



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtq.2016.01.011

胡珊珊, 张涛. 白洋淀流域潜在蒸散量与实际蒸散量变化分析[J]. 2016, 14(1): 67-71.

HU Shan shan, ZHANG Tao. Variation characteristics of potential evapotranspiration and actual evapotranspiration during 1960-2011 in Baiyangdian Basin[J]. 2016, 14(1): 67-71. (in Chinese)

# 白洋淀流域潜在蒸散量与实际蒸散量变化分析

胡珊珊<sup>1</sup>, 张涛<sup>2</sup>

(1. 首都师范大学 资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 中国地质调查局 国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083)

**摘要:** 基于 Penman Monteith 公式和 Budyko 假设, 利用白洋淀流域 1960 年-2011 年的气象、水文资料, 计算分析了该流域潜在蒸散量与实际蒸散量的长期变化趋势, 并初步分析了实际蒸散量变化与降水变化、潜在蒸散量变化的关系。结果表明: 过去 52 年白洋淀流域潜在蒸散量和实际蒸散量分别以 10.3 mm/(10a) 和 11.6 mm/(10a) 的速度呈下降趋势; 年代际变化分析表明, 潜在蒸散量的下降趋势在不同年代际间具有持续性, 而实际蒸散量则表现为波动下降, 其波动性受降水波动的影响, 年实际蒸散量的变化与年降水的变化呈正相关关系( $R^2 = 0.99$ ), 与潜在蒸散量的变化呈负相关关系( $R^2 = 0.37$ ), 即降水量的变化对实际蒸散量的变化起主要控制作用。

**关键词:** 白洋淀流域; 潜在蒸散量; 实际蒸散量; Penman Monteith 公式; Budyko 假设

**中图分类号:** P426.2    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2016)01-0067-05

## Variation characteristics of potential evapotranspiration and actual evapotranspiration during 1960-2011 in Baiyangdian Basin

HU Shan shan<sup>1</sup>, ZHANG Tao<sup>2</sup>

(1. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China;

2. Aero Geophysical and Remote Sensing Center, CGS, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Based on the meteorological and hydrological data of Baiyangdian basin during 1960-2011, the change trends of potential evapotranspiration ( $ET_0$ ) and actual evapotranspiration ( $ET_a$ ) and their relationship were studied by using Penman Monteith formula and Budyko hypothesis. Our results showed that both  $ET_0$  and  $ET_a$  presented a decreasing trend and the decreasing rate were about 10.3 mm/(10a) and 11.6 mm/(10a), respectively. Through the inter decadal variation analysis,  $ET_0$  was characterized by a continuous decline, and  $ET_a$  was characterized by fluctuate loss, which was influenced by precipitation volatility. The results of the correlation analysis showed that the change of  $ET_a$  was positively correlated with the change of precipitation ( $R^2 = 0.99$ ), and negatively correlated with the change of  $ET_0$  ( $R^2 = 0.37$ ). The precipitation was the main driving force for the reduction of  $ET_a$ .

**Key words:** Baiyangdian basin; potential evapotranspiration; actual evapotranspiration; Penman Monteith formula; Budyko hypothesis

蒸散发是连接地表水量平衡和能量平衡的中心环节,也是水循环中最直接受气候变化影响的环节。分析蒸散发的长期变化趋势及其对气候变化的响

应,对深入理解气候变化对水文循环的影响具有重要的理论和实践意义<sup>[1-2]</sup>。目前,全球不少陆地地区观测的蒸发皿蒸发量和计算的潜在蒸发量均呈下降

收稿日期: 2015-08-31    修回日期: 2015-12-25    网络出版时间: 2016-02-27

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160227.1703.026.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(41501027)

Fund: National Natural Science Foundation of China(41501027)

