

# 高山增水效应及其水资源意义

丁 贤 荣

( 河海大学 水文水资源及环境学院, 江苏 南京 210098)

**摘 要:** 根据高山上云、雾、雨、雪、径流等水资源丰富现象, 分析了高山冰川、植被、地形等与汽- 水作用关系, 提出高山增水效应概念和高山区水资源开发与保护的新思路。高大山体及其造成的垂向对流、高山冰川和高山植被共同作用形成了高山增水效应, 并形成良性增水系统。山体愈高大, 增水效应愈明显。对内陆干旱地区开发利用更多的高山水资源具有意义。

**关键词:** 高山; 增水效应; 水资源开发与保护; 冰川; 植被

**中图分类号:** X143                      **文献标识码:** A

我国西部天山、祁连山, 深居欧亚大陆腹地, 山麓周围戈壁、沙漠环抱, 年降水量盆地不足 50 mm, 天山上年降水可高达 800~ 1 000 mm, 相当于我国东部江淮地区的年均降水量<sup>[1]</sup>, 山上山下形成强烈的气候反差。天山顶发育永久性冰川, 山间有植被、甚至原始森林覆盖, 不仅构成独特的天山绿洲, 而且孕育了塔里木河、伊犁河等内陆主要河流, 构成了欧亚腹地最大的“水岛”和水源地。由此可见, 陆地水资源空间分布除了受海陆分布的影响外, 地形高低也是重要控制因素, 也说明高山具有增水效应。我国是多山的国家, 海拔 2 000 m 以上的国土占 33%<sup>[1]</sup>。本文从水资源角度探索高山的增水效应, 旨在揭示高山的水资源地理模式, 其现实意义在于探索解决内陆干旱地区严重缺水的途径。

## 1 高山降水现象

### 1.1 高山降雨量及其递增率

根据天山、帕米尔、祁连山等 14 座山的山顶、山麓气象站资料, 山地与降水的关系<sup>[2]</sup>(表 1)。显示在一定高程范围内, 随着山体增高, 降水量不断增加, 14 个站平均年降水梯度 28. 12 mm/ 100m。北方 19. 22 mm/ 100m, 南方 37. 01 mm/ 100m; 东北地区 20

mm/ 100m, 西部地区 20 mm/ 100m; 高山(海拔 3 000 m 以上)自然降水量一般是山前地带的 2~ 3 倍, 局部甚至高达近 10 倍。天山最大降水带年降水高达 800 ~ 1 000 mm, 塔里木沙漠盆地年降水量仅 10~ 20 mm, 二者相差 50 倍。西部内陆干旱地区, 高山降水梯度局部高达 80 mm/ 100 m<sup>[3, 4]</sup>。

### 1.2 高山云、雾、淞、雪时间长

主要山地云、雾、淞、雪情况见表 1<sup>[2]</sup>。

山顶站年均总云量 6. 62 成, 低云量 4. 3 成, 山麓站年均总云量 6. 32 成, 低云量 3. 14 成, 高下分别相差 0. 3 成和 1. 16 成, 夏季差异分别达 0. 71 成和 1. 80 成。平均每上升 100 m, 总云量增加 0. 05 成, 低云量增加 0. 12 成。低云量比总云量多 0. 86 成。从地理上, 北方总云量高下差异 0. 6 成, 南方 0. 19 成, 北方大于南方 0. 41 成。

用低云量作为高标准阴天的划分依据, 山顶年均阴天日数 76. 21, 山麓 41. 1 d, 多 35. 11 d。平均每上升 100 m 增加阴天 2. 27 d。

山顶站年均雾日数 206. 9 d, 山麓站仅 29. 4 d, 多 177. 5 d。平均每上升 100 m 雾日数增加 11. 94 d。

淞有雾淞、雨淞多种。山顶站年均雨淞日数 34. 6 d, 山麓站 0. 63 d。平均每上升 100 m 雨淞增加 2. 37 d。五台海拔 2 895. 8 m, 年均雾淞 108. 8 d。

收稿日期( Received date): 2002- 10- 05; 改回日期( Accepted): 2003- 10- 30。  
作者简介( Biography): 丁贤荣( 1955- ) 男 江苏句容人 副教授 主要从事水利地理及信息技术教研[ Ding Xian-rong: Associate Professor, Male, Born 1955, Ju Rong City, Jiangsu Province, Studying Water Resources Geography and Geographical information system(GIS) . ]  
© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1 部分山地气候分析<sup>[2]</sup>

