

基于 SEBAL 模型的漓江流域蒸散量变化分析

周玲^{1,2}, 张丽¹, 许君一², 刘广¹

(1. 中国科学院 遥感与数字地球研究所 数字地球重点实验室, 北京 100094;

2. 山东科技大学 测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要: 基于 1993 年、1999 年、2006 年和 2010 年 Landsat TM/ETM+ 影像, 应用 SEBAL 模型估算了漓江流域四期不同时相的日蒸散量, 并应用 P-M 公式对估算结果进行验证。通过对研究区蒸散量结果进行分析, 得出以下结论: (1) 日蒸散量分布受到季节及气候的影响, 植被生长季的蒸散量明显高于其他季节; (2) 漓江流域的蒸散分布具有明显的空间差异性, 不同土地利用类型的蒸散均值相差较大, 不同时期的蒸散量均表现出林地 > 水体 > 灌木/草地 > 耕地 > 建设用地的规律; (3) 近 20 a 来漓江流域土地利用变化显著, 除去气候及降水量等因素的影响, 蒸散量受到土地利用变化的影响明显。随着漓江水源地林地的减少与退化, 日蒸散量呈现下降的趋势, 进一步揭示了经济发展与人类活动对漓江流域生态环境及水热平衡的影响。

关键词: 遥感; 漓江流域; 土地利用; 蒸散量; SEBAL 模型

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)04-0332-06

Analysis of the Variations of Evapotranspiration in Lijiang River Basin Based on SEBAL Model

ZHOU Ling^{1,2}, ZHANG Li¹, XU Junyi², LIU Guang¹

(1. Key Laboratory of Digital Earth Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 2. Geomatics College, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: Based on Landsat TM/ETM+ images in 1993, 1999, 2006 and 2010, regional evapotranspiration were estimated using the SEBAL model. The P-M model and the data from meteorology station were used to verify the accuracy of ET estimation from SEBAL model. The results shows that: (1) the evapotranspiration in Lijiang River Basin was strongly influenced by season and climate, and ET in growing season was much higher than that during other seasons; (2) the ET in the Lijiang River basin had the obvious spatial variations depending on different vegetation types, and the evapotranspiration for different periods all presented the sequence of woodland > water > bush/grassland > cropland > construction land; (3) the land use and land cover of the Lijiang River Basin had changed drastically, which had strongly influenced ET in the study region. ET showed the declining trend due to the forest degradation, which further indicated the influences of economic development and human activity on the environment and water-heat balance in the Lijiang River basin.

Keywords: remote sensing; Lijiang River Basin; land use and land cover; evapotranspiration; SEBAL model

漓江是广西壮族自治区最重要的生态及旅游资源, 享有山水甲天下之美誉。漓江流域土地及生态环境的可持续发展对维持流域内及河流下游的经济和社会发展具有十分重要的意义^[1]。但近年来, 随着漓江流域的经济发展以及农林经济的发展, 漓江上游部分原始林地遭到砍伐转换为经济林、果园以及农田等, 且城市建设用地面积不断增加, 使漓江流域的土地利用/覆盖不断发生变化, 从而进一步导致漓江水量不断减少、枯水期逐年延长, 土壤涵水能力下降, 生态环境不断恶化等问

题^[2]。土地利用/土地覆盖变化是人为因素作用于地理过程、水文过程的主要表征, 土地利用/覆盖变化通过改变下垫面地表反射率、粗糙度、植被覆盖度等因素, 会进一步引起地表水热循环的变化。地表蒸散是反映土地利用/覆盖变化所引起地表水热变化的敏感因子, 因此研究蒸散量的时空变化特征, 能够进一步揭示漓江流域土地利用/覆盖变化对水热平衡的影响。

