

吐鲁番坎儿井在促进干旱区绿洲城乡融合发展中的生态价值研究

乃皮赛·艾山 吴文婕

新疆农业大学, 中国·新疆 乌鲁木齐 830052

摘要: 探究吐鲁番坎儿井在干旱区绿洲城乡融合中生态价值及作用机理, 以吐鲁番市 3 个区县 20 个乡镇为样本, 用变异系数-改进 TOPSIS 法、中介与调节效应模型、空间相关性检验, 分析坎儿井生态价值强度对城乡融合发展的影响, 以及生态系统服务、水资源优化配置的作用。结果表明, 坎儿井生态价值强度对干旱区绿洲城乡融合发展有显著正向影响, 对生态与产业融合作用更明显, 生态系统服务供给水平起到 34.7% 的部分中介作用, 水资源优化配置水平对二者关系起正向调节作用, 城乡融合存在显著的空间溢出效应, 坎儿井生态价值影响具有空间联动性。研究确定了坎儿井生态价值的作用途径, 给干旱区生态保护和城乡协同发展赋予理论支撑和实际参照。

关键词: 吐鲁番坎儿井; 干旱区绿洲; 城乡融合; 生态价值; 水资源配置

Study on the Ecological Value of Turpan Karez in Promoting the Integrated Development of Urban and Rural Areas in Arid Zone Oases

Nepisay Aishan, Wu Wenjie

Xinjiang Agricultural University, China Xinjiang Urumqi 830052

Abstract: This paper explores the ecological value and action mechanism of Turpan Karez in the urban-rural integration of arid zone oases. Taking 20 towns and townships in 3 districts and counties of Turpan City as research samples, the coefficient of variation-improved TOPSIS method, mediating and moderating effect models, and spatial correlation test were adopted to analyze the impact of the intensity of Karez's ecological value on the integrated development of urban and rural areas, as well as the roles of ecosystem services and optimal water resource allocation. The results show that the intensity of Karez's ecological value has a significant positive impact on the integrated development of urban and rural areas in arid zone oases, with a more obvious effect on the integration of ecology and industry. The supply level of ecosystem services plays a partial mediating role with a mediating effect of 34.7%, and the level of optimal water resource allocation exerts a positive moderating effect on the relationship between the two. There is a significant spatial spillover effect in urban-rural integration, and the impact of Karez's ecological value has spatial linkage characteristics. This study clarifies the action paths of Karez's ecological value, and provides theoretical support and practical reference for ecological protection and the coordinated development of urban and rural areas in arid zones.

Keywords: Turpan karez; Arid zone oasis; Urban-rural integration; Ecological value; Water resource allocation

0 引言

吐鲁番盆地是我国西北极度干旱区的典型代表, 年降水量不到 20 毫米, 蒸发量却高达 3000 毫米以上, 水资源短缺成了制约区域城乡融合发展的主要瓶颈。坎儿井是当地流传千年的地下水利工程, 依靠特有的构造设计, 在削减水资源蒸发、保持地下水补给方面起着不可替代的作用, 而且维持着绿洲生态系统完整性。近些年来, 城镇化进程不断加快, 干旱区绿洲城乡空间格局、产业结构发生深刻变化, 城乡用水矛盾和生态保护压力同步加剧, 坎儿井的

生态功能与城乡融合发展之间的关联性也逐渐受到重视。已有研究大多集中在坎儿井的气候调节、地下水保护等单一生态效应上, 或者孤立地研究城乡融合发展路径, 很少从生态价值传导的角度来分析坎儿井对城乡融合的作用机制, 也没有中介和调节效应的实证检验。因此本文以吐鲁番坎儿井为研究对象, 探究其生态价值在干旱区绿洲城乡融合中的作用途径, 明确生态系统服务和水资源优化配置的影响效应, 给干旱区生态保护和城乡协同发展提供理论依据和实践参考。

1 理论分析与研究假设

1.1 坎儿井生态功能对干旱区绿洲城乡融合的直接影响

坎儿井的主要生态功能是水资源供给和生态维护，这两大功能直接为干旱区绿洲城乡融合打下了基础。从水资源供给角度来说，坎儿井依靠地下渠道输送地下水，有效地减少蒸发损耗，给城乡生产生活提供稳定的水源。农村地区依靠坎儿井灌溉发展特色农业，形成与绿洲生态相适应的产业体系，城市依靠坎儿井补充供水，缓解城镇化带来的用水压力，保证城市生态绿地灌溉和居民生活用水。从生态维护上看，坎儿井的输水过程可以保持地下水水位稳定，防止绿洲沙化、土地盐碱化，给城乡提供优质的生态空间。完整的绿洲生态系统可以促进城乡生态要素的流动，使城市生态休闲功能向农村延伸，把农村生态产品供给给城市，缩小城乡生态差距。因此提出假设 H1：坎儿井生态价值强度正向影响干旱区绿洲城乡融合发展水平。

