

苏锡常地区浅层地下水 $r\text{Na}/r\text{Cl}$ 特征及其成因初探

刘立才^{1,2} 陈鸿汉³ 杨 仪⁴ 王金生¹

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 北京市水利科学研究所, 北京 100044;

3. 中国地质大学(北京)水资源与环境工程北京市重点实验室, 北京 100083

4. 江苏省地质工程勘察院, 江苏 南京 210012)

摘要: 本文从苏锡常地区浅层地下水含水介质及包气带沉积环境的角度, 阐明了浅层地下水中 Cl^- 和 Na^+ 浓度东高西低的分布特征。根据数据分析, 浅层地下水中 Na^+ 与 Cl^- 的毫克当量比值 $r\text{Na}/r\text{Cl}$ 与海侵形成的沉积环境和沉积历史关系密切。地下水淡化历史越长, 含水层介质中吸附的 Na^+ 与地下水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 之间的阳离子交换吸附程度越高, 大量的 Na^+ 进入地下水中, 使得 $r\text{Na}/r\text{Cl}$ 比值越高。

关键词: 浅层地下水; 沉积环境; 海侵; 淡化; 阳离子交换吸附

中图分类号: X143 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2008)01-0117-06

地下水中普遍含有钠离子和氯离子, 它们的来源主要有三个方面: 一方面来自水岩相互作用下岩石中钠、氯成分在地下水中的溶解; 另一方面来自人类活动产生的污染物; 最为重要的是, 在三角洲沿海地区, 地下水中的 Na^+ 和 Cl^- 与地质历史时期的海侵有着密切的联系。尤其是第四纪更新世以来, 间冰期的数次海侵对第四系松散地层地下水中的 Na^+ 和 Cl^- 有着较大的影响。以长江三角洲苏锡常平原区浅层地下水为研究对象, 阐述了地下水中 Cl^- 和 Na^+ 的浓度空间分布, 以及 $r\text{Na}/r\text{Cl}$ 比值与水岩相互作用之间的内在联系。

1 浅层地下水含水层及其包气带岩性介质

苏锡常地区的浅层地下水并非赋存于同一个含水层中。常州、无锡地区浅层地下水含水层为上更新统上段潟湖相沉积的灰黄色粉细砂, 含水层上覆土层岩性为上更新统上段河湖相沉积的棕黄色

硬粘土(图 1)。该区全新统粘土层基本缺失, 局部地区零星分布且厚度很薄。与常州、无锡地区不同, 苏州地区浅层地下水含水层大部为全新统地层(图 1), 昆山、吴江大部分地区浅层地下水含水层为全新统潟湖、湖沼相的淤质粉质粘土, 在吴江市北部局部地段则为上更新统的棕黄色粉质粘土; 张家港、常熟、太仓沿江一线, 浅层地下水含水层的岩性为全新统滨海、海湾相沉积的灰黄色粉细砂, 上覆地层岩性为全新统河流泛滥相沉积的灰色粉质粘土。

2 Cl^- 和 Na^+ 空间分布特征及影响因素

2.1 空间分布特征

为研究苏锡常地区浅层地下水的水质状况, 2003 年初, 在该区选取了 86 个取样点并采样分析。为查明中小城镇浅层地下水的水质状况, 选取了张家港以北沿江地段及常州溧湖北部地段的农业区进行取样分析。

