

张金良, 万德辉, 明广辉, 等. 塔里木河流域灌溉效率悖论成因实例研究[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(5): 833-842.
ZHANG J L, WAN D H, MING G H, et al. A case study on the causes of the paradox of irrigation efficiency in the Tarim River basin[J].
South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(5): 833-842. (in Chinese)

塔里木河流域灌溉效率悖论成因实例研究

张金良^{1,2}, 万德辉³, 明广辉^{1,2}, 谭培影^{1,2}, 海洋⁴, 刘登峰⁵

(1. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 郑州 450003; 2. 水利部黄河流域水治理与水安全重点实验室, 郑州 450003; 3. 河南黄河建设工程有限公司, 郑州 450003; 4. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 5. 西安理工大学西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048)

摘要:以塔里木河流域为例,对天然绿洲和人工绿洲面积进行遥感解译,设置灌溉面积扩张(现实)和维持不变(理想)两种实例,对比分析 1990—2020 年平原绿洲耗水平衡和用水效率,从灌溉面积扩张视角对灌溉效率悖论成因进行探讨。结果表明:现实实例下,36 亿 m³ 净节水量被用于扩大灌溉面积,人工和天然绿洲耗水比从 4:6 转变为 6:4,产生了严重的灌溉效率悖论;理想实例下,人工和天然绿洲耗水比维持在 4:6,产生真实节水量 24 亿 m³,可避免灌溉效率悖论的产生。灌溉效率悖论的产生是连续丰水年出现、节水技术推广、种植结构调整和灌溉面积扩张等因素综合作用的结果,30 年来灌溉面积扩张对塔里木河流域灌溉效率悖论的产生起主导作用。

关键词:塔里木河流域;节水灌溉;灌溉效率悖论;灌溉面积扩张;耗水量

中图分类号:TV213 **文献标志码:**A **DOI:**10.13476/j.cnki.nsbdkq.2023.0082

一般而言,农业用水占到世界用水总量的 70% 以上^[1-2]。长期以来,推广节水灌溉技术、提升农业用水效率一直被视为减少农业用水量、缓解区域缺水的有效方法。然而,越来越多的研究显示,随着节水技术的应用和节水水平的提高,世界各地的水资源短缺反而更加严重,产生了灌溉效率悖论^[3-5]。灌溉效率悖论是指由于缺乏科学的管理,节水技术的推广应用没有降低用水量或者耗水量,反而造成用水量或者耗水量增加的现象^[1,5]。灌溉效率悖论的产生是水文、经济、社会、制度、管理等多种因素作用的结果,而灌溉面积扩大是悖论产生的重要原因^[6-7]。研究^[8]表明,从 1980—2010 年全球灌溉用水量消耗量持续增加,而超过 50% 的是由于灌溉面积扩张所致。Zhou 等^[9]把我国用水量增加速率降低的原因归于我国农业集约化程度很高且农地规模很小,并认为难以产生灌溉效率悖论。但是在我国西北干旱区,水资源短缺但土地资源丰富,随着节水技术的广泛应用,农民为了获得利益很可能将节约水量用于开发更多的灌溉面积。因此,从灌溉面积

扩张视角揭示灌溉效率悖论产生的原因并提出应对策略,对于缓解西北干旱区的缺水形势十分必要。

塔里木河流域自 1988 年被列为新疆重点棉花基地以来,垦荒植棉使得绿洲规模迅速扩大,耕地面积的增加,一方面扩大了人工绿洲规模,另一方面也激化了水资源供需矛盾,下游出现了河道断流和尾间湖泊萎缩^[10]。为了遏制塔里木河生态恶化,2001 年国务院批复了《塔里木河流域近期综合治理规划》,近一半投资于灌区节水改造^[11],但并未取得应有的效果。综合治理实施以来,灌溉面积扩大,“边治理边开荒”、“边节水边耗水”现象普遍存在^[12]。灌溉面积由规划实施之初的 126 万 hm² 扩大到了 2012 年 171 万 hm²,增加了 45 万 hm²。灌溉面积的扩张抵消了治理工程节出的 27 亿 m³ 水量,同时还吞噬了近 12 年来因丰水期多来的近 30 亿 m³ 的水量,更进一步挤占流域生态用水,严重影响了项目实施的效果^[13]。

围绕塔里木河流域节水发展、灌溉面积扩张对水资源系统的影响相关学者开展了大量研究。张

收稿日期:2023-05-08 修回日期:2023-09-11 网络出版时间:2023-10-07

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20230928.0853.002

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3202400);国家自然科学基金项目(52109031);“科创中原”行动项目(2023HYTP017)

作者简介:张金良(1963—),男,河南新安人,正高级工程师,博士,主要从事流域水文水资源与水沙调控研究。E-mail:jlzhangyrec@126.com

通信作者:明广辉(1987—),男,河南范县人,高级工程师,博士,主要从事干旱区农业节水和水资源规划研究。E-mail:minggh@yrec.cn

治^[14]通过对开都孔雀河流域节水技术发展和耗水量进行研究,指出膜下滴灌在农田尺度上实现了节水增产的目标,但在更大区域尺度上,若没有科学的管理,可能导致水分更多地消耗,出现效率悖论现象。刘焯^[6]通过对塔里木河流域 2000 年社会水文动态演化历史的阶段分析,发现外部社会输入的技术与制度的因素长期主导了当地社会水文系统发展阶段的演替。Liu 等^[15]通过建立概念性社会水文模型来研究塔里木河流域人类活动对水资源的影响,结果表明随着人类对生态环境价值的认识,经济社会和生态环境耗水量存在钟摆现象。张沛^[16]探究了塔里木河流域社会-生态-水资源系统的耦合度与内在驱动机制,指出水资源的过度开发利用是引起生态环境系统恶化的主要原因。李丽琴等^[17]通过构建基于生态水文阈值调控的水资源多维均衡配置模型,在平枯水年通过退减灌溉面积、新增节水灌溉面积,可实现该地区水资源-经济社会-生态环境复合系统的有序良性演化和高效均衡发展。雷志栋等^[18]应用散耗性水文模型对塔里木盆地大型绿洲的年耗水水平、社会经济与自然生态系统耗水比例等进行了分析。邓铭江^[19]提出了“五五五分账,三七调控”干旱区内陆河流域水资源阈值管控模式,兼顾了经济社会和自然生态对水资源的高度依赖关系。

