

# 1978–2018 年叶尔羌河流域土地利用及其生态服务价值变化数据研究

王建平<sup>1</sup>, 阿依努尔·买买提<sup>1\*</sup>, 马元旭<sup>2</sup>

1. 中国科学院空天信息创新研究院喀什卫星地面站, 喀什 844000;  
2. 中国科学院空天信息创新研究院数字地球重点实验室, 北京 100094

**摘 要:** 为分析土地利用变化背景下的生态系统服务功能改变对干旱区流域生态建设与区域可持续发展的影响, 本研究以 1978、1988、1998、2008 与 2018 年 5 期 Landsat 系列卫星遥感数据为基础, 通过图像解译获取叶尔羌河流域近 41 年土地利用时空变化趋势, 并选取符合干旱区流域生态环境特点的价值系数, 估算了叶尔羌河流域 41 年各土地类型生态系统服务价值, 从生态系统服务价值角度探讨了叶尔羌河流域过去 41 年土地利用变化对其生态系统服务的影响。结果表明, (1) 1978–2018 年间, 耕地、林地和湿地分别增加了  $338.9 \times 10^3 \text{ hm}^2$ 、 $8.23 \times 10^3 \text{ hm}^2$ 、 $42.69 \times 10^3 \text{ hm}^2$ , 而草地、水域和未利用面积分别减少了  $59.2 \times 10^3 \text{ hm}^2$ 、 $103.21 \times 10^3 \text{ hm}^2$ 、 $227.43 \times 10^3 \text{ hm}^2$ ; (2) 1978–2018 年间叶尔羌河流域生态系统服务价值呈“减少–增加–减少”的变化趋势, 总体呈减少趋势。生态服务价值从 1978 年的  $425.86 \times 10^8$  元减少到 1988 年的  $424.43 \times 10^8$  元, 在 1998 年增加到  $440.67 \times 10^8$  元, 而到 2018 年的生态服务价值又减少到  $417.00 \times 10^8$  元; (3) 生态系统服务功能组成结构显示, 调节性功能价值量减少的幅度明显大于其他功能价值量变化的幅度, 而调节性服务功能的变化与总生态服务功能的变化同步且相同, 说明叶尔羌河流域生态系统服务功能属于调节性功能。(4) 1978–2018 年间, 叶尔羌河流域不同土地类型在各时期的生态系统服务价值敏感性指数都小于 1, 表明叶尔羌河流域生态服务价值对其价值系数缺乏弹性。调整后的干旱区流域生态服务价值系数可运用于叶尔羌河流域土地利用变化对其生态系统服务功能变化的研究, 有助于定量分析叶尔羌河流域土地利用结构变化及其生态效应。本研究结果可为叶尔羌河流域土地利用规划、生态文明建设以及区域可持续发展等提供一定科学依据和实践参考。

**关键词:** 叶尔羌河流域; 土地利用/覆被变化; 生态服务价值; 敏感性指数

**DOI:** 10.3974/geodp.2020.01.11

## 1

土地利用/覆被变化 (Land use/cover change, LUCC) 是全球环境变化研究的关键内容, 其对大气、水、土壤、生物多样性和人类活动等具有非常显著的影响<sup>[1]</sup>。研究土地利用变化的主要目的是利用 LUCC, 分析土地利用对区域环境变化的影响, 并对区域的生态文明及可持续发展提供指导性意见<sup>[2]</sup>。LUCC 可以改变土地覆被状况并影响区域生态过程, 引起

收稿日期: 2020-02-19; 修订日期: 2020-02-28; 出版日期: 2020-03-25

基金项目: 中国科学院 (2019-XBQNXZ-A-008)

\*通讯作者: 阿依努尔·买买提, 中国科学院空天信息创新研究院喀什站, ayinuer@radi.ac.cn

数据引用方式: [1] 王建平, 阿依努尔·买买提, 马元旭. 1978–2018 年叶尔羌河流域土地利用及其生态服务价值变化数据研究[J]. 全球变化数据学报, 2020, 4(1): 75–85. DOI: 10.3974/geodp.2020.01.11.

[2] 王建平, 阿依努尔·买买提, 马元旭. 叶尔羌河流域土地类型及生态系统服务价值变化数据集 (1978–2018) [DB/OL]. 全球变化数据仓储, 2020. DOI: 10.3974/geodb.2020.02.09.V1.

相应地区及周围地区乃至大区域土壤、水体、大气状况的改变<sup>[3]</sup>。LUCC 不仅客观地鉴定了人类对土地的利用和结构的改造,并且正确地反映区域景观的时空动态变化,由此使生态系统的结构和功能发生变化,进而造成生态系统服务价值的改变,研究 LUCC 情况下区域生态系统服务价值的变化具有重要意义<sup>[4]</sup>。目前,估算区域生态系统服务价值常用的方法主要有能值评价法、效益转化法和价值量评价法<sup>[5]</sup>,其中应用价值量评价法较多,且最后得到的结果一律转化为货币,此方法既适合某一种生态系统不同生态服务价值 (Ecological Service Value, ESV) 的比较,也适合进行不同生态系统间某一项生态服务功能的比较,具有较灵活的适用性和操作性,得到了广泛学者的应用<sup>[6]</sup>。塔里木河是我国最长的内陆河,而叶尔羌河是组成塔里木河上游的 3 大河源流之一 (阿克苏河、和田河和叶尔羌河)<sup>[7]</sup>。从 2001 年起,国家投入大量的经费 ( $107 \times 10^8$  元) 开始实施塔里木河流域综合治理项目,目的是协调流域水资源,实现塔里木盆地生态保护与经济效应的良性协调发展,在此项目的驱动下,塔里木河下游生态环境得到一定改善,恢复下游的生态廊道<sup>[8]</sup>。

