

# 2000—2014 年塔里木河干流的植被覆盖与蒸散发时空变化及其关系

闫俊杰<sup>1,2,3,4</sup>, 吕光辉<sup>4</sup>, 徐海量<sup>2</sup>, 徐新文<sup>2</sup>, 凌红波<sup>2</sup>

(1. 伊犁师范学院, 新疆 伊宁 835000; 2. 中国科学院 新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 新疆大学 资源与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830046)

**摘要:** [目的] 掌握塔里木河生态恢复的耗水规律, 为生态水的合理规划和配置提供相应参考。[方法] 利用 MODIS 的蒸散发(ET)和 NDVI 数据, 及 Mann-Kendall 检验与 Theil-Sen median 趋势分析方法, 选择阿拉尔—大西海子段作为代表区域, 对塔里木河干流植被覆盖和蒸散发(ET)时空变化及其关系进行分析。[结果] ①塔里木河干流阿拉尔—大西海子段, NDVI 及 ET 多年平均值分别为 0.33, 118.41 mm, ET 及 NDVI 空间分异总体一致, ET 分布受植被覆盖控制, 总体表现为上段(阿拉尔—十四团) > 下段(恰拉—大西海子) > 中段(十四团—恰拉)。②年际变化上, NDVI 与 ET 年时空变化差异明显, 两者总体变化趋势相反, NDVI 显著增加 ( $Z_c > 1.96$ ), ET 非显著下降 ( $-1.96 < Z_c < 0$ ); 空间上, 全区 48.83% 区域的 NDVI 发生降低, 主要集中在中段, 而 ET 的该比例则高达 70.57%, 广泛分布于中段及下段。③相对于 NDVI, 径流及水汽压, ET 的年际变化与气温和降水相关性更好。[结论] 塔里木河干流 ET 空间分布虽受植被覆盖所控制, 但两者时空变化却差异明显。

**关键词:** 植被覆盖; 蒸散发; MODIS 数据; 塔里木河干流

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)03-0248-08

中图分类号: Q948.15

**文献参数:** 闫俊杰, 吕光辉, 徐海量, 等. 2000—2014 年塔里木河干流的植被覆盖与蒸散发时空变化及其关系[J]. 水土保持通报, 2018, 38(3):248-255. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2018.03.040. Yan Junjie, Lü Guanghui, Xu Hailiang, et al. Spatial-temporal variations in vegetation cover and evapotranspiration and their relationship in Tarim River during 2000—2014[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(3):248-255.

## Spatial-Temporal Variations in Vegetation Cover and Evapotranspiration and Their Relationship in Tarim River During 2000—2014

YAN Junjie<sup>1,2,3,4</sup>, LÜ Guanghui<sup>1</sup>, XU Hailiang<sup>2</sup>, XU Xinwen<sup>2</sup>, LING Hongbo<sup>2</sup>

(1. Yili Normal University, Yi'ning, Xinjiang 835000, China; 2. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang 830011, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. College of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China)

**Abstract:** [Objective] To understand the water consumption law in the ecological restoration of Tarim River, in order to provide references for the rational planning and allocation of ecological water. [Methods] Data including MODIS NDVI and evapotranspiration(ET) was collected in subsection of Alar-Daxixaizi in Tarim River from 2000 to 2014. Mann-Kendall method and Theil-Sen median trend analysis was used to investigate the spatiotemporal variations and the relationships between vegetation cover and ET. [Results] ① In the Alar-Daxixaizi section of the Tarim River, the average value of NDVI and ET years was 0.33 and 118.41 mm, respectively. The spatial variation of the NDVI and ET was highly consistent, both were characterized as: upper reach (Alar—14th regiment) > down reach (Charla—Daxixaizi) > middle reach (14th regiment—Charla). The spatial distribution of ET was controlled by vegetation cover. ② For the inter-annual variability, the difference between the spatial variations of NDVI and ET was obvious, and the change trends of them

收稿日期: 2017-11-30

修回日期: 2017-12-21

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“塔里木河绿洲适宜配比及水量调控”(41471099); 中国科学院“西部之光”人才培养计划“基于生态保护红线的和田河流域水量分配研究”(XBBS-2014-13)

第一作者: 闫俊杰(1984—), 男(汉族), 河南省林州市人, 在读博士, 主要从事遥感生态应用相关研究。E-mail: yan3550@sina.com。

were generally reversed. NDVI increased significantly ( $Z_c > 1.96$ ), while ET decreased ( $-1.96 < Z_c < 0$ ). NDVI in 48.83% of the whole area decreased, which mainly located at the middle reach. The proportion of ET with decreasing trend accounted for 70.57% of the whole area, which was widely distributed in the middle and down reach. ③ Compared to NDVI, runoff and water vapor pressure, the annual variation of ET was more closely related to temperature and precipitation. [Conclusion] Although the spatial distribution of the ET in Tarim River was controlled by the vegetation cover, the spatiotemporal variations between them was distinct.

