山东省空中水资源的初步分析*

龚佃利 边道相
(山东省气象科学研究所，济南 250031)

摘 要 利用 1997～1999 年逐日探空资料和同期水文水资源资料，分析了山东省域空中水汽资源的时空分布特征及地-气系统的水量平衡关系。结果表明：山东省空中水汽资源受天气系统和季节变化的影响明显；静态水汽含量年均值为 20.75 mm，动态水汽净输出量全年平均为 440.91 mm，并以 850 hPa 层的水汽净输出为主。水汽净收支率年、季分布具有较强的地域特征。全年的水汽输入量很大，但空中水汽资源转化为地面降水的效率不足 5%，而降水转化为水资源的量约为 27.31%，空中水汽资源具有很大开发潜力。另外，从大气水量平衡角度分析了山东干旱气候特征的客观必然性，并提出开源增量、增加水资源的对策。

关键词：水汽；水资源；干旱气候；人工增雨

1 引言

大气中水汽的运动和循环紧密联系着地球水圈、大气圈、岩石圈和生物圈，在全球水量、能量和地球化学物质的迁移和转换中起着重要的作用。因此，研究大气中水汽含量、水汽输送、收支与平衡等水汽特征量，揭示水汽运动的规律具有重要意义，这已是许多国际水文、气候等研究计划的一项重要内容。在全球水资源日益紧缺的今天，以上研究也可为开发利用空中水资源提供必要的气候背景。

Филиппова 等[1]、黄荣辉等[2]利用国际计划"夏季季风试验"期间观测资料和 ECMWF 数值分析资料，对夏季东亚季风区水汽含量和水汽输送特征进行了系统的研究。崔玉琴[3]将我国大陆边界分成 20 个方向不同，彼此相接的多边形，计算并分析了我国大陆上空水汽资源蓄留量、季节分配等特征。伊兰等[4]则根据地-气系统水量平衡方法，用降水量、径流量和整层大气的水汽通量散度对东亚季风区的蒸发量、土壤和地下水含量进行了估算，并分析了其水量平衡关系。以上研究对于加深对东亚范围大气水汽资源的认识，建立该区域地-气水分平衡模式具有重要意义。

山东是一个极度缺水的省份，多年平均水资源总量 308 m^3，占全国水资源总量的 1.2%，人均水资源量为 360 $m^3\ a^{-1}$，远低于目前国际上流行的"水紧缺指标"1 000～1 700 m^3。除引黄河客水弥补水资源短缺外，很大部分依赖对地下水的开采。近几年，黄河下游断流严重，1997 年黄河下游断流开始的时间、断流天数、断流河长均创历史记录；其中，山东利津水文站开始断流时间提前至 2 月 7 日，年内累计断流达 226 天（其中主汛期 7～9 月断流 78 天）。黄河断流使山东引黄灌区到了无水可引的地步，只有

2001-09-17 收到，2002-02-04 收到修改稿
* 科技部社会公益研究专项资金项目 2001DIB20104 和山东省科技发展计划项目 012150103 共同资助

依赖对地下水的过量开采，地下水开采率高达 91.4%[5]，其结果是以牺牲生态环境为代价。解决缺水问题的根本是开源增量，其中，采用人工增雨手段开发空中水汽资源，已成为缓解水资源短缺的重要手段。因此，研究山东省域范围的空中水汽资源量及其水量平衡关系，对于山东省空中水资源的评价和干旱气候研究具有重要意义。