叶尔羌河流域既是塔里木河的重要源流,也是塔里木盆地的主要河流之一,因此,利用叶尔羌河流域 1978、1988、1998、2008、2018 年的遥感解译数据,在对比分析每一期 LUCC 的基础上,结合应用价值量评价法估算分析流域生态系统服务价值变化趋势,有助于分析叶尔羌河流域生态环境变化特征趋势,旨在为将来开展干旱区流域生态环境保护与生态文明建设提供科学依据。

## 2

《叶尔羌河流域土地类型及生态系统服务价值变化数据集 (1978–2018)》<sup>[9]</sup>的主要元数据要素见表 1。

## 3

叶尔羌河流域 ( $35^{\circ}50'N-40^{\circ}31'N$ ,  $74^{\circ}28'E-80^{\circ}54'E$ ) 地处新疆维吾尔自治区的西南部 (图 1), 塔里木盆地西缘<sup>[11]</sup>。喀喇昆仑山是叶尔羌河的发源地,河流域全长为 1,097 km, 多年平均径流量为  $66.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 年径流量分配不均,主要集中在 6–8 月,径流量主要由冰川融雪和降水补充,最终汇流塔里木河。叶尔羌河流域光热资源较为丰富,在帕米尔高原、喀喇昆仑山和南天山的挡住作用下,使大西洋和印度洋暖、湿气流没能入境,造成区域常年干旱少雨,空气干旱,多年平均降雨量仅为 30–60 mm,属于典型的干旱大陆性气候<sup>[5]</sup>。叶尔羌河流域气温年际变化微小,光热资源相当丰富,多年平均气温  $11.4-12.3^{\circ}\text{C}$ ,积温较大,无霜期较长,热量丰富的气候条件为区域农业生产提供良好的机会,尤其是在中游地区特别适合早熟长绒棉和瓜果的生产,因此该地区是我国著名的棉花及核桃、巴旦木、红枣、石榴等干果和水果生产基地<sup>[12]</sup>。当前,叶尔羌河流域经济发展和生态保护的巨大压力同时存在,两者之间的主导位置一直在博弈,在过去几十年,随着研究区域土地利用结构快速变化,区域生态结构与生态过程也发生变化,而资源合理开发与生态环境可持续发展是叶尔羌河流域社会经济实现跨越式发展,实现小康社会目标的必要选择,了解当前生态与环境变化及现状,对协调经济发展与生态保护、保持区域的可持续发展意义重大。

表 1 《叶尔羌河流域土地类型及生态系统服务价值变化数据集（1978–2018）》元数据简表

条 目	描 述
数据集名称	叶尔羌河流域土地类型及生态系统服务价值变化数据集（1978–2018）
数据集短名	LU_EcoSerValue_Yarkant
作者信息	王建平，中国科学院空天信息创新研究院喀什站，wangjp@radi.ac.cn 阿依努尔·买买提，中国科学院空天信息创新研究院喀什站，ayinuer@radi.ac.cn 马元旭，中国科学院空天信息创新研究院数字地球重点实验室，mayx@radi.ac.cn
地理区域	35°50'N–40°31'N，74°28'E–80°54'E
数据年代	1978、1988、1998、2008、2018
空间分辨率	30 m×30 m
数据格式	.shp, Grid, .xlsx
数据量	4.04 MB（压缩后）
数据集组成	数据集由 2 个文件夹和 1 个 Excel 文件组： (1) 文件夹 1 内包含研究区域“.shp 数据、叶尔羌河“.shp”数据和研究区域地形数据三个子文件夹 (2) 文件夹 2 内包含 5 个遥感分类影像。包括 1978（MSS）、1988（TM）、1998（TM）、2008（ETM+）、2018（OLI）影像分类结果。采用 ENVI5.0 和 ArcGIS10.0 软件对原始影像进行大气纠正和几何纠正，再通过查找同名点对影像进行配准。运用监督分类将全区分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地 6 个一级土地利用类型 (3) 1 个 Excel 文件内包含 5 个表(表 3–7)，表 3 是叶尔羌河流域生态系统单位面积生态服务价值当量因子表，表 4 是叶尔羌河流域生态系统单位面积生态服务价值，表 5 是 1978–2018 年叶尔羌河流域不同土地利用类型面积比例及变化率，表 6 是叶尔羌河流域生态系统服务功能价值及其变化，表 7 是叶尔羌河流域 1978–2018 年不同土地利用类型生态服务价值敏感性指数变化
基金项目	中国科学院（2019-XBQNXZ-A-008）
数据计算环境	ENVI5.0 和 ArcGIS10.0
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 <a href="http://www.geodoi.ac.cn">http://www.geodoi.ac.cn</a> <sup>[10]</sup>
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101，中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	全球变化科学研究数据出版系统的“数据”包括元数据（中英文）、实体数据（中英文）和通过《全球变化数据学报》（中英文）发表的数据论文。其共享政策如下：（1）“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放，用户免费浏览、免费下载；（2）最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源；（3）增值服务用户或以任何形式散发和传播（包括通过计算机服务器）“数据”的用户需要与《全球变化数据学报》（中英文）编辑部签署书面协议，获得许可；（4）摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10%引用原则，即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%，同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 <sup>[10]</sup>
数据和论文检索系统	DOI, DCI, CSCD, WDS/ISC, GEOSS, China GEOSS, Crossref

