

DOI: 10.5846/stxb201301150102

王海波, 马明国. 基于遥感和 Penman-Monteith 模型的内陆河流域不同生态系统蒸散发估算. 生态学报, 2014, 34(19): 5617-5626.

Wang H B, Ma M G. Estimation of transpiration and evaporation of different ecosystems in an inland river basin using remote sensing data and the Penman-Monteith equation. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(19): 5617-5626.

基于遥感和 Penman-Monteith 模型的内陆河流域不同生态系统蒸散发估算

王海波, 马明国*

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 黑河遥感试验研究站, 甘肃 730000)

摘要: 遥感数据具有很好的时空连续性, 它是区域蒸散发通量估算的有效方法。引入了一个简单的具有生物物理基础的 Penman-Monteith (P-M) 模型, 分别利用黑河流域高寒草地阿柔站和干旱区农田盈科站 2008—2009 年的气象数据和 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 叶面积指数 (LAI), 实现了 2008—2009 年日蒸散发的估算, 并同时实现了对植被蒸腾和土壤蒸发的分别估算。结果表明, 利用 P-M 公式模拟的蒸散发与实测的蒸散发具有较好的一致性, 日蒸散发模拟的决定系数 (R^2) 超过 0.8。估算的高寒草甸和干旱区农田玉米全年平均的蒸腾分别为 0.78 mm/d 和 1.20 mm/d, 分别占总蒸散发的 60% 和 61%, 土壤蒸发分别为 0.53 和 0.77 mm/d, 占总蒸发的 40% 和 39%。可见两种生态系统的作物蒸腾均强于土壤蒸发, 同时农田玉米蒸腾强于高寒草甸蒸腾。研究结果证明了基于遥感的 P-M 公式可以很好地实现对高寒草地和干旱区农田生态系统蒸散发的估算。通过考虑土壤水分变化对气孔导度的影响, 可以提高模型对农田蒸散发的模拟精度。

关键词: 高寒草地生态系统; 干旱区农田生态系统; 蒸散发; Penman-Monteith 公式; 叶面积指数

Estimation of transpiration and evaporation of different ecosystems in an inland river basin using remote sensing data and the Penman-Monteith equation

WANG Hai-bo, MA Ming-guo*

Heihe Remote Sensing Experimental Research Station, Cold and Arid Regions Environmental Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

Abstract: The terrestrial water cycle is of critical importance to a wide array of earth systems. Evapotranspiration (ET) is an important component of the terrestrial water cycle, which controls the distribution of plant communities and the net primary production of ecosystems. Considerable efforts have been made by scientists to use remotely sensed data to estimate the spatial and temporal distribution of evaporation rates. Compared with other methods of estimation based on remotely sensed data, the Penman-Monteith equation has proven effective at both the point scale and the kilometer scale but the effectiveness of the surface conductance model in some specific areas such as arid regions still requires validation. Evaporation processes are complex in arid regions and the processes and patterns of ET under different vegetation types in arid regions are poorly researched. Therefore the Heihe River Basin was chosen as a study area because it is a typical arid area in China. The aim of this study was to evaluate the Penman-Monteith equation for estimating daily evaporation fluxes in arid regions using MODIS LAI data and meteorological data. A simple biophysical model using leaf area index (LAI) from remotely sensed data and the Penman-Monteith equation was used to calculate the daily ET of grassland and farmland at various sites in the middle and upper reaches of the Heihe River. The Penman-Monteith equation is a biophysically based

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-EW-312); 国家自然科学基金重点项目 (91125004)

收稿日期: 2013-01-15; **网络出版日期:** 2014-03-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mmg@lzb.ac.cn

equation for calculating land surface evaporation and has been used extensively. The model for computing the surface conductance contains six parameters requiring local calibration. The shuffled complex evolution (SCE) algorithm was used to optimize the parameters in the surface conductance model for each site. The Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) was selected as the optimized objective function. Optimal parameters in the surface conductance model were obtained by minimizing the cost function NSE with the SCE algorithm. Excellent agreement was obtained between the measured mean daily evaporation rates and those calculated using remotely sensed LAI data and the Penman-Monteith equation. The NSE at the A'rou (grassland) and Yingke (farmland) sites were 0.84 and 0.85, respectively and the root mean square error (RMSE) were 1.25 and 1.66 MJ m⁻² d⁻¹, respectively. With regard to grassland and farmland ecosystems in this study, the transpiration was much stronger than the soil evaporation during the growing seasons, however, the opposite situation was found during the non-growing seasons. From this study it can be concluded that the Penman-Monteith equation combined with LAI data can provide reliable estimates of ET at daily time scales in different ecosystems of arid and cold regions. However, there are still some uncertainties in ET estimations of the ecosystems in this study area, especially the cropland at the Yingke station. These biases are possibly because the model cannot simulate the impact of the extreme soil moisture changes caused by irrigation on ET. The soil evaporation factor is a constant in this study, whereas in reality it is a variable that depends on the moisture status of the soil near the surface. Thus, the effect of soil moisture variation on surface conductance was considered, and it improved the precision of the equation in the simulation of farmland ET.

Key Words: alpine meadow ecosystem; arid cropland ecosystem; evapotranspiration; Penman-Monteith equation; leaf area index

陆地生态系统水循环是地球系统中一个十分关键的过程,它在气候变化、植被动态和碳氮循环等过程中起着重要作用^[1]。蒸散发过程包括土壤蒸发和植被蒸腾,是陆地生态系统水循环的一个重要组分,它是连接作物碳交换、气孔行为和水分利用效率的纽带^[2],从而控制着植物群落的分布和植被的净生产率等关键生态系统过程^[3]。在干旱区 90% 的降水通过蒸散发作用耗散到大气中^[4],使得干旱区生态环境极为脆弱,水资源的缺乏也随之成为干旱区经济发展和生态保护的主要限制因子^[5]。因此,干旱区蒸散发的准确估算对于该区生产发展和生态环境保护具有重要作用。

遥感数据的时空连续性,使得遥感技术成为快速准确估算区域地表蒸散发的最佳手段^[6]。目前,利用遥感估算区域地表蒸散发主要有 3 种方法:基于能量平衡原理的单层和双层模型、遥感经验模型和基于彭曼公式等物理模型法^[7]。第 1 种方法使用遥感反演的辐射温度结合气温以及阻抗公式求取显热,然后通过能量平衡余项表达蒸散发。根据分层的不同,可以分为单层和双层模型。其中单层模型将能量界面当作组分均匀的单层“大叶”,不区分土壤和植被;双层模型分别考虑土壤和植被水热传输

