

# 基于多模型比较的云南地区蒸散量时空特性分析

李旭, 朱玘, 杨发伟

华能澜沧江水电股份有限公司漫湾水电厂, 云南 临沧

收稿日期: 2024年7月8日; 录用日期: 2024年8月13日; 发布日期: 2024年8月21日

## 摘要

准确估算蒸散量并了解其时空变化有助于促进水资源的综合利用、合理配置以及管理规划。为研究云南地区蒸散量及其时空变化特征, 文章选用1990年~2019年云南地区25个气象站点的逐日数据, 并使用R语言包Evapotranspiration中的Penman模型、AA模型及GG模型分别计算蒸散量, 由于多种因素影响会导致模型所得结果存在差值, 故需要研究模型的适用性以便更好地描述区域蒸散发。研究结果表明: 1) Penman模型在云南地区蒸散量估算中具有较好的适用性好; 2) 云南地区蒸散量具有明显的季节性特征, 蒸散量集中在夏季, 春冬季节较少; 3) 随着地势从北到南逐渐降低, 蒸散量逐渐增加, 滇西北及滇东北地区蒸散量最少, 在怒江、澜沧江流域多年平均蒸散量沿河流呈条带状变化。

## 关键词

蒸散量, 时空分异, Penman公式, 数值模型

# Analysis of Evapotranspiration Spatiotemporal Characteristics in Yunnan Province Based on Multi-Evapotranspiration Model

Xu Li, Qi Zhu, Fawei Yang

Manwan Hydropower Plant, Huaneng Lancang River Hydropower Inc., Lincang Yunnan

Received: Jul. 8<sup>th</sup>, 2024; accepted: Aug. 13<sup>th</sup>, 2024; published: Aug. 21<sup>st</sup>, 2024

## Abstract

Accurately estimating evapotranspiration and understanding its spatiotemporal variations will

contribute to promoting the further comprehensive utilization, rational allocation, and management planning of water resources. To study the characteristics of evapotranspiration and its spatiotemporal variations in Yunnan, the daily data of 25 meteorological stations from 1990 to 2019 was selected, and the evapotranspiration was calculated respectively by Penman, AA and GG models in R package "Evapotranspiration". Due to the difference in the results caused by various factors, it is necessary to study the applicability of the model to better describe regional evapotranspiration. The results show that: 1) Penman method is more applicable to estimate evapotranspiration in Yunnan. 2) The evapotranspiration has seasonal characteristics in Yunnan, with evapotranspiration being concentrated in summer and relatively lower in spring and winter. 3) With the decrease of terrain from north to south, the evapotranspiration increases gradually, and the evapotranspiration is the least in Northwest and Northeast Yunnan. In the Nujiang and Lancangjiang river basins, the average annual evapotranspiration along the rivers changes in a zonal pattern.

## Keywords

Evapotranspiration, Spatiotemporal Differentiation, Penman's Formula, Numerical Model

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

蒸散发(ET)是区域生态循环系统、气候系统和水循环过程的重要组成部分[1]。分析区域蒸散量时空分布及其变化趋势,能够为探究区域水循环机制、理清气候变化下区域生态、水文响应机制提供数据基础及科学依据[2]。

蒸散量时空分异特征受区域气候及地理格局差异影响,与区域水热条件、海拔梯度的关系明显[3]。云南省跨越多个气候带及复杂地理单元,生态格局垂向分异显著,蒸散发具有较强地时空分异特征,估算较为复杂。目前常用的蒸散量数值模型有 Penman 模型, Brutsaert 和 Strickler 提出的 AA (the advection-aridity model)模型、Granger 和 Gray 提出的 GG 模型等[4]。上述方法在驱动数据需求及参数选用上均存在差异,从而影响方法的区域适用性。在地理及气候特征差异明显的云南地区,基于多模型比较,能够更为准确的计算蒸发量,进而有助于合理分析该区域蒸散量时空特性。

再者,受全球气候变化影响,极端气候事件频发,中纬度地区的更加剧烈及频繁[5]。作为反映极端气候灾害的有效指征,蒸散发量能够为区域干旱计算及评估的关键参数。本研究选取用于 3 种数值模型来计算蒸散量,并分析其时空分布趋势探究云南省蒸散发时空变化规律,对该区域自然灾害风险调控具有现实意义。

