

基于 AVHRR NDVI 的 Shuttleworth-Wallace 模型在韩江流域的应用*

曹启桓^{1,2}, 刘 远¹, 周买春¹, 钟向宁¹

(1. 华南农业大学水利与土木工程学院, 广东 广州 510642;

2. 广东珠荣工程设计有限公司, 广东 广州 510610)

摘要: 基于 AVHRR NDVI (归一化植被指数)、IGBP 土地覆盖及 CRU 气象数据, 利用 Shuttleworth-Wallace (S-W) 模型估算韩江流域 1981 - 2000 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, 从 714.8 ~ 1 570.7 mm/a, 主要受土地覆盖类型和地理位置影响; PET 随植被类型和叶面积指数 (LAI) 季节性变化; 输入数据的时空分辨率对 PET 的估算精度有较大影响; 与 Thornthwaite 公式和 FAO-56 方法相比, S-W 模型能够很好地反映地表变化对 PET 的影响。BTOPMC 模型的应用表明, 由 S-W 模型估算的 PET 在分布式水文模拟中取得了较好的效果。

关键词: 潜在蒸散发; Shuttleworth-Wallace 模型; NDVI; 叶面积指数; 植被覆盖; 韩江流域

中图分类号: P333 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529 - 6579 (2013) 02 - 0121 - 08

Application of Shuttleworth-Wallace Model in Hanjiang River Basin Using AVHRR NDVI Data

CAO Qihuan^{1,2}, LIU Yuan¹, ZHOU Maichun¹, ZHONG Xiangning¹

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;

2. Zhurong Engineering Company Limited of Guangdong, Guangzhou 510610, China)

Abstract: Using AVHRR NDVI (normalized difference vegetation index), IGBP land cover and CRU meteorological database, potential evapotranspiration (PET) over Hanjiang River basin in 1981 - 2000 was estimated by Shuttleworth-Wallace (S-W) model. Spatially, PET was distributed over the basin strikingly non-uniformly from 714.8 mm to 1 570.7 mm yearly, mainly because of the influence of land cover types and geographical location. Temporally, PET changed significantly with vegetation seasonal development, thus with vegetation leaf area index (LAI). Temporal and spatial resolutions of input data greatly affected PET estimation accuracy. Compared with Thornthwaite formula and FAO-56 method, S-W model can reflect the effects of vegetation change on PET very well. By applying the derived PET to a distributed hydrological model - BTOPMC, good results was achieved in the Hanjiang River basin.

Key words: potential evapotranspiration; Shuttleworth-Wallace model; NDVI; leaf area index; vegetation cover; Hanjiang River basin

流域陆面蒸发是植被地面在气象作用力下对植被截留和土壤水分的蒸发, 以土壤水分蒸发为主。

水文站和气象站具有长期的蒸发皿观测资料, 代表气象作用力对水面的蒸发。由于下垫面和蒸发条件

* 收稿日期: 2012 - 11 - 28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41171029); 广东省水利科技创新项目 (2009-42); 华南农业大学校长科学基金项目 (7600-K07050)

作者简介: 曹启桓 (1986 年生), 男, 硕士; 通讯作者: 周买春; E-mail: mczhou@scau.edu.cn

不同, 蒸发皿测量数据不能代表陆面蒸发, 大面积的陆面蒸发难以通过实测来获得, 往往先通过模型计算陆面的潜在蒸散发, 然后将潜在蒸散发输入到水文模型得到实际蒸散发, 以考虑土壤水分对蒸散发的胁迫。

潜在蒸散发 (PET) 是指充分供水条件下地表的蒸散发能力。计算潜在蒸散发的模型很多, 从单一气候变量的经验公式 (如 Thornthwaite 公式^[1]) 到能量平衡和空气动力学原理相结合的组合方法 (如 Penman 方程^[2])。通过引进冠层阻力系数, Monteith 将 Penman 方程推广到受水分胁迫的旱作物蒸发, 即 Penman-Montieth (P-M) 方程^[3], 并被标准化为 FAO-56 方法用以计算参考作物的蒸散发 (RET) 以指导农业灌溉^[4]。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^[5]。在 P-M 方程的基础上, Shuttleworth 和 Wallace 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^[6]。S-W 模型可用于计算植被截留蒸发和土壤水分蒸发, 但 S-W 模型复杂, 包含大量的参数, 需要大量的气象和地面特征数据, 以往的研究大多集中在模型验证, 或在较小的实验流域对一些特定植被进行短期研究^[7]。近年来, 随着遥感技术的发展和大型数据库的支持, S-W 模型在大流域得到了应用^[8,9]。

