

新疆塔里木河下游断流河道输水的生态效应分析^{*}

陈亚宁^{①**} 张小雷^① 祝向民^② 李卫红^① 张元明^①
徐海量^① 张宏锋^① 陈亚鹏^①

(① 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; ② 塔里木河流域管理局, 库尔勒 831102)

摘要 对塔里木河下游断流河道 4 次输水过程以及 9 个地下水监测断面和 15 个植被样地的实地监测资料分析表明, 塔里木河下游地下水位随输水次数增加呈不断上升趋势. 地下水埋深分别由输水前的 9.87 m 升高到第 1 次输水后的 7.74 m, 第 2 次输水后的 3.79 m, 第 3 次输水后的 3.61 m 以及第 4 次输水后的 2.66 m, 输水河段两侧地下水位的横向响应范围呈逐渐扩大趋势, 响应范围由第 1 次输水后的 450 m 宽增加到第 4 次输水后的 1050 m 宽, 但地下水响应程度随远离输水河槽中轴线而减小; 地下水埋深对天然植被的组成、分布及长势有直接关系. 反映物种的数量变化和物种的生物学多样性程度的 Simpson 多样性指数、McIntosh 均匀度指数和 Margalef 丰富度指数, 由上游至下游, 随地下水位埋深加大, 分别由 0.70, 0.48 和 0.90 降低为 0.26, 0.17 和 0.37. 输水后, 随着地下水位的抬升, 天然植被得到拯救和恢复, 植被的响应范围也逐渐扩大, 由第 1 次输水后的 200~250 m, 扩展到第 4 次输水的 800 m, 但距保护塔里木河下游“绿色走廊”的目标还有很大差距. 鉴于此, 提出实施双河道输水以及河道输水与面上供水相结合方式, 或者通过建立现代化管道输水网络系统, 集约化地进行天然植被的输水拯救, 实现水资源的高效利用, 加快塔里木河下游受损生态系统的恢复与重建.

关键词 断流河道 输水 地下水位 天然植被 生态效应 塔里木河

水是干旱区绿洲生态系统构成、发展和稳定的基础, 是干旱区最关键的生态因子. 干旱区生物过程微弱, 稳定性低^[1~9], 地下水位的变化会直接影响天然植物的生长发育, 导致区域生态系统受损^[10,11]. 因此, 探讨地下水位变化与植被演变之间的关系, 已成为

生态与环境学家们进行干旱区荒漠生态保育和生态需水量研究的热点问题^[12~15].

中国西部干旱区生态环境极为脆弱, 水资源开发过程中的生态与经济的矛盾十分突出, 严重影响着区域社会经济的可持续发展. 地处中国西北干旱

2003-07-20 收稿, 2003-11-30 收修改稿

^{*} 中国科学院知识创新项目(批准号: KZCX1-08-03)和国家自然科学基金重点项目(批准号: 90102007)联合资助

^{**} E-mail: chenyn@ms.xjkb.ac.cn

区新疆的塔里木河, 全长 1321 km, 是中国最长的内陆河, 也是世界著名的内陆河之一, 具有自然资源丰富和生态环境脆弱双重性特点. 在过去的 50 年里, 塔里木河在以水资源开发利用为核心的大强度人类经济、社会活动的作用下, 流域自然生态过程发生了显著变化. 特别是位于塔克拉玛干沙漠和库鲁克沙漠之间的塔里木河下游地区, 属大陆性暖温带荒漠干旱气候, 气候干燥, 多风沙天气, 平均年降水量在 17.4~42.0 mm 之间, 而平均年蒸发力高达 2500~3000 mm. 1972 年大西海子水库建成后, 拦截了塔里木河, 致使其下游 321 km 河道彻底断流, 河流尾间湖泊——罗布泊和台特玛湖分别于 1970 和 1972 年干涸. 河水断流, 地下水位下降到 8~12 m, 导致由地下水维系的天然植被极度退化, 大面积死亡, 土地荒漠化过程加剧, 生态系统严重受损, 夹持在塔克拉玛干沙漠和库鲁克沙漠间的“绿色走廊”^[1]急剧萎缩. 塔里木河下游已成为中国西部干旱区水资源利用与生态环境问题最为突出的地区之一.

塔里木河下游日益退化的生态与环境问题, 引起了中国政府和国际社会的热切关注. 中国政府拟投资 107×10^8 元对塔里木河进行综合治理, 并于 2000 年开始向塔里木河下游断流 30 年的河道实施应急输水工程. 众多学者也纷纷从不同角度分析塔里木河水资源变化及消长过程^[16-19], 研究水资源开发

过程中的经济与生态的关系, 探讨生态退化与保护对策^[18-26], 为塔里木河流域水资源保护和生态建设提供了许多有益的建议, 但均未涉及塔里木河下游断流河道输水生态响应与生态恢复和保育等方面的科学问题.

