

毛乌素沙漠南部植被指数的变化规律研究

刘登峰¹, 王心睿¹, 黄强¹, 孟宪萌², 林木³

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 陕西 西安 710048;
2. 中国地质大学(武汉) 环境学院, 湖北 武汉 430074; 3. 中央财经大学 统计与数学学院, 北京 100081)

摘要: 为了认识毛乌素沙漠南部植被的变化, 基于 MODIS 的 *NDVI* 遥感数据分析了 2000–2013 年毛乌素沙漠南部植被的变化特征, *NDVI* 年平均值呈上升趋势, 年增长率为 $2.69 \times 10^{-3}/a$ 。各年均值的空间最大值变化幅度不大, 基本表现为上升趋势。结合转移矩阵的方法, 将 *NDVI* 值分为不同级别并建立植被指数转移矩阵, 计算分析了 *NDVI* 值逐年的级别转移情况。由各年 *NDVI* 值较上年的变化及各年植被覆盖级别较上年的变化分析显示, 总体 *NDVI* 都表现为较上一年变好的趋势, 2013 年相对 2000 年的 72.37% 的像元的植被级别变好。将 2013 年相对 2000 年转移矩阵中 *NDVI* 值在各等级所占个数进行统计显示, *NDVI* 值由矩阵的下三角向上三角转移, 上三角阵中 *NDVI* 像元的个数远大于下三角阵, 说明 *NDVI* 值表现出由低等级向高等级转化的趋势, 植被情况逐步转好。整体上, 2000–2013 年毛乌素沙漠南部整体植被情况在持续转好。

关键词: 植被指数; 转移矩阵; 空间变化; 生态; 毛乌素沙漠

中图分类号: Q948 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2017)03-0005-05

Study on the evolution law of the vegetation index in the southern Maowusu Desert

LIU Dengfeng¹, WANG Xinrui¹, HUANG Qiang¹, MENG Xianmeng², LIN Mu³

(1. State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. School of Statistics and Mathematics, Central University of Finance and Economics, Beijing 100081, China)

Abstract: To know the vegetation changes in the southern Maowusu Desert, the vegetation dynamic in above area from 2000 to 2013 was analyzed from the Normalized Difference Vegetation Index (*NDVI*), based on the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). The results show that the annual averages of *NDVI* presented a rising tendency with an annual growth rate of $2.69 \times 10^{-3}/year$. The changes of the spatial maximums of the annual averages of *NDVI* were insignificant, with an increasing trend. Using the transfer matrix method, the *NDVI* values were divided into different levels and the transfer matrix of vegetation index was built. The yearly transfers of the *NDVI* levels were further analyzed. Comparing the *NDVI* values and *NDVI* levels of this year to that of last year, the *NDVI* shows a trend of getting better generally. The vegetation levels of 72.37% of the pixels became better in 2013 compared with that in 2000. The numbers of *NDVI* values in different levels in the transfer matrix in 2013 compared with that in 2000 were analyzed and the result suggests that, the *NDVI* values moved from the lower to the upper triangular of the transfer matrix, and the numbers of pixels in the upper triangular were much larger than that in the lower. This result suggests that the *NDVI* presents a tendency of a transformation from the lower level to the higher, and the vegetation became better gradually. In the whole, the vegetation of the southern Maowusu Desert was getting better continuously from 2000 to 2013.

Key words: vegetation index; transfer matrix; spatial change; ecology; Maowusu Desert

收稿日期: 2016-09-10; 修回日期: 2017-02-23

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2016JQ5105); 国家自然科学基金项目(51309188、51609270); 教育部博士学科点基金(20136118120021)

作者简介: 刘登峰(1984-), 男, 陕西凤翔人, 副教授, 主要研究方向: 流域生态水文演化过程的分析 and 模拟。

1 研究背景

荒漠化是严重威胁人类生存和发展的重大环境问题之一,毛乌素沙漠植被变化过程的研究对掌握沙漠南部荒漠区植被演变情况以及荒漠化防治和生态安全都有着至关重要的作用。在气候变化和剧烈人类活动的背景下,毛乌素沙漠的植被如何变化是认识和治理荒漠化首先要解决的问题。国内对毛乌素沙漠南部荒漠区的生态植被变化已有研究,周淑琴等^[1]利用 RS 和 GIS 技术提取信息并分析了毛乌素沙地南缘植被景观格局的演变,李登科等^[2]使用 NOAA/AHRR NDVI 数据、气候资料,分析了陕北长城沿线风沙区植被覆盖的历史演变及其与气候因子的关系,植被状况在转好。遥感数据具有识别区域特征的优势,分析遥感获得的植被指数数据是认识地区植被演化的重要手段。

