

2000—2018 年乌海市植被覆盖度时空变化

刘瑞瑶, 许丽, 丰菲, 刘莹, 张新蕾

(内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 呼和浩特 010018)

摘要:为了探究乌海市植被覆盖度时空动态变化特征以及预测 NDVI 变化趋势,基于 Landsat OLI/TM/ETM,DEM 影像运用像元二分模型法、趋势分析法研究了乌海市 2000—2018 年植被覆盖度时空动态变化特征,重标极差(R/S)分析法的 Hurst 指数预测了乌海市未来 NDVI 变化趋势。结果表明:(1) 2000—2018 年乌海市植被覆盖度整体呈现上升趋势,增长速率为 $0.07\%/10\text{ a}$,植被覆盖度均值由 22.26% 增至 41.30% ;(2) 空间上植被覆盖度呈现由西北向东南逐渐递增的趋势,植被覆盖度改善的区域大于退化区域,海南区改善趋势更明显;(3) 从地形因子来看,植被覆盖度受高程、坡度影响较大,不同坡向间变化不明显;(4) 乌海市大部分地区植被未来变化趋势为随机发展,持续改善区域占 10.95% ,持续退化区域占 2.93% ,海勃湾区持续变化性强,乌达区反持续变化性强。整体来看研究区 2000—2018 年植被覆盖度持续上升,植被改善明显,未来进行生态保护时应多关注地形因素和植被退化的区域,从而制定合理的政策。

关键词:植被覆盖度; 时空变化; 地形因子; 乌海市

中图分类号:Q948.15; TP79

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)02-0265-09

Spatiotemporal Variation of Vegetation Coverage in Wuhai City from 2000 to 2018

LIU Ruiyao, XU Li, FENG Fei, LIU Ying, ZHANG Xinlei

(College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: In order to explore the characteristics of temporal and spatial dynamic change of vegetation coverage in Wuhai City and forecast the trend of NDVI in the future, based on Landsat OLI/TM/ETM, DEM images were used to study the characteristics of temporal and spatial dynamic change of vegetation coverage in Wuhai City from 2000 to 2018 by using binary pixel model and trend analysis method. The Hurst index of R/S analysis method was used to predict the future NDVI trend in Wuhai City. The results show that: (1) from 2000 to 2018, the vegetation coverage in Wuhai City showed an increasing trend, with an increasing rate of $0.07\%/decade$, and the mean FVC increased from 22.26% to 41.30% ; (2) the spatial FVC increased gradually from northwest to southeast, and the improved area of FVC was greater than the degraded area, and the improvement trend was more obvious in Hainan; (3) from the perspective of topographic factors, the vegetation coverage was greatly affected by elevation and slope, and the change between different slope aspects was not obvious; (4) the future change trend of vegetation in most areas of Wuhai City is random development, the area of continuous improvement accounts for 10.95% , and the area of continuous degradation accounts for 2.93% ; Haibwan District has strong sustainable change, and Wuda District has strong anti-sustainable change. On the whole, vegetation coverage in the study area continued to rise from 2000 to 2018, and vegetation improved significantly. In future ecological protection, more attention should be paid to topographic factors and areas with vegetation degradation, so as to formulate reasonable policies.

Keywords: vegetation coverage; spatiotemporal variation; topographic factor; Wuhai City

收稿日期:2021-03-31

修回日期:2021-04-18

资助项目:国家重点研发项目(2017YFC0504400, 2017YFC0504402)

第一作者:刘瑞瑶(1995—),女,内蒙古鄂尔多斯人,硕士研究生,研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail:1305752276@qq.com

通信作者:许丽(1965—),女,内蒙古巴彦淖尔人,博士,硕士生导师,主要从事矿区生态修复研究。E-mail:xulinmg@163.com

植被在生态系统中有着关键作用,是大气、水和土壤的连接纽带,可对生态系统进行调节和指示^[1],也是反映自然环境特点的良好标志,能较迅速明显地反映出周围环境变化和社会经济活动对环境产生的影响^[2]。植被与其生态因子间的相互作用关系,是指导地区生态发展方向的重要科学参考和依据^[3-5]。植被覆盖度(Fractional Vegetation Coverage,简称 FVC)指单位面积内植被叶、茎、枝等地上部分在地面的垂直投影面积占统计区总面积的百分比^[6]。可以反映生态环境的变化,对植被覆盖度动态变化监测具有深远的意义^[7-8]。

传统植被覆盖度测量,多数是在研究区选择有限的几个或几十个典型样点进行实地测量,虽能够保证数据观测的精度,但费时费力、成本高、难度大,并且难以满足区域地表植被覆盖度的需求;而遥感具有快速实时、多方位、全天时、大范围等优点。利用遥感技术进行植被分类和植被覆盖面积估算已经成为极具活力的研究方向^[9-10]。分析 NDVI 在时间序列上的变化,对探寻植被空间分布和植被覆盖度的变化规律具有积极意义^[11]。郭山川等^[12]发现乌海矿区 2000—2009 年植被覆盖度逐渐萎缩,2009—2015 年植被覆盖度水平提高;翟孟源等^[13]利用 Landsat 遥感影像以及 NDVI 数据对 1979—2010 年乌海市煤矿开采区时空变化过程及其对生态环境的影响开展研究,发现矿区开采面积仍呈增长趋势但全市植被覆盖度有所好转;赵勋刚等^[14]对乌海市生态环境进行评价,发现海南区的生态修复工作成效最大,海勃湾和乌达区的生态修复成效较差。地形是影响植被覆盖变化的重要因素之一^[15-16],童晓伟等^[17]认为高程、坡度和坡向对植被分布影响较大;赵婷等^[18]研究发现,不同海拔、坡度、坡向下植被覆盖度存在差异。

阅读相关文献后,发现对乌海市长时序植被覆盖度的时空变化研究尚不多见,利用 R/S 法 Hurst 指数来预测乌海市植被未来变化趋势的研究目前还没有。综上所述,本文基于 Landsat OLI/TM/ETM 遥感影像,采用像元二分模型法进行植被覆盖度反演;趋势分析法分析植被覆盖度空间变化特征;利用 DEM 数据提取高程、坡度、坡向与植被覆盖度分布图进行叠加,分析地形因子对植被覆盖度分布的影响;运用 R/S 法对乌海市 NDVI 未来变化趋势进行预测。通过对乌海市植被覆盖度时空变化特征进行研究,在一定程度上掌握研究区植被变化趋势,更多关注有退化趋势的区域,以期对乌海市生态环境保护提供理论借鉴和参考。

