

任强,龙爱华,杨永民,等.近20年塔里木河干流生态环境变化遥感监测分析[J].水利水电技术(中英文),2021,52(3):103-111.

REN Qiang, LONG Aihua, YANG Yongmin, et al. Analysis on remote sensing monitoring of eco-environment variation of main stream basin of Tarim River in recent 20 years [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(3): 103-111.

# 近20年塔里木河干流生态环境变化遥感监测分析

任强<sup>1</sup>, 龙爱华<sup>2</sup>, 杨永民<sup>2</sup>, 刘静<sup>2</sup>

(1. 新疆维吾尔自治区水资源中心, 新疆 乌鲁木齐 830000;

2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

**摘要:** 针对塔里木河流域综合治理后生态环境的变化状况及植被的恢复状况等热点问题, 基于遥感时空变化分析方法从土地利用、地表水体和植被覆盖度的时空变化方面分析了近20年来塔里木河干流生态环境的变化状况。结果表明: (1) 塔里木河干流土地利用受到人类活动的影响显著, 自2000年以来, 塔里木河干流耕地面积增加显著, 净增2 229 km<sup>2</sup>, 草地面积整体下降, 萎缩3 157 km<sup>2</sup>; (2) 综合治理以来, 下游河段2009—2018时段水体出现频率明显高于2000—2008时段, 水体出现频率提高约15%; (3) 2000年以来, 塔里木河流域的植被覆盖度持续增加, 特别是下游河段植被覆盖度增加明显, 覆盖度增加18%。但中、上游流域的植被覆盖度的增加趋势主要贡献来源于耕地, 中上游地区耕地的增加仍会对塔里木河流域的生态保护和恢复造成一定的影响。

**关键词:** 塔里木河流域; 遥感监测; 植被覆盖度; 土地利用; 水资源; 干旱; 人类活动; 气候变化

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2021.03.012

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: X87

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2021)03-0103-09



## Analysis on remote sensing monitoring of eco-environment variation of main stream basin of tarim river in recent 20 years

REN Qiang<sup>1</sup>, LONG Aihua<sup>2</sup>, YANG Yongmin<sup>2</sup>, LIU Jing<sup>2</sup>

(1. Water Resource Center of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830000, Xinjiang, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** Aiming at the hotspot issues, i. e. the status of the eco-environment variation, the status of the vegetation restoration, etc. after the comprehensive improvement of Tarim River Basin, the changing status of the eco-environment of the main stream basin of Tarim River in recent 20 years is analyzed from the aspect of land-use, surface water and the vegetation coverage on the basis of the remote sensing. The results show that (1) the land-use within the main stream of Tarim River is significantly influenced by the human activities, and the cultivated area is remarkably increased with the net increment of 2 229 km<sup>2</sup>, while the grassland area is generally decrease with the decrement of 3 157 km<sup>2</sup>; (2) after the comprehensive improvement, the occurring frequency of water body within the period of 2009—2018 in the lower river reach is obviously higher than that in the

收稿日期: 2020-09-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0404301, 2017YFC1502406, 2017YFC0405803, 2016YFA0601602); 中国水科院科研专项(J20145B032017); 新疆维吾尔自治区流域规划委员会重大咨询项目(403-1005-YBN-FT61-2; 403-1005-YBN-FT61-7)

作者简介: 任强(1986—), 男, 工程师, 学士, 主要从事新疆水利规划、水资源管理研究工作。E-mail: 402655708@qq.com

通信作者: 龙爱华(1976—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事干旱区社会水循环、水文及水资源配置研究。E-mail: ahleng@iwhr.com

period of 2000—2008, for which the occurring frequency of water body is increased about 15%; (3) since 2000, the vegetation coverage within the main stream of Tarim River Basin is continuously increased, especially the obvious increase of vegetation coverage in the lower reach with the increment of the coverage of 18%. However, the vegetation coverage increasing trends of the upper and the lower reaches are mainly contributed by cultivated land, while the increases of the cultivated land areas in the upper and the lower reaches are still to make certain influences on the protection and restoration of the main stream basin of Tarim River.

**Keywords:** Tarim River Basin; remote sensing monitoring; vegetation coverage; land-use; water resources; drought; human activities; climate change

## 0 引 言

塔里木河地处塔克拉玛干沙漠北缘,是我国最长的内陆河流<sup>[1-2]</sup>。塔里木河两岸分布有世界上面积最大的以胡杨林为主体的荒漠河岸林植物群落,是抵御风沙、抑制沙化、维护区域生态平衡、保护生物多样性以及保障绿洲农牧业生产的重要屏障<sup>[3]</sup>。从上世纪 50 年代开始,由于塔里木河流域水土资源的无序开发和不合理利用,流域生态环境严重恶化,塔里木河出现下游河道断流、湖泊干涸、荒漠河岸林衰败、土地沙化等一系列严重的生态环境问题<sup>[4-5]</sup>。为应对塔河流域水资源的不合理利用导致的生态环境严重恶化问题,2001 年国务院批复实施《塔里木河近期综合治理规划》,启动了塔里木河流域综合治理工程,截至 2018 年,综合治理工程已进行了 18a,总投资达 100 多亿元<sup>[6]</sup>。塔河综合治理工程是世界范围内生态修复的稀有案例和人为干预条件下生态修复的典型实例<sup>[7]</sup>,塔里木河近期综合治理工程实施以来,塔里木河生态环境的变化状况及植被的恢复状况等热点是国家和地方政府关注的焦点<sup>[8-9]</sup>。

卫星遥感技术具有大范围、动态、客观准确等技术优势,是土地利用、生态环境变化监测的重要手段。在全球尺度的植被变化分析方面,SONG 等<sup>[10]</sup>利用 35 年的高级甚高分辨率辐射计(AVHRR)的卫星资料分析全球植被覆盖度的变化情况,结果表明全球的森林覆盖呈现增加趋势,相应的亚洲农业耕种地区的裸地覆盖正在相应减少。我国是全球气候变化的敏感区和影响显著区,中国气象局气候变化中心发布《中国气候变化蓝皮书(2020)》显示,2000—2019 年,中国年平均归一化差植被指数(NDVI)呈显著的上升趋势,全国整体的植被覆盖稳定增加,呈现变绿趋势,我国生态气候总体趋好,但区域生态环境不稳定性加大。许玉凤等<sup>[11]</sup>使用长时间序列植被指数数据分析了新疆植被覆盖的时空变化,结果表明 1982—2013 年间植被改善面积大于退化面积,绿洲农田的

