

# 五台山区地形雨减少对水资源量的影响

杨汉波, 杨大文, 雷志栋

(清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 海河流域水资源量减少的原因倍受关注, 以五台山地区为例分析地形雨减少对水资源量的影响, 分析五台山站与山下周边的 5 个站点年降水量之比——地形强化因子 ( $R_o$ ) 的减少趋势以揭示地形雨的减少; 并利用水热耦合平衡方程定量评估地形雨减少对该地区水资源量的影响。结果表明, 近 50 年间  $R_o$  减少了 0.53 (27%), 即地形雨大幅度减少; 导致南庄水文站控制的五台山地区天然年径流量减少了 1.9 亿  $m^3/a$ , 占径流总减少量的 70%, 为多年平均年径流量的 26%。中国很多地区的降水观测站网都缺少位于山上的雨量站, 难以估计山区地形雨的减少, 导致根据降水进行径流计算时, 会低估水资源的减少量。

关键词: 地形雨; 水资源; 五台山; 降雨插值; 地形强化因子

中图分类号: TV 125 文献标志码: A 文章编号: 1001-6791(2010)05-0674-07

海河流域是中国经济最发达的地区之一, 同时又是中国水资源严重短缺的地区之一, 近些年面临山区天然径流量显著减少、径流系数急剧减小的严峻形势<sup>[1]</sup>, 对不少控制站的分析表明在同量级降水情况下, 20 世纪 80-90 年代的产流量明显小于 50-60 年代产流量<sup>[2]</sup>。其原因是一个备受关注的问题, 有研究认为人类活动的影响是主要的, 具体表现为人类活动造成的土地利用类型变化、上游截流等<sup>[3]</sup>。这些研究侧重在降水消耗增加对水资源的影响上, 缺少山区地形雨减少对水资源量影响的研究。地形对降水产生的影响可以采用增幅系数法进行描述, 增幅系数定义为实测降水量(有地形影响)和降水系统本身的降水量(无地形影响)的比值<sup>[4]</sup>。本文采用降水的地形强化因子  $R_o$  来定量描述,  $R_o$  定义为山上降水量与山下降水量的比值。面平均降水量的变化可分为两部分: 一是山区大尺度降水量的总体变化, 二是局部地形雨的变化(即  $R_o$  变化对应的量)。

近年来, 大量颗粒物被排放到大气中导致气溶胶浓度增加, 从而抑制降水的形成, 尤其是地形雨的形成。这种抑制效应在许多地区被发现<sup>[5-8]</sup>, 包括五台山区<sup>[9]</sup>。有学者探讨定量评价地形雨减少对水资源量的影响, Givati 和 Rosenfeld 利用降雨~径流关系计算得到地形雨减少导致约旦河可利用水量减少约 1.1 亿  $m^3/a$ <sup>[5]</sup>; 不过值得注意的是, 降水~径流法中没有考虑蒸发能力对径流的影响。本研究选择位于海河流域西部的五台山区(滹沱河流域)作为研究区域, 分析地形雨的变化趋势, 并以水热耦合平衡方程为工具, 综合考虑降水及潜在蒸发(蒸发能力)对径流的影响, 探讨地形雨减少对山区水资源量的影响。

## 1 数据及方法

### 1.1 研究区域及数据

为了分析地形对降水的影响, 本研究中以五台山站(海拔 2 896 m)为研究站, 山下周边的 5 个站点作为对比站点, 站点相关信息见表 1。进行气象要素空间插值时, 还采用了邻近的 16 个站点的数据(图 1)。所用的数据包括 1961~2005 年逐日降水量、平均风速、平均气温、平均相对湿度等。

以位于五台山区滹沱河上游的南口水文站作为水文控制断面, 采用的水文数据为全国最近一次水资源

收稿日期: 2009-08-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50909051); 公益性行业科研专项经费资助项目(200801012)

