

doi:10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0177

Deng Xiaoya, Yang Zhifeng, Long Aihua. Ecological operation in the Tarim River basin based on rational allocation of water resources[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(6): 1600—1609. [邓晓雅, 杨志峰, 龙爱华. 基于流域水资源合理配置的塔里木河流域生态调度研究[J]. 冰川冻土, 2013, 35(6): 1600—1609.]

基于流域水资源合理配置的塔里木河流域生态调度研究

邓晓雅¹, 杨志峰¹, 龙爱华^{2*}

(1. 北京师范大学 环境学院 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘 要: 塔里木河流域近期综合治理已近尾声, 众多山区水库及水电开发建设将大规模展开, 开展流域生态调度对巩固综合治理已取得的成效, 强化水资源统一管理, 构建和谐流域具有重要的现实意义。基于流域已确定实施的水资源分配方案和近 10 a 来的生态输水实践, 分析了生态调度与水资源合理配置的关系以及流域生态调度关键问题、主要技术路线和基本框架结构, 计算了流域生态调度关键控制断面阿拉尔断面生态流量, 探索了源流区、干流中上游、干流下游生态调度的目标和措施, 提出了源流“集中同步组合”、干流“分段耗水控制”、干流下游“地下水位调控”的生态调度方案, 以为流域水资源统一管理、控制性水利工程运行管理和流域生态环境保护提供参考依据。

关键词: 塔里木河流域; 生态调度; 水资源配置; 生态流量

中图分类号: P343.9/TV213.4 **文献标识码:** A

0 引言

塔里木河流域位于新疆南部(简称南疆), 是环塔里木盆地的阿克苏河、渭干河、喀什噶尔河、叶尔羌河、和田河、开都河-孔雀河等九大水系 144 条河流的总称, 流域总面积 $102.7 \times 10^4 \text{ km}^2$, 多年平均径流量约 $410 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。流域分为源流区和干流区, 源流叶尔羌河和阿克苏河在肖夹克汇合后始称塔里木河, 塔河干流自身不产流, 从肖夹克至台特玛湖河道全长 1 321 km。其中, 上游河段肖夹克至英巴扎, 长 495 km; 中游河段英巴扎至恰拉, 长 398 km; 下游河段恰拉至台特玛湖, 长 428 km。受人类活动与气候变化的影响, 许多源流早已中断了向干流的水量补给, 九大向心聚流水系中, 只有阿克苏河、和田河、叶尔羌河和开都河-孔雀河四条源流与干流有地表水利联系, 呈现“四源一干”的局面(图 1)。其多年平均径流量为 $270.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[1], 人口 615.5×10^4 人, 灌溉面积 $170.8 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。流

域各主要河流来水主要集中在每年的 6—9 月, 天然径流过程基本符合灌溉农业和天然生态需水过程要求。但 20 世纪 50 年代以来, 流域进入大规模的农业垦殖时期, 引水量迅速增加, 上中游河段耗水量不断增加, 下游来水剧减, 尤其是随着下游大西海子拦河水库的建成蓄水, 从 20 世纪 70 年代初开始, 下游 300 余 km 的河道断流近 30 a^[2]。强烈的人类活动打破了流域原本就十分脆弱的自然生态系统的平衡, 过度无序的水土开发、严重恶化的生态环境和由此引发的各种社会矛盾, 引起了国内外的广泛关注。

1 研究背景与研究进展

1.1 塔里木河流域水资源及其开发利用

塔里木河流域水资源的形成以冰雪融水补给为主, 并有降雨径流加入, 各河流均以河流出口为界, 出口以上为径流形成区, 径流量沿程递增; 河流出口以后, 沿程渗漏、蒸发, 用于灌溉、流入

收稿日期: 2013-02-18; 修订日期: 2013-07-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(50939001; 51079160)资助

作者简介: 邓晓雅(1986—), 女, 湖南耒阳人, 2008 年毕业于西安理工大学, 现为在读博士研究生, 主要从事水资源与生态环境保护方面的研究。E-mail: lily80876@163.com

* 通讯作者: 龙爱华, E-mail: ahlng@iwahr.com

湖泊或盆地，径流量沿程递减，最后消失于湖泊、灌区或沙漠中。流域多年平均（1957—2010 年系列）水资源总量为 $430.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，其中，地表水资源量为 $409.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，地下水与地表水不重复量为 $20.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。截至 2010 年，全流域已修建各类水库 116 座，总库容 $57.67 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，其中“四源一干”已建水库 66 座，总库容 $43.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，平原水库居多；总用水量 $302.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，总灌溉面积 $258.0 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，其中，流域“四源一干”地区灌溉面积 $170.8 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，用水量 $193.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，人均灌溉面积约 0.28 hm^2 。自 20 世纪 80 年代末尤其进入 21 世纪以来，塔里木河流域各源流普遍进入丰水期^[3]，阿克苏河、和田河和叶尔羌河近 10 a 平均来水量比多年平均来水量增加了 $27.45 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，对塔里木河下游生态输水影响较大的开都河近 10 a 的水量也比多年平均高出 $0.74 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，但源流区灌溉面积却增加了一倍多，年用水量平均约增加 $50 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，因此补给干流的总水量并未有明显变化。这表明，在不改变现有的水土资源扩张开发模式下，源流来水增加对塔里木河干流来水增加的影响并不大。以 2008 年为例，四源流出山口径流比多年平均增加约 11.5%，但实际完成的输水量不足规定输水量的 60%^[4-5]。

在干流河段，对阿拉尔、新渠满、英巴扎、乌斯满和恰拉等典型水文断面 1957—2010 年年径流量统计资料分析表明，近 50 a 来塔里木河干流年际间耗水量也呈波动变化，阿拉尔—新渠满、新渠满

—英巴扎、英巴扎—乌斯满 3 个水文断面耗水量均呈上升趋势，然而乌斯满—恰拉、恰拉以下 2 个水文断面耗水量呈下降趋势。其中，上游段是干流主要的农业开发区，伴随着农业生产规模的持续扩大，上游上段耗水量以每年 $0.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 速率增加，上游下段以每年 $0.067 \times 10^8 \text{ m}^3$ 速率增加；中游段是主要的牧业区和天然胡杨林区，是耗水量最大的河段，由于上游段来水的减少，其耗水量是以每年 $0.073 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的速率减少。干流上游段耗水量已增至干流总耗水量的 40%，加剧了中下游可用水量的减少；中游区耗水量占干流的 46.89%，是干流最大的耗水量区段。流入下游的水量不断减少，考虑了生态输水后的年平均消耗水为 $5.94 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，占干流耗水量的 13.11%，这也正是塔河下游出现严重生态退化、近期综合治理工程即将完成之际流域生态修复效果并不明显的一个重要原因。