以上研究对于深化人类活动对塔里木河流域水资源系统演变的认识具有重要作用,但对于灌溉效率悖论产生的因素和机理还缺乏有针对性的研究。塔里木盆地地处内陆干旱区,水资源严重短缺,自然生态十分脆弱,在总水资源量一定的条件下,天然系统与人工系统的用水存在着此消彼长的博弈竞争关系^[20],亟须探究节水发展过程中天然绿洲生态系统与人工绿洲经济社会系统(含人工系统生态用水)用耗水量随用水效率的演变规律^[21]。本研究以水土资源矛盾突出的塔里木河流域为例,选取节水技术快速发展的 1990—2020 年作为研究时段,设置灌溉面积扩张和维持不变两种实例,重点对天然绿洲和人工绿洲耗水平衡进行分析,探究不同实例灌溉耗水量随灌溉水利用效率的变化规律,从灌溉面积扩张视角探究灌溉效率悖论的成因,并提出应对策略。

1 研究区概况

塔里木河干流全长 1 321 km。流域由环塔里木

盆地的和田河、叶尔羌河、喀什噶尔河、阿克苏河、渭干河与库车河、迪那河、开都-孔雀河、车尔臣河和克里雅河等 9 大水系和 144 条河流组成,流域总面积 103 万 km²。塔里木河流域深居内陆,气候干旱,降雨稀少,蒸发强烈,水资源相对贫乏,生态环境脆弱。20 世纪后期以来,塔里木河流域气候呈现出较为明显的暖湿现象,各河流来水明显偏丰。与 1956—2000 年系列相比,2001—2016 年塔里木河流域地表径流年均增多 64.8 亿 m³,增幅 16.8%。

塔里木河流域行政区划上包括巴音郭楞蒙古自治州、阿克苏地区、克孜勒苏柯尔克孜自治州、喀什地区、和田地区 5 地州。流域在新疆社会经济地位极为重要,不仅是我国重要的优质棉和特色林果生产基地,而且是我国重要的煤炭油气资源基地。受历史及自然因素的限制,农业在流域经济社会发展中占重要地位,农业用水占总用水的 95% 左右。

2 研究方法 with 数据来源

2.1 研究方法

2.1.1 实例设置

选取节水技术快速发展的 1990—2020 年作为研究时段,统计分析 1990、2000、2010 和 2020 年 4 个特征年份的指标变化情况,并按每 10 年划分为阶段 1(1990—2000 年)、阶段 2(2000—2010 年)和阶段 3(2010—2020 年)3 个阶段。在节水水平完全一致的前提下,设置灌溉面积扩张和维持不变的两种实例,分别称为现实实例和理想实例。现实实例下,灌溉面积、人工绿洲和天然绿洲面积按照实际情况变化。理想实例下灌溉面积和人工绿洲面积保持不变。30 年来 2000 年天然绿洲面积最大,为了促进生态环境保护,2010 年和 2020 年维持 2000 年的天然绿洲面积。详见表 1。

表 1 实例设置
Tab. 1 Scenario setting 单位: 万hm²

年份	灌溉面积		人工绿洲面积		天然绿洲面积	
	现实实例	理想实例	现实实例	理想实例	现实实例	理想实例
1990	207	207	309	309	448	448
2000	268	207	331	309	469	469
2010	316	207	384	309	448	469
2020	441	207	523	309	405	469

2.1.2 计算方法

塔里木河流域山区是径流形成区,平原区是主

要的水资源利用与耗散区^[22]。为了体现平原区水资源用于经济社会和自然生态的散耗特点,重点对绿洲耗水平衡进行分析^[23]。流域总耗水量为人工绿洲耗水量和天然绿洲耗水量之和。人工绿洲耗水量主要包括生活、工业、农业和人工生态耗水量。塔里木河流域农林灌溉耗水量占到总耗水量的95%以上,生活、工业耗水量有限,为计算方便将其省略,则人工绿洲耗水量为灌溉耗水量加上人工生态耗

水量。干旱区植被生态耗水是通过根系对地下水的吸收和叶面蒸散而实现的。大部分天然绿洲不用单独灌溉,而是依附于人工绿洲,依赖河道入渗补给地下水及洪水漫溢的地面灌溉,间接获得水源供给。

