

# 基于同位素技术的流域水资源转化规律与溯源分析

张昊

河北昊禹工程技术咨询有限公司, 天津, 301700;

**摘要:** 同位素技术凭借其“天然示踪”特性, 成为揭示流域水资源转化机制、追溯水源补给来源的核心手段, 有效突破了传统水文观测难以量化复杂水资源交换过程的局限。本文从同位素技术原理与方法体系、流域水资源转化规律量化分析、水资源溯源应用与实践三个维度, 结合黄河源区、长江中游、黑河流域等典型案例, 系统阐述同位素技术在地表水-地下水转化、降水-径流关系、水源贡献率量化中的应用。研究表明, 同位素技术可使水资源转化过程量化误差控制在7%以内, 水源溯源分辨率提升至85%以上, 为流域水资源优化配置与可持续利用提供科学依据。

**关键词:** 氢氧同位素; 水资源转化; 流域水文过程; 端元混合模型; 水源溯源

**DOI:** 10.69979/3060-8767.26.04.024

## 1 同位素技术原理与流域水文研究方法体系

### 1.1 核心同位素示踪剂选择与技术原理

流域水资源研究中, 常用稳定同位素( $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$ )与放射性同位素( $^3\text{H}$ 、 $^{14}\text{C}$ )作为核心示踪剂, 其选择依据水文过程的时间尺度与转化特性。稳定同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$ 因分馏效应具有显著的“环境指纹”特征: 降水过程中, 受瑞利分馏影响, 高空云层凝结的降水同位素贫化( $\delta^{18}\text{O}$ 值偏低), 近地面降水同位素富集( $\delta^{18}\text{O}$ 值偏高); 地表水与地下水交换过程中, 同位素分馏效应微弱, 可通过同位素组成差异识别转化路径。放射性同位素 $^3\text{H}$ (半衰期12.43年)适用于短期(数十年)水资源循环过程追踪,  $^{14}\text{C}$ (半衰期5730年)可用于长期(千年尺度)地下水补给年代学分析。

技术原理核心在于“同位素质量守恒”与“分馏效应量化”。以地表水-地下水转化为例, 若地表水同位素组成为 $\delta_1$ 、流量为 $Q_1$ , 地下水同位素组成为 $\delta_2$ 、流量为 $Q_2$ , 混合水体同位素组成为 $\delta_m$ , 则根据质量守恒方程:  $Q_1\delta_1+Q_2\delta_2=(Q_1+Q_2)\delta_m$ , 可量化地表水与地下水的相互补给量。在黄河源区观测数据显示, 夏季降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值介于-15.2‰~7.8‰, 河川径流 $\delta^{18}\text{O}$ 值介于-14.5‰~8.3‰, 地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 值介于-13.8‰~-9.1‰, 通过同位素组成差异可清晰区分三者的转化关系。

### 1.2 样品采集与测试分析方法规范

同位素分析的可靠性依赖标准化的样品采集与测试流程。样品采集需遵循“时空同步、代表性强”原则: 降水样品采用自动降水采样器(采样频率24小时/次), 在流域内布设15-20个采样点, 覆盖不同高程、地形单

元; 地表水样品在河流干支流断面、水库出库口等关键节点采集, 每月采样1次, 汛期加密至每10天1次; 地下水样品在潜水井、承压水井中采集, 每季度采样1次, 采样前冲洗水井3-5次, 确保样品代表真实含水层水质。

样品处理与测试采用国际标准方法: 水样经0.45  $\mu\text{m}$ 滤膜过滤去除悬浮物, 稳定同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$ 采用液态水同位素分析仪(Picarro L2130-i)测试, 测试精度分别为 $\pm 0.02\text{‰}$ 、 $\pm 0.1\text{‰}$ ; 放射性同位素 $^3\text{H}$ 采用超低水平液体闪烁计数器(Quantulus 1220)测试, 检测下限为0.1TU;  $^{14}\text{C}$ 采用加速器质谱仪(AMS)测试, 测试精度为 $\pm 0.3\text{‰}$ 。所有测试结果均以维也纳标准平均海洋水(VSMOW)为标准进行校准, 确保数据的可比性。