特性及其相互作用。余项法存在一些问题,例如它受到能量不闭合的影响,因干湿限选取的不确定性引发空间歧义性问题,空气动力温度用辐射表面温度代替后存在差异,感热计算过分依赖于地表温度和空气动力阻抗等^[8]。第 2 种方法通过直接建立对蒸散发较为敏感和重要的气象或下垫面特征与蒸散发的关系来估算蒸散发。遥感经验模型的优势在于不需要气象观测数据,避免了机理模型中所需气象场模拟的不确定性,简单实用。但该方法需要遥感影像范围内大气状况相对稳定,且差异不大,并存在极干和极湿的区域,具有较大的经验性^[7]。第 3 种方法利用 P-M (Penman-Monteith) 公式直接进行蒸散发的估算。P-M 模型综合了辐射和感热的能量平衡和空气动力学传输方程,有着坚实的物理基础。而遥感技术在 P-M 模型中的应用为其估算区域蒸散发提供了一种新的途径^[5]。遥感技术可以提供大尺度的地面参数,利用遥感数据所提供的信息从而使模型在时空尺度上得以扩展。

P-M 模型可以直接计算蒸散发,通过应用遥感反演得到区域尺度的参数,使估算的结果更加精确。P-M 模型具有合理的生物物理基础,是一种有效的蒸散发估算方法。然而 P-M 模型是对冠层结构的简

化,在植被冠层郁闭的情况下估算精度较高,适合在干旱区农田作物蒸散发估算中使用^[5]。而在稀疏植被覆盖的陆面蒸散发估算中,需要对 P-M 公式的表面阻抗经过恰当的参数化。地表阻抗与植被覆盖度和下垫面湿度的变化有关,在植被全覆盖时近似等于气孔阻抗,在裸露土壤等于土壤地表阻抗。目前,很多研究者在 P-M 模型的基础上,基于 LAI 发展了稀疏植被覆盖状况下的地表导度参数化方案。例如 Cleugh 等^[8]提出的一个简单的基于 LAI 的线性关系的地表导度公式;Mu 等^[9]进一步利用 LAI (Leaf Area Index)、温度、湿度和增强植被指数对其进行了改进,改进后的模型精度得到提高。Leuning 等^[10]在比较了 Cleugh 和 Mu 的方案之后,提出了一个简单且具有生物物理基础的模型,来改善蒸散发的估算。Zhang 等^[6]应用该模型,在澳大利亚地区进行了验证。然而,目前该模型在中国干旱地区的验证较为少见,尤其对于干旱区不同地表类型条件下的蒸散发过程与格局的研究还比较薄弱^[11]。

因此,本文以我国典型干旱区,黑河流域为研究区域,基于 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 遥感数据和地面观测数据,分别对高寒草地和干旱区农田生态系统的蒸散发进行了估算,验证了基于遥感叶面积指数的 P-M 模型的有效性。通过对作物蒸腾和土壤蒸发的区分,对高寒草地和绿洲农田生态系统蒸散发的进行了比较分析。同时通过考虑土壤水分变化对气孔导度的影响,对农田蒸散发模拟进行了一定的优化和改进。蒸散发的估算为区域水分平衡、生态需水量的估算、草场的科学经营和农田绿洲水资源管理等提供依据。通过对不同下垫面蒸散发估算方法的验证和结果优化,为下一步开展全流域的蒸散发估算研究奠定了基础。

1 模型与方法

1.1 基于遥感的 P-M 模型

1948 年 Penman^[12]提出了计算开放水面和湿润下垫面潜在蒸发的公式。1965 年 Monteith^[13]在此基础上引入“表面阻抗”的概念,从而导出了计算非饱和下垫面蒸散发的 Penman-Monteith (P-M) 公式:

$$\lambda E = \frac{\varepsilon A + (\rho_a C_p / \gamma) D_a G_a}{\varepsilon + 1 + G_a / G_s} \quad (1)$$

式中, E 为蒸散发; λ 为汽化潜热; $\varepsilon = s/\gamma$, s 是温度-饱和水汽压曲线斜率; ρ_a 为空气密度; C_p 为空气定压比热; γ 为干湿表常数; D_a 为参考高度饱和水汽压差; A 为可用能量, $A = R_n - G$, R_n 为净辐射, G 为土壤热通量; G_a 为空气动力学导度; G_s 为地表导度。

Leuning 等^[10]通过将可用能量 A 分割为冠层吸收的能量(A_c)和土壤吸收的能量(A_s),从而将蒸散发区分为土壤蒸发和植被蒸腾两部分:

$$\lambda E = \frac{\varepsilon A_c + (\rho_a C_p / \gamma) D_a G_a}{\varepsilon + 1 + G_a / G_c} + \frac{f \varepsilon A_s}{\varepsilon + 1} \quad (2)$$

式中, A_c 、 A_s 分别为被冠层和土壤吸收的能量。其中 $A_c/A = 1 - \tau$, $A_s/A = \tau$, τ 是冠层的透过率,根据 Beer 定律可以求解。对于植被蒸腾,区别于地表导度 G_s ,引入了冠层导度 G_c 。 f 是土壤蒸散发系数,表示土壤的湿润程度。

冠层导度 G_c 的参数化方案根据 Leuning 等^[10]提出的基于冠层上方最大气孔导度 g_{sx} 和叶面积指数 LAI 计算得到:

$$G_c = \frac{g_{sx}}{k_Q} \ln \left[\frac{Q_h + Q_{50}}{Q_h \exp(-k_A \text{LAI}) + Q_{50}} \right] \left[\frac{1}{1 + \frac{D_a}{D_{50}}} \right] \quad (3)$$

式中, k_Q 和 k_A 分别是短波辐射和可用辐射的衰减系数; Q_h 是冠层上方可见光辐射通量; Q_{50} 和 D_{50} 分别是当最大气孔导度一半时的可见光辐射通量和水汽压差。

空气动力学导度 G_a 利用公式 4 计算:

$$G_a = \frac{k^2 u_m}{\ln[(z_m - d)/z_{0m}] \ln[(z_m - d)/z_{0v}]} \quad (4)$$

式中, k 为 von Karman 常数; z_m 为风速 g 观测高度; u_m 为 z_m 高度处的风速; d 为零平面位移; z_{0m} 和 z_{0v} 分别是动力学粗糙度和热力学粗糙度,可以用冠层高度 h 估算, $z_{0m} = 0.123h$, $z_{0v} = 0.1z_{0m}$ 。

本模型所用的数据包括遥感叶面积指数、太阳辐射、最高温度、最低温度、实际水汽压等。因为使用的是日平均气象资料,可认为土壤热通量 G 趋于零,因此本研究中 G 设为零。公式 2 和 3 一共包含 6 个参数: k_Q , k_A , Q_{50} , D_{50} , g_{sx} 和 f , 需要通过模型参数优化获得。利用气象资料和遥感数据,根据公式 2 可以实现对蒸散发的估算。

