

松嫩盆地的地下水化学特征及水质变化规律

廖资生, 林学钰
吉林大学环境与资源学院, 吉林长春 130026

摘要: 松嫩盆地位于东北腹部, 是我国主要的大型地下水盆地之一. 地下水资源十分丰富, 但水质问题复杂, 原生水质状况不佳, 人为污染比较严重. 根据水利、地质部门多年积累的地下水水质监测资料, 对地下水中原生有害组分和人为污染组分的形成机理和区域分布规律进行了比较全面、深入的研究, 着重分析了在人为活动影响下, 盆地不同地下水系统内地下水水质的多年变化规律. 认为地质构造上的封闭性、强还原/弱碱性/富含有机质的水文地球化学环境、地下水运动滞缓是盆地地下水中多种原生有害组分富集的基本条件. 近半个世纪以来强烈的人类活动, 则是导致地下水水质发生趋势性变化的主要原因. 提出了改善区域地下水交替循环条件, 治理环境污染, 治理和更新已成为污染通道的水井, 利用洁净松花江水开展地下水人工回灌等改良与保护地下水水质的主要措施.

关键词: 松嫩盆地; 地下水化学特征; 水质变化趋势; 水质污染与防治.

中图分类号: P641.12 文章编号: 1000-2383(2004)01-0096-07 收稿日期: 2003-05-12

Chemical Characteristics and Variations of Groundwater Quality in Songnen Basin

LIAO Zi-sheng, LIN Xue-yu
College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130026, China

Abstract: Songnen basin is located in the center of the northeast China. It is one of the main large-scale groundwater basin which is very abundant in groundwater resources in China, but the situation of groundwater there is complex; the original groundwater quality is not very good and the pollution due to human activities is relatively severe. Based on groundwater quality data monitored by water conservancy and geological department for many years, in-depth study on the formation mechanics and regional distribution laws of primary harmful components and man-made pollutant in groundwater is conducted. Furthermore, the perennial change laws of groundwater quality in the basin because of human activities are analyzed in the paper. The results show that the primary harmful components would be concentrated under the following conditions: the geological structure is enclosed, the environment of strong reducing/alkalescent/full of organic matter in groundwater and groundwater seepage velocity is slow. The main reason for change tendency of groundwater quality is the human activities in recent years. The paper gives some advice on amelioration and preservation of groundwater quality such as enhancing regional groundwater circulation and exchange function, fighting against environment pollution, treating or refreshing the polluted well and utilizing artificial recharge with clean water of Songhua River.

Key words: Songnen basin; chemical characteristics of groundwater; transformation tendency of groundwater quality; pollution and prevention of groundwater quality.

1 盆地的自然地理及水文地质概况 西三面分别以长白山、小兴安岭、大兴安岭为界, 南部以低缓的松辽分水岭与辽河平原相隔. 盆地面积 $17.8 \times 10^4 \text{ km}^2$. 盆地具有较好的封闭性, 仅有嫩江松嫩盆地位于我国东北大平原的北部, 东、北、

从西北方向流入,而后横穿盆地中部,改名为松花江,从盆地东部流出。盆地东及东北面地形较高,而西及西南面较低。盆地的东及东北部气候属半湿润型,向西及西南逐渐过渡为半干旱气候。

松嫩盆地在地质结构上是一个典型的中、新生代沉积断陷盆地。在水文地质结构上,则是一个由多层含水层组成的特大型潜水—承压水盆地。主要含水层有:下白垩统裂隙或裂隙—孔隙含水层(或含水带);新、老第三系孔隙—裂隙含水层;第四系下更新统冰水砂砾石含水层;中、上更新统冲—洪积砂砾石含水层;上更新统冲—湖积粉细砂含水层(分布于盆地中央);全新统现代河谷冲积砂砾石含水层(林学钰等,2000)(图1)。其中,中—上更新统至全新统的含水层为潜水,其余均为承压水。

松嫩盆地的地下水是一个统一的系统.在天然条件下,地下水主要从盆地周边获得降水和地表水的入渗补给,而后流向盆地中心.盆地地下水,除一小部分在西部山前冲洪积扇前缘和东部高平原边缘以泉水形式排泄外,绝大部分地下水均通过盆地中心承压含水层向上越流补给潜水,而后消耗于蒸发,但是目前人为开采量已逐渐成为承压水的主要消耗项.

