

应用遥感技术研究贵州春季蒸散发空间分异规律*

田 雷^{1,2}, 杨胜天³, 王玉娟¹

(1. 北京师范大学 环境学院, 北京 100875; 2. 交通部 公路科学研究所, 北京 100088;
3. 北京师范大学 地理学与遥感科学学院, 北京 100875)

摘 要: 蒸散发量的估算对于灌溉策略、蓄水流失、水分平衡计算、径流预测和气象气候研究等都是不可缺少的因素。遥感(RS)和地理信息技术(GIS)的发展实现了蒸散发量的空间分布估算。利用 1 km 分辨率的 MODIS 影像数据反演的下垫面参数(如地表温度、反照率等)数据、日值的气象数据的空间插值结果数据及高程数据等基础信息数据,以贵州省典型喀斯特环境为研究区域,利用 Penman2monteith 蒸散发模型,在面的尺度上估算连续 2 个月的日值蒸散发量,定量描述蒸散发量的转化过程。通过蒸散发与相关因子的相关性分析,总结出贵州省影响蒸散发量时间动态、空间分布变化的主要影响因子和限制因子,进一步探索典型喀斯特生态环境的贵州省蒸散发量的变化规律。

关键词: 贵州省; 蒸散发; 遥感

中图分类号: P332.2; TP79 文献标识码: A 文章编号: 100523409(2008)012008205

Research on the Spring Evapotranspiration of Karst Area Based on RS and GIS in Guizhou Province

TIAN Lei^{1,2}, YANG Sheng2tian³, WANG Yu2juan¹

(1. State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Research Institute of Highway Ministry of Communications, Beijing 100088, China; 3. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The evapotranspiration estimation is very important to the irrigation policy, the water loss, water equilibrium and so on. Using the remote sensing (RS) and GIS technology, and integrating the remote sensing data (MODIS), climate data and radiation observing data, the paper estimates the two month evapotranspiration in spring in Guizhou province by Penmanmonteith model. The paper also inversions each factor (for example, the vegetation index, the surface temperature, the albedo and so on) that the model needs using Remote Sensing techniques, and applies the model to the facial scale of Guizhou Province. In the facial scale, the paper modulates the evapotranspiration conversion of motion of Guizhou Province and reveals the evapotranspiration variation quantitatively. The correlations between evapotranspiration and climatic factors are also studied.

Key words: Guizhou Province; evapotranspiration; Remote Sensing

1 引 言

贵州省是典型的以二元结构为基本特征的喀斯特地区,该地区具有土地薄瘠、土壤侵蚀退化严重、地表漏水的特点。陆表蒸散发是其水分流失的主要途径,作物需水估算的越精确就越能有效地利用该地区的水资源^[1]。因此,蒸散发估算是衡量该地区水分动态转化的一个主要指标。土壤-植被-大气系统(SPAC)蒸散的观测研究起初只限于斑块尺度陆面过程的研究,如农田、草原和森林生态系统内部的研究,这些研究的主要目标是调查 SPAC 界面能量、水分的垂直交换情况,在这个尺度上已发展了许多方法以计算及观测近地层水分及热量的湍流输送,如能量平衡法、空气动力学方法等^[2]。长期以来,人们从不同角度对蒸散发进行广泛的研

究,大多以点观测为基础。由于观测手段的局限性和地域的非均匀性,研究成果难以在大面积上应用^[3]。随着流域水文及全球变化研究的需要,更多的是需要了解流域、区域或全球尺度上地-气系统的能量传输过程,因此应将斑块尺度的研究推广到更大尺度水平的研究。

遥感技术的发展,从多时相、多分辨率、多光谱及多角度遥感信息可以提取地表覆盖状况(植被指数)、冠层结构(如 LAI)、地表反射率、地表辐射温度及土壤水分状况等,而这些因子都直接影响到土壤-植被-大气系统的水热交换过程。研究尺度从传统的点上或局部研究转向区域或全球尺度,卫星遥感资料在地表蒸散发研究中的作用也越来越大,尤其最近,卫星遥感技术被广泛用于区域蒸散的研究。如 S.

