

doi:10.3799/dqkx.2016.041

# 衡水地区咸水层沉积物粒度及氘氧同位素的古气候指示

牛宏<sup>1</sup>, 梁杏<sup>1,2\*</sup>, 李静<sup>1</sup>, 马斌<sup>1</sup>, 葛勤<sup>1</sup>

1. 中国地质大学环境学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学湿地演化与生态恢复湖北省重点实验室, 湖北武汉 430074

**摘要:** 衡水地区的咸水层特征一直备受关注. 为了探讨咸水层分布区的沉积环境与咸水形成期的古气候特征, 利用钻孔(深度130 m)采集了衡水地区咸水层沉积物, 进行了沉积物粒度和粘性土孔隙水氘氧同位素测试. 沉积物粒度标准偏差显示, 剖面上由深至浅, 沉积时期水动力呈由弱到强再到弱的变化趋势, 其中水动力强段为90~65 m, 为厚层砂砾层. 孔隙水 TDS 和 $\delta^{18}\text{O}$ 特征显示在6 m以上受到大气降水和人类活动的影响, 并且主要是以淡水灌溉影响为主. 剖面上粘性土孔隙水的 $\delta^{18}\text{O}$ 在130~90 m平均值为-11.5‰, 65~29 m平均值为-12.1‰, 23~0 m为-10.6‰, 而下部淡水含水层地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 为-9.8‰, 上部咸水含水层地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 为-8.2‰, 粘性土孔隙水 $\delta^{18}\text{O}$ 明显偏负于含水层的地下水, 反映保存记录了古气候信息. 130~90 m,  $\delta^{18}\text{O}$ 先增大后减小反映温度先升高后降低; 65~29 m,  $\delta^{18}\text{O}$ 反映温度偏低的气候特征; 23~0 m,  $\delta^{18}\text{O}$ 相对比较稳定, 总体偏正, 反映了全新世为一个相对较为稳定但较高的温度.

**关键词:** 衡水; 沉积物粒度; 粘性土孔隙水; 氘氧同位素; 古气候.

中图分类号: P532

文章编号: 1000-2383(2016)03-0499-09

收稿日期: 2015-09-13

## Paleoclimate Instruction of Sediment Grain Size and Deuterium-Oxygen Isotope in Saline Stratum of Hengshui

Niu Hong<sup>1</sup>, Liang Xing<sup>1,2\*</sup>, Li Jing<sup>1</sup>, Ma Bin<sup>1</sup>, Ge Qin<sup>1</sup>

1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Key Laboratory of Wetland Evolution & Ecological Restoration, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** The characteristics of saline stratum in Hengshui have always been concerned. In order to discuss the paleoenvironment and the paleoclimate in Hengshui area, grain size and pore water stable isotope ( $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) of clay collected from Hengshui saline stratum (thickness of 130 m) by drilling were analyzed. The standard deviation of sediment grain size shows that the hydrodynamic strength changed from weak to strong and then to weak, there is a deep gravel layer in 90–65 m, which reflects a strong hydrodynamic strength and a humid climate. The TDS and  $\delta^{18}\text{O}$  reflect the affect of atmospheric precipitation and human irrigation above 6 m, specially for the human irrigation. The mean value of  $\delta^{18}\text{O}$  at depth of 130–90 m is -11.5‰, and it is -12.1‰ and -10.6‰ at depth of 65–29 m and 23–0 m. The  $\delta^{18}\text{O}$  of aquifer at 90–65 m is -9.8‰, and -8.2‰ of 29–23 m. The  $\delta^{18}\text{O}$  of clay pore water is negative compared with the aquifer groundwater, reflecting that the clay pore water saves paleoenvironment information. The  $\delta^{18}\text{O}$  at depth of 65–29 m firstly increases and than decreases reflecting the temperature firstly increases and than decreases; the  $\delta^{18}\text{O}$  at depth of 65–29 m reflects a low temperature; the  $\delta^{18}\text{O}$  at depth of 23–0 m is relatively stable, but is positive overall, indicating a warm climate in Holocene.

**Key words:** Hengshui; sediment grain size; clay pore water; deuterium-oxygen isotopes; paleoclimate.

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划“973”项目(No. 2010CB428802); 国家自然科学基金(Nos. 41272258, U1403282).

**作者简介:** 牛宏(1988-), 男, 博士研究生, 主要研究水文地质方向. E-mail: nrg880607@126.com

\* **通讯作者:** 梁杏, E-mail: xliang@cug.edu.cn

**引用格式:** 牛宏, 梁杏, 李静, 等, 2016. 衡水地区咸水层沉积物粒度及氘氧同位素的古气候指示. 地球科学, 41(3): 499–507.

气候是地球环境的重要组成部分,它的变化对海平面、水动力、成壤作用、生物生态和资源形成等具有强烈的影响,研究气候变化特征和揭示气候变化规律对于人类的生存和社会的可持续发展具有重要的意义.对古气候的了解可以增进人们对气候变化的认识,然而比较广泛和可靠的气温测量数据只有大约 150 a,所以只能用一些间接的数据(如地层孢粉、地下水氧同位素、沉积物粒度等)来估算古气温(Hendry and Woodbury, 2007).

粒度直接影响沉积岩与沉积物的物理性能,如可塑性、烧结性、孔隙性及渗透性.因此,粒度分析在区分沉积环境、判定物质输运方式、判别水动力条件和分析粒径趋势等方面具有重要作用(孙永传和李惠生,1986;肖晨曦和李志忠,2006),是衡量沉积盆地能量和沉积介质能量的一种代用指标(曹建廷等,2000;王君波和朱立平,2002),其与沉积环境关系密切,可以反映沉积环境及水动力的变化过程(张建新等,2007;于革等,2007;王心源等,2008;史凯等,2009),并且对古气候古环境的重建具有重大的意义(成都地质学院陕北队,1978;李其华,2003;何华春等,2005).沉积岩性的变化主要受构造和气候变化的控制,构造变动产生新的空间,气候变化引起流域降水等的改变,造成流域水位和水量的变化,使岩心剖面沉积物颗粒发生变化(陈诗越等,2006),因而具有干湿变化的指示意义.从沉积物样品的粒度参数中可以解译出大量气候和环境的演化信息(雷坤等,2006),常常是探究沉积物特征及其古环境一气候意义的第一步骤(王红亚等,2002).

