

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.02.011

塔里木河下游土地利用/覆被变化对生态输水的响应

王珊珊^{1,2,3,4},王金林^{1,2,3,4},周可法^{1,2,3,4},汪 玮^{1,2,3,4},万应彩^{2,3}

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830011;
2. 新疆矿产资源与数字地质重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830011; 3. 中国科学院新疆矿产资源
研究中心,新疆 乌鲁木齐 830011; 4. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:以2000—2015年的遥感影像资料和生态输水数据为基础数据源,利用ENVI和GIS数据分析处理工具,基于时间轨迹分析方法研究塔里木河下游土地利用/覆被变化(LUCC)对生态输水的响应。结果表明:2000—2015年的16次、1670d间歇性生态输水,使林地和草地分别增加了823个和1347个像元,耕地、湿地和人工用地分别减少了1422个、736个和222个像元,其他用地增加了210个像元;植被面积总体上呈扩大趋势,2015年较2000年净增植被面积382.85 km²,人工表面增加356.10 km²;戈壁、裸土、沙漠等其他用地面积共计减少了738.95 km²;土地利用变化主要发生在塔里木河下游两岸的河水漫溢、滞留区,呈现出破碎化、不规则化和复杂化的趋势。

关键词:土地利用/覆被变化;生态输水;遥感数据;塔里木河下游

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)02-0069-06

Response of land-use/land cover change to ecological water conveyance in the lower reach of Tarim River//WANG Shanshan^{1,2,3,4}, WANG Jinlin^{1,2,3,4}, ZHOU Kefa^{1,2,3,4}, WANG Wei^{1,2,3,4}, WAN Yingcai^{2,3} (1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Mineral Resources and Digital Geology, Urumqi 830011, China; 3. Xinjiang Research Centre for Mineral Resources, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on remote sensing image data and ecological water conveyance data from 2000 to 2015, this paper studies the response of land-use/land cover change (LUCC) to ecological water conveyance in the lower reaches of the Tarim River using ENVI and GIS data analysis and processing tools. The results show that intermittent ecological water conveyance of 16 times and 1670 days from 2000 to 2015 makes woodland and grassland increase 823 and 1347 cell dollars respectively, cultivated land, wetlands and artificial land decrease 1422, 736 and 222 cell dollars, respectively, and other lands increase 210 cell dollars. On the whole, the vegetation area showed an expanding trend. In 2015, compared with 2000, the net vegetation area increased by 382.85 km², and the artificial surface increased by 356.10 km². The total area of Gobi, bare soil, desert and other land use decreased by 738.95 km². The land use change mainly occurs in the overflowing and stranded area of the river in the lower reaches of the Tarim River River, which shows the trend of fragmentation, irregularity and complication.

Key words: land-use/land cover change; ecological water conveyance; remote sensing data; lower reach of Tarim River

塔里木河是我国最长的内陆河,具有自然资源丰富和生态系统脆弱的双重性特点,是保障塔里木盆地绿洲经济、自然生态和新疆各族人民生活的生命线,同时在干旱区水资源研究方面具有代表

性^[14]。塔里木河流域属于极端干旱环境,流域内几乎所有的自然过程或人类活动都直接或间接受制于水资源的限制,因此对水资源进行全方位的观测非常必要和紧迫。目前,塔里木河下游已成为国内甚

基金项目:国家自然科学基金(U1803241);新疆维吾尔自治区科技计划重大专项(2017B03017-2);自治区创新环境(人才、基地)建设专项(人才专项计划-天山青年计划)(2019Q033)

作者简介:王珊珊(1982—),女,副研究员,博士,主要从事遥感应用和定量遥感研究。E-mail:wangss0509@163.com

通信作者:王金林(1978—),男,高级工程师,博士,主要从事地理信息系统与遥感技术研究。E-mail:wangjinlin@ms.xjb.ac.cn

至国外研究和恢复保护的热点地区之一,引起了国内外各行各业的广泛关注^[5-9]。

1972年,塔里木河道完全断流,从而导致下游地下水位显著下降,河道沿岸的天然植被大面积退化和严重的土地荒漠化^[10-11]。2000年,为了下游河段沿岸的生态恢复,塔里木河实施了间歇性生态输水,使断流区域生态和环境发生了变化,土地利用/土地覆盖变化(land-use/land cover change, LUCC)也相应地产生了变化^[12]。LUCC是衡量一个地区生态和环境是否可持续发展的重要指标之一,也是引起其他环境变化问题的主要原因之一,在区域环境变化和可持续发展研究中占有重要地位^[13-15]。

