

# 山西省万家寨引黄入晋工程总干线 环境水文地质问题<sup>①</sup>

侯敬泽, 徐 胜

(山西省引黄工程总公司, 太原 030012)

**摘 要:**山西省万家寨引黄工程是解决山西能源基地及省会太原市供水短缺的战略性工程,总干线引水工程主要建筑物为引水隧洞,总长 42.1km。该区为黄土覆盖的岩溶高原地区,地表严重缺水,生态环境脆弱。隧洞工程主要是在天桥泉域区域岩溶地下水的包气带通过,虽然对区域岩溶水文地质环境影响不大,但对浅层岩溶水文地质环境有一定影响,表现为对岩溶区各种上层滞水及浅层地下水产生疏干作用,从而对岩溶高原区的农村生活用水及生态环境产生影响。本文探讨隧洞工程对浅层水文地质环境的影响的形势并提出了治理措施。

**关键词:**山西万家寨;引黄工程;浅层地下水;岩溶环境

**中图分类号:**X141 **文献标识码:**A

## 0 前 言

万家寨引黄入晋工程位于山西省西北部,从黄河万家寨水利枢纽引水,经总干线和南干线向太原市供水。总干线长度为 44.4km,引水流量为  $48\text{m}^3/\text{s}$ ,年引水总量为 5.6 亿  $\text{m}^3$ 。总干线引水工程主要建筑物为引水隧洞工程,其中有压隧洞 5 段,无压隧洞 6 段,总长 42.1km。其次还有渡槽 4 座,长 550m,泵站 3 座。

总干线工程沿线处于晋西北黄土覆盖的岩溶高原地区,引水隧洞均在碳酸盐岩中通过,横穿山西著名的天桥泉域。工程施工对岩溶水文地质环境有一定影响。本文拟就此作一初步探讨,并将提出相应的治理对策。

## 1 环境水文地质特征

### 1.1 自然地理

引黄总干线的引水口为万家寨水利枢纽。该枢纽位于偏关县以北的黄河晋陕峡谷中,河床高程 900m,大坝高 90m,正常蓄水位高程 980m。引水隧洞由西向东延伸(图 1),所处位置为吕梁山北段管汾山与黄河

之间的黄土覆盖岩溶高原地区,地面标高 1250~1400m。

本区除黄河外,主要支流为偏关河,发源于西部汾山分水岭,向西注入黄河。该河在上游为季节性的干谷,中下游有常年流水,流量  $0.2\sim 1.0\text{m}^3/\text{s}$  左右。该河在隧洞线南侧,基本与隧洞平行分布。此外,还有一些近南北向的沟谷,如水泉沟等,底部均切割基岩,是典型的干谷。

本区属温带干旱—半干旱气候,具有气温低,干旱少雨,风沙大特点,年平均气温  $7\sim 8^\circ\text{C}$ ,年降水量  $350\sim 500\text{mm}$ ,全年蒸发量  $1500\sim 1800\text{mm}$ 。

本区处于黄河峡谷的东侧,地表多有黄土覆盖,一般厚度大于 30m,水土流失严重,侵蚀模数在陡坡处可达  $10000\text{t}/\text{km}^2\cdot\text{a}$ ,在吕梁山麓人为破坏较少,侵蚀模数为  $1000\sim 5000\text{t}/\text{km}^2\cdot\text{a}$ 。