Table 1 Climate analysis on mountains

山地 mountain	站名 station	海拔(m) Altitude	年降水 rainfall (mm/a)	年降雪 snowfall (天/a)	年低云量 cloudage (成)	年阴日 cloudy day (天/a)	年雾日 fog day (天/a)	年雾凇 rime day (天/a)	年雨凇 dew day (天/a)
天山	云雾站	3 539	436.9	123.0	2.7	22.9	63.1	10.8	0.3
	小渠子	2 161	572.7	55.6	2.0	19.6	29.1	10.8	2.3
	蔡家湖	441	128.2	31.5	0.8	1.0	36.4	68.4	0.3
乌鞘岭	乌鞘岭	3 045			2.0	104.9	57.9	36.4	3.4
	景泰	1 631			0.5	78.4	0.6	0.1	0
五台山	五台山	2 895.8	913.3	79.4	3.1	94.2	191.9	105.2	5.0
	原平	836.7	453.7	10.6	1.2	76.2	6.0	2	0.1
峨眉山	峨眉山	3 047.4	1 922.8	83.0	6.7	232.8	322.1	139.4	141.3
	乐山	422.1	1 367.6	1.6	4.7	256.8	41.1	0	0
长白山	天池	2 623.5	1 332.6	144.5	4.2	111.0	264.8	165.0	18.5
	长白	1 016.7	695.3	70.0	3.3	92.5	98.5	20.1	0
衡山	南岳	1 265.9	2 074.4	17.6	5.4	210.6	251.5	63.5	58.5
	衡阳	103.2	1 337.4	7.5	3.9	199.3	17.8	0.4	4.1

年降雪: 山顶站 42.6 d, 山麓站 11.6 d, 每上升 100 m 增加降雪 2.09 d。山顶站平均有雪期 183.7 d, 山麓站 86.5 d, 高山多出 97.2 d, 每上升 100 m 增加有雪期 6.54 d。年积雪: 山顶站 69.0 d, 山麓站 19.7 d, 每上升 100 m 增加积雪期 3.32 d, 北方高山则达到 6.91 d。

总之, 高山上比山麓降水多, 云雾凇雪等天气现象持续时间长。山上比山下水资源丰富。相对于周围的山麓平原、盆地, 高山具有明显的增水效应。这种增水效应是指因存在高山而造成的局部区域水资源增加, 否则不可能有更多的水资源。

此外, 高山实际降水量大于实测降水量。从高山冰川积雪推测和高山径流推算的降水量大于实测降水量<sup>[2,5]</sup>, 原因是高山存在水平降水。一般山高风大, 雨雪并非全是垂直降落, 许多情况时风雨横扫, 即所谓水平降水。常规气象观测目前不能有效监测水平降水。高山雾、凇也是水平降水的重要形式。非洲云雾包裹的高山有雾降水年总量 5 664 mm, 实际(垂直)年降水量 1 904 mm<sup>[2]</sup>。高山实际降水大于实测降水, 意味着高山实际增水效应高于实测资料揭示的高山增水效应。

2 高山增水机理

高山水资源丰富已为人们熟知, 但探讨高山增

水机理目前鲜为少见。高山增水可能是非常复杂的系统和作用过程, 涉及到高山水汽输送、水汽-高山-水之间的相互作用与转换过程, 我们尚未完全认识与理解。

2.1 高山水汽输送充足

根据我国水汽输送高度统计, 700 hPa 以下大气层水汽净输入量占整层的 90%, 且以 700~850 hPa 大气层更为集中(表 2)<sup>[3]</sup>, 700~850 hPa 大气层的海拔高度为 1 500~3 000 m。1 500~3 000 m 海拔是我国常见山地的高度, 31.3% 的国土高度为 1 000~3 000 m<sup>[1]</sup>。

表 2 水汽输送高度

Table 2 Atmosphere vapor transportation with Altitude

气压层(hPa) Air pressure	海拔(m) altitude	水汽输入% input	水汽输出% out put	水汽净输入% net input
500	5 500			
700	3 000	30.0	32.9	11.2
850	1 500	34.1	32.1	47.7
1 000	0(海面)	22.1	19.1	42.4

高山降水带的高度与水汽输送高度相互应证(表 3)。高山上一般存在这样一个降水带, 其降水量比其上下更低或更高的地方的降水量大得多, 故称最大降水带, 其带高度称之最大降水高度。最大

