



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.05.008

杨敏芝, 钟平安, 汪曼琳, 等. 大汶河流域陆面蒸发估算方法比较[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(5): 50-55. YANG Min zhi, ZHONG Ping an, WANG Man lin, et al. Comparative study on the methods of estimating land surface evaporation in Dawenhe River basin[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(5): 50-55. (in Chinese)

大汶河流域陆面蒸发估算方法比较

杨敏芝¹, 钟平安¹, 汪曼琳¹, 尚艳丽², 程传民³

(1. 河海大学 水文水资源学院, 南京 210098; 2. 泰安市水文局, 山东 泰安 271000;
3. 泰安市水利和渔业局, 山东 泰安 271000)

摘要: 区域陆面蒸散的估算对于计算区域水资源总量, 合理配置水资源具有重要意义。针对处于大汶河流域上游、受人类活动影响较小的雪野水库、黄前水库、东周水库控制子流域的实际特点, 分别利用 MODIS 遥感方法、SWAT 模型法、水面蒸发折算系数法对这三个子流域 2000 年-2008 年的多年平均年陆面蒸发量及多月平均陆面蒸发量进行估算, 并基于水量平衡方程, 结合各子流域的同期降雨与天然径流资料, 对估算结果进行了分析比较。结果表明: 在大汶河流域内, 采用 MODIS 遥感方法估算实际陆面蒸散的精度较低; 水面蒸发折算系数法具有一定精度; SWAT 模型法精度较高、适应性较好, 估算误差仅在 3% 左右。研究结果可为半湿润区陆面蒸发估算方法的选择提供参考。

关键词: 陆面蒸发; 大汶河流域; MODIS 遥感方法; SWAT 模型; 折算系数法

中图分类号: TV 125 文献标识码: A 文章编号: 1672-1683(2017)05-0050-06

Comparative study on the methods of estimating land surface evaporation in Dawenhe River basin

YANG Min zhi¹, ZHONG Ping an¹, WANG Man lin¹, SHANG Yan li², CHENG Chuan min³

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Tai'an Municipal Bureau of Hydrology, Tai'an 271000, China;

3. Tai'an Municipal Water Conservancy and Fishery Bureau, Tai'an 271000, China)

Abstract: The estimation of regional land surface evapotranspiration is of great significance to calculating the total amount of regional water resources and to allocating water resources reasonably. According to the characteristics of the sub basins controlled by Xueye reservoir, Huangqian reservoir, and Dongzhou reservoir in Dawenhe River basin, we respectively used MODIS remote sensing method, SWAT model, and conversion coefficient of water surface evaporation to estimate the average yearly and monthly land surface evaporation of the three sub basins from 2000 to 2008. Based on the rainfall and natural runoff data of each sub basin over the same period, we analyzed and compared the estimated results. The results showed that: in Dawenhe River basin, the accuracy of the MODIS remote sensing method was low; the conversion coefficient method had a certain precision; the SWAT model method had higher calculation precision and better adaptability, and its estimation error was only about 3%. The results can provide references for selecting methods of estimating the land surface evaporation in the semi-humid region.

Key words: land surface evaporation; Dawenhe River basin; MODIS remote sensing method; SWAT model; conversion coefficient method

收稿日期: 2016-08-15 修回日期: 2016-10-19 网络出版时间: 2017-08-29
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170829.1918.003.html>
基金项目: 国家自然科学基金(51579068; 51379055)

Funds: National Natural Science Foundation of China(51579068; 51379055)

作者简介: 杨敏芝(1993-), 女, 江苏常州人, 主要从事水资源规划与管理方面研究。E-mail: 348912187@qq.com

通讯作者: 钟平安(1962-), 男, 安徽无为, 教授, 博士, 主要从事水资源规划与管理方面研究。E-mail: Pazhong@hhu.edu.cn

陆面蒸发包括地表水体的水面蒸发、土壤蒸发和植物散发等,是区域内各种下垫面条件下的总蒸发,同时也是地表热量平衡和水量平衡方程的重要组成部分。蒸发是决定区域水资源量多寡的重要环节,二者的时空分布规律之间存在着密切联系,因此陆面蒸发的计算在水资源研究中占有重要比重,对区域水资源优化配置具有重要意义。

