

近20年塔里木河干流区地下水埋深变化特征及其生态效应研究

雍正^{1,3,4}, 赵成义², 施枫芝^{1,3,4}, 马晓飞^{1,3,4}

(1.中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室,乌鲁木齐 830011;

2.南京信息工程大学土地科学研究中心,南京 210044;

3.新疆阿克苏绿洲农田生态系统国家野外科学观测研究站,新疆阿克苏 843017;4.中国科学院大学,北京 100049)

摘要: 基于塔里木河干流区近20年水文生态变化监测资料,研究了其地下水埋深时空变化特征与河道来水的相互关系及其生态效应。结果表明:塔河干流上中游段地下水埋深年度变化呈枯水期3—4月变幅在0.42~0.92 m,汛期7—9月变幅在1.06~3.67 m。经近20年的生态输水,2009—2017年9年间下游段地下水埋深平均抬升了3.75 m,地下水埋深随输水量的变化明显,总体上在输水停止后1月内达到峰值,而后逐渐降低,直至下一次输水才会明显回升。2009年之后的生态输水对下游植被恢复效果明显,下游NDVI平均值由0.05提升至0.15。本研究系统分析了塔里木河干流区生态输水以来区域生态环境对地下水的综合响应,可为区域水资源调控和进一步量化输水效益提供理论依据。

关键词: 生态输水;地下水埋深;生态效应;塔里木河干流

中图分类号: P641.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)03-0182-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.03.028

Variation Characteristics of Groundwater Depth and Its Ecological Effect in the Main Stream of Tarim River in Recent 20 Years

YONG Zheng^{1,3,4}, ZHAO Chengyi², SHI Fengzhi^{1,3,4}, MA Xiaofei^{1,3,4}

(1.State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011; 2.Institute of Geographical Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044; 3.Aksu National Station of Observation and Research for Oasis Agro-ecosystem, Aksu, Xinjiang 843017; 4.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: The spatio temporal variation characteristics of groundwater depth and the inflow of river and its ecological effect were studied based on the monitoring of hydrological and ecological parameters in the main stream area of Tarim River in recent 20 years. The results showed that the annual variation of ground water depth in the upper and middle reaches of the main Tarim River was 0.42~0.92 m in the dry season from March to April, and 1.06~3.67 m in the flood season from July to September. After nearly 20 years of ecological water conveyance, the groundwater depth in the downstream section had increased by 3.75 m during 2009—2017. The depth of groundwater varied significantly with the amount of water conveyance. Generally, it reached the peak value within one month after the water conveyanced. After that, it gradually decreased until the next water conveyance. After 2009, the ecological water transport has obvious effect on the vegetation restoration of downstream, and the average value of NDVI in the downstream increased from 0.05 to 0.15. This study systematically analyzed the comprehensive response of regional ecological environment to groundwater since the ecological transport of the main stream of Tarim River, which could provide theoretical basis for regional water resource management and further quantification of water transport benefits.

Keywords: ecological water conveyance; groundwater depth; ecological effect; main stream of Tarim River

地下水是干旱区地表过程变化及演变的关键因素之一^[1],其决定着干旱区地表生态水文过程的演变方向和范围,尤以对荒漠河岸林影响最为显著^[2]。塔

里木河干流区是极端干旱区典型区域^[3],因源流地区来水量逐渐减少,塔里木河干流区地下水补给量逐年短缺,加之农业灌溉、工业和生活耗水增加等人类活

收稿日期:2019-10-31

资助项目:国家自然科学基金重点项目(41671030);中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA2006030201);中国科学院青年千人计划项目(Y772121)

第一作者:雍正(1994—),男,硕士研究生,主要从事干旱区生态水文研究。E-mail: schizor@foxmail.com

通信作者:赵成义(1966—),男,博士,教授,研究员,主要从事生态水文学和土壤学研究。E-mail: zhaocy@nuist.edu.cn

动影响,河岸植被因地下水埋深降低而退化明显,严重威胁到“绿色走廊”生态安全。自 2000 年塔河综合治理工程实施以来,截至 2019 年已先后完成了 19 次生态输水^[4],地下水埋深抬升明显,下游河岸植被明显恢复^[5-6],已引起了国内外许多学者的高度关注^[7-8],针对下游地区的生态问题不同学者给出了适宜植被生长的地下水埋深^[9]。纵观研究进展,塔里木河干流地下水动态特征及其生态效应研究主要集中在下游,上中游的研究较少,关于塔河干流地表水与地下水的相互作用生态效应的研究不多^[10]。调查发现,塔河干流上中游区域近年开始出现生态环境略微衰退的迹象,因此从全流域角度长时间序列探讨塔河干流流域的地下水埋深变化特征及其生态效应的研究非常具有现实意义。本文基于塔里木河干流的野外调查、地下水埋深实时监测和径流量、输水量统计资料,对比分析了上中游河道来水和下游人工输水情况下的地下水埋深变化及其生态效应,探讨了河道来水量与地下水埋深水位之间的关联性与植被覆盖变化,尝试为塔里木河干流的生态环境恢复和保护、生态用水精细化管理提供依据。

1 研究区概况

塔里木河干流地理坐标 81°13′—88°34′E, 39°26′—41°32′N, 面积 $4.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 1)。其地势西高东低,海拔为 779~1 031 m,最低位于台特玛湖。塔里木河干流全长 1 321 km,分上中下游 3 段,阿拉尔、英巴扎、恰拉为上中下游分段剖面节点。土壤以砂质土壤为主,表层土壤以亚砂土为主,含水层土壤以中细砂为主^[11]。干流河源阿拉尔断面多年平均径流量 $47.47 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。塔里木河干流区为典型的大陆性干旱气候,冬季干冷,夏季酷热,年均气温 10.6~11.5 °C,年均降水量 17.4~42.8 mm,蒸发量 2 300~3 000 mm^[12]。研究区地下水与地表水流向一致,自西向东。水力坡度一般为 0.000 2 上下^[13],径流极其缓慢,潜水埋深一般为 3~10 m。植被类型为乔灌木结构,乔木以胡杨(*Populus euphratica*)为主要建群种,灌木包括怪柳(*Tamarix chinensis*)、铃铛刺(*Halimodendron halodendron*)和黑刺(*Lycium ruthenicum*)等,草本植物有芦苇(*Phragmites communis*)、花花柴(*Karelinia caspica*)、鹿角草(*Glossogyne tenuifolia*)和骆驼刺(*Alhageiton glomeratus*)等。

