

基于MODIS数据的博斯腾湖流域 地表蒸散时空变化

徐永明¹,赵巧华¹,巴雅尔²,白淑英¹,孙德勇¹

(1. 南京信息工程大学遥感学院, 江苏 南京 210044; 2. 新疆巴音郭楞蒙古自治州
博斯腾湖研究所, 新疆 库尔勒 841000)

摘要: 基于2002~2009年期间的MODIS遥感数据和气象观测数据,运用能量平衡法计算博斯腾湖流域的地表蒸散量,蒸散平均绝对误差为12.39 mm,相对误差为14.15%。根据遥感反演结果分析了研究区地表蒸散的时空变化特征及其与降水、气温等气候因子的关系。博斯腾湖流域年地表蒸散表现出西北高东南低的空间分布格局,明显受到土地覆盖类型的影响。蒸散季节变化主要表现为单峰形式,夏季蒸散量占全年总蒸散量的48.10%。降水、气温对于博斯腾湖流域的地表蒸散变化有重要影响,并且在不同季节中两者的贡献度存在很大差异。

关键词: 博斯腾湖流域; 蒸散; 遥感; 时空变化

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2012)11-1353-05

地表蒸散是水分循环过程中的关键环节,也是能量平衡的主要项^[1-3]。获取蒸散的时空变化特征对于了解水分循环与能量平衡过程具有重要的科学意义与实用价值^[4]。传统的地表蒸散研究往往根据气象或水文数据进行计算,局限于“点”尺度^[5]。卫星遥感技术的发展为地表蒸散的计算提供一种新的手段。近些年来,国内外利用遥感资料估算地表蒸散的研究逐渐增多^[4-9],但是针对干旱半干旱地区地表蒸散多年时空变化分析方面的研究还不多见。本文利用MODIS遥感数据和气象观测数据计算了博斯腾湖流域的地表蒸散量,对该流域蒸散的时空变化特征进行了分析,为该流域水资源管理和生态环境研究提供了重要的参考资料。

1 研究区与研究数据

1.1 研究区概况

博斯腾湖流域位于天山南坡的新疆维吾尔自治区巴音郭楞蒙古自治州,82°57'~88°18'E,41°25'~43°34'N之间,流域面积约4.33×10⁴km²(图1)。流域西北部为巴音布鲁克草原,海拔在2400~

4500 m之间,气候为高寒山区气候,土地覆盖以高寒草甸、高寒草原和高寒低地沼泽草甸为主。流域东南部为焉耆盆地,海拔在1000~2000 m之间,气候为温带大陆性干旱气候,土地覆盖以荒漠、农田和水体为主。研究区地处西北干旱内陆区,水资源的变化直接制约着生态系统的发展演变趋势^[10,11]。准确的掌握流域内地表蒸散的时空变化信息,对于理解流域水分循环、气候变化以及人类活动对于流域生态系统的影响具有重要意义。

1.2 研究数据

研究过程中使用的遥感数据主要为2002年7月至2009年12月的AQUA/MODIS数据,包括年合成土地覆盖产品、月合成植被指数产品、8 d合成地表温度产品和16 d合成反照率产品。此外,海拔数据使用了SRTM DEM数据。对所有遥感数据进行投影转换,对地表温度和反照率数据进行插补,消除无效值,然后按月进行合成处理,与NDVI数据相匹配。

气象资料为博斯腾湖流域范围内及周边地区9个气象站点2002年7月至2009年12月的逐日最高气温、平均风速、降水资料,此外还有1个站点

收稿日期: 2011-12-25; **修订日期:** 2012-02-13

基金项目: 国家环保行业科研专项(200909048)、国家重大专项水体污染控制与治理项目(2009ZX07106-004)资助。

作者简介: 徐永明(1980-),男,江苏连云港人,讲师,主要从事资源环境遥感研究。E-mail: xym30@263.net

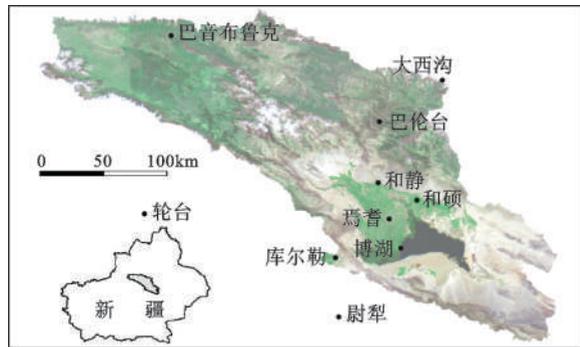


图1 博斯腾湖流域及气象站点分布

Fig. 1 Bosten Lake Basin and the spatial distribution of meteorological stations

(博湖站)2005~2009年的蒸发皿资料(图1)。为了与遥感资料相匹配,对逐日气象资料进行月合成处理,得到月合成的逐日最高气温、平均风速、降水和蒸发资料。

2 研究方法

地表能量平衡是遥感估算蒸散的理论基础,在不考虑光合作用耗能和水平方向能量输送的情况下,地表能量平衡方程可表达为:

$$R_n = G + H + L_{LE} \quad (1)$$

式中, R_n 为净辐射, G 为土壤热通量, H 为显热通量, L_{LE} 为潜热通量。通过计算净辐射通量、土壤热通量和显热通量来推算潜热通量,进一步计算可得到地表蒸散量。

2.1 净辐射

地表净辐射 R_n 的表达式为:

$$R_n = (1 - \alpha) \cdot R_s \downarrow + \varepsilon R_L \downarrow - R_L \uparrow \quad (2)$$

式中, α 为地表反照率, $R_s \downarrow$ 为太阳短波辐射, $R_L \downarrow$ 为大气下行长波辐射, $R_L \uparrow$ 为地面长波辐射, ε 为地表比辐射率。

计算净辐射过程中有两个重要的参数需要计算:大气透过率和近地表气温。根据宗雪梅等研究结果中^[12]乌鲁木齐和喀什两地光学厚度及海拔,建立了新疆地区光学厚度与海拔的简单线性关系,根据6S模型模拟大气透过率随光学厚度及海拔的变化关系,建立2维查找表,根据查找表计算出研究区的大气透过率。根据站点气温数据和对应位置的地表温度、海拔、NDVI及太阳天顶角等建立了气温的分段经验方程,反演得到研究区的近地表气温。

2.2 土壤热通量

对于植被和非植被地区,分别用不同的经验

公式来估算土壤热通量^[13,14]:

$$G = \begin{cases} \left[\frac{T_s}{a} (0.0038a + 0.0074a^2)(1 - 0.98N_{NDVI}^4) \right] R_n & \text{植被区} \\ c_g \cdot R_n & \text{非植被区} \end{cases} \quad (3)$$

式中,地表温度 T_s 的单位为 $^{\circ}\text{C}$, c_g 是针对不同地表的经验常数, N_{NDVI} 为NDVI的值。

2.3 显热通量

显热通量的计算公式为:

$$H = \rho \cdot C_p \cdot T_d / r_{ah} \quad (4)$$

式中, ρ 为空气密度(kg/m^3), C_p 为空气定压比热($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$), T_d 为地气温差($T_s - T_a$), r_{ah} 为空气动力学阻抗(s/m)。

求出中性稳定度下的摩擦速率 μ^* 与空气动力学阻抗 r_{ah} ,引入Moin-obukov长度通过多次循环递归运算对 μ^* 和 R_{ah} 进行修正,直到得到稳定的潜热通量 H 值为止。

2.4 日蒸散量

求出净辐射 R_n 、土壤热通量 G 和显热通量 H 后,根据式(1)计算出瞬时潜热通量 L_{LE} ,根据蒸发比不变法进行时间尺度扩展得到日蒸散量^[15],然后计算出2002年7月至2009年12月的月蒸散以及年蒸散量。

3 结果与讨论

3.1 蒸散结果比较评价

由于博斯腾湖流域缺乏通量观测资料,无法对蒸散遥感反演结果进行非常严格验证。利用气象站蒸发资料进行比较评价,一定程度上能反映反演结果的可信性和合理性。博湖站距离博斯腾湖非常近($<2 \text{ km}$),其蒸发状况与湖面水体很相近,因此可以用该站点蒸发数据与附近水体的遥感蒸散结果进行比较。根据博斯腾湖流域附近的塔里木河流域水面蒸发折算系数^[16]将蒸发皿数据转换为大面积水面蒸发量,与附近水体的遥感蒸散数据进行比较(图2)。两者的相关系数为0.97,平均绝对误差为12.39 mm,相对误差为14.15%。需要指出的是,相对于整个流域复杂的地表覆盖和气候空间分布,利用博湖站点数据的评价结果主要反映站点附近水体蒸散量的精度,而其它区域由于缺乏资料,目前尚无法进行更详尽的验证。

