

基于过程模型的森林流域的实际蒸散发研究

杨金明, 范文义* (东北林业大学林学院, 黑龙江哈尔滨 150040)

摘要 蒸散发是陆地水文收支平衡中非常重要的一部分, 是水资源评价和可持续性水资源管理政策的决定性关联因素。利用 Terrain-Lab 过程模型对大兴安岭地区一个流域进行了蒸散发量分析, 得到了研究区 2008 年每日及全年的蒸散发量, 分析了不同土地覆盖类型的蒸散强度。模型输入数据有 DEM(Digital Elevation Model)、土地覆盖类型、LAI(Leaf Area Index)和气象数据等。流域年总蒸散发量为 255.02 mm, 占全年总降雨量(599.68 mm)的 42.5%, 其中 6~8 月的蒸散发占全年总蒸散发量的 73%。针叶林、阔叶林及针阔混交林对蒸散发的贡献率分别为 97.4%、0.4% 和 1.7%, 其他土地覆盖类型总的贡献率为 0.5%。

关键词 Penman-Monteith; 实际蒸散发; 流域; 物理模型; 气孔阻抗; 空气动力阻力

中图分类号 S715.4 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2013)35-13674-04

Study on Actual Evapotranspiration from a Forestry Watershed based on Process Model

YANG Jin-ming et al (College of Forestry, Northeast University, Harbin, Heilongjiang 150040)

Abstract Evapotranspiration (ET) is a very important component in the terrestrial hydrological balance. It is a decisive relative factor of water resources evaluation and sustainable water resource management policy. In this study, the daily and whole year's ET in 2008 in a watershed in Daxinganling region was analyzed using the process model TerrainLab, and ET intensity for different land covers was analyzed. The input data for this model are DEM (Digital Elevation Model), land cover type, LAI (Leaf Area Index) and meteorological data and so on. The annual total ET for the watershed is 255.02 mm, which accounts for 42.5% of total rainfall (599.68 mm) throughout the year. Among the total ET, ET from June to August account for 73%. Coniferous forest, broad-leaved forest and mixed forest contribute to 97.4%, 0.4% and 1.7% of the ET separately, other land cover type makes a contribution of 0.5%.

Key words Penman-Monteith; Actual evapotranspiration; Watershed; Physical model; Stomatal resistance; Aerodynamic resistance

蒸散发包含植被的蒸腾作用和植被及土壤表面水分的蒸发作用, 它是陆地水文收支平衡中非常重要的一部分, 是水资源评价和可持续性水资源管理政策的决定性关联因素^[1-2]。蒸散发是水平衡中非常不确定性的一项, 它受气象条件、植被气孔、表面阻抗和土壤中水含量等诸多因素影响, 较难计算, 因此蒸散发地域性特征明显^[3]。

实际蒸散发 (Actual Evapotranspiration, AET) 是水分胁迫条件下的蒸散发, 其值要小于或等于不受水分限制的潜在蒸散发 (Potential Evapotranspiration, PET)^[4-6]。因此, 在相同的大气条件下, 根系越深、吸收水分越多的植被 AET 速率越大^[7]。森林覆盖的变化对土壤出水量的影响研究已经表明, 植被类型的变化能够有效地影响蒸散发及地表径流量^[8-9]。因此, 准确地估算实际蒸散发对于透彻地认识区域水资源平衡及植被动态变化具有重要意义。

蒸散发可以从不同的空间时间尺度进行计算, 例如从以农业利用^[10-11]和生态学研究^[12]为目的的短期小区域估算, 到长期大区域地下水资源评价^[13-14]和气象预测^[15-16]。国内外对蒸散发的研究多集中于潜在蒸散发^[17-18]和作物参考蒸散发^[19-20]。而实际蒸散发量的计算往往具有低时间分辨率和低空间分辨率的特点^[21-23]。为此, 笔者采用分布式水文模型研究了大兴安岭一流域 30 m 分辨率每日实际蒸散发量。

1 流域概况

研究区域处于大兴安岭地区, 地理坐标为 51°14'57"~52°39'20"N、122°37'07"~125°05'33"E。流域范围边界是利用

ArcGIS 9.3 从经过水文校正的数字高程模型 DEM (Digital Elevation Model) 描绘得到的, 描绘过程中水流方向采用 D-8 方法^[24]。该区域属寒温带大陆性气候, 气候变化显著, 冬季漫长干燥而寒冷, 夏季短暂而湿热, 年平均气温 -2.4℃, 年平均降雨量 463.2 mm, 主要集中在 7、8 月份, 年日照时数 2 015~2 865 h。该研究所用流域包含 30 m 分辨率像元 5 236×5 696 个, 高程范围 344~1 521 m。流域中包含卡马兰河、塔哈河及呼玛河上游的一部分, 最后卡马兰河与塔哈河汇聚到呼玛河从流域出口流出。

