

文章编号: 1008 - 2786 - (2017)6 - 908 - 11

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000293

山地地表蒸散发遥感估算研究现状

赵伟¹, 黄盼^{1,2}, 李爱农^{1*}

(1. 数字山地与遥感应用中心, 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 地表蒸散是陆地生态系统水文循环过程中最重要的水分输出机制, 也是决定地表水热平衡的关键参量。然而, 在山地特殊的气候和地形条件下, 山地地表蒸散过程表现出极大的复杂性及地形相关性。本文在地表蒸散遥感估算方法的基础上, 综述了当前面向山地复杂地形环境的地表蒸散遥感估算研究进展, 讨论了山地地表蒸散空间分布的复杂性及高空间异质性, 并分析了山地地表蒸散遥感估算存在的问题及可能的解决途径。

关键词: 山地; 遥感; 地表蒸散; 地形影响

中图分类号: P426.2; TP79

文献标志码: A

地表蒸散 (Evapotranspiration, 简称为 ET), 涵盖地面水分蒸发 (Evaporation) 和植被蒸腾 (Transpiration) 两大部分, 是陆表各圈层间能量与水分交换的主要过程^[1], 直接关系着陆地水文循环和地表热量平衡。然而, 山地地表起伏及其复杂的地表覆被对准确估算 ET 时空格局提出了严峻挑战。

基于地面站点观测设备的直接观测, 是定量获取 ET 时空分布特征及变化规律比较通用获取方法。观测设备包含早期的蒸渗仪 (lysimeter)^[2]、波文比 (Bowen Ratio)^[3] 和目前应用较为广泛的涡动相关 (Eddy Covariance)^[4]、大孔径闪烁仪 (Large-aperture scintillometer)^[5] 等。除直接观测外, 还可以通过一些水文和气象学方法估算地表蒸散, 如水量平衡法^[6]、互补关系法^[7]、参考作物系数法^[8, 9] 等。这些方法能够较为准确地获得单点或田间尺度 ET, 但由于地表异质性的存在, 难以在空间上直接推演

到大区域尺度, 其单点测量的局限性和地表蒸散的高空间异质性导致在空间推广上存在很大的局限性, 难以满足区域尺度水量平衡分析研究与应用的实际需求。卫星遥感对地观测技术的兴起, 为获取区域尺度 ET 提供了可能。迄今, ET 遥感估算研究, 在遥感数据类型、估算模型以及结果应用等多个方面, 已取得了很大的进展。

山地约占全球陆地面积的 24%, 我国陆地面积的 2/3, 在调节区域乃至全球气候环境、维持生态系统生物多样性、和涵养水源等方面发挥着重要的生态服务功能^[10]。然而, 在山地地形作用影响下, 不同的海拔、坡度、坡向的地表水热分布状况相比平坦地表更为复杂。山地地形起伏直接作用于山地 ET 估算所需的地表水分、气象参数 (空气温湿度、风速、风向和气压)、热力条件 (太阳辐射等) 以及山地遥感数据等因素, 导致山地 ET 遥感估算相比平坦

收稿日期 (Received date): 2016 - 12 - 27; **改回日期** (Accepted date): 2017 - 06 - 22

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金项目 (41771409, 41631180); 中国科学院国际合作局对外合作重点项目 (GJHZ201320); 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所青年百人团队计划 (SDSQB - 2015 - 02); 中国科学院青年创新促进会 (2016333) 联合资助 [National Natural Science Foundation Program (41771409; 41631180); the International Cooperation Key Project of CAS (GJHZ201320); the Youth Talent Team Program of Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS (SDSQB - 2015 - 02); Youth Innovation Promotion Association CAS (2016333)]

作者简介 (Biography): 赵伟 (1984 -), 男, 江西上高人, 副研究员, 研究方向: 山地地表水热通量遥感反演 [ZHAO Wei (1984 -), male, associate professor, research on mountain water and heat fluxes estimation by remote sensing method] E-mail: zhaow@imde.ac.cn

* **通信作者** (Corresponding author): 李爱农 (1974 -), 男, 安徽庐江人, 研究员, 博士生导师, 研究方向: 山地定量遥感及其应用研究 [LI Ai - Nong (1974 -), male, researcher, research on mountain quantitative remote sensing and its application] E-mail: ainongli@imde.ac.cn

地表不确定性更大,需考虑的因素更多且难度更高,其影响过程如图1所示。目前,针对山地的ET遥感估算工作已逐步成为当前遥感界相关领域关注的重点方向之一。

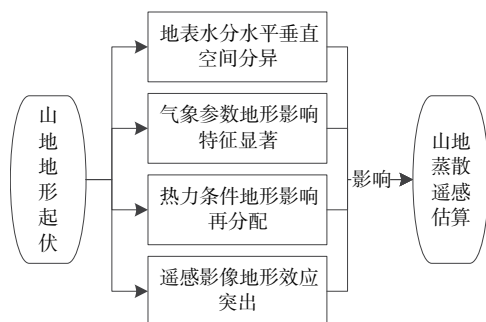


图1 山地对蒸散遥感估算的影响

Fig. 1 Influence of mountain on estimation of surface evapotranspiration by remote sensing

本文在简要回顾当前区域ET遥感估算方法的基础上,结合地形对地表水热格局的影响和作用机制,综述了当前ET遥感估算方法在山地环境的应用现状,并讨论了已有研究或方法中面临的一些关键问题,希望为后续相关研究提供参考与帮助。

1 遥感估算区域地表蒸散的方法

近年来,国内外不断涌现出遥感估算区域ET的方法,在不断提高估算精度的同时,也极大地拓宽了遥感估算ET的应用范围。根据学者们对遥感估算ET方法的综述归纳^[11-16],当前常用方法主要包括以下几类:经验统计模型、与传统方法相结合的遥感模型(Penman-Monteith公式和Priestley-Taylor模型等)、地表温度-植被指数特征空间法、地表能量平衡模型(SEBAL^[17]、SEBS^[18]、METRIC^[19]、TSEB^[20]等),其主要原理可归纳为:

(1)经验统计模型。其原理主要为将遥感观测数据与站点通量观测数据相结合,直接建立遥感参数(如地表温度、植被指数等)与地表蒸散的经验回归关系,继而估算区域地表蒸散^[21]。该方法的优点是简单易行,但它在很大程度上依赖地面观测数据,可移植性较差。

(2)与传统方法相结合的遥感模型。该方法主要基于传统的具有较坚实物理基础的Penman-Monteith(P-M)公式或Priestley-Taylor(P-T)模型等,利用遥感对地技术定量反演模型中所需要的地表参数(如地表净辐射、土壤热通量、阻抗等),使其从点尺度拓展到区域尺度,进而得到区域蒸散。但是,当