2　资料和计算方法

用 1997～1999 年东亚范围内逐日 08、20 时探空资料，根据 MM4 中尺度模式客观分析输出的各层温度、比湿、uv风分量等格点资料，计算山东整层大气积分水汽含量、水汽输送、辐合等水汽资源特征量，用来反映空中静态和动态水汽资源量，并分析其时空分布特征。模式中心点定在济南，格距取 80 km，山东大部可落在 8×5 个格点形成的矩形区内，按山东省陆地面积占网格区面积比例进行四舍五入，山东实际占 25 个网格。以 25 个网格区外边界所围区域作为山东省的边界（图 1），面积误差为 2.56%；其中 AB 段为南边界，BC、DE 为东南边界，CD、EF、GH 和 IK 为北边界，FG、HI 和 KA 为西边界。计算单位时间通过各边界垂直截面上的水汽输入、输出率和两者的差（净水汽收支率），然后进行时间积分可得到逐日、逐月等不同时段的水汽输入、输出总量和水汽净输入量。由于空间计算步长的缩短，使水汽特征量的计算精度得到很大提高，可较好地反映出中尺度系统的水汽运动特征，这对研究省域范围的云水资源量及其空间分布特征是比较适宜的。

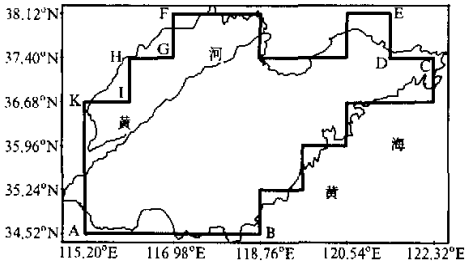

图 1　山东省水汽输送边界划分示意图

从地面p_0到某一层 p 面上大气柱的积分水汽含量 Q 按下列公式计算：

$$Q=\frac{1}{g}\int_{p_0}^{p} q\mathrm{d}p,$$

式中 q 为比湿（单位：g kg^{-1}）、g 为重力加速度（单位：m s^{-2}）。Q 的含义为将气柱内水汽全部凝结降落后所形成的水层深度，即静态水汽含量（单位为 g cm^{-2} 或 mm）。由于大多数水汽集中在对流层中下层，因此，取p_0 = 1 000 hPa 和 p = 300 hPa 进行垂直积分，可得到每个格点整层气柱的水汽含量。

瞬时纬向和经向水汽通量分量F_x和F_y的计算公式为

$$F_x=\frac{1}{g}\int_{p_0}^{p} qu\mathrm{d}p,$$

$$F_y=\frac{1}{g}\int_{p_0}^{p} qv\mathrm{d}p.$$

在忽略比湿局地变化时，各计算网格区的净水汽收支率 N 可由下式计算：

$$N \approx -\frac{1}{g}\int_0^{p_0} \nabla \cdot Vq\mathrm{d}p,$$

若 $N>0$，则水汽输入大于输出，有水汽的净输入；反之，若 $N<0$，则有水汽净输出。为了便于计算和提高计算精度，将上式进行高斯定理变换成如下形式[6]：

$$N \approx -\frac{1}{s}\int_L \int_0^{p_0} \left(\frac{1}{g}V_n q\right)\mathrm{d}p\mathrm{d}L,$$

式中 s 为网格区面积，为 6 400 km^2；V_n 为与边界正交的法向风速分量；L 为网格区周界长度，为 320 km；垂直方向同样从地面积分到 300 hPa。这样，只要计算出沿周界的水汽通量，即可计算单位时间内该网格区的水汽净收支率，并可分析其空间分布。

3 水汽资源的时间分布

3.1 静态水汽资源量

由于整层大气的水汽含量是一个相对稳定的量，我们视之为空中静态水汽资源量。图 2 给出了 1997～1999 年山东省域各月平均水汽含量和月度水汽含量极值。其中，某月水汽含量极大值和极小值由 3 年内同一月的每日探空资料计算得出。

