

中国地表潜在蒸散发敏感性的时空变化特征分析

刘昌明^{1,2}, 张 丹^{1,3}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875;

3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:潜在蒸散发是农田灌溉管理、作物需水量估算、稀缺资料地区水量平衡等研究中的重要参量,分析其对气象因子的敏感性有助于农业水资源优化配置和气候变化对水资源的影响研究。根据中国1960-2007年的653个气象台站的常规气象观测资料,采用优化太阳辐射计算的Penman-Monteith潜在蒸散发计算方法,分析了中国10大流域片区的潜在蒸散发对最高气温、最低气温、风速、太阳辐射、水汽压的敏感性及其区域分异。研究结果表明:(1)采用优化后的Penman-Monteith公式,计算的潜在蒸散发与蒸发皿蒸发量的复相关系数从0.61提高到了0.75;计算得出的潜在蒸散发在8个流域片区呈下降趋势,从流域尺度上揭示了“蒸发悖论”在中国的普遍存在。(2)空间上,海河流域片区、黄河流域片区、淮河流域片区、长江流域片区、珠江流域片区、东南诸河的潜在蒸散发对最高气温最为敏感,松花江流域片区、辽河流域片区和西北诸河对水汽压最为敏感,西南诸河则对太阳辐射最为敏感。全国范围内,潜在蒸散发对气象因子的敏感性为:水汽压>最高气温>太阳辐射>风速>最低气温;且各敏感系数与海拔有一定的线性相关性。(3)时间尺度上,潜在蒸散发对最高气温和太阳辐射最为敏感的月份是7月,而对最低气温、风速和水汽压最为敏感的月份是1月。1960-2007年之间,潜在蒸散发对最高气温的敏感性呈下降趋势,而对最低气温、风速、太阳辐射和水汽压的敏感性呈上升趋势。

关键词:Penman-Monteith潜在蒸散发;气象因子;敏感性;中国;流域片区

1 引言

潜在蒸散发是指充分供水条件下的区域蒸散发能力^[1]。由于实际蒸散发观测资料的缺乏,人们往往参照潜在蒸散发来估算实际蒸散发量。潜在蒸散发已被广泛应用于农田灌溉、作物需水量等水资源管理的研究中^[2-3]。从气象学和水文学的角度来看,潜在蒸散发也是地表水量平衡和能量平衡的重要研究内容^[4]。在全球变暖的背景下,近50年来世界各地的潜在蒸散发量(包括蒸发皿观测与计算公式得到的结果)大多呈下降趋势^[5-6],这一现象被称作“蒸发悖论”^[7]并受到广泛关注。区域气象要素的变化会造成潜在蒸散发的变化,分析潜在蒸散发对气象因子的敏感性有利于定量研究气候变化对流域水循环的影响,且对水热转换的深入理解和农业灌溉管理具有重要意义。Saxton^[8]在western Iowa的研究指出潜在蒸散发最为敏感的因子是净辐射;Hupet等^[9]在Belgium的研究指出潜在蒸散发的计算最为敏感的气象因子是最高气温;Gong等^[10]发现长江流域潜在蒸散发最为敏感的气象因子是相对湿度;刘小莽等^[11]在海河流域的研究则表明潜在蒸散发最为敏感的气象因子是水汽压。可见潜在蒸散发计算方法的不同得出的其对气象因子的敏感性有所差异。世界粮农组织(FAO)于

收稿日期:2011-03-16; 修订日期:2011-04-06

基金项目:国家自然科学基金项目(40971023);国家重点基础研究发展规划项目(2010CB428406) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.40971023; National Basic Research Program of China, No.2010CB428406]

作者简介:刘昌明,男,湖南汨罗人,中国科学院院士,中国地理学会名誉理事长(S110001654H),主要从事水文地理方面的研究。E-mail: liucm@igsnrr.ac.cn

通讯作者:张丹,女,博士研究生,从事水文气象方面的研究。E-mail: nuistgiszd@163.com

1998年推出的修正 Penman-Monteith 方程是应用最为广泛的计算方法之一^[1, 8, 12],但方程中的参数多数具有经验性和地方性,因此对参数进行区域优化是提高潜在蒸散发计算精度的重要手段。目前关于全国尺度的潜在蒸散发对气象因子敏感性的研究尚少,且以往的研究多基于气象站点的分析和计算,缺乏对流域潜在蒸散发敏感性的系统分析。本文在 Penman-Monteith 潜在蒸散发计算中引入邱新法的太阳辐射优化公式^[13],计算了中国水资源 10 大流域片区 (7 大江河流域及东南、西南、西北 3 个区的诸河流域) 内的潜在蒸散发对最高气温、最低气温、风速、太阳辐射和水汽压的敏感性,并分析敏感系数的时空分布和变化,为中国各流域片区气候变化对水循环的影响、农业灌溉管理和水资源优化配置研究提供基础参考。

2 数据和方法

2.1 数据

本文采用中国气象局 1960-2007 年的 653 个气象站的常规观测数据,包括月平均最高气温、月平均最低气温、月日照时数、10 m 处风速、相对湿度。数据经过严格的质量控制和筛选后,部分缺测的数据采用反距离权重法进行空间内插得到 (不包括台湾资料)。其中,317 个台站 (1961-2000 年资料完整) 的 20 cm 口径蒸发皿蒸发量及 116 个台站的太阳辐射资料用来检验参数优化后 Penman-Monteith 潜在蒸散发的估算精度。文中各参量的空间化方法采用反距离权重法进行插值^[14],空间分辨率 5 km×5 km。中国 653 个台站和 10 大流域片区的空间分布图如图 1 所示。

2.2 方法

2.2.1 世界粮农组织 (FAO) 潜在蒸散发的计算方法及其参数优化 世界粮农组织于 1998 年推出的修正 Penman-Monteith 方程是目前最常用的潜在蒸散发估算方法之一。其中参考

