

1998 – 2013 年釜溪河流域植被覆盖时空演变及其驱动因子研究

王二丽^{1,2}, 刘小芳^{1,2}, 候亚妮^{1,2}, 陈光建¹, 万新¹

(1. 四川理工学院计算机学院, 四川 自贡 643000; 2. 四川理工学院江河流域生态环境的集成感知与应用院士(专家)工作站, 四川 自贡 643000)

摘要: 植被覆盖是评价生态环境的重要指标之一。基于 1998 – 2013 年 SPOT VEGETATION 数据集, 采用趋势分析、偏相关分析及计算 Hurst 指数等方法, 反演了釜溪河流域 NDVI 分布的时空格局及其变化趋势; 并结合该地区同期降水量和温度数据, 利用相关系数法对釜溪河流域植被覆盖变化的驱动因子进行分析。研究表明 1998 – 2013 年间釜溪河流域植被覆盖表现出上升趋势, 增速为 0.24%/16a; Hurst 指数计算结果显示, 流域内植被反向变化特征强于同向特征, 结合 NDVI 趋势图, 未来植被改善区域面积所占比例为 60.98%, 持续退化面积所占比重为 5.97%, 主要分布于自贡市南部及其他环绕城镇地区; 植被覆盖变化主要以非气候因子驱动型为主, 其面积所占比例为 88.48%, 而影响植被生长的气候因子中气温的作用强于降水的作用。

关键词: 植被覆盖变化; Hurst 指数; 偏相关性分析; 驱动因子; 釜溪河流域

中图分类号: TP79

文献标志码: A

引言

植被不仅是陆地生态系统的重要组成部分, 也是水循环、生物化学等能量循环的重要媒介, 在减少温室气体排放、调节碳平衡、维持气候稳定方面具有十分重要的作用^[1-2], 由于其对气候变化的敏感性, 植被覆盖动态变化已成为全球陆地生态系统监测的关键问题之一^[3]。目前国内外学者针对不同地域, 利用植被指数对植被相关变化及其与气候因子的关系进行了深入的探讨^[4-7], 研究结果均表明气候对植被生长起到了重要作用, 但部

分地区植被变化的决定性因子与人类活动密切相关。毛德华^[8]等研究表明温度是影响东北地区不同植被类型 NDVI 最重要的因子, 而严恩萍^[9]等研究成果表明对于京津风沙源重点治理区植被覆盖上升最主要的驱动因素是人类活动。不同区域植被变化驱动力通常有所不同, 大多数研究在选择研究区域时主要集中于省市^[10]、各类生态区^[11-12]、国家^[13]及全球^[14]等更为宏观的层面, 但对以流域为单元进行研究的并不多见^[15]。

釜溪河流经四川省威远县、自贡市, 是沿途区域农业灌溉、工业及生活用水的主要来源, 而近些年随着工

收稿日期: 2017-07-21

基金项目: 四川省科技厅项目(2017GZ0303); 自贡市科技局项目(2016DZ11); 江河流域生态环境的集成感知与应用院士(专家)工作站项目(2016YSGZZ02); 企业信息化与物联网测控技术四川省重点实验室项目(2016WYY01); 四川省智慧旅游研究基地项目(ZHY17-01)

作者简介: 王二丽(1991-), 女, 河北石家庄人, 硕士, 主要从事环境遥感方面的研究, (E-mail) welsuse@163.com

业建设,流域生态环境状况愈下,部分区域植被退化严重,亟需快速监测手段进行应对管理。为探究釜溪河流域植被覆盖情况,本文采用 SPOT VEGETATION 数据集,研究流域 1998-2013 年植被覆盖变化,同时结合气温、降水数据,分析流域植被气候变化的响应特征,并尝试对植被变化的驱动力进行分析,旨在为该地区生态系统的恢复、稳定及可持续发展提供科学的依据。

1 研究区域概况

釜溪河在沱江下游右岸,由旭水河和威远河在自贡市境内凤凰坝双河口处汇成干流,河长 190 公里,天然落差 360 余米,于富顺县釜溪口汇入沱江。流域面积 3490 平方公里,地势自西北向东南倾斜。釜溪河流域属于亚热带温湿气候,具有冬暖、春早、夏热、秋凉四季分明的特点,年平均气温约为 18℃,年平均降水量为 1000 mm~1080 mm,集中在 6-9 月份。研究区域如图 1 所示。