重点对人工绿洲灌溉耗水量、天然绿洲耗水量、人工和天然绿洲耗水比、绿洲耗水量占水资源量的比开展分析,计算流程见图1。

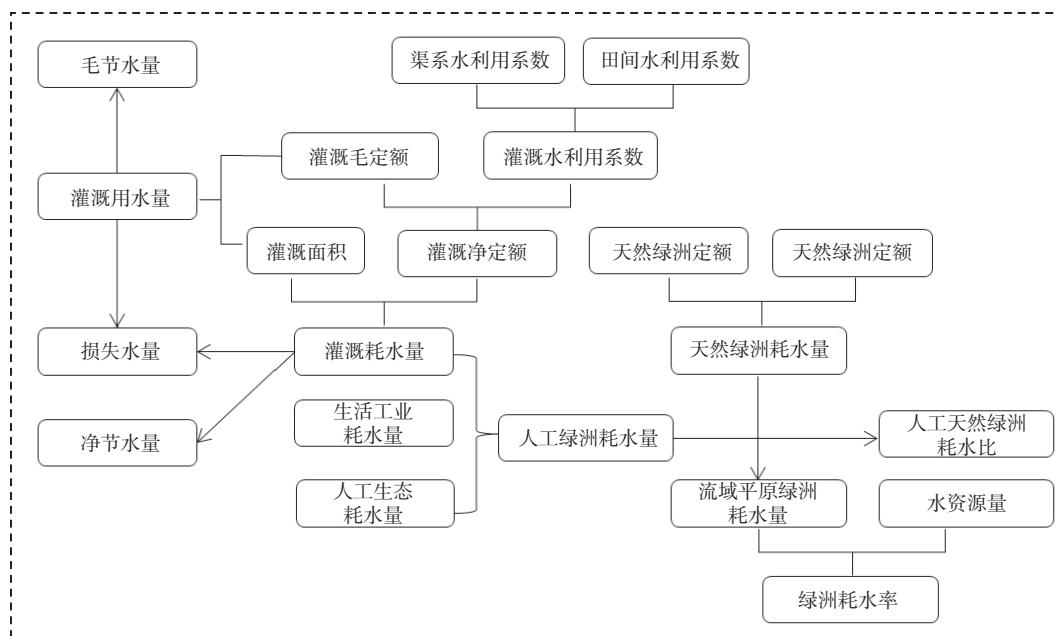


图1 流域平原绿洲耗水平衡计算流程

Fig. 1 Flow chart of water consumption balance calculation

人工绿洲灌溉用水量的计算采用定额法,计算公式为

$$I_s = Q_s \times A \quad (1)$$

式中: I_s 为人工绿洲灌溉用水量, m^3 ; Q_s 为灌溉毛定额, m^3/hm^2 ; A 为人工绿洲灌溉面积, hm^2 。灌溉面积包括灌溉农田和灌溉林草面积,灌溉毛定额为灌溉农田和林草的综合定额。

人工绿洲灌溉用水量加上人工生态用水量,为人工绿洲社会经济用水总量,表达式为

$$H_s = I_s + E_s \quad (2)$$

式中: E_s 为人工生态用水量, m^3 ; H_s 为人工绿洲社会经济用水总量, m^3 。

人工绿洲社会经济用水总量除以流域水资源量,即为流域水资源开发利用效率,表达式为

$$\varphi = H_s / R \quad (3)$$

式中: φ 为流域水资源开发利用效率; R 为流域的水资源总量, m^3 。

灌溉净定额为灌溉毛定额与灌溉水利用系数的

乘积,表达式为

$$Q_d = Q_s \times \eta \quad (4)$$

式中: Q_d 为灌溉净定额, m^3/hm^2 ; η 为灌溉水利用系数。

灌溉水利用系数可以由渠系水利用系数和田间水利用系数的乘积求得,表达式为

$$\eta = \eta_{渠} \times \eta_{田} \quad (5)$$

式中: $\eta_{渠}$ 为渠系水利用系数; $\eta_{田}$ 为田间水利用系数。

利用灌溉净定额和人工绿洲灌溉面积的乘积计算人工绿洲灌溉耗水量,表达式为

$$I_d = Q_d \times A \quad (6)$$

式中: I_d 为人工绿洲灌溉耗水量, m^3 。

灌溉损失水量为灌溉用水量减去灌溉耗水量,表达式为

$$I_r = I_s - I_d \quad (7)$$

式中: I_r 为灌溉损失水量, m^3 。

人工绿洲耗水量为灌溉耗水量和人工生态耗水量之和,表达式为

$$H_d = I_d + E_d \quad (8)$$

式中: H_d 为人工绿洲耗水量, m^3 ; E_d 为人工生态耗水量, m^3 。

天然绿洲耗水量为天然绿洲面积乘以天然绿洲耗水定额, 表达式为

$$N_d = A_n \times Q_{nd} \quad (9)$$

式中: N_d 为天然绿洲耗水量, m^3 ; A_n 为天然绿洲面积, hm^2 ; Q_{nd} 为天然绿洲耗水定额, m^3/hm^2 。

人工绿洲和天然绿洲耗水量的比为人工天然绿洲耗水比, 表达式为

$$\varepsilon = H_d/N_d \quad (10)$$

式中: ε 为人工天然绿洲耗水比。

人工绿洲和天然绿洲耗水量的和为平原绿洲耗水量, 表达式为

$$O_d = H_d + N_d \quad (11)$$

式中: O_d 为平原绿洲耗水量, m^3 。

平原绿洲耗水量除以流域水资源量, 即为绿洲耗水率, 表达式为

$$\theta = O_d/R \quad (12)$$

式中: θ 为绿洲耗水率。

毛节水量根据前一个阶段的灌溉面积和前后两个阶段灌溉毛定额差的乘积计算, 公式为

$$S_s = A_{n-1} (Q_{s_{n-1}} - Q_{s_n}) \quad (13)$$

式中: S_s 为毛节水量, m^3 ; A_{n-1} 为前一个阶段的灌溉面积, hm^2 ; $Q_{s_{n-1}}$ 和 Q_{s_n} 分别为前后两个阶段灌溉毛定额, m^3/hm^2 。

净节水量根据前一个阶段的灌溉面积和前后两个阶段灌溉净定额差的乘积计算, 公式为

$$S_d = A_{n-1} (Q_{d_{n-1}} - Q_{d_n}) \quad (14)$$

式中: S_d 分别为净节水量, m^3 ; $Q_{d_{n-1}}$ 和 Q_{d_n} 分别为前后两个阶段灌溉净定额, m^3/hm^2 。

水分生产率是表征作物灌溉水利用效率的重要参数。为方便起见, 假设流域内统一种植当地最广泛的经济作物棉花。棉花水分生产率计算公式为

$$W_p = \frac{y}{Q_d} \quad (15)$$

式中: W_p 为水分生产率, kg/m^3 ; y 为棉花皮棉产量, kg/hm^2 。

考虑灌溉棉花收益和灌溉节水投资, 灌溉净收益计算公式为

$$p = A \times y \times a - A \times b \quad (16)$$

式中: p 为净收益, 元; a 为棉花皮棉价格, 元/kg; b 为单位面积高效节水投资, 元/ hm^2 ; A 为灌溉面积, hm^2 。

2.2 数据来源

社会经济和节水灌溉发展指标。社会经济指标如人口、GDP 来源于新疆统计年鉴, 实际灌溉面积根据遥感解译的结果。高效节水面积、高效节灌率、灌溉毛定额、田间水利用系数、渠系水利用系数和灌溉水利用系数等节水灌溉发展指标, 来源于《塔里木河流域近期综合治理规划》^[11]、《塔里木河流域综合规划》^[24]等规划成果。

绿洲面积和灌溉面积遥感解译。土地利用遥感数据来自中国科学院地理所中国土地利用现状遥感数据库 1990—2020 年 4 期 30 m 分辨率栅格数据 (<http://www.resdc.cn/>)。土地利用类型划分遵循中国科学院土地利用覆盖分类体系, 包括 6 个一级土地类型和 25 个二级土地类型。将林草植被和河湖湿地作为天然绿洲。其中, 林草植被包括有林地、疏林地、灌木林、高覆盖度草地和中覆盖度草地, 河湖湿地包括湖泊、滩地和沼泽湿地。将旱地、水田、农村居民点、城镇用地、河渠、水库坑塘等作为人工绿洲。塔里木河流域平原绿洲降水稀少, 耕地完全依靠灌溉, 将耕地面积作为灌溉面积。

