

# 一种获取地区大气降水线方程(LMWL)的简单方法 ——以北京平原为例

刘元章, 王树芳, 王丽亚, 郭彬彬, 崔一娇

(北京市水文地质工程地质大队, 北京 100195)

**摘要:**地区大气降水线(LMWL)是进行区域水循环研究的基准。受监测站点数量的限制,大多数地区无法获得,只能参考最近监测站点的降水线或全球大气降水线(GMWL),或者需要较长时间的监测后才能获得。传统的获取方法存在较多的限制。本研究以北京平原区为例,提出了一种获取地区大气降水线(LMWL)的新方法:通过对不同深度的第四系地下水进行取样测试获取同位素数据,然后拟合获得。通过与传统方法所得的本区大气降水线对比,表明本次所得方程的相关系数更大,标准误差小,样本量大,拟合效果更好。同时可以节约大量的监测时间与人力物力,且可获得长时间序列的历史数据,较为简单实用。该方法也存在一定的局限,要求取样时尽量选取颗粒细小的冲积平原地带。

**关键词:**地区大气降水线;获取方法;氘氧稳定同位素;北京平原;地下水

中图分类号:P641.12

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2016)05-0039-07

## 1 引言

大气降水中的氢、氧稳定同位素之间存在着一定的线性关系,这是同位素水文学的核心概念及应用基础。Craig在1961年发表了著名的全球大气降水线(GMWL, Global Meteoric Water Line)方程(又称作Craig线)<sup>[1]</sup>:

$$\delta D = 8\delta^{18}O + 100\% \text{ SMOW (标准平均海水)}$$

后来随着全球降水同位素监测站网(GNIP)资料的增加,逐步提高了Craig线的精度<sup>[2]</sup>。但由于其统计平均的性质,其实质上是全球很多地方大气降水监测数据的平均值,实际上也可以认为GMWL就是很多地区大气降水线(LMWL, Local Meteoric Water Line)的综合<sup>[3]</sup>。

由于地理参数和气候的不同,地区大气降水线一般会与全球大气降水线不同,包括斜率( $a$ )和截距( $d$ )。影响地区大气降水线的气候因子包括水蒸气气团的起源、运移途径、降水期间的二次蒸发和降水的季节变化等<sup>[4]</sup>。

由于Craig线的形式简单,被广泛地作为对比基

准应用于水循环特别是降水过程的研究<sup>[4]</sup>。但随着越来越多的、更加复杂的区域环境问题的出现,需要更加细致的研究,这时Craig线就显得有些粗略,就需要有更加准确的地区基准,即地区大气降水线(LMWL)。地区大气降水线是进行区域水循环研究的基础,在水汽循环、大气降水、地表水-地下水循环转化、污染物运移机理等方面的研究中,有着重要的应用。

## 2 以往获取方法的不足

对于地区大气降水线的获得,并非很简单。传统的方法一般是通过大气降水监测获取数据再进行拟合,所存在的问题主要有:

首先,需要积累有较多的监测数据。有人认为,有一年以上的月资料即可得到LMWL<sup>[4]</sup>;但更多的人认为,大气降水线必须要用月资料根据降水量加权平均为年数据<sup>[5]</sup>,必须是年的数据才可用来导出地方降水线<sup>[6]</sup>。如果是这样,仅有几年的资料即只有几个点,所做出的线效果就不好。一般认为,区域内的监测点越多、数据时间序列越长效果越好。而事实上,受监测站点数量的限制,目前能有较长时间序列的地点相对并不多,大多

收稿日期:2015-10-10

基金项目:北京市平原区地下水污染调查项目(PXM2009-158305-074498)

作者简介:刘元章(1973-),男,山东临沂人,博士,主要从事水文地质及环境地质等方面的工作及研究。E-mail: yuanchangliu@163.com

数地方只能借鉴距离该处最近监测站点的资料。

其次,由于取样的方式、分析精度、数据多少、序列长短,及数据处理方法等的不同,会使得所得的同一个地方的地区大气降水线因人而异,出现多个不同的版本,甚至差别较大,也较难评判。如对北京地区的大气降水线,就有着几种不同的表述<sup>[7-9]</sup>。

因此,如何更加快捷地获取一个相对更加准确的地区大气降水线,显得较为重要。

### 3 新方法介绍—以北京平原区为例

研究区北京平原位于华北平原的北端,平均海拔在40m左右。本区属典型暖温带半湿润大陆性季风气候,四季分明,冬季寒冷干燥,夏季高温多雨。多年平均气温11.7℃。多年平均降水量为586mm,多集中在6~9月,其间降水量占年降水量的85%以上;降水量年际变化也较大。