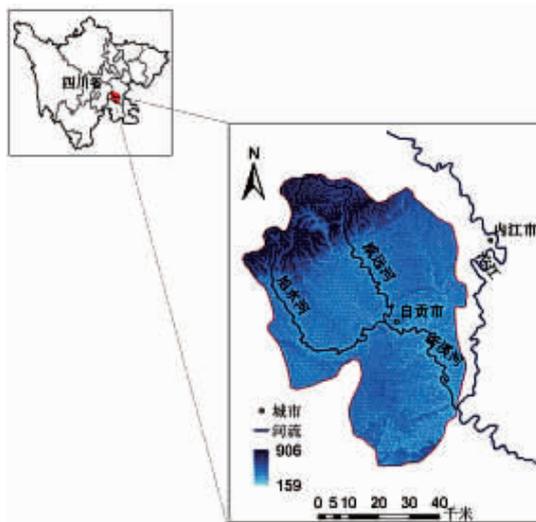


图 1 研究区域

2 研究方法

2.1 数据来源

研究所选 NDVI 数据集来源于 SPOT VGT 数据分发中心,时间跨度为 2000 年到 2013 年。根据公式 $NDVI = DN \times 0.004 - 0.1$ 将像元值转换为对应的 NDVI 值,并采用最大值合成法对产品进行处理,获取逐月最大 NDVI。降水 and 气温数据来源于中国气象数据共享网月平均温度和月降水资料,进行 Kriging 空间插值,获取与

NDVI 数据集像元大小一致、投影相同的气象栅格图像,并通过数据裁剪获得流域月平均温度和月降水量数据。

2.2 趋势分析

一元线性回归分析针对每个栅格点逐像元拟合 NDVI 的斜率,反映植被覆盖时空演变特征^[16]。计算公式为:

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

式中: n 为监测时间序列的长度, $NDVI_i$ 第 i 年 NDVI 的均值; $slope$ 是趋势线增加的斜率。

2.3 偏相关分析

地理要素之间的相关关系密切程度的测定,主要是通过计算相关系数与检验完成。用以度量除却其他因素影响,而研究单独两个要素之间的相互关系的密切程度,称为偏相关系数^[17]。计算公式为

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

式中: $r_{xy,z}$ 为变量固定后变量 x 和 y 的偏相关系数, r_{xy} 、 r_{xz} 、 r_{yz} 分别表示变量 x 和 y 、变量 x 和变量 z 、变量 y 和变量 z 的相关系数。

2.4 复相关分析

多要素间相关程度的测定通过复相关系数的计算与检验实现,复相关系数计算公式为:

$$R_{x,yz} = \sqrt{1 - (1 - r_{xy}^2)(1 - r_{xz,y}^2)} \quad (3)$$

式中: $R_{x,yz}$ 表示因变量 x 和自变量 y, z 的复相关系数, $r_{xz,y}$ 表示固定变量后 y 变量 x 和 z 的偏相关系数, r_{xy} 表示变量 x 和变量 y 的相关系数。

2.5 Hurst 指数及 R/S 分析

Hurst 指数是描述自然界自相似性和长期依赖性最有效的方法^[18],由 Hurst 提出的重标极差法(R/S)是目前估测 Hurst 指数最常用的方法^[19],其计算主要过程^[20]:

(1) 将时间序列 $\{\xi(\tau)\}$ ($\tau = 1, 2, 3, \dots, n$) 分解为 τ 个子时间序列 $X(t)$, 其中 $t = 1, \dots, \tau$ 。

(2) 计算每个子时间序列的均值:

$$(\xi)_{\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} x(t) \quad (4)$$

