

人类活动对植被退化/恢复影响的空间格局 ——以陕西省为例

周洪建, 王静爱*, 岳耀杰, 李 睿

(北京师范大学地理学与遥感科学学院; 北京师范大学区域地理研究实验室;
北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875)

摘要: 基于陕西省 1998 ~ 2005 年 SPOT_{VEG} NDVI 月数据和月降水序列的相关性分析, 构建修正的归一化植被指数 (*C-NDVI*) 剔除降水量对 *NDVI* 的影响, 探讨了人类活动对植被影响的空间格局。主要结论: ① 陕西省 *NDVI* 和降水量间存在显著的相关性, 相关系数呈现出北高南低中间最低的空间格局, 与所处气候带和土地利用状况的差异有关; ② 1998 ~ 2005 年人类活动对植被的影响表现出显著的空间差异性, 北部地区以植被恢复为主, 年增长率在 2.1% ~ 4.1%, 其驱动力主要是退耕还林(草)、防沙治沙工程中对植被的保护和恢复性措施; 中部平原区水浇地、城镇用地集中分布, 表现出水浇地区人为活动对植被变化基本无影响, 而城镇用地扩展区导致植被退化; 中北部、南部林地分布区地形坡度大、降水量相对丰富, 人类活动对植被的影响表现为植被退化, 可能是经济林、用材林的周期性采伐所致。研究可为区域优化土地利用结构, 合理规划和调整生态建设布局提供依据。

关键词: 植被退化; 植被恢复; 修正的归一化植被指数 (*C-NDVI*); 空间格局; 陕西

文章编号: 1000-0933(2009)09-4847-10 中图分类号: Q14, Q948, Q988, X24 文献标识码: A

Research on spatial pattern of human-induced vegetation degradation and restoration: a case study of Shaanxi Province

ZHOU Hong-Jian, WANG Jing-Ai*, YUE Yao-Jie, LI Rui

College of Geography and Remote Sensing Science, Beijing Normal University; Key Laboratory of Regional Geography, Beijing Normal University; Key Laboratory of Environment Change and Natural Disaster, Ministry of Education of China / Beijing Normal University; Beijing 100875, China
Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(9): 4847 ~ 4856.

Abstract: Monitoring and mapping the effects of human activities on land performance change is necessary for optimizing regional land use structure and evaluating the effects of ecological programs. In this study, *NDVI* data derived from SPOT VEGETATION and monthly rainfall data during 1998 — 2005 were used to estimate vegetation change in Shaanxi province. Corrected *NDVI* (*C-NDVI*), the temporal trends in the differences between the observed *NDVI* and the *NDVI* predicted by the rainfall, was developed to evaluate the effects of human activities on vegetation change (degradation and restoration). through filtering out the effects of rainfall on *NDVI*-value change. Also, the spatial pattern of *C-NDVI* was analyzed. The results showed that, (i) there was a strong relationship between integrated monthly *NDVI* data and rainfall volume, while the correlation coefficient increased from south to north and it had the lowest value in central part of Shaanxi due to large areas of irrigated farmland, which had low dependence on rainfall. In the southern part of the province, which has a more humid climate low coefficient was delineated. (ii) The spatial patterns of human-induced vegetation change in 1998 — 2005 were obviously different in four parts. In the north of Shaanxi, the *C-NDVI* suggested a upward trend in the capacity of vegetation restoration, with the annual increase rate of 2.1% — 4.1%, due to the “Grain for Green” program and “preventing and combating desertification and sandification” program. With large areas of irrigated farmland and urban land, the *C-NDVI* in central part indicated degraded vegetation in urban sprawl areas and it had remained more or less

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40671003); 国家杰出青年科学基金资助项目(40425008)

收稿日期: 2008-06-11; 修订日期: 2008-12-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sqq@bnu.edu.cn

constant over 8 years in irrigated field. In the central-northern part and southern parts, large areas of forestland represented a downward trend in vegetation coverage, which could be understood as the vegetation degradation, and the reason might be the seasonal disafforestation in economic forest land.

Key Words: vegetation degradation; vegetation restoration; Corrected *NDVI* (*C-NDVI*); spatial pattern; Shaanxi

土地退化是我国最严重的生态问题之一,植被覆盖降低加剧水土流失、风蚀沙化,是造成近年来水灾频繁、风沙加剧的根源^[1,2]。生态恢复的相关研究作为当前科学发展的前沿领域之一^[3,4],其效果主要体现在区域的资源和环境效应上^[5,6],其中植被恢复是生态恢复主要外在表现之一。地表植被变化是人类活动和气候因素共同作用的结果^[7],因气候因素的易变性和难控制性,客观、可重复地监测人类活动对地表植被影响的空间格局成为区域有效防治土地退化和实施生态恢复工程的重要支撑^[7,8]。

在干旱、半干旱地区,水分是决定植被组成和分布的主要因素^[9,10],这在较大空间区域内分析植被覆盖与降水的关系提供了可能^[11]。归一化植被指数(normalized difference vegetation index, *NDVI*)是评估植被状况的最有效参数之一^[12],且已被成功地应用到地表植被分布、植被生产力及其动态变化的时空趋势和土地退化评估的研究中^[13~17]。本文在分析月均 *NDVI* 与降水量关系的基础上,通过构建修正的归一化植被指数(corrected *NDVI*, *C-NDVI*)分析了人类活动对区域植被影响的空间格局,旨在为区域优化土地利用结构,合理规划和调整生态恢复建设格局提供依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

