

# 莱州湾南岸潍河下游地区咸水入侵灾害成因及特征

刘恩峰<sup>1,3</sup>, 张祖陆<sup>2</sup>, 沈吉<sup>1</sup>, 宋俊峰<sup>4</sup>

(1. 中国科学院 南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008 2. 山东师范大学 地理系, 山东 济南 250014  
3. 中国科学院 研究生院, 北京 100039 4. 内蒙古自治区地质调查院, 内蒙古 呼和浩特 010020)

[摘要] 通过对莱州湾南岸咸水入侵较严重地潍河下游地区晚更新世以来沉积特征及现代自然环境条件变化的分析, 探讨了沉积相对咸水入侵产生及空间范围特征的环境机理。晚更新世以来的三次海平面升降变化造成了潍河下游地区海陆沉积环境交替, 形成了巨厚的海陆交互相沉积层。海进时期, 大面积的滨海平原被淹没, 在近海平原洼地滞留的海水经过蒸发、浓缩变为卤水, 成为咸水入侵的物源; 海退后陆源碎屑在滨海地区沉积形成了巨厚的古河道砂层。20世纪70年代末期以来, 随着对地下淡水的过度开采, 淡咸水头压力差减小, 卤水通过古河道砂层快速南侵。通过对潍河下游地区100余个地质钻孔水化学连续监测资料分析, 阐明了咸水入侵的特征, 有针对性地提出了咸水入侵的防治措施。

[关键词] 潍河下游地区; 环境演变; 咸水入侵; 变化特征

[中图分类号] P66 [文献标识码] A [文章编号] 1672-6561(2004)03-0078-05

[作者简介] 刘恩峰(1976—), 男, 山东德州人, 中国科学院博士研究生, 现从事沉积学、环境灾害学研究工作。

咸水入侵是一种典型的环境灾害<sup>[1~3]</sup>, 位于莱州湾南岸潍河下游的滨海平原是中国典型的咸水入侵区。20世纪70年代末期以来, 随着经济的快速发展, 地下水过度开采, 出现大面积、层位复杂的咸水入侵, 1980~2000年, 咸水入侵面积达303 km<sup>2</sup>。咸水入侵使水质恶化, 造成工农业生产和人畜饮水困难, 特别是土壤中的Cl<sup>-</sup>含量增高, 土壤生态肥力降低, 土地资源退化, 使生态环境、植物群落逆向演替, 成为阻碍区域经济发展的主要因素<sup>[4]</sup>。20世纪80年代以来, 随着咸水入侵灾害的加剧, 采取了许多防治措施<sup>[5]</sup>, 但是由于对咸水入侵原因及特征缺乏深入地了解, 许多措施效果并不明显, 亦不可能从根本上防治咸水入侵。笔者通过对莱州湾南岸潍河下游地区晚更新世以来古环境演变、现代环境变化及人类活动方式的分析, 探讨了莱州湾地区咸水入侵产生的原因及入侵特征, 对有针对性地防治咸水入侵、合理开发利用地下水资源有重要意义。研究区西至虞河, 东至胶莱河, 南为潍河冲—

洪积扇顶(双台—南逢—宋庄), 北至莱州湾, 行政区以昌邑市为主, 总面积约1 000 km<sup>2</sup>(图1)。第四纪以来受间歇性凹陷沉降的控制, 沉积层厚度由南向北由30~40 m变为300余米, 地形起伏较缓和, 坡降小, 为河湖广布的平原地貌<sup>[6~7]</sup>。

对研究区内100余个地质钻孔资料进行了分析整理, 孔深平均30~70 m, 最深为120 m, 并对典型钻孔粒度、岩性、沉积相及年代数据进行分析。2000年, 在咸淡水过渡带上钻取A1~A5五个沉积岩心, A1, A5孔钻取深度分别为80 m, 100 m, A2~A4孔深30 m, A1~A5孔均作为后期水化学监测孔。根据A1, A5孔岩心岩性特征, 按0.5~1.5 m间隔取样, 对上部样品粒度、有孔虫及沉积年代等指标进行测试, 分别于1993, 1995及2000年进行了地下水野外调查, 选取典型剖面作为地下水动态监测网。

