



黄河三角洲南部冲洪积扇区 地下淡水调蓄条件研究*

王彦俊¹, 于翠翠¹, 刘咏明¹, 韩晓静²

(1. 山东省地矿工程集团有限公司, 山东 济南 250013; 2. 沾化县国土资源局, 山东 沾化 256800)

摘要:黄河三角洲南部冲洪积扇区浅层地下水由于长期大量开发利用, 早已形成了区域性漏斗群。通过对漏斗区地下水赋存条件和调蓄条件的分析, 提出了由新建的引黄主干渠引黄河水, 采用河渠、坑塘内施工回灌引渗, 以及丰水期大气降水地表径流拦蓄引渗和引黄河水引渗回灌联合调度的方案, 并从调蓄资源增量、调蓄可行性和调蓄效益等方面进行了论证。

关键词:地下水; 回灌; 入渗; 调蓄方案; 冲洪积扇区; 黄河三角洲南部

中图分类号: P641.25

文献标识码: A

黄河三角洲南部为冲积洪积扇平原区, 地层为第四系, 浅层地下水为淡水。由于农田灌溉、城镇供水等大量持续开发利用, 浅层地下水降落漏斗早已形成, 并迅速向纵深发展; 到1990年, 业已形成了由广饶—寿光、寒亭、昌邑等降落漏斗组成的区域漏斗群^[1]; 以0 m等水位线为界, 区域降落漏斗群面积为1 826 km² (2007年10月), 中心区域水位埋深37.80 m。

1 地下水赋存条件

黄河三角洲南部冲洪积扇区自西向东从广饶到昌邑分布着淄河、弥河、白浪河和潍河等4个冲洪积扇, 以东部弥河、白浪河和潍河3个冲洪积扇富水性最好。淄河冲洪积扇涌水量240~720 m³/d·m, 局部地段72~240 m³/d·m; 其他3条河流冲洪积扇涌水量中心地带大于720 m³/d·m, 扇缘地带72~240 m³/d·m, 山前地段一般小于72 m³/d·m^①。

1.1 淄河冲洪积扇区

淄河冲洪积扇位于广饶境内, 含水层颗粒较细, 主要岩性为细砂、粉砂和粉土, 呈叠瓦状自南向北倾斜。含水层厚度5~30 m, 自上而下分布3层。第

一层沿淄河分布, 厚度3~5 m, 埋深多小于20 m, 目前已疏干; 第二层埋深10~35 m, 厚度3~8 m, 上部已部分疏干; 第三层埋深29~42 m, 厚度2~6 m。第三层砂以下为一较连续的黏性土层, 构成了浅层地下水含水层隔水底板。

1.2 弥河冲洪积扇区

弥河冲洪积扇位于寿光境内。以寿光到丹河范围为轴部, 呈SW—NE方向展布。含水层自下而上可分为2层。第一含水层: 顶板埋深5~10 m, 北部局部地段大于20 m; 弥河以东以中、粗砂, 粗砂含砾为主, 累计厚度大于5 m; 弥河以西属弥河泛流带, 仅寿光县城以南后张庄以北, 以及寿光县城—张建新桥北、北洛城分布有条带中粗砂, 累计厚度小于5 m; 其余地段均以粉砂为主, 厚度小于10 m。第二含水层: 顶板埋深一般小于20 m, 中段30~40 m, 向NE下游和河间带方向逐渐加深; 南部大马疃以西以粗砂砾石为主, 厚度大于15 m; 北部寒桥以东以中粗砂为主, 单层厚度小于10 m。

1.3 白浪河冲洪积扇区

白浪河冲洪积扇位于潍坊寒亭区内。以白浪河到虞河范围为轴部, 呈近于SN方向展布。有1~3

* 收稿日期: 2010-03-29; 修订日期: 2010-04-05; 编辑: 陶卫卫

作者简介: 王彦俊(1958—), 男, 山东平原人, 高级工程师, 主要从事水文地质环境地质工作; E-mail: sddkwj2008@163.com。

①山东省地矿工程集团有限公司, 黄河三角洲高效生态经济区环境地质调查报告, 2009年。

层砂层,含水层岩性为粉砂、中粗砂夹砾石,顶板埋深7~40 m,砂层厚度2.5~30 m。

1.4 潍河冲洪积扇区

潍河冲洪积扇位于昌邑境内。冲洪积扇以现潍河中心,东到蒲河、西到夹沟河范围为轴部,呈近于SN方向展布。朱里以东含水层颗粒粗,一般为砂砾石层,含水砂层与现代河床西部砂体连为一体,最深达80 m,砂层厚度大于30 m。至下游围子东冢有2个或2个以上含水层,上部为中粗砂和粗砂夹砾石,顶板埋深8~20 m,厚度6~13 m;下部岩性为细砂和中粗砂,顶板埋深22~35 m,厚度6~11 m。

