 *NDVI* 的增长对全年 (1—12 月) *NDVI* 增加的贡献最大。

表 2 1999—2013 年不同植被类型近 15 a *NDVI* 的均值
Tab. 2 Statistical average values of interannual and seasonal mean *NDVI* of different vegetation types from 1999 to 2013

植被类型	全年	季节			
		1—3 月	4—6 月	7—9 月	10—12 月
阔叶林	0.568 7	0.582 0	0.486 4	0.479 6	0.730 3
针叶林	0.357 3	0.303 7	0.299 5	0.354 7	0.475 2
灌草过渡	0.223 5	0.158 5	0.181 0	0.303 4	0.252 8
灌丛	0.206 5	0.140 2	0.175 8	0.311 7	0.198 8
草甸	0.153 8	0.100 5	0.126 5	0.242 2	0.146 9
草原	0.135 7	0.087 9	0.113 9	0.196 8	0.144 4
高山植被	0.085 1	0.051 4	0.067 0	0.135 9	0.087 5

3.3 不同海拔梯度 NDVI 变化与植被类型的相关性

雅鲁藏布江流域各海拔梯度近 15 a NDVI 变化与植被类型的相关系数(r)见图 5(r 全部通过 95% 以上的显著性检验)。可以看出,阔叶林的 r 呈随高程增大而减小的趋势,针叶林、灌草过渡、灌丛、草原、草甸、高山植被的 r 均呈随高程增大而先增大、再减小的趋势。阔叶林在 $<3\,500\text{ m}$ 时的 r 最高(0.89),其后逐渐降低,以在 $4\,000\sim4\,500\text{ m}$ 时的 r 最小(0.71)。针叶林在 $3\,500\sim4\,000\text{ m}$ 时的 r 最高(0.95),灌草过渡在 $4\,000\sim4\,500\text{ m}$ 时的 r 最高(0.90)。灌丛的 r 以在 $<3\,500\text{ m}$,草甸、草原和高山植被的 r 以 $3\,500\sim4\,000\text{ m}$ 时最小(介于 0.60~0.72)。不同的是,灌丛、草原、草甸的 r 在 $4\,500\sim5\,000\text{ m}$ 时最高(分别为 0.90、0.83、0.95),高山植被的 r 在 $5\,000\sim5\,500\text{ m}$ 时最高(0.98),其后均随高程的增大而呈下降状态,但 r 仍然维持在 0.63 以上的较高水平。

就各海拔梯度近 15 a NDVI 变化与植被类型的 r 大小而言, $<3\,500\text{ m}$ 海拔梯度的 NDVI 变化受针叶林、阔叶林的影响较大, $3\,500\sim4\,000\text{ m}$ 海拔梯度的 NDVI 变化受灌草过渡、针叶林的影响较大, $4\,000\sim4\,500\text{ m}$ 海拔梯度的 NDVI 变化受灌草过渡、灌丛的影响较大, $4\,500\sim5\,000\text{ m}$ 海拔梯度的 NDVI 变化受草甸、高山植被和灌丛的影响较大, $>5\,000\text{ m}$ 的 2 个海拔梯度的 NDVI 变化均受草甸、高山植被的影响较大。由此可见,植被类型的差异性对不同海拔梯度 NDVI 的变化具有显著影响。

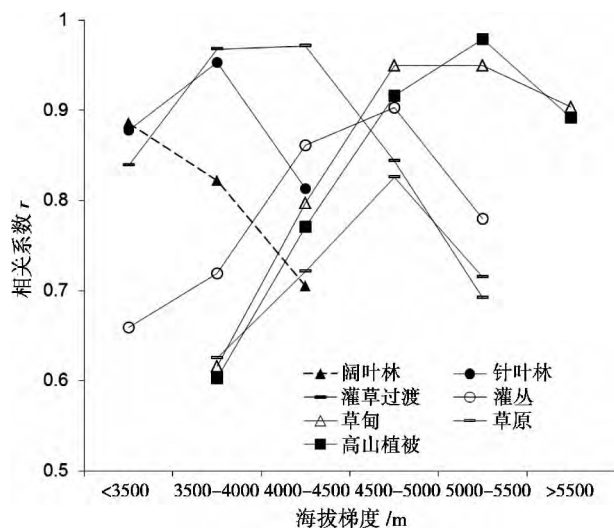


图 5 不同海拔梯度 NDVI 变化与植被类型的 Pearson 相关系数($p > 0.05$)

Fig. 5 Pearson coefficients between NDVI variations in different altitudinal gradients and vegetation types($p > 0.05$)

