

基于同位素与水化学分析法的地下水补径排研究 ——以苏锡常地区浅层地下水为例

张秭媛¹, 陈锁忠², 都娥娥²

(1 江苏省水资源服务中心, 江苏 南京 210029)

(2 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210046)

[摘要] 在分析研究区浅层地下水空间分布特征的基础上, 采用同位素与化学分析相结合的方法研究苏锡常浅层地下水的补径排条件. 利用氢氧同位素的分析结果, 建立潜水与微承压水的 $\delta D - \delta^{18}O\%$ 关系曲线, 分析潜水含水层与河流、湖泊等地表水体关系; 利用放射性同位素氚与 ^{14}C 研究微承压水与现代水的补给关系; 利用常规的水化学分析方法研究浅层地下水补给途径. 结合研究区地下水水位、地层岩性、地形、地貌等多方面因素综合分析了浅层地下水的补径排条件, 从而指导苏锡常地区浅层地下水合理开发利用.

[关键词] 环境同位素, 水化学, 补径排条件, 浅层地下水, 苏锡常

[中图分类号] P641 [文献标志码] A [文章编号] 1001-4616(2011)02-0107-06

Study on Replenishment Runoff and Discharge of the Shallow Groundwater Based on the Isotope and Hydrochemistry Analysis Methods

——For Example the Shallow Groundwater in Su-Xi-Chang Area

Zhang Lijuan¹, Chen Suozhong², Du Ee²

(1 Water Resources Service Centre of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China)

(2 Key Lab of Virtual Geographic Environment, Nanjing Normal University, Ministry of Education, Nanjing 210046, China)

Abstract On the basis of analysis and study of spatial distribution characteristics of shallow groundwater, this paper studies replenishment, runoff and discharge conditions of the shallow groundwater using isotope and hydrochemistry analysis methods in Su-Xi-Chang area. The $\delta D - \delta^{18}O\%$ curve is established for phreatic and micro confined underground water by the analysis results of hydrogen and oxygen isotope. According to the $\delta D - \delta^{18}O\%$ curve, analyzing the relations of the phreatic aquifer with rivers, lakes and other surface water, and the evaporation degree of micro confined groundwater. The replenishment relations of micro confined groundwater and modern water are studied by radioisotope tritium and ^{14}C . The problem of the shallow groundwater replenishment sources change is studied by the conventional method of chemical. That synthetically analyze the conditions of shallow groundwater replenishment, runoff and discharge combining with groundwater level, lithology, topography and other aspects, in order to guide the rational development and utilization of shallow groundwater in Su-Xi-Chang.

Key words environmental isotope, water chemistry, recharge, runoff and discharge conditions, shallow groundwater, Su-Xi-Chang area

苏锡常地处长江三角洲, 长期以来一直超量开采深层地下水资源, 诱发了地面沉降、地裂缝等一系列环境地质问题, 大面积地面沉降使原来地势十分低洼的平原区向沼泽化方向发展, 生态、建设环境不断恶化, 已影响到区内国民经济的可持续发展. 针对这一问题, 江苏省人大于 2000 年下达苏锡常地区地下水禁采令, 目的是使地下水位逐步恢复, 以缓解和控制地质灾害的继续发生. 禁采后, 苏锡常地区引用长江水与

收稿日期: 2011-03-17

基金项目: 国家“863”计划 (2009AA12Z223)、江苏省高校自然科学研究重大项目 (10KJA170028).

通讯联系人: 陈锁忠, 教授, 博士生导师, 研究方向: 科学计算可视化与水文地质学. E-mail: 09153@njnu.edu.cn

太湖水作为供水水源,但是在供水管网未达的乡村地区及对水质具有特殊要求的企业供水矛盾较为突出,需要寻找新的供水水源.为此,许多水文地质学专家提出开发利用浅层地下水设想,他们认为:苏锡常地区浅层地下水资源广为分布发育,水质较好,因直接接受大气降水的入渗补给,其补给资源量较为丰富,开发利用浅层地下水能缓解苏锡常一些地区的用水矛盾^[1].