2 数据与方法

2.1 野外观测

研究所用数据包括塔里木河干流区现有 14 个监测断面 98 眼观测探孔 2009—2017 年的地下水埋深日数据,部分断面 2012—2017 年的月来水量数据,下

游输水量统计资料,2009—2017 年干流区域的 108 期 MODIS 遥感影像资料。14 个监测断面上游 2 个:阿拉尔和新其满;中游 6 个:英巴扎、沙吉力克、沙子河口、乌斯满、阿其克、铁依孜;下游 6 个:恰拉、英苏/老英苏、喀尔达依/博孜库勒、阿拉干、依干不及麻、库尔干。每个断面的观测探孔一般设置 6 个,在主河道的北岸或者南岸,以阿拉尔(A)断面为例:A₁探孔距离主河道 100 m,A₂探孔距离主河道 300 m,A₃探孔距主河道 500 m,A₄探孔距主河道 800 m,A₅探孔距主河道 1 100 m,A₆探孔距离主河道 1 300 m;其他断面的观测探孔距离布设与此类似。上中游断面观测探孔 2012 年建设完成,下游断面的观测探孔 2009 年建设完成。河道来水量数据时间长度从 2012 年 1 月到 2017 年 12 月,监测站点共 6 个,包括上游阿拉尔、新其满;中游英巴扎、乌斯满、阿其克;下游的恰拉。具体见表 1。

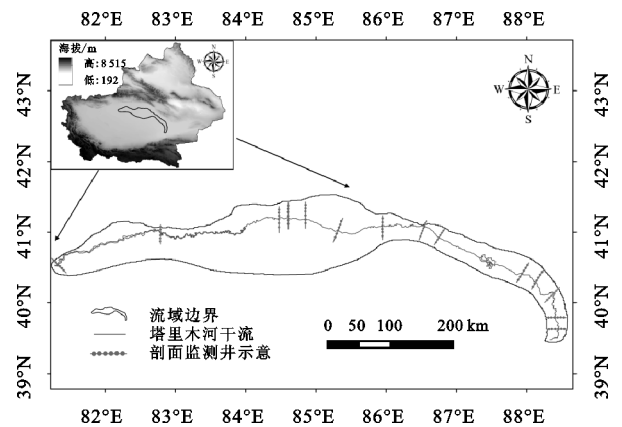


图 1 研究区概况

2.2 数据处理

根据获取到的序列资料,去除异常值,用 SPSS 进行空间插值,插补去除异常值之后的空缺,使数据序列达到完整。利用 ArcGIS 分析地下水埋深与 NDVI 的相关性。统计学常规数值计算包括:最大值、最小值、变幅、平均值、标准差、变差系数等。

3 结果与分析

3.1 近 20 年塔河干流地下水埋深变化特征

3.1.1 塔河干流上中游地下水埋深的变化 塔里木河的径流量主要来自于山区的冰雪融水,每年到了 8 月左右气温最高的时候,融水量最大,形成了塔里木河 8 月左右的汛期。干流区域无支流汇入,降水补给较少,径流量沿河逐渐消耗,地表径流部分逐渐转化为地下水。地下水埋深主要受塔里木河径流量的影响,出现上下波动起伏,上中游段的地下水埋深最浅一般出现在 8—9 月的汛期,汛期一结束,地下水消耗于各种途径,埋深逐渐变深,埋深最深出现在每年汛期到来前的 5—6 月,汛期到来,地下水埋深迅速抬升

达到每年的峰值,塔河干流两岸的地下水埋深对河流汛期的响应很快。统计参数上,标准差除阿拉尔 A₆探孔以外均低于 1.00 m,上中游探孔的变差系数也相对较小(表 2)。而下游的地下水埋深由于受人工输水的影响,情况相当复杂,标准差除喀尔达依/博

孜库勒 G₆探孔和阿拉干 H₆探孔以外,其他探孔均在 1.00 m 以上。埋深最深英苏断面 F₆探孔可以达到 13.48 m,埋深最浅恰拉 N₁探孔可以达到 0.05 m,变幅最大的库尔干 J₆探孔可以达到 10.47 m,变差系数也比上中游段的观测探孔高许多。

表 1 塔河干流生态监测断面地理位置及监测探孔信息

所处位置	序号	断面名称	探孔数/眼	坐标		探孔距/m	建设年份
				经度 E	纬度 N		
上游	1	阿拉尔(A)	6	80°57′	40°29′	50~100	2012
	2	新其满(B)	6	82°47′	41°00′	50~100	2012
中游	3	英巴扎(C)	6	84°31′	41°10′	50~100	2012
	4	沙吉力克(T)	6	84°35′	41°12′	50~100	2012
	5	沙子河口(L)	6	84°52′	41°11′	50~100	2012
	6	乌斯满(D)	6	85°20′	41°01′	50~100	2012
	7	阿其克河口(E)	6	85°58′	41°03′	50~100	2012
	8	铁依孜(W)	6	86°31′	41°03′	50~100	2012
下游	9	恰拉(N)	7	86°42′	40°57′	50~100	2010
	10	英苏/老英苏(F)	11	87°56′	40°25′	50~100	2010
	11	喀尔达依/博孜库勒(G)	12	88°10′	40°22′	50~100	2010
	12	阿拉干(H)	6	88°21′	40°08′	50~100	2010
	13	依干不及麻(I)	6	88°22′	39°47′	50~100	2010
	14	库尔干(J)	6	88°25′	39°36′	50~100	2010

