#### DOI: 10.5846/stxb201904280871

周紫燕,汪小钦,丁哲,陈芸芝,汪传建.新疆生态质量变化趋势遥感分析.生态学报,2020,40(9):2907-2919. Zhou Z Y, Wang X Q, Ding Z, Chen Y Z, Wang C J.Remote sensing analysis of ecological quality change in Xinjiang.Acta Ecologica Sinica,2020,40(9): 2907-2919.

# 新疆生态质量变化趋势遥感分析

周紫燕1,汪小钦1,\*,丁 哲1,陈芸芝1,汪传建2

1 福州大学空间数据挖掘和信息共享教育部重点实验室,卫星空间信息技术综合应用国家地方联合工程研究中心,数字中国研究院(福建),福州 350108

2 石河子大学信息科学与技术学院,兵团空间信息工程技术研究中心,石河子 832000

摘要:新疆是我国西部生态环境问题比较突出的区域,开展生态状况调查评估、及时掌握生态质量状况及其变化特征是环境保 护的一个研究重点。以遥感数据为基础,根据构建垂直干旱指数(Perpendicular Drought Index, PDI)的思想,改变土壤基线所经 过的原点,提出表征土壤湿度的垂直湿度指数(Perpendicular Moisture Index, PMI)。基于代表绿度的垂直植被指数 (Perpendicular Vegetation Index, PVI)、代表湿度的垂直湿度指数 PMI和代表热度的地表温度(Land Surface Temperature, LST), 利用空间几何原理创建了植被-湿度-温度生态指数(Vegetation-Moisture-Temperature Ecological Index, VMTEI)。利用 MODIS 数 据计算了新疆 2000—2018 年的 VMTEI,并进行趋势分析。结果表明:VMTEI集成了植被、湿度和热度的信息,能很好地反映新 疆生态质量的空间分布和时间变化趋势。新疆生态质量状况总体空间分布格局变化不大,与植被分布特征比较一致,呈现出纬 向伸展的变化,不同生态系统 VMTEI 均值差异明显,湿地生态系统生态质量状态最好,VMTEI 均值为 0.43 左右,其次为森林生 态系统;最差的是荒漠生态系统,VMTEI 均值差异明显,湿地生态系统生态质量状态最好,VMTEI 均值为 0.43 左右,其次为森林生 态系统;最差的是荒漠生态系统,VMTEI 仅为 0.28。近 20 年来,新疆生态状况总体上得到改善,其中,生态状况明显改善的区域 占 2.332%,主要集中在塔里木河干流、伊犁河、额敏河和天山北坡绿洲经济带,以农田、聚落生态系统为主,主要原因为三北防 护林建设、风沙治理、城市绿地面积增加造成的生态质量状况改善;生态状况严重退化的区域占 0.430%,主要集中在塔克拉玛 干沙漠外围、博斯腾湖、艾比湖以及零星分布于新疆的不同地区,以湿地生态系统为主,主要由于人为因素和气候变化造成平原 湖泊以及部分水库的生态退化。

关键词:空间几何原理;垂直植被指数;垂直湿度指数;地表温度;植被-湿度-温度生态指数;趋势分析;新疆

# Remote sensing analysis of ecological quality change in Xinjiang

ZHOU Ziyan<sup>1</sup>, WANG Xiaoqin<sup>1,\*</sup>, DING Zhe<sup>1</sup>, CHEN Yunzhi<sup>1</sup>, WANG Chuanjian<sup>2</sup>

- 1 Key Laboratory of Spatial Data Mining & Information Sharing of Ministry of Education, National & Local Joint Engineering Research Center of Satellite Geospatial Information Technology, Fuzhou University, The Academy of Digital China (Fujian), Fuzhou 350108, China
- 2 College of Information Science and Technology, Shihezi University & Geospatial Information Engineering Research Center, Xinjiang Production and Construction Crops, Shihezi 832000, China

**Abstract**: Xinjiang is a region with vulnerable eco-environment in western China. It is of significance to carry out ecoenvironment survey, assessment and timely grasp the ecological status and its changing characteristics for environmental protection. To meet this requirement, this paper developed a Vegetation-Moisture-Temperature Ecological Index (VMTEI) for measuring of region ecology. As an index for assessment of region ecological status, the VMTEI synthesized three important ecological indicators which were frequently used in evaluating ecology. These are greenness, wetness and heat. The three indicators can be represented respectively by three remote sensing indices or components, which are the perpendicular vegetation index (PVI), perpendicular moisture index (PMI), and land surface temperature (LST). Instead

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0504203);中央引导地方发展专项(2017L3012)

收稿日期:2019-04-28; 网络出版日期:2020-03-16

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: wangxq@ fzu.edu.cn

of a simple addition or weighted addition of the three indicators, the 3D spatial geometry principle was utilized to compress the three indicators into one to develop the VMTEI for assessing ecological status. The VMTEI of Xinjiang from 2000 to 2018 was calculated and the trend analysis was carried out by Sen + Mann-Kendall method. The results showed that VMTEI synthesized information on vegetation, soil moisture, and heat could well reflect the spatial distribution and temporal change of Xinjiang's ecological quality. The overall spatial distribution pattern of eco-environment in Xinjiang had little change, which is consistent with the distribution of vegetation with the change of latitudinal extension. The mean value of VMTEI in various ecosystems was obviously different. The eco-environment of wetland ecosystem was the best, the mean values of its VMTEI is 0.43, and followed by forest ecosystems. The worst was the desert ecosystem with VMTEI only 0.28. In the past 20 years, Xinjiang's ecological status has been improved overall. The area with obvious improvement of ecological quality status accounted for 2.332%, mainly concentrated in the farmland and settlement ecosystem which distributed in the Tarim River mainstream, Yili River, Emin River, and Tianshan North Slope Oasis Economic Belt. The main reasons of improvement were the construction of the Three-North Shelter Belt, sand management and the increase of urban green space. The area witnessed eco-degradation was 0.430%, mainly located in the wetland ecosystem which distributed in the periphery of the Taklimakan Desert, Bosten Lake, Aibi Lake and scattered in different regions of Xinjiang mainly due to ecodegradation of plain lakes and some reservoirs to human factors and climate change.

