

中国地质科学院

水文地质工程地质研究所
所 刊

第 8 号

地质出版社

(京)新登字 085 号

中国地质科学院
水文地质工程地质研究所刊
第 8 号

责任编辑：张新兴 殷正宙 陈东俊

地质出版社 出版发行

(北京和平里)

北京地质印刷厂印刷

(北京海淀区学院路 29 号)

新华书店总店科技发行所经销

开本：787×1092¹/₁₆ 印张：13 字数：313000
1992 年 7 月北京第一版·1992 年 7 月北京第一次印刷
印数：1—1255 册 国内定价：7.40 元
ISBN 7-116-01099-8/P·928

目 录

宁波盆地地下水铁及微量元素地球化学·····	阎葆瑞 张胜 张作辰 (1)
太平洋中部水文地球化学·····	汪蕴璞等 (27)
柴达木盆地尕斯库勒湖区含钾卤水形成、分布规律和综合评价研究·····	
·····	王焕夫 叶思源 (51)
兰州市傍河水源地环境同位素和水化学研究·····	焦鹏程 (78)
南通市区第Ⅲ承压含水层地下水数学模型研究·····	曲焕林 高火焰 王士远 (87)
中国东部第四纪玄武岩空隙特征及其水文地质意义·····	张玉芳 (101)
秦皇岛市岩土体工程地质特征及其地基区划·····	
·····	翟荣廷 王志成 张文生 李增水 (117)
闽南三角地区地壳形变特征、现今构造应力场及地震危险性评价·····	
·····	张永波 林蓬琪 田洪训 马集遐 (140)
“示范性地热资源数据库”的研制和应用·····	
·····	“七五”国家重点科技攻关项目“21-05-03-01”专题组 (160)
污染质在包气带和含水层中运移规律的实验研究·····	
·····	“六五”国家重点科技攻关项目“38-1-4”课题组 (177)
潜水蒸渗理论及计算方法研究·····	王红旗 (191)

BULLETIN OF THE INSTITUTE OF HYDRO- GEOLOGY AND ENGINEERING GEOLOGY

CHINESE ACADEMY OF
GEOLOGICAL SCIENCES

No.8

CONTENTS

- Geochemical Characteristics of Iron and Some Trace Elements in
Groundwater in Ningbo City
..... *Yan Baorui, Zhang Sheng and Zhang Zuochen* (26)
- Hydrogeochemistry in the Central Part of Pacific Ocean
..... *Wang Yunpu et al.* (49)
- Formation and Distribution Laws as well as Comprehensive Asse-
ssment of Potassium-Bearing Brine Water of Gas Hure Lake
in Qaidam Basin.....*Wang Huanfu and Ye Siyuan* (76)
- A Combined Environment Isotopic and Hydrochemical Approach to
Groundwater sourceland along Yellow River in Lanzhou, Gansu
Province..... *Jiao Pengcheng* (86)
- Groundwater Mathematical Model for Third-Bed Confined Aquifer
in Nantong City, Jiangsu Province
..... *Qu Huanlin, Gao Huoyan and Wang Shiyuan* (99)
- Void Characteristics of Quaternary Basalt in Eastern China and Its
Hydrogeological Significance..... *Zhang Yufang* (112)
- Engineering Geological Characteristics of Rockmass and Soilmass and
Its Foundation Regionalization in Qinhuangdao City
..... *Zhai Rongting, Wang Zhicheng, Zhang Wensheng and Li Zengshui*(139)
- Assessment to Crustal Deformation, Current Tectonic Stress Field and
Earthquake Risk in Southern Fujian Deltaic Area
.....*Zhang Yongbo, Lin Pengqi, Tian Hongxun and Ma Jixia*(159)
- Development and Application of Geothermal Resources Demonstra-
tion Database..... *Research Group of Project No. "21-05-03-01"*(176)
- Migration Laws of Contaminants in Vadose Zone and Aquifer
..... *Research Group of Project No. "38-1-4"* (190)
- Some Theoretical Problems and Calculating Method for Evapotra-
nspiration and Infiltration Recharge of Groundwater *Wang Hongqi*(206)

Geological Publishing House
(Hepingli, Beijing)

Institute of Hydrogeology
and Engineering Geology
(Zhengding County, Hebei Province)

宁波盆地地下水铁及微量元素地球化学

GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF IRON AND SOME TRACE ELEMENTS IN GROUNDWATER IN NINGBO CITY

阎葆瑞 张胜 张作辰

内容提要 本文以氢氧同位素、有机地球化学及微生物地球化学等方法,进行了野外及室内元素转移的实验研究,并着重研究了宁波盆地地下水主要开采层——大型淡水体中铁及微量元素地球化学行为及其形成、分布。提出非离子态铁主要是以无机及有机络合物形式存在和迁移的新认识,认为有机物及微生物代谢活动对铁及某些微量元素的迁移聚集起着重要作用。通过元素转移的化学及生物因素作用的对比实验,论证了宁波盆地大型淡水体的整个水动力过程,不单是无生命的无机化学过程,而是一个水-岩-微生物相互作用活的生态系统,在这一系统中元素得以积极地相互转化,最后提出了去除高含量铁的处理方法。

前 言

地下水含铁过量,不仅使水的感观性状恶化,还会对纺织、印染、造纸、酿酒及食品工业产品质量造成不良影响,直接影响工农业用水,而且还能堵塞滤水管和输水管道,腐蚀金属材料等。总之,高含量铁地下水造成的危害是很大的。因此,研究地下高含量铁水地球化学及其形成机理和除铁方法已成为工业和城镇供水的一个重要课题。它不但具有理论意义,而且具有很大的实用价值。

宁波盆地深埋的大型淡水体是宁波市地下水开采层,但其中的铁含量大都超过饮用水标准,甚至在很大范围内的地下水中含铁量达 10 mg/L。

宁波盆地高含量铁、锰地下水中富含有机物及微生物。铁、锰的形成是一个复杂的过程。在地下水中铁、锰并不单是以简单的阳离子或阴离子形式存在,而是在许多情况下能与有机质作用形成络合物。这些络合物的存在导致了铁、锰不断从岩石向水中迁移,使铁、锰含量增高。此外,不同微生物的代谢作用也直接参与了地下水中铁、锰的迁移和聚集过程。为此在本项研究中我们应用水文地球化学原理,运用有机物及微生物地球化学方法结合同位素方法,对地下水中铁及某些微量元素的转化进行了综合研究。本文重点讨论宁波盆地深层淡水体中铁、锰地球化学行为及形成机理。其特点是把宁波盆地大型淡水体作为水-岩-微生物活的生态系统,综合研究了这一系统中化学和生物因素对元素迁移、聚集的作用。最后提出了铁锰的处理方法。

