

# 湖南省柘溪水库流域空中 水汽资源特征及人工增雨潜力

唐 林<sup>1,2</sup> 王治平<sup>2</sup> 丁岳强<sup>2</sup> 张中波<sup>2</sup>

(1. 南京大学, 210093; 2. 湖南省人工影响天气办公室)

**提 要:** 根据湖南省境内怀化和长沙2个探空站的1994—2003年1—12月每日两个时次(北京时间08时和20时)的资料,对柘溪水库库区及流域大气中的垂直气柱水汽含量进行了计算与分析。结果表明,柘溪水库流域全年年平均水汽含量值为 $3.62\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。各种天气形势下水汽含量值各不相同,台风外围云系水汽含量值相对较大,为 $6.01\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。大气垂直气柱水汽含量交换次数平均为3.04次/月,更新率为9.92天。柘溪流域上空平均每年净输入的水汽含量为 $234.87\times 10^8\text{m}^3$ 。若对所有的可作业云系施加人工影响,全年平均可能增雨总量达 $29.843\times 10^8\text{m}^3$ 。

**关键词:** 水汽含量 水汽交换 水汽收支 人工增雨潜力

## Water Vapor Resource and Potentiality of Increasing Rain Artificially in Zhexi Reservoir and Its Drainage Area of Hunan Province

Tang Lin<sup>1,2</sup> Wang Zhiping<sup>2</sup> Ding Yueqiang<sup>2</sup> Zhang Zhongbo<sup>2</sup>

(1. Nanjing University, 210093; 2. Hunan Weather Modification Office)

**Abstract:** Based on the sounding data at Huaihua and Changsha weather stations, Hunan Province from 1994 to 2003, the cloud water vapor content in the vertical atmosphere columnation are analyzed and computed over Zhexi reservoir and drainage area of Hunan province. It shows that the annual average value of cloud water vapor content is  $3.62\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$  and varies with the synoptic pattern in Zhexi reservoir and drainage area. The cloud system water

资助项目: 湖南省柘溪水电厂资助项目 ZXJSFW1《湖南省柘溪水库库区空中过境水资源分析》

收稿日期: 2005年11月22日; 修定稿日期: 2006年3月8日

vapor content value near the outer edges of the typhoon is  $6.01\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ , greater than other cloud. Average exchange times of water vapor content is 3.04 times per month in vertical atmosphere columniation and updating ratio of water vapor is 9.92 days. Average net water vapor content into the atmosphere in Zhexi drainage area in one year is 23487 million  $\text{m}^3$ . It is possible that precipitation enhancement gross value would be about 2984.3 million  $\text{m}^3$ , if all potential clouds in the sky in this area are seeded.

**Key Words:** water vapor content water vapor exchange water vapor budget potentiality of precipitation enhancement artificially

## 引言

柘溪水库位于湖南省资水中游,控制集雨面积  $2.26 \times 10^4 \text{km}^2$ ,总库容  $35.7 \times 10^8 \text{m}^3$ ,正常高水位 169.0m,死水位 144m。资水流域属于中亚热季风湿润气候,多年平均降水量为 1462mm。降水是资水流域径流的唯一来源,多年平均径流深 813.1mm,折合径流量  $217.4 \times 10^8 \text{m}^3$ 。

开发空中水资源,加快大气水循环,开展水库人工增雨试验,为水库增加来水,首先应了解库区及流域的大气水资源分布状况。目前,我国各地对水汽资源的研究非常重视,例如邹进上等对我国上空的水汽含量及季节变化<sup>[1]</sup>,俞亚勋等对西北地区的水汽时空分布及变化趋势<sup>[2]</sup>,李玉林等对江西的夏季水汽资源的研究<sup>[3]</sup>、刘世祥等对甘肃等地区空中水汽资源特征的分析研究<sup>[4]</sup>,对不同尺度的地区的水汽含量分布和水汽输送及其季节变化作了定性和定量的分析。这些研究都是基于面积较大的区域而开展的,对于某一河流的流域,其空中水汽资源的分析研究较少,而且没有分析其增雨潜力。利用水库流域的两个探空站的资料以及小网格再分析场的客观分析量,对柘溪水库流域上空水汽资源进行了分析,给出其增雨潜力,为合理开发柘溪水库流域空中水资源提供科学依据。