3.2 蒸散的空间分布特征

对遥感反演得到的2003~2009年的地表年蒸

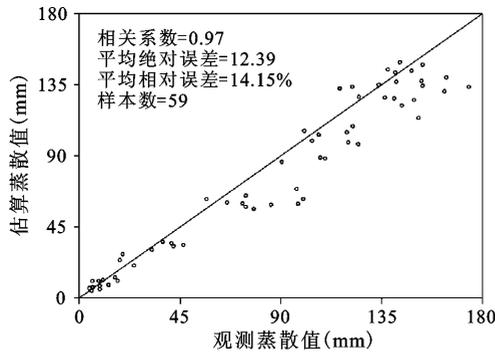


图2 博湖站点观测蒸发量与附近水体遥感估算蒸散量
Fig. 2 Scatter plot between observed ET of Bohu station and estimated ET of the Tarim River nearby Bosten Lake

散进行平均,得到博斯腾湖流域的7 a 平均蒸散分布图(图3)。从整体上看,研究区体现出西北高、东南低的特点。西北部主要是草地,蒸散年均值一般在250~400 mm之间。东南部的博斯腾湖及小湖区湿地具有最高的蒸散值,普遍在700 mm以上,博湖西部的农耕区也具有较高的蒸散值,一般在300~400 mm之间。湖区周围的荒漠地带年平均地表蒸散量多在150 mm以下,显著低于其它地区。

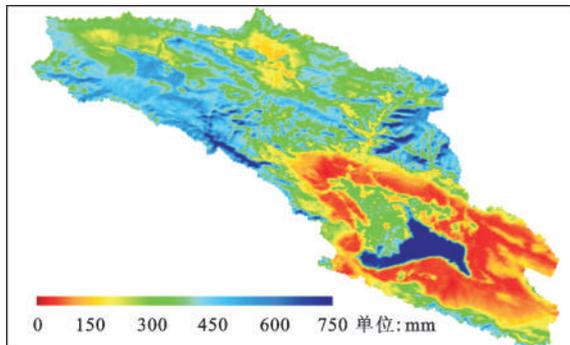


图3 博斯腾湖流域年平均蒸散量空间分布
Fig. 3 The spatial distribution of mean annual ET of Bosten Lake Basin

3.3 蒸散的时间变化特征

图4给出了博斯腾湖流域地表蒸散年内变化趋势。可以看出,蒸散的年内变化呈现单峰特征。1~4月蒸散缓慢上升,4~7月蒸散急剧升高,在7月达到最高值(56.25 mm)。然后7~11月期间迅速下降,11~12月缓慢下降,12月份的蒸散量为全年最低(8.48 mm)。博斯腾湖流域的地表蒸散主要集中于夏季,6~8月的地表蒸散量占全年总蒸散量的48.10%。冬季蒸散最低是因为气温较低和降水少的缘故;春季由于气温回升,加上积雪融水的

补给使得地表蒸散显著升高;夏季气温最高,冰雪融水最多,而且流域的降水也主要集中在该季节,因此地表蒸散保持在较高的水平上;秋季气温回落,降水也减少,使得地表蒸散迅速下降。

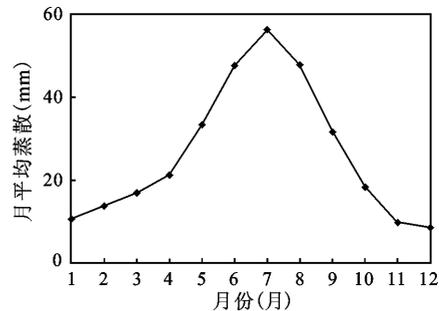


图4 博斯腾湖流域月平均蒸散的年内变化趋势
Fig. 4 Intra-annual variations of mean monthly ET of Bosten Lake Basin

降水和温度是影响地表蒸散的关键气象要素,降水提供土壤水分,温度影响植物冠层气孔导度的大小和土壤表面蒸发等过程,还影响高海拔地区冰雪融化的速度进而影响土壤水分含量。将2002年9月至2009年11月的博斯腾湖流域月平均蒸散与流域内9个气象站点的月平均降水、气温进行比较(图5),可见月蒸散与降水、气温的时相变化趋势非常相近。将蒸散与降水、气温进行相关分析,相关系数分别为0.90和0.89,说明蒸散的变化受到降水和气温的影响,降水越多,气温越高,地表蒸散量也越高。将这87个月按照春夏秋冬4个季节分别进行相关分析,结果见表1。春季蒸散与降水的相关系数要远高于蒸散与气温的相关系数,说明该季节流域的土壤含水量一般都处于不饱和状态,制约蒸散的主要因素是水而不是热。

