

# 黄土高原地区植被覆盖时空演变对气候的响应<sup>\*</sup>

信忠保<sup>1,2</sup> \*\* 许炯心<sup>1</sup>

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 100039

**摘要** 利用 GIMSS/NDVI 数据对黄土高原地区 1982—2003 年期间植被覆盖变化的研究表明: 黄土高原地区植被覆盖整体呈现增加趋势, 并存在明显的空间差异. 植被覆盖改善区域主要分布在河套平原、鄂尔多斯高原、兰州北部等黄土高原的北部地区, 而退化区从西峰、延安向东到离石、临汾以至太原以西呈条带状分布. 值得关注的是虽然 20 世纪 80 年代植被覆盖增加趋势明显, 但 90 年代中期以来植被覆盖退化趋势非常显著. 降水是影响黄土高原地区植被覆盖变化的重要因素, 月降水量小于 40—60 mm 期间, 植被 NDVI 和降水量呈线性关系, 但当月降水超过 60 mm 之后, 植被 NDVI 不再有明显的增长趋势.

**关键词** 黄土高原 植被覆盖 NDVI 气候响应 时空演变

黄河是世界上最为著名的多泥沙河流, 年输沙量高达  $16 \times 10^8$  t, 黄河泥沙中 90% 来自地处黄河中游的黄土高原<sup>[1]</sup>. 黄土高原是中国独特的地貌单元, 是世界上水土流失最严重的地区之一. 植被对黄土高原的产流产沙过程具有重要影响<sup>[2-4]</sup>, 发挥了保持水土、减轻水土流失的作用. 同时, 植被覆盖反映了黄土高原地区生态环境的整体状况. 因此, 黄土高原植被覆盖状况一直被公众和科学界所关注. 近 20 多年来, 黄土高原植被覆盖变化是对全球气候和人类活动最重要的响应之一, 剧烈人类活动和气候变化背景下的黄土高原地区植被覆盖的时空变化研究, 对生态环境评估、黄河水沙发展趋势预测以及理解气候与生物相互关系都有着重要意义.

归一化植被指数 (normal difference vegetation index, NDVI) 是目前最为广泛应用的表征植被状况的指数, 它是遥感影像的近红外波段 (infrared) 和红外波段 (red) 的比值参数<sup>[5]</sup>, 计算公式是  $NDVI = (\text{infrared} - \text{red}) / (\text{infrared} + \text{red})$ , 它可以很好地反映植被覆盖、生长活力以及生物量等情况. 利用

NDVI 数据在植被覆盖变化趋势及其和气候的关系方面国外学者做了大量工作<sup>[6-8]</sup>. 近 20 年来, 植被生长受到全球变暖的影响<sup>[9, 10]</sup>, 北半球高纬地区植被活动显著增加<sup>[9, 11, 12]</sup>, 巴西热带雨林地区、非洲和中亚地区的干旱半干旱荒漠地带都是该研究领域的热点地区<sup>[13-15]</sup>. 也有很多研究将植被覆盖变化与年际最强的气候变化信号 ENSO<sup>[16-18]</sup> 和人类活动<sup>[19]</sup> 联系在一起.

国内学者在该领域也做了很多工作, 研究发现北半球春季 NDVI 年际间波动和大尺度气候系统有关, 东亚 NDVI 增长 8.0%/10 年<sup>[20]</sup>. 中国近 20 年来植被活动在增强, 与 20 世纪 80 年代初相比, 90 年代末植被地区的面积增加 3.5%, 全国平均年 NDVI 增加了 7.4%<sup>[21]</sup>. 中国西部、西北部地区植被覆盖普遍增高, 尤其是近年来降水增多的新疆<sup>[22]</sup>. 植被 NDVI 和气温关系密切<sup>[22-25]</sup>, 其季节变化和降水相关性非常高<sup>[26]</sup>, 降水是制约北方荒漠草原植被生长的根本原因, 并表现出滞后效应<sup>[27]</sup>. 气候因子对植被 NDVI 影响表现出显著的空间差异<sup>[28, 29]</sup>, 对农业而言, 在华中、新疆等灌溉农业

2006-08-30 收稿, 2006-11-16 收修改稿

\* 国家自然科学基金(批准号: 40671019)和国家自然科学基金及水利部黄河水利委员会联合重点资助项目(批准号: 50239080)资助

\*\* E-mail: xinzb.05b@gsnr.ac.cn

©1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

区,灌溉会降低农业植被的 NDVI 和降水的相关程度<sup>[24]</sup>.对黄河流域的研究表明,黄河流域植被覆盖有增加的趋势<sup>[30-32]</sup>,从年际变化看,黄河流域 NDVI 波动趋势与降水具有一定的相关性,但与径流的关系复杂,不具有明显的相关性<sup>[32]</sup>.在宏观大尺度的 NDVI 对全球气候变化响应规律方面业已做了大量工作,加强区域中尺度上 NDVI 对全球气候变化响应规律的研究,有利于加深对植被和气候之间响应关系的认识.此外,前人对全球大尺度的高植被覆盖地区研究相对较多,而对覆盖度较低的黄土高原地区中尺度研究不多,对黄土高原地区来说缺乏针对性.

作为自然地理单元的黄土高原,其范围一般认为是太行山以西,日月山以东,秦岭以北,长城以南,但考虑到黄土高原与黄河的密切联系以及保持研究的完整性,该研究中采用中国科学院黄土高原综合科学考察队在“七五”重点攻关科技项目中所确定的黄土高原范围<sup>[33]</sup>,将研究范围向北推移到阴山以南,包括黄土高原及其北部毗邻地区,称为“黄土高原地区”,面积  $62.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,人口近 1 亿人.