## 1 咸水入侵产生的原因

### 1.1 晚更新世以来的沉积环境演变

根据钻孔沉积学及生物学特征, 结合已有研究成果<sup>[1,6,8~9]</sup>, 潍河下游地区晚更新世以来的沉积受第四纪冰期气候的控制。晚更新世以来本地区发

[收稿日期] 2003-09-28  
[基金项目] 山东省自然科学基金重点资助项目(Z2000E01); 中国科学院南京地理与湖泊研究所知识创新项目

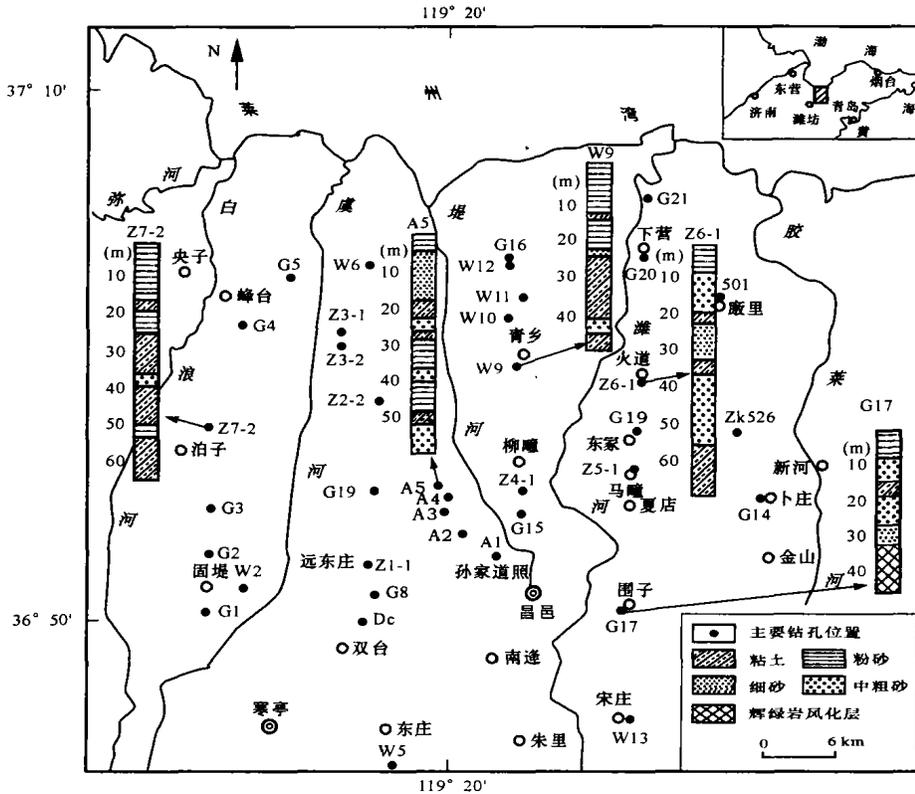


图1 研究区主要钻孔分布及典型钻孔剖面

Fig. 1 Spatial distribution of main well and lithofacies profiles of five typical well

生了3次海平面升降变化,海侵期为河流相及海相沉积,海退期以河流相沉积为主,形成了海陆交互沉积层。

(8.5~7.4)×10<sup>4</sup> a B.P. 发生第一次海侵,在莱州湾南岸称为“羊口海侵”,相当于渤海西岸的“上沧州海侵”,海侵范围较小,潍河以东大于以西地区,沉积物主要为黄褐色或黄褐-灰白相间的粉砂、中细砂。