1 研究区概况

乌海市地处内蒙古自治区西南部,地理坐标为 39°02′30″—39°54′55″N,106°36′25″—107°08′05″E,东接鄂尔多斯,西连阿拉善盟,南与宁夏自治区一河相隔,北望河套平原,乌海市地势东西高,中间低^[19],面积 1 653 km²,平均海拔 1 105 m,境内含海勃湾、海南、乌达 3 区。属于温带干旱大陆性季风气候,年平均气温 9.3℃,年蒸发量 3 289 mm,年降水量 162 mm,相对湿度为 42%,风大沙多,气候干燥。土壤类型以漠钙土、风沙土为主。主要植被类型包括荒漠植被型、干旱草原植被型和沙生植被型,常见植物种有霸王(*Sarcosygium xanthoxylon*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)以及国家濒危保护植物半日花(*Helianthemum soongoricum*)、四合木(*Tetraena mongolica maxim*)等。乌海是我国西部地区的主要工矿城市之一,有着“乌金之海”的称号,主要以露天开采为主^[20],其煤炭资源丰富。长期高强度的矿产资源的开发,尤其是露天煤矿的开采,导致矿区内土地挖损、压占与地面塌陷严重,且乌海先天环境恶劣,地处乌兰布和、库布齐和毛乌素 3 大荒漠的交汇处,气候干旱,风蚀现象严重,环境承载力较低,生态环境脆弱^[21]。

2 数据与方法

2.1 数据来源与预处理

基于地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn/>)获取乌海市 2000—2018 年 TM/ETM/OLI 分辨率为 30 m 的遥感影像,同时获取分辨率为 30 m 的 DEM 影像数据。影像获取时间均为乌海市植被生长季(6—9 月),利于植被生长状况和分布区域的提取和识别。基于 ENVI5.3 软件对影像进行镶嵌、裁剪、辐射定标、大气校正、几何校正,通过 Band Math 模块进行植被覆盖度的计算。

地形因子提取:利用 ArcGIS 10.2 软件对乌海市 DEM 数据进行镶嵌、裁剪等处理,通过 3D 分析模块提取高程、坡度、坡向等地形因子,并进行重分类与植被覆盖度分布图叠加,探讨地形因子对研究区植被覆盖度分布的影响。

(1) 高程。研究区最大高程 1 768 m,最低高程 983 m。为方便研究,按照自然间断点分级法将研究区高程分为 7 类,即 983~1 100 m,1 100~1 200 m,1 200~1 300 m,1 300~1 400 m,1 400~1 500 m,1 500~1 600 m,1 600~1 768 m。

(2) 坡度。依据《水土保持综合治理规划通则》^[22](GB/T15772—2008)和参考水土保持工作中

普遍采用的 8° 作为缓坡和斜坡的分级标准,结合乌海地形将坡度分级为 $0^\circ\sim 5^\circ$, $5^\circ\sim 8^\circ$, $8^\circ\sim 15^\circ$, $15^\circ\sim 25^\circ$, $25^\circ\sim 35^\circ$, $>35^\circ$ ^[23-24]。

(3) 坡向。参考相关研究^[25]以正北方向为 0° , 22.5° 为步长,将研究区分为平面(-1°),北坡($0^\circ\sim 22.5^\circ$)和($337.5^\circ\sim 360^\circ$)东北坡($22.5^\circ\sim 67.5^\circ$)东坡($67.5^\circ\sim 112.5^\circ$)东南坡($112.5^\circ\sim 157.5^\circ$)南坡($157.5^\circ\sim 202.5^\circ$)西南坡($202.5^\circ\sim 247.5^\circ$),西坡($247.5^\circ\sim 292.5^\circ$)西北($292.5^\circ\sim 337.5^\circ$)9个坡向带。

2.2 研究方法

2.2.1 基于NDVI的植被覆盖度估算法 归一化植被指数即NDVI(Normalized Difference Vegetation Index),是反映近红外与红光波段的比值关系的函数。NDVI对植物的检测灵敏度较高,所得数据可比性明显,可对植被覆盖度动态变化进行表征。

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

式中: NIR 为近红外波段的反射值; R 为红光波段的反射值。NDVI取值为 $-1\sim 1$,将NDVI与像元二分模型相结合,进行乌海市植被覆盖度反演。一个像元的NDVI可以通过土壤所显示的信息($NDVI_{soil}$)和绿色植物所显示的信息($NDVI_{veg}$)表述。

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \quad (2)$$

式中: $NDVI_{soil}$ 为裸露地表或无植被覆盖像元的NDVI; $NDVI_{veg}$ 为完全被植被所覆盖像元的NDVI。根据乌海市实际情况,将评价单元内NDVI累积频率为95%的NDVI作为 $NDVI_{veg}$,NDVI累积频率为5%的值作为 $NDVI_{soil}$ 。

2.2.2 趋势分析法 一元线性回归分析能够模拟每个像元的变化趋势,满足在若干时间节点的长时段内模拟变化趋势要求,常用在植被覆盖度变化趋势中^[26]。对研究区19 a来植被覆盖度空间变化规律基于像元进行模拟,用一元线性回归趋势分析得出研究区2000—2018年植被覆盖度的空间变化趋势,其计算公式如下:

$$slope = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times NDVI_i) - \sum_{i=1}^n i \times \sum_{i=1}^n NDVI_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (3)$$

式中: i 为年限; n 为研究时段; $NDVI_i$ 为每个像元第 i 年的NDVI值; $slope$ 为各个像元NDVI变化趋势斜率,用于反映其变化趋势; $slope > 0$,代表该像元NDVI值呈增加趋势,且 $slope$ 值越大,表示上升趋势越明显,即植被改善越迅速;若 $slope < 0$,代表该像元NDVI值呈减少趋势, $slope$ 值越大,表示下降趋势越

明显,即植被退化越迅速。根据乌海市具体情况,将 $slope$ 分为5个等级:明显减少($slope \leq -0.015$)轻微减少($-0.015 < slope \leq -0.005$)稳定不变($-0.005 < slope \leq 0.005$)轻微增加($0.005 < slope \leq 0.015$)明显增加($slope > 0.015$)。

2.2.3 NDVI未来发展趋势预测 基于重标极差(R/S)分析方法的Hurst指数法对乌海市NDVI未来演变趋势进行预测,其原理是:

$$\begin{aligned} \text{差分序列: } \Delta NDVI_i &= NDVI_i - NDVI_{i-1} \\ (i &= 1, 2, 3, \dots, n) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{均值序列: } \overline{\Delta NDVI}_t &= \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t \Delta NDVI_i \\ (t &= 1, 2, 3, \dots, n) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{累计离差: } X(h) &= \sum_{i=1}^h (\Delta NDVI_i - \overline{\Delta NDVI}_t) \\ (1 \leq h \leq t) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{极差: } R(t) &= \max_{1 \leq t \leq n} X(h) - \min_{1 \leq t \leq n} X(h) \\ (t &= 1, 2, 3, \dots, n) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{标准差: } S(t) &= \left[\frac{1}{t} \sum_{i=1}^t (\Delta NDVI_i - \overline{\Delta NDVI}_t)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\ (t &= 1, 2, 3, \dots, n) \end{aligned} \quad (8)$$

$$R(t)/S(t) = a \cdot t^H \quad (9)$$

式中: a 为常数; $R(t)/S(t)$ 是重标极差; H 为Hurst指数。当满足上述公式(9)时,说明研究的时间序列中存在Hurst现象,在对数坐标系($\ln i, \ln R/S$)中,采用最小二乘法拟合得到Hurst指数的估计值。

