

基于 GIS 和 RS 的延河流域植被覆盖度与地形因子的相关性研究

汤巧英¹, 戚德辉², 宋立旺², 温仲明³

(1. 浙江同济科技职业学院, 杭州 311231, 2. 浙江省水利水电勘测设计院, 杭州 310002, 3. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要:以延河流域为研究区,综合运用 GIS 和 RS 技术,基于 Landsat TM 影像,运用改进的像元二分模型估算了延河流域 2000 年和 2010 年的植被覆盖度,结合 DEM 数据提取的高程、坡度、坡向地形数据,分析了植被覆盖度与地形因子的相关性,以为延河流域植被恢复和生态建设提供依据。结果表明:(1) 延河流域植被覆盖度从 2000 年的 29.18% 增加到 2010 年的 52.42%,呈上升趋势。(2) 2000 年植被覆盖度随高程的增加呈减小的趋势,2010 年植被覆盖度随高程的增加呈先增加后减少的趋势。2000 年和 2010 年植被覆盖度随坡度的升高,大致呈现先升高后降低的趋势,在 30°~35° 范围内最高。2000 年和 2010 年植被覆盖度总体表现为阴坡(北、东北)>半阳坡(东南、西)=半阴坡(东、西北)>阳坡(南、西南)>平地,其中阴坡的植被覆盖度最高,平地的植被覆盖度最低。(3) 在高程 1 000~1 500 m,坡度在 25°~45° 范围内,植被覆盖度增加的值最大。

关键词:植被覆盖度;地形因子;相关性;延河流域

中图分类号: TP79; S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)04-0198-06

Correlation of Vegetation Coverage and Topographic Factors in Yanhe River Basin Based on GIS and RS

TANG Qiaoying¹, QI Dehui², SONG Liwang², WEN Zhongming³

(1. Zhejiang Tongji Vocational College Of Science And Technology, Hangzhou 311231, China;

2. Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hanzhou 310002, China;

3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract:Vegetation coverage of Yanhe River Basin from 2000 to 2010 was calculated from Landsat TM image using mixed pixel decomposition model based on GIS and RS. In order to provide basis for vegetation restoration and ecological construction of Yanhe River Basin, the correlation of vegetation coverage and topographic factors was analyzed combing elevation, slope and slope aspect extracted from DEM. The result showed that vegetation coverage of Yanhe River Basin increased from 29.18% in 2000 to 52.42% in 2010; in 2000, vegetation coverage of Yanhe River Basin decreased with the elevation increased; in 2010, vegetation coverage of Yanhe River Basin increased first and then decreased as the elevation increased; vegetation coverage of Yanhe River Basin increased first and then decreased as the slope increased, and was the highest in the lands with gradients of 30°~35°; vegetation coverage in 2000 and 2010 decreased in the sequence: shady slope (north, northeast)>half sunny slope(southeast, west)=half shady slope(east, northwest)>sunny slope(south, southwest)>flat, the highest vegetation coverage was found in shady slope and the lowest vegetation coverage was found in flat land. The value of vegetation coverage increase was the biggest at 1 000~1 500 m elevation and on the slope with gradients of 25°~45°.

Keywords:vegetation coverage; topographic factors; correlation; Yanhe River Basin