作者简介: 胡珊珊(1984-),女,湖北宜昌人,讲师,主要从事环境变化对水文过程的影响研究。E-mail: hushshan@126.com

趋势<sup>[3,5]</sup>,这一现象被称作“蒸发悖论”<sup>[6]</sup>并受到广泛关注<sup>[7,8]</sup>。潜在蒸散发是充分供水条件下的蒸散发能力,代表一个地区接受太阳能的多少,地表的实际蒸散发才是衡量水分变化的客观变量。由于长时段和大范围实际蒸发量观测数据的缺乏,因此加强蒸发皿观测的水面蒸发、蒸发潜力以及地表实际蒸发之间的关系研究对正确认识实际蒸散发变化十分重要<sup>[9]</sup>。国内外学者对此进行过大量研究,如 Zhang 等<sup>[10]</sup>分析了青藏高原蒸发皿蒸发量、参考蒸散量、实际蒸散量的时间变化趋势及其变化原因,并验证了蒸发悖论和 Bouchet 互补相关假设在青藏高原的适应性;Gao 等<sup>[11]</sup>分析了海河流域实际蒸散发的时空变化特征,指出降水减少和潜在蒸散量的减少共同导致了流域实际蒸散量的减少;童瑞等<sup>[12]</sup>运用 Mann-Kendall 趋势检验方法和 Budyko 水分能量平衡公式,分析了实际蒸散发量、潜在蒸散发量、蒸散发率和干燥指数的时空变化趋势及蒸散发受水分能量供应条件的限制情况;王艳君等<sup>[13]</sup>从长江流域实际蒸发量变化的原因着手,探讨了实际蒸发量与潜在蒸发量之间的关系;谢平等<sup>[14]</sup>利用实测的水文气象资料,分析出东江流域实际蒸发量和蒸发皿蒸发量都有减少的趋势,二者之间存在不确定相关关系和弱的负相关关系。目前,关于潜在蒸散发量与实际蒸散发量之间的关系仍无确定性的结论。

基于前人在蒸散发计算以及潜在蒸散发与实际蒸散发关系等方面的研究,本文以华北白洋淀流域为研究区,利用 Penman-Monteith 公式和 Budyko 假设的傅抱璞公式,对潜在蒸散发量和实际蒸散量的变化特征进行对比研究,并初步分析了实际蒸散发量变化与降水变化和潜在蒸散发量变化的关系,为变化环境下的流域水资源评价与规划提供依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究区概况与资料

白洋淀位于海河流域中部,是华北平原上最大的淡水湖泊。白洋淀以上流域面积 3.2 万 km<sup>2</sup>,其中河北省占 81.04%,山西和北京分别占 11.85%、7.11%(图 1)。流域自西向东自然形成山区(包括丘陵)、平原和洼淀三大地貌单元,其中山区占 64.1%,平原和洼淀占 35.9%。流域气候属暖温带大陆性季风气候,具有春旱多风,夏季高温多雨,冬季干寒的特点,年平均气温在 7.3℃~12.7℃,流域年平均降水量为 494 mm,70%集中于 6 月~8 月份,降水年际变化大。

本文采用的气象资料来源于国家气象局提供的

1960 年~2011 年日值资料。选取了白洋淀流域及其周边 9 个气象台站(图 1)的逐日平均、日最高和最低气温,以及日照时数、风速、相对湿度、日降雨量数据。采用反距离加权平均法(IDW)将各站点的降雨量、潜在蒸散量和实际蒸散发量插值到流域的形心处,代表流域面平均值。同时,本文还收集了流域内 10 个蒸发站点的 1963 年~1991 年间的月蒸发皿观测资料以及海河 GEF 项目提供的海河流域 2002 年~2008 年逐月实际蒸散发遥感产品。

