

# 氯离子质量平衡法应用问题刍议

袁瑞强<sup>1</sup>, 龙西亭<sup>2</sup>, 王 鹏<sup>3</sup>, 宋献方<sup>4</sup>

(1.山西大学环境与资源学院,山西 太原 030006; 2.湖南省地质矿产勘查开发局四零二队,湖南 长沙 410014;  
3.江西师范大学鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室,江西 南昌 330022;  
4.中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101)

**摘 要:**氯离子质量平衡法(CMB)利用惰性示踪剂 Cl<sup>-</sup>可以揭示区域地水平均补给速率,补给事件和环境、气候变化事件等信息,可为相关研究提供可靠的信息。虽然该方法简单、有效,已经得到大量应用,但是也具有明显的局限性。综述了基于 CMB 法的相关研究,回溯了该方法的提出和演化,讨论了其主要假设条件和应用的局限性,阐明为了准确地应用该方法需要加强的方面。首先要重视氯离子干沉降的观测和研究。其次要加强氯离子沉降空间变化的观测和研究。在方法上要注意综合采用多种示踪剂、土壤理化性质和平行钻孔等手段来研究。最后要加强对氯离子平衡过程,及其相关的自然过程和人类活动的研究。对促进氯离子质量平衡法在地下水研究方面的应用和发展,具有一定的参考价值。

**关键词:**氯离子质量平衡; 干旱区和半干旱区; 地下水补给; 示踪剂; 非饱和带

**中图分类号:**P345      **文献标识码:**A      **文章编号:**1000-0852(2015)04-0007-07

## 1 引言

氯离子质量守恒法 (the Chloride Mass Balance Technique, CMB)假设大气氯离子干、湿沉降输入是包气带水或者浅层地下水中氯离子的唯一来源,在降水转化为包气带水和地下水的过程中,氯离子的通量守恒。基于这种假设,利用氯离子质量守恒法可以直接估算地下水接受降水入渗的补给速率。常用的氯离子质量守恒法可以分为基于含水层的和基于非饱和带的,其中应用较广泛的是基于非饱和带的氯离子质量平衡法<sup>[1]</sup>。

非饱和带是四大层圈结合部位的一个复杂的开放体系,记录了区域的乃至全球的水文地球化学和人为影响的变化,往往作为地质环境的监控区引起人们的注意,并把它与生态环境和全球变化研究联系起来<sup>[2]</sup>。在不受海侵影响的干旱半干旱地区,利用非饱和带水

中的 Cl<sup>-</sup>作为示踪剂可以研究降水的补给过程,并计算土壤水的年龄及降水的补给速率<sup>[3]</sup>。用作示踪剂的溶质必须满足不与土壤颗粒骨架中的矿物质和有机物反应,化学性质保守。氯离子具有较强的亲水性,符合上述要求。此外,地下水和土壤水中氯离子含量比氯离子检测限高几个数量级,因此氯离子是理想的溶质示踪剂。

尽管有多种方法可用于定量研究降水入渗补给量,当降水入渗补给速率较低时,基于非饱和带研究的氯离子质量平衡法是应用最广泛的定量研究方法<sup>[4]</sup>。CMB 法是最为简单,最为经济,并且最为有效的定量干旱、半干旱区域降水入渗补给的方法之一<sup>[5-6]</sup>。非饱和带不仅包含了用于定量降水入渗补给速率的信息,还包含了补给速率历史变化的信息<sup>[7]</sup>,应用 CMB 法可以得到几十年至几千年时间尺度上地下水补给的估算结果<sup>[8]</sup>。基于非饱和带研究的 CMB 法在探讨区域地下

收稿日期:2014-05-08

基金项目:国家自然科学基金项目“引黄调水对汾河上游水环境的影响研究”(41301033);“973”项目“华北平原地下水演变机制与调控”(2010CB428805)

作者简介:袁瑞强(1980-),男,山西太原人,博士,硕士研究生导师,主要从事流域水循环与水环境研究。E-mail: rqyuan@sxu.edu.cn

水补给历史信息,研究土地覆被和土地利用类型变化方面已经被广泛地应用<sup>[9-10]</sup>。此外,利用非饱和带土壤水氯离子和同位素对水文和环境变化的过程的记录,CMB法也被用于古气候变化的研究。

CMB法虽然简便,但在特定区域具有独特的应用价值。该方法在发展过程中不断演化,在实际应用中受到一些假设条件的限制。同时,要利用该方法得到正确的结果必须有相关的研究数据支撑。因此,本文综述了基于CMB法的研究,回溯了该方法的提出和演化,讨论了其应用的局限性,阐明相关研究的必要性,以达到促进该方法应用和发展的目的。