针对不同卫星资料和辅助数据,众多学者开展了景观生态、植被监测、LUCC等研究。Kennedy等^[16]应用 Landsat TM/ETM+ 各个波段的反射率,通过回归分析方法模拟了第五波段变化,对1988—2007年乌克兰喀尔巴阡山的森林覆盖情况在人为影响的变化轨迹进行监测。Zhou等^[17]结合 Landsat TM、ETM+、SPOT 和 MSS 等多时相、多源遥感数据,通过各时相 LUCC 变化轨迹研究基于人为因素下的 LUCC 的过程特征。朱长明等^[18]基于2000—2017年 MOD13Q1 密集时序植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)数据,反演和监测塔里木河下游植被覆盖度(fractional vegetation cover, FVC)变化,探讨了塔里木河下游植被在生态输水条件下的生长和恢复情况。Liu等^[19]结合 Landsat TM/ETM 和 CBERS/CCD 遥感图像,通过土壤调节植被指数(soil adjusted vegetation index, SAVI)法研究1999—2010年塔里木河下游植被恢复状况。各位学者通过稳定的、长时间序列和不同时间段的遥感影像数据,进行植被、土地利用和环境资源大范围、体系化的研究,对区域乃至全球的 LUCC 和生态恢复具有重要的理论和现实意义。

本文从塔里木河流域的生态输水情况出发,基于时间轨迹分析方法,以遥感影像资料和生态输水监测数据为基础信息源,采用 ENVI 和 GIS 为数据分析处理工具,分析塔里木河下游 LUCC 对生态输水的响应,以期对塔里木河流域水资源优化调度提供科学依据。

1 研究区概况

研究区为塔里木河下游断流地区,该区位于塔克拉玛干和库鲁克两大沙漠之间,海拔在 801.50 ~ 846.25 m 之间,特玛湖区为最低点(801.50 m)。塔里木河下游沿岸发育呈带状分布的干旱区荒漠河岸林,在荒漠之中形成一道著名的“绿色走廊”。本文

研究区域地理位置为 86°00'E ~ 89°30'E 和 39°00'N ~ 41°30'N(图1)。为了充分研究受生态输水不同影响程度的区域,本文以生态输水主河道为中心线,向两侧建立近 30 ~ 50 km 的缓冲带,以此作为本研究重点讨论的区域。

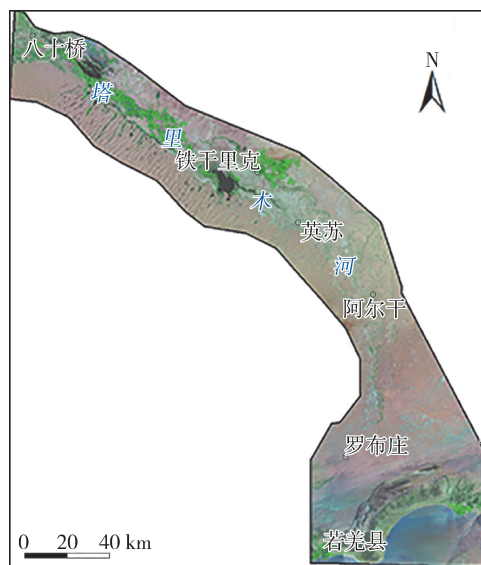


图1 研究区位置示意图

Fig. 1 Sketch map of the study area

研究区属大陆性暖温带荒漠干旱气候,多年平均降水量仅 17.4 ~ 42.0 mm,潜在年蒸发量(蒸发力)高达 2 500 ~ 3 000 mm,为年降水量的 79.6 ~ 166.8 倍;年平均气温 10.7 ~ 11.5 °C,年较差达 35.7 ~ 35.9 °C;太阳总辐射 5 692 ~ 6 360 MJ/m²,日照时数 2 780 ~ 2 980 h,大于或等于 10 °C 年积温为 4 100 ~ 4 300 °C。降水量与潜在蒸发量有着强烈反差,导致该区域极度干燥,是中国最干旱地区之一。