蒸散 (Evapotranspiration, ET) 是地表与大气间水热平衡的主要组成部分, 也是陆面过程研究的重要参

数。地表蒸散过程包括土壤蒸发和植被蒸腾,此过程需要吸收周围环境热量,因此蒸散发过程是陆面耗水的主要方式^[3]。随着遥感技术的不断发展,应用卫星遥感技术估算蒸散量为区域蒸散量的估算提供了可能,其大尺度、高时效等优势在区域蒸散估算中发挥着越来越大的作用。在以遥感技术为基础的估算方法中,常用的计算方法多是基于能量平衡法^[4]。其中陆面能量平衡 SEBAL(Surface Energy Balance Algorithm for Land)模型算法是一种典型的基于能量平衡方程的区域蒸散反演方法,该模型的优点在于能够充分应用遥感数据信息。模型从建立到现在,已经在巴基斯坦、美国及中国很多区域得到了试验和验证。

本文基于 SEBAL 模型,以漓江流域为研究区,应用四期 Landsat TM/ETM+ 遥感影像,结合漓江流域 DEM 及风速、空气温度等气象数据,实现漓江流域日蒸散量的估算,并结合近年来研究区内土地利用/覆盖信息,统计不同土地利用类型的日蒸散量,进一步分析土地利用/覆盖变化对日蒸散量的影响,为漓江流域土地利用、灌溉规划、水权调整等水资源管理的可持续发展提供参考依据。

1 研究区概况与数据

1.1 研究区概况

漓江流域位于广西东北部,地理坐标为 109°45′—110°40′E,24°18′—25°41′N,北靠猫儿山自然保护区;南至桂林阳朔县;西面与柳州相接,东至海洋山自然

保护区。研究区以桂林市为中心,包括桂林市区及兴安、灵川、临桂、阳朔 4 个县,形成中部平坦、四周青山环绕的盆地地势。研究区内包括猫儿山、海洋山及青狮潭三个国家生态自然保护区,整个研究区内山峦叠嶂,溪谷纵横,植被丰富,构成了丰富的景观类型,主要土地利用类型包括林地、灌木/草地、耕地、建设用地及水体等。

漓江流域属于中亚热带湿润季风气候区,气候温和,雨量充沛,光照充足,四季分明且雨热同季,气候条件十分优越。年平均无霜期 309 d,年平均降雨量 1 949.5 mm,平均蒸发量 1 490~1 905 mm。中部灵川县境内,年蒸发量 1 856.6 mm;中下游地带主要包括桂林市区和阳朔县、临桂县地区,年降雨量 1 838~1 941.5 mm,年蒸发量 1 377~1 856.6 mm,降雨量大于蒸发量,年平均相对湿度 76%^[5]。

1.2 数据及预处理

文章试验所需数据包括遥感影像、DEM 数据及气象数据。遥感数据选取分辨率 30 m 的 Landsat 影像。通过对 1990 年之后的 landsat 可用数据进行质量筛选后,最终选取 1993 年、1999 年、2006 年及 2010 年四期 TM/ETM+ 数据,7 个波段的全部资料用于反演各类地面参数及水热通量。DEM 数据采用 ASTER GDEM30 米分辨率数据。气象数据选用桂林气象站点 1993 年、1999 年、2006 年、2010 年的日值气象数据(中国气象科学数据共享服务网,http://cdc.cma.gov.cn/),主要用于估算模型参数及精度验证。

表 1 Landsat 数据行带号及获取时间

影像行带号	125—42	125—43	124—42	124—43
数据时间	1993-09-24	1993-09-24	1992-10-16	1992-10-16
	1999-10-19	1999-12-15	1999-12-15	1999-12-15
	2006-09-12	2006-09-12	2006-09-21	2006-09-21
	2010-05-02	2010-07-05	2009-10-31	2010-08-31

整个研究区由四景 Landsat 影像覆盖,影像行带号分别为 125—42,125—43,124—42 及 124—43。由于林地面积占研究区土地利用类型主要比例,因此所选影像成像时间尽量在植被生长季内。数据行带号及时间如表 1 所示。为保证试验精度,在应用 Landsat 遥感影像进行估算前,首先对影像进行几何精校正与大气校正,几何校正精度在 0.5 个像元内。

2 漓江流域蒸散量估算

SEBAL 模型由荷兰学者 Bastiaanssen 于 1988 年提出,是应用遥感数据估算区域蒸散量的重要方法^[6-7]。该模型的优点在于具有清楚的物理意义,能够应用在不同的气候条件下,且除遥感影像资料外,