**Keywords: vegetation cover; evapotranspiration; MODIS data; Tarim River**

干旱与半干旱区绿洲系统所具有的适宜小气候及稳定的植被群落是保证其内部人类及其他生物活动所需环境的基础<sup>[1]</sup>,充足的水源供给则是维持绿洲环境稳定的关键<sup>[2]</sup>,然而,随着绿洲内部社会及经济的发展,人类生产生活用水不断挤占自然生态用水<sup>[3-4]</sup>,致使社会发展与环境稳定之间的矛盾日趋紧张<sup>[3-5]</sup>,威胁到绿洲系统良性发展,合理配置有限的水资源对绿洲自然与社会协同发展意义重大。蒸散发(evapotranspiration, ET)代表了植被及地面向大气输送的水汽总通量<sup>[6]</sup>,在绿洲系统耗水中占有重要比例,量化绿洲系统蒸发与植被变化及其相互关系对指导绿洲系统水资源调控与分配具有重要指导价值。

遥感方法是开展全球或区域尺度蒸散发与植被动态监测的有效方法<sup>[7-9]</sup>。目前已有多个世界机构和科研团队公开发布了不同时间及空间尺度的蒸散发与植被遥感的成品数据,其中蒸散发数据有欧洲气象卫星应用组织发布的LSA-SAF MSG ET数据集、Jung等<sup>[9]</sup>制作的1982—2008年全球陆地蒸散发数据集以及美国航空航天局(NASA)的MODIS MOD16全球ET数据集;由于与植被生产力具有良好相关性,归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)是陆表植被动态监测的有效指标<sup>[9-10]</sup>,目前主要的成品数据有起始于1982年的NOAA-AVHRR NDVI,起始于1998年的SPOT-VGT数据以及起始于2000年的MODIS NDVI数据<sup>[10]</sup>。对于3种蒸散发数据,多位学者已对MOD16数据在亚洲、中国西北及新疆地区的精度进行验证<sup>[11-13]</sup>,证明了其有效性及广泛适用性。而MODIS NDVI数据则是植被动态监测中被广泛采用的数据<sup>[14-15]</sup>。

塔里木河干流位于新疆塔里木盆地北缘,地处塔克拉玛干沙漠边缘,干旱少雨,自然生态主要依靠河水及地下水来维持,但长期以来流域内自然生态用水与农业用水矛盾突出,耕地的持续扩张促使河水及地下水被过度引用和开采,生态用水被挤占,致使塔里木河水量锐减甚至断流<sup>[16]</sup>,生态环境受到严重损害<sup>[17]</sup>,自2000年起,为改善塔里木河流域的生态环境问题,国家及当地有关部门制定和实施了生态输

水、统一管理等一系列生态恢复措施<sup>[18]</sup>,经过多年持续治理,塔里木河生态环境得到了明显改善<sup>[18]</sup>,目前,针对生态恢复措施对塔里木河生态环境的影响,大量学者就生态需水、植被变化等方面进行了深入而广泛的研究<sup>[14,19-20]</sup>,但关于生态恢复过程中蒸散发的变化规律及其与植被变化协同关系尚缺乏深入研究。基于此,本文拟利用2000—2014年MODIS NDVI及MOD16 ET数据产品,综合利用遥感及GIS空间分析技术,分析塔里木河干流植被覆盖及蒸散发时空变化,探讨植被覆盖变化对蒸散发的影响,以期掌握塔里木河生态恢复的耗水规律,以及生态水的合理规划 and 配置提供相应参考。

## 1 研究区概况

塔里木河干流地处中纬度欧亚大陆腹地,远离海洋,北靠天山,南邻塔克拉玛干沙漠,受大陆性暖温带极端干旱气候控制,气候干旱少雨,蒸发强烈,多年年平均降水仅50.4 mm,年平均蒸发高达1 880.0 mm,极端最高温度39.4℃,多年平均气温10.7℃,干燥度12~19。该地区植被地带性属温性灌木和半灌木,但受外来河水补给影响,其植被群落多以胡杨、柽柳、芦苇等为建群种。

塔里木河干流通常指塔里木河阿拉尔断面至台特玛湖的河段,其下游的中大西海子—台特玛湖河段植被覆盖虽然经过多年输水治理后有了显著改善,但相对于阿拉尔—大西海子段,其植被仍非常稀疏,且植被带宽度及面积也均非常有限,因此截取植被覆盖相对较高的阿拉尔—大西海子段作为本文研究区域。

## 2 材料与方法

### 2.1 数据来源及预处理

本文用到的NDVI数据和ET数据分别为MODIS MOD13 Q1产品和MOD16 A3产品,两者空间分辨率分别为250和1 000 m,时间分辨率分别为16和8 d,时间序列为2000—2014年。MODIS ET数据由美国蒙大拿大学森林学院工作组在Penman-Monteith公式基础上融合MODIS遥感数

据制作而成<sup>[21]</sup>,计算过程考虑了符合绿洲和荒漠下垫面特征的土壤表面蒸发、冠层截流水分蒸发和植物蒸腾的差异,适用于干旱与半干旱区地表蒸散发研究<sup>[9]</sup>。MODIS NDVI 数据是的 NOAA/AVHRR NDVI 的延续和发展<sup>[22]</sup>在红光波段(RED)和近红外波段(NIR)波段的波幅以及辐射定标技术上均有较大改进<sup>[23]</sup>。

对获得的遥感数据除进行了数据格式转换、镶嵌、投影转换及研究区提取等预处理外,对 NDVI 数据进行了 Savitzky-Golay 滤波和 MVC 合成处理,以降低噪音信息对数据影像,并获得代表植被生长最好状况的年 NDVI 数据;对于 ET 数据,由于塔里木河流域距离河道较远的区域植被覆盖较低,容易造成研究区内 ET 数据出现空缺值,因此对 ET 数据中的空缺值进行了 8 邻域均值插值。最后为保证 ET 数据与 NDVI 数据的空间匹配,将两种数据像元重采样为 250 m×250 m。

