

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2017.04.006

2000—2014年塔里木河下游地下水补给量及合理需求量

王希义¹, 徐海量², 潘存德¹, 凌红波², 郭宏伟²

(1. 新疆农业大学草业与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830052;

2. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:以塔里木河下游为研究区,以区域内9个固定监测断面为基础,依据断面内各个地下水监测井,收集了输水前和第15次输水后的地下水位数据,结合土壤饱和差计算方法,分析了第15次输水后的地下水补给量,并联系植被生长所需的合理水位探讨了地下水到达合理水位所需的水量,以期评价生态输水的阶段性效果,为调整生态输水方案提供理论参考。结果表明:①生态输水前地下水埋深在6~13 m之间,第15次生态输水后,地下水最大升高幅度达到8.26 m;②第15次生态输水后,塔里木河下游地下水补给量约为20.44亿 m^3 ;③为使地下水达到植被生长所需适宜水位,塔里木河下游地下水的合理需求量约为24.08亿 m^3 。

关键词:生态输水;合理水位;补给量;合理需求量;塔里木河下游

中图分类号:TV213.4

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2017)04-0032-08

Study on groundwater recharge amount and suitable demand amount in lower reaches of Tarim River from 2000 to 2014

WANG Xiyi¹, XU Hailiang², PAN Cunde¹, LING Hongbo², GUO Hongwei²

(1. College of Grassland and Environment Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

2. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

Abstract: The lower reaches of the Tarim River was selected as the study area. First, the data of groundwater level were collected before water transport and after the water transport was carried out 15 times, based on the locations of groundwater monitoring wells at nine sections. Then, the groundwater recharge amount after the 15th time of water transport was analyzed using the calculation method of saturation deficit of soil. Finally, the suitable demand amount of groundwater that enables the groundwater level to reach a water level suitable for plant growth was determined. This study aimed to evaluate the effects of ecological water transport at different stages and provide theoretical references for the adjustment of water transport. The results are as follows: (1) the depth to water table ranged from 6 m to 13 m before ecological water transport, and its maximum increment reached 8.26 m after the 15th time of water transport; (2) the recharge amount of groundwater was about $20.44 \times 10^8 \text{ m}^3$ in the lower reaches of the Tarim River after the 15th time of water transport; and (3) the suitable amount of groundwater in the lower reaches of the Tarim River should be about $24.08 \times 10^8 \text{ m}^3$, in order to guarantee the suitable water level for plant growth.

Key words: ecological water transport; suitable water level; recharge amount; suitable demand amount; lower reaches of Tarim River

基金项目:国家自然科学基金(31370551,41471099,31400466);中国科学院“西部之光”人才培养计划(XBBS-2014-13)

作者简介:王希义(1987—),男,博士研究生,主要从事恢复生态学研究。E-mail:binzhouwxy@163.com

通信作者:徐海量,研究员,博士。E-mail:xuhl@ms.xjb.ac.cn

干旱半干旱区植被退化严重,生态脆弱,是全球贫困人口的主要分布区^[1]。水是干旱区最为重要的生态因子,是构成绿洲的基本条件,也是维持绿洲生态系统稳定发展的基础^[2-3],水决定着干旱区绿洲化过程与荒漠化过程两类极具对立与冲突性的生态环境演化过程^[4]。随着社会经济与自然环境的协调发展越来越受到重视,干旱区地下水动态变化的研究逐渐成为热点^[5-6]。

20 世纪 80 年代以来,生态学理论与应用有了迅猛发展,有关地下水方面的研究也取得了一系列进展。近几年来,国外有关地下水的研究包括依据地下水变化特征预测植被变化^[7-8]、地下水与地质灾害间的关系^[9-10]、地下水变化对土地利用的影响^[11-12]等方面;在国内,研究主要集中在地下水模型^[13-15]、地下水与植被间的关系^[16-17]、地下水污染^[18-19]。然而以上研究大多集中于地下水变化特征、地下水与周围环境的关系等方面,对地下水变化的量化研究较为少见。

中国塔里木河下游地区极为干旱,流域内水文过程的完整性曾经丧失^[20],使地下水位大幅下降,生态退化严重。自 2000 年以来,随着生态输水工程的实施,塔里木河下游的水文过程逐渐恢复。针对塔里木河下游地下水的研究主要有水位动态变化^[21-22]、地下水与植被间关系^[23-24]、地下水化学特征^[25-26]等方面,而对地下水增加量进行量化的研究较为少见。本文利用输水前的地下水位数据和 2014 年第 15 次输水后的数据,分析了第 15 次输水后地下水补给量,并对适合植被生长所需的合理水位进行了模拟,进一步探讨了地下水到达合理水位所需的水量;试图为评价生态输水的阶段性效果提供理论依据,以期为制定合理的生态输水方案提供决策参考。