## 2 基于氯离子质量平衡法的研究

### 2.1 国内基于氯离子质量平衡法的研究

在华北平原,陈宗宇等<sup>[11-12]</sup>利用非饱和带水的氯含量变化研究气候变化对华北平原地下水的影响以及该地区的古水文-气候变化状况,其研究表明:研究区300年以来有过3次干/湿变化旋回,并且反映在地下水补给速率的变化上。张光辉<sup>[13]</sup>基于石家庄附近两个钻孔全岩心原状样应用CMB法研究了石家庄地区地下水补给历史,得到各钻孔记录长度分别为185年和295年,对应的平均降水入渗补给速率分别为9.1mm/yr和6.7mm/yr,且两个剖面的氯含量分布与研究区旱涝分布规律具有对应性,可清晰划分出3个干、湿旋回,与孢粉反映出的水文演化规律相一致。汪丙国和靳孟贵等<sup>[14]</sup>利用CMB法评价了河北平原垂向入渗补给量,结果表明该方法在山前冲洪积平原水位埋深大的淡水区应用效果较好,鹿泉和栾城的补给量分别为44.7mm/yr和31.3mm/yr,占多年平均降雨量的8.2%和5.8%,以扩散流入渗为主。王茜、沈彦俊等<sup>[15]</sup>也利用氯离子平衡法估算了华北山前平原灌溉农田深层土壤水渗漏量为65mm/yr。氯离子质量平衡法在河北平原山前地带水位埋深大的淡水区应用较好,在浅层咸水分布区、盐渍化地区、受灌溉(或施肥)影响的地区以及地下水水位埋深小的地区应用受到限制。Yuan等<sup>[16]</sup>利用华北平原干河床非饱和带Cl剖面 and  $\delta^{18}\text{O}$ 恢复了降水入渗补给率近30年的变化历史,估算平均降水入渗补给率为 $3.8\pm 0.8$  mm/yr,该结果彻底排除了灌溉的影响。

在西北干旱区,Edmunds等<sup>[17]</sup>使用CMB法,结合同位素、惰性气体示踪研究了民勤盆地地下水补给历史,认为以活塞流形式补给的地下水不超过

3mm/yr。Zhu等<sup>[18]</sup>同样用CMB法研究了该地区地下水补给速率为1.55~1.64mm/yr,平均值为1.6mm/yr,约占当地降水量的1.5%,并估算了地下水直接补给量约为 $0.666\times 10^8\text{m}^3/\text{yr}$ ,间接补给量(河渠入渗)为 $0.945\times 10^8\text{m}^3/\text{yr}$ ,民勤盆地总补给量为 $1.6\times 10^8\text{m}^3/\text{yr}$ 。Gates等<sup>[19]</sup>通过非饱和带的18个钻孔(6~16m深)的数据,利用CMB法估算出巴丹吉林沙漠地下水的平均补给速率为1.4mm/yr,约为平均年降水量的1.7%,并根据水量平衡法推论直接降水入渗补给不是该区域第四系含水层主要补给来源。类似地,刘晓艳、陈建生等<sup>[20]</sup>利用氯离子示踪法计算了巴丹吉林沙漠东南部地区的降雨入渗补给量,得到乌海子、诺尔图地区的年平均补给率分别为0.81mm/yr和1.24mm/yr,占多年平均降雨量的0.9%和1.4%,推论现代降雨不是地下水的主要补给源。马金珠等<sup>[21]</sup>利用CMB法估算巴丹吉林沙漠地下水的平均补给速率为1.3mm/yr,认为1500~1530年干旱区气候突变。Ma和Edmunds<sup>[22]</sup>通过CMB法恢复了巴丹吉林沙漠22m深的土壤水剖面记录的1185年的补给历史,以及水文和气候变化信息,得到主要的干、湿时期,确定该地区平均补给速率为0.95~1.33mm/yr。Ma等<sup>[23]</sup>基于巴丹吉林沙漠沙丘非饱和带深度30m的钻孔岩心,重建了过去2050年来时间分辨率为30~50年的气候变化过程,估算了该沙漠西部的补给速率为0.9mm/yr,约占该区域年降水量的1%。该研究成果是目前亚洲类似研究中重建历史最长的。

此外,马金珠等<sup>[24]</sup>研究了腾格里沙漠的一个钻孔剖面,估算了过去930年以来的补给量变化过程及其所反映的气候波动特征,将930aBP气候划分为4个干期和3个湿期,平均补给量仅为1.26mm。邓林等<sup>[25]</sup>基于CMB法研究了陕北砂黄土包气带氯剖面记录的近百年来地下水补给过程,结果表明地下水的补给强度变化与年降水量在趋势上存在较好的对应关系,由于降水自20世纪90年代后期减少导致的地下水补给明显减少。王言思等<sup>[26]</sup>用土壤水均衡法、氯离子剖面法和地下水动态法研究了内蒙古阿拉善盟李井滩地下水补给问题,结果表明降水对地下水的补给量还不到0.1mm/yr,而在长期灌溉的地区多年平均补给量达231.5mm/yr。Huang等<sup>[27]</sup>使用CMB法结合多种示踪剂研究得到六盘山附近黄土层的入渗补给速率达94~100mm/yr,并发现由于地表覆被由自然状态的草原变为冬小麦种植区使得地下水补给速率降低了42%~50%。Ting<sup>[28]</sup>结合CMB法和泰森多边形法估算了

