

长江下游沿江升金湖河湖过渡带地下水来源及水质影响因素分析*

崔玉环¹, 王杰^{2**}, 刘友存³, 郝泷¹, 周婷⁴

(1: 安徽农业大学理学院, 合肥 230036)

(2: 安徽大学资源与环境工程学院, 合肥 230039)

(3: 嘉应学院地理科学与旅游学院, 梅州 514015)

(4: 安徽农业大学工学院, 合肥 230036)

摘要: 为探究河湖过渡带地下水来源及其水质影响因素, 本文分析了不同水体氢氧同位素的分布特征, 确定地下水的补给来源, 而后采用贝叶斯混合模型 (MixSIAR) 定量解析不同补给源对地下水的贡献率, 并计算混合水源对地下水酸碱度 (pH)、电导率 (Cond) 和总溶解固体 (TDS) 的贡献量, 探究水源混合对地下水水质的影响。研究发现: 近长江和湖岸的地下水同位素特征与长江水、湖水接近, 其水力联系密切, 而中部地下水同位素特征与河水接近, 受河水补给明显; 河水对地下水的贡献率最大, 约为 47%, 降水贡献率约为 20%, 湖水和长江水的贡献率分别约为 16% 和 17%; 混合水源对 pH 的贡献率接近 100%, 对 Cond 的贡献率约为 70%, 而对 TDS 的贡献率很小。此外, 生活污水、农业污染等外源输入也会导致地下水 pH 下降, Cond 和 TDS 明显升高。

关键词: 地表-地下水转换; 氢氧同位素; MixSAIR 模型; 水源混合; 河湖过渡带; 升金湖

Groundwater sources and the influencing factors on water quality in the river-lake transition zone of Lake Shengjin, lower reaches of the Yangtze River*

Cui Yuhuan¹, Wang Jie^{2**}, Liu Youcun³, Hao Shuang¹ & Zhou Ting⁴

(1: School of Science, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, P.R.China)

(2: College of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230039, P.R.China)

(3: School of Geography Science and Tourism, Jiaying University, Meizhou 514015, P.R.China)

(4: School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, P.R.China)

Abstract: The distribution characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ and δD in precipitation, surface water and groundwater are analyzed, and the potential recharge sources of groundwater are determined. Then the MixSIAR model is used to calculate the contribution rate of different recharge sources to groundwater quantitatively, and the influence of water source mixing on groundwater's quality is also analyzed. The results show that the characteristics of $\delta^{18}\text{O}$, δD in groundwater near the Yangtze River and the lake are similar to those in the Yangtze River and lake, indicating that a close hydraulic connection exists. While $\delta^{18}\text{O}$, δD values in groundwater located in the middle region are similar to those in rivers, indicating that groundwater is mainly recharged by rivers. The contribute ratio of the river to groundwater is the largest, about 47%, that of precipitation is about 20%, lake and the Yangtze River are about 16% and 17%, respectively. The contribution rate of the mixed water source to the pH of the groundwater is close to 100%. And the contribution rate of the mixed water source to conductivity is about 70%, contributes the conductivity value in most of the groundwater samples, but only contributes a small part of the total dissolved solids value.

Keywords: Surface water-groundwater interaction; hydrogen and oxygen isotopes; MixSIAR model; water source mixing; the river-lake transition zone; Lake Shengjin

* 2020-12-07 收稿; 2021-02-18 收修改稿。

国家自然科学基金项目 (41401022, 41861002, 41801332)、安徽高校自然科学研究项目 (KJ2019A0045) 和安徽省自然科学基金项目 (2008085ME158) 联合资助。

** 通信作者; E-mail: wangjie@ahu.edu.cn.

河湖过渡带是河流和湖泊之间的过渡区域^[1],也是河水、湖水与地下水相互作用的关键区域,对河湖与陆地之间的水力联系和碳氮交换起着纽带作用^[2-3]。在河湖季节性水文情势或洪水过程的影响下,河湖过渡带中具有不同化学离子和营养盐成分的地表水(江水、河水、湖水)与地下水转换频繁,过程复杂,不仅对区域水分传输起着重要的调节作用^[4-5],同时还直接参与其生物地球化学循环过程,进而引起地下水化学组分的变化^[6]。作为我国淡水湖群最集中地区,长江中下游地区河湖过渡带分布广泛,人口聚集,流域水污染状况日益突出。因此,深入开展河湖过渡带地下水的来源解析,以及研究混合水源对地下水水质的影响,对流域水环境保护、水资源开发以及饮用水安全均具有重要意义。

河湖地区地下水与地表水的转化方式、途径与转化量的研究,一直是国内外关注的重要科学问题。随着地表水与地下水相互作用研究的不断细化和量化,人工示踪法、水化学和环境同位素越来越多地用来估算两者的转化量^[7-8]。处于水循环系统中的不同水体,因其成因不同而具有不同的同位素组成特征,即氢($\delta^2\text{H}$ 或 δD)和氧($\delta^{18}\text{O}$)同位素的富集程度不同^[9]。依据不同水体中同位素浓度的变化,能够示踪其形成和运移方式,探究变化环境下的水循环规律及水体间的相互关系^[10-11]。

相关研究发现^[3,7],河湖等地表水与地下水的季节性补排关系具有空间差异性,在有些区域地下水补给河流湖泊,而同时期有些地区则是河湖水补给周边地下水。Wang等^[12]依托野外调查和同位素示踪技术,提出了黄河流域河水与地下水之间的8种转化方式,并通过室内模拟实验揭示了河水与地下水转化方式对转化量的影响机理。Ala-Aho等^[13]以芬兰北部湖泊、河流和湿地为综合体,基于耦合数值模型定量计算了地表水与地下水之间的转化量,并揭示了转化量的时间变异性及空间分布。詹庐成等^[14]通过对洞庭湖区4月和8月降水、地表水和地下水氢氧同位素的测试分析,得出不同水体的同位素特征,及它们之间的水力联系。上述研究从流域尺度上分析了地表水与地下水的转换过程,但在位于长江、湖泊之间的河湖过渡带,不同水体间的水力联系复杂多变,地表水与地下水之间的补排关系随时间的变化规律,以及水源混合对区域地下水水质的影响情况等,目前仍不清楚。

