

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2017.02.007

不同气候区潜在蒸散发全局敏感性分析

张永生^{1,2}, 陈喜^{1,2}, 高满^{1,2}, 孙一萌^{1,2}, 黄日超^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 基于 Penman-Monteith 公式, 运用全局敏感性方法分析我国 4 个气候区 12 个气象站潜在蒸散发对最高气温、最低气温、相对湿度、风速和日照时数的敏感性。结果表明: (a) 不同气候区及不同季节潜在蒸散发对气象因子的敏感性排序存在差异。夏季日照时数对潜在蒸散发影响最大; 冬季最高气温、相对湿度和风速比较敏感; 最低气温在全年各季节均不敏感。 (b) 从中温带半湿润地区→高原温带半干旱区→北亚热带湿润地区→南亚热带湿润地区, 日照时数对潜在蒸散发的影响逐渐增强, 风速对潜在蒸散发的影响逐渐减弱。 (c) 全局灵敏度与局部灵敏度方法分析结果具有很大差异, 局部法分析对潜在蒸散发影响的气象因子敏感性排序与气象因子取值有关。

关键词: 潜在蒸散发; 全局敏感性方法; Penman-Monteith 公式; 气象因子; 中温带半湿润地区; 高原温带半干旱区; 北亚热带湿润地区; 南亚热带湿润地区

中图分类号: P426.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2017)02-0137-08

Global sensitivity analysis of potential evapotranspiration in different climatic regions

ZHANG Yongsheng^{1,2}, CHEN Xi^{1,2}, GAO Man^{1,2}, SUN Yimeng^{1,2}, HUANG Richao^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the Penman-Monteith equation, the sensitivities of potential evapotranspiration to the maximum and minimum temperatures, relative humidity, wind speed, and sunshine duration were analyzed using the global sensitivity method at 12 meteorological stations in four climatic regions of China. The results indicate that (a) ranks of the sensitivity of the potential evapotranspiration to meteorological factors were different in various climatic regions and seasons. Sunshine duration had the greatest influence on potential evapotranspiration in summer, while the maximum temperature, relative humidity, and wind speed were sensitive in winter, and the minimum temperature was insensitive throughout the year. (b) From the middle temperate and semi-humid area to the plateau temperate semi-arid area, north subtropical humid area, and south subtropical humid area, the impact of sunshine duration on potential evapotranspiration presented an increasing tendency, and the impact of wind speed on potential evapotranspiration decreased. (c) The results were significantly different with use of the global and local sensitivity methods, and the ranking of the sensitivity of potential evapotranspiration to meteorological factors with use of the local method was related to the selected values of the meteorological factors.

收稿日期: 2016-03-07

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(51190091); 江苏省高校自然科学基金项目(13KJB170018); 江苏省基础研究计划(自然科学基金)青年基金(BK20150809)

作者简介: 张永生(1990—), 男, 河北石家庄人, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: yszhangvip@163.com

通信作者: 陈喜, 教授。E-mail: xichen@hhu.edu.cn

Key words: potential evapotranspiration; global sensitivity method; Penman-Monteith equation; meteorological factors; middle temperate and semi-humid area; plateau temperate semi-arid area; north subtropical humid area; south subtropical humid area

蒸散发过程是水文循环的重要组成部分,是影响区域和全球水热平衡计算的重要因素,也是全球变化对水文、水资源等方面评估的重要内容。潜在蒸散发 E_0 取决于气温、风速、湿度、辐射等气象要素,根据气象要素估算 E_0 通常采用 Penman-Monteith 法,该方法能够全面考虑气象因素, E_0 计算较为准确,适用于不同气候类型区的 E_0 计算以及气候变化情景下水文水资源响应研究^[1-3]。然而,一些区域在气象要素观测资料不完备的情况下,需选择对 E_0 影响显著的气象因子,采用简化方法^[4] 估算 E_0 , 譬如:气温相关法(如 Thornthwaite, Blaney-Criddle 和 Hargreaves 公式)、辐射相关法(如 Makkink, Jensen-Haise 和 Priestley-Taylor 公式)、空气动力学法(如 Dalton 公式)。另一方面,以气温上升为背景的全球气候变化,导致所谓的“蒸发悖论”,需要探究气温升高对 E_0 变化影响的贡献,预测未来 E_0 变化^[5]。因此,研究不同气象因子对 E_0 的影响程度具有重要意义。

