

曹永强,高璐,袁立婷,等.辽宁省潜在蒸散发量及其敏感性规律分析[J].地理科学,2017,37(9):1422-1429.[Cao Yongqiang, Gao Lu, Yuan Liting et al. Analysis of Potential Evaporation and Its Sensitivity in Liaoning Province. Scientia Geographica Sinica,2017,37(9):1422-1429.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2017.09.015

辽宁省潜在蒸散发量及其敏感性规律分析

曹永强,高璐,袁立婷,李维佳

(辽宁师范大学城市与环境学院,辽宁 大连 116029)

摘要:采用Penman-Monteith法和敏感系数法对辽宁省1965~2014年潜在蒸散发量及影响潜在蒸散发的气象因子敏感性进行分析,探讨气候变化下影响辽宁省潜在蒸散发量变化的主导因子及潜在蒸散发对气候变化的定量响应。结果表明:①近50 a辽宁省潜在蒸散发呈现显著减少趋势,在空间上由西向东递减;②潜在蒸散发对气象因子的敏感性在年尺度上表现为,水汽压最为敏感,其次为太阳辐射、风速、平均气温;在季节尺度上,春季和秋季对平均气温最不敏感,夏季对风速最不敏感,冬季对太阳辐射最不敏感;③空间分布上,气象因素的敏感系数与气象因子空间变化规律相吻合,潜在蒸散发对气温的敏感性由北部向南部递增,对水汽压、太阳辐射的敏感性由东部向西部递减,而风速与之变化趋势相反。④风速的显著降低是辽宁省潜在蒸散发量下降的主要原因,太阳辐射的下降及水汽压的升高也促使了潜在蒸散发量的下降。

关键词:辽宁省;潜在蒸散发量;Penman-Monteith法;敏感性;贡献水平

中图分类号:P426.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0690(2017)09-1422-08

潜在蒸散发是指在一定气象条件下,水分供应不受限制时某一固定下垫面可能达到的最大蒸散发量^[1]。由于实际蒸散发观测资料的缺乏,人们往往依据潜在蒸散发来估算实际蒸散发量。在全球变暖的背景下,近50 a来世界各地的潜在蒸散发量大多呈下降趋势,这一现象被称作“蒸发悖论”并受到广泛关注^[1,2]。国内外学者对“蒸发悖论”的现象一般有3种解释:①云量或大气气溶胶等污染物增加,太阳辐射下降,蒸发量减少;②大气水分增多导致空气湿度增加,水汽压差减小;③夏季季风变化,引起地面风速下降^[3,4]。由于潜在蒸散发量受诸多因素影响,包括太阳辐射、空气湿度、风速以及水汽压差等。为了辨析潜在蒸散发的变化原因,近几年开展了一系列潜在蒸散发对气象因子的敏感性研究^[5-8],这对于深入理解气候变化对水文循环的影响具有重要的理论和实践意义。刘昌明等^[1]根据中国1960~2007年的653个气象台站的常规气象观测资料,分析了中国10大流域片区的潜在蒸散发对气象因子的敏感性及其

区域分异,发现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,且敏感系数与海拔有一定的线性相关性。邹璐等^[9]分析了辽宁省1954~2006年的潜在蒸散发量并探讨了敏感系数的时空变化特征,结果表明多年平均潜在蒸散发量以0.017 mm/(d·10 a)的速率减少,潜在蒸散发对相对湿度最敏感,其次为太阳辐射、温度和风速。

研究潜在蒸散发量及其敏感性变化规律,对辽宁省农业持续发展和保护生态环境具有重要意义,但目前针对辽宁省的研究较少且研究时间不能反映现状特点,因此本文参阅已有研究方法及成果,采用Penman-Monteith方法,揭示长时间序列下(1965~2014年)辽宁省潜在蒸散发对于气候变化的定量响应关系以及识别影响辽宁省潜在蒸散发量变化的主导因子;利用ArcGIS软件对辽宁省各区域潜在蒸散发空间变化特征进行系统分析,探讨区域间潜在蒸散发的相异性,期为辽宁省不同地区农作物合理管理及灌溉等提供

收稿时间:2016-10-12;**修订日期:**2017-01-05

基金项目:国家自然科学基金(51579126、51779114),中国科学院农业水资源重点实验室2016年对外开放基金(KFKT201602)资助。
[Foundation: National Natural Science Foundation of China (51579126,51779114), Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences, 2016 Opening Fund (KFKT201602).]

