

# 云南省四季潜在蒸散量时空演变的主导气象因子分析

谢平<sup>1,2</sup>, 龙怀玉<sup>1</sup>, 张杨珠<sup>2</sup>, 张认连<sup>1</sup>

(1. 中国农业科学院 农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 湖南农业大学 资源环境学院, 长沙 410128)

**摘要:**基于1981—2011年云南省52个站点气象数据,通过敏感系数和贡献率法,定量分析了各站点冬春夏秋季潜在蒸散量变化的成因。结果表明:(1)1981—1990年、1991—2011年春、夏、秋季,云南省各站点潜在蒸散量均对平均气温最敏感,其次是相对湿度和日照时数,对风速的敏感性最低;冬季有部分站点以相对湿度的敏感系数最大。(2)蒸散量变化的主导因子因季节不同而不同。1981—1990年,绝大多数站点冬季蒸散量变化主导因子为平均气温,其他季节多数站点主导因子为日照时数;1991—2011年,冬、春、秋季,多数站点以平均气温为主导因子,夏季则以日照时数为主导因子的站点居多。(3)主导因子空间分布格局有差异。平均气温是云南省东部地区冬季蒸散量变化的主导因子,日照时数是中南部地区夏季蒸散量变化的主导因子,春、秋季节,前后时间段主导因子区域差异较大。这些结果表明云南省蒸散量变化的主导因子具有阶段性、季节性和区域差异性。

**关键词:**云南省;潜在蒸散量;季节;气象因子;敏感系数;贡献率

**中图分类号:**S161.4

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2017)02-0184-04

## Dominant Meteorological Factors of Spatiotemporal Variations of Seasonal Potential Evapotranspiration in Yunnan Province During the Period from 1981 to 2011

XIE Ping<sup>1,2</sup>, LONG Huaiyu<sup>1</sup>, ZHANG Yangzhu<sup>2</sup>, ZHANG Renlian<sup>1</sup>

(1. *Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China*; 2. *College of Resources and Environment, Hu'nan Agricultural University, Changsha 410128, China*)

**Abstract:** Based on the data of 52 meteorological stations in Yunnan Province from 1981 to 2011, we quantitatively analyzed the main factors affecting the change of seasonal potential evapotranspiration in each station by sensitivity coefficient and the contribution rate. The results show that: (1) the average temperature was the most sensitive variable for seasonal  $ET_0$  in each station, and then followed by relative humidity, sunshine hours in spring, summer and autumn in the period from 1981 to 1990 and from 1991 to 2011, the sensitive of wind speed was the lowest; in winter, relative humidity was the most sensitive factor in a few stations; (2) the main factor of  $ET_0$  change in most stations was different with seasons; from 1981 to 1990 in most stations, the determining factor of winter  $ET_{0w}$  was average temperature, and sunshine hours were the determining factor of other three seasons; from 1991 to 2011 in most stations, the  $ET_0$  changed in summer mainly due to the sunshine hours, and other seasons were average temperature; (3) the spatial distribution patterns of main factors were different. The rise of average temperature was the dominating factor leading to the increase of winter  $ET_{0w}$  in the eastern region, and the sunshine hour was the main factor of summer  $ET_{0e}$  change in south-central area; in spring and summer, the regional diversity of the dominating factor was relatively obvious in different periods. The above results indicated that the dominating factor affecting the  $ET_0$  in Yunnan Province had the characteristics of stage, season and region.

**Keywords:** Yunnan Province; potential evapotranspiration; seasons; meteorological factors; sensitivity coefficient; contribution rate

潜在蒸散量(Potential evapotranspiration,  $ET_0$ )是陆面水平衡和地表能量平衡的重要组成部分,与降

水共同决定了区域干湿状况,同时也是预测作物需水、指导合理灌溉、监测地表旱情、评价生态环境等的

重要参数<sup>[1]</sup>。

近几十年来,国内外学者在潜在蒸散量演变机制方面有了不少的研究。在印度<sup>[2]</sup>、美国<sup>[3]</sup>、泰国<sup>[4]</sup>等国家的研究表明,由于风速和太阳辐射的减少,ET<sub>0</sub>整体上表现为下降趋势;Dinpashoh等<sup>[5]</sup>发现伊朗北部地区的ET<sub>0</sub>呈增加趋势,并主要归因于风速的上升和相对湿度的减小。不少学者对我国新疆<sup>[6]</sup>、吉林<sup>[7]</sup>、北京<sup>[8]</sup>、河南<sup>[9]</sup>、河北<sup>[10]</sup>、四川<sup>[11]</sup>等地区,黄河流域<sup>[12-14]</sup>、长江流域<sup>[15]</sup>、黑河流域<sup>[16-17]</sup>等区域ET<sub>0</sub>的研究也表明,不同地区ET<sub>0</sub>变化趋势不同,即ET<sub>0</sub>变化特征有区域差异,同时影响ET<sub>0</sub>的主导因子也存在空间差异。

潜在蒸散量的变化与气候因子密切相关。Mcvicar等<sup>[18]</sup>认为在评估蒸散量的变化趋势时,应考虑风速、湿度、辐射、气温等气象因子;尹云鹤等<sup>[1]</sup>、段永红等<sup>[8]</sup>认为,ET<sub>0</sub>的变化不仅受气候因子的影响,而且海拔、地形等地理条件的变化会导致地表温度和热量平衡的变化,影响ET<sub>0</sub>的时空变异。云南地处云贵高原主体,地形复杂,气候类型多样,干湿季分明,其ET<sub>0</sub>影响因子应该有着其自身的特征。彭桂芬等<sup>[19]</sup>、段旭等<sup>[20]</sup>的研究表明,云南省降水、气温等气候因子区域差异性、季节差异性显著,这使得ET<sub>0</sub>变化的主导因子可能存在区域差异和季节差异。云南是我国干旱灾害发生频率较高的地区之一,尤其是2009—2012年四年连旱<sup>[21]</sup>造成了重大经济损失。而潜在蒸散量可用于旱涝灾害的监测,其变化与气象因子密切相关,研究蒸散量的主导因子有助于旱涝灾害的准确监测。因此,本文利用云南省52个气象站点1981—2011年气象数据,从春夏秋冬四季分析各站点气候要素对同期ET<sub>0</sub>变化的影响,揭示ET<sub>0</sub>的演变与气候因子变化之间的关系以及探讨主导因子的区域差异和季节差异,以期更好地认识云贵高原ET<sub>0</sub>的演变规律,从而增强对旱涝灾害发生预测的准确性,为优化配置水资源,评价不同地区的干湿状况等提供理论指导。

## 1 资料和方法

### 1.1 资料

气象数据来源于国家气象中心,包括云南省52个站点1981—2011年各候平均气温、最高气温、最低气温、相对湿度、日照时数、气压、风速等气象资料及各站点经纬度、海拔等资料。一般5d为一候,一个月6候,一年72候,67—72,1—12候为冬季,13—30候为春季,31—48候为夏季,49—66候为秋季。以FAO推荐的Penman-Monteith公式<sup>[22]</sup>计算ET<sub>0</sub>。

### 1.2 研究方法

1.2.1 ET<sub>0</sub>计算方法:Penman-Monteith公式(PM公式)

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U)} \quad (1)$$

式中: $R_n$ 为输入冠层净辐射量(MJ/m<sup>2</sup>); $G$ 为土壤热通量(MJ/m<sup>2</sup>); $T$ 为平均温度(°C); $U$ 为2m高处风速(m/s); $e_s$ 为饱和水汽压(kPa); $e_a$ 为实际水汽压(kPa); $\Delta$ 为饱和水汽压与温度关系曲线在某处的斜率(kPa/°C); $\gamma$ 为干湿温度计常数(kPa/°C)。

云南省各站点年均潜在蒸散量以ET<sub>0y</sub>表示;冬、春、夏、秋季蒸散量分别以ET<sub>0w</sub>,ET<sub>0s</sub>,ET<sub>0e</sub>,ET<sub>0u</sub>表示。

1.2.2 潜在蒸散量变化影响因子时间段的选取 由图1可以看出,1981—2011年云南省ET<sub>0y</sub>整体上线性趋势变化不明显,变化率仅为0.81 mm/a,最小值出现在1990年。1981—1990年,ET<sub>0y</sub>以-4.45 mm/a的速率下降;1991—2000年和2001—2011年,ET<sub>0y</sub>上升速率分别为1.06 mm/a,1.86 mm/a。由上可知,1981—2011年,云南省ET<sub>0y</sub>的整体增率掩盖了80年代ET<sub>0y</sub>下降的事实,若从整段时间分析,会忽略其阶段性变化规律。另有研究表明,中国年均ET<sub>0</sub>的变化在90年代初期发生了明显趋势转折<sup>[23]</sup>,云南省气候带<sup>[24]</sup>、降水<sup>[25]</sup>等也存在年代际差异,尤其是1990年以来是气候带变化最大的时期。因此,对云南省ET<sub>0</sub>的演变机制按时间段分析很有必要。1991—2000年、2001—2011年ET<sub>0y</sub>均表现为上升趋势,因此合并为一个研究时段,而1981—1990年,ET<sub>0y</sub>呈下降趋势,因此单独作为一个研究时段。运用气候变化趋势转折判别模型<sup>[26]</sup>分析1981—2011年云南省ET<sub>0y</sub>的转折特征,结果表明1981—1990年,1991—2011年也为满足趋势转折判别条件的最佳分段组合,即1990年为蒸散量变化的转折点,因此本文对云南省各站点ET<sub>0</sub>影响因子的分析也以1990年为分界点。