植被作为陆地生态系统的重要组成部分,对全球的气候和环境变化具有重要的指示作用,此外植被能够截留降雨、减少雨滴击溅、增加土壤入渗、延缓径流,因此植被覆盖能减少土壤侵蚀量,对遏制土壤侵蚀,减少水土流失有重要作用^[1-2]。植被覆盖度是指单位面积内植被地上部分(包括叶、茎、枝)在地面的垂直投影面积占统计区总面积的百分比,是衡量地表植被及区域生态环境状况的重要指标^[3-4]。归一化植被指数(NDVI)是遥感影像近红外波段反射值(NIR)和红光波段反射值(R)之差与 NIR 和 R 之和的比值,常被用来表征植被覆盖和植被生长状况,可以对植被生长进行动态监测,能在时空尺度上反映植被信息^[2,5-6],可以对植被生长动态变化进行监测,同时能够在较大时空尺度上客观反映植被信息^[7],是目前科学研究中最常用的植被指数。近年来,国内外许多学者对植被覆盖度进行了不同尺度的研究^[8-9],如高健健等^[8]对黄土高原 1981—2012 年植被覆盖度的时空变化进行了研究,发现黄土高原生长季平均植被覆盖度空间分布表现为从东南向西北逐渐递减的趋势。陈妮等^[9]对北洛河流域植被覆盖度的时空变化进行了研究,发现 1987—2007 年植被覆盖度呈现增加的趋势。还有学者研究了植被覆盖度与气候及地形的关系^[10-11],如杨尚武等^[10]对甘肃河东植被覆盖度进行研究,发现植被生长主要受降水影响。刘尧文等^[11]对平潭岛植被覆盖度与地形的关系进行了研究,表明植被覆盖度受坡度和高程影响较大,坡向影响较小。蔡虹等^[12]对赤水河流域内植被覆盖度与地形的关系进行了研究,表明坡度和坡向对植被覆盖的影响都明显高于高程。目前黄土高原地区植被覆盖度时空变化的分析已经取得一些成果^[8-9,13],但从 1999 年实行退耕还林以来,对黄土高原地区植被覆盖度与地形的关系研究相对薄弱。

黄土高原黄土堆积,土质疏松,水土流失严重^[14],加强黄土高原植被覆盖度时空变化及与地形关系的研究,有助于理解植被的动态变化特征,为黄土高原植被恢复重建和生态建设提供理论支持。基于此,本研究以黄土高原延河流域为研究区,利用延河流域 2000 年和 2010 年两期遥感影像,结合 DEM 数据,探讨延河流域植被覆盖度的时空变化以及与地形的关系,以便更好地理解延河流域的植被覆盖度的分布特征,为该区植被恢复和水土流失综合治理提供理论支持。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

延河流域(36°23′—37°17′N,108°45′—110°28′

E)地处黄土高原丘陵沟壑区,属大陆性季风气候,年均降水量 500 mm,年均气温 9℃。延河的干流全长 286.9 km,流域面积 7 687 km²,平均坡度 4.4‰,河网密度 4.7 km/km²^[15]。从东南向西北,降雨、温度呈现出明显的梯度变化特征,从东南向西北递减,植被分布具有明显的地带性规律,依次划分为森林区、森林草原区、典型草原区^[16]。分布较广,多度较高的植物物种有白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、芨芨草(*A. leucophylla*)等^[17]。流域土壤类型主要为黄绵土,具有土质疏松,抗侵蚀能力差等特点。流域内沟壑纵横、川道狭长、梁峁遍布,地形对土壤养分、水分具有强烈的再分配作用,并影响到群落物种组成的空间格局^[18]。

1.2 数据来源及处理

本研究所采用的遥感数据为 Landsat-5 TM 影像,空间分辨率为 30 m,原始影像数据是从地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)下载的,选择覆盖延河流域的 8 景遥感影像,地面站接收时间为 2000 年和 2010 年,轨道号分别为 127/34,127/35,126/35,126/34,两期影像数据平均云量均低于 10%,数据质量良好,两期数据集中于 6 月和 7 月,处于植被生长旺季,具有可比拟性,能满足研究需求。先后对影像数据进行了辐射定标、大气校正、几何校正和裁剪等基本预处理操作。地形数据是由课题组提供的 30 m 分辨率的 DEM 数据,来源于国际科学数据服务平台。上述所有数据的投影方式都转换为 WGS-84 坐标系下通用横轴墨卡托投影,在采用相同投影的矢量边界数据裁剪下,得到了研究区范围的最终数据。