实际陆面蒸发量由于区域下垫面情况复杂等多重因素很难由仪器直接测出,且精度难以保证,因此寻求合适方法估算区域陆面蒸发量并增加估算结果的可信度显得尤为重要,长久以来一直是水文界研究的热点与难点^[1-2]。目前,基于不同原理的陆面蒸发估算方法如FAO Penmar Monteith法、SPAC水分传输综合模拟法、涡动相关观测法、蒸渗计观测法等^[3-4]有很多,这些方法存在所需资料难以获取且估算精度有限等问题导致普适度不高,在实际应用中受限较大。近年来,遥感技术弥补了传统实测方法无法满足大区域要求、耗时长、分辨率低的缺点,尤其是NASA发布的MODIS全球蒸散发产品MOD16,提供了高时空分辨率的陆地蒸散发数据集,从而使从总体上把握整个区域系统的实际陆面蒸发量成为可能。同时,遥感技术也在分布式水文模型中得到了广泛应用,如SWAT模型^[5]能够利用GIS和RS提供的空间数据信息与少量气象资料对区域实际蒸散发进行定量模拟,模型中的蒸散发模块功能强大、物理基础扎实,已被一些学者应用于具体区域并取得了良好的估算效果^[6]。蒸发皿观测法,即水面蒸发折算系数法,因其计算简单、资料易于获取,也在一些地区得到了很好的应用^[7-8]。

结合以往的一些研究,易知:由于对不同方法估算的蒸散发量的理解存在一定偏差,加上蒸散发的各种影响因子随着气候及下垫面条件的变化不确定性较大,在陆面蒸发的估算过程中往往会进行不合理替代,从而因水量不平衡等问题而导致深入研究受限。因此,在具体的气候类型区对比研究不同方法的估算能力和适用性十分必要^[9-10]。鉴于此,本文将利用大汶河流域陆面过程综合观测资料,探讨MODIS遥感方法、SWAT模型法、水面蒸发折算系数法在大汶河流域的适应性,并根据水量平衡公式对其计算结果进行比较分析,以期在半湿润地区陆面蒸发研究方法的选择提供一定的参考。

1 研究区域概况

大汶河流域位于山东省中部的泰山南麓,总流

域面积为9 069 km²,是黄河下游重要支流。流域地属温带大陆性半湿润季风气候区,多年平均年降水量711 mm,其中6月-9月降雨量占年降雨量的75%。流域内降水时空分布不均,东多西少,年际年内分配不均,旱涝灾害较严重。

本文选取了大汶河流域上游受人为调蓄、消耗影响较小,能大致反映流域天然径流情况的雪野水库、黄前水库以及东周水库控制的三个闭合子流域。其中,雪野水库位于莱芜市北部,黄前水库和东周水库分别位于泰安市的东北部和东南部,见图1。



图1 研究区域概况

Fig. 1 Sketch map of the study area

2 陆面蒸发量估算

2.1 MODIS 遥感方法

MODIS是中分辨率成像光谱仪(MODerate resolution Imaging Spectroradiometer)的简称,作为新一代“图谱合一”的光学遥感仪器,其数据与产品已经被越来越多地用于监测地表能量平衡与水分状况。MODIS搭载在两颗太阳同步极轨卫星-Terra和Aqua上,为了获取多波段的降雨、蒸发等水文数据,两颗星相互配合每天或每两天对地球表面进行重复观测,从而使人们更加深入地理解全球陆地、海洋和低层大气内水分的动态变化规律。