植被覆盖的动态变化研究^[3]也是生态水文学中的重要问题。归一化植被指数(NDVI)是遥感数据表征植被覆盖时常用的一种植被指数,是单位像元内的植被类型、覆盖形态、生长状况等的综合反映^[4]。由于 NDVI 能够很好地反映植被的动态变化,并且可以与叶面积指数(LAI)建立定量关系,所以,NDVI 常被作为生态系统监测的首选指标^[5]。而转移矩阵可以表征区域中不同类型网格点的等级变化规律,于秀娟等^[6]利用植被覆盖等级转移矩阵分析了三江源区植被覆盖度的动态变化,叶红梅等^[7]利用土地覆盖类型转移矩阵分析了疏勒河流域中下游植被覆盖的演变规律,刘静等^[8]采用转移矩阵分析了毛乌素沙地 1990 年与 2007 年间植被覆盖的变化,结果显示整体呈良性转移趋势。这些研究工作有效地揭示了植被覆盖的变化规律。本研究中使用转移矩阵分析不同水平的植被指数互相转移的特征,从而反映区域内植被指数的变化趋势。

本文采用 MODIS 卫星遥感获取的 NDVI 植被指数数据,分析 NDVI 逐时段和年际的变化规律,使用转移矩阵分析毛乌素沙漠南部 2000 - 2013 年植被指数的整体变化,分析结果可为区域生态环境治理提供参考。

2 研究区域和数据

毛乌素沙漠位于 $37^{\circ}20' \sim 39^{\circ}50'N$, $107^{\circ}10' \sim 113^{\circ}45'E$,总面积约 $5.84 \times 10^4 \text{ km}^2$,处于三面为黄河所环抱的鄂尔多斯高原的南部。毛乌素沙漠南部,是晋陕蒙宁甘 5 省区交界的农牧交错带,包括陕

西省榆林市西北部的榆阳、神木、府谷、横山、靖边、定边等 6 个区县的 59 个乡镇^[9-10]。该区域在自然环境中属于我国北方对气候变化特别敏感的生态脆弱带,在农业生产方式上属于农区向牧区过渡的半农半牧地带,更是干旱、大风、土地沙漠化、沙尘暴频发的多灾地带^[11]。该地区以温带草原植被为主,多年平均降水量约 400 mm,榆林气象站和周边雨量站的年降水量呈现并不显著的下降趋势^[12-13]。1949 年以来在陕北进行了固沙工作,引水拉沙,发展灌溉,植树造林,改良土壤,改造沙漠,成效显著。通过各种改造措施,毛乌素沙漠南部面貌已发生变化,荒漠化程度在降低,生态环境在改善^[14]。

研究区域为榆林市北部的四边形区域,四点坐标分别是,SW ($38.335069^{\circ}N, 109.159142^{\circ}E$), SE ($38.335069^{\circ}N, 109.424794^{\circ}E$), NE ($38.543447^{\circ}N, 109.741117^{\circ}E$), NW ($38.543447^{\circ}N, 109.474694^{\circ}E$),如图 1 所示。研究区距离榆林市区约 28 km。覆盖面积 533.61 km^2 。研究区基本覆盖了毛乌素沙漠南部的大部分地区,可以代表毛乌素沙漠南部。



图 1 研究区位置图

本文采用来自 MODIS/Terra 网站提供的 NDVI 遥感数据,数据集全称为 MODIS/Terra Vegetation Indices 16 - Day L3 Global 250m SIN Grid V005,简称 MOD13Q1。MOD13Q1 数据是 16 d 合成,空间分辨率为 250m,数据文件包含了 12 个字段的数据^[15]。NDVI 的有效值在 $-1 \sim 1$ 之间,其中, -0.1 为水体,0 代表裸露地表,NDVI 值越大则植被越茂密^[16]。该数据集在研究区域内有 100 行,100 列,共 10 000 个像元值。

MOD13Q1 数据有数据质量控制字段,数据的可靠性标识分别有良好数据、有用的临界数据、地面被冰雪覆盖的数据、被云层遮挡的数据,剔除标识为地面冰雪覆盖或被云层遮挡的数据,其余数据为有效