塔里木河下游生态输水的目的是通过河道输水来补给和抬升地下水位, 使其升高至天然植被适合生长的范围, 以挽救日益衰败的天然植被, 保护“绿色走廊”, 恢复和重建塔里木河下游严重退化的生态系统. 本文结合 2000~2002 年对塔里木河下游植被、生态输水过程以及输水后地下水位变化的野外调查和实地监测资料的计算, 针对断流河道间歇性输水对浅层地下水、地表植被的影响以及维系生态安全的需水量等科学问题进行分析, 讨论塔里木河下游断流河道输水的生态效应, 提出塔里木河下游生态输水与加速受损生态系统的修复和重建的具体建议, 旨在为塔里木河下游生态环境保育提供科学依据.

1 资料采集

针对塔里木河下游输水可能产生的生态效应, 我们沿塔里木河下游输水河道——齐文阔尔河建立 9 个地下水监测断面(图 1), 每个断面间距约 20 km, 由大西海子水库向下, 分别是阿克墩(I)、亚合埔(II)、英苏(III)、阿布达勒(IV)、喀尔达依(V)、吐格买莱(VI)、阿拉干(VII)、依干不及麻(VIII)、老干(IX). 罗布庄.

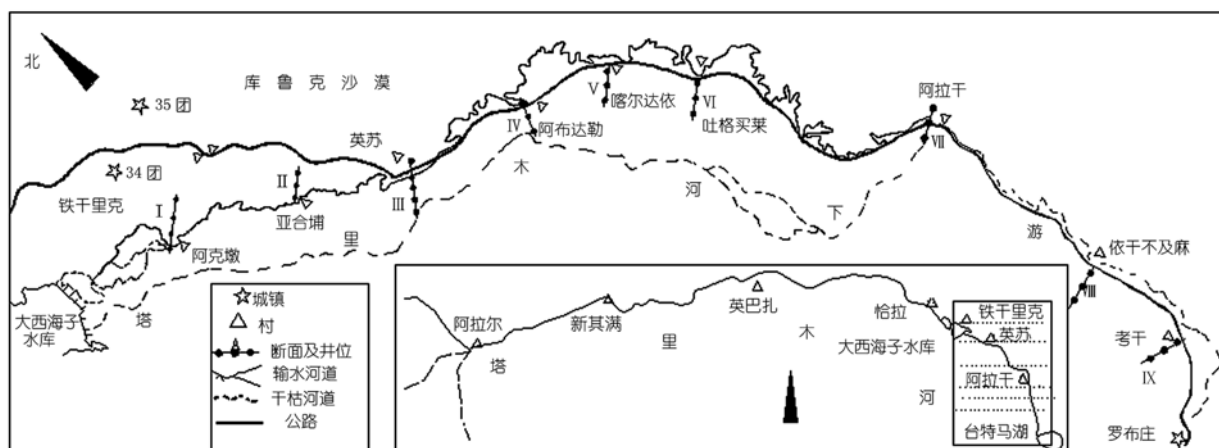


图 1 塔里木河下游 9 个监测断面布局示意图

1) 塔里木河下游中、下段河道位于塔克拉玛干沙漠和库鲁克沙漠之间, 由于以前沿河道植被生长较好, 被誉为“绿色走廊”. 218 国道穿行于“绿色走廊”之间, 拟建的新-青铁路也将从这里通过

莱(VI)以及阿拉干(VII)、依干不及麻(VIII)和考干(IX). 其中, 后 3 个断面的间距为 45 km, 并在断面上横向布设地下水监测井 40 眼(井深 8~17m), 监测输水过程中地下水位、水盐动态变化.

结合地下水位监测, 选择其中具有代表性的 5 个断面(英苏、阿布达勒、喀尔达依、阿拉干和依干不及麻), 建立固定植物样地 15 个, 大小为 50 m×50 m, 在选择的每一样地中, 再以 25 m 为间隔设置成 4 个 25 m×25 m 的乔木灌木样方, 记录每种乔木(或灌木)的个体数、盖度、胸径、基径、高度、冠幅等指标; 同时, 样方内设置 4 个 5 m×5 m 的草本样方, 分别记录每种草本的个体数、盖度、高度、冠幅、频度等指标, 并以 GPS 进行定位, 记录每个样地的海拔高度、经纬度及各样地的地下水埋深等.

2 结果分析

2.1 生态输水量

塔里木河下游生态输水工程于 2000 年 5 月开始启动. 河水主要来自我国最大内陆淡水湖博斯腾湖. 从博斯腾湖调水至大西海子水库, 然后, 由大西海子水库集中沿塔里木河下游大支流——齐文阔尔河自然河道下泄.