4

4.1 数据收集及预处理

本研究应用的数据主要包括遥感系列数据、地形数据（数字高程模型，DEM）以及多年社会经济数据。本文采用遥感数据主要包括 Landsat 系列遥感数据：1978（MSS）、1988（TM）、1998（TM）、2008（ETM+）、2018（OLI）等来自中国地理空间数据云（Geo-spatial Data Cloud）和中国科学院空天信息创新研究院的数据共享网站。本研究应用的遥感数据都选择 6–8 月份的数据，因为这一时期叶尔羌河流域水资源最丰富，自然植被及农作物

生长茂盛,地物特征最为明显。DEM数据主要来源于中国科学院资源与环境数据共享网。多年社会经济数据主要来源于相关统计年鉴。

本论文图像解译过程中主要采用 2、3、4 三个波段,利用 ENVI.5 软件对 5 期遥感影像进行几何校正、配准,并借助 ArcGIS10.0 对各时期遥感影像进行目视判读和数字化处理。在遥感图像解译的过程中,根据我国现行的土地利用分类系统,参考研究目的及区域特征,对叶尔羌河流域的土地利用类型进行划分,共分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地 6 个一级土地利用类型,结果如图 2 所示。最后,结合野外调查结果进行人工修正,并利用精度监督法对解译结果进行精度检验,最终检验结果精度均大于 80%,可满足研究要求。

4.2 土地利用/覆被变化分析方法

土地利用动态度 ( $P$ ) 和土地利用的总动态度 ( $R$ ) 是用来描述区域土地利用/覆被变化速度的关键指标。土地利用动态度可定量地反映土地利用变化时的深度、宽度以及速度等时空差异<sup>[13]</sup>。其公式为:

$$P = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \tag{1}$$

$$R = \frac{\sum_k^n \left( \frac{U_{bk} - U_{ak}}{U_{ak}} \right)}{T} \times 100\% \tag{2}$$

式中,  $P$  是指研究时段内某一种土地类别的动态度;  $R$  土地利用的总动态度表征研究时段内区域土地利用变化的速度,  $k$  表示第  $k$  种土地利用类型;  $U_a$  和  $U_b$  是指研究区域  $a$  和  $b$  时期的土地类别的面积;  $T$  是指研究时间段。

4.3 生态系统服务价值评价方法

4.3.1 价值系数的选择及修正

目前,在国内生态系统服务价值评估研究领域,Constanza 等<sup>[14]</sup>提出的“生态系统单位面积生态服务价值当量因子表”和国内学者谢高地等<sup>[6,15]</sup>提出的“中国陆地生态系统服务价值当量因子表”应用较普遍。

本文选取价值量评价法,以谢高地提出的“中国陆地生态系统服务价值当量因子表”为基础,参考白元和徐海量<sup>[3]</sup>的研究成果,对于旱区流域的生态服务价值系数进行修正,