1.2 模型参数估计方法

遥感 P-M 模型在干旱区应用时,需要对其关键

参数进行重新率定。SCE-UA 算法是由 Duan 等^[14]提出的,它在单纯形方法的基础上,综合了自然界的生物竞争进化原理而形成的一种解决非线性约束最优化问题的方法。该方法具有较好的稳健性和性能,在水文模型参数优化方面应用十分广泛。本研究基于 SCE-UA 算法对模型的 6 个关键参数进行了优化,并参考 Leuning 的方法对参数范围进行了设置。参数优化过程就是求取模型优化的目标函数的最大值或者最小值过程。本研究采用 Nash-Sutcliffe 系数 (NSE) 作为模型优化的目标函数进行结果评价:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{sim,t} - X_{obs,t})^2}{\sum_{i=1}^n (X_{obs,t} - \bar{X}_{obs,t})^2} \quad (5)$$

式中, $X_{sim,t}$ 和 $X_{obs,t}$ 分别为 t 时刻蒸散发的模拟值和观测值, $\bar{X}_{obs,t}$ 表示观测蒸散发的算术平均值。NSE 越大表示观测和模拟的蒸散发拟合效果越好,模拟精度越高。模型参数率定时采用涡动相关观测的蒸

散发作为真实值验证模型模拟的蒸散发值,通过 SCE-UA 优化算法选择满足蒸散发估算误差最小的一组参数作为最优参数。

2 研究站点及数据

2.1 研究区域与站点概况

黑河流域是我国西北地区第二大内陆流域,位于河西走廊中部,为甘蒙西部最大的内陆河流域。黑河发源于青海省祁连山区的冰川积雪地带。该河系穿越祁连山北坡,经河西走廊中段,流泻于内蒙古西部高原,流域面积约 $13 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[15]。该流域具有独特的“冰雪/冻土-森林-河流\湖泊-绿洲-荒漠”多元自然景观,从河流的源头到尾间依次分布着高山冰雪带、森林草原带、平原绿洲带和戈壁荒漠带等自然地理单元^[16]。上游主要植被类型为高寒草甸。中游是人工绿洲区,主要农作物类型为制种玉米。本文的研究站点分别是流域上游八宝河子流域的阿柔冻融观测站和中游的盈科灌区绿洲站。图 1 显示的是阿柔站和盈科站以及黑河流域位置示意图。

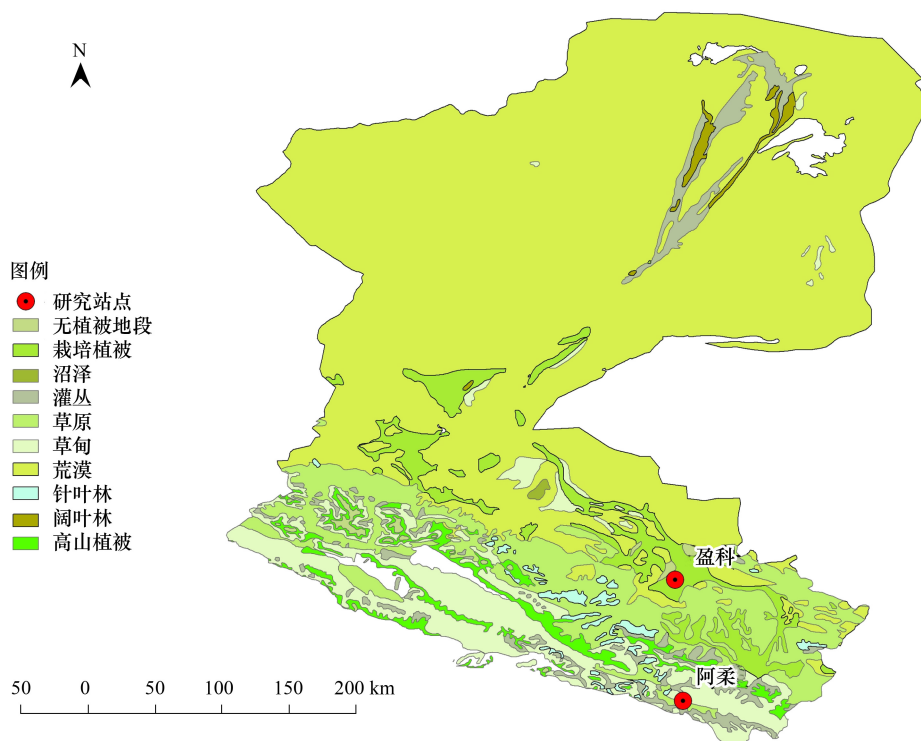


图 1 研究区域和研究站点位置示意图

Fig.1 Locations of the Yingke and A'rou stations in Heihe River Basin

阿柔冻融观测站(简称阿柔站)位于青海省祁连县中东部地区的阿柔乡草大板村瓦王滩牧场。经纬

度为 $100^{\circ}28' \text{ E}$, $38^{\circ}03' \text{ N}$, 海拔高度为 3032.8 m。试验场位于黑河上游,周围地势相对平坦开阔,下垫面

为草地,夏季牧草长势良好,植被高度在 20—30 cm 之间。盈科灌区绿洲站(简称盈科站)位于甘肃省张掖市的盈科灌区农田内。观测点的经纬度为 100°25′ E,38°51′ N,海拔高度为 1519 m。试验场位于黑河中游,主要农作物类型为制种玉米。主要的观测项目包括:风温湿梯度观测(2 m 和 10 m)、气压、降水、四分量辐射和涡度相关等。涡度相关系统包括一个三维超声风速仪(Campbell Scientific Inc.)和一个 LI-7500 开路红外气体分析仪(LI-Cor. Inc.),主要用于观测植被与大气界面的二氧化碳及水热通量,观测频率为 10 Hz。这两个站的观测项目参见李新等^[16]的文献总结。

2.2 研究数据及处理

模型应用了遥感数据和气象及通量数据。本研究采用的遥感数据主要是 MODIS 1 km 分辨率 LAI 的 8 天合成产品,从 MODIS 陆地产品网站上下载(<http://www.modis.ornl.gov>)。气象数据和涡动数据