根据水质测试结果, 可绘制出苏锡常地区浅层

收稿日期: 2007-06-20; 改回日期: 2007-08-01

基金项目: 科技部国际科技合作项目(2006DFA21180)和中国地质调查局地质大调查项目(200310400046)共同资助。

作者简介: 刘立才, 男, 1973 年生, 博士生, 主要从事地下水资源环境研究工作; E-mail: llc1021@126.com。

通讯作者: 陈鸿汉, 教授, 博士生导师, E-mail: chenhh@cugb.edu.cn。

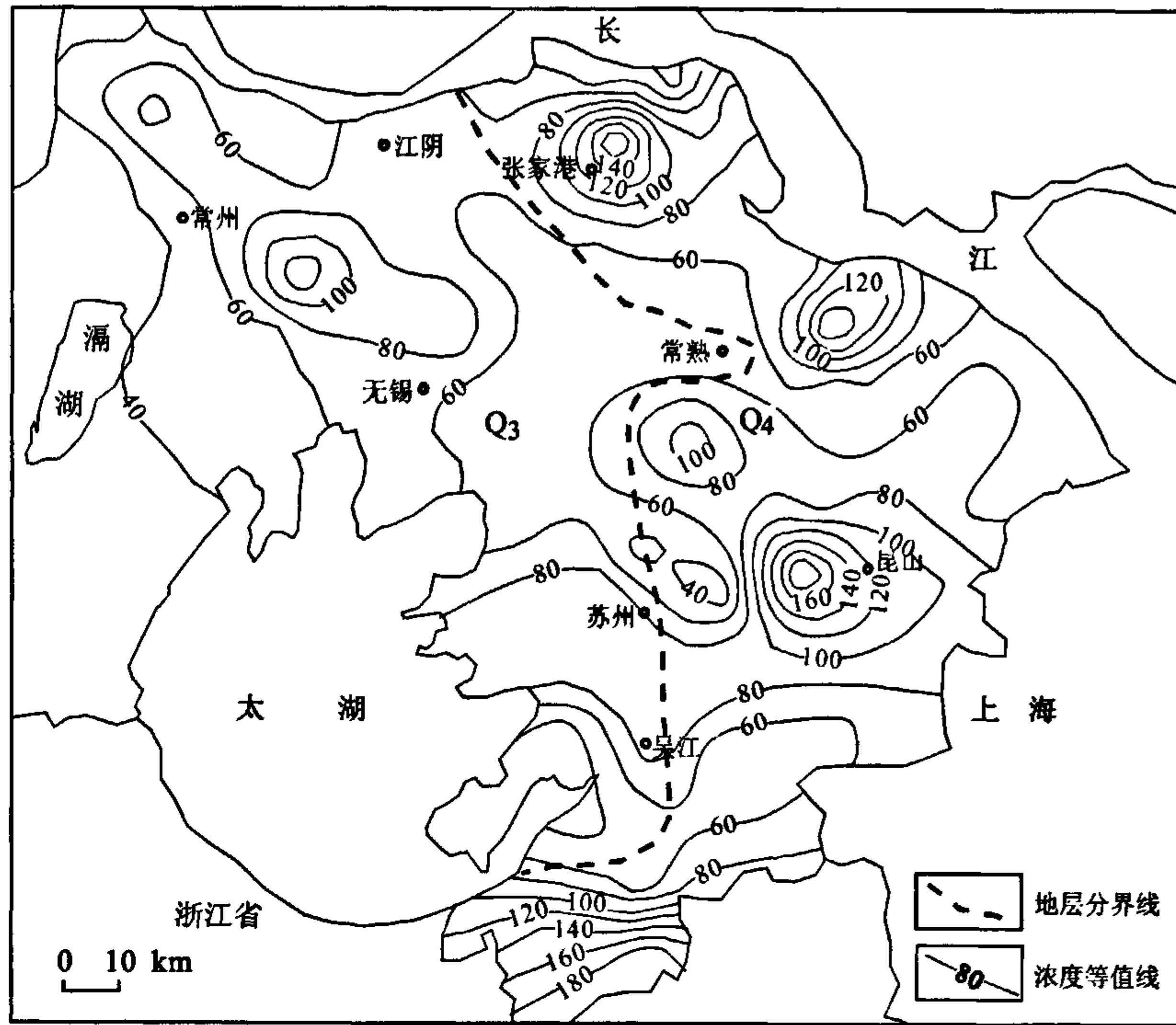


图1 浅层地下水氯离子浓度等值线

Q₃—上更新统; Q₄—全新统;

