

云南立体气候条件下参考作物腾发量计算方法的适用性研究

高 蓉, 吴 雷, 顾世祥*, 赵绍熙, 李 磊, 苏建广, 杨 涛
(云南省水利水电勘测设计研究院, 昆明 650021)

摘 要:【目的】合理估算云南省特殊气候条件下的参考作物腾发量, 验证不同 ET_0 计算方法的适用性。【方法】利用云南省 6 个灌溉用水分区的 14 个气象站资料, 以 FAO 推荐的 ET_0 计算方法 (FAO-56 Penman-Monteith 法) 为标准, 利用标准差 (δ)、相对误差 (RE)、一致性指数 (IOA)、Nash-Sutcliffe 系数 (NES)、线性回归法、反距离加权平均法等指标和方法对其他 6 种常用 ET_0 计算方法的适用性进行评价。【结果】随着降水量的减少, ET_0 大体上呈增加趋势。受云南省特殊低纬高原季风气候及“通道-阻隔”效应影响, 云南省各分区逐月 ET_0 值呈双峰曲线的变化规律, 峰值分别位于 4 月和 8 月。不同水平年 ET_0 计算方法的适用性不存在一致的规律性, 6 种 ET_0 计算方法与 FAO-56 Penman-Monteith 法计算得到的 ET_0 计算结果的线性回归决定系数 (R^2) 均大于 0.9, FAO-79 Penman 法和 Irmann-Allen 法于 6 个分区显著相关, FAO-24 Penman 法仅在 1 个分区显著。各分区各种方法的 RE 值均不大, 在 0~0.28 之间。各方法中 IOA 值和 NSE 值在各区表现最好的方法为 FAO-79 Penman 法, IOA 值和 NSE 值分别为 0.65~0.96 和 0.58~0.89。【结论】FAO-79 Penman 法在云南省除干热河谷区外的其他区域的适用性最强, 计算精度最高; FAO-24 Penman 法在云南省范围内适用最差, 误差较大; FAO-24 Radiation 法在除滇西北区以外的区域相对误差较小; Hargreaves-Samani 法在干热河谷区及滇中区适用性较好。

关 键 词: 云南省; 立体气候; 参考作物蒸腾量; FAO-56 Penman-Monteith 法; 适用性

中图分类号: S161

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.2019220

高蓉, 吴雷, 顾世祥, 等. 云南立体气候条件下参考作物腾发量计算方法的适用性研究[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(7): 91-99.

GAO Rong, WU Lei, GU Shixiang, et al. Study on Adaptation of Reference Crop Evapotranspiration Calculation Methods under Stereo Climatic Conditions in Yunnan Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(7): 91-99.

0 引 言

作物需水量计算是灌溉系统设计及田间水资源配置的基础, 而参考作物腾发量 (ET_0) 是作物需水量计算的关键, 准确估算 ET_0 成为农业水资源合理配置的前提^[1-2], ET_0 计算方法主要分为经验法、辐射法、温度法和综合法 4 类, 采用各类方法的前提和所需基础资料各异, 在不同的情形下使用受限。经验法公式形式简单, 但区域局限性较为明显, 针对其他地区的使用效果往往不佳。Irmann-Allen 法为根据湿润地区资料得到的模型公式, 适用于湿润区域^[3]。辐射法根据太阳辐射资料计算 ET_0 , 主要包括 Makkink 法、

Priestley-Taylor 法和 FAO-24 Radiation 法。其中 Priestley-Taylor 法以假设周围环境湿润为前提, 平衡蒸发为基础, 是忽略动力学项得出简化方程的方法^[4]; FAO-24 Radiation 法源于 Makkink 公式, 计算精度随海拔变化明显^[5]。温度法主要为 Hargreaves-Samani 法及其修正式, 是根据温差来反映辐射项, 适用于缺少辐射资料地区 ET_0 的有效估算^[6]。综合法在考虑热量因子的同时, 考虑空气动力因子的影响, 主要为彭曼公式及其修正式, 包括 Penman 法, 1982 年提出的 FAO-24 Penman 法, 1979 年提出并被我国《灌溉与排水工程规范》(GB 50288—99)引用的 FAO-79 Penman 法, 以及 FAO-56 Penman-Monteith 法等。

FAO-56 Penman-Monteith 法以水汽扩散理论和能量平衡理论为基础, 在考虑辐射和空气动力学影响的同时, 考虑了作物生理特性因素。在不改变任何参数的情况下适用于世界各地, 且计算精度高, 被联合国粮农组织推荐为 ET_0 的标准计算方法^[7], 但该方法计算过程复杂, 需要的气象资料条件相对严格, 在气

收稿日期: 2019-09-02

基金项目: 云南省创新团队专项 (2018HC024); 科技入滇专项; 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2013ZX07102-006); 国家高分辨率对地观测系统重大科技专项 (89-Y40-G19-9001-18/20-03)

作者简介: 高蓉 (1992-), 女(白族), 云南大理人。工程师, 主要从事节水灌溉理论技术研究。E-mail: ronggao@whu.edu.cn

通信作者: 顾世祥(1972-), 男(彝族), 云南镇雄人。教高, 主要从事节水灌溉理论技术研究。E-mail: gushixiang@public.km.yn.cn

象资料不齐备区域难以应用^[8-9]。因此大量学者针对缺乏部分气象数据的 ET_0 计算方法开展了研究, 试图找到资料相对缺乏地区 ET_0 计算的有效方法^[10-15]。然而研究主要集中在北方和西部干旱和半干旱地区^[16-18], 针对立体气候突出、低纬高原气候显著地区 ET_0 计算方法评价的研究较少。因此, 以云南省 6 个灌溉用水分区的共计 14 个站点共 48 a (1970—2017 年) 的气象数据为基础, 以 FAO-56 Penman-Monteith 法计算结果为参照, 对 ET_0 计算的 6 种方法进行分析评价, 以期对云南典型立体气候条件下的 ET_0 估算提供一定理论依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