1 研究区概况

塔里木河流域地处亚欧大陆腹地,是中国典型的干旱荒漠区。塔里木河下游是指从大西海子水库至尾间湖台特玛湖,总长度为 363 km(图 1)。区域属温带荒漠干旱气候,年降水量 20~50 mm,而潜在蒸发量高达 2 500~3 000 mm^[27]。自 2000 年开展生态输水以来,塔里木河流域地下水埋深有了大幅抬升,水环境状况有所改善。由于受到地下水以及河水的补给,河漫滩以及河道两侧低阶地内形成了大面积的乔灌木带,并且随着与河道距离的增加,呈现出有规律的分布^[28]。乔木主要是胡杨(*Populus euphratica*),灌木则包括柽柳(*Tamarix chinensis*)、黑刺(*Lycium ruthenicum*)、铃铛刺(*Halimodendron*

halodendron)等,草本植物主要有芦苇(*Phragmites communis*)、鹿角草(*Glossogyne tenuifolia*)、骆驼刺(*Alhagi sparsif*)、花花柴(*Karelinia caspica*)、盐生草(*Halogeton glomeratus*)等。

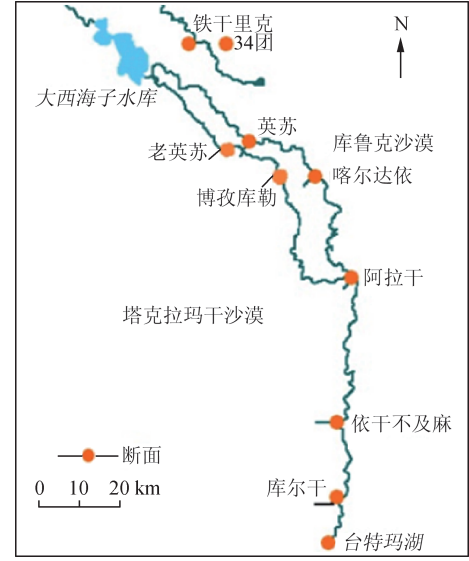


图 1 塔里木河下游监测断面分布示意图

2 资料来源与研究方法

2.1 资料来源

塔里木河下游通过其文阔尔河与老塔里木河两条河道进行生态输水。自 2000 年首次开展生态输水以来,到 2014 年已经实施了 15 次输水。本文利用恰拉断面的地下水位代替大西海子区域的地下水位,然后在老塔里木河的老英苏、博孜库勒,以及其文阔尔河的英苏、喀尔达依、阿拉干、依干不及麻、库尔干(代替台特玛湖)等监测断面分别统计地下水位数据。

监测井位置。塔里木河的地下水监测井由塔里木河流域管理局布设,具有一定的规律。每一个监测断面均有 6 个监测井,分别布设在离河道 50 m、150 m、300 m、500 m、750 m、1 050 m 处。鉴于生态输水后地下水位变动具有滞后性特征,选择在 2014 年 10 月份在每一个监测断面,依据地下水监测井的位置,记录第 15 次生态输水后离河道不同距离的 6 处地下水位数据。

地下水位数据提取。采用 SWJ90 钢尺水位仪(读数精度为 1 cm)监测每一口井的地下水位。首先,将水位仪测头位置记为零;之后,按下电源按钮,此时电源指示灯亮;然后手拿钢尺电缆,把测头缓缓放入监测井中,并缓慢向下移动,当测头触点接触到水面时,水位仪的接收系统便会发出轰鸣声,此时读出钢尺电缆在井口的数值,记为该监测井的地下水埋深;最后,在塔里木河流域管理局等相关部门获取输水前各个断面不同离河道距离上的地下水位数据。

2.2 研究方法

2.2.1 土壤饱和差计算方法

在输水前,由于断流多年,土壤含水量极低,因此在地下水位上升过程中,土壤得到的补给水量为饱和含水率与初始含水率的差值,故土壤饱和差 μ 值须取为土壤含水率的饱和差。

塔里木河下游土壤的饱和重量含水率一般取为 25.8%^[29],而输水前土壤的重量含水率 n 可采用式 (1)^[30] 计算:

$$n = 35.72e^{-0.185D} \tag{1}$$

式中, D 为地下水埋深, m。

由不同含水率间的转换关系可知:土壤的重量含水率乘以其干容重后即为土壤的体积含水率,塔河下游段土壤的干容重一般为 1.36 g/cm³,由此可得到计算土壤饱和差 u 的公式^[30]:

$$u = 1.36 (25.8 - n)/100 \tag{2}$$

2.2.2 输水后地下水位抬升量化

如图 2 所示,曲线 $ABCD$ 可视为输水后的地下水位线, $EFGH$ 为输水前的地下水位线,两曲线间部分即为恢复的地下水体。

对于某一个监测断面而言,断面一侧曲边形 $CDHG$ 内单位河长的恢复水量设为 Q_1 ;河床正下方的恢复水量为 Q_2 ,由于对称性可以得到断面沿河道单位长度上的恢复水量 Q 。