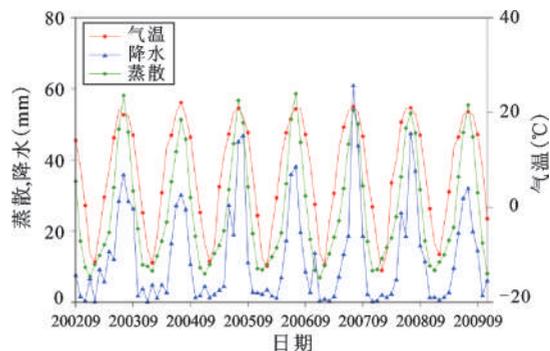


图5 月蒸散与气温、降水的时间序列变化
Fig. 5 Temporary variations of mean monthly ET, air temperature and precipitation

表1 4个季节蒸散与降水以及气温之间的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between monthly ET and precipitation, temperature during four seasons

	春季	夏季	秋季	冬季
降水	0.64 **	0.85 **	0.66 **	-0.11
气温	0.27 *	0.89 **	0.97 **	0.41 **

*表示通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验;**表示通过 $\alpha=0.01$ 的显著性检验

夏季蒸散与降水、气温的相关系数都很高,说明该季节降水和气温都是地表蒸散的重要影响因素。秋季蒸散与气温的相关系数要远高于蒸散与降水的相关系数,说明该季节土壤水分相对充足,地表蒸散的影响因素主要是气温。冬季蒸散与降水的相关系数为负值,且显著度不高,说明该地区冬季蒸散主要受气温影响,受降水影响很小。

4 结 论

本文利用MODIS数据研究了博斯腾湖流域地表蒸散的时空变化,得到以下几点结论:

1) 遥感反演地表蒸散的平均绝对误差为12.39 mm,平均相对误差为14.15%,说明遥感估算值合理可信,通过卫星遥感方法能够获取地表蒸散量的准确时空分布信息。

2) 博斯腾湖流域地表蒸散在空间上体现出西北高、东南低的特点。西北部草地蒸散年均值一般在250~400 mm之间,而东南部除了博斯腾湖及小湖区湿地之外的荒漠地带的年平均蒸散量多在150 mm以下,地表蒸散的空间分布特征明显受土地覆盖的影响。

3) 流域蒸散的年内变化呈单峰格局,7月最高(56.25 mm),12月最低(8.48 mm),夏季的地表蒸散量占全年总蒸散量的48.10%,体现出显著的季节变化特征。

4) 流域蒸散与降水、气温的相关分析表明,蒸散的变化受到降水和气温的影响,降水越多,气温越高,地表蒸散量也越高。从不同季节来看,春季降水对蒸散的影响大于气温;夏季蒸散与降水、气温都存在明显的正相关性;秋季和冬季气温对蒸散的影响要大于降水。

参考文献:

- [1] 易永红, 杨大文, 刘 钰. 区域蒸散发遥感模型研究的进展[J]. 水利学报, 2008, **39**(9): 1118~1124.
- [2] 张小磊, 杨梅学. 基于GAME-Tibet IOP的青藏高原蒸散研究[J]. 地理科学, 2010, **30**(6): 929~935.
- [3] 姚玉璧, 王润元, 杨金虎, 等. 黄土高原陆地表层作物生长季最大可能蒸散量的变化特征[J]. 地理科学, 2011, **31**(8): 989~995.
- [4] 李发鹏, 徐宗学, 李景玉. 基于MODIS数据的黄河三角洲区域蒸散发量时空分布特征[J]. 农业工程学报, 2009, **25**(2): 113~120.
- [5] 杜 嘉, 张 柏, 宋开山, 等. 基于MODIS产品和SEBAL模型的三江平原日蒸散量估算[J]. 中国农业气象, 2010, **31**(1): 104~110.
- [6] Bastiaanssen W G M, Menenti m, Feddes R A, et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation[J]. Journal of Hydrology, 1998, **212-213**: 198-212.
- [7] Cleugh H A, Leuning R, M U Q, et al. Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, **106**: 285-304.
- [8] 刘三超, 张万昌, 高懋芳, 等. 分布式水文模型结合遥感研究地表蒸散发[J]. 地理科学, 2007, **27**(3): 354~358.
- [9] 张万昌, 高永年. 区域土壤植被系统蒸散发二源遥感估算[J]. 地理科学, 2009, **29**(4): 523~528.
- [10] 孙才志, 谢 巍, 邹 玮. 中国水资源利用效率驱动效应测度及空间驱动类型分析[J]. 地理科学, 2011, **31**(10): 1213~1220.
- [11] 李 艳, 张鹏飞, 唐晓春. 气候变暖背景下塔里木盆地水资源可持续利用[J]. 地理科学, 2011, **31**(11): 1403~1408.
- [12] 宗雪梅, 邱金桓, 王普才. 近10年中国16个台站大气气溶胶光学厚度的变化特征分析[J]. 气候与环境研究, 2005, **10**(2): 201~208.
- [13] Bastiaanssen W G M. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey[J]. Journal of Hydrology, 2000, **229**: 87-100.
- [14] Morse A, Tasumi M, Allen R G, et al. Application of the SEBAL Methodology for Estimating Consumptive Use of Water and Stream flow Depletion in the Bear River Basin of Idaho through Remote Sensing[R]. Synergy Phase 1 Final Report, Idaho Department of Water Resources, Boise, Idaho, 2000: 46-70.
- [15] Cargo R D. Conversion and variability of the evaporative fraction during the daytime[J]. Journal of Hydrology, 1996, **180**: 173-194.
- [16] 胡顺军, 田长彦, 宋郁东, 等. 塔里木河流域水面蒸发折算系数分析[J]. 中国沙漠, 2005, **25**(5): 649~651.