作者简介: 杨汉波(1979-), 男, 四川营山人, 博士, 讲师, 主要从事水文水资源方面研究。

E-mail: yhb99@mails.tsinghua.edu.cn

评价的天然径流量, 时间范围为 1961~2000 年。根据美国联邦地质调查局 (USGS) 的数字高程模型 (DEM) 由 ArcGIS 生成流域, 确定南口水文站控制的流域范围 (图 1), 面积为 1.19 万 km<sup>2</sup>, 与山西水文信息网上提供的南庄水文站控制面积一致 (<http://www.sxsw.org.cn/jigou/nanzhuang.asp>), 文中将该地区称为滹沱河上游地区, 多年平均径流量 7.2 亿 m<sup>3</sup>。

表 1 五台山站及对比站点的相关信息

Table 1 Information of Wutaishan station and its contrastive stations

站点名	经度 /°E	纬度 /°N	海拔 /m	离五台山站的距离 /km
五台山	113.53	39.03	2896	0
原平	112.72	38.73	828	78
阳泉	113.55	37.85	742	180
蔚县	114.57	39.83	910	125
大同	113.33	40.10	1067	120
石家庄	114.42	38.03	81	135

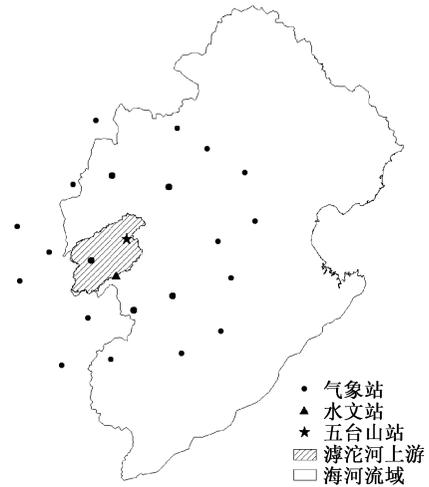


图 1 研究区域及站点分布

Fig. 1 Location of the study region

### 1.2 数据处理及研究方法

计算流域的面平均潜在蒸发量时, 先将气象站的气象要素进行空间插值, 得到整个区域 10 km 分辨率的空间分布信息, 然后计算出每个网格的潜在蒸发量, 再统计得到研究区域的面平均值。气温空间插值采用高程修正的距离反比法, 其它气象要素的插值采用距离反比法。每个网格上的潜在蒸发计算采用 Penman 公式<sup>[10]</sup>。

$$E_0 = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) / \lambda + 6.43 \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} (1 + 0.536U_2) (p_s - p_f) / \lambda \quad (1)$$

式中  $\Delta$  为饱和水汽压~温度曲线的斜率;  $\gamma$  为湿度计常数;  $\lambda$  为汽化潜热, MJ/kg;  $p_s$  为饱和水汽压, kPa;  $p_f$  为实际水汽压, kPa;  $U_2$  为离地面高度为 2m 处的风速, m/s;  $G$  为土壤热通量, MJ/(m<sup>2</sup>·d), 当计算尺度为天或更大时间尺度时  $G$  的取值为 0;  $R_n$  为净辐射通量, MJ/(m<sup>2</sup>·d)。

本研究中以五台山周边 5 个站点降水的平均值作为大尺度地理因素作用下的降水状况。降水的地形强化因子  $R_0$  为五台山站降水量与这 5 个站点降水平均值的比值, 回归分析得到的  $R_0$  的变化趋势。假定  $R_0$  不变, 由 5 个站点的平均降水量计算得到五台山站的降水量, 然后进行插值得到地形雨不变情况下的面雨量。

## 2 降水量径流量的变化趋势

### 2.1 站点年降水量的变化趋势

首先, 利用统计软件 SPSS 分析山下站点年降水量的变化趋势, 及其与五台山站年降水量变化的线性相关性 (见表 2)。结果表明, 这 5 个站点的年降水量呈减小趋势不过除阳泉站外, 其它站的显著性水平并不高; 这 5 个站点年降水量与五台山站年降水量有很好的相关性 (显著性水平  $p \leq 0.001$ ), 这表明周边 5 个站点的年降雨与五台山具有较强的一致性, 影响降水的大尺度地理因素相同。