数据。本研究中数据集提供的数据为319景,剔除整幅数据都标识为冰雪覆盖或被云层遮挡的数据后有效数据为297景,有效数据占数据总数的百分比为93.1%,有效数据在各年分布均匀,不存在长时段缺少数据现象,可以使用有效数据进行植被指数变化规律的分析 and 计算。

3 NDVI 演变趋势分析

3.1 NDVI 的逐时段变化规律分析

对日期进行编号,将2000年1月1日记为第1d,至2013年12月31日记为第5114d。把各景的数据用算术平均值进行空间平均,剔除无效数据,得到面平均NDVI的变化过程。选取各景NDVI值,建立NDVI与时间的相关关系,并用增加趋势项的傅里叶级数进行拟合,见图2,拟合公式为:

$$y = a_0 + a_1 \cos(\omega x) + b_1 \sin(\omega x) + ax + b \quad (1)$$

式中: y 为NDVI值; x 为时间; a_0, a_1, b_1 为傅里叶级数中的系数; ω 为角频率; a 和 b 是线性关系的系数。

拟合的结果显示,系数 $a_0 = -2.19 \times 10^{-3}$, $a_1 = -6.98 \times 10^{-2}$, $b_1 = -3.83 \times 10^{-2}$, $a = 8.19 \times 10^{-6}$, $b = 1.69 \times 10^{-1}$ 。NDVI的增长率为 $8.19 \times 10^{-6}/d$,变化周期为364.90d。这显示,植被指数以 $8.19 \times 10^{-6}/d$ 的速率增长。

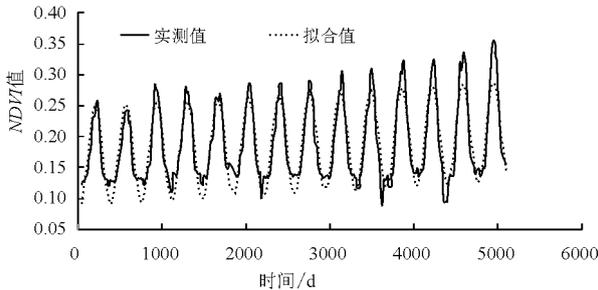


图2 2000-2013年研究区NDVI的变化过程

3.2 NDVI 年际变化规律分析

先计算2000-2013年各像元的NDVI的年平均,分析植被的年际变化规律,以消除NDVI值的年内波动对变化趋势的影响。对各像元的年平均NDVI值,计算其空间平均值、空间上的最大值和最小值,见图3。图3显示,在研究区各年最大值变化幅度不大。最大值的变化基本与均值一致,均呈现逐渐变大的趋势。最小值的变化较为明显,在2004-2012年均小于0.1。总体上各年的均值与最小值更为接近。

对像元的年平均NDVI值的空间平均值的变化过程进行线性拟合,如图4。图4显示,2000-2013年NDVI值呈现波动递增的趋势,年增长率为

$2.69 \times 10^{-3}/a$,相关系数为0.94。最小值为0.17,发生在2001年,最大值为0.22,发生在2013年。整体增长趋势呈现为阶段性的“S”型增长,2000-2001年下降,2001-2005年波动上升且年增长率为 $5.4 \times 10^{-3}/a$,2005-2009年NDVI值在0.005的范围内微波波动,总体上基本保持稳定。2009年开始上升,到2013年达到最大,增长率为 $5.6 \times 10^{-3}/a$ 。NDVI值的年平均值呈现总体变好的趋势,而2000-2013年的降水量没有明显的趋势性变化,年际间有较大的波动,所以,NDVI的趋势性变化可能与近年来实施的沙漠治理、植树造林等措施有关。