云南省地处我国西南边陲, 位于 $97^{\circ}31' - 106^{\circ}11'E$, $21^{\circ}8' - 29^{\circ}15'N$, 面积 32.32 万 km^2 。全省地势总体呈西北高、东南低, 海拔相差极大, 地形地貌复杂, 山地面积达 90%, 相对平缓的地带仅占 10%, 境内又有以纵向岭谷区为主体的大型河流, 这些地貌对东南季风及西南季风起到东西向的阻隔和南北向的通道作用, 气候及河川径流变化“通道-阻隔”效应显著^[19-21]。云南省属低纬高原季风气候, 气候类型多样, 立体气候特点显著, 四季温差小, 日温差大, 干湿季分明, 气温随海拔高低垂直变化明显。云南省降水在季节上和地域上分配不均, 85%以上降水集中在 5—10 月, 年降水最高达 2 200~2 700 mm, 最低年降水量不超过 600 mm。

1.2 计算方法

在 ET_0 的 4 类计算方法中分别选取 Irmak-Allen 法、Priestley-Taylor 法、FAO-24 Radiation 法、Hargreaves-Samain 法、FAO-24 Penman 法和 FAO-79 Penman 法(下文分别简称 I-A 法、P-T 法、FAO-24 R 法、H-S 法、FAO-24 P 法和 FAO-79 P 法)等 6 种方法进行计算, 计算结果与 FAO-56 Penman-Monteith 法(简称 FAO-56 P-M 法)对比, 并利用线性回归法、相对误差(RE)、标准偏差(θ)、一致性指数(IOA)和 Nash-Sutcliffe 系数(NSE)进行误差分析^[22], 各 ET_0 计算式分别为:

1) FAO-56 Penman-Monteith:

$$ET_{0b} = \left[0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{273 + T} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a) \right] / \left[\Delta + \gamma(1 + 0.34 \cdot u_2) \right] \quad (1)$$

2) Irmak-Allen 法 (ET_{01}):

$$ET_{01} = 0.489 + 0.298R_n + 0.023T \quad (2)$$

3) Priestley-Taylor 法 (ET_{02}):

$$ET_{02} = 1.26 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n - G}{\lambda} \quad (3)$$

4) Hargreaves-Samain 法 (ET_{03}):

$$ET_{03} = 0.002 \cdot 3R_n(T + 17.8)(T_{\max} - T_{\min})^{0.5} / \lambda \quad (4)$$

5) FAO-24 Radiation 法 (ET_{04}):

$$ET_{04} = (a_s + b_s \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_s) / \lambda \quad (5)$$

6) FAO-24 Penman 法 (ET_{05}):

$$ET_{05} = \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + 6.43 \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} (1 + 0.862 \cdot u_2) \cdot (e_s - e_a) \right] \quad (6)$$

7) FAO-79 Penman 法 (ET_{06}):

$$ET_{06} = \left(\frac{P_0}{P} \frac{\Delta}{\gamma} \frac{R_n}{\lambda} + E_a \right) / \left(\frac{P_0}{P} \frac{\Delta}{\gamma} + 1 \right) \quad (7)$$

式(1)~式(7)中: ET_{0i} 为参照作物腾发量速率(mm/d); R_n 为作物表面净辐射($MJ/(m^2 \cdot d)$); T 、 $T_{\max}$ 和 $T_{\min}$ 分别为平均气温、最高温和最低温($^{\circ}C$); Δ 为饱和水汽压曲线倾率; γ 为湿度计常数($KPa/^{\circ}C$); λ 为潜热通量(MJ/kg); a 、 b 为经验系数; R_s 为太阳辐射量($MJ/(m^2 \cdot d)$); G 为土壤热通量($MJ/(m^2 \cdot d)$); T 为 2 m 高处日平均气温($^{\circ}C$); u_2 为 2 m 高处风速(m/s); e_s 和 e_a 分别为饱和水汽压和实际水汽压(kPa); P_0 和 P 分别为标准大气压和实际大气压(hPa); E_a 为干燥力(mm/d)。各参数计算方法参照 FAO-56 作物需水量计算指南^[23]。

1.3 数据来源

本文引用云南省地方标准用水定额(DB53/T 168—2019)的分区方法: 根据气候、水资源、土壤、地形地貌、种植结构等因素, 将全省划分为滇中区(涉及昆明、曲靖、玉溪、楚雄、红河、大理、丽江等 7 个州市)、滇东北区(涉及昭通、曲靖 2 个市)、滇东南区(涉及曲靖、文山、红河等 3 个州市)、滇西南区(涉及保山、临沧、德宏、普洱、西双版纳、楚雄、红河、大理、玉溪等 9 个州市)、滇西北区(涉及怒江、迪庆、丽江、大理 4 个州市)和干热河谷区(涉及金沙江干热河谷区、怒江干热河谷区)6 个灌溉用水分区, 本文别用 DZQ、DDBQ、DDNQ、DXNQ、DXBQ、GRHGQ 表示, 细分为 14 个亚区。作物腾发耗水是通过土壤-植物-大气系统的连续传输过程, ET_0 主要受气象因素影响, 同时与土壤特性、作物生理特征等因素有关, 用水定额中灌溉用水分区的方法综合考虑了前述影响 ET_0 的因素, 引用灌溉用水分区作为 ET_0 计算分区, 实现了作物用水定额与作物需水量研究在分区上统一, 有利于分析比较, 同时保持作物需水计算与灌溉系统设计用水定额选取的一致性。

在每个亚区各选取 1 个数据相对完整可靠且在空

间上具有代表性的气象站, 共计 14 个气象站 1970—2017 年的逐日气象资料对 ET_0 进行计算, 包括日最高温、日最低温、日平均气温、相对湿度、日照时间、风速、降雨量等, 以亚区计算结果的平均值作为所属灌溉用水区的 ET_0 值。气象资料来自中国国家气象资料服务网, 气象站点分布如图 1。