对比分析位于山顶的五台山站的年降水量与山下 5 个气象站年降水量的平均值 (图 2), 及两者比值  $R_0$  的变化趋势 (图 3)。

表 2 周边站点年降水量的变化趋势及其与五台山站的相关性

Table 2 Trends in annual gauge precipitation near by Wutaishan station and their correlations with that gauged by Wutaishan station

站点名	变化趋势 / (mm·a <sup>-1</sup> )	变化趋势的显著性水平	相关系数	相关性的显著性水平
原平	-1.49	0.30	0.69	< 0.001
阳泉	-3.11	0.06	0.60	< 0.001
蔚县	-0.47	0.65	0.60	< 0.001
大同	-0.51	0.60	0.57	< 0.001
石家庄	-1.65	0.41	0.48	0.001

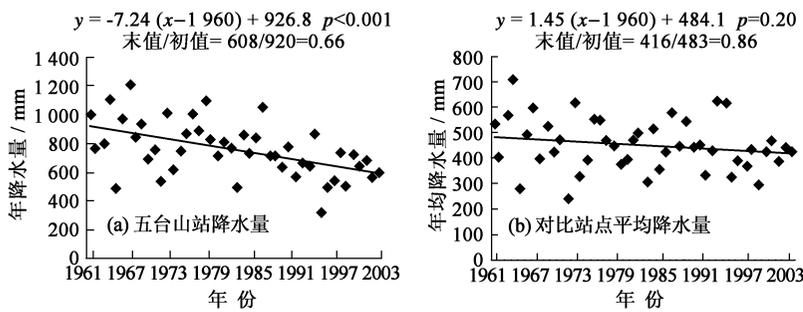


图 2 五台山区站点年降水量的变化趋势

Fig. 2 Trend in annual gauge precipitation over the Wutai Mountains

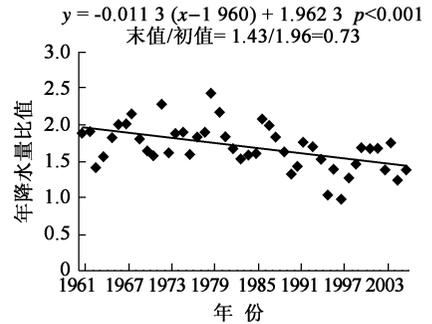


图 3 五台山区年降水量的比值  $R_0$  的变化趋势

Fig. 3 Trend in the annual precipitation ratio  $R_0$  in the Wutai Mountains

从变化趋势来看,山下 5 个站点的平均年降水量的变化趋势并不很明显,与线性回归得到的 1961 年年降水量 483mm 相比(以下的变化量分析均以线性回归得到的量为基准),减少了 14% (67 mm);而五台山站的年降水量显著减少 ( $p < 0.001$ ),45 年间减少了 34% (312 mm)。图 3 表明,在 45 年间,  $R_0$  显著减小 ( $p < 0.001$ ),幅度为 27%,反映了地形雨显著减少。

2.2 研究区域面平均降水量的变化趋势

空间插值得到滹沱河上游(即南庄水文站控制流域)1961~2000 年的面平均降水量变化趋势(图 4)。可以发现,面平均降水量呈减少趋势 ( $p = 0.09$ ),减少率为  $-2.67 \text{ mm/a}$ ,小于五台山站的  $-7.24 \text{ mm/a}$  大于对比站点的  $-1.45 \text{ mm/a}$ 。从变化量来看,1961~2000 年间,减少了 104 mm,占总量的 18%。

