

西藏地区潜在蒸散量变化特征及灰色模型 预测初探

史继清¹, 边多¹, 杨霏云², 甘臣龙³, 樊栋樑²

(1. 西藏自治区气候中心, 西藏 拉萨 850000;

2. 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081;

3. 墨竹工卡县气象局, 西藏 拉萨 850000)

摘要: 基于西藏地区 38 个气象站点 1981—2019 年逐日气象资料, 采用 Penman-Monteith 模型、趋势分析、Morlet 小波分析、Mann-Kendall 检验、经验正交函数法 (Empirical orthogonal function, EOF) 和灰色模型探究潜在蒸散量 (ET_0) 的时空演变规律以及未来 ET_0 的变化趋势。结果表明: 在时间尺度上, 西藏地区 ET_0 平均为 597.12mm, 1981—2001 年呈显著的减少趋势、2002—2019 年呈显著的增加趋势 ($P < 0.01$); 西藏全区及五大气候区年均 ET_0 均呈现增加趋势 (除东南部), 且均以 33a 的周期震荡为第一主周期。在空间尺度上, 年 ET_0 主要呈现由中部中心向西南和东南逐步递减的分布特征, 高值中心集中在沿江一线, 低值中心位于南部地区。年 ET_0 发生突变的站点主要分布在南部边缘地区、沿江一线和东北部, 发生时间集中在 20 世纪 80 年代。构建的 GM (1,1) 预测模型预测精度均值为 87.85%, 可用于西藏年均 ET_0 日期序列的中长期预测, 预测结果显示, 除东南部年 ET_0 的预测值有明显下降, 其他区域均呈现上升态势。

关键词: 西藏; Penman-Monteith 模型; 潜在蒸散量; 时空分析; 灰色模型

1 ET_0 时空分布特征

1.1 西藏 ET_0 的变化特征

近 39a 来西藏那曲中西部和沿江一线 ET_0 的多年均值比较接近, 分别为 663.25 mm 和 728.91 mm, 南部边缘和东南部 ET_0 较接近, 分别为 510.14 mm 和 537.42 mm, 而东北部最少, 为 436.28 mm。全区年均 ET_0 为 597.12 mm, 1981—2001 年呈显著的减少趋势, 2002—2019 年呈显著的增加趋势, 下降、上升率分别为 $88.41 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 、 $109.70 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ (图 2a); 2 个不同时间段的高值区均分布在那曲中西部和沿江一线, 其余研究区属于低值区 (图 2b~c)。

基金项目: 西藏自治区自然科学基金 (XZ202001ZR0033G); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目 (2019QZKK0105, 2019QZKK0106) 资助

作者简介: 史继清 (1988-), 女, 工程师, 硕士研究生, 主要从事农业气象灾害、遥感方面研究. E-mail: 549923050@qq.com

通讯作者: 边多 (1966-), 男, 正研级高工, 硕士研究生, 主要从事卫星遥感与资源环境评价方面研究. E-mail: 1213098351@qq.com
在《干旱区地理》发表。