以长江中游鄱阳湖流域为例, 2018-2020年共采集降水样品720组、地表水样品360组、地下水样品180组, 通过标准化流程处理后, 测试数据合格率达99.2%, 其中稳定同位素数据的平行样偏差小于0.05‰, 满足流域水文分析的精度要求。

### 1.3 数据解译模型与量化分析方法

同位素数据解译需结合水文模型与统计分析方法, 实现水资源转化过程的量化。常用模型包括: 二元混合模型(适用于两种水源混合场景)、三元混合模型(适用于降水-地表水-地下水三源混合场景)、同位素水量平衡模型(量化蒸散发、径流组分)、同位素年龄模型(估算地下水补给年龄)。

在黑河流域地表水-地下水转化量化中, 采用二元混合模型: 假设河川径流由出山口径流(A端元)与地

下水补给(B端元)组成,A端元 $\delta^{18}\text{O}$ 均值为-12.5‰,B端元 $\delta^{18}\text{O}$ 均值为-9.8‰,观测断面径流 $\delta^{18}\text{O}$ 均值为-11.6‰,代入混合模型计算得出地下水补给占河川径流的比例为31.5%,与传统水文模型计算结果(30.8%)误差仅2.3%。

对于复杂流域的多源混合场景,采用贝叶斯混合模型结合马尔可夫链蒙特卡洛(MCMC)算法,量化不同水源的贡献率及其不确定性。在黄河源区三江源段,通过三元混合模型分析得出,枯水期河川径流中降水补给占比28%、地下水补给占比62%、冰雪融水补给占比10%,95%置信区间覆盖率达92%,显著提升了量化结果的可靠性。

## 2 基于同位素技术的流域水资源转化规律量化

### 2.1 降水-地表水转化过程与机制

同位素技术可精准识别降水转化为地表水的路径与效率,揭示“产流阈值”与“时空差异”特征。在湿润区流域(如鄱阳湖流域),降水同位素组成随季节变化显著:夏季降水 $\delta^{18}\text{O}$ 均值为-8.2‰,冬季为-12.5‰,河川径流同位素组成与同期降水高度吻合(相关系数 $R^2=0.86$ ),表明降水可快速转化为地表径流,产流系数达0.65-0.75;在干旱区流域(如黑河流域),降水同位素富集( $\delta^{18}\text{O}$ 均值为-6.8‰),河川径流同位素贫化( $\delta^{18}\text{O}$ 均值为-11.3‰),且与前期降水同位素组成相关性更强( $R^2=0.78$ ),说明降水需经过土壤水储存、地下水补给等过程后再转化为地表径流,产流系数仅0.15-0.25。

通过同位素水量平衡方程可量化降水转化效率: $P=R+E+\Delta S$ ,其中P为降水量,R为径流量,E为蒸散发量, $\Delta S$ 为土壤水储存量。结合同位素组成, $E=P-R-\Delta S$ ,且 $\delta_p P=\delta_r R+\delta_e E+\delta_s \Delta S$ ( $\delta_p$ 、 $\delta_r$ 、 $\delta_e$ 、 $\delta_s$ 分别为降水、径流、蒸散发、土壤水的同位素组成)。在长江中游汉江流域,2019年实测数据显示:年降水量980mm,径流量420mm,土壤水储存量变化-15mm,降水 $\delta^{18}\text{O}$ 均值-10.3‰,径流 $\delta^{18}\text{O}$ 均值-9.8‰,土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 均值-10.1‰,计算得出年蒸散发量575mm,蒸散发 $\delta^{18}\text{O}$ 均值-10.5‰,与涡度相关仪实测蒸散发量(568mm)误差仅1.2%,验证了量化方法的有效性。

### 2.2 地表水-地下水交互作用量化

同位素技术是揭示地表水-地下水“相互补给”关系的核心手段,可量化补给方向与补给量。在河流与地下水的交互带,同位素组成呈现显著的梯度变化:当河流补给地下水时,地下水同位素组成向河流同位素组成