台湾 Pingtung 平原地下水的补给速率和补给量,结果表明除了灌溉水入渗补给的部分,在整个研究区域内降水总量的 15% 补给进入地下水。

## 2.2 国外基于氯离子质量平衡法的研究

前人大量的研究表明,CMB 法能直接得到空间点上降水直接入渗补给的速率,是干旱、半干旱地区地下水补给研究的主要方法<sup>[4]</sup>。Sibanda<sup>[29]</sup>利用 CMB 法、地下水水位波动法、达西流网法、C-14 定年法和地下水模型法分别对非洲南部津巴布韦半干旱区 Nyamandhlovu 地下水补给进行了估算,结果表明 CMB 法估算结果的范围大于其他方法,揭示了不同点上补给速率存在的空间变化。然而,CMB 法也被尝试用于面上的地下水补给问题和湿润地区地下水补给问题的研究。Yidana 和 Koffie<sup>[30]</sup>利用 CMB 法研究了 Northern Ghana 的 Voltaian 流域地下水补给的分布,发现补给速率的分布与  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  的分布呈反相关,即补给速率高的地方地下水中重同位素组成较贫化, $\delta$  值低,补给速率低的地方,地下水中重同位素组成较富集, $\delta$  值高。同时,国外学者尝试将 CMB 法用于半湿润地区的研究。Russoa 等<sup>[31]</sup>研究了意大利半湿润地区 Po 平原地下水的补给,并讨论了土壤剖面上氯离子浓度的 CMB 法应用于种植作物区域的地下水补给问题,探讨了氯离子浓度的季节变化对该方法的影响,应用 CMB 法估算出研究区地下水年补给速率为 205mm/yr,与土壤溶质运移方程计算出的结果十分接近。

近年来,国外学者尝试用 CMB 法探讨人类活动的影响。Fragalà 和 Parkin<sup>[32]</sup>研究了英格兰西北部冰川沉积物和河流冲积物的 Cl<sup>-</sup>和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>剖面,分析了垂向的补给过程以及沉积物组成和结构以及地形对农业源污染物入渗的影响。Schmidt 等<sup>[33]</sup>基于对岩溶泉水中氯离子含量的多年观测,利用 CMB 法估算降水补给地下水的比率介于 25%~50%,同时揭示近来上游污水入渗混入泉水的比率介于 0~20%。Perera 等<sup>[34]</sup>利用 CMB 法研究了加拿大多伦多东部 Highland Creek 区域用于融雪剂中有约 40% 的氯离子进入含水层,并导致氯离子在浅层地下水中的持续累积。Guan 等<sup>[35]</sup>研究了澳大利亚南部 Mount Lofty 山区 11 个曾经历过大规模山林砍伐的小流域的氯离子再平衡,指出部分流域受人类活动的影响使得流域输入和输出的氯离子没有达到平衡,不适宜使用 CMB 法。Cartwright 等<sup>[36]</sup>分析了澳大利亚南部河流 22 年的电导率记录,认为除了用 Cl/Br 比率确

定的来自石盐溶解的氯离子外,其余的氯离子含量变化可以反应出流域水文环境的变化。例如,植被退化造成地下水位升高和基流量增大,更多的氯离子被排泄进入河流;流域上游地表覆被和土地利用很少受人类影响,所以达到化学平衡,并由氯离子的输入和输出之间的平衡反映出来。

## 3 讨论

### 3.1 氯离子质量平衡法的提出和演化

Eriksson 和 Khunakasem<sup>[37]</sup>首先提出了利用地下水中氯离子含量估算地下水补给速率的氯离子质量平衡法。该方法假设地下水水量和氯离子质量守恒,系统处于稳定状态;地下水为  $x$  方向的一维流动; $Q$  为大气氯离子输入速率,不随时间变化;含水层内没有其他氯离子来源。基于该假设,地下水平均补给速率可以由下式计算:

$$\bar{C}_g \cdot \int_0^x R dx = \int_0^x Q dx \quad (1)$$

式中: $\bar{C}_g$  为沿流向不同位置、不同深度地下水中氯离子浓度的平均值; $R$  为地下水补给速率。积分的起始位置为地下水系统的上游边界(地下水分水岭),沿着地下水流动方向  $x$  进行积分。

Allison 和 Hughes<sup>[38]</sup>认为从长期平均的结果来看,氯离子从地表输入的通量等于植物根系带以下氯离子的通量,由此提出非饱和带的氯离子质量平衡法:

$$\bar{P} \cdot \bar{C}_p = \bar{R} \cdot \bar{C}_R \quad (2)$$

式中: $\bar{P}$  为某年降水量,其氯离子含量为  $C_p$ ; $\bar{R}$  为该年地下水补给通量,其氯离子含量为  $C_R$ ;横线表示数学期望。该方法假设大气降水中的氯离子,包括(干、湿沉降部分),是地下水中氯离子的唯一来源,而且在入渗补给的过程中氯离子保持化学惰性。根据随机过程理论,可由上式得到地下水平均补给速率:

$$\bar{R} = (\bar{P} \cdot \bar{C}_p - \Delta R \cdot \Delta C_R) / \bar{C}_R \quad (3)$$

式中: $\bar{R}$  为年平均补给速率; $\bar{C}_R$  为补给水中氯离子含量的年平均值; $\Delta R$  和  $\Delta C_R$  为某年的  $R$  和  $C_R$  与年平均值的偏差。由实测资料发现,尽管年降水量  $P$  和  $R$  存在较明显的年际变化,然而氯离子在地表的输入通量基本保持稳定。因此, $\bar{P}$  与  $C_p$  之间存在反比关系,类似地  $R$  与  $C_R$  也存在反比关系。因此, $\Delta R \cdot \Delta C_R$  为非零的负值。

进一步地,在满足上述假设的条件下,土壤非饱和

带氯离子质量平衡关系可以简化为<sup>[39]</sup>:

$$\bar{P} \times \bar{C}_p = \bar{R} \times \bar{C}_R \quad (4)$$

降水中氯离子年加权平均浓度由下式计算得到:

$$\bar{C}_p = \frac{\sum_{i=1}^n P_i C_{pi}}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (5)$$

