doi:10.3799/dqkx.2012.045

基于MODIS数据的海流兔河流域蒸散量的计算

张雨航[1],王晓林[1],胡光成[2]

1. 中国地质大学水资源与环境学院,北京 100083
2. 中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室,北京 100101

摘要:蒸散量是水均衡和能量平衡的重要组成部分,对全球气候的演变和水资源评价及分析研究十分重要,而准确估算蒸散量是当今研究热点之一.采用遥感模型,基于表面能量平衡系统的原理,选取了MOD09地表反射率和MOD11地表温度、辐射率数据,并结合实测的气象水文资料对该流域蒸散量进行了估算.海流兔河流域2008年全年蒸散量结果为324.94 mm.这一结果在海流兔河流域,用水均衡法得到了很好的验证.

关键词:蒸散量;水均衡;MODIS;遥感地质;环境工程;水文地质.
中图分类号:P641.2 **文章编号**:1000-2383(2012)02-0375-06 **收稿日期**:2010-08-12

Evapotranspiration Estimation of Hailiutu River Basin Based on MODIS Data

ZHANG Yu-hang[1], WANG Xiao-lin[1], HU Guang-cheng[2]

1. *School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China*
2. *State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*

Abstract: Evapotranspiration is an important component of both energy balance and hydrological budget. It also plays a major role in both assessment and analysis of water resources and global climate change. Accurate estimation the evapotranspiration is a key issue in hydrological study field. Based on the surface energy balance system, the surface reflection of MOD09 and land surface temperature, emissivity of MOD11 was used to estimate the evapotranspiration of Hailiutu River basin, combined with the observed meteorological and hydrological data. The results indicate that the annual evapotranspiration of Hailiutu River basin in 2008 is 324.94 mm, which is validated by water budget.

Key words: evapotranspiration; water budget; moderate-resolution imaging spectroradiometer; remote sensing geology; environmental engineering; hydrogeology.

0 引言

土壤蒸散发和植物蒸腾合称为蒸散,它是土壤-植物-大气系统中能量、水分传输和转化的主要途径.到达地面的太阳辐射有48%消耗于蒸散过程;陆地上64%的降水以蒸散的方式进入大气,直接参与地球水循环(Peixoto and Oort,1995).蒸散量是能量平衡和水分平衡的重要组成部分,因此准确地测定和估算蒸散量不仅对研究全球气候演变、环境问题以及水资源评价等有重要的意义,而且对指导排水灌溉、监测农业旱情、提高农业水资源的利用率等也有十分重大的意义(刘绍民等,2003).

在传统的区域蒸散量计算中,多数研究者使用以点带面的传统方法,精度往往难以满足实际需要.从20世纪70年代起,国外开展了利用卫星遥感技术估算区域蒸散发量的研究:Penman(1948)提出了Penman公式,这为以后的蒸散量估算模型奠定了基础;Brown and Rosenberg(1973)把红外遥感温度利用到作物蒸散模型中,并且提出了作物阻抗-蒸散模型;Bastiaanssen *et al*.(1998)提出了SEBAL模型;Roerink *et al*.(2000)提出了S-SEBI模型;Su(2002)提出用地表能量平衡系统(SEBS)估算湍流热通量,该模型利用遥感数据和气象观测数据,可以

基金项目:国家自然科学基金项目(No.40772158).
作者简介:张雨航(1985-),男,硕士,主要从事生态水文方面研究.E-mail:yuhang0728@163.com

获得非均匀下垫面不同尺度的地表湍流热通量和蒸发比.

