

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2015.05.001

黄河三角洲刁口河生态补水对地下水影响的模拟分析

彭 勃¹, 葛 雷¹, 王瑞玲¹, 刘 波², 娄广艳¹, 黄文海¹

(1. 黄河水资源保护科学研究院, 河南 郑州 450004; 2. 淮海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对 2010 年以来实施的黄河三角洲刁口河流路恢复过水及湿地生态补水措施, 建立黄河三角洲刁口河流路及尾间湿地地下水数值模型, 模拟黄河三角洲刁口河流路及湿地补水前后地下水变化情况, 评估刁口河恢复过流及尾间湿地补水对区域地下水的影响。结果表明, 刁口河恢复过水及尾间湿地补水对地下水具有积极补给作用, 在 2010 年、2011 年、2013 年生态补水期间, 刁口河沿岸地下水渗漏量分别为 10.2 万 m³/d、10.6 万 m³/d、9.2 万 m³/d, 刁口河尾间湿地周边地下水渗漏量分别为 1.4 万 m³/d、2.7 万 m³/d、1.03 万 m³/d; 随着地下水资源的补给, 补水区及周边地下水水位抬升明显, 刁口河沿岸及尾间湿地周边地下水抬升范围分别为 950~1100 m 和 800~1100 m, 地下水最大抬升幅度分别为 60~80 cm 和 35~46 cm。

关键词: 尾间湿地; 生态补水; 地下水水位; 地下水数值模型; 刁口河; 黄河三角洲

中图分类号: X3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2015)05-0001-06

Simulation analysis on effect of ecological water supplement on groundwater in Diaokou River of Yellow River Delta

PENG Bo¹, GE Lei¹, WANG Ruiling¹, LIU Bo², LOU Guangyan¹, HUANG Wenhai¹

(1. Yellow River Water Resources Protection Institute, Zhengzhou 450004, China;

2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the flow recovery of Diaokou River in Yellow River Delta and the ecological water supplement of wetland carried out since 2010, groundwater numerical models of Diaokou River and the tail wetland in Yellow River Delta are established, the phreatic fluctuation before and after water diversion period are simulated, and impacts of the flow recovery of Diaokou River and the ecological water supplement of wetland are evaluated. The result shows that the flow recovery of Diaokou River and ecological water supplement of tail wetland furnished the groundwater nearby. The infiltration of groundwater along the bank of Diaokou River was 10.2×10^4 、 10.6×10^4 、 9.2×10^4 m³/d and the infiltration of groundwater around the wetland was 1.4×10^4 、 2.7×10^4 、 1.03×10^4 m³/d in 2010, 2011 and 2013, respectively. With the supplement of groundwater, the groundwater level raise occurred obviously in the supplied area and the areas around, the capture zone scope of groundwater ranged from 950 to 1100m and 800 to 1100m and the max uplift ranged from 60 to 80cm and 35 to 46cm along Diaokou River bank and in the adjacent tail wetland, respectively.

Key words: tail wetland; ecological water supplement; groundwater level; groundwater numerical model; Diaokou River; Yellow River Delta

刁口河故道是国家确定的黄河近期备用流路之一,其尾间部分为黄河三角洲国家级自然保护区的重要生态保护区,同时也是黄河三角洲高效生态

经济区的组成区域。然而自 1972 年断流以来,由于水沙条件变化、海洋动力作用及人类活动的影响,刁口河地形地貌、自然形态和生态环境发生较大改变,

出现了河口海岸蚀退、河槽萎缩、地下水含盐量增加、湿地萎缩等一系列严重的生态问题,对黄河三角洲生态系统的稳定及区域社会经济的可持续发展构成威胁。

为改善刁口河流路生态环境、高效管理和保护黄河入海备用流路,2009年7月,水利部黄河水利委员会做出了“启用刁口河流路,实施生态调水”的决策。2010年6月,黄河水利委员会在黄河“调水调沙”期间开展了黄河三角洲生态调水及刁口河流路恢复过水试验,至今已连续5年实施刁口河流路及尾间湿地生态补水,取得了较为显著的生态效果。2008年,范晓梅等^[1]利用竖管法对黄河三角洲沉积物的渗透系数进行现场实验测定;2010年黄狮等^[2]利用水文模型 SOBEK 和地下水模型 Visual Modflow 对不同补水预案下湿地水文过程进行了模拟;2011年王新功等^[3]采用调水前后实时监测遥感解译及地下水模型模拟等方法,对2010年刁口河生态调水前后的植被、湿地、土壤含盐量、地下水等因子进行了跟踪评估分析。开展刁口河生态调水对地下水影响的评估研究,分析黄河三角洲刁口河流路及湿地补水前后地下水变化状况及规律,评估刁口河恢复过流及尾间湿地补水对区域地下水的影响,将为深化黄河三角洲生态调度,维持黄河三角洲生态系统良性循环,促进黄河三角洲高效生态经济区可持续发展具有重要意义。

