

文章编号:1009-0258(2000)02-0024-07

# 菏泽凸起地下热水的水文地球化学特征及成因分析

马振民<sup>1</sup>,何江涛<sup>1</sup>,张锡明<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学,北京 100083; 2. 山东省第一地质矿产勘查院,山东 济南 250014)

**摘要:** 在分析地下热水水文地球化学特征的基础上,对菏泽凸起地下热水的化学成分形成和演化过程进行了研究,并利用水文地球化学方法、同位素分析方法及古水文地质条件分析方法对菏泽凸起地下热水的成因进行了探讨。认为菏泽凸起地下热水为大气降水起源的入渗变质水。

**关键词:** 地下热水; 水文地球化学; 成因分析; 山东菏泽

**中图分类号:** P314.1; P641.3; P641.11

**文献标识码:** A

地热是一种巨大而重要的新型热能资源,它具有成本低、易开采、可直接利用、无环境污染等优点。菏泽凸起蕴藏着丰富的地下热水资源,为了使其尽快地得以开发利用,近几年山东省第一地勘院在鄆城、菏泽等地成功地实施了奥陶系热储勘探评价工作,取得了一些勘查成果。依据这些资料,本文对菏泽凸起地下热水水文地球化学特征及成因机理进行了初步分析。

## 1 地下热水赋存环境及热储特征

### 1.1 地质构造特征

菏泽凸起位于华北平原南部,鲁西断块鲁西南拗陷的西南隅。凸起西以聊考断裂为界与东濮凹陷相邻,南以单县断裂为界与太康隆起相接,东以曹县断裂为界与成武凹陷及巨野凹陷相邻,北以郓城断裂为界与汶泗凹陷相接。凸起东西宽近 67km,南北长约 75km。

菏泽凸起为一被第三系覆盖的背斜断块。背斜轴向为 NNE 向,核部为前震旦系变质岩及寒武—奥陶系石灰岩、白云岩,背斜西翼由石炭系、二叠系及侏罗系组成,东翼被曹县断裂切断。菏泽凸起边界断裂皆为活动断裂及控热断裂;凸起内部盖层断裂主要有菏泽断裂、皂山断裂、成武—东明断裂及小宋—解元集断裂,且均为晚近活动及发震断裂,构成地下热水运移通道及赋存场所(图 1)。

收稿日期:1999-12-14; 修订日期:2000-05-20; 编辑:孟舞平

作者简介:马振民(1962-),男,高级工程师,现从事水文地质工程地质及环境地质工作。

菏泽凸起自中生代以来构造活动强烈,近 500 年来发生 5.0~7.0 级地震 6 次<sup>[1]</sup>。

## 1.2 热储特征

菏泽地热田沿菏泽凸起构造呈层状兼带状分布。地热田盖层由第四系粉土、砂质粘土、新第三系粘土岩、泥岩、砂质泥岩以及石炭系泥岩、砂岩组成,总厚度 1174~1231m;热储为中奥陶世马家沟组石灰岩、白云岩,热储温度 53.3~55.7。

地热田地下热水含水层为半封闭系统。其西侧聊考断裂为阻水断裂,含水层沿东西向断裂在鲁中南地区出露,接受大气降水补给。地下水沿断裂、裂隙向聊考断裂一带径流,形成地下水深循环。地下热水含水层总厚度大于 368m,水位埋深 8.5~10.0m,单位涌水量 6.1~24.8m<sup>3</sup>/h·m。凸起中心部位水质类型为 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-Ca<sup>2+</sup>·Na<sup>+</sup>水,凸起边缘水质类型为 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-Na<sup>+</sup>·Ca<sup>2+</sup>水。