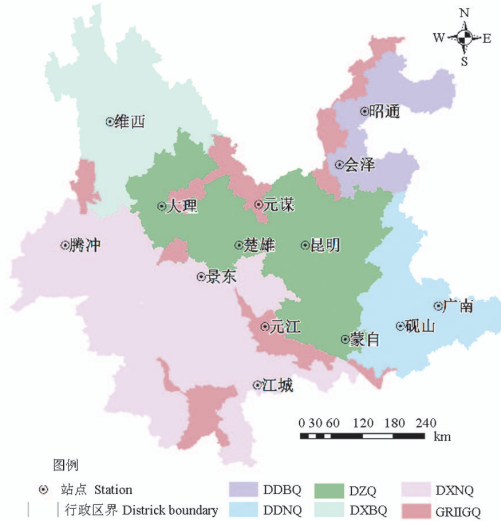


图 1 云南省灌溉用水分区及站点分布示意图

Fig. 1 Layout of irrigation water zones and stations in Yunnan Province

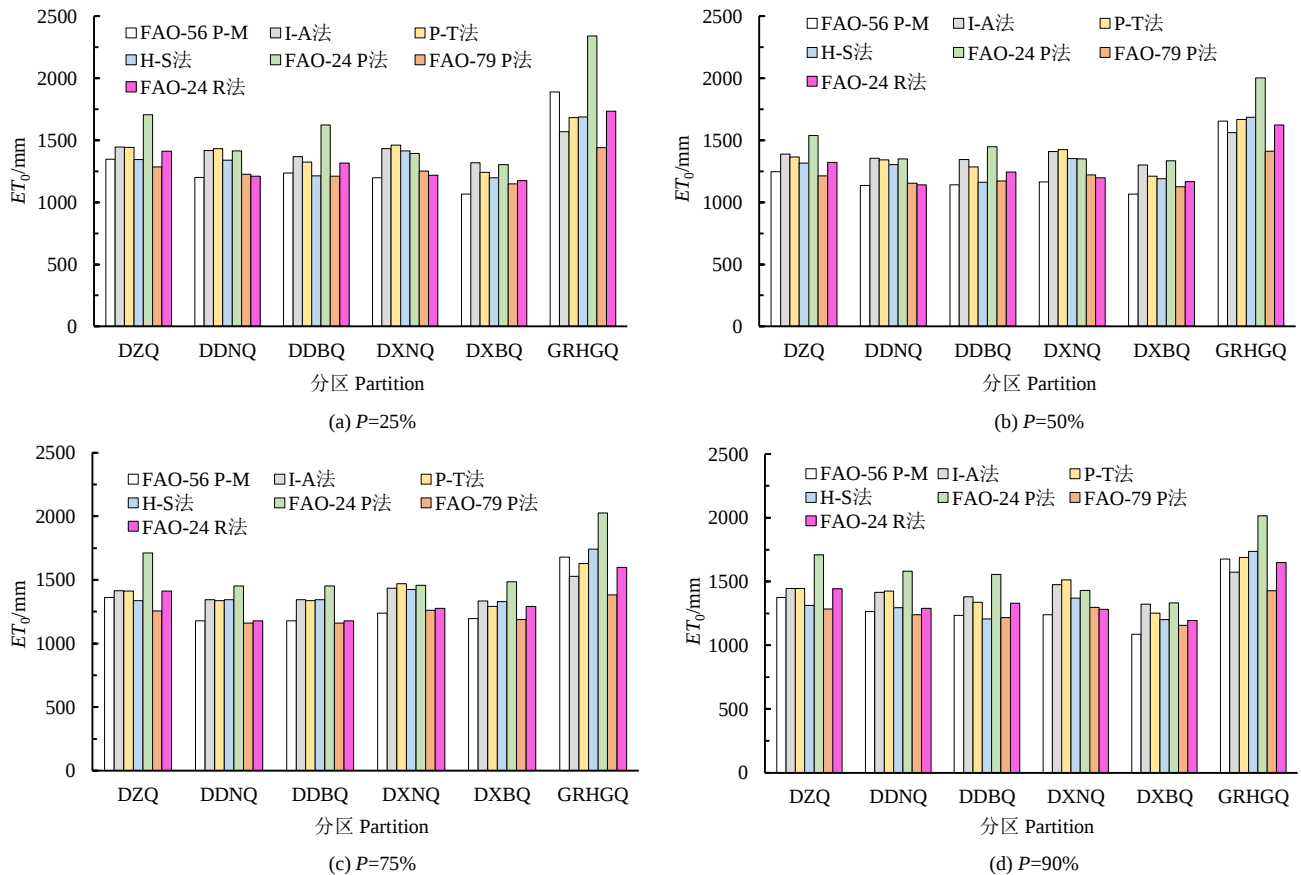


图 2 各典型年不同计算方法在各分区的计算结果

Fig. 2 Calculation results of different calculation methods of different zones in typical years

2 结果与分析

2.1 不同典型年各方法 ET_0 计算结果

以前述亚区的 14 个气象站连续 48 a (1970—2017 年) 的气象资料为依据, 对 48 a 各站点平均降雨资料进行排频分析, 选取典型年依次为: 丰水年 ($P=25\%$) 1997 年、平水年 ($P=50\%$) 1975 年、枯水年 ($P=75\%$) 2006 年、特旱年 ($P=90\%$) 2003 年。各典型年不同计算方法在各分区的应用, 计算所得结果如图 2 所示。由图 2 可知, 随着降雨的减少, ET_0 大体上呈增加的趋势。不同典型年 7 种方法、6 个分区的 42 个 ET_0 最值中, 出现在平水年、枯水年和特枯年的个数分别为 6、13 和 23, 丰水年无最值出现。

不同典型年同一分区内与目前公认标准方法 FAO-56 P-M 法较为接近的方法各不相同, 滇中区丰水年和特枯年最接近的为 FAO-79 P 法, 平水年和枯水年为 H-S 法; 滇东南区丰水年和平水年最接近的为 FAO-24 R 法, 枯水年和特枯年为 FAO-79 P 法; 其他分区结果表现类似, 可见不同水平年 ET_0 计算方法的适用性不存在一致的规律性, 这是因为各气象因子对 ET_0 的作用为综合影响, 而非线性单独作用。

2.2 不同方法 ET_0 月均值计算结果

各分区不同方法 ET_0 月均值计算结果如图3所示。从图3可知,在云南的6个灌溉用水分区内不同方法计算得的逐月 ET_0 的变化趋势大体上相同,均是先逐渐增大,达到峰值后逐渐减小,随后继续增加,达到另一峰值后,缓慢下降,呈双峰的变化规律。该变化规律与其他省份的研究结果不同,其他区域的 ET_0 一般呈单峰趋势变化^[24-27]。云南处低纬高原季风气候,干湿季较为分明,从1月开始,随着气温的升高, ET_0 逐渐增加,到4月温度较高和辐射较强的时候,达到最大。5月雨季来临,气温降低,辐射减少, ET_0 降低,6—7月降到最小值。8—9月温度回升, ET_0 略微增加,9月后随着气温的降低, ET_0 逐渐下降。