在我国利用遥感技术进行蒸散量的定量计算研究起步相对较晚,近几年这方面的发展迅速:郭晓寅(2005)利用 NOAA/AVHRR 资料,选取 Priestley-Taylor 公式作为计算蒸散发量的模型,对黑河流域的蒸散发理进行了研究;周会珍等(2006)应用基于互补相关原理的平流－干旱模型,结合 1 km 分辨率的 NOAA/AVHRR、MODIS 反照率和气象资料,对乌审旗 1981－2003 年的地表蒸散量进行了估算;金晓媚等(2008a,2008b)运用 SEBS 方法对张掖盆地的区域蒸散量进行了估算,并在水均衡原理的基础上,对蒸散计算结果的准确性进行了验证;田辉等(2009)依据空气动力学方法和蒸散发量时间尺度扩展方案,利用 MODIS(moderate-resolution imaging spectroradiometer)资料和气象资料,计算中国西北内陆黑河流域复杂地形下,2004 年夏季(7 月)蒸散发量空间分布及总量. 随着近些年遥感技术的发展,传感器的更新换代,高分辨率的遥感数据的出现,将遥感信息与地面观测的水文、气象实测资料相结合,来计算区域蒸散量已经成为一种行之有效的方法. 本文是以海流兔河流域为例,利用 MODIS 数据,结合气象资料,运用遥感模型中的表面能量平衡法对该流域蒸散量进行估算,并用水均衡原理从区域尺度上验证了此方法的可行性.

1 研究区概况

鄂尔多斯高原地下矿产资源丰富,是我国重要的新兴能源基地,尤以煤炭遍布各地,地下埋藏煤炭占据高原面积的 80%,已探明储量达 1 050 亿 t,有“煤海”之称. 其中两大煤田,东胜煤田和准格尔煤田正在进行大规模建设,区内植被生态环境脆弱,因此解决水资源开发与生态环境保护的协调统一问题迫在眉睫. 而蒸散量是环境问题以及水资源评价问题的重要组成部分,其准确计算一直是一个难以解决的问题. 本文以海流兔河流域为背景,对蒸散量进行了探索性定量计算研究.

海流兔河流域位于鄂尔多斯盆地中部,流域面积 2 600 km^2. 区域内发育的海流兔河为无定河的一级支流,而无定河则为黄河的一级支流. 研究区地理坐标为东经 108° 17′ 36″ ～ 109° 40′ 22″ 和北纬 37°38′54″ ～39°23′50″,地处陕北黄土高原与毛乌素沙漠之间过渡带,地貌以沙丘沙地为主,地势北高南低、东西高、中间低,海流兔河河谷最低(图 1),海拔一般在 1 300～1 400 m. 区内属温带大陆性气候,年平均气温 6.8 ℃,年降水量 350～400 mm,主要集中在 6、7、8、9 月. 植被以旱生植物种群为主,常见沙柳、沙蒿、旱柳等.

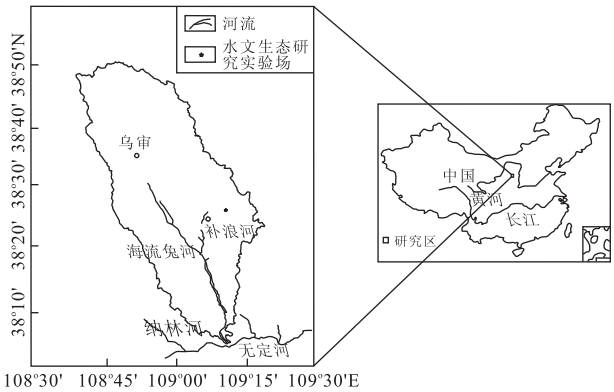

图 1 研究区地理位置示意

Fig. 1 Location of the study area

2 研究方法与数据

2.1 方法

此研究方法是基于荷兰学者 Su(2002)提出的基于表面能量平衡系统(surface energy balance system,简称 SEBS)的理论,主要由以下基本成分组成:(1)一系列确定地表物理参数的遥感数据反演方法,例如通过光谱反射和辐射数据来计算反照率、比辐射率、温度、植被覆盖度等;(2)用于确定热传导粗糙长度的扩展模型;(3)一个基于特定条件下的能量平衡关系来确定蒸发比的数学模型(金晓媚等,2008a,2008b).

