

空间插值气象数据在 Shuttleworth-Wallace 潜在蒸散发模型中的应用

刘 远,周买春

(华南农业大学水利与土木工程学院,广州 510642)

摘要:基于 Kriging 空间插值气象数据、IGBP 土地覆盖和 AVHRR NDVI 数据,利用 Shuttleworth-Wallace 模型估算韩江流域 2000—2006 年的潜在蒸散发(PET)。结果表明:流域 PET 空间分布呈显著的非均匀性,其值在 496.6~1741.8 mm/a 范围内变化,标准差为 165.9 mm/a,主要受区域的气候和植被类型影响;PET 随气候的变化和植被的生长呈季节性变化;低分辨率的输入数据会使 PET 模拟结果在相同尺度的范围内被一定程度地均化;气象站点密度对 PET 的计算结果有影响,Kriging 插值气象数据的站点密度远大于 CRU 数据,两种数据计算的 PET 结果的空间分布和季节变化的对比显示,前者计算的 PET 精度高于后者。

关键词:潜在蒸散发;Kriging 插值;Shuttleworth-Wallace 模型;气象数据;韩江流域
中图分类号:TV11 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2017)01-0008-09

Application of spatially interpolated meteorological data in estimation of potential evapotranspiration using Shuttleworth-Wallace model//LIU Yuan, ZHOU Maichun(College of Water Conservancy and Civil Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Based on meteorological data generated by Kriging spatial interpolation, International Geosphere-Biosphere Program (IGBP) land cover data, and Normalized Difference Vegetation Index data observed by the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR NDVI), the potential evapotranspiration (PET) in the Hanjiang River Basin during the period from 2000 to 2006 was estimated with the Shuttleworth-Wallace (S-W) model. The results show that the spatial distribution of PET over the basin is significantly non-uniform, with annual PET values ranging from 496.6 to 1741.8 mm/a and an annual standard deviation of 165.9 mm/a. The non-uniform distribution of PET is mainly caused by local climate and vegetation types. PET changes seasonally with climate and the growth of vegetation. Input data with low resolution may homogenize the PET results to a certain extent in the same coverage. The density of the meteorological stations will affect the estimated results of PET. The density of meteorological data from Kriging spatial interpolation is much higher than that of the Climatic Research Unit (CRU) data. The spatial distribution and seasonal change of PET calculated using the Kriging interpolation data and CRU data were compared, and the results show that the PET data calculated using the Kriging interpolation data are more accurate than those using the CRU data.

Key words: potential evapotranspiration; Kriging interpolation; Shuttleworth-Wallace model; meteorological data; Hanjiang River Basin

气象数据是研究全球碳循环和水文循环、气候变化、植被生态过程及动态变化等的基础数据。对于小区域的短期研究,通常可自设小型的气象站来获取所需的气象数据;但对于大范围的长期研究,以自主观测来获得完全的气象数据显然是不现实的,使用国家地面气象站的观测数据是唯一可行的途径。由于从气象部门获得数据较复杂,学者们更偏向于使用现成的、易获得的气象数据,如应用最广泛的由英国东安哥拉大学气象研究中心(Climatic Research Unit, CRU)基于国际气象交换站资料建立的 CRU 数据集。CRU 数据覆盖全球,且时间跨度长,在很多研究领域中得到了应用^[1-7]。由于 CRU 数据的低空间分辨率(0.5°,约 50 km)无法体现气象要素的空间变异性,使得模拟结果在与之相同的

空间尺度内被均化^[8]。2001 年,国家科技部启动了基础性工作专项资金项目“气象资料共享系统建设”,标志着气象资料公益性共享进入了试点建设和实施阶段。截至 2011 年底,气象科学数据共享平台共开发了 599 个基本覆盖大气科学领域的数据集产品,数据量达到 116 TB,可在线共享服务的数据量超过了 50 TB。这些数据向广大的科研工作者开放,为研究提供了极大的便利。随着这些气象数据在气候、水文、生态等方面的应用,相关的成果不断呈现^[9-16]。

潜在蒸散发 (potential evapotranspiration, PET) 是指充分供水条件下地表的蒸散发能力。Penman-Montieth (P-M) 方程^[17]是应用最广的潜在蒸散发计算模型之一。P-M 方程被称为“大叶”模型,不适用于计算稀疏植被和作物全生育期的蒸散发^[18]。在 P-M 方程的基础上,Shuttleworth 和 Wallace^[19]采用植被冠层和冠层间(或冠层下)裸土表面双源蒸发耦合的阻力网络,构建了适用于稀疏植被的 Shuttleworth-Wallace (S-W) 模型。S-W 模型结构复杂,包含很多参数,需要大量的气象和地面特征数据。随着遥感技术的发展,为区域潜在蒸散发模拟提供了时空连续的地面参数,如地表反射率、植被参数 (NDVI、LAI 等)、地表温度等。但是,众多的气象要素仍依靠于地面气象站的观测数据,而且作为 PET 的主要影响因素,气象数据的精度对 PET 模拟结果有重要的影响,刘远等^[20]研究表明,S-W 模型的 PET 计算结果对各气象要素都有着较高的敏感性。利用当前可获得的较多站点的气象数据来替代 CRU 数据,可望提高 S-W 模型的 PET 模拟精度。

本文以我国南方的韩江流域为例,应用多个地面气象站的观测数据,通过 Kriging 插值获得其空间分布;采用 S-W 模型计算流域的 PET,并与 CRU 数据计算的 PET 结果比较,分析不同精度气象数据对 PET 模拟结果的影响。

1 研究方法

1.1 Kriging 插值法

Kriging 插值法又称空间自协方差最佳插值法,由南非矿山地质工程师 Krige 于 1951 年提出,法国地质学家 Matheron 于 1962 年引入区域化变量的概念,将 Kriging 插值法加以完善^[21]。普通 Kriging 插值法采用区域变量观测点原始数据和变异函数对未观测点的区域化变量进行线性无偏最优估计。通过对预测点周围的各个观测点的观测值赋予不同的权重,累加后得到预测点的估计值,即

