

包气带剖面中古水文-气候信息的初步研究

陈宗宇^{1,2)} 毕二平²⁾ 聂振龙²⁾ 叶浩²⁾ 南云驹²⁾

(1)吉林大学地球科学学院,长春 (2)中国地质科学院水文地质环境地质研究所,石家庄)

摘要 包气带作为联系地表各层圈相互作用的敏感带,具有特殊的记忆功能,是最有可能的古水文-气候变化记录档案。研究中以2个包气带剖面为研究对象,通过对剖面上土壤水的 Cl^- 含量变化进行研究,利用 Cl^- 质量平衡方法探讨识别其所代表的古水文-气候记录的方法,恢复研究区的古水文补给历史。研究结果表明,研究区300 a以来的古水文-气候状况有过3次干/湿变化旋回,并且反映在地下水补给速率的变化上。

关键词 包气带 古气候信息 古水文补给 氯质量平衡

过去对于水文振荡的认识通常是通过研究沉积物和化石来实现的。近期的水循环状况可以用降水记录和特定地区的河流流量变化记录来研究。随着全球变化研究的深入,人们发现地下水系统中具有保存古气候记录的潜力。包气带作为广义上地下水系统的一部分,是最有可能的古气候档案之一。大气降水是通过包气带向下入渗补给地下水的,在合适的情况下,包气带保存有相对比较古老的气候变化信息,特别是在干旱-半干旱地区,包气带中化学溶质的扩散作用较弱,有助于在土壤中保存与降雨相关的地球化学信息。因此,从包气带中示踪剂的分布可以推断出古气候和古补给的关系。Edmunds和Waltor(1980)首先研究并认识到包气带具有用于古气候重建的潜力,他们识别了包气带中短期的水文-气候变化的同位素和化学记录;Cook(1992)则提出了分析世纪尺度的气候振荡的方法。对于古气候的重建,要求更长期的记录,这种记录可能在干旱-半干旱地区发现。在澳大利亚和美国,包气带中记录了过去2000 a的补给,并已经应用于古气候重建(Stone,1992)。对于古补给历史的恢复,目前的研究多侧重于利用氯和同位素标记法,其中最主要的方法是氯质量平衡方法,该方法最早由Erisksson等(1969)和Allison等(1978)提出,用于计算含水层补给通量。最近,该方法经过改进应用于古补给的研究(Ellyn et al.,1996)。本文以太行山山前2个包气带剖面为研究对象,利用这种方法对该区的古水文-气候状况进行初步研究和探讨。

1 研究区概况及数据的获取

研究区位于太行山中段倾斜平原地带,地面高程60~110 m,地势西高东低,向东倾斜,地形坡度1.6‰~2.5‰。属温带大陆性季风气候,多年平均气温13℃,降雨分布不均,多年平均降雨量500~600 mm,70%左右的降雨集中在7~9月份,区内蒸发作用较强,年均水面蒸发量为900~1200 mm。

本区包气带及含水层为第四系松散沉积物。按岩性和沉积年代、隔水层分布状况、水动力条件等特征划分为4个含水岩组,分别相当于全新统(Q_4)、上更新统(Q_3)、中更新统(Q_2)、下更新统(Q_1)。地下水动态受气候影响,年变化规律为季节性,多年变化规律随降雨量大小而升降,天然条件下地下补给主要为大气降水入渗,其次为河渠渗漏。包气带厚度大,多为层状非均质亚粘土、亚砂土、砂及砂砾石等组合而成。取样点分别位于石家庄市西北试验场(ZK1孔)及北部正定试验场(ZK2孔),两点相距13 km。包气带岩性为粘土和亚粘土及砂互层,粘土为黄色、黄褐色轻亚粘土、亚砂土,砂为粉细砂到中粗砂,ZK1孔的沉积物颗粒要比ZK2孔的粗。

样品是利用工程钻取全芯原状样,两孔深分别为18.2 m(ZK1)和18.9 m(ZK2),其中ZK2达到地下水位(18.7 m)。样品的长度为20~30 cm,密封在铁质取样盒中,送回实验室立即进行密度和含水量测试,随后萃取孔隙水中的 Cl^- ,余下的样品放在密封的玻璃容器内贮存备用。密度和含水量在土壤 Cl^-