覆盖度增加明显。

塔里木河是新疆南部民众赖以生存的“母亲河”,其生态环境的时空演变及塔河近期综合治理的效果备受关注。在土地利用变化方面,张继等<sup>[12]</sup>以 Landsat 卫星影像为主要信息源,通过解译数据分析了新疆塔里木河流域 1990—2015 年土地利用变化特征,结果显示耕地的持续扩张导致流域内草地和水体斑块个数成倍增加,斑块破碎化程度进一步加剧。ZHANG 等<sup>[13]</sup>基于 MODIS 植被指数分析了塔里木河中游的景观格局的变化,并构建了景观生态风险指数对生态环境状况进行了评估。在分析塔河近期综合治理效果方面,朱长明等<sup>[14]</sup>利用密集时间序列的 MODIS 数据对塔里木河下游的植被进行监测,谭克龙等<sup>[15]</sup>利用遥感数据对塔河流域治理前后主要生态要素,特别是干流绿色走廊带植被和耕地变化进行了动态监测和分析,结果均表明生态输水以来塔河下游植被覆盖度总体上呈现增加趋势,干流生态环境有所好转。刘桂林等<sup>[16]</sup>利用中巴资源卫星 CCD 影像对生态输水前后塔河下游植被景观格局时空特征进行分析,结果表明河道附近植被景观优势度较大,植被恢复较好;白元等<sup>[17]</sup>对塔河干流荒漠河岸林空间分布的研究也得出相似的结论。廖淑敏等<sup>[18]</sup>以塔里木河第 12~18 次生态输水为例,采用经验统计模型和克里金插值法分析了输水前后塔里木河下游地下水埋深和夏季归一化差异植被指数(NDVI)的时空变化,结果表明 NDVI 与多年累积输水量呈显著正相关关系。除此以外,基于遥感数据的塔河流域湖泊生态<sup>[19]</sup>、绿洲地表热环境<sup>[20]</sup>等其他生态要素的研究也逐渐受到学者的关注,遥感数据已经成为流域生态研究中的关键支撑。

塔河生态恢复状况、流域综合治理效果面临的生态环境恶化风险是国内外关注的焦点。以往的塔河流域生态环境变化的遥感变化监测研究工作多集中在土地利用和植被指数的时序分析单一分析上。针对传统研究存在不足,本文利用遥感技术手段,基于时

间序列分析方法从土地利用、地表水体和植被覆盖度的时空变化三个方面对塔里木河流域和植被覆盖度的时空变化进行监测,综合分析近20年来塔里木河生态环境的变化状况,分析流域综合治理后生态环境的恢复状况及仍然面临的风险,为塔里木河流域生态环境的治理及高质量发展提供参考。

## 1 研究区域概况

塔里木河环绕塔克拉玛干沙漠,干流全长1321 km,是我国最大的内陆河。塔里木河分为上、中和下游3个区段,从其中肖夹克至英巴扎为上游段,河长495 km;英巴扎至恰拉为中游段,河长398 km;恰拉至台特玛湖为下游段,河长428 km(见图1)。塔里木河干流是典型的干旱区内陆河,干流不产流,属于纯耗散型河流。塔里木河远离海洋,地处中纬度欧亚大陆腹地,属暖温带干旱沙漠性气候,年降水量在50 mm以下,年蒸发潜力2778 mm。降水稀少、蒸发强烈,四季气候悬殊、温差大,多风沙、浮尘天气,日照时间长,光热资源丰富。塔河干流的主要土壤类型为盐化草甸土、盐土、绿洲潮土、胡杨林土、沼泽土和风沙土等。

植被分为乔木、灌木和草本植物,其中乔木主要是胡杨,灌木主要有柽柳、铃铛刺、白刺等,草本植物主要有芦苇、大花罗布麻、疏叶骆驼刺等。塔河河道两侧水分条件较好,植被生长良好,形成了以胡杨林为主的天然绿色屏障,对阻止两大沙漠的合拢,具有重要的生态意义和战略意义<sup>[7]</sup>。

