

文章编号:1672-3031(2020)05-0361-08

## 和田河干流河道径流损失与植被生态需水关系研究

龙爱华<sup>1</sup>, 张沛<sup>1</sup>, 李江<sup>2</sup>, 邓晓雅<sup>1</sup>, 王杰<sup>3</sup>, 徐海量<sup>4</sup>, 张继<sup>3</sup>, 张广朋<sup>4</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 新疆水利水电规划设计管理局, 新疆 乌鲁木齐 830000;

3. 石河子大学 水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832003;

4. 中国科学院 新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830001)

**摘要:** 和田河干流植被生态需水量是多少? 河道渗漏水量能否满足两岸植被的生态需水? 为了回答这两个事关和田河中下游河道整治必要性的基础问题, 本研究定量分离河道损耗水量, 探究河道渗漏水量与天然植被生态需水之间的定量响应关系, 结果表明: (1)多年平均来水条件下, 和田河干流河损量约为 $6.46 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 其中, 蒸发量与渗漏量分别为 $3.5 \times 10^8$ 和 $2.65 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 各占河损量的58.88%和41.12%; (2)和田河干流天然植被的生态需水量 $1.37 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 河道渗漏水量可以满足植被生态水量需求。因此, 本研究认为开展河道整治, 不仅不会影响干流植被生态需水, 还可以减少水面蒸发, 提高和田河输水能力, 更有利于开展生态水量调度, 保护和恢复干流天然植被。

**关键词:** 河道径流损失; 渗漏水量; 植被生态需水; 和田河

**中图分类号:** TV213

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13244/j.cnki.jiwhr.20200506

### 1 研究背景

河道径流损失量(简称河损)是径流行进过程中由于水面蒸发、河道渗漏和洪水漫溢等因素影响下两断面之间径流量的差值, 是河流水量的重要组成部分。在干旱区由于地势平坦, 河道上下游比降小, 河道较宽、水流较缓, 河损占比较湿润地区大。河道渗漏是干旱区径流性水资源补给地下水与土壤水的主要方式, 也是维持天然植被正常生长繁殖的重要生态水文过程<sup>[1-2]</sup>。因此, 定量分离河损的组成, 对研究干旱区植被的生态需水量具有重要意义。

和田河发源于昆仑山脉, 由玉龙喀什河和喀拉喀什河汇流而成, 是塔里木河的三源流之一, 年均约1/4的径流下泄注入塔里木河, 形成了塔里木河流域唯一贯通塔克拉玛干沙漠的绿色走廊。因此, 和田河既承担着向塔里木河输水的任务, 又承担着维系天然植被与生态走廊的重任, 其健康持续意义重大。玉龙喀什河与喀拉喀什河汇形成和田河干流, 自阔什拉什汇合口至肖塔断面约319 km, 为沙漠无人区。该河段河道宽阔平坦, 根据遥感测量河道宽度500~3500 m之间, 平均河宽约为1750 m。由于河段缺乏整治工程, 河道泥沙淤积严重, 河势多变, 过流能力不足, 同时加上两源流上控制性水利枢纽尚不完备, 防洪能力严重不足, 在降水与径流量均呈增加趋势时<sup>[3-4]</sup>, 洪灾发生频率较高<sup>[5]</sup>, 因此和田河中下游河道整治一度被列为塔里木河综合治理的重要工程任务。然而, 部分学者提出和田河流域尤其是干流地区分布着濒危的灰胡杨对区域环境改善和维持具有重要生态意义, 灰胡杨的生长主要依靠和田河渗漏补给的地下水, 一旦对和田河河道进行加固和整治, 河道渗漏量减少, 灰胡杨的生态需水的满足程度会受到严重影响, 并且认为近年来河道两岸植被的退化是因为植被生态需水量得不到有效保障而造成的。上述疑问实质是需科学合理地回答“和田河的河道渗漏水量是多少? 能否满足两岸植被生态需水?”这两个基本问题。为此, 本研究以和田河干流为研究靶

收稿日期: 2020-08-01; 网络首发时间: 2020-09-25

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5020.TV.20200923.1726.005.html>

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0404301, 2016YFA0601600); 新疆维吾尔自治区流域规划委员会重大咨询项目

(403-1005-YBN-FT61-2, 403-1005-YBN-FT61-7); 中国工程院咨询项目(2020-XY-41)

作者简介: 龙爱华(1976-), 博士, 教授级高级工程师, 主要从事水资源配置与流域水循环研究。E-mail: ahleng@iwhr.com

区, 分析河段来水量与河道损耗水量之间的关系, 定量分离河道损耗水量, 探究河道渗漏水量与天然植被生态需水之间的定量响应过程, 以为流域河道管理和最严格的水资源管理制度提供技术支撑, 为新一轮的塔里木河流域综合治理提供决策参考。

