



引文格式: 马红娜, 刘江, 王冬, 等. 1985~2020 年孔雀河绿洲土地利用时空演变及与环境的响应关系研究[J]. 西北地质, xxxx, x(x): 1-12. DOI: 10.12401/j.nwg.2025062

Citation: MA Hongna, LIU Jiang, WANG Dong, et al. Spatial-temporal Changes of Land Use and Response Relationship with the Environment in Kongqi River Oasis Area, Xinjiang, during 1985-2020[J]. Northwestern Geology, xxxx, x(x): 1-12.  
DOI: 10.12401/j.nwg.2025062

## 1985~2020 年孔雀河绿洲土地利用时空演变及与环境的响应关系研究

马红娜<sup>1,2</sup>, 刘江<sup>1,2,\*</sup>, 王冬<sup>1,2</sup>, 李成柱<sup>1,2</sup>, 曾庆铭<sup>1,2</sup>, 李彦娥<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710119; 2. 陕西省水资源与环境工程技术研究中心, 陕西 西安 710119)

**摘要:** 研究孔雀河绿洲区土地利用时空演变及其与环境的响应关系, 对绿洲区土地资源开发、水资源优化和可持续发展具有重要意义。基于 1985~2020 年间共 8 期 Landsat 影像数据, 结合土地利用转移矩阵分析孔雀河绿洲土地利用时空变化情况, 探究土地变化与环境变化的响应关系。结果表明: 近 35 年中, 孔雀河绿洲耕地面积增加 1433.62 km<sup>2</sup>, 增涨幅度为 159.39%, 建设用地面积增加 155.67 km<sup>2</sup>, 增涨幅度为 4 064.50%, 未利用地、草地和水域面积分别减少 1 558.43 km<sup>2</sup>、24.77 km<sup>2</sup>、6.10 km<sup>2</sup>; 耕地主要由草地转入, 其次由未利用地转入, 未利用地主要向草地转化, 其次向耕地转化, 呈现草地转耕地, 未利用地转草地的替代关系; 土地利用变化迁移强度较大的区域与地下水位降落漏斗区域基本吻合, 其变化呈现同步性和一致性; 土地利用及其耗水机制的变化, 引起地下水动力场和化学场发生变化, 绿洲内 TDS 淡水分布区减少, 微咸水和半咸水区域扩大。土地变化受水资源、人口、社会经济发展和种植结构等多种因素交互影响, 社会经济发展对 LUCC 影响显著。

**关键词:** 土地利用变化; 时空变化; 地下水; 矿化度; 孔雀河

中图分类号: P967; P641.69

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(xxxx)xx-xxxx-12

### Spatial-temporal Changes of Land Use and Response Relationship with the Environment in Kongqi River Oasis Area, Xinjiang, during 1985-2020

MA Hongna<sup>1,2</sup>, LIU Jiang<sup>1,2,\*</sup>, WANG Dong<sup>1,2</sup>, LI Chengzhu<sup>1,2</sup>, ZENG Qingming<sup>1,2</sup>, LI Yane<sup>1,2</sup>

(1. China Geological Survey Bureau of Xi'an geology survey center, Xi'an, 710119, Shaanxi, china; 2. Shaanxi Engineering research Centre of Water resources and Environment, Xi'an, 710119, Shaanxi, China)

**Abstract:** Studying the spatial-temporal changes of land use and its response relationship with the environ-

收稿日期: 2024-03-01; 修回日期: 2024-12-07; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 中国地质调查局项目“丝绸之路境内段(新疆)资源环境承载能力监测评价(DD20221731)”, 第三次新疆综合科学考察项目“塔里木河流域关键区生态适宜性调查(2022xjkk0300)”, 陕西省重点研发计划一般项目“秦岭北麓西安段水、碳循环及其优化调控研究(2024SF-YBXM-562)”联合资助。

作者简介: 马红娜(1979-), 女(回族), 高级工程师, 主要从事水工环地质调查工作。E-mail: 54459589@qq.com。

\* 通讯作者: 刘江(1985-), 男, 副研究员, 主要从事水工环地质调查工作。E-mail: liujiang689@163.com。

ment is of great significance for the development of land resources, optimization of water resources, and sustainable development. Based on the Landsat images from 1985 to 2020, a total of 8 periods, combined with land use transfer matrix, the spatial-temporal changes of land use were analyzed, and the response relationship between land changes and the environment changes were explored. The results showed that in the past 35 years, the farmland area increased by  $1433.62 \text{ km}^2$  (159.39%), and the construction land area increased by  $155.67 \text{ km}^2$  (4 064.50%). By comparison, the unused land, grassland and water area were reduced by  $1558.43 \text{ km}^2$ ,  $24.77 \text{ km}^2$  and  $6.10 \text{ km}^2$  respectively. The farmland was mainly transferred from grassland, followed by unused land, the unused land is mainly transformed into grassland, and then into farmland, the substitution relationship of grassland to arable land and unused land to grassland was presented. The area with large migration intensity of land use change was basically consistent with the area of groundwater level drop funnel, and its changes showed synchronization and consistency. The change of land use and water consumption mechanism caused the change of groundwater dynamic field and chemical field, the distribution area of TDS freshwater in oasis decreased, and the area of brackish water and brackish water expanded. Land change was influenced by multiple factors such as water resources, population, social and economic development and planting structure, the social and economic development has a significant impact on LUCC.

**Keywords:** land use change; spatial-temporal change; groundwater; mineralization; Konqi River

土地利用/覆被变化 (land-use and land-cover change, LUCC) 是生态环境变化的重要因素之一, 它对地表植被、气候变化、生物多样性、生物地球化学与水循环等均有不同程度的影响, LUCC 具有动态性和复杂性, 它不仅在一定程度上影响区域经济的发展, 而且对生态环境尤其是生态脆弱区具有重要影响(雷燕慧等, 2021; 匡文慧, 2022 等; 常雪儿等, 2022; 郭瑞等, 2023; 刘靖宇等, 2023)。

孔雀河是塔里木盆地东北缘的一条重要绿色屏障, 对维持塔里木河下游生态环境健康运行具有重要意义(刘加珍等, 2018)。但由于孔雀河流域处于西北内陆干旱气候带, 降水稀少、生态环境十分脆弱。水资源是绿洲发展的主要动力, 也是维持区域生态稳定和促进经济发展的重要因素。土地利用/覆被变化不但影响流域的蒸发散性能, 同时通过地表覆被改变影响地表径流的产生, 进而影响到地下水(王盛萍等, 2006), 由此可见, 土地利用与水资源是孔雀河绿洲环境变化的重要组成部分。20世纪80年代, 孔雀河绿洲的耕地主要在孔雀河沿岸呈带状分布, 耕地占比仅20%左右, 此时的绿洲生态环境基本处于天然状态, 随着土地利用的演变, 孔雀河绿洲由天然绿洲转变为人工绿洲。过去的几十年间, 因耕地面积不断扩大, 地下水超采, 引发地下水水位大幅下降, 形成地下水降落漏斗, 导致孔雀河中、下游河道长期断流和干涸, 两岸沿河胡杨林大面积死亡(魏雄等, 2020; 肖伟等,

