Journal of Water Resources Research 水资源研究, 2026, 15(4), 348-356
Published Online August 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/jwrr
https://doi.org/10.12677/jwrr.2026.154038

塔里木河流域农业水土资源匹配研究

高晓宇[1]，方功焕[2*]，朱怀松[3]，唐玉倩[4]

[1]新疆维吾尔自治区人民政府研究室，新疆 乌鲁木齐
[2]中国科学院新疆生态与地理研究所，干旱区生态安全与可持续发展全国重点实验室，新疆 乌鲁木齐
[3]新疆华科同方环境工程咨询有限公司，新疆 乌鲁木齐
[4]陕西师范大学地理科学与旅游学院，陕西 西安

收稿日期：2026年6月25日；录用日期：2026年8月6日；发布日期：2026年8月27日

摘 要

水土资源是支撑经济社会发展的基础性生产要素，其空间匹配程度直接影响绿洲农业的可持续发展。塔里木河流域水资源短缺且时空分布不均，水资源形成区与农业用地区空间分离。本文基于2000~2023年长时序观测数据，采用垦殖率和水土资源匹配系数，系统分析塔里木河流域农业水土资源匹配关系的空间格局和阶段性差异。结果表明：1) 流域垦殖率呈显著的“北高南低”空间格局。2023年，渭干河、阿克苏河和塔里木河干流的垦殖率相对较高，叶尔羌河次之，开都－孔雀河、和田河和车尔臣河相对较低。2000~2023年，各子流域垦殖率总体上升，部分流域在2020年后趋于稳定或略有下降。2) 不同子流域农业水土资源匹配程度差异明显。塔里木河干流和和田河流域匹配系数相对较高，阿克苏河、叶尔羌河和车尔臣河流域处于中等水平，开都－孔雀河和渭干河流域相对较低；2010~2023年各流域匹配系数最大相差约4.9倍，表明单位耕地对应的农业水资源量存在明显的区域差异。研究结果可为塔里木河流域耕地发展、农业用水配置及分区管理提供科学依据。

关键词

农业水土资源，垦殖率，匹配系数，塔里木河流域

Study on the Matching Degree of Agricultural Water-Land Resources in the Tarim River Basin

Xiaoyu Gao[1], Gonghuan Fang[2*], Huaisong Zhu[3], Yuqian Tang[4]

[1]Research Office of the Xinjiang Uygur Autonomous Region Government, Urumqi Xinjiang
[2]State Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi Xinjiang
[3]Xinjiang Huake Tongfang Environmental Engineering Consulting Co., Ltd., Urumqi Xinjiang
[4]School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi’an Shaanxi

作者简介：高晓宇(1977-)，男，博士，主要从事干旱区水资源与生态保护研究，Email: xiaoyugaoucas@126.com
[*]通讯作者 Email: fanggh@ms.xjb.ac.cn

文章引用：高晓宇, 方功焕, 朱怀松, 唐玉倩. 塔里木河流域农业水土资源匹配研究[J]. 水资源研究, 2026, 15(4): 348-356.
DOI: 10.12677/jwrr.2026.154038

Received: June 25, 2026; accepted: August 6, 2026; published: August 27, 2026

Abstract

Water and land resources are fundamental production factors supporting socio-economic development, and their spatial matching degree directly affects the sustainability of oasis agriculture. The Tarim River Basin is characterized by water scarcity, uneven spatio-temporal distribution of water resources, and spatial separation between water-source areas and agricultural land. Based on long-term observational data from 2000 to 2023, this study employed the cultivated-land ratio and water-land resource matching coefficient to systematically analyze the spatio-temporal variation and changes in agricultural water-land resource matching across the basin. The results showed as follows: 1) The cultivated-land ratio exhibited a pronounced north-south spatial gradient, with higher values in the Weigan River Basin, Aksu River Basin, and the mainstream area of the Tarim River. The Yarkant River Basin had an intermediate value, whereas the Kaidu-Kongque, Hotan, and Qarqan River basins had relatively low values. From 2000 to 2023, the cultivated-land ratio generally increased across the sub-basins, although it stabilized or declined slightly in some sub-basins after 2020. 2) Agricultural water-land resource matching differed markedly among the sub-basins. Matching coefficients were relatively high in the mainstream area of the Tarim River and the Hotan River Basin, moderate in the Aksu, Yarkant, and Qarqan River basins, and relatively low in the Kaidu-Kongque and Weigan River basins. During 2010 to 2023, the maximum matching coefficient was approximately 4.9 times the minimum, indicating pronounced regional differences in water availability per unit area of cultivated land. These findings provide a scientific basis for cultivated-land planning, agricultural water allocation, and differentiated management in the Tarim River Basin.