## 2 资料与方法

**2.1 研究区概况** 和田河是昆仑山北坡的第二大河流, 东邻克里雅河流域, 西与叶尔羌河流域接壤, 两河出山口多年平均(1962—2012)径流量约 44.08 亿  $m^3$ <sup>[6]</sup>。和田河流域属于典型的暖温带大陆性气候, 年降水量为 5.4~89.6 mm, 年蒸发潜力为 2159~3137 mm<sup>[7]</sup>。流域内有 5 个水文站, 分别为玉龙喀什河上的同古孜洛克(出山口)与艾格利牙、喀拉喀什河上的乌鲁瓦提(出山口)与吐直鲁克、以及和田河干流入塔里木河的肖塔。整个流域 95% 以上的人类活动和社会水资源消耗集中于玉龙喀什河和喀拉喀什河段, 和田河干流无种植用地分布及人类取水活动(图 1)。

**2.2 数据来源** 本研究使用的水文数据来源于塔里木河流域管理局与和田河流域管理局, 地面气象站观测数据(日值)来源于中国气象网(<http://www.cma.gov.cn/>), 遥感数据源于 Landsat 8 OLI\_TIRS 卫星, 下载于地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn/>), 空间分辨率 30 m。

### 2.3 研究方法

**2.3.1 遥感图像处理** 本研究选择 2015 年 8 月份 Landsat 8 OLI\_TIRS 卫星遥感数据, 根据研究区的范围, 利用 ENVI 5.3 遥感图像处理软件, 采用 5、7、1 波段对获得的遥感影像进行假彩色合成用于凸显植被和水体(植被表现为红色, 水体为蓝色或黑色, 沙漠为浅棕黄色, 盐碱地则呈现由青白到青灰色调等)。随后对图像进行波段融合、图像镶嵌、图像裁剪等处理, 再根据国家土地资源遥感宏观调查的分类体系, 并结合统计资料、地形图及 Google Earth 同期地面资料, 建立解译标志, 应用图像处理软件, 采用人机交互的监督分类方法进行解译, 按照国土资源部发布的《土地利用现状分类标准》(GB/T 21010-2017)最后生成土地覆被数据。

**2.3.2 河道水面蒸发计算** 河道水面蒸发是河道水量损耗的主要组成之一。和田河干流河道水面蒸发量采用面积定额法计算:

$$W_R = A_R \cdot E_\phi \cdot k \quad (1)$$

式中:  $W_R$  为水面蒸发量,  $10^8 m^3$ ;  $E_\phi$  为直径 20 cm 水面蒸发皿观测的水面蒸发量, mm, 取柯坪、阿拉尔国家气象站蒸发数据的平均值;  $k$  为水面折算系数, 借鉴塔里木河干流的相关研究成果, 取阿拉尔站与博斯腾湖的平均值 0.62;  $A_R$  为河段水面面积,  $m^2$ , 采用遥感解译的方法获得。

**2.3.3 植被生态需水计算** 潜水蒸发法适合于干旱区植被生存主要依赖于地下水的情况。和田河流域平原区降水稀少, 两岸多为中旱生的非地带性植被, 主要依靠地下潜水维持生命。因此, 本研究在干流植被景观类型遥感解译的基础上, 选择潜水蒸发法来估算天然植被需水量。潜水蒸发法即某一植被类型在某一潜水位面积乘以该潜水位下的潜水蒸发量。计算公式为<sup>[8]</sup>:

$$W = \sum_{i=1}^4 10^{-3} \cdot A_i \cdot W_{gi} \quad (2)$$

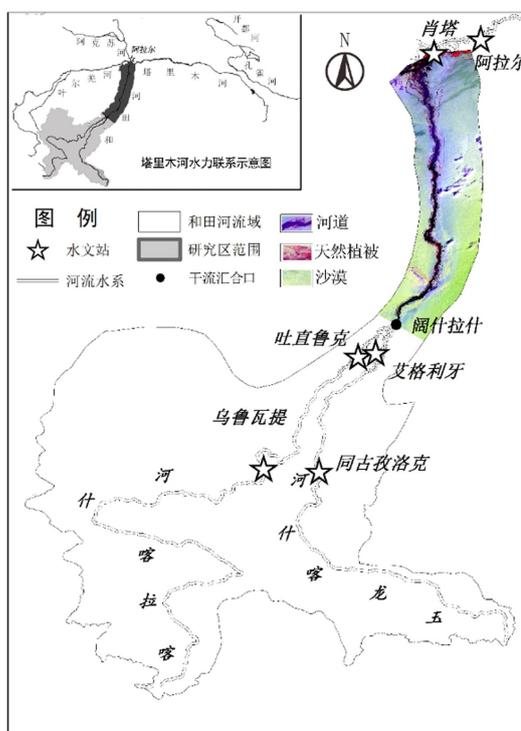


图 1 研究区概况及和田河干流假彩色遥感图

式中： $W$ 为植被需水量， $10^8 \text{ m}^3$ ； $A_i$ 为植被类型*i*的面积， $\text{hm}^2$ ； $W_{gi}$ 为植被类型*i*在某一地下水埋深时的潜水蒸发量， $\text{mm}$ 。

植被的面积( $A_i$ )通过遥感解译获得，以2015年8月份的植被分布为基准；潜水蒸发量( $W_{gi}$ )是潜水蒸发法计算植被生态需水量的关键，以阿维利扬诺夫公式计算较为常见，计算公式如下<sup>[9-10]</sup>：

$$W_{gi} = aE_{\phi} \left(1 - h_i/h_{\max}\right)^b \quad (3)$$

式中： $a$ 、 $b$ 为经验系数，其中 $a$ 为0.52， $b$ 为2.51<sup>[11]</sup>； $h_i$ 为植被类型*i*的地下水埋深， $\text{m}$ ； $h_{\max}$ 为潜水蒸发极限埋深， $\text{m}$ ； $E_{\phi}$ 为20 cm蒸发皿蒸发量， $\text{mm}$ 。

2.3.4 河损计算 本研究采用水量平衡方程计算河道损失水量。

$$W_L = W_U - W_D - W_P - W_O + W_I \quad (4)$$

式中： $W_L$ 为河道损失水量； $W_U$ 和 $W_D$ 分别为研究区河道上、下断面水量； $W_P$ 为河段降水量； $W_O$ 为区间河段人类活动引水量； $W_I$ 为河段回归水量。

### 3 结果与分析

3.1 河道水量耗散规律分析 基于水文站监测数据，绘制月尺度(2007—2016多年平均)和田河干流径流过程线，并分析干流年来水量与肖塔下泄水量的相关关系，结果如图2所示。其中，和田河干流来水量为艾格利牙与吐直鲁克水文站来水量之和。

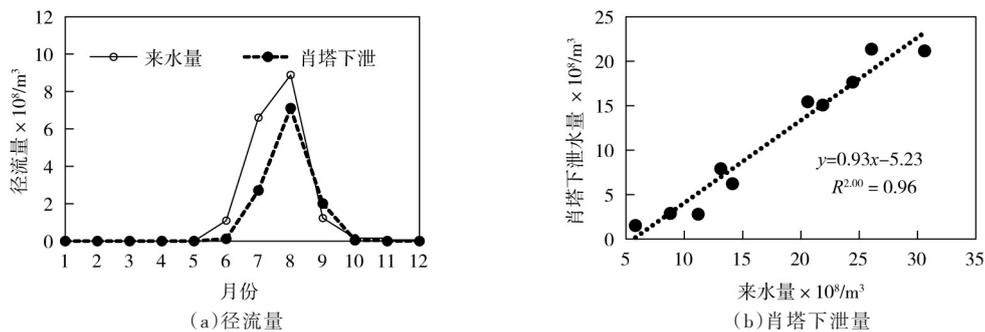


图2 和田河干流来水径流过程

由图2(a)可以看出，和田河干流来水量主要集中在7—10月份，而当年11月—翌年6月河道无水经过，河床裸露。除2016年以外，当干流来水量较大时(当月超过 $8 \times 10^8 \text{ m}^3$ )，肖塔下泄水量的峰值与上断面有显著响应关系。从年际尺度来看，和田河干流来水量与肖塔下泄水量呈显著正相关关系(图2(b))，根据线性拟合曲线的结果计算可知，当干流来水量小于 $5.23 \times 10^8 \text{ m}^3$ 时，肖塔断面将不会有水下泄到塔里木河。

以年为尺度计量和田河干流径流量以及河损如表1所示。

从表1可知，和田河干流2007—2016年水量损失介于 $4.29 \times 10^8 \sim 9.45 \times 10^8 \text{ m}^3$ 之间，单位河长河损量介于 $134.48 \times 10^4 \sim 296.24 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}$ 之间，其中，2009年河段水量损耗最小，2010年河段河损水量最大。以2011年塔里木河流域近期综合治理基本完成为界限，对比分析2007—2011年和2012—2016年的不同时段径流量和河损量，可见近期综合治理之后干流来水量有明显增加，河损量和单位河长河损较前一阶段下降了20.32%，肖塔断面径流量增加了123.96%；河道输水效率(肖塔断面下泄水量与干流来水量之比)在近期综合治理之前为49%，之后提高到73%。