升金湖国家自然保护区是国际重要湿地,也是我国重要的越冬鹤类栖息地,地处长江中下游河湖过渡带,其地下水环境对保障当地居民生产生活、湿地生物多样性有着重要影响。鉴于此,本研究以长江中下游升金湖河湖过渡带为研究区,自2015年3月—2016年2月按月收集该地区的大气降水,并于2017年4月中旬全面采集地表水(河水、湖水和长江水)、地下水水样,根据不同水体的氢氧同位素测定数值分析不同水体中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的变化特征,并通过MixSAIR模型进行混合水体来源解析,并探究该区域地表水对地下水的补给规律,旨在揭示大气降水、地表水和地下水之间的水力联系,从而分析不同水体补排对地下水质的影响,以期水利工程施工、生态环境保护与治理提供理论指导。

1 数据与方法

1.1 研究区介绍

研究区位于安徽省池州市境内,地处通江湖泊升金湖与长江的过渡带,北、西濒临长江,南与升金湖相接,东侧由黄湓河将升金湖与长江连通(图1)。研究区属于升金湖西北沿江冲积平原,为第四纪地层构造,土壤以黄色亚黏土和砂砾土为主^[15]。地势从西北向东南逐渐降低,土地肥沃,水网密集,为长江中下游平原重要的人口集聚区与集约农业种植区。根据国产高分一号影像遥感解译统计,该区域的农业用地、建设用地分别占总面积的37%和22%,林地仅占1%左右。年平均降水量约为1600 mm,且受亚热带季风影响,主要集中在夏季,约占50%,地表径流丰富。

为了有效控制升金湖水位,在湖泊至长江出口的黄湓河上建有黄湓闸,汛期拒江水倒灌入湖,汛后排泄湖泊渍水,干旱年份引江水入湖或关闸蓄水,在一定程度上维持升金湖水位,减少干旱年份湖泊过度萎缩的风险。但该闸的运作,导致该地区地表水、地下水之间的水力关系更为复杂,地下水受长江、湖泊和河水的综合影响较大。

1.2 水样采集与分析

本研究于2017年4月13—15日对研究区进行水文化学调查,共布设33个采样点(图1)。其中布设6个河流水采样点(Ch31、Ch32、Ch41、Ch11、Ch12和Ch21),21个地下水采样点(D11~D48),在长江干流布设

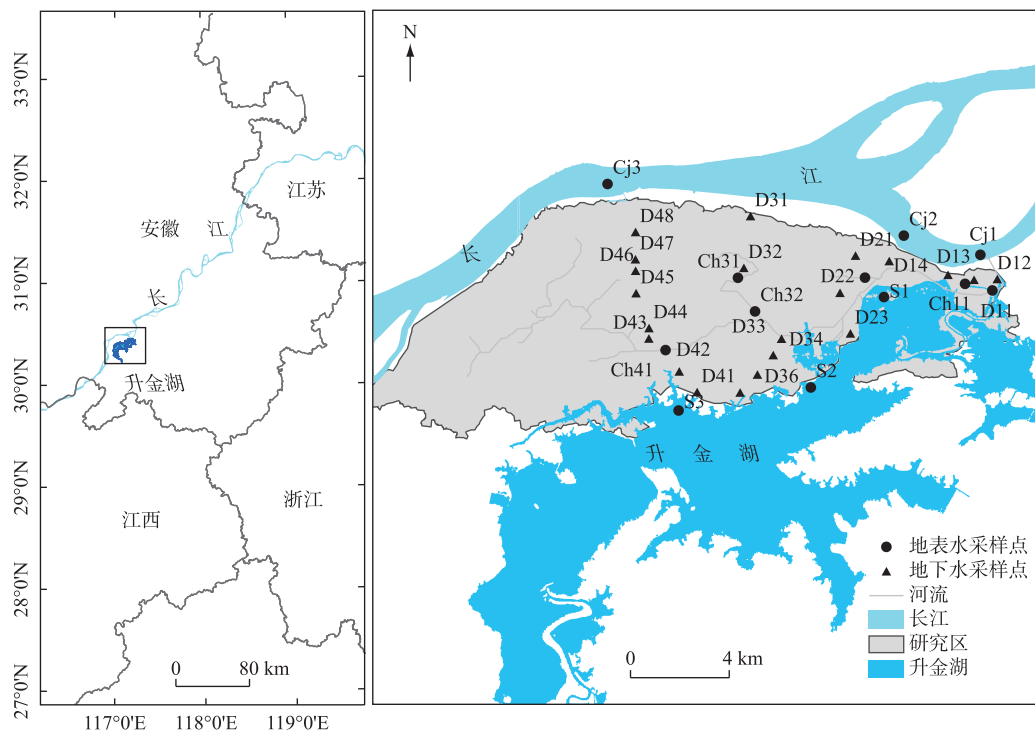


图1 研究区采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites in the study area

3个采样点(Cj1~Cj3),在升金湖布设3个采样点(S1~S3).除了Ch31、Ch32和Ch41位于新河干流的采样点外(新河为农业区的引水灌溉渠道,采样期处于基本不流通状态),河湖水样均采集于流速较大的地方,到岸边距离大于2 m.地下水采样点除D31(农田灌溉水井)以外,均为居民区地下水井,均采集于井深6~9 m的浅层潜水井,且在水样采集时用小型抽水泵抽取水井底部水体,以减少水深差异对同位素值的影响.另外,为了分析研究区降水、地表水与地下水之间的转化关系,本研究自2015年3月至2016年2月按月收集升金湖地区大气降水,测定研究区降水中的 δD 和 $\delta^{18}O$.