(4~2.4)×10<sup>4</sup> a B.P. 的晚更新世中期,为上亚间冰期气候<sup>[1]</sup>,发生了本区晚更新世以来规模最大的“广饶海侵”。根据沉积物岩性及粒度判断,海岸线在远东庄—孙家道照—刘家庄—马疃一带,沉积物为黄褐-浅黄色粉砂、细砂,埋深15~45 m。

根据A1、A5孔有孔虫组合及<sup>14</sup>C测年,结合其他钻孔岩性分析,全新世海侵开始于1.0×10<sup>4</sup> a B.P. 之前,称为“垦利海侵”,比渤海西岸海侵((0.8~0.7)×10<sup>4</sup> a B.P.)<sup>[10]</sup>早(0.2~0.3)×10<sup>4</sup> a。(0.65~0.6)×10<sup>4</sup> a B.P. 为海侵最盛时期,海岸线在孙家道照—夏店—卜庄一带,至0.4×10<sup>4</sup> a B.P. 海水已完全退出本区,此期海侵沉积物为青灰-灰白色粉砂、细砂,埋深6~13 m。

海退期,为河流相沉积,形成埋藏古河道。晚更新世中、早期古河道厚度大,连通性好,沉积物为中粗砂或细砂,晚更新世晚期及全新世古河道厚度小,沉积物为细砂或粉砂<sup>[8]</sup>。古河道沉积在潍河以东、以西存在差异,潍河以东砂层(粒径>63 μm,以下相同)累计厚度为30~50 m,在40~60 m之间连通性好,40 m以上砂层间有多层砂质粘土或粘质砂土隔水层,厚度变化较大。潍河以西古河道埋藏浅,砂层累计厚度<20 m,30 m以下砂层连通性较好。海陆交互沉积在潍河下游地区形成了由南向北缓倾,砂砾层和粘土、粉砂层相间叠置的巨厚沉积层。

莱州湾南岸海陆相交交互沉积及冷暖气候交替有利于卤水的形成、储存<sup>[6,9,11]</sup>。海平面的升降变化引起了近岸沉积物的分异,成为卤水形成、储存的地质基础。陆相河流沉积形成的古河槽以及古河道沉积物海侵期储存了大量的海水,海退时干冷的气候环境,海水蒸发、浓缩,并沿古河道砂层下渗、聚集,形成高浓度的地下卤水。与三期海侵相对应,可分为三个成卤期,相应形成了下层承压卤水、上层承压卤水及潜水卤水层,卤水体在潍河以

东地区厚度及面积都大于淮河以西地区<sup>[9]</sup>。卤水的埋藏层位与古河道砂层基本一致,且与南部冲-洪积山前平原地下水保持较好水力联系。

## 1.2 现代人类活动对自然环境及咸水入侵的影响

本区现代地貌为山前平原,地势南高北低,平均坡降 0.52/1000,由南向北主要地貌类型依次为山前冲-洪积平原、冲积-海积平原和海积平原<sup>[11]</sup>;东西方向上受河流堆积作用的控制,河流带和古河道带略高,其间形成众多洼地,有利于地表水的下渗。但莱州湾地区为暖温带半湿润季风气候,年均降水量 650 mm,集中在 6~8 月份,多年平均蒸发量为 1 800 mm,降水量远小于蒸发量。20 世纪 70 年代后期至 80 年代降水明显减少,严重干旱;90 年代以来,降水量虽有所增加,但仍然远不能满足全区水资源量的需求<sup>[12]</sup>。地表水资源主要依靠天然降水,客水注入较少。淮河为区内最大的河流,多年平均入海径流量  $13.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[6]</sup>。由于上游峡山水库的拦截,近年水量减少,成为季节性河流,且污染严重。