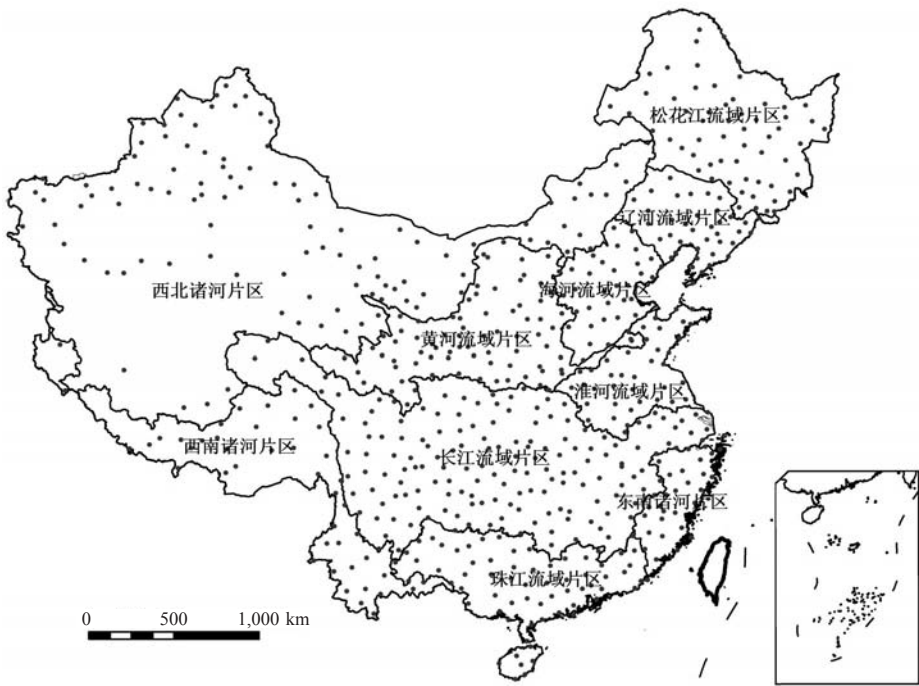


图 1 中国 653 个气象台站和主要流域片区分布图
Fig. 1 Locations of 653 meteorological stations and 10 river basins in China

下垫面为植被高度0.12 m的草地,具有固定的表面阻抗70 s/m,反照率为0.23,表达式为^[1]:

$$E_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{mean} + 273} U_2 (vp_s - vp)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$$

(1)

式中: E_0 为潜在蒸散发(mm), R_n 为作物表层净辐射($\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$), G 为土壤热通量($\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$), T_{mean} 日平均气温($^{\circ}\text{C}$), U_2 为2 m高度处风速(m/s), vp_s 为饱和水汽压(kPa), vp 为实际水汽压(kPa), Δ 为饱和水汽压曲线斜率($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$), γ 为干湿表常数($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$)。其中, R_n 是太阳辐射 R_s 的函数 $R_n = f(R_s)$,太阳辐射 R_s 可表示为:

$$R_s = (a_s + b_s \frac{S}{N}) R_a$$

(2)

式中: S 为月日照时数(h), N 为月最大可照时数(h), R_a 为大气层外太阳辐射($\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$), a_s 和 b_s 分别为经验系数,大多数学者在应用该公式时取 $a_s=0.25$, $b_s=0.50$ 。由于太阳辐射是地表能量的最终来源,其准确的估算对潜在蒸散发尤为重要。中国地域广阔,且跨越不同的气候带,因此全国用一组经验系数是不合理的^[13]。本文引入邱新法等^[13]的太阳辐射优化模型^[13],根据太阳辐射分布的地域性特征,采用全国116个太阳总辐射观测站的数据利用区域优化算法来确定 a_s 和 b_s 。从优化后的年平均 a_s 和 b_s 空间分布图(图2)可以看出, a_s 在0.12~0.29之间, b_s 在0.45~0.73之间,优化后的参化具有显著的区域性,且空间上均匀变化。经计算,在 $a_s=0.25$, $b_s=0.50$ 时全国116个站的年太阳辐射相对误差平均值为15.64%,优化后的相对误差平均值仅为6.48%,可见,优化后的太阳辐射误差减小了一倍以上。采用优化后的 a_s 和 b_s 计算 R_s ,能进一步提高潜在蒸散发量的定量精度。

为验证优化后的Penman-Monteith潜在蒸散发的计算精度,采用1961-2000年有完整的蒸发皿观测资料的317个台站的蒸发皿数据与优化后的Penman-Monteith潜在蒸散发进行对比。尽管蒸发皿蒸发量并不等于地表的实际潜在蒸散发量,但两者都反映一定气候条件下流域蒸散发能力,它们之间有良好的相关性^[15-16]。从相关统计参数(表1)可以看出,优化后的潜在蒸散发与蒸发皿蒸发量的复相关系数较优化前的复相关系数有了大幅度的提高,尤其是各站逐年条件下,其复相关系数从0.61提高到0.75。这说明优化后的Penman-Monteith公式更加适用于我国地表的潜在蒸散发分析。

2.2.2 敏感系数的定义与计算 本文的潜在蒸

表1 Penman-Monteith公式优化前后
参数统计表

Tab. 1 Comparison of Penman-Monteith formula
and improved formula

类别	R ² (优化前)	R ² (优化后)	样本数
逐年多站平均	0.88	0.90	40
逐站多年平均	0.62	0.79	317
逐站逐年	0.61	0.75	12680