除了沉积物粒度能反映古气候变化,粘性土孔隙水同样具有其特定的指示意义.过去水文地质学家主要研究含水层,对含水层间的粘性土孔隙水研究较少,这里的孔隙水指粘性土中在自身重力作用下不能自由移动的那部分水,如结合水、毛细水、以及封闭的重力水.一定厚度的粘性土层在许多大平原或盆地分布很广,如河北平原第四纪地层中广泛沉积有中厚—巨厚层粘性土(张宗祜,1997;陈宗宇,2009;张光辉等,2010),天然条件下粘性土(包括粉质粘土)渗透性极差,仅为砂类土层渗透性的千分之几甚至万分之几,孔隙水处于滞留状态,保留着形成时期的“古环境”信息(Sacchi *et al.*, 2001).沉积物粒度特征和粘性土孔隙水中氧同位素组成可以作为沉积环境和气候变化的“化石”(Desaulniers *et al.*, 1981; Remenda *et al.*, 1994; Hendry and Wassenaar, 1999; Husain *et al.*, 2004).关于河北

平原晚更新世以来的古气候与古环境的特征和演化过程,前人依据黄土、湖泊、河流及海陆交互相沉积物记录研究,已取得了许多成果(王强和李凤林,1983;王苏民等,1990;安芷生等,1991a, 1991b).

河北平原地下水分布具有明显的分带性,除山前冲洪积平原为全淡水区外,中部平原和滨海平原浅部广泛分布有不同厚度的咸水层.自 20 世纪 70 年代以来,随着河北平原地下淡水资源的超量开采,地下水流场发生了改变,出现了地下咸水对地下淡水资源的入侵,地下淡水资源水质趋于恶化,对宝贵的地下淡水资源构成威胁(张素娥,2010).衡水地区咸水层厚度大,浅部地下水基本没有开采,主要是以开采深层地下水为主,浅层咸水特征一直备受关注.因此,本研究选择河北平原咸水区衡水市利用钻孔采集咸水层的沉积物,通过沉积物粒度和粘性土孔隙水氧同位素特征分析,探讨咸水层分布区的沉积环境与咸水形成期的古气候特征.

## 1 研究区概况与研究钻孔

河北平原为华北平原内黄河以北的地区,南界黄河,北至燕山,西邻太行山,东濒渤海(图 1).地形

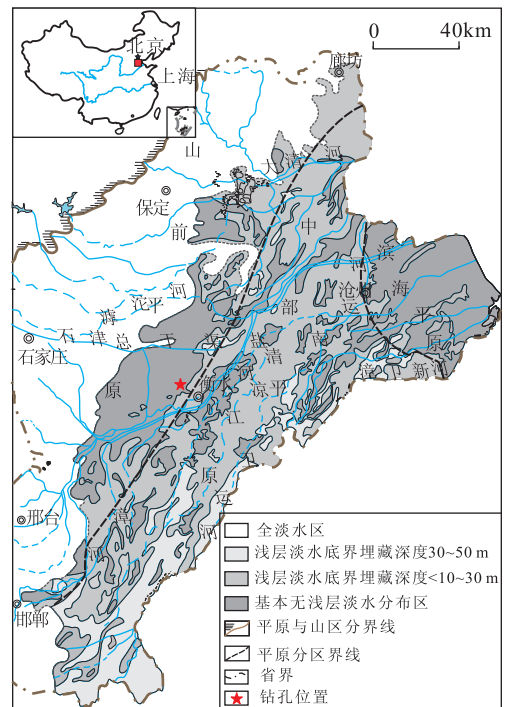


图 1 河北平原分区及钻孔位置

Fig. 1 Study area and locations of the drilling  
据张人权等(2013)

由西、西南向渤海方向倾斜. 全区大致可分为3部分:西部为山前冲洪积平原,海拔小于100 m,地面坡度2‰~1‰;中部为冲积湖积平原,滹沱河、滏阳河、子牙河等主要水系流经其间;东部为滨海平原,坡度0.3‰~0.1‰. 河北平原现代气候干旱,属大陆性半干旱季风气候区,冬季寒冷干燥,夏季炎热多雨. 年平均气温12~13℃,年平均降雨量500~600 mm,年平均蒸发度1100~1800 mm(刘存富和王佩仪,1997). 本区以扭动形成的新华夏系构造体系为主,纬向和经向构造亦有发育,但不甚显著. 新构造活动和现今构造活动比较强烈,主要表现为山地上升和平原区沉降以及频繁的地震活动,并由此控制着微地貌形态和地质环境的变化(张春山等,1995). 由于受不同地质历史时期的古气候、古地理沉积环境及新构造运动等因素控制,河北平原的第四系厚度,在山麓前缘平原地带为200~300 m,广大低平原区为350~500 m,厚者达到550~600 m. 含水岩层在不同深度处的分布形态和发育程度,均存在着差异性,以第四纪沉积物的岩性和水文地质条件为依据,一般将河北平原的第四系含水岩系划分为4个含水层组:第1含水层组包含全新统及上更新统上段;第2含水层组相当于上更新统中下段;第3、第4含水层组分别相当于中更新统及下更新统(陈浩等,2005;张人权等,2013).

