



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.01.018

丁文荣,等.金沙江下段植被NDVI变化趋势及其归因[J].南水北调与水利科技,2017,15(1):107-112.
DING Weirong, et al. Study on the relationship between change trend of NDVI and environmental factors in the lower section of Jinsha River, China[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(1): 107-112. (in Chinese)

金沙江下段植被 NDVI 变化趋势及其归因

丁文荣

(云南师范大学 旅游与地理科学学院, 昆明 650500)

摘要: 基于 MODIS NDVI 数据及标准气象站数据、退耕还林资料, 辅以空间统计、叠置分析和趋势分析等方法, 研究了金沙江下段植被 NDVI 时空变化特征及其影响因素, 结果表明: 从年内来看, 金沙江下段植被 NDVI 变化呈单峰型, 3 月份为最低值 0.55, 而 9 月份为最高值 0.75, 年际上 10 年以来植被覆盖总体呈现出增长趋势, 且这种增长存在显著的空间异质性; 研究区植被覆盖较好, 植被 NDVI 平均值为 0.65, 海拔 3 850 m 以下植被覆盖随海拔上升而增加, 超过 3 850 m 后随海拔升高呈降低趋势; 年内植被 NDVI 受降水量的影响较气温更为明显, 对两者均有 2 个月的滞后期, 而年际上植被 NDVI 则受气温变化的影响较降水量更为突出, 且大规模的植被恢复工程对金沙江下段植被覆盖的增加有重要贡献。

关键词: 植被 NDVI; 气温; 降水; 人类活动; 金沙江下段

中图分类号: K903 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)01-0107-06

Study on the relationship between change trend of NDVI and environmental factors in the lower section of Jinsha River, China

DING Weirong

(College of Tourism and Geography Science, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

Abstract: Jinsha River is a key area for hydropower construction in China and an ecological barrier of Yangtze River. Based on the temperature and precipitation data from standard meteorological stations and MODIS data, this paper studied the spatiotemporal variation of vegetation NDVI and related influence factors in the lower section of Jinsha River through correlation analysis, spatial statistical analysis, overlay analysis, and other methods. The results showed that during a year, changes of NDVI showed a single peak, with the lowest value at 0.55 in March and the highest value at 0.75 in September. Over the 10 years, the vegetation coverage showed an overall growing trend. There was spatial heterogeneity in the NDVI growth. Below 3 850 m altitude, the vegetation NDVI generally gradually escalated with altitude, but it declined above 3 850 m altitude. During a year, the impact of precipitation on vegetation NDVI was more obvious than that of air temperature, and the NDVI change was two months behind the precipitation and temperature. Over the years, temperature had more prominent influence on vegetation NDVI than precipitation. Besides, the large scale conversion of farmland to forest had important contribution to the increase of NDVI in the lower section of Jinsha River.

Key words: NDVI; temperature; precipitation; human activity; Jinsha River

收稿日期: 2016-03-21 修回日期: 2016-09-09 网络出版时间: 2017-01-04
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170104.0934.014.html>

基金项目: 国家自然科学基金(41101099; 41261044); 云南省教育厅重点项目(2015Z056)

Fund: National Natural Science Foundation of China (41101099; 41261044); Key Project of Education Department of Yunnan Province (2015Z056)

作者简介: 丁文荣(1979-), 男, 云南昆明人, 副教授, 博士, 主要从事水文水资源方面的研究工作。E-mail: dingwenrong@163.com

作为陆地生态系统重要组成部分, 植被是生态系统中物质循环与能量流动的中心环节。归一化植被指数 (Normal Difference Vegetation Index, NDVI) 与生物量、叶面积指数、植被覆盖度、土地利用等密切相关, 是目前最为常用的表征植被状况的指标。诸多学者对气候因子与植被 NDVI 的关系研究发现, 降水、气温与植被 NDVI 关系最为密切, 降水对植被覆盖的影响具有滞后性, 它们之间的关系具有显著的空间差异^[1]。国外对植被覆盖空间变化方面的研究表明, 北半球中高纬地区植被活动显著增加, 气候变暖导致全球部分地区植被覆盖发生显著变化^[2], 这在我国对东北、华北、青藏高原及东北等地区的研究中也得到了验证^[3-5]。对植被 NDVI 变化与人类活动的关系研究, 现有结果表明农业生产与植被恢复会导致 NDVI 上升, 而植被分布及变化与人口密度、单位 GDP 等呈显著负相关^[6]。