1 研究方法及其研究范围

1.1 研究方法

本研究使用 Visual Modflow 模型来模拟刁口河流路及尾间区域周边地下水的变化过程。收集、整理研究区有关资料,建立符合黄河三角洲实际的概念模型,在此基础上建立相应的数学模型,再利用 Visual Modflow 软件进行模拟,分析生态调水前后刁口河故道周边地下水的变化及其尾间湿地补水对周边地下水影响程度,跟踪评估黄河三角洲刁口河恢复过水及尾间湿地生态补水对地下水的影响及其生态效应。

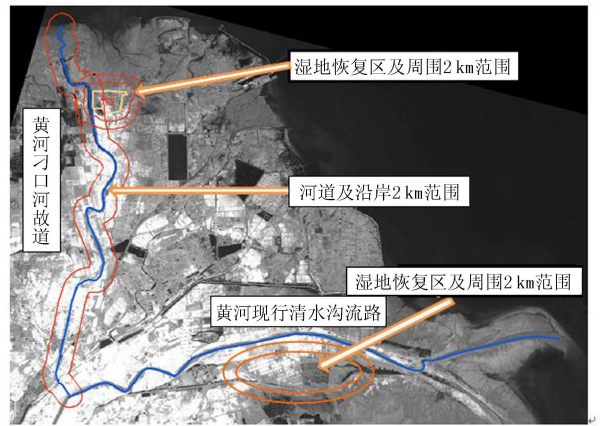
1.2 研究范围

选定现代黄河三角洲,即为以渔洼为顶点向东展开的扇状三角洲,该洲陆上面积约为 3000 km²,包括黄河故道刁口河流路和现行清水沟流路。重点研究区是刁口河流路及尾间湿地,即黄河三角洲刁口河沿岸 2 km、刁口河湿地恢复区及影响区 2 km 范围内。研究范围及模拟重点区域详见图 1。

研究区处在华北地台新生拗陷的东南部,主要受新华夏构造体系和北西向构造的控制。自新生代



(a) 研究模拟范围



(b) 重点研究区范围

图 1 研究模拟范围及重点研究区范围示意图

以来,研究区地表以沉降运动为主,区内广为第三系和第四系沉积物覆盖,地貌上主要分为山前平原区和黄泛平原区。研究区属小清河以北黄泛平原区,受地貌沉积物和构造条件制约,浅层地下水主要赋存于第四系上部的冲积海积层中的松散沉积物孔隙含水层中,粉砂和黏土质粉砂是地下水的赋存介质^[4-5]。

2 研究区生态调水期间地下水动态变化规律

研究区内地下水普遍埋藏较浅,约为 0 ~ 5 m。为掌握黄河三角洲地下水状况及变化规律,中国科学院地理科学与资源研究所在黄河三角洲范围内布设了 20 眼地下观测井,进行水位及盐度观测。观测井分布位置见图 2。

2.1 生态调水情况

从 2010 年起,黄河水利委员会在黄河“调水调沙”期间开展了黄河刁口河流路恢复过水试验,2010 年、2011 年、2013 年刁口河共实施生态补水 9847.19 万 m³,每年补水时间及水量见表 1。