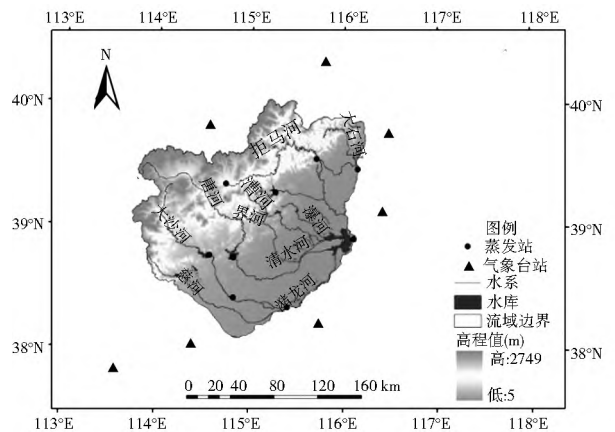


图 1 白洋淀流域概图

Fig. 1 Map of Baiyangdian Basin

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 潜在蒸散发计算方法

采用世界粮农组织(FAO)推荐的修正 Penman-Monteith 公式估算流域的潜在蒸散发。其中,参考下垫面为植被高度 0.12 m 的草地,具有固定的表面阻力 70 s/m,反照率为 0.23,计算公式如下<sup>[15]</sup>:

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{mean} + 273} U_2 \cdot (VP_s - VP)}{\Delta + \gamma (1 + 0.3U_2)} \quad (1)$$

式中:  $ET_0$  为潜在蒸散发 (mm/d);  $R_n$  为净辐射 ( $MJ/(m^2 \cdot d)$ );  $G$  为土壤热通量 ( $MJ/(m^2 \cdot d)$ );  $\gamma$  为干湿常数 ( $kPa/^\circ C$ );  $\Delta$  为饱和水汽压曲线斜率 ( $kPa/^\circ C$ );  $U_2$  为 2 m 高处的风速 (m/s);  $VP_s$  为平均饱和水汽压 (kPa);  $VP$  为实际水汽压 (kPa);  $T_{mean}$  为平均气温 ( $^\circ C$ )。

### 1.2.2 实际蒸散发估算方法

Budyko<sup>[16]</sup>认为,流域的实际蒸散发由水分条件(降水量)和能量条件(蒸发能力)所控制,年实际蒸散发对年降水量的比值是年降水与年蒸发能力(净辐射量或潜在蒸散发)比值的函数,即

$$\frac{E}{P} = f\left(\frac{E_0}{P}\right) = f(\Phi) \quad (2)$$

式中： $\phi$ 为辐射干燥度； $f$ 是一个普适函数。

基于 Budyko 假设，众多学者进行了一系列关于流域水量平衡和能量平衡的研究，并提出流域的水热平衡经验关系<sup>[17]</sup>。我国学者傅抱璞<sup>[18]</sup>根据流域水文气象的物理意义提出了一组 Budyko 假设的微分形式，并推导出其解析表达式如下：

$$\frac{E}{P} = 1 + \phi - f [1 + (\phi)^w]^{1/w} \quad (3)$$

式中： $w$ 为模型参数，与植被类别、土壤水力特性及地形有关<sup>[19]</sup>。

本文采用傅抱璞公式计算流域的实际蒸散量，根据白洋淀流域内的地形、土壤和植被条件，分别确定山区和平原区的下垫面参数  $w$ 。

### 1.2.3 趋势分析方法

采用常用的线性回归法和 Mann Kendall 秩次相关检验法(简称 M-K 检验)进行趋势分析<sup>[20]</sup>，通过计算线性回归系数分析蒸散发系列的长期变化率，利用 M-K 检验判断长期变化趋势的显著性。

## 2 结果分析

### 2.1 潜在蒸散量与实际蒸散量计算结果的验证

为验证 Penman Monteith 公式在白洋淀流域内的适用性，本文对 1963 年-1991 年间计算的潜在蒸散量( $ET_0$ )与实测的蒸发皿蒸发量( $E_{pan}$ ) (经折算系数全部换算为 E601 蒸发量)进行了相关分析(图 2)，结果表明，月尺度  $E_{pan}$  和  $ET_0$  相关系数为 0.99，线性回归方程的系数(截距为 0)为 0.97，说明 Penman Monteith 公式计算出的潜在蒸散量与 E601 蒸发皿的水面蒸发量比较一致，可以代表流域的蒸发潜力。