作者简介:曹永强(1972-),男,内蒙古丰镇人,博士,教授,主要从事水文水资源研究。E-mail: caoyongqiang@lnnu.edu.cn

理论基础。

1 研究区域概况、数据来源及研究方法

1.1 研究区域概况

辽宁省位于欧亚大陆东岸、中纬度地区,118°50′~125°47′E,38°43′~43°29′N之间,属于温带大陆性季风气候。气候总体特点为:雨热同期,冬季温度低,寒冷期比较漫长,夏季气温适中,日照时数大,春秋季节短。平均气温在2~10℃的范围内波动,自沿海向内陆逐渐降低。阳光辐射年总量在100~200 cal/cm²之间,年日照时数2 100~2 600 h,四季各区域日照时数不均匀。

1.2 数据来源及处理

综合辽宁省1965~2014年逐日平均温度、最高温度、最低温度、风速、日照时数以及相对湿度等气象数据,为保证所选气象数据资料的均一和稳定,选取辽宁省数据完整的21个气象站点进行研究,数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/site/index.html>),站点分布如图1所示。

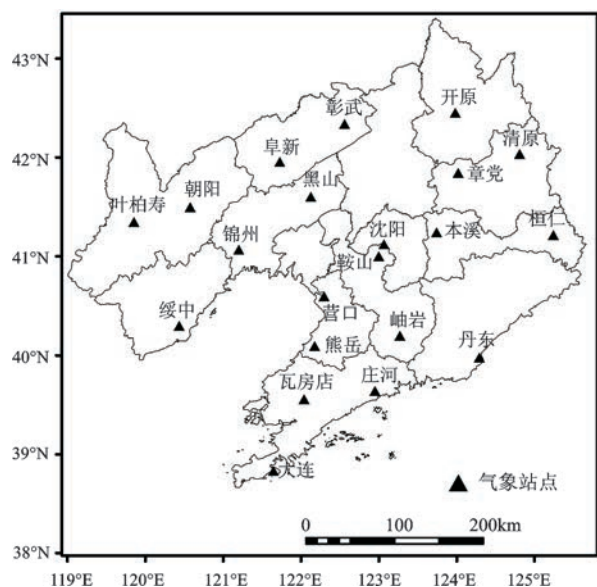


图1 辽宁省气象站点分布

Fig.1 Spatial distribution of weather stations in Liaoning Province

1.3 研究方法

1.3.1 Penman-Monteith (P-M)法

Penman-Monteith (P-M)法是目前公认的单点计算潜在蒸散发量误差最小的一种标准方法,以能量平衡和水汽扩散理论为基础,充分考虑了植被的生理特征。本文采用世界粮农组织(FAO)

1998年修正的P-M模型计算潜在蒸散发量,计算公式如下^[10-12]:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{G_n}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + G_d u_2)} \quad (1)$$

式中, ET_0 为P-M法计算的潜在蒸散发量,mm; R_n 为净辐射,MJ/(m²·d); T 为日平均温度(°C); G 为土壤热通量,MJ/(m²·d); u_2 为2 m高处风速,m/s; e_s 为饱和空气水汽压,kPa; e_a 为空气水汽压,kPa; Δ 为饱和水汽压-温度曲线的梯度,kPa/°C; γ 为湿度计常数,kPa/°C;在估算逐日潜在蒸散发量时 G_n 和 G_d 为固定常数, G_n 为900, G_d 为0.34。各因子的计算公式不再赘述,具体参照文献[13]中的计算步骤。

1.3.2 敏感系数

蒸散发的气候敏感系数是衡量气候要素(如气温、风速等)变化对蒸散发影响的重要指标。由于本文选择FAO-56推荐的PM公式计算 ET_0 ,因此采用基于P-M模型的敏感系数法,该方法在潜在蒸散发研究中得到了广泛应用^[1,6-9]。基于P-M公式推求的无量纲敏感系数公式,蒸散发气候敏感系数为蒸散发变化率与气候因子变化率之比,即:

$$S_x = \lim_{\Delta x/x \rightarrow 0} \left(\frac{\frac{\Delta ET_0}{ET_0}}{\frac{\Delta x}{x}} \right) = \frac{\partial ET_0}{\partial x} \cdot \frac{x}{ET_0} \quad (2)$$

式中, S_x 为蒸散发关于气象因子 x 的敏感系数,无量纲。公式(2)的特点在于通过变化率把各个气象因子无量纲化,可便于不同气候因子之间的比较。敏感系数绝对值越大,表明气候变量对 ET_0 的影响越大,例如当潜在蒸散发对某气象因子的敏感系数为0.1时,则当气象因子变量变化10%,潜在蒸散发将变化1%。

1.3.3 气象因子对 ET_0 贡献值

采用尹云鹤等^[14]提出的敏感系数和多年相对变化率计算气象因子对 ET_0 变化的贡献研究潜在蒸散发变化的成因。公式如下:

$$C_{vi} = S_{vi} \cdot Rc_{vi} \quad (3)$$

$$Rc_{vi} = \frac{n \cdot Trend_{vi}}{\bar{vi}} \cdot 100\% \quad (4)$$

式中, C_{vi} 和 S_{vi} 为气象因子 vi 对 ET_0 变化的贡献率(%)和敏感系数; Rc_{vi} 、 $Trend_{vi}$ 、 \bar{vi} 分别为气象因子 vi 的多年相对变化率、多年线性倾向率以及多年均值; n 为统计年数。

2 潜在蒸散发量时空变异规律

1965~2014年辽宁省 ET_0 变化趋势如图2所示,年均 ET_0 在 $\alpha=0.05$ 水平下呈现出显著下降的趋势,多年平均值为926.28 mm。绘制曼-肯德尔法(M-K)检验统计量曲线发现(图3),UF曲线小于0,说明辽宁省 ET_0 有减少的趋势,从2010年开始 ET_0 减少的趋势超过了显著性水平0.05临界线,表明辽宁省 ET_0 下降趋势是显著的。