Fig.1 Contours of the chloride ion concentration in shallow groundwater

Q₃—Upper Pleistocene; Q₄—Holocene

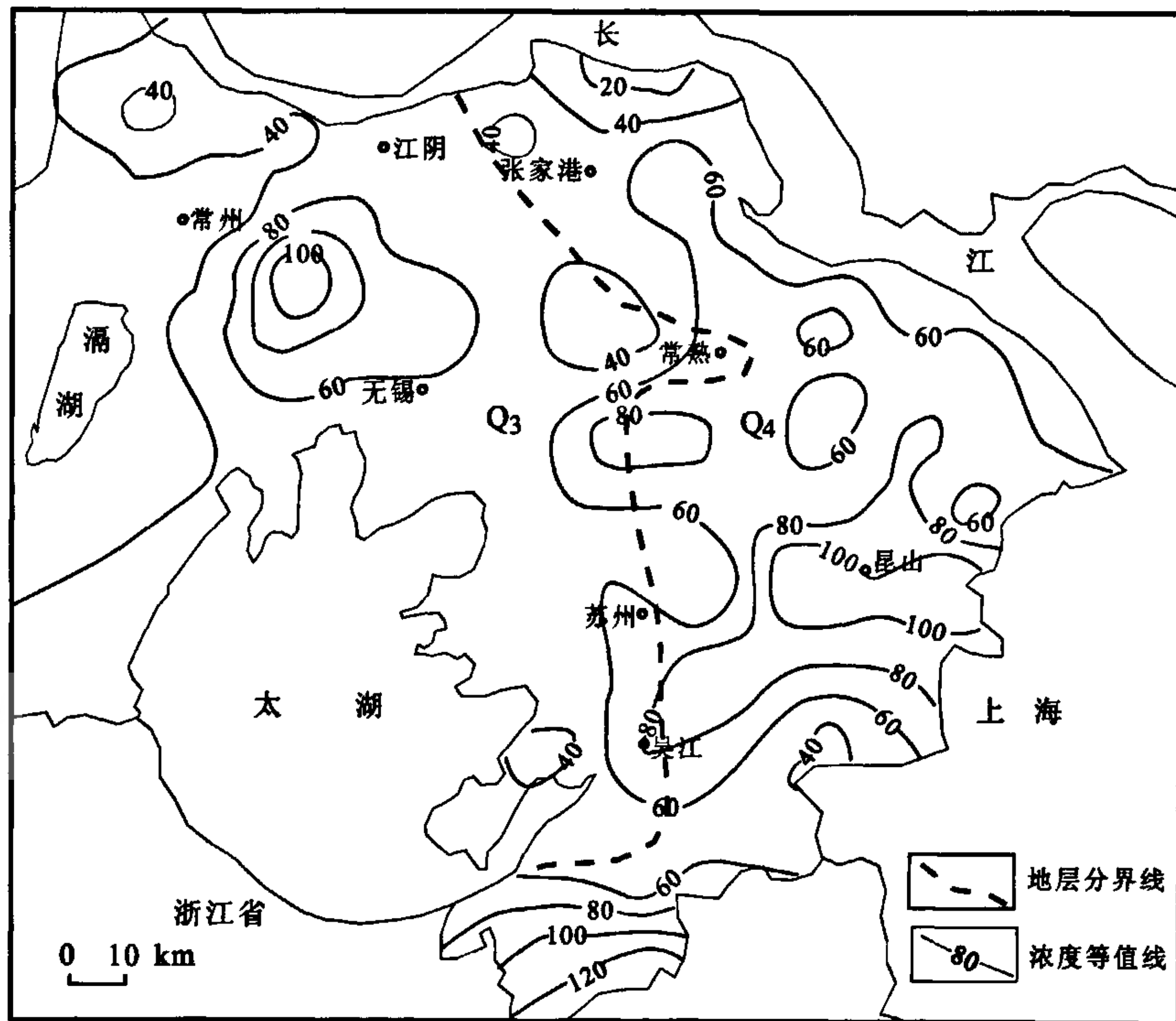


图2 浅层地下水钠离子浓度等值线

Fig.2 Contours of the sodium ion concentration in shallow groundwater

地下水 Na^+ 、 Cl^- 浓度等值线图(图 1~2)。从图上可以看出,张家港、常熟沿江地区和昆山、吴江地区的 Cl^- 浓度较高,大部分地区高于 80 mg/L,而无锡、常州地区的 Cl^- 浓度较低,一般小于 80 mg/L,东西部的 Cl^- 浓度差异非常显著。浅层地下水中的 Na^+ 浓度与 Cl^- 浓度的空间分布基本一致,也表现出东部较高、西部较低的分布规律。

2.2 影响因素

苏锡常地区浅层地下水 Na^+ 、 Cl^- 浓度的空间分布是多种因素综合影响的结果,与沉积年代和沉积环境、包气带地层岩性以及人类活动有关。

2.2.1 沉积年代和沉积环境的决定作用

长江三角洲地区曾经历过 5 次海侵,在第四系中存在海侵沉积相。苏锡常地区浅层地下水含水层的沉积形成受第 IV 次及第 V 次海侵的影响^[4]。无锡、常州地区浅层地下水含水层属于晚更新世第 IV 次海侵滨海潟湖相沉积。沿江地区浅层地下水含水层属于第 V 次海侵滨海、海湾相沉积层。昆山、吴江地区处于全新世期间第 V 次海侵范围的边缘地带,受第 V 次海侵的波及影响,浅层地下水含水层为潟湖、湖沼相沉积。已有资料表明在太仓、昆山和吴江的局部地区,浅层地下水中存在片状微咸水。

无锡、常州地区上更新统硬粘土层经历了成土作用,许多原始特征已在成土过程中受到不同程度的改造,成为古土壤,在地质历史时期长期淋滤和末次冰期地下水水位升降的作用下,包气带中盐分含量很低^[2-5];且无锡、常州地区浅层地下水含水层形成于晚更新世,淡化历史长,地下水中的 Na^+ 、 Cl^- 浓度较低;而苏州地区浅层地下水含水层及其上覆地层形成于全新世,未经历成土作用。一方面,水质淡化历史相对较短;另一方面,含水层及其上覆土层中的盐分含量较高,在降雨、河流入渗及地下水位升降的过程中,不断进入地下水,故浅层地下水中的 Na^+ 、 Cl^- 浓度相对较高。

根据古地理研究土层采样分析,上更新统上段的硬粘土层与上覆全新统海相地层中 Cl^- 的含量呈突变关系。 Cl^- 的含量在全新统海相层中一般大于 0.2%,在上更新统的硬粘土层中,其含量基本小于 0.1%,且自上而下有不断减少的趋势^[6]。

可见,苏锡常地区浅层含水层及包气带的沉积年代和沉积环境是引起区域上 Na^+ 、 Cl^- 浓度东高西低的决定因素。

2.2.2 包气带地层岩性的影响

常州、无锡地区浅层地下水的包气带为上更新统上段的粘土层,致密坚硬,可塑性极强,粘粒含量高,粒径小于 0.001 mm 的粘粒含量一般在 30%以上,有的层位可达 40%,浅层地下水的防污性能强,地下水对地表污染源的敏感性较差,不易被污染;而苏州地区浅层地下水的包气带岩性为粉质粘土,粘粒含量低,可塑性较差,地下水的防污性能较差,相比而言,地下水易受污染。因此,浅层地下水的防污性能对 Na^+ 、 Cl^- 浓度空间分布有一定的影响。

2.2.3 人类活动的影响

苏锡常地区浅层地下水是一个开放系统,接受河网和大气降雨的补给,地表污染物在渗透补给作用下也会进入地下水中。苏锡常是工农业发达地区,工农业散落分布,地表污染源对地下水的污染大小难以引起 Na^+ 、 Cl^- 浓度东高西低的空间趋势性分布。地表污染源对地下水的影响是局部的,由浓度等值线可见,在常州、无锡的局部地点,也存在浓度高值点。

由此可见,虽然苏锡常地区浅层地下水中的 Na^+ 、 Cl^- 浓度受地层岩性和工农业活动的影响,但东、西部浅层地下水含水层及其上覆土层沉积年代和沉积环境的差异是引起区域上 Na^+ 、 Cl^- 浓度东高西低的主要原因。