采样时,用便携式哈希水质测定仪(HQ40d)现场测定水体的pH、溶解氧(DO)、电导率(Cond)和总溶解固体(TDS)等参数,并将采集的水样用0.45 μm 玻璃纤维滤膜现场过滤,然后用500 mL聚乙烯瓶收集水样品,当日送至实验室进行水化学测试(例如总氮(TN)、总磷(TP)、硝酸盐(NO_3^-)浓度等).另外用水样冲洗的2 mL棕色小口玻璃瓶分装水样,放置于4℃冰箱中冷藏保存,用于后期测定水体 δD 和 $\delta^{18}O$.

水样化学组分测试中,TP浓度采用钼酸铵分光光度法测定,TN浓度采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定, NO_3^- 浓度用戴安ICS-1500离子色谱仪分析.氢氧同位素室内测试在中国农业科学院环境稳定同位素实验室完成,采用TC-EA高温裂解,制备出 H_2 和 CO 之后再进行同位素的测定,采用维也纳平均海水(VSMOW)为标准样, δD 和 $\delta^{18}O$ 的测定精度分别达到 $\pm 0.2\text{‰}$ 和 $\pm 0.01\text{‰}$.

1.3 贝叶斯混合模型

在水文混合模型中,假定水体的成分是来自不同来源特征的综合混合物^[16],可以使用 n 个不同的示踪剂来唯一确定 $n+1$ 个源对混合物的贡献比率^[17].贝叶斯混合模型可以用来识别多个(>3)源并计算它们对混合物的贡献^[18-19],该模型基于狄利克雷分布,在贝叶斯框架下构建了一个逻辑先验分布.本研究利用由R包创建和运行的贝叶斯混合模型(MixSIAR版本3.1.10)^[20]来量化研究区地下水不同补给来源的贡献比率.

1.4 混合水源对水化学参数的贡献

地下水中pH、Cond和TDS等水质参数受补给水源混合和存储环境化学离子输入的综合影响,其中补给

水源对水化学参数浓度的贡献量可用下式计算:

$$\text{pH}_i = \text{pH}_{\text{长江水}} \cdot x_{i\text{长江水}} + \text{pH}_{\text{湖水}} \cdot x_{i\text{湖水}} + \text{pH}_{\text{河水}} \cdot x_{i\text{河水}} + \text{pH}_{\text{降水}} \cdot x_{i\text{降水}} \quad (1)$$

$$\text{Cond}_i = \text{Cond}_{\text{长江水}} \cdot x_{i\text{长江水}} + \text{Cond}_{\text{湖水}} \cdot x_{i\text{湖水}} + \text{Cond}_{\text{河水}} \cdot x_{i\text{河水}} + \text{Cond}_{\text{降水}} \cdot x_{i\text{降水}} \quad (2)$$

$$\text{TDS}_i = \text{TDS}_{\text{长江水}} \cdot x_{i\text{长江水}} + \text{TDS}_{\text{湖水}} \cdot x_{i\text{湖水}} + \text{TDS}_{\text{河水}} \cdot x_{i\text{河水}} + \text{TDS}_{\text{降水}} \cdot x_{i\text{降水}} \quad (3)$$

式中, pH_i 、 Cond_i 和 TDS_i 指混合水源对第 i 个地下水样 pH、Cond 和 TDS 的贡献量, $x_{i\text{长江水}}$ 、 $x_{i\text{湖水}}$ 、 $x_{i\text{河水}}$ 和 $x_{i\text{降水}}$ 分别为长江水、湖水、河水和降水对第 i 个地下水样的贡献率。

2 结果与讨论

2.1 氢氧同位素特征分析

2.1.1 降水同位素特征 本文根据 2015 年 3 月—2016 年 2 月按月收集的大气降水数据, 分析降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素、月降水量的年内变化趋势。由图 2a 可知, 研究区降水量年内分配不均匀, 1—4 月降水量占全年降水量的 26.3%, 5—9 月占全年降水量的 63.3%, 10—12 月占全年降水量的 10.4%; 其中月降水量在 7 月最高 (465.8 mm), 占全年降水量的 20.5%。降水 $\delta^{18}\text{O}$ 在 6—9 月最小, 其余月份较大, 主要原因在于: 研究区 6—9 月属于夏季季风期, 降雨充沛, 水汽的同位素在多次冷凝后变得越来越贫化, 而其余月份主要受冬季季风影响, 气团主要来自高纬度的亚洲内陆, 所携带的水汽同位素值偏正, 降水同位素富集, 这也是中低纬季风区 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 存在的一个普遍特点^[21-23]。

降水同位素是一种非常理想的天然示踪剂, $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD 在蒸发过程中将保持线性关系, 不同月份的降水蒸发后都沿着各自的蒸发线分布。研究区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD 的关系见图 2b, 进而获得对应降水线 LMWL: $\delta\text{D} = 8.18\delta^{18}\text{O} + 22$ 。该地区降水线斜率大于全球降水线斜率 8, 反映出水循环过程中稳定同位素非平衡分馏的影响^[24], 其截距也明显大于全球降水线的截距 10‰, 与稳定同位素动力分馏和局地气候有关^[25-27]。研究区降水线的斜率和截距与长沙^[28]、桂林^[29]和南京^[29]等地的大气水线差别不大, 反映了这些地区在受季风影响程度与降水水汽来源等方面具有相似性。

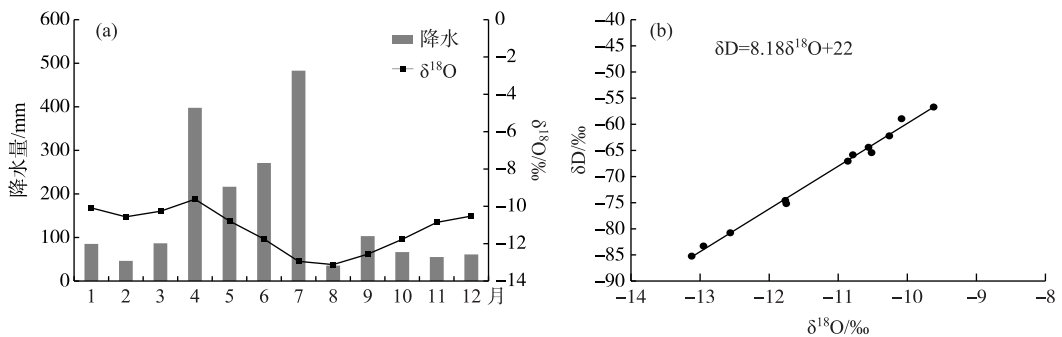


图2 研究区月降水量、氢氧同位素变化特征:(a)降水量与 $\delta^{18}\text{O}$ 的月变化过程;
(b) 研究区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD 的关系