陕西省是我国水土流失、沙化等生态问题最为严峻的省区之一,水土流失面积占全省土地总面积的 66.9% (图 1a),其中山地丘陵地区平均水力侵蚀率为 150 t/(hm²·a)^[18],北部风力-水力侵蚀率大于 100 t/(hm²·a),大大降低了区域农业生产能力,亦成为黄河泥沙的主要来源^[19]。根据陕西省 2000 年土地资料,土地利用类型以草地为主,占全省总面积的 47.8%,耕地包括旱地、水浇地和少量的水田,占全省总面积的 29.7%,灌丛和疏林地占 6.0%,林地(包括经济林、水源涵养林)占 13.1%,沙地占 3.3%。为防治水土流失和风蚀沙化,自 20 世纪 50 年代以来,陕西省在全国生态建设工程项目的驱动下,先后实施了 5 项生态恢复工程,其中退耕还林(草)工程和天然林资源保护工程覆盖全省(图 1b),截至 2004 年底,全省 60% 的水土流失面积得到有效治理。以陕西省为例开展人类活动对地表植被影响的空间格局研究具有很强的代表性。

1.2 数据来源

降水数据来自国家气象局提供的陕西省境内 6 个国家基准站(榆林、延安、西安、宝鸡、安康、汉中)和陕西周边省区的 20 个站点 1998 年 4 月至 2005 年 12 月的月降水量数据,在 Arcgis 9.0 的空间分析工具的插值模块(interpolation, IDW 插值方法)的支持下得到分辨率为 8 km × 8 km(合计共 3873 个像元)的 93 个月份的降雨量栅格数据。

NDVI 数据来自 SPOT VEGETATION 产品(旬数据),空间分辨率为 1 km × 1 km^[20],数据自 1998 年 4 月上旬至 2005 年 12 月下旬,共 273 幅影像。为保证与气象数据空间分辨率和时间分辨率的匹配,首先应用下式将所有像元的旬数据取平均转换为月数据,然后基于 Arcgis 9.0 的栅格工具中的重采样模块(resample)将图像的分辨率转换为 8 km。

$$NDVI_x = \frac{1}{3} \times \sum_{i=1}^3 (D_i - NDVI_x)$$

式中,*NDVI_x*指像元 *x* 的月 *NDVI* 值,*D_i-NDVI_x*指像元 *x* 的第 *i* 旬的 *NDVI* 值,*i* = 1, 2, 3。

1.3 修正的归一化植被指数(*C-NDVI*)

修正的归一化植被指数(*C-NDVI*)是剔除气候要素(文中指降水)对 *NDVI* 的影响后的 *NDVI* 值。降雨对植被生长影响的滞后效应的研究表明,不同地区由于植被组成和土壤类型的差异,降雨影响的滞后时间不

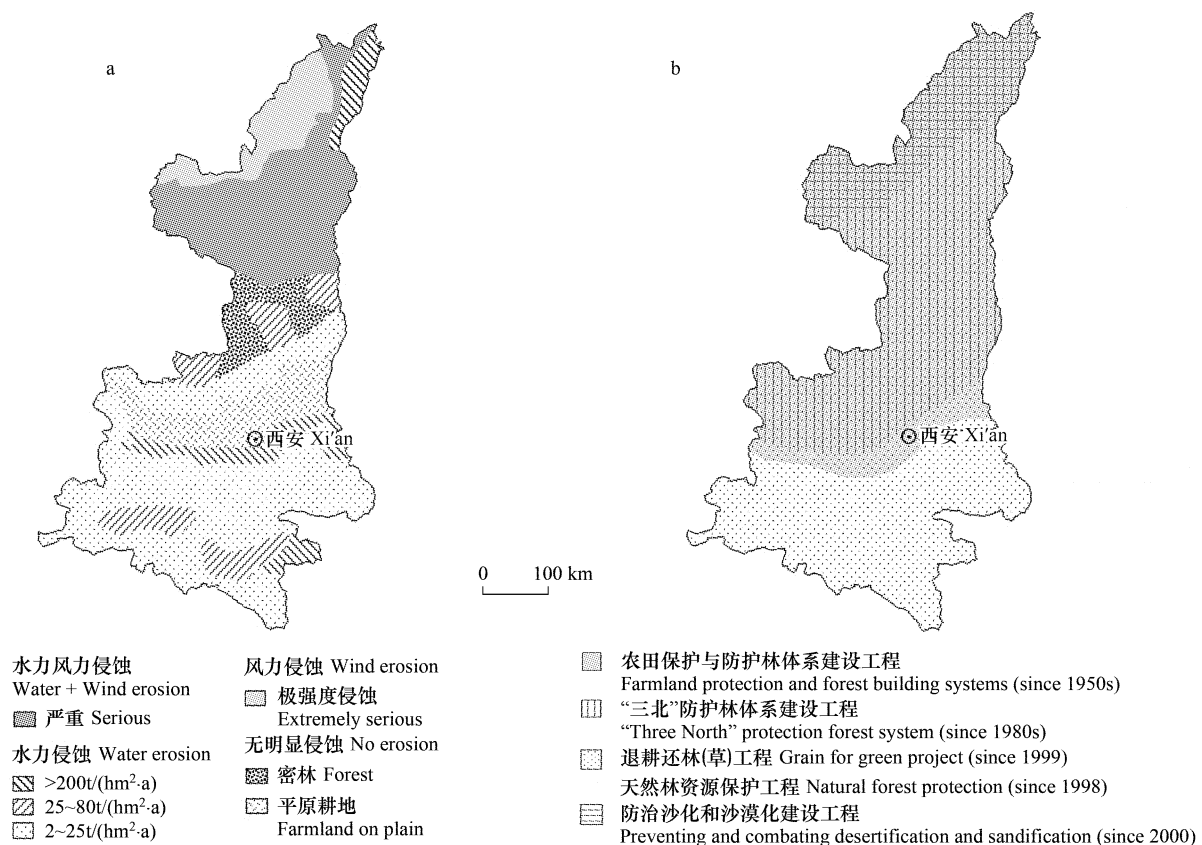


图1 陕西省土壤侵蚀分布(a),生态建设工程分布(b)

Fig. 1 Spatial distribution of soil erosion (a), and ecological programs in Shaanxi Province (b)