所需气象资料较少。到目前为止,该模型已经在蒸散发研究中得到了广泛的应用^[8-10]。SEBAL 模型原理基于陆面能量平衡方程:

$$R_n = \lambda \cdot ET + G + H$$
 (1)

式中: R_n ——地表净辐射通量; $\lambda \cdot ET$ ——蒸发潜热; G ——土壤热通量; H ——感热通量。模型通过遥感影像可见光、近红外与热红外波段进行估算,获取地表净辐射量、土壤热通量与感热通量,在此基础上根据公式(1)求得潜热通量,通过时间扩展获得日蒸散量。

本文以漓江流域为研究区,利用 Landsat 影像的可见光与近红外波段可以计算地面反照率、植被指数 NDVI、及比辐射率,应用热红外波段及比辐射率计算地面温度,详细算法及计算过程见 Bastiaanssen 等

人的文章^[6-7,10]。在地表参数的估算过程中,由于地表温度等参数难以获取,因此对计算过程进行了简化处理。本文在获得各类地面参数的基础上,应用 SEBAL 模型进行研究区水热通量及日蒸散量的估算。

2.1 地表净辐射量

净辐射量的计算过程可以表达^[11]为:

$$R_n = (1 - \alpha)R_s + (R_{in} - R_{out}) - (1 - \varepsilon)R_m \quad (2)$$

式中: R_s ——入射的短波辐射; R_{in} ——入射的长波辐射; R_{out} ——反射的地表长波辐射; α ——地面反照率,各表达式如下:

$$R_s = G_{sc} \times \cos(\theta) \times d \times \tau_{sw} \quad (3)$$

$$R_{in} = 1.08(-\ln \tau_{sw})^{0.265} s T_{air}^4 \quad (4)$$

$$R_{out} = \varepsilon s T_s^4 \quad (5)$$

式中: G_{sc} ——太阳常数,值为 $1\,367\text{ W/m}^2$; d ——日地距离系数,主要通过影像获取日期在太阳历中的排列序号计算得到; s ——Stefan Boltzman 常数($5.67 \times 10^{-8} [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)]$); T_{air} ——空气温度; T_s ——地表温度; θ ——太阳天顶角; ε ——地面比辐射率。

2.2 土壤热通量

土壤热通量是由于传导作用而改变土壤与植被的能量。这部分热量相对较小,直接计算很复杂。对于植被下垫面,SEBAL 模型一般通过土壤热通量 G 与地表温度 T_s 、净辐射量 R_n 、地面反射率 α 及 NDVI 的经验关系求得。计算公式如下:

$$G = \frac{T_s - 273.16}{\alpha} (0.0038\alpha + 0.0074\alpha^2) (1 - 0.98\text{NDVI}^4) R_n \quad (6)$$

对于非植被下垫面,计算公式需要改变^[12],近似取为:

$$G = 0.2R_n \quad (7)$$

2.3 感热通量

感热通量指由于传导和对流作用而散失到大气中的那部分能量,是关于大气稳定度、风速和表面粗糙度的函数。感热通量的计算是应用 SEBAL 模型估算蒸散量的关键环节,也是计算过程最为复杂的步骤,计算公式如下:

$$H = \frac{\rho_{air} C_p \Delta T}{r_{ah}} \quad (8)$$

式中: ρ_{air} ——空气密度(kg/m^3); C_p ——空气热量常数 $[1004\text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$; ΔT ——高度为 Z_1 和 Z_2 (通常取 $Z_1 = 0.01\text{ m}$, 相当于裸露土地的粗糙度长度; $Z_2 = 2\text{ m}$, 为气象数据中的参考高度)处的温度之差 $T_{z_1} - T_{z_2}$; r_{ah} ——空气动力学阻力。

为求得 $T_{z_1} - T_{z_2}$, SEBAL 模型假设该值与地面温度成线性关系: $T_{z_1} - T_{z_2} = aT_s + b$, 为求得 a, b , 在