1.2 生态系统服务的中介作用

生态系统服务供给水平是联系坎儿井生态价值和城乡融合的中介载体。坎儿井的生态功能提高区域生态系统服务能力，从而间接促进城乡融合发展。水资源保障服务属于核心中介环节，坎儿井稳定的供水能力可以改善城乡用水格局，推动农村特色农业规模化发展和城市产业绿色转型，促进城乡产业融合。环境调节服务依靠坎儿井维系下的绿洲生态系统来调节区域小气候，改善城乡居住环境，促使人口、资本等要素在城乡间合理流动，促进城乡空间融合。生态系统服务水平的提高能够增强城乡居民的生态

获得感，凝聚起生态保护和城乡协同发展的共识，给融合发展创造良好的社会氛围。如果没有足够的生态系统服务供给，坎儿井的生态价值就无法有效地转化为城乡融合的动力。据此提出假设 H2：生态系统服务供给水平在坎儿井生态价值与干旱区绿洲城乡融合发展间发挥中介作用。

1.3 水资源优化配置的调节作用

水资源优化配置水平对坎儿井生态价值向城乡融合转化的过程具有调节效应。干旱区水资源总量少，配置是否合理直接关系到坎儿井生态功能发挥的效率。在水资源优化配置水平较高的地方，通过科学划分城乡用水配额、提高用水效率，可以使坎儿井供给的水资源精准匹配城乡生产生活和生态需求，增强坎儿井对城乡融合的推动作用。反之，如果水资源配置失衡，城市过度挤占坎儿井水资源，就会造成农村灌溉用水不足、绿洲生态退化，削弱坎儿井的生态价值，阻碍城乡融合进程。另外水资源优化配置可以统筹城乡水利设施建设，使坎儿井和现代水利工程互相补充，放大其生态效应，给城乡融合提供持续支撑。据此提出假设 H3：水资源优化配置水平正向调节坎儿井生态价值对干旱区绿洲城乡融合发展的影响，配置水平越高，影响效应越强。

2 研究设计

2.1 变量选取

被解释变量是干旱区绿洲城乡融合发展水平，从空间、产业、生态三个方面建立评价指标体系。空间融合选择城乡建成区密度比、城乡交通通达度两个指标；产业融合选择城乡产业产值比、城乡从业人员流动率两个指标；

表1 变量选取及测度方法

变量类型	变量名称	具体指标	测度方法
被解释变量	城乡融合发展水平	城乡建成区密度比	农村建成区密度/城市建成区密度
		城乡交通通达度	城乡路网密度比值
		城乡产业产值比	农村第一产业产值/城市二三产业产值总和
		城乡从业人员流动率	农村向城市流动从业人员/农村总从业人员
		城乡绿化覆盖率差	城市绿化覆盖率-农村绿化覆盖率
		城乡饮用水达标率	城乡饮用水达标户数占比均值
解释变量	坎儿井生态价值强度	坎儿井年径流量	实地监测与水文站数据汇总（万立方米）
		坎儿井灌溉面积	实际灌溉耕地面积（平方公里）
		坎儿井覆盖区植被覆盖率	遥感影像解译结果（%）
中介变量	生态系统服务供给水平	人均水资源占有量	区域水资源总量/总人口（立方米/人）
		地下水补给量	水文监测数据（万立方米）
		区域小气候调节幅度	坎儿井覆盖区与无坎儿井区气温差（℃）
调节变量	水资源优化配置水平	城乡用水配额达标率	达标区域数/总区域数（%）
		农业灌溉水有效利用系数	实际灌溉用水量/总供水量
		工业用水重复利用率	重复利用工业用水量/工业总用水量（%）