## 2.2 趋势检验

用 Mann-Kendall 检验与 Theil-Sen median 趋势分析判断 NDVI 及 ET 时间序列数据变化趋势,并量化其变化率<sup>[24-25]</sup>。Mann Kendall 检验统计量计算过程为:

$$Z_c = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{var}(s)}} & (s>0) \\ 0 & (s=0) \\ \frac{s+1}{\sqrt{\text{var}(s)}} & (s<0) \end{cases} \quad (1)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(x_k - x_j) \quad (2)$$

$$\text{var}(s) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (3)$$

$$\text{sign}(x_k - x_j) = \begin{cases} 1 & (x_k - x_j > 0) \\ 0 & (x_k - x_j = 0) \\ -1 & (x_k - x_j < 0) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $x_k, x_j$ ——NDVI 或 ET 样本时序数据集合; $n$ ——数据集合长度;sign——符号函数。在给定显著性水平  $\alpha$  下,当  $|Z_c| > U_{1-\alpha/2}$  时,表示时间序列在  $\alpha$  水平上变化趋势显著。若统计量  $Z_c$  值为正,表示变化趋势上升,若  $Z_c$  值为负,则表示变化趋势下降。

Theil-Sen median 趋势分析用于量化变化趋势,表示单位时间内的变化量,计算公式为:

$$\beta = \text{median}\left(\frac{x_i - x_j}{i - j}\right) \quad \forall j < i \quad (5)$$

式中: $1 < j < i < n$ 。当  $\beta > 0$  时,反映了时间序列呈上升趋势;反之,则呈现下降趋势。

## 3 结果与分析

### 3.1 NDVI 及 ET 整体特征

以 2000—2014 年多年平均 NDVI 和 ET 代表研究区植被覆盖和 ET 的总体特征,并根据研究区 NDVI 及 ET 直方图的特征,分别将 NDVI 和 ET 划分为了 5 个等级(表 1—2)。此外,还根据研究区 ET 和 NDVI 的空间分布特征,将研究区以十四团和恰拉 2 个断面划分为了上(阿拉尔—十四团)、中(十四团—恰拉)和下(恰拉—大西海子)3 段,便于更为详尽的分析研究区 NDVI 及 ET 的空间分异特征。

表 1 研究区各河段及全区平均 NDVI 及 NDVI 等级比例

%

河段	平均 NDVI	NDVI 等级				
		<0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	>0.8
上段	0.53	7.28	23.67	21.73	43.29	4.03
中段	0.28	33.53	46.38	17.47	3.19	0.00
下段	0.36	31.88	29.11	20.87	18.01	0.13
全区	0.33	28.65	40.69	18.44	11.50	0.72

表 2 研究区各河段及全区平均 ET 及 ET 等级比例

%

河段	平均 ET/mm	ET 等级/mm				
		<100	100~120	120~160	160~200	>200
上段	157.05	12.43	14.68	23.92	28.39	20.58
中段	108.94	42.38	38.34	16.62	2.38	0.28
下段	121.05	30.76	28.85	27.60	11.96	0.84
全区	118.41	36.13	33.37	18.86	7.76	3.88

研究区 NDVI 与 ET 的空间分异一致,阿拉尔—十四团的上段均为 NDVI 和 ET 高值的集中分布区,

中段中的十四团—新渠满及英巴扎—恰拉河段则均为 NDVI 和 ET 低值的集中分布区,恰拉—大西海子

的下段及中段的新渠满—英巴扎为 NDVI 和 ET 中值的集中分布区。研究区 NDVI 与 ET 空间分异的一致性在一定程度上也表明了 ET 的大小与植被覆盖的高低具有较高的相关性。

根据表 1 和表 2 中的统计结果,研究区全区多年平均 NDVI 为 0.33,69.34% 的区域的 NDVI < 0.40,仅有 0.72% 的区域 NDVI > 0.80,而 NDVI 介于 0.60~0.80 的面积比例也仅达到 11.50%,剩余 18.44% 的区域的 NDVI 介于 0.40~0.60。研究区全区多年平均 ET 仅为 118.41 mm,与其干旱缺水的环境特性一致;全区 69.50% 的区域 ET < 120 mm,ET > 200 mm 的面积比例仅为 3.88%,剩余 7.76% 和 18.86% 的区域的 ET 分别介于 160~200 mm 和 120~160 mm。

对于不同河段,上段的 NDVI 及 ET 均最高,分别为 0.53,157.05 mm,分别高出其全区平均值 60.61% 和 32.63%,该河段 47.32% 区域的 NDVI > 0.60,48.97% 区域的 ET > 160 mm。中段因 79.91% 面积的 NDVI < 0.40,80.72% 面积的 ET < 120 mm,其平均 NDVI 和 ET 均最低,分别为 0.28,108.94 mm;下段 NDVI 和 ET 分别为 0.36,121.05 mm,均高于全区平均值,虽然其大面积的 NDVI < 0.40 及

ET < 120 mm,但其 39.01% 面积的 NDVI > 0.40,40.40% 面积的 ET > 120 mm。

### 3.2 NDVI 及 ET 变化趋势

由图 1 和表 3 可知,除了 2007 年外,NDVI 与 ET 呈现相同的年际波动,均于 2003,2008 及 2012 年出现相对峰值,于 2001,2009 年出现相对谷值。但对研究区全区平均 NDVI 和平均 ET 的趋势分析显示,NDVI 呈显著增加趋势,而 ET 虽然变化趋势未达到显著水平但却呈下降趋势,两者变化率分别为 0.003 单位/a 和 -0.03 mm/a (表 3)。

