

## 不同算法下中国大气水线及其意义

刘雪媛, 陈粉丽\*, 周鑫 (西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃兰州 730000)

**摘要** 基于1961—2009年全球降水同位素网络(GNIP)监测站点同位素资料,运用最小二乘回归(OLSR)、简化主轴回归(RMA)、主轴回归(MA)、加权最小二乘回归(PWLSR)、加权简化主轴回归(PWRMA)和加权主轴回归(PWMA)6种方法计算了全国的大气水线方程,结果发现,大气水线方程的斜率和截距都一致的表现东部季风区最大、西北干旱区居中、青藏高原区最小;斜率在空间上表现出由北方到南方逐渐增大的趋势,而截距的变化较为复杂;全国共30个站点的未加权算法的斜率和截距表现为 $OLSR > RMA > MA$ ,同样地,加权算法的斜率和截距也表现出 $RYYWSR > PWRMA > PWMA$ ;在6种大气水线算法下,东部季风区的斜率和截距在未加权和加权的2种情况下均为最大,西北干旱区在加权的算法下最小,而青藏高原区在未加权的算法下最小;以连续性大降水事件为主的东部季风区各站点可以选择RMA、MA算法;而以小降水事件为代表的西北内陆干旱区可以选择PWMA或者PWRMA算法将更加合理。

**关键词** 大气水线;计算方法;斜率;截距

中图分类号 P426.6 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2020)09-0001-07

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2020.09.001



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

## Chinese Atmospheric Waterline and Its Significance under Different Algorithms

LIU Xue-yuan, CHEN Fen-li, ZHOU Xin (College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730000)

**Abstract** Based on isotope data of global precipitation isotope network GNIP (Global Meteoric water Line of Craig) monitoring station from 1961 to 2009, OLSR, RMA, MA, PWLSR, PWRMA and PWMA methods were used to study the national atmospheric waterline equation. The results showed that the slope and intercept of the atmospheric water line equation were consistent performance for the eastern monsoon > northwest arid > qinghai-tibet plateau area; the slope increased gradually from north to south in space, while the change of intercept was complex; the slope and intercept of the unweighted algorithm of 30 sites in China were shown as follows:  $OLSR > RMA > MA$ . Similarly, the slope and intercept of the weighted algorithm were shown as follows:  $RWSR > PWRMA > PWMA$ ; the slope and intercept of the eastern monsoon region were the largest under the two conditions of unweighted and weighted, the northwest arid region was the smallest under the weighted algorithm, and the qinghai-tibet plateau was the smallest under the unweighted algorithm. Each station in the eastern monsoon region with continuous heavy precipitation events could choose RMA and MA algorithms; PWMA or PWRMA algorithm was more reasonable for the northwest inland arid regions represented by small precipitation events.

**Key words** Atmospheric waterline; Calculation method; Slope; Intercept

地球上的水循环经历了蒸发、输送、凝结、降落、径流等过程。水循环耦合了大气圈、岩石圈和生物圈,成为沟通地球各大圈层的桥梁和纽带<sup>[1]</sup>。降水过程是水圈循环中的最重要输入成分之一,而其中水汽所含有的降水稳定同位素 $\delta^{18}O$ 和 $\delta D$ 能够反映研究区域降水水汽团来源、运行方向以及示踪水起源地等<sup>[2-3]</sup>。

在水汽蒸发和凝结的过程中,由于同位素的分馏效应,使得大气降水中的氢氧同位素呈现线性相关的关系,其表达式为 $\delta D = a\delta^{18}O + b$ ,其中 $a$ 表示斜率, $b$ 表示截距,此关系称为大气水线方程<sup>[4]</sup>。根据 $a$ 和 $b$ 之间的关系变化,可以得到不同研究区域的大气水线方程。该方程无论是在区域还是全球范围内的同位素水循环研究中都有着广泛的应用<sup>[5-6]</sup>。在此基础上,国内外学者对于大气水线方程的研究取得了一定的成果。如Graig等<sup>[7]</sup>在研究北美不同水体的 $\delta^{18}O$ 和 $\delta D$ 同位素基础之上,首次提出了Craig全球大气水线,用 $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$ 表示,此方程也被称为Graig方程。全球大气水线方程(GMWL)表明其在全球平均水平之上,稳定同位素 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 的分馏比例之间的线性关系<sup>[8]</sup>。然而,由于全球各地气候类型、地形、降水量以及蒸发量等地理要素的巨大差异性,需要更加精确的局部计算,即地方大气水线方程

LMWL(local meteoric water line)<sup>[9]</sup>。LMWL的计算结果可以更准确地反映区域特征,进而对于探究区域性的水-汽循环、追踪水汽来源以及对区域小气候的研究都具有深远的意义<sup>[10]</sup>。而我国学者郑淑蕙等<sup>[11]</sup>于1983年在我国氢氧同位素的数据基础上,使用最小二乘法建立了我国大气水线方程 $\delta D = 7.9\delta^{18}O + 8.2$ ;随后其他学者,如刘进达等<sup>[12]</sup>使用最佳主轴算法计算出我国大气水线方程 $\delta D = 7.74\delta^{18}O + 6.48$ ,并使用相同算法计算出我国西北地区的大气水线方程 $\delta D = 7.8\delta^{18}O + 9.4$ 。

对于大气水线计算方法的研究,国内外学者提出了许多的算法,如Crawford等<sup>[13]</sup>于2013年根据GNIP数据率先采用最小二乘回归(OLSR)、简单主轴回归(RMA)和加权最小二乘法(PWLSR)3种方法计算了澳大利亚的大气水线方程,结果表明,PWLSR算法对澳大利亚大气水线的计算精确度最高。2014年,Crawford等<sup>[14]</sup>又采用OLSR、RMA、主轴回归(MA)、PWLSR、加权简化主轴回归(PWRMA)、加权主轴回归(PWMA)6种方法计算全球大气水线,结果表明,提出的RMA算法和PWRMA算法在计算大气水线方面效果较好,而PWRMA算法更适用于地中海沿岸大气水线的计算。2015年,王圣杰<sup>[15]</sup>基于6种不同的大气水线计算方法,对天山地区大气水线进行了研究,结果表明,该算法在OLSR、RMA、MA、PWLSR、PWRMA和PWMA算法中具有较好的稳定性;回归分析表明,PWLSR方法适用于天山地区的大气水