$$Q = 2Q_1 + Q_2 \tag{3}$$

其中
$$Q_1 = \mu \int_0^x [f_2(x) - f_1(x)] dx \tag{4}$$

$$Q_2 = \mu [f_2(0) - f_1(0)] B_0 \tag{5}$$

式中: $f_1(x)$ 为河床一侧输水前的水位线, m; $f_2(x)$ 为河床一侧输水后的水位线, m; B_0 为河床的平均底宽, m。

若在某段河道的上游断面的补给水量为 $Q_上$,下游断面的补给水量为 $Q_下$,两断面间的河道距离为 L ,则在此区间内河段的总补给水量 W 为

$$W = L (Q_上 + Q_下)/2 \tag{6}$$

2.2.3 合理恢复水位量化

依据塔里木河下游植被生态的研究结果,在地下水埋深在 2.5 ~ 4.0 m 时,植被会维持较好的生长和恢复状态,又可避免土壤盐渍化及裸地的无效蒸发,从而提高生态水利用效率^[31]。但地下水埋深存在一定坡度,如果将距河道 2000 m 范围内地下水埋深都恢复到 4.0 m 以上,目前难以做到。因此本研究遵循以下原则:首先,距离河道 2000 m 外的侧渗量很小,可以忽略,即河岸的研究宽度位于 0 ~ 2000 m 之间;其次,基于河道沿程流量的递减规律,确定英苏以上河段在离河 500 m 范围处的地下水埋深确定为 3.0 m,其以下河段则为 4.0 m^[30]。确定恰拉-英苏、恰拉-老英苏以上河段在离河 500 m 处地下水埋深应达到 3.0 m,以下河段 500 m 处地下水埋深应达到 4.0 m。由此可以在各个断面上拟合出一条合理水位线,此线与现状的水位线之间呈现大致平行的关系,两者间所包含的面积乘以河段长度及饱和差即为地下水恢复量(图 3),其中 $y = f_1(x)$ 为 15 次输

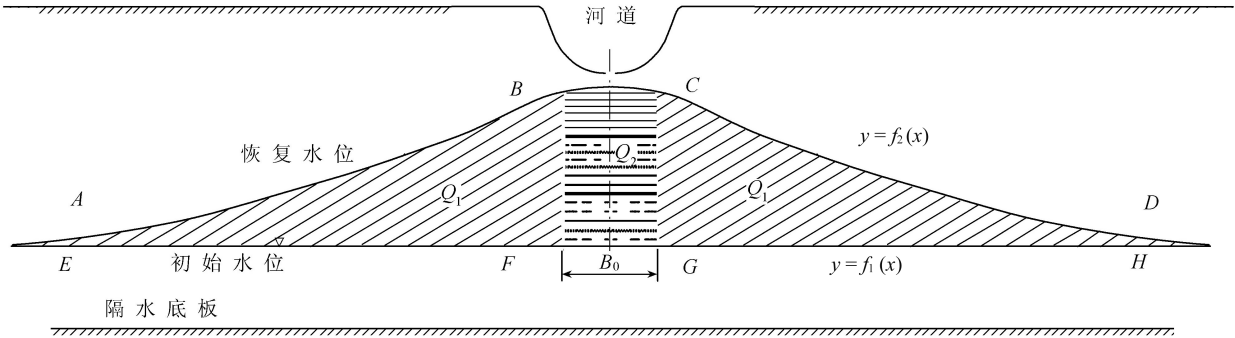


图 2 地下水恢复水位示意图

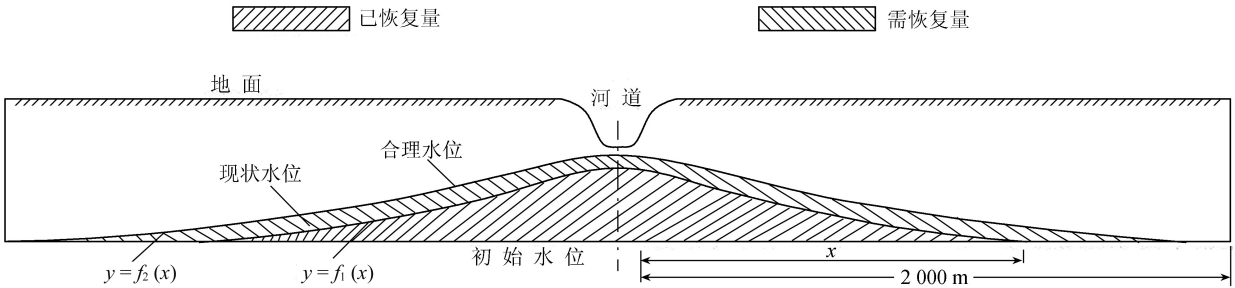


图 3 地下水期望水位示意图

水后地下水位线, $y=f_2(x)$ 为期望通过输水要达到的合理水位线。因此,借鉴 2.2.1 中的计算方法,推算地下水位恢复到合理水位时所需的水量。

本文作图与分析利用软件 sigmaplot 10.0。

3 结果与分析

3.1 不同监测断面地下水位的变化特征

在 20 世纪 60 年代到 70 年代初期,大西海子水库每年都有水下泄,1964—1973 年平均下泄水量为 2.54 亿 m^3/a ;1974 年以后平均下泄水量降至 0.46 亿 m^3/a ,铁干里克以下河段则完全断流,仅在 1995 年由大西海子水库水下泄 0.28 亿 m^3 ,输水距离仅为 40 km。自 1972 年以后,阿拉干以下河段就开始持续断流,地下水位不断下降,植被退化严重。

3.1.1 输水之前各断面地下水埋深

塔里木河下游由于输水量减少导致河道断流,地下水埋深急剧降低,由 20 世纪 50 年代的 3~5 m 下降到 70 年代的 3~8 m,直至 2000 年输水之前的 6~13 m(表 1),在横向上基本处于水平状态。

