张掖地区植被覆盖变化及其预测研究

李 芳[1], 蒋志荣[1,2]

(1. 甘肃农业大学 林学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省农村发展研究院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 基于 MODIS—NDVI 数据,运用植被重心法、一元线性回归及 R/S 分析法对张掖地区 2000—2008 年 204 幅遥感图像进行了分析。结果表明:(1) 2000—2003 年植被重心向东移动,说明东部植被增加或西部植被减少;2006—2008 年向北移动,说明北部植被增加或南部植被减少。植被重心年内变化表现为以 5 月和 11 月为界的不稳定—稳定—不稳定变化趋势。(2) 近 10 a 来植被覆盖呈增加趋势,植被改善区域占整个研究区面积的 75.98%,分布于山丹、民乐和张掖盆地,主要土地类型为旱地和人工草地;人工植被增加速度高于天然植被;退化地区零星分布于人类活动强的张掖盆地和祁连山地北部。(3) 生长季平均 NDVI值的 Hurst 指数集中分布在 0.4～0.6 之间,以弱持续性和反持续性为主,但生长季各月则有一定的差异性,从 5,6 月份以持续性趋势为主到 7 月份的持续性减弱,反持续性增强,再到 8,9 月份的反持续性趋势减弱,持续性增强;不同土地利用类型的 Hurst 值排序为:其它未利用土地＜建设用地＜草地＜耕地＜未利用土地＜林地＜水体。

关键词: 张掖地区; 植被重心; 一元线性回归分析; Hurst 指数

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2011)05-0220-05 **中图分类号**: TP79

Dynamic Analysis of Vegetation Cover and Prediction in Zhangye Region

LI Fang[1], JIANG Zhi-rong[1,2]

(1. *Forestry College of Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu* 730070, *China*;
2. *Gansu Rural Development Research Institute, Lanzhou, Gansu* 730070, *China*)

Abstract: The temporal and spatial variations of normalized difference vegetation index (NDVI) in Zhangye region during 2000—2008 were analyzed using the gravity center of vegetation, linear regression and R/S analysis based on the MODIS—NDVI data. The results show that the gravity center of vegetation moved eastward during 2000—2003, indicating increases of vegetation cover in the east and decreases in the west. The gravity centre of vegetation moved northward during 2006—2008, which revealed the vegetation increases in the north and decreases in the south during this period. Annual variations of the vegetation gravity centre were unstable from January to May and from November to January, but stable from May to November. Vegetation cover increased in basins of Shandan, Minle and Zhangye during recent ten years, which accounts for 75.98% of the whole study area. The main land use types of the study area were dry land and artificial grassland. The artificial vegetation increased faster than natural vegetation. Degraded regions distributed sporadically over Zhangye Basin and Qilian Mountain due to intensified human activities. The Hurst index of the growing season NDVI focused on 0.4～0.6, indicating weak sustainability and/or non-sustainability. However, the indices of each month in the growing seasons differed substantially. The Hurst index showed a transition of vegetation cover from sustainable in May to unsustainable in July, while the sustainability of the vegetation cover increased in August and September. The results also show different land use types in the order of increasing Hurst value as: unused land Ⅱ＜ construction land＜grass＜cultivated land＜unused land Ⅰ＜forest.

Keywords: **Zhangye City; the gravity centre of vegetation; linear regression; Hurst index**

收稿日期:2010-11-02 **修回日期**:2011-02-26

资助项目:甘肃省教育厅项目"张掖荒漠化防治研究"(省教技[200831 号])

作者简介:李芳(1987—),女(汉族),内蒙古自治区包头市人,在读硕士,主要从事水土保持与荒漠化防治专业。E-mail:lifang_418007@163.com。

通信作者:蒋志荣(1959—),男(汉族),甘肃省白银市人,教授,主要从事林业可持续经营和荒漠化防治方面的研究。E-mail:jzhirong@gsau.edu.cn。

植被覆盖具有截留降雨、削减径流、保水固土等生态功能,是影响土壤侵蚀的重要因素,同时植被覆盖易受自然和人为因素作用而发生变化[1]。植被覆盖变化影响局部气候及区域生态平衡,其研究对西部地区环境保护和生态建设具有重要的指导意义[2]。目前普遍使用归一化差值植被指数(normalized different vegetation index,NDVI)反映植被覆盖的基本状况。国外学者对时间序列的 NDVI 进行了深入研究得出,由于全球气候变暖,北半球中高纬度地区植被活动增强,欧亚大陆北纬 40°～70°的地区,61%面积的植被表现出持续性增长趋势[3-5]。国内学者对植被覆盖的研究得出,近 20 a 中国植被活动在增强,但地域差异比较明显[6-7]。R/S 分析法是由 Hurst 在水文研究中提出的一种时间序列统计方法,后经 Mandelbrot 与 Wallis 在理论上对该方法进一步补充完善,把它发展成为研究时间序列的分形理论,近些年开始运用于环境变化、地理科学等研究领域[8]。王新明等[9]首次应用 R/S 方法分析中国陆地 NDVI 时间序列,王桂钢等[2]运用 R/S 方法分析了新疆地区植被覆盖变化,但该方法在张掖地区的植被覆盖变化研究中应用较少。张掖地区属于大陆性干旱气候,生态环境脆弱,植被覆盖低,是典型的生态脆弱带,所以运用 R/S 方法分析该区植被覆盖的变化规律,预测植被覆盖未来的变化趋势,对该地区的可持续发展有着重要的现实意义。