**作者简介** 刘雪媛(1996—),女,甘肃定西人,硕士研究生,研究方向:同位素水文学。\*通信作者,副教授,博士,硕士生导师,从事同位素水文学研究。

**收稿日期** 2019-11-04

线计算。笔者结合 GNP 数据,将上述 6 种方法用于中国大气水线的计算中,并对计算结果进行比较与分析,在此基础上,着重探讨在不同计算方法下我国不同分区大气水线的差异性,并对比得出最佳算法,使计算结果能够更好地服务于区域水循环研究。

## 1 研究区概况和研究方法

### 1.1 研究区概况 我国幅员辽阔、纬度跨度较大,且地处欧

亚大陆东部,季风气候非常显著,水热空间分布按纬度方向更替和季风环流强度呈空间性递变。我国地势呈现西高东低的分布态势,为三级阶梯状分布,平原、山地、盆地和高原广布,复杂的地理要素决定了我国独特的气候分布类型。如图 1 所示,该研究依据中国综合自然地理区划<sup>[16-17]</sup>,将全国划分为东部季风区、西北干旱区和青藏高原区三大自然区。

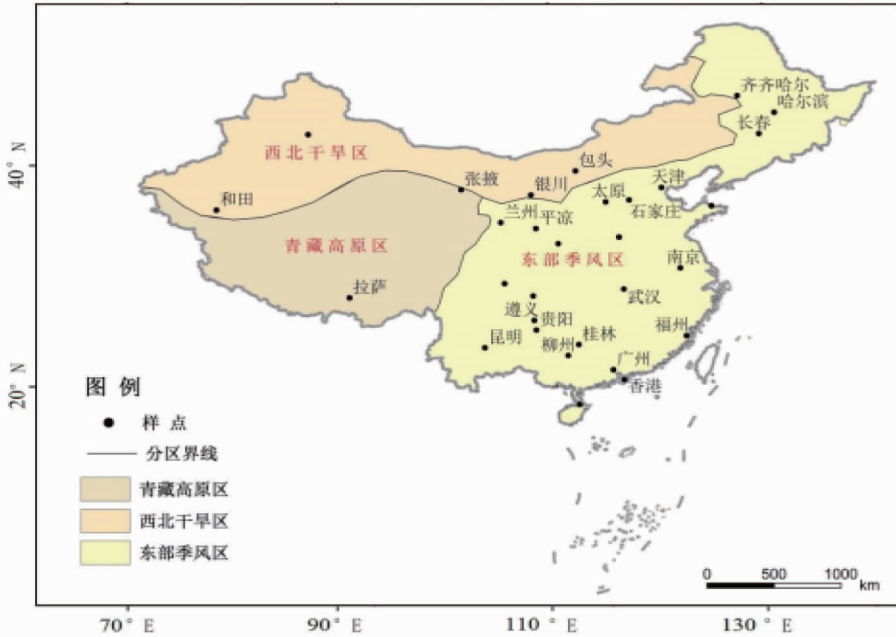


图 1 中国三大自然区划示意图

Fig. 1 Schematic diagram of natural zoning in China

东部季风区气候特点表现为冬季低温少雨,夏季高温多雨<sup>[18-19]</sup>;西北干旱区是典型的温带大陆性气候,全年降水量不足 250 mm,以风沙天气为主<sup>[20]</sup>;青藏高原区地势由西北向东南降低,气温低,降水量多为 200 mm 以下<sup>[21]</sup>。不同气候类型和复杂水汽来源决定了我国大气水线的明显区域差异性。因此,该研究采用分区法探讨了计算大气水线的最佳算法,并对比分析每个区域的大气水线方程,在区与区之间进行比较,寻求其最佳计算方法。

**1.2 研究方法** 该研究采用 Crawford 等<sup>[14]</sup>使用的加权与未加权方法来计算大气水线方程。

未加权回归方法包括最小二乘法 (OLSR)、简化主轴回归法 (RMA) 和主轴回归法 (MA)。各算法的大气水线斜率如下:

$$a_{\text{OLSR}} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i)}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (1)$$

$$a_{\text{RMA}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i)^2}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2}}}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i)^2}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2}}} \quad (2)$$

$$a_{\text{MA}} = \frac{(\sum_{i=1}^n V_i^2 - \frac{n}{n} \sum_{i=1}^n U_i^2) + \sqrt{(\sum_{i=1}^n V_i^2 - \frac{n}{n} \sum_{i=1}^n U_i^2) + 4(\sum_{i=1}^n U_i V_i)^2}}{2 \sum_{i=1}^n U_i V_i} \quad (3)$$

式中,

$$U_i = x_i - \bar{x} \quad (4)$$

$$V_i = y_i - \bar{y} \quad (5)$$

在上述 3 种未加权的算法中,斜率都可以写作:

$$b = \bar{y} - a\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} - a \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (6)$$

其斜率和截距的标准差分别为

$$\delta_a = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-2}}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \quad (7)$$

$$\delta_b = \delta_a \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}} \quad (8)$$

式中,

$$\hat{y}_i = ax_i + b \quad (9)$$

对于加权方法,则有加权最小二乘法 (PWLRS)、加权简化主轴回归法 (PWRMA) 和加权主轴回归法 (PWMA),各算法的大气水线斜率分别如下:

$$a_{\text{PWLRS}} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i y_i - \sum_{i=1}^n w_i x_i \sum_{i=1}^n w_i y_i}{\sum_{i=1}^n w_i x_i^2 + \sum_{i=1}^n w_i x_i} \quad (10)$$