3.2 河道水量耗散定量分离 本研究将和田河干流河段河道损耗分为蒸发和渗漏两部分，水面蒸发采用式(1)计算方法而得，河道渗漏水量为河损量与蒸发量的差值，具体情况见表2。

根据表2可知，2007—2016年和田河干流蒸发水量介于 $2.51 \times 10^8 \sim 4.68 \times 10^8 \text{ m}^3$ 之间，均值为 $3.80 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，占河损总量的58.88%；渗漏水量介于 $1.18 \times 10^8 \sim 5.04 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，均值为 $2.66 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，占河损总量的

表1 和田河干流河段逐年核算情况

年份	来水量 $\times 10^8/m^3$	河损 $\times 10^8/m^3$	河损率/%	单位河长河损 $\times 10^4/(m^3/km)$	肖塔径流量 $\times 10^8/m^3$
2007	8.80	5.92	67.27	185.58	2.88
2008	11.19	8.40	75.07	263.32	2.79
2009	5.81	4.29	73.84	134.48	1.52
2010	30.60	9.45	30.88	296.24	21.15
2011	14.13	7.91	55.98	247.96	6.22
2012	21.87	6.80	31.09	213.17	15.07
2013	26.05	4.69	18.00	147.02	21.35
2014	13.13	5.22	39.78	163.72	7.91
2015	20.58	5.15	25.04	161.55	15.43
2016	24.44	6.80	27.84	213.30	17.64
2007—2011 均值	14.11	7.19	51.00	225.52	6.91
2012—2016 均值	21.21	5.73	28.35	179.69	15.48
2007—2016 均值	17.66	6.46	44.48	202.60	11.20

表2 和田河干流河损定量分离

年份	水面蒸发		河道渗漏	
	水量 $\times 10^8/m^3$	占比/%	水量 $\times 10^8/m^3$	占比/%
2007	2.93	49.55	2.99	50.45
2008	3.36	39.97	5.04	60.03
2009	2.51	58.50	1.78	41.50
2010	4.68	49.53	4.77	50.47
2011	3.72	47.00	4.19	53.00
2012	4.15	61.08	2.65	38.92
2013	3.56	75.89	1.13	24.11
2014	3.30	63.11	1.93	36.89
2015	4.18	81.20	0.97	18.80
2016	5.63	82.72	1.18	17.28
2007—2011 年平均值	3.44	47.82	3.75	52.18
2012—2016 年平均值	4.16	72.64	1.57	27.42
2007—2016 年平均值	3.80	58.88	2.66	41.20

41.20%。在塔里木河流域近期综合治理完成后，河道渗漏水量有所下降，而水面蒸发水量增加了21%，导致蒸发水量占河损总量的72.64%。

将和田河干流来水量与水面蒸发和河道渗漏进行曲线拟合，如图3(a)所示，和田河干流河道水面蒸发量和来水量呈显著正相关，原因是来水量越大，河道水面越宽，导致蒸发量越大；图3(b)和图3(c)表明河道渗漏水量与当年来水量无显著相关关系，但与前一年来水量显著相关：随着前一年来水量的增加，河道渗漏水量呈现“先减后增”的变化趋势。其主要原因可能是河道垂向入渗速度随河床初始含水率的增大而减小，后期随着河道来水量增大，河道湿周增加，侧向渗入量随着增大。由此可知，维持较为稳定的年际河道来水量可有效调控河道渗漏损耗。

**3.3 和田河干流天然植被生态需水** 根据遥感解译结果可知，和田河干流林地和高、中覆盖草地主要分布在河道两岸3 km以内，低覆盖草地分布在河道两岸7 km之内，干流天然植被空间分布情况见图4。

根据公式计算和田河干流天然植被生态需水量，选取柯坪(51720)、阿拉尔(51730)两个国家级气象站的2000—2016年20 cm蒸发皿蒸发量数据的多年平均值(1425 mm)，作为研究区的潜在蒸发数据；植被影响系数借鉴参考《中国塔里木河水资源与生态问题研究》<sup>[12]</sup>中的相关成果，见表3。