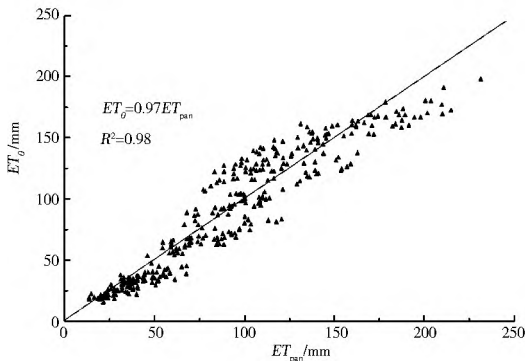


图 2 白洋淀流域潜在蒸散量( $ET_0$ )与 E601 蒸发皿蒸发量( $E_{pan}$ )的比较

Fig. 2 Comparison of  $ET_0$  and  $E_{pan}$  in Baiyangdian Basin

同时，对海河 GIF 项目提供的 2002 年-2008

白洋淀流域遥感实际蒸散量( $ET_{RS}$ )和傅抱璞公式得到的实际蒸散量( $ET_{Fu}$ )进行对比分析，发现二者之间的相关系数达到 0.9，说明基于 Budyko 假设计算流域实际蒸散量是可行的。

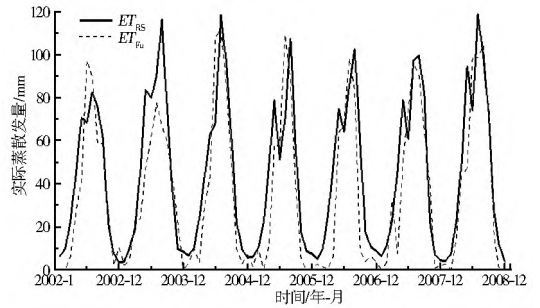


图 3 白洋淀流域实际蒸散量计算值( $ET_{Fu}$ )与遥感估算值( $ET_{RS}$ )的比较

Fig. 3 Comparison of  $ET_{Fu}$  and  $ET_{RS}$  in Baiyangdian Basin

### 2.2 潜在蒸散量和实际蒸散量的时间变化特征

计算结果表明，白洋淀流域 1960 年-2011 年多年平均潜在蒸散量和实际蒸散量分别为 1031.1 mm 和 461.1 mm。图 4 给出了白洋淀流域潜在蒸散量和实际蒸散量的逐年变化，由图可见，1960 年-2011 年白洋淀流域年潜在蒸散量和实际蒸散量均呈下降趋势，其中潜在蒸散量通过了显著性水平  $\alpha=0.05$  的 M-K 检验。由线性倾向估计，白洋淀流域 1960 年-2011 年年潜在蒸散量和年实际蒸散量的变化速率分别为 10.3 mm/(10a) 和 11.6 mm/(10a)。

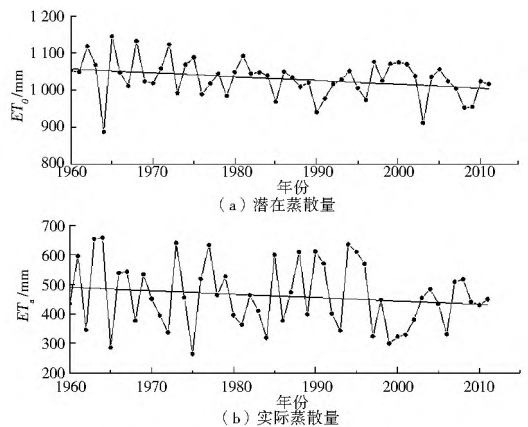


图 4 白洋淀流域 1960 年-2011 年潜在蒸散量(a)和实际蒸散量(b)变化趋势

Fig. 4 The change of  $ET_0$ (a) and  $ET_a$ (b) during 1960-2011 in Baiyangdian basin

图 5 给出了白洋淀流域潜在蒸散量、实际蒸散量以及降水量的年代际距平百分比(相对于 1960 年-2011 年平均值)。从变化趋势看，白洋淀流域潜在蒸散量在 20 世纪 60 年代至 80 年代为逐渐减小的正距平，20 世纪 90 年代和 2000 年代为逐渐增加的负距平，表明潜在蒸散量在不同年代际间持续