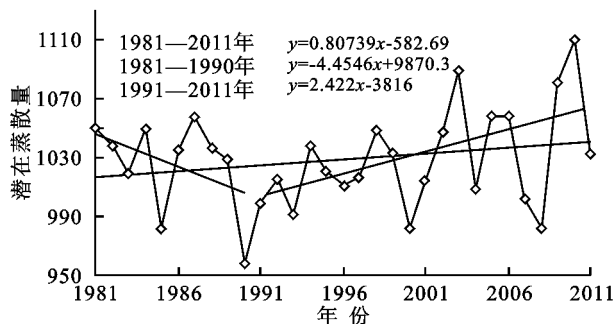


图1 1981—2011年云南省年均ET<sub>0</sub>的变化过程

1.2.3 变化特征 ET<sub>0</sub>与气象因子的变化趋势由线

性回归法获得,以斜率表示。

#### 1.2.4 基于敏感系数的贡献率分析

(1) 敏感分析。PM 模型属于多变量模型,需要对其进行无量纲化来计算相对敏感系数,相对敏感系数的计算方法如下<sup>[1]</sup>:

$$S_x = \frac{\Delta ET_0}{\Delta X} \cdot \frac{|X|}{ET_0}$$

式中: $S_x$  为  $X$  的敏感系数,表示气候变量  $X$  变化所导致的  $ET_0$  变化,如敏感系数等于 0.5,代表该变量增加(减少)10%,在其他变量不变的情况下, $ET_0$  将增加(减少)5%; $\Delta X$  为气候要素  $X$  的变化, $X$  取绝对值; $\Delta ET_0$  为  $\Delta X$  引起的  $ET_0$  变化。 $S$  取正值表明  $ET_0$  随  $X$  的增大而增大,反之亦然。本文以气候要素变化 $\pm 10\%$ ,求得相应的敏感系数后,再求两者的平均值,得到最终的敏感系数。

Lenhart<sup>[27]</sup>将敏感系数分为 4 个等级,见表 1。

表 1 敏感系数等级

敏感系数	敏感程度
$0.00 \leq  S_x  < 0.05$	忽略
$0.05 \leq  S_x  < 0.20$	中
$0.2 \leq  S_x  < 1.00$	高
$ S_x  \geq 1$	非常高

(2) 气候因子对  $ET_0$  的贡献。单个气象因子的敏感系数与该因子的多年相对变化率相乘,得到由此因子引起  $ET_0$  的变化,即该因子对  $ET_0$  变化的贡献<sup>[1]</sup>。若引起  $ET_0$  增加称为正贡献,引起  $ET_0$  减小称为负贡献。根据贡献率绝对值的大小,可以判断影响  $ET_0$  变化的主导因子,绝对值越大,对  $ET_0$  影响越大,绝对值最大的因子,为主导因子。表达形式如下:

$$Con_x = S_x \cdot RC_x; RC_x = \frac{a \cdot bX}{|V_x|} \times 100\%$$

式中: $Con_x$  表示气象因子  $X$  对  $ET_0$  变化的贡献率; $RC_x$  表示  $X$  的多年相对变化率; $a, b$  分别表示相应研究时段的年数、 $X$  的倾向率; $V_x$  表示相应时间段  $X$  的平均值。

本文从平均气温、相对湿度、风速和日照时数的变化来探究站点  $ET_0$  变化的机制。

## 2 结果与分析

### 2.1 冬季潜在蒸散量变化成因分析

2.1.1 敏感性分析 云南省站点潜在蒸散量对气象因子的敏感性有明显区域差异。从表 2(相关风速数据未列出)可以看出,站点  $ET_{0w}$  对平均气温的敏感系数为 0.46~1.97,这表明平均气温对  $ET_{0w}$  的影响在不同站点差异是较大的。 $ET_{0w}$  对相对湿度的敏感系数为 -0.27~-2.59,其变化与相对湿度的变化趋势

相反,其中有 25 个站点的敏感程度达到了“非常高”。 $ET_{0w}$  对风速的敏感系数为 -0.20~0.28,有 21 个站点敏感系数在 0.05 以下,即这些站点风速对  $ET_{0w}$  的影响可忽略。 $ET_{0w}$  对日照时数的敏感系数为 0.14~0.43,多数站点达到了“高”等级。52 个站点中,昭阳等 26 个站点以相对湿度的敏感系数绝对值最大,即这些站点  $ET_{0w}$  对相对湿度的敏感程度最高;其他站点均以平均气温的敏感系数最大。

1991—2011 年,站点  $ET_{0w}$  对平均气温的敏感系数为 0.42~1.90,均达到了“高”等级。 $ET_{0w}$  对相对湿度的敏感系数绝对值除耿马外,其他站点均在 0.2 以上。 $ET_{0w}$  对风速的敏感程度仅在玉龙、巧家站点达到了“高”,其他站点为“中”或可忽略其影响。 $ET_{0w}$  对日照时数的敏感程度在镇雄等 5 个站点为“中”,在其他站点均为“高”。玉龙等 38 个站点以平均气温的敏感系数最高,永胜等 14 个站点则以相对湿度的敏感系数绝对值最大。

2.1.2 贡献率分析  $ET_0$  的变化与气象因子的变化密切相关。由表 2 可知,1981—1990 年冬季,平均气温仅在南华、施甸、耿马站点呈下降趋势,对  $ET_{0w}$  为负贡献;其余 49 个站点气温均呈上升趋势,贡献率为 0.99%~36.04%,多数站点贡献率在 10% 以下。相对湿度在 18 个站点呈上升趋势,对  $ET_{0w}$  为负贡献,在其他 34 个站点对  $ET_{0w}$  表现为正贡献。风速在 33 个站点贡献率绝对值在 1% 以下,贡献率较小。日照时数对  $ET_{0w}$  表现有正负贡献的站点基本一致,贡献率基本为 -4.94%~5.98%。

1991—2011 年冬季,平均气温、相对湿度在所有站点均为正贡献,贡献率分别为 1.48%~28.87%,0.74%~16.84%。平均风速在 28 个站点表现为下降趋势,其中包括砚山等在内的 8 个站点风速对  $ET_{0w}$  为正贡献,在另外 24 个站点中,有 12 个站点风速对  $ET_{0w}$  为负贡献。日照时数在 30 个站点表现为上升趋势,对  $ET_{0w}$  为正贡献,其他站点,日照时数的贡献率为 -3.23%~-0.02%。

2.1.3 主导因子的时空差异 1981—1990 年冬季,  $ET_{0w}$  变化以平均气温为主导因子的站点有 41 个,在云南省东南地区分布较集中(图 2);以相对湿度为主导因子的 5 个站点主要集中分布于云南西北地区;以日照时数为主导因子的 5 个站点分布较零散,仅江川站点以风速为主导因子。1991—2011 年冬季,昭阳、南涧、墨江、石屏站点以相对湿度对  $ET_{0w}$  贡献最大,风速仅在巧家为主导因子,景东、宁洱站点以日照时数正贡献最大,其他 45 个站点主导因子均为平均气温。

