

晋西南黄土高原区植被覆盖度变化 及其生态效应评估

张文强^{1,2,3}, 孙从建¹, 李新功¹

(1. 山西师范大学地理科学学院, 临汾 041000; 2. 中国科学院荒漠与绿洲生态国家重点实验室,
乌鲁木齐 830011; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 水土流失和生态退化是黄土高原区面临的严峻问题, 已经严重制约了经济发展。基于 TM 和 OLI 数据, 分别估算晋西南黄土高原区的植被覆盖度(FVC)和遥感生态指数(RSEI), 定量分析了晋西南黄土高原区的植被和生态恢复效果, 并提出需要重点治理的区域。研究结果表明: (1) 15年间晋西南黄土高原区的植被覆盖度和遥感生态指数都呈现增加的趋势, FVC指数从2002年的42.69%增加至2017年的47.67%, RSEI指数由2002年的45%增加至2017年的52.5%, 反映出研究区生态质量有了明显提高; (2) 除研究区内芝河流域、汾河谷地和沁河流域的生态质量出现严重退化外, 研究区大部分区域的FVC指数和RSEI指数都呈改善趋势, 因此需对芝河流域、汾河谷地和沁河流域加大生态治理力度; (3) 除研究区汾河谷地外, 其余地区植被覆盖度和遥感生态指数的变化趋势基本吻合, 汾河谷地由于冬小麦大面积种植, 植被覆盖度得到一定程度改善, 但遥感生态指数并没有明显改善。

关键词: 晋西南黄土高原区; 植被覆盖度(FVC); 遥感生态指数(RSEI); 生态质量

植被在全球变化和环境气候变化中起到了重要的指示作用, 对区域能量循环有着重要影响, 同时植在地表水循环过程中也具有重要作用。研究表明植被对于截留降雨、减少雨滴击溅、增加土壤入渗、延缓径流^[1-3]都具有显著的作用。

水土流失是困扰当今世界的严峻问题, 严重的水土流失不仅会破坏土壤资源、导致土壤荒漠化, 还会导致地表植被大量退化、降低土地生产力。黄土高原是中国甚至世界上水土流失最严重、生态环境最敏感的地区。晋西南是中华文明的发源地, 拥有历史悠久的农耕文明, 是中国重要的粮食产区。近年来, 严重的水土流失已造成了生态环境的急剧退化。因此, 及时快速地监测水土流失区的生态环境变化已显得尤为重要。遥感技术作为一种有效的工具已在生态环境监测领域得到广泛应用。基于水土流失区的遥感生态指数^[4-5]能够定量地分析评价水土流失区的生态恢复效果, 可以有效监测水土流失区的生态变化。国内研究者对其他水土流失区已展开诸多研究, 如南方红壤区^[6-9]、东北黑土区^[10]、关中平原区^[11]、农牧交错区^[12]等, 但对晋西南黄土高原区的植被覆盖度及其生态评价鲜有研究。

本文在研究晋西南黄土高原区2002-2017年植被覆盖度的基础上, 利用遥感技术获取研究区三期遥感生态指数, 进而分析植被覆盖度和生态变化之间的关系。研究结果对于

收稿日期: 2019-02-27; 修订日期: 2019-06-10

基金项目: 荒漠与绿洲生态国家重点实验室开放基金 (G2018-02-06); 国家自然科学基金项目 (41601317)

作者简介: 张文强 (1996-), 男, 山西太原人, 硕士, 主要从事遥感生态研究。E-mail: 846739949@qq.com

通讯作者: 孙从建 (1986-), 男, 河北沧州人, 副教授, 主要从事生态水文学研究。

E-mail: suncongjian@sina.com

晋西南黄土高原区的生态恢复、水土流失整治、资源可持续利用等具有重要的指导意义。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

晋西南黄土高原区位于黄土高原西南部 ($35^{\circ}23'\sim 36^{\circ}57'N$, $110^{\circ}22'\sim 112^{\circ}34'E$), 土地总面积 20275 km²。该区四周环山, 中间平川, 海拔多在 1000 m 以上, 土壤发育较完全, 形成深重粘化层, 养分含量较为丰富, 境内有黄河、汾河、昕水河等大小河流 200 余条 (图 1)。晋西南黄土高原区地处半干旱、半湿润季风气候区, 属温带大陆性气候, 四季分明, 雨热同期, 年平均气温 $9.0\sim 12.9^{\circ}C$, 降水量 420.1~550.6 mm。独特的自然条件决定了该地区生态的脆弱性, 该地区水土流失面积达 14374 km², 占总面积的 70.9%, 是山西省水土流失最严重的地区之一。2015 年国务院批复的《全国水土保持规划 (2015-2030 年)》(国函〔2015〕160 号)^[13]将晋西南黄土高原区作为重点治理区域。