4 结论与讨论

4.1 结论

1. 1999—2013 年雅鲁藏布江流域各海拔梯度的 NDVI 年际变化均呈显著增长趋势。不同季节各海拔梯度近 15 a NDVI 均值的大小顺序与 1—12 月的变化趋势相同,均表现为 NDVI 随高程的增大而减小,流域 NDVI 变化具有显著的垂直梯度性。 $<3\,500\text{ m}$ 海拔梯度 NDVI 的增长速率最大, $>3\,500\text{ m}$ 海拔梯度 NDVI 的增长速率总体上随高程增大而减小,随 NDVI 的增大而减小。1—3 月 $<3\,500\text{ m}$ 、7—9 月 $>3\,500\text{ m}$ 、10—12 月 $<4\,500\text{ m}$ 各海拔梯度近 15 a 的 NDVI 增长趋势显著。7—9 月和 10—12 月 $<4\,500\text{ m}$ 海拔梯度的 NDVI 同时呈显著增长趋势,表明这两个季节 NDVI 增长对全年(1—12 月) NDVI 增加的贡献较大。

2. 雅鲁藏布江流域各植被类型近 15 a 的 NDVI 年际变化与不同海拔梯度的相似,均呈显著增长趋势。阔叶林和针叶林的增长速率较大,灌草过渡、灌丛、草甸、草原、高山植被的增长速率均较小,不同植被类型 NDVI 的增长速率与其 NDVI 大小基本呈正相关。1—3 月的灌丛,4—6 月的草甸和草原,7—9 月的阔叶林、灌草过渡、灌丛、草甸和高山植被,10—12 月的阔叶林、针叶林、灌草过渡、灌丛、草原和高山植被近 15 年的 NDVI 均呈显著增长趋势。

3. 定量揭示了植被类型对不同海拔梯度近 15 a NDVI 变化的显著影响。 $<3\,500\text{ m}$ 海拔梯度的 NDVI 变化受针叶林、阔叶林的影响较大, $3\,500\sim4\,000\text{ m}$ 海拔梯度的 NDVI 变化受灌草过渡、针叶林的影响较大, $4\,000\sim4\,500\text{ m}$ 海拔梯度的 NDVI 变化受灌草过渡、灌丛的影响较大, $4\,500\sim5\,000\text{ m}$ 海拔梯度的 NDVI 变化受草甸、高山植被和灌丛的影响较大, $>5\,000\text{ m}$ 的 2 个海拔梯度的 NDVI 变化均受草甸、高山植被的影响较大。

4.2 讨论

本研究针对高海拔大流域植被垂直地带性分布显著的特点,综合运用 GIS 空间分析与气候变化趋势检验方法,开展了雅鲁藏布江流域不同海拔梯度、植被类型 NDVI 的垂直变化研究,发现 $<3\,500\text{ m}$ 海拔梯度 NDVI 的增长速率最大, $>3\,500\text{ m}$ 海拔梯度 NDVI 的增长速率总体上随高程增加而减小, $3\,500\sim4\,500\text{ m}$ 是流域 NDVI 季节变化的过渡带。这与

陈斌等^[11]以 1 000 m 为间隔把流域划分为 5 个高程等级,结合 2009 年流域 NDVI 数据,研究指出的“3 000 m 左右是流域尺度植被格局变化的一个转折点”的结论基本吻合,进一步验证了雅鲁藏布江流域存在一个植被分布转折高程的前期研究。但本研究“以 500 m 作为高程等级划分间隔、利用近 15 a 的 NDVI 均值”得出的 3 500 m 分界点的结论更具说服力,是对前期研究的细化和有益补充,研究结果可以为气候变暖背景下不同海拔梯度的环境风险评估提供重要依据。

雅鲁藏布江流域是典型的高海拔大流域,生物多样性丰富、上下游气候条件差异较大^[11,18],是我国生物多样性保护优先区和气候变化的敏感区。相关研究表明,气候变化对高海拔地区生物多样性的影响显著,尤其是对高山带植物多样性的影响明显^[9,19-21]。本研究发现“流域 7—9 月和 10—12 月 NDVI 的增长对全年 NDVI 增加至关重要”的规律,表明雅鲁藏布江流域植被生长期结束时间存在延迟现象,这与部分年份 10 月仍有适量降水和较好的土壤水分^[6,20] 植被虽然枯黄、生长减缓,但仍维持一定的地上生长量有关。本研究从大流域尺度揭示了气候变暖背景下不同海拔梯度植被覆盖的垂直变化特征及其植被类型的影响,但仍需要从生物学角度进一步深入研究其影响机理,并结合气候变化事实和情景分析,开展高海拔大流域生物多样性应对气候变化的脆弱性与适应性评估研究。