图 4 的计算结果为面平均降水量实际发生的变化,包括地形雨减少的影响。由图 2 中的回归关系计算得到,2000 年山下站点平均年降水量为 426 mm。由图 4 得到的面雨量称之为方案一 ( $R_0$  变小);假定地形雨不变(即  $R_0$  保持 1961 的水平 1.96 不变),可以得到 2000 年五台山站的降水量为  $1.96 \times 426 = 835 \text{ mm}$ ,进一步插值得到面雨量,称之为方案 2(见表 3)。如表 3 所示,  $R_0$  减小对五台山站年降水量变化趋势的影响是  $835 - 637 = 198 \text{ mm}$ ,占总变化量的比例为  $(835 - 637) / (920 - 637) = 70\%$ 。滹沱河上游的面雨量由 1961 年的 572 mm 减少到 2000 年的 468 mm,地形雨的贡献为  $(526 - 468) / (572 - 468) = 56\%$ 。

表 3 滹沱河上游地区 2000 年面平均降水量的计算  
Table 3 Estimation of areal precipitation in the upstream of the Futuo River in 2000

方案	$R_0$	五台山 降水量 /mm	面平均 降水量 /mm	面平均降水量的 变化量 /mm
1	1.51	637	468	-104
2	1.96	835	526	-58

注:方案一的  $R_0$  由图 3 中回归方程计算得到。

注:方案一的  $R_0$  由图 3 中回归方程计算得到。滹沱河上游的面雨量由 1961 年的 572 mm 减少到 2000 年的 468 mm,地形雨的贡献为  $(526 - 468) / (572 - 468) = 56\%$ 。

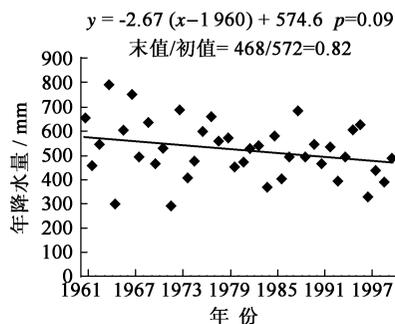


图 4 滹沱河上游面平均降水量的变化趋势

Fig. 4 Trend of areal precipitation in the upstream of the Futuo River

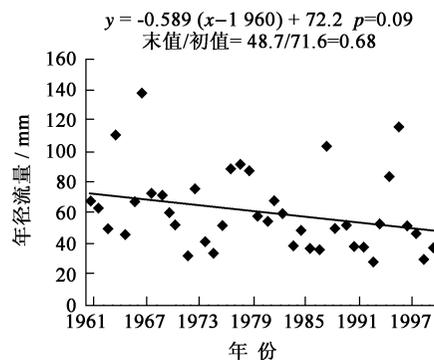


图 5 滹沱河上游年径流量的变化趋势

Fig. 5 Trend of annual runoff in the upstream of the Futuo River

### 2.3 年径流变化趋势

图 5 给出了南庄水文站(滹沱河上游)的逐年径流量, 在 1961~2000 的 40 年间, 年径流量减少(显著性水平  $p=0.09$ ), 从 72 mm 减少到 49 mm, 减少率为 32%。

## 3 地形雨减少对水资源量的影响

### 3.1 水热耦合平衡方程

本文采用水热耦合平衡方程<sup>[11-12]</sup>综合考虑潜在蒸发量及降水量变化的作用, 定量评价地形雨减少对水资源的影响。水热耦合平衡方程是描述流域实际蒸发量与可利用水量和能量关系的数学函数关系, 作为有效的理论工具, 被广泛应用于实际蒸发的计算<sup>[13-14]</sup>。本研究中采用的水热耦合平衡方程具体表达式为

$$E = PE_0 / (P^n + E_0^n)^{1/n} \quad (2)$$

式中 参数  $n$  反映了流域下垫面特性<sup>[14]</sup>。将方程改写为微分形式, 得到蒸发对潜在蒸发和降水变化的响应。

$$dE = (\partial E / \partial E_0) dE_0 + (\partial E / \partial P) dP \quad (3)$$