由于苏锡常地区以往水、工、环地质工作重点在于深层地下水的水文地质条件和资源方面的勘察及评价,导致对浅层地下水资源的研究甚少,特别是对浅层地下水补给、径流与排泄条件研究程度较低,不足以支持浅层地下水资源合理开发方案的制定,需要进一步开展勘查工作.然而采用传统方法进行浅层地下水补、径、排条件勘查,将耗费巨大财力,并且需要各级行政管理部門的协调,调查周期长,在目前市场经济环境下较难实现.因此,本文针对上述问题,采用同位素与水化学分析相结合的方法,尝试在较短的时间内以及有限经费的条件下研究苏锡常地区浅层地下水的补给、径流与排泄条件.

1 浅层地下水空间分布概况

至目前为止,关于浅层地下水的定义在国际上尚未统一,不同地区,浅层地下水的补、径、排条件不同,深度范围也有所区别.根据苏锡常地区的水文地质条件,确定浅层地下水为积极参与浅部水循环交替的地表以下 20~ 50 m 深度范围内的潜水和微承压水.

1.1 潜水

潜水含水层主要由全新世与部分晚更新世时期的湖积、冲湖积亚粘土、亚砂土和粘土层组成,由于受沉积环境不同的影响,故含水层岩性、厚度及底板埋藏条件亦有所不同,主要分为沿江区、苏东区与常锡区.其中沿江区分布于江阴 张家港 常熟一线长江沿岸,地形平坦;水位埋深 1~ 2 m,局部地区小于 1 m;岩性多为冲积相、滨海相灰黄色、灰色亚砂土、粉砂夹亚砂土薄层,局部有粉砂透镜体,含水层底板埋深一般小于 15 m.苏东区分布于苏州东部阳澄湖、澄湖水网地区、吴江南部地区,该区水域面积较大,地势较低洼;水位埋深 1~ 2 m;含水层岩性多为湖积相、湖沼相灰色、灰黄色、青灰色的亚粘土、淤质亚粘土、亚砂土及亚粘土夹粉砂薄层,含水层底板埋深一般在 6~ 10 m.常锡区分布于常州 江阴南部 无锡 苏州市以西的广大平原地区;该区地势相对较高,地下水位埋深一般大于 3 m,局部地区为 1~ 3 m;含水层岩性多为冲积相、湖积相灰黄色亚粘土、亚砂土;含水层底板埋深一般小于 6 m,局部地区 6~ 10 m.

1.2 微承压地下水

除基岩山区及江阴、常熟等地残丘周围含水层缺失外,其他地区皆有分布.含水层岩性多为灰、灰黄色粉砂和粉砂夹亚粘土薄层,其顶板埋深 4~ 12 m,底板埋深在 25~ 50 m 间.受沉积环境控制,含水砂层在平面分布上具有条带状展布规律.在平面空间上可划分为隔湖 常州市区 圩塘、硕放 北桥-辛庄 沙家浜-梅李 与无锡硕放东-东桥 苏州 郭巷-角直-千灯三个条带.其中隔湖 常州市区 圩塘条带呈北东向展布,含水层顶板埋深 6~ 8 m,岩性为粉砂、亚砂土、亚砂土夹粉砂薄层;条带中心厚余镇-西横桥镇 常州市区-龙虎塘镇 利港一线,砂层厚度一般均大于 15 m,向两侧方向,含水砂层逐渐变薄,奔牛-安家舍-魏村以西,戴溪-戚墅堰区 无锡江阴以东地区,砂层厚度小于 5 m,其他地区 5~ 15 m 不等.硕放-北桥-辛庄 沙家浜-梅李条带在常熟西南又分支出王庄-港下-塘市-张家港支线;含水顶板埋深较小,介于 0~ 6 m 之间,张家港、常熟等沿江地带的局部地区缺失;条带中心砂层厚度普遍大于 10 m,含水层岩性为粉、细砂,苏州市区以北至常熟的北部,含水层上部分布一层亚砂土;在张家港、常熟北部沿江地区大于 15 m,条带两侧含水砂层明显变薄变细,在常州戚墅堰以东,羊尖镇-东湖塘镇-璜塘镇以西,江阴以南的无锡大部分地区,含水层厚度小于 5 m,含水层岩性由粉、细砂过渡为亚砂土,其他地区介于 5~ 10 m 之间.无锡硕放东-东桥-苏州 郭巷-角直-千灯条带含水层顶板埋深 6~ 8 m,含水层岩性为粉砂,亚砂土,亚砂土夹薄层粉砂,砂层厚度 9~ 15 m 不等,其中在角直镇厚度最大,为 40.56 m,含水层厚度小于 5 m 主要分布在条带边缘区,包括苏州西部基岩山区外围,苏州市北郊陆墓-黄桥-蠡口-阳澄湖区域,昆山市以北,常熟支塘以东至太仓的广大地区以及吴江市同里周庄以南的大部分地区.

