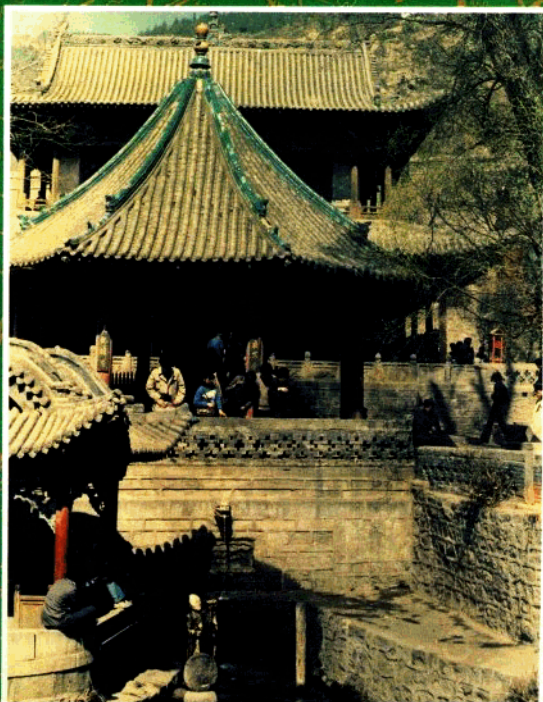


太原地区 喀斯特水资源研究

何宇彬 吴 琼 徐 超 著

同济大学出版社



序

太原是我国北方的工业城市，主要以中奥陶统灰岩（ O_2 ）中的喀斯特水为供水水源，此外还取用部分第四系的孔隙水。由于城市和工业的不断发展，供水问题逐年紧张。喀斯特水是否还有潜力？不同的人有不同的看法，也有人提出可以开采中深层喀斯特水。于是，有关部门出资，进行勘探。作者广泛搜集了以往历年来的资料，再加上这次的资料，进行综合分析研究和计算，获得了比较切合实际的结论。

众所周知，我国北方喀斯特水和南方喀斯特水有很大差异。在这类地区作大范围的资源评价，并获得比较切合实际的结果，这在我国尚属首次，实在是一项重大成果。作者首先根据地质条件进行分析，在此基础上又使用了多种手段，根据地下水迳流进行了水文地质分区。最后，根据不同情况，选用了科学合理的晋祠泉水水资源预报模型，获得了太原地下水系统的总资源补给量（ $Q=10-11m^3/s$ ）。

总之，全书资料丰富，分析深入，结论可信。实为我国北方喀斯特水资源研究的不可多得的著作。同时，也给太原市提供了比较可靠的用水依据，是一部高水平的著作。

原中国地质学会水文地质专业委员会主任
中国地质大学水文地质系 教授

王大纯

1995年7月26日
北京

目 录

0. 绪 论	(1)
1. 碳酸盐岩溶蚀机理及含水介质类型	(8)
1.1 碳酸盐岩发育特征	(8)
1.1.1 碳酸盐岩组构特征及岩石类型	(10)
1.1.2 碳酸盐岩的孔隙	(17)
1.1.3 碳酸盐岩层组类型	(19)
1.2 溶蚀机理研究	(19)
1.2.1 矿物成分、微结构与溶蚀速度的关系	(19)
1.2.2 各类碳酸盐岩溶蚀机理研究	(21)
1.2.3 膏溶作用	(27)
1.3 含水介质及水文地质分层	(28)
1.3.1 野外溶蚀现象	(28)
1.3.2 钻孔揭示孔隙的空间分布特点	(29)
1.3.3 奥陶系灰岩含水(层)段及富水性	(30)
1.3.4 含水介质类型及水文地质分层	(35)
2. 水文地质结构	(37)
2.1 基础构造格局	(38)
2.1.1 燕山期构造形变的基本特征	(38)
2.1.2 喜山期的构造发育特征	(40)
2.2 水文地质结构	(43)
2.2.1 水文地质单元	(43)
2.2.2 水文地质单元边界	(50)
2.3 各水文地质单元概述	(53)
2.3.1 西山水文地质单元	(53)
2.3.2 北山水文地质单元	(61)
2.3.3 东山水文地质单元(Ⅱ)	(70)
2.3.4 晋中(北)断陷水文地质单元(N)	(75)
2.3.5 水文地质结构框图	(81)
3. 晋祠泉地下水系统的随机模拟	(82)
3.1 晋祠泉流量的动态分析	(82)
3.1.1 泉流量的动态变化特征	(82)
3.1.2 关联度分析	(83)
3.1.3 泉流量与降水量的互相关函数分析	(84)
3.2 随机模型在晋祠泉地下水系统中的应用	(86)
3.2.1 系统理论模型及其应用	(86)

3.2.2 门限自回归模型及其应用	(92)
3.2.3 结论	(100)
结束语	(101)
参考文献	(103)
英文摘要	(104)
图题表题英文译文	(116)
后记	(119)

CONTENTS

0. Introduction	(1)
1. Carbonate rock corrosion mechanism and water-bearing medium types	(8)
1.1 Developmental features of carbonate rocks	(8)
1.1.1 Fabrics and types of carbonate rocks	(10)
1.1.2 Voids of carbonate rocks	(17)
1.1.3 Strata Combinative types of carbonate rocks	(19)
1.2 Study on corrosion mechanism	(19)
1.2.1 Mineralogic and microstructural controls on corrosion rate	(19)
1.2.2 Corrosion mechanism in different carbonate rock groups	(21)
1.2.3 Gypsum strata dissolution	(27)
1.3 Water-bearing medium and hydrogeostratigraphy	(28)
1.3.1 Field corrosion phenomena	(28)
1.3.2 Spacial distribution of cavern-fissures in borehole	(29)
1.3.3 Ordovician carbonate rock water-bearing layers and watery abundance	(30)
1.3.4 Water-bearing medium types and Hydrogeostratigraphy	(35)
2. Hydrogeologic structure model	(37)
2.1 Geologic framework	(38)
2.1.1 Principle features of Yanshan tectonic deformation	(38)
2.1.2 Himalaya tectonic features	(40)
2.2 Hydrogeologic structures	(43)
2.2.1 Hydrogeologic units	(43)
2.2.2 Boundary of hydrogeologic units	(50)
2.3 Outline of different hydrogeologic units	(53)
2.3.1 West Mountain hydrogeologic unit	(53)
2.3.2 North Mountain hydrogeologic unit	(61)
2.3.3 East Mountain hydrogeologic unit	(70)