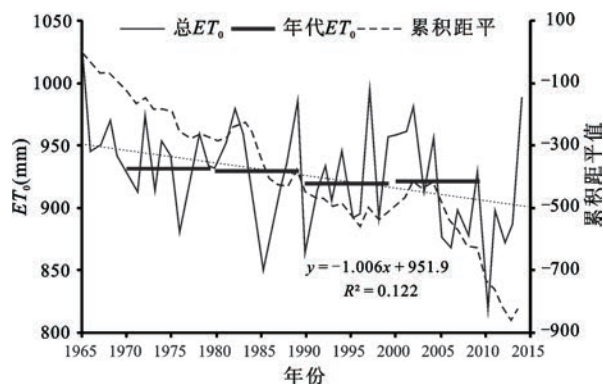


图2 潜在蒸散发量年际及年代变化趋势

Fig.2 Annal and interannual trends of ET_0

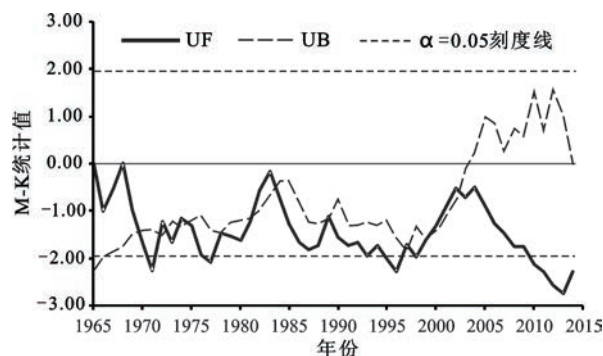


图3 潜在蒸散发量M-K检验统计量曲线

Fig.3 The trend of M-K to ET_0

对 ET_0 多年平均数据进行空间分析(图4a)发现,辽宁省多年平均 ET_0 表现出由西向东递减的趋势,高值区位于朝阳市的朝阳气象站(1 062.82 mm),低值区位于抚顺市的清源气象站(768.18 mm),由于所处地理环境不同导致各区域多年平均 ET_0 存在明显差异。 ET_0 变化率空间分布图(图4b)结果表明,西部 ET_0 变化相比东部更为明显,说明西部的气象因子在近50 a内对 ET_0 作用较为显

著,全省 ET_0 变化率最大为锦州市的黑山气象站,该区域 ET_0 平均每年下降2.71 mm;同时以朝阳市、葫芦岛市、锦州市为代表的全省大部分地区 ET_0 均呈现下降趋势(90.48%的气象站点),合理解释了前文 ET_0 呈现显著下降趋势的现象。

3 潜在蒸散发敏感性分析

3.1 敏感系数年际变化分析

采用敏感系数法分析潜在蒸散发对平均风速(U)、太阳辐射(R_s)、平均气温(T)和水汽压(e_a)的敏感性如图5及表1所示,潜在蒸散发对气象因素敏感性在年际上呈现增加的态势,且增加最为显著的是水汽压,变化趋势为0.022/10 a。在年际尺度上潜在蒸散发对气象因子的敏感性为:水汽压($S-e_a$)>太阳辐射($S-R_s$)>风速($S-U$)>平均气温($S-T$)。因此水汽压是对辽宁省潜在蒸散发影响最突出的气象因子,而风速和平均气温则为相对不敏感的气象因子。

潜在蒸散发与各气象要素的敏感系数空间分布上存在较为明显的地带性特征(图6)。 $S-T$ 、 $S-U$ 以及 $S-R_s$ 在研究区域内均为正值,而 $S-e_a$ 为负值,说明当气温、风速和太阳辐射数值增加10%时, ET_0 将增加1%,而水汽压对潜在蒸散发的影响与之相反。 $S-T$ 呈现自北部向南部敏感性增加的趋势,高值区位于大连市、丹东市以及鞍山市南部,由于海陆地区气温差异明显,所以该区域气温对潜在蒸散发的影响较北部更为敏感; $S-U$ 表现较为明显的地区包括辽宁西部及西北部地区,以朝阳市、葫芦岛市、阜新市为主,说明当风速发生变化时,辽宁西部及西北部地区的潜在蒸散发能敏感的反应风速的变化; $S-R_s$ 的空间变化呈现由东南向西北敏感性随之减弱的特征,由于太阳辐射随纬度越高辐射量越小,因此潜在蒸散发对低纬度地区太阳辐射变化更为敏感,所以大连市、丹东市、抚顺市、本溪市及鞍山市的南部敏感系数较高;与 $S-R_s$ 空间变化趋势整体相似, $S-e_a$ 空间变化以辽宁南部和东部地区敏感系数较大,而西部以及本溪市、抚顺市的东部小范围地区敏感性较弱。根据空间变化特点,与已有参考文献中辽宁省各气象因子的空间变化规律对比发现,气象因素的敏感系数与气象因子空间变化规律^[15-17]相吻合,说明了不同区域的潜在蒸散发气候敏感性存在一定的差异,这与该地区气象因子的变化有关。