相同分区不同月份各计算方法的 ET_0 计算结果与FAO-56 P-M法的差异不一致,各分区不同算法的逐月 ET_0 变化曲线与FAO-56 P-M的曲线未呈近似平行

关系。FAO-24 P法在全年较FAO-56 P-M法偏大;I-A法除在滇西北和滇西南地区全年偏大外,在其他区域大体呈上半年偏小、下半年偏大特性;P-T法在滇中区、滇东北区和干热河谷区大体呈2—5月偏小、6—12月偏大规律外,其他3个区在全年偏大;H-S法仅在滇西南区全年偏大,其他各分区大体在1—5月偏小、5—12月偏大;FAO-79 P法除在干热河谷区全年偏小外,在其他各分区大体呈1—6月偏小、7—12月偏大的规律;FAO-24 R法在各分区呈6—9月偏小、10—次年5月偏大的规律。可见各 ET_0 计算方法在月尺度上的适用性不同,不同分区的同一方法的逐月 ET_0 变化亦存在差异。这与云南省气候及河川径流变化表现出显著的“通道-阻隔”效应有关,这种效应使得各区域间的气候差异明显,时间尺度上变化复杂,从而导致各计算方法在各分区逐月 ET_0 与FAO-56 P-M法的差异各不相同。

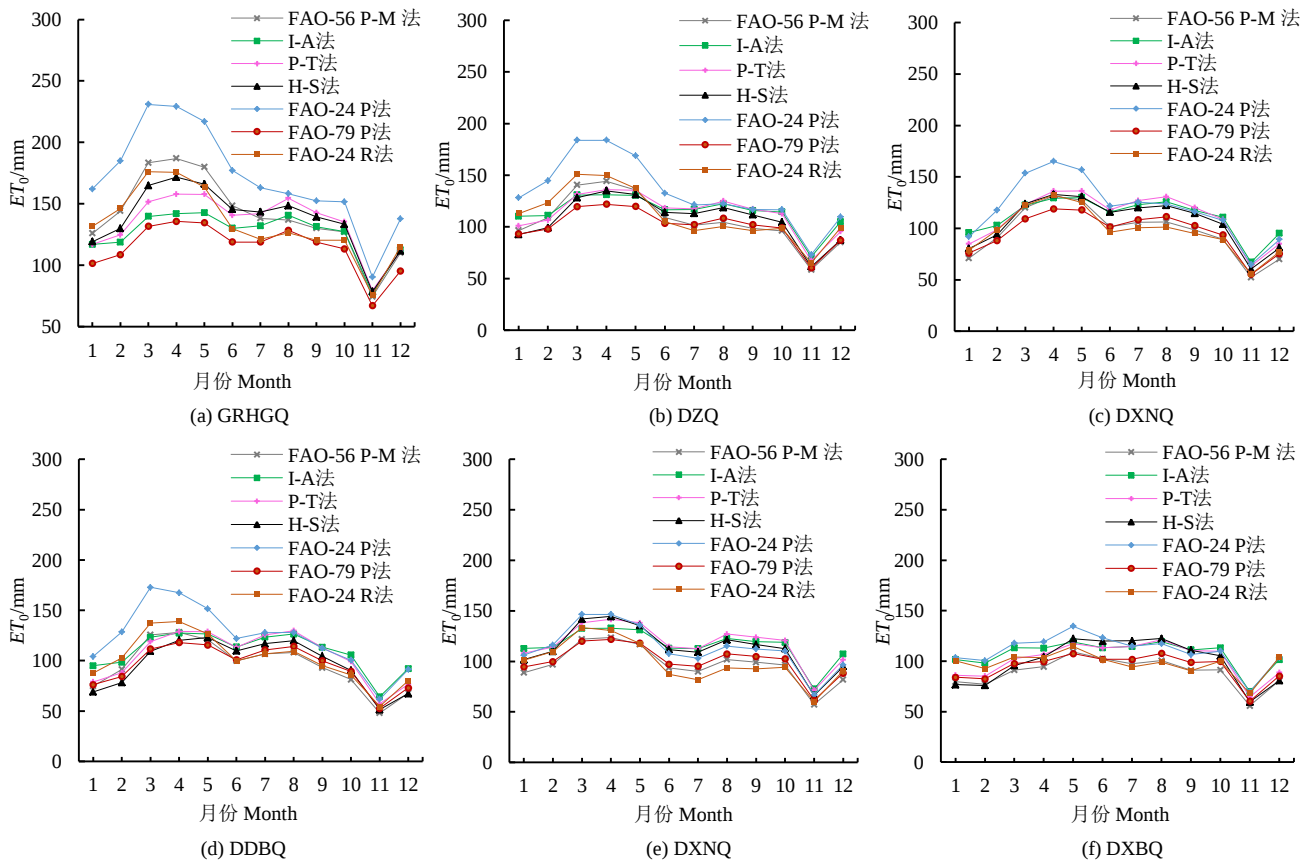


图3 不同计算方法 ET_0 月均值

Fig.3 Monthly ET_0 of different calculation methods

2.3 不同方法 ET_0 日均值计算结果

2.3.1 各 ET_0 计算方法与FAO-56 P-M法的对比

为了分析各计算方法在云南省不同分区的适用性,以FAO-56 P-M法的计算结果作为标准,对其他6种计算方法进行分析,其他6种方法与FAO-56 P-M法计算结果存在明显的线性关系,因此对数据进行线性拟合及方差分析,计算结果列于表1。

由表1知,6种 ET_0 计算方法与FAO-56 P-M法计算得到的 ET_0 计算结果的决定系数(R^2)均大于0.9,FAO-79 P法和I-A法于6个分区显著相关,H-S法、FAO-24 R法于5个分区显著相关,P-T法则在4个分区显著,FAO-24 P法仅在1个分区显著。从整体上看,各计算方法 ET_0 计算结果偏大,FAO-24 P法在6个分区的斜率均大于1,I-A法和P-T法斜率大于1

的分区数目为 5，H-S 法和 FAO-24 R 法在 4 个分区斜率大于 1，FAO-79 P 法在 2 个分区斜率大于 1；干热河谷区仅 FAO-24 P 法斜率大于 1。