近年来美国国家航空航天局基于彭曼·蒙蒂斯模型结合MODIS遥感数据在蒸散发反演算法上取得了重大突破,并在地球观测系统上发布了全球MODIS陆地蒸散发旬、月合成产品数据系列(MOD16),它能够提供模拟精度高达86%的地表蒸散量的特征参数,且能在NASA网站上免费获得^[11-12],因此本文选用MOD16产品来进行大汶河流域实际蒸散发的估算。

MOD16产品数据集提供了包括蒸散发(ET)、潜热通量(LE)、潜在蒸散发(PET)和潜在潜热通量(PLE)的信息,MOD16蒸散发算法^[13]基于彭曼公式,计算时分别考虑了土壤表面蒸发、植被冠层截留水分蒸发和植物蒸腾量等因素。公式如下:

$$\lambda E = \frac{s \cdot A + \rho \cdot C_p \cdot (e_{sat} - e) / r_a}{s + \gamma \cdot (1 + r_s / r_a)} \quad (1)$$

式中： λE 为潜热通量； λ 为蒸发潜热； E 为蒸发量； s 为饱和水汽压与温度的曲线斜率； γ 为湿度计算常数； A 为可利用能量； ρ 为空气密度； C_p 为空气定压比热； e_{sat} 为饱和水汽压； e 为实际水汽压； r_a 为空气动力学阻抗； r_s 为表面阻抗。

本文直接选用大汶河流域 2000 年 1 月 - 2008 年 12 月空间分辨率为 1 km 的 GeoTiff 格式的 MOD16A2^[14-17] 月尺度陆面蒸发资料，分别利用三个子流域内的 MOD16 陆地 4 级标准格点数据，依据式(2) 求算三个子流域 2000 年 - 2008 年的多年平均年陆面蒸发量，得出雪野水库、黄前水库以及东周水库控制子流域的陆面蒸发量分别为 452.7 mm、451.9 mm 以及 421.0 mm。

$$E = \frac{1}{Y \cdot N} \sum_{y=1}^Y \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^{12} E_{m,y,n} \quad (2)$$

式中： $E_{m,y,n}$ 为某子流域 n 格点 y 年 m 月的陆面蒸发量； N 为子流域内的格点总个数； Y 为陆面蒸发资料总长度，本次为 9 a。

2.2 SWAT 模型法

本文采用美国农业部(USDA) 农业研究中心开发的 SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 模型中的蒸散发模块计算大汶河流域的实际蒸散发。SWAT 模型是一个具有很强水文物理基础的长时段分布式流域尺度水文模型，其采用微气象学的方法来计算蒸散量，模型中的 Hargreaves 法具有对气象资料要求低且计算精度较高等优点^[18]，所以本文采用 Hargreaves 法计算潜在蒸发。SWAT2012 模型采用的是 1985 年公布的对原方程做出几次修正后的方程：

$$\lambda E_0 = 0.0023 H_0 (T_{max} - T_{min})^{0.5} (T_{av} + 17.8) \quad (3)$$

式中： λ 为蒸发潜热 (MJ/kg)； E_0 为潜在蒸发量 (mm/d)； H_0 为地外辐射 (MJ/(m²·d))； T_{max} 为某天的最高气温 (°C)； T_{min} 为某天的最低气温 (°C)； T_{av} 为某天的平均气温 (°C)。

首先建立大汶河流域 SWAT 模型，根据雪野水库、黄前水库、东周水库的实际经纬度人工添加三个水库控制点，根据加载的 DEM 数据自动划分生成 54 个子流域，如图 2。在模型蒸散发模块中输入流域内 3 个代表性气象站泰安、泰山、淄川站的最高气温、最低气温与平均气温的数据，利用式(3) 计算得出各子流域的逐月潜在蒸发量。得到潜在蒸发量之后，SWAT 模型将计算植被冠层截留雨量蒸发、最大蒸腾量、最大升华量和最大土壤蒸发量，最后计算