表 2 塔里木河干流区监测探孔地下水埋深统计参数

监测井 位置	站点 名称	单位:m					
		最大值	最小值	变幅	平均值	标准差	变差 系数
上游	A ₁	3.99	1.75	2.24	2.90	0.46	0.16
	A ₆	6.52	1.68	4.84	3.09	1.09	0.35
	B ₁	3.04	0.04	3.00	1.94	0.62	0.32
	B ₆	1.93	0.01	1.92	1.09	0.44	0.40
中游	C ₁	3.82	0.17	3.65	2.28	0.89	0.39
	C ₆	3.30	1.33	1.97	2.47	0.50	0.20
	T ₁	3.34	0.02	3.32	1.53	0.93	0.61
	T ₆	3.85	0.42	3.43	2.23	0.95	0.43
	L ₁	6.50	2.55	3.94	4.95	0.82	0.17
	L ₆	7.67	5.32	2.35	6.66	0.52	0.08
	D ₁	3.57	0.39	3.18	2.21	0.80	0.36
	D ₆	4.34	3.19	1.15	3.64	0.35	0.10
	E ₁	4.16	1.01	3.15	2.29	0.59	0.26
	E ₆	3.61	1.96	1.65	2.86	0.50	0.18
	W ₁	3.78	0.06	3.72	2.07	0.71	0.34
	W ₆	5.02	3.38	1.64	3.66	0.21	0.06
下游	N ₁	4.19	0.05	4.13	1.82	1.03	0.57
	N ₇	5.45	2.72	2.73	3.80	1.04	0.27
	F ₁	9.06	0.83	8.24	4.06	1.79	0.44
	F ₅	10.49	3.15	7.33	6.50	1.14	0.17
	F ₆	13.48	3.68	9.80	7.21	1.31	0.18
	F ₁₁	9.34	1.36	7.98	5.18	1.89	0.36
	G ₁	8.06	2.54	5.52	5.73	1.33	0.23
	G ₆	7.98	3.94	4.04	7.45	0.48	0.06
	G ₇	7.05	0.24	6.81	4.83	1.72	0.36
	G ₁₂	7.86	0.75	7.11	4.26	2.10	0.49
	H ₁	9.50	3.84	5.66	6.17	1.61	0.26
	H ₆	8.56	5.32	3.25	6.85	0.95	0.14
	I ₁	6.87	0.17	6.70	3.65	1.62	0.44
	I ₆	7.09	0.14	6.95	5.50	1.62	0.29
	J ₁	9.22	0.93	8.29	4.89	2.39	0.49
	J ₆	11.48	1.01	10.47	5.76	1.98	0.34

地下水埋深的横向变化是指顺河道方向地下水埋深的动态变化特征。图 2(a)为塔河干流上游阿拉尔 A₁探孔和新其满 B₁探孔在 2012—2017 年的地下水埋深波动变化情况。阿拉尔 A₁探孔地下水埋深处于 1.75~3.99 m,新其满 B₁探孔地下水埋深处于 0.03~3.04 m,两者的地下水埋深都浅于适宜生态水位,相对位置处于下游的 B₁探孔地下水埋深整体浅于 A₁探孔。2 个探孔的监测数据显示近年埋深都呈缓慢抬升的趋势,B₁探孔抬升幅度略高于 A₁探孔。不难发现,2 个观测探孔 8—9 月地下水埋深都出现了大幅升高的现象,其中 2015 年抬升幅度最大,2014 年抬升幅度最小,最大抬升幅度是 B₁探孔 2015 年的 7—8 月,单次升高 2.34 m;另外 3—4 月也都出现了小幅回升。年际变幅在 2.24~3.0 m,年内变幅在 1.01~2.61 m。可见上游的地下水埋深年内变幅稍大于年际变幅。

中游断面的地下水埋深变化相较于上游断面更加多变,波动范围更大(图 2(b))。6 年间,英巴扎 C₁探孔地下水埋深范围在 0.17~3.82 m,乌斯满 D₁探孔地下水埋深范围在 0.39~3.57 m,阿其克 E₁探孔地下水埋深处于 1.01~3.15 m。3 个观测探孔的地下水埋深的深浅差别不大,同上游断面相似的是同样每年都有 2 次地下水埋深抬升明显的现象,与上游断面不同的是中游断面抬升幅度较大的时期在 9—11 月,而 3—4 月的小幅抬升不甚明显。年际变幅 2.13~3.65 m,年内变幅 0.82~2.23 m,年际变幅大于年内变幅。对比上游断面和中游断面的地下水埋深,上游的断面之间的地下