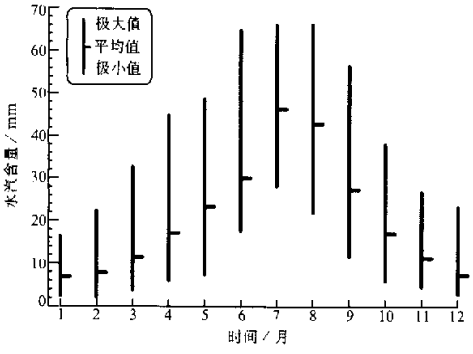

图 2 山东省各月平均水汽含量和月内水汽含量极值

由图 2 可见，山东空中水汽含量存在着明显的季节变化，总体呈单峰型分布。冬季（12～2 月）最低，平均为 7.40 mm；夏季（6～8 月）最高，平均为 39.67 mm；春季（3～5 月）水汽含量平稳增加，季平均 17.33 mm；而秋季（9～11 月）逐渐减少，平均为 18.61 mm。月平均水汽含量最高值在 7 月，为 46.25 mm；最低值在 1 月，只有 6.93 mm；7 月份水汽含量是 1 月的 6.7 倍。6 月的水汽含量波动幅度最大，极大值约是极小值的 3.7 倍；1 月的水汽含量波动幅度最小。

3 年中水汽含量极大值出现在 1997 年 8 月 20 日，为 66.02 mm，全省合计约 105.63 亿 m^3。时值 9711 号台风倒槽及其诱生低压影响山东省，18 日后半夜～20 日全省有 24 个县降特大暴雨。水汽含量极小值出现在 1999 年 2 月 19 日，只有 2.23 mm，全省合计约 3.56 亿 m^3。当时全省受强冷空气影响，出现了明显的降温过程。可见，空中静态水资源量明显受天气系统的影响，夏季台风可为山东带来充沛的水汽，而冬季寒潮大风降温使空中静态水资源骤减。

3.2 动态水汽资源量

大气中的水汽资源除相对稳定的静态水汽含量外，还有动态的水汽输送及其辐合、

辐散造成的净水汽收支量。我们定义图 1 网格边界内的水汽净输入量为山东空中动态水汽资源量。

图 3 给出了 1997～1999 年逐月水汽净输入量的变化。可见，1997、1999 年各月的水汽净输入量变化趋势较为接近。除 3 月为净收入外，其他月份均为水汽净支出。降水偏多的 1998 年 3、4、7、8 月为水汽净收入，其中，8 月为 3 年中水汽净收入最多的月份，为 124.4 mm；而 9 月为 3 年中水汽净支出最多的月份，为−161.5 mm。普查 1998 年 8 月的降水过程可看到，该月先后有 4 次大范围的强降水过程，全省平均降水量为 282.4 mm，较常年偏多 86%；而 9 月份全省以晴热天气为主，气温较常年偏高 2.9℃，平均降水量 15.1 mm，较常年偏少 79%。由此看出，空中动态水汽资源量主要受具体天气系统的影响，阴雨天气可使大量水汽输入我省，并有水汽存留，而晴热天气，水汽大量散失。

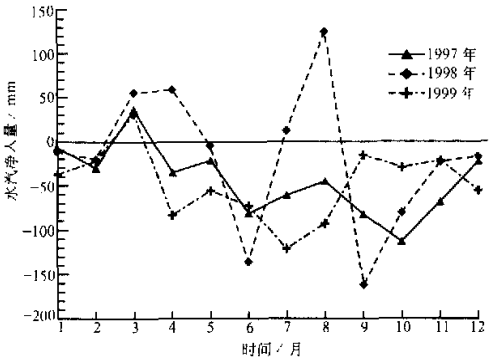

图 3　1997～1999 年平均逐月水汽净输入量变化

4　水汽资源的空间分布

4.1　静态水汽资源分布

以 1、4、7、10 月代表冬春夏秋四季，统计 1997～1999 年计算结果（图略）可见，山东各季水汽含量均表现为自鲁西南向鲁北、山东半岛地区递减的分布特征，其中春季、夏季表现更明显，水汽含量等值线近于西北−东南走向。这表明山东自春季开始逐渐受东亚季风影响，并在夏季达到强盛；而秋季，蒙古冷高压造成的偏北风加强，并在冬季居主导地位。夏季风和冬季风势力的消长更替、南北进退，决定了水汽含量的主要空间分布特征。