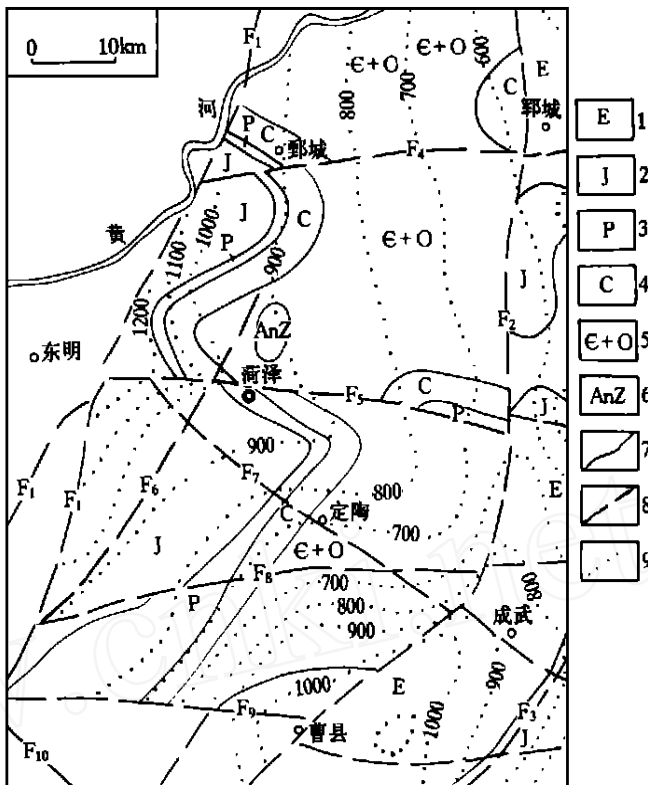


图 1 菏泽凸起地质构造图

Fig. 1 Geological structure of Heze salient

1—第三系;2—侏罗系;3—二叠系;4—石炭系;5—寒武、奥陶系;6—前震旦系;7—地质界线;8—断层;9—上第三系底界等深线;F<sub>1</sub>—聊考断裂;F<sub>2</sub>—曹县断裂;F<sub>3</sub>—巨野断裂;F<sub>4</sub>—鄆城断裂;F<sub>5</sub>—菏泽断裂;F<sub>6</sub>—解元集-小留集断裂;F<sub>7</sub>—成武-东明断裂;F<sub>8</sub>—皂山断裂;F<sub>9</sub>—单县断裂;F<sub>10</sub>—新乡-商丘断裂

## 2 地下热水的水文地球化学特征

地热田为一个特定温度条件下形成的化学系统,其水文地球化学特征是该系统的热水-岩石达到平衡状态的反映<sup>[2]</sup>。菏泽凸起地下热水化学特征见表 1。

从表 1 可以看出,菏泽凸起地下热水化学组成具有以下特征:

(1) 地下热水总溶解固体(TDS)为 3719.17~4111.00mg/L,属中等矿化水;pH 值为 7.14~7.40,呈弱碱性。

(2) 地下热水的宏量组分中阳离子主要为 Ca<sup>2+</sup> 及 Na<sup>+</sup>,其含量分别为 435.57~514.00mg/L 及 503.00~531.12mg/L;阴离子以 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 为主,其含量为 2046.55~2244.00mg/L。地下热水主要阴、阳离子含量大小顺序分别为:SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > Cl<sup>-</sup> > HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup> (Na<sup>+</sup>) > Mg<sup>2+</sup> > K<sup>+</sup>,属 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-Na<sup>+</sup>·Ca<sup>2+</sup> 或 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-Ca<sup>2+</sup>·Na<sup>+</sup>型水。

(3) 地下热水中  $\text{CO}_2$  以水溶性  $\text{CO}_2$  及  $\text{HCO}_3^-$  形式,而不以  $\text{CO}_3^{2-}$  形式存在。