2.3.4 Jinzhong (north) depression hydrogeologic unit	(75)
2.4 Hydrogeologic structure model	(81)
3. Stochastic model for Jinci Spring ground water system	(82)
3.1 Regime analysis for Jinci Spring flow	(82)
3.1.1 Fluctuation in Jinci Spring flow	(82)
3.1.2 Analyses of the Connection degree	(83)
3.1.3 Cross-correlation function analysis of spring flow and precipitation	(84)
3.2 Stochastic model as an aids in Jinci Spring ground water system study	(86)
3.2.1 Systematic theory model and its application	(86)
3.2.2 Threshold autoregression Model and its application	(92)
3.2.3 Conclusion	(100)
Postscript	(101)
List of references	(103)
Abstract in English	(104)
List of figures and tables in English	(116)
Concluding remarks	(119)

0. 绪论

笔者于1983—1986年曾承担了中国科学院与煤炭工业部合作的“太原地区中深层地下水资源研究”课题(国家“六五”攻关课题),1988—1991年在山西省水资源委员会的支持下,继续深入此项课题研究。在原中国科学院地质研究所课题组的全面工作基础上,也吸取了其他单位专家们的论著和观点,力求避免主观片面性。

0.1 研究问题

0.1.1 水资源开采现状

太原市是新型的工业城市,又是国家煤炭能源基地。城市人口已达250多万,还有钢铁厂、化工厂、西山710矿等大型工矿企业;目前古交煤矿亦投入生产。太原地区的用水量逐年增长。

太原市自来水公司在1977—1980年平均日供水量为40万立方米(不包括工农业用水量),1982年减至37.2万 m^3 ,1984年又减至35.3万 m^3 。占城市供水量60%的兰村水源地,1982年以来集水井的水位已低于设计的安全水位,日产水量由1981年的25.2万 m^3 至1984年减到20.3万 m^3 ;每年的用水旺季,城市供水短缺6—10万 m^3/d 。

据现有资料计算,全市地下水允许开采量为5.16亿 m^3 (其中孔隙水为3.06亿 m^3 、喀斯特水为2.10亿 m^3),但实际开采量已逾5.2亿 m^3 。从而造成采补失调。由此造成地下水位大幅度下降,形成了大面积的降落漏斗和大批水井报废;1965年降落漏斗面积为70 km^2 、中心最大降深为20m,1984年降落漏斗扩大为300 km^2 、中心最大降深为71m。同时也造成地面下沉,1980—1985年地面下沉量大于100mm的面积为226 km^2 ;并使某些地区120m深度以上的承压水遭到污染。

著名的晋祠泉1958年平均流量为1.98 m^3/s ,后来化工厂区 and 附近农村大量开采地下水,到1971年流量减至1.30 m^3/s 。1978年平泉打了自流井($Q=0.8\text{m}^3/\text{s}$),又使晋祠泉流量减至0.44 m^3/s (1984);到1991年流量衰减至0.16 m^3/s ,甚至1992年出现断流,名胜游览区遭受破坏。

预计2000年太原市总用水量为11.73亿 m^3 (其中市区和近郊区为8.96亿 m^3)。再加上古交煤矿用水量约1.0 m^3/s ,致使太原地区的水资源危机越显突出。如何解决新水源?能否就近找到新水源?仍是本课题回答的问题。

0.1.2 研究问题

太原市的水资源危机日显突出。

自 70 年代以来,省市领导开始注意了对地下水资源的勘探研究。80 年代前期,山西省地矿局第一水文地质队分别对西山、东山开展了勘探工作。1983—1986 年中国科学院地质研究所和山西省 229 煤田水文地质队共同承担了“太原中深层地下水资源研究课题”。此外,还有国内不少专家也十分关注这一问题。

随着研究深度的增进和资料的积累,发现的问题也越来越多,这有利于促进学术发展。各家的学术见解不尽一致,尤其对地下水资源的潜力和前景分歧意见更大。

笔者注意到,太原地区地质构造复杂,奥灰水^{*}埋藏深度大。过去所做的多属 300m 以内的浅孔勘探,难以查清奥灰水的埋藏迳流条件。如若基础水文地质工作不来个飞跃性进展,对地下水资源评价是缺乏基础的,所得出的各种数学模型也仅仅是纸上谈兵而难以生效。

我们的课题组是以“构造水文地质”为主导,深入研究太原地区的“水文地质结构”模式。为了查清基本的构造和水文地质条件,开展了 1:10 万,面积为 13464km² 的综合水文地质测绘;盆地内及边山带布设地震测深、变频电测深及直流电测深剖面 32 条,总长 160km、最大深度 6km;热惯量红外扫描 496m²。为了系统研究寒武—奥陶系灰岩的富水性,完成了中深层水文地质钻孔 25 个、总进尺为 17471.58m (最浅孔为 420m、最深孔为 1016m),并作了 43 次抽水试验;溶蚀机理的微观研究中鉴定了碳酸岩薄片和化学分析样品 550 个,孔隙度和溶蚀试样 41 个,扫描电镜样品 15 个。水同位素的定量研究中取得氡分析数据 296 个、氡和¹⁸O 数据 223 个,¹⁴C 和¹³C 数据分别为 20 个和 49 个,³⁴S 数据 93 个,²³⁸U 及²³⁴U 比值数据 131 个,各种同位素数据共 1166 个。水化学分析取得 40 个样品的常量组分分析数据 240 个。在不足一万平方公里的太原地下水系统范围内,取得如此大量的研究数据在国内外都是罕见的。这给揭示深部奥灰水的补迳蓄排条件提供了丰富的资料。