水埋深差相较于中游的断面之间差距更大,上游断面

埋深的年际变化更小,但年内变化更大一些。

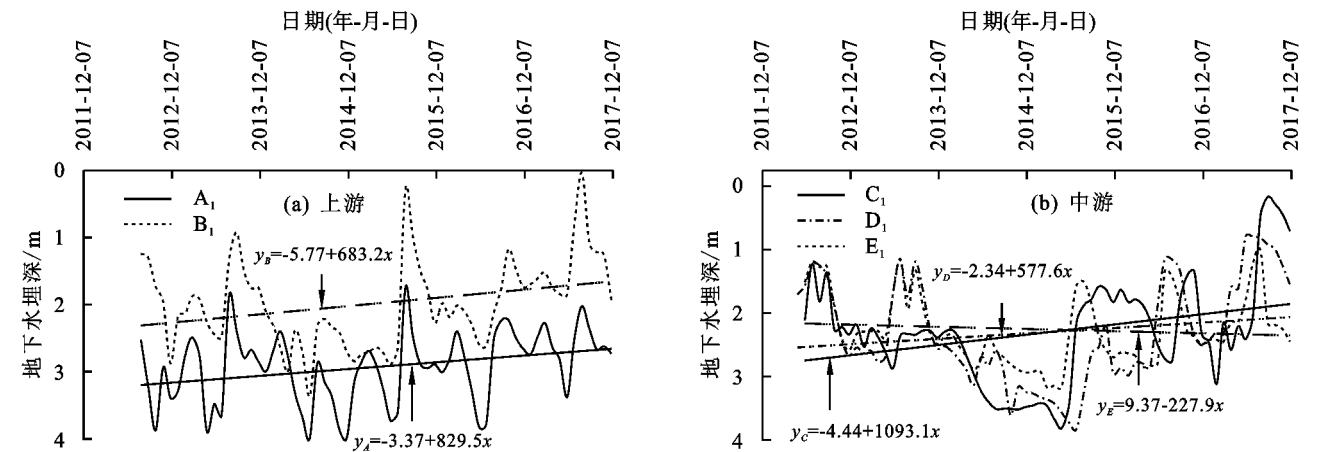


图 2 塔河干流上游中游断面地下水埋深变化

地下水埋深的纵向变化是指以河道为中心,垂直于河道作剖面,沿着剖面向河道两岸延伸地区的地下水埋深出现的变化趋势。本研究分别在上游(新其满 B)和中游(乌斯满 D)各选取 1 个代表断面来分析,以说明塔河干流的上中游河段地下水埋深在纵向上的变化规律。新其满和乌斯满断面的地下水埋深总体出现的现象

是从近河岸处的 B₁、D₁ 向远河岸处的 B₆、D₆ 逐渐变深,不同年份之间稍有波动。B₁ 和 B₆ 同年最大埋深相差仅 1.02 m, D₁ 和 D₆ 同年最大埋深相差 2.07 m,从图 3 中能直观看出,近 6 年中游的乌斯满断面埋深下限低于上游的新其满断面。可见中游的不同距河距离埋深差大于上游的不同距河距离埋深差。

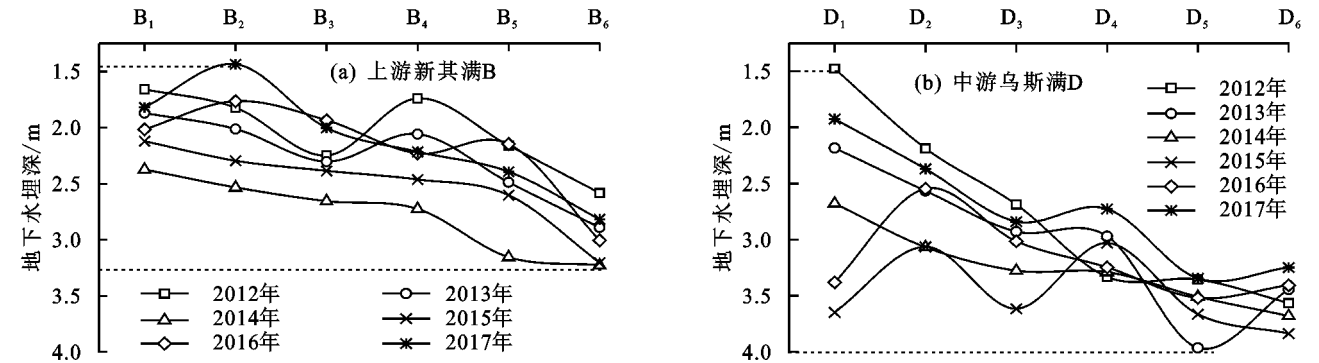
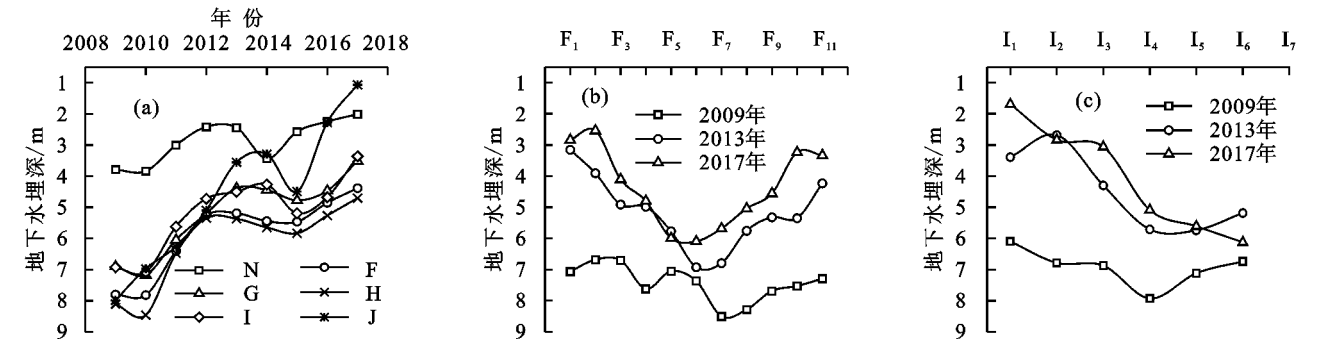


图 3 上中游典型断面地下水埋深纵向变化

3.1.2 塔河干流下游地下水埋深的变化 随着生态输水的进行,下游地区地下水埋深也在明显抬升,2009—2017 年 6 年间下游 6 个监测断面的地下水埋深总体呈现梯级抬升的态势(图 4)。沿大西海子水库以下的输水河段,英苏/老英苏 F、喀尔达依/博孜库勒 G、阿拉干 H、依干不及麻 I、库尔干 J 地下

水埋深分别抬升 3.43,3.65,3.76,3.72,6.92 m,抬升幅度也呈现间断递增的趋势;地下水埋深分别达到 4.39,3.52,4.70,3.36,1.07 m,均达到生态警戒埋深水位 6 m 以上;距离尾间台特玛湖最近的库尔干断面抬升幅度最明显,由 2009 年的 7.99 m 抬升至 2017 年的 1.07 m。