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \tag{1}$$

式中: $\hat{Z}(x_0)$ 为区域化变量在预测点 x_0 处的估计值; $Z(x_i)$ 为观测点 x_i 处的观测值; n 为观测点的个数; λ_i 为 $Z(x_i)$ 对应的权重系数,根据无偏和最小方差准则来确定,即

$$E(\hat{Z}(x_0) - Z(x_0)) = 0 \tag{2}$$

$$\sigma_z^2 = \text{Var}[\hat{Z}(x_0) - Z(x_0)] = \min \tag{3}$$

式中: $Z(x_0)$ 为区域化变量在预测点 x_0 处的真值; $E(\xi)$ 为 ξ 的数学期望, $\text{Var}(\xi)$ 为 ξ 的方差。根据区域化变量满足二阶平稳或本征假设,应用拉格朗日乘数法求极值,由式(2)(3)可得到 Kriging 线性方程组:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma(x_i - x_j) + \mu = \gamma(x_i - x_0) \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{cases} \tag{4}$$

式中: μ 为拉格朗日乘子; $\gamma(x_i - x_j)$ 为变异函数,满足

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E[Z(x) - Z(x+h)]^2 \tag{5}$$

式中: h 为两样本点空间距离; $Z(x)$ 和 $Z(x+h)$ 分别为区域化变量在 x 和 $x+h$ 处的真值。

在实际计算中常采用理论变异函数模型来替代实验变异函数,Kriging 法常用的理论变异函数模型有球形模型、指数模型、高斯模型、幂函数模型等。其中球形模型是地统计分析中应用最广泛的理论模型,常用于气象物理量场的空间插值,表达式为

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ C_0 + C \left(\frac{3h}{2a} + \frac{h^3}{2a^3} \right) & 0 < h \leq a \\ C_0 + C & h > a \end{cases} \tag{6}$$

式中: C_0 为块金常数; C 为拱高; $C_0 + C$ 为基台值; a 为变程。

获得变异函数后,由方程组(4)可求得 λ_i 和 μ ,将权重系数 λ_i 代入式(1),便可得到区域化变量在预测点 x_0 处的估计值 $\hat{Z}(x_0)$ 。本文采用 ArcGIS 软件的地统计分析模块中普通 Kriging 插值来实现各种气象要素的空间插值。

1.2 S-W 模型

S-W 模型中植被地面蒸发由植被冠层腾发和冠层间(或冠层下)裸土地面蒸发两部分组成:

$$\lambda ET = C_c ET_c + C_s ET_s \tag{7}$$

$$ET_c = \frac{\Delta(R_n - G) + \frac{(24 \times 3600) \rho c_p (e_s - e_a) - \Delta r_{ca} (R_{sn} - G)}{r_{aa} + r_{ca}}}{\Delta + \gamma \left[1 + \frac{r_{cs}}{r_{aa} + r_{ca}} \right]} \tag{8}$$

$$ET_s = \frac{\Delta(R_n - G) + \frac{(24 \times 3600) \rho c_p (e_s - e_a) - \Delta r_{sa} (R_n - R_{sn})}{r_{aa} + r_{sa}}}{\Delta + \gamma \left[1 + \frac{r_{ss}}{r_{aa} + r_{ca}} \right]} \quad (9)$$

其中

$$C_c = \frac{1}{1 + R_c R_a / R_s (R_c + R_a)}$$

$$C_s = \frac{1}{1 + R_s R_a / R_c (R_s + R_a)}$$

$$R_a = (\Delta + \gamma) r_{aa}$$

$$R_c = (\Delta + \gamma) r_{ca} + \gamma r_{cs}$$

$$R_s = (\Delta + \gamma) r_{sa} + \gamma r_{ss}$$

式中: ET 为总蒸散发, mm/d; λ 为水汽化潜热, MJ/kg; ET_c 、 ET_s 分别为郁闭冠层腾发和裸土地面蒸发, 以相应潜热表示, MJ/(m² · d); C_c 、 C_s 分别为它们的权重系数; R_n 、 R_{sn} 分别为冠层和土壤表面的净辐射, MJ/(m² · d); G 为土壤热通量, MJ/(m² · d); e_s 和 e_a 分别为饱和水汽压和实际水汽压, kPa; Δ 为饱和水汽压-温度曲线的斜率, kPa/°C; ρ 为平均空气密度, kg/m³; c_p 为空气定压比热容, 平均大气条件下 $c_p = 1.013$ kJ/(kg · °C); γ 为空气湿度常数, kPa/°C; r_{cs} 、 r_{ca} 分别为冠层气孔阻力和冠层边界层阻力, s/m; r_{sa} 、 r_{aa} 分别为土壤表面到冠层、冠层到参考高度间的空气动力学阻力, s/m; r_{ss} 为土壤表面阻力, s/m。

S-W 模型参数可归为以下 3 类分别进行计算:
①大气环境参数。S-W 模型中与大气环境有关的参数包括 λ 、 e_s 、 Δ 、 ρ 、 c_p 和 γ , 采用 Shuttleworth 和 Allen 的方法计算^[22-23]。②阻力参数。应用 K 理论, 通过积分土壤表面到冠层的优先高度 (preferred height)

和冠层的优先高度到参考高度的涡流扩散系数, 可得到空气动力学阻力 r_{sa} 和 r_{aa} ^[24]; 冠层气孔阻力 r_{cs} 受叶面积指数 (leaf area index, LAI) 和环境变量 (光合有效辐射、水汽压差、温度、土壤水分) 的影响, 可用 Jarvis 的方法计算^[25]; 冠层边界层阻力 r_{ca} 采用与叶片宽度有关的平均边界层阻力来计算^[19, 26]; 在计算 PET 时, 假定根系层的土壤含水量为田间持水量, 此时土壤表面阻力 $r_{ss} = 500$ s/m^[19, 27]。③能量参数。冠层净辐射 R_n 使用 FAO-56 方法中的公式^[23], 扣除地面的反射, 用下垫面的辐射能量平衡来计算, 地表面的反射率表示为地面植被 LAI 的函数^[28]; 土壤表面净辐射 R_{sn} 采用 Beer 指数衰减定律计算; 土壤热通量 G 采用前一时段和后一时段的平均气温的经验公式来计算^[23]。

