

# 葫芦岛市空中水资源及人工增雨潜力分析

江和文<sup>1</sup>, 曹士民<sup>2</sup>, 何宝财<sup>1</sup>, 张丽敏<sup>1</sup>, 张博<sup>1</sup>

(1. 辽宁省葫芦岛市气象局, 辽宁 葫芦岛 125000; 2. 辽宁省盘锦市气象局, 辽宁 盘锦 124000)

**摘 要:**基于 1971—2009 年葫芦岛市 4 站逐日的地面水汽压和降水资料, 计算了每个站整层大气可降水量、有效空中水资源量、自然降水产出率以及人工增雨(雪)潜力值, 分析了其时空特征和多年变化趋势。结果表明: (1) 葫芦岛年平均整层大气可降水量为 5 436~6 543 mm, 呈现出沿海高, 内陆低的特点, 有效空中水资源量为 1 742~1 971 mm, 约为整层大气年降水量的 1/3, 总体呈现出南部略大, 北部略小的特点; (2) 39 a 间自然降水产出率平均为 32%, 多年月平均自然降水产出率大值多出现在 4 月, 小值多出现在 6 月和 9 月; (3) 葫芦岛地区全年人工增雨(雪)潜力值为 1 211~1 370 mm, 约为该地区 39 a 平均降水量的(574 mm)2.2 倍, 最大值均出现在 7 月, 最小值出现在 12 月或者 1 月, 夏季(6—8 月)的可开发潜力值约占全年的 70%。

**关键词:**葫芦岛; 空中水资源 人工增雨潜力; 时空变化

中图分类号: TV213.9

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2014)02-0290-04

## Analysis of Air Water Vapor Resources and the Artificial Precipitation Potentiality of Huludao City

JIANG He-wen<sup>1</sup>, CAO Shi-min<sup>2</sup>, HE Bao-cai<sup>1</sup>, ZHANG Li-min<sup>1</sup>, ZHANG Bo<sup>1</sup>

(1. Huludao Meteorological Bureau, Huludao, Liaoning 125000, China;

2. Panjin Meteorological Bureau, Panjin, Liaoning 124000, China)

**Abstract:** Based on the daily data of precipitation and the ground water vapor pressure from 1971 to 2009 in 4 stations of Huludao City, the atmospheric precipitable water of the whole layer, effective air water vapor resources, natural precipitation out ratio and artificial precipitation potentiality of each station were calculated, spatiotemporal features and annual trend for these years were analyzed. The results shows that: (1) the annual average atmospheric precipitable water of the whole layer of Huludao City is 5 436~6 543 mm, which is higher in the costal, and lower in the inland, effective air water vapor resources is 1 742~1 971 mm, which is about one third of the annual atmospheric precipitable water of the whole layer, and it is greater in the south, less in the north; (2) the average natural precipitation out ratio of 39 years is 32%, the maximum value occurs in April, and the minimum value occurs in June and September; (3) the whole year artificial precipitation potentiality of Huludao area is 1 211~1 370 mm, which is about 2.2 times of the average precipitation in 39 years(574 mm), the maximum value occurs in July, and the minimum value occurs in December or January, the development potential in summer (from June to August) is about 70% of the annual total.

**Key words:** Huludao City; air water resources; artificial precipitation potentiality; spatiotemporal features

葫芦岛市地处辽宁省西南部, 下辖一市两县三区, 国土面积 10 302 km<sup>2</sup>, 是辽宁省干旱灾害发生最为严重的区域之一, 尤其是春播期, 素有“十年九旱”之称<sup>[1]</sup>。近年来, 随着当地经济社会的快速发展, 工农业生产用水及人畜消耗用水的逐渐增加, 淡水资源短缺的矛盾更加突出。面对日益严重的“缺水”危机,

葫芦岛市在积极发展节水灌溉和加强用水资源管理的同时, 也把空中水资源开发提升到战略高度。

近年来, 辽宁省干旱趋势日趋严重<sup>[2]</sup>, 全社会对于合理开发保护水资源的意识不断提升, 关于空中水资源开发利用的研究工作也越来越多, 取得了许多新进展<sup>[3-5]</sup>, 张怡等<sup>[6]</sup>利用商丘市周边台站的探空资料