式中,

$$w_i = \frac{P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (11)$$

$$a_{\text{PWRMA}} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i (y_i - \bar{y}_w)^2}{\sum_{i=1}^n w_i (x_i - \bar{x}_w)^2} \quad (12)$$

式中,

$$\bar{y}_w = \sum_{i=1}^n w_i y_i \quad (13)$$

$$\bar{x}_w = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (14)$$

$$a_{\text{PWMA}} =$$

$$\frac{(\sum_{i=1}^n w_i V_{wi}^2 - \sum_{i=1}^n w_i U_{wi}^2) + \sqrt{(\sum_{i=1}^n w_i V_{wi}^2 - \sum_{i=1}^n w_i U_{wi}^2)^2 + 4(\sum_{i=1}^n w_i U_{wi} V_{wi})^2}}{2 \sum_{i=1}^n w_i U_{wi} V_{wi}} \quad (15)$$

式中,

$$U_{wi} = x_i - \bar{x}_w \quad (16)$$

$$V_{wi} = y_i - \bar{y}_w \quad (17)$$

对于加权的 PWSR、PWRMA 和 PWMA 方法,大气水线的截距如下:

$$b_w = \bar{y}_w - a \bar{x}_w = \sum_{i=1}^n w_i y_i - a \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (18)$$

大气水线的斜率和截距的标准差分别为

$$\sigma_a = \frac{\sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n w_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-2}}}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n w_i (x_i - \bar{x}_w)^2}} \quad (19)$$

$$\sigma_b = \sigma_a \sqrt{\sum_{i=1}^n w_i x_i^2} \quad (20)$$

## 2 结果与分析

**2.1 大气水线方程** 根据 1961—2009 年全国的 GNIP 资料得到的  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  的值,确定两者之间的线性关系,即得到全国大气水线方程(local meteoric water line)如下:

$$\delta\text{D} = 7.51\delta^{18}\text{O} + 6.82 \quad (r^2 = 0.96, P < 0.01, n = 1258) \quad (21)$$

与全国大气水线( $\delta\text{D} = 7.51\delta^{18}\text{O} + 6.82$ )<sup>[22]</sup>和全球大气水线( $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$ )<sup>[23]</sup>相比,公式(21)的大气水线斜率和截距都表现为相对较低。从全国来看,大气水线的斜率大于中国大气水线方程(CHNIP)多年的监测结果( $a = 7.48$ ),但是小于全球降水同位素网络(GNIP)的计算结果( $a = 7.74$ <sup>[12]</sup>;  $a = 7.70$ <sup>[24]</sup>),且与 1983 年全国监测结果( $a = 7.90$ <sup>[11]</sup>)相比同样偏小。同样地,公式(21)与我国东部季风区大气水线方程( $\delta\text{D} = 7.46\delta^{18}\text{O} + 0.90$ )<sup>[25]</sup>、我国南部大气水线方程( $\delta\text{D} = 5.15\delta^{18}\text{O} - 15.50$ )<sup>[26]</sup>、我国西北干旱区大气水线方程( $\delta\text{D} = 7.05\delta^{18}\text{O} - 2.17$ )<sup>[27]</sup>相比均是斜率偏大,截距偏大;但是与青藏高寒区大气水线方程( $\delta\text{D} = 8.25\delta^{18}\text{O} + 9.22$ )<sup>[28]</sup>相比表现为斜率较小、截距也较小。

为了更好地反映全国大气水线方程的区域差异性,故将全国划分为三大自然区,并根据 GNIP 资料计算得到东部季风区、西北干旱区和青藏高寒区的 LMWL 大气水线方程如图 2 所示。从总体上来看,全国三大自然区大气水线方程总体上斜率比较接近,极差值是 0.77,并且表现为东部季风区>西北干旱区>青藏高原区;但是相较于斜率,截距的差异较大,极差值为 9.83,且表现为东部季风区>西北干旱区>青藏高原区。