2 模型描述与数据准备

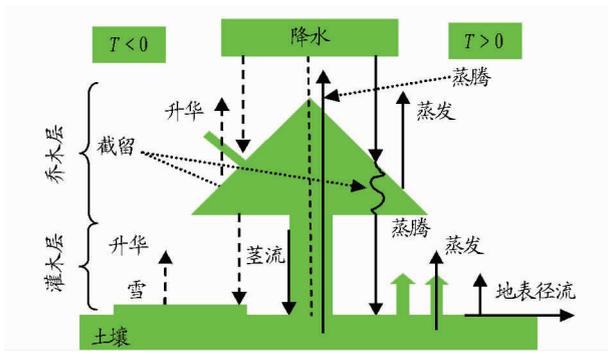
2.1 模型描述 TerrainLab 是由 Wigmosta^[25] 的分布式水文—植被模型发展而来。在一个流域内, 森林生态系统被划分为基本的空间单元, 或称为像元。每一个像元被认为是独一无二的植被土壤系统, 基本的自然和生物过程的模拟均在像元尺度进行。一个像元在垂直方向被分为 5 层, 即乔木层、灌木层、苔藓层、不饱和土壤层和饱和土壤层。当降雨落到森林乔灌层时, 一部分水被截留, 这部分水通过随后的蒸发回到大气中, 另一部分通过林中孔隙茎流到土壤表面的水分湿润地表并下渗到不饱和层, 当下渗水超过土壤最大持水量时, 地表径流将会发生。在一次降雨过程中, 当不饱和的土壤含水量超过田间持水量时, 不饱和层向饱和层的下渗将发生^[26]。图 1 是 TerrainLab 描述的基本水流过程。

2.2 数据准备 图 2 中显示了几个模型所需要输入的空间数据。其中 A 为土地覆盖类型, 来源于全球土地覆盖类型 GLC2000 (<http://bioval.jrc.ec.europa.eu/products/glc2000/products.php>); B 为 DEM, 来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站 (<http://datamirror.csdb.cn>), 坡度坡向数据由此 DEM 计算得到; C 为叶面积指数 LAI (Leaf Area Index), 通过遥感影像反演得到; D 为湿度指数, 用于计

基金项目 “十二五”国家科技支撑项目(2011BAD08B01)。

作者简介 杨金明(1986-), 男, 山东临沂人, 博士研究生, 从事林业遥感及碳水循环模型研究。* 通讯作者, 教授, 博士生导师, 从事林业遥感与地理信息系统研究。

收稿日期 2013-11-25



注: T 代表温度。

图1 TerrainLab 中描述的水流过程

算初始地下水位^[27]。土壤质地数据是利用土壤质地三角形国际分类标准计算得到的,其中土壤砂粒、粉粒和黏粒含量数据来源于北京师范大学^[28]。国际分类标准共 12 种土壤质地类型,该研究区只有一种类型即黏土。所有空间数据空间分辨率为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$,投影为 UTM Zone 51N。

该研究分析的是研究区 2008 年实际蒸散发,日值气象数据包括降雨、最高最低气温、平均气温、湿度和风速,数据

来源于中国气象科学数据共享服务网。研究区气象站没有每日短波辐射记录,因此采用改进的 Bristow-Campbell 模型根据每日降雨、气温、湿度等数据计算得到^[29]。

3 研究方法简介

TerrainLab 模型中采用物理机理方程 Penman-Monteith^[30]来计算蒸散发。

$$E_t = \frac{\Delta R_n + \rho c_p \frac{e_s - e_a}{r_a}}{\lambda [\Delta + \gamma (1 + \frac{r_s}{r_a})]} \delta t \quad (1)$$