2021)。因此, 厘清孔雀河绿洲 LUCC 的时空变化及其对周围环境的影响程度, 对了解区域生态环境变化, 协调区域经济与环境的发展具有重要的指示意义。1973~1999年间, 孔雀河流域土地利用/覆盖类型结构的重心, 由草地、林地、盐碱地转向草地、耕地、盐碱地, 耕地、草地面积增加, 水域、盐碱地面积减少(郭健等, 2006); 1977~2015年间, 流域内耕地和建设用地显著扩张, 面积增幅均在200%以上, 草地和未利用地面积明显减少(张军峰等, 2018; 常存等, 2016)。土地利用/覆被的变化主要受水资源、经济发展、人口增长及政策等因素的控制, 孔雀河绿洲是塔里木河流域重要的人口聚集地之一, 受益于连接南北的交通枢纽地理位置、能源开发和能源化工业的发展, 近年来, 孔雀河绿洲人口、经济迅速增长, 绿洲内经济承载状态为超载(汪菲等, 2017); 为恢复孔雀河两岸生态环境, 新疆2016年实施孔雀河应急补水工程, 生态补水后, 绿洲地下水位得到了一定的抬升, 植被也有一定的恢复(刘璐等, 2021); 2015年新疆出台了棉花种植面积调减指导性计划表(王晶等, 2018), 由此带来的人口、耕地面积等均有不同程度的降低。由此可见, 孔雀河绿洲内人地关系复杂, 社会经济、政策因素等复杂多变, 揭示孔雀河绿洲区近年来土地利用的时空变化特征和规律, 对于绿洲内土地利用结构调整、实现可持续发展尤为重要。

笔者在查阅已有研究成果的基础上, 基于30 m

精度的 Landsat 土地覆盖数据、地下水监测数据等, 分析孔雀河绿洲 1985~2020 年的 LUCC 时空变化特征, 探究土地变化对地下水水位埋深变化、地下水咸淡水的分布特征影响及土地变化与人类活动的响应关系等, 为孔雀河绿洲的土地资源开发、土地结构优化及区域资源环境的可持续发展提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

孔雀河绿洲地处天山南麓, 塔里木盆地东北缘, 地理位置为  $N41^{\circ}11'26''\sim N41^{\circ}58'41''$ ,  $E85^{\circ}20'42''\sim$

$E86^{\circ}46'15''$ , 是孔雀河与塔里木河共同冲积形成的冲积平原。绿洲位于新疆维吾尔自治区巴音郭楞蒙古自治州境内, 在各县市的面积占比分布为库尔勒市(59.51%)、尉犁县(26.76%)、铁门关市(13.69%)、焉耆县(0.04%), 绿洲范围如图 1(桂东伟等, 2021)。孔雀河发源于博斯腾湖, 流经库尔勒市、贯穿尉犁县及兵团二师 31、33、34 团场, 历史上最后注入罗布泊, 现在尉犁县下游发生断流。区内地势北高南低, 东高西低, 北靠库鲁克塔格山, 南接塔克拉玛干沙漠。为典型的暖温带大陆干旱气候, 降水稀少, 蒸发强烈, 昼夜温差大, 年均降雨量 55.4 mm, 年均蒸发量 2 775 m, 多年平均降雨量 62 mm。

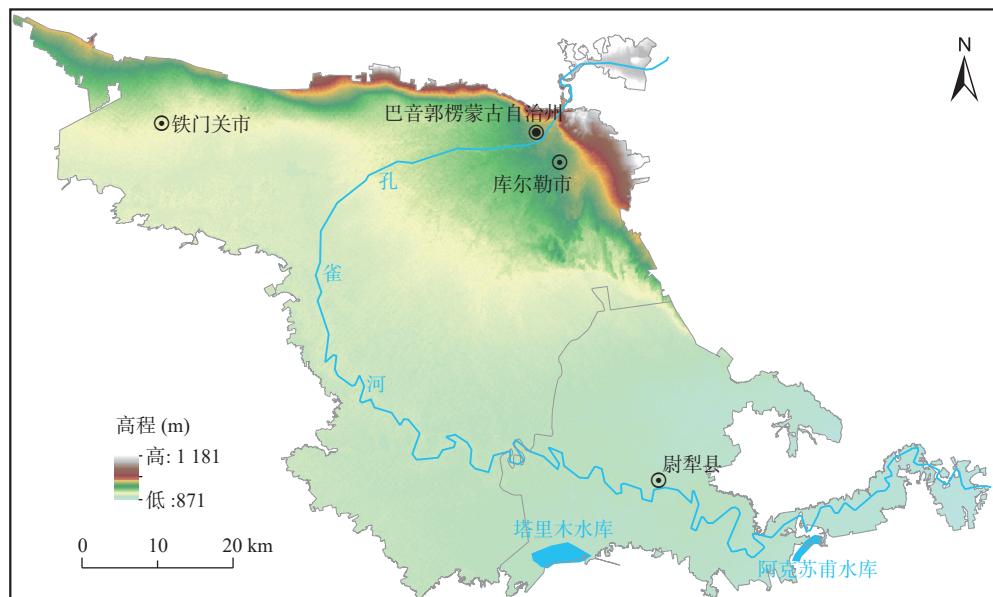


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

### 1.2 数据来源与处理

土地利用数据来源于中国土地覆盖数据集(CLCD)(Yang J et al, 2021), 选取 1985、1990、1995、2000、2005、2010、2015 和 2020 年共 8 期 Landsat 影像, 数据精度为 30 m, 数据格式为 TMG 栅格影像, 经过剪裁、投影、波段计算等预处理后用于研究区土地利用变化分析。参考全国土地利用现状调查技术规程, 将孔雀河绿洲土地划分为耕地、林地、草地、水域、湿地、建设用地和未利用地七类。DEM 数据为全球 30 m 分辨率数字高程数据(NASA DEM), 来源于美国国家航空航天局(<https://www.nasa.gov>), 数据采用 UTM/WGS84 地理坐标, 数据格式为 TMG 栅格影像, 对 DEM 进行图像镶嵌、剪裁、投影变化等预处理后用于研究区地

形地貌、高程分析。地下水水位、水质数据采用研究区内地下水统测点和国家监测工程点共计 155 组, 采用克里金插值法, 生成地下水位埋深分区和矿化度分区图。研究区人口、经济、农业数据等来自新疆统计年鉴(2000~2020), 由新疆维吾尔自治区统计局收集获取, 水资源数据来自巴音郭楞蒙古自治州水资源公报(2001~2019), 由巴音郭楞蒙古自治州水利局获取。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵反映不同时段土地类型的相互转换关系, 是马尔可夫模型在土地利用变化方面的应用(袁盼丽等, 2021)。运用 ArcGIS 软件对 1985~2020 年 8 期遥感影像进行土地利用转移统计, 并利用

桑基图进行可视化处理, 土地利用转移矩阵公式如下:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $A$  为转移矩阵,  $a_{mn}$  为  $T$  时期的  $m$  种土地类型转变为  $T+1$  时期  $n$  种土地类型的面积;  $m, n$  分别为研究初期和末期的土地类型, 其中  $a_{mn}$  为两个时期土地类型没有发生转变。

### 1.3.2 土地利用动态度

土地利用动态度表示土地资源的变化速率, 单一土地动态度( $K$ )公式为

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (2)$$

$K$  为特定时间范围内某一土地类型的动态度, 即年变化率(%/a),  $U_a$ 、 $U_b$  分别为研究初期和末期土地类型的面积,  $T$  为变化时间段。