萃取前测试。重量含水量是利用原始湿样称重 100 g 后,在 80℃ 的条件下干燥 24 h 再称重测得; Cl^- 的萃取是将 100 g 样品利用 500 mL 蒸馏水溶液振荡,放置 24 h,然后离心过滤,测试溶液, Cl^- 在土壤水中的浓度利用重力含水量计算:

$$\text{Cl}_{\text{sw}} = \frac{\text{萃取的氯} \cdot \text{蒸馏水} / \text{土样系}}{\text{重力含水量}}$$

式中:萃取的氯为 $\mu\text{g/g}_{\text{水}}$,蒸馏水为 $\text{g}_{\text{水}}$,土样重量为 g ,重力含水量(%)为 $\text{g}_{\text{水}}/\text{g}_{\text{干土}}$ 。

2 包气带剖面的含水量及氯含量变化

图 1 和图 2 分别是两个包气带剖面综合资料图。2 个孔的沉积物相同,只是厚度和粒度粗细不同,ZK1 孔以粗砂为主,ZK2 以中细砂为主;由图 1 和图 2 可见,在近地表,2 个孔的含水量都较大,反映出近期降水的影响;在 3~4 m,含水量约为 20%~25%,ZK1 孔在 4~7 m 减小,8 m 左右增加到 22%,随后至 12 m 减小到 4%,到底部减小到 2%左右。ZK2 孔在 5~8 m 减小到 2%左右,下部由于接近地下水位而增加。

2 个孔的 Cl^- 含量也表现出相似的特征,在地表 1~2 m, Cl^- 含量很低,反映了最近降水入渗事件淋滤,在这个淋滤带以下, Cl^- 浓度急剧增加,出现 Cl^- 的峰值,这样的峰值在干旱-半干旱地区是非常典型的,反映了植物蒸发积盐的影响。在该峰值以下,2 孔稍有不同,ZK1 孔和 ZK2 孔分别在 12 m 和 10 m 左右出现第二个峰值,并分别在 15 m 和 16 m 左右出现第三个峰值,且后 2 个峰值明显不如第一个峰值那么明显。

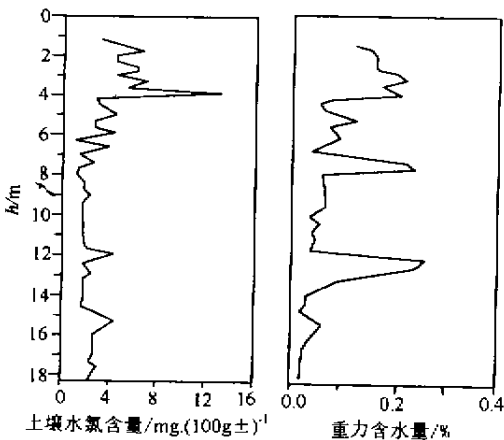


图 1 包气带剖面的综合曲线

Fig.1 The profile of unsaturated zone profile ZK1
万方数据

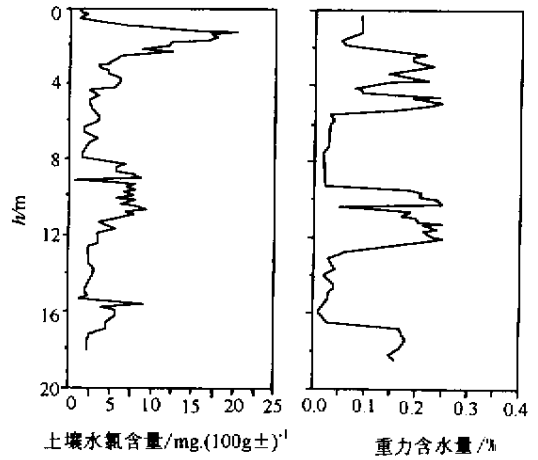


图 2 ZK2 剖面土壤氯含量和重力含水量

Fig.2 Soil chloride content and gravity water content in profile ZK2

一般来说,如果气候条件比较稳定,降水补给和 Cl^- 输入变化很小,示踪剂浓度随深度增加后趋于一个稳定的不变浓度。而出现多个峰值的现象则被 Allison 等解释为过去区域气候条件的变化所致。假设 Cl^- 输入量在整个研究区是恒定的,土壤水 Cl^- 浓度的变化则反映了湿度通量的差异。土壤水中 Cl^- 浓度在含水量较小时达到峰值,峰值以下含水量增加, Cl^- 含量趋于减小。在 Cl^- 开始积累以前,包气带经历了一个区域规模的地下水补给过程,并产生了目前在不同深度所见到的低 Cl^- 时期,反映出气候状态发生变化。