截止 2002 年 12 月, 先后向塔里木河下游间歇性输水 4 次(表 1), 合计输水 439 天, 输水总量约 $10\times 10^8\text{ m}^3$. 其中, 第 1 次输水, 河水到达喀尔达依断面(V 断面)附近, 输水量约为 $1.0\times 10^8\text{ m}^3$; 第 2 次输水, 河水到达阿拉干断面以下 146 km 处, 输水量为 $2.2\times 10^8\text{ m}^3$; 在第 3 和第 4 次输水过程中, 河水分别于 2001 年 11 月 2 日和 2002 年 10 月 4 日两次到达河流

尾间台特玛湖. 据实地测算, 2001 年 11 月输水结束时, 台特玛湖形成了约 4.5 km^2 的水域面积; 2002 年 11 月第 4 次输水结束时, 台特玛湖形成了约 16 km^2 的水域面积.

2.2 生态输水对浅层地下水位的影响

向塔里木河下游断流河段输水是为了补给和抬升浅层地下水位, 从而实现拯救下游天然植被、恢复生态的目的. 因此, 分析和了解生态输水对河道附近区域浅层地下水位变化的影响是实施塔里木河下游“绿色走廊”生态环境保育工作的基础.

(1) 地下水位的纵向变化 对输水河道 9 个断面的监测资料分析表明, 在纵向上, 浅层地下水对河道输水的响应程度由河道上游至下游呈减弱趋势, 地下水位抬升幅度随输水距离的由近至远而降低. 图 2 是塔里木河下游沿纵向 9 个断面输水后地下水位抬升的百分比统计. 由图 2 可见, 随着生态输水工程的进行, 塔里木河下游地区输水河道附近的浅层地下水位普遍抬升, 表现为愈靠近上游输水源——大西海子水库, 地下水位抬升幅度愈大, 而远离输水源, 地下水位的抬升幅度依次减小. 如距大西海子水库 20 km 的第 1 断面(阿克墩), 4 次输水均经过该断面, 输水历时长, 地下水位抬升幅度最大, 地下水埋深从第 1 次输水前的 6.74 m 抬升到第 4 次输水后的 0.87 m, 抬升幅度达 84%; 而下游第 9 断面, 仅受到第 3 和第 4 次两次输水的影响(表 1), 地下水埋深从输水前的 12.07 m 抬升到第 4 次输水后的 10.15 m, 抬升幅度仅为 16%. 这说明地下水位抬升幅度与河水在输水河道中滞留时间密切相关.

(2) 地下水位的横向变化 监测表明, 随着输

表 1 塔里木河下游 4 次输水统计一览表

	第 1 次输水	第 2 次输水	第 3 次输水		第 4 次输水
			第 1 阶段	第 2 阶段	
开始时间	2000-05-14	2000-11-03	2001-04-01	2001-09-12	2002-07-20
结束时间	2000-07-13	2001-02-14	2001-07-06	2001-11-17	2002-11-10
持续天数/d	61	104	97	67	110
输水量/ $\times 10^4\text{ m}^3$	9883.18	22000	18400	19700	29300
水头到达位置	接近喀尔达依断面	阿拉干断面以下	阿拉干断面以下	台特玛湖	台特玛湖
距大西海子水库/km	约 102	146	约 160	321	321

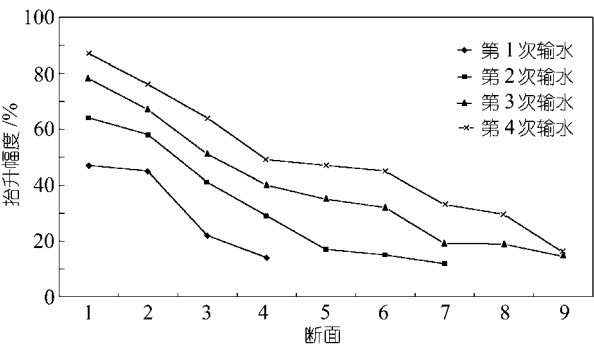


图2 塔里木河下游输水与地下水位纵向变化过程线

水次数的增加, 输水河段两侧的地下水位横向响应范围逐渐扩大, 响应宽度由第1次输水的450 m增加到第4次输水的1050 m, 但响应程度却随远离输水河槽中轴线而减小(图3). 详尽分析地下水位抬升幅度与影响距离的关系发现, 在250 m宽度范围内, 浅层地下水对地表输水的响应较为敏感, 输水过程中的地下水位抬升和输水停止后地下水位回落过程都十分明显; 250~450 m宽度范围内的地下水响应程度不如前者敏感, 但地下水位随着第2~4次输水, 仍然呈逐级抬升过程(图4); 在750 m宽度范围外, 地下水位受到第4次输水影响, 但影响甚微, 水位升高幅度也很小.