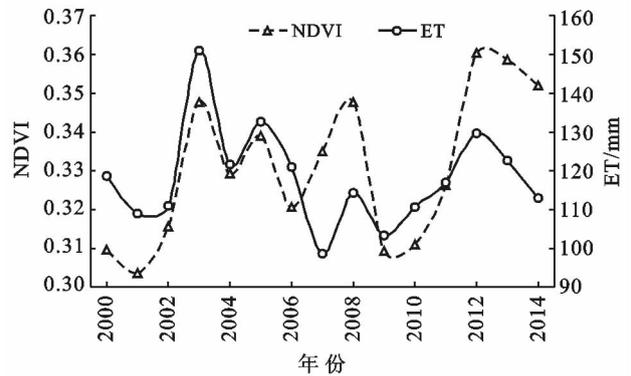


图 1 研究区全区 NDVI 和 ET 年际变化

表 3 研究区全区及不同河段 NDVI 和 ET 变化趋势

河段	NDVI			ET		
	$Z_c$	$B/(\text{单位} \cdot \text{a}^{-1})$	趋势	$Z_c$	$\beta/(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	趋势
上段	3.76**	0.007	极显著增加	1.78	1.91	非显著增加
中段	0.89	0.002	非显著增加	-0.79	-0.48	非显著减少
下段	1.98*	0.004	显著增加	-0.79	-0.52	非显著减少
全区	2.18*	0.003	显著增加	-0.10	-0.03	非显著减少

注: \*\* 表示达到极显著水平,  $p < 0.01$ ; \* 表示达到显著水平,  $p < 0.05$ 。下同。

对于不同河段,上段 NDVI 和 ET 一直为最高,其次为下段,中段一直最低(图 2—3)。不同河段 NDVI 和 ET 大小虽然差异较大,但其年际波动则基本相同,且与全区平均 NDVI 和 ET 年际波动一致。对不同河段 NDVI 和 ET 的变化趋势分析(表 3)发现,3 个河段之中上段不仅植被覆盖最高,其 NDVI 和 ET 变化速率也最大,分别为 0.007 单位/a, 1.91 mm/a,均远高于其他 2 个河段,其中 NDVI 呈显著增加变化趋势,ET 也呈增加趋势,但增加未通过  $\alpha = 0.05$  显著检验;中段植被覆盖最低,其 NDVI 和 ET 变化速率也最小,分别为 0.002 单位/a 和 -0.48 mm/a,其 NDVI 为非显著增加,ET 则为非显著减小;下段 NDVI 和 ET 变化趋势分别为显著增加和非显著减小,其变化量分别为 0.004 单位/a 和 -0.52 mm/a。

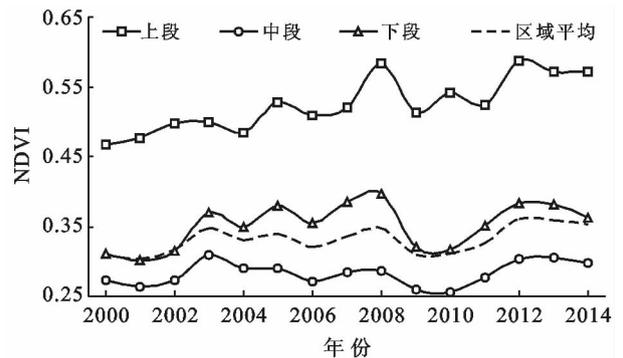


图 2 研究区各河段 NDVI 年际变化

从上述分析可以发现,无论是全区平均还是各河段,其 NDVI 与 ET 呈现几乎一致的年际波动,但除植被覆盖较高的上段 NDVI 与 ET 呈现相同变化趋势外,其他 2 个河段却呈现相反的年际变化趋势,在

一定程度上表明虽然年 ET 总量与 NDVI 存有较高的相关性,但 NDVI 年际变化并非是决定 ET 年际变化的控制因素。

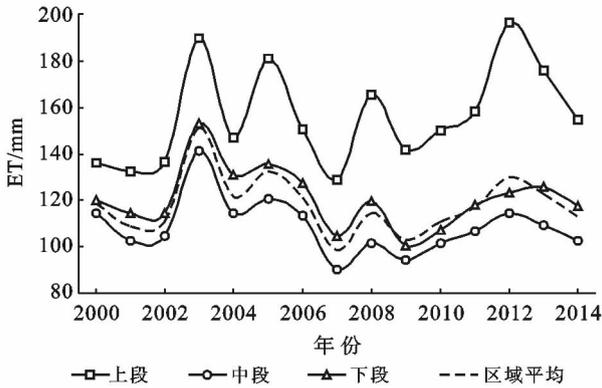


图 3 研究区各河段 ET 年际变化

### 3.3 NDVI 及 ET 变化的空间特征

根据 Mann-Kendall 检验与 Theil-Sen median 趋势分析计算公式,对研究区 NDVI 和 ET 逐像元计算,获得 NDVI 和 ET Mann-Kendall 检验统计量  $Z_c$  值及年际变化速率  $\beta$  值空间分布数据。依据此数据,对 NDVI 和 ET 的变化趋势及变化速率进行分类和划等,统计其比例特征(表 4—6)。