分析了商丘市空中水资源的季节分布,并计算了其人工影响天气效益为 1:39。杨茜等<sup>[7]</sup>利用重庆及周边 11 个站探空资料分析了重庆地区上空水汽含量和水汽输送的时空分布特征后认为重庆人工增雨潜力较大,龚佃利等<sup>[8]</sup>、刘晓冉等<sup>[9]</sup>分别利用探空资料对山东和三峡库区的空中水资源及水汽输送做了类似的分析。纵观上述研究成果,大多都基于探空资料来计算当地的空中水资源含量,而葫芦岛市本地没有探空站,周边探空站数量也较少,所以用探空资料来分析葫芦岛市空中水资源分布情况是难以实现的,另外关于葫芦岛市空中水资源开发研究工作也鲜有报道。

1 资料与方法

1.1 资料来源

本文的气象资料来源于葫芦岛市气象局,资料的时间序列为 1971—2009 年,共计 39 a,包括所辖 4 个地面气象观测站(兴城、绥中、建昌、连山)的逐日地面水汽压、降水观测数据以及海拔高度、经纬度。季节按习惯划分,即春季 3—5 月,夏季 6—8 月,秋季 9—11 月,冬季 12—翌年 2 月。

1.2 计算方法

1.2.1 整层大气可降水量( $W$ )和有效空中水资源量( $W_e$ ) 大气中的水汽是始终存在的,若假设垂直气柱中所含有的水汽全部凝结,并积聚在气柱底面上所具有的液态水的深度,即所谓的整层大气可降水量,也可称为空中水资源总量,可以表示为:

$$W = \frac{1}{\rho g} \int_0^{p_0} \frac{\epsilon e}{p - (1 - \epsilon)e} dp \tag{1}$$

式中: $\rho$ ——液态水密度; $g$ ——重力加速度; $p$ ——气压; $p_0$ ——地面气压; $\epsilon$ ——水汽和干空气平均摩尔质量之比; $e$ ——水汽压。其中 $\frac{\epsilon e}{p - (1 - \epsilon)e}$ 在气象上又称为比湿。

杨景梅等<sup>[10-11]</sup>基于我国 28 个台站的探空资料,利用公式(1)和饱和水汽压及温度之间的关系,建立了地面水汽压关系经验公式,该方法具有良好的时间稳定性,而且适用于我国大部分地区,解决了没有探空站地区难以估算空中水资源量的问题,在青藏高原以外的中高纬地区(纬度 $\geq 33^\circ$ )的具体表达式如下:

$$W = 0.03 \exp(-1.39H^2 + 2.74H + 0.15) + [0.17 + \frac{0.066}{(\varphi - 33)^2 + 4.41}]e \tag{2}$$

式中: $W$ ——整层大气可降水量(cm); $\varphi$ ——地理纬度; $H$ ——海拔高度(km); $e$ ——地面水汽压(hPa)。将葫芦岛地区 4 个地面站的海拔高度和地理纬度代入公式(2),计算结果见表 1。

表 1 葫芦岛地区各站整层可降水量( $W$ )计算表达式

站名	站号	表达式
建昌	54452	$W = 0.7881 + 1.7101e$
连山	54453	$W = 0.3865 + 1.7102e$
绥中	54454	$W = 0.3769 + 1.7114e$
兴城	54455	$W = 0.3685 + 1.7106e$

由于晴空大气,水汽含量有时候也很丰富,但不会产生降水,根据向玉春等<sup>[12]</sup>研究,有效空中水资源量( $W_e$ )可以定义为有降水产生( $\geq 0.1$  mm)的整层大气可降水量( $W$ ),这一点也是比较符合当前人工增雨(雪)业务实际的。对逐日的整层大气可降水量( $W$ )或者有效空中水资源量( $W_e$ )按照所需的时段进行时间积分计算,即可得到相应时段内的值。

1.2.2 自然降水产出率( $E_r$ ) 所谓自然降水产出率( $E_r$ )是指相同统计时段内,实际产生的自然降水量( $R$ )与有效空中水资源量( $W_e$ )的百分比,其表达式为:

$$E_r = \frac{R}{W_e} \times 100\% \tag{3}$$

1.2.3 人工增雨(雪)潜力值( $W_z$ ) 一般来说,在有效空中水资源量一定的情况下,自然降水产出率( $E_r$ )越低,滞留在大气中水汽含量越多,其人工增雨(雪)潜力越大,因此人工增雨(雪)潜力( $W_z$ )可表示为:

$$W_z = W_e(1 - E_r) \tag{4}$$

2 结果与分析

2.1 葫芦岛空中水资源的时空分布特征

2.1.1 年变化 根据公式(2),分别计算出葫芦岛各县区 1971—2009 年 39 a 年整层大气可降水量( $W$ )和有降水条件下的整层大气可降水量,即年有效空中水资源量( $W_e$ ),结果见图 1。