1986年地矿部下达了沿海重点开放城市环境地质重点攻关课题。本文正是为适应这一课题的需要,立项开展宁波盆地地下水铁及某些微量元素地球化学研究,并为宁波地下水资源评价和开采利用提供水质资料和水文地球化学研究依据。

一、地质、水文地质条件

(一) 地质概况

宁波市位于浙江省东北部, 濒临东海。宁波平原在构造上为一中新生代断陷盆地, 盆地内地层为上侏罗统中酸性火山碎屑岩, 分布在盆地的边缘; 下白垩统为陆相碎屑岩沉积, 以紫红色砂岩及紫灰色泥砂岩为主, 并有膏盐层。白垩系之上直接被第四系覆盖, 仅在盆地西南边缘零星出露。

本区构造以断裂为主, 褶皱构造不发育。盆地东侧边缘为北东向深断裂带, 以五乡石契-慈城断层规模最大, 横贯测区。盆地本身是一个北东向倾伏的宽阔的向斜构造。

盆地内第四纪地层厚度由平原区南部及边沿向海滨方向递增, 主要河谷地段厚约30—40m, 在宁波市区为85—105m。山麓沟谷区及山前地带第四系以陆相为主, 厚约30—40m; 滨海平原以河湖相、海相为主, 厚达120m以上。

(二) 地下水的赋存条件和分布规律

宁波地区地下水的赋存与分布, 大体可分为3个埋藏分布区:

1. 低山丘陵区: 主要为基岩裂隙水和红层裂隙水。基岩主要为数千米厚的中、新生界火山岩、沉积岩及燕山晚期侵入岩。构造裂隙、风化裂隙、孔隙裂隙是地下水分布和赋存的场所, 常以泉的形式出露地表。

2. 山麓河谷区: 由冲积、洪积及坡洪积地层组成。在较大河谷, 如鄞江、奉化西江等的冲积砂砾石含水层中蕴藏着丰富的地下水。

3. 滨海平原区: 平原深部以深埋承压的第四系松散岩类孔隙水为主, 近山前则为浅埋承压的孔隙水和潜水。其次为分布在下白垩统和上侏罗统的基岩裂隙水。

总之, 由山区到平原依次分布有: 基岩裂隙水, 山麓河谷坡积及冲积层孔隙水, 平原边缘地带浅层孔隙承压水, 平原中下部深层孔隙承压水。因此, 宁波盆地构成了一个完整的水文地质单元。

(三) 地下水的补给、径流、排泄条件

1. 基岩山区及山前平原区

基岩山区的地下水以大气降水补给为主, 本区降水量大, 水量均匀且降水强度小, 利于渗透补给。由于裂隙发育不深, 故径流途径较短, 地形坡度较大, 大部分就地排泄, 并以下降泉形式补给地表水, 少部分沿着构造裂隙向深部渗透形成地下径流。基岩区的井、泉, 水动态变化受季节影响明显。

在山前由潜水转变为承压水时, 由于水力坡度减小, 径流迟缓, 除小部分向平原深部渗透外, 大部分潜水以泉的形式出露地表补给地表水系而成为地表径流。干旱季节的地表蒸发也是潜水排泄的途径之一。

2. 滨海平原区

(1) 平原浅部孔隙潜水含水层

本含水层透水性差,基本为滞水带。地下水以垂向运动为主,大气降水及地表水为其主要补给源,蒸发是其主要排泄方式。

(2) 平原深部承压含水层

本层为宁波平原主要供水源。分为两个主要承压含水层。

第一承压含水层:主要以冲积砂砾石、中细砂为主,顶板埋深45—55m,江东地段埋深大于50m。该含水层在本市范围内绝大多数是微咸水,江东有一片咸水,在市西南郊有一片约28 km²的淡水体。

第一承压含水层顶板以上有较厚的粘性土层,在含水层内部夹有不稳定的亚粘土层,另外与下伏的第二含水层间有粘性土相隔。同时天然水力坡度平缓。因此含水层本身在垂向和水平方向上得到的补给量甚微。生产井的开采是第一承压含水层的主要排泄方式。

第二承压含水层:以冲积砂砾石层为主,顶板埋深62—85m,市区及近郊区矿化度小于1 g/L,是宁波平原最大的淡水体,也是宁波市的主要开采层之一。

淡水体周围为咸水所包围,上部有较厚的粘性土层相隔,不易接受垂向补给,地下水的天然水力坡度小于0.1‰,径流不畅。因此,淡水体在水平方向及垂向上得到外界的补给量极微。含水层下伏岩组含水贫乏,顶托补给亦甚少。生产井的开采是淡水体的主要排泄方式。

历年的观测资料表明,在长期持续开采条件下,导致地下水位大幅度下降,降落漏斗不断扩展,周围咸水向开采区缓慢移动,淡水体边缘带的矿化度不断升高,因而淡水体逐步缩小。此淡水体现处于非稳定的开发状态。

二、水文地球化学及同位素组成特征

(一) 基岩山区及山前倾斜平原区地下水地球化学特征

山区基岩裂隙水接受大气降水补给,以溶滤作用为主,矿化度小于0.2 g/L,多为HCO₃-Na或HCO₃·Cl-Na型水。由于大片分布富钾钠火山岩,故阳离子中钙离子相对含量较低;硫酸根离子含量也很低。只是在局部地区,如鄞县横溪镇南凤凰山59号孔及鄞县凤香等地,地下水溶滤了富硫的母岩使水中硫酸根离子增高,而成硫酸盐型水。

基岩山区裂隙水和山麓沟谷区潜水均属大陆溶滤水, r_{Na}/r_{Cl} 和 $(r_{Na}-r_{Cl})/r_{SO_4}$ 比值均大于1;矿化度小于0.2 g/L,Cl含量小于9 mg/L,水化学类型在山麓沟谷区属HCO₃-Ca·Na型。