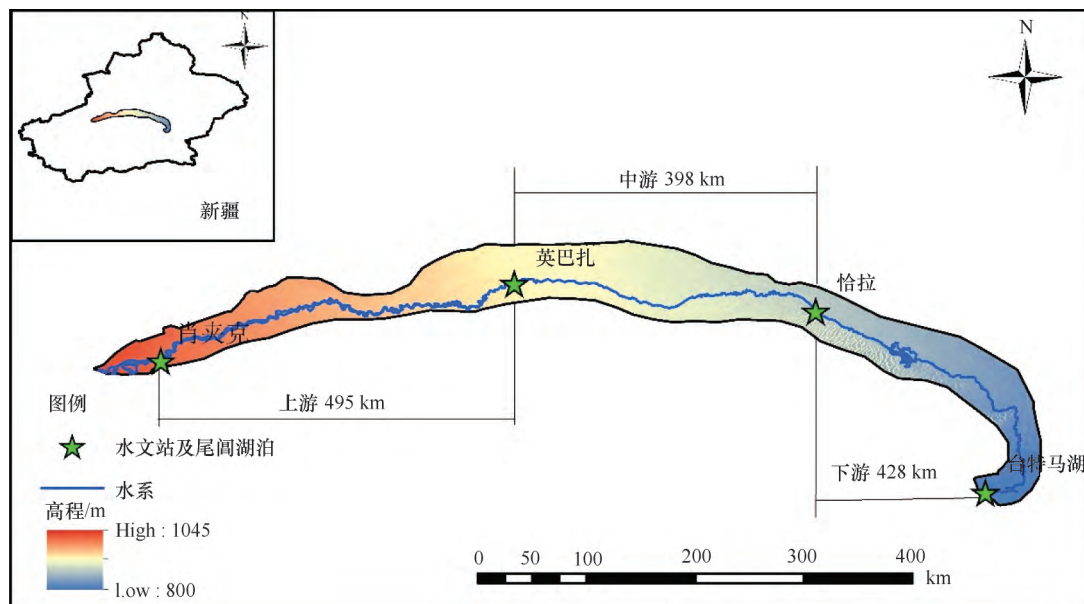


图1 塔里木河干流示意

Fig.1 Map of the mainstream of Tarim river

## 2 遥感数据源及研究方法

### 2.1 遥感数据源

#### 2.1.1 土地利用土地覆被遥感数据

土地利用土地覆被遥感数据来源于中科院地理所中国土地利用现状遥感监测数据库(<http://www.resdc.cn/>),数据集以2000年、2005年、2010年、2015年Landsat TM/ETM遥感影像为底图,基于中科院土地利用覆盖分类体系利用Erdas/ArcGIS/ENVI等专业软件通过人工目视解译生成,在矢量数据的基础上栅格化生成的30 m分辨率栅格数据。为减少解译者主观因素的影响,土地利用分类各工序过程质量按要求进行过程检查,并对获取的土地利用数据产品进行空间抽样检查,验证土地利用解译的正确性,对不合理的分类结果进行重新解译。土地利用类型包括耕地(包括水田、旱地)、林地(包括有林地、灌木林地、疏林地)、草地(包括高覆盖草地、中覆盖草地、低覆盖草地)、水域(包括河渠、湖泊、水库坑塘、永久性冰川雪地、滩涂、滩地)、城乡工矿居民用地(包括城镇用地、农村居民用地、其它建设用地)、其他未利用地(沙地、戈壁、盐碱地、沼泽地、裸土地、裸岩石质地)等6个一级土地类型及25个二级土地类型<sup>[21]</sup>。中国土地利用现状遥感监测数据库是目前我国精度最高的土地利用遥感监测数据产品,已经在国家土地资源调查、水文、生态研究中发挥着重要作用。

#### 2.1.2 地表水域数据集

地表水域数据集来源于欧洲联合研究中心(Joint Research Centre of European Commission, JRC)制作的全球水域数据集(global surface water, GSW, <https://global-surface-water.appspot.com/>)。这套地表水域数据集是由Pekel等基于Google earth Engine平台,利用覆盖全球的Landsat系列

卫星遥感影像,使用地表水体专家分类系统自动提取,生成了1984—2015年的全球水体分布<sup>[22]</sup>。数据集包括水体月分布、年分布、最大水面分布、水体再现频率分布等多种类型的数据。GSW数据集是全球范围内基于统一分类算法获得的高精度水体分布数据集。数据格式为栅格数据类型,可回溯地表水体历史变化的情况,这些地图面向所有用户免费开放。

### 2.1.3 植被覆盖度数据集

植被覆盖度数据来源于美国国家航空航天局(NASA)基于第6版算法计算发布的EOS/MODIS MOD44Bv006植被覆盖度产品(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/products/MOD44B/>)集。MOD44B产品使用MODIS 1-7可见光波段和31和32热红外波段,利用线性回归树算法估算像元内植被覆盖度的面积比率。MOD44B产品包括林木覆盖度、灌丛草本覆盖度和非植被覆盖度三个图层,产品分辨率为250 m。本文选用塔河2000—2018年的MOD44B产品数据开展植被覆盖度的变化分析。

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 土地利用变化分析方法

土地利用转移矩阵可直观反映土地利用类型的相互转变以及变化方向,并定量突出土地利用的变化去向和转化来源,揭示土地利用模式的时空演变过程<sup>[12-23]</sup>。公式如下

$$U = \begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} & \cdots & U_{1(n-1)} & U_{1n} \\ U_{12} & U_{12} & \cdots & U_{2(n-1)} & U_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ U_{(n-1)1} & U_{(n-1)2} & \cdots & U_{(n-1)(n-2)} & U_{(n-1)n} \\ U_{n1} & U_{n2} & \cdots & U_{n(n-1)} & U_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $U$ 为土地利用类型面积; $U_{ij}$ 为研究时段初期 $i$ 土地利用类型到研究时段末期转变为 $j$ 土地利用类型的面积。

### 2.2.2 水域时空变化分析方法

水域时空变化分析使用水体再现频率变化法进行分析。由于1984—2000年JRC水域数据时空连续性存在缺陷,采用2000—2018年的地表水域数据进行分析。水体再现频率变化分析采用2000—2008年和2009—2018两个时段的水体出现频率变化,以揭示塔里木河水域的变化。

$$OCC = OC_{09-18} - OC_{00-08} \quad (2)$$

式中, $OCC$ 为水体出现频率变化; $OC_{09-18}$ 为2009至

2018年的水体再现频率; $OC_{00-08}$ 为2000—2008年的水体再现频率。水体再现频率的计算使用JRC水域数据集为基础,计算如下

$$OC = \frac{N_{water}}{N_{all}} \quad (3)$$

式中, $OC$ 为水体出现频率; $N_{water}$ 为时段内像元被水体覆盖的次数; $N_{all}$ 为时段内所有有效的观测值。

### 2.2.3 植被覆盖度时空变化分析方法

植被覆盖度的空间变化分析采用时段首末年份的覆盖度的差值

$$VFC_{diff} = VFC_{2018} - VFC_{2000} \quad (4)$$

式中, $VFC_{diff}$ 为时段植被覆盖度的变化值; $VFC_{2018}$ 为时段末的植被覆盖度,本文为2018年; $VFC_{2000}$ 为时段初的植被覆盖度,本文为2000年。