#### 3.1 方法原理

降水对地下水的补给是在一定的时间和空间尺度上的平均补给,随着时间尺度的延伸,一定区域的大气降水对地下水补给的同位素组成呈现出稳定的值。这个值是以降水量为权重,以每场降水的同位素值求加权平均值得到的<sup>[10]</sup>。温带气候条件下浅层地下水的同位素组成近似代表当前年平均降水中的同位素组成<sup>[4]</sup>。

因此,通过对当地地下水进行取样测试,即可得到本地区的较长时间内的大气降水同位素的综合情况。本方法即是基于这一原理,通过对不同深度的地下水进行取样测试,获取不同时期的、长时间序列的大气降水同位素加权平均值,来获取地区大气降水线。因为通过很多的地下水定年数据来看,深层地下水年龄一般较大,最老会达到30000年左右,如本次在北京平原区所取部分<sup>14</sup>C定年数据(表1)。

表1 北京平原部分地点地下水<sup>14</sup>C数据

Table1 Carbon-14 data of some samples of the Beijing plain

编号	采样地点	取样深度 / m	PMC / %	距今年代 / a BP
C1-1	大兴区瀛海	50	75.69±0.60	2240±60
C1-2	大兴区瀛海	100	56.45±0.73	4590±100
C2-1	大兴区采育	50	55.26±0.68	4760±100
C2-2	大兴区采育	100	5.27±0.16	23650±240
C2-3	大兴区采育	180	4.42±0.30	25050±535
C2-4	大兴区采育	300	1.58±0.17	33320±860

(取样时间为2008.10,由中国地震局地震动力学国家重点实验室分析测试)

#### 3.2 关于几个关键问题的探讨

(1)关于地下水赋存及运移规律。浅层地下水尤其是海拔高于周边地区的浅井的同位素组成近似代表当地当前年平均降水中的同位素组成<sup>[4,11]</sup>。而对于深层地下水,一种可能是由浅层地下水逐步向下渗透而形成的,也有一种可能是上游或周边地区地下水通过径流而到达该地的。这就需要当地的地下水赋存运移规律做一定的探讨。

北京平原区地下水赋存及运移规律的相关研究较多,随着各种定年资料的增多,越来越多的认识倾向于“总体径流缓慢、局部滞留”的观点<sup>[12-13]</sup>。如表1中的<sup>14</sup>C定年数据显示,地下水年龄一般都在数千年以上,甚至超过3万年,这些地点的地下水径流应该是非常缓慢的,可以说是近乎滞留的。而这样的数据在本区是比较普遍的<sup>[14-15]</sup>。

表1中数据显示本区的较深的地下水年龄一般都在数千年以上,到300m深度时甚至达3万年以上。这首先反映出这些地点的垂向径流非常缓慢;而同一地点的垂向径流相对水平径流总体而言应该更大,因为水力梯度最大。因此,这也反映出这些地点的水平径流速度应该也非常缓慢。因此本区地下水赋存及运移具有“总体径流缓慢、局部滞留”的特点。对于这一特点的原因,可从以下3方面来解释:

首先是本区海拔较低,平均在40m左右,距海约100km,水力坡度非常小,天然状态下水平径流速度不可能很快。

第二个原因应该是粘土类地层的较小的渗透系数。以淤泥类土为例,渗透系数一般为 $10^{-6}$ ~ $10^{-8}$ cm/s<sup>[16]</sup>,而纯粘土则小于 $10^{-9}$ cm/s<sup>[17]</sup>,压实的粘土层还会渗透系数更小<sup>[18]</sup>。如按 $10^{-7}$ cm/s计,则1年的渗透量约为3cm,如有一3m厚的粘土层,则需要约100年才能完成渗透。而被厚层地层覆盖、压实的粘土层其渗透系数还会更小,具有很强的阻水效果。陆相沉积非常复杂多变,粘土类沉积会不时出现,会使得水平及垂向径流不断受阻。垂向上粘土层的不断出现会使得水位、水温、水质及稳定同位素等一般会表现出呈层性<sup>[12,19]</sup>。

第三个重要的方面,含水层在上覆地层的不断加积压实作用下通透性会大大变小,甚至会完全阻断。就如同软管里的水流,如果施加外部压力(如放上一块石头),水管将会被压扁,水流减小,如果外部压力足够大,水流可能会完全停止。地层在不断沉积压实的过程中,总会有差异性压实,即有些地方压实厉害,

这些地方会形成“瓶颈”或完全封堵。这样含水层中侧向流动将受到阻碍，甚至可能会产生出一些孤立封闭的滞留含水层<sup>[20-22]</sup>，即使是在相对较浅的深度上也会如此。这种相对封闭的含水层最明显的例子是海底淡水含水层的存在，部分地区海水下存在有淡水资源在世界很多地方都有例证<sup>[23-24]</sup>。

