

# 青藏高原的水塔功能

鲁春霞<sup>1</sup>, 谢高地<sup>1</sup>, 成升魁<sup>1</sup>, 李双成<sup>2</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 北京大学环境学院, 北京 100871)

**摘 要:** 青藏高原是维持我国乃至东亚地区生态系统的重要水塔。高原平均海拔在 4 000 m 以上, 与周边地区形成了巨大的地势差。高原东南部不仅具有丰富的降水, 而且在 3 500 m 以上以冰川雪被形态储存了巨大的水资源, 因此, 高原具有重要的水塔功能。基于高原潜在输出总水量和不同海拔区域水体所具有的势能两个方面, 建立了高原水塔功能的模型, 从而利用 GIS 方法, 通过对我国 1: 400 万系列图和相关资料的统计分析, 计算出高原不同高度带贮存的大气降水、冰川储水量、湖泊水量以及工农业用水量。计算结果表明, 青藏高原冰川湖泊的淡水储量达  $39\,921 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 其中冰川储水量为  $39\,228 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 可利用湖泊储水量为  $693 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 平均每年由降水获得的水资源量为  $8\,495 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 高原工农业用水量为  $129 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。因此, 高原的输出水量即出境河川径流量为  $6\,870 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。高原储水主要分布在海拔 3 000~ 5 000 m 间, 与高原周围相比, 平均势差在 2 000~ 4 000 m 间, 最大的势差达 5 500 m。水体具有巨大的势能, 在势能的作用下, 自然向周边区域输送汇集, 维持着周边地区的生态过程和社会经济活动, 因此, 青藏高原的水塔功能对于周边地区的生态系统和社会经济系统是极其重要的。

**关键词:** 水塔功能; 水资源储量; 青藏高原

**中图分类号:** G304

**文献标识码:** A

由于山地对水汽的阻挡作用, 容易形成降雨, 产生了所谓山地效应。因此, 降雨随着海拔高度的增加而增大, 一般海拔每上升 100 m, 降雨量增加 5~ 750 mm, 降雨量的多少主要取决于气候带。近年来, 山地和高原的水塔功能已经引起了学者的关注<sup>[1-3]</sup>。山地和高原具有较高的降水量、具有自然储存和保持水的功能, 具有通过人工修建水库保存水的可能性, 能够在高海拔地区以冰雪形态储存降水等特征。在湿润地区, 山地产生的水量有 30%~ 60% 提供给低地, 在干旱和半干旱地区山地通常是能产生径流并补给地下水的唯一区域, 一般可以向周边低地提供 70%~ 585% 的水量<sup>[2]</sup>。所以研究认为, 在淡水资源短缺的当今世界, 没有任何一个地区象山地和高原那样具有更重要的环境价值。山地和高原作为人类的水塔, 其水资源的管理和区域的可

持续发展是 21 世纪应该优先考虑的议题。

青藏高原面积约  $250 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 平均海拔在 4 000 m 以上, 与周围地形反差极大。昆仑山与塔里木盆地的高差在 4 000 m 以上, 而喜马拉雅山与南侧恒河平原高差达 6 000 m。同时, 青藏高原降水丰沛, 冰雪广布, 这就使它成为亚洲主要河流的发源地。外流水系如长江、黄河、恒河、印度河等, 分布在高原的东南和西南部。其中黄河总水量的 49%, 长江水量的 25%, 澜沧江(湄公河)水量的 10% 都来自青藏高原。内陆水系主要分布在高原的北部和西部, 如喀什河、和田河、克里雅河等。丰富的水资源与巨大的势差一起使得高耸的青藏高原就如同世界上一个最大的水塔, 向周边低地区域输送着大量的水资源。所以, 有学者指出<sup>[4]</sup> 青藏高原不仅是中华水塔, 而且是万川之源。

收稿日期(Received date): 2004- 01- 01; 改回日期(Accepted): 2004- 04- 11。

基金项目(Foundation item): 国家重点基金资助(30230090, 2003- 2005)项目典型生态系统服务功能及其价值评价方法研究。[Supported by Key Program of National Natural Sciences Funds for Typical ecosystem service evaluation methods(30230090, 2003- 2005).]