致谢:感谢审稿专家提出的宝贵意见与建议,感谢美国国立数学生物学综合研究所(NIMBioS)姜姜博士在数据处理与分析过程中给予的指导和帮助。

参考文献(References)

- [1] 方精云,朴世龙,贺金生,等. 近 20 年来中国植被活动在增强[J]. 中国科学: C 辑, 2003, 33(6): 554-565 [Fang Jingyun, Piao Shilong, He Jinsheng, et al. The vegetation enhancement activities over the past 20 years in China[J]. Science in China(Series C), 2003, 33(6): 554-565]
- [2] 朴世龙,方精云. 最近 18 年来中国植被覆盖的动态变化[J]. 第四纪研究, 2001, 21(4): 294-302 [Piao Shilong, Fang Jingyun. Dynamic vegetation cover change over the last 18 years in China[J]. Quaternary Sciences, 2001, 21(4): 294-302]
- [3] Zhang J, Zhang Q, Yang L H et al. Seasonal characters of regional vegetation activity in response to climate change in West China in recent 20 years [J]. Journal of Geographical Sciences, 2006, 16(1): 78-86
- [4] 周伟,刚成诚,李建龙,等. 1982—2010 年中国草地覆盖度的时空动态及其对气候变化的响应[J]. 地理学报, 2014, 69(1): 15-30 [Zhou Wei, Gang Chengcheng, Li Jianlong, et al. Spatiotemporal dynamics of grassland coverage and its response to climate change in China during 1982—2010[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(1): 15-30]
- [5] 张一驰,于静洁,乔茂云,等. 黑河流域生态输水对下游植被变化影响研究[J]. 水利学报, 2011, 42(7): 757-765 [Zhang Yichi, Yu Jingjie, Qian Maoyun, et al. Effects of eco-water transfer on changes of vegetation in the lower Heihe River basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(7): 757-765]
- [6] Li Haidong, Shen Weishou, Zou Changxin, et al. Spatio-temporal variability of soil moisture and its effect on vegetation in a desertified aeolian riparian ecotone on the Tibetan Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2013, 479: 215-225
- [7] 鲍雅静,宋国宝,李政海,等. 纵向岭谷区植被覆盖的空间分异及其对气候的时滞效应[J]. 科学通报, 2007, 52(S2): 37-42 [Bao Yajing, Song Guobao, Li Zhenghai, et al. Spatial vegetation cover of the longitudinal range gorge region differentiation and the time delay effect on climate[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(S2): 37-42]
- [8] 姚永慧,张百平,谭靖,等. 长江上游山地垂直带谱及其空间分布模式[J]. 地理研究, 2009, 28(6): 1633-1643 [Yao Yonghui, Zhang Baiping, Tan Jin, et al. Pattern analysis of mountain altitudinal belts in the Upper Yangtze River[J]. Geographical Research, 2009, 28(6): 1633-1643]
- [9] 张百平. 数字山地垂直带谱研究进展[J]. 山地学报, 2008, 26(1): 12-14 [Zhang Baiping. Progress in the study on digital mountain altitudinal belts[J]. Mountain Research, 2008, 26(1): 12-14]
- [10] 张百平,周成虎,陈述彭. 中国山地垂直带信息图谱的探讨[J]. 地理学报, 2003, 58(2): 163-171 [Zhang Baiping, Zhou Chenghu, Chen Shupeng. The Geoinfospectrum of Montane Altitudinal Belts in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(2): 163-171]
- [11] 陈斌,李海东,曹学章,等. 雅鲁藏布江流域植被格局与 NDVI 分布的空间响应[J]. 中国沙漠, 2015, 35(1): 120-128 [Chen Bin, Li Haidong, Cao Xuezhang, et al. Vegetation pattern and spatial distribution of NDVI in the Yarlung Zangbo River Basin of China[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(1): 120-128]
- [12] 付新峰,杨胜天,刘昌明. 雅鲁藏布江流域 NDVI 变化与主要气候因子的关系[J]. 地理研究, 2007, 26(1): 60-66 [Fu Xinfeng, Yang Shengtian, Liu Changming. Changes of NDVI and their relations with principal climatic factors in the Yarlung Zangbo River Basin[J]. Geographical Research, 2007, 26(1): 60-66]
- [13] 吕洋,董国涛,杨胜天,等. 雅鲁藏布江流域 NDVI 时空变化及其与降水和高程的关系[J]. 资源科学, 2014, 26(3): 603-611 [Lv Yang, Dong Guotao, Yang Shengtian, et al. Spatial Temporal Variation in NDVI in the Yarlung Zangbo River Basin and Its Relationship with Precipitation and Elevation[J]. Resources Science, 2014, 26(3): 603-611]
- [14] 李海东,沈渭寿,蔡博峰,等. 雅鲁藏布江流域 NDVI 变化与风沙化土地演变的耦合关系[J]. 生态学报, 2013, 24: 7729-