除了土壤表面阻力和土壤热通量外, S-W 模型的其他阻力参数和能量参数都与植被参数 (LAI、植被高度和叶片宽度) 有关。植被 LAI 使用 SiB2 方法由 AVHRR NDVI 反演得到^[29]; 植被高度和叶片宽度通过区分一年生和多年生植被来计算, 并与 LAI 相关联^[1]。S-W 模型的参数化过程中, 需要确定一系列植被冠层参数的阈值 (如最小和最大植被高度、最大 LAI、最大叶片宽度、地面粗糙高度等), Zhou 等^[1] 根据 IGBP (international geosphere-biosphere program) 土地覆盖分类, 确定了这些参数的相应阈值。

2 研究区域和数据

2.1 研究区域

韩江流域 (图 1(a)) 位于 115°13' ~ 117°09'E、

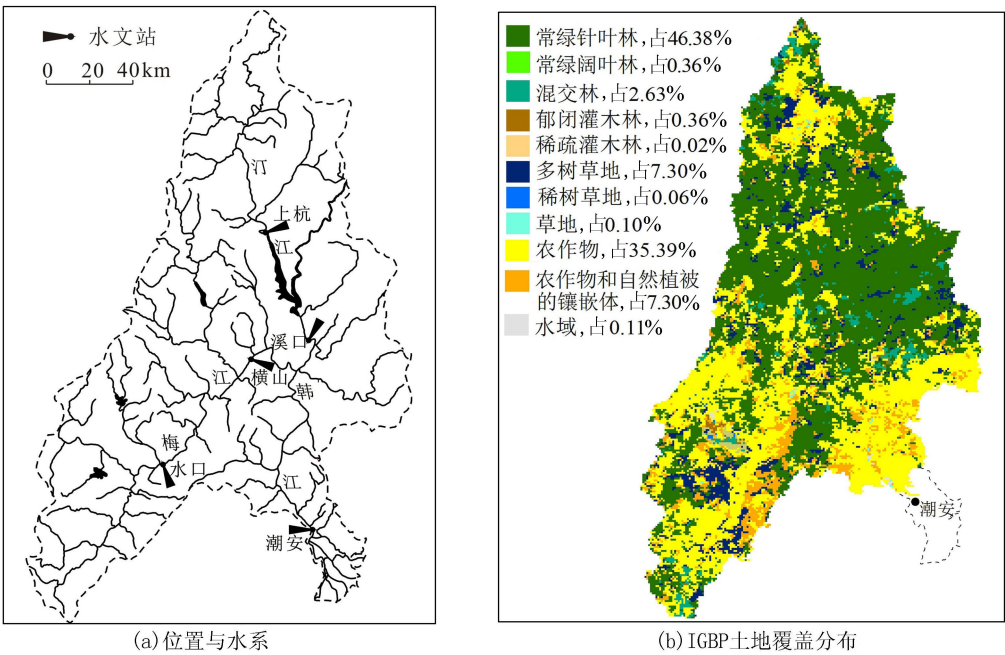


图 1 韩江流域位置、水系及 IGBP 土地覆盖分布

23°17'~26°05'N 范围,覆盖广东东部、福建西南部、江西南部共 22 个县市,流域面积 30 112 km²。其中山地约占 70%,主要分布在流域北部和中部;丘陵约占 25%,分布在梅江流域和其他干支流谷地;平原约占 5%,主要分布在韩江三角洲。梅江是韩江的主流,在广东大埔的三河坝与汀江汇合后始称韩江,全长 470 km。梅江、汀江、韩江干流和三角洲的集水面积分别为 13 929 km²、11 802 km²、3 346 km² 和 1 035 km²。

韩江流域属亚热带气候,受海洋性西南季风影响很大,夏长冬短,雨量充沛,四季常绿。流域多年平均气温 20℃,极端最高温度 42.8℃(上杭站 1952 年 8 月),极端最低温度 -7.3℃(梅县站 1958 年 1 月);在 4—9 月的前、后汛期里,西南、东南季风将孟加拉湾和南海的丰沛水汽带入流域,7—10 月是热带气旋盛行季节,台风将西太平洋与南海的暖湿水汽带入韩江流域;流域多年平均降水量 1 450 ~ 2 000 mm,降水量年际变率大,年内季节分配极不均匀,多集中于 4—9 月,约占全年的 80%;流域多年平均水面蒸发量为 996 ~ 1 406 mm。

2.2 土地覆盖和植被数据

土地覆盖数据采用 USGS (United States Geological Survey) 建立的 GLCC (global land cover characteristics) 全球 IGBP 土地覆盖数据集,该数据将全球土地覆盖分为 17 种类型,空间分辨率为 1 km。图 1(b) 是韩江潮安水文站(韩江干流控制性水文站)以上流域 IGBP 土地覆盖分布,流域主要植被是常绿针叶林和农作物(或农作物和自然植被的镶嵌体),约占全流域总面积的 90%。

植被 NDVI 数据采用由 NASA (National Aeronautics and Space Administration) GIMMS (global inventor modeling and mapping studies) 发布的覆盖全球的半月最大值合成 AVHRR NDVI 数据,数据空间分辨率是 8 km,时间是 1981 年 1 月至 2006 年 12 月。GIMMS 数据经过几何精度纠正、辐射校正、大气校正等预处理,且都已采用最大值合成法以减少云、大气、太阳高度角等的影响,同时还利用经验模式分解减少了由于卫星轨道漂移所产生的噪音,并利用交叉辐射定标的方法,增强了数据的精度。用流域边界裁剪得到韩江流域的 NDVI,图 2(a) 是韩江流域 2000—2006 年的平均 NDVI 分布。基于 SiB2 方法^[29],由 NDVI 和 IGBP 计算得到流域的 LAI,如图 2(b) 所示。可以看到,植被类型为常绿针叶林的地区,植被覆盖率较高,NDVI 和 LAI 较大;农作物(或农作物和自然植被的镶嵌体)地区的植被覆盖率较低,NDVI 和 LAI 较小;由于采用 SiB2 方

法由 NDVI 计算 LAI 时,融入了与 1 km 分辨率 IGBP 土地覆盖分类相关的参数,使得 LAI 的分辨率为 1 km,即在 1 个 8 km 的 NDVI 网格中,若 IGBP 类型不同,计算得到的 LAI 不同。但在一些大面积 IGBP 类型相同的区域,同一 NDVI 网格中计算得到的 LAI 是相同的,呈现出与 NDVI 相同的分辨率。