注:(a)下游典型断面代表年地下水埋深变化;(b)英苏/老英苏 F;(c)依干不及麻 I。

图 4 塔里木河下游断面地下水埋深变化

从图 4 可以看出,下游生态输水对地下水埋深在横向上的影响显著。英苏/老英苏 F 断面设置于老

塔里木河和其文阔尔河中间, F_1 探孔紧挨其文阔尔河, F_{11} 探孔挨着老塔里木河, 因此地下水埋深由两边向中间逐渐变深。结合典型断面地下水埋深年际变化, 参考数据的完整性, 选取 2009 年、2013 年、2017 年作为代表年份。从 2009 年、2013 年、2017 年 3 个代表年的埋深变化来看, 断面所有观测探孔的地下水埋深均在升高, F_1 、 F_{11} 观测探孔较 F_5 、 F_6 观测探孔抬升幅度更大。距离放水地较远的依干不及麻 I 断面地下水埋深横向抬升没有英苏/老英苏 F 断面明显, 但 I_1 观测探孔的抬升幅度很可观, 2017 年埋深较 2009 年埋深抬升了 4.41 m, 而 I_6 探孔仅抬升了 0.61 m。

3.2 地下水埋深变化与河道来水量的关系

3.2.1 上中游来水量和下游输水量变化 塔里木河流域包括“四源一干”的水源和河流过程^[14], 四源流是阿克苏河、和田河、叶尔羌河以及开都—孔雀河, 干流段为三源流(阿克苏河、和田河、叶尔羌河)汇合处阿拉尔的肖夹克至尾间台特玛湖。阿拉尔是塔里木河干流起始点, 其来水量供给干流全长 1 321 km 的水流。以 2015 年为例, 到恰拉断面时由 $50.87 \times 10^8 \text{ m}^3$ 减少到 $7.9 \times 10^8 \text{ m}^3$, 可见在阿拉尔到恰拉这 893 km 的里程上水量消耗是相当大的。阿拉尔的来水量高低不均, 最大值与最小值相差甚远, 2012—2017 年 6 年期间, 阿拉尔来水量最高是丰水年 2017 年的 $67.39 \times 10^8 \text{ m}^3$, 最低为枯水年 2014 年的 $22.63 \times 10^8 \text{ m}^3$, 两者相差 3 倍有余。

本文统计了 2009 年 12 月 5 日到 2018 年 1 月 4 日共 9 次的输水情况, 其中输水最多的是 2017 年 4 月 27 日开始的第 18 次输水, 其总量为 $12.146 1 \times 10^8 \text{ m}^3$, 最少的是 2014 年 6 月 17 日开始的第 15 次输水, 其总量为 $0.727 \times 10^8 \text{ m}^3$, 与该年为枯水年有关, 上游来水量少。这 9 次的输水源基本来自于塔里木河干流上中游的来水, 仅 2009 年的第 10 次输水来自于孔雀河的调水。下游的输水方式采用单通道输水、双通道输水、汊河输水、面状输水 4 种方式相结合的形式^[15]; 当本年的源流来水量较少时, 就采用单通道输水, 使其水量尽量到达尾间台特玛湖, 尽可能的延长输水里程; 当本年来水量足够丰富时, 便结合所有输水方式, 尽可能的扩大输水区域, 使更多地区受到水的滋润。水头第 1 次到达台特玛湖是在 2001 年的输水, 整个输水阶段耗时 67 天; 而 2011 年的第 12 次输水时, 水头到达台特玛湖只用了 18 天; 最近 2017 年第 18 次输水到达台特玛湖耗时更短, 仅仅 15 天就到达了台特玛湖, 过水时间缩短了 42 天。

3.2.2 塔河干流上游、中游、下游来水量对地下水埋深变化的影响 新其满断面位于塔里木河干流上游段的中间位置, 故选取该断面作为上游区域的典型代

表断面进行讨论。一般情况下, 地下水埋深根据河流的来水量多少出现上下波动状态。2012—2017 年除 2015 年外的 3—4 月, 由于春季到来, 气温回升至零上, 山间积雪融化^[16], 形成水源, 因而 B_1 、 B_5 探孔的地下水埋深都出现了小幅抬升情况; 到了汛期 8 月, 每年的地下水埋深都有很大幅度的升高, 枯水年和丰水年升高幅度不同; 在平常的 10 月到翌年 6 月, 地下水埋深呈缓慢降低趋势, 到汛期来临之前埋深降低到最深点, 汛期到来迅速回升。2014 年为枯水年, B_5 观测探孔距主河道 1 100 m, 河水对地下水的补给相对甚少, 因此 B_5 探孔的地下水埋深降落明显, 直到第 2 年汛期来临埋深才抬升至正常水平(图 5(a))。

塔河干流中游段选取乌斯满断面作为代表断面进行讨论。相较于上游的新其满断面来水量小了很多, 但是同上游断面一样会有汛期、早期的水量波动。因为来水量的波动变化, 造成了地下水埋深的此起彼伏, 但都存在一定的滞后性。由图 5(b)可知, 乌斯满断面的汛期在 8 月, 地下水埋深抬升的峰值点却在 9—10 月, D_1 探孔的波动关系对来水量的响应更加明显, D_5 探孔由于距离主河道较远, 加之中游的来水量相较于上游少了很多, 地下水埋深在横向上的响应体现微弱。

塔河干流下游的生态输水量与地下水埋深关系可以概括为: 当输水量达到一定规模时, 地下水埋深抬升明显, 无来水时, 地下水埋深缓慢下落, 与生态水文学^[17]的基本规律相一致。2009 年的第 10 次、2014 年的第 15 次输水量都很小, 从英苏/老英苏 F_1 探孔和依干不及麻 I_1 探孔的地下水埋深动态变化来看都未出现抬升现象(图 5(c)), 而其余 7 次输水都出现了不同幅度的抬升, 比较明显的是第 11、13、16 次输水, 第 11 次输水 F_1 探孔和 I_1 探孔地下水埋深分别升高 5.16、3.22 m; 第 13 次输水 F_1 探孔埋深升高 4.02 m; 第 16 次输水 I_1 探孔埋深升高 3.49 m。此外还有一个现象值得一提, 在输水量很大的情况下, 地下水埋深的抬升幅度并不会同样很大, 当埋深达到一定峰值的时候就不再继续抬升, 但是输水量大能够延缓地下水埋深的回落速度, 使其在一个相对较长时间内保持在较浅的埋深水位。