1.2 塔里木河流域生态调度问题的提出

塔里木河流域近期综合治理工程于 2001 年开始实施，总投资 107×10^8 元，截至 2012 年底已实际完成投资 99×10^8 元。迄今近期综合治理工程已近尾声，“工程措施”已基本建成，“非工程措施”却远未发挥预期效能，源流和干流地区“边治理边开荒，边节水边增加耗水”的现象还较为严重。近 10 a 在各源流天然来水普遍偏丰的情况下，干流来水持续减少的势头仍未得到有效遏制。与此同时，根据四源流已编制完成的流域规划，在山区河段拟建设“14 库 64 级”水库-电站梯级^①，届时四源流山区水

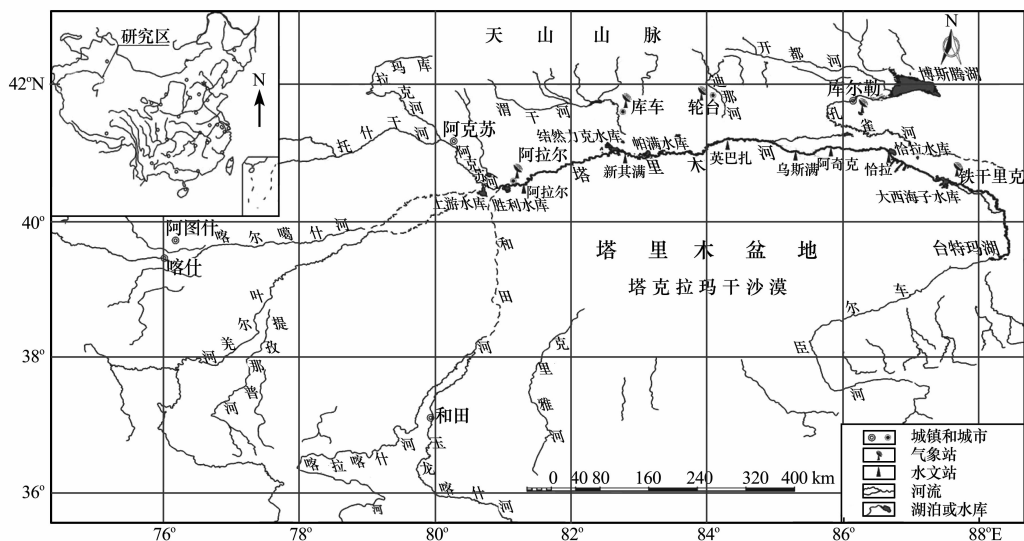


图 1 塔里木河流域水系分布示意图

Fig. 1 A sketch map of the Tarim River basin

① 新疆人民政府已以新政函(2003)203号文件，批准实施《塔河流域“四源一干”地表水水量分配方案》。

库总库容将达到 $113.3 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占四源流多年平均总径流的 45.9%。众多山区水库的建成对各源流水资源的控制及其对河流生态系统产生的胁迫是客观存在、不容回避的事实, 如果不改变“发展就是开荒”的惯性思维, 届时“生态需水”径流过程以及干流生态保护所需的“生态洪水”将面临严重威胁。因此, 发电与农业灌溉、生态环境用水过程的矛盾, 人工绿洲与天然绿洲的竞争性用水矛盾, 是流域可持续发展面临的突出问题。在既要巩固综合治理已取得的成效, 而山区水库电站加快建设趋势又不可避免的形势下, 基于流域已批复实施的地表水水量分配方案, 开展流域生态调度研究, 加快制定流域生态调度实施方案, 对巩固成效, 科学调度, 强化管理, 维护塔河健康生命, 迎接流域新一轮大开发(山区水库建设、水电资源开发)具有非常重要的现实意义。

1.3 生态调度研究进展

生态调度旨在抢救或恢复已受损的河流生态系统, 促进河流生态系统自我修复能力提高而实施的各项河流和水工程调度措施的统称^[6], 其实质就是将生态因素纳入到现行水库调度和区域水资源配置方案中进行多目标综合调度。其通常做法是充分考虑水库调节性能和河道输送特性, 利用水库库容适时蓄存或泄放径流以调整天然水沙过程, 改善库区和下游的河流水环境条件, 保障河流生态系统水需求, 实现防洪、发电、供水、灌溉、航运等社会经济多种目标^[7-8]。

生态调度在许多国家已成为一种主要的河流生态修复措施, 其中尤以美国、澳大利亚、日本、德国等西方发达国家的生态调度理论和实践水平最高。总的做法是: 在保证防洪安全和不显著改变发电、灌溉等效益的条件下, 调节下泄流量的时间序列, 尽可能恢复下游水流的自然节律过程, 并通过人造洪峰等恢复自然水位涨落特征, 调节水质、水温和泥沙冲淤, 进行流域自然生态环境修复^[7,9-10]。国外对生态调度的研究主要集中在河道生态需水理论及计算方法、水利水电工程调度方式优化、水库水沙调节、生态洪水、水质保护、水库及下游河道生物栖息地改善、生态调度方案评价、生态调度立法等方面^[11-13], 许多国家已将保护河流生态环境内容列入相关法律法规, 明确河流生态保护目标和生态管理程序^[14]。目前, 生态调度的实践与研究已从前期的水库生态调度拓展到流域生态调度的新阶段, 并逐步融入到流域综合管理范畴, 以满足流域

水资源优化调度和河流生态健康为目标的流域生态调度日益成为社会共识^[6]。例如澳大利亚在建有 90 多座大型水库、拥有 8 个国际重要湿地的墨累-达令流域, 将河流、生态系统和流域健康作为战略目标于 2002 年启动了墨累河生命行动计划^[10]。