## 1 数据与方法

本文使用的 NDVI 数据来自美国航空航天局(NASA)全球监测与模型研究组(Global Inventor Modeling and Mapping Studies, GIMMS)发布的 GIMMS/NDVI 最大值半月合成数据<sup>[34-36]</sup>. Slayback 等<sup>[37]</sup>的研究认为,该数据在黄土高原地区的应用是可靠的,用来分析植被覆盖是合适的.该研究用到的 NDVI 数据为从 1982—2003 年共 22 年 528 个时相栅格图像数据,其中每月有两个时相的半月数据,上半月是 1—15 日,下半月数据是 16 日至月末,空间分辨率是 8 km.对于该数据作了如下几个方面的校正<sup>[12, 38]</sup>:(i)校正了由火山喷发造成同温层气溶胶的影响;(ii)对北半球冬季由于最大太阳高度角导致的数据缺失进行插补;(iii)交叉辐射定标;(iv)通过云监测,消除了云遮盖;(v)卫星漂移;(vi)消除了亚相元云和水汽影响.

本研究所使用的气候数据为 1982—2001 年间 58 个气象站的月平均气温和月降水资料,来自中国气象局.

本文地形数据来源于中国科学院资源与环境数据中心的全国 1:25 万 DEM 数据.

在 GIS 软件 ARC/INFO 的 GRID 模块中,利用黄土高原地区的边界提取研究区内的 NDVI 栅格图像数据,同样提取 25 万比例尺的地形数据.该研究中所有栅格图像数据的坐标投影都统一采用 Albers 等积投影(Krasovsky 1940 Albers).月 NDVI 数据通过上下两幅半月数据算术平均计算得到,年平均 NDVI 数据是 24 幅半月数据的平均值.

## 2 结果与分析

### 2.1 时间趋势

**2.1.1 植被年际变化趋势** 从图 1(a)年均 NDVI 波动曲线可见,1982—2003 年黄土高原地区的植被 NDVI 整体呈微弱的上升趋势,植被覆盖略有增加,但相关系数仅为 0.34,只能通过  $p < 0.1$  检验.从年代来看,20 世纪 80 年代年均 NDVI 增长趋势明显;90 年代年均 NDVI 表现为以 1998 年为波峰、1994 年和 2000 年为波谷的大振幅波动过程,总体上未见增大趋势.

**2.1.2 不同季节植被的 NDVI 变化趋势** 从季节来看,黄土高原地区春秋季节植被覆盖呈现明显的上升趋势(图 1(b)),由线性回归方程的斜率推算,春季 NDVI 每 10 年增长 3.1%,秋季 NDVI 平均每 10 年增加 2.5%,但就整个黄土高原地区而言,夏季和冬季并没有发现明显的变化趋势.春季 NDVI 增长趋势最为显著,增长速度最大,这与其他学者得出的北半球春季植被活动加强的趋势一致<sup>[38, 39]</sup>.Houghton<sup>[40]</sup>和 Piao 等<sup>[41]</sup>认为生长季的延长(包括春季提前和秋季推迟)和生长季的生长加速导致北半球陆地植被活动增强的两个重要方面,黄土高原春秋季节植被 NDVI 增大可能是对全球变暖的响应.

**2.1.3 不同月份植被 NDVI 变化趋势** 利用线性回归斜率推算出了 22 年累积变化量每个月的增量,并点绘了分布直方图(图 2(a)),从中同样可以发现春秋季节增长明显,尤其是 2—5 月和 8—10 月,其中以 2 月,5 月和 10 月增长量最大,22 年累积增长量分别是 10%,9%和 9%.

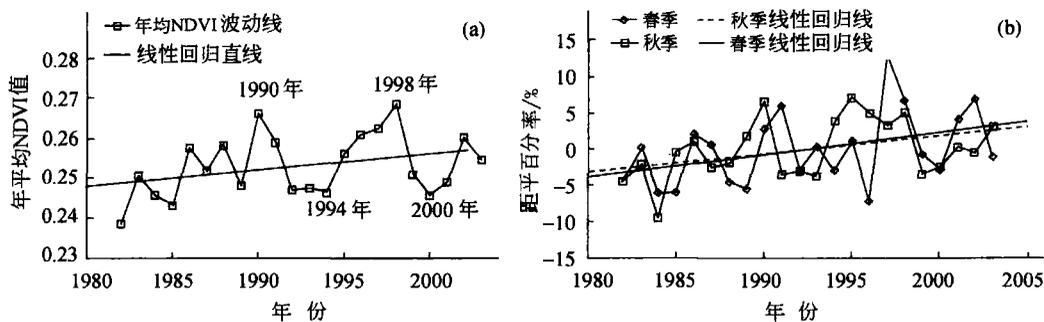


图 1 1982—2003 年黄土高原地区植被 NDVI 年际变化曲线

(a) 年均 NDVI 年际波动; (b) 春秋季节 NDVI 的年际波动

黄土高原地区在 8 月份期间的植被覆盖度最高, NDVI 亦最大, 因此, 8 月份的 NDVI 对黄土高原地区的植被覆盖水平具有最好的代表性. 图 2(b) 给出了 1982—2003 年黄土高原地区 8 月份平均 NDVI 的变化过程. 从中可以看出, 1990/1991 年是植被 NDVI 变化的转折点, 1982—1990 年期间

NDVI 在不断提高, 趋势性明显 (相关系数  $r=0.73$ ,  $n=9$ ,  $p<0.01$ ), 1991—2003 年 NDVI 下降趋势明显, 尤其是经过 1991—1995 大振幅振荡之后, 1996 年以来植被 NDVI 下降趋势非常显著 ( $r=0.81$ ,  $n=8$ ,  $p<0.01$ ), 值得关注.