降水带一般出现在海拔 2 000~ 3 000 m 的山腰。部分高大山脉最大降水带以上还出现另一个大降水带, 由山下往山上, 分别称第一最大降水带和第二大降水带(表 3)。第一最大降水带一般以降雨为主, 第

二大降水带以降雪为主<sup>[2,6]</sup>。最大降水的高度随各山脉的地理位置、气象条件而变化, 降水量因地而异。高山降水带水量比山前平原一般多 1~ 3 倍, 局部更高。

表 3 部分高山降水带  
Table 3 Most rainfall belt on mountains<sup>[2,6]</sup>

山区 mountain	第一降水带 1 <sup>st</sup> rainfall belt		水量( mm) rainfall	第二降水带 2 <sup>nd</sup> rainfall belt		水量( mm) rainfall
	position	Altitude(m)		position	Altitude(m)	
天山	北坡	2 200	540	托木尔峰	5 250	1 000
	北坡	2 300~ 2 400	450~ 500			
昆仑山	北坡	3 200	300	北坡	4 700	600~ 800
喜马拉雅山	甘托克	1764	3 452	(尼) 孔布冰川	5 500	450( 2 100)
				南坡西斗冰川	6 160	1 500~ 1 700

2 2 高山山体增水作用

首先, 高大山体强迫山前迎风气流抬升, 抬升气流层厚度可达 5 km<sup>[2]</sup>。若一系列高山(山脉) 呈喇叭形迎风展开, 还迫使气流先水平方向辐合, 然后又垂向抬升。迎风坡引发垂向上升对流, 导致底层暖湿气流与高空冷空气强烈混合。因对流层气温随高度增加而下降, 递减率一般 0. 65 ℃/ 100 m, 山下暖湿气流逆坡上升而降温, 导致水汽饱和, 产生降雨、降雪, 这是常见的地形降雨现象。其次, 白天阳坡山地温度高于同高层气温, 山体热力作用形成上坡风、谷风, 也造成地形性云雨。珠穆郎玛峰地区上升气流速度可达 100~ 200 m/ min, 造成了许多积云, 12~ 18 时积云出现的次数是日出前的 9 倍, 积云上升至凝结高度, 导致高山带降水<sup>[5]</sup>。还有, 高山、尤其是山脉, 阻碍降雨天气系统和锋面运动, 使其减速缓行, 甚至停止移动, 形成局部地区持续性降雨。最后, 冬季或夜间山顶温度低于气温, 当山顶地面温度低于气流得露点时, 水汽在山上地面及植物体上形成凝结或凝华, 高山云雾形成雾滴, 山体作为气流的冷凝器和雾栅而造成降水<sup>[2]</sup>。因此, 静态山体作用于运动气流, 山体的温度变化又影响气流的热力交换, 共同形成高山的山体增水作用。

2 3 高山植被增水作用

非饱和水汽经过高山上冰冷植被枝叶, 很快在叶面上饱和积冰、积水, 形成雾凇、雨凇。有报道, 若把树上的雾凇扫下, 厚度可达 40~ 50 mm, 甚至 100 mm。五台山有记录雾架上累计最大结冰直径达 597

mm<sup>[2]</sup>。山地植被对水汽的吸附与阻留作用、植物蒸腾对非饱和水汽的催化作用, 使其具有显著的增雨效应。西双版纳森林可增加年降水 80 mm, 非洲森林有 1 000 mm 的报道<sup>[6]</sup>; 日本报道, 1 m 宽的林带每小时可从雾中捕获 5 升水<sup>[2]</sup>, 日本森林涵养水资源的能力达 23 × 10<sup>10</sup> m<sup>3</sup>/ a<sup>[6]</sup>。

植被发育, 尤其是森林植被, 既是雨量充沛的结果, 又是降水加速器。内陆高山地区植被垂直分带性体现了植被与降水相互作用关系, 从山下荒漠平原沿坡上山, 依次出现: 干旱草地、草甸、森林草地、高山森林、高山草甸、地衣等景观带<sup>[1]</sup>, 以高山森林带空气最湿润、降水量最丰富。干旱地区山地林带高度与第一大降水带高度基本一致<sup>[2]</sup>。