* 收稿日期: 20061209
基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2005CB422207); / 高等学校学科创新引智计划0项目(Supported by the 111 Project)(B06004); 长江学者与创新团队发展计划项目
作者简介: 田雷(1980-),男,硕士,主要从事遥感和环境科学研究。
通信作者: 杨胜天(1965-),男,教授,博士,主要从事自然地理、遥感和环境科学研究。

S. Ray 等利用多时相遥感数据反演得到的植被指数计算作物系数结合利用实际观测数据通过空间插值估算出的参考作物蒸散发一起计算实际蒸散分布。大多数研究都是利用依据于能量平衡原理而推导出的一层阻抗模型 Penmar2 Monteith 公式或修正的 Penmar2Monteith 公式结合遥感图像数据估算蒸散发^[4]。Lu Zhang 等在总结已有方法的基础上,提出了遥感数据估算区域蒸散发的一层阻抗模型,通过 Monir2Obukhov 相似性理论和遥感监测的表面温度结合能量平衡方程确定空气动力学阻抗和表面阻抗,结合 NOAA2 AVHRR 遥感影像和地面气象数据应用到一层阻抗模型中,在区域的尺度上估算蒸散发量,很具有代表性^[5]。在国内,利用卫星遥感资料研究地表能量平衡的起步比较晚。陈云浩、史培军在利用遥感资料求取地表特征参数的基础上,首先建立了 2 种极端条件下(裸露地表和全植被覆盖)的裸土蒸发和全植被覆盖蒸散计算模型,然后结合植被覆盖度给出非均匀陆面条件下的区域蒸散发计算方法^[6]。但是,我国大部分研究大多是集中在北方或西北干旱地区,在西南喀斯特地区应用遥感数据大面积估算喀斯特环境下的蒸散发时间动态、空间分布变化规律还尚缺乏深入研究。该文以典型的喀斯特地区(贵州省)为研究区域,利用较为成熟的 Penmar2 Monteith 蒸散发模型估算出了贵州省连续 2 个月的日值蒸散发量时间动态、空间分布情况,从定性和定量的角度对贵州省蒸散发量的时间动态、空间分布变化进行研究,通过其与相关因子的相关性分析,总结了影响该地区蒸散发变化的主要限制因子,结果可以用于贵州喀斯特地区的物质能量分布及变化过程分析。

2 研究区概况

贵州地处低纬高原山区,平均海拔 1 218 m,年均温为 15.6℃,属于典型的中亚热带湿润季风气候,年降水量 1 100 mm 左右。研究区的气候温和湿润,立体气候明显,热量较丰,南北差异小,东西差异大,降雨充沛,干湿季明显、总辐射弱,多散射光、湿度较大,风速较小,水、热条件良好,非常有利于多种植物生长发育,容易成林,以热带、亚热带的成份占明显优势。研究区内地形崎岖、山高坡陡,地形破碎,分布着喀斯特地貌发育比较成熟的残丘溶原、峰林盆地或峰林谷地。碳酸盐岩、溶岩地貌分布广,岩石裸露率高,喀斯特面积占总面积的 73%,耕作土壤占面积少,以地带性黄壤、黄红壤为主,土壤分布不连续且浅薄而石漠化比例大^[720]。

3 实验数据及处理

气象数据:从中国气象局国家气象中心气象资料室中获得中国地面气候资料日值数据集,从中获得 2000 年 4、5 月的气压、气温、相对湿度、降水量、风速和日照时数 6 个气象因子数据。通过对贵州省及其 300 km 缓冲区内的 96 个气象站点气象数据的 kriging 方法进行空间插值,分辨率为 1 km,将气象数据扩展到每个栅格,并将其投影转换为 Albers 等积圆锥投影。

遥感影像数据:选用 MODIS 数据,通过 MODIS 网站提供的 MRT 投影工具软件,将获得的遥感数据进行格式转换,在 ENVI 遥感软件及 ARCGIS 9.0 的支持下,将原来用于全球的 GOOD 投影转换为我国常用的 Albers 投影。