Keywords

Agricultural Water and Land Resources, Cultivated-Land Ratio, Matching Coefficient, Tarim River Basin

Copyright © 2026 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

塔里木河流域是西北干旱区典型的以农牧业发展为主要模式的内陆河流域，不仅是南疆地区的核心生态屏障，更是“一带一路”倡议中丝绸之路经济带的重要区域[1]。其特殊的地理位置和生态环境不仅为流域带来丰富的土地、光热、油气和矿产等自然资源，也是主要的棉花产区和能源战略接替区[2]。近年来，随着生态文明建设的深入推进，以农牧业为主的发展模式对水土自然资源和生态环境依赖程度较高[3]，塔里木河流域的水土资源可持续利用已成为协调区域经济发展与生态保护的核心议题。农业水土资源的高效匹配不仅是保障区域粮食安全的基础条件，更是维持绿洲生态系统稳定的关键因素[4]。然而，受气候变化与人类活动的双重影响，水资源开发利用过程中始终存在着水资源短缺、水土空间分布不均等严峻挑战。探究塔里木河流域水土资源的匹配现状，科学优化流域水土资源配置，既是推进南疆以农业为主的乡村振兴战略的重要途径，也是保障区域农业生产和国家棉花等重要农产品供给安全的必然要求。

现有研究主要围绕评价方法拓展、空间尺度细化和多源数据与模型融合三个方面展开。方法论体系方面，吴宇哲等[5]引入基尼系数方法，系统量化全国水土资源匹配格局，奠定了水土资源匹配研究的范式基础。该方

法被广泛应用于多区域尺度的匹配性评价研究中，如王飞等[6]解析了云南高原不同地理区域水土资源的空间协调性，范振功[7]评估了山东省农业系统中水土资源的匹配特征并提出优化建议。在此基础上，曲绅豪[8]和郭辉[9]等学者引入匹配系数模型、耦合模型及多情景预测方法，进一步增强了对水土资源匹配过程的时序动态模拟与前瞻性预判能力。在研究尺度层面，研究从国家层面逐步向更高分辨率推进。从省域尺度(如张雯等[10]对山东省的研究)拓展至地市尺度(王妍等[11]、曹连海等[12])乃至灌区与垦区尺度(如姚怀柱等[13]对江苏灌区的研究、郑久瑜等[14]关于河套灌区的匹配分析)，尺度的精细化推动了对区域水土资源矛盾的精准识别与调控。部分研究也开始引入自然管理单元如流域、水资源区等作为基础空间单元，提高了水土匹配研究对地理生态过程的响应能力[15]。在要素融合方面，侯慧敏等[16]结合 FLUS 和 InVEST 模型，模拟不同发展情景下土地利用变化及其对农业水土资源匹配关系的影响，焦士兴等[17]则从水足迹视角出发，研究黄河流域农作物种植结构对水土匹配格局的调节机制。国际上更多是从土地利用和农业水土资源优化配置等角度开展相关研究。例如，英国 Jackson 等[18]构建了 Polyscape 空间决策框架，综合评估土地利用调整对水资源调节、土壤保持等多种生态系统服务的影响，为流域尺度土地利用优化提供了空间显式的决策支持；美国 Scanlon 等[19]以高平原和中央谷地为对象，系统分析了灌溉农业发展引起的地下水消耗及其可持续性，强调应通过地下水–地表水联合管理和人工回补等措施提高干旱区水资源利用的韧性；伊朗 Amini Fasakhodi 等[20]采用多目标分式目标规划方法，综合考虑农业收益、就业和用水效率等目标，对水资源约束下的作物种植结构进行优化，为干旱区农业水土资源协调配置和水资源可持续利用提供了方法借鉴。

现有研究虽然在评价方法、空间尺度和数据来源等方面不断拓展，但其基本评价单元仍多采用省、市、县等行政区划。行政边界便于获取社会经济和农业统计数据，却往往与河流集水范围及水资源形成、输移和配置边界不一致，难以反映上下游之间以及不同源流之间的水文联系。在塔里木河流域，农业用水主要来源于山区径流，并沿各源流向绿洲和干流输送，水资源形成区、输送通道和耕地集中区具有明显的空间分离特征。若以行政区划作为评价单元，可能将同一水系划分至不同地区，或将分属不同水系的耕地和水资源合并统计，从而掩盖不同源流之间真实的水土资源配置差异。尽管已有研究分别关注塔里木河流域整体、典型源流或主要灌区的水土资源利用问题[21]，但在统一指标体系下，以“六源一干”自然水系单元系统比较水土资源匹配差异及其长期演变的研究仍相对不足。