式中:  $C_{pi}$  为第  $i$  次降雨样品中的氯离子的浓度(mg/l);  $P_i$  为第  $i$  次降雨量(mm);  $n$  为降雨次数。

非饱和带氯离子质量平衡方法假设植物根系带以下,包气带水以活塞流形式向下做一维运动。然而,在非均质介质中,土壤水的优先流也具有重要作用。Sharma 和 Hughes<sup>[39]</sup>提出了考虑土壤水优先流的氯离子质量平衡法。该方法在 Ericsson 方法的基础上,假设土壤水优先流不被植物根系带吸收利用,直接向下补给地下水。地下水的总补给包括土壤水活塞流形式的补给和优先流形式的补给两部分:

$$\bar{P} \times \bar{C}_p = \bar{R}_d \times \bar{C}_g \quad (6)$$

$$\bar{R}_d = \bar{R}_d + \bar{R}_b \quad (7)$$

$$\bar{R}_d \times \bar{C}_g = \bar{R}_d \times \bar{C}_s + \bar{R}_b \times \bar{C}_b \quad (8)$$

式中:  $\bar{R}_d$  为总补给速率(mm/yr);  $\bar{C}_g$  为地下水中氯离子的浓度;  $\bar{R}_d$  为以活塞流(diffusion flow)形式补给的速率(mm/yr);  $\bar{C}_s$  为土壤水中氯离子的浓度;  $\bar{R}_b$  为以优先流(by-pass flow)形式补给的速率(mm/yr);  $\bar{C}_b$  为优先流形式补给水中氯离子的含量,假设其等于降水中氯离子的平均含量( $\bar{C}_b = \bar{C}_p$ )。求解上述三个方程可以得到  $\bar{R}_d$  和  $\bar{R}_b$ :

$$\bar{R}_d = \bar{R}_t \left( \frac{\bar{C}_g - \bar{C}_p}{\bar{C}_s - \bar{C}_p} \right) \quad (9)$$

$$\bar{R}_b = \bar{R}_t \left( \frac{\bar{C}_s - \bar{C}_g}{\bar{C}_s - \bar{C}_p} \right) \quad (10)$$

Sharma 和 Hughes<sup>[39]</sup>认为使用上述公式计算总补给速率时,可以通过比较土壤水中和地下水中氯离子含量,以了解土壤水的流动形式。如果土壤水中氯离子含量接近地下水中氯离子含量,可以假设土壤水通过活塞流形式补给地下水构成唯一的补给。如果土壤水中氯离子含量高于地下水中氯离子含量,那么地下水的补给还包括来自土壤水优先流补给的部分。

当考虑灌溉存在的情况时,式(8)可以改写为:

$$\bar{R}_d \times \bar{C}_g = \bar{R}_d \times \bar{C}_s + \bar{R}_b \times \bar{C}_b + \bar{R}_{ib} \times \bar{C}_{ib} \quad (11)$$

式中:  $\bar{R}_{ib}$  为通过局部发生的优先流形式补给到地下水的灌溉水量(mm/yr);  $\bar{C}_{ib}$  为补给到地下水的灌溉水中氯

离子的含量,近似等于灌溉水的平均氯离子含量。

在均质介质中,包气带水的垂向运动可以近似为只存在活塞流形式。此时,非饱和带的氯离子剖面可以用于研究过去的补给速率和某一深度处土壤水的停留时间。非饱和带某一深度处土壤水的停留时间可以用该深度以上氯离子累积总量与年平均氯离子输入量来估算<sup>[40]</sup>:

$$t = \frac{1}{\bar{P} \times \bar{C}_p} \int_0^z \theta(z) C(z) dz \quad (12)$$

式中:  $t$  为平均停留时间;  $\theta(z)$  为深度  $z$  处土壤体积含水量;  $\bar{C}_p$  为降水中氯离子的平均含量;  $C(z)$  为深度  $z$  处土壤中氯离子的含量。

当从地表开始到地面下  $A$  点以一定的间隔对非饱和带采样时,该方程可写为<sup>[21]</sup>:

$$t = (10 \sum_{i=1}^A h_i C_i \frac{w_i b_i}{\rho_i}) / (\bar{P} \times \bar{C}_p + D) \quad (13)$$

式中:  $h_i$  为采样间隔;  $C_i$  为每个深度处包气带水氯离子含量;  $w_i$  为重量含水量;  $b_i$  为干容重;  $\rho_i$  为包气带水的密度。该方法假设包气带水只存在垂向向下的活塞流动,其余假设与前述 CMB 法相同。该方法的时间分辨率取决于非饱和带采样的间隔,采样间隔越小,时间分辨率越高。非饱和带氯离子平衡原理在降水稀少的干旱区研究地下水补给具有较强的适用性,与氢、氧稳定同位素及含水量在包气带垂向的变化相结合,能够准确地计算地下水的多年平均补给率,并记录水文气候变化信息。

如果平均降水 Cl 含量已知,则可以确定短时间尺度的补给变化。然而,已有的对降水 Cl 的观测表明长期来看降水输入的氯离子浓度极有可能是变化的。因此非饱和带水时间尺度的确定可用氡和氯-36 代替累积氯方法<sup>[12]</sup>,以提高定年的准确性。受限于从干旱-半干旱区非饱和带提取氡和氯-36 水样较困难,有学者尝试结合氢氧稳定同位素剖面记录的环境干湿状况变化来确定包气带水的时间尺度<sup>[16]</sup>。