作者简介(Biography): 鲁春霞(1965- ), 女, 陕西宝鸡人, 生态学博士, 副研, 主要从事生态与资源安全领域的研究。[Lu Chunxia, female, born in 1965 in Baoji, Shaanxi Province, PhD, associate research professor. Her research interests include ecosystem services and valuation and natural resources safety. E-mail: luxc@igsnr.ac.cn]

# 1 青藏高原水塔功能的模型构建

青藏高原作为一个庞大的综合自然体, 犹如亚洲中部一座高耸的巨塔, 由于热力和地形的抬升作用, 降水丰沛, 冰雪广布, 蕴涵着较丰富的水资源和水能资源。青藏高原的水塔功能主要表现为两个方面: 第一, 高原有丰富的贮水量。青藏高原水资源量占全国水资源总量的 20.23%, 高原上单位面积的产水量为  $22.55 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$ , 接近全国均值<sup>[5]</sup>。第二, 高层势必然产生质量汇。高原与周边地区之间巨大的高差形成了强大的势差, 这种势能驱动水体向周边地势较低的方向汇集。因此, 青藏高原大大提高了高原面地表水的势能。在重力势能的作用下, 这些水体向周边地区输送。由此高原达成了水利工程建设中水塔所具有的功能。因此, 可以用两个物理过程共同来构建青藏高原的水塔功能模型。

$E = H_i * M_i$ , 其中  $E$  为势能,  $H_i$  为  $i$  处的海拔高度,  $M_i$  为  $i$  处水体的质量

$W_p = W_c - W_h$  ( $W_p$  为地表潜在输出水量,  $W_c$  为河川年径流量,  $W_h$  为工农业用水量)

从上面的模型可知,  $E$  和  $W$  愈大, 高原的水塔功能愈强。海拔高度  $H_i$  愈大, 水体的质量愈高, 水体的势能越大。

# 2 青藏高原水塔功能的分析

## 2.1 青藏高原蕴涵的潜在输出水量及其分布

### 2.1.1 青藏高原地表储水量

为了便于进行空间分析, 本文应用中国 1:400 万降水等值线图和中国 1:400 万 DEM 图, 分析计算青藏高原的大气降水的空间分布特征, 并结合已有的冰川和湖泊分布资料, 对高原地表的储水量、输出水量及其势能分布进行评估。

计算高原储水量的势能时, 取海拔 1 000 m 高程的势能为高原水塔的零势能。

#### 1. 青藏高原的冰川储水量及其势能

我国现代冰川绝大部分分布在青藏高原。青藏高原发育有现代冰川 36 793 条, 冰川面积  $49\,873.44 \text{ km}^2$ , 冰川冰储量  $4\,561.385\,7 \text{ km}^3$ , 分别占我国冰川总数的 79.4%、84.0% 和 81.6%。冰川折合水量为  $39\,227.92 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 冰川融水是青藏高原河流主要的补给来源。高原冰川主要分布在海拔

5 500~ 6 000 m 间, 几乎占总冰川储水量的一半<sup>[6]</sup> (表 1)。

高原每年可提供冰川融水  $504 \times 10^8 \text{ m}^3$  来补给河流径流(表 2)<sup>[6]</sup>。在西北内流区, 冰川融水对河流的补给比重较大, 如在塔里木盆地的策勒河可达年径流量的 60%<sup>[6]</sup>。青藏高原地区的河流, 大多靠冰川融水补给, 长江和黄河就直接孕育于冰川。因此, 青藏高原冰川水资源对我国主要河流的形成与维持、对于区域社会经济发展和生态环境保护具有重要的支撑功能。

表 1 青藏高原冰川储水及其势能随海拔的分布  
Table 1 Glacier distribution with the altitude in Tibetan Plateau

高程 (m)	冰川折合水量 ( $10^8 \text{ m}^3$ )	百分比 (%)	势能 ( $10^4 \text{ J}$ )
3 000~ 4 000	117.69	0.3	231~ 346
4 000~ 4 500	2 981.32	7.6	8 765~ 1 0226
4 500~ 5 000	9 453.93	24.1	32 427~ 37 059
5 000~ 5 500	7 335.62	18.7	28 756~ 32 350
5 500~ 6 000	19 339.37	49.3	85 287~ 94 763
总 计	39 227.92	100	

表 2 青藏高原冰川融水对不同水系的径流补给  
Table 2 River basin recharge by glacial meltwater of Tibetan Plateau

流域	冰川储量		冰川融水径流量	
	( $\text{km}^3$ )	(%)	( $10^8 \text{ m}^3$ )	(%)
西北内流水系	2 551.317 8	55.9	137.60	27.3
黄河上游	12.293 1	0.3	2.86	0.6
长江	147.264 8	3.2	32.71	6.5
澜沧江	17.878 1	0.4	7.16	1.4
怒江	114.974 5	2.5	35.98	7.1
雅鲁藏布江	1 622.176 6	35.6	280.48	55.6
印度河	93.787 6	2.1	7.70	1.5
总计	4 561.385 7	100	504.49	100