由于本区干旱少雨,再加上过度垦殖,植被退化,水土流失严重,致使荒漠化不断发展。近年来,由于加强小流域治理,退耕还林、草,荒漠化趋势有所减轻。

### 1.2 地质构造

工程沿线出露的地层主要为古生界寒武系、奥陶

<sup>①</sup> 作者简介:侯敬泽(1942—),女,高级工程师,从事工程环境保护工作。  
收稿日期:2001-08-13

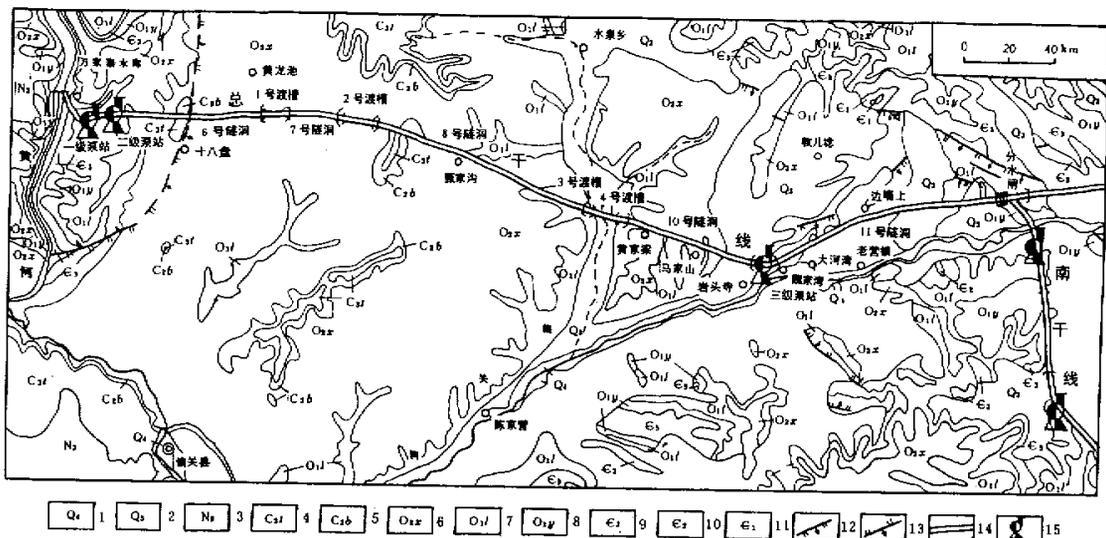


图1 万家寨引黄工程总干线地质图

Fig.1 Geological sketch along the main canal of the Yellow River Diversion Project in Wanjiashai

- 1. 第四系全新统; 2. 第四系上更新统; 3. 第三系上新统; 4. 石炭系上统太原组; 5. 石炭系中统本溪组;
- 6. 奥陶系中统下马家沟组; 7. 奥陶系下统亮甲山组; 8. 奥陶系下统冶里组; 9. 寒武系上统; 10. 寒武系中统;
- 11. 寒武系下统; 12. 正断层; 13. 逆断层; 14. 引水线路; 15. 泵站

系碳酸盐岩地层及石炭、二叠系碎屑地层。此外, 新生代第三系和第四系广泛分布(图1)。

寒武系仅出露张夏组( $E_{2z}$ )、崮山组( $E_{3g}$ )、长山组( $E_{3c}$ )、凤山组( $E_{3f}$ ), 主要岩性为鲕状灰岩夹竹叶状灰岩和泥质条带灰岩, 白云质鲕状灰岩、薄层灰岩, 含燧石条带白云岩等。

奥陶系广泛出露下奥陶统的冶里组( $O_{1y}$ )、亮甲山组( $O_{1l}$ )以及中奥陶统上、下马家沟组( $O_{2s}$ 、 $O_{2x}$ )、峰峰组( $O_{2f}$ ), 岩性主要为厚层结晶白云岩, 中厚层灰岩、泥灰岩、白云质灰岩、泥质白云质、膏溶角砾岩。

石炭系及二叠系为碎屑岩和煤系地层, 不整合于奥陶系之上。

第三系上新统( $N_2$ )广泛分布, 可分为两层, 下部为红土砾石层及红粘土层, 砾石层呈半胶结状, 孔隙发育, 底部红土层结构致密, 上部以红色、棕红色粘土为主, 含少量砾石。第三系上新统厚度随古地形起伏变化很大, 最大厚度可达200m以上。