能量平衡是此研究方法的理论基础,SEBS 模型即是基于此,地表得到的净辐射是各种能量交换的基础,任一时刻的地表能量平衡方程为:

$$R = G + H + LE\ , \tag{1}$$

式中:R 是净辐射,G 是土壤热通量,H 是感热通量,LE 是潜热通量(L 为汽化潜热,E 为实际水分蒸发蒸腾总量),所有的单位为 W/m^2.

计算净辐射通量的方程为:

$$R = (1-\alpha) \times R_{swd} + \varepsilon \times R_{l=owd} - \varepsilon \times \sigma \times T_0^4\ , \tag{2}$$

式中:α 为地表反射率;R_{swd} 为下行太阳辐射;ε 为地表比辐射率;$R_{l=owd}$ 为下行长波辐射;σ 为 Stefan-Bolzmann 常数;T_0^4 为传感器测得的辐射温度.

计算土壤热通量的方程如下:

$$G = R \times [\Gamma_c + (1 - f_c) \times (\Gamma_s - \Gamma_c)], \quad (3)$$

式中:这里假定土壤热通量和净辐射通量之间的比值对于完全植被覆盖的地区 $\Gamma_c = 0.05$(Monteith,1973),相对于裸土设定为 $\Gamma_s = 0.315$(Kustas and Daughtry,1990). 在这 2 种极端条件之间则可以利用植被覆盖度(f_c)来进行插值计算,其中 f_c 能够通过遥感数据来确定.

为了确定蒸发比的值,需要考虑在最干和最湿润 2 种极限状态下的能量平衡关系. 计算相对蒸发比的公式如下:

$$\Lambda_r = 1 - \frac{H - H_{wet}}{H_{dry} - H_{wet}}, \quad (4)$$

式中:Λ_r 为相对蒸发比;H_{dry}为干限条件下的感热通量;H_{wet}为湿限条件下的感热通量.

日蒸散量的计算公式如下:

$$E_{daily} = 8.64 \times 10^7 \times \Lambda \times \frac{R - G}{\gamma \rho}, \quad (5)$$

式中:E_{daily}为日蒸散量;Λ 为蒸发比;ρ 为水的密度.

此模型首先通过高程数据和反照率、反射率、地温的数据集得出地表物理参数. 其次,通过输入相应的气象参数(海拔、气压、相对湿度、风速、温度等)和以上的 3 个数据计算出蒸散量信息.

2.2　数据

MODIS 的各种光谱空间分辨率相对较低(250,500 或 1 000 m),会造成不同组复合的混合像元,但在大尺度研究范围中,选择分辨率较低的遥感数据,可以更为精确地获得各种地物对某种物理量的贡献. MODIS 有 4 个热红外通道,几乎覆盖了整个热红外波段,所以他们可高精度地反演出地表温度. 同时 MODIS 具有多视角扫描和多光谱的特征,可反演出更接近地表真实状况的地表反照率,因此选择 MODIS 数据进行蒸散量的研究,可得到更为真实的结果.

就目前来说,MODIS 是最佳的遥感信息来源,它的出现进一步深化了用遥感方法估算区域蒸散量的研究. 在本次研究中笔者选取了 MOD09 数据,它是陆地 2 级标准数据产品,内容为表面反射率,空间分辨率为 500 m;MOD11 数据,它是陆地 2、3 级标准数据产品,内容为地表温度和辐射率,Lambert 投影,空间分辨率为 1 km. 笔者对数据进行了插值处理,让其分辨率变为 500 m,使得区域的蒸散量的计算更为准确,满足此次研究的需要.