Gong 等^[6] 在长江流域的研究表明 E_0 最为敏感的气象因子是相对湿度;Liang 等^[7] 研究我国东北洮儿河流域也发现相对湿度对 E_0 的影响最大;刘小莽等^[8] 发现海河流域的 E_0 对水汽压最敏感;李斌等^[9] 在澜沧江流域的研究则表明日照时数对 E_0 的影响最大;刘昌明等^[10] 研究得到全国范围内 E_0 对气象因子的敏感性排序为水汽压>最高气温>太阳辐射>风速>最低气温;Xu 等^[5] 在浙江省的研究发现:春、夏、秋三季太阳辐射对 E_0 影响最大,冬季 E_0 对相对湿度最敏感。Razavi 等^[11] 认为目前在地球和环境系统模型中对敏感性定义和分析方法还不是很明确,上述研究大都采用局部灵敏度分析方法,以潜在蒸散发变化率与气象因子变化率之比来定义潜在蒸散发气候敏感系数:

$$S_i = \lim \left(\frac{\frac{\Delta E_0}{E_0}}{\frac{\Delta x_i}{x_i}} \right) = \frac{\partial E_0}{\partial x_i} \frac{x_i}{E_0} \tag{1}$$

式中: S_i —— E_0 对气象因子 x_i 的敏感系数。

显然,式(1)中 $\frac{\partial E_0}{\partial x_i}$ 和 $\frac{\partial E_0}{\partial x_i} \frac{x_i}{E_0}$ 计算通常取 x_i 的某一特定值(如均值)。但是局部灵敏性方法存在很大的局限性^[12],如假设输入与输出是线性关系,输入因子在中间值处变化不大(一般不超过中间值的 10%),所有输入因素变动范围相同。而从 Penman-Monteith 公式来看, E_0 与气象因子之间是非线性关系,同时各气象因子在不同时空尺度上存在较大的变化,不满足局部灵敏度分析方法的前提条件。与局部分析方法相比,全局灵敏度方法可以分析非线性、非单调和非叠加模型输入、输出的敏感性,而且考虑输入因素在不同范围内变化以及不同输入因子之间相关性的影响。因此,近年来全局灵敏性方法在因变量与自变量之间关系以及水文模型参数敏感性分析中得到重视。

为此,笔者选取我国 4 个气候区 12 个基本气象站观测资料,利用 Penman-Monteith 公式,采用 Sobol' 法和傅里叶幅值灵敏度检验法(FAST 法)分别在日、季节、年尺度上分析影响 E_0 的气象因子敏感性及其在不同气候区的差异性,并与局部敏感性方法进行对比,阐明全局和局部敏感性分析方法计算结果的差异以及局部敏感性方法的局限性。

1 研究区站点及资料选择

分别选取位于中温带半湿润地区、高原温带半干旱区、北亚热带湿润地区和南亚热带湿润地区 4 个气候区气象数据连续性和一致性较好的 12 个气象站点(表 1)作为研究对象,采用国家气象局发布的最高气温、最低气温、平均相对湿度、10 m 处的平均风速、日照时数、平均气压 6 个气象因子逐日观测数据。

表 1 气象站点基本情况
Table 1 Basic conditions of meteorological stations

气候区	气象台站					气候区	气象台站				
	名称	经度	纬度	海拔/m	系列长度		名称	经度	纬度	海拔/m	系列长度
中温带	哈尔滨	126°46′	45°45′	142	1955—2009 年	北亚热	杭州	120°10′	30°14′	41	1955—2009 年
半湿润	齐齐哈尔	123°55′	47°23′	147	1951—2009 年	带湿润	武汉	114°08′	30°37′	23	1951—2009 年
地区	长春	125°13′	43°54′	237	1951—2009 年	地区	南京	118°48′	32°00′	7	1951—2009 年
高原温	西宁	101°45′	36°43′	2 295	1955—2009 年	南亚热	南宁	108°13′	22°38′	122	1955—2009 年
带半干	门源	101°37′	37°23′	7 850	1958—2009 年	带湿润	百色	106°36′	23°54′	173	1953—2009 年
旱区	都兰	98°06′	36°18′	3 191	1955—2009 年	地区	广州	113°20′	23°10′	41	1952—2009 年

注:气候区划分参见文献[13]。

2 研究方法

2.1 潜在蒸散发计算公式

采用 FAO 推荐的修正 Penman-Monteith 公式^[14]计算潜在蒸散发:

$$E_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \frac{900}{T + 273} \gamma u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

(2)

式中: Δ ——饱和水汽压-温度曲线斜率, $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$; R_n ——净辐射, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; G ——地表热通量, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; T ——平均气温, $^{\circ}\text{C}$; γ ——湿度计常数, $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$; u_2 ——2 m 处风速, m/s ; e_s ——饱和水汽压, kPa ; e_a ——实际水汽压, kPa 。

由于大部分站点缺乏 R_n 观测数据,根据日照时数 N 计算 R_n ; u_2 由 10 m 处风速转化而来;饱和水汽压-温度曲线斜率可由平均气温得出(公式略);平均气温 T 由最高气温和最低气温的均值代替^[14]。为提高气象要素敏感性分析的效率,再考虑影响潜在蒸散发的主要因素,最终确定敏感性分析的关键气象要素为最高气温、最低气温、相对湿度、风速和日照时数 5 个因子。