按照区域地下水的循环方式和水文地质结构特征,可将盆地地下水大系统进一步划分为 5 个亚系统(图 2).

根据对多年的地下水水位和水质动态监测资料的分析,在强烈的取水和环境污染日益加剧的条件下,盆地内区域地下水的循环方式、地下水水位及水质状态均发生了很大的变化.本文将着重阐述目前尚未进行过深入研究,也尚未受到重视的盆地地下

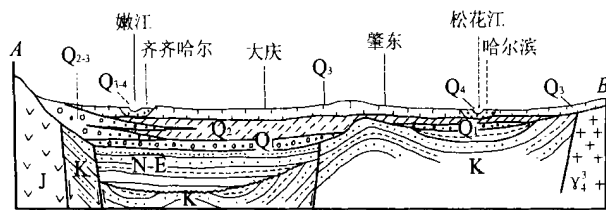


图 1 区域水文地质剖面示意图

Fig. 1 Sketch map of regional hydrogeologic profile

Q₃₋₄, 第四系全新统一上更新统河谷砂砾石; Q₃, 第四系上更新统黄土状亚粘土含粉细砂层; Q₂₋₃, 第四系中、上更新统冲洪积砂砾石层; Q₁, 第四系下更新统冰水砂砾石层; N-E, 新老第三系砂岩及泥岩; K, 下白垩统泥岩、砂岩、砂砾岩; γ_4^3 , 海西期花岗岩; J, 侏罗系火山岩

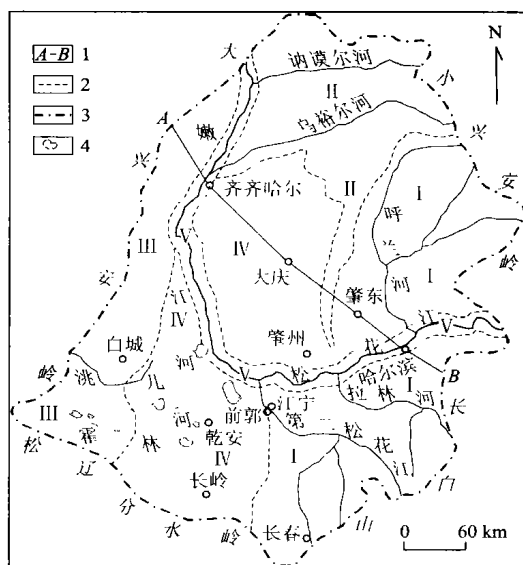


图2 盆地地下水系统分区

Fig. 2 Division map of groundwater system in Songnen basin

1. 区域水文地质剖面线; 2. 地下水系统界线; 3. 松嫩盆地边界; 4. 河流和湖泊; I. 松花江高平原地下水亚系统; II. 嫩江高平原地下水亚系统; III 大兴安岭山前平原地下水亚系统; IV. 中央低平原地下水亚系统 V. 松嫩干流地下水亚系统

水水质的演化规律, 以及时敲响水质恶化的警钟, 尽快制定防治水质继续恶化的对策.

2 盆地地下水化学特征

2.1 区域地下水化学类型

松嫩盆地的地球化学景观具有和许多含油盆地相同的变化规律, 即盆地边缘的地下水主要为 HCO_3-Ca 型, 偶见 HCO_3-Ca 、 Mg 或 $\text{Ca}-\text{Na}$ 型. 向盆地中心则逐渐过渡为 HCO_3-Na 型. 但是盆地中心的潜水, 由于蒸发浓缩作用和离子交换吸附作用的影响, 水化学类型相对复杂, 局部出现 HCO_3° 、 Cl 或 $\text{HCO}_3^\circ\text{SO}_4-\text{Na}$ 型水.

地下水的矿化度和硬度从盆地边缘到中心均呈现出由低到高的变化规律. 从盆地边缘到盆地中心, 潜水的矿化度由小于 1 g/L 上升到 1~3 g/L 或更大; 硬度由小于 10 德国度增加到 20~25 德国度. 承压水的矿化度和硬度变化普遍比潜水小.