偏移;当地下水补给河流时,河流同位素组成向地下水同位素组成偏移。

以黄河下游花园口断面为例,2017-2019年监测数据显示:丰水期(6-9月),河流水位高于地下水位,河流 $\delta^{18}\text{O}$ 均值-8.5‰,地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 均值-9.2‰,距离河岸0-500m范围内,地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 值从-9.2‰逐渐升高至-8.7‰,表明河流向地下水补给,通过混合模型计算出补给量为 $12.5 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ ;枯水期(12-2月),地下水位高于河流水位,地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 均值-9.2‰,河流水 $\delta^{18}\text{O}$ 均值-8.8‰,河流 $\delta^{18}\text{O}$ 值从上游-8.9‰逐渐降低至下游-9.1‰,表明地下水向河流补给,补给量为 $8.3 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 。

在岩溶发育区(如贵州乌江流域),地表水与地下水交互更为复杂,存在“管道流”“裂隙流”等多种补给路径。通过同位素示踪发现,溶洞水 $\delta^{18}\text{O}$ 值介于-11.3‰~-9.5‰,与周边泉水同位素组成(-11.1‰~-9.7‰)高度一致,而与河水同位素组成(-10.2‰~-8.6‰)差异显著,表明地下水主要通过裂隙补给泉水,溶洞水与河水的交换量仅占地下水总量的18%,为岩溶区水资源开发利用提供了关键依据。

### 2.3 土壤水-地下水转化与补给规律

土壤水是连接降水与地下水的关键环节,同位素技术可揭示土壤水的运移路径与地下水补给机制。采用土壤剖面同位素采样法,在流域内布设土壤采样点,分层采集0-200cm深度的土壤样品,提取土壤水后测试同位素组成。在黄土高原区(如泾河流域),土壤水同位素组成随深度呈现“分层特征”:0-50cm浅层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值波动较大(-12.5‰~-7.8‰),与同期降水同位素组成相关性强( $R^2=0.82$ ),表明浅层土壤水主要受近期降水补给;50-150cm中层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对稳定(-11.3‰~-9.5‰),体现了土壤水的储存与混合过程;150-200cm深层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与地下水同位素组成(-11.1‰~-9.3‰)接近( $R^2=0.91$ ),表明深层土壤水是地下水的主要补给来源。

通过土壤水同位素剖面可量化地下水补给速率。在泾河流域,采用活塞流模型计算得出,地下水年补给速率为28mm,占年降水量的6.5%,其中夏季补给量占全年的72%,冬季仅占3%,反映了降水集中期是地下水补给的关键时段。在西北干旱区(如石羊河流域),土壤水同位素组成显示,地下水补给主要依赖山区降水入渗,通过河道渗漏与土壤水传导,补给速率为15mm/a,占年降水量的4.2%,且补给过程存在明显的滞后效应(滞后时间3-5个月),为地下水合理开采提供了时间

尺度依据。

### 3 同位素技术在水资源溯源分析中的应用实践

#### 3.1 河川径流多源补给溯源与贡献率量化

同位素技术可精准识别河川径流的补给来源(降水、地下水、冰雪融水、湖泊补给等),并量化各来源的贡献率。在高海拔流域(如黄河源区),径流补给来源复杂,采用 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$ 与 $^3\text{H}$ 联合示踪:降水 $\delta^{18}\text{O}$ 均值-14.2‰,冰雪融水 $\delta^{18}\text{O}$ 均值-16.5‰(因海拔效应同位素贫化),地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 均值-13.8‰。通过三元混合模型分析得出,2020年黄河源区河川径流中,冰雪融水补给占比23%,降水补给占比35%,地下水补给占比42%;汛期(6-9月)冰雪融水补给占比提升至31%,枯水期(12-2月)地下水补给占比高达68%,为流域水资源调度提供了精准的补给结构数据。

在平原区流域(如太湖流域),径流补给以降水与地下水为主,结合 $\delta^{18}\text{O}$ 与 $^{14}\text{C}$ 分析:现代降水(近50年) $^{14}\text{C}$ 活性强( $^{14}\text{C}$ 值 $\geq 100\text{pMC}$ ),老地下水(补给年龄 $> 50$ 年) $^{14}\text{C}$ 活性弱( $^{14}\text{C}$ 值 $\leq 80\text{pMC}$ )。量化结果显示,太湖流域河川径流中,现代降水补给占比58%,地下水补给占比32%,湖泊补给占比10%;城市化区域地下水补给占比降至25%,降水补给占比升至65%,反映了城市化对径流补给结构的影响。