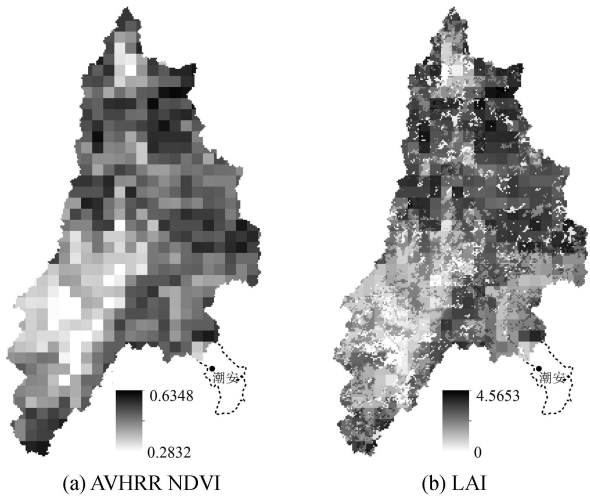


图 2 韩江流域 2000—2006 年平均 NDVI 和 LAI 分布

2000—2006 年月平均 NDVI 和 LAI 的年内变化如图 3 所示,结果显示两者是同步变化的,且与流域的气候变化相一致;在降水充足的 4—9 月,植被生长旺盛,而植被对降水的响应通常有 1 个月的滞后^[30],所以 NDVI 和 LAI 在 5—10 月较大;在降水较少的 1—3 月和 12 月,植被开始凋落,NDVI 和 LAI 在 1—4 月较小。

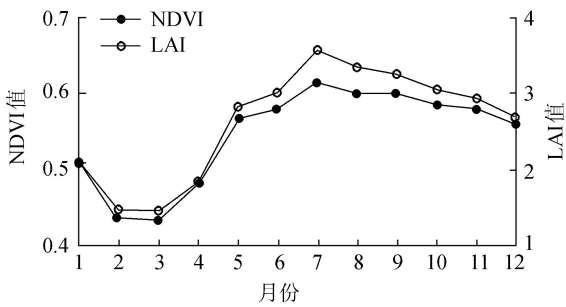


图 3 韩江流域 AVHRR NDVI 和 LAI 的年内变化

2.3 气象数据

用于空间插值的气象数据来自中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.nmic.cn/home.do>)提供的“中国地面气候资料月值数据集”。该数据集是中国 752 个基本、基准地面气象观测站及自动站 1951 年以来的气候资料月值数据集,内容包括 S-W 模型所需的平均气温、最高气温、最低气温、水汽压、风速和日照百分率,以及其他一些常用的气象数据。在数据集中获取韩江流域内和附近的 45 个气象站 2000—2006 年的月时间序列数据,这些气象站主要分布在广东省、福建省和江西省境内。

用于比较的气象数据是基于国际交换站(其中中国 194 个)气象资料建立的 CRU 数据集,其中 CRU TS(a gridded time-series dataset)可提供平均气温、最高气温、最低气温、降水、云量、水汽压等地表变量 1901—2014 年月平均值的,空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ (约 $50\text{ km} \times 50\text{ km}$),覆盖全球陆地; CRU CL(a gridded climatology of 1961—1990 monthly means)可提供 1961—1990 年多年平均月风速,空间分辨率也是 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 。

3 结果与分析

3.1 气象数据 Kriging 插值结果及与 CRU 数据的对比

根据“中国地面气候资料月值数据集”中获得的韩江流域内和附近的 45 个气象站 2000—2006 年的月时间序列数据,利用 Kriging 插值法得到流域各气象要素的分布场,将其转化为 1 km 分辨率的栅格图。同时,用流域边界在 CRU TS 数据中裁剪同期的平均气温、最高气温、最低气温、水汽压和云量数据,将云量转换成日照百分率 n/N ($n/N = 0.9234 - 0.048C - 0.0042C^2$,其中 C 是云量);裁剪 CRU CL 数据中的多年平均月风速代替 2000—2006 年各月的平均风速。两种方法得到的各气象要素平均值在韩江流域的分布如图 4、图 5 所示(最高气温和最低气温的分布与平均气温类似,图中未给出)。可以