在我国, 对生态调度的研究最早是 20 世纪 80 年代方子云等^[15]提出了水库生态调度的雏形, 进入 21 世纪才逐渐引起学者的注意, 并在引进国外思想、方法和技术的范畴内, 先后对生态调度概念与内涵、河流生态环境需水计算方法、水沙调度、水库优化运行、生态调度方案等方面进行着研究和实践^[16-17]。但绝大部分研究仅限于单条河流或部分重要水库, 以流域生态系统健康的生态调度尚未正式提出。随着对生态调度概念认知的逐步加深以及日益增多的实践, 国内学者进一步提出了河流健康的概念, 认为河流健康一般是指在满足基本水量前提下, 具有稳定的河道、适度的洪水、良好的水质、健康的流域生态系统、流畅的水沙过程和持续的造物能力, 一定时期内其自然功能与社会功能均衡并能够和谐发展^[18-20]。比较水库生态调度和河流健康的内涵可以发现, 二者相互包容, 目标基本一致, “生态调度-河流健康”可成为一个完整的理念。因此, 流域生态调度是水库调度发展的新阶段, 是以满足流域水资源优化配置和河流生态健康为目标的调度。修复流域生态环境促成了水库调度作用的生态化, 使水库调度作用拓展到河流生态环境恢复的层面。本文泛指生态调度, 是包含水库生态调度和河流健康以及相关扩展研究内容的广域概念。

2 流域生态调度关键问题及主要技术路线

2.1 流域生态调度与水资源合理配置关系

生态调度源于水库调度, 是考虑生态因子的水库优化调度, 目前已成为既满足人类社会水资源配置又确保维护河流健康生命的主要措施之一。事实上, 针对干旱地区由于缺水而导致的一系列生态环境问题, 20 世纪 90 年代后期一些学者就从区域或流域生态系统的角度提出水资源合理配置除了考虑水资源的供需平衡外, 还要考虑与水有关的生态平衡关系, 即面向生态的水资源合理配置^[21-22]。因此, 一定程度上生态调度是面向生态的水资源合理配置的主要非工程措施, 流域生态调度也为新时期的水资源合理配置提供了新范式, 即: 在水资源开发利用规划阶段就将生态调度理念与设计纳入配置

表 1 塔里木河流域“四源一干”不同来水频率水量分配方案^①

Table 1 Water resources allocation schemes under different hydrological frequencies in the Tarim River basin

来水 频率 /%	阿克苏河			和田河			叶尔羌河			孔雀河补 干流/ 10^8m^3	干流水量 / 10^8m^3
	来水 / 10^8m^3	源流区耗水 量/ 10^8m^3	入干流水 量/ 10^8m^3	来水 / 10^8m^3	源流区耗水 量/ 10^8m^3	入干流水 量/ 10^8m^3	来水 / 10^8m^3	源流区耗水 量/ 10^8m^3	入干流水 量/ 10^8m^3		
25	88.49	46.46	42.03	50.00	24.42	15.51	84.19	73.14	5.58	4.5	67.62
50	80.60	46.40	34.20	42.70	24.16	9.29	72.79	64.54	3.30	4.5	51.29
75	72.51	46.10	26.41	36.10	20.83	6.39	65.06	62.43	0	4.5	37.30
90	66.78	41.56	25.22	31.00	20.68	2.02	58.47	58.47	0	4.5	31.74

注：1. 源流分配水量中不包括绿洲内经济和生态用水以及其下游河道内生态耗水；2. 资料统计系列为 1956—2005 年。

方案。

从这个意义上，当前的生态调度主要是针对已对或可能对河流生态系统健康生命产生不利影响的已建(在建)水库，采用优化水库运行方式进行“亡羊补牢”式的“补偿”修复，这将不得不调整现有的水资源利用格局，甚至牵涉到较大的利益冲突，难以达到生态修复目标。因此，在水资源合理配置中统一规划水库建设，并根据河流健康生命的要求，在规划阶段对各配置节点的“协同行为”设计统筹方案，工程建成后对各河流与水利工程进行统一、优化调度，方可取得事半功倍的生态修复效果，本文将将其称为：基于流域水资源合理配置的生态调度。

2.2 基于水资源合理配置的流域生态调度关键问题分析

2.2.1 流域水资源配置方案

依据新疆人民政府、水利部共同编制，2001 年国务院批准实施的《塔河流域近期综合治理规划》(以下简称《综合治理》)^②和新疆人民政府批准实施的《塔河流域“四源一干”地表水水量分配方案》(以下简称《分配方案》)^①，表 1 列出了源流与干流以及干流上、中、下游地表水配置方案。

按照“丰增枯减”和生态供水保证率 $P=50\%$ 的原则，确定阿拉尔断面地表来水量应从综合治理前的 $36.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ (其中，阿克苏河 $28.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、和田河 $8.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、叶尔羌河 0.0 m^3)，增加到 $46.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ (阿克苏河 $34.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、和田河 $9.29 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、叶尔羌河 $3.3 \times 10^8 \text{ m}^3$)，再加上开都河-孔雀河流域注入下游水量从 $2.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增加到 $4.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，塔里木河干流总水量应该达到 $51.29 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

2.2.2 流域生态调度关键问题分析

(1) 河道内生态流量。确定河流生态流量是保护河流生态系统功能的有效措施，也是改善河流生态环境的最根本措施。国内外关于河道内生态需水量的计算方法较多，例如，水文指数法、水力学法、栖息地法、整体分析法、变动范围法等^[23]。选择合适的方法确定不同河段的河道内生态流量，是实施流域生态调度的基础。

(2) 用(耗)水总量控制。近 30 a 来，随着人类活动范围与强度的不断加大，流域资源开发利用量和经济社会耗水量持续增加，对生态用水的挤占日益加剧。尤其值得注意的是，近几年来迅速增长的地下水开采和灌溉面积的持续扩大，开都河自 2012 年开始断流，新的生态隐患已初现端倪。因此，保障流域生态环境必要的用水需求，关键在于控制流域社会经济水资源开发利用总量。科学确定流域社会经济耗水总量是成功实施流域生态调度的前提。

(3) 生态调度的分级目标与关键控制节点。塔里木河流域面积广阔，源流至干流尾间全长达 2 486 km，在“14 库 64 级”梯级开发过程中，水库统一调度的复杂度将逐步增加，因此如何分解各河段(各源流、干流上中下游)的生态调度目标，如何选择各河段之间的关键控制节点，是开展流域生态调度的关键问题之一。