在垂向空间上,大部分地区呈上、下两层分布,20 m 以浅含水层岩性多为粉细砂、粉土、粉质粘土夹薄层粉砂,基本上全区发育,分布较为稳定;除武进横林至无锡市西部地区发育较差外,其他地区均较稳定,厚度为 5~ 25 m 左右;在 35~ 50 m 区段内,含水砂层多呈夹层状发育,层次较多,岩性较细,平面上变化复

杂, 分布很不稳定. 两层砂之间岩性在区域上也呈现规律性变化, 太湖平原区以粉质粘土为主, 长江三角洲地区主要为粉质粘土夹薄层粉砂、粉土 (千层饼状结构) 等, 局部地区上下两含水层与下部 I 承压含水层连通, 含水层厚度较大.

2 同位素与水化学分析样品

同位素分析样品有氢氧同位素、放射性同位素与碳同位素 3 种类型. 氢氧同位素样品 30 件, 其中潜水 9 个、微承压水 9 个, 地表水 9 个、深井水 2 个, 包气带水样 1 个; 放射性同位素氙样 10 个, 取样以开采示范井的潜水、微承压水为主, ¹⁴C 样 2 个, 为深层地下水. 氢氧同位素样品测试结果如表 1 所示, 放射性同位素氙的测试结果如表 2 所示. 水化学分析样品 240 件, 遍全区的每一个乡镇, 皆为全分析样. 同位素与水化学分析样采集时间为 2008 年. 此外, 为了进行对比分析, 将 1982 年全区采集的水化学样作为对比分析样^[2].

表 1 苏锡常地区地下水 δD-δ¹⁸O 测试结果一览表

Table 1 The δD-δ¹⁸O examining result of groundwater in Su-Xi-Chang area

点号	点位	样品性质	δ ¹⁸ O‰	δD‰	点号	点位	样品性质	δ ¹⁸ O‰	δD‰
T ₀₂	常州龙虎塘镇	微承压水	- 6. 5	- 56	T ₁₆	常熟市沙家浜	潜水	- 5. 2	- 53
T ₀₃	常州龙虎塘镇	潜水	- 3. 7	- 55	T ₁₇	常熟市福山镇	微承压水	- 6. 4	- 57
T ₀₄	常州龙虎塘镇	河水	- 5. 4	- 55	T ₁₈	常熟市福山镇	潜水	- 6. 8	- 56
T ₀₅	无锡山北乡	微承压水	- 2. 9	- 54	T ₁₉	常熟市福山镇	深井水	- 6. 8	- 59
T ₀₆	无锡山北乡	潜水	- 4. 4	- 53	T ₂₀	常熟市福山镇	河水	- 3	- 57
T ₀₇	无锡山北乡	运河水	- 4. 2	- 53	T ₂₁	张家港东沙	长江水	- 5. 4	- 52
T ₀₈	无锡市新安镇	太湖水	- 4. 6	- 53	T ₂₂	张家港市泗港	微承压水	- 5. 1	- 57
T ₀₉	苏州市工勘院	运河水	- 4. 3	- 51	T ₂₃	张家港市泗港	潜水	- 4. 8	- 57
T ₁₀	苏州市工勘院	微承压水	- 5. 8	- 53	T ₂₄	江阴市利港	微承压水	- 5. 6	- 54
T ₁₁	苏州市工勘院	潜水	- 5. 1	- 57	T ₂₅	江阴市利港	潜水	- 5. 9	- 56
T ₀₁	相城区黄埭	河水	- 3. 5	- 53	T ₁₀₁	吴江同里	雨水	- 4. 5	- 55
T ₁₂	相城区黄埭	微承压水	- 4. 9	- 57	T ₁₀₂	吴江同里	地表水	- 5. 1	- 56
T ₁₃	相城区黄埭	深井水	- 7	- 58	T ₁₀₃	吴江同里	潜水	- 5. 6	- 58
T ₁₄	相城区黄埭	潜水	- 3. 9	- 57	T ₁₀₄	吴江同里	微承压水	- 3. 4	- 53
T ₁₅	常熟市沙家浜	微承压水	- 6	- 55	T ₁₀₅	吴江同里	包气带水	- 5. 2	- 53