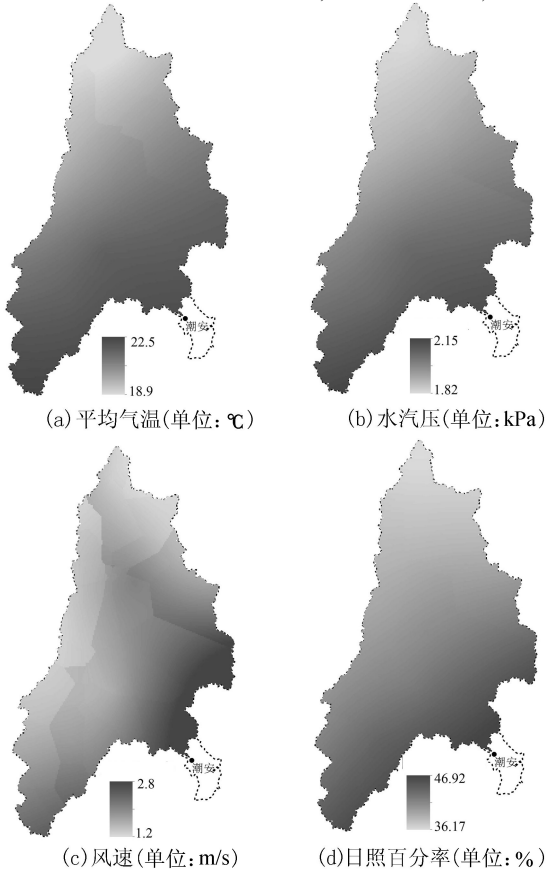


图 4 韩江流域 2000—2006 年气象要素平均值的插值分布

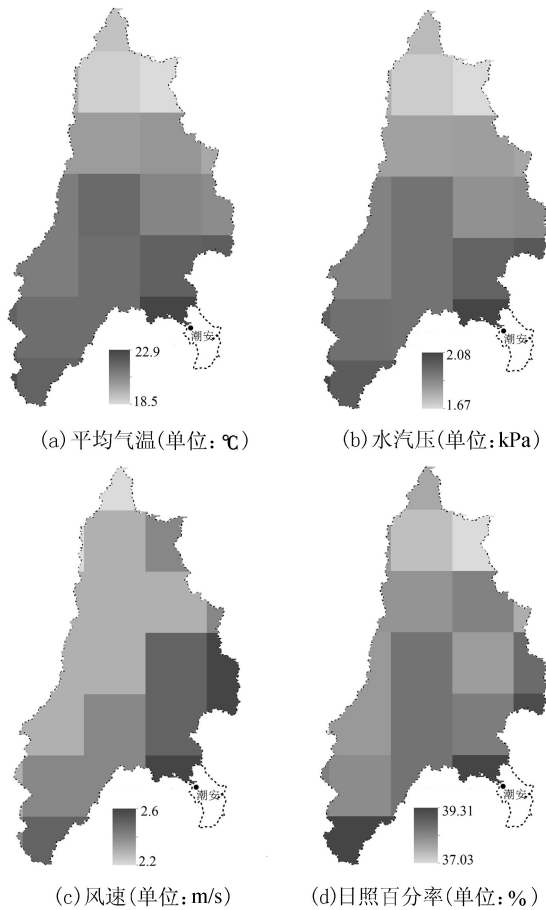


图 5 韩江流域 2000—2006 年 CRU 气象要素平均值的分布

看到,由于“中国地面气候资料月值数据集”的站点密度远高于 CRU 数据(在中国前者是 752 个站点,后者是 194 个站点),所以 Kriging 插值法得到的气象要素空间分辨率高于 CRU 数据。但两种方法得到的气象要素空间分布的变化趋势是一致的,其中气温、水汽压和日照百分率随纬度的增大而减小的趋势较明显,风速则从沿海向内陆呈减小趋势。

统计各气象要素月平均值的年内变化,结果如图 6 所示。两种方法得到的气象要素的季节变化一致;从数值大小来看,两者的平均气温大小基本没有差别,而 CRU 的水汽压全年都略小于 Kriging 插值得到的值;由于 CRU 采用的是 1961—1990 年的平均风速,其值明显较 Kriging 插值得到的大,这有可能是因为近 30 年来流域的城市化建设使得地面粗糙度变大,所以气象站的风速测值较过去小;CRU 的日照百分率除 1 月和 12 月较 Kriging 插值得到的值大外,其他月份的值都较小,而且在少数月份(如 6 月、9 月)两种方法得到的值相差较大,这有可能是因为日照百分率与云量直接相关,而云量随空间具有较大的变异性,即使是位置较接近的气象站测到的云量都可能相差较大,CRU 和 Kriging 插值使用不同的气象站数据,导致日照百分率的大小差异较大。

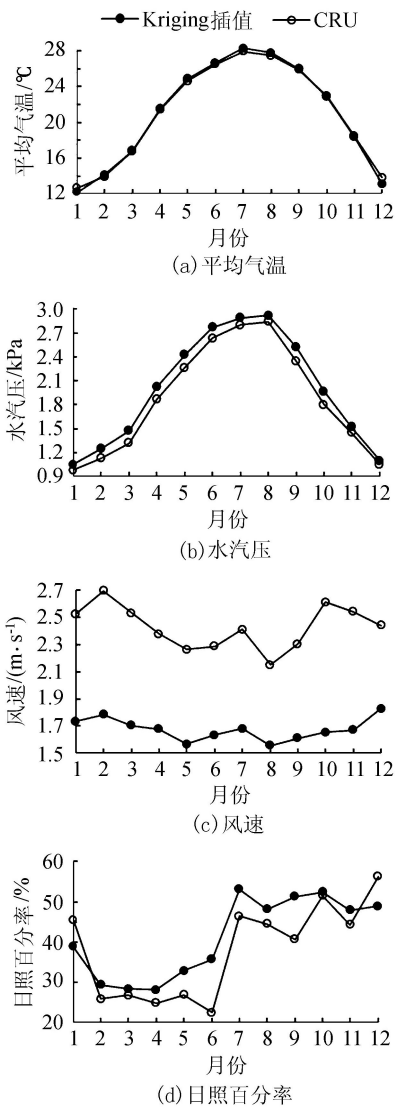


图6 韩江流域2000—2006年气象要素月平均值的年内变化

3.2 Kriging 插值计算的 PET 及与 CRU 计算结果的比较

3.2.1 PET 的空间分布

分别利用 Kriging 插值气象数据和 CRU 数据驱动 S-W 模型,计算韩江流域 2000—2006 年的 PET (分别记为 E_K 和 E_C),图 7 给出了它们的年平均在流域的空间分布。 E_K 的流域平均值为 1009.7 mm/a,其空间分布具有较大的非均匀性,标准差达 165.9 mm/a;最大值为 1741.8 mm/a,出现在流域出口潮安水文站处的水域,因为该处纬度较低,太阳辐射较强,且为水面蒸发,所以 E_K 最大;最小值为 496.6 mm/a,出现在流域北部汀江干流附近的多树草地,因为该处纬度较高,太阳辐射较弱,且为矮小植被覆盖,蒸腾作用较弱,所以 E_K 最小。 E_K 有些地方呈现“马赛克”分布,同一“马赛克”中的 E_K 值相近。这些“马赛克”的大小为 8 km×8 km,与 AVHRR NDVI(或 LAI)的栅格大小相同,且位置重

合, E_K “继承”了 NDVI 数据的分辨率,说明位置接近时,相同的植被覆盖, E_K 的大小相当。

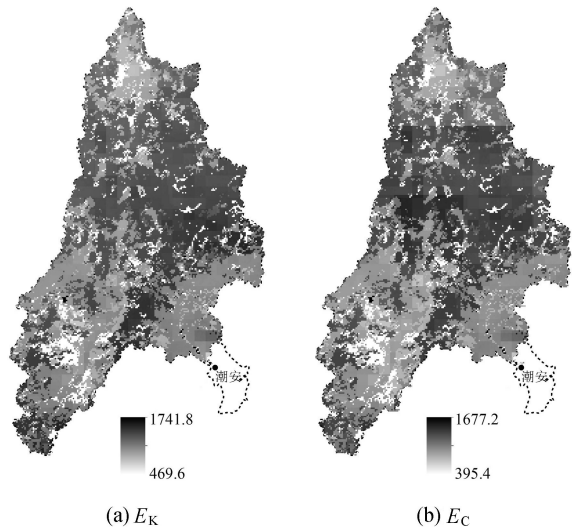


图7 韩江流域2000—2006年平均PET分布(单位:mm/a)