植被覆盖度的时空变化采用线性回归模型进行计算分析

$$y = \beta_0 + \beta_1 t + \varepsilon \quad (5)$$

式中, $y$ 为植被覆盖度的时间序列; $t$ 为时间; $\beta_0$ 和 $\beta_1$ 分别为回归曲线的截距和斜率; $\varepsilon$ 为随机误差。

本文对MOD44B产品中的林木覆盖度、灌丛草本覆盖度求和获得逐个像元的植被覆盖度,对其进行线性回归分析,以反映植被覆盖度的时空变化状况。使用线性回归模型的相关系数来反映趋势线的显著程度。

## 3 结果分析

### 3.1 土地利用时空变化分析

从地类空间分布特征来看(见图2),耕地主要分布在干流上游,或零散分布于河流水域两侧,2000—2005年上游耕地显著增加,此后13年间中上游耕地面积增加明显;2000—2005年塔里木河干流尾间湖泊台特马湖水域面积增加明显,2005—2015年台特马湖湖面面积较稳定,此后3年湖面萎缩明显。2000—2018年塔里木河干流区六种土地利用方式如表1所列,其中未利用地包括荒漠、沙漠、裸地及盐碱地,从分布面积来看,六种地类中草地、未利用地占比较大,分别占区域总面积的32.28%、36.54%,为区域主导性地类。近20年来,区域地类结构发生显著变化,耕地持续上升,净增2229 km<sup>2</sup>,草地整体下降,萎缩3157 km<sup>2</sup>,林地先减后增,净增190 km<sup>2</sup>,水域先增后减,净增-241 km<sup>2</sup>,建设用地持续上升,净增39 km<sup>2</sup>,未利用地先减后增,净增941 km<sup>2</sup>。值得注意的是,2015—2018年区域地类变化特征较此前15年存在明显的差异,其中林地、未

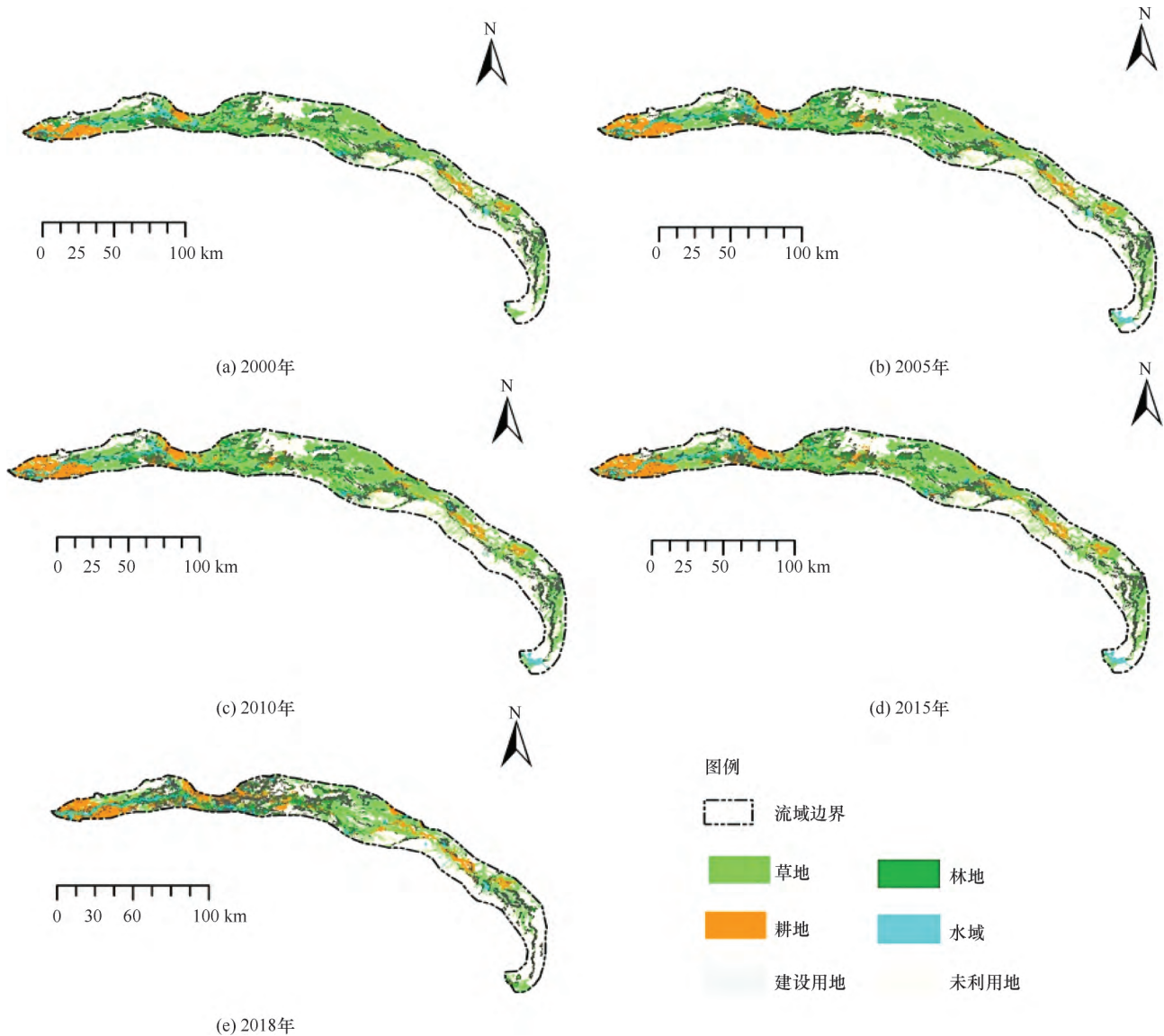


图 2 近 20 年来塔里木河干流土地利用

Fig. 2 The land use and land cover in the mainstream of Tarim river in recent 20 years

利用地变化趋势均在 2015 年之后发生转折, 由下降趋势转变为上升趋势; 耕地、建设用地自 2015 年后扩张速度明显增加; 相反, 水域、草地萎缩速率加快。

表 1 2000—2018 年土地利用情况  $\text{km}^2$

Table 1 The statistics of land use in the mainstream of Tarim river from 2000-2018  $\text{km}^2$