## 2. 青藏高原的湖泊储水量

青藏高原湖泊总面积达  $36\,889 \text{ km}^2$ , 湖水储量为  $5\,460 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 占全国的 73%。高原湖泊主要分布在海拔 4 000~ 5 000 m 的区域(表 3), 占高原湖泊总储水量的 75%。高原湖泊中以内陆咸水湖或盐湖为主, 淡水湖为外流湖, 淡水占湖泊水贮量的 12.7%。因此, 高原可利用的湖泊水资源量实际上只有  $693.42 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

表 3 青藏高原湖泊储水随海拔高度的分布

Table 3 Lake distribution with the altitude in Tibetan Plateau

海拔高度 (m)	湖泊贮水量 (10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	占总量的百分率 (%)	势能 (10 <sup>4</sup> J)
3 000~ 4 000	1 365	25	2 675~ 4 031
4 000~ 4 500	709. 8	13	2 087~ 2 435
4 500~ 5 000	3 385	62	11 610~ 13 269
总计	5 460	100	

2. 1. 2 高原大气降水资源

青藏高原年降水量一般在 278~ 1 158 mm 间。根据中国 1: 400 万降雨量等值线图, 应用 GIS 统计了青藏高原的年降水量在不同海拔高度的分布。计算结果表明, 青藏高原平均每年由降水获得的水资源量为  $8\,495 \times 10^8\text{ m}^3$ 。不同海拔的年降雨量分布如表 4 所示。

表 4 青藏高原不同海拔的年降水量分布

Table 3 Precipitation distribution with altitude in Tibetan Plateau

海拔高度 (m)	年降水总量 (10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	百分比 (%)	势能 (10 <sup>4</sup> J)
4 500~ 5 000	3 790	44. 6	12 999~ 14 857
3 500~ 4 000	2 480	29. 2	6 076~ 7 291
2 500~ 3 000	651	7. 66	957~ 1 276
4 000~ 4 500	543	6. 39	1 596~ 1 863
3 000~ 3 500	294	3. 47	576~ 720
5 500~ 6 000	261	3. 07	1 151~ 1 279
5 000~ 5 500	222	2. 62	870~ 979
1 500~ 2 000	120	1. 41	59~ 118
2 000~ 2 500	101	1. 19	99~ 149
1 000~ 1 500	33	0. 39	0~ 16
6 000~ 6 500	1. 86	0. 02	9. 0~ 10
6 500~ 7 000	1. 08	0. 01	5. 8~ 6. 4
总计	8 497. 94	100	

2. 2 高原水塔的输出水量

青藏高原以及高原内的极高山地其地表水主要以冰雪和湖泊形式存在。由于青藏高原的大部分河流主要形成于冰川融水, 湖泊对河川径流也有一定的补给。因此, 从理论上讲, 冰川湖泊储水量大, 高原的河川径流量愈大, 高原水塔的输出水量也愈大。

河川径流量是山地和高原向周围低地输送的出境水量。因此, 高原水塔的输出水量取决于大气降水所产生的地表径流量和冰川融水每年对河川径流的补给量。根据估算<sup>[4]</sup>, 青藏高原河川径流量  $W_r$

(含境外) 约  $7\,000 \times 10^8\text{ m}^3$ 。  
青藏高原现有耕地  $112.86 \times 10^4\text{ hm}^2$ , 有效灌溉面积为  $42.5 \times 10^4\text{ hm}^2$ 。我国西部地区农田每公顷的平均用水量为  $9\,450\text{ m}^3$ ,<sup>[8]</sup> 因此, 高原农田的灌溉用水总量为  $40.2 \times 10^8\text{ m}^3$ 。

1999 年西藏的工业产值为  $7.43 \times 10^8$  元, 青海省为  $100.52 \times 10^8$  元(1990 年不变价), 两省区万元工业产值的用水量分别为  $389\text{ m}^3$  和  $180\text{ m}^3$ <sup>[9-10]</sup>, 则两省区的工业用水总量为  $2.08 \times 10^8\text{ m}^3$ 。由于缺少位于高原上的其他省区部分的工业产值资料, 且青海和西藏的工业产值应该占高原工业产值的主体, 因此, 用两省区的万元产值用水量可以代表高原的工业用水量。