Key Words: spatial geometry principle; perpendicular vegetation index; perpendicular moisture index; land surface temperature; Vegetation-Moisture-Temperature ecological index; trend analysis; Xinjiang

生态质量变化和人类活动已经给生态系统带来了很大的破坏,并引起了广泛的关注<sup>[1-2]</sup>。基于实地调查 的生态数据不适合在区域或全球范围内直接应用,遥感技术由于可以在不同的空间和时间尺度上提供丰富的 大气和地表数据,已被广泛应用于监测生态系统的生态属性<sup>[3-4]</sup>。利用各种遥感指数来对森林<sup>[5]</sup>、草地<sup>[6]</sup>、城 市<sup>[7]</sup>、河流<sup>[8]</sup>乃至整个区域<sup>[9]</sup>的生态系统进行监测和评价,已经成为生态遥感领域的重要组成部分。其中, 植被指数是各种生态遥感研究中最常用的单一指标,用于描述区域植被的特征<sup>[10-11]</sup>,以表征生态质量状况的 "绿度";其他单一的生态指数如干旱指数<sup>[12-13]</sup>和地表温度<sup>[14-15]</sup>也被认为能较好的指示不同生态系统的"湿 度"和"热度"方面的变化。但这种基于单个指标的分割化评价,仅能反映生态系统的某一个侧面,无法客观、 全面地反映生态状况整体情况及变化。

国家环境保护部在 2006 年颁布的《生态环境状况技术规范》中推出了主要基于遥感技术的生态状况指数 EI,通过权重的设定将生物丰度、植被覆盖度、水网密度、土地退化指数和环境质量指数结合起来。该规范试行期间,已在国内得到广泛的应用,但也发现了不少问题,如没有空间分布、权重的合理性、指标的易获得性等。近年来,部分学者针对这些存在的问题进行了相应的研究,以期快速、定量、客观地评价区域生态质量状况。如徐涵秋<sup>[16]</sup>利用主成分分析法从影响生态系统的绿度、湿度、干度和热度这四个方面提出了遥感生态指数(A remote sensing based ecological index,RSEI);Zhang 等<sup>[17]</sup>通过因子分析法集成了不透水面、植被指数、地表温度及缨帽变换的绿度和亮度 5 个指标,提出了一种利用生态评价模型绘制和监测生态质量和环境变化的方法。这些方法克服了单一指标的缺点和传统方法难以确定权重的问题,在一定程度上得到了广泛的应用<sup>[9,18-20]</sup>。然而,无论是主成分分析亦或是因子分析,其物理意义都不够明显,不能像原始变量的含义那么清晰明确。本文参考 Amani 等<sup>[21]</sup>利用空间几何原理构建三维干旱指数的思想,从植被、湿度和热度这三个角度来构建综合生态质量表征指数,进行生态系统监测评估。

新疆维吾尔自治区地处世界典型的极端干旱区,生态环境十分脆弱。这里不仅是我国重要的战略资源储备区,也是"一带一路"建设、国家西部大开发、生态文明建设的主战场。由于长期以来,人类对自然资源特别是水资源的不合理利用,使得新疆生态状况面临着巨大的压力。《新疆生态环境十年(2000—2010年)遥感调查与评估》<sup>[22]</sup>,Du 等<sup>[23]</sup>和申丽娜等<sup>[24]</sup>分别从不同生态系统和植被的角度对新疆整体生态环境进行了评价;

同时,《塔里木河流域生态系统综合监测与评估》<sup>[25]</sup>,《博斯腾湖生态环境演化》<sup>[26]</sup>,朱长明等<sup>[27]</sup>,唐宏等<sup>[28]</sup>, 阿依努尔·买买提等<sup>[29]</sup>,朱小强等<sup>[30]</sup>,黄麟等<sup>[31]</sup>对新疆典型区域进行多角度的生态质量工作研究。目前, 针对大范围、长时间序列新疆生态质量变化多因子监测的研究很少。

本文通过组合绿度、湿度、温度这三个生态学意义明确的遥感监测指标,基于空间几何原理构建了新型、 简单、实用的遥感生态质量状况监测指数。利用该指数评价新疆生态质量状况及新疆近 20 年来生态系统的 生态变化,对明确生态系统重点治理区,提高生态系统保护效率具有重要的意义,同时为加强生态保护、改善 全区环境质量,建设美丽新疆提供依据。

#### 1 研究区与数据介绍

1.1 研究区

新疆维吾尔自治区位于中国西北边陲地区,介于 34.25°—49.17°N,73.33°—96.42°E 之间(图1),总面积 160万km<sup>2</sup>。它是一个典型的山体、盆地相间的地貌系统,包括呈纬向延伸的三大山系阿尔泰山、天山、昆仑山 及山脉之间的准格尔盆地、塔里木盆地。该区域垂直地带性明显,大面积的森林和草地植被沿山脉的垂直方 向变化,准格尔盆地和塔里木盆地分布有典型的温带荒漠植被,绿洲和城市则分布在河谷平原区。新疆远离 海洋,三面环山,属典型的大陆性干旱半干旱气候;夏季干热,冬季寒冷,干燥少雨,蒸发强烈,日照时间长等。总体上,区域植被覆盖率较低,空间差异明显,生态系统较为脆弱、敏感。

根据中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn/)提供的新疆生态系统数据,新疆生态系统以荒漠生态系统为主,其次是草地生态系统。新疆生态系统数据是基于遥感解译获取的各个生态系统类型 辨识的研究成果,每五年一景。图 1 展示了 2015 年新疆的陆地生态系统空间分布,其中荒漠生态系统占 60.57%,主要分布于塔里木盆地、准格尔盆地以及新疆东部地区;草地生态系统占 28.60%,主要分布于阿尔泰 山、天山北坡绿洲经济带、伊犁河流域、塔里木河干流及昆仑山脉;其余生态系统的面积比都小于 5%,农田生 态系统占 4.71%,森林生态系统占 2.26%,湿地生态系统占 1.07%,冰川生态系统占 2.38%,聚落生态系统占 0.41%。