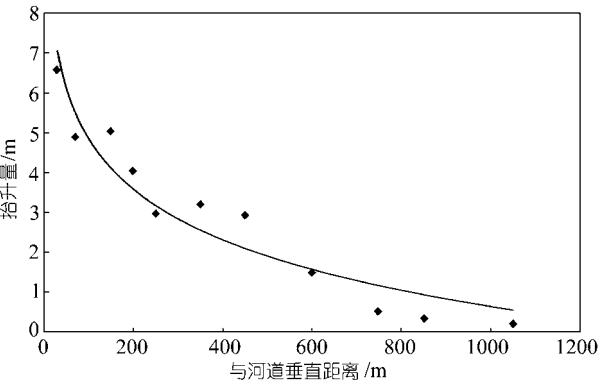


图3 塔里木河下游输水与地下水位横向变化过程

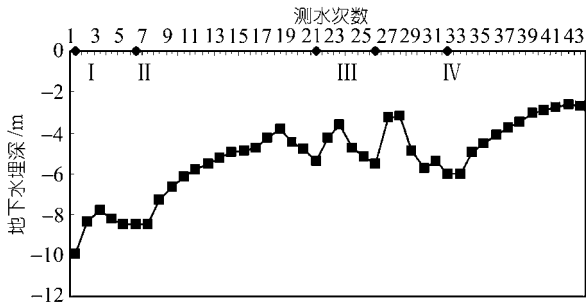


图4 塔里木河下游生态输水与地下水位变化过程曲线
I~IV分别为第1~4次输水起始时间

(3) 地下水抬升幅度 分析塔里木河下游4次输水过程与地下水位的响应表明, 地下水位抬升幅度与输水过程、输水量密切相关. 图4是2000年5月至2002年11月塔里木河下游英苏断面(距河道150 m处观测井)4次输水过程中的地下水位变化过程线. 由图4可见, 地下水位随输水次数增加呈不断上升趋势, 只是由于输水过程、输水持续时间和输水量的不同, 地下水位的抬升过程不尽一致. 在4次输水过程中, 地下水埋深分别由输水前的9.87 m升高到第1次输水后的7.74 m, 第2次输水后的3.79 m, 第3次输水后的3.61 m和3.16 m以及第4次输水后的2.66 m, 升幅分别是21.6%, 66.4%, 34%和42.3%, 以及55.4%(表2). 其中, 第1次和第4次的升幅最大. 究其原因, 主要有两个方面:

一是与输水量和输水持续时间的长短有关. 分析4次输水过程可见(表2), 塔里木河下游的4次输水过程中, 有3次(第2次、第4次和第3次输水的第2阶段)的日均输水量超过 $200\times10^4\text{ m}^3$. 其中, 第2次、第4次输水持续时间超过100天, 输水总量都在 $2.0\times10^8\text{ m}^3$ 以上. 所以, 第2次和第4次输水对地下水位影响较大; 第3次输水的第2阶段持续时间短, 仅67天, 输水量不足 $2.0\times10^8\text{ m}^3$, 因而, 对地下水位的影响比前者小.

表2 塔里木河下游输水与地下水位抬升

输水次数	第1次	第2次	第3次		第4次
			第1阶段	第2阶段	
地下水位抬升量/m	2.31	4.71	1.77	2.32	3.45
地下水位抬升幅度/%	21.6	66.4	34	42.3	55.4
输水持续时间/d	61	104	97	67	110
日均输水量 $\times10^4/\text{m}^3$	162.02	211.54	189.68	294.03	266.37

二是与输水季节有关。比较第2和第4次输水持续时间和输水量发现,第2次的输水持续时间和输水量均低于后者,分别为104天和 $2.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。然而,前者的地下水抬升幅度却大于后者,这是因为第2次输水时间主要发生在冬季(2001年11月3日~2002年2月14日),气温已降至零度以下。在输水过程中,河面蒸发损失少,绝大部分河水下渗补给给了浅层地下水。

2.3 生态输水对天然植被的影响

塔里木河下游是我国最为干旱的地区之一,天然植被生长所需的水分主要依靠地下水的补给。地下水是维系该地区天然植被生存的最主要、最根本的来源。因此,分析浅层地下水变化与天然植被的关系,解读塔里木河下游生态输水对天然植被的影响,对恢复和重建塔里木河下游受损生态系统具有重要意义。