3 氯质量平衡方法

在应用 Cl^- 质量平衡方法时使用了假设条件:①补给水来源于大气降水;②补给水运动在很大程度上是活塞流;③土壤水中的 Cl^- 来源于降水和降尘;④用于计算补给速率和土壤水年龄的降水量对于样品所代表的时间尺度是合理的;⑤用于计算补给和土壤水年龄的总 Cl^- 输入值对于样品所代表的时间尺度是合理的。实际上,目前的地下水补给除了大气降水补给外,在上述条件下,根带以下 Cl^- 的平均通量应该等于降落 Cl^- 的平均通量,补给速率可以利用下列关系计算:

$$R = (\text{Cl}_0 / \text{Cl}_{\text{sw}}) \cdot P$$

R 为降水对地下水长期平均补给量(mm/a); Cl_0 是当地大气降水和降尘中平均 Cl^- 浓度(mg/L),一般可以认为是“有效氯浓度”,包括干和湿的沉降,但多数研究者都采用降水中的值而忽略干沉降; P 是多年平均降水量(mm/a); Cl_{sw} 是土壤水中某点 Cl^-

浓度或剖面上某一部分的平均 Cl^- 浓度(mg/L),一般根据土壤可溶 Cl^- 的总量除以总体积含水量而得。

如果 Cl^- 输入在整个时期内保持恒定,且没有附加的其它 Cl^- 来源,在土壤剖面上任意一点 z 处的土壤水 Cl^- 年龄 $A(z)$ 等于到 z 点的累积 Cl^- 质量浓度除以 Cl^- 年沉降量(Tyler et al. ,1996)即:

$$A(z) = \frac{\int_{\text{地表}} \theta_1 \text{Cl}_{\text{sw}} dz}{P \text{Cl}_0}$$

其中 θ_1 是体积含水量, $A(z)$ 是土壤水在 z 点的年龄(a B. P.), $A(z)$ 也可以根据包气带剖面取样间隔来近似:

$$A(z) \approx \sum_i (\text{Cl}_i z_i \gamma_i) / P \text{Cl}_0$$

Cl_i 为第 i 个样品的浓度($\text{gCl/g}\pm$); z_i 是第 i 个样品的长度(m), γ_i 是样品的密度(g/m^3); $\sum (\text{Cl}_i z_i \gamma_i)$ 是到第 i 个样品深度的总氯质量(g/m^2)。由 $A(z)$ 公式可以看出,包气带剖面所保存的记录长度主要取决于包气带深度、湿度和补给速率。

上述这些条件并不可能完全满足,因此,适当的取值,对于计算补给速率和年龄则越接近实际。

补给源一般不可能仅仅由降水补给,径流通过入渗也是一种补给过程,在某些地区深部地下水可以形成补给源,另外,灌溉回归水补给也占一定的比例。在本研究区,地下水的补给主要是大气降水,河渠渗漏次之,灌溉水在研究场地仅发生在 1984 年以前,因此影响相对较小。如果水以活塞流运动,那么水进入包气带并以相似的方式迭置并向下运动到达地下水位。一般来说,某些光滑的 Cl^- 曲线反映了扩散作用造成的 Cl^- 的再分布,2 个钻孔的 Cl^- 曲线峰值都比较陡而剧烈,说明扩散作用很小,只有 ZK2 孔的第二个峰值可能存在一个扩散作用的影响。因此,研究区的水流基本上为活塞流。弥散作用可以忽略。

包气带的岩相为第四系陆相沉积,不含海相起源的 Cl^- ,含 Cl^- 的矿物影响也可排除,因此, Cl^- 主要来源于降水。

任何古气候的研究数据都不可能提供精确的第四纪时期的降水量值,因此,研究区附近的气象台站观测的现代多年平均降水量和 Cl^- 含量值被用于计算补给速率,因为过去降水量可能在该值上、下振荡。石家庄地区的多年平均降雨量为 600 mm,据 1982 年 7~8 月北京、天津、河北、山东等气象台站采集的降水样品,实测降水中 Cl^- 的质量浓度为 5.0 mg/L (刘存富等,1993),则降水中 Cl^- 的年均降落量为 0.3 mg/cm^2 ,北京地区 20 年前大气降水的水质监测表明,当时的 Cl^- 的年均降落量为 0.24 mg/cm^2 (王健民,1978),因此,本区大气降水中 Cl^- 的平均值