图 1 研究区 MODIS 影像(241 波段) 假彩色合成和生态系统分布 Fig.1 The false color composite MODIS image of study area (241 bands) and distribution of ecosystem

## 1.2 遥感数据源及其预处理

本文主要采用的遥感数据为 NASA MODIS 陆地产品组提供的 2000—2018 年的 MOD09A1 的第 1、2 波段 和 MOD11A2 数据产品。MOD09A1 为 8 天合成的空间分辨率 500 m 的地表反射率产品,第 1 波段为红光波 段,波段范围 620—670 nm,第 2 波段为近红外波段,波段范围 840—876 nm; MOD11A2 为 8 天合成的空间分

辦率为1km的地表温度LST产品。为避免时相差异造成的影响,均选用植被生长最旺盛的7月份的影像开展研究。利用最大值合成方法得到月尺度的 MOD09A1 和 MOD11A2 数据,并进行图像镶嵌、裁剪数据、格式转换、投影转换及质量检验等预处理过程。MOD11A2 数据采用最邻近方法重采样到 500 m,以匹配 MOD09A1 的空间分辨率。

### 2 技术方法

绿度、湿度和热度是反映生态质量的重要指标,也是人类直观感受生态状况优劣的重要因素,因此常被用 于评价生态质量状况。本文根据构建垂直干旱指数(Perpendicular Drought Index, PDI)的思想,以土壤线上最 干旱的点 D 点为原点,提出表征土壤湿度的垂直湿度指数(Perpendicular Moisture Index, PMI)。参考 Amani 等<sup>[21]</sup>构造三维干旱指标的空间几何原理,选择代表绿度的垂直植被指数(Perpendicular Vegetation Index, PVI)、代表湿度的垂直湿度指数 PMI 和代表热度的地表温度(Land Surface Temperature, LST)这三个遥感参 数构造生态质量三维空间,构建一种能够反映生态质量的遥感综合指数:植被-湿度-温度生态指数 (Vegetation-Moisture-Temperature, VMTEI)。计算 2000—2018 年新疆生态指数 VMTEI,并利用 Sen+Mann\_ Kendall 方法对其进行趋势分析。

## 2.1 VMTEI 指数的构建

2.1.1 基于土壤线方程的 PVI 计算和土壤湿度表征(PMI)

土壤线是在红光波段(Red)和近红外波段(Nir)二维光谱空间中土壤纯像元光谱反射率按照大小排列而成的直线,综合反映了具有不同水分条件的土壤含水状况,对于了解土壤和植被的理化性质和生态特征具有重要的意义,它可以基于遥感数据 Red-Nir 的二维空间散点图获取<sup>[32]</sup>。在图像包含地表覆盖类型比较全面的情况下,Red-Nir 波段的散点图呈典型三角形分布,如图 2a 所示。像素在三角形中的位置取决于土壤覆盖、土壤水分、植被覆盖度、植被种类和植被生长阶段等多个因素。利用该散点图可以确定土壤线方程和表征土壤最干旱的点 D 点。线段 AC 表示地表植被从全覆盖区域(A)和部分覆盖区域(F)到裸露土壤(C)的变化。而线段 BD(土壤线 SL)是指土壤水分状况被描述为湿土区(B)、半干旱区(C)到干土区(D)的变化。Richardson和 Wiegand<sup>[33]</sup>利用 Red-NIR 光谱特征空间任一点到土壤线的垂直距离来描述植被覆盖状况,提出了垂直植被指数 PVI(式1)。秦其明等<sup>[32]</sup>利用 Red-NIR 光谱特征空间任一点到土壤线的垂直距离来描述植被覆盖状况,提出了垂直于土壤线的线)的距离来表征区域土壤含水状况,提出了垂直干旱指数 PDI(式 2)。可以发现,具有相同 PVI值的像素形成一系列的等值线与相同 PDI 值所形成的等值线之间存在垂直关系。关于 Red-NIR 光谱空间的基本理论和光谱特征的详细信息可以参考 Jackson<sup>[34]</sup>和 Ghulam 等<sup>[35]</sup>文献。

$$PVI = \frac{\rho_{\text{NIR}} - M \times \rho_{\text{Red}} - I}{\sqrt{1 + M^2}}$$
(1)

$$PDI = \frac{1}{\sqrt{1 + M^2}} (\rho_{\text{Red}} + M \times \rho_{\text{NIR}})$$
(2)

式中, $\rho_{\text{Red}}$ 和 $\rho_{\text{NIB}}$ 分别代表红光和近红外的反射率;M和I分布代表土壤线方程的斜率和截距。

土壤湿度是反映生态质量状况的一个重要指标。通常,地表温度升高,土壤湿度则相应下降,当土壤湿度低于某一特定水平时,由于不能吸收到足够的水分,植被就会变得不健康。为了保证在三维特征空间中土壤湿度大小和方向的一致性,本文依据 PDI 创建思想,平移原来经过原点的土壤基线(即图 2a 中直线 l<sub>0</sub>)至最干旱点 D 点,得到新的土壤基线 l<sub>0</sub>(即与 X<sub>PVI</sub> 重合)。Red-NIR 光谱特征空间中任一点到新土壤基线 X<sub>PVI</sub>(经过 D 点且垂直于土壤线的线)的距离即为垂直湿度指数 PMI(式 3)。

$$PMI = \frac{\left| \rho_{NIR} + \frac{\rho_{red}}{M} - b \right|}{\sqrt{1 + \frac{1}{M^2}}}$$
(3)

#### http://www.ecologica.cn



图 2 (a) Red-NIR 特征空间和基于 Red-NIR 特征空间所构建的 $X_{PVI}$ - $Y_{SMI}$ 特征空间(P 代表任意一个像素点);(b)基于线段 DE 的 VMTEI 表达:在包含最高温度、最小植被覆盖度和最小土壤湿度的 D 点附近的像素具有最差的生态质量状况(VMTEI=0),而 DE 的另一 端 E 点则代表最优的生态质量状况(VMTEI=1)

Fig.2 (a) Sketch map of Red-NIR space and the  $X_{PVI}$ - $Y_{SMI}$  space developed inside the Red-NIR spectral space (P represents a random pixel); (b) Development of the VMTEI based on the line DE: Pixels near the point D containing maximum temperature, minimum vegetation cover, and minimum soil moisture, have the worst eco-environment status (VMTEI=0), and the other end of DE (point E) have the best eco-environment status (VMTEI=1)