由以上分析，在沉积粒径较细的冲洪积平原区，地下水的水平及垂向径流速度可能会均较慢。因此，本地地下水可认为主要是由当地降水不断入渗而形成的。

(2)关于地质历史时期的大气降水是否同现在的情况一样能满足大气降水线。据相关研究很多地区的古水(1.3 万年之前末次冰期补给的地下水)都能满足大气降水线的关系，例如据 Sonntag 等的研究，欧洲地区的古地下水很接近 GMWL，表现出与现代欧洲降水和下渗水相同的关系<sup>[25]</sup>。这表明欧洲降水中氘盈余  $d$  至少在 3 万年内没有变化，即亚热带大西洋上的相对湿度在这期间内大体上没有变化。不同时期的水均为当地大气降水，均能满足大气降水线，则混合后的混合水仍能满足大气降水线的关系<sup>[26]</sup>，如图 1 所示。

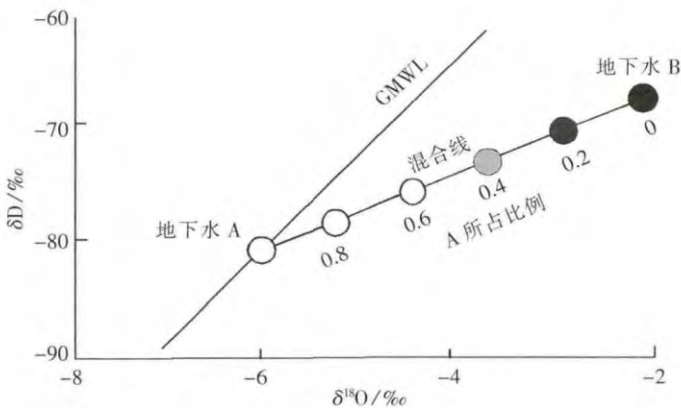


图 1 两端元混合系统示意图(Masaya Yasuhara, 2002<sup>[9]</sup>)

Fig.1 Schematic diagram of the ends-mixed system

(3)关于降水在入渗为地下水之前是否受到蒸发作用的明显影响。对于本区降水同位素组成在入渗为地下水之前是否受到蒸发作用的明显影响，通过对北京平原区当前浅层地下水的同位素含量与当前降水的对比，可大致反映总体情况。本次所取浅井水样有 6 个(Z3, M4, M5, M6, M11, M15, 井深均 ≤ 15m),  $\delta^{18}O$  的范围为  $-8.4‰ \sim -7.7‰$ ，均值为  $-8.0‰$ 。由于北京不是 GNIP 的监测站点，一直缺乏长序列的观测资料。根据 GNIP 数据库资料，距北京较近的天津地区(距离约为

100km) 大气降水  $\delta^{18}O$  的多年加权平均值为  $-7.8‰$ <sup>[27]</sup>，可作为参考。可见本区浅层地下水的  $\delta^{18}O$  值与大气降水的基本一致，因此可认为大气降水在入渗之前并没有受到明显的蒸发作用的影响。

通过上述分析，通过对不同深度的地下水进行取样测试，以获取不同时期的、长时间序列的大气降水氘氧同位素值，来获取地区大气降水线，这一方法的原理较为正确可靠。

### 3.3 本方法的运用实例

表 2 为北京平原区不同地点、深度的氘氧同位素分析数据，根据表中数据，利用最小二乘法进行拟合，得到的本区大气降水线如图 2 所示：

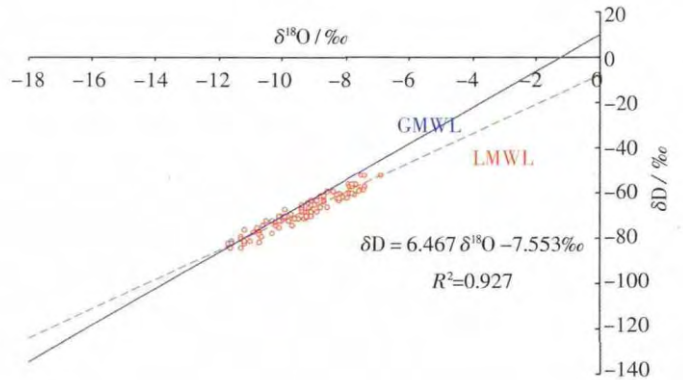


图 2 本次所拟合得出的北京大气降水线

Fig.2 The local meteoric water line (LMWL) derived in Beijing

本次所得的北京地区的大气降水线拟合方程为：  
 $\delta D = 6.467\delta^{18}O - 7.553‰ \text{ V-SMOW } (R^2 = 0.927, n = 90)$  (2)