若 $0 < H < 0.5$,NDVI时间序列是反持续性的,表明未来发展趋势与过去相反; $H = 0.5$ 时,说明NDVI时间序列时随机的,不存在长期相关性; $0.5 < H < 1$,表明NDVI时间序列是持续性的,未来的变化状况与过去一致。若 H 越接近0,反持续性越强,越靠近1,持续性越强。

3 结果与分析

3.1 植被覆盖度时间变化特征

3.1.1 植被覆盖度年际变化 根据《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190—2007)和乌海市植被覆盖度的实际情况将其分为5级,便于植被覆盖度动态变化分析:极低植被覆盖度($0 \leq FVC < 0.1$),低植被覆盖度($0.1 \leq FVC < 0.3$),中低植被覆盖度($0.3 \leq FVC < 0.45$),中植被覆盖度($0.45 \leq FVC < 0.6$),高植被覆盖度($0.6 \leq FVC < 1$)。

如图1所示,以年为时间尺度,基于平均植被覆盖度进行分析。结果表明,2000—2018年乌海市平均植被覆盖度呈增加趋势,增速为 $0.07\%/10 \text{ a}$, $R^2 = 0.5156$ 。

2010 年出现较大的波动,2002 年植被覆盖度值为 16.87%,为 19 a 来最低值,植被覆盖度最高值为 2018 年的 41.3%。乌海市 2000—2018 年植被覆盖度由 22.26% 上升至 42.30%,增长率为 20.04%。

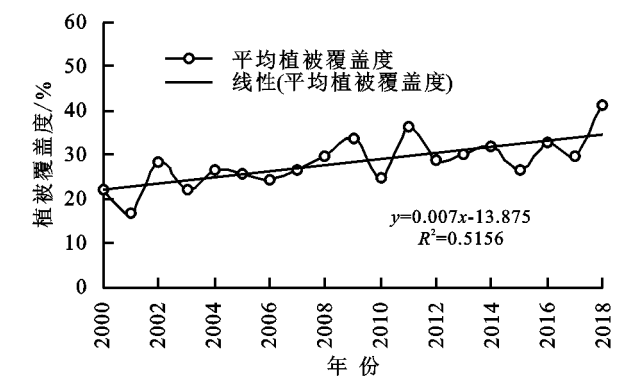


图 1 2000—2018 年乌海市植被覆盖度变化趋势

表 1 各等级植被覆盖度面积统计

| 等级 | 面积/km ² | | | | 年变化率/% | | |
|----|--------------------|--------|--------|--------|-------------|-------------|-------------|
| | 2000 年 | 2006 年 | 2012 年 | 2018 年 | 2000—2006 年 | 2006—2012 年 | 2012—2018 年 |
| 极低 | 743.28 | 530.70 | 257.11 | 132.72 | −12.86 | −16.55 | −7.52 |
| 低 | 563.07 | 697.61 | 894.86 | 501.84 | 8.14 | 11.93 | −23.77 |
| 中低 | 90.65 | 190.67 | 226.22 | 400.37 | 6.05 | 2.15 | 10.53 |
| 中 | 63.15 | 76.30 | 85.14 | 258.85 | 0.80 | 0.53 | 10.51 |
| 高 | 193.06 | 157.93 | 189.87 | 359.42 | −2.12 | 1.93 | 10.26 |

3.2 植被覆盖度空间分布特征

3.2.1 植被覆盖度空间分布格局分析 从图 2 可以看出,乌海市 2000—2018 年植被覆盖度整体上呈现南部地区高于北部地区,西部地区略优于东部地区的分布格局。研究区南部的 NDVI 值减小明显,高植被覆盖度面积增加,植被恢复明显好转;研究区内耕地沿着黄河河道东西两侧分布,主要集中分布在研究

3.1.2 各等级植被覆盖度面积年际变化 分别统计 2000 年、2006 年、2012 年和 2018 年不同植被覆盖度等级的面积(表 1),并对各植被覆盖度面积变化情况进行分析。由表 1 可知,2000—2018 年乌海市极低植被覆盖度面积大幅减少,由 743.28 km² 降至 132.72 km²,2006—2012 年变化率最大,减少了 16.55 %;低植被覆盖度面积虽有增减波动,但整体呈现微弱下降趋势;中低植被覆盖度面积在 2000—2018 年稳定增加,面积增加量约为 2000 年的 3.5 倍,2012—2018 年涨幅最大;中植被覆盖度面积在 19 a 间持续扩大,扩大 195.7 km²;在矿山生态环境综合治理和城市绿化工程共同开展下,高植被覆盖度面积增长近一倍,治理效果明显。2000—2018 年研究区植被逐渐恢复,生态环境向着良好的趋势发展。

区的西部地区,黄河两岸植被覆盖呈现增加态势;2000—2006 年,中部和东北地区植被覆盖度低,林草地集中分布在此区域,因露天煤矿开采导致天然草地和林地遭受侵害而使之面积减少;2012—2018 年乌海市积极推进生态环境建设,重点生态治理,使得植被恢复大有好转。