表 1 生态输水前塔里木河下游多年地下水埋深

监测断面	与大西海子 水库距离/km	地下水埋深/m		
		1973 年	1989 年	1997 年
新英苏	61.4	5.40	8.00	9.40
喀尔达依	117.8	5.86	10.00	11.13
阿拉干	204.5	7.00	10.40	12.65
依干不及麻	300.5	6.20	12.75	12.92

3.1.2 输水后地下水位变化特征

利用 8 个断面输水前与 15 次输水后的统计资料,得出了各个断面不同离河距离上地下水位升高幅度(图 4)。

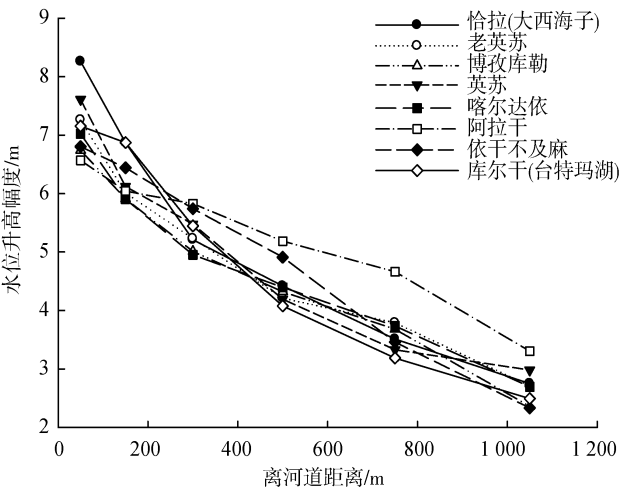


图 4 输水前后各监测断面地下水抬升高度

由图 4 可见,经过 15 次生态输水,河道两侧的地下水埋深都有了大幅度抬升,并且基本都是随着

离河道距离的增加而呈现降低趋势。在所监测的结果中,以恰拉断面(大西海子)升高幅度最大,在离河 50 m 处为 8.26 m,最小值出现在依干不及麻断面离河道 1050 m 处,水位升高幅度为 2.33 m。

3.2 地下水净补给量

3.2.1 不同监测断面土壤饱和差

因此,对于每一个监测断面,结合各个断面的地下水埋深,可以得到不同离河距离上输水前土壤的平均重量含水率,然后将这些土壤重量含水率进行平均计算,记为输水前该断面土壤的平均重量含水率。结合输水前各断面的地下水埋深数据,利用式(1)和式(2)计算出各个断面的 u 值(表 2)。

表 2 输水前各断面土壤重量含水率 n 与土壤饱和差 u

监测断面	$n/\%$	u
恰拉(大西海子)	5.61	0.27
老英苏	5.03	0.28
英 苏	5.15	0.28
博孜库勒	5.01	0.28
喀尔达依	4.99	0.28
阿拉干	4.10	0.29
依干不及麻	4.17	0.29
库尔干(台特玛湖)	3.62	0.30

3.2.2 各个断面单位河长地下水净增加量

选取线性、对数、多项式、乘幂、指数 5 种方程对每一个断面的地下水位进行模拟,选取 R^2 值最高者确定为地下水位拟合方程,由此可得各个断面输水前后地下水位的模拟方程(表 3)。

表 3 各断面输水前后地下水位拟合方程

断面	输水前后	拟合方程	R^2
恰拉(大西海子)	输水前	$y = -0.000\ 5x + 835.72$	0.960 5
	输水后	$y = 6 \times 10^{-6}x^2 - 0.013\ 6x + 844.74$	0.989 3
老英苏	输水前	$y = -0.000\ 3x + 826.64$	0.977 8
	输水后	$y = 3 \times 10^{-6}x^2 - 0.008\ 2x + 834.03$	0.925 3
博孜库勒	输水前	$y = -0.000\ 5x + 820.32$	0.960 7
	输水后	$y = 1 \times 10^{-6}x^2 - 0.006\ 2x + 827.14$	0.984 1
英 苏	输水前	$y = -0.000\ 2x + 826.71$	0.948 1
	输水后	$y = 4 \times 10^{-6}x^2 - 0.010\ 9x + 836.02$	0.992 0
喀尔达依	输水前	$y = -0.000\ 4x + 820.34$	0.949 5
	输水后	$y = -1.695\ 3\ln x + 834.77$	0.990 2
阿拉干	输水前	$y = -0.000\ 2x + 814.90$	0.832 3
	输水后	$y = 820.97x^{-0.000\ 9}$	0.901 0
依干不及麻	输水前	$y = -0.000\ 2x + 801.73$	0.972 2
	输水后	$y = 1 \times 10^{-5}x^2 - 0.017\ 8x + 810.79$	0.971 1
库尔干(台特玛湖)	输水前	$y = -0.000\ 4x + 795.52$	0.933 7
	输水后	$y = 810.68x^{-0.001\ 6}$	0.983 8

注: x 为断面离河道距离, m; y 为地下水高程, m。

目前,生态输水的影响宽度已达 2 000 m 左右^[32]。因此, x 的取值范围设定在 $[0,2\,000]$ 之间,利用式(3),计算每一个断面河岸地带地下水增加量 Q_1 。

对于河床地带,首先依据 Google earth 地图,在每个断面上提取河道宽度;而后结合图 2,将 BCDF 可近似视作一矩形,FG 的长度 B_0 可以用河道的宽度来代替,利用式(4)便可以计算出 Q_2 的值;最后利用式(5)可得各个断面单位长度地下水总补给量(表 4)。