根据遥感解译结果及地下水埋深情况，分析不同植被类型的面积及其潜水埋深情况，并根据计

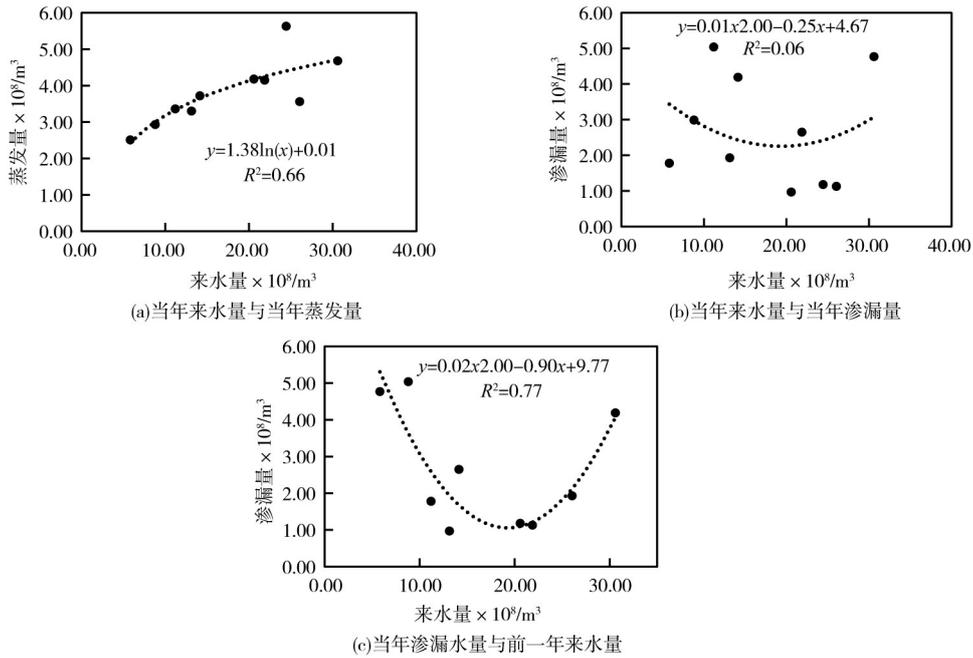


图3 来水量与蒸发量和渗漏量的关系

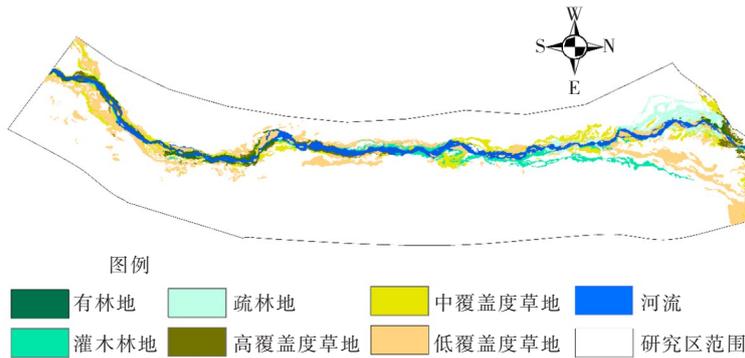


图4 和田河干流不同植被类型分布情况

表3 不同潜水埋深下植被影响系数

潜水埋深/m	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
植被影响系数	1.98	1.63	1.56	1.45	1.38	1.29	1.00

算公式，得到和田河干流生态需水量，见表4所示。

表4 和田河干流不同植被类型面积与生态需水量

植被类型	有林地	灌木林地	疏林地	高覆盖度草地	中覆盖度草地	低覆盖度草地	合计
潜水埋深/m	1.5 ~ 4.0	2.5 ~ 6.0	3.0 ~ 8.0	1.0 ~ 3.5	2.5 ~ 4.0	>3.5	
计算平均埋深/m	2.5	3.5	4.0	1.5	2.5	3.5	
面积/hm <sup>2</sup>	8768.07	9770.13	498.96	9800.19	33235.83	149629.7	211702.86
生态需水量×10 <sup>8</sup> /m <sup>3</sup>	0.12	0.02	<0.01	0.42	0.47	0.33	1.37

根据表4可知，和田河干流生态需水量为  $1.37 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，其中高覆盖度草地和中覆盖度草地需水量最多，分别占总需水量的39%和32%，疏林地生态需水量最少，不足  $0.01 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。由此可知，和田河干流河道多年平均(2007—2016)渗漏水量约为  $2.65 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，近乎干流植被生态需水量2倍，因此依靠河道渗漏水量完全可满足和田河干流天然植被的生态需水量。