忽略流域的蓄变量, 可以将年径流的变化量表示为

$$dR = dP - dE = (1 - \partial E / \partial P) dP - \partial E / \partial E_0 dE_0 \quad (4)$$

式中  $-\partial E / \partial E_0 dE_0$  表示潜在蒸发量变化对径流量的影响,  $(1 - \partial E / \partial P) dP$  表示降水量变化对径流量的影响, 其中的偏导数可以由多年平均降雨量和潜在蒸发量计算得到。

### 3.2 水热耦合平衡方程的验证

在年尺度上, 忽略流域的蓄变量, 由流域的水量平衡可以得到

$$E = P - R \quad (5)$$

由此计算得到滹沱河上游地区的逐年实际蒸发量  $E$ , 将其作为实际蒸发的“观测值”。利用 20 世纪 60 年代的观测数据, 拟合得到式(2)中的参数  $n=1.6$ 。利用 1971~2000 年的数据进行方程验证, 模拟值与“观测值”的结果比较见图 6。

如图 6 所示, 观测值和模拟值的决定系数  $R^2 = 0.97$ , 平均绝对偏差  $M_{AE} = 7.4 \text{ mm}$ 。这表明水热耦合平衡方程能很好地模拟该流域年实际蒸发量(或径流量)。

### 3.3 地形雨减少对径流量的影响

滹沱河上游地区多年平均年降雨量为 520 mm, 多年平均年潜在蒸发量为 1311 mm(由式(1)计算得到)。对式(2)求偏导得到  $\partial E / \partial E_0 = 0.0647$ ,  $\partial E / \partial P = 0.7165$ 。

在 2.2 部分中计算得到的 2000 年滹沱河上游地区面平均年降水量  $P = 468 \text{ mm}$ , 维持  $R_0$  不变计算得到的面平均年降水量  $P_1 = 526 \text{ mm}$ 。从 1961 到 2000 年, 年潜在蒸发变化量  $dE_0 = -97 \text{ mm}$ , 其趋势与整个海河流域一致的<sup>[15]</sup>; 面平均降水量变化量  $dP = -104 \text{ mm}$ , 其中地形雨减少产生的影响为  $dP_1 = -58 \text{ mm}$ , 见表 4。

表 4 2000 年滹沱河上游地区地形雨减少对径流量的影响  
Table 4 Effect of decreasing orographic rain fall on runoff in the upstream of the Futuo River in 2000

方案	面雨量减少量 /mm	对径流的影响量 /mm	对径流的影响量 /亿 m <sup>3</sup>
1	-104	-29	-3.4
2	-58	-16	-1.9

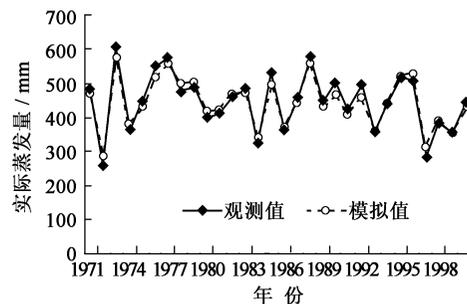


图 6 水热耦合平衡方程的验证

Fig. 6 Validation of the coupled water energy balance equation

潜在蒸发变化对径流的影响为

$$(-\partial E / \partial E_0) dE_0 = -0.0647 \times (-97 \text{ mm}) = 6 \text{ mm}$$

降水量变化对径流的影响为

$$(1 - \partial E / \partial P) dP = (1 - 0.7165) \times (-104 \text{ mm}) = -29 \text{ mm}$$

其中, 地形雨减少产生的影响占 56% (-16 mm), 合 -1.9 亿 m<sup>3</sup>, 为多年平均径流量的 26%。dR = (1-

$\partial E / \partial P) dP - \partial E / \partial E_0 dE_0 = -23 \text{ mm}$ , 与观测到的天然径流量的变化量  $-24 \text{ mm}$  (见图 5) 一致。地形雨减少的影响占天然径流量总的变化量的比例为  $(-16) / (-23) = 70\%$ 。

