

doi: 10.12029/gc20230209002

王璐晨, 韩海辉, 张俊, 黄姣, 顾小凡, 常亮, 董佳秋, 龙睿, 王倩, 杨炳超. 2024. 塔里木河流域土地利用及人类活动强度的时空演化特征研究[J]. 中国地质, 51(1): 203–220.

Wang Luchen, Han Haihui, Zhang Jun, Huang Jiao, Gu Xiaofan, Chang Liang, Dong Jiaqiu, Long Rui, Wang Qian, Yang Bingchao. 2024. Spatio-temporal evolution of land use and human activity intensity in the Tarim River Basin, Xinjiang[J]. Geology in China, 51(1): 203–220(in Chinese with English abstract).

塔里木河流域土地利用及人类活动强度的 时空演化特征研究

王璐晨^{1,2,3}, 韩海辉^{3,4}, 张俊^{2,3}, 黄姣⁵, 顾小凡^{2,3,6}, 常亮^{2,3},
董佳秋^{2,3}, 龙睿^{2,3}, 王倩^{2,3}, 杨炳超^{2,3}

(1. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083; 2. 中国地质调查局干旱—半干旱区地下水与生态重点实验室, 陕西西安 710054; 3. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西西安 710054; 4. 自然资源部黄河上中游自然资源智能遥感监测工程技术创新中心, 陕西西安 710054; 5. 长安大学, 陕西西安 710064; 6. 中国地质科学院, 北京 100037)

摘要:【研究目的】人类活动引起的土地利用/覆被变化是全球环境变化的重要组成部分, 旱区土地利用对区域水文和生态的影响尤为显著, 探究土地利用变化及其对人类活动的响应对西北干旱内陆生态与资源环境可持续发展具有重要意义。【研究方法】基于 1980—2018 年间共 5 期遥感影像, 结合土地利用动态度、土地利用转移矩阵和人类活动强度指数分析塔里木河流域各水资源分区土地利用变化特征。【研究结果】近 40 年中, 塔里木河流域耕地、建设用地和林地面积分别增加 $1.58 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $1.2 \times 10^3 \text{ km}^2$ 和 347 km^2 , 而草地、未利用地和水域面积分别减少 $1.33 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $0.32 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 815 km^2 。各水资源分区中塔里木河干流土地利用类型变化最大, 其次为渭干河、阿克苏河和喀什噶尔河流域。自 2000 年以来, 塔里木河流域建设用地当量面积和人类活动强度增加相对较快, 特别是 2000—2010 年间呈显著增长趋势。【结论】塔里木河流域各水资源分区的人类活动强度呈显著的空间差异性。社会经济发展和政策的导向性作用是塔里木河流域土地利用变化和人类活动强度的主要影响因素。

关键词: 水; 水资源分区; 土地利用变化; 人类活动强度; 水文地质调查工程; 塔里木河流域; 新疆

创新点: (1) 选取塔里木河流域典型区, 首次以水资源分区为划分依据, 分析 1980—2018 年土地利用类型及人类活动强度的时空演化特征; (2) 以土地利用动态变化模型、土地利用类型转移模型、土地利用程度和区域分异模型和人类活动强度模型等多分析方法与 GIS 技术相结合研究土地利用变化对人类活动的响应。

中图分类号: F301.2; TV1 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)01-0203-18

Spatio-temporal evolution of land use and human activity intensity in the Tarim River Basin, Xinjiang

收稿日期: 2023-02-09; 改回日期: 2023-03-27

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划(2022JQ-271)、中国地质调查局项目(DD20190351、DD20221751)、国家自然科学基金(41877199、42177346、52009103、U2243240)、陕西省创新能力支撑计划(2019TD-040)和陕西省重点研发计划(2021ZDLSF05-01、2022SF-327、2023-GHZD-38)联合资助。

作者简介: 王璐晨, 女, 1992 年生, 博士, 工程师, 主要从事旱区水文地质研究工作; E-mail: wangluchen@email.cugb.edu.cn。

通讯作者: 韩海辉, 男, 1983 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事资源与环境遥感工作; E-mail: hanhh06@hotmail.com。

WANG Luchen^{1,2,3}, HAN Haihui^{3,4}, ZHANG Jun^{2,3}, HUANG Jiao⁵, GU Xiaofan^{2,3,6}, CHANG Liang^{2,3},
DONG Jiaqiu^{2,3}, LONG Rui^{2,3}, WANG Qian^{2,3}, YANG Bingchao^{2,3}

(1. School of Water Resource and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Groundwater and Ecology in Arid and Semi-arid Areas, China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Xi'an Center, China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 4. Upper and Middle Reaches of Yellow River Natural Resources Intelligent Remote Sensing Monitoring Engineering Technology Innovation Center, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 5. Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 6. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: This paper is the result of hydrogeological survey engineering.

[Objective] Land Use/Cover Change (LUCC) caused by human activities is a critical part of global environmental change. LUCC in arid regions has a particularly significant impact on regional hydrology and ecology. Therefore, exploring LUCC and its response to human activities is of great significance to the sustainable development of ecology, resources and environment in the arid inland of Northwest China. **[Methods]** Based on the Landsat images during 1980 to 2018, this paper analyzes the characteristics of land use change in nine divisions of water resources of Tarim River Basin, by the combination of land use dynamic degree, land use transfer matrix and human activity intensity degree. **[Results]** In the past 40 years, cropland, constructive land and forest increased by 1.58×10^4 km², 1.2×10^3 km² and 347 km², respectively. By comparison, grassland, unutilized land, water and wetland decreased by 1.33×10^4 km², 0.32×10^4 km² and 815 km², respectively. The main stream of Tarim River Basin has experienced the most significant change in land use types among nine divisions of water resources, followed by Weigan, Aksu and Kashgar river basin. Since 2000, the equivalent area of constructive land and human activity intensity in Tarim River Basin has increased relatively fast, especially from 2000 to 2010. **[Conclusions]** Human activity intensity has showed significant spatial difference among division of water resources. Socio-economic development and policy guidance are major factors leading to land use change and human activity intensity difference.

Key words: water; divisions of water resources; land use change; human activity intensity; hydrogeological survey engineering; Tarim River Basin; Xinjiang

Highlights: (1) This paper focuses on typical areas of Tarim River Basin, for the first time divides the area based on water resources zoning, and analyzes the spatial-temporal evolution of land use type and human activity intensity from 1980 to 2018. (2) The response of land use change to human activities is studied by combining the land use dynamic change model, land use type transfer model, land use degree and regional differentiation model, and human activity intensity model with GIS techniques.

About the first author: WANG Luchen, female, born in 1992, doctor, engineer, engaged in the research of hydrogeology in arid areas; E-mail: wangluchen@email.cugb.edu.cn.

About the corresponding author: HAN Haihui, male, born in in 1983, doctor, senior engineer, engaged in the research of remote sensing for natural resources and environment; E-mail: hanhh06@hotmail.com.

Fund support: Supported by the projects of Natural Science Basic Research Program of Shaanxi (No.2022JQ-271), China Geological Survey (No.DD20190351, No.DD20221751), National Nature Science Foundation of China (No.41877199, No.42177346, No.52009103, No.U2243240), Innovation Capability Support Program of Shaanxi (No.2019TD-040) and Key Research and Development Program of Shaanxi (No.2021ZDLSF05-01, No.2022SF-327, No.2023-GHZD-38).

1 引 言

人类活动改变近 75% 的地表覆被, 土地利用/覆被变化 (Land Use/Cover Change, LUCC) 影响地表辐射收支和水汽交换等过程, 改变地表物质和能量循环, 进而对区域乃至全球气候、水资源和生态

环境产生重大影响 (Pielke and Avissar, 1990; Murray and Rogers, 1999; Strassburg et al., 2014; Daneshi et al., 2021)。人类活动强度作为评价和衡量人类对地球生态系统影响程度的重要指标, 成为研究人类与土地关系的新视角 (Sanderson et al., 2002; Turner et al., 2003; 徐勇等, 2015; 段群滔和罗立辉, 2021)。

已有的土地利用变化及响应相关研究,大多侧重于全球尺度或人口集聚度较高的湿润地区,对干旱内陆的关注相对较少。实际上,干旱内陆地区 LUCC 对人类活动的反应更加敏感,更易反馈区域生态和水文过程对 LUCC 的响应。

塔里木河(下文简称为“塔河”)是中国最大的内陆河,塔河流域是实施西部大开发、生态安全战略和丝绸之路经济带的重要区域(尹立河等, 2021)。但由于塔河流域深居欧亚大陆腹地,远离海洋,气候极端干旱,生态环境脆弱且抗干扰能力弱(李彦娥等, 2023)。水资源是塔河流域维系生态环境稳定的重要保障,也是推动社会经济发展的重要支撑要素。而不合理的水资源开发利用导致塔河流域下游土地利用类型发生显著变化,引发河道断流,植被极度退化和荒漠化加剧等生态环境问题(陈亚宁和徐宗学, 2004; 满苏尔·沙比提和陆吐布拉·依明, 2011; 郭宏伟等, 2017)。同时,土地利用/覆被变化是人类活动的重要体现,也是水文变化的重要驱动因素,通过改变流域下垫面状况对流域产汇流过程、水循环空间格局以及时空配置产生影响,使水土资源与生态环境保护矛盾频发(史永亮等, 2006; 江山等, 2023)。由此可见,土地利用与水资源是塔河流域环境变化中互相作用的重要组成部分。塔河流域是一个相对独立的生态环境系统,但其干流及各源流的地形地貌、地质构造、水文气象不尽相同,水资源分布与生态环境也各具特点。因此,厘清各水资源分区的土地利用及人类活动强度变化,可为协调区域生态、农业及水文水资源合理分配提供因地制宜的科学理论依据。

近 30 年(1990—2016 年),塔河干流流域内耕地和建设用地面积变化最为明显,其次为林草地,21 世纪以前,该区植被覆盖严重退化,2000 年启动的塔里木河综合治理后,植被覆盖度呈波动上升趋势,特别是在绿洲农业灌溉区和退耕还林草恢复区,呈现出人工绿洲替代天然绿洲的趋势(杨光华等, 2010; 赵少军等, 2018)。水资源再分配对塔河下游河岸带土地利用影响较大,使林草地面积增加,耕地和人工用地减少,抑制了盐碱化和土地沙化趋势(孙美琴等, 2013; 王珊珊等, 2021)。2009—2018 年,塔河流域内建设用地、耕地和其他农用地面积呈增长趋势,园林地、草地、水域及未利用地面积持

续下降,且林草和水域均呈现出向人工用地转化的趋势,其中克孜勒苏柯尔克孜州、阿克苏和喀什地区的土地利用结构受人类活动影响较大,土地利用的有序性和优势度较低(高玥和刘新平, 2019; 周瑞涛等, 2021)。塔河各流域土地利用的相关研究也逐渐增多:1980—2015 年间,开都—孔雀河流域的耕地和建设用地均呈显著扩张趋势,其中孔雀河流域耕地和建设用地面积增幅均在 200% 以上,其他土地利用类型均有不同程度减少,2000 年前后自然植被出现小幅退化—恢复的过程,人口增长和塔河生态综合治理是土地利用变化的主要驱动因子(张军峰等, 2018; 刘薇, 2019)。1990—2014 年人类活动强度增大,导致渭干—库车河流域的耕地扩张和草地锐减(侯一峰等, 2020)。1990—2016 年塔河流域南缘和田地区耕地持续加速扩张和建设用地面积增加,致使林草地和未利用地面积减少(胡栩等, 2020)。塔河流域西部的喀什地区,建设用地当量面积和人类活动在 2000—2020 年均呈稳步增长趋势,增速逐渐加快,其北部叶尔羌河流域和喀什噶尔河流域人类活动强度最高,人口密度增加对人类活动强度变化起主导作用(闫伊亮, 2022)。阿克苏河流域近 20 年(2000—2020)土地利用由调整时期转化为发展时期,各土地利用类型之间相互转化的活跃水平趋于平缓,用地结构和布局逐渐得到优化(艾克旦·依萨克, 2022)。从目前的研究情况来看,对塔里木河流域土地利用结构研究大多集中于干流区域,对各水资源分区的土地利用和人类活动强度相关的研究有待更加系统深入。