3　研究结果

3.1　蒸散量

选取 2008 年 12 个月 MOD09 和 MOD11 可用遥感数据. 用 MRT 进行波段处理后,选取需要波段,并进行插值处理;调整为相同的分辨率,然后在 ENVI 软件中,进行基于 SEBS 某日蒸散量的定量计算. 计算步骤主要如下:

(1)首先选取某月第 i 天的可用遥感数据计算出第 i 天的蒸散量 ET_i,并选取与之对应的观测蒸散量 $ET_{观测i}$,求出校正系数 a_i,公式如下:

$$a_i = ET_i / ET_{观测i}. \quad (6)$$

(2)再计算出某月的平均系数 $\bar{a}_j$,对某月可用天数的校正系数求和 $\sum a_i$,可用天数为 n,公式如下:

$$\bar{a}_j = \sum a_i / n. \quad (7)$$

(3)再用第 j 月的总观测蒸散量 $ET_{总j}$,与月平均校正系数 $\bar{a}_j$,求出第 j 月实际的蒸散量 $ET_{实际j}$,公式如下:

$$ET_{实际j} = \bar{a}_j \times ET_{总j}. \quad (8)$$

通过此方法笔者计算出了每个月的蒸散量值,全年的蒸散发主要集中在 6、7、8、9 月,其中 7 月份蒸散量最大,为 125.69 mm,1 月份蒸散量最小,为 0.01 mm. 出现这种时间序列分布,主要是植被和降雨因素所致,在夏季由于植被生长优良,覆盖度高,因此区域蒸散量为最大值. 同时通过每个月的蒸散量值得到 2008 年的全年蒸散量值为 324.94 mm. 图 2 为 2008 年海流兔河流域 1～12 月的潜在蒸散量和实际计算的蒸散量在时间序列上的分布.