淮河下游地区为重要的农业区,由于地表水资源缺乏,农业用水多以地下水为主,20 世纪 70 年代中期以前,井深一般 < 10 m,对地下水开采量较小,地下水系统处于天然的动态平衡<sup>①</sup>;70 年代末以来,随着工农业经济的发展以及干旱程度的加重,地下水开采量增大,并由浅变深。1960~1990 年,地下水累计超采  $2.11 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>②</sup>,过量的开采导致淡水区水位下降,压力减小,地下水动态平衡完全遭到破坏,形成了以寒亭区和昌邑市区为中心的地下淡水降落漏斗。1992 年漏斗面积已扩展到 300  $\text{km}^2$ ,0 m 水位线逐渐向卤水区移动。80 年代初期,昌邑漏斗北缘 0 m 水位线在昌邑市以北约 4 km;1985 年,0 m 水位线位于柳疃附近<sup>①</sup>;2000 年,0 m 水位线北移至柳疃以北 6~8 km,已接近卤水分布区南界。地下水降落漏斗降低了淡-咸水水头压力,成为咸水入侵的诱因。

由于咸淡水过渡带上晚更新世以来的地层沉积具有多旋回性,盲目的打井,破坏了咸淡水之间的隔水层,导致不同含水层大范围的水质交换,形成咸水的越流入侵,加重了咸水入侵的程度。在没有大量客水补给的形势下,最终将形成咸淡水变化区内浅层咸水向南侵染,受侵染的水又在深层向北部深层淡水区补给的环流局面,结果咸水面积扩展,深度加大。

## 2 咸水入侵特征

### 2.1 咸水入侵面积不断扩展

咸水入侵过程中,引起水质变化最明显地是  $\text{Cl}^-$  的含量。根据本区的实际情况,将地下水中  $\text{Cl}^-$  浓度 250 mg/L 作为咸水入侵的指标<sup>[13]</sup>。20 世纪 80 年代以前,咸水入侵速度较缓<sup>[6]</sup>,80 年代以来,为咸水入侵快速发展及严重恶化阶段<sup>[14]</sup>。80 年代初期,咸水入侵年增长 10  $\text{km}^2$  左右;80 年代中后期,随着地下淡水资源超采量的加大,淡水降落漏斗面积扩展,深度加大,咸水入侵年增长 20  $\text{km}^2$ ;进入 90 年代以来,降水量相对增加,采取了部分咸水入侵防治措施,咸水入侵有所减缓。1980~1995 年,咸水入侵面积 254  $\text{km}^2$ ,年均 17  $\text{km}^2$ 。截止到 1995 年,研究区内咸水区面积已达 713  $\text{km}^2$ ,占到研究区总面积的 71%,占整个昌邑市面积的 40%。1995~2000 年,咸水入侵面积年增长 < 10  $\text{km}^2$ ,咸淡水界线已接近冲-海积平原的南界(图 2)。

### 2.2 古河道砂层成为咸水入侵的主要通道

地质历史上,咸淡水过渡带相对稳定不动,由水位差引起的向海渗流与由盐分浓度差引起的向陆弥散间达到平衡。随着南部淡水降落漏斗深度加大,面积扩展,淡水水头减小,在水动力及水化学作用下,卤水沿古河道强透水层,以对流、扩散、弥散等方式侵染淡水区。在用水集中的古河道发育区入侵快,水质变化轻缓,形成了宽 2~4 km 的水质过渡带, $\text{Cl}^-$  的含量为 200~3 000 mg/L<sup>[13,15]</sup>;而现代河床受河水的顶托,咸水入侵受阻,入侵程度远不如河谷两侧地带,水质变化率陡(见图 2)。

受沉积特征、人类活动强度等因素的影响,在剖面上咸淡水界面多呈参差交错状。淮河以东水质为二元结构<sup>[8~9]</sup>,上淡下咸,咸淡水界面埋深 30 m 左右,以承压卤水入侵为主。如 1993 年 Z5-1 孔 46~64.5 m 的  $\text{Cl}^-$  浓度为 22 688 mg/L,而 24 m 以上的  $\text{Cl}^-$  浓度为 207 mg/L。古河道透水层(埋深 40~60 m)主要以中粗砂、细砂为主,连续性好,北部地区存在高浓度地下卤水体(承压卤水),在地

① 山东省地质矿产局第二水文地质工程地质大队. 山东省莱州湾南岸淮河下游地区海(咸)水入侵勘查报告. 1993

② 山东省水文水资源勘测局. 山东省地下水资源开发利用规划.