注: R² 为复相关系数

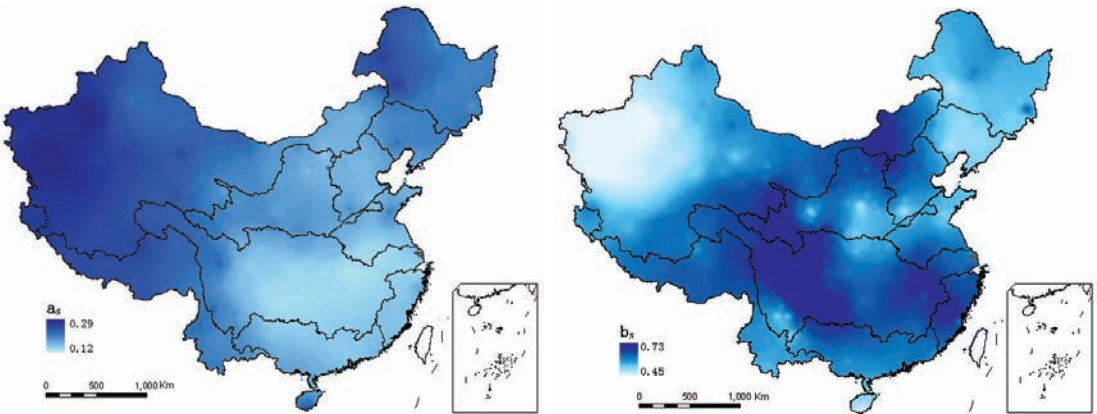


图2 区域优化的 a_s 和 b_s 空间分布图
Fig. 2 Spatial distribution of the improved a_s and b_s

散发气候敏感系数为:潜在蒸散发变化率与气象因子变化率之比^[17],即:

$$S_x = \lim(\frac{\Delta E_0/E_0}{\Delta x/x}) = \frac{\partial E_0}{\partial x} \cdot \frac{x}{E_0}$$

(3)

式中: E_0 为潜在蒸散发, S_x 为潜在蒸散发关于气象因子 x 的敏感系数,无量纲,该式便于不同气象因子之间的对比。敏感系数为正表示潜在蒸散发随气象因子的增加而增加;敏感系数为负表示潜在蒸散发随气象因子的增加而减小,其绝对值越大表明气象因子对 E_0 的影响越大。本文关于潜在蒸散发对最高气温、最低气温、风速、太阳辐射和水汽压的敏感系数进行讨论,分别表示为 S_{Tmax} 、 S_{Tmin} 、 S_{U2} 、 S_{Rs} 和 S_{ep} 。

本文采用的统计方法主要有气候倾向率^[18]和Mann-Kendall趋势检验^[19]。

3 中国主要流域片区潜在蒸散发敏感性的时空特征分析

3.1 潜在蒸散发及其各相关气象要素的变化

我国10大流域片区各气象要素和潜在蒸散发量在1960-2007年的48年间气候倾向率分析结果(表2)显示,近50年来中国的各气象要素发生了显著的变化。各流域片区的最高气温均有上升趋势,除淮河流域片区、长江流域片区和珠江流域片区以外,其他7个片区的气候倾向率均通过了 $\alpha = 0.05$ 的Mann-Kendall显著性检验,全国最高气温显著升高,其气候倾向率为 $0.205\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$;最低气温在全国10大流域片区均通过了 $\alpha = 0.05$ 的Mann-Kendall显著性检验,上升趋势显著,全国而言,气候倾向率为 $0.393\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。风速在近48年呈下降趋势,除西南流域片区以外,其他9个片区的风速下降率通过了 $\alpha = 0.05$ 的Mann-Kendall显著性检验,全国风速的气候倾向率为 $-0.115\text{ m}/(\text{s}\cdot 10\text{a})$ 。太阳辐射在全国也有明显的减小趋势,其中一半以上的流域片区通过了 $\alpha = 0.05$ 的Mann-Kendall显著性检验,全国太阳辐射的减少率为 $0.114\text{ (MJ}/\text{m}^2\cdot \text{d})/10\text{a}$ 。水汽压在各流域片区均为上升趋势,且西南诸河片区、西北诸河片区通过了 $\alpha = 0.05$ 的Mann-Kendall显著性检验,上升趋势显著,全国水汽压的气候倾向率为 $0.086\text{ hPa}/10\text{a}$ 。就潜在蒸散发而言,松花江流域片区和黄河流域片区以 $3.775\text{ mm}/10\text{a}$ 和 $1.092\text{ mm}/10\text{a}$ 的速度呈微弱的上升趋势,这与Gao等^[20]指出的1960-2002年中国东北—黄河中上游—青藏高原东部一线上潜在蒸散发存在上升趋势的结论相一致;其他8个流域片区潜在蒸散发均呈下降趋势,这说明在流域尺度上“蒸发悖论”现象存在的普遍性,全国范围内潜在蒸散发的减小趋势为 $6.204\text{ mm}/10\text{a}$ 。

3.2 潜在蒸散发对气象要素的敏感系数及其空间分布

基于ArcGIS9.3,采用反距离权重法得出潜在蒸散发对各气象要素敏感系数的空间分

表2 中国10大流域片区气象要素和潜在蒸散发的气候倾向率 (/10a)

Tab. 2 Climate trends of meteorological factors and potential evapotranspiration of 10 river basins (/10a)

区域	最高气温 ($^{\circ}\text{C}$)	最低气温 ($^{\circ}\text{C}$)	风速 (m/s)	太阳辐射 ($\text{MJ}/\text{m}^2\cdot \text{d}$)	水汽压 (hPa)	潜在蒸散发 (mm)
松花江流域片区	0.327 [*]	0.558 [*]	-0.180 [*]	-0.080	0.066	3.775
辽河流域片区	0.274 [*]	0.463 [*]	-0.191 [*]	-0.120 [*]	0.089	-4.299
海河流域片区	0.241 [*]	0.490 [*]	-0.166 [*]	-0.307 [*]	0.084	-10.154
黄河流域片区	0.273 [*]	0.385 [*]	-0.083 [*]	-0.097	0.068	1.092
淮河流域片区	0.112	0.321 [*]	-0.127 [*]	-0.331 [*]	0.079	-13.512
长江流域片区	0.132	0.232 [*]	-0.090 [*]	-0.185 [*]	0.058	-7.137
东南诸河片区	0.296 [*]	0.344 [*]	-0.140 [*]	-0.323 [*]	0.124	-4.037
珠江流域片区	0.106	0.206 [*]	-0.061 [*]	-0.215 [*]	0.013	-6.592
西南诸河片区	0.125 [*]	0.337 [*]	-0.057	-0.036	0.074 [*]	-3.037
西北诸河片区	0.228 [*]	0.473 [*]	-0.134 [*]	-0.040	0.125 [*]	-9.671
全国	0.205 [*]	0.393 [*]	-0.115 [*]	-0.114	0.086	-6.204