3 rNa/rCl 特征及其成因

受全新世海侵的影响,沿江地区和昆山、吴江地区浅层地下水中的 Cl^- 浓度较高;而受晚更新世晚期海侵影响的常州、无锡地区浅层地下水中的 Cl^- 浓度相对较低。与 Cl^- 一样, Na^+ 浓度的空间变化规律同样也与海侵和淡化历史有密切的关系。根据区域浅层地下水 86 个水样点的水质资料,可利用散点图刻画 Na^+ 浓度与 Cl^- 浓度的相关性,如图 3 所示,二者呈显著线性正相关,相关系数为 0.81。

同受海侵影响,因上更新统浅层地下水的淡化历史较长,其水质浓度应低于全新统浅层地下水水质浓度。根据苏州、张家港地区 27 个采样点和常州太湖地区 23 个采样点的水质资料,可利用数理统计学中两样本假设检验方法检验二者之间水质的差异性(表 1)。据表 1,二者之间除 Na^+ 浓度平均值相近、无显著差异性外,张家港浅层地下水中 Cl^- 等其他组分浓度平均值均明显高于太湖区。

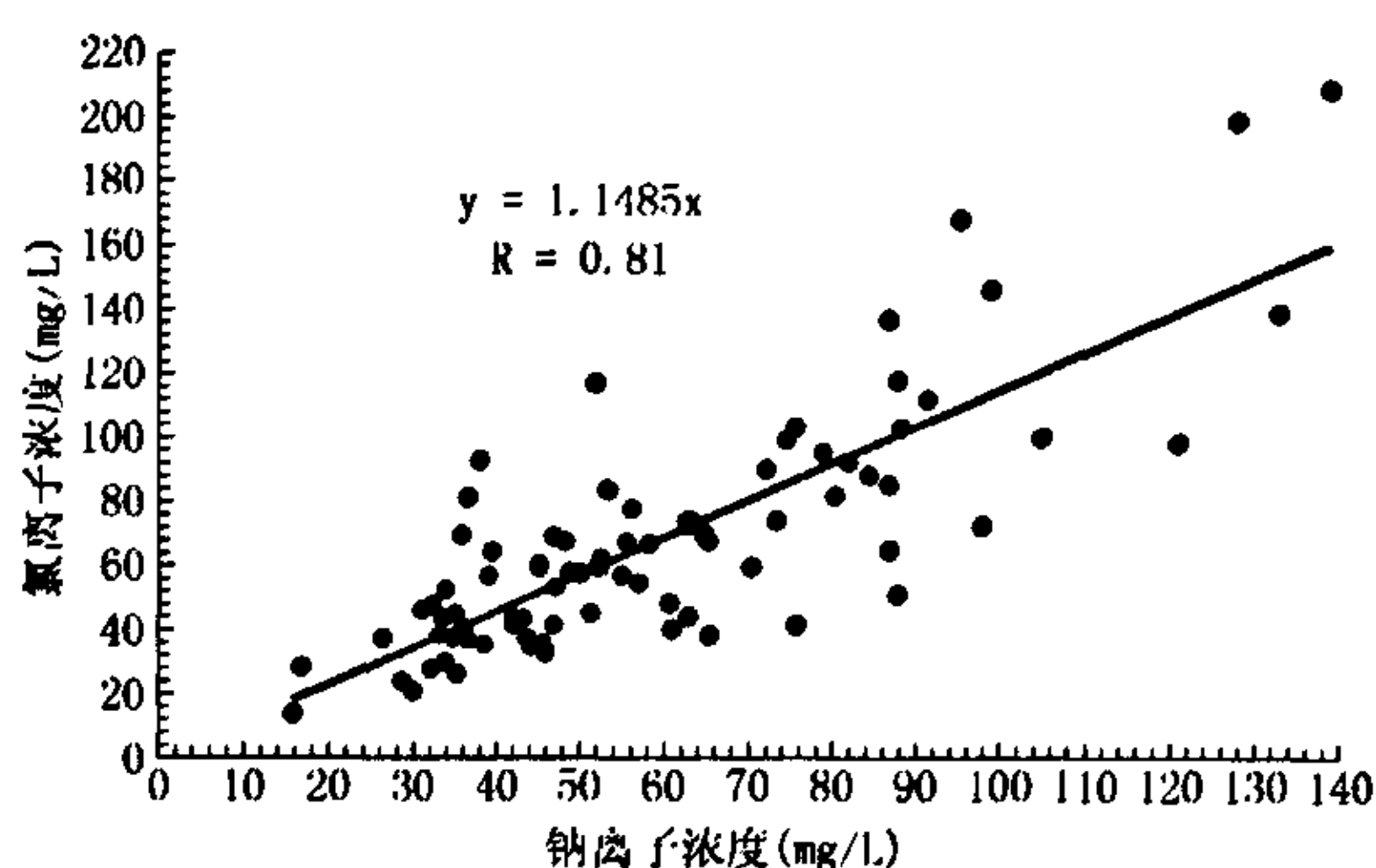


图 3 区域浅层地下水中钠离子和氯离子关系图
Fig.3 Graph of relation between sodium ions and chloride ions in shallow groundwater

表 1 两典型区各离子组分浓度平均值检验对比
(单位: mg/L)