(4) 地下热水的微量组分主要为 Sr, Li,  $\text{H}_2\text{SiO}_3$  及  $\text{HBO}_2$ 。

表 1 菏泽凸起地下热水化学特征

Table 1 Chemical characteristics of geothermal water in Heze uplift

名称	单位	含量	名称	单位	含量		
阳离子	$\text{K}^+$	mg/L	5.83 ~ 23.66	微量组分	Co	mg/L	< 0.03
	$\text{Na}^+$	mg/L	503.00 ~ 531.12		F	mg/L	3.28 ~ 3.63
	$\text{Ca}^{2+}$	mg/L	435.57 ~ 514.00		Br	mg/L	0.62 ~ 0.71
	$\text{Mg}^{2+}$	mg/L	103.37 ~ 137.00		I	mg/L	0.08 ~ 0.14
	$\text{Fe}^{3+}$	mg/L	0.76 ~ 1.21		$\text{H}_2\text{SiO}_3$	mg/L	29.55 ~ 48.00
	$\text{NH}_4^+$	mg/L	1.00 ~ 1.52		$\text{HBO}_2$	mg/L	4.01
	$\text{Al}^{3+}$	mg/L	0.02		Ba	mg/L	< 0.05
					V	mg/L	< 0.0001
阴离子	$\text{Cl}^-$	mg/L	321.50 ~ 325.00	其它项目	TDS	mg/L	3719.17 ~ 4111.00
	$\text{SO}_4^{2-}$	mg/L	2046.55 ~ 2244.00		总硬度 ( $\text{CaCO}_3$ )	mg/L	1512.80 ~ 1848.00
	$\text{HCO}_3^-$	mg/L	165.00 ~ 175.44		暂时硬度 ( $\text{CaCO}_3$ )	mg/L	136.00 ~ 142.78
	$\text{CO}_3^{2-}$	mg/L	< 1.00		永久硬度 ( $\text{CaCO}_3$ )	mg/L	1365.04 ~ 1712.00
	$\text{NO}_3^-$	mg/L	0.90 ~ 1.48		酸度	mg/L	24.77
	$\text{NO}_2^-$	mg/L	< 0.003		碱度	mg/L	136.00 ~ 142.78
	$\text{PO}_4^{3-}$	mg/L	< 0.10	游离 $\text{CO}_2$	mg/L	11.40 ~ 21.78	
微量组分	Li	mg/L	0.47 ~ 0.64	放射性组分	总	Bq/L	0.26 ~ 0.50
	Sr	mg/L	6.75 ~ 8.56		总	Bq/L	1.13 ~ 1.26
	Zn	mg/L	< 0.05		$^{226}\text{Ra}$	Bq/L	0.05 ~ 0.20
	Ge	mg/L	< 0.01		$^{232}\text{Th}$	Bq/L	0.00112
	Se	mg/L	< 0.0008		$^{234}\text{U}$	Bq/L	0.00124
	Mo	mg/L	< 0.02		$^{222}\text{Rn}$	Bq/L	2.38 ~ 2.58
	Ni	mg/L	< 0.03				
	Ag	mg/L	< 0.01				
	Hg	mg/L	< 0.002				
	As	mg/L	< 0.01				
	Pb	mg/L	< 0.001				
	Cd	mg/L	< 0.001				
	Cu	mg/L	< 0.05				
	Mn	mg/L	< 0.02				
Cr	mg/L	< 0.006					

### 3 地下热水的化学演化

#### 3.1 地下热水的水文地球化学环境

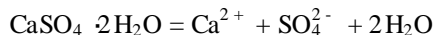
地下热水水文地球化学特征反映了地下热水系统的水文地球化学环境<sup>[2]</sup>。水文地球化学环境包括含水介质岩性、水动力条件、氧化—还原环境及酸碱度等基本内容。菏泽凸起地下热水系统含水介质为海相沉积的石灰岩及白云岩;地下热水径流途径长,水循环缓慢,地下热水呈弱碱性(pH 为 7.14 ~ 7.40);地下热水  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{CO}_2$  的存在形式及宏量组分的组合关系反映了地下热水系统为弱还原环境。

### 3.2 地下热水形成的化学过程

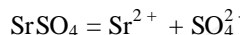
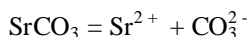
菏泽凸起地下热水化学成分的形成和演化是含水介质的化学成分、水化学作用、沉积环境及水循环等诸多因素共同作用的结果。

(1) 溶滤作用: 溶滤作用是地下热水系统化学成分形成的主要水化学作用。地下热水中  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HSiO}_3^-$ ,  $\text{Sr}^{2+}$  等离子浓度增高主要是溶滤作用的结果。

热储下一中奥陶统石灰岩、白云岩地层中膏盐含量较大, 且有石膏夹层, 在热储温度、压力和盐度的长期作用下, 膏盐逐渐溶解, 导致地下热水中  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度增大。