1 S-W 模型

S-W 模型计算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:

$$\lambda ET = C_c ET_c + C_s ET_s \quad (1)$$

$$ET_c =$$

$$\left[\Delta(R_n - G) + \frac{[(24 \times 3600)\rho c_p (e_s - e_a) - \Delta r_a^c (R_n^c - G)]}{(r_a^c + r_s^c)} \right] /$$

$$\left\{ \Delta + \gamma \left[1 + \frac{r_s^c}{(r_a^c + r_s^c)} \right] \right\} \quad (2)$$

$$ET_s =$$

$$\left[\Delta(R_n - G) + \frac{[(24 \times 3600)\rho c_p (e_s - e_a) - \Delta r_a^s (R_n - R_n^s)]}{(r_a^s + r_s^s)} \right] /$$

$$\left\{ \Delta + \gamma \left[1 + \frac{r_s^s}{(r_a^s + r_s^s)} \right] \right\} \quad (3)$$

$$C_c = 1 / \left\{ 1 + \frac{(R_c R_a)}{[R_s (R_c + R_a)]} \right\} \quad (4)$$

$$C_s = 1 / \left\{ 1 + \frac{(R_s R_a)}{[R_c (R_s + R_a)]} \right\} \quad (5)$$

$$R_a = (\Delta + \gamma) r_a^a \quad (6)$$

$$R_c = (\Delta + \gamma) r_c^c + \gamma T_s^c \quad (7)$$

$$R_s = (\Delta + \gamma) r_s^s + \gamma T_s^s \quad (8)$$

式中, ET 为总蒸散发 (mm/d); λ 为水汽化潜热 (MJ/kg); ET_c 和 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 和 C_s 分别为它们的权重系数; R_n 和 R_n^s 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, $c_p = 1.013 \times 10^{-3}$ MJ/(kg·°C); γ 为空气湿度常数 (kPa/°C); r_s^c 和 r_a^c 分别为冠层气孔阻力和冠层边界层阻力 (s/m); r_s^s 和 r_a^s 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_s^s 为土壤表面阻力 (s/m)。模型参数化见文献 [8], 所需的原始数据包括气象数据 (气温、水汽压、云量和风速) 和植被数据 (NDVI、LAI、植被覆盖类型)。

2 研究区域和数据来源

韩江流域位于 115°13′ - 117°09′E、23°17′ - 26°05′N 范围, 覆盖广东东部、福建西南部、江西东南部共 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它干支流谷地; 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, 11 802, 3 346 和 1 035 km² (图 1(a))。

气象数据包括平均气温, 最高、最低气温, 水汽压, 云量和风速, 采用 CRU (Climate Research Unit at University of East Anglia in UK) 月时间序列数据集, 空间分辨率 0.5°, 覆盖全球。NDVI 采用 NASA (National Aeronautics and Space Administration) NOAA-AVHRR NDVI 数据集, 包括旬数据和月数据, 空间分辨率 8 km, 覆盖全球。下载的 AVHRR NDVI 数据已经过几何、辐射、大气等校正处理, 为旬和月最大合成值, 减少了云、大气、太阳高度角等的影响。LAI 使用 SiB2 方法^[10] 由 NDVI 反演得到。植被覆盖采用 USGS GLCC IGBP (International Geosphere-Biosphere Program, Global Land Cover Characteristics, United States Geological