1.3 植被覆盖度估算

像元二分模型是估算植被覆盖度常用的方法,其基本原理是:假设遥感影像的每个像元可以分解为纯植被和纯土壤两个部分,所得的光谱信息即为两种纯组分以面积比例加权的线性组合^[19]。本研究采用李苗苗等^[20]改进的像元二分线性模型来估算植被覆盖度,其公式为:

$$FVC = (NDVI - NDVI_s) / (NDVI_v - NDVI_s) \quad (1)$$

式中:FVC 是植被覆盖度;NDVI 为影像中任意像元的归一化植被指数;NDVI_s 代表裸土的植被指数;NDVI_v 为纯植被覆盖下的归一化植被指数。

首先通过公式(2),即近红外波段(NIR)与红波段(R)数值之差和这两个波段数值之和的比值,计算出归一化植被指数 NDVI,然后根据两期影像的 NDVI 值序列,采用 0.5% 置信度截取 NDVI 的上下阈

值,在置信区间内取最大值和最小值分别近似代替 $NDVI_V$ 和 $NDVI_S$,最后估算出 2000 年和 2010 年的植被覆盖度。

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad (2)$$

式中:NDVI 是归一化植被指数^[6],是指示植被生长状态和植被覆盖度最佳因子^[6];NIR 为近红外波段的反射率; R 为红光波段的反射率。

1.4 地形因子的提取与分级

利用 ArcGIS 10.2 软件从 DEM 数据中提取出高程、坡度和坡向。其中结合延河流域地形的实际情况,考虑自然规律和经济活动,将高程分为 5 级;考虑研究区地形及其对植被长势的影响,借鉴水土流失调查中采用的 8° 作为缓坡和斜坡界线的方法^[21],将坡度分为 6 级;有研究表明,因为地球公转以及太阳入射角的原因,北半球西南坡向最干燥,东北坡向最潮湿,按照湿润程度由高到低,依次为:东北向>北向>

西北向>东向>西向>东南向>南向>西南向^[22],考虑到坡向与环境因子的关系,将坡向分为 5 个,分别为平地、阴坡($0^\circ \sim 67.5^\circ, 337.5^\circ \sim 360^\circ$)、半阴坡($67.5^\circ \sim 112.5^\circ, 292.5^\circ \sim 337.5^\circ$)、半阳坡($112.5^\circ \sim 157.5^\circ, 247.5^\circ \sim 292.5^\circ$)、阳坡($157.5^\circ \sim 247.5^\circ$)^[23]。地形分级情况具体见表 1。延河流域高程、坡度、坡向分级图见图 1。

表 1 地形因子分级及面积

等级	高程/ m	面积 比例/%	坡度/($^\circ$)	面积 比例/%	坡向	面积 比例/%
1	<800	1.55	<5	4.58	平地	0.7
2	800~1000	11.53	5~8	3.46	阴坡	18.19
3	1000~1200	32.05	8~15	12.83	半阴坡	29.58
4	1200~1500	48.95	15~25	32.33	半阳坡	28.64
5	>1500	5.92	25~35	34.24	阳坡	22.89
6			>35	12.56		