## 4 讨论

**4.1 和田河干流生态需水量** 根据已有研究成果,塔里木河干流有林地、灌木林地、疏林地、高覆盖度草地、中覆盖度草地和低覆盖度草地蒸发定额分别为1432.4、497.3、392.1、2343.8、867.3、392.1  $\text{m}^3/\text{hm}^{2[13]}$ ,基于此计算可得和田河干流天然植被生态需水量为 $1.28 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

对比分析两种方法计算的和田河干流天然植被生态需水总量结果(见表5)可知,二者总量差异较小,但不同植被类型计算结果差异较大,其中仅有灌木林地生态需水量差异大于50%,高、中、低覆盖度草地生态需水量差异分别为45.33%、38.69%和43.74%。本研究取两种方法计算的不同植被类型需水量的最大值之和及最小值之和作为干流天然植被生态需水量的范围,可知和田河干流天然植被生态需水量介于 $0.99 \times 10^8 \sim 1.66 \times 10^8 \text{ m}^3$ 之间。

表5 不同计算方法下和田河干流不同植被生态需水量及其比较 (单位:  $\times 10^8 \text{ m}^3$ )

植被类型	有林地	灌木林地	疏林地	高覆盖度草地	中覆盖度草地	低覆盖度草地	合计
潜水蒸发法	0.12	0.02	<0.01	0.42	0.47	0.33	1.37
面积定额法	0.13	0.05	<0.01	0.23	0.29	0.59	1.28
二者最大值	0.13	0.05	<0.01	0.42	0.47	0.59	1.66
二者最小值	0.12	0.02	<0.01	0.23	0.29	0.33	0.99

另外,有学者研究得出和田河流域天然植被生态需水量为 $5.52 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,其中玉龙喀什河、喀拉喀什河与和田河干流3条河段植被分布面积相当,且两源流植被质量优于和田河干流<sup>[8]</sup>,因此可以推断,干流植被生态需水量小于和田河流域天然植被生态需水总量的1/3( $1.84 \times 10^8 \text{ m}^3$ ),也小于本研究中多年平均河道渗漏水量 $2.65 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

根据干旱区天然植被的生态需水过程可知,4—6月份是胡杨返青期,7—9月份为胡杨落种期。胡杨落种期内实现1~2次漫溢,可以促进植被群落的更新繁育,因此,保护与修复天然植被不仅仅要总量满足,更应该在满足其生长过程需水,河道整治对径流进行年内调控可进一步满足胡杨返青期的植被需水。

**4.2 河道损失与植被生态需水之间的关系** 据以往研究成果可知,胡杨和柽柳等荒漠河岸林植被在不同水分胁迫条件下对土壤水与地下水的利用策略虽然有所不同<sup>[14]</sup>,但二者所占比重远远超过了90%,凝结水利用所占比例不足10%,且主要是浅根系草本植物<sup>[15]</sup>,因此,在干旱与半干旱地区,地下水与土壤水是植被满足其生理需求的主要水分来源。地下水与土壤水的补给来源则主要是河流的侧向渗漏,并且土壤水与地下水的主要排泄方式是垂向的潜水蒸发和植被蒸腾,侧向的排泄量则相对很小。鉴于长时期来看流域地下水储量恒定不变,因此可认为由地表水转化的地下水与土壤水为潜水蒸发与植被蒸腾所消耗<sup>[2]</sup>。

在整个塔里木河流域,由于大量泥沙在河道频繁改道的过程中沉积,形成了巨厚的第四系松散沉积层,其岩性主要为粉砂、粉土及黏性土的互层,地质条件较为复杂<sup>[16]</sup>,河流地表水与地下水相互转换较为频繁,难以利用地表水-地下水转换模型模拟出河道渗漏水量,因此本研究采用河损分离的方法推算河道渗漏水量,即河道损失总量减去河道水面与潜水蒸发量。基于此,本研究所得出的河道渗漏水量即地表水转化为地下水量约为河道损失量的41.2%,这与王希义等<sup>[17]</sup>在塔里木河下游采用同位素计算的地表水与地下水的转化系数43.36%相近。

前文中提及部分学者担心进行河道整治后,河道宽度缩减、河岸硬化,虽然输水能力将得到提升,水面无效蒸发量大大减小,但渗漏补给天然植被生态水量也会相应减少。根据地下水运动达西定律,河道渗漏水量的大小与河道面积、渗透系数和地表水与地下水的水力坡度成正比,为满足干流河道天然植被生态保护与修复的需水量,可以通过增加地表水与地下水的水力坡度、延长过水时间等措施增加河道补给天然植被生态需水量。另外,结合玉龙喀什河与喀拉喀什河山区控制性水利枢纽,通过开展精细化生态调度,更有利于河道两岸天然植被的生态保护与修复。