本研究以塔里木河流域“六源一干”为基本评价单元，依据源流集水区边界和塔里木河干流供水范围分别核算开都–孔雀河、阿克苏河、叶尔羌河、和田河、车尔臣河、渭干河及塔里木河干流的垦殖率及水土资源匹配系数，揭示其时空变化规律，识别水土资源配置的重点调控区域，并提出农业布局优化和水资源调配建议。本研究将为流域水资源科学调度、农业种植结构优化及生态保护提供理论支撑，对推动干旱区内陆河流域农业可持续发展具有重要的实践意义。

2. 数据与方法

2.1. 研究区概况

塔里木河流域位于新疆南部，北依天山，南接昆仑山和阿尔金山，西部为帕米尔高原，整体呈周缘高山环绕、盆地内部低平的地形格局[22]。流域属典型温带大陆性干旱气候，盆地平原降水稀少、蒸发强烈，潜在蒸发量远高于年降水量，部分区域可达到降水量的 30 倍以上[23]。依据水系边界及农业用水联系，本研究重点分析“六源一干”7 个评价单元，包括开都–孔雀河流域、阿克苏河流域、叶尔羌河流域、和田河流域、车尔臣河流域、渭干河流域和塔里木河干流区。流域河流主要发源于周缘山区，径流由降水、积雪融水、冰川融水和地下水等共同补给，不同水源的贡献具有明显的区域差异和季节变化。塔里木河干流由阿克苏河、叶尔羌河与和田河汇流形成，是中国最长的内陆河[24] (图 1)。

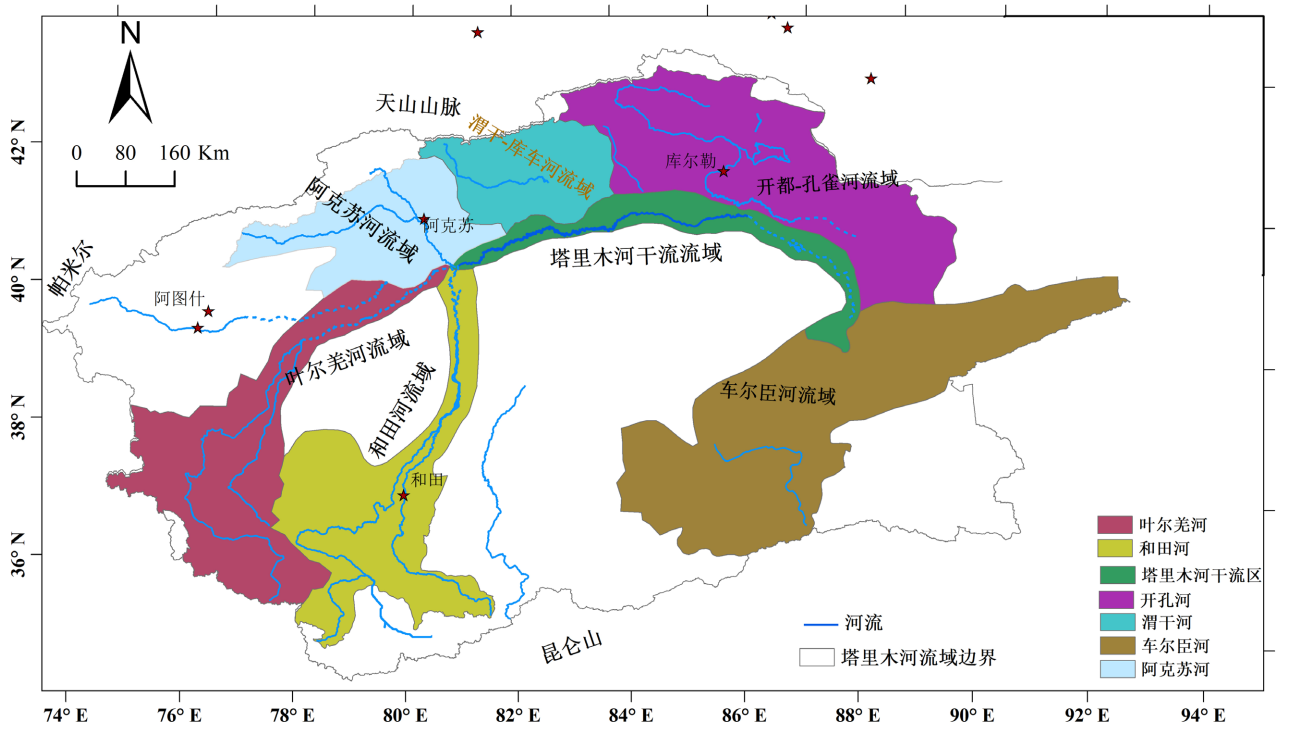


图 1. 研究区域示意图

2.2. 数据来源与处理

2000~2023 年阶段径流量数据来源于塔里木河流域水资源管理机构、水资源公报以及实地观测数据；流域耕地面积数据来源于资源环境科学数据平台(https://www.resdc.cn/Default.aspx)。

