

半干旱地区蒸散发时间尺度扩展方法对比分析

翟劭燊¹, 王文种¹, 刘九夫^{1,2}, 王欢¹, 陆之昂¹

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京, 210029; 2. 水利部应对气候变化研究中心, 江苏 南京, 210029)

摘要: 蒸散发量(ET, evapotranspiration)的时间尺度扩展是遥感反演区域 ET 的关键。为评价由瞬时潜热通量经时间尺度扩展方法计算日蒸散发量的可靠性, 利用美国西南部半干旱地区的 Walnut Gulch 实验流域草地站点的波文比系统实测数据, 分析评价蒸发比法、简化蒸发比法、作物系数法、简化参考作物系数法、正弦关系法、冠层阻力法和修正冠层阻力法共 7 种蒸散发时间尺度扩展方法的估计效果, 统计结果显示, 7 种蒸散发时间尺度扩展方法总体趋势具有一致性, 存在着一定的规律性, 采用 10:00~14:30 的瞬时值估计较为接近实测蒸发值。正弦法、简化参考作物系数法及简化的蒸发比法的模拟精度较高(相对均方根误差在 20%左右), 比较适合于估算半干旱地区的日蒸散发量。对具有相近气象、气候、下垫面条件和空间尺度数据且具有充足气象观测资料的地区, 推荐采用基于简化作物系数的时间尺度扩展方法开展从小时到日的 ET 时间尺度扩展, 对于缺少气象观测资料的类似地区, 推荐采用正弦法和简化的蒸发比法进行时间尺度扩展。

关键词: 蒸散发量; 时间尺度扩展; 蒸发比; 作物系数; 正弦关系; 冠层阻力; 不确定性分析

中图分类号: S161.4+1

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2019)03-0008-07

遥感卫星可以提供空间连续的地表参数, 是模拟大范围地表蒸散发的有效途径, 比常规的气象学方法有着十分明显的优势^[1]。然而, 遥感卫星只能获取每日 1~2 次的过境时刻的瞬时值, 为了计算日蒸散发量, 须将遥感反演得到的瞬时潜热通量进行时间尺度扩展^[2]。研究者提出了多种蒸散发时间尺度扩展方法, 例如经验拟合法^[3]、正弦函数法^[4]、蒸发比法^[5-6]、作物系数法^[7]等, 这些时间尺度扩展方法在不同气候条件和下垫面条件下的适用范围和精度各不相同^[8-9]。目前根据遥感数据估算潜热通量进而计算日蒸散发量的研究有很多, Alves^[10]等对冠层阻力的研究结果显示其在日内变化不大。Colaizzi^[11]等对比基于蒸发比和作物系数法的 ET 时间尺度扩展方法, 发现两种方法针对不同下垫面的适用性存在差异。刘国水等^[12]对比基于蒸发比、作物系数法和冠层阻力法的 ET 时间尺度扩展方法研究结果表明, 不同的时间尺度扩展方法针对不同气候区、不同作物类型及空间尺度特性存在适用性上的差异。陈鹤^[13]对华北平原和东北平原下垫面进行蒸散发

时间尺度扩展方法比较和精度的结果表明, 采用的几种扩展尺度方法总体上具有一致性, 简化的蒸发比法的模拟精度最高, 更适合于估算中国北方典型农田的日蒸散发量。夏浩铭等^[14]系统介绍了遥感反演蒸散发时间尺度拓展方法, 总结了每种方法的基本原理、优缺点、适用性和误差来源, 对比了不同时间尺度拓展方法估算精度, 并对遥感反演蒸散发时间尺度拓展方法的发展趋势进行了探讨。

为此, 有必要在特定气候及下垫面条件下, 对基于蒸发比、简化蒸发比、作物参考系数、简化作物参考系数、正弦比法、冠层阻力法和修正冠层阻力法的 ET 时间尺度扩展方法应用效果进行分析比较, 探讨分析几种方法的适用性和稳定性。上述扩展方法基于类似理论假设, 即分别假定各参数在日内变化较为稳定且日内值与日均值接近。因此, 本文采用美国西南部半干旱地区的 Walnut Gulch 实验流域草地、裸土站点的波文比系统观测数据, 分析蒸发比、简化蒸发比、作物参考系数、正弦比法和冠层阻力等参数日内的变异

收稿日期: 2018-02-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579148)

作者简介: 翟劭燊(1983-), 男, 河南长垣人, 博士研究生, 主要从事遥感水文应用研究。E-mail: 283995938@qq.com

性,并对比 7 种 ET 时间尺度扩展方法扩展结果,探讨适宜干旱、半干旱下垫面条件下 ET 时间尺度扩展方法。

1 研究区域概况及扩展方法

1.1 研究区域概况

Kendal 站位于 31°44'10"N,110°44'10"W,平均高程为 1526m,仪器在地面 1.03m 上,位于草地和裸露地表之上。站点所在流域位于索诺兰沙漠和齐瓦瓦沙漠之间的过渡地带,属于半干旱地区,平均年气温 17.7°C,平均年降水量 350mm,平均每年有 53d 降雨,60%以上的降雨集中在 7、8、9 月份。