式中, E_t 为 δt (s) 时间段内 (24 h) 的蒸发量或蒸腾量 (mm); R_n 为作物表层净辐射 (W/m^2); ρ 为空气密度 (kg/m^3); c_p 为常压下空气的比热容 [$1.01 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{C})$]; e_a 为表面实际水气压 ($\times 10^2 \text{ Pa}$); e_s 为饱和水气压 ($\times 10^2 \text{ Pa}$); γ 为干湿表常数 ($\times 10^2 \text{ Pa}/\text{C}$); r_s 冠层内部或叶片内部水气蒸腾阻力 (s/m); r_a 空气动力阻力 (s/m); λ 为蒸发潜热 ($2.2 \times 10^6 \text{ J}/\text{kg}$); Δ 为饱和水气压曲线斜率 ($\times 10^2 \text{ Pa}/\text{C}$), $\Delta = 4.098 e_s / (237.3 + T)^2$, 其中, T 为空气温度, $e_s = 6.108 e^{17.277 / (237.3 + T)}$ 。

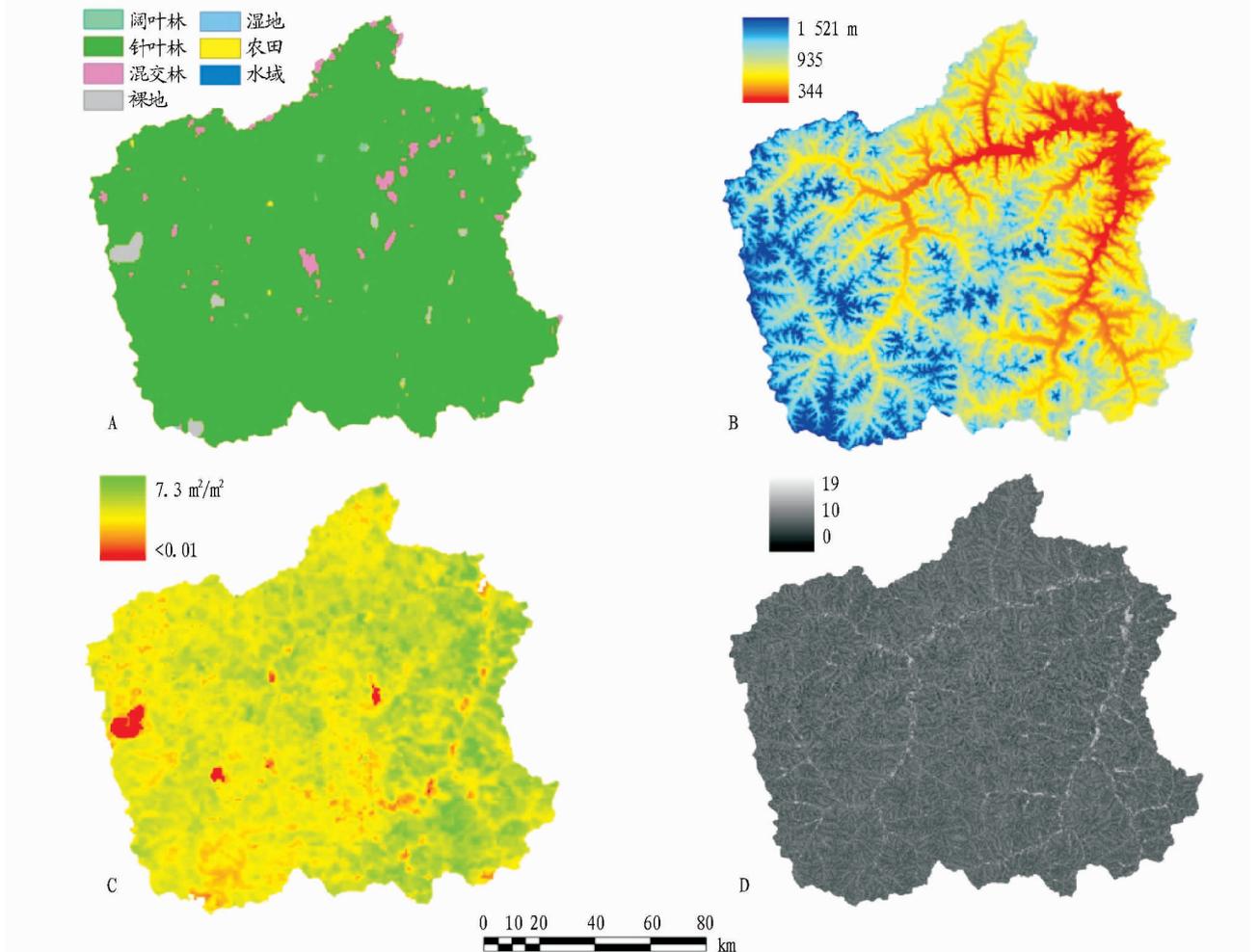


图2 运行 TerrainLab 所需要的其中几个空间数据集

当 E_t 为蒸发量时, $r_s = 0$, 当 E_t 为植物的蒸腾时;