2 研究方法

2.1 数据获取与预处理

本文获取的多景 Landsat TM、ETM+ 和 OLI 遥感影像从美国地质调查局(USGS)官方网站(<http://glovis.usgs.gov>)免费下载。TM、ETM+ 和 OLI 遥感数据为 30 m 空间分辨率、包括可见光、近红外波段和短波红外波段的光谱分辨率。由于遥感影像存在仪器本身、拍摄天气和获取时间等一系列问题,根据获取的数据中的云覆盖情况、条纹噪音以及波段间的空间位置匹配情况对图像进行了筛选,并将成像日期限制在植被生长旺盛、物候特征稳定的时间阶段的影像。根据以上限制因素和对研究区的分析,分别获取于 1990 年和 2015 年夏季中旬,天气状况良好,图像轨道号分别为 143/31、142/31、142/32、142/33、141/31、141/32、141/33、141/34、140/33 的多景遥感影像数据。

采用图像到图像的配准方法,以 2000 年遥感影像图为基础,对 2015 年遥感影像进行几何纠正。地面控制点(GCP)主要选择道路、河流交叉口、建筑边界、远离公路的孤立植被点等;GCP 每幅不少于 30 个,均匀分布,河道沿岸适当加密。采用二次多项式进行几何纠正,并保证了配准时的残差在一个像元以内,以达到制图精度的要求。为了便于出图,对几何纠正后的影像数据进行 9 幅图遥感图像的镶嵌。镶嵌时应当选择占研究区域最多面积且数据质量好的一景影像作为基准图像,其余几景影像颜色平衡到基准图像。同时,对两幅影像运用 ENVI 5.3 中的 FLAASH 模块进行了大气纠正,以消除大气对影像的影响。

2.2 LUCC 信息提取

对遥感数据进行分类并提取 LUCC 信息时,建立一个符合研究区特点的分类体系是至关重要的。不同的分类标准和体系有可能导致 LUCC 分析的结果大相径庭。因此,根据研究区的地物和研究目的,选择合适的土地利用类型不仅可以有利于 LUCC 的监测,还可以减小分类中的误差。研究区域范围内主要有:自然植被(林地、草地和湿地)、人工用地、戈壁和沙漠等。参考中国土地资源分类系统一级分类标准^[20]和依据塔里木河下游的土地利用和规划的特点,如植被高度、覆盖度、植被 1 a 中被水覆盖的时间和年积温等指标,将 20 个二级土地利用类型合并为林地、草地、耕地、湿地、人工表面及其他等 6 个一级土地利用单元(表 1)。

表 1 研究区域 LUCC 分类标准

Table 1 LUCC classification standard in the study area						
一级分类	林地	草地	耕地	湿地	人工表面	其他
二级分类	落叶阔叶灌丛	草本绿地	旱地	草本湿地	采矿场	戈壁
	落叶阔叶林	温性草甸	水田	河流	建设用地	裸土
	乔木园地	温性草原		湖泊	交通用地	沙漠
	稀疏灌丛	稀疏草地		水库/坑塘		

通过表 1 分类标准,应用遥感图像处理软件 ENVI 5.3 对 2000—2015 年的研究区影像图进行监督分类,提取研究区的 LUCC(图 2)。其中,整体分类精确度分别为 85.92% 和 87.21%,达到了精度要求,满足对 LUCC 等监测的需求。

3 结果与分析

3.1 塔里木河下游间歇性生态输水统计分析

自 20 世纪 50 年代以来,塔里木河下游受到了高强度人类活动的影响,导致植被处于衰败趋势,沙漠化越来越严重。2000 年 5 月,新疆维吾尔自治区人民政府以拯救塔里木河下游“绿色走廊”为目的,