在查阅已有研究成果的基础上,本文对塔里木河流域及其各水资源分区进行研究,结合土地利用动态度、土地利用变化重要性指数、土地利用转移矩阵、桑基图和人类活动强度指数,剖析 1980—2018 年间塔里木河流域不同水资源分区的土地利用状况及人类活动强度的变化特征,为塔里木河流域的土地资源开发与保护、土地利用结构优化以及经济建设与区域资源环境的可持续发展提供科学依据。

2 材料与方法

2.1 研究区概况

塔里木河流域(34°55′~43°48′N, 73°10′~94°05′E)

位于新疆维吾尔自治区南部塔里木盆地,由塔里木河干流及环塔里木盆地的阿克苏河、和田河和渭干河等九大水系组成(邓铭江等, 2017; Wang et al., 2021)。塔里木河流域是一个封闭的内陆水循环和水平衡相对独立的集水区,面积约为 $1.02 \times 10^6 \text{ km}^2$,是黄河流域的 1.4 倍。塔里木河全长 1321 km,自身不产流,主要依靠源流高山区冰雪融水和降水补给,阿克苏河是塔里木河干流水量的主要补给来源,补给量占 73.2%,其次为和田河,补给量约 23.2%(陈亚宁等, 2003; 刘静等, 2019)。该流域位于天山、东帕米尔高原、喀喇昆仑山和昆仑山之间,地貌复杂多样,地表植被稀少单一,由山地、平原和沙漠三大地貌单元构成,分别占流域总面积的 47%、22% 和 31%(冉启云, 2017)。流域范围涉及行政区包括巴音郭楞蒙古自治州、阿克苏地区、喀什地区、克孜勒苏柯尔克孜自治州及和田地区共 5 个地州、44 个

县市和新疆生产建设兵团的 4 个师辖地。

本文根据塔里木河九大水系分区,将塔河流域分为 9 个水资源分区(图 1),分别是: I 克里亚诸小河(克里亚河)、II 和田河、III 车尔臣诸小河(车尔臣河)、IV 叶尔羌河、V 开都河—孔雀河(开孔河)、VI 塔里木河干流区(塔河干流)、VII 喀什噶尔河(喀什河)、VIII 阿克苏河和 IX 渭干河。由于塔里木河流域中部塔克拉玛干沙漠和东部库木塔格沙漠的自然本底条件较差,水资源匮乏,故不对其进行分区。

2.2 数据来源及处理

本文所用数据为 Landsat MSS/TM/ETM/OLI 遥感影像数据,来源于美国地质调查局网站(<https://earthexplorer.usgs.gov/>)和中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>)。选取 1980、1990、2000、2010 和 2018 年 6—10 月的遥感影像,将各景影像进行进行辐射定标和

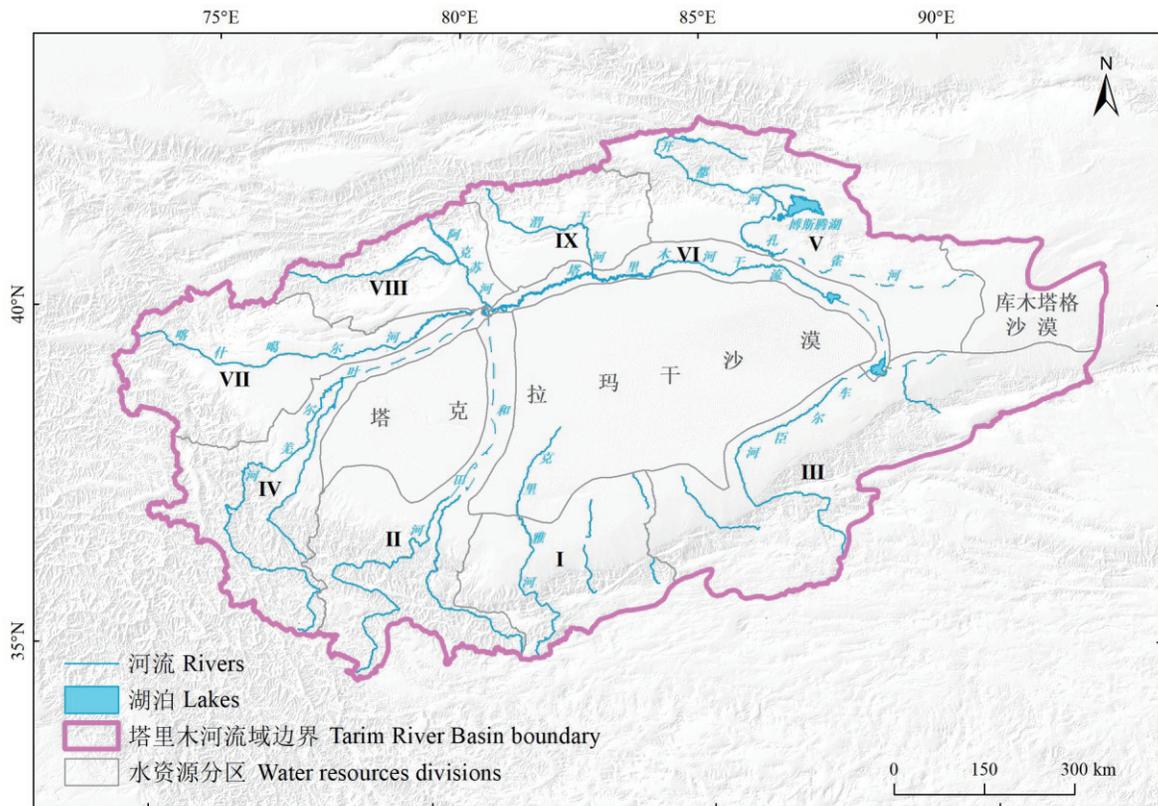


图 1 研究区范围及水资源分区示意图

I—克里亚诸小河; II—和田河; III—车尔臣河; IV—叶尔羌河; V—开都河—孔雀河; VI—塔里木河干流; VII—喀什噶尔河; VIII—阿克苏河; IX—渭干河

Fig. 1 Location and water resources divisions of the Tarim River Basin

I—The small rivers of Keriya River; II—Khotan River; III—Qarqan River; IV—Yarkant River; V—Kaidu River—Kongque River; VI—The main stream of Tarim River; VII—Kashgar River; VIII—Aksu River; IX—Weigan River

大气校正等预处理,消除传感器本身性能、地形、光照条件、大气环境等因素引起的误差,再进行波段融合、图像镶嵌和裁剪、波段计算等处理,最终生成 5 期可用于土地利用变化分析的研究区遥感影像。参考全国土地利用现状调查技术规程,对土地利用/覆被分类进行定义,确定分类方案包括耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地(表 1)。

2.3 土地利用变化研究方法

2.3.1 土地利用动态变化分析

土地利用动态度是分析土地利用变化的常用指标,用于表征土地利用类型在特定时段内的动态变化幅度和速率。单一土地利用动态度(王秀兰和包玉海, 1999)可表达研究区某时段内某一类土地利用的数量变化情况,其数学模型为:

$$K = \frac{S_b - S_a}{S_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中, S_a 和 S_b 分别表示研究时段始末的某一类土地利用类型面积, T 为研究时段长度。

2.3.2 土地利用类型转移分析

通过定量描述各地类之间的系统转移和状态转移建立转移矩阵,可有效反映 LUCC 转移变化的结构特点与方向(徐岚和赵羿, 1993)。表 2 中, A_n 为土地利用/覆盖中各种地类(本文中 $n=6; 1\sim 6$ 分别表示耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用

地), S_{mn} 代表相应年份下两种地类的转化面积(nn 相同表示未发生变化的面积), T_1 、 T_2 表示研究时段的初始和结束年份。从地类转移矩阵中可以得到各类面积的变化,即 T_1 至 T_2 年间各地类的面积变化。

桑基图可直观表示数据间的转换、流向及关系,是描述大量复杂数据之间流动情况的有效方法。土地利用变化本质上也是不同土地利用类型之间面积的转移,某地类面积增加意味着另一种地类面积的减少,使用桑基图对转移矩阵进行可视化,可反映不同土地利用类型间的转移轨迹和数量(Schmidt, 2008; 王徐凡, 2019)。

2.3.3 土地利用程度分析

土地开发利用是人类改变地表土地类型的方式之一,土地利用程度综合指数可表征人类活动对区域土地的开发利用和影响程度。土地利用程度和区域分异模型(庄大方和刘纪远, 1997)为:

$$L_i = 100 \times \sum_{i=1}^n (A_i \times R_i) \quad (2)$$

式中, L_i 为土地利用程度综合指数, $100 \leq L_i \leq 400$; A_i 为区域内第 i 类土地利用程度分级指数, R_i 为第 i 类土地利用程度分级面积占比,文中将未利用地赋值为 1,林地、草地和水域赋值为 2,耕地赋值为 3,建设用地赋值为 4。

表 1 塔里木河流域土地利用/土地覆被分类方案

Table 1 Classification scheme of LUCC in the Tarim River Basin

序号	类别	土地利用类型及范围
1	耕地	指种植农作物的土地,包括旱田和水浇地
2	林地	指经济林、防护林及各类园地等,包括有林地、灌木林、疏木林和其他林地
3	草地	指以草本植物为主,覆盖度在5%以上的各类草地,包括高/中/低覆盖度草地
4	水域	包括河渠、湖泊、水库坑塘、滩地和永久性冰川雪地等
5	建设用地	包括城镇用地、农村居民点和其它建设用地
6	未利用地	包括沙地、戈壁、盐碱地、沼泽地、裸土地、裸岩和其他未利用地等

表 2 土地利用转移矩阵

Table 2 Transfer matrix of land use and cover types

项目	T_2					T_2 年总计
	A_1	A_2	...	A_n		
T_1	A_1	S_{11}	S_{12}	...	S_{1n}	$S_{11} + \dots + S_{1n}$
	A_2	S_{21}	S_{22}	...	S_{2n}	$S_{21} + \dots + S_{2n}$

	A_n	S_{n1}	S_{n2}	...	S_{nn}	$S_{n1} + \dots + S_{nn}$
T_1 年总计	$S_{11} + \dots + S_{n1}$	$S_{12} + \dots + S_{n2}$		