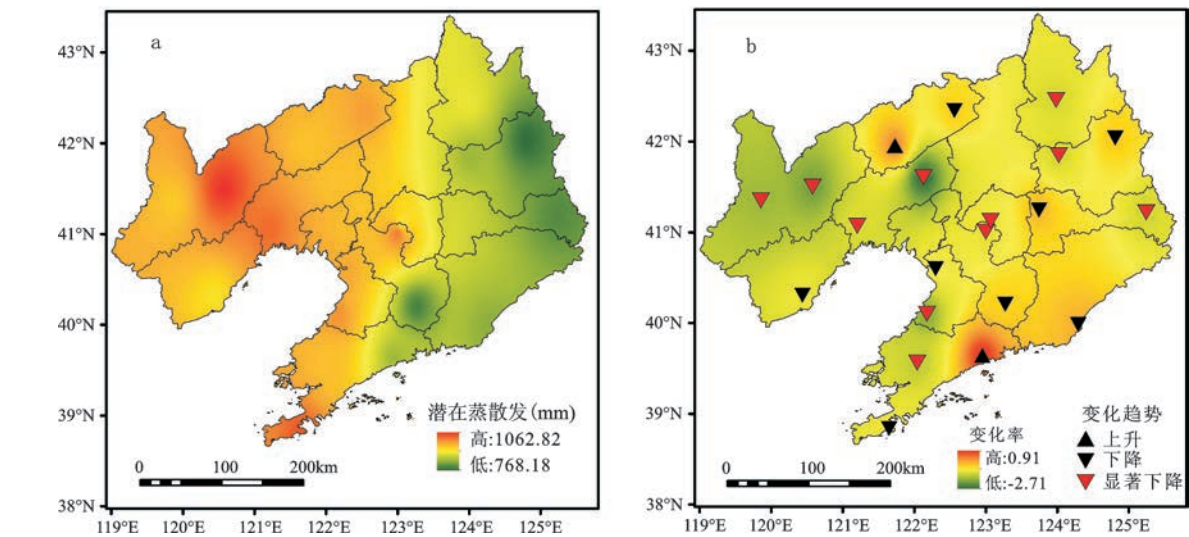


图4 潜在蒸散发量空间分布(a)和变化趋势(b)
Fig.4 Spatial distribution of ET_0 (a) and the trend of ET_0 (b)

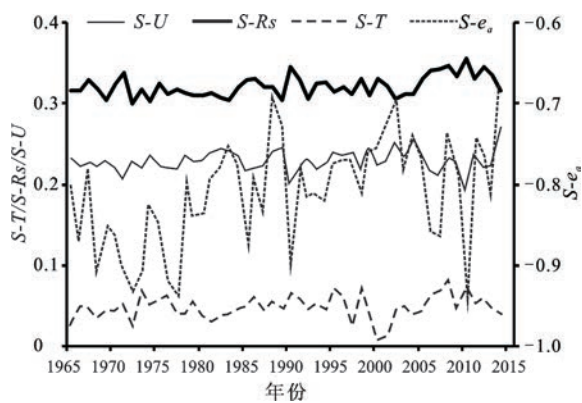


图5 敏感系数年际变化
Fig. 5 Interannual trends of sensitivity coefficients

表1 潜在蒸散发气候敏感系数年际变化趋势				
Table 1 Interannual variation trend in sensitivity coefficients of ET_0				
	$S-T$	$S-U$	$S-Rs$	$S-e_a$
上升	17	12	18	16
显著上升	7	6	10	12
下降	4	9	3	5
显著下降	—	3	—	2
多年平均	0.05	0.23	0.32	-0.81
变化趋势/(10 a)	0.002	0.001	0.004	0.022

注:显著上升/下降表示通过了在 $\alpha=0.05$ 水平下显著性检验。

3.2 敏感系数年内变化趋势

在月尺度上潜在蒸散发对气象因子的敏感程度及气象因子年内变化,结果如图7所示,敏感性

与气象因子变化存在不同程度的响应。从图7a中发现,在冬季 $S-T$ 数值最小表明冬季不利于蒸散发的进行,且平均气温和其敏感系数变化趋势相同,则表明年内敏感系数随着气温的变化而变化; $S-U$ 呈现夏季敏感系数最低冬季较高的现象,与风速年内变化不同,风速增加并不能引起敏感系数的增加,则说明潜在蒸散发对风速敏感性较弱; $S-Rs$ 变化曲线(图7c)表现为单峰变化且最大值出现在夏季,与太阳辐射变化曲线对比发现,虽然在4月太阳辐射减少但敏感系数曲线仍在上升,直到8月才转变为下降的趋势,则认为4~8月太阳辐射的敏感性较年内其他月份变弱; $S-e_a$ 变化呈现为双峰曲线,在5月和9月分别出现了波峰,同时对照水汽压变化曲线,发现敏感系数并未随水汽压的增加而变大,也出现了减少的现象。综上所述,在季节尺度上,蒸散发对水汽压最为敏感,春季和秋季对风速最不敏感,夏季对风速最不敏感,冬季对太阳辐射最不敏感。

