

全球大气降水中年平均氡浓度的恢复模型

章艳红,叶淑君,吴吉春

南京大学水科学系,南京,210093

内容提要:氡作为一种天然的环境同位素可广泛应用于水文地质领域,由于实测资料的稀缺,极大地限制了氡的应用。为了能够解决这一问题,选用国际原子能机构最近发布的1960~2005年南纬50°至北纬70°区域内氡值实测资料,应用因子分析方法建立了全球大气降水中年平均氡浓度的恢复模型。选取了三个任意典型站点采用“直接求参法”所建模型进行了验证和一个任选站点采用“间接求参法”所建模型进行了验证,然后以南京站为例对模型进行了具体应用。因子分析应用于全球氡值恢复具有物理意义明确、适用范围广泛、操作方法简单、影响因素少,很好地恢复出氡值变化曲线的峰值和形态等特点。分析结果表明全球模型输出结果与实测值吻合,不但具有全球适用性,而且在一定程度上解决了原全球模型精度欠佳的问题,为资料稀缺和无资料地区1960~2005年大气降水中年平均氡浓度恢复提供了一种新方法。同时对模型应用中出现的问题也提出了解决方案。

关键词: 氡浓度;大气降水;因子分析;最小二乘法;全球

氡(^3H 或 T)是氢(^1H)元素的一种放射性同位素,在环境中主要以 HTO 的形式存在。氡不稳定,会衰变成氦(^3He),半衰期 $12.33\pm0.03\text{a}$ (Lucas et al., 2000)。 HTO 分子在天然水循环中不断衰变,时间越长,水中氡含量越低(卫克勤等,1982)。含氡(HTO)水分子与普通(H_2O)水分子一样,在天然水循环过程中,打上了各种环境因素影响的特征标记,成为追踪各种水文地质作用的一种理想示踪剂(王恒纯,1991)。应用大气降水中的氡作为示踪核素来研究地下水的状态,有广泛的实际应用,已受到水文、环境、地热等领域的广泛重视(卫克勤,1980; Wei et al., 1980; 马致远,1997; 陈建生等,2004; 陈宗宇等,2004; 马致远,2004; Boronina et al., 2005; 连珏^①; 丁宏伟等,2009; Pang et al., 2010)。用氡来研究地下水的运动规律时,必然会遇到氡的输入背景值问题(马致远,1997; 王瑞久,1984; 陈宗宇等,2004; 马致远,2004)。

大气降水中的氡作为环境同位素有两个来源:一是来源于大气层上层宇宙射线形成的中子和氮原子的相互作用而形成的宇宙氡(Danielsen, 1968);二是来源于1952年以来的人工氡,主要来源于热核爆炸,1963年达到高峰(Eriksson, 1965; IAEA,

1969)。随后由于国际公约对核试验的限制,降水中的氡浓度以指数形式递减,到1990年大部分由于“爆炸”产生的氡已经从大气中冲刷下来,目前大气降水中的氡基本恢复到自然水平(张琳等,2008)。

为查明大气降水氡浓度的时空分布规律,国际原子能机构(IAEA)和世界气象组织(WMO)在世界各地建立了观测站,而我国的背景值监测工作起步较晚,除香港外,广大地区缺少1953~1978年20多年的系列观测资料(王恒纯,1991)。实测资料不能满足应用要求,因而需应用合适的数学方法对大气降水的氡浓度进行恢复。目前我国应用的恢复方法主要有关秉钧法(关秉钧,1986; 关秉钧等,1992; 苏小四,2002; 田华^②; 陈宗宇等,2004),插值法(王瑞久,1984; 邵益生,1987; 王凤生,1998; 田华,2003; 连珏^①; 巴琦等,2010),双参考曲线法(连炎清,1990; 苏小四,2002; 田华^②),不同影响因素(多为降水量)的一元线性相关(邵益生,1987; 马致远,1997; 王凤生,1998; 马致远,2004),人工神经网络法(龙文华等,2008)等。相对于水文地质工作者和相关研究者的迫切需要,以上方法均表现出一定时空局限性。将因子分析法应用于全球大气降水年平均氡浓度的恢复最早由Doney et al. (1992)提出,Doney et al.

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号40872155,40725010,41030746)和国家重点基础研究发展计划资助(编号2010CB428803)的成果。

收稿日期:2010-08-28;改回日期:2011-01-13;责任编辑:章雨旭。

作者简介:章艳红,女,1985年生。博士研究生。主要从事污染水文学和生态水文学的研究。通讯地址:210093,南京大学水科学系; Email:yhzhangn618@gmail.com。通讯作者:叶淑君,电话:025-83594150; Email:sjye@nju.edu.cn。

轴 F_j 上的投影。

因子分析中,有一种特殊的正交因子分析模型,是专门针对标准变量建立的,即那些均值为 0,方差为 1 的随机变量,其具体模型见式(3),与方程(2)不同的是少了均值 μ 这一项,使得两个模型适用的条件不同。

2 大气降水中氡浓度恢复模型

相关研究表明全球大气降水中氡浓度历年变化曲线具有形态相近的特性(Taylor, 1966; Koster et al., 1989; Michel, 1989),亦表明数据内部之间存在相关性。图 1a、b 为分别位于北、南半球典型站点大气降水中年平均氡浓度变化曲线。在北半球,大气降水中的氡峰值出现在 1963 年,而且观测数据亦表明其具有明显的纬度效应(Morishima et al., 1985; Taylor, 1966)。在南半球,大气降水中的氡平均浓度比半球的浓度低两至三个数量级,而且整个历时曲线相对更加平缓(Weiss et al., 1980)。