(二) 滨海平原区地下水地球化学特征

1. 平原浅层潜水

宁波平原浅层多为湖沼相堆积物,潜水为淡水。其下为海积淤泥质亚粘土,含盐量较高(0.05—10‰)。由于成陆先后不同,承受大气降水和地表水淋滤-冲淡作用的时间长短以及与现代海水关系密切程度不同,使淤泥质亚粘土含盐量由陆向海、由表层向下层逐渐

增高。因而地下水矿化度也由山前向滨海逐渐增大,山前地带为 0.35 g/L 左右,海滨增至 6 g/L 或更高。水化学类型由 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}$ 或 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Mg}$ 型过渡到 Cl-Na 型(表 1)。

表 1 宁波市地下水水化学参数

位置	比值	$r_{\text{Na}}/r_{\text{Cl}}$	$r_{\text{Ca}}/r_{\text{Cl}}$	$r_{\text{SO}_4}/r_{\text{Cl}}$	$r_{\text{Cl}}/r_{\text{Mg}}$	HCO_3/Cl	Ca/Sr	$\text{SO}_4^{2-}/\text{Sr}$ (mg/L)	$\text{SO}_4^{2-}/\text{Sr}$	矿化度 (mg/L)	水化学类型
基岩区	最高	5.36	2.54	0.023	25.0	6.9	110.45	4.0	5.64	0.67	$\text{HCO}_3\cdot\text{Cl-Ca}\cdot\text{Na}$
	最低	1.062	2.24	0.01	4.18	2.75	94.5	2.0	4.54	0.36	
	平均	3.21	2.39	0.016	14.59	4.83	102.48	3.0	5.09	0.52	$\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$
淡水体边缘	最高	1.186	2.93	0.282	13.63	1.4	158.6	95.1	171.04	1.0	$\text{HCO}_3\cdot\text{Cl-Na}\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}$
	最低	0.807	1.02	0.17	1.97	1.25	30.32	83.9	25.3	0.7	$\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Mg}$
	平均	0.997	1.97	0.226	7.8	1.33	94.46	89.5	98.17	0.8	$\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}$
淡水体中心	最高	1.97	59.7	0.237	6.09	5.27	111.27	30.9	38.1	0.6	$\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$
	最低	0.69	0.94	0.023	0.69	1.39	64.52	8.0	9.0	0.43	
	平均	1.24	12.88	0.13	2.23	3.94	88.82	17.82	21.06	0.5	$\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}$
淡水体外围 河谷地区	最高	1.45	3.86	1.1	1.82	4.6	1000.0	8.0	666	0.48	$\text{HCO}_3\cdot\text{Cl-Ca}\cdot\text{Na}$
	最低	0.88	0.43	0.55	0.83	3.11	116.0	0	0	0.04	
	平均	1.38	2.17	0.55	1.25	3.62	413	5.33	248.6	0.22	$\text{HCO}_3\cdot\text{Cl-Na}\cdot\text{Ca}$

2. 深部承压水

(1) 封存水

从表 1、2、图 1 可见其水化学分布的基本特点:

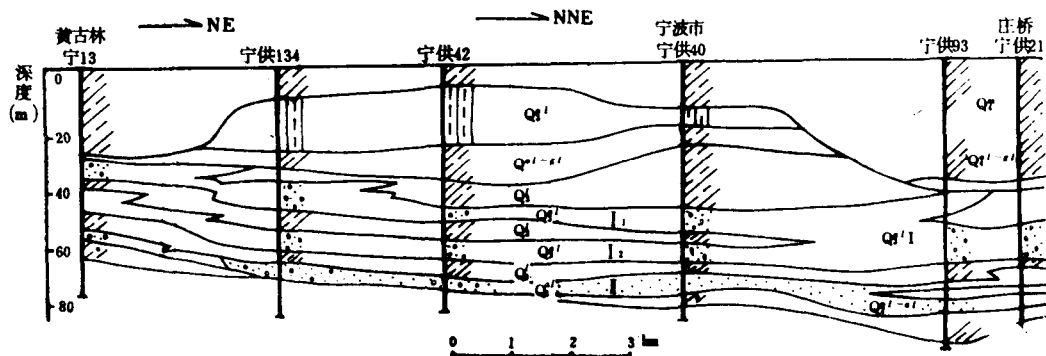


图 1 黄古林—庄桥水文地质剖面示意图

(据浙江省地矿局水文地质大队, 1977)

Fig. 1 Hydrogeological section of Huanggulin-Zhuangqiao

A. 矿化度自淡水体中心向四周逐渐增高, Cl^- 也有相应的变化;

表 2 黄古林—庄桥剖面承压含水层地下水水化学参数及水化学类型

承压含水层	井 位	矿化度 (g/L)	Cl ⁻ (mg/L)	r_{Na}/r_{Cl}	水化学类型
I ₁	宁13	7.27	4530	0.45	Cl-Na
	宁供134	2.66	1534	0.17	Cl-Mg·Ca
	供42	0.69	198	0.40	HCO ₃ ·Cl-Mg·Na
	供40	1.40	732	0.31	Cl-Mg·Ca·Na
	供21	5.79	3491	0.57	Cl-Na
I ₂	供42	0.62	153	0.53	HCO ₃ ·Cl-Mg·Na
	供40	1.31	620	0.26	Cl·HCO ₃ -Mg·Ca·Na
	供93	2.81	1702	0.33	Cl-Na·Ca
	供21	3.11	1985	0.31	Cl-Na·Ca
II	宁13	2.61	1516	0.25	Cl-Ca·Na·Mg
	供42	0.58	62	2.0	HCO ₃ -Na·Mg
	供40	0.44	124	0.73	HCO ₃ ·Cl-Na
	供93	0.69	251	0.55	Cl·HCO ₃ -Na·Ca
	供21	2.48	1268	0.32	Cl-Na·Ca

(据浙江省地矿局水文地质大队, 1977)

B. 水化学类型由淡水体中心向四周过渡, 中心以 HCO₃-Na·Ca 型 为主→HCO₃·Cl-Na·Ca 型→淡水体边缘的 Cl·HCO₃-Na·Ca·Mg 型, 微咸水区则为 Cl-Na·Mg 型;

C. r_{Na}/r_{Cl} 系数由中心向四周减小, 地下水由盆地中心的溶滤水向外围过渡为海相成因的地下水;

D. 按苏林水化学分类, 水化学成因类型由淡水体中心向四周过渡渐变, 中心区 $r_{Na}/r_{Cl} > 1$, $(r_{Na}-r_{Cl})/r_{SO_4} > 1$, 为 NaHCO₃ 大陆溶滤型水; 过渡区以 NaHCO₃ 为主, MgCl₂ 次之, 即溶滤水和海水混合型; 淡水体边缘微咸水区则是 $r_{Na}/r_{Cl} < 1$, $r_{Cl}/r_{Mg} < 1$, 为海水型。

