论文

塔里木河下游生态输水与生态调度研究

邓铭江^{①*}, 周海鹰^②, 徐海量^③, 凌红波^③, 张沛^③^① 新疆维吾尔自治区科学技术协会, 乌鲁木齐 830054;^② 新疆塔里木河流域管理局, 库尔勒 841000;^③ 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011

* E-mail: xjdmj@163.com

收稿日期: 2015-12-21; 接受日期: 2016-05-12

国家自然科学基金(41471099, 31370551, 31400466)资助项目

摘要 以塔里木河下游为研究对象, 通过连续 14 年的动态监测、资料收集、野外数据采集及实验室数据处理, 对塔里木河下游生态输水的特点及方式、生态输水后的生态环境变化进行了系统的分析与评估, 同时对下游生态调度策略与模式进行了初步探讨, 得出以下结论: (1) 塔河下游生态输水经历了从单通道、双通道输水, 向汊河输水和面状输水方式的转变; (2) 从河水耗散分析看, 补给地下水占比最大为 57.7%, 土壤与植被消耗占 37.9%, 入湖水量与河道内水面蒸发所占比例为 4.4%; (3) 输水后塔里木河下游地下水位上升、地下水水质明显好转, 植被面积扩大, 群落物种种类增加, 胡杨长势好转, 表明塔里木河下游生态退化的趋势得到遏止, 但生态脆弱性依然没有根本转变; (4) 为了更好地巩固生态恢复的成效, 应制定合理的生态调度计划, 在河道线状输水的基础上, 进一步扩大受水区范围, 有效补给地下水, 合理调控地下水位; (5) 生态变化是一个长期而缓慢的过程, 需从地表水、地下水、植被响应、生物多样性等方面, 长期监测输水对生态环境恢复的响应, 以利采取更为科学有效的措施。

关键词 塔里木河下游, 河道输水, 生态调度, 植被变化

1 引言

塔里木河全长 1321 km, 是中国乃至世界生态最为脆弱的地区之一。从 20 世纪 50 年代开始, 在其源流阿克苏河、和田河、叶尔羌河, 甚至在塔里木河干流, 开发了大规模的灌溉农业。过度的水土资源开发利用, 特别是 1972 年下游大西海子拦河水库建成以后, 直接导致河道断流。为了保护塔里木河流域的生

态环境, 拯救断流近 30 年、濒于毁灭的下游“绿色走廊”, 中国政府投资 107 亿元, 于 2001 年启动了塔里木河流域近期综合治理工程。2000~2013 年向大西海子水库下游断流河道实施了 14 次生态输水, 共计输水 46.41 亿 m³, 基本实现了年均下泄 3.5 亿 m³ 的预期目标。但是在这一水资源极其宝贵的极端干旱区, 输水后的生态恢复能否达到预期效果, 无疑是国内外关注的焦点。为此, 许多学者从不同角度分析研究了

引用格式: 邓铭江, 周海鹰, 徐海量, 等. 塔里木河下游生态输水与生态调度研究. 中国科学: 技术科学, 2016, 46: 864–876
Deng m J, Zhou H Y, Xu H L, et al. Research on the ecological operation in the lower reaches of Tarim River based on water conveyance (in Chinese). Sci Sin Tech, 2016, 46: 864–876, doi: 10.1360/N092015-00263

输水后的生境变化, 由于时限问题, 结论也不尽一致. 如地下水对生态输水的响应, 陈亚宁等人^[1]认为, 输水后河道两侧各 250 m 范围内的地下水位呈明显上升, 250~450 m 较为显著, 450~750 m 范围内不显著; 徐海量等人^[2]认为, 阶段性输水后河道两侧各 1 km 范围内的地下水位呈明显上升趋势, 然而在远离河道区域的地下水位回升尚不显著; 杨鹏年等人^[3]认为, 洪水对地下水影响较大的是距河 2 km 的区间内, 当距离河道大于 6 km 时, 地下水的横向水力坡度已变得很小, 地下水的流动已极为缓慢, 河水位的变化对地下水几乎无影响. 在以往生态输水后生态响应的相关研究中, 不同学者针对生态响应方式的差异选取不同的指标进行分析. 如从输水后植被恢复的年内变化进行分析, 研究了植物群落的覆盖度、综合优势比沿河道的空间变化和时间变化, 以综合反映塔里木河下游天然植被对输水工程的响应过程^[4]; 从输水前后地上和地下生物量的变化开展研究, 分析了地上和地下生物量对输水过程的响应特点, 并据此计算生态输水后植被恢复的地表生态经济价值^[5,6]. 研究大尺度天然植被对水分变化的响应则离不开遥感技术, 为此一些学者以塔里木河下游生态输水为背景, 利用遥感、GIS 等空间信息技术, 通过分析 NDVI 等级转化情况^[7], 分析该区植被变化特征. 同样在黑河流域, 利用遥感技术并结合实地监测, 一些学者研究了调水下游天然植被的变化特点^[8~10]. 但以往研究较为单一且受时限等因素影响, 难以系统地表征生态系统对输水的响应过程. 鉴于此, 本文利用 14 次生态输水实测资料, 试图从输水后地下水位、河道水质和植被响应等方面, 反映输水后的生态变化. 同时, 为了更好地体现输水的效果, 从生态调度角度对今后输水的时间、水量、形式等进行了探讨, 目的是为今后更好地实施生态输水工程提供指导和借鉴.