### 3.2 正确运用氯离子质量平衡法

注意氯离子质量平衡法应用的假设条件。首先,该方法假设大气的干、湿沉降是浅层地下水中氯离子的唯一来源。在有人类活动影响的区域要考虑是否有农药、农肥引入的氯离子通量,以及其它人类生活、生产污染引入的氯离子通量。如果研究区内不能避免人类活动的影响,那么必须考虑定量这部分氯离子通量。此

外,要分析是否可能有地层内的蒸发盐岩溶解和海水入侵途径的氯离子通量,可以考虑用 Cl/Br 比率确定这部分氯离子的量。其次,CMB 法假设氯离子的大气输入通量保持稳定。通常近似地认为该假设在较短的时间尺度上满足。然而,当研究的时间尺度长达数千年时,考虑到局地气候的不稳定性,需要对这一假设进行评估。否则结论中可能会引入较大的不确定性。最后,虽然有改进的 CMB 法研究土壤中的优先流,但是该法的基本应用还是基于活塞流假设的。例如,非饱和带惰性示踪剂 Cl 可以提供干旱区气候、水文和环境变化过程的记录,是良好的历史信息载体。相关研究都是基于非饱和带为均质介质,土壤水以扩散流为主,做垂直向下一维流动的假设。脱离开上述假设,CMB 法得到的结论就似是而非了。

基于这些假设的 CMB 法仍然存在一定的不确定性,使得其应用受到一定制约。一方面,大气干、湿沉降的氯离子通量难以准确测定,且环境中的氯离子往往有多种来源;另一方面,完全均质的介质不存在,优先流在一定程度上发生。为了正确地运用氯离子质量平衡法,需要加强以下研究。

#### (1) 获得准确的氯离子输入通量

定量氯离子总输入量,尤其是定量干沉降量存在较大的不确定性。现有研究多数通过观测降水样品中的氯离子含量,并假设氯离子的湿沉降量近似为氯离子的总沉降量。由此,CMB 方法的主要误差来自附着于植物叶片、茎干上的海盐颗粒等干沉降输入。可以在有植被覆盖区域的地面收集降水水样来提高氯离子输入的计算精度。Deng 等<sup>[41]</sup>研究了澳大利亚南部海岸带桉树林和松树林对降水中氯离子浓度的影响,结果表明桉树林和松树林降水中氯离子浓度均被增大,分别增加了 28%和 89%。不考虑干沉降量将明显地低估由 CMB 法估算的降水入渗补给速率。因此,为了准确地应用 CMB 法必须对区域的干沉降量做长期观测和研究。

氯离子的沉降量在空间上的变化导致 CMB 法结果的不确定性。Edmunds 等<sup>[42]</sup>将 CMB 法应用于研究尼日利亚北部地区地下水补给的空间变化,并恢复重建了古补给和古气候事件。研究发现如果使用该地区三个监测站 10 年的降水资料确定大气氯离子输入值(1.7mg/L),则该区域地下水平均补给速率点估计值介于 14~49mm/yr,区域地下水补给速率估计值为 139mm/yr。这与水平平衡模型的研究结果相差较大。如果

使用较低的大气氯离子输入值(0.65mg/L),则计算结果与水平平衡模型的吻合较好。作者认为至少在该区域氯离子的有效沉降通量比来自有限个雨量筒的分析值要低。Guan 等<sup>[43]</sup>研究了澳大利亚南部滨海的 Mount Lofty 山区 9 000km<sup>2</sup> 范围内氯离子空间输入分布,指出离海距离对氯离子输入空间变化贡献了 70%左右,高程、地形、坡度和坡向等因素贡献了 15%左右。基于上述研究,Guan 等利用 Kriging 模型(ASOAdEK)得到了该区域氯离子输入的空间分布图。然而,其平均不确定性仍然介于 20%~50%。因此,为了用 CMB 法精确地估算,需要对氯离子沉降的空间分布进行长期的观测和研究。

#### (2) 合理确定非饱和带剖面记录范围

由于地表往往存在植被和动物的活动,使得大孔隙优先流普遍存在。陈宗宇等<sup>[12]</sup>指出补给水的优先流动可使包气带剖面中的溶质浓度减小。同时,受土壤质地的影响土壤水蒸发在一定深度内十分明显。优先流和水汽的存在使得剖面上部存在一个混合层,入渗的降水首先在这个混合层内在一定的时间尺度上混合,之后才继续下渗以活塞流形式做一维运动。因此,运用氯离子质量平衡法时,非饱和带剖面的记录范围存在一个上边界。

此外,地下水位的大幅振荡和离子扩散会使包气带剖面下部的记录破坏,毛细前缘将限制水位附近 3~4m 之间的数据的可用性<sup>[12]</sup>。因此,运用氯离子质量平衡法时,非饱和带剖面的记录范围存在一个下边界。这种边界的具体范围,受到具体研究场地的影响。在氯离子质量平衡法的实际运用中必须仔细调查剖面的情况,收集有关资料,提出有研究场地的包气带水运移概念模型<sup>[16]</sup>,在此基础上合理地确定非饱和带剖面的记录范围。