1　研究区概况

张掖地区地处甘肃省河西走廊的中段,地理坐标为东经 97°20′—102°12′,北纬 37°28′—39°57′。行政区划上辖山丹、民乐、临泽、高台、肃南和甘州 6 县区。自南向北分为祁连山地、中部走廊平原、北山山地 3 大地形区。除祁连山属高寒半湿润气候外,其余地方均属大陆性中温带干旱气候,多大风,太阳辐射强烈,昼夜温差大,年平均气温 2.8～7.6 ℃,年平均降水量 104～495 mm,70%集中在 6—9 月。主要内陆河流有黑河、马营河、洪水河、梨园河等。天然植被稀疏,主要有红砂、珍珠和泡泡刺等,人工植被多以杨树、沙枣、柽柳、梭梭、花棒和柠条为主,森林覆盖率为 10.71%。地带性土壤为灰棕漠土、风沙土[10]。张掖绿洲是甘肃的商品粮基地和"西菜东运"基地之一,是甘肃经济发展的重要精华之地[11]。

2　数据来源与研究方法

2.1　数据来源

本文数据来源于国家自然科学基金委员会"中国西部环境与生态科学数据中心",为黑河流域的 2000—2008 年 9 a 的 MODIS—NDVI 数据。时间分辨率 16 d,空间分辨率 250 m×250 m,共 204 幅图。本影像为 MOD 13 数据产品,根据 MODIS 处理流程,已无需进行大气校正、辐射校正、几何校正。本文的预处理包括图像配准、图像切割等。通过 ArcGIS 空间分析模块得出年、季、月平均 NDVI 数据集。土地利用数据来源于张掖市国土资源局提供的 2008 年 MapGIS 格式的土地利用现状图,通过 MapGIS 软件转化为 Shp 矢量文件。数据处理包括栅格矢量数据转换、经纬度添加和矢量叠加等基本操作。由于获得的遥感图像为黑河流域数据,所以本研究的张掖地区不包括肃南东南小部分地区。

2.2　研究方法

(1) 植被重心法。重心也称加权平均中心,用以揭示事物在空间上的不均衡分布规律[12-13]。利用 NDVI 值作为加权系数计算重心,揭示张掖地区植被总体的演变轨迹。

$$(x,y)=\left(\frac{\sum_{i=1}^{n}w_i x_i}{\sum_{i=1}^{n}w_i},\frac{\sum_{i=1}^{n}w_i y_i}{\sum_{i=1}^{n}w_i}\right) \tag{1}$$

式中:x,y——某时间植被重心的坐标,用经纬度表示;n——像元数;i——像元序号;x_i,y_i——植被像元中心的经纬度;w_i——该像元的 NDVI 值。

(2) 一元线性回归法。求出每一栅格对应多年的 NDVI,与年份之间做一元线性回归方程,其斜率反映植被在时间序列内的变化趋势[14]。

$$\theta_{\text{slope}}=\frac{n\times\sum_{i=1}^{n}i\times M_{\text{NDVI}_i}-\sum_{i=1}^{n}i\sum_{i=1}^{n}M_{\text{NDVI}_i}}{n\times\sum_{i=1}^{n}i^2-(\sum_{i=1}^{n}i)^2} \tag{2}$$

式中:n——研究年数;i——年序号;M_{NDVI_i}——第 i 年的生长季平均 NDVI 值。回归直线斜率(slope)值为正表示植被改善,值越大改善越明显;相反则退化。

(3) 重标极差(R/S)法。R/S 方法通过分析多样本时间序列的自相似和长程依赖性得到 Hurst 指数,可以定量描述时间序列的变化趋势[15]。R/S 分析的基本原理:对于时间序列$\{\text{NDVI}(t)\}$,$t=1,2,3,\cdots,n$,对于任意正整数 $\tau\geqslant 1$ 定义均值序列:

$$\overline{\text{NDVI}}(\tau)=\frac{1}{\tau}\sum_{\tau=1}^{\tau}\text{NDVI}(\tau)\quad(\tau=1,2,3,\cdots,n) \tag{3}$$

累计离差:$X(t,\tau)=\sum_{t=1}^{t}[\text{NDVI}(t)-\overline{\text{NDVI}}(\tau)]$

$$(1\leqslant t\leqslant\tau) \tag{4}$$

极差:$R(\tau)=\max_{1\leqslant t\leqslant\tau}X(t,\tau)-\min_{1\leqslant t\leqslant\tau}X(t,\tau)$

$$(\tau=1,2,3,\cdots,n) \tag{5}$$

标准差：$S(\tau)=\left[\frac{1}{\tau}\sum_{t=1}^{\tau}(\mathrm{NDVI}(t)-\overline{\mathrm{NDVI}(\tau^2)}\right]^{1/2}$

$$(\tau=1,2,3,\cdots,n) \tag{6}$$

对于比值 $R(\tau)/S(\tau)=R/S$，若存在关系 $R/S\propto\tau^H$，则说明所分析的时间序列存在 Hurst 现象，H 为 Hurst 指数。Hurst 指数取值包括 3 种形式：如果 $0.5<H<1$，表明 NDVI 时间序列是一个持续性序列，即过去的增加（减少）预示的将来的继续增加（减少）特征；如果 $H=0.5$，则说明 NDVI 时间序列为随机序列，不存在长期相关性；如果 $0<H<0.5$，则表明 NDVI 时间序列数据具有反持续性，即过去的增加（减少）预示着未来的减少（增加）特征，序列有突变跳跃逆转性。H 值越接近于 1 或 0，则持续性或反持续性越强。