图 3 为海流兔河流域 2008 年 12 个月(从左到

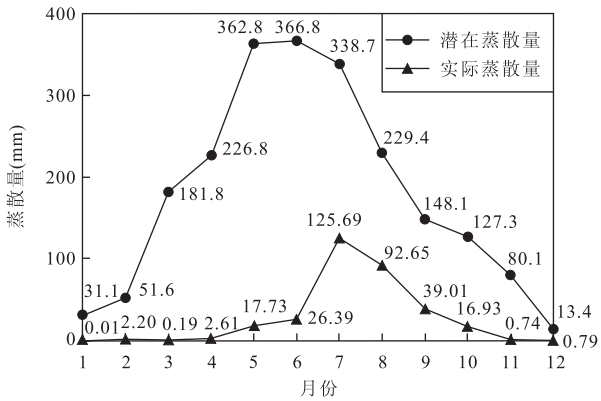

图 2　2008 年蒸散量的变化曲线

Fig. 2　The variation of evapotranspiration (ET) in 2008

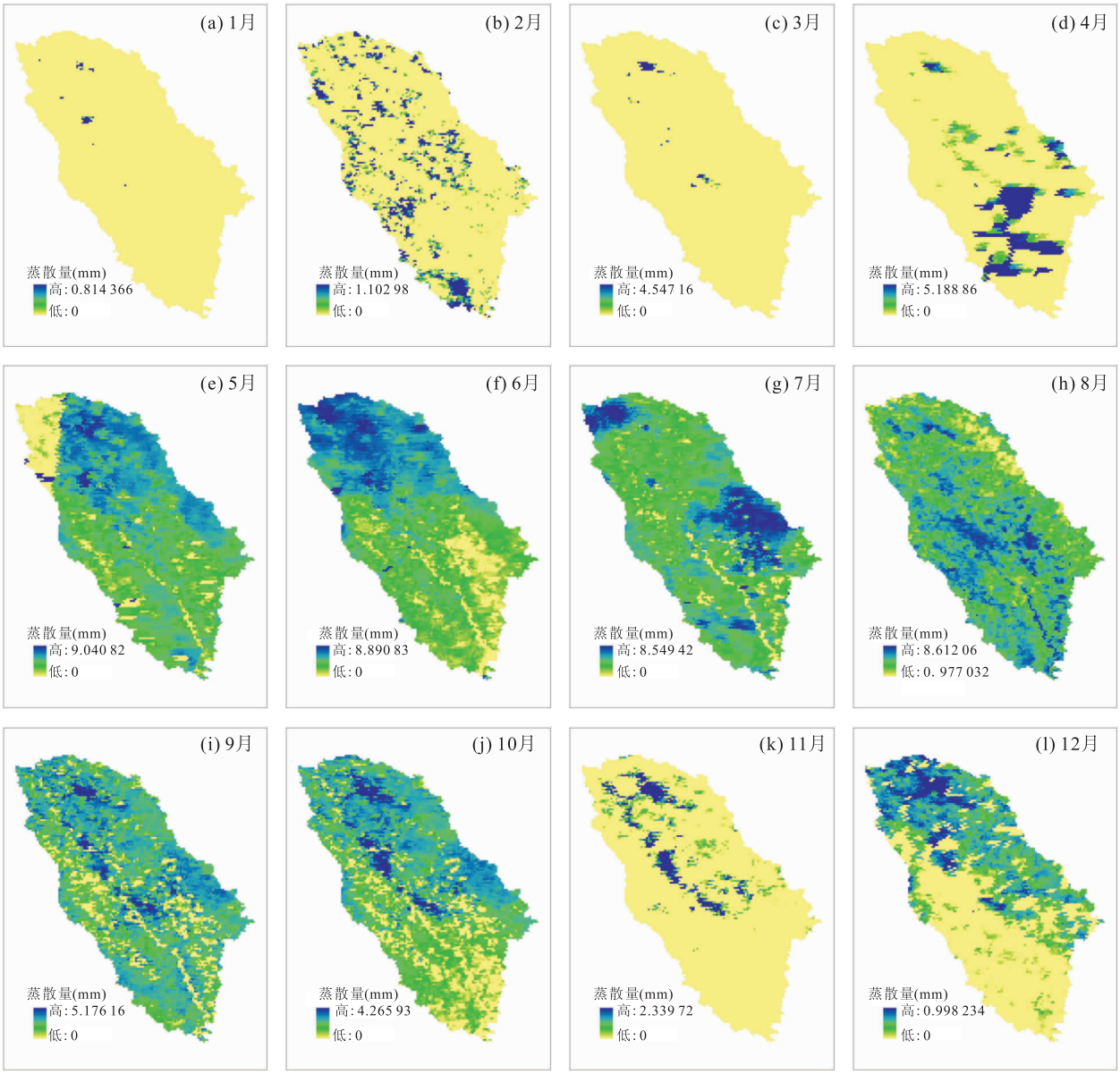

图 3 海流兔河流域 2008 年蒸散量空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of evapotranspiration of Hailiutu River basin in 2008

右为 1～12 月)的蒸散量分布,从中可以看出,在冬季由于温度比较低,降雨量相对偏少,且几乎无植被,因此蒸散量很小;而到了春夏由于降水的增加,温度升高,且植被生长旺盛,覆盖程度好,因此在这个期间的蒸散量相对比较大,与实际相符.

3.2 水均衡法进行验证

海流兔河流域地处盆地地貌,将其作为已封闭的地貌单元,补给来源于降水,排泄主要为径流排出和蒸散发排出,因此选择水均衡法进行验证,其步骤主要如下:

$$(P-ET_a)\times A-R=0\,, \tag{9}$$

式中:P 为多年平均降水量(mm/a),ET_a 为多年平均实际蒸散量(mm/a),A 为流域面积(km^2),R 为出流域的径流量(m^3/a). 通过公式(9)对实际蒸散量计算可以推导出如下公式:

$$ET_a=(PA-R)/A\,. \tag{10}$$

笔者根据现有水文资料统计出了 2008 年的月降水资料(图 4)和海流兔河的年平均径流量(图 5). 图 5 表明,全年降水主要集中在 6、7、8、9 月,这 4 个月的降水量占全年降水总量的 88%,统计得到海流兔河流域 2008 年降水量为 376.1 mm.