表 4 各个断面地下水净补给量 万 m³/km

监测断面	地下水净补给量
恰拉(大西海子)	434. 81
老英苏	399. 74
博孜库勒	282. 14
英 苏	449. 74
喀尔达依	420. 64
阿拉干	170. 86
依干布及麻	619. 38
库尔干(台特玛湖)	866. 98

3.2.3 塔里木河下游地下水总补给量

将塔里木河下游地区分成 6 个区间进行探讨,包括大西海子-英苏、英苏-喀尔达依、喀尔达依-阿拉干、阿拉干-依干不及麻、依干不及麻-台特玛湖。对于每一个河流区间利用式(6)计算出其文阔尔河和老塔里木河各个河段的地下水补给量(表 5、表 6)。塔里木河下游地下水总补给量为 20. 44 亿 m³。

表 5 其文阔尔河地下水补给量

河道区间	河道长度/ km	地下水补 给量/亿 m ³
大西海子—英苏	61. 4	2. 72
英苏—喀尔达依	56. 5	2. 46
喀尔达依—阿拉干	86. 7	2. 56
阿拉干—依干不及麻	96. 0	3. 79
依干不及麻—台特玛湖	57. 1	4. 24
合计		15. 77

表 6 老塔里木河地下水补给量

河道区间	河道长度/ km	地下水补 给量/亿 m ³
大西海子—老英苏	57. 7	2. 41
老英苏—博孜库勒	27. 6	0. 94
博孜库勒—阿拉干	58. 5	1. 32
合计		4. 67

3.3 地下水合理需求量

3.3.1 输水后不同断面土壤饱和差

依据输水后各个断面所到达的地下水埋深,利

用式(1)和式(2)进行计算,得输水后各监测断面的平均土壤饱和差(表 7)。

表 7 输水后各断面土壤重量含水率 n 与平均土壤饱和差 u

监测断面	$n/\%$	u
恰拉(大西海子)	15. 72	0. 14
老英苏	13. 20	0. 17
博孜库勒	12. 58	0. 18
英 苏	13. 73	0. 16
喀尔达依	12. 97	0. 17
阿拉干	11. 27	0. 19
依干不及麻	11. 14	0. 20
库尔干(台特玛湖)	9. 68	0. 22

3.3.2 各个断面地下水合理需求量

对英苏以上断面,结合现状离河距离 500 m 处的地下水埋深,将曲线平行上移,使 500 m 的地下水埋深到达 3. 0 m,并换算成地下水位海拔高度;英苏以下断面 500 m 处的地下水埋深平行上移到 4. 0 m,并换算成海拔高度。由此可得各个断面合理水位的拟合方程(表 8)。

表 8 各个断面地下水合理水位拟合方程

断面	拟合方程	R^2
恰拉(大西海子)	$y = 6 \times 10^{-6}x^2 - 0. 013\,6x + 847. 47$	0. 989 3
老英苏	$y = 3 \times 10^{-6}x^2 - 0. 008\,2x + 837. 88$	0. 977 8
博孜库勒	$y = 1 \times 10^{-6}x^2 - 0. 006\,2x + 830. 10$	0. 984 1
英 苏	$y = 4 \times 10^{-6}x^2 - 0. 010\,9x + 839. 55$	0. 991 9
喀尔达依	$y = - 1. 695\,3\ln x + 837. 55$	0. 990 2
阿拉干	$y = 823. 78x^{-0. 000\,9}$	0. 900 9
依干不及麻	$y = 1 \times 10^{-5}x^2 - 0. 017\,8x + 813. 63$	0. 970 9
库尔干(台特玛湖)	$y = 815. 19x^{-0. 001\,6}$	0. 983 8

与补给水量的计算方法类似,利用式(3)~(5)可以计算各个断面的地下水合理需求量(表 9)。

表 9 各个断面地下水合理需求量 万 m³

监测断面	地下水合理需求量
恰拉(大西海子)	365. 41
老英苏	504. 75
博孜库勒	357. 05
英 苏	538. 27
喀尔达依	449. 21
阿拉干	333. 23
依干不及麻	642. 54
库尔干(台特玛湖)	1 013. 31

3.3.3 流域地下水合理需求量评估

依据相邻两个监测断面间的距离,利用式(6)计算出塔里木河下游各河段地下水的合理需求量(表 10、表 11)。由表 10 和表 11 可得,塔里木河下游地下水合理需求总量为 24. 08 亿 m³。

表 10 其文阔尔河地下水合理需求量

河道区间	河道长度/km	地下水合理需求量/亿 m ³
大西海子—英苏	61.4	2.77
英苏—喀尔达依	56.5	2.79
喀尔达依—阿拉干	86.7	3.39
阿拉干—依干不及麻	96	4.68
依干不及麻—台特马湖	57.1	4.73
合计		18.36

表 11 老塔里木河地下水合理需求量

河道区间	河道长度/km	地下水合理需求量/亿 m ³
大西海子—老英苏	57.7	2.51
老英苏—博孜库勒	27.6	1.19
博孜库勒—阿拉干	58.5	2.02
合计		5.72