本书主要研究了:(1)太原地下水系统水文地质结构模式;(2)晋祠泉域的随机模型(系统理论及门限自回归模型),系统理论模型适用于线性时不变集中参数系统,门限自回归模型用来解非线性随机序列的模拟问题。在这两个模型的基础上,笔者对几个大家所关切的问题得到以下认识:①关于奥灰水^{*}的深部迳流问题,晋中高原是上升隆起区,新构造运动较明显,沿汾河深部活动断裂确实存在奥灰水的深部迳流,它就是本区深部奥灰水迳流的基准面。②关于西山边山带的潜流侧排问题,据随机模型计算,在天然场况状态下无边山侧排,晋祠泉域属封闭型水文地质单元。③关于东山的潜流侧排问题,东山的深部构造复杂,属半封闭型水文地质单元,深部奥灰水沿断层以潜流形式侧排。④关于兰村与枣沟水源地的水力联系问题,棋子山南端通过纬向活动断层,它勾通了这两个水源地,目前两个水源地已出现了同步下降。⑤关于奥灰水^{*}资源潜力问题,笔者认为当前奥灰水的天然补给量只有 10—11m³/s,而不是 13m³/s。当前西山和北山水文地质单元已进入超产阶段,为了保护环境,水资源管理问题日渐迫切和突出。东山水文地质单元约有 2m³/s 的水资源潜力,可以考虑建立 5—10 万 m³/d 的新水源地(观孟前—杨家峪地区);“排供结合”也是

^{*}指中奥陶统灰岩中的地下水。

东山煤矿治水的唯一出路。

太原水源地是国内著名的大型水源地，历史之悠久，问题之复杂为学术界所共知。80年代以来系统全面地开展勘探研究工作，所用的经费已逾3000多万元。深部地质研究揭示出奥灰水的深远流确实存在（ $\pm 40\text{m}$ ），这一特殊水文地质问题还是首次发现，它的机理问题有待深入研究。这一新构造水文地质问题的揭示和研究，有可能丰富水文地质学的内容。

笔者认为，太原水源地可以视为国内诸水源地的模式，它不但有重大的实际价值，还有深远的理论意义，应引起学术界的关注。

0.2 研究现状概述

笔者全面客观地研究了许多专家的成果和论文，现将他们的主要学术见解归纳如下：

钱学溥（国家矿产储量管理局 高级工程师，1988年）

（1）古交一带是晋祠泉水源的补给区，如在古交一带开采 $1.0\text{m}^3/\text{s}$ 的奥灰水，势必造成晋祠泉的进一步削减。开采西山边山一带的奥灰水必将削减兰泉和晋祠泉的流量。

（2）清徐县平泉自流井对晋祠泉有影响，西铭710矿开采奥灰水对晋祠亦有直接影响。

（3）在东山（指棋子山以东）大量开采奥灰水，影响兰村水源地的可能性是存在的。

（4）太原地区水资源明显短缺，为了保护兰村水源地和晋祠风景区，待考虑外源水的引入补给。汾河二库总库容为1.2亿立方米，每年可向城市供水0.6亿立方米，亦可增加对晋祠泉、兰泉和西张水源地的补给。

张超（清华大学水利系 副教授，1988年）

目前太原市的地下水开采量已超过了天然逐年可恢复的补给量而供不应求，现在的地下水资源量已经承受不了当前城市需水的要求，对未来的不断增长的更大的城市需水量就更难应付。城市作为一个系统而存在，它的发展规模不可能无限扩大，城市系统自然消亡的直接或主要原因，很可能是首先由于城市水资源系统被破坏而造成。城市的开发与规划不可能超越城市水资源开发的阶段，在制定各个阶段城市开发战略时，应特别注意不使城市水资源破坏而危及城市的生存。

卢耀如（地矿部水文地质工程地质研究所 研究员，1988年）

兰村及西张水源地的开采量1984年比1980年减少11.8%，晋祠泉流量目前也只有 $0.36\text{m}^3/\text{s}$ ，这主要是过量开采奥灰水所造成的。西山（指棋子山以西）的兰村与晋祠泉域的奥灰水资源，应当在 $7.0\text{m}^3/\text{s}$ 左右，是开采奥灰水的极限值。汾河自汾河一库至峙头村，长74.75km河段内有罗家曲至龙尾头、古交镇至寺头村两处渗漏段，渗漏量达 $2.1\text{m}^3/\text{s}$ ，这是不可忽略的数值。因此可以考虑在渗漏段修建水库，拦蓄地表水后，使其渗漏补给奥灰岩含水水体，以增加地下水的储存量。

山西省第一水文地质队西山组（1981—1984年）：

（1）大川河以西石千峰向斜区的深埋藏奥灰水属滞流区，渗透能力极弱。大川河以东深层奥灰水呈散流状态向晋祠泉汇集。

（2）古交→王封→西铭→晋祠泉存在奥灰水的集中远流带，红沟村钻孔水位标高

为 $+802.9\text{m}$ （指人工流场——作者），证明目前西铭是一个侧排点。

(3) 晋祠泉 50 年代天然流量为 $1.95\text{m}^3/\text{s}$ ，至 1980 年衰减至 $0.362\text{m}^3/\text{s}$ ，主要是过量开采所致。

(4) 古交与晋祠泉存在着水力联系，古交开采奥灰水只能控制在 $1.0\text{m}^3/\text{s}$ 之内，若开采 $3\text{m}^3/\text{s}$ ，则 1—2 年将影响晋祠泉的水量。