0.27 mg/cm^2 。根据统计研究结果^①,滹沱平原 1956~1984 年地下水的农业灌溉面积 4 708 km^2 ,多年平均井灌回归水量为 $1.68 \times 10^8 \text{ m}^3$,地下水的 Cl^- 在 1973~1977 年平均为 39.8 mg/L (张宗祜等,2000),计算得灌溉水 Cl^- 通量为 0.14 mg/cm^2 。考虑灌溉的影响,氯的沉降量取值每年为 0.41 mg/cm^2 。

4 包气带中的古降水补给速率及古气候信息

根据 2 个剖面的氯数据,计算出 2 个孔各自的 Cl^- 年龄,ZK1 孔为 185 a,ZK2 孔为 295 a。图 3 是 2 个剖面土壤水氯含量与石家庄地区 300 a 来的干旱指数对比。干旱资料来自于《中国 500 a 来旱涝等级图》(气象科学院,1982),干旱指数 5 为大旱,4 为偏旱,3 表示正常年,2 为偏湿,1 为湿。图中的 Cl^- 曲线变化和旱涝状况基本对应,表明了包气带中的 Cl^- 记录了过去的气候变化。气候湿润多雨,土壤水 Cl^- 含量低,反之则高。从表 1 可见,在环境条件相对稳定的条件下计算的 2 个孔各自记录的时间内的平均补给速率,以及反映出的补给速率差异与沉积颗粒的粗细有关。

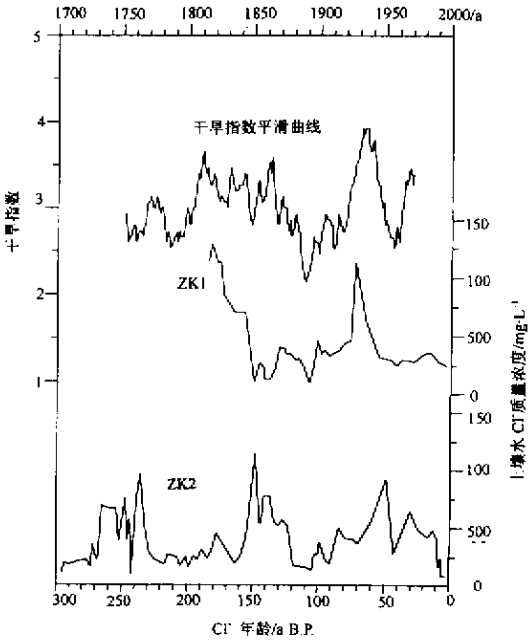


图 3 包气带剖面 Cl^- 曲线与干旱指数对比
Fig.3 Comparison between chloride concentration of the two profiles and arid index of the study area

表 1 包气带剖面数据及计算的平均补给速率

Table 1 The mean recharge rate calculated from unsaturated zone profile

剖面	深度 m	记录长度 a	补给量速率 mm·a ⁻¹	样品平均 长度/m	总含水量 m ³ ·m ²	总氯 g·m ²
ZK1	18.20	185	9.09	0.5	1.68	757.84
ZK2	18.45	295	6.72	0.6	2.02	1209.80

根据包气带剖面计算的环境变化必须要用独立的其它地质证据来佐证和检验。研究区的古气候和第四纪地质研究程度较高。按照竺可桢先生将中国近 5 000 a 来温暖期与寒冷期划分的标准看,近 500 a 的温度变化应属于第四次冷期,在这 500 a 里,又可以根据气候记录分出 4 个次暖期和 3 个次冷期。冷期为 1470 ~ 1520 年、1620 ~ 1720 年、1840 ~ 1890 年、1945 至今;暖期为 1550 ~ 1600 年、1720 ~ 1830 年、1916 ~ 1945 年。研究表明(马锡彬等,1997),北京地区从 1724 ~ 1974 年的 251 a 平均降水量为 533.3 mm,以降水量距平值超过 ± 20% 分别为涝年和旱年,并以旱、涝频率划分为多雨期与少雨期,对比这种多雨期与少雨期和从包气带推测的水文状况发