2 研究区概况

塔里木河下游位于塔克拉玛干沙漠和库姆塔格沙漠之间, 地理位置介于 39°30'01"~40°35'13"N, 88°27'29"~87°33'48"E, 大西海子水库以下输水河段 357 km(图 1), 主要位于罗布泊微弱拗陷区, 构造稳定, 地形平坦, 第四纪沉积物厚约 350 m 以黏土质的河、湖相沉积为主. 由于有河流和地下水补给, 沿河两岸生长了大片荒漠河岸林, 主要有胡杨(*Populus*

euphratica)、怪柳(*Tamarix chinensis*)、黑刺(*Lycium ruthenicum*)、铃铛刺(*Halimodendron halodendron*)、芦苇(*Phragmites communis*)、疏叶骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)、罗布麻(*Apocynum venetam*)、花花柴(*Kareliniacaspica*)、胀果甘草(*Glycyrrhiza inflata*)等^[5,6], 阻止着两大沙漠的合拢, 因此被誉为“绿色走廊”. 该区属典型的大陆性干旱气候, 年降水量仅 17.4~42.0 mm, 年蒸发潜势高达 2500~3000 mm, 生态环境极为脆弱.

20 世纪 70 年代初, 随着塔里木河各源流来水量的减少和干流上中游耗水量的持续增加, 下游来水量锐减, 特别是 1972 年大西海子拦河水库建成后, 河道基本已无水下泄, 塔里木河下游开始断流、台特马湖干涸. 断流 30 多年后的下游河道, 地下水位持续降低、以胡杨为主要建群植物的荒漠河岸林全面衰败, 生物多样性严重受损, 沙漠化加剧、面积不断扩大, 灾害性天气(浮尘、沙尘暴)增加, 绿色走廊急剧萎缩, 位于河道东西两侧的库鲁克沙漠和塔克拉玛干沙漠呈合拢态势, 成为塔里木河流域最严重的生态灾难区^[11].

3 研究方法

3.1 监测断面设置

输水期间, 设置了大西海子、英苏、阿拉干、依干不及麻、台特马湖 5 个地表水监测断面和英苏、喀尔达依、阿拉干、依干不及麻、库尔干、台特马湖、老英苏(老塔河)、博孜库勒(老塔河)9 个地下水监测断面 45 眼地下水监测井以及英苏、阿拉干、依干不及麻 3 个土壤水监测断面.

3.2 河道水量平衡计算

河道水量平衡包含包气带补给水量、地下水补给量、河道水面蒸发量和尾间湖泊的入湖水量. 其中, 河道沿岸包气带补给量主要用于裸地蒸发、植物蒸腾及增加土壤含水量.

塔里木河下游大西海子至台特马湖生态输水的水量平衡方程如下:

$$W_{\text{下}} = W_{\text{包}} + W_{\text{地下}} + W_{\text{蒸发}} + W_{\text{入湖}}, \quad (1)$$

式中, $W_{\text{下}}$ 为大西海子水库下泄水量, 即下游河道来水总量; $W_{\text{包}}$ 为输水期间河道沿岸包气带的补给水量, 包括输水期内腾发量与包气带净增水量; $W_{\text{地下}}$ 为输水

图1 塔里木河下游研究区示意图

期内河道沿岸地下水补给量; $W_{\text{蒸发}}$ 为输水期间河道水面蒸发量; $W_{\text{入湖}}$ 为进入台特马湖水量.

3.3 生态环境本底调查与生态监测评估

为了作好输水前后的对比分析, 除对输水前的本底进行调查, 还需将连续 14 次输水后生态环境监测数据进行比较. 利用 2000~2013 年每年的遥感监测数据, 结合 65 个植被长期监测样方和 135 棵胡杨树的年轮取样数据, 及不同高度和方向胡杨 10 个生理指标的测定, 25 个生态指标的监测, 旨在综合评估塔里木河下游的生态变化, 回答天然植被衰败的局面是否得到遏制, 植物的种类变化和长势是否好转等科学问题. 研究区年均降水量为 30 mm, 对监测结果影响甚微, 因此在监测结果分析过程中不考虑气候参数.

3.4 荒漠河岸林植被群落变化指标选择

植被群落是在一定生境下由不同植物构成的一

个总体,其变化特征是描述群落结构和功能复杂性的重要指标,对于揭示环境变化等方面起着重要作用。在干旱区,水分条件是决定群落结构的重要指标,本文结合塔里木河植被特征选取以下 3 个生物多样性指数来反映其变化情况。即: Simpson 指数是反映群落优势度较好的一个指标^[12,13]; Shannon-Wiener 指数反映群落中生物种类及群落的复杂程度,其值越大,群落所含的信息量越大^[14]; Margalef 指数反映一个群落中各物种个体分布的均匀程度^[15, 16]。

4 结果与分析

4.1 生态输水过程及输水方式

4.1.1 生态输水过程及特点

下游生态输水可分为两个阶段(表 1). 第一阶段 2000~2004 年为应急输水, 主要利用开都河水量连续偏丰、博斯腾湖水位持续上升的时机, 采取应急措施

表 1 塔里木河下游大西海子断面历次生态输水统计(水量单位: 万 m³)