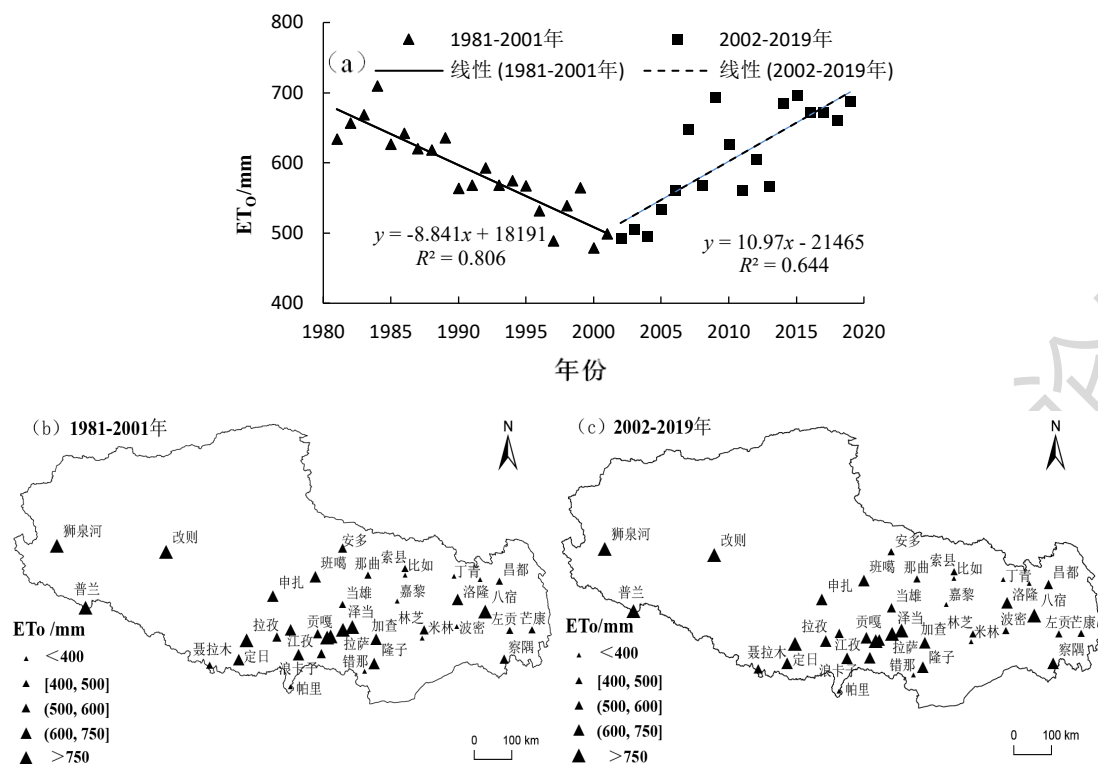


图 2 全区潜在蒸散量 (ET_0) 年际变化及空间变化

Fig. 2 Interannual and spatial variations of ET_0 in the whole region

1.2 西藏年 ET_0 的 EOF 分析

第一模态 (EOF1) 特征向量的方差贡献率为 51.5%，在整个研究区域均为正值，表明 1981—2019 年西藏的年 ET_0 变化趋势在空间上具有高度的一致性。年 ET_0 高值中心位于沿江一线，低值中心位于南部地区，整体空间分布呈现出由中部中心向西南和东南逐步递减的分布特征 (图 3a)。

第一模态 (EOF1) 时间序列 (图 3d) 可以看出，1981—1989 年、2007 年、2009—2010 年、2012 年、2014—2019 年的时间系数大于零，表明这 5 个时段西藏地区年 ET_0 呈上升趋势，这与西藏年蒸散的变化趋势相吻合，反之，其他时间段年 ET_0 呈下降趋势。

第二模态 (EOF2) 的贡献率为 12.1%，西藏年 ET_0 在空间上表现为西藏中西部正值中心与西藏东南部负值中心呈相反的空间变化特征 (图 3b)。EOF2 时间序列可以看出 (图 3e)，西藏中西部 ET_0 大幅度增加，而西藏东南部呈递减趋势。

第三模态 (EOF3) 的贡献率为 6.0%，该模态下西藏 ET_0 呈现中南、东南正值中心与西北部负值中心的分布特征 (图 3c)。从 EOF3 时间序列发现 (图 3f)，1981—2019 年 EOF3 时间系数在正负间振荡，表明西藏地区 ET_0 年际间的变化趋势显著。