(5) 晋祠泉域天然水资源量：①回归计算分析。晋祠泉域面积为 436km^2 、入渗系数 $\alpha = 0.3$ ，多年平均降水量为 520mm ，晋泉流量为 $2.04\text{m}^3/\text{s}$ ，深部侧排汇入盆地的水量为 $0.5\text{m}^3/\text{s}$ ，故天然水资源量为 $2.54\text{m}^3/\text{s}$ 。②水均衡法计算天然资源量为 $2.5524\text{m}^3/\text{s}$ 。

山西省第一水文地质队东山组（1983—1986 年）：

(1) 东山①西侧的一条经向断层断距达数百米、长 30km ，该断层西侧为石炭—二叠系砂页岩（卧虎山），而东侧为上马家沟灰岩（后沟、枣沟），西侧灰岩单井涌水量仅 $200—1000\text{m}^3/\text{d}$ ，而东侧各钻孔单井涌水量为 $4000—20000\text{m}^3/\text{d}$ 。两侧灰岩水位差为 0.44m ，证明新城以南的经向断层是阻水的，新城与枣沟水源地之间无水力联系。另外，S-1 孔（青龙镇）水位为 $+815.16\text{m}$ ，而向东 200m 的 S_5 孔水位为 $+814.96\text{m}$ ，反映东山奥灰水不可能沿棋子山南端补给兰村水源地。

(2) 东山总面积约 6000km^2 、上马家沟灰岩 (O_2) 裸露面积为 700km^2 ，取 $\alpha = 0.32$ ，计算天然补给量为 $2.2\text{m}^3/\text{s}$ ($19 \times 10^4\text{m}^3/\text{d}$)。

(3) 东山地下水域为隔水的一类边界，西侧及东南部边界为断层构成的弱透水边界。观家峪以南有数条阶梯式的东西向展布的断层阻隔，东山奥灰水穿过断裂带直接向南排泄的通道不畅。而顺断裂带的延伸方向往东流较为有利，此段构造裂隙发育，娘子关基准面又低，深部灰岩连成一体。另外，榆次、平地泉、寿阳、坪兴及范村钻孔水位标高均表明地下水东流，其排泄量达 $1.39\text{m}^3/\text{s}$ 。

王怀颖、王瑞久（地矿部环境地质中心 研究员）

(1) 东、西山的奥灰水都可汇入新城凹陷，谷旦村奥灰水 $+813.72\text{m}$ ，高于松散层水位 ($+805.46\text{m}$)，东山奥灰水在谷旦不仅能侧向流入盆地的灰岩中，还可顶托补给新生界，看来东山奥灰水已越过断层流向太原盆地。水同位素资料显示谷旦的松散层地下水与青龙镇松散层地下水差别很大，而与灰岩水的同位素值基本相同，说明它接受奥灰水的越流补给。

(2) 东山观家峪一带奥灰水呈 SO_4 型、 $M = 1.6—2.4\text{g/L}$ ，处于滞留状态，故不可能向东流入娘子关泉域。

(3) 系舟山是复杂而巨大的破裂带（压性），对东山地下水不能构成边界。东霍泉的补给来自系舟山，它由东山奥灰水经深循环补给。

(4) 东山奥灰水属独立地下水系，不能看作兰泉的补给区。东山的西边界由断层组成，它在三给地垒以北作为排泄边界，以南阻水。灰岩裸露区只有一部分奥灰水汇入太原方向，另一部分排向东霍泉和漳沱河。

王发轫（山西省 229 煤田地质队 高级工程师）

(1) 东山枣沟的奥灰水汇入城北凹陷，西边山发育 NWW，NW 向张扭性断裂，导致北石槽（分水岭）以东的奥灰水东流补给西张水源地，西张的孔隙水 50% 接受奥灰水补给，反

① 过去从地理上把棋子山以西称为西山，以东称为东山。

映三给地垒以北的东山、北山^①的灰岩是连接的。

(2) 西边山山前东南麓平泉自流井的水温比晋祠泉高 7℃、水质亦差,反映水来自深部向斜滞流区,由于近十年来孔隙水超量开采,增大了深层奥灰水的越流量。

卫克勤(中国科学院地球化学研究所 研究员):

(1) 西山奥灰水和上覆含水层的裂隙水以及汾河渗漏水有密切的水力联系,属渗入混合水。而东山奥灰水实际上是无氟水,从迳流区到排泄点(兰泉),奥灰水 δD , $\delta^{18}O$, 3H 值均无变化,反映它没有浅层水的混入。

(2) 西张水源地开采第四系孔隙水,经水同位素研究证实,它除接受汾河渗漏补给外,还有一部分上兰泉奥灰水供给。另外,西张水样正好落在东山奥灰水和汾河渗透水的混合线上,说明西张水源中还有一部分东山奥灰水的侧向补给,补给量占西张水源地开采量的 48% ($1.3m^3/s$)。

(3) 晋祠泉和兰村泉分属两个地下水系统。兰村泉基本上不含氟。晋祠泉的平均氟含量为 22.7TU。汾河渗透水和浅层裂隙水对晋祠泉的补给量占总流量的 29%。

(4) 西山奥灰水的铀含量和铀同位素比值变化较大。平泉—谭村一带为低铀含量、高比值,这说明奥灰水以还原条件为主,处于相对封闭状态。这一带奥灰水与晋祠泉无水力联系,有自己的迳流通道。

(5) 根据铀含量和铀同位素比值推断,东山奥灰水的氧化条件占主导,属于迳流较好的类型, $M < 0.5g/L$ 。水化学类型为: $HCO_3-SO_4-Ca-Mg$ 型,反映具较好的迳流、排泄条件。

(6) 古交和晋祠存在水力联系,目前开化沟化工水源地和 710 煤矿的开采,均对晋祠泉流量有影响。

中国科学院地质研究所地热组(汪辑安等 研究员)

(1) 汾河、三给地垒以北地区属对流型(低温异常),它的影响深度多在 500—1000m,反映奥灰水活动强烈。东山亦属对流型,而三给地垒以南盆地与西边山东南麓山前地带属传导型,出现奥灰水弱迳流现象。交城以北、清徐东北出现的两个高温梯度区是奥灰水滞流带,以水位高、水温高(24—25℃)、水质差为特征。