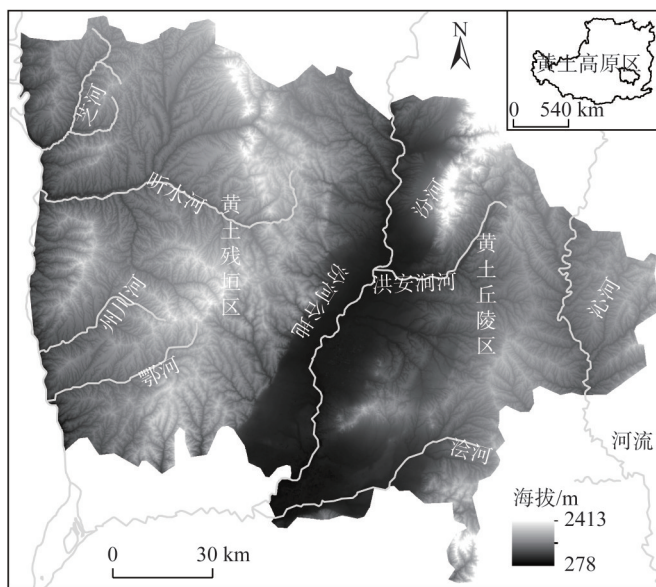


图1 研究区地形及河流分布

Fig. 1 Topography and river distribution in the study area

1.2 数据来源及预处理

本文使用 Landsat 系列卫星数据, 完全覆盖研究区需要三景影像, 所用影像获取时间为: 2002 年 10 月 26 日 (TM), 2009 年 10 月 29 日 (TM) 和 2017 年 11 月 4 日 (OLI)。遥感数据的预处理包括几何配准、镶嵌、辐射定标、大气校正^[14-15]和裁剪等操作。

1.3 研究方法

1.3.1 植被覆盖度计算

目前, 获取植被覆盖度的方法主要有地面测量和遥感测量两大类^[16-22], 遥感测量法能有效弥补地面测量法的局限性和不易推广性^[16-18]。本文采用三波段梯度差法^[23]估算植被覆盖度。

三波段梯度差法基于近红、红、绿三个波段梯度差与全覆盖植被在这三个波段的梯

度差之比来获取植被覆盖度^[23-24],在实际计算时,可通过最大梯度差确定全植被覆盖:

$$FVC = d/d_{\max} \quad (1)$$

$$d = \frac{R_{ir} - R_r}{\lambda_{ir} - \lambda_r} - \frac{R_r - R_g}{\lambda_r - \lambda_g} \quad (2)$$

式中: R_{ir} 、 R_r 、 R_g 、 λ_{ir} 、 λ_r 、 λ_g 分别为近红、红、绿波段的反射率和中心波长; FVC 为植被覆盖度; d 为像元梯度差; d_{\max} 为像元最大梯度差。

通过对研究区地物进行分类,提取研究区森林信息,在植被覆盖度的基础上统计研究区森林植被覆盖度的时间变化趋势。

1.3.2 遥感生态指数计算

本文采用遥感生态指数(RSEI)来评价研究区自然生态环境。该指数综合了绿色、湿度、热度、干度四个评价指标,这四个指标可采用植被指数、裸土指数、湿度分量、地表温度来代表。四个指标获得方法如下:

(1) 绿色指标(NDVI): 归一化植被指数 $NDVI$ 作为使用广泛的植被指数,其能够有效地指示植物生长状况,故采用 $NDVI$ 代表绿色指标:

$$NDVI = \frac{R_{nir} - R_r}{R_{nir} + R_r} \quad (3)$$

式中: R_i 代表相应波段光谱反射率。

(2) 湿度指标(Wet): 湿度指标由K-T变化中的湿度分量^[25]代表,Landsat不同传感器数据计算参数不同,分别如下:

TM数据:

$$Wet = 0.0315R_{blue} + 0.2021R_{green} + 0.3102R_{red} + 0.1594R_{nir} - 0.6706R_{mir1} - 0.6109R_{mir2} \quad (4)$$

OLI数据:

$$Wet = 0.1511R_{blue} + 0.1973R_{green} + 0.3283R_{red} + 0.3407R_{nir} - 0.7117R_{mir1} - 0.4559R_{mir2} \quad (5)$$

式中: R_i 代表相应波段光谱反射率。

(3) 干度指标(NDSI): $RSEI$ 中所用的干度指标是由裸土指数(SI)^[26]和建筑指数(ABI)^[27-29]二者合成:

$$NDSI = \frac{SI + ABI}{2} \quad (6)$$

$$SI = [(R_{mir1} + R_{red}) - (R_{nir} + R_{blue})] / [(R_{mir1} + R_{red}) + (R_{nir} + R_{blue})] \quad (7)$$

$$ABI = \frac{2R_{mir1} / (R_{mir1} + R_{nir}) - [R_{nir} / (R_{nir} + R_{red}) + R_{green} / (R_{green} + R_{mir1})]}{2R_{mir1} / (R_{mir1} + R_{nir}) + [R_{nir} / (R_{nir} + R_{red}) + R_{green} / (R_{green} + R_{mir1})]} \quad (8)$$

式中: R_i 代表相应波段光谱反射率。

(4) 热度指标(LST): 热度指标可用大气校正法^[30-32]从遥感影像中反演的地表温度代表:

$$L_\lambda = [\varepsilon B(T_s) + (1 - \varepsilon)L_\downarrow]\tau + L_\uparrow \quad (9)$$

式中: ε 为地表比辐射率; T_s 为地表真实温度(K); $B(T_s)$ 为黑体热辐射亮度; τ 为大气在热红外波段的透过率; L_\uparrow 、 L_\downarrow 分别为大气向上辐射亮度和大气向下辐射亮度。则温度为T的黑体在热红外波段的辐射亮度 $B(T_s)$ 为:

$$B(T_s) = [L_\lambda - L_\uparrow - \tau(1 - \varepsilon)L_\downarrow] / \tau\varepsilon \quad (10)$$

T_s 可以用普朗克公式的函数获取:

$$T_s = K_2 / \ln(K_1 / B(T_s) + 1)$$

(11)