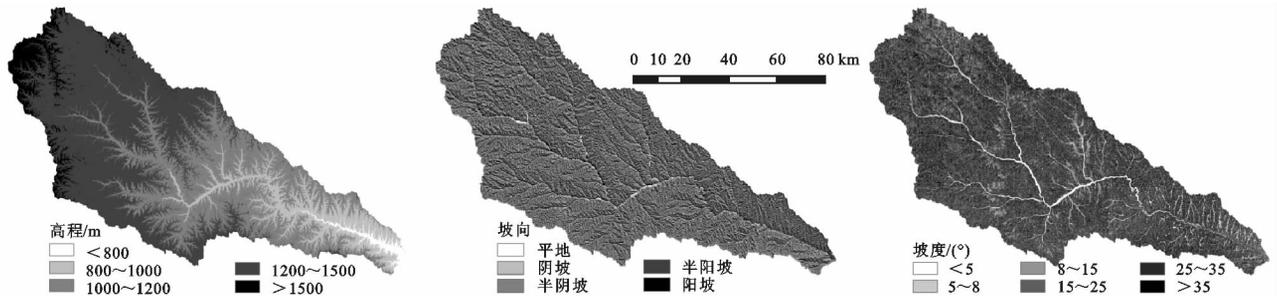


图 1 延河流域高程、坡度、坡向分级图

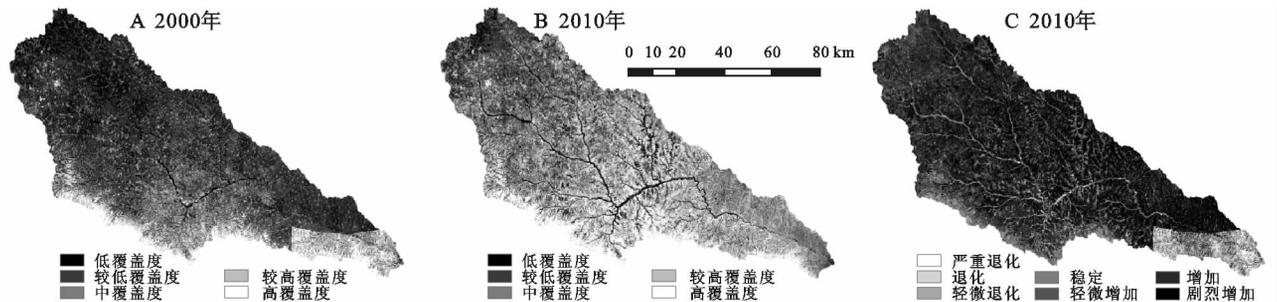


图 2 研究区 2000 年和 2010 年植被覆盖度分级图(A 和 B)及植被覆盖动态图(C)

2 结果与分析

2.1 延河流域植被覆盖度总体特征

通过 2000 年和 2010 年预处理后的 Landsat 5 TM 影像提取 NDVI,然后估算 2000 年和 2010 年延河流域的植被覆盖度,根据植被覆盖情况,结合前人的研究^[8],将植被覆盖度划分阈值区间,利用 ArcGIS 软件对植被覆盖度图进行重分类,得到 2000 年和 2010 年的植被覆盖分级图(图 2A 和 B),将 2000 年和 2010 年植被覆盖度做差值运算(较晚年份减去较早年份),然后结合前人研究^[8],将差值运算得到的植被覆盖度差值图划分阈值区间进行重分类,得到植被

覆盖动态图(图 2C)。由结果得知,2000 年延河流域的植被覆盖度为 29.18%,2010 年延河流域植被覆盖度为 52.42%,说明在 2000—2010 年这 10 a 间,植被覆盖度呈现上升趋势。由表 2 可以看出,2000 年延河流域植被覆盖度主要以低覆盖度、较低覆盖度为主,占 66.41%,而 2010 年延河流域植被覆盖度主要以中覆盖度、较高覆盖度和高覆盖度为主,占 80.48%,2010 年延河流域高覆盖度、较高覆盖度和中覆盖度面积较 2000 年有明显的增加趋势,特别是较高覆盖度面积由 2000 年的 6.92%增加到 26.24%,增幅高达 19.32%,低覆盖度和较低覆盖度区域的面积显著减少,特别是较低覆盖度区域,由 2000 年的 43.19%减少到 16.42%,降幅高达 26.77%。这可能与 1999 年

以来,国家实施退耕还林还草政策有密切的关系。由图2可以看出高覆盖度、较高覆盖度区域主要分布在延河流域东南部森林带和森林草原带,而延河流域年均降雨量和气温从东南向西北递减,这可能主要与延河流域降雨和气温由西北向东南递增有关,在空间尺度上植被覆盖度的分布整体与延河流域的水热分布一致^[16]。

表2 植被覆盖度等级划分及面积比例

植被覆盖度等级	植被覆盖度阈值区间/%	各阈值范围面积比例/%		2000年和2010年变化幅度/%
		2000年	2010年	
低覆盖度	<10	23.22	3.10	-20.12
较低覆盖度	10~30	43.19	16.42	-26.77
中覆盖度	30~50	16.60	29.35	12.75
较高覆盖度	50~70	6.92	26.24	19.32
高覆盖度	>70	10.07	24.89	14.82