Survey) 数据集, 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%。

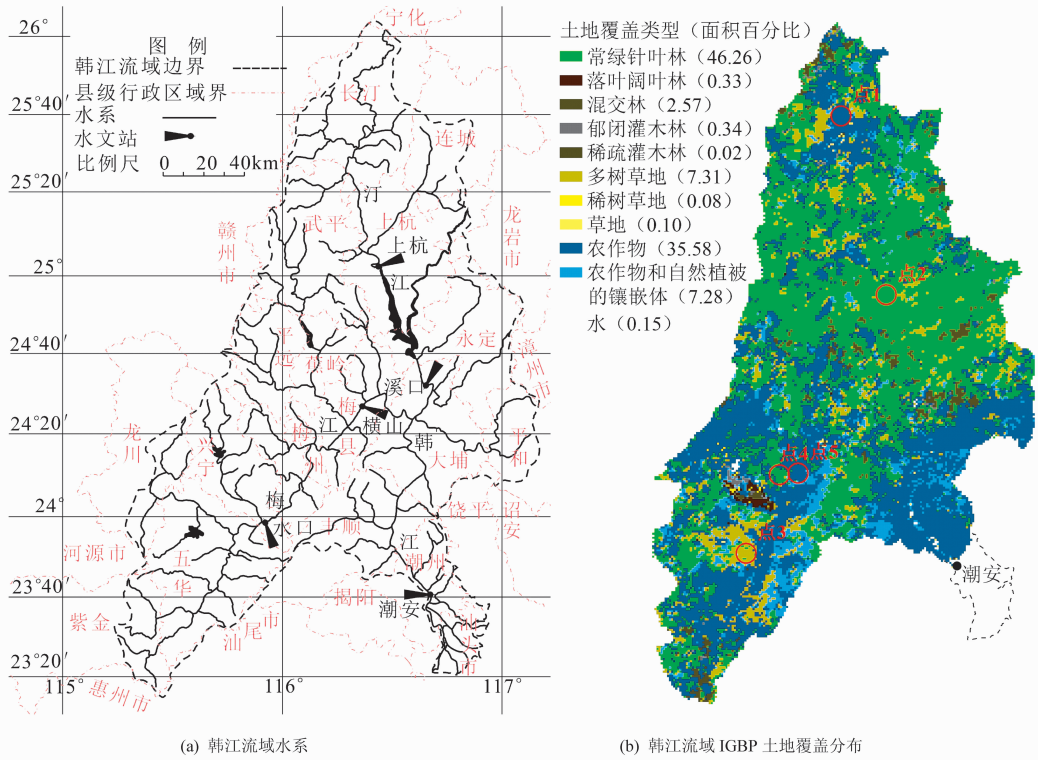


图 1 韩江流域水系及 IGBP 土地覆盖分布

Fig. 1 Drainage networks and IGBP land cover in Hanjiang river basin

3 结果分析

3.1 韩江流域 PET 计算结果

由月 NDVI, 得到韩江流域 1981 - 2000 年的 PET 变化曲线如图 2 所示, 多年平均为 1 146 mm/a, 标准差 (STDEV) 为 59.7 mm, 相对标准差 (RSD, 与多年平均值之比) 为 5.2%, 见表 1。图 3 是流域多年平均 PET 的空间分布, 最小出现在流域北部汀江上游的农作物地, 仅 715 mm/a, 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 PET 最小; 最大出现在兴宁市和山岩水库, 1 571 mm/a, 因为该处纬度较高, 太阳辐射较强, 且为水面蒸发, 所以 PET 最大。流域 PET 空间分布呈显著的非均匀性, 主要受土地覆盖类型和地理位置影响。另外, 输入数据的时间、空间分辨率对 PET 的估算精度也有较大影响。

3.2 植被类型对 PET 的影响

在流域中选取 3 个代表不同植被的点: 点 1 汀江上游的农作物, 点 2 汀江中游的常绿针叶林, 点 3 梅江上游的多树草地, 如图 1(b) 所示。各点在

1981 - 2000 年的 PET 变化如图 2 所示, 其多年平均值两两相差约 200 mm/a, 点 2 最大, 点 3 最小, 见表 1。从地理位置上看, 点 3 的纬度最低, 点 2 次之, 一般来讲纬度越低太阳辐射越强, 但因点 3 是多树草地, 属矮小植被, PET 反而最小, 而点 2 是常绿针叶林, 属高大植被, PET 最大。尽管 3 个点的地理位置和植被类型不同, 但它们的 RSD 几

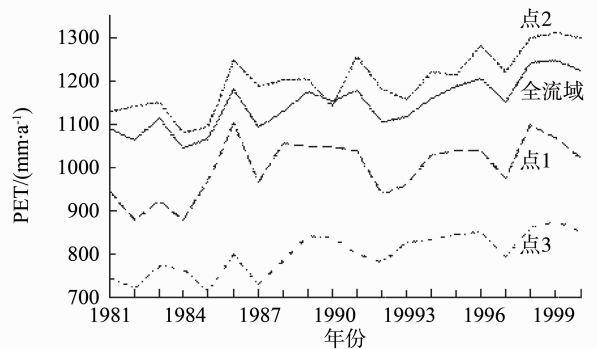


图 2 1981 - 2000 年韩江流域及代表点 PET 变化

Fig. 2 Annual PET over Hanjiang river basin and at specific points in 1981 - 2000

乎在同一水平, 同时又都略大于全流域的平均值。这说明韩江流域不同植被对气候变化的响应是相类似的, 程度上存在微小差别, 其中常绿针叶林是多年生植被, LAI 较大且相对稳定, 所以气候变化对