E_C 的流域平均值为 951.2 mm/a,比 E_K 小 5.8%,且 E_C 的最大和最小值也都较 E_K 的小;从流域内的空间分布看, E_C 与 E_K 的空间分布基本是一致的。 E_C 同时继承了来自 NDVI 数据的 8 km 分辨率和 CRU 数据的 50 km 分辨率,使其分布中既存在 8 km 的“马赛克”,又可见 50 km 的“块”;由于 E_C 融入了来自 IGBP 土地覆盖的 1 km 高分辨率,且不同土地覆盖对 PET 有较大的影响(见 3.2.2),使得这些粗分辨率在 E_C 中表现的并不明显。

3.2.2 PET 随植被类型的变化

表 1 为全流域和流域内 4 种主要植被覆盖的多年平均 LAI 和 PET 值。 E_K 随植被类型的不同有较大的变化。由于常绿针叶林属高大植被,LAI 也是 4 种植被类型中最大的,相比较矮小的农作物和草地,其蒸腾作用更剧烈,所以 E_K 最大;其他 3 种植被 LAI 较接近,由于农作物大多分布在流域的南部,太阳辐射较强,所以其 E_K 较大;多树草地、农作物和自然植被的镶嵌体分布都较分散,后者的 LAI 较大,所以 E_K 较大。除多树草地由于分布分散,相对标准差(标准差与平均值之比)较大外,其余植被覆盖 E_K 的相对标准差几乎在同一水平,说明韩江流域不同植被覆盖 E_K 的地域差异是相类似的,而且都呈从北向南逐渐增大的趋势。

与全流域的计算结果一样,各种植被覆盖计算得到的 E_K 均比 E_C 大,其中常绿针叶林的 E_K 和 E_C 差距明显较其他 3 种植被小,说明 LAI 较大时,PET 受气象要素的影响较小。全流域和各种植被的 E_C 标准差均比 E_K 的大,因为较低分辨率的 CRU 气象数据的空间差异较 Kriging 插值的数据大,所以计算得到的 E_C 空间差异也较大。

表 1 韩江流域 2000—2006 年不同植被覆盖平均 LAI 与 PET

区 域	LAI 值	E_K			E_C			$[(E_K - E_C)/E_K]/\%$
		均值/ ($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)	标准差/ ($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)	相对标准 差/%	均值/ ($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)	标准差/ ($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)	相对标准 差/%	
全流域	2.62	1 009.7	165.9	16.4	951.2	184.2	19.4	5.8
常绿针叶林	2.99	1 064.8	151.9	14.3	1 020.5	169.1	16.6	4.2
多树草地	2.22	900.3	241.7	26.8	831.8	259.0	31.1	7.6
农作物	2.26	972.1	135.0	13.9	900.9	146.4	16.3	7.3
农作物和自然 植被的镶嵌体	2.43	944.1	166.3	17.6	865.9	177.8	20.5	8.3

3.2.3 PET 的季节变化

图 8(a)(b)为全流域和流域内 3 种主要植被覆盖的多年平均月 PET 的年内变化,气候变化对流域的 E_K 有较大的影响。常绿针叶林各月的 E_K 都较其他植被的大,多树草地各月的 E_K 都最小。虽然各种植被覆盖的 E_K 大小不同,但是它们随季节的变化是同步的,最小值都出现在 1 月,最大值都出现在 7 月。 E_K 在 5—10 月较大,因为该时段流域的气温较高,太阳辐射强烈,且雨量充沛(占全年雨量的 80% 以上),植物生长旺盛,蒸腾作用剧烈,所以 E_K

较大。

由 CRU 气象数据计算得到的各种植被覆盖的 E_C 同样具有季节变化的一致性,而且变化的规律与 E_K 基本相同,较大的 E_C 同样出现在 5—10 月。但是,各种植被 5 月和 6 月的 E_C 基本相等,而 E_K 则较明显地上升,较好地反映了植被的生长趋势。将全流域的 E_K 和 E_C 进行对比(图 8(c)),可以发现在 6—9 月 E_K 明显比 E_C 大。Kriging 插值得到的气温和 CRU 的基本相等,它们计算的 PET 差异主要是由水汽压、日照百分率和风速引起的。S-W 模型的敏感性分析表明^[20],PET 对水汽压和日照百分率有较高的敏感性,而对风速的敏感性较低,PET 随水汽压的增大而减小,随日照百分率的增大而增大。Kriging 插值得到水汽压和日照百分率全年都较 CRU 的大(1 月和 12 月的日照百分率除外),日照百分率相差更为明显,尤其是 6—9 月,使得这 4 个月的 E_K 明显比 E_C 大;由于 CRU 6 月的日照百分率明显下降,使得该月的 E_C 没有较 5 月上升。

4 结 语

随着气象科学数据共享平台各种数据集的开放和应用,结合覆盖全球的、免费公开使用的土地覆盖数据和反映植被形态随环境(如长期水分胁迫)、季节动态变化的卫星遥感植被数据(NDVI、LAI),将 S-W 潜在蒸散发模型用于大流域长时段 PET 模拟成为可能。基于 Kriging 插值气象数据的 S-W 模型在韩江流域的应用表明,流域 PET 空间分布呈显著的非均匀性,PET 在 496.6 ~ 1 741.8 mm/a 范围内变化,标准差为 165.9 mm/a,主要受区域的气候和植被类型影响;PET 随气候变化和植被生长呈季节性变化;低分辨率的输入数据会使 PET 模拟结果在相同尺度的范围内被一定程度地均化;获得气象空间数据的站点密度对 PET 的计算结果有影响,Kriging 插值气象数据的站点密度远大于 CRU 数据,两种数据计算的 PET 结果的空间分布和季节变化的对比显示,前者计算的 PET 精度高于后者。