2.2 全局敏感性方法

2.2.1 Sobol’ 法

Sobol’ 法^[15]基于参变量方差分析,描述单个变量及变量之间相关性对因变量的影响程度,在考虑到因子之间非线性和稳健性分析方面,明显优于传统的敏感性分析方法。

Sobol’ 法在 n 维空间 $\Omega_n = \{X \mid 0 \leq x_i \leq 1; i = 1, 2, \cdots, n\}$ 将函数 $f(X)$ 分解为下列不同维数之和:

$$f(X) = f_0 + \sum_{i=1}^n f_i(x_i) + \sum_{i < j} f_{ij}(x_i, x_j) + \cdots + f_{1,2,\cdots,n}(x_1, x_2, \cdots, x_n)$$

(3)

式中: $X = (x_1, x_2, \cdots, x_n)$ ——自变量; n ——自变量个数; f_0 ——常量。

对式(3)先平方、后积分,因变量总方差为

$$D(y) = \sum_{i=1}^n D_i + \sum_{i < j} D_{ij} + \cdots + D_{1,2,\cdots,n}$$

(4)

Sobol’ 法定义^[16]敏感系数为

$$S_{i_1, i_2, \cdots, i_k} = \frac{D_{i_1, i_2, \cdots, i_k}}{D(y)}$$

(5)

则一阶敏感系数 $S_i = \frac{D_i}{D(y)}$, 二阶敏感系数 $S_{ij} = \frac{D_{ij}}{D(y)}$, 依此类推。

参变量总敏感系数为参数各阶敏感系数之和:

$$S_T = S_i + \sum_{j \neq i} S_{ij} + \cdots + S_{1,2,\cdots,n}$$

(6)

以上各式中方差可以用蒙特卡罗数值积分近似得到^[17]。

2.2.2 FAST 法

FAST 法^[18]采用傅里叶变换分析不同频率变量或参数的傅里叶振幅,指示参数的敏感性,振幅越大,表明函数或模型对该参数越敏感,反之亦然^[19]。

对于 m 个输入参数的函数或模型 $y = g(X) = g(x_1, x_2, \cdots, x_m)$, 通过变换函数 $(x_i = G_i[\sin(w_i s)])$, $i = 1, 2, \cdots, m$ 将参数 X 的 m 维积分转化到变量 s 的一维积分, 其中, x_i 是模型参数, w_i 是给定的模型参数整数频率, s 是引入的独立参数, G_i 为搜索曲线函数。

对于 x_i 的分布函数 F_i (如正态分布), Lu 等^[20] 提出下列搜索函数:

$$x_i = F_i^{-1}\left\{c + \frac{1}{\pi}\arcsin\left[\sin(w_i s)\right]\right\} \tag{7}$$

式中: F_i^{-1} —— x_i 分布函数的反函数; c ——常数。

y 期望值可表示为

$$E(y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(s) \, ds \tag{8}$$

其中 $f(s) = f(G_1(\sin w_1 s), G_2(\sin w_2 s), \cdots, G_m(\sin w_m s))$

根据傅里叶级数的特点分析, y 的方差可定义为

$$D(y) = 2 \sum_{j=1}^{\infty} (A_j^2 + B_j^2) \tag{9}$$

其中 $A_j = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(s) \cos(js) \, ds \quad B_j = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(s) \sin(js) \, ds$

式中: A_j 、 B_j ——傅里叶系数。

3 结果与分析

3.1 潜在蒸散发对气象因子的全局敏感性分析

采用 4 个气候区内气象站逐日数据,运用 Sobol' 法和 FAST 法计算逐日潜在蒸散发 E_0 对气象因子的敏感系数 S_i 和 S_{fast} 。4 个气候区代表站点分析结果(图 1)表明:(a)2 种全局敏感性方法计算的气象因子对 E_0 影响结果基本相同(图 1(a)(b))。(b)各气象站最低气温 $T_{\min}$ 的 S_i 变幅很小,均在 0.04 以内;日照时数 N 的 S_i 曲线均呈单峰形,波动最大;其他气象因子(如最高气温 $T_{\max}$ 、相对湿度 R_H 、风速 U)的 S_i 曲线波动程度介于 $T_{\min}$ 和 N 之间,在不同气候区差异较大。(c)夏季 N 对 E_0 影响最大,且随着从中温带半湿润地区→高原温带半干旱区→北亚热带湿润地区→南亚热带湿润地区, N 对 E_0 的影响逐渐增强; $T_{\min}$ 对 E_0 影响最小,其他气象因子在不同气候区和不同时期对 E_0 影响程度存在较大差异。