表 4 研究区全区及各河段 NDVI 和 ET 不同变化趋势比例

河段	NDVI				ET			
	显著减少	非显著减少	非显著增加	显著增加	显著减少	非显著减少	非显著增加	显著增加
上段	3.71	22.14	32.88	41.27	2.33	24.32	48.73	24.62
中段	23.94	31.97	26.80	17.29	22.44	57.73	17.63	2.21
下段	8.70	26.73	40.08	24.49	6.78	70.81	20.80	1.61
全区	19.05	29.78	29.04	22.13	17.53	53.04	23.35	6.08

表 5 研究区全区及各河段 NDVI 不同变化速率等级比例

河段	变化速率等级/(单位·a <sup>-1</sup> )				
	<-0.005	-0.005~0	0~0.005	0.005~0.01	>0.01
上段	9.38	15.29	25.50	20.18	29.66
中段	20.05	34.59	24.08	9.37	11.92
下段	11.49	22.56	33.96	14.33	17.66
全区	17.42	30.14	25.20	11.70	15.53

表 6 研究区全区及各河段 ET 不同变化速率等级比例

河段	变化速率等级/(mm·a <sup>-1</sup> )				
	<-0.20	-0.20~0	0~0.20	0.20~0.40	>0.40
上段	4.56	21.11	32.63	23.44	18.26
中段	3.62	75.33	16.89	3.19	0.97
下段	2.55	72.40	21.43	2.96	0.66
全区	3.69	66.58	19.05	6.71	3.97

2000—2014 年 NDVI 和 ET 的变化趋势存在较大的差异。根据表 4 中统计结果,15 a 内全区内 51.17% 区域的 NDVI 有所增加,而 ET 发生增加的区域仅为 29.43%,NDVI 发生减少的比例为 48.83%,ET 发生减少的比例则高达 70.57%。但同时也应该看到,全区绝大部分区域 NDVI 和 ET 的增加或减少并未达到显著水平,其中 NDVI 的比例为 58.82%,而 ET 的比例则为 76.39%。

对于不同河段,各个河段 NDVI 与 ET 的变化趋势的空间分布均存在较大差异。上段是 NDVI 和 ET 增加的集中区域,根据表 4 中的统计结果,其 NDVI 与 ET 增加和减少的面积比例虽相对一致,分别为 74.15% 和 73.35%,25.85% 和 26.65%,但 NDVI 显著增加的比例高达 41.27%,而 ET 的该比例却为 24.62%,远低于 NDVI;同时 NDVI 与 ET 非显著增加的比例也有较大差别,分别为 32.88% 和 48.73%。中段和下段 NDVI 与 ET 变化趋势空间分布的差异均远高于上段,两河段 NDVI 显著增加的比例分别达到 17.29% 和 24.49%,而 ET 显著增加的比例的则仅为 2.21% 和 1.61%,同时,两个河段 NDVI 和 ET 非显著减少和显著减少的差异也很大,而显著减小的差异则均较为一致。

对于研究区 NDVI 和 ET 变化率的空间特征,从表 5—6 可知,研究区 NDVI 的变化率主要介于 -0.005~0.005 单位/a,其比例为 55.34%,变化率 < -0.005 单位/a 及变化率 > 0.005 单位/a 的比例分别为 17.42% 和 27.23%。研究区 ET 的变化率主要介于 -0.20~0 mm/a,其比例为 66.58%,变化率介于 0~0.20 mm/a 及变化率 > 0.20 mm/a 的比例分别达到了 19.05% 和 10.68%,而 ET 变化率 < -0.20 mm/a 的比例仅为 3.69%;不同河段,上段是 NDVI 及 ET 增加速率最快的集中区域,其 NDVI 变化速率 > 0.005 mm/a 和 ET 变化速率 > 0.20 mm/a 的比例分别达到了 49.84% 和 41.70%。中段 NDVI 和 ET 减少的集中区域,其 NDVI 变化速率 < -0.005 单位/a 的比例达到了 20.05%,其 ET 变化速率主要介于 -0.20~0 mm/a,比例为 75.33%。下段 NDVI 主体表现为增加,

呈增加的比例达到了 65.95%,ET 主体表现为减少,减少速率主要介于 $-0.20\sim 0$  mm/a,其比例为 72.40%。

## 4 讨论

### 4.1 植被覆盖与蒸散发关系

利用 2001—2015 年研究区 NDVI 和 ET 的 15 a 平均空间数据以及其变化率空间数据建立其散点图(图 4—5),并将 NDVI 和 ET 变化率按 0.01 个单位及 0.002 5 单位/a 的间隔划分区间,计算每个区间内所有像素点 ET 平均值和 ET 变化率的平均值,绘制 ET 及 ET 变化率随 NDVI 及 NDVI 变化率的变化曲线和其趋势线,分析 NDVI 与 ET 及两者变化的相关关系。

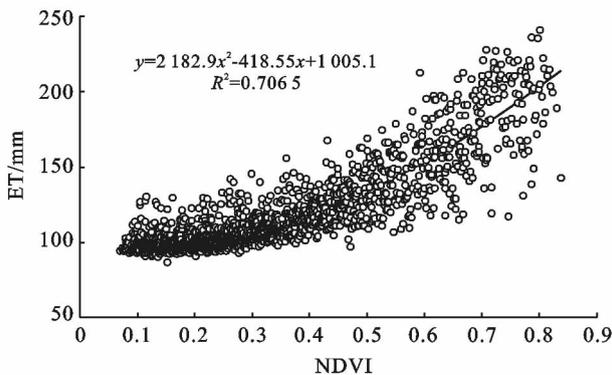


图 4 研究区 15 a 平均 NDVI 和平均 ET

对于研究区 ET 与 NDVI 的关系,由图 4 可知,研究区 ET 随 NDVI 的增加逐步增加,两者拟合曲线的  $R^2$  达到了 0.71,同时经相关分析,两者相关系数也达到 0.81( $p=0.001$ ),即植被覆盖高的区域也是 ET 的高值区域,这也与 NDVI 和 ET 的空间分布格局一致,也证明了植被覆盖是决定研究区 ET 空间分