表 2 苏锡常氙同位素测试结果一览表

Table 2 The H³ examining result of groundwater in Su-Xi-Chang area

位置	第 I、II 承压水	微承压水	潜水
常州龙虎塘镇		(8±3) TU	(23±3) TU
苏州市相城区黄埭	< 1 TU	(6±3) TU	(5±3) TU
常熟市福山镇	< 1 TU	(5±3) TU	(4±3) TU
吴江同里		(5±3) TU	(4±3) TU

3 浅层地下水与大气降水、地表水、深层地下水关系分析

苏锡常地区浅层地下水补径排关系十分复杂, 前人在这面积累了大量的资料, 但与降雨、地表水的关系, 在不同地形、岩性等方面的运移机制, 人为活动方面的影响等因素尚未进行深入研究, 补径排机制并未完全查明. 为研究苏锡常地区浅层地下水的补径排条件, 在充分总结前人资料的基础上, 本文尝试从同位素、水化学成分角度, 结合地下水水位、地层岩性、地形、地貌等多方面综合分析, 以期得出比较合理的解释.

3.1 基于氢氧同位素分析

1961 年, 克雷格通过世界上一些河流、湖泊、降雨和雪的水样测定, 得出全球大气降水基本上都近似符合关系式 (1) (即通常所称的大气降水线)^[3-9]:

$$\delta D = 8 \times \delta^{18}O + 10 \tag{1}$$

通过对表 1 中氢氧同位素测试结果进行统计, 可得出苏锡常地区潜水与微承压水的 δD-δ¹⁸O‰ 关系曲线, 并将 δD-δ¹⁸O‰ 关系曲线与前人的大气降水线进行比较 (图 1), 分析图 1 可以得出:

苏锡常地区地表水、潜水与微承压水的 δD-δ¹⁸O 样点均处在该线的右下方, 说明无论地表水或浅层

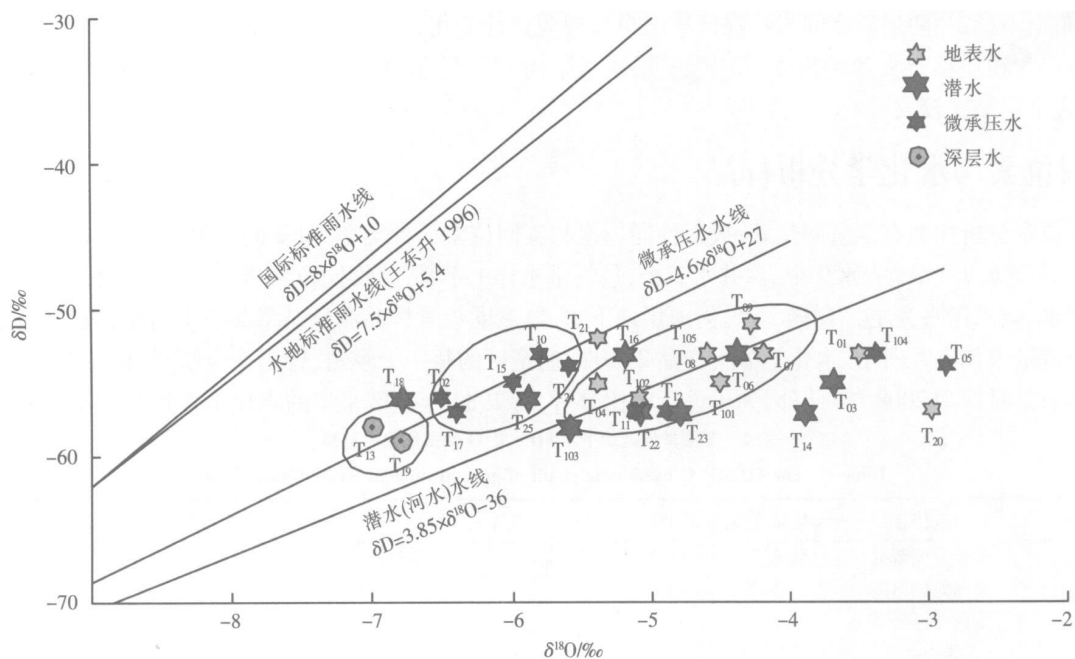


图 1 苏锡常地区地下水 $\delta D-\delta^{18}O$ 关系对比图

Fig.1 The $\delta D-\delta^{18}O$ relations contrast of groundwater in Su-Xi-Chang Area