下降;实际蒸散量在 20 世纪 60 年代、70 年代、90 年代为正距平,80 年代和 2000 年代为负距平,表明实际蒸散量在不同年代际间表现为波动下降趋势,比较其与降水量的年代际变化可以看出,实际蒸散量和降水量的年际变化趋势一致,二者随年代际同时增大与减小,说明实际蒸散量的波动性受降水波动的影响。从变化幅度看,潜在蒸散量和实际蒸散量均在 20 世纪 60 年代达到最大值,两者年代际距平百分比分别为 2.2% 和 7.8%;2000 年代为最小值,两者年代际距平百分比分别为 -1.7% 和 -8.1%,说明潜在蒸散量的年代际变化幅度小于实际蒸散量的变化幅度。

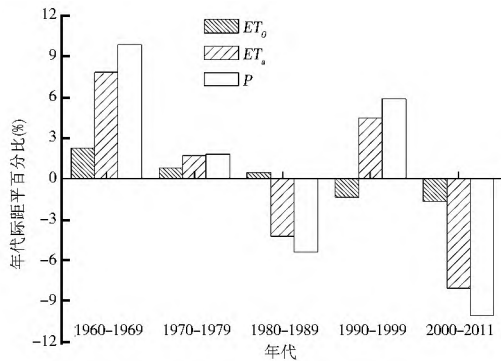


图 5 白洋淀流域潜在蒸散量、实际蒸散量和降雨量的年代际距平百分比

Fig. 5 The inter-decadal variation of  $ET_0$ ,  $ET_a$  and  $P$  in Baiyangdian basin

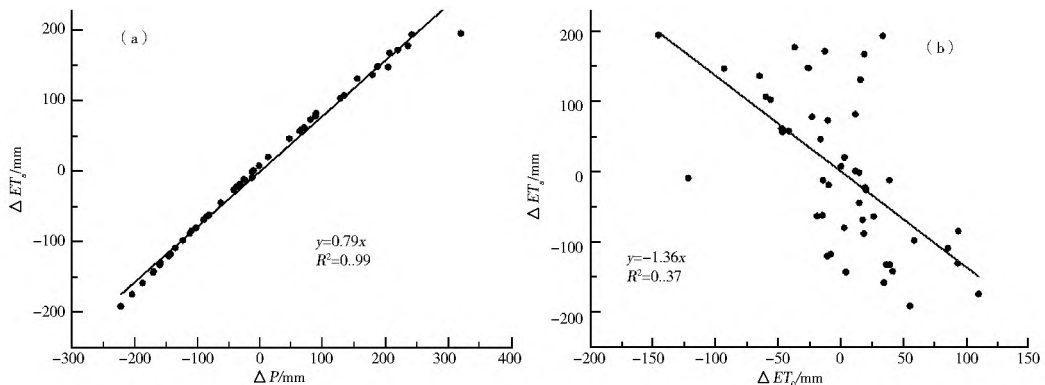


图 6 实际蒸散量变化随年降水变化 (a) 和年潜在蒸散量变化 (b) 的关系

Fig. 6 The changes of  $ET_a$  with precipitation change (a) and  $ET_0$  change (b)

在此基础上分析了白洋淀流域潜在蒸散量和实际蒸散量的时间变化规律,结果如下。

(1) 1960 年-2011 年白洋淀流域年潜在蒸散量和实际蒸散量均呈下降趋势,其中潜在蒸散量通过了显著性水平  $\alpha = 0.05$  的 MK 检验,二者下降速率分别为  $10.3 \text{ mm}/(10\text{a})$  和  $11.6 \text{ mm}/(10\text{a})$ 。