基础数据:中国 1 km 分辨率 dem 数据;1B 400 万中国

省界,1B 400 万中国土壤图。

4 陆面蒸散发计算方法

蒸发是水量平衡和热量平衡的重要组成部分,植被地段的蒸发和蒸腾统称为蒸散。潜在蒸散发是实际蒸散量的理论上限,并且通常也是计算实际蒸散量的基础,广泛应用于水资源合理利用和评价、农业作物需水和生产管理、生态环境如荒漠化等研究中。

估算潜在蒸散量的方法有许多,多年来国内外开展了大量的对比研究^[11215],许多工作一致认为:基于能量平衡和水汽扩散理论的 Penman2moneith 公式具有理论基础坚实、物理意义明确,能够反映各气候要素的综合影响等特点,而且计算结果准确,适应于不同气候类型地区潜在蒸散的计算。中国科学院遥感应用研究所李贵才等运用 Penman2moneith 模型计算了全国陆表蒸散发,结果精度能满足大尺度要求^[16],在大尺度估算蒸散量时,许多学者都采用此模型^[1718],具体计算过程如下。

4.1 实际蒸散发量 ET_a

实际蒸散量取决于潜在蒸散量和制约整个过程的土壤水分胁迫系数。潜在蒸散量也称为作物需水量,由大气蒸发力决定。联合国粮农组织(Doorenbos, 1977)建议用参考作物蒸散量和作物特性对作物需水量的影响即作物系数来计算潜在蒸散量。因此,实际蒸散量和潜在蒸散量可表示为

$$ET_p = K_c \# ET_0 \tag{1}$$

$$ET_a = K_s \# ET_p \tag{2}$$

式中:ET₀))) 参考作物蒸散量(mm/d);ET_p))) 潜在蒸散量(mm/d);ET_a))) 实际蒸散量(mm/d);K_s))) 土壤水分胁迫系数;K_c))) 作物系数。

Jensen 等(1971)的研究结果表明,土壤水分胁迫系数 K_s 可用下式表示:

$$K_s = \ln(100 \# A_v + 1) / \ln(101) \tag{3}$$

$$A_v = [(W - W_m) / (W_f - W_m)] \tag{4}$$

式中:A_v))) 相对有效含水率;W))) 根区实际土壤含水量(m³/m³);W_m))) 萎蔫含水量(m³/m³);W_f))) 田间持水量(m³/m³)。

4.2 参考蒸散量 ET₀

为了说明气候条件对作物需水量的影响,通常将土壤充分供水及生长着短命绿草条件下测定的蒸散量称为参考作物蒸散量(ET₀),模式如下:

$$ET_0 = ET_{ad} + ET_{aero} =$$

$$\frac{1}{L} \frac{\$ (R_n - G)}{L\$ + r(1 + 0.34U_2)} + \frac{900rU_2(e_s - e_a)}{\$ + r(1 + 0.34U_2)} = \frac{0.408\$ (R_n - G) + C \frac{900}{T + 273} U_2(e_s - e_a)}{\$ + C(1 + 0.34U_2)} \tag{5}$$

式中:ET₀))) 参考作物蒸散量(mm/d);ET_{ad}))) 辐射项;ET_{aero}))) 空气动力学项;L))) 水的蒸发潜热;R_n))) 地表净辐射量[MJ/(m² # d)];e_s))) 饱和水汽压(kPa);e_a))) 实际水汽压(kPa);(e_s - e_a))) 饱和水汽压与实际水汽压之差,即及水汽压亏缺(kPa);\$))) 饱和水汽压与温度关系曲线斜率(kPa/℃);g))) 干湿表常数(kPa/℃);U₂))) 2 m 高处的风速(m/s)。