天然生态耗水定额。天然生态耗水包括林草植被和河湖湿地消耗水量。假设 30 年来植被结构和河湖湿地规模不变, 天然生态耗水定额一定。根据《塔里木河流域综合规划》, 444 万 hm^2 的天然绿洲面积耗水量 192.2 亿 m^3 , 净定额为 4 320 m^3/hm^2 ^[24]。贾宝全等^[25]估算塔里木河流域生态需水量为 161.2 亿 m^3 。综合考虑以上两个成果, 取均值确定天然绿洲净定额为 3 900 m^3/hm^2 。

人工生态耗水量。人工生态主要包括人工绿洲中的防护林、园林和城市生态 3 个部分。人工生态用水在流域生态用水中的占比较小。假定人工生态结构不变, 人工生态耗水量按照贾保全等^[25]的估算结果, 为 21.57 亿 m^3 。

水资源量和可耗水量分析。根据全国第二次和第三次水资源调查评价成果, 塔里木河流域人类活动区(不包括库木塔格沙漠、羌塘高原区、柴达木盆地西部、奇普恰普河等无人区)1956—2000 年和 1956—2016 年系列水资源总量分别为 430 亿 m^3 和 441.3 亿 m^3 , 即为可用于平原区社会经济系统和生态环境系统可消耗的水量。考虑到 2000 年后流域来水偏丰, 将 4 个年份可消耗水资源量定为 420 亿 m^3 、420 亿 m^3 、430 亿 m^3 和 440 亿 m^3 。

棉花价格和节水投资。棉花价格参考国家物价局、商业部、财政部联合发布的年度棉花收购价格。节水投资参照《塔里木河流域近期综合治理规划》和《塔里木河流域综合规划》相关成果。

3 结果与分析

3.1 社会经济和节水发展

1949年塔里木河流域人口只有300万人, GDP仅为3亿元, 灌溉面积70万 hm^2 。1949—2020年,

流域人口呈直线增长, GDP和遥感解译灌溉面积呈指数增长, 见图2。流域2020年人口达到1200万人, GDP达到4127亿元, 灌溉面积达到441万 hm^2 。1949年以来流域人口、GDP和灌溉面积分别增长了3倍、1375倍和5.3倍。在1990—2020年的30年间, 随着西部大开发、“一黑一白”等政策、塔里木河流域近期综合治理实施后, 水土资源开发和社会经济取得巨大发展, 人口增长了74%, GDP增长了38倍, 灌溉面积增长了1.13倍, 见表2。

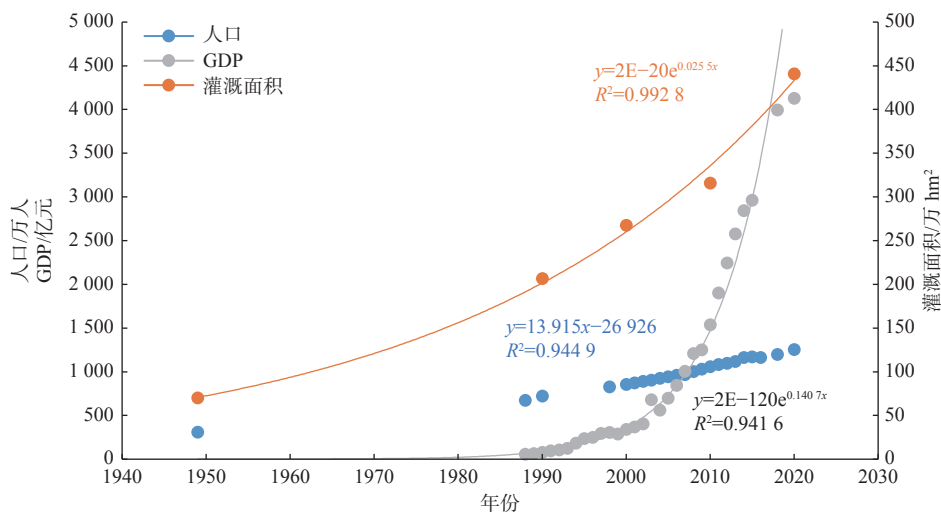


图2 1949—2020年塔里木河流域人口、灌溉面积和GDP发展情况

Fig. 2 Variation of population, irrigated area and GDP in Tarim River basin from 1949—2020

表2 1990—2020年塔里木河流域社会经济和节水灌溉情况

Tab. 2 Socio-economic and water-saving irrigation in Tarim River basin from 1949—2020

年份	人口/ 万人	GDP/ 亿元	A_i / 万 hm^2	A_d / 万 hm^2	ε_A	$\eta_{渠}$	$\eta_{田}$	η	Q_s / ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	Q_d / ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	y / ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	a / ($\text{元} \cdot \text{hm}^{-2}$)	b / ($\text{元} \cdot \text{hm}^{-2}$)
1990	721.4	79.4	207	10	0.05	0.40	0.70	0.28	18 000	5 040	780	6	12 000
2000	855.5	339.0	268	27	0.10	0.50	0.75	0.38	14 175	5 310	1 545	8	15 000
2010	1 056.3	1 538.6	316	77	0.25	0.60	0.80	0.48	12 750	6 120	1 650	10.6	18 000
2020	1 200	4 127.0	441	253	0.57	0.65	0.85	0.55	9 000	4 980	1 950	15.4	22 500

注: A_i 指高效节水灌溉面积; ε_A 为高效节灌率, 等于高效节水灌溉面积除以灌溉面积。

30年来, 塔里木河流域节水发展较为迅速, 高效节水灌溉面积增长了24.3倍。渠系水利用系数从0.40提高到0.65, 田间水利用系数从0.70提高到0.85。灌溉水利用系数从0.28提高到0.55, 翻了近1倍。灌溉毛定额降低了1/2。与灌溉毛定额一直下降相比, 灌溉净定额阶段1和2是增加的, 可能是由于棉花、特色林果等高耗水作物的种植使得净定额升高的结果。随着节水和农业管理水平的提高, 流域皮棉单产逐渐增加, 而随着经济发展皮棉价格和节水投资也呈增加趋势, 见表2。