2.1 提取公共因子

本文选用的是国际原子能机构(IAEA)发布的大气降水中年平均氡值资料,来源于 GNIP 数据库(IAEA/WMO, 2009)。选择站点分布较多的南纬 50° ~北纬 70° 这一区间作为研究区域,在此研究范围内的所有站点均进行统计,只对部分极端数值进行人为剔除。将整个研究区域划分为 12 个区间(即每 10° 为一个区间),以纬度作为变量进行数据的整理。这样处理使得原来数据间复杂的相关关系简化为只与纬度相关。通过对 IAEA 提供的观测资料完整性进行分析,确定 1960~2005 年作为本次的研究时间系列,时间系列长度为 46a。然后,分别对区域内每一区间进行算术平均统计,得到 12 个区间 46a 期间的大气降水中年平均氡浓度系列,在此基础上对于每一变量分别进行 Z 统计量标准化处理(贾俊平, 2004),最终得到 12 个 46 维标准化大气降水中年平均氡浓度列变量,即一个 46×12 的矩阵,记作 $C_p(t, \varphi)$,利用 R 型因子分析方法对该矩阵进行分析:

$$C_p(t, \varphi) = \sum_i^n [C_p(t, i)l(i, \varphi)] + \epsilon(t, \varphi) \quad (3)$$

式中, $c_p(t, i)$ 是因子得分的第 i 个向量(时间记录), $l(i, \varphi)$ 是因子载荷的第 i 个向量(纬度模式), $\epsilon(t, \varphi)$ 是特殊因子矩阵。如上所述,矩阵 $C_p(t, \varphi)$ 是由 12 个标准化变量组成,所以,在因子提取过程中采用的表达式是式(3),即表达式中没有均值变量这一项。

之所以在因子提取这一过程中对变量 $C_p(t, \varphi)$ 进行标准化得理原因主要有以下两个方面:① 如图 1a 和 b 所示,北半球的氡值在数量级上明显地高于南半球,为了消除变量间在数量级上的不同,使不同计算标准下变量的比较成为可能,达到简化解释的目的,② 用于公共因子提取的资料来自于研究区域范围内所有资料的分析整理,数据量充沛,使标准化处理成为可能。因子分析的过程利用软件 SPSS (SPSS 13.0 for windows developed by the Apache Software Foundation)(巴克豪斯等, 2009)完成,结果提取了两个公共因子,此时累积方差贡献率达到了 94.99%,即损失的方差贡献率仅为 5.01%(图 2)。因子得分和因子载荷分别见图 3a、b,两个公共因子具体取值详见表 1。

为了说明应用因子分析方法的有效性及其公共因子的可解释性,对公共因子进行命名,即找出其所代表的物理意义,一般可根据公共因子得分和因子载荷两方面进行综合考量。首先,因子得分的两条曲线的形状分别与南、北半球典型站点的年平均大气降水氡浓度变化曲线形状很相似,其中公因子 1 因子得分曲线与北半球渥太华(Ottawa)站大气降水中年平均氡浓度曲线的形状相近(图 1a 和图 3a);公共因子 2 因子得分曲线则与南半球 Kaitoke 站大气降水中氡年平均浓度曲线的形状很相近(图 1b 和图 3a)。其次,从因子载荷曲线也可以看出,公共因

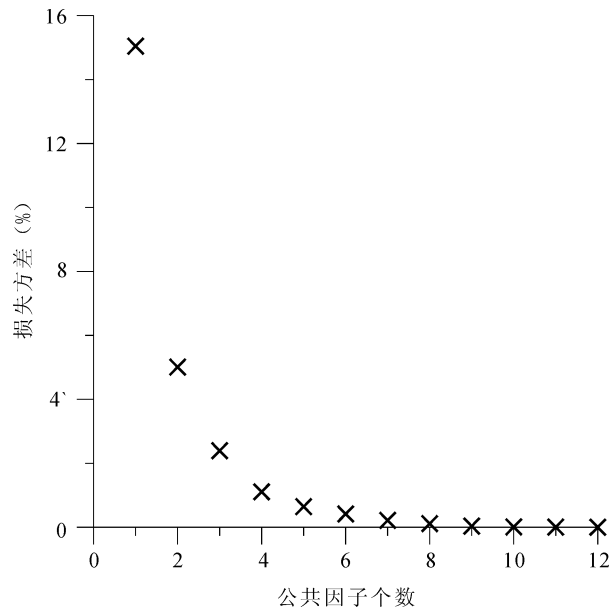


图 2 公共因子个数和方差信息损失量关系曲线
Fig. 2 Plot of the numbers of factors vs. uncounted variances

表 1 预测降水中氚浓度的标准化公因子(单位:TU)
Table 1 Normalized factors for predicting tritium in precipitation (unit:TU)

年份	公共因子 1	公共因子 2	年份	公共因子 1	公共因子 2
1960	0.0039	-0.9347	1983	-0.2945	-0.3538
1961	0.0608	0.3415	1984	-0.2208	-0.4890
1962	1.9769	-0.0380	1985	-0.2021	-0.5240
1963	5.4586	0.0036	1986	-0.1720	-0.6024
1964	2.6818	1.3165	1987	-0.1827	-0.6605
1965	0.4232	2.3588	1988	-0.1729	-0.6204
1966	-0.2008	2.1669	1989	-0.1301	-0.7531
1967	-0.4265	2.0606	1990	-0.0687	-0.8731
1968	-0.5580	1.9604	1991	-0.1163	-0.7710
1969	-0.7550	2.2681	1992	-0.1254	-0.7683
1970	-0.7553	1.9909	1993	-0.1556	-0.7263
1971	-0.6311	1.4901	1994	-0.1369	-0.7720
1972	-0.4888	0.8763	1995	-0.1439	-0.7131
1973	-0.4719	0.6202	1996	-0.1125	-0.7274
1974	-0.3480	0.4250	1997	-0.1516	-0.7201
1975	-0.2389	0.1407	1998	-0.2506	-0.06660
1976	-0.2594	0.0002	1999	-0.1791	-0.7251
1977	-0.2282	-0.1015	2000	-0.2760	-0.06131
1978	-0.1700	-0.1844	2001	-0.3626	-0.3818
1979	-0.2483	-0.1844	2002	-0.2194	-0.6936
1980	-0.1941	-0.4217	2003	-0.1919	-0.7560
1981	-0.1845	-0.4424	2004	-0.1721	-0.7896
1982	-0.2612	-0.3727	2005	-0.1476	-0.8405