式中: K_1 、 K_2 的取值可参见遥感数据头文件中; L_1 、 L_2 、 τ 的取值可参见NASA网站。

由于以上四个指标有不同量纲, 所以对其进行归一化处理以消除数据间由于单位不同产生的差异, 经过归一化后的无量纲数据取值介于 [0, 1] 之间, 归一化公式为:

$$NI_i = \frac{I_i - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}}$$

(12)

式中: NI_i 为某一像元归一化后的数值; I_i 为某一像元值; I_{\max} 、 I_{\min} 分别为该分量的最大值和最小值。

经过归一化计算后的指标就可以通过主成分分析来根据每个指标的特点来分配权重进行集成, 利用式 (12) 对所得主成分进行归一化处理, 经过归一化后的 $RSEI$ 值越接近 1, 表明研究区生态条件越好。

2 结果分析

2.1 晋西南黄土高原区植被覆盖度变化特征

由表 1 可知, 晋西南黄土高原区植被覆盖度在 15 年间呈上升趋势, 其均值从 2002 年的 42.69% 上升到 2017 年的 47.67%。2002-2009 年间 FVC 增幅为 2.92%, 2009-2017 年增幅为 2.06%, 增幅有所下降, 但总体仍处于增长阶段, 说明 15 年来晋西南黄土高原区水土流失治理卓有成效, 研究区植被有所恢复。研究区森林植被覆盖度逐年下降, 其均值由 2002 年的 57.8% 下降到 2017 年的 51.69%, 降幅由第一阶段的 4% 减少到第二阶段的 1.69%, 降幅有所减少, 但森林植被覆盖度仍处于下降阶段。人类在植被茂盛的森林地区进行旅游开发是导致森林植被覆盖度下降的主要原因。

表 1 各级植被覆盖度所占比例表
Table 1 Proportion of vegetation coverage at all levels

植被覆盖度 等级	分级 标准/%	各级别所占比例/%			相邻年份变化幅度/%	
		2002 年	2009 年	2017 年	2002-2009 年	2009-2017 年
低覆盖度	0~20	10.86	7.89	12.07	-2.97	4.18
较低覆盖度	20~40	33.94	33.68	34.57	-0.26	0.89
中覆盖度	40~60	38.97	37.77	26.26	-1.2	-11.51
较高覆盖度	60~80	12.77	14.51	11.39	1.74	-3.12
高覆盖度	80~100	3.45	6.14	15.71	2.69	9.57
植被覆盖度均值		42.69	45.61	47.67	2.92	2.06
森林植被覆盖度		57.28	53.28	51.59	-4	-1.69

对比三期结果 (图 2a~图 2c) 可知, 2002 年低植被覆盖度地区基本分布在汾河谷地及东部高海拔地区, 2017 年汾河谷地植被覆盖有所改善, 但研究区西北部芝河流域和东部沁河流域植被覆盖度有所恶化; 较低覆盖度地区基本分布在研究区北部谷地和研究区东西部较高海拔的地区; 中覆盖度的地区分布较广, 遍及整个研究区; 较高覆盖度和高覆盖度地区分布在研究区东部太岳山和南部中条山、西部吕梁山脉南缘, 2017 年汾河谷地植被覆盖度大面积改善, 出现高植被覆盖地区。2002 年和 2009 年研究区植被覆盖度的

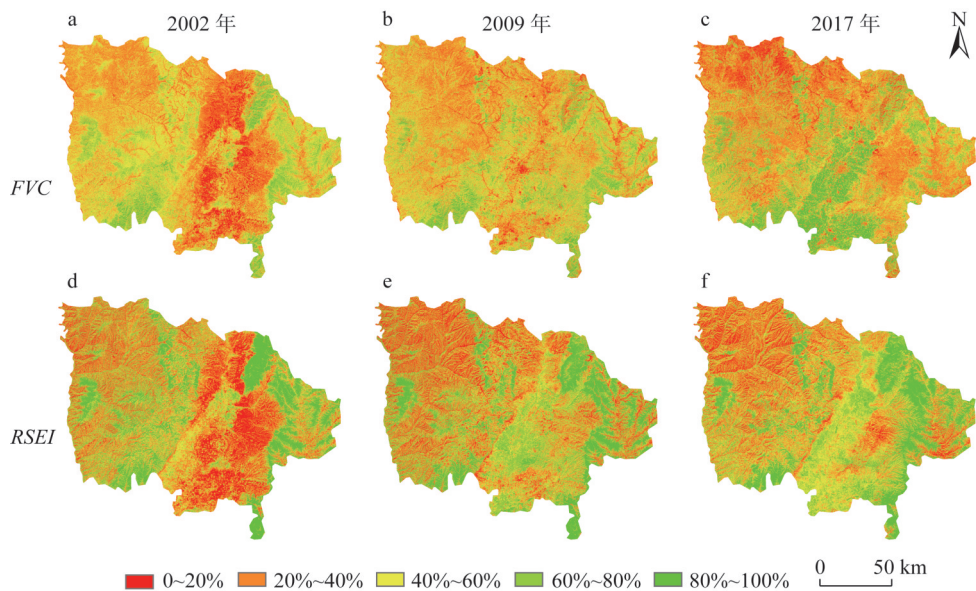


图2 研究区各年份植被覆盖度 (FVC) 和遥感生态指数 (RSEI) 分级
Fig. 2 FVC and RSEI classification map of each year in the study area