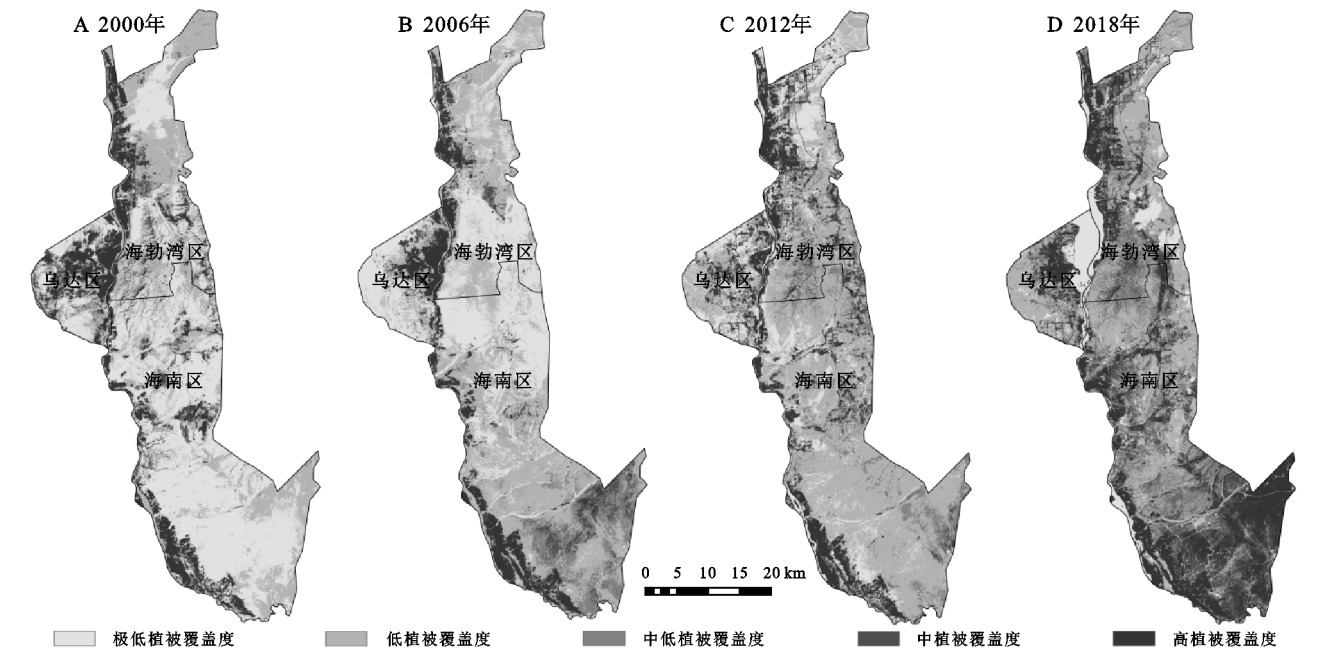


图 2 2000—2018 年乌海市植被覆盖度空间分布

采用趋势分析法对乌海市 2000—2018 年整个时期和 2000—2006 年、2006—2012 年、2012—2018 年 3 个不同时段 NDVI 空间变化趋势进行分析,由图 3 知,植被覆盖度轻微增加的区域有 787.80 km²,占比 47.29%;明显增加的区域占 18.78%;且研究区植

被退化区域很少,仅占 10.83%,主要分布在西部的乌达区。植被覆盖增加的面积远大于减少面积,轻微增加占主导趋势。说明 2000—2018 年,研究区植被覆盖变化呈现增加趋势,整体得到改善的区域大于退化区域,乌海市 19 a 来生态环境在逐步改善。

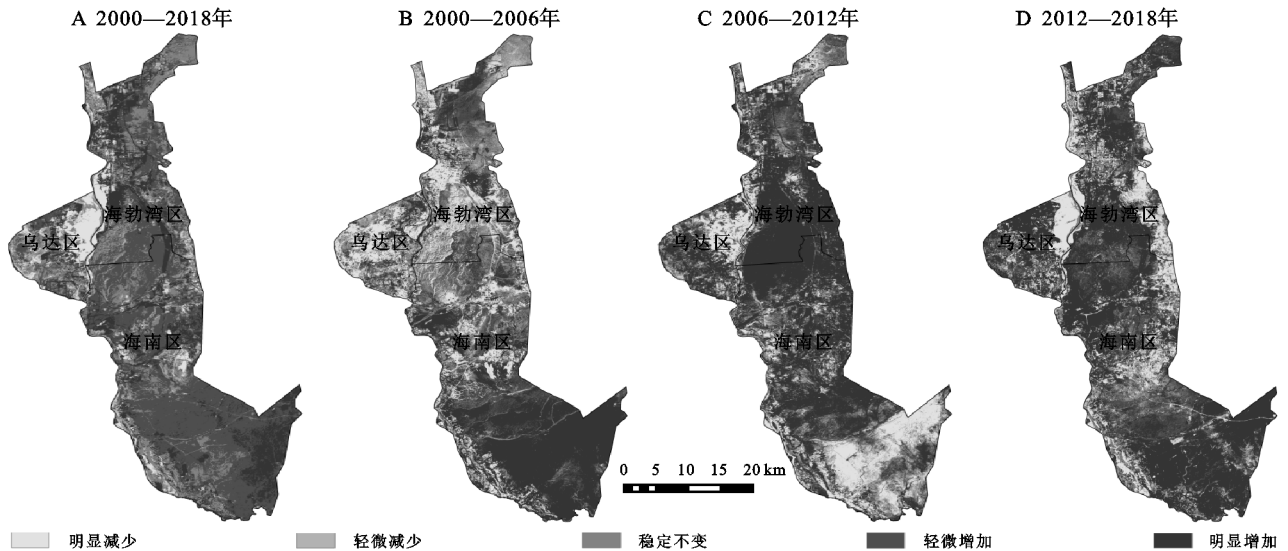


图3 2000—2018年乌海市植被覆盖度变化趋势空间分布

3.2.2 乌海市各区植被覆盖面积变化分析 整体来看 2000—2018 年海勃湾区植被覆盖状况出现轻微好转(图 4A),各等级植被覆盖度面积变化不明显;海南区在研究期间植被覆盖度明显好转(图 4B),极低植被覆盖面积下降明显,由 561.2 km²降至 28.42 km²,高植被覆盖面积增加 173.86 km²;乌达区植被覆盖

稍有退化(图 4C),高植被覆盖面积下降 14.39%。生态未破坏前煤矿主要分布在中西部的海南区,随着煤矿产业的快速发展,生态影响区域迅速发展北部海勃湾区和乌达区。经过乌海政府和当地煤炭企业的治理,乌海市的生态环境得到明显改善,尤其是海南区,这与赵勋刚^[14]的研究结果相一致。