得出土壤的实际升华量和蒸发量，最终得到实际陆面蒸发量。本文选取了 SWAT 模型计算得到的大汶河流域中 54 个子流域 2000 年 1 月 - 2008 年 12 月的逐月陆面蒸发资料，并计算得到三个水库控制的子流域 2000 年 - 2008 年多年平均年陆面蒸发量，见表 1。

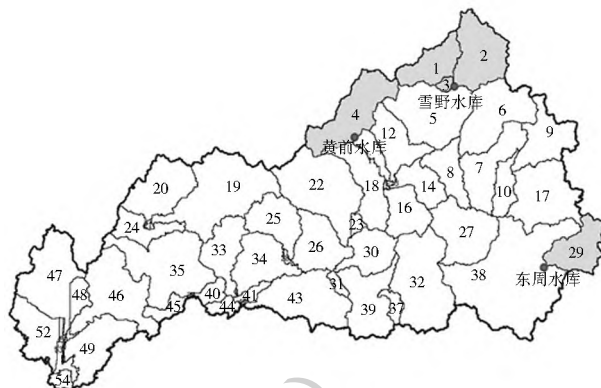


图 2 大汶河流域子流域划分

Fig. 2 Division of sub-basins in the Dawenhe River basin

表 1 水库控制子流域 2000 年 - 2008 年多年平均年陆面蒸发量 SWAT 模型计算结果

Tab. 1 Calculation results of the average annual land surface evaporation of the sub-basins controlled by reservoirs using SWAT model during 2000-2008

水库名	水库控制子流域编号	多年平均年陆面蒸发量/mm
雪野	sub1, sub2, sub3	523.7
黄前	sub4	520.6
东周	sub29	482.4

2.3 水面蒸发折算系数法

水面蒸发是供水充分条件下的蒸发，常用来作为反映蒸发能力的一个指标，其与陆面蒸发相比具有不同热力学性质的蒸发面，但由于它们发生的气候条件类似，因此两者存在一定的关系，可由水面蒸发量乘一个折算系数间接求得陆面蒸发量，即

$$E = K \times E_0 \quad (4)$$

式中： E 为陆面蒸发量； E_0 为水面蒸发量； K 为综合陆面蒸发折算系数，与区域内气候条件、土壤特性、植被种类、植被覆盖率等因素有关，取值在 0~1 之间。

水面蒸发量一般可由 E601 型蒸发皿观测值代替^[19-21]，本文采用的数据是雪野水库、黄前水库、东周水库 2000 年 1 月 - 2008 年 12 月的 E601 型蒸发皿蒸发资料，利用易于获得的水面蒸发量对大汶河流域陆面蒸发量进行估算，从而建立陆面蒸发与水面蒸发的关系。

为了避免自证，本文选取 1980 年 - 1999 年资料率参数 K ，并将优选的参数移植到 2000 年 - 2008 年与其他两种方法比较。 K 值优选采用年径

流残差平方和最小为目标函数^[22-23], 具体公式如下:

$$\min = \sum_{t=1}^n (R_t - R_{0t})^2 \quad (5)$$

$$\text{其中: } R_t = P_t - K \times E_{0t} \quad (6)$$

式中: R_t 为第 t 年的估算径流量; P_t 为第 t 年的降雨量; E_{0t} 为第 t 年的水面蒸发量; R_{0t} 为第 t 年的天然径流量; n 为径流资料长度, 本次取 20 a。

利用 1980 年- 1999 年的多年降雨、水面蒸发及天然径流资料, 雪野水库、黄前水库、东周水库控制的三个子流域均能得出一个折算系数, 分别为: 0.76、0.70、0.47。率定期年径流过程对比见图 3, 由图可知, 三个子流域的估算径流与天然径流拟合情况良好。

利用 1980 年- 1999 年的多年降雨、水面蒸发及天然径流资料, 雪野水库、黄前水库、东周水库控制的三个子流域均能得出一个折算系数, 分别为: 0.76、0.70、0.47。率定期年径流过程对比见图 3, 由图可知, 三个子流域的估算径流与天然径流拟合情况良好。