$$r_s = \frac{1}{g_s LAI} \quad (2)$$

g_s 为植物的气孔导度^[31-32];

$$g_s = \max[g_{\max} f(F_p) f(T) f(D_v) f(\theta_{sw}), g_{\min}] \quad (3)$$

式中, g_{\max} 为最大气孔导度 (mm/s), 对于针叶林、阔叶林、针

阔混交林和草地,其值分别为 1.6、2.5、2.0 和 5.0 mm/s; F_p 为光合作用光通量密度 $PPFD$ (Photosynthetic Photo FluxDensity); T 为温度; D_v 为气压差; θ_{sw} 为土壤水含量。每个参数的阈值见表 1。

$$f(F_p) = \frac{F_c F_p}{1 + F_c F_p}$$

$$f(T) = \begin{cases} \ln(T)/\ln(T_o), & T \leq T_o \\ \cos\left[\frac{\pi(T - T_o)}{T_{max} - T_o}\right], & T > T_o \\ 0, & T \geq 1 \end{cases} \quad (4)$$

$$f(D_v) = \begin{cases} 1, & D'_v \leq D_{open} \\ \frac{D_{close} - D_v}{D_{close} - D_{open}}, & D_{open} < D_v < D_{close} \\ 0, & D_v \geq D_{close} \end{cases} \quad (5)$$

$$f(\theta_{sw}) = \begin{cases} 0, & \theta_{sw}(z) \leq \theta_{up} \\ \frac{\theta_{sw}(z) - \theta_{up}}{\theta_{fc}(z) - \theta_{up}}, & \theta_{up} < \theta_{sw}(z) \leq \theta_{fc}(z) \\ 1 - 0.5 \frac{\theta_{sw}(z) - \theta_{fc}(z)}{\theta_s(z) - \theta_{fc}(z)}, & \theta_{fc}(z) < \theta_{sw}(z) \leq \theta_s(z) \end{cases} \quad (6)$$

表 1 气孔导度的计算阈值

符号	定义	值	单位	参考文献
F_c	g_s 与 $PPFD$ 间的关系系数	0.01	$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	[32]
T_o	最佳温度	25	$^{\circ}\text{C}$	[32]
T_{max}	光合作用最大温度	40	$^{\circ}\text{C}$	[32]
D_{open}	气孔开放时的气压差	0.2	kPa	[33]
D_{close}	气孔关闭时的气压差	3.0	kPa	[33]
θ_{up}	永久凋萎点	3.0	%	[26]
$\theta_s(z)$	饱和土壤水含量	80.0	%	[26]

4 结果与分析

4.1 每日平均蒸散发分析 从图 3、4 可以看出,在气象数据中对蒸散发影响最大的是每日降雨量与短波辐射,辐射强度直接影响到蒸散发量的多少,而降雨量影响到短波辐射,同时影响到随后的蒸发量。因此,蒸散发随时间的波动受降雨量与短波辐射的共同影响。蒸散发分为植被和土壤表面的水分蒸发与植被生理蒸腾两部分,当有降雨时,植被表面会截留部分水分,这部分水分会在随后的过程中蒸发掉,这样就会提高总的蒸散发量,所以,蒸散发量在波动形式上看上去受降雨量影响较大,并且会有滞后效应。