式中,  $\rho_{\text{Red}}$ 和 $\rho_{\text{NR}}$ 分别代表红光和近红外的反射率; *M*为土壤线方程的斜率; *b*为与土壤线垂直且通过 D 点的土壤基线与 NIR 轴的截距。

#### 2.1.2 PVI-PMI-LST 三维特征空间的构建

如图 2a 所示,基于 Red-NIR 光谱空间,构建以 D 点为原点, PVI 为 x 轴, PMI 为 y 轴的  $X_{PVI} - Y_{PMI}$  二维特 征空间。之后,在  $X_{PVI} - Y_{PMI}$  二维空间上添加 LST 为 z 轴,则完成了 PVI-PMI-LST 三维特征空间的构建(图 2b)。本研究中, LST 为 2.2 小节中预处理后的 MOD11A2 产品。

# 2.1.3 VMTEI 的表征

在构建 VMTEI 生态指标之前,需要确定每个轴的范围,使指标之间具有可比性。为了使 VMTEI 的值在 [0,1]之间,把各个指标统一归一化到 $[0, \frac{\sqrt{3}}{3}]$ 之间,然后计算 VMTEI。其中,PVI、PMI 以公式(4)进行归一 化,LST 以公式(5)进行反向归一化:

$$N_i = \left(\frac{i - \min(i)}{\max(i) - \min(i)}\right) \times \frac{\sqrt{3}}{3}$$
(4)

$$N_{\rm lst} = \left(\frac{i - \max(i)}{\min(i) - \max(i)}\right) \times \frac{\sqrt{3}}{3}$$
(5)

式中, $N_i$ 为归一化后的值,*i*分别对应 PVI、PMI。max(*i*)为指标的最大值, mix(*i*)为指标的最小值。

在三维特征空间中(图 2b),包含最高温度、最小植被覆盖度和最小土壤湿度的 D 点附近的像素具有最差的生态质量状况(VMTEI=0)。随着 $N_{pvi}$ 、 $N_{pmi}$ 和 $N_{lst}$ 的增加,生态质量状况逐渐改善,线段 DE 的另一端 E 点则 代表最优的生态质量状况(VMTEI=1)。因此,本文用该三维特征空间中的任何一点到 D 点的距离来构建表 征生态质量状况的生态指数 VMTEI(式 6)。

$$VMTEI = \sqrt{N_{pvi}^{2} + N_{pmi}^{2} + N_{lst}^{2}}$$
(6)

VMTEI 即为所建基于植被-土壤湿度-地表温度的遥感生态指数,值介于[0,1]之间。VMTEI 越接近1,生态越好,反之,生态越差。

2.2 Sen+Mann-Kendall 趋势分析

Sen 趋势度和 Mann-Kendall 趋势检验结合,成为判断时序数据趋势的重要方法,已经逐步运用在气候、植被等的时序变化特征分析中<sup>[36-38]</sup>。Sen 趋势度计算公式(式7):

$$\beta = \operatorname{Median}\left(\frac{x_i - x_j}{j - i}\right), \,\forall j > i$$
(7)

式中,  $i \pi_j$ 分别表示第  $i \in \pi \pi \beta_j \in x_i \pi_x_j$ 分别表示第  $i \in \pi \delta$  VMTEI 值和第  $j \in \pi \delta$  VMTEI 值;  $\beta$ 表示趋势 度, 当 $\beta > 0$ 时, 时序呈上升的趋势, 反之呈下降的趋势。

Mann-Kendall 趋势检验:对于序列  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  做出如下假设:  $H_0$ : 序列中的数据随机分布, 无显著 趋势;  $H_1$ : 序列存在上升或下降单调趋势。检验统计量 S 由式(8)计算:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \operatorname{sgn}(x_{j-} x_{i}), \operatorname{sgn} = (x_{j} - x_{i}) = \begin{cases} +1, x_{j} - x_{i} > 0\\ 0, x_{j} - x_{i} = 0\\ -1, x_{j} - x_{i} < 0 \end{cases}$$
(8)

式中,将S标准化得到统计检验值Z,利用Z值进行显著性检验,其公式如式(9):

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\operatorname{var}(S)}} S > 0\\ 0S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\operatorname{var}(S)}} S < 0 \end{cases}$$
(9)

式中,*n* 是序列样本数,*m* 是序列中重复出现数据组的个数,*t<sub>i</sub>* 是第*i* 组重复数据组中的重复数据个数。采用 双边趋势检验,在给定显著性水平  $\alpha$  下,从正态分布表中查得临界值  $Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$ ,当  $|Z| \leq Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$ 时,接受原假设,即 趋势不显著;若  $|Z| > Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$ ,则拒绝原假设,认为趋势显著。

#### 3 结果与讨论

利用 MODIS 波段 1 和波段 2 的数据进行散点图分析<sup>[39-40]</sup>,获得平均土壤线方程为: *y* = 1.262*x* + 0.018,最 干旱点 D 的坐标为(0.370,0.485)。

## 3.1 VMTEI 空间分布特征

利用空间几何原理,计算 2000—2018 年各年份 PVI、PMI 和 LST 三个分量及生态质量指数 VMTEI,其中 2000 年、2018 年和 19 年的平均 VMTEI 分布如图 3 所示。从图 3 可知,近 20 年来,新疆生态质量状况空间分 布格局变化不大,空间分布与新疆现有的生态质量状况比较吻合,由区域的地形地貌等自然特征决定,总体上 与植被分布特征比较一致,呈现出纬向伸展的变化。生态质量状况恶劣的区域主要分布在准格尔盆地、塔里 木盆地及新疆的东部地区,这些区域主要为荒漠、戈壁区,几乎没有植被生长,土壤湿度低,地表温度高, VMTEI 值低于 0.3;生态质量状况中等的区域主要分布在天山北坡绿洲经济带、塔里木河流域及绿洲与荒漠、 戈壁的过渡带,这些区域以耕地、灌木覆盖为主,植被覆盖稀疏,土壤有一定的湿润度,地表温度较荒漠区有所 降低,VMTEI 值在 0.35 左右;生态质量状况表现出良好的区域主要分布在阿尔泰山、天山山脉、昆仑山脉以及 伊犁河流域,这些区域有大面积的草地、森林、绿洲,是整个研究区植被覆盖较好的区域,VMTEI 值大于等于 0.35。