由表3可以看出延河流域植被覆盖变化主要以增加、剧烈增加为主,占72.85%,稳定变化的区域占11.23%,只有9.39%的区域呈退化趋势。

表3 植被覆盖度变化等级

植被覆盖度变化等级	植被覆盖度差值的阈值区间/%	植被覆盖度差值阈值区间面积比例/%
严重退化	[-100,-30]	2.00
退化	(-30,-10]	4.93
轻微退化	(-10,-5]	2.46
稳定	(-5,5]	11.23
轻微增加	(5,10]	6.53
增加	(10,30]	35.57
剧烈增加	(30,100]	37.28

2.2 植被覆盖度对地形的响应规律

2.2.1 植被覆盖度随高程的变化规律 为了更好地研究植被覆盖度随地形的变化规律,将高程以100 m为间隔,将高程划分为13个梯度带,运用ArcGIS 10.2对不同高程等级的植被覆盖度进行分区统计,结果见图3,在各个高程范围内,2010年植被覆盖度都高于2000年植被覆盖度,这也反映了国家退耕还林还草,生态恢复重建政策的效果显著。2000年植被覆盖度随高程的升高,大致呈现逐渐降低的趋势,在495~600 m范围内最高,为57.21%;在1700~1800 m范围内最低,为11.34%;2010年植被覆盖度随高程的升高,大致呈现先升高后降低的趋势,在1100~1200 m范围内最高,为60.18%,在1700~1800 m范围内最低,为29.31%。结合表1中的梯度分级,2000年植被覆盖度在495~800 m范围内最高,在1500~1800 m范围内最低;2010年植被覆盖在1000~1300 m范围内最高,在1500~1800 m范围内最低。2010年植被覆盖度较2000年相比,在1000~1500 m范围内,植被覆盖度增加的值最大。

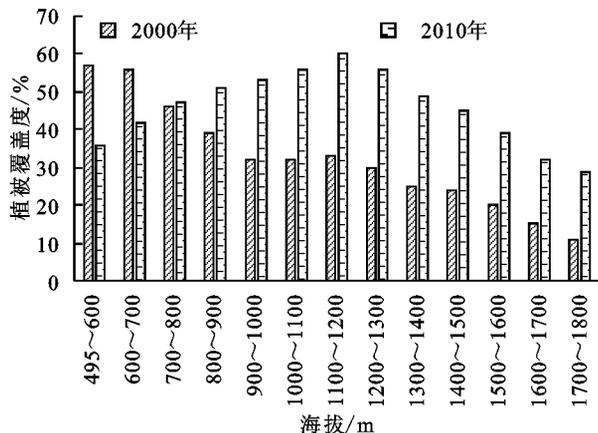


图3 2000年和2010年各高程植被覆盖度均值分布图

2.2.2 植被覆盖度随坡度的变化规律 为更加细致地研究延河流域植被覆盖度随坡度的变化规律,将坡度以5°为间隔进行分级,共划分14个梯度。运用ArcGIS 10.2对不同坡度等级的植被覆盖度进行分区统计,结果见图4,在各个坡度范围内,2010年植被覆盖度都高于2000年植被覆盖度,这也反映了国家退耕还林还草,生态恢复重建政策的效果显著。2000年和2010年植被覆盖度随坡度的升高,大致呈现先升高后降低的趋势,在30°~35°范围内最高,在65°~70°范围内最低。2010年植被覆盖度较2000年相比,在25°~45°范围内,增加的值最大。结合表1中的坡度分级,结果发现2000年和2010年植被覆盖度在25°~35°范围内最高,在65°~70°范围内最低。