来源于黑河综合遥感联合试验试验。其中,气象数据包括阿柔站和盈科站 2008—2009 年的气温、降雨、相对湿度、净辐射等。阿柔站的涡度数据从 2008 年 7 月 15 日开始,到 2009 年 11 月。盈科站的通量数据从 2008 年 1 月到 2009 年 11 月。气象及通量数据首先处理成 30min 的数据产品,最后处理成日平均数据。对气象数据原始资料进行了野点剔除和插值处理,其处理过程详见黄广辉等^[17]。涡动原始资料采用 Edire 软件进行处理,主要包括野点剔除、坐标旋转、滞后订正和空气密度脉动影响校正等。通量数据处理过程与质量控制参考张智慧等^[18]。图 2 显示了阿柔站和盈科站 2008—2009 年降雨和气温的季节变化。阿柔站的年 2008 年和 2009 年平均气温分别为 -1℃ 和 -0.3℃,降雨量分别为 449.4 mm 和 450.5 mm。盈科站 2008 年和 2009 年的年平均气温分别是 7℃ 和 7.8℃,降雨量分别为 67.4 mm 和 68.7 mm,降雨较少,主要依靠农业灌溉。

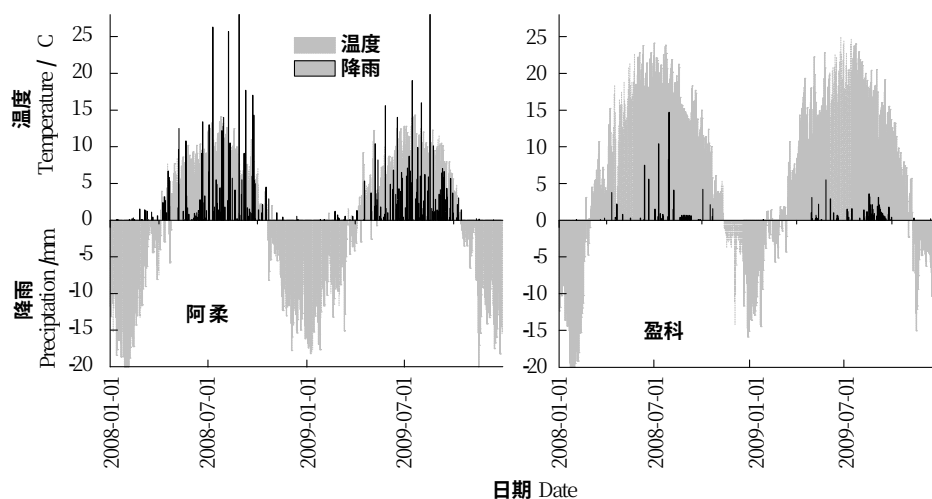


图 2 阿柔站和盈科站 2008—2009 年气温和降雨的季节变化

Fig.2 Seasonal variations of temperature and precipitation of 2008—2009 in Yingke and A'rou station

3 结果与讨论

3.1 模型参数优化结果

利用遥感数据和 P-M 模型,首先需要确定几个关键参数的值。本研究基于 SCE-UA 算法,并利用阿柔站 2009 年全年实测的蒸散发进行模型参数的估计,然后利用 2008 年的观测数据进行验证(阿柔的涡动数据从 2008 年 7 月开始)。同样地,利用盈科站 2008 年全年实测的蒸散发进行模型参数的估计,然后利用 2009 年的观测数据进行验证。优化以

后的结果统计如表 1 所示。从表 1 中可看出,遥感 P-M 模型优化后的精度较高,其 NSE 都超过 0.8。从土壤蒸散发系数 f 的大小来看,土壤蒸散发系数较高,表明研究区域土壤较为湿润,这和该区域的降雨量、植被覆盖度以及农业灌溉有关。而阿柔的 f 值高于盈科,则说明高寒草地相比绿洲农田而言,受水分限制较少。

3.2 高寒草甸与干旱区农田生态系统蒸散发模拟结果与季节变化

图 3 是阿柔站与盈科站 2008—2009 年的蒸

表 1 模型优化结果及优化参数值
Table 1 Optimized results of the model and parameters

站点 Site	纳什系数 Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)	均方根误差/ (MJ m ⁻² d ⁻¹) Root Mean Square Error (RMSE)	短波辐射 衰减系数/ (MJ m ⁻² d ⁻¹) <i>k_Q</i> [*]	可用辐射衰减 系数/ (MJ m ⁻² d ⁻¹) <i>k_A</i> [*]	最大气孔导度 一半时的辐射/ (MJ m ⁻² d ⁻¹) <i>Q₅₀</i> [*]	最大气孔导度 一半时的水汽 压差/Kpa <i>D₅₀</i> [*]	最大气孔 导度/(m/s) <i>g_{sx}</i> [*]	土壤蒸散 发系数 (0—1) <i>f</i> [*]
阿柔	0.87	1.13	0.38	0.36	10.68	1.42	0.044	0.99
盈科	0.86	1.60	0.61	0.72	20.18	0.50	0.034	0.88

* 短波辐射衰减系数(*k_Q*)和可用辐射衰减系数(*k_A*): extinction coefficients for visible radiation and available energy; 最大气孔导度一半时的辐射(*Q₅₀*)和最大气孔导度一半时的水汽压差(*D₅₀*): the values of solar radiation and atmospheric humidity deficit when the stomatal conductance is half its maximum; 最大气孔导度(*g_{sx}*): maximum stomatal conductance; 土壤蒸散发系数(*f*): the ratio of soil evaporation to the equilibrium rate corresponding to the energy absorbed at the soil surface

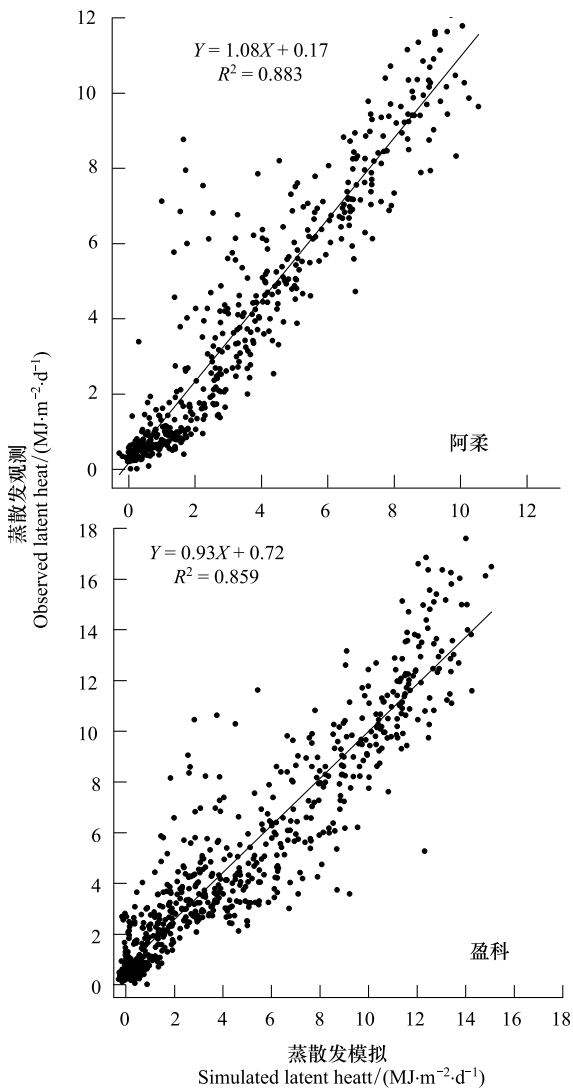


图 3 阿柔草地和盈科农田生态系统 2008—2009 年蒸散发模拟与实测散点图
Fig.3 Scatter plot of the evapotranspiration predicted by P-M model and observed by EC at the A'rou and Yingke station in 2008 and 2009