## 2 结果分析

### 2.1 孔雀河绿洲土地利用/覆被时空变化

#### 2.1.1 土地利用格局及变化分析

基于 1985~2020 年孔雀河绿洲多期 Landsat 解译

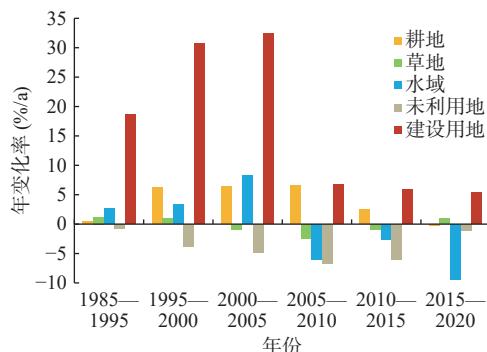


图 2 1985~2020 年孔雀河绿洲土地利用动态度

Fig. 2 Dynamic attitude of land use in Kongqi River Oasis during 1985~2020

结果(表 1, 表 2, 图 2、图 3), 经过多年演变, 绿洲内土地类型以耕地为主(58.48%), 其次是草地(24.29%)和未利用地(12.91%), 耕地分布范围由南北两侧向绿洲中部延伸, 草地的分布则由中部向绿洲边缘转移, 未利用地面积不断减少。耕地、建设用地面积以增加为主, 未利用地面积以减少为主, 草地和水域面积总体呈减少趋势; 近 35 年, 孔雀河绿洲耕地面积增加 1 433.62 km<sup>2</sup>, 增涨幅度为 159.39%, 其中, 1985~1995 年耕地面积略有增加, 1995~2015 年处于扩张时期, 2015 年以后略有下降趋势, 耕地在孔雀河绿洲的面积占比从 22.55% 增加至 58.48%。建设用地虽然在区内占比较小, 但呈快速增长趋势, 面积增加 155.67 km<sup>2</sup>,

表 1 1985~2020 年孔雀河绿洲土地利用类型面积变化

单位: km<sup>2</sup>

Tab. 1 Land use type area change in Kongqi River Oasis during 1985~2020

类型	1985年	1990年	1995年	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年
耕地	899.44	898.28	916.70	1 203.80	1 586.42	2 106.36	2 366.16	2 333.07
草地	993.71	1 003.35	1 112.24	1 168.28	1 111.83	976.04	926.76	968.94
水域	18.99	19.76	24.14	28.22	39.95	28.03	24.25	12.89
未利用地	2 073.23	2 063.33	1 925.16	1 561.09	1 178.13	781.57	546.45	514.81
建设用地	3.83	4.48	10.96	27.81	72.87	97.21	125.59	159.50

表 2 1985~2020 年孔雀河绿洲土地利用动态度变化情况

单位: %/a

Tab. 2 Change of land use dynamic attitude in Kongqi River Oasis during 1985~2020

类型	1985~1995	1995~2000	2000~2005	2005~2010	2010~2015	2015~2020
耕地	0.19	6.26	6.36	6.55	2.47	-0.28
草地	1.19	1.01	-0.97	-2.44	-1.01	0.91
水域	2.71	3.38	8.31	-5.97	-2.70	-9.37
未利用地	-0.71	-3.78	-4.91	-6.73	-6.02	-1.16
建设用地	18.64	30.76	32.41	6.68	5.84	5.40

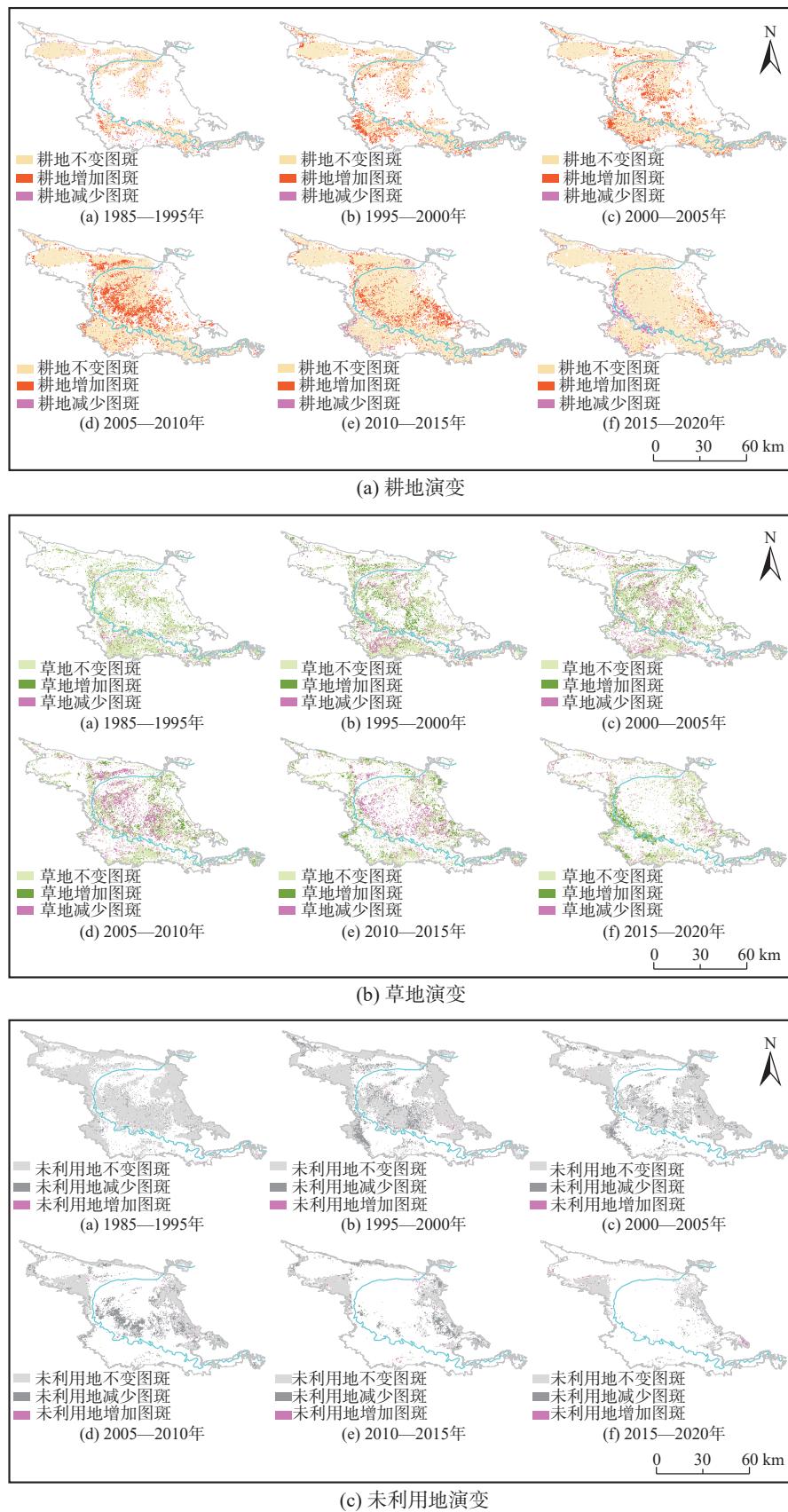


图3 近 35 年孔雀河绿洲土地类型变化图

Fig. 3 Map of the land change of Kongqi River Oasis in recent 35 years

增涨幅度为 4 064.50%。草地呈先增再减又增趋势, 1985~2000 年呈递增趋势, 2000~2015 年呈递减趋势, 2015~2020 年呈递增趋势, 草地面积总体减少 24.77 km<sup>2</sup>, 在绿洲的面积占比从 24.91% 减少至 24.29%, 初期和末期变化较小。未利用地呈递减趋势, 面积减少 1 558.43 km<sup>2</sup>, 在绿洲的面积占比从 51.97% 减少至 12.91%。水域呈先增后减趋势, 水域面积总体减少 6.1 km<sup>2</sup>。