3.3 地下水埋深变化后的生态效应分析

上游新其满监测断面的 B_1 和 B_5 探孔和中游乌斯满监测断面的 D_1 和 D_5 探孔地下水埋深在 2012—2017 年 6 年间相对变化幅度不大, 因此与之相关的 NDVI 同样呈周期性的年变化, 但近 2 年指数值相对往年略微减少, 距离河道更近的 B_1 和 D_1 探孔更明显, 近河岸地下水埋

深变化相对远河岸更大。究其原因可能与数据来源关系较大,NDVI 数据来源于2组不同的遥感影像,2012—2015年1组和2016—2017年1组。但经野外考察和查阅资料发现近2年的塔河来水量处于枯水年,同时对下游的输水大部分水源来自上中游的调水,上中游的一部分水量流向下游,自然上中游的植被指数同样也应处于低水平(图6)。

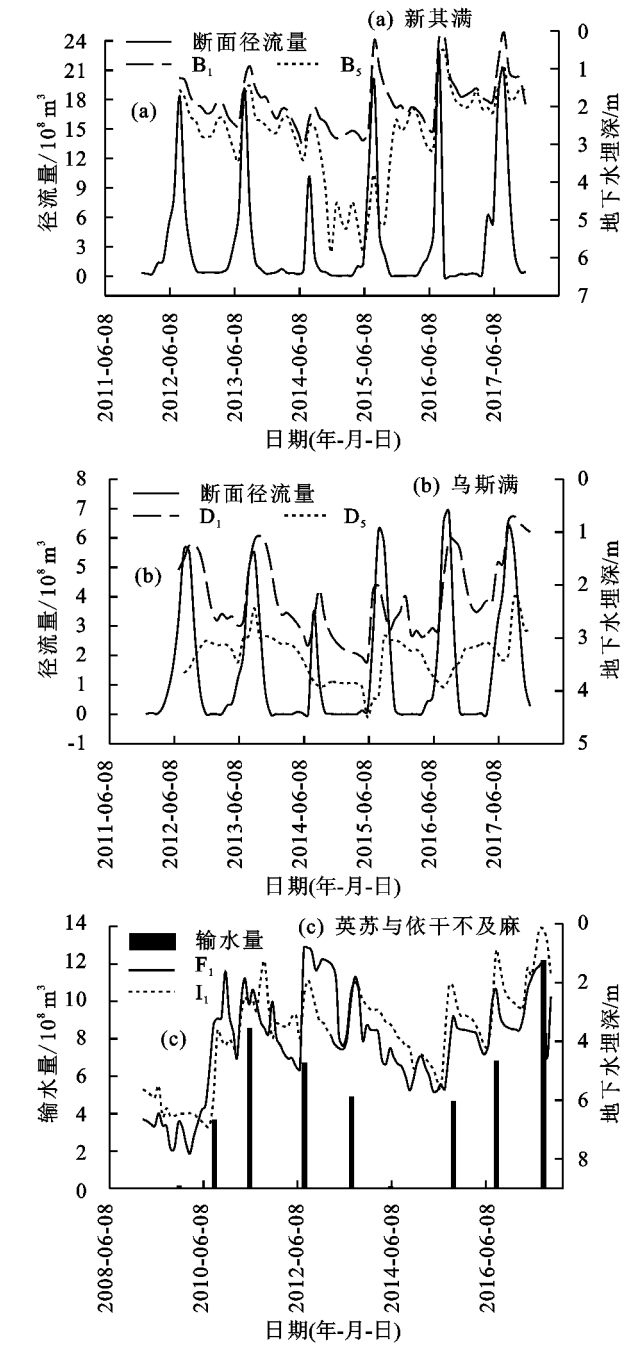


图5 断面来水量与地下水埋深关系

从下游的英苏 F_1 探孔和依干不及麻 I_1 探孔可以看出,随着下游输水的不断进行, F_1 探孔地下水埋深由2009年的6.66 m抬升到了2017年的2.48 m,9年间升高了4.18 m; I_1 探孔地下水埋深由2009年的5.65 m抬升到了2017年的1.78m,9年之内升高了

3.87 m。地下水资源作为干旱区影响植被生长的最关键因素,地下水埋深的深浅直接决定在其地表能够生长的植被类型结构以及植被的茂密程度。从下游2个代表监测断面的 F_1 和 I_1 探孔监测数据显示的地下水埋深数据和从遥感影像中提取的 NDVI 绘成的曲线图变化走势发现,随着地下水埋深的间断往复变化,NVDI 由2010年前后的几近平稳到2014年的开始略微出现如上中游一样的年周期变化再到后来2016年左右的显著提高, F_1 探孔的 NDVI 由最低的0.05 升高到了0.14, I_1 探孔的 NDVI 由最低的0.04 提升到0.11(图6)。沿河两岸的植被类型分布由近河岸向外按乔木、灌木、草本结构延伸,近河岸地下水埋深浅地带分布着密集的以胡杨林为主的乔木建群种,随着埋深的降低,由耐旱植被——梭梭、柽柳等形成沙丘灌丛,灌丛外沿地下水位较深的地带分布草本植物,两岸延伸可达10~35 km。在这么宽阔的范围内,茂密的植被通过改变下垫面温度、影响土壤蒸发和形成植物蒸腾起到涵养水分的作用。可以发现,对塔河下游的生态输水工程,给下游沿河两岸的河岸植被恢复产生了积极的显著效果,植被逐渐恢复。