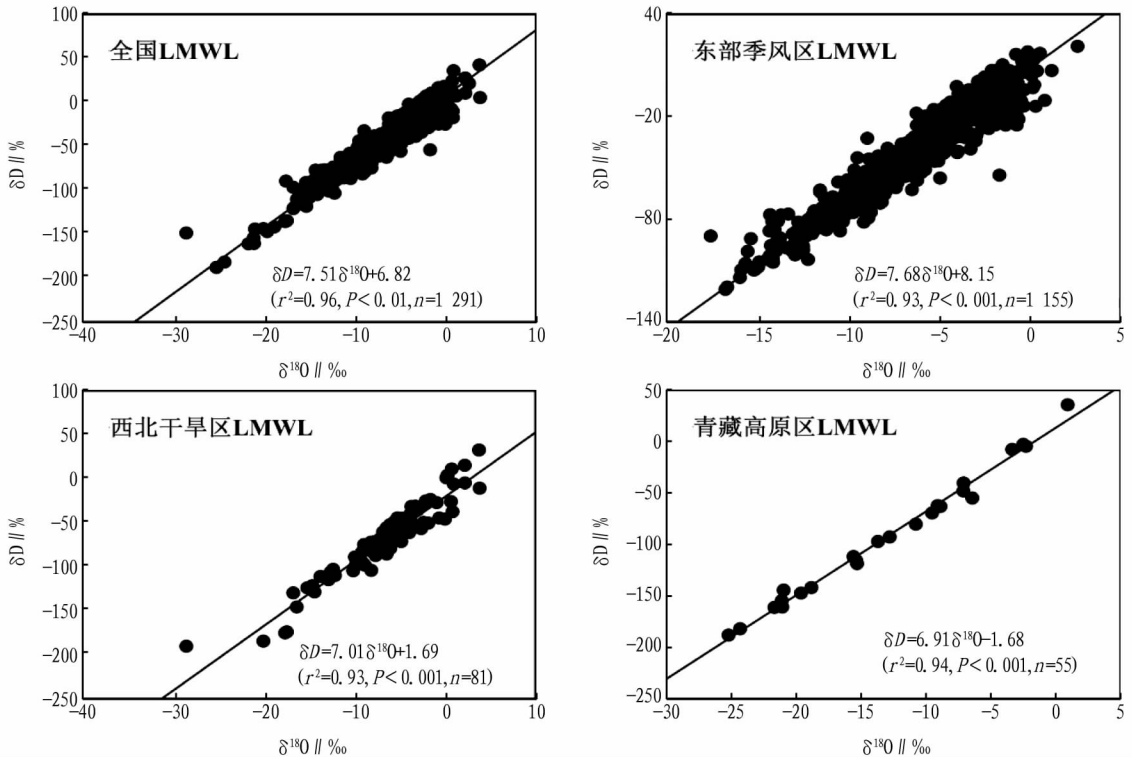


图 2 1961—2009 年全国三大自然区 GNIP 大气水线方程

Fig. 2 GNIP atmospheric waterline equation of three nature regions in China from 1961 to 2009

根据该研究计算结果得出的东部季风区大气水线方程 ( $\delta D = 7.688^{18}O + 8.15$ ) 与柳鉴容等<sup>[29]</sup>的计算结果(东部季风区  $\delta D = 7.466^{18}O + 0.90$ )相比斜率差距不大,但截距差距偏大;西北干旱区大气水线方程( $\delta D = 7.016^{18}O + 1.69$ )与柳鉴容等<sup>[30]</sup>的研究结果(西北干旱区  $\delta D = 7.056^{18}O - 2.17$ )比较,斜率差距很小、截距相差较大;而青藏高原区大气水线方程( $\delta D = 6.916^{18}O - 1.68$ )与章新平等<sup>[31]</sup>的研究结果(青藏高原区  $\delta D = 8.256^{18}O + 9.22$ )相比表现为斜率偏小、截距也偏小。上述计算结果表明,在不同的方法下大气水线的计算结果并不一致,更甚在某种程度上表现为差异巨大,原因可能是计算方法和资料来源的不同等。但是这种差异更多地能够启

发思考是否可以寻求一种统一的关于大气水线计算方法。该研究基于这样的思想,在下述的讨论中来探究全国大气水线的计算方法,并选取最佳的计算方法。

图3反映了研究时段内不同采样点大气水线的斜率和截距,斜率最小值在长春站(4.47),最大值出现在贵阳站(8.82),且在空间上表现出由北方到南方逐渐增大的趋势;而截距的变化更加复杂,最小值在长春站(-25.11‰),最大值出现在贵阳站(22.07‰),这与斜率的空间分布相似。其中,共有11个站点截距值为负值,其余19个站点截距为正,且基本上所有正值站点分布于南方地区,北方地区截距多为负值,表现为南正北负的空间变化规律。

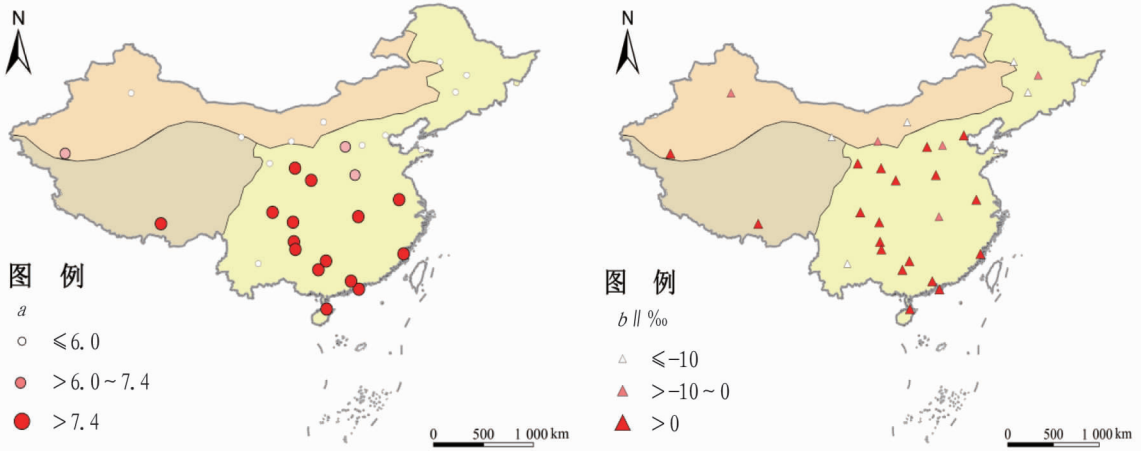


图3 1991—2009年全国大气水线斜率和截距的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of slope and intercept of national atmospheric waterline from 1991 to 2009

**2.2 三大自然区6种算法的大气水线分布** 通过对地方大气水线方程(LMWL)的计算,得到结果如表1所示。从表1可以看出,6种算法下的全国三大自然分区的大气水线的斜

率和截距结果在一定程度上有所差异。全国共30个站点的未加权算法的斜率和截距表现为  $OLSR > RMA > MA$ , 同样地,加权算法的斜率和截距也表现出  $PWLSR > PWRMA > PWMA$ 。

表1 基于6种算法下全国三大自然区的斜率、截距和  $rmSSE_{av}$

Table 1 Slope, intercept and  $rmSSE_{av}$  of three natural areas in China based on six algorithms