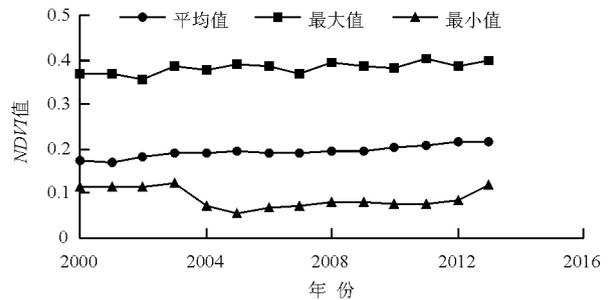


图3 各年NDVI的空间上最小值、均值和最大值

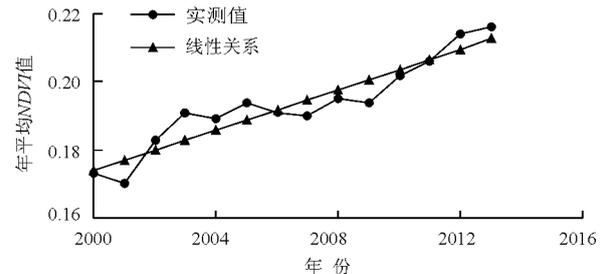


图4 NDVI 的年际变化趋势

4 植被指数的转移矩阵

为了揭示各像元的植被指数的变化规律,采用转移矩阵分析各级别的像元的变化趋势。为便于使用转移矩阵,将NDVI值分为若干级别。由于各年NDVI值大于0.5的个数为0,因此,只分析NDVI在0~0.5间各级别的相互转化规律,共分为10个级别,即0~0.05、0.05~0.1、0.1~0.15、0.15~0.2、0.2~0.25、0.25~0.3、0.3~0.35、0.35~0.4、0.4~0.45、0.45~0.5。

4.1 转移矩阵的计算方法

根据转移矩阵的计算方法^[17],初始状态转移矩阵(步长为1a)的表达式为:

$$P = P_{ij}(n) = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1m} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{m1} & P_{m2} & \cdots & P_{mm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: P_{ij} 是 $NDVI$ 等级 i 经过一步转化为 j 的比例; m 是 $NDVI$ 的级别数。其中, P_{ij} 为非负值, 且矩阵每行元素之和等于 1。 P_{ij} 也可以是发生转移的元素个数。

根据马尔柯夫过程理论, 可以利用初始状态转移矩阵模拟出某一初始年后任意 n 年的 $NDVI$ 等级结构。 n 步的转移比例计算公式为:

$$P_{ij}^{(n)} = \sum_{k=0}^{n-1} P_{ik} P_{kj}^{(n-1)} = \sum_{k=0}^{n-1} P_{ik}^{(n-1)} P_{kj} \quad (3)$$

根据初始年 $NDVI$ 等级结构矩阵 $A(0)$ 和 n 步转移矩阵, 可以计算出经过 n 步变换后的 $NDVI$ 等级结构矩阵 $A(n)$, $A(n)$ 满足以下方程:

$$A(n) = A(n-1) \times P(1) = A(0) \times P^{(n)} \quad (4)$$

4.2 $NDVI$ 值与植被覆盖水平的变化情况分析

在遥感领域中常用 $NDVI$ 值以表征植被覆盖和生长状况, 把所有像元的 $NDVI$ 年均值与上一年 $NDVI$ 年平均值进行比较, 得到 2001-2013 年间各年 $NDVI$ 值相对上一年变差、不变以及变好的像元个数所占比例, 变化过程见图 5。

由图 5 可以看出, 对于各像元的 $NDVI$ 值, 变好

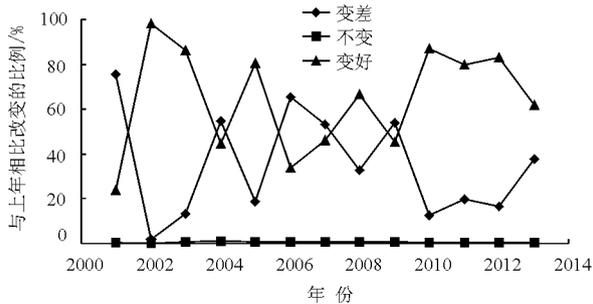


图 5 各年 $NDVI$ 与上年相比改变的比例

和变差所占比例变化波动剧烈, 相比上一年不变的所占比例全部在 1% 以下并基本保持稳定, 在波动变化中变好的比例呈现递增趋势而变差的比例呈现递减的趋势。这也说明植被植树在空间上逐年转好。相比上一年, $NDVI$ 变差的比例平均为 35.08%, $NDVI$ 不变的平均为 0.51%, $NDVI$ 变好的比例平均为 64.40%。2013 年相对 2000 年 $NDVI$ 值变差、不变及变好的个数所占比例分别为 3.38%、0%、96.62%。