在获取原数据的基础上, 进行蒸散发量的计算, 计算流程如图 1 所示。

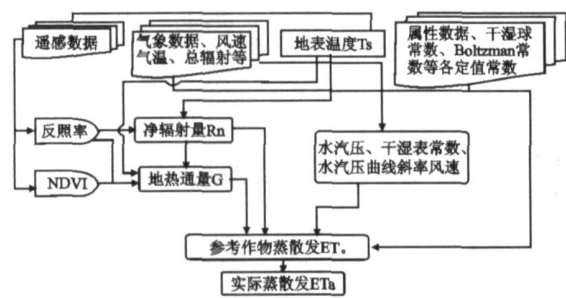


图 1 蒸散发量的计算流程

5 结果分析

在 ENVI 遥感软件的支持下, 结合以上预处理的数据, 以 IDL 语言环境编写运算程序, 通过 Penman2Monteith 蒸散

发模型的运行, 得到了贵州省的辐射量、蒸散发量的时间动态和空间分布结果。

5.1 蒸散发量空间分布特征

通过 Penman2monteith 蒸散发模型的运行得到蒸散发量的估算结果空间分布图及频度分布直方图如图 2, 3。

从图 4 中可以看出, 实际蒸散发 ET_a 总的趋势与海拔高程空间分布特征(图 4)的趋势基本一致, 呈现经向分布, 由西向东逐渐减少。从图 3 中 ET_a 频度分布直方图上可以看出, 实际蒸散发 ET_a 集中分布在 2~ 2.4 mm/d, 大部分栅格的数值在 2.0 mm/d 左右。从图 5 中 ET_a 随各时间点的均值变化图上可以看出, 2000 年 4, 5 月份实际蒸散发量 ET_a 1.4~ 2.4 mm/d, 全省平均值为 1.65 mm/d。从总的时序趋势上看, ET_a 都逐渐增加, 这是因为进入 5 月太阳辐射强度增大, 气温升高, 蒸散发量相对增加。