金沙江流域尤其是下段作为国家水电能源建设基地、长江上游的生态屏障, 植被演变过程关乎国家能源安全与长江流域生态安全而备受瞩目。随着 1989 年长江上游水土流失重点防治区首批一期小流域综合治理工程 (“长治”工程) 正式启动, 1998 年长江流域洪水后金沙江中下游地区停止天然林商品性采伐并实施天然林保护工程 (“天保”工程), 以及 1999 年开始的 “退耕还林” 工程后, 金沙江下段植被逐步得到保护和恢复^[7-8]。但是, 这些工程实施后金沙江下段植被覆盖发生的变化及其在时空上呈现的特征, 以及这些变化的主要影响因素等问题, 到目前为止仍未弄清楚。基于此, 本文在对金沙江下段植被 NDVI 时间空间分布格局和变化特征分析的基础上, 从气候和人类活动两个方面分析植被 NDVI 变化的驱动因素, 以期为该区水电建设与生态保护提供决策依据。

1 研究区概况

本研究所指的金沙江下段为四川得荣县-九龙县-马边彝族自治县以南的金沙江流域部分, 位于 $98^{\circ}55' - 104^{\circ}55' E$ 和 $23^{\circ}30' - 29^{\circ}30' N$ 之间, 面积约 $18.87 \times 10^4 \text{ km}^2$, 海拔自东向西逐渐升高, 最高处位于稻城县贡嘎山, 海拔为 6 032 m, 而最低处为宜宾市江安县长江河谷一带, 海拔仅 236 m。区内山地和高原占总面积的 80% 以上, 平地仅占不足 20% 的面积 (图 1)。金沙江下段特别是河谷地带, 光热资源丰富, 年均温 $20 \sim 23 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\geq 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温达 $7\ 000 \sim 8\ 000 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 年日照时数 $2\ 500 \sim 2\ 700 \text{ h}$, 有利于农业发展^[9]。土壤类型以红壤、紫色土和黄棕壤为主, 海

拔 $1\ 730 \text{ m}$ 以下发育有干热区特有的土壤类型燥红土。植被类型复杂多样, 镶嵌交错分布, 山地垂直植被带完整, 发育有西南地区特有的干热河谷植被类型。近年来, 随着我国 “长治” 工程和 “天保” 工程的实施, 生态环境总体得到恢复, 但局部地段尤其是干流干旱河谷区, 恶化趋势仍未得到有效控制。

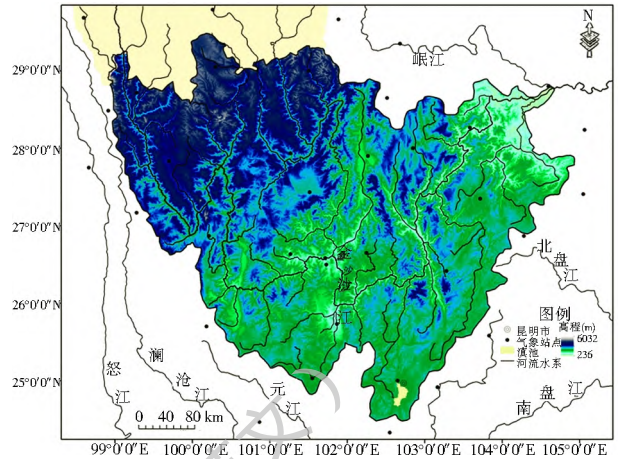


图 1 金沙江下段与采用气象站点分布

Fig. 1 Study area and location of meteorological stations

2. 数据与方法

遥感数据采用地理科学数据云 (<http://www.gscloud.cn/>) 提供的全国 MODND 1M 产品, 时间跨度为 2001 年 1 月至 2010 年 12 月, 时间分辨率为 1 月, 空间分辨率为 1 km 。对数据进行格式和投影转换, 并利用研究区边界截取金沙江下段 NDVI 数据后, 为有效消除云遮蔽、大气影响等不利因素, 对预处理好的 MODIS NDVI 数据, 采用最大合成法 MVC (Maximum Value Composites) 折算为年值 NDVI 数据^[10]。公式如下:

$$NDVI_{mi} = \max(NDVI_{ij}) \quad (1)$$

式中: $NDVI_{mi}$ 代表第 i 年的 NDVI 最大化合成值, $NDVI_{ij}$ 代表第 i 年第 j 月的 NDVI 值。

采用一元线性回归方法计算研究区每个像元年最大 NDVI 的变化趋势^[11], 公式为:

$$Slop = \left(n \cdot \sum_{i=1}^n i \cdot NDVI_i - \sum_{i=1}^n i \cdot \sum_{i=1}^n NDVI_i \right) / \left(n \cdot \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2 \right) \quad (2)$$

式中: 变量 $Slop$ 为 NDVI 变化趋势斜率; n 为研究时段年数; $NDVI_i$ 为第 i 年 NDVI 最大值。斜率为负值表示植被覆盖度下降, 反之则表示植被覆盖度上升。

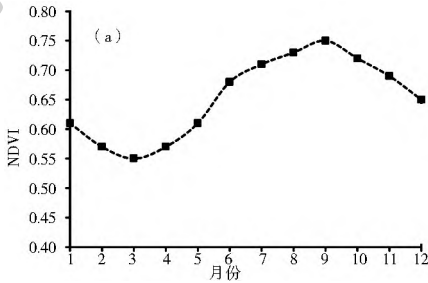
气象数据为 2001 年-2010 年金沙江下段 36 个气象站月平均气温和降水资料 (图 1), 数据源于中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.nmic.>

cn/home.do)、云南省气象局资料中心和四川省气象局,均经过严格的质量控制,包括连续性检验、极值检验和时间一致性检验。对收集到的月均气温和降水资料,累计得到对应站点的年平均气温和降水量。然后采用泰森多边形法^[12]将不同站点的气象数据转化为金沙江下段的面值气象数据。

3 植被 NDVI 时空变化特征

3.1 植被 NDVI 时间演变

植被覆盖度与 NDVI 呈正相关,可由遥感影像反演的 NDVI 充分反映,植被覆盖度愈好, NDVI 值



愈大^[13]。为揭示金沙江下段植被覆盖的变化情况,对采用最大合成法获取的研究区每个栅格的月 NDVI 值进行全区平均,得到全区的月均 NDVI 值(图 2)。从图 2a 中可以看出,就年内来看,金沙江下段 NDVI 值变化于 0.55~ 0.73 之间,3 月份为一年中的最低值 0.55,而 9 月份为最高值 0.75,呈现出明显的单峰型变化特征。3 月份达到最低值 0.55 后进入生长期,3 月- 4 月上升较慢,4 月- 6 月在一年中加速最快,6 月- 9 月微弱上升,9 月份达到峰值后生长期结束并开始下降,一直持续到翌年 3 月份。

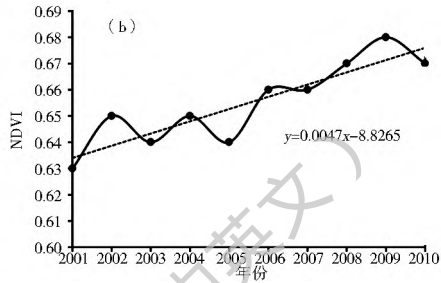


图 2 金沙江下段植被 NDVI 变化特征((a) 年内; (b) 年际)

Fig. 2 Change of NDVI in the study area ((a) annual; (b) interannual)