Fig.2 Monthly variation characteristics of δD , $\delta^{18}\text{O}$ and precipitation: (a) the monthly change process of precipitation and $\delta^{18}\text{O}$; (b) the relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and δD of precipitation in the study area

2.1.2 地表水与地下水同位素特征 从研究区地表水、地下水中氢氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD 的关系 (图 3a) 可以看出, 在地表水体中, 河水的氢氧同位素最富集, $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD 平均值最大, 湖水的次之, 而长江水的 $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD 值最小。地表水 $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD 的关系点基本都落在降水线 LMWL 之下, 得到地表水拟合线为 $\delta\text{D} = 8.00\delta^{18}\text{O} + 19.8$, 斜率和截距均小于降水线, 这说明本地区地表水补给源主要来自大气降水。根据地表水 $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD 的关系可将水样分成两组, A 组包括长江水和湖水, 受降水补给, 更新速度较快, 同位素较为贫乏; B 组包括新河等流通性较差水体, 在蒸发作用下, 同位素最为富集。同位素在蒸发分馏时, δD 的富集速率远大于 $\delta^{18}\text{O}$ ^[28], 使得新河等流通性差的水体 δD 富集较 $\delta^{18}\text{O}$ 快, 进而导致地表水蒸发线斜率小于降水线斜率。

由图 3b 可以看出,地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 值范围为 $-5.41\text{‰} \sim -8.68\text{‰}$,均值为 -7.07‰ , δD 值范围为 $-18.7\text{‰} \sim -51.7\text{‰}$,均值为 -35.96‰ ,由于地下水埋深和来源不同,不同样点 $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD 值存在较大差异. 本研究所得地下水拟合线为 $\delta\text{D} = 9.78\delta^{18}\text{O} + 33.1$,斜率和截距均大于降水线. 由于水体水分来源不同,同位素值差异较大,按照 $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD 同位素关系可分成两组:A 组包括近长江和湖岸的样点, $\delta^{18}\text{O}$ 最大值为 -7.06‰ ,最小值为 -8.67‰ ,均值为 -7.73‰ , δD 值最大为 -36.65‰ ,最小为 -51.7‰ ,均值为 -42.52‰ ,同位素较为贫乏,且该组地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD 同位素值和长江、湖泊水接近,与长江、湖泊水体之间的水力联系紧密;B 组包括采样区中部大部分采样点, $\delta^{18}\text{O}$ 最大值为 -5.41‰ ,最小值为 -6.75‰ ,均值为 -6.00‰ , δD 最大值为 -18.7‰ ,最小值为 -33.2‰ ,均值为 -25.69‰ ,同位素较为富集,且该组地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD 同位素值和河水接近,说明其与河水之间水力联系更为密切.

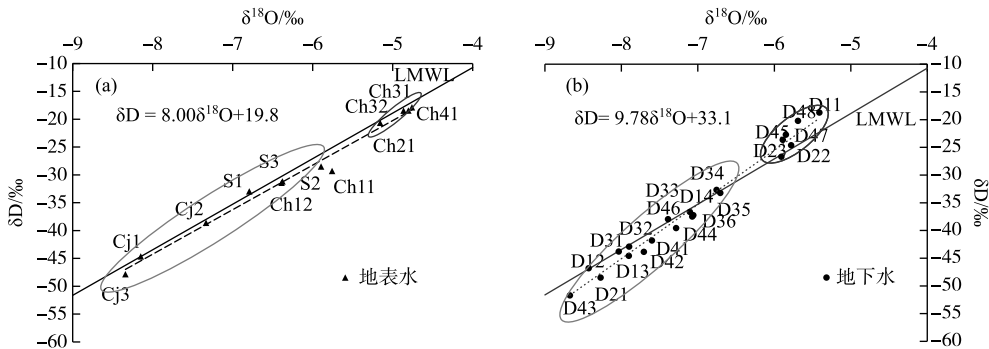


图 3 研究区地表水(a)和地下水(b)中 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 的关系

Fig.3 Relationship between δD and $\delta^{18}\text{O}$ in surface water (a) and groundwater (b)

2.2 地下水补给来源解析

通过分析地表、地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值的特征发现,研究区地下水与长江水、湖水和河水之间的水力联系密切,此外降水也是地下水的一种重要来源. 考虑到本研究采样期为 4 月中旬,研究区还未进入雨季,地下水位要低于地表水(表 1),忽略了地下水向地表水的补给,仅考虑地表水向地下水的补给水量. 因此,本研究确定地下水具有长江水、湖水、河水和降水这 4 种补给水源(即混合水源). 根据实地调查结果统计,上述 4 种补给水源的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 数值范围如表 1 所示.

表 1 采样期不同水体 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的数值范围及对应水位

Tab.1 The value ranges of $\delta^{18}\text{O}$ and δD and water levels in different types of water bodies

来源	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$			$\delta\text{D}/\text{‰}$			水位/m
	最大值	最小值	平均值 \pm 偏差	最大值	最小值	平均值 \pm 偏差	平均值 \pm 偏差
长江水	-5.7	-11.0	-8.2 ± 1.4	-29.9	-75	-48.8 ± 12.2	9.9 ± 0.2
湖水	-4.6	-8.8	-6.8 ± 1.1	-20.7	-54.8	-39.3 ± 9.2	10.3 ± 0.3
河水	-4.8	-6.4	-5.4 ± 0.7	-17.9	-31.4	-13.0 ± 5.9	9.4 ± 1.0
降水	-10.1	-13.1	-11.4 ± 1.1	-58.9	-85.2	-71.3 ± 9.1	—
地下水	-5.4	-8.7	-7.1 ± 1.0	-18.7	-51.7	-35.9 ± 9.6	7.5 ± 1.3

根据表 1 中长江水、湖水、河水和降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 实测数值,利用 MixSIAR 模型定量计算了采样期长江水、湖水、河水和降水对每个地下水样的贡献率(图 4). 结果发现,河水对地下水的贡献率最大,范围为 26%~75%,均值为 47%;其次为降水,范围为 4%~41%,均值为 20%;湖水和长江水贡献率接近,范围分别为 13%~20%和 5%~21%,均值分别为 16%和 17%.