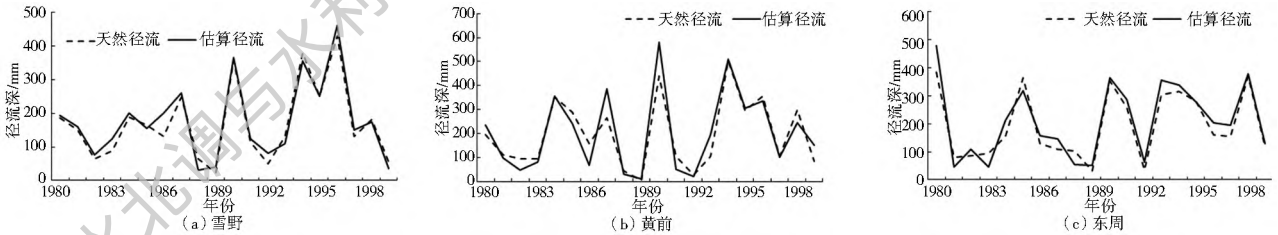


图 3 水库控制子流域率定期年径流过程对比

Fig. 3 Comparison of the annual runoffs during the calibration period

利用每个子流域算出的折算系数乘 2000 年-2008 年的多年平均年水面蒸发量, 从而求得 2000 年-2008 年多年平均年陆面蒸发量, 计算结果见表 2。

表 2 水库控制子流域 2000 年- 2008 年多年平均年陆面蒸发量估算

Tab. 2 Estimation of the average annual land surface evaporation of the sub-basins during 2000-2008

水库名	多年平均年水面蒸发量/mm	K 值	多年平均年陆面蒸发量/mm
雪野	664.1	0.76	504.7
黄前	725.4	0.70	507.8
东周	988.1	0.47	464.4

4 结果比较

为了验证区域蒸散发估算结果, 选取了大汶河

流域 2000 年- 2008 年的降水和实测径流资料, 结合上文通过 MODIS 遥感数据、SWAT 模型以及综合陆面蒸发折算系数估算的子流域多年平均年陆面蒸发量, 运用水量平衡公式评估三种方法的估算精度:

$$R = P - E \quad (7)$$

式中: R 为多年平均年径流量; P 为多年平均年降水量; E 为多年平均年陆面蒸发量; 以上各项以水深 mm 计。

分别计算利用三种方法得到的三个子流域 2000 年- 2008 年的多年平均年径流量与多年平均年天然径流量的绝对误差与相对误差, 结果比较见表 3。水库控制子流域 2000 年- 2008 年多年平均月径流过程对比见图 4。

表 3 不同陆面蒸发估算方法结果比较

Tab. 3 Comparison between the results of different methods of estimating land surface evaporation

水库名	年天然径流/mm	MODIS 遥感方法			SWAT 模型法			水面蒸发折算系数法		
		年径流计算值/mm	绝对误差/mm	相对误差 (%)	年径流计算值/mm	绝对误差/mm	相对误差 (%)	年径流计算值/mm	绝对误差/mm	相对误差 (%)
雪野	244.4	319.0	74.6	30.5	248.0	3.6	1.5	267.0	22.6	9.2
黄前	277.1	357.7	80.6	29.1	289.0	11.9	4.3	301.8	24.7	8.9
东周	238.2	306.3	68.1	28.6	244.9	6.7	2.8	262.9	24.7	10.4