**4.3 和田河干流河道损失** 和田河作为塔里木河干流三源流之一, 向干流阿拉尔断面下泄水量的多年平均值为  $11.20 \times 10^8 \text{ m}^3$  (2007—2016), 占同期阿拉尔断面径流量的 25%。秦胜英等<sup>[3]</sup>核算了和田河干流的河道蒸发和渗漏量, 认为干流水面多年平均蒸发量为  $0.64 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 河道渗漏量  $0.065 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 漫溢水量为  $6.56 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 这一结果与本研究有较大差异, 主要是前者认为干流存在较大的漫溢水量, 并且蒸发量与渗漏水量较本研究偏小。

已有大量研究表明, 河道漫溢对天然植被的生长和繁育具有重要作用<sup>[18]</sup>, 如果河道发生大规模漫溢, 必然会出现大面积新增天然植被。然而和田河流域天然植被面积近 20 年来不仅没有增加, 反而呈现略有减少趋势<sup>[19]</sup>。因此本研究认为文献[3]中和田河干流所谓河水漫溢并非是真的漫溢, 而是由于河道较宽, 水面较大, 河道中间形成了诸多沙洲, 遥感影像上将这种现象认为是漫溢。

以往有研究在计算河道水面蒸发过程中, 计算了河道水面宽度与来水量的关系, 从而计算了不同来水情况下河道水面蒸发量。然而和田河干流由于河道较宽, 多数情况下, 河道水量处于漫流状态, 水面宽度小于河道宽度。虽然水面蒸发面积较小, 但河床潜水位与河道水面水位持平, 因此河床潜水蒸发与水面蒸发相差无几, 可以当做水面蒸发来计算。文献[3]中水面蒸发量较小主要原因是河床潜水蒸发部分未计入蒸发项所致。

## 5 结论与建议

本研究基于水文站监测数据、遥感影响资料和蒸发模型, 定量分析了和田河干流河道损失组成与过程, 并对天然植被的生态需水量进行了核算, 结果表明: (1) 多年平均来水条件下, 和田河干流河损量约为  $6.46 \times 10^8 \text{ m}^3$  (2007—2016), 河损率为 44.48%, 单位河长河损量为  $202.60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}$ 。从河损的组成来看, 水面蒸发量为  $3.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 占河损量的 58.88%, 渗漏水量为  $2.65 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 占 41.12%; (2) 和田河干流天然植被的生态需水量  $1.37 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 河道渗漏水量可以满足植被生态水量需求。进行河道整治, 不仅可以减少水面蒸发, 提高和田河输水能力, 更有利于开展生态水量调度, 保护和恢复干流天然植被。

当前和田河源流之一喀拉喀什河上游已建有乌鲁瓦提水库, 总库容 3.47 亿  $\text{m}^3$ , 兴利库容 2.24 亿  $\text{m}^3$ ; 玉龙喀什河上游山区玉龙喀什水利枢纽工程设计库容 5.36 亿  $\text{m}^3$ , 建成后对和田河径流调节能力达到 20%, 基本满足流域社会经济需水与天然植被生态需水的调度要求。建议河道治理建设中设置生态闸口用于调度, 适时适量开展天然植被漫溢灌溉。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 席海洋, 冯起, 司建华, 等. 黑河下游额济纳三角洲河道渗漏对地下水补给研究综述[J]. 冰川冻土, 2012, 34(5): 1241-1247.
- [ 2 ] LING H B, ZHANG P, XU H L, et al. Determining the ecological water allocation in a hyper-arid catchment with increasing competition for water resources[J]. Global and Planetary Change, 2016, 145: 143-152.
- [ 3 ] 董弟文, 阿布都热合曼·哈力克, 王大伟, 等. 近 60 年和田河源流区径流特征及对气候变化的响应[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16(6): 536-543.
- [ 4 ] 刘静, 龙爱华, 李江, 等. 近 60 年塔里木河三源流径流演变规律与趋势分析[J]. 水利水电技术, 2019, 50(12): 10-17.
- [ 5 ] 翟超, 肖杨, 王新. 和田河流域防洪工程现状及措施探讨[J]. 吉林水利, 2019, 443(4): 63-66.
- [ 6 ] 秦胜英, 黄领梅, 罗光明, 等. 新疆和田河干流水平衡要素定量分析[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(7): 119-122.
- [ 7 ] 徐宗学, 米艳娇, 李占玲, 等. 和田河流域气温与降水量长期变化趋势及其持续性分析[J]. 资源科学, 2008, 30(12): 1833-1838.
- [ 8 ] 关洪涛, 杨泽慧, 宋剑鹏, 等. 和田河绿色走廊天然生态需水量估算[J]. 水资源与水工程学报, 2005, 16(1): 71-74.
- [ 9 ] 叶朝霞, 陈亚宁, 李卫红. 基于生态水文过程的塔里木河下游植被生态需水量研究[J]. 地理学报, 2007,