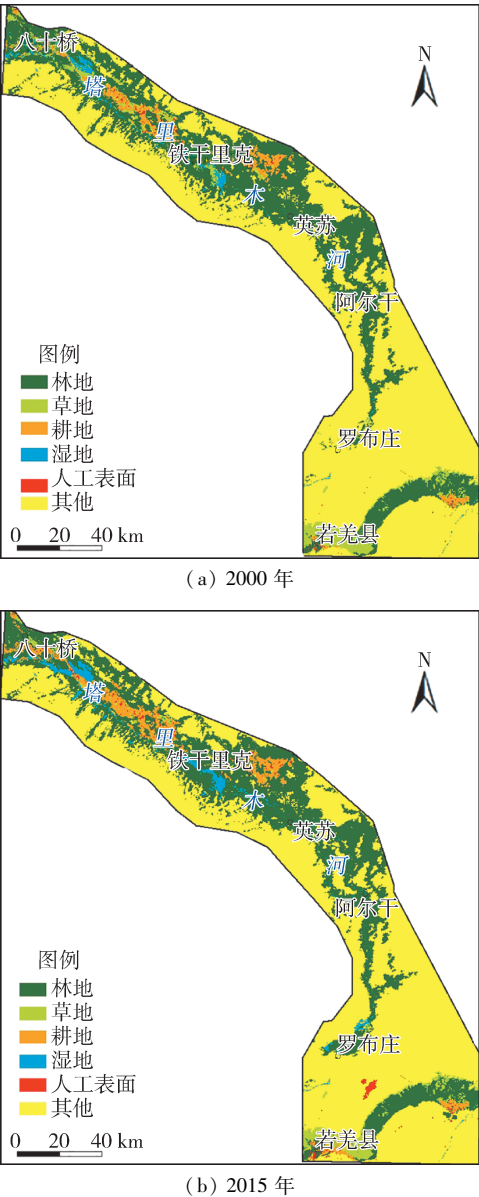


图 2 2000 年和 2015 年研究区 LUCC 分类图
Fig.2 LUCC classification map of the study area in 2000 and 2015

而实施了“塔里木河下游应急生态输水工程”,并于 2001 年实施了“塔里木河流域近期综合治理工程”。2001 年,国务院以国函【2001】74 号文批准并执行共计 107 亿元的《塔里木河流域近期综合治理规划》项目投资,同时,世界银行针对塔里木河流域生态保护和生态恢复给予大量的贷款支持^[12,21-22]。

由于遥感数据源的限制,仅采用了 2000 年和 2015 年的遥感数据进行塔里木河下游 LUCC 分析,考虑到选用遥感数据的时间和跨度及研究的 LUCC 与生态输水的关系,所以选用 2000—2015 年的 16 次输水数据进行分析研究。据塔里木河流域管理局监测数据,《塔里木河流域近期综合治理规划》项目实施以来,自 2000 年起实施至 2015 年年底已完成了 16 次共计 21 期的生态输水,输水总量已达到

51.35 亿 m³,多次实现了双河道输水,水头多次到达台特马湖,并形成了大面积的水域(图 3)。这样大规模的间歇性人工输水工程,在全国乃至全球范围内都实属罕见。

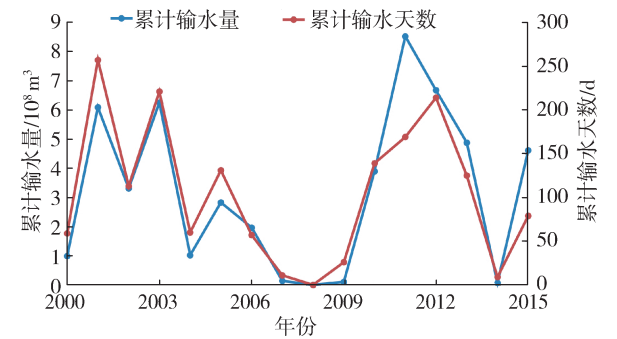


图 3 塔里木河下游应急输水量年度变化
Fig.3 Change of water volumes of emergency ecological water coveyance

3.2 LUCC 的数量特征与趋势分析

根据图 2 可以对 16 年间塔里木河下游地区的土地利用变化进行分析。表 2 直观展现了 2000 年与 2015 年之间的土地利用变化,可以看出林地和草地 2015 年比 2000 年分别增加了 823 个和 1 347 个像元;耕地、湿地和人工用地 2015 年比 2000 年分别减少了 1 422 个、736 个和 222 个像元;戈壁、裸土、沙漠等其他用地 2015 年比 2000 年增加了 210 个像元。

表 2 2000 年和 2015 年不同土地利用类型的变化
Table 2 The change of different land use types in 2000 and 2015

LUCC 类型	2000 年像元数/个	2015 年像元数/个
林 地	44 427	43 604
草 地	1 018 857	1 017 510
耕 地	3 495	4 917
湿 地	1 370	2 106
人工表面	209	431
其 他	60 442	60 232

为了更清楚地了解和分析 2000—2015 年 LUCC 的变化,计算了 2000—2015 年间塔里木河下游地区 LUCC 的转移矩阵,结果见表 3。从表 3 可以看出,2000—2015 年塔里木河下游区域的 LUCC 变化不大,

表 3 2000—2015 年 LUCC 转移矩阵

Table 3 Land-use/land cover change matrix from 2000 to 2015

单位:km²

LUCC 类型	林地	草地	耕地	湿地	人工表面	其他	2000 年合计
林 地	4 767.68	0.56	97.07	66.57	4.08	0.29	4 936.25
草 地	39.87	458.38	118.05	41.40	8.20	3.30	669.20
耕 地	5.57	0.02	509.62	0.01	1.89	0.00	517.11
湿 地	9.66	0.46	1.91	206.99	0.28	0.98	220.28
人工表面	0.15	0.00	0.49	0.00	34.08	0.00	34.72
其 他	105.44	0.14	5.69	28.11	33.97	10 210.13	10 383.48
2015 年合计	4 928.37	459.56	732.83	343.08	82.50	10 214.70	16 761.04