### 2.1.2 土地利用转移特征

1985~2020 年, 绿洲内耕地、草地和未利用地的转化最为显著(图 4)。耕地的转入面积最大, 1985~1995 年耕地主要集中于冲洪积扇尚有和孔雀河下游沿岸区域; 1995~2005 年间, 耕地增加区域除了孔雀河上游绿洲外围之外, 绿洲西南侧及孔雀河两岸亦有增加; 2005~2015 年, 新增耕地则集中、大规模出现在了中部的冲洪积扇外围区域; 2015 年之后, 少量新增的耕地主要为原有人工绿洲内部的调整挖潜; 上述新增耕地主要由草地转入, 其次由未利用地转入。耕地增加的区域大多为草地减少的区域, 减少的草地则由未利用地替代转入。未利用地的转出面积最大, 主要向草地转化, 其次向耕地转化。建设用地主要由未利用地、草地转入。

2005~2010 年间土地利用转化量最为显著, 是 6 个时期中土地利用转移强度最大的一期, 草地主要向耕地转化, 未利用地主要向草地、耕地转化; 1995~2000 年、2000~2005 年和 2010~2015 年三个时期的土地利用转移强度也相对较强, 主要表现在草地向耕地转化, 未利用地向草地转化; 1985~1995 和 2015~2020 年两个时期的土地利用转移强度相对较弱, 主要表现在未利用地转化为草地, 耕地与草地互相转化。

### 2.2 地下水水位埋深变化

绿洲区两期(1985、2020 年)地下水埋深对比分析(图 5), 1985 年地下水水位埋深普遍小于 5 m, 分布面积占总面积的 80% 以上, 表现为天然状态下地下水流动特征; 2020 年地下水水位主要处于 10~40 m 之间, 面积占比达到 60% 以上, 冲洪积平原区(北、西、南三面环孔雀河的地区)埋深大于 20 m, 地下水水位普遍下降 15~40 m, 最大降幅达到 50.5 m, 而冲洪积平原区恰好是近 35 年来耕地扩张的主要区域, 在土地转换最剧烈的中部地带(图 4), 耕地扩张引起地下水位下降, 形成明显的地下水漏斗区(图 5, b)。地下水漏斗区范围以标高 870 m 等水位线闭合区为边界, 总面

积 967.51 km<sup>2</sup>, 1985~2020 年漏斗范围内土地利用变化最大的是耕地与未利用地(表 3), 1985 年未利用地占主体, 占比达 75%, 其次是草地占比 20%, 耕地仅占 4%, 2020 年耕地占比 76%, 未利用地占比 3%, 2020 年耕地面积较 1985 年增加了 694.91 km<sup>2</sup>, 是 1985 年耕地面积的 17 倍, 土地利用类型的主体由未利用地转变为耕地(转化面积占比 63.68%); 漏斗区地下水水位埋深下降呈现未利用地转耕地>草地转耕地>耕地转草地>未利用地转草地>其他地类转换(表 4), 其中, 未利用地转耕地图斑范围内, 地下水水位埋深平均下降了 36.09 m, 耕地范围内的地下水位埋深下降值明显高于其他地类, 侧面说明了因农业用水的增加, 导致地下水开采量增加, 总体来看, 地下水漏斗的形成与土地利用演变之间存在联系。

35 年来, 土地利用变化迁移强度较大的区域与地下水位降落漏斗区域基本相吻合, 其变化呈现同步性和一致性。土地利用与水资源分布互相影响制约, 天然的水资源格局影响着土地利用的分布状态, 土地利用变化迁移又制约水资源的动态分布格局, 两者之间呈现互馈制约的关系。因此, 在干旱区土地利用迁移变化、水资源短缺、生态脆弱共存, 任何一个环节的变化迁移, 都会影响其他系统的动态变化。

### 2.3 地下水质变化

绿洲区三期(1985、2014、2020 年)地下水矿化度对比分析(图 6), 在天然条件下, 孔雀河上游河段及山前冲洪积扇的上部地区地下水水质较好, 地下水从山前冲洪积扇顶部向下游流动, 它在流经含水层时逐渐溶解盐分, 导致含盐量逐步增加, 当到达冲洪积扇中下部的浅埋带时, 地下水的矿化度升高, 变为微咸水, 在孔雀河中下游段, 由于地下水埋深变浅, 加之干旱气候下强烈的蒸发作用, 矿化度进一步升高, 水质由微咸水逐渐变为半咸水和咸水。随着耕地面积的增大, 农业灌溉用水量大幅增加, 从 1985 年到 2014 年, 再到 2020 年, 咸淡水的分布特征发生了显著变化, 从零散分布转变为连片成区, 淡水分布面积持续缩小, 微咸水大面积连片分布在绿洲的中部, 半咸水分布在绿洲的南部, 咸水则主要分布在孔雀河下游、绿洲的东南角和西北角。由于耕地扩张形成的地下水漏斗改变了地下水的动力场和化学场, 不仅漏斗区内原有的浅层咸水和半咸水被开采, 同时地下水径流方向也发生了变化, 向漏斗区汇集, 使得这些区域的微咸水逐渐流入漏斗区, 导致绿洲区中部地带的矿化度相较