## 4 分析及讨论

近 50 年, 五台山区年降水量呈减少的趋势, 其中地形雨减少尤为明显, 位于山顶的五台山站年降水量与山下周边 5 个站点平均年降水量的比值  $R_0$  减少了  $1/3$ 。导致这种变化的原因可能是气溶胶浓度增加对降水的抑制<sup>[9]</sup>。类似的影响在其它地区也有, Rosenfeld 等发现华山地区近 40 年  $R_0$  减小了  $10\% \sim 25\%$ <sup>[7]</sup>, Yang 等发现东北、华北及东南沿海山区的 3 个山区近 30 年  $R_0$  减少了  $20\% \sim 40\%$ <sup>[8]</sup>, 秦岭地区近 30 年  $R_0$  减少了  $11\% \sim 20\%$ <sup>[16]</sup>。

在 1961~2000 年的 40 年间, 滹沱河上游地区 (以南庄水文站为控制断面) 的天然年径流量减少了  $1/3$ , 约为  $2.8 \text{ 亿 m}^3$ 。其中, 地形雨的减少导致天然年径流量减少了  $1.9 \text{ 亿 m}^3$ , 占天然径流减少量的  $68\%$ , 是其减少的主要原因。此外, 研究区域潜在蒸发量也呈减少趋势, 这导致蒸发减少、径流增加, 抵消了降水减少的部分影响, 不过相对影响较小。

此外, 还有一点值得注意: 雨量站的分布通常是平原区多, 山区少; 而对于山区站点而言, 通常又是大多位于山下, 而较少位于山顶。在进行面雨量插值时, 由于缺少实测数据, 山上的降水量通常由山下的降水量通过地形修正得到, 而这种插值方法无法估计  $R_0$  减小 (即地形雨减少) 带来的山区面雨量的变化, 即低估面雨量的减少量, 由此降水计算径流时会低估水资源减少的严峻形势。以滹沱河上游地区为例, 如果没有五台山站的观测, 计算得到 2000 年的面平均降水量为  $526 \text{ mm}$ , 而由于地形雨减少导致的实际面雨量为  $468 \text{ mm}$ , 误差为  $12\%$ ; 由此计算径流, 对天然径流的减少量低估了  $1.9 \text{ 亿 m}^3$ , 占总变化量的比例高达  $70\%$ 。

对于海河流域, 山区是径流形成的重要区域, 一方面山区地形雨的减少导致流域水资源量的减少; 另一方面, 缺少足够的位于山上的雨量站来反映局部地形雨减少的影响。这两方面原因可能导致插值得到的面雨量没有包含地形雨减少的影响。在利用降水评估径流 (即水资源量) 时, 由于没有考虑地形雨减少的影响从而低估面雨量的减少, 这可能是产生海河流域面雨量 (没有考虑地形雨减少的影响) 没有显著减少而山区天然径流量显著减少现象的原因之一。

山区降水的空间分布极为复杂, 本研究区域中仅有五台山站一个山区站, 面雨量插值可能存在较大误差, 还有待采用雷达、遥感等多源数据获取降水的区域分布, 以准确描述地形雨的分布及其变化, 进一步研究地形雨减少对水资源的影响。

## 5 结 论

海河流域水资源量减少是备受关注的问题。以五台山区为例, 在过去的 1961~2005 年间, 该地区地形雨显著减少, 降水的地形强化因子 (五台山站与山下对比站点年降水量的比值) 减少了  $27\%$ , 其可能原因是海河流域社会经济的高速发展伴生的大气污染加剧。在 1961~2000 年间, 南庄水文站控制的五台山区天然年径流量减少了  $1/3$ , 约为  $2.8 \text{ 亿 m}^3$ 。