	2000	2005	2010	2015	2018
耕地	1 783	2 431	2 655	3 157	4 012
草地	13 350	12 976	13 125	12 841	10 193
林地	4 461	4 279	4 056	3 959	4 651
水域	1 334	1 415	1 286	1 272	1 094
建设用地	50	61	59	65	89
未利用地	10 597	10 429	10 395	10 297	11 538

从土地利用转移去向和来源特征来看(见表 2), 2000—2010 年主要是其它地类向耕地的转变, 其中草地、林地和未利用地向耕地的转变面积分别为  $425.51 \text{ km}^2$ 、 $323.82 \text{ km}^2$ 、 $116.19 \text{ km}^2$ , 扣除耕地向其它地类转变面积, 耕地净增加  $872.13 \text{ km}^2$ 、草地净增加  $-225.26 \text{ km}^2$ 、林地净减  $-405.51 \text{ km}^2$ 、未利用地净增加  $-201.64 \text{ km}^2$ ; 2010—2018 年间土地利用类型转变剧烈, 整体呈现草地的大幅度减少和耕地的大幅度增加, 其中主要为草地和水域向耕地、林地和未利用地转变; 2000—2018 年间土地利用发生巨大转变基本集中在后 8 年。

### 3.2 水域时空变化分析

地表水体作为陆地水循环中的重要载体, 陆表水

表 2 2000—2018 年土地利用转移矩阵

km<sup>2</sup>

Table 2 Land use area change matrix in the Tarim river over the period from 2000–2018

km<sup>2</sup>

		2010					
		耕地	草地	林地	水域	建设用地	未利用地
2000	耕地		12.33	1.21	0.82	7.87	2.16
	草地	425.51		12.66	61.85	1.35	3.42
	林地	323.82	115.34		15.67	0.05	1.57
	水域	30.69	138.68	13.96		0.04	2.28
	建设用地	0.30	0.01	0.00	0.00		0.01
	未利用地	116.19	13.17	23.10	58.61	0.00	
	净增加面积	872.13	-225.26	-405.51	-48.69	8.97	-201.64
		2018					
		耕地	草地	林地	水域	建设用地	未利用地
2010	耕地		232.56	59.02	21.26	45.86	19.45
	草地	998.79		2 162.12	325.46	11.79	2 969.52
	林地	444.28	1417.28		142.00	6.08	264.78
	水域	81.36	427.30	189.80		0.51	98.90
	建设用地	32.31	3.27	0.56	0.17		0.20
	未利用地	177.82	1 455.22	457.82	117.12	2.29	
	净增加面积	1 356.40	-2 932.06	594.90	-191.85	30.02	1142.58
		2018					
		耕地	草地	林地	水域	建设用地	未利用地
2000	耕地		136.30	17.16	8.86	48.74	9.68
	草地	1 295.06		2 119.47	264.69	13.86	3 008.96
	林地	731.82	1 446.08		166.01	7.60	263.39
	水域	114.74	448.54	196.85		0.63	38.49
	建设用地	30.61	3.22	0.57	0.20		0.21
	未利用地	277.06	1 510.64	470.25	118.95	2.97	
	净增加面积	2 228.55	-3 157.26	189.40	-240.53	38.99	940.84

域的形成与消失、扩张与收缩及其引起的生态环境变化都反应了区域气候变化和人类活动的影响。本文使用 JRC 全球水体数据,对塔里木河 2000—2008(时段 1)和 2009—2018(时段 2)两个时段的水体出现频率进行分析,以揭示塔里木河流域综合治理工程实施以来塔里木河水域的空间分布变化情况。图 3 为 2000—2008 和 2009—2018 两个时段塔里木河水体的出现频率空间分布图。结果显示塔里木河下游大西海子水库至台特马湖区段 2009—2018 时段的水体出现的频率明显高于 2000—2008 时段。时段 2 的水体出现频率较时段 1 提高约 15%。同时,台特马湖的水域面积扩张明显,从 2000—2008 时段的最大水面 230 km<sup>2</sup> 扩大到 2009—2018 时段的最大水面 505 km<sup>2</sup>。而大西海子水库水体的出现频率明显降低,从时段 1 的 96% 降低到时段 2 的 83%。水体的出现频率也在一定程度反映了河道的自然变化。受河道的蜿蜒摆动的影响,塔里木河中游区段部分地区水体的出现频率下降。英巴扎至乌斯满河段及河段北岸水体出现频率呈现微弱下降趋势。而乌斯满站至恰拉区段,河道北岸区域水体出现频率下降明显。塔里木河中游区段河道区域受河道的改道变迁影响,河道凸岸的水