散发模拟与估算的散点图。它们的 R^2 分别为 0.883 和 0.856, 蒸散发的模拟结果与观测结果拟合性较好, 说明模型的模拟精度较高。从图 3 的散点图还可以看出, 两个站点均存在一些离散点, 这表明模型的模拟值与观测值仍存在一定的偏差, 后面部分将对模型的不确定进行讨论。

图 4 显示了阿柔站与盈科站蒸散发估算的时间序列结果。可以看出蒸散发的模拟值与观测值具有较好的一致性。从时间序列上看, 蒸散发具有明显的季节变化特征, 而且与生长季气候特征相一致, 夏季达到峰值, 冬季为低谷。同时, 在生长季的峰值时段, 模拟的蒸散发存在一定程度的低估现象, 这可能与遥感叶面积指数的尺度效应有关。从图 4 中比较而言, 在生长季节里, 农田玉米的蒸散发强于草地蒸散发。

3.3 蒸散发、植被蒸腾和土壤蒸发的季节变化特征

图 5 是阿柔和盈科站点估算的蒸散发、植被蒸腾和土壤蒸发的季节变化趋势。从季节变化上分析, 它们三者具有明显的季节变化特征。冬季的蒸散发较低, 春季植被覆盖度很低, 土壤蒸发占主要部分, 在生长季高峰期, 随着植被覆盖度的增加和植被的生长, 植被蒸腾占据主导作用, 最后随着植被的成熟枯黄或者作物的收割, 植被蒸腾逐渐降低, 蒸散发也随着降低。从年平均值来看, 阿柔草地的实测蒸散发、估算蒸散发和降雨量较为接近, 估算的年平均蒸散发略低于实测值。估算的全年平均的植被蒸腾为 0.78 mm/d, 土壤蒸发为 0.53 mm/d, 植被蒸腾约占估算蒸散发的 60%, 土壤蒸发约占 40%, 植被蒸腾量要强于蒸发。对于盈科农田玉米而言, 估算的蒸散发的年平均值与实测值相当, 但远大于降雨量。可见, 降雨量对于农田蒸散发的贡献相对较小, 而农

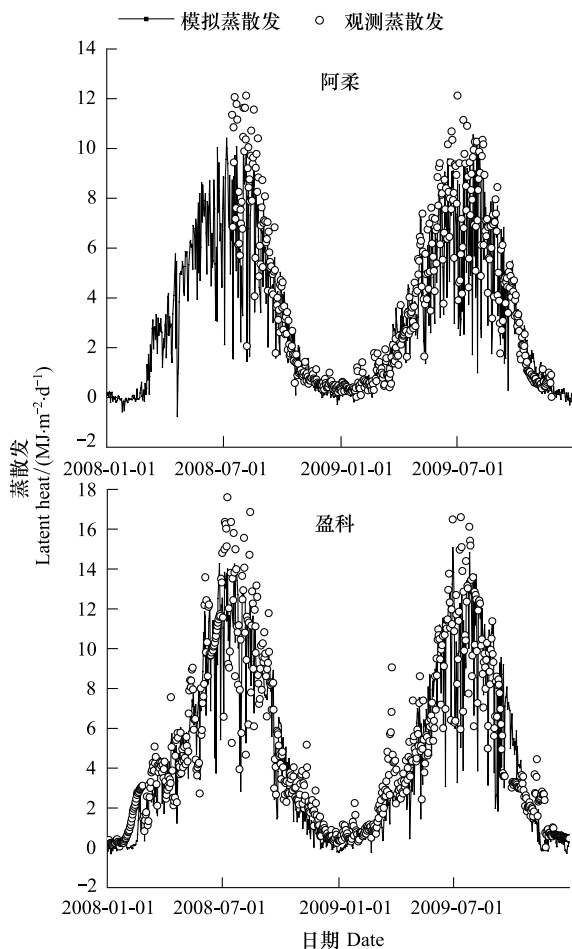


图4 阿柔站和盈科站 2008—2009 年蒸散发模拟与实测对比图
Fig.4 Comparison of the evapotranspiration predicted values and observed values at the A'rou and Yingke station during 2008—2009

田灌溉水分对蒸散发具有重要贡献。年平均土壤蒸发为 0.77 mm/d, 植被蒸腾为 1.20 mm/d, 植被蒸腾站估算蒸散发的 61%, 土壤蒸发占 39%, 全年平均的植被蒸腾量要强于土壤蒸发。

3.4 讨论

3.4.1 与其他相关研究的比较

当前,对于高寒草甸蒸散发的研究相对较少,但也开展了一些研究工作。例如刘安花等^[19]利用实测土壤含水量资料和水量平衡方法计算了海北高寒草甸地区的植物生长期(5—9月)植被的实际蒸散量为 425.5 mm;吴锦奎等^[20]利用了小型蒸渗仪、波文比与涡度相关技术 3 种方法对疏勒河上游高寒草甸生态系统的蒸散量进行对比研究,计算得到的蒸散发范围为 236.1—270.6 mm。本文观测的阿柔高寒草甸 2009 年蒸散发为 410.4 mm,和海北高寒草甸结果接近,但比疏勒河上游高寒草甸要高。造成他