(2) 盆地边缘淡水

其主要分布于山前及河谷出口处。这种类型地下水是被全新世海侵严重咸化的地下水, 经后期淡水混合而成的低矿化水。其基本特征:

A. 矿化度自上游潜水段至下游承压水段逐渐升高, 由 0.12 g/L→6—7 g/L, Cl⁻含量由 10 mg/L 左右向下游相应增至 172 mg/L。

B. 水化学类型从上游至下游由 HCO₃-Ca·Na 型, HCO₃·Cl-Ca·Na 型过渡到 Cl-Na 型水。

C. r_{Na}/r_{Cl} 比例系数由大变小, 由溶滤水变为海水型。

(三) 地下水同位素组成特征

从上述化学特征来看, 宁波盆地深层承压含水层具有良好的封存条件, 但随着地下水的开采利用, 淡水体逐渐缩小。为了弄清楚淡水体的特征及是否有其它补给来源问题, 我们开展了同位素 ²H、¹⁸O 及 ³H 的研究, 测试结果表示在图 2 中。

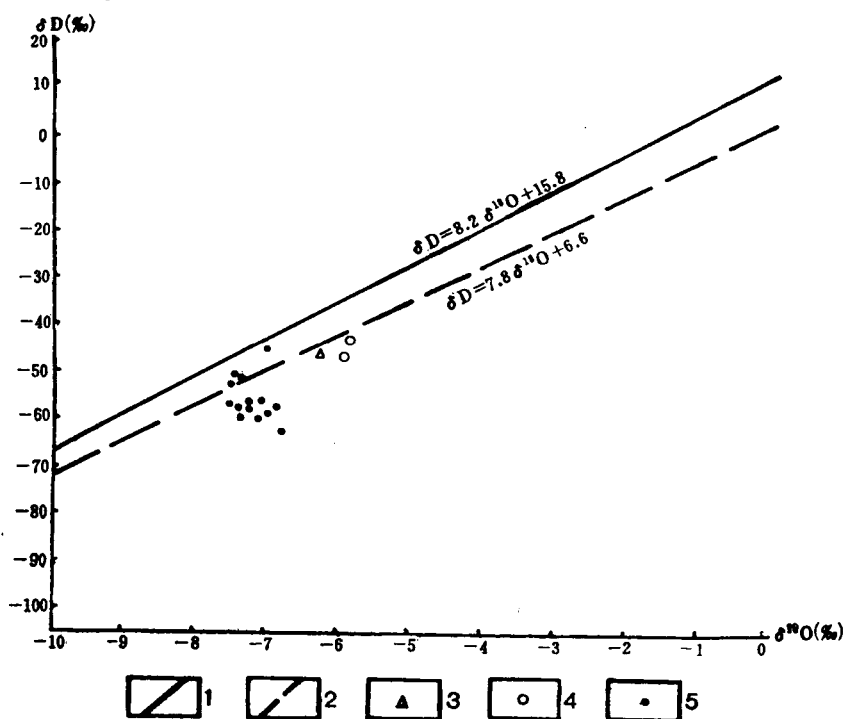


图 2 宁波盆地淡水体、地表水及大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 关系图

(两条雨水线据于津生等, 1987)

Fig.2 Relationship Between $\delta^{18}\text{O}$ and δD in Fresh Groundwater, surface water and precipitation water in Ningbo Basin

1—上海地区雨水线; 2—中国东部地区雨水线; 3—雨水; 4—河水; 5—地下水

从淡水体氡含量结果来看, 淡水体内地下水中现代降雨占有一定的比例。在取样的 16 个地下水点中, 据 J.Ch 丰特的经验估算法估计, 有 4 个水点低于 5 个氡单位, 40 a 前的“古水”成分占优势, 其余水点氡含量 5—30 TU 间, 为新近入渗水与“古水”混合而成; 2 个水点氡含量超过 40 TU, 表明新近入渗水占优势。虽然这些分析是很粗略的, 但至少有一点可以肯定, 就是宁波大型淡水体内地下水并非完全的“封存水”, 已经有一定比例的现代水 (小于 50 a) 补给了淡水体。

由图 2 可知, 宁波淡水体内 16 个水点的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 普遍低于现今大气降水和河水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 。宁波淡水体内的 16 个水点的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围在 -6.87 — -7.48 ‰ 之间, 平均值为 -7.3 ‰; δD 值在 -41.8 — -58.1 ‰ 之间, 平均值为 -54.43 ‰。可见淡水体的 $\delta^{18}\text{O}$ 及 δD 值低于现今大气降水和地表水的 $\delta^{18}\text{O}$ 及 δD 值。从计算的各类水的氡盈余值可知, 降水的氡盈余 d 值为 6.0, 而淡水体的氡盈余 d 值为 3.86, 淡水体的氡盈余 d 值与降水的氡盈余之差为 2.14。这种差值说明大型淡水体主要为古大气降水。

从宁波深埋的第一、二两个含水层的沉积环境变迁历史分析, 这两个含水层中的地下水可能形成于晚更新世初期和中期。因当时海岸线远离宁波平原, 处于淡水沉积环境, 孔隙水为大气降水成因的溶滤水。至晚更新世中期末, 该区经历了一次海侵和海退, 其所形成

的黄色硬土层几乎覆盖了整个平原,其沉积环境是一个冷而干旱的气候环境,这是宁波盆地第四纪期间一次重要的寒冷期。在这一寒冷期内,接受火气降水补给的第一、二含水层的 $\delta^{18}\text{O}$ 及 δD 值应低于现今的大气降水。全新世的大规模海侵侵蚀了平原大部分黄色硬土层。在保留有黄色硬土层的地段的第一、二含水层以淡水透镜体形式保留下来,保持了封存水的特征,其中的 $\delta^{18}\text{O}$ 及 δD 值仍属于“古水”特征。