(1) 天然植被与地下水位的关系 从天然植被的空间分布格局看,塔里木河下游地区的植被组成、分布及长势与地下水埋深有着密切的关系,表现为自上游的阿克墩断面至下游的考干及河流尾间台特玛湖,随地下水埋深加大(图5),植物群落由乔、灌、草群落组成逐渐演变为单一的灌木群落。英苏、阿布达勒断面以及喀尔达依断面的部分地段为乔、灌、草群落组成,乔木主要是胡杨,灌木有多枝桉柳、刚毛桉柳、白刺、铃铛刺,草本植物有甘草、罗布麻、骆驼刺、芦苇等。其中,胡杨与桉柳植物是该群落的优势种。从群落的水平结构来看,群落内植株间生长稀疏,草本植物分布多呈碎片状,且沿河道向下在种类、数量上有减少趋势;在喀尔达依的部分地段以及吐格买莱、阿拉干、依干不及麻断面为乔灌群落,以胡杨与桉柳为主,还伴生有白刺,草本植物稀少,除偶见深根系的骆驼刺外,几乎无其他草本植物,且植被多呈衰败状态;考干以下为单一灌木群落,植被构成单纯,为桉柳包或裸地,严重退化。

物种多样性变化与地下水位的分析结果也反映了塔里木河下游天然植被与地下水位的密切关系。物种多样性表达物种的数量变化和物种的生物学多样性程度^[27,28],在反映物种变化的多样性指数中,

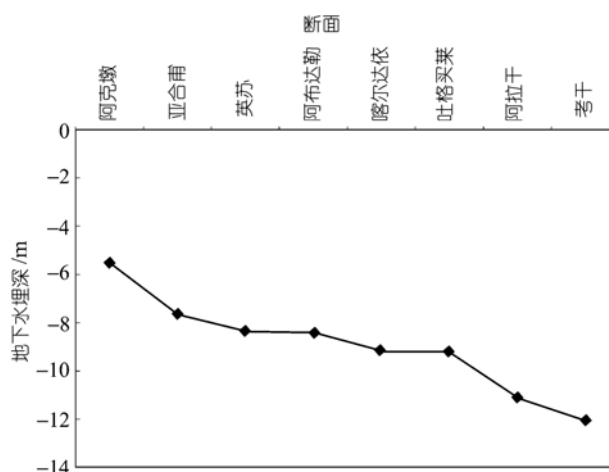


图5 塔里木河下游地下水位分布示意图

Simpson指数被认为是反映群落优势度较好的一个指数,McIntosh指数被认为是反映物种均匀度较好的一个指数,Margalef指数则被认为是反映物种丰富度较好的一个指数^[29,30]。对塔里木河下游物种多样性变化与地下水的关系研究表明,塔里木河下游地区植物的丰富度和均匀度都较低,从英苏断面至依干不及麻断面,随着地下水埋深的加大,反映物种数量变化和物种的生物学多样性程度的Simpson多样性指数、McIntosh均匀度指数和Margalef丰富度指数,分别由0.70、0.48和0.90降低为0.26、0.17和0.37(图6)。

植被的盖度、密度和植物种类数也反映出相同的变化趋势。由样地调查和统计分析可见(表3),输水前,从上段的阿克墩断面至下段的依干不及麻,地下水埋深由5.5 m下降到11.4 m,而随着地下水埋深的

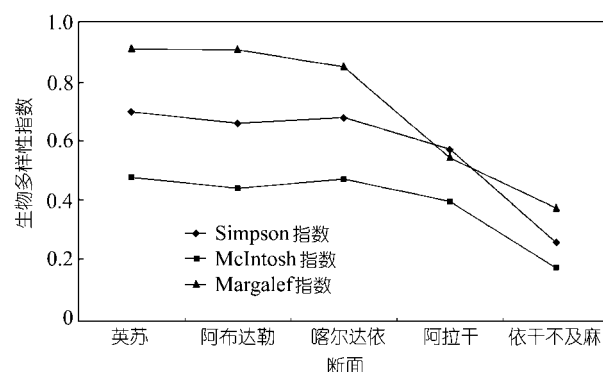


图6 塔里木河下游物种多样性指数变化曲线

表 3 塔里木河下游典型断面植被状况与地下水位埋深一览表

断 面	植被盖度	植被密度	植物种类数	优势种比例/%	平均地下水埋深/m
阿克墩	0.48	0.55	11	97.17	5.5
英 苏	0.16	0.19	9	37.37	8.34
阿布达勒	0.14	0.15	8	42.54	8.41
喀尔达依	0.13	0.08	8	43.33	9.16
阿拉干	0.06	0.02	4	90.56	11.1
依干不及麻	0.04	0.01	2	100.00	11.4

增加, 植被的盖度、密度分别由 0.48 和 0.55 减少到 0.04 和 0.11, 植物种类数由 11 种减少到 2 种.