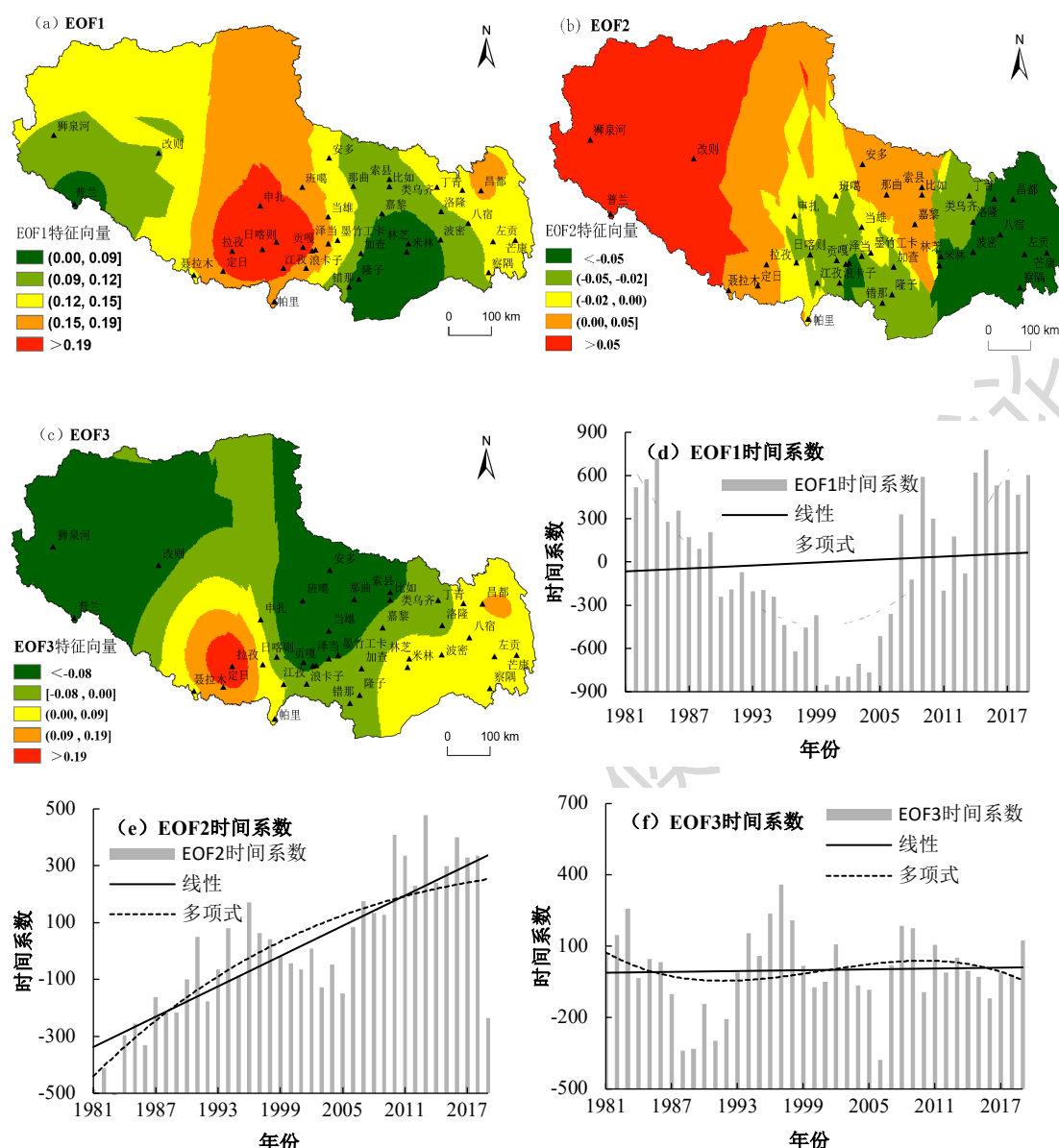


图3 西藏年 ET_0 的经验正交函数 (EOF) 模态分析

Fig. 3 EOF Modal Analysis of ET_0 in Tibet

2 ET_0 突变分析

2.1 西藏年 ET_0 变化趋势分析

西藏地区 38 个站点 1981—2019 年年 ET_0 的 Kendall 趋势系数空间分布如图 4a, 从图中可以看出, Kendall 趋势系数为负值的气象站点有 15 个, 其中贡嘎、隆子、八宿站 ET_0 下降趋势非常显著, 其 Kendall 趋势系数分别为-4.63、-2.67 和-4.53。Kendall 趋势系数为正值的气站共 23 个, 占总站点数量的 61%, 主要集中在那曲中西部和南部边缘地区, 且西藏最长连续无降水日数的高值区主要位于干旱与半干旱气候区^[29], 可见该区域气候出现了暖干化现象; 此外, 狮泉河、

聂拉木、拉萨、帕里、索县和米林站的上升趋势均达到显著性水平。

2.2 西藏年 ET_0 突变分析

本文针对 Yamamoto 法，基于时间序列（1981—2019 年），人为设置某一时刻为基准点，基准点前后长度分别取 $n_1=n_2=3$ 、 $n_1=n_2=5$ ，结果发现仅那曲和当雄站发生 2 次突变，20 个站发生 1 次突变，其余站未发生突变。38 个气象站点的突变年份中（表略），在 20 世纪 80 年代发生突变的台站最多（13 个），其次是 21 世纪 10 年代（8 个）。发生突变的站点主要分布在南部边缘地区、沿江一线和东北部，其中南部边缘地区所属站点全部发生突变，且出现年 ET_0 上升的突变（除隆子），表明该区域年 ET_0 变化具有强敏感性；未发生突变的站点主要集中在那曲中西部。