## 1 空中水汽含量的计算

由于水汽主要集中在对流层下部,所以一般只从地面计算到 300hPa 或 200 hPa 即可。在具体计算时,通常采用大气分层的办法。从地面到高空分成 5 层(地面至 850hPa、850~700hPa、700~500hPa、500~400hPa、400~300hPa)分别计算柘溪库区及流域境内范围的大气中的垂直气柱水汽含量。大气中的垂直气柱各层的水汽含量  $W_a$ ,是根据式(1)来对各层的比湿  $q(p)$  分别进行计算的:

$$W_a = -\frac{1}{g} \int_{p_0}^{p_z} q(p) dp \quad (1)$$

式中:  $g$  为重力加速度;  $p_0$  与  $p_z$  为地面及大气顶高度  $z$  处的气压值。利用怀化和长沙 2 个探空站的 1994—2003 年 1—12 月每日两个时次(北京时间 08 时和 20 时)的探空资料,计算得出大气中各层气柱水汽含量,然后利用梯形面积叠加求和方法计算整层大气垂直气柱内的水汽含量。式(1)中的  $q$  与  $e$  值分别由式(2)、(3)计算得出:

$$q = 621.98e/p \quad (2)$$

$$e = A \cdot 10^{\frac{a(t_d - b)}{T_d}} \quad (3)$$

式(2)、(3)中:  $q$ : 比湿;  $e$ : 水气压;  $p$ : 规定层气压;  $A = 6.11$ ,  $a = 7.5$ ,  $b = 237.3$ ,  $t_d$ : 规定层露点温度。整层大气的水汽含量采用各层计算值通过梯形面积叠加

求和得到, 而计算两规定层间气柱水汽含量 ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) 公式由式 (4) [由式 (2)、(3) 式代入式 (1), 经变换简化而得, 式 (4) 中的  $p$ 、 $q$  及常量也是由式 (2)、(3) 变换得出] 计算得到:

$$W_{i \rightarrow i+1} = \frac{q_i + q_{i+1}}{2} (p_i - p_{i+1}) \frac{13.6 \times 0.076}{1013.25} \quad (4)$$

式 (4) 中:  $p_1$ 、 $q_1$ : 地面气压 (hPa) 和比湿;  $p_2$ 、 $q_2$ : 850hPa 和比湿;  $p_3$ 、 $q_3$ : 700hPa 和比湿;  $p_4$ 、 $q_4$ : 500hPa 和比湿;  $p_5$ 、 $q_5$ : 400hPa 和比湿;  $p_6$ 、 $q_6$ : 300hPa 和比湿。整个大气中气柱水汽含量  $W$  为 5 层总和。同时, 在计算时还与天气系统 (低槽、副热带高压、东风波、台风低压、台风外围) 一并结合计算, 得出湖南省柘溪水库流域空中水汽含量, 见表 1 和表 2。

## 2 空中水汽含量变化特征

### 2.1 水汽含量时间变化

由表 1 可以看出, 湖南省柘溪水库流域 1994—2003 年 1—12 月年平均水汽含量值为  $3.62 \text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 08 时水汽含量为  $3.63 \text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 20 时水汽含量为  $3.61 \text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。极大值为  $6.48 \text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 出现在 7 月; 极小值为  $1.45 \text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 出现在 2 月。

春季 (3—5 月) 平均水汽含量值为  $3.43 \text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 夏季 (6—8 月) 平均水汽含量值为  $5.44 \text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 秋季 (9—11 月) 平均水汽含量值为  $3.67 \text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 冬季 (12—2 月) 平均水汽含量值为  $1.95 \text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

### 2.2 不同天气系统影响下空中水汽量值变化

不同的天气形势下的大气水汽量是不一样的, 根据 1999—2003 年 23 次主要降水过程的分析, 其中西风大槽 9 次, 北涡南槽 6 次, 南支槽 4 次, 东风波 1 次, 台风外围 1