(2) 天然植被对地下水位变化的响应 塔里木河下游以胡杨、柽柳等为主体的天然植被主要依赖于地下水和土壤水维系其生存, 因而, 浅层地下水位的动态变化将对植物的生长产生直接影响. 由实地调查可见, 随着生态输水工程的实施和河道附近地下水位的抬升, 输水河道附近的天然植被表现出明显的响应. 沿岸一些草本植被, 如: 甘草、骆驼刺、罗布麻、芦苇、猪毛菜、鹿角草、花花柴等, 在塔里木河下游的一些局部地区成片出现, 以胡杨、柽柳等为主的一些耐旱的乔、灌木, 随着地下水位升至其生长适宜水位, 长势也得以重新恢复.

从纵、横向两个方面进行的植物响应(范围、程度)调查表明, 塔里木河下游天然植被对生态输水后的响应与地下水抬升变化存在较好的同步性, 显示出随着塔里木河下游输水工程的不断实施和地下水位的抬升, 植被的响应范围呈逐渐扩大的态势. 从效应物角度看, 由于不同植物对地下水位的深度要求不一样, 因而, 不同植被受水分胁迫的忍耐程度及其响应过程也不同.

在草本植物中, 对芦苇的各项叶特征指标(叶重量、叶面长、宽等)分析测试表明, 其生长情况对地下水位的抬升变化反应十分敏感, 各样地平均数差异显著. 在阿克墩断面, 第 1 次输水后(2000 年 8 月), 芦苇的反应敏感区横向范围约在 100~150 m 区间(图 7).

在乔、灌木植被中, 通过对塔里木河下游主要建群种胡杨的叶相对含水量、平均叶重量、胡杨叶长度、胡杨平均当年生小枝长度等项指标的测试表明, 在第 1 次输水后(2000 年 8 月), 横向影响范围的宽度在 200~250 m 之间, 较草本植物(芦苇)响应范围略宽. 在纵向上, 由亚合甫马汗、英苏至阿布达勒断面, 随

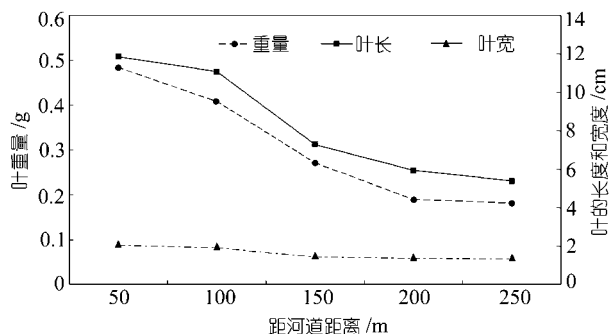


图 7 阿克墩断面横向上芦苇叶特征指标变化

着地下水位抬升幅度的减小, 平均叶数从上游至下游, 分别较喀尔达依断面增加 57%, 22.2%, 9.2%; 在 2002 年第 4 次输水过程后, 在横向上, 输水对胡杨的影响范围扩展到 800 m, 胡杨的冠幅和郁闭度与 2000 年输水前比较, 都呈明显增加态势(图 8). 这显示了生态输水对塔里木河下游天然植被的影响程度在不断加深, 影响范围在不断扩大.

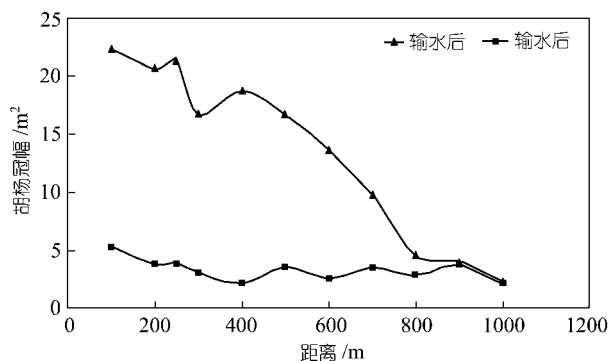


图 8 塔里木河下游胡杨对地下水变化的响应

采用 1999 年 8 月和 2002 年 8 月 ETM 数据, 从宏观上对塔里木河下游实施输水工程以来的地表景观变化的对比分析表明, 近两年来, 通过实施生态输水工程, 塔里木河下游沙漠化过程出现明显逆转现

表 4 塔里木河下游中、下段 1999 年和 2002 年地表景观动态监测结果(单位: hm²)

地表景观类型	2002 年		1999 年		土地利用变化	变化率/%
	面积	百分比/%	面积	百分比%		
天然植被	214345.8	27.9	196357.4	25.6	17988.4	8.4
沙地	526130.8	68.7	559826.1	73.1	-33695.3	-6.4

象^[26,31],天然植被与输水前的 1999 年比较,增加 8.4%,天然植被的增加主要是草本植被,分布于输水河道两侧和局部低洼地带;土地沙漠化面积减少 6.4% (33 km²),取而代之的是水体和新生长的天然植被(表 4);2002 年 8 月的 ETM 数据采集时,恰逢塔里木河下游第 4 次输水,因而,较 1999 年输水前相比,区域内水体面积增加幅度较大,达 94.8%。

