

泾河流域植被覆盖动态变化特征及其与降雨的关系

陈操操^{1,2}, 谢高地¹, 甄霖¹, 耿艳辉^{1,2}, 冷允法¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 植被退化是全球环境变化研究的一个重点问题, 植被状况是环境评估的重要指标。利用 8km 分辨率的 NOAA-AVHRR/NDVI 时间序列数据, 对位于黄土高原的泾河流域 1982~2003 年植被特征及变化状况进行系统分析, 并在此基础上评估降雨与流域植被的相互关系。研究主要利用了变化斜率法、主成分分析法和相关分析法, 得到如下结论: 过去 22a 来流域植被 NDVI 均值波幅和变化都很小, 变化较显著的区域集中在流域上游和流域边缘的山区。变化斜率分析得出了类似的结论, 气候变化以及人类活动导致的土地利用改变可能是影响在流域不同地区植被状态变化的主要原因。对 NDVI 时间序列的主成分分析发现 PC1 和 PC2 与植被覆盖和气候密切联系, PC3 和 PC4 与流域汛期洪水有关, PC5 和 PC6 体现了人类活动的影响。流域的 NDVI 与降雨显示了良好的相关性, 降雨与 NDVI 相关性的阈值可能在 550mm 或更高。

关键词: 植被变化; 时间序列; 相关关系; 人类活动; 降雨

文章编号: 1000-0933(2008)03-0925-14 中图分类号: Q948 文献标识码: A

Analysis of Jinghe watershed vegetation dynamics and evaluation of its relation to precipitation

CHEN Cao-Cao^{1,2}, XIE Gao-Di¹, ZHEN Lin¹, GENG Yan-Hui^{1,2}, LENG Yun-Fa¹

1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(3): 0925 ~ 0938.

Abstract: Vegetation degradation is one of the key subjects in the study of global environmental change, and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) is generally recognized as a good indicator of terrestrial vegetation productivity and growth status. To evaluate the vegetation dynamic changes in the Jinghe watershed on Loess Plateau from 1982 to 2003, major methods of changing slope, principal component analysis and correlation analysis are employed with 8km resolution NOAA-NDVI time series data. Based on these analyses, the relationship between precipitation and NDVI is discussed. Results show that there is little change in both the amplitude and variety of NDVI during the past 22 years. Vegetation in the upper stream areas, typically the watershed marginal mountain areas, changes significantly. A trend analysis shows the similar finding on that vegetation dynamics in different areas tends to be induced by climate change and human land use transformation. A standardized principal components analysis indicates that the first two components, or PC1 and PC2, are closely related to vegetation and climate changes. While PC3 and PC4 are connected with floodwater in

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(2002CB111506); 国家自然科学基金资助项目(30670374); 欧盟第六框架资助项目(优先领域 1.1.6.3) SENSOR-TTC(003874-2)

收稿日期: 2007-07-09; **修订日期:** 2007-12-29

作者简介: 陈操操(1980~), 男, 广东湛江人, 博士生, 主要从事资源生态学与景观生态学。E-mail: Chencc.05b@igsrr.ac.cn

致谢: 本文气象数据由中国气象局国家气象中心气象资料室提供, 特此致谢。

Foundation item: The project was financially supported by Major State Basic Research Development Program of China (No. 2002CB111506); National Natural Science Foundation of China (No. 30670374); Sixth Framework Programme of European Union (Priority 1.1.6.3) (No. 003874-2)

Received date: 2007-07-09; **Accepted date:** 2007-12-29

Biography: CHEN Cao-Cao, Ph. D. candidate, mainly engaged in resource ecology and landscape ecology.

flooding seasons, PC5 and PC6 reflect the effects of human activities. Finally, the correlation analysis between NDVI and precipitation shows that they have a close positive relationship in this region. The rainfall sensitivity threshold reaches 550mm or even higher.

Key Words: vegetation dynamics; time series; correlation; human activity; precipitation

全球环境的种种变化威胁着人类及其社会的持续发展,越来越受到各国政府和科学家的重视,植被长期的退化是其中受到关注的一个重点,植被覆盖状况也是环境评估的重要指标。一些研究指出^[1,2]:随着社会经济发展和人口密度增加,城市化和工业化进程加快,区域土地利用和覆盖格局发生改变,受过度放牧及定居点增加等人类活动影响,地表植被退化严重。这种情况在经济不发达地区更加明显。中国西北的黄土高原地区就是属于经济相对落后地区和生态脆弱区,农业人口比重大,人口出生率高,加大了土地资源和自然资源的利用强度。近年来由于不合理的土地利用方式,该地区森林、牧场和耕地受到严重破坏,盐碱化、沙漠扩张等严重环境问题时有发生^[3,4]。同时黄土高原地区具有典型的干旱性大陆气候特征,主要为干旱半干旱地带,是我国全球变化一、二级敏感带所在地,植被对温度、降雨等气候的微小变化较为敏感。研究该地区的植被覆盖变化对于环境质量评估、气候变化、能量循环等均具有重要的意义。

遥感数据的可重复获取特性是其相对其他数据源的优势之一。不少研究者利用植被指数探寻植被变化状况,最常用的植被指数是归一化差值植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)。经研究发现由 NOAA 传感器红外波段和近红外波段提取的多时相 NDVI 指数可以有效的指示植被绿色叶片生物量、植物光合能力、干物质累积及年净初级生产力^[5],是植被生长状态及植被空间分布密度的良好指示因子^[6],此外 NDVI 还显示出与气候变量具有不错的相关性^[7],如降雨、温度和蒸发,特别是在干旱地区 NDVI 与气候变量的相关性更加强烈。因此 NDVI 指数不仅可以用于描述区域或时间上的植被变化,而且还可认为体现了植被对气候的反馈和响应^[8]。在过去研究里利用廉价的时间序列的 NOAA-NDVI 指数在全球或区域的植被覆盖变化、环境监测等方面得到广泛应用^[9,10]。基于多时相的 NDVI 植被指数变化分析技术手段,主要有以下几种:

(1)不同时相的差值或比值比较^[4,11] 利用两个时相的影像相减或相除,得到反映变化的结果。如方精云^[1]利用 NDVI 数据对比了我国 20 世纪 80 年代初和 90 年代末两个时期定义的‘植被地区’和‘植被稀少地区’面积的变化,得出结论我国 18a 来植被地区面积增加,植被稀少地区减少。孙睿等^[12]计算了 1982~1986 年(平均)和 1995~1999 年(平均)黄河流域植被覆盖度,比较了流域年际间变化情况,认为黄河流域平均植被覆盖有增加的趋势。

(2)变化斜率法 为了研究 NDVI 时间序列的趋势,利用最小二乘法计算数据集上所有像元的 NDVI 序列与时间的回归直线。结果是一幅斜率影像,表达出影像上逐个像元所代表的 NDVI 线性变化。如 Fuller^[13]和 Tottrup 等^[14]分别利用变化斜率法以及 NOAA-NDVI 时序数据研究塞内加尔国家或地区粮食产量、生物量或净初级生产力(NPP)变化情况。国内利用变化斜率法的探讨植被覆盖的研究很多,在国家^[1,15]、区域^[4,25]、流域尺度^[27]都开展了相关工作。

(3)主成分分析法 主成分分析法(PCA)是一种广泛应用于变化的探测分析的方法,常用于多维数据的降维,提取前若干个主成分,结合专业知识,赋予不同主成分特定的专业背景解释。常用的包括标准化和非标准化主成分分析,其中标准化主成分分析比非标准化主成分分析更适用于探测多时相遥感影像变化^[16],因为前者能有效降低不同时段数字影像均值的差异^[16]。它的原理是假设时间轴上 NDVI 序列存在内在的相关性,可以根据协方差矩阵或相关矩阵对时间序列数据线性变换,提取一系列标准化后正交的主成分,籍此可能找出这些主成分与自然进程或人类活动之间的关系^[8]。Eastman^[9], Anyamba^[17], Li^[8], Gurgel^[10]等人以主成分分析及 NDVI 时间序列数据研究了非洲、美国及巴西等地 NDVI 或 GVI 变化,认为空间上植被指数的异常