研究区域的卫星图像上确定两个极端点: 一个“冷点”与一个“热点”^[13]。“冷点”是指该点植被生长茂盛、地表温度较低,水分供应充足、蒸散量处于潜在蒸散的水平,感热通量基本为 0, $LE \approx R_n - G$ 。“热点”是指蒸散量基本为零的像元,主要是指没有植被覆盖的干燥农田或盐碱地,满足 $H \approx R_n - G$ 。由于近地层大气的不稳定,通过一次选取冷点、热点并不能取得稳定的值,因此模型应用莫宁—奥布霍夫 (Monin-Obukhov) 定律,通过多次迭代运算对空气动力学阻力、空气密度进行校正,直到取得稳定的感热通量值为止,进而粗略求得研究区域各像元点的感热通量。

冷点与热点的选取对蒸散量的计算结果具有一定的影响,因此在进行冷热点的选取时,将研究区遥感影像解译结果与 Google 高分影像相结合,使得所选像元满足冷热点的特征要求。经过分析,最终确定研究区影像冷点与热点分别位于漓江上游青狮潭水库中心位置及桂林两江机场附近西南方的裸地区域。基于冷热点的各地表参数,通过多次循环迭代运算,最后得到四期不同时相影像 ΔT 和地表温度 T_s 之间的关系系数,如表 2 所示。

表 2 Monin-Obukhov 定律迭代系数结果

影像时相	a	b
1993-09-24	0.330559	-95.862518
1999-12-15	0.742480	-212.197083
2006-09-21	0.666106	-192.263184
2010-08-31	0.509940	-148.547943

2.4 日蒸散量

根据能量平衡方程及获取的净辐射量、感热通量及土壤热通量,可以得到卫星过境时的瞬时潜热通量。研究区潜热通量空间分布如附图 1 所示。

潜热通量是下垫面与大气之间交换的水汽通量,是水分循环和能量平衡的重要组成部分。潜热通量与感热通量值相反,一般植被覆盖较好、表面温度较低和表面湿度较大的区域,显热通量较低、潜热通量较高;而在地表湿度较低、温度较高的区域,地表与近地面空气的温差较大,所以近地面大气与地表能量的交换方式是以感热为主,而潜热较低。漓江流域地处亚热带气候区,降雨量较多,相较于感热,潜热通量具有不可忽视的作用。经过对研究区感热和潜热估算结果的对比,以及附图 1 潜热的空间分布可以看出,漓江流域感热与潜热大致呈现相反的分布状态。在漓江上游高植被覆盖区域,感热较低而潜热较高。与此相反,在研究区中部建设用地集中区域,感热较高而潜热值相应较低。

根据瞬时潜热通量只能得到遥感影像过境时的瞬时蒸散量,根据研究表明,蒸发比在一天时间内基

本保持不变^[14]。因此本文应用蒸发比的概念,采用蒸发比不变法把瞬时的蒸散量扩展成日蒸散量。日蒸散量可表示为:

$$\Delta_{\text{day}} = \frac{R_n - G - H}{R_n - G} = \frac{\lambda \cdot \text{ET}}{R_n - G} \quad (9)$$

$$\text{ET}_{\text{day}} = \frac{\Delta_{\text{day}} (R_{n24} - G_{24})}{\lambda} \quad (10)$$

式中: Δ_{day} ——一天 24 h 内的蒸发比; R_{n24} ——一天内的净辐射量; G_{24} ——一天内的土壤热通量,在计算日蒸散量时可以忽略不计; λ ——水的汽化潜热。

附图 2 所示依次为 1993 年 9 月 24 日、1999 年 12 月 15 日、2006 年 9 月 21 日和 2010 年 8 月 31 日漓江流域蒸散量估算结果。

3 结果与分析

3.1 蒸散量估算结果验证

由于研究区内缺少蒸散实测站点,难以获取蒸散实测数据,因此无法应用实测数据对 SEBAL 模型的蒸散估算结果进行验证。Penman-Monteith 公式是计算植被蒸散的重要方法,应用温度、相对湿度、风速等气象数据即可计算日蒸散量,且精度较高^[15],因此试验估算结果应用 Penman-Monteith 公式和气象站点数据进行间接对比验证。