#### (3) 多种方法结合评估活塞流假设

Edmunds 和 Tyler<sup>[44]</sup>综述了利用非饱和带土壤水中惰性示踪剂 Cl 结合其它化学和同位素示踪剂对气候变化信息的研究。作者强调了非饱和带为均质介质,土壤水以扩散流为主做垂直向下一维流动假设的重要性。同时,作者指出以多示踪剂联合使用结合土壤理化性质调查来验证活塞流假设是该方法发展的方向。Yuan 等<sup>[16]</sup>在利用 CMB 法恢复华北平原直接补给历史时,通过干河床非饱和带两个钻孔  $\delta^{18}\text{O}$  剖面和 Cl 离子剖面的对比分析,结合钻孔不同位置土壤样品的粒度分析等手段交叉验证土壤水活塞流假设,为研究奠

定了基础。为了正确地运用 CMB 法,未来的研究需要应用多种示踪剂,结合土壤剖面样品理化性质分析来验证非饱和带活塞流假设。同时建议在单个采样点设置平行钻孔来加强验证。

#### (4)注意氯离子的平衡假设

目前的研究主要应用了非饱和带的氯离子质量平衡法。该方法假设非饱和带内存在一个稳定带,即输入的氯离子和输出的氯离子达到平衡。一般认为这种假设在一定时期是满足的,但是当地表条件或者气候条件发生变化时要注意该假设是否成立。将氯离子质量平衡法应用于含水层时,假设地下水水量和氯离子质量守恒,系统处于稳定状态。将氯离子质量平衡法应用于整个流域时,假设流域的氯离子处于平衡状态。由于人类活动的影响,天然状态下处于平衡的氯离子可能处于再平衡的过程中。因此,研究者需要注意检验氯离子平衡假设。

## 4 结语

综上所述,氯离子质量平衡法是得到国内外学者一致认可的简便、有效的方法,可以用于地下水补给、水文和环境变化以及人类活动影响等方面的研究,该方法不断地得到简化和改进,但是其前提假设没有改变,在实际应用中仍然存在局限,需要注意以下问题:(1)要重视氯离子干沉降量的观测研究;(2)要加强对氯离子沉降空间分布的研究;(3)要注重采用多种示踪剂示踪、土壤理化性质分析和平行钻孔等手段来验证活塞流假设,确定非饱和带稳定带的范围;(4)研究影响氯离子平衡的自然过程和人类活动。在上述研究的基础上,未来 CMB 法的应用可以更多地关注人类活动对自然水循环过程的干预和影响。

#### 参考文献:

- [1] 陈植华,徐恒力. 确定干旱-半干旱地区降水入渗补给量的新方法—氯离子示踪法[J]. 地质科技情报, 1996,15(3):87-92. (CHEN Zhihua, XU Hengli. Chloride tracer method for estimation natural groundwater recharge in arid and semiarid regions [J]. Geological Science and Technology Information, 1996,15(3):87-92. (in Chinese))
- [2] 张宗祜,施德鸿,沈照理,等. 人类活动影响下华北平原地下水环境的演化与发展[J]. 地球学报, 1997,18(4):337-344. (ZHANG Zonghu, SHI Dehong, SHEN Zhaoli, et al. Evolution and development of groundwater environment in north China plain under human activities [J]. Acta Geoscientia Sinica, 1997,18(4):337-344. (in Chinese))
- [3] Stone W J. Paleohydrological implications of some deep soil water chloride profiles, Murray basin, south Australia [J]. Journal of Hydrology, 1992,132:201-223.
- [4] Scanlon B R, Healy R, Cook P G. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge [J]. Hydrogeology Journal, 2002,10(1):18-39.
- [5] Allison G B, Gee G W, Tyler S W. Vadose-zone techniques for estimating groundwater recharge in arid and semiarid regions [J]. Soil Science Society of America Journal, 1994,58(1):6-14.
- [6] Murphy EM, Ginn TR, Phillips JL. Geochemical estimates of paleorecharge in the Pasco basin: evaluation of the chloride mass balance technique [J]. Water Resources Research, 1996,32(9):2853-2868.
- [7] Cook P G, Edmunds W M, Gaye C B. Estimating paleorecharge and paleoclimate from unsaturated zone profiles [J]. Water Resources Research, 1992,28(10):2721-2731.
- [8] Scanlon B R, et al. Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions [J]. Hydrological Processes, 2006,20(15):3335-3370.
- [9] Scanlon B R, Reedy R C, Tachovsky J A. Semiarid unsaturated zone chloride profiles: Archives of past land use change impacts on water resources in the southern High Plains, United States [J]. Water Resources Research, 2007,43(6), doi:10.1029/2006WR005769.
- [10] Radford B J, Silburn D M, Forster B A. Soil chloride and deep drainage responses to land clearing for cropping at seven sites in central Queensland, northern Australia [J]. Journal of Hydrology, 2009,379(1-2):20-29.
- [11] 陈宗宇,张光辉,徐家明. 华北地下水古环境意义及古气候变化对地下水形成的影响 [J]. 地球学报, 1998,18 (4): 338-345. (CHEN Zongyu, ZHANG Guanghui, XU Jiaming. Paleoclimate record deduced from groundwater and climate change implications of groundwater resources in north China [J]. Acta Geoscientia Sinica, 1998,19(4):338-345. (in Chinese))
- [12] 陈宗宇,毕二平,聂振龙,等. 包气带剖面中古水文-气候信息的初步研究[J]. 地球学报, 2001,22(4):335-339. (CHEN Zhongyu, BI Erping, NIE Zhenlong, et al. A tentative discussion on paleohydrological and paleoclimatical information from unsaturated zone profile [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2001,22(4):335-339. (in Chinese))
- [13] 张光辉,费宇红,王金哲,等. 300 年以来太行山前平原地下水补给演化特征与趋势 [J]. 地球学报, 2003,24 (3): 261-266. (ZHANG Guanghui, FEI Yuhong, WANG Jinzhe, et al. Evolution characteristics and trend of shallow groundwater recharge in Taihangshan piedmont plain over the last 300 years [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2003,24(3):261-266. (in Chinese))
- [14] 汪丙国,靳孟贵,王文峰,等. 氯离子示踪法在河北平原地下水垂向入渗补给量评价中的应用 [J]. 节水灌溉, 2006,(3):16-20. (WANG Binguo, JIN Menggui, WANG Wenfeng, et al. Application of chloride ion tracer method in estimation of vertical infiltration recharge of groundwater in Hebei plain [J]. Water Saving Irrigation, 2006,(3):16-20. (in Chinese))
- [15] 王茜,沈彦俊,裴宏伟,等. 华北山前平原灌溉农田深层土壤水分动态特征及渗漏量估算[J]. 南水北调与水利科技, 2013,(1):155-160. (WANG Qian, SHEN Yanjun, PEI Hongwei, et al. Dynamic