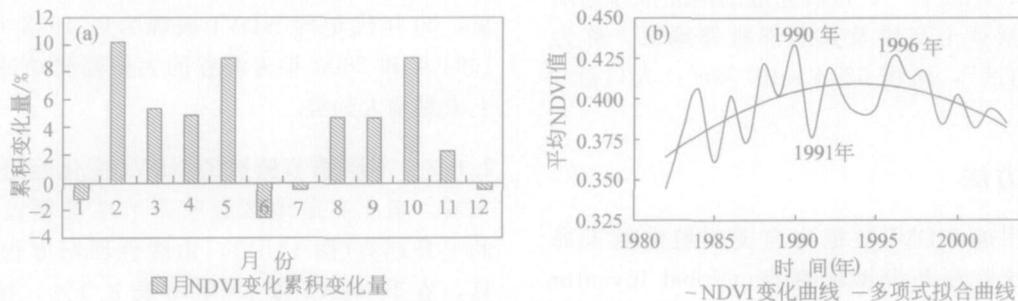


图 2 1982—2003 年黄土高原地区植被 NDVI 不同月份年际变化

(a) 各月累积变化量; (b) 8 月 NDVI 变化曲线

## 2.2 空间差异

### 2.2.1 年际变化趋势的空间差异

由于上述 NDVI 时间序列是研究区内所有像元的平均结果, 因此, 所体现的只是黄土高原地区整体变化趋势, 并没有反映出植被覆盖变化趋势的空间差异. 将研究区内每个栅格的年平均 NDVI 序列与其对应的时间进行相关系数计算, 相关系数为正表明在 1982—2003 年期间该栅格所在位置年平均 NDVI 序列有增加趋势, 植被覆盖在逐步提高, 相反, 呈负相关则表明当地植被覆盖降低.

图 3(a)和图 3(b) 是分别用相关系数和相关置信度水平来表达的植被覆盖年际变化趋势的空间分

布图, 可以看到黄土高原地区植被覆盖在 1981—2003 年段期间发生了很大变化. 从整体来看, 植被覆盖在提高, 这和人前相关研究结论基本一致<sup>[30-32]</sup>. 黄土高原地区植被覆盖变化存在明显的区域差异, 植被覆盖显著增加的区域主要分布在黄土高原地区的北部: 鄂尔多斯高原、山西北部、河套平原等地区, 同时, 在兰州的北部、渭河的支流葫芦河流域的中东部、泾河的中下游和北洛河的下游以及清水河谷地等区域也存在不同程度的植被覆盖增加趋势; 植被覆盖下降的区域主要分布在从西峰、延安向东到离石、临汾以至太原以西呈条带状分布的黄土高原中部地区, 六盘山山区以及秦岭北坡, 同时, 在包头—呼和浩特一带、银川南部青龙

峡附近呈斑块状分布。植被覆盖显著提高的河套平原、清水河两岸是近 20 多年来当地灌溉农业持续发展的结果，鄂尔多斯高原植被覆盖的提高体现了近年来的大量退耕还林还草、禁牧圈养等生态建设工作所带来的生态自然恢复过程，而黄土高原腹地和山西中西部的植被退化和降水减少等气候变化相关。

图 2(b) 显示黄土高原地区植被覆盖变化表现出前后两个时期变化趋势相反的阶段性特点。为了进行比较，提取以 1982—1989 年为代表的 80 年代和 1996—2003 年为代表的 90 年代中期以来的 8 月份植被 NDVI 数据，进而得到这两个阶段的植被覆盖变化的空间分布特征图(图 3(c)和图 3(d))，从图中可见，20 世纪 80 年代黄土高原地区除了青海东部、

秦岭北坡、山西局部地区植被覆盖呈斑块状退化之外，植被覆盖整体增加趋势明显，而自 20 世纪 90 年代中期以来，黄土高原地区植被覆盖以退化为主导的趋势非常显著。近 20 年来，黄土高原地区的气候明显地向干热化趋势发展(参见图 6(a)和(b))，这一不利于植被生长的气候变化所造成的影响，在 80 年代由于大量的水土保持工作和迅速发展的农业生产活动并没有在植被覆盖变化过程中体现出来，相反，植被覆盖还在不断提高。但经过 90 年代前期的徘徊，90 年代之后，从整个黄土高原地区来看，植被覆盖退化趋势显著，气候变化对黄土高原地区植被建设造成的不利影响已经开始凸现，生态建设形势严峻。