(2) 白洋淀流域潜在蒸散量和实际蒸散量的年代际变化表明,潜在蒸散量在不同年代际间表现为持续下降趋势,实际蒸散量在不同年代际间表现为

## 2.3 实际蒸散发受水分能量限制的影响

流域实际蒸散发机理复杂,影响因素众多,主要受下垫面供水条件(此处以降水  $P$  表征)、能量条件(此处以潜在蒸散发  $ET_0$  表征)以及区域地理特征( $w$ )的影响。假设在一定的时间内,地形、植被、土壤等区域地理特征( $w$  值)不变,则实际蒸散发的长期变化趋势取决于受降水和潜在蒸散发变化趋势的控制程度。图 6 分别给出了年实际蒸散量距平( $\Delta ET_a$ )随年降水量距平( $\Delta P$ )、年潜在蒸散量距平( $\Delta ET_0$ )的关系(相对于各自 1960 年-2011 年平均值)。相关分析表明,年实际蒸散量的变化和年降水的变化呈正相关关系,相关系数高达 0.99,10% 的降水变化将引起 7.9% 的实际蒸散量变化;年实际蒸散量变化与潜在蒸散量的变化呈负相关关系,相关系数为 0.61,10% 的潜在蒸散量变化将引起 13.6% 的实际蒸散量变化,说明白洋淀流域的能量供应能够充分满足蒸散发的需要,但由于降水量偏少,影响蒸散发的主要因素为水量供应限制,所以年降水量的变化对年实际蒸散发的变化起着主要控制作用。

## 3 结论

本文通过对白洋淀流域潜在蒸散量和实际蒸散量的计算分析,验证了 Penman-Monteith 公式和 Budyko 假设在白洋淀流域蒸散发量模拟的适用性,

波动下降趋势,其波动性受降水波动的影响;二者均在 20 世纪 60 年代达到最大值,年代际距平百分比分别为 2.2% 和 7.8%,均在 2000 年代达到最小值,年代际距平百分比分别为 -1.7% 和 -8.1%。

(3) 白洋淀流域年实际蒸散量的变化和年降水的变化呈正相关关系,相关系数高达 0.99;年实际蒸散量变化与潜在蒸散量的变化呈负相关关系,相关系数为 0.61。实际蒸散发的变化主要受到降水变化的控制。