同^[21~22]。为确定最优的滞后时间,首先,将当月 $NDVI$ 值与本月的降水量、本月与上月的降水量的平均值、本月与上两个月的降水量的平均值等分别进行相关分析。其次,将相关性最好的降水量与 $NDVI$ 值进行线性回归分析,得到所有像元 $NDVI$ 值与降水量关系的回归方程(其形式如下式)。

$$R-NDVI_x = f(\text{Rainf all}) = \alpha R_x + \beta$$

其中, $R-NDVI_x$ 是回归方程得到的像元 x 的月 $NDVI$ 值, R_x 是像元 x 的降水量, α, β 是方程参数。再次,利用回归得到的月 $NDVI$ 值($R-NDVI$) 计算不受降水约束的修正的 $NDVI$ 值($C-NDVI$),即人类活动影响的月 $NDVI$ 值,计算公式如下。

$$C-NDVI_x = NDVI_x - \alpha R_x - \beta$$

再次,选取研究区 7~10 月(生长季)修正的 $NDVI$ 值得到各像元 1998~2005 年生长季的平均 $C-NDVI$ 值;最后,对各像元年均 $C-NDVI$ 值进行趋势分析,利用下式评价 $C-NDVI$ 值是否显著增加或降低。

$$C-NDVI_{ax} = at + b$$

其中, $C-NDVI_{ax}$ 是像元 x 各年生长季修正后的 $NDVI$ 值, t 是年份($t = 1998, 1999, \dots, 2005$), a, b 是方程参数。根据上式的坡度方向(即 a 值的正负)和 $C-NDVI$ 值与年份回归关系(即 $C-NDVI$ 与 t 的相关系数)的显著度来判断像元 x 内人类活动对植被的影响:若 $a > 0$,表明人类活动对植被的影响表现为植被覆盖率增大,即植被恢复,相反,若 $a < 0$,表明植被退化。

2 结果与分析

2.1 $NDVI$ 与降水量的相关性

陕西省 1998~2005 年月 $NDVI$ 值与降水量的相关分析表明,全省范围内两者均存在显著的相关性,但是最优的降水时段和相关系数却存在明显的空间差异(图 2a)。两者关系中以当月 $NDVI$ 值与当月的降水量存

在明显关系为主, 占全省总面积的 83.8%, 主要分布于陕西省延安市及其以南的地市和榆林市西部的榆阳、衡山和靖边等县区。东北部(榆林市东部, 主要包括府谷、神木、佳县、米脂、子洲、绥德和清涧等县)则呈现出当月 *NDVI* 值与当月和上月降水量之和存在显著的相关性, 主要原因是此区域处于黄土沟壑区, 相比于榆林西部的沙地区而言, 植被覆盖较好, 且地处半干旱地带, 植被生长需要更多的水分积累, 降水量的多少和空间分布对此区域地表植被的生长影响更为敏感; 延安及其以南的地市虽然植被覆盖也较好, 但随着纬度的降低, 区域降水量呈现递增趋势, 当月的降水可满足植被生长对水分的需求, 因此表现出当月 *NDVI* 值与当月降水量存在显著相关性。

月 *NDVI* 值与降水量的相关系数的空间分布呈现出北高南低、中部最低的格局(图 2b)。北部地区(榆林市, 延安市的吴旗、志丹、安塞、子长、延川、甘泉和延长等县市)地处半干旱地带^[23], 是降水量与 *NDVI* 值的相关性分析的最佳地区^[24], 两者表现出很好的相关性; 榆林市西部大面积沙地导致植被覆盖率较低, 在一定程度上降低了对降雨的利用效率, 成为北部地区相关系数较小的区域。中北部(延安南部富县、宜川、洛川、黄陵、黄龙等县)、中部(西安市、咸阳及渭南南部、宝鸡中南部)、南部(汉中、安康和商洛市)处于半湿润、湿润地带^[23], 降水量可满足植被生长对水分的需求, 降低了 *NDVI* 值对降雨的敏感性, 相关系数较小。其中, 中部区横跨全省, 是全省水浇地集中分布区, 水浇地的 *NDVI* 值受人类活动影响大, 季节性明显, 且水分来源主要是水库等灌溉用水, 对自然降雨的依赖性小, 加之周期性波动, 两者关系表现为负向。