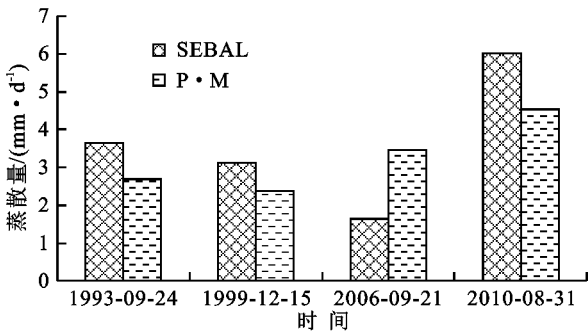


图 1 桂林站点模型估算结果与 P-M 公式计算蒸散量对比

如图 1 所示,本文应用桂林气象站点气象数据,通过 P-M 公式计算得 1993-09-24,1999-12-15,2006-09-21,2010-08-31 日蒸散量值分别为 2.68,2.37,3.45,4.53 mm,而 SEBAL 模型估算该站点附近建设用地的日蒸散均值为 3.66,3.13,1.63,6.03 mm。通过比较发现除 2006 年 SEBAL 模型估算结果低于 P-M 计算结果外,其他三个时相的模型估算结果较 P-M 计算结果均出现不同程度的高估现象,但相差不大,最大相对相差为 33%,说明 SEBAL 模型在本研究区的估算结果较为合理。

本文在 SEBAL 模型反演的过程中,各类参数的估算过程是影响反演精度的主要因素。由于模型所需参数较多而研究区内的实测数据有限,因此很多参数只能借鉴一些较为经典的经验公式进行估算,这样就会

由于地域、气候等因素的差异使各个参数的普适性受到影响,从而进一步影响估算精度^[16]。因此在未来应该尽可能获取更多的实测气象数据及蒸散量实测数据,结合影像实际成像条件及研究区的实际情况进行估算及验证,从而进一步提高模型的估算精度。

3.2 蒸散量时空分布特征分析

从附图 2 漓江流域日蒸散量估算结果可以看出,研究区日蒸散量具有一定的空间差异性。估算结果均呈现出漓江上游海拔较高山地蒸散量较高、中部平原地区相对较小的空间分布特征。研究区北部及周边区域海拔较高,主要以山地为主,植被覆盖主要为水源林地,水源丰富,植被长势较好,具备了良好的蒸散条件,因此林地及水体的蒸散量在整个研究区内为最高水平。而中部平原地区主植被主要以农作物及低矮灌木为主,植物蒸腾能力小于高大的乔木,因此蒸散量相对较小。漓江下游南部地区主要以灌木/草地为主,植被蒸腾作用介于乔木与农作物之间,因此蒸散量小于北部但高于中部平原地区。

表 3 漓江流域区域蒸散量统计 mm/d

参数	1993-09-24	1999-12-15	2006-09-21	2010-08-31
最大值	17.39	8.10	15.87	17.50
最小值	0.09	0.04	0.14	0.23
平均值	6.51	3.22	5.45	7.64

通过附图 2 和表 3 统计数据,发现四个不同时期的蒸散量估算结果具有较大的波动性。结合当日气候条件进行分析:1993 年 9 月 24 日蒸散量均值为 6.51 mm,高于同一时期的 2006 年 9 月 21 日蒸散均值;1999 年 12 月 15 日的日平均蒸散量为 3.22 mm,最大值为 8.10 mm,其中大部分区域蒸散量在 2~5 mm/d 之间,与其他三个时相的估算结果相差较大,这主要是由于冬季植被处于休眠期,且气温较低、降水量较少,不利于蒸散活动的进行,因此蒸散量处于一年之中最低的时段。2006 年 9 月 21 日的平均蒸散量为 5.45 mm,此时研究区处于夏末秋初时节,气温适中、日照时间较为充足,植被覆盖度比冬季要高,但植被已经处于生长季末端,随时间推移呈现不断减少的趋势,因此 2006 年 9 月 21 日蒸散量较 1999 年 12 月 15 日蒸散量有所提高,但少于 2010 年 8 月 31 日蒸散量。2010 年 8 月 31 日蒸散量均值为 7.64 mm,大部分地区蒸散量在 6 mm 以上,在四个时相中蒸散量最大,这是由于 8 月份漓江流域正值盛夏,夏季气温高、降雨量丰沛,因此土壤含水量丰富,且植被及农作物处于生长旺盛的阶段,植被覆盖度最高,因此蒸散量在四个时相中最高。