流域水文模拟时间尺度一般要达到日,对于洪

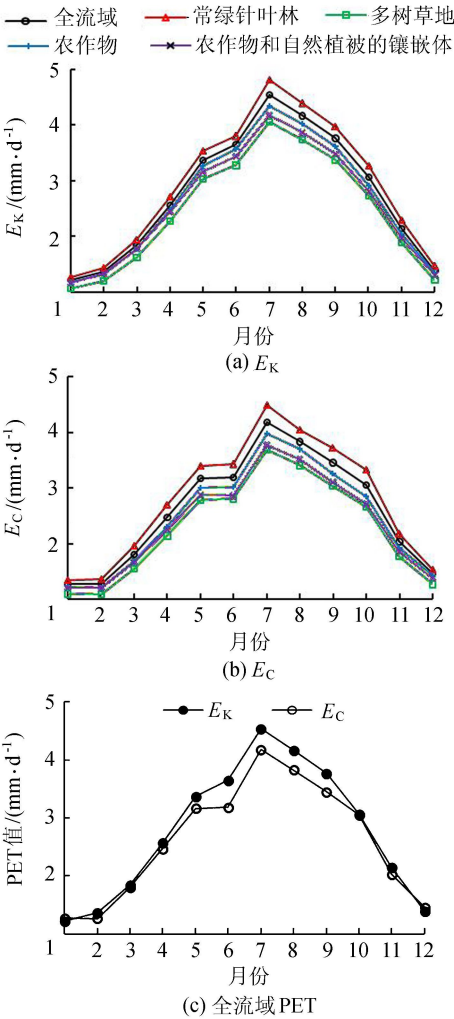


图 8 韩江流域 2000—2006 年不同植被覆盖平均月 PET 年内变化

水预报更是要以小时为尺度,但受输入数据的时间尺度限制,模型估算的潜在蒸散发的尺度往往只到月或旬。大多数学者是将月潜在蒸散发简单应用到日,即认为月内每天潜在蒸散发不变,这无疑均化了潜在蒸散发的时间变异性,对水文模拟的结果造成影响。随着遥感技术的发展,植被数据的时间分辨率不断提高(如 MODIS 植被数据的时间分辨率可达到 8 d),以及各种时间序列(月、日、时)气象数据的开放,使日尺度的潜在蒸散发模拟成为可能。

参考文献:

[1] ZHOU Maichun,ISHIDAIRA H,HAPUARACHCHI H P, et al. Estimating potential evapotranspiration using Shuttleworth-Wallace model and NOAA-AVHRR NDVI data to feed a distributed hydrological model over the Mekong River Basin[J]. Journal of Hydrology,2006,327 (1/2): 151-173.

[2] ZHOU Maichun,ISHIDAIRA H,TAKEUCHI K. Estimation of potential evapotranspiration over the Yellow River Basin: reference crop evaporation or Shuttleworth-Wallace? [J]. Hydrological Processes, 2007, 21 (14): 1860-1874.

[3] 王景凯,郭华东,李新武. 2003—2010 年中亚地表土壤水对气候变化的响应[J]. 干旱区研究,2015,23 (1): 40-47. (WANG Jingkai, GUO Huadong, LI Xinwu. Responses of surface soil moisture in Central Asia to climate change during 2003—2010 [J]. Arid Zone Research,2015,23(1): 40-47. (in Chinese))

[4] 赵靖川,刘树华. 植被变化对西北地区陆气耦合强度的影响[J]. 地球物理学报,2015,58 (1): 47-62. (ZHAO Jingchuan, LIU Shuhua. Research on the impact of vegetation change on land-atmosphere coupling strength in Northwest China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015,58(1): 47-62 (in Chinese))

[5] 戚颖,王斌,黄金柏,等. CRU 数据集在黑龙江省 ET_0 计算中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2014, 42(4): 367-371. (QI Ying, WANG Bin, HUANG Jinbai, et al. Application of CRU dataset to calculation of ET_0 of Heilongjiang Province [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2014, 42 (4): 367-371. (in Chinese))

[6] 孙文超,庞博,鱼京善,等. 基于分布式水文模型 BTOPMC 的晋江流域水文循环模拟[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2013,49 (2/3): 145-151. (SUN Wenchao, PANG Bo, YU Jingshan, et al. Simulating hydrological cycle in Jinjiang River Basin with BTOPMC [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2013,49(2/3): 145-151. (in Chinese))

[7] 刘晋,魏新平,王军. SWAT 模型在密赛流域的应用与比较研究[J]. 水文,2014,34 (6): 49-54. (LIU Jin, WEI Xinping, WANG Jun. Application of SWAT model in Misai

Basin[J]. Journal of China Hydrology,2014,34 (6): 49-54. (in Chinese))

[8] 曹启桓,刘远,周买春,等. 基于 AVHRR NDVI 的 Shuttleworth-Wallace 模型在韩江流域的应用[J]. 中山大学学报(自然科学版),2013,52 (2): 121-128. (CAO Qihuan, LIU Yuan, ZHOU Maichun, et al. Application of Shuttleworth-Wallace model in Hanjiang River Basin using AVHRR NDVI data [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2013, 52 (2): 121-128. (in Chinese))

[9] 牛纪苹,栗晓玲. 石羊河流域参考作物蒸发蒸腾量对气候变化的响应模拟及预测[J]. 水利学报,2014,45 (3): 286-295. (NIU Jiping, SU Xiaoling. Simulation and estimation of reference evapotranspiration responding to climate change in Shiyang River Basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45 (3): 286-295. (in Chinese))

[10] 夏婷,王忠静,罗琳,等. 基于 REDRAW 模型的黄河河龙间近年蒸散发特性研究[J]. 水利学报,2015,46 (7): 811-818. (XIA Ting, WANG Zhongjing, LUO Lin, et al. REDRAW-based evapotranspiration characters analysis in Hekou-Longmen Section of the Yellow River [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2015,46(7): 811-818. (in Chinese))

[11] 徐勇,奚砚涛. 江苏省植被覆盖动态变化及其与气候因子的关系[J]. 水土保持通报,2015,35 (4): 195-201. (XU Yong, XI Yantao. Change of vegetation coverage in Jiangsu Province and its relation with climatic factors[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35 (4): 195-201. (in Chinese))