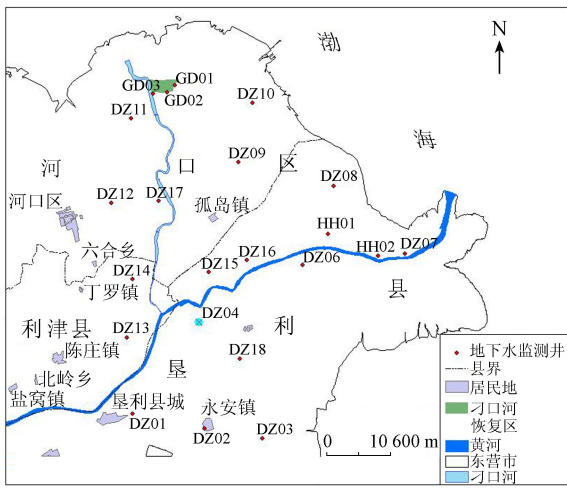


图2 黄河三角洲地下水监测井分布示意图

表1 2010年、2011年、2013年刁口河生态补水时间及补水量

补水时间	补水天数/d	补水量/万 m ³	
		刁口河	刁口河尾间恢复区
2010-06-24—2010-08-05	45	3 608.47	805
2011-07-04—2011-08-08	36	3 618.70	371
2013-06-25—2013-07-10	16	2 620	

注:2013年刁口河总的生态补水量是2620万 m³。

2.2 生态调水前后地下水动态变化分析

选取刁口河附近地下水观测井(编号DZ11)监测数据对刁口河生态调水前后地下水动态变化进行分析。图3描述的是2010年、2011年和2013年该观测井在生态调水前、生态调水措施实施过程中和生态调水后的地下水水位随时间的变化过程。分析时段选取为每年6月5日至8月31日。

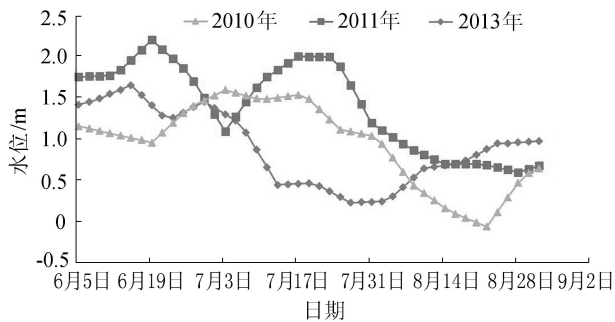


图3 刁口河生态补水前后地下水动态变化过程

分析生态调水前后刁口河周边地下水动态变化规律,可知2010年、2011年和2013年3年的地下水水位随时间的变化趋势基本一致,且分析时段内水位总体呈现先下降后上升、整体下降的趋势。调水结束后地下水水位基本都小于或等于调水前地下水水位。相比之下,2010年地下水水位波动较大,在补水结束后,地下水水位迅速下降;2011年地下水水位呈现明显的波动性;2013年地下水水位具有明显的突变点,大致在7月中旬——补水中期,地下水

水位有明显的下降趋势。

补水前地下水水位的变化主要受降水、蒸发因素影响,2010年、2011年和2013年地下水水位的变化没有明显的一致性,主要受当年气象条件的影响;补水期间,在补水和自然条件的共同作用下,2010年、2011年和2013年地下水水位呈现先上升后下降的趋势,说明生态补水在一定程度上改变了研究区内地下水水流情况;补水结束后,研究区内地下水水位动态主要受气象条件的影响,2010年、2011年和2013年地下水水位下降。

以上地下水动态变化过程是研究区内地下水均衡各要素发生变化的综合反映,在分析时段内,该区域地下水为负均衡,含水层总排泄量大于总补给量,地下水水位在补水时缓慢上升保持在高水位,补水结束后地下水水位迅速下降。

同时,2011年、2013年与2010年相比,研究区各位置的地下水水位并没有统一上升,说明该研究区的地下水水位主要受垂向作用较大,即受降水入渗和潜水蒸发的影响。而生态调水时间、调水规模以及补水范围等有限,上年度生态调水渗漏补给影响区外的地下水,效果较小。

3 黄河三角洲地下水模型构建及率定

3.1 水文地质概念模型

根据研究区现有的地质勘查成果,将土壤岩性由粉砂土突变成亚黏土的深度作为含水层的厚度(即所研究的含水层)。将研究区概化为潜水含水层,根据研究区的水文地质图、综合水文地质剖面图等相关附件,将渗透系数和给水度划分为9个类型(表2)^[6]。由于研究区地下水水位埋深较浅,刁口河过流一段时间后即与周边地下水形成直接水力联系;现行流路清水沟常年过流,河流与周边地下水存在直接水力联系,因此将河流对地下水的补给均概化为直接补给。将清水沟流路河床底渗透系数设为0.00167 m/d,河床底沉积物厚度设为0.5 m;刁口河流路河床底渗透系数设为0.0023 m/d,河床底沉积