1998

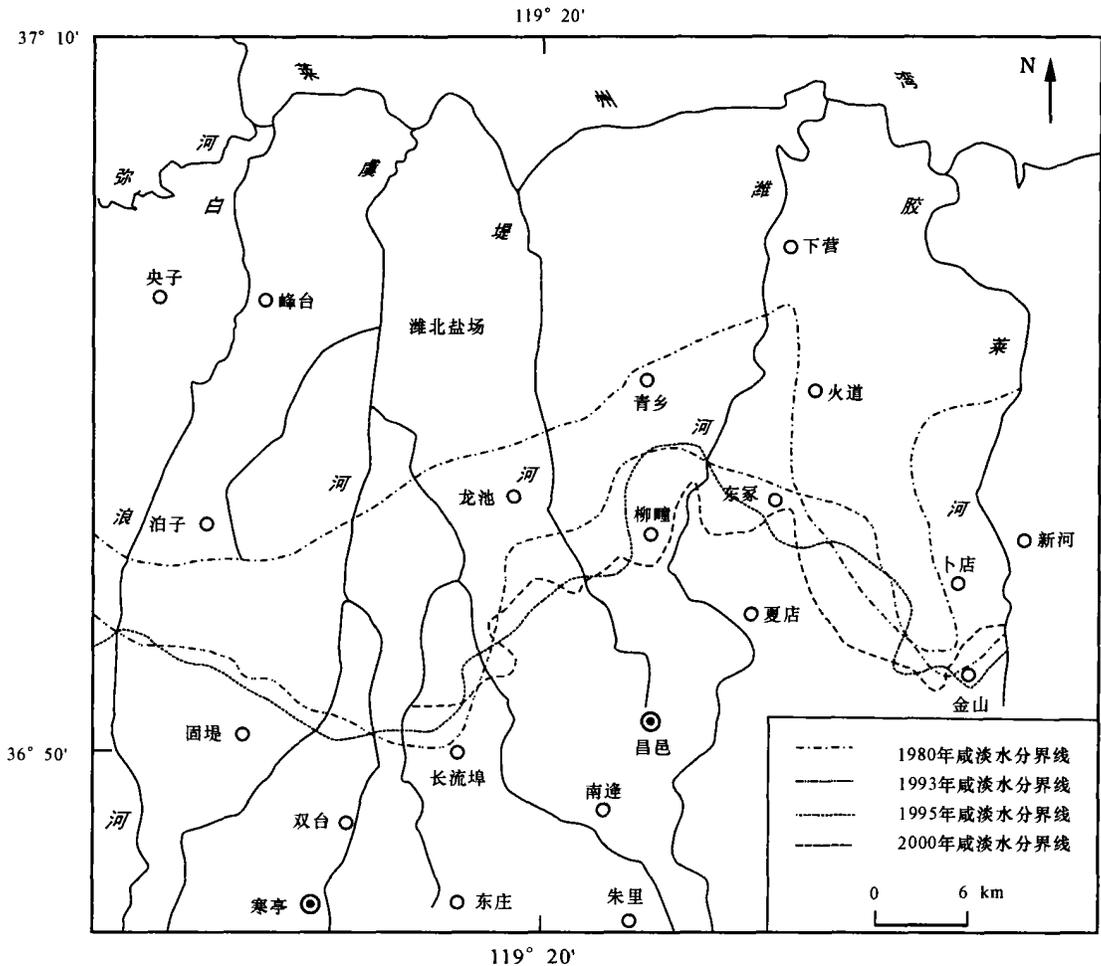


图2 研究区咸水入侵界线

Fig. 2 Demarcation lines at different periods of salt-water intrusion

下水大规模开采(1980年)以前,承压卤水已沿古河道下部强透水层侵入南部淡水区,咸淡水界线明显向南突出。20世纪80年代以来,潍河以东地区经济发展落后于潍河西部,对地下水的开采量较小,而且咸淡水界线以南沉积物厚度、粒度逐渐减小,淡水水头增大,咸水入侵较缓。同时由于北部廆里盐场对地下卤水的不断开采,卤水水头压力减小,也减缓了咸水入侵。

而潍河以西地区,水质为淡-咸-淡三元结构<sup>[8-9]</sup>,以上层承压卤水的楔状入侵为主,上界面埋深15~30 m,下界面埋深约50~100 m,由南向北逐渐加深。1995年Z2-2孔32~52.2 m, Cl<sup>-</sup>浓度为53 042 mg/L,表层水(10~24 m)Cl<sup>-</sup>浓度为2 540 mg/L。潍河以西透水层(埋深>30 m)沉积物以细砂、粉砂为主,厚度较小,透水性较差,在淡水水头压力作用下,70年代末期以前,咸淡水界面维持在靠海一侧。70年代末期以来,地下淡水大量开采,

淡水水头减小,地下水动态平衡遭到破坏,咸水沿古河道透水层大范围快速入侵。在昌邑-龙池古河道发育带上<sup>[8]</sup>,入侵距离为8 km;东冢-下营古河道发育带上<sup>[8]</sup>,入侵距离为12 km。咸淡水过渡带上盲目的打井,破坏了隔水层,导致不同含水层大范围的水质交换,加重了咸水入侵的程度。