(2) 古交—王封—西铭一线出现低温异常现象,是奥灰水的主迳流带。晋祠—开化沟是侧排点,水源来自西北,系主迳流带奥灰水沿边山断裂向南的部分混合。 $M=0.5g/L$ 水温 17℃。晋泉只排泄浅层奥灰水,而大量奥灰水以侧排形式汇入盆地深部呈地下潜流(指人工流场——作者)。

(3) 东山的奥灰水一部分向西北方向迳流汇入太原城北盆地,但主要是向南在榆次以西沿隐伏的黄陵背斜汇入晋源—小店凹陷。另外,发现在榆次—清徐之间存在一条断续相连的低温异常带,反映低温的奥灰水沿深断裂上涌对流,水源是沿黄陵背斜来自东山西南端(N-E-SW 向低温带)的奥灰水。

(4) 太原市区两侧各有一条强迳流带,而太原市区奥灰水的活动较弱。

石慧馨等(中国科学院地质研究所 副研究员)

(1) 西山系统和汾河沿岸 3H 在 60TU 以上,于西山山前断裂带降至 10—46.8TU,表

① 中科院地质所课题组将太原地下水系统划分为:西山、北山、东山及太原盆地单元。

明奥灰水向东南流动。汾河、古交、下槐、王封、西张、晋祠、平泉 $^3\text{H}>10\text{TU}$ ，不少地点大于 50TU ，反映有浅层水混入。

(2) 兰村、三给地垒到杨家峪煤矿一带 $^3\text{H}<10\text{TU}$ ，反映北山、东山系统的奥灰水埋深大。

(3) 在镇城底和古交断层组之间的马兰，大虎峪断层与碾底断层组之间的白家庄、开化沟，以及碾底断层组西端的覃村 $^3\text{H}<10\text{TU}$ ，反映奥灰水埋深大，迳流不畅。

潘曙兰（中国科学院地质研究所 副研究员）

(1) 太原地区奥灰水分属三个地下水系统。①西山地下水系统属于与浅层水均匀混合型。②北山地下水系统基本上未与浅层水混合，其补给来自北山，也有一小部分来自西山。③东山系统的地下水就其稳定同位素组成，可分为两种类型，一种同位素组成与水化学特征跟西山奥灰水接近；另一种则在较寒冷的气候条件下形成，其同位素特征是： $\delta\text{D}=-78\text{‰}-79\text{‰}$ ， $\delta^{18}\text{O}=-10.5\text{‰}-10.7\text{‰}$ ， $\delta^{34}\text{S}=-7.6\text{‰}$ ，这一股水目前尚未开采过，值得注意。

(2) 晋祠泉水的同位素组成不变，表明混合过程不在泉水出露点附近，泉水的浅层水混合比约为 36% 。

(3) 奥灰水侧排点有：开化沟、晋祠、兰村、Ts-6（东山东南隅）。

(4) 古交和晋祠泉同属一个地下水系统，稳定同位素数据表明古交和晋祠有水力联系，如若在古交大量开采奥灰水，将会对晋祠泉有影响。

(5) 东山的观家峪、郝庄、南坪头一带，存在着可供开采的奥灰水资源。

赵树森（中国科学院地质研究所 副研究员）

(1) 太原地区奥灰水侧排点有以下几处：晋祠泉至山前冲积扇，开化沟化肥厂至沟口冲积层，兰村至西张水源地第四系，东山煤矿至沟口道长沟第四系。

(2) 奥灰水混合比例计算结果说明，西山古交地区奥灰水接受地表水补给量约占一半以上，自古交向东南方向地表水补给奥灰水的量逐减。据此认为：古交开采奥灰水控制在 $0.5\text{m}^3/\text{s}$ 以下，会得到地表水补充，因为古交段的汾河迳流量为 $1.2\text{m}^3/\text{s}$ （处于渗漏段），这样对晋祠泉的影响不会太大。

赵永贵（中国科学院地质研究所 博士、副研究员）：

(1) 东山奥灰水以潜流排泄为主。排泄带集中在太原城东断阶、黄陵隆起和北砖井、大峪口一带，一部分深层奥灰水越流补给裂隙水（ C_2-P_1 ），另一部分奥灰水通过深部迳流穿过田庄-西贾断层转化为晋中盆地孔隙水。

(2) 西边山侧排北起三给、经西铭、开化沟至晋祠、牛家口、清徐、谭村、交城，全长 60km 的侧排带。它集中在三个侧排点：西铭断阶附近、开化沟-晋祠、南峪-谭村。自从盆地内孔隙水大量开采后，激化了深部奥灰水侧排越流补给孔隙水。计算侧排量为 $3.6\text{m}^3/\text{s}$ （指人工流场——作者）。

(3) 太原地区天然水资源量为：西山单元为 $5.6\text{m}^3/\text{s}$ （包括侧排量——作者）、北山单元为 $5.2\text{m}^3/\text{s}$ 、东山单元为 $2.2\text{m}^3/\text{s}$ ，共计 $13.0\text{m}^3/\text{s}$ 。

蔡祖煌（中国科学院地质研究所 副研究员）

(1) 太原地区奥灰水补给量：东山为 $3.73\text{m}^3/\text{s}$ 、北山为 $4.58\text{m}^3/\text{s}$ 、西山为 $5.05\text{m}^3/\text{s}$ ，共计 $13.36\text{m}^3/\text{s}$ 。边山侧排量西山为 $2\text{m}^3/\text{s}$ 、东山为 $0.23\text{m}^3/\text{s}$ ，流入寿阳的水量为 $1.13\text{m}^3/\text{s}$ 。

s。太原地区地下水开采潜力为 $2.91\text{m}^3/\text{s}$ 。古交开采 $1\text{m}^3/\text{s}$ 可能使晋祠泉水量减小 13.7% ，采水量控制在 $0.5\text{m}^3/\text{s}$ ，可能使晋祠泉水量减小 6.9% 。