峰值为中覆盖度地区，2017年植被覆盖度峰值为较低覆盖度地区。

2.2 晋西南黄土高原区生态质量变化

由表2可得：三个时期PC1的贡献率分别为96.9%、94.63%、91.98%，表明PC1已集成四个指标大部分特征，LST和NDSI两个指标的符号与WET和NDVI两个指标符号相

表2 遥感生态指数主成分分析

Table 2 Principal component analysis of remote sensing ecological index

年份		第一主成分PC1	第二主成分PC2	第三主成分PC3	第四主成分PC4
2002	LST	0.421	0.886	-0.037	0.192
	NDSI	0.556	-0.388	0.36	0.641
	WET	-0.468	0.045	-0.51	0.72
	NDVI	-0.543	0.251	0.78	0.184
	特征值	0.2377	0.0042	0.0028	0.0006
	特征值贡献率/%	96.9	1.71	1.14	0.25
2009	LST	-0.426	-0.287	0.783	-0.352
	NDSI	-0.543	0.099	-0.544	-0.633
	WET	0.674	-0.434	-0.059	-0.595
	NDVI	0.264	0.849	0.297	-0.349
	特征值	0.1973	0.0046	0.004	0.0026
	特征值贡献率/%	94.63	2.21	1.92	1.24
2017	LST	0.582	0.793	0.08	0.162
	NDSI	0.674	-0.594	0.135	0.418
	WET	-0.379	0.126	-0.268	0.877
	NDVI	-0.251	0.053	0.951	0.174
	特征值	0.133	0.0063	0.0044	0.0009
	特征值贡献率/%	91.98	4.36	3.04	0.62

反，它们对研究区生态起相反作用，其中 *LST* 和 *NDSI* 对生态起消极作用，*WET* 和 *NDVI* 起积极作用。四个指标在 2009 年 *PC1* 载荷和其余两期 *PC1* 载荷符号不同，表明 2002 年和 2017 年研究区的生态条件与 *PC1* 值成反比，为了使三期统一，所以在归一化之前需要用对 *PC1* 进行反向处理，使得 *PC1* 值大的代表好的生态条件。

表 3 统计了研究区各年份指标和 *RSEI* 的均值变化情况，由表 3 可得：（1）热度指标呈现先增后减的状态，干度指标在 15 年间持续增加，但增幅有所减少。（2）起积极作用的湿度和绿度指标在 15 年间持续增长，且增幅有所增加。（3）总体来说，四个指标的变化趋势表明晋西南黄土高原区生态条件持续改善，研究区遥感生态指数均值呈上升趋势，由 2002 年的 0.487 增长到 2009 年的 0.502 后，继续增长到了 2017 年的 0.525。

表 3 研究区各年份四个指标和遥感生态指数 *RSEI* 的均值变化
Table 3 Mean changes of four indicators and *RSEI* in each year of the study area

年份	热度 <i>LST</i>	干度 <i>NDSI</i>	湿度 <i>WET</i>	绿度 <i>NDVI</i>	遥感生态指数 <i>RSEI</i>
2002	0.515	0.605	0.583	0.502	0.487
2009	0.589	0.624	0.711	0.513	0.502
2017	0.535	0.632	0.842	0.53	0.525

以 20% 的相等间隔对 *RSEI* 指数进行分级，由表 4 可知，研究区面积占比最大的区域由 2002 年生态条件较差的区域转向 2009 年生态条件良好的区域，然后转向 2017 年生态条件中等的区域；在 2002-2009 年间，生态条件差和较差的区域有所减少，其中生态条件较差的区域减幅达到 8.84%；生态条件中等、良好和优秀的区域面积均有不同程度增加，其中生态条件良好的面积增幅达到 9.53%。

表 4 研究区生态等级变化
Table 4 Changes in ecological grades in the study area (%)

遥感生态 指数等级	分级标准	各级别所占比例			相邻年份变化幅度	
		2002 年	2009 年	2017 年	2002-2009 年	2009-2017 年
差	0~20	23.08	20.1	12.55	-2.98	-7.55
较差	20~40	26.18	17.34	22.51	-8.84	5.17
中等	40~60	19.82	21	27.15	1.18	6.15
良好	60~80	14.04	23.57	19.46	9.53	-4.11
优秀	80~100	16.87	17.99	18.33	1.12	0.34

在 2009-2017 年间，生态条件差的区域改善明显，由 2009 年的 20.1% 降到了 2017 年的 12.55%，此外，生态条件良好的区域所占面积也有所下降；生态条件较差、中等和优秀的区域面积均有不同程度增加，其中生态条件中等区域增幅达 6.15%；与上一时段相比，生态条件差、中等和优秀的区域保持了前一阶段的变化趋势，而生态条件较差的区域表现为先减后增的趋势，但总体来说较差的区域面积减少了 3.67%，生态条件良好的区域表现为先增后减的趋势，但 15 年间生态条件良好的区域增加了 5.42%。

由图 2d~图 2f 可得，生态条件差和较差的区域主要集中在研究区西北部芝河流域、北部河谷、东部丘陵区 and 沁河流域，但东部黄土丘陵区有明显改善趋势；生态条件中等的区域主要分布在研究区中部汾河谷地，随着时间推移，生态条件中等的区域逐渐增多，东部丘陵区也出现生态条件中等的区域；生态条件良好和优秀的区域主要分布在研