另外,在研究周期内,海流兔河的年径流量总体呈下降趋势,1980－1984 年属于稳定期,此时由于工农业不够发达,对水资源的需求量相对较小,研究

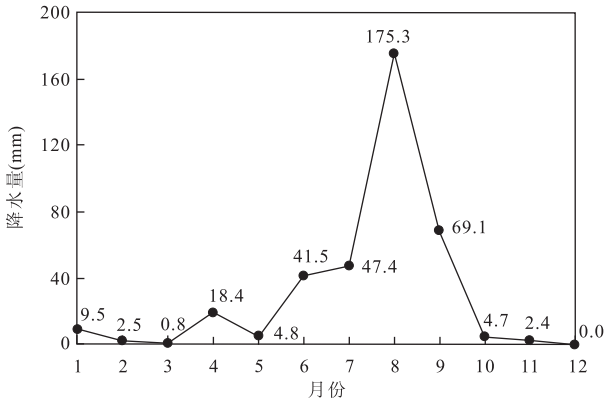

图 4　乌审旗站 2008 年每月的降水量

Fig. 4　The monthly precipitation of Wushenqi meteorological station in 2008

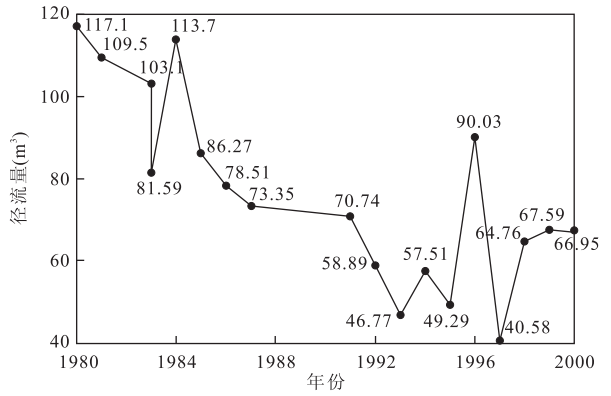

图 5　海流兔河 1985－2000 年平均径流量(据韩家峁水文站)

Fig. 5　Mean annual runoff of Hailiutu River basin from 1985－2000

区内水均衡属于自然平衡状态;从 1984－1993 年呈现急剧下降,这是因为随着工农业的发展对水资源的需求加大所致;在随后几年径流量有所增加,是由于人们逐渐意识到无限制消耗水资源对当地生态环境带来的破坏,所以加强了对水资源的科学化管理与利用. 其中 1983 与 1996 年径流量出现的骤增,是由于当地属于丰水年份. 根据已有数据,统计得到 1980－2000 年期间海流兔河的年均径流量为 $7.6\times10^7\,m^3$,根据公式(10)得到 2008 年海流兔河的蒸散量为 346. 69 mm,与遥感模型的计算结果 324. 94 mm吻合较好.

4　结论

(1)利用 MODIS 数据(MOD9、MOD11),结合 2008 年气象资料,通过表面能量平衡方法进行蒸散量计算,发现研究区蒸散发主要集中在 6、7、8、9 月,其中 7、8 月蒸散量最大,得到年蒸散量为 324. 94 mm. (2)根据现有水文气象资料得到 2008 年降水量为 376. 1 mm,1980－2000 年海流兔河的年均径流量为 76 460 290 m^3,通过水均衡法,计算出蒸散量为 346. 69 mm. (3)通过水均衡法验证得到的蒸散量与 SEBS 得到的蒸散量基本相符,从而证明基于 MODIS 数据的蒸散量计算在精度上可以满足实际需要. (4)研究区内蒸散量主要由降水和植被覆盖情况所定. 通过 MODIS 数据得到 2008 年 12 个月份蒸散发空间分布图,发现由于冬季植被覆盖度低,蒸散量小;而夏季植被覆盖好,蒸散量大. 由降水资料发现 2008 年降水主要集中在 5、6、7、8 月,这 4 个月降水量占全年降水量的 88%,而对应的蒸散量占全年蒸散量的 86%.