通过对水热耦合平衡方程进行偏微分, 建立了定量评估径流对降水及蒸发能力变化响应的模型, 与降雨~径流模型相比, 该模型在考虑降雨变化影响的同时还考虑了蒸发能力 (潜在蒸发) 变化的影响。利用该模型的分析表明, 在五台山地区, 地形雨的减少导致天然年径流量减少了  $1.9 \text{ 亿 m}^3$ , 约占总减少量的  $70\%$ , 是该地区径流减少的主要原因。

对于海河流域 (以及中国其它很多流域), 缺少位于山上的雨量站, 因此无法反映地形雨减少的影响, 这将导致利用降水评估水资源量时低估其减少量。在缺少山区雨量站的情况下, 如何充分考虑地形雨减少 (或增加) 的影响, 进行合理的面雨量插值还需要进一步的研究。

## 参考文献:

- [1] 王静怡, 王晓燕. 密云水库流域径流变化特征及影响因素分析 [J]. 首都师范大学学报: 自然科学版, 2007, 28(2): 89-92. (WANG Jingyi, WANG Xiaoyan. Analysis on variation and influencing factors of runoff in Miyun reservoir watershed [J]. Journal of Capital Normal University: Natural Science Edition, 2007, 28(2): 89-92. (in Chinese))
- [2] 陈民, 谢悦波, 冯宇鹏. 人类活动对海河流域径流系列一致性影响的分析 [J]. 水文, 2007, 27(3): 57-59. (CHEN Min, XIE Yuebo, FENG Yupeng. Influence of human activity on consistency of runoff series in Haihe River basin [J]. Journal of China Hydrology, 2007, 27(3): 57-59. (in Chinese))
- [3] WANG Gangsheng, XIA Jun, CHEN J. Quantification of effects of climate variations and human activities on runoff by a monthly water balance model: A case study of the Chaobai River basin in northern China [J]. Water Resources Research, 2009, 45, W00A11, doi: 10.1029/2007WR006768.
- [4] 刘国纬. 关于地形对降水的影响研究简介 [J]. 水文, 1982(2): 59-63. (LIU Guowei. Introduction to orographic impacts on precipitation [J]. Journal of China Hydrology, 1982(2): 59-63. (in Chinese))
- [5] GIVATIA, ROSENFELD D. Possible impacts of anthropogenic aerosols on water resources of the Jordan River and the Sea of Galilee [J]. Water Resources Research, 2007, 43, W10419, doi: 10.1029/2006WR005771.
- [6] GIVATIA, ROSENFELD D. Separation between cloud seeding and air pollution effects [J]. Journal of Applied Meteorology, 2005, 44(9): 1298-1314.
- [7] ROSENFELD D, DAI J, YU X, et al. Inverse relations between amounts of air pollution and orographic precipitation [J]. Science, 2007, 315(5817): 1396-1398.
- [8] YANG Hanbo, YANG Darwen, LI Pingyun, et al. Possible impact of aerosols on orographic precipitation in eastern China [C] // IAHS-AISH Publication, 2008, 322, 48-53.
- [9] 杨汉波, 杨大文, 李萍云, 等. 五台山区地形雨减少与能见度减小的可能联系 [J]. 气象, 2009, 2010, 36(4): 16-20. (YANG Hanbo, YANG Darwen, LI Pingyun, et al. Possible relation of decreasing orographic precipitation with declining visibility in the Wutai Mountain region [J]. Meteorological Monthly, 2010, 36(4): 16-20. (in Chinese))
- [10] PENMAN H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass [J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1948, 193(1032): 120-145.
- [11] 孙福宝, 杨大文, 刘志雨, 等. 基于 Budyko 假设的黄河流域水热耦合平衡规律研究 [J]. 水利学报, 2007, 38(4): 409-416. (SUN Furbao, YANG Darwen, LIU Zhiyu, et al. Study on coupled water-energy balance in Yellow River basin based on Budyko Hypothesis [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(4): 409-416. (in Chinese))
- [12] 杨汉波, 杨大文, 雷志栋, 等. 任意时间尺度上的流域水热耦合平衡方程的推导及验证 [J]. 水利学报, 2008, 39(5): 151-158. (YANG Hanbo, YANG Darwen, LEI Zhidong, et al. Derivation and validation of watershed coupled water-energy balance equation at arbitrary time scale [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(5): 151-158. (in Chinese))
- [13] YANG Darwen, SUN Furbao, LIU Zhiyu, et al. Analyzing spatial and temporal variability of annual water-energy balance in nonhumid regions of China using the Budyko hypothesis [J]. Water Resources Research, 2007, 43, W04426, doi: 10.1029/2006WR005224.
- [14] YANG Hanbo, YANG Darwen, LEI Zhidong, et al. New analytical derivation of the mean annual water-energy balance equation [J]. Water Resources Research, 2008, 44, W03410, doi: 10.1029/2007WR006135.
- [15] 杨贵羽, 王知生, 王浩, 等. 海河流域  $ET_0$  演变规律及灵敏度分析 [J]. 水科学进展, 2009, 20(3): 409-415. (YANG Guiyu, WANG Zhisheng, WANG Hao, et al. Potential evapotranspiration evolution rule and its sensitivity analysis in Haihe River basin [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(3): 409-415. (in Chinese))
- [16] 徐小红, 余兴, 戴进. 气溶胶对秦岭山脉地形云降水的影响 [J]. 气象, 2009, 35(1): 37-47. (XU Xiaohong, YU Xing, DAI Jin. Effect of aerosols on orographic precipitation in Qinling Mountains [J]. Meteorological Monthly, 2009, 35(1): 37-47. (in Chinese))