## 4 该方法的优点与缺点

### 4.1 优点

#### (1)拟合效果更佳

卫克勤等(1982)对北京地区 1979 和 1980 两年内每次降水进行了取样，用每个月中全部降水的平均样进行了每月值的测定，然后用最小二乘法对分析数据进行了拟合<sup>[7]</sup>，给出的拟合方程为：

$$\delta D = 7.3\delta^{18}O + 9.7‰ \text{ SMOW } (R^2 = 0.855, n = 20) \quad (3)$$

郑淑惠等(1983)根据 1980 年北京站一年内的各月分析数据进行了分析拟合。所采水样方式为取每月上、中、下三旬中各一天降水的平均样<sup>[8]</sup>。所得的拟合方程为：

$$\delta D = 6.9\delta^{18}O + 3.2‰ \text{ SMOW } (R^2 = 0.881, n = 12) \quad (4)$$

翟远征等(2013)根据卫克勤<sup>[7]</sup>、温学发<sup>[28]</sup>等人的以前所测数据，结合取样，获取了 1979, 1980, 2007, 2008, 2009

表2 地下水样氘氧同位素分析数据  
Table2 The isotopic data of Deuterium and Oxygen-18 of the samples

样品 编号	位置	深度 / m	$\delta D$ (V-SMOW / ‰)	$\delta^{18}O$	样品 编号	位置	深度 / m	$\delta D$ (V-SMOW / ‰)	$\delta^{18}O$
Z1	昌平区沙河	151	-67	-9.4	Z46	通州区刘庄村	300	-84	-11.6
Z2	昌平区沙河	250	-70	-10.0	Z46	通州陆河中学	43	-68	-9.4
Z3	昌平区小汤山	10	-56	-7.7	Z48	通州陆河中学	83	-71	-9.5
Z4	昌平区小汤山	124	-70	-10.1	Z49	通州陆河中学	143	-74	-10.2
Z5	昌平区小汤山	202	-72	-9.8	Z50	通州区张家湾	30	-66	-8.6
Z6	昌平区立水桥	30	-68	-8.9	Z51	通州区张家湾	160	-71	-9.6
Z7	昌平区立水桥	63	-82	-11.7	Z52	通州区张家湾	280	-75	-10.1
Z8	昌平区立水桥	98	-81	-11.0	Z53	通州区牛堡屯	97	-63	-8.2
Z9	昌平区立水桥	158	-81	-11.6	Z54	大兴区海子角	37	-57	-7.4
Z10	昌平区立水桥	180	-80	-11.3	Z55	大兴区海子角	77	-66	-8.8
Z11	昌平区马连店	62	-63	-8.7	Z56	大兴区海子角	123	-65	-9.0
Z12	昌平区马连店	100	-66	-9.2	Z57	大兴区瀛海村	60	-60	-8.2
Z13	昌平区马连店	181	-72	-10.1	Z58	大兴区瀛海村	85	-57	-7.8
Z14	昌平区马连店	302	-77	-10.3	Z59	大兴区瀛海水厂	50	-60	-7.9
Z15	朝阳区东郊牛场	235	-79	-11.3	Z60	大兴区瀛海水厂	100	-62	-8.0
Z16	朝阳区楼梓庄	121	-74	-10.6	Z61	大兴区沙窝营	50	-72	-10.5
Z17	朝阳区楼梓庄	167	-71	-9.5	Z62	大兴区沙窝营	150	-80	-11.1
Z18	朝阳区大鲁店	60	-66	-8.8	Z63	大兴区沙窝营	303	-77	-10.9
Z19	朝阳区大鲁店	112	-67	-9.9	Z64	平谷区青杨屯	50	-59	-7.5
Z20	朝阳区大鲁店	185	-70	-9.9	Z65	平谷区青杨屯	100	-60	-7.7
Z21	朝阳区大鲁店	230	-77	-10.7	Z66	顺义李家桥	30	-62	-8.3
Z22	朝阳区八里桥	238	-72	-10.0	Z67	顺义李家桥	100	-68	-9.2
Z23	朝阳区青年路	25	-52	-7.5	Z68	顺义李家桥	200	-78	-10.7
Z24	朝阳区青年路	120	-72	-10.3	Z69	顺义区于地村	104	-71	-9.3
Z25	朝阳区将台路	53	-61	-8.8	Z70	顺义区罗各庄	301	-79	-10.6
Z26	朝阳区将台路	112	-63	-8.7	M1	大兴区芦城	54	-57	-7.8
Z27	朝阳区将台路	192	-61	-8.7	M2	大兴区芦城	85	-59	-7.6
Z28	朝阳区将台路	256	-75	-10.8	M3	大兴区南小营	80	-68	-9.1
Z29	朝阳区定福庄	90	-66	-9.4	M4	顺义区前桑园	4.5	-56	-7.9
Z30	朝阳区定福庄	185	-68	-9.3	M5	顺义区赵各庄	14	-57	-7.9
Z31	通州区牛堡屯	194	-71	-9.6	M6	顺义区杨镇	15	-61	-8.3
Z32	通州区宋庄	100	-65	-9.1	M7	顺义区红寺村	90	-60	-7.8
Z33	通州区宋庄	211	-71	-9.3	M8	顺义区高丽营	100	-59	-8.6
Z34	通州区神仙村	62	-64	-9.2	M9	大兴区青云店	40	-70	-9.1
Z35	通州区神仙村	146	-67	-9.4	M10	海淀区皇后店	80	-65	-9.4
Z36	通州区神仙村	300	-82	-11.6	M11	房山区篱笆房村	30	-52	-6.9
Z37	通州区牛堡屯	31	-63	-8.9	M12	房山区长沟村	10	-56	-7.8
Z38	通州区牛堡屯	97	-63	-9.1	M13	房山区石楼村	36	-52	-7.4
Z39	通州区牛堡屯	194	-76	-11.2	M14	房山区窦店牛场	38	-62	-8.2
Z40	通州区三垓村	58	-62	-8.1	M15	平谷区靠山集村	12	-59	-8.4
Z41	通州区三垓村	94	-70	-9.3	M16	大兴安定镇煤厂	90	-68	-9.4
Z42	通州区三垓村	183	-81	-10.7	M17	大兴区采育二村	300	-74	-9.7
Z43	通州区刘庄村	46	-59	-7.6	M18	大兴区小海字村	370	-82	-11.2
Z44	通州区刘庄村	105	-69	-9.7	M19	大兴区永乐店	280	-84	-11.3
Z45	通州区刘庄村	180	-82	-11.2	M20	大兴区康营村	150	-81	-11.2