地下水均受过不同程度的蒸发影响; 地表水体的 $\delta D-\delta^{18}O$ 关系曲线与潜水基本一致, 表明潜水与河流、湖泊等地表水体关系密切, 存在着相互补给、相互排泄的关系; 微承压水样点的 δD 与 $\delta^{18}O$ 关系点大部分落于潜水位左上方, 接近于雨水线, 可见微承压水的蒸发作用明显弱于潜水; 根据微承压水各样点的位置, 蒸发作用较为明显的样点, 如无锡市山北乡 (T₀₅)、苏州同里 (T₁₀₄)、黄埭 (T₁₂)、张家港 (T₂₂) 基本处于东部地区, 分析认为, 与苏州以东大部分地区潜水水位埋深较浅, 蒸发作用较为强烈有关.

3.2 基于放射性同位素分析

1952年人类开始热核爆炸, 大量的人工氚进入到大气中, 至 1963年左右达到了顶峰, 北半球大气降水氚值达到了 10 000 TU, 1971年下降至 30~ 150 TU; 而在 1952年以前, 降水中氚最大值不超过 10 TU, 4 次衰变后剩下 0. 62 TU. 因此, 低于 0. 62 TU 的水体基本上是 1952年以前补给的. 由表 2 的氚同位素测试结果分析可以得出: 微承压水氚的含量都在 5~ 8 TU 之间, 存在着人工氚, 验证了微承压水接受现代水补给的推测; 微承压含水层沉积时段为 10~ 3. 5 ka 之间, 常熟福山微承压水 ¹⁴C 化验结果表明该层水距今只有 (1 530 ± 60) a 证明了现代水补给了微承压含水层; 潜水中氚值普遍小于微承压水中的氚值, 分析认为潜水循环更新速度较快, 大气降水的补给较为迅速.

3.3 基于水化学分析

根据 1982 年与 2008 年全区潜水样品的测试结果, 可分别画出如图 2 与图 3 所示的三线图. 通过对比分析可得出:

1982 年: $6\% < Cl^- + SO_4^{2-} < 92\%$, 毫克当量 (mEq) 大于 60% 的样品占总数的 19. 4%;
 $10\% < HCO_3^- + CO_3^{2-} < 90\%$, 毫克当量 (mEq) 小于 40% 的样品占总数的 17. 3%.
2008 年: $10\% < Cl^- + SO_4^{2-} < 70\%$, 毫克当量 (mEq) 大于 60% 的样品只占总数的 1. 8%;
 $30\% < HCO_3^- + CO_3^{2-} < 90\%$, 毫克当量 (mEq) 小于 40% 的样品为 1. 68%.

可以看出 1982 年潜水样品 $Cl^- + SO_4^{2-}$ 及 $HCO_3^- + CO_3^{2-}$ 的毫克当量 (mEq) 的范围值较 2008 年大, 2008 年样品较多 (240 件), 分布于全区的每一个乡镇, $Cl^- + SO_4^{2-}$ 及 $HCO_3^- + CO_3^{2-}$ 的毫克当量 (mEq) 含量分布范围较为集中.

分析认为: 虽然全区潜水含水层的赋存条件各异, 但随着浅层地下水的使用, 水质有一种趋同作用, 它有别于潜水与贮存介质之间的物理化学作用, 理论上应属于补给源的趋同性质.