2 地下水调蓄条件

2.1 地下水调蓄水源条件

2.1.1 当地地表径流

南部冲洪积扇区年均降水量585 mm。6—9月平均总降水量424 mm,占全年的72.5%;其中7—8月平均总降水量293 mm,占全年降水量的60.4%;其他月份降水量不到全年降水量的30%。丰水年年均降水量820 mm,枯水年年均降水量404 mm^[1]。

区内降水时间上分配不均,年际间变化明显,年内降水主要集中在汛期。这种降水特点使地表径流在时间上分配也不均匀。根据水利部门资料统计,调蓄区内多年平均地表径流量 $1.66 \times 10^8 \text{ m}^3$,不到降水量的13%;年内地表径流多集中在汛期,汛期的地表径流量占全年的76.2%。因此,丰水期地表径流作为调蓄水源成为可能。

2.1.2 引黄水

黄河是我国第二大河,径流量季节分配极不均匀,年际变化大(表1)。

表1 多年黄河入海流量与山东省引黄利用量

年份	径流量 ($10^8 \text{ m}^3/\text{a}$)	全省引黄量 ($10^8 \text{ m}^3/\text{a}$)	年份	径流量 ($10^8 \text{ m}^3/\text{a}$)	全省引黄量 ($10^8 \text{ m}^3/\text{a}$)
1988	284.8	87.4	1997	18.6	71.4
1989		123.5	1998	107.3	68.0
1990		—	1999	66.0	73.9
1991	182.1	72.0	2000	49.0	59.5
1992		84.0	2001	46.4	56.0
1993		83.0	2002	41.6	74.0
1994	226.0	69.4	2003	191.3	46.7
1995	138.8	68.0	2004	198.2	44.9
1996	158.7	80.0	2005	198.2	46.5

山东省引黄分配量 $70 \times 10^8 \text{ m}^3$,实际引黄量一直呈下降趋势。20世纪90年代灌溉用水粗放,用水量大,年平均引黄量 $74.4 \times 10^8 \text{ m}^3$;进入21世纪以来,在不断改善用水计划和灌溉方式的情况下,全省引黄用水量明显降低,一般每年维持在 $50 \times 10^8 \text{ m}^3$ 左右。

2003年黄河调水后下游流量在枯水—平水年份仍能维持在 $200 \times 10^8 \text{ m}^3$ 左右。黄河最低生态流量 $(50 \sim 76) \times 10^8 \text{ m}^3$ 。也就是说,在维持黄河最低生态流量的状况下,黄河下游尚有 $100 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 左右的水量。黄河水是黄河三角洲主要供水水源,目前虽然大水漫灌引黄灌溉方式被塑料袋管技术取代,但仍属于粗放型灌溉用水模式;在进一步改革灌溉方式后节水潜力巨大。南部冲洪积扇区距黄河较近,引黄济青渠从区内穿过,具有较好的引黄条件,因此黄河水可以作为调蓄水源。

综上所述,区内地下水调蓄可以大气降水地表径流和黄河客水作为主要调蓄水源;以地表径流作为调蓄水源,水量偏小,经济易行;以黄河水作为调蓄水源,可引水量大,费用较高。

2.2 地下水调蓄入渗条件

调蓄区地形较为平坦,由西南向东北微倾,坡度1:500~1:1500。由于河流的泛滥冲积,形成了岗、坡、洼相间的微地貌形态。

区内主干河流有淄河、弥河、白浪河、潍河等4条,由西向东还分布着泥子河—裙带河、阳河、乌阳河、益寿河、跃龙河、丹河、桂河、虞河、浞河、瀑沙河、夹沟河、漩河等支流,还有少量的引排水渠道,以及大量的路沟等。坑塘主要为砖厂取土坑、村内外塘等,数量较多。初步估算,南部冲洪积扇区河流、沟渠、坑塘最大容积量为 $14\,097 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