变化在某种程度与厄尔尼诺(ENSO)现象所引发的降雨和温度异常有关。国内主要应用主成分分析法在土地利用变化监测及分类上,开展长时间序列 NDVI 变化的研究较少。

上述多时相变化分析方法各有特色和侧重点,相对的差值法和变化斜率法简单、直观并易于解释,对空间范围无要求;主成分分析法的每个主成分可以单独的解釋生物量、降雨、温度等时空变化及响应,综合性强,但由于这些主成分由变换得出,需要相对复杂的分析和解释,不同的空间范围得到的主成分分析结果不同。

在干旱半干旱地区,由于水源稀缺蒸发量高,无论是农作物生产还是天然植被生长都严重依赖降雨,降雨通常是影响植被生产力、生态系统结构以及动态过程的最关键因素^[18]。许多区域性的研究或对比表明,降雨与 NDVI 在时间上和空间上具有良好和显著的线性关系^[4,7,19,20]。一些研究者也考虑了其它的气象因子与 NDVI 的关系,如温度、太阳辐射、风速等^[21,22],结果发现某些气象因子和 NDVI 也存在显著相关关系,但是各种结论间差别很大,存在正向或负向的相关关系结果^[21,22]。因此本研究的前提假设是流域降雨与 NDVI 之间存在较高的相关性,然后通过计算证明。前人研究大都采用年降雨量或季节间降雨量和对应的 NDVI 数据进行相关分析,并获得不错的结果,由于研究区降雨恰好集中在夏秋两季,以生长季对应月份的降雨之和作为年降雨值。此外,前人的研究较少体现出空间上降雨与 NDVI 间的强弱变化,本研究尝试去检验两者的空间差异并给出合理的解释。还需要指出,干旱地区 NDVI 与降雨间近似的线性关系存在阈值,当降雨量超过阈值后,降雨与 NDVI 的相关性将开始降低,研究得出在博茨瓦纳地区约为 500mm/a^[20],塞内加尔约为 700 ~ 800mm/a^[29],中国则为 500 ~ 700mm/a^[29]。本文将对流域降雨与 NDVI 是否存在线性阈值及其大小进行探讨。

综上所述,本研究的目的是对泾河流域的植被覆盖长期变化状况进行分析,并在此基础上评估该区时空尺度上降雨量对 NDVI 变化的影响,分为降雨无延迟和有延迟两种情况讨论,最后分析该区是否存在线性降雨阈值,估计了阈值的大小。植被覆盖变化研究主要采用了变化斜率和主成分分析方法,降雨对 NDVI 的影响使用相关分析方法。

1 研究区概况

泾河流域包括陕甘宁 3 省 31 个县市,属于黄河中上游地区,行政边界位于东经 105°49' ~ 108°58',北纬 34°14' ~ 38°10'之间。流域内土地利用类型主要有农地(坡耕地、梯田耕地、坝地和水田)、林地、草地、果园、水域、荒地、未利用地、交通过地和居民用地,其中比重较大的类型为农地、林地和草地(2000 年土地利用三者比例高达 95.7%),农林斑块相互穿插。流域地形西北高东南低,总体地势由东北西三面向东南倾斜。泾河及各级支流均深切于梁、塬、峁和黄土沟壑镶嵌的黄土地貌景观中,地貌类型主要有北部黄土高原沟壑区,中部黄土塬区,西南部山地林区和东南部山川区。流域气候是典型的温带大陆性气候,从北向南由冷温带半干旱区向冷温带半湿润区过渡,受大陆季风影响,降雨量由南向北逐渐减少,年平均降雨量 250 ~ 560mm,年际变化大,暴雨集中在夏秋两季,约占全年降雨的 50% ~ 60%,降雨年际间变化差异很大。由于暴雨集中,植被稀疏、土壤抗侵蚀性差,水土流失严重,再加上土地利用不合理,使得该区成为我国水土流失最严重的地区之一^[23]。流域气温同样南高北低,年均气温 8 ~ 13℃,全年无霜期 150 ~ 210d,旱灾较为频繁。

泾河流域生长季集中在 4 ~ 10 月份。由流域内各农气站收集的数据显示,植被生长一般从 4 月上中旬开始返青,10 月中下旬开始枯萎,一般而言盐池、固原等中上游地区生长季开始较晚,而下游咸阳、泾阳等地开始较早,前后差异在 1 ~ 2 旬之间。20 世纪 80 年代初至今,土地利用格局变化^[24]主要以草地和农地的相互转化为主。

2 数据和方法

2.1 NDVI 数据和气象数据

本研究使用的 NDVI 数据来自全球土地利用数据中心(Global land cover facility, GLCF)的 GIMMS 数据库所提供的 1982 年 1 月到 2003 年 12 月每 15d 的 NDVI 时间序列数据,共 528 景。图像的空间分辨率为 8km × 8km,时间分辨率为 15d,投影方式为经纬度投影(Geographic)。

气象数据使用了中国国家气象局提供的泾河流域及邻近周边地区均匀分布的 30 个气象站(盐池、横山、海原、同心、华家岭、固原、环县、平凉、西峰等)1982~2003 年逐月的气温和月降水量资料。

2.2 其他数据

其他辅助数据包括流域土地利用图(1:500000),流域植被类型图(1:500000),1995 年和 2000 年的经济和人口密度数据(1:500000)等。

2.3 数据处理和方法

GIMMS 数据库的 AVHRR/NDVI 数据集是最新释放的免费版本,考虑了多种因素对 NDVI 值的影响,通过了辐射纠正、几何纠正、卫星传感器的不稳定性校正、太阳天顶角校正等前期预处理,利用交叉辐射定标的方法降低了由于 1993 年菲律宾 Pinatubo 火山爆发,引起平流层气溶胶变化带来的影响^[25],增加了热带阔叶林区覆盖引起的变形校正,北半球冬季缺失数据插值等。本研究中逐月的 NDVI 数据通过国际通用的 MVC(最大值合成)法获得^[26],该方法可以进一步消除云、大气、太阳高度角等部分干扰。对于缺失的影像数据利用了惯用的处理手段,以时间序列上与缺失数据相邻的前后两旬影像平均,并利用其他旬的图像进行对比校正。所有图像坐标统一转化为 Albers 等面积投影,并截取流域及涉及数据计算的周边部分。由于非生长季植被覆盖差,NDVI 数据容易受积雪及土壤反射等因素影响^[27],不参与计算年 NDVI 数值。逐年 NDVI 值通过 4~10 月份的月 NDVI 最大化合成获得,表征流域植被覆盖的年变化情况。NDVI 的取值范围为 -1.0~1.0,在植被生长季范围内,定义 NDVI 像元数值大于 0.55 为高植被覆盖,大于 0.35 而小于 0.55 为中等植被覆盖,小于 0.35 为低植被覆盖。

比较流域不同时相 NDVI 的分布和质量变化情况,按照 3 个时段划分(1982~1985;1992~1995;2000~2003),分别计算年 NDVI 均值,并进行统计处理,计算流域层面及各县高植被覆盖($\text{NDVI} \geq 0.55$)、中植被覆盖($0.35 \leq \text{NDVI} \leq 0.55$)和低植被覆盖($0.10 \leq \text{NDVI} \leq 0.35$)单位面积 NDVI 均值状况。

利用变化斜率法分析以年为基本单位的流域植被长期变化趋势,年 NDVI 影像通过最大化合成相应的生长季月份。计算的斜率为负值的区域,表示其植被覆盖呈减少趋势,斜率为正值的地区,植被覆盖呈增加趋势。趋势显著性检验采用 F 检验,根据各像元 NDVI 变化趋势和显著性水平,将变化趋势分为 5 级:增加极显著($\alpha \leq 0.05$);增加显著($\alpha \leq 0.10$);减少极显著($\alpha \leq 0.05$);减少显著($\alpha \leq 0.10$);基本无变化($\alpha \geq 0.10$)。变化斜率的计算公式如下:

$$\text{SLOPE}_i = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times \text{NDVI}_i - \left(\sum_{i=1}^n i \right) \left(\sum_{i=1}^n \text{NDVI}_i \right)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (1)$$