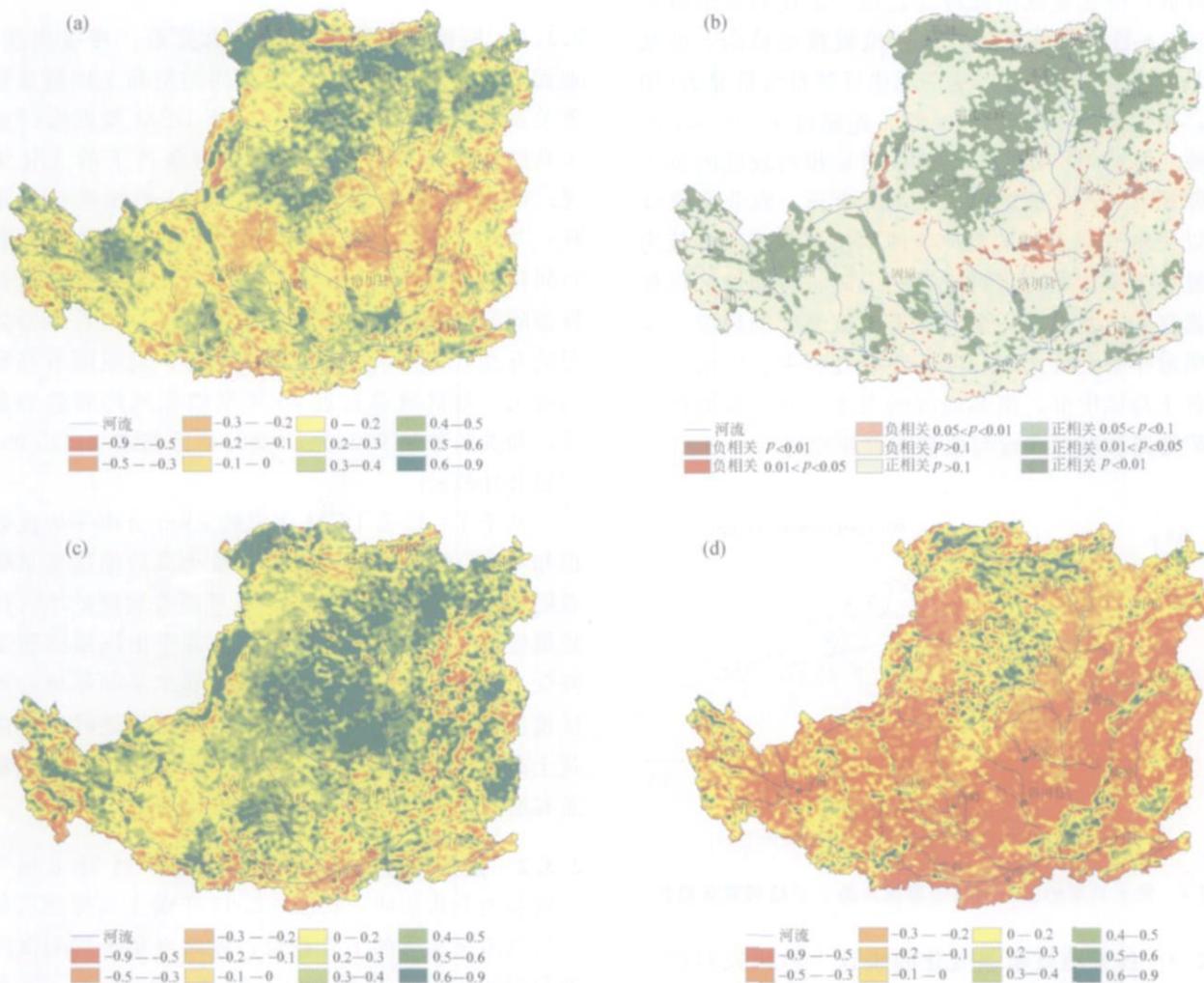


图 3 1982—2003 年黄土高原地区植被 NDVI 时空演变图

(a) 年均 NDVI 与年相关系数图; (b) 年均 NDVI 与年相关性置信度水平图; (c) 1982—1989 年 8 月 NDVI 与年相关系数图;

(d) 1996—2003 年 8 月 NDVI 与年相关系数图。相关系数为正值(绿色)表征植被覆盖在改善, 为负值(红色)表征植被覆盖在退化

**2.2.2 各县植被覆盖变化的空间差异** 为了将黄土高原地区植被演变特征在空间上进一步深化, 以及便于和生态建设过程中最为熟悉的县域联系在一起, 我们对黄土高原地区 285 个县的植被变化进行了研究, 以期对当前黄土高原地区生态建设具有一定的指导作用. 以代表多年植被覆盖程度的多年 NDVI 平均值为横轴, 以各县 NDVI 与时间相关系数为纵轴, 分别按 1—12 月份点绘成图(图略). 图中表明, 随着各县平均 NDVI 的增大, 在 5—10 月县植被 NDVI 与时间相的相关系数有减小的趋势, 即植被覆盖低的地区相关系数呈现较大正相关, 植被覆盖具有明显转好的趋势, 随着县平均 NDVI 的增大, 相关系数在减小, 说明植被覆盖转好的趋势在降低. 随之县域植被覆盖表现为退化的县也越来越多. 8 月份的黄土高原地区植被覆盖最高, 植被 NDVI 的水平亦最高, 这一规律反映得也最显著(图 4), 相关系数  $-0.516 (n=285)$  远超过  $p < 0.001$  的检验. 该趋势可能是由于植被覆盖相对较低的黄土高原北部、西北部地区由于水保措施、农业灌溉发展以及对气候变化的响应等原因植被覆盖改善较为明显, 而植被覆盖相对较高的中部、南部地区植被覆盖改善不明显, 甚至出现了植被退化的现象. 这表明近年来在黄土高原生态建设过程中, 应适当加强黄土高原中部、南部地区的力度, 并有效地防止工矿道路和城市建设对植被的破坏作用.