(2) 棋子山南端断裂属治元-黄岭纬向断裂带的一段，它与 NE、NW 向断裂交汇，奥灰水饱和差值表明方解石溶解较强、导水系数为 $0.2-0.7\text{m}^2/\text{s}$ ，属地下水强烈迳流区，等水位线稀疏，导致奥灰水通过候村-青龙镇纬向断裂进入新城凹陷。奥灰水水位 +814—815m、水力坡度小，而新城凹陷的奥灰水通过深部承压越流供给兰村水源地，并部分供给西张孔隙水。

李时毓 王新民 (太原工业大学, 1990 年)

自 60 年代以来晋祠泉流量逐年下降，可分三个阶段：

(1) 1960 年以前处于天然动态阶段， $Q_k=2.18\text{m}^3/\text{s}$ ， $Q_b=1.75\text{m}^3/\text{s}$ ， $Q_p=1.24$ ，属极稳定性泉。

(2) 1962—1977 年为缓慢下降阶段，流量明显减小。1962—1970 年平均开采量为 $0.29\text{m}^3/\text{s}$ ， $Q_k=1.96\text{m}^3/\text{s}$ ， $Q_b=1.36\text{m}^3/\text{s}$ ，多年平均流量为 $1.72\text{m}^3/\text{s}$ ；1971—1977 年平均开采量为 $0.59\text{m}^3/\text{s}$ ， $Q_k=1.74\text{m}^3/\text{s}$ ， $Q_b=0.82\text{m}^3/\text{s}$ 。

(3) 1978 年至今为急剧衰减阶段，工农业开采量为 $1.2\text{m}^3/\text{s}$ ，1978 年平泉打成 10 眼自流井，洞儿沟打成一眼井，平泉成井后总流量为 $1.65\text{m}^3/\text{s}$ ，它的 80% 是夺取晋祠泉水。1978—1982 年晋祠泉 $Q_k=1.32\text{m}^3/\text{s}$ ， $Q_b=0.23\text{m}^3/\text{s}$ ，多年平均流量为 $0.75\text{m}^3/\text{s}$ 。可以认为平泉自流井的开采是导致晋泉衰减的主要原因之一。

肖菁英 (山西省地质矿产局高级工程师, 1990 年)

将太原地下水系统划分为三个含水系统。①西山地下水系统 (指棋子山以西——作者) 天然资源量约为 $7.85\text{m}^3/\text{s}$ ，晋祠泉域属全排型泉，仅上兰村一线有奥灰水潜流侧排，侧排量约为 $1.4\text{m}^3/\text{s}$ ；兰泉多年平均流量为 $4.5\text{m}^3/\text{s}$ 、晋祠泉多年平均流量为 $1.95\text{m}^3/\text{s}$ 。②东山地下水系统 (指棋子山以东——作者) 天然资源量约为 $2\text{m}^3/\text{s}$ 。③盆地孔隙水含水系统天然资源量为 $5.83\text{m}^3/\text{s}$ 。

1. 碳酸盐岩溶蚀机理及含水介质类型

太原地区下古生界寒武—奥陶系碳酸盐岩发育较好,沉积厚度达 900m(表 1-1),裸露面积约 2873km²,主要出露在西山汾河以北、棋子山及东山地区。然而在石千峰向斜区、太原断陷盆地、阳曲断陷盆地、西烟与杨兴断陷盆地、东山背斜南端灰岩则隐伏于深部,上覆石炭—二迭系碎屑岩或新生界地层。

奥陶系中统(O_2)马家沟组灰岩是供水水源地的目的层,它是我们研究的重点层位。按其岩性组合及沉积旋回划分为三组八段:

(1)下马家沟组(O_{2x})为一套“潮上一潮间—潮下”动荡的沉积环境,表现在粉晶白云岩与泥晶灰岩常呈间互成层,但各处微相变较频繁。下段(O_{2x}^1)为一套角砾状泥云岩沉积,有的地区为角砾灰岩与泥灰岩;古交地区(K-21、K-39 孔)见有石膏层(厚 10m),但各处相变较大,具砂屑泥晶结构及层纹结构。中段(O_{2x}^2)上部以致密中厚层泥晶—粉晶灰岩为主,发育方解石细脉或团块;下部是泥晶灰岩与粉—细晶灰云岩交互变化,属潮下与潮间的动荡环境。上段(O_{2x}^3)以致密块状粉晶—泥晶灰岩为主,间夹粉—细晶灰云岩;灰岩中见有少量生物碎屑,还有长柱状石膏假晶;底部泥晶灰岩中尚含有砂砾屑颗粒。

(2)上马家沟组(O_{2s})为一套“潮下—潮间”开闢海相沉积环境的厚层云斑灰岩,但所夹含的泥质灰岩或白云岩透镜体各处变化不一。下段(O_{2s}^1)为一套不纯的云青岩层,泥灰岩、泥云岩与石膏角砾岩呈间互状,属“潮上”沉积环境,既有致密块状的含云青岩、也有角砾状云青岩;其中单个角砾上有时可见良好的层纹结构。中段(O_{2s}^2)以厚层泥晶—粉晶灰岩为主,含生物屑及砂屑,顶部有层纹结构。上段(O_{2s}^3)以泥晶—粉晶灰岩为主,含生物屑及砂屑,常夹微晶白云岩;灰岩中亦含白云石斑及石膏假晶。

(3)峰峰组(O_{2f})顶面接受剥蚀,各处厚度略有变化。下段(O_{2f}^1)为一套不纯的碳酸盐岩,系含石膏层或石膏角砾的泥灰岩及泥云岩,属“潮上”沉积环境。上段(O_{2f}^2)上部为泥晶—粉晶灰岩,含生物屑及少量球粒;下部为泥质灰岩及泥质灰云岩,局部地区灰岩中尚夹含泥质灰岩透镜体;向东山方向本组石膏层含量增加至 20—30m。