^{*}表示通过了 $\alpha = 0.05$ 的Mann-Kendall显著性检验

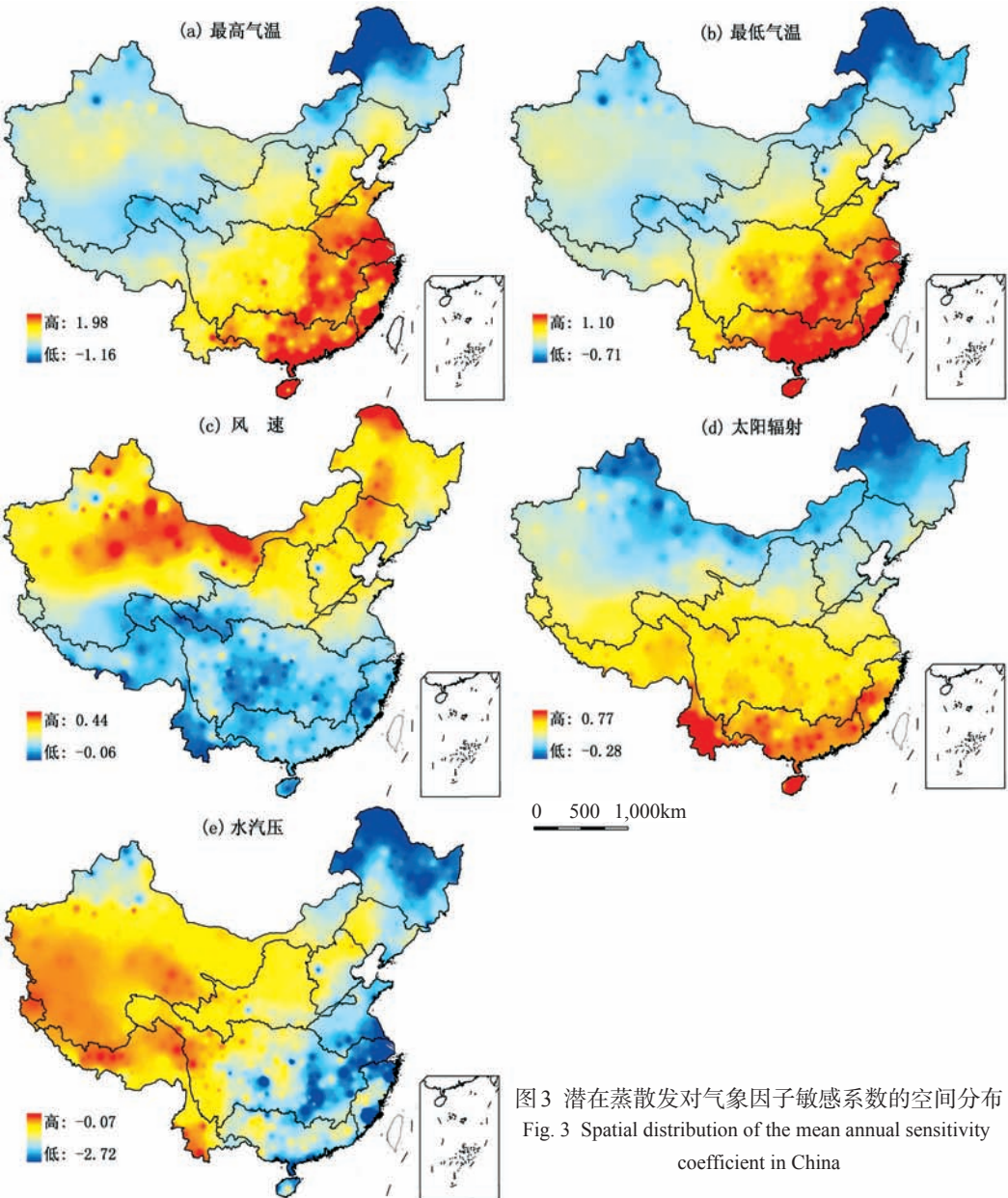


图3 潜在蒸散发对气象因子敏感系数的空间分布
Fig. 3 Spatial distribution of the mean annual sensitivity coefficient in China

布(图3)。从潜在蒸散发对最高气温敏感系数的分布看(图3a):敏感系数分布在-1.16~1.98之间,珠江、东南沿海诸河、淮河和长江中下游为正值区,松花江流域西北部为负值区,西北内陆出现一个相对负值区。从潜在蒸散发对最低气温敏感系数的空间分布可看出(图3b),其分布趋势与图3a大致相似,即东部沿海潜在蒸散发随气温的升高而升高,松花江、长江上游和黄河上游潜在蒸散发随最低气温的降低而升高。图3c为潜在蒸散发对风速敏感系数的空间分布图,敏感系数大致从西南向东北方向递增,介于-0.06~0.44之间,西北内陆区、松花江流域、辽河流域、海河流域和黄河中游为高值区,长江流域、珠江流域、西南诸河、东南诸河及黄河上游地区对风速的敏感性较小。潜在蒸散发对太阳辐射敏感系数(图3d)在-0.28~0.77之间,其分布趋势与对风速敏感系数的分布趋势大致相反,长江流域、珠江流域、西南诸河和东南诸河为高值区,松花江流域北部和西北诸河的北部为低值区。图3e为潜在蒸散发