3 讨论与结论

(1) 塔里木河下游是我国最干旱地区之一,特殊的地理位置和自然条件,决定了其生态系统的脆弱性与不稳定性,区域内天然乔、灌、草植被的生存对水的依存性极为强烈。从塔里木河下游的阿克墩地区至末段台特玛湖,随地下水位埋深加大,物种多样性指数降低、植物种类减少、群落结构趋向简单的生态系统退化态势,反映了水分是影响塔里木河下游植被分布和生存的主要因素,地下水位的不断下降和土壤含水率大大丧失是引起塔里木河下游植被退化的主导因子。

(2) 塔里木河下游生态输水引起河道两侧一定范围内的地下水位上升,其上升幅度随着远离河流而越来越小,上升时间随远离河岸越来越推迟,变动速率也随远离河流越来越小。纵向上,地下水位对河道输水的响应程度由上游至下游而减弱,地下水位抬升幅度由上游的 84%降至下游的 16%;横向上,地下水位的响应范围随着输水次数的增加而逐渐扩大,由第 1 次输水后的 450 m 宽增加到第 4 次输水后的 1050 m 宽,说明塔里木河下游输水对河道附近地下水位起到了抬升作用。

(3) 塔里木河下游植物种群的生存、演替受物理环境的支配明显强于群落的生物环境因素^[32,33],大多数植物依环境而生存,草本、灌木、乔木之间的相互依存作用较小,地下水是维持天然植被生命活力

延续的惟一的、根本的水源。随着输水后地下水位的抬升,植被的响应范围逐渐扩大。塔里木河下游的主要建群种胡杨的响应范围,由第 1 次输水后的 200~250 m 宽扩展到第 4 次输水后的 800 m 宽,只是植被的长势随远离河道而变差。由此表明,目前实施的生态输水工程对塔里木河下游植被生长产生了直接作用,继续实施塔里木河下游生态输水工程,对恢复植被、保育生态有着重要的实际意义。值得指出的是,在塔里木河下游地区,影响植被生长的主要因素是水分和盐分^[33,34],而土壤中的水分和盐分都与地下水位高低有关。因此,确定既能减少地下水强烈蒸发返盐不利于植物生长、又不造成土壤变干而影响植物繁殖的这一合理生态水位,对水资源合理利用和确立维系塔里木河下游生态安全的最低需(用)水量有着重要意义。但塔里木河下游的合理生态水位是多少,如何维持最佳的生态水位?尚值得进一步研究和思考。

(4) 塔里木河下游目前采取的是沿河道“线形”输水方式,这种输水方式虽然对提升河道附近地下水位、拯救天然植被的生命系统起到了重要作用,但它只能起到对原有的、日益衰败的老龄植被的拯救和复壮作用,而不能实现胡杨、柽柳等植物的更新,更难以实现区域生态系统的可持续性。在 2000~2002 年的 4 次间歇性输水过程中,均采用沿自然河道“线形”输水方式,这对断流 30 余年的河流来说,是一个拯救生命的过程,是及时的和必要的,对河道附近地下水位抬升和拯救垂死的天然植被起到了重要作用,但对植被的影响范围极为有限,距保护“绿色走廊”的目标还有很大差距。为此,应逐步实施双河道输水以及河道输水与面上供水相结合方式,有计划、分区段进行面上供水,由上段至下段逐步扩大恢复范围、并在分区段面上给水的基础上,结合塔里木河下游主要建群种胡杨和柽柳的落种时间,优选输水时段,确立

每年 8~9 月为最佳输水时期,使输水时机与植物种子成熟、萌发期相一致,达到“生态契合”¹⁾,为植物的落种更新提供条件,扩大输水的生态效应,以实现生态系统的可持续性.

(5) 塔里木河流域水资源开发过程中的经济与生态的矛盾日趋突出,塔里木河下游生态系统的急剧退化正是由缺水而引起.并且,随着流域社会、经济发展和人口的增长,势必对水资源的压力和需求更为强烈,生产、生活和生态用水的矛盾更显突出.为此,能否确保每年都有一定量水向断流 30 年之久的塔里木河下游输送的问题已引起人们思考.从干旱区节约和高效利用水资源、加快实现塔里木河下游受损生态系统的恢复与重建角度出发,合理调配水资源,优化输水方案(包括输水方式、输水时间等)则成为确保塔里木河下游生态安全的关键所在,是值得我们进一步研究的重要课题.