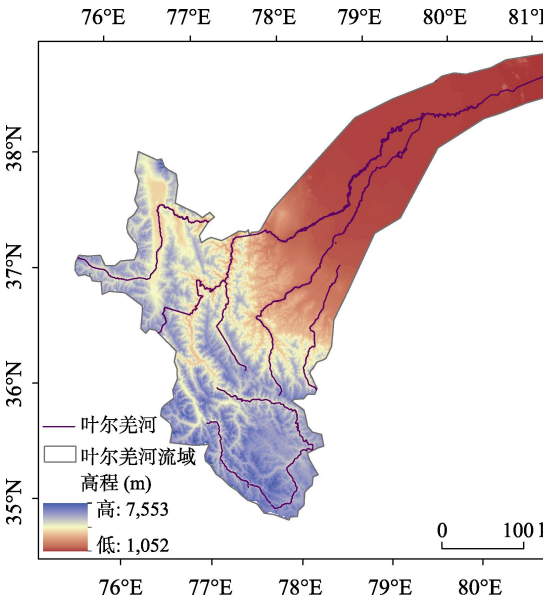


图 1 叶尔羌河流域地形图

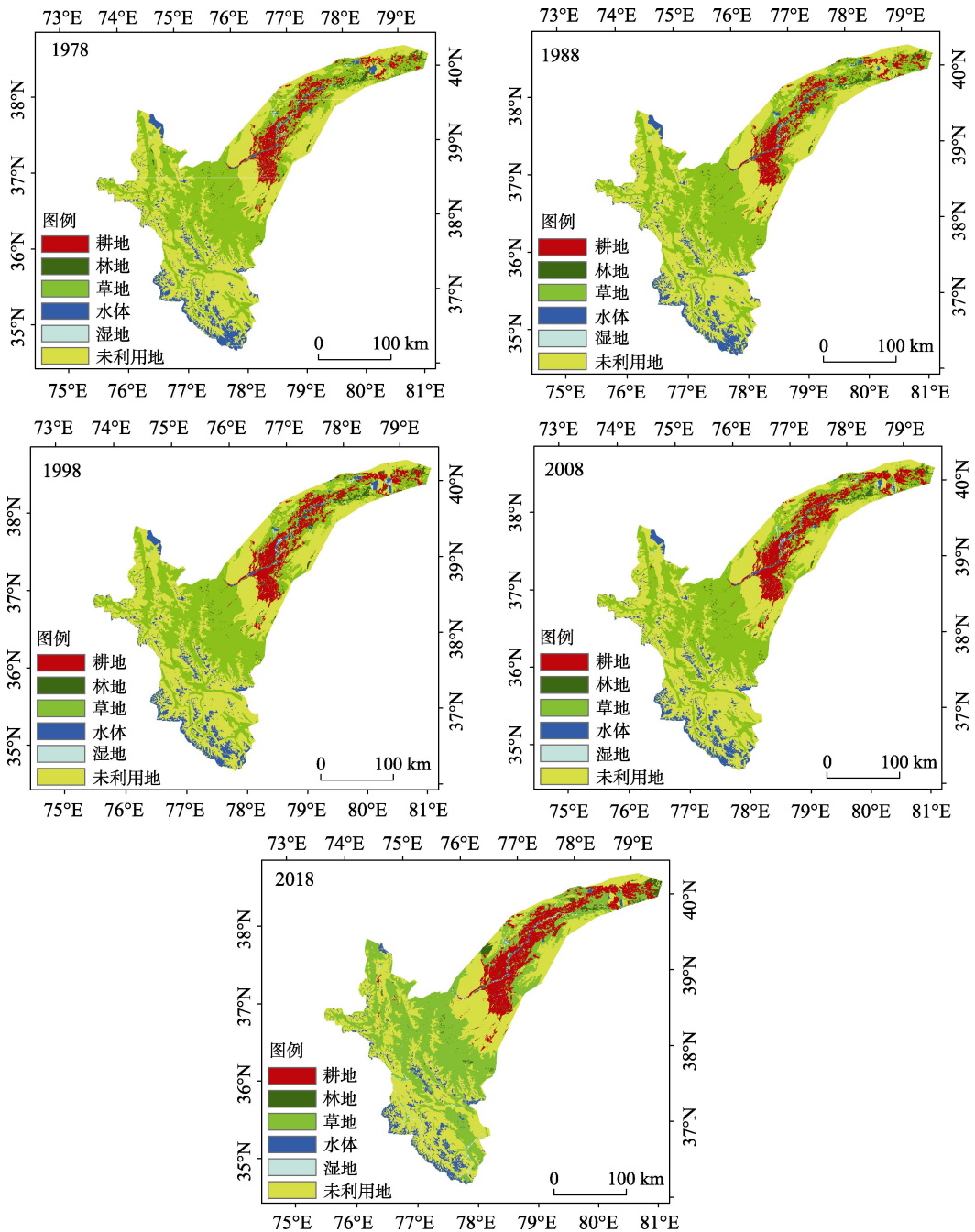


图 2 1978—2018 年叶尔羌河流域土地利用/覆被变化

以表 2 为标准，利用修正后的生态服务价值系数，得出适宜干旱区流域的生态服务价值当量因子示于表 3，其计算公式如下：

$$E_{ij} = e_{ij}E_a \tag{3}$$

式中， $E_{ij}$  为修正后第  $i$  类土地类型的第  $j$  项生态服务功能价值当量因子； $e_{ij}$  为  $j$  种景观

$i$  类生态服务功能的修正系数;  $E_a$  为中国陆地生态系统服务价值当量因子。

表 2 干旱区河流流域不同生态系统修正系数

生态系统	耕地	林地	草地	水体	湿地	未利用地
修正系数	0.37	0.422,2	0.333,4	0.61	0.69	0

表 3 叶尔羌河流域生态系统单位面积生态服务价值当量因子表

服务功能		耕地	林地	草地	水体	湿地	未利用地
调节服务	气体调节	0.19	1.48	0.27	0.00	1.24	0.00
	气候调节	0.33	1.14	0.30	0.30	11.80	0.00
	水文调节	0.22	1.35	0.27	13.54	10.70	0.03
	废物处理	0.61	1.64	0.44	11.82	12.54	0.01
支持服务	保持土壤	0.54	0.56	0.65	0.01	1.18	0.02
	生物多样性保护	0.26	1.38	0.36	1.62	1.73	0.34
生产服务	食物生产	0.37	0.05	0.10	0.06	0.21	0.01
	原材料生产	0.04	1.10	0.02	0.01	0.05	0.00
文化服务	娱乐文化	0.00	0.54	0.01	2.82	3.83	0.01
总计		2.56	9.24	2.42	30.17	43.27	0.42