[12] 刘宪锋,朱秀芳,潘耀忠,等. 1982—2012 年中国植被覆盖时空变化特征[J]. 生态学报,2015,35 (16): 5332-5342. (LIU Xianfeng, ZHU Xiufang, PAN Yaozhong, et al. Spatiotemporal changes in vegetation coverage in China during 1982—2012 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35 (16): 5331-5342. (in Chinese))

[13] 蔡辉艺,余钟波,杨传国,等. 淮河流域参考蒸散发量变化分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2012,40 (1): 76-82. (CAI Huiyi, YU Zhongbo, YANG Chuanguo, et al. Analysis of variation of reference evapotranspiration in Huaihe Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012,40(1):76-82. (in Chinese))

[14] 马放,姜晓峰,王立,等. 基于 SWAT 模型的亚流域划分方法研究[J]. 中国给水排水,2015,31 (7): 53-57. (MA Fang, JIANG Xiaofeng, WANG Li, et al. Study on subwatershed delineation based on SWAT model [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31 (7): 53-57. (in Chinese))

[15] 朱非林,王卫光,孙一萌,等. 汉江流域实际蒸散发的时空演变规律及成因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2013, 41 (4): 300-306. (ZHU Feilin, WANG Weiguang, SUN Yimeng, et al. Spatial and temporal variations of actual evapotranspiration and their causes in

- Hanjiang River Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2013, 41 (4): 300-306. (in Chinese))
- [16] 仙巍,邵怀勇. 长江上游安宁河流域植被生长变化对气候条件的响应[J]. 国土资源遥感, 2015, 27(3): 108-113. (XIAN Wei, SHAO Huaiyong. Responses of vegetation changes to climatic variations in Anning River Basin of upper Yangtze River Region[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2015, 27(3): 108-113. (in Chinese))
- [17] MONTEITH J L. Evaporation and environment[C]//19th Symposia of the Society for Experimental Biology. Cambridge: Cambridge University Press, 1965: 205-234.
- [18] 莫兴国,林忠辉,刘苏峡. 基于 Penman-Monteith 公式的双源模型的改进[J]. 水利学报, 2000, 31(5): 6-11. (MO Xingguo, LIN Zhonghui, LIU Suxia. An improvement of the dual-source model based on Penman-Monteith formula[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 31(5): 6-11. (in Chinese))
- [19] SHUTTLEWORTH W J, WALLACE J S. Evaporation from sparse crops-an energy combination theory[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1985, 111(469): 839-855.
- [20] 刘远,周买春,陈芷菁,等. 基于 S-W 模型的韩江流域潜在蒸散发的气候和植被敏感性[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 92-100. (LIU Yuan, ZHOU Maichun, CHEN Zhijing, et al. Sensitivity of the potential evapotranspiration to climate and vegetation in Hanjiang River Basin based on S-W Model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(10): 92-100. (in Chinese))
- [21] 范玉洁,余新晓,张红霞,等. 降雨资料 Kriging 与 IDW 插值对比分析:以漓江流域为例[J]. 水文, 2014, 34(6): 61-66. (FAN Yujie, YU Xinxiao, ZHANG Hongxia, et al. Comparison between Kriging interpolation method and Inverse Distance Weighting tensor for precipitation data analysis: taking Lijiang River Basin as a study case [J]. Journal of China Hydrology, 2014, 34(6): 61-66. (in Chinese))
- [22] SHUTTLEWORTH W J. Evaporation [M]. New York: McGraw-Hill, 1993.
- [23] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements [R]. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [24] SHUTTLEWORTH W J, GURNEY R J. The theoretical relationship between foliage temperature and canopy resistance in sparse crop [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1990, 116(492): 497-519.
- [25] JARVIS P G. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences, 1976, 273(927): 593-610.
- [26] BRISSON N, ITIER B, L'HOTEL J C, et al. Parameterisation of the Shuttleworth-Wallace model to estimate daily maximum transpiration for use in crop models[J]. Ecological Modeling, 1998, 107(2/3): 159-169.
- [27] FEDERER C A, VOROSMARTY C J, FEKETE B. Intercomparison of methods for potential evapotranspiration in regional or global water balance models [J]. Water Resources Research, 1996, 32(7): 2315-2321.
- [28] UCHIJIMA Z. Maize and rice [M]. New York: Academic Press, 1976.
- [29] SELLERS P J, LOS S O, TUCKER C J, et al. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs, part II: the generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data [J]. Journal of Climate, 1996, 9: 706-737.
- [30] 崔林丽,史军,杨引明,等. 中国东部植被 NDVI 对气温和降水的旬响应特征[J]. 地理学报, 2009, 64(7): 850-860. (CUI Linli, SHI Jun, YANG Yinming, et al. Ten-day response of vegetation NDVI to the variations of temperature and precipitation in eastern China [J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(7): 850-860. (in Chinese))
- (收稿日期:2015-12-25 编辑:郑孝宇)
- +++++
- 简讯 ·
- 《水利水电科技进展》入选中国高校百佳科技期刊
- 由中国高校科技期刊研究会组织的 2016 年度中国高校杰出·百佳·优秀科技期刊评选结果于日前揭晓,由河海大学主办的《水利水电科技进展》入选中国高校百佳科技期刊。此次评选活动旨在不断提高高校科技期刊的学术影响力和编辑出版质量,对高校科技期刊在科研活动和学术交流中所起的作用及其质量作出客观、全面的评价。共选出中国高校杰出科技期刊 20 种、中国高校百佳科技期刊 104 种、中国高校优秀科技期刊 254 种、中国高校编辑出版质量优秀科技期刊 69 种。
- 在上一轮评选中,本刊入选中国高校优秀科技期刊;在本轮评选中更上一层楼,揽获中国高校百佳科技期刊这一殊荣。近年来,《水利水电科技进展》在主办单位、编委、审稿专家、广大作者和读者的关心和支持下,学术影响力不断增强,社会影响力和美誉度也得到提升。在此,顾冲时主编携编辑部全体成员向大家致以深深的感谢!
- (本刊编辑部供稿)

· 简讯 ·

(本刊编辑部供稿)