输水 次数	输水方式	输水时间	大西海子以下输水总量(万 m ³)			到达地点
			开都-孔雀河	塔里木河	合计	
1	单通道输水	2000 年 5~7 月	9923		9923	喀尔达依
2	单通道输水	2000 年 11 月~2001 年 2 月	22655		22655	阿拉干
3	双通道输水	2001 年 4~11 月	34733	3490	38223	台特马湖
4	双通道输水、汉河输水	2002 年 6~11 月	24500	8629	33129	台特马湖
5	双通道输水、面状型输水	2003 年 3~11 月	24000	38509	62509	两次到达台特马湖
6	单通道输水	2004 年 4~6 月	7350	2857	10207	台特马湖
7	双通道输水	2005 年 4~11 月	5246	23026	28272	台特马湖
8	单通道输水	2006 年 9~11 月	2700	16944	19644	库尔干
9	单通道输水	2007 年 9~10 月	1410		1410	喀尔达依
10	单通道输水	2009 年 11~12 月	1066		1066	喀尔达依
11	双通道输水	2010 年 6~11 月		36393	36393	台特马湖
12	双通道输水、汉河输水	2011 年 1~11 月		85211	85211	两次到达台特马湖
13	双通道输水、汉河输水	2012 年 4~5 月		66716	66716	台特马湖
14	双通道输水、枝河输水	2013 年 4~11 月		48769	48769	台特马湖
合计			133583	330544	464127	

通过孔雀河向塔里木河下游实施生态抢救性输水, 4 次输水至台特马湖, 加上车尔臣河洪水汇入, 形成了约 100 km² 的湖面, 结束了下游河道断流 30 多年的历史. 第二阶段为常态化输水, 2005 年后, 开都河开始进入平、枯水年, 博斯腾湖水位逐年下降, 已无充裕水量输送往塔里木河下游, 而上游阿克苏河、叶尔羌河、和田河 3 条源流总来水进入丰水期, 加之塔里木河流域近期综合治理工程建设的开展和工程效益的逐步发挥, 塔里木河到达下游的水量增多, 逐步替代了博斯腾湖的应急输水, 使下游生态输水成为“常态化”.

下游生态输水主要呈现 3 个特征.

(1) 依靠双水源输水. 其中, 开都-孔雀河输水 13.36 亿 m³, 占总输水量的 28.8%; 塔里木河干流来水 33.05 亿 m³, 占总输水量的 71.2%.

(2) 地表来水不稳定, 间歇性输水特征明显. 由于是在人为干预的情况下, 向断流 30 多年的河道恢复输水, 各种变化因素多, 且水源遥远、流程漫长, 输水过程中时常出现径流不稳定、间歇性演进的输水状况.

(3) 利用大西海子水库储水, 集中调控下游河道输水. 通过大西海子水库集中蓄存开都-孔雀河和塔里木河来水, 人工调控向下游输水的时间、水量、流量及输水方式, 提高输水的生态效益, 实现水流到达尾间台特马湖的目标.

4.1.2 生态输水方式

塔里木河下游生态输水有以下 4 种方式(图 2).

(1) 单通道输水. 指利用其文阔尔河或老塔里木河其中的一条通道, 输水至台特马湖的输水方式. 主要用于在下游来水量较少的情形下, 集中一条通道输水, 通常采用从其文阔尔河输水至台特马湖.

(2) 双通道输水. 指通过其文阔尔河和老塔里木河输水至台特马湖的输水方式. 这种方式是先从其文阔尔河或老塔里木河输水, 水头到达台特马湖后, 再从另一条河流开始输水. 在下游来水量较丰, 大西海子水库蓄存水量较多的情况下, 多次采用这种输水方式.

(3) 汉河输水. 指在主河道输水过程中, 利用其文阔尔河和老塔里木河两侧自然分布的汉河, 灌溉河流沿岸较远处天然植被, 扩大天然植被受水范围.

(4) 面状输水. 指在河道上堵坝或修建节制闸, 营造河水漫溢条件, 扩大河道沿线受水范围. 如在第 5 次输水时, 阿拉干以下河段采用了这种输水方式.

4.1.3 河段水量消耗

根据监测数据和水平衡分析, 计算出下游河道各区间的消耗量(表 2).

14 次输水大西海子以下累计下泄水量 46.41 亿 m³. 其中, 大西海子-英苏段耗水量 10.06 亿 m³, 占总水量的 21.7%; 英苏-阿拉干段(包括老塔里木河)、

图 2 塔里木河下游生态输水方式示意图

(a) 单通道输水; (b) 双通道输水; (c) 汉河输水; (d) 面状输水

阿拉干-依干不及麻段、依干不及麻-台特马湖河段耗水量分别占总耗水量的 49.3%、13.9%和 10.4%; 台特

马湖耗水量(入湖水量)占总耗水量的 4.7%. 从河道水量的消耗分析, 显然, 大西海子-阿拉干河段耗水

表 2 塔里木河下游各河段水量消耗情况(水量单位: 万 m³)^{a)}

输水次数	大西海子 下泄水量	大西海子-英苏 耗水量	英苏-阿拉干 耗水量	阿拉干-依干不及麻 耗水量	依干不及麻-台特马 湖耗水量	入台特马湖 水量
第 1 次	9923	8416	1507			
第 2 次	22655	13019	9044	592		
第 3 次	38223	13696	15106	5229	3444	748
第 4 次	33129	7753	14983	5620	3356	1417
第 5 次	62509	5944	36800	11224	5564	2977
第 6 次	10207	1633	5765	1754	1055	
第 7 次	28272	7259	14528	2916	3072	497
第 8 次	19644	10415	7603	1289	337	
第 9 次	1410	634	776			
第 10 次	1066	638	428			
第 11 次	36393	13866	14754	5228	1527	1018
第 12 次	85211	296	51951	13399	11739	7826
第 13 次	66716	9251	35756	9927	11782	
第 14 次	48769	7808	19977	7320	6344	7320
河道长度(km)		120	229	96	40	
单位河长耗水量(万 m ³ /km)		839	999	672	1205	
合计	464127	100628	228978	64498	48220	21803