夏季的蒸散发量要明显强于其他季节,6~8 月(第 153~

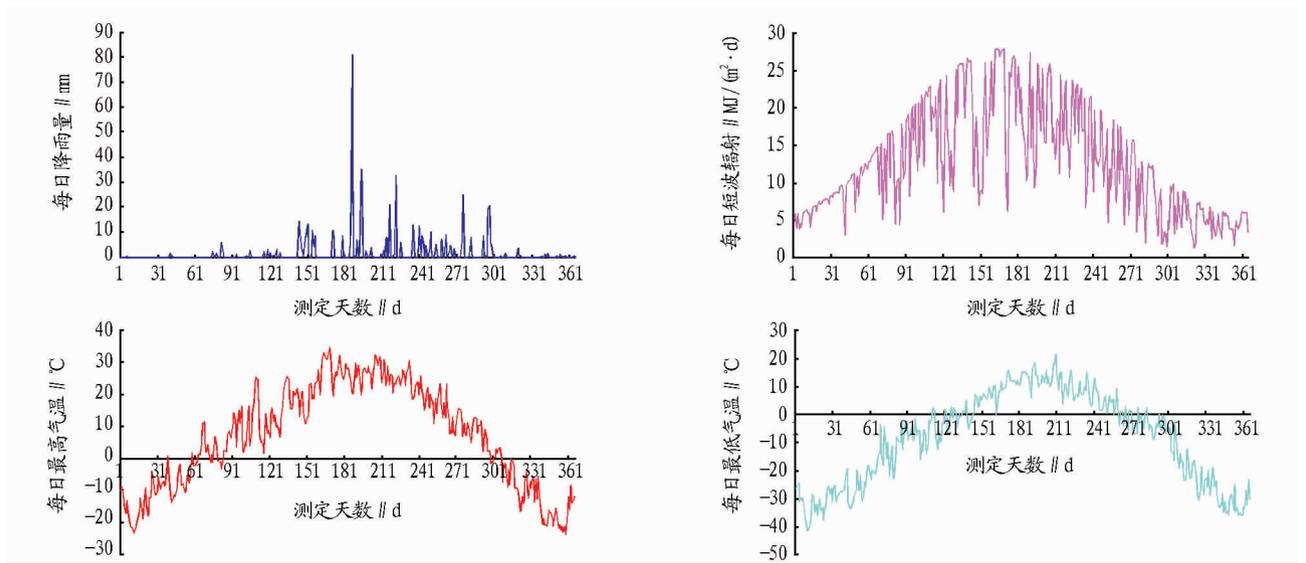


图 3 气象数据

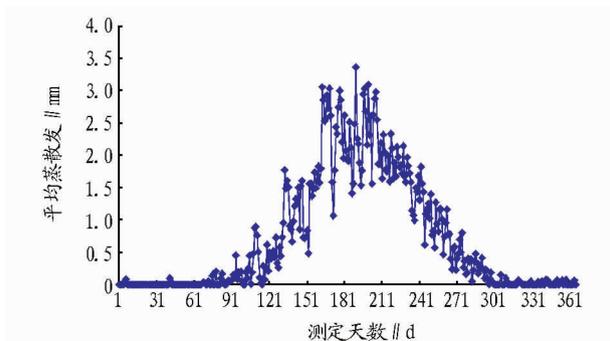


图 4 每日平均蒸散发

244 天)的平均蒸散发为 2.04 mm,占全年总蒸散发 187.50 mm 的 73%。其中最大值出现在第 190 天,为 3.36 mm,最大

值出现的原因可能是第 187 天遇有强降雨,日降雨量为 80.6mm,第 188、189 天的降雨量分别为 0.3、0.2 mm,而第 190 天为晴天,短波辐射强[27.3 MJ/(m²·d)],因此出现了较高的蒸发量。

2008 年研究区总降雨量为 599.68 mm,全年蒸散发为 255.02 mm,即 2008 年研究区 42.5% 的降水通过蒸发和蒸散被消耗掉,剩余的水分则通过地下下渗及地表径流等排走或者储存在流域生态系统内部。

4.2 不同土地覆盖类型的蒸散发分析 从表 2 可以看出,研究区以针叶林为主,其比例达到 97% 以上。在所有土地覆盖类型中,水域的蒸发最强,其全年平均蒸发量为 325.05 mm,超出全年蒸散发量第 2 强的混交林 14.4%,是裸地全年

蒸散发的 2 倍多,这是由于水域蒸发不受水源的限制,蒸发时间长,而植被类型表面截留的雨水蒸发完后只剩植被的蒸腾作用,所以蒸散发量小。阔叶林蒸散发要强于针叶林,而针阔混要强于单一植被类型,因为阔叶植物蒸腾要强于针叶植物,同时阔叶林生长季节 LAI 要高于针叶林,阔叶、针叶和针阔混的平均 LAI 分别为 3.6、3.1 和 3.4 m^2/m^2 ,因此阔叶林对降雨的截留能力强于针叶林。裸地区域年平均蒸发最弱,只有 156.18 mm。

表 2 2008 年不同土地类型的蒸散发情况

土地类型	年总蒸散发量//mm	所占面积 km^2	年总蒸散发量// km^3	面积所占比例//%	蒸散发所占比例//%
阔叶林	274.13	71.74	0.017 70	0.411 8	0.398 3
针叶林	217.45	16 902.33	4.327 83	97.006 5	97.397 2
混交林	284.03	296.83	0.075 88	1.70 36	1.707 6
裸地	156.18	146.66	0.020 62	0.841 7	0.463 9
湿地	264.07	1.57	0.000 37	0.009 0	0.008 4
农田	233.66	3.73	0.000 78	0.021 4	0.017 6
水域	325.05	1.05	0.000 31	0.006 0	0.006 9