参 考 文 献

- 1 李 新,周宏飞,樊自立.塔里木河水资源利用与土地荒漠化效应分析.中国沙漠,1998,18(增刊 1): 46~54
- 2 邓 伟,何 岩.论地下水对地表生态的作用.地理科学,1993,13(2): 161~168
- 3 侯印伟,王常明.论水文地质环境在土地沙漠化发展过程中的控制作用.水文地质与工程地质,1992,19(5): 25~28
- 4 陈荷生.西北干旱区水资源开发引起环境变化识别.中国沙漠,1987,7(2): 1~11
- 5 马金珠,高前兆.西北干旱区内陆河流域水资源系统与生态环境问题.干旱区资源与环境,1997,11(4): 15~21
- 6 朱震达.塔克拉玛干沙漠地区沙漠化过程及其发展趋势.中国沙漠,1987,7(3): 16~28
- 7 刘亚传.试论水文地质环境与绿洲农业生态.水文地质与工程地质,1984,11(6): 28~30
- 8 Ma J Z. Sustainable exploitation and utilization of water resources in the inland riverbasin of arid north-west China. Chinese Geographical Science, 1997, 7(4): 347~351
- 9 Ma Jinzhu, Qian Ju, Gao Qianzhao. The groundwater evolution and its influence on the fragile ecology in the south edge of Tarim Basin. J of Desert Research, 2000, 20(2): 145~149
- 10 Arias H M. International groundwaters: the Upper San Pedro River Basin case. Nat Res J, 2000, 40(2): 199~221
- 11 Varady R G, Moote M A, Merideth R. Water management options for the Upper San Pedro Basin: Assessing the social and institutional landscape. Nat Res J, 2000, 40(2): 223~235
- 12 张天曾.中国干旱区水资源利用与生态环境.自然资源,1981,(1): 62~67
- 13 冯 起,程国栋,谭志刚.荒漠绿洲植被生长与生态地下水位的.中国沙漠,1998,18(增刊 1): 107~109
- 14 袁长极.地下水临界深度的确定.水利学报,1964,9(3): 50~53
- 15 袁生绿.民勤沙漠绿洲地下水生态开采量的初步研究.水土保持学报,1987,1(2): 18~22
- 16 李 新,周宏飞.人类活动干预后的塔里木河水资源持续利用问题.地理研究,1998,17(2): 171~177
- 17 周宏飞.塔里木河干流区的水量消耗和潜力分析计算.干旱区资源与环境,1998,12(3): 48~52
- 18 季 方,樊自立,邓永新.塔里木河干流水资源利用区域分异特点及其改造途径.干旱区资源与环境,1998,12(2): 15~18
- 19 海米提·依米提,塔西甫拉提·特依拜,熊黑钢.内流河流域水资源利用对径流年际年内变化影响的分析——以塔里木河流域为例.地理研究,2000,19(3): 271~276
- 20 陈亚宁,李建邦.塔里木河流域的环境问题及治理重点.见: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,1998.239~242
- 21 陈亚宁.塔里木盆地资源环境与可持续发展.干旱区资源与环境,1999,13(1): 11~16
- 22 汤奇成,张捷斌.西北干旱地区水资源与生态环境保护.地理科学进展,2001,20(3): 227~233
- 23 韩德麟,樊自立.塔里木河流域可持续发展面临的资源环境问题及对策.国土开发与整治,1998,8(3): 47~51
- 24 徐金燕,王永红.试论塔里木河流域绿色走廊的保护与恢复.新疆环境保护,1997,19(4): 21~23
- 25 王 润,高前兆,陆锦华,等.塔里木河下游绿色走廊生态环境与前景.干旱区资源与环境,1997,11(3): 42~46
- 26 王 涛.塔里木河下游阿拉干地区沙漠化过程及其预测.中国沙漠,1986,10(2): 16~18
- 27 周红章,于晓东,罗天宏,等.物种多样性变化格局与时空尺度生物多样性.生物多样性,2000,(3): 325~326
- 28 孙儒泳,李 博,诸葛阳,等.普通生态学.北京:高等教育出版社,1993.136
- 29 马克平.生物群落多样性的测度方法I α 多样性的测度方法(上).生物多样性,1994,(2)3: 162~168
- 30 马克平,刘玉明.生物群落多样性的测度方法I α 多样性的测度方法(下).生物多样性,1994,(2)4: 231~239
- 31 王让会,樊自立.利用遥感和 GIS 研究塔里木河下游阿拉干地区土地沙漠化.遥感学报,1998,2(2): 137~142
- 32 刘加珍,陈亚宁.新疆塔里木河下游植物群落逆向演替分析.干旱区地理,2002,25(3): 231~236
- 33 黄培佑.干旱生态学.乌鲁木齐:新疆大学出版社,1993.207~230
- 34 Murgai R, Ali M, Byerlee D. Productivity growth and sustainability in post-green revolution agriculture: the case for the Indian and Pakistan Punjab. World Bank Res Observ, 2001, 16: 199~218[DOI]

1) 中国科学院院士张新时先生首先提出