1.2 数据处理方法

波文比综合观测系统,利用地表能量平衡方程和空气动力学方程计算波文比,得到净辐射在生态系统内部的分配比及规律。物理概念明确,计算方法简单,通常情况下测量精度较高。可采集温度、湿度、风向、风速、太阳辐射、雨量、气压、光照度、土壤温度、土壤湿度。Hatfield 等^[19]研究表明系统运作正常且精度符合要求。本文剔除波文比在 -0.75~-1.25 间数据^[10]、降雨日和观测数据记录异常观测数据得到晴朗无云日数据作为本研究和分析样本。本研究以 Kendal 草地站点为例采用残余法对能量不闭合问题进行处理后闭合度为 0.85。采用当日内的 9:00~15:30 作为典型时段,分析观测数据对不同 ET 时间尺度扩展计算结果的影响。

1.3 时间尺度扩展方法

总结已有研究文献,本文采用简化的蒸发比法、简化的参考作物系数法以及目前常用的蒸散发时间尺度扩展方法进行对比。

1.3.1 蒸发比法

蒸发比法的基本假设前提是能量平衡方程中各组分之间的比例保持不变^[17],即是一个恒定的值。其发展经历了考虑土壤热通量的蒸发比法和简化的蒸发比法。

蒸发比^[6](Evaporative Fraction, EF)定义为:瞬时潜热通量与有效能量之间的比值^[18-19]:

$$EF_i = \frac{LE_i}{(R_{n,i} - G_i)} = \frac{\lambda ET_i}{(R_{n,i} - G_i)} \quad (1)$$

假定蒸发比在白天恒定不变,则蒸发比法计算日蒸散发公式为:

$$ET = 86400 \frac{EF_i}{\lambda} (R_n - G) \quad (2)$$

式中:下标 i 为瞬时值;EF_i 为小时尺度蒸发比;LE_i、λET_i 为小时尺度潜热通量(J·m⁻²·s);R_{n,i} 为小时尺度净

辐射(J·m⁻²·s);G_i 为小时尺度土壤热通量(J·m⁻²·s);ET 为日蒸散发量(mm/d);λ 为汽化潜热(J/kg);R_n 为日净辐射(J·m⁻²·s);G 为日土壤热通量(J·m⁻²·s)。

1.3.2 简化的蒸发比法

假定土壤热通量在一天内的均值为 0^[12,17],减小土壤热通量计算不确定性带来的误差。简化后的蒸发比为:

$$EF_i = \frac{LE_i}{R_{n,i}} = \frac{\lambda ET_i}{R_{n,i}} \quad (3)$$

$$ET = 86400 \frac{EF_i}{\lambda} R_n \quad (4)$$

式中参数同式(1)~(2)。

1.3.3 参考作物系数法

Allen 等^[20]研究发现,实际蒸发与参考作物的比值也即作物系数在日内变化较小。当蒸发比法中的有效能量为参考作物的蒸散发时,称之为作物系数法^[7,20]。

作物系数^[20]K_c 定义为瞬时蒸散发与参考作物蒸发量的比值^[21-22]:

$$K_{c,i} = \frac{ET_i}{ET_{0,i}} \quad (5)$$

式中:ET_i 为瞬时蒸散发,由瞬时潜热通量经过单位换算得到;ET_{0,i} 为参考作物蒸发量,具体公式可参考文献[7]。

假定作物系数在白天恒定不变,则日蒸散发量 ET 可由下式计算:

$$ET = K_c ET_0 \quad (6)$$

1.3.4 简化的参考作物系数法

采用段铮等^[23]提出的参考作物蒸发量公式为:

$$ET_{0,j} = \frac{\Delta (R_n - G)}{0.85 \Delta + \gamma 0.63} \quad (7)$$

1.3.5 正弦关系方法

正弦关系法由 Jackson^[4]提出,与太阳短波辐射计算类似,假定瞬时潜热通量在日内呈现正弦变化的趋势^[24],由下面公式计算:

$$J = \frac{ET_i}{ET_d} = \frac{\pi}{2n} \sin(\pi t/n) \quad (8)$$

$$ET_d = LE_i \cdot \frac{2n}{\pi \sin(\pi t/n)} \cdot \frac{86400}{\lambda} \quad (9)$$