结合图 1 分析,地下水样点 D11、D22、D23、D41 和 D42 位于研究区中部的河道周边,主要受河水补给,贡献率高达 60%以上,D12、D13、D21、D31、D32、D43~D48 基本位于长江南岸,受降水和长江水的补给较高,

总贡献率达 50% 左右,湖水对每个地下水样点的补给差异较小,贡献率在 16% 左右. 前期相关研究^[30] 分析了 2015—2017 年长江安庆段、升金湖水位的年际变化特征,以及黄湓闸控水运作方式,夏、秋季长江高水位,黄湓闸防止长江水倒流而关闭,长江水侧渗补给周边地下水,冬、春季长江水位回落,开闸放水,湖泊水向周边地下水补给. 本研究的采样期处于长江高水位期并向周围地下水下渗补给,导致了长江南岸的地下水样受长江水补给较大. 另外,研究区河水为农业区的引水灌溉渠道,受水闸控制,采样期处于春季引水灌溉之后,因此模型解析结果表明河水对地下水的贡献率最高.

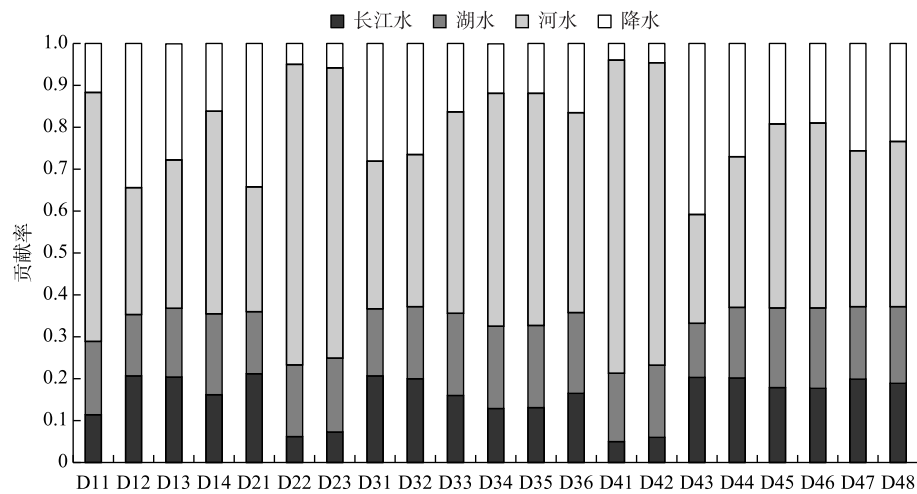


图 4 长江水、湖水、河水和降水对地下水的贡献率

Fig.4 Contribution ratios of Yangtze River, lake, surface water and precipitation to groundwater

2.3 水源混合对地下水水质参数的影响

由于不同水体之间的化学转换非常复杂且很难定量,因此本研究重点考虑水源混合和外源输入对地下水 pH、Cond 和 TDS 实测水质参数的影响. 为探究水源混合(长江水、湖水、河水和降水)对研究区地下水水质的影响,本文根据 MixSIAR 模型解析得到各类水源对地下水的贡献率,结合对应 pH、Cond 和 TDS 的实测值(表 2),进一步计算混合水源对各地下水样 pH、Cond 和 TDS 的贡献量(公式(1)),并计算地下水中混合水源对水质参数的贡献率,贡献率=(贡献量/实测值)×100%,结果见图 5a.

表 2 长江水、湖水、河水和降水的 pH、Cond 和 TDS 实测值(平均值±偏差)

Tab.2 The pH, Cond and TDS values of Yangtze River, lake, river water and precipitation

来源	pH	Cond/(μ S/cm)	TDS/(mg/L)
长江水	8.2±0.5	288.7±14.7	193.3±10.2
湖水	7.6±0.2	183.7±7.9	121.7±5.0
河水	8.1±0.6	327.2±30.6	218.7±21.5
降水	4.7±0.5	37.1±24.7	25.8±20.6

从图 5a 可以看出,来自混合水源的 pH 贡献量与实测值接近,但在 D11、D14、D22、D23、D33~D36、D41、D42 地下水样的贡献值略大于实测值,混合水源基本决定了地下水的酸碱度;混合水源对地下水 Cond 的贡献率在 50% 以上(除了 D21、D34 和 D47),均值为 69%,贡献了绝大部分地下水的 Cond 值;混合水源对地下水 TDS 在 D11、D22、D34~D36、D45 和 D48 的贡献率在 50% 左右,其他样点均较小,贡献率均值为 37%,混合水源仅贡献了小部分的地下水 TDS 值. 结合图 1 中地下水点位和图 4 中混合水源对地下水的贡献率发现,混合水源对地下水 pH 贡献值与实测值的较大误差出现在 D11、D14、D22、D23、D33~D36、D41、D42 等受河水补给较大的地下水样点,河水补给率达 60% 以上,对地下水 Cond、TDS 贡献值与实测值的较大误差出现在 D12~D14、D21、D23、D31~D33、D47 等受河水或长江水补给较大的地下水样点,这与地下水存储环境化学离子的外源输入有关.