总体而言,基于 Penmar Monteith 公式和 Budyko 假设,能够对白洋淀流域参考蒸散发和实际蒸散给出有参考价值的估计,由此得到的蒸散发变化趋势可以为流域水资源管理提供参考,但本研究仅考虑天然降水情境下的供水,未来需要进一步考虑地下水灌溉、水库蓄水等其他人类活动的影响。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] Jung M, Reichstein M, Ciais P, et al. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply [ J ]. *Nature*, 2010, 467( 7318 ): 951-954.
- [ 2 ] M. Ukkola, I. C. Prentice. A worldwide analysis of trends in water-balance evapotranspiration [ J ]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17( 10 ): 4177-4187.
- [ 3 ] 刘昌明,张丹.中国地表潜在蒸散发敏感性的时空变化特征分析[ J ]. *地理学报*, 2011, 66( 5 ): 579-588. ( LIU Chang min, ZHANG Dan. Temporal and spatial change analysis of the sensitivity of potential evapotranspiration to meteorological influencing factors in China[ J ]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66( 5 ): 579-588. ( in Chinese ) )
- [ 4 ] 杜军,胡军,刘依兰,等.近 25 年雅鲁藏布江中游蒸发皿蒸发量及其影响因素的变化[ J ]. *自然资源学报*, 2008, 23( 1 ): 120-126. ( DU Jun, HU Jun, LIU Yilan, et al. Changes of pan evaporation and its impact factors in middle reaches of the Yarlung Zangbu River over Tibet in recent 25 Years[ J ]. *Journal Of Natural Resources*, 2008, 23( 1 ): 120-126. ( in Chinese ) )
- [ 5 ] Donald H. Burn, Nicole M. Hesch. Trends in evaporation for the Canadian prairies [ J ]. *Journal of Hydrology*, 2007, 336( 1-2 ): 61-73.
- [ 6 ] M L Roderick, G D Farquhar. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years [ J ]. *Science*, 2002, 298( 5597 ): 1410.
- [ 7 ] 马雪宁,张明军,王圣杰,等.“蒸发悖论”在黄河流域的探讨[ J ]. *地理学报*, 2012, 67( 5 ): 645-656. ( MA Xue ning, ZHANG Ming jun, WANG Sheng jie, et al. Evaporation paradox in the Yellow River Basin[ J ]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67( 5 ): 645-656. ( in Chinese ) )
- [ 8 ] 丛振涛,倪广恒,杨大文,等.“蒸发悖论”在中国的规律分析[ J ]. *水科学进展*, 2008, 19( 2 ): 147-152. ( CONG Zhen tao, NI Guang heng, YANG Da wen, et al. Evaporation paradox in China[ J ]. *Advances in Water Science*, 2008, 19( 2 ): 147-152. ( in Chinese ) )
- [ 9 ] Ohmura A, Wild M. Is the hydrological cycle accelerating[ J ]. *Science*, 2002, 298: 1345.
- [ 10 ] Zhang Y Q, Liu C M, Tang Y H, et al. Trends in pan evaporation and reference and actual evapotranspiration across the Tibetan Plateau [ J ]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2007, 112( D12110 )
- [ 11 ] Gao, G., Xu C. Y., Chen D. L., et al. Spatial and temporal characteristics of actual evapotranspiration over Haihe River basin in China [ J ]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 26( 5 ): 655-669.
- [ 12 ] 童瑞,杨肖丽,任立良,等.黄河流域 1961—2012 年蒸散发时空变化特征及影响因素分析[ J ]. *水资源保护*, 2015, 31( 3 ): 16-21. ( TONG Rui, YANG Xiao li, REN Li liang, et al. Temporal and spatial characteristics of evapotranspiration in the Yellow River Basin during 1961-2012 and analysis of its influence factors[ J ]. *Water Resources Protection*, 2015, 31( 3 ): 16-21. ( in Chinese ) )
- [ 13 ] 王艳君,刘波,翟建青,等.长江流域潜在蒸发量和实际蒸发量的关系[ J ]. *气候变化研究进展*, 2011, 7( 6 ): 393-399. ( WANG Yan jun, LIU Bo, ZHAI Jian qing, et al. Relationship Between potential and actual evaporation in Yangtze River Basin [ J ]. *Advances in Climate Change Research*, 2011, 7( 6 ): 393-399. ( in Chinese ) )
- [ 14 ] 谢平,陈晓宏,王兆礼,等.东江流域实际蒸发量与蒸发皿蒸发量的对比分析[ J ]. *地理学报*, 2009, 64( 3 ): 270-277. ( XIE Ping, CHEN Xiaohong, WANG Zhao li, et al. Comparison of actual evapotranspiration and pan evaporation [ J ]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64( 3 ): 270-277. ( in Chinese ) )
- [ 15 ] Allen RG, Pereira LS, Raes D, et al. Crop evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements FAO Irrigation and drainage paper 56 [ M ]. Rome: FAO, 1998.
- [ 16 ] Budyko M. I. *Climate and Life* [ M ]. San Diego: Academic, 1974.
- [ 17 ] Zhang L, Dawes W, Walker G. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale [ J ]. *Water Resources Research*, 2001, 37: 701-708.
- [ 18 ] 傅抱璞.论陆面蒸发的计算[ J ]. *大气科学*, 1981, 5( 1 ): 23-31. ( FU Bao pu. On the calculation of the evaporation from land surface [ J ]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1981, 5( 1 ): 23-31. ( in Chinese ) )
- [ 19 ] 栗铭,陈喜.基于 Budyko 假设的海河流域蒸散发量和径流量估算研究[ J ]. *中国农村水利水电*, 2014, ( 6 ): 107-111. ( LI Min, CHEN Xi. Research on the estimation of the evaporation and the runoff in the Haihe River Basin Based on Budyko Hypothesis [ J ]. *China Rural Water and Hydropower*, 2014, ( 6 ): 107-111. ( in Chinese ) )
- [ 20 ] 魏凤英.现代气候统计诊断预测技术[ M ].北京:气象出版社, 1999. ( WEI Fengying. *Modern climate statistical diagnosis and Prediction Technology* [ M ]. Beijing: China Meteorological Press, 1999. ( in Chinese ) )