表3 四种不同拟合方程的对比

Table3 Comparison between the four different fitting equations

拟合方法	拟合方程	相关系数 ( $R^2$ )	标准误差 ( $\sigma$ )	样本量 ( $n$ )
卫克勤,等(1982)	$\delta D = 7.36\delta^{18}O + 9.7\text{‰}$ SMOW	0.855	11.858‰	20
郑淑惠,等(1983)	$\delta D = 6.96\delta^{18}O + 3.2\text{‰}$ SMOW	0.881	9.356‰	12
翟远征,等(2013)	$\delta D = 7.018\delta^{18}O + 3.523\text{‰}$ V-SMOW	0.86	10.534‰	36
本次	$\delta D = 6.467\delta^{18}O - 7.553\text{‰}$ V-SMOW	0.927	2.244‰	90

五年内的共 36 对数据,通过拟合,得出北京地区的大气降水线方程为<sup>[9]</sup>:

$\delta D = 7.018\delta^{18}O + 3.523\text{‰}$  V-SMOW ( $R^2 = 0.86, n = 36$ ) (5)

从以上 3 个拟合方程所得的拟合线与本文方法所得的大气降水线直观对比可看出,本方法的数据点离散度低,奇异点少。4 种不同方法的对比如图 3 及表 3 所示:

方法相对较为简单。

(3)能获取地质历史时期的、长时间序列的同位素数据

因为是多年的混合,时间序列长,达到了数万年,实现了最大限度的多年平均。因为是较长时间的综合,拟合方程应更能体现多年平均,更具有代表性。

4.2 缺点

本方法具有的不足之处主要包括以下两个方面:

(1) 本应用实例北京平原地处温带沿海季风气候区,地表的蒸发作用对入渗地下水的同位素组成影响较小;其他类地区,尤其是蒸发作用较强的干旱内陆地区,地表蒸发层厚度较厚,蒸发作用对入渗地下水的影响可能会较大<sup>[32]</sup>。因此,有必要在不同类的典型地区,选择监测资料较多的地点,对大气降水和地下水的同位素组成之间关系作出一定的研究,然后根据两者之间的关系对本方法做出一定的校正,使其更加准确实用。这有待进一步的研究。

(2)对于当地的地下水是否会受到远处区域地下水径流的影响,并不能完全排除。为尽量减小这种可能,取样时应注意以下几点:应当尽量避开跨区域大河流的河道两侧,以免受到远处区域来水的影响;尽量选取第四系冲洪积平原中下游地带中沉积颗粒较细的区域,因为这些地点的地下水运移速度会相对更小;不能利用基岩井取样,还应尽量避开山前地带,因为基岩裂隙较大,地下水运移可能会速度更快、距离较远。