已有研究发现水体电导率的大小取决于含水层的岩性及人类生产活动的影响^[31],并将电导率作为检测生活粪便污染、工业污水等排放物的主要指标^[32]. 江南等^[33]和陈银萍等^[34]在对长江上游农业流域和兰州农村浅层地下水水质研究中也发现了 pH 值与 NO_3^- 浓度呈现负相关关系. 前期研究发现研究区地下水中污水/粪便对硝酸盐的贡献高达 70% 以上^[35],这会导致较大的 Cond 值出现,进而影响 TDS 值,因此,本研究将 NO_3^- 浓度作为外源输入的标志参数,以混合水源对地下水 pH、Cond 和 TDS 的贡献量与实测值的差值作为外源贡献量 (ΔpH 、 ΔCond 、 ΔTDS),分析两者之间的关系(图 5b).

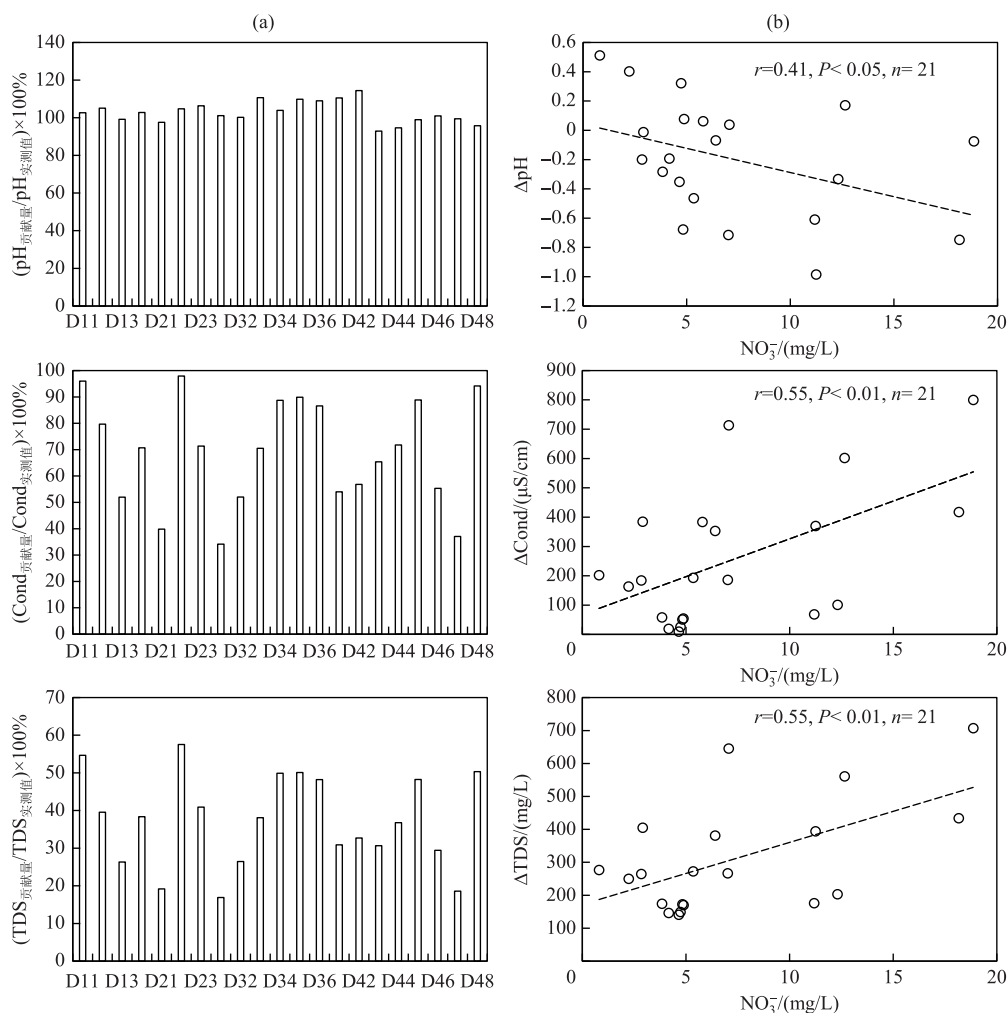


图 5 水源混合及外源输入对地下水水质参数的影响:(a) 混合水源对地下水 pH、Cond 和 TDS 的贡献率;(b) 地下水 pH、Cond 和 TDS 外源贡献量与 NO_3^- 的关系
(r 为 Pearson 相关系数, P 为显著性水平, n 为样本个数)

Fig.5 Influence of water source mixing and external source input on groundwater quality parameters:
(a) Contribution rates of mixed water sources to pH, Cond and TDS values of groundwater samples;
(b) the relationship between the deviation of the calculated pH, Cond and TDS values of groundwater samples and NO_3^- (r is the Pearson correlation coefficient, P is the significance level, and n is the number of samples in the figure)

从图 5b 可以看出,在 $P < 0.05$ 的显著性水平下, ΔpH 与 NO_3^- 浓度呈负相关,其 Pearson 相关系数为 0.41,说明额外的 NO_3^- 输入会导致水体 pH 减小;在 $P < 0.01$ 的显著性水平下, ΔCond 、 ΔTDS 与 NO_3^- 浓度均呈正相关,其 Pearson 相关系数均为 0.55,说明额外的 NO_3^- 输入会导致水体 Cond 和 TDS 均有较大幅度增加. 这与该区域地下水受到硝酸盐污染有关:研究区为主要的人口聚集地和集约农业种植区,来自于农村居民地和牲畜养殖场粪便/污水的点源污染,以及周围农业种植的面源污染,均导致该地区地下水污染严重,进而导致 NO_3^- 、Cond 和 TDS 浓度增加明显.

长江中下游地区湖泊聚集,河湖过渡带空间分布广泛,地表水类型多样,与地下水之间的水力联系复杂多变,同时还受到人类活动扰动的影响. 本文选择的升金湖河湖过渡带在流域特征上具有明显的代表性,提出的研究方法与研究结论都具有一定的推广价值,对整个区域河湖过渡带的水环境保护、水资源开发以及饮用水安全具有重要的指导意义.

3 结论

本文以升金湖河湖过渡带为研究区,采用 MixSIAR 模型定量解析不同补给源对地下水的贡献率,并探究了水源混合对地下水水质的影响,得出以下结论:

通过不同水体氢氧同位素特征分析,近长江和湖岸的地下水样点同位素值贫乏,与长江水、湖水同位素特征相近,其与长江、湖泊的水力联系密切,而中部地下水同位素值较为富集,与河水同位素特征接近,其与河水的水力联系更为紧密.