据张之淦(1987,图2),河北平原山前平原主要发育局部水流系统(地下水年龄100~200 a);中部平原及滨海平原浅部发育局部水流系统(地下水年龄100~200 a),深部发育区域水流系统(地下水年龄10 000~20 000 a);中部平原(如衡水地区)的咸水主要为大陆盐化的产物(地下水年龄1 000~

2 000 a). 地下水  $\delta^{18}\text{O}$  平均值由表层越往下,值越小(如图中的-8.1‰、-9.1‰、-10.5‰). 根据咸水分布状况,可将河北平原地下水划分为全淡水区和咸水区,二者大致以安次—高阳—束鹿—邯郸—魏县一线为界,其西部为全淡水区,其东部为有咸水区(周炼,1998). 河北平原咸水体自东向西呈楔形,东部厚,向西逐渐变薄,底界面与基底构造有关,隆起区底板埋深60~100 m,拗陷区埋深较大,最深可达220~240 m. 位于河北平原中部的衡水地区,浅层地下水基本没有开采,以深层淡水为主要开采源,是浅层地下咸水分布中心,咸水层 TDS(溶解性固体总量)最高可达15 g/L以上,厚度可达50~100 m(部洪强,2010).

2013年8月在衡水市大屯镇大屯村开展了130 m钻探取样,钻孔经纬度:115°22'16.35"E、37°47'23.25"N,位置如图1所示. 根据钻孔岩性及现场钻探情况可知,该孔包含两个含水层:深度29~23 m,岩性以细砂和中砂为主,地下水 TDS 为8.4 g/L;深度90~65 m,为中砂夹砾石. 本钻孔共取沉积物粒度样品134件,粘性土孔隙水氧同位素样品87件,粘性土孔隙水水化学样品50件.

据高业新(2008)在第四纪年代地层格架基础上,结合地层岩性、测年、古生物、古地磁等多方面资料,建立了衡水地下水综合试验场第四纪地层层序,认为该地区全新世(Q<sub>4</sub>)底界约35 m,晚更新世(Q<sub>3</sub>)延伸至约170 m. 参考衡水地下水试验场地层层序,并结合现场岩性观察,将该钻孔 Q<sub>4</sub> 与 Q<sub>3</sub> 界限定在35 m,所以130~35 m为 Q<sub>3</sub>,以上为 Q<sub>4</sub>.

## 2 孔隙水提取与样品测试

### 2.1 沉积物粒度测试步骤

称取1~2 g样品;加10%的双氧水5~10 mL,泡24 h,至完全去除有机质(若样品有机质含量较高时加热处理);加10%的盐酸30~50 mL,搅拌,浸泡6~8 h,至完全去除碳酸盐;加50~100 mL的蒸馏水搅拌,清洗静置,倒掉上清液,重复2~3遍,直至呈中性;保留泥浆,约10~15 mL. 前处理完成后,送往中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室采用全自动激光粒度仪进行测试.

### 2.2 粘性土孔隙水提取与测试

用于氢氧同位素测试的孔隙水提取采用真空蒸馏法. 该方法利用真空泵实现真空条件,加热装置实现高温状态,为难释水物体中水的快速和完全释放

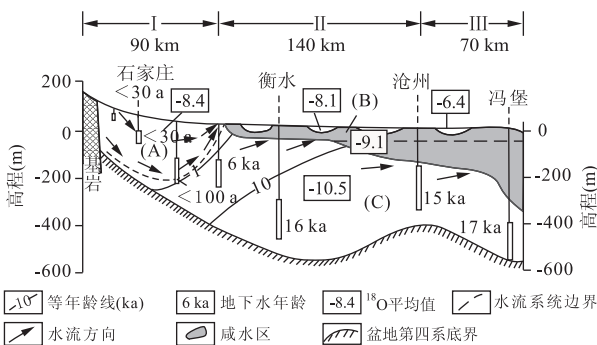


图2 河北平原地下水流系统示意图

Fig. 2 The schematic map of groundwater flow systems in Hebei Plain

据张之淦(1987); A. 扇地局部水流系统; B. 浅层局部水流系统; C. 区域水流系统

表 1 粘性土孔隙水  $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$ Table 1  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  of clay pore water

深度(m)	$\delta\text{D}\%$	$\delta^{18}\text{O}\%$	深度(m)	$\delta\text{D}\%$	$\delta^{18}\text{O}\%$	深度(m)	$\delta\text{D}\%$	$\delta^{18}\text{O}\%$
0.5	-66.8	-8.9	31.0	-93.4	-12.2	83.0	-92.3	-12.5
0.8	-68.3	-9.2	32.0	-87.9	-11.8	91.0	-94.7	-12.8
1.5	-71.1	-9.4	33.0	-76.9	-9.9	92.0	-86.7	-11.4
2.0	-65.7	-8.8	34.0	-107.8	-14.6	93.0	-91.7	-11.7
2.5	-78.1	-10.4	35.1	-75.7	-9.9	94.0	-86.1	-11.3
3.0	-77.1	-10.3	39.0	-97.2	-13.2	95.0	-95.9	-12.5
3.5	-92.4	-12.6	40.0	-74.2	-9.8	99.0	-84.7	-10.5
4.0	-70.1	-9.4	41.0	-96.7	-13.0	100.0	-88.1	-10.7
4.5	-93.6	-12.5	43.0	-90.7	-11.8	101.0	-97.6	-12.5
5.0	-69.8	-9.5	44.0	-86.1	-11.7	102.0	-90.9	-11.7
6.0	-85.8	-11.9	45.0	-84.7	-11.2	103.0	-86.4	-11.0
7.0	-86.8	-11.6	46.0	-90.3	-12.0	104.0	-94.1	-12.3
8.0	-83.3	-11.0	47.0	-95.3	-12.6	105.0	-86.8	-11.4
9.0	-93.5	-12.2	49.0	-92.1	-12.2	106.0	-80.7	-10.6
10.0	-77.4	-10.5	51.0	-79.6	-10.3	109.0	-81.0	-10.6
11.0	-65.9	-8.9	52.0	-85.7	-11.1	110.0	-87.4	-11.4
12.0	-93.5	-12.6	53.0	-96.4	-12.2	111.0	-84.6	-11.2
13.0	-85.9	-11.7	54.0	-102.8	-13.8	112.0	-82.0	-10.7
15.0	-77.3	-10.4	55.0	-86.3	-11.3	113.0	-88.9	-11.9
16.0	-71.1	-9.0	56.0	-96.0	-12.8	114.0	-83.7	-11.0
19.0	-73.6	-9.9	57.0	-96.2	-12.6	115.0	-86.3	-11.5
20.0	-93.6	-12.6	58.0	-80.3	-10.8	117.2	-82.6	-10.9
21.0	-82.6	-10.9	58.8	-88.3	-11.9	118.0	-96.7	-13.3
22.0	-70.3	-9.7	60.0	-100.0	-13.1	119.0	-84.5	-11.6
24.0	-91.5	-12.0	61.0	-104.7	-13.8	120.0	-83.5	-11.3
25.0	-89.3	-11.8	62.0	-87.1	-12.2	123.0	-84.4	-11.5
27.0	-68.9	-9.1	63.0	-90.0	-12.1	124.0	-82.5	-11.2
29.0	-80.8	-10.8	64.0	-104.5	-14.0	125.0	-87.0	-11.9
30.0	-101.9	-13.1	65.0	-88.1	-12.0	129.3	-86.8	-11.7