统计季节和年尺度 E_0 对气象因子的全局及局部敏感性排位见表 2。可以看出:(a)在同一气候区, E_0 对气象因子的敏感性排位总体较为一致,但不同气候区的敏感性排位存在较大差异;(b)在季节尺度上,中温带半湿润地区,春、冬两季 E_0 对 $T_{\max}$ 最敏感,夏季对 N 最敏感,秋季对 U 最敏感。高原温带半干旱区,夏季 E_0 对 N 最敏感,冬季对 U 最敏感,春秋两季各站点气象因子敏感性排位存在差异,如春季都兰站 $T_{\max}$ 最敏感,其他两站 N 最敏感;秋季门源站 N 最敏感,其他两站 U 最敏感。北亚热带湿润地区,冬季 E_0 对 R_H 最敏感,对 $T_{\max}$ 敏感性次之;春、夏、秋三季 N 最敏感,春、夏季 $T_{\max}$ 或 R_H 敏感性次之,秋季 U 或 R_H 敏感性次之,Xu 等^[5] 研究得到与此相似的结果。南亚热带湿润地区, N 对 E_0 的影响在四季最大(除广州站冬季 U 最敏感),南宁站和百色站敏感性排位基本一致,即 $N > T_{\max} > U > R_H > T_{\min}$ 。(c)在年尺度上,中温带半湿润地区的 E_0 对 $T_{\max}$ 最敏感,其他因子敏感性排位依次为 U 、 R_H 、 N 、 $T_{\min}$ 。在其他 3 个气候区,除都兰站外,均是 E_0 对 N 最敏感,对 $T_{\min}$ 最不敏感,其他因子敏感性排位介于两者之间,在这 3 个气候区排位存在差异。

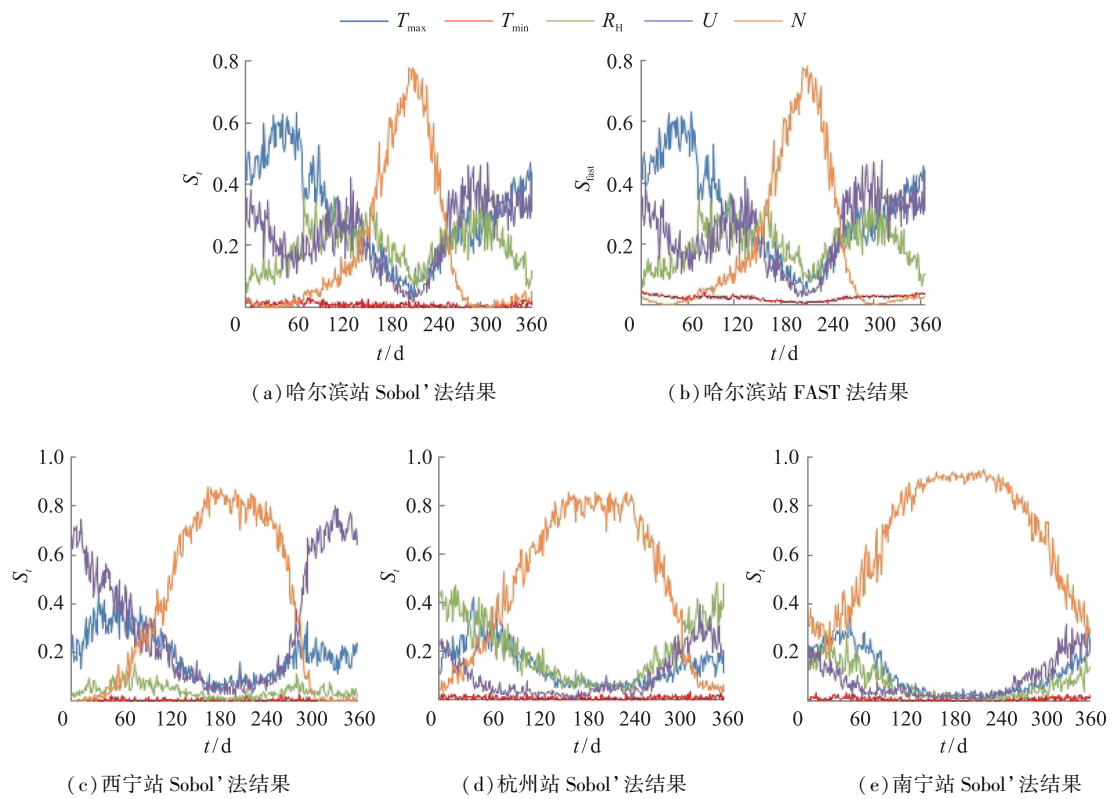


图1 潜在蒸散发对气象因子的逐日全局敏感系数

Fig. 1 Daily global sensitivity coefficients of meteorological factors on potential evapotranspiration