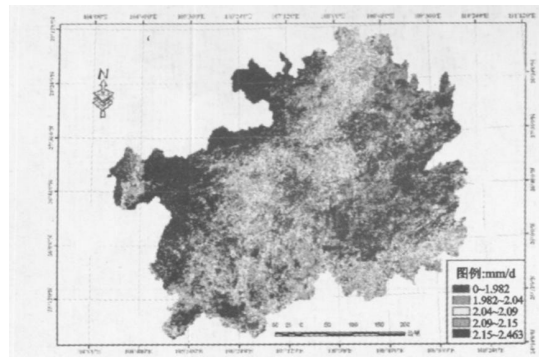


图 2 2000 年 4—5 月实际蒸散发量空间分布

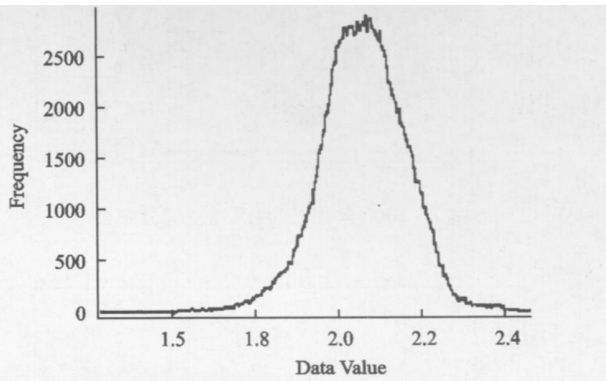


图 3 ET_a 频度分布直方图

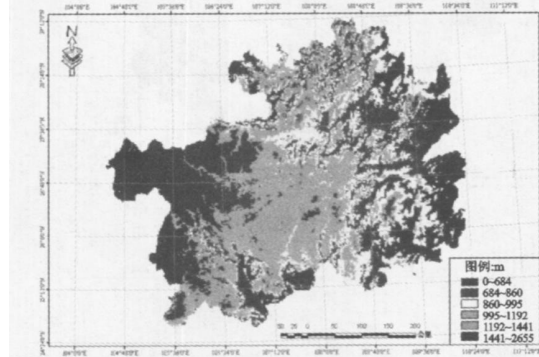


图 4 贵州省海拔高度图

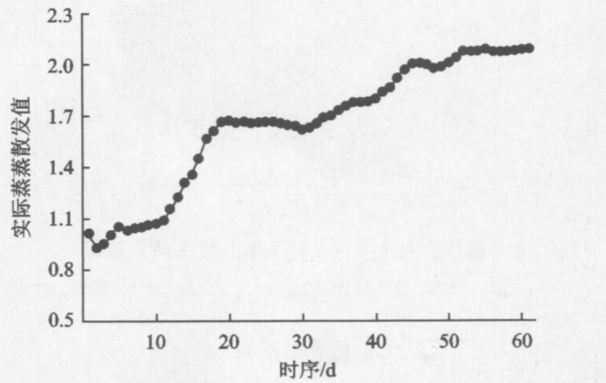


图 5 ET_a 随时序变化图 (mm/d)

辐射量是影响蒸散发数值的主要因子, 贵州净辐射量受海拔高程因素的影响呈现出由西向东减少的趋势, 故蒸散发量也呈现出这样的趋势。另外, 从贵州省植被覆盖情况可知, 中东部海拔较小的地区植被覆盖情况较好, 主要以植物蒸腾的方式, 而中西部海拔较大的地区植被覆盖情况较差, 主要以裸地蒸发的形式贡献蒸散发量, 而裸地蒸发强度较植物蒸腾的强度大, 这也是促进贵州省蒸散发量从西向东呈现出减少态势的一个因素。

5.2 蒸散发量与气象要素间相关性分析

5.2.1 气象数据空间插值方法与结果

(1) 空间插值方法。模型中需要多个气象参数的输入, 气象数据从国家气象中心获取。将站点数据经 Kriging 插值为空间栅格数据, 然后赋予投影信息, 进行投影转换, 并使

其投影参数与表所述一致。该文共获得贵州省及其 300 km 缓冲区内的 96 个气象站点气象数据, 样本分布基本均匀。因此选用 kriging 插值法研究区域气象要素的空间插值。原始气象数据为 TXT 文本文件格式, 以天为单位存储。实施步骤如下:

- 1 首先根据站点的数量进行, 感兴趣站点数据的筛选。
- 2 根据数据中所提供的站点经纬度信息, 将各时相的数据转换为空间矢量数据, 并赋予地理坐标信息。
- 3 将所需参数值作为属性字段添加到矢量数据中。
- 4 进行 kriging 插值。

上述处理通过 IDL 语言、ARC 命令环境等实现。技术处理流程如图 6 所示:

(2) 插值结果。通过气象数据的 ARC 软件的插值, 利用 ENVI 附带的 IDL 语言编程处理得到各气象因子两个月的

平均值,通过 GIS 软件出图,各因子在贵州省的空间分布情况如图 7- 12 所示。

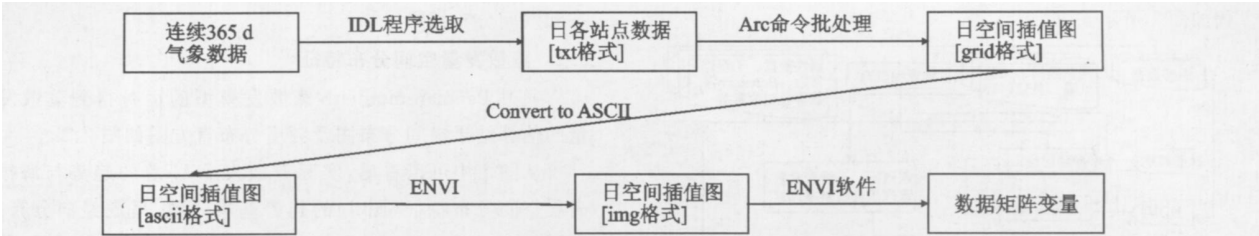


图 6 气象数据空间插值技术流程路线

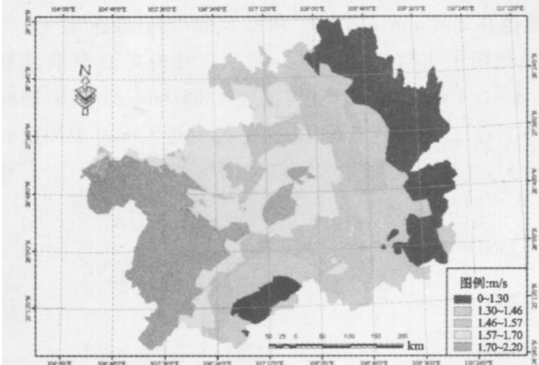


图 7 2000 年 4-5 月风速空间分布图

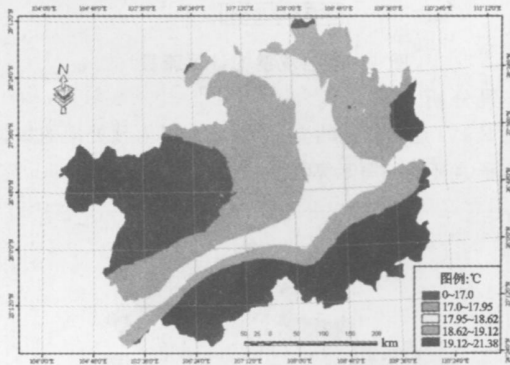


图8

图 8 2000 年 4-5 月气温空间分布图

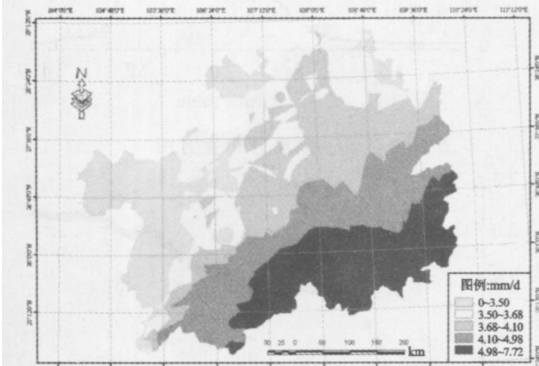


图 9 2000 年 4-5 月降水量空间分布图

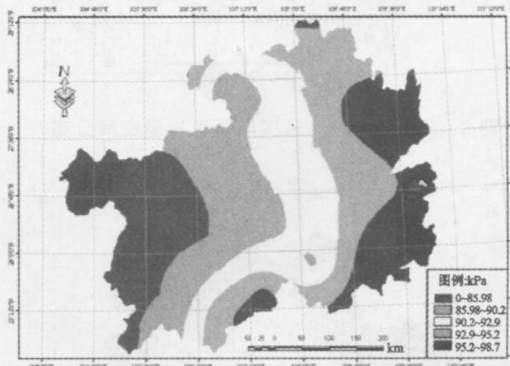


图 10 2000 年 4-5 月气压空间分布图

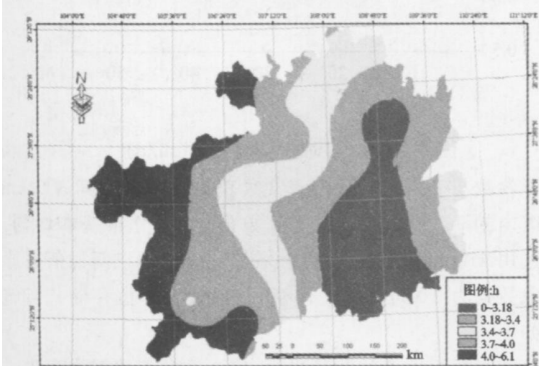


图 11 2000 年 4-5 月日照时数空间分布图

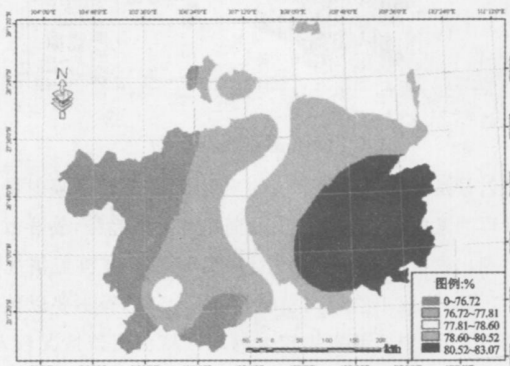


图 12 2000 年 4-5 月相对湿度空间分布图

5.2.2 相关分析方法与结果

在 ENVI 软件的支持下,利用 IDL 的编程环境,通过计算实际蒸散发量与 6 个气候因子(风速 U、气温 T、日照时数 n、降水量、气压、相对湿度)的相关系数(公式如式(6)所示),得到贵州省蒸散发量与气象因素的相关性空间分布结果。在 IDL 语言编程环境下,统计得到的各相关系数空间分布

数据的平均值,可以定量显示整个贵州省的蒸散发与各气象因子的相关性,结果如图 13 所示。