综上所述,奥陶系属化学沉积的均匀状纯碳酸盐岩夹不纯碳酸盐岩。但在纵横剖面上的微相变明显,如厚层灰岩中常夹含数量不等的白云岩或泥灰岩层,导致富水(层)段的复杂化。

1.1 碳酸盐岩发育特征

奥陶纪继寒武纪以来,除早奥陶世晚期外,因山西地区没有古陆,因此陆屑很少带入,

表 1-1 碳酸盐岩(e2-O2)层组类型

层	组	层 组		岩 性	CaO (%)	MgO (%)	CaO MgO (%)	碳酸 盐 (%)	方解石白云石 (%)	K _{av}	K _{ee}	岩性特征	层组类型	含水介 质类型
		厚度(m)	段											
中奥陶统	O ₁	42.0	O ₁ ¹	上部灰岩下为厚层灰岩, 中为白云岩	52.65	1.41	37.34	2.16	90.57	6.14		大带聚, 溶穴	均匀状灰岩(wt)	潜水
		86.0	O ₁ ²	含巨角砾灰岩与厚层白云岩互层	29.04	15.69	1.85	9.18	30.44	39.41		不规则碳酸盐岩(ma)	均匀状灰岩(wt)	潜水
		82.48	O ₁ ³	上部厚层, 中厚层灰岩互层, 下为巨厚层砂质灰岩, 含少量砾石砂核	54.08	0.67	80.72	1.44	94.64	3.75	1.02	1.01	均匀状灰岩(wt)	潜水
		60.46	O ₁ ⁴	厚层状灰岩, 白云岩互层组合	50.62	3.21	15.77	3.48	82.55	13.39	1.10	1.09	不规则碳酸盐岩(ma)	潜水
		35.23	O ₁ ⁵	中厚层灰岩, 白云岩, 泥质灰岩, 白云岩互层	42.60	9.93	4.29	5.91	58.60	34.66			均匀状灰岩(wt)	潜水
	O ₂	39.46	O ₂ ¹	中厚层灰岩, 白云岩, 泥质灰岩, 白云岩互层	5.41	2.14	24.02	2.88	85.19	12.38	1.25	1.02	不规则碳酸盐岩(ma)	潜水
		36.33	O ₂ ²	厚层状灰岩, 白云岩互层	45.26	7.23	6.26	1.95	55.89	36.82	1.08	0.89	均匀状灰岩(wt)	潜水
		43.43	O ₂ ³	中厚层灰岩, 白云岩, 泥质灰岩, 白云岩互层									不规则碳酸盐岩(ma)	潜水
		19.23	O ₂ ⁴	角砾状白云岩, 云岩, 下为厚层状灰岩	34.27	4.19	2.41	18.51	38.54	39.86			不规则碳酸盐岩(ma)	潜水
		103.98	O ₂ ⁵	厚层白云岩与中厚层白云岩互层, 含砾石砂核灰岩	32.04	18.14	1.77	4.04	11.77	83.72	0.69	0.57	均匀状白云岩(wt)	潜水
上奥陶统	O ₃	27.65	O ₃ ¹	中厚层白云岩与中厚层白云岩互层, 灰岩	29.87	45.77	6.65	3.36	2.67	93.52	0.58	0.51	以溶核, 溶孔为主, 厚层状灰岩发育溶穴	潜水
		83.0	O ₃ ²	厚层白云岩与厚层白云岩, 泥质白云岩互层	35.18	15.68	2.24	3.59	24.29	71.17	0.64	0.59	均匀状白云岩(wt)	潜水
		51.74	O ₃ ³	厚层白云岩, 白云岩, 泥质白云岩互层	31.11	20.81	1.43	0.77	5.99	92.27	0.48	0.44	均匀状白云岩(wt)	潜水
		57.12	O ₃ ⁴	白云岩, 泥质白云岩, 白云岩互层	50.03	2.55	18.42	4.17	82.44	13.08	1.12	1.02	以溶核, 溶孔为主, 厚层状灰岩发育溶穴	潜水
		39.74	O ₃ ⁵	厚层白云岩, 白云岩, 泥质白云岩互层	50.07	2.95	16.97	5.07	84.06	8.97	1.35	1.06	均匀状白云岩(wt)	潜水
	O ₄	91.25	O ₄ ¹	中厚层白云岩, 白云岩, 泥质白云岩互层									不规则碳酸盐岩(ma)	潜水
		48.87	O ₄ ²	厚层白云岩, 白云岩, 泥质白云岩互层									不规则碳酸盐岩(ma)	潜水
			O ₄ ³	厚层白云岩, 白云岩, 泥质白云岩互层									不规则碳酸盐岩(ma)	潜水
			O ₄ ⁴	厚层白云岩, 白云岩, 泥质白云岩互层									不规则碳酸盐岩(ma)	潜水
			O ₄ ⁵	厚层白云岩, 白云岩, 泥质白云岩互层									不规则碳酸盐岩(ma)	潜水

海水清冽,以巨厚的碳酸盐岩沉积为最主要特征。早奥陶世早期(治里期)太原地区处于潮间泻湖和咸化局限海环境,白云岩沉积相即是这种环境的特征反映。早奥陶世晚期(亮甲山期)处于咸化海的潮下带环境。早奥陶世末期山西整体上升为陆,中奥陶世海水又侵入了山西,属陆间海性质,这就决定了整个中奥陶世的总沉积相。中奥陶世早期(下马家沟前期)属潮上带环境,主要形成一些潮上盐湖相沉积,以泥灰岩、白云质泥灰岩(页岩)为主;中期处于广海陆棚环境,有时出现一些咸化的局限海环境,形成了白云岩或灰云岩;后期地壳不稳,处于潮间泻湖-广海陆棚交替出现的环境,沉积了云灰岩,云泥灰岩。中奥陶世中期(上马家沟期)的前期于潮上盐坪相带,沉积了泥灰岩、白云质灰岩,太原西山个别地方出现了泻湖相,沉积了石膏。中期处于海陆棚状态,沉积了巨厚的灰岩,由于灰岩的同生白云岩化作用,灰岩中发育豹斑构造;后期地壳又不时回升,潮间泻湖与广海陆棚状态频繁交替出现。中奥陶世晚期(峰峰期)的前期太原处于巨型泻湖相,沉积了巨厚的石膏层;后期海浸较广,处于海棚状态,发育了古生代以来最纯的碳酸钙沉积。而后发生了加里东运动,华北地台整体上升为陆,经历了大陆剥蚀作用。