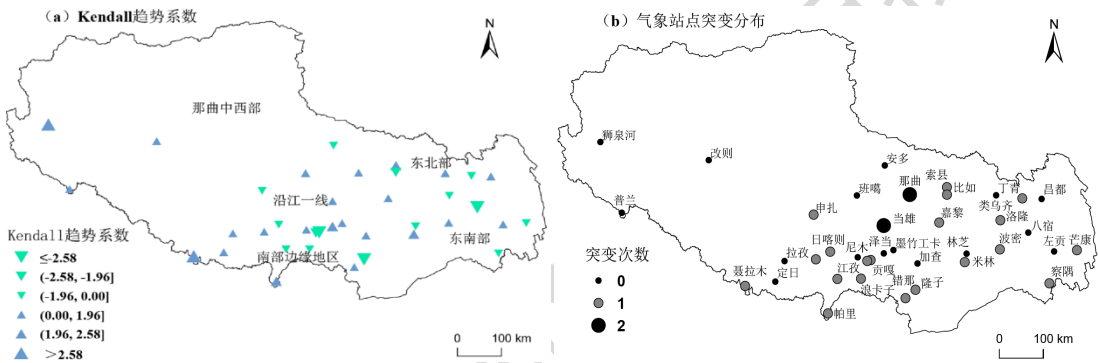


图 4 西藏地区 ET_0 的 Kendall 趋势系数和气象站点突变分布

Fig.4 Kendall trend coefficient of ET_0 and mutation distribution of weather stations in Tibet

3 ET_0 周期变化特征

近 39a 来全区、沿江一线 ET_0 经历了“偏大—偏小”交替过程；而在 11a 时间尺度也存在较为密集的正负交替，表明该区域 ET_0 在短时间尺度上存在更多“偏大期”和“偏小期”（图 5a、5c）。通过小波方差检验确定全区、沿江一线年均 ET_0 在 33a 时间尺度上达最高小波方差，即为第一主周期，此外在 11a 的时间尺度上对应第二主周期（图 5g、i）。那曲中西部年平均 ET_0 在 30~35a、20~25a 和 3~8a 时间尺度呈现交替过程（图 5b），加之方差验证（图 5h），第一主周期为 33a，第二、三主周期分别在 22a 和 3a。图 5d 表明南部边缘地区在 30~35a 存在正负交替的周期振荡，而在 8~12a 存在密集正负交替，进一步通过图 5j 可见，小波方差图有 3 个峰值，其 3 个主周期分别是 33a、8a 和 12a。图 5e 中，东北部大时间尺度在 30~35a，目前处于偏大时期，小时间尺度 3~8a 较为密集，结合图 5k 来看，33a 和 8a 分别是第一、二主周期。图 5f 显示东南部大时间尺度在 30~35a，小时间尺度 3~5a、8~12a 时间尺度交替相对密集，通过图 5l 检验，小波方差图