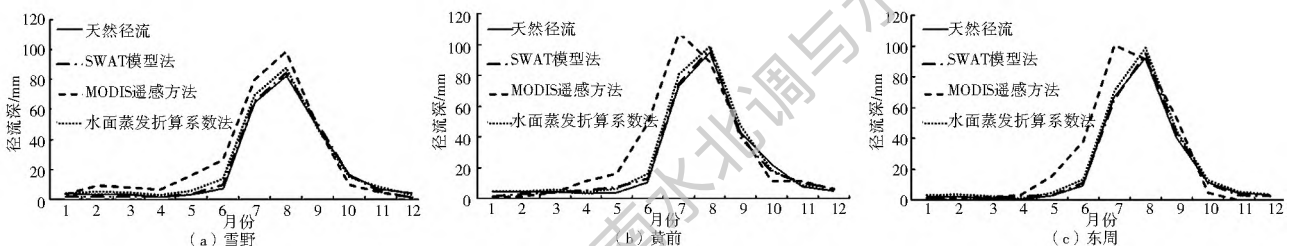


图 4 水库控制子流域 2000 年- 2008 年多年平均月径流过程对比

Fig. 4 Comparison between average monthly runoff processes of the sub-basins controlled by reservoirs during 2000-2008

由表 3 和图 4 可看出, 不同子流域的结果是一致的, 即利用 SWAT 模型计算得出的多年平均年径流量与多年平均年天然径流量的相对误差均为最小, 误差值集中在 3% 左右; MODIS 遥感方法计算的相对误差最大, 三个子流域的平均值为 29.4%; 水面蒸发折算系数法计算的相对误差较小, 平均值为 9.5%。表明在大汶河流域, SWAT 模型估算的陆面蒸发精度最高, 水面蒸发折算系数法次之, 在实际工作中可以采用这两种方法估算此流域的陆面蒸发。

5 结论

区域陆面蒸散发的准确估算对区域水资源优化配置有一定参考价值。本文以大汶河流域的三个子流域为例对 MODIS 遥感方法、SWAT 模型法、水面蒸发折算系数法对陆面蒸散发的估算效果进行了分析评价, 得出以下主要结论。

(1) 由于区域下垫面条件复杂, 格点内蒸散发差异较大, 因此利用 MODIS 全球蒸散发产品 MOD16 产品估算小区域陆面蒸发应当慎重, 依据其评价区域天然径流量可能会产生较大误差。未来遥感技术应致力于增加卫星数量, 实现多源遥感数据的融合, 同时加强对于较小空间范围的监测, 进一步提高产品精度。

(2) 利用水面蒸发折算系数法估算区域陆面蒸发具有一定精度, 由于信息易于获取, 在缺乏详细气象资料时, 可作为可选的方法, 但由于 K 的区域性较强, 应进行仔细率定。

(3) SWAT 模型估算流域实际陆面蒸散发的相对误差仅在 3% 左右, 表明模型中的 Hargreaves 法在大汶河流域的应用效果好, 只需要结合少量气象资料即可估算出高精度的流域实际陆面蒸散量。

参考文献(References):