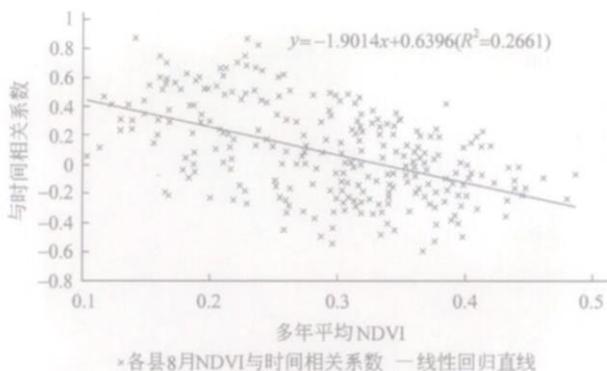


图 4 黄土高原地区不同植被覆盖度的各县植被变化趋势

**2.2.3 各县植被覆盖变化的统计** 将研究时段分为 1982—1992 年和 1993—2003 年前后两个时段, 统计两个阶段期间每个县的 NDVI 年均值和变化率, 结果表明(表 1), 植被覆盖增加的县占总县数

目的 62.9%, 其中增加量大于 5% 的占 10.1%, 皋兰县 NDVI 增加 14.4%. 同时, 37.1% 的县的植被覆盖在降低, 降幅大于 5% 的县占总县的 4.6%, 其中汾西县的 NDVI 下降 7.5%, 汾西县植被覆盖退化在其他相关研究也有发现<sup>[42]</sup>. 植被覆盖增加的趋势不管从数量还是强度上都比植被降低趋势明显, 可见植被覆盖增加是黄土高原地区近 20 多年来的主要特征.

表 1 1982—2003 年黄土高原地区各县植被变化统计表

累积变化率/%	-10--5	-5-0	0-5	5-10	10-15
县的个数/个	13	93	151	25	4
所占总县百分比/%	4.6	32.5	52.8	8.7	1.4

### 2.3 影响因素分析

**2.3.1 植被覆盖和地貌因子的关系** 海拔高度、地面坡度等地貌因子与土地利用类型和土地覆盖程度关系密切, 在此利用 1:25 万 DEM 数据探讨黄土高原地区植被覆盖在不同地貌条件下的变化情况. 以 50 m 为高程等间距对 DEM 数据进行重采样, 并计算出每个地形栅格所对应的年均 NDVI 和时间相关系数. 图 5(a) 中点绘了黄土高原地区植被覆盖随海拔高程上的变化, 从中可见, 随着地面高程的升高, 相关系数有增大的趋势, 说明随着高程的增大, 植被覆盖在近 20 年来增加的趋势愈加显著, 相关系数是  $0.396 (n=88)$ , 已超过  $p < 0.001$  的显著性检验.

基于 1:25 万 DEM 生成的 8 km 分辨率坡度数据和年 NDVI 时间序列点绘了黄土高原地区植被覆盖随坡度的变化(图 6(b)), 可见随着坡度的增大植被覆盖增大的趋势在逐步下降, 甚至出现植被覆盖降低. 坡度平缓的农业种植区和鄂尔多斯草地沙地区植被覆盖有所提高, 而相对地形比较破碎陡峭的黄土高原沟壑丘陵区以及吕梁、秦岭山地区植被覆盖有所降低, 图 6(b) 中的变化与此有关.

**2.3.2 植被覆盖和温度的年际关系** 对 58 个气象资料的分析表明, 1982—2001 年黄土高原地区年平均气温呈显著的上升趋势, 各站点年平均温度序列和时间相关系数都在 0.5 以上(西宁-0.178 例外), 区内差异不大. 58 站点平均温度序列和时间的相关系数是 0.721, 通过了 0.001 置信度水平检