葫芦岛年平均整层大气可降水量为 5 436 ~ 6 543 mm,年平均整层大气可降水量最大值出现在兴城,最小值出现在建昌,呈现出沿海高,内陆低的特点,可见海洋作为一个巨大的水源,对沿海大气中水汽含量的影响还是非常明显的。有效空中水资源量为 1 742 ~ 1 971 mm,约为年整层大气降水量的 1/3,总体呈现出南部略大,北部略小的特点,最大值出现在绥中,最小值出现在建昌,各县区之间差异较小。从天气学角度分析,究其原因主要有两点:(1)降水出现时,近地面大气中水汽一般都接近或达到饱和,海洋蒸发的水汽输送作用要低于无雨条件下,导致沿海和内陆的有效空中水资源差异较小;(2)降水的水汽来源主要依赖于大气中水汽输送,特别是在大的降水出现时,本地水汽贡献量较小,而葫芦岛地区降水水汽主要来源于西南方向,这就导致了南部的有效空中水资源量略高于北部。

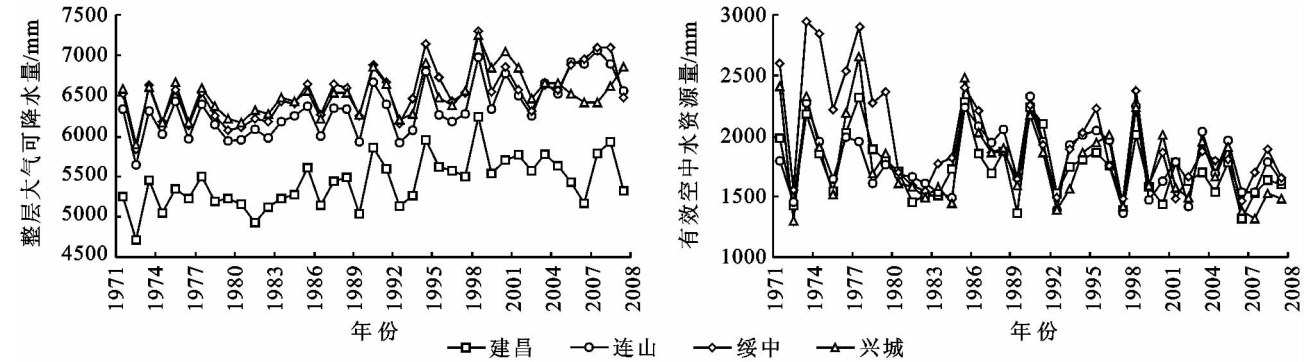


图 1 1971—2009 年整层大气年可降水量( $W$ )和年有效空中水资源量( $W_e$ )时间变化趋势

2.1.2 多年月平均变化 1971—2009 年,葫芦岛各县区无论是多年月平均整层大气可降水量还是多年月平均有效空中水资源量,最大值都出现在 7 月,最小值均出现在 1 月,夏季(6—8 月)是整层大气可降水量和有效空中水资源量最多的季节,约占全年的 60%左右,这一点和当地夏季降水集中的情况非常吻合,冬季(12 月至翌年 2 月)是空中水资源量最少的

季节,春秋两季的空中水资源量较为接近。具体情况如表 2 所示。

从表 2 可以看出,各月有效空中水资源量( $W_e$ )占当月整层大气可降水量( $W$ )比率有以下特点:6 月最高,为 34%~43%,12 月最低,为 7%~9%,上半年逐渐增大,下半年逐渐减小,夏季最大,冬季最小,春季略高于秋季。

表 2 葫芦岛地区各月多年月平均整层大气可降水量和有效空中水资源量

项目		mm											
		1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
整层大气可降水量( $W$ )	建昌	80	91	151	269	621	801	1168	1083	656	368	179	103
	连山	96	114	190	335	568	918	1312	1242	781	458	218	123
	绥中	103	122	205	344	581	931	1334	1267	805	481	232	132
	兴城	102	120	201	351	594	943	1329	1262	802	477	230	130
有效空中水资源量( $W_e$ )	建昌	7	9	23	59	147	345	496	370	184	71	22	7
	连山	8	11	23	71	149	347	508	389	173	85	26	10
	绥中	10	13	29	79	160	332	561	439	215	102	31	12
	兴城	9	11	24	67	147	325	515	389	174	86	32	11

2.2 自然降水产出率

根据公式(3),利用近 39 a 葫芦岛各县区各月多年平均降水量除以同期多年有效空中水资源量( $W_e$ ),即可计算出葫芦岛各县区各月多年平均自然降水产出率,结果如图 2 所示。