## 2. 数据与方法

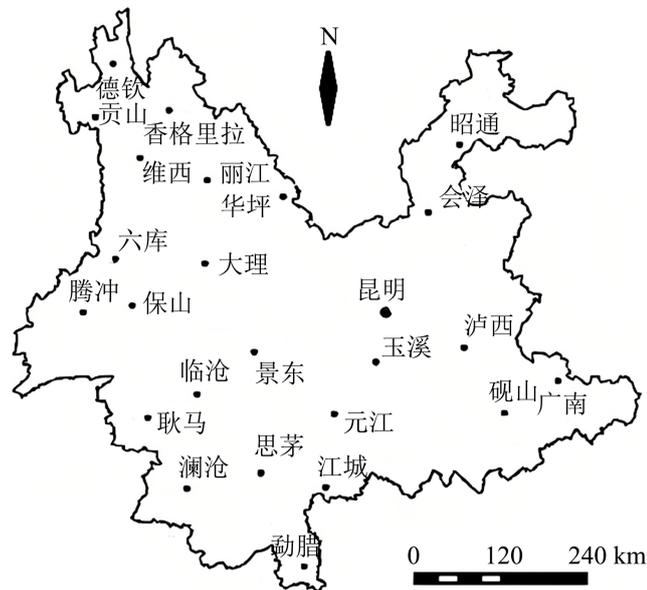
### 2.1. 区域概况

云南省位于中国西南地区,介于北纬 21°8'32"~29°15'8"和东经 97°31'39"~106°11'47"之间,气候基本上属于亚热带季风气候和热带季风气候,而且云南地区正好位于季风交汇区域。此外,云南地区地势复杂,海拔高度差异很大,整个区域地势总体呈现出西北高、东南低的特点,且自北向南地势逐渐降低。而云南地区海拔的变化也导致了气温、降雨量和其它气象因素的变化。云南省年平均气温分布整体从滇西北向南随纬度降低而增加,极值气温低值区域主要分布在滇西北、滇东北[6]。云南省的降雨量分布极不均

匀, 存在季节性和区域性分布, 有着干季和雨季之分, 但大多数地区年降水量超过 1000 mm。

## 2.2. 数据来源

本次研究选取中国气象数据网地面气候资料日值数据集中云南地区 25 个气象站点 1990 年至 2019 年气象数据的逐日时序来计算云南地区蒸散量, 并对其进行定量分析, 探究研究区域蒸散量的时空变化特性。站点分布如图 1 所示。



**Figure 1.** The Yunnan region with the meteorological station analyzed in this study  
**图 1.** 研究区气象站分布

## 2.3. 计算方法

本次研究利用 R 语言包 Evapotranspiration 中的对应数值模型计算蒸散量[7], 主要使用了 Penman 模型、AA 模型、GG 模型 3 种数值模型[8]-[10]。本次研究中, 3 种数值模型计算蒸散量需要用到的数据包括经纬度、海拔高度、气温、相对湿度、风速、日照时数等。

此外, 本研究还将实际蒸发皿法计算的蒸散量用于评价上述模型的计算结果的可靠性, 虽然该方法中蒸发皿系数在较大区域较难准确确定, 可能导致计算存在较大误差, 但由于该方法基于实际观测蒸发推算蒸散量, 时间分布特征及变化趋势能够较好反应真实情况, 因此可以作为评价蒸发模型的有效参考。

Penman 模型依据能量平衡原理、水汽扩散原理及空气热导定律, 该方法由英国科学家 Penman 提出, 用于定量估算蒸散量, Penman 公式见式(1) [8]。

$$ET_1 = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n}{\lambda} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_a \quad (1)$$

式中,  $ET_1$  为蒸散量, mm/d。

Brutsaer 等根据 Bouchet 提出的陆面实际蒸散与潜在蒸散互补相关原理, 并结合相关公式来计算蒸散量, 提出了 AA (the advection-aridity model) 模型, 公式见式(2) [9]。

$$ET_2 = (2\alpha_{pr} - 1) \frac{\Delta}{\Delta + \lambda} \frac{R_n}{\lambda} - \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(u_2) (v_a^* - v_a) \quad (2)$$