式中:t 为日内时刻;n 为白昼时间,具体的计算公式可以参考文献[8,25-28]。

1.3.6 基于冠层阻力方法

Alves^[10]和 Farah 等^[29]研究发现,冠层阻力的日内变化不大,具有一定的稳定性。很多学者利用此特性进行日尺度扩展研究^[30-31]。根据 Penman-Monteith 公式反推出冠层阻力计算公式,ET 基于冠层阻力的 ET 时间尺度扩展方法^[30,32]为:

$$r_{ah,i} = \frac{\ln\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)}{u_* \cdot k} = \frac{\ln\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right) \ln\left(\frac{Z_2}{Z_{som}}\right)}{u_* \cdot k^2} \quad (10)$$

$$r_{s,i} = r_{ah,i} \left[\frac{1}{\gamma} \left(\frac{\Delta(R_n - G) + \rho_i \cdot C_p \cdot (e_{s,i} - e_{a,i})/r_{ah}}{\lambda ET_i} - \Delta_i \right) - 1 \right] \quad (11)$$

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho \cdot C_p \cdot (e_s - e_a)/r_{ah}}{\Delta + \gamma(1 + r_{s,i}/r_{ah})} \quad (12)$$

式中: $r_{s,i}$ 为小时尺度表面冠层阻抗 (s/m); $r_{ah,i}$ 为小时尺度空气动力学阻抗 ($s \cdot m^{-1}$); 其他参数见参考文献[30, 32]。

1.3.7 基于修正的冠层阻力 r_s 方法

刘国水等^[12]研究发现, 不同时段内的冠层阻力扩展得到的日蒸发与实测数据相关性显著。但是日内冠层阻力计算过程未考虑对空气动力学阻力进行稳定度修正^[33], 日内变异性较大。基于修正冠层阻力的 ET 时间尺度扩展方法为:

$$r_{ah,i} = \frac{\ln\left(\frac{2-d}{Z_{som}}\right) \ln\left(\frac{2-d}{Z_{zoh}}\right)}{k^2 u_2} \quad (13)$$

$$r_{s,i} = r_{ah,i} \left[\frac{1}{\gamma} \left(\frac{\Delta(R_n - G) + \rho_i \cdot C_p \cdot (e_{s,i} - e_{a,i})/r_{ah}}{\lambda ET_i} - \Delta_i \right) - 1 \right] \quad (14)$$

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho \cdot C_p \cdot (e_s - e_a)/r_{ah}}{\Delta + \gamma(1 + r_{s,i}/r_{ah})} \quad (15)$$

式中: d 为零平面位移, 一般取值 $0.01m$; 其他参数及取值见前文注释。

1.4 时间尺度扩展方法检验及评价指标

为了定量评价 7 种蒸散发时间尺度扩展方法的模拟结果, 本研究利用相关系数 r 和 t 检验等方法对 ET 时间尺度扩展值进行统计分析, 采用线性拟合的斜率(a)、截距(b)、相关系数(r)、绝对平均误差 MAE、均方根误差 RMSE 以及拟合效率系数 ε 作为评价指标^[11], 检验不同时间尺度扩展方法的估算效果。

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |ET_{p,i} - ET_{obs,i}| \quad (16)$$

$$RMSE = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (ET_{p,i} - ET_{obs,i})^2 \right)^{1/2} \quad (17)$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (ET_{p,i} - ET_{obs,i})^2}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (|ET_{p,i} - \overline{ET_p}| + |ET_{obs,i} - \overline{ET_{obs}}|)^2} \quad (18)$$

式中: $ET_{obs,i}$ 为观测值; $ET_{p,i}$ 为模拟值; $\overline{ET_{obs}}$ 为观测值均值; $\overline{ET_p}$ 为模拟值的均值; N 为样本数; ε 为拟合指数, 越接近 1 表示模拟的结果越好。

2 结果与分析

2.1 蒸散发时间尺度扩展日内变异性分析

采取上文介绍的 7 种日尺度扩展方法, 对观测站点 2007~2015 年的观测数据进行计算, 每种方法选取 9:00~15:30 共 14 个时刻分别进行尺度扩展, 并与观测站实测的日蒸散发进行线性拟合, 拟合结果如表 1 所示。

从表 1 中可以看出, 7 种方法在该站点的拟合斜率在日内呈现稳定趋势, 但是在 12:00~13:00 点左右, 拟合斜率发生较大变化, 这说明 7 种尺度扩展方法对采用不同时刻瞬时值估算日蒸散发量的计算结果具有很大的差异性。

7 种扩展方法拟合后的截距方面, 上午的瞬时值进行扩展结果的拟合截距都较小, 均小于 0.1; 下午的瞬时值进行扩展结果的拟合截距在 12:30 和 15:00 偏大。而从拟合的确定性系数来看, 7 种方法均呈现出中午高、上午和下午低的特点。表 1 的统计结果显示, 蒸散发时间尺度扩展方法存在着一定的规律性, 即采用 10:00~14:30 的瞬时值估计较为接近实测蒸发值, 上午 10:00 前瞬时估计可能造成日蒸散发被低估, 而采用下午 14:00 时刻的瞬时值变化剧烈, 可能造成日蒸散发估算偏差过大。