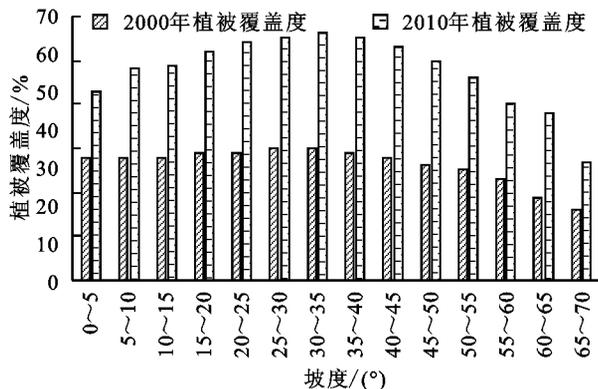


图4 2000年和2010年各坡度植被覆盖度均值分布

2.2.3 植被覆盖度随坡向的变化 运用ArcGIS 10.2对不同坡向等级的植被覆盖度进行分区统计,结果见表4,在各个坡向范围内,2010年植被覆盖度都高于2000年植被覆盖度;2000年和2010年植被覆盖度在北面、西北面最高分别为29.36%和57.48%;在平地最低,分别为23.12%和33.14%。结合表1的坡向分级,结果发现2000年和2010年植被覆盖度总体表现为阴坡(北、东北)>半阳坡(东南、西)=半阴坡(东、西北)>阳坡(南、西南)>平地,其中阴坡的植被覆盖度最高,平地的植被覆盖度最低。

表4 2000年和2010年各坡向植被覆盖度均值分布

分级	坡向	2000年	2010年
1	平面	23.12	33.14
2	东北	27.13	53.24
3	东	24.42	50.31
4	东南	23.24	49.16
5	南	23.41	49.26
6	西南	25.25	52.21
7	西	28.42	57.37
8	西北	29.28	57.48
9	北	29.36	57.26

3 讨论

高程影响温度、湿度,反映人类活动的频率,并在一定程度上影响土壤性质、辐射强度和空气流动,进而影响植被的分布^[24]。2000年植被覆盖度随高程升高,呈现逐渐降低的趋势,这与程圣东等^[25]在文安译流域的研究一致。延河流域沟壑纵横,土质疏松,梁卯遍布,在低程较少的地方,低程小于700 m,地势相对平坦,水热条件优越,自然植被和人工恢复植被成活率高,植被覆盖较好^[26],这也反映了国家退耕还林还草,生态恢复重建政策的效果显著。因此,在退耕还林政策实施之初,在低程较少的区域植被覆盖度较高;随低程升高,山区丘陵地形由于不利于土壤水分的入渗,使得海拔较高的地区土壤含水量减少,气温降低,土壤肥力下降,因此,植被覆盖度逐渐降低。2010年,退耕还林还草政策实施多年后,由于低海拔地区人类活动频繁,因此植被覆盖度相对较低;在一定程度上,封山育林使植物群落迅速生长,保土固肥能力增强,因此在一定范围内,随低程升高,植被覆盖度增加,随低程继续增加,温度降低,降雨量减少,因而植被恢复缓慢,植被覆盖度低^[27]。

坡向通过影响坡面接受的太阳光辐射和地面与风向的夹角,使得在不同坡向之间的水、热、光、土以及植被的分布受到较大的影响;坡度使水分、光照等环境因子发生变化,直接或间接地影响植物生长^[28]。坡度在小于35°时,植被覆盖度与坡度呈正相关,在30°~35°范围内达到最大值,坡度超过35°后,植被覆盖度与坡度呈现负相关。原因是坡度增大后水层压力在垂直坡面方向大幅减小,坡度的增加不利于水分入渗^[29],而且随坡度增加,所得积温越少,自然降雨越容易流失,单位面积降雨量越少,因此植被覆盖度降低。2000年和2010年植被覆盖度总体表现为阴坡(北、东北)>半阳坡(东南、西)=半阴坡(东、西北)>阳坡(南、西南)>平地,其中阴坡的植被覆盖度最

高,平地的植被覆盖度最低,这与程圣东等^[25]人的研究大体一致;这主要是因为坡向不同,导致阴阳坡所得太阳辐射能不同,进而温度产生差异,在黄土丘陵沟壑区,南坡辐射总量高于北坡,而湿度北坡高于南坡,植物群落盖度和高度北坡高于南坡^[30],因此植被覆盖度表现为阴坡最高。