式中,  $ET_2$ 为蒸散量, mm/d;  $\alpha_{PT}$ 为经验系数, 取 1.28;  $u_2$ 为 2 米高处风速, m/s;  $\nu_a^*$ 为日饱和水汽压, kPa;  $\nu_a$ 为平均每日实际水汽压, kPa。

Granger 等运用 Dolton 的蒸发定律推导出实际蒸散发与潜在蒸散发的互补关系, 并进一步引进相对蒸散发的概念, 计算饱和/非饱和陆面的实际蒸散量, 提出了 GG 模型, 公式见式(3) [10]。

$$ET_3 = \frac{\Delta G_g}{\Delta G_g + \gamma} \frac{R_n - G}{\lambda} - \frac{\gamma G_g}{\Delta G_g + \gamma} E_a \quad (3)$$

式中,  $ET_3$ 为蒸散量, mm/d;  $G_g$ 为无量纲相对蒸散发因子;  $G$ 为土壤热通量, MJ/m<sup>2</sup>·d。

式(1) (3)中,  $E_a$ 为空气干燥力, mm/d。

式(1) (2) (3)中,  $\Delta$ 为饱和水汽压曲线斜率, kPa/°C;  $\gamma$ 为干湿表常数, kPa/°C;  $R_n$ 为蒸发面的净入射太阳辐射, MJ/(m·d);  $\lambda$ 为热通量, W/m<sup>2</sup>。

蒸发皿法是根据实测值与主要气象因子进行回归分析, 得到的经验公式, 公式见式(4) [11]。

$$ET_0 = K_p \times E_{pan} \quad (4)$$

式(4)中,  $ET_0$ 为潜在蒸散量, mm/d;  $K_p$ 为蒸发皿系数, 云南地区  $K_p$ 取值为 0.72 [12];  $E_{pan}$ 为蒸发皿蒸发量, mm/d。

### 3. 结果与讨论

#### 3.1. 模型比较

根据 Penman 模型 AA 模型、GG 模型计算的云南省多年平均蒸散发量分别为: 1296 mm、1482 mm 及 863 mm, 由实际蒸发皿法估算的蒸散发量为 1160 mm。从数值上看 Penman 法与实际蒸发皿法计算结果较为接近。而从蒸散发年内分配上看, 三种方法中 Penman 法与实际蒸发皿法的计算结果在年内分配特征上最为接近(图 2)。综上可以基本判定 Penman 模型较为适用于云南地区蒸散发估算。AA 模型计算结果与实际蒸发皿法计算结果差异较大, 并且年内分配特征与其他两种方法及实际蒸发皿法计算结果有明显差异(图 2), 可以认为 AA 模型难以很好的计算云南地区蒸散发量。因此在后续蒸散发量时空特征分析中仅采用 Penman 模型及 GG 模型的计算结果进行统计分析。