表 2 冬季不同时段气象因子的敏感系数、变化率及贡献率

地区	1981—1990 年									1991—2011 年								
	平均气温			相对湿度			日照时数			平均气温			相对湿度			日照时数		
	$S_X$	$b_X$	con <sub>X</sub>	$S_X$	$b_X$	con <sub>X</sub>	$S_X$	$b_X$	con <sub>X</sub>	$S_X$	$b_X$	con <sub>X</sub>	$S_X$	$b_X$	con <sub>X</sub>	$S_X$	$b_X$	con <sub>X</sub>
昭阳	0.46	0.46	21.22	-1.72	-0.07	12.18	0.21	0.26	5.41	0.42	0.20	8.51	-1.30	-0.07	8.75	0.21	-0.04	-0.75
镇雄	0.49	0.61	29.82	-2.02	-0.04	7.34	0.15	0.21	3.18	0.48	0.29	13.94	-1.66	-0.05	7.50	0.12	0.18	2.20
玉龙	0.65	0.08	5.39	-0.77	0.04	-3.29	0.14	0.04	0.58	0.61	0.24	14.73	-0.62	-0.13	8.16	0.15	0.07	1.05
永胜	0.71	0.07	5.06	-0.86	0.00	-0.31	0.19	-0.01	-0.24	0.72	0.13	9.20	-0.82	-0.06	4.83	0.21	-0.01	-0.17
鹤庆	0.63	0.10	6.16	-0.66	0.03	-2.23	0.20	-0.01	-0.21	0.65	0.20	12.73	-0.63	-0.02	1.09	0.20	0.10	2.12
永仁	0.98	0.01	1.10	-0.76	0.05	-3.98	0.24	0.00	0.04	1.03	0.13	13.06	-0.83	-0.06	4.98	0.26	0.01	0.17
巧家	0.96	0.11	10.29	-0.53	-0.07	3.86	0.16	0.10	1.59	0.89	0.07	6.69	-0.45	-0.15	6.69	0.17	0.04	0.63
宣威	1.00	0.18	17.88	-2.02	-0.07	15.00	0.17	0.15	2.48	0.79	0.16	12.44	-1.21	-0.09	11.08	0.18	-0.18	-3.23
腾冲	0.83	0.13	11.05	-0.74	-0.04	2.92	0.31	0.01	0.29	0.87	0.12	10.44	-0.72	-0.11	7.74	0.31	0.15	4.73
云龙	0.91	0.05	4.43	-0.87	0.10	-8.27	0.25	-0.01	-0.18	0.85	0.15	12.69	-0.74	-0.13	9.33	0.27	0.08	2.13
永平	0.84	0.03	2.43	-0.76	0.02	-1.75	0.32	-0.06	-1.84	0.89	0.10	8.76	-0.83	-0.04	3.19	0.34	0.08	2.59
隆阳	0.88	0.11	9.31	-0.78	0.00	-0.10	0.32	0.06	1.92	0.73	0.09	6.72	-0.45	-0.04	1.69	0.33	0.14	4.49
宾川	0.94	0.08	7.61	-0.65	-0.02	1.21	0.26	0.00	0.00	0.94	0.12	11.65	-0.62	-0.05	3.01	0.27	0.02	0.60
弥渡	1.00	0.04	4.19	-0.89	0.00	0.27	0.26	-0.04	-1.13	0.90	0.21	18.96	-0.69	-0.16	11.04	0.27	0.09	2.53
祥云	1.00	0.03	2.57	-1.07	0.07	-7.88	0.16	-0.01	-0.24	1.01	0.24	23.73	-1.05	-0.13	13.52	0.18	0.14	2.49
南华	0.88	-0.02	-1.98	-0.94	0.08	-7.98	0.29	0.02	0.45	0.87	0.15	12.71	-0.92	-0.06	5.75	0.32	0.06	1.81
楚雄	0.75	0.18	13.25	-0.60	-0.10	5.77	0.28	0.01	0.17	0.85	0.12	10.36	-0.66	-0.11	7.47	0.25	0.16	4.09
禄劝	0.97	0.02	2.40	-1.02	0.01	-0.79	0.28	-0.17	-4.76	0.95	0.25	23.91	-0.91	-0.19	16.84	0.27	-0.05	-1.35
禄丰	1.04	0.05	4.74	-1.09	0.00	-0.29	0.33	-0.03	-0.89	1.00	0.17	17.09	-0.93	-0.07	6.29	0.31	0.18	5.54
寻甸	0.99	0.11	11.21	-1.28	-0.05	6.26	0.22	0.10	2.22	0.74	0.22	15.93	-0.69	-0.06	4.21	0.24	-0.09	-2.12
马龙	1.28	0.14	18.03	-2.22	-0.04	8.71	0.18	0.00	0.03	1.09	0.15	16.44	-1.56	-0.06	9.42	0.21	-0.01	-0.31
陆良	1.22	0.13	15.48	-1.64	-0.05	7.99	0.21	-0.02	-0.33	1.08	0.17	18.84	-1.27	-0.10	12.76	0.21	0.00	0.08
盈江	0.84	0.05	4.58	-0.35	-0.02	0.64	0.43	-0.04	-1.52	0.78	0.13	9.79	-0.24	-0.13	3.23	0.40	0.17	6.87
施甸	0.78	0.00	-0.08	-0.52	0.03	-1.43	0.33	-0.07	-2.44	0.83	0.21	17.17	-0.54	-0.24	12.97	0.31	0.17	5.46
凤庆	1.03	0.06	6.51	-0.79	-0.02	1.23	0.27	-0.05	-1.48	0.99	0.06	6.14	-0.71	-0.04	3.12	0.28	0.00	0.02
南涧	1.20	0.06	7.72	-0.77	0.03	-2.11	0.18	-0.01	-0.20	1.20	0.03	3.24	-0.79	-0.06	4.86	0.21	0.03	0.68
云县	1.23	0.08	9.92	-0.76	-0.06	4.30	0.32	-0.06	-1.85	1.14	0.11	12.40	-0.63	-0.15	9.51	0.32	0.10	3.12
景东	0.69	0.04	2.74	-0.26	-0.04	0.97	0.36	-0.14	-4.94	0.72	0.05	3.67	-0.28	-0.10	2.80	0.36	0.20	7.28
双柏	1.03	0.11	11.00	-1.05	-0.04	4.15	0.22	0.05	1.14	1.16	0.12	13.41	-1.20	-0.05	5.51	0.21	0.11	2.29
镇沅	0.99	0.04	4.14	-0.58	-0.02	0.91	0.35	0.06	2.05	0.96	0.13	12.16	-0.49	-0.02	0.74	0.36	-0.02	-0.69
新平	1.26	0.06	8.09	-1.09	-0.04	3.97	0.27	0.03	0.86	1.33	0.07	8.70	-1.13	-0.06	6.42	0.29	0.06	1.80
澄江	1.14	0.07	7.47	-1.25	-0.02	3.10	0.28	0.12	3.20	1.01	0.18	18.41	-0.90	-0.11	10.29	0.26	-0.07	-1.84
红塔	1.04	0.09	9.05	-1.08	-0.03	2.85	0.31	-0.05	-1.67	0.99	0.11	11.21	-0.82	-0.08	6.74	0.27	0.21	5.67
江川	0.92	0.01	0.99	-0.90	0.00	-0.38	0.33	-0.02	-0.63	0.90	0.27	24.04	-0.77	-0.15	11.34	0.32	0.10	3.27
华宁	1.06	0.05	5.45	-1.10	-0.04	4.15	0.32	-0.02	-0.62	0.87	0.29	24.80	-0.69	-0.16	10.96	0.31	0.03	0.80
宜良	1.18	0.05	5.83	-1.28	-0.03	3.44	0.28	-0.14	-3.85	1.17	0.25	28.87	-1.11	-0.13	14.89	0.26	-0.01	-0.18
石林	1.41	0.14	19.79	-1.73	-0.08	13.25	0.24	-0.01	-0.25	0.99	0.21	20.82	-0.89	-0.10	9.09	0.25	-0.05	-1.16
师宗	1.38	0.23	32.03	-2.59	-0.09	22.62	0.23	0.09	2.05	1.04	0.15	15.45	-1.46	-0.05	7.44	0.22	0.07	1.45
弥勒	1.53	0.04	6.42	-1.63	0.01	-1.04	0.25	0.09	2.12	1.41	0.14	20.31	-1.39	-0.09	12.59	0.22	-0.10	-2.23
泸西	1.28	0.13	16.28	-1.75	-0.05	8.85	0.26	0.05	1.40	1.33	0.12	16.11	-1.74	-0.05	8.52	0.25	0.00	-0.02
丘北	1.25	0.19	23.32	-1.45	-0.06	8.54	0.26	0.23	5.98	1.15	0.13	14.54	-1.19	-0.10	12.36	0.23	-0.13	-2.90
罗平	1.43	0.25	36.04	-2.37	-0.06	14.63	0.19	0.27	5.12	1.28	0.06	7.54	-1.83	-0.03	4.90	0.18	-0.10	-1.90
峨山	1.01	0.03	3.42	-0.99	-0.01	1.17	0.35	-0.05	-1.70	1.12	0.19	21.50	-1.06	-0.07	7.89	0.32	0.03	0.99
耿马	0.89	-0.03	-2.84	-0.46	0.05	-2.32	0.40	-0.03	-1.09	0.70	0.08	5.64	-0.19	-0.10	1.84	0.38	-0.07	-2.59
临翔	0.76	0.05	3.43	-0.37	-0.05	1.87	0.32	0.09	2.84	0.74	0.09	7.02	-0.31	-0.14	4.31	0.33	0.10	3.44
宁洱	1.03	0.05	5.26	-0.63	-0.01	0.94	0.33	0.26	8.31	0.97	0.05	4.73	-0.50	-0.07	3.68	0.36	0.20	7.31
墨江	1.14	0.05	5.24	-0.75	0.01	-0.70	0.35	0.03	1.05	1.06	0.01	1.48	-0.64	-0.12	7.67	0.34	0.08	2.67
石屏	1.20	0.07	8.66	-0.90	-0.03	2.89	0.29	0.12	3.61	1.22	0.06	7.50	-0.92	-0.10	8.74	0.29	-0.01	-0.18
建水	1.49	0.07	9.96	-1.17	0.00	-0.06	0.25	-0.02	-0.49	1.44	0.10	15.01	-1.08	-0.10	10.71	0.23	0.06	1.35
砚山	1.97	0.14	26.69	-2.54	-0.02	5.91	0.25	0.20	5.10	1.90	0.07	12.52	-2.29	-0.02	4.44	0.23	-0.02	-0.40
文山	1.91	0.12	23.20	-1.92	-0.03	6.44	0.25	0.06	1.39	1.57	0.08	13.19	-1.36	-0.07	9.50	0.24	0.09	2.26
马关	1.39	0.13	18.60	-1.39	-0.01	1.09	0.24	0.00	0.09	1.44	0.03	4.02	-1.36	-0.02	2.24	0.23	-0.02	-0.36

注： $S_X$  表示敏感系数； $b_X$  表示变化率；平均气温的单位为  $^{\circ}\text{C}/\text{a}$ ；相对湿度的单位为  $\%/\text{a}$ ；风速的单位为  $\text{m}/\text{s}$ ；日照时数的单位为  $\text{h}/\text{a}$ ；con<sub>X</sub> 表示贡献率，单位均为  $\%$ ，下同。