从年际来看,最大化 NDVI 数据散点图中(图 2 (b)),能清晰的看出在研究时段内年均植被 NDVI 波动于 0.63~ 0.68 之间,2001 年 0.63 为最低值,而 2009 年 0.68 则为最高值。年均植被 NDVI 呈现出上升的趋势,速率为 0.05/(10a)。以 2005 年为界,金沙江下段植被 NDVI 变化可以分为两个阶段,2001 年- 2005 年有小幅波动但趋势不明显,而 2006 年- 2009 年则上升趋势较为突出。

3.2 植被 NDVI 空间特征

总体而言,金沙江下段植被覆盖较好,植被

NDVI 多年平均值为 0.65(图 3(a))。其中,滇西、滇西北和雅砻江流域干流沿线植被覆盖在整个研究区相对最好,而滇东北的昭通一直延伸到四川昭觉县一带则植被覆盖相对较差。这主要与人类活动有较大关系,滇东北是云南省人口密度较高和开发最早的区域,降水量较少,喀斯特发育,故植被覆盖相对为差。而滇西、滇西北则主要以发展旅游业为主,人口密度相对较低,加之众多自然保护区,使植被得以良好保护。

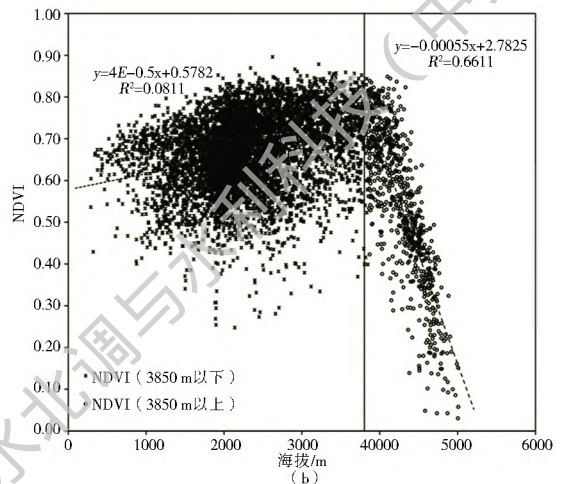
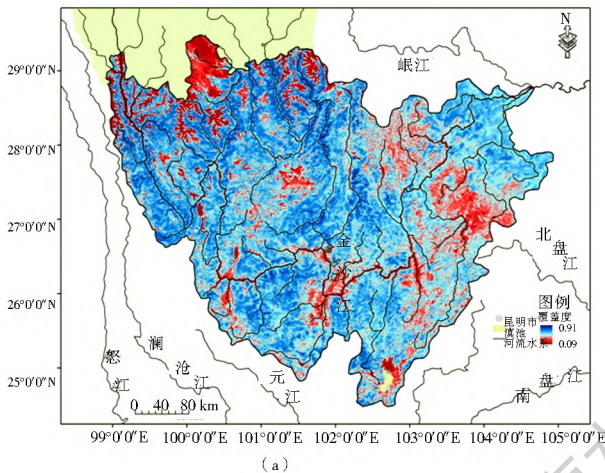


图 3 金沙江下段植被 NDVI 空间变化(a) 及其与海拔的关系(b)

Fig. 3 Spatial change of NDVI (a) and the relationship between NDVI and altitude (b)

从金沙江下段植被覆盖与海拔之间的关系来看(图 3(b)), 海拔高度为 3 850 m 左右是植被覆盖的一个转折点。3 850 m 以下植被覆盖随着海拔高度增加而覆盖度上升, 而超过 3 850 m 后则随着海拔高度的增加, 植被覆盖反而呈现降低趋势。这主要是 3 850 m 左右为亚高山针叶林和高山灌丛草甸的分界线, 海拔更高则被砾石和冰川所覆盖^[14], 植被 NDVI 因此降低。

域主要集中在 3 个区域, 分别是云南省昆明市滇池周围, 云南省桑园河、鱼泡江流域和四川省的雅砻江中下游干流沿线。采用空间统计方法, 对金沙江下段植被覆盖呈增加和减少趋势的面积分别进行统计后得知, 增加和减少的面积分别占总面积的 78. 33% 和 21. 67%。可见, 经过多年持续不断的植被恢复和保护后, 当地的植被覆盖整体上得到了有效提升。