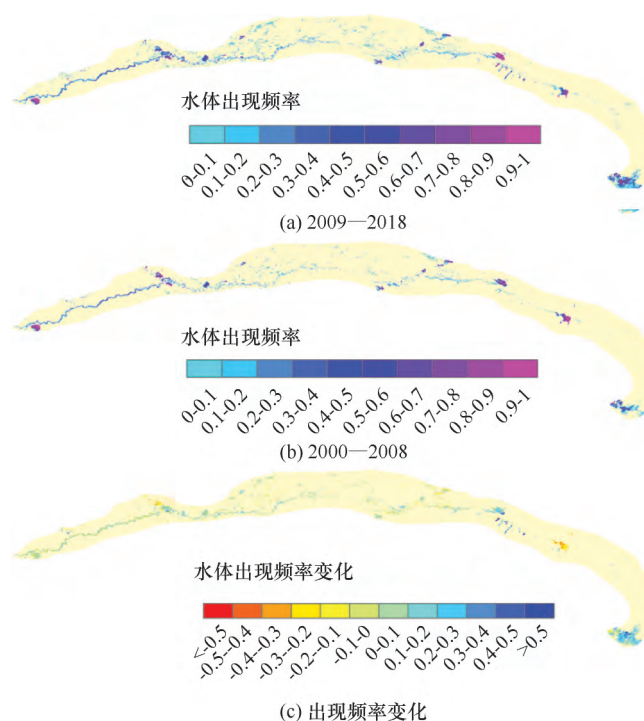


图 3 塔里木河干流水体再现频率分布及变化

Fig. 3 The distribution and changes of water occurrence over Tarim river

体出现频率下降明显,凹岸的水体出现频率上升。在新渠满站附近远离河道的水体频率出现下降趋势。

### 3.3 植被覆盖度变化分析

塔里木河综合治理实施以来,截至2018年底共向下游生态输水20次,塔河生态恢复状况、流域综合治理效果亟待客观分析。对此,本文利用遥感技术手段,对塔里木河2000—2018年间植被覆盖度的变化情况进行监测分析,对塔里木河生态环境的恢复状况进行分析评估。图4为2000年和2018年塔里木河覆盖度的空间分布及覆盖度的变化图。对比2000年和2018年塔里木河植被覆盖度的空间分布图发现塔里木河中上游绿洲的范围明显扩大。下游河道两岸附近的植被覆盖度明显增加,覆盖度增加约18%。这与塔里木河综合治理工程的推进,大西海子向下游生态用水的下泄,塔里木河下游水域出现频率增加,河道两岸的草本和灌丛逐渐恢复密切相关。

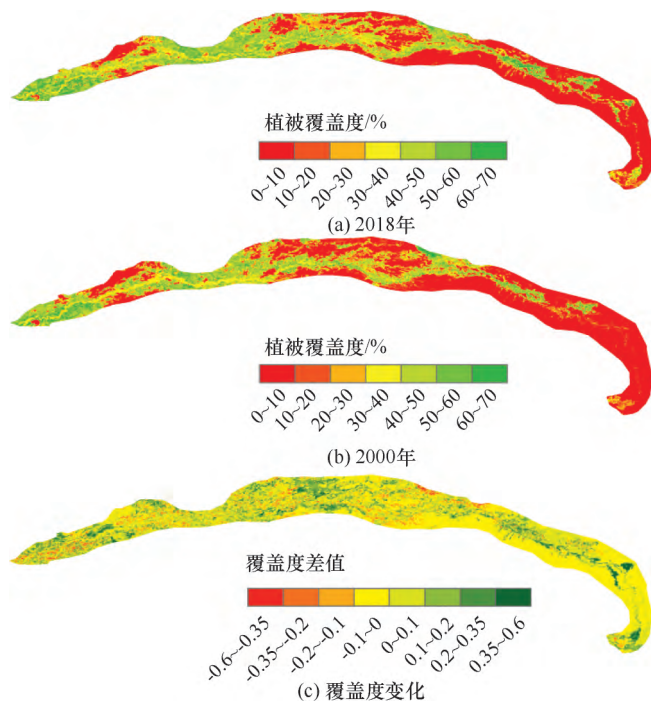


图4 塔里木河干流植被覆盖度空间分布及变化

Fig.4 The distribution and changes of vegetation fractional cover over Tarim river

采用线性回归模型方法对塔里木河植被覆盖度的年际变化及空间格局进行分析,以揭示植被覆盖度的时空变化状况。2000—2018年塔里木河植被覆盖度变化斜率线性拟合结果如图5所示。斜率大于零表示植被覆盖度在2000—2018年间呈增加趋势,斜率小于零表示植被覆盖度呈现减小趋势,使用相关系数来表示拟合线的显著程度。2000—2018年塔里木河植

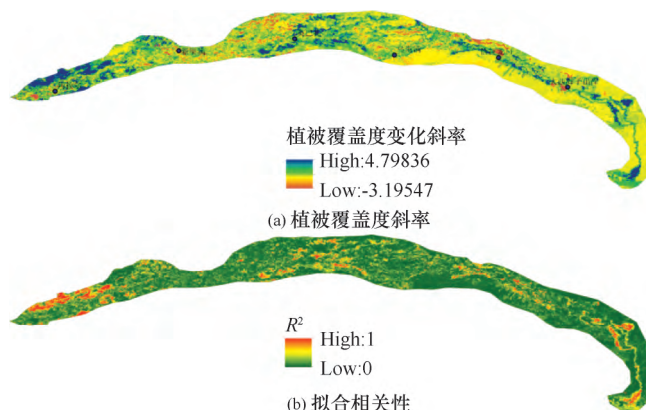


图5 2000—2018年塔里木河植被覆盖度变化斜率线性拟合结果

Fig.5 Spatial distribution of linear trend of vegetation fractional cover and significant level of vegetation fractional cover trend by the correlation coefficient

被覆盖度线性拟合斜率的取值范围为-3.19~4.79之间,植被覆盖度显著增加( $R^2 > 0.7$ )的区域主要分布在塔里木河的下游河道两岸及中、上游的部分地区。植被覆盖度的变化趋势表明下游地区的植被覆盖度持续增加,生态环境表现为向好趋势。中、上游植被覆盖度增加的区域主要对应于土地利用类型主要为耕地,虽然中、上游的植被覆盖度大部分表现为增加趋势,但是主要的贡献来源于耕地的贡献。塔里木河干流生态环境脆弱,中上游地区的耕地增加会潜在的对生态环境的保护和恢复造成一定的影响。

## 4 讨论

塔河生态恢复状况、流域综合治理效果是学者们关注的热点问题。基于土地利用变化分析显示,自2000年以来塔里木河干流耕地面积增加显著,这与谭克龙等<sup>[15]</sup>、孙美琴等<sup>[24]</sup>和赵锐锋等<sup>[25]</sup>的研究结论较为一致。谭克龙等<sup>[15]</sup>对塔里木河流域综合治理生态要素变化的遥感分析,结果显示相比其他支流,塔里木河干流区耕地面积增加最快。

基于遥感时空变化分析方法分析了塔里木河的水体出现频率和植被覆盖度的变化,塔里木河综合治理以来塔河下游的生态环境状况得到了一定程度的改观,特别是下游河道附近地区的水体出现频率提高约15%,植被覆盖度增加18%。基于地表水域的时空变化分析显示塔里木河下游大西海子水库至台特马湖区段的水体出现频率增加明显(见图3)。基于时序遥感植被覆盖度变化分析显示塔里木河流域植被覆盖程度呈现好转趋势,特别是下游河道两岸附近的植被覆盖