表2 对潜在蒸散发影响的气象因子全局、局部敏感性排位

Table 2 Ranks of sensitivity of potential evapotranspiration to meteorological factors using global and local methods						
气象台站	分析方法	春	夏	秋	冬	年
哈尔滨、 齐齐哈尔、 长春	全局	$T_{\max}>R_H\approx U>N>T_{\min}$	$N>R_H>T_{\max}\approx U>T_{\min}$	$U>T_{\max}\approx R_H>N>T_{\min}$	$T_{\max}>U>R_H>N\approx T_{\min}$	$T_{\max}>U>R_H\approx N>T_{\min}$
	局部	$R_H>T_{\max}>U>N>T_{\min}$	$R_H\approx T_{\max}>N>U>T_{\min}$	$R_H>U\approx T_{\max}>N>T_{\min}$	$R_H>T_{\max}>U>T_{\min}>N$	$R_H>U>T_{\max}>N>T_{\min}$
西宁、门源、 都兰	全局	$N>T_{\max}\approx U>R_H>T_{\min}$	$N>T_{\max}\approx U>R_H\approx T_{\min}$	$U>N>T_{\max}>R_H>T_{\min}$	$U>T_{\max}>R_H>N\approx T_{\min}$	$N>U>T_{\max}>R_H>T_{\min}$
	局部	$T_{\max}>N>R_H>U>T_{\min}$	$T_{\max}>N>R_H>U\approx T_{\min}$	$T_{\max}\approx R_H>U\approx N>T_{\min}$	$U>R_H>T_{\max}>T_{\min}\approx N$	$T_{\max}>R_H>U\approx N>T_{\min}$
杭州、武汉、 南京	全局	$N>R_H\approx T_{\max}>U>T_{\min}$	$N>R_H\approx T_{\max}>U>T_{\min}$	$N>R_H>U>T_{\max}>T_{\min}$	$R_H>T_{\max}>U>N>T_{\min}$	$N>R_H>T_{\max}>U>T_{\min}$
	局部	$R_H>T_{\max}>N>U\approx T_{\min}$	$T_{\max}\approx R_H>N>T_{\min}>U$	$R_H>T_{\max}>N>U>T_{\min}$	$R_H>T_{\max}>U>N>T_{\min}$	$R_H>T_{\max}>N>U>T_{\min}$
南宁、百色、 广州	全局	$N>T_{\max}>R_H>U>T_{\min}$	$N>T_{\max}\approx U\approx R_H\approx T_{\min}$	$N>U>T_{\max}\approx R_H>T_{\min}$	$N>T_{\max}>U\approx R_H>T_{\min}$	$N>T_{\max}>U\approx R_H>T_{\min}$
	局部	$R_H>T_{\max}>N>T_{\min}>U$	$T_{\max}>R_H>N>T_{\min}>U$	$T_{\max}>R_H>N>T_{\min}>U$	$R_H>T_{\max}>U\approx N>T_{\min}$	$R_H>T_{\max}>N>T_{\min}>U$

注：≈表示敏感性排位基本相同。与表排序不同的站点：对于局部法，齐齐哈尔夏季 $T_{\max}$ 最敏感，门源、都兰春、秋及年尺度 R_H 最敏感， $T_{\max}$ 次之；南京夏季 R_H 最敏感，百色春季及年尺度 $T_{\max}$ 最敏感；对于全局法，都兰春季 $T_{\max}$ 最敏感，年尺度 U 最敏感，门源秋季 N 最敏感，广州冬季 U 最敏感。

3.2 全局敏感性与局部敏感性对比分析

采用式(1)进行局部敏感性分析,各站点在季节、年尺度局部敏感性排位见表2。对比图1及表2可以看出, E_0 对气象因子的全局、局部敏感性排位存在明显差异。以年尺度为例,在中温带半湿润地区,全局法 $T_{\max}$ 最敏感、局部法 R_H 最敏感。在高原温带半干旱区,全局法西宁、门源站 N 最敏感、局部法分别是 $T_{\max}$ 、 R_H 最敏感;都兰站全局法 U 最敏感、局部法 R_H 最敏感。在北亚热带湿润地区和南亚热带湿润地区,除百色站外,其他各站全局法 N 最敏感,局部法 R_H 最敏感。

3.3 局部敏感性方法局限性分析

以哈尔滨站1955—2009年7月1日实测数据为例, $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ 、 R_H 、 U 、 N 的均值分别为27.3℃、16.8℃、

71.3%、3.4 m/s、8.2 h;变化范围分别为 19.7 ~ 33.6 ℃、11.7 ~ 20.6 ℃、45% ~ 92%、1 ~ 7.3 m/s、0 ~ 14.3 h;变幅小于 10% 的分别为 63.6%、49.1%、52.7%、12.7%、9.1%;变幅大于 10% 的分别为 36.4%、50.9%、47.3%、87.3%、90.9%。可以看出,各气象因子的变幅大,其中 U 和 N 变幅超过 10% 的年数占总年数的 87.3% 和 90.9%,显然不满足局部法自变量变幅在 10% 以内的要求。