## Impact of decreasing orographic precipitation on water resources in Wutai Mountain region, China\*

YANG Han-bo, YANG Dawen, LEI Zhidong

(State key Laboratory of Hydro-Science and Engineering & Department of Hydraulic Engineering,

Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** Much attention has been paid to the cause of declining water resources in the Haihe River basin. In this study, the Wutai Mountain region is chosen to assess the impact of decreasing orographic precipitation on water resources. The orographic precipitation enhancement factor  $R_o$  is defined as the ratio between the hilly precipitation from Wutaishan station and the low land precipitation from 5 stations around the Wutai Mountain. A coupled water-energy balance equation is used to evaluate the impact of decreasing orographic precipitation on water resources in the region. Results show that the value of the factor  $R_o$  is down by 0.53 in the past 50 years, or a reduction of 27%, indicating a significant decline in orographic precipitation and leading to a reduction of 190 million  $m^3/y$ , about 26% of the mean annual runoff received in the region, which can even account for 70% of the total reduction of water resources. In addition, the hilly precipitation is often underestimated due to the current precipitation gauge networks suffers from a shortage of precipitation gauges at the peak of mountains in many regions of China. As a result, the impact of orographic precipitation on water resources may not be properly evaluated. The reduction of water resources could thus be under-evaluated when runoff is calculated from the gauge precipitation.

**Key words** orographic precipitation, water resources, Wutai Mountain, precipitation interpolation, orographic precipitation enhancement factor

### 声 明

本刊所登论文的中、英文摘要或全文同时被有关文摘刊物、检索系统、中国学术期刊(光盘版)、《中国期刊网》等有关网上期刊转载、传播,作者著作权使用费随本刊稿酬一次性给付。作者将稿件交本刊登载的同时也将网络传播权授予本刊编辑部。凡有不同意见者,可另投他刊。本刊所付稿酬包含刊物内容上网服务报酬。

作者来稿文责自负,不得一稿多投。收到本刊收稿回执后 3 个月未接到本刊录用通知者,若无其他约定,可自行处理稿件。论文出版后,按本刊规定酌付稿酬,并赠阅当期期刊两份。受编辑部人力所限,退稿稿件恕不返审稿意见,敬请谅解。

《水科学进展》编辑部

\* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50909051).