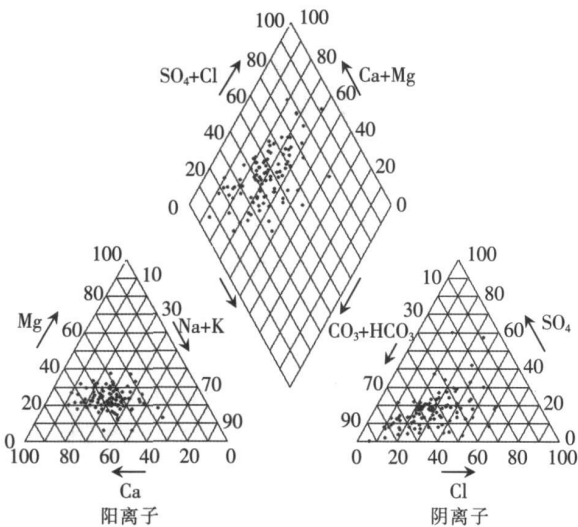


图 2 1982 年潜水三线图

Fig.2 The piper figure of phreatic water in 1982

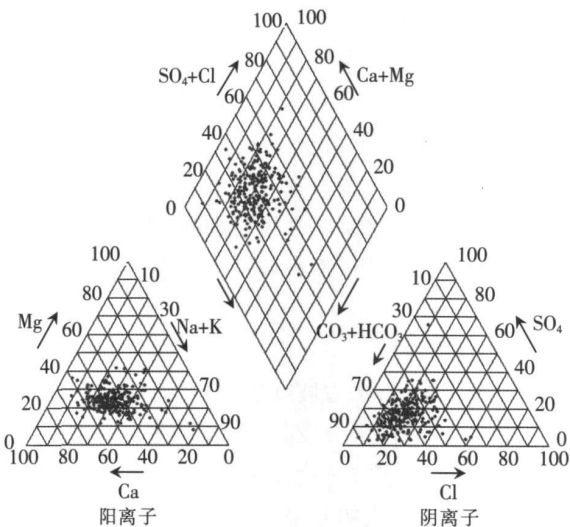


图 3 2008 年潜水三线图

Fig.3 The piper figure of phreatic water in 2008

4 浅层地下水补径排条件分析

通过上述同位素、水化学的探讨,对浅层水补径排方面有了一些初步认识,再结合地形、地貌、岩性、气候等条件进行综合分析,以期归纳出全区浅层水补径排关系。

4.1 补给条件

(1) 大气降雨入渗补给. 苏锡常地处亚热带湿润气候带,雨量充沛、地势平坦,包气带岩性多为粘土,但厚度不大,有利于降水的入渗,潜水动态与大气降水密切相关,潜水接受雨水、地表水体的补给,并对微承压水有越流补给作用,但潜水更新的速度要远大于微承压水.微承压水同样接受大气降水的补给影响,但不是直接性地被补层位,而是先补给潜水,然后由潜水越流补给微承压水。

以同里示范工程长期抽水试验为例:微承压水水位下降后,激发了上部潜水层的补给,潜水位也相应有所下降,但一次降雨过后,潜水位能迅速恢复(图 4),而在整个抽水过程中,微承压水位变化不大.但同时可以看到,由于近年来苏锡常城市进程加快,城市化水平较高,大片土地被水泥路面或工厂厂房覆盖,造成大气降雨入渗面积减少,一定程度上影响到潜水的补给资源量。

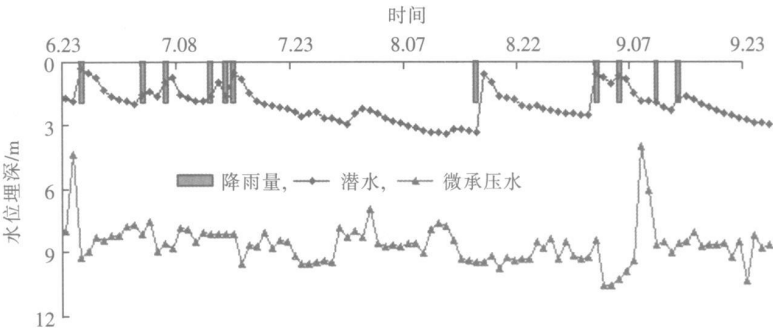


图 4 大气降雨量与浅层地下水位埋深关系曲线

Fig.4 The relations curve of rainfall and shallow groundwater

(2) 农田灌溉对潜水的补给. 据前人试验资料,全区灌溉水的回渗系数为 0.1~0.12,局部可达 0.2 以上,苏锡常地区水稻的大量种植成为全区潜水的重要补给源之一,年补给量可达 $3 \times 10^8 \sim 4 \times 10^8 \text{ m}^3$,近年由于经济的高速发展,工业化程度不断提高,水稻种植面积已大大减少,补给量有所减少。

(3) 地表水体的入渗、侧向补给. 河、湖等地表水体往往切割潜水含水层而与潜水连通,分布极为广泛,但由于潜水含水层颗粒极细,渗透系数小,水力坡度极小,潜水与河、湖水位基本保持一致,侧向径流补给量极为有限,一般影响范围在数百米之内,以互补、调控潜水水位为主。

4.2 径流条件

由于区内地势平坦, 潜水含水层岩性为亚粘土、细粉砂, 颗粒较细, 径流较为微弱, 造成地表水体的补给量小; 由于微地貌的变化, 地下水流一般由高亢处向低洼处径流. 地势较高的地区与较低的地区水位埋深往往相差无几, 但由于全区地势极为平坦, 潜水水力坡度极小, 河湖对潜水的侧向补给作用往往局限于河湖附近地带.