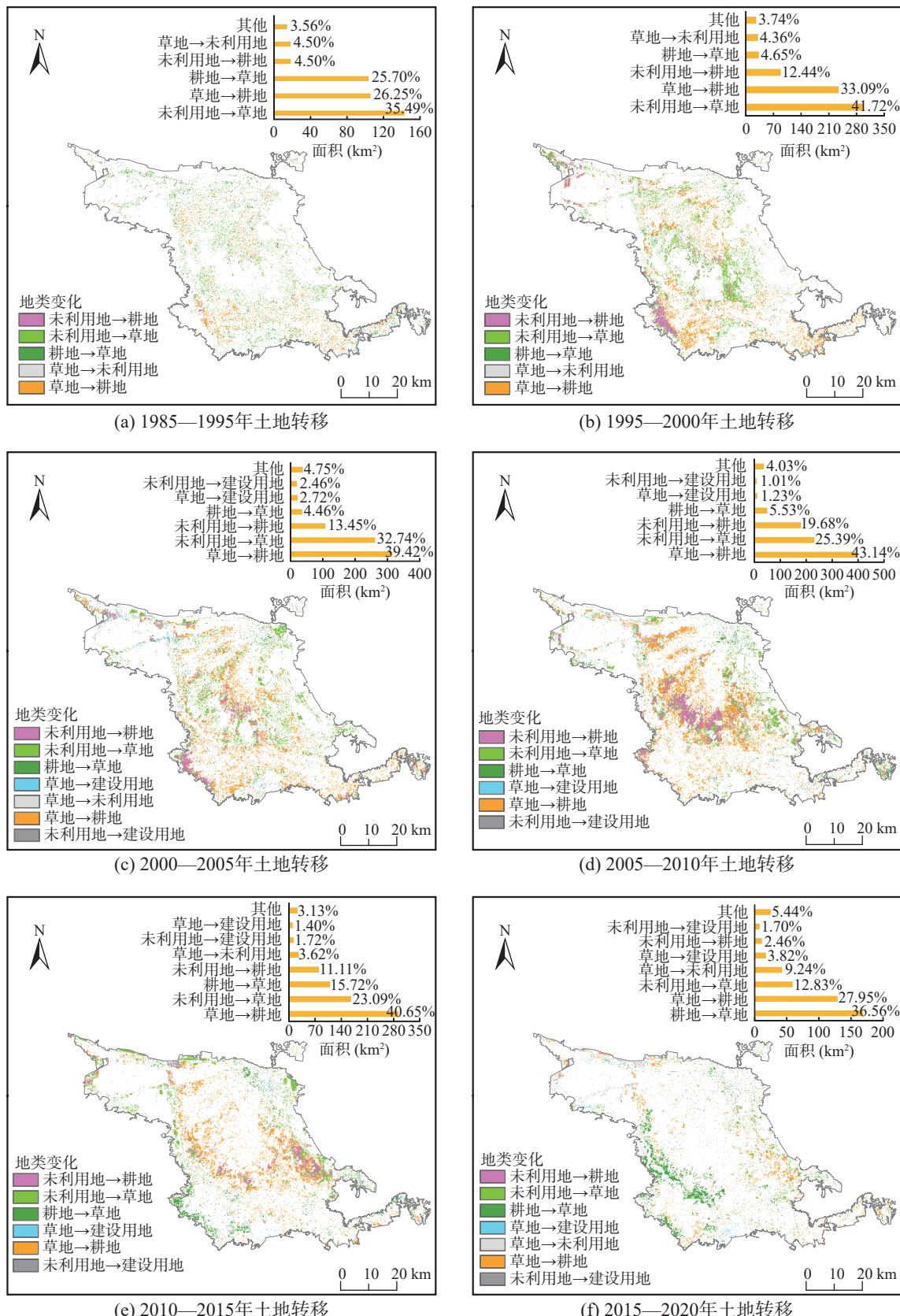


图4 不同时期孔雀河绿洲土地利用转移图斑

Fig. 4 Map of the land use transfer in Kongqi River Oasis of different periods

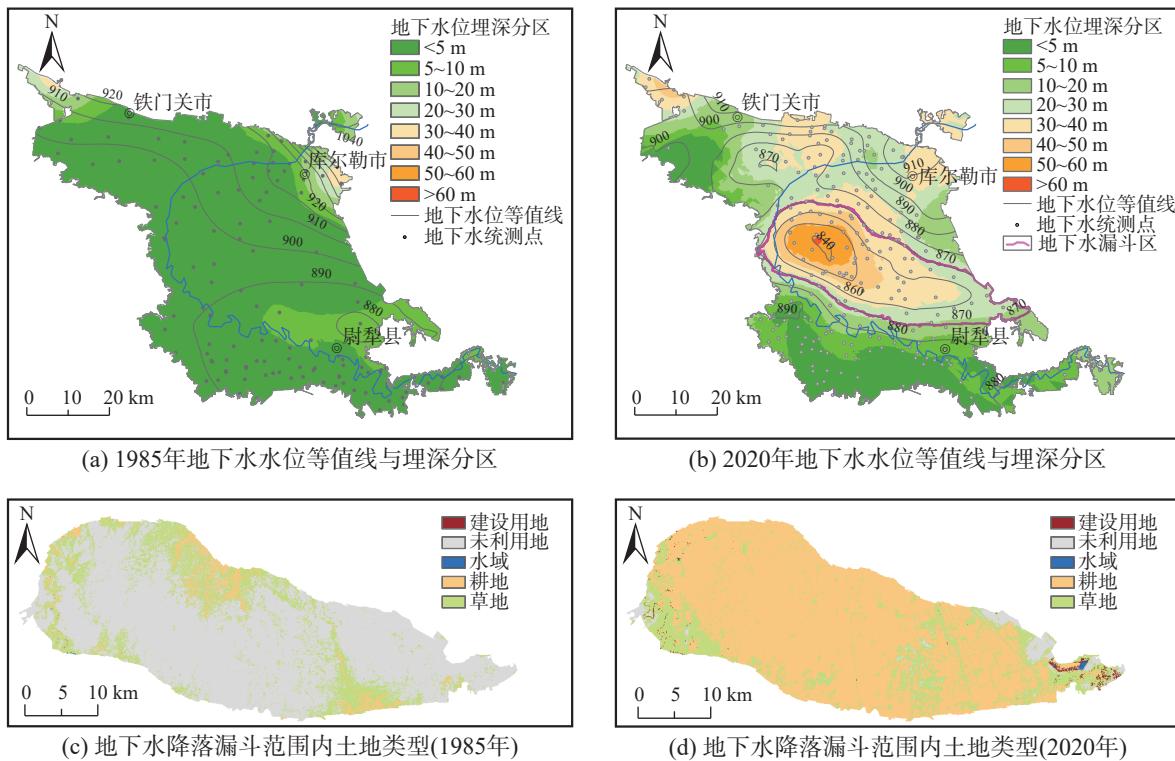


图5 1985和2020年孔雀河绿洲地下水埋深分区与土地类型

Fig. 5 Map of groundwater depth zoning and land types in 1985 and 2020

表3 1985~2020年地下水降落漏斗范围内土地利用类型变化

单位:  $\text{km}^2(\%)$

Tab. 3 Changes in land types within the groundwater drawdown funnel areas

土地利用类型	1985年	2000年	2020年
耕地	42.87(4%)	99.59(10%)	737.78(76%)
草地	197.14(20%)	346.11(36%)	190.67(20%)
建设用地	0.06(0.01%)	0.26(0.03%)	5.81(0.6%)
未利用地	727.20(75%)	521.37(54%)	32.09(3%)
水域	0.23(0.02%)	0.18(0.02%)	1.17(0.12%)
合计	967.51	967.51	967.51

表4 1985~2020年地下水降落漏斗范围内水位埋深变化与土地利用转化类型关系

Tab. 4 Relationship between groundwater depth changes and land use conversion within the groundwater drawdown funnel areas

土地利用转化类型	转化面积( $\text{km}^2$ )	转化面积占比(%)	地下水位埋深下降均值(m)
未利用地转耕地	545.40	63.68	36.09
草地转耕地	154.43	18.03	34.00
耕地转草地	144.54	16.88	28.32
未利用地转草地	4.65	0.54	26.73
未利用地转建设用地	4.43	0.52	16.13
未利用地转水域	1.16	0.14	16.11
其他	1.89	0.21	/