4 植被 NDVI 变化的归因

植被 NDVI 的时空变化影响要素是多方面的, 可以概括为自然方面和人为影响方面。长时间尺度上人类活动尤其是土地开发利用影响突出, 短时间尺度上自然因素特别是降水与气温变化往往是导致植被 NDVI 变化的主控因子^[15]。

4.1 植被 NDVI 与气候变化

从图 5A 可以看出, 就气温而言金沙江下段年内气温波动于 5.8~19.7℃ 之间, 1 月份气温最低而 7 月份气温最高。从降水量来看, 11 月至次年 4 月份降水量较少, 不足全年降水量的 10%, 而降水量最多的 6 月- 8 月份, 占全年的比例高达 59. 73%。此外, 7 月份既是一年中平均气温最高的月份, 也是降水量最多的月份。对比图 2(a) 可知, 金沙江下段年内植被 NDVI 极值出现在 9 月, 而该区降雨量与气温的年内极值则出现在 7 月, 表明植被 NDVI 较降雨量和气温有 2 个月的滞后时间。

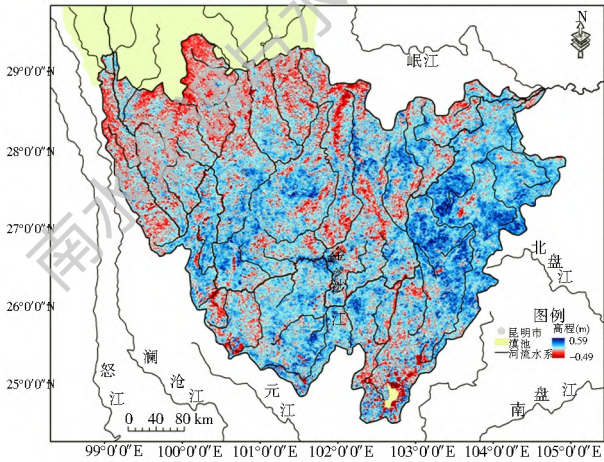


图 4 金沙江下段植被 NDVI 变化趋势

Fig. 4 Interannual change of NDVI in the lower section of Jinsha River

图 4 为金沙江下段 2001 年至 2010 年的植被 NDVI 空间变化状况。可以看出, 就整个金沙江下段来看, 植被 NDVI 以增加为主, 尤其是嵩明县-西昌市一线以东地区增加最为突出, 云南楚雄龙川江流域及丽江地区也主要表现为增加趋势。减少的区

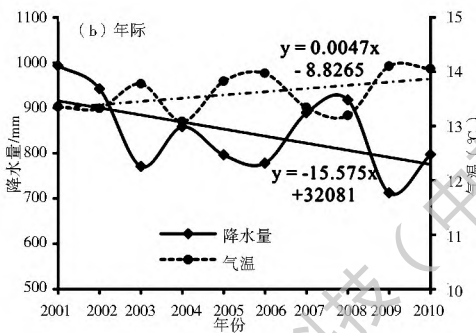
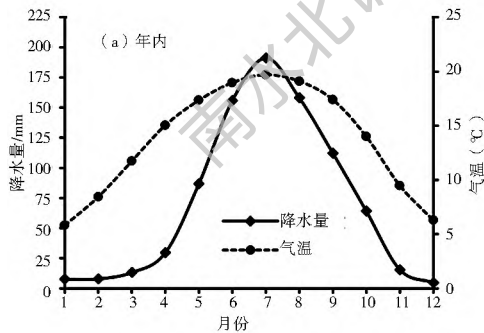


图 5 金沙江下段降水量与气温变化状况

Fig. 5 Change trend of precipitation and temperature in the study area((a) annual and; (b) interannual)

为探讨年内降水量与气温对植被 NDVI 的影响程度, 对自 2001 年 1 月至 2010 年 12 月的降水量和气温分别与植被 NDVI 进行回归分析和相关分析(图 6)。从图中可知, 月降水量和月均气温与月值 NDVI 的确定系数 R^2 分别为 0.26 和 0.17, 而相关系数则分别为 0.52 和 0.42, 故从年内来看, 植被 NDVI 受降水量的影响较气温更为明显。