2.2 地下水中的原生有害组分分布特征

在松嫩盆地特殊的水文地球化学环境条件下, 氟、铁(锰)、氨离子等对人体有害的化学组分, 在地下水中得以广泛富集, 严重损坏了地下水的水质。

松嫩盆地中分布有我国面积最大的氟病区。整个盆地中央低平原区的潜水和绝大部分的承压水氟含量均超过饮用水质的国家标准,即 $\rho(\text{F}^-) > 1 \text{ mg/L}$,并呈现出越近盆地中央,氟浓度越高的规律。盆地中央许多低洼地段,潜水氟浓度可高达 $5 \sim 20 \text{ mg/L}$;承压水的氟浓度最高可达 $1 \sim 3 \text{ mg/L}$ 。氟离子的富集,主要与本区半干旱气候和富钙地球化学环境的土壤苏打盐渍化作用有关。

高铁(锰)水的广泛分布,是松嫩盆地地下水的另一个显著特征。除西部山前的冲洪积扇区和东南部的高平原和松辽分水岭地段,因地下水径流条件较好而铁(锰)含量较低外,盆地绝大多数地段的地下水的铁(锰)含量均大于饮用水质的国家标准,即 $\rho(\text{TFe}) > 0.3 \text{ mg}$ 或 $\rho(\text{Mn}) > 0.1 \text{ mg/L}$ 。特别是在松花江以北的承压水区和几乎所有的河谷潜水区,铁离子的含量常常高达 $5 \sim 20 \text{ mg/L}$ 。铁(锰)离子的富集,主要与本区良好的封闭还原环境、含水介质中富含有机质和地下水径流滞缓等因素有关。

氨离子在地下水中聚积的条件和铁(锰)离子相似,但它要求具有更好的封闭还原条件,故氨离子主要富集于盆地中央封闭性良好的承压水中。据概略的统计,氨离子超过生活饮用水质的国家标准,即 $\rho(\text{NH}_4) > 0.2 \text{ mg/L}$ 的范围,大约要占盆地总面积的60%以上。在松花江以北承压水中的氨离子浓度可达到 $1.0 \sim 2.5 \text{ mg/L}$ 。

2.3 地下水中的人为污染组分分布特征

在近半个世纪强烈的人类活动作用下,盆地的地下水已受到严重的污染,特别是农业化肥、农药的面源污染和城市“三废”的污染,已对盆地的供水安全构成严重威胁。

据水利部门 1990—1994 年的水质监测资料,化肥、农药造成的地下水氮、磷污染超标区已达到盆地总面积的 $25\% \sim 30\%$ 。氮、磷污染超标区分布上的共同特点是:主要分布于农业发达、包气带土层较厚的盆地东部和东南部的高平原区;污染含水层主要为潜水和浅层承压水。污染超标区内地下水的 NO_3^- 浓度一般为 $90 \sim 200 \text{ mg/L}$, NO_2^- 浓度为 $0.2 \sim 3.5 \text{ mg/L}$;磷的浓度一般为 $0.2 \sim 1.5 \text{ mg/L}$,均超过生活饮用水质的国家标准。

除氮、磷的污染,挥发酚的污染也不可忽视。其污染区的分布特征,大致和氮、磷污染区分布范围一致,但多呈零星的点、片状污染,且多集中分布于盆地北部(北纬 47° 以北)地区的城镇附近。以上说明

酚的污染,除与农药的大量使用有关外,还与城镇污水的入渗、污水灌溉有关。此外,酚的污染随着纬度北移而加剧的现象也说明,低温环境更有利于酚在土壤和地下水中的积存。

除上述农业的污染外,城市地区地下水的污染也已十分严重。目前除西部大兴安岭山前平原区的城市因经济欠发达、地下水开采量较小而污染较轻外,其余绝大部分城市市区的地下水水质均遭受比较严重的污染。城市地下水污染的共同特点是,超标组分一般多为矿化度、总硬度、硝酸盐或亚硝酸盐、氯和硫酸盐。但在大中城市中,挥发酚、铬、砷、COD 等的超标情况也很严重,且超标面积普遍有扩大之势,污染含水层正由上层潜水向深部承压水发展。