- characteristics and drainage assessment of deep soil moisture in the irrigated farmland of piedmont region of north China Plain [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013,(1):155-160. (in Chinese))
- [16] Yuan R Q, Song X F, Han D M, et al. Rate and historical change of direct recharge from precipitation constrained by unsaturated zone profiles of chloride and oxygen-18 in dry river bed [J]. Hydrological Processes, 2012,26(9):1291-1301.
- [17] Edmunds W M, Ma J Z, Aeschbach-Hertig W, Kipfer R, Darbyshire D P F. Groundwater recharge history and hydrogeochemical evolution in the Minqin basin, north west China [J]. Applied Geochemistry, 2006,21(12):2148-2170.
- [18] Zhu G F, Li Z Z, Su Y H, Ma J Z, Zhang Y Y. Hydrogeochemical and isotope evidence of groundwater evolution and recharge in Minqin basin, northwest China [J]. Journal of Hydrology, 2007,339(3-4):227-228.
- [19] Gates J B. Conceptual model of recharge to southeastern Badain Jaran desert groundwater and lakes from environmental tracers [J]. Applied Geochemistry, 2008,23(12):3519-3534.
- [20] 刘晓艳, 陈建生, 孙晓旭. 采用氯离子示踪法计算沙漠降雨入渗量 [J]. 农业工程学报, 2010,26 (Supp.1):146-149. (LIU Xiaoyan, CHEN Jiansheng, SUN Xiaoxu. Application of chloride tracer method to study replenishment ratio of precipitation in desert [J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(Supp.1):146-149. (in Chinese))
- [21] 马金珠, 陈发虎, 赵华. 1000 年以来巴丹吉林沙漠地下水补给与气候变化的包气带地球化学记录 [J]. 科学通报, 2004,49 (1):22-26. (MA Jinzhu, CHEN Fahu, ZHAO Hua. Unsaturated zone records of groundwater recharge and climate change in Badain Jaran desert since 1000 years ago [J]. Chinese Science Bulletin, 2004,49(1):22-26. (in Chinese))
- [22] Ma J Z, Edmunds W M. Groundwater and lake evolution in the Badain Jaran desert ecosystem, inner-Mongolia [J]. Hydrogeology Journal, 2006,14(7):1231-1243.
- [23] Ma J Z, Edmunds W M, He J H, Jia B. A 2000 year geochemical record of palaeoclimate and hydrology derived from dune sand moisture [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2009,276(1-4):38-46.
- [24] 马金珠, 李相虎, 黄天明, 等. 石羊河流域水化学演化与地下水补给特征 [J]. 资源科学, 2005,27(3):117-122. (MA Jinzhu, LI Xianghu, HUANG Tianming, et al. Chemical evolution and recharge characteristics of water resources in the Shiyang River basin [J]. Resources Science, 2005,27(3):117-122. (in Chinese))
- [25] 邓林. 地下水补给历史及其对气候变化的响应 [D]. 西安: 长安大学, 2010. (DENG Lin. Historical Record and Response to Climate Change of Groundwater Recharge [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010. (in Chinese))
- [26] 王言思. 内蒙李井灌区地下水补给的研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009. (WANG Yansi. Study on Groundwater Recharge in Luanjing Irrigation Area of Inner-Mongolia [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009. (in Chinese))
- [27] Huang T M, Pang Z H, Edmunds W M. Soil profile evolution following land-use change: implications for groundwater quantity and quality [J]. Hydrological Processes, 2013,27(8):1238-1252.
- [28] Ting C S, Kerh T, Liao C J. Estimation of groundwater recharge using the chloride mass-balance method, Pingtung plain, Taiwan [J]. Hydrogeology Journal, 1998,(6):282-292.
- [29] Sibanda T, Nonner JC, Uhlenbrook S. Comparison of groundwater recharge estimation methods for the semi-arid Nyamandhlovu area, Zimbabwe [J]. Hydrogeology Journal, 2009,17(6):1427-1441.
- [30] Yidana S M and Koffie E. The groundwater recharge regime of some slightly metamorphosed neoproterozoic sedimentary rocks: an application of natural environmental tracers [J]. Hydrological Processes, 2014,25(7):3104-3117.
- [31] Russo S L, Zavattoni L, Acutis M, Zuppi G M. Chloride profile technique to estimate water movement through unsaturated zone in a cropped area in subhumid climate [J]. Journal of Hydrology, 2003,270:65-74.
- [32] Fragalà F, Parkin G. Local recharge processes in glacial and alluvial deposits of a temperate catchment [J]. Journal of Hydrology, 2010,389:90-100.
- [33] Schmidt S, Geyer T, et al. Quantification of long-term wastewater impacts on karst groundwater resources in a semi-arid environment by chloride mass balance methods [J]. Journal of Hydrology, 2013,502:177-190.
- [34] Perera N, Gharabaghi B, et al. Groundwater chloride response in the Highland Creek watershed due to road salt application: a reassessment after 20 years [J]. Journal of Hydrology, 2013,479:159-168.
- [35] Guan H, Love A, Simmons C, et al. Catchment conceptualization for examining applicability of chloride mass balance method in an area with historical forest clearance [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2010,14:1233-1245.
- [36] Cartwright I, Gilfedder B, et al. Transient hydrological conditions implied by chloride mass balance in southeast Australian rivers [J]. Chemical Geology, 2013,357:29-40.
- [37] Eriksson E, Khunakasem V. Chloride concentration in groundwater, recharge rate and rate of deposition of chloride in the Israel coastal plain [J]. Journal of Hydrology, 1969,(7):178-197.
- [38] Allison G B, Hughes M W. The use of environmental chloride and tritium to estimate total recharge to an unconfined aquifer [J]. Australian Journal of Soil Research, 1978,16(2):181-195.
- [39] Sharma M L, Hughes M W. Groundwater recharge estimation using chloride, deuterium and oxygen-18 profiles in the deep coastal sands of western Australia [J]. Journal of Hydrology, 1985,81:93-109.
- [40] Tyler S W, Chapman J B, Conrad S H. Soil-water flux in the southern Great Basin, United States: temporal and spatial variations over the last 120,000 years [J]. Water Resources Research, 1996,32(6):1481-1499.