究区东西部较高海拔地区，2009年研究区中部汾河谷也出现生态条件良好的区域，这一趋势延续到2017年，且汾河谷地的生态条件得到了更大程度地改善。

2.3 空间分布变化

利用较晚年份的数据减去较早年份数据，得到研究区FVC和RSEI空间分布变化，并对其变化面积进行统计。

由图3a、图3b可得，在2002-2009年间，FVC退化区主要分布在研究区西部黄土残垣区和东部太岳山脉，中部的汾河谷地也有少量分布，在2009-2017年间，西部黄土残垣区和东部太岳山脉退化趋势有所减缓，但西北部汾河流域和东部黄土丘陵区出现了退化的现象；稳定区15年间虽有所减少，但分布规律并没有发生显著变化；研究区中部的汾河谷地在15年间出现持续改善的现象，东部丘陵区在第一个时段也出现大面积改善区，但这个趋势并没有持续到第二个时段，对应的区域出现不同程度的退化现象。

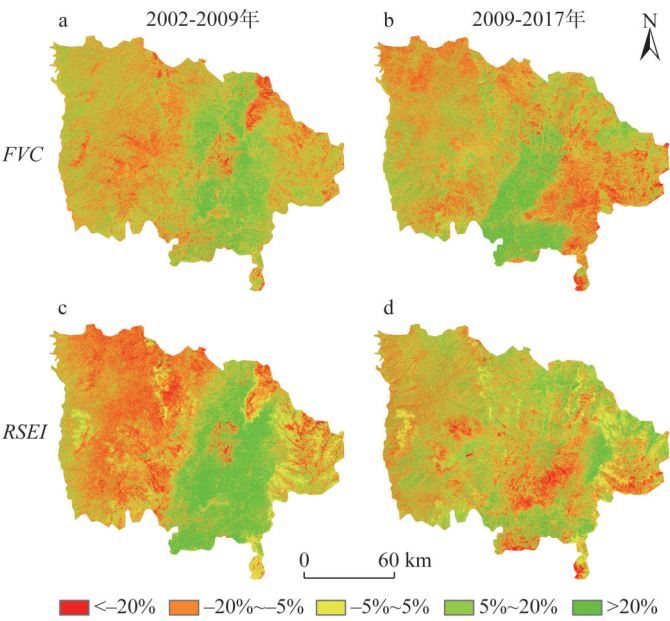


图3 研究区FVC和RSEI空间变化特征

Fig. 3 Spatial variation of FVC and RSEI in the study area

由图3c、图3d可得，RSEI退化区在第一个时段内主要集中在研究区西部黄土残垣区和东部的太岳山脉、沁河流域，中部汾河谷地也有少量分布，这与植被覆盖度在第一时段内的变化趋势基本相符，在第二个时段，除西部还零星分布有生态退化区外，中部汾河谷地出现连片的生态退化区，而东部的沁河流域仍分布有生态退化区；一年间生态稳定区有所增加，分布规律没有发生太大变化；改善区在第一个时段内主要分布在研究区中部汾河谷地和东部黄土丘陵区，在第二个时段内，除汾河流域和东部较高海拔区域仍分布有少量改善区外，其余地区生态条件都出现不同程度退化。

由表5可知，植被覆盖度退化区在第二个时段内面积占比为40.24%，与第一个时段的36.25%相比，增加了4.09%，15年间植被覆盖度稳定区减少了1.14%，改善区在第二个时段内面积占比为39.01%，与第一个时段的41.96%相比，减少了2.95%；遥感生态指数退化

表5 研究区 *FVC*和*RSEI*空间变化统计
Table 5 Spatial variation statistics of *FVC* and *RSEI* in the study area (%)

	分级标准	植被覆盖度各级所占比例		遥感生态指数各级所占比例	
		2002-2009年	2009-2017年	2002-2009年	2009-2017年
严重退化区	<-20	11.09	15.17	11.26	12.26
轻微退化区	-20~-5	25.06	25.07	23.22	21.74
稳定区	-5~5	21.89	20.75	20.14	25.22
轻微改善区	5~20	24.71	19.78	21.08	23.94
显著改善区	>20	17.25	19.23	24.30	16.84

区在第二个时段内面积占比为34%，与第一个时段的34.48%相比，减少了0.48%，15年间稳定区增加了5.08%；改善区在第二个时段内面积占比为40.78%，与第一个时段的45.38%相比，减少了4.6%。虽然整个研究区内不同地区植被覆盖度和遥感生态指数变化不尽相同，但其稳定区和改善区面积占比大于退化区，表明研究区15年间生态质量有明显上升。

2.4 植被覆盖度与遥感生态指数相关性分析

表6为*FVC*与*RSEI*相关系数，由表6可得，晋西南黄土高原区的植被覆盖度与遥感生态指数有较好的相关性，三期相关系数均大于0.6，三期均值为0.66，表明植被覆盖度的升高对研究区生态条件的改善有一定的促进作用。

表6 *FVC*与*RSEI*的相关系数
Table 6 Correlation coefficients between *FVC* and *RSEI*

	2002年	2009年	2017年
	植被覆盖度		
遥感生态指数	0.684	0.66	0.64
三年平均相关度	0.66		

植被覆盖度和遥感生态指数在空间上存在一定的相关性，*FVC*增加或减少的区域*RSEI*指数也相应的增加或减少，由图3可知，在第一时段，*FVC*与*RSEI*的空间分布高度吻合，研究区表现出二者较好的相关性；在第二个时段，研究区西部黄土残垣区和东部黄土丘陵区较好地表现出二者的相关性，但位于研究区中部的汾河谷地二者的相关性较差，*FVC*的改善区连片分布在汾河谷地，但对应区域仅零星分布*RSEI*的改善区。