Table 1 Contrast of average concentrations of various ions in shallow groundwater between the Zhangjiagang area and Gehu area (unit: mg/L)

离子组分	Na ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	TH	TDS
张家港	30.09	41.99	777.30	648.61	789.24
隔 湖	34.96	21.05	341.50	259.71	383.15
检验结果	μ _张 =μ _湖	μ _张 >μ _湖	μ _张 >μ _湖	μ _张 >μ _湖	μ _张 >μ _湖

表 2 各区域浅层地下水及海水的 rNa/rCl 比值
Table 2 rNa/rCl values of shallow groundwater of different areas and seawater

水的来源	含水层的沉积年代	样点个数	rNa/rCl 平均值
太湖农业区 浅层地下水	Q ₃	23	1.82
苏锡常区域 浅层地下水	Q ₃ +Q ₄	87	1.35
张家港农业区 浅层地下水	Q ₄	28	0.95
海水	/	/	0.85

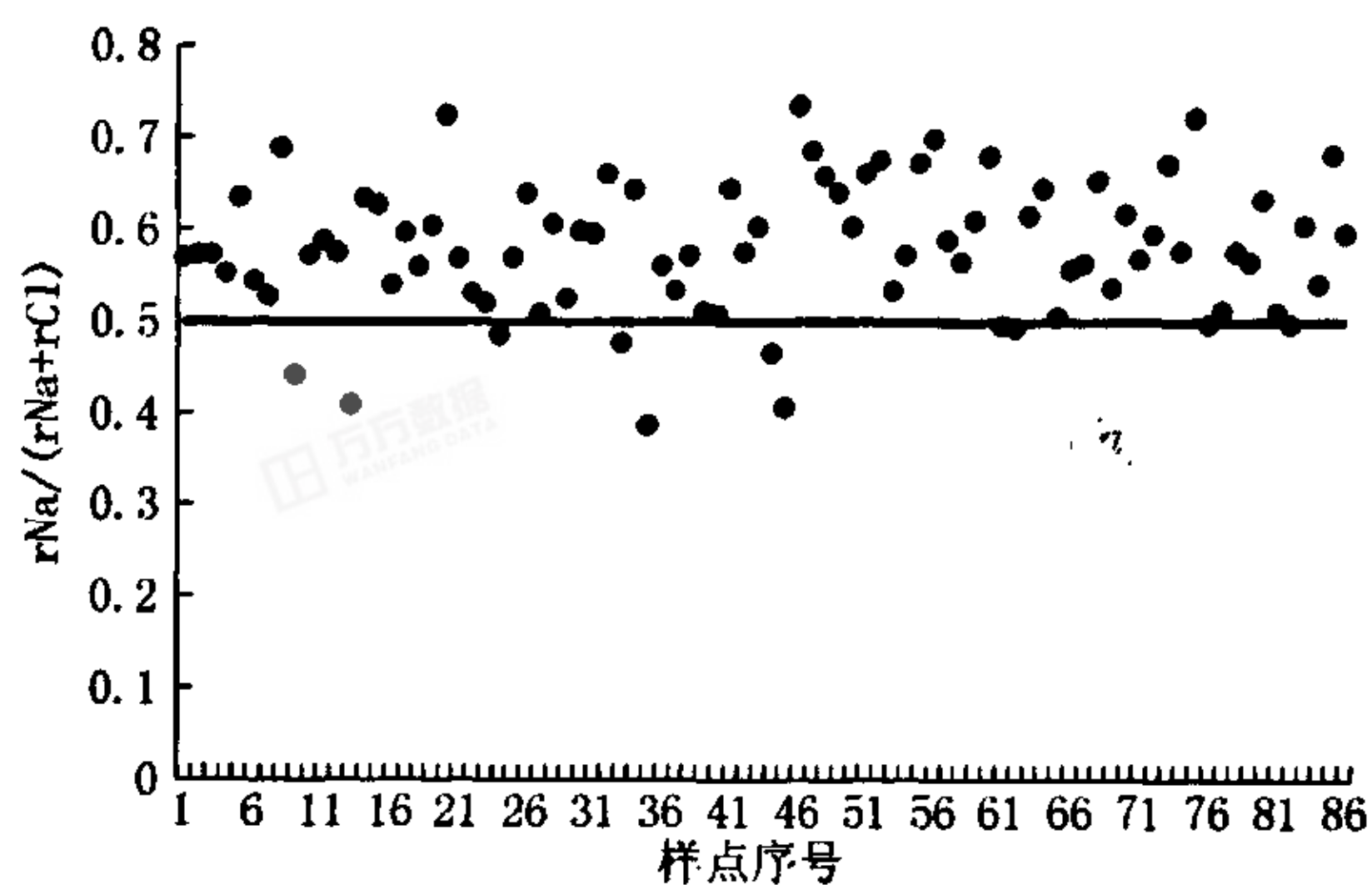


图 4 区域水样中各样点的 rNa/(rNa+rCl) 散点图
Fig.4 Scattergram of rNa/(rNa+rCl) values of water samples from the Suzhou-Wuxi-Changzhou region

张家港地区与太湖地区浅层地下水中 Na⁺浓度平均值无显著差异,很可能与阳离子交换吸附有关。在海侵期间 Na⁺会吸附到含水层介质中的粘土颗粒表面,在后期含水层的淡化过程中,吸附的 Na⁺将与水中的 Ca²⁺、Mg²⁺发生阳离子交换而进入地下水中。随着浅层地下水的不断淡化,地下水中 rNa/rCl 比值将会逐渐升高,淡化历史越长,二者的比值越高。