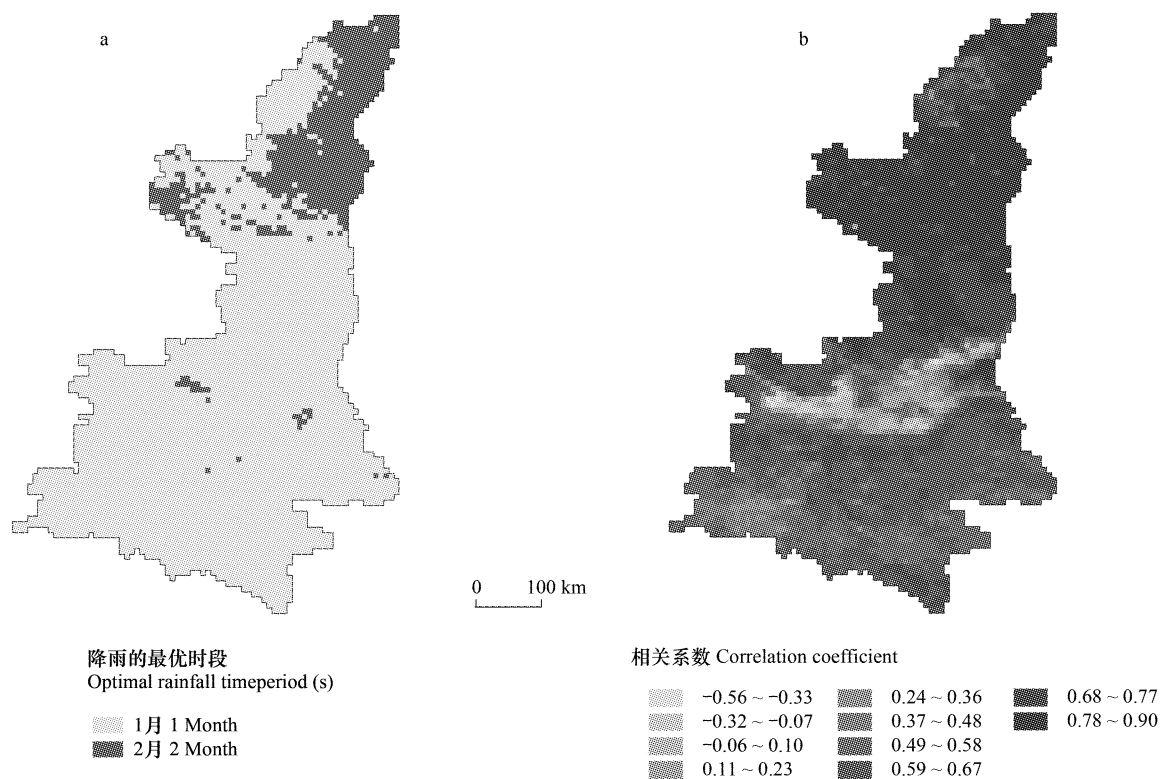


图2 陕西省 *NDVI* 值与降水量相关性分析中降雨的最优时段分布(a), 相关系数分布(b)

Fig. 2 The distribution of optimal precedent rainfall period (a), and correlation coefficient (b) between monthly *NDVI* value and optimal precedent time period rainfall volume in Shaanxi Province

2.2 植被变化的空间格局分析

降水利用率(rainfall-use efficiency, 简称为 *RUE*, 是 $\Sigma NDVI$ 和降雨量的比率)作为表达土地退化或恢复的有效指标得到较为广泛的应用^[25,26]。陕西省 7 ~ 10 月份降水利用率的结果表明, 1998 ~ 2005 年平均降水利用率呈现出南高北低的格局, 其中最低值出现在北部(图 3-i-A)的榆林地区和中部平原地区(图 3-i-C), 前者

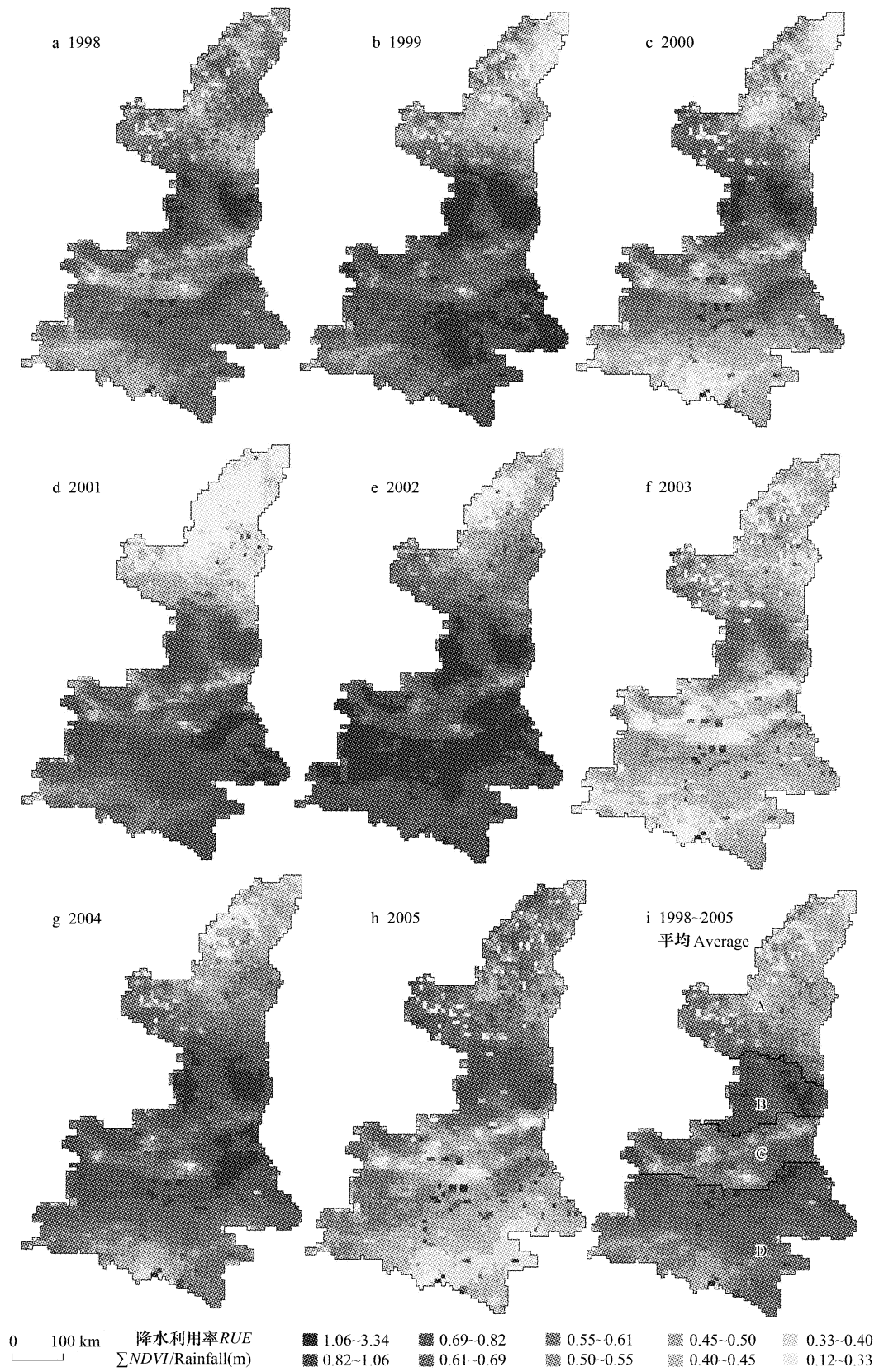


图3 陕西省1998~2005年生长期(7~10月份)降水利用率分布

Fig. 3 Distribution of rainfall-use efficiency (RUE) in the period of July to October during 1998–2005 in Shaanxi Province