以上现象可能与冬小麦的种植有关。结合该地区土地覆被数据发现，研究区耕地面积由2002年的12.69%减少至2009年的11.67%，后又增加至2017年的17.01%。汾河谷地分布大量耕地，是冬小麦的主要种植区^[33-34]。结合2017年影像获取时间，该区域的冬小麦正处于生长期，这是该区域*FVC*得到改善的主要原因，但冬小麦对于汾河谷地*RSEI*指数贡献较小。结合表2可以发现，在2002年时，干度指标对*RSEI*贡献最大；在2009年时，湿度指标对*RSEI*的贡献最大；在2017年时，对*RSEI*贡献最大的指标又转变为干度指标。虽然2002年与2017年*RSEI*中贡献最大的都是干度指标，但2017年对*RSEI*起正面作用的绿度和湿度指标与贡献最大的干度指标之间的差异相对2002年来说呈增加趋势，表明建筑面积大量增加、城市发展扩张对生态质量的影响逐渐增大。受到人类活动影响较多的汾河谷地则是城市化的主要区域，这就导致虽然汾河谷地*FVC*明显改善，但是并不足以使该区域*RSEI*也相应得到大面积改善。

3 结论

(1) 本文采用三波段梯度差法估算研究区的植被覆盖度，而没有采用基于*NDVI*的植被覆盖度估算模型，可以有效避免植被覆盖度与遥感生态指数二者互为相关。统计结果

表明,研究区15年间植被覆盖度呈持续增长趋势,表明15年来晋西南黄土高原区水土流失治理卓有成效,研究区植被有所恢复。

(2) 基于水土流失区构建的遥感生态指数同样适用于水土流失严重的黄土高原区,利用主成分分析法计算得到RSEI指数很好的集成了热度、干度、湿度、绿度四个指标,使每个指标能根据自身数据特点分配不同的权重进行集成,由结果可得,研究区15年间生态条件持续改善,但RSEI指数15年内仅上升了3.8%,说明晋西南黄土高原区的生态治理仍需要高度重视。

(3) 除研究区汾河谷地外,其余区域植被覆盖度和遥感生态指数的变化特征在空间上基本吻合,研究区大部分地区植被覆盖度和生态条件明显改善,但西北部芝河流域和东部的沁河流域仍出现了不同程度的退化,因此为保护晋西南黄土高原区脆弱的生态环境,应将退化区作为治理重点,加大对这些地区的保护力度;对于研究区中部河谷地区,由于冬小麦大面积种植,植被覆盖度得到一定改善,但生态条件并没有明显改善,所以应在实践中探索适合该区域生态恢复的有效措施;对于研究区内海拔较高、受到人类影响较小的地区,其自然恢复趋势良好,所以对这些地区可采取自然恢复为主、人工干预为辅的生态治理政策。总之,水土流失和生态治理工程作为一项关乎人类切身利益的工程,应当对此高度重视并长期执行。

参考文献(References):

- [1] 杨峰,李建龙,钱育蓉,等. 天山北坡典型退化草地植被覆盖度监测模型构建与评价. 自然资源学报, 2012, 27(8): 1340-1348. [YANG F, LI J L, QIAN Y R, et al. Estimating vegetation coverage of typical degraded grassland in the northern Tianshan Mountains. Journal of Natural Resources, 2012, 27(8): 1340-1348.]
- [2] 张学珍,郑景云,何凡能,等. 1982-2006年中国东部秋季植被覆盖变化过程的区域差异. 自然资源学报, 2013, 28(1): 28-37. [ZHANG X Z, ZHENG J Y, HE F N, et al. Regional differences in the process of vegetation cover change in Eastern China from 1982 to 2006. Journal of Natural Resources, 2013, 28(1): 28-37.]
- [3] 赵文慧,陈妮,闫瑞,等. 近20年来北洛河流域植被覆盖度随地形因子变化特征探究. 水土保持研究, 2016, 23(4): 10-14. [ZHAO W H, CHEN N, YAN R, et al. Study on variation of the vegetation coverage based on terrain factors in the Beiluo River Basin in the past 20 years. Research of Soil & Water Conservation, 2016, 23(4): 10-14.]
- [4] 徐涵秋. 水土流失区生态变化的遥感评估. 农业工程学报, 2013, 29(7): 91-97. [XU H Q. Assessment of ecological change in soil loss area using remote sensing technology. Transactions of the CSAE, 2013, 29(7): 91-97.]
- [5] 徐涵秋. 区域生态环境变化的遥感评价指数. 中国环境科学, 2013, 33(5): 889-897. [XU H Q. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes. China Environmental Science, 2013, 33(5): 889-897.]
- [6] 徐志刚,高鹏. 永定客家土楼世界遗产地土地覆盖与生态变化遥感评价. 国土资源遥感, 2018, 30(1): 102-108. [XU Z G, GAO P. Evaluation of land cover and ecological change of Yongding Hakka Tulou World Heritage Protection Area using remote sensing image. Remote Sensing for Land and Resources, 2018, 30(1): 102-108.]
- [7] 吴志杰,王猛猛,陈绍杰,等. 基于遥感生态指数的永定矿区生态变化监测与评价. 生态科学, 2016, 35(5): 200-207. [WU Z J, WANG M M, CHEN S J, et al. Monitoring and evaluation of ecological environment's spatio-temporal variation in mine based on RSEI in Yongding mine. Ecological Science, 2016, 35(5): 200-207.]
- [8] 张灿,徐涵秋,张好,等. 南方红壤典型水土流失区植被覆盖度变化及其生态效应评估: 以福建省长汀县为例. 自然资源学报, 2015, 30(6): 917-928. [ZHANG C, XU H Q, ZHANG H, et al. Fractional vegetation cover change and its ecological effect assessment in a typical reddish soil region of southeastern China: Changting county, Fujian province. Journal of Natural Resources, 2015, 30(6): 917-928.]
- [9] 罗春,刘辉,戚陆越. 基于遥感指数的生态变化评估: 以常宁市为例. 国土资源遥感, 2014, 26(4): 145-150. [LUO C, LIU H, QI L Y. Ecological changes assessment based on remote sensing indices: A case study of Changning city. Remote Sensing for Land and Resources, 2014, 26(4): 145-150.]
- [10] 王士远,张学霞,朱彤,等. 长白山自然保护区生态环境质量的遥感评价. 地理科学进展, 2016, 35(10): 1269-1278. [WANG S Y, ZHANG X X, ZHU T, et al. Assessment of ecological environment quality in the Changbai Mountain Na-