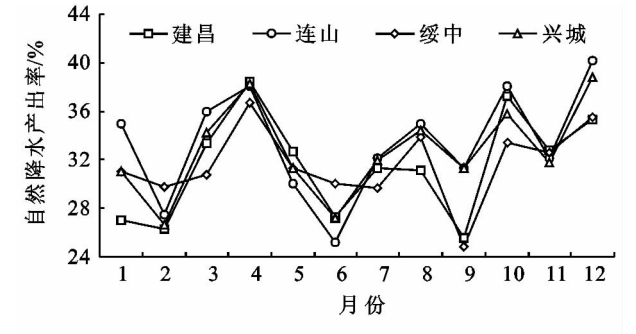


图 2 葫芦岛多年月平均自然降水产出率

从图 2 可以看出,1971—2009 年 39 a 间葫芦岛各地月平均自然降水产出率变化趋势较为相似,上半年峰值均出现在 4 月,下半年各地变化趋势较为复杂,大值一般出现在 10 月和 12 月,小值一般出现在 9 月和 11 月,全年最小值一般出现在 6 月和 9 月。影响自然降水产出率的因素很多,如水汽输送、地理条

件,观测站周边的小气候条件等,这些因素分别作用于降水量( $R$ )和有效空中水资源量( $W_e$ ),从而导致自然降水产出率月际差异。

1971—2009 年 39 a 间葫芦岛市平均年降水量为 373~791 mm,年降水量最少年份为 1992 年,最多的年份为 1977 年,平均年自然降水产出率为 24%~41%,39a 均值为 32%,年自然降水产出率最小的年份为 1999 年,最大的年份为 1994 年。为了比较上述二者之间的关系,本文统计了葫芦岛地区年平均降水量和年平均自然降水产出率,具体如图 3 所示。从图 3 可以看出,自然降水产出率与降水量之间有比较好的对应关系,大多数降水多的年份,自然降水的产出率数值也较大。

2.3 人工增雨(雪)潜力值

空中水资源作为一种潜在的可再生的水资源,就目前的技术水平来看,人工增雨是开发空中水资源的最有效的手段,而空中水资源可开发潜力对于开展人工增雨工作具有十分重要的指导意义。根据公式(4),计算出葫芦岛各县区空中水资源可开发潜力值,结果如表 3 所示。

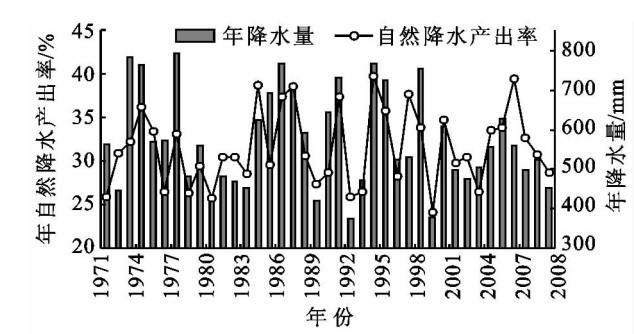


图3 葫芦岛地区平均年降水量与平均年自然降水产出率之间的关系

从表3可以看出,葫芦岛地区全年人工增雨(雪)潜力值为1 211~1 370 mm,平均值1 257 mm,约为该地区39 a平均降水量(574 mm)的2.2倍,最大值

表3 葫芦岛地区多年月平均人工增雨(雪)潜力值													mm
区域	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	全年
建昌	5	7	16	37	99	251	341	255	137	45	15	5	1211
连山	5	8	15	44	104	259	345	253	119	52	17	6	1227
绥中	7	9	20	50	110	233	394	290	161	68	21	8	1370
兴城	6	8	16	41	101	237	350	255	120	55	22	7	1218
平均	6	8	17	43	103	245	358	263	134	55	19	6	1257

### 3 结论

(1) 葫芦岛年平均整层大气可降水量为5 436~6 543 mm,年平均整层大气可降水量最大值出现在兴城,最小值出现在建昌,呈现出沿海高,内陆低的特点,有效空中水资源量为1 742~1 971 mm,约为整层大气年可降水量的1/3,总体呈现出南部略大,北部略小的特点,最大值出现在绥中,最小值出现在建昌,各县区之间差异较小。

(2) 葫芦岛1971—2009年39 a间自然降水产出率平均为32%,年自然降水产出率与年降水量有较好的对应关系,一般降水偏多的年份自然降水产出率也较大,但不绝对。各月自然降水上半年最大值均出现在4月,下半年各地变化趋势较为复杂,大值一般出现在10月和12月,小值一般出现在9月和11月。