式中, n 代表年,本研究共有 22a, NDVI_i 代表图像上的每个像元表示的植被指数值。 SLOPE_i 为该像元长期的变化程度。

利用标准化主成分分析方法研究 NDVI 时间序列,以生长季月份为最小分析单位。通过正交和线性变换后形成了一些可解释原有序列的主成分。由于前 6 个主成分累积方差贡献率达 92.2% 以上,选取了它们对原始 NDVI 序列进行解释。这 6 个主成分代表了 NDVI 空间上的变化形态,同时每个主成分都会产生对原有序列的分子载荷矩阵,此载荷矩阵可以用于解释 NDVI 在时间上的变化。通过比较载荷因子矩阵与气候变量可以得到它们之间的相互关系。利用专业知识综合每个主成分及其载荷矩阵具体情况进行分析。

降雨的空间数据由分布在流域周边的 30 个气象站点数值插值获得,转化成与 NDVI 数据统一 8km 分辨率的栅格影像(Albers 投影)。每年的降雨量由生长季 4~10 月份的月降雨量求和,提取计算了 1982~2003 年逐年(4~10 月份)的降雨栅格影像。由于降雨、土壤水和植被利用存在一定的迟滞效应,同时考虑了从生长季提前一月开始到提前一月结束的年降雨纪录(3~9 月份),利用相同的方法得到 22a 的(3~9 月份)降雨栅格影像。将两套数据分别与 NDVI 时间序列作基于像元的 Pearson 相关分析,并进行结论的对比。

3 结果与分析

3.1 不同时段差值分析

以流域行政区边界作掩模,计算流域范围内单位面积 NDVI 的时序变化。在过去 22a 中流域多年单位面积 NDVI 平均值为 0.438,高于平均值的年份有 12 个,低于平均值的年份有 10 个。逐年 NDVI 值一元线性回归趋势线方程的斜率为正值,但检验并不显著,表示植被覆盖可能处于上升状况。NDVI 年变化量 0.0004,占多年平均值的 0.09%,上升变化幅度很小。而变异系数的计算结果为 0.05,体现 NDVI 相对波动程度也较小,变化较为平稳。整体上流域 NDVI 变化在过去 20 多年中变化不明显,波动程度小,并没有像一些报道中描述出现显著退化迹象^[28],植被覆盖可能还呈轻微上升趋势。

根据已经定义的高覆盖、中覆盖及低覆盖区的划分标准,对 3 个时段植被覆盖等级进行划分,研究流域植被覆盖的宏观变化状况(图 1)。可见在不同时段分布 1982~1985 年、1992~1995 年和 2000~2003 年植被覆盖具有基本相同的分布特点。流域西南和东部各有一条狭长的 NDVI 高值区,数值在 0.55 以上。西南部六盘山林区一带四县(彭阳、平凉、崇信、长武)的植被覆盖较好,沿泾河的主流域向下游伸展;东部子午岭山系的山川区林地各县(如华池、庆阳、宁县等)植被覆盖率也很高。山地林区间流域中部的黄土塬区植被覆盖次之,数值在 0.35~0.55 之间,包含镇原、西峰、庆阳一线以下至彬县广大的三角区域。流域北部泾河两条支流上游黄土丘陵区(盐池、定边和环县等)植被覆盖最低,数值在 0.35 以下。

通过前期与后期的叠加得到不同时段 NDVI 差异(图略)。1992~1995 年与 1982~1985 年相比,东部子午岭山区 NDVI 均值下降幅度和 NDVI 减少的区域斑块面积最大,某些地区 NDVI 降幅达到 24%,其次降幅略低的是西南六盘山地区和下游的灵台、长武以东地区;流域上游和中游的一部分县市(镇原、庆阳、盐池和定边)植被指数出现增加,如盐池县大部分地区的增幅为 50%~71%。当然如此显著的增幅很可能来自于这些地区较低的 NDVI 基数(NDVI 多年平均均值在 0.19~0.27 之间)。

2000~2003 年与 1992~1995 年相比,NDVI 降幅最高的地区出现在上游(盐池,六盘山地区及环县、华池、合水等县),盐池植被覆盖倒退最严重,降幅达 16%~39%,同样强烈的植被变化可理解为较低的基数;流域下游地区大部分县市(正宁、旬邑、灵台和长武等)以及上游两县(定边和固原)NDVI 值出现提高,最高增幅达 39%;流域中游腹地各县的 NDVI 增减幅度不明显。

图 2 显示高中低植被覆盖在 3 个时段段上单位面积 NDVI 均值,植被高覆盖地区 NDVI 出现下降,但变化非常轻微,流域植被质量保持稳定。在缺乏实地收集植被数据选择变化阈值的情况下,统计上常用的方法可以选择标准差,认为只有那些与均值之差的绝对值大于 2 倍标准差的像元发生了真正的变化。设置该阈值,标识出从 1982~1985 年到 1992~1995 年约 4.4% 的地区植被发生了显著变化,从 1992~1995 年到 2000~2003 年约 5.4% 的地区植被发生了显著变化。并且两个变化时段变化显著地区的像元大部分位于流域边缘地区,即由流域上游往下游方向,西部为盐池和六盘山地区各县(固原、隆德、泾源),东部主要是定边及子午岭山区各县(华池、合水、正宁等)。

总结差值分析的结果,22a 来泾河流域植被覆盖整体年际变化稳定,以流域为基本单元的单位面积 NDVI 均值波幅和变化均很小;在 3 个典型时段中高中低植被覆盖区的单位面积 NDVI 均值也没有大的变化。时段间差值图像的统计结果发现,植被发生显著变化的像元只占流域总面积的 4.4%~5.4%,分布较有规律,集中在流域的边缘山区和上游的两个县。由于森林等高覆盖植被主要集中在流域边缘山区,且高覆盖植被单位 NDVI 出现轻微下降,意味着未来森林等高覆盖植被可能有潜在退化的风险,这一趋势对流域长久的生态安全构成威胁。而对于上游盐池、定边等县,植被反复变化可能有多方面原因:首先该区属黄土高原沟壑区,垦殖指数高,植被稀少,土质疏松,暴雨集中,水土流失严重,是重要的水土流失防治区和生态建设区,地形和气候容易造成地表中低覆盖的灌草植被变化。同时泾河上游地区也是退耕还林政策实施的重点区域,政策可能对植被覆盖面积增加产生影响。2000 年以后国家推行天然林恢复和保护政策,泾河、北洛河上游的部分地区开始进行退耕还林还草,封山育林,加强天然次生林保护,加强水源涵养和生态修复等工作。由于实施的时间

接彩图 1

不长,植被质量不会得到马上提高。实地调研发现,虽然上游固原、平凉等地区的退耕还林政策取得一定成效,植被覆盖面积较以往有所提高,但是没有形成规模,森林植被以幼龄林为主,草地植被非常稀疏,在暴雨、山洪和泥石流的冲刷下极有可能重新退化。

3.2 变化斜率分析

尽管泾河流域总体上 NDVI 没有明显的增减趋势,但各个区域存在不同的空间差异,泾河流域 22a 来各像元的变化斜率、比重和显著性检验可见图 3。结果显示流域植被覆盖减少极显著($\alpha \leq 0.05$)地区面积达 5056 km²,增加极显著($\alpha \leq 0.05$)地区面积 12032 km²,两者加总占流域面积比重不大,只有 24.2%,流域绝大部分区域增加或减少都不显著($\alpha \geq 0.10$),占流域总面积比重 69.3%,对应的面积为 48832 km²。意味着泾河流域 22a 来植被覆盖增减呈显著性变化的地区比例较少,而大部分地区植被覆盖变化不显著,与前面得到的结果相似。