自然区 Natural area	$a + \sigma_a // ‰$					
	OLSR	RMA	MA	PWLSR	PWRMA	PWMA
东部季风区 Eastern monsoon area	7.67±0.06	7.98±0.06	8.28±0.07	7.82±0.06	8.05±0.06	8.29±0.06
西北干旱区 Northwest arid area	7.01±0.22	7.28±0.22	7.55±0.23	6.86±0.25	7.20±0.25	7.55±0.26
青藏高原区 Qinghai-Tibet Plateau area	6.91±0.23	7.11±0.23	7.32±0.24	7.64±0.13	7.70±0.13	7.75±0.13
自然区 Natural area	$b + \sigma_b // ‰$					
	OLSR	RMA	MA	PWLSR	PWRMA	PWMA
东部季风区 Eastern monsoon area	8.15±0.45	10.04±0.45	11.94±0.47	8.98±0.44	10.66±0.44	12.34±0.45
西北干旱区 Northwest arid area	1.69±1.76	3.46±1.74	5.22±1.82	0.85±1.89	3.15±1.92	5.49±1.98
青藏高原区 Qinghai-Tibet Plateau area	-1.68±2.75	0.23±2.71	2.12±2.83	4.31±1.94	5.05±1.95	5.78±1.96
自然区 Natural area	$rmSSE_{av}$					
	OLSR	RMA	MA	PWLSR	PWRMA	PWMA
东部季风区 Eastern monsoon area	1.016 0	1.006 2	1.015 8	1.007 4	1.005 7	1.015 9
西北干旱区 Northwest arid area	1.015 5	1.006 0	1.015 3	1.028 6	1.005 4	1.014 4
青藏高原区 Qinghai-Tibet Plateau area	1.012 0	1.004 7	1.011 8	1.000 0	1.008 0	1.016 8

在三大自然区未加权的算法下,东部季风区的斜率均比其他各站点的斜率大,青藏高原区的斜率比其他各站点都小;不同算法下东部季风区的截距均比其他各站点的截距大,青藏高原区的截距比其他各站点都小,这与斜率的计算结果一致,并且青藏高原区的OLSR算法的截距小于0,其他

站点均为正值。在三大自然区加权的算法下,东部季风区的斜率均比其他各站点的斜率大,与未加权算法结果不同的是:西北干旱区的斜率比其他各站点都小,而非青藏高原区;对于截距来说,东部季风区的截距均比其他各站点的截距大,西北干旱区的截距比其他各站点都小,这与斜率的计算

结果一致。由此可以看出,未加权算法与加权算法相比,计算结果最值并不一致,最大值都出现在东部季风区,但是最小值并不一致,且加权算法未出现截距负值,全部为正值。

**2.3 不同算法下全国三大自然区的大气水线差异** 对 6 种算法(OLSR、RMA、MA 和 PWLSR、PWRMA、PWMA)计算的斜率结果分别进行对比分析,得到的结果如图 4 所示。从 3 种未加权算法(OLSR、RMA 和 MA)的斜率比较分析结果可以看出,总体上,OLSR 算法的斜率相对最小,RMA 算法居中,MA 算法最大。若按照相对于东部季风区对西北干旱区

和青藏高原区的在不同算法下的升高幅度来计算,则所有采样点的  $a_{\text{OLSR}}$  在西北干旱区的升高幅度小于 9%,其中 80% 采样点相对于东部季风区的下降幅度小于 5%;而对于  $a_{\text{RMA}}$  各点来讲,西北干旱区  $a_{\text{RMA}}$  的各采样点全部位于东部季风区  $a_{\text{RMA}}$  的对角线之下,都小于东部季风区  $a_{\text{RMA}}$ ;与前两者计算方法不同的是,所有采样点  $a_{\text{MA}}$  的计算结果并不呈现对角线分布,且  $a_{\text{MA}}$  在西北干旱区的计算结果是最小的,均小于东部季风区和青藏高原区。

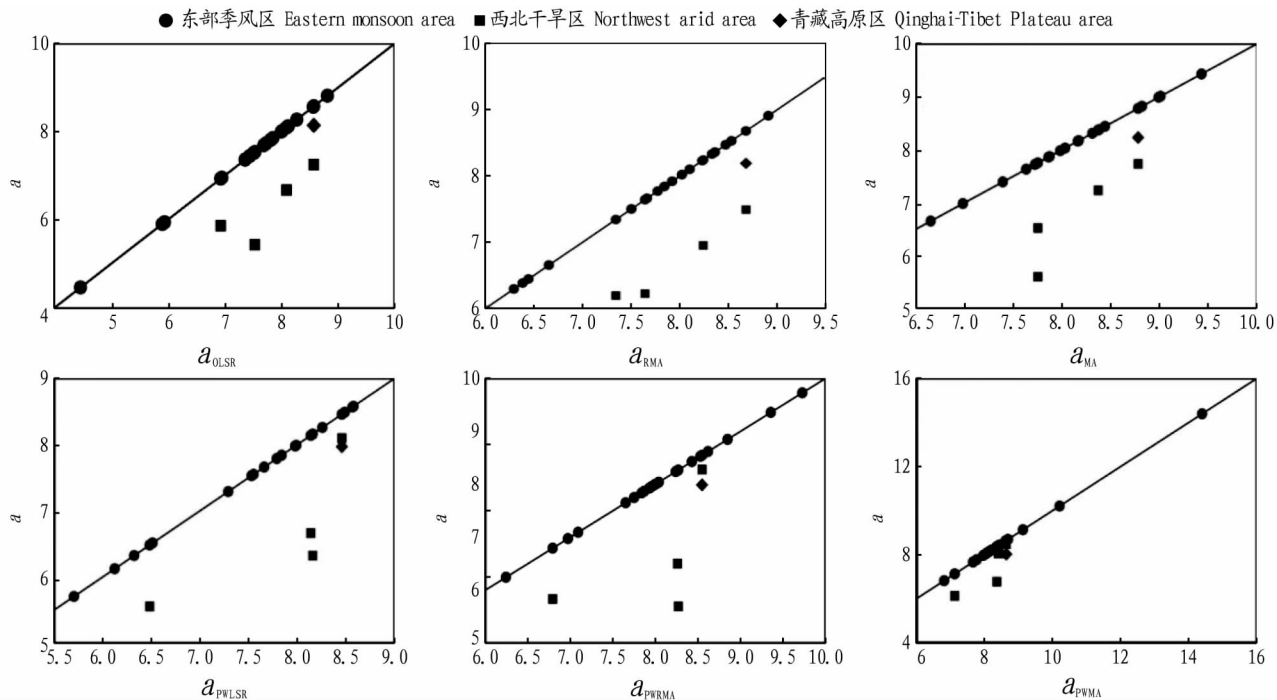


图 4 基于不同算法的全国三大自然区大气水线的斜率结果

Fig. 4 Slope results of atmospheric waterline in three natural regions of China based on different algorithms