4.2　动态水汽资源分布

1997～1999 年各季平均净水汽收支率空间分布（图 4）可见，1 月（图 4a）鲁东南为水汽辐合区，辐合中心大于 60 $m^3\ s^{-1}$，其他地区均为水汽辐散区；4 月（图 4b）山东半岛南部、鲁东南到黄河三角州地区为水汽辐合区，山东西部和山东半岛北部为水汽辐散区；7 月（图 4c）鲁北到鲁中山区为强水汽辐合区，辐合中心超过 150 $m^3\ s^{-1}$，鲁西南和山东半岛地区则为水汽强辐散区；10 月（图 4d）除了鲁东南的日照市有弱水汽辐合区外，其他地区均为水汽辐散区。

综上分析，山东各地水汽净收支量随季节变化的特征非常明显；从地域分布看，鲁东南到鲁中山区易出现水汽辐合，而山东半岛北部为常年水汽辐散区。从 1998 年降水偏多年（较常年偏多 15.3%）和 1999 年降水偏少年（偏少 20.9%）的全年水汽收支率空间分布（图 5）也可看出这一特征。这表明，一方面，鲁中山区到黄河三角洲地区，

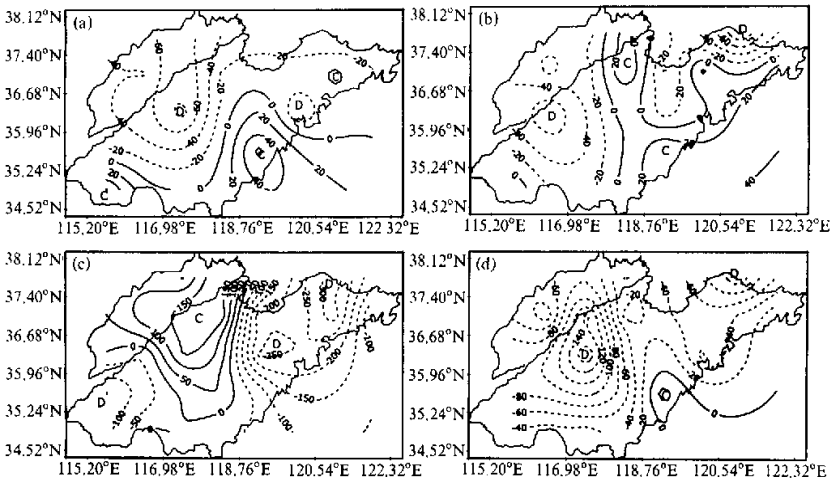

图4 1997～1999年平均各季净水汽收支率空间分布（单位：$m^3\ s^{-1}$）
(a) 1月；(b) 4月；(c) 7月；(d) 10月
C为水汽辐合中心，D为辐散中心

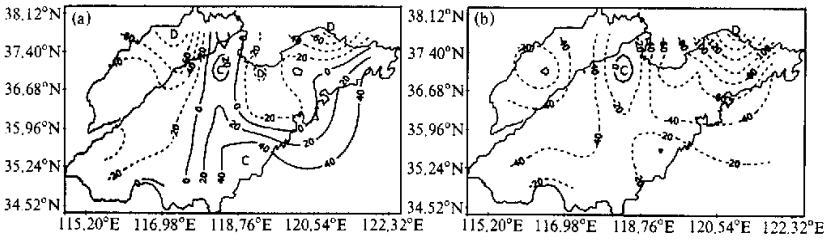

图5 1998年（a）和1999年（b）平均净水汽收支率空间分布（单位：$m^3\ s^{-1}$）

常常是沿西太平洋副热带高压西北边缘的西南水汽流和沿西风槽南下的偏北水汽流的交汇区，成为水汽辐合区；另一方面，鲁中山区和山东半岛地形，特别是迎风坡地形的抬升作用可造成水汽的净辐合收入；文献[7]的暴雨个例分析也揭示了鲁中山区对水汽的辐合作用。以上分析的年、季水汽辐合区如何在人工增雨作业区设计中应用及山东特定地形在水汽运动中的作用等问题有待近一步揭示和研究。