2.2.1. 土地垦殖率

土地垦殖率是表征区域耕地开发强度的核心指标，其定义为耕地总面积占土地总面积的百分比[25]。该指标通过量化自然生态系统向农业系统的转化程度，反映人类活动对土地覆被格局的干预强度[26]。在干旱区农业系统中，高垦殖率往往与水资源压力正相关，尤其在塔里木河流域等生态脆弱区，垦殖率的空间差异能够反映不同流域耕地开发强度。本研究采用该指标解析耕地资源本底状况，表达式为：

$$A_i = \frac{L_i}{C_i} \times 100 \tag{1}$$

式中：A_i 为 i 流域的土地垦殖率，%；L_i 为 i 流域耕地面积，10^4 hm^2；C_i 为 i 流域土地总面积，10^4 hm^2。

2.2.2. 农业水土资源匹配系数

农业水土匹配系数是反映特定区域农业生产可供的水资源和耕地资源时空适宜匹配的量比关系，采用单位面积耕地可拥有的水资源量来表示[27]。该系数可揭示一定区域尺度水资源和土地资源时空分配的均衡状况与满足程度[28]。系数越大，表示单位耕地面积对应的农业水量越多；系数越小，表示单位耕地面积对应的农业水量越少，反映了水土资源数量配置关系[29]。以流域为基本单元，农业水土资源匹配系数表达式为：

$$R_i = \frac{W_i \alpha}{L_i} \tag{2}$$

式中：R_i 为 i 流域的水土资源匹配系数，用于表征单位耕地面积对应的农业水资源量；W_i 为 i 流域水资源量，10^8 m^3；L_i 为 i 流域耕地面积，10^4 hm^2；α 为各流域农业用水比重。

3. 结果与分析

3.1. 塔里木河流域垦殖率变化

2000~2023 年塔里木河流域垦殖率空间分异显著(图 2 和图 3)。渭干河流域垦殖率最高，达到 14.26%；其次为阿克苏河流域和塔里木河干流，分别为 13.86%和 11.52%；叶尔羌河、开都－孔雀河、和田河和车尔臣河流域分别为 9.58%、5.36%、3.88%和 0.60%。和田河流域与车尔臣河流域的垦殖率为全流域最低值，表明该区域土地资源开发利用程度相对较低。2000~2023 年，各流域垦殖率总体均呈上升趋势，部分流域在 2020 年后趋于稳定或略有下降，但总体扩张格局未发生明显改变。垦殖率变化速率呈现区域复杂性，车尔臣河流域的增长速率(76.4%)相对高于和田河流域(31.5%)。