微承压水含水层岩性为粉细砂, 水平方向的渗透性明显强于潜水含水层, 其径流条件也明显要比潜水流好, 但在天然条件下, 水力坡度非常小, 径流微弱. 开采水平较高的常州地区水力坡度虽略有上升, 但只有 1/10 000 左右.

4.3 排泄条件

潜水埋藏浅, 水力坡度小, 蒸发消耗、人工开采、向微承压越流是潜水的主要排泄方式. 在水网化密度很高的地区, 潜水水位较高, 潜水蒸发量相对较大, 全区来看, 苏州以东地区蒸发量大于常州、无锡地区. 在雨季, 由于地下水排泄途径短, 过水断面较大, 向地表水体的排泄成为潜水的主要排泄方式.

深层地下水大幅开采后, 浅层地下水与深层地下水之间存在着较大的水位差, 在静水压力的驱动下, 浅层地下水将通过弱透水层越流排泄给深层地下水. 区内微承压水井逐渐增多, 人为开采已成微承压水的又一排泄方式.

5 结语

通过采用同位素与水化学分析法分析, 苏锡常地区地表水体的 $\delta D - \delta^{18}O$ 关系曲线与潜水基本一致, 表明潜水与河流、湖泊等地表水体关系密切, 存在着相互补给、相互排泄的关系; 微承压水氡的含量都在 5 ~ 8 TU 之间, 存在着人工氡, 微承压水 ^{14}C 化验结果表明该层水距今只有 $1\,530 \pm 60\,a$ 证明微承压水接受了现代水补给; 潜水中氡值普遍小于微承压水中的氡值, 分析认为潜水循环更新速度较快, 大气降水的补给较为迅速. 潜水的开发使用则加快大气降雨与地表水体(河、湖)的入渗补给, 促使潜水质趋向于一致性. 因此, 苏锡常地区浅层地下水主要接受大气降雨、农田灌溉以及地表水体的垂向与侧向入渗补给; 径流条件受区内微地貌控制, 浅层地下水流一般由高亢向低洼处径流; 蒸发消耗、人工开采、向微承压越流是潜水的主要排泄方式.

[参考文献]

- [1] 顾阿明, 王彩会, 朱锦旗. 苏锡常地区浅层地下水开发利用前景分析 [J]. 水文地质工程地质, 2003 30(4): 90-92
- [2] 陆徐荣, 朱锦旗, 王彩会. 环境同位素技术释解苏锡常地区浅层地下水水循环机制 [J]. 水文地质工程地质, 2006 33(4): 52-55
- [3] 王杰, 王文科, 田华, 等. 环境同位素在三水转化研究中的应用 [J]. 工程勘察, 2007, 7(3): 31-39
- [4] 侯新伟, 李向全, 陈浩. 汾河中游干流河水与大气降水和浅层地下水的转化关系 [J]. 水文地质工程地质, 2008, 12(6): 38-49
- [5] 钱云平, 林学钰, 秦大军. 应用同位素研究黑河下游额济纳盆地地下水 [J]. 干旱区地理, 2005 10(5): 574-580
- [6] 于艳青, 余秋生, 薛忠歧, 等. 同位素技术判定银川平原地下水补给模式 [J]. 宁夏工程技术, 2005, 6(3): 208-212
- [7] Vandenshrieck G, Van Wesemael B. Using stable isotope analysis ($\delta D - \delta^{18}O$) to characterize the regional hydrology of the Sierra de Gador south east Spain [J]. Journal of Hydrology, 2002(265): 43-55
- [8] Aggarwal P K, Froehlich K, Gonfiantini R, et al. Isotope hydrology: a historical perspective from the IAEA [M] // Aggarwal P K, Gaj R, Froehlich K. Isotopes in the Water Cycle: Past, Present and Future of a Developing Science. Berlin: Springer, 2005: 3-8
- [9] Mook W G. Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle [M]. Paris: UNESCO, 2000

[责任编辑: 丁 蓉]