第四系上更新统( $Q_3$ )黄土广泛分布, 形成梁、卯地形, 厚度30~100m以上。全新统( $Q_4$ )多分布在河谷地带, 多为砂砾石层。

区内大地构造分区以十八盘绕曲为界, 西部属鄂尔多斯台向斜, 东部为偏关—神池块坪。总体构造形态为管湾大背斜西翼向西及北西倾斜的波状起伏单

斜构造, 并被次一级东西向或北西向褶皱或断裂切割。沿总干线除局部地段外, 地层产状平缓, 为一平缓的东西向背斜。

十八盘绕曲为一北北东向的褶皱带, 在6#隧洞桩标6+800附近通过。断层西盘抬升、东盘下降, 岩层陡倾, 破碎影响带宽600m, 裂隙发育, 岩层破碎。

### 1.3 岩溶发育特征及岩溶水文地质条件

#### 1.3.1 岩溶发育特征

区内碳酸盐岩广泛分布, 岩溶发育具有北方干旱、半干旱岩溶<sup>[1~3]</sup>的特点。总的来看, 是以裂隙岩溶为主。地表多为裸露或半裸露的常态山、干谷。地下以溶隙为主, 局部发育溶洞。

岩溶发育受地层岩性影响很大。中奥陶统马家沟灰岩具有似层状岩溶特点, 这是因为在上马家沟组与下马家沟组底部泥灰岩及泥云岩层中夹石膏层, 溶蚀后形成膏溶角砾岩、溶隙、溶孔及小溶洞。而中寒武统张夏灰岩为纯质厚层灰岩, 发育典型的裂隙岩溶, 仅沿断层和裂隙带溶蚀。岩溶发育极不均一。

区内古岩溶现象较普遍。主要的古岩溶发育期如下:

(1) 加里东期古岩溶 自中奥陶世起至中石炭世, 在1亿年的历史时期中, 本区遭受长期侵蚀—溶蚀作用, 表现为中奥陶统顶部形成古溶蚀面, 峰峰组残缺不

全,古溶蚀面起伏不平,并有古洼地、古漏斗分布,其中充填铝土质和铁质岩,溶蚀带厚 20~40m(图 2)。

(2)第三纪古岩溶区内 自第三纪以来一直处于上升剥蚀—溶蚀状态,第三纪的古岩溶现象分布普遍,特别是由于上新统(N<sub>2</sub>)红色地层的存在,可以确定唐县期的古溶蚀洼地分布相当普遍,分布高程在 1250~1350m 之间。洼地深度可达 50~80m,致使引水隧洞在局部地段遇上新统红色粘土层,并产生洞内塌方(图 3)。

第三纪古岩溶除了表现在广泛分布的古岩溶剥蚀面外,还有与这些古岩面相关的古溶洞,在隧洞施工中,在洼地高程上遇到的溶洞均为同期的岩溶现象,如 8# 隧洞在进口 10586.49m 处遇直径 2m 的溶洞,7# 隧洞在 1465.14~1466.74m 段遇直径 1.5m 溶洞,在 29178~2921.5m 处遇直径 3m 的溶洞等。

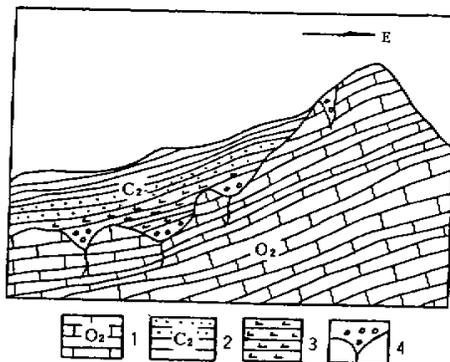


图 2 偏关附近加里东期古岩溶剖面  
Fig. 2 The Caledonian paleokarst profile near Pianguan county  
1. 中奥陶统灰岩; 2. 中石炭统碎屑岩夹煤层;  
3. 铝土质岩; 4. 古洼地中的褐铁矿