通过对已有研究中新疆生态质量状况相关的研究成果进行 VMTEI 指数的定性分析和间接对比验证。 《新疆生态环境十年(2000—2010年)遥感调查与评估》<sup>[22]</sup>中 2000年、2005年、2010年新疆生境质量空间分 布与 VMTEI 值的空间分布较一致,表现为较高等级生境分布区域 VMTEI 值较大,较低等级生境分布区域 VMTEI 值较小;唐宏等<sup>[28]</sup>通过构建区域发展水平和生态质量状况的评价指标体系,对新疆天山北坡区域进行 协调度评价,其中生态质量状况呈现出由西向东逐渐下降的空间分布,这与 VMTEI 值具有较好的一致性;阿 依努尔.买买提等<sup>[41]</sup>对新疆开孔河流域人居环境适宜性的评价结果也表现出与 VMTEI 指数空间分布的相 似性。



图 3 新疆 VMTEI 的空间分布 Fig.3 Spatial distribution of VMTEI in Xinjiang

## 3.2 VMTEI 趋势分析

利用 Sen+Mann-Kendall 法对新疆 2000—2018 年的 VMTEI 进行趋势分析,采用检验统计量 Z 值来进行趋势检验,检验中取置信水平  $\alpha = 0.05$ ,  $Z_{1-\frac{\alpha}{2}} = Z_{0.975} = 1.96$ 。将  $|\beta| \le 0.005$  的区域视为无明显变化区域;当 $\beta > 0.005$  且 |Z| > 1.96 时,序列呈显著上升趋势;当 $\beta > 0.005$  且  $|Z| \le 1.96$  时,序列呈上升但不显著趋势;当 $\beta < -0.005$  且 |Z| > 1.96 时,序列呈显著下降趋势;当 $\beta < -0.005$  且  $|Z| \le 1.96$  时,序列呈下降但不显著趋势;当

图 4 是结合趋势度和统计量 Z 值的结果,该图清晰地表明了新疆 VMTEI 变化趋势的空间分布格局:生态 状况呈现局部改善与部分退化并存的局面,但是总体上以改善面积大于恶化面积。其中,生态状况明显改善 的面积占 2.332%,主要集中在塔里木河干流、伊宁市及霍尔果斯河周边地区、额敏河,并以天山北坡绿洲经济 带生态质量改善最为明显。陈曦等<sup>[25]</sup>对塔里木河流域"四源一干"生态系统进行全面的分析,王倩等<sup>[42]</sup>对伊 犁河流域植被变化进行监测,唐宏等<sup>[28]</sup>对天山北坡区域发展与生态质量协调度进行评价,其研究结果与本文 相符。这一现象说明近年来新疆的绿洲经济、塔河综合治理工程、退耕还林还草工程、"三北"防护林工程起 到了一定的效果,植被改善趋势十分明显,平原绿洲灌区面积不断增大<sup>[43-44]</sup>。生态状况严重退化的区域面积 较小,占 0.430%,主要集中在塔克拉玛干沙漠外围、博斯腾湖、艾比湖及零星分布于新疆的不同地区,阿依努 对于趋势分析结果的进一步验证,由于研究区范围 较大,且许多区域因气候和地形等因素很难进行实地调 查,因此本文采用中分辨率的 Landsat 影像对生态质量 状况显著变化的 4 个典型区域进行验证,分别为艾比湖 (区域 I)、天山北坡绿洲经济带(区域 II)、孔雀河绿洲 (区域 II)、博斯腾湖(区域 IV)(图 5),其中区域 I 和区 域 IV 是生态明显退化区,区域 II 和区域 III 是生态状况 明显改善区域,这 4 个区域的生态质量变化已经得到了 较多的关注和研究<sup>[22, 29-30,41, 46-48]</sup>。根据数据的可获得 性,选取了区域 I—IV 不同时期生长季 7—8 月份的 Landsat 影像(图 5)。

从图 5 可知,图中 4 个区域的 VMTEI 与 Landsat 影像中区域植被分布和地表覆盖有较好的一致性,水域和高植被覆盖区 VMTEI 值较大,干燥裸土和低植被覆盖区 VMTEI 值较小。区域 I 展示了 2002 年至 2015 年新疆艾比湖面积的不断萎缩,同时艾比湖周边的植被覆盖面积不断增大,图中区域 I 的 VMTEI 均值由 0.36 下降至 0.32;区域 IV 位于博斯腾湖,趋势评价结果为湖泊边



图中区域Ⅰ:艾比湖;区域Ⅱ:天山北坡绿洲经济带;区域Ⅲ:孔雀 河绿洲;区域Ⅳ:博斯腾湖

缘存在明显退化的现象,但湖泊周边植被覆盖区依旧表现出生态质量状况好转的趋势,整体 VMTEI 均值从 0.40降低至 0.37,这与图 4 中趋势分析的结果相吻合。一方面,湖水量与湖水面积的变化受到人为因素不同 程度的驱动而改变,另一方面,湿地蒸发量大、降水少等自然因素的影响也造成了艾比湖和博斯腾湖面积的萎缩,使其生态质量状况表现出退化的趋势<sup>[29-30,46]</sup>。区域 II 和区域 III 分别为天山北坡绿洲经济带西部地区以 及孔雀河绿洲,通过 Landsat 影像与 VMTEI 值的对比可以直观地看出植被增长的趋势很明显,区域 II 中 VMTEI 均值从 2000 年的 0.29 增加至 2017 年的 0.33,其中,唐宏等<sup>[28]</sup>的研究成果同样表明,随着天山北坡绿洲经济带的发展,天山北坡西部地区生态质量状况良好;区域 III 的 VMTEI 均值从 2003 年的 0.30 增加至 2017 年的 0.35,生态质量状况有所改善,由于区域人口的增长、经济发展的需要和生态输水工程的实施,近年 来孔雀河的农田开垦速率非常快,耕地和园地面积增加显著,大量占用荒漠、低覆盖灌丛的面积<sup>[49]</sup>。