3.3 蒸散量的影响因素分析

3.3.1 不同土地利用类型日蒸散量的分布特征 本文采用的四期土地利用/覆盖数据是基于 1993 年、

1999 年、2006 年及 2010 年 Landsat 数据,基于混合分类方法(监督分类与非监督分类相结合)获得^[17]。根据附图 3 可知,研究区内土地利用类型分为林地、灌木/草地、耕地、建设用地、水体五类,漓江上游及其东南部多为水源林地,植被茂密;到中下游土地类型逐步过度到以低矮灌木/草地和耕地为主。在 1993—2010 年,研究区内林地面积所占比重最大,但受经济发展影响,水源林地面积正不断减少,建设用地比重有逐年增加的趋势。为了获取日蒸散量与土地利用类型的关系,分别统计出不同时期各土地利用类型的日蒸散量均值,统计结果如表 4 所示。

表 4 不同土地利用类型蒸散量均值 mm/d

日期	耕地	灌木/草地	林地	建设用地	水体
1993-09-24	3.56	5.20	8.82	3.66	5.16
1999-12-15	1.28	2.36	4.27	3.13	4.19
2006-09-21	3.43	4.56	7.32	1.63	3.67
2010-08-31	5.73	7.36	9.25	6.03	7.93

从表 4 可知,1993-09-24,1999-12-15,2006-09-21,2010-08-31 不同土地利用类型的日蒸散量均值都表现为林地>水体>灌木/草地>耕地的规律。漓江上游是国家生态环境重点保护区域,大部分区域是水源林地,林木长势茂盛,植被覆盖度很高,且土壤含水量丰富,因此植被的蒸腾作用显著,故林地的平均蒸散量比单靠吸收热量进行蒸发的水体平均蒸散量要高,为不同土地利用类型中蒸散量最大者。水体区域主要包括漓江上游的青狮潭水库以及漓江主体,占漓江流域总面积的 2%左右。水体通过吸收太阳辐射进行蒸发,蒸散量高于灌木/草地和耕地。对附图 2 蒸散量的空间分布及表 4 进行分析可知,1993 年,1999 年,2006 年,2010 年四个时相的耕地平均蒸散量波动较大,这主要是不同时节耕地的覆盖度变化较大的原因。漓江虽地处南方,但受气候影响,冬季农作物大多数仍枯落或处于休眠期,因此 1999 年 12 月 15 日耕地蒸散量较低;而夏季是农作物生物量积累的重要阶段,生长旺盛,因此其他三个时相的蒸散量相对较高。

3.3.2 土地利用/覆盖变化对蒸散量的影响 图 2 为研究区 2010 年各土地利用类型占研究区比例,研究区内所占比例最大的地类为林地,所占比例为 43%左右,因此林地面积的变化对整个研究区的日蒸散均值的影响最大。通过对漓江流域近 20 a 来的土地利用/覆盖进行变化分析可知,从 1993—2010 年,研究区林地面积比重持续降低,共减少约 4.23%。研究区桂林气象站点 1981—2010 年的平均月降水量如图 3 所示,漓江流域月降水量受季节气候影响明显,从 4 月份开始随着气温的不断回升,降水量逐渐增加,6 月份达到峰值,之后逐月减少。林地面积的

减少与降水量的季节性变化必然会引起研究区蒸散发的变化。

1993—1999 年,林地面积减少约 1.82%,同时从表 4 的蒸散量统计数据可以看出,1993 年 9 月 24 日与 1999 年 12 月 15 日的日蒸散均值分别为 6.51 mm 与 3.33 mm,林地蒸散均值分别为 8.82 mm 及 4.27 mm,两个时相的蒸散量出现如此大幅度的下降,除了与 1999 年影像处于冬季,地表蒸散活动受到抑制有较大的关系,林地面积的减少也成为蒸散量减少的原因之一。