提供可能. 在真空条件下, 液态水产生的蒸汽压力将爆破被封闭的水, 使其以水蒸汽的形式从样品中释出, 在持续高温真空状态下, 液态水分子将加速蒸发, 避免了环境水蒸气的污染. 在实际实验操作中, 一般粘土样品需要加热 7 h 左右(Li, 2003). 提取工作在中国林业科学研究院荒漠化研究所完成. 提取完成后, 送往中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室采用气体稳定同位素比值质谱仪(MAT-253)进行测试. 粘性土孔隙水氧同位素测试结果如表 1 所示.

用于水化学测试的粘性土孔隙水采用低压机械压榨仪进行提取. 压榨装置由样品室(长 20 cm, 直径 8 cm)、顶盖、可移动活塞和底座组成, 材质为不锈钢. 重力压力装置是根据杠杆原理, 支架轴承作为支点, 设计力臂比为 1:12. 施加的压力由连接双杆传递到活塞再传向沉积物(Reeburgh, 1967; Bricker, 1977); 沉积物受力被压缩变形, 孔隙水则不断被排挤而出. 底座设有交叉的圆形沟槽, 且与沉积物

间附有聚四氟乙烯过滤网和过滤膜. 孔隙水过滤后从中心的导水孔排出, 可收集到干净的可量体积的样品瓶中. 粘性土孔隙水 TDS 和 pH 采用便携式水质分析仪进行测试, 各样品 TDS 大小如图 4.

### 3 粒度特征

#### 3.1 粒度参数

粒度参数是以一定的数值定量地表示碎屑物质的粒度特征. 单个粒度参数及其组合特征可作为判别沉积水动力条件及沉积环境的参考依据. 最常用的粒度参数包括: 平均粒度  $M$ 、标准偏差  $S.D.$ . 粒度参数选用 Blott and Pye(2001)提出的以  $\mu\text{m}$  为单位的矩法进行粒度参数的计算方法:

$$\text{平均值: } M = \frac{\sum fm}{100}.$$

$$\text{标准偏差: } S.D = \sqrt{\frac{\sum f(m-M)^2}{100}},$$

式中: $m$ 和 $f$ 分别代表频率曲线上粒径及其对应的百分含量.按照国家海洋局1975年粒度分级标准,通常以 $63\mu\text{m}$ 和 $4\mu\text{m}$ 作为砂粒/粉粒/粘粒的分界线(国家海洋局,1975).

平均粒径代表粒度分布的集中趋势,即碎屑物质的粒度一般是趋向于围绕着一个平均的数值分布.在实际意义上,它反映了搬运介质的平均动能.标准偏差反映沉积物颗粒的分选程度,即不同粒径颗粒的分散和集中状态,标准偏差数值越大,表示其分选程度越差,反映了较强的水动力条件(王君波和朱立平,2002).

图3所示平均粒径、标准偏差和各粒级百分含量随深度的变化,整个深度上沉积物平均粒径为 $114.7\mu\text{m}$ ,总体偏细,其中粉粒与粘粒总和占80%左右.平均粒径与砂粒百分含量呈同步正相变化,说明平均粒径主要受砂粒含量变化所控制.

### 3.2 沉积物粒度特征

频率曲线特征是判断沉积作用形式的重要手段之一,频率曲线的峰型变化常反映沉积作用形式的

变化.对钻孔沉积物粒度分析可知,该孔基本都是多峰型,占到总样品数的88.9%,单峰和双峰较少,说明沉积物受多种水流作用.根据平均粒径的波动情况,再考虑 $Q_4$ 与 $Q_3$ 界线,把该钻孔在深度上分为4段,具体描述如下:

130~90 m属于 $Q_3$ ,平均粒径 $100.98\mu\text{m}$ ,小于整体平均值.其中95.4~91.9 m为灰黑色粘土,116.8~114.3 m发白,121.8~121.0 m含钙质胶结物.以细颗粒、粉粒为主,反映该阶段搬运介质的平均动能较小,气候偏干旱,其中也包含3段砂层,说明水流强度存在一定的波动.标准偏差波动较大,总体较小反映分选性较好,水动力较弱.

90~65 m属于 $Q_3$ ,平均粒径 $273.95\mu\text{m}$ ,大于整体平均值.65.4~61.5 m底部见砾石,以粗颗粒、砂粒为主,为含水层,反映该阶段搬运介质的平均动能较大,气候偏湿润.标准偏差较大反映说明分选性较差,水动力较强.

65~35 m属于 $Q_3$ ,平均粒径 $76.85\mu\text{m}$ ,35~0 m属于 $Q_4$ ,平均粒径 $64.88\mu\text{m}$ ,这两段粒径都小于整体平均值,以细颗粒、粉粒为主,反映该阶段搬运介质的平均动能较小,气候偏干旱.标准偏差反映分选性较好,水动力较弱.