4 讨 论

干旱区水资源在诸多环境因子中居于首要地位,研究干旱区水资源的变化特征具有十分重要的意义^[33-34]。在塔里木河下游地区,植物生长吸收土壤水,而土壤水受到地下水位高度的影响,地下水位高度又受河道输水量的影响^[35]。一般而言,随着与河距离的增加,地下水的补给量逐渐减少,地下水位的抬升幅度逐渐减小,这与本研究的成果相一致,也与徐海量等^[36-37]的研究成果相一致。这些研究都表明,在实施生态输水的过程中,假设河道输水量固定,随着与河道距离的增加,地下水升高幅度呈现降低趋势。

塔里木河下游生态输水使地下水位升高,地下水量也相应增加。本文利用地下水位变动数据,拟合了第 15 次输水后的地下水位曲线,然后利用微积分方程计算了第 15 次输水后地下水补给量,大约为 20.44 亿 m³。2000—2014 年,从大西海子水库一共向下游输水 46.5 亿 m³,因此地下水补给量约占下泄总水量的 43.98%。而杨鹏年等^[30]研究得第 5 次输水后地下水补给量占总下泄水量的 58%,即第 15 次输水后,地下水增加量占下泄总水量的比重有所减少。这可能与区域内植被面积增加、耕地增加、生活用水量增加等方面有关,具体的原因还需要深入进行探讨。

塔里木河下游首要的任务是拯救植被系统,而这一目标的实现主要是依靠生态输水^[38]。当地下水埋深在 2.5~4.0 m 时,植被的生长或恢复状态最好。但是,地下水的埋深并不是水平的,而是具有一定的坡度。本文确定英苏以上断面在离河 500 m 地下水埋深为 3.0 m,英苏以下河段为 4.0 m,分析了地下水的合理水位和合理需求量,得出地下水达到

植被生长的适宜水位时所需的地下水量约为 24.08 亿 m³,超过了前 15 次地下水补给量的总和。因此,生态输水和植被恢复是一个漫长的过程,此阶段的生态输水处于“应急救命”阶段,距离完全恢复受损的生态系统、保护绿色走廊的目标还很远。以后的输水过程应与实地情况相结合,对输水方式与输水规模进行适当调整,保证地下水抬升和生态恢复达到最佳效果。另外,在实施生态输水的过程中,河水补给地下水,地下水从河道处流向离河道较远地区。地下水在流动过程中,受到水道管壁摩擦等各种阻力的影响,从而造成水头损失,即河水补给地下水的水量不完全等于地下水的增加量。但是本文只是针对地下水增加量以及合理需求量进行分析,未对地下水在运移过程中的损失量进行研究。因此,在以后的研究中,应加强对水力坡度内容的探讨,分析地下水在运移过程的损失特征,以便更好地研究河水对地下水的补给过程,为实现合理生态输水、促进生态恢复提供科学依据。

5 结 论

a. 生态输水之前,塔里木河下游地下水埋深在 6~13 m 之间;生态输水后,各断面的地下水埋深都有大幅度升高,并且随着与河距离的增加呈现降低趋势;地下水位升高幅度最大值在恰拉断面离河 50 m 处的 8.26 m,最小值为依干不及麻断面离河道 1 050 m 处的 2.33 m。

b. 塔里木河下游第 15 次生态输水后,其文阔尔河流域地下水总补给量为 15.77 亿 m³,老塔里木河地下水总补给量为 4.67 亿 m³,塔里木河下游地下水总补给量为 20.44 亿 m³。

c. 其文阔尔河地下水合理需求量约为 18.36 亿 m³,老塔里木河地下水合理需求量约为 5.72 亿 m³,塔里木河下游地下水合理需求总水量约为 24.08 亿 m³。

参考文献:

[1] ELHADI A Y, NYARIKI D M, WASONGA V O, et al. Factors influencing transient poverty among agro-pastoralists in semi-arid areas of Kenya. [J]. African Crop Science Journal, 2012, 20(Sup1):113-122.

[2] SHAHJAHAN H M, AHMED T A M. Some results of rearing giant prawn, *Macrobrachium rosenbergii*, in the oasis water of alhassa, saudi arabia [J]. Journal of the World Mariculture Society, 2009, 15(1-4):92-94.

[3] 肖庆礼,黄明斌,邵明安,等. 黑河中游绿洲不同质地土壤水分的入渗与再分布 [J]. 农业工程学报,2014,30(2):124-131. (XIAO Qingli, HUANG Mingbin, SHAO Ming'an, et al. Infiltration and drainage processes of