- hydrology: a fully -distributed physically -based approach [J].  
Journal of Hydrology, 2004,298(1-4):80-111.
- [25] Jenson S K, Domingue J O. Extracting topographic structure from  
digital elevation data for geographic information -system analysis [J].  
Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1988,54 (11):  
1593-1600.

## GPU Parallel Computing and Fast Simulation of Distributed Hydrological Models

LIU Yonghe<sup>1</sup>, FENG Jinming<sup>2</sup>, XU Wenpeng<sup>3</sup>

(1. *Institute of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China*; 2. *Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*; 3. *Institute of Computer Science and Technologies, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China*)

**Abstract:** Distributed hydrological models have been applied in various watershed hydrological processes. They are often combined with numerical weather and climate prediction, which make them need enormous calculation. In recent years, the progress of GPU technology makes the ordinary computer to perform efficient and inexpensive parallel computing. This paper presented the GPU implementation of data interpolation, runoff generation and unit hydrograph calculation in parallel computation. A recursive non-parallel implementation of Muskingum river-routing method was also presented. Based on the common notebook computer with NVIDIA GPU/CUDA and C# language, the parallel simulation of rainfall-runoff process in the Yihe River Basin by the Xinanjiang Model based distributed hydrological model indicates that the performance of parallel execution of precipitation spatial interpolation and Xinanjiang discharge calculation has a speed of 8~9 times of that from a common CPU based C # execution. The recursive Muskingum method was also 0.5~0.9 times faster than the traditional calculation using a routing order table.

**Key words:** distributed hydrological model; Xinanjiang model; CUDA; parallel calculation; flow concentration

(上接第 13 页)

- [41] Deng Z, Priestley S C, et al. Canopy enhanced chloride deposition in coastal South Australia and its application for the chloride mass balance method [J]. Journal of Hydrology, 2013,497: 62-70.
- [42] Edmunds W M, Fellman E, Goni I B, Prudhomme C. Spatial and temporal distribution of groundwater recharge in northern Nigeria [J]. Hydrogeology Journal, 2002,10(1):205-215.
- [43] Guan H, Love A, Simmons C, et al. Factors influencing chloride deposition in a coastal hilly area and application to chloride deposition mapping [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2010,14:801-813.
- [44] Edmunds W M, Tyler S W. Unsaturated zones as archives of past climates: toward a new proxy for continental regions [J]. Hydrogeology Journal, 2002,10(1):216-228.

## Discussion on Application of Chloride Mass Balance Method

YUAN Ruiqiang<sup>1</sup>, LONG Xiting<sup>2</sup>, WANG Peng<sup>3</sup>, SONG Xianfang<sup>4</sup>

(1. *School of Environment and Resource, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*; 2. *402 team, Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration of Hunan Province, Changsha 410014, China*; 3. *Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China*; 4. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*)

**Abstract:** Chloride is used as the inert tracer in the chloride mass balance method (CMB) to discover the variances of groundwater recharge rates and to offer reliable information about environment and climate changes. The method is simple and valid gaining a wide range of applications, although the limits are also obvious. In this paper, research based on CMB and evolutions of the method were widely reviewed. Hypotheses and limits were discussed. Future works were emphasized. Dry depositions of chloride need to be observed, and spatial variance of the depositions should be studied well. Multi-tracers, soil properties and duplicated borehole should be employed to enhance cross validations. The need of studies on the budget of chloride and the related natural processes and anthropogenic activities was highlighted. Our work contributes to promote the applications and developments of the method in groundwater hydrology.

**Key words:** chloride mass balance; arid and semi-arid areas; groundwater recharge; tracers; unsaturated zone