### 4 粘性土孔隙水特征

如图4所示,上部咸水含水层的地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 为 $-8.2\text{‰}$ ,另外采集了两个附近抽取下部淡水含水层的灌溉井水样,测试 $\delta^{18}\text{O}$ 分别为 $-10.2\text{‰}$ 和 $-9.3\text{‰}$ ,均值为 $-9.8\text{‰}$ .而粘性土孔隙水的 $\delta^{18}\text{O}$ 在130~90 m平均值为 $-11.5\text{‰}$ ,65~29 m平均值为 $-12.1\text{‰}$ ,23~0 m为 $-10.6\text{‰}$ .可见粘性土孔隙水 $\delta^{18}\text{O}$ 明显偏负于含水层的地下水,由于粘性土的低渗透性,粘性土孔隙水保存和记录了古环境信息.

另外,处于含水层中的粘性土夹层(图4中29~23 m的空心三角和空心圆点),其中赋存的孔隙水受到流动地下水的影响较大,已经不适宜用来分析古气候.虽然TDS在上段明显受到影响,但此钻孔两段含水层的粘性土孔隙水 $\delta^{18}\text{O}$ 与其他段差异并不显著,可能是由于此钻孔揭穿的是咸水层,人类基本没有开采,对孔隙水 $\delta^{18}\text{O}$ 影响不大.孔隙水TDS在130~90 m处比较稳定,65 m往上开始增大,最大值出现在19.15 m处,为 $17.94\text{ g/L}$ ,之后开始减小,最小值出现在0.65 m处,为 $2.11\text{ g/L}$ .据部洪强(2010),该地区浅部咸水为 $5\text{ g/L}$ ,而粘性土孔

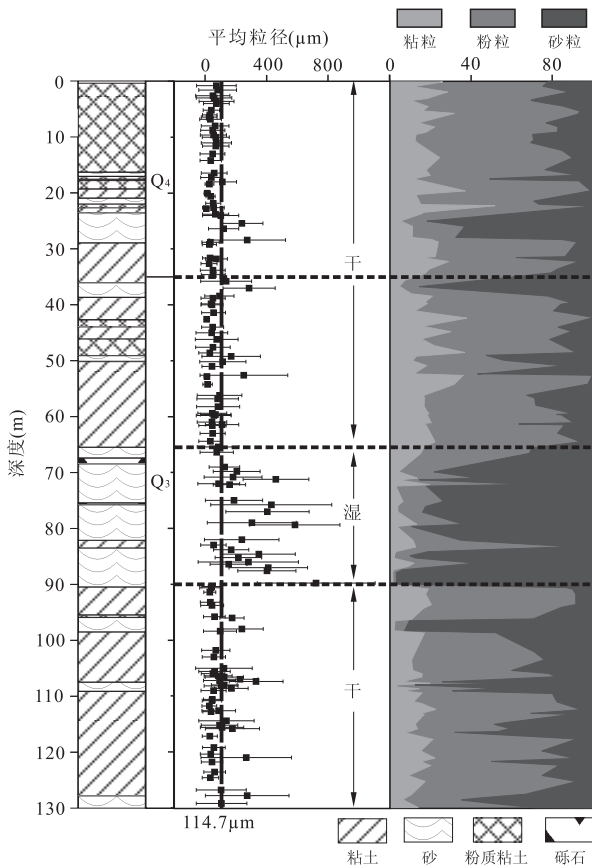


图3 沉积物粒度参数随深度变化

Fig. 3 Parameters of sediment grain size vary with depth  
平均粒径上的误差棒长度表示了标准偏差的相对大小

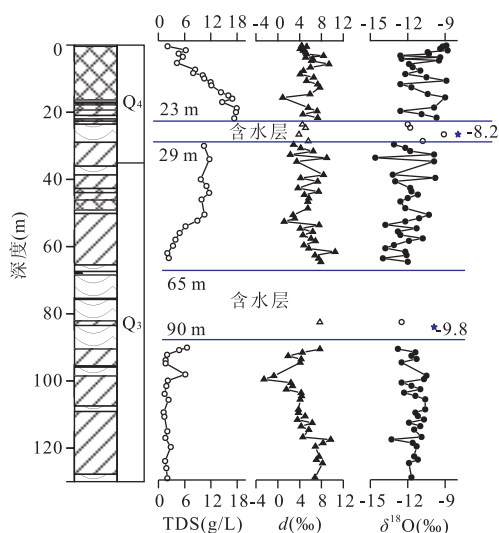


图 4 粘性土孔隙水各参数随深度变化

Fig. 4 Parameters of clay pore water vary with depth

五角星代表本次所测得的含水层地下水  $\delta^{18}\text{O}$  值,空心三角形和圆圈表示处于含水层中的粘性土孔隙水  $\delta^{18}\text{O}$

隙水在 7.65 m 处为 8.69 g/L,5.65 m 处为 4.23 g/L,往上呈波动下降.另外粘性土孔隙水  $\delta^{18}\text{O}$ ,在 6 m 处为  $-11.9\text{‰}$ ,在 5 m 处为  $-9.5\text{‰}$ ,以此为界,6 m 及其以下值普遍偏负,6 m 以上值相对偏正,最浅部接近下部淡水含水层的地下水  $\delta^{18}\text{O}$ ,值为  $-9.8\text{‰}$ .综合考虑 TDS 和  $\delta^{18}\text{O}$ ,认为在 6 m 以上受到大气降水和人类活动的影响,并且主要是以淡水灌溉影响为主.pH 变化区间 7.84~8.70,属弱碱性—碱性水,这也是大陆盐化水的一般特点(沈照理和朱宛华,1993).