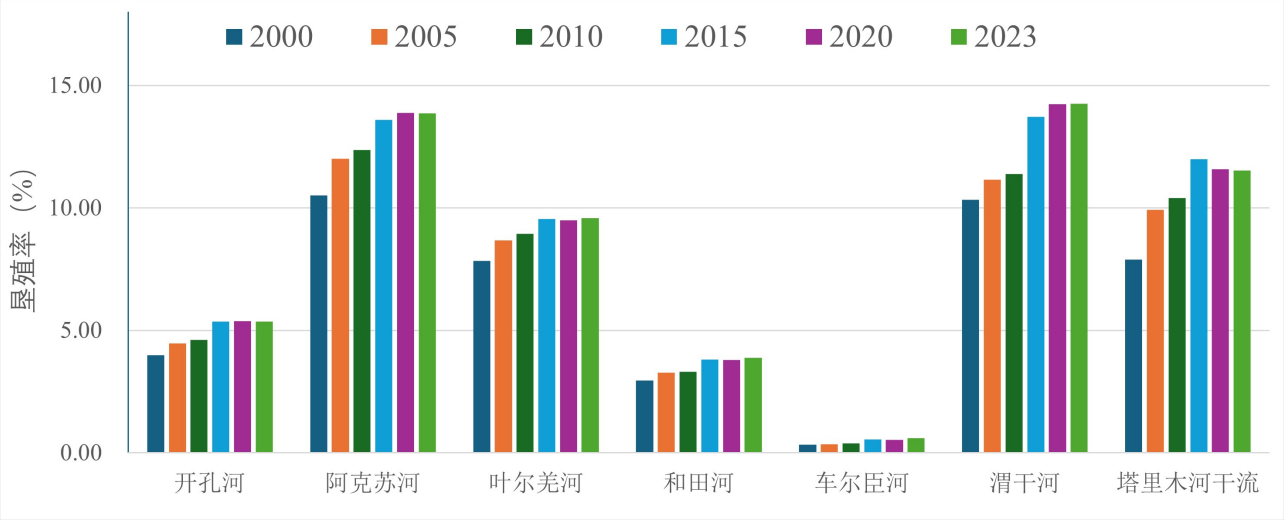


图 2. 塔里木河流域垦殖率

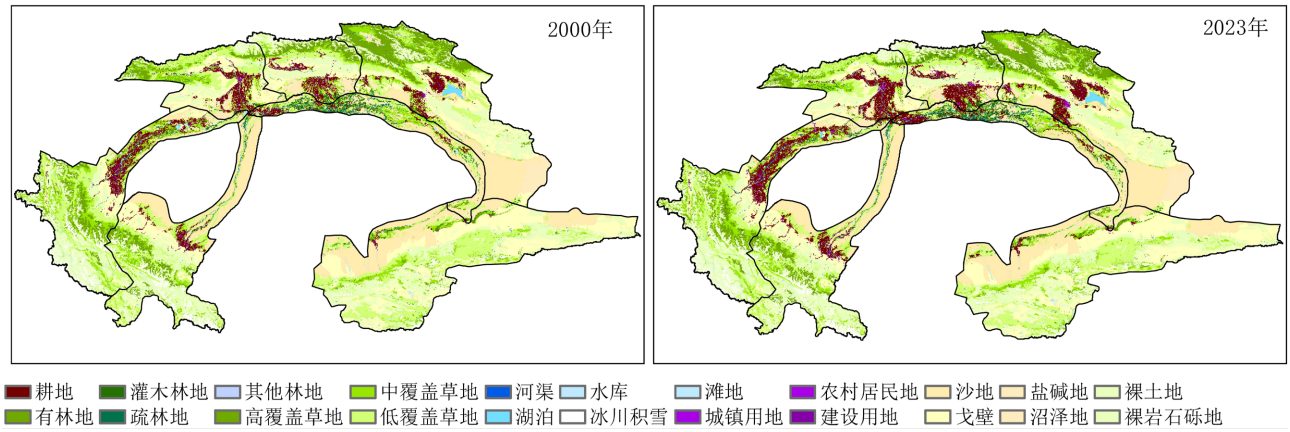


图 3. 塔里木河流域耕地的空间分布

3.2. 塔里木河流域农业水土资源匹配系数分析

塔里木河流域农业水土资源匹配具有明显的空间差异(表 1、图 4)。2000~2023 年，塔里木河干流水土匹配

系数最高(2.09)，其次为和田河流域(1.73)；叶尔羌河、阿克苏河和车尔臣河流域分别为 1.09、1.06 和 1.02，处于中等水平；开都－孔雀河和渭干河流域相对较低，分别为 0.81 和 0.49。总体呈现干流中下游及西南部较高、北部和东北部较低的空间格局。不同流域匹配系数最大相差约 4.3 倍，表明单位耕地可利用水资源量存在显著差异。

2010~2023 年，各流域水土匹配格局总体保持稳定，但局部有所变化。塔里木河干流、和田河、车尔臣河和叶尔羌河流域的匹配系数较 2000~2023 年平均水平有所提高，其中塔里木河干流由 2.09 升至 2.33；阿克苏河、开都－孔雀河和渭干河流域则略有降低。需要强调的是，较高的匹配系数仅表示单位耕地对应的水资源量相对较多，并不意味着具有进一步扩大耕地的空间，仍需综合考虑生态需水、水资源可利用量及生态环境承载能力。

表 1. 塔里木河流域水土资源匹配系数

流域单元	水土匹配系数($R_{i,2000\sim2023}$)	水土匹配系数($R_{i,2010\sim2023}$)
阿克苏河	1.06	1.03
叶尔羌河	1.09	1.11
和田河	1.73	1.88
车尔臣河	1.02	1.19
开都－孔雀河	0.81	0.78
渭干河	0.49	0.48
塔里木河干流	2.09	2.33