从 3 种加权算法(PWLSR、PWRMA 和 PWMA)的斜率对比分析结果可以看出,对于某一采样点来说, $a_{\text{PWLSR}}$ 、 $a_{\text{PWRMA}}$  和  $a_{\text{PWMA}}$  三者之中, $a_{\text{PWLSR}}$  为最大值, $a_{\text{PWRMA}}$  次之, $a_{\text{PWMA}}$  为最小值,这与上述未加权算法得出的结论是一致的。所有采样点的  $a_{\text{PWLSR}}$  在西北干旱区的下降幅度小于 8.5%,其中 75% 采样点相对于东部季风区的升高幅度小于 8.25%;对于  $a_{\text{PWRMA}}$  各点来讲,在西北干旱区的下降幅度小于 8.5%,其中 75% 采样点相对于东部季风区的升高幅度小于 8.25%;与前两者计算方法不同的是,所有采样点  $a_{\text{PWMA}}$  的计算结果在东部季风区相对于其他两区的下降程度都差别不大,分布在对角线下侧。与未加权的 3 种方法相比较,加权算法的计算结果并不呈现对角线分布的形态,呈现为简单的一次线性关系。

由图 5 可知,与斜率类似的是,在这 3 种方法的大气水线截距中, $b_{\text{OLSR}}$  依然为最小值, $b_{\text{MA}}$  最大,而  $b_{\text{RMA}}$  则介于二者之间。与斜率的计算结果不同的是,全国三大自然区的截距计算结果并不呈现良好的线性关系,相关性不强,且相对于东部季风区的升高幅度,西北干旱区和青藏高原区的截距相差较远,最大差值大于 83.45%,这表明在 6 种不同算法之

下,截距的变化更加具有差异性。

对于未加权与加权算法选取 OLSR 算法和 PWLSR 算法进行对比分析。在绝大多数采样点,降水量加权后的大气水线斜率更大, $a_{\text{PWLSR}}/a_{\text{OLSR}}$  在大多数采样点都大于 0.12%,27 个采样点  $a_{\text{PWLSR}}$  相较于  $a_{\text{OLSR}}$  升高幅度在 0~10%,其中 15 个采样点升高幅度在 0~5%。但截距计算的结果并不呈现良好的线性关系,相关性不强,且相对于东部季风区的升高幅度,西北干旱区和青藏高原区的截距相差较远,最大差值大于 83.45%,这表明在 6 种不同算法下截距的变化更加具有差异性。但相对于 6 种算法的计算结果,还需要结合误差分析来综合评定,才能得到最优算法。

**2.4 不同大气水线算法的比较及选择** 平均标准化方根误差 ( $\text{rmSSE}_{\text{av}}$ ) 由平方垂直距离标准化方根误差 ( $\text{rmSSE}_v$ )、三角面积标准化方根误差 ( $\text{rmSSE}_t$ ) 和平方垂直距离标准化方根误差 ( $\text{rmSSE}_p$ ) 的算术平均数算得,平均标准化方根误差值越接近 1.000 0,显示回归模型效果越好。该研究基于降水同位素数据,用 6 种方法计算了全国三大自然区的平均标准化均方根误差 ( $\text{rmSSE}_{\text{av}}$ ),结果如图 6 所示。

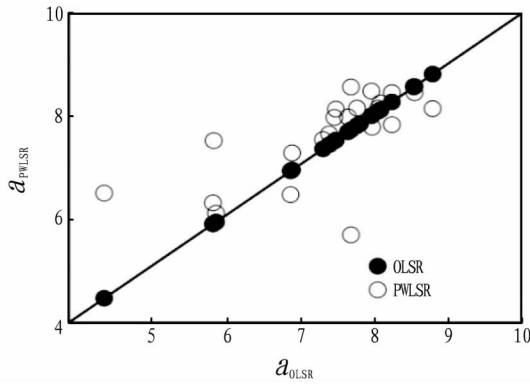


图5 全国三大自然区大气水线斜率与截距的关系

Fig. 5 Relationship between slope and intercept of atmospheric waterline in three natural areas of China

从图6可以看出, OLSR、RMA、MA、PWLSR、PWRMA和PWMA算法计算得到的平均标准化均方根误差( $rmSSE_{av}$ )都普遍接近1.0000。在6种算法中PWLSR和PWMA算法的 $rmSSE_{av}$ 较大, PWLSR算法的 $rmSSE_{av}$ 最大值超过1.03。OLSR、RMA、MA、PWRMA算法的 $rmSSE_{av}$ 较小, 均小于1.02; 其中RMA、PWRMA算法的 $rmSSE_{av}$ 小于1.01。

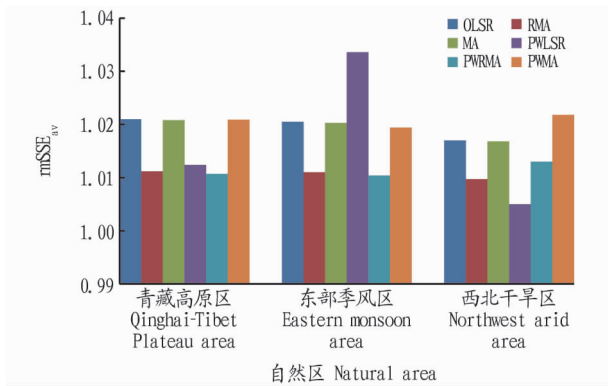
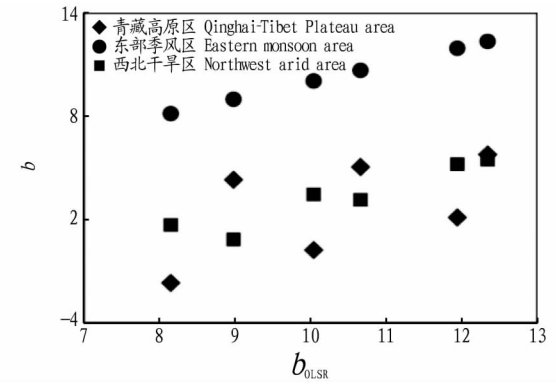