2.4 人类活动强度评价

徐勇等(2015)基于土地利用/覆被概念,提出以“建筑用地当量(CLE, Construction Land Equivalent)”为度量单位,用于评价人类活动对陆地表层影响和作用程度。该方法将度量单位统一,便于进行不同空间和时间尺度的对比分析。人类活动强度(HAI, Human Activity Intensity)模型:

$$HAI = \frac{S_{CLE}}{S} \times 100\% \quad (3)$$

$$S_{CLE} = \sum_{i=1}^n (S_i \times CI_i) \quad (4)$$

式中, HAI 为人类活动强度, S_{CLE} 和 S 分别为建筑用地当量面积和区域总面积, S_i 为第 i 种土地利用类型的面积, CI_i 为第 i 种土地利用类型的建筑用地当量折算系数(CI, Conversion Index of Construction Land Equivalent)。 CI_i 是根据人类活动对不同土地利用类型的陆地表层作用的强弱换算所得,可反映的人类对陆地表层自然覆被利用、改造和开发的程度。 CI_i 可通过两层级分步式法进行换算:第一层级,将表层自然属性未改变且自然覆被未被利用的特征值设定为 0,而表层有人工隔层且表层上下水分、养分、空气和热量交换都被阻滞的特征值设定为 1,以“自然覆被改变”和表层上下“水分”、“养分”、“空气”和“热量”能否发生交换等 5 个特征为标志,对应的特征值设置为 0.2(0~1 间五等分),多特征标志叠加对应的特征值为 0.2 的倍数;第二层级,将“自然覆被改变”这一特征再进行细化,分别把“表层自然覆被未改变但被利用”、“自然覆被改变—种植多年生植物”、“自然覆被改变—种植 1 年

生作物”为标志,这 3 个特征标志所反映的表层自然属性变化的程度是递进的,即自然覆被未改变但被利用对应的特征值为 0.067、自然覆被改变—种植多年生植物对应的特征值为 0.133、自然覆被改变—种植 1 年生作物对应的特征值为 0.2。不同土地利用类型的折算系数见表 3, n 为区域内土地利用类型数量。

3 结果分析

3.1 塔里木河流域土地利用结构及变化分析

3.1.1 土地利用分布格局及变化分析

基于遥感影像解译结果,对塔里木河流域土地利用数据进行统计分析(表 4, 表 5),塔河流域由中山带草原/森林区、山前戈壁砾石和平原区塔克拉玛干沙漠组成,未利用地和草地是该流域的主要用地方式。1980 年塔河流域(图 2a)的未利用地和草地面积占比分别为 66.75% 和 26.34%,2018 年流域(图 2b)内其面积占比略有下降,分别减少 0.35%

表 3 不同土地利用类型的建设用地当量折算系数

Table 3 Conversion index of construction land equivalent of different land use and cover types

序号	土地利用类型	二级土地利用类型	折算系数
1	耕地	水田/旱田	0.2
2	林地	有林地/灌木林/疏林地	0
		其他林地	0.2
3	草地	高/中/低覆盖度草地	0
		湖泊/永久性冰川积雪/滩地	0
4	水域	河渠	0.067
		水库水面	0.6
5	建设用地	城镇用地/农村居民点/其他建设用地	1
6	未利用地	沙地/戈壁/盐碱地/沼泽地/裸土地/裸岩	0
		石质地/其他未利用地	0

表 4 1980—2018 年塔里木河流域各土地利用类型面积及其占比

Table 4 The area and proportion of land use types in the Tarim River Basin

土地利用类型	土地利用量 (10^4 km^2) 及占比				
	1980年	1990年	2000年	2010年	2018年
耕地	2.6853 (2.29%)	2.7809 (3.02%)	3.1879 (3.46%)	3.6013 (3.91%)	4.2668 (4.64%)
林地	1.2377 (1.35%)	1.2605 (1.37%)	1.3310 (1.45%)	1.2929 (1.40%)	1.2724 (1.38%)
草地	24.2407 (26.34%)	24.5259 (26.65%)	23.6588 (25.71%)	23.4081 (25.44%)	22.9069 (24.89%)
水域	2.2592 (2.46%)	2.2581 (2.45%)	2.1791 (2.37%)	2.1351 (2.32%)	2.1776 (2.37%)
建筑用地	0.1749 (0.19%)	0.2071 (0.23%)	0.1897 (0.21%)	0.2200 (0.24%)	0.2947 (0.32%)
未利用地	61.4251 (66.75%)	60.9903 (66.28%)	61.4763 (66.81%)	61.3654 (66.68%)	61.1044 (66.40%)

表 5 1980—2018 年塔里木河流域各土地利用类型面积及其占比变化
Table 5 Changes of area and proportion of land use types in the Tarim River Basin

类型	土地利用变化量 (10 ⁴ km ²) 及占比				
	1980—1990年	1990—2000年	2000—2010年	2010—2018年	1980—2018年
耕地	0.0956 (0.10%)	0.4070 (0.44%)	0.4134 (0.45%)	0.6655 (0.72%)	1.5815 (1.72%)
林地	0.0228 (0.02%)	0.0704 (0.08%)	-0.0381 (-0.04%)	-0.0205 (-0.02%)	0.0347 (0.04%)
草地	0.2852 (0.31%)	-0.8670 (-0.94%)	-0.2507 (-0.27%)	-0.5013 (-0.54%)	-1.3338 (-1.45%)
水域	-0.0010 (0)	-0.0791 (-0.09%)	-0.0440 (-0.05%)	0.0426 (0.05%)	-0.0815 (-0.09%)
建筑用地	0.0323 (0.04%)	-0.0174 (-0.02%)	0.0303 (0.03%)	0.0747 (0.08%)	0.1198 (0.13%)
未利用地	-0.4349 (-0.47%)	0.4861 (0.53%)	-0.1109 (-0.12%)	-0.2610 (-0.28%)	-0.3207 (-0.35%)

和 1.45%。流域内耕地面积及其占比分别增加 $1.58 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 1.72%。建设用地面积及其占比分别增加 $1.2 \times 10^3 \text{ km}^2$ 和 0.13%。

1980—2018 年,塔河流域耕地呈持续扩张趋势,且增幅逐渐增大,1990—2000 年和 2010—2018 年土地利用类型结构变化幅度较大,2010—2018 年增幅是 1980—1990 年的 4.5 倍,2000—2010 年整体变化较为平缓。建筑用地面积除 1990—2000 年略微缩减(-0.02%)外,整体呈扩大趋势。林地在 1980—2000 年呈扩张趋势,面积及其占比分别增加 933 km^2 和 0.1%,2000—2018 年呈缩减趋势,土地利用量和面积占比分别减少 586 km^2 和 0.07%。1980—2010 年水域面积呈缩小趋势,土地利用量和面积占比分别减少 1241 km^2 和 0.14%,2010—2018 年呈扩张趋势,土地利用量和面积占比分别增加 425 km^2 和 0.05%。未利用地面积整体呈减少趋势,1980—2018 年面积占比共减少 0.35%,仅在 1990—2000 年呈微弱扩张趋势。

3.1.2 土地利用转移特征分析

利用桑基图对塔河流域 1980—2018 年的土地利用转移矩阵进行可视化处理,分析转移变化特征(图 3)。1980—2018 年,塔河流域草地的转出面积最大,主要向耕地和沙漠荒地转化;其次为未利用地,主要转化为草地、耕地和水域。2018 年的耕地转入面积最大,主要由草地、沙漠和戈壁、盐碱地等类型转变而来;草地和未利用地的转入面积较大,两者转化呈此消彼长的趋势。此外,尽管流域内建设用地的面积占比较小,但转入量显著,主要由未利用地、耕地和草地转化而来。

1980—1990 年,全流域的耕地、草地和未利用地转化最为显著,耕地和未利用地主要转化为草地,大部分草地转化为耕地。1990—2000 年土地利用转化量在 4 个时段内最为显著,草地的转出面积最大,主要转为未利用地和耕地,未利用地主要转为草地、水域和耕地,耕地面积变化主要归因于草地和未利用地,此外水域变化较为明显,主要转化为草地和未利用地。2000—2010 年和 2010—2018 年两个时段内的土地利用转移强度相对较弱,主要表现为由林地、草地和未利用地转化为耕地,其中草地和未利用地转为耕地的占比较大。

3.2 塔里木河流域各水资源分区土地利用变化

3.2.1 土地利用时空分布格局

根据土地利用类型数据,获取各水资源分区土地利用结构(图 4)。1980 年,各水资源分区土地利用类型占地较大的分别是未利用地(39.75%~70.99%)、草地(26.64%~46.14%)和耕地(0.27%~9.10%)。阿克苏河(VIII, 9.10%)、渭干河(IX, 8.59%)、喀什河(VII, 7.15%)、叶尔羌河(IV, 6.58%)和塔河干流(VI, 6.41%)流域的耕地面积较大(均>5%);塔河干流(VI)林地面积较大(13.65%);克里亚河(I)、和田河(II)、车尔臣河(III, 70.99%)、开孔河(V)和渭干河(IX)的未利用地面积占比较大(均>50%)。和田河(II)和叶尔羌河(IV)水域面积占比较大,分别为 8.38% 和 6.79%,克里亚河(I)、车尔臣河(III)和开孔河(V)流域水域面积占比较小(均<2%)。

2018 年,各水资源分区主要土地利用类型未发生改变,未利用地、草地和耕地的面积占比范围分别为 37.68%~70.43%、26.73%~41.18% 和 0.59%~

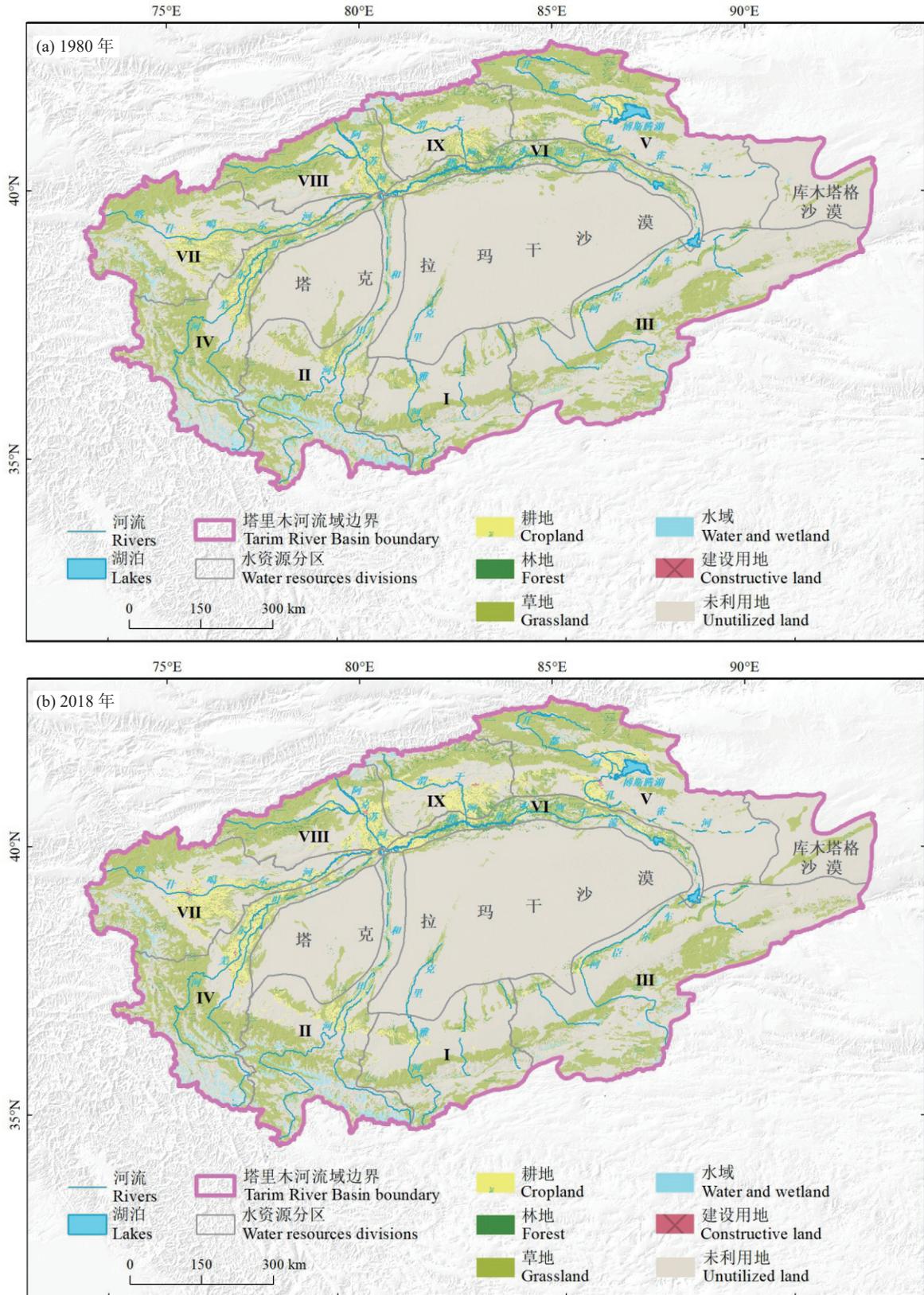


图2 1980年和2018年塔里木河流域土地利用类型分布图(I-IX说明见图1)