利用 MixSIAR 模型对采样期地下水水源定量解析发现,受水位、闸控运作、引水灌溉等综合影响,河水对地下水的贡献率最大,约为 47%;其次为降水,贡献率约为 20%;湖水和长江水的贡献率相近,分别约为 16% 和 17%.

混合水源对 pH 的贡献量和实测值接近,其贡献率接近 100%,基本决定了地下水的酸碱度;混合水源对 Cond 的贡献率约为 70%,贡献了绝大部分的地下水 Cond 值;混合水源对 TDS 的贡献率均小于 50%,只贡献了小部分的地下水 TDS 值. 另外,研究区粪便/污水点源污染、农业面源污染等外源 NO_3^- 输入也会导致地下水 pH 下降,Cond 和 TDS 值明显升高.

4 参考文献

- [1] Lowrance R, Altier LS, Williams RG *et al.* The riparian ecosystem management model simulator for ecological processes in riparian zones. Las Vegas, NV: First Federal Interagency Hydrological Modeling Conference, 1998: 19-23.
- [2] Yue J, Wang YL. Progresses and perspectives in the study of riparian zone. *Progress in Geography*, 2005, **24**(5): 33-40. [岳隽, 王仰麟. 国内外河岸带研究的进展与展望. 地理科学进展, 2005, **24**(5): 33-40.]
- [3] Wood PJ, Hannah DM, Sadler JP eds. Hydroecology and ecohydrology: Past, Present and Future. Wiley Publishes. DOI: 10.1002/9780470010198.
- [4] Lallias-Tacon S, Liébault F, Piégay H. Use of airborne LiDAR and historical aerial photos for characterising the history of braided river floodplain morphology and vegetation responses. *CATENA*, 2017, **149**: 742-759. DOI: 10.1016/j.catena.2016.07.038.
- [5] Gandy CJ, Smith JWN, Jarvis AP. Attenuation of mining-derived pollutants in the hyporheic zone: A review. *Science of the Total Environment*, 2007, **373**(2/3): 435-446. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2006.11.004.
- [6] Graham PW, Andersen MS, McCabe MF *et al.* To what extent do long-duration high-volume dam releases influence river-aquifer interactions? A case study in New South Wales, Australia. *Hydrogeology Journal*, 2015, **23**(2): 319-334. DOI: 10.1007/s10040-014-1212-3.
- [7] Song XF, Liu X, Xia J *et al.* Interactions between surface water and groundwater in Chabagou catchment using hydrogen and oxygen isotopes. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2009, **17**(1): 8-20. [宋献方, 刘鑫, 夏军等. 基于氢氧同位素的岔巴沟流域地表水-地下水转化关系研究. 应用基础与工程科学学报, 2009, **17**(1): 8-20.]
- [8] Chen JS, Peng J, Zhan LC *et al.* Analysis of isotopes characteristics of river water, lake water and groundwater in Poyang Lake Basin. *Water Resources Protection*, 2015, **31**(4): 1-7. [陈建生, 彭靖, 詹沪成等. 鄱阳湖流域河水、湖水及地下