其中, $\tau = 1, 2, 3, \dots, n_0$

(3) 计算累计离差:

$$X(t, \tau) = \sum_{u=1}^t (\xi(u) - (\xi)_\tau) \quad (5)$$

其中, $t = 1, \dots, \tau$

(4) 计算极差:

$$R(\tau) = \max X(t, \tau) - \min X(t, \tau) \quad (6)$$

其中, $t = 1, \dots, \tau, \tau = 1, 2, 3, \dots, n_0$

(5) 计算时间序列的标准差:

$$S(\tau) = \left(\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (\xi(t) - (\xi)_\tau)^2 \right)^{1/2} \quad (7)$$

其中, $\tau = 1, 2, 3, \dots, n_0$

(6) 求取 H :

$$\frac{R(\tau)}{S(\tau)} = (c\tau)^H \quad (8)$$

根据 Hurst 及 Mandelbrot 等人的研究^[20-21], Hurst 指数 H 的值域范围在 0 ~ 1 之间, 当 H 值等于 0.5 时, 表明所研究的时间序列没有持续性, 为随机序列; 当 H 大于 0.5 时, 该时间序列表现出一致性, 而 H 小于 0.5 时, 则呈现相反的迹象。

3 结果与分析

3.1 植被覆盖时间变化特征

1998-2013 年釜溪河 NDVI 变化趋势如图 2 所示, 研究区域内植被覆盖表现出上升趋势, 但并不显著 ($R^2 = 0.1001$)。2013 年较 1998 年相比 NDVI 值增加 0.038, 平均每年以 0.0024 速度增加。1998 年到 2004 年植被变化较为剧烈, 呈波浪式推进, 2004 年达到最高值 0.752, 之后几年植被覆盖略有起伏, 2011 年下降较为明显, 整体的植被覆盖呈现良好状态。

3.2 植被覆盖空间变化特征

3.2.1 植被空间分布特征

以每年最大 NDVI 值计算得到釜溪河流域 NDVI 均值, 空间分布图如图 3(a) 所示, 16 年均值为 0.66, 最大值为 0.73。釜溪河流域植被覆盖格局整体呈现片状聚集的分布特征, 高值区主要分布于流域南部、威远河上游及自贡市北部地区, 环绕旭水河、威远河中间夹集区也有较高的 NDVI 值分布, 由于这些区域主要以耕地、林地为主, 植被长势较好, NDVI 值较大; 而低值区则主要