从淡水体内16个水样分析结果看,在不同位置氟含量变化很大,最低者3.29 TU,最高者可达47.77 TU,由此可见,现代降水补给淡水体的方式很可能是点补式,即可能来自含水层下部基岩或上部天窗。

由此可以推断大型淡水体形成于地质历史时期,而后经过各种地质作用的改造,接受了小量大气降水的补给。因此,可以认为现在大型淡水体是历史时期形成的古水和现代大气降水在淡水体内不同位置以不同比例混合的结果。

三、地下水中铁的地球化学

(一) 宁波盆地地下水中铁的分布

宁波盆地地下水中高含量铁水的分布是很广泛的。不仅在咸水体中铁离子含量高,即使在淡水体范围内多数铁离子的浓度也超过0.3 mg/L。一般铁离子含量为2 mg/L以上,最高者可达100 mg/L。

从平面分布图上可以看出,在局部山前及滨海地区地下水铁离子含量较高,宁波市北滨海地带水动力条件较差,地层内常含有机质,地下水富含铁锰离子,在淡水体中心的三江交汇处铁离子含量较高。

在沟谷内水交替条件好,补给量大,地下水铁锰离子含量低(0.0~0.2 mg/L)。而随着远离山前带,盆地粘土层增厚,水动力条件变差,形成了水文地球化学还原环境,此处地下水富集铁锰。总的分布特点是:在冲积成因有机质贫乏的姜山及局部地区地下水中铁离子<0.5 mg/L, Mn<0.2 mg/L;而在市区南部及局部山前地带:五乡、慈城地区地下水铁离子含量为0.5—5 mg/L, 锰离子为0.2—1.0 mg/L;市区北部和东部、西部山前地带为冲积、海积成因的富含有机质的地层分布,地下水铁离子含量一般>5 mg/L,有时可高达100 mg/L,而锰也多大于1 mg/L。

在垂向上盆地深部地下水中铁的分布具有如下特点:

1. 第一含水层井水中铁离子含量平均为6.5 mg/L,最高为24 mg/L。在第一、第二含水层混合开采的地下水铁离子的含量为10.13 mg/L。最高为17.4 mg/L。而在第二含水层中地下水铁离子的含量较第一含水层的浓度为低,平均为3.57 mg/L,最高为10.7 mg/L。其中铁的存在形式以二价铁离子占优势。

2. 周围咸水段地下水铁离子的含量要比淡水透镜体内铁离子含量高(图3)。在盆地西部咸水分布区,地下水中总铁含量达26—85 mg/L,并且以二价铁离子占优势;在盆地西南沿刻江段萧镇一带,由山间河水渗透补给的下部承压含水层中自上而下铁离子含量呈下降趋势,由15 mg/L降到0.4 mg/L;在盆地东部及东北滨海地带大片地段为总铁高

含量区,由丘隘—团桥一线向东北直到入海的广大地区地下水总铁含量大多超过 40mg/L,最高可达 115 mg/L,且以亚铁离子占优势,此区仍呈现了第一含水层大于第二含水层的特点。盆地外围浅层地下水铁离子含量较低,平均为 0.654 mg/L。而地表水铁离子含量则较高,在三江交汇处铁离子含量为 6.5 mg/L,例如奉化江中铁离子高达 9.7 mg/L。

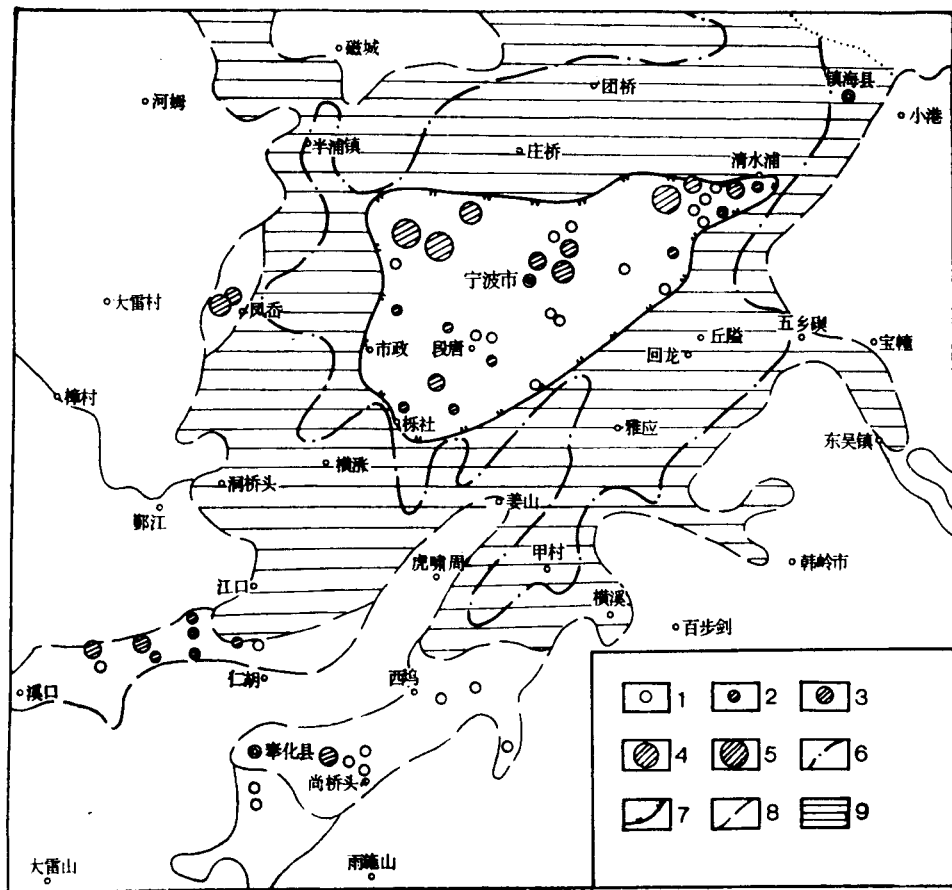


图 3 宁波平原地下淡水总铁含量分布略图

(据浙江水文地质大队, 1977)

Fig. 3 Schematic map of distribution of total iron content in fresh ground water of Ningbo plain

- 1—总铁含量 < 0.3 mg/L; 2—总铁含量 0.3—1 mg/L; 3—总铁含量 1—5 mg/L; 4—总铁含量 5—10 mg/L;
5—总铁含量 > 10 mg/L; 6—第 II 含水层边界; 7—第 II 含水层淡水边界; 8—第 I 含水层边界; 9—咸水段