a) 大西海子-英苏段和英苏-阿拉干段河道长度与河道耗水量均包括其文阔尔河和老塔里木河。依干不及麻-台特马湖段耗水量未包括入台特马湖水量

量达到总耗水量的 71.0%，是耗水量最大的河段。从单位河长耗水量来看，大西海子-阿拉干河段单位河长耗水相对来说也较大。

4.1.4 河道水量平衡

许多学者围绕生态输水过程的水量平衡，开展了不同阶段的分析研究^[17-19]。本文是在以往研究成果的基础上，对 14 次生态输水的总体河道水量平衡进行了分析，见表 3。

根据表 3 的计算结果可以看出，塔里木河下游 14 次生态输水总量 46.41 亿 m³，其中补给河道沿岸包气带水量、地下水补给量、河道水面蒸发量、入台特马湖水量分别占总下泄水量的 46.9%，46.2%，2.2%和 4.7%。其中 93.1% 的水量用于补给河道沿岸包气带和地下水，这对沿河天然植被的长期恢复和更新极为有利。

4.1.5 地下水位和水质的变化分析

随着生态水的不断下泄，沿河一定范围的地下水位随之发生了明显变化(图 3)。以离河岸 100~150 m 处地下水位变化为例，下游英苏、喀尔达依、阿拉干 3 个典型断面，生态输水前平均地下水埋深为

11 m，前 5 次大剂量连续生态输水后，地下水响应十分显著，2003 年地下水位迅速达到峰值。2004~2009 年虽然保持每年输水，但输水量明显减少，下游各断面的地下水埋深均呈现缓慢降低趋势。2010 年大强度输水后，地下水位又迅速抬升。截止到 2013 年各断面平均地下水埋深为 4.47 m，地下水位抬升幅度达 59.58%。

伴随着地下水位的抬升，地下水水质也出现了明显变化。图 4 是英苏、阿拉干、喀尔达依 3 个断面输水后水质的变化趋势图。如阿拉干断面输水前，由于长期断流，表层土壤在潜水蒸发作用下不断积盐，地下水处于浓缩状态，矿化度初始值较高。输水后，表层的积盐溶解于水并随之渗入地下，潜水的矿化度会随之上升，曲线出现一个峰值。输水量与地下水矿化度密切相关，2005~2008 年输水减少后，地下水矿化度有明显的上升趋势。经过多次输水后，地下水的盐分随着地下水的运移逐渐排向下游及河道两侧，因而矿化度的变幅逐渐减小，这在其他断面也表现出同样的变化特点。

截止到 2013 年，各断面近河道区域地下水矿化度由输水初期的 4~5 g/L 降至 1~2 g/L，地下水化学类型由 Cl⁻·SO₄²⁻-Na⁺(Na⁺·Mg²⁺)型四元水逐渐演化为

表3 塔里木河下游生态输水水量平衡表(水量单位: 万 m³)

输水次数	下泄水量	补给量		转化量		河道水面蒸发	百分比 (%)	入湖水量	百分比 (%)
		包气带补给量	百分比 (%)	地下水补给量	百分比 (%)				
第1次	9923	5216	52.6	4581	46.2	126	1.3		
第2次	22655	10245	45.2	12374	54.6	36	0.2		
第3次	38223	9143	19.4	27418	75.6	914	1.2	748	3.8
第4次	33129	8724	26.3	22291	67.3	697	2.1	1417	4.3
第5次	62509	25461	40.7	32090	51.3	1981	3.2	2977	4.8
第6次	10207	1863	18.3	7837	76.8	507	5.0		
第7次	28272	10389	36.7	16472	58.3	914	3.2	497	1.8
第8次	19644	8161	41.5	11260	57.3	223	1.1		
第9次	1410	354	25.1	1036	73.5	20	1.4		
第10次	1066	354	33.2	698	65.5	14	1.3		
第11次	36293	17054	46.9	17041	46.8	1280	3.5	1018	2.8
第12次	85211	59461	44.0	16772	45.6	1152	0.8	7826	9.6
第13次	66716	45850	68.7	18912	28.3	1954	2.9		
第14次	48769	15506	31.8	25505	52.3	438	0.9	7320	15.0
合计	464127	217781	46.9	214287	46.2	10256	2.2	21803	4.7

图3 老英苏断面不同离河距离地下水动态特征

图4 塔里木河下游各监测断面地下水矿化度变化趋势图

Cl⁻-Na⁺型二元水, 地下水水质明显改善, 淡化带的影响范围约 1 km^[11].

4.2 塔里木河下游输水后生态监测评估

4.2.1 水域和植被面积变化

输水后生态的整体变化, 可以从水域面积和植被面积的变化得到反映. 尾间湖水域面积的增加不仅表明流域水文过程完整性的恢复, 也反映植被生

存环境的好转. 如图 5 所示, 尾间台特马湖水域从一片流沙覆盖的不毛之地到碧波荡漾的广阔水域.

生态输水前, 台特马湖依靠车尔臣河季节洪水维持少量水面(图 6). 生态输水后, 为了加快生态修复, 扩大天然植被的受水范围, 采取了单河道、双河道、汊河输水、面状输水等 4 种形式, 意在控制入湖水量, 减少水面无效蒸发损失. 即便是这样, 仍有大量水流入台特马湖, 致使水域面积陡增. 2005~2008 年输水减少后, 水不能到达台特马湖, 2008 和 2009 年湖水面积急剧缩减.