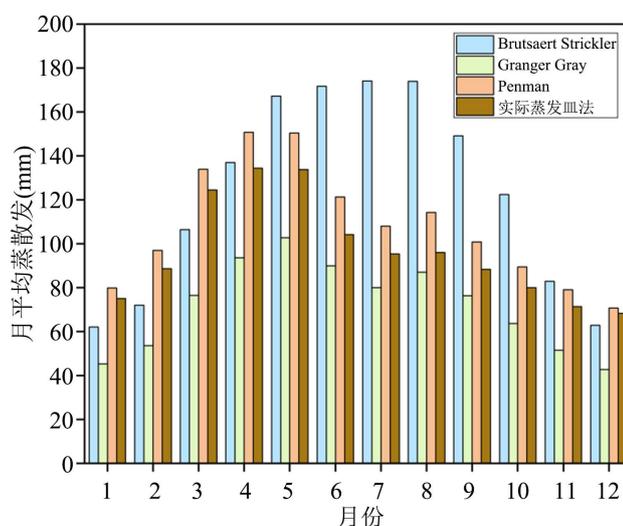
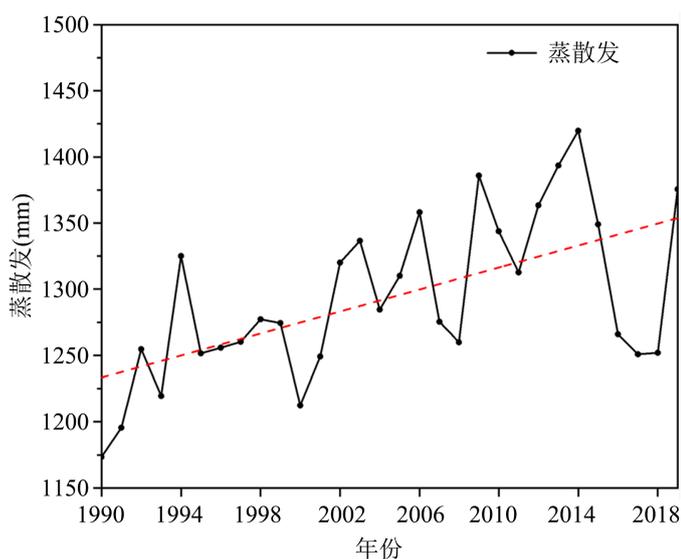


Figure 2. Annual distribution of evapotranspiration in the Yunnan region (Penman model)

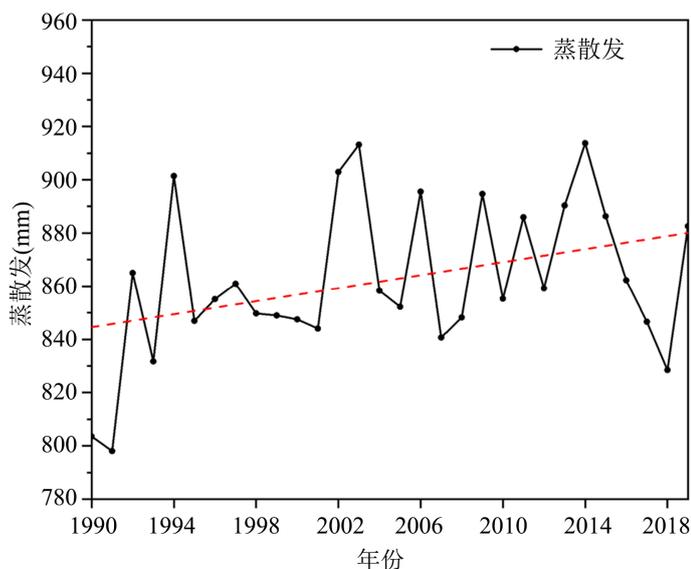
图 2. 多模型蒸散发年内分配计算结果

### 3.2. 时间变化特征

基于 Penman 模型、GG 模型两种数值模型的蒸散发计算结果, 绘制了 1990~2019 年蒸散发量年际变化过程线(图 3、图 4), 用于反映云南地区蒸散发长时序变化特征、及其总体变化趋势。1990~2019 年间云南地区蒸散发整体呈现波动增加趋势, 且随着时间推移年际间变化幅度逐渐增加。上述变化特征极有可能与区域气候变化高度相关。根据陈恩波等[13]基于云南省近 50 年观测资料的梳理, 云南省气候变化呈现气温增加, 降水减少的趋势, 其中气温增加幅度较为明显(升温率达  $0.24^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ )。高强度增温作用, 致使区域土壤、水面蒸发、植物散发水平相应升高, 甚至影响海拔较高的滇西北地区冰雪蒸发过程, 导致区域整体蒸散发显著提升。



**Figure 3.** Variation of the annual evapotranspiration in the Yunnan region (Penman model)  
**图 3.** 蒸散发量年际变化特征(Penman 模型)



**Figure 4.** Variation of the annual evapotranspiration in the Yunnan region (GG model)  
**图 4.** 蒸散发量年际变化特征(GG 模型)

从图 2 反映的蒸散发年内分配情况来看, 云南省的蒸散发具有较为明显地季节性波动, 其中春季、夏季蒸散发量较高, 而冬季最低。从月尺度上看, 云南省蒸散发量在的 5、6 月份最大, 在每年的 11 月~次年 1 月份相对较小。