其影响较其它植被小, RSD 较小。尽管不同土地覆盖对气候变化的响应程度存在差别, 但由于流域存在多种土地覆盖, 全流域平均就拉平了流域对气候变化响应程度, 使其 RSD 最小。

表 1 韩江流域及代表点的年 PET 特征值

Table 1 Characteristic values of annual PET over Hanjiang river basin and at some specific points

位置	全流域	点 1	点 2	点 3	点 4	点 5
经度	115°13' - 117°09'E	116°25'10.9"E	116°30'15.1"E	115°41'00.24"E	115°53'17.8"E	115°58'33.9"E
纬度	23°17' - 26°05'N	25°41'09.6"N	24°53'5.64"N	23°53'21.48"N	24°12'01.8"N	24°11'33.72"N
土地覆盖	常绿针叶林和农作物为主	农作物	常绿针叶林	多树草地	常绿针叶林	农作物
S-W 模型估算的 PET (mm/a) (月 NDVI)						
最小值 (年份)	1 043 (1984)	878 (1984)	1 082 (1984)	716 (1985)	1 253 (1984)	1 009 (1982)
最大值 (年份)	1 248 (1999)	1 101 (1986)	1 312 (1999)	876 (1999)	1 557 (1999)	1 242 (1998)
多年平均值	1 146	1 001	1 201	801	1 406	1 136
STDEV (RSD)	59.7 (5.2%)	66.9 (6.7%)	67.8 (5.6%)	49.1 (6.1%)	88.6 (6.3%)	67.2 (5.9%)
S-W 模型估算的 PET (mm/a) (旬 NDVI)						
多年平均值	1 070	910	1 152	756	1 331	1 043
Thornthwaite 公式估算的 PET (mm/a)						
多年平均值	1 015	979	1 018	1 071	1 110	1 110
STDEV (RSD)	28.7 (2.8%)	25.7 (2.6%)	29.6 (2.9%)	35.2 (3.3%)	35.7 (3.2%)	35.7 (3.2%)
FAO-56 方法估算的 RET (mm/a)						
多年平均值	1 068	1 022	1 067	1 113	1 145	1 140
STDEV (RSD)	39.4 (3.7%)	36.6 (3.6%)	38.9 (3.6%)	47.7 (4.3%)	42.6 (3.7%)	42.8 (3.8%)

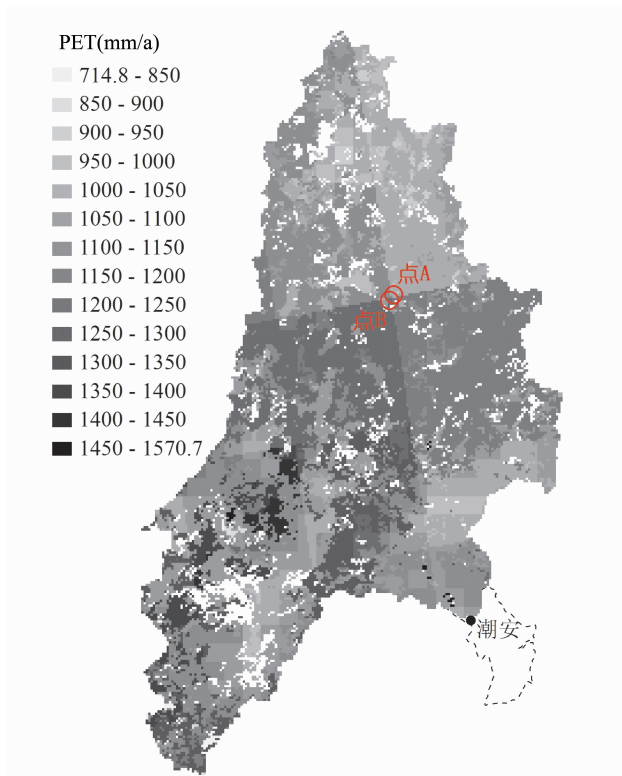


图 3 韩江流域 1981 - 2000 年的平均 PET 分布

Fig. 3 Annual PET over Hanjiang river basin averaged in 1981 - 2000

如图 2 所示, 虽然 3 个点的 PET 大小处于不同水平, 变化幅度也有所差别, 但它们的变化具有同步性, 且与全流域的变化情况相似。只是点 2 的 PET 在 1990 年有明显下降, 点 2 植被覆盖为常绿针叶林, 常绿针叶林占全流域最大面积, 使得全流域该年的 PET 也略有下降。常绿针叶林属于多年生高大植被, 阳光和充足的水分有助于其生长, 蒸腾作用更强烈; 农作物和草地属于一年生矮小植被, 对阳光的需求不像森林那样强烈, 只要温度适宜、水分充足也能生长很好。分析气象数据发现, 1990 年降雨量较前后年份大, 相应地云量和水汽压也较高, 导致太阳辐射减少, 森林蒸腾作用减弱; 但该年的温度并不低, 在适宜的范围, 且水分充足, 农作物和草地生长良好, 蒸腾作用并没有减弱。