3 结果分析

3.1 张掖地区 NDVI 的重心变化

从图 1 整体看，2000—2008 年植被重心变化分为 3 个阶段：以 2002 和 2006 年为界的不稳定—稳定—不稳定变化。经度方向看，经度最大、最小值分别出现在 2003 年和 2000 年；除 2001 年偏东南方向外，2000—2003 年植被重心向东变化，重心移动距离为 4.033 km，说明研究区东部植被增加或西部植被减少。这是因为 2000—2003 年东部（山丹、民乐和肃南）降水增加，西部（甘州、临泽和高台）降水缓慢下降[16-17]。纬度方向看，纬度最大、最小值出现在 2007 和 2001 年；2006—2008 年植被重心向北变化，移动距离为 1.717 km，说明研究区北部植被增加或南部植被减少。究其原因，一方面是近几年来气温的小幅度上升[16]，另一方面是对水资源的合理配置和有效利用，体现为以人工渠道代替天然河道、人工水库代替天然湖泊等地表水资源的时空再分配[17-18]。

从图 2 可见，年内植被重心变化分为 3 个阶段，表现为以 5 月和 11 月为界的不稳定—稳定—不稳定变化。3—5 月植被重心向西北方向变化，是由于气温的逐渐升高及冰雪融水所致。5—11 月植被重心向西变化是气温和降水的共同影响，其中降水起主导作用。植被重心变化从 5 月生长季开始到 11 月，植被重心呈顺时针方向变化，7，8 月达到经度最小值，9 月达到纬度最大值，说明 7—9 月西北部植被增加达到最大。11 月至翌年 1 月植被向西南方向回归。

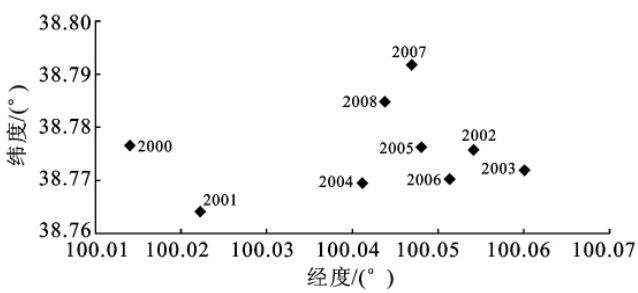


图 1 张掖地区植被重心的年际变化

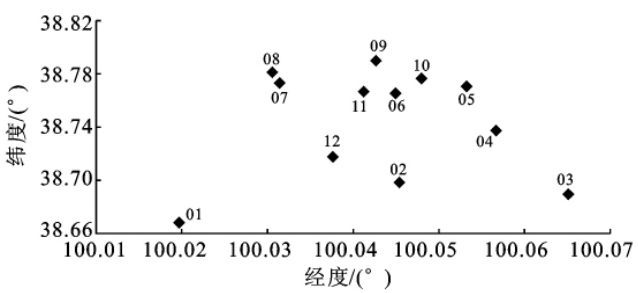


图 2 张掖地区植被重心年内变化

3.2 张掖地区 NDVI 空间变化趋势

张掖的农作物多为一年生作物，且常绿植被较少，因此选生长季（5—9 月）平均 NDVI 值分析其空间变化规律。本文采用宋怡等[19]研究西北地区的 slope 划分标准：slope＞0.000 9 表示植被改善，其中 0.001 0＜slope≤0.004 5 表示植被覆盖轻微改善，0.004 5＜slope≤0.009 0 表示植被覆盖中度改善，slope＞0.009 0 表示植被覆盖明显改善；slope＜－0.000 9 表示植被退化。从附图 8 可以看出，张掖地区近 10 a 生长季植被变化总体呈现出改善趋势，分布在张掖大部分地区，占整个研究区的 75.98%，其中轻微改善、中度改善和明显改善分别占整个研究区的 45.85%，19.35% 和 10.78%，轻微改善分布于张掖大部分地区，中度和明显改善的地区主要为山丹、民乐县和张掖盆地（张掖、临泽、高台走廊）。这是由于全球变暖的大环境背景条件下气温、降水的增加[20]；同时张掖地区生态环境建设（退耕还林、植树种草、合理放牧等）的影响。基本不变地区占整个研究区的 18.21%，主要是因为分布在张掖地区的北部未利用土地类型地区对 NDVI 值在较低水平上保持稳定[2]。植被退化地区较少，占整个研究区的 5.81%，主要分布在人类活动较强的张掖盆地和祁连山地地区。植被改善和退化均出现在张掖盆地的结论与梁继运等[21]研究张掖盆地植被覆盖变化的结论一致。

通过对生长季平均 NDVI 值的 slope 图矢量化，并将其与土地利用现状图叠加，利用 ArcGIS 分区统计功能得出各土地利用类型的变化斜率值。从表 1 可以看出，不同土地覆盖类型其变化斜率不尽相同。按一级土地利用类型 slope 排序：草地（改良草地和人工草地）＞耕地＞城镇及工矿用地＞果园＞林地＞未

利用土地,说明近 10 a 人工植被增加趋势明显高于天然植被。按二级土地利用类型得出:旱地、人工草地、改良草地的变化斜率较高,分别达到 0.009 42,0.008 35和 0.005 05。这是由于这期间张掖地区大力发展农业、大量开垦农田,使得植被覆盖变化不同程度地受到人类活动的干扰,人工植被逐年增长[22]。沼泽地、荒草地、盐碱地等未利用土地变化斜率较低,这与前面的 NDVI 对未利用土地(荒草地、盐碱地、沙地等)保持相对稳定的结论一致。