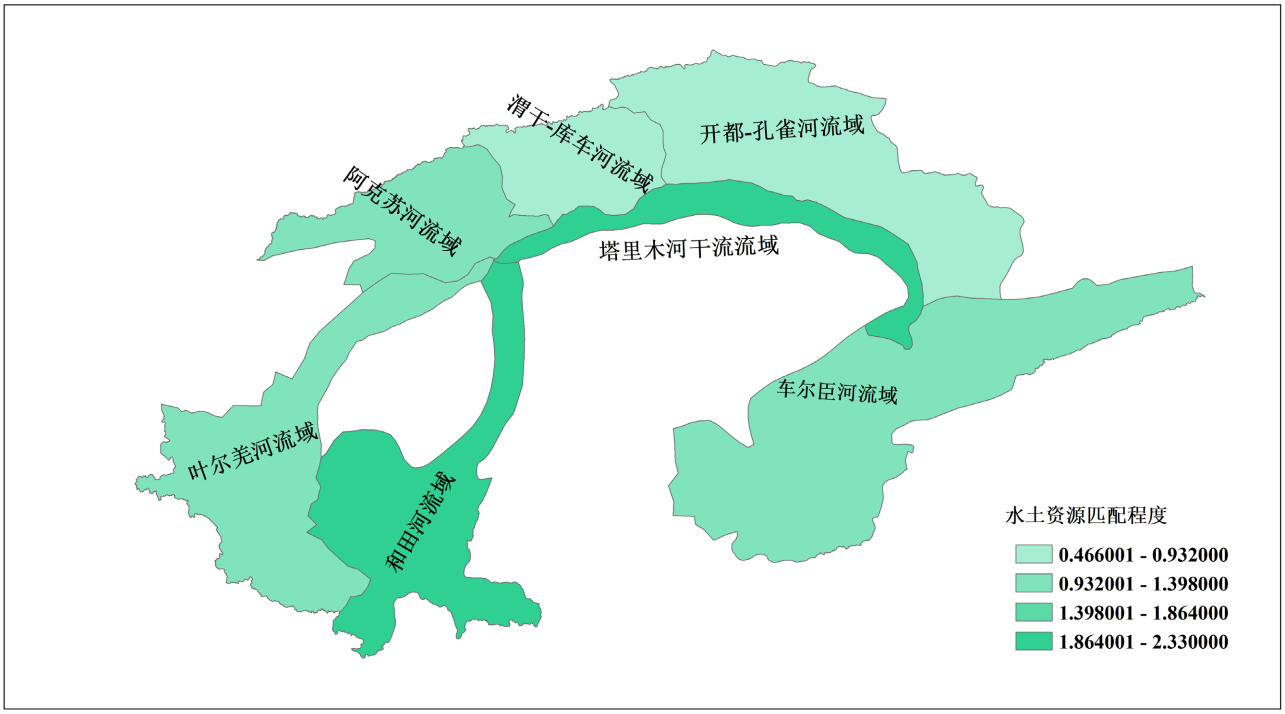


图 4. 塔里木河流域水土资源匹配空间分布

4. 讨论

已有研究多从行政区划或流域整体尺度分析塔里木河流域水土资源配置，认为区域水土资源空间分布不均，农业发展面临结构性缺水问题[21]。本研究得到的总体认识与其一致，但以“六源一干”自然水系为评价单元后，

进一步识别出不同源流之间明显的匹配差异。与行政单元相比，自然水系单元能够更好地衔接山区产流、河流输水与绿洲农业用水过程，避免因行政边界分割同一水系或合并不同水系而掩盖局地水土资源矛盾。类似的空间错配现象在北方及阿姆河等干旱区流域也有报道[25] [26]，表明水资源形成区与耕地集中区空间分离是干旱区农业发展的普遍约束。本文进一步发现，水土资源匹配系数不仅受水资源量影响，也与耕地开发规模密切相关。因而，匹配系数较高仅表示单位耕地对应的农业水资源量较多，并不意味着仍具有较大的耕地开发潜力；匹配系数较低也不完全等同于农业发展不可持续，还需结合灌溉效率、作物结构和水资源利用方式综合判断。

本文仍存在一定局限。首先，水土资源匹配系数侧重反映水资源量与耕地面积的数量关系，尚未考虑不同作物需水量、灌溉定额及农业用水效率的差异。其次，本文主要采用地表水资源量进行评价，未充分纳入地下水利用、跨流域调水、灌溉回归水及生态需水等因素。第三，采用多年平均值能够反映总体格局，但难以刻画水资源年内分配及极端干旱年份的供需矛盾。未来可进一步结合种植结构、作物蒸散发、地表水－地下水联合利用和生态需水，构建更加综合的农业水土资源配置评价体系。

5. 结论与建议

5.1. 结论

基于 2000~2023 年塔里木河流域长期观测数据，本研究综合运用 GIS 空间分析技术与土地垦殖率、水土资源匹配系数等方法，系统揭示了塔里木河流域(开都－孔雀河流域、阿克苏河流域、叶尔羌河流域、和田河流域、车尔臣河流域、渭干河流域及塔里木河干流)耕地利用的时空变化特征及其水土资源匹配现状的变化。得到以下结论：

1) 塔里木河流域垦殖率呈现明显空间分异：渭干河流域、塔里木河干流、阿克苏河流域为高值区，而西部(叶尔羌河流域)及昆仑山北坡流域(和田河流域与车尔臣河流域)较低。2000~2023 年，各流域垦殖率总体均呈上升趋势，部分流域在 2020 年后趋于稳定或略有下降。