Spatio-temporal Variations of Land Surface Evapotranspiration of Bosten Lake Basin Based on MODIS Data

XU Yong-ming¹, ZHAO Qiao-hua¹, BA Ya-er², BAI Shu-ying¹, SUN De-yong¹

(1. School of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China;

2. Bosten Lake Science Research Institute of Bayangol Mongol Autonomous Prefecture, Kuerle, Xinjiang 841000, China)

Abstract: Land surface evapotranspiration is an important process in the energy balance and water cycle between the atmosphere and the land surface. Detailed understanding of the spatial and temporal variations of land surface evapotranspiration is critical for hydrologic cycle study and water resource management, especially in arid and semi-arid area. Satellite remote sensing provides a straightforward and consistent way to observe evapotranspiration over large scales with more spatially detailed information than traditional in-situ observation. In this paper, remote sensing data from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) on the EOS/AQUA satellite and ground meteorological data from July 2002 to September 2009 were employed to estimate the land surface evapotranspiration in Bosten Lake Basin, Xinjiang Uygur Autonomous Region. Four remotely-sensed variables (land cover, land surface temperature, normalized difference vegetation index and surface albedo) and three ground measured variables (air temperature, precipitation and wind velocity) were used. First the net radiation, ground heat flux and sensible heat flux were estimated and therefore the latent heat flux could be calculated based on the surface energy balance approach. Then the accumulated daily evapotranspiration was derived by up-scaling the instantaneous latent heat flux under the assumption of constant daytime evaporative fraction. The validation of the estimated evapotranspiration gives a satisfactory accuracy with the mean absolute error of 12.39 mm and the mean relative error of 14.15%. The annual mean land surface evapotranspiration of Bosten Lake Basin exhibits a distinguishable spatial pattern, high in the northwest (higher than 700 mm) and low in the southeast (lower than 150 mm). The Bosten Lake and the small lake wetland exhibit the highest evapotranspiration while the desert around Bosten Lake exhibits obviously lower evapotranspiration than other areas, indicating that the spatial distribution of evapotranspiration is highly influenced by land cover. The seasonal variation of mean evapotranspiration shows a unimodal pattern, with the evapotranspiration in summer accounts for 48.10% of the whole year. Evapotranspiration is significantly positively correlated with precipitation and air temperature, suggesting that the evapotranspiration in Bosten Lake Basin increases with precipitation and air temperature. Furthermore, the two climate factors show different contributions to evapotranspiration in different seasons. In spring, the precipitation has more impact on evapotranspiration than air temperature; in summer, both precipitation and air temperature have obvious high correlation coefficients with evapotranspiration; in autumn and winter, air temperature has greater effect on evapotranspiration than air temperature. This study shows that satellite remote sensing is an effective approach for estimating spatial land surface evapotranspiration at regional scale with the aid of meteorological data. The spatial and temporal variations of evapotranspiration provides important reference for the water resource management and ecological environment research of the Bosten Lake Basin.

Key words: Bosten Lake Basin; evapotranspiration; remote sensing; spatio-temporal variations