地下热水流动缓慢, 在漫长的水-岩相互作用过程中, 热储含锶的石灰岩中碳酸盐和硫酸盐矿物充分溶解形成  $\text{Sr}^{2+}$ 。另一方面,  $\text{Sr}^{2+}$  的浓度与  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度呈正相关关系, 热水溶液  $\text{SO}_4^{2-}$  高,  $\text{Sr}^{2+}$  的浓度也高<sup>[31]</sup>。

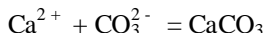


$\text{H}_2\text{SiO}_3$  的溶解度与温度、pH 呈正相关关系。深循环的地下热水长期溶滤热储底部富含正长石的花岗片麻岩, 使正长石分解为高岭土、其它硅酸盐及可溶性  $\text{SiO}_2$ 。在较高温度和弱碱性介质作用下形成较高浓度的  $\text{H}_2\text{SiO}_3$  地下热水。



(2) 易溶盐溶解: 易溶盐溶解是地下热水化学成分形成的重要作用。海相沉积的下一中奥陶统石灰岩、白云岩热储含有盐岩等易溶盐类。在热储温度作用下, 盐岩等易溶盐溶解度增大, 形成  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{I}^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  等离子。

(3) 沉淀作用: 地下热水中  $\text{Ca}^{2+}$  浓度约为  $\text{SO}_4^{2-}$  的一半, 且地下热水中无  $\text{CO}_3^{2-}$  存在, 这是地下热水系统中产生沉淀作用的结果。补给区含有  $\text{Ca}^{2+}$  及  $\text{CO}_3^{2-}$  的地下水, 在径流过程中, 遇到含石膏的热储, 结果使石膏溶解, 增大了  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度。同时, 因同离子效应及热储温度的共同作用产生  $\text{CaCO}_3$  沉淀。



长期沉淀作用的结果使  $\text{Ca}^{2+}$  浓度与  $\text{SO}_4^{2-}$  相差悬殊, 亦使  $\text{CO}_3^{2-}$  消耗殆尽。

### 3.3 地下热水的变质与演化

地下水的变质是指水化学成分之间相互反应引起离子组合比例变化的过程。强酸根与弱酸根的比例系数 (K) 和溶液的离子强度 (I) 定量表征了水化学成分的变质程度:

$$K = \frac{\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-}{\text{HCO}_3^- + \text{HSiO}_3^-} \quad (1)$$

$$I = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n C_i Z_i^2 \quad (2)$$

式中:  $C_i$ —离子体积摩尔浓度;  $Z_i$ —离子的电价。

由(1)式和(2)式计算得菏泽凸起地下热水:  $K = 11.6 \sim 12.0$ ,  $I = 0.08 \sim 0.10$ , 即  $4 < K < 60$ ,  $0.05 < I < 0.20$ , 根据别尔亚柯夫 (E. E. e) 1970 年提出的按 K 及 I 分类的

水质变质程度分类方案<sup>[4]</sup> ( $K < 0.5$ ,  $I < 0.006$ , 为未变质水;  $0.5 < K < 4.0$ ,  $0.01 < I < 0.04$ , 为初期变质水;  $4.0 < K < 60.0$ ,  $0.05 < I < 0.20$ , 为中度变质水;  $K > 60.0$ ,  $I > 0.20$ , 为高度变质水), 该地下热水应属中度变质水。表明地下热水中化学成分之间发生了比较复杂的反应, 包括易溶盐的溶解、难溶盐  $\text{CaCO}_3$  的沉淀以及水中离子与含水介质离子的交换反应等。反应的结果使地下热水中的阴离子成分逐渐由以  $\text{HCO}_3^-$  为主演化为  $\text{SO}_4^{2-}$  及  $\text{Cl}^-$  为主, 而阳离子逐渐由以  $\text{Ca}^{2+}$  为主演化为以  $\text{Na}^+$  为主。