表2 渗透系数和给水度分区

分区	类型	渗透系数/(m·d ⁻¹)	给水度
1	含淡水砂层	4.000	0.20
2	含淡水黏层	0.500	0.10
3	含淡水砂黏互层	1.200	0.15
4	含卤水砂层	1.000	0.20
5	含卤水黏层	0.001	0.10
6	含咸水砂层	2.000	0.15
7	含咸水黏层	0.002	0.20
8	含咸水砂黏互层	0.200	0.10
9	其他	0.050	0.70

物厚度设为 0.3 m。模拟区内地下水水流呈非稳定流状态,将其概化成二维非稳定流,含水层为非均质各向同性,同一参数分区内视为均质,水流符合达西定律。根据研究区边界的实际情况,将水流模型的边界概化为二类边界。研究区内地下水补给项主要包括降水入渗、地表水体入渗、侧向补给,以及补水后湿地下渗补给;排泄项主要包括蒸散发、侧向排泄以及部分河段地下水泄流量。

3.2 地下水数值模型

根据上述地下水地质概念模型,建立相应的地下水数值模型^[7],利用 Visual Modflow 求解建立的数值模型。根据研究需要,黄河三角洲地下水模型剖分为 100 行×100 列的矩形单元,在模型的重点模拟区,即刁口河尾间湿地及现行流路南岸湿地处,将网格细分,经加密后,研究区网格分为 152 行×188 列(图 4)。根据地下水水位观测资料,运用 SURFER 软件对研究区地下水的水位分布进行插值计算,得出模拟初始时刻的地下水流场,见图 5。

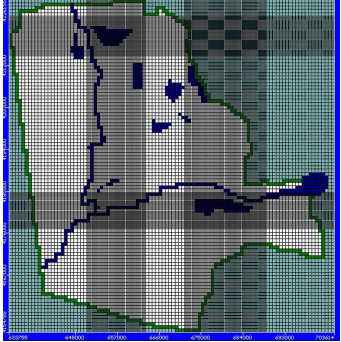


图 4 黄河三角洲地下水模型平面网格剖分

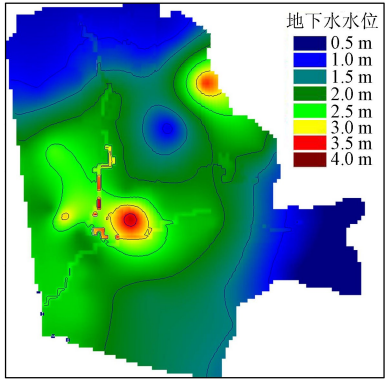


图 5 黄河三角洲地下水初始流场

3.3 模型校正

根据黄河三角洲地下水动态监测数据,经过反复参数调整,对模型参数进行了率定,得到了较为理想的模型识别结果。选定 2010 年 6 月 23 日至 2010 年 8 月 31 日为模型的模拟校正时段,以 2010 年 7 月 27 日及 8 月 31 日(即模拟期第 35 天与第 70 天)为例,对各观测点的计算值与实测值进行比较,见图 6。从模型结果来看,在第 35 天,各拟合点的绝对误差为 0.124 m;第 70 天,各拟合点的绝对误差为 0.12 m,由此计算第 35 天、第 70 天的标准化均方根分别为 3.625%,8.225%,可以满足模型的使用精度要求。

差为 0.124 m;第 70 天,各拟合点的绝对误差为 0.12 m,由此计算第 35 天、第 70 天的标准化均方根分别为 3.625%,8.225%,可以满足模型的使用精度要求。