于1985年反而呈现出减小的趋势,不同水层间的水质交换使咸淡水的零散分布转化为连片分布。此外,未利用地转化为耕地后,在灌溉过程中,盐碱地中的

盐分溶解后渗入地下水,导致绿洲西南区域局部出现TDS升高的现象。

土地覆被迁移转化较为剧烈的区域其供水发生

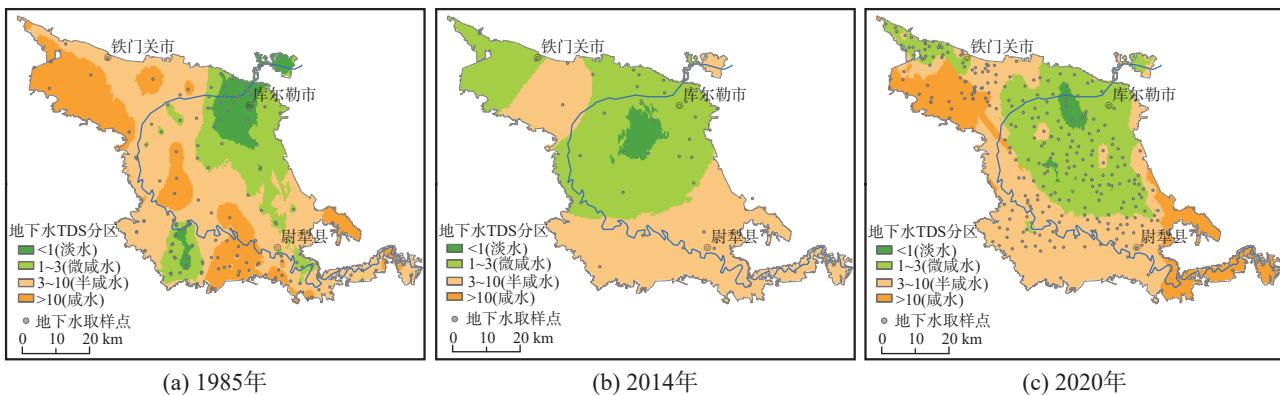


图6 1985、2014年和2020年孔雀河绿洲地下水矿化度分区图

Fig. 6 Map of groundwater mineralization zoning in 1985、2014 and 2020

了较大变化,由于地下水的大量开采,改变了其地下水动力场和化学场,随着地下水漏斗区的扩大,TDS淡水分布区减少,微咸水和半咸水区域扩大。

#### 2.4 绿洲区供水资源变化

2001~2009年孔雀河绿洲供水结构(图7)表明,绿洲区水资源利用以地表水为主,地下水为辅,2001~2009年总供水量相对稳定,多年平均供水量为10.63亿m<sup>3</sup>,2010~2011年供水量陡然增大至峰值,年平均供水量为23.30亿m<sup>3</sup>,2011年供水量较2001年增加了139%,2012~2019年供水量呈下降趋势,多年平均供水量为17.27亿m<sup>3</sup>。地表水供水量总体呈先减少再增加后减少趋势,2001~2009年呈递减趋势,2010年地表供水量急剧增大,至2011年达到峰值19.77亿m<sup>3</sup>,之后呈下降趋势,2016年之后地表水供水量稳定至10亿m<sup>3</sup>左右,2001~2005年地表水供水量占总供水量的88~90%,2010年之后,地表水供水量占总供水量的59~77%,平均供水量约68%。地下水供水量呈先增加再减小的趋势,2001年起逐年增大,2010~2016年达到峰值,峰值时期平均供水量为6.23亿m<sup>3</sup>,

尤其是2016年地下水供水量约是2001年供水量的7倍,2016~2019年地下水供水量呈逐年减小趋势。

绿洲区经济发展主要以农业为主,农业用水量占总用水量的90%左右,由于耕地的扩张,农业灌溉面积不断增大,使得水资源的利用格局也发生了变化。2001~2010年,地表水供水量总体呈下降趋势,地下水供水量呈上升趋势,而该时期是土地利用动态度变化最大的时期,耕地面积大幅增加,地表水的可利用空间逐渐减少,地下水开采强度日益增加,2010年耕地扩张速率达到最大,2011年地表水供水量达峰值,之后,耕地扩张速度趋缓,地表水供水量下降,地下水供水量依然维持在峰值,2010年之后,地表水和地下水供水量均高于2010年之前,2016年,巴州对孔雀河中下游实施生态输水工程,退耕还水使耕地面积减少,地下水位得到了一定的抬升,地下水供水量明显减少,绿洲区供水结构时间序列上的变化规律与土地变化关联度高。

#### 2.5 人类活动变化

对库尔勒和尉犁县2000~2020年人口、社会经济及种植结构分析(图8),总人口呈先增后减趋势,2000年总人口为48.55万人,2015年人口增长到66.21万人,2018年略有下降至57.96万人,2000~2015年总人口涨幅幅度达36.38%,2015年之后呈不同程度的下降趋势;地区生产总值总体呈递增趋势,2000年,区内生产总值为107.56亿元,2018年增长至731.85亿元,2000~2020年地区生产总值涨幅达580.37%。种植结构上,以棉花种植为主,2000年棉花占耕地面积的70%左右,2005年以后增加至90%以上;棉花播种面积呈先增后减趋势,2000年棉花播种面积为48千公顷,2015年增加至167千公顷,涨幅为247.9%。

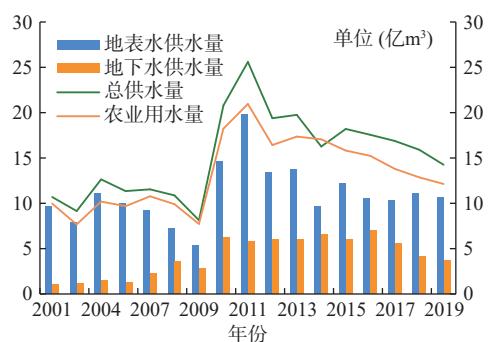


图7 2001~2019年孔雀河绿洲供水结构变化图

Fig. 7 Map of the changes of water supply structure from 2001 to 2019

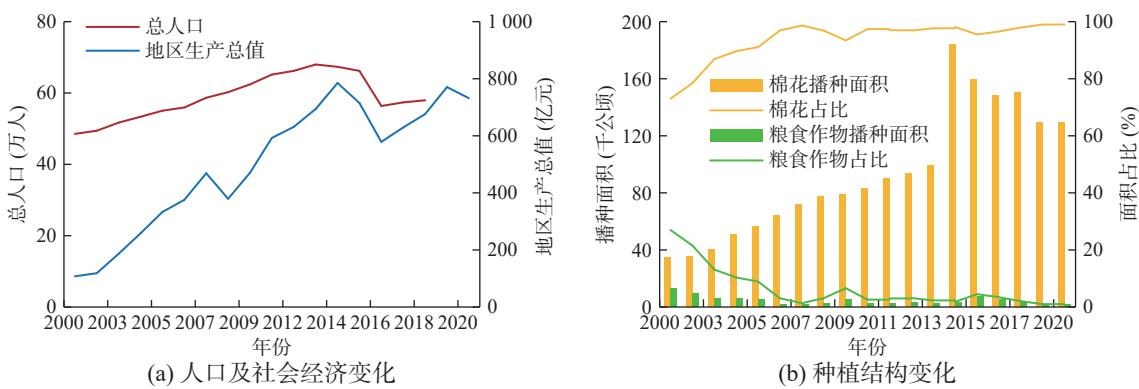


图8 近 20 年来库尔勒和尉犁县人口、社会经济和种植结构变化情况

Fig. 8 Changes of population, social economy and planting structure in the past 20 years

区内人口和经济的发展带动粮食需求和城市化发展,直接促进耕地和建设用地的扩张,棉花种植是耕地大面积增加的重要原因之一,耕地变化趋势与人口、棉花种植面积变化趋势一致,呈正相关。人类活动对土地利用变化有明显的影响。