同时,取样时还应注意以下两点:尽量避开水库及湖泊周边地带,因为这些地带的地下水可能会受到已受较强蒸发作用影响的湖水的入渗影响;根据取样经验,最好是针对不同深度的分层监测井进行取样,这样同位素值的变化范围会更广,对于降水线方程的拟合效果会更好。因为民用井为上下多层的混合水,同位素值变化幅度会变小。

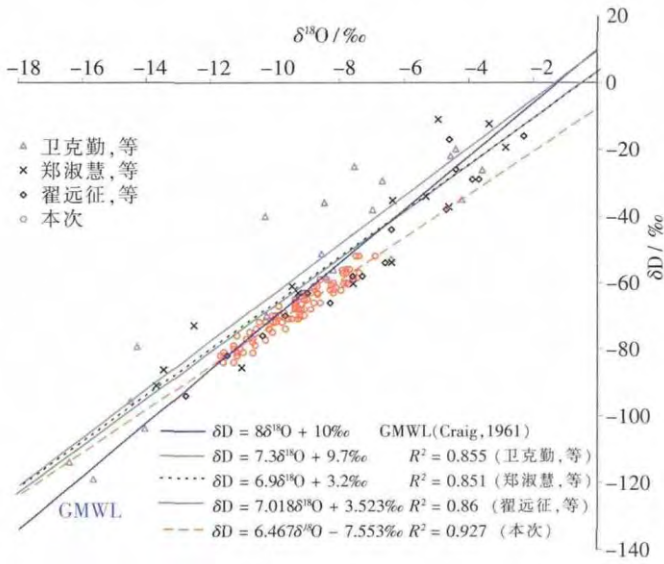


图3 四种不同的北京大气降水线对比图

Fig.3 Comparison between the four different local meteoric water lines (LMWL) of Beijing

通过对比可看出,本方法的拟合相关系数更高,标准误差较小,样本量更大,效果更佳。

(2)数据获取相对简单,且成本较低

本方法不需要长时间的监测工作,一次取样,短时间内即可获取大量样本数据,相对节省了大量的人力物力与时间;而且所得数据为天然的多年综合结果,不需再做其他的数据处理,不需考虑其他各种复杂的影响大气降水同位素变化的因素<sup>[29-31]</sup>,

## 5 主要结论

(1)根据大气降水监测资料获取地区大气降水线的传统方法存在着较多的局限性,如所需时间长、数据量小、时间序列较短、数据处理方法不一等问题;

(2)本方法基于“冲积平原区第四系地下水运移整体非常缓慢,地下水是当地大气降水的多年入渗的综合”这一原理,以北京平原为例,通过对不同深度的地下水进行取样测试,直接生成大气降水线,方法较为简单;

(3)通过与已有的其他北京地区大气降水线拟合效果进行对比,本方法相关系数高、标准误差小、样本量大,拟合效果更好;

(4)本方法的优点还包括:可以节省大量的人力物力与监测时间,一次取样,短时间内即可获得结果;而且可获得地质历史时期的数据,做到了真正长时间序列数据的综合,更具代表性,是传统方法所不能比拟的。