3.2 绿洲面积和耗水量

利用遥感解译的方法对比分析两种实例天然绿洲和人工绿洲面积的变化, 见图3。现实实例下, 1990—2020年的近30年以来, 塔里木河流域人工绿洲面积增加了213万 hm^2 , 增加了69%。3个阶段分别增加21万 hm^2 、53万 hm^2 、139万 hm^2 , 阶段3增加最快。天然绿洲面积减少了43万 hm^2 , 减少了9.5%。3个阶段的变化分别为增加21万 hm^2 、减少21万 hm^2 、减少43万 hm^2 。绿洲总面积增加了171万 hm^2 , 增加了22.5%, 绿洲面积占整个塔里木河流

域面积的比例从 7.3% 提高到 9%。理想实例下, 阶段 1 天然绿洲面积有所增加, 阶段 2 和 3 维持不变,

人工绿洲面积 3 个阶段均保持不变。

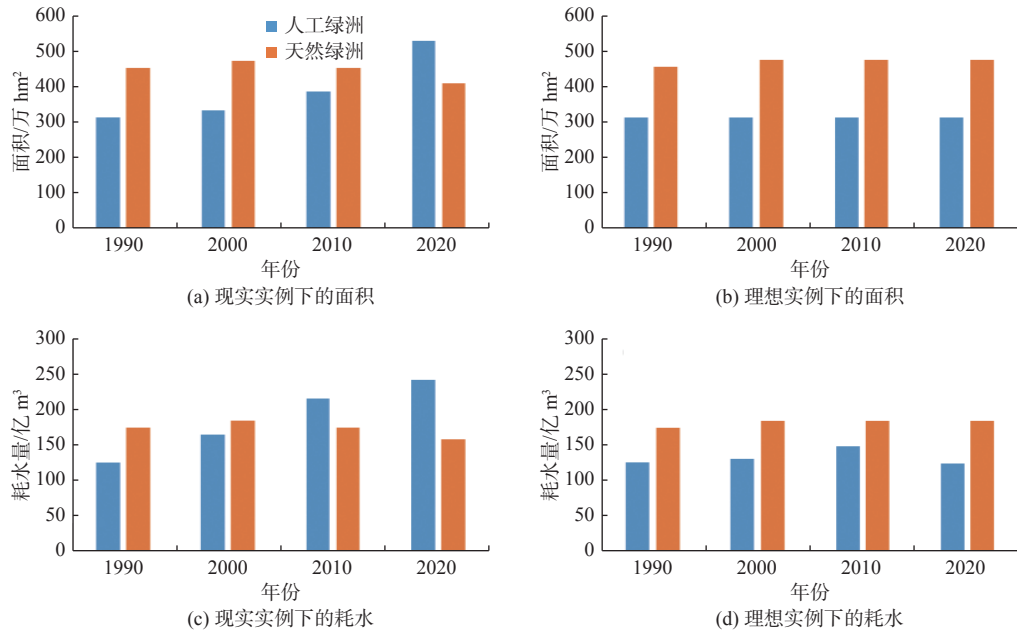


图 3 两种实例人工绿洲和天然绿洲面积和耗水量变化对比
Fig. 3 Comparison of area and water consumption between artificial oasis and natural oasis

对两种实例人工和天然耗水量进行对比分析, 结果见图 3。现实实例人工绿洲耗水量逐年增加, 3 个阶段分别增加 38 亿 m³、51 亿 m³ 和 26 亿 m³, 阶段 3 增加幅度最小; 天然绿洲耗水量阶段 1 增加 8 亿 m³, 阶段 2 和 3 分别下降 8 亿 m³ 和 17 亿 m³。理想实例人工绿洲耗水量阶段 1 和 2 分别增加 6 亿 m³ 和 17 亿 m³, 阶段 3 下降 24 亿 m³; 天然绿洲耗水量阶段 1 增长 8 亿 m³, 阶段 2 和 3 保持不变。

现实实例绿洲总耗水量 3 个阶段一直在增加, 理想实例阶段 1 和 2 增加, 阶段 3 下降。3 个阶段

现实实例的绿洲耗水量均大于理想实例, 见表 3。现实实例人工绿洲和天然绿洲耗水比逐渐增加, 从 42 : 58 增加到 60 : 40; 而理想实例人工绿洲和天然绿洲的耗水阶段 1 不变, 阶段 2 增加, 阶段 3 下降, 人工绿洲和天然绿洲耗水比从 42 : 58 增加到 45 : 55, 而后下降为 40 : 60。流域绿洲耗水率现实实例阶段 1 和 2 均在增加, 阶段 3 由于丰水年使得耗水率不变。理想实例阶段 1 和 2 增加, 阶段 3 下降, 生态环境耗水量得到保障的同时, 流域整体开发利用效率降低。

表 3 绿洲总耗水量、人工绿洲和天然绿洲耗水比及耗水率变化

Tab. 3 Comparison of water consumption, water consumption ratio of artificial and natural oases, and water consumption rate

年份	绿洲总耗水量/亿 m ³		人工绿洲和天然绿洲耗水比		水资源量/ 亿 m ³	耗水率/%	
	现实实例	理想实例	现实实例	理想实例		现实实例	理想实例
1990	300	300	42 : 58	42 : 58	420	72	72
2000	347	314	47 : 53	42 : 58	420	83	75
2010	390	331	55 : 45	45 : 55	430	91	77
2020	399	307	60 : 40	40 : 60	440	91	70

3.3 节水量和损失水量

对两种实例条件产生的节水量和损失水量进行分析, 见表 4。现实实例灌溉用水量阶段 1 和 2 增加, 阶段 3 稍微下降, 灌溉耗水量 3 个阶段均增加。理想实例灌溉用水量持续下降, 灌溉耗水量阶段 1 和 2 增加, 阶段 3 下降。现实实例灌溉用水量均大

于理想实例, 现实实例阶段 1 和 2 灌溉耗水量增加幅度均大于理想实例。随着灌溉用水效率的提高, 两种实例损失水量 3 个阶段均下降, 现实实例 3 个阶段的损失水量均大于理想实例。现实实例和理想实例 3 个阶段均有毛节水量, 合计分别为 236 亿 m³ 和 186 亿 m³, 相差 50 亿 m³。现实实例和理想实例