生态融合选择城乡绿化覆盖率差、城乡饮用水达标率两个指标，从多方面反映城乡融合的特征。解释变量为坎儿井生态价值强度，选取坎儿井年径流量、坎儿井灌溉面积、坎儿井覆盖区植被覆盖率三个指标来表征水资源供给和生态维护价值。中介变量是生态系统服务供给水平，包括水资源保障和环境调节两个方面，选取人均水资源占有量、地下水补给量、区域小气候调节幅度这三个指标。调节变量为水资源优化配置水平，从分配合理性、利用效率两个方面出发，选取城乡用水配额达标率、农业灌溉水有效利用系数、工业用水重复利用率这三个指标（见表 1）。

2.2 研究方法

用变异系数法确定指标权重，避免主观赋权带来的偏差，再用改进 TOPSIS 法求出各个评价单元的相对贴近度，作为变量的量化结果。用空间相关性检验分析坎儿井生态价值和城乡融合发展空间分布特征，用莫兰指数判断二者是否具有空间集聚效应，为空间效应分析打下基础。用中介效应模型检验生态系统服务供给水平的中介作用，用逐步回归法依次检验核心变量之间的回归关系，判断中介效应是否显著。使用调节效应模型检验水资源优化配置水平的调节作用，用交互项分析调节变量对核心解释变量和被解释变量关系的影响。多种方法结合使用可以保证研究结论的科学性、可靠性，全面解析坎儿井生态价值的作用机理。

2.3 样本选取与数据来源

选择吐鲁番市高昌区、鄯善县、托克逊县作为研究区域，包括吐鲁番盆地主要绿洲区域和坎儿井分布区，选取 20 个乡镇级行政单元作为样本，研究周期为 2018 年—2024 年。数据来源分为实地调研数据、官方统计数据 and 遥感监测数据三种。实地调研数据通过样本区坎儿井实地勘察获得，包括坎儿井年径流量、灌溉面积等核心数据，同

时收集当地农户、企业用水情况问卷数据。官方统计数据来自吐鲁番统计年鉴、新疆统计年鉴和当地水利、生态环境部门年度报告，包含城乡经济、人口、水资源利用等指标。遥感监测数据来源于 Landsat 系列卫星影像，用 ENVI 软件解译得到植被覆盖率、建成区面积等空间指标。所有数据经过整理、校核之后，用 SPSS 26.0 和 ArcGIS 10.8 软件进行分析，保证数据的准确性以及适用性（见表 2）。

3 实证结果与分析

3.1 坎儿井生态价值与城乡融合的空间相关性

空间相关性检验结果表明，研究区域坎儿井生态价值强度与城乡融合发展水平的全局莫兰指数为 0.426，P 值为 0.008，说明二者在空间上存在显著的正相关集聚特征，即坎儿井生态价值强度高的地方，城乡融合发展水平也较高，形成空间集聚格局。从局部莫兰指数分析可知，高昌区中部、鄯善县北部等坎儿井密集区为高－高集聚，坎儿井年径流量大、灌溉面积广，绿洲生态系统稳定，城乡产业协同、空间联通性强，融合发展水平高。托克逊县南部等坎儿井分布较少的地方，呈低－低集聚状态，水资源供给不足造成农村产业发展受限，城乡生态和经济差距大，融合发展水平低。空间分布特征显示，坎儿井生态价值的空间分布同城乡融合发展空间格局高度一致，给后续实证分析赋予了空间维度的支撑。

3.2 变量描述性统计与共线性检验

变量描述性统计结果表明，城乡融合发展水平平均值为 0.553，标准差为 0.102，说明样本区域城乡融合发展水平存在差异，大体上处于中等水平。坎儿井生态价值强度均值为 0.586，标准差为 0.134，说明不同地区坎儿井生态功能发挥程度存在较大差异，与坎儿井分布密度和维护状况有关。生态系统服务供给水平平均值为 0.521，标准差为 0.117，水资源优化配置水平平均值为 0.498，标准差为

表2 研究区域坎儿井及城乡融合发展基础数据

样本区域	坎儿井数量（条）	年均径流量（万立方米）	灌溉面积（平方公里）	城乡融合发展水平均值
高昌区	124	1860	142.3	0.628
鄯善县	87	1025	89.7	0.543
托克逊县	59	680	56.2	0.489
均值	90	1188.3	96.1	0.553

表3 变量描述性统计与共线性检验结果

变量名称	均值	标准差	最小值	最大值	方差膨胀因子
城乡融合发展水平	0.553	0.102	0.412	0.786	—
坎儿井生态价值强度	0.586	0.134	0.321	0.845	1.426
生态系统服务供给水平	0.521	0.117	0.305	0.768	1.389
水资源优化配置水平	0.498	0.123	0.287	0.732	1.512