对泾河流域各县年平均 NDVI 值、变化幅度(变化与 22a 平均值的百分比)分析发现,流域大部分县(市)年 NDVI 变化介于 0.008% ~ 0.521% 之间,31 个县/市中只有西峰、礼泉、正宁和咸阳市 4 地变化率出现负值。各县多年 NDVI 变化斜率较小,其中斜率变化较大的几个县(彭阳、乾县和泾源等)主要分布在流域支流泾河上游及马莲河上游一带,流域中游和下游大部分地区斜率变化非常小。各县植被质量(NDVI 单位面积均值)比较,流域中游和下游地区要好于上游地区。

4 个年 NDVI 变化斜率出现负值的县市都处于泾河流域中下游地区,它们的共同特点是区位优势好,资源丰富,经济发展快。咸阳和礼泉位于泾河下游,邻近关中平原城市群(如西安、宝鸡等),受其辐射影响工业在经济结构中比例较高;中游的西峰和正宁同为庆阳市辖区,前者石油探明地质储量丰富是著名的石油城,后者以煤炭资源和小手工艺品制作而著名,属于当地经济强县。由于城市化发展和人口增加对植被地区的占用,植被覆盖出现退化是可以预计的结果。年 NDVI 变化斜率为正,但增减百分率较小的地区位于流域中游,如崇信、泾川、庆阳、合水县偏东南的广大区域,这一地区俗称陇东粮仓,是我国农业起源最早的地区之一,从 20 世纪 60 年代开始这里就形成了以农业为本的粮食生产格局。因此认为稳定的粮食生产使得这一地区 NDVI 变化幅度小,农业增产是 NDVI 变化斜率为正值的主要因素。

年 NDVI 增减百分率较大的地区大都分布在流域上游地区,以及流域西南和东部的山地,16 个年 NDVI 增减百分率达到 0.15% 以上的县中共有 8 个位于上述区域。上游地区县市人口密度比下游小,特别是两侧山地的每 km² 人口密度只有 100 人左右,农地和草地结构比重很高,由于地处半干旱区,农业生产和自然植被生长都严重依赖自然降雨。气候因素和人类活动影响下土地利用的改变都会导致植被覆盖变化,只是在较长的时间尺度内,可能气候变化带来的影响较大,而在较短的时间尺度内,由土地利用改变带来的影响较大。因此推测在各种自然和人类活动正向或负向的影响下,上游地区植被发生了不稳定变化,20 多年来变化趋势呈现为正值。

3.3 主成分分析

图 4 为前 6 个主成分空间形态(前 6 个主成分的累积方差贡献率达 92.2% 以上)。表 1 是 NDVI 序列各主成分可能代表的含义以及影响区域,主成分 1(简称 PC1,以下类似)的空间形态代表了植被多年间的自然

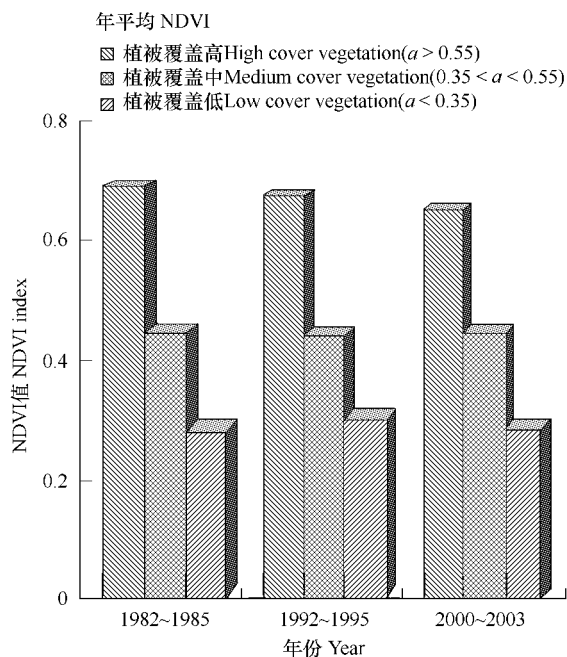


图 2 不同植被覆盖等级 NDVI 均值变化

Fig. 2 Change of various vegetation cover with NDVI index

① High cover vegetation ($\alpha > 0.55$); ② Medium cover vegetation ($0.35 < \alpha < 0.55$); ③ low cover vegetation ($\alpha < 0.35$)

接彩图 3

生长状况,由西北向东南植被状况趋于变好,可近似的作为流域植被覆盖图,它的方差贡献率高达 84.9%,与所有 154 个被分析月份都具有较高的相关性(平均因子载荷 92.0%),且时间上载荷平稳。其他各主成份在时间上载荷及可能的生态学意义为:PC2 代表 NDVI 年内的季节变化,PC2 因子载荷以生长季为周期呈倒 U 型,表现植被的生长规律,在 2~6 主成分中,只有 PC2 与气候因子表现出显著的正相关性,与降雨的相关性 $r=0.447^*$,与温度的相关性 $r=0.657^*$,因此估计 PC2 的空间形态可能体现的是流域植被受气候影响形成的空间变异格局,其主要负值区位于中下游狭长的纺锤型区域(镇原、庆阳、平凉以东南方向广大地区),正值区在流域两个边缘山区以及流域上游地区。在下游这部分负值区是作为流域主要的农业区,土地利用类型主要有坡旱地、平旱地、水浇地和果园等构成的农地,由于人工灌溉等外在干预的存在,令植被变化对气候变化相对不敏感。

表 1 主成分方差贡献率、可能含义及影响地区

Table 1 Principal components variances, possible explanations and associated regions

主成分 Principal components	方差贡献率(%) Variances	可能含义 Possible explanation	影响地区 Associated regions
PC1	84.9	植被自然形态 Natural pattern of vegetation	全流域 Whole basin
PC2	4.4	气候影响下的植被格局异常 Climate induced	正值区位于流域中下游,负值区包括西南六盘山地区,东部子午岭山区和流域上游 Positive regions locate in middle and lower reaches. Negative regions include Liu Pan mountain area in south-west, Zi Wu mountain area in east and upper stream.
PC3	1.2	自然因素(洪水) Flood induced	全流域 Whole basin
PC4	0.8	自然因素(洪水) Flood induced	全流域 Whole basin
PC5	0.5	人为因素 Human influence	正值区多为经济密度较高,人口密度较大地区,负值区恰好相反 Positive regions are mostly high density in economy and population, and negative regions is contrary to it.
PC6	0.5	人为因素 Human influence	全流域 Whole basin

PC3 和 PC4 主要体现流域植被受自然条件影响下的变化状况,汛期的洪水可能作为其中主要影响因素。首先 PC3 和 PC4 与气候因子的相关性都不突出,相关性很小或显示为负相关。其次在各自主成分载荷上 PC3 和 PC4 与 PC2 相比变化的频次大,波动的正负幅度基本一致。此外 PC3 与 PC4 空间形态分布规律,PC3 的负值区与流域两条主要支流之一的泾河所控制区域大致重合(缘于泾源,经平凉、泾川、长武并入泾河干流),PC4 的正值区则是流域另一条重要支流马莲河涵盖的地段(起于定边、经庆阳、宁县在长武附近并入干流)。这两条主要支流流经的上中游地区是常见的暴雨中心地带,当地的黄土抗侵蚀性差,植被疏松,在汛期暴雨或洪水的冲刷下,地表的植被很可能因此改变。必须指出目前的分析仅为一种推断还不能完全确定,作为空间形态上的巧合或者另有原因,需要进一步的研究确认。