图 5 显示了不同土地覆盖类型第 90 ~ 300 天的蒸散发变化,可以看出,所有土地覆盖类型的每日变化趋势基本一致,因为它们的主要影响因素降雨和短波辐射都一样。蒸散发变化量的不同主要发生在 6 ~ 8 月,这是由于降雨、植物蒸腾、高辐射等放大了不同土地利用类型的蒸发强度之间的差距。

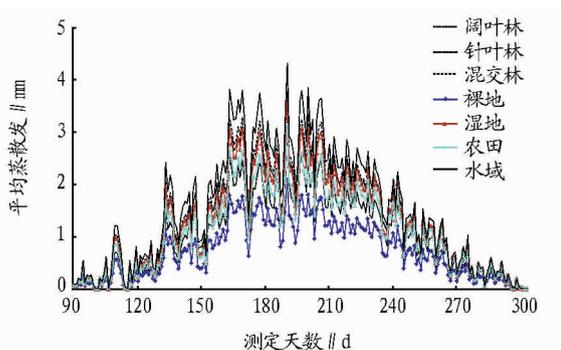


图 5 不同土地利用类型的每日蒸散发

2008 年全年总降雨量为 10.448 77 km^3 ,其中蒸散发量为 4.44 km^3 ,占 42.5%。针叶林、阔叶林及针阔混交林对蒸散发的贡献分别为 97.4%、0.4% 和 1.7%,其他土地利用类型总的贡献率为 0.5%,这与各类型面积所占的比重基本一致。

图 6 为研究区 2008 年区域蒸散发,对比图 2 可以看出,它受土地利用类型的影响较大。

5 结论

该研究利用 TerrainLab 过程模型,以 DEM、土地利用类型、2008 年 LAI 和气象数据等,计算了大兴安岭一小流域的每日蒸散发。2008 年研究区全年总降雨量为 599.68 mm,全年总蒸散发为 255.02 mm,占总降雨量的 42.5%。其中 6 ~ 8 月的平均蒸散发为 2.04 mm,占全年总蒸散发(187.50 mm)的 73%。

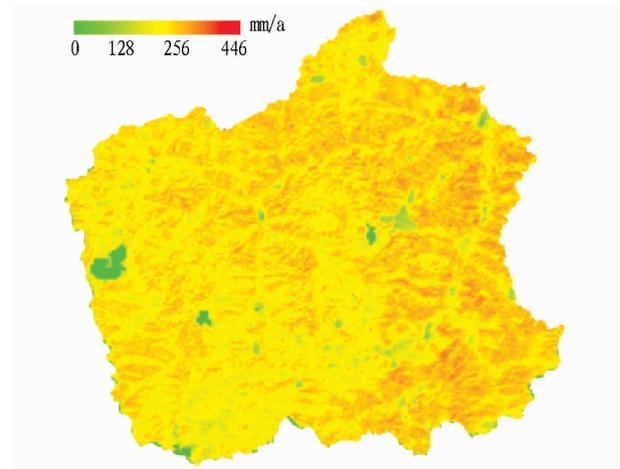


图 6 2008 年塔河流域蒸散发

该研究分析了不同土地利用类型的每日蒸散发强度。其中水域的全年平均蒸散发最强为 325.05 mm,其次为针阔混交林 284.03 mm,蒸散发最弱的为裸地 156.18 mm。研究区总的蒸散发量为 4.44 km^3 ,针叶林、阔叶林及针阔混交林对蒸散发的贡献分别为 97.4%、0.4% 和 1.7%,其他土地利用类型总的贡献率为 0.5%。