次, 台风低压 1 次, 副热带高压系统南退影响 1 次。

表 1 湖南柘溪水库流域大气中气柱水汽含量月变化 (单位:  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ )

| 月份 | 08 时 |      |      | 20 时 |      |      | 日平均  |
|----|------|------|------|------|------|------|------|
|    | 平均   | 极大值  | 极小值  | 平均   | 极大值  | 极小值  |      |
| 1  | 1.90 | 2.17 | 1.61 | 1.91 | 2.27 | 1.68 | 1.91 |
| 2  | 1.93 | 2.34 | 1.47 | 1.83 | 2.14 | 1.45 | 1.88 |
| 3  | 2.69 | 3.39 | 2.12 | 2.62 | 3.32 | 2.10 | 2.66 |
| 4  | 3.64 | 4.16 | 3.01 | 3.45 | 3.80 | 2.90 | 3.55 |
| 5  | 4.01 | 4.87 | 3.06 | 4.14 | 4.94 | 3.01 | 4.08 |
| 6  | 5.29 | 6.22 | 4.34 | 5.33 | 6.15 | 4.32 | 5.31 |
| 7  | 5.47 | 6.31 | 5.05 | 5.51 | 6.48 | 4.99 | 5.49 |
| 8  | 5.46 | 6.06 | 4.72 | 5.57 | 6.24 | 4.88 | 5.52 |
| 9  | 4.66 | 5.61 | 4.02 | 4.59 | 5.64 | 3.77 | 4.63 |
| 10 | 4.04 | 4.65 | 3.22 | 3.91 | 4.44 | 3.10 | 3.98 |
| 11 | 2.43 | 2.88 | 2.01 | 2.38 | 2.93 | 1.99 | 2.41 |
| 12 | 2.05 | 2.43 | 1.67 | 2.05 | 2.58 | 1.63 | 2.05 |
| 平均 | 3.63 |      |      | 3.61 |      |      | 3.62 |

表 2 湖南柘溪水库流域不同天气系统下的大气中气柱水汽量 (单位:  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ )

| 时次   | 西风大槽 | 北涡南槽 | 南支槽  | 东风波  | 台风外围 | 台风低压 | 副热带高压 |
|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 08 时 | 4.59 | 5.00 | 4.17 | 4.76 | 5.75 | 5.89 | 5.27  |
| 20 时 | 4.39 | 4.91 | 3.89 | 4.72 | 6.18 | 6.12 | 5.14  |
| 日平均  | 4.49 | 4.96 | 4.03 | 4.74 | 5.97 | 6.01 | 5.21  |

结果表明, 台风外围和台风低压系统影响下, 水汽量值相对较大, 分别为  $5.97 \text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$  和  $6.01 \text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。这是因为台风自海上带来大量的水汽所致。而影响次数最多的还是西风大槽, 平均水汽量为  $4.49 \text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 极大值为  $7.01 \text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 极小值为  $3.36 \text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 这说明西风大槽系统影响下的降雨过程, 其大气水汽量值变化较大, 配合有较好的南支气流活动, 水汽量值就较大。

### 2.3 大气中垂直气柱水汽含量交换次数与更新率变化

为了分析柘溪水库库区及集水流域的大气水汽资源的更新周期, 进一步表述大气中垂直气柱的水汽含量的特征, 并使之与降雨量

能联系起来,对大气中气柱水汽含量的平均交换次数  $N$  与更新率  $T$  进行了计算。

计算结果表明,大气垂直气柱水汽含量交换次数:全年平均交换次数 3.04 次/月,5 月最大,为 5.6 次,9 月最小,为 1.35 次。春季的水汽交换次数为 5.08 次/月,夏季为 3.35 次/月,秋季为 1.91 次/月,冬季为 2.75 次/月。而更新率全年平均为 9.92 天,春季更新最快,仅需 6.14 天,秋季更新最慢,需 16.1 天,夏季和冬季分别需 9.54 天和 11.22 天,也就是说,库区春季其降水频率高,夏季次之,冬季比秋季略高,从而反映春季的人工增雨作业条件相对较好。