(3) 葫芦岛地区全年人工增雨(雪)潜力值为1 211~1 370 mm,约为该地区39 a平均降水量(574 mm)的2.2倍,最大值均出现在7月,最小值出现12月或者1月,夏季(6—8月)的可开发潜力值约占全年的70%。

(4) 本文计算出的空中水资源量及人工增雨(雪)潜力值虽然根据当前葫芦岛市人工增雨(雪)作业实际,做了一定的修正,由于大气中的水汽是不可能全部凝结为降水,所以计算出的结果要比实际偏大,但分析葫芦岛市空中水资源及人工增雨(雪)潜力值的时空分布特征,对于有效开发空中水资源,合理进行人工增雨(雪)作业仍具有重要的参考价值。

均出现在7月,最小值出现在12月或者1月,夏季(6—8月)的可开发潜力值约占全年的70%。

实际上,将大气中的水汽全部转化为降水是不可能实现的,所以上面计算出的人工增雨(雪)潜力值对于实际的人工增雨作业而言是偏大的。目前,气象部门平均增雨(雪)效果约为16%~17%,我国北方各省人工增雨率在20%左右<sup>[13-14]</sup>,假设仅能将空中水资源可开发潜力值的10%转化为降水,对于葫芦岛地区10 302万km<sup>2</sup>的国土面积,增加的水资源量将是12亿t,随着人工增雨(雪)作业技术水平的提高和催化技术的发展,人工增雨(雪)作业能够将更多的水汽转化为降水,所以说葫芦岛市空中水资源可开发的潜力还是很大的。

表3 葫芦岛地区多年月平均人工增雨(雪)潜力值													mm
区域	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	全年
建昌	5	7	16	37	99	251	341	255	137	45	15	5	1211
连山	5	8	15	44	104	259	345	253	119	52	17	6	1227
绥中	7	9	20	50	110	233	394	290	161	68	21	8	1370
兴城	6	8	16	41	101	237	350	255	120	55	22	7	1218
平均	6	8	17	43	103	245	358	263	134	55	19	6	1257

#### 参考文献:

[1] 汪丽新. 葫芦岛市旱涝指标的确定和干旱规律分析[J]. 江西农业学报, 2010, 22(1): 78-80.

[2] 江和文, 郭婷婷, 包颖, 等. 辽宁省近50年旱涝灾害的时空特征分析[J]. 水土保持研究, 2012, 19(2): 29-33.

[3] 周长艳, 王顺久, 彭骏. 金沙江流域及邻近地区空中水资源的气候特征分析[J]. 资源科学, 2010, 32(12): 2433-2440.

[4] 刘芸芸, 张雪芹. 西北干旱区空中水资源的时空变化特征及其原因分析[J]. 气候变化研究进展, 2011, 7(6): 385-392.

[5] 肖劲松, 毛锋, 邱晓玫. 人工增雨与空中水资源的合理开发[J]. 云南环境科学, 2006, 25(1): 11-13.

[6] 张怡, 朱世红, 陈巧, 等. 空中水资源开发潜力及增雨效益分析[J]. 气象与环境科学, 2009, 32(增刊): 119-122.

[7] 杨茜, 李轲, 廖代秀, 等. 重庆地区空中水资源的时空分布特征[J]. 气象, 2010, 36(8): 100-105.

[8] 龚佃利, 边道相. 山东省空中水资源的初步分析[J]. 气象与环境研究, 2002, 7(4): 474-482.

[9] 刘晓冉, 杨茜, 王若瑜, 等. 1980—2009年三峡库区空中水资源变化特征[J]. 自然资源学报, 2012, 27(9): 1550-1560.

[10] 杨景梅, 邱金恒. 用地面湿度参量计算我国整层大气可降水量及有效水汽含量方法的研究[J]. 大气科学, 2002, 26(1): 9-22.

[11] 杨景梅, 邱金恒. 我国可降水量同地面水汽压经验表达式[J]. 大气科学, 1996, 20(5): 620-626.

[12] 向玉春, 唐茂. 湖北省空中水资源开发潜力分析[C]. 中国气象学会2008年年会论文集, 2008.

[13] 张自国. 人工增雨效果检验绝对增雨量效果评估方案[J]. 内蒙古气象, 2003(4): 56-58.

[14] 胡鹏, 谷湘潜, 冶林茂, 等. 人工增雨效果的数值统计评估方法[J]. 气象科技, 2005, 33(2): 189-192.