2) 塔里木河流域子流域间水土资源匹配系数差异接近 5 倍。空间上，塔里木河干流和和田河流域的匹配系数相对较高，开都－孔雀河和渭干河流域的匹配系数相对较低，阿克苏河、叶尔羌河和车尔臣河流域处于中间水平。与 2000~2023 年平均水平相比，2010~2023 年塔里木河干流、和田河、车尔臣河和叶尔羌河流域的匹配系数有所提高，阿克苏河、开都－孔雀河和渭干河流域略有降低，但流域总体空间格局未发生明显改变。

5.2. 建议

科学合理的水土资源匹配管理对策是实现塔里木河流域社会经济高质量发展的重要保证。本文依据塔里木河流域农业水土资源匹配程度的分区结果，提出对应的建议及对策。

针对塔里木河流域水土匹配的空间分异特征，治理需以提升“水－土－生态”系统协调性为核心[30]。在高匹配流域应维持现状优势，通过滴灌智能化与种植结构优化(压减高耗水作物)在保障天然径流生态需水阈值前提下提升单位水资源产能，严禁破坏水土量比平衡的垦殖扩张；在低匹配流域须通过耕地红线刚性约束与暗管排盐－水肥一体化技术破解水土“量比失衡”矛盾，促使资源赤字区向水土协调转型；塔里木河干流区可以构建动态配水模型，利用过境水优势通过地下水库调蓄平抑水土匹配波动，增强气候变化下匹配稳定性，并强化冰川融水对匹配格局的预测预警。

1) 低匹配系数流域以控制农业用水需求为重点。开都－孔雀河流域和渭干河流域单位耕地对应的农业水资源量较少，应严格控制新增耕地和高耗水作物种植规模，合理调整棉花、小麦和玉米等作物的种植比例，适当发展低耗水、耐旱型作物。优先推进大中型灌区续建配套与现代化改造，完善高标准农田和高效节水灌溉体系，推广水肥一体化及“干播湿出”等节水技术，在减少冬、春灌用水的同时保障作物出苗和正常生长，缓解农业用水压力。

2) 中等匹配系数流域以稳定耕地规模和提高用水效益为重点。阿克苏河、叶尔羌河和车尔臣河流域应稳定现有耕地规模，根据各流域来水条件优化棉花、粮食和特色林果业布局。在保障粮食生产能力的基础上，因地制宜发展棉花等“白色产业”、红枣、辣椒和番茄等“红色产业”以及葡萄、香梨和苹果等“绿色产业”。同时，稳步推进土地流转，强化规模化设施农业建设，为水土资源的集约化经营管理奠定基础；加大农产品的生产加工基地建设和产业开发力度，壮大农产品加工龙头企业，延伸农业产业链。

3) 高匹配系数流域以统筹生态保护与增量水资源利用为重点。和田河流域及塔里木河干流的水土资源匹配系数相对较高。在气候变暖背景下，昆仑山北坡部分河流径流总体增加，为塔克拉玛干沙漠边缘阻击战由“锁边”向“固边、扩边、富边”推进提供了新的水资源条件。应在保障河道、天然绿洲及下游生态系统基本需水的前提下，科学利用增量水资源。针对极端水文事件增多和径流波动加剧，应进一步完善防洪、蓄水及输配水工程体系，加强洪水监测预警和风险防控，因地制宜推进洪水资源化利用，将汛期洪水用于生态补水、地下水回补和应急水源储备。同时，加强流域动态配水和上下游联合调度，根据丰水、平水和枯水等不同来水情景，合理配置农业与生态用水，提高水资源调蓄能力和综合利用效益。

基金项目

国家自然科学基金项目(W2412135)和中国科学院青年创新促进会项目资助。

参考文献

[1] 陈亚宁, 郝兴明, 陈亚鹏, 等. 新疆塔里木河流域水系连通与生态保护对策研究[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(10): 1156-1164.

[2] 朱亚雪, 王光耀. SES 框架下农业灌溉用水效率及其影响因素研究——基于塔里木河流域棉农调研数据[J]. 中国农业资源与区划, 2026, 47(2): 96-108.

[3] 曹莉媛, 王晓菁. 塔里木河流域生态补偿机制研究[J]. 投资与合作, 2025(3): 85-87.

[4] CHEN, Y., FANG, G., LI, Z., et al. The crisis in oases: Research on ecological security and sustainable development in arid regions. Annual Review of Environment and Resources, 2024, 49: 1-20. https://doi.org/10.1146/annurev-environ-111522-105932

[5] 吴宇哲, 鲍海君. 区域基尼系数及其在区域水土资源匹配分析中的应用[J]. 水土保持学报, 2003(5): 123-125.