表 1　不同土地利用类型的斜率值

土地利用类型	变化斜率	土地利用类型	变化斜率
灌溉水田	0.003 03	城镇及工矿用	0.004 56
水浇地	0.004 62	特殊用地	0.004 22
旱 地	0.009 43	沼泽地	0.001 92
有林地	0.003 84	冰川积雪	0.001 88
灌木林	0.003 93	荒草地	0.002 49
疏林地	0.001 51	盐碱地	0.002 15
未成林造林地	0.003 82	沙 地	0.002 54
天然草地	0.003 93	裸土地	0.004 05
改良草地	0.005 05	裸岩石砾地	0.003 44
人工草地	0.008 35	其它未利用土	0.004 65

3.3　张掖地区植被 R/S 分析

R/S 分析是通过 Hurst 指数预测未来植被覆盖变化趋势的持续性或反持续性的时空演变特征。Hurst 指数值的变化表现了植被覆盖持续性或反持续性的增强或减弱。由附图 9 可见,生长季平均值 NDVI 变化的 Hurst 指数集中在 0.4～0.6 之间,表现出弱持续性和反持续性的变化。持续性较强分布在张掖盆地,反持续性较强则零星分布在祁连山地东北部;不同月份的月平均 NDVI 值的 Hurst 指数表现出不同的变化趋势,体现在由 5,6 月份的以持续性趋势为主到 7 月份的持续性减弱,反持续性增强,再到 8,9 月份的反持续性趋势减弱,持续性增强。说明除 7 月植被覆盖未来变化与近些年呈相反趋势外,5—9 月未来的变化趋势与近些年的变化相一致。

Hurst 指数能很好地揭示出时间序列的趋势性成分,并且能用 Hurst 指数值的大小判断趋势性成分的持续性或反持续性强度的大小[15,23],由此总结出了 Hurst 指数分级表(表 2)。从表 3 看出,5—9 月份 NDVI 的 Hurst 指数分布呈现出一定的差异性规律。5 月 Hurst 指数,弱持续性(0.5～0.7)占整个研究区的 61.35%,强持续性(0.7～1.0)占 15.45%,强持续性趋势主要在山丹南北部和民乐南部。6 月较 5 月持续性减弱,Hurst 指数 0.4～0.6 面积占 69.69%,随机性增强,强持续性趋势大大减少,只出现在肃南的西南部,反持续性加强,主要分布在民乐和甘州区。7 月反持续性继续增强,Hurst 指数 0.3～0.5 面积占 45.37%,且出现两大分布带,一是分布于山丹和甘州区北部大部分地区,二为肃南裕固族自治县的东部大部及与甘州区和临泽接壤地带。至此,反持续性达到最大趋势。8,9 月反持续性减弱,持续性又开始增加;其值比 7 月份分别增加了 13.22%和 16.77%,8,9 月 Hurst 指数分别以 0.4～0.6,0.5～0.7 为主。

表 2　Hurst 指数分级

等级	Hurst 指数值域	趋势性
4	$1.0<H<0.8$	持续性强
3	$0.8\leqslant H<0.7$	持续性较强
2	$0.7\leqslant H<0.6$	持续性较弱
1	$0.6\leqslant H<0.5$	持续性弱
−1	$0.5<H\leqslant 0.4$	反持续性弱
−2	$0.4<H\leqslant 0.3$	反持续性较弱
−3	$0.3<H\leqslant 0.2$	反持续性较强
−4	$0.2<H<0.0$	反持续性强

表 3　2000－2008 年张掖市 Hurst 指数变化趋势统计图

项 目		Hurst 反持续性				Hurst 持续性			
		强	较强	较弱	弱	弱	较弱	较强	强
生长季平均值	面积/km²	12.25	454.06	3 400.88	11 580.13	15 337.81	7 427.06	2 119.25	767.25
	面积比/%	0.03	1.10	8.27	28.18	37.32	18.07	5.16	1.87
5 月平均值	面积/km²	9.00	315.75	2 038.56	7 172.75	14 089.13	11 123.88	4 766.19	1 583.44
	面积比/%	0.02	0.77	4.96	17.45	34.28	27.07	11.60	3.85
6 月平均值	面积/km²	15.25	494.44	3 223.88	12 044.88	16 597.13	6 211.5	1 932.25	579.38
	面积比/%	0.04	1.20	7.84	29.31	40.38	15.11	4.70	1.41
7 月平均值	面积/km²	16.88	680.00	4 506.88	14 135.00	12 621.44	6 045.44	2 327.88	765.19
	面积比/%	0.04	1.65	10.97	34.39	30.71	14.71	5.66	1.86
8 月平均值	面积/km²	20.63	452.06	3 324.81	9 988.63	13 200.69	8 961.63	3 785.44	1 364.81
	面积比/%	0.05	1.10	8.09	24.30	32.12	21.81	9.21	3.32
9 月平均值	面积/km²	8.94	460.88	3 321.94	8 531.94	13 322.06	10 001.44	4 218.63	1 232.88
	面积比/%	0.02	1.12	8.08	20.76	32.41	24.34	10.26	3.00