### 3.3. 空间分布特征

多年平均蒸散发量的空间分异特征如图 5、图 6 所示。基于 Penman 模型、GrangerGray 模型两种数值模型计算的蒸散量均大致呈现自滇西北向滇南逐渐增加趋势, 与黄英等[14]研究结论“年蒸散量滇西北少, 滇中地区次之, 滇南地区最多的趋势一致”相互印证。上述分布格局与区域地势由北向南阶梯状分布有关, 亦与纬度差异造成的气温变化梯度有关。

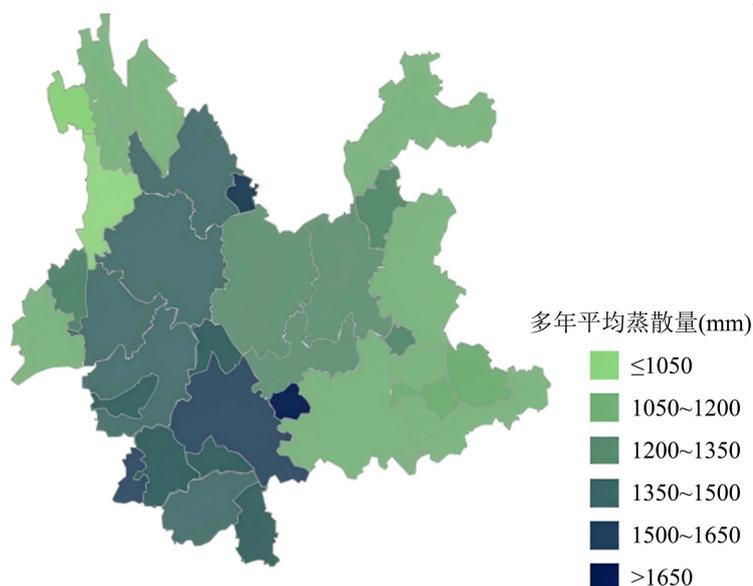


Figure 5. Spatial distribution of average evapotranspiration in the Yunnan region (Penman model)

图 5. 多年平均蒸散量空间分布(Penman 模型)

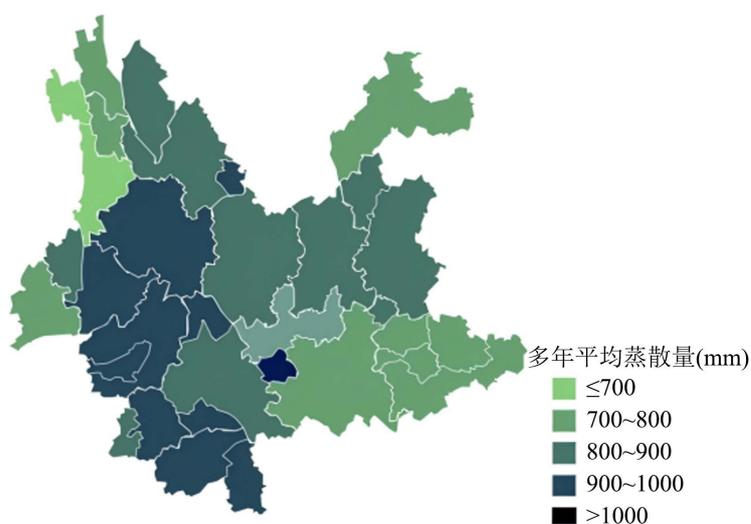


Figure 6. Spatial distribution of average evapotranspiration in the Yunnan region (GG model)

图 6. 多年平均蒸散量空间分布(GG 模型)

上述蒸散发量空间分布格局在怒江、澜沧江流经的“条带状”区域尤为明显。上述两条河流位于横断山脉的纵向岭谷区,为纵向发育河流,流域水热分布格局受到通道-阻隔效应影响[15]-[17],呈现降雨量自流域中下游(滇西北)向滇南逐渐增多趋势,区域气温亦呈现增加趋势,导致河流上下游地表生态格局存在明显差异,致使该区域多年平均蒸散发量存在沿河流的条带状变化特征。从两种模型蒸散发计算结果的空间分异特征对比上看, Penman 模型计算结果与云南省地理单元梯度变化特征更为契合。