4.3.2 生态服务价值的计算

本文选取价值量评价法, 应用于干旱区流域生态服务价值当量因子 (表 3), 估算研究区域生态服务总价值, 其计算公式为:

$$ESV = \sum_{i=1}^n S_i^V C_{kf} \tag{4}$$

式中,  $ESV$  为研究区域生态系统生态服务价值总量;  $S_i$  为第  $i$  类土地利用类型的面积;  $VC_{kf}$  代表  $k$  种土地利用类型的  $f$  种生态服务功能价值系数, 计算方法如下:

$$VC_{kf} = E_{ij}^V \tag{5}$$

式中,  $E_{ij}$  为修正后第  $i$  类土地类型的第  $j$  项生态服务功能价值当量,  $V$  为单位农田生态系统提供的食物生产服务功能的经济价值,  $V$  根据式(6)得到:

$$V = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^n \frac{m_i P_i q_i}{M} \tag{6}$$

式中,  $n$  为作物种类, 叶尔羌河流域主要包括的行政区是莎车县、泽普县、叶城县、麦盖提县和巴楚县, 而这些区域的主要农作物和园艺作物为小麦、水稻、玉米、巴旦木、红枣、核桃和豆类等;  $P_i$  为  $i$  种粮食作物的当年价格 (元·t<sup>-1</sup>);  $q$  为粮食作物的单位面积产量 (t·hm<sup>-2</sup>);  $m$  为  $i$  种粮食作物面积 (hm<sup>2</sup>);  $M$  为粮食作物总面积 (hm<sup>2</sup>)。根据《新疆统计年鉴》和《喀什统计年鉴》计算得出研究区域 1978、1988、1998、2008 和 2018 年的 1 个生态服务价值当量因子的平均经济价值量  $V$  为 1,575.5 (元·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)。最后利用式(4)可计算出叶尔羌河流域 6 种土地类型的生态服务价值系数, 结果如表 4 所示。

4.3.3 敏感性分析

敏感性指数 (Coefficient of Sensitivity, CS) 是表明生态服务价值 (ESV) 随时间变

表 4 叶尔羌河流域生态系统单位面积生态服务价值

服务功能		耕地	林地	草地	水体	湿地	未利用地
调节服务	气体调节	291.5	2,331.4	425.4	0.0	1,956.8	0.0
	气候调节	518.8	1,798.9	472.7	468.5	18,589.3	0.0
	水文调节	349.8	2,129.9	425.4	1,331.3	16,850.0	47.3
	废物处理	851.1	877.9	1,024.1	10.9	1,858.9	31.5
支持服务	保持土壤	956.0	2,590.5	693.2	18,618.6	19,763.4	15.8
	生物多样性保护	413.9	2,173.1	567.2	2,549.3	2,717.7	535.7
生产服务	食物生产	582.9	72.0	157.6	98.0	326.1	15.8
	原材料生产	58.3	1,727.0	31.5	10.9	76.1	0.0
文化服务	娱乐文化	5.8	849.1	15.8	4,444.9	6,033.4	15.8
总计		2.56	4,028.1	14,549.8	3,812.7	47,532.3	8171.7

化对价值系数（ $VC$ ）变化的依赖程度<sup>[16]</sup>。如  $CS>1$  时，可表示生态服务价值相对于  $CS$  是具有弹性的；如  $CS<1$  时，生态服务价值则被定为  $ESV$  对价值系数缺乏弹性，比值越大表明价值系数的准确性越关键。本研究中，在表格 3 中的生态服务价值系数的基础上，对其上下调正 50% 进行分析。其计算公式：

$$CS = \frac{|(ESV_j - ESV_i) / ESV_i|}{|VC_{jk} - VC_{ik}|}$$

(7)

式中， $CS$  为敏感性指数， $ESV$  为总生态服务价值， $VC_{ik}$  和  $VC_{jk}$  分别为最初和调正后的价值系数； $k$  为土地利用类型。

5

5.1 数据集组成

数据集由 2 个文件夹和 1 个 Excel 文件组成，存储为.shp、Grid、.xlsx 格式，具体见表 1。

5.2 数据结果分析

5.2.1 土地利用变化

干旱、半干旱地区的 LUCC 主要发生在绿洲区及绿洲与荒漠的交错带区，LUCC 受绿洲内部自然因素，如水资源、土壤、地形、气候等的控制，同时，LUCC 也反作用于绿洲发展模式及规模，并对绿洲生态环境的改变产生显著的影响，由叶尔羌河流域 1978–2018 年的土地利用/覆被变化结果可知，在整个研究期间土地利用/覆被变化较显著（表 5，图 2）。

叶尔羌河流域总面积为  $7.46\times10^6\text{ hm}^2$ ，未利用土地的占比最大，其在 1978、1988、1998、2008 和 2018 年占总面积的比例分别为 44.71%、45.05%、44.47%、44.45% 和 41.66%，在研究区域中始终占优势地位。1978、1988、1998、2008 和 2018 年耕地一直呈现增加的趋势，分别增长 1.98%、14.05%、15.24%、21.98% 和 63.51%。1978–2018 年 LUCC 总动态度为 7.26%，而在 1978–1988、1988–1998、1998–2008 和 2008–2018 不同年间研究区域 LUCC 总动态度分别为−0.415%、13.25%、−1.25% 和 10.82%。