2.2 蒸散发时间尺度扩展结果对比分析

对比 7 种时间尺度扩展方法模拟结果, 绝对误差分布在 $0.1mm \sim 0.26mm$, 从图 1 可以看出, 采用不同时刻瞬时值的日蒸散发模拟结果呈现平稳趋势, 日内变化规律不明显, 总体来看日内呈现微弱单调递增的关系, 存在明显的系统偏差, 但呈现早晚略高、中午高和上午、下午低趋势。尤其在中午时刻, 蒸发比法和参考作物法计算的绝对误差差异发生剧烈变化, 而其他几种方法计算的绝对误差差异表现平稳, 但在下午时段, 均呈现出明显升高的特点。下午 15:00 偏差均发生较为强烈的变化, 但是误差基本在 $0.20mm$ 附近。对比 7 种方法的模拟结果进行比较, 总体上 7 种方法的模拟结果与实测值吻合较好, 波动不大, 表现出了较强的一致性和规律性; 修正冠层法在绝大多数时段模拟结果总体高于其他几种方法, 模拟的误差较小, 且对于不同时刻的瞬时值均具有较好的适应性; 而简化

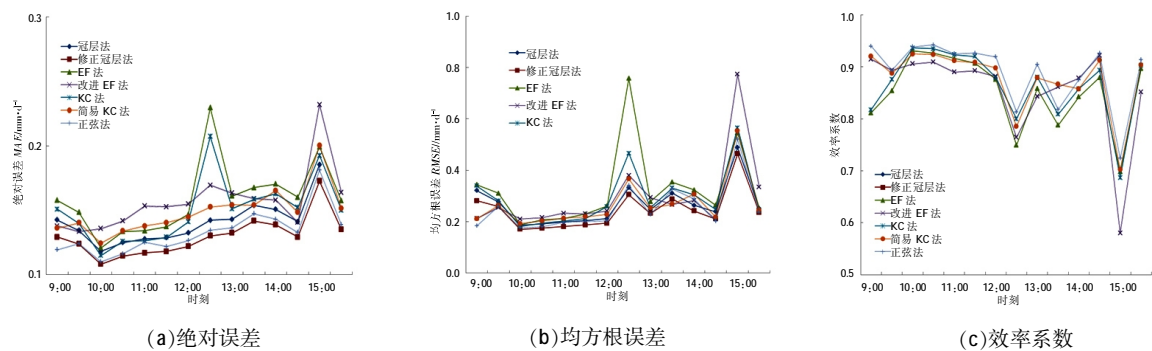


图 1 7 种时间尺度扩展方法结果对比分析

Fig.1 The results comparsion analysis of the 7 tempoal scale expansion methods

表1 7种尺度扩展计算日蒸散发拟合结果

Table1 The fitting results of the 7 temporal scale expansion calculation and daily ET