Fig.2 The distribution of land use types in the Tarim River Basin in 1980 and 2018 (Descriptions of I-IX shown in Fig.1)

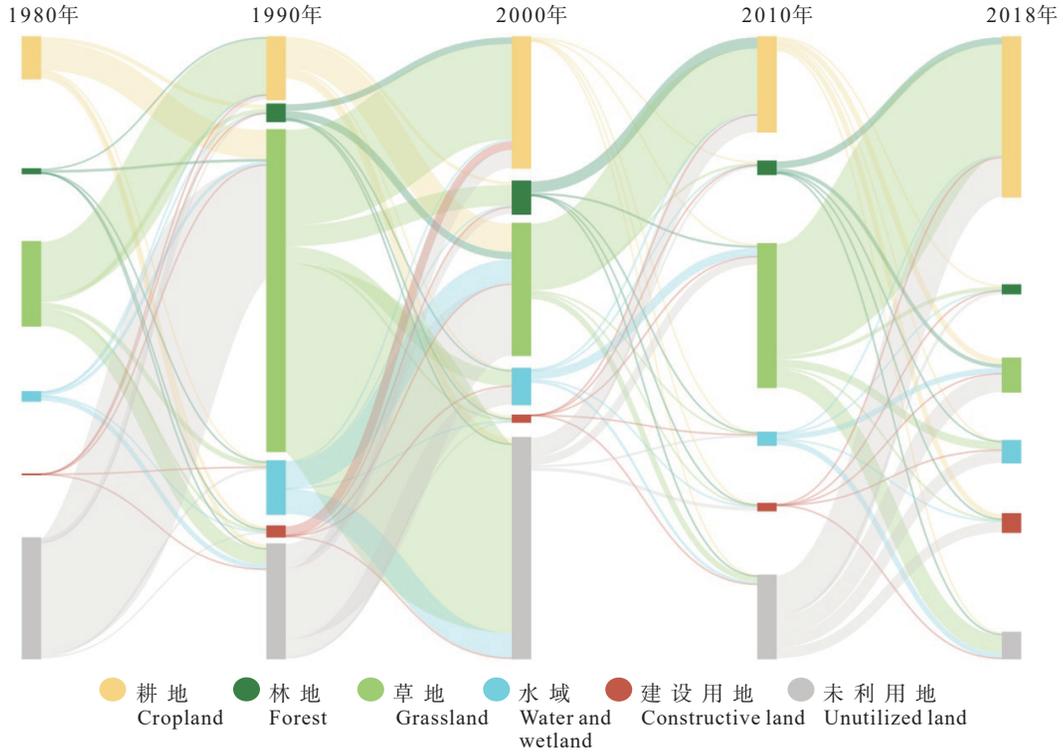


图 3 1980—2018 年塔里木流域 LUCC 转移轨迹
Fig.3 Trajectories of LUCC convention in the Tarim River Basin from 1980 to 2018

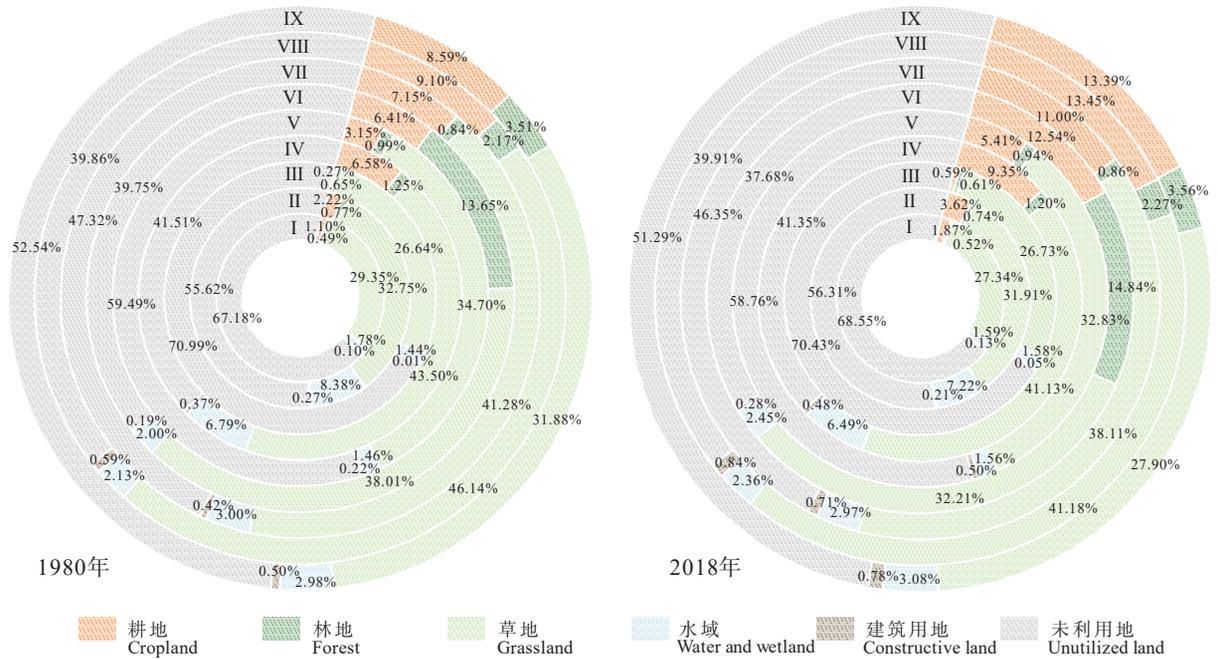


图 4 各水资源分区的土地利用结构(I-IX 说明见图 1)
Fig.4 The structure of land use types in different water resource divisions (Descriptions of I—IX shown in Fig.1)

13.45%。与 1980 年相比,塔河干流区耕地占比显著增加,除克里亚河、和田河和车尔臣河区,其他分

区耕地面积占比均大于 5%。与 1980 年相比,和田河、车尔臣河、叶尔羌河和开孔河区林地面积占比

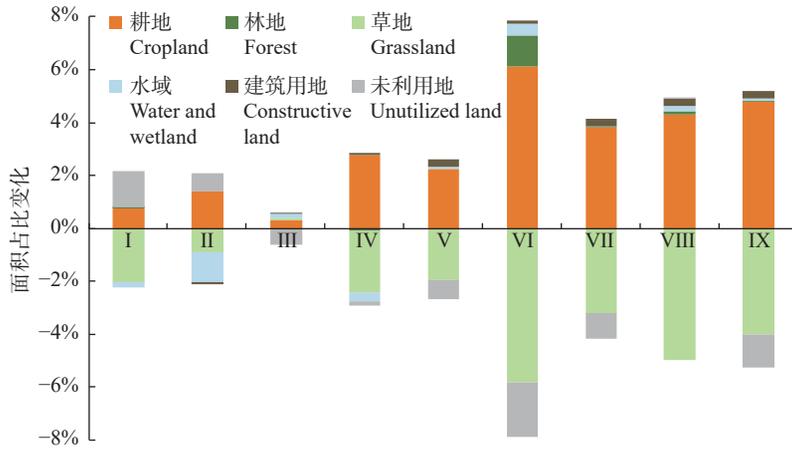


图5 各水资源分区的土地利用变化率(I-IX 说明见图 1)

Fig.5 The variance ratio of land use types in different water resource divisions (Descriptions of I-IX shown in Fig.1)

略有减少, 降幅在 0.03%~0.05%, 其他分区林地面积占比均有增加, 增幅在 0.02%~1.19%。

1980—2018 年, 塔河干流区土地利用类型变化最大, 其次为渭干河、阿克苏河和喀什河区(图 5)。各分区耕地面积和草地面积占比变化较大, 此外, 克里亚河区草地和未利用地面积占比变化较大, 和田河区耕地和水域面积占比变化较大, 车尔臣河区

的未利用地面积占比变化较大。

3.2.2 土地利用动态度及利用程度分析

为定量描述各水资源分区各土地利用类型的变化速率及利用程度, 分别计算不同时段的一土地利用动态度(图 6)和土地利用程度综合指数(表 6)。各区耕地和建设用地变化显著, 其他土地利用类型变化速率与利用程度不尽相同, 具体分析

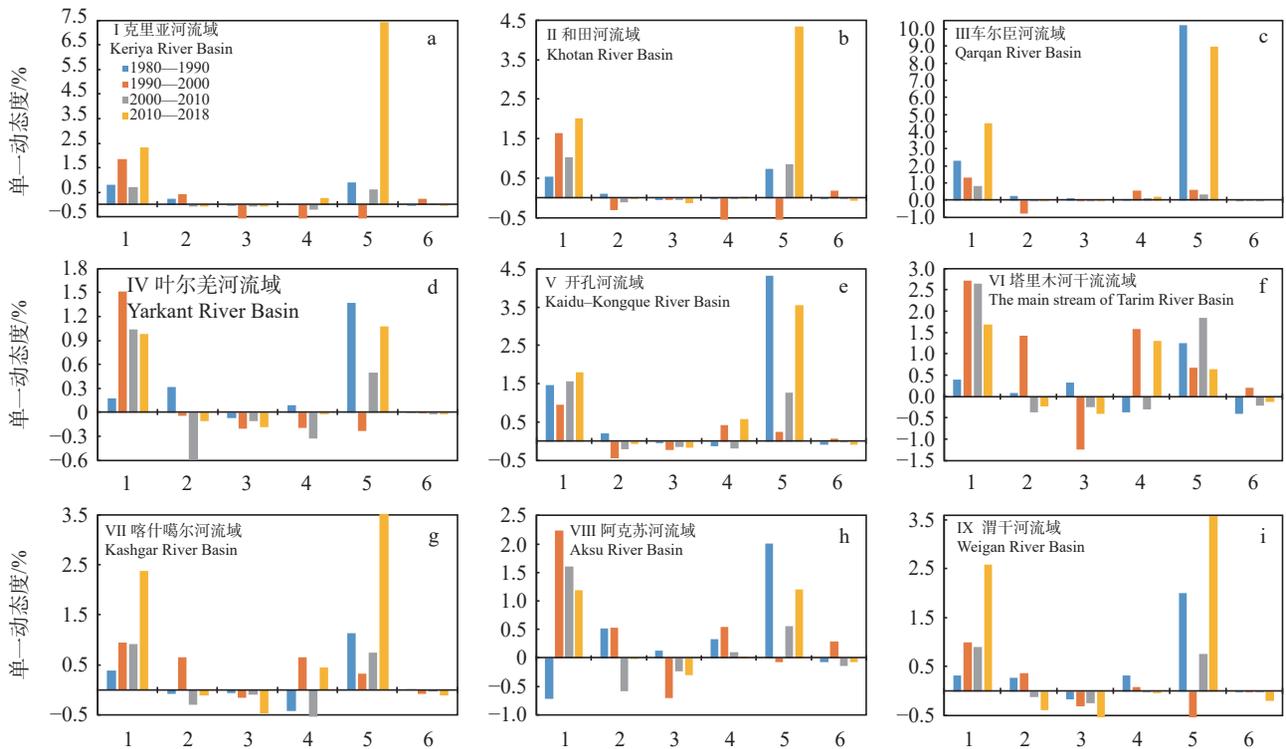


图6 不同时期各水资源分区的土地利用类型变化速度(土地类型序号见表 1)