3 盆地地下水水质的变化趋势

纵观盆地的地下水水质,在人类活动的作用下,已发生了很大的变化,在不同的原生水文地球环境和不同的人类活动作用影响下,显现出不同的变化规律。现按地下水亚系统简介如下:

3.1 大兴安岭山前平原地下水亚系统水质的变化趋势

由于区内地下水开采资源比较丰富,且目前的开采量不大,故区内地下水至今保持着水质较好的天然状态(Ⅱ—Ⅱ级水)(国家技术监督局,1994),但是一些中等城市自 20 世纪 90 年代以来地下水的污染趋势已日渐明显。如白城市城区,1991—1995 年间,用每年枯水期监测结果相比较,矿化度、总硬度、 HCO_3^- 、 NO_3^- 、 Cl^- 等指标均呈现较明显的上升趋势。矿化度平均年增幅 10 mg/L ,氯化物年增幅为 2 mg/L ,硝酸根年增幅为 2.6 mg/L (图 3)。尽管目前上述污染还不太严重,但本区地表粘性土层很薄,潜埋深很浅(一般小于 5 m),是地下水的强脆弱带,如不及早采取防患措施,地下水的污染程度将会迅速加强。

3.2 盆地东部嫩江、松花江高平原地下水亚系统的水质变化趋势

区内主要开采中、下更新统的砂砾石浅层承压含水层,局部为白垩系基岩裂隙含水层(带),其上有厚度不太大($10 \sim 20 \text{ m}$)的黄土状土层覆盖,原生环境属于地下水的中等脆弱带。目前在开采强度不大的广大农村,地下水的水质一般可达到Ⅱ/Ⅱ级水。

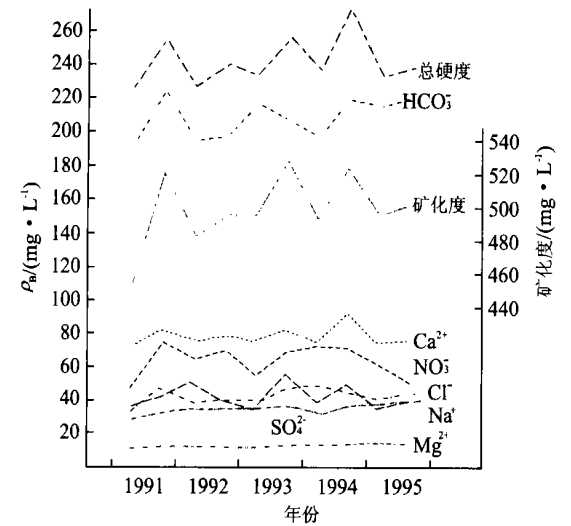


图 3 白城市地下水(1991—1995)水质动态曲线

Fig. 3 Regime curve of groundwater quality (1991—1995) in Baicheng city

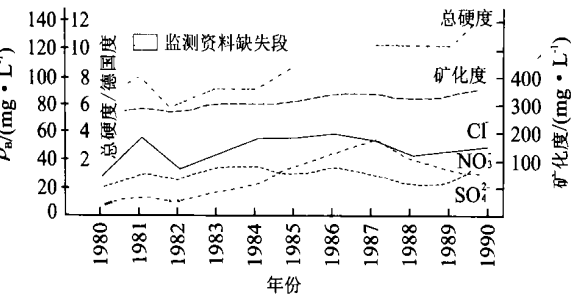


图 4 长春市市区浅层承压水水质动态曲线

Fig. 4 Regime curve of groundwater quality in shallow porous confined aquifer Changchun city

的水平; 开采量较大和环境污染严重的城镇及近郊, 地下水的污染面正日益扩大, 污染程度日渐加深. 以长春市为例, 自 20 世纪 80 年代初期以来, 浅层孔隙承压水的矿化度、硬度、硝酸根、氯化物、硫酸盐、酚、六价铬和 COD 等多项指标均在逐年上升(图 4). 该市浅层孔隙承压水的严重污染区(综合污染指数 > 10)面积 1981 年为 27 km², 1990 年则扩大到 38 km². 重污染区(综合污染指数为 7~10)面积已占据了市区含水层分布面积的 50% 以上(牟淑琴和陈延龙, 1992). 与孔隙地下水有直接水力联系的白垩系基岩裂隙水的水质, 和浅层孔隙承压水有着相似的变化规律.