日内时刻	9:00	9:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	
斜率a	EF 法	0.8718	0.8675	1.0945	0.9895	1.0763	1.0319	1.0611	0.8664	1.0827	0.9675	0.9276	1.0398	0.6611	0.9951
	简化EF 法	1.0648	0.9463	1.2280	1.1191	1.1846	1.1873	1.1820	0.9369	1.0625	1.1251	0.9326	1.0847	0.5098	0.8304
	KC 法	0.8727	0.8918	1.0929	0.9944	1.0746	1.0388	1.0482	0.9414	1.0908	0.9923	0.9403	1.0493	0.6444	0.9952
	简易KC 法	1.0010	0.9223	1.1533	1.0564	1.1231	1.1102	1.1422	0.9219	1.1110	1.0781	0.9277	1.1019	0.6445	0.9757
	正弦法	1.0074	0.9111	1.1166	1.0298	1.1129	1.0667	1.1404	0.9317	1.0945	0.9684	0.9301	1.0877	0.6675	0.9559
	冠层法	0.8978	0.9026	1.1322	1.0511	1.1084	1.0835	1.1412	0.9572	1.0955	1.0092	0.9769	1.0330	0.6910	0.9580
	修正冠层法	0.9296	0.9127	1.1228	1.0523	1.1075	1.0806	1.1317	0.9751	1.0917	1.0201	0.9899	1.0497	0.7089	0.9650
	截距b	EF 法	0.0665	0.0645	0.0065	0.0350	0.0328	0.0506	0.0600	0.4851	0.0736	0.1058	0.1272	0.0849	0.1954
简化EF 法		0.0197	0.0500	0.0007	0.0250	0.0311	0.0313	0.0327	0.1314	0.0770	0.0517	0.0968	0.0579	0.2233	0.1141
KC 法		0.0636	0.0518	0.0038	0.0297	0.0285	0.0437	0.0609	0.4554	0.0626	0.0904	0.1164	0.0758	0.2028	0.0855
简易KC 法		0.0199	0.0447	-0.0014	0.0233	0.0273	0.0340	0.0327	0.1191	0.0589	0.0581	0.1157	0.0571	0.1830	0.0822
正弦法		0.0127	0.0481	0.0035	0.0250	0.0220	0.0371	0.0210	0.1052	0.0491	0.0912	0.1046	0.0485	0.1703	0.0799
冠层法		0.0624	0.0536	0.0015	0.0190	0.0254	0.0337	0.0254	0.1006	0.0544	0.0815	0.0862	0.0747	0.1575	0.0853
修正冠层法		0.0454	0.0470	-0.0009	0.0147	0.0191	0.0279	0.0214	0.0847	0.0476	0.0687	0.0738	0.0601	0.1479	0.0760
相关系数		EF 法	0.8138	0.8603	0.9452	0.9279	0.9287	0.9150	0.8922	0.7750	0.8833	0.8014	0.8613	0.8981	0.7647
	简化EF 法	0.9247	0.8944	0.9590	0.9309	0.9321	0.9350	0.9241	0.7821	0.8652	0.8927	0.8895	0.9400	0.7333	0.8755
	KC 法	0.8199	0.8794	0.9501	0.9360	0.9346	0.9277	0.8934	0.8221	0.9031	0.8218	0.8745	0.9103	0.7605	0.9157
	简易KC 法	0.9218	0.8887	0.9538	0.9316	0.9342	0.9290	0.9274	0.7974	0.9063	0.8865	0.8740	0.9349	0.7811	0.9135
	正弦法	0.9409	0.8955	0.9568	0.9457	0.9437	0.9371	0.9449	0.8228	0.9240	0.8275	0.8888	0.9426	0.7941	0.9224
	冠层法	0.8340	0.8814	0.9539	0.9395	0.9423	0.9366	0.9388	0.8277	0.9078	0.8435	0.8987	0.9169	0.8076	0.9101
	修正冠层法	0.8678	0.8952	0.9619	0.9495	0.9537	0.9466	0.9200	0.9200	0.9200	0.9200	0.9200	0.9200	0.9200	0.9200
	相对误差/%	EF 法	11.56	7.90	-4.73	0.21	-12.19	-10.17	-14.62	-2.88	-18.91	-15.13	-19.42	-19.29	-5.45
简化EF 法		-4.32	-0.07	-14.07	-9.28	-17.19	-18.28	-18.82	-17.21	-17.37	-18.34	-13.74	-18.65	13.80	-8.17
KC 法		11.66	7.70	-4.51	0.20	-12.09	-9.83	-14.35	-2.37	-18.43	-14.84	-20.07	-19.73	-5.24	-19.13
简易KC 法		11.61	7.70	-4.50	0.25	-12.09	-9.78	-14.33	-2.34	-18.40	-15.03	-20.02	-19.74	-5.25	-19.09
正弦法		11.49	7.71	-4.56	0.53	-11.99	-9.73	-14.33	-2.35	-18.37	-15.04	-20.05	-19.61	-5.25	-19.16
冠层法		11.38	7.75	-4.78	0.54	-12.03	-10.19	-14.21	-2.48	-18.29	-15.03	-19.97	-19.57	-5.11	-19.04
修正冠层法		11.37	7.67	-4.94	0.38	-12.09	-10.36	-14.14	-2.38	-18.08	-15.17	-19.91	-19.62	-5.03	-18.97

的蒸发比法在整体模拟值略高,总体上模拟误差低于其他几种方法。

图 1(b)是扩展结果均方根误差的对比结果,随瞬时值时刻的变化呈现出显著的规律性,均呈现出早晚高,中午高的双峰规律,进一步印证了图 1(a)中所阐释的尺度扩展方法对不同模拟时刻的偏差走势规律。具体来看,采用上午 9:00 时刻~正午时刻和 13:00~14:30 时刻的相对均方根相对较高,10:00 时刻的模拟值的相对均方根误差最低,上午的模拟结果的相对均方根误差较下午明显减小。从数值上看,采用上午至正午时刻的模拟结果的均方根误差在 0.2mm 左右,其中以修正的冠层阻力法扩展结果的误差最小,简化蒸发比法相对于蒸发比法、简易参考作物系数法相对于参考作物系数法、修正的冠层阻力法相对于冠层阻力法进行时间扩展结果均有显著改善,这与图 1(a)的结果一致。