下垫面条件较复杂时,表面阻抗难以准确计算,因此应用范围受到一定的限制。

(3)地表温度-植被指数特征空间法。该方法主要是基于地表温度(LST)与植被指数(VI)散点图内的三角形或梯形特征空间,利用特征空间与土壤湿度以及植被蒸腾的冠层阻抗的强相关性,实现地表蒸散的估算^[22, 23]。具体而言,该方法通过确定LST-VI特征空间的干边和湿边(分别对应最小和最大的蒸散),进而对蒸发比(EF)、作物缺水指数^[24]和Priestley-Taylor系数等^[25]进行插值,再结合Penman-Monteith或Priestley-Taylor方程求解潜热通量^[26]。该方法不需要太多的气象数据,但干湿边的选取有一定的主观性,而且要求地表水分状况或植被覆被变化范围较大。

(4)地表能量平衡模型。该类方法的核心是地表能量平衡原理,即在不考虑由平流引起的水平能量传输的前提下,垂直方向上地表单位面积所接受的净辐射能量主要消耗于以下形式:用于加热地表的土壤热通量(G)、由蒸散消耗的潜热通量(LE)和由于存在温度梯度而进行热交换的显热通量(H),还有一部分消耗于植被光合作用、呼吸作用以及植被热量贮存,由于该部分数量级很小,通常忽略不计^[11]。为实现地表蒸散的有效估算,在确定显热通量和潜热通量过程中从不同的构建思想出发,形成了不同的解决方案,包括将能量界面(土壤和植被)当做均匀“大叶”的单层模型(SEBAL, SEBS, METRIC等)、考虑土壤和植被水热传输特性差异及相互作用的多层模型(TSEB)。与前几种方法相比,地表能量平衡法的估算精度更高,但同时难度也更大。在当前地表蒸散估算向定量化和高精度发展的趋势下,地表能量平衡法在目前遥感估算不同时空尺度地表蒸散中应用最为广泛。

总体而言,遥感估算ET无论在理论方法、技术模型等方面都有长足的进展。虽然各种方法仍存在各自的缺点,但为解决山地环境条件下地表蒸散估算问题提供了多种选择。

2 地形对山地地表水热参量空间格局的影响

地表水热状态是影响地表蒸散的重要因素。因此,开展山地ET遥感估算,首先必须准确认识山地环境地表水热参量空间格局的复杂性,下面分别就山地地形条件对山地地表水热参量空间格局的影响

做简要地分析。

2.1 对地表辐射能量分布的影响

在山区,受坡度、坡向和地形相互遮蔽的影响,导致山地地表不同地形环境接收到的太阳入射辐射能量差异显著,呈现出复杂的空间分布。如图2所示,山地地表接收的太阳入射辐射分为直接辐射、散射辐射和邻近地形的反射辐射三个部分,而不同地点的局地地形因子导致所接收的太阳辐射大小随时间、纬度、坡度、坡向等因素而变^[27]。

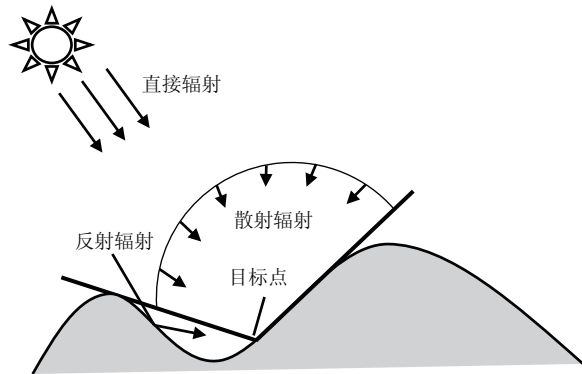


图2 山区地表接收太阳辐射示意
Fig. 2 Schematic diagram of surface solar radiation over mountainous area

2.2 对地表水分条件分布的影响

地表水分状况是影响地表热量传输的关键因素。在山地地形影响下,山地地表水分含量呈现显著的时空异质性特征,且在不同的时空尺度上,其影响因子存在差异。在大尺度上,主要受大范围的大气条件控制,如大气降水等;小尺度上,地表土壤水分空间分布主要受地形、植被、土壤物理性质等环境因子控制^[28]。

山地降水的空间分布很复杂,它既与大气气候条件有关,又受地形和海拔高度的影响。以高山区为例,在气流抬升和下沉的动力作用及山区温度分带差异导致的热力效应共同作用下,导致山地降水

量和降水日数均较大,且呈现随高度增长而增长的趋势,并在一个高度上达到最大值。表1列出的我国西部典型山地降水垂直分布特征明确地反映了这一现象^[29]。

对局地尺度而言,大量研究表明,地形是影响土壤水分含量及其时空变异的一个重要因子^[28]。地形因子(包括坡度、坡向、坡位及相对高程)通过控制地表水分的侧向流动从而形成山地地表水分复杂多变的空间格局^[30]。由上可知,由于山地地带性差异、海拔差异、坡度坡向差异、季节以及干湿年不同,导致山地地表水分条件在水平空间和垂直空间上差异性十分显著。

2.3 对地表温度空间分布的影响

众所周知,地表温度影响着地表显热、潜热及辐射能量传输过程,是量化开展地-气相互作用过程研究的重要物理量^[31]。地表温度的变化过程受地表辐射收支与能量平衡过程综合控制,由于地表接收太阳总辐射是地表能量的主要来源,在大区域尺度上,地表温度与纬度、经度和海拔高度相关^[32],而在山地坡面等小空间尺度上,地形引起的地表辐射平衡差异,直接影响局地地表辐射收支,是影响地表温度的主要因素^[33]。赵伟等^[34]在分析山地地表温度地形效应时发现,地表温度随着海拔、坡度、坡向均呈现出十分显著的变化规律,地表温度均随着海拔和坡度的升高而降低,而在坡向方面,南坡的温度比北坡的温度要高,这些现象反映出地形引起的入射辐射条件差异对地表温度空间分布的影响。地表温度的梯度性变化特征导致山地地表水热交换过程也表现出巨大的梯度差异。

综上所述,山地地形条件如海拔、坡向和坡度等因素,直接影响山地不同地形环境的辐射收支、地表水分和地表温度分布状况,进而直接影响山地下垫面条件,包括植被类型、空间分布和生长状况,造成山地典型的垂直地带性。例如,随着海拔的上升,从

表1 西部典型山区降水垂直分布特征^[29]

Table. 1 Characteristics of vertical distribution of precipitation in the typical mountains of western China

贡嘎山东坡			二郎山西坡			天山南坡		
站	海拔/m	年降水/mm	站	海拔/m	年降水/mm	站	海拔/m	年降水/mm
泸定	1320	644	泸定	1320	644	伽师	1209	52.8
磨西	1600	993	甘谷地	1400	666	阿图什	1298	70.2
三营	3000	1890	凉风顶	1760	704	乌恰	2137	170
林线	4200	2500	别托	2040	795	巴音谷格提	2400	210
			垭子口	2840	1008	吐儿格特	3505	248