5 水汽净收支率的垂直分布和月际变化

表1为1997～1999年全省各月平均水汽净收支率的垂直分布。可见，850 hPa层各月均表现为水汽净支出，且5～10月的平均水汽净支出率均在22 $m^3\ hPa^{-1}\ s^{-1}$以上，9月份的水汽净支出率最强，达到36.46 $m^3\ hPa^{-1}\ s^{-1}$；700 hPa除6月、10月和冬季12～2月为水汽净支出外，其他月份均为水汽净输入；500～300 hPa水汽以净输入为主，

表 1　山东省各月各高度层平均水汽净收支率　　$m^3 hPa^{-1} s^{-1}$

高度（hPa）	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
200	0.82	−0.34	−0.38	0.14	0.04	0.56	0.57	−0.28	0.66	−0.07	−0.15	−0.26
300	1.67	0.01	1.44	1.93	1.60	3.65	1.96	0.55	0.58	1.86	0.31	0.28
400	2.83	0.34	4.32	4.13	5.06	6.58	3.79	2.15	2.10	4.30	−0.01	0.70
500	1.93	0.63	6.76	6.03	9.27	7.34	5.26	6.12	4.17	5.79	−0.44	0.53
700	−2.87	−2.59	7.45	1.73	2.72	−9.94	11.92	19.06	5.34	−3.03	1.91	−2.24
850	−6.02	−6.15	−4.01	−14.29	−22.58	−29.56	−34.06	−26.30	−36.46	−26.02	−13.91	−8.33

但量值较小。总体看，整层水汽净收支量表现为低层净支出，而中高层有净输入。由于水汽主要集中在对流层低层，且山东全年平均降雨日数（≥ 0.1 mm）约 80 天，多数时间以晴为主，因此全年表现为水汽净输出也是必然的。

6　空中年水汽资源的输送总量

表 2 给出了 1997～1999 年经山东省南、东南、北、西 4 个边界的水汽年输入、输出量和全省年总输入、输出量。由表 2 和各边界水汽输入、输出量的月际变化（图略）可见：

表 2　1997～1999 年各边界年水汽输入、输出量和累计总输入、输出量　　mm

年份	南边界		东南边界		北边界		西边界		全省范围	
	输入	输入	输入	输出	输入	输出	输入	输出	输入	输出
1997	2467.65	2093.90	3254.27	8687.54	3953.16	3752.60	5429.78	1105.89	15104.87	15639.94
1998	3370.28	2330.52	3891.41	10999.17	4073.23	4633.13	7477.14	1056.21	18812.06	19019.03
1999	2142.40	2597.76	3549.11	8984.02	4247.70	3317.30	5927.09	1547.94	15866.29	16447.02
平均	2660.11	2340.73	3564.93	9556.91	4091.36	3901.01	6278.00	1236.68	16594.41	17035.32

（1）山东西边界为主要的水汽输入边界，而东南边界和北边界为主要的水汽输出边界。夏季，伴随西太平洋台风的活动，来自西太平洋的强水汽流经东南边界输入山东省，导致 7～8 月份的东南边界水汽输入量超过西边界。东南边界包括经向和纬向两种边界，其中经向的边界以水汽输出为主，而纬向的边界以水汽输入为主。各边界水汽输入、输出量的差值为各边界水汽输送收支的净量，差值较大的边界为东南边界和西边界。

（2）山东省年水汽输入、输出量的数值非常大，3 年平均水汽输入量为 16 594.41 mm，水汽输出量为 17 035.32 mm，水汽净支出 440.91 mm。各季对年总水汽收支量的贡献差别很大。冬季（12～2 月）水汽收支量平均不足 700 mm／月，而 5～9 月份水汽收支明显增强，尤其是以 7、8 月份最强。如 1998 年 8 月份水汽输入量达到 3 477.60 mm，而同年 1 月份水汽输入量只有 585.69mm，前者是后者的 5.94 倍。