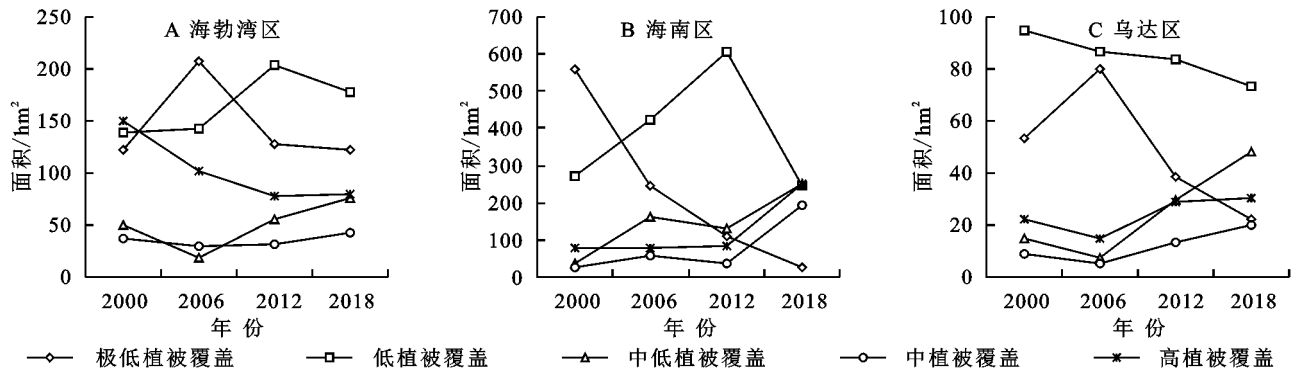


图4 乌海市 2000—2018 年各区植被覆盖面积变化

3.3 植被覆盖度随地形的变化特征

3.3.1 植被覆盖度随高程的变化 研究区东部有桌子山、甘德尔山,西部有五虎山,均呈南北向带状延伸。高程影响植被对温度、水分、土壤成分的吸收,图 5 是 2000—2018 年植被覆盖度与高程的叠加结果。在 983~1 768 m 范围内,植被覆盖度面积随高程的增加呈先上升后降低的趋势,极低、低植被覆盖度面积变化明显。小于 1 000 m 的范围内,植被覆盖度较低,随着高程的增加植被覆盖度开始逐渐升高,达到 1 200 m 时逐渐平稳,1 200~1 300 m 范围

内植被覆盖度面积稍有降低,1 300~1 400 m 植被覆盖度面积下降明显。研究区植被主要分布在 1 000~1 300 m 的高程内,约占 85%,该区域植被生长状况良好。在 1 100~1 200 m,1 200~1 300 m 高程处植被覆盖分布面积有明显变化,极低植被覆盖面积呈现明显下降趋势,分别减少 369.09,220.29 km²;中低、中、高植被覆盖面积在此高程内呈明显增加趋势,中低植被覆盖面积分别增加 154.33,92.08 km²,中植被覆盖面积增加 115.11,58.64 km²,高植被覆盖面积增加 90,71.18 km²。这是因为低高程区,虽然水分、热

量和气温都适合植被的生长需要,但该区域受人类活动干扰大;随着高程升高,人类活动相对较少,热量和水分仍适合植被生长,植被覆盖度开始上升,当高程

大于 1 400 m 后,随着高程升高,气温偏低不利于土壤水土保持且空气稀薄,严重影响植被的生长,则植被覆盖度下降。

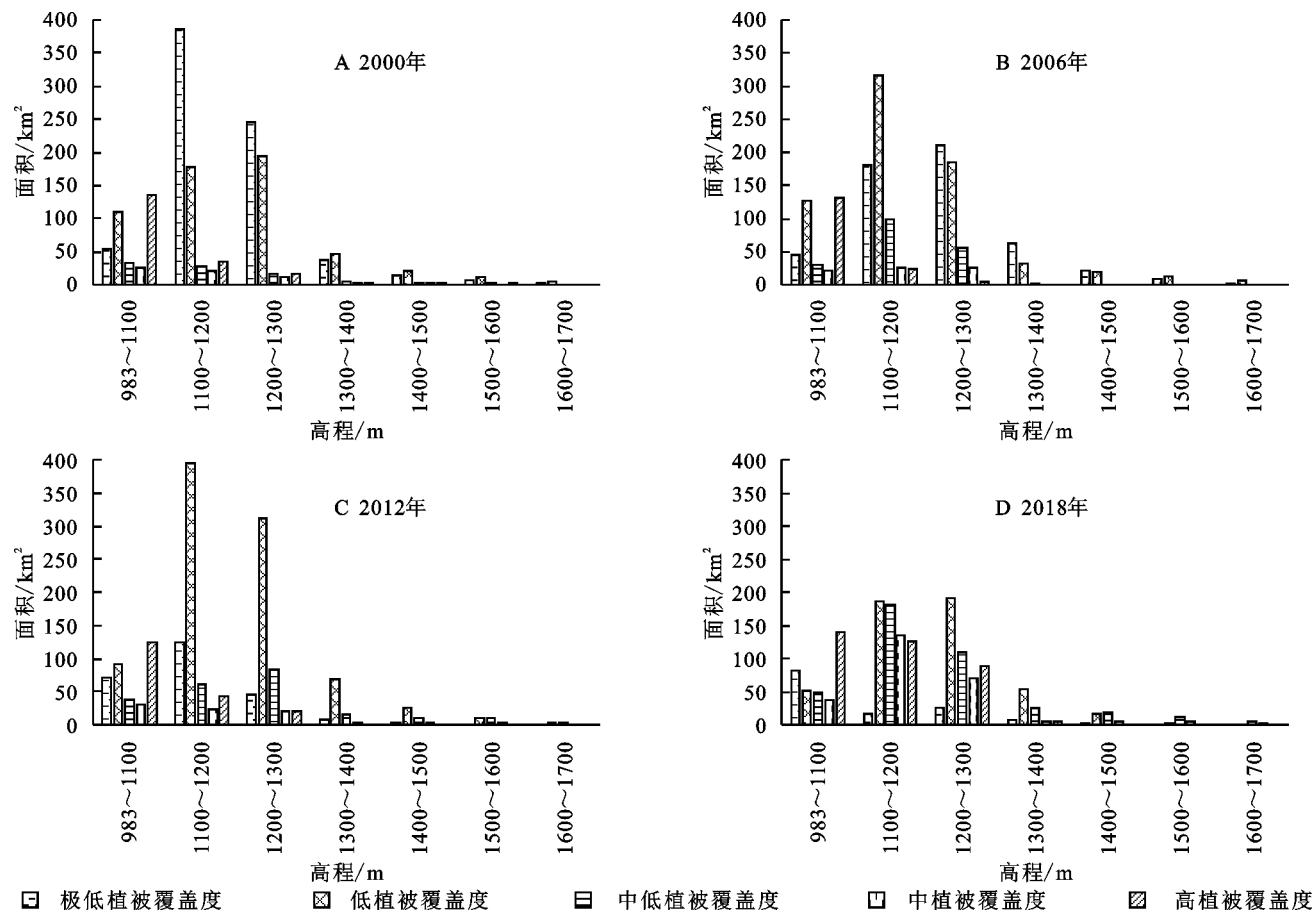


图 5 2000—2018 年植被覆盖度随高程变化面积

3.3.2 植被覆盖度随坡度的变化 研究区境内多山,山地丘陵约占总面积的 2/3,地形起伏以平坦地类为主 ($0^{\circ}\sim 15^{\circ}$),一线天风景区、桌子山周边较大,以 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 为主。坡度表示局部地表的倾斜程度,与水分条件、热量、土壤厚度等因素关系密切,在很大程度上影响地表植被的分布^[27]。图 6 为 2000—2018 年植被覆盖度与坡度的叠加结果,研究区植被覆盖度面积随着坡度增大呈现减小的趋势。从各坡度范围内的植被覆盖度变化面积情况来看,在坡度 $0^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 时植被覆盖度面积达到最大值,在 $0^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 的范围内植被覆盖面积约占 95%,是植被状况生长良好的区域, $>15^{\circ}$ 的地区整体植被覆盖度面积小。坡地过高,地势过于陡峭易发生水土流失,土壤养分也不易保存,植物生长受限。