根据 $NDVI$ 转移矩阵中 $NDVI$ 级别的变化过程, 分析计算得到各像元逐年的变化情况, 变化过程见图 6。相比上一年, $NDVI$ 级别变差的比例平均为 4.54%, $NDVI$ 级别不变的比例平均为 84.42%, $NDVI$ 级别变好的比例平均为 11.04%。2013 年相对 2000 年的植被覆盖度级别变差、不变及变好所占比例分别为 1.62%、26.01%、72.37%。这说明消除 $NDVI$ 的细微波动的影响后, $NDVI$ 级别变好的比例占多数, 多数地点的 $NDVI$ 都在变好。

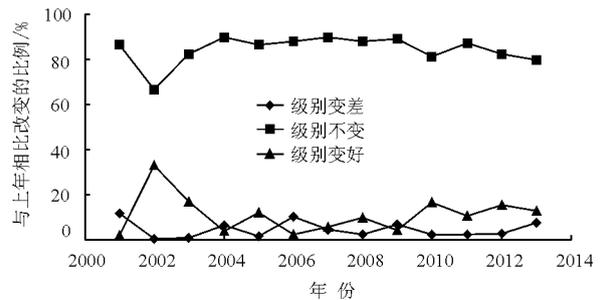


图 6 各年植被覆盖级别与上年相比变化的比例

表 1 2013 年相对于 2000 年的 $NDVI$ 转移矩阵

$NDVI$ 的区间	0.10~0.15	0.15~0.20	0.20~0.25	0.25~0.30	0.30~0.35	0.35~0.40	合计
0.10~0.15	128	2426	632	20	0	0	3206
0.15~0.20	142	2101	2326	439	22	0	5030
0.20~0.25	1	7	123	646	177	0	954
0.25~0.30	3	0	5	87	423	18	536
0.30~0.35	0	0	0	0	145	108	253
0.35~0.40	0	0	0	0	4	17	21
合计	274	4534	3086	1192	771	143	10000

4.3 $NDVI$ 的转移矩阵分析

以 2013 年相对于 2000 年的 $NDVI$ 等级结构转移矩阵为例, 说明本研究分析 $NDVI$ 转移矩阵的具体过程。计算结果显示, $NDVI$ 值在 0~0.1 和 0.4~0.5 之间的个数为零, 因此, 只计算 0.1~0.4 之间的部分, 表示为各等级所占个数的 6×6 矩阵, 见

表 1, 每一行表示 2000 年 $NDVI$ 在该区间的个数, 每一列表示 2013 年 $NDVI$ 在该区间的个数。2000 年和 2013 年 $NDVI$ 在 0.1~0.4 范围内各等级所占个数的矩阵分别为 $[3206 \ 5030 \ 954 \ 536 \ 253 \ 21]$ 和 $[274 \ 4534 \ 3086 \ 1192 \ 771 \ 143]$ 。

转移矩阵显示, 2013 年相对于 2000 年, $NDVI$

值由矩阵的下三角向上三角转移,上三角阵中 *NDVI* 像元的个数远大于下三角阵,这说明 *NDVI* 值在由低级别向高级别转移,每个等级向高一等级转移的个数多于向低等级别转移的个数,植被情况在逐步缓慢地转好。

5 结论

本文使用 MODIS 的 *NDVI* 遥感数据,对毛乌素沙漠南部 533.61 km² 区域在 2000–2013 年的植被变化进行分析,结论如下:

(1) 对于逐景的 *NDVI* 分析显示,2000–2013 年总体呈现递增趋势,年增长率为 $8.19 \times 10^{-6}/\text{d}$,变化周期为 364.90 d,说明各景的植被情况在逐步转好,且每年各月植被生长和枯萎周期基本保持稳定。

(2) 年平均 *NDVI* 值从 2000 到 2013 年表现为波动上升的趋势,且年增长率为 $2.69 \times 10^{-3}/\text{a}$,相关系数为 0.94。年最小值为 0.17 发生在 2001 年,最大值为 0.22 发生在 2013 年。各年的最大值变化幅度不大。*NDVI* 的最大值和均值均呈现变大的趋势。