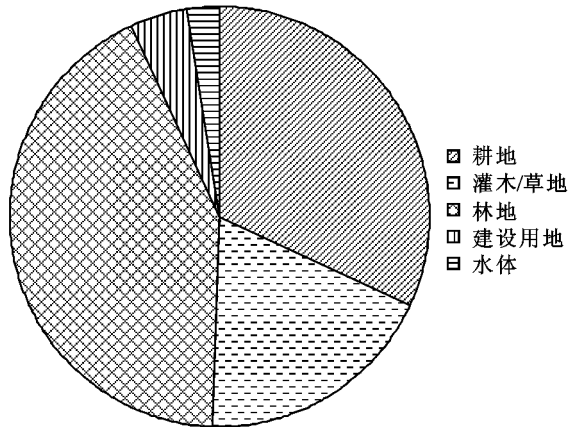


图 2 漓江流域 2010 年各土地利用类型比例

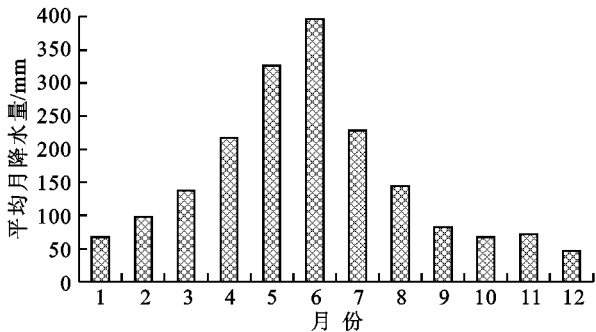


图 3 桂林站点 1981—2010 年平均月降水量

2006 年林地比重与 1999 年基本持平,但较 1993 年林地面积仍然是减少的,灌木/草地所占比重减小,主要向耕地转移;2006 年 9 月 21 日蒸散量均值为 5.45 mm,较 1999 年 12 月 15 日蒸散有所增加,这主要是受夏季气温较高,降水量丰沛有利于蒸散活动导致的结果,但相比同一月份的 1993 年 9 月 24 日蒸散量均值仍然有所降低,则是受林地退化、建设用地扩张的影响,进一步说明漓江水源林地的减少与退化对研究区内蒸散活动产生消极的影响。

2006—2010 年,水源林地面积减幅较大,减少约 9%,主要向灌木/草地及耕地转化。而 2010 年 8 月 31 日蒸散量均值较 2006 年 9 月 21 日平均蒸散量及各地类蒸散均值有所增加。通过桂林气象站点平均月降水量可知,8 月平均降水量较 9 月降水多出 60 mm 左右,降水量的增多使地表土壤含水量增多,有利于土壤蒸发,加之 2010 年时相较 2006 年时相植被

生长更为旺盛,植被蒸腾作用更为显著,因此 2010 年 8 月 31 日蒸散量较 2006 年 9 月 21 日蒸散量有所增高是土地利用/覆盖变化与降水量共同影响的结果。

4 结论与讨论

本文在基于遥感影像的基础上,应用基于能量平衡原理的 SEBAL 模型,对漓江流域的日蒸散量进行了估算模拟,获取了四个不同时相的相关地面特征参数及日蒸散量。通过对不同时相的估算结果进行分析,得出以下结论:

(1) 漓江流域的蒸散分布具有明显的空间差异性。漓江上游地区植被覆盖度较高,植被蒸腾作用显著,从而蒸散量较高;中部地区以桂林市区为中心,主要以建设用地和农业耕地为主,建筑物无蒸发性,通过吸收太阳辐射能量使地表温度增加,因而感热高潜热低,蒸散量较低;耕地受季节变化影响植被覆盖变化较大,因此蒸散量随季节变化较大。南部区域主要以灌木/草地为主,蒸散量小于上游地区但高于中部平原地区。

(2) 从时间上看,漓江流域不同时节日蒸散量差异较大。受温度、风速等气候因素的影响,冬季气温较低,降水量较少,植被覆盖度下降,蒸散量低;而夏季光照充足,雨量充沛,植被生长旺盛,从而蒸散量较高。