青藏高原总人口为 1 100 万左右, 青海人均综合用水量为  $540\text{ m}^3$ , 西藏为  $1\,040\text{ m}^3$ , 以两省区的人均用水量作为高原的人均用水量, 则人口的总消耗水量为  $86.9 \times 10^8\text{ m}^3$ 。

综上所述, 青藏高原工农业用水量  $W_h$  为  $129.2 \times 10^8\text{ m}^3$ 。青藏高原的输出水量为  $6\,870 \times 10^8\text{ m}^3$ 。

根据径流量的海拔高度分布, 径流量主要产流于海拔 3 000~ 5 000 m 间。因此, 我国的主要河流长江、黄河、雅鲁藏布江、澜沧江等大都发源于这一海拔区域, 这些河流象水塔的输水管道将高原贮水输送到周边区域。尤其是高原的太平洋水系和内陆水系, 其输送的水量对于我国西部地区和华北地区生态系统的维持与人类的生存的具有至关重要的支撑作用。

结 论

山地有较高的降雨量。山地对水汽的阻挡作用, 容易形成降雨, 即所谓的地效应。因此降雨随着海拔的高度增加而增大, 一般海拔每上升 100 m 降雨量增加 5~ 750 mm, 这主要取决于气候带。在海拔 1 500~ 4 000 m 间时, 降雨量达到最大值。在干旱半干旱地区, 只有山区具有充分的降水来产生径流和地下水补给。高海拔的寒温带地区具有较低的蒸散率, 所以, 在山区的水平衡是正的。而在周围低地, 降雨少而蒸散率高, 水平衡通常是负的。这种不平衡通过山地河流的调节而得到缓解。

我国西北的河西走廊, 塔里木盆地、柴达木盆地等内陆干旱区的水系主要依靠来自青藏高原的冰川

融水补给, 因此, 这些地区的工农业生产和生态系统、生态环境均依靠高原来水维持和支撑。高原的水塔功能在干旱的西北内陆表现尤为突出。

青藏高原作为庞大的自然综合体, 对于周边地区的生态系统具有巨大的生命支持功能。从对大气过程的影响来看, 它随季节在热塔与冷塔功能之间转换, 因而影响着东亚地区的气候变化; 从水的角度来看, 它就像一个巨大的水塔, 向周边地区输送大量的水资源。

本研究基于高原潜在输出总水量和不同海拔区域水体所具有的势能两个方面, 建立了高原水塔功能的模型, 从而利用 GIS 方法, 通过对我国 1: 400 万系列图和相关资料的统计分析, 计算了不同高度地带贮存的大气降水、冰川水储量、湖泊水量以及工农业用水量。结果表明, 青藏高原冰川湖泊的淡水储水量为  $39\,921.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。由于冰川主要分布在海拔 4 500~ 6 000 m 间, 因此这些储水具有巨大的势能, 为冰川融水径流向周边地区的输送具备了优越的能量条件。这与冰川主要分布在这一区域一致。如果从高原贮水总量的情形来看, 分布在海拔 4 500~ 6 500 m 间的大量贮水, 在巨大的高差和强大的势能驱动下, 向周遍区域输送汇集。显然, 青藏高原具有强大的水塔功能。

高原水塔的输出水量——高原的河川径流量, 除去高原的工农业用水量之外, 则高原的实际输出总水量达  $6\,870 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。高原产流区主要分布在海拔 3 000~ 5 000 m 间, 与高原周围相比, 平均势差在 2 000~ 4 000 m 间, 最大的势差达 5 500 m。水体具有巨大的势能, 在势能的作用下, 水体自然向周边区域输送汇集, 因此, 使青藏高原具有显著的水塔功能。青藏高原的水塔功能对于维持与保护周边地区的生态系统具有重要的作用。

近年来, 由于全球气候干旱化和人为活动的干扰, 青藏高原的自然生态环境呈现恶化趋势。冰川快速退缩、河流干涸断流、湖泊自然萎缩, 江河源地的地下水位下降, 大面积草场正朝荒漠化演退。沙漠、砾漠、泥漠、盐漠的扩展显著地改变着高原陆地的性质, 使昔日水草丰茂的草场, 渐渐失去涵养水源