为了分析气象因子不同取值对局部敏感性分析结果的影响,本文计算各气象因子(R_H 、 $T_{\max}$ 、 N 、 U)不同取值下 E_0 及其局部敏感系数 S 差值。首先在 R_H 变化范围内分别选取 50%、70%、90%,分析 E_0 及 S 随 $T_{\max}$ 和 N 的变化(图 2、图 3)。在图 3 中, $S_{T_{\max}} - S_N$ 表示当 $T_{\max}$ 、 N 不同取值时 E_0 对 $T_{\max}$ 敏感系数 $S_{T_{\max}}$ 与 E_0 对 N 敏感系数 S_N 之间的差值,显然 $S_{T_{\max}} - S_N$ 为正值,即 $T_{\max}$ 比 N 更敏感;反之, N 比 $T_{\max}$ 敏感。图 2 和图 3 表明:对于 3 种 R_H 取值, E_0 均随着 $T_{\max}$ 、 N 的增加而增大;但对于 $T_{\max}$ 、 N 不同取值, $S_{T_{\max}} - S_N$ 有正、有负,表明 $T_{\max}$ 、 N 敏感性排位与这 2 个气象因子取值有关。同样,在 U 变化范围内分别选取 1 m/s、3 m/s、5 m/s(图 4、图 5),对应于 $T_{\max}$ 、 N 不同取值, $S_{T_{\max}}$ 与 S_N 之间的差值 ($S_{T_{\max}} - S_N$) 也有正、有负,即 $T_{\max}$ 、 N 敏感性排位与其取值有关。总之, E_0 对气象因子的局部法敏感性与气象因子取值有关。

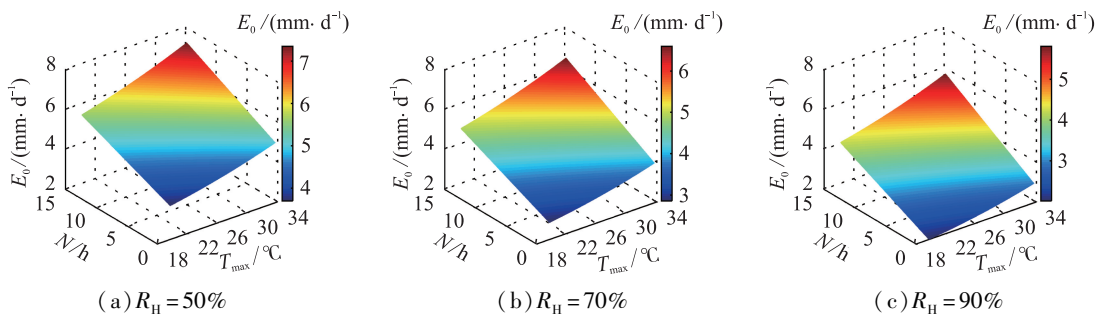


图 2 3 种 R_H 下 E_0 与 $T_{\max}$ 、 N 关系

Fig. 2 Influence of maximum temperature ($T_{\max}$) and sunshine duration (N) on potential evapotranspiration (E_0) with three specified values of relative humidity (R_H)

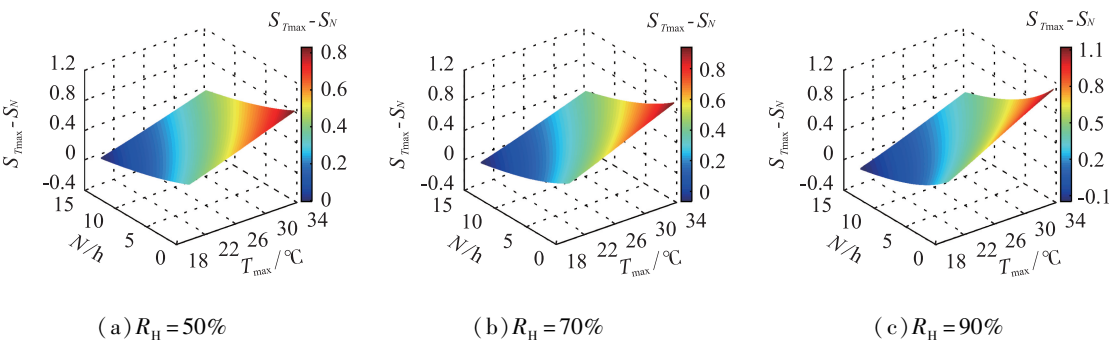


图 3 3 种 R_H 下 $T_{\max}$ 、 N 敏感系数差值 ($S_{T_{\max}} - S_N$)

Fig. 3 Differences of sensitivity coefficients ($S_{T_{\max}} - S_N$) with three specified values of relative humidity (R_H)

4 结 论

- 全局敏感性分析结果表明,各气象因子对潜在蒸散发影响的敏感性排位在不同气候区、不同季节上存在差异。
- 时间上,日照时数在夏季对潜在蒸散发影响最大,最高气温、相对湿度和风速在冬季比较敏感,最低气温在全年均不敏感。
- 空间上,随着从中温带半湿润地区→高原温带半干旱区→北亚热带湿润地区→南亚热带湿润地区,日照时数对潜在蒸散发影响逐渐增强;风速对潜在蒸散发的影响程度自北向南递减。
- 局部法与全局法敏感系数计算结果具有很大差异,气象因子的局部法敏感性排序与气象因子取值有关。