布的重要因素。此外,袁国富等<sup>[26]</sup>通过对塔里木河干流下游(大西海子—台特玛湖段)涡度相关观测数据的分析也表明,蒸散的空间格局受到植被叶面积指数的控制,植被盖度越大,蒸散量越大,与本文的研究结果一致。

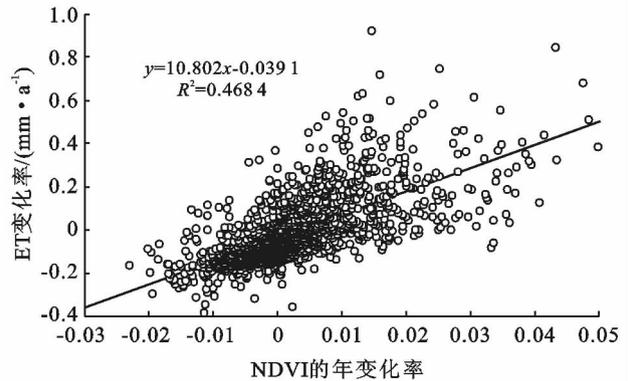


图 5 研究区 NDVI 和 ET 变化率

而对于 NDVI 与 ET 年际变化的关系,从图 5 中可以看出,ET 变化率随 NDVI 变化率的增加而逐步增加,但两者拟合关系远低于图 4 中 NDVI 与 ET 的拟合关系;同时相关分析表明,研究区 2001—2014 年全区平均年 NDVI 和年 ET 的相关系数为 0.49( $p=0.067$ ),NDVI 变化速率与 ET 变化速率的相关系数为 0.59( $p=0.001$ ),均低于图 4 中 NDVI 与 ET 的相关系数。此外,根据表 7 中统计结果,研究区 NDVI 和 ET 变化趋势一致的面积比例为 69.08%,变化趋势相反的面积比例为 30.92%,其中 26.73%的区域为共同增加,42.35%为共同减少,26.35%区域 NDVI 呈增加趋势而 ET 则呈减少趋势,4.57%区域 NDVI 呈降低趋势而 ET 呈增加趋势。可见,研究区植被覆盖并非是 ET 年际变化的决定因素。

表 7 研究区 ET 变化率等级与 NDVI 变化率等级比例矩阵

ET 变化率等级	NDVI 变化率等级				
	$< -0.005$	$-0.005\sim 0$	$0\sim 0.005$	$0.005\sim 0.01$	$> 0.01$
$< -0.20$	2.58	0.60	0.35	0.11	0.08
$-0.20\sim 0$	13.65	25.52	17.28	4.84	3.69
$0\sim 0.20$	0.98	2.93	5.95	4.63	6.12
$0.20\sim 0.40$	0.15	0.38	1.29	1.46	3.55
$> 0.40$	0.06	0.07	0.44	0.73	2.56

### 4.2 ET 年际变化影响因素

张巧凤等<sup>[27]</sup>通过对锡林郭勒草原 ET 年际变化分析表明,ET 的年际变动态是气候及植被覆盖等多种因素共同作用的结果,ET 变化与降水量、NDVI 和水汽压呈极显著正相关关系,而与气温呈负相关关系;赵燊等<sup>[28]</sup>对山东省 ET 的研究也表明 ET 的时空

变化与诸多气象因子相关,其中与降水及温度的关系最为密切;代超<sup>[29]</sup>,蹇东南等<sup>[30]</sup>通过对塔里木河整个流域长时间序列的数据分析表明,除了气候变化因素外,径流量及耕地面积的增加也是该区域 ET 时空变化的重要因素。基于前人研究,本文对 ET 与年平均气温、年平均水汽压、年降水量及年径流量进行了相

关分析,发现相对其它要素,ET 年际变化与降水和气温相关性更好(表 8)。

表 8 塔里木河 ET 与各要素的相关系数及其  $p$  值

项目	径流	降水量	水汽压	气温	NDVI
相关系数	0.34	0.67**	0.44	-0.64*	0.49
$p$ 值	0.209	0.007	0.097	0.010	0.067

刘波等<sup>[31]</sup>的研究认为,对于干湿条件不同的气候区,影响 ET 变化的主导因子存在明显差异,而对于中国西北干旱区,影响 ET 变化的主要因子是供水条,蹇东南等<sup>[30]</sup>的研究也发现出山口径流量减少是致使 1997—2013 年塔里木河流域 ET 减少的重要因素,然而代超<sup>[29]</sup>的研究表明塔里木河流域 ET 变化是灌溉引水及气候变化共同作用的结果。同时,本文分析发现 ET 与径流量相关系数却仅为 0.34 ( $p = 0.209$ ),相关性差,除此之外,自 2000 年开始,塔里木河实施综合规划管理<sup>[32]</sup>,在耕地扩张、生态闸截水/调水及补给地下水等人为干扰因素的影响下,塔里木河下垫面特征及水资源的时空分布发生较大改变<sup>[33]</sup>,必将在很大程度上改变 ET 与植被、径流及气象等因素的时空匹配特征,因此量化人为因子的变化特征,分析其对 ET 的贡献率将一加深对塔里木河干流 ET 时空变化规律的认识。