阶段1和2均没有净节水量,阶段3均有净节水量,分别为36亿 m^3 和24亿 m^3 。但现实实例的净节水量被阶段3增加的125万 hm^2 灌溉面积所消耗,理想实例由于没有灌溉面积扩张净节水量是真实节水量。

表4 用耗水平衡特征和节水量

Tab. 4 Water consumption balance characteristics and water-saving amount

单位:亿 m^3

年份	灌溉用水量		灌溉耗水量		损失水量		毛节水量		净节水量	
	现实实例	理想实例	现实实例	理想实例	现实实例	理想实例	现实实例	理想实例	现实实例	理想实例
1990	372	372	104	104	268	268				
2000	379	293	142	110	237	183	79	79	-6	-6
2010	403	264	193	126	209	137	38	29	-22	-17
2020	397	186	219	103	177	83	118	78	36	24

3.4 水分生产率和收益

两种实例灌溉净定额、皮棉单产相同,水分生产率也相等。水分生产率阶段1升高,阶段2稍微有所下降,阶段3由于灌溉定额下降、棉花产量提高,取得了节水增产的效果,水分生产率得到大幅提升,表5。

表5 水分生产率的变化

Tab. 5 Variation of water productivity

年份	$Q_w/(m^3 \cdot hm^{-2})$	$y/(kg \cdot hm^{-2})$	$W_p/(kg \cdot m^{-3})$
1990	5 040	780	0.15
2000	5 310	1 545	0.29
2010	6 120	1 650	0.27
2020	4 980	1 950	0.39

两种实例棉花收益、节水投资和净收益都在增加,阶段3灌溉面积增加较大使得棉花收益和节水投资增加较大,见表6。净收益占GDP的比重,现实实例阶段1上升阶段2和3下降,理想实例三个阶段一直下降,两种实例阶段2下降幅度最大。现实实例农业收益占比大于理想实例,理想实例工业和第三产业收益占比比较大,产业结构更为合理。

表6 净收益情况对比

Tab. 6 Comparison of net incomes

年份	棉花收益/亿元		节水投资/亿元		净收益/亿元		净收益占GDP比例/%	
	现实实例	理想实例	现实实例	理想实例	现实实例	理想实例	现实实例	理想实例
1990	97	97	12	12	84	84	79	79
2000	331	255	25	31	306	224	90	66
2010	552	361	91	91	461	270	30	18
2020	1 323	621	395	267	928	354	22	9

3.5 灌溉耗水量随用水效率变化规律

对比相同灌溉用水效率情况下两种实例灌溉耗水量随着灌溉水利用系数的变化规律,见图4。现

实实例的灌溉耗水量大于理想实例,且两种实例之间的耗水量差距越来越大。随着灌溉水利用系数的提高,现实实例耗水量逐年增加,产生了灌溉效率悖论。由于灌溉水利用系数的提高和净耗水定额的下降,现实实例阶段3耗水量增速放缓,说明节水灌溉技术的推广一定程度上可以减轻灌溉效率悖论的程度。理想实例阶段1和阶段2耗水量也在缓慢增加,因为随着节水灌溉的推广,产量增加导致蒸散发量即耗水量增加,也产生了一定的效率悖论。阶段3耗水量下降,灌溉效率悖论不再产生。因此,灌溉效率悖论的产生是用水效率提高和灌溉面积两个方面综合作用的结果。在用水效率相同的情况下,灌溉面积变化对耗水量的增长起决定作用。

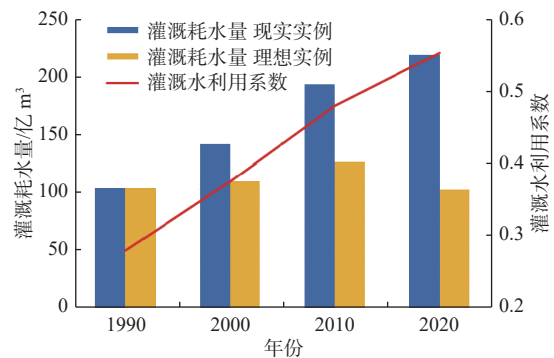


图4 两种实例灌溉耗水量随灌溉水利用系数的变化规律

Fig. 4 Comparison of the variation of water consumption and irrigation efficiency in the two scenarios

4 讨论

在塔里木河流域水资源量、节水条件一致的情况下,设置灌溉面积扩张和维持不变两种实例,探讨灌溉面积扩张对流域水量平衡和用水效率的影响。现实实例随着灌溉面积增加,人工绿洲面积增加了69%,天然绿洲面积减少了9.5%,人工绿洲侵

占天然绿洲的现象明显。人工绿洲和天然绿洲耗水比由 4:6 转变为 6:4, 人工绿洲耗水量升高而天然绿洲耗水量逐渐降低。绿洲耗水总量逐渐增加, 绿洲耗水率达到 90% 以上, 河流的开发利用率过高。理想实例由于没有灌溉面积的扩张, 人工绿洲耗水量得到控制, 天然绿洲耗水量得到保障。人工绿洲和天然绿洲耗水比为 4:6, 较为符合“生态环境的耗水不低于水资源总量的 50%”的要求^[18]。绿洲总耗水量在 70% 左右, 河流的开发利用率较为合适。相较于现实实例以依靠灌溉面积扩张为主的粗放式发展, 理想实例工业和第三产业收益增加、农业收益占比明显小于现实实例, 发展模式更为合理。