参考文献

- [1] ARORA V K. The use of the aridity index to assess climate change effect on annual runoff[J]. Journal of Hydrology, 2002, 265(1/4): 164 - 177.
- [2] DALEZIOS N R, LOUKAS A, BAMPZELIS D. Spatial variability of reference evapotranspiration in Greece[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2002, 27(23/24): 1031 - 1038.
- [3] MILLY P C D, EAGLESON P S. Effects of spatial variability on annual average water balance[J]. Water Resources Research, 1987, 23(11): 2135 - 2143.
- [4] JACKSON R B, SCHENK H J. Belowground consequences of vegetation change and their treatment in models[J]. Ecological Applications, 2000, 10(2): 470 - 483.
- [5] NOSETTO M D, JOBBAGY E G. Land-use change and water losses: The case of grassland afforestation across a soil textural gradient in central Argentina[J]. Global Change Biology, 2005, 11(7): 1101 - 1117.
- [6] SCOTT R L, HUXMAN T E. Ecophysiological impacts of woody - plant encroachment: Seasonal patterns of water and carbon dioxide exchange within a semiarid riparian environment[J]. Global Change Biology, 2006, 12(2): 311 - 324.
- [7] CALDER I R. Water use by forests, limits and controls[J]. Tree Physiology, 1998, 18(8/9): 625 - 631.
- [8] BOSCH J M, HEWLETT J D. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapo-transpiration [J]. Journal of Hydrology, 1982, 55(1/4): 3 - 23.
- [9] FARLEY K A, JOBBAGY E G. Effects of afforestation on water yield: A global synthesis with implications for policy[J]. Global Change Biology, 2005, 11(10): 1565 - 1576.
- [10] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements[M]. Rome, Italy: Irrigation and Drainage, 1998.
- [11] DROOGERS P, ALLEN R G. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions[J]. Irrigation and Drainage Systems, 2002, 16(1): 33 - 45.
- [12] DOMINGO F, VILLAGARCCÍA L, BOER M M, et al. Evaluating the long-term water balance of arid zone stream bed vegetation using evapotranspiration modelling and hillslope runoff measurements[J]. Journal of Hydrology, 2001, 243(1/2): 17 - 30.
- [13] CONTRERAS S, BOER M M. An ecohydrological modelling approach for assessing long - term recharge rates in semiarid karstic landscapes [J]. Journal of Hydrology, 2008, 351(1/2): 42 - 57.

些物理模型存在一定的争论^[12]。

新型的降雨监测仪器——激光雨谱仪和2DVD视频雨滴谱系统,可直接监测次、分段降雨的雨滴直径、速度等分布,能够准确计算降雨动能,可直接在土壤侵蚀物理模型中使用降雨动能以及速度指标,尤其是可建立溅蚀阶段土壤侵蚀与降雨动能之间的关系表达式,修订薄层水流侵蚀过程的数学表达式,进而准确拟定侵蚀动力的计算公式及划分标准,解决土壤侵蚀动力计算中的繁琐问题。这可为土壤侵蚀物理模型的理论探索提供数据支持。

3 结论

随着科学技术的发展,降雨观测设备由天池盆、圆罍逐渐演变成测雨器、雨量筒、自记雨量计、自记雨量器、视频雨滴谱系统、激光雨滴谱仪,监测设备的自动化程度越来越高。新兴的视频雨滴谱系统和激光雨滴谱仪具有以下优点:①监测降雨特性指标齐全,尤其能够监测雨滴的粒径、速度,从而可计算雨滴的动能;②精确度高;③性能稳定、操作方便。综上所述,雨滴谱仪具有众多优点,可以满足土壤侵蚀、水土保持及相关研究对降雨数据的需要,具有很好的应用推广价值。然而,新兴的雨滴谱仪也存在一定的不足之处,尤其价格比较昂贵,且2DVD视频雨滴谱系统较为笨重,这是它们