研究期间,极低植被覆盖面积在各坡度范围内都在减少, $0^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 范围内由 509 km² 降低到 89.76 km²,变化尤为显著; $0^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 范围内,中低、中、高植被覆盖分布面积有明显增加趋势,分别增加 190.93, 152.65, 135 km²;其他坡度下,植被覆盖面积变化平稳。

3.3.3 植被覆盖度随坡向的变化 不同坡向能够接

受到的太阳辐射和水分蒸散量不同,植被的生长和分布特征也会有所差异^[24]。图 7 为 2000—2018 年植被覆盖度与坡向的叠加结果,各坡向间差异不大,除了平坡植被覆盖度较低外,其他坡向之间植被覆盖面积分布几乎一致。西北坡、西坡生长状况稍好,东坡、北坡和东北坡植被生长状况稍差,这是由于研究区属于干旱区,年降雨量较少,东坡方向虽光热条件充足,但蒸发量过大,易使土壤水分含量不足;西坡、西北坡接受太阳辐射较少,土壤水分易于保持,光热条件适宜,更有利于植被生长^[28]。

研究期间,极低、低植被覆盖分布面积在各坡向上都有所减少,极低植被覆盖面积减少尤为显著;中低、中、高植被覆盖分布面积在各坡向都有一定程度的增加。

3.4 NDVI 演变趋势预测

采用 R/S 分析法对乌海市 NDVI 未来变化趋势进行预测,基于 MATLAB 软件实现 Hurst 指数的逐像元空间计算,图 8A 为乌海市 2000—2018 年 NDVI Hurst 指数空间分布图。Hurst 指数范围为 0.11~1,随机变化区域占比最大为 68.78%,反持续性发展强

的区域(16.46%)稍多于同向发展趋势(14.76%)。海勃湾区 Hurst 指数较高,植被变化的持续性高,乌达区西部 Hurst 指数低,该区域反持续性强,反向发展区域多于同向。为深入分析乌海市 NDVI 变化趋势的可持续性,将植被覆盖度趋势分布图和 Hurst 指数空间分布图进行叠加分析,得到二者的耦合信

息,(图 8B,表 2),对乌海市 NDVI 未来发展趋势进行预测。未来变化趋势不确定的区域占大部分约 70%;研究区植被持续改善面积占 10.95%,主要分布在海勃湾区东部和海南区北部的矿区;退化转改善的区域占 13%,各区均有分布但主要集中于乌达区西部;持续退化和改善转退化的区域面积很少。