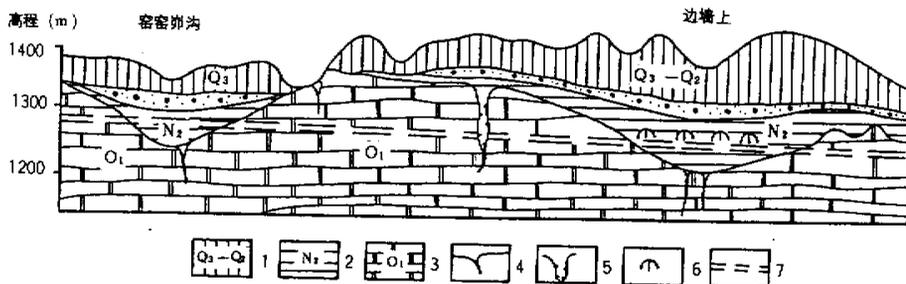


图 3 总干线 11# 隧洞沿线的古岩溶面  
Fig. 3 Paleokarst surface along the line 11# tunnel of the canal  
1. 黄土及砾石层(Q<sub>2</sub>~Q<sub>3</sub>); 2. 红粘土层(N<sub>2</sub>); 3. 白云岩(O<sub>1</sub>); 4. 古岩溶洼地; 5. 古溶洞; 6. 隧洞内塌方; 7. 隧洞线

### 1.3.2 岩溶水文地质条件

在区域水文地质方面,引黄总干线位于天桥岩溶大泉泉域的北部。天桥泉位于保德县黄河天桥峡谷中,泉群出露标高 816~830m,总流量约 8m<sup>3</sup>/s 左右。主要含水层为奥陶系灰岩及寒武系灰岩。区域岩溶地下水水位标高 935~1180m,区域地下水位埋深 100~200m 左右。天桥泉域总面积 10000km<sup>2</sup> 左右,其中裸露碳酸盐岩面积占 30%。岩溶地下水的补给主要靠大气降水入渗及沟谷径流渗漏补给。地下水由东部分水岭向西部黄河河谷运动,水力坡降 4‰。左右。由于引黄总干线位于天桥泉域北部补给区,奥陶系岩溶含水层多抬起处于包气带,而寒武系张夏组灰岩成为主要含水层。

在区域地下水位以上,存在多层上层滞水含水层,尽管富水性较弱,但因水位高,易于利用,成为沿线乡村的饮用水源。区内主要的上层滞水及浅层水类

型如下:

(1)上新统(N<sub>2</sub>)红土层上层滞水 N<sub>2</sub> 红土层分布较广,是区域相对隔水层,渗透系数  $K=10^{-15} \sim 10^{-7} \text{cm/s}$ 。在与上覆黄土接触带存在厚 2~5m 的砾石层,汇集地下水,当地民井多取本层水,在汇水条件较好的地段,每日可出水 1~3m<sup>3</sup>/d。该层水直接接受大气降水入渗补给,在干旱年份,水量减少甚至干涸。

(2)下奥陶统泥灰岩上层滞水 下奥陶统白云岩层中夹有多层泥灰岩,泥灰质页岩,为相对隔水层,形成上层滞水,并有小泉水出露,流量 0.2~1.5 l/s 左右。某些农村的饮用水即依靠这种小泉水。

(3)河谷第四系砂砾石层孔隙潜水 偏关河中上游,河谷宽阔,砂砾石层厚 5~15m 左右,下面有红土隔水层。砂砾层中含较丰富的浅层地下水。沿河农村在河谷阶地及漫滩上挖井取水。

## 2 引黄总干线岩溶水文地质环境问题

引黄总干渠引水工程主要建筑物为引水隧洞,共 11 段总长 42.1km,其次还有渡槽和泵站。引水隧洞一般埋深 50~200m,大都穿越奥陶系石灰岩、白云岩层。由于隧洞洞身高程多在 1200m 以上,高于区域岩溶地下水位,处于包气带中,因此隧洞施工中不会产生大规模的岩溶涌水,也没有对区域岩溶水文地质环境产生明显影响。但对表层水文地质环境产生一定影响,并直接影响上层滞水及浅层地下水的天然状态。在干旱缺水的山区,这些问题必须引起足够重视。隧洞施工对表层环境水文地质的影响可分为如下四种类型:

### 2.1 施工斜井切穿上层滞水隔水层

隧洞施工中经常要先开凿斜井,从地表开始凿至主洞,这种斜井对浅部地下水的隔水层破坏最大,往往使上层滞水补给的泉水及井水干涸。

偏关县老营镇马家山村位于引黄总干线 10# 洞中段,地面标高 1300~1400m,大部分地区被黄土覆盖。在该村东的泉子沟中出露下奥陶统白云岩夹薄层状泥质白云岩及泥灰质页岩数层,具有相对隔水作用,形成上层滞水,并出露泉水(泉子沟泉),流量约 10m<sup>3</sup>/h 左右,该泉水标高 1350m,为高悬于区域岩溶地下水位之上的悬挂泉水,高于区域岩溶地下水位 180m。该泉虽然流量较小,但却是当地村民唯一的水源(图 4)。

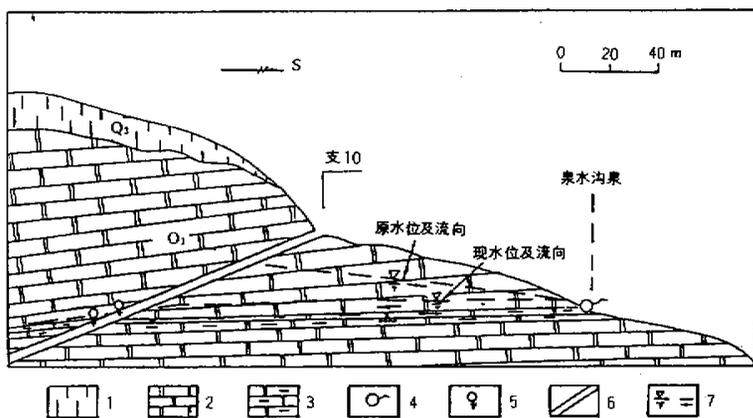


图 4 马家山 10# 支洞环境水文地质图

Fig. 4 Environment hydrogeologic of 10# branch tunnel of Majiashan

1. 黄土; 2. 白云岩; 3. 泥灰质页岩; 4. 泉; 5. 斜井内涌水点; 6. 斜井; 7. 上层滞水水位流向

支 10# 斜井在泉子沟中由南掘进,坡度 22°,当掘进至 80~90m 处,揭穿泉水下伏泥质页岩隔水层,在斜井中出现二股涌水,流量约 10m<sup>3</sup>/h,与此同时,泉子沟泉逐渐干涸。经水质化验,斜井中涌水与原泉子沟泉水水质完全相同。可以确认,泉水的干涸完全是由于斜井施工揭穿隔水层,又没有采取止水措施,致使斜井中的涌水点取代了泉水点,成为新的排水点,最后使泉水完全干涸。

### 2.2 隧洞穿越古岩溶面,影响上层滞水

区内经多期古岩溶作用,古岩溶面分布普遍。特别是新第三纪唐县期的古洼地、古漏斗广泛分布,其发育深度可达 50~80m。在这些古洼地、古漏斗中,充填上新世红粘土层。红粘土层透水性差,形成相对隔水层,在其上部与黄土层接触带普遍分布砾石层,厚 3~5m,接受黄土层渗水补给形成上层滞水,当隧洞穿

越红粘土层时,影响上层滞水。

偏关县老营镇边墙上村的供水井位于一个古洼地中,井深 6~8m,取红粘土层上部的砾石层上层滞水。总干线 11# 隧洞在附近通过,隧洞洞身低于民井井底 55m 左右。此段隧洞穿越红粘土层,该粘土层为可塑状态,稳定性差,造成隧洞塌方和涌水,塌方量近万立方米,对红粘土隔水层造成大范围破坏,使上层滞水被疏干,民井也完全干涸(图 5)。

### 2.3 泵站基坑排水,疏干河谷浅层地下水

引黄总干线引水工程除了隧洞工程外,还有 3 个大型泵站,多修建在河谷地带。如三级泵站位于偏关河谷边缘,基坑开挖深 10m 以上,开挖面积近 2000m<sup>2</sup>。河谷砂砾石层含丰富浅层地下水,附近的岩头寺村、魏家湾村、大河湾村的民井都取自这层地下水。泵站基坑日排水量 5000m<sup>3</sup> 左右,从 1998 年 10 月