子 1 在北半球的荷载因子较大;而公共因子 2 则相反,在南半球的因子载荷较大(图 3b)。综上所述,可将公共因子 1 命名为北半球影响因子,公共因子

2 命名为南半球影响因子。而且,南纬 20°以南的地区主要受到南半球影响因子的控制;南纬 20°至北纬 20°的范围,即赤道附近,受到南和北半球影响因子的共同控制;在北纬 20°以北的区域则主要受到北半球影响因子的控制。

2.2 模型建立

对于全球的某个具体站点而言,很多地区监测工作起步晚,除了几个长期监测的站点外,观测资料相对较少,这种情况下,由于数据量的限制难以对随机观测变量进行标准化处理。因此,单个站点的氚恢复模型是带有均值项的因子分析方程式(2)。全球任一站点的年平均氚浓度 $c_p(t)$ (未经过标准化处理)认为是两个公共因子 $c_p(t,1)$ 和 $c_p(t,2)$ 的线性组合,即:

$$c_p(t)=b+f_1c_p(t,1)+f_2c_p(t,2)+\epsilon(4)$$

其中, b 为常数项; f_1 、 f_2 分别为公共因子 $c_p(t,1)$ 、 $c_p(t,2)$ 的回归系数,其物理意义可对比因子载荷, ϵ 为随机误差。式(4)即为应用因子分析方法建立的全球大气降水中年平均氚浓度恢复模型。式(4)中公共因子 $c_p(t,1)$ 和 $c_p(t,2)$ 的具体取值详见表 1,而参数 b 、 f_1 、 f_2 则采用最小二乘法原理进行求解。

根据各个站点实测资料的具体情况,参数 b 、 f_1 、 f_2 通过不同的途径获取,分为“直接求参法”和“间接求参法”两种。之所以要采两种不同的求参方

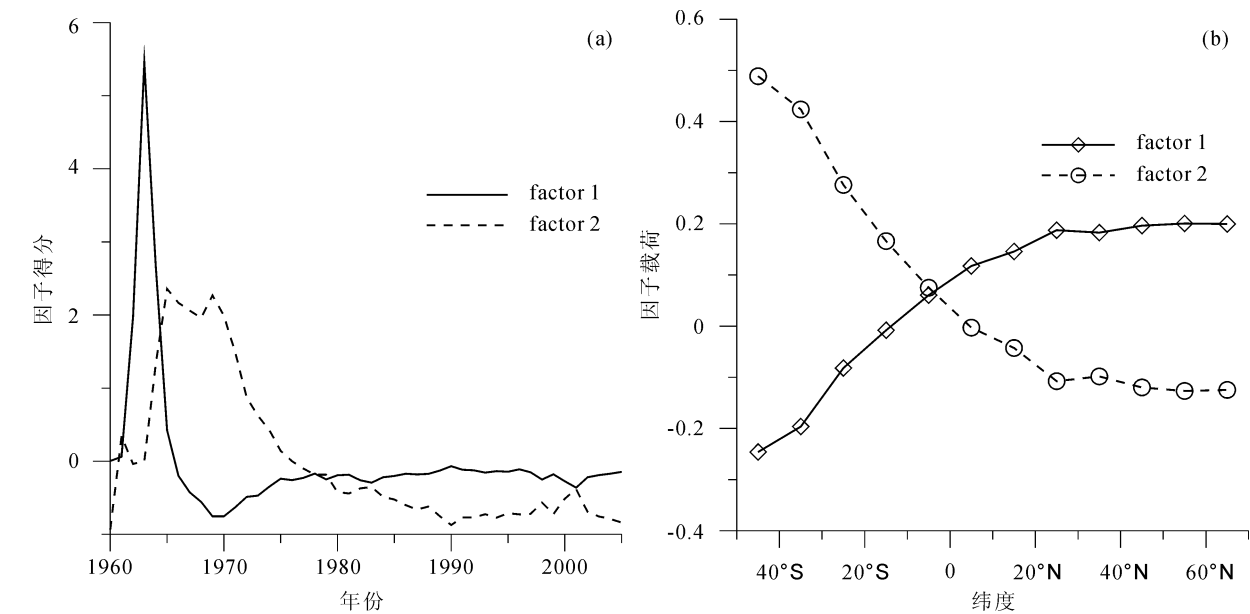


图 3 1960~2005 年全球标准公共因子得分和载荷曲线
Fig. 3 (a) Factor scores and (b) factor loadings calculated from the zonally averaged precipitation tritium data by equation (2) with two factors

法是最小二乘法原理和氡历时曲线特性所共同决定。为了防止出现“异参同效”,而得到“假解”的现象,实测资料应能做到把握曲线的大体形状。①“直接求参法”:根据该站点实测资料, $c_p(t)$,利用最小二乘法直接反求参数,在本文直接采用 Excel 回归函数 LINEST 进行多元线性回归分析(李朋, 2006)求解。此外为了说明回归方程的可靠性,还应对回归方程的显著性检验和拟合优度统计检验。根据以上分析论证,此方法适于那些存在 1960 年代中期 4~5 年数据的站点。②“间接求参法”:这一方法其实是基于“直接求参法”之上的间接获取参数的一种方法。具体的操作方法为:选取两个参数已知的站点作为基准站点,以纬度关系作为变量,线性内插得到所求站点的参数。对于站点的选取可以优先考虑距目标站点空间距离近、相关程度高,且数据充沛的站点,这样可以确保输出结果的精度更高;对于两个站点纬度的关系还应该满足可以利用线性内插得到目标站点。

对比 Doney 模型,本模型最本质的不同就是在针对随机观测变量建立的全球模型中增加了代表均值向量的常数项 b ,使得全球模型更适应于未经标准化的全球的观测资料。