1.1.1 碳酸盐岩组构特征及岩石类型

我们对本区中寒武统至奥陶系地层剖面采集了 95 块岩样,开展了试验室分析和溶蚀试验研究。

1) 碳酸盐岩的矿物成分

本区碳酸盐岩的物质组成比较单一(表 1-1)。

根据每块样品的矿物成分进行碳酸盐岩成分分类示于图 1-1,并将其在剖面上的分布特征示于图 1-2、图 1-3。图中显示:本区碳酸盐岩主要为较纯的灰岩类和白云岩类岩石,不纯碳酸盐岩仅有少量沉积(以 O_x 含量较高)。白云石含量以上寒武统及下奥陶统较发育,当时处于潮间泻湖和咸化局限海环境。

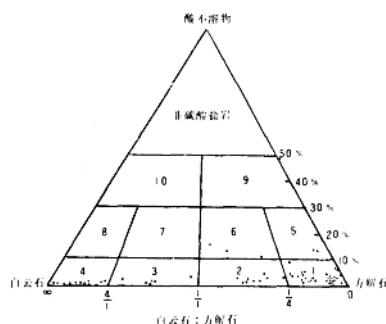


图 1-1 碳酸盐岩成分三角形图(据马凤山,1985)

1—灰岩;2—白云质灰岩;3—灰质白云岩;4—白云岩;5—(不纯)质灰岩;6—(不纯)质白云岩;
7—(不纯)质灰岩;8—(不纯)质白云岩;9—(不纯)质灰岩;10—(不纯)质白云岩

表 1-2

碳酸盐岩岩性结构及溶蚀特征

地 层	组 段	厚度 (m)	岩石名称	岩性特征及成岩条件	化学成分(%)			岩石薄片结构	岩样溶蚀面特征	溶蚀试验		
					CaO MgO	不 溶 物	SiO ₂			K _v	K _{cv}	P (%)
上 马 家 沟 组	O ₁ ²	2.90	泥晶灰岩	中厚层状含豹斑团块	84.86	1.36		泥晶结构, 含砂屑及方解石团块				0.64
		9.85	灰 岩	灰色中厚层状灰岩								
		6.87	泥晶灰岩	灰色中厚层状灰岩				泥晶结构, 含方解石细脉				
		3.91	泥晶灰岩	薄层状灰岩, 云灰岩及泥质白云岩				泥晶结构, 含生物骸屑, 孔隙(0.7-2mm)				
		10.90	泥晶泥灰岩	灰色中厚层状灰岩, 含燧石结核	38.88	21.21		泥晶结构, 含生物骸屑, 溶解发育				
	O ₂	22.63	泥晶灰岩	薄层状粉灰中厚层灰岩及灰云岩	70.57	1.30		泥晶结构, 含石膏假晶	溶蚀面似砂瘤状, 砂屑颗粒突起	0.96	0.94	1.67
		28.4	泥晶灰岩	厚层状粉泥灰岩, 含少量燧石结核	9.74	5.34	4.99	泥晶结构, 含生物屑及砂屑, 方解石细脉多	溶孔大小不等, 粉砂屑, 骸屑优先溶蚀	1.09	1.11	1.89
		82.58	泥晶灰岩	厚层状粉泥灰岩, 含少量燧石结核	22.87	6.23	4.87	含球粒泥晶结构, 散布交代白云石颗粒				0.74
		8.85	泥晶灰岩	厚层状粉泥灰岩, 含中厚层灰岩	27.53	2.39		泥晶结构, 孔隙发育(0.05-0.1mm)				
		4.81	泥晶灰岩	薄层状灰岩, 含中厚层灰岩	77.66	2.74		泥晶结构, 含少量孔眼		1.03	1.03	
O ₂	O ₂ ²	7.72	泥晶灰岩	中厚层状灰岩, 含燧石结核及白云石团块	5.35	3.52		泥晶结构, 方解石团块已白云石化				
		13.29	泥晶云灰岩	深灰色中厚层状灰岩, 含少量燧石结核	11.70	1.14		泥晶结构, 含砂屑假晶, 白云石交代方解石	溶蚀面似砂瘤状, 方解石细脉优先溶蚀	1.18	1.12	0.73
		16.0	泥晶灰岩	深灰色中厚层状含燧石结核的粉泥灰岩								
		6.19	灰 岩	深灰色巨厚层状粉泥灰岩								
		60.86	云质灰岩	薄层状泥岩夹中层状云灰岩	1.77			泥晶结构, 白云石颗粒散布其间				
	O ₁ ¹	5.31	泥晶白云岩	灰白色厚层含泥质白云岩	25.45	2.34		砂屑及生物骸屑泥晶结构, 溶孔(0.5-2.0mm)发育				4.3
		11.3	砂质灰岩	灰白色角砾状含泥质灰岩	4.78	14.15	9.68	泥晶结构, 孔隙白云灰岩, 溶孔发育				16.7
		10.6	泥质云灰岩	角砾状泥灰岩, 燧石状溶蚀	5.75	2.56		微晶结构, 孔隙(0.4-1.0mm)				0.90
		8.1	微晶云灰岩	角砾状云灰岩, 夹薄层状泥灰岩								
		35.23										