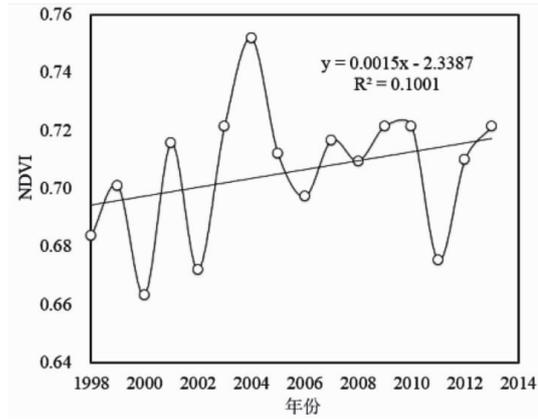


图 2 1998-2013 年釜溪河流域 NDVI 值变化趋势

分布于自贡市区、威远河中游(威远县城)及旭水河上中游(荣县县城)部分地区, 该区域土地利用类型均以城镇用地为主, 植被 NDVI 值较小。

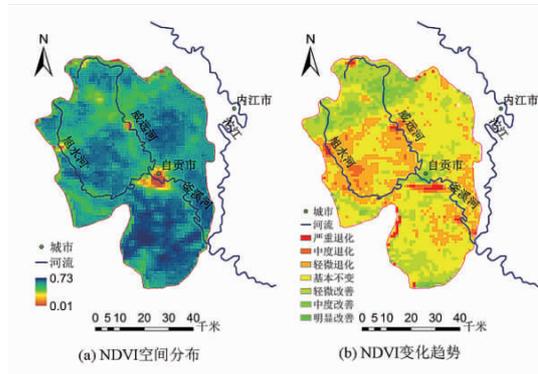


图 3 1998-2013 釜溪河流域 NDVI 空间分布及变化趋势图

为监测釜溪河流域植被覆盖变化特征, 计算 1998-2013 年植被 NDVI 趋势, 并将结果进行标准差分类, NDVI 变化趋势空间分布图如图 3(b) 所示。明显改善区域主要分布于流域东北部, 该地区地形较高, 受人类活动干预较少, 特别是近年退耕还林等政策的实施使得区域植被覆盖度得到明显的提高。而严重退化区域与植被覆盖度较低区域相一致, 主要以环绕城镇地区为主。中度退化及轻度退化区域则集中于旭水河中下游、威远河中下游及釜溪河中下游地区。釜溪河流域 NDVI 变化趋势统计结果见表 1, 结果表明流域植被覆盖所改善的面积大于退化面积, 整体改善呈上升趋势, 这与文中 3.1 所述植被时间变化特征相一致。流域植被覆盖所改善的面积(27.44%)大于退化面积(25.74%), 流域内保持不变的面积所占比重 46.82%。

表1 釜溪河流域 NDVI 变化趋势

NDVI 变化趋势	变化程度	所占百分比
$\theta_{slope} \leq -0.0063$	严重退化	1.74%
$-0.0063 < \theta_{slope} \leq -0.0032$	中度退化	2.70%
$-0.0032 < \theta_{slope} \leq -0.0001$	轻微退化	21.30%
$-0.0001 < \theta_{slope} \leq 0.0030$	基本不变	46.82%
$0.0030 < \theta_{slope} \leq 0.0061$	轻微改善	20.80%
$0.0061 < \theta_{slope} \leq 0.0093$	中度改善	6.15%
$0.0093 < \theta_{slope} \leq 0.0165$	明显改善	0.49%

3.2.2 流域未来趋势特征

上述分析主要针对近16年来釜溪河流域植被空间和时间上的分布特征,但未来趋势变化特征并不明朗,为此进一步计算植被NDVI的Hurst指数,以指示其未来变化趋势,Hurst空间分布图如图4(a)所示。釜溪河流域植被NDVI的Hurst指数值域区间为[0.22,0.75],平均值为0.46,其中Hurst指数大于0.5的像元数所占百分比为33.24%,表明研究区域植被反向变化特征强于同向特征。将釜溪河流域Hurst指数与趋势slope图进行叠加,NDVI变化特征如图4(b)所示,统计显示流域内由退化区域转为改善区域所占面积为46.23%,主要分布于旭水河、威远河、釜溪河中下游地区。而由改善转为退化区域所占面积为32.99%,持续退化面积所占比重为5.97%,主要分布于自贡市南部及其它环绕城镇地区。持续增加面积所占比重为14.75%,以流域边缘地区分布居多。

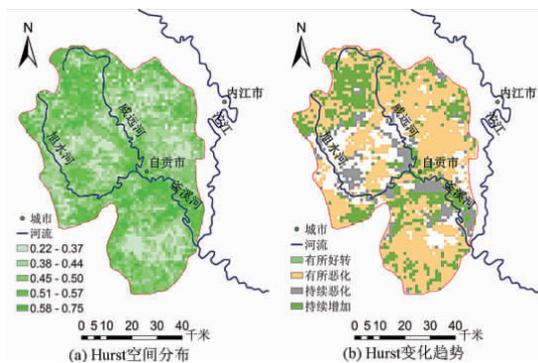


图4 Hurst 指数空间分布图及 NDVI 变化特征

3.3 气温、降水变化特征

1998-2013年釜溪河流域平均年气温为18.02℃,平均年降水量为9608.23mm,流域平均气温变化及降雨量变化如图5所示。流域气温和降水总体呈现递增趋势,但趋势并不明显,而年平均气温增长显著程度($R^2 =$

0.2671)远大于年降水量增长程度($R^2 = 0.0021$)。平均气温总体呈现上升趋势,从2000年最低气温(17.11℃)至2002年持续增长,2003年略有下降后流域气温一直递增至2006年出现峰值(18.94℃),2009年出现次高温后气温略有下降。年降雨量变化较为反复,2013年降雨量为顶峰达到13104.78mm,2006年降雨量为低谷值7080.64mm,其余时段降雨量波动较为剧烈。