2.3 模型验证

任意选取不同地区三个具有代表性的站点进行模型的验证,即解释公共因子的全球适用性,其中有南、北半球的典型站点,即 Kaitoke(南纬 $41^{\circ}6'00''$)、渥太华(Ottawa,北纬 $45^{\circ}19'12''$),也有我国数据资料比较全的香港站(Hongkong,北纬 $22^{\circ}19'00''$)。结果如图 4a、b、c 所示,按纬度顺序由小到大排列。

Kaitoke 站,氡恢复模型为, $c_p(t) = 9.09 + 2.70 \times c_p(t,1) + 10.91 \times c_p(t,2)$ (5)

从方程的检验来看,总体方程拟合优度 0.98,且通过了 F 检验,回归方程显著。

Hongkong 站,氡恢复模型为, $c_p(t) = 48.12 + 116.44 \times c_p(t,1) + 33.73 \times c_p(t,2)$ (6)

从方程的检验来看,总体方程拟合优度 0.97,且通过了 F 检验,回归方程显著。

Ottawa 站,氡恢复模型为 $c_p(t) = 48.12 + 116.44 \times c_p(t,1) + 33.73 \times c_p(t,2)$ (7)

从方程的检验来看,总体方程拟合优度 0.97,且通过了 F 检验,回归方程显著。

以上从统计学上的角度说明了反求出参数的有效性。以下从不同的角度对计算结果进行一些定性的分析及比较:

(1)从整个数据系列的角度,采用相同的观测资料 and 求解方法,以新的公共因子为自变量进行多元线性回归得到的结果与实测曲线的趋势和形状吻合,尤其是对于整个曲线峰值的拟合,本文结果远好于 Doney 模型的结果。

(2)从选取站点的范围的角度,包括了两种典型曲线形状,从结果可以看出这两种曲线与新的全球公因子具有很高线性相关性,也再次地验证了公共因子的全球代表性,从而说明了模型的全球适用性,可用于恢复全球内任一观测站,不管是内陆站点还是近海站点,而且方法相对简单,易于操作。因子分析方法应用于大气降水中年平均氡浓度恢复的空间广泛适用性亦可由 Doney 模型的结果得到佐证。

(3)从氡恢复模型本身特征的角度,常数项 b 的物理意义是样本均值 μ , b 值大小与纬度相关,北半球 b 值比南半球大,纬度越高 b 值越大。如 Ottawa 站(北纬 $45^{\circ}19'12''$)的 b 值为 213.63 大于 Hongkong(北纬 $22^{\circ}19'00''$)的 b 值(48.12)。而这两个站的 b 值均大于位于南半球的 Kaitoke 站(南纬 $41^{\circ}6'00''$)(b 值为 9.09)。前文介绍的正交因子模型说明了常数项 b 的物理意义的准确性,模型的验证也说明了常数项 b 代表的是整个预测变量的均值。回归系数 f_1 、 f_2 的物理意义相当于两个公因子的因子载荷,从数值大小来看,北半球的站点 $f_1 > f_2$,南半球则相反, $f_1 < f_2$,再次说明了提取的公因子的合理性和有效性。这是因为:公共因子是标准化的变量,而用于恢复站点模型的观测变量是未经标准化的,明显地对于那些高纬度的北半球站点,求得的系数和常数项都较大,而南半球则相对较小。从图 3b 中可以看出因子载荷与纬度之间的相关关系,这和大气降水中氡浓度的纬度效应相吻合。因子分析方法将原来不同变量间的相关关系通过公共因子转化为不同站点参数间的相关关系,这也是模型应用的依据所在。

以上选取的三个任意典型站点由于实测数据序列完整,均是通过 3.2 部分“模型建立”中提到的“直接求参法”进行模型的验证。“直接求参法”适用性有限,无法适用于广大资料稀缺甚至无资料地区,但这是全球模型的基础;而“间接求参法”才是模型应用的关键所在,为广大资料稀缺甚至无资料地区提供了有意义的参考值。

下面将以 Kaitia(New Zealand,南纬 $35^{\circ}4'12''$)为例对“间接求参法”进行验证,为了说明方法的有效性,选取了实测资料相对较全的 Kaitia 站,但需

要声明的是利用“间接求参法”时完全不利用实测资料。具体恢复步骤如下:第一,选取相邻参考站点,即实测资料较丰富的站点。本例选取了 Kaitoke (New Zealand,南纬 41°6′00″)和 Parotonga— Cook Island(Pacific Ocean,南纬 21°11′60″);第二,利用“直接求参法”求解参考站点的参数;第三,根据纬度关系线性内插得到所求站点的参数。将“间接求参法”得到的参数代入氚恢复模型,式(4),得到

Kaitaia 站的降水年平均氚恢复模型:

$$c_p(t)=7.6+2.3\times c_p(t,1)+7.9\times c_p(t,2)(8)$$

模型结果见图 4d,模拟值与实测资料基本吻合,“间接求参法”得到的结果亦能客观反映实际,较之于 Doney 模型结果精度亦更高。

模型验证时发现一个不符合常理的现象,即模型中的结果中有部分负值,出现在 1990 年以后。出现这一现象的原因可以归结为以下几点:第一,由于收集资料是有限的,很多站点缺失 1990 年以后的数