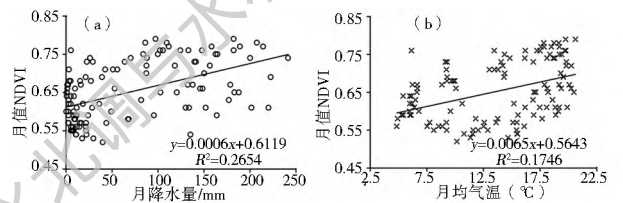


图 6 金沙江下段 NDVI 与降水量和气温之间的关系((a)降水量(b)气温)

Fig. 6 Relationship between NDVI and precipitation (a) or temperature (b)

从年降水量变化趋势来看(图 5(b)), 2001 年-2010 年金沙江下段的降水呈减少趋势, 减少速率高达 155.75 mm/(10a)。其中 2001 年降水量最多, 为 993 mm, 而 2009 年降水量仅有 712 mm, 相当于 2001 年的 71.2%。就年均气温而言, 则呈现出微弱的升高趋势, 速率为 0.05 °C/(10a)。对自 2001 年至 2010 年的降水量和气温分别与植被 NDVI 进行回归分析和相关分析后发现, 年降水量和年均气温与年值 NDVI 的确定系数 R^2 分别为 0.18 和 0.11, 而相关系数则分别为 -0.43 和 0.33。可见, 从整个研究区域来看, 降水的减少并没有影响植被覆盖度的增加, 说明短期内(2001 年-2010 年)降水的减少对植被覆盖变化并没有明显的作用, 而植被 NDVI

受气温变化的影响较降水量更为突出, 这与我国重庆市、陕北地区的研究结果基本一致^[4, 16]。

4.2 人类活动与植被 NDVI 变化

人类活动对植被的影响分为正面效应(如退耕还林还草等生态工程)和负面效应(如城市扩展、人为森林破坏等)^[17]。其中, 退耕还林还草工程对区域生态环境的恢复和改善有重要影响。研究区所属的四川省 1999 年开始退耕还林试点, 为我国最早开始退耕还林试点的三个省份之一。云南省也自 2000 年开始试点, 并于 2002 年全面启动了退耕还林工程。由于这些工程的实施, 使金沙江下段总退耕还林面积达 189 268.6 hm², 荒山荒地造林及封山育林面积分别达 296 865.9 hm² 和 39 467.1 hm²(表 1)。

表 1 金沙江下段退耕还林现状

Tab. 1 Situation of the conversion of farmland to forest in the lower section of Jinsha River

州市	统计时段	退耕地还林	荒山荒地造林	封山育林	合计
昆明市	2000 年- 2012 年	17 533.3	31 133.3	3 200.0	51 866.7
昭通市	2000 年- 2010 年	36 133.4	57 266.6	1 733.3	95 133.4
楚雄州	2000 年- 2012 年	27 200.1	43 266.7	1 000.0	71 466.7
曲靖市	2000 年- 2011 年	26 533.3	54 466.3	9 333.3	90 333.3
大理州	2000 年- 2010 年	32 533.3	44 866.7	3 000.5	80 400.2
迪庆州	2002 年- 2010 年	10 400.2	13 200.0	/	23 600.8
丽江市	2002 年- 2010 年	6 800.8	24 266.7	9 866.7	40 933.1
西昌市	1999 年- 2011 年	14 200.7	12 066.2	9 666.6	35 933.4
攀枝花市	1999 年- 2011 年	17 933.3	16 333.3	1 666.7	35 933.5