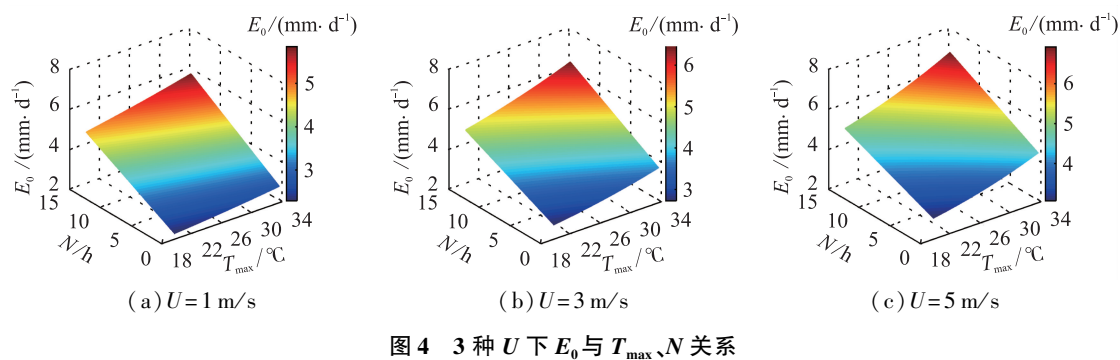


图 4 3 种 U 下 E_0 与 $T_{\max}$ 、 N 关系

Fig. 4 Influence of maximum temperature ($T_{\max}$) and sunshine duration (N) on potential evapotranspiration (E_0) with three specified values of wind speed (U)

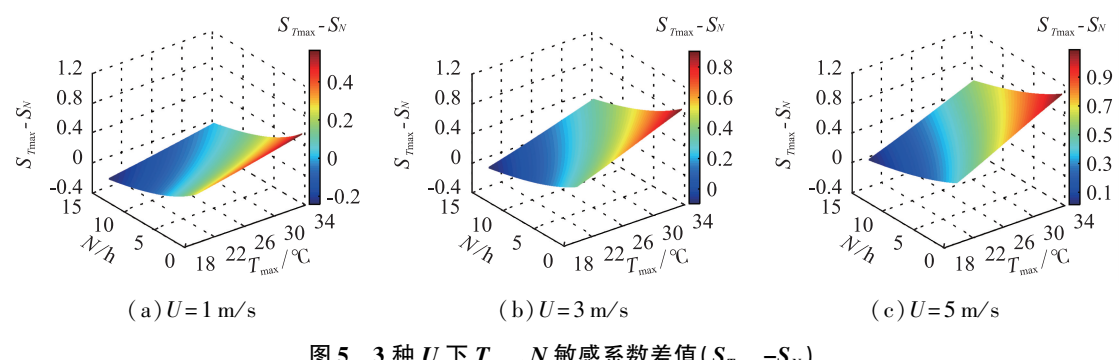


图 5 3 种 U 下 $T_{\max}$ 、 N 敏感系数差值 ($S_{T_{\max}} - S_N$)

Fig. 5 Differences of sensitivity coefficients ($S_{T_{\max}} - S_N$) with three specified values of wind speed (U)

参考文献:

[1] 秦年秀,陈喜,薛显武,等. 潜在蒸散发量计算公式在贵州省适用性分析 [J]. 水科学进展,2010,21(3):357-363. (QIN Nianxiu,CHEN Xi,XUE Xianwu,et al. An applicability study of potential evapotranspiration model [J]. Advances in Water Science,2010,21(3):357-363. (in Chinese))

[2] 陈晓菲,任立良,江善虎,等. 赣江上游流域蒸散发量影响因素的遥感分析 [J]. 水资源保护,2014,30(2):33-37. (CHEN Xiaofei,REN Liliang,JIANG Shanhu,et al. RS-based analysis of factors influencing evapotranspiration in upstream region of Ganjiang Basin [J]. Water Resources Protection,2014,30(2):33-37. (in Chinese))

[3] 朱非林,王卫光,孙一萌,等. 汉江流域实际蒸散发的时空演变规律及成因分析 [J]. 河海大学学报(自然科学版),2013,41(4):300-306. (ZHU Feilin,WANG Weiguang,SUN Yimeng,et al. Spatial and temporal variations of actual evapotranspiration and their causes in Hanjiang River Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2013,41(4):300-306. (in Chinese))

[4] 丛振涛,杨大文,倪广恒. 蒸发原理与应用 [M]. 北京:科学出版社,2013.

[5] XU Yueping,PAN Suli,FU Guangtao,et al. Future potential evapotranspiration changes and contribution analysis in Zhejiang Province,East China [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres,2014,119(5):2174-2192.