- different textural soil moisture in middle reaches of Heihe River Basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30 (2): 124-131. (in Chinese))
- [4] 凌红波. 基于水资源变化的干旱区典型流域绿洲适宜规模研究[D]. 合肥:中国科技大学, 2013.
- [5] TSAI T C, KATIYAR V, TOY D, et al. Conjunctive management of large-scale pressurized water distribution and groundwater systems in semi-arid area with parallel genetic algorithm [J]. Water Resources Management, 2009, 23(8):1497-1517.
- [6] 陆垂裕,孙青言,李慧,等. 基于水循环模拟的干旱半干旱地区地下水补给评价[J]. 水利学报, 2014, 45(6): 701-711. (LU Chuiyu, SUN Qingyan, LI Hui, et al. Estimation of groundwater recharge in arid and semi-arid areas based on water cycle simulation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45 (6): 701-711. (in Chinese))
- [7] CUNNINGHAM S C, THOMSON J R, NALLY R M, et al. Groundwater change forecasts widespread forest dieback across an extensive floodplain system [J]. Freshwater Biology, 2011, 56(8):1494-1508.
- [8] KROS J, MOLDIJKSTRA J P, WAMELINK G W W, et al. Modelling impacts of acid deposition and groundwater level on habitat quality and plant species diversity[J]. Ecological Processes, 2016, 5(1):22-40.
- [9] DAZHAO G U, ZHANG J, WANG Z, et al. Observations and analysis of groundwater change in Shendong mining area[J]. Coal Geology & Exploration, 2013, 41(4):35-39.
- [10] CHEONG J Y, HAMM S Y, KIM S H, et al. Analyzing groundwater change on a volcanic island caused by the impact of the M9 Sumatra earthquake[J]. Geosciences Journal, 2013, 17(2):183-195.
- [11] LERNER D N, HARRIS B, BEDDINGTON J. The relationship between land use and groundwater resources and quality[J]. Land Use Policy, 2009, 26(12):S265-S273.
- [12] KEELER B L, POLASKY S. Land-use change and costs to rural households: a case study in groundwater nitrate contamination [J]. Environmental Research Letters, 2014, 9(7):074002.
- [13] 卢文喜. 地下水运动数值模拟过程中边界条件问题探讨[J]. 水利学报, 2003, 34(3):33-36. (LU Wenxi. Approach on boundary condition in numerical simulation of groundwater flows [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(3):33-36. (in Chinese))
- [14] 王仕琴,邵景力,宋献方,等. 地下水模型 MODFLOW 和 GIS 在华北平原地下水资源评价中的应用[J]. 地理研究, 2007, 26(5): 975-983. (WANG Shiqin, SHAO Jingli, SONG Xianfang, et al. The application of groundwater model, MODFLOW, and GIS technology in the dynamic evaluation of groundwater resource in North China Plain[J]. Geographical Research, 2007, 26(5): 975-983. (in Chinese))
- [15] 张真真,卞建民,韩宇,等. 基于多变量时间序列模型的大安市地下水埋深预测[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(3):211-216. (ZHANG Zhenzhen, BIAN Jianmin, HAN Yu, et al. Groundwater table forecast in Da'an City based on multivariate time series model[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(3):211-216. (in Chinese))
- [16] 赵传燕,李守波,贾艳红,等. 黑河下游地下水波动带地下水与植被动态耦合模拟[J]. 应用生态学报, 2008, 19(12):2687-2692. (ZHAO Chuanyan, LI Shoubo, JIA Yanhong, et al. Dynamic changes of groundwater level and vegetation in water table fluctuant belt in lower reaches of Heihe River: coupling simulation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(12):2687-2692. (in Chinese))
- [17] 张俊,赵振宏,马洪云,等. 基于物种生存域的干旱半干旱区地下水与植被关系研究[J]. 水土保持研究, 2014, 21(5):240-243. (ZHANG Jun, ZHAO Zhenhong, MA Hongyun, et al. Study on relationship between groundwater and vegetation in arid and semiarid region based on survival regions of plant species[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(5):240-243. (in Chinese))
- [18] 张亚丽,张依章,张远,等. 浑河流域地表水和地下水氮污染特征研究[J]. 中国环境科学, 2014, 34(1):170-177. (ZHANG Yali, ZHANG Yizhang, ZHANG Yuan, et al. Characteristics of nitrate in surface water and groundwater in the Hun River Basin [J]. China Environmental Science, 2014, 34(1):170-177. (in Chinese))
- [19] 龚香宜,何炎志,孙云雷. 江汉平原四湖流域上区地下水中多环芳烃分布特征与源解析[J]. 环境科学学报, 2015, 35(3):789-796. (GONG Xiangyi, HE Yanzhi, SUN Yunlei. Distribution and source of polycyclic aromatic hydrocarbons in groundwater in the upper region of Sihulake Basin from Jiangnan Plain [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(3):789-796. (in Chinese))
- [20] 徐海量. 流域水文过程与生态环境演变的耦合关系[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2005.
- [21] 徐海量,宋郁东,陈亚宁. 生态输水后塔里木河下游地下水的动态变化[J]. 中国环境学, 2003, 23(3):327-331. (XU Hailiang, SONG Yudong, CHEN Yaning. Dynamic change of groundwater after ecological water transport at the lower reaches of Tarim River[J]. China Environmental Science, 2003, 23(3):327-331. (in Chinese))
- [22] 蒋良群,陈曦,包安明. 塔里木河下游地下水变化动态