(4) 流域生态调度的巨系统分解与协调。塔里木河从源头到尾间流经高原山区、山前平原和沙漠区等地貌单元，各河流径流年内分配极不均匀，河流沿线各种水利工程和利益相关者较多，因此是一个高度复杂的巨系统。对这样一个复杂巨系统开展生态调度，需合理地对其进行分解降维，为确保流

① 新疆人民政府已以新政函(2003)203 号文件，批准实施《塔河流域“四源一干”地表水水量分配方案》。

② 新疆人民政府、水利部共同编制，2001 年国务院批准实施的《塔河流域近期综合治理规划》。

域生态调度过程中各关键节点的生态流量, 亟待科学统筹各源流水资源开发利用控制目标与水库调度方案。

2.2.3 基于水资源配置方案的流域生态调度技术路线图

综合分析流域水系组成及其径流特性、人工绿洲与天然绿洲分布格局以及生态环境的地域特征, 流域生态调度应通过“初始水权管理、源流总量控制→入干流水量控制、确保生态流量过程→工程与非工程手段、控制干流分段耗水→水库生态调度、河道生态输水与调控地下水水位”等 4 个过程的技术路线联动, 实现流域生态调度目标(图 2)。

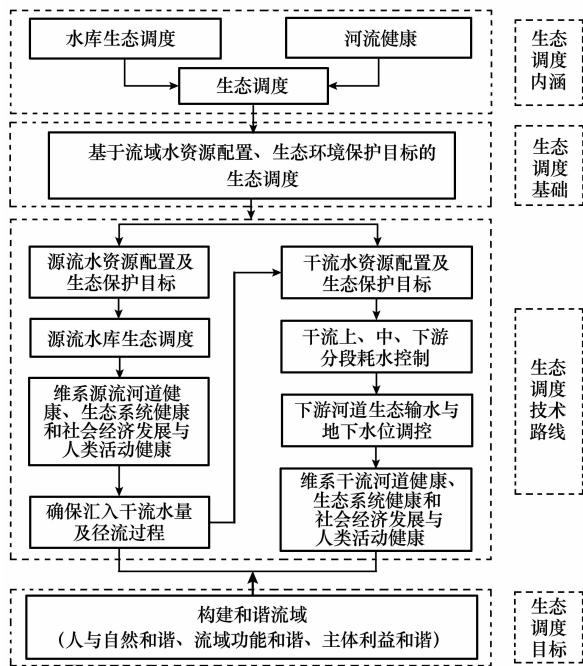


图 2 塔河流域生态调度技术路线图

Fig. 2 Framework of ecological operation of the Tarim River basin

(1) 基于流域水资源配置方案, 以初始水权管理为核心, 实现源流“总量控制”生态调度目标。《分配方案》按照“留足城镇生活用水, 保证工业用水, 减少农业用水, 确保生态用水”的原则, 明确了源流与干流、地方与兵团、干流上、中、下游地表水分配的初始水权。因此, 生态调度必须以水权为中心, 以限额水量来合理配置各业用水, 实现源流与干流的总量调度目标, 确保各源流下泄到干流的水量。

(2) 基于“总量控制”调度目标, 量化、细化各源流及控制性工程生态调度方案, 实现干流“生态需水”和“生态洪水”调度目标。除保证各源流下游

河道内生态径流要求外, 上游三源流汇入干流阿拉尔断面的径流过程应基本保持河道天然径流过程, 每年以 6—9 月集中输水为主。塔里木河干流天然河道长达 1 321 km, “细水”无法“长流”, 实施“生态洪水”集中下泄可有效提高输水效率。这样可以尽可能地大面积淹灌天然植被和补给地下水, 这是塔里木河干流生态需水的特点和基本要求。

(3) 根据干流来水情况与水量配置方案, 控制干流上、中、下游河道分段耗水, 确保各河段生态调度计划。塔里木河是一条游荡性河流, 河道上、中游沿河两岸人工开挖的汉河和引水口众多, 消耗了近 90% 的水量。因此, 必须通过工程和非工程措施, 控制河势变化, 从根本上改变上、中游耗水量大、到达下游水量少的局面, 实现上、中、下游耗水控制目标, 维系塔里木河干流整体生态健康。

(4) 根据塔河干流和开-孔河到达下游的水量情况, 充分发挥大西海子水库的生态调度作用, 实现下游河道生态输水和地下水水位调控目标。无论是从塔里木河干流输水, 还是从博斯腾湖调水, 到达下游台特玛湖都有上千公里的输水距离。因此, 必须发挥大西海子水库生态调度作用, 汇集两路水源, 集中向下游河道输水, 合理确定输水线路及流量, 尽快恢复生态修复区地下水水位, 拯救濒于毁灭的绿色走廊。

3 流域生态调度方案基本框架结构

3.1 阿拉尔断面生态流量

河流自然动态变化特征是维护河流生态系统完整性的决定因素, 因此保障河流的自然水流情势是恢复河流生态完整性理论上的根本手段。但由于人类社会的发展深刻地改变了河流生态系统的结构, 完全恢复河流自然水流情势已经不可能, 因此只能在充分了解河流水流情势与河流生态响应关系的基础上, 权衡经济社会可承受力, 尽可能地保留对河流生态影响重大的流量组分, 以最大限度地塑造近自然的水流情势, 尽可能地恢复河流的生态完整性, 这也是生态调度的现实准则^[24]。

阿拉尔水文站是塔里木河最为重要的标志性断面, 其生态流量控制应以满足生态需水为主。本文认为, 阿拉尔断面合适的生态流量过程应是“水流接近天然流态”时的流量过程。鉴于流域经济社会耗水不断增加的事实, 需分析上游三源流区间耗水量从缓慢增加到迅速转变为显著增加的转折点, 该转折点之前的多年平均径流过程可视为“水流接近

表 2 塔里木河阿拉尔断面(6—9月)生态流量计算

Table 2 Calculated environmental flows at the Alar Station of Tarim River basin from June to September

年水量 / 10^8 m^3	生态流量	汛期水量/ 10^8 m^3					占年水量 /%	全 年 / 10^8 m^3
		6 月	7 月	8 月	9 月	合计		
61.32	最小生态需水量	2.73	11.34	20.26	2.79	37.12	77.13	48.13
	适宜生态需水量	3.78	14.89	21.14	5.62	45.43	74.15	61.26
46.79	最小生态需水量	0.25	4.56	16.04	3.15	24.00	74.63	32.16
	适宜生态需水量	1.17	8.76	19.90	5.31	35.14	73.85	47.55
32.80	最小生态需水量	1.46	4.08	9.40	2.39	17.33	70.91	24.45
	适宜生态需水量	1.92	6.20	11.09	3.26	22.47	69.92	32.13
27.24	最小生态需水量	0.20	4.08	6.54	2.10	12.92	75.35	17.16
	适宜生态需水量	1.34	5.65	9.88	2.35	19.22	71.75	26.79