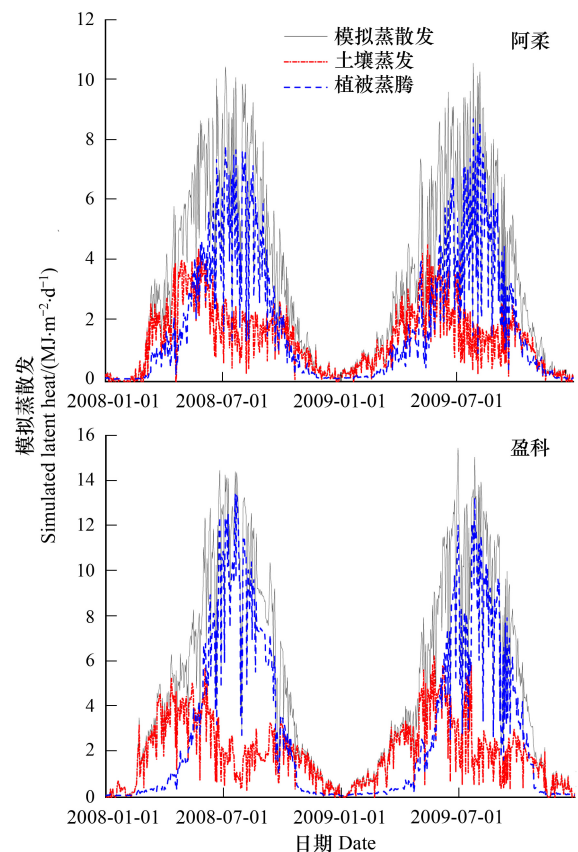


图5 阿柔站与盈科站估算的蒸散发、蒸腾和蒸发的季节变化
Fig.5 Seasonal dynamics of the evapotranspiration, transpiration and evaporation at the A'rou and Yingke stations during 2008 and 2009

们之间的差异的原因可能与两地的海拔高度(疏勒河上游 3885 m)及气温(疏勒河气温较低)等有关。

对于干旱区绿洲农田作物蒸散发的研究,前人已做了大量的工作,吴锦奎等^[21-22]利用波文比法和参考作物蒸散量作物系数法得到的张掖绿洲区党寨镇 2004 年和 2005 年的作物蒸散总量范围为 486.2—688.0 mm;吉喜斌等^[23]利用田间观测和水量平衡方法观测的临泽站春小麦 2003 年 4—7 月的蒸散发为 372.7 mm;赵丽雯等^[24]运用参考作物蒸散量-双作物系数法计算的甘肃临泽 2009 年绿洲农田实际蒸散量为 671.2 mm;Zhao 等^[25]观测的生长季蒸散发为 651.6 mm。本文计算的盈科绿洲农田生长季的蒸散发(2008—2009 年平均 552.2 mm)和其他相关研究结果基本接近,但也存在差异。计算结果间的差异可能是不同地点不同年份影响农田蒸散的天气状况、作物类型及土壤形状等因素不同造成的。

3.4.2 模型优化参数个数对结果的影响

根据 Leuning 等^[10]的研究,P-M 公式中的表面

导度模型的 6 个参数中, k_Q, k_A, Q_{50}, D_{50} 对模拟结果相对不敏感, 而参数 g_{sx} 和 f 对结果较为敏感。因此, 可以将前 4 个参数设为常数, 参考 Leuning 等^[10] 的结果, 分别设置前面 4 个参数为 0.6, 0.6, 30 W/m² 和 0.7 kPa, 通过模型参数优化方法对参数 g_{sx} 和 f 进行率定, 并利用阿柔和盈科站的数据进行验证。它们的 R^2 分别为 0.86 和 0.84, 可见, 随着优化参数个数的减少, 模型对蒸散发的模拟精度并没有显著地减小, 从而可以简化模型参数化过程。

3.4.3 存在的问题及结果优化

从前面的研究可以看出, 彭曼模型取得了较好的模拟效果, 但也存在一些问题。例如, 模型在农耕区蒸散发模拟时对土壤水分的敏感性较差。比较阿柔和盈科站的模拟结果, 可以发现它们之间存在一定的差异, 总体而言, 阿柔站的结果略好。由于阿柔站的植被类型是自然植被, 而盈科站为农田作物, 受到农业管理方式的影响。因此模拟结果的差异可能与模型无法准确模拟农田灌溉引起的土壤含水量的剧烈变化对蒸散发的影响有关。如图 6 所示, 灌溉前后, 农田蒸散发的变化明显, 但模型对土壤水分的变化不太敏感。这是因为模型的蒸散发系数 f 是一个固定的值, 无法表达出这种土壤湿度的季节变化特征, 从而无法实现对农田蒸散发的准确模拟。为了反映出土壤水分的季节变化对蒸散发的影响, 对模型进行了一系列的优化改进实验, 其模拟结果如图 6 和图 7 所示。其中 LE0 表示固定蒸散发系数 f

的模拟结果, LE1, LE2 和 LE3 分别表示以下 3 个实验的模拟结果。

(1) 实验 1 为了考虑土壤水分对气孔导度的影响, 在等式 3 的基础上, 增加了水分限制因子 (等式 6), 从而修改了冠层气孔导度的表达。 $f(\theta)$ 的范围为 0—1 之间, 其中 θ 为表层土壤含水量。

$$f(\theta) = \begin{cases} 1, & \theta > \theta_{cr} \\ \frac{\theta - \theta_w}{\theta_{cr} - \theta_w}, & \theta_w \leq \theta \leq \theta_{cr} \\ 0, & \theta < \theta_w \end{cases} \quad (6)$$

式中, θ_w 表示土壤凋萎系数 (m³/m³), θ_{cr} 表示作物受水分限制的临界含水量, 可设置为土壤饱和含水量的 0.75 倍^[26]。

(2) 实验 2 基于 Bouchet^[27] 的互补假设, 土壤表层水分状况反映了大气对土壤蒸发的需求, 它可以通过临近的空气的湿润程度 (空气相对湿度等) 来体现。通过土壤水分逆差指数 f_{SM} 来控制土壤蒸发, $f_{SM} = RH^{VPD}$, 该因子是土壤含水量的指针, 描述了土壤水分对蒸发的限制作用。用 f_{SM} 表示土壤蒸散发系数, 从而表征水分变化对蒸散发的影响。

(3) 实验 3 由于土壤蒸散发系数 f 与土壤表层含水量相关, 用表层土壤 (10cm) 的相对土壤含水量 REW 替换 f , 同时优化其他 5 个参数, 从而对蒸散发进行估算。其中 $REW = (VWC - VWC_{min}) / (VWC_{max} - VWC_{min})$ 。