- 分析[J]. 干旱区地理, 2005, 28(1):33-37. (JIANG Liangqun, CHEN Xi, BAO Anming. Analysis on the changing dynamics of groundwater level in the lower reaches of the Tarim River, Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2005, 28(1):33-37. (in Chinese))
- [23] 陈永金, 陈亚宁, 刘加珍. 塔里木河下游植被覆盖度变化与地下水水质关系[J]. 环境科学, 2010, 31(3):612-617. (CHEN Yongjin, CHEN Yaning, LIU Jiazhen. Correlations between the coverage of vegetation and the quality of groundwater in the lower reaches of the Tarim River [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2010, 31(3):612-617. (in Chinese))
- [24] 朱绪超, 袁国富, 邵明安, 等. 塔里木河下游河岸带植被的空间结构特征[J]. 植物生态学报, 2015, 39(11):1053-1061. (ZHU Xuchao, YUAN Guofu, SHAO Ming'an, et al. Spatial pattern of riparian vegetation in desert of the lower Tarim River Basin[J]. Journal of Plant Ecology, 2015, 39(11):1053-1061. (in Chinese))
- [25] 陈永金, 陈亚宁, 李卫红, 等. 塔里木河下游地下水化学特征对输水响应的阶段性研究[J]. 环境科学, 2006, 27(7):1299-1304. (CHEN Yongjin, CHEN Yaning, LI Weihong, et al. Spatial pattern of riparian vegetation in desert of the lower Tarim River Basin[J]. Environmental Science, 2006, 27(7):1299-1304. (in Chinese))
- [26] 朱海勇, 陈永金, 刘加珍, 等. 塔里木河中下游地下水化学及其演变特征分析[J]. 干旱区地理, 2013, 36(1):8-18. (ZHU Haiyong, CHEN Yongjin, LIU Jiazhen, et al. Spatial pattern of riparian vegetation in desert of the lower Tarim River Basin[J]. Arid Land Geography, 2013, 36(1):8-18. (in Chinese))
- [27] 徐海量, 宋郁东, 王强, 等. 塔里木河中下游地区不同地下水位对植被的影响[J]. 植物生态学报, 2004, 28(3):400-405. (XU Hailiang, SONG Yudong, WANG Qiang, et al. The effect of groundwater level on vegetation in the middle and lower reaches of the Tarim River, Xinjiang, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2004, 28(3):400-405. (in Chinese))
- [28] 陈亚宁, 王强, 李卫红, 等. 植被生理生态学数据表征的合理地下水位研究:以塔里木河下游生态恢复过程为例[J]. 科学通报, 2006, 51(增刊1):7-13. (CHEN Yaning, WANG Qiang, LI Weihong, et al. Study on reasonable groundwater level that representation by physiological ecology data of vegetation: a example study on ecological restoration process in the lower reaches of Tarim river [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(Sup1):7-13. (in Chinese))
- [29] 新疆地矿局第一勘察院. 塔里木河干流流域水文地质及地下水开发利用调查[R]. 乌鲁木齐:新疆地矿局第一勘察院, 1990:173-177.
- [30] 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]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2005.
- [31] 樊自立, 马英杰, 张宏, 等. 塔里木河流域生态地下水位及其合理深度确定[J]. 干旱区地理, 2004, 27(1):8-13. (FAN Zili, MA Yingjie, ZHANG Hong, et al. Research of eco-water table and rational depth of groundwater of Tarim River drainage basin[J]. Arid Land Geography, 2004, 27(1):8-13. (in Chinese))
- [32] 白元, 徐海量, 张青青, 等. 基于地下水恢复的塔里木河下游生态需水量估算[J]. 生态学报, 2015, 35(3):630-640. (BAI Yuan, XU Hailiang, ZHANG Qingqing, et al. Evaluation on ecological water requirement in the lower reaches of Tarim River based on groundwater restoration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(3):630-640. (in Chinese))
- [33] SEMHI K, ABDALLA O A E, KHIRBASH S A, et al. Mobility of rare earth elements in the system soils-plants-groundwaters: a case study of an arid area (Oman) [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2009, 2(2):143-150.
- [34] MASOUD A A, KOIKE K, MASHALY H A, et al. Spatio-temporal trends and change factors of groundwater quality in an arid area with peat rich aquifers: emergence of water environmental problems in Tanta District, Egypt [J]. Journal of Arid Environments, 2016, 124:360-376.
- [35] 徐海量, 宋郁东, 陈亚宁. 塔里木河下游生态输水后地下水变化规律研究[J]. 水科学进展, 2004, 15(2):223-226. (XU Hailiang, SONG Yudong, CHEN Yaning. Study on variation of ground-water after ecological water transport in the lower reaches of Tarim River [J]. Advances in Water Science, 2004, 15(2):223-226. (in Chinese))
- [36] 徐海量, 叶茂, 李吉玫. 塔里木河下游输水后地下水动态变化及天然植被的生态响应[J]. 自然科学进展, 2007, 17(4):460-470. (XU Hailiang, YE Mao, LI Jimei. Dynamic change of groundwater and ecological response of natural vegetation after the water conveyance in the lower reaches of Tarim River [J]. Progress in Natural Science, 2007, 17(4):460-470. (in Chinese))
- [37] 芦艳玲, 叶朝霞. 塔里木河下游地下水位对生态输水的响应[J]. 干旱区研究, 2012, 29(4):574-578. (LU Yanling, YE Zhaoxia. Response of groundwater level to the ecological water conveyance in the lower reaches of the Tarim River [J]. Arid Zone Research, 2012, 29(4):574-578. (in Chinese))
- [38] 陈亚宁, 李卫红, 徐海量, 等. 塔里木河下游地下水位对植被的影响[J]. 地理学报, 2003, 58(4):542-549. (CHEN Yaning, LI Weihong, XU Hailing, et al. The influence of groundwater on vegetation in the lower reaches of Tarim River, China [J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(4):542-549. (in Chinese))

(收稿日期:2016-12-09 编辑:徐娟)