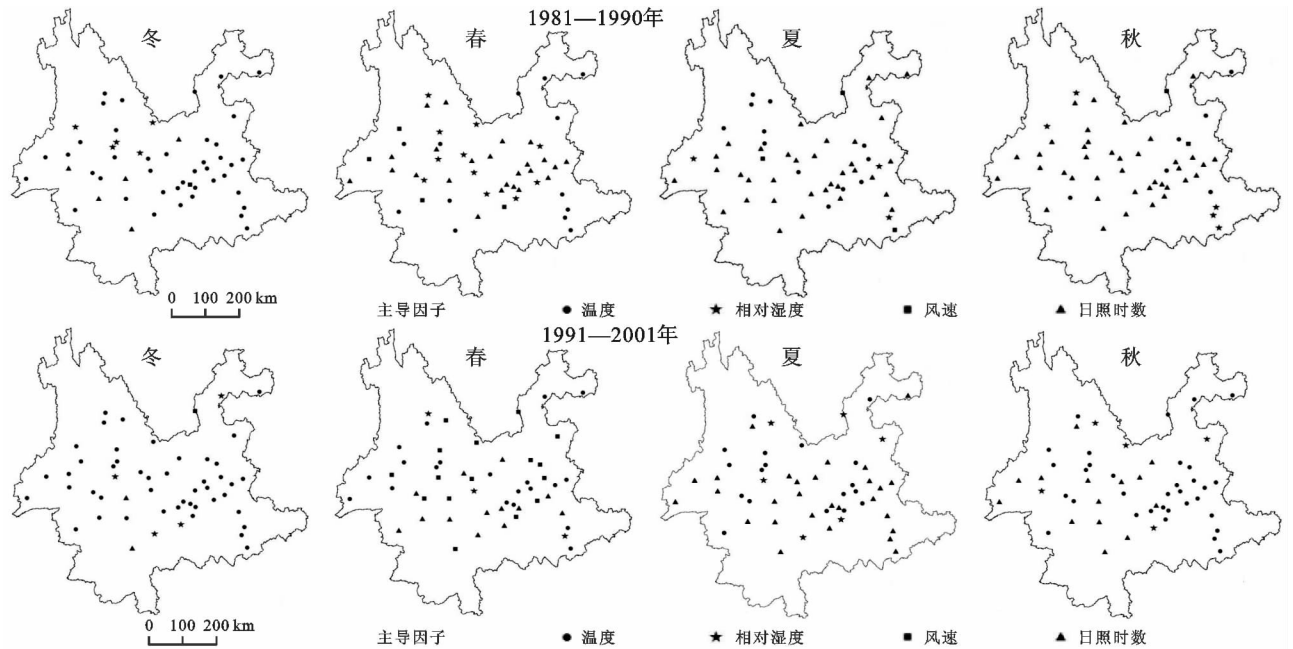


图3 各时段各季节潜在蒸散量变化的主导因子

## 2.2 春季潜在蒸散量变化成因分析

2.2.1 敏感性分析 1981—1990年春季(表3),  $ET_{0s}$ 对平均气温的敏感程度均达到了“高”及以上等级。 $ET_{0s}$ 对相对湿度的敏感程度仅景东站点为“中”,其他站点均为“高”或以上等级。 $ET_{0s}$ 对风速的敏感程度在施甸等32个站点敏感程度为“中”或“高”等级,在其他站点的敏感性可忽略。 $ET_{0s}$ 对日照时数的敏感系数除巧家为0.19外,在其他站点敏感程度均达到了“高”。

1991—2011年春季, $ET_{0s}$ 对平均气温的敏感系数均在0.7以上,对相对湿度的敏感程度除景东站点外,均达到“高”或以上等级,对风速的敏感系数在多数站点为“中”等级,对日照时数的敏感系数为0.21~0.39,均为“高”等级。两个时间段的春季,各站点 $ET_{0s}$ 均对平均气温最敏感,其次是相对湿度,然后是日照时数,对风速的敏感程度最低。

2.2.2 贡献率分析 1981—1990年春季,平均气温、日照时数、相对湿度分别在36,46,39个站点对 $ET_{0s}$ 为负贡献;相应的其他站点则为负贡献。风速在38个站点呈下降趋势,其中有5个站点风速对 $ET_{0s}$ 为正贡献,其他14个站点,仅镇雄站点风速为负贡献。1991—2011年春季,平均气温、相对湿度、日照时数分别在14,16,45个站点对 $ET_{0s}$ 为负贡献,其他站点则为正贡献。风速变化对 $ET_{0s}$ 的贡献有正有负。

2.2.3 主导因子的时空差异 由图2可以看出,1981—1990年, $ET_{0s}$ 变化以日照时数为主导因子的站点有24个,主要集中分布于云南省中部地区。平均气温为主导因子的站点有13个,主要分布于云南

东北、东南、西南区域。相对湿度为主导因子的站点零散分布于云南中部。仅临翔、石屏站点 $ET_{0s}$ 变化以风速为主导因子。1991—2011年, $ET_{0s}$ 变化以平均气温、风速、日照时数为主导因子的站点分别有20,16,13个,以相对湿度为主导因子的只有玉龙、双柏、文山站点。日照时数为主导因子的站点集中分布于中南地区,其他气象因子为主导因子的站点区域差异不明显。

## 2.3 夏季潜在蒸散量变化成因分析

2.3.1 敏感性分析 1981—1990年夏季, $ET_{0e}$ 对平均气温的敏感程度除石林站点外,其他站点均达到了“非常高”。 $ET_{0e}$ 对相对湿度的敏感程度除石林站点外,其他站点均为“高”或以上等级。 $ET_{0e}$ 对风速的敏感系数在永胜等12个站点为正值,其他站点均为负值,多数站点绝对值在0.05及以下。 $ET_{0e}$ 对日照时数的敏感系数为0.20~0.34,敏感程度均为“高”。

1991—2011年夏季, $ET_{0e}$ 对平均气温、相对湿度的敏感程度达到了“高”或“非常高”。 $ET_{0e}$ 对风速的敏感系数绝对值仅在宾川等8个站点为“中”等级,在其他站点均低于0.5。 $ET_{0e}$ 对日照时数的敏感系数为0.22~0.34,敏感程度均为“高”。综合来看,夏季52个站点均以平均气温的敏感系数最大。

2.3.2 贡献率分析 1981—1990年夏季,平均气温在44个站点呈下降趋势,贡献率为-5.48%~-0.08%;呈上升趋势的8个站点中,镇雄站点贡献率最大,为2.18%。相对湿度在30个站点呈下降趋势,贡献率为0.15%~4.06%;相对湿度呈上升趋势的站点中,贡献率绝对值多数在1%以下。风速在38个站点呈下降趋势,

以巧家站点负贡献最大,贡献率为-1.80%,正贡献以马趋势,贡献率为-0.03%~-16.10%,其他 14 个站  
林站点最大,为 2.98%。日照时数在 38 个站点呈下降点贡献率基本为 0.07%~8.09%。