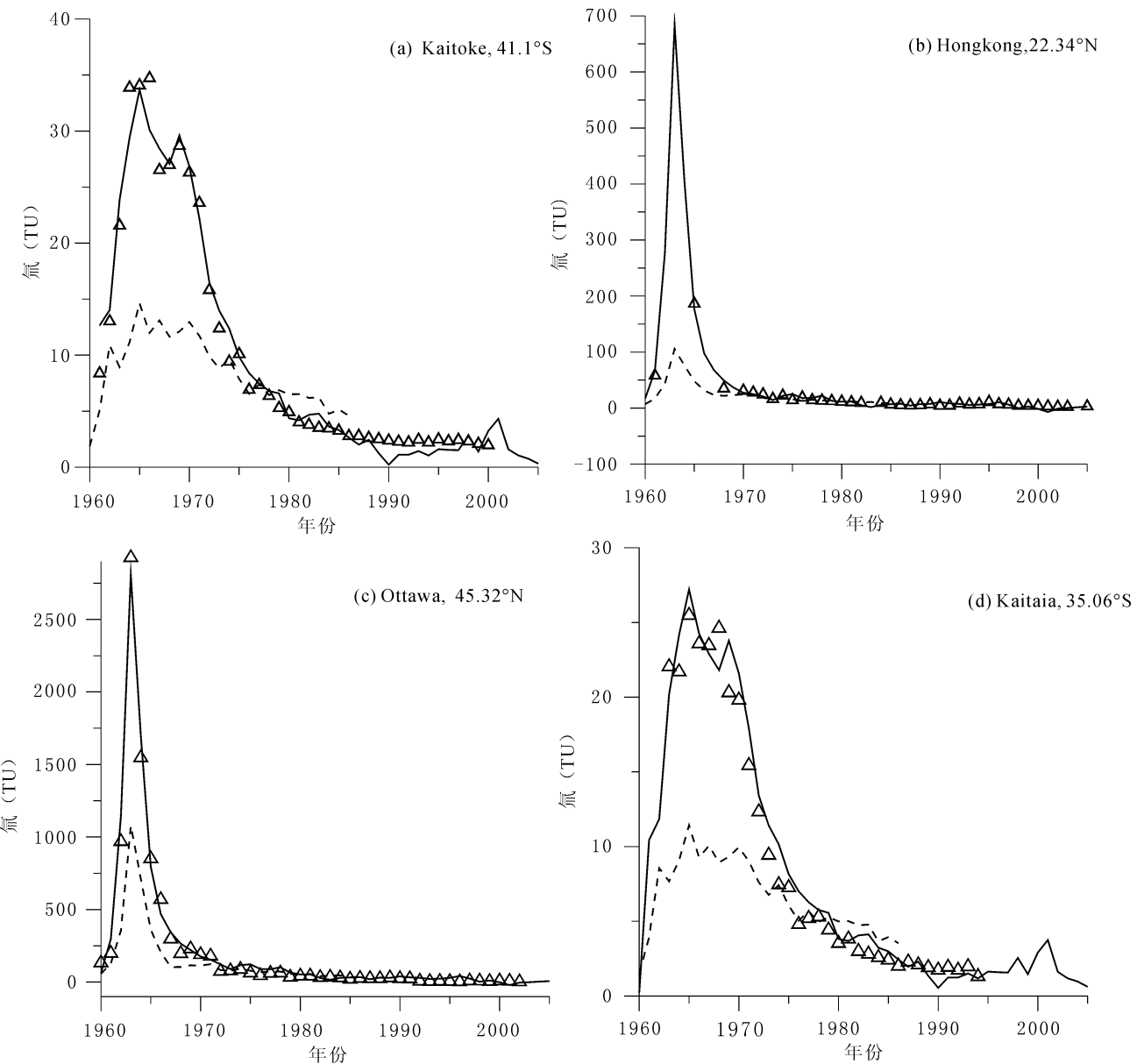


图 4 (a)凯托克,(b)香港,(c)渥太华站“直接求参法”和(d)凯塔亚站“间接求参法”结果输出和对比图

Fig. 4 Comparisons of observed and predicted annual mean tritium concentrations in precipitation in (a) Kaitoke, (b) Hongkong, (c)Ottawa stations with the direct calibrated parameters and (d) Kaitaia station with the interpolated parameters

△:观测值;---: Doney 模型结果;—:新模型结果

△: observations; ---: the outputs of Doney model; —: the outputs of the new model

据,造成文中提取的公共因子本身存在一定误差。第二,是最小二乘法这种求解方法本身带来的误差,由于核爆造成降水中氡峰值与背景值有数据级间的差别,在求解时占权重很大,得到优先满足,相对数值较小的90年代后期数据则误差较大。经分析后发现出现负值的年份都在1990年以后,这一时间段全球大气降水氡浓度基本恢复正常,接近于环境背景值,平稳变化。但是对于出现负值这一现象,亦提出了相应的定性解决方法。根据不同的精度要求,可采用不同的方法,具体有:①利用当地的背景值代替,这样做处理方法简单,但是不能反映年际间波动变动;②可利用相应纬度地区的年平均大气降水氡浓度系列进行线性内插,这样做能够反映站点的区域特征,不适用于独特性很强的站点;③根据方法的特点,充分利用现有实测资料,利用当地1990~2005年观测资料仅对1990年以后数据(若无资料地区可适当放宽至1980年以后)应用因子分析方法进行恢复,根据恢复结果对出现的负值进行修正。在存在部分资料的地区,建议采用方法③进行处理。

2.4 模型的应用

下面以南京站为例详细描述本文模型的具体应用。南京地区只有1988~1992年实测资料,缺少1960年代的观测资料,应该采用“间接求参法”。具体的步骤如下:

(1)选取基准站点,并计算参考站点的参数。根据2.2部分的选取已知邻近站点原则,为了说明这一方法的广泛适应性,选取相距较远的Ottawa和Hongkong站为参考站点,更加节省了参考站点参数的计算过程。

(2)利用已知参数利用纬度关系线性内插获得目标站点参数,并代入方程式(4)得到第一步的结果,见图5中的第一步结果。

(3)利用第一步结果得到的峰值和已有较少的实测资料对模型进行形状修正,得到图5中的第二步结果。

(4)对于拟合中产生的负值和1990年以后结果进行合理修正,本例中采用3.3部分的方法③进行修正,得到图5中的第三步恢复曲线。

图6中亦给出了根据参数的“直接求参法”利用南京地区1988~1992年实测资料直接进行多元线性回归,求解参数 f_1, f_2, b 后得到的模拟结果,即图5中的“直接求参法”结果。南京地区仅有的1988~1992年实测资料,“直接求参法”结果不理想,没有出现降水氡浓度曲线的峰值,曲线的整体形状低矮