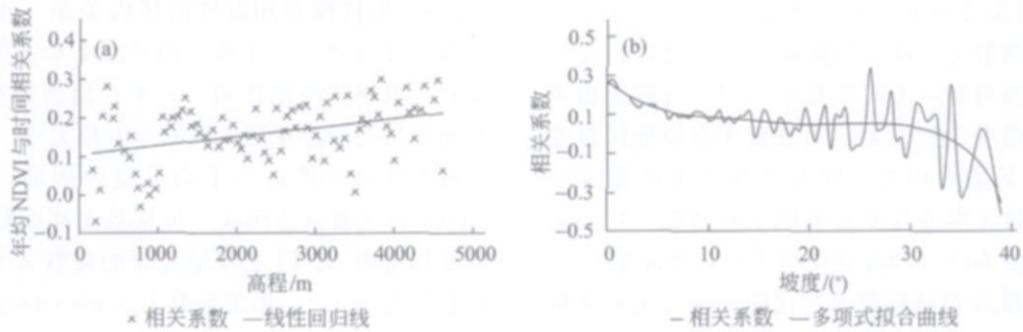


图 5 1982—2003 年植被变化在高程和坡度上的变化差异

(a) 植被随高程增大的变化规律; (b) 植被随坡度增大的变化规律

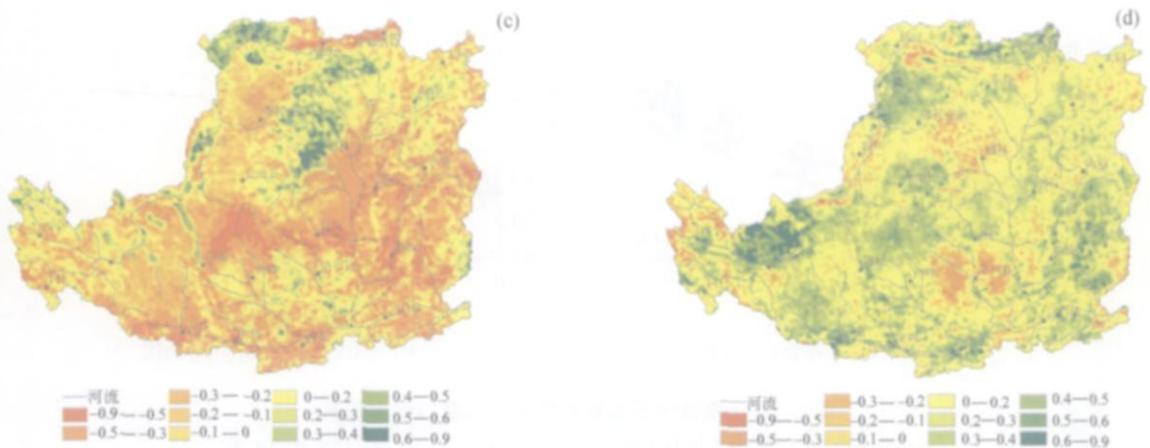
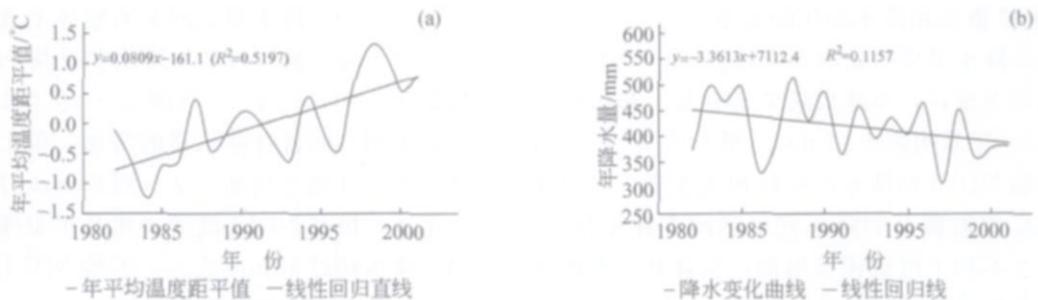


图 6 黄土高原地区气候变化及其夏季 NDVI 和温度降水年际相关性的空间分布

(a) 1982—2001 年平均温度变化趋势; (b) 1982—2001 年降水变化趋势;

(c) 夏季 NDVI 和温度相关系数的空间分布; (d) 夏季 NDVI 和降水相关系数的空间分布

验, 线性回归增长速度是  $0.809\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ , 温度上升非常明显(图 6(a)). 年平均温度和 NDVI 的相关系数是 0.318, 呈正的弱相关. 植被和气温之间相关性不高, 可能存在如下 3 个方面原因: (i) NDVI 和气温数据都是面上多站点数据进行平均的结果;

(ii) 气温年际变化量相对不大, 影响主要体现在对植被季节生长控制方面; (iii) 气温只是植被生长影响因素之一, 降水也影响植被的变化(见后).

考虑到夏季是黄土高原植被生长最为旺盛的时期和 6—9 月份是黄土高原地区的汛期, 将 58 个站

的 6—9 月份温度数据平均, 然后用 ARC/INFO 软件进行空间离散化, 进行与同期 NDVI 进行相关系数计算, 进而得到黄土高原夏季 NDVI 与温度相关的空间分布情况(图 6(c)). 可见黄土高原地区温度和植被的关系呈负相关, 即温度升高植被覆盖减少. 由于温度年际变化是显著的上升趋势, 它们之间的关系已由 NDVI 年际变化所主导, 因此图 6(c) 的空间分布模式和植被覆盖变化的空间变化非常相似. 温度的上升增加了地面水分蒸发, 促进土壤的干化, 这对于降水原本缺乏的黄土高原地区的植被生长极其不利.

**2.3.3 植被覆盖和降水的年际关系** 近 20 年来黄土高原地区降水呈现明显的下降趋势(图 6(b)), 从线性回归斜率推算, 年降水减少速率为 3.36mm/a, 年降水量 20 年累积减少 67 mm. 图 6(d) 是 6—9 月份期间植被 NDVI 和降水的年际相关关系, 可见黄土高原地区植被覆盖和降水在年际间存在正相关, 降水的减少不利于植被覆盖增加, 但森林分布的子午岭和黄龙山地区对降水响应不敏感.