为排除地理位置的影响, 另选位置接近但植被不同的两点: 点 4 常绿针叶林和点 5 农作物, 都在兴宁市内, 如图 1(b) 所示。多年平均的 LAI 和 PET, 点 4 为 2.213 和 1 406 mm/a, 而点 5 为 0.994 和 1 136 mm/a。可见, 位于同一纬度上的两个点, 森林的 LAI 和 PET 比农作物的高出许多。

3.3 地理位置对 PET 的影响

点 1 和点 5 均为农作物, 处于不同纬度, 它们

的 LAI 和 PET 随季节的变化具有同步性, 如图 4 所示 (多年平均), 而且 LAI 大致反映韩江流域水稻种植两个时期, 即 3-7 月和 8-11 月。另一方面, 点 5 的 LAI 和 PET 全年都高于点 1, 说明韩江流域低纬度地区农作物生长较茂盛, LAI 较大; 纬度较低, 太阳辐射越强, PET 越大。

3.4 数据分辨率对 PET 的影响

3.4.1 NDVI 时间分辨率的影响 采用旬 NDVI, 各旬气象数据采用月值, 计算旬 PET。无论全流域, 还是不同植被, 计算结果与月 NDVI 计算的 PET 具有同步性, 但后者较前者大, 在 2-6 月相差明显, 其它月份则相差不多 (见图 5)。这是因

为月 NDVI 是由该月各旬 NDVI 的最大值合成, 旬 NDVI 是由日 NDVI 的最大值合成, 2-6 月阴雨天气多, 云量明显较其它月份的大, 云量对旬 NDVI 的影响较大, 所以这段时间的旬 NDVI 明显小于月 NDVI, 相应的 PET 也明显较小。对于不同植被, 在点 4 (森林) 月 NDVI 计算的 PET 比旬 NDVI 的大 75 mm/a, 而在点 5 (农作物) 月 NDVI 计算的 PET 比旬 NDVI 的大 93 mm/a, 说明 NDVI 时间分辨率造成的 PET 差异因植被类型而异。与森林植被相比, 农作物随季节动态生长快 (从苗期、分蘖、拔节、孕穗、乳熟、黄熟到收割), LAI 变化较快, PET 对 NDVI 时间分辨率更为敏感。