根据地层资料分析,南部冲洪积扇区包气带主要岩性为粉砂、粉土和粉质黏土(图1),在5~40 m深度内,可以分为砂性土、黏性土2种包气带土体组合类型。西部以黏性土为主;东部集中在弥河、白浪河、潍河冲洪积扇轴部砂性土渐多,并与含水层相连,而以潍河冲洪积扇砂性土分布最广。与此相对应,包气带的渗透性能自东向西、自南向北减弱。由渗水试验资料可知,冲洪积扇南部渗透性最好,渗透系数大于1.0 m/d,中部0.5~1.0 m/d,北部区段一般小于0.5 m/d。

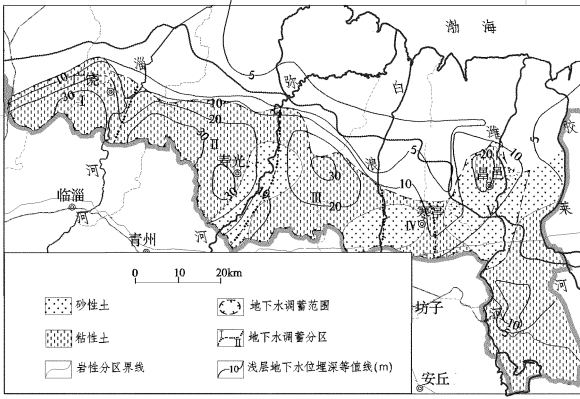


图1 黄河三角洲南部冲洪积扇区调蓄入渗图

2.3 地下水调蓄空间分析

南部冲洪积扇区区域漏斗群边缘水位埋深大于5 m,中心水位埋深25~40 m,以0 m等水位线为界,2007年10月区域降落漏斗群总面积为1 826 km²,中心区域水位埋深37.80 m^[2,3]。如前所述,以广饶-寿光、留吕、寒亭、昌邑漏斗组成的区域漏斗群为依托,以埋深3.5 m为调蓄水位上限(顶界),浅层地下水含水层砂层底部第一个连续稳定的黏性土

层为底界,构成了地下水调蓄总空间^[4]。现状调蓄空间为一不规则的串珠状漏斗槽。根据漏斗群形态特征,划分为广饶、大王-寿光、留吕、寒亭、昌邑5个调蓄分区,调蓄库容总量 $34.233 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

2.4 回灌参数分析

在潍河和淄河冲洪积扇上,采用自流回注(水头差15~27 m)方式进行的回灌试验表明^[5],利用机井进行回灌具有可行性。西部淄河冲洪积扇回灌性能和回灌量较东部潍河冲洪积扇等为小,东部单井回灌量可达涌水量近90%,西部单井回灌可达到涌水量的70%多(表2)。

根据引渗试验分析,黄河三角洲南部冲洪积扇区引渗调蓄单位面积渗入率 $0.1 \sim 0.2 \text{ m}^3/\text{d} \cdot \text{m}^2$ (表3)。坑塘回灌能有效地补给浅层地下水。引渗调蓄入渗量与入渗速度受引渗调蓄场地包气带岩性、厚度和入渗条件影响,包气带岩性厚度越大、岩性越细、入渗系数越小,引渗调蓄入渗量与入渗速度则越小。同时,回灌水深对入渗量起重大作用,入渗量与回灌水深呈近似线性关系。

表2 回灌与抽水试验对比分析结果

位置	抽水试验成果						回灌试验量 $q(\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{m})$	回灌量/ 涌水量(%)	
	S_1 (m)	Q_1 (m^3/d)	q_1 ($\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{m}$)	S_2 (m)	Q_2 (m^3/d)	q_2 ($\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{m}$)			q ($\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{m}$)
广饶(淄河冲洪积扇)				5.27	476	3.76	3.76	2.69	71.5
昌邑(潍河冲洪积扇)	0.39	231	24.68	1.92	762	16.54	20.61	18.59	90.2

注: S_1, Q_1, q_1 为第一抽水落程参数; S_2, Q_2, q_2 为第二抽水落程参数。

表3 引渗调蓄试验成果

位置	回灌水 深(m)	入渗量 (m^3/d)	单位面积渗入率	
			回灌水深 ($\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$)	1m回灌水深 ($\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$)
广饶石村 镇大尧*	1.2	67.8	0.156	0.13
	1.8	183.2	0.273	0.152
广饶稻庄镇 东朱营	1.8	191.6	0.167	0.093
昌邑市双台 镇南褚村	0.8~1.0	45~65	0.13~0.17	0.14~0.18