对水汽压敏感系数的空间分布图,敏感系数介于-2.72~0.07之间,其经向分布趋势显著,从西向东潜在蒸散发对水汽压的敏感性增大。结合表3,可以看出,松花江流域片区、辽河流域片区和西北诸河潜在蒸散发对水汽压的变化最为敏感,海河流域片区、黄河流域片区、淮河流域片区、长江流域片区、东南诸河和珠江流域片区潜在蒸散发对最高气温的变化最为敏感,而西南诸河潜在蒸散发对太阳辐射的变化最为敏感,全国范围内,潜在蒸散发对气象因子的敏感性为:水汽压 > 最高气温 > 太阳辐射 > 风速 > 最低气温。

3.3 潜在蒸散发对气象因子敏感系数与高程的关系

结合测站流域高程资料,发现各流域片区潜在蒸散发对气象因子的敏感系数与高程有一定的关系。考虑到黄河流域片区内高程的变化大,且跨越多种气候区,因此,以其为例分析各敏感系数在该流域内与高程的关系,该流域内共有77个气象站点。从图4可看出,潜在蒸散发对最高气温(图4a)、风速(图4b)的敏感系数随着海拔的增加而降低,复相关系数分别达到0.66、0.53;潜在蒸散发对太阳辐射的敏感系数(图4c)和对水汽压的敏感系数(图4d)与海拔的关系较弱。潜在蒸散发对气象要素的敏感系数与海拔的线性关系反映了不同海拔的地形、植被、土壤和大气之间的复杂反馈机制。

表3 中国10大流域片区潜在蒸散发对主要气象因子的敏感系数统计表

Tab. 3 Statistics of the sensitivity coefficients of 10 river basins

区域	最高气温	最低气温	风速	太阳辐射	水汽压
松花江流域片区	0.02	-0.35	0.27	0.18	-1.03
辽河流域片区	0.53	-0.03	0.27	0.29	-0.67
海河流域片区	0.63	0.06	0.24	0.34	-0.60
黄河流域片区	0.50	-0.01	0.19	0.40	-0.48
淮河流域片区	0.98	0.28	0.19	0.41	-0.91
长江流域片区	0.75	0.23	0.12	0.50	-0.68
东南诸河片区	1.07	0.44	0.10	0.54	-0.97
珠江流域片区	1.02	0.46	0.11	0.57	-0.77
西南诸河片区	0.46	0.03	0.11	0.54	-0.31
西北诸河片区	0.37	-0.10	0.25	0.31	-0.39
全国	0.52	0.02	0.20	0.39	-0.58

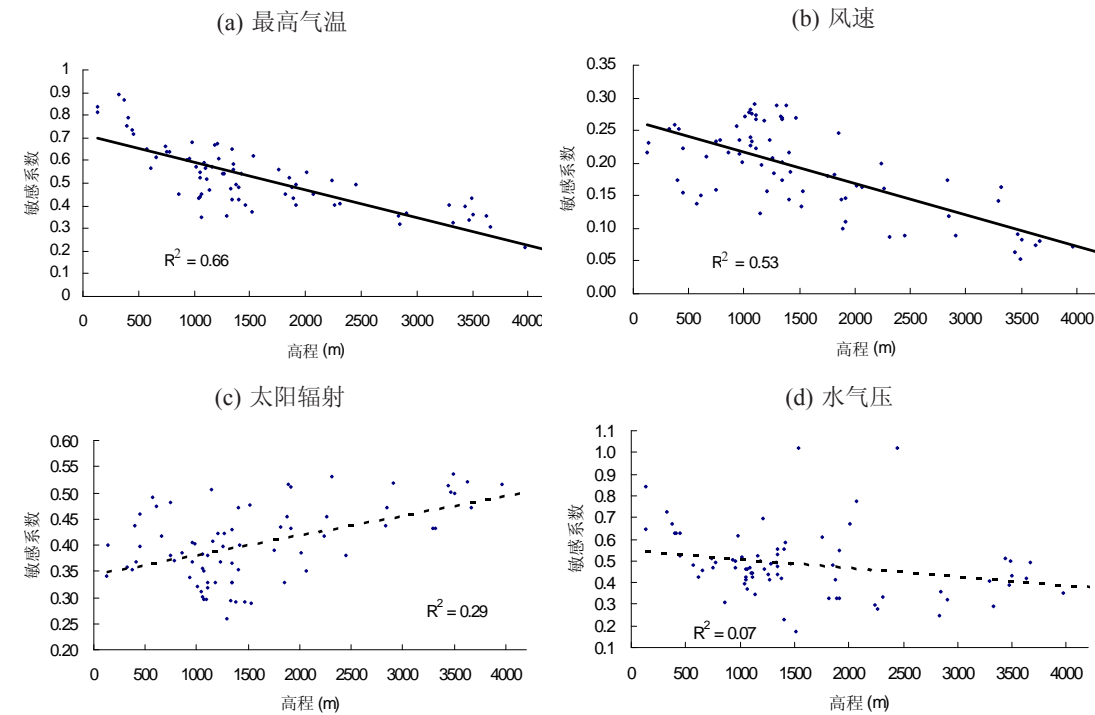


图4 潜在蒸散发对气象因子敏感系数与高程的关系
Fig. 4 Correlations between the sensitivities and altitudes

3.4 潜在蒸散发对气象因子敏感系数的年内变化

从全国 1960-2007 年的气候平均潜在蒸散发对气象因子的敏感系数的逐月变化(图 5)可以看出,潜在蒸散发对风速和太阳辐射的敏感系数均为正值,表明潜在蒸散发随这两个气象因子的增大而增大。潜在蒸散发对风速的敏感系数在 0.11~0.31 之间,8 月份最小,1 月份最大,对太阳辐射的敏感系数在 0.01~0.64 之间,12 月份最小,7 月份最大。潜在蒸散发对水汽压的敏感系数均为负值,5 月份敏感性最小,为-0.40,1 月份敏感性最大,为-0.93。潜在蒸散发对最高气温的敏感系数介于-0.22~0.84 之间,最敏感的月份为 7 月;对最低气温的敏感系数介于-0.43~0.30 之间,最敏感的月份为 1 月。