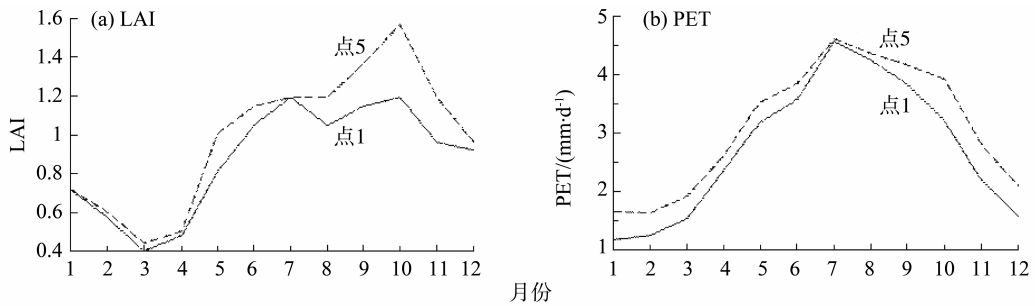


图 4 不同位置代表点 LAI 和 PET 的季节变化

Fig. 4 Seasonal change of LAI and PET at different sites

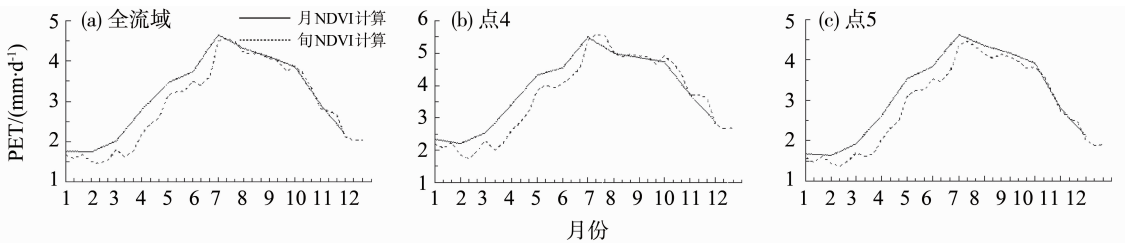


图 5 NDVI 时间分辨率对 PET 的影响

Fig. 5 Effects of NDVI temporal resolution on PET estimation

3.4.2 空间分辨率的影响 图 3 韩江流域 PET 的分辨率为 1 km, 与 IGBP 数据相同, 但明显呈块状分布。为了检查这种块状分布的原因, 在 PET 相差较大的块边界处选取植被相同的两点: 点 A 和点 B, 均为常绿针叶林, 相距约 3.1 km。两点靠近、植被相同是为了使太阳辐射和植被类型的影响最小。A、B 两点多年平均 PET 分别为 1 090 和 1 251 mm/a, 相差达到 161 mm/a。对比发现, PET “块” 恰恰与 CRU 气象数据 0.5° × 0.5° 网格重合。即 A、B 两点在 CRU 数据中处于相邻的两个网格, 它们的气象要素大小不同, 如多年平均气温分别为 17.8 和 19.7 °C, 相差近 2 °C; 多年平均水汽压和云量分别为 1.77 kPa、7.06 tenth 和 1.92 kPa、

7.03 tenth, 也有一定差异。FAO-56 方法为气象要素驱动力的综合反映 (见下节), 在 A、B 两点上计算的多年平均 RET 分别为 984 和 1 067 mm/a, 相差 83 mm/a, 其差别比 PET 小, 这是因为 RET 是参考作物 (12 cm 高的全覆盖草地) 的潜在蒸散发。高大的针叶林将草地参考作物所反映的气象驱动力 (RET) 放大了。另外, 各块中有一些马赛克, 这些 “马赛克” 与 NDVI 数据 8 km × 8 km 网格重合。可见, PET “继承” 了输入数据的空间分辨率。

3.5 与其它蒸散发估算方法的比较

将 S-W 模型 (月 NDVI) 与 Thornthwaite 公式^[1, 11]、FAO-56 方法^[3-4]比较, 计算结果见表 1。

除点 3 外, PET 值及其相对标准差 (RSD), Thornthwaite 公式最小, FAO-56 方法次之, S-W 模型最大 (点 5 的 PET 值与 FAO-56 方法几近相等, 略小)。这是因为 Thornthwaite 公式是温度经验公式, 仅考虑了单一气象因素, FAO-56 方法考虑了包括温度在内的各种气象因素 (如风速、水汽压、太阳辐射等), 而 S-W 模型不仅考虑了各种气象因素, 还考虑了土地覆盖类型和植被生长过程。比较 S-W 模型与 FAO-56 方法, 对于农作物 (点 1 和点 5), 两者估算值较接近; 但对于森林 (点 2 和点 4), S-W 模型的计算值较 FAO-56 方法大; 而对于草地 (点 3), S-W 模型的计算值又较 FAO-56 方法小。一方面这是因为 S-W 模型是双源模型, 冠层结构 (如植被高度、叶片宽度、郁闭度等) 对计算结果有较大影响。但更主要的原因是对于不同植被, S-W 模型采用不同冠层反射率, 并与植被的 LAI 相关联, 常绿针叶林和多树草地的冠层反射率相差较大, 它们的最大反射率 (冠层密闭区的反射率) 分别为 0.16 和 0.20^[8]。反射率越大冠层吸收的太阳辐射就越少, 腾发量就越小。由于全流域植被多为常绿针叶林, 草地面积很少, 所以在整个流域, S-W 模型的估算值高于 FAO-56 方法。

4 S-W 模型估算的 PET 在分布式水文模拟中的应用

对流域进行水文模拟, 除 PET 外, 还需要输入植被截留潜在蒸散发 PET_0 , 通过设定 S-W 模型中的 $r_s^c = r_s^s = 0$ 来估算。全流域多年平均 PET_0 为 6.4 mm/d, 远远高于植被截留蓄水容量^[8]。因此, 植被截留的实际蒸发为截留蓄水量所控制。分布式水文模型 BTOPMC^[12-14] 由地形、产流、汇流等子模型构成, 需要率定的模型参数包括土壤参数 (如饱和传导率、土壤干燥系数等) 和汇流参数 (如曼宁糙率系数)。模型的输入除 PET 和 PET_0 外, 还包括①降雨: 流域 193 个雨量站的实测日雨量; ②地形: 分辨率为 90 m 的 SRTM3 DEM; ③土