3.3 中央低平原地下水亚系统水质的变化趋势

(1) 地下水含氟量的变化. 由于该区潜水的含氟量普遍高于生活饮用水质的国家标准, 不宜饮用, 故深层低氟承压水氟浓度的变化, 便是人们关注的

中心. 笔者全面分析了区内 100 多眼中深层承压水井氟含量动态监测资料, 将本区氟的多年动态归纳为 3 种类型:

①含氟量持续上升型. 如图 5 中动态曲线③、④、⑤所在地的承压水井, 从 1984—1995 年的 11 年间, 含氟量均上升了 1 mg/L 以上, 使原本适合饮用的承压水变为不适合饮用的高氟水. 承压水含氟量上升的原因主要有二: 一是因为承压含水层的隔水顶板缺失或厚度太薄; 二是因为水井施工时对上部高氟潜水含水层隔离封堵质量不好, 因此造成高氟潜水下渗补给中深层承压水, 促使承压水含氟量逐年升高. 根据原吉林省地矿局何敏樵等人的调查资料, 从 1977—1984 年间, 吉林省通榆、乾安 2 县的近 500 眼防氟水井(承压水)含氟量年平均升幅均在 0.1 mg/(L·a) 左右.

②氟含量上升—稳定型. 该种动态类型, 实际上是上述上升型动态随着时间延续, 承压水和上层高氟潜水完全混合的必然结果. 仔细分析图 5 中的几条上升型动态曲线, 均可见随着时间的延续, 承压水含氟量的年升幅越来越小, 逐渐趋向稳定; 同一地点承压水含氟量的升高上限将与高氟潜水(图 5 中的动态曲线①)的含氟量接近.

③氟含量多年稳定型. 如图 5 中的动态曲线①和②. 对中深层承压水来说, 这种动态类型主要出现在下部承压含水层和上部高氟潜水含水层之间有厚度较大、分布稳定隔水层的地区, 而且水井施工时对上层潜水层的封堵质量较好, 故两者之间水力联系微弱.

(2) 松花江以北地下水集中开采区水质的变化趋势. 该区是我国的主要石油产区, 也是盆地地下水开采强度最大的地段, 该系统中的中深层承压水(下更新统一—上白垩统明水组含水层)在各油田水源地

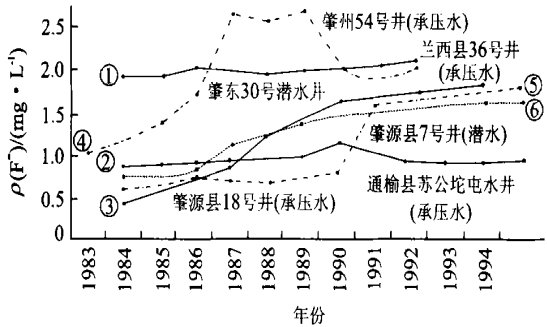


图 5 地下水含氟量的多年动态曲线

Fig. 5 Regime curve of fluorine content in groundwater

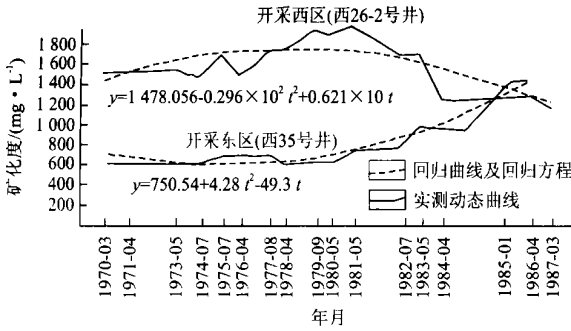


图 6 大庆市深层承压水矿化度多年动态曲线(牟淑琴和陈延龙, 1992)