有 4 个峰值，共 4 个主周期分别是 33a、22a、12a 和 5a。

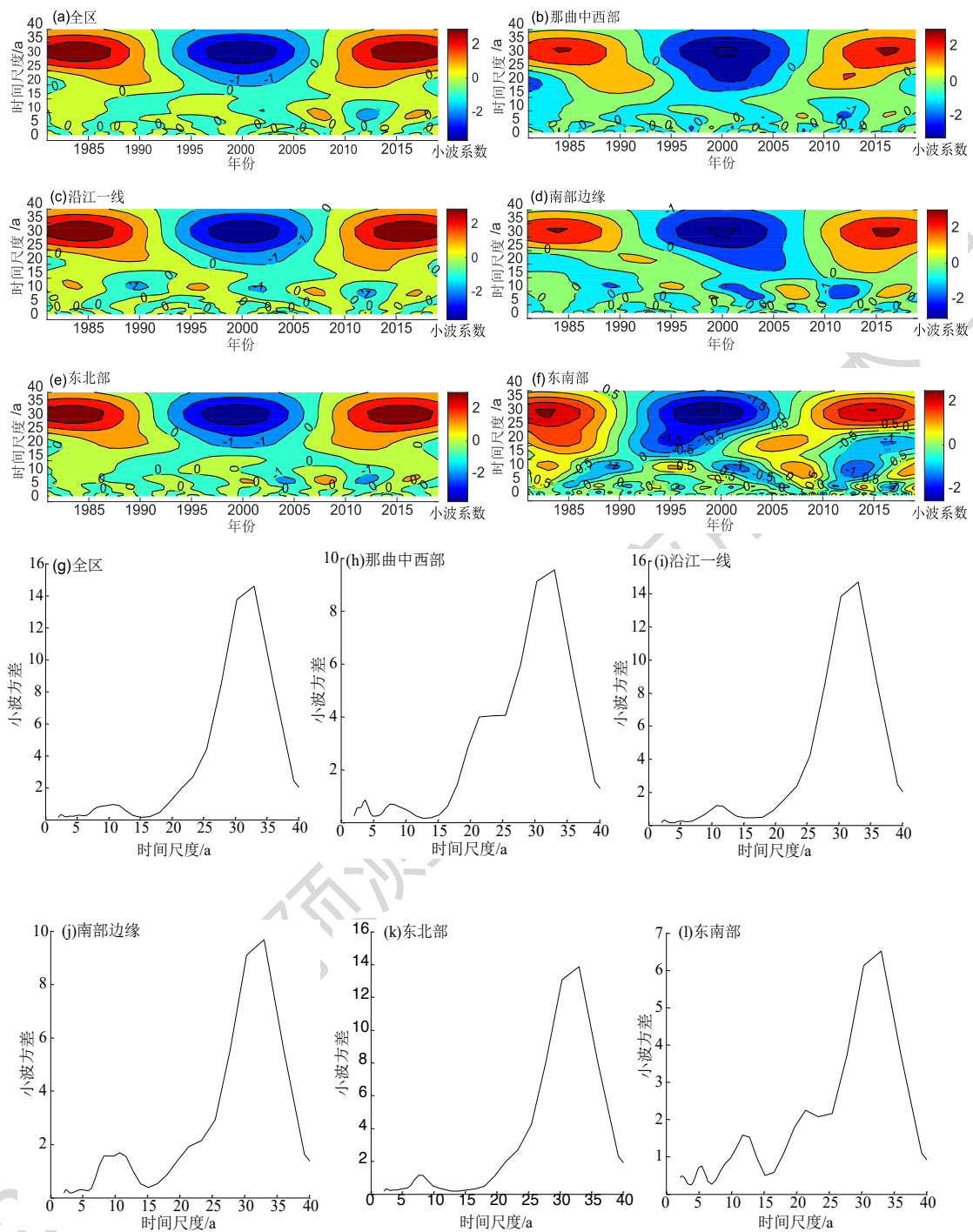


图 5 西藏 ET_0 在全区及五大气候区的 Morlet 小波变换实部时频分布和小波方差检验

Fig.5 Time-frequency distribution of real part of Morlet wavelet transform and wavelet variance test of ET_0 in the whole region and the five major climate regions in Tibet

4 灰色预测模型

由表可见，该模型灰参数 $a \geq -0.3$ 且 $a \in (-2, 2)$ ，加上级比是平滑的，符合灰色系统理论范畴；预测精度检验在 80% 以上的站点有 33 个（25 个三级、8 个二

级)，占研究站点总数的 87%，故本文构建的 GM (1,1) 模型适用于西藏年均 ET_0 日期序列的中长期预测。

剔除不合格建模的 5 个站点，分别构建全区及五大气候区的灰色模型(表略)，并根据各预测模型分别得出西藏 2020—2039 年和 2020—2050 年年均 ET_0 的预测值。分析发现，东南部年均 ET_0 有明显下降趋势，其他区域均呈现上升态势（南部边缘地区上升最快），且 2 组预测值的气候倾向率基本无变化。 ET_0 的变化必然是受到西藏气候的影响，最终其变化趋势将直接影响到当地的水资源及生态状况。