山麓到山顶气温逐渐降低,植被生长季逐渐缩短,变化过程中伴随着降水量、风速、辐射、土壤等条件也发生变化,地表水热交换过程也因此呈现出十分复杂的变化过程^[35]。同时,山地地形条件还造成山区复杂的局地气候环境,如干热河谷现象:鉴于谷底比两侧谷坡海拔低,谷底就要暖和些,由于山顶与谷底附近空气之间的热力差异(辐射、温度)而引起的山谷风,气流过山下沉,受焚风效应的影响,谷底比两侧谷坡的降水要少些,所以谷底形成干燥炎热的气候特征^[36],间接影响着局部地区的蒸散特征。由此可见,在山地复杂的气候和地形条件下,地表蒸散的空间分布表现出极大的复杂性与地形相关性,导致山地 ET 的遥感估算需考虑的因素更多、难度更高。

3 山地地表蒸散遥感估算进展

为了准确获取山地 ET 的时空格局,已有学者在当前遥感估算模型理论与方法的基础上,针对山地环境遥感观测以及估算过程的复杂性,发展了考虑地形影响的山地地表蒸散遥感估算方法^[37-39]。与此同时,一些考虑地形影响遥感估算模型也相继被提出^[19, 40, 41],一定程度上增强了山地复杂地形条件下地表蒸散的估算精度。综述当前山地 ET 遥感估算方法,我们可以发现,相比平坦地表未考虑地形的遥感估算模型,其改进主要在于考虑了山地地形对遥感参量反演、地表辐射通量估算、气象数据空间化以及模型关键参数参数化的影响。本部分将从以下几个方面对当前山地 ET 遥感估算的研究进展进行梳理和总结。

3.1 遥感反演参量的地形效应校正

山地不同坡向的照射条件有很大的差异,导致山地遥感影像中相同地物类型在光照区和阴影区的光谱辐射强度不一致,地形效应十分显著^[42],严重影响了山地地表参量的遥感定量反演。在山地 ET 估算过程中,地表温度、地表反照率等参数是决定估算结果精度的关键,然而这些参数的地形效应不可避免地给估算结果带来一定的偏差。为克服地形效应影响,减少遥感数据自身的不确定性,遥感数据地形效应校正成为当前山地 ET 遥感估算的一项重要前提工作。

3.1.1 地表温度

在当前山地 ET 遥感估算研究中,为突出考虑地表温度的地形效应,学者们从卫星接收地表辐射能量的地形影响以及地表温度地形影响机制两个方

向展开。

第一个方向主要考虑遥感成像过程中,地形起伏引起卫星观测每个像元的观测角度发生差异,进而造成像元所接收的地表辐射能量有所差异。为降低能量差异对地表温度估算的影响,Liu 等通过计算局地观测天顶角,提出了引入余弦改正对坡面地表温度进行归一化处理的方法,进而获得地形改正后的真实地表温度^[43]:

$$T'_s = \left(\frac{T_s^4}{\cos\theta_v} \right)^{1/4} \quad (1)$$

其中, T'_s 是校正后的地表温度, T_s 为遥感反演的地表温度, θ_v 为局地观测天顶角,可通过以下公式计算得到:

$$\cos\theta_v = \cos s \cos \beta_v + \sin \alpha \sin \beta_v \cos(\varphi_v - \varphi) \quad (2)$$

式中, s 为坡度, β_v 为卫星观测天顶角, φ_v 为卫星方位角, φ 是坡向。Zhao and Liu^[44]采用上述改正方法用于山地地表蒸散的地形影响分析研究,结果表明不同坡度和坡向的 ET 估算结果在改正前后均呈现出较大的变化,也进一步说明了地表温度地形效应改正的必要性。

第二方向主要考虑地表温度的地形影响机制。一般而言,山地地表温度空间分布的影响因素众多,且在不同的尺度条件下,其影响的主要因子也存在变化。因此,其影响过程可分解为宏观地理因素影响和微观地形因素影响两部分。在宏观地理因素影响方面,地表温度可认为是宏观因素如经度 λ 、纬度 ψ 以及海拔高度 z 等的函数^[45]。但是,地表温度对微观地形影响如坡度、坡向、地形遮蔽度等在空间上响应分布规律性不显著,很难用简单函数形式来表达只能根据具体地形情况,具体确定微观地形因子对该地地表温度的影响。

因此,任意时间、地形环境的地表温度可表示为:

$$T(\lambda, \psi, z, t) = T_0(\lambda, \psi, z, t) + \Delta T_m(t) \quad (3)$$

式中, $T(\lambda, \psi, z, t)$ 为 t 时刻某点的地表温度; $T_0(\lambda, \psi, z, t)$ 为相同位置但不受微地形影响的宏观温度场,是经纬度、海拔和时间的函数; $\Delta T_m(t)$ 是该点微地形订正值。

在上述地形对地表温度影响理论分析的基础上,Chang^[46]和 Liu^[47]采用空气温度垂直递减率近似地表温度海拔变化的思路,对山区蒸散反演过程中地表温度的地形影响进行了改正。鲍平勇^[48]则

在开展黄河流域地表蒸散的遥感估算研究中,采用公式(3)的温度订正思路,结合气象观测站点对热红外遥感反演的像元尺度地表温度进行小地形影响修正并用于估算地表蒸散。修正前后结果对比表明,利用地形修正后地表温度的 ET 估算精度比不考虑地表温度地形影响的 ET 估算精度有所提高,平均相对误差从 13.1% 减小到 9.5%。

3.1.2 地表反照率

地表反照率是计算地表热交换的重要参数,直接关系到估算过程中地表辐射能量的计算精度,进而影响到最终 ET 估算结果。在山地环境光学遥感成像过程中,地形起伏导致不同朝向的坡面接收的太阳辐射不同,致使相同的地物在向阳面与阴面有较大的光谱差异,遥感表征的地表反照率具有较为明显的地形效应。因此,在当前山地 ET 遥感估算研究中,为获取准确的地表反照率数据,首先要对遥感影像进行地形辐射校正,尝试将坡面像元的辐亮度转换为水平像元辐亮度,使两个反射特性相同的地物在同一景遥感图像中具有相同或相近的亮度值,从而减缓或消除地形引起的辐射失真。

目前较为通用的改正方法是通过采用地形校正模型,首先对地表波段反射率进行地形校正,再用校正后结果估算地表反照率。Chen 等^[40]在估算青藏高原珠穆朗玛山地区地表水热通量研究中,为降低地表波段反射率的地形效应,采用 Richter^[49]地形校正方法对各波段地表反射率进行改正:

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi L_{\lambda}}{ESUN_{\lambda} d_r \cos \theta / \cos s} \quad (4)$$

式中, L_{λ} 为波段(λ)的辐亮度, $ESUN_{\lambda}$ 为大气层顶太阳常数, d_r 为日地距离订正系数, θ 为太阳入射天顶角, s 为坡度。基于以上地形校正结果,通过多元加权线性求和便可获取地形效应改正后的地表反照率。Han 等^[37]基于类似的地形效应改正思路,采用 C 校正地形辐射校正模型^[50]实现各波段地形辐射改正:

$$\rho_c(\lambda) = \rho_t(\lambda) \frac{\cos Z_s + C_{\lambda}}{\cos \theta + C_{\lambda}} \quad (5)$$

式中, $\rho_c(\lambda)$ 为地形改正后波段 λ 的地表反射率, $\rho_t(\lambda)$ 为受地形影响的地表反射率, Z_s 为太阳天顶角, θ 为局地太阳入射天顶角, C_{λ} 为 C 改正系数。

此外,直接对地表反照率进行地形校正也是一种处理方式。Zhao 和 Liu^[44]在针对太湖流域部分山区开展 ET 估算时,采用余弦法直接对地表反照率进行地形改正:

$$\rho' = \frac{\rho}{\cos \theta} \quad (6)$$

式中, ρ' 为地形改正后地表反照率, θ 为局地太阳入射天顶角, ρ 为卫星反演地表反照率。在采用以上方法进行地表反照率地形改正后,有效提高了反演过程中地表短波净辐射的估算精度,为山地 ET 的准确估算奠定了基础。

3.2 山地地表辐射估算改进

作为蒸散模型的能量输入,精确估算太阳辐射的空间分布对蒸散的可靠估算至关重要^[51]。在平原地区,不考虑地形影响,通常只需要利用少数几个气象站点的观测值进行简单的空间插值,就能得到区域的太阳入射辐射空间分布。但是山区地形条件复杂,海拔、坡度和坡向引起的地表太阳入射条件差异,邻近地形的遮蔽作用,以及地表反照率的地形效应特征,共同导致山区各部位接收到的太阳辐射存在巨大的差异^[52]。Aguilar^[38]比较了考虑地形影响与未考虑地形因素(仅通过地面站点观测空间插值)的太阳辐射估算结果,观测数据验证表明考虑地形影响的太阳辐射估算结果精度更高。同时,把以上太阳辐射估算结果分别用彭曼公式计算得到地表参考蒸散,结果表明估算过程中考虑地形与否对 ET 估算结果存在十分显著的差异。

因此,在估算山地地表辐射时,Allen 等^[19]综合地球倾角、地面经纬度、坡度和坡向等几何信息,首先考虑太阳直接入射辐射的地形影响机制。在此基础上,后续研究工作对地表接收的入射太阳辐射进一步细化,将入射短波辐射(SWD)分为太阳直接入射辐射 I_b , 天空散射辐射 I_d 和周围地形反射辐射 I_r 三个部分:

$$SWD = I_b + I_d + I_r \quad (7)$$

基于上述能量分配特征,高永年等^[53]为量化表征山地起伏地表的蒸散空间格局,选择我国陕甘宁交界区五县区为研究区,从能量平衡原理入手,对各能量通量进行了量化计算,以着重考虑地表净辐射的地形效应对 ET 估算的影响。Chen 等^[40]则基于 SEBS 模型,在考虑地表辐射通量地形影响的前提下,发展了地形增强的地表能量平衡模型即(TESEBS),并应用于珠峰地区的地表通量模拟,结果显示地表接收太阳辐射估算的平均偏差仅为 -9.6 W/m^2 , 相关系数高达 0.99, 而最终估算的各地表通量相比原始 SEBS 模型估算结果精度有了显著提高。在 TESEBS 模型的基础上, Han 等^[37]进一步改进地表入射接收太阳辐射中散射辐射以及邻近

地形反射辐射的估算方案,主要是利用天空可视因子 SVF 来表达目标点能接受到的散射辐射比例,同时在反射辐射的计算加入地形结构因子 C_t 的考虑。其中,散射辐射和反射辐射分别表示为:

$$\begin{aligned} I_d &= I_{d,flat} \times SVF \\ I_{d,flat} &= I_0 \times \tau_d \times \cos(Z_s) \\ I_r &= \alpha \times C_t \times (I_b + I_d) \\ C_t &= (1 + \cos s)/2 - SVF \end{aligned} \quad (8)$$

$$(9)$$

式中, $I_{d,flat}$ 是平坦地表的太阳散射辐射, I_0 为天顶太阳入射辐射, Z_s 为太阳入射天顶角, s 为地面坡度, α 为邻近地表反照率。通过统计分析散射辐射及反射辐射的数值变化特征,二者变化范围分别为 $30 \sim 60 \text{ W/m}^2$ 和 $0 \sim 100 \text{ W/m}^2$,数值大小体现了地形对地表入射太阳辐射影响的程度,而验证数据也表明考虑地形影响的太阳辐射估算方法极大地提高了入射辐射估算精度(均方根误差和平均偏差仅为 26.3 W/m^2 和 -2.9 W/m^2)。

3.3 山地气象观测数据的空间化

气象数据是当前多数遥感估算 ET 模型的关键输入参数,对估算精度有重要的影响。然而,由于自然和社会因素的限制,山区气象台站稀少,如何在气象站点有限的情况下,获得高精度的气象网格数据,是开展山地 ET 遥感估算的关键。在当前山地 ET 遥感估算的工作中,许多学者针对气象数据的空间化考虑了地形的影响^[19, 40, 53]。

就近地表空气温度而言,较为通用的是利用空气温度与海拔的关系,如 Liu 等^[47]在估算开都河流域的地表蒸散时利用气温的垂直递减率($0.65 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$)进行了气温数据的空间化。高永年等^[53]在估算陕甘宁交界区地表蒸散时,采用正弦-指数模型计算气象站点在卫星过境时刻的空气温度,并将空气温度与海拔进行线性拟合,获得关系模型并推广至研究区获取空气温度的空间分布。该类方法原理简单,但要进一步提高空间化的精度,则应该更加全面的考虑下垫面差异^[54]。为了进一步考虑地形影响,蔡迪花等^[55]建立了空气温度与其影响要素之间的多元统计模型,主要包括经纬度、海拔、坡度、坡向等,基于 DEM 的气温多元线性回归插值模型可表示为:

$$T = a_0 + a_1X + a_2Y + a_3H + a_4S + a_5A \quad (10)$$

式中, T 为气温; X 为经度; Y 为纬度; H 为海拔高度; S 为坡度; A 为坡向; $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ 为回归系数。该方法由于考虑了空气温度的水平和垂直地带性特征,插值结果精度相对较高,与空气温度的实际