### 3 咸水入侵的防治措施

从以上分析可以看出,地下淡水水位下降是本区20世纪70年代末期以来咸水入侵的主要诱导因素,因此根据本区的自然环境、水文地质条件及咸水入侵特点,应有针对性地实施咸水入侵防治工程,合理有效地利用有限的淡水资源。

#### 3.1 加强用水管理,调整产业结构

加强用水管理,严格控制地下淡水开采量,是防治咸水入侵的根本措施。农业用水约占总用水

量的 80% 以上, 根据寿光市的经验, 如果节水 20%, 地下水位将回升 30%~50% 左右<sup>[19]</sup>。本区经济水平相对落后, 如采用其他地区改大水漫灌为低压管道灌溉或喷灌的模式, 投资大, 与当地经济水平不相适应, 因此应从产业结构调整入手。在咸水入侵重灾区, 以调整食物链结构为突破口, 建立适合区域生态特点的农牧渔林良性循环的生态系统, 建立盐业牧草带和浅海滩涂养殖带, 在充分利用盐业资源的基础上, 发展畜牧业, 改良土壤; 对灾害威胁区, 及时调整产业结构和水资源利用方向, 发展节水型农牧业和工业; 在淮河上游南部山区以绿化和涵养水源为出发点, 发展生态农业。

### 3.2 拦蓄补源工程

本区自然环境与水文地质条件决定了该地区水资源十分贫乏, 古河道透土层即是淡水含水层, 又是咸水入侵的主要通道, 枯水期咸水入侵快, 丰水期入侵较缓。全区降水集中, 河流短而且流急, 水资源平均拦蓄利用率低, 仅 15% 左右<sup>[3]</sup>, 雨季大部分水流入海洋, 拦蓄潜力很大。在河流上游地区加固现有的峡山水库, 下游修建平原水库, 枯水季节利用废弃的机井、古河槽洼地回灌地下水, 可有效地储存淡水, 抬高淡水漏斗区水位, 减缓咸水入侵。