表 3 春季不同时段气象因子的敏感系数、变化率及贡献率

	1981—1990 年									1991—2011 年								
	平均气温			相对湿度			日照时数			平均气温			相对湿度			日照时数		
	$S_X$	$b_X$	$con_X$	$S_X$	$b_X$	$con_X$	$S_X$	$b_X$	$con_X$	$S_X$	$b_X$	$con_X$	$S_X$	$b_X$	$con_X$	$S_X$	$b_X$	$con_X$
昭阳	1.10	-0.05	-5.10	-0.98	0.02	-2.12	0.29	-0.16	-4.69	0.97	0.05	4.79	-0.74	-0.04	2.59	0.30	-0.06	-1.79
镇雄	1.19	-0.03	-3.34	-1.17	0.01	-1.66	0.24	-0.10	-2.49	1.07	0.08	8.38	-0.94	-0.07	7.03	0.23	0.02	0.41
玉龙	1.05	-0.04	-4.01	-0.69	0.08	-5.36	0.21	-0.09	-1.91	0.97	0.10	10.10	-0.56	-0.10	5.69	0.23	-0.03	-0.77
永胜	1.06	-0.03	-2.90	-0.61	0.01	-0.64	0.23	-0.14	-3.30	1.04	0.02	1.64	-0.57	-0.01	0.82	0.24	-0.08	-1.89
鹤庆	0.94	-0.02	-2.00	-0.51	0.04	-2.26	0.24	-0.14	-3.48	0.96	0.05	4.63	-0.50	0.07	-3.53	0.25	0.11	2.74
永仁	1.15	-0.03	-3.86	-0.45	0.09	-4.13	0.24	-0.09	-2.28	1.14	-0.01	-1.01	-0.46	0.07	-3.08	0.25	-0.11	-2.74
巧家	1.25	-0.03	-3.20	-0.43	0.02	-0.97	0.19	-0.06	-1.14	1.07	-0.01	-1.32	-0.32	-0.02	0.70	0.23	-0.10	-2.32
宣威	1.40	-0.05	-6.70	-1.04	0.03	-3.00	0.22	-0.13	-2.73	1.09	0.00	0.41	-0.65	-0.05	3.47	0.26	-0.14	-3.63
腾冲	1.09	0.03	3.28	-0.63	-0.06	3.65	0.31	-0.05	-1.55	1.08	0.05	5.41	-0.56	-0.08	4.70	0.32	0.14	4.62
云龙	1.10	-0.01	-1.19	-0.56	0.00	-0.03	0.25	0.03	0.80	1.03	0.05	5.04	-0.48	-0.07	3.22	0.27	-0.04	-0.98
永平	1.06	-0.03	-3.36	-0.55	0.01	-0.52	0.33	0.04	1.23	1.09	0.02	2.13	-0.55	-0.01	0.69	0.34	0.01	0.36
隆阳	1.12	0.02	2.53	-0.62	-0.02	1.44	0.33	0.13	4.40	0.87	0.02	2.03	-0.33	0.02	-0.65	0.36	-0.11	-3.77
宾川	1.06	-0.04	-4.53	-0.38	0.12	-4.55	0.25	-0.07	-1.72	1.03	0.01	0.54	-0.37	0.07	-2.47	0.28	-0.03	-0.92
弥渡	1.20	-0.01	-0.80	-0.58	0.01	-0.60	0.26	-0.09	-2.39	1.06	0.04	4.38	-0.44	-0.02	0.78	0.28	-0.05	-1.34
祥云	1.35	-0.03	-3.95	-0.81	0.04	-3.55	0.21	-0.08	-1.60	1.35	0.08	11.29	-0.78	-0.08	6.24	0.21	0.03	0.55
南华	1.13	-0.04	-5.06	-0.61	0.11	-6.55	0.29	-0.07	-1.95	1.12	0.02	2.69	-0.60	0.01	-0.62	0.32	-0.10	-3.13
楚雄	0.96	0.04	4.14	-0.41	-0.07	2.75	0.28	-0.24	-6.74	0.98	-0.01	-0.92	-0.40	0.01	-0.26	0.26	-0.08	-2.06
禄劝	1.17	0.01	0.69	-0.60	0.03	-2.06	0.28	-0.29	-8.13	1.03	0.03	3.44	-0.47	-0.10	4.94	0.28	-0.29	-8.18
禄丰	1.24	0.00	-0.57	-0.65	0.00	-0.06	0.32	-0.14	-4.34	1.14	0.03	3.13	-0.55	0.03	-1.40	0.32	-0.04	-1.19
寻甸	1.21	-0.02	-2.44	-0.73	0.03	-2.23	0.26	-0.09	-2.48	0.87	0.04	3.53	-0.37	0.01	-0.34	0.30	-0.24	-7.02
马龙	1.51	-0.04	-6.51	-1.09	0.07	-8.11	0.22	-0.21	-4.42	1.25	-0.01	-1.18	-0.77	0.03	-1.98	0.26	-0.15	-4.01
陆良	1.48	-0.02	-2.49	-0.96	0.02	-2.10	0.24	-0.23	-5.55	1.27	0.03	3.17	-0.70	-0.04	2.52	0.26	-0.11	-2.99
盈江	1.21	0.01	1.01	-0.49	-0.02	1.20	0.37	-0.31	-11.45	1.08	0.05	5.39	-0.36	-0.10	3.53	0.37	0.01	0.47
施甸	1.00	-0.01	-1.35	-0.44	-0.01	0.41	0.33	-0.15	-5.02	1.03	0.07	6.69	-0.43	-0.15	6.52	0.31	0.00	0.03
凤庆	1.14	0.02	2.72	-0.55	-0.06	3.21	0.28	-0.15	-4.34	1.11	0.00	-0.05	-0.51	0.05	-2.73	0.28	-0.23	-6.58
南涧	1.37	0.01	1.77	-0.56	0.03	-1.80	0.22	-0.01	-0.15	1.28	-0.02	-3.00	-0.51	0.06	-2.98	0.23	-0.18	-4.32
云县	1.54	0.04	6.56	-0.67	-0.10	6.74	0.26	-0.12	-3.25	1.31	0.03	3.69	-0.51	-0.06	3.23	0.27	-0.14	-3.83
景东	0.77	0.02	1.21	-0.19	-0.05	0.97	0.37	-0.16	-5.92	0.77	0.00	-0.30	-0.18	-0.04	0.69	0.38	-0.05	-2.05
双柏	1.25	-0.03	-3.39	-0.67	0.07	-4.74	0.24	-0.12	-2.81	1.34	-0.02	-3.30	-0.73	0.11	-7.96	0.23	-0.19	-4.41
镇沅	1.07	0.01	1.43	-0.38	0.02	-0.64	0.33	-0.04	-1.32	0.96	0.01	1.14	-0.31	0.07	-2.19	0.36	-0.09	-3.36
新平	1.34	-0.01	-1.35	-0.64	0.05	-3.10	0.26	-0.08	-2.03	1.33	-0.03	-4.61	-0.62	0.04	-2.70	0.30	-0.16	-4.72
澄江	1.24	-0.01	-1.43	-0.70	0.04	-3.05	0.30	-0.16	-4.76	1.08	0.06	6.51	-0.50	-0.07	3.30	0.30	-0.14	-4.33
红塔	1.26	0.02	2.89	-0.72	-0.01	1.00	0.32	-0.35	-11.15	1.18	0.05	5.79	-0.64	-0.02	1.22	0.33	-0.03	-0.87
江川	1.16	0.00	-0.26	-0.61	0.02	-0.96	0.32	-0.20	-6.37	1.01	0.06	5.64	-0.44	-0.07	3.28	0.33	-0.08	-2.63
华宁	1.24	-0.02	-1.94	-0.67	0.01	-0.36	0.33	-0.13	-4.16	1.01	0.10	10.11	-0.43	-0.13	5.78	0.34	-0.26	-8.80
宜良	1.44	-0.02	-3.30	-0.79	0.01	-0.53	0.28	-0.23	-6.34	1.28	0.05	6.40	-0.62	-0.08	5.18	0.29	-0.15	-4.35
石林	1.50	0.01	0.83	-0.91	0.01	-0.87	0.26	-0.19	-5.04	1.10	0.03	3.59	-0.50	0.00	0.01	0.29	-0.12	-3.49
师宗	1.63	-0.02	-3.61	-1.26	-0.01	1.05	0.25	-0.23	-5.85	1.31	0.01	1.59	-0.84	-0.01	0.82	0.28	-0.02	-0.43
弥勒	1.63	-0.05	-7.96	-0.91	0.09	-8.63	0.26	-0.23	-6.18	1.52	0.02	3.09	-0.79	-0.02	1.20	0.25	-0.29	-7.11
泸西	1.48	-0.03	-4.01	-0.95	0.04	-3.56	0.29	-0.28	-8.06	1.54	-0.01	-1.42	-0.95	0.01	-0.65	0.29	-0.14	-4.11
丘北	1.37	-0.03	-3.69	-0.78	0.03	-2.28	0.29	0.00	0.13	1.32	-0.02	-2.00	-0.68	-0.05	3.28	0.29	-0.27	-7.79
罗平	1.69	-0.03	-4.90	-1.20	-0.01	1.67	0.25	-0.26	-6.38	1.61	0.01	2.05	-1.09	-0.03	3.69	0.27	-0.03	-0.68
峨山	1.11	-0.01	-1.59	-0.56	0.03	-1.93	0.36	-0.19	-6.88	1.15	0.06	7.15	-0.56	-0.05	2.97	0.36	-0.22	-7.80
耿马	1.18	0.01	1.23	-0.48	-0.01	0.62	0.35	-0.03	-0.98	0.90	0.02	1.76	-0.24	-0.05	1.28	0.36	-0.20	-7.02
临翔	0.93	0.02	1.96	-0.34	-0.05	1.67	0.31	0.08	2.36	0.91	0.02	2.20	-0.31	-0.06	1.95	0.32	-0.09	-2.78
宁洱	1.11	0.02	2.02	-0.46	0.01	-0.66	0.34	0.01	0.27	0.96	0.01	0.65	-0.32	-0.04	1.16	0.39	-0.02	-0.82
墨江	1.12	0.00	0.42	-0.46	0.04	-1.98	0.36	-0.17	-6.27	1.06	-0.02	-1.66	-0.40	-0.05	1.92	0.37	-0.16	-5.85
石屏	1.21	-0.02	-2.15	-0.55	0.06	-3.06	0.31	-0.01	-0.21	1.17	-0.04	-4.28	-0.40	-0.01	0.52	0.29	-0.15	-4.50
建水	1.56	-0.04	-5.89	-0.76	0.11	-8.15	0.27	-0.21	-5.71	1.49	-0.02	-2.30	-0.67	0.00	-0.21	0.26	-0.10	-2.50
砚山	2.03	-0.06	-11.79	-1.39	0.03	-3.74	0.27	-0.19	-5.03	2.00	-0.01	-2.94	-1.29	-0.01	1.68	0.27	-0.04	-1.20
文山	1.88	-0.04	-8.36	-1.11	0.02	-2.47	0.29	-0.21	-5.96	1.56	0.00	0.16	-0.79	-0.06	4.52	0.31	-0.06	-1.76
马关	1.52	-0.06	-9.08	-0.90	0.03	-2.49	0.31	-0.19	-5.85	1.57	-0.03	-4.29	-0.89	-0.02	2.05	0.33	-0.10	-3.25

1991—2011年夏季,平均气温仅在红塔、丘北、墨江站点对 $ET_{0e}$ 为负贡献,在其他站点均为正贡献,贡献率为 $0.0\%\sim 8.84\%$ 。相对湿度仅在鹤庆、隆阳站点呈上升趋势,在其他50个站点,对 $ET_{0e}$ 的贡献率为 $0.57\%\sim 9.77\%$ 。风速的贡献率为 $-3.17\%\sim 3.20\%$ 。日照时数仅在永胜等9个站点对 $ET_{0e}$ 为负贡献,在其他43个站点为正贡献,贡献率为 $0.54\%\sim 13.99\%$ 。

**2.3.3 主导因子的时空差异** 1981—1990年夏季, $ET_{0e}$ 变化以日照时数为主导因子的站点达到了34个,主要分布在西北以外的地区,在西南地区尤为集中,西北地区以平均气温为主导因子的站点居多。仅腾冲、师宗、文山站点以相对湿度为主导因子,巧家、南涧、马关站点以风速为主导因子。1991—2011年夏季,有28个站点 $ET_{0e}$ 变化以日照时数为主导因子,集中分布于东南、中西南地区。18个站点以平均气温为主导因子,集中分布于云南西北和中部偏东地区,以相对湿度为主导因子的站点分布零散无序。