## 5 结论

本文利用 MODIS 的 ET 和 NDVI 数据,及 Mann-Kendall 检验与 Theil-Sen median 趋势分析方法,选择阿拉尔—大西海子段作为代表区域,分析了 2000—2014 年塔里木河干流植被覆盖及 ET 时空变化规律,并探讨了两者的相互关系及 ET 变化的影响因素,得出如下结论:

(1) 研究区多年平均 NDVI 及 ET 分别为 0.33, 118.41 mm; 全区 69.34% 的面积 NDVI < 0.40, 69.50% 的面积 ET < 120 mm。空间上 ET 及 NDVI 空间分异总体一致,均表现为上段 > 下段 > 中段。

(2) 研究区 NDVI 与 ET 平均变化趋势相反,NDVI 显著增加 ( $Z_c > 1.96$ ),而 ET 则表现为非显著下降 ( $-1.96 < Z_c < 0$ )。3 个河段之中,上段 NDVI 和 ET 变化速率最大,且表现为增加,中段和下段变化速率均较小,且变化趋势相反。

(3) 研究区 NDVI 与 ET 的变化趋势及变化速率均存在较大空间差异,全区 NDVI 发生降低的比例为 48.83%,而 ET 的该比例则高达 70.57%; 全区 NDVI 变化速率主要介于  $-0.005 \sim 0.005$  单位/a, ET 的变化速率主要介于  $-0.20 \sim 0$  mm/a; NDVI 及 ET 增加

的区域集中分布在上段,而 NDVI 和 ET 减少的区域则集中分布在中段。

(4) ET 的空间分布受植被覆盖控制,但在年际变化上,ET 与 NDVI 相关性较低,且全区 30.92% 的面积 NDVI 和 ET 呈现相反的变化趋势。相对于 NDVI,径流及水汽压,ET 的年际变化与气温和降水相关性更好。

## [参 考 文 献]

- [1] 陈曦,罗格平. 干旱区绿洲生态研究及其进展[J]. 干旱区地理,2008,31(4):487-495.
- [2] 张帅普,邵明安,李丹凤. 绿洲—荒漠过渡带土壤蓄水量的空间分布及其时间稳定性[J]. 应用生态学报,2017,28(8):2509-2516.
- [3] 熊宇斐,张广朋,陈超群,等. 基于水量变化的塔里木河统一管理成效评价[J]. 自然资源学报,2016,31(11):1806-1816.
- [4] 张青青,徐海量,樊自立,等. 北疆玛纳斯河流域人工绿洲演变过程及其特点[J]. 冰川冻土,2012,34(1):72-80.
- [5] 魏轩,周立华,陈勇,等. 民勤绿洲水资源利用的综合效益评价[J]. 冰川冻土,2015,37(6):1688-1696.
- [6] 路倩倩. 中国东部南北样带森林生态系统 T/ET 时空格局研究[D]. 北京:中国科学院大学,2015.
- [7] Kim H W, Hwang K, Mu Qiaozhen, et al. Validation of MODIS16 global terrestrial evapotranspiration products in various climates and land cover types in Asia[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2012,16(2):229-238.
- [8] 姜艳阳,王文,周正昊. MODIS MOD16 蒸散发产品在中国流域的质量评估[J]. 自然资源学报,2017,32(3):517-528.
- [9] Tian Fen, Fensholt R, Verbesselt J, et al. Evaluating temporal consistency of long-term global NDVI datasets for trend analysis[J]. Remote Sensing of Environment, 2015,163:326-340.
- [10] 闫俊杰,乔木,周宏飞,等. 基于 MODIS/NDVI 的新疆伊犁河谷植被变化[J]. 干旱区地理,2013,36(3):512-519.
- [11] Jang Keunchang, Kang Sinkyu, Lim Yura, et al. Monitoring daily evapotranspiration in Northeast Asia using MODIS and a regional Land Data Assimilation System[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013,118(23):12927-12940.
- [12] 邓兴耀,刘洋,刘志辉,等. 中国西北干旱区蒸散发时空动态特征[J]. 生态学报,2017,37(9):2994-3008.
- [13] 阿迪来·乌甫,玉素甫江·如素力,热伊莱·卡得尔,等. 基于 MODIS 数据的新疆地表蒸散量时空分布及变化趋势分析[J]. 地理研究,2017,36(7):1245-1256.
- [14] 郭继凯,吴秀芹,董贵华,等. 基于 MODIS/NDVI 的塔里木河流域植被覆盖变化驱动因素相对作用分析[J]. 干旱区研究,2017,34(3):621-629.
- [15] 葛静,孟宝平,杨淑霞,等. 基于 UAV 技术和 MODIS