是陕西省沙地分布的主要区域,降雨量少且波动大,植被覆盖低,风沙活动频繁,风蚀沙化导致土地退化严重;

后者是陕西大城市集中分布区,城市化占用农业用地,地表植被覆盖度显著降低。中北部(图 3-i-B)、南部(图 3i D)林地、灌丛集中分布,成为降水利用率的高值区,且林地分布区较灌丛分布区具有更高的降水利用率。

降水利用率的空间格局因生长季降水的波动和地表植被的变化表现出显著的年际差异(图 3a ~ 3h)。北部地区,按照降水利用率由大到小的顺序对各年份进行排序的结果与按降水量大小排序的结果对应性差,表明该区降水利用率变化受降水量波动的影响较小;两者的对应性在中部和南部地区比在北部地区稍好;中北部地区两者的排序表现出最好的对应性,1999、2002 年较低的降水量使得降水利用率表现出高值(表 1)。对各像元 1998 ~ 2005 年降雨利用率的时间趋势分析表明,8a 来只有位于北部地区的 0.8% 的像元表现出明显的 *RUE* 增加趋势,其它像元无明显的增加或降低趋势。因此,*RUE* 虽能表达地表植被的变化状况,但由人为和自然等因素的共同作用的复杂性,未能在所有像元上表现出明显的增加或者降低趋势。

表 1 陕西省不同区域 1998 ~ 2005 年降水利用率与降水量的年际排序对比

Table 1 Inter-annual variation in *RUE* and rainfall during 1998 ~ 2005 in different areas of Shaanxi province

类别 Items	排序 Sequence
降雨量 Rainfall	2003 > 2005 > 2000 > 2004 > 1998 > 2001 > 2002 > 1999
降水利用率 <i>RUE</i>	
北部 Northern part	1998 > 2002 > 2005 > 2000 > 2004 > 1999 > 2003 > 2001
中北部 Central-northern part	1999 > 2002 > 2004 > 2000 > 1998 > 2001 > 2005 > 2003
中部 Central part	2002 > 2004 > 2001 > 1999 > 1998 > 2000 > 2005 > 2003
南部 Southern part	2002 > 1999 > 2001 > 1998 > 2004 > 2000 > 2003 > 2005

2.3 人类活动对植被影响的空间格局

陕西省修正的归一化植被指数(*C-NDVI*)计算结果表明(图 4),1998 ~ 2005 年北部地区 *C-NDVI* 呈现出明显的递增趋势,表明人类活动对该地区植被的影响是正向的,即单位面积的植被生产能力提高;中北部和南部地区 *C-NDVI* 则表现出递减趋势,表明植被在人类活动影响下覆盖率降低,可能是植被类型及其组合规律发生变化导致,也可能是人类对植被的破坏导致;中部地区则呈现出东西差异,东部主要以 *C-NDVI* 增加为主,西部为表现出减小趋势。

选取 7 个典型区域对计算结果进行检验(图 4)。北部地区土地利用主要以草地和旱地为主,且旱地坡度较大(图 5a,5c),1995 ~ 2000 年该小区(小区 1,图 4)土地利用变化以旱地向草地转化为主,加之 1999 年以来实施的退耕还林(草)政策,小区内植被持续增加,1998 ~ 2005 年年增长率介于 2.1% ~ 4.1%,是人类活动作用影响下植被恢复效果最好的典型区域之一。

榆林榆阳区也表现出较明显的植被恢复趋势(小区 2,图 4),但年增长率小于 0.8%。根据 2005 ~ 2007 年榆阳区不同土地利用类型的植被盖度实地测定结果,结合相应月份的遥感 TM 影像得到的 *NDVI* 值的分布,建立遥感 *NDVI* 数据与实测植被盖度的回归关系,得到的 1996、2005 年榆林市不同植被覆盖度的数量分布(表 2)表明,1996 ~ 2005 年榆林市植被覆盖度大幅度提

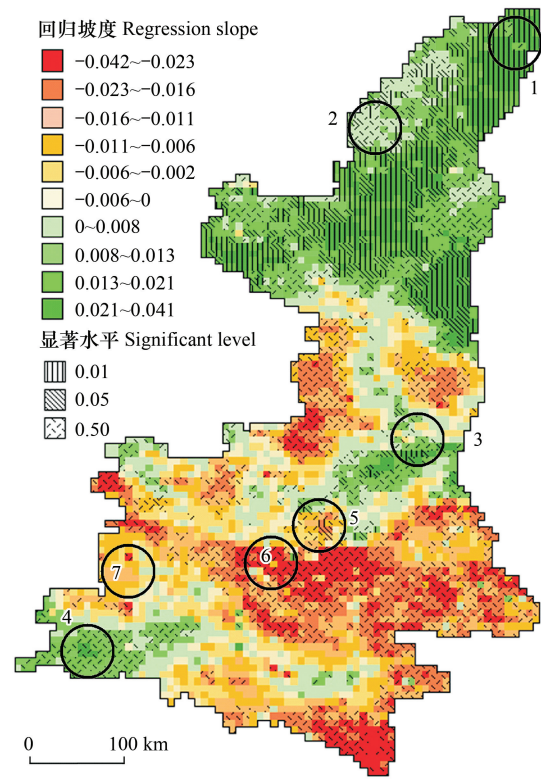


图 4 陕西省 1998 ~ 2005 植被变化的人为影响的空间分布
Fig. 4 Spatial pattern of human-induced land performance change during 1998 - 2005 in Shaanxi Province