(3) 漓江流域的日蒸散量受到土地利用类型的影响。不同土地利用类型的蒸散量均值表现为林地>水体>灌木/草地>耕地>建设用地的规律。统计表明研究区从 1999—2010 年漓江流域林地面积减少,而耕地与建设用地面积增加,而 2006 年日蒸散量较 1993 年同期日蒸散量有所降低,说明蒸散量受到土地利用变化的影响。随着漓江水源林地的减少与退化,蒸散量呈现下降的趋势,从而进一步揭示了当地经济发展与人类活动对漓江流域生态环境及水热平衡的影响。

文章在对研究区蒸散量进行估算和分析的过程中,还存在问题与发现,有待于进一步的研究:(1) 应用 SEBAL 模型估算研究区蒸散量时,由于大气程辐射值、汽化潜热等参数的获取难度较大,在估算过程中进行了简化与近似取值处理,因此难免会带来误差,因此在未来应该尽可能获取更多的实测数据进行估算与验证;(2) SEBAL 模型较适用于平坦地区,漓江流域中部地区虽然大部分地势平坦,但漓江上游多为山地,地势较为复杂,因此受地势影响,应用模型进行估算时会降低精度,在今后的研究中需要结合地形因素对模型进行进一步改进,使其适用于复杂的地形。

参考文献:

- [1] 向悟生,李先琨,丁涛,等. 土地利用变化对漓江流域生态服务价值影响[J]. 水土保持研究,2009,16(6):46-50.
- [2] 李先琨,吕仕洪,黄玉清,等. 漓江流域红壤侵蚀区植被演替与复合农林试验[J]. 生态环境,2007,16(1):140-148.
- [3] Bastiaanssen W G M, Molden D J, Makin L W. Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications[J]. Agricultural Water Management,2000,46(2):137-155.
- [4] 辛晓洲,田国良,柳钦火. 地表蒸散定量遥感的研究进展[J]. 遥感学报,2003,7(3):233-240.
- [5] 王月容. 旅游开发对漓江流域景观结构的影响研究[D]. 长沙:中南林学院,2003.
- [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(1/4): 198-212.
- [7] Bastiaanssen W G M, Pelgrum H, Wang J, et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). : Part 2: Validation[J]. Journal of Hydrology, 1998, 212: 213-229.
- [8] 曾丽红,宋开山,张柏,等. 利用 SEBAL 模型与 P-M 公式估算乌裕尔河下游地表蒸散[J]. 干旱地区农业研究, 2009,07(5):216-224.
- [9] 李红军,雷玉平,郑力,等. SEBAL 模型及其在区域蒸散研究中的应用[J]. 遥感技术与应用,2005,20(3):321-325.
- [10] Bastiaanssen W G M. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey[J]. Journal of Hydrology,2000,229(1):87-100.
- [11] Liebe H J, Hufford G A, Cotton M G. Propagation modeling of moist air and suspended water/ice particles at frequencies below 1000 GHz[C]// AGARD. Atmospheric Propagation Effects Through Natural and Man-Made Obscurants for Visible to MM-Wave Radiation 11 p (SEE N94-30495 08-32),1993.
- [12] 刘京涛. 岷江上游植被蒸散时空格局及其模拟研究[D]. 北京:中国林业科学研究院,2006.
- [13] 王修信,王培娟,朱启疆. 漓江上游山区复杂地形水热通量的时空变化规律[J]. 农业工程学报,2012,28(3): 118-122.
- [14] 王介民,高峰,刘绍民. 流域尺度 ET 的遥感反演[J]. 遥感技术与应用,2003,18(5):332-338.
- [15] 陈吉琴. 近 50a 来长江流域气象因素分析及蒸发变化原因初探[D]. 南京:河海大学,2007.
- [16] 曾丽红,宋开山,张柏,等. 应用 Landsat 数据和 SEBAL 模型反演区域蒸散发及其参数估算[J]. 遥感技术与应用,2008,23(3):255-263.
- [17] 周玲,张丽,许君一,等. 漓江流域土地利用变化分析及预测[J]. 水土保持研究,2013,20(6):218-223.