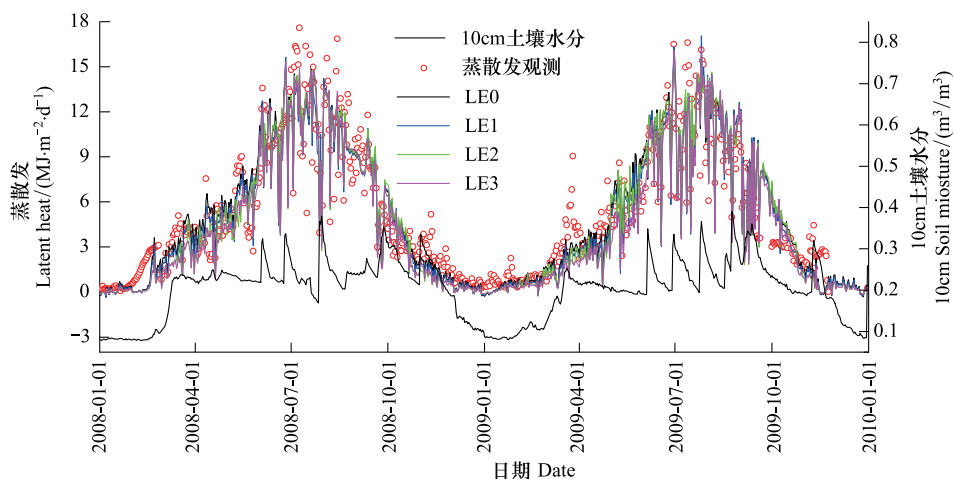


图 6 盈科 2008—2009 年 10cm 土壤水分及蒸散发观测和模拟结果 (LE0 表示原模型方案的模拟结果, LE1, LE2 和 LE3 分别表示实验 1、实验 2、实验 3 的模拟结果)

Fig. 6 Seasonal dynamics of 10 cm soil moisture, the observed and simulated evapotranspiration at the Yingke station during 2008 and 2009 (LE0 represented the original simulation results; LE1, LE2, LE3 indicated the simulation results of experiment 1, experiment 2 and experiment 3, respectively)

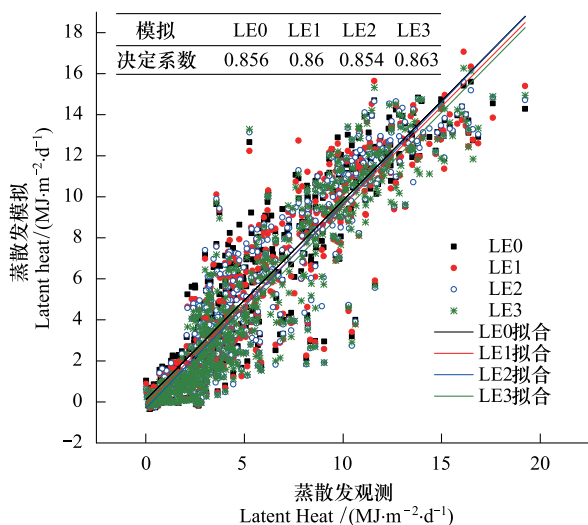


图7 盈科蒸散发观测和模拟结果的散点图(LE0表示原模型方案的模拟结果,LE1,LE2和LE3分别表示实验1、实验2、实验3的模拟结果)

Fig.7 Scatter of the observed and simulated evapotranspiration at the Yingke station (LE0 represented the original simulation results; LE1, LE2, LE3 indicated the simulation results of experiment 1, experiment 2 and experiment 3, respectively)

根据以上不同的方案,考虑土壤水分的季节变化对蒸散发的影响,LE1表示在气孔导度求解时考虑水分变化的模拟结果(实验1),LE2表示利用空气湿度表示土壤水分状态的模拟结果(实验2),LE3表示采用相对土壤水分替换 f 的模拟结果(实验3)。从蒸散发的模拟与观测结果的相关系数可以看出,LE3取得了最好的模拟结果,其次是LE1,LE2略差。总体而言,考虑土壤水分的变化以后,模型对蒸散发的峰值模拟精度略有提高,在一定程度上改进和优化了模型对农田蒸散发的模拟。

彭曼模型运用实测的空气温度和湿度等直接计算蒸散发,可以不受地表能量不闭合的影响。Leuning方法的优点是其气孔导度模型基于生理生态过程,参数具有生理意义,从而便于对其进行参数化。通过在不同下垫面站点上对彭曼模型进行验证和优化实验,为下一步区域尺度的蒸散发模拟奠定了基础。对于区域尺度的蒸散发估算,除了准备区域气象要素和植被土壤参数以外,还需确定不同下垫面对应的冠层导度估算参数表。

蒸散发估算和验证的前提是通量观测的准确性。但是,涡动通量观测一般有10%—30%的误差,同时通量塔观测与遥感像元尺度之间存在转换问题。本文在模型验证时,直接采用了站点涡动资料,

但是通量塔在不同的气象环境条件下,具有不同的源区(Footprint),因而导致蒸散发验证结果的不确定性,今后将针对这一问题进行进一步的深入研究。

4 结论

本文利用MODIS叶面积指数产品和P-M模型,并利用了SCE-UA算法对模型参数进行率定,对高寒草甸和干旱区农田生态系统的蒸散发进行了估算,同时实现了对植被蒸腾和土壤蒸发的分别估算。结果表明,利用该方法模拟的蒸散发与观测值具有很好的一致性,其拟合精度 R^2 分别达到0.88和0.87。因此,该模型可以较好地实现对干旱区不同生态系统的蒸散发的模拟。干旱区农田和草地生态系统的蒸散发具有明显的季节变化趋势,在生长季里的植被蒸腾左右要强于土壤蒸发,而在非生长季和生长季初期,土壤蒸发超过植被蒸腾,占据蒸散发的主导地位。总体而言,该模型的模拟精度较高,但也存在一些不确定性。通过考虑表层土壤水分变化对气孔导度的影响,初步改进和优化了模型对农田蒸散发的模拟。

References:

- [1] Vörösmarty C J, Federer C A, Schloss A L. Potential evaporation functions compared on US watersheds: Possible implications for global-scale water balance and terrestrial ecosystem modeling. *Journal of Hydrology*, 1998, 207(3/4): 147-169.
- [2] Sellers P J, Randall D A, Collatz G J, Berry J A, Field C B, Dazlich D A, Zhang C, Collelo G D, Bounoua L. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I: Model formulation. *Journal of Climate*, 1996, 9(4): 676-705.
- [3] Misson L, Panek J A, Goldstein A H. A comparison of three approaches to modeling leaf gas exchange in annually drought-stressed ponderosa pine forests. *Tree Physiology*, 2004, 24(5): 529-541.
- [4] Guo X Y, Cheng G D. Advances in the application of remote sensing to evapotranspiration research. *Advances in Earth Science*, 2004, 19(1): 107-114.
- [5] Wang G H, Zhao W Z. Advances in the application of remote sensing to evapotranspiration research in arid regions. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(8): 848-858.
- [6] Zhang Y Q, Chiew F H S, Zhang L, Leuning R, Cleugh H A. Estimating catchment evaporation and runoff using MODIS leaf area index and the Penman-Monteith equation. *Water Resource Research*, 2008, 44 (10): W10420, doi: 10.1029/2007WR006563.
- [7] Gao Y C, Long D. Progress in models for evapotranspiration estimation using remotely sensed data. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(3): 515-528.
- [8] Cleugh H A, Leuning R, Mu Q Z, Running S W. Regional

- evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 106: 285-304.
- [9] Mu Q Z, Heinsch F A, Zhao M S, Running S W. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 111 (4): 519-536.
- [10] Leuning R, Zhang Y Q, Rajaud A, Tu K. A simple surface conductance model to estimate regional evaporation using MODIS leaf area index and the Penman-Monteith equation. *Water Resources Research*, 2008, 44 (10): W10419, doi: 10.1029/2007WR006562.
- [11] Li Q, Chen X, Liu Y, Bao A M, Veroustraete F. Regional evapotranspiration retrieval in arid areas. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, 26(8): 108-112.
- [12] Penman H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical & Engineering Sciences*, 1948, 193(1032): 120-145.
- [13] Monteith J L. Evaporation and environment // *The State and Movement of Water in Living Organisms*. Symposium of the Society for Experimental Biology. England: Cambridge University Press, 1965, 19: 205-234.
- [14] Duan Q Y, Sorooshian S, Gupta V. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resource Research*, 1992, 28(4): 1015-1031.
- [15] Cheng G D. Study on the Integrated Management of the Heihe River Basin Water. Ecological and Economic System. Beijing: Science Press, 2009.
- [16] Li X, Ma M G, Wang J, Liu Q, Che T, Hu Z Y, Xiao Q, Liu Q H, Su P X, Chu R Z, Jin R, Wang W Z, Ran Y H. Simultaneous remote sensing and ground based experiment in the Heihe river basin: scientific objectives and experiment design. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(9): 897-913.
- [17] Huang G H, Ma M G, Tan J L, Zhang Z H. Data quality control and products of automatic weather stations for watershed allied telemetry experimental research. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, 25(6): 788-796.
- [18] Zhang Z H, Wang W Z, Ma M G, Xu Z W, Wu Y R, Huang G H, Tan J L. Data processing and product analysis of eddy covariance flux data for WATER. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, 25(6): 788-796.
- [19] Liu A H, Li Y N, Xue X J, Wang J L, Zhang F W. Study on evapotranspiration and crop coefficient of the alpine meadows in the Haibei area. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2010, 31 (1): 59-64.
- [20] Wu J K, Chen J W, Wu H, Zhang S Q, Gao M J, Qin Y. Comparative study of evapotranspiration in an alpine meadow in the upper reach of Shulehe river basin. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(1): 97-103.
- [21] Wu J K, Ding Y J, Wang G X, Yamazaki Y, Kubota J. Evapotranspiration of intercropping field in an artificial oasis in arid region. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(9): 16-20.
- [22] Wu J K, Ding Y J, Wang G X, Yamazaki Y, Kubota J. Evapotranspiration of seed maize field in arid region. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2007, 26(1): 14-17.
- [23] Ji X B, Kang E S, Zhao W Z, Chen R S, Jin B W, Zhang Z H. Simulation of the evapotranspiration from irrigational farmlands in the oases of the Heihe river basin. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(6): 713-719.
- [24] Zhao L W, Ji X B. Quantification of transpiration and evaporation over agricultural field using the FAO-56 dual crop coefficient approach—a case study of the maize field in an oasis in the middlestream of the Heihe river basin in Northwest China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(19): 4016-4026.
- [25] Zhao C Y, Nan Z R. Estimating water needs of maize (*Zea mays* L.) using the dual crop coefficient method in the arid region of northwestern China. *African Journal of Agricultural Research*, 2007, 2(7): 325-333.
- [26] Thompson N, Barrie I A, Ayles M. The Meteorological Office Rainfall and Evaporation Calculation System: MORECS. Bracknell: Hydrological Memorandum, Meteorological Office, 1981, (45): 69-69.
- [27] Bouchet R J. Évapotranspiration réelle et potentielle signification climatique. *International Association of Hydrological Sciences*, 1963, 62: 134-142.

参考文献:

- [4] 郭晓寅, 程国栋. 遥感技术应用于地表面蒸散发的研究进展. *地球科学进展*, 2004, 19(1): 107-114.
- [5] 王国华, 赵文智. 遥感技术估算干旱区蒸散发研究进展. *地球科学进展*, 2011, 26(8): 848-858.
- [7] 高彦春, 龙笛. 遥感蒸散发模型研究进展. *遥感学报*, 2008, 12(3): 515-528.
- [11] 李琴, 陈曦, 刘英, 包安明, Veroustraete F. 干旱区区域蒸散发量遥感反演研究. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(8): 108-112.
- [15] 程国栋. 黑河流域: 水-生态-经济系统综合管理研究. 北京: 科学出版社, 2009.
- [16] 李新, 马明国, 王建, 刘强, 车涛, 胡泽勇, 肖青, 柳钦火, 苏培玺, 楚荣忠, 晋锐, 王维真, 冉有华. 黑河流域遥感——地面观测同步试验: 科学目标与试验方案. *地球科学进展*, 2008, 23(9): 897-913.
- [17] 黄广辉, 马明国, 谭俊磊, 张智慧. 黑河综合遥感联合试验自动气象站数据质量控制与产品生成. *遥感技术与应用*, 2010, 25(6): 814-820.
- [18] 张智慧, 王维真, 马明国, 徐自为, 吴月茹, 黄广辉, 谭俊磊. 黑河综合遥感联合试验涡动相关通量数据处理及产品分析. *遥感技术与应用*, 2010, 25(6): 788-796.
- [19] 刘安花, 李英年, 薛晓娟, 王建雷, 张法伟. 高寒草甸蒸散量及作物系数的研究. *中国农业气象*, 2010, 31(1): 59-64.
- [20] 吴锦奎, 陈军武, 吴灏, 张世强, 高明杰, 秦彧. 疏勒河上游高寒草甸蒸散对比研究. *地理科学*, 2013, 33(1): 97-103.
- [21] 吴锦奎, 丁永建, 王根绪, 山崎佑介, 窝田隆平. 干旱区人工绿洲间作农田蒸散研究. *农业工程学报*, 2006, 22(9): 16-20.
- [22] 吴锦奎, 丁永建, 王根绪, 山崎佑介, 窝田隆平. 干旱区制种玉米农田蒸散研究. *灌溉排水学报*, 2007, 26(1): 14-17.
- [23] 吉喜斌, 康尔泗, 赵文智, 陈仁升, 金博文, 张智慧. 黑河流域山前绿洲灌溉农田蒸散发模拟研究. *冰川冻土*, 2004, 26(6): 713-719.
- [24] 赵丽雯, 吉喜斌. 基于 FAO-56 双作物系数法估算农田作物蒸腾和土壤蒸发研究——以西北干旱区黑河流域中游绿洲农田为例. *中国农业科学*, 2010, 43(19): 4016-4026.