- 遥感数据的高寒草地盖度动态变化监测研究:以黄河源东部地区为例[J]. 草业学报, 2017, 26(3): 1-12.
- [16] 黄强, 赵冠南, 郭志辉, 等. 塔里木河干流水资源优化配置研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34(4): 38-46.
- [17] 邓晓雅, 杨志峰, 龙爱华. 基于流域水资源合理配置的塔里木河流域生态调度研究[J]. 冰川冻土, 2013, 35(6): 1600-1609.
- [18] 罗敏, 古丽·加帕尔, 郭浩, 等. 2000—2013年塔里木河流域生长季 NDVI 时空变化特征及其影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2017, 32(1): 50-63.
- [19] 白元, 徐海量, 凌红波, 等. 塔里木河干流区天然植被的空间分布及生态需水[J]. 中国沙漠, 2014, 34(5): 1410-1416.
- [20] 刘新华, 徐海量, 凌红波, 等. 塔里木河下游生态需水估算[J]. 中国沙漠, 2013, 33(4): 1198-1205.
- [21] Mu Qiaozhen, Zhao Maosheng, Running S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(8): 1781-1800.
- [22] 李红军, 郑力, 雷玉平, 等. 基于 EOS/MODIS 数据的 NDVI 与 EVI 比较研究[J]. 地理科学进展, 2007, 26(1): 26-32.
- [23] 林金堂, 冯学智, 肖鹏峰, 等. 基于 MODIS 数据的玛纳斯河山区雪盖年际波动特征研究[J]. 干旱区地理, 2011, 34(6): 975-982.
- [24] 潘彬, 韩美, 倪娟. 黄河下游近 50 a 径流量变化特征及影响因素[J]. 水土保持研究, 2017, 24(1): 122-127.
- [25] 闫俊杰, 闫敏, 崔东, 等. 近 55 a 新疆伊犁河谷气温和降水变化趋势分析[J]. 水电能源科学, 2017, 35(10): 13-16, 12.
- [26] 袁国富, 罗毅, 邵明安, 等. 塔里木河下游荒漠河岸林蒸散发规律及其关键控制机制[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(5): 695-706.
- [27] 张巧凤, 刘桂香, 于红博, 等. 基于 MOD16 A2 的锡林郭勒草原近 14 a 的蒸散发时空动态[J]. 草地学报, 2016, 24(2): 286-293.
- [28] 赵桑, 陈少辉. 基于台站和 MOD16 数据的山东省蒸散发及潜在蒸散发时空变化[J]. 地理科学进展, 2017, 36(8): 1040-1047.
- [29] 代超. 气候变化和人类活动对塔里木河流域蒸散发影响分析[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [30] 蹇东南, 李修仓, 陶辉, 等. 基于互补相关理论的塔里木河流域实际蒸散发时空变化及影响因素分析[J]. 冰川冻土, 2016, 38(3): 750-760.
- [31] 刘波, 肖子牛, 马柱国. 中国不同干湿区蒸发皿蒸发和实际蒸发之间关系的研究[J]. 高原气象, 2010, 29(3): 629-636.
- [32] 郭辉. 2000—2013年塔里木河干流植被覆盖度时空变化特征及影响因子分析[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- [33] 张沛, 徐海量, 杜清, 等. 基于 RS 和 GIS 的塔里木河干流生态环境状况评价[J]. 干旱区研究, 2017, 34(2): 416-422.

(上接第 247 页)

- [4] Sui Dianzhi. GIS-based urban modeling: Practices, problems and prospects[J]. International Journal of Geographical Information Science, 1998, 12(7): 651-671.
- [5] Verburg P H, Berkel D B V, Doorn A M V, et al. Trajectories of land use change in Europe: A model-based exploration of rural futures[J]. Landscape Ecology, 2010, 25(2): 217-232.
- [6] Langpap C, Hascic I, Wu Junjie. Protecting watershed ecosystems through targeted local land use policies[J]. American Journal of Agricultural Economics, 2008, 90(3): 684-700.
- [7] 吴得文, 毛汉英, 张小雷, 等. 中国城市土地利用效率评价[J]. 地理学报, 2011, 66(8): 1111-1121.
- [8] 梁流涛, 赵庆良, 陈聪. 中国城市土地利用效率空间分异特征及优化路径分析: 基于 287 个地级以上城市的实证研究[J]. 中国土地科学, 2013, 27(7): 48-54.
- [9] 杨清可, 段学军, 叶磊, 等. 基于 SBM-Undesirable 模型的城市土地利用效率评价: 以长三角地区 16 城市为例[J]. 资源科学, 2014, 36(4): 712-721.
- [10] 王雨晴, 宋戈. 城市土地利用综合效益评价与案例研究[J]. 地理科学, 2006, 26(6): 7143-7148.
- [11] 孟成, 卢新海, 彭明军, 等. 基于土地税收的土地利用效率计算方法研究[J]. 中国土地科学, 2016, 30(7): 56-63.
- [12] 黄和平, 彭小琳. 脱钩视角下城市土地利用效率变化与提升策略: 以南昌市为例[J]. 资源科学, 2016, 38(3): 493-500.
- [13] 崔玮, 苗建军, 杨晶. 基于碳排放约束的城市非农用地生态效率及影响因素分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(7): 63-69.
- [14] 宋吉涛, 宋吉强, 宋敦江. 城市土地利用结构相对效率的判别性分析[J]. 中国土地科学, 2006, 20(6): 9-15.
- [15] 冯广京, 朱道林, 林坚, 等. 2016 年土地科学研究重点进展评述及 2017 年展望[J]. 中国土地科学, 2017, 31(1): 3-20.
- [16] 张明斗, 莫冬燕. 城市土地利用效益与城市化的耦合协调性分析: 以东北三省 34 个地级市为例[J]. 资源科学, 2014, 36(1): 8-16.
- [17] 周来友, 仇童伟, 周冬, 等. 丘陵山区劳动力老龄化对土地利用效率的影响: 基于直接效应和间接效应的识别[J]. 中国土地科学, 2015, 29(10): 35-41.