注:*鲁北地质工程勘察院,黄河三角洲南部地下水人工调蓄试验普查,1999年。

综上所述,沟渠坑塘引渗具有条件简单、经济易行等优点,适宜进行大面积的地下水调蓄;但在水位埋深大、包气带入渗条件差的地区,回灌补给地下水时间长,回灌时消耗量大、效率低。井灌直接对地下水进行补给,补给量大,回灌效果好;但回灌井容易发生淤塞,寿命短、造价高。

3 地下水调蓄方案

3.1 现状调蓄方案

近期地下水资源调蓄以适当增加地下水储存量和可开采量,阻止北部咸水南侵^[6],防止浅层地下水资源枯竭为主要目的。利用现有沟渠和河流、坑塘,以拦蓄引渗丰水期大气降水地表径流为主;在昌邑市以及部分有条件的地段,通过引黄济青渠引黄河水入潍河、大型沟渠等现有渠系和坑塘设施拦蓄引渗(图2)。

3.2 远景调蓄方案

远期地下水资源调蓄,在工作区南部施工黄河引水主干渠,由黄河邹平码头作为引黄主干渠首,向东经过邹平城南—桓台城北、临淄区北部,由孙家集进入寿光,穿过桓台-潍坊区域漏斗中心部位,继续

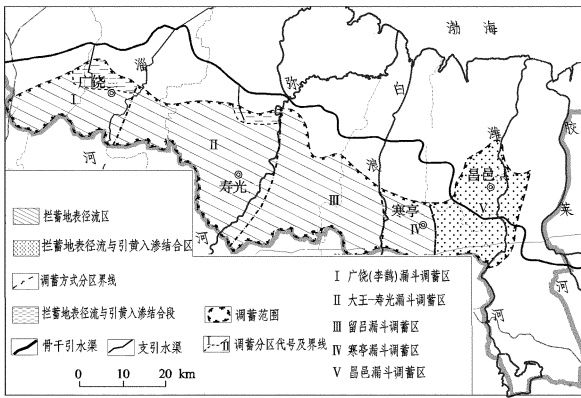


图2 黄河三角洲南部冲洪积扇区现状调蓄方案图

向东越弥河、白浪河，直达原引黄济青渠，全长185 km。由新建的引黄主干渠引黄河水，再利用区内的骨干河渠，由南向北把黄河水引入区内。采用河渠、坑塘引渗，以及与大型沟渠、坑塘内施工回灌井引渗相结合的方式，实现丰水期大气降水地表径流拦蓄引渗和引黄水引渗回灌联合调度，充分利用地下水调节空间，大量引渗和回灌引黄水。从大的河流开始，遵循河流→大型沟渠→大型坑塘→一般沟渠、坑塘引渗回灌顺序，拦蓄大气降水与引黄水引渗相结合，联合调度区内外地表水，充分合理利用地下水调节空间，大量引渗和回灌引黄水(图3)。

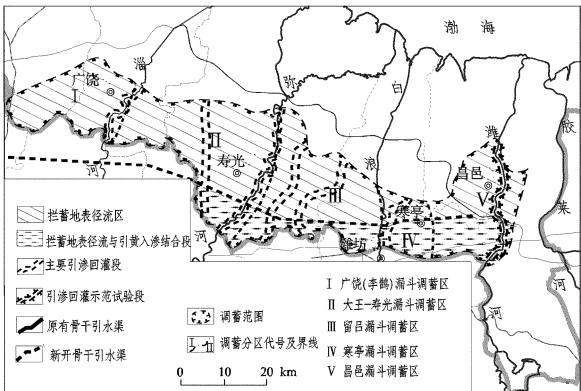


图3 黄河三角洲冲洪积扇区远景调蓄方案图

4 地下水调蓄分析

4.1 地下水调蓄资源增量分析

地下水调蓄资源增量主要决定于调蓄水源、调蓄空间、调蓄引渗能力3方面因素^[7]。

调蓄区地下水调蓄库容量 $34.23 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。地表径流量 $16\ 267 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。全省引黄分配量