高,其中以覆盖度在 50% ~90% 的面积增加为主。

处于中部平原与丘陵山地的过渡地带,1995 ~2000 年土地利用变化以坡耕地向草地的转化为主,小区 3 植被覆盖度明显增大,但增大幅度小于小区 1,主要原因有两个:一是小区内土地利用类型以旱地、水浇地为主,植被生长对降雨的依赖性小(图 2);二是植被组成具有很大的季节波动性,影响 $C\text{-}NDVI$ 随时间变化的规律。1995 ~2000 年土地利用变化以草地向林地的转化为主,加之 1998 年以来实施的天然林保护工程,小区 4 植被覆盖度增大,但较低的 $NDVI$ 值与降水量的相关系数,对 $C\text{-}NDVI$ 的年际变化的显著性造成一定影响。

城市扩展占用农业用地,使得地表植被大量减少,人类活动对植被的影响表现出显著的植被退化趋势(小区 5,图 4)。位于中部平原和南部山地的过渡区,地形坡度大,加之降雨量较大,水力侵蚀强度大,人类活动对植被的干扰效果在一定程度上得到放大,植被退化趋势较明显,年退化率介于 2.3% ~4.2%(小区 6,图 4),成为植被退化的主要分布区之一。以林地覆盖为主,处于较强的水力侵蚀区,但由于天然保护工程的保护,小区 7 未表现出明显的植被退化趋势。

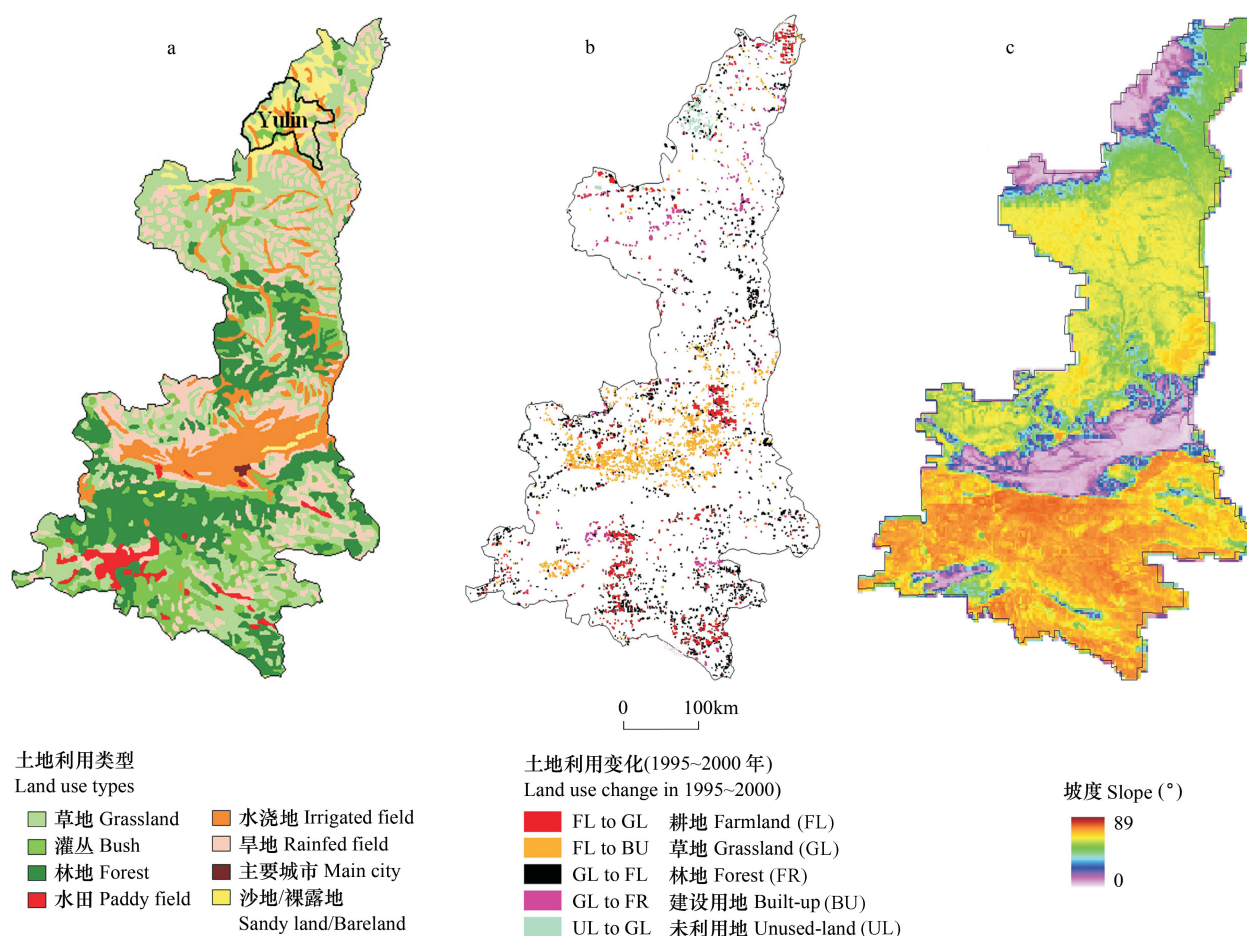


图 5 陕西省 1995 年土地利用分布(a),1995 ~2000 年土地利用变化^[27](b),地形坡度分布(c)

Fig. 5 Land use types in 1995 (a), land use change during 1995 ~2000^[27] (b), and topographical slope derived from the DEM with resolution of 90 m (c) in Shaanxi Province

2.4 讨论

基于 SPOT- $NDVI$ 值与降水量的关系,并在此基础上剔除降水对 $NDVI$ 的影响,揭示人类活动对植被的影响的空间格局是本文的研究目的之一。构建 $C\text{-}NDVI$ 指标表达人类活动对植被变化的影响,通过 $C\text{-}NDVI$ 随年份变化的回归关系的坡度大小和显著水平表征人类活动的影响程度,在研究区内的大部分地区取得了较好的效果。然而南部地区降水丰富,降水量多于植被生长需要的有效水量,导致 $NDVI$ 值与降水量的相关性降