度增加显著(见图4)。这与管文轲<sup>[26]</sup>、孙天瑶等<sup>[27]</sup>的研究结果较为一致。孙天瑶等<sup>[27]</sup>对2000—2018年塔里木河流域植被覆盖时空格局进行分析,表明人类活动对塔河流域植被变化产生积极影响的区域主要分布于绿洲荒漠过渡带以及塔里木河下游附近。自2000年起,塔里木河先后向下游进行了20余次生态输水,下游水体出现频率明显提高,生态输水有效缓解了塔河流域生态严重退化的局面,下游河道附近的植被覆盖度持续增加。此外,本文结合土地利用和植被覆盖度变化分析表明塔河中、上游植被覆盖度增加的区域主要为耕地贡献,进一步揭示了塔里木河干流生态环境修复存在的潜在风险。

本文仅从遥感数据的角度去分析了土地利用、水体再现频率和植被覆盖度的变化,一定程度反映了塔里木河的生态环境的变化状况,未来仍需进一步结合径流、地下水观测资料开展进一步深入的研究。

## 5 结论

塔里木河综合治理后,生态环境的变化状况及植被的恢复状况等热点问题是国内外关心的热点。对此,利用遥感技术手段,对2000—2018年塔里木河干流的土地利用变化、地表水域和植被覆盖度进行时空变化分析,主要结论如下:

(1) 自2000年以来,塔里木河干流耕地面积增加显著,净增2 229 km<sup>2</sup>,草地整体下降,萎缩3 157 km<sup>2</sup>。受人类活动的影响,中下游的生态环境的保护和恢复存在一定的风险。

(2) 塔里木河地表水域的时空变化方面,下游大西海子水库至台特马湖区段2009—2018时段的水体出现的频率明显高于2000—2008时段,水体再现频率提高15%,但中上游部分河段受到河道摆动的影响,水体的出现频率降低。

(3) 近20年以来,塔里木河中上游绿洲的范围明显扩大,下游河道两岸附近的植被覆盖度增加显著。植被覆盖度的变化趋势表明下游地区的植被覆盖度持续增加,生态环境表现为持续向好趋势。但中上游的植被覆盖度的增加趋势主要贡献来源于耕地。中上游地区的耕地面积的增加会对塔里木河干流生态环境的保护和恢复造成一定的影响。

## 参考文献(References):

[1] 王让会,樊自立. 干旱区内陆河流域生态脆弱性评价——以新疆塔里木河流域为例[J]. 生态学杂志, 2001, 20(3): 63-68.  
WANG Ranghui, FAN Zili. Ecological Fragility Assessment on Continental River Basin in Arid Zone—Taking Tarim River Basin, Xinjiang

as An Example[J]. Chinese Journal of Ecology, 2001, 20(3): 63-68.

[2] 王燕云, 龙爱华, 向立云, 等. 基于LP-PSO的塔里木河流域农业种植结构优化研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50(12): 191-197.  
WANG Yanyun, LONG Aihua, XIANG Lingyun, et al. Study on optimization of agriculture planting structure based on LP-PSO[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(12): 191-197.

[3] 赵俊红, 周华荣, 卢雅焱, 等. 2000—2015年塔里木胡杨林国家级自然保护区NPP时空动态特征及其影响因素[J]. 干旱区地理, 2020, 43(1): 190-200.  
ZHAO Junhong, ZHOU Huarong, LU Yayan, et al. Temporal-spatial characteristics and influencing factors of the vegetation net primary production in the National Nature Reserve of Populuseuphratica in Tarim from 2000 to 2015[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(1): 190-200.

[4] 陈亚宁, 崔旺诚, 李卫红, 等. 塔里木河的水资源利用与生态保护[J]. 地理学报, 2003, 58(2): 215-222.  
CHEN Yaning, CUI Wangcheng, LI Weihong, et al. Utilization of Water Resources and Ecological Protection in the Tarim River[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(2): 215-222.

[5] 冯起, 刘蔚, 司建华, 等. 塔里木河流域水资源开发利用及其环境效应[J]. 冰川冻土, 2004, 26(6): 682-690.  
FENG Qi, LIU Wei, SI Jianhua, et al. Utilization of Water Resources and Its Environment Effect in the Tarim River Basin[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(6): 682-690.

[6] 徐海量, 樊自立, 杨鹏年, 等. 塔里木河近期治理评估及对编制流域综合规划建议[J]. 干旱区地理, 2015, 38(4): 645-651.  
XU Hailiang, FAN Zili, YANG Pengnian, et al. Short term evaluation and advice of compiling planning for the Tarim River Basin in future[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(4): 645-651.

[7] 陈曦, 包安明, 王新平, 等. 塔里木河近期综合治理工程生态成效评估[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(1): 20-28.  
CHEN Xi, BAO Anming, WANG Xinping, et al. Ecological Effect Evaluation of Comprehensive Control Project in Tarim River Basin[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(1): 20-28.

[8] 邓铭江, 周海鹰, 徐海量, 等. 塔里木河干流上中游丰枯情景下生态水调控研究[J]. 干旱区研究, 2017, 34(5): 959-966.  
DENG Mingjiang, ZHOU Haiying, XU Hailiang, et al. Regulation of Ecological Water Volume under High-or Low-flow in the Mainstream Area of the Tarim River[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(5): 959-966.

[9] 邓铭江. 塔里木河下游生态输水及植被恢复遥感监测评价[J]. 冰川冻土, 2007, 29(3): 380-386.  
DENG Mingjiang. An Appraisal of Remote-Sensing Monitoring on Vegetation Restoration and Ecological Water-Conveying in the Lower Reaches of Tarim River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(3): 380-386.