[6] 王飞, 吴雷, 毛宗波, 等. 云南高原不同地理区域水土资源匹配性研究[J]. 中国农村水利水电, 2025(7): 65-71+79.

[7] 范振功. 基于 GIS 的农业水土资源匹配特征分析[J]. 北京测绘, 2022, 36(12): 1715-1721.

[8] 曲绅豪, 姚怀柱, 王彦东, 等. 江苏典型灌区农业水土资源匹配现状及其承载力特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 452-457+467.

[9] 郭辉, 夏帆, 张晓立, 等. 河南省沿黄城市水土资源时空匹配特征及预测分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2025, 46(6): 34-43.

[10] 张雯, 刘倩倩, 王慧, 等. 基于水足迹的山东省农业水土资源匹配特征及短缺压力分析[J]. 生态学报, 2023, 43(12): 4943-4953.

[11] 王妍, 雷晓辉, 张玉, 等. 北京市水土资源匹配时空模式研究[J]. 中国农学通报, 2021, 37(35): 73-77.

[12] 曹连海, 刘晓博, 张志强, 等. 基于 CRITIC-TOPSIS 的许昌市农业水土资源评价[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2023, 44(1): 56-61.

[13] 姚怀柱, 曲绅豪, 彭亚敏, 等. 典型大型灌区水土资源生产力现状及匹配格局研究[J]. 江苏水利, 2023(4): 33-37.

[14] 郑久瑜, 赵西宁, 操信春, 等. 河套灌区农业水土资源时空匹配格局研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(3): 132-136.

[15] 杨静, 周冬梅, 马静, 等. 疏勒河流域农业水土资源时空匹配特征分析[J]. 干旱区地理, 2023, 46(6): 982-992.

[16] 侯慧敏, 王辉, 王鹏全, 等. 基于 FLUS-InVEST 模型的石羊河流域水土资源空间匹配评价[J]. 长江科学院院报, 2025, 42(7): 42-51.

[17] 焦士兴, 李玉靖, 王安周, 等. 水足迹视角下黄河流域经济作物水土资源匹配格局[J]. 人民黄河, 2023, 45(9): 104-110.

[18] JACKSON, B., PAGELLA, T., SINCLAIR, F., et al. Polyscape: A GIS mapping framework providing efficient and spatially

explicit landscape-scale valuation of multiple ecosystem services. Landscape and Urban Planning, 2013, 112: 74-88. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.12.014

[19] SCANLON, B. R., FAUNT, C. C., LONGUEVERGNE, L., et al. Groundwater depletion and sustainability of irrigation in the US High Plains and Central Valley. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109(24): 9320-9325. https://doi.org/10.1073/pnas.1200311109

[20] AMINI FASAKHODI, A., NOURI, S. H. and AMINI, M. Water resources sustainability and optimal cropping pattern in farming systems: A multi-objective fractional goal programming approach. Water Resources Management, 2010, 24(15): 4639-4657. https://doi.org/10.1007/s11269-010-9683-z

[21] 王悦, 蒋志辉, 褚家琦, 等. 塔里木河流域农业水土资源时空匹配关系研究[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(2): 360-370.

[22] 刘文君, 胡可可, 苏里坦, 等. 塔里木河流域农业耗水特征及其影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2025, 48(11): 1951-1960.

[23] 黄婉婷, 穆振侠, 杨荣钦, 等. 基于 CMIP6 气候变化下塔里木河流域天然植被生态需水预估[J]. 干旱区研究, 2025, 42(10): 1860-1875.

[24] 魏宸博, 刘龙浩, 王紫怡, 等. 塔河流域生态重要性评价与修复区优先序识别[J]. 测绘科学, 2025, 50(1): 125-133.

[25] 侯淑涛, 袁伟豪, 陈建龙, 等. 黑龙江省农业水土资源匹配格局与区域调控[J]. 水土保持通报, 2022, 42(1): 150-157+165.

[26] 李文静, 许文强, 包安明, 等. 阿姆河流域耕地变化及水土匹配特征分析[J]. 水资源保护, 2021, 37(3): 80-86+107.

[27] 金苗, 刘哲. 基于基尼系数的陕西省水土资源匹配状况分析[J]. 水利规划与设计, 2025(4): 23-25+33.

[28] 张巧丽, 王欢, 蒋德志. 基于基尼系数的江苏省水资源空间均衡评价[J]. 水资源开发与管理, 2025, 11(4): 7-14+31.

[29] 陈粤桂, 齐广平. 基于均衡系数的甘肃省水资源空间均衡研究[J]. 水利规划与设计, 2024(11): 53-58.

[30] 尹立河, 张俊, 姜军, 等. 南疆地区水资源问题与对策建议[J]. 中国地质, 2023, 50(1): 1-12.