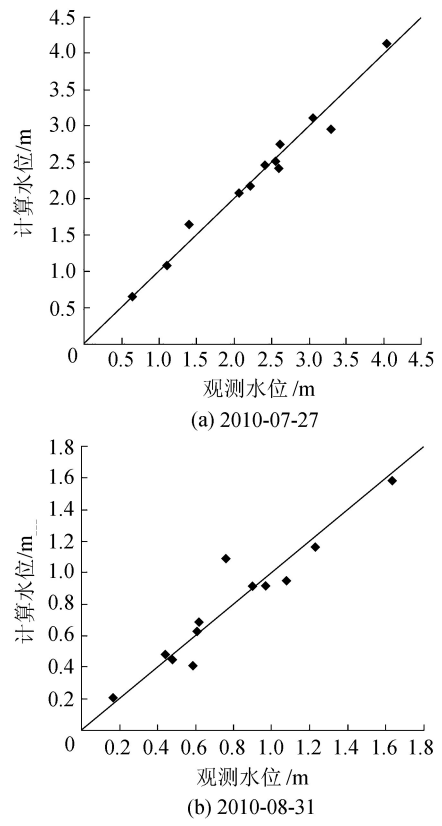


图 6 Visual Modflow 模型计算值与实测值对比

同期,对 2010 年补水过程中地下水水位数据进行模拟,分别选取刁口河尾间湿地保护区附近观测点 DZ11、现行流路南岸观测点 DZ06 的水位拟合过程线见图 7。可见,在整个模拟期间,模拟的地下水水位动态及水均衡特征与实际观测情况较为一致,数值模型能够较为真实地还原地下水水位的动态变化过程。

4 研究区生态调水对地下水影响的模拟分析

应用地下水数值模型,针对 2010 年、2011 年、2013 年的补水过程,对黄河三角洲刁口河流路及尾间湿地恢复区生态补水过程进行了全过程模拟。根据地下水数值模拟结果,在 3 年补水过程中,刁口河生态补水对地下水的日均河道渗漏量分别为 10.2 万 m³、10.6 万 m³ 和 9.2 万 m³,刁口河尾间湿地生态补水对地下水的日渗漏量分别为 1.4 万 m³/d、2.7 万 m³/d 和 1.03 万 m³/d,可见,黄河三角洲刁口河流路及尾间湿地恢复区的生态补水对刁口河及尾间湿地周边地下水具有积极补给作用。

4.1 刁口河生态调水对周边地下水水位的影响

刁口河沿岸地下水在补水期间受河流渗漏补

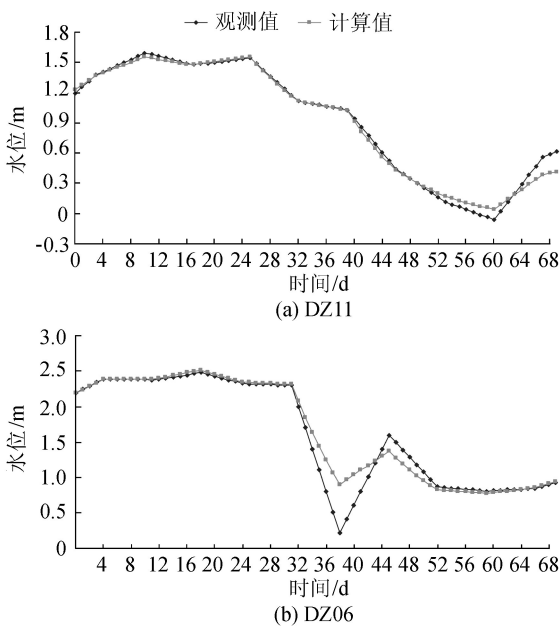


图7 DZ11、DZ06 水位观测值和计算值拟合过程线

给,地下水水位随之提升。根据地下水模型模拟结果(图8)可知,补水对刁口河沿岸的地下水水位抬升效果显著,且距离河道越近水位抬升越明显。其中2011年刁口河补水对地下水水位的抬升影响最明显,最大抬升幅度为80 cm;2010年为首次补水,河流日渗漏量相对2011年要小,地下水水位的抬升幅度次之,最大抬升幅度为75 cm;2013年无论补水量和补水时间均居最末,相应的地下水水位抬升作用最小,但最大抬升幅度也达到了60 cm。

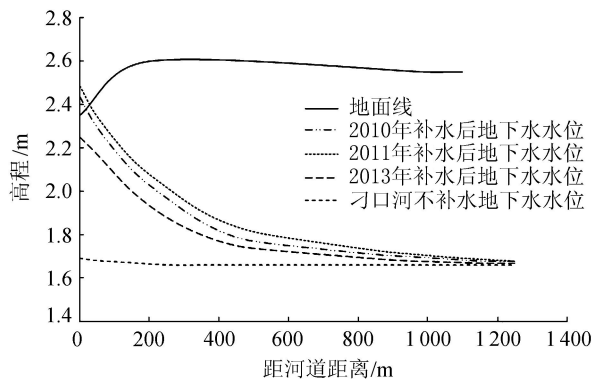


图8 刁口河生态补水后地下水水位变化

由于三角洲地区沉积物颗粒较细、含水层渗透系数较小,河流过流对沿岸地下水的影响是有一定范围的。模型分析结果表明,2013年刁口河生态补水期间,在距刁口河300 m范围以内地下水水位抬升比较明显,水位增幅超过20 cm,但其后水位的抬升作用迅速减弱;在距刁口河950 m处,过水前后地下水水位差已小于5 cm,地下水水位的抬升作用已不明显,所以,2010年刁口河过流对沿岸地下水的影响范围约为950 m。同理推算2010年、2011年刁口河过流对沿岸地下水的影响范围约为1000 m、