变化的面积为 772.57 km²,总面积为 16 761.03 km²,变化面积占总面积的 4.61%。耕地、人工表面和湿地的面积均有不同程度的增加,分别增加了 215.71 km² (41.71%)、47.78 km² (137.63%)、122.80 km² (55.74%);草地、林地和戈壁、裸土、沙漠等其他用地面积有所减少,分别减少了 209.65 km² (31.33%)、7.87 km² (0.16%)与 168.77 km² (1.63%)。

采矿场、建设用地、交通用地等人工表面迅速扩张(扩大了 137.63%),主要来源于其他用地(71.32%)、草地(17.16%)、林地(8.54%)、耕地(3.96%)以及湿地(0.58%)。湿地增加了 122.80 km² (55.74%),主要来源于林地(54.21%)、草地(33.71%)和其他用地(22.89%)。在减少的类型中,减少的草地主要用于增加耕地(56.30%)和湿地(19.75%)等土地类型。其中,人工表面所占面积并不大,由 2000 年 34.72 km²的变为了 2015 年的 82.49 km²,但增长速度极快。

LUCC 的遥感变化检测,需要获取 3 方面的信息:变化的位置、变化的方向和变化的过程,其中变化位置对于生态系统的监测最为重要,有助于分析和解释变化的原因。在驱动因子明确的情况下,变化过程研究有利于揭示 LUCC 对生态、环境改变和人类干预的响应,有利于揭示 LUCC 变化趋势。

对 2000 年和 2015 年的土地利用分类图进行叠加分析,得到了 2000—2015 年塔里木河下游 LUCC 分布图,如图 4 所示。八十桥附近(86°17'48"E, 41°12'9.69"N)有一块草地变为了林地。恰拉水库附近,河道沿岸区域 2000 年的 LUCC 为草地林地,2015 年的土地类型变为了湿地和农田。2000 年大西海子水库附近的草地,2015 年大部分变为了湿地,小部分变为了林地。在琼达里亚什克附近(88°15'49"E,39°29'46"N)由 2000 年的戈壁、裸土、沙漠等其他用地,变为了 2015 年的林地和湿地。在研究区的最南边的若羌县(88°16'15"E,39°3'3.9"N)内有一块条带状的 2000 年的草地,2015 年变为了耕地。

此外,LUCC 主要发生在塔里木河下游区域的

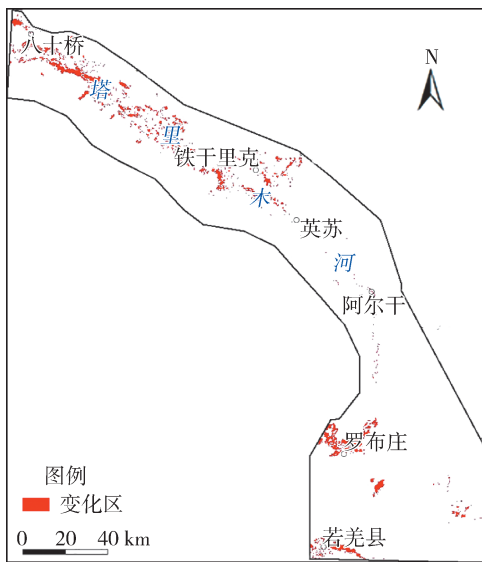


图4 2000—2015年塔里木河下游LUCC分布

Fig.4 Distribution of LUCC of Tarim River from 2000 to 2015

河道两旁,主要分布在河水漫溢、滞留区,说明河水漫溢可以促进局部植被的恢复。转变类型主要是草地类型变化为湿地和耕地类型,土地利用变化呈现出破碎化、不规则化和复杂化的趋势。

3.3 植被面积变化与生态输水的响应

2000年5月至2015年11月共计16次、1670 d的51.35亿 m^3 间歇性生态输水,使植被面积总体上呈增加趋势,2015年较2000年植被面积增加382.85 km^2 ;人工表面也呈现增加趋势,2015年较2000年增加面积为356.10 km^2 ;戈壁、裸土、沙漠等其他用地面积有所下降,减少了738.95 km^2 。