平缓,与北半球典型站点的曲线形状相异。结果与之前分析相吻合,验证了“直接求参法”不能直接应用于没有20世纪60年代中期实测资料的站点这一结论。然而,采用“间接求参法”结果则有明显改善。首先,利用“间接求参法”得到的第一步结果,其整体曲线形状和北半球典型站点相符,得到的峰值亦符合大气降水氡浓度全球分布规律。由于没有加入实测资料,第一步结果中90年代后期误差较大。然后,利用实测资料对第一步结果进行校正,即得到第二步结果。第二步结果较之于第一步结果,曲线在形状上大体相同,1988~1992年结果却有明显的必进,可1990年以后仍存在负值。正如上文分析,由于公共因子和求解方法两方面的误差存在,在很好地控制曲线形状的同时,可能1990年以后结果会损失一定的精度。最后,第三步则是对1990年以后的结果进行修正,本例采用上文介绍的方法③,具体区别可详见图5中的小图。通过以上三个步骤就得到了南京地区1960~2005年最终的大气降水年平均氡值系列。

3 讨论

因子分析方法是从小数据本身出发,研究数据之间的相关关系,将变量和可测量因子间的复杂关系转化为更少的不可测量的公共因子之间的线性相关关系。降水氡浓度受到纬度、降水量、高程、海陆距离等多种因素的综合影响,因子分析方法将全球大气降水氡浓度变量同纬度、降水量、高程、海陆距离等多种因素之间的复杂关系转化成它和两个公共因子之间的线性关系。结果使得相关关系得到简化,但本质上综合考虑了各种因素的影响。因子分析的过程中选择以纬度为标准对变量进行划分,变量和公共因子之间的这种相关关系又表现出纬度相关性,具体可参见图3b,这就是提出“间接求参法”的依据所在。大气降水氡浓度受大气环流(纬度分带)的影响,同一纬度区间的氡浓度具有相似性。在准备数据的过程中以 10° 为一个纬度区间选择变量,均一化了该纬度区间各站点的信息,即忽略了同一纬度区间内某些站点的特殊信息,但是却能代表这一纬度区间的平均水平。本文立足于建立一个适用于全球的氡恢复模型,在全球尺度上比较符合客观实际。从局部范围来看,降水氡浓度除了受大气环流特征(纬度分带)影响外,气候条件(如降雨量)和地理因素可能影响显著。例如发生人工核爆试验的地理位置,氡浓度还和核爆当量和次数等因素有

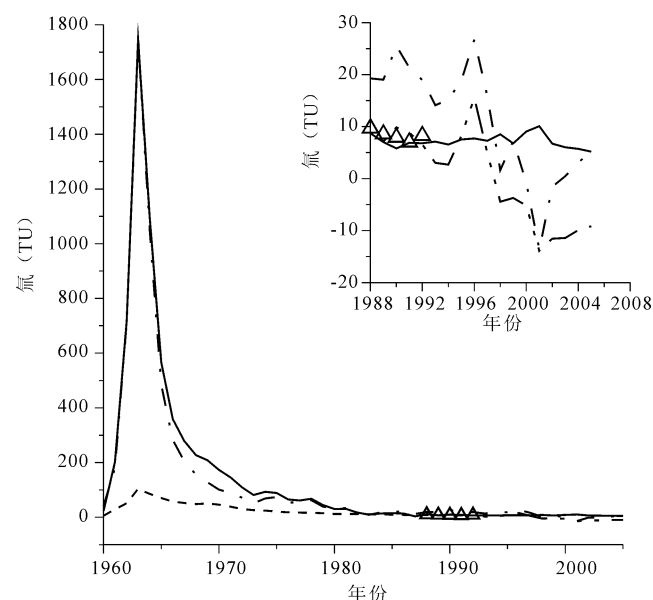


图 5 1960~2005 年南京地区大气降水中年平均氚恢复过程图

Fig. 5 Comparison of the predicted annual tritium concentration in precipitation from 1960 to 2005 at Nanjing by different techniques

△: 观测值; ———: “直接求参法”结果; — · — ·: “间接求参法”第一步结果; — · · · — · · ·: “间接求参法”第二步结果; ———: “间接求参法”第三步结果

△: observations; ———: the outputs of “method with direct calibrated parameters”; — · — ·: the first outputs of “method with interpolated parameters”; — · · · — · · ·: the second outputs of “method with interpolated parameters”; ———: the third outputs of “method with interpolated parameters”

关。本方法对于异常值很敏感,不推荐直接用于预测后期人工核爆试验的影响。如何应用因子分析法在全球尺度获得比较符合客观实际的氚恢复模型后,再进一步考虑局部范围内一些特殊因素的影响,提高局部范围的恢复精度,还有待进一步的研究。全球任一站点的氚浓度变量均是两个公共因子的线性组合,而且其系数在全球范围内服从一定的分布规律(见图 3b)。若已知全球的系数分布图,可以恢复出全球范围内任一站点的大气降水氚浓度历时曲线。“间接求参法”假设恢复站点与参考站点的大气降水氚浓度具有相同或相似的分布,对于在站点较密的情况下可以保证大气降水氚浓度恢复的精度,但对于大范围站点较稀的情况或许不符合这种前提。例如我国广大的西北地区周边的 IAEA 站点较少,只有伊尔库茨克、雅库茨克站,但这些站点资料仅限于 1969~2000 年(IAEA/WMO, 2009),而且距离较大。利用这种站点相关线性插值方法的一个

理论基础就是两个站点具有相同的水汽来源或具有相似的水汽运动模式,而欲恢复氚浓度的各站点之间并不都具有这种相同(相似)性,此时可选择基于全球系数图获取参数,再进行大气降水氚浓度恢复,避免选用某两个参考站点带来的误差。需要说明的是,本文提出的全球模型可以恢复全球尺度上比较符合实际的氚浓度,可用于任何地点的降水氚浓度估计,适用范围广,但没有直接考虑当地地面高程或核爆等局部因素的影响,对于局部地区特性很强的站点,恢复结果可能存在较大偏差。建议这些站点,可以考虑使用本方法进行氚浓度的初步估计,然后根据当地的实际情况和资料进行后期的修正,如可以考虑采用王凤生(1998)提出的大气降水恢复区域校正模型 I-3 对高程效应进行修正等。