### 3 水汽收支特征分析

#### 3.1 水汽输送量

把柘溪库区集水流域分为东、南、西、北四个边界,其长度分别为 240km、80km、240km 和 80km。计算各边界的水汽收支,可以了解水汽来源及区域内总的水汽收支量,并对大气进行垂直分层,可得到各标准等压面层之间的水汽收支量。

任一层的水汽收支计算公式如下:

$$A_i = \frac{1}{g} \int_{p_0}^{p_i} q_i v_m l_i dp \quad (5)$$

式中  $A_i$  为第  $i$  边界的水汽收支,  $q_i$  为第  $i$  边界平均比湿,  $v_m$  为垂直第  $i$  边界的风的分量,  $l_i$  为第  $i$  边界的长度。当相应的单位取为  $g: m \cdot s^{-2}$ ,  $l_i: km$ ,  $u_i: m \cdot s^{-1}$ ,  $p: hPa$ ,  $q_i: g \cdot kg^{-1}$  时,得到的水汽收支单位为  $10^{-1} t \cdot s^{-1}$ 。则年平均水汽收支为  $T \cdot A_i$ ,其中  $T$  为  $3.1536 \times 10^7 s$ 。若  $A_i$  为正为输入,反之  $A_i$  为负为输出。

计算通过各边界气流的年平均水汽输送量,可以看出通过各边界气流的年平均水汽输送量差异不大,只有南边界的输出水汽输送量比较小,为  $149.32 g \cdot cm^{-1} \cdot s^{-1}$ ,说明从北方下来的天气系统带来的水汽比较少,而西风带系统、南支气流和东风波系统带来的水汽相对较多。

根据柘溪水库流域上空 10 年(1994—2003 年)水汽平均收支的统计和计算表明,平均每年通过柘溪水库流域边界输入区域境内的水汽含量为  $5419.53 \times 10^8 m^3$ ,从柘溪水库流域边界输出的水汽含量为  $5184.66 \times 10^8 m^3$ ,其平均每年净输入的水汽含量为  $234.87 \times 10^8 m^3$ ,约占总输入量的 4.33%,折合成平均水深 1223.3mm,见表 3。

表 3 各边界年平均输入、输出的水汽输送量

|            | 输入水汽通量<br>( $10^{-1} t \cdot s^{-1}$ ) | 输入水汽输送量<br>( $g \cdot cm^{-1} \cdot s^{-1}$ ) | 输出水汽通量<br>( $10^{-1} t \cdot s^{-1}$ ) | 输出水汽输送量<br>( $g \cdot cm^{-1} \cdot s^{-1}$ ) |
|------------|--|---|--|---|
| 东边界(240km) | 64307.443                              | 267.95  | -68672.631                             | 286.14  |
| 南边界(80km)  | 21740.447                              | 271.76  | -11945.428                             | 149.32  |
| 西边界(240km) | 62591.716                              | 261   | -65126.121                             | 271.36  |
| 北边界(80km)  | 23212.866                              | 290.16  | -18658.877                             | 233.24  |

#### 3.2 各边界的水汽收支及垂直分布

由于柘溪水库流域是东西长约 80km,南北长约 240km 的区域,因此东、西边界的水汽输送占很大的比例,其水汽主要是从东、西边界输入,分别占 37.42% 和 36.42%,南、北边界相对较少。东、西边

界虽然水汽输入占主要,但水汽输出也占主要,分别占水汽输出的 41.77% 和 39.61%,这样,东、西边界的净输入为负。因此柘溪水库流域这样特定的区域,上空水汽净输入主要从南边界和北边界输入,东、西边界水汽输送大,但由于滞留时间短,水汽输入多,输出也多。

水汽输送通量是随高度变化的，因而水汽收支也存在着随高度的变化。从表4可见，柘溪水库流域上空500hPa以下气层中水汽总输入占整层的87.16%，水汽总输出占整层的88.03%，净输入水汽含量占整层的70.26%，即500hPa以下为水汽净辐合，同样分析高层水汽输送可知，300hPa以上为水汽净辐散。