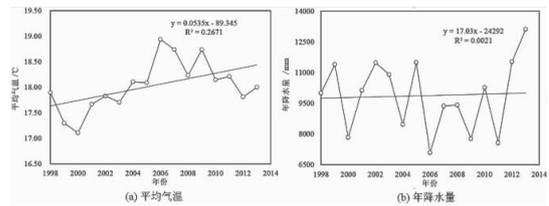


图5 1998-2013年釜溪河流域平均气温变化及降雨量变化

3.4 NDVI 与气候间的关系

根据研究区域气温、降水数据,计算NDVI与气温和降水的偏相关系数,偏相关系数空间分布如图6所示。结果显示,NDVI与气温的相关性为0.532(-0.58~0.88),与降水的相关性为0.28(-0.60~0.72)。尽管流域内NDVI与气温和降水的相关性并不高,但NDVI与气温的偏相关系数大于NDVI与降水的偏相关系数,这在一定程度表明釜溪河流域植被生长受气温的影响要强与降水的影响。

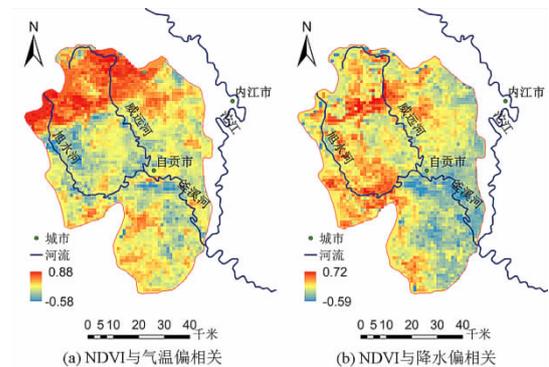


图6 NDVI 与气温、降水偏相关系数空间分布

流域内NDVI最高值出现在2004年,最低值出现在2000年,而同期的气温数据最低值与NDVI最低值相符,均出现在2000年,但气温最高值与NDVI最高年份有所差异,出现在2006年。NDVI在2006年后呈现缓慢波动上升趋势,但在2011年陡然下降,该年份降水量出现一个较小值,但气温与同期相比并没有太大差

异。这在一定程度上表明流域内植被覆盖变化并不仅仅是气候因素主导作用的结果,同时 NDVI 与气温和降水的偏相关系数较低也能从侧面阐述气候因子与 NDVI 变化趋势并不一致的现象。

为进一步阐明气候因子与 NDVI 的关系,计算复相关系数以反映 NDVI 与降水、温度间的复相关程度,复相关系数空间分布结果如图 7(a) 所示。釜溪河流域平均复相关系数为 0.34,复相关系数较大区域主要分布于威远河中上游。同时参照陈云浩、王永财^[22-23]等研究植被覆盖变化驱动分区原则及标准,对釜溪河流域植被覆盖变化进行驱动分区。流域植被覆盖驱动分区结果如图 7(b) 所示,10.1% 区域属于气温驱动型,主要呈片状集中于流域东北部、威远河上游地带。降水驱动型面积仅占流域面积的 0.38%,零星状分布于旭水河中下游地带。降水和气温驱动型所占流域面积的 1.04%,主要位于威远河中部两山夹集处。而非气候因子驱动型所占比例最大为 88.48%,基本覆盖整个流域。以上分析表明,釜溪河流域植被覆盖动态变化在一定程度、一定区域范围内受到气候因素的变异,但主要驱动因素还是非气候因子主导作用。已有研究表明退耕还林等生态工程的实施,使得流域植被覆盖率上升,而城市扩展将导致城市周围植被遭到破坏植被覆盖率降低^[24],这与釜溪河流域城镇 NDVI 值较小且有持续恶化趋势相一致。