本文应用因子分析法所建全球大气降水年平均氚浓度恢复模型具有以下几个特点:

(1)物理意义明确,具体某一站点的氚值是北、南半球两个影响因子 $c_p(t, 1)$ 和 $c_p(t, 2)$ 的线性组合,在北半球主要受北半球影响因子的控制,南半球受南半球影响因子的控制,赤道周围受两个因子的共同影响,常数项 b 代表样本的均值。本文所建模型较之于原 Doney 模型能够更好地模拟大气降水中氚浓度变化曲线的峰值和形态。

(2)适用范围广泛,包含时空两个范畴。空间上,适用于全球的任何一站点,这一点在公因子的提取过程中得到详细说明;时间上,模拟的时间系列相对较长(1960~2005 年),即使 1990 年以后氚值基本恢复至背景值,但是年际间仍然略有变化。此外也可利用 1990 年以后资料对模型进行修正和检验,为相关工作提供更好的参考数据。模型的验证结果表明本文所建模型在全球范围内预测 1960~2005 年期间大气降水平均氚浓度是有效和可靠的。

(3)模型对于实测资料可以做到无要求。资料稀缺甚至无资料地区,可以利用“间接求参法”建立氚浓度恢复模型。

(4)该方法应用简单,模型求解简单,具有可重复操作性,以文中提供的两个公共因子为基础,根据模型验证和应用部分提到的参数反求方法得到参数值后即可建立起具体的氚恢复模型的数学表达式。

(5)模型涵盖信息量大,但是影响因素少,在模型中恢复的氚值只和纬度相关,这样避免了信息的重复和遗漏。

(6)“直接求参法”可应用于有 20 世纪 60 年代中期五年以上实测资料的站点,对于不具备该条件

的站点,应采用“间接求参法”来建立大气降水年平均氡浓度恢复模型,这一点在应用中值得注意。

总之,本文所建的氡值恢复模型可广泛应用于1960~2005年期间全球大气降水中年平均氡值的恢复,具有广泛的时间和空间适用性。模型对于实测资料可以做到无要求,这为资料稀缺甚至无资料地区提供了一种获取1960~2005年期间大气降水年平均氡值的有效方法。虽然由于资料限制,本文的工作只做到了2005年,但如果后期的实测数据得到补充,可以按照文中介绍的方法对原系列进行延长。由于篇幅所限,本文立足于介绍如何应用因子分析法建立全球大气降水中年平均氡浓度的恢复模型,并对模型进行验证和应用。关于模型预测出的氡值在全球范围内的分布特征,在陆地与海洋站点的拟合情况等将另文介绍。本文基于因子分析法提出的全球大气降水中年平均氡浓度恢复模型,可以在全球尺度上计算出比较符合实际的氡浓度值,但如何考虑局部范围内一些特殊因素的影响,提高局部范围的恢复精度,还有待进一步的研究。

4 结论

本文最大限度地利用IAEA发布的1960~2005年南纬50°至北纬70°内所有全球站点的大气降水年平均氡值实测资料,以10°为一个区间分析整理实测资料,得到了一个46×12的矩阵,然后进行因子分析,提取了两个命名为北、南半球影响因子的公共因子,此时对应的信息损失量仅为5.01%。因子分析方法是从小变量的内部关系出发,涵盖了降水氡的纬度效应、大陆效应、降水量、高程等多种因素的综合影响。以这两个公因子为基础建立了全球大气降水中年平均氡浓度恢复模型。任意选取三个观测序列完整的站点对采用参数直接求解法所建恢复模型进行了验证,同时也随机地选择了一个观测序列完整的站点对采用参数间接求解法所建恢复模型进行了验证。结果表明:该方法可用于全球范围内站点大气降水氡浓度恢复,而且较之于Doney模型单个站点精度有明显的提高,提供了更为可靠的大气降水氡输入背景值信息。在此基础上,提出了模型应用的具体方法和步骤,并以南京地区为例详细说明该模型应用于观测资料稀缺地区可能出现的问题,提出相应的解决方案。因子分析方法为全球大气降水氡恢复提供了更好的思路和方法。

注 释 / Notes

①连珺. 2007. 银川平原地下水的环境同位素示踪. 硕士学位论文. 西

安:长安大学.

②田华. 2003. 关中盆地环境同位素分布特征及水文地质意义. 硕士学位论文. 西安:长安大学.