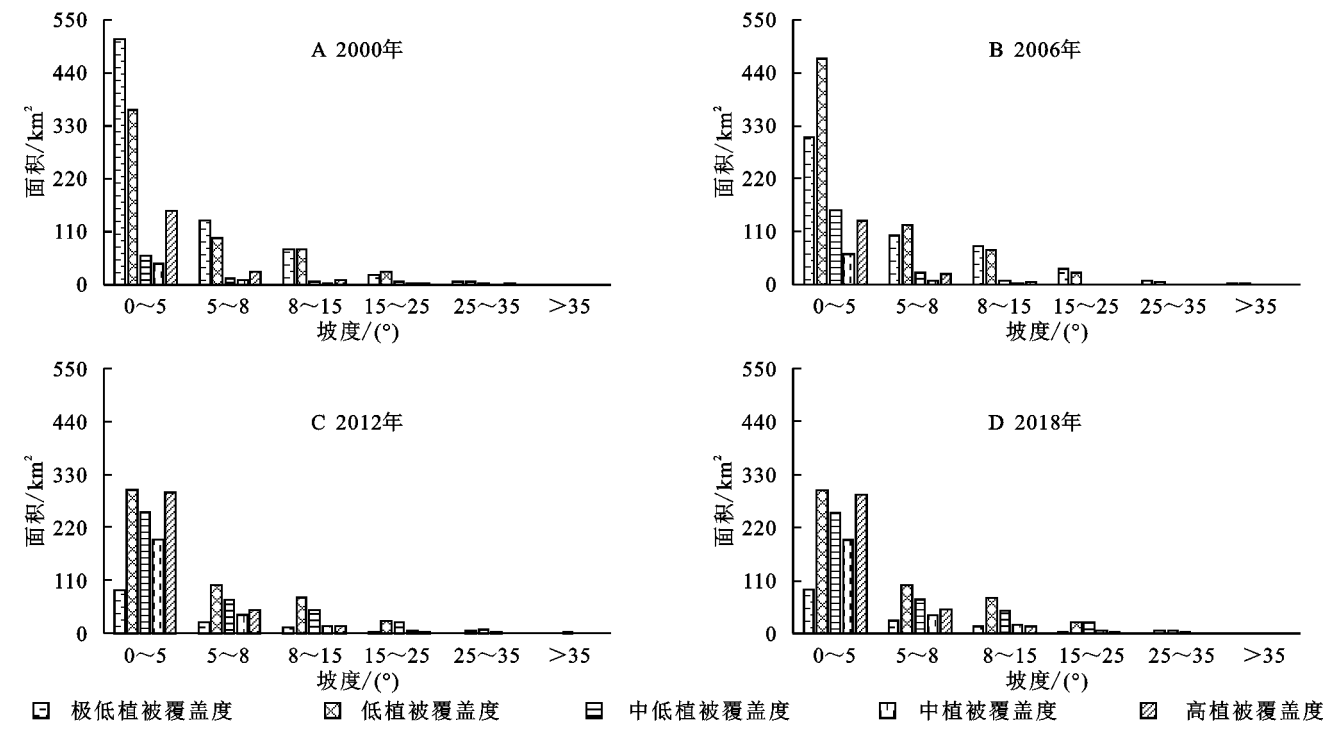


图 6 2000—2018 年植被覆盖度随坡度变化面积

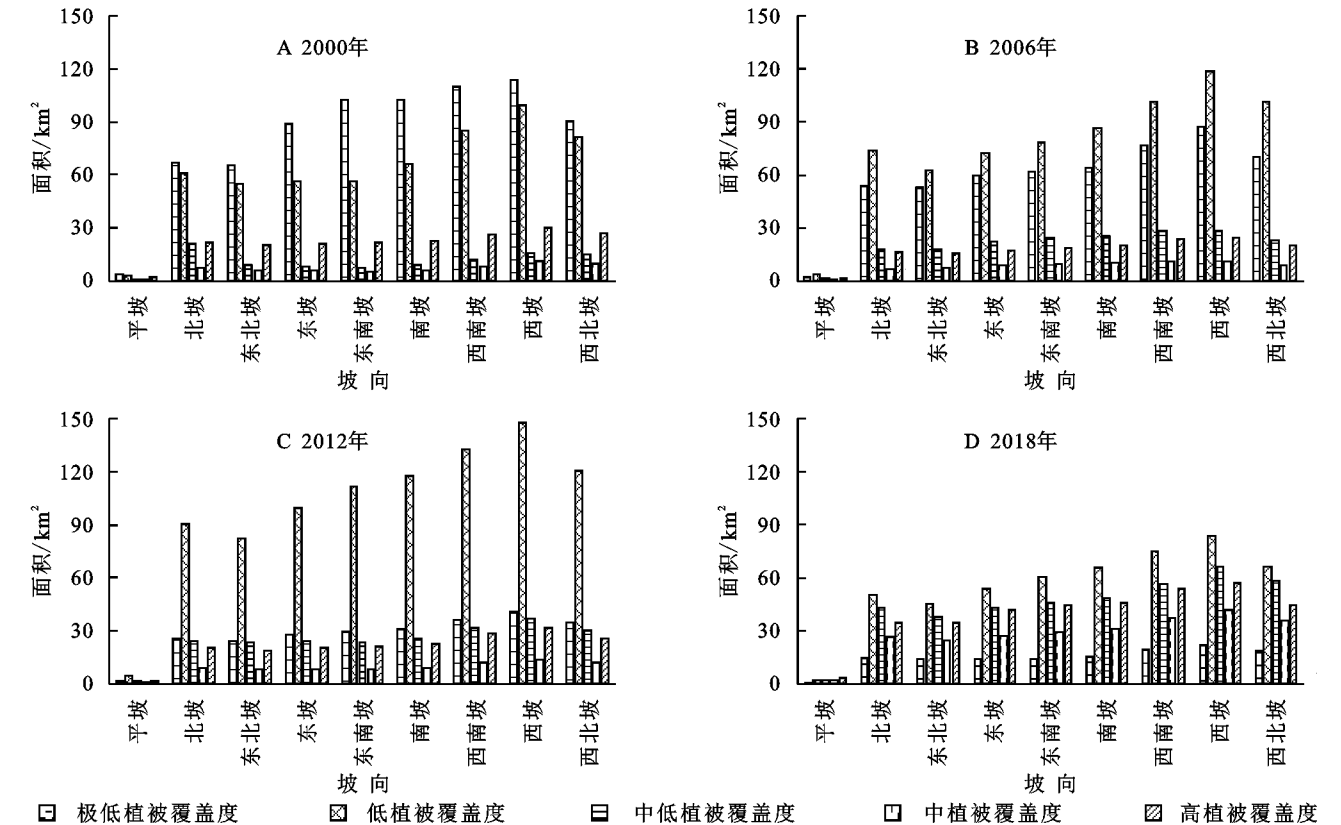


图 7 2000—2018 年植被覆盖度随坡向变化特征

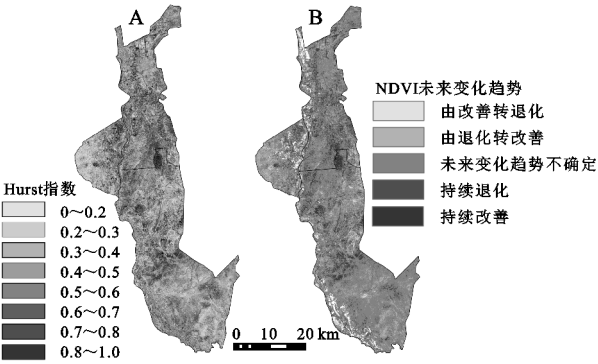


图 8 2000—2018 年乌海市 NDVI Hurst 指数空间分布及未来变化趋势预测

表 2 乌海市 NDVI 未来变化趋势预测结果统计

| 变化趋势 | 持续性 | 趋势预测 | 占比/% |
|------|---------|-----------|-------|
| >0 | >0.6 | 持续改善 | 10.95 |
| <0 | <0.4 | 由改善转退化 | 2.31 |
| >0 | <0.4 | 由退化转改善 | 13.00 |
| <0 | >0.6 | 持续退化 | 2.93 |
| >0 | 0.4~0.6 | 未来变化趋势不确定 | 61.75 |
| <0 | 0.4~0.6 | 未来变化趋势不确定 | 9.05 |

4 讨论

地形是影响植被覆盖空间分布的一个重要因素，不同地形条件下水热状况不同，从而导致不同地形因子下植被覆盖存在一定差异。低高程地区是人类活动的主要区域，受人为影响大，随高程增加植被覆盖会有所增加，当高程增到一定时，植被生长受限，覆盖情况不佳。纵观整个研究时段，区域植被覆盖度稍有改善，对于地势平坦和开发力度较大地方要加大植被的保护和防护林的建设，降低风沙灾害影响，实现可持续发展。有研究表明^[29]一般坡度越大积温越少，土层持水性能也越差，植被覆盖度应随坡度的增大而减小，与本研究相一致。高坡度地区植被覆盖差，易发生水土流失，可通过分析坡度和植被覆盖度来研究当地的水土保持情况。

植被覆盖变化多是自然因素和人为因素等多因素共同作用下的结果。2000—2018 年乌海市 NDVI 值在时间序列上总体呈现上升的变化，降水量和气温也呈波动中上升趋势。分别以 2.26 mm/10 a 和 1.289℃/10 a 的速度增加，NDVI 与降水正相关($r=0.543$)，与气温正相关($r=0.426$)；年降水量最大值为 198.8 mm(2002 年)，最小值为 43.4 mm(2010 年)，年均气温最大值为 11.07℃(2017 年)最小值为 8.7℃(2008 年)。降水和气温与植被覆盖密切相关，降水和气温的升高更有利于乌海市植被生长。降水量有时减少，但 NDVI

值依旧表现出逐年增加的趋势，这与乌海市的生态治理工程有关。乌海市矿产资源主要以露天开采为主，通过破坏表土对地下煤层进行开采，造成大量土地挖损、占压、植被破坏，导致生态环境急剧恶劣。2005 年乌海市市政府提出对矿区实行“先关闭，后整合”的政策，植被覆盖有所恢复，但乌海市前期矿产资源开发的压力依旧存在，植被覆盖度所以会出现波动。2010—2018 年地方政府和煤炭企业推进了生态文明建设政策方针，落实了土地复垦、植树造林和环境治理等工程，促进了研究区植被、生态环境的恢复，因此乌海市 NDVI 值形成明显反弹，这与汤傲^[30]的研究相一致。乌海市植被覆盖变化也与当地煤炭行业发展和治理有一定关系，2013—2020 年，按照“谁开发谁保护，谁破坏谁治理”的原则，全面推进绿色矿山建设，恢复项目区的生态环境，这一政策的实施，使乌海市生态恢复大有好转。乌海城市扩张的高速发展占据了大量农业用地以及矿产资源开采侵占了大量林草地，给当地的生态环境带来了很大的压力，在一系列政策下，植被覆盖虽有好转但仍需持续关注和治理植被退化和未来趋势不确定的区域。