- [1] 朱非林, 王卫光, 孙一萌, 等. 汉江流域实际蒸散发的时空演变规律及成因分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2013, 41(4): 300-306. (ZHU Fei lin, WANG Wei guang, SUN Yi meng, et al. Spatial and temporal variations of actual evapotranspiration and their causes in Hanjiang River basin[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2013, 41(4): 300-306. (in Chinese)) DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2013.04.004
- [2] 刘晓帆, 任立良, 袁飞, 等. 双源蒸散发能力计算模型在半干旱区的适用性[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2009, 37(2): 138-142. (LIU Xiaofan, REN Liliang, YUAN Fei, et al. Applicability of two source potential evapotranspiration model in semi arid areas[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2009, 37(2): 138-142. (in Chinese)) DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2009.02.003
- [3] 袁小环, 杨学军, 陈超, 等. 基于蒸渗仪实测的参考作物蒸散发模型北京地区适用性评价[J]. 农业工程学报, 2014, 30(13): 104-110. (YUAN Xiaohuan, YANG Xuejun, CHEN Chao, et al. Applicability assessment of reference evapotranspiration models in Beijing based on lysimeter measurement[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(13): 104-110. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.13.013
- [4] 詹志明. 区域遥感蒸散发模型方法研究[J]. 遥感技术与应用, 2002, 17(6): 364-369. (ZHAN Zhiming. Study on regional evapotranspiration model based on remote sensing method[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2002, 17(6): 364-369. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-0323.2002.06.016
- [5] 王中根, 刘昌明, 黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究[J]. 地理科学进展, 2003, 22(1): 79-86. (WANG Zhonggen, LIU Changming, HUANG Youbo. The theory of SWAT model and its application in Heihe basin[J]. Progress in Geography, 2003, 22(1): 79-86. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-6301.2003.01.010
- [6] 钱坤, 叶水根, 朱琴. 基于 SWAT 模型的房山区不同情景方案下的蒸腾蒸发模拟[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 99-105. (QIAN Kun, YE Shuigen, ZHU Qin. Evapotranspiration simulation with different scenarios analyses of Fangshan District by SWAT model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(1): 99-105. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.01.015
- [7] 胡顺军, 田长彦, 周宏飞, 等. 渭干河灌区陆面蒸发量估算[J]. 干旱区地理, 2000, 23(1): 67-71. (HU Shunjun, TIAN Changyan, ZHOU Hongfei, et al. Estimation of land evaporation in the Weigan irrigated area, Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2000, 23(1): 67-71. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-6060.2000.01.012
- [8] 邱新法, 刘昌明, 曾燕. 黄河流域近 40 年蒸发皿蒸发量的气候变化特征[J]. 自然资源学报, 2003, 18(4): 437-442. (QIU Xinfafa, LIU Changming, ZENG Yan. Changes of pan evaporation in the recent 40 years over the Yellow River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(4): 437-442. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-3037.2003.04.007
- [9] 张国华, 郭磊, 刘健, 等. 山东省陆面实际蒸发量估算及变化特征分析[J]. 人民黄河, 2014, 36(10): 26-29. (ZHANG Guohua, GUO Lei, LIU Jian, et al. Estimation and variation characteristics of land actual evapotranspiration in Shandong Province[J]. Yellow River, 2014, 36(10): 26-29. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2014.10.008
- [10] 张可义. 沧州市蒸发量特性分析[J]. 水利科技与经济, 2011, 17(5): 68-69. (ZHANG Keyi. Analysis on the characteristics of evaporation in Cangzhou City[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2011, 17(5): 68-69. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1006-7175.2011.05.029
- [11] 范建忠, 李登科, 高茂盛. 基于 MOD16 的陕西省蒸散量时空