### 参考文献:

- [1] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. *Science*, 1961,133:1702-1703.
- [2] Rozanski K, Arans-Araguas L, Gonfiantini R. Relation between long-term trends of oxygen-18 isotope composition of precipitation and climates [J]. *Science*, 1992,258(5084):981-985.
- [3] 顾祖超,庞忠和,王全九,等. 同位素水文学[M]. 北京: 科学出版社, 2011:124-127. (GU Weizu, PANG Zhonghe, WANG Quanjiu, et al. *Isotope Hydrology* [M]. Beijing: Science Press, 2011:124-127. (in Chinese))
- [4] Clark Ian D, Peter Fritz. *Environmental Isotopes in Hydrogeology* [M]. New York: Lewis Publishers, 1999:50-98.
- [5] Gat J R, Dansgaard W. Stable isotope survey of the fresh water occurrences in Israel and the northern Jordan Rift valley [J]. *Journal of Hydrology*, 1972,16(3):177-211.
- [6] Ferronsky V I, Polyakov V A. *Environmental Isotopes in the Hydrosphere* [M]. Chichester, New York: John Wiley & Sons, 1982: 15-56.
- [7] 卫克勤,林瑞芬,王志祥. 北京地区降水中的氘、氧-18、氚含量[J]. *中国科学: B 辑*, 1982,8:754-757. (WEI Keqin, LIN Ruifen, WANG Zhixiang. Deuterium, oxygen-18 and tritium content of precipitation in Beijing [J]. *Science China:Series B*, 1982,8:754-757. (in Chinese))
- [8] 郑彦慧,侯发高,倪葆龄. 我国大气降水中的氢氧同位素研究[J]. *科学通报*, 1983,13:801-806. (ZHENG Shuhui, HOU Fagao, NI Baoling. Study on the hydrogen and oxygen isotopes in precipitation in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1983,13:801-806. (in Chinese))
- [9] Zhai Yuanzheng, Wang Jinsheng, Zhang Yang, et al. Hydrochemical and isotopic investigation of atmospheric precipitation in Beijing, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2013,456-457:202-211.
- [10] 刘相超,宋献方,夏军,等. 东台沟实验流域降水氧同位素特征与水汽来源[J]. *地理研究*, 2005,24(2):196-205. (LIU Xiangchao, SONG Xianfang, XIA Jun, et al. Study on the hydrogen and oxygen isotopes in precipitation in Dongtaigou basin, Beijing [J]. *Geographical Research*, 2005,24(2):196-205. (in Chinese))
- [11] 徐彦泽,田小伟,郑跃军,等. 沧州小山地区地下水的补给研究[J]. *水文地质工程地质*, 2009,36(3):51-54. (XU Yanze, TIAN Xiaowei, ZHENG Yuejun, et al. Recharge of groundwater in the Xiaoshan area of Cangzhou [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2009,36(3):51-54. (in Chinese))
- [12] Liu Yuanzhang, Wu Qiang, Lin Pei, et al. Restudy of the storage and migration model of the Quaternary groundwater in Beijing plain area [J]. *Science China Earth Sciences*, 2012,55(7):1147-1158.
- [13] 刘元章,武强,刘久荣,等. “井水不犯河水”水文地质学含义初步探讨[J]. *地下水*, 2011,33(6):122-127. (LIU Yuanzhang, WU Qiang, LIU Jiurong, et al. Preliminary study of the hydrogeology meaning of Chinese saying that “well water doesn't interfere river water”[J]. *Ground Water*, 2011,33(6):122-127. (in Chinese))
- [14] 王新娟,周训. 北京市永定河流域地下水 14C 年龄的初步分析[J]. *地质论评*, 2006,52(2):283-288. (WANG Xinjuan, ZHOU Xun. A preliminary analysis of the 14C age of groundwater in the Yongdinghe River alluvial plain in Beijing [J]. *Geological Review*, 2006,52(2):283-288. (in Chinese))
- [15] 北京市地质矿产勘查开发局,北京市水文地质工程地质大队. 北京地下水[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008:77-83. (Geology and Mineral Resources Bureau of Beijing, Beijing Institute of Hydrogeology and Engineering Geology. *Groundwater of Beijing* [M]. Beijing: China Land Press, 2008:77-83. (in Chinese))
- [16] 李智毅,杨裕云. 工程地质学概论[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1994:43. (LI Zhiyi, YANG Yuyun. *Engineering Geology Introduction*[M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 1994:43. (in Chinese))
- [17] 中国大百科全书总编辑委员会《土木工程》编辑委员会. 中国大百科全书·土木工程卷[M]. 北京,上海: 中国大百科全书出版社, 1987: 579. (Editorial Committee of Civil Engineering Volume of the Chinese Encyclopedia. *Chinese Encyclopedia Civil Engineering Volume*[M]. Beijing, Shanghai: Chinese Encyclopedia Press, 1987:579. (in Chinese))
- [18] Neuzil, C. How permeable are clays and shales [J]. *Water Resource Research*, 1994,30(2):145-150.
- [19] 刘元章,武强,高志辉,等. 北京平原区第四系地下水水位变化规律的再认识 [J]. *工程勘察*, 2013,5:43-47. (LIU Yuanzhang, WU Qiang, GAO Zhihui, et al. Re-understanding of the variation laws

