

40 a 气候变化对扎龙湿地蒸散影响分析

王 昊¹, 许士国^{*1}, 孙 石²

(1.大连理工大学 土木水利学院, 辽宁 大连 116024;
2.齐齐哈尔市气象局, 黑龙江 齐齐哈尔 161000)

摘要: 利用扎龙湿地周边 5 气象站 1961~ 2000 年的气象数据,研究了湿地区域最高气温、最低气温、降雨量、2 m 高风速等气象因子的变化趋势,分析 40 a 气候变化对湿地蒸散耗水产生的影响. 气象因子趋势分析使用 Mann-Kendall 检验,芦苇沼泽蒸散耗水计算采用耦合上述气象因子的经验模型. 结果表明,研究区域最高气温具有不显著的上升趋势 ($0.15^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$),最低气温呈现显著的上升趋势 ($0.74^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$),二者变化是非对称的;风速具有显著的下降趋势 ($-0.14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}/10\text{ a}$),而降雨量没有显著变化,芦苇蒸散量呈下降趋势 ($-22.9\text{ mm}/10\text{ a}$). 最高气温、最低气温是影响蒸散量变化的主要因子,二者升温速度的差异决定蒸散量的变化趋势,气象因子的变化表征了近年来空气中悬浮物气溶胶的增加屏蔽了太阳辐射,进而引起净辐射的降低.

关键词: 扎龙湿地区域; 单因子 Mann-Kendall 检验; 气象因子敏感性分析; 实际芦苇沼泽蒸散量

中图分类号: TV 211.1 **文献标识码:** A

0 引 言

辐射、气温、风速、降雨等气象因子的持续变化可以显著改变水文要素的响应,进而导致水资源时间、空间上的重新分配. 分析气候因子的变化趋势、明确气候因素对水文要素的影响机理对于合理进行水资源规划具有重要意义. 近年来国内外广泛开展了这方面的研究, Rao 等使用水量平衡模型研究了降雨和温度变化对径流的影响^[1], Herrington 分析了英格兰与威尔士气候变化对水量需求的影响,认为气温上升 1.1°C 将会导致农业用水增加 12%^[2]; Yu 等使用改进的 Penman 模型分析了气象因子对模型蒸散发输出的敏感性,并使用两种气候情景预测 50 a 后台湾地区稻谷的蒸散耗水量变化趋势^[3]; 邱新法等 2003 年使用黄河流域 123 个气象站 1961~ 2000 年 20 cm 口径蒸发皿数据研究了蒸发皿蒸发量的

气候变化趋势^[4]; 徐宗学等使用 Mann-Kendall 方法检验了黄河流域蒸发皿及降雨量的变化趋势^[5,6]; 刘晓英等研究了未来温度上升 $1\sim 4^{\circ}\text{C}$ 的假设情景下,我国华北地区主要作物需水量的变化,并给出了需水量变化预测^[7]. 相关的研究均揭示出气候变化对水文要素的影响程度.

扎龙湿地地处我国北方半干旱地区,以芦苇沼泽和露天水域构成湿地的主要下垫面类型,湿地水分损失以水生植物蒸散发耗水为主,通过研究气候变化规律揭示湿地芦苇沼泽耗水变化的趋势,可为未来的水资源管理提供可靠依据,有利于重新调整区域水量分配,保证湿地最优的水量供应. 本文通过对邻近湿地的 5 个气象观测站 40 a (1961~ 2000 年) 的最高气温、最低气温、风速、降雨量年变化趋势的检验,使用经验模型研究各因子对模型蒸散发输出值的敏感性并计算扎龙芦苇生长期内 (每年 5~ 10 月份) 的实际蒸散发量,

收稿日期: 2005-05-10; 修回日期: 2006-12-21.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (重点项目 50139020).
作者简介: 王 昊 (1967-), 男, 博士生; 许士国* (1958-), 男, 教授, 博士生导师.
©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

分析湿地芦苇沼泽蒸散耗水量变化的气候学原因.