表 1 各站点 GM (1,1) 模型的参数和检验结果

Tab.1 Parameters and test results of GM (1,1) model at each site

气候区	站点	模型中的参数		预测精度%	级比 $\sigma^{(0)}$	气候区	站点	模型中的参数		预测精度%	级比 $\sigma^{(0)}$
		a	u					a	u		
那曲中西部	那曲	-0.0036	424.38	86.55	0.61~1.66	南部边缘地区	聂拉木	-0.0076	421.78	91.60	0.78~1.21
	班戈	-0.0016	657.56	89.71	0.62~1.51		定日	-0.0025	670.98	88.46	0.80~1.31
	申扎	0.0012	710.82	87.12	0.65~1.32		隆子	0.0037	752.32	93.24	0.80~1.19
	当雄	-0.0043	443.73	81.01	0.58~1.63		错那	-0.0064	258.23	89.19	0.76~1.31
	安多	0.0008	508.92	87.29	0.65~1.44		帕里	-0.0071	310.47	88.95	0.63~1.27
	狮泉河	-0.0061	740.05	91.36	0.77~1.24	东南部	林芝	-0.0006	483.09	87.46	0.65~1.82
	普兰	-0.0011	784.19	94.75	0.80~1.18		波密	-0.0034	353.26	87.46	0.77~1.35
	改则	0.0003	862.05	92.26	0.78~1.37		察隅	0.0002	575.12	81.51	0.74~1.52
沿江一线	拉萨	-0.0079	693.78	90.42	0.46~1.62		左贡	-0.0031	403.29	86.99	0.74~1.78
	泽当	0.0047	1001.80	87.58	0.57~1.78		芒康	0.0007	467.01	85.04	0.66~1.27
	日喀则	-0.0105	526.21	85.61	0.70~1.40		米林	-0.0034	327.10	90.58	0.79~1.31
	江孜	0.0009	688.26	86.10	0.68~1.28		八宿	0.0073	1227.70	89.23	0.53~1.42
	浪卡子	-0.0009	592.48	90.30	0.70~1.34	东北部	昌都	-0.0148	349.23	74.83	0.62~1.42
	拉孜	-0.0003	884.31	79.57	0.46~1.62		丁青	-0.0055	321.21	79.52	0.68~1.84
	尼木	-0.0060	514.40	63.90	0.60~1.87		索县	-0.0083	369.50	80.44	0.64~1.68
	贡嘎	0.0113	924.95	88.36	0.56~1.35		嘉黎	-0.0038	298.42	87.83	0.73~1.39
	墨竹工卡	-0.0012	792.12	88.23	0.71~1.32		比如	0.0059	427.13	83.81	0.66~1.21
	加查	-0.0012	634.69	89.50	0.73~1.43		洛隆	0.0022	732.76	88.66	0.66~1.36
	南木林	0.0063	678.85	59.13	0.44~1.44		类乌齐	0.0019	375.38	85.66	0.62~1.57

注：参数 a 、 u 为 GM (1,1) 预测模型待定系数， a 是模型的发展系数， u 是内生控制系数。

参考文献 (References)

- [1] 曹永强, 肖春柳, 李元菲. 河北省春季潜在蒸散量变化特征与成因[J]. 水土保持研究, 2019, 26(5): 195-209. [Cao Yongqiang, Xiao Chunliu, Li Yuanfei. Characteristics and causes of potential evapotranspiration in spring in Hebei Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(5): 195-209.]
- [2] 徐宗学. 水文模型[M]. 北京: 科学出版社, 2009. [Xu Zongxue. Hydrological modelling[M]. Beijing: Meteorological Press, 2009.]