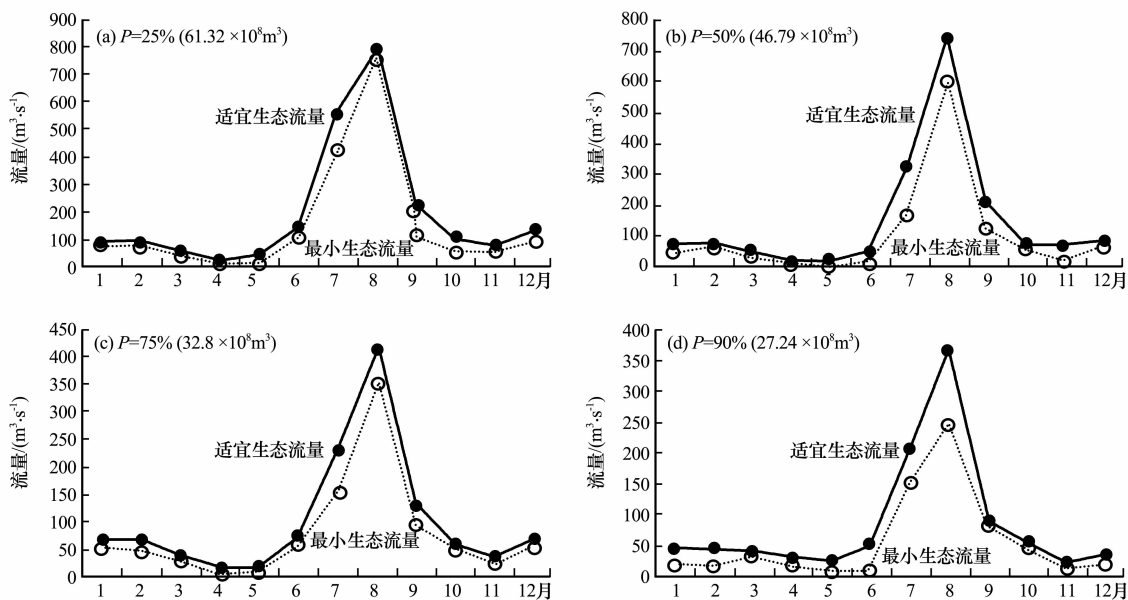


图 3 塔里木河阿拉尔断面生态流量过程线

Fig. 3 Monthly variations of the ecological flows at Alar Station in the Tarim River basin

天然流态’的合适程度”生态流量过程。根据塔里木河上游三源流区间耗水量长系列计算结果，并采用 Mann-Kendall 方法进行跃值突变检验，结果表明：1957—2010 年上游三源流区间耗水量总体呈现增加趋势，但 1989 年是一个明显的转折点，源流区耗水量从缓慢增加迅速转变为显著增加^[23,25]。由此，在受人类干扰较少的 1957—1989 年水文系列中，选择与总水量基本一致的典型年族，分析计算 6—9 月生态流量，采用实测逐旬最小和平均流量作为最小生态流量和适宜生态流量(表 2 和图 3)。图 3 中的外包线(实线)与内包线(虚线)实际构成阿拉尔断面生态流量的“值域”。

3.2 源流区生态调度

塔里木河上游三条源流中，和田河年径流量变

幅较大， C_v 值为 0.24，阿克苏河和叶尔羌河年径流的年际变化不太大，三源流合成后的径流系列 C_v 值为 0.13，表明上游三源流年径流变化存在互补性。1956—2010 年，上游三源流总的天然来水量总体呈增加态势，但受上游源流区灌溉耗水不断增长的影响，阿拉尔站实测年径流呈持续减少趋势，且年际变化较为剧烈， C_v 值为 0.27(图 4)。研究表明^[25-27]：阿克苏河、叶尔羌河、和田河流域耗水量基本上逐年增加，其中 2000—2010 年间平均耗水量比 1980—1989 年间分别约增加了 $22.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。源流区地处“边、少、穷”的南疆三地州，经济社会发展相对滞后，综合治理开展以来，尽管在节水方面做了较大努力，但灌溉面积扩大、用水量增加的趋势并没有得到遏制。各源流区用水

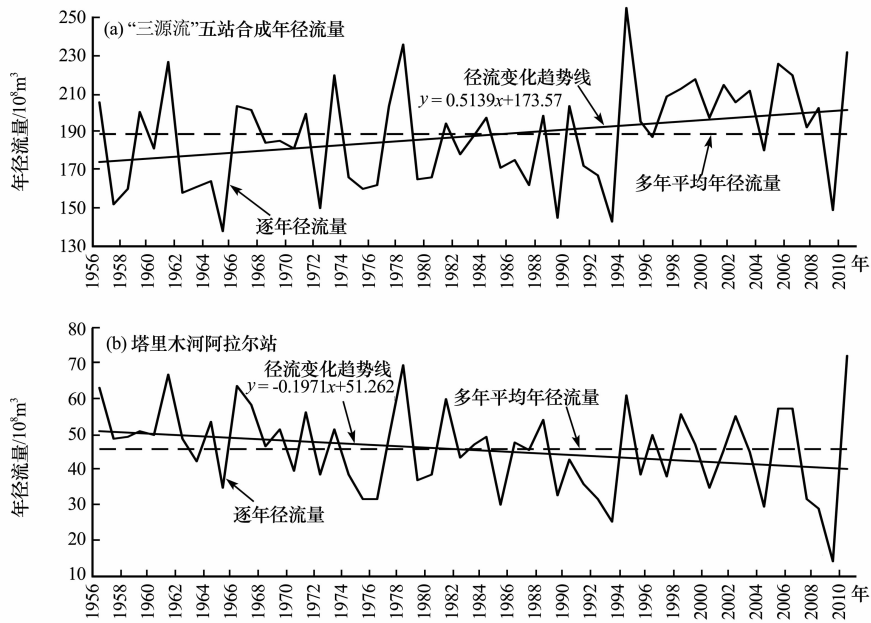


图4 上游“三源流”合成及阿拉尔站径流变化对比

Fig. 4 Variations of the runoff at Alar Station and the superposed runoff of the three upper streams