各分区达到极显著水平的计算方法中，滇西南区 FAO-24 R 法和 FAO-79 P 法回归方程斜率更接近 1，大小分别为 1.024 和 1.033，标准差分别为 0.023 和

0.01；FAO-79 P 法在滇东南区、滇东北区和滇西北区斜率较其他方法更接近于 1，分别为 0.985、0.992 和 1.051，方差为 0.01~0.018；H-S 法在滇中区和干热河谷区斜率更接近 1，分别为 1.003 和 0.972，方差分别为 0.024 和 0.019。

表 1 不同计算方法与 FAO-56 P-M 法计算结果

Table 1 Calculation results by different calculation methods and FAO-56 P-M method

分区 Partition	参数 Parameter	I-A 法	P-T 法	H-S 法	FAO-24 P 法	FAO-79 P 法	FAO-24 R 法
滇中区 DZQ	m	1.058	1.053	1.003	1.255	0.938	1.044
	R^2	0.987**	0.991**	0.993**	0.998	0.993**	0.995**
	δ	0.033	0.028	0.024	0.015	0.022	0.02
滇东南区 DDNQ	m	1.129	1.135	1.091	1.231	0.985	1.003
	R^2	0.989**	0.995**	0.996**	0.999	0.996**	0.997
	δ	0.032	0.023	0.018	0.012	0.018	0.014
滇东北区 DDBQ	m	1.124	1.089	1.007	1.282	0.992	1.066
	R^2	0.989**	0.991**	0.990**	0.996**	0.994**	0.997**
	δ	0.034	0.028	0.028	0.022	0.021	0.016
滇西南区 DXNQ	m	1.182	1.205	1.168	1.168	1.033	1.024
	R^2	0.996**	0.999	1.000	0.999	0.999**	0.994**
	δ	0.021	0.013	0.006	0.007	0.010	0.023
滇西北区 DXBQ	m	1.199	1.140	1.119	1.231	1.051	1.09
	R^2	0.997**	0.998	0.994**	0.998	0.998**	0.99**
	δ	0.018	0.014	0.025	0.139	0.010	0.030
干热河谷区 GRHGQ	m	0.881	0.945	0.972	1.220	0.804	0.949
	R^2	0.984**	0.987**	0.995**	0.999	0.990**	0.977**
	δ	0.031	0.030	0.019	0.011	0.022	0.015

注 **表示拟合结果在 $p=0.01$ 水平上显著， m 为斜率， R^2 为相关系数， δ 为标准差。

Note ** indicates that the fitting result is significant at the level of $P = 0.01$, m is the slope, R^2 is the correlation coefficient, and δ is the standard deviation.

2.3.2 各 ET_0 计算方法精度分析

6 个分区 6 种 ET_0 计算方法的相对误差 (RE)、一致性指数 (IAO) 和 Nash-Sutcliffe 系数 (NSE) 与标准 FAO-56 P-M 法的对比结果如表 2。 RE 值越小，表明 2 种算法差异越小， IOA 与 NSE 值越趋近于 1，说明该算法偏离标准算法程度越小，一致性越好。从表 3 中可知，各分区各种方法的 RE 值均不大，在 0~0.28 之间。各方法中 IOA 值和 NSE 值在各区表现最好的方法为 FAO-79P 法，其次为 FAO-24 R 法，最差的为 I-A 法和 P-T 法，各分区精度最好的计算方法与线性回归的结论基本保持一致。滇中区 H-S 法和 FAO-24 R 法精度较高， RE 值分别为 0.01 和 0.05， IAO 值分别为 0.93 和 0.95， NES 值分别为 0.89 和 0.94；滇东北区、滇东南区、滇西南区和滇西北区均为 FAO-79 P 法精度最高， RE 、 IOA 和 NSE 值分别为 0~0.05、0.89~0.96 和 0.58~0.89；干热河谷区 H-S 法和 FAO-24 R 法精度较高， RE 值分别为 0.02 和 0.05，

IOA 值分别为 0.94 和 0.95， NSE 值均为 0.83。

2.4 不同计算方法空间适用性评价

为了进一步分析各 ET_0 计算方法在各分区的适用性，以 FAO-56 P-M 法的计算结果为标准，对其他 6 种方法与其的相对误差进行反距离加权分析，各计算方法的相对误差空间分布如图 4 所示。

从图 4 可以看出，滇中区和干热河谷区 H-S 法相对误差最小，其值为 8%，这与 H-S 法主要适用于地形起伏不大、日温度变化幅度小的地区有关^[14,16]。滇东北区、滇东南区和滇西北区以 FAO-79 P 法精度最高，滇东南区以 FAO-24 R 法精度最高，相对误差均小于 8%。FAO-79 P 法在除干热河谷区的云南省范围内适用性较好，除干热河谷区相对误差较大，达 24% 外，其他分区的相对误差小于 8%，多个区域小于 4%。FAO-24 R 法为继 FAO-79 P 法后，适用性最好的方法，全省范围内相对小于 12%，在滇西北区外的其他分区相对误差均小于 8%，滇东南区误差最小，小于 4%。

FAO-24 R 法计算误差随海拔的增加而增大, 滇西北区为云南海拔最高地区, 误差较大。I-A 法和 P-T 法的相对误差分布较为复杂, 总体上看, 在滇中区相对误差较其他分区小, 在干热河谷区局部出现异常现象。FAO-24 P 法在整个云南省范围内的相对误差都较大, 相对误差最小值高达 16%, 适用性较差。