- 水同位素特征分析. 水资源保护, 2015, **31**(4): 1-7.]
- [9] Zhang YH, Wu YQ, Wen XH *et al.* Application of environmental isotopes in water cycle. *Advances in Water Science*, 2006, **17**(5): 738-747. [张应华, 仵彦卿, 温小虎等. 环境同位素在水循环研究中的应用. 水科学进展, 2006, **17**(5): 738-747.]
- [10] Li FD, Zhang QY, Tang CY *et al.* Denitrifying bacteria and hydrogeochemistry in a natural wetland adjacent to farmlands in Chiba, Japan. *Hydrological Processes*, 2011, **25**(14): 2237-2245. DOI: 10.1002/hyp.7988.
- [11] Zhang B, Song XF, Zhang YH *et al.* Relationship between surface water and groundwater in the second Songhua River basin. *Advances in Water Science*, 2014, **25**(3): 336-347. [张兵, 宋献方, 张应华等. 第二松花江流域地表水与地下水相互关系. 水科学进展, 2014, **25**(3): 336-347.]
- [12] Wang WK, Li JT, Feng XZ *et al.* Evolution of stream-aquifer hydrologic connectedness during pumping - Experiment. *Journal of Hydrology*, 2011, **402**(3/4): 401-414. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.03.033.
- [13] Ala-Aho P, Rossi PM, Kløve B. Estimation of temporal and spatial variations in groundwater recharge in unconfined sand aquifers using Scots pine inventories. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015, **19**(4): 1961-1976. DOI: 10.5194/hess-19-1961-2015.
- [14] Zhan LC, Chen JS, Zhang SY. Characteristics of stable isotopes in precipitation, surface water and groundwater in the Dongting Lake region. *Advances in Water Science*, 2014, **25**(3): 327-335. [詹泸成, 陈建生, 张时音. 洞庭湖湖区降水-地表水-地下水同位素特征. 水科学进展, 2014, **25**(3): 327-335.]
- [15] Li DC, Zhang GL, Wang H eds. Anhui volume of Chinese soil series. Beijing: Science Press, 2017. [李德成, 张甘霖, 王华. 中国土系志·安徽卷. 北京: 科学出版社, 2017.]
- [16] Christophersen N, Neal C, Hooper RP *et al.* Modelling streamwater chemistry as a mixture of soilwater end-members—A step towards second-generation acidification models. *Journal of Hydrology*, 1990, **116**(1/2/3/4): 307-320. DOI: 10.1016/0022-1694(90)90130-P.
- [17] Christophersen N, Hooper RP. Multivariate analysis of stream water chemical data: The use of principal components analysis for the end-member mixing problem. *Water Resources Research*, 1992, **28**(1): 99-107. DOI: 10.1029/91WR02518.
- [18] Phillips DL, Gregg JW. Source partitioning using stable isotopes: Coping with too many sources. *Oecologia*, 2003, **136**(2): 261-269. DOI: 10.1007/s00442-003-1218-3.
- [19] Wang J, Lu N, Fu BJ. Inter-comparison of stable isotope mixing models for determining plant water source partitioning. *Science of the Total Environment*, 2019, **666**: 685-693. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.262.
- [20] Stock B, Semmens B, Ward E *et al.* MixSIAR: Bayesian Mixing Models in R, 2018, <https://CRAN.R-project.org/package=MixSIAR>.
- [21] Xu Z, Liu YH, Wang ZS *et al.* Relationships between stable isotopes in precipitation in Wolong and monsoon activity. *Environmental Science*, 2008, **29**(4): 1007-1013. DOI: 10.13227/j.hjlx.2008.04.019. [徐振, 刘玉虹, 王中生等. 卧龙降水稳定同位素与季风活动的关系. 环境科学, 2008, **29**(4): 1007-1013.]
- [22] Zheng YM, Zhong W, Peng XY *et al.* Correlation of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and moisture sources at Yunfu, western Guangdong Province, China. *Environmental Science*, 2009, **30**(3): 637-643. DOI: 10.13227/j.hjlx.2009.03.001. [郑琰明, 钟巍, 彭晓莹等. 粤西云浮市大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与水汽来源的关系. 环境科学, 2009, **30**(3): 637-643.]
- [23] Yao TC, Zhang XP, Xie YL *et al.* Variations of hydrogen and oxygen isotopes in atmospheric water vapor of near surface in Changsha. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(2): 545-553. DOI: 10.13671/j.hjlx.2016.0182. [姚天次, 章新平, 谢宇龙等. 长沙地区近地面水汽中氢氧稳定同位素的变化特征. 环境科学学报, 2017, **37**(2): 545-553.]
- [24] Zhang XP, Yao TD. Distributional features of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation in China. *Acta Geographica Sinica*, 1998, **53**(4): 356. [章新平, 姚檀栋. 我国降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的分布特点. 1998, **53**(4): 356.]
- [25] Peng HD, Mayer B, Norman AL *et al.* Modelling of hydrogen and oxygen isotope compositions for local precipitation. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2005, **57**(4): 273-282. DOI: 10.3402/tellusb.v57i4.16545.
- [26] Liu JR, Song XF, Yuan GF *et al.* Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over Eastern Monsoon China and the water vapor sources. *Chinese Science Bulletin*, 2009, **54**(22): 3521-3531. DOI: 10.1007/s11434-009-0202-7. [柳鉴容, 宋献方, 袁国富等. 中国东部季风区大气降 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征及水汽来源. 科学通报, 2009, **54**(22): 3521-3531.]
- [27] Ma Q, Zhang MJ, Wang SJ *et al.* Contributions of moisture from local evaporation to precipitations in Southeast China based on hydrogen and oxygen isotopes. *Progress in Geography*, 2013, **32**(11): 1712-1720. DOI: 10.11820/dlkxjz.2013.

- 11.014. [马潜, 张明军, 王圣杰等. 基于氢氧同位素的中国东南部降水局地蒸发水汽贡献率. 地理科学进展, 2013, **32**(11): 1712-1720.]
- [28] Li G, Zhang XP, Zhang LF *et al.* Stable isotope characteristics in different water bodies in Changsha and implications for the water cycle. *Environmental Science*, 2015, **36**(6): 2094-2101. DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.06.024. [李广, 章新平, 张立峰等. 长沙地区不同水体稳定同位素特征及其水循环指示意义. 环境科学, 2015, **36**(6): 2094-2101.]
- [29] Li J, Wang C, Liang X *et al.* Experimental study of water salinization and isotopic fractionation in continuous evaporation and recharge evaporation. *Geochimica*, 2015, **44**(6): 556-563. DOI: 10.19700/j.0379-1726.2015.06.004. [李静, 王聪, 梁杏等. 持续蒸发与补给蒸发过程中水体咸化及同位素分馏的实验研究. 地球化学, 2015, **44**(6): 556-563.]
- [30] Cui YH, Wang J. Influence of the sluice on water level and area of Yangtze River-connected lakes: A case study in Shengjin Lake. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018, **29**(4): 47-52. [崔玉环, 王杰. 控水闸对通江湖泊水位及面积变化的影响分析——以升金湖为例. 水资源与水工程学报, 2018, **29**(4): 47-52.]
- [31] Pitt R ed. Illicit discharge detection and elimination, a guidance manual for program development and technical assessments. Cent Watershed Prot, 2004.
- [32] Panasiuk O, Hedström A, Marsalek J *et al.* Contamination of stormwater by wastewater: A review of detection methods. *Journal of Environmental Management*, 2015, **152**: 241-250. DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.01.050.
- [33] Jiang N, Zhou MH, Li H *et al.* Spatial-temporal variations and the regulators of nitrate status in shallow groundwater of the typical mountainous agricultural watershed in the upper reaches of the Yangtze River. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4539-4546. DOI: 10.13227/j.hjxx.201912188. [江南, 周明华, 李红等. 长江上游典型山地农业小流域浅层地下水硝态氮时空变异特征及影响因素. 环境科学, 2020, **41**(10): 4539-4546.]
- [34] Chen YP, Luo YQ, Tao L *et al.* Investigation on nitrate nitrogen distribution characteristics of drinking water in Lanzhou rural area, China. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, **30**(1): 183-189. [陈银萍, 罗永清, 陶玲等. 兰州市农村饮用水中硝态氮分布特征及评价. 农业环境科学学报, 2011, **30**(1): 183-189.]
- [35] Cui YH, Wang J, Hao S *et al.* The contribution rates of nitrate sources and their uncertainties in Shengjin Lake Basin, middle and lower reaches of the Yangtze River. *J Lake Sci*, 2021, **33**(2): 474-482. DOI: 10.18307/2021.0213. [崔玉环, 王杰, 郝洸等. 长江中下游升金湖流域硝酸盐来源解析及其不确定性. 湖泊科学, 2021, **33**(2): 474-482.]