4 潜在蒸散发变化成因分析

利用近50 a气象数据对影响潜在蒸散发的气象因子变化趋势进行分析,如表2所示。近50 a内,平均气温、风速、太阳辐射和水汽压的变化均通过了 $\alpha=0.05$ 水平下显著检验,其中平均气温和水汽压呈现增加趋势,变化速率为 $0.27^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.02\text{ hPa}/10\text{a}$,而风速和太阳辐射呈现相反变化趋势,太阳辐射的下降速度为 $0.12\text{ MJ}/(\text{m}^2\cdot\text{d}\cdot10\text{a})$,风

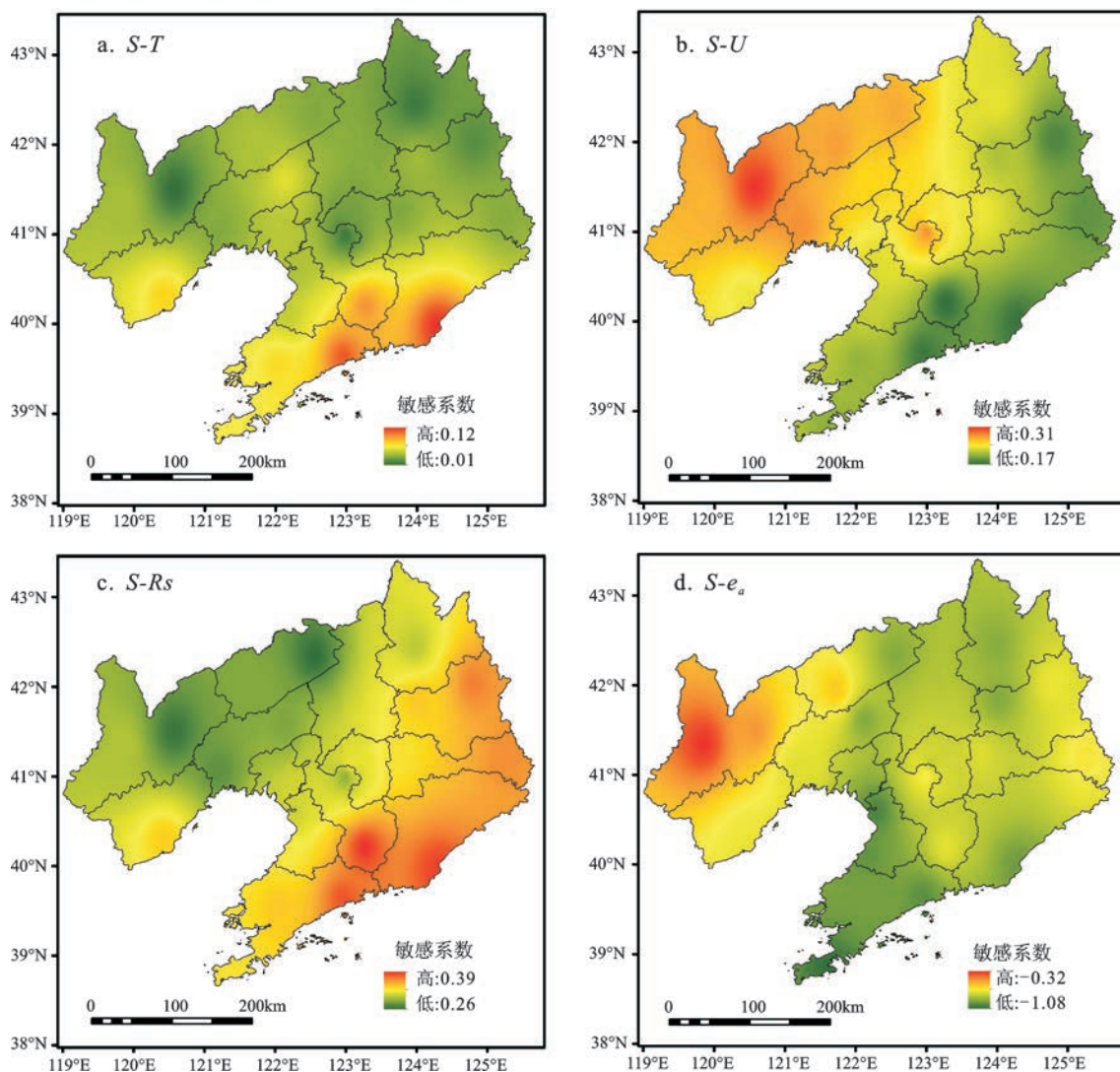


图6 敏感系数空间变化

Fig. 6 Spatial distribution of sensitivity coefficient

速的下降速度为 $0.18 \text{ m}/(\text{s} \cdot 10 \text{ a})$, 且相关系数通过了 $\alpha=0.01$ 水平下显著检验。

各气象因子对 ET_0 变化的贡献结果表明 (表 2), 4 个气象因子对 ET_0 多年相对变化的之和为 -15.38% , 辽宁省主要是由于平均风速下降引起 ET_0 的显著减少。由上文敏感性分析发现, 潜在蒸散发对风速的敏感系数值较低, 但是风速对潜在蒸散发的负贡献率最大, 为 -9.12% , 多年相对变化率为 -39.89% , 说明风速的显著降低是造成辽宁省潜在蒸散发量下降的主要原因。诸多学者研究表明, 中国近 50 a 风速明显减小^[18,19], 而辽宁省为中国风速下降较大的区域之一。造成辽宁省风速下降可能原因归纳为自然原因和人为原因, 其中自然