$70 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，进入21世纪实际引黄量 $50 \times 10^8 \text{ m}^3$ 左右；黄河调水后，在维持黄河最低生态流量的状况下，黄河入海口仍有近 $100 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的调节水量。因此，地下水调蓄库容巨大，调蓄水源充沛。调蓄引渗能力是决定该区地下水资源调蓄资源增加量的关键因素。经综合分析，全区地下水近期调蓄资源增量 $14\ 141 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ (表4)，远景调蓄资源增量 $53\ 163 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ (表5)。

表4 地下水调蓄资源增量

县市行政区		近期调蓄资源增量 ($10^4 \text{ m}^3/\text{a}$)			远景调蓄资源增量 ($10^4 \text{ m}^3/\text{a}$)			
名称	面积 km^2	径流 引渗	引黄 引渗	合计	径流 引渗	引黄 引渗	井灌 引渗	合计
博兴	154	239	11	249	239	578	192	1008
广饶	308	1238	81	1319	1238	3420	903	5560
寿光	966	5017	185	5203	4560	10921	5423	20904
寒亭	520	3156	0	3156	3156	6731	4531	14418
昌邑	262	2172	2043	4215	2172	6128	2973	11273
合计	2210	11822	2319	14141	11365	27777	14021	53163

4.2 地下水调蓄可行性分析

如前所述，地下水调蓄库容巨大，调蓄水源充沛，既有巨大的调蓄空间，又有丰富的调蓄水源，从蓄水源、调蓄空间是可行的。南部冲洪积扇区浅层地下水矿化度低，含水层厚度大，埋藏浅，单井涌水量较大，开采技术条件良好。近期主要通过拦洪引渗调蓄，不需大的施工建设和经济投入，能获得 $1.41 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 调蓄资源增量，经济上和技术上是可行的。远景施工的骨干引黄渠，正好从整个桓台-寿光漏斗区中心区穿过^[8]，该区经济发达、土地肥沃，无论是直接利用黄河水供水，还是引黄调蓄，都具有十分重要的现实意义。施工引渗机井，可一井两用，用水季节可作为抽水井，枯水季节可再作为引渗井。引渗井成井浅，费用低，回渗效益大，切实可行。

4.3 地下水调蓄效益分析

4.3.1 资源效益

调蓄区地下水开发利用总量 $4.82 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ，其中，浅层地下水开采量达 $4.32 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ，深层地下水开采量 $0.50 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。根据当地水资源条件，现状供水保证程度70%，供水不足；到2020年(远景年)供水保证程度约54%，供水明显不足(表5)。

表5 调蓄区水资源供需平衡分析

项目	需水量($10^4\text{m}^3/\text{a}$)				可供水量($10^4\text{m}^3/\text{a}$)				供需平衡	
	农业	工业	生活	合计	地表水	浅层	深层	合计	供需差($10^8\text{m}^3/\text{a}$)	保证程度(%)
现状年	37480	16389	2819	56688	2053	33450	3994	40005	-1.7191	70
远景年	42521	25216	5291	73029	2053	33450	3994	40221	-3.3531	54

通过人工调蓄措施,可获得 $1.41 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 的近期水资源增量, $5.32 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 的远景水资源增量^[9]。现状水资源缺口 $1.72 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$,调蓄后可使水资源供需基本达到平衡。远景水资源缺口 $3.35 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$,调蓄后可完全解决当地的水资源供需要求,甚至还有近 $2 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 的水资源盈余。

4.3.2 环境效益分析

地下水调蓄后,北部咸淡水过渡带附近可以形成淡水帷幕阻止咸水南侵^[10],改变该区咸水区面积不断扩大,淡水资源逐渐咸化的状况,使北部地区的工农业用水条件得到改善。由于地下水位上升、储存量和资源量增加,将摆脱浅层地下水日趋枯竭的现状,使供水条件得到改善。另外,随着调蓄后地下水位的上升,区内地面沉降等地质灾害将得到有效抑制^[11],可产生良好的环境效益。

4.3.3 经济效益分析

地下水调蓄是利用沟渠引水,疏干含水层蓄水。它工程规模小、占地少、投资省、技术简易,运行管理简便,与修建地表蓄水工程比较,具有造价低、社会效益好的优点。根据牟平地下水回灌资料介绍,修建地下水调蓄工程的费用仅相当于修建普通地表水库的 $1/2 \sim 3/5$ 。利用地下含水层蓄水,还具有库容量大,水资源蒸发损失小,污染轻等优点。随着调蓄后水位的上升,提水费用将大大降低,可产生良好的经济效益。