研究表明,输水效益的呈现是一个长达数年的过程,正如输水前植被退化过程很迟缓一样,下游植被的生态响应和地下水的响应在一个大的空间、时间尺度上将是逐渐呈现出来的^[18,23-24]。各年植被面积与其前一年的生态输水累积量呈正相关关系,植被面积随生态输水的增加而增加,但是植被面积的增加滞后1 a,也就是说植被面积对生态输水的响应有1 a的滞后期。2014年6月的输水仅9 d,输水量727万 m^3 ;2015年的输水主要在秋季进行,此时已经错过了植被的生长旺季。这将影响2015年的当年植被面积,然而秋季的生态输水将主要通过补给地下水,对2016年植被的生长产生影响。因此,植被面积的变化受多种因素影响,如当年的气候、输水量、输水天数、输水时间、输水的平均速度和人为因素等。研究还表明塔里木河下游地下水的主要补给来源为河道径流以垂向和侧向的方式补给,地下水波动幅度随距离的增加在纵横两个方向上均逐步减缓^[1,6,25]。通过遥感解译和野外监测,可以看出生态输水使得塔里木河下游的浅层地下水位有所升高,

地表植被的物种数目和丰富度逐渐增加,如猪毛菜、白刺、骆驼刺、芦苇、沙枣、甘草等植物区域性出现,一些耐旱的乔灌木也慢慢恢复,植被群落生物多样性得到逐渐恢复。同时,人工表面呈现增加趋势,戈壁、裸土、沙漠等其他用地的面积大幅度下降,也表明了2000年以来塔里木河下游区域受到人类活动的影响越来越多,人为因素的作用也越来越强。但从2000—2015年LUCC与生态输水的响应来看,植被的增加和恢复仍然主要集中在部分区域,还没有达到恢复和重建塔里木河下游生态和环境的总体目标。同时,遥感数据的时相要与LUCC的时间特征相协调,才能够有效检测变化的特征^[26-27]。本研究由于遥感数据源的限制,仅用2000—2015年的2个时相数据来说明植被面积与生态输水量之间的相关性,可能不够充分,但仍具有启示意义。

要完成大规模塔里木河下游生态恢复,必须采取有针对性的输水方式,使输水效益和输水配置达到最大化和最优化^[6,28]。根据2000—2015年的生态输水实践和积累的经验,知道必须结合水情来调节河水漫溢的次数、干扰的强度和输水时间。首先,采用相比于自然状态河水漫溢更为灵活的方式:枯水期时,以线状输水为主;丰水期时,增加汊河和面状输水,扩大地下水的补给范围,这将避免自然状态下河水集中耗散的问题。其次,利用水库调度功能合理调控输水时段,选择每年4—5月、8—10月为主要输水时间。草甸植被恢复采用间歇机动式水量调度,而林、灌、草植被生态系统的恢复以水量量级分配、断面流量和总量控制等方式进行水量调度。同时,要加强塔河流域的监测、监控和水资源统一调控设施、体制的完善。要促进塔河流域水资源和生态环境可持续发展,仍需要坚持不懈的努力。

4 结 论

从变化趋势看,研究区在2000—2015年间,林地和草地分别增加了823个和1347个像元;耕地、湿地和人工用地分别减少了1422个、736个和222个像元;戈壁、裸土、沙漠等其他用地2015年比2000年增加了210个像元,其中植被的转变占优势,并引起植被面积扩大。植被面积总体上呈增加趋势,2015年较2000年净增植被面积382.85 km^2 ;人工表面也呈增加趋势,2015年较2000年净增356.10 km^2 ;其他用地的面积共计减少了738.95 km^2 。输水过程中,植被面积总体上呈扩大趋势,但植被总面积的扩大对生态输水有1 a的滞后。LUCC主要发生在塔里木河下游区域的河水漫溢、滞留区,说明河水漫溢可以促进局部植被的恢复,主要为草地类

型变化为湿地和耕地类型,变化趋势呈现出破碎化、不规则化和复杂化的趋势。塔里木河下游 LUCC 除影响该地区地下水、微气候、自然植被覆盖、野生动物分布等自然环境外,还将对该地区的人类生活方式和生活水平产生重大和深远的影响。

参考文献:

- [1] 陈亚宁,郝兴明,陈亚鹏,等.新疆塔里木河流域水系连通与生态保护对策研究[J].中国科学院院刊,2019,34(10):1156-1164. (CHEN Yaning, HAO Xingming, CHEN Yapeng, et al. Study on water system connectivity and ecological protection countermeasures of Tarim River Basin in Xinjiang[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(10): 1156-1164. (in Chinese))
- [2] 邓铭江,杨鹏年,周海鹰,等.塔里木河下游水量转化特征及其生态输水策略[J].干旱区研究,2017,34(4):717-726. (DENG Mingjiang, YANG Pengnian, ZHOU Haiying, et al. Water conversion and strategy of ecological water conveyance in the lower reaches of the Tarim River [J]. Arid Zone Research, 2017, 34(4): 717-726. (in Chinese))
- [3] 左其亭,韩淑颖,韩春辉,等.基于遥感的新疆水资源适应性利用配置-调控模型研究框架[J].水利水电技术,2019(1):1-10. (ZUO Qiting, HAN Shuying, HAN Chunhui, et al. Research frame of adaptive utilization allocation-regulation model of water resources in Xinjiang region based on RS[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019(1): 1-10. (in Chinese))
- [4] 吴业鹏,袁汝华.丝绸之路经济带背景下新疆水资源与经济社会协调性评价[J].水资源保护,2016,32(4):60-66. (WU Yepeng, YUAN Ruhua. Evaluation of coordination between water resources and economic and social development in Xinjiang in context of Silk Road Economic Belt[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(4): 60-66. (in Chinese))
- [5] 张鹏飞,古丽·加帕尔,包安明,等.塔里木河流域近期综合治理工程生态成效评估[J].干旱区地理,2017,40(1):156-164. (ZHANG Pengfei, JIAPAER Guli, BAO Anming, et al. Ecological effects evaluation for short term planning of the Tarim River[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(1): 156-164. (in Chinese))
- [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. (in Chinese))
- [7] 黄粤,包安明,王士飞,等.间歇性输水影响下的2001—2011年塔里木河下游生态环境变化[J].地理学报,2013,68(9):1251-1262. (HUANG Yue, BAO

- Anming, WANG Shifei, et al. Eco-environmental change in the lower Tarim River under the influence of intermittent water transport [J]. ACTA Geographica Sinica, 2013, 68(9): 1251-1262. (in Chinese))
- [8] 桂东伟.塔里木河下游应急输水后的生态响应及生态用水保障研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2007.
- [9] 王希义,徐海量,潘存德,等.2000—2014年塔里木河下游地下水补给量及合理需求量[J].水资源保护,2017,33(4):32-39. (WANG Xiyi, XU Hailiang, PAN Cunde, et al. Study on groundwater recharge amount and suitable demand amount in lower reaches of Tarim River from 2000 to 2014[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(4): 32-39. (in Chinese))
- [10] 尚河英,尹忠东.塔里木河流域生态输水效益分析[J].水利科技与经济,2014,20(2):17-20. (SHANG Heying, YIN Zhongdong. An analysis on the Tarim River Basin ecological water conveyance[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2014, 20(2): 17-20. (in Chinese))
- [11] 艾力克木·卡德尔.塔里木河中游近50a以来的水系变迁及生态环境的响应研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2008.
- [12] 张小清,桂东伟,李丽君.塔里木河干流水资源分配现状及其利用问题[J].干旱区地理,2018,41(2):248-254. (ZHANG Xiaoqing, GUI Dongwei, LI Lijun. Water resources allocation along the mainstream of Tarim River [J]. Arid Land Geography, 2018, 41(2): 248-254. (in Chinese))
- [13] 陈佑启,杨鹏.国际上土地利用/土地覆盖变化研究的新进展[J].经济地理,2001,21(1):95-100. (CHEN Youqi, YANG Peng. New progress in the study of land use/land cover change in the world [J]. Economic Geography, 2001, 21(1): 95-100. (in Chinese))
- [14] COMMITTEE S S, LUCC I P O O, NUNES C, et al. Land-use and land-cover change (LUCC): implementation strategy [J]. Environmental Policy Collection, 1999, 11(2): 28-44.
- [15] YUAN X, GAN S, HE D, et al. LUCC remote sensing monitoring on man wan dam immigrant settlement area [J]. IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 57: 13-22.
- [16] KENNEDY R E, COHEN W B, SCHROEDER T A. Trajectory-based change detection for automated characterization of forest disturbance dynamics [J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 110(3): 370-386.
- [17] ZHOU Q, LI B, KURBAN A. Trajectory analysis of land cover change in arid environment of China [J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(4): 1093-1107.