4 结论

(1) 延河流域植被覆盖度从2000年的29.18%增加到2010年的52.42%,呈上升趋势。

(2) 2000年,植被覆盖度随高程的增加呈减小的趋势,2010年,植被覆盖度随高程的增加呈先增加后减少的趋势。植被覆盖度随高程的变化规律还需进一步加强研究。2000年和2010年植被覆盖度随坡度的升高,大致呈现先升高后降低的趋势。在坡度为35°处出现转折,坡度在小于35°时,植被覆盖度与坡度呈正相关,坡度超过35°后,植被覆盖度与坡度呈负相关。2000年和2010年植被覆盖度总体表现为阴坡(北、东北)>半阳坡(东南、西)=半阴坡(东、西北)>阳坡(南、西南)>平地,其中阴坡的植被覆盖度最高,平地的植被覆盖度最低。

(3) 在低程1000~1500 m,坡度在25°~45°范围内,植被覆盖度增加的值最大。

参考文献:

- [1] 王光谦,张长春,刘家宏,等. 黄河流域多沙粗沙区植被覆盖变化与减水减沙效益分析[J]. 泥沙研究,2006(2): 10-16.
- [2] 张宝庆,吴普特,赵西宁. 近30年黄土高原植被覆盖时空演变监测与分析[J]. 农业工程学报,2011,27(4):287-293.
- [3] 孙红雨,王长耀,牛铮,等. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系:基于NOAA时间序列数据分析[J]. 遥感学报,1998,2(3):204-210.
- [4] Gitelson A A, Kaufman Y J, Stark R, et al. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction [J]. Remote Sensing of Environment, 2002,80(1):76-87.
- [5] Pettorelli N, Vik J O, Myysterud A, et al. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2005,20(9):503-510.
- [6] 陈效述,王恒. 1982—2003年内蒙古植被带和植被覆盖度的时空变化[J]. 地理学报,2009,64(1):84-94.
- [7] 王丝丝,于兴修,刘正佳. 沂蒙山区植被NDVI的时空特征及其对水热条件的响应[J]. 遥感技术与应用,2014,29(1):61-68.
- [8] 高健健,穆兴民,孙文义. 1981—2012年黄土高原植被覆盖度时空变化特征[J]. 中国水土保持,2016(7):52-56.
- [9] 陈妮,李谭宝,张晓萍,等. 北洛河流域植被覆盖度时空变化的遥感动态分析[J]. 水土保持通报,2013,33(3): 206-210.