注: “/”表示无数据。

有研究显示, 在山区 7°、15°及 25°是较为明显的土壤侵蚀临界坡度值^[17], 而根据我国退耕还林政策, 规定大于 25°的陡坡耕地必须无条件地退耕, 15°~25°的陡坡耕地有选择的退耕。由此, 本研究计算了金沙江下段不同坡度范围植被 NDVI 的趋势斜率, 结果见图 7。统计结果表明, 对于金沙江下段而言, 0°~7°坡度约占总面积的 12.87%, 是区内人居和粮食生产的重要区域, 尽管植被覆盖有上升趋势, 但斜率最低(图 7)。随着坡度的升高, 平均斜率值也越来越大, 7°~35°坡度之间斜率平均值都维持在一个较高的水平, 其中 25°~35°坡度时斜率平均值最大, 为 0.005。这缘于退耕还林主要集中在有坡度及坡度比较大的区域, 而坡度 25°以上正是金沙江下段退耕还林的重点区域。充分说明了坡耕地退耕还林取得了明显的植被恢复效果, 印证了金沙江下段从 1989 年“长治”工程、1998 年“天保”工程以及 1999 年“退耕还林”工程开始试点并实施后, 大面积的植被恢复使 2000 年以后 NDVI 稳定增加, 是金沙江下段植被覆盖变化的主要因素。

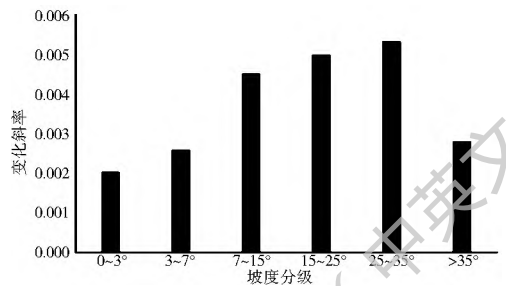


图 7 金沙江下段不同坡度 NDVI 的回归方程平均斜率

Fig. 7 Average slope of the NDVI regression equations at different gradients in the study area

5 结论

本文意在揭示 1989 年开始的“长治”工程、1998 年开始的“天保”工程和 1999 年的“退耕还林”工程实施后, 金沙江下段植被 NDVI 时空变化规律及其成因。结果如下。

(1) 年内金沙江下段 NDVI 年内变化呈单峰型, 植被 NDVI 值变化于 0.55~0.73 之间, 2001 年来金沙江下段植被覆盖总体呈现出增长趋势, 增速

为 0.05%/(10a)。

(2) 从年际来看,金沙江下段植被覆盖存在显著的空间差异,嵩明县—西昌市一线以东地区增加最为明显,减少的区域主要集中在云南省昆明市滇池周围,云南省桑园河、鱼泡江流域和四川省的雅砻江干流沿线。总体来看,金沙江下段植被覆盖呈增加和减少趋势的面积分别占总面积的 78.33% 和 21.67%。

(3) 就影响因素而言,年内时间尺度上金沙江下段植被 NDVI 受降水量的影响较气温更为明显,相对于两者有 2 个月的滞后时间。从年际时间尺度来看,植被 NDVI 受气温变化的影响较降水量更为突出,且大面积的植被恢复工程是金沙江下段植被覆盖增加的重要因素。

参考文献(References):