3.5 潜在蒸散发对气象因子敏感系数的年际变化

从 1960-2007 年潜在蒸散发对气象因子敏感系数的变化趋势相关统计参数(表 4)可以看出,在 10 大流域片区,除松花江流域片区和黄河流域片区外,其他的流域片区潜在蒸散发对最高气温的敏感性下降,全国的敏感系数气候倾向率为-0.0060/10a。除东南诸河片区和珠江流域片区外,潜在蒸散发对最低气温的敏感性均呈增大趋势,松花江流域片区、辽河流域片区、黄河流域片区、海河流域片区、西南诸河和西北诸河潜在蒸散发对最低气温敏感性的上升趋势通过了 $\alpha = 0.05$ 的 Mann-Kendall 显著性检验,且全国以 0.0107/10a 的速度呈显著增加趋势。除西南诸河、西北诸河以外,潜在蒸散发对风速的敏感性上升,且松花江流域片区和东南诸河片区的上升趋势通过了 $\alpha = 0.05$ 的 Mann-Kendall 显著性检验,全国而言,对风速敏感系数的增加率为 0.0075/10a。各流域片区的潜在蒸散发对太阳辐射的敏感性有增有减,西北诸河潜在蒸散发对太阳辐射敏感系数的上升趋势通过了 $\alpha = 0.05$ 的 Mann-Kendall 显著性检验,全国范围内对太阳辐射的敏感性呈上升趋势。10 大流域片区潜在蒸散发对水汽压的敏感性均呈增加趋势,其增加率为 0.0259/10a,松花江流域片区、辽河流域片区和海河流域片区的增加率通过了 $\alpha = 0.05$ 的 Mann-Kendall 显著性检验。

4 讨论

“蒸发悖反”现象一直是潜在蒸散发研究中的热点。但有研究指出近年来潜在蒸散发在中国^[21]、澳大利亚^[22]等有上升趋势,潜在蒸散发的上升是否意味着“蒸发悖反”现象的减弱甚至消失?从 1960-2007 年的中国潜在蒸散发时间序列(图 6)可以看出,1993 年以后,潜在蒸散

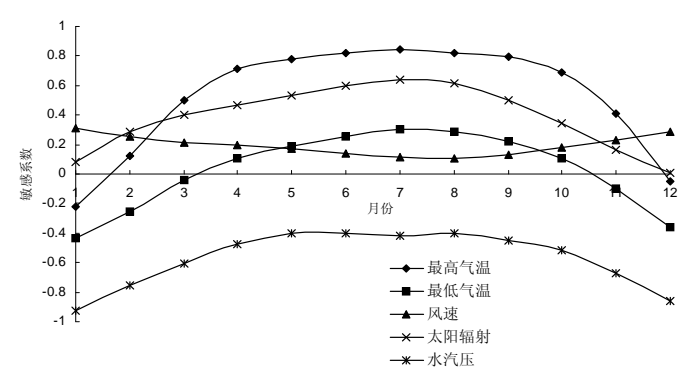


图 5 潜在蒸散发对气象因子敏感系数的年内变化
Fig. 5 Variation of monthly mean sensitivity coefficient in China

表 4 中国 10 大流域片区潜在蒸散发对气象因子敏感系数的年际变化趋势 (/10a)

Tab. 4 Climate trends in sensitivity coefficients of 10 river basins (/10a)					
区域	最高气温	最低气温	风速	太阳辐射	水汽压
松花江流域片区	0.0126	0.0208 [*]	0.0102 [*]	-0.0120	0.0292 [*]
辽河流域片区	-0.0041	0.0104 [*]	0.0039	0.0017	0.0248 [*]
海河流域片区	-0.0044	0.0125 [*]	0.0048	-0.0007	0.0216 [*]
黄河流域片区	0.0003	0.0079 [*]	0.0026	0.0007	0.0150
淮河流域片区	-0.0181	0.0064	0.0035	-0.0001	0.0244
长江流域片区	-0.0154	0.0001	0.0018	0.0005	0.0247
东南诸河片区	-0.0180	-0.0012	0.0081 [*]	-0.0033	0.0368
珠江流域片区	-0.0204	-0.0035	0.0043	-0.0028	0.0219
西南诸河片区	-0.0051	0.0037 [*]	-0.0036	0.0055	0.0024
西北诸河片区	-0.0041	0.0095 [*]	-0.0042	0.0065 [*]	0.0155
全国	-0.0060	0.0107 [*]	0.0075	0.0111	0.0259

^{*}表示通过了 $\alpha = 0.05$ 的 Mann-Kendall 显著性检验

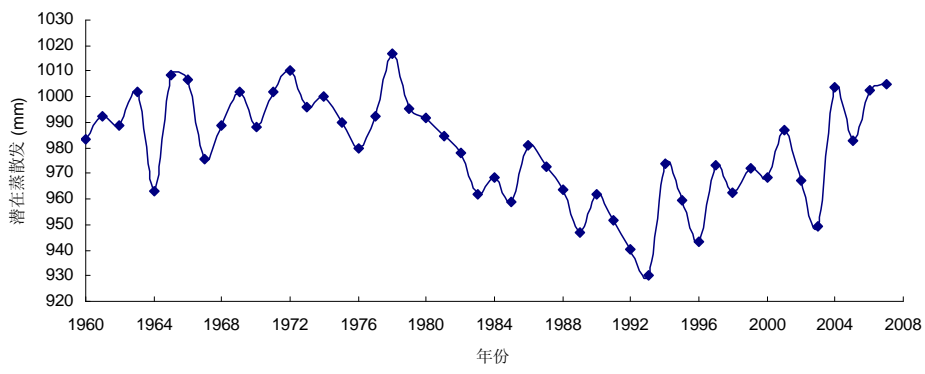


图 6 1960-2007年潜在蒸散发变化趋势

Fig. 6 Changing trend of potential evapotranspiration between 1960 and 2007

发呈上升趋势。3.1节的研究结果表明,黄河流域片区的潜在蒸散发在过去的48年中呈微弱的上升趋势,这与LIU等^[6]对黄河流域1961-2000年的蒸发皿持续下降的研究结果不同,它们能否从侧面反映出“蒸发悖反”现象在黄河流域片区的减弱甚至消失有待于结合更加全面的观测数据进行深入的探讨。