Fig.6 The change rate of land use types in different water resources zones in different periods (The number of land type shown in Table 1)

表 6 塔里木河流域各水资源分区土地利用程度综合指数及变化

分区	土地利用程度综合指数变化				1980—2018年	2018年	
	1980—1990年	1990—2000年	2000—2010年	2010—2018年		综合指数	利用程度
I 克里亚河	-0.54	0.20	-1.50	0.02	0.74	133.57	低
II 和田河	0.59	0.16	-1.05	0.41	1.07	147.73	较低
III 车尔臣河	0.96	0.55	0.00	0.06	0.35	130.26	低
IV 叶尔羌河	3.15	0.18	1.00	0.94	1.02	168.96	较高
V 开孔河	3.54	1.10	-0.05	0.88	1.61	147.64	较低
VI 塔河干流	8.40	1.88	1.06	3.15	2.30	175.42	高
VII 喀什河	5.40	0.31	1.08	0.97	3.04	166.07	较高
VIII 阿克苏河	4.79	-0.16	0.74	2.31	1.90	175.22	高
IX 渭干河	6.62	0.53	0.80	1.09	4.20	163.67	较高

如下:

I 区 由图 6a 可知, 该区耕地和建设用地的变化速度较为显著, 耕地呈波动式扩张, 增速分别为 0.83%、1.87%、0.74% 和 2.34%, 建设用地变化速度分别为 0.93%、-3.48%、0.86% 和 7.46%。林地和未利用地均呈先增后减的变化趋势, 草地整体呈缩减趋势, 1990—2000 年间降速显著。水域面积在 1980—1990 年和 2010—2018 年增加, 1990—2010 年下降。与其他分区相比, 土地利用程度及其变化低(表 6), 1980—1990 年和 2000—2010 年利用程度变化减小。

II 区 该区近 40 年单一土地利用动态度较小(图 6b), 1990—2000 年与 2010—2018 年土地利用类型动态变化较为显著, 其他时间段内变化速度相对较小。该区耕地、建设用地与林地、草地、水域和未利用地呈此消彼长的关系, 耕地和建设用地呈扩张趋势, 林地、草地、水域和未利用地整体呈下降趋势, 只有 1980—1990 年时段内的林地和 1990—2000 年时段内的未利用地呈扩张趋势。与其他分区相比, 土地利用程度及其变化相对较低(表 6), 2000—2010 年间利用程度变化减小。

III 区 该区土地利用程度及其变化最低(表 6), 变化速度较明显的是耕地和建设用地(图 6c), 建设用地呈明显增加趋势, 特别是在 1980—1990 年和 2010—2018 年增速达到 10.25% 和 8.97%; 耕地面积变化速度先减小后增加, 增速分别为 2.34%、1.33%、0.86% 和 4.54%。草地、林地、水域和未利用地变化速度较小, 在 1990—2018 年变化速度在 -0.79%~0.56%, 其他时段变化速度均在 -0.06%~0.26%。

IV 区 该区土地利用程度及其变化较高(表 6), 仅在 1990—2000 年利用程度变化相对较低。1980—

2018 年间土地利用变化程度整体偏小(图 6d), 单一动态度介于 -0.59~1.52%; 耕地和建设用地较其他土地利用类型变化更为显著, 整体呈上升趋势, 只有 1990—2000 年建设用地面积呈缩减趋势(-0.23%); 林地、草地、水域和未利用地整体呈缩减趋势, 仅有 1980—1990 年的林地和水域呈扩张趋势, 2000—2010 年变幅较明显。

V 区 该区土地利用程度较高, 仅在 2000—2010 年利用程度变化减少(表 6)。林地、草地、水域和未利用地在四个时期变化程度较小(图 6e), 均小于 0.5%。林地、草地和未利用地整体呈缩减趋势, 1980—1990 年的林地和 1990—2000 年的未利用地呈小幅上升趋势, 1990—2018 年间林地缩减速度逐渐减小。

VI 区 塔河干流区利用程度最高(表 6), 变化也最为显著(图 6f)。耕地和建设用地在 4 个时段内均呈扩张趋势, 变化速度分别为 0.40%、2.72%、2.64%、1.70% 和 1.27%、0.69%、1.85%、0.65%。林地在 1980—2000 年呈扩张趋势, 特别是 1990—2000 年增速达 1.42%, 是 1980—1990 年的 14.65 倍, 2000—2018 年林地面积呈缩减趋势, 变化程度逐渐降低。草地和未利用地整体呈缩减趋势, 仅在 1980—1990 年的草地和 1990—2000 年的未利用地呈增加趋势, 变幅小于 0.5%。水域面积整体呈增加趋势, 1990—2000 年(1.59%) 和 2010—2018 年(1.30%) 增幅明显大于其他两个时段(-0.36% 和 -0.30%)。

VII 区 该区土地利用程度较高(表 6), 变化趋势与 VI 区(塔河干流)相似(图 6g), 2010—2018 年变化最为剧烈, 耕地和建设用地呈扩张趋势, 草地和未利用地呈缩减趋势; 林地和水域在 1990—2000 年扩张, 水域在 2010—2018 年扩张, 其余时段内均

呈缩减趋势。

Ⅷ区 该区 1980—2000 年各土地利用类型动态变化程度明显高于 2000—2018 年(图 6h)。耕地面积呈先减后增趋势,变化速度分别为-0.72%、2.24%、1.61% 和 1.20%;林地和草地均呈先增加后减少的趋势,变化速度分别为 0.52%、0.54%、-0.58%、-0.01% 和 0.13%、-0.70%、-0.23%、-0.30%。水域面积整体呈增加趋势,2000 年之前扩张速度高于 2000 年之后。建设用地除 1990—2000 年内缩减外,整体呈扩张趋势,建设用地与未利用地呈此消彼长的变化关系。土地利用程度仅次于塔河干流区(Ⅵ区),利用程度高,仅在 1990—2000 年利用程度变化减小。

Ⅸ区 该区土地利用程度较高(表 6),耕地和建设用地变化较为明显(图 6i),2010—2018 年变化最为显著;耕地 40 年间持续扩张,建设用地在 1990—2000 年缩减外,整体呈扩张趋势。林地和水域变化趋势一致,1980—2000 年呈扩张趋势,2000—2018 年呈缩减趋势;草地和未利用地均呈下降趋势,且变化速度逐期增大。

3.3 人类活动强度变化

3.3.1 塔里木河流域总体变化特征

塔河流域建设用地当量面积和人类活动强度大致以 2000 年为界,前期增长相对较慢,后期相对较快,特别是 2000—2010 年期间呈显著增长趋势(图 7)。1980 年、1990 年和 2000 年塔河流域建设用地当量面积分别为 $9.15 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $9.75 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $1.05 \times 10^4 \text{ km}^2$,人类活动强度分别为 0.99%、1.06% 和 1.14%;2010 年建设用地当量面积和人类活动强度骤增,分别达到 $3.08 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 3.34%,2000—2010 年,建设用地面积年均增长量为 $0.2 \times 10^4 \text{ km}^2$,人类活动强度年均增长率为 0.22%。2018 年塔河流域建设用地面积为 $3.32 \times 10^4 \text{ km}^2$,人类活动

强度为 3.61%;2010—2018 年,建设用地面积和人类活动强度分别增加 $0.24 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 0.26%。

3.3.2 时空分异特征

为清晰揭示塔里木河流域人类活动强度的空间分异特征,以县级行政区为空间单元,计算得到各县级单元的人类活动强度。基于 GIS 技术的自然断裂法,将各县级行政单元的人类活动强度根据“<0.6%、0.6%~1.5%、1.5%~4%、4%~10% 和 >10%”的分级标准,划分为低、较低、中等、较高和高共 5 个等级(表 7,图 8)。

整体上看,1980—2018 年塔河流域人类活动强度空间分布格局大致以塔克拉玛干沙漠北缘为界,呈西北高,东南低的特点。塔河各流域的人类活动强度也呈现出显著的空间分布差异性,综合分析各流域单元及各等级类型特点的空间分布状况如下:

(1)高强度类型区。主要集中在研究区西部平原区的县(市):1980 年和 1990 年,人类活动强度大于 10% 的县级单元共 4 个,分别是喀什河流域的喀什市和疏勒县,叶尔羌河流域的泽普县,以及和田河流域的和田市人类活动强度高;2000 年以来,包括 6 个县级单元,人类活动强度的单元平均值呈递

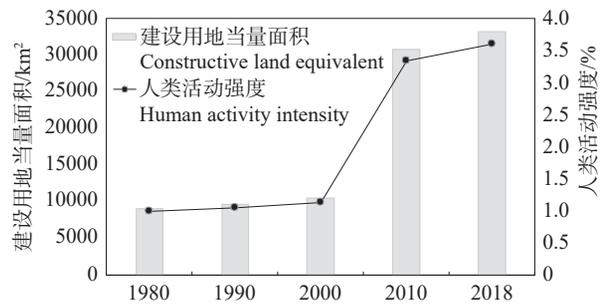


图 7 1980—2018 年塔里木流域建设用地当量面积及人类活动强度

Fig.7 Construction land equivalent and human activity intensity of the Tarim River Basin from 1980 to 2018

表 7 1980—2018 年塔里木河流域人类活动强度分级

Table 7 Classification of human activity intensity in the Tarim River Basin from 1980 to 2018

等级类型	分级标准/%	1980年		1990年		2000年		2010年		2018年	
		单元/个	均值/%								
低	<0.6	13	0.25	13	0.27	13	0.28	12	0.28	11	0.33
较低	0.6~1.5	8	0.76	8	0.86	8	0.90	9	0.94	8	1.00
中等	1.5~4	12	2.39	10	2.29	10	2.55	10	2.81	10	2.74
较高	4~10	7	5.80	9	5.81	7	5.35	7	5.79	9	6.52
高	>10	4	14.36	4	15.33	6	14.69	6	15.38	6	18.03