伴随地下水位的抬升, 水域面积的增加, 土壤水分条件的好转, 植被面积也不断扩大. 如图 7 所示, 根据遥感调查统计, 2013 年比输水前植被面积增加了 56.1%, 表明下游生态退化的趋势已得到遏止, 生态环境恢复的景象已在一定区域内显现.

2010 和 2011 年源流来水量大, 塔里木河全线贯通, 湖水面积最高达到 200 km². 根据樊自立等人^[20]的研究成果, 台特马湖对下游具有重要的生态经济功能, 维持一定湖面面积和满足湖泊需水量可以保证其发挥正常的生态功能和实现区域的生态恢复. 同时, 这也说明塔里木河下游的生态恢复主要依赖于源流来水.

4.2.2 荒漠河岸林植被群落变化

生态输水后 Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数和 Margalef 指数分别比输水前增加了 83.52%,

图 5 生态输水前(a)、中(b)、后(c)台特马湖入湖口地表景观变化

图 6 台特马湖 1999~2013 年湖泊水域面积变化图

图 7 生态输水前后塔里木河下游植被面积变化对比图

图 8 喀尔达依断面生态输水前后物种多样性指数对比图

87.50%和 140.89%(图 8), 表明塔河下游植被群落生物多样性得到明显恢复. 生态输水使得浅层地下水位逐渐升高, 一年生草本等大量浅根系植物幼苗萌发, 地表植被的物种数目和丰富度均明显增加. 这点也可从长期野外监测得到验证, 随着输水的实施, 沿河许多草本植被得以重新萌发, 像甘草、骆驼刺、白刺、罗布麻、芦苇、猪毛菜、沙枣等物种重新大片地出现, 而一些耐旱的乔灌木也重新复苏, 下游植物种类由输水前的 9 科 13 属 17 种, 增加到输水后的 15

科 36 属 46 种.

除了植被群落生物多样性, 群落的年龄结构也是评判生态系统恢复、种群动态变化的一个重要指标^[21]. 本文参照一些学者的研究方法^[22,23], 以胡杨为例, 对荒漠河岸林群落年龄结构进行划分. 经调查显示: 下游输水前基本是过熟林, 由此导致种群更新和繁衍功能的丧失, 而输水后随着水分条件好转, 胡杨林种群结构出现明显变化, 下游昆阿斯特和依干不及麻断面均以幼龄胡杨(胸径<4 cm)占据最大比例,

分别为 84.9% 和 81.1%(图 9), 说明生态输水所引起的水分变化带来了胡杨幼苗的大量萌发, 使得胡杨林种群更新能力有所恢复。

总体而言, 生态输水后塔河下游植被种类增加, 物种多样性指数升高, 胡杨幼龄比例增加, 群落的年龄结构趋于正常, 反映了该区域植被群落功能的修复, 胡杨种群更新能力得以恢复, 生态环境趋于良性发展。

4.2.3 输水后主要建群植物的变化

胡杨是荒漠河岸林植被群落中最重要的建群种和表征种, 是构成内陆河河岸林生态系统结构的主体^[24, 25]。因此, 胡杨生态指标的变化是评估生态输水效果的又一个重要指针。经长期野外监测, 本文选取阿拉干断面胡杨冠幅和径向生长量变化特征来反映输水前后胡杨长势的变化。

由图 10 可知, 阿拉干断面输水前下游胡杨基本呈现枯梢、枯枝现象, 生态输水后随水分条件改善, 冠幅大幅度增加, 如离河 200 m 处 2013 年的胡杨冠幅较 2000 年增加了 146.38%, 5 个离河距离下的 2013 年平均胡杨冠幅较 2000 年的增加幅度为 148.97%。由此说明, 生态输水促进了胡杨冠幅的增加, 胡杨生

图 10 生态输水前后阿拉干断面不同离河距离的胡杨冠幅变化

长逐渐趋于正常。

高分辨率的树木年轮资料对分析过去水文环境变化具有不可替代的作用^[26, 27]；在干旱区塔里木河流域, 沙漠边缘的胡杨树木年轮中贮存大量的环境变化信息^[7], 胡杨径向生长量的增加不仅表明胡杨长势好转, 也反映其周边生态环境的好转。对比分析输水前后下游胡杨径向生长量的变化, 是衡量下游环境是否好转和胡杨长势变化的重要指标, 通过分析发现 2000 年输水后 14 年期间胡杨径向生长明显高于输水前 14 年(图 11)。由于 2005~2008 年输水减少, 2009 和 2010 年径向生长量很小, 表明输水后胡杨生长仍受到一定胁迫, 植物群落稳定性较差, 生态环境依然脆弱。

4.3 下游生态修复与生态调度研究

生态输水试验和生态监测是制定科学的生态调度方案的前提。基于以上研究, 本文针对实现塔里木河下游的生态修复提出适宜的生态调度方案。

4.3.1 生态保护目标

根据下游植被及地下水埋深的分布特点, 结合

图 9 生态输水后不同退化样地的胡杨年龄分布比例图

图 11 阿拉干断面胡杨径向生长量变化图

生态输水方式确定了生态保护目标.