## 2.4 秋季潜在蒸散量变化成因分析

**2.4.1 敏感性分析** 1981—1990年秋季(表4), $ET_{0u}$ 对平均气温、相对湿度的敏感程度达到了“高”或“非常高”。 $ET_{0u}$ 对风速的敏感程度在楚雄等21个站点为“中”或“高”,其他站点的敏感程度可忽略。各站点 $ET_{0u}$ 对日照时数的敏感程度均为“高”等级。站点 $ET_{0u}$ 对4个气象因子的敏感系数绝对值大小均为:平均气温>相对湿度>日照时数>风速。

1991—2011年秋季, $ET_{0u}$ 对平均气温、相对湿度的敏感程度均为“高”或“非常高”。 $ET_{0u}$ 对风速的敏感程度仅罗平等16个站点在“中”等级,其他站点的敏感性可忽略。 $ET_{0u}$ 对日照时数的敏感程度除镇雄站点外,均为“高”等级。根据各站点敏感系数绝对值大小可知,各站点 $ET_{0u}$ 对气象因子的敏感程度以平均气温最高,其次为相对湿度和日照时数,对风速的敏感程度最低。

**2.4.2 贡献率分析** 1981—1990年秋季,平均气温在36个站点呈下降趋势,对 $ET_{0u}$ 的贡献率为 $-10.76\%\sim -0.17\%$ ;平均气温上升的站点,贡献率为 $0.25\%\sim 6.61\%$ 。相对湿度有下降或上升趋势表现的站点数差不多,贡献率为 $-12.2\%\sim 7.40\%$ 。风速对 $ET_{0u}$ 负贡献以南华站点最大,贡献率为 $-1.85\%$ ,正贡献以巧家站点最大,达到了 $9.12\%$ 。日照时数仅在丘北、临翔站点呈上升趋势;日照时数下降的站点,贡献率为 $-16.58\%\sim -0.82\%$ 。

1991—2011年秋季,平均气温仅在南涧、红塔、墨江站点呈下降趋势,其他站点均表现为上升趋势,贡献率为 $0.96\%\sim 18.81\%$ 。有50个站点相对湿度表现为下降趋势,贡献率基本在 $10\%$ 以下。风速在31个站点呈下降趋势,对 $ET_{0u}$ 的贡献率为 $-5.85\%\sim 3.01\%$ 。日照时数呈上升趋势的站点达到了41个,贡献率绝对值基本为 $0.38\%\sim 9.70\%$ 。

**2.4.3 主导因子的时空差异** 1981—1990年, $ET_{0u}$ 变化以日照时数为主导因子的站点相对于夏季上升到了39个,无区域差异,以其他气象因子为主导因子的站点均较少,零散分布于各区域。1991—2011年秋季,平均气温对 $ET_{0u}$ 变化起主要作用的站点在云南省东南地区布较集中,其他区域分布较零散。以日照时数为主导因子的站点集中分布于中南部地区,仅永胜、永仁、宣威、施甸、石屏站点以相对湿度为主导因子,无站点以风速为主导因子。

## 3 讨论

不同地区 $ET_0$ 对气象因素的敏感性存在差异,曾丽红等<sup>[28]</sup>研究认为,东北地区 $ET_0$ 对气温最敏感;董煜<sup>[29]</sup>等表明新疆地区最高温度的敏感性最高,相对湿度次之,而日照时数的敏感性最低;赵彩霞等<sup>[30]</sup>研究表明,黄淮海平原春、秋、冬季和年 $ET_0$ 对相对湿度最敏感,夏季 $ET_0$ 对太阳辐射最敏感,而不同区域,敏感性又有差别。在云南省,敏感系数的区域差异性体现在各站点。

1981—1990年冬季,相对湿度与平均气温敏感系数最大的站点数量一致;1991—2011年冬季,平均气温敏感系数最大的站点占多数。两个时间段的其他季节,各站点均以平均气温的敏感系数最大,其次为相对湿度,以风速最小,但同一因子在不同站点敏感系数大小不一。平均气温和相对湿度均为高敏感因子。而从贡献率分析可知, $ET_0$ 变化以相对湿度为主导因子的站点不多,各季节,均以平均气温或日照时数为主导因子的站点居多,综合来说,即相对湿度变化对 $ET_0$ 的影响比日照时数变化对 $ET_0$ 的影响小。这表明,气象因子的敏感系数并不能完全反映各气象因子变化对 $ET_0$ 变化的实际影响,与董煜等<sup>[29]</sup>研究一致。这是因为气象因子对 $ET_0$ 的影响大小是由气象因子的敏感性以及因子本身的变化趋势和变化程度共同决定的,而各气象因子在不同季节变化趋势及程度差异较大。贡献率法则综合了气象因子的敏感性及其变化程度,能定量分析各气象因子对 $ET_0$ 变化的贡献,准确反映气象因子的影响。