4 讨论

数据分析显示,由于近20年河道来水量的略微增加以及行政部门对塔里木河生态环境的重视开展的诸如修建生态水闸、生态放水、专项生态用水等项目的实施,塔里木河干流上中游的地下水埋深总体呈现缓慢抬升趋势,抬升幅度由近河岸向远河岸递减,河岸植被状况保持稳定。下游段从2000年5月14日开始的第1次生态输水到现在的2019年,已累计完成19次输水,截至2018年1月4日结束的第18次输水,已累计向下游输水约 $70 \times 10^8 \text{ m}^3$ [15]。输水的生态效应在不断得到反馈[7],输水的方案在不断地优化[8],输水的管理体制更加合理高效[18]。众多专家学者在讨论到生态输水时,几乎都主张将生态输水继续开展下去,只有保证一定较浅的地下水埋深,才能满足下游植被的生长和生态恢复,塔河干流下游的生态修复工程是世界上人类干预改良自然生态环境获得阶段性成功的典型案例。虽然已经取得一些成果,但生态输水取得的成绩还不足以证明生态恢复的目标已经达到,输水“救命”的阶段经过近20年的努力已经基本完成,接下来的工作是使生态输水更加精细化,提高水资源的利用效率。

研究[19]结果表明,塔里木河干流的地下水埋深已不断抬升至草本植被都能够汲取水分的深度(3~5 m),植物有了水的滋养从而得到显著性的恢复,植被

盖度增加^[20],乔灌木冠幅扩大^[21],物种多样性逐渐显现^[19],生态系统受到一定程度的补偿^[22],随着由地下水供养的自然植被群落沿乔灌草秩序逐渐恢复^[23],风蚀沙化作用减弱,林间沙地出现由流动沙丘向

固定沙丘演化的趋向,使塔克拉玛干沙漠和库鲁克塔格沙漠的合拢态势得到有效遏制^[24],荒漠绿洲生态系统活力重新迸发;同时生物灾害慢慢减少,生产力提升,生态环境向着不断改善甚至良好的状态转变。

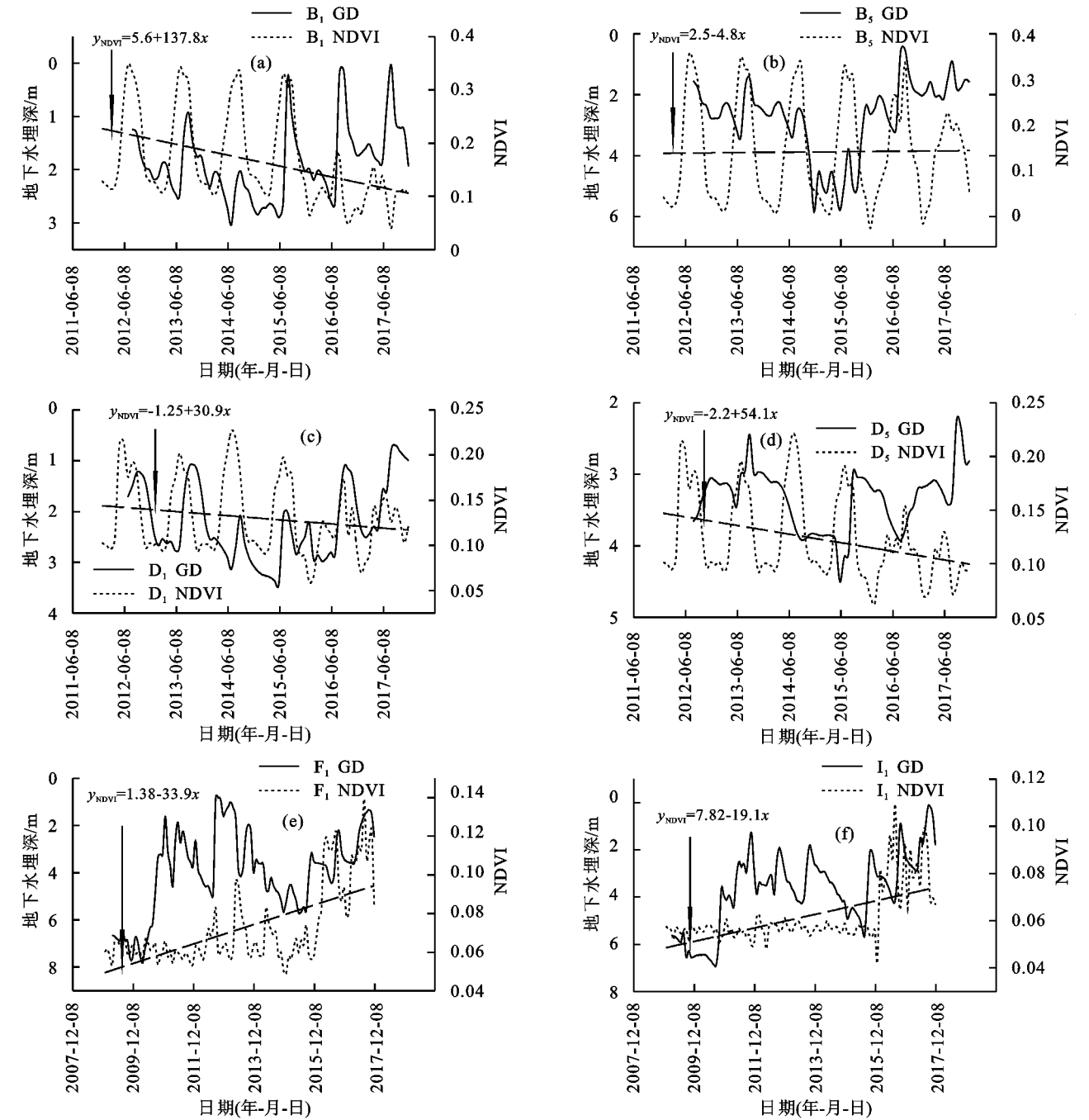


图 6 地下水埋深与 NDVI 关系

5 结论

塔里木河干流上中游两岸的地下水埋深根据每年的河道来水量多少出现上下波动起伏的现象,汛期埋深达到最浅,而后缓慢降低,至汛期到来前的 5—6 月达到最深,地下水埋深的升降对来水量的响应有一定的滞后性,越到下游滞后性越明显,汛期在 8 月,而地下水埋深的最浅峰值往往在 9 月甚至 10 月。上中游自然来水量除 2014 年的枯水年外都较为丰沛,地