- 62(5): 451–461 .
- [ 10 ] 秦长海, 孙素艳 . 宁夏社会经济及生态需水预测[J] . 水资源保护, 2007, 24(5): 24–29 .
- [ 11 ] 郭宏伟, 徐海量, 凌红波, 等 . 和田河流域生态保护红线划定初探[J] . 干旱地区农业研究, 2017, 35(6): 235–243 .
- [ 12 ] 宋郁东, 樊自立, 雷志栋, 等 . 中国塔里木河水资源与生态问题研究[M] . 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 2000 .
- [ 13 ] 王让会, 宋郁东, 樊自立, 等 . 塔里木流域“四源一干”生态需水量的估算[J] . 水土保持学报, 2001, 15(1): 19–22 .
- [ 14 ] LING H B, XU H L, GUO B, et al . Regulating water disturbance for mitigating drought stress to conserve and restore a desert riparian forest ecosystem[J] . Journal of Hydrology, 2019, 572: 659–670 .
- [ 15 ] 李文静, 吕光辉, 张磊, 等 . 干旱区荒漠植物体内潜在水源差异及利用策略分析[J] . 生态环境学报, 2019(8): 1557–1566 .
- [ 16 ] 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[J] . 干旱区研究, 2008, 25(3): 331–335 .
- [ 17 ] 王希义, 徐海量, 闫俊杰, 等 . 基于氧同位素( $\delta^{18}O$ )的塔里木河下游河水向地下水的转化研究[J] . 水资源与水工程学报, 2018, 29(2): 87–92 .
- [ 18 ] 张沛, 徐海量, 凌红波, 等 . 塔里木河下游不同漫溢频次下植物群落变化初探[J] . 干旱区研究, 2016, 33(6): 1242–1248 .
- [ 19 ] 张鹏飞, 古丽·加帕尔, 包安明, 等 . 塔里木河流域近期综合治理工程生态成效评估[J] . 干旱区地理, 2017, 40(1): 156–164 .

### Relationship between runoff loss and ecological water requirements of the desert riparian vegetation in Hotan River

LONG Aihua<sup>1</sup>, ZHANG Pei<sup>1</sup>, LI Jiang<sup>2</sup>, DENG Xiaoya<sup>1</sup>, WANG Jie<sup>3</sup>,  
XU Hailiang<sup>4</sup>, ZHANG Ji<sup>3</sup>, ZHANG Guangpeng<sup>4</sup>

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;  
2. Xinjiang Water Resources and Hydropower Planning and Design Administration, Urumqi 830000, China;  
3. College of Water and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China;  
4. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830001, China)

**Abstract:** River leakage is one of the crucial ways to support riparian ecosystems in arid regions, while our understanding of river leakage process in the inland rivers of arid regions in China is insufficient. Here, this study in Hotan River seeks to 1) assess and quantify the ecological water requirements of the remaining desert riparian vegetation, and 2) understand whether the ecological water requirements of the desert riparian vegetation can be satisfied by the river leakage loss. To do so, ecological water requirements of the desert riparian vegetation was estimated based on recommended values of single desert plant water needs provided by historical literature and the area of each plant cover type provided by remote-sensing image. The total runoff losses of the Hotan River during the period from 2007 to 2016 were calculated from the water balance equation. Results show that total runoff losses are 0.646 km<sup>3</sup> in Hotan River during the study period. Evaporative water loss from the river channel is 0.38 km<sup>3</sup>, which accounts for as much as 58.82% of the runoff losses in Hotan River, while the loss amount from river leakage is 0.266 km<sup>3</sup>, accounting for 41.18% of the total runoff losses. In particular, the amount from river leakage can satisfy the ecological water requirements of the desert riparian vegetation (0.137km<sup>3</sup>). Our current findings do support the conclusion that river regulation reduces the vapor evaporation and enhances the water delivery efficiency without affecting the environmental water needs. The outcomes of this research may accomplish large-scale river regulation goals in both research and management, and help to protect and regenerate the desert riparian vegetation in many arid regions.

**Keywords:** runoff loss; river leakage; ecological water demand of the desert riparian vegetation; Hotan River

(责任编辑: 王学风)