3.3 不同生态系统 VMTEI 变化特征分析

区域 VMTEI 的平均值时间序列在一定程度上反映了该区域的生态质量状况的变化情况。利用新疆生态 系统的空间分布对新疆生态质量状况 VMTEI 进行均值统计,从图 6 中可以看出,2000 年至 2018 年期间,整体 上趋于平稳的状态,年际间呈现波动式变化。全疆平均 VMTEI 值在 0.300 附近波动,与荒漠生态系统的变化 趋势较吻合,这主要是由于荒漠生态系统占整个研究区的面积最大,达到了 60%以上。湿地生态系统的 VMTEI 均值最高,在 0.430 左右,这表明湿地生态质量状况最为理想;其次为森林、农田、草地、聚落生态系统, 四者 VMTEI 均值都高于新疆整体,其中农田生态系统在近 20 年期间有较大幅度的改善,主要由于农田绿洲 外围的荒漠化土地面积不断减少,农田面积不断增大,同时,三北防护林的建设增加了农田林网化的密度,植 被覆盖度增加<sup>[24,31]</sup>;聚落生态系统表现出分段式变化,2000—2007 年增长幅度较大,2007—2018 年波动幅度 较小,王长建等<sup>[50]</sup>对新疆城市化与生态质量状况关系的分析结果与聚落生态系统的变化相符;荒漠生态系统 的整体均值最低,说明其生态质量状况最差,2000—2018 年期间表现出轻微波动的趋势。



图 5 Landsat 验证趋势分析的结果 Fig.5 Verify the results of trend analysis using Landsat





计算不同生态系统在 2000—2018 年 VMTEI 的均值和标准差,得到图 7 中的箱线图。其中均值大小可以 体现不同生态系统及新疆总体生态质量的变化,箱体长短代表不同年份的差异;而标准差大小则反映了生态 系统内的变化大小,箱体长短代表年际间的波动状况。

从图 7 左图可以发现,各生态系统 2000 年至 2018 年间的 VMTEI 均值排序:湿地>森林>农田>草地>聚落 >荒漠,这表明湿地生态系统的总体生态质量状况最好,其次是森林,平均 VMTEI 为 0.37,最差的为荒漠生态

系统,平均 VMTEI 仅为 0.28。根据不同生态系统统计得到箱线图上下分位点之间的跨度长短可以判断不同 年份生态状况变化的差异性大小,发现农田的箱体跨度最大,为 0.323—0.361,说明其 VMTEI 均值在这段时 间内的变化较大,这也表明了农田生态系统生态质量状况发生了较大的变化。

各生态系统 2000 年至 2018 年的 VMTEI 标准差均值可以分为两大类,一类包括森林、草地、湿地和荒漠 生态系统,约 0.08,说明这几类生态系统内部差异相对较大;另一类为农田和聚落生态系统,约 0.04,说明这 2 类生态系统内部差异较小。湿地生态系统内部包含湖泊、水库坑塘、永久性冰川雪地等,内部差异最大,因此, 其标准差值及其变化都最大;荒漠生态系统不仅包含戈壁、沙地、裸岩,还包含了稀疏草地、苔原等未利用土 地,内部差异较大且箱体跨度长短次之;森林和草地生态系统标准差值集中于 0.08 左右,表明其标准差值年 际间变化较小但生态系统内部差异明显;农田和聚落生态系统内部差异和标准差值变化都较小,表明其生态 质量状况较为稳定。





根据不同生态系统对近 20 年来趋势分析结果进行统计(图 8,未展示基本不变的占比)。从图 8 可知,不同生态系统的变化面积占比低于 15%,改善区域的面积均大于恶化区域,其中湿地生态系统生态状况变化较大,约占 14.37%;其次是农田生态系统,变化面积占比约占 12.39%,变化较小的是荒漠和森林生态系统,变化面积占比低于 3%。

明显改善比例最多的为农田生态系统,达到了 11.7%,而呈现严重退化区域的比例仅占 0.46%,这与新疆 大规模进行"三北"防护林体系建设、荒漠绿化、开展治沙工程有很大的关系,目前全区 7000 多万亩耕地中的 95%都受到三北工程的林网庇护,为新疆农业提供了强有力的生态保障(《新疆日报 2018 年 12 月 2 日讯》)。 聚落生态系统的生态质量状况明显改善的比例为 6.29%,在强调城市化与生态环境协调发展理念的同时,伴 随着新疆各重点区域城镇面积的增加,城市绿地的面积也不断增加,王长建等<sup>[30]</sup>和张超<sup>[47]</sup>分别对新疆地区 以及新疆天山北坡地区进行城市化和生态质量状况的协调发展研究,其研究结果表明城市聚落生态质量状况 呈现一定程度的改善,均与本文相符。草地生态系统的生态状况明显改善的比例占 2.70%,主要由草本荒漠 和耕地转化而来,与退牧还草、草原封育和退耕还草工程有关<sup>[22]</sup>;森林生态系统的生态状况明显改善的比例 占 1.79%,得益于退耕还林工程及三北长江流域等防护林的建设,退耕还林的面积从 2001 年 13173hm<sup>2</sup> 增加 到 2017 年的 81490hm<sup>2</sup>,同时防护林的面积从 2004 年的 70129hm<sup>2</sup> 增加到 2017 年的 145102hm<sup>2[51]</sup>。湿地生 态系统严重退化的面积占比最多,为 2.69%,,明显改善的区域占 7.83%,表明新疆区域湿地生态系统退化最 严重,这主要是由于新疆湿地分布广泛,从平原至高山均有分布,通过对不同湿地类型的比较短现,湿地面积 增加生态状况改善主要是由于高山区温度升高冰川积雪消融引起的草甸沼泽化以及河流面积的扩大,而湿地