原因可能是由于近几十年东亚冬季风和夏季风的减弱, 而辽宁省正处于东亚季风区, 风速受季风系统的减弱而相应减小, 也有专家认为是高纬度地带地面气温显著上升, 改变了大尺度环流场, 从而明显减弱了近地面的平均风速^[20]; 人为原因可能与辽宁省老工业基地和较快的城市化发展影响有关, 城市化使建筑物增多导致风速减小, 也存在风速观测记录方式改变等其他人为因素的影响^[20,21]。

水汽压的负贡献率为 -5.76% , 也是引起 ET_0 减少的主要原因之一。虽然其在近 50 a 上升变化幅度较小, 但由于 ET_0 对水汽压的变化敏感性较强, 促使其对 ET_0 的减少贡献也较大。水汽压受相对湿度、日最高气温及日最低气温影响且与之成正

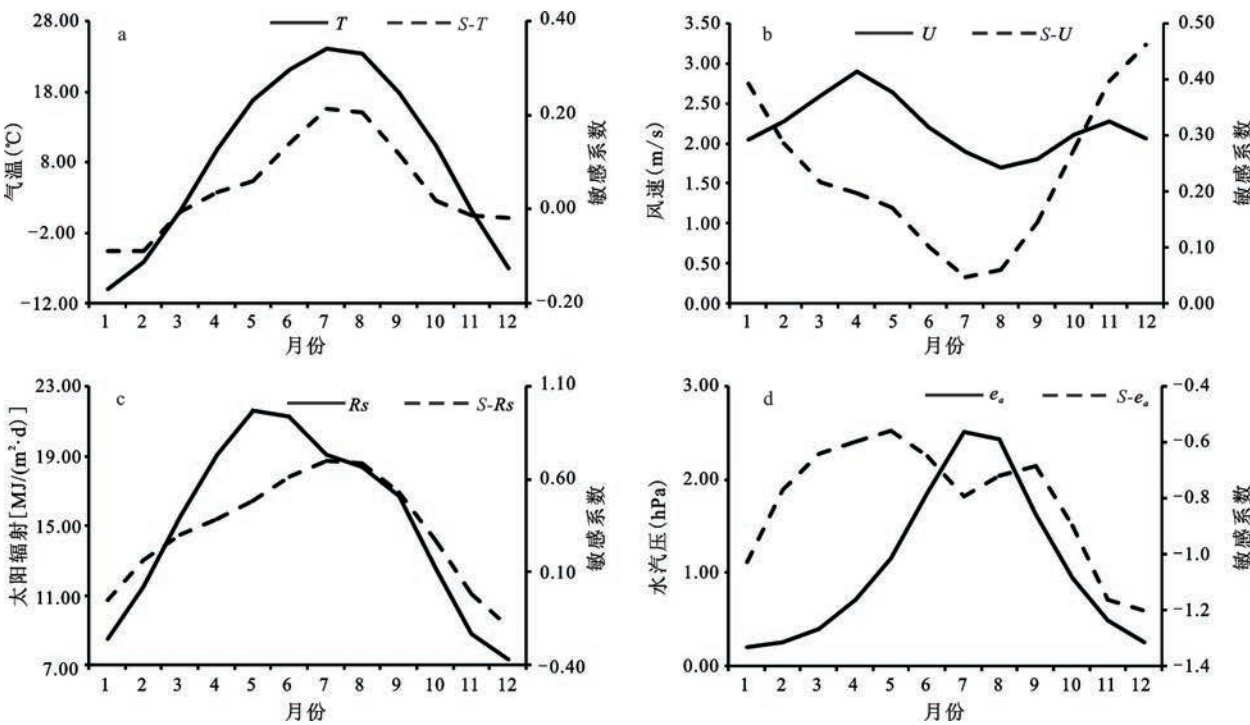


图7 气象因子及敏感系数年内变化曲线

Fig.7 The change of meteorological factors and sensitivity coefficient in the year

表2 气候因子变化对潜在蒸散发的贡献率

Table 2 Contribution rate of meteorological factors to ET_0

	多年线性倾向率	多年平均值	多年相对变化率(%)	敏感系数	贡献率(%)
风速	-0.018**	2.205 m/s	-39.890	0.229	-9.120
太阳辐射	-0.012*	14.999 MJ/(m ² ·d)	-3.922	0.322	-1.263
平均气温	0.027*	8.525℃	15.913	0.048	0.766
水汽压	0.002*	1.070 hpa/10a	7.107	-0.810	-5.758

注:*表示通过了 $\alpha=0.05$ 水平下显著检验,**表示通过了 $\alpha=0.01$ 水平下显著检验。

比例相关,近 50 a 暖湿化现象较为突出,3 个气象因素均呈现不同程度的上升趋势,因此三者叠加导致了辽宁省水汽压呈现显著的增加态势,从而对潜在蒸散发量的变化影响较为突出。