分布情况更为接近,优于传统反距离权重、样条函数、克里金插值等方法,为山地 ET 估算中空气温度空间数据的获取提供了很好的研究思路。

除了空气温度,在计算空气动力学阻抗的过程中还涉及到大气压、风速等气象数据,它们在复杂地形下的空间变异与高程密切相关,Allen^[19]在 METRIC 模型中充分考虑这点,通过 DEM 数据来推算区域大气压和风速,由此可以得到更接近山地真实情况的气象数据空间分布,其表达式如下:

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26} \quad (11)$$

$$u' = u \left(1 + 0.1 \left(\frac{z - z_s}{1000} \right) \right) \quad (12)$$

P 为大气压, z 为高程, u' 是校正后风速, u 是站点观测风速, z_s 为站点高程。

从当前研究来看,山地 ET 估算过程中对气象数据空间化的重视程度还不够,其获取过程大多采用经验化模型,有的研究甚至直接使用研究区内的一个站点数据代替整个区域。但是,由于气象要素是复杂多变的,气象参数空间化所带来的误差可能会远远大于遥感参数反演误差,进而蒸散遥感反演过程中产生很大不确定性。

3.4 模型关键参数估算方法改进

地表能量平衡模型蒸散估算方法,又可称为地表能量平衡余项法,其估算地表蒸散的关键在于如何准确地估算地表显热通量(H)。显热通量主要反映地表下垫面与大气间由于温差作用,能量以湍流的方式传给大气,即用于加热空气。在单层大叶模型中,地表显热通量可表达为:

$$H = \rho C_p \frac{T_{aero} - T_a}{r_a} \quad (13)$$

$$r_a = \left[\ln \left(\frac{z - d_0}{z_{0m}} \right) - \psi_h \right] / kU \quad (14)$$

式中, ρ 为空气密度; C_p 为空气定压比热; T_{aero} 为空气动力学温度,即土壤和植被水热源汇处的温度; T_a 为参考高度处的温度; r_a 是空气动力学阻抗,是风速、大气稳定性和动量传输粗糙度长度 z_{0m} 的函数; z 为参考高度; d_0 为零平面位移; ψ_h 为热力学稳定度校正函数; k 为卡曼常数; U 为摩擦速度。

其中动量粗糙度长度 z_{0m} 属于空气动力学参数,是影响地表和大气间动量传输的关键参数之一,其大小依赖于风速、风向和地表特征^[56],在目前估算地表蒸散研究中通常根据土地覆被类型和像元植被量(如 NDVI 和 LAI) 等参数来获取。周艳莲等^[57]分析了不同下垫面的粗糙度长度的动态变化对

显热通量计算造成的影响,发现农田、复杂下垫面和森林的相对误差分别可达 2.7%、33.8%、18.1%。对于山区来说,森林是主要的土地覆被,粗糙度长度相对较长,其 50% 的偏差可以造成估算的显热通量相对误差超过 40%^[58]。由此可见, z_{0m} 的准确与否对蒸散估算结果至关重要。

虽然当前利用 z_{0m} 与 NDVI 的关系一定程度可以表征不同类型间粗糙度的差异,但相对于目前参数化更细化的趋势仍存在不足。例如,NDVI 在生物量较大(植被覆盖度较高)时容易达到饱和,导致空气动力学参数估算结果存在一定的不确定性^[52]。因此对于山区 z_{0m} 的参数化应当采取不一样的方法。Tian 等^[58]利用森林垂直结构参数(植被高度 h 和风廊道迎风面积指数 FAI)和地上生物量(AGB)的回归关系,通过 AGB 获取 h 和 FAI,再结合 GLASS LAI 产品,运用 SD00 模型^[59],成功估算出祁连山区森林 8 天时间尺度的 z_{0m} 产品,然后输入 SEBS 模型估算得到了长时间序列的森林蒸散数据,通过与实测数据比较,获得了比 MODIS ET 产品 MOD16 更好的效果。另外,青藏高原的地表通量研究表明,显热通量在低值区和高值区存在低估和高估现象,通过敏感性分析,发现这些误差与裸土的热传输附加阻抗 kB_s^{-1} 有关,然后通过对其进行修正,得到了比原始模型更好的表现^[60]。由于非均匀地表所产生的运动垂直分量会加快风速,而且对于倾斜表面,单个像元所代表的实际地表面积会更大,因此风的动量传输路径也会增加,导致了复杂地形下 z_{0m} 的参数化方案需要调整,在坡度大于 5 度的地表,可以通过以下公式修正地形影响^[19]:

$$z_{0m_adj} = z_{0m} \left(1 + \frac{180}{\pi} \cdot s - 5 \right) \quad (15)$$

式中, z_{0m_adj} 为地形纠正后的动量粗糙度长度; s 为坡度。然而对于非均匀地表,空气动力学粗糙度长度不但随植被状况发生变化,还与风向、风速及摩擦速度等因子有关,目前在计算粗糙度长度时对这些因子的考虑尚不全面,给地表蒸散模型计算带来误差,尤其是对于研究较小空间或时间尺度的地表通量模型^[39]。为了得到更准确的山地 ET,未来在计算粗糙度长度时要避免当前经验模型的局限性,发展有坚实物理意义的机理模型是一个可供选择的方法。

3.5 验证

山地 ET 遥感估算的另一个重要方面是反演结果的精度验证。从目前验证方法来看,其主要是采用直接验证的方法,即将遥感反演结果与地面通量

观测数据进行比较。

地表蒸散地面精确观测方法中比较有代表性的是蒸渗仪法、波文比法、涡度相关法和闪烁通量仪法等,但是它们在观测空间范围上存在较大的差异。其中蒸渗仪、波文比-能量平衡观测系统、涡动相关仪等观测空间尺度为点尺度(几米至几百米),主要适用于较高空间分辨率地表蒸散遥感估算结果的验证;而大孔径闪烁仪则在一定程度上改善了空间代表性有限的问题,可测量 500 ~ 5000 m 范围内的地表通量,在中低分辨率遥感估算结果验证方面具有明显的优势^[61]。但是,在实际验证过程上,由于受到大气平流扩散等作用的影响,通量观测站点的测量值可能并不仅仅来自垂直方向的地表,而更可能是来自水平范围上的一定源区。针对这个问题,部分研究通过求取一定范围内蒸散结果的平均值来与地表观测值进行比较^[62, 63];而另一部分研究则在验证遥感反演地表蒸散过程中引入足迹模型,通过求得地表观测值的通量贡献源区,采用权重分配的方式实现遥感估算值与地表观测值之间的空间代表范围匹配及精度验证^[64, 65]。