面积减少生态状况退化较显著的区域主要为平原湖泊以及部分水库,《新疆生态环境十年(2000—2010年)遥 感调查和评估》<sup>[22]</sup>、阿依努尔·买买提等<sup>[29,46]</sup>和朱小强等<sup>[30]</sup>对湿地的研究结果与本文较一致。荒漠生态系 统明显改善的区域与严重退化的区域比例分别为 0.92%和 0.31%,总体变化不大<sup>[52]</sup>。

#### 4 结论

VMTEI 指数是基于绿度、湿度、热度指标建立的一个完全依靠遥感信息的综合生态指数,很好地集成了影响生态质量状况三个主要方面的信息,因此可以快速大面积地评价区域生态质量状况。该指数既考虑了与生态相关的多个因子,又引入空间几何原理避免了多指标加权集成方法权重难以确定或物理意义不明晰的不足,有效地提高了生态指数 VMTEI 的物理意义。利用 VMTEI 生态指数对 2000—2018 年新疆生态及其变化分析的结果表明 VMTEI 可以较好地反映区域生态质量空间分布和时间变化规律。近 20 年来,新疆生态质量总体格局变化不大,呈现波动式的平稳变化状况。其中生态质量明显改善的面积占总面积的 2.332%,明显退化的区域占 0.430%,这主要是由防护林体系、城市绿地、湿地变化造成的,说明未来新疆生态系统保护应侧重湿地保护与恢复工程,重点发展荒漠天然植被,建立绿洲外围荒漠地区防护林体系,同时完善水资源管理,使生态系统格局趋于合理化。

目前在生态遥感领域还没有完整的生态指标评价体系,主要是利用遥感技术反演与生态相关的因子,然后进行耦合。如何选择合适的生态遥感因子并进行多因子耦合分析是一个需要不断进行创新的研究方向。由于温度对于生态状况具有不确定性,当温度过高或过低时,生态质量都会朝着恶劣的方向发展,如何规范温度对生态状况的影响值得进一步探讨。同时,针对红光波段和近红外波段的绿度、湿度这两个生态因子,可以考虑利用能够获得热度(地表温度)的中高分辨率传感器(如 Landsat 等)构建较高空间分辨率 VMTEI 的可行性及其区域应用。

#### 参考文献(References):

- [1] 刘世梁,刘芦萌,武雪,侯笑云,赵爽,刘国华.区域生态效应研究中人类活动强度定量化评价.生态学报,2018,38(19):6797-6809.
- [2] Jorda-Capdevila D, Gampe D, GarcíaV H, Ludwig R, SabaterS, VergoñósL, AcuñaV. Impact and mitigation of global change on freshwater-related

ecosystem services in Southern Europe. Science of the Total Environment, 2019, 651: 895-908.

- [3] Reza M I H, Abdullah S A. Regional index of ecological integrity: a need for sustainable management of natural resources. Ecological Indicators, 2011, 11(2): 220-229.
- [4] Willis K S. Remote sensing change detection for ecological monitoring in United States protected areas. Biological Conservation, 2015, 182: 233-242.
- [5] Pfeifer M, Kor L, Nilus R, Turner E, Cusack J, Lysenko I, Khoo M, Chey V K, Chung A C, Ewers R M. Mapping the structure of Borneo's tropical forests across a degradation gradient. Remote Sensing of Environment, 2016, 176: 84-97.
- [6] Han Z, Song W, Deng X Z, Xu X L. Grassland ecosystem responses to climate change and human activities within the Three-River Headwaters region of China. Scientific Reports, 2018, 8(1); 9079.
- [7] Sekertekin A, Abdikan S, Marangoz A M. The acquisition of impervious surface area from LANDSAT 8 satellite sensor data using urban indices: a comparative analysis. Environmental Monitoring and Assessment, 2018, 190(7): 381.
- [8] Yi H C, Güneralp B, Kreuter U P, Güneralpİ, FilippiA M. Spatial and temporal changes in biodiversity and ecosystem services in the San Antonio River Basin, Texas, from 1984 to 2010. Science of the Total Environment, 2018, 619-620: 1259-1271.
- [9] 张浩,杜培军,罗洁琼,李二珠.基于遥感生态指数的南京市生态变化分析.地理空间信息,2017,15(2):58-62.
- [10] Ochoa-GaonaS, Kampichler C, de Jong B H J, Hernández S, GeissenV, HuertaE. A multi-criterion index for the evaluation of local tropical forest conditions in Mexico. Forest Ecology and Management, 2010, 260(5): 618-627.
- [11] White D C, Lewis M M, Green G, Gotch T B. A generalizable NDVI-based wetland delineation indicator for remote monitoring of groundwater flows in the Australian Great Artesian Basin. Ecological Indicators, 2016, 60: 1309-1320.
- [12] Rao M, Silber-Coats Z, Powers S, Fox III L, GhulamA. Mapping drought-impacted vegetation stress in California using remote sensing. GiScience& Remote Sensing, 2017, 54(2): 185-201.
- [13] Zhang L F, Jiao W Z, Zhang H M, Huang C P, Tong Q X. Studying drought phenomena in the Continental United States in 2011 and 2012 using various drought indices. Remote Sensing of Environment, 2017, 190: 96-106.
- [14] Streutker D R. A remote sensing study of the urban heat island of Houston, Texas. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(13): 2595-2608.
- [15] Zhou D C, Bonafoni S, Zhang L X, Wang R H. Remote sensing of the urban heat island effect in a highly populated urban agglomeration area in East China. Science of the Total Environment, 2018, 628-629: 415-429.
- [16] 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.
- [17] Zhang J Q, Zhu Y Q, Fan F L. Mapping and evaluation of landscape ecological status using geographic indices extracted from remote sensing imagery of the Pearl River Delta, China, between 1998 and 2008. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(4): 327.
- [18] 徐涵秋,施婷婷,王美雅,林中立.雄安新区地表覆盖变化及其新区规划的生态响应预测.生态学报,2017,37(19):6289-6301.
- [19] Hu X S, Xu H Q. A new remote sensing index for assessing the spatial heterogeneity in urban ecological quality: a case from Fuzhou City, China. Ecological Indicators, 2018, 89: 11-21.
- [20] Xu H Q, Wang M Y, Shi TT, Guan H D, Fang G Y, Lin Z L. Prediction of ecological effects of potential population and impervious surface increases using a remote sensing based ecological index (RSEI). Ecological Indicators, 2018, 93: 730-740.
- [21] Amani M, Salehi B, Mahdavi S, Masjedi A, DehnaviS. Temperature-vegetation-soil moisture dryness index (TVMDI). Remote Sensing of Environment, 2017, 197: 1-14.
- [22] 阴俊齐,陈丽,贾尔恒,阿哈提,袁新杰.新疆生态环境十年(2000-2010年)遥感调查与评估[M].北京:科学出版社,2017.
- [23] Du J Q, Shu J M, Yin J Q, Yuan X J, Jiaerheng A, Xiong S S, He P, Liu W L. Analysis on spatio-temporal trends and drivers in vegetation growth during recent decades in Xinjiang, China. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2015, 38: 216-228.
- [24] 申丽娜, 孙艳玲, 杨艳丽, 景悦. 基于 NDVI 的三北防护林工程区植被覆盖度变化图谱特征. 环境科学与技术, 2017, 40(4): 70-77, 106-106.
- [25] 陈曦,包安明,古丽·加帕尔,黄粤,徐海量,艾里西尔·库尔班.塔里木河流域生态系统综合监测与评估.北京:科学出版社,2016.
- [26] 高光,汤祥明,赛·巴雅尔图.博斯腾湖生态环境演化.北京:科学出版社,2013.
- [27] 朱长明,李均力,沈占锋,沈谦.塔里木河下游生态环境变化时序监测与对比分析.地球信息科学学报,2019,21(3):437-444.
- [28] 唐宏,杨德刚,乔旭宁,杨莉,王国刚.天山北坡区域发展与生态环境协调度评价.地理科学进展,2009,28(5):805-813.
- [29] 阿依努尔·买买提,玉米提·哈力克,阿依加马力·克然木,宋泽亮.博斯腾湖面积变化遥感监测及其驱动因素分析.新疆农业科学, 2017,54(4):766-774.
- [30] 朱小强,塔西甫拉提·特依拜,丁建丽,依力亚斯江·努尔麦麦,夏楠,杨童童,张淑霞.基于 MODIS 与 Landsat 8 的艾比湖湿地旱情时空 变化及其影响因素分析. 生态学报, 2018, 38(8): 2984-2994.