低,影响到 $C\text{-}NDVI$ 的敏感性,因此,南部地区人类活动对植被影响的显著水平明显低于北部地区。如何从自然降水量中提取植被生长需要的有效水量,提高 $NDVI$ 与降水量的相关关系,是更精确地表达人类活动对植被影响的关键。同时,中部平原区土地利用类型以水浇地为主,对天然降水的依赖性低, $NDVI$ 与降水量的相关性低,因此 $C\text{-}NDVI$ 指标表达人类活动对水浇地区的影响应继续探讨。

降水量与 $NDVI$ 值存在较好的相关性,尤其是在干旱、半干旱地区,然而气温、蒸发量、太阳辐射等气象指标也与 $NDVI$ 值有相关性。区域植被变化部分是由于气候变化导致,其中前 6~8 个月气温对植被的影响在一定程度上大于降水波动对植被的影响^[28];在干旱地区,实际蒸发量与 $NDVI$ 值的相关性高于降水量与 $NDVI$ 值的相关性,是一个重要的影响植被变化的气象指标^[29];在南方湿润地区,太阳辐射与 $NDVI$ 值具有很强的相关性^[30]。由于缺少研究区 1998~2005 年气温、蒸发量、太阳辐射等数据,文中只考虑了降水与 $NDVI$ 值的关系,通过补充数据,构建多种气象指标与 $NDVI$ 值的关系,可在一定程度上提高 $C\text{-}NDVI$ 指标的准确性。

表 2 基于野外植被盖度测量与遥感 $NDVI$ 数据回归关系得到的榆林 1996、2005 年植被覆盖率分布

Table 2 Vegetation coverage change in Yulin county, northern Shaanxi, in 1996 and 2005 according the relationship between remote sensing $NDVI$ and ground-based total phytomass

植被盖度 Vegetation coverage(%)	年份 Year			
	1996		2005	
	面积 Area(km ²)	百分比 Percent(%)	面积 Area(km ²)	百分比 Percent(%)
0~5	250.53	3.58	217.20	3.11
5~10	12.88	0.18	63.17	0.90
10~20	185.85	2.66	569.32	8.15
20~30	1015.40	14.53	981.45	14.04
30~40	1414.70	20.24	915.72	13.10
40~50	947.44	13.56	817.23	11.69
50~60	698.10	9.99	737.53	10.55
60~70	578.88	8.28	680.49	9.74
70~80	536.87	7.68	641.25	9.17
80~90	561.62	8.04	630.07	9.01
90~100	786.95	11.26	735.79	10.53

文中所使用的降水数据来自包括陕西省境内 6 个国家基准气象站在内的 26 个站点数据,为保证降水数据空间分布的精度,构建了分辨率为 8 km 的网格数据来表达空间格局。相对于地表植被组成和土壤类型的空间差异,网格数据掩盖了一定的植被、土壤类型信息,降低了对植被变化表达的准确性。提供更为详细的气象数据,如县级气象站点数据,可以将空间格局的差异进行细化,更有利于指导土地利用结构的优化。

3 结论

准确定位人类活动对植被影响的空间位置,客观、可重复地对空间格局及其变化进行监测,可为区域优化土地利用结构、合理规划和调整生态建设布局提供重要依据。本文利用 SPOT- $NDVI$ 数据和月降水资料,在计算两者相关关系的基础上,剔除气候要素(主要是降水)对植被的影响,构建了修正的归一化植被指数($C\text{-}NDVI$),对陕西省 1998~2005 年人类活动对植被影响的空间格局进行研究,主要结论如下:

陕西省 1998~2005 年月均 $NDVI$ 值和月降水量存在显著的相关性,相关系数的大小呈现出明显的北-中-南差异:榆林和延安北部半干旱地区是相关系数最大的区域;西安、咸阳及渭南南部、宝鸡中南部的大面积水浇地减弱了 $NDVI$ 值对降水的敏感度,相关系数最低;汉中、安康和商洛等湿润地区降水量丰富,两者相关性较北部低。

人类活动对植被影响的空间格局表现出明显的区域差异:北部地区人类活动对植被的影响表现为植被覆盖度的提高或植被恢复,其中以黄土沟壑区为主,年均增长率介于 2.1%~4.1%,是退耕还林(草)等政策驱动的直接结果;北部沙地区亦表现出明显的植被覆盖度提高的趋势,年增长率小于 0.8%,是防沙治沙工程实

施效果的客观表达;中部地区呈现出东西差异,东半部以植被恢复为主,主要是坡旱地转化为草地,西半部并未表现出明显的退化或者恢复的趋势,原因是该区为水浇地分布区且坡度小,植被变化主要农作物种植结构的调整,*C-NDVI* 指标未能监测其年际差异;中北部和南部地区作为林地和灌丛的主要分布区,植被覆盖度降低,可能是经济林等的周期性更替,加之地形坡度大、降水量相对丰富极易造成水土流失等原因所致。

References:

- [1] Messing I, Chen L D, Hessel R. Soil conditions in a small catchment on the loess plateau in China. *Catena*, 2003, 54: 45 — 58.
- [2] Chen L D, Huang Z L, Gong J, Fu B J, Huang Y L. The effect of land cover/vegetation on soil water dynamic in the hilly area of the loess plateau, China. *Catena*, 2007, 70: 200 — 208.
- [3] Mi W B, Xie Y Z. The comprehensive summarization of ecological restoration and reconstruction. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(2): 49 — 53.
- [4] Ren H, Peng S L, Lu H F. Degraded ecosystem and restoration ecology. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(8): 1760 — 1768.
- [5] Song Y H, Ma J H. SWAT-aided research on hydrological responses to ecological restoration: a case study of the Nanhe River basin in Huajialing of Longxi Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 636 — 644.
- [6] Peng S L, Lu H F. Some key points of restoration ecology. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 27(7): 1249 — 1257.
- [7] UNCCD, United Nations Convention to combat desertification in counties experiencing serious drought and/or desertification, particularly in Africa. A/AC.241/27, Paris, 1994.
- [8] Pickup G. Estimating the effects of land degradation and rainfall variation on productivity in rangelands: an approach using remote sensing and models of grazing and herbage dynamic. *Journal of Applied Ecology*, 1996, 33: 819 — 832.
- [9] Rodriguez-Iturbe I, D'Oroico P, Porporato A, Ridolfi L. On the spatial and temporal links between vegetation, climate, and soil moisture. *Water Resources Research*, 1999, 35(12): 3709 — 3722.
- [10] Smit G, Rethman N F. The influence of tree thinning on the soil water in a semi-arid savanna of southern Africa. *Journal of Arid Environments*, 2000, 44(1): 41 — 59.
- [11] Scanlon T M, Albertson J D, Caylor K K, Williams C A. Determining land surface fractional cover from NDVI and rainfall time series for a savanna ecosystem. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 82: 376 — 388.
- [12] Paruelo J M, Epstein H E, Lauenroth W K, Burke I C. A NPP estimates from NDVI for the central grassland region of the United States. *Ecology*, 1997, 78(3): 953 — 958.
- [13] Holm A M, Cridland S W, Roderick M L. The use of time-integrated NOAA NDVI data and rainfall to assess landscape degradation in the arid shrubland of Western Australia. *Remote Sensing of Environments*, 2003, 85: 145 — 158.
- [14] Li J, Lewis J, Rowland J, Tappan G, Tieszen L L. Evaluation of land performance in Senegal using multi-temporal NDVI and rainfall series. *Journal of Arid Environments*, 2004, 59: 463 — 480.
- [15] Pettorelli N, Vik J O, Mysterud A, Gaillard J M, Tucker C J, Stenseth N C. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology and Evolution*, 2005, 20 (9): 503 — 510.
- [16] Piao S L, Mohammad A, Fang J Y, Cai Q, Feng J M. NDVI-based increase in growth of temperate grasslands and its responses to climate changes in China. *Global Environmental Change*, 2006, 16: 340 — 348.
- [17] Lunetta R S, Knight J F, Ediriwickrema J, Lyon J G, Worthy L D. Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 105: 142 — 154.
- [18] Chen Y Z, Luck S H. Sediment sources and recent changes in the sediment load of Yellow River, China. In: Rindwanich, S. ed. *Land Conservation for Future Generations*. Ministry of Agriculture, Bangkok, 1989. 313 — 323.
- [19] Li M, Li Z, Liu P, Yao W. Using Cesium-137 technique to study the characteristics of different aspect of soil erosion in the wind-water erosion crisscross region on Loess Plateau of China. *Applied Radiation and Isotopes*, 2005, 62: 109 — 113.
- [20] Duchemin B, Berthelot B, Dedieu G, Leroy M, Maisongrande P. Normalization of directional effects in 10-day global syntheses derived from VEGETATION/SPOT. II Validation of an operational method on actual data sets. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(1): 101 — 113.
- [21] Potter C S, Brooks V. Global analysis of empirical relations between annual climate and seasonality of NDVI. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19: 2921 — 2948.
- [22] Richard Y, Pocard I. A statistical study of NDVI sensitivity to seasonal and interannual rainfall variations in Southern Africa. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19: 2907 — 2920.
- [23] Wu S H, Yin Y H, Zheng D, Yang Q Y. Research on the dry-wet condition on land surface of China in recent 30 years. *Science in China Seri.*

- D (Earth Sciences), 2005, 35(3): 276—273.
- [24] Nicholson S E, Farrea T J. The influence of soil type on the relationship between NDVI, rainfall, and soil moisture in semiarid Botswana. I. NDVI response to rainfall. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 50: 107—120.
- [25] Holm A M, Loneragan W L, Adams M A. Do variations on a model of landscape function assist in interpreting the growth response of vegetation to rainfall in arid environments? *Journal of Arid Environments*, 2002, 50: 23—52.
- [26] Wessels K J, Prince S D, Malherbe J, Small J, Frost P E, VanZyl D. Can human-induced land degradation be distinguished from the effects of rainfall variability? A case study in South Africa. *Journal of Arid Environments*, 2007, 68: 271—297.
- [27] Liu J Y, Liu M L, Zhuang D F, Zhang Z X. Study on spatial pattern of land-use in China during 1995—2000. *Science in China, Ser. D*, 2003, 46(4): 373—384.
- [28] Ostwald M, Chen D. Land-use change: Impacts of climate variations and policies among small-scale framers in the Loess Plateau, China. *Land Use Policy*, 2006, 23: 361—371.
- [29] Yu F, Price K P, Ellis J, Feddema J J, Shi P. International variations of the grassland boundaries bordering the eastern edge of the Gobi Desert in central Asia. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25: 327—346.
- [30] Guo Z H, Peng S L, Wang B S. Estimation of solar energy use efficiency and spatio-temporal pattern in Guangdong based on multi-temporal NOAA-AVHRR NDVI and GLS methods. *Acta Botanica Sinica*, 2001, 43: 857—862.

参考文献:

- [3] 米文宝, 谢应忠. 生态恢复与重建研究综述. *水土保持研究*, 2006, 13(2): 49~52.
- [4] 任海, 彭少麟, 陆宏芳. 退化生态系统与恢复生态学. *生态学报*, 2004, 24(8): 1760~1768.
- [5] 宋艳华, 马金辉. SWAT 模型辅助下的生态恢复水文效应——以陇西黄土高原华家岭南河流域为例. *生态学报*, 2008, 28(2): 636~644.
- [6] 彭少麟, 陆宏芳. 恢复生态学焦点问题. *生态学报*, 2003, 23(7): 1249~1257.
- [23] 吴绍洪, 尹云鹤, 郑度, 杨勤业. 近 30 年中国陆地表层干湿状况研究. *中国科学 D 辑(地球科学)*, 2005, 35(3): 276~283.