Fig. 6 Regime curve of TDS in deep confined aquifer of Daqing city

的强烈开采条件下, 已形成近 4 000 km² 的区域水位降落漏斗, 区域水文地球化学条件由封闭还原环境逐渐转向开启一半开启的弱氧化环境, 承压水的某些组分已明显地出现了趋势性的变化. 在主要含水层埋藏较深的大庆油田开采西区, 自 20 世纪 70 年代末期到 80 年代末期的 10 余年间, 矿化度和硬度均呈现出缓慢上升→平稳→缓慢下降的变化趋势, 据分析可能与上部更新统地下水的越流下渗补给有关(图 6 中西 26—2 号井). 铁(锰)出现不断的下降趋势, 据喇二 9 号水井 1976—1999 年的水质监测资料, 总铁含量由 2.3 mg/L 下降到 1.0 mg/L; 锰含量由 0.29 mg/L 下降到 0.1 mg/L. 含氟量则略有上升, 由 0.4 mg/L 上升到 0.52 mg/L(喇 10 号井)(周福俊等, 1994).

位于大庆油田开采东区(含水层埋藏较浅, 开启条件较好)的各水源井的矿化度(或硬度)、总铁(锰)和氟在多年开采条件下的变化趋势, 正好和开采西区相反, 即矿化度和铁(锰)的多年变化均呈上升趋势(图 6 中西 35 号井), 而氟呈现下降趋势.

(3) 松花江以南分散开采区地下水水质的变化趋势. 中、深层承压水是区内农业灌溉及城镇生活和生产用水的水源. 对于广大的农业区, 由于地下水开采强度不大, 故区域水动力条件和水文地球化学条件仍基本上保持着天然状态, 因此常规水化学组分变化不大(图 7). 但是由于该含水层位于盆地中心, 补给条件不佳, 故在一些开采量和开采强度较大的城市和工业集中供水水源地, 当开采强度较大时(1 万到数万 m³/d), 即可形成一定规模的开采水位降落漏斗, 从而导致上部劣质潜水大量下渗补给承压水, 致使承压水的常规组分普遍出现上升趋势. 如乾

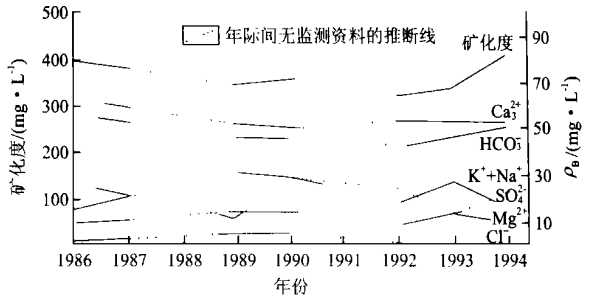


图 7 农业区的中深层承压水水质动态曲线(吉林省乾安县某动态监测井)

Fig. 7 Regime curve of groundwater quality in medium-deep confined aquifer in agricultural area

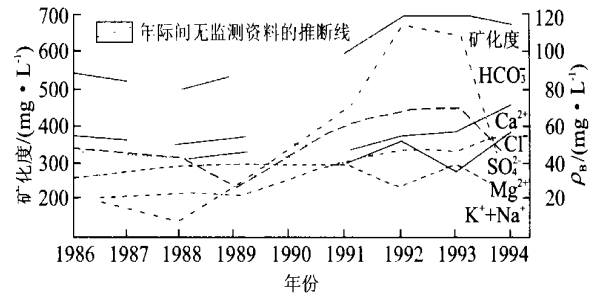


图 8 集中开采区的中深层承压水水质动态曲线(吉林省乾安县城 60 号动态监测井)

Fig. 8 Regime curve of groundwater quality in medium-deep confined aquifer in the concentrated exploitation area

安县城 60 号水井 1986—1994 年的 8 年间, 承压水中的氯离子含量增加了 2 倍, 硫酸根离子含量增加了 1 倍, 矿化度年平均升幅达 18.5 mg/L(图 8).

3.4 松嫩干流地下水亚系统的水质变化趋势

该亚系统的主要开采含水层包含了从全新世的现代河流冲洪积层到第三系的多个含水层. 资源极其丰富, 但由于地表粘性土层很薄, 各时代含水层间缺少稳定隔水层, 其上部潜水又和河水多有密切水力联系, 故地下水的脆弱性极强. 因此, 沿松嫩干流的齐齐哈尔、哈尔滨和松源等城市, 在区域水位下降不很大(5~20 m)的情况下, 即引起了地下水水质恶化. 目前, 上部潜水已普遍遭到严重污染, 齐齐哈尔市和松源市的深层承压水也出现局部污染. 以松源市江宁 D050 号潜水井为例, 1991—1995 年的 5 年间, 矿化度上升了 100 mg/L, 总硬度上升了 75 mg/L, SO₄²⁻ 上升了 57 mg/L(图 9); 第二松花江南岸的前郭县城区, 则由于潜水与承压水之间有稳定的隔水层分布, 故承压水水质未见明显变化(图 10).