[10] SONG X, HANSEN M C, STEHMAN S V, et al. Global land change

- from 1982 to 2016[J]. *Nature*, 2018, 560: 639-643.
- [11] 许玉凤, 杨井, 李卫红, 等. 1982—2013 年新疆不同植被生长时空变化[J]. *草业学报*, 2016, 25(1): 47-63.  
XU Yufeng, YANG Jing, LI Weihong, et al. Spatial-temporal change in different vegetation growth of Xinjiang from 1982 to 2013[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(1): 47-63.
- [12] 张继, 龙爱华, 於嘉闻, 等. 基于 GIS 与 RS 下的 1990—2015 年塔里木河流域 LUCC 及景观格局时空分析[J]. *水利水电技术*, 2019, 50(12): 18-26.  
ZHANG Ji, LONG Aihua, YU Jiawen, et al. GIS and RS-based analysis on temporal and spatial changes of LUCC and landscape patterns in Tarim River Basin from 1990 to 2015[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2019, 50(12): 18-26.
- [13] ZHANG H, XUE L, WEI G, et al. Assessing Vegetation Dynamics and Landscape Ecological Risk on the Mainstream of Tarim River, China. [J] *Water* 2020, 12(8): 2156.
- [14] 朱长明, 李均力, 沈占锋, 等. 基于 MODIS 密集时间序列数据的塔里木河下游植被活动过程监测[J]. *资源科学*, 2019, 41(3): 597-600.  
ZHU Changming, LI Junli, SHEN Zhanfeng, et al. Spatiotemporal dynamics of vegetation activities in the lower reach of the Tarim River based on MODIS intensive time series data[J]. *Resources Science*, 2019, 41(3): 597-600.
- [15] 谭克龙, 王晓峰, 高会军, 等. 塔里木河流域综合治理生态要素变化的遥感分析[J]. *地球信息科学学报*, 2013, 15(4): 604-610.  
TAN Kelong, WANG Xiaofeng, GAO Huijun, et al. Analysis of Ecological Elements of Comprehensive Harnessing in Tarim River Basin Using Remote Sensing[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2013, 15(4): 604-610.
- [16] 刘桂林, 艾里西尔·库尔班, 艾尔肯·艾白不拉, 等. 塔里木河下游生态输水后植被景观格局动态变化研究[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(1): 161-168.  
LIU Guilin, KURBAN Alishir, ABAYDULIA Arkin, et al. Changes in Landscape Pattern in the Lower Reaches of Tarim River after an Ecological Water Delivery[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(1): 161-168.
- [17] 白元, 徐海量, 刘新华, 等. 塔里木河干流荒漠河岸林的空间分布与生态保护[J]. *自然资源学报*, 2013, 28(5): 776-785.  
BAI Yuan, XU Hailiang, LIU Xinhua, et al. Spatial Distribution Characteristics and Ecological Protection of the Desert Riparian Forest in the Mainstream of the Tarim River[J]. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(5): 776-785.
- [18] 廖淑敏, 薛联青, 陈佳澄, 等. 塔里木河生态输水的累积生态响应[J]. *水资源保护*, 2019, 35(5): 120-126.  
LIAO Shumin, XUE Lianqing, CHEN Jiacheng, et al. Cumulative ecological response of ecological water transmission in Tarim River[J]. *Water Resources Protection*, 2019, 35(5): 120-126.
- [19] 阿布都米吉提·阿布力克木, 阿里木江·卡斯木, 艾里西尔·库尔班, 等. 基于多源空间数据的塔里木河下游湖泊变化研究[J]. *地理研究*, 2016, 35(11): 2071-2090.  
ABLEKIM Abdimijit, KASIMU Alimujiang, KURBAN Alishir, et al. Evolution of small lakes in lower reaches of Tarim River based on multi-source spatial data[J]. *Geographical Research*, 2016, 35(11): 2071-2090.
- [21] LIU J Y, ZHANG Z X, XU X L, et al. Spatial patterns and driving forces of land use change in China during the early 21st century [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(4): 483-494.
- [22] PEKEL J, COTTAM A, GORELICK N, et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes[J]. *Nature*, 2016, 540: 418-422.
- [23] 徐国印, 王忠静, 胡智丹, 等. 柴达木盆地土地利用/覆被综合指数评价[J]. *水力发电学报*, 2019, 38(9): 44-55.  
XU Guoyin, WANG Zhongjing, HU Zhidan, et al. Evaluation of land use/cover change and land use grade in Qaidam basin, China[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2019, 38(9): 44-55.
- [24] 孙美琴, 赵成义, 施枫芝, 等. 近 20a 塔里木河干流区土地利用变化特征[J]. *干旱区研究*, 2013, 30(1): 16-21.  
SUN Meiqin, ZHAO Chengyi, SHI Fengzhi, et al. Analysis on land use change in the mainstream area of the Tarim River in recent 20 years[J]. *Arid Zone Research*, 2013, 30(1): 16-21.
- [25] 赵锐锋, 姜朋辉, 陈亚宁, 等. 塔里木河干流区土地利用/覆被变化及其生态环境效应[J]. *地理科学*, 2012, 32(2): 244-250.  
ZHAO Ruifeng, JIANG Penghui, CHEN Yaning, et al. Land use/cover change and its eco-environment effect in the main stream of Tarim River[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(2): 244-250.
- [26] 管文轲, 韦红, 钟家骅, 等. 塔里木河流域植被覆盖变化的遥感监测[J]. *水土保持通报*, 2018, 38(5): 244-248.  
GUAN Wenke, WEI Hong, ZHONG Jiahua, et al. Remote sensing monitoring of vegetation cover change in Tarim River Basin[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(5): 244-248.
- [27] 孙天瑶, 李雪梅, 许民, 等. 2000—2018 年塔里木河流域植被覆盖时空格局[J]. *干旱区地理*, 2020, 43(2): 415-424.  
SUN Tianyao, LI Xuemei, XU Min, et al. Spatial-temporal variations of vegetation coverage in the Tarim River Basin from 2000 to 2018[J]. *Arid Land Geography*, 2020, 43(2): 415-424.

(责任编辑 王海锋)