- 分布特征[J]. 生态环境学报, 2014, 23(9): 1536-1543. (FAN Jiannong, LI Dengke, GAO Maosheng. Spatiotemporal variations of evapotranspiration in Shaanxi Province using MOD16 products[J]. Ecology and Environment Sciences, 2014, 23(9): 1536-1543. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1674-5906.2014.09.022
- [12] 冯飞, 姚云军, 张彦彬, 等. 基于 MOD16 产品的三江平原蒸散发时空分布特征分析[J]. 生态环境学报, 2015, 24(11): 1858-1864. (FENG Fei, YAO Yunjun, ZHANG Yanbin, et al. Spatiotemporal variations of evapotranspiration in Sanjiang Plain using MOD16 products[J]. Ecology and Environment Sciences, 2015, 24(11): 1858-1864. (in Chinese)) DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2015.11.016
- [13] 夏浩铭, 李爱农, 赵伟, 等. 遥感反演蒸散发时间尺度拓展方法研究进展[J]. 农业工程学报, 2015, 31(24): 162-173. (XIA Haoming, LI Aining, ZHAO Wei, et al. Review of temporal scale expansion for evapotranspiration retrieved by remote sensing data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(24): 162-173. (in Chinese)) DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.24.025
- [14] 杨秀芹, 王磊, 王凯. 基于 MOD16 产品的淮河流域实际蒸散发时空分布[J]. 冰川冻土, 2015, 37(5): 1343-1352. (YANG Xiurong, WANG Lei, WANG Kai. Spatiotemporal distribution of terrestrial evapotranspiration in Huaihe River basin based on MOD16 ET data[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(5): 1343-1352. (in Chinese)) DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2015.0148
- [15] 田文婷, 王飞, 王新, 等. 钱塘江流域蒸散发遥感估算[J]. 浙江水利科技, 2015, 43(6): 84-89. (TIAN Wenting, WANG Fei, WANG Xin, et al. Evapotranspiration remote sensing estimation of Qiantang River[J]. Zhejiang Hydraulics, 2015, 43(6): 84-89. (in Chinese)) DOI: 10.13641/j.cnki.33-1162/tv.2015.06.026
- [16] 张巧凤, 刘桂香, 于红博, 等. 基于 MOD16A2 的锡林郭勒草原近 14 年的蒸散发时空动态[J]. 草地学报, 2016, 24(2): 286-293. (ZHANG Qiaofeng, LIU Guixiang, YU Hongbo, et al. Temporal and spatial dynamic of ET based on MOD16A2 in recent fourteen years in Xilingol Steppe[J]. Acta Agrestia Sinica, 2016, 24(2): 286-293. (in Chinese)) DOI: 10.11733/j.issn.1007-0435.2016.02.007
- [17] 贺添, 邵全琴. 基于 MOD16 产品的我国 2001-2010 年蒸散发时空格局变化分析[J]. 地球信息科学学报, 2014, 16(6): 979-988. (HE Tian, SHAO Quanshen. Spatiotemporal variation of terrestrial evapotranspiration in China from 2001 to 2010 using MOD16 products[J]. Journal of Geographical Science, 2014, 16(6): 979-988. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1047.2014.00979
- [18] 刘宏伟, 余钟波. 用 Hargreaves 法与 Penman-Monteith 法计算 ET₀——以太湖流域的应用为例[J]. 水资源保护, 2010, 26(1): 6-8. (LIU Hongwei, YU Zhongbo. Application of Hargreaves and Penman-Monteith Equation to estimating ET₀: a case study in Taihu basin[J]. Water Resources Protection, 2010, 26(1): 6-8. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2010.01.002
- [19] 王艳君, 姜彤, 许崇育. 长江流域 20cm 蒸发皿蒸发量的时空变化[J]. 水科学进展, 2006, 17(6): 830-833. (WANG Yanjun, JIANG Tong, XU Chongyu. Spatiotemporal change of 20cm pan evaporation over the Yangtze River basin[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(6): 830-833. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn.1001-6791.2006.06.013
- [20] 胡微. 浅谈特殊雨情下 E601 型蒸发器的蒸发量计算[J]. 陕西水利, 2011(5): 148-150. (HU Wei. The evaporation of E601 type evaporator under special situation[J]. Shaanxi Water Resources, 2011(5): 148-150. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1673-9000.2011.05.079
- [21] 荣艳淑, 张行南, 姜海燕, 等. 长江上游区域蒸发皿蒸发量变化及其对水分循环的影响[J]. 地球物理学报, 2012, 55(9): 2889-2897. (RONG Yanshu, ZHANG Xingnan, JIANG Haiyan, et al. Pan evaporation change and its impact on water cycle over the upper reach of the Yangtze River[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(9): 2889-2897. (in Chinese)) DOI: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.09.008
- [22] 邹乐强. 最小二乘法原理及其简单应用[J]. 科技信息, 2010, 02(23): 282-283. (ZOU Leqiang. Principle of least square method and its simple application[J]. Science and Technology Information, 2010, 02(23): 282-283. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-9960.2010.23.875
- [23] 谢万银, 陈英, 徐彬. 甘肃民勤小型与 E601 型蒸发皿蒸发量折算系数分析[J]. 干旱气象, 2014, 32(3): 481-486. (XIE Wanyin, CHEN Ying, XU Bin. Analysis on small type and E601 type evaporation conversion coefficient in Minqin of Gansu Province[J]. Journal of Arid Meteorology, 2014, 32(3): 481-486. (in Chinese)) DOI: 10.11755/j.issn.1006-7639(2014)-03-0481