7　山东大气水量平衡关系

表 3 列出了 1997～1999 年山东空中水汽资源和水文水资源各特征量的数值。其

表3 1997～1999年山东地-气系统水量平衡各要素对应关系 mm

年份	大气水汽资源特征量					水文水资源特征量			
	水汽含量	输入量	输出量	净输入量	蒸发量	降水量	地表水资源	地下水资源	总水资源
1997	19.238	15104.87	15639.94	-535.07	1087.92	552.85	68.0	72.0	120.0
1998	22.116	18812.06	19019.03	-206.97	974.20	767.23	196.1	117.0	262.8
1999	20.908	15866.29	16447.02	-580.73	1107.03	526.30	77.3	77.4	121.6
平均	20.754	16594.41	17035.32	-440.91	1056.37	615.46	113.8	88.8	168.1

中，水文水资源中地表水资源量指地表水体的动态水量，用天然河川径流量表示；地下水资源量指当地降水和地表水体补给的地下含水层的动态水量；水资源总量指评价区内当地降水形成的地表、地下产水总量（不包括区外来水量），由地表水资源量与地下水资源量相加，扣除两者之间互相转化的重复计算量而得。地表、地下和总水资源数据取自中国水利科技信息网站（www.chinawater.net.cn）公布的中国水资源公报。

根据大气水量平衡法[4,6]计算得出的山东年平均蒸发量约为1 056.37 mm，该蒸发量远大于山东省的陆面蒸发量，但与高达1 434.1～2 430.4 mm[8]的水面蒸发量相比仍在合理的范围之内。

表3较好地反映出山东省域地-气系统各平衡要素之间的对应关系。其中，1997～1999年净水汽输入量均为负值。即使1998年丰水年份，水汽输入量高达18 812.06 mm，水汽含量和降水量也比常年偏多，但全年水汽仍净输出206.97 mm。这表明，山东全年水汽是净散失的，这与伊兰等[4]的计算结果一致，即山东属于河套东北部和华北平原至渤海、黄海一带的水汽辐散区，蒸发力大于降水量。

1998年，水汽输入量最大，相应的地面降水量也最大，地表、地下和总的水资源也最多。但从3年的平均情况看，水汽输入山东省后的降水转化效率很低，只有3.32%～4.08%，绝大部分水汽输出山东省，成为过境水汽。降水量转化为水资源量的比例，3年平均为27.31%，1998年最高，为34.25%。可见，山东省空中水汽资源具有很大的开发潜力。

8 山东干旱气候特征及对策

8.1 干旱气候的客观必然性

从以上分析可以看出，山东"十年九旱"的干旱气候特征有其客观必然性。图4、图5所揭示的山东年、季水汽净辐散区主要在鲁西北和半岛北部，这些区域正是山东最易发生干旱灾害和水资源供应最紧张的地区。尤其是鲁西北地区，年降水量最少，而蒸发量最多，水汽亏缺最为严重。表1所揭示的山东省域大气平均净水汽收支率的时间-高度分布特征，决定了山东全年水汽净支出是必然的，图2也反映了这一结论。因此，山东干旱气候特征有其特定地理位置所决定的客观必然性，山东属资源性缺水，干旱和水资源紧缺的问题将长期存在。

8.2 水资源开源增量对策

干旱和水资源紧缺是制约山东经济发展的重大问题。虽然沿黄地区引黄灌溉、山东半岛地区引黄和海水淡化一定程度缓解了水资源危机。但是一旦黄河引水发生困难，将

对沿黄和半岛地区工农业发展和居民生活用水造成威胁。因此，开发利用空中水汽资源势在必行。

山东全省年空中水汽为净支出，这并不意味着无空中水资源可利用。事实上，年总水汽输入量主要集中在有降水天气过程的时段，尤其是夏季暴雨；此时的水汽输入多，输出少，全省为净收入。人们可以抓住这一云水资源转化最活跃的时机，通过人工参与调节整个大气水循环过程，提高空中水汽资源转化为地面降水的效率，增加地面降水。人工增雨工作除了在干旱的春秋季满足农作物播种、生长需水外，还可积极开展针对对流云的增雨技术研究，未雨绸缪，在汛期防汛形势允许的情况下，在一定的区域开展增雨工作，可取得更显著的经济和社会效益。