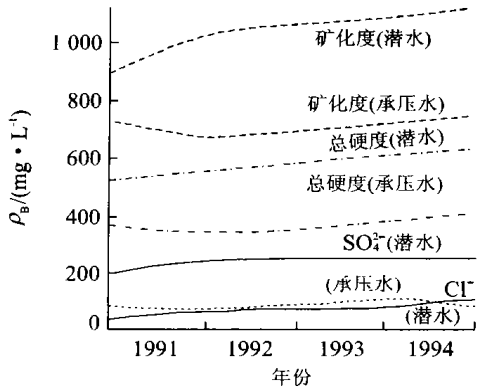


图 9 江北岸江宁区潜水(D050 号井)和承压水(D742 号井)水质动态曲线

Fig. 9 Regime curve of groundwater quality in unconfined (well D050) and confined (well D742) aquifers in Jiangning district of north river bank

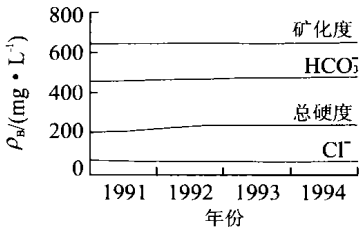


图 10 江南岸前郭县城区(D021 号井)承压水水质动态曲线

Fig. 10 Regime curve of groundwater quality (well D021) in confined aquifer in Qianguo county of south river bank

沿江(河)城市地下水水质大多数均在不断恶化,但也有个别沿江(河)城市的劣质潜水因河水水质改善而有所改善.如长春市伊通河谷的潜水,近年来因城市污水不再排入河流,同时城区河段因橡皮坝修建而使河水回灌补给两岸潜水,因而原已严重污染的潜水水质正逐年得到改善.在河水回灌后的 7 年间(1983—1990),地下水矿化度由 700 mg/L 下降到 300 mg/L,总硬度由 400 mg/L 下降到 250 mg/L,硫酸根和氟离子含量也有明显下降.

3.5 农业污染组分磷、氮、酚的变化趋势

潜水—浅层承压水遭受磷、氮、酚污染的趋势,由于检测资料不多,尚难对它们的变化趋势作出明确的结论.从所筛选出的少数水质监测点的资料来看,硝酸根(NO₃⁻)和磷(总磷或 P₂O₅ 和 P₄O₃)似有随着年降水量增减而上下波动,随着施肥量不断增加而呈现逐年上升的趋势,在高原上不少地区的潜水和浅层承压水中的含量已大大超过国家饮用水

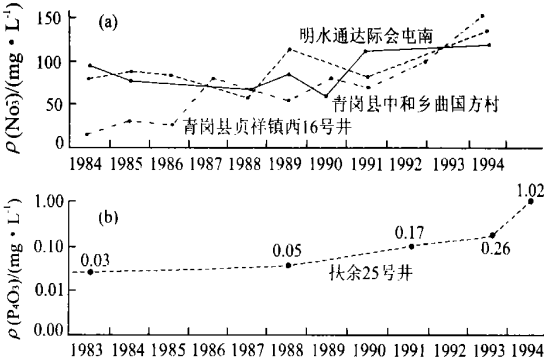


图 11 东部高平原区地下水硝酸盐和磷的动态曲线

Fig. 11 Regime curve of nitrate and phosphate in groundwater in the east high plain

标准的规定值(图 11).而化学稳定性差的 NO₂⁻、C₆H₅OH(挥发酚)等组分在地下水中的浓度动态则无趋势性的变化,但其浓度超过饮用水质标准的地区已经不少.由于农业污染是一种面源污染,因此,应该倍加重视.