PC5 和 PC6 的因子载荷在时间轴的变化上与前面 4 个主成分有很大的不同,呈现出波动降低或跳跃的状态。空间的分布上 PC5 和 PC6 的正负区域零乱破碎,相互镶嵌。将人口密度图和经济密度图与之进行对比,发现与 PC5 的正负空间形态较为相似,流域人口和经济密度较高的地区集中在流域的中下游地势较低的盆地,以及上游的固原、定边等地,流域西南山区和东部山区人口密度很小。无疑工业或农业等人类活动对当地的植被都会产生一定影响(直接侵占,毁林开荒,酸雨及污染排放等)。研究据此推测 PC5 和 PC6 与人类活动有着部分的关系,但具体的原因或驱动因素需要在将来进一步工作中继续深化。

3.4 降雨与 NDVI 的关系

研究计算了降雨与 NDVI 在每个栅格单元的相关系数(1982~2003 年)。图 5 显示在没有延迟的情况下,流域相当地区降雨与 NDVI 具有非常好的相关性。相关系数较高(0.45~0.7 或以上)的地区主要有:流域上游的环县、定边、彭阳等县及以北地区,流域下游的彬县、永寿、灵台等地,占流域总面积的 11.5%。共有

接彩图 4

27%的栅格显示出显著的相关性(95%的显著性水平,图略)。呈现出零相关或负相关的地区在流域东部和西南部诸县,如华池、合水、泾源、陇县等。对于降雨与植被相关性空间形态,一种合理的解释理由是地表的植被覆盖不同,获得土壤水份能力大小各异,导致了相关性的差异。如流域的东部和西南山区植被覆盖以森林为主,森林的根系发达可以获取大量的水分,这些地区森林植被生长可能受到干旱年份降雨短缺的影响不会明显体现。流域的上游地区植被覆盖主要是草地、灌丛和耕地,它们的根系相对较短,获取土壤水份能力差,因此受年降雨量的影响较大。Propastin 等^[22]曾经发现耕地、草地和灌丛等植被类

型与降雨在具有延迟的情况下具有 0.8 左右的高相关性,而灌溉后的耕地与植被间相关性只有 0.1^[22]。在下游地区,植被类型以耕地和草地为主,它们的根系也不发达,受雨水的影响较大,可以用相同的理论解释。

研究比较了延迟与不延迟的差别。在 1 月延迟的情况下,降雨与 NDVI 的相关性空间形态与无延迟时相似,且相关程度更高。流域内相关性高(0.4~0.7 或以上)的地区面积占总流域的 18.3%,高达 60%的栅格单元呈现显著相关(95%显著性水平)。一方面说明泾河流域作为干旱半干旱地区,降雨与 NDVI 的相关性很高,植被受降雨的影响非常突出;另一方面说明考虑植被对降雨的延迟吸收能更好体现出 NDVI 与降雨的相关程度。

从图 5 还可以看到,NDVI 和降雨相关性较高的地区与年降雨等值线范围较为符合,等降雨量线 250~400mm,500~550mm 覆盖的地区具有较高的相关性系数,其中相关系数的峰值在 250~400mm 出现。随着降雨量由西北向东南逐渐增加,相关系数没有出现明显的下降,这意味着在泾河流域降雨与 NDVI 的相关性的降雨阈值可能在 550mm 或更高,如果降雨增大或通过其他途径外部输水,植被覆盖将变得更好。通过比较 1 月延迟和零延迟图像,有延迟时降雨等值线与相关性高值区契合的更好。至于东部和西南部以及流域下游存在相关性较弱或负值的区域,可以由以下原因解释:首先是植被覆盖的不同可能导致的对降雨敏感性的不同,其次下游比上游的经济发展水平高,人类活动更密集,人为的灌溉浇水等可能会降低当地大量的农田、果园等人工植被对降雨的敏感性。

5 结论与讨论

总结全文得出以下结论:(1)流域 22a 来植被 NDVI 均值波幅和变化都很小,在 3 个典型时段中发生显著变化的像元仅占流域总面积的 4.4%~5.5%,集中在流域边缘山区和上游两个县,但是流域的边缘山区森林植被 NDVI 轻微下降,未来具有潜在的退化风险,对长久的生态安全不利。(2)在具体的空间差异上,22a 来流域植被增加或减少极显著地区面积比例不大(24.2%),69.3%的土地植被覆盖增减变化不明显,其中上游地区比下游地区植被变化活跃,气候因素和人类活动影响下土地利用的改变都造成了植被覆盖变化。(3)利用标准化的主成分分析法发现,PC1 和 PC2 具有良好的生态学意义,PC3 和 PC4 显示植被变化可能与流域汛期洪水有关,PC5 和 PC6 表现出植被可能受到人类活动影响的异常变化区域。(4)流域的 NDVI 与降雨显示了良好的相关性,植被受降雨的影响很大,考虑降雨延迟情况后相关性程度更高,体现降雨与 NDVI 相关性的阈值可能在 550mm 或更高。

在研究中分别利用了变化斜率法和主成分分析法研究时间序列植被覆盖的变化,比较之下变化斜率法没有限制条件,直观而易于解释,主成分分析法提取和浓缩了时间序列信息,需要丰富的专业知识对各主成分形态进行合理和谨慎的解释,应用的难度较大,研究探讨了几种主成分体现的含义和影响因素,但无法得到确定程度的结论,进一步的研究可能要扩大研究的空间尺度,从而在更宏观的层面上发现和分析规律。因此对研

表 2 主成分(2~6)因子载荷与气候因子的相关关系

Table 2 Correlation between principle components loading(2~6) and climate factors

主成分 Principal components	因子载荷与降雨相关性 Correlation between principle components loading and precipitation	因子载荷与温度相关性 Correlation between principle components loading and temperature
PC2	0.447 *	0.657 *
PC3	-0.003	0.020
PC4	-0.122	-0.423 *
PC5	-0.233 *	-0.236 *
PC6	-0.078	-0.275 *

* 号代表双侧显著性检验 $P < 0.01$ means it has passed the significant test ($P < 0.01$)

接彩图 5

究区泾河流域而言变化斜率法可能更加适合。最后需要指出实际上 NDVI 与降雨的关系十分复杂,还会受到土壤类型及属性、海拔、植被种类等多种因素影响,下一步工作需要在此基础上继续完善。

References:

- [1] Fang J Y, Piao S L, He J S, *et al.* Increasing terrestrial vegetation activity in China. *Science in China Series C-Life Science*, 2003, 12(6): 554 — 565.
- [2] Xu X K, Chen H, Zhang F. Temporal and spatial change of vegetation cover in the Northwest of China and factors analysis influencing on vegetation variation. *Environment Science*, 2007, 1(28): 41 — 47.
- [3] Yang Y C. The analysis of the oasis environmental change and its reason of the lower reaches of the arid region - a case study of Mingqin County in the lower reaches of Shiyang river in Hexi corridor, Gansu Province. *Human Geography*, 2003, 18(4): 42 — 47.
- [4] Li Z, Yan F L, Fan X T. The variability of NDVI over Northwest China and its relation to temperature and precipitation. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 5(03): 308 — 313.
- [5] Tucker, Sellers. Satellite remote sensing of primary production. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7: 1133 — 1135.
- [6] Sun H Y, Wang Ch Y, Niu Z, *et al.* Analysis of the cover change and the relationship between NDVI and environmental factors by using NOAA time series data. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 2(3): 205 — 210.
- [7] Nicholson S E, Davenport M L, Malo A R. A comparison of vegetation response to rainfall in the Sahel and East Africa using normalized difference vegetation index from NOAA-AVHRR. *Clim. Change*, 1990, 17: 209 — 241.
- [8] Li Kafatos. Interannual Variability of Vegetation in the United States and Its Relation to El Nino/Southern Oscillation. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 71: 239 — 247.
- [9] Eastman J R, Fulk M A. Time Series Analysis of Remotely Sensed Data Using Standardized Principal Components Analysis. *Proceedings 25th International Symposium on Remote Sensing and Global Environmental Change*, Volume I, April, 4 — 8, Graz-Austria, 1993. 1485 — 1496.
- [10] Gurgel H C, Ferreira N J. Annual and interannual variability of NDVI in Brazil and its connections with climate. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 20: 3595 — 3609.
- [11] Li B, Tao S. A new method for vegetation change detection based on multitemporal Landsat TM image application in vegetation change detection of Dunhuang Oasis. *Journal of Remote Sensing*, 2000, 11(04): 295 — 298.
- [12] Sun R, Liu C M, Zhu Q J. Relationship between the fractional vegetation cover change and rainfall in the yellow river basin. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 11(06): 667 — 672.
- [13] Fuller. Trends in NDVI time series and their relation to rangeland and crop production in Senegal, 1987 — 1993. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 19(10): 2013 — 2018.
- [14] Christian Tottrup, Michael Schultz Rasmussen. Mapping long-term changes in sacannah crop productivity in Senegal through trend analysis of time series of remote sensing data. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2004, 103: 545 — 560.
- [15] Piao S L, Fang J Y. Dynamic vegetation cover change over the last 18 years in China. *Quaternary Sciences*, 2001, 7(04): 294 — 302.
- [16] Eastman J R, Fulk M. Long sequence time series evaluation using standardized Principal Components. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1993, 56(6): 991 — 996.
- [17] Anyamba A, Eastman J R. Interannual Variability of NDVI over Africa and its relation to El Niño / Southern Oscillation. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(13): 2533 — 2548.
- [18] Jeremy L. Weiss, David S. Gutzler, Julia E. Allred Coonrod, *et al.* Seasonal and inter-annual relationships between vegetation and climate in central New Mexico, USA. *Journal of Arid Environments*, 2004, 57: 507 — 534.
- [19] Camberlin P, Martiny N, Philippon N, *et al.* Determinants of the interannual relationships between remote sensed photosynthetic activity and rainfall in tropical Africa. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 106: 199 — 216.
- [20] Herrmann S M, Anyamba A, Tucker C J. Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate. *Global Environmental Change*, 2005, 15: 394 — 444.
- [21] Wang J, Rich P M, Price K P. Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plain, USA. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24: 2345 — 2364.
- [22] Pavel P. Propastin and Martin Kappas. Temporal Responses of Vegetation to Climatic Factors in Kazakhstan and Middle Asia. *Shaping the Change. XIII FLG Congress*. Munich, Germany, October, 2006, 8 — 13.
- [23] Ran D C. Hydrology analysis of water and sand in Jinghe river basin. *Yellow river*, 2001, 23(2): 9 — 11.
- [24] Yang L, Xie G D, Zhen L, *et al.* Spatio-temporal changes of land use in Jinghe watershed. *Resources Science*, 2005, 4(27): 26 — 32.

- [25] Ma M G, Wang J, Wang X M. Advance in the inter-annual variability of vegetation and its relation to climate based on remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 2003, 4(02): 232—236.
- [26] Holben B N. Characteristics of maximum-value composite images for temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7: 1435—1445.
- [27] Yang J P, Ding Y J, Chen R S. NDVI reflection of alpine vegetation changes in the source regions of the Yangtze and Yellow rivers. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 5(3): 467—478.
- [28] Ma M G, Dong L X, Wang X M. Study on the dynamically monitoring and simulating the vegetation cover in Northwest China in the past 21 years. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 4(02): 232—236.
- [29] J. Li, J. Lewis, J. Rowland, *et al.* Evaluation of land performance in senegal using multi-temporal NDVI and rainfall series.

参考文献:

- [1] 方精云, 朴世龙, 贺金生, 等. 近 20 年来中国植被活动在增强. *中国科学(C 辑)*, 2003, 12(6): 554~565.
- [2] 徐兴奎, 陈红, 张凤. 中国西北地区地表植被覆盖特征的时空变化及影响因子分析. *环境科学*, 2007, 1(28): 41~47.
- [3] 杨永春. 干旱区流域下游绿洲环境变化及其成因分析——以甘肃省河西地区石羊河流域下游民勤县为例. *人文地理*, 2003, 18(4): 42~47.
- [4] 李震, 阎福礼, 范湘涛. 中国西北地区 NDVI 变化及其温度和降水的关系. *遥感学报*, 2005, 5(03): 308~313.
- [6] 孙红雨, 王长耀, 牛铮, 等. 中国地表植被覆盖变化及其气候因子关系. *遥感学报*, 1998, 2(3): 205~210.
- [11] 李本纲, 陶澎. 一种利用多时相 TM 影像分析地表植被变化的新方法. *遥感学报*, 2000, 11(04): 295~298.
- [12] 孙睿, 刘昌明, 朱启疆. 黄河流域植被覆盖度动态变化与降水的关系. *地理学报*, 2001, 11(06): 667~672.
- [15] 朴世龙, 方精云. 最近 18 年来中国植被覆盖的动态变化. *第四纪研究*, 2001, 7(04): 294~302.
- [23] 冉大川. 泾河流域水沙变化水文分析. *人民黄河*, 2001, 23(2): 9~11.
- [24] 杨丽、谢高地、甄霖, 等. 泾河流域土地利用格局的时空变化分析. *资源科学*, 2005, 4(27): 26~32.
- [25] 马明国, 王建, 王雪梅. 基于遥感的植被年际变化及其与气候关系研究进展. *遥感学报*, 2006, 5(3): 421~431.
- [27] 杨建平, 丁永建, 陈仁升. 长江黄河源区高寒植被变化的 NDVI 纪录. *地理学报*, 2005, 5(3): 467~478.
- [28] 马明国, 董立新, 王雪梅. 过去 21a 中国西北植被覆盖动态监测与模拟. *冰川冻土*, 2003, 4(02): 232~236.