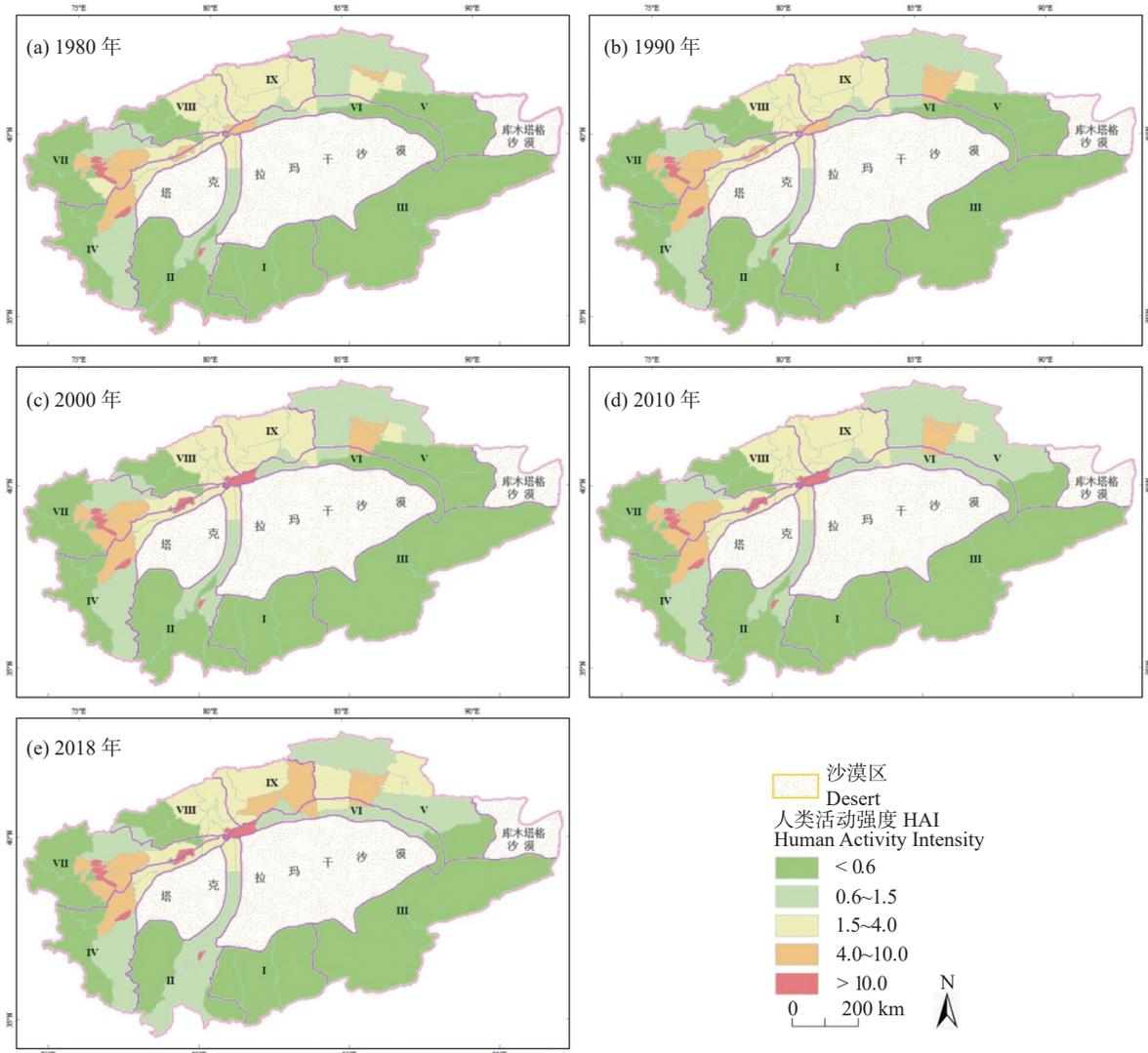


图 8 1980—2018 年塔里木流域人类活动强度空间变化(I-IX 说明见图 1)

Fig. 8 Spatial changes of human activity intensity of the Tarim River Basin from 1980 to 2018 (Descriptions of I-IX shown in Fig. 1)

增趋势,增加的 2 个县级单元分别是位于阿克苏河流域和塔河干流流域的阿拉尔市,和位于喀什河流域和叶尔羌河流域交界的图木舒克市,均由较高强度类型转化而来。(2)较高强度类型区。1980—2018 年,高类型区包括的县级单元数和均值均发生小幅度波动。1980 年较高强度类型区集中分布在人口较为密集的县(市),包括喀什河流域的疏附县、伽师县、岳普湖县,叶尔羌河流域的莎车县和图木舒克市,塔河干流流域的阿拉尔市,和开孔河流域的焉耆回族自治县;研究期内,喀什河流域周边的英吉沙县,开孔河流域的库尔勒市、渭干河流域的库车县和新和县由中等强度区转化为较高强度

区,而图木舒克市和阿拉尔市则由最初的较高强度区转化为高强度区。(3)中等强度类型区。中等强度类型区主要集中分布在渭干河流域、喀什河流域、叶尔羌河流域和开孔河流域。(4)较低和低强度类型区。研究区东部和南部山前平原,人类活动强度以较低和低类型为主,且 40 年间无明显改变。综上所述,喀什河流域和叶尔羌河流域人类活动强度最高,其次为渭干河流域、阿克苏河流域和塔河干流流域。

4 讨论

自 1980 年改革开放以来,随着新疆社会经济

持续发展,土地使用制度改革逐步实施,塔河流域土地利用变化加快,土地利用程度呈“从上游到下游”逐渐增大的趋势,主要表现在耕地和建设用地面积增加,空间的集聚和转移是人类活动变化的主要方式(图 8)。

1980—1990 年,改革开放初期,大规模推进农田林网化及水利设施等基础设施建设,塔河流域土地利用类型转移总面积、单一动态度和土地利用程度变化幅度较大,人类活动对土地利用的影响较大。与此同时,部分耕地从农业用地转化为间接农业用地或建设用地,而部分耕地受灌溉条件和盐渍化等因素影响,被弃耕转化为草地或未利用地(图 3),1984—1985 年达到弃荒高潮期。1986 年,全国及当地政府对已出现的环境及耕地存在问题有所认识,采取一定的措施遏止耕地向非农用地的强势转化,1988 年出现小开荒潮(贺凌云等, 2005)。20 世纪 90 年代,国家及地方政府出台政策,鼓励个人及集体开垦土地,又兴起开荒热潮(张春轶等, 2007)。1993 年塔河流域大西海子水库干涸,水资源不合理利用导致生态环境逐步恶化,1990—2000 年间大量草林地转化为未利用地。同期塔河流域土地利用类型转移总面积为近 40 年之首,但与以往认知不同的是,建设用地面积小幅缩减(表 5),变化趋势与已有研究(孙美琴等, 2013; 杜清, 2015; 夏婷婷, 2022)相同,表现为农村居民点面积减少,而城镇用地及其他建设用地面积增加,究其原因受脱贫攻坚及生态移民、节水灌溉工程实施和农业集约化影响,灌区及绿洲河岸带的农村居民点转化为耕地,其中和田河和喀什河流域最为显著(张灵俐, 2015)。2001 年首次确认塔河流域东部罗布泊地区是我国第二大钾盐矿,因此在该区沙漠戈壁等未利用地建设厂区。2002 年新疆全面推行退耕还林草计划,加之土地管理法规的逐步完善,2000—2010 年间塔河流域未利用地转移面积及各类土地利用转移总面积达到 40 年内最低水平,人类活动对该时段土地利用影响较小。2010—2018 年间,随着生态输水及节水灌溉工程实施,促进绿洲农业发展,周边耕地大量开垦,且耕地开垦强度和面积大于退耕还林草工程的强度和范围,因此塔河流域耕地呈现大幅增加的特征,以草地转为耕地为主,其次为未利用地转为耕地。

各水资源分区中塔河干流、渭干河流域、喀什河流域和阿克苏河流域的 LUCC 和人类活动强度变化最为显著(图 7, 图 9),其特点是耕地和建设用地面积增加,由此带来草地持续退化,林地也在 2000 年之后不断减少,而 1990—2000 年间林地扩张,说明该时期推行的退耕还林等生态政策大规模实施和发展林果业等产业结构调整,使林地面积呈增加趋势(孙美琴等, 2013; 段峥嵘等, 2018; 艾克旦·依萨克, 2022; 闫伊亮, 2022)。受气候变化和水利设施影响,各水资源分区水域面积变化趋势不同。未利用地的开发对流域生态恢复起到一定作用,但退耕还林草、严守生态保护红线的政策亟待持续推进。截至 2018 年,各水资源分区中土地利用程度最高是塔河干流区和阿克苏河流域,其次为叶尔羌河、喀什河和渭干河流域,这些地区整体地势平坦,人口密集,经济发达,人类活动对土地利用影响较大。车尔臣河、克里亚河等区域,地形地貌以山地和沙漠戈壁为主,人口稀少,社会经济发展基础薄弱,由于产业结构和自然地理条件的原因,未利用地和草地居多,土地利用程度较低。

土地利用变化主要受自然因素和人为因素影响,在较短时间内,自然因素对土地利用变化的影响程度有限,人类活动起主导作用。近 40 年,影响塔河流域土地利用时空变化的主要驱动因素包括:

(1)人口和社会经济发展。塔河流域 1988 年人口为 672.29 万人,2000 年为 872.5 万人,到 2018 年人口数量已上升至 1159.26 万人(新疆维吾尔自治区统计局, 2001, 2019; 段峥嵘等, 2018),人口增长近一倍,粮食需求量增大,导致其他土地利用类型转出为耕地。另一方面,随着我国经济社会的快速发展和综合国力的显著增强,城乡居民生活和消费水平大幅提高,市场经济体制不断完善,为商品流通特别是农副产品交换提供了便利条件,对居住环境和农副产品的需求日益增加,农产品价格的提高也为农民增收带来实惠,推进了城市化和农业规模化发展。

(2)政策实施是影响 LUCC 的另一个驱动因素。除上述政策外,1978 年十一届三中全会后,改革开放政策和国家石油开发战略重点西移促进新疆发展。同时,种植业结构调整和特色农业等政策的实施极大影响了种植业结构和耕地面积,如

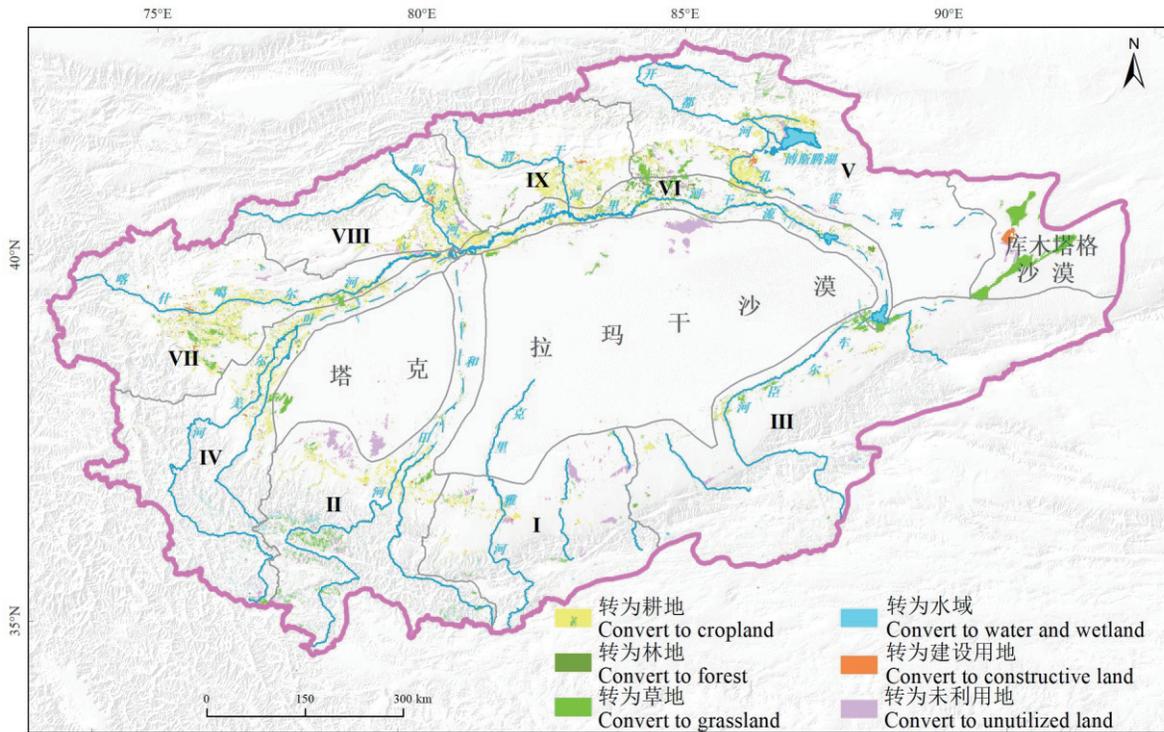


图 9 1980—2018 年塔里木河流域土地利用转移空间格局(I-IX 说明见图 1)