表 4 秋季不同时段气象因子的敏感系数、变化率及贡献率

	1981—1990 年									1991—2011 年								
	平均气温			相对湿度			日照时数			平均气温			相对湿度			日照时数		
	$S_X$	$b_X$	con <sub>X</sub>	$S_X$	$b_X$	con <sub>X</sub>	$S_X$	$b_X$	con <sub>X</sub>	$S_X$	$b_X$	con <sub>X</sub>	$S_X$	$b_X$	con <sub>X</sub>	$S_X$	$b_X$	con <sub>X</sub>
昭阳	1.17	-0.01	-1.55	-1.08	0.02	-1.71	0.23	-0.39	-9.01	1.01	0.13	13.51	-0.82	-0.05	4.24	0.24	0.10	2.44
镇雄	1.49	0.04	6.61	-1.47	-0.01	1.26	0.20	-0.10	-2.02	1.36	0.14	18.81	-1.26	-0.01	1.70	0.19	0.25	4.76
玉龙	1.44	-0.04	-5.28	-1.16	0.11	-12.20	0.24	-0.33	-8.07	1.21	0.02	2.88	-0.90	-0.01	1.32	0.26	-0.03	-0.69
永胜	1.50	-0.02	-3.68	-1.13	0.06	-6.42	0.27	-0.32	-8.81	1.36	0.02	2.38	-0.99	-0.05	5.25	0.28	-0.06	-1.77
鹤庆	1.30	-0.02	-2.35	-0.93	0.08	-7.03	0.27	-0.32	-8.46	1.32	0.01	1.92	-0.93	0.03	-2.48	0.28	0.09	2.61
永仁	1.37	-0.06	-8.27	-0.75	0.10	-7.33	0.34	-0.31	-10.28	1.38	0.02	2.13	-0.79	-0.04	3.53	0.32	-0.03	-0.94
巧家	1.25	-0.07	-8.87	-0.52	0.14	-7.56	0.22	-0.24	-5.34	1.10	0.08	8.42	-0.42	-0.15	6.22	0.24	0.16	3.88
宣威	1.78	-0.06	-10.76	-1.55	0.03	-4.57	0.20	-0.29	-5.75	1.33	0.12	16.02	-1.04	-0.16	16.29	0.22	0.22	4.84
腾冲	1.25	0.03	4.22	-0.70	-0.01	0.54	0.31	-0.31	-9.70	1.33	0.05	7.05	-0.74	-0.10	7.68	0.32	0.32	10.30
云龙	1.50	-0.02	-3.31	-0.92	0.11	-10.23	0.30	-0.32	-9.41	1.44	0.04	6.16	-0.84	-0.04	3.58	0.30	-0.05	-1.60
永平	1.10	0.01	1.18	-0.56	0.02	-1.14	0.34	-0.21	-7.10	1.20	0.03	3.65	-0.64	-0.03	1.80	0.34	0.06	1.90
隆阳	1.15	0.03	3.16	-0.59	0.01	-0.50	0.34	-0.12	-4.05	0.96	0.01	1.07	-0.38	0.00	-0.14	0.36	0.10	3.48
宾川	1.28	-0.05	-6.75	-0.59	0.14	-8.35	0.31	-0.30	-9.02	1.24	0.04	5.39	-0.56	-0.06	3.35	0.33	-0.03	-0.96
弥渡	1.60	-0.02	-3.26	-0.98	0.04	-4.36	0.31	-0.31	-9.46	1.30	0.03	4.52	-0.71	-0.04	3.02	0.33	0.11	3.63
祥云	1.77	-0.01	-1.82	-1.29	0.03	-4.29	0.26	-0.22	-5.82	1.71	0.06	10.65	-1.23	-0.07	8.74	0.26	0.14	3.65
南华	1.30	-0.03	-3.31	-0.85	0.04	-3.32	0.31	-0.12	-3.80	1.18	0.03	3.03	-0.74	-0.01	0.70	0.33	0.07	2.44
楚雄	1.03	0.02	1.56	-0.54	-0.02	0.97	0.29	-0.35	-10.06	1.19	0.01	0.96	-0.67	-0.04	2.68	0.25	0.19	4.69
禄劝	1.27	-0.02	-3.11	-0.76	0.02	-1.70	0.29	-0.50	-14.37	1.16	0.01	1.02	-0.67	-0.07	4.39	0.27	-0.17	-4.60
禄丰	1.33	0.00	-0.57	-0.79	0.01	-1.04	0.31	-0.46	-14.17	1.23	0.02	3.04	-0.69	-0.02	1.58	0.30	0.32	9.70
寻甸	1.35	-0.03	-3.73	-0.98	-0.02	1.91	0.26	-0.03	-0.82	0.82	0.10	8.30	-0.43	-0.07	2.83	0.26	-0.17	-4.43
马龙	2.19	-0.03	-7.45	-1.97	0.01	-2.26	0.22	-0.22	-4.89	1.66	0.07	12.16	-1.39	-0.06	7.92	0.27	0.21	5.51
陆良	1.86	-0.02	-2.96	-1.44	-0.02	2.66	0.23	-0.14	-3.26	1.44	0.08	10.96	-1.02	-0.08	8.61	0.24	0.34	8.25
盈江	1.12	0.02	2.23	-0.36	0.00	0.07	0.39	-0.43	-16.58	1.14	0.06	6.29	-0.35	-0.11	3.88	0.38	0.19	7.28
施甸	1.13	-0.01	-0.72	-0.52	0.05	-2.45	0.33	-0.39	-12.81	1.18	0.06	7.27	-0.55	-0.16	8.68	0.33	0.23	7.59
凤庆	1.25	0.01	1.59	-0.67	0.01	-0.43	0.29	-0.47	-13.46	1.17	0.04	4.32	-0.59	-0.04	2.12	0.30	0.01	0.38
南涧	1.56	0.00	-0.38	-0.78	0.05	-3.79	0.27	-0.19	-5.09	1.46	0.00	-0.53	-0.72	-0.02	1.15	0.29	-0.06	-1.75
云县	1.43	0.01	1.67	-0.65	0.01	-0.77	0.33	-0.23	-7.45	1.35	0.04	4.75	-0.56	-0.07	4.12	0.35	0.08	2.64
景东	0.82	0.01	0.79	-0.22	-0.03	0.63	0.32	-0.46	-14.45	0.91	0.02	1.50	-0.29	-0.09	2.65	0.32	0.25	7.90
双柏	1.68	-0.01	-1.43	-1.25	0.01	-1.68	0.29	-0.19	-5.57	1.82	0.05	9.86	-1.40	-0.04	6.13	0.27	0.29	7.77
镇沅	0.97	0.01	0.65	-0.34	0.01	-0.24	0.31	-0.17	-5.48	0.99	0.08	7.48	-0.35	-0.05	1.65	0.32	0.26	8.22
新平	1.64	-0.01	-2.19	-0.99	0.01	-1.37	0.28	-0.26	-7.29	1.51	0.03	4.41	-0.93	-0.04	3.48	0.31	0.14	4.26
澄江	1.47	-0.03	-4.37	-0.98	0.00	0.11	0.26	-0.14	-3.69	1.17	0.10	11.61	-0.70	-0.08	5.88	0.26	0.10	2.53
红塔	1.27	0.00	-0.44	-0.75	-0.01	0.95	0.28	-0.51	-14.10	1.20	-0.02	-2.31	-0.69	-0.03	2.14	0.26	0.28	7.25
江川	1.28	-0.01	-1.36	-0.76	0.00	0.19	0.28	-0.26	-7.38	1.00	0.09	8.83	-0.54	-0.10	5.33	0.29	0.28	7.97
华宁	1.34	-0.02	-2.13	-0.83	-0.03	2.36	0.28	-0.12	-3.35	0.96	0.11	10.21	-0.49	-0.12	6.03	0.29	0.05	1.50
宜良	1.47	-0.02	-3.48	-0.92	-0.03	2.71	0.27	-0.41	-11.04	1.37	0.08	11.01	-0.81	-0.09	7.65	0.27	0.07	1.97
石林	1.90	-0.01	-1.41	-1.38	-0.03	3.87	0.27	-0.34	-9.03	1.15	0.08	9.42	-0.64	-0.08	4.86	0.27	0.12	3.29
师宗	1.86	-0.02	-4.24	-1.60	-0.02	3.90	0.22	-0.21	-4.69	1.32	0.09	11.89	-1.00	-0.05	5.42	0.24	0.25	6.02
弥勒	1.88	-0.02	-3.60	-1.22	-0.01	1.23	0.27	-0.16	-4.23	1.61	0.08	12.75	-0.99	-0.09	9.23	0.25	-0.04	-0.91
泸西	1.72	-0.01	-1.94	-1.26	-0.03	3.21	0.27	-0.31	-8.36	1.67	0.05	8.43	-1.23	-0.04	5.19	0.27	0.08	2.04
丘北	1.46	-0.01	-1.74	-0.94	-0.01	1.38	0.28	0.01	0.42	1.34	0.05	7.26	-0.81	-0.07	5.63	0.27	-0.13	-3.65
罗平	2.09	-0.02	-3.56	-1.69	-0.03	5.54	0.21	-0.27	-5.72	1.67	0.08	12.85	-1.21	-0.03	4.01	0.26	0.22	5.65
峨山	1.26	-0.01	-1.37	-0.73	0.01	-0.67	0.30	-0.28	-8.44	1.35	0.05	7.24	-0.81	-0.04	3.53	0.29	0.15	4.25
耿马	1.04	0.02	2.07	-0.37	-0.01	0.44	0.37	-0.06	-2.16	0.88	0.03	2.46	-0.21	-0.04	0.87	0.37	0.05	1.75
临翔	1.01	0.01	1.49	-0.40	-0.01	0.27	0.31	0.02	0.70	1.04	0.04	4.54	-0.42	-0.10	4.26	0.31	0.21	6.58
宁洱	1.07	0.00	0.25	-0.45	0.00	-0.09	0.29	-0.05	-1.54	0.91	0.03	3.00	-0.29	-0.09	2.54	0.34	0.36	12.16
墨江	1.16	0.00	-0.17	-0.51	0.01	-0.72	0.34	-0.16	-5.48	1.05	-0.01	-1.49	-0.42	-0.07	3.10	0.35	0.14	4.85
石屏	1.38	-0.01	-0.94	-0.75	-0.01	0.41	0.29	-0.04	-1.20	1.30	0.04	4.58	-0.67	-0.09	5.92	0.30	0.02	0.67
建水	1.75	0.01	1.28	-1.01	-0.02	2.15	0.29	-0.25	-7.49	1.66	0.05	8.16	-0.93	-0.08	6.99	0.28	0.12	3.44
砚山	2.10	0.00	-0.89	-1.56	-0.04	7.00	0.26	-0.14	-3.61	2.11	0.05	11.33	-1.55	-0.01	1.12	0.26	0.21	5.34
文山	2.11	0.00	0.94	-1.35	-0.05	7.40	0.26	-0.07	-1.88	1.63	0.08	12.80	-0.91	-0.08	6.87	0.28	0.23	6.60
马关	1.43	0.00	0.34	-0.83	-0.03	2.77	0.26	-0.07	-1.87	1.53	0.05	7.48	-0.90	-0.02	1.65	0.28	0.16	4.41

一般认为蒸散量会随气温的上升而增加,即蒸散量与温度变化趋势一致,实际上研究者们发现在大部分地区蒸散量表现出随温度升高而下降的趋势,即“蒸发悖论”<sup>[1-4,7,12-16,31-35]</sup>,在云南省各站点也有体现,同时也有站点 ET<sub>0</sub> 表现出随温度下降而上升的趋势。但通过云南省各气象因子对 ET<sub>0</sub> 的贡献分析可知,气温



上升,  $ET_0$  下降和气温下降,  $ET_0$  上升实际上并不矛盾。气温下降对  $ET_0$  为负贡献, 使  $ET_0$  呈下降趋势变化, 这与  $ET_0$  随温度的升高而增大实质是一样的。之所以出现  $ET_0$  变化趋势与气温相反的情况, 是由于其他气象因子的综合作用, 对  $ET_0$  下降的影响超过了气温上升对  $ET_0$  增加的影响, 掩盖了气温对  $ET_0$  变化的贡献。同时, 我们也可以推测“蒸发悖论”的出现, 是由于在一定程度上忽略了其他气象因子的影响, 也忽视了气温的定量效应。

在影响  $ET_0$  的气象因子中, 日照时数属于能量因素。众多研究表明, 日照时数(太阳辐射)是  $ET_0$  变化的重要影响因子<sup>[1,3,14,35-36]</sup>, 本文研究与其一致。1981—1990年, 除冬季外, 其他季节  $ET_0$  变化均以日照时数为主导因子的站点居多, 即此时段日照时数对蒸散量的影响比其他气象因子都高。1991—2011年时段, 绝大多数站点日照时数由下降转变为上升趋势, 由负贡献转变为正贡献, 对  $ET_0$  的上升有重要作用。

蒸散过程中的水汽输送与相对湿度和风速密切相关<sup>[23]</sup>。曹雯等<sup>[23]</sup>通过对中国大陆潜在蒸散变化原因的研究认为 90 年代后相对湿度的下降对  $ET_0$  的上升有重要作用。在云南省, 1991—2011 年相对湿度呈下降趋势的站点数远多于 1981—1990 年站点数, 即正贡献站点多于负贡献站点, 对  $ET_0$  的上升有重要贡献; 但在 1981—1990 年时段, 对  $ET_0$  的影响也不可忽略。。相对湿度在不同站点对  $ET_0$  的贡献不同, 贡献率有大有小,  $ET_0$  变化以相对湿度为主导因子的站点数基本为 3~6 个, 1981—1990 年春季达到了 11 个。