总量已大大超过《分配方案》所规定的限额^[1],即使在 2000—2010 年三源流普遍处于丰水期、源流区地下水开采量大幅度增加的情形下,三源流汇入干流的水量仍未达到 50% 频率下 $46.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的综合治理目标。

由此可见,流域生态调度的关键是:控制源流区耗水量,确保下泄至阿拉尔断面的流量。为此,要严格控制各源流灌溉用水总量,不但要禁止开荒,甚至还要压缩现有灌区规模。

除满足下泄干流的水量要求,上游三条源流的五大支流还承担本流域经济社会发展和自身生态环境保护的艰巨任务。和田河、叶尔羌河出口距阿拉尔断面河道流程较长,河道蒸发渗漏损耗严重,要实现下泄目标需采用短时间大流量方式。阿克苏河流程相对较短,在 $P=25\%$ 、 $P=50\%$ 、 $P=75\%$ 和 $P=90\%$ 的水文年景,其下泄水量占阿拉尔断面总水量分别为 66.6%、73.1%、80.5% 和 92.6%。因此,要满足阿拉尔断面生态流量要求,需要重点做好阿克苏及其两条支流库拉克河和托什干河的生态调度,在每年 6—9 月开展集中调度,以阿克苏河生态流量调度为中心,协调和田河、叶尔羌河同步实施生态调度,以完成阿拉尔断面生态流量的空间组合调度,即:各源流“集中同步组合”的生态调度。

3.3 干流上中游区生态调度

塔里木河上游段河道比较顺直,河漫滩发育,

河势多变,汛期洪水漫溢。中游段河道弯曲,河势相对稳定,泥沙淤积,河床有所抬升,洪水漫溢严重,20 世纪曾经有过两次大的改道^[28]。20 世纪 70 年代以来,干流上、中游段耗水大幅度增加,导致下游水量急剧减少,特别是大西海子拦河水库建成后,下游河道开始断流。《综合治理》实施后,为有效控制河段耗水量,在干流上共修建了 609 km 输水堤,实行上、中、下游水资源合理配置。有部分学者认为:输水堤将河岸植被生态系统人为地割裂成两个单元,限制了洪水漫溢的范围,生态系统将因此而不断萎缩。本文认为,控制河段耗水,在急需整治的河段合理地布置一定规模的输水堤是必要的,对堤外部分地带性植被的影响可通过修建生态闸的办法得到解决。

塔里木河干流两岸不适宜发展大规模的灌溉农业,应以天然植被保护为主要目标,努力减少并约束人类活动的干扰影响,天然植被以自然繁衍、自然修复为主,倡导人与自然和谐的科学发展观。因此,首先要控制干流各段工农业耗水量,干流工农业总用水量控制在 $12 \times 10^8 \sim 13 \times 10^8 \text{ m}^3$ 左右,生态与社会经济用水应控制在 70:30。上、中、下游河道耗水比例基本控制在 40%:40%:20% 为宜;其次,要继续开展河道治理工程,在上游河段有针对性的修建输水堤,主要引水口修建控制闸,减少单位河长耗水量,对淤积河段实施必要的疏通清障工程;三是要充分发挥生态闸的调控作用,为堤外天

然植被生长适时提供地表水源, 并使其保持一定的地下水位, 发挥乌斯满、阿其克等已建控制性分水闸的作用, 合理调控河段水量分配。

3.4 干流下游区生态调度

3.4.1 生态调度目标

(1) 河道生态调度. 断流 30 多年的下游河道, 地下水位下降至 10~12 m, 使得依赖地下水为生、抗旱能力极强的胡杨和怪柳也难以生存, 大片胡杨林枯死, 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现合拢态势^[29]. 因此, 恢复下游河道生态输水, 尽可能多地恢复河道两岸的天然植被, 拯救濒于毁灭的绿色走廊以阻止两大沙漠合拢. 根据《分配方案》大西海子水库多年平均下泄生态水 $3.5 \times 10^8 \text{ m}^3$, 实行其文阔河和老塔里木河双河道输水, 进入台特玛湖水量控制在 $1\,000 \times 10^4 \sim 2\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$, 加上车尔臣河汛期的人湖水量使湖面维持在 200 km^2 左右。

(2) 地下水位调控目标. 在干旱地区, 对地表水无法到达的大部分区域, 地下水是维系地表植被生长繁殖的唯一水源. 相关研究表明: 地下水埋深 $< 4 \text{ m}$ 时植被恢复等级为优; 地下水埋深在 $4 \sim 6 \text{ m}$ 时植被恢复等级为良, 地下水埋深在 $6 \sim 8 \text{ m}$ 时植被有恢复响应, 地下水埋深 $> 8 \text{ m}$ 时植被恢复响应微弱^[30]. 鉴于塔里木河水资源的紧缺现状, 下游地区生态环境修复近河地带可以做到“枝繁叶茂”, 但大部分地区宜以“维持生机”作为控制标准. 因此, 离河 100 m 范围地下水埋深宜控制在 $2 \sim 4 \text{ m}$, 离河 100~500 m 范围地下水埋深宜控制在 $4 \sim 6 \text{ m}$, 离河 500~1 000 m 范围的地下水埋深宜控制在 $6 \sim 8 \text{ m}$.

3.4.2 生态调度措施

(1) 充分发挥大西海子水库的生态调度作用. 博斯腾湖至尾间台特玛湖全长 927 km, 输水距离遥远, 加上来水过程不集中, 输水效率有限. 大西海子水库泄洪闸到台特玛湖 357 km(图 4), 作为汇集两路水源、集中向下游河道输水的调蓄水库, 大西海子水库成为流域生态调度专用水库对下游生态修复的效果要更明显. 2000 年至 2010 年底, 自大西海子水库泄洪闸向下游断流河道共完成 11 次生态输水, 累计输水 $26.6 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中 6 次将水送入下游台特玛湖, 结束了下游河道断流近 30 a 的历史, 下游河道两侧各 1 km 范围内的地下水位呈明显上升趋势, 离河 300 m、地下水埋深 $< 4 \text{ m}$ 的区域荒漠植被种类明显增加, 胡杨、怪柳等乔灌木植被

重新恢复了开花结实的生殖能力, 植被生态系统重新趋于活跃^[29-30].