Fig.9 Spatial pattern of land use transition of the Tarim River Basin from 1980 to 2018(Descriptions of I-IX shown in Fig.1)

20 世纪 90 年代前塔河流域粮食作物种植面积高于棉花、甜菜、油料和水果(枣、香梨)等经济作物,1988 年将新疆列为国家重点棉花甜菜开发区,计划 1995 年将新疆建成为国家级棉花、甜菜商品生产基地,棉花和甜菜种植面积大幅增加,到 2018 年经济作物种植面积高于粮食作物(张正文, 2013; 王晶和肖海峰, 2018; 宋风娇, 2021),耕地面积表现为明显的增加趋势。2000 年以来我国相继出台“西部大开发”战略和农业三项补贴政策,推动工业化和城市化进程,增大对农户的扶持力度,调动农户耕种积极性(王丹等, 2017; 杨志华, 2020),是建设用地和耕地大面积增加的重要原因之一。

(3)生态环境修复影响塔河流域的土地利用结构。为改善塔里木河干流下游生态环境恶化问题,2001 年启动塔里木河生态综合治理工程,通过山区控制性水库建设、灌区节水改造和河道治理等措施,定期向塔里木河干流下游进行生态输水,不仅塔里木河干流受益于此项工程,开孔河流域、阿克苏河流域、和田河流域和叶尔羌河流域的生态也有所改善,在此期间促进土地向耕地的转化;2002 年开始推行退耕还林草计划,塔里木河流域林草地面积呈

增加趋势。

5 结 论

基于 1980、1990、2000、2010 和 2018 年 5 期 Landsat 遥感影像,分析塔里木河流域及各水资源分区土地利用的时空分布变化和差异,探究土地利用变化规律对人类活动的响应,得出以下结论。

(1)1980—2018 年塔里木河流域土地利用类型以未利用地和草地为主,所占比例变化极小。塔里木河流域建设用地和耕地面积呈增长趋势,耕地在 2010—2018 年增幅最大且变化速率最快,分别达到 665.5 km^2 和 0.72% 。草地和未利用地面积呈下降趋势,减少的草地主要转化为耕地和未利用地,未利用地主要转化为草地、耕地和水域。

(2)各水资源分区 LUCC 存在差异,塔里木河干流区变化最大,其次为渭干河、阿克苏河和喀什噶尔河流域。1980—1990 年为各分区的增长期间,土地利用程度变化显著,1990—2010 年属相对平稳阶段,2010—2018 年是增长期,到 2018 年塔里木河干流区和阿克苏河分区土地利用程度最大,而车尔臣河、克里亚河等地因其产业结构和自然地理条件

的原因,土地利用类型以未利用地和草地为主,人口稀少,社会经济发展慢,土地利用程度较低。

(3)各水资源分区的人类活动强度也呈显著差异性,以塔克拉玛干沙漠北缘为界,呈西北高,东南低的特点。人类活动强度高类型区主要集中在城市化水平较高,人口密度较大的西部和北部平原区,研究期内呈扩大趋势,土地利用结构受人类活动影响较大;东部的沙漠戈壁及南部山前平原,由于气候极端干旱,耕地面积较少,城镇化水平较低,以较低和低强度类型为主。

(4)社会经济发展、国家生态建设和产业结构调整等多因素交互叠加,是近 40 年来影响塔里木河流域土地利用变化的主要驱动因素。1980—1990 年改革开放初期,基础设施建设、大力推动生产等因素造成 LUCC 剧烈变化,1990—2000 年,水资源不合理利用导致生态环境逐步恶化,大量林草地退化为未利用地,2000—2010 年间启动退耕还林草工程及逐步完善土地管理法规,LUCC 处于相对平稳阶段,2010—2018 年的社会经济发展对 LUCC 影响显著。

References

- Chen Yaning, Cui Wangcheng, Li Weihong, Chen Yapeng, Zhang Hongfeng. 2003. Utilization of water resources and ecological protection in the Tarim River[J]. *Acta Geographica Sinica*, 58(2): 177–215 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yaning, Xu Zongxue. 2004. The impact of global climate change on water resources possibility in Tarim River Basin, Xinjiang[J]. *Science in China: Earth Sciences*, 34(11): 1047–1053 (in Chinese with English abstract).
- Daneshi A, Brouwer R, Najafinejad A, Panahi M, Zarandian A, Maghsood F F. 2021. Modelling the impacts of climate and land use change on water security in a semi-arid forested watershed using InVEST[J]. *Journal of Hydrology*, 593: 125621.
- Deng Mingjiang, Fan Zili, Xu Hailiang, Zhou Haiying. 2017. Ecological function regionalization of Tarim River Basin[J]. *Arid Land Geography*, 40(4): 705–717 (in Chinese with English abstract).
- Du Qing. 2015. Study on Land Use and Ecological Environment in Tarim River Basin[D]. Urumqi: Chinese Academy of Sciences, 1–108 (in Chinese with English abstract).
- Duan Quntao, Luo Lihui. 2021. Summary and prospect of spatialization method of human activity intensity: Taking the Qinghai-Tibet Plateau as an example[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 43(5): 1582–1593 (in Chinese with English abstract).
- Duan Zhengrong, Zubaidai-Muyibula, Xia Jianxin, Liu Rongxia. 2018. Land use/cover temporal-spatial change and driving force study in Aksu Oasis during the last 25 years[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 26(2): 413–426 (in Chinese with English abstract).
- Eqide-Issac. 2022. Study on Land Use Change and Ecological Security Early Warning in Aksu River Basin[D]. Urumqi: Xinjiang Normal University, 1–60 (in Chinese with English abstract).
- Gao Yue, Lin Xinping. 2019. Spatial and temporal variation of land use structure in inland river basin of arid area: Take the Tarim River Basin as an example[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 58(7): 62–66 (in Chinese with English abstract).
- Guo Hongwei, Xu Hailiang, Zhao Xinfeng, Ling Hongbo. 2017. The maximum irrigation area and overload situations of the mainstream of Tarim river basin[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 56(2): 140–150 (in Chinese with English abstract).
- He Lingyun, Haimiti Yimiti, Li Xiehui. 2005. Analysis on the change of cultivated land in the Hetian District[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, (1): 83–86 (in Chinese with English abstract).
- Hou Yifeng, Wang Yang, Zhang Shuai. 2020. Impact of human activities on land use change in Weigan-Kuqa River Basin[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 33(8): 1760–1768 (in Chinese with English abstract).
- Hu Xu, Nie Yong, Xu Xia, Jiang Sheng, Zhang Yili. 2020. Monitoring land-use change in Hetian Tarim Basin, China using satellite remote sensing observation between 1990 and 2016[J]. *Progress in Geography*, 39(4): 577–590 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Shan, Shi Xufei, Guo Changlai, Feng Yulin, Sun Xiubo, Sun Jiaquan, Ni Jin. 2023. Land use changes and simulation prediction in Daling River Basin based on CA-Markov mode[J]. *Geology and Resources*, 32(5): 624–632 (in Chinese with English abstract).
- Li Yan'e, Wang Huaqi, Liu Jiang, Ma Hongna. 2023. Spatial and temporal distribution and driving factors of ecosystem carbon sink in Northwest China[J]. *Northwestern Geology*, 56(4): 185–195 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jing, Long Aihua, Li Jiang, Yu Jiawen, Zhang Ji. 2019. Analysis on runoff evolution laws and trends of three source-streams of Tarim River in recent 60 years[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 50(12): 10–17 (in Chinese with English abstract).
- Liu Wei. 2019. Effects of Climate Change and Human Activities on Land Use Change in the Kaikong River Basin, China[D]. Shanghai: East China Normal University, 1–87 (in Chinese with English abstract).
- Mansur Sabit, Lutpulla Imin. 2011. Land use change and its ecoeffects in Southern Xinjiang, China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 31(4): 440–446 (in Chinese with English abstract).
- Murray K S, Rogers D T. 1999. Ground water, vulnerability, browfield redevelopment and land use planning[J]. *Journal of Environmental Planning and Management*, 42(6): 801–806.
- Pielke R A, Avissar R. 1990. Influence of landscape structure on local and regional climate[J]. *Landscape Ecology*, 4: 133–155.
- Ran Qiyun. 2017. Spatio-temporal Change Characteristics and Analysis of Surface Water Resources in the Tarim River Basin[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 1–86 (in Chinese with English abstract).