- [3] Brutsaert W, Parlange M B. Hydrologic cycle explains the evaporation paradox[J]. *Nature*, 1998, 396(6706): 30.
- [4] 张璐, 朱仲元, 张圣微, 等. 近 59 a 锡林河流域潜在蒸散发及地表干湿状况变化趋势分析[J]. *干旱区地理*, 2020, 43(4): 997-1003. [Zhang Lu, Zhu Zhongyuan, Zhang Shengwei, et al. Trends of potential evapotranspiration and surface wet conditions in the Xilin River Basin in recent 59 years[J]. *Arid Land Geography*, 2020, 43(4): 997-1003.]
- [5] 赵志平, 吴晓蕾, 李果, 等. 2009—2011 年我国西南地区旱灾程度及其对植被净初级生产力的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(2): 350-360. [Zhao Zhiping, Wu Xiaofu, Li Guo, et al. Drought severity and its impact on vegetation net primary productivity in southwest China from 2009 to 2011[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(2): 350-360.]
- [6] 秦鹏程, 刘敏, 刘志雄, 等. 湖北省潜在蒸散发估算模型对比[J]. *干旱气象*, 2014, 32(3): 334-339. [Qin Pengcheng, Liu Min, Liu Zhixiong, et al. Comparison of potential evapotranspiration estimation models in Hubei Province[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2014, 32(3): 334-339.]
- [7] 穆文彬, 孙素艳, 马伟希, 等. 若尔盖湿地潜在蒸散量演变特征及影响因素分析[J]. *高原气象*, 2019, 38(4): 716-724. [Mu Wenbin, Sun Suyan, Ma Weixi, et al. Analysis on evolution characteristics and influencing factors on evapotranspiration of Zoige wetland[J]. *Plateau Meteorology*, 2019, 38(4): 716-724.]
- [8] Wilber L Q, Ricardo Z B, Pedro, et al. Can artificial neural networks estimate potential evapotranspiration in Peruvian highlands?[J]. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2019, 5(4): 1911-1924.
- [9] 拉巴, 除多, 德吉央宗. 基于 SEBS 模型的藏北那曲蒸散量研究[J]. *遥感技术与应用*, 2012, 27(6): 919-926. [La Ba, Chu Duo, Deji Yangzong. Study on evapotranspiration in northern Tibet based on SEBS model[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2012, 27(6): 919-926.]
- [10] 钟巧, 焦黎, 李稚, 等. 博斯腾湖流域潜在蒸散发时空演变及归因分析[J]. *干旱区地理*, 2019, 42(1): 103-112. [Zhong Qiao, Jiao Li, Li Zhi, et al. Spatial and temporal changes of potential evapotranspiration and its attribution in the Bosten Lake Basin[J]. *Arid Land Geography*, 2019, 42(1): 103-112.]
- [11] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements[R]. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome, 1998.
- [12] Song X Y, Lu F, Xiao W H, et al. Performance of 12 reference evapotranspiration estimation methods compared with the Penman-Monteith method and the potential influences in northeast China[J]. *Meteorological Applications*, 2019, 26(1): 83-96.
- [13] Yang Y, Chen R S, Song Y X, et al. Sensitivity of potential evapotranspiration to meteorological factors and their elevational gradients in the Qilian Mountains, northwestern China[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 568: 147-159.
- [14] Zhao Y F, Zou X Q, Cao L G, et al. Spatiotemporal variations of potential evapotranspiration and aridity index in relation to influencing factors over Southwest China during 1960—2013[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2018, 133(3-4): 711-726.
- [15] 杜军, 边多, 拉巴, 等. 1971—2005 年西藏主要农区农田蒸散量变化特征及其与环境因子的关系[J]. *冰川冻土*, 2009, 31(5): 815-821. [Du Jun, Bian Duo, La Ba, et al. Changes in evapotranspiration in the main agriculture areas of central Tibet and its relation to the environment

- factors in 1971—2005[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(5): 815-821.]
- [16] 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. Spatiotemporal variation of reference evapotranspiration in Tibet[J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(6): 775-781.]
- [17] 毛飞, 卢志光, 张佳华, 等. 近 40 年那曲地区气候特征分析[J]. *高原气象*, 2007, 26(4): 708-715. [Mao Fei, Lu Zhiguang, Zhang Jiahua, et al. Analysis on climate characteristics in Naqu in recent 40 years[J]. *Plateau Meteorology*, 2007, 26(4): 708-715.]
- [18] 何慧根, 胡泽勇, 荀学义, 等. 藏北高原季节性冻土区潜在蒸散和干湿状况分析[J]. *高原气象*, 2010, 29(1): 10-16. [He Huigen, Hu Zeyong, Xun Xueyi, et al. Analysis on potential evapotranspiration and dry-wet conditions in seasonal frozen soil region of northern Tibetan Plateau[J]. *Plateau Meteorology*, 2010, 29(1): 10-16.]
- [19] 张娜, 金建新, 佟长福, 等. 西藏参考作物蒸散量时空变化特征与影响因素[J]. *干旱区研究*, 2017, 34(5): 1027-1034. [Zhang Na, Jin Jianxin, Tong Changfu, et al. Spatiotemporal variation of evapotranspiration of referred crops and the affecting factors in Tibet[J]. *Arid Zone Research*, 2017, 34(5): 1027-1034.]
- [20] 唐小萍, 罗礼洪, 卓玛, 等. 气候变化对西藏雅鲁藏布江中游地区潜在蒸散量的影响分析[J]. *高原山地气象研究*, 2011, 31(3): 49-53. [Tang Xiaoping, Luo Lihong, Zhuo Ma, et al. Impact analysis of climate change on potential evapotranspiration over midstream of Yarlung Zangbo River in Tibetan Plateau[J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 2011, 31(3): 49-53.]
- [21] 温克刚, 刘光轩. 中国气象灾害大典(西藏卷)[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 21-25. [Wen Kegang, Liu Guangxuan. *Chinese meteorological disasters (Tibet Volume)*[M]. Beijing: Meteorological Press, 2007: 21-25.]
- [22] 甘臣龙. 基于作物生育期的潜在蒸散的时空演变特征及 R/S 分析[J]. *西藏科技*, 2015(5): 53-56, 59. [Gan Chenlong. Spatiotemporal evolution characteristics and R/S analysis of potential evapotranspiration based on crop growth period[J]. *Tibet Science and Technology*, 2015(5): 53-56, 59.]
- [23] 李红瑛, 薛羽, 曹二佳, 等. 近 50 年来乌兰察布市水分盈亏量时空变化特征[J]. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(12): 145-151. [Li Hongying, Xue Yu, Cao Erjia, et al. Spatiotemporal variation characteristics of water deficit in Ulanqab during the latest 50 years[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33(12): 145-151.]
- [24] Liu H J, Li Y, Josef T, et al. Quantitative estimation of climate change effects on potential evapotranspiration in Beijing during 1951—2010[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(1): 93-112.
- [25] Jung J. Spatial analysis of the vulnerability to meteorological hazards in Korea[J]. *Journal of Climate Research*, 2018, 13(3): 211-229.
- [26] 赵峰, 毕硕本, 李兴宇, 等. 基于 EOF 和 REOF 的 1470—1911 年黄河中下游地区旱涝空间分布特征分析[J]. *干旱区地理*, 2019, 42(4): 799-809. [Zhao Feng, Bi Shuoben, Li Xingyu, et al. Spatial characteristics of drought/flood disasters based on EOF and REOF in the middle and lower reaches of the Yellow River[J]. *Arid Land Geography*, 2019, 42(4): 799-809.]
- [27] Cheng M L, Shi G J, Xiang M Y. On the improvement of the parameter estimation of the grey model GM(1, 1) and model application[J]. *Communications in Statistics-Simulation and Computation*, 2020, 49(5): 1367-1384.