图 1(c)是扩展结果效率系数的对比结果,效率系数对不同的瞬时时刻的规律与前面统计结果一致。在 10:00~正午 12:00 时刻效率系数最高,上午逐渐减小;而中午 12:30 的效率系数出现一个波谷,小于临近的上午和下午时刻;下午效率系数出现双峰、双谷,波动较大。根据 7 种方法的横向比较,效率系数呈现相同的规律。但是在上午时段表现比较稳定,下午时段的效率系数显著低于上午时段出现较大波动。

整体来看,7 种方法在日内各瞬时时刻扩展估算过程中的效率系数在 10:00~12:00 保持稳定且能维持较高的水平,大部分均在 90%以上。

表 1 中列出典型日内不同瞬时时刻尺度扩展估算值与实测结果间相误差变化过程,EF 法、简化 EF 法、KC 法、简易 KC 法、正弦法、冠层法和修正冠层法的日 ET 尺度扩展方法的平均相对误差分别为 -8.76%、-11.55%、-8.65%、-8.65%、-8.62%、-8.65%和 -8.66%,这表明几种方法的时间尺度扩展效果差别不大。但是日内相对误差过程下午时段增大但是最大误差在 20%,上午 10:30 和中午 12:30 的相对误差最小。

2.3 时间尺度扩展方法精度评价

目前常用的卫星数据产品的过境时间均为上午或者下午(上午 10:00 或下午 14:00),因此,有必要对卫星过境时刻的瞬时值进行尺度扩展的精度进行分析。为此,本节以精度相对较高的修正冠层阻力法进行精度评价,分别选取上午 10:00 和下午 14:00 典型卫星过境时刻尺度扩展分析说明。

从表 1 中可以看出,总体来说模拟值与观测值吻

合较好,离散程度不高,采用上午卫星模拟的日蒸散发量略大于观测值,拟合斜率均在 0.9 以上,最小值为 0.91,最大值为 1.13;采用下午卫星模拟的日蒸散发量总体上略小,离散程度略大,拟合斜率的最小值为 0.71,最大值为 1.09。总体上,10:00~15:00 的扩展模拟结果与实测值的一致性较好,离散程度不大。上午 10:00 卫星过境时刻的日蒸散发量大于观测值,拟合斜率 1.12,下午 14:00 卫星过境时刻的日蒸散发量略很接近观测值,拟合斜率 0.99。

根据对蒸散发尺度扩展的精度分析可以总结出,模拟值与实测值的一致性较好,离散程度不大;采用上午卫星的模拟结果略大,采用下午卫星的模拟结果接近,原因可能是遥感蒸散发时间尺度扩展方法中隐含的蒸发比在日内保持不变的假定不成立。

3 结论

本文选取美国西部半干旱地区草地植被类型作为研究对象,基于 2007~2015 年的实测数据,采用 7 种蒸散发时间尺度扩展方法进行蒸发估算,并与观测值进行对比和验证估算效果,主要结论如下:

在估算日蒸散发量时,7 种方法在总体上具有一致性,均能取得较理想的效果,估算的日蒸散发量精度较高(相对误差最大约为 20%),但是简化的蒸发法、简化的参考作物系数法和基于修正的冠层阻力法分别对相应的未做简化的方法有明显提高。相同下垫面条件下,不同瞬时时刻模拟精度不同,中午时刻的瞬时值模拟精度最高,这与以往学者研究结论一致^[8, 28]。

针对不同卫星过境时间,基于修正的冠层阻力法的稳定性最高。在实际应用中,参考作物法、冠层阻力法几种计算方法对气象数据要求较多,对与文中研究区域具有类似气象、气候、下垫面条件的地区,推荐采用正弦关系法及简化的蒸发比法进行日时间扩展。

参考文献:

- [1] Li Z L. A review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation from remotely sensed data [J]. Sensors, 2009, 9(5):3801.
- [2] Hoedjes J C B, Chehbouni A, Jacob F, et al. Deriving daily evapotranspiration from remotely sensed instantaneous evaporative fraction over olive orchard in semi-arid Morocco [J]. Journal of Hydrology, 2008, 354(1-4):53-64.
- [3] Jackson R D, Reginato R J, Idso S B. Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements [J]. Water Resources Research, 1977, 13(3):651-656.