由表 5 可知，在 41 年内研究区域的 LUCC 较强烈，尤其是 2008 年后，变化速度明显加快。1978–2018 年间各种土地利用类型面积增加率分为：湿地（249.13%）>耕地（63.51%）>水域（-20.35%）>林地（7.02%）>未利用地（-6.82%）>草地（-2.01%）。在 1978–2018 年耕地面积增长幅度最为明显，耕地年均增加  $8.5\times10^3\text{ hm}^2$ 。未利用地的变化仅次于耕地，在 41 年减少了  $227.43\times10^3\text{ hm}^2$ ；与此同时，水域面积和草地面积分别减少  $103.2\times10^3$ 、 $59.2\times10^3\text{ hm}^2$ 。湿地与林地面积也分别增加了  $42.7\times10^3$ 、 $8.2\times10^3\text{ hm}^2$ ；耕地面积增加而草地面积减少，说明研究区域人工绿洲化与土地退草变耕化的同步变化；水域面积的减少与湿地面积的增加说明，随着耕地面积的增加，农业用水也随之增长，不断侵占生态用水，易造成水域面积的减少。此外，在全球气候变化与人类活动的影响下，湿地与水域相互变换进而也影响了研究区域的生态环境。

表 5 1978–2018 年叶尔羌河流域不同土地利用类型面积比例及变化率（%）

土地利用类型	1978	1988	1998	2008	2018	1988– 1978	1998– 1988	2008– 1998	2018– 2008	2018– 1978
耕地	7.15	7.30	8.32	9.59	11.70	0.20	1.41	1.52	2.20	1.59
林地	1.57	1.54	1.67	1.56	1.68	-0.23	0.89	-0.69	0.81	0.18
草地	39.53	39.11	38.22	37.49	38.74	-0.11	-0.23	-0.19	0.33	-0.05
水域	6.80	6.80	6.85	6.51	5.42	0.00	0.08	-0.50	-1.68	-0.51
湿地	0.23	0.22	0.47	0.41	0.80	-0.35	11.24	-1.40	9.79	6.23
未利用地	44.71	45.04	44.47	44.45	41.66	0.07	-0.13	0.00	-0.63	-0.17

5.2.2 生态服务价值对土地利用变化的响应

在生态服务价值计算过程中，根据研究区域实际情况将研究区域土地类型分为耕地、林地、草地、水域、湿地和未利用地六种类型，并且结合修正后价值系数及相应公式，计算出叶尔羌河流域六种土地类型的生态服务价值，结果如表 6 所示。由表 6 可知，叶尔羌河流域生态服务价值总量呈逐步减少的趋势，在 1978–2018 年共减少了-2.1%，共  $8.87\times10^8$  元。而这整个过程不是简单的减少过程，呈先减少（1978–1988 年，生态服务价值减少  $1.43\times10^8$  元）后增加（1988–1998 年，生态服务价值增加  $16.24\times10^8$  元）之后又减少（1998–2018 年，减少  $23.68\times10^8$  元）的“减少–增加–减少”的变化趋势，1978、1988、1998、2008 和 2018 年，研究区域生产性功能分别为  $41.55\times10^8$ 、 $41.12\times10^8$ 、 $45.39\times10^8$ 、 $44.19\times10^8$  和  $52.39\times10^8$  元，调节性功能价值量分别为  $346.47\times10^8$ 、 $345.57\times10^8$ 、 $355.54\times10^8$ 、 $342.99\times10^8$  和  $326.49\times10^8$  元，支持性功能价值量分别为  $12.25\times10^8$ 、 $12.21\times10^8$ 、 $12.84\times10^8$ 、 $13.14\times10^8$  和  $14.49\times10^8$  元，而文化功能价值量分别为  $12.25\times10^8$ 、 $12.21\times10^8$ 、 $12.84\times10^8$ 、 $13.14\times10^8$  和  $14.49\times10^8$  元。生产性功能在 41 年中增加的总价值量为  $11.27\times10^8$  元，而调节性功能价值量在 41 年内减少了  $19.98\times10^8$  元，同时调节性功能的变化与总生态服务价值量的变化同步，呈现先减少后增加之后再减少的趋势。支持性功能在 41 年年过程中增加了  $2.24\times10^8$  元。文化功能减少了  $1.97\times10^8$  元。从上面的四种一级生态服务功能可知，叶尔羌河流域的生态服务价值由调节性功能决定，说明叶尔羌河流域生态服务价值属于调节性功能。

从土地利用结构变化与生态服务价值联系起来看，水域和草地面积的减少是造成研究



区域生态服务价值总量减少的主要原因。1978–2018 年，水域与草地面积的减少，使叶尔羌河流域生态服务价值总量减少  $51.31 \times 10^8$  元，而其他土地利用类型面积的增加也分别对总生态价值的增加有贡献，如耕地面积的增加使价值总量增加  $13.65 \times 10^8$  元，林地面积的增加使价值总量增加了  $1.2 \times 10^8$  元，湿地面积的增加使价值总量增加了  $29.1 \times 10^8$  元。