塔里木河流域近 20 年属于丰水年, 为灌溉面积扩张提供了水源条件。塔里木河流域 2000—2013 年多年平均来水量增加 33 亿 m^3 , 2013 年塔里木河流域耕地面积比 2000 年增加了 66%, 导致多年平均生态耗水量呈现下降趋势^[17]。另一个导致耗水量增加的因素是种植结构调整, 有研究^[16]表明, 从 1990—2015 年, 塔里木河流域由以粮食作物种植为主逐渐转变为以经济价值较高的经济作物种植为主, 使得棉花种植耗水量从 16.05 亿 m^3 增加到 135.62 亿 m^3 , 大枣种植耗水量从 2003 年开始增加到 2015 年的 29.88 亿 m^3 。由 3.5 节分析可知, 理想实例阶段 1 和 2 净耗水量有所增加, 因为以棉花、特色林果等高耗水作物为主的种植结构调整使得净灌溉定额提高(表 2), 从而导致灌溉效率悖论的情况发生。Contor 等^[26]提出灌溉效率悖论产生的 3 种机理分别是灌溉技术本身提高了耗水量、灌溉面积扩张和种植高耗水作物。灌溉技术本身提高了耗水量的例子比如滴灌湿润区较小使根区蒸发较小, 但滴灌时间长导致蒸散发增加。综合以上分析, 灌溉效率悖论的产生是连续丰水年出现、节水技术推广、种植结构调整和灌溉面积扩张等因素综合作用的结果。塔里木河流域近 30 年灌溉面积扩张幅度大, 相较于其他影响因素, 灌溉面积扩张对绿洲耗水量的增加和灌溉效率悖论的产生起主导作用。有研究^[16]表明, 在基本实现自身粮食安全基础上, 农业种植面积快速扩张是灌溉面积扩张和灌溉效率悖论产生的重要因素。

只提高节水灌溉效率而不控制灌溉规模就会导致严重的灌溉效率悖论。其实早在 1865 年 Jevons^[27]就提出, 蒸汽机作为一种价格便宜的高能效设备, 却有可能因为其应用更加广泛而实际上加

速煤炭的消耗, 产生效率悖论现象。效率悖论反映了提高灌溉效率和产业规模发展之间的矛盾。我国内陆干旱区的经济以绿洲农业经济为主, 只要有水扩大灌溉面积就会使经济得到发展。但是大规模的发展模式, 其生产效率低下, 加之受水资源条件的限制, 破坏了自然生态系统, 是不可持续的^[28]。为避免灌溉效率悖论的发生, 需要严格水资源管理。坚持“四水四定”原则, 对水资源供给量或者可利用耕地面积进行限制。正确处理扩大生产规模和提高生产效率的关系, 促进干旱内陆河流域水土资源均衡发展^[29-30]。

5 结论

以塔里木河流域为例, 利用限定影响因子实例分析法, 从灌溉面积扩张的视角对灌溉效率悖论产生的原因进行分析, 主要结论如下:

现实实例发展模式, 没有控制灌溉规模, 导致严重的灌溉效率悖论。人工绿洲和天然绿洲生态耗水比例从 4:6 变为 6:4, 绿洲耗水率超过 90%, 天然生态耗水量和河流下泄水量无法得到保障。理想情况下灌溉面积得到控制, 避免灌溉效率悖论的产生。人工绿洲和天然绿洲生态耗水比例保持在 4:6, 绿洲耗水率维持在 70%, 产业结构更为合理。

灌溉效率悖论的产生是连续丰水年出现、节水技术推广、种植结构调整和灌溉面积扩张等因素综合作用的结果。在水资源条件、社会经济、种植结构、节水水平一致的条件下, 限定灌溉面积唯一的影响因子, 对比分析灌溉面积扩张和维持不变两种实例, 表明近 30 年灌溉面积扩张对塔里木河流域灌溉效率悖论的产生起主导作用。

为了避免灌溉效率悖论的发生, 需要严格水资源管理, 坚持“四水四定”原则, 把水资源作为最大的刚性约束。根据水资源承载力进行土地资源的开发利用, 节水灌溉技术适度发展, 促进西北干旱区平原绿洲水土资源均衡可持续发展。

参考文献:

- [1] GRAFTON R Q, WILLIAMS J, PERRY C J, et al. The paradox of irrigation efficiency[J]. *Science*, 2018, 361(6404): 748-750. DOI: 10.1126/science.aat9314.
- [2] 管驰明, 张洋洋, 石常峰. 农业虚拟水消耗影响因素分解及时空差异: 以西北 5 省(自治区)为例[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(5): 193-201. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0109.
- [3] 宋健峰, 王玉宝, 吴普特. 灌溉用水反弹效应研究综