References

Bastiaanssen, W. G. M., Menenti, M., Feddes, R. A., et al., 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. formulation. *Journal of Hydrology*, (212－213): 198－212. doi: 10. 1016/S0022. 1694(98)00253－4

Brown, K. W., Rosenberg, N. J., 1973. A resistance model to predict evapotranspiration and its application to a sugar beet field. *Agronomy Journal*, 65(3): 341－347. doi: 10. 2134/agronj1973. 00021962006500030001x

Guo, X. Y., 2005. A remote sensing study on the distribution of Heihe River basin. *Progress in Natural Science*, 15(10): 1266－1270 (in Chinese).

Jin, X. M., Wan, L., Liang, J. Y., 2008a. Accuracy verification of evapotranspiration result using hydrological budget method—a case study of the Zhangye basin. *Geoscience*, 22(2): 299－302 (in Chinese with English abstract).

Jin, X. M., Wan, L., Su, B., 2008b. Remote sensing and regional ground evapotranspiration estimation method. Geological Publishing House, Beijing, 62－64 (in Chinese).

Kustas, W. P., Daughtry, C. S. T., 1990. Estimation of the soil heat flux/net radiation ratio from spectral data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 49(3): 205－223. doi: 10. 1016/0168－1923(90)90033－3

Liu, S. M., Sun, Z. P., Li, X. W., et al., 2003. A comparative study on models for estimating evapotranspiration. *Journal of Natural Resources*, 18(2): 161－167 (in Chinese with English abstract).

Monteith, J. L., 1973. Principles of environmental physics. Edward Arnold Press, London.

Peixoto, J. P., Oort, A. H., 1995. Physics of climate. Trans-

lated by Wu, G. X., Liu, H., et al.. China Meteorological Press, Beijing, 75－141 (in Chinese).

Penman, H. L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society* (*A*), 193 (1032): 120－145. doi: 10.1098/rspa.1948.0037

Roerink, G. J., Su, Z., Menenti, M., 2000. S-SEBI: a simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. *Physics and Chemistry of the Earth*, 25(2): 147－157. doi: 10.1016/S1464－1909(99)00128－8

Su, Z., 2002. The surface energy balance system (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(1): 85－99. doi: 10.5194/hess－6－85－2002

Tian, H., Wen, J., Ma, Y. M., et al., 2009. Estimation of summer evapotranspiration using satellite remote sensing data over the Heihe River basin. *Advances in Water Science*, 20(1): 18－24 (in Chinese with English abstract).

Zhou, H. Z., Liu, S. M., Yu, X. F., et al., 2006. Study on estimation of regional evapotranspiration by remote sensing in the Mu Us sandland—a case study of Wushen County in Inner Mongolia. *Progress in Geography*, 25(4): 79－87 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

郭晓寅，2005. 黑河流域蒸散发分布的遥感研究. 自然科学进展，15(10)：1266－1270.

金晓媚，万力，梁继运，2008a. 水均衡法验证蒸散量计算的可靠性——以张掖盆地为例. 现代地质，22(2)：209－302.

金晓媚，万力，Su, B.，2008b. 遥感与区域地面蒸散量估算方法. 北京：地质出版社，62－64.

刘绍民，孙中平，李小文，等，2003. 蒸散量测定与估算方法的对比研究. 自然资源学报，18(2)：161－167.

Peixoto, J. P., Oort, A. H., 1995. 气候物理学. 吴国雄，刘辉，等译. 北京：气象出版社，75－141.

田辉，文军，马耀民，等，2009. 夏季黑河流域蒸散发量卫星遥感估算研究. 水科学进展，20(1)：18－24.

周会珍，刘绍民，于小飞，等，2006. 毛乌素沙地蒸散量的遥感研究——以内蒙古乌审旗为例. 地理科学进展，25(4)：79－87.