但是,由于山地地表水热通量观测站点稀少,导致验证数据缺乏,难以对山地 ET 遥感估算结果进行全面完整的评价。已有的验证工作也主要是基于平坦地表的观测结果展开^[37, 40],即使在山区,观测站点也通常安装在相对平坦的地方,很难对山地坡面 ET 估算结果进行有效验证,这是制约山地 ET 遥感估算研究工作进一步发展的关键。

4 结语与展望

山地地表水热交换过程表现出与水平地表不一样的特征,为了定量表征起伏地表条件下的蒸散格局,基于遥感观测手段开展定量估算时必须考虑地形因素,在 DEM 辅助下进行。本文综述了当前山地 ET 遥感反演研究进展,其中包含了反演过程中涉及的遥感参量地形效应改正、地表辐射估算方法改进、山地气象参数空间化以及模型关键参数改进等多个部分,为提高山地 ET 的估算精度提供了很好的设计思路与研究经验。虽然当前已针对山地 ET 遥感估算开展了一些研究性工作,但仍然存在一些问题。针对这些问题,后续工作可在以下几个方面展开:

(1) 受云雾、大气、太阳高度角、卫星观测角等因素的影响,山区遥感观测数据的有效性受到一定的限制。为避免上述因素干扰,利用可见光、热红外

及微波等多源多尺度遥感数据进行蒸散估算模型关键输入参数的协同反演,是提高地表参数的反演精度及时空连续性,进而提高山区 ET 遥感估算精度的一种选择途径。

(2)山区气象站点少,利用有限的观测站点数据,在考虑地形等因素的影响下,获得空间化的模型常规输入气象参数是一个棘手的问题,另外,站点稀少导致地面验证数据的缺乏。因此,应加强山区地表通量的地面观测,获取第一手高精度地表蒸散数据,这既是山区生态-水文过程研究的基础,也可以作为遥感估算结果的地面验证。

(3)水文过程研究需要高频次遥感蒸散结果,然而时空分辨率是一个矛盾体。对于空间异质性较强的山区,如何通过不同尺度的数据获得最优的时空分辨率是一个复杂的问题。为了能够让地面观测数据与遥感估算的面数据进行比较,加强遥感估算蒸散空间降尺度和地表测量蒸散升尺度研究;同时针对遥感估算得到的瞬时结果,还需要发展更准确的时间尺度拓展方法,以适应山区不同时空尺度的研究需求。

(4)在山区特殊气候和地形条件下,大气情况复杂多变,更容易形成平流,当前蒸散模型大多未考虑水平方向的能量输入,估算非均匀下垫面蒸散时会出现误差,未来应充分考虑山地的地形影响,基于坚实的物理基础,构建和发展普适性的山区任意地形和不同植被覆盖条件下的高精度蒸散遥感估算模型,满足山区生态-水文过程研究的需要。

参考文献 (References)

- [1] PRIESTLEY C H B, TAYLOR R J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters [J]. Monthly Weather Review, 2009, **100**(2): 81–92
- [2] 葛帆, 王钊. 蒸渗仪及其应用现状 [J]. 节水灌溉, 2004(2): 30–35 [GE Fan, WANG Zhao. Introduction of lysimeter and its application status in quo [J]. Water Saving Irrigation, 2004(2): 30–35.]
- [3] BOWEN I S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface [J]. Physical Review, 1925, **27**(6): 779–787
- [4] SWINBANK W C. The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere [J]. Journal of Meteorology, 1951, **8**(3): 135–145
- [5] WANG T, OCHS G R, CLIFFORD S F. A saturation-resistant optical scintillometer to measure C_n2 [J]. Journal of the Optical Society of America, 1978, **68**(3): 334–338
- [6] 武夏宁, 胡铁松, 王修贵, 等. 区域蒸散发估算测定方法综述 [J]. 农业工程学报, 2007, **22**(10): 257–262 [WU Xianing, HU Tiesong, WANG Xiugui, et al. Review of Estimating and Measuring Regional Evapotranspiration [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, **22**(10): p. 257–262]
- [7] BOUCHET R J. Evapotranspiration réelle et potentielle, signification climatique [J]. 1963, **62**: 134–142
- [8] GUTMAN G, RUKHOVETZ L. Towards satellite-derived global estimation of monthly evapotranspiration over land surfaces [J]. Advances in Space Research, 1996, **18**(7): 67–71
- [9] CHEN J H, KAN C E, TAN C H, et al. Use of spectral information for wetland evapotranspiration assessment [J]. Agricultural Water Management, 2002, **55**(3): 239–248
- [10] 李爱农, 尹高飞, 靳华安, 等. 山地地表生态参量遥感反演的理论, 方法与问题 [J]. 遥感技术与应用, 2016, **31**(1): 1–11 [LI Ainong, YIN Gaofer, JIN Huaan, et al. Principles and methods for the retrieval of biophysical variables in mountainous areas [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2016, **31**(1): 1–11]
- [11] LI Z L, TANG R, WAN Z, et al. A review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation from remotely sensed data [J]. Sensors (Basel), 2009, **9**(5): 3801–53
- [12] 高彦春, 龙笛. 遥感蒸散发模型研究进展 [J]. 遥感学报, 2008, **12**(3): 515–528 [GAO Yanchun, LONG Di. Progress in models for evapotranspiration estimation using remotely sensed data [J]. Journal of Remote Sensing, 2008, **12**(3): 515–528]
- [13] 张荣华, 杜君平, 孙睿. 区域蒸散发遥感估算方法及验证综述 [J]. 地球科学进展, 2012, **27**(12): 1295–1307 [ZHANG Ronghua, DU Junping, SUN Rui. Review of estimation and validation of region evapotranspiration based on remote sensing [J]. Advances in Earth Science, 2012, **27**(12): 1295–1307]
- [14] 周倜, 彭志晴, 辛晓洲, 等. 非均匀地表蒸散发遥感研究综述 [J]. 遥感学报, 2016, **20**(2): 257–277 [ZHOU Ti, PENG Zhiqing, XIN Xiaozhou, et al. Remote sensing research of evapotranspiration over heterogeneous surface: A review [J]. Journal of Remote Sensing, 2016, **20**(2): 257–277]
- [15] WANG K, DICKINSON R E. A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability [J]. Reviews of Geophysics, 2012, **50**(2)
- [16] DREXLER J Z, SNYDER R L, SPANO D, et al. A review of models and micrometeorological methods used to estimate wetland evapotranspiration [J]. Hydrological Processes, 2004, **18**(11): 2071–2101
- [17] BASTIAANSEN W, MENENTI M, FEDDES R, et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation [J]. Journal of hydrology, 1998, **212**: 198–212
- [18] SU Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes [J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2002, **6**(1): 85–100
- [19] ALLEN R G, TASUMI M, TREZZA R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model [J]. Journal of irrigation and drainage engineering, 2007, **133**(4): 380–394