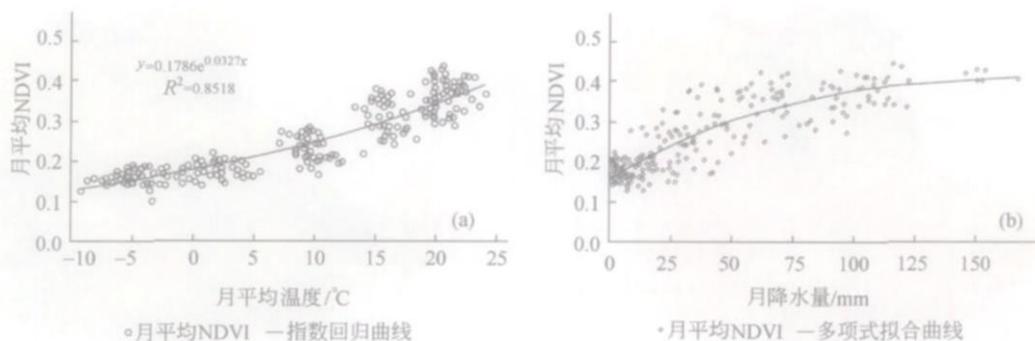


图 7 黄土高原地区植被和气温、水量的年内关系

(a) 月平均 NDVI 和月平均温度的关系; (b) 月平均 NDVI 和月降水量的关系

### 3 结论与讨论

本文利用 GIMSS/NDVI 数据基于 Arc/Info 软件对黄土高原地区期间植被覆盖变化的时间过程和空间特征进行了研究. 1982—2003 年期间黄土高原地区的植被覆盖呈明显的上升趋势, 但存在明显的空间差异. 从年代来看, 80 年代年均 NDVI 整体呈现稳定的增长, 增长趋势明显, 90 年代存在较大振

**2.3.4 植被覆盖和温度的年内关系** 由于太阳辐射等天文因素在 1 年周期的尺度上对温度和植被生长具有很强的控制作用, 月平均温度和植被 NDVI 时间序列之间存在非常高的年内相关性. 图 7(a) 是以黄土高原地区各月平均温度为横轴, 以月平均 NDVI 为纵轴点绘而成, 可见黄土高原地区月平均温度和植被 NDVI 之间呈显著的指数关系, 复相关系数高达 0.852, 相关系数为 0.906 ( $n=240$ ).

**2.3.5 植被覆盖和降水的年内关系** 图 7(b) 是以黄土高原地区 58 站点各月平均降水为横轴, 以月平均 NDVI 为纵轴点绘而成, 可见黄土高原地区植被 NDVI 和月降水量之间关系整体呈现线性增长趋势, 黄土高原地区月平均降水和平均 NDVI 相关系数是 0.849 ( $n=240$ ), 远超过  $p < 0.001$  的检验. 图 7(b) 表明, 随着月降水量的增加, 黄土高原地区的月均 NDVI 随之增加, 从 0 到 60 mm 月均 NDVI 增加迅速, 植被 NDVI 随着降水几乎呈线性上升. 但当月降水超过 60 mm 之后, 平均 NDVI 维持在 0.40 上下, 不再有明显的增长趋势.

幅的波动, 变化趋势不明显, 但 90 年代中期以来植被退化趋势非常显著. 黄土高原地区植被覆盖变化存在明显的空间差异, 植被覆盖显著增加的区域主要分布在黄土高原的北部: 鄂尔多斯高原、山西北部、河套平原等地区; 植被覆盖下降的区域主要分布在从西峰、延安向东到离石、临汾以至太原以西呈条带状分布. 近 20 年来黄土高原地区气候向暖干趋势发展, 黄土高原植被 NDVI 和气温年际相

关呈现出较弱的正相关, 年内变化则呈显著的指数关系. 黄土高原地区平均 NDVI 和降水的年内明显, 月降水量小于 40—60 mm 期间, 植被 NDVI 和降水量呈线性关系, 但当月降水超过 60 mm 之后, 植被 NDVI 不再有明显的增长趋势.

植被覆盖对气候响应过程是一个非常复杂的多圈层交互作用过程. 该研究中用的 GIMSS/NDVI 数据的空间分辨率是 8 km, 数据稍显不够精细, 22 年时间序列还不够长, 这些不足随着遥感技术的发展会得到逐步的改善和提高. 不同土地利用类型的植被对气候响应的差别很大, 并且植被 NDVI 的时空演变是气候变化、水土保持、土地利用等自然和人类活动多种因素综合作用的结果, 因此, 土地利用类型上的植被覆盖对气候变化的响应规律和气候变化之外的因素对植被覆盖变化影响都有待进一步研究.

**致谢** Thanks are extended to the NDVI datasets distributors: NASA GIMMS team (Compton Tucker, Molly Brown, Jorge Pinzon and Colleagues) for their NDVI datasets.

参 考 文 献

- 1 钱 宁, 王可钦, 闫林德, 等. 黄河中游粗泥沙来源区对黄河下游冲淤的影响. 中国水利学会. 第一次河流泥沙国际学术讨论会论文集. 北京: 光华出版社, 1980, 53—62
- 2 Douglas I. Man, vegetation and sediment yield of river. *Nature* 1967, 215: 925—928
- 3 卢金发, 黄秀华. 土地覆被对黄河中游流域泥沙产生的影响. *地理研究*, 2003, 22(5): 571—578
- 4 陈 浩, 蔡强国. 坡面植被恢复对沟道侵蚀产沙的影响. *中国科学*, D 辑, 2006, 36(1): 69—80
- 5 Tucker C.J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 1979, 8(2): 127—150
- 6 Cihlar J, Laurent St, et al. relation between the NDVI and ecological variables. *Remote Sensing of Environment*, 1991, 35(3): 279—298
- 7 Nicholson SE, Farrar T.J. The influence of soil type on the relationship between NDVI, rainfall, and soil moisture in semiarid Botswana. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 50 (2): 107—120
- 8 Eklundh L. Estimating relations between AVHRR NDV I and rainfall in East Africa at 102 day and monthly time scales. *Inter-*