### 3 讨论

在绿洲扩张过程中,各土地要素之间差异很大,主要表现在耕地、建设用地增加,未利用地减少,草地略有减少。从土地利用转移矩阵分析,耕地开发利用主要分为三个阶段:缓慢增长期(1985~1995)、扩张期(1995~2015)和下降时期(2015~2020)。20世纪90年代,库尔勒被列为新疆重点种棉基地,大力发展棉花,由于绿洲内产业结构调整和沙漠开荒等(贺凌云等,2005;张春铁等,2007),1995年之后耕地进入扩张时期,早期耕地集中分布在地表水资源丰富的河道附近,随着农田水利设施建设,引水渠系的兴修(如2003年建成库塔干渠东干渠,吾买尔江·吾布力等,2017),耕地扩张范围逐渐从河道向绿洲中部延伸,草地的分布由中部向绿洲边缘转移,未利用地面积不断减少,表现出明显的开发未利用地趋势。绿洲区经济发展主要以农业为主,不同的种植方式对水资源的需求不同,干旱区棉花种植灌溉用水量远高于其他种植方式,孔雀河绿洲主要农作物为棉花,耕地扩张过程,新增农田多为草地或裸地,含盐量高的土地需利用漫灌排盐,以漫灌为主的农田周围土壤表层含水量高,促进了未利用地向草地转化,形成草地转耕地,未利用地转草地或耕地的发展模式。南疆节水灌溉技术始于20世纪90年代,发展初期由于节水技术成本较高发展缓慢,2008年自治区每年投入9亿元高效节水

补贴,此后开始大量推广和应用(胡家帅,2017;孔令英等,2022),随着节水灌溉技术的广泛应用,未利用地向草地转化的面积逐渐减小(图3)。2015~2020年,区内耕地面积呈现下降趋势,草地则有一定的恢复,在孔雀河两岸部分耕地转化为草地。人类活动扰动是区内土地变化的重要原因之一,随着人口增长、经济发展、棉花播种面积的增加,2015年绿洲内经济发展空前高涨,人口和经济的发展带动粮食需求和城市化发展,直接促进耕地和建设用地的扩张。由于耕地面积扩大,地下水开采强度日益增加,地下水成为孔雀河流域农业灌溉的重要水源(张俊等,2021),如库尔勒和尉犁县两地机井多达1.3万眼(肖伟,2021),侧面反映了地下水的开采程度,地下水位的下降导致孔雀河下游河道断流,大片胡杨林死亡,2016年巴州对孔雀河中下游实施生态输水工程(魏雄,2020;肖伟,2021),对孔雀河两岸1 km范围内的非法取水口、非法泵站等进行了依法查处,实施退耕还水行动,生态补水后,绿洲地下水位得到了一定的抬升,在孔雀河两岸部分耕地转化为草地,植被也有一定的恢复;同时,为缓解人口增长、资源环境、社会经济发展等压力,2015年新疆出台了棉花种植面积调减指导性计划表(王晶等,2018),2015年之后区内人口、经济和棉花种植均呈现不同程度的下降趋势,区内耕地变化趋势与人口、棉花种植面积变化呈正相关。

孔雀河绿洲经过多年的扩张,各种问题凸显,对绿洲的可持续发展存在潜在风险。耕地的快速增长导致绿洲出现了地下水降落漏斗,还导致周边地下咸水、微咸水入侵,从而使地下水的整体质量下降,导致应对地表水供应短缺风险的能力下降,同时也面临着农田生态质量降低的风险,绿洲的开发已然受到了水资源、地下水水质等环境要素的限制,历史上,曾经发

生过多起因为水资源问题导致的绿洲荒废(贺凌云等, 2005), 地下水埋深、地下水水质的变化, 绿洲外围过渡带生态变差等都可能导致绿洲生产水平降低。因此建议相关部门制定多种举措统筹考虑绿洲的发展, 一是空间上基于科学评价, 制定开发区块的优先顺序, 有序增加人工绿洲; 二是实施严格的水资源利用管理, 提高农业科技水平, 防止农田质量下降; 三是建立种植结构调整风险预判机制, 针对种植结构及相应的农业用水量进行预判, 科学合理控制种植规模, 建议在绿洲区外围使用生存能力较强的经济作物替代部分棉花种植; 四是建立监测预警风险体系, 对绿洲区农业生产面积、种植结构等人类活动影响因素进行必要的监测, 不断避免风险, 发掘潜力。

## 4 结论

(1) 1985~2020 年, 孔雀河绿洲耕地面积增加 1 433.62 km<sup>2</sup>, 增涨幅度为 159.39%; 其中, 1985~1995 年耕地面积略有增加, 1995~2015 年处于扩张时期, 2015 年以后略有下降趋势, 耕地在孔雀河绿洲的面积占比从 22.55% 增加至 58.48%。建设用地呈递增趋势, 面积增加 155.67 km<sup>2</sup>, 增涨幅度为 4 064.50%, 主要由未利用地和草地转入。未利用地呈递减趋势, 面积减少 1 558.43 km<sup>2</sup>, 主要转出为草地、耕地和建设用地, 在绿洲的面积占比从 51.97% 减少至 12.91%。草地呈先增再减又增趋势, 1985~2000 年呈递增趋势, 2000~2015 年呈递减趋势, 2015~2020 年呈递增趋势, 1985~2020 年, 草地面积总体减少 24.77 km<sup>2</sup>, 在绿洲的面积占比从 24.91% 减少至 24.29%, 总体变化不明显。水域呈先增后减趋势, 水域面积总体减少 6.1 km<sup>2</sup>。

(2) 1985~2020 年, 绿洲内耕地、草地和未利用地的转化最为显著。耕地的转入面积最大, 主要由草地转入, 其次由未利用地转入; 未利用地的转出面积最大, 主要向草地转化, 其次向耕地转化; 草地主要向耕地转化。区域土地利用转移呈现草地转耕地, 未利用地转草地的替代关系, 这也是草地多次参与转化, 但基年与末年总体变化不大的原因, 这种转化关系与区内灌溉方式有关。

(3) 绿洲区土地利用变化迁移强度较大的区域与地下水位降落漏斗区域基本相吻合, 其变化呈现同步性和一致性, 随着土地利用的变化, TDS 淡水分布区减少, 微咸水和半咸水区域扩大。土地利用与水资源

互相影响制约, 两者之间呈现互馈制约的关系。土地变化受水资源、人口、社会经济发展和种植结构等多种因素交互影响, 社会经济发展对 LUCC 影响显著。

## 参考文献(References):

- 常存, 包安明, 李均力. 塔里木河四源区耕地时空演化的驱动分析[J]. 干旱区研究, 2016, 33(2): 239~245.
- CHANG Cun, BAO An-ming, LI Jun-li. Spatiotemporal evolution of cultivated land in the headwaters of the Tarim River[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(2): 239~245.
- 常雪儿, 汪洋, 甄慧, 等. 1990—2018 年新疆喀什噶尔河流域土地利用/覆盖变化空间耦合及其生态效应[J]. 西南农业学报, 2022, 35(3): 596~607.
- CHANG Xueer, WANG Yang, ZHEN Hui, et al. Spatial couple of land use /cover changes and its consequence for ecological systems in Kaxgar River basin in Xinjiang from 1990 to 2018[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2022, 35(3): 596~607.
- 桂东伟, 李伯驥, 张思源, 等. 孔雀河绿洲-全球变化数据大百科辞条 [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志(中英文), 2021.
- GUI Dongwei, LI Bofei, ZHANG Siyuan, et al. Aksu River Oasis - Global Change data Encyclopedia[J/DB/OL]. Global Change Data Warehousing Electronic Journal (English and Chinese), 2021.
- 郭健, 于礼, 董新光. 新疆孔雀河流域平原区土地利用/覆盖变化分析[J]. 新疆农业大学学报, 2006, 29(3): 82~85.
- GUO Jiang, YU Li, DONG Xinguang. An analysis of land use/cover changes of the Peacock River basin in Xinjiang[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2006, 29(3): 82~85.
- 郭瑞, 刘蔚, 李宗省, 等. 祁连山甘肃片区土地利用变化特征及驱动力[J]. 中国沙漠, 2023, 43(3): 188~198.
- GUO Rui, LIU Wei, LI Zongsing, et al. An analysis on the land use change characteristics and driving forces in Gansu part of the Qilian Mountain[J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(3): 188~198.
- 贺凌云, 海米提·依米提, 李谢辉. 和田地区近五十年耕地变化分析[J]. 水土保持研究, 2005, 12(1): 83~86.
- HE Lingyun, Himiti YIMITI, LI Xiehui. Analysis on the change of cultivated land in the Hetian district[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(1): 83~86.
- 胡家帅. 2017. 南疆沙区成龄红枣漫改滴灌高效灌溉技术研究[D]. 石河子大学.
- HU Jiashuai. 2017. The efficient irrigation technology research for traditional irrigation to drip irrigation in sandy of red jujube in Southern Xinjiang[D]. Shihezi University.
- 孔令英, 余欣. 新疆节水灌溉与农业绿色治理协调发展研究[J]. 石河子大学学报(哲学社会科学版), 2022, 36(4): 32~39.
- KONG Lingying, YU Xin. Research on the collaborative development of agricultural green governance and water-saving irriga-