- [10] 杨尚武,张勃. 基于 SPOT NDVI 的甘肃河东植被覆盖变化及其对气候因子的响应[J]. 生态学杂志, 2014, 33(2): 455-461.
- [11] 刘尧文,沙晋明. 基于 Landsat 影像的多时相植被覆盖度与地形因子关系研究:以平潭岛为例[J]. 福建师范大学学报:自然科学版, 2016, 4(32): 89-98.
- [12] 蔡宏,何政伟,安艳玲,等. 基于 RS 和 GIS 的赤水河流域植被覆盖度与各地形因子的相关强度研究[J]. 地球与环境, 2014, 42(4): 518-524.
- [13] 张含玉,方怒放,史志华. 黄土高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应[J]. 生态学报, 2016, 36(13): 3960-3968.
- [14] 郭忠升,邵明安. 半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力[J]. 生态学报, 2003, 23(8): 1640-1647.
- [15] 张莉,温仲明,苗连朋. 延河流域植物功能性状变异来源分析[J]. 生态学报, 2013, 33(20): 6543-6552.
- [16] 温仲明,焦峰,焦菊英. 黄土丘陵区延河流域潜在植被分布预测与制图[J]. 应用生态学报, 2008, 19(9): 1897-1904.
- [17] 秦伟,朱清科,张宇清,等. 陕北黄土区生态修复过程中植物群落物种多样性变化[J]. 应用生态学报, 2009, 20(2): 403-409.
- [18] 杨士梭,温仲明,苗连朋,等. 黄土丘陵区植物功能性状对微地形变化的响应[J]. 应用生态学报, 2014, 25(12): 3413-3419.
- [19] 马娜,胡云锋,庄大方,等. 基于遥感和像元二分模型的内蒙古正蓝旗植被覆盖度格局和动态变化[J]. 地理科学, 2012, 2(32): 251-256.
- [20] 李苗苗,吴炳方,颜长珍,等. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J]. 资源科学, 2004, 26(4): 153-159.
- [21] 李智广编著. 水土流失测验与调查[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2005.
- [22] Day F P, Monk C D. Vegetation patterns on a southern Appalachian watershed[J]. Ecology, 1974, 55(5): 1064-1074.
- [23] 额日敦同拉嘎. 基于 DEM 的内蒙古大青山林地景观格局分析[D]. 呼和浩特:内蒙古师范大学, 2013.
- [24] 王莉雯,卫亚星,牛铮. 基于遥感的青海省植被覆盖时空变化定量分析[J]. 环境科学, 2008, 29(6): 1754-1760.
- [25] 程圣东,李占斌,鲁克新,等. 文安驿流域植被覆盖度时空分异及其与地貌因子关系研究[J]. 西安理工大学学报, 2011, 27(2): 145-150.
- [26] 崔晓临,赵娟,白红英,等. 基于 MODIS NDVI 的陕西省植被覆盖变化分析[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2013, 41(5): 87-93.
- [27] 闫瑞,张晓萍,闫胜军,等. 1995—2014 年北洛河流域植被恢复的地形分布特征[J]. 东北大学学报:自然科学版, 2016, 37(11): 1598-1603.
- [28] Auslander M, Nevo E, Inbar M. The effects of slope orientation on plant growth, developmental instability and susceptibility to herbivores[J]. Journal of Arid Environments, 2003, 55(3): 405-416.
- [29] 黄俊,吴普特,赵西宁,等. 坡面生物调控措施对土壤水分入渗的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 29-37.
- [30] 党晶晶,赵成章,李钰,等. 祁连山高寒草地甘肃臭草叶性状与坡向间的关系[J]. 植物生态学报, 2015, 39(1): 23-31.

~~~~~

(上接第 197 页)

- [7] 李博,佟连军,韩增林. 东北地区煤炭城市脆弱性与可持续发展模式[J]. 地理研究, 2010, 29(2): 361-372.
- [8] 苏飞,张平宇. 基于集对分析的大庆市经济系统脆弱性评价[J]. 地理学报, 2010, 65(4): 454-464.
- [9] 李鹤,张平宇. 东北地区矿业城市社会就业脆弱性分析[J]. 地理研究, 2009, 28(3): 751-760.
- [10] 王乃举,周涛发. 矿业城市经济系统脆弱性评价:以铜陵市为例[J]. 地理与地理信息科学, 2012, 28(3): 49-53.
- [11] 孙平军,修春亮. 脆弱性视角的矿业城市人地耦合系统的耦合度评价:以阜新市为例[J]. 地域研究与开发, 2010, 29(6): 75-79.
- [12] 顾康康,刘景双,王洋,等. 辽中地区矿业城市生态系统脆弱性研究[J]. 地理科学, 2008, 28(6): 759-764.
- [13] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州:浙江科学技术出版社, 2000: 1-7.
- [14] 王文圣,李跃清,金菊良,等. 水文水资源集对分析[M]. 北京:科学出版社, 2010: 21-33.
- [15] 陈明星,陆大道,张华. 中国城市化水平的综合测度及其动力因子分析[J]. 地理学报, 2009, 64(4): 387-398.
- [16] Kelly C, Ferrara A, Wilson G A, et al. Community resilience and land degradation in forest and shrubland socio-ecological systems: Evidence from Gorgoglione, Basilicata, Italy[J]. Land Use Policy, 2015, 46: 11-20.
- [17] 苏飞,张平宇,李鹤. 中国煤矿城市经济系统脆弱性评价[J]. 地理研究, 2008, 27(4): 907-916.
- [18] 王乃举,周涛发. 矿业城市经济系统脆弱性评价:以铜陵市为例[J]. 地理与地理信息科学, 2012, 28(3): 49-53.
- [19] 杨艳茹,王士君,陈晓红. 石油城市经济系统脆弱性动态演变及调控途径研究:以大庆市为例[J]. 地理科学, 2015, 35(4): 456-463.
- [20] 王群,陆林,杨兴柱. 千岛湖社会—生态系统恢复力测度与影响机理[J]. 地理学报, 2015, 70(5): 779-795.