## 5 古气候指示

Dansgaard(1964)首先提出利用  $d$  值对全球降水中的氘盈余进行描述,定义  $d$  值计算公式为  $d = \delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$ ,研究表明降水中氘盈余主要受水汽来源地的水体蒸发时周围环境空气相对湿度的影响,温度变化只引起很小的  $d$  的变化.如果相对湿度是 100%,则发生平衡分馏,氘盈余为 0,随着湿度的降低,氘盈余呈线性升高.如图 4 所示从下往上, $d$  值波动较为频繁,其中 130~90 m 深度段, $d$  值先减小后增大,平均值 4.66‰,说明湿度总体增大,后期有所减小(黄天明等,2008);65~29 m 深度段,由深至浅, $d$  值总体呈减小趋势,平均值 2.16‰,说明湿度逐渐增大,与第一含水层出现砂粒对应,湿度较大;23~0 m 深度段, $d$  值较为稳定,平均值为

5.73‰,说明湿度偏小,反映全新世偏干的气候特点.与沉积物粒度从下往上偏干—偏湿—偏干的气候波动分析结果一致,更说明了此处的粘性土孔隙水受后期改造较小,可以作为古气候反演的证据.

粘性土孔隙水  $\delta^{18}\text{O}$  变化特征如下:130~90 m,  $\delta^{18}\text{O}$  平均值为  $-11.5\text{‰}$ ,并且显示了先增大后减小的趋势,反映温度先增大后减小(Dansgaard *et al.*, 1970),但总体偏大.65~29 m,  $\delta^{18}\text{O}$  较小并逐渐增大,平均值为  $-12.1\text{‰}$ ,反映温度较低,但有升高的趋势.此段的孔隙水 TDS 也逐渐增大,反映温度升高,蒸发作用增强,盐分积累.23~0 m,  $\delta^{18}\text{O}$  相对比较稳定,总体偏大,平均值为  $-10.6\text{‰}$ ,反映全新世为一个相对稳定且较高的温度.

## 6 结论

本文重点分析了河北平原衡水地区咸水层的沉积物粒度和粘性土孔隙水氧同位素特征,研究表明该地区粘性土孔隙水保留了封存时的古环境信息,得出以下认识:(1)粒度标准偏差反映,从下往上,水动力由弱到强再到弱的变化趋势,粒度平均值与孔隙水氘盈余都反映气候由偏干到偏湿再到偏干的变化趋势,90~65 m,有一段很深的砂砾层,反映水动力较强,气候相对较为湿润;(2)孔隙水 TDS 和  $\delta^{18}\text{O}$  特征显示在 6 m 以上受到大气降水和人类活动的影响,并且主要是以淡水灌溉影响为主;(3)该钻孔的粘性土孔隙水  $\delta^{18}\text{O}$  明显偏负于地下水,虽然表层受到人类活动影响,但还是保存记录了古环境信息,130~90 m,  $\delta^{18}\text{O}$  先增大后减小反映温度先升高后降低;65~29 m,  $\delta^{18}\text{O}$  反映温度偏低的气候特征;23~0 m,  $\delta^{18}\text{O}$  相对比较稳定,总体偏大,反映了全新世为一个相对较为稳定但较高的温度.

致谢:钻孔取样得到河北地矿工程集团衡水公司的帮助,沉积物粒度和氘氧同位素测试由中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室完成,本文引用参考了部分前人的研究成果,在此一并表示感谢.

## References

- An, Z. S., Wu, X. H., Wang, P. X., et al., 1991a. China's Paleomonsoon in the Recent 130 ka- II. Paleomonsoon Change. *Scientia Sinica Chemica*, (11):1 (in Chinese).  
An, Z. S., Wu, X. H., Wang, P. X., et al., 1991b. China's Paleomonsoon in the Recent 130 ka- I. Paleomonsoon