0.123, 两者波动幅度适中。共线性检验结果表明, 所有变量的方差膨胀因子都小于 2.5, 远远低于临界值 10, 说明各个变量之间不存在严重的多重共线性问题, 建立的回归模型具有较好的稳定性, 可以进行后续的实证检验。变量分布合理, 数据波动符合研究区实际情况, 给实证分析的有效性提供保证(见表 3)。

3.3 坎儿井对干旱区绿洲城乡融合的生态价值影响

3.3.1 基准回归结果

基准回归结果表明, 坎儿井生态价值强度对城乡融合发展水平的回归系数为 0.386, P 值小于 0.01, 在 1% 显著性水平下, 坎儿井生态价值强度正向影响城乡融合发展水平, H1 假设得到验证。该结果表明坎儿井的生态价值越大, 对干旱区绿洲城乡融合的推动作用就越明显。经济发展水平、基础设施完善度的回归系数都显著为正, 说明区域经济实力提高、基础设施改善可以促进城乡融合。从各个维度上看, 坎儿井生态价值对城乡生态融合的影响系数最大, 其次是产业融合, 对空间融合的影响比较小。原因是坎儿井直接关系到绿洲的生态平衡, 快速缩小城乡生态差距, 通过稳定的供水支撑特色农业的发展, 促进城乡产业的协同发展, 但是空间融合受规划、交通等多重因素的影响, 生态价值的传导效应比较滞后。

3.3.2 中介效应检验

中介效应检验结果表明, 坎儿井生态价值强度对生态系统服务供给水平的回归系数为 0.421, P 值小于 0.01, 说明坎儿井生态价值可以提高生态系统服务供给水平。将中介变量加入基准回归模型之后, 生态系统服务供给水平对城乡融合发展水平的回归系数为 0.315, P 值小于 0.01, 坎儿井生态价值强度的回归系数降为 0.253, 仍然显著为正。这表明生态系统服务供给水平在坎儿井生态价值与城乡融合发展间发挥部分中介作用, 假设 H2 得到验证。中介效应占比为 $(0.421 \times 0.315) / 0.386 \approx 34.7\%$, 说明坎儿井生态价值除了直接促进城乡融合之外, 还通过提高生态系统服务供给能力来间接推动城乡融合, 水资源保障服务、环境调节服务是主要的传导路径。

3.3.3 调节效应检验

调节效应检验结果表明, 坎儿井生态价值强度和水资源优化配置水平交互项的回归系数为 0.218, P 值小于 0.05, 说明水资源优化配置水平对二者关系有显著的正向调节作用, H3 假设得到验证。进一步分析可知, 在水资源优化配置水平高的地方, 交互项系数为 0.523, 显著正向影响城乡融合; 在水资源优化配置水平低的地方, 交互项

系数为 0.186, 影响效应明显减弱。科学合理的水资源配置可以放大坎儿井生态价值的积极作用, 统筹城乡用水、提高利用效率, 使坎儿井水资源更好地服务于城乡融合。反之, 配置失衡会制约生态价值转化, 使坎儿井的生态效应不能充分发挥出来, 甚至会引起城乡用水矛盾。

3.3.4 空间效应分析

空间效应分析用空间滞后模型和空间误差模型来检验, 结果表明空间滞后模型的拟合优度更高, 为 0.783, 空间滞后项系数为 0.286, P 值小于 0.05, 说明城乡融合发展存在明显的空间溢出效应。坎儿井生态价值强度的空间回归系数为 0.321, 仍然显著为正, 说明在考虑空间相关性之后, 坎儿井生态价值对城乡融合的正向影响仍然稳健。空间溢出效应的存在说明, 某一个区域坎儿井生态价值的提高, 不仅可以促进本区域城乡融合, 还可以通过生态要素流动、产业协同等方式带动周边区域融合发展。该结果与空间相关性检验的结果一致, 再次证明了坎儿井生态价值与城乡融合在空间上是联动的, 给区域统筹推进坎儿井保护和城乡融合提供空间视角的依据。