根据太湖农业区、张家港农业区和区域上水样的 Na⁺与 Cl⁻的浓度数据资料,可分别计算出三者 rNa/rCl 的平均值(表 2)。rNa/rCl 比值和浅层地下水的淡化历史的吻合性非常好,太湖农业区的浅层地下水的淡化历史最长,其 rNa/rCl 平均比值最大,张家港典型区浅层地下水的淡化历史最短,其 rNa/rCl 平均比值较小,苏锡常区域的 86 个样点中既包含上更新统含水层中的水样,又包括全新统含水层的地下水水样,其 rNa/rCl 平均比值应介于两农业区之间,计算结果也证实了这一点。海水中的 rNa/rCl 比值较为稳定,基本恒定于 0.85 左右,较张家港典型区浅层地下水的 rNa/rCl 平均比值小。可见,海侵沉积地层中的地下水淡化历史越长,阳离子交换吸附就越充分,rNa/rCl 值就越高。

已有研究认为,rNa/(rNa+rCl) 比值能够很好地反映地下水中阳离子的交换程度,当比值大于 0.5 时,表明发生了阳离子交换,吸附钠被淡水中钙镁替代后,进入浅层地下水中^[7]。将研究区 86 个水样中的 rNa/(rNa+rCl) 比值以散点图(图 4)的形式表示出来,可以发现大多数浅层地下水水样中的 rNa/(rNa+rCl) 比值为 0.5~0.7,表明苏锡常地区浅层地下水与含水介质之间已发生了不同程度的阳离子交换吸附。据图 5~6,张家港农业区 27 个水样点的 rNa/(rNa+rCl) 比值基本小于 0.7,其中 17 个点大于 0.5;而太湖农业区 23 个水样点中有 20 个点的 rNa/(rNa+rCl) 比值大于 0.5,其中 9 个点大于 0.7。可见,太湖农业区浅层地下水与含水层介质之间的阳离子交换程度明显高于张家港农业区。

由于苏锡常区域、张家港农业区及太湖农业区浅层地下水含水层的沉积形成与海侵息息相关,在海侵过程中,大量的 Na⁺吸附于含水层介质表面,海退后,在地质历史时期的淡化过程中,在垂向降雨入渗的淋滤及西部浅层地下水向东径流的双重作用下,含水层介质表面吸附的 Na⁺不断地被淡水中的 Ca²⁺、Mg²⁺置换进入地下水中,故不论是区域上,还

是两个农业区内, 浅层地下水水样中多数样点的 $rNa/(rNa+rCl)$ 比值大于 0.5, 且淡化历史越长, rNa/rCl 比值越高。因此, 阳离子交换吸附是苏锡常地区浅层地下水中 rNa/rCl 比值在不同地区呈现规律变化的主要原因。