(2) 下游生态输水方案优化. 基于多年生态输水监测资料, 不少研究均认为: 大西海子水库以下采用其文阔河和老塔里木河双河道连续输水方案较为合理^[30-32]. 为了使 $3.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 水发挥最大的生态效益, 应将线状与面状输水结合起来, 尽可能多地扩大生态保护和修复的范围, 加大地下水和土壤水补给力度, 提高植被腾发的有效耗水量. 可根据地形和现有的老河床, 积极开展引灌、渗灌, 恢复并合理调控其文阔河和老塔里木河两河间地下水位, 使一部分区域地下水埋深恢复到 $4 \sim 6 \text{ m}$, 一部分区域地下水埋深恢复到 $6 \sim 8 \text{ m}$. 当大部分区域地下水位恢复到 $4 \sim 8 \text{ m}$ 后, 可采取分区轮灌的方式, 动态调控地下水位, 逐步形成稳定的、布局合理的林灌草植被生态系统。

4 结语

(1) 为了巩固《综合治理》已取得的成效, 基于已批复实施的《分配方案》, 积极开展生态调度研究与实践是十分必要的, 对于强化水量统一调度、实施最严格的水资源管理、避免大规模水库电站梯级开发对流域生态环境可能造成新的、更大的胁迫, 也是十分迫切的。

(2) 本文基于流域水资源合理配置方案, 提出了流域生态调度技术路线和源流“集中同步组合”、干流“分段耗水控制”和干流下游“地下水位调控”的生态调度调控对策. 但在实施的过程中, 还须站在流域全局的角度, 逐条源流加以细化, 增强其可操作性。

参考文献 (References):

- [1] Deng Mingjiang. Theory and Practice of Water Conservancy in Tarim River Basin, China[M]. Beijing: Science Press, 2009. [邓铭江. 中国塔里木河治水理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2009.]
- [2] Rao Ruifu. Change and regulation of the Tarim River[C]//Mao Dehua. Water Resources, Environment and Management of the Tarim River Basin. Beijing: China Environmental Science Press, 1998: 184-193. [饶瑞符. 塔里木河的变迁与整治[C]//毛德华. 塔里木河流域水资源、环境与管理. 北京: 中国环境科学出版社, 1998: 184-193.]
- [3] Wu Yongping, Wang Chenghai, Shen Yongping. Spatiotemporal evolution of precipitation over Tarim River basin during 1960-2009: Characteristics and reasons[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(6): 1268-1273. [吴永萍,

- 王澄海, 沈永平. 1960—2009年塔里木河流域降水时空演化特征及其原因分析[J]. 冰川冻土, 2011, **33**(6): 1268—1273.]
- [4] Wang Jin, Liu Xiang, Gong Weihua, *et al.* Streamflow variations and flow-break causes of four source rivers and mainstream of Tarim River, Xinjiang in 2008[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, **32**(3): 593—601. [王进, 刘湘, 龚伟华, 等. 2008年塔里木河流域“四源一干”径流运行与河道断流成因分析[J]. 冰川冻土, 2010, **32**(3): 593—601.]
- [5] Liu Xiang, Duan Jianjun, Lu Feng, *et al.* The counter measures coping with climate change and human activities in Tarim River basin[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, **32**(4): 740—748. [刘湘, 段建军, 陆峰, 等. 塔里木河流域适应气候变化和人类活动的应对措施[J]. 冰川冻土, 2010, **32**(4): 740—748.]
- [6] Tan Hongwu, Liao Wengen, Li Guoqiang, *et al.* Progress of ecological operation practice domestic & overseas and its development strategy in China [C]//Proceedings of Chinese Hydraulic Engineering Society in 2008: Vol. I, Haikou, Oct. 28—30, 2008: 338—343. [谭红武, 廖文根, 李国强, 等. 国内外生态调度实践现状及我国生态调度发展策略浅议[C]//中国水利学会2008学术年会论文集: 上册, 海口, 2008年10月28—30日: 338—343.]
- [7] Higgins J M, Brock W G. Overview of reservoir release improvement at 20 TVA dams[J]. Journal of Energy Engineering, 1999, **125**(1): 1—17.
- [8] Dong Zheren. Multi-objective ecological operation of reservoirs [J]. Technology of Water Conservancy and Hydropower, 2007, **38**(1): 28—32. [董哲仁. 水库多目标生态调度[J]. 水利水电技术, 2007, **38**(1): 28—32.]
- [9] Symphorian G R, Madamombe E, van der Zaag P. Dam operation for environmental water releases; the case of Osborne dam, Save catchment, Zimbabwe[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2003, **28**(20/27): 985—993.
- [10] Gippel C J, Jacobs T, McLeod T. Determining environmental flow needs and scenarios for the River Murray System, Australia[J]. Australian Journal of Water Resources, 2001, **5**(1): 61—74.
- [11] Junk W J. Amazonian floodplains: Their ecology, present and potential use[J]. Revue d'Hydrobiologie Tropicale, 1982, **15**(4): 285—301.
- [12] Petts G E. Water allocation to protect river ecosystems[J]. Regulated Rivers: Research & Management, 1996, **12**(4/5): 353—365.
- [13] Hughes D A, Hannart P. A desktop model used to provide an initial estimate of the ecological instream flow requirements of rivers in South Africa[J]. Journal of Hydrology, 2003, **270**(3/4): 167—181.
- [14] Yin Zhengjie, Huang Wei, Chen Jin. Discussion on the management system of ecological operation for cascade reservoirs in Yangtze River[J]. Yangtze River, 2008, **39**(20): 15—17.
- [尹正杰, 黄薇, 陈进. 长江流域梯级水库生态调度管理体制探讨[J]. 人民长江, 2008, **39**(20): 15—17.]
- [15] Fang Ziyun, Tan Peilun. Preliminary study on reservoirs operation for eco-environment improvement [J]. Yangtze River, 1984, **15**(6): 65—67. [方子云, 谭培伦. 为改善生态环境进行水库调度的初步研究[J]. 人民长江, 1984, **15**(6): 65—67.]
- [16] He Junshi, Han Yuzhou, Zhang Lei, *et al.* Research on ecological scheduling of reservoir in Puhe basin[J]. Water Resources and Power, 2010, **28**(9): 34—36. [何俊仕, 韩宇舟, 张磊, 等. 蒲河流域水库生态调度研究[J]. 水电能源科学, 2010, **28**(9): 34—36.]
- [17] Huang Yunyan. Studies on the Ecological Operation of Reservoir's Methods[D]. Master Thesis, Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008. [黄云燕. 水库生态调度方法研究[D]. 硕士学位论文, 武汉: 华中科技大学, 2008.]
- [18] Li Guoying, Han Qiwei, Wen Fubo, *et al.* Definition and connotation of river health[J]. Advance in Water Sciences, 2007, **18**(1): 140—150. [李国英, 韩其为, 文伏波, 等. 河流健康的定义与内涵[J]. 水科学进展, 2007, **18**(1): 140—150.]
- [19] Hu Chunhong, Chen Jianguo, Guo Qingchao, *et al.* Key technology and regulation measures on maintaining a healthy life of the Yellow River[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2005, **3**(2): 4—9. [胡春宏, 陈建国, 郭庆超, 等. 论维持黄河健康生命的关键技术与调控措施[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2005, **3**(2): 4—9.]
- [20] Liu Changming, Liu Xiaoyan. Healthy river: Essence and indicators[J]. Acta Geographica Sinica, 2008, **63**(7): 683—692. [刘昌明, 刘晓燕. 河流健康理论初探[J]. 地理学报, 2008, **63**(7): 683—692.]
- [21] Wang Hao, Chen Minjian, Qin Dayong. Research on the Rational Allocation and Carrying Capacity of Water Resources in Northwest China[M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2003. [王浩, 陈敏建, 秦大庸. 西北地区水资源合理配置和承载能力研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2003.]
- [22] Su Xiaoling, Kang Shaozhong. Research advances and key topics on optimal allocation of water resources based on ecosystem in the arid areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, **21**(1): 167—172. [粟晓玲, 康绍忠. 干旱区面向生态的水资源合理配置研究进展与关键问题[J]. 农业工程学报, 2005, **21**(1): 167—172.]
- [23] Yang Zhifeng, Liu Jingling, Sun Tao, *et al.* The Law of Ecological Water Requirement in a River Basin[M]. Beijing: Science Press, 2006. [杨志峰, 刘静玲, 孙涛, 等. 流域生态需水规律研究[M]. 北京: 科学出版社, 2006.]
- [24] Kang Ling, Huang Yunyan, Yang Zhengxiang, *et al.* Reservoir ecological operation model and its application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, **41**(2): 134—141. [康玲, 黄云燕, 杨正祥, 等. 水库生态调度模型及其应用[J]. 水利学报, 2010, **41**(2): 134—141.]
- [25] Liu Xinhua, Xu Hailiang, Ling Hongbo, *et al.* Research on