现,恢复的古水文状况基本上和古降水研究结果相对应(表 2)。

为了检验环境变化的可能性,利用不同深度的累积氯含量相对于不同深度的累积含水量作图(图 4)可以确定所记录的环境变化。利用累积含水量代替深度是为了反映含水量的变化。每个图都由多个直线段组成,每个直线段代表一个降水状况近似稳定的时期,图中的直线斜率代表 Cl_{SW}^{-1} ,斜率恒定说明在这一时期均一的环境条件,多个直线段反映了不同的环境条件,斜率大,则反映过去的水或 Cl^{-} 补给通量较大。根据不同直线段部分的实测数据,计算出各个稳定气候时期的补给速率(表 2),从表中可见有几次较大的补给分别在公元 1702 ~ 1725 年、1761 ~ 1825 年、1876 ~ 1892 年。如果以整个剖面的平均补给量 9.09 mm/a 和 6.72 mm/a 作为相对标准,则可以划分出各个时期相对的“干”和“湿”状况,这种“干”、“湿”反映出了降水的变化,表现出 3 次旋回,ZK1 孔可更进一步区分出本世纪早期比近期要“干”的多。

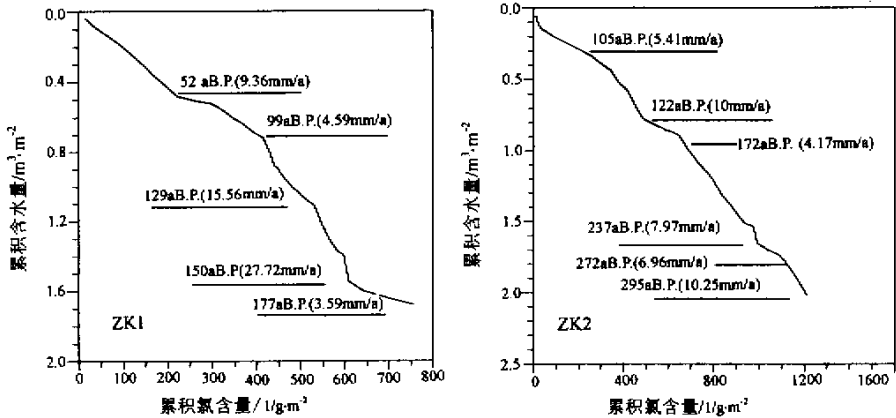


图 4 利用包气带氯数据计算的过去补给速率变化

Fig.4 The recharge rate calculated from the two unsaturated zone profiles

表 2 北京地区降水状况与包气带中的古水文信息对比

北京地区降水状况		ZK1 孔			ZK2 孔		
年代/a B. P.	降水状况	年代/a B. P.	净补给量/mm·a ⁻¹	干湿状况	年代/a B. P.	净补给量/mm·a ⁻¹	干湿状况
1724 ~ 1760	少				1702 ~ 1725	10.25	湿
1761 ~ 1825	多				1726 ~ 1760	6.69	偏干
1826 ~ 1870	少	1820 ~ 1847	3.59	干	1761 ~ 1825	7.97	湿
		1848 ~ 1868	27.72	湿	1826 ~ 1875	4.17	干
1871 ~ 1898	多	1869 ~ 1897	15.65	湿	1876 ~ 1892	10.00	湿
1899 ~ 1948	少	1898 ~ 1945	4.59	干	1893 ~ 1997	5.41	干
1949 ~ 1970	多	1946 ~ 1997	8.71	偏干			

5 讨论与结论

5.1 讨论

尽管利用 Cl^- 和稳定同位素浓度变化均可推断补给的变化 ,由于同位素可以进入气相 ,因此用 Cl^- 比用同位素标记效果要好。如果平均降落 Cl^- 已知 ,则可以确定短时间尺度的补给变化 ,然而 ,降落 Cl^- 的观测说明短期氯是变化的 ,因此 ,时间尺度的确定可以利用氡和氯-36 代替累积氯方法。