- national Journal of Remote Sensing, 1998, 19 (3): 563—568
- 9 Myneni RB, Keeling CD, Tucker CJ, et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981—1999. *Nature*, 1997, 386: 698—702
- 10 Myneni RB, Tucker CJ, Asar G, et al. Interannual variations in satellite sensed vegetation index data from 1981 to 1991. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(6): 6145—6160
- 11 Keeling CD, Chin JFS, Whorf TP. Increasing activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO<sub>2</sub> measurement. *Nature*, 1996, 382: 146—149
- 12 Zhou L, Kaufmann RK, Tian Y, et al. Relation between interannual variations in satellite measures of northern forest greenness and climate between 1982 and 1999. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(1): 1029—2002
- 13 Tucker C.J, Nicholson SE. Variations in the size of the Sahara desert from 1980 to 1997. *Ambio*, 1999, 28(7): 587—591
- 14 Beurs KM, Henebry GM. Trend Analysis of the Pathfinder AVHRR Land (PAL) NDVI data for the deserts of central Asia. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2004, 1 (4): 282—286
- 15 Barbosa HA, Huete AR, Baethgen WE. A 20-year study of NDVI variability over the Northeast region of Brazil. *Journal of Arid Environments*, 2006, 37(2): 288—307
- 16 Anyamba A, Eastman JR. Interannual variability of NDVI over Africa and its relation to El Nino/Southern Oscillation. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(13): 2533—2548
- 17 Li ZT, Kafato M. Interannual variability of vegetation in the United States and its relation to El Nino/Southern Oscillation. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 71(3): 239
- 18 Buermann W, Anderson B, Tucker CJ, et al. Interannual covariability in Northern Hemisphere air temperatures and greenness associated with El Nino-Southern Oscillation and the Arctic Oscillation. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2003, 108(13): 4396
- 19 Vicente-Serrano SM, Lasanta T, Romo Alfredo. Analysis of spatial and temporal evolution of vegetation cover in the spanish central pyrenees; Role of human management. *Environment Management*, 2005, 34(6): 802—818
- 20 Gong DY, Shi PJ. Northern hemispheric NDVI variations associated with large-scale climate indices in spring. *Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(12): 2559—2566
- 21 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, 33(6): 554—565
- 22 Zhang J, Zhang Q, Yang LH, et al. Seasonal characters of regional vegetation activity in response to climate change in West China in recent 20 years. *J Geographical Sciences*, 2006, 16(1): 78—86
- 23 孙红雨, 王常耀, 牛 铮, 等. 中国植被覆盖变化及其与气候

- 因子关系—基于 NOAA 时间序列数据. 遥感学报, 1998, 2(3): 204—210
- 24 李本纲, 陶 澍. AVHRR-NDVI 与气候因子的相关分析. 生态学报, 2000, 20(5): 898—902
- 25 龚道溢, 史培军, 何学兆. 北半球春季植被 NDVI 对温度变化响应的区域差异. 地理学报, 2002, 57(5): 505—514
- 26 唐海萍, 陈玉福. 中国东北样条带 NDVI 的季节变化及其与气候因子的关系. 第四纪研究, 2003, 23(3): 318—325
- 27 李晓兵, 史培军. 中国典型植被类型 NDVI 动态变化与气温、降水敏感性分析. 植被生态学报, 2000, 24(3): 379—382
- 28 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. 生物生态学报, 2001, 25(6): 716—720
- 29 李晓兵, 陈云浩, 张云霞, 等. 气候变化对中国北方荒漠草原植被的影响. 地球科学进展, 2002, 17(2): 254—261
- 30 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, 56(6): 667—672
- 31 杨胜天, 刘昌明, 孙 睿. 近 20 年来黄河流域植被覆盖变化分析. 地理学报, 2003, 57(1): 679—692
- 32 李春晖, 杨志峰. 黄河流域 NDVI 时空变化及其与降水/径流关系. 地理研究, 2004, 23(6): 753—759
- 33 中国科学院黄土高原综合科学考察队. 黄土高原地区综合治理与开发—宏观战略与总体方案. 北京: 中国科学技术出版社, 1991, 5
- 34 Pinzon J. Using HHT to successfully uncouple seasonal and interannual components in remotely sensed data. SCI 2002. Conference Proceedings Jul 14—18. Orlando, Florida
- 35 Pinzon J, Brown ME, Tucker CJ. Satellite time series correction of orbital drift artifacts using empirical mode decomposition. In: Hilbert-Huang Transform: Introduction and Applications, eds. Huang N. Chapter 10, Part II. Applications. Hackensack: World Scientific, 2004
- 36 Tucker CJ, Pinzon JE, Brown ME, et al. An extended AVHRR 8-km NDVI data set compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. International Journal of Remote Sensing, 2005, 26(20): 4485—4498
- 37 Slayback D, Pinzon J, Los S O, et al. Northern hemisphere photosynthetic trends 1982—1999. Global Change Biology, 2003, 9(1): 1—15
- 38 Zhou L, Tucker CJ, Kaufmann RK, et al. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981—1999. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(17): 20069—20083
- 39 Los SO, Collatz GJ, Bounoua L, et al. Global interannual variations in sea surface temperature and land surface vegetation, air temperature and precipitation. J Climate, 2001, 14: 1535—1549
- 40 Houghton RA. Temporal patterns of land-use change and carbon storage in China and tropical Asia. Science in China. Series C, 2002, 45(Supp): 10—17
- 41 Piao SL, Fang JY, Chen AP. Seasonal dynamics of terrestrial net primary production in response to climate change in China. Acta Bot Sin, 2003, 45(3): 269—275
- 42 蒋卫国, 陈云浩, 李 京, 等. 中国北方农牧交错带生态环境的空间格局演变. 自然资源学报, 2005, 20(6): 871—878