下水埋深整体较浅,2012—2017 年平均埋深维持在 1.70~4.14 m,近 20 年的生态输水工程,从塔河干流上中游引水,并没有使上中游的地下水埋深出现下降的现象。年际变幅和年内变幅在干旱区内陆河里相比相对较小,标准差普遍低于 1.00,变差系数也要小一些,但中游的不同距河距离埋深差相对于上游的不同距河距离埋深差要大一些。上中游的归一化植被指数(NDVI)呈年周期变化,最近 2 年略微降低。可

见,在重视下游植被恢复的同时,还应警惕对下游输水的过度分配而挤占上中游农业灌溉和植被所需耗水导致的植被指数降低现象,造成上中游的生态环境危机,应避免“拆东墙补西墙”事件的发生。

塔里木河干流下游两岸的地下水埋深在深度的人类活动影响下 2009—2017 年平均抬升 3.75 m,最浅平均埋深阿拉干断面达到 4.70 m,可见下游生态输水对地下水埋深抬升的影响显著,下游的植被指数也慢慢得到提升,NDVI 平均值由 0.05 提升至 0.15。但从第 15 次很小的输水量情况下,几乎无地下水埋深抬升痕迹的现象可以看出,间断的输水效果始终没有像上中游那样自然径流的状态良好,根据 2019 年 8 月对塔河干流的考察,下游台特玛湖的湖面面积在 2018 年 11 月已经超过 500 km²,过多的水资源囤积在尾间湖,而上中游没有得到充分灌溉,也是一种浪费。因此要想达到恢复下游的生态环境的最终目标,实现最佳的生态效应,还须更加细致的对源流不同来水量的快速反应策略进行研究。在本研究过程中,如果能收集到更加全面的资料,延长数据长度,补充生态方面的调查,也就能够对塔河干流上中游的认识更加全面,从而对生态效应方面的介绍提供更有力的事实证据。

参考文献:

[1] 范磊,侯光才,陶正平.毛乌素沙漠萨拉乌苏组地下水特征与植被分布关系[J].水土保持学报,2018,32(4):151-157.

[2] 王勇,赵成义,王丹丹,等.塔里木河流域不同林龄胡杨与怪柳的水分利用策略研究[J].水土保持学报,2017,31(6):157-163.

[3] 邓铭江,周海鹰,徐海量,等.塔里木河干流上中游丰枯情景下生态水调控研究[J].干旱区研究,2017,34(5):959-966.

[4] Martin K, Marek S, Anton K. Null model analyses of temporal patterns of bird assemblages and their foraging guilds revealed the predominance of positive and random associations[J]. Ecology and Evolution, 2019, 9(15): 8541-8554.

[5] 张瑞文,赵成义,王丹丹,等.极端干旱区不同水分条件下胡杨林生态耗水特征[J].水土保持学报,2019,33(4):270-278.

[6] 张静,雍会.干旱区塔里木河流域地下水生态调节与监测预警研究[J].中国农业资源与区划,2018,39(5):77-83.

[7] 陈亚宁,李卫红,陈亚鹏,等.科技支撑新疆塔里木河流域生态修复及可持续管理[J].干旱区地理,2018,41(5):901-907.

[8] 邓铭江,樊自立,徐海量,等.塔里木河流域生态功能区

划研究[J].干旱区地理,2017,40(4):705-717.

[9] 刘迁迁,古力米热·哈那提,苏里坦,等.塔里木河下游河岸带地下水埋深对生态输水的响应过程[J].干旱区地理,2017,40(5):979-986.

[10] 班春广,陶辉.董义阳,等.未来气候情景下塔里木河干流日径流过程模拟研究[J].干旱区研究,2018,35(4):770-778.

[11] 王锋,赵成义.农田灌溉模式下塔里木河流域地下水水位的变化分析:以塔里木河上游为例[J].干旱区资源与环境,2008,22(1):157-161.

[12] 施枫芝,赵成义,叶柏松,等.基于 PTFs 的干旱地区土壤饱和导水率的尺度扩展[J].中国沙漠,2014, 34(6):1584-1589.

[13] 赵成义,施枫芝,盛钰,等.近 30 年阿克苏绿洲水面蒸发趋势及影响因素[J].水土保持学报,2012,26(1):237-240,245.

[14] Yang F, Xue L Q, Wei G H, et al. Study on the dominant causes of streamflow alteration and effects of the current water diversion in the Tarim River Basin, China[J].Hydrological Processes,2018,32(22):3391-3401.

[15] 李丽君,张小清,陈长清,等.近 20 a 塔里木河下游输水对生态环境的影响[J].干旱区地理,2018,41(2):238-247.

[16] 赵成义,施枫芝,盛钰,等.近 50 a 来新疆降水随海拔变化的区域分异特征[J].冰川冻土,2011,33(6):1203-1213.

[17] 徐宗学,李景玉.水文科学研究进展的回顾与展望[J].水科学进展,2010,21(4):450-459.

[18] 熊宇斐,张广朋,陈超群,等.基于水量变化的塔里木河统一管理成效评价[J].自然资源学报,2016,31(11):1806-1816.

[19] 王希义,徐海量,潘存德,等.塔里木河下游地下水埋深对草本植物地上特征的影响[J].生态学杂志,2015,34(11):3057-3064.

[20] 万红梅,李霞,董道瑞,等.塔里木河下游植被覆盖变化遥感定量分析[J].自然资源学报,2013,28(4):668-677.

[21] 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[J].干旱区地理,2010,33(3):442-448.

[22] Aishan T, Halik U, Cyffka B, et al. Monitoring the hydrological and ecological response to water diversion in the lower reaches of the Tarim River, Northwest China[J].Quaternary International,2013,311:155-162.

[23] Thomas F M, eschke M J, ZhangX M, et al. Stand structure and productivity of populus euphratica along a gradient of groundwater distances at the Tarim River (NW China) [J]. Journal of Plant Ecology, 2017, 10(5):753-764.

[24] 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.