## 4 地下热水成因分析

菏泽凸起地下热水是在漫长的地质历史发展过程中各种自然因素综合作用的结果<sup>[5]</sup>。水文地质条件对地下热水的形成起主要作用。

### 4.1 地下热水化学成分特征系数及水文地球化学分析

化学成分特征系数是指能够表征地下水成因类型和地下水化学成分形成和演化过程中各种化学和生物化学变化特征的化学组分之间的比例系数<sup>[6]</sup>。利用化学特征系数结合具体水文地质条件(表 2), 可判断菏泽凸起地下热水的成因和化学成分的来源。菏泽凸起地下热水含水岩系由海相沉积的石灰岩、白云岩组成, 赋存其间的原始水体源于海水。因此地下热水应反映海水的化学成分特征或者保留古海水的某些成分的痕迹。从表 2 可以看出:

表 2 菏泽凸起地下热水化学特征系数及同位素组分

Table 2 Chemical characteristics coefficient and isotope components of geothermal water in Heze uplift

名称		海水	补给区岩溶水	地下热水	
特征系数	成因系数	Cl/Br	297	—	489
		Ca/Sr	53	—	64
		Na/Cl	0.85	1.27	2.47
	变质系数	Mg/Ca	5.2	0.19	0.42
		Ca/Cl	0.004	11.32	2.61
		Mg/Cl	0.29	2.14	1.10
SO <sub>4</sub> /Cl		0.10	0.47	4.89	
同位素	D(‰)	—	-52.8	-57.0	
	<sup>18</sup> O(‰)	—	-8.2	-9.2	
	T(TU)	—	60.1	<0.5	

(1) 地下热水的成因系数  $\text{Na/Cl} = 2.47$ ,  $\text{Ca/Sr} = 64$ ,  $\text{Cl/Br} = 489$ , 即地下热水的成因系数均大于海水的成因系数, 说明地下热水为溶滤水。

(2) 将地下热水及补给区岩溶水与海水的变质系数进行对比, 可以看出  $\text{Mg/Ca}$  比海水小, 而  $\text{Ca/Cl}$ ,  $\text{Mg/Cl}$  及  $\text{SO}_4/\text{Cl}$  皆比海水大。地下热水与原始沉积水成分之间差距颇大, 表明原始沉积水已经经历相当程度的淡化。地下热水与大气降水成因的补给区岩溶水具有相似的特征系数, 说明地下热水为渗入起源的溶滤水。

### 4.2 地下热水的同位素分析

从氢氧同位素分析结果可知(表 2), 地下热水与补给区岩溶水的 D 和 <sup>18</sup>O 均分布

在大气降水线附近,表明地下热水与补给区岩溶水皆由大气降水补给。根据法国 J. Ch. 来特的经验估算结果: $T = 0 \sim 5 TU$  表明 40 年以前的“古水”占优势, $T > 40 TU$  表明新近入渗水占优势。对比 T 分析结果,补给区岩溶水为新近入渗水为主,地下热水则为近代入渗水经变质形成的入渗变质水。

#### 4.3 地下热水古水文地质条件分析

菏泽凸起形成于新生代。早寒武世至中奥陶世,本区为海侵盆地,地下水高度盐化;加里东运动使盆地整体上升为古陆,上奥陶统至下石炭统缺失,中奥陶世以前地层裸露地表,遭受风化剥蚀和淋滤,地下水系统由盐化水被大气降水入渗混合和交替成为淡化水;中石炭世开始,本区整体下降,海水时进时退,地下水向盐化方向转化;二叠纪后期的海西运动,使本区进入以抬升为主的构造发展阶段,陆台上升,并又一次遭受强烈的剥蚀,构成开启型水文地质构造系统,盐化的地下水为入渗水所置换替代,成为岩溶-裂隙型淡水;新生代以来,聊考断裂活动强烈,断裂上盘相对下降形成东濮断陷,接受老第三纪沉积,下盘相对上升,形成菏泽凸起,岩石被淋滤,同时断裂活动使岩层内岩溶、裂隙系统发育,形成大气降水入渗水;新第三纪至今,菏泽凸起接受沉积,被上第三系和第四系覆盖,形成埋藏封闭系统,但地下热水补给区含水岩系裸露地表,接受大气降水补给,形成近代大气降水入渗起源的变质水。