的能力。认识青藏高原是人类重要的水塔, 将有助于我们采取有效的措施, 保护高原的生态环境, 确保高原水塔的持续利用。

## 参考文献(References):

- [1] Mountain Agenda. Mountains of the world: water towers for the 21st Century, prepared for the United Nations Commission on sustainable development[R]. Institute of Geography, University of Bern (Centre for Development and Environment and Group for Hydrology) and Swiss Agency for Development and Cooperation. Paul Haupt AG Berne. 1998.
- [2] Bandyopadhyay, J. The Mountains and uplands as water-towers for humanity: need for a new perspective in the context of the 21st century compulsions[R]. International Academy of the Environment. Geneva, Switzerland. 1995. 4.
- [3] Krause, A. 2003. Mountains as water towers: the quantity and quality of water in and from mountain areas. 4~ 18 August 2003. Discussion Summary, Topic 3, who owns It? Integrated water management. North American Mountain Forum.
- [4] Wang Tianjin. Population and Environmental Carrying Capacity of Tibetan Plateau[M]. Beijing, Tibetan press of China, 1998. [王天津. 青藏高原人口与环境承载力[M]. 北京: 中国藏学出版社, 1998.]
- [5] Sheng Dajun, Chen Chuanyou. Water resources of the Qinghai Xizang Plateau and its exploitation. Journal of Natural Resources. 1996, 11(1): 8~ 14. [沈大军, 陈传友, 青藏高原水资源及其开发利用[J]. 自然资源学报, 1996, 11(1): 8~ 14.]
- [6] Liu Zongxiang, Su Zhen, Yao Tandong, et al. Resources and distribution of glacier on the Tibetan Plateau[J]. Resources Sciences, 2000, 22(5): 49~ 52. [刘宗香, 苏珍, 姚檀栋, 等. 青藏高原冰川资源及其分布特征[J]. 资源科学, 2000, 22(5): 49~ 52.]
- [7] Yang Zhenxiang. Glacier and Water resources of China[M]. Lanzhou, Gansu Sciences and Technology Press, p. 115~ 137, 1991. [杨针娘. 中国冰川水资源[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1991, 115~ 137.]
- [8] Sun Honglie, Zheng Du. Formation, Evolution and Development of Tibetan Plateau[M], Guangzhou, Guangdong Sciences and Technology Press, p. 165~ 169, 1998. [孙鸿烈, 郑度. 青藏高原形成演化与发展[M]. 广州: 广东科技出版社, 1998, 165~ 169.]
- [9] Yearbook of Chinese Water Conservancy for 2000[M]. Beijing: Chinese Water Conservancy Press, 2000. [中国水利统计年鉴 2000[M]. 北京: 中国水利出版社, 2000.]
- [10] Bulletin of Chinese Water Resources[M]. Beijing: Chinese Water Conservancy Press, 2000. [中国水资源公报[M]. 2000, 北京: 中国水利出版社, 2000.]

# The Tibetan Plateau as Water Tower

LU Chunxia<sup>1</sup>, XIE Gaodi<sup>1</sup>, CHENG Shengkui<sup>1</sup>, LI Shuangcheng<sup>2</sup>

(1. *Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing, 100101*)

(2. *College of Environmental Sciences, Peking University, Beijing, 100871*)

**Abstract:** Mountains and uplands form a barrier to incoming air masses, forcing the air to rise and cool, triggering precipitation as rain or snow. So the mountains and uplands have been seen as an exclusive water tower for the lowlands or plains. The Tibetan Plateau plays an important role as water tower in China and in East Asia. Tibetan Plateau formed a great dynamical elevation with the average elevation of 4 000 m. There is a plenty of precipitation in southeastern part, at the same time, a vast of glaciers cover the plateau above the altitude of 3 500 m. So the Tibetan Plateau is same as a huge water tower. Based on two aspects of potential water amount reserved in the plateau and potential energy, this paper built a model of water tower function. By using GIS, the rainfall isoline map and DEM were treated and analyzed at scale of 1: 4 000 000. The results showed that the total freshwater amount reaches  $39\,921 \times 10^8 \text{ m}^3$ . Of which glaciers water is about  $39\,227 \times 10^8 \text{ m}^3$  and the available lake water  $693 \times 10^8 \text{ m}^3$  and rainfall  $8\,495 \times 10^8 \text{ m}^3$ , the use amount for industry, agriculture and other use occupied about  $129.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ . Finally the actual water outflow is about  $6\,870 \times 10^8 \text{ m}^3$ . Water ranges from 3 000 m to 5 000 m, and the average dynamical elevation changes from 2 000 m to 4 000 m. Obviously, there exists a huge dynamical elevation so water inflow upstreams of Tibetan Plateau and supply for mid-downstreams. The freshwater from Tibetan Plateau support the ecosystem and eco-social system, it is no doubt that the Tibetan Plateau is important as a water tower.

**Key words:** water tower; water storage and conservation; Tibetan Plateau