1 研究区域与气象数据

研究区域地处松嫩洪泛平原,嫩江支流乌裕尔河、双阳河下游湖沼苇草地带,地理坐标北纬 $46^{\circ}52' \sim 47^{\circ}32'$,东经 $123^{\circ}47' \sim 124^{\circ}37'$,总面积近 $2\,100\text{ km}^2$ (见图 1). 本区属寒温带大陆性季风气候,年平均气温 $2\sim 4^{\circ}\text{C}$,多年平均降雨量 426 mm , $7\sim 9$ 月降雨量占全年降雨量的 70% ,蒸发强烈,年水面蒸发 $800\sim 900\text{ mm}$,属半干旱地区^[8].

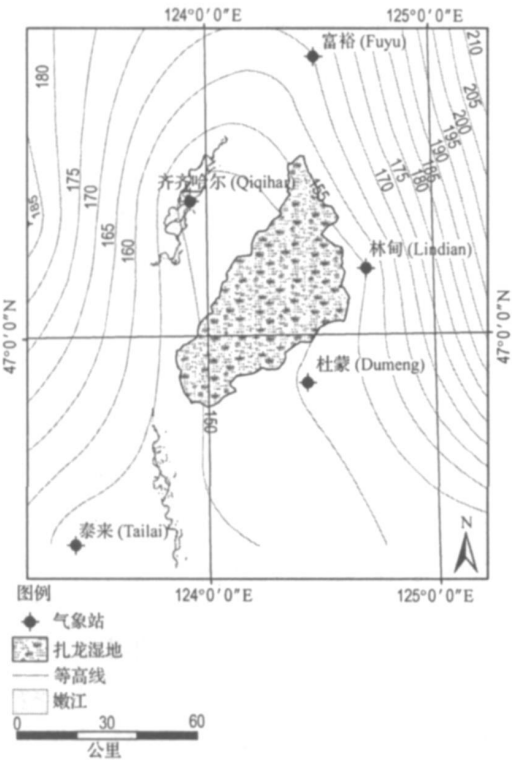


图 1 扎龙湿地及周边气象台站位置分布图
Fig. 1 The position of each weather station around Zhalong wetland

扎龙湿地通过乌裕尔河、双阳河及中部引嫩工程等补充湿地需水,其中乌裕尔河是形成和维持扎龙湿地生态系统的主要水源,河流至下游时失去明显河道,河水漫溢形成大面积淡水沼泽,以小型露天水域、广阔芦苇沼泽和草甸为主要地貌特征,湿地芦苇生长旺盛,构成湿地主要水生植物^[8]. 本研究选取了扎龙湿地周边的齐齐哈尔、富裕、杜蒙、泰来、林甸等 5 个基准气象观测站

1961~ 2000 年的最高气温、最低气温、降雨、风速数据,研究湿地区域芦苇沼泽蒸散耗水量变化趋势.

2 气象因子变化趋势分析

为研究扎龙湿地区域气象因子的变化趋势,选择了湿地周边具有较小地貌差异的 5 个地区,利用了其 1961~ 2000 年长系列的气象数据集分析湿地区域气象因子的变化趋势.

2.1 基本原理

本研究使用了单因子 Mann-Kendall 检验判断 5 站点最高气温、最低气温、风速、降雨等气象因子逐年的变化趋势. Mann-Kendall 法是一种非参数统计检验方法,用来评估气候要素时间序列趋势,其检验统计量公式为

$$s = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sgn}(x_i - x_j)$$

当 $x_i - x_j$ 小于、等于或大于零时 $\text{sgn}(x_i - x_j)$ 分别为 -1 、 0 或 1 ; Mann-Kendall 统计量公式分别在 S 大于、等于、小于零时为

$$z = \begin{cases} (s - 1) / \sqrt{n(n-1)(2n+5)/18}; & s > 0 \\ 0; & s = 0 \\ (s + 1) / \sqrt{n(n-1)(2n+5)/18}; & s < 0 \end{cases}$$

z 为正值表示增加趋势,负值表示减少趋势. z 值在大于等于 $|1.28|$ 、 $|1.64|$ 、 $|2.32|$ 时分别表示通过了 90% 、 95% 、 99% 置信度显著性检验. 本研究使用了 Libiseller 的 Mann-Kendall 检验程序^[9-10], H_0 : 不显著变化; H_1 : 显著变化,给定显著水平为 0.05 的双边检验,拒绝域为 $(-\infty, -1.64] \cup [1.64, +\infty)$,事件发生的概率小于等于 0.025 时, Mann-Kendall 统计值 z 落在拒绝域中,有理由拒绝原假设,即说明变化趋势显著;当事件发生的概率大于 0.025 时, Mann-Kendall 统计值 z 没有落在拒绝域中,认为原假设成立,即说明变化趋势不显著.