(下转第80页)

- dynamic heterogeneous panel methods [J]. Agricultural Economics, 2018, 49(6): 681-690.
- [16] 沈强, 左其亭. 塔里木河流域灌溉定额计算及系统开发 [J]. 灌溉排水学报, 2007(5): 94-96. (SHEN Qiang, ZUO Qiting. Calculation and system development of irrigation quota for the Tarim River Basin [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2007(5): 94-96. (in Chinese))
- [17] 薛联青, 王晶, 魏光辉. 基于 PSR 模型的塔里木河流域生态脆弱性评价 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2019, 47(1): 13-19. (XUE Lianqing, WANG Jing, WEI Guanghui. Dynamic evaluation of the ecological vulnerability based on PSR modeling for the Tarim River Basin in Xinjiang [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(1): 13-19. (in Chinese))
- [18] 薛联青, 符芳兵, 祝薄丽, 等. 塔里木河流域下游绿洲演变对生态输水的响应 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2019, 47(4): 310-316. (XUE Lianqing, FU Fangbing, ZHU Boli, et al. Response of oasis evolution to ecological water transport in the downstream of Tarim River Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(4): 310-316. (in Chinese))
- [19] 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. (in Chinese))
- [20] ZHANG F, ENGELB B A, ZHANG C L, et al. Agricultural production planning approach based on interval fuzzy credibility-constrained bi-level programming and Nerlove supply response theory [J]. Journal of Cleaner Production, 2019(233): 1158-1169.
- [21] NERLOVE M. Estimates of the elasticities of supply of selected agricultural commodities [J]. Journal of Farm Economics, 1956, 38(2): 350-351.
- [22] 肖俊夫, 刘战东, 段爱旺, 等. 中国主要农作物全生育期耗水量与产量的关系 [J]. 中国农学通报, 2008(3): 430-434. (XIAO Junfu, LIU Zhandong, DUAN Aiwang, et al. Water production function during the whole growing stage for main crops in China [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008(3): 430-434. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-06-27 编辑: 彭桃英)

(上接第 74 页)

- [18] 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): 591-600. (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): 591-600. (in Chinese))
- [19] LIU G, KURBAN A, DUAN H, et al. Desert riparian forest colonization in the lower reaches of Tarim River based on remote sensing analysis [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 71(10): 4579-4589.
- [20] 何立恒, 鲍其胜, 隋铭明. 《土地利用现状分类》在土地利用现状调查中的应用研究 [J]. 安徽农业科学, 2010(7): 440-442. (HE Liheng, BAO Qisheng, SUI Mingming. Study on the application of *classification of land use status* in the survey of land use status. [J]. Anhui Agricultural Science, 2010(7): 440-442. (in Chinese))
- [21] 王永嘉, 郭宇宏. 生态输水前后塔里木河下游绿洲特征分析 [J]. 沙漠与绿洲气象, 2018, 12(2): 37-42. (WANG Yongjia, GUO Yuhong. Characteristics of oasis before and after the ecology water transportation in lower reaches of the Tarim River [J]. Desert and Oasis Meteorology, 2018, 12(2): 37-42. (in Chinese))
- [22] 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. (in Chinese))
- [23] 牛婷. 塔里木河下游植被恢复遥感定量评估研究 [D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2014.
- [24] 万红梅. 塔里木河下游植被恢复的遥感测度 [D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2012.
- [25] 白元, 徐海量, 张青青, 等. 基于地下水恢复的塔里木河下游生态需水量估算 [J]. 生态学报, 2015, 35(3): 630-640. (BAI Yuan, XU Hailiang, ZHANG Qinqin, et al. Evaluation on ecological water requirement in the lower reaches of Tarim River based on groundwater restoration [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(3): 630-640. (in Chinese))
- [26] 李超, 李畅游, 赵水霞, 等. 基于遥感数据的河冰过程解译及分析 [J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(3): 52-56. (LI Chao, LI Changyou, ZHAO Shuixia, et al. Interpretation and analysis of river ice process based on remote sensing data [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(3): 52-56. (in Chinese))
- [27] 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. (in Chinese))
- [28] 邓铭江, 周海鹰, 徐海量, 等. 塔里木河下游生态输水与生态调度研究 [J]. 中国科学, 2016, 46(8): 864-876. (DENG Mingjiang, ZHOU Haiying, XU Hailiang, et al. Research on the ecological operation in the lower reaches of Tarim River based on water conveyance [J]. Science Sinica Technologica, 2016, 46(8): 864-876. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-06-27 编辑: 彭桃英)