the high-low flow variation and the correlation between runoff and precipitation at the headwaters of the Aksu River[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, **35**(3): 741—750. [刘新华, 徐海量, 凌红波, 等. 阿克苏河源流区径流量与降水量丰枯变化和相关性研究[J]. 冰川冻土, 2013, **35**(3): 741—750.]

[26] Zhou Haiying, Zhang Xiaolei, Xu Hailiang, *et al.* Influences of climate change and human activities on Tarim River runoffs in China over the past half century[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, **67**(1): 231—241.

[27] Yang Pengnian, Zhang Shengjiang, Dong Xinguang. Characteristics of water transform in the downstream of the main-stream Tarim River after the ecological water delivery[J]. *Arid Region Research*, 2007, **24**(2): 174—178. [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[J]. 干旱区研究, 2007, **24**(2): 174—178.]

[28] Xia Dekang. Transition and water resources of Tarim River in Xinjiang, China[J]. *Resources and Environment of Arid Region*, 1998, **12**(2): 7—14. [夏德康. 新疆塔里木河变迁与水资源[J]. 干旱区资源与环境, 1998, **12**(2): 7—14.]

[29] Deng Xiaoya, Zhang Shengjiang. Ecology remediation and seven water conveyance in downstream of Tarim River[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2008, **27**(5): 83—86. [邓晓雅, 张胜江. 塔里木河下游输水与生态修复[J]. 灌溉排水学报, 2008, **27**(5): 83—86.]

[30] Liu Guilin, Alishir Kurban, Arkin Abaydulla, *et al.* Changes in landscape pattern in the lower reaches of Tarim River after an ecological water delivery[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, **34**(1): 161—168. [刘桂林, 艾里西尔·库尔班, 艾尔肯·艾白不拉, 等. 塔里木河下游生态输水后植被景观格局动态变化研究[J]. 冰川冻土, 2012, **34**(1): 161—168.]

[31] Yang Pengnian. Study on Groundwater Restoration and Vegetation Response of the Tarim Downstream Under Intermittent Water Delivery[D]. PhD Thesis, Ürümqi: Xinjiang Agricultural University, 2005. [杨鹏年. 塔里木河下游间歇输水条件下地下水恢复与植被响应研究[D]. 博士论文, 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2005.]

[32] Deng Zhengbo, Shu Longcang. Construction of digital groundwater depth model for lower Tarim River[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2005, **33**(1): 45—48. [邓正波, 束龙仓. 塔里木河下游数字地下水埋深模型的构建[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2005, **33**(1): 45—48.]

Ecological Operation in the Tarim River Basin Based on Rational Allocation of Water Resources

DENG Xiao-ya¹, YANG Zhi-feng¹, LONG Ai-hua²

(1. *State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*; 2. *China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China*)

Abstract: Based on the authorized projects of water resources allocation and the practices of the ecological water conveyance in the past 10 years, we discussed the relationship between ecological water conveyance and rational water resources allocation, and analyzed the key issues of ecological operation and the basic framework of ecological operation in the Tarim River basin. The environmental flows in Alar Station were calculated. We discussed the goals and measures of ecological operation in the

Tarim River basin and suggest some regulations of ecological operation, such as combination of synchronous with concentration in the headstream, water consumption control by subsections in the Tarim River and underground water level regulation in lower reaches of the Tarim River. The regulations are expected to be useful in the integrated water resources management, the operations of the hydraulic engineering and the protection of ecological environment in the Tarim River basin.

Key words: Tarim River basin; ecological operation; allocation of water resources; environmental flowlow