太阳辐射减少也对 ET_0 的减少做出一定贡献,太阳辐射受纬度、日照时数等因素影响,由于人为因素影响了大气层云量和气溶胶量,使太阳辐射在近 50 a 总体趋势以下降为主,造成了 ET_0 的减少。

平均气温的增加引起了 ET_0 的增加,平均气温对 ET_0 的贡献率为 0.77%,多年相对变化率为 15.91%,但该增加的部分却由风速、太阳辐射的减少以及水汽压的增加同时作用导致的 ET_0 减少所抵消,从而最终导致辽宁省潜在蒸散发量的减少,出现了“蒸发悖论”的现象,即气温增加,而蒸散发

量减少。

5 结论与讨论

5.1 结论

- 1) 近 50 a, 年均潜在蒸散发量在 $\alpha=0.05$ 水平下呈现出显著下降的趋势, 多年平均为 926.28 mm, 空间上呈现由西向东递减的趋势, 且西部较东部变化更为明显。
- 2) 潜在蒸散发对气象因子的敏感性为: 水汽压>太阳辐射>风速>平均气温, 因此辽宁省潜在蒸散发对水汽压的变化最为敏感, 对平均气温最不敏感。平均气温敏感系数、风速敏感系数、太阳辐射敏感系数以及水汽压的敏感系数年际间呈上升变化, 且速率分别为 0.002/10a、0.001/10a、0.004/10a、

0.022/10 a。在季节尺度上,潜在蒸散发对水汽压最为敏感,春季和秋季对平均气温最不敏感,夏季对风速最不敏感,冬季对太阳辐射最不敏感。

3) 敏感系数在空间上的明显地域差异与气象因子空间变化规律相吻合,潜在蒸散发对气温的敏感性呈北部向南部递增,对水汽压、太阳辐射的敏感性呈东部向西部递减,而风速与水汽压、太阳辐射的变化趋势相反。

4) 风速的显著降低是辽宁省潜在蒸散发量下降的最主要原因,水汽压的升高及太阳辐射的减少也促使了潜在蒸散发量的下降,而平均气温的增加引起的潜在蒸散发量增加的部分被其他因素导致的减少所抵消,从而出现了“蒸发悖论”的现象。

5.2 讨论

敏感性分析可以获得潜在蒸散发对气候因子变化的定量响应关系,结合气象因子对潜在蒸散发量变化的贡献水平可以进一步识别影响辽宁省潜在蒸散发量变化的主导因子。辽宁省近年来暖湿化现象越发明显,加之风速显著减少,对辽宁省潜在蒸散发的影响甚大,这将直接影响辽宁省农作物灌溉需水量、灌溉制度及合理管理。通过分析辽宁省气象因子的变化程度、潜在蒸散发量对气象因子的定量响应关系以及气象因子对潜在蒸散发量的贡献水平发现,自然因素和人为因素均直接或间接影响了潜在蒸散发量的变化,而城市化的快速发展、社会经济发展、空气污染严重等人为因素所导致的气象因子变化已成为了现阶段影响辽宁省潜在蒸散发量变化的主要原因,因此采取合理的手段改善由于潜在蒸散发量变化对农业灌溉产生影响是下一步工作的重点。

参考文献(References):

- [1] 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. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(5): 579-588.]
- [2] Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y. Evaporation losing its strength[J]. *Nature*, 1995, 377: 687-688.
- [3] 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. [Yue Yuan, Wang Yanping, Wang Qi et al. “Evaporation paradox” phenomenon expression in Jilin Province. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(5): 225-231.]
- [4] 卓嘎, 尼玛央珍, 唐小萍. 1980-2009年西藏西北部潜在蒸散发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, Ni Mayangzhen, Tang Xiaoping. Spatio-temporal distribution of potential evapotranspiration and its affecting factors in northwest Tibet during the period of 1980-2009. *Arid Zone Research*, 2016, 33(4): 698-707.]
- [5] 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. *Resources Science*, 2009, 31(9): 1470-1476.]
- [6] 李耀军, 魏霞, 苏辉东. 近30年甘肃省潜在蒸散发时空变化特征及演变归因的定量分析[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(1): 219-225. [Li Yaojun, Wei Xia, Su Huidong. Quantitative analysis of causes for temporal and spatial variation characteristics and evolution of potential evapotranspiration in Gansu Province during recent 30 years. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2015, 26(1): 219-225.]
- [7] 栗晓玲, 宋悦, 牛纪苹, 等. 泾惠渠灌区潜在蒸散发量的敏感性及其变化成因[J]. 自然资源学报, 2015, 30(1): 115-123. [Su Xiaoling, Song Yue, Niu Jiping et al. Sensitivity and attribution of potential evapotranspiration in Jinghuiqu Irrigation District. *Journal of Natural Resource*, 2015, 30(1): 115-123.]
- [8] 赵玲玲, 夏军, 王中根, 等. 北京潜在蒸散发量年内-年际的气候变化特征及成因辨识[J]. 自然资源学报, 2013, 28(11): 1911-1921. [Zhao Lingling, Xia Jun, Wang Zhonggen et al. The Iner-Intra annual climatic pattern of potential evaporation in Beijing and attribution. *Journal of Natural Resource*, 2013, 28(11): 1911-1921.]
- [9] 邹璐, 陈涛涛, 孔凡丹, 等. 辽宁省参考作物腾发量的敏感性分析[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(1): 50-54. [Zou Lu, Chen Taotao, Kong Fandan et al. Sensitive analysis on reference evapotranspiration in Liaoning province. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2014, 33(1): 50-54.]
- [10] Penman, H L. Natural evaporation from open water, barc and grass[J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1984, A 109: 46-120.
- [11] Monteith J L. Environmental contral of plant growth(LT Evants, ed)[J]. New York:Academic Press, 1963,623(S1-2):14-28.
- [12] Hafeez, M M, Chemin Y. Estimation of crop water deficit through remote sensing in Central Luzon, Philippines[C]. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2002,2778-2780.
- [13] Allen R G, Pereira L S, Raes D et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements: irrigation drainage paper No. 56[R]. Rome: FAO, 1998.
- [14] 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(1/2): 19-28.
- [15] 杨东, 刘洪敏, 郭盼盼, 等. 1956-2008年辽宁省日照时数变化特征[J]. 干旱区研究, 2010, 27(6): 885-891. [Yang Dong, Liu