- ture Reserve based on remote sensing technology. *Progress in Geography*, 2016, 35(10): 1269-1278.]
- [11] 张洪敏, 张艳芳, 田茂, 等. 基于主成分分析的生态变化遥感监测: 以宝鸡市城区为例. *国土资源遥感*, 2018, 30(1): 203-209. [ZHANG H M, ZHANG Y F, TIAN M, et al. Dynamic monitoring of eco-environment quality changes based on PCA: A case study of urban area of Baoji city. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2018, 30(1): 203-209.]
- [12] 张晓东, 刘湘南, 赵志鹏, 等. 农牧交错区生态环境质量遥感动态监测: 以宁夏盐池为例. *干旱区地理*, 2017, 40(5): 1070-1078. [ZHANG X D, LIU X N, ZHAO Z P, et al. Dynamic monitoring of ecology and environment in the agro-pastoral ecotone based on remote sensing: A case of Yanchi county in Ningxia Hui Autonomous region. *Arid Land Geography*, 2017, 40(5): 1070-1078.]
- [13] 中华人民共和国中央人民政府. 国务院关于全国水土保持规划(2015-2030年)的批复. [2015-10-17]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-10/17/content_10232.htm. [The Central People's Government of the People's Republic of China. Approval of State Council about Plan for National Water and Soil Conservation of 2015 to 2030. [2015-10-17]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-10/17/content_10232.htm.]
- [14] 张兆明, 何国金. Landsat 5 TM数据辐射定标. *科技导报*, 2008, 26(7): 54-58. [ZHANG Z M, HE G J. Radiometric calibration of Landsat 5 TM data. *Science & Technology Review*, 2008, 26(7): 54-58.]
- [15] 张志杰, 张浩, 常玉光, 等. Landsat系列卫星光学遥感辐射定标方法综述. *遥感学报*, 2015, 19(5): 719-732. [ZHANG Z J, ZHANG H, CHANG Y G, et al. Review of radiometric calibration methods of Landsat series optical remote sensors. *Journal of Remote Sensing*, 2015, 19(5): 719-732.]
- [16] 程红芳, 章文波, 陈锋. 植被覆盖度遥感估算方法研究进展. *国土资源遥感*, 2008, 28(1): 13-18. [CHENG H F, ZHANG W B, CHEN F. Advances in researches on application of remote sensing method to estimating vegetation coverage. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2008, 28(1): 13-18.]
- [17] 江洪, 王钦敏, 汪小钦. 福建省长汀县植被覆盖度遥感动态监测研究. *自然资源学报*, 2006, 21(1): 126-132, 166. [JIANG H, WANG Q M, WANG X Q. Dynamic monitoring of vegetation fraction by remote sensing in Changting county of Fujian province. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(1): 126-132, 166.]
- [18] 郑朝菊, 曾源, 赵玉金, 等. 近15年中国西南地区植被覆盖度动态变化. *国土资源遥感*, 2017, 29(3): 128-136. [ZHENG Z J, ZENG Y, ZHAO Y J, et al. Monitoring and dynamic analysis of fractional vegetation cover in Southwestern China over the past 15 years based on MODIS data. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2017, 29(3): 128-136.]
- [19] 李艺梦, 祁元, 马明国. 基于Landsat8影像的额济纳荒漠绿洲植被覆盖度估算方法对比研究. *遥感技术与应用*, 2016, 31(3): 590-598. [LI Y M, QI Y, MA M G. The contrast research of estimating vegetation fraction coverage in the Ejina Oasis based on Landsat 8 Images. *Remote Sensing Technology & Application*, 2016, 31(3): 590-598.]
- [20] 侯志华, 马义娟, 葛虹. 基于RS的汾河流域植被覆盖变化研究. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(2): 162-166. [HOU Z H, MA Y J, GE H. The vegetation cover change in Fen River Basin. *Journal of Arid Land Resources & Environment*, 2013, 27(2): 162-166.]
- [21] 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. *资源科学*, 2004, 26(4): 153-159. [LI M M, WU B F, YAN C Z, et al. Estimation of vegetation fraction in the upper basin of Miyun reservoir by remote sensing. *Resources Science*, 2004, 26(4): 153-159.]
- [22] 贾坤, 姚云军, 魏香琴, 等. 植被覆盖度遥感估算研究进展. *地球科学进展*, 2013, 28(7): 774-782. [JIA K, YAO Y J, WEI X Q, et al. A review on fractional vegetation cover estimation using remote sensing. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(7): 774-782.]
- [23] 唐世浩, 朱启疆, 周宇宇, 等. 一种简单的估算植被覆盖度和恢复背景信息的方法. *中国图象图形学报*, 2003, 8(11): 1304-1308. [TANG S H, ZHU Q J, ZHOU Y Y, et al. A simple method to estimate crown cover fraction and rebuild the background information. *Journal of Image & Graphics*, 2003, 8(11): 1304-1308.]
- [24] 古丽·加帕尔, 陈曦, 包安明. 干旱区荒漠稀疏植被覆盖度提取及尺度扩展效应. *应用生态学报*, 2009, 20(12): 2925-2934. [GULI J P, CHEN X, BAO A M. Coverage extraction and up-scaling of sparse desert vegetation in arid area. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(12): 2925-2934.]
- [25] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用. *生态学报*, 2013, 33(24): 7853-7862. [XU H Q. A remote sensing urban ecological index and its application. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(24): 7853-7862.]
- [26] RIKIMARU A, ROY P S, MIYATAKE S. Tropical forest cover density mapping. *Tropical Ecology*, 2002, 43: 39-47.
- [27] 徐涵秋, 张铁军, 黄绍霖. Landsat-7 ETM+与ASTER建筑指数的定量比较. *地理研究*, 2013, 32(7): 1336-1344. [XU H Q, ZHANG T J, HUANG S L. Quantitative comparison of Landsat 7 and ASTER multispectral measurements for the NDBI and IBI. *Geographical Research*, 2013, 32(7): 1336-1344.]
- [28] 杨安妮, 许亚辉, 苏红军. 结合建筑指数的城市建筑用地提取与变化检测分析. *测绘与空间地理信息*, 2014, 37(8):