参 考 文 献 / References

- 巴克豪斯·斯克罗斯,埃里克森·本德,普林克·伍尔夫,等(Klaus B, Eriksson B, Woolf P, et al.). 2009. 多元统计分析方法:用SPSS工具. 王煦逸,等. 译. 上海:格致出版社, 235~284.
- 巴琦,徐永福. 2010. 氡输入函数的构造与北太平洋氡分布的模拟. 中国科学(D辑), 40(1): 115~126.
- 陈建生,汪集畅,赵霞,盛雪芬,顾慰祖,陈亮,苏治国. 2004. 用同位素方法研究额济纳盆地承压含水层地下水的补给. 地质论评, 50(6): 649~658.
- 陈宗宇,聂振龙,张荷生,程旭学,赫明林. 2004. 从黑河流域地下水平年龄论其资源属性. 地质学报, 78(4): 560~567.
- 丁宏伟,姚吉禄,何江海. 2009. 张掖市地下水位上升区环境同位素特征及补给来源分析. 干旱区地理, 30(1): 1~8.
- 耿修林,谢兆茹. 2002. 应用统计学. 北京:科学出版社, 240~289.
- 关秉钧. 1986. 我国大气降水中氡的数值推算. 水文地质工程地质, 13(4): 38~41.
- 关秉钧,唐京春. 1992. 用环境同位素研究北京地区地下水及工业污染时空变化规律. 水文地质工程地质, 19(5): 10~14.
- 贾俊平. 2004. 统计学. 北京:清华大学出版社, 125~128, 323~337.
- 李朋. 2006. EXCEL统计分析实例精解(第12章:回归分析与预测). 北京:科学出版社.
- 连炎清. 1990. 大气降水氡含量恢复的多元统计学方法——以临汾地区降水氡值恢复为例. 中国岩溶, 6(2): 157~166.
- 龙文华,陈鸿汉,段青梅,李志,潘洪捷,刘荣益. 2008. 人工神经网络方法在大气降水氡浓度恢复中的应用. 地质与资源, 17(3): 208~212.
- 陆璇,叶俊. 2008. 实用多元统计分析(第六版). 北京:清华大学出版社, 374~409.
- 马致远. 1997. 用天然氡确定隐伏岩溶水滞留时间及含水层参数. 煤田地质与勘探, 38: 34~38.
- 马致远. 2004. 环境同位素方法在平凉市岩溶地下水研究中的应用. 地质论评, 50(4): 433~439.
- 邵益生. 1987. 应用环境同位素方法确定泉域岩溶水滞留时间和含水层的参数. 工程勘察, 2: 39~45.
- 苏小四. 2002. 同位素技术在黄河流域典型地区地下水可更新能力研究中的应用——以银川平原和包头平原为例. 博士学位论文. 吉林:吉林大学.
- 王凤生. 1998. 吉林省大气降水浓度恢复的区域模型探讨. 吉林地质, 17(3): 75~80.
- 王恒纯. 1991. 同位素水文地质概论. 北京:地质出版社, 71~83; 99~117.
- 王瑞久. 1984. 山西娘子关泉的地下水储量估算. 水文地质工程地质, 11(6).
- 卫克勤,林瑞芬,王志祥. 1982. 北京地区降水中的氘、氧-18、氡含量. 中国科学(B辑), 27(8): 754~758.
- 卫克勤,林瑞芬,王志祥,周秀云. 1980. 我国天然水中氡的分布特征. 科学通报, 25(10): 467~470.
- 袁志发,宋世德. 2009. 多元统计分析. 北京:科学出版社, 88~104.
- 张琳,王莹,刘福亮. 2008. 近二十年我国大气降水氡浓度用其变化. 南水北调与水利科技, 6(6): 94~96.
- Boronina A, Renard P, Balderer W, Stichler W. 2005. Application of tritium in precipitation and in groundwater of the Kouris catchment (Cyprus) for description of the regional groundwater

- flow. *Applied Geochemistry*, 20(7): 1292~1308.
- Danielsen E F. 1968. Stratospheric—tropospheric exchange based on radioactivity, ozone and potential vorticity. *J. Atmos. Sci.*, 25: 502—518.
- Doney S C, Glover D M, Jenkins W J. 1992. A Model Function of the Global Tritium Distribution in Precipitation, 1960~1986. *Journal of Geophysical Research*, 97(C4):5481~5492.
- Eriksson E. 1965. An account of the major pulses of tritium and their effect in the atmosphere. *Tellus*, 17: 118~130.
- IAEA. 1969. Environmental isotope data No. 1: World survey of isotope concentration in precipitation (1953~1963). 421.
- IAEA/WMO. 2009. GNIP Database: Global network of isotopes in precipitation. [2009-05-21] http://www-naweb.iaea.org/naweb/ih/IHS_resources_gnip.html.
- Koster R D, Broecker W S, Jouzel J, Suozzo R J, Rusell G L, Rind D, White J W C. 1989. The Global Geochemistry of Bomb-produced Tritium: General Circulation Model Compared to Available Observations and Traditional interpretations. *Journal of Geophysical Research*, 94: 18305~18326.
- Lucas L L, Unterweger M P. 2000. Comprehensive review and critical evaluation of the half-life of tritium. *J. Res. Natl. Inst. Standard. Technol.*, 105: 541~549.
- Michel R L. 1989. Tritium Deposition over the Continental United States, 1953 ~ 1983, in *Atmospheric Deposition*. IAHA Publication, 179: 107~115.
- Morishima H, Kawai H, Koga T, Niwa T. 1985. The trends of Global Tritium Precipitations. *J. Radiat. Res.*, 26:283~312.
- Pang Z H, Huang T M, Chen Y N. 2010. Diminished groundwater recharge and circulation relative to degrading riparian vegetation in middle Tarim River, Xinjiang Uygur, Western China. *Hydrological Process*, 24: 147~159.
- Taylor C B. 1966. Tritium in Southern Hemisphere Precipitation, 1953~1964. *Tellus*, 18: 105~131.
- Wei K Q, Lin R F, Wang Z X, Zhou X Y. 1980. Distribution of tritium in natural water in China. *Chin. Sci. Bull.*, 25(4): 337~342.
- Weiss W, Roether W. 1980. The rates of tritium input to the world ocean, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 49, 435~446.

A Global Model of Recovering the Annual Mean Tritium Concentration in Atmospheric Precipitation

ZHANG Yanhong, YE Shujun, WU Jichun

Department of Hydrosociences, Nanjing University, Nanjing, 210093

Abstract: Tritium, as a natural environmental isotope, can be broadly applied in hydrogeology. The application of tritium is greatly limited by the scarcity observations. We have developed, selecting the International Atomic Energy Agency (IAEA) tritium data set in area from 50 S to 70 N, a modified global model for predicting the annual mean tritium concentration in atmospheric precipitation by using factor analysis method. Three random representative stations have been chosen to verify the model with direct calibrated parameters, and one station for the model with interpolated parameters. Moreover, Nanjing station has been taken as an example to explain the application of the global model. The application of factor analysis method for recovering the tritium concentration in rain has its own obvious characteristics, such as its definite meaning in physics, extensive range in application, simple process in operation, few variables in influence and well modeling the shape and peak value of the history curve. Through the analysis of the results, it shows the tritium contents in precipitation restored by the global model fit the observations very well. It also indicates that the new model is not only appropriate for the global but also improves the accuracy to some extent. In short, it provides a new idea to reconstruct the tritium concentration in atmospheric precipitation in scarcity even no data area between 1960 and 2005. However, problems of application have also been proposed, discussed and put to solutions.

Key words: tritium concentration; precipitation; factor analysis; least square method; global