研究中还发现,潜在蒸散发对风速和太阳辐射的敏感系数与潜在蒸散发自身有良好的相关性。图7给出了以黄河流域片区为例的77个气象站点的敏感系数与潜在蒸散发的相关关系图。潜在蒸散发与 S_{U2} 和 S_{R_s} 的复相关系数分别达0.88和0.74,且两者呈相反的关系,即当潜在蒸散发较小时,它对风速的敏感性较小而对太阳辐射的敏感性较大;随着潜在蒸散发的增大,它对风速的敏感性增加,而对太阳辐射的敏感性减少。这可能是因为太阳辐射和风速分别是显热通量和感热通量的重要影响因子,在地表能量平衡中,忽略土壤热通量,感热通量越大,潜热通量越小,反之亦然。风速和太阳辐射在过去的48年间呈下降趋势,尤其是风速的下降趋势显著,其变化对潜在蒸散发可能产生的影响需要更加科学的理论方法以得出可靠的结论。

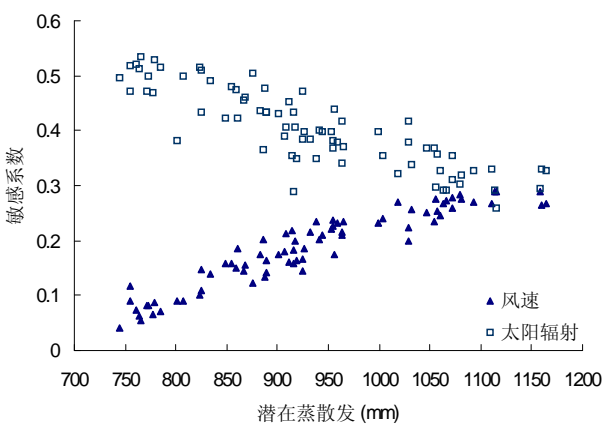


图 7 潜在蒸散发对气象因子敏感系数与潜在蒸散发的关系

Fig. 7 Correlations between sensitivities and potential evapotranspiration

5 总结

本文利用1960-2007年653个气象站点的常规气象资料,优化了世界粮农组织 (FAO) 推荐的Penman-Monteith公式中的太阳辐射计算参数,分析了中国10大水资源分区的潜在蒸散发对气象因子的敏感系数的时空分布和变化,得出以下主要结论:

- (1) 采用优化后的太阳辐射计算参数,使其误差减小了一倍以上,并且使潜在蒸散发与蒸发皿蒸发量的复相关系数从0.61提高到了0.75。
- (2) 中国10大流域片区的最高气温、最低气温和水汽压均呈上升趋势,且最高气温和最低气温的变化最为显著;风速和太阳辐射呈下降趋势,且风速的变化趋势显著。除松花江流

域片区和黄河流域片区外,其他流域片区的年平均潜在蒸散发均呈下降趋势,从流域尺度上揭示了“蒸发悖论”在中国大部分流域片区存在的普遍性。

(3) 空间上,海河流域片区、黄河流域片区、淮河流域片区、长江流域片区、珠江流域片区、东南诸河的潜在蒸散发对最高气温最为敏感,松花江流域片区、辽河流域片区和西北诸河对水汽压最为敏感,西南诸河则对太阳辐射最为敏感。潜在蒸散发对最高气温、风速的敏感系数与海拔有显著的负相关性。

(4) 时间上,潜在蒸散发对最高气温和太阳辐射最为敏感的月份是7月,而对最低气温、风速和水汽压最为敏感的月份是1月;1960-2007年之间,潜在蒸散发对最高气温的敏感性呈下降趋势,而对最低气温、风速、太阳辐射和水汽压的敏感性呈上升趋势。

本文分析了潜在蒸散发对5个气象因子的敏感性,它为农业水资源管理和气候变化的深入研究提供重要参考。潜在蒸散发与地形、植被、土壤、大气以及实际蒸散发有着复杂的反馈机理,有待进一步探讨它们之间的定量关系。

参考文献 (References)