- Change. *Scientia Sinica Chemica*, (10):1076—1081 (in Chinese).
- Blott, S. J., Pye, K., 2001. GRADISTAT: A Grain Size Distribution and Statistics Package for the Analysis of Unconsolidated Sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(11):1237—1248. doi:10.1002/esp.261
- Bricker, O. P., Matisoff, G., Holder, G. R. Jr., 1977. Interstitial Water Chemistry of Chesapeake Bay Sediments. Basic Data Report No. 9. Department of Natural Resources Maryland Geological Survey, U. S. A.
- Cao, J. T., Wang, S. M., Shen, J., et al., 2000. The Paleoclimate Changes during the Past Millennium Inferred from the Lacustrine Core in Daihai Lake, Inner Mongolia. *Scientia Geographica Sinica*, 20(5):391—396 (in Chinese with English abstract).
- Chen, H., Wang, G. L., Zhang, W., et al., 2005. The Evolution of Groundwater Chemic Character in Hebei Plain. *Earth and Environment*, 33(z1):620—623 (in Chinese with English abstract).
- Chen, S. Y., Wang, S. M., Wu, Y. H., 2006. Sedimentary Cycles and Paleoenvironmental Evolution of the Co Ngoin Lake in Tibetan Plateau since Late Cenozoic. *Acta Geoscientica Sinica*, 27(4):315—322 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Z. Y., Gao, H. Q., Wei, W., et al., 2009. Confined Aquifer in North China Plain. *Resources Science*, 31(3):388—393 (in Chinese with English abstract).
- Dansgaard, W., 1964. Stable Isotopes in Precipitation. *Tellus*, 16(4):436—468. doi:10.1111/j.2153—3490.1964.tb00181.x
- Dansgaard, W., Johnson, J., Clausen, H. B., et al. 1971. Climatic Oscillations Depicted and Predicted by Isotope Analysis of a Greenland Ice Core//First International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions I., U. S. A. 17—22.
- Desaulniers, D. E., Cherry, J. A., Fritz, P., 1981. Origin, Age and Movement of Pore Water in Argillaceous Quaternary Deposits at Four Sites in Southwestern Ontario. *Journal of Hydrology*, 50:231—257. doi:10.1016/0022—1694(81)90072—x
- Gao, H. Q., Fei, Y. H., Luo, G. Z., et al., 2010. Effect Analysis of Saline Groundwater Utilization in Hebei Plain. South-To-North Water Transfers and Water Science & Technology, 8(2):53—56 (in Chinese with English abstract).
- Gao, Y. X., 2008. Study on Groundwater Hydraulic Connection in Different Aquifers under Mass Pumped Conditions in Typical Area North China Plain (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- He, H. C., Ding, H. Y., Zhang, Z. K., et al., 2005. Grain-Size Characteristics and their Environmental Significance of Hongze Lake Sediments. *Scientia Geographica Sinica*, 25(5):80—86 (in Chinese with English abstract).
- Hendry, M. J., Wassenaar, L. I., 1999. Implications of the Distribution of  $\delta D$  in Pore Waters for Groundwater Flow and the Timing of Geologic Events in a Thick Aquitard System. *Water Resources Research*, 35(6):1751—1760.
- Hendry, M. J., Woodbury, A. D., 2007. Clay Aquitards as Archives of Holocene Paleoclimate:  $\delta^{18}O$  and Thermal Profiling. *Ground Water—November—December*, 45(6):683—691.
- Huang, T. M., Nie, Z. Q., Yuan, L. J., 2008. Temperature and Geographical Effects of Hydrogen and Oxygen Isotopes in Precipitation in West of China. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 22(8):76—81 (in Chinese with English abstract).
- Husain, M. M., Cherry, J. A., Frape, S. K., 2004. The Persistence of a Large Stagnation Zone in a Developed Regional Aquifer, Southwestern Ontario. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(5):943—958. doi:10.1139/t04—040
- Lei, K., Meng, W., Zheng, B. H., et al., 2006. Grain Size Distributions of Sediments in the Intertidal Zone on the West Coast of the Bohai Bay. *Marine Science Bulletin*, 25(1):54—61 (in Chinese with English abstract).
- Li, Q. H., 2003. Application of Deposit's Size to Reconstruction of Ancient Environment. *Journal of Chaohu College*, (3):26—28 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C. F., Wang, P. Y., 1997. The Environment Significance of H, O, C and Cl Isotopic Composition in Groundwater of Hebei Plain. *Earth Science Frontiers*, 4(2):267—274 (in Chinese with English abstract).
- Northern Shanxi Team of Chengdu College of Geology, 1978. Sedimentary Rocks (Sediments) Size Analysis and Its Applications. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Reeburgh, W. S., 1967. An Improved Interstitial Water Sampler. *Limnology and Oceanography*, 12(1):163—165. doi:10.4319/lo.1967.12.1.0163
- Remenda, V. H., Cherry, J. A., Edwards, T. W. D., 1994. Isotopic Composition of Old Ground Water from Lake Agassiz: Implications for Late Pleistocene Climate. *Science*, 266(5193):1975—1978. doi:10.1126/science.

266. 5193. 1975

- Sacchi, E., Michelot, J. L., Pitsch, H., et al., 2001. Extraction of Water and Solutes from Argillaceous Rocks for Geochemical Characterisation: Methods, Processes and Current Understanding. *Hydrogeology Journal*, 9(1): 17–33. doi:10.1007/s100400000113
- Shen, Z. L., Zhu, W. H., 1993. Hydrogeochemical Foundation. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Shi, K., Dai, X. R., Shi, Y. X., et al., 2009. Grain-Size Characteristics and their Palaeoenvironmental Significance of SC7 Core Sediments in Lake Chenghu, Jiangsu Province, China. *Journal of Lake Sciences*, 21(5): 741–748 (in Chinese with English abstract).
- State Oceanic Administration, 1975. Area of Marine Survey (Fourth Volumes-Marine Geological Survey). Ocean Press, Beijing, 9–88 (in Chinese).
- Sun, Y. C., Li, H. S., 1986. Sedimentary Facies and Depositional environment of Clastic Rocks. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Wang, H. Y., Shi, Y. C., Yu, P. T., et al., 2002. Alluviums of the Early and Middle Holocene in the Quzhou Area, the Southern Hebei Plain and Palaeoenvironment Inferences. *Quaternary Sciences*, 22(4): 381–393 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. B., Zhu, L. P., 2002. Grain-Size Characteristics and their Paleo-Environmental Significance of Chen Co Lake Sediments in Southern Tibet. *Progress in Geography*, 21(5): 459–467 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q., Li, F. L., 1983. The Changes of Marine-Continental Conditions in the West Coast of the Bohai Gulf during Quaternary. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 3(4): 83–89 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S. M., Wu, R. J., Jiang, X. H., 1990. Environment Evolution and Paleoclimate of Daihai Lake, Inner Mongolia since the last Glaciation. *Quaternary Sciences*, 10(3): 223–232 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. Y., Wu, L., Zhang, G. S., et al., 2008. Characteristics and Environmental Significance of Magnetic Susceptibility and Grain Size of Lake Sediments since Holocene in Chaohu Lake, Anhui Province. *Scientia Geographica Sinica*, 28(4): 548–553 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, C. X., Li, Z. Z., 2006. The Research Summary of Grain Size Analysis and Its Application in the Sedimentation. *Journal of Xinjiang Normal University*, 25(3): 118–123 (in Chinese with English abstract).
- Yang, G. F., Wu, F. D., Chen, Z. H., et al., 2015. *n*-Alkane Distribution and Their Palaeoenvironmental Implications in Fluvial-Lacustrine Sediments in Dengkou, Inner Mongolia. *Earth Science*, 40(2): 327–333 (in Chinese with English abstract).
- Yu, G., Liu, J., Xue, B., et al., 2007. Dynamical Palaeoclimate Simulations. Higher Education Press, Beijing, 137–139 (in Chinese).
- Zhang, C. S., Zhang, Y. C., Hu, J. J., 1995. Evolution of Geological Environment in North Huabel Plain in Historic Times. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 6(2): 12–19 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. H., Fei, Y. H., Yang, L. Z., et al., 2010. Variation Characteristics and Mechanisms of Exploitation Yield Formation in the Region with Confined-Groundwater Depression Cone. *Advances in Water Science*, 21(3): 370–376 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. X., Shen, Z. J., Gu, H. B., et al., 2007. Quaternary Environmental Geochemistry of Dongting Lake Area. Geological Publishing House, Beijing, 124–127 (in Chinese).
- Zhang, R. Q., Liang, X., Jin, M. G., 2013. The Evolution of Groundwater Flow Systems in the Quaternary of Hebei Plain since the last Glacial Maximum. *Earth Science Frontiers*, 20(3): 217–226 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. E., Li, Z. J., Sun, X. F., et al., 2010. Impact of Invasion of Salty Groundwater into Fresh Groundwater in Hebei Province. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 21(1): 26–30 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. H., Shi, D. H., Ren, H. F., 1997. Evolution of the Quaternary groundwater system of the North China Plain. *Scientia Sinica Terrae*, 27(2): 168–173 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, L., Liu, C. F., Wang, P. Y., 1998. Isotopic Composition of Saline Water in Quaternary Aquifers of Hebei Plain. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 25(3): 6–10 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 安芷生, 吴锡浩, 汪品先, 等, 1991a. 最近 130 ka 中国的古季风-I. 古季风记录. 中国科学 B 辑: 化学, (10): 1076–1081.
- 安芷生, 吴锡浩, 汪品先, 等, 1991b. 最近 130 ka 中国的古季风-II. 古季风变迁. 中国科学 B 辑: 化学, (11): 1.
- 曹建廷, 王苏民, 沈吉, 等, 2000. 近千年来内蒙古岱海气候环境演变的湖泊沉积记录. 地理科学, 20(5): 391–396.