表 2 各 ET_0 计算方法精度对比Table 2 Accuracy comparison of ET_0 calculation methods

分区 Partition	参数 Parameter	I-A 法	P-T 法	H-S 法	FAO-24 P 法	FAO-79 P 法	FAO-24 R 法
滇中区 DZQ	RE	0.08	0.07	0.01	0.25	0.05	0.05
	IOA	0.78	0.87	0.93	0.73	0.88	0.95
	NSE	0.46	0.60	0.78	-1.20	0.69	0.78
滇东南区 DXNQ	RE	0.15	0.15	0.10	0.23	0.00	0.01
	IOA	0.76	0.84	0.91	0.77	0.96	0.98
	NSE	0.22	0.34	0.67	-0.49	0.89	0.94
滇东北区 DDBQ	RE	0.15	0.10	0.01	0.28	0.00	0.07
	IOA	0.78	0.89	0.94	0.71	0.96	0.95
	NSE	0.28	0.56	0.77	-1.12	0.87	0.82
滇西南区 DXNQ	RE	0.19	0.21	0.17	0.17	0.04	0.02
	IOA	0.64	0.65	0.76	0.77	0.96	0.92
	NSE	-1.16	-1.45	-0.61	-0.62	0.88	0.62
滇西北区 DXBQ	RE	0.20	0.14	0.11	0.23	0.05	0.10
	IOA	0.49	0.68	0.75	0.51	0.89	0.55
	NSE	-3.67	-1.37	-1.33	-5.00	0.58	-1.05
干热河谷区 GRHGQ	RE	0.10	0.04	0.02	0.22	0.18	0.05
	IOA	0.66	0.82	0.94	0.77	0.65	0.95
	NSE	0.18	0.56	0.83	-0.61	-0.43	0.83

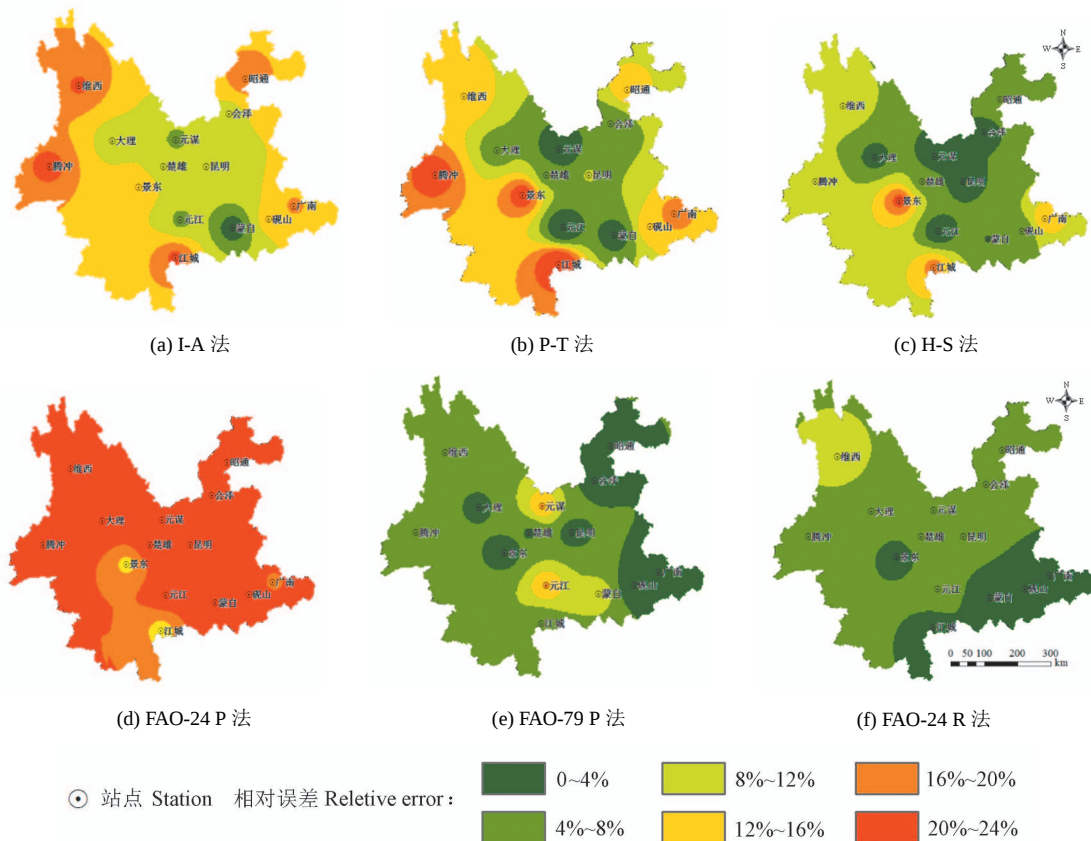


图 4 各计算方法与 FAO-56 P-M 法相对误差空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of relative error between each calculation method and FAO-56 P-M method

3 讨论

本文以灌溉用水分区为基础, 从不同典型年 ET_0 年值以及 ET_0 月均值、 ET_0 日均值等角度研究了各 ET_0 计算方法在各灌溉用水分区的变化规律及其差异, 同时通过相对误差 (RE)、一致性指数 (IAO)、 NSE 、线性拟合、方差分析和反距离加权平均法等指标和方法分析了各计算方法与标准 FAO-56 P-M 法之间的差异性, 结果发现同为综合法的 FAO-79 P 法和 FAO-24 P 法适用性表现出较大差异, FAO-79 P 法在云南省的适用性最好, FAO-24 P 法适用性最差, 这与前人研究结果^[16,28]一致。本文 FAO-79 P 法的 δ 、 RE 、 IOA 和 NES 值分别为 0.01~0.022、0.04~0.05、0.88~0.96 和 0.58~0.89, 计算精度高, 可见灌溉与排水工程设计规范《GB50288—99》将 FAO-79 P 法作为计算 ET_0 的方法是合理的。但由于云南省地处低纬高原山区, 受通断阻隔和季风性气候的影响, 立体气候突出, FAO-79 P 法在干热河谷区适用性不佳。根据本文研究结果, 干热河谷区可用 FAO-24 R 法或 H-S 法计算 ET_0 , 干热河谷区为高温、低湿河谷地带, 与前述 FAO-24 R 法适用于低海拔地区、H-S 法适用于地形起伏小, 日温差变小的研究结果一致。

由于本文的研究重点为各 ET_0 计算方法在不同灌溉用水分区上的适用性, 故在气象站点的选取上以考虑各灌溉用水分区间的均衡性为主。本文分别选取各亚区上具有空间均衡性的一个站点代表亚区, 以相应亚区的均值作为各灌溉用水分区的值。此站点选取角度虽未对云南全部站点进行研究, 但考虑了计算结果在空间分布上的均衡性, 若选取较多站点进行比较, 虽能在空间上获得相对较理想的差值结果, 但可能无法相对明显地反映各灌溉用水分区的适用性的差别。另外由于篇幅有限及研究角度原因, 本文仅研究了各计算方法 ET_0 的年内变化规律, 及各计算方法与 FAO-56 P-M 法相对误差的空间分布特征。感兴趣读者可从不同分区角度、考虑大量站点情形下的各 ET_0 计算方法的适用、云南省立体气候条件下 ET_0 时空分布规律等方面进一步开展研究。