4 地下水水质的改良与污染防治对策

地质构造上的封闭性、地球化学上的弱碱性强还原环境、富含有机质的含水地层和地下水的滞缓运动状态是导致松嫩盆地地下水中多种有害化学组分富集的原生条件.但是,近半个世纪以来人类对地下水的强烈开采和环境污染的日益加剧,则是导致盆地地下水水质发生趋势性变化的主导诱因.

分析松嫩盆地各地下水亚系统地下水水质变化趋势的影响因素可知,人为活动对地下水水质的影响负面效应居多,但也有某些正面效应.因此,加大有利于改善地下水水质的人类活动;减少和防止不利于地下水水质的人类活动,将是今后盆地地下水可持续开发利用和水质改良与保护的基本对策.目前可采取以下主要措施和开展相应的研究试验工作:(1)对于封闭性好、强还原环境、水交替滞缓、原生水质不佳的盆地中心地区,可通过适当加大开采强度,增大水位降深和水交替强度,使地下水中氨、铁、锰等原生有害组分浓度得以降低.(2)加大盆地环境整治和保护力度,是防治城市和农业发达地区浅层地下水污染的基本策略.(3)制定严格的成井工艺要求,防止水井本身成为地表污水和浅层劣质潜水下渗污染深层承压水的通道,逐步治理或更新已成为污染通道的原有水井.(4)利用目前水质尚属良

好的嫩江、第二松花江、拉林河中、上游段河水,大规模开展地下水的人工回灌试验,通过“抽旧补新”的方法,改造原生劣质地下水体。(5)健全和完善地下水动态监测网,建立盆地地下水水质的预报、预警系统,把地下水水质保护和污染治理作为盆地地下水资源可持续开发利用的基本策略。

致谢: 本文编写时, 参考了吉林省和黑龙江省水文水资源勘测局和环境地质监测总站大量地下水动态观测资料, 作者表示衷心的感谢。

References

Lin, X. Y., Chen, M. X., Wang, Z. X., et al., 2000. Study on groundwater resources and sustainable development in Songnen basin. Earthquake Press, Beijing, 68—81 (in Chinese).

Mu, S. Q., Chen, Y. L., 1992. Dynamics and analysis on groundwater in ten years in Changchun city, Jilin

Province, Science Press, Beijing, 30—40 (in Chinese).

State Supervision of Technology, 1994. State criteria of the People's Republic of China, groundwater quality criteria. The State Criteria Press, Beijing (in Chinese).

Zhou, F. J., Shan, R. Q., Zhang, Z. Y., et al., 1994. Study on groundwater chemistry in the middle of Songnen plain. Jilin University Press, Changchun, China, 105—110 (in Chinese).

附中文参考文献

林学钰, 陈梦熊, 王兆馨, 等, 2000. 松嫩盆地地下水资源及其可持续发展研究. 北京: 地震出版社, 68—81.

牟淑琴, 陈延龙, 1992. 吉林省长春市十年地下水动态及其分析. 北京: 科学出版社, 30—40.

国家技术监督局, 1994. 中华人民共和国国家标准《地下水质量标准》. 北京: 国家标准出版社.

周福俊, 单润起, 张中庸, 等, 1994. 松嫩平原中部地区地下水水化学研究. 长春: 吉林大学出版社, 105—110.

(上接 95 页)

gradient estimates. *Bulletin of the Oil and Natural Gas Commission*, 24(2): 133—153.

Tan, C. X., Jin, Z. J., Zhang, M. L., et al., 2001. An approach to the present-day three-dimensional (3-D) stress field and its application to hydrocarbon migration and accumulation in the Zhangqiang depression, Liaohe field, China. *Marine and Petroleum Geology*, 18(9): 983—994.

Wang, L. J., Zhang, L. R., Yuan, J. Y., et al., 1996. Crustal stress and oil-gas migration. *Journal of Geomechanics*, 2(2): 3—10 (in Chinese with English abstract).

Yassir, N. A., Rogers, A. L., 1993. Overpressures, fluid flow and stress regimes in the Jeanne d'Arc basin, Canada. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 30(7): 1209—1213.

附中文参考文献

李明诚, 1994. 石油与天然气运移. 北京: 石油工业出版社.

王连捷, 张利容, 袁嘉音, 等, 1996. 地应力与油气运移. 地质力学学报, 2(2): 3—10.