#### 4.4 地下热水的成因模式分析

菏泽凸起地下热水埋藏于新生代沉积盆地,赋存于中奥陶统岩溶、裂隙热储,为传导对流型地下热水。

钻孔测温资料表明,郓城断裂带内地温梯度为  $4.73 / 100m$ ,断裂北 1500m 处为  $3.96 / 100m$ ,断裂北 2500m 处为  $3.39 / 100m$ ,说明凸起边界的郓城断裂为导热断裂。钻孔测井资料表明热储内地温梯度为零,地热田中心与边缘热水温度仅相差  $1.8$ ,这是热水在热储内充分对流的结果。

地热田沿菏泽凸起盖层断裂及菏泽背斜呈层状兼带状分布,受聊考断裂等凸起边缘断裂构造控制。深部热源沿聊考断裂等凸起边界深大断裂传导,在盖层内张性导水断裂的构造作用下与深循环的冷水产生对流,形成地下热水。

## 5 结论

(1) 菏泽凸起地下热水为受聊考深大断裂构造控制的深循环低温热水。

(2) 地下热水的水质类型为  $SO_4^{2-} \cdot Na^+ \cdot Ca^{2+}$  水,或  $SO_4^{2-} \cdot Ca^{2+} \cdot Na^+$  水,地下热水形成于弱还原环境。

(3) 地下热水形成的化学过程以溶滤作用为主,地下热水化学成分是在地下水长期径流及深循环过程中各种水化学作用的结果。

(4) 地下热水起源于大气降水,为入渗中度变质水。

(5) 地下热水成因为传导对流型,深部热源沿聊考深大断裂等传导,在早—中奥陶统灰岩及白云岩热储内对流形成现今地下热水。

## 参考文献:

- [1] 胡长和. 1937年菏泽地震[M]. 北京:地震出版社,1991.
- [2] 沈照理. 水文地球化学基础[M]. 北京:地质出版社,1993.
- [3] 文冬光. 水-岩相互作用的地球化学模拟理论及应用[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1998.
- [4] 陈静生. 水环境化学[M]. 北京:高等教育出版社,1991.
- [5] 陈墨香. 华北地热[M]. 北京:科学出版社,1998.
- [6] 汪集麟. 中低温地下水对流型地热系统[M]. 北京:科学出版社,1993.

## Hydro - geochemical Characteristics of Geothermal Water in Heze Uplift and Its Origin Analysis

MA Zhen - min<sup>1</sup>, HE Jiang - tao<sup>1</sup>, ZHANG Xi - ming<sup>2</sup>

(1. *China Geological University, Beijing 100083, China*; 2. *No. 1 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources Shandong Jinan 250014, China*)

**Abstract :** On the basis of analyzing the hydro - geochemical characteristic of geothermal water, the formation and evolution of chemical compositions in the geothermal have been studied in this paper. By the analysis of hydro - geochemistry, isotope analysis and paleohydro - geological conditions; the origin of geothermal water in Heze uplift has been discussed, the geothermal water being infiltration metamorphic water from rainfall concluded.

**Key words :** Geothermal water; hydro - geochemistry; origin analysis; Heze in Shandong province

## 《山东地质》加入“中国期刊网”的声明

为了实现科技期刊编辑、出版、发行工作的电子化,推进科技信息交流的网络化进程,本刊作为中国科技论文统计源期刊,已于1998年入编《中国学术期刊(光盘版)》,并于1999年加入“中国期刊网”。今后,凡向本刊投稿并被本刊录用的稿件,将一律由编辑部按照统一格式制作编入万方数据(ChinaInfo)系统,进入因特网提供信息服务。读者可通过因特网进入ChinaInfo系统(网址: <http://WWW.Chinainfo.gov.cn/Periodical>) 免费(一年后酌情收费)查询检索本刊内容,也欢迎各界朋友通过万方数据(ChinaInfo)系统向本刊提出意见、建议或征订本刊。

如作者不愿将自己的文章编入万方数据(ChinaInfo)系统,请另投它刊或在来稿时予以说明,本刊将做适当处理。本刊所付稿酬已包括刊物内容上网服务报酬。

《山东地质》编辑部