- 30-34. [YANG A N, XU Y H, SU H J. Urban built-up land extraction and change detection analysis using built-up indexes. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2014, 37(8): 30-34.]
- [29] 徐涵秋. 一种基于指数的新型遥感建筑用地指数及其生态环境意义. *遥感技术与应用*, 2007, 22(3): 301-308. [XU H Q. A new index-based built-up index (IBI) and its eco-environmental significance. *Remote Sensing Technology & Application*, 2007, 22(3): 301-308.]
- [30] 祝善友, 张桂欣, 尹球, 等. 地表温度热红外遥感反演的研究现状及其发展趋势. *遥感技术与应用*, 2006, 21(5): 420-425. [ZHU S Y, ZHANG G X, YIN Q, et al. Actualities and development trends of the study on land surface temperature retrieving from thermal infrared remote sensing. *Remote Sensing Technology & Application*, 2006, 21(5): 420-425.]
- [31] SOBRINO J A, JIMÉNEZ-MUÑOZ J C, PAOLINI L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90(4): 434-440.
- [32] 李波, 黄敬峰, 吴次芳. 基于热红外遥感数据和光谱混合分解模型的城市不透水面估算. *自然资源学报*, 2012, 27(9): 1590-1600. [LI B, HUANG J F, WU C F. Estimating urban impervious surface based on thermal infrared remote sensing data and a spectral mixture analysis model. *Journal of natural resources*, 2012, 27(9): 1590-1600.]
- [33] 米晓楠, 杨超, 李峰, 等. 晋南区冬小麦种植分布卫星遥感反演及时空变化分析. *山西农业科学*, 2018, 46(3): 378-382. [MI X N, YANG C, LI F, et al. Analysis of temporal and spatial variations in winter wheat growing regions in Jinan region using remote sensing. *Shanxi Agricultural Science*, 2018, 46(3): 378-382.]
- [34] 吴乾慧, 张勃, 马彬, 等. 气候变暖对黄土高原冬小麦种植区的影响. *生态环境学报*, 2017, (3): 429-436. [WU Q H, ZHANG B, MA B, et al. Impact of climate warming on winter wheat planting in the Loess Plateau. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(3): 429-436.]

Vegetation cover change and ecological effect assessment in the Loess Plateau of Southwest Shanxi province based on remote sensing image

ZHANG Wen-qiang^{1,2,3}, SUN Cong-jian¹, LI Xin-gong¹

(1. School of Geographical Sciences, Shanxi Normal University, Linfen 041000, Shanxi, China;

2. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, CAS, Urumqi 830011, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Soil erosion and ecological degradation are serious problems for the Loess Plateau, which have seriously restricted economic development. Based on TM and OLI data, the *FVC* and *RSEI* in the Loess Plateau of Southwest Shanxi were estimated in this paper, and the effects of vegetation and ecological restoration were quantitatively analyzed. The results show that: (1) The index of *FVC* increased from 42.69% in 2002 to 47.67% in 2017, and the index of *RSEI* increased from 45% in 2002 to 52.5% in 2017, indicating a significant improvement of the ecological quality in the study area. (2) The ecological environment in most parts of the study area has been improved. Ecological degradation occurred in the Zhihe River Basin, Fenhe River Valley and Qinhe River Basin. (3) Due to the large-scale planting of winter wheat in the Fenhe River Valley, the index of *FVC* has been improved to some extent, but the index of *RSEI* has not been significantly improved. The variation trend of *FVC* and *RSEI* in other areas is basically consistent.

Keywords: Southwestern Loess Plateau; fractional vegetation cover (*FVC*); remote sensing ecological index (*RSEI*); ecological quality