5 结论

以广饶-寿光、留吕、寒亭、昌邑漏斗组成的区域漏斗群为地下水调蓄空间,进行地下水资源调蓄,总面积 2210km^2 ,调蓄库容量 $34.17 \times 10^8 \text{m}^3$ 。近期,利用现有河流、沟渠和坑塘,以拦蓄引渗丰水期大气降水地表径流为主,可获得 $1.41 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 的调蓄资源增量,能使水资源供需基本达到平衡。远期,主要由新引黄主干渠引黄水入区,采用区内河渠、坑塘引渗,以及与骨干河渠、大型坑塘内施工回灌井引渗

相结合的方式引渗回灌,拦蓄大气降水与引黄水引渗相结合,可获得 $5.32 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 的调蓄资源增量,能够完全解决当地水资源供需要求,尚有近2亿 m^3/a 的水资源盈余。

黄河三角洲南部冲洪积扇区地下水调蓄,具有优良的调蓄条件、巨大的库容空间、充沛的水源和引渗条件,调蓄方案造价低、简单易行。地下水调蓄后可以逐渐摆脱浅层地下水日趋枯竭和咸化的威胁,完全解决黄河三角洲南部地区供水问题,具有良好的资源、环境和经济社会效益。

参考文献:

- [1] 徐建国,卫政润,张涛,等. 环渤海山东地区浅层地下水资源潜力分析及利用对策[J]. 地质调查与研究,2004,(3):203-207.
- [2] 赵书泉,梁凤英,刘春萍,等. 烟台地区地下水水库建设的地质环境条件及其效益浅析[J]. 山东国土资源,2005,21(4):27-29.
- [3] 王彦俊. 德州深层地下水降落漏斗相关模型建立及其应用[J]. 山东国土资源(原山东地质),1998,14(2):38-45.
- [4] 孙晓明,王卫东,徐建国,等. 环渤海地区地下水水库开发利用前景[J]. 地质调查与研究,2007,(1):54-61.
- [5] 王贞国,王彦俊,冯守涛,等. 德州市深层地下水人工回灌试验浅探[J]. 山东国土资源,2005,21(6-7):82-85.
- [6] 徐建国,卫政润,张涛,等. 环渤海山东地区地下水水库建设条件分析[J]. 地质调查与研究,2004,(3):197-202.
- [7] 戴长雷,迟宝明. 地下水水库调蓄能力分析[J]. 水文地质工程地质,2003,(3):37-40.
- [8] 孙晓明,吴登定,肖国强,等. 环渤海地区地下水资源与环境地质若干问题探讨[J]. 地质调查与研究,2006,(1):47-58.
- [9] 董华,王彦俊,阎震鹏,等. 黄河下游浅层地下水资源潜力与含水系统调蓄能力分析[J]. 地理与地理信息科学,2004,(3):92-95.
- [10] 段秀铭,林常平. 潍坊市北部沿海地区海咸水入侵灾害及防治对策[J]. 山东国土资源(原山东地质),2000,16(1):46-51.
- [11] 刘桂仪,王彦俊. 黄河下游断流问题的环境地质效应分析[J]. 山东国土资源(原山东地质),1992,8(2):59-66.

Study on Underground Fresh Water Storage in Southern Flood Alluvial Area in the Yellow River Delta Area

WANG Yanjun¹, YU Cuicui¹, LIU Yongming¹, HAN Xiaojing²

(1. Shandong Geo - engineering Exploration Institute, Shandong Jinan 250013, China; 2. Zhanhua Bureau of Land and Resources, Shandong Zhanhua 256800, China)

Abstract: Due to development and utilization of shallow underground water in southern flood alluvial area in the Yellow River Delta area, regional group of funnels have been formed in this area. Through analysis on occurrence and storage conditions of underground water in funnel area, some countermeasures for water storage are put forward, such as guiding water from the Yellow River by using new diversion channels, recharging and infiltrating by using construction in chanals and ponds, and realizing storage and infiltration of rainfall or by leading water from the Yellow river in rainy season. Regulation and storage resources, regulation of resource increment, storage feasibility and effectiveness are briefly introduced as well.

Key words: Underground water recharge; infiltration; storage programs; flood alluvial delta area; southern of the Yellow River delta area