### 3.3 调整井灌体系, 封闭咸水层

20 世纪 80 年代对地下水的掠夺式开发, 咸淡水过渡带上绝大多数井报废, 废弃机井成为咸水越流入侵的主要通道。因此, 应首先清理废弃机井, 封闭咸水层, 咸淡水过渡区, 严格控制深度超过 100 m 的机井, 保护深层淡水资源。

## 4 结论与讨论

咸水入侵是一种水文地质环境灾害, 晚更新世以来的海陆环境交替沉积形成的卤水是本区咸水入侵源, 陆相古河道沉积体成为咸水入侵的通道。70 年代末期以来对地下淡水超采, 淡水水位下降, 水头压力减小, 打破了咸淡水的动态平衡, 卤水在水头压力作用下不断向淡水区侵染, 是咸水入侵的直接原因; 盲目打井, 破坏了隔水层, 加速了咸水入侵。淮河以东、以西沉积特征及人类活动的差异导致了咸水入侵方式的不同, 淮河以西沉积物粒度小、连通性差, 淮河以东沉积物粒度粗、连通性好, 在自然状态下, 淮河以东地区北部承压卤水已沿 40~60 m 古河道南侵, 即 1980 年的咸淡水界面, 80 年

代以来入侵速度较缓, 过渡带为上淡一下咸二元水文地质体; 在人类活动的干扰下, 淮河以西 80 年代以来发生上层承压卤水大面积的入侵, 过渡带形成淡一咸一淡三元水文地质体, 咸淡水界线已达晚更新世以来的最大海侵南界。

治理咸水入侵应以开源节流为出发点, 以产业结构调整为突破口, 抬高淡水水位, 恢复咸淡水的动态平衡。有效地治理咸水入侵, 可改善生态环境, 促进本区经济的发展。

### [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] 赵德三, 尹泽生, 张祖陆, 等. 山东省沿海区域环境与灾害 [M]. 北京: 科学出版社, 1992
- [ 2 ] Melloul A J, Goldenberg L C. Early-indicator signals of groundwater contamination: the case of seawater encroachment [J]. *Environmental Geology*, 1998, 33(4): 279~288
- [ 3 ] Chiocchini U, Gisotti G, Macioce A, et al. Environmental geology problems in the Tyrrhenian coastal area of Santa Marinella province of Rome, central Italy [J]. *Environmental Geology*, 1997, 32 (1): 1~8.
- [ 4 ] 韩美. 山东省莱州湾地区海水入侵对社会与经济的影响 [J]. *自然灾害学报*, 1997, 6(1): 82~87.
- [ 5 ] 胡政, 冯志泽, 何钧, 等. 山东省莱州湾地区海水入侵灾害及其综合防治 [J]. *自然灾害学报*, 1995, 4(1): 104~109.
- [ 6 ] 韩有松, 孟广兰, 王少青, 等. 中国北方沿海第四纪地下卤水 [M]. 科学出版社, 1996
- [ 7 ] 王守春. 历史时期莱州湾沿海平原湖沼的变迁 [J]. *地理研究*, 1998, 17(4): 423~428.
- [ 8 ] 聂晓红, 刘恩峰, 张祖陆. 淮河下游地区浅埋古河道沉积与第四系地层划分 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2001, 21(4): 89~93
- [ 9 ] 韩非, 薛禹群, 吴吉春, 等. 莱州湾南岸咸水入侵条件下地下水的水化学特征与卤水形成 [J]. *地质论评*, 2001, 47 (1): 102~108.
- [ 10 ] 王绍鸿. 莱州湾西岸晚第四纪海相地层及其沉积环境的初步研究 [J]. *海洋与湖沼*, 1979, 10(1): 9~22.
- [ 11 ] 王珍岩, 孟广兰, 王少青. 渤海莱州湾南岸第四纪地下卤水演化的地球化学模拟 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2003, 23(1): 49~53.
- [ 12 ] 邓惠平, 李爱贞, 刘厚凤, 等. 气候波动对莱州湾地区水资源及极端旱涝事件的影响 [J]. *地理科学*, 2000, 20(1): 56~60.
- [ 13 ] 张祖陆, 彭利民. 莱州湾东、南沿岸海(咸)水入侵的地下水化学特征 [J]. *中国环境科学*, 1998, 18(2): 121~125
- [ 14 ] 庄振业, 刘冬雁, 杨鸣, 等. 莱州湾沿岸平原海水入侵灾害的发展进程 [J]. *青岛海洋大学学报*, 1999, 29(1): 141~147.
- [ 15 ] 薛禹群, 谢春红, 吴吉春, 等. 海水入侵、咸淡水界面运移规律研究 [M]. 南京: 南京大学出版社, 1991.
- [ 16 ] 赵德三. 咸水入侵综合防治寿光示范区建设研究 [M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1996