2. 4 高山冰川增水作用

冰川冰的温度常年保持在 0℃以下, 冰川冰的温度随山高增加而降低, 冰层内部温度低于表层, 内部低温可达- 18℃<sup>[5]</sup>。永久性高山冰川成为高空中位置相对固定的持续性寒冷中心, 暖湿气飘移经过冰川, 如同遇上空调冷凝器, 被冰川捕获、降温, 形成雨雪降水。《祁连山现代冰川考察报告》有一段情景描述:“夏季, 每座高峰都是一个湿岛, 野马山(大雪山) 自成一天气单位, 山周围都有云, 山上空的云层常常是最密和最厚, 山上空的积云停住不动, 其他的云层一片片移动……, 8 月 4 日老虎沟冰川上, 白天雨雪竟达 16 次之多”<sup>[5]</sup>。

许多冰川降水观测与物质平衡计算说明高山冰川具有显著的增水作用<sup>[5]</sup>。冰川区径流也体现了冰

川增水效应。我国西部盆地地表径流深不足 10 mm,高山冰川区可达 500~1 000 mm。径流模数:高山冰川区  $9.612 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ,黄河流域  $8.317 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$ <sup>[5]</sup>,冰川区是黄河流域的 11.56 倍。中国冰川总面积 58 615.08 km<sup>2</sup>,冰川融水径流量  $563.42 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,而黄河流域面积 794 712 km<sup>2</sup>,年径流量仅  $661 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[3]</sup>。高山冰川区雪线高度 4 000~6 000 m<sup>[5]</sup>,黄河流域主体高度只有 1 000~2 000 m<sup>[7]</sup>。

总之,随着山体增高到 3 000 m 以上,除了山体本身的增水作用外,山地冰川又产生了特殊的冰川增水。高山上大面积高山冰川,如同冰箱、空调的冷凝器,促使水汽冷却并使之转化为高山雨、雪,往往形成 1~2 个高山大降水带。

综上所述,高山的增水作用主要体现在高山水汽输送充足,且水汽接近饱和状态,高山山体引发地形云雨,高山冰川的低温冷凝形成高山雨雪,高山植被导致雾凇、雨凇等,它们共同形成高山增水效应,促使水汽不断向高山聚集、滞留,高山低温促使丰沛的水汽高效地转化为高山雨雪。高山是一个良性增水系统。山体愈高大,接触与阻流浮云的机会愈多,垂向对流愈强;山上温度愈低,水汽饱和愈快,雨雪愈多;永久积雪愈多,冰川愈发育,冰川及其低温场愈强大,形成更多雨雪;降水愈丰富,空气土壤愈湿润,高山植被生长发育愈充分;森林植被愈茂密,面积愈大,捕获云雾能力愈强,高山更加湿润多雨,水土流失减少,水分涵养愈充分。总之,山体愈高大,高山增水系统发育愈充分,系统循环更加良性化,增水效应愈显著。高山特有的增水效应,是山麓平原乃至低山丘陵所不具备的。

### 3 探讨高山增水的水资源意义

探讨高山增水效应的理论意义在于揭示水资源的地理模式,尤其是揭示内陆地区水资源空间分布差异的实质。过去我们习惯将西部内陆干旱少雨简单地理解为深居内陆,远离海洋的缘故。如果水资源的海陆距离决定论是完全正确的话,内陆干旱地区缺水难题意味着无解,因为海陆距离人类永远不可改变。如能全面正确地认识高山增水效应,对开发、利用和保护高山水资源具有积极意义,对解决内陆干旱地区缺水难题将有新思路和新方向。当然,本文讨论的高山增水效应还是概念性模式,高山增水是否还有其他因素?山体、冰川、植被等各种增水

的功效有多大?增水的条件如何?相互作用关系怎样?许多问题还需深入研究。

探讨高山增水效应的现实意义在于能否为内陆地区开发更多的水资源,从高空大气中获得更多的水资源,而不是消耗高山冰川和开采地下水获得的水资源。能否利用高山的自然增水效应,采用高山人工增水方式,获得更多的过境的云水资源?如能实现高山人工增雨,并达到预期增水效果,意味着开辟了西部缺水天上取的通道。根据高山增水效应,每一座高山都是一个天水转换通道,山愈高大,天水转换通道愈通畅。高山将是内陆水资源最便捷的开发通道,可永续开发的通道。