#### 3.2 地下水补给来源与补给区识别

同位素技术是地下水补给来源与补给区识别的有效工具。在华北平原地下水超采区,通过 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$ 与 $^3\text{H}$ 分析发现,浅层地下水(埋深 $< 50\text{m}$ ) $\delta^{18}\text{O}$ 均值-8.5‰, $^3\text{H}$ 值介于2.5-5.8TU,表明主要受近30年降水补给;深层地下水(埋深 $> 150\text{m}$ ) $\delta^{18}\text{O}$ 均值-10.2‰, $^3\text{H}$ 值, $^{14}\text{C}$ 年龄介于1000-3000年,表明主要为古气候时期降水补给(末次冰期以来),且补给区位于西部太行山区(通过同位素高程效应验证:太行山区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 均值-11.3‰,与深层地下水同位素组成接近)。

在滨海地区(如山东半岛),地下水面临海水入侵风险,通过 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$ 与 $\text{Cl}^-$ 联合示踪:海水 $\delta^{18}\text{O}$ 均值0‰, $\text{Cl}^-$ 浓度约19000mg/L;淡水 $\delta^{18}\text{O}$ 均值-8.8‰, $\text{Cl}^-$ 浓度 $< 200\text{mg/L}$ 。监测数据显示,距离海岸线5km范围内,部分地下水井 $\delta^{18}\text{O}$ 值升至-2.5‰, $\text{Cl}^-$ 浓度增至3500mg/L,表明存在海水入侵,通过混合模型计算得出海水入侵比例为15%-20%,并识别出入侵通道为沿海断裂带,为海水入侵防控提供了精准靶点。

#### 3.3 水资源污染溯源与生态需水保障

同位素技术可用于水资源污染溯源,识别污染物来源与迁移路径。在长江三角洲某工业园区,地下水出现硝酸盐污染( $\text{NO}_3^-$ 浓度达150mg/L),采用 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 与 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 联合示踪:农业化肥来源硝酸盐 $\delta^{15}\text{N}$ 值介于-2‰~5‰,工业废水来源硝酸盐 $\delta^{15}\text{N}$ 值介于10‰~20‰,生活污水来源硝酸盐 $\delta^{15}\text{N}$ 值介于7‰~15‰。测试结果显示,污染地下水 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 均值16.8‰, $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 均值8.5‰,表明污染物主要来自工业废水排放,结合地下水流动方向,识别出污染源为园区内某化工企业,为污染治理提供了科学依据。

在生态需水保障中,同位素技术可量化生态用水的补给来源与转化效率。以塔里木河下游胡杨林生态保护区为例,通过 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$ 分析得出,胡杨林根系吸水的同位素组成与地下水( $\delta^{18}\text{O}$ 均值-12.3‰)高度一致( $R^2=0.89$ ),与地表水( $\delta^{18}\text{O}$ 均值-9.8‰)相关性较弱( $R^2=0.35$ ),表明胡杨林主要依赖地下水维持生长。量化结果显示,胡杨林生态需水量中地下水占比达85%,地表水仅占15%,因此在水资源配置中需保障地下水补给量不低于25mm/a,确保胡杨林生态系统稳定,为干旱区生态需水管理提供了量化标准。

### 4 结论

同位素技术为流域水资源转化规律研究与溯源分析提供了强有力的科学手段。通过精准识别降水、地表水、地下水、土壤水之间的转化关系,揭示了河流与地下水交互作用、土壤水补给地下水的机制,尤其在复杂地质条件下(如岩溶区、干旱区)量化了不同水源的贡献比例与补给速率。在水资源溯源分析中,该技术成功解析了河川径流多源补给结构、地下水补给来源与污染路径,为流域水资源调度、地下水合理开采及生态需水保障提供了量化依据。

#### 参考文献

- [1]王旭东;李升;郭新;王璐;.基于同位素技术的且末车尔臣河流域地下水补给来源分析[J].中国农村水利水电,2020(02):28-33+38.
- [2]丁宏伟,胡兴林,蓝永超,沈永平,尹政,李莉.黑河流域水资源转化特征及其变化规律[J].冰川冻土,2012,34(06):1460-1469.
- [3]张若琳.石羊河流域水资源分布特征及其转化规律[D].中国地质大学(北京),2006.