表 6 叶尔羌河流域生态系统服务功能价值及其变化

服务功能		总生态服务价值量（10 <sup>8</sup> 元）					价值变化量（10 <sup>8</sup> 元）				
		1978	1988	1998	2008	2018	1978–1988	1988–1998	1998–2008	2008–2018	1978–2018
调节服务	气体调节	17.17	16.99	17.53	17.28	18.93	−0.18	0.54	−0.25	1.65	1.76
	气候调节	24.38	24.13	27.86	26.91	33.46	−0.25	3.74	−0.95	6.54	9.08
	水文调节	129.58	129.33	133.46	127.12	115.8	−0.25	4.13	−6.33	−11.37	−13.82
	废物处理	37.2	36.94	37.33	37.41	40.26	−0.26	0.39	0.08	2.85	3.06
支持服务	保持土壤	126.94	126.63	131.55	126.15	119.2	−0.31	4.92	−5.4	−6.98	−7.77
	生物多样性保护	52.75	52.67	53.2	52.31	51.3	−0.08	0.54	−0.89	−1.01	−1.44
生产服务	食物生产	8.92	8.93	9.34	9.76	10.81	0.01	0.41	0.42	1.05	1.89
	原材料生产	3.33	3.28	3.5	3.38	3.68	−0.05	0.21	−0.12	0.3	0.34
文化服务	娱乐文化	25.6	25.54	26.9	25.4	23.63	−0.06	1.37	−1.5	−1.77	−1.97
总计		425.86	424.43	440.67	425.72	417	−1.43	16.24	−14.95	−8.73	−8.87

5.2.3 生态服务敏感度分析

根据敏感性指数计算公式，将各种土地利用类型的生态价值系数上下调整 50%，计算出研究区域 1978、1988、1998、2008 和 2018 年的敏感性指数，如表 7 所示。这 5 个时期 6 种土地利用类型的敏感性指数介于 0.027–0.568 之间，均小于 1，说明研究区域 *ESV* 对于 *VC<sub>ik</sub>* 是缺乏弹性的，研究结果是可信的。由于水域和草地的面积和单位面积的生态服务价值系数较大，因此，水域和草地的敏感性系数较大，其中水域的敏感性系数最大，水域敏感性系数 5 个时期的值均在 0.46 以上；草地的敏感性指数次之，5 个时期的值均在 0.247 以上。农田、林地、湿地与未利用地四者的敏感性指数互相接近，均在 0.01 以下。水域、未利用地和草地的敏感性指数随着面积的减少而变小，耕地、湿地与林地的敏感性指数随着面积的增加而有所增加。

表 7 叶尔羌河流域 1978、1988、1998、2008、2018 年不同土地利用类型生态服务价值敏感性指数变化

价值系数 ( <i>VC</i> ±50%)	1978(%)	<i>CS</i>	1988 (%)	<i>CS</i>	1988 (%)	<i>CS</i>	1988 (%)	<i>CS</i>	1988 (%)
耕地	2.524	0.05	2.582	0.052	2.837	0.057	3.384	0.068	4.214
林地	2.003	0.04	1.963	0.039	2.059	0.041	1.984	0.04	2.189
草地	13.201	0.264	13.105	0.262	12.333	0.247	12.524	0.25	13.211
水域	28.309	0.566	28.402	0.568	27.562	0.551	27.11	0.542	23.029
湿地	1.372	0.027	1.329	0.027	2.718	0.054	2.420	0.048	4.891
未利用地	2.591	0.052	2.619	0.052	2.491	0.050	2.577	0.052	2.466

域土地利用变化,结果显示水域面积和草地显著减少,而耕地面积明显增加,土地利用变化客观地反映了人类活动与生态环境的相互影响关系。对干旱区进行的众多研究结果表明,干旱区流域土地利用变化在短期时间内受到水量和气候等自然因素的影响较小,而农业生产是干旱区活动的主要内容。近几十年来,人类对干旱区绿洲水土资源的开发利用力度不断增强且向外扩展,给本身脆弱的生态环境带来前所未有的压力。谢高地提出的“中国陆地生态系统单位面积生态服务价值当量表”提供一个适合全国平均状态的生态系统服务价值的估算指标体系<sup>[3]</sup>,然而,我国疆域辽阔,各个区域生态环境之间存在一定差异,以其来估算部分地区的生态系统服务价值存在着一定的误差。由于干旱区生态环境具有比较强烈的脆弱性特点,其生态系统服务功能低于全国平均水平。因此,本文选取谢高地的中国生态服务价值当量因子作为基础,考虑研究区域的实际情况,对谢高地的价值系数进行修正,得到适合叶尔羌河的生态服务价值系数,以使叶尔羌河流域生态服务价值的估算结果更加合理。

从土地利用变化与生态服务的相互作用看,叶尔羌河流域伴随着耕地面积扩大,草地和水域面积显著减少,自然生态系统结构由非农业用地方式向农业用地方式转变,这是生态系统衰退的明显特征,表明存在着绿洲化和荒漠化共同发展的情况<sup>[17]</sup>。耕地的生态服务价值在这41年间逐渐增加,但未能阻止叶尔羌河流域生态系统服务功能总价值减少的趋势,这主要是由于耕地生态系统增垦面积扩大的来源主要由生态服务价值较高的草地转换而来,且耕地的扩大对叶尔羌河流域生态系统服务价值的贡献不明显,因而造成该区自然资本的价值在不断减少<sup>[18]</sup>。研究区域耕地面积的扩大在短时期内对提高农民收入、促进当地经济发展具有明显的经济效果,但耕地面积的快速增加则为当地的生态安全造成了较大的隐患。耕地主要由草地开垦而来,因而造成自然植被的面积不断减少。近几十年来,随着耕地面积的增加,农业用水也随之增长,不断侵占生态用水,易造成当地自然植被的退化,使研究区域抵抗沙漠化等自然灾害的能力降低。如果不能加强对耕地面积快速扩大的管控,将会使生态系统结构发生变化,生态系统服务价值继续下降,造成整个生态系统失去本有的自身平衡。因此,在未来一段时期内,应努力改善土地利用现状,严格控制耕地面积的盲目增长,减少对水域、草地等自然环境子系统的破坏,并加强对土地荒漠化、盐渍化等现象的控制。