3.4 稳健性检验

用替换核心解释变量、改变样本区间两种方法做稳健性检验。替换解释变量, 用坎儿井水资源贡献率代替坎儿井生态价值强度, 回归结果系数为 0.352, P 值小于 0.01, 仍然显著正向影响城乡融合, 和基准回归结论一致。剔除异常值样本后, 用 2019 至 2023 年的数据重新进行回归, 坎儿井生态价值强度的回归系数为 0.371, P 值小于 0.01, 中介效应和调节效应依然显著, 影响系数波动不大。两种方法的检验结果均表明, 本文研究结论具有良好的稳健性, 不存在样本选择偏差或变量度量偏差导致的结论失真问题, 坎儿井生态价值对干旱区绿洲城乡融合的正向影响及作用机制具有可靠性。

4 结论与建议

4.1 结论

本文通过理论分析与实证检验, 探究了吐鲁番坎儿井在干旱区绿洲城乡融合发展中的生态价值及作用机制, 得出以下结论。坎儿井生态价值强度显著正向影响干旱区绿洲城乡融合发展水平, 其水资源供给和生态维护功能给城乡融合提供基础支撑, 对生态融合和产业融合的影响更加明显。生态系统服务供给水平在两者之间起部分中介作用, 坎儿井生态价值通过提高水资源保障和环境调节服务能力, 间接促进城乡融合, 中介效应占 34.7%。水资源优化配置水平有明显的正向调节作用, 可以放大坎儿井生态价值对

城乡融合的推动效应,配置水平越高,影响越大。另外,城乡融合发展存在明显的空间溢出效应,坎儿井生态价值影响具有空间联动性,能带动周边区域融合发展。研究结果确定了坎儿井生态价值的作用途径,给干旱区生态保护和城乡协同发展提供理论依据。

4.2 建议

根据研究结果,提出如下建议,加强坎儿井生态保护与修复,加大坎儿井修缮投入,清理渠道淤积,提高水资源输送能力,建立坎儿井覆盖区生态监测体系,保证植被覆盖率和地下水水位稳定,强化其生态功能。提升生态系统服务供给能力,以坎儿井为核心创建综合水利生态体系,完善水资源保障设施,改善区域小气候,推动生态产品城乡流通,畅通生态价值传导路径。优化水资源配置机制,统筹城乡用水需求,制定科学的用水配额制度,提高农业和工业用水效率,加强城乡水利设施互联互通,放大坎儿井生态价值效应。强化区域统筹协同,从空间溢出效应出发,打破行政区域壁垒,统筹推进吐鲁番盆地坎儿井保护和城乡融合规划,使生态要素、产业资源在区域内合理流动,实现干旱区绿洲城乡高质量融合发展。

参考文献:

- [1] 马梅,赵鹏博,徐伟伟等.吐鲁番坎儿井对区域小气候的调节效应研究[J].人民黄河,2025,47(S1):65-66+68.
- [2] 比拉力·加拉力.极度干旱地区的用水智慧[D].西北民族大学,2025.
- [3] 郝馨.吐鲁番市农户坎儿井农业文化遗产保护行为

及影响因素研究[D].新疆农业大学,2025.

- [4] 徐伟伟.吐鲁番市坎儿井可持续发展的实践与思考[J].海河水利,2025,(04):124-128.

- [5] 王涛,徐明.新疆吐鲁番坎儿井分布区地下水环境现状研究[J].地下水,2025,47(02):18-20+108.

- [6] 李道忠.吐鲁番坎儿井:古老灌溉系统的传承与新生[N].农民日报,2025-01-07(006).

- [7] 余孝营,徐伟伟,周金龙等.近30年吐鲁番盆地坎儿井年径流量变化特征[J].地质科技通报,2025,44(06):259-269.

- [8] 杨志旺.吐鲁番水文化景观活态保护研究[D].中南林业科技大学,2023.

- [9] 王羽坚,王思明.伊朗喀山与我国新疆吐鲁番坎儿井对比研究[J].农业考古,2021,(01):134-140.

- [10] 苏春雨,李琛,王力恒等.吐鲁番绿洲乡村振兴与坎儿井保护协同策略研究[J].小城镇建设,2020,38(01):22-28.

- [11] 杜泽慧.基于区域多中心治理模式的生态恢复——以吐鲁番地区坎儿井水利系统的再生利用为例[J].景观设计学,2019,7(03):146-155.

基金项目:2026年新疆维吾尔自治区高校科研建设类项目“南疆水土资源生态系统约束下典型乡村转型发展实践研究”;新疆农业大学大学生创新创业训练计划项目“吐鲁番坎儿井在促进干旱区绿洲创新融合发展中的生态价值研究”(项目编号:dxscx2025141)资助。