- [1] Nemani R, Keeling C D, Hashimoto H. Climate driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999 [J]. *Science*, 2003, 300: 1560-1563. DOI: 10.1126/science.1082750
- [2] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1999[J]. *Nature*, 1997, 386: 698-702. DOI: 10.1038/386698a0
- [3] 毛德华, 王宗明, 韩信兴, 等. 1982-2010 年中国东北地区植被 NPP 时空格局及驱动因子分析[J]. *地理科学*, 2012, 32(9): 1106-1111. (MAO Dehua, WANG Zongming, HAN Jinxing, et al. Spatiotemporal pattern of net primary productivity and its driven factors in Northeast China in 1982-1982[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(9): 1106-1111. (in Chinese)) DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2012.09.1106
- [4] 白建军, 白江涛, 王磊. 2000-2010 年陕北地区植被 NDVI 时空变化及其与区域气候的关系[J]. *地理科学*, 2014, 34(7): 882-887. (BAI Jianjun, BAI Jiangtao, WANG Lei. Spatiotemporal change of vegetation NDVI and its relations with regional climate in Northern Shaanxi Province in 2000-2010[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(7): 882-887. (in Chinese)) DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2014.07.882
- [5] 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]. *地理学报*, 2014, 32(4): 475-480. (ZHANG Xiaoke, LU Xuyang, WANG Xiaodan. The spatial and temporal variation of NDVI and its relationships to climatic factors in Northern Tibet over the period of 2000-2010: Take Shantsa for example[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 32(4): 475-480. (in Chinese))
- [6] 侯光雷, 张洪岩, 郭聃, 等. 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. Spatiotemporal 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. (in Chinese)) DOI: 10.11820/dlkxjz.2012.03.003
- [7] 戴仕宝, 杨世伦, 郜昂, 等. 近 50 年来中国主要河流入海泥沙变化[J]. *泥沙研究*, 2007, (2): 49-57. (DAI Shiba, YANG Shilun, GAO Ang. Trend of sediment flux of main rivers in China in the past 50 years [J]. *Journal of Sediment Research*, 2007, (2): 49-57. (in Chinese))
- [8] 闫云霞, 许炳心, Marwan Hasson, 等. 长江流域侵蚀产沙尺度效应的区域分异[J]. *山地学报*, 2011, 29(2): 141-153. (YAN Yunxia, XU Bingxin, Marwan Hasson, et al. Spatial variation of scale effects of sediment yield in the Yangtze River Basin [J]. *Journal of Mountain Science*, 2011, 29(2): 141-153. (in Chinese))
- [9] 张荣祖, 郑度, 杨勤业. 横断山区干旱河谷[M]. 北京: 科学出版社, 1992. (ZHANG Rongzu, ZHENG Du, YANG Qinye. The dry valleys of the Hengduan mountains region [M]. Beijing: Science Press, China., 1992. (in Chinese))
- [10] Holben B N. Characteristics of maximum value composite images from temporal AVHRR data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(11): 1417-1434. Doi: 10.1080/01431168608948945
- [11] 汪芳甜, 安萍莉, 蔡璐佳, 等. 基于 RS 与 GIS 的内蒙古武川县退耕还林生态成效监测[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(11): 269-277. (WANG Fangtian, AN Pingli, CAI Lujia, et al. Monitoring effects of ecosystem restructuring project for returning grain plots to forestry in Wuchuan county of Inner Mongolia based on RS and GIS [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(11): 269-277. (in Chinese)) DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.11.039
- [12] 朱求安, 张万昌, 赵登忠. 基于 PRISM 和泰森多边形的地形要素日降水量空间插值研究[J]. *地理科学*, 2005, 25(2): 233-238. (ZHU Qiuran, ZHANG Wangchang, ZHAO Dengzhong. Topography-based spatial daily precipitation interpolation by means of PRISM and Thiessen polygon analysis [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, 25(2): 233-238. (in Chinese)) DOI: 10.11821/yj2002050004
- [13] 甘春英, 王兮之, 李保生, 等. 连江流域近 18 年来植被覆盖度变化分析[J]. *地理科学*, 2011, 31(8): 1019-1024. (GAN Chunying, WANG Xizhi, LI Baosheng, et al. Changes of vegetation coverage during recent 18 Years in Lianjiang River Watershed [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(8): 1019-1024. (in Chinese))
- [14] 张经纬, 姜怒. 珠穆朗玛峰地区的植被垂直分带及其与水平地带关系的初步研究[J]. *植物学报*, 1973, 15(2): 221-239. (ZHANG Jingwei, JIANG Nu. A primary study on the vertical vegetation belt of Mt. Jolmo-Lungma (Everest) region and its relationship with horizontal zone [J]. *Acta Botanica Sinica*, 1973, 15(2): 221-239. (in Chinese))
- [15] 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): 1-6. (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): 1-6. (in Chinese))
- [16] 李惠敏, 刘洪斌, 王伟. 近 10 年重庆市归一化植被指数变化分析[J]. *地理科学*, 2010, 30(1): 119-123. (LI Huimin, LIU Hongbin, WU Wei. Vegetation change in the Three Gorges Reservoir area of Chongqing [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2010, 30(1): 119-123. (in Chinese)) DOI: 10.11821/yj2010080009