3. 深部承压含水层中铁的分布在小范围内很不均匀,其主要原因是深部含水层中的水交替条件极差,另在不同地段地层内铁及有机物质的分布不均匀也是含水层内铁分布不均匀的原因之一。但不同的地下水化学环境能够保持相对稳定,因此,相同地段的同一含水层中铁含量相差悬殊,如宁供 47 第一含水层铁(总) 24 mg/L,而相距约 7 km 的宁供 17 则只有 0.12 mg/L;又如奉化周家,浅 11 和浅 12 相距 200m 左右,浅 11 水量小,几乎无铁检出,而浅 12 井水量大,并且可自流,铁离子含量达 7.5 mg/L。图 3 反映了宁波平原地下水总铁含量分布特征。

(二) 地下水铁的成因

宁波盆地为一断陷盆地,第四系厚度约100m,含水层之上覆盖较厚的湖泊,海相粘性土层,地下水循环补给条件较差,构成封闭的还原条件。宁波平原第一、二含水层均为冲积或海积的砂砾和中细砂。含大量的粘性土、泥炭层,上覆的冲湖积粘性土中含有大量的铁锰结核及小量的黄铁矿,并且还有大量的动植物残体、泥炭等。

铁与粘性土矿物伴生是一种十分重要的方式,凭借这种方式铁被河流等地表水流搬运到沉积场所,这种沉积场所在宁波盆地中为淡水环境。附在矿物上的铁质沾染物说明,有大量的三氧化铁沉积,而粘土矿物中的铁也起重要作用。在天然环境中,沉积物中的有机物提供给细菌发育的能源。它们使得铁质进行转移。因此,在宁波盆地,海侵造成的海相环境中,呈非晶质硫化亚铁沉淀的大部分来源则是粘土矿物颗粒上的铁质沾染及晶架内的铁,尤其是在有黑色淤泥发育时更是如此。黑色的氧化亚铁与非晶质硫化亚铁常共生。丰富的有机物和细菌产生强烈的还原条件是铁迁移的有利条件,从而大大加强了铁从围岩不断进入地下水中。另周围山区的火山碎屑岩富含黄铁矿,在长期的地质历史中,在溶解氧和其它化学、生物因素作用下,黄铁矿(FeS)形成可溶的硫酸亚铁(FeSO_4),使铁在水中富集,但铁的硫酸盐易溶解被氧化后则以 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 形式沉淀析出。而在还原环境中,特别是在有机质的参与下,铁的氢氧化物沉淀可以重新转化为二价铁进入水溶液。全新世的海侵,使海相淤泥质亚粘土覆盖在上更新统及部分全新统含水层之上,从而创造了这些转化条件。

四、宁波盆地地下水中微量元素的地球化学特征

宁波盆地为滨海平原,地下水中铁、锰、锶等元素含量较高,铁、锰含量大都超过饮用水水质标准,从而影响了地下水的开发利用。据此我们开展了宁波盆地地下水微量元素的研究,对宁波盆地外围浅层水和盆地中部第四系承压水进行了水化学取样和现场测试工作。

(一) 宁波盆地地下水中微量元素的分布特征

宁波盆地地下水中主要含有铁、锰、锶、锌、铅、钼、铜、铬、镍、钴等元素,其中铁离子含量较高,平均为6.76 mg/L,最高可达17.40 mg/L,锰含量也较高,平均为0.67 mg/L,最高可达2.07 mg/L,此两项均超过饮用水标准。另外,锶的含量也较高,平均1.50mg/L,最高为3.3mg/L,锌的含量仅在个别地区比较高(如五七乡地下水中锌含量高达4.605 mg/L),其它地区均较低。其它元素含量都很低(表3)。

1. 地下水中锰的分布

宁波盆地地下水中锰的含量较高,一般在0.5 mg/L以上。从平面分布来看,其分布与铁相似,以市区三江交汇处和甬江两岸地区地下水中Mn含量较高。从垂向分布来看,第一含水层地下水中锰的含量较高,平均为0.816 mg/L,最高为2.07 mg/L,锰的最高区与铁的最高区是一致的,在回龙鸡场处为最高。第一、二含水层混合水平均含量为0.715 mg/L,最高为0.92 mg/L。第二含水层地下水中锰的浓度较第一含水层为低,但

表 3 地下水化学组分含量变化表

位置	井号	Fe	Fe ³⁺ / Fe ²⁺	Mn	Sr	Cr	Mo	Li	F	Pb	Zn	Cu	Eh (mV)	pH	PO ₄	耗氧量	有机质
基 岩 区	五七	0.088	0.0833	0.10	0.88	0.0	0.0069	0	0.1	0	4.605	0	117.9	7.38		0.58	12.18
	供 62	0.128	3.57	0.06	0.354	0.0	0.0032	0	0.6	<0.005	0.026	0	348.7	7.7		0.64	13.4
淡 水 体 边 缘	98	0.12	3.28	0.50	0.556	<0.05	0.008	0.182	0.8	0.007	<0.001	<0.005	297.7	7.47		2.24	47.04
	99	3.0	1.14	0.10	3.304	<0.05		0.326		0.009	0.03	<0.005		7.24	0.3	2.72	57.12
	150	11	0.833	0.41	1.686	<0.05	0.0003	0		0	0.103	0					
淡 水 体 中 心	116	1.4	0.55	0.16	0.612	<0.05	0.00092	0	0.3	0	0.612	0	100.7	7.21	0.04	2.08	43.68
	供 29	13	3.33	0.16	1.04	<0.05	0.0011	0.076		<0.005	0.12	0.014	81.6	7.5	0.14	20.16	0.96
	145	1.8	5.42	0.13	0.884	<0.05	0.0024	0	0.2	<0.05	2.45	0			0.3	1	21
	宁动 2	2.0	0.176	0.58	1.106	<0.05	0.0011	0	0.2	<0.05	0.198	0	122.2	6.3	0.04	1.0	21
	138	0.24	0.5	0.36	0.618	<0.05	0.00405	0	0.2	<0.005	3.20	<0.005	368.1	7.33	0.6	2.08	43.68
	155	3.0	3/0	0.60	1.386	<0.05	0.0003	0		0	0.296	0			0.1	3.84	80.64
淡 水 体 外 围 河 谷 地 区	N 2	0.052	0.625		0.10	0.0006	0	0	0.1	0.002	0.04	0.007				10.2	4.2
	N 8	0.068	0.307		0.12	0.0	<0.001	0	0.1	0.0018	0.055	0.013			0.16	0.2	4.2
	集 1-2	1.80	0.07	0.06	0.12	0.0	0.0081	0	0.3	0.00032	0.045	0.012			5	0.92	19.32
江水	1	8.08		0.43	0.064	<0.05	0.00071	0		<0.05	0.155	0.023					