从表 4 得出，除未成林造林地外其它土地利用类型 Hurst 指数值都集中在弱持续性 0.5～0.6 之间，地表覆盖变化趋势表现为弱持续性。按土地利用的大类排序为：其它未利用土地＜建设用地＜草地＜耕地＜未利用土地＜林地＜水体。从中看出，其它未利用土地最接近 0.5，是由于其本身生态环境的脆弱性导致其变化趋势的随机性。建设用地、草地和耕地的随机性也较强，其原因是由于受人类活动的影响使其自身的稳定性下降，随机性加强。未利用土地和水体基本为无植被或少植被地区，受外界环境影响较小，相对稳定，因此 Hurst 指数相对较大。通过 slope 值和 Hurst 指数值可以预测不同土地覆盖的变化趋势（持续增加趋势、持续减少趋势、反持续性减少趋势、反持续性增加趋势）。由表 1 可见，旱地和人工草地的植被覆盖增长趋势十分明显，其 Hurst 值分别为 0.574 46和 0.562 68，说明旱地和人工草地将会继续增加，但增加的持续性较弱。

表 4 不同土地利用类型的 Hurst 指数

土地利用类型	Hurst 指数	土地利用类型	Hurst 指数
灌溉水田	0.511 758	城镇及工矿用地	0.547 388
水浇地	0.566 500	特殊用地	0.488 551
旱 地	0.574 460	水 体	0.581 126
果 园	0.574 207	沼泽地	0.576 543
有林地	0.568 193	冰川积雪	0.548 240
灌木林	0.542 613	荒草地	0.591 703
疏林地	0.583 297	盐碱地	0.562 094
未成林造林地	0.628 356	沙 地	0.595 540
天然草地	0.556 567	裸土地	0.549 577
改良草地	0.540 783	裸岩石砾地	0.558 922
人工草地	0.562 084	其它未利用土地	0.520 721

4 结 论

（1）2000—2008 年植被重心变化表现为以 2002 和 2006 年为界的不稳定—稳定—不稳定变化。2000—2003 年植被重心向东移动，说明东部植被增加或西部植被减少；2006—2008 年向北移动，说明北部植被增加或南部植被减少。植被重心年内变化表现为以 5 和 11 月为界的不稳定—稳定—不稳定变化。1—3 月向东移动，3—5 月向西北变化，5—11 月相对稳定，但表现为顺时针变化趋势，11—翌年 1 月向西南回归。这是温度和降水共同作用造成的。

（2）2000—2008 年张掖地区 NDVI 的空间变化趋势为整体改善，局部退化。明显增加区主要分布在山丹、民乐和张掖盆地，主要土地类型为旱地、人工草地、改良草地等；退化区主要是张掖盆地和祁连山地；基本不变区域为北部的戈壁荒漠。不同土地类型的 slope 值的排序为：草地（改良草地和人工草地）＞耕地＞城镇及工矿用地＞果园＞林地＞未利用土地，表明人工植被增长速度高于天然植被。

（3）生长季平均值的 Hurst 指数值以弱持续性和反持续性为主。持续性较强分布在张掖盆地，反持续性较强则零星分布在东北部祁连山地。生长季各月的 Hurst 指数分布差异较大，由 5，6 月份的以持续性趋势为主到 7 月份的持续性减弱，反持续性增强，再到 8，9 月份的反持续性趋势减弱，持续性增强。各土地类型的 Hurst 值排序为：其它未利用土地＜建设用地＜草地＜耕地＜未利用土地＜林地＜水体。

通过 R/S 分析法可以客观地模拟出张掖地区未来几年内植被覆盖的空间变化趋势，说明此方法适用于对植被变化预测的分析，但这种预测的有效的时间范围没有进一步的说明；本文研究了不同土地利用类型情况下 NDVI 的变化情况，而没有进一步考虑人为因素及其它自然因素（气温、降水、太阳辐射、水汽压、水文等）下 NDVI 的变化趋势。

［参 考 文 献］

[1] 章文波，路炳军，石伟. 植被覆盖度的照相测量及其自动计算[J]. 水土保持通报，2009，29(2)：39-42.

[2] 王桂钢，周可法，孙莉，等. 近 10 年新疆地区植被动态与 R/S 分析[J]. 遥感技术与应用，2010，25(1)：84-90.

[3] 王辉，酋国盛，毕晓丽，等. 基于 MODIS 的泾河流域植被动态年际变化[J]. 植物生态学报，2007，31(5)：850-856.

[4] Zhou L，Tucker C，Kaufmann R，et al. Variation in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981—1999[J]. Journal of Geophysical Research，2001，106：20069-20083.

[5] Kawabata A，Ichii K，Yamaguchi Y. Global Monitoring of the inter-annual changes in vegetation activities using NDVI and its relationships to temperature and precipitation [J]. International Journal of Remote Sensing，2001，22：1377-1382.

[6] 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.

[7] Fang J Y，Piao S L，He J S，et al. Increasing terrestrial vegetation activity in China，1982—1999[J]. Science in China Series：C，2004，47(1)：241-250.

[8] 冯新灵，冯自立，罗隆诚，等. 青藏高原冷暖气候变化趋势的 R/S 分析及 Hurst 指数试验研究[J]. 干旱区地理，2008，31(2)：175-181.

[9] 王新明，王长耀，牛铮. 应用 R/S 方法分析 NDVI 时间序列[J]. 地理与地理信息科学，2005，21(5)：20-23.

（下转第 239 页）

mate Chang. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

[6] Zhai P M, Ren F M, Zhang Q. Detection of trends in China's precipitation extremes[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1999,57:208-216.

[7] 张瑞君,邸利,黄海霞,等. 定西市安家沟小流域生态经济系统健康定量评价[J]. 甘肃农业大学学报,2009,44(1):132-137.

[8] 孙中峰,张学培,张晓明,等. 晋西黄土区林地坡面土壤水分异质性研究[J]. 干旱地区农业研究,2004,2:81-85.