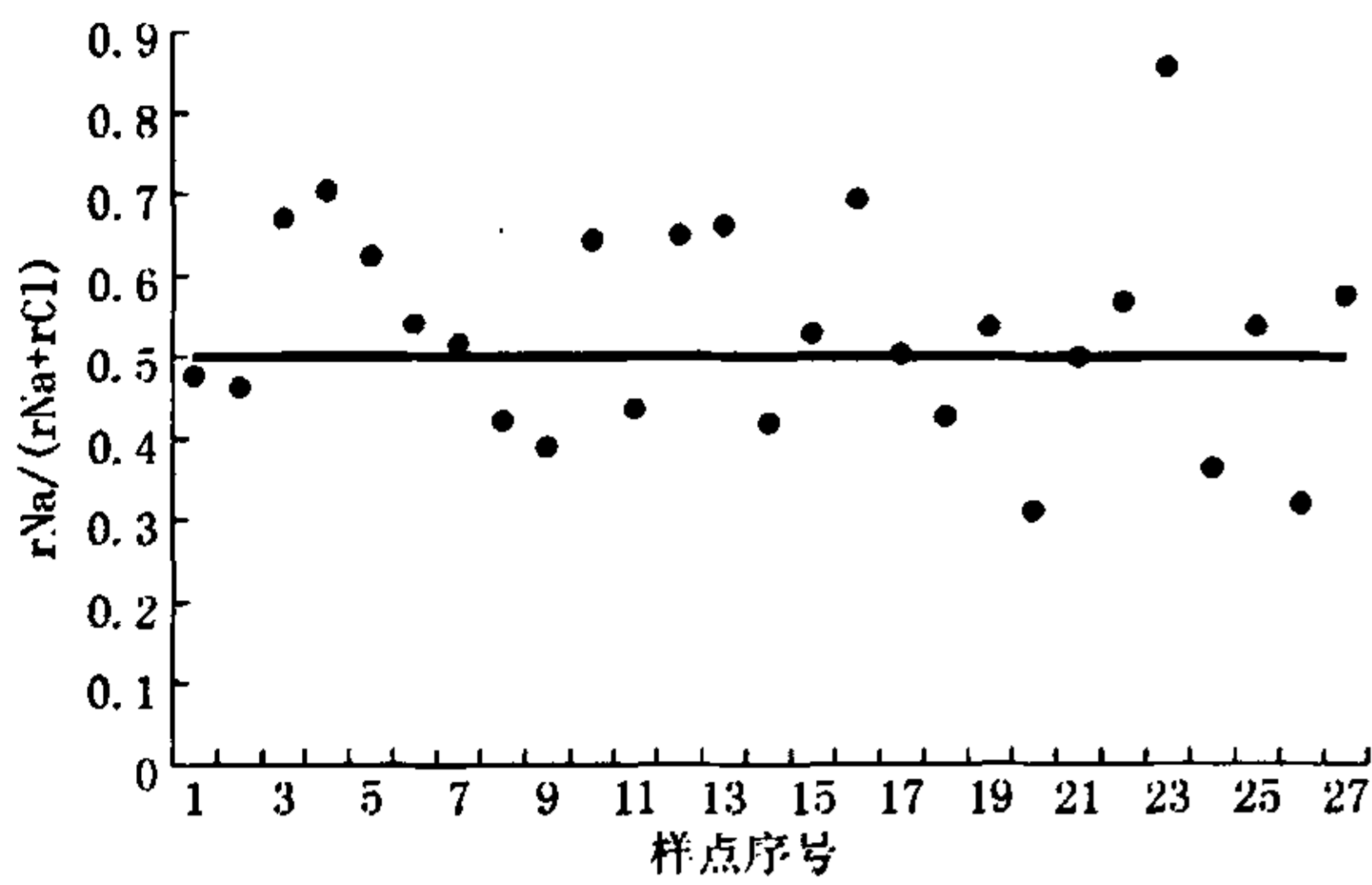


图 5 张家港水样中各样点 $rNa/(rNa+rCl)$ 散点图
Fig.5 Scattergram of $rNa/(rNa+rCl)$ values of water samples from the Zhangjiagang area

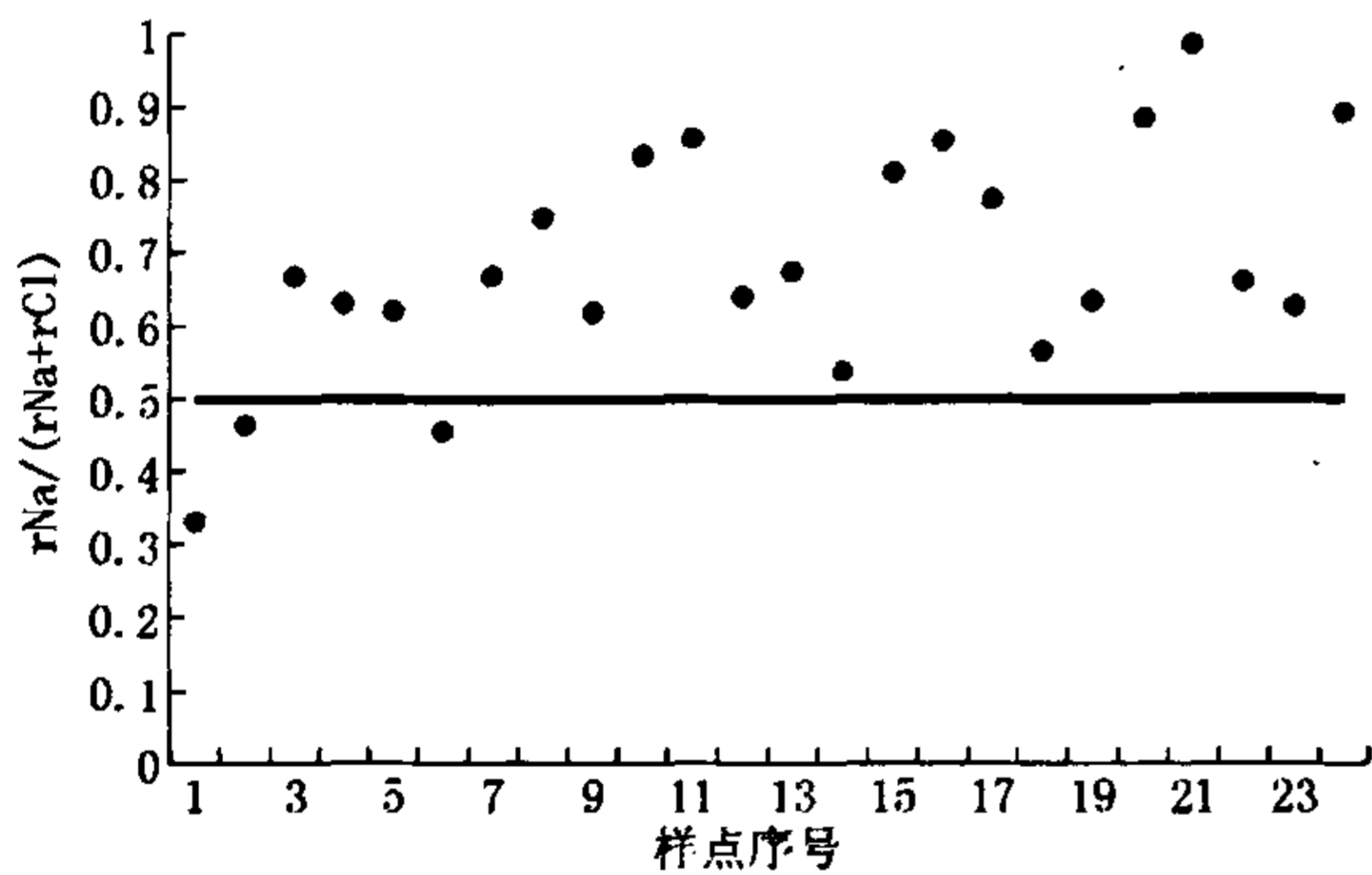


图 6 溇湖水样中各样点 $rNa/(rNa+rCl)$ 散点图
Fig.6 Scattergram of $rNa/(rNa+rCl)$ values of water samples from the Gehu area