此外,从不同站点多年平均量的角度上看,位于滇西北怒江流域贡山站的多年平均蒸散发量最小。而位于滇南地区的元江站最大,该站点为于元江流域干热河谷区,受焚风效应影响,该区域炎热少雨,蒸散发量极高,孕育了中国唯一的“萨王纳”稀树草原。

#### 4. 结论

本文研究了云南地区蒸散量的时空变化特征,主要结论为:

1) 根据三种模型方法的对比, Penman 模型在云南地区蒸散量的计算中最为适用, AA 模型在云南地区蒸散发量的计算中不太适用。

2) 近 30 年,云南地区蒸散发量呈增加趋势,且增幅逐渐变大,具有较为明显的季节性特点,年内蒸散发量存在峰谷值,春、夏两季蒸散发量最大,冬季节最小。

3) 云南地区的蒸散发受地势及气温变化梯度影响,具有明显的梯度变化特征,随着海拔从北到南逐渐降低,蒸散发量逐渐增加。滇西北地区蒸散发量较少,而越是接近滇南及滇西南地区,蒸散发量越大,而在怒江、澜沧江流域多年平均蒸散发量沿河流呈条带状变化。

#### 参考文献

- [1] 李汇文,王世杰,白晓永,等.西南近50年实际蒸散发反演及其时空演变[J].生态学报,2018,38(24):8835-8848.
- [2] 李晓媛,于德永.蒸散发估算方法及其驱动力研究进展[J].干旱区研究,2020,37(1):26-36.
- [3] 刘波,翟建青,高超,等.基于实测资料对日蒸散发估算模型比较[J].地球科学进展,2010,25(9):974-980.
- [4] 韩松俊,胡和平,田富强.三种通过常规气象变量估算实际蒸散发量模型的适用性比较[J].水利学报,2009,40(1):75-81.
- [5] 袁旭.基于数据驱动模型的西南跨境流域水文过程模拟及变化响应研究[D]:[博士学位论文].昆明:云南大学,2023.
- [6] 张万诚,郑建萌,马涛,等.1961-2012年云南省极端气温时空演变规律研究[J].资源科学,2015,37(4):710-722.
- [7] Guo, D., Westra, S. and Maier, H.R. (2016) An R Package for Modelling Actual, Potential and Reference Evapotranspiration. *Environmental Modelling & Software*, **78**, 216-224. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.12.019>
- [8] Penman, H.L. (1948) Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. *Mathematical and Physical Sciences*, **193**, 120-145.
- [9] Brutsaert, W. and Stricker, H. (1979) An Advection-Aridity Approach to Estimate Actual Regional Evapotranspiration. *Water Resources Research*, **15**, 443-450. <https://doi.org/10.1029/wr015i002p00443>
- [10] Granger, R.J. and Gray, D.M. (1989) Evaporation from Natural Nonsaturated Surfaces. *Journal of Hydrology*, **111**, 21-29. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(89\)90249-7](https://doi.org/10.1016/0022-1694(89)90249-7)
- [11] 许迪,刘钰.测定和估算田间作物腾发量方法研究综述[J].灌溉排水,1997,16(2):54-59.
- [12] 袁旭.基于MIKE SHE水文模型的补远江流域径流模拟研究[D]:[硕士学位论文].昆明:云南大学,2019.
- [13] 陈恩波,广键梅,张开源.1961-2010年云南省气候变化特征分析[J].农学学报,2017,7(5):60-68+95.
- [14] 黄英,王宇.云南省蒸发量时空分布及年际变化分析[J].水文,2003(1):36-40.
- [15] 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.
- [16] 万云霞,张万诚,肖子牛.中国西南纵向岭谷地区可降水量的变化特征[J].自然资源学报,2008(4):657-664.
- [17] 何云玲,张一平.纵向岭谷区“通道-阻隔”作用下气温和降雨的空间分布特征[J].山地学报,2007(2):169-176.