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=0}^{n-1} (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=0}^{n-1} (y_i - \bar{y})^2}}$$

(6)

式中: R_{xy}))) 变量 x, y 的相关系数; \bar{x} , \bar{y}))) 变量 x, y 的均

值:n))) 样本数。

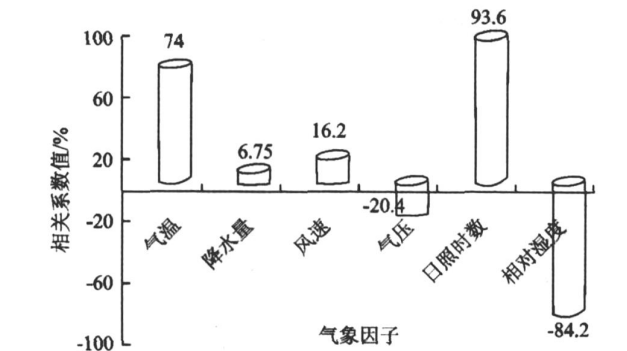


图 13 日照百分率空间分布

图 13 看出,就整个贵州省范围而言,在影响蒸散发量的 6 个气象因子中日照时数与蒸散发量的平均相关系数最大,为 93.6%;其次是气温与蒸散发量的相关系数,为 74%;与蒸散发量正相关最小也即对蒸散发贡献量最小的是降水量气象因子为 6.75%;而气压和相对湿度与蒸散发呈负相关关系,变化相反,其中以相对湿度的负相关性最大,平均-84.2%。所以,日照时数和气温是贵州蒸散发量的 2 个主要贡献因子。将气象因子按照对蒸散发量的贡献量大小排序如下:日照时数> 气温> 风速> 降水量> 气压> 相对湿度。

贵州省 4、5 月多阴雨天气、云量较多、雨量较多,是其雨季,素有/ 天无三日晴0的谚语。该地区太阳辐射较小,蒸散发强度小,不像我国西北干旱地带,蒸散发强度很大,水分短时间内消失,次降雨可以明显增加其蒸散发量,正是由于贵州湿度大,水汽条件良好,蒸发力也小,所以,贵州省蒸散发量变化不受该地区降雨量太大的影响,蒸散发量的时空分布与变化与该地区降水量的时空分布变化关系不十分密切,降水量基本上不是该区域蒸散发的限制因子。贵州蒸散发量不受降雨的主要影响,而与实际日照时数密切相关的辐射量是蒸散发量的主要影响因子。