(单位: mg/L)

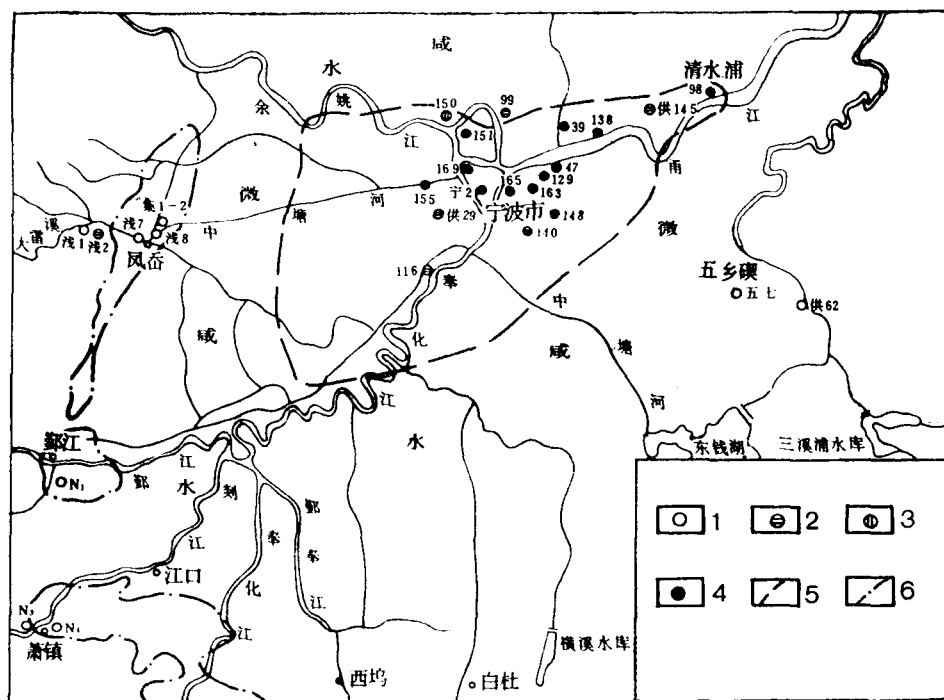


图4 宁波盆地地下水锰含量分布略图

Fig. 4 Schematic map of distribution of manganese content in groundwater of Ningbo Basin

1—锰含量小于0.1mg/L; 2—锰含量0.1—0.3mg/L; 3—锰含量0.31—0.5 mg/L; 4—锰含量大于0.5mg/L;
5—承压淡水界线; 6—浅层淡水界线

也有高值点, 如渔业公司处地下水中锰含量为1.10 mg/L。基岩裂隙水中锰的含量则很低, 平均为0.08 mg/L。外围浅层地下水中锰含量也较低, 其平均为0.059 mg/L (表3、图4)。

2. 地下水中锶的分布

宁波盆地地下水中锶的含量比较高, 平均含量为1.5 mg/L。整个平面分布上, 宁波市区范围内的三江交汇地带即盆地中心地区地下水中锶的含量较高, 而盆地外围则较低。垂向分布: 第一含水层地下水中锶平均含量为1.693 mg/L, 含量最高; 第一、二含水层混合水中锶平均含量为1.592mg/L, 第二含水层地下水中锶含量稍低, 平均为1.217mg/L, 但也有高值点, 高达3.304 mg/L。基岩区裂隙水中锶含量较低, 平均为0.617 mg/L。盆地边缘地带地下水中锶含量最低, 平均含量为0.129 mg/L。宁波地区, 地表水中锶含量较地下水为低, 平均只有0.043 mg/L (图5、表2)。

3. 地下水中锌的分布

宁波盆地地下水中锌的含量较低, 平均为0.414 mg/L, 没有超过饮用水标准。从平面分布来看, 甬江两岸地区地下水中有高锌地带, 含量大于1.0 mg/L, 出现在本区的锌的最高值点为五七井 (为基岩区), 锌含量为4.605 mg/L。宁波市区范围内地下水中锌的含量多大于0.1 mg/L, 较市区外围高 (外围地下水中锌含量一般都小于0.1 mg/L)。从

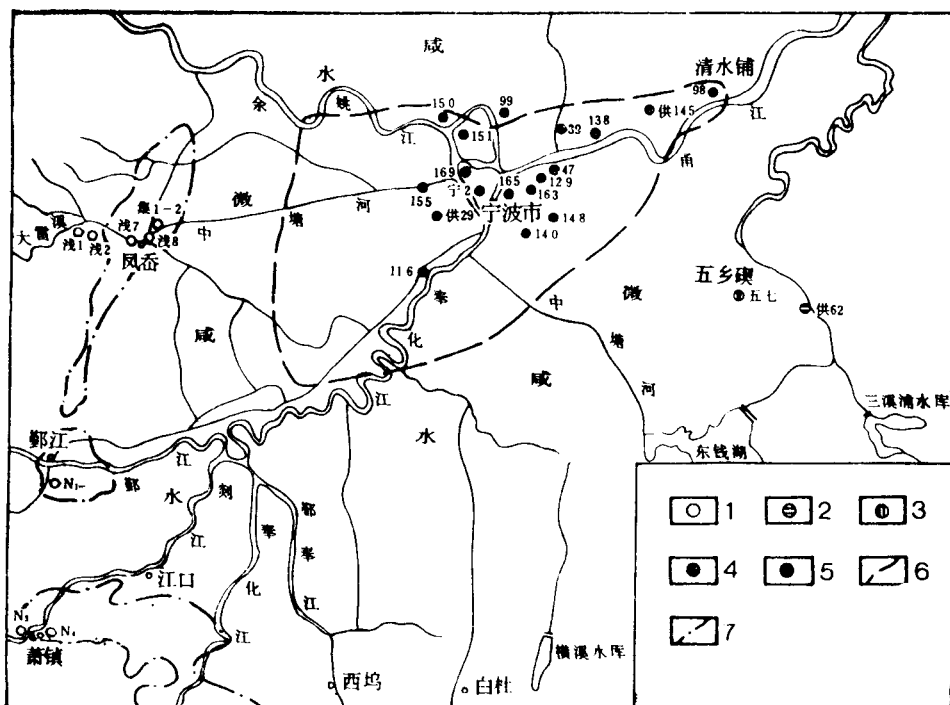


图 5 宁波盆地地下水锶含量分布略图

Fig. 5 Schematic map of distribution of strontium content in groundwater of Ningbo Basin