4 结论

(1)浅层地下水含水层及其上覆地层的沉积年代和沉积环境对浅层地下水中 Na^+ 和 Cl^- 浓度的空间分布具有决定性的控制作用, Na^+ 和 Cl^- 的浓度呈现出东高西低的分布规律。

(2)海侵地层中浅层地下水的水质淡化历史对 rNa/rCl 影响较大, 地下水的淡化历史越长, rNa/rCl 比值就越大, 反之, 地下水淡化历史越短, rNa/rCl 比值就越小, 越接近于海水的 rNa/rCl 比值。

(3)苏锡常地区的浅层地下水与含水介质之间已发生了不同程度的阳离子交换吸附, 溇湖农业区的阳离子交换吸附程度明显高于张家港农业区, 表明淡化历史越长, 阳离子交换吸附程度越高。

参考文献 (References):

- [1] 陈希祥. 关于长江三角洲第四纪海侵的一孔之见[J]. 地层学杂志, 1996, 20(4):291-294.
Chen Xixiang. Limited knowledge about the Quaternary transgressive layers in the delta of Yangtze River [J]. Journal of Stratigraphy, 1996, 20(4):291-294(in Chinese with English abstracts).
- [2] 廖启林, 吴新民, 翁志华, 等. 南京地区多目标地球化学调查基本成果及其相关问题探讨[J]. 中国地质, 2004, 31(1):70-77.
Liao Qilin, Wu Xinmin, Weng Zhihua, et al. Basic results of multi-target geochemical survey in the Nanjing area and its relevant problems[J]. Geology in China, 2004, 31(1):70-77(in Chinese with English abstracts).
- [3] 陈庆强, 李从先. 长江三角洲地区晚更新世硬粘土层成因研究[J]. 地理科学, 1998, 18(1):53-57.
Cheng Qingqiang, Li Congxian. Studies of origin of the late Pleistocene stiff clays at the Yangtze delta [J]. Scientia Geographica Sinica, 1998, 18(1):53-57(in Chinese with English abstracts).
- [4] 李从先, 陈庆强, 范代读, 等. 末次盛冰期以来长江三角洲地区的沉积相和古地理[J]. 古地理学报, 1999, 1(4):12-25.
Li Congxian, Chen Qingqiang, Fan Daidu, et al. Palaeogeography and palaeoenvironment in Changjiang delta since last glaciation [J]. Journal of Palaeogeography, 1999, 1 (4):12-25 (in Chinese with English abstracts).
- [5] 刘宝柱, 李从先, 业治铮. 长江三角洲晚更新世末期古土壤与古环境[J]. 青岛海洋大学学报, 1997, 27(3):397-404.
Liu Baozhu, Li Congxian, Ye Zhizheng. Late Pleistocene paleosols and paleoenvironment in the Yangtze River delta area[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1997, 27 (3):397-404 (in Chinese with English abstracts).
- [6] 陈庆强, 李从先. 长江三角洲晚第四纪古土壤与古环境初探[J]. 沉积学报, 1995, 13:79-87.
Chen Qingqiang, Li Congxian. Preliminary study on late Quaternary paleosols and paleoenvironments of the Yangtze delta[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1995,13:79-87(in Chinese with English abstracts).
- [7] 宋保平, 张先林, 方正, 等. 长江河口地区第四系地下水化学演化机制[J]. 地理学报, 2000, 55(2):209-218.
Song Baoping, Zhang Xianlin, Fang Zheng, et al. Mechanism of chemical evolution for Quaternary groundwater in Yangtze River estuarine region[J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(2):209-218 (in Chinese with English abstracts).

Characteristics and genesis of rNa/rCl in shallow groundwater in the Suzhou–Wuxi–Changzhou region

LIU Li-cai^{1,2}, CHEN Hong-han³, YANG Yi⁴, WANG Jin-sheng¹

(1. College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Beijing Hydraulic Research Institute, Beijing 100044, China;

3. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

4. Survey institute of geological engineering of Jiangsu Province, Nanjing 210012, Jiangsu, China)

Abstract: Based on the sedimentary environment of the shallow groundwater aquifer and its vadose zone, the paper illustrates the decreasing trend of sodium and chloride ion concentrations from east to west in shallow groundwater in the Suzhou–Wuxi–Changzhou region. According to a data analysis, the ratio of rNa/rCl in shallow groundwater is closely related to the sedimentary environment of transgression and sedimentary history. The longer the freshening history of groundwater is, the higher the degrees of the cation and exchange adsorption between sodium ions adsorbed in aquifer media and calcium and magnesium ions in groundwater will be. As large numbers of sodium ions enter groundwater, the ratio of rNa/rCl is higher and higher.

Key words: shallow groundwater; sedimentary environment; transgression; freshening; cation exchange adsorption

About the first author: LIU Li-cai, male, born in 1973, PhD, majors in groundwater resources and environment research; E-mail: llc1021@126.com.