- Sanderson E W, Jaiteh M, Levy M A, Redford K H, Wannebo A V, Woolmer G. 2002. The human footprint and the last of the wild[J]. *Bioscience*, 52: 891–904.
- Schmidt M. 2008. The sankey diagram in energy and material flow management—Part II: Methodology and current applications[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 12(2): 173–185.
- Shi Yongliang, Wang Rusong, Zhou Haibo, Chen Liang. 2006. Land use change and its ecological effects in the ecotone of Southern Xinjiang Uyghur Autonomous Region: A case study of Akesu City area[J]. *Chinese Journal of Ecology*, (7): 753–758 (in Chinese with English abstract).
- Song Fengjiao. 2021. Study on Spatio-temporal Change and Benefit Evaluation of Cultivated Land Use in Xinjiang[D]. Shihezi: Shihezi University, 1–70 (in Chinese with English abstract).
- Strassburg, B B N., Latawiec, A E, Barioni, L G, Nobre, C A, da Silva V P, Valentin J F, Vianna M, Assad E D. 2014. When enough should be enough: Improving the use of current agricultural lands could meet production demands and spare natural habitats in Brazil[J]. *Global Environmental Change—human and Policy Dimensions*, 28: 84–97.
- Statistic Bureau of Xinjiang Uyghur Autonomous Region. 2001. Xinjiang Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press (in Chinese).
- Statistic Bureau of Xinjiang Uyghur Autonomous Region. 2019. Xinjiang Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press (in Chinese).
- Sun Meiqin, Zhao Chengyi, Shi Fengzhi, Peng Dongmei, Wu Shixin. 2013. Analysis on land use change in the mainstream area of the Tarim River in recent 20 years[J]. *Arid Zone Research*, 30(1): 16–21 (in Chinese with English abstract).
- Turner B L, Kasperson R E, Matson P A, McCarthy J J, Corell R W, Christensene L, Eckley N, Kasperson J X, Luers A, Martello M L, Polsky C, Pulsipher A, Schiller A. 2003. A frame work for vulnerability analysis in sustainability science[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(14): 8074–8079.
- Wang Dan, Wu Shixin, Zhang Shouyu. 2017. Expansion of both cultivated and construction land in Xinjiang since the late 1980s[J]. *Arid Land Geography*, 40(1): 188–196 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jing, Xiao Haifeng. 2018. Optimization of the distribution of cotton production in Xinjiang under the view of cultivated land ecological security[J]. *Arid Land Geography*, 41(4): 833–843 (in Chinese with English abstract).
- Wang L C, Yu K, Chang L, Zhang J, Tang T, Yin L H, Gu X F, Dong J Q, Li Y, Jiang J, Yang B C, Wang Q. 2021. Response of glacier area variation to climate change in the Kaidu–Kongque river basin, Southern Tianshan Mountains during the last 20 years[J]. *China Geology*, 4(3): 389–401.
- Wang Shanshan, Wang Jinlin, Zhou Kefa, Wang Wei, Wan Yingcai. 2021. Response of land–use/land change to ecological water conveyance in the lower reach of Tarim River[J]. *Water Resource Protection*, 37(2): 69–74,80 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiulan, Bao Yuhai. 1990. Study on the methods of land use dynamic change research[J]. *Progress in Geography*, (1): 83–89 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xufan. 2019. Research and Implementation on Visual Expression of Land Cover Temporal and Spatial Change[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1–73 (in Chinese with English abstract).
- Xia Tingting. 2022. Analysis of Characteristics and Driving Factors of Land Use Change in the Tarim River Basin[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 1–55 (in Chinese with English abstract).
- Xu Lan, Zhao Yi. 1993. Forecast of land use pattern change in Dongling District of Shenyang: An application of Markov process[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, (3): 272–277 (in Chinese with English abstract).
- Xu Yong, Sun Xiaoyi, Tang Qing. 2015. Human activity intensity of land surface: Concept, method and application in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 70(7): 1068–1079 (in Chinese with English abstract).
- Yan Yiliang. 2022. Research on Temporal and Spatial Variation of Human Activity Intensity in Kashgar Prefecture Based on Land Use[D]. Urumqi: Xinjiang Normal University, 1–80 (in Chinese with English abstract).
- Yang Guanghua, Bao Anming, Chen Xi, Liu Hailong, Huang Ying, Dai Shuyong. 2010. Vegetation cover change with climate and land use variation along main stream of Tarim River[J]. *Journal of Desert Research*, 30(6): 1389–1397 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zhihua. 2020. Study on Farmers' Willingness to Protect Cultivated Land and Influencing Factors under the Background of Cultivated Land Fertility Protection Subsidy Policy: A Case of Qitai in Xinjiang[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 1–74 (in Chinese with English abstract).
- Yin Lihe, Zhang Jun, Wang Zhe, Dong Jiaqiu, Chang Liang, Li Chunyan, Zhang Pengwei, Gu Xiaofan, Nie Zhenlong. 2021. Groundwater circulation patterns and its resources assessment of inland river catchments in northwestern China[J]. *Geology in China*, 48(4): 1094–1111 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chunyi, Wahap Halik, Ma Yan. 2007. The study on population driving forces to cultivated land change in Hotan Oases[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, (2): 85–89 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Junfeng, Meng Fanhao, Bao Anming, Li Changchun, Qi Xiudong, Liu Tie, Zhang Pengfei. 2018. LUCC analysis of the upstream of the Kongqi River, Xinjiang, China[J]. *Journal of Desert Research*, 38(3): 664–672 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Lingli. 2015. Study on the Compensation Mechanism of Ecological Migrants in Sinkiang[D]. Shihezi: Shihezi University, 1–168 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhengwen. 2013. The Research on the Development of Cotton Industry of Xinjiang[D]. Urumqi: Xinjiang University, 1–59 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Shaojun, Wei Qiang, Zhao Xinfeng. 2018. Analysis of the change process and land use types in the main stream of Tarim River[J].

- Journal of Xinjiang Agricultural University, 41(4): 298–306 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Ruitao, Zheng Hang, Liu Yueyi. 2021. Understanding the evolution of the Tarim River Oasis[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 52(2): 155–164 (in Chinese with English abstract).
- Zhuang Dafang, Liu Jiyuan. 1997. Study on the model of regional differentiation of land use degree in China[J]. Journal of Natural Resources, (2): 105–111 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 艾克旦·依萨克. 2022. 阿克苏河流域土地利用变化及生态安全预警研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 1–60.
- 陈亚宁, 崔旺诚, 李卫红, 张元明. 2003. 塔里木河的水资源利用与生态保护[J]. 地理学报, 58(2): 177–215.
- 陈亚宁, 徐宗学. 2004. 全球气候变化对新疆塔里木河流域水资源的可能性影响[J]. 中国科学: 地球科学, 34(11): 1047–1053.
- 邓铭江, 樊自立, 徐海量, 周海鹰. 2017. 塔里木河流域生态功能区划研究[J]. 干旱区地理, 40(4): 705–717.
- 杜清. 2015. 塔里木河流域土地利用及生态环境状况研究[D]. 乌鲁木齐: 中国科学院大学, 1–108.
- 段群滔, 罗立辉. 2021. 人类活动强度空间化方法综述与展望[J]. 冰川冻土, 43(5): 1582–1593.
- 段峥嵘, 祖拜代·木依布拉, 夏建新, 刘荣霞. 2018. 近 25 年阿克苏绿洲土地利用时空变化及其驱动力分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 26(2): 413–426.
- 高玥, 刘新平. 2019. 干旱区内陆河流域土地利用结构时空变化分析——以塔里木河流域为例[J]. 湖北农业科学, 58(7): 62–66.
- 郭宏伟, 徐海量, 赵新风, 凌红波. 2017. 塔里木河流域最大灌溉面积与超载情况探讨[J]. 中山大学学报(自然科学版), 56(2): 140–150.
- 贺凌云, 海米提·依米提, 李谢辉. 2005. 和田地区近五十年耕地变化分析[J]. 水土保持研究, (1): 83–86.
- 侯一峰, 汪洋, 张帅. 2020. 人类活动对渭干—库车河流域土地利用变化的影响[J]. 西南农业学报, 33(8): 1760–1768.
- 胡栩, 聂勇, 徐霞, 蒋盛, 张德锂. 2020. 塔里木盆地南缘和田地区土地利用变化的遥感研究[J]. 地理科学进展, 39(4): 577–590.
- 江山, 石旭飞, 郭常来, 冯雨林, 孙秀波, 孙家全, 倪金. 2023. 基于 CA-Markov 模型的大凌河流域土地利用变化与模拟预测研究[J]. 地质与资源, 32(5): 624–632.
- 李彦娥, 王化齐, 刘江, 马红娜. 2023. 西北地区生态系统碳汇时空分布特征及相关驱动因子分析[J]. 西北地质, 56(4): 185–195.
- 刘静, 龙爱华, 李江, 於嘉闻, 张继. 2019. 近 60 年塔里木河三源流径流演变规律与趋势分析[J]. 水利水电技术, 50(12): 10–17.
- 刘薇. 2019. 开孔河流域气候变化和人类活动对土地利用变化的影响[D]. 上海: 华东师范大学, 1–87.
- 满苏尔·沙比提, 陆吐布拉·依明. 2011. 新疆南疆地区土地利用变化及其生态效应[J]. 地理科学, 31(4): 440–446.
- 冉启云. 2017. 塔里木河流域地表水体时空变化特征探究及分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 1–86.
- 史永亮, 王如松, 周海波, 陈亮. 2006. 南疆生态脆弱区土地利用变化及其生态影响评价——以新疆阿克苏市为例[J]. 生态学杂志, (7): 753–758.
- 宋凤娇. 2021. 新疆耕地利用时空变化及效益评价研究[D]. 石河子: 石河子大学, 1–70.
- 孙美琴, 赵成义, 施枫芝, 彭冬梅, 吴世新. 2013. 近 20a 塔里木河干流区土地利用变化特征[J]. 干旱区研究, 30(1): 16–21.
- 王丹, 吴世新, 张寿雨. 2017. 新疆 20 世纪 80 年代末以来耕地与建设用地扩张分析[J]. 干旱区地理, 40(1): 188–196.
- 王晶, 肖海峰. 2018. 耕地生态安全视域下棉花生产布局优化问题研究——以新疆为例[J]. 干旱区地理, 41(4): 833–843.
- 王珊珊, 王金林, 周可法, 汪玮, 万应彩. 2021. 塔里木河下游土地利用/覆被变化对生态输水的响应[J]. 水资源保护, 37(2): 69–74, 80.
- 王秀兰, 包玉海. 1999. 土地利用动态变化研究方法探讨[J]. 地理科学进展, (1): 83–89.
- 王徐凡. 2019. 土地覆被时空变化的可视化表达研究与实现[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1–73.
- 夏婷婷. 2022. 塔里木河流域土地利用变化及驱动因素分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 1–55.
- 新疆维吾尔自治区统计局编. 2001. 新疆统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社.
- 新疆维吾尔自治区统计局编. 2019. 新疆统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社.
- 徐岚, 赵羿. 1993. 利用马尔柯夫过程预测东陵区土地利用格局的变化[J]. 应用生态学报, (3): 272–277.
- 徐勇, 孙晓一, 汤青. 2015. 陆地表层人类活动强度: 概念、方法及应用[J]. 地理学报, 70(7): 1068–1079.
- 闫伊亮. 2022. 基于土地利用的喀什地区人类活动强度时空变化研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 1–80.
- 杨光华, 包安明, 陈曦, 刘海隆, 黄莹, 代述勇. 2010. 气候和土地利用变化对塔里木河干流区植被覆盖变化的影响[J]. 中国沙漠, 30(6): 1389–1397.
- 杨志华. 2020. 耕地地方保护补贴政策背景下农户耕地保护意愿及影响因素研究——以新疆奇台县为例[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 1–74.
- 尹立河, 张俊, 王哲, 董佳秋, 常亮, 李春燕, 张鹏伟, 顾小凡, 聂振龙. 2021. 西北内陆河流域地下水循环特征与地下水资源评价[J]. 中国地质, 48(4): 1094–1111.
- 张春铁, 瓦哈甫·哈力克, 马燕. 2007. 和田绿洲耕地变化的人口驱动因素研究[J]. 干旱区资源与环境, (2): 85–89.
- 张灵俐. 2015. 新疆生态移民补偿机制研究[D]. 石河子: 石河子大学, 1–168.
- 张军峰, 孟凡浩, 包安明, 李长春, 齐修东, 刘铁, 张鹏飞. 2018. 新疆孔雀河流域人工绿洲近 40 年土地利用/覆被变化[J]. 中国沙漠, 38(3): 664–672.
- 张正文. 2013. 新疆棉花产业发展研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 1–59.
- 赵少军, 魏强, 赵新风. 2018. 塔里木河干流土地利用变化类型及过程分析[J]. 新疆农业大学学报, 41(4): 298–306.
- 周瑞涛, 郑航, 刘悦忆. 2021. 塔里木河流域的绿洲迁移研究[J]. 水利水电技术, 52(2): 155–164.
- 庄大方, 刘纪远. 1997. 中国土地利用程度的区域分异模型研究[J]. 自然资源学报, (2): 105–111.