空中水汽资源作为一种潜在的水资源，在开发其降水潜力的同时，如何有效加以利用变得十分重要。实际上，每次较强的降水过程均可使我省可利用水源快速增加，通过水库蓄水和森林树木、农田作物及自然植被的吸收，可使地面降水在整个大气水分循环中得到充分利用，提高降水向水文水资源转化的效率，这对增加水资源、改善生态环境有重要意义。

9　结论

（1）山东空中水汽含量存在着明显的季节变化，7 月最高，1 月最低，年平均为 20.75 mm。水汽净收支量除 3 月外，其他月份大多为水汽净支出。鲁东南到鲁中山区易出现水汽辐合，而山东半岛北部为常年水汽辐散区，其他地区水汽的收支状况随季节有较大的变化。水汽净收支率的垂直分布和月际变化也反映出山东水汽净支出的特征。

（2）山东西边界为主要的水汽输入边界，东边界和北边界为主要的水汽输出边界；全省年均水汽输入量为 16 594.41 mm，水汽输出量为 17 035.32 mm，水汽净支出 440.91 mm。输入水汽的降水转化率很低，不足 5%。由大气水平衡关系计算的年蒸发量超过 1 000 mm，蒸发量高于降水量。

（3）山东空中水汽资源的年收支状况决定了山东干旱气候特征的客观必然性。山东属资源性缺水，干旱和水资源紧缺的问题将长期存在。积极开发利用空中水汽资源是开源增量，抗御干旱灾害，缓解水资源供需矛盾，改善生态环境的有效手段。

参 考 文 献

1　Филиппова, М. Г., А. В. Харитонов, 廉毅，中国和东亚大气中的水汽含量和输送（根据夏季季风试验资料），气象科技，1997, **3**, 61～63.

2　黄荣辉、张振洲、黄刚等，夏季东亚季风区水汽输送特征及其与东亚季风区水汽输送的差别，大气科学，1998, **4**, 460～469.

3　崔玉琴，中国大陆上空水汽资源，水文，1997, No.1, 12～18.

4　伊兰、陶诗言，东亚季风区地气系统的水平衡，气候与环境研究，1996, **1**(1), 63～80.

5　赵国红，从胶东大旱看南水北调的必要性，山东水利，2001, **3**(5), 12.

6　刘国纬，水文循环的大气过程，北京：科学出版社，1997.

7　龚佃利、边道相，"8.11"特大暴雨过程水汽条件分析，山东气象，1999, **19**(2), 25～27.

8　山东省地方史志编撰委员会，山东省志（气象志），济南：山东人民出版社，1993.

An Elementary Analysis of Water Vapour Resources over Shandong Province

Gong Dianli and Bian Daoxiang
(*Shandong Research Institute of Meteorological Science, Jinan* 250031)

Abstract Using daily sounding data and water resources data from 1997~1999, the spatial–temporal characteristics and the water balance relations of land–atmosphere system are analyzed. The results show that the water vapour resources over Shandong Province are affected by weather system and season evidently. The annual average water vapour content is 20.75 mm. The annual average net vapour import amounts is −440.91 mm, and 850 hPa is the mainly net vapour export layer. The net vapour import rate has strong area distribution characteristics. The annual vapour transpot amount is very great, but less 5% of them can be translated into precipitation, and about 27.31% of the rainfall can be translated into water resources, the water vapour resources over Shandong Province have great potentialities to be exploited. The objective inevitability of drought climate characteristic in Shandong Province are anaylzed in the view of atmosphere vapour bablance, the countermeasures of adding water resources are given.

Key words: water vapour; water resource; drought climate; artifical precipitation