- tion in Xinjiang[J]. Journal of Shihezi University(Philosophy and Social Sciences), 2022, 36(4): 32–39.
- 匡文慧, 张树文, 杜国明, 等. 2015-2020 年中国土地利用变化遥感制图及时空特征分析[J]. 地理学报, 2022, 77(5): 1056–1071.
- KUANG Wenhui, ZHANG Shuwen, DU Guoming, et al. Remotely sensed mapping and analysis of spatio-temporal patterns of land use change across China in 2015-2020[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(5): 1056–1071.
- 雷燕慧, 丁国栋, 李梓萌, 等. 京津风沙源治理工程区土地利用/覆盖变化及生态系统服务价值响应[J]. 中国沙漠, 2021, 41(6): 29–40.
- LEI Yanhui, DING Guodong, LI Zimeng, et al. Land use/cover change and its ecosystem service value response in the Beijing-Tianjin sandstorm source control project area[J]. *Journal of Desert Research*, 2021, 41(6): 29–40.
- 刘加珍, 李卫红, 陈永金, 等. 孔雀河下游衰退河岸林的沙漠化分析[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2018, 31(1): 65–71.
- LIU Jiazheng, LI Weihong, CHEN Yongjin, et al. Analysis on desertification of degraded riparian forest in the lower reaches of Peacock river[J]. *Journal of Liaocheng University(Natural Science edition)*, 2018, 31(1): 65–71.
- 刘靖宇, 蒋磊, 尹立河, 等. 塔里木盆地东北缘绿洲区土壤养分特征及主控因素分析[J]. 西北地质, 2023, 56(3): 141–152.
- LIU Jingyu, JIANG Lei, YIN Lihe, et al. Soil nutrient characteristics and main controlling factors in the oasis zone of the northeastern margin of Tarim Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(3): 141–152.
- 刘璐, 陈亚鹏, 李肖杨. 生态输水对孔雀河地下水埋深及植被的影响[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 901–909.
- LIU Lu, CHEN Yapeng, LI Xiaoyang. Effect of ecological water conveyance on groundwater depth and vegetation in the Kongque River[J]. *Arid Zone Research*, 2021, 38(4): 901–909.
- 汪菲, 王长建. 基于相对资源承载力模型的区域可持续发展研究—以开都河-孔雀河为例[J]. 资源与产业, 2017, 19(1): 108–115.
- WANG Fei, WANG Changjian. Regional sustainable development based on relative resources carrying capacity model: a case study on Kaidu river-Kongque river basin[J]. *Resources & Industries*, 2017, 19(1): 108–115.
- 王晶, 肖海峰. 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, 2018, 41(4): 833–843.
- WANG Jing, XIAO Haifeng. Optimization of the distribution of cotton production in Xinjiang under the view of cultivated land ecological security[J]. *Arid Land Geography*, 2018, 41(4): 833–843.
- 王盛萍, 张志强, 孙阁, 等. 黄土高原流域土地利用变化水文动态响应—以甘肃天水吕二沟流域为例[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(1): 48–54.
- WANG Shengping, ZHANG Zhiqiang, SUN Ge, et al. Effects of land use change on hydrological dynamics at watershed scale in the Loess Plateau: A case study in the lvergou watershed, Gansu Province[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28(1): 48–54.
- 魏雄. 基于生态流量保障的孔雀河输水调度方案分析[J]. 陕西水利, 2020(7): 217–218.
- WEI Xiong. Analysis of water transfer scheme of Kongquehe River based on ecological flow guarantee[J]. *Shaanxi Water Resources*, 2020(7): 217–218.
- 吾买尔江·吾布力, 李卫红, 朱成刚, 等. 新疆孔雀河流域生态退化问题与保护恢复研究[J]. 新疆环境保护, 2017, 39(1): 8–12.
- WUBULI Wumaierjiang, LI Weihong, ZHU Chenggang, et al. Research on ecological degradation, protection and restoration of Peacock River Basin, Xinjiang[J]. *Environmental Protection of Xinjiang*, 2017, 39(1): 8–12.
- 肖伟. 开都-孔雀河流域水生态安全与对策研究[J]. 水利科学与寒区工程, 2021, 4(1): 72–74.
- XIAO Wei. Study on water ecological security and countermeasures in Kaidu-Kongquehe River Basin[J]. *Hydro Science and Cold Zone Engineering*, 2021, 4(1): 72–74.
- 袁盼丽, 汪传建, 赵庆展, 等. 基于深度学习的寒旱区多时序影像土地利用及变化监测—以新疆莫索湾垦区为例[J]. 干旱区地理, 2021, 44(6): 1717–1728.
- YUAN Panli, WANG Chuanjian, ZHAO Qingzhan, et al. Dynamic monitoring of land-use/land-cover change in cold and arid region based on deep learning: A case study of Mosowan reclamation area in Xinjiang[J]. *Arid Land Geography*, 2021, 44(6): 1717–1728.
- 张春轶, 瓦哈甫·哈力奇, 马燕. 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, 2007, 21(2): 85–89.
- ZHANG Chunyi, Wahafu HALIQI, MA Yan. The study on population driving forces to cultivated land change in Hotan Oases[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2007, 21(2): 85–89.
- 张俊, 尹立河, 顾小凡, 等. 同位素水化学指示的新疆孔雀河流域地下水与地表水关系[J]. 西北地质, 2021, 54(1): 185–195.
- ZHANG Jun, YIN Lihe, GU Xiaofan, et al. Study on the relationship between groundwater and surface water in XinJiang Kongque River Basin using isotopes and hydrochemistry method[J]. *Northwestern Geology*, 2021, 54(1): 185–195.
- 张军峰, 孟凡浩, 包安明, 等. 新疆孔雀河流域人工绿洲近 40 年土地利用/覆盖变化[J]. 中国沙漠, 2018, 38(3): 664–672.
- ZHANG Junfeng, MENG Fanhao, BAO Anming, et al. LUCC Analysis of the Upstream of the Kongqi River, Xinjiang, China.[J]. *Journal of Desert Research*, 2018, 38(3): 664–672.
- Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 3907–3925.