溶质和同位素浓度在包气带剖面中的变化 ,可由其它非气候或补给条件的变化而引起变化。补给的优先流动可使包气带剖面中的溶质浓度减小 ;某些情况土壤岩石风化会使 Cl^- 增加 ;地下水位的振荡和离子扩散会使包气带剖面下部的记录破坏 ;另外毛细前缘将限制动水位附近 3 ~ 4 m 之间的数据的可用性 ,气候变化引起的地下水补给变化可能由于植物生长吸收水分而变化不明显 ;土地利用(农业浇灌)也会影响包气带剖面的信息。上述各种影响都将使剖面溶质变化的解释变得复杂 ,但在同一地点 ,利用几个剖面对比研究 ,可以识别空间上的变化及各种因素影响 ,确定是否补给的变化反映了区域气候或局部气候条件的变化 ,以得到真正的环境变化信息。

5.2 结论

(1) Cl^- 质量平衡为研究包气带中的古补给提供了一种方法 ,尽管地下水位振荡、土地利用、水的选择性流动等影响到包气带中的古水文气候信息 ,但研究结果初步识别出过去气候变化的趋势。

(2) 研究区的 2 个包气带剖面分别记录了 295 a 和 185 a 以来的古水文-气候变化状况 ,两点的平均补给速率分别为 9.09 mm/a 和 6.72 mm/a。该区 300 a 来的水文-气候似乎存在 3 次干湿变化 ,湿期

对地下水的补给有着重要的意义。本世纪以来 ,气候明显偏干。

致谢 工作过程中得到水文地质环境地质研究所孙继朝研究员和张光辉研究员的指导与帮助 ,在此表示感谢。

参 考 文 献

刘存富,王佩仪,周 炼.1993.河北平原第四系地下水 ^{36}Cl 年龄初探.中国同位素水文地质学之进展(1988~1993).天津:天津大学出版社.114~118.

马锡彬,李玉尧.1997.地表层水环境的变化及其利用.北京:气象出版社.

气象科学研究院.1982.中国近500年旱涝分布图集(1470~1979).北京:地图出版社.321~332.

王健民.1979.北京地区大气降水水质初步分析研究,水文地质工程地质(4)55~61.

张宗祜,沈照理,薛雨群等.2000.华北平原地下水环境演化.北京:地质出版社.109.

Allison G B, Hughes M W.1978.The use of environmental chloride and tritium to estimate total recharge to an unconfined aquifer. Aust. J. Soil Res., 16 :181~195.

Cook P G et al..1992. Estimating paleorecharge and paleoclimate from unsaturated zone profile. Water Resources Research. 28 :272~2731.

Edmunds W M ,Walton N R G.1980. A Geochemical and isotopic approach to recharge evaluation in semi-arid zones: Past and present. Arid Zone Hydrol. Invest. Isot. Tech., Proc. Advis. Group Meeting Appl. Isot. Tech. Arid Zones Hydro. 47~68.

Ellyn M, Murpy et al.1996. Geothermal estimates of paleorecharge in the Pasco Basin: Evaluation of the chloride mass balance technique, Water Resources Research. 32(9):853~868.

Eriksson E, Khunak Sen V.1969. Chloride concentration in groundwater recharge rate and rate of deposition of chloride in Israel coastal plain. J. Hydrology., 7:178~197.

Stone W J.1992. Paleohydrological implications of some soil water chloride profiles, Murray Basin, South Australia. J. Hydrology. 132:201~223.

Tyler S W et al..1996. Soil-water flux in the Southern Great Basin, United States: Temporal and spatial Variations over the last 120 000 years. Water Resources Research, 32(6):1481~1499.

A Tentative Discussion on Paleohydrological and Paleoclimatical Information from Unsaturated Zone Profile

Chen Zongyu^{1,2)} Bi Erping²⁾ Nie Zhenlong²⁾ Ye Hao²⁾ Nan Yunju²⁾

(1) College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun, Jilin (2) Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Shijiazhuang, Hebei

Abstract The unsaturated zone, as a sensitive zone relating to various processes at the surface of the earth, has a unique recording function and hence serves as potential archives of the past hydrological or climatic changes. From two unsaturated zone profiles in Shijiazhuang of North China Plain, the authors revealed the implications of paleohydrology and paleoclimate by analyzing the chloride profiles and estimating the recharge rate with chloride mass balance method. Meanwhile, the recharge history of this area was reconstructed. The results suggest that there seem to have had three dry/wet hydrological cycles over the last 300 years. Furthermore, the changes of recharge rate have also reflected these hydrological fluctuations.

Key words unsaturated zone North China Plain paleorecharge paleoclimate chloride mass balance technique