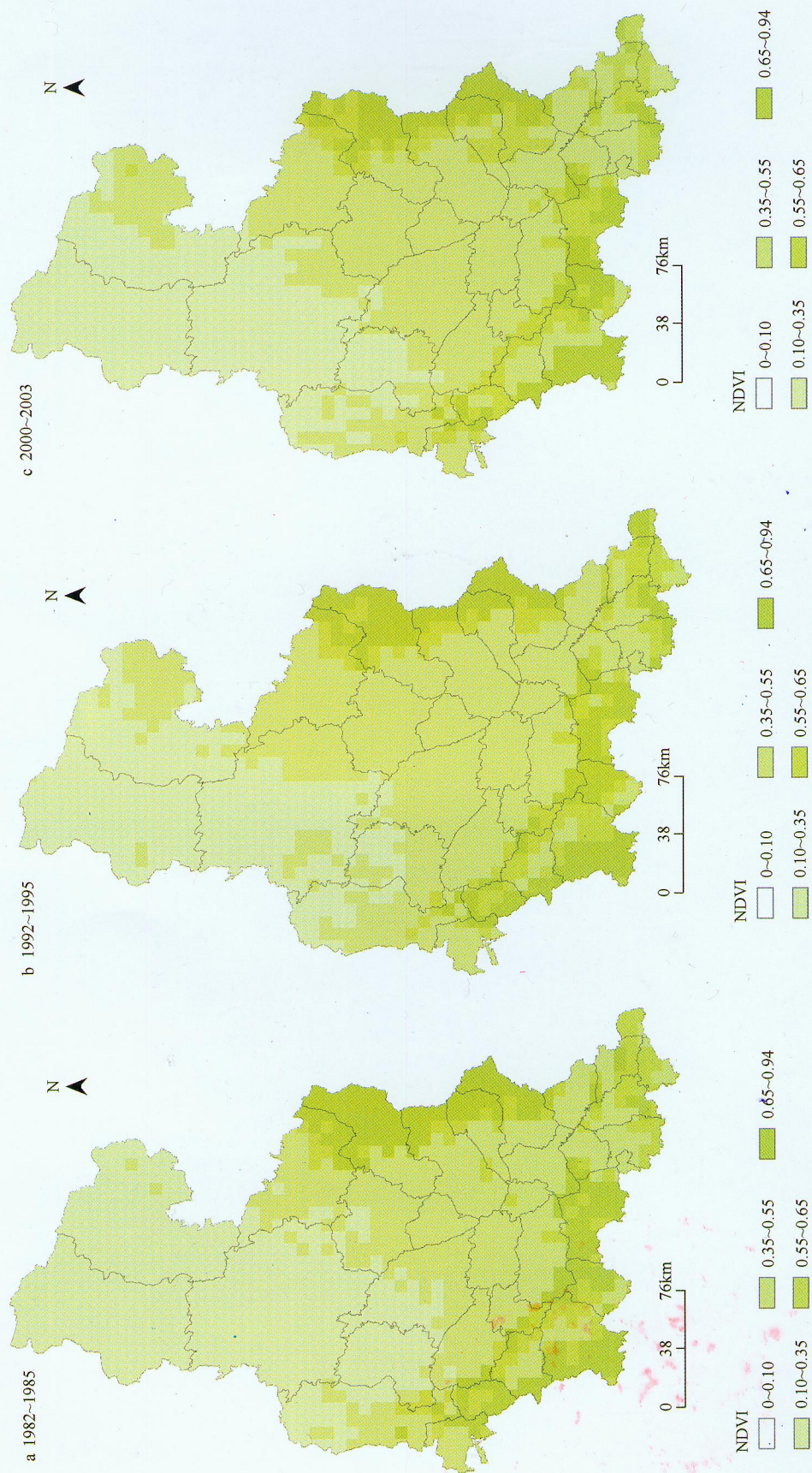


图 1 泾河流域 1982~1985, 1992~1995, 2000~2003 年等时段 NDVI 空间分布
Fig.1 Spatial distribution of NDVI in Jinghe watershed (1982~1985, 1992~1995, 2000~2003)

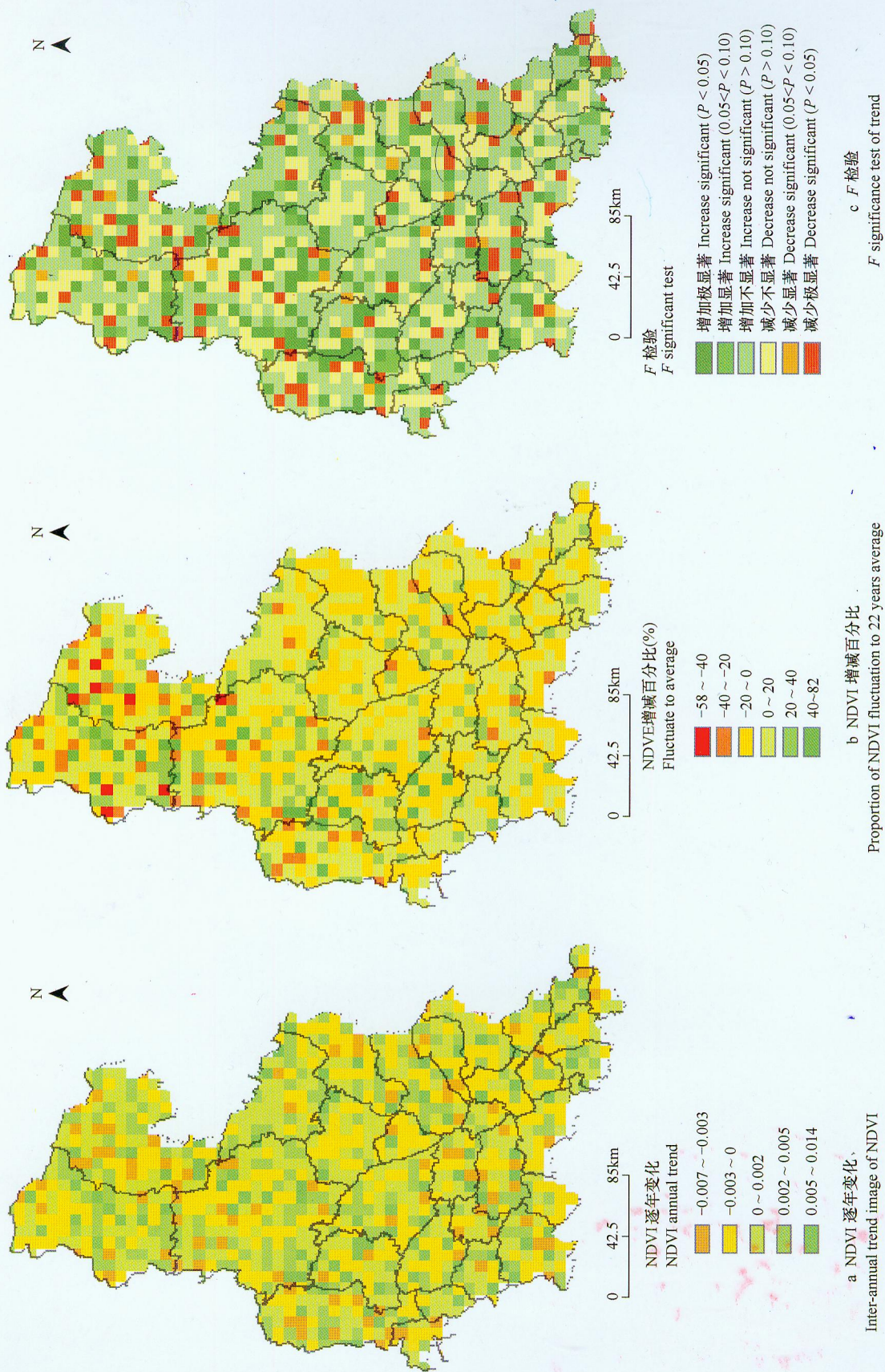


图 3 泾河流域 NDVI 逐年 / 总体变化趋势及 F 显著性检验

Fig.3 Inter-annual trend image of NDVI, proportion of NDVI fluctuation to 22 years average and F significance test in Jinghe watershed