2.2 趋势检验结果

1961~ 2000 年 5 站点年最高气温、最低气温、风速、降雨的变化趋势检验结果(概率)见表 1. 由结果可见,40 a 湿地周边 5 站最高气温上升趋势均不明显,而 5 站的最低气温均有显著的上升趋势;5 站的年平均风速的变化趋势检验结

果说明,除杜蒙站外(不显著的年下降趋势),各站点年平均风速均具有显著的下降趋势;5站点年降雨量变化趋势检验结果表明,湿地西部(齐齐哈尔、泰来)年降雨量呈现不显著的上升趋势,而湿地东部三站则具有下降的趋势,而且5站的雨量变化都不显著,因此可认为湿地地区40 a的降雨量不具有明显变化.对湿地周边5气象站的趋势检验结果说明,湿地区域的年最高气温具有不显著的上升趋势,最低气温具有显著的上升趋势,风速具有显著的下降趋势,而降雨的变化不明显.

表 1 研究区域 1961~2000 年气候因子年变化趋势

Tab. 1 Annual change trend of meteorological factors in study region (1961~2000)

站点	最高气温	最低气温	风速	降雨
齐齐哈尔	0.116	3×10^{-6}	-4×10^{-7}	0.74
泰来	0.218	3×10^{-7}	-1×10^{-7}	0.573
杜蒙	0.230	5×10^{-8}	-0.705	-0.34
林甸	0.313	1×10^{-8}	-1×10^{-8}	-0.94
富裕	0.259	1×10^{-7}	-0.02 ²	-0.14

注:置信度为95%,负号代表下降趋势,双边检验值<0.025为显著变化(*部分)

3 扎龙湿地蒸散量变化趋势及其气候学原因分析

研究计算了湿地主要下垫面类型——芦苇沼泽的实际蒸散量,使用周边5气象站E601蒸发皿记录资料进行了对比.扎龙湿地芦苇生长期为每年5~10月,因此蒸发皿记录值取这个时段蒸发之和作为与芦苇沼泽蒸散量的对比值.

3.1 湿地区域芦苇沼泽实际蒸散量及蒸发皿蒸发量计算

为了揭示气候变化对扎龙湿地芦苇沼泽蒸散发(芦苇蒸腾及棵间水面蒸发之和)的影响,计算了扎龙湿地芦苇沼泽1961~2000年逐年的蒸散发耗水量,通过分析蒸散发年际间的差异,说明湿地芦苇沼泽蒸散耗水变化对气候因子的响应情况.

研究区域芦苇沼泽蒸散量计算采用以下方法:

选取湿地周边地形地貌较为一致的5个地区

气象站最高气温、最低气温、降雨、风速因子计算各站点处潜在蒸散发,利用软件arcgis8.3中空间分析模块内插湿地范围的潜在蒸散发分布,计算湿地范围潜在蒸散发平均值,经FAO56(国际粮农组织科技文献)单系数法^[11]换算为实际蒸散发.

潜在蒸散发计算采用拟合P-M模型结果的当地经验模型,表达式为

$$E_0 = \exp(2\times 10^{-2}R_a + 7.0\times 10^{-2}\theta_{\max} - 3.33 \times 10^{-2}\theta_{\min} - 4.46\times 10^{-4}P + 1.086\times 10^{-1}U_2 - 7.96\times 10^{-1}) \quad (1)$$

式中: E_0 为参照作物潜在蒸散发(mm/d); R_a 为外空辐射($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$),由纬度值确定; $\theta_{\max}$ 为月最高气温($^{\circ}\text{C}$); $\theta_{\min}$ 为月最低气温($^{\circ}\text{C}$); P 为月降雨量(mm); U_2 为2 m高度处风速(m/s).

芦苇生长各时期持续时间及相应作物系数见表2,各阶段持续时间考虑了扎龙芦苇的实际生长状况,植物系数考虑了风及相对湿度进行了重新调整,方法详见文献[12].扎龙湿地平均的蒸发皿蒸发量计算同样使用了arcgis8.3,计算结果见图2.