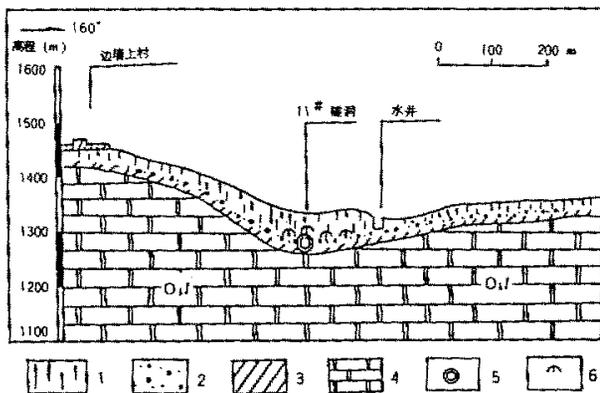


图 5 边墙上 11# 隧洞环境水文地质剖面图

Fig. 5 Environment hydrogeologic profile of 11# tunnel of Bianqiangshang

1. 黄土; 2. 砂砾石; 3. 红粘土; 4. 白云岩; 5. 11# 隧洞; 6. 隧洞内塌方

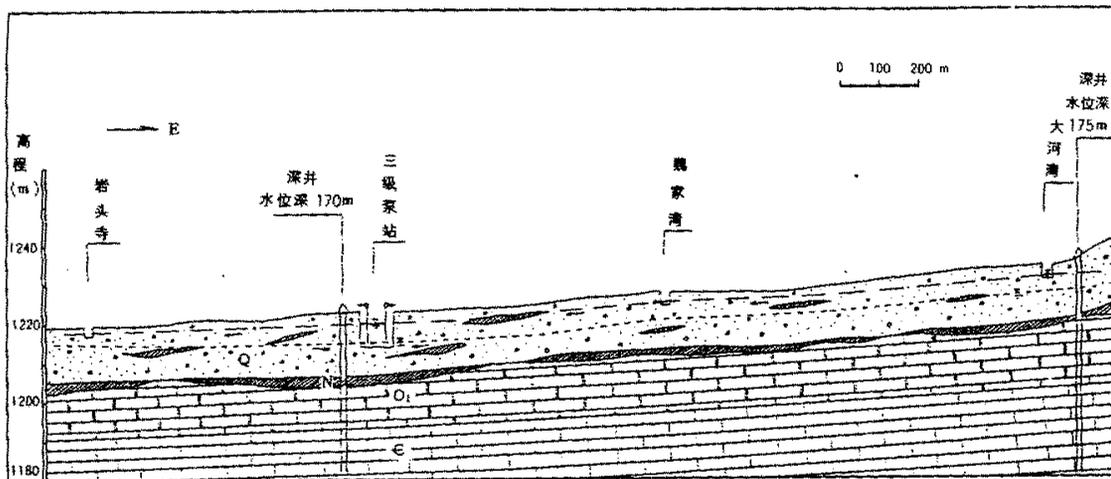


图 6 引黄总干线岩头寺—三级泵站—魏家湾—大河湾水文地质剖面图

Fig. 6 The hydrogeologic profile from Yantousi, Pump station 3, Weijiawan to Dahewan along the main canal of the Yellow River Diversion Project

1. 砂砾石层; 2. 粘土层; 3. 白云岩层; 4. 石灰岩层; 5. 民井; 6. 三级泵站基坑排水; 7. 原始地下水位; 8. 下降地下水位

份开始排水,至 2000 年年底,使河谷浅层地下水位大幅度下降,以泵站基坑为中心,形成半径达 2000m 的降落漏斗(图 6),上述三村的民井都处于降落漏斗范围内,使民井水位下降,甚至干涸,造成村民饮水困难。应当指出,河谷砂砾石含水层与区域岩溶地下水有一定的补排关系。前者主要靠河床底部的第三系红粘土层作为隔水底板,而红粘土层分布不连续,形成某些“天窗”,使浅层地下水向深层岩溶含水层渗漏。当地深井的区域岩溶地下水比浅层地下水位深 160~170m。因此,尽管河谷砂砾层透水性强,但地下水资源量有限,长期大量排水,使降落漏斗发展很快。