(下转第 87 页)

## Study on the climatic changes between the last interglacial age and the last glacial age recorded by ostracoda in eastern Qaidam Basin

JING Min-chang<sup>1</sup>, YANG Ge-lian<sup>1</sup>, SUN Nai-da<sup>2</sup>

(1. *Dpt. of Earth Sciences, University of Petroleum, Beijing 102249, China;*

2. *Dpt. of Geography, Capital Normal University, Beijing 100083, China)*

**Abstract:** The Quaternary deposits of the Qaidam Basin are abundant in Ostracoda whose combination can be used to study the evolution of the climate because of their sensitivity to the climatic changes. There are two main Ostracoda *Ilyocypris inemis* and *Cyprideis torosa* which occupied above 90 percent of total Ostracoda abundance in upper well Dacan1 located in the southeast basin. The abundance curve of these two Ostracoda shows that during the last interglacial age the Qaidam Basin has undergone three warmer periods, 5e, 5c and 5a, and two colder periods, 5d and 5b, indicated by higher and lower abundances respectively. During the last glacial age the Qaidam Basin has undergone three steps—the early glacial step, the interglacial step and the late glacial step. The interglacial step can be divided into two warmer periods, 3c and 3a, and one colder period, 3b. These stages can be correlated with other climatic records and demonstrates that the climatic change of the Qaidam Basin has the same characteristics as that of globe.

**Key words:** last interglacial age; last glacial age; climatic change; quaternary period; ostracoda; Qaidam Basin

[英文审定: 杨家喜]

(上接第 82 页)

## Origin and characteristics of salt-water intrusion disaster in the downstream of Weihe River on the south coast of Laizhou Bay

LIU En-feng<sup>1, 3</sup>, ZHANG Zu-lu<sup>2</sup>, SHEN Ji<sup>1</sup>, SONG Jun-feng<sup>4</sup>

(1. *Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;* 2. *Geography Dept. of Shandong Normal University, Jinan 250014, China;* 3. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences,*

*Beijing 100039, China;* 4. *Institute of Inner Mongolia Geological Survey, Hohhot 010020, China)*

**Abstract:** As one of the typical environmental disasters at south strand plain in Laizhou Bay, occurrence, development and variation of salt-water intrusion have close relationship with paleo-environmental evolution since Late Pleistocene, and with modern environmental change and human activities. There were three times of sea-level fluctuation corresponding to the paleo-climate evolution, which had formed the sediments of alternative sea and river facies. The alternative changes of paleo-environment favored the formation and imbedding of brine, which is the source of salt-water intrusion; and the paleochannel that formed during regressive of sea level is the path of salt-water intrusion. Large scale salt-water intrusion has been occurred since late 1970's due to freshwater exploitation by human activity. The genesis and variation characteristics are suggested on the basis of the analysis of typical groundwater hydro-chemical section monitoring, geographical prospection data and hydro-chemical analysis from more than 100 geological cores.

**Key words:** the lower reaches of Weihe River; environmental change; salt-water intrusion; variation characteristics

[英文审定: 苏生瑞]