4 结论

1) 随着降水量的减少, ET_0 大体上呈增加的趋势, 且不同水平年各 ET_0 计算方法在同一分区的适用性规律不存在一致性。

2) 各分区逐月 ET_0 变化规律大体上相同, 受云南特殊低纬高原季风气候影响, 呈现与其他省份不同的双峰曲线变化规律; 显著“通道-阻隔”效应使得各分区间的气候差异显著, 致不同分区间各算法的逐

月 ET_0 差异各不相同。

3) 各 ET_0 计算方法与 FAO-56 P-M 法线性回归的绝对系数均大于 0.9, FAO-79 P 法在 6 个分区均显著, 且在滇东南区、滇东北区、滇西北区斜率较其他方法更接近 1, δ 、 RE 、 IOA 和 NES 较其他方法理想。

4) FAO-79 P 法在除干热河谷区外的云南省其他区域的适用性最强, 可作为云南省除干热河谷区外其他区域的 ET_0 简化计算方法。FAO-24 P 法在全省范围内的适用性均较差, 相对误差均大于 12%, 不宜用其进行 ET_0 简化计算。FAO-24 R 法为继 FAO-79 P 法后计算精度较高的方法, 其适用于海拔相对较低的滇东南区, 相对误差小于 4%。在气候相对特殊的干热河谷区宜用 H-S 法进行 ET_0 简化计算, 其相对误差值小于 8%。

参考文献:

- [1] 史晓楠, 王全九, 王新, 等. 参考作物腾发量计算方法在新疆地区的适用性研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(6): 19-23.
SHI Xiaonan, WANG Quanjiu, WANG Xin, et al. Adaptability of different reference evapo-transpiration estimation methods in Xinjiang region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(6): 19-23.
- [2] 刘晓英, 林而达, 刘培军. Priestley-Taylor 与 Penman 法计算参照作物腾发量的结果比较[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 32-36.
LIU Xiaoying, LIN Erda, LIU Peijun. Comparative study on Priestley-Taylor and Penman methods in calculating reference crop evapotranspiration[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(1): 32-36.
- [3] IRMAK S, IRMAK A, ALLEN R G, et al. Solar and net radiation-based equations to estimate reference evapotranspiration in humid climates[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2003, 129(5): 336-347.
- [4] PRIESTLEY C H B, TAYLOR R J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters[J]. Monthly Weather Review, 1972, 100(2): 81-92.
- [5] HAUSER V L, GIMON D M, HORIN J D. Draft protocol for controlling contaminated groundwater by phytostabilization[J]. 1999.
- [6] 李晓军, 李取生. 东北地区参考作物蒸散确定方法研究[J]. 地理科学, 2004, 24(2): 212-216.
LI Xiaojun, LI Qusheng. Study on calculating methods for reference crop evapotranspiration in northeastern China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2004, 24(2): 212-216.
- [7] WALLER P, YITAYEW M. Crop evapotranspiration[M]//Irrigation and Drainage Engineering. Cham: Springer International Publishing, 2016: 89-104.
- [8] CHIEW F H S, KAMALADASA N N, MALANO H, et al.

- Penman-Monteith, FAO-24 reference crop evapotranspiration and class-A pan data in Australia[J]. *Agricultural Water Management*, 1995, 28(1): 9-21.
- [9] VALIPOUR M. Importance of solar radiation, temperature, relative humidity, and wind speed for calculation of reference evapotranspiration[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2015, 61(2): 239-255.
- [10] 何军, 崔远来, 李远祥. 气象资料缺测条件下武汉地区计算 ET_0 方法适用性分析[J]. *中国农村水利水电*, 2009(10): 68-71, 75.
HE Jun, CUI Yuanlai, LI Yuanxiang. Applicability analysis of calculation methods for ET_0 with limited weather data in Wuhan[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2009(10): 68-71, 75.
- [11] 刘钰, L. S. Pereira. 气象数据缺测条件下参照腾发量的计算方法[J]. *水利学报*, 2001(3): 11-17.
LIU Yu, L. S. Pereira. Calculation methods for reference evapotranspiration with limited weather data[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2001(3): 11-17.
- [12] 汤鹏程, 徐冰, 高占义, 等. 西藏高海拔地区气象数据缺失条件下的 ET_0 计算研究[J]. *水利学报*, 2017, 48(9): 1 055-1 063.
TANG Pengcheng, XU Bing, GAO Zhanyi, et al. Simplified limited data ET_0 equation adapted for high-elevation locations in Tibet[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(9): 1 055-1 063.
- [13] JABLOUN M, SAHLI A. Evaluation of FAO-56 methodology for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data: Application to Tunisia[J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(6): 707-715.
- [14] 张倩, 潘旭, 张鹏, 等. 基于温度资料的山东沿海站点参照作物腾发量估算方法比较研究[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(S1): 74-79.
ZHANG Qian, PAN Xu, ZHANG Peng, et al. Comparative study on estimation of crop evapotranspiration in Shandong coastal sites based on temperature data[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(S1): 74-79.
- [15] 余婷, 崔宁博, 张青雯, 等. 基于 MEA-BP 模型的西北地区参考作物腾发量模拟[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(S2): 107-115.
YU Ting, CUI Ningbo, ZHANG Qingwen, et al. Reference evapotranspiration simulation in northwest China based on MEA-BP model[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(S2): 107-115.
- [16] 尹春艳, 陈小兵, 刘虎, 等. 黄河三角洲参考作物腾发量计算方法适宜性研究[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(6): 36-41, 108.
YIN Chunyan, CHEN Xiaobing, LIU Hu, et al. Comparison of different methods for calculating evapotranspiration of crops in the Yellow River Delta[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, 36(6): 36-41, 108.
- [17] 杨玫, 孙西欢. 参考作物腾发量计算方法在玛纳斯河流域的应用比较[J]. *灌溉排水学报*, 2011, 30(1): 125-129.
YANG Mei, SUN Xihuan. Comparison of reference crop evapotranspiration computing methods on Manasi basin[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2011, 30(1): 125-129.
- [18] 王新华, 郭美华, 徐中民. 分别利用 Hargreaves 和 PM 公式计算西北干旱区 ET_0 的比较[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(10): 21-25.
WANG Xinhua, GUO Meihua, XU Zhongmin. Comparison of estimating ET_0 in arid-area of Northwest China by Hargreaves equation and Penman-Monteith equation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(10): 21-25.
- [19] 吴绍洪, 潘韬, 曹杰, 等. 西南纵向岭谷地形对季风的“通道-阻隔”作用[J]. *地理研究*, 2012, 31(1): 1-13.
WU Shaohong, PAN Tao, CAO Jie, et al. Barrier-corridor effect of terrain on monsoons longitudinal range-gorge in Southwest China[J]. *Geographical Research*, 2012, 31(1): 1-13.
- [20] ZHANG K Y. The climatic dividing line between SW and SE monsoons and their differences in climatology and ecology in YP of China[J]. *Climatological Notes*, 1988(38): 197-207.
- [21] 王宇. 云南山地气候[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2006.
WANG Yu. Yunnan mountain climate[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2006.
- [22] 彭灵灵. 不同方法估算参考作物腾发量对干旱指标 $SPEI$ 的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
PENG Lingling. Different methods to estimate the effect of reference crop evapotranspiration on drought index $SPEI$ [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2017.
- [23] ALLEN R G, PEREIRAL S, RAES D, et al. Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper No.56[M]. Rome: FAO-Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [24] 霍再林, 史海滨, 陈亚新, 等. 内蒙古地区 ET_0 时空变化与相关分析[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(6): 60-63.
HUO Zailin, SHI Haibin, CHEN Yaxin, et al. Spatio-temporal variation and dependence analysis of ET_0 in north arid and cold region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(6): 60-63.
- [25] 倪广恒, 李新红, 丛振涛, 等. 中国参考作物腾发量时空变化特性分析[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(5): 1-4.
NI Guangheng, LI Xinhong, CONG Zhentao, et al. Temporal and spatial characteristics of reference evapotranspiration in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(5): 1-4.
- [26] 杨永红, 张展羽, 阮新建. 西藏参考作物蒸发蒸腾量的时空变异规律[J]. *水科学进展*, 2009, 20(6): 775-781.
YANG Yonghong, ZHANG Zhanyu, RUAN Xinjian. Temporal and spatial variation law of reference crop evapotranspiration in Tibet[J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(6): 775-781.
- [27] 赵捷, 徐宗学, 左德鹏. 黑河上中游潜在蒸散发模拟及变化特征分析[J]. *水科学进展*, 2015, 26(5): 614-623.
ZHAO Jie, XU Zongxue, ZUO Depeng. Estimation of potential