地面至850hPa大气层只有东边界为净输出，而且量值较小，因此净输入相对较大，占整层大气净输入的54.75%；850~700hPa大气层南、北边界输入量大，占整层大气的输入量的32.24%，东、西边界水

汽输出量大，占整层大气的输出量的33.37%，输入多，输出也多，因此净输入较小，仅占整层输入量的1%，因此这层大气的人工增雨潜力最大；而700~500hPa只有西边界为净输出，其它边界则为输入，净输入量较大。这层大气的输入量也比较大，占整层大气的30.17%，输出量占整层大气的31.17%，净输入占整层总输入量的1.2%，因此这层大气的人工增雨潜力也很大。事实上，湖南省开展地面高炮、火箭人工增雨主要影响云层均位于850~700hPa和700~500hPa两层。

表4 东、南、西、北四个边界的水汽输送净通量垂直分布表 (单位:  $10^8 m^3$ )

| 年份 | 地面~850hPa | 850~700hPa | 700~500hPa | 500~400hPa | 400~300hPa | 整层     |
|----|-----------|------------|------------|------------|------------|--------|
| 东  | -8.31     | -100.27    | 17.36      | 5.35       | 6.35       | -79.52 |
| 南  | 42.23     | 110.33     | 120.21     | 25.33      | 10.79      | 308.89 |
| 西  | 83.9      | -68.81     | -118.09    | 18.36      | 4.67       | -79.97 |
| 北  | 10.78     | 76.08      | 34.33      | 11.26      | 11.16      | 143.61 |

#### 4 水汽总通量及人工增雨潜力

##### 4.1 水汽总通量的计算

通过  $L_1$  边长的水汽总通量为：

$$R_v = L_1 \cdot V \cdot Q_v \quad (6)$$

式中  $V$  为垂直于  $L_1$  的平均风速， $Q_v$  为垂直气柱中水汽总量。取  $V = 10 m \cdot s^{-1} = 36 km \cdot h^{-1}$ ， $Q_v$  为各月的平均水汽含量， $L_1$  为 80km。  $R_v$  为水汽总通量，单位为  $10^9 t/月$ 。

##### 4.2 月降水总量的计算

该区域面积为  $L_1 \cdot L_2$ ，月雨量为  $R$ ，则降水总量

$$R_w = L_1 \cdot L_2 \cdot R \quad (7)$$

这里， $L_1$  为 80km， $L_2$  为 240km， $R$  为月雨量， $R_w$  为月降水总量，单位为  $10^9 m^3$ 。

计算表明，月水汽总通量极大值为  $114.4 \times 10^9 m^3$ ，对应的时段是 8 月份；极

小值为  $38.98 \times 10^9 m^3$ ，对应 2 月份。而降水总量的极大值为  $4.3987 \times 10^9 m^3$ ，对应 6 月份；极小值为  $0.887 \times 10^9 m^3$ ，对应 12 月份。降水总量与水汽总通量之比极大值为 4.97%，对应 4 月份；极小值为 1.98%，对应 11 月份。这说明，水汽总通量与降水总量都有很明显的季节变化。夏季水汽总通量最大，而降水量却不是最大。

逐月平均水汽总通量与降水总量分布曲线如图 1 所示。

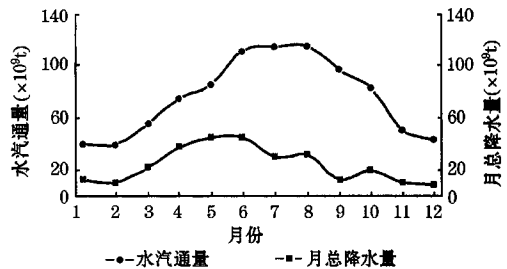


图1 月平均水汽通量与月总降水量示意图

由图1可以看出，水汽总通量呈单峰分

布,而降水总量却呈多峰分布,尤其是7、9月位于谷底,为低值区,而水汽总通量却为高值区,两者差异相当显著。

#### 4.3 人工增雨潜力分析

水汽总通量可凝结的水汽含量,即可能降水量为水汽总通量乘以凝结率,湖南省积云的云凝结率 $\alpha$ (云凝结率是指水汽凝结成云的效率)平均为0.1,因此可能降水总量:

$$R_p = R_v \cdot \alpha \quad (8)$$

根据湖南省人工增雨随机试验结果,我省境内积云人工增雨率 $\beta$ 平均为24%<sup>[5]</sup>,因此对有增雨潜力的云系进行作业,取作业机会平均为有增雨潜力云系的1/5(实际作业的平均状况),若对所有可作业云系进行作业,可能增雨总量为 $R_i$ :

$$R_i = 1/5 \cdot (R_p - R_w) \cdot \beta \quad (9)$$

式中, $R_i$ 为月可能增雨总量, $R_p$ 为月可能降水总量, $R_w$ 为月降水总量,单位均为 $m^3$ 。

计算结果表明,柘溪水库库区及集水流域年可增雨潜力总量为 $621.6 \times 10^8 m^3$ ,如果对所有的可作业云系施加人工影响,全年平均可能增雨总量达 $29.843 \times 10^8 m^3$ 。其中,7—10月平均为 $3.7745 \times 10^8 m^3$ ,即这段时期任何一个月实施人工增雨作业,可能增雨 $3.7745 \times 10^8 m^3$ ,考虑径流系数(0.2~0.5),可能增加水库蓄水达 $0.7549 \times 10^8 \sim 1.8873 \times 10^8 m^3$ ,这与2001、2003年在柘溪水库实施人工增雨试验的增雨总量相似。

## 5 结 语

(1) 柘溪水库流域全年年平均水汽含量值为 $3.62g \cdot cm^{-2}$ 。极大值为 $6.48g \cdot cm^{-2}$ ,出现在7月;极小值为 $1.45g \cdot cm^{-2}$ ,出现在2月。各种天气形势下水汽含量不一样,台风外围和台风低压系统影响

下,水汽含量值相对较大,分别为 $5.97$ 和 $6.01g \cdot cm^{-2}$ ,而影响次数最多的是西风大槽,平均水汽含量为 $4.49g \cdot cm^{-2}$ 。

(2) 大气垂直气柱水汽含量交换次数:全年平均交换次数3.04次/月,5月最大,为5.6次,9月最小,为1.35次。而更新率全年平均为9.92天,春季更新最快,仅需6.14天,秋季更新最慢,需16.1天,夏季和冬季分别需9.54天和11.22天。

(3) 每年通过柘溪库区及集水流域上空平均每年净输入的水汽含量为 $234.87 \times 10^8 m^3$ ,约占总输入量的4.33%,柘溪库区及集水流域上空水汽净输入主要从南边界和北边界输入。柘溪库区及集水流域上空500hPa以下气层中水汽总输入占整层的87.16%,水汽总输出占整层的88.03%,净输入水汽含量占整层的70.26%。

(4) 柘溪水库库区及集水流域年可增雨潜力总量为 $621.6 \times 10^8 m^3$ ,如果对所有的可作业云系施加人工影响,全年平均可能增雨总量达 $29.843 \times 10^8 m^3$ 。其中,7—10月平均为 $3.7745 \times 10^8 m^3$ ,即这段时期任何一个月实施人工增雨作业,可能增雨 $3.7745 \times 10^8 m^3$ ,考虑径流系数(0.2~0.5),可能增加水库蓄水达 $0.7549 \times 10^8 \sim 1.8873 \times 10^8 m^3$ 。

## 参考文献

- 1 邹进上,刘蕙兰.我国大陆上空平均水汽含量及其季节变化[J].气象科学,1983,(1):32-40.
- 2 俞亚勋,王劲松,李青燕.西北地区空中水汽时空分布及变化趋势分析[J].冰川冻土,2003,(2):149-156.
- 3 李玉林,杨梅,曾光平.江西省7至9月水汽资源特征[J].气象科技,2003,31(3):167-173.
- 4 刘世祥,杨建才,陈学君等.甘肃省空中水汽含量、水汽输送的时空分布特征[J].气象,2005,31(1):51-54.
- 5 刘耀宗,王治平,陈历舒.湖南单块积云高炮增雨随机化试验效果的分析[J].气象,1999,25(8):16-21.