1100 m,历年生态调水对沿岸地下水水位的影响范围基本一致,差别在200 m范围以内。由于2013年调水量为历年中最小,历时最短,影响范围相应最小;2010年为刁口河多年断流后首次过水,且历时较长,地下水水位响应较为显著;2011年为刁口河断流后第二次全线过流,调水量大,历时较长,且有2010年的调水基础,因此地下水水位的响应最为显著,影响范围最大。

4.2 刁口河尾间湿地生态补水对周边地下水水位的影响

根据地下水模型模拟结果及2010年、2011年和2013年地下水水位响应图(图9)可知,2011年刁口河尾间湿地生态补水对地下水水位的抬升影响最明显,最大抬升幅度为46 cm;2010年是首次开展刁口河恢复过水及尾间湿地生态补水,为试验性生态调水,调水量及补水量较小,湿地日渗漏量相对2011年较小,对周边地下水水位的抬升作用相对较弱,最大抬升幅度为40 cm;2013年刁口河生态调水量及尾间湿地补水量最小,相应地对周边地下水水位的抬升作用相对最小,但最大抬升幅度也达到了35 cm。

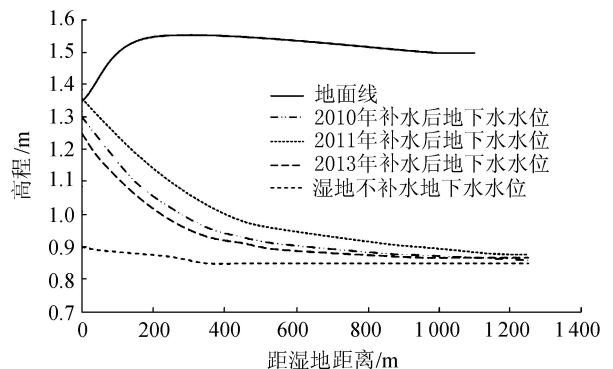


图9 刁口河尾间湿地生态补水与不补水周边地区地下水水位对比

由于生态恢复区沉积物颗粒较细,含水层渗透系数较小,刁口河尾间湿地补水对周边地下水的影响是有一定范围的。根据模型模拟数据结果,2013年刁口河尾间湿地补水期间,在距湿地生态补水区300 m范围以内地下水水位抬升比较明显,水位增幅超过10 cm,但其后水位的抬升作用迅速减弱,在距生态恢复区800 m处,恢复过水措施约2个月后,实际过水条件下的地下水水位与不过水条件下差别已不足5 cm。2013年生态恢复区补水对沿岸地下水的影响范围约为800 m,2010年、2011年生态恢复区蓄水对沿岸地下水的影响范围分别约为1000 m、1100 m。3次湿地生态补水对周边地下水水位的影响范围基本一致,差别在300 m范围以内。2011年生态调水量最大,湿地日渗透补给量最大,因而调水对地下水的影响范围最大;2010年为首次试验性调

水,湿地日渗透补给量较小,因而调水对地下水的影
响范围相对较小;2013年湿地日渗透补给量最小,
故调水对地下水的影影响范围最小。

5 结 语

黄河三角洲刁口河生态补水是为改善刁口河流
路生态环境,逐步恢复刁口河流路输水输沙功能而
实施的一项重大治黄实践活动,取得了较为显著的
生态环境效果。本研究以2010年以来实施的黄河
三角洲刁口河流路恢复过水及湿地生态补水为基
础,建立了黄河三角洲刁口河流路及尾间湿地地下
水数值模型,模拟了刁口河及尾间湿地补水前后地
下水变化状况,结果表明:

a. 刁口河及尾间湿地生态补水对周边地下水
具有积极补给作用,在2010年、2011年、2013年生
态补水期间,刁口河沿岸地下水渗漏量分别为
10.2万 m^3/d 、10.6万 m^3/d 、9.2万 m^3/d ,刁口河尾
间湿地周边地下水渗漏量分别为1.4万 m^3/d 、
2.7万 m^3/d 、1.03万 m^3/d 。