表 2 扎龙芦苇生长各时期持续时间及作物系数
Tab. 2 Lengths of reed development stages and crop K_c in Zhalong wetland

芦苇生长各时期	持续时间 /d	K_c
初始期	1~15	1.200
生长期	16~50	1.191
稳定期	51~140	1.178
枯萎期	141~165	1.083

3.2 结果与分析

扎龙湿地E601蒸发皿蒸发量及芦苇沼泽40 a实际蒸散量见图2,1961至2000年蒸发皿值及芦苇沼泽蒸散量变化较为一致,二者的相关系数为0.66,具有较为显著的相关性,变化均呈现下降趋势(线性趋势),但芦苇蒸散量的下降幅度要超过E601蒸发皿值.

本文通过研究经验模型中各气象因子的敏感性来分析最高气温、最低气温、降雨和风速因子对芦苇沼泽实际蒸散量的影响程度.如图3所示为最高气温、最低气温的升高对模型输出的影响,最高气温与芦苇蒸散量呈正比,最低气温与芦苇蒸

散量成反比,它们的升高显著改变芦苇沼泽的蒸散量.

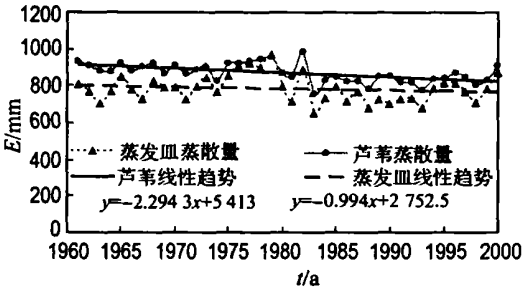


图 2 1961~ 2000 年湿地 E601 蒸发皿值、芦苇沼泽实际蒸散量及 40 a 线性趋势
Fig. 2 The E601 evaporation pan values and actual evapotranspiration on reed swamp from 1961 to 2000 and its linear trend

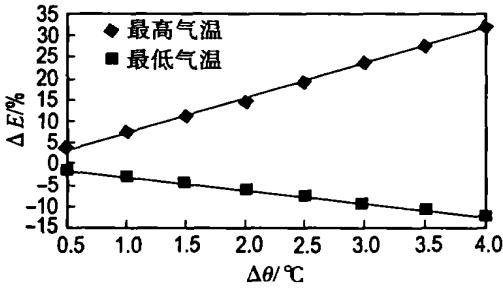


图 3 最高气温、最低气温敏感性曲线
Fig. 3 The sensitivity curves of the maximal temperature and the minimum temperature

图 4 所示降雨、风速的变化会改变模型的输出值,风速与模型输出成正比关系,降雨则成反比关系,与最高气温、最低气温相比,风速、降雨对模型输出的影响很小. 综合上述因子的影响,最高

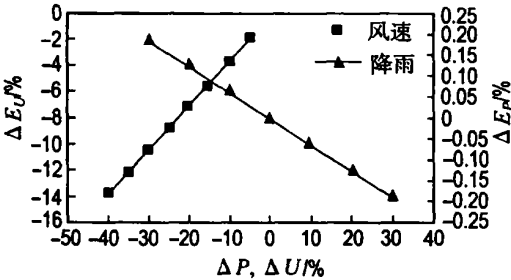


图 4 降雨、风速因子的敏感性曲线
Fig. 4 The sensitivity curves of the wind speed and precipitation

气温、最低气温对模型最为敏感,是控制芦苇沼泽蒸散耗水变化趋势的主要因素.

研究引入气候倾向率的概念说明主要影响因子及芦苇沼泽蒸散量之间的变化关系,建立一个因子时间系列的线性回归方程:

$$y(t) = a + bt \tag{2}$$

其趋势变化率方程为

$$d[y(t)]/dt = b$$

将 $10 \times b$ 称为气候倾向率,温度的气候倾向率单位为 $^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,蒸发的气候倾向率单位为 $\text{mm}/10\text{ a}$,方程 (2) 的系数 a, b 由最小二乘法确定.