[9] 袁嘉祖,闵庆文. 水是西北地区生态系统重建的根本[J]. 自然资源学报, 2001,16(6):511-515.

[10] 冉大川,柳林旺,赵力仪,等. 黄河中游河口镇至龙门区间水土保持与水沙变化[M]. 河南 郑州:黄河水利出版社,2000:22-27.

[11] 杨德应,王玲,高贵成,等. 陕北清涧河"2002·7"暴雨洪水分析[J]. 人民黄河,2002,24(12):10-11.

[12] 黄河水利科学研究院. 黄土高原典型支流生态环境建设的水文效应研究技术报告[R]. 河南 郑州:黄河水利科学研究院,2005:12.

[13] 傅伯杰,王军,马克明. 黄土丘陵区土地利用对土壤水分的影响[J]. 中国科学基金,1999,4:225-227.

[14] 徐宗学,张楠. 黄河流域近 50 年降水变化趋势分析[J]. 地理研究,2006,25(1):27-34.

[15] 卢爱刚. 半个世纪以来黄土高原降水的时空变化[J]. 生态环境学报,2009,18(3):957-959.

[16] 张晓明. 黄土高原典型流域土地利用/森林植被演变的水文生态响应与尺度转换研究[D]. 北京:北京林业大学, 2008.

[17] 张杰,李栋梁,何金梅,等. 地形对青藏高原丰枯水年雨季降水量空间分布的影响[J]. 水科学进展,2007,18(3):319-326.

[18] 林之光. 地形降水气候学[M]. 北京:科学出版社,1995:97-105.

[19] Jammalamadaka S R, Goria M N. A test of goodness-of-fit based on Gini's index of spacings[J]. Statistics & Probability Letters, 2004,68:177-187.

[20] Samel A N, Wang W C, Liang X Z. The monsoon rainband over China and relationships with the Eurasian circulation[J]. Journal of Climate, 1999,12:115-131.

(上接第 224 页)

[10] 张勃,孟宝,郝建秀,等. 干旱区绿洲—荒漠带土壤水盐异质性及生态环境效应研究:以黑河中游张掖绿洲为例[J]. 中国沙漠,2006,26(1):81-84.

[11] 金蓉,石培基,王雪平. 张掖绿洲水循环经济发展探讨[J]. 中国沙漠,2005,25(6):922-927.

[12] 马荣华,陈雯,陈小卉,等. 常熟市城镇用地扩张分析团[J]. 地理学报,2004,59(3):418-426.

[13] 宋开山,张柏,段洪涛,等. 近 20 年吉林中东部地区林地的时空变化及成因浅析[J]. 资源科学,2005,27(2):77-82.

[14] 韩贵锋,赵柯,徐建华. 基于时间序列遥感的长三角地区植被时空格局演变[J]. 中国园林,2009(2):60-64.

[15] 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.

[16] 殷学莲,贺建锋. 河西走廊中部气候资源特点及其开发应用[J]. 干旱区研究,2010,27(2):188-193.

[17] 李鸣骥,石培基. 黑河流域张掖地区近 38 年以来气候变化特征分析[J]. 中国沙漠,2007,27(6):1048-1054.

[18] 王启朝,胡录,陈海牛. 张掖地区黑河近期综合治理工程效益初步分析[J]. 中国沙漠,2008,28(3):498-503.

[19] 宋怡,马明国. 基于 SPOT-VEGETATION 数据的中国西北植被覆盖变化分析[J]. 中国沙漠,2007,27(1):89-93.