- evapotranspiration and its variability in the upper and middle reaches of the Heihe River basin[J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26(5): 614-623.
- [28] 廖显琴, 李毅. 参考作物腾发量计算方法的适用性研究[J]. *灌溉排水学报*, 2009, 28(6): 14-17, 71.
- LIAO Xianqin, LI Yi. Adaptability research of different reference crop evapotranspiration estimated methods in Shaanxi[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2009, 28(6): 14-17, 71.

Study on Adaptation of Reference Crop Evapotranspiration Calculation Methods under Stereo Climatic Conditions in Yunnan Province

GAO Rong, WU Lei, GU Shixiang*, ZHAO Shaoxi, LI Lei, SU Jianguang, YANG Tao
(Yunnan Institute of Water & Hydropower Engineering Investigation, Design and Research, Kunming 650021, China)

Abstract: 【Objective】 This paper is to reasonably estimate the reference crop evapotranspiration under the special climate conditions in Yunnan Province, which providing reliable basis for the design of irrigation system and water resource allocation, and then achieving the purpose of water conservation and rational utilization of water resources.

【Method】 We based on the data of 14 meteorological stations in 6 irrigation water zones of Yunnan Province and used the FAO recommended ET_0 standard calculation method (FAO-56 Penman-Monteith) to evaluate the applicability of six commonly used ET_0 calculation methods with criteria and methods which including standard deviation (δ), relative error (RE), consistency index (IOA), Nash-Sutcliffe coefficient (NES), linear regression method and inverse distance weighted average method. 【Result】 ET_0 increased with the decrease of rainfall. The change rule of monthly ET_0 was basically the same in each partition. Influenced by the monsoon climate of Yunnan special low latitude plateau, it showed a change law of bimodal curve, different from other provinces. The peak value was in April and August, respectively. The significant “channel barrier” effect made the climate difference between regions significant, which made the monthly ET_0 differences of algorithms different among regions. The applicability of ET_0 calculation methods in different level years was not consistent. The absolute coefficient of linear regression (R^2) of ET_0 calculated by other methods and FAO-56 Penman-Monteith method were all greater than 0.9. FAO-79 Penman method and Irmak-Allen method were significantly correlated in six regions, and FAO-24 Penman method was only significant in one region. The RE values of each methods in different partition were small, ranging from 0 to 0.28. FAO-79 Penman method has the best performance, and the IOA and NSE were 0.65~0.96 and 0.58~0.89 respectively. The applicability of different reference crop evapotranspiration calculation methods in different regions was obviously different. 【Conclusion】 The FAO-79 Penman method has the strongest applicability and the highest accuracy in Yunnan except for the dry-hot valley. The values of δ , RE , IOA and NES are 0.01~0.022, 0.04~0.05, 0.88~0.96 and 0.58~0.89, respectively. FAO-24 Penman method has the worst application in the whole province, and its error is larger than 12%. It is not suitable for ET_0 calculation. The applicability of FAO-24 Radiation method in Yunnan Province is also better after FAO-79 Penman method. Except for Northwest Yunnan, the relative error of FAO-24 Radiation method is less than 8%. This method is especially suitable for Southeast Yunnan, where the altitude is relatively low. The relative error is only about 2%. Hargreaves-Samani method has better applicability in dry-hot valley and central Yunnan, and the values of δ , RE , IOA and NES are 0.019~0.024, 0.01~0.02, 0.93~0.96 and 0.78~0.83, respectively.

Key words: Yunnan Province; stereo climate; reference crop evapotranspiration; FAO-Penman-Monteith method; applicability

责任编辑: 陆红飞