风速是影响  $ET_0$  的一个重要因子, 曹雯等<sup>[37]</sup>指出 1961—2010 年安徽省春、秋、冬季  $ET_0$  变化的主导因子是风速; 王潇潇等<sup>[38]</sup>的研究表明风速下降是影响内蒙古地区  $ET_0$  下降的首要因子; Mcvicar 等<sup>[18]</sup>综合前人研究结果表明了风速的重要性, 同时风速也是解释“蒸发悖论”的一个重要因子。但在云南省各站点,  $ET_0$  对风速的敏感系数均较小, 风速对  $ET_0$  的贡献率在大多数站点均在 1% 以下, 各站点  $ET_0$  变化以风速为主导因子的站点也极少, 仅 1991—2011 年春季有 16 个站点。可见, 风速对云南省  $ET_0$  的影响是较小的, 这也是云南省不同于  $ET_0$  变化以风速为主导因子的其他地区的特点之一, 这可能与云南省的复杂气候、各站点的特殊地形有关。

通过以上分析可知, 云南省  $ET_0$  变化的主导因子具有阶段性、季节性和区域差异性。不同研究时段,  $ET_0$  变化的主导因子在各站点不一定相同; 同一研究时段不同季节,  $ET_0$  变化的主导因子也不一定相同, 即主导因子有区域差异性, 空间分布格局有差异且处于

动态演变中。两个时间段的冬季, 平均气温是云南省东部地区  $ET_{0a}$  呈现上升趋势变化的主导因子; 夏季, 日照时数是中南部地区  $ET_{0e}$  变化的主要原因, 其他两个季节, 则无一致性。1981—1990 年春季主导因子为相对湿度的站点以中部地区较多, 为日照时数的站点以中东区域分布较集中, 而 1991—2011 年春季主导因子为相对湿度的站点少且分布零散, 为日照时数的站点主要分布于中南部地区。1981—1990 年秋季主导因子为相对湿度的站点仅在西北及东南地区有少数分布, 其他区域均以日照时数为主导因子的站点居多; 1991—2011 年秋季主导因子为相对湿度的站点分布较分散, 为日照时数的站点集中分布于中南部等区域, 而主导因子为平均气温的站点区域差异性也较大。

## 4 结论

(1) 1981—1990 年和 1991—2011 年两个时间段, 云南省各站点  $ET_0$  在春、夏、秋季对气象因子的敏感系数绝对值从高到低依次为: 平均气温 > 相对湿度 > 日照时数 > 风速; 冬季有部分站点以相对湿度的敏感系数最大。

(2) 不同季节, 站点潜在蒸散量变化的主导因子不同。1981—1990 年, 绝大多数站点冬季  $ET_{0a}$  变化以平均气温为主导因子, 而春、夏、秋季, 则主导因子为日照时数的站点居多; 1991—2011 年, 冬、春、秋季  $ET_0$  变化, 均以平均气温为主导因子的站点居多, 夏季则以日照时数为主导因子的站点居多。

(3) 从空间分布来说, 主导因子空间分布格局有差异, 而且处于动态演变中。两个时间段, 温度上升是云南省东部地区冬季  $ET_{0a}$  呈现上升趋势变化的主要原因, 日照时数是中南部地区夏季  $ET_{0e}$  变化的主导因子。而春、秋季节, 前后时间段主导因子区域差异较大, 无一致性。

### 参考文献:

- [1] 尹云鹤, 吴绍洪, 戴尔阜. 1971—2008 年我国潜在蒸散时空演变的归因[J]. 科学通报, 2010, 55(22): 2226-2234.
- [2] Bandyopadhyay, Bhadra A, Raghuwanshi N S, et al. Temporal trends in estimates of reference evapotranspiration over India[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2009, 14: 508-515.
- [3] Golubev V S, Lawrimore J H, Groisman P Y, et al. Evaporation changes over the contiguous United States and the former USSR: A reassessment [J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28(13): 2665-2668.
- [4] Sangchan Limjirakan, Atsamon Limsakul. Trends in Thailand pan evaporation from 1970 to 2007 [J]. Atmospheric Research, 2012, 108: 122-127.

- [5] Dinpashoh Y, Jhajharia D, Fakheri-Fard A, et al. Trends in reference crop evapotranspiration over Iran[J]. *Journal of Hydrology*, 2011,399(3/4):422-433.
- [6] 石鑫,吴普特,王玉宝,等.近50年新疆参考作物蒸发蒸腾量的时空演变分析[J]. *灌溉排水学报*,2012,31(1):10-14.
- [7] 岳元,王艳萍,王琪,等.“蒸发悖论”现象在吉林省地区的表现[J]. *干旱地区农业研究*,2015,33(5):225-231.
- [8] 段永红,陶澍,李本纲.北京市参考作物蒸散量的时空分布特征[J]. *中国农业气象*,2004,25(2):22-25.
- [9] 姬兴杰,朱业玉,顾万龙.河南省参考作物蒸散量变化特征及其气候影响分析[J]. *中国农业气象*,2013,34(1):14-22.
- [10] 李春强,洪克勤,李保国.河北省近35年(1965—1999年)参考作物蒸散量的时空变化[J]. *中国农业气象*,2008,29(4):414-419.
- [11] 陈超,庞艳梅,潘学标.四川地区参考作物蒸散量的变化特征及气候影响因素分析[J]. *中国农业气象*,2011,32(1):35-40.
- [12] 马雪宁,张明军,王圣杰,等.“蒸发悖论”在黄河流域的探讨[J]. *地理学报*,2012,67(5):645-656.
- [13] Wang W G, Shao Q X, Peng S Z, et al. Reference evapotranspiration change and the causes across the Yellow River Basin during 1957—2008 and their spatial and seasonal differences[J]. *Water Resources Research*, 2012,48:27-35.
- [14] Liu Q, McVicar T R, McVicar. Assessing climate change induced modification of Penman potential evaporation and runoff sensitivity in a large water-limited basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2012,464:352-362.
- [15] 王琼,张明军,潘淑坤,等.长江流域潜在蒸散量时空变化特征[J]. *生态学杂志*,2013,32(5):1292-1302.
- [16] Zhao Jie, Zong Xuexu, De Pengzuo, et al. Temporal variations of reference evapotranspiration and its sensitivity to meteorological factors in Heihe River Basin, China[J]. *Water Science and Engineering*, 2015,8(1):1-8.
- [17] Liu Q, Xia X H. Contribution of meteorological variables to changes in potential evaporation in Haihe River Basin, China [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2012,13:1836-1845.
- [18] McVicar T R, Roderick M L, Donohue R J, et al. Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation [J]. *Journal of Hydrology*, 2012(416):182-205.
- [19] 彭桂芬,刘瑜,张一平.云南干旱的气候特征及变化趋势研究[J]. *灾害学*,2009,24(4):40-44.
- [20] 段旭,陶云.云南近50年来的气候变化[J]. *热带气象学报*,2012,28(2):243-250.
- [21] 陶云,张万诚,段长春,等.云南2009—2012年4年连旱的气候成因研究[J]. *云南大学学报*,2014(36):866-874.
- [22] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements [Z]. FAO Irrigation and drainage paper No. 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1998,300(9):D05109.
- [23] 曹雯,段春峰,申双和.1971—2010年中国大陆潜在蒸散变化的年代际转折及其成因[J]. *生态学报*,2015,25(15):1-12.
- [24] 程建刚,王学锋,范立张,等.近50年来云南气候带的变化特征[J]. *地球科学进展*,2009,28(1):18-24.
- [25] 纪智荣,黄中艳,谢国清.1961—2010年云南干湿气候变化[J]. *气象科技*,2013,41(6):1073-1079.
- [26] Tomé A R, Miranda P M A. Piecewise linear fitting and trend changing points of climate parameters[J]. *Geophysical Research Letter*, 2004,31(2):1-4.
- [27] Lenhart T, Eckhardt K, Fohrer N, et al. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2002,27(9):645-654.
- [28] 曾丽红,宋开山,张柏,等.东北地区参考作物蒸散量对主要气象要素的敏感性分析[J]. *中国农业气象*,2010,31(1):11-18.
- [29] 董煜,陈学刚.新疆参考作物蒸散量敏感性分析. *灌溉排水学报*,2015,34(8):82-86.
- [30] 赵彩霞,梅旭荣,居辉,等.黄淮海平原各农业亚区潜在蒸散量变化及其对气候要素的敏感性分析[J]. *中国农业气象*,2015,36(5):570-577.
- [31] 丛振涛,倪广恒,杨大文,等.“蒸发悖论”在中国的规律分析[J]. *水科学进展*,2008,19(2):147-152.
- [32] Bhadra A, Raghuvanshi N S, et al. Temporal trends in estimates of reference evapotranspiration over India[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2009,14:508-515.
- [33] Yin Yunhe, Wu Shaohong, Chen Gang, et al. Attribution analyses of potential evapotranspiration changes in China since the 1960s[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2010,101(1):19-28.
- [34] Liu Xiaoming, Zheng Hongxing, Zhang minghua, et al. Identification of dominant climate factor for pan evaporation trend in the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2011,21(4):594-608.
- [35] 蒋冲,王飞,刘思杰.“蒸发悖论”在秦岭南北地区的探讨[J]. *生态学报*,2013,33(3):844-855.
- [36] Thomas A. Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration trends over China[J]. *International journal of climatology*, 2000,20:381-396.
- [37] 曹雯,段春峰,姚筠,等.1961—2010年安徽省参考作物蒸散时空变化特征及成因[J]. *应用生态学报*,2014,25(12):3619-3626.
- [38] 王潇潇,潘学标,顾生浩,等.内蒙古地区参考作物蒸散变化特征及其气象影响因子[J]. *农业工程学报*,2015,31(25):142-152.