(1) 以保护近河天然植被为基本目标. 在沿河两岸各 1 km 宽、面积为 1062 km² 范围内的天然植被, 实现平均地下水埋深 0~6 m, 平均埋深达到多数植被适宜的水位 4 m, 并结合汊河和微地形, 逐步扩大天然植被的生态保护范围.

(2) 以保护其文阔尔河与老塔里木河之间的天然植被为主攻目标. 两河间面积 328 km², 距离 9.3 km, 通过面状输水, 促进两河间的地下水埋深抬升至 6~8 m, 保证胡杨生长在地下水胁迫水位以上, 使两河间地下水位整体得到抬升, 胡杨群落在 2~3 年输水间隔仍能维系其基本生存需要.

(3) 以维系台特马湖一定水面, 保障河湖的连通性及生态系统的完整性和稳定性.

4.3.2 生态调度措施

(1) 大西海子水库生态调度

大西海子水库作为汇集两路水源(开都-孔雀河和塔里木河)、集中向下游河道输水的调蓄水库, 自博斯腾湖至水库输水线路全长 570 km, 塔里木河干流从肖夹克来水全长 1001 km, 由于输水距离遥远, 来水过程不集中, 表现为来水时间不同步, 来水频率差异大, 因此应由大西海子水库来集中调度, 该库经改造后的总库容 0.98 亿 m³, 通过它可实现以生态保护为目标的水库生态调度.

(2) 实现保护目标的生态需水量

根据 3 个生态保护目标, 实现基本目标的生态需水量约为 2.04 亿 m³, 达到主攻目标的生态需水量约为 1.39 亿 m³[9]; 维系台特马湖一定水面的生态需水量约为 0.3 亿 m³, 其中塔里木河和车尔臣河各承担一半[9,26]. 因此, 保护塔里木河下游生态, 塔里木河所需供水量为 3.58 亿 m³, 包含了入台特马湖的水量. 该水量与樊自立等人[28]研究成果基本一致, 也与塔里木河流域近期综合治理规划报告确定的大西海子断面规划下泄水量目标基本吻合[27].

(3) 生态调度流量和调度时段

生态调度流量和生态调度时段是在生态调度实际操作过程中需要着重考虑的两大要素. 生态调度流量指在满足生态保护目标和生态需水量的条件下, 河道内允许流量的阈值. 根据 2003 年下游河道实测纵横断面, 运用较为广泛的 Manning 公式[29], 计算得到, 塔里木河下游其文阔尔河流量最大为 40 m³/s,

老塔里木河流量最大为 40 m³/s; 结合历年生态输水流量, 从大西海子水库下泄至台特马湖不小于 15 m³/s. 据此确定, 塔里木河下游生态调度流量为 15~40 m³/s.

塔里木河是一条以冰雪融水和降水混合型补给为主的河流, 其中冰川融水补给占径流组成的 48.2%, 因此各源流来水主要集中于每年 7~9 月, 且不尽同步. 而通过研究发现, 主要建群植物胡杨和柽柳集中于每年 8~9 月落种[30]. 从生态恢复的角度看, 下游生态输水时段应与天然植物落种更新时间形成一种生态契合[31], 因此每年 8~9 月下泄生态水是较为适宜的. 同时, 一般情况下多数草本植物种子萌发的时间在开春阶段, 考虑每年 4~5 月输送一部分生态水, 在这个时期, 水面蒸发不大, 下泄的地表水也可更多地补给地下水, 利于天然植被生长.

综合分析保护生态需水量、生态调度流量和调度时段, 根据塔里木河流域近期综合治理规划报告、历年实际输水水量以及河道过水能力, 将塔里木河下游生态调度分为两个时段: 第一时段, 每年 4~5 月, 河道流量为 15 m³/s, 生态输水总量 0.8 亿 m³; 第二时段, 每年 8~10 月, 河道流量为 30 m³/s, 生态输水总量 2.7 亿 m³.

(4) 多方式结合的生态调度措施

结合生态水量调度时段选择, 通过多方式结合的生态调度形式, 逐步形成稳定的、布局合理的林灌草植被生态系统.

生态输水第一时段每年 4~5 月, 采用单通道输水, 交替经过其文阔尔河或老塔里木河输水, 使水到达台特马湖, 维持河道地下水位, 促进植被成长.

生态输水第二时段每年 8~10 月, 结合胡杨种子萌蘖期, 采用双通道输水、枝杈型输水、面状输水方式, 其作用是扩大天然植被受水面积, 抬升地下水位, 保持尾间台特马湖适宜湖面.

间歇性机动供水是对局部适宜区域, 分年度分时段实施间隔机动供水, 形成一定范围的由多年生草本和一年生草本混搭的草地景观. 该措施虽然不能增加稳定性的植被面积, 但是可以恢复草甸植被的多样性, 增加抗风蚀强度, 可以起到防止土地沙化的作用.

4.3.3 地下水位调控

在干旱地区, 天然植被生长和繁育更新所需的

生态水量主要依靠地表水转换成地下水的形式补给. 研究表明: 地下水埋深在 $<4\text{ m}$ 和 $4\sim6\text{ m}$ 时植被恢复等级分别为优和良, 在 $6\sim8\text{ m}$ 时植被有恢复响应, 但在 $>8\text{ m}$ 时植被恢复响应微弱^[32]. 鉴于塔里木河水资源的紧缺现状, 大部分地区宜以“维持生机”作为适宜度控制标准. 因此, 采取单通道或双通道输水, 使离河 100 m 范围地下水埋深宜控制在 $2\sim4\text{ m}$; 采取汉河输水和面状输水等措施相结合, 使离河 $100\sim500\text{ m}$ 范围地下水埋深宜控制在 $4\sim6\text{ m}$, 离河 $500\sim1000\text{ m}$ 范围地下水平均埋深控制在 6 m 以内; 两河间大部分地区地下水埋深恢复到 $6\sim8\text{ m}$.