b. 随着刁口河及尾间湿地水资源的补给,一定
范围内的地下水水位抬升明显。其中刁口河补水对
沿岸地下水的抬升影响范围在950~1100m之间,地
下水水位最大抬升幅度在60~80cm之间,与河道距
离越远,地下水水位抬升幅度越小;刁口河尾间湿地
生态补水对周边地下水水位抬升影响范围在800~
1100m,地下水水位最大抬升幅度在35~46cm之间。

c. 根据模型分析结果可知,影响黄河三角洲地
下水的首要因素仍为降雨,但生态补水成为汛期稳
定高效补充地下水的有益措施。随着多年持续不断
的补水,刁口河尾间湿地生态环境得到修复,两岸生
态恶化趋势得到一定程度的遏制,黄河三角洲尾间
生态状况得到显著改善^[8]。

d. 黄河三角洲地下水流数值模型较好地实现
了对黄河三角洲地下水动态模拟,所得数据可以满
足黄河三角洲地下水研究要求,为开展刁口河补水
的生态效益分析提供了有力支撑。

由于研究区内地下水埋深较浅,在补水的作
用下地下水水位抬升明显,在夏季蒸发强烈的作用
下,有可能在补水结束后引起地下水中盐分上升并
在地表聚集,加重研究区内土壤盐渍化,然而受资
料限制,暂时未能对其进行研究分析,这将是下一
步研究的重点。

参 考 文 献:

[1] 范晓梅,刘高焕,束龙仓,等. 黄河三角洲沉积环境和沉
积物渗透系数的现场实验测定[J]. 水资源与水工程学

报,2008(5):6-10. (FAN Xiaomei, LIU Gaohuan, SHU
Longcang, et al. Field measuring the hydraulic conductivity
of different sediments in Yellow River Delta[J]. Journal of
Water Resources & Water Engineering, 2008(5):6-10. (in
Chinese))

[2] 黄翀,刘高焕,王新功,等. 不同补水条件下黄河三角洲
湿地恢复情景模拟[J]. 地理研究,2010(11):2026-
2034. (HUANG Cong, LIU Gaohuan, WANG Xingong, et
al. Scenario simulation of wetlands restoration in the Yellow
River Delta[J]. Geographical Research, 2010(11):2026-
2034. (in Chinese))

[3] 王新功,王瑞玲,刘波,等. 黄河三角洲刁口河生态调水
效果评估研究[J]. 水利水电技术,2011,42(11):17-
21. (WANG Xingong, WANG Ruiling, LIU Bo, et al. Study
on evaluation of effect from eco-water supplement to
Diaokouhe River in Yellow River Delta [J]. Water
Resources and Hydropower Engineering, 2011, 42(11):17-
21. (in Chinese))

[4] 李胜男,王根绪,邓伟,等. 黄河三角洲典型区域地下水
动态分析[J]. 地理科学进展,2008(5):49-56. (LI
Shengnan, WANG Genxu, DENG Wei, et al. Variations of
groundwater depth in Yellow River Delta in recent two
decades. [J]. Progress in Geography, 2008(5):49-56. (in
Chinese))

[5] 安乐生,赵全升,叶思源,等. 黄河三角洲浅层地下水化
学特征及形成作用[J]. 环境科学,2012,33(2):370-
378. (AN Lesheng, ZHAO Quansheng, YE Siyuan, et al.
Hydrochemical characteristics and formation mechanism of
shallow groundwater in the Yellow River Delta [J].
Environmental Science, 2012, 33(2):370-378. (in
Chinese))

[6] 姜广艳,范晓梅,张绍峰,等. 黄河三角洲不同补水方案
下地下水水位及水均衡影响研究[C]//第三届黄河国
际论坛论文集. 郑州:黄河水利出版社,2008.

[7] 薛禹群. 地下水动力学[M]. 2版. 北京:地质出版社,
1997.

[8] 葛海燕. 刁口河尾间黄河三角洲自然保护区生态补水效
果评估[J]. 山东林业科技,2012(5):34-36. (GE
Haiyan. Evaluation of effects on water supplement on
Yellow River Delta Nature Reserve in lower reaches of
Diaokou River [J]. Journal of Shandong Forestry Science
and Technology, 2012(5):34-36. (in Chinese))

(收稿日期:2014-12-20 编辑:彭桃英)