6 结 论

- (1) 4、5 月份是贵州省的雨季,其净辐射量、日照百分率受到海拔高程空间分布的影响,总体上呈自东向西增加的分布特征,海拔高程是净辐射量空间分布格局形成的主要限制因子,全省净辐射量日均值 6.5~ 9 MJ/(m²·# d)。
- (2) 蒸散发量的空间分布格局与海拔高度分布趋势大体一致,由西向东逐渐减少,呈现出一定的经度地带性规律,总体上受海拔高程的影响很大。中东部地区的植被覆盖度较西部地区的大,也是促成东部地区蒸散发强度较小的原因之一。研究时段内,贵州省潜在蒸散发量平均值为 1.973 mm/d,实际蒸散发量平均值为 1.65 mm/d。
- (3) 通过蒸散发与各个气象因子的相关性分析得知,贵州省不像我国西北干旱地区,蒸散发强度大,土壤水分消耗较快,次降雨可以明显增加蒸散发的量。贵州省降雨量并不是蒸散发的主要限制因子,实际日照时数是贵州蒸散发量最主要的限制因子。比较各气象因子对蒸散发的贡献量,结果为:日照时数> 气温> 风速> 降水量> 气压> 相对湿度。
- (4) 贵州省海拔差异明显,垂直性差异都较为显著。海拔高程决定着该地区的能量分布格局,海拔分布决定着净辐射量、日照百分率、蒸散发量等气象因子的空间分布特征,故海拔高程相对于其它因素扮演着一个较为重要的角色。

参考文献:

[1] Medina J L, Camacho E, Reza J. Determination and analysis of regional evapotranspiration in southern Spain based on remote sensing and GIS [J]. Phys. Chem. Earth, 1998, 4(23): 427-432.

[2] Michael T H, et al. The complementary relationship in estimation of regional evapotranspiration: The complementary relationship area evapotranspiration and aridity models [J]. Water Resour. Res., 2001, 37(5): 1367-1387.

[3] 陈鸣, 潘之棣. 用卫星遥感热红外数据估算大面积蒸散量[J]. 水科学进展, 1994, 5(2): 126-133.

[4] Ray S S, Dadhwal V K. Estimation of crop evapotranspiration of irrigation command area using remote sensing and GIS[J]. Agric. Water Manage., 2001, 49: 232-249.

[5] Lu Zhang, Lemur R, Goutorbe J P. A one-layer resistance model for estimating regional evapotranspiration using remote sensing data[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1995, 77: 241-261.

[6] 陈云浩, 李晓兵, 史培军. 非均匀陆面条件下区域蒸散量计算的遥感模型[J]. 气象学报, 2002, 60(4): 508-512.

[7] 万军. 贵州省喀斯特地区土地退化与生态重建研究进展[J]. 地球科学进展, 2003, 18(3): 442-453.

[8] 吴俊铭, 童碧庆, 杨静. 论贵州喀斯特地区气候与生态环境治理的关系[J]. 贵州气象, 2003, 27(5): 25-28.

[9] 邓晓红, 毕坤. 贵州省喀斯特地貌分布面积及分布特征分析[J]. 贵州地质, 2004, 21(3): 191-194.

[10] 谢双喜, 丁贵杰, 刘官浩. 贵州贞丰县兴北喀斯特森林植被的调查分析[J]. 2001, 21(5): 63-67.

[11] 陈良富, 庄稼礼, 徐希儒, 等. 非同温混合像元热辐射有效比辐射率概念及其验证[J]. 科学通报, 2000, 45(1): 222-229.

[12] 陈鸣, 潘之棣. 用卫星遥感热红外数据估算大面积蒸散量[J]. 水科学进展, 1994, 5(2): 126-133.

[13] 陈云浩, 李晓兵, 史培军. 非均匀陆面条件下区域蒸散量计算的遥感模型[J]. 气象学报, 2002, 60(4): 508-512.

[14] Wolfram M, Stephan S. Modelling the spatial distribution of evapotranspiration on different scales using remote sensing data [J]. J. Hydrol., 1998, 212-213.

[15] Ray S S, Dadhwal V K. Estimation of crop evapotranspiration of irrigation command area using remote sensing and GIS [J]. Agric. Water Manage., 2001, 49: 232-249.

[16] 李贵才. 基于 MODIS 数据和光能利用率模型的中国陆地净初级生产力估算研究[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2004.

[17] 孙睿, 朱启疆. 陆地植被净第一性生产力的研究[J]. 应用生态学报, 1999, 10(6): 752-760.

[18] 高彦春. 基于 NOAA 数据的中国陆地植被净第一性生产力计算及粮食估测[R]. 博士后出站报告. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2000.