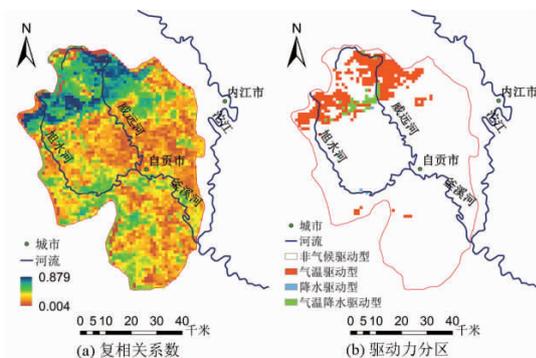


图7 复相关系数分布及驱动力分区图

4 结论与讨论

本文以 SPOT VEGETATION 数据集,辅以趋势分析、Hurst 指数及偏相关分析等方法,反演釜溪河流域

1998-2013 年 NDVI 分布时间、空间格局及其变化趋势,并结合该地区同期降水量和温度数据,采用相关系数法对釜溪河流域植被覆盖变化的驱动因子进行分析。研究表明釜溪河流域植被覆盖表现出上升、改善趋势。流域植被反向变化特征强于同向特征,植被生长受气温的影响强于降水影响,而植被覆盖驱动因素分区中非气候因子驱动型所占比例为 88.48%。

2001 年,自贡市委市政府提出“东进南移”城市发展战略,随着城市的不断推进,使得自贡市南部和东部地区呈现由改善区域转为退化区域及持续退化区域的趋势。城市发展早期由于缺少对环境的保护易导致植被遭到较严重的破坏,相关部门应该做好城市可持续发展的规划,增加园林绿化面积,加强对环境的治理,提升植被覆盖度。城镇化进程的加快促进人口的聚集,而人类对于生态环境的干预程度远高于气候因子的作用,更应在保护环境发挥正向主导作用。针对植被覆盖度持续下降区域,政府部门应积极实施生态工程,引导农民合理种植农作物,退耕还林,扩大植被覆盖率,防止水土流失及生态环境的进一步恶化。

植被覆盖变化监测是一个长期过程,文中仅针对釜溪河流域近 16 年植被空间格局变化进行了探讨,如有更长时间序列数据则可进一步揭示流域植被时空变化及其归因。植被覆盖变化必然受到除气候之外的因素影响,本文中仅仅对气候因素进行了重点阐述和说明,并未明确其他因素在流域植被动态变化中所产生的影响,如何定量区分其他因素如人类活动对植被空间格局的变化及其影响仍是进一步需要探讨的内容。

参考文献:

- [1] GODINEZ-ALVAREZ H, HERRICK J, MATTOCKS M, et al. Comparison of Three Vegetation Monitoring Methods: Their Relative Utility for Ecological Assessment and Monitoring[J]. *Ecological Indicators*, 2009, 9 (5): 1001-1008.
- [2] PENG J, LIU Z, LIU Y, et al. Trend Analysis of Vegetation Dynamics in Qinghai-Tibet Plateau Using Hurst