需要改进的地方。

参考文献

- [1] 中华人民共和国水利部,中华人民共和国国家统计局. 全国第一次水利普查公报[M]. 北京:中国水利水电出版社,2013.
 - [2] 刘宝元,谢云,张科利. 土壤侵蚀预报模型[M]. 北京:中国科学技术出版社,2001.
 - [3] 姚文艺,汤立群. 水力侵蚀产沙过程及模拟[M]. 郑州:黄河水利出版社,2001.
 - [4] 吴普特,周佩华. 雨滴击溅在薄层水流侵蚀中的作用[J]. 水土保持通报,1992,12(4):19-26,47.
 - [5] 王万忠. 黄土地区降雨特性与土壤流失关系的研究[J]. 水土保持通报,1983(4):1-8.
 - [6] 牟金泽. 雨滴速度计算公式[J]. 中国水土保持,1983(3):40-41.
 - [7] 南文铨. 对于朝鲜世宗朝创制的观天授时仪器的技术考察[J]. 自然科学史研究,1995,14(1):42-50.
 - [8] COOK H L. The nature and controlling variables of the water erosion process[J]. Soil Sci Soc Am Proc,1936,1:60-64.
 - [9] MUSGRAVE G W. The quantitative evaluation of factors in water erosion: A first approximation[J]. J Soil Water Conserv,1947,2:133-138.
 - [10] WISCHMEIER W H, SMITH D D. Rainfall energy and its relationship to soil loss[J]. Trans AGU,1958,39:285-291.
 - [11] WISCHMEIER W H, SMITH D D. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning[R]. US Dep Agric, Agric Handb,1978:537.
 - [12] HUANG C H, 郑粉莉. 美国土壤侵蚀过程及其预报模型研究进展[J]. 水土保持通报,2003,23(3):1-5.
- (上接第13677页)
- [14] ALCALÁ F J, CANTÓN Y. Diffuse and concentrated recharge evaluation using physical and tracer techniques: results from a semiarid carbonate massif aquifer in southeastern Spain[J]. Environmental Earth Sciences, 2010,62(3):541-557.
 - [15] SOBRINO J A, GÓMEZ M. Application of a simple algorithm to estimate daily evapotranspiration from NOAA-AVHRR images for the Iberian Peninsula[J]. Remote Sensing of Environment,2007,110(2):139-148.
 - [16] CHENINI I, MAMMOU A B. Groundwater recharge study in arid region: An approach using GIS techniques and numerical modeling[J]. Computers and Geosciences,2010,36(6):801-817.
 - [17] ABTEW W, OBEYSEKERA J. Pan evaporation and potential evapotranspiration trends in South Florida[J]. Hydrological Processes,2011,25(6):958-969.
 - [18] LIU C M, ZHANG D. Temporal and spatial change analysis of the sensitivity of potential evapotranspiration to meteorological influencing factors in China[J]. Acta Geographica Sinica,2011,66(5):579-588.
 - [19] KATERJI N, RANA G. Crop reference evapotranspiration: A discussion of the concept, analysis of the process and validation[J]. Water Resources Management,2011,25(6):1581-1600.
 - [20] GUO X H, SUN X H. Prediction of daily crop reference evapotranspiration (ET₀) values through a least-squares support vector machine model[J]. Hydrology Research,2011,42(4):268-274.
 - [21] SHANG S H. Calculating actual crop evapotranspiration under soil water stress conditions with appropriate numerical methods and time step[J]. Hydrological Processes,2012,26(22):3338-3343.
 - [22] LIU J. Mapping evapotranspiration based on remote sensing: An application to Canada's landmass[J]. Water Resources Research,2003,39(7):1-15.
 - [23] MEI X, SHEN B, MO S H. Cause analysis of annual variation of evapotranspiration in guanzhong region[J]. Water Resources and Power,2012,30(8):5-8.
 - [24] JENSON S K, DOMINGUE J O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing,1988,54(11):1593-1600.
 - [25] WIGMOSTA M S, VAIL L W. A Distributed hydrology-vegetation model for complex terrain[J]. Water Resources Research,1994,30(6):1665-1679.
 - [26] CHEN J M, CHEN X. Distributed hydrological model for mapping evapotranspiration using remote sensing inputs[J]. Journal of Hydrology,2005,305(1/4):15-39.
 - [27] BEVEN K J, KIRKBY M J. A physically-based, variable contributing area model of basin hydrology[J]. Hydrological Sciences Bulletin,1979,24(1):43-69.
 - [28] SHANGGUAN W, DAI Y. A soil particle-size distribution dataset for regional land and climate modelling in China[J]. Geoderma,2012,171-172:85-91.
 - [29] THORNTON P E, RUNNING S W. An improved algorithm for estimating incident daily solar radiation from measurements of temperature, humidity, and precipitation[J]. Agricultural and Forest Meteorology,1999,93(4):211-228.
 - [30] MONTEITH J L. Evaporation and the environment[J]. Proceedings of the Symposium on Experimental Biology,1965,19:205-234.
 - [31] CHEN J M, LIU J. Daily canopy photosynthesis model through temporal and spatial scaling for remote sensing applications[J]. Ecological Modelling,1999,124(2/3):99-119.
 - [32] KIMBALL J S, THORNTON P E, WHITE M A. Simulating forest productivity and surface-atmosphere carbon exchange in the BOREAS study region[J]. Tree Physiology,1997,17:589-599.
 - [33] DANG Q L, MARGOLIS H A, COYEA M R, et al. Regulation of branch-level gas exchange of boreal trees roles of shoot water potential and vapour pressure difference[J]. Tree Physiology,1997,17:521-535.