### 3 治理措施

引黄总干线隧洞工程多在区域岩溶地下水包气带中施工,泵站工程也只是影响河谷浅部含水层。因此,整个工程对区域岩溶水文地质环境不会造成明显的影响。

但该区是干旱缺水的高原地区,工程对浅层地下水及上层滞水的影响直接涉及当地农村供水问题。因此,必须采取有效措施,解决沿线群众供水问题,具体措施如下:

### 3.1 打深井取深层岩溶地下水,彻底解决供水问题

工程沿线区域岩溶地下水埋深 150~200m 左右,主要含水层为寒武系灰岩,尽管地下水分布不均,但在构造裂隙带成井条件较好。工程沿线已打成多眼深井,这些井可以移交地方使用,彻底解决群众缺水问题。

### 3.2 修建水窑,拦蓄雨水,解决农户用水

很多农户分散在黄土梁、峁上,供水极为困难,可以就地修建水窑,拦蓄雨水。当地群众对修建水窑有积极性,也有经验。只要给予资助,就能解决很多农户的饮水问题。

### 3.3 封堵施工斜井和隧洞中的漏水点,恢复天然状态

目前施工斜井和隧洞中的一些漏水点还没有彻底封堵。尽管水量不大,但对疏干上层滞水作用不小,应该对股状漏水点进行特殊封堵,争取恢复天然状

态。

### 3.4 退耕还林、还草,改善生态环境

该区是黄土覆盖的岩溶高原区,由于过度垦殖,水土流失严重,植被退化,荒漠化发展很快,表层地下水的调蓄能力极差。为了从根本上改善当地干旱缺水状态,应大力加强生态建设,退耕还林、还草。

致谢:本文在编写过程中得到中国地质科学院岩溶地质研究所韩行瑞教授的热心帮助,特此致谢。

#### 参考文献:

- [1] 韩行瑞,鲁荣安等.岩溶水系统[M].地质出版社,1993.
- [2] 袁道先,蔡桂鸿.岩溶环境学[M].重庆出版社,1988.
- [3] 韩行瑞,时坚等.丹河岩溶水系统[M].广西师大出版社,1994.
- [4] 韩行瑞.鄂尔多斯盆地南、西边缘的古岩溶及地文期的划分[J].中国岩溶,2001,20(1):125-129.

## KARST HYDROGEOLOGICAL ENVIRONMENT PROBLEMS ALONG THE MAIN CANAL OF THE YELLOW RIVER DIVERSION PROJECT IN WANJIAZHAI, SHANXI

HOU Jing-ze, XU Sheng

(Shanxi Wanjiashai Yellow River Diversion Project Corporation, Taiyuan 030012, China)

**Abstract:** The Diversion Project of the Yellow River in Wanjiashai, Shanxi is a strategic project that solve the problem of water supply shortage in the energy resources bases and the provincial capital of Taiyuan city. The main part of the canal is a water diversion tunnel, with a total length of 42.1km. The region is a karst plateau with loess overburden, the surface water seriously deficits and the ecoenvironment is fragile. The tunnel mainly passes through an aerated zone of karst groundwater in the Tianqiao spring catchment area. Its effect on the regional karst hydrogeologic environment is not remarkable but it has some effect on the shallow karst hydrogeologic environment, dewatering perched water and shallow groundwater in the karst area, having an effect on drinking water in the villages and ecoenvironment of the karst plateau. The effect of the tunnel on the shallow hydrogeological environment was discussed and the control methods are put forward.

**Key words:** Wanjiashai, Shanxi; The Diversion Project of the Yellow River; Arid areas; Karst plateau; Shallow groundwater; Karst environment