- 7738 [Li Haidong, Shen Weisou, Cai Bofeng, et al. The coupling relationship between variations of NDVI and change of aeolian sandy land in the Yarlung Zangbo River Basin of Tibet, China [J]. *Acta ecologica Sinica*, 2013, 33(24): 7729–7738]
- [15] 郑维列. 雅鲁藏布江大拐弯地区蕨类植物科属区系特征分析 [J]. *云南植物研究*, 1999, 21(1): 45–52 [Zheng Weilie. Analyses of the floristic features on the families, Genera of pteridophyta from the Big Bend Region at Yalu Tsangpo River, Xizang, China [J]. *Acta Botanica Yunnanica*. 1999, 21(1): 45–52]
- [16] 王兆印, 巩同梁, 施文婧. 雅鲁藏布植被类型及与侵蚀类型的关系 [J]. *地球科学进展*, 2011, 26(11): 1208–1216 [Wang Zhaoyin, Gong Tongliang, Shi Wenjing. Typical types of vegetation and erosion in the Yalutsangpo Basin [J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(11): 1208–1216]
- [17] 李渤生. 南迦巴瓦峰地区植被垂直带谱 [J]. *山地研究(现山地学报)*, 1984, 2(3): 174–181 [Li Bosheng. The vertical spectra of vegetation in the Namjag Barwa region [J]. *Mountain Research*, 1984, 2(3): 174–181]
- [18] Shen Weishou, Li Haidong, Sun Ming, et al. Dynamics of aeolian sandy land in the Yarlung Zangbo River basin of Tibet, China from 1975 to 2008 [J]. *Global and Planetary Change*, 2012, 86–87: 37–44
- [19] 刘洋, 张健, 杨万勤. 高山生物多样性对气候变化响应的研究进展 [J]. *生物多样性*, 2009, 17(1): 88–96 [Liu Yang, Zhang Jian, Yang Wanqin. Responses of alpine biodiversity to climate change [J]. *Biodiversity*, 2009, 17(1): 88–96]
- [20] Gaur NU, Raturi GP, Bhatt AB. Quantitative response of vegetation in glacial moraine of central Himalaya [J]. *The Environmentalist*, 2003, 23: 237–247
- [21] Klanderud K. Climate change effects on species interactions in an alpine plant community [J]. *Journal of Ecology*, 2005, 93: 127–137

Dynamic Changes in Vegetation Coverage in the Yarlung Zangbo River Basin Based on SPOT – VGT NDVI

CHEN Bin^{1,2}, LI Haidong¹, CAO Xuezhong¹, TANG Huanhuan^{1,2}

(1. *Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China;*

2. *School of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)*

Abstract: In this paper, the interannual and seasonal variations of mean Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in different altitudinal gradients and different vegetation types were extracted and analyzed from 1999 to 2013, with the help of Geographical Information System (GIS) and Mann–Kendall non-parametric test method, based on SPOT–VGT NDVI data sets, 1:1 000 000 vegetation map, and Digital Elevation Model (DEM), thereafter, the correlation between NDVI variation in different altitudinal gradients and vegetation types was discussed. The results showed that, 1) The interannual variation of mean NDVI in different altitudinal gradients presents a significant increasing trend in the past fifteen years, the same as different vegetation types. The interannual increasing rate of NDVI variation in the altitudinal gradient less than 3 500 m is the largest. The growing season in the altitudinal gradients more than 4 500 m is longer than others from July to December. 2) The interannual increasing rate of mean NDVI in broad-leaved and coniferous forest is higher, while it is lower in transition of bush and grass, bush, grassland, meadow and alpine vegetation. The increasing trends of mean NDVI in different vegetation types are all significant when it points to bush from January to March, meadow and grassland from April to June, broad-leaved forest, transitions of bush and grassland, bush, meadow and alpine vegetation from July to September, broad-leaved forest, coniferous forest, transitions of bush and grassland, bush, grassland, alpine vegetation from October to December. 3) The spatial distribution and interannual variation of NDVI in the basin have the characteristics of altitudinal gradient and zonation of vertical vegetation. The variation of NDVI in the altitudinal gradient less than 3 500 m mainly affected by coniferous forest and broad-leaved forest, while it mainly affected by coniferous forest, transitions of bush and grassland, bush, meadow, alpine vegetation where altitudinal gradients are more than 3 500 m.

Key words: NDVI; altitudinal gradient; interannual variation; seasonal variation; Tibetan Plateau