图6 不同算法的平均标准化均方根误差( $rmSSE_{av}$ )的分布

Fig. 6 Distribution of mean normalized square root error ( $rmSSE_{av}$ )

在全国三大自然区当中, 除西北干旱区PWLSR算法的 $rmSSE_{av}$ 较其他值较大外, 其余各站点的 $rmSSE_{av}$ 在不同算法下都非常小, 误差不超过 $1.0 \pm 0.2$ ; 其中青藏高原区的 $rmSSE_{av}$ 较小, PWLSR算法的 $rmSSE_{av}$ 值最小为1.0000。西北干旱区的PWLSR算法的 $rmSSE_{av}$ 值最大, 最大值超过1.02。6种算法在不同站点的计算结果显示, 各算法在不同站点都具有最小值, 即不同的站点选择相应的方法计算大气水线具有优越性。总体而言, 6种算法在东部季风区的拟合效果最好, 算法之间的差异相对较小; 而在青藏高原区的拟合效果最差, 计算结果差异较大。从算法结果比较来看, OLSR、RMA、MA、PWRMA和PWMA算法的 $rmSSE_{av}$ 值都较小, 而OLSR和PWLSR算法的 $rmSSE_{av}$ 值在不同的站点上有波动性、不稳定。与RMA、MA和PWRMA算法的 $rmSSE_{av}$ 值相比, RMA、MA和PWMA算法的 $rmSSE_{av}$ 值相对稳定。因此, RMA、PWMA和PWRMA算法作为分区大气水线的计算方法具有较为良好的效果。

从未加权的3种算法的 $rmSSE_{av}$ 值来看, RMA比OLSR



和MA的都小; 在加权的3种算法中, PWRMA的 $rmSSE_{av}$ 也比PWLSR和PWMA的更小。综合来看, RMA的 $rmSSE_{av}$ 在各种方法中取得最小值, 也就是说RMA的计算结果更为稳定。对于东部季风区来讲, 大多数站点为一些沿海和海岛站点, 大气水线并没有较好的线性关系, 在这样的区域考虑OLSR以外的方法可能更有意义, 且东部季风区内的降水事件以大规模连续性降水为主, 雨量大、持续时间长, 对于本区的大气水线计算方法, 选择加权与否并无明显影响。但是, 对于内陆地区的站点不同方法的差异并不大。在西北干旱区和青藏高原区的内陆站点, 大气水线的线性关系十分显著, 多以小降水事件为主, 需要赋以权重来计算大气水线会更有意义, 计算结果更加准确可信。综上所述, 以大降水事件为代表的东部季风区可以选择RMA、MA算法; 以小降水事件为主的内陆西北干旱区可以选择PWMA或者PWRMA算法更加合理。

### 3 结论与讨论

(1) 根据1961—2009年全国GNIP资料得到的 $\delta^{18}O$ 和 $\delta D$ 的值, 得到全国大气水线方程 $\delta D = 7.51\delta^{18}O + 6.82$ , 斜率最小值在长春站(4.47), 最大值出现在贵阳站(8.82), 且在空间上表现出由北方到南方逐渐增大的趋势; 截距最小值在长春站(-25.11‰), 最大值出现在贵阳站(22.07‰), 这与斜率的计算结果相同。基本上所有正值站点分布于南方地区, 北方地区截距多为负值, 表现为南正北负的空间变化规律。

(2) 计算得到东部季风区、西北干旱区和青藏高寒区的LMWL大气水线方程分别为 $\delta D = 7.68\delta^{18}O + 8.15$ 、 $\delta D = 7.01\delta^{18}O + 1.69$ 和 $\delta D = 6.91\delta^{18}O - 1.68$ 。全国三大自然区大气水线方程总体上斜率比较接近, 极差值是0.77, 并且表现为东部季风区>西北干旱区>青藏高原区; 但是相较于斜率, 截距的差异较大, 极差值为9.83, 且表现为东部季风区>西北干旱区>青藏高原区。

(3) 全国共30个站点的未加权算法的斜率和截距表现为 $OLSR > RMA > MA$ , 同样地, 加权算法的斜率和截距也表现出 $PWLSR > PWRMA > PWMA$ 。

(4) 在三大自然区未加权的算法下, 东部季风区的斜率均比其他各站点的斜率大, 青藏高原区的斜率比其他各站点都小; 不同算法下东部季风区的截距均比其他各站点的截距

大,青藏高原区的截距比其他各站点都小,这与斜率的计算结果一致,并且青藏高原区的 OLSR 算法的截距小于 0,其他站点均为正值。

(5)在三大自然区加权的算法下,东部季风区的斜率均比其他各站点的斜率大,西北干旱区的斜率比其他各站点都小;对于截距来说,东部季风区的截距均比其他各站点的截距大,西北干旱区的截距比其他各站点都小,这与斜率的计算结果一致。由此可以看出,未加权算法与加权算法相比,计算结果最值并不一致,最大值都出现在东部季风区,但是最小值并不一致,且加权算法未出现截距负值,全部为正值。