探讨高山增水效应还具有水资源保护的现实意义。保护山体、保护高山冰川、保护高山植被就是保护高山增水效应,保护高山就是保护高山水资源通道,就是保护水资源。内陆地区干旱水资源保护方向首先是保护高山环境,包括保护高山冰川、保护高山植被,其次是千方百计提高高山冰川储量与规模,提高高山森林蓄积量与植被覆盖面积。优先建设高山防护林,而不是优先进行沙漠植树造林。高山防护林有助于形成良性水资源循环系统,沙漠植树造林是以消耗当地珍贵的水资源为前提,不具有高山林地明显的增水效应。沙漠绿化面积愈大,需要消耗的水资源愈多,反而加速内陆干旱地区水资源恶性循环。

### 4 结语

山愈高大,水资源愈丰富,这是事实,但高山增水机理有待深入认识。高山的增水效应主要由 3 种作用形成:高大山体本身及其引发的空气流垂向对流而产生的山体增水作用,高山冰川及其低温场形成的冰川增水作用和高山植被的增水作用,他们共同形成了高山增水效应。上述 3 种增水作用在高山区形成良性循环系统,高山形成丰富的地形云雨,雨雪丰富,促进高山冰川与高山植被发育,高山冰川与高山植被发育又促进高山云雨更有效地转换为雨雪降水,它们相互支持,相互促进。山体愈高大,高山的增水效应愈显著,高山水资源则愈丰富,反之增水效应差,水资源愈少。

一座座高山如同一个个汽-水转换通道,借此通道可向天取水。内陆干旱地区缺水难题不会因海陆距离不变而无解,可以利用高山天然增水效应进

行高山人工增水, 获得更多水资源, 进行水资源永续开发。高山是上苍赐予内陆干旱地区的水资源珍珠。保护高山, 包括保护山体、保护高山冰川、保护高山植被, 就是保护高山水资源, 保护内陆干旱地区的生命线。

#### 参考文献(Reference):

- [1] Ren Mei-e. An Outline of China's Physical Geography[M]. Beijing: Commerce Press, 1992. 334~ 370. [任美镔. 中国自然地理纲要[M]. 北京: 商务印书馆, 1992. 334~ 370]
- [2] Lin Zhi-guang. Climatology of Terrain Precipitation[M]. Beijing: Science Press, 1995. 1~ 13; 19; 24~ 32; 41~ 49; 96~ 105; 171~ 360[林之光. 地形降水气候学[M]. 北京: 科学出版社, 1995. 1~ 13; 19; 24~ 32; 41~ 49; 96~ 105; 171~ 360]
- [3] The Hydrology Bureau of China Water Resource Ministry. Water Resource Evaluate of China[M]. Beijing: Hydraulic Engineering and Electric Power Press, 1987. 14~ 34; 41~ 65[水利部水文局. 中国水资源评价[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987. 14~ 34; 41~ 65]
- [4] Lu Yü-rong, Gao Guo-dong. Climate Atlas of Water Vapor, China [M]. Beijing: Meteorology Press, 1984. 1; 64~ 138[陆渝蓉、高国栋. 中国水分气候图集[M]. 北京: 气象出版社. 1984• 1; 64~ 138]
- [5] Shi Yafeng, *et al.*. An Outline of China's Glaciers[M]. Beijing: Science Press, 1998. 15~ 28; 105~ 121; 138~ 170; 199~ 204[施雅风等. 中国冰川概论[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 15~ 28; 105~ 121; 138~ 170; 199~ 204]
- [6] He Zhong. Physical Geography[M]. Beijing: Hydraulic Engineering and Electric Power Press, 1991. 184~ 190[何钟. 自然地理学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991. 184~ 190]
- [7] He Zhong, Ding Xian-rong. Water Geography of China[M]. Nanjing: Hohai University Press, 1989. 39~ 44[何钟, 丁贤荣. 中国水利地理[M]. 南京: 河海大学出版社, 1989. 39~ 44]

## Water Increasing Effect of Mountains and Its Value of Water Resources

DING Xian-Rong

(College of Water Resources and Environment, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

**Abstract:** This paper discusses the reason of more water (precipitation, run-off, glacier) in high mountains than in low lands. The idea of water increasing effect and the way of water resources development and protection in mountains are put forward from the phenomena that there is abundant water (cloud, fog, rainfall, snowfall) in high mountains and from the relation analysis that the terrain, glacier and vegetation of mountain act on atmosphere vapor and form good water circulation systems on mountains. The higher the mountain is, the more the water resources will be. The water increasing effects that made of the actions of terrain, glacier and vegetation generation of plentiful water resources on high mountains.

**Key words:** high mountains; water increasing effect; water resources development and protection; glacier; vegetation