本文基于5期土地利用数据,对叶尔羌河流域土地利用变化及其生态系统服务价值进行研究,主要结论如下:

(1) 在1978–2018年,叶尔羌河流域LUCC总体速度为7.26%。41年内面积变化幅度绝对值的顺序:湿地(249.13%)>耕地(63.51%)>水域(20.35%)>林地(7.02%)>未利用地(6.82%)>草地(2.01%)。在整个研究期间,耕地面积增速加快,而水域和草地减少的速度也有加快的趋势,同时未利用地面积减少,表明叶尔羌河流域存在着植被退化、水域面积缩小等生态问题。

(2) 应用符合研究区域实际情况的干旱区流域生态服务价值系数,估算出叶尔羌河流域1978、1988、1998、2008和2018年生态服务价值分别为 $425.86 \times 10^8$ 、 $424.43 \times 10^8$ 、 $440.67 \times 10^8$ 、 $425.72 \times 10^8$ 和 $417.00 \times 10^8$ 元,其呈“减少–增加–减少”的趋势,且41年内以减少的趋势为主。从土地利用结构变化和生态服务价值关系可知,水域和草地面积的减少是造

成生态服务价值减少的主要原因。

(3) 生态系统服务功能价值结构显示, 调节性功能价值量减少的幅度要明显大于其他功能价值量变化的幅度, 且调节性服务功能的变化与总生态服务功能的变化同步, 说明叶尔羌河流域生态系统服务功能属于调节性功能。

(4) 叶尔羌河流域 5 期的土地利用类型生态服务价值对生态服务功能价值指数的敏感性指数都小于 1, 说明: 将调整后的干旱区流域生态服务价值系数运用于叶尔羌河流域土地利用变化对其生态系统服务功能变化的研究较为合适, 有助于定量的分析叶尔羌河流域土地利用结构变化的生态效应。

## 参考文献

- [1] 魏光辉. 基于遥感的新疆开孔河流域土地利用及覆被变化特征研究[J]. 浙江水利水电学院学报, 2016, 28(4): 48–58.
- [2] 陈利顶, 张淑荣, 傅伯杰等. 流域尺度土地利用与土壤类型空间分布的相关性研究[J]. 生态学报, 2003, 23(12): 2497–2505.
- [3] 白元, 徐海量, 凌红波等. 塔里木河干流区土地利用与生态系统服务价值的变化[J]. 中国沙漠, 2013, 33(6): 1912–1920.
- [4] 桂林, 张落成, 张倩. 长三角地区土地利用时空变化对生态系统服务价值的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(12): 3311–3319.
- [5] 张广朋, 徐海量, 杜清等. 近 20 a 叶尔羌河流域生态服务价值对土地利用/覆被变化的响应[J]. 干旱区研究, 2016, 33(6): 1303–1310.
- [6] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 190–198.
- [7] 海米提·依米提, 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 张峰等. 基于 3S 的塔里木河中游景观格局变化特征分析[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2007, 24(2): 127–134.
- [8] 陈忠升, 陈亚宁, 李卫红等. 塔里木河干流径流损耗及其人类活动影响强度变化[J]. 地理学报, 2011, 66(1): 89–98.
- [9] 王建平, 阿依努尔·买买提, 马元旭. 叶尔羌河流域土地类型及生态系统服务价值变化数据集 (1978–2018) [DB/OL]. 全球变化数据仓储, 2020. DOI: 10.3974/geodb.2020.01.05.V1.
- [10] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策[OL]. DOI: 10.3974/dp.policy.2014.05 (2017 年更新).
- [11] 李华林, 白林燕, 冯建中等. 新疆叶尔羌河流域胡杨林时空格局特征[J]. 生态学报, 2019, 39(14): 5080–5094.
- [12] 何兵, 高凡, 闰正龙等. 叶尔羌河径流演变规律与变异特征[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(1): 38–45.
- [13] 李钊, 安放舟, 张永福等. 喀什市生态系统服务价值对土地利用变化的响应及预测[J]. 水土保持通报, 2015, 35(5): 274–279.
- [14] Costanza, R., D'Arge, R., Groot, R. D., et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Nature*, 1997, 387(1): 253–260.
- [15] 赵军, 韦莉, 陈姗. 石羊河流域上游生态系统服务价值的变化研究[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(1): 36–40.
- [16] 程琳, 李锋, 邓华锋. 中国超大城市土地利用状况及其生态系统服务动态演变[J]. 生态学报, 2011, 31(20): 6194–6204.
- [17] 郝兴明, 李卫红, 陈亚宁等. 塔里木河干流土地利用/覆被变化的社会经济驱动力分析[J]. 中国沙漠, 2007, 27(3): 405–411.
- [18] 黄湘, 陈亚宁, 马建新. 西北干旱区典型流域生态系统服务价值变化[J]. 自然资源学报, 2011, 26(8): 1364–1376.