[6] GONG Lebing,XU Chongyu,CHEN Deliang,et al. Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) Basin [J]. Journal of Hydrology,2006,329(3/4):620-629.

[7] LIANG Liqiao,LI Lijuan,ZHANG Li,et al. Sensitivity of Penman-Monteith reference crop evapotranspiration in Tao'er River Basin of northeastern China [J]. Chinese Geographical Science,2008,18(4):340-347.

[8] 刘小莽,郑红星,刘昌明,等. 海河流域潜在蒸散发的气候敏感性分析 [J]. 资源科学,2009,31(9):1470-1476. (LIU Xiaomang,ZHENG Hongxing,LIU Changming,et al. Sensitivity of the potential evapotranspiration to key climatic variables in the Haihe River Basin [J]. Resources Science,2009,31(9):1470-1476. (in Chinese))

[9] 李斌,李丽娟,覃驭楚,等. 澜沧江流域潜在蒸散发敏感性分析 [J]. 资源科学,2011,33(7):1256-1263. (LI Bin,LI Lijuan,QIN Yuchu,et al. Sensitivity analysis of potential evapotranspiration in the Lancang River Basin [J]. Resources Science,2011,33(7):1256-1263. (in Chinese))

- [10] 刘昌明,张丹. 中国地表潜在蒸散发敏感性的时空变化特征分析[J]. 地理学报,2011,66(5):579-588. (LIU Changming, ZHANG Dan. Temporal and spatial change analysis of the sensitivity of potential evapotranspiration to meteorological influencing factors in China [J]. Acta Geographica Sinica,2011,66(5):579-588. (in Chinese))
- [11] RAZAVI S, GUPTA H V. What do we mean by sensitivity analysis? The need for comprehensive characterization of “global” sensitivity in Earth and Environmental systems models [J]. Water Resources Research,2015,51(5):3070-3092.
- [12] 李睿. Sobol’ 灵敏度分析方法在结构动态特性分析中的应用研究[D]. 长沙: 湖南大学,2003.
- [13] 郑景云,尹云鹤,李炳元. 中国气候区划新方案[J]. 地理学报,2010,65(1):3-12. (ZHENG Jingyun, YIN Yunhe, LI Bingyuan. A new scheme for climate regionalization in China [J]. Acta Geographica Sinica,2010,65(1):3-12. (in Chinese))
- [14] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56 [M]. Rome: FAO-Food and Agriculture Organization of the United Nations,1998.
- [15] SOBOL’ I M. Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models [J]. Mathematical Modeling and Computational Experiments,1993,1(4):407-414.
- [16] SOBOL’ I M. Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates [J]. Mathematics and Computers in Simulation,2001,55(1/2/3):271-280.
- [17] TANG Y, REED P, WAGENER T, et al. Comparing sensitivity analysis methods to advance lumped watershed model identification and evaluation [J]. Hydrology & Earth System Sciences,2007,11(2):793-817.
- [18] CUKIER R I, FORTUIN C M, SHULER K E, et al. Study of the sensitivity of coupled reaction systems to uncertainties in rate coefficients: I theory [J]. Journal of Chemical Physics,1973,59(8):3873-3878.
- [19] 徐崇刚,胡远满,常禹,等. 生态模型的灵敏度分析[J]. 应用生态学报,2004,15(6):1056-1062. (XU Chonggang, HU Yuanman, CHANG Yu, et al. Sensitivity analysis in ecological modeling [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2004,15(6):1056-1062. (in Chinese))
- [20] LU Y C, MOHANTY S. Sensitivity analysis of a complex, proposed geologic waste disposal system using the Fourier Amplitude Sensitivity Test method [J]. Reliability Engineering & System Safety,2001,72(3):275-291.

· 简 讯 ·

河海大学陈文教授入选 2016 年中国高被引学者榜单

2017 年 2 月 27 日爱思唯尔(Elsevier)发布 2016 年中国高被引学者(Most Cited Chinese Researchers)榜单,河海大学力学与材料学院陈文教授继入选 2014、2015 中国高被引学者榜单之后,今年再次入选。2016 中国高被引学者榜单的研究数据来自全球最大的同行评议学术论文索引摘要 Scopus 数据库,此次榜单中,来自中国的社会科学、工程、物理、化学、数学、经济等 38 学科的 1776 名学者入选。

爱思唯尔 Scopus 数据库是全球最大的同行评议学术论文索引摘要数据库,提供了海量与科研活动有关的文献、作者和研究机构数据。高被引学者作为第一作者和通信作者发表论文的被引总次数在本学科所有中国(大陆地区)的研究者中处于顶尖水平。入选高被引科学家名单,意味着该学者在其所研究领域具有世界级影响力,其科研成果为该领域发展做出了较大贡献。陈文教授 2016 年发表 SCI 索引论文 20 余篇,其中 2 区及以上论文近 10 篇。

(本刊编辑部供稿)