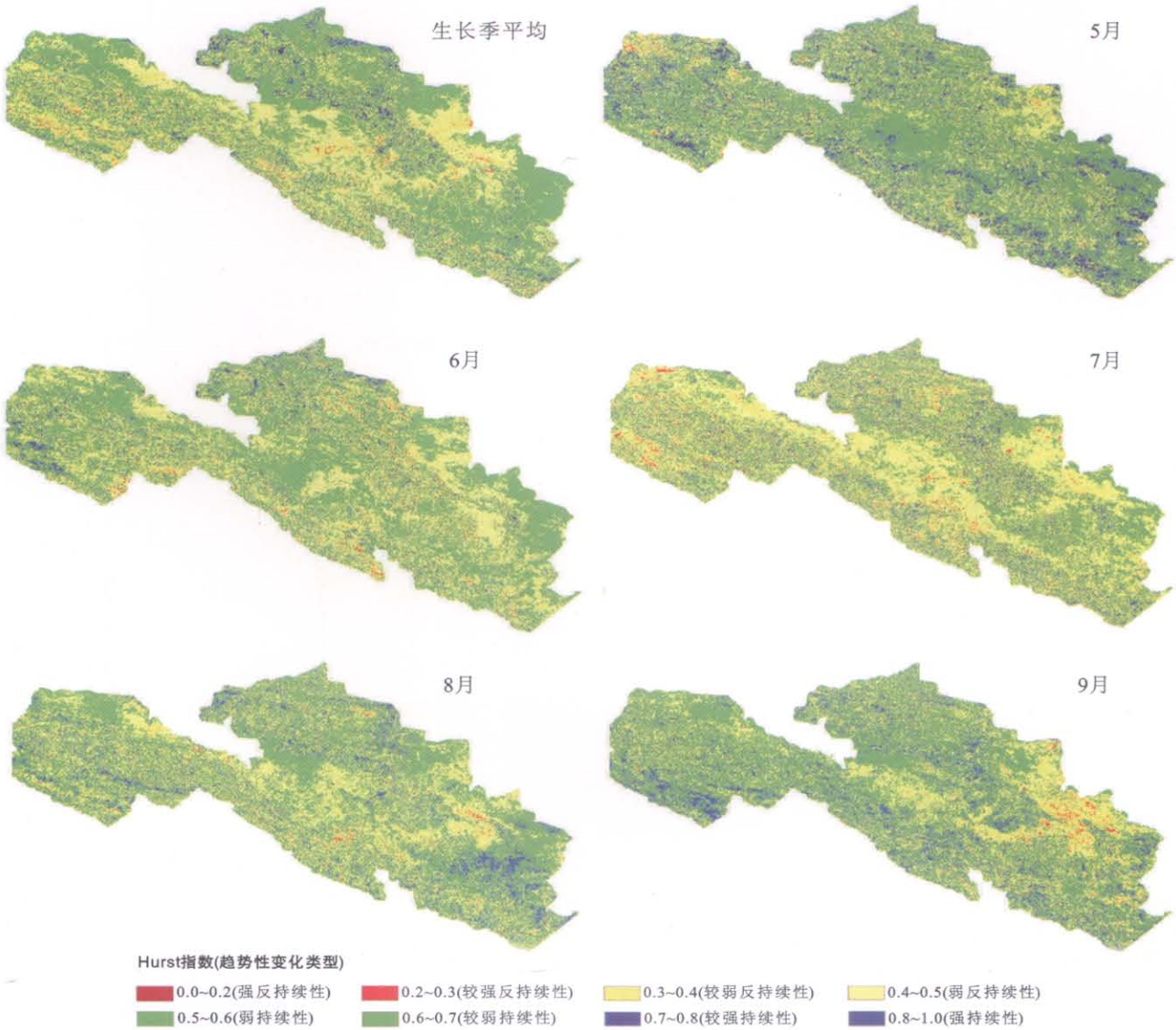
[20] 姜晓勇,张勃,张遇春. 张掖地区近 35 年来气温和降水的变化[J]. 干旱区资源与环境,2008,22(2):81-86.

[21] 梁继运,万力,金晓媚,等. 基于 SPOT-VEGETION 数据的张掖盆地植被覆盖变化动态分析[J]. 科技导报,2009,27(12):65-70.

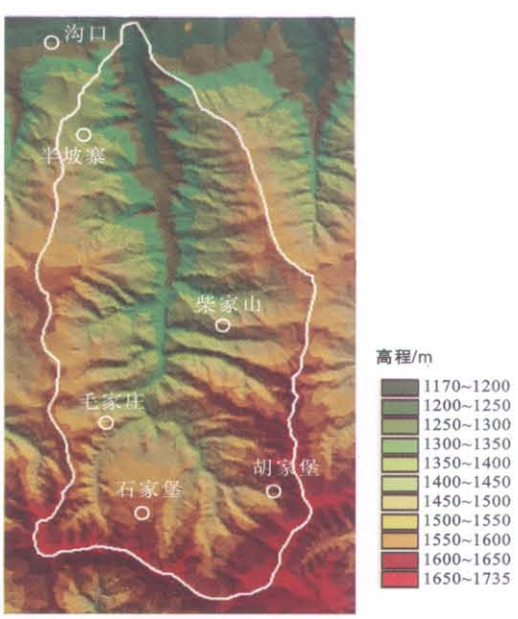
[22] 金晓媚,万力,李文梅. 祁连山以北地区生态植被的变化规律[J]. 科技导报,2007,25(3):18-21.

[23] 赵晶,王乃昂. 近 50 年来兰州城市气候变化的 R/S 分析[J]. 干旱区地理,2002,25(1):90-95.

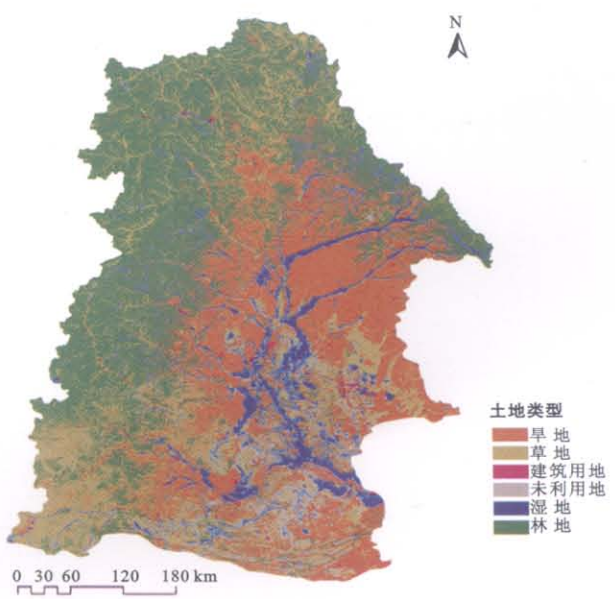
[24] 曲广周,覃英红,刘亮,等. 基于 R/S 分析黄河及黄土高原主要河流水资源的变化[J]. 中国沙漠,2010,30(2):467-470.