- [4] Jackson R D, Hatfield J L, Reginato R J, et al. Estimation of daily evapotranspiration from one time-of-day measurements [J]. *Agricultural Water Management*, 1983,7(1-3):351-362.
- [5] Kustas W P, Schmugge T J, Humes K S, et al. Relationships between evaporative fraction and remotely sensed vegetation index and microwave brightness temperature for semiarid rangelands [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1993,32(1993):1781-1790.
- [6] Shuttleworth W J, Gurney R J, Hsu A Y, et al. FIFE: the variation in energy partition at surface flux sites [A]. *Remote Sensing and Large-Scale Global Processes*[C]. IAHS Publication,1989.
- [7] Allen R G. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements[J]. *Fao Irrigation & Drainage Paper*, 1998,56.
- [8] Zhang L, Lemeur R. Evaluation of daily evapotranspiration estimates from instantaneous measurements[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 1995,74(1-2):139-154.
- [9] Chehbouni A, Joostcb H, Juliocesar R, et al. Using remotely sensed data to estimate area-averaged daily surface fluxes over a semi-arid mixed agricultural land [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2008,148(3):330-342.
- [10] Alves I, Perrier A, Pereira L S. Aerodynamic and surface resistances of complete cover crops: how good is the "big leaf"[J]. *Transactions of the Asae*, 1998,41(2):345-351.
- [11] Colaizzi P D, Evett S R, Howell T A, et al. Comparison of five models to scale daily evapotranspiration from one-time-of-day measurements [J]. *Transactions of the Asabe*, 2006,49(5):1409-1417.
- [12] 刘国水,刘钰,许迪. 基于涡度相关仪的蒸散量时间尺度扩展方法比较分析[J]. *农业工程学报*, 2011,27(6):7-12.(LIU Guoshui,LIU Yu, XU Di. Investigation on performance of evapotranspiration temporal upscaling methods based on eddy covariance measurements [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011,27(6):7-12. (in Chinese))
- [13] 陈鹤,杨大文,吕华芳.不同作物类型下蒸散发时间尺度扩展方法对比[J]. *农业工程学报*, 2013,29(6):73-81.(CHEN He, YANG Dawen, LV Huafang. Comparison of temporal extrapolation methods for evapotranspiration over variant underlying croplands [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2013,29(6):73-81. (in Chinese))
- [14] 夏浩铭,李爱农,赵伟,等. 遥感反演蒸散发时间尺度拓展方法研究进展[J]. *农业工程学报*, 2015,31(24):162-173.(XIA Haoming, LI Ainong, ZHAO Wei, et al. Review of temporal scale expansion for evapotranspiration retrieved by remote sensing data [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015,31(24):162-173. (in Chinese))
- [15] Barr A G, King K M, Gillespie T J, et al. A comparison of Bowen ratio and eddy correlation sensible and latent heat flux measurements above deciduous forest [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1994,71(1):21-41.
- [16] Ohmura A. Objective criteria for rejecting data for Bowen ratio flux calculations[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1982,21(21):595-598.
- [17] Chemin Y, Alexandridis T. Improving Spatial Resolution of ET Seasonal for Irrigated Rice in Zhanghe, China [A]. *22nd Asian Conference on Remote Sensing*, 2001:5.
- [18] 王春梅,王鹏新,朱向明,等. 区域蒸散和表层土壤含水率遥感模拟及影响因子[J]. *农业工程学报*, 2008,24(10):127-133. (WANG Chunmei, WANG Pengxin, ZHU Xiangming, et al. Estimations of evapotranspiration and surface soil moisture based on remote sensing data and influence factors [J]. *Transactions of the CSAE*, 2008,24(10):127-133. (in Chinese))
- [19] Brutsaert W, Sugita M. Application of self-preservation in the diurnal evolution of the surface energy budget to determine daily evaporation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992,97(D17): 99-104.
- [20] Allen R G, Tasumi M, Trezza R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-model[J]. *Journal of Irrigation & Drainage Engineering*, 2007,133(4):380-394.
- [21] Allen R G, Tasumi M, Morse A, et al. A landsat-based energy balance and evapotranspiration model in Western US water rights regulation and planning [J]. *Irrigation & Drainage Systems*, 2005,19(3-4):251-268.
- [22] Virgini V, Shafiqul I, Leticia R. Estimation of evaporative fraction and evapotranspiration from MODIS products using a complementary based model [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008,112(1):132-141.
- [23] Duan Z, Bastiaanssen W G M. Estimating water volume variations in lakes and reservoirs from four operational satellite altimetry databases and satellite imagery data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013,134(5):403-416.
- [24] 谢贤群. 遥感瞬时作物表面温度估算农田全日蒸散总量 [J]. *环境遥感*, 1991,(4):253-260. (XIE Xianqun. Estimation of daily evapotranspiration from one time-of-day remotely sensed canopy temperature [J]. *Remote Sensing of Environment China*, 1991,(4): 253-260. (in Chinese))
- [25] Brasa-Ramos A, Olalla F M D S, Caselles V, et al. Comparison of evapotranspiration estimates by NOAA-AVHRR images and aircraft flux measurements in a semiarid region of Spain [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1998,70(3):285-294.
- [26] Caselles V, Delegido J, Sobrino J A, et al. Evaluation of the maximum evapotranspiration over the La Mancha region, Spain, using NOAA AVHRR data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1992,13(5):939-946.
- [27] Hurtado E, Artigao M M, Caselles V. Estimating Maize (Zea mays) evapotranspiration from NOAA-AVHRR thermal data in the Albacete area, Spain [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1994,15(10):2023-2037.
- [28] Chávez J L, Neale C M U, Prueger J H, et al. Daily evapotranspiration estimates from extrapolating instantaneous airborne remote sensing ET values [J]. *Irrigation Science*, 2008,27(1):67-81.
- [29] Farah H O, Bastiaanssen W G M, Feddes R A. Evaluation of the temporal variability of the evaporative fraction in a tropical watershed[J]. *International Journal of Applied Earth Observation &*