- Exponent[J].*Ecological Indicators*,2012,14(1):28-39.
- [3] KELLY M, TUXEN K A, STRALBERG D. Mapping Changes to Vegetation Pattern in a Restoring Wetland: Finding Pattern Metrics that are Consistent Across Spatial Scale and Time[J].*Ecological Indicators*,2011,11(2):263-273.
- [4] PARK H S, SOHN B. Recent Trends in Changes of Vegetation Over East Asia Coupled with Temperature and Rainfall Variations[J].*Journal of Geophysical Research: Atmospheres*(1984-2012),2010,115(D14).
- [5] ZHAO J, ZHANG H, ZHANG Z, et al. Spatial and Temporal Changes in Vegetation Phenology at Middle and High Latitudes of the Northern Hemisphere over the Past Three Decades [J].*Remote Sensing*,2015,7(8): 10973-10995.
- [6] 孙庆龄,李宝林,许丽丽,等.2000-2013年三江源植被 NDVI 变化趋势及影响因素分析[J].*地球信息科学学报*,2016,18(12):1707-1716.
- [7] 朱明明,侯西勇,毋亭.基于 MODIS NDVI 的中国东部植被覆盖时空变化特征[J].*遥感技术与应用*,2013,28(6):1027-1032.
- [8] 毛德华,王宗明,罗玲,等.基于 MODIS 和 AVHRR 数据源的东北地区植被 NDVI 变化及其与气温和降水间的相关分析[J].*遥感技术与应用*,2012,27(1):77-85.
- [9] 严恩萍,林辉,党永峰,等.2000~2012年京津风沙源治理区植被覆盖时空演变特征[J].*生态学报*,2014,34(17):5007-5020.
- [10] 何月,樊高峰,张小伟,等.浙江省植被 NDVI 动态及其对气候的响应[J].*生态学报*,2012,32(14):4352-4362.
- [11] 宋富强,邢开雄,刘阳,等.基于 MODIS/NDVI 的陕北地区植被动态监测与评价[J].*生态学报*,2011,31(2):354-363.
- [12] 王园香,唐世浩,郑照军.1982~2006年中国5-9月的 NDVI 变化与人类活动影响分析[J].*地球信息科学学报*,2015,17(11):1333-1340.
- [13] 刘宪锋,朱秀芳,潘耀忠,等.1982-2012年中国植被覆盖时空变化特征[J].*生态学报*,2015,35(16): 5331-5342.
- [14] SOUTHWORTH J, ZHU L, BUNTING E, et al. Changes in Vegetation Persistence Across Global Savanna Landscapes 1982~2010[J].*Journal of Land Use Science*,2016,11(1):7-32.
- [15] 符静,秦建新,张猛,等.2001~2013年洞庭湖流域植被覆盖度时空变化特征[J].*地球信息科学学报*,2016,18(9):1209-1216.
- [16] STOW D, DAESCHNER S, HOPE A, et al. Variability of the Seasonally Integrated Normalized Difference Vegetation Index Across the North Slope of Alaska in the 1990s [J].*International Journal of Remote Sensing*,2003,24(5):1111-1117.
- [17] 徐建华.计量地理学[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [18] 谢平,陈广才,雷红富.基于 Hurst 系数的水文变异分析方法[J].*应用基础与工程科学学报*,2009,17(1):32-39.
- [19] 江田汉,邓莲堂.Hurst 指数估计中存在的若干问题[J].*地理科学*,2004,24(2):177-182.
- [20] HURST H E. Long-term Storage Capacity of Reservoirs [J].*American Society of Civil Engineering*, 1951,116:770-808.
- [21] MANDELBROT B B, WALLIS J R. Robustness of the Rescaled Range R/S in the Measurement of Noncyclic Long Run Statistical Dependence[J].*Water Resources Research*,1969,5(5):967-988.
- [22] 陈云浩,李晓兵,史培军.1983~1992年中国陆地 NDVI 变化的气候因子驱动分析[J].*植物生态学报*,2001,25(6):716-720.
- [23] 王永财,孙艳玲,王中良.1998-2011年海河流域植被覆盖变化及气候因子驱动分析[J].*资源科学*,

2014,36(3):594-620.

区植被覆盖时空变化特征及其归因[J].地理学报,

[24] 刘宪峰,潘耀忠,朱秀芳,等.2000-2014年秦巴山

2015,70(5):705-716.

The Spatiotemporal Changes of Vegetation Cover and Climate Factor Drivers of Variation in Fuxi River Basin From 1998-2013

WANG Erli^{1,2}, LIU Xiaofang^{1,2*}, HOU Yani^{1,2}, CHEN Guangjian¹, WAN Xin¹

(1. School of Computer Science, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China;

2. Sichuan Provincial Academician(Expert) Workstation-Integrated Perception and Application of Eco-Environment in River Basins, Zigong 643000, China)

Abstract: Vegetation coverage is an important index to evaluate the environment. On the basis of SPOT VEGETATION from 1998 to 2013, distribution, spatial pattern and trends of NDVI were analyzed by the methods of trend analysis, Hurst exponent and partial correlation analysis in Fuxi River Basin. Combined with precipitation and temperature, vegetation cover change driving factors were analyzed using correlation coefficient. The result indicates that vegetation cover shows a rising trend and the growth rate is 0.24%/16a. Hurst exponent shows that the reverse characteristics of vegetation coverage change are stronger than the same characteristic in Fuxi River Basin, and 60.98% of the total area will follow a continuous increasing trend with the slope of NDVI. The proportion of persistent degradation area is 5.97%, mainly distributed in the southern part of Zigong and surrounding towns. Vegetation cover change is mainly driven by non-climatic factors, which accounting for 88.48% of the entire area. The growth of vegetation is more effected by temperature than precipitation in the climatic factors.

Key words: vegetation coverage; Hurst index; partial correlation analysis; driven factor; Fuxi River Basin