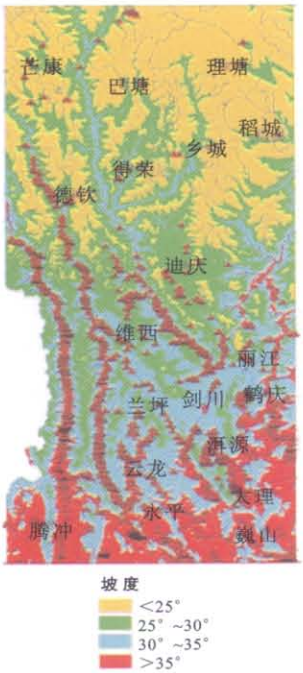
附图9　2000—2008年张掖地区生长季平均值、5—9月份的Hurst指数变化趋势



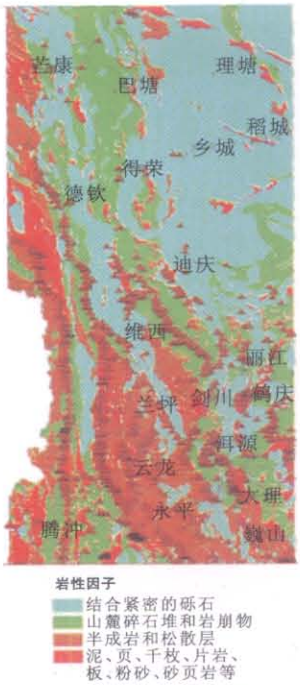
附图10　甘肃省天水市秦州区吕二沟流域雨量站位置及控制面积



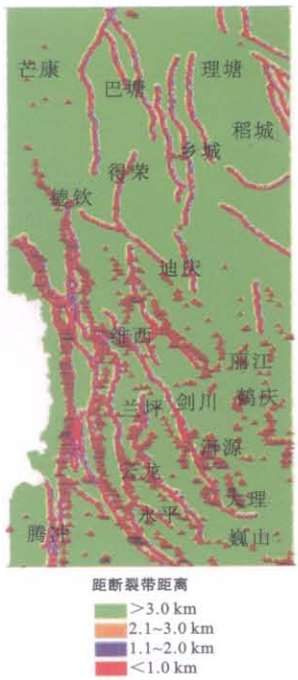
附图11　2005年嫩江流域土地利用分类



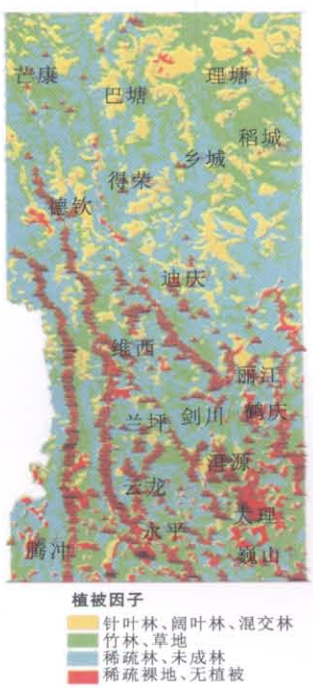
附图1　三江并流区坡度因子分级



附图2　三江并流区岩性因子分级



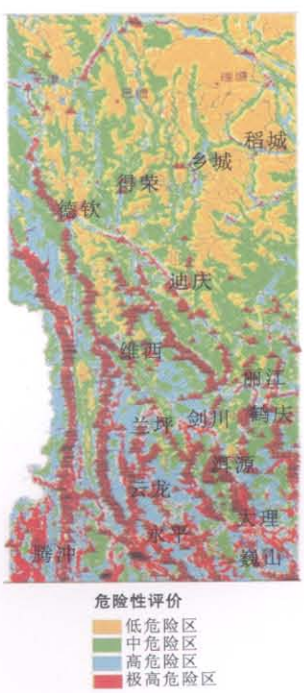
附图3　三江并流区断裂因子分级



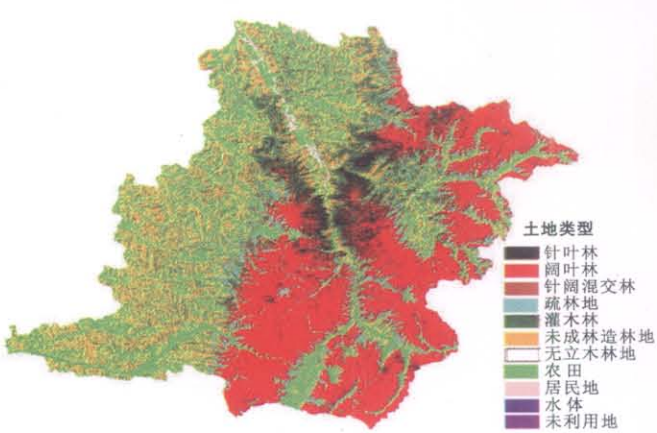
附图4　三江并流区植被因子分级



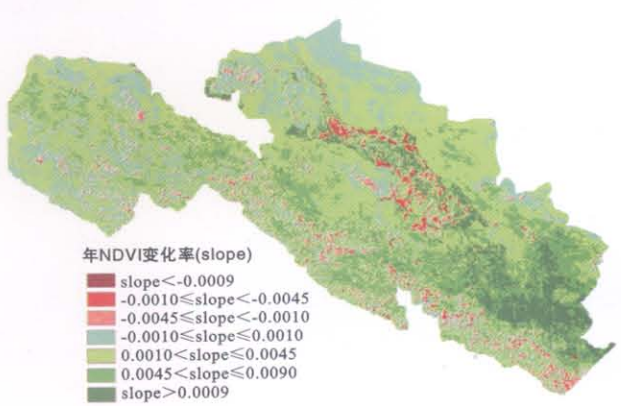
附图5　三江并流区道路因子分级



附图6　三江并流区泥石流危险性评价区划



附图7　山西省中阳县土地利用



附图8　张掖地区2000—2008年生长季NDVI变化率