5 结论

- (1) 时间上来看，乌海市近 19 a 来植被覆盖度在 16.87%~41.3% 波动，中低、中、高植被覆盖度面积呈现上升趋势，2012—2018 年涨幅明显，研究区植被覆盖状况明显好转。
- (2) 空间上来看，植被覆盖度呈现南部地区高于北部地区，西部地区略优于东部地区的分布格局。结合趋势分析，乌海市植被覆盖改善的区域远大于植被退化的区域，植被覆盖增加的区域占 66%，退化仅占 10.83%。
- (3) 地形因子是影响植被覆盖度的重要自然因子，植被覆盖度面积总体随高程增加呈现先增加后减小的趋势，在高程 1 100~1 200 m 地带时达到最大值；植被覆盖度面积随坡度增加呈现减少的趋势，0°~5° 的地带上达到最大植被覆盖面积；在坡向上呈现出西坡、西北坡最高，平坡最低和东坡、北坡和东北坡相对较低的趋势，总体来看各坡向植被覆盖变化趋势相近。
- (4) 乌海市 NDVI 未来变化趋势多为随机，占比约 70%，植被持续改善、退化转改善持续退化、改善转退化区域占比分别为 10.95%，13%，2.93%，2.31%。植被退化和变化趋势不确定的区域应重点关注。

参考文献：
[1] 何立恒，周寅康，杨强.延安市 2000—2013 年植被覆盖

- 时空变化及特征分析[J].干旱区资源与环境,2015,29(11):174-179.
- [2] 陈鹏,初雨,顾峰雪,等.绿洲-荒漠过渡带景观的植被与土壤特征要素的空间异质性分析[J].应用生态学报,2003,14(6):904-908.
- [3] Chen X Q, Hu B, Yu R. Spatial and temporal variation of phenological growing season and climate change impacts in temperate eastern China[J]. Global Change Biology, 2005,11:1118-1130.
- [4] 朴世龙,方精云.1982—1999年我国陆地植被活动对气候变化响应的季节差异[J].地理学报,2003,58(1):119-125.
- [5] Xu X L, Ma K M, Fu B J, et al. Relationships between vegetation and soil and to pography in a dry warm river valley, SW China[J]. Catena,2008,75(2):138-145.
- [6] 温小乐,姜兴强,徐涵秋.基于 TM 影像的长乐市植被覆盖度变化研究[J].遥感信息,2013,28(6):56-61.
- [7] 黄林峰,田鹏举,帅士章,等.2000—2016年赤水河流域植被生态质量变化分析[J].中低纬山地气象,2018,42(5):20-24.
- [8] 熊俊楠,彭超,程维明,等.基于 MODIS-NDVI 的云南省植被覆盖度变化分析[J].地球信息科学学报,2018,20(12):1830-1840.
- [9] 陈朝晖,朱江,徐兴奎.利用归一化植被指数研究植被分类、面积估算和不确定性分析的进展[J].气候与环境研究,2004,9(4):687-696.
- [10] 陈云浩,李晓兵,史培军,等.北京海淀区植被覆盖的遥感动态研究[J].植物生态学报,2001,25(5):588-593.
- [11] 张珊.归一化植被指数研究[J].绿色科技,2019(20):25-28
- [12] 郭山川,汤傲,李效顺,等.融合主被动遥感的乌海矿区土地损伤测度[J].生态与农村环境学报,2018,34(8):678-685.
- [13] 翟孟源,徐新良,江东,等.1979—2010年乌海市煤矿开采对生态环境影响的遥感监测[J].遥感技术与应用,2012,27(6):933-940.
- [14] 赵勋刚,胡雨村,王文辉,等.乌海市生态环境评价及驱动因子分析[J].浙江农林大学学报,2019,36(5):990-998.
- [15] 朱林富,谢世友,杨华,等.基于 MODIS EVI 的重庆植被覆盖变化的地形效应[J].自然资源学报,2017,32(12):2023-2033.
- [16] 吴志杰,何国金,黄绍霖,等.南方丘陵区植被覆盖度遥感估算的地形效应评估[J].遥感学报,2017,21(1):159-167.
- [17] 童晓伟,王克林,岳跃民,等.桂西北喀斯特区域植被变化趋势及其对气候和地形的响应[J].生态学报,2014,34(12):3425-3434.
- [18] 赵婷,白红英,邓晨晖,等.2000—2016年秦岭山地植被覆盖变化地形分异效应[J].生态学报,2019,39(12):1-11.
- [19] 荣立明,张成梁,王妍,等.乌海市露天煤矿生态环境现状分析及治理对策[J].内蒙古林业,2018(4):21-23.
- [20] 张子珩,濮励杰,周秀慧.乌海市可持续发展的系统动力学模型仿真[J].干旱区资源与环境,2010,24(12):55-60.
- [21] 黄园园,闫庆武,雷少刚,等.基于 GIS 的乌海矿区土地退化因素分析[J].生态与农村环境学报,2016,32(3):361-366.
- [22] 中华人民共和国水利部.水土保持综合治理规划通则 GB/T15772—2008[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [23] 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.
- [24] 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,2016,32(4):89-98.
- [25] 汤巧英,戚德辉,宋立旺,等.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[J].水土保持研究,2017,24(4):198-203.
- [26] 肖骁,李京忠,韩彬,等.东北老工业区植被覆盖度时空特征及城市化关联分析[J].生态科学,2017,36(6):71-77.
- [27] 黄得青,于兰,张耀生,等.祁连山北坡天然草地地上生物量及其与土壤水分关系的比较研究[J].草业学报,2011,20(3):20-27.
- [28] 吴思佳,吴伟,陈文惠,等.基于地理探测器的闽三角城市群植被覆盖时空变化及影响因素研究[J].福建师范大学学报:自然科学版,2019,35(5):81-88.
- [29] 张诗羽,张毅,王昌全,等.岷江上游流域植被覆盖度及其与地形因子的相关性[J].水土保持通报,2018,38(1):69-74.
- [30] 汤傲.基于遥感的干旱半干旱矿区生态环境监测及修复策略研究:以乌海矿区为例[D].江苏徐州:中国矿业大学,2017.