- [20] NORMAN J M, KUSTAS W P, HUMES K S. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1995, **77**(3): 263–293
- [21] JACKSON R D, HATFIELD J L, REGINATO R J, et al. Estimation of daily evapotranspiration from one time-of-day measurements [J]. *Agricultural Water Management*, 1983, **7**(13): 351–362
- [22] CARLSON T N, CAPEHART W J, GILLIES R R. A new look at the simplified method for remote sensing of daily evapotranspiration [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, **54**(2): 161–167
- [23] NEMANI R R, RUNNING S W. Estimation of regional surface resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal-IR AVHRR data [J]. *Journal of Applied meteorology*, 1989, **28**(4): 276–284
- [24] MORAN M S, RAHMAN A F, WASHBURNE J C, et al. Combining the Penman-Monteith equation with measurements of surface temperature and reflectance to estimate evaporation rates of semiarid grassland [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 1996, **80**(24): 87–109
- [25] WANG K, WANG P, LI Z, et al. A simple method to estimate actual evapotranspiration from a combination of net radiation, vegetation index, and temperature [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2007, **112**(D15): D15107
- [26] JIANG L, ISLAM S. An intercomparison of regional latent heat flux estimation using remote sensing data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, **24**(11): 2221–2236
- [27] HUANG P, ZHAO W, LI A. The Preliminary Investigation on the Uncertainties Associated With Surface Solar Radiation Estimation in Mountainous Areas [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, **14**(7): 1071–1075
- [28] FAMIGLIETTI J, RUDNICKI J, RODELL M. Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas [J]. *Journal of Hydrology*, 1998, **210**(1): 259–281
- [29] 钟祥浩. 山地学概论与中国山地研究[M]. 2000: 四川科学技术出版社 [ZHONG Xianghao, YU Dafu, ZHENG Lin, et al. *Introduction to Mountain Science and Chinese Mountain Studies* [M]. 2000: Sichuan Science & Technology Press]
- [30] GRAYSON R B, WESTERN A W, CHIEW F H, et al. Preferred states in spatial soil moisture patterns: Local and nonlocal controls [J]. *Water Resources Research*, 1997, **33**(12): 2897–2908
- [31] ZHAN W, CHEN Y, ZHOU J, et al. Disaggregation of remotely sensed land surface temperature: Literature survey, taxonomy, issues, and caveats [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, **131**: 119–139
- [32] WANG Y, HOU S. A new interpolation method for Antarctic surface temperature [J]. *Progress in Natural Science*, 2009, **19**(12): 1843–1849
- [33] 金会军, 孙立平, 王绍令, 等. 青藏高原中、东部局地因素对地温的双重影响(I): 植被和雪盖 [J]. *冰川冻土*, 2008, **30**(4): 535–545 [JIN Huijun, SUN Liping, WANG Shaoling, et al. Dual influences of local environmental variables on ground temperatures on the Interior-Eastern Qinghai-Tibet Plateau (I): vegetation and snow cover [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, **30**(4): 535–545]
- [34] 赵伟, 李爱农, 张正健, et al. 基于 Landsat8 热红外遥感数据的山地地表温度地形效应研究[J]. *遥感技术与应用*, 2016, **31**(1): 63–73 [ZHAO Wei, LI Ainong, ZHANG Zhengjian, et al. A study on land surface temperature terrain effect over mountainous area based on Landsat 8 thermal infrared data [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2016, **31**(1): 63–73]
- [35] 张百平, 周成虎, 陈述彭. 中国山地垂直带信息图谱的探讨[J]. *地理学报*, 2003, **58**(2): 163–171 [ZHANG Baiping, ZHOU Chenghu, CHEN Shupeng. The geo-info-spectrum of montane Altitudinal belts in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, **58**(2): 163–171]
- [36] 文传甲. 横断山区地形对水热条件的影响 [J]. *山地研究*, 1989, **7**(1): 65–73 [WEN Chuanjia. Influence of the relief on conditions of water and heat in the Hengduan mountainous region [J]. *Mountain Research*, 1989, **7**(1): 65–73]
- [37] HAN C, MA Y, CHEN X, et al. Estimates of land surface heat fluxes of the Mt. Everest region over the Tibetan Plateau utilizing ASTER data [J]. *Atmospheric Research*, 2016, **168**: 180–190
- [38] AGUILAR C, HERRERO J, POLO M J. Topographic effects on solar radiation distribution in mountainous watersheds and their influence on reference evapotranspiration estimates at watershed scale [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, **14**(12): 2479–2494
- [39] ALLEN R G, TREZZA R, KILIC A, et al. Sensitivity of landsat-scale energy balance to aerodynamic variability in mountains and complex terrain [J]. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 2013, **49**(3): 592–604
- [40] CHEN X, SU Z, MA Y, et al. Estimation of surface energy fluxes under complex terrain of Mt. Qomolangma over the Tibetan Plateau [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, **17**(4): 1607–1618
- [41] GAO Z, LIU C, GAO W, et al. A coupled remote sensing and the Surface Energy Balance with Topography Algorithm (SEBTA) to estimate actual evapotranspiration over heterogeneous terrain [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, **15**(1): 119–139
- [42] 穆悦, 安裕伦, 王喆, 等. 不同地形校正模型计算地形复杂山区地表反射率的对比 [J]. *山地学报*, 2015, **32**(4): 257–266 [MU Yue, AN Yulun, WANG Zhe, et al. Comparison of different topographic correction models for surface reflectance calculating in rugged terrain area [J]. *Journal of Mountain Science*, 2015, **32**(4): 257–266]
- [43] LIU Y, HIYAMA T, YAMAGUCHI Y. Scaling of land surface temperature using satellite data: A case examination on ASTER and MODIS products over a heterogeneous terrain area [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, **105**(2): 115–128
- [44] ZHAO X, LIU Y. Relative contribution of the topographic influence on the triangle approach for evapotranspiration estimation over mountainous areas [J]. *Advances in Meteorology*, 2014, **1**: 16
- [45] 傅抱璞. 山地气候要素空间分布的模拟 [J]. *气象学报*,