4.3.4 下游生态监测

生态变化是一个长期而缓慢的过程, 生态环境对输水工程的响应还需要长期监测, 监测主要包括: ① 地表水、地下水和土壤水监测, 选取塔里木河下游大西海子水库、英苏、阿拉干、喀尔达依和依干不及麻断面设水文站、地下水和土壤水监测断面. 在来水时期对地表水的流速、流量、悬移质输沙率、水温、水化学等进行监测. 在垂直河道方向, 距河道不同距离处依次布设地下水监测井, 对静水位埋藏深度、高程、水温、PH、电导率等指标进行逐日全年监测. 在地下水监测井附近, 同时监测土壤水含量; ② 植被变化监测, 植被监测应做到空中与地面相结合; 植被空中监测主要利用影像提取植被面积变化信息; 地面监测, 主要选取下游代表断面, 依据离河距离和监测井位置, 布设 $50\text{ m}\times50\text{ m}$ 的永久性样方, 每年在植物生长期对样地内乔灌木的数目、盖度、郁闭度、胸径、冠幅、树高、枝下高、基部萌生枝、树龄以及林下植被等可视指标进行监测; ③ 生物多样性调查, 在下游每年开展一次详细的地表植物监测, 主要监测地表植物的种类、数量和群落类型, 通过计算群落的重要值和多样性指数掌握群落种类和类型的变化(图 12).

5 结论

通过对 14 年来生态输水的特点及输水后的变化, 本文得到以下结论.

(1) 塔里木河下游河道总输水量的消耗中, 河道内水面蒸发与入湖水量分别占 4.4% , 补给地下水占 57.7% , 土壤与植被消耗占 37.9% .

图 12 生态监测布设示意图

(2) 生态输水后, 塔里木河下游生态环境出现明显变化, 如地下水位上升、地下水水质明显好转; 植被面积扩大, 群落物种种类增加, 多样性提高; 主要建群种胡杨长势好转, 径向生长量增加, 这表明塔里木河下游生态环境状况趋于好转.

(3) 生态输水工程基本遏止了塔河下游生态系统不断退化趋势, 但是区域生态系统的脆弱性还没有得到根本改变. 例如 2008 和 2009 年逢枯水年时, 台特马湖水面减少, 胡杨径向生长量缩小, 说明输水后的塔里木河流域生态环境状况依旧脆弱.

(4) 目前输水方式还处于探索阶段, 前期主要以单通道、双通道输水为主, 现已向支汉型和面状型输水方式转变. 而为了更好地实现生态输水工程, 首先需要保证大西海子向下游下泄 3.5 亿 m^3 生态水; 为保证台特马湖 $30\sim50\text{ km}^2$ 湖面面积, 需保证 $3\sim4.5\text{ 亿 m}^3$ 生态水, 水量应由塔里木河和车尔臣各承担一半; 为了使输水效益达到最大化, 输水最好于每年 $8\sim10$ 月、 $4\sim5$ 月进行; 对于林灌草植被生态系统的恢复进行多种方式结合的调水方式, 对于草甸植被恢复采用间歇机动调水方式.

(5) 生态变化是一个长期而缓慢的过程, 生态治

理的工程也不可能在短时期完成, 生态环境对输水工程的响应还需要长期监测. 以后生态监测还需要从地表水、地下水、植被响应、生物多样性等方面进行.