(6)对 OLSR 和 PWLSR 方法进行对比,在绝大多数采样点,降水量加权后的大气水线斜率更大, $a_{PWLSR}/a_{OLSR}$  在大多数采样点都大于 0.12%,27 个采样点  $a_{PWLSR}$  相较于  $a_{OLSR}$  升高幅度为 0~10%,其中 15 个采样点升高幅度在 0~5%。但截距计算的结果并不呈现良好的线性关系,相关性不强,且相对于东部季风区的升高幅度,西北干旱区和青藏高原区的截距相差较远,最大差值大于 83.45%,这表明在 6 种不同算法之下截距的变化更加具有差异性。

(7)综合来看,RMA 的  $rmSSE_w$  在各种方法中取得最小值,也就是说 RMA 的计算结果更为稳定。对于东部季风区来讲,大多数站点为一些沿海站点,大气水线并没有较好的线性关系,在这样的区域考虑 OLSR 以外的方法可能更有意义;在西北干旱区和青藏高原区的内陆站点,大气水线的线性关系十分显著,多以小降水事件为主,需要赋以权重来计算大气水线会更有意义。综上所述,以大降水事件为代表的东部季风区可以选择 RMA、MA 算法;以小降水事件为主的内陆西北干旱区及青藏高原区可以选择 PWMA 或者 PWRMA 算法更加合理。

## 参考文献

[1] 张应华, 仵彦卿, 温小虎, 等. 环境同位素在水循环研究中的应用[J]. 水科学进展, 2006, 17(5): 738-747.  
 [2] 汪集旸. 同位素水文学与水资源、水环境[J]. 地球科学, 2002, 27(5): 532-533.  
 [3] 章新平, 姚檀栋. 全球降水中氧同位素比率的分布特点[J]. 冰川冻土, 1994, 16(3): 202-210.  
 [4] 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.  
 [5] 章新平, 姚檀栋. 我国降水中  $\delta^{18}O$  的分布特点[J]. 地理学报, 1998, 53(4): 356-364.  
 [6] 卫克勤, 林端芬. 论季风气候对我国雨水同位素组成的影响[J]. 地球

化学, 1994, 23(1): 33-41.  
 [7] CRAIG H, GORDON L I, HORIBE Y. Isotopic exchange effects in the evaporation of water; I. Low-temperature experimental results[J]. Journal of geophysical research, 1963, 68(17): 5079-5087.  
 [8] 孔彦龙. 基于氘盈余的内陆干旱区水汽再循环研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.  
 [9] 宋献方, 刘相超, 夏军, 等. 基于环境同位素技术的怀沙河流域地表水和地下水转化关系研究[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2007, 37(1): 102-110.  
 [10] 章新平, 刘晶淼, 姚檀栋, 等. 中纬度地区混合云中稳定同位素分馏的数学模拟: 以乌鲁木齐降水为例[J]. 气象学报, 2003, 61(1): 95-105.  
 [11] 郑淑蕙, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究[J]. 科学通报, 1983, 28(13): 801-806.  
 [12] 刘进达, 赵迎昌, 刘恩凯, 等. 中国大气降水稳定同位素时-空分布规律探讨[J]. 勘察科学技术, 1997(3): 34-39.  
 [13] CRAWFORD J, HUGHES C E, PARKES S D. Is the isotopic composition of event based precipitation driven by moisture source or synoptic scale weather in the Sydney Basin, Australia[J]. Journal of hydrology, 2013, 507: 213-226.  
 [14] CRAWFORD J, HUGHES C E, LYKOURDIS S. Alternative least squares methods for determining the meteoric water line, demonstrated using GNIP data[J]. Journal of hydrology, 2014, 519: 2331-2340.  
 [15] 王圣杰. 天山地区降水稳定氢氧同位素特征及其在水循环过程中的指示意义[D]. 兰州: 西北师范大学, 2015.  
 [16] 中国科学院《中国自然地理》编辑委员会. 中国自然地理总论[M]. 北京: 科学出版社, 1985.  
 [17] 赵松乔. 中国综合自然地理区划的一个新方案[J]. 地理学报, 1983, 38(1): 1-10.  
 [18] 陈曦. 中国干旱区自然地理[M]. 北京: 科学出版社, 2010.  
 [19] 黄秉维. 中国综合自然区划草案[J]. 科学通报, 1959(18): 594-602.  
 [20] 王静爱. 中国地理教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.  
 [21] 赵济, 陈传康. 中国地理[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.  
 [22] 王永森, 陈建生, 汪集旸, 等. 降水过程中氢氧稳定同位素理论关系研究[J]. 水科学进展, 2009, 20(2): 204-208.  
 [23] LUZ B, BARKAN E, YAM R, et al. Fractionation of oxygen and hydrogen isotopes in evaporating water[J]. Geochimica et cosmochimica acta, 2009, 73(22): 6697-6703.  
 [24] 顾慰祖. 同位素水文学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.  
 [25] 王涛. 中国东部季风区降水稳定同位素的时空分布特征及其气候意义[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.  
 [26] 马潜, 张明军, 王圣杰, 等. 基于氢氧同位素的中国东南部降水局地蒸发水汽贡献率[J]. 地理科学进展, 2013, 32(11): 1712-1720.  
 [27] 靳晓刚. 西北干旱区大气水线算法的比较[D]. 兰州: 西北师范大学, 2016.  
 [28] 姚檀栋, 周行, 杨晓新. 印度季风水汽对青藏高原降水和河水中  $\delta^{18}O$  高程递减率的影响[J]. 科学通报, 2009, 54(15): 2124-2130.  
 [29] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 中国东部季风区大气降水  $\delta^{18}O$  的特征及水汽来源[J]. 科学通报, 2009, 54(22): 3521-3531.  
 [30] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 西北地区大气降水  $\delta^{18}O$  的特征及水汽来源[J]. 地理学报, 2008, 63(1): 12-22.  
 [31] 章新平, 中尾正义, 姚檀栋, 等. 青藏高原及其毗邻地区降水中稳定同位素成分的时空变化[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2001, 31(5): 353-361.