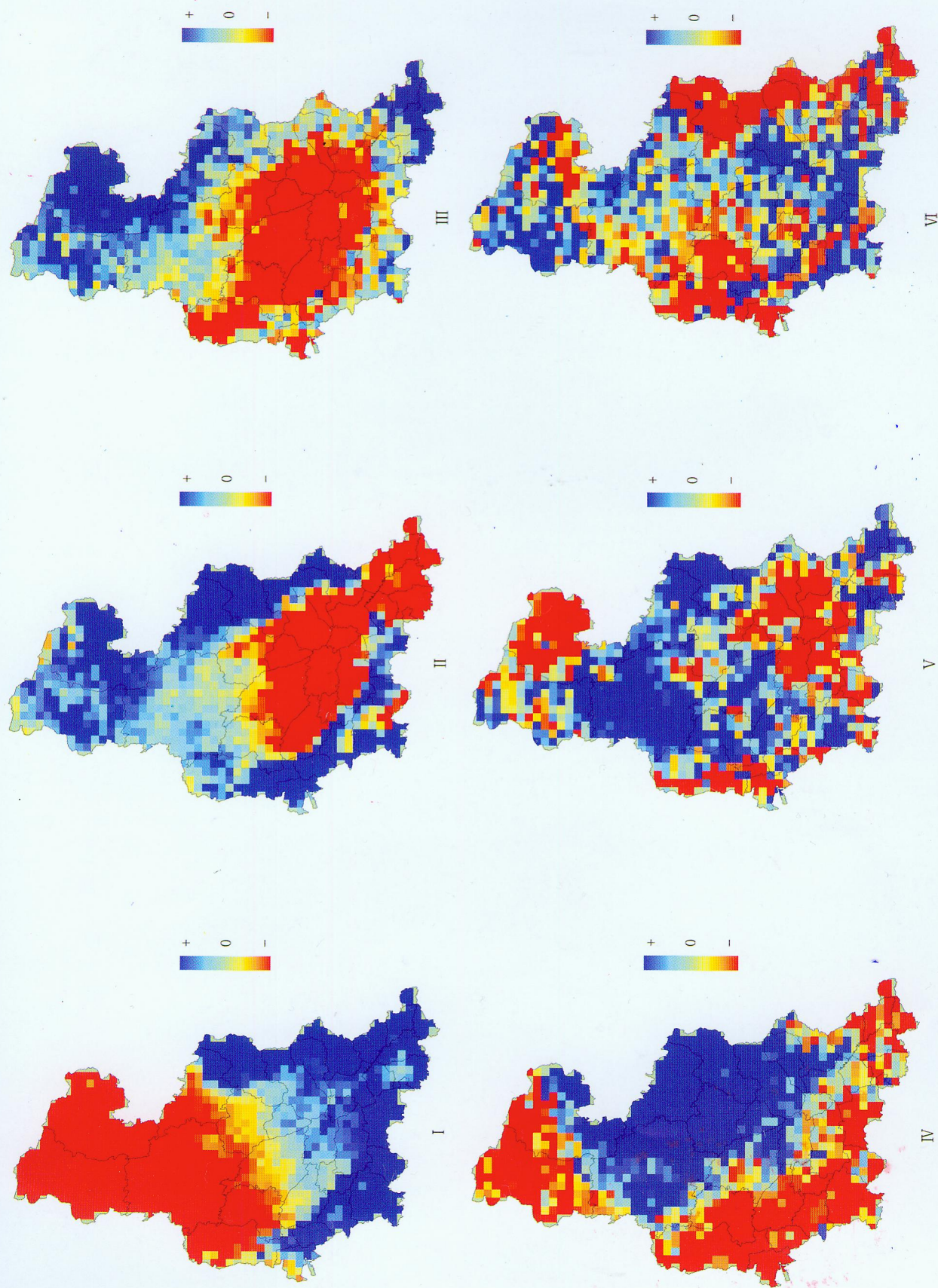
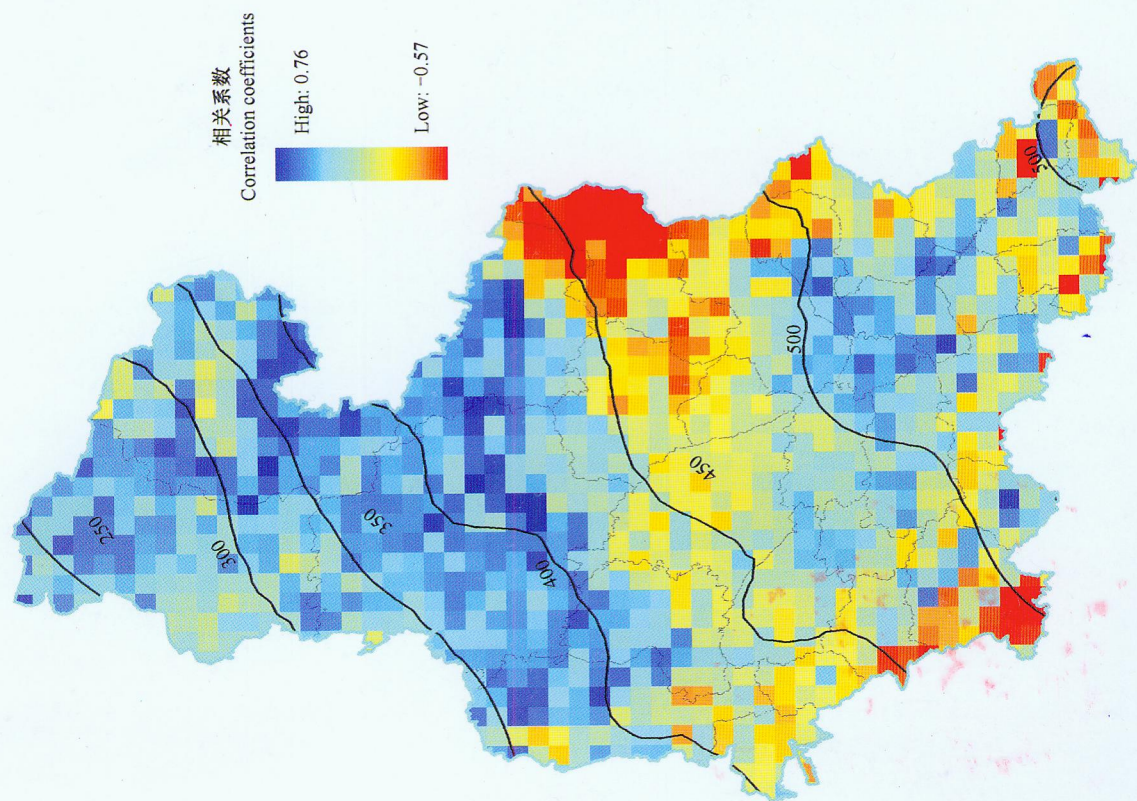
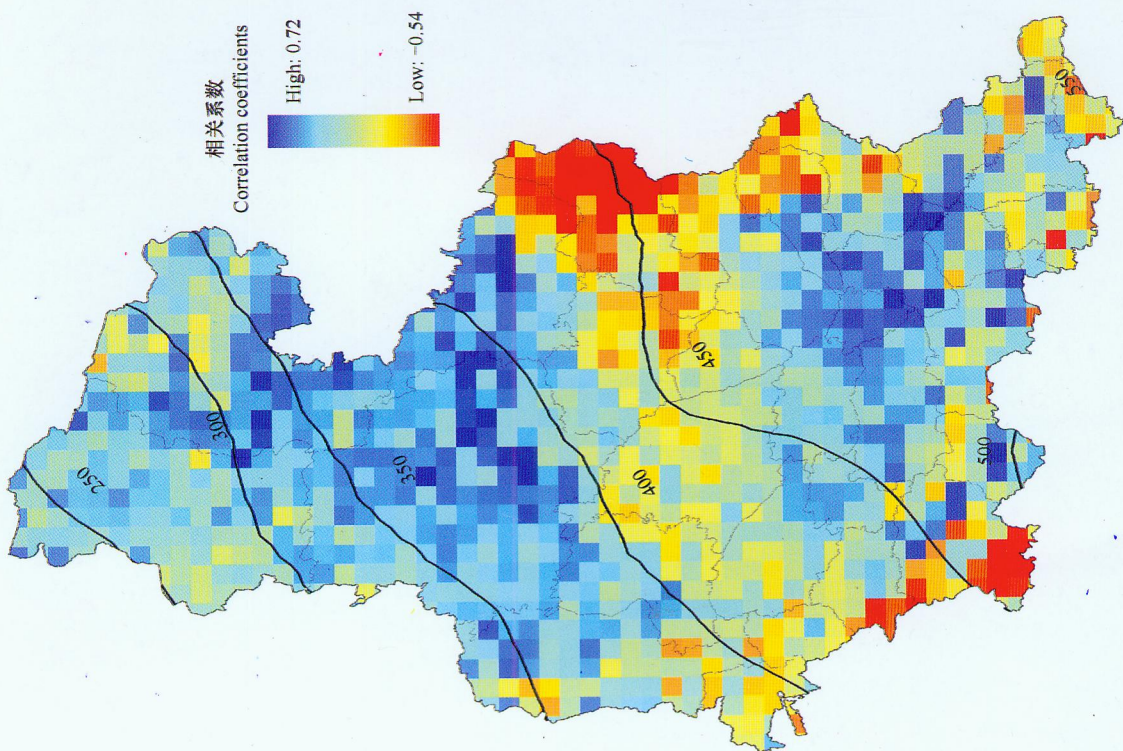


图 4 前 6 个主成分的空间形态
Fig.4 Spatial patterns of the first six principle components



a 零延迟 No delay



b 1月延迟 One month delay

图 5 逐年降雨与 NDMI 相关系数 (1982~2003) 与多年平均年降雨等值线图

Fig.5 Spatial correlation coefficients between inter-annual precipitation and NDMI from 1982 to 2003 and comparison to rainfall isolines