- [1] Allen R G, Pereira L S, Raes D et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, 1998.
- [2] Liu C M, Zhang X Y, Zhang Y Q. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 111: 109-120.
- [3] Guo S L, Guo J, Zhang J et al. VIC distributed hydrological model to predict climate change impact in the Hanjiang Basin. *Science China: Series E*, 2009, 52(11): 3234-3239.
- [4] Liu Changming; Sun Rui. Ecological aspects of water cycle: Advances in soil vegetation atmosphere of energy and water fluxes. *Advances in Water Science*, 1999, 10(3): 23-28. [刘昌明, 孙睿. 水循环的生态学方面: 土壤—植被—大气系统水分能量平衡研究进展. *水科学进展*, 1999, 10(3): 23-28.]
- [5] Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y. Evaporation losing its strength. *Nature*, 1995, 377: 687-688.
- [6] Liu Changming, Zeng Yan. Changes of pan evaporation in the recent 40 years in the Yellow River Basin. *Water International*, 2004, 29(4): 510-516.
- [7] Brutsaert W, Parlange M B. Hydrologic cycle explains the evaporation paradox. *Nature*, 1998, 396: 30.
- [8] Saxton K E. Sensitivity analysis of the combination evapotranspiration equation. *Agricultural and Meteorology*, 1975, 15 (3): 343-353.
- [9] Hupet F, Vanclooster M. Effect of the sampling frequency of meteorological variables on the estimation of the reference evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 2001, 243: 192-204.
- [10] Gong L B, Xu C Y, Chen D L et al. Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in Changjiang (Yangtze River) Basin. *Journal of Hydrology*, 2006, 329: 620-629.
- [11] Liu Xiaomang, Zheng Hongxing, Liu Changming et al. Sensitivity of the potential evapotranspiration to key climatic variables in the Haihe River Basin. *Resources Science*, 2009, 31(9): 1470-1476. [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. *资源科学*, 2009, 31(9): 1470-1476.]
- [12] Chen D, Gao G., Xu C Y et al. Comparison of Thornthwaite method and pan data with the standard Penman-Monteith estimates of potential evapotranspiration for China. *Climate Research*, 2005, 28: 123-132.
- [13] Zeng Yan, Qiu Xinfu, Pan Aoda et al. Distributed modeling of global solar radiation over rugged terrain of the Yellow River Basin. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(11): 1185-1193. [曾燕, 邱新法, 潘敖大等. 地形对黄河流域太阳辐射影响的分析研究. *地球科学进展*, 2008, 23(11): 1185-1193.]
- [14] Qian T, Dai A, Trenberth K E et al. Simulation of global land surface conditions from 1948-2004 (Part I): Forcing data and evaluation. *Hydrometeorology*, 2006, 7(5): 953-975.
- [15] Roderick M L, Rotstajn L D, Farquhar G D et al. On the attribution of changing pan evaporation. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34, L17403, doi: 10.1029/2007GL031166.
- [16] Zheng H, Liu X, Liu C et al. Assessing contributions to panevaporation trends in Haihe River Basin, China. *Geophys. Res.* 2009, 114: D24105, doi: 10.1029/2009JD012203.
- [17] McCuen R H. A sensitivity and error analysis of procedures used for estimating evaporation. *Water Resource Bulletin*, 1974, 10(3): 486-498.
- [18] Shi Neng, Chen Jiaqi, Tu Qipu. 4-phase climate change features in the last 100 years over China. *Acta Meteorologica Sinica*, 1995, 53(4): 431-439. [施能, 陈家其, 屠其璞. 中国近100年来4个年代际的气候变化特征. *气象学报*, 1995, 53

(4): 431-439.]

- [19] Sun Peng, Zhang Qiang, Chen Xiaohong et al. Spatio-temporal patterns of sediment and runoff changes in the Poyang Lake Basin and underlying causes. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(7): 828-840. [孙鹏, 张强, 陈晓宏 等. 鄱阳湖流域水沙时空演变特征及其机理. *地理学报*, 2010, 65(7): 828-840.]
- [20] Gao G, Chen D, Xu C Y et al. Trend of estimated actual evapotranspiration over China during 1960-2002. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112, D11120, doi: 10.1029/2006JD008010.
- [21] Cong Zhentao, Zhao Jingjing, Yang Dawen et al. Understanding the hydrological trends of river basins in China. *Journal of Hydrology*, 2010, 388: 350-356.
- [22] Gifford R M, Farquhar G D, Nicholls N et al. Workshop summary on pan evaporation: An example of the detection and attribution of climate change variables. *Australia Academy of Sciences*, 2005: 22-23.

Temporal and Spatial Change Analysis of the Sensitivity of Potential Evapotranspiration to Meteorological Influencing Factors in China

LIU Changming^{1,2}, ZHANG Dan^{1,3}

(1. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;*

2. *College of Resources and Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;*

3. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

Abstract: Potential evapotranspiration (E_0), as an estimate of the evaporative demand of the atmosphere, has been widely discussed in researches on irrigation management, crop water demand and predictions in ungauged basins (PUBs). Analysis of the sensitivity of E_0 to meteorological factors is the basic research on the impact of climate change on water resources, and also is important to the optimal allocation of agricultural water resources. In this study, the calculation method of global radiation in Penman-Monteith formula was improved by optimization, and the sensitivities of Penman-Monteith potential evapotranspiration to the daily maximum temperature ($S_{T_{max}}$), daily minimum temperature ($S_{T_{min}}$), wind speed (S_{U_2}), global radiation (S_{R_s}) and vapor pressure (S_{VP}) were calculated and analyzed based on the long-term meteorological data at 653 meteorological stations in China during the period 1961-2000. The results are obtained as follows. (1) The multiple correlation coefficient between E_0 and pan evaporation increased from 0.61 to 0.75 using the improved Penman-Monteith formula. Trend analysis shows that E_0 had the decreasing trends in eight basins of China, which indicates that "pan evaporation paradox" common existed in China from 1960 to 2007. (2) Spatially, T_{max} was the most sensitive variable in the Haihe River, Yellow River, Huaihe River, Yangtze River, Pearl River and river basins in southeastern China, and VP was the most sensitive variable in the Songhua River Basin, Liaohe River Basin and river basins in Northwest China, while R_s was the most sensitive variable in river basins of Southwest China. For the national average, the most sensitive variable was VP , followed by T_{max} , R_s , U_2 and T_{min} . In addition, the changes in sensitivity coefficients had certain correlation with elevation. (3) Temporally, the maximum values of $S_{T_{max}}$ and S_{R_s} occurred in July, while the maximum values of $S_{T_{min}}$, S_{VP} and S_{U_2} occurred in January. Moreover, trend analysis indicates that $S_{T_{max}}$ had decreasing trends, while $S_{T_{min}}$, S_{U_2} , S_{R_s} and S_{VP} had increasing trends.

Key words: Penman-Monteith potential evapotranspiration; meteorological factors; sensitivity; China; river basin area