1—锶含量小于 0.2 mg/L; 2—锶含量 0.2—0.5 mg/L; 3—锶含量 0.51—1.0 mg/L; 4—锶含量 1.1—2.0 mg/L; 5—锶含量大于 2.0 mg/L; 6—承压淡水界线; 7—浅层淡水界线

垂向来看, 第一含水层地下水中锌的平均含量为 0.243 mg/L, 第二含水层地下水中锌的平均含量为 0.218 mg/L, 第一、二含水层混合水中锌含量则较低, 平均为 0.061 mg/L (表 2)。

4. 地下水中铜、铅、铬的分布

宁波盆地地下水中铜的含量较低, 平均为 0.013 mg/L, 市区内地下水中很少有铜检出, 盆地外围地下水中铜含量则更低, 有的较盆地中心部位低一个数量级 (表 2)。

宁波盆地地下水中铅的含量平均为 0.04 mg/L, 市区内地下水水中铅均可检出, 但含量不高, 盆地外围地下水中铅含量较盆地中心部位低, 有的低到 1—2 个数量级 (表 2)。

宁波盆地地下水中铬的平均含量小于 0.5 mg/L, 未超过饮用水标准。盆地中部地下水中铬含量稍高些, 所取样品中均可检出; 而盆地外围地下水中铬含量则很低, 很少检出 (表 2)。

5. 地下水中钼的分布

宁波盆地地下水中钼的平均含量为 0.0013 mg/L。第一含水层地下水中钼的含量最低, 平均为 0.00035 mg/L; 第一、二含水层混合水钼也较低, 平均含量为 0.00097 mg/L; 第二含水层地下水中钼。含量为 0.00268 mg/L; 基岩山区地下水中钼最高, 平均含量可达 0.00509 mg/L。外围地下水中钼的平均含量为 0.00186 mg/L, 地表水为 0.00057 mg/L。

(表2)。

6. 地下水中锂的分布

宁波盆地地下水中锂的含量是很低的, 所取水样中很少被检出。第一承压含水层地下水中锂较低, 一般未检出。第二含水层地下水中锂含量高于第一含水层, 少数井点能被检; 外围地下水中锂含量也很低, 所取水样中只有N₃井中被检出, 为0.01mg/L(表2)。

7. 地下水中氟、钴、镍的分布

宁波盆地地下水中氟的含量较低, 一般多低于0.5 mg/L, 低于饮用水质标准。研究区内地下水中钴、镍含量很低, 所取样品中很少检出(表3)。

(二) 地下水中微量元素的地球化学特征

1. 宁波盆地地下水中微量元素地球化学特征

锰 锰是地壳中仅次于铁的最丰富的重金属, 其在地壳中的丰度为0.1% (维诺格拉多夫, 1962)。锰具有-2到+7价的变价状态, 但在自然界只见有Mn²⁺和Mn⁴⁺, 偶见有Mn³⁺。Mn²⁺是可溶的, Mn⁴⁺是不溶的。在地下水中锰以Mn²⁺、Mn³⁺、Mn⁴⁺形式存在, 但其中以Mn²⁺最为稳定。在酸碱度较低的环境和还原环境下, 锰是可溶的, 而在酸碱度高和氧化条件下, 锰则迅速沉淀。因此, 锰的分布在很大程度上受其价态发生变化的环境条件的影响。地下水的pH值及Eh值, 直接影响水中Mn的迁移性。例如当pH为8—9时, Mn(OH)₂按下式沉淀。



在25℃时, pH值增大一个单位, 锰的氧化物的溶解度减为原来的10⁻²倍, 例如当pH=7时, Mn(OH)₂的溶度积为4 mol/L, 而pH=8时, 其溶度积减少至4×10⁻²mol/L。宁波盆地地下水pH大多在7.21—7.50之间, 属弱碱性环境, 对Mn²⁺的迁移不利。氧化还原电位(Eh值)对锰的迁移是另一个重要的地球化学因素, 它与水的pH值有密切联系, 并且随氢离子指数的改变而变化。因为氧化-还原反应中起主导作用的是决定水中pH的氢离子和OH⁻浓度。在高Eh和pH环境中, 锰趋向进入固相, 形成MnO₂矿物; 而在低pH、Eh的环境条件下, 锰趋向于形成可溶态的Mn²⁺。

应当指出, 尽管Eh与pH条件基本上可以决定锰的化合价和稳定性, 但在自然界还有其他因素, 如络合迁移、胶体迁移以及有机和生物因素的影响而偏离锰的化学平衡理论计算值。例如, 有机物和无机物都可以吸收锰形成各种络合物, 从而强化或延缓锰向固相转移。锰的含水氧化物本身是Mn²⁺和其它阳离子的螯合剂, 它们可促使锰形成络合迁移而增高锰在水中的浓度。宁波盆地地下水有机物含量较高(20—80 mg/L)(见表3), 它们对地下水锰的迁移起着重要作用。因为腐殖酸和生物分泌的一些有机物等可与地下水中锰形成稳定的络合物, 从而增强其抵抗氧化沉淀的能力, 在弱碱水中也不发生锰的沉淀。这种有机络合作用大大增强了锰的迁移性, 使地下水中锰的含量增高。例如宁波盆地地下水pH值在7.21—7.50之间, Eh值也为正值, 在+81.6—+368.1mV之间。按计算理论, 宁波盆地地下水在这样高值的pH及Eh的条件下, 本不应该有可溶态锰的存在。而实际上, 宁波盆地地下水中锰的含量却较高, 达0.2—2.07 mg/L(见表3)。这种事实说明, 宁波盆地地下水中的有机物与锰形成了有机络合物, 使其稳定的在地下水中迁移。