- [31] 黄麟, 祝萍, 肖桐, 曹巍, 巩国丽. 近 35 年三北防护林体系建设工程的防风固沙效应. 地理科学, 2018, 38(4): 600-609.
- [32] 秦其明,游林,赵越,赵少华,姚云军.基于二维光谱特征空间的土壤线自动提取算法.农业工程学报,2012,28(3):167-171.
- [33] Richardson A J, Weigand C L. Distinguishing vegetation from soil background information. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1977, 43(12): 1541-1552.
- [34] Jackson R D. Spectral indices in N-Space. Remote Sensing of Environment, 1983, 13(5): 409-421.
- [35] Ghulam A, Qin Q M, Zhan Z M. Designing of the perpendicular drought index. Environmental Geology, 2007, 52(6): 1045-1052.
- [36] de Beurs K M, Henebry G M. A statistical framework for the analysis of long image time series. International Journal of Remote Sensing, 2005, 26 (8): 1551-1573.
- [37] Xu C C, Li J X, Zhao J, Gao S T, Chen Y P. Climate variations in northern Xinjiang of China over the past 50 years under global warming. Quaternary International, 2015, 358: 83-92.
- [38] Li Y, Yao N, Chau H W. Influences of removing linear and nonlinear trends from climatic variables on temporal variations of annual reference crop evapotranspiration in Xinjiang, China. Science of the Total Environment, 2017, 592; 680-692.
- [39] SandholtI, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(2/3): 213-224.
- [40] Fox G A, Sabbagh G J, Searcy S W, Yang C. An automated soil line identification routine for remotely sensed images. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(4): 1326-1331.
- [41] 阿依努尔·买买提,玉米提·哈力克,娜斯曼·那斯尔丁.基于 3S 技术的开孔河流域人居环境适宜性评价. 农业工程学报, 2017, 33 (9): 268-275.
- [42] 王倩,杨太保,杨雪梅.新疆伊犁河流域植被变化动态监测与评价.干旱区资源与环境,2015,29(8):126-131.
- [43] 王爱辉. 天山北坡城市群经济、社会与环境协调发展与对策. 水土保持研究, 2014, 21(2): 316-322.
- [44] 刘斌,张琴琴,辛海强,巴艳君,梁艳. 塔里木河流域 2000—2014 年地表覆盖动态变化监测. 测绘科学, 2018, 43(5): 45-49.
- [45] 张飞, 王娟, 塔西甫拉提・特依拜, 周梅, 王东芳, 李瑞, 李晓航. 1998—2013 年新疆艾比湖湖面时空动态变化及其驱动机制. 生态学报, 2015, 35(9): 2848-2859.
- [46] 阿依努尔・买买提,玉米提・哈力克,阿依加马力・克然木.天山典型湖泊水位变化影响因素对比分析——以博斯腾湖与伊塞克湖为 例.干旱区资源与环境,2017,31(8):143-147.
- [47] 张超. 天山北坡典型绿洲城市的城市化与生态环境协调发展研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2015.
- [48] Wei H J, Liu H M, Xu Z H, Ren J H, Lu N C, Fan W G, Zhang P, Dong X B. Linking ecosystem services supply, social demand and human well-being in a typical mountain-oasis-desert area, Xinjiang, China. Ecosystem Services, 2018, 31: 44-57.
- [49] 吾买尔江·吾布力,何宇,马哈木·马木提,冯平,李卫红,朱成刚.新疆孔雀河流域生态综合治理分区探讨.新疆环境保护,2017,39 (1):18-23,40-40.
- [50] 王长建,张小雷,杜宏茹,汪菲.近 30a 新疆城市化与生态环境互动关系的动态计量分析.中国沙漠, 2012, 32(6): 1794-1802.
- [51] 高卫红,杨磊. 2018年新疆统计年鉴.北京:中国统计出版社, 2018.
- [52] 李春娥. 新疆土地荒漠化时空变化特征分析. 测绘科学, 2018, 43(9): 33-39.