- 1988, **46** (3): 319 – 326 [FU Baopu. Simulation of the distribution of climatic elements in mountainous areas. national conference on Local Climate [J]. 1988, **46**(3): 319 – 326]
- [46] CHANG Y, DING Y, ZHAO Q, et al. Remote estimation of terrestrial evapotranspiration by Landsat 5 TM and the SEBAL model in cold and high-altitude regions: a case study of the upper reach of the Shule River Basin, China [J]. Hydrological Processes, 2017, **31**(3): 514 – 524
- [47] LIU X, SHEN Y, LI H, et al. Estimation of land surface evapotranspiration over complex terrain based on multi-spectral remote sensing data [J]. Hydrological Processes, 2017, **31**(2): 446 – 461
- [48] 鲍平勇. 半干旱区域日蒸散发估算的遥感研究 [D]. 2007, 河海大学 [BAO Pingyong. Estimation of the day evapotranspiration in semiarid area using remote sensing [D]. 2007, Hohai University]
- [49] RICHTER R, KELLENBERGER T, KAUFMANN H. Comparison of topographic correction methods [J]. Remote Sensing, 2009, **1** (3): 184 – 196
- [50] REESE H, OLSSON H. C-correction of optical satellite data over alpine vegetation areas: A comparison of sampling strategies for determining the empirical c-parameter [J]. Remote Sensing of Environment, 2011, **115**(6): 1387 – 1400
- [51] RUNNING S W, COUGHLAN J C. A general model of forest ecosystem processes for regional applications I. Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes [J]. Ecological modelling, 1988, **42**(2): 125 – 154
- [52] 杨何群. 基于遥感和DEM的山区—平原地表水热通量估算及对比分析研究 [D]. 2006, 兰州大学 [YANG Hequn. Estimation and analysis of land surface water and heat fluxes in mountain-plain area based on remote sensing and DEM [D]. 2006, Lanzhou University]
- [53] 高永年, 高俊峰, 张万昌, 等. 地形效应下的区域蒸散发遥感估算 [J]. 农业工程学报, 2010, **26** (10): 218 – 223 [GAO Yongnian, GAO Junfeng, ZHANG Wanchang, et al. Estimation of region evapotranspiration by remote sensing data considering topographic effects [J]. Transactions of the CSAE, 2010, **26** (10): 218 – 223]
- [54] 廖顺宝, 李泽辉, 游松财. 气温数据栅格化的方法及其比较 [J]. 资源科学, 2003, **25** (6): 83 – 88 [LIAO Shunbao, LI Zhehui, YOU Songcai. Comparison on methods for rasterization of air temperature data [J]. Resource Science, 2003, **25** (6): 83 – 88]
- [55] 蔡迪花, 郭锐, 李崇伟. 基于DEM的气温插值方法研究 [J]. 干旱气象, 2009, **27** (1): 10 – 17 [CAI Dihua, GUO Ni, LI Chongwei. Interpolation of air temperature based on DEM over eastern region of Gansu [J]. Journal of Arid Meteorology, 2009, **27**(1): 10 – 17]
- [56] 周艳莲, 孙晓敏, 朱治林, 等. 几种典型地表粗糙度计算方法的比较研究 [J]. 地理研究, 2007, **26** (5): 887 – 896 [ZHOU Yanlian, SUN Xiaomin, ZHU Zhilin, et al. Comparative research on four typical surface roughness length calculation methods [J]. Geographical Research, 2007, **26** (5): 887 – 896]
- [57] 周艳莲, 孙晓敏, 朱治林, 等. 几种不同下垫面地表粗糙度动态变化及其对通量机理模型模拟的影响 [J]. 中国科学. D 辑: 地球科学, 2006 (S1): 244 – 254 [ZHOU Yanlian, SUN Xiaomin, ZHU Zhilin, et al. The dynamic change of several roughness length on different underlying surface and influence on the simulation for flux mechanism Model [J]. Science in China Ser D: Earth Sciences, 2006(S1): 244 – 254]
- [58] TIAN X, VAN DER TOL C, SU Z, et al. Simulation of forest evapotranspiration using time-series parameterization of the Surface Energy Balance System (SEBS) over the Qilian Mountains [J]. Remote Sensing, 2015, **7**(12): 15822 – 15843
- [59] SCHAUDT K, DICKINSON R. An approach to deriving roughness length and zero-plane displacement height from satellite data, prototyped with BOREAS data [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, **104**(2): 143 – 155
- [60] CHEN X, SU Z, MA Y, et al. An improvement of roughness height parameterization of the Surface Energy Balance System (SEBS) over the Tibetan Plateau [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2013, **52**(3): 607 – 622
- [61] 贾贞贞, 刘绍民, 毛德发, 等. 基于地面观测的遥感监测蒸散量验证方法研究 [J]. 地球科学进展, 2010, **25** (11): 1248 – 1260 [JIA Zhenzhen, LIU Shaomin, MAO Defa, et al. A study of the validation method of remotely sensed evapotranspiration based on observed data [J]. Advances In Earth Science, 2010, **25** (11): 1248 – 1260]
- [62] HEMAKUMARA H, CHANDRAPALA L, MOENE A F. Evapotranspiration fluxes over mixed vegetation areas measured from large aperture scintillometer [J]. Agricultural Water Management, 2003, **58**(2): 109 – 122
- [63] JIA L, SU Z, VAN DEN HURK B, et al. Estimation of sensible heat flux using the Surface Energy Balance System (SEBS) and ATSR measurements [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2003, **28**(1): 75 – 88
- [64] CHAVEZ J, NEALE C M, HIPPS L E, et al. Comparing aircraft-based remotely sensed energy balance fluxes with eddy covariance tower data using heat flux source area functions [J]. Journal of Hydrometeorology, 2005, **6**(6): 923 – 940
- [65] LIU S, HU G, LU L, et al. Estimation of regional evapotranspiration by TM/ETM+ data over heterogeneous surfaces [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2007, **73** (10): 1169 – 1178

A Review of Evapotranspiration Estimation Using Remotely Sensed Data in Mountainous Region

ZHAO Wei¹, HUANG Pan^{1,2}, LI Ainong^{1*}

(1. *Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Surface Evapotranspiration (ET) is one of the most important terms of hydrological cycle in terrestrial ecosystems and also a key parameter in water and heat balances on the Earth's surface. Accurately obtaining the spatio-temporal characteristics of mountain ET is essential for quantitatively understanding mountain water cycle and protecting mountain ecological environment. However, under mountain special climate and terrain conditions, mountain evapotranspiration process usually shows great complexity and high relevance to surface terrain. Compared with the traditional ground site measurements, remote sensing estimation method based on Earth observation satellite technology can obtain a wide range of spatial distribution of ET. This research briefly introduced the main surface evapotranspiration estimation methods, including surface energy balance models, Penman-Monteith models, temperature-vegetation index space methods, Priestley-Taylor models and other methods such as empirical statistical methods, complementary methods and land process assimilation models. The influence of complex terrain on surface water and heat pattern pointed out the complexity and high spatial heterogeneity of the spatial distribution of mountain ET. By reviewing the current studies of remote sensing based ET estimation methods with focuses on complex terrain environment, the problems of mountain ET remote sensing estimation was concluded and their possible solutions for promoting the development of mountain ET remote sensing estimation methods was suggested.

Key words: mountain; remote sensing; ET; topographic influence