壤: FAO 数字土壤图。将整个流域分为 5 个子流域, 子流域出口对应 5 个水文站: 上杭、溪口、水口、横山和潮安, 见图 1(a)。水文模拟空间分辨率为 1 km, 时间步长为日, 每日的 PET 和 PET_0 取月平均值。

以 Nash-Sutcliffe 效率系数 ns 为目标函数^[15], 同时考虑模拟流量与实测流量的体积比 Vol, 产、汇流各阶段的水量平衡, 使用试错法率定模型参数。率定期 1981 - 1984 年, 验证期 1985 - 1988 年, 使用来自 5 个水文站的实测日流量数据。水文模拟的评价指标列于表 2, 率定期 5 个站的 ns 都在 80% 以上, Vol 超过 90%; 验证期 ns 稍差, 除上杭站外, ns 和 Vol 分别都超过 75% 和 90%。BTOPMC 对韩江流域的模拟有较高精度。以潮安站为例 (如图 6 所示), 模拟和实测结果吻合良好, 中小洪峰的模拟精度高, 大洪峰的模拟精度相对较低。

5 结 论

S-W 模型在韩江流域应用表明, 潜在蒸散发不仅受气候条件影响, 而且随植被类型及其生长过程而变化。与 Thornthwaite 公式和 FAO-56 方法相比, S-W 模型虽然复杂, 但由于其物理基础好, 能够反映地表的动态变化, 值得推荐。CRU 气象数据集、IGBP 土地覆盖、特别是反映植被形态随环境条件 (如长期水分胁迫) 和季节动态变化的卫星遥感 NDVI, 为 S-W 模型提供了大流域长时段的完整数据, 这些数据覆盖全球范围、公开免费使用。将 S-W 模型估算的 PET 和 PET_0 输入到分布式水文模型 BTOPMC, 实现了韩江流域的水文模拟。

由于 CRU 数据集的空间分辨率是 0.5°, 时间分辨率是月, AVHRR NDVI 的空间分辨率是 8 km, 时间分辨率最大是 10 d, 对潜在蒸散发的估算精度有一定的影响。要实现对中小流域的精确模拟, 还需寻求更高时空分辨率的气象数据和地面数据, 一种可能性是采用气象站实测资料和 MODIS 卫星遥感数据。

表 2 BTOPMC 在韩江流域的模拟评价

Table 2 Evaluation of BTOPMC in Hanjiang river basin modeling

水文站		上杭	溪口	水口	横山	潮安
率定期	ns	80.8	82.8	80.9	82.2	85.1
	Vol	91.1	93.9	96.8	98.5	94.1
验证期	ns	73.6	75.5	76.0	75.5	81.6
	Vol	89.1	92.3	96.1	97.5	97.2