- Geoinformation, 2004,5(2):129-140.
- [30] 胡继超,张佳宝,赵炳梓,等. 冬小麦冠层阻力日变化的估算[J]. 灌溉排水学报, 2005,24(2):1-4. (HU Jichao, ZHANG Jiabao, ZHAO Bingzi, et al. Estimating diurnal variation of winter wheat canopy resistance at different growth stages [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2005,24(2):1-4. (in Chinese))
- [31] Liu G, Liu Y, Xu D. Comparison of evapotranspiration temporal scaling methods based on lysimeter measurements [J]. Journal of Remote Sensing, 2011.
- [32] Malek E, Bingham G E, Mccurdy G D. Continuous measurement of aerodynamic and alfalfa canopy resistances using the Bowen ratio-energy balance and Penman-Monteith methods[J]. Boundary-Layer Meteorology, 1992,59(1-2):187-194.
- [33] Choudhury B J, Reginato R J, Idso S B. An analysis of infrared temperature observations over wheat and calculation of latent heat flux[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 1986,37(1):75-88.

**Comparative Analysis of Temporal Scale Expansion
Methods for Evapotranspiration over Semi-arid Areas**
ZHAI Shaoyi¹, WANG Wenzhong¹, LIU Jiufu^{1,2}, WANG Huan¹, LU Zhiang¹
(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;
2. Research Center for Climate Change, MWR, Nanjing 210029, China)

Abstract: Evapotranspiration (ET) temporal scale expansion methods play an important role in ET remote sensing. This study aimed to compare and assess the accuracy of seven temporal scale expansion methods. Based on the measured data of the observed flux site located in the Walnut experimental basin in the southwestern United States, it analyzed the estimation effect of seven methods: evaluation of the constant evaporative fraction method, the simplified evaporation fraction method, crop coefficient method, simplified crop coefficient method, sinusoidal relation method, canopy resistance method and modified canopy resistance method. The results show that the 7 methods are consistent in the overall trend, and the simulation precision of the revised crop coefficient method, simplified crop coefficient method and the simplified evaporation fraction method (relative root mean square error is about 20 %) are much higher, which are suitable to estimate the daily evapotranspiration in semi-arid areas. For the areas with similar climate, meteorological conditions, underlying surface conditions, spatial scale data and with enough meteorological observation data, the temporal scale expansion method based on the improved crop coefficient is recommended to extend the time scale from the hour to the day. For the similar areas without meteorological observation data, the sinusoidal method and simplified evaporation fraction method are recommended for temporal scale expansion.

Key words: evapotranspiration (ET); temporal scale expansion; evaporative fraction; crop coefficient, sine relation; canopy resistance; uncertainty analysis

《水文》编辑部严正声明

近期,我们发现一些组织或个人盗用本刊刊名、刊号,冒充《水文》编辑部在网上征稿,向作者发送稿件录用通知并收费,影响恶劣,严重损害本刊声誉,给部分作者造成损失。

为维护本刊的合法权益,避免作者上当受骗,本刊严正声明如下:

1. 本刊刊名为“水文”,不带有任何期刊、杂志等附加名称;本刊由中华人民共和国水利部主管、水利部信息中心主办;本刊编辑部为“水利部《水文》编辑部”,设在水利部信息中心。

2. 本刊从未委托任何组织或个人代为征稿或进行广告经营等活动。

3. 作者投稿本刊采用以下两种方式: ①使用本刊投稿系统: <http://sw.allmaga.net/ch/index.aspx>, ②邮件投稿: j.hyd@mwr.gov.cn;

《水文稿件录用函》发布唯一邮箱: muyuhan@mwr.gov.cn;

其他组织或个人通过网站、邮件等形式发布的《水文》征稿及录用信息,均与本刊无关。

4. 本刊警告相关组织或个人,立即停止损害本刊声誉的侵权行为,同时本刊保留追究有关组织或个人法律责任的权利。

5. 本刊通讯地址:北京市西城区白广路二条2号,邮编:100053,联系电话:010-63202029,63203269。