- 陈浩,王贵玲,张薇,等,2005.河北平原地下水水化学演化.地球与环境,33(z1):620—623.
- 陈诗越,王苏民,吴艳宏,2006.西藏错鄂湖沉积旋回与古环境变迁.地球学报,27(4):315—322.
- 陈宗宇,皓洪强,卫文,等,2009.华北平原深层地下水的更新与资源属性.资源科学,31(3):388—393.
- 成都地质学院陕北队,1978.沉积岩(物)粒度分析及其应用.北京:地质出版社.
- 郜洪强,费宇红,雒国忠,等,2010.河北平原地下咸水资源利用的效应分析.南水北调与水利科技,8(2):53—56.
- 高业新,2008.华北平原典型地区大规模开采条件下不同层位含水组地下水互动关系研究(博士学位论文).北京:中国地质科学院.
- 国家海洋局,1975.海洋调查范围(第四分册—海洋地质调查).北京:海洋出版社,9—88.
- 何华春,丁海燕,张振克,等,2005.淮河中下游洪泽湖湖泊沉积物粒度特征及其沉积环境意义.地理科学,25(5):80—86.
- 黄天明,聂中青,袁利娟,2008.西部降水氢氧稳定同位素温度及地理效应.干旱区资源与环境,22(8):76—81.
- 雷坤,孟伟,郑丙辉,等,2006.渤海湾西岸潮间带沉积物粒度分布特征.海洋通报,25(1):54—61.
- 李其华,2003.沉积物粒度在古环境重建中的应用.巢湖学院学报,(3):26—28.
- 刘存富,王佩仪,1997.河北平原地下水氢,氧,碳,氯同位素组成的环境意义.地学前缘,4(2):267—274.
- 沈照理,朱宛华,1993.水文地球化学基础.北京:地质出版社.
- 史凯,戴雪荣,师育新,等,2009.苏州澄湖 SC7 孔沉积物粒度特征及其古环境意义.湖泊科学,21(5):741—748.
- 孙永传,李惠生,1986.碎屑岩沉积相和沉积环境.北京:地质出版社.
- 王红亚,石元春,于澎涛,等,2002.河北平原南部曲周地区早、中全新世冲积物的分析及古环境状况的推测.第四纪研究,22(4):381—393.
- 王君波,朱立平,2002.藏南沉错沉积物的粒度特征及其古环境意义.地理科学进展,21(5):459—467.
- 王强,李凤林,1983.渤海湾西岸第四纪海陆变迁.海洋地质与第四纪地质,3(4):83—89.
- 王苏民,吴瑞金,蒋新禾,1990.内蒙古岱海末次冰期以来的环境变迁与古气候.第四纪研究,10(3):223—232.
- 王心源,吴立,张广胜,等,2008.安徽巢湖全新世湖泊沉积物磁化率与粒度组合的变化特征及其环境意义.地理科学,28(4):548—553.
- 肖晨曦,李志忠,2006.粒度分析及其在沉积学中应用研究.新疆师范大学学报(自然科学版),25(3):118—123.
- 杨桂芳,武法东,陈正洪,等,2015.内蒙古磴口河湖相沉积物正构烷烃分布特征及其环境意义.地球科学,40(2):327—333.
- 于革,刘健,薛滨,等,2007.古气候动力模拟.北京:高等教育出版社,137—139.
- 张春山,张业成,胡景江,1995.华北平原北部历史时期地质环境演化.地质灾害与环境,6(2):12—19.
- 张光辉,费宇红,杨丽芝,等,2010.深层水漏斗区开采量组成变化特征与机制.水科学进展,21(3):370—376.
- 张建新,申志军,顾海滨,等,2007.洞庭湖区第四纪环境地球化学.北京:地质出版社,124—127.
- 张人权,梁杏,靳孟贵,2013.末次盛冰期以来河北平原第四系地下水流动系统的演变.地学前缘,20(3):217—226.
- 张素娥,李志军,孙先锋,等,2010.河北省地下咸水对地下淡水资源入侵影响分析.地质灾害与环境,21(1):26—30.
- 张宗祜,施德鸿,任福弘,等,1997.论华北平原第四系地下水系统之演化.中国科学 D 辑:地球科学,(2):168—173.
- 周炼,刘存富,王佩仪,1998.河北平原第四系咸水同位素组成.水文地质工程地质,25(3):6—10.