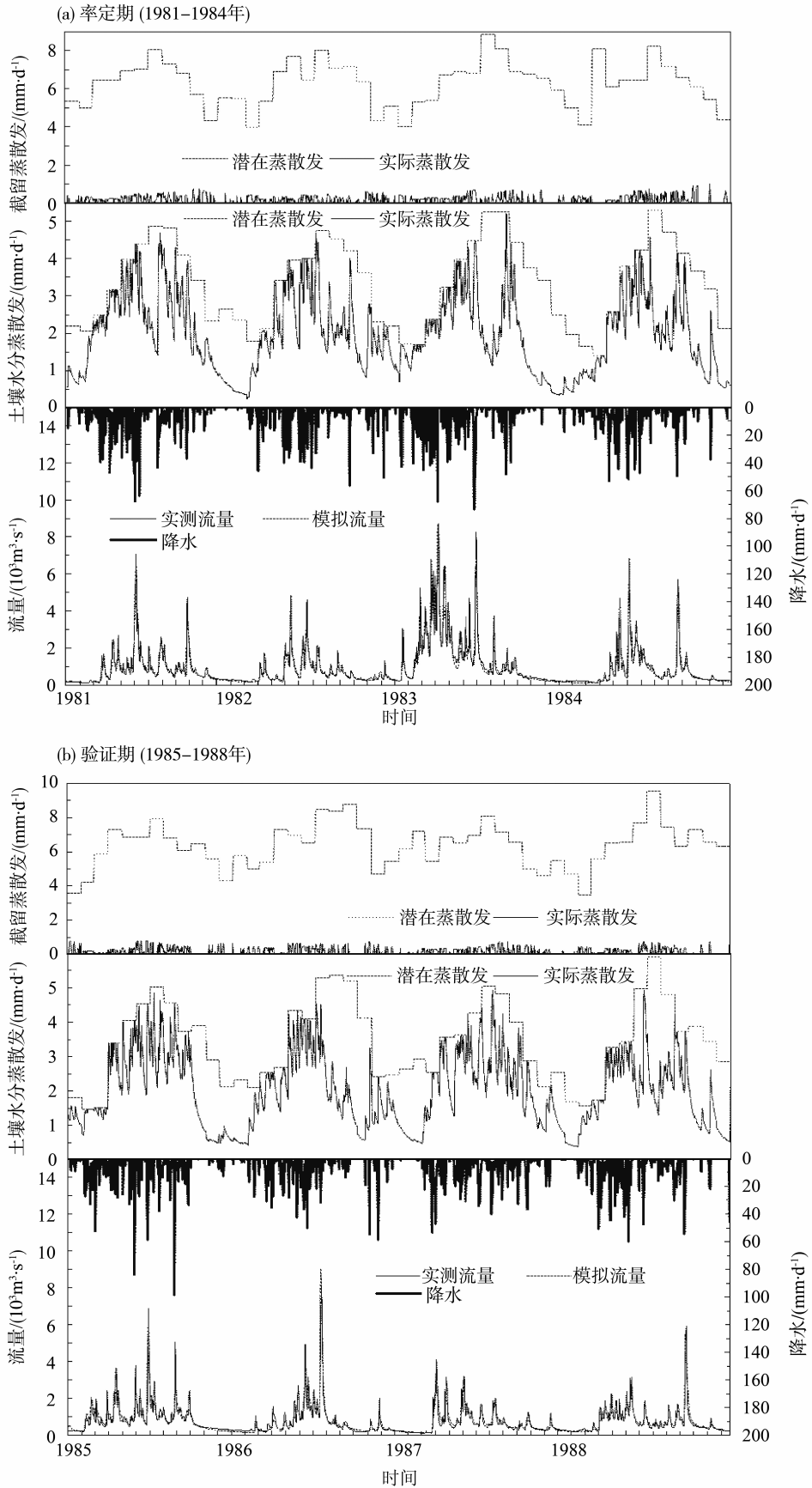


图 6 潮安站日流量模拟过程

Fig. 6 Daily streamflow simulation at Chao'an station

参考文献:

- [1] THORNTHWAITE C W. An approach toward a rational classification of climate[J]. *Geographical Review*, 1948, 38: 55 - 94.
- [2] PENMAN H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass [C]//Proceedings of royal society of London. Mathematical and Physical Sciences, 1948, Series A 193: 120 - 146.
- [3] MONTEITH J L. Evaporation and environment [C]//The state and movement of water in living organisms. Symposium of society for experimental biology. England: Cambridge University Press, 1965, 19: 205 - 234.
- [4] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, *et al.* Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements [R]. Roma: FAO Irrigation and Drainage Paper, 1998.
- [5] 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 (5): 6 - 11.
- [6] SHUTTLEWORTH W J, WALLACE J S. Evaporation from sparse crops-an energy combination theory [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1985, 111: 839 - 855.
- [7] IRITZ Z, LINDROTH A, HEIKINHEIMO M, *et al.* Test of a modified Shuttleworth-Wallace estimate of boreal forest evaporation [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 98/99: 605 - 619.
- [8] ZHOU M C, ISHIDAIRA H, HAPUARACHCHI H P, *et al.* Estimating potential evapotranspiration using the Shuttleworth-Wallace model and NOAA-AVHRR NDVI to feed a distributed hydrological modeling over the Mekong River Basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 327: 151 - 173.
- [9] ZHOU M C, 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.
- [10] 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.
- [11] WILLMOTT C J, ROWE C M, MINTZ Y. Climatology of the terrestrial seasonal water cycle [J]. *Journal of Climatology*, 1985, 5: 589 - 606.
- [12] TAKEUCHI K, AO T Q. Introduction of block-wise use of TOPMODEL and Muskingum-Cunge method for the hydro-environment simulation of a large ungauged basin [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 1999, 44 (4): 633 - 646.
- [13] AO T Q. Development of a Distributed Hydrological Model for Large River Basins and Its Application to Southeast Asian Rivers [D]. Kofu, Japan: University of Yamanashi, 2001.
- [14] TAKEUCHI K, HAPUARACHCHI H P, ZHOU M C, *et al.* A BTOP model to extend TOPMODEL for distributed hydrological simulation of large basins [J]. *Hydrological Processes*, 2008, 22(17): 3236 - 3251.
- [15] NASH J E, SUTCLIFFE J V. River flow forecasting through conceptual models, Part I: A discussion of principles [J]. *Journal of Hydrology*, 1970, 10(3): 282 - 290.