- of the Quaternary groundwater in Beijing plain [J]. *Geotechnical Investigation and Wurveying*, 2013,5:43–47. (in Chinese))
- [20] Mazor E. Stagnant aquifer concept part 1. large-scale artesian systems—Great Artesian basin, Australia [J]. *Journal of Hydrology*, 1995,173(1–4):219–240.
- [21] Mazor E, Gilad D, Fridman V. Stagnant aquifer concept part 2. small scale artesian systems—Hazeva, Dead Sea Rift valley, Israel [J]. *Journal of Hydrology*, 1995,173(1–4):241–261.
- [22] Fridman V, Mazor E, Becker A, et al. Stagnant aquifer concept part 3. stagnant miniaquifers in the stage of formation, Makhtesh Ramon, Israel [J]. *Journal of Hydrology*, 1995,173(1–4):263–282.
- [23] Edmunds W M. Significance of geochemical signatures in sedimentary basin aquifer systems [A]. *Proceedings of 10th Water-rock Interaction* [C]. Balkema, 2001:29–36.
- [24] 李珍,李杰,李贞,等. 浙江嵊泗海域第四纪沉积层序及承压水层位特征初探[J]. *上海地质*, 2008,1:7–13. (LI Zhen, LI Jie, LI Zhen, et al. The primary research on the quaternary stratigraphic sequence and the characteristics of the water-bearing stratum in the sea of Shengsi area, Zhejiang province [J]. *Shanghai Geology*, 2008,1:7–13. (in Chinese))
- [25] Sonntag C, Klitzsch H E, Lohnert EP, et al. Palaeoclimatic information from deuterium and Oxygen-18 in carbon-14 dated North Saharan groundwater. In: *Isotope Hydrology 1978, Vol* [M]. Vienna: IAEA, 1979: 569–581.
- [26] Masaya Yasuhara. Environmental isotopes in groundwaters. In: Naohiro Yoshida ed. *Hydrogen and Oxygen Isotopes in Hydrology* [M]. IHP, UNESCO, 2002:109–132.
- [27] 陈宗宇,齐继祥,张兆吉,等. 北方典型盆地同位素水文地质学方法应用[M]. 北京:科学出版社,2010:25–52. (CHEN Zongyu, QI Jixiang, ZHANG Zhaoji, et al. *Applications of Isotope Hydrogeology Methods in Typical Basins of North China* [M]. Beijing: Science Press, 2010: 19–152. (in Chinese))
- [28] WEN Xue-Fa, ZHANG Shi-Chun, SUN Xiao-Min, et al. Water vapor and precipitation isotope ratios in Beijing, China [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010,115,D01103, doi:10.1029/2009JD012408.
- [29] 陈中笑,程军,郭品文,等. 中国降水稳定同位素的分布特点及其影响因素[J]. *大气科学学报*, 2010,33(6):667–679. (CHEN Zhongxiao, CHEN Jun, GUO Pinwen, et al. Distribution characters and its control factors of stable isotope in precipitation over China [J]. *Transactions of Atmospheric Science*, 2010,33(6):667–679. (in Chinese))
- [30] 王涛,张洁茹,刘笑,等. 南京大气降水氧同位素变化及水汽来源分析[J]. *水文*, 2013,33(4):25–31. (WANG Tao, ZHANG Jieru, LIU Xiao, et al. Variations of stable isotopes in precipitation and water vapor sources in Nanjing area [J]. *Journal of China Hydrology*, 2013,33(4):25–31. (in Chinese))
- [31] 黄锦忠,谭红兵,王若安,等. 我国西北地区多年降水的氢氧同位素分布特征研究[J]. *水文*, 2015,35(1):33–39. (HUANG Jinzhong, TAN Hongbing, WANG Ruolan, et al. Hydrogen and oxygen isotopic analysis of perennial meteoric water in northwest China [J]. *Journal of China Hydrology*, 2015,35(1):33–39. (in Chinese))
- [32] Allison G B. The relationship between 18O and deuterium in water in sand columns undergoing evaporation [J]. *Journal of Hydrology*, 1982,55:163–169.

## A Simple Method of Obtaining Local Meteoric Water Line (LMWL) Equation: A Case Study in Beijing Plain

LIU Yuanzhang, WANG Shufang, WANG Liya, GUO Binbin, CUI Yijao

(Beijing Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Beijing 100195, China)

**Abstract:** The local meteoric water line (LMWL) is a significant benchmark in regional water cycle research. Because of the limited numbers of monitoring stations, most sites cannot obtain the LMWL easily, and could only refer the LMWL of the nearest monitoring station or the Global Meteoric Water Line (GMWL), or there needs a long term monitoring before analyzing and obtaining. There also exist many limitations in the conventional methods to obtain the LMWL. A case study was carried out in the Beijing Plain, and a new simple method of obtaining the LMWL was proposed in this paper. The data of the  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  of historical periods can be got through quaternary groundwater sampling and analysis, and the LMWL was obtained with the data directly. Compared with the LMWL equations using the conventional method, the new method is shown to have many advantages. The method could save a lot of human and physical resources and monitoring time, is relatively simple and is more practical. Moreover, it has a better fitting effect. It is also noted that the method has some deficiencies: it requires the sampling sites to be selected from an alluvial plain area with fine deposition particles.

**Keywords:** local meteoric water line; obtaining method; stable isotope of oxygen-18 and deuterium; Beijing Plain; groundwater