- Hongmin, Guo Panpan et al. Characteristic on sunshine duration in Liaoning province during the period from 1956 to 2008. *Arid Zone Research*, 2010, 27(6): 885-891.]
- [16] 曹永强,张亮亮,王学风,等. 近50年辽宁省气温及降水量变化趋势与突变特征分析[J]. *水电能源科学*, 2016, 34(1): 6-9+39. [Cao Yongqiang, Zhang Liangliang, Wang Xuefeng et al. Trend and abrupt change analysis of annual temperature and precipitation in Liaoning Province over the past 50 years. *Water Resources and Power*, 2016, 34(1): 6-9, 39.]
- [17] 刘洪敏. 1957~2009年辽宁省气候变化趋势分析[D]. 兰州: 西北师范大学, 2011. [Liu Hongmin. The analysis of the climatic variation in Liaoning Province from 1956 to 2009. Lanzhou: Northwest Normal University, 2011.]
- [18] 任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 近50年中国地面气候变化基本特征[J]. *气象学报*, 2005, 63(6): 942-956. [Ren Guoyu, Guo Jun, Xu Mingzhi et al. Climate changes of China's mainland over the past half century. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63(6): 942-956.]
- [19] 赵宗慈, 罗勇, 江滢, 等. 近50年中国风速减小的可能原因[J]. *气象科技进展*, 2016, 6(3): 106-109. [Zhao Zongci, Luo Yong, Jiang Ying et al. Possible reasons of wind speed decline in China for the last 50 years. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2016, 6(3): 106-109.]
- [20] 金巍, 任国玉, 曲岩, 等. 1971-2010年东北三省平均地面风速变化[J]. *干旱区研究*, 2012, 29(4): 648-653. [Jin Wei, Ren Guoyu, Qu Yan et al. Change in surface mean wind speed of Northeast China during the period of 1971-2010. *Arid Zone Research*, 2012, 29(4): 648-653.]
- [21] 龚强, 汪宏宇, 张运福, 等. 气候变化背景下辽宁省气候资源变化特征分析[J]. *资源科学*, 2010, 32(4): 671-678. [Gong Qiang, Wang Hongyu, Zhang Yunfu et al. Analysis of changes in climate resources in Liaoning province in the context of global climate change. *Resources Science*, 2010, 32(4): 671-678.]

Analysis of Potential Evaporation and Its Sensitivity in Liaoning Province

Cao Yongqiang, Gao Lu, Yuan Liting, Li Weijia

(College of Urban and Environmental Science, Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning, China)

Abstract: Research the change of potential evapotranspiration and its sensitivity, it is of great significance for agricultural sustainable development and protection of the ecological environment. This article use Penman-Monteith method and sensitivity coefficient method to analyze spatial and temporal variation of potential evapotranspiration and sensitivity of potential evapotranspiration to average temperature, wind speed, solar radiation, and vapor pressure from 1965 to 2014 in Liaoning Province. It aimed to investigate the dominant factors affecting the potential evapotranspiration and the quantitative response of potential evapotranspiration to climate change. The results showed that: Nearly 50 years potential evapotranspiration showed a significant decrease trend. In space, it presented by the west to east decreasing trend. The reference evapotranspiration was most sensitive to vapor pressure, which is followed by solar radiation and wind speed, average temperature on an annual scale. In terms of season, average temperature was the least sensitive variable in spring and autumn, wind speed was the least sensitive variable in summer and solar radiation was the least sensitive variable in winter. Spatially speaking, spatial variation of meteorological factors and its sensitivity coefficient are consistent during the year. Sensitivity to the temperature of the potential evaporation is increasing north to the south, sensitivity to the vapor pressure and solar radiation of the potential evaporation is decreasing east to west, but the change of wind speed is opposite. The main reasons for the decrease of potential evapotranspiration in Liaoning Province are the significant decrease of wind speed, and the decrease of solar radiation and the increase of vapor pressure also contribution to the decrease of potential evapotranspiration.

Key words: Liaoning Province; evapotranspiration; Penman-Monteith method; sensitivity; level of contribution