(3) 对 2000–2013 年 *NDVI* 转移矩阵的分析显示,在 *NDVI* 值的逐年变化中,*NDVI* 值变好和变差所占比例波动剧烈,*NDVI* 值相比上一年不变的像元所占比例全部在 1% 以下并基本保持稳定,在波动变化中变好的比例呈现递增趋势,变差的比例呈现递减的趋势。*NDVI* 级别与上一年相比变差的比例平均为 4.54%,*NDVI* 级别不变的比例平均为 84.42%,*NDVI* 级别变好的比例平均为 11.04%。2013 年相对 2000 年的植被覆盖度级别变差、不变及变好所占比例分别为 1.62%、26.01%、72.37%。这说明消除 *NDVI* 的细微波动的影响后,*NDVI* 级别变好的比例占多数,多数地点的 *NDVI* 都在变好,植被情况整体在持续转好。

(4) 2013 年相对于 2000 年的 *NDVI* 转移矩阵分析显示,2013 年相对于 2000 年,*NDVI* 值由矩阵的下三角向上三角转移,上三角阵中 *NDVI* 像元的个数远大于下三角阵。这说明 *NDVI* 值在由低等级别向高等级别转移,表明植被情况在逐步缓慢地转好。

各种分析显示,整体上毛乌素沙漠的植被覆盖情况在逐渐变好。这是由于多年来开展生态环境保护、退耕还林、退耕还草的积极效果。但是由于 MODIS 数据的时间序列较短,不能代表长期历史变化。同时,需要寻找地面观测等其他途径的实测资料与遥感数据进行互相验证,提高结果的可靠性和准确

性。还需要进一步分析植被变化的原因并建立定量关系,以便指导今后的水土保持和生态保护工作。

参考文献:

- [1] 周淑琴,荆耀栋,张青峰,等. 毛乌素沙地南缘植被景观格局演变与空间分布特征[J]. 生态学报, 2013, 33(12): 3774–3787.
- [2] 李登科,郭 锐,何慧娟. 陕北长城沿线风沙区植被指数变化及其与气候的关系[J]. 生态学报, 2007, 27(11): 4620–4629.
- [3] 朴世龙,方精云. 最近 18 年来中国植被覆盖的动态变化[J]. 第四纪研究, 2001, 21(4): 294–302.
- [4] 霍艾迪,康相武,王国梁,等. 基于 MODIS 的沙漠化地区植被覆盖度提取模型的研究[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(6): 217–223.
- [5] 卢 玲,李 新,程国栋. 利用 NOAA AVHRR 植被指数数据集分析黑河流域季候特征[J]. 中国沙漠, 2002, 22(2): 187–191.
- [6] 于秀娟,燕 琴,刘正军,等. 三江源区植被覆盖度的定量估算与动态变化研究[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(1): 66–74.
- [7] 叶红梅,陈少辉,盛 丰,等. 疏勒河流域中下游土地覆盖度动态变化及其与地下水的相关性[J]. 水利学报, 2013, 44(1): 83–90.
- [8] 刘 静,银 山,张国盛,等. 毛乌素沙地 17 年间植被覆盖度变化的遥感监测[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(7): 162–167.
- [9] 彭茹燕,张慧芝,哈 斯,等. 陕北风沙区景观格局分析[J]. 干旱区研究, 2005, 22(1): 51–56.
- [10] 刘彦随, Jay Gao. 陕北长城沿线地区土地退化态势分析[J]. 地理学报, 2002, 57(4): 443–450.
- [11] 汪一鸣,赵小勇. 蒙陕宁甘长城沿线干旱风沙区土地沙漠化防治对策[J]. 水土保持研究, 2002, 9(3): 1–4.
- [12] 王心睿,杨倩文,刘登峰,等. 陕北荒漠区降水量演变规律研究[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(6): 66–70.
- [13] 常肖杰,沈 冰,黄领梅. 1976–2010 年榆林市降水时空变化趋势分析[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(2): 30–35.
- [14] 成军锋,贾宝全,赵秀海,等. 干旱半干旱地区植被覆盖度的动态变化分析——以毛乌素沙漠南部为例[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(12): 172–176.
- [15] 刘登峰,黄 强,林 木. 基于遥感的塔里木河植被变化规律研究[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(4): 32–36.
- [16] 陈晓光,李剑萍,李志军,等. 宁夏盐池近年来植被与气候变化分析[J]. 生态学报, 2006, 26(5): 1516–1522.
- [17] 李富程,王 青,李国蓉,等. 马尔柯夫过程预测官司河流域土地利用/覆被格局变化[J]. 水土保持研究, 2009, 16(5): 31–34.