参考文献

- 1 Chen Y N, Zhang X L, Zhang Y M, et al. Analysis on the ecological benefits of the stream water conveyance to the dried-up river of the lower reaches of the Tarim River. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2004, 47: 1053–1064
- 2 Xu H L, Ye M, Song Y D, et al. The natural vegetation responses to the groundwater change resulting from ecological water conveyances to the lower Tarim River. *Environ Monit Assess*, 2007, 131: 37–48
- 3 杨鹏年, 邓铭江, 李霞, 等. 塔里木河下游间歇输水地下水响应宽度——以塔里木河下游英苏断面为例. *干旱区研究*, 2008, 25: 331–335
- 4 张丽华, 陈亚宁, 李卫红. 塔里木河下游生态输水对植物群落数量特征的影响. *干旱区研究*, 2006, 23: 32–38
- 5 杨戈, 郭永平. 塔里木河下游末端实施生态输水后植被变化与展望. *中国沙漠*, 2004, 24: 167–172
- 6 袁素芬, 陈亚宁, 李卫红, 等. 新疆塔里木河下游灌丛生物量及其空间分布. *生态学报*, 2006, 26: 1818–1824
- 7 邓晓雅. 塔里木河生态输水与胡杨林生态恢复关系研究. 博士学位论文. 北京: 北京师范大学, 2013. 13–24
- 8 贾艳红, 赵传燕, 南忠仁. 西北干旱区黑河下游植被覆盖变化研究综述. *地理科学进展*, 2007, 26: 64–74
- 9 严登华, 王浩, 秦大勇, 等. 黑河流域下游水分驱动下的生态演化. *中国环境科学*, 2005, 25: 37–41
- 10 季凤玲, 高海明. 对黑河下游额济纳绿洲抢救与生态保护的思考. *内蒙古水利*, 2001, 86: 34–35
- 11 邓铭江. 塔里木河下游环境监测与生态修复研究. *水利规划与设计*, 2005, 55: 31–35
- 12 马克平, 黄建辉, 于顺利. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究. *生态学报*, 1995, 15: 268–277
- 13 Kint V, Van Meirvenne M, Nachtergale L, et al. Spatial methods for quantifying forest stand structure development: A comparison between nearest-neighbor indices and variogram analysis. *Forest Sci*, 2003, 49: 36–49
- 14 Amaral L P, Ferreira R A, Lisboa G S, et al. Spatial variability of the Shannon-Wiener Diversity Index in a mixed ombrophilous forest. *Sci Forest*, 2013, 41: 83–93
- 15 Moer M. Characterizing spatial patterns of trees using stem-mapped data. *Forest Sci*, 1993, 39: 756–775
- 16 Iglesias-Rios R, Mazzoni R. Measuring diversity: Looking for processes that generate diversity. *Nat Conser*, 2014, 12: 156–161
- 17 杨鹏年, 董新光. 塔里木河下游第五次应急输水后地下水恢复量的计算. *自然资源学报*, 2005, 20: 1–6
- 18 艾尔肯·艾白不拉, 杨鹏年, 吴文强, 等. 塔里木河下游生态输水量转化分析. *水资源工程学报*, 2013, 24: 54–59
- 19 加帕尔古丽, 陈曦, 包安明. 干旱区荒漠稀疏植被覆盖度提取及尺度扩展效应. *应用生态学报*, 2009, 20: 2925–2934
- 20 樊自立, 徐海量, 傅蓁仪, 等. 台特玛湖湿地保护研究. *第四纪研究*, 2013, 3: 594–602
- 21 Silvertown J W. Measuring plant distribution in limestone pavement. *Field Stud*, 1982, 5: 651–662
- 22 周斌, 杨红梅, 胡顺军, 等. 河水漫溢对塔里木河下游土壤及植被的影响. *干旱区地理*, 2010, 33: 442–448
- 23 Wan H M, Li X, Dong D R, et al. Correlation analysis and characteristics of measuring factors for *Populus euphratica* after drought stress water delivery. *Int J Auto Comput*, 2012, 34: 34–38
- 24 赵峰侠, 尹林克. 荒漠内陆河岸胡杨和多枝桧柳幼苗种群空间分布格局及种间关联性. *生态学杂志*, 2007, 26: 972–977
- 25 李吉玫, 徐海量, 张青青, 等. 塔里木河下游荒漠河岸林不同退化区胡杨种群结构和空间分布格局研究. *生物土壤与生态*, 2009, 29: 897–904
- 26 喻树龙, 袁玉江, 金海龙, 等. 用树木年轮重建天山北坡中西部 7–8 月 379 a 的降水量. *冰川冻土*, 2005, 27: 404–410
- 27 刘普幸, 勾晓华, 张齐兵, 等. 国际树轮水文学研究进展. *冰川冻土*, 2004, 26: 720–728
- 28 樊自立, 徐海量, 傅蓁仪, 等. 台特玛湖湿地保护研究. *第四纪研究*, 2013, 33: 594–602
- 29 张海燕. 河流演变工程学. 北京: 科学出版社, 1990. 30–31
- 30 徐海量, 叶茂, 李吉玫, 等. 塔里木河下游土壤种子库的季节差异分析. *水土保持通报*, 2008, 28: 17–22
- 31 叶茂, 徐海量, 任铭. 塔里木河下游生态输水的合理时间初探. *干旱区研究*, 2012, 29: 907–912
- 32 杨鹏年, 张胜江, 董新光. 塔里木河干流下游生态输水后水量转化特征. *干旱区研究*, 2007, 2: 174–178

Research on the ecological operation in the lower reaches of Tarim River based on water conveyance

DENG MingJiang¹, ZHOU HaiYing², XU HaiLiang³, LING HongBo³ & ZHANG Pei³

¹ Xinjiang Association for Science and Technology, Urumqi 830054, China;

² Xinjiang Tarim River Basin Management Bureau, Korla 841000, China;

³ Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

This paper analyzed the ecological water conveyance characteristics, process and model, assessed the environment changes after ecological water conveyance, and preliminary discussed the strategy and model of ecological water operation, based on the methods of data collection, field investigation and lab analysis in downstream area of Tarim River Basin. The conclusions stated as follows: the water conveyance model changed from single and double-channel patterns in prophase to branches and faceted patterns in anaphase; from the point of channel dissipation, the rate of recharging groundwater, soil and vegetation consumption, water surface evaporation and flowing into lake were 59.6%, 35.6%, 2.4% and 2.4% separately; with the ecological water conveyance carrying out, the environment condition turned around, such as groundwater table rose, the groundwater quality got better, vegetation area expanded, community species increased and the growth status of *Populus euphratica* turned around, all which indicated that the ecological degradation trend in lower reaches of the Tarim River was contained, but the vulnerability was still on; in order to show the effects of ecological water conveyance, the reasonable ecological water operation plan was the annual discharge volume from Daxihaizi Reservoir should be 350 Mm³, where no less than 15 Mm³ was used to protect the Taitema Lake, and the period water discharge was from September to November, with multi-ways and flexibility; ecological environment change was a long and slow process, and its response to the water conveyance project also need long-term monitoring from the point of surface water, groundwater, vegetation response, biodiversity, etc.

the lower reaches of the Tarim River, ecological operation, water conveyance, vegetation recovery

doi: 10.1360/N092015-00263