- 述[J]. *水科学进展*, 2017, 28(3): 452-461. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2017.03.017.
- [4] WARD F A, PULIDO-VELAZQUEZ M. Water conservation in irrigation can increase water use[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(47): 18215-18220. DOI: 10.1073/pnas.0805554105.
- [5] PERRY C J, STEDUTO P. Does improved irrigation technology save water? A review of the evidence[R]. Cairo: Food and Agriculture Organization of the United Nation, 2017.
- [6] 刘焯. 干旱区社会水文系统演化规律与驱动机制研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.
- [7] 何凡, 顾冰, 何国华, 等. 中国用水量变化的驱动效应[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(3): 417-428. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0042.
- [8] ZHOU X Y, ZHANG Y Q, SHENG Z P, et al. Did water-saving irrigation protect water resources over the past 40 years? A global analysis based on water accounting framework[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 249: 106793. DOI: 10.1016/j.agwat.2021.106793.
- [9] ZHOU F, BO Y, PHILIPPE C, et al. Deceleration of China's human water use and its key drivers[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2020, 117(14): 7702-7711. DOI:10.1073/pnas.1909902117.
- [10] 王铁成, 谢红彬, 贾宝全. 孔雀河流域绿洲生态支持系统调控模式研究[J]. *干旱区资源与环境*. 2002, 16(3): 7-11.
- [11] 新疆维吾尔自治区人民政府, 中华人民共和国水利部. 塔里木河流域近期综合治理规划报告[R]. 2021.
- [12] 邓铭江. 塔里木河流域径流与耗水变化及其综合治理对策研究[J]. *干旱区地理*, 2008, 31(4): 550-559. DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2008.04.019.
- [13] 中国国际工程咨询公司. 塔里木河流域近期综合治理规划项目后评价报告[R]. 2015.
- [14] 张治. 绿洲膜下滴灌农田水盐运移及动态关系研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.
- [15] LIU D F, TIAN F Q, LIN M, et al. A conceptual socio-hydrological model of the co-evolution of humans and water case study of the Tarim River basin, western China[J]. *Hydrol. Earth Syst. Sci*, 2015(19): 1035-1054.
- [16] 张沛. 塔里木河流域社会-生态-水资源系统耦合研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019.
- [17] 李丽琴, 王志璋, 贺华翔, 等. 基于生态水文阈值调控的内陆干旱区水资源多维均衡配置研究[J]. *水利学报*, 2019, 50(3): 377-387. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20180855.
- [18] 雷志栋, 胡和平, 杨诗秀, 等. 塔里木盆地绿洲耗水分析[J]. *水利学报*, 2006, 37(12): 1470-1475.
- [19] 邓铭江. 南疆未来发展的思考: 塔里木河流域水问题与水战略研究[J]. *干旱区地理*, 2016, 39(1): 1-11. DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2016.01.001.
- [20] 左其亭. 水科学的核心与纽带: 人水关系学[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(1): 1-8. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0001.
- [21] 胡和平, 汤秋鸿, 雷志栋, 等. 干旱区平原绿洲散耗型水文模型: I模型结构[J]. *水科学进展*, 2004, 15(2): 140-145.
- [22] 雷志栋, 苏立宁, 杨诗秀, 等. 青铜峡灌区水土资源平衡分析的探讨[J]. *水利学报*, 2002(6): 9-14.
- [23] 秦长海, 赵勇, 李海红, 等. 区域节水潜力评估[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(1): 36242. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0003.
- [24] 新疆水利水电勘测设计研究院. 塔里木河流域综合规划[R]. 2012.
- [25] 贾宝全, 慈龙骏. 新疆生态用水量的初步估算[J]. *生态学报*, 2000, 20(2): 243-250.
- [26] CONTOR B A, TAYLOR R G. Why improving irrigation efficiency increases total volume of consumptive use[J]. *Irrigation and Drainage*, 2013, 62(3): 273-280. DOI: 10.1002/ird.1717.
- [27] JEVONS W S. The coal question: An inquiry concerning the progress of the nation, and the probable exhaustion of our coal-mines[M]. London: Macmillan & Co, 1865.
- [28] 雷志栋, 杨诗秀, 王忠静, 等. 内陆干旱平原区水资源利用与土地荒漠化[J]. *水利水电技术*, 2003, 34(1): 36-40.
- [29] ZHANG L, MA Q M, ZHAO Y B, et al. Determining the influence of irrigation efficiency improvement on water use and consumption by conceptually considering hydrological pathways[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 213: 674-681. DOI: 10.1016/j.agwat.2018.11.016.
- [30] 李慧, 丁跃元, 李原园, 等. 新形势下我国节水现状及问题分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(1): 202-208. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2019.0027.

A case study on the causes of the paradox of irrigation efficiency in the Tarim River basin

ZHANG Jinliang^{1,2}, WAN Dehui³, MING Guanghui^{1,2}, TAN Peiyong^{1,2}, HAI Yang⁴, LIU Dengfeng⁵

(1. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd, Zhengzhou 450003, China; 2. Key Laboratory of Water Management and Water Security for Yellow River Basin (Ministry of Water Resources), Zhengzhou 450003, China; 3. Henan Yellow River Construction Engineering Co., Ltd, Zhengzhou 450003, China; 4. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resource and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 5. State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Agricultural water consumption accounts for over 70% of the world's water consumption. For a long time, promoting water-saving irrigation technology and improving agricultural water efficiency have been regarded as effective methods to reduce agricultural water consumption and alleviate regional water scarcity. However, an increasing number of studies have shown that with the application of water-saving technology and the improvement of water-saving levels, the shortage of water resources worldwide has become even more severe, resulting in the paradox of irrigation efficiency. The emergence of the paradox of irrigation efficiency results from various factors such as hydrology, economy, society, institutions, and management, and the expansion of irrigation area is an important reason for the paradox. Revealing the mechanism of the paradox of irrigation efficiency is the basis for improving water and land resources management in the river basins. Tarim River basin is located in an inland arid area with scarce water resources, and the natural ecology is very fragile. In the recent comprehensive management of the Tarim River basin, nearly half of the investment was spent on water-saving renovation in irrigation areas. However, the expected results were not achieved. The expansion of irrigation area resulted in the widespread phenomenon of "reclaiming land while controlling" and "saving water while consuming water". Under the condition of a certain amount of total water resources, there is a game competition relationship between natural and artificial systems regarding water consumption. Therefore, it is urgent to explore the evolution of water consumption with water use efficiency in water-saving development between natural oasis ecosystems and artificial oasis socio-economic systems.

The Tarim River basin, the most apparent contradiction in water and land resources, was taken as an example. The rapid development of water-saving technology from 1990 to 2020 was selected as the study time. Under the conditions of consistent water resources, social economy, and water-saving levels in the basin, two cases were set up, i.e., the actual case with irrigation area expansion and the ideal case with irrigated area maintenance. The basin's water consumption and water use efficiency varying with the development of water-saving irrigation were analyzed and compared with the two cases.

The results show that in the past 30 years, the irrigation water use efficiency of the basin has increased from 0.28 to 0.55, the gross irrigation quota has been reduced by twice, and the water-saving level has been significantly improved. In the actual case, 3.6 billion m^3 of net water savings have been used to expand irrigation area, resulting in more than doubling of irrigation area and water consumption. The area ratio of artificial and natural oases has changed from 40 : 60 to 55 : 45, and the water consumption ratio has changed from 4 : 6 to 6 : 4. The proportion of oasis water consumption to water resources has increased from 72% to 91%, resulting in a severe paradox of irrigation efficiency. In the ideal case, the irrigation water consumption is reduced, the area and water consumption ratio of artificial and natural oases are maintained at around 4 : 6, and the proportion of oasis water consumption to water resources is 70%, resulting in an actual water saving of 2.4 billion m^3 , avoiding the occurrence of the paradox of irrigation efficiency.

The emergence of the paradox of irrigation efficiency is the complete result of factors such as great water conditions, water-saving development, planting structure adjustment, and irrigation area expansion. In the past 30 years, the expansion of the irrigation area has played a leading role in the emergence of the paradox of irrigation efficiency in the Tarim River basin. In order to avoid the occurrence of the paradox of irrigation efficiency, it is necessary to manage water resources strictly, adhere to the principle of "water settling land", and promote the balanced development of soil and water resources in arid inland river basins.

Key words: Tarim River basin; water-saving irrigation; paradox of irrigation efficiency; irrigation area expansion; water consumption