- [28] 郭建平, 陈玥煜, 赵俊芳. 新疆棉花热量指数的灰色预测方法[J]. 干旱区地理, 2010, 33(5): 710-715. [Guo Jianping, Chen Yueyi, Zhao Junfang. Grey forecasting model of heat index of cotton in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2010, 33(5): 710-715.]
- [29] 张核真, 尼玛吉, 多吉次仁. 近 50 年西藏最长连续无降水日数变化特征[J]. 中国农学通报, 2016, 32(35): 151-154. [Zhang Hezhen, Ni Maji, Duoji Ciren. Variation characteristics of the longest continuous no-precipitation days in Tibet in recent 50 years[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(35): 151-154.]
- [30] 王娜. 对构建西藏生态安全屏障的几点思考[J]. 西藏发展论坛, 2011(3): 43-46. [Wang Na. Some thoughts on the construction of ecological security barrier in Tibet[J]. The Theoretical Platform of Tibetan Development, 2011(3): 43-46.]
- [31] 史战红, 刘敏, 牛雪娜. 基于灰色预测的甘南农牧民收入趋势分析[J]. 甘肃科学学报, 2019, 31(6): 8-11. [Shi Zhanhong, Liu Min, Niu Xuena. Trend analysis of incomes and herdsmen in Gannan Tibetan autonomous prefecture based on Grey Prediction[J]. Journal of Gansu Sciences, 2019, 31(6): 8-11.]
- [32] 赵俊芳, 郭建平, 房世波, 等. 未来气候情景下西藏地区的干湿状况变化趋势[J]. 中国农业气象, 2011, 32(1): 61-66. [Zhao Junfang, Guo Jianping, Fang Shibo, et al. Trends of Tibet's dry-wet condition under future climate scenario[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2011, 32(1): 61-66.]
- [33] 曹雯, 申双和, 段春锋. 中国西北潜在蒸散时空演变特征及其定量化成因[J]. 生态学报, 2012, 32(11): 3394-3403. [Cao Wen, Shen Shuanghe, Duan Chunfeng. Temporal-spatial variations of potential evapotranspiration and quantification of the causes in northwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(11): 3394-3403.]
- [34] 卓嘎, 尼玛央珍, 唐小萍. 1980—2009 年西藏西北部潜在蒸散时空分布特征及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2016, 33(4): 698-707. [Zhuo Ga, Nima Yangzhen, Tang Xiaoping. Spatiotemporal distribution of potential evapotranspiration and its influencing factors in northwest Tibet from 1980 to 2009[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(4): 698-707.]