研究区域最高气温 40 a 变化倾向率为 $0.15^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,最低气温变化倾向率为 $0.74^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,二者的变化是非对称的,见图 5. 研究区域蒸发皿及芦苇沼泽蒸散量的气候倾向率分别为 $-9.9\text{ mm}/10\text{ a}$ 和 $-22.9\text{ mm}/10\text{ a}$ (负号代表下降趋势,见图 2).

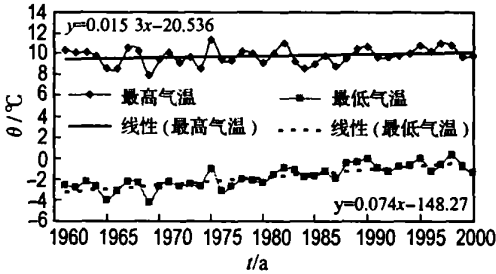


图 5 1961~ 2000 年研究区域最高气温、最低气温变化
Fig. 5 The maximum temperature and minimum temperature in study region, 1960 to 2000

如图 5 所示,1961~ 2000 年湿地区域的平均温度(最高气温与最低气温的平均值)呈现上升趋势,而芦苇蒸散量和蒸发皿蒸发量则呈下降趋势(图 2),在湿地区域最高、最低气温非对称变化的前提下,平均气温变化不能说明蒸散发的变化趋势. 研究最高气温、最低气温与芦苇蒸散发变化率之间的关系,来说明蒸散发的变化趋势. 将 1961~ 2000 年以 10 a 为间隔分为 4 个时期,分别计算每个时期的最高气温、最低气温、芦苇蒸散量的气候倾向率,研究它们之间的变化关系.

分析结果表明,最高气温升高抵消最低气温升高对蒸散耗水的负面影响,三者变化的倾向率

满足以下公式定义的比例关系:

$$\frac{dE_c}{dt} = k \left[7.01 \times \frac{d\theta_{max}}{dt} - 3.33 \times \frac{d\theta_{min}}{dt} \right] \quad (3)$$

如图 6 所示,最高气温升温幅度大于最低气温升温幅的时期,蒸散量呈现明显的上升趋势(参见图 2),如 1971~ 1980 年、1991~ 2000 年两个时期,式 (3) 决定蒸散量变化倾向率的大小;在最低气温升温幅度大于最高气温升幅,且满足式 (3) 的条件下,如 1961~ 1970 年、1981~ 1990 年两个时期,尽管平均气温呈上升趋势,但蒸散量仍呈较明显的下降趋势(参见图 2)。

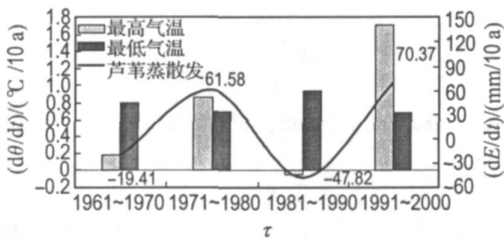


图 6 最高气温、最低气温与蒸散量的气候倾向率

Fig. 6 The climate tendency rate of the maximum and minimum temperature and evapotranspiration

4 结 论

通过对扎龙湿地周边 5 个气象站 1961~ 2000 年最高气温、最低气温、风速、降雨等气象因子的变化趋势的分析得出,湿地区域内最高气温具有不显著的上升趋势,40 a 的变化倾向率为 0.15 °C /10 a,最低气温呈显著的上升趋势,变化倾向率为 0.74 °C /10 a,风速具有显著的降低趋势,变化倾向率为 - 0.14 m · s⁻¹ /10 a,而 40 a 的降雨量几乎没有变化。各因子敏感性分析表明,最高气温、最低气温是影响芦苇沼泽蒸散量的两个主要因子,扎龙湿地区域的平均气温在过去的 40 a 上升了 1.68 °C,而芦苇沼泽蒸散量却降低了 92 mm,这是由最高气温、最低气温升温速度的差异决定的,微分方程 (3) 描述了它们之间的变化规律。

湿地区域最高气温、最低气温的升温幅度差异表征着地球表面接收到净辐射能的变化,Allen

等认为^[11]最高、最低气温差值与太阳净辐射之间存在统计关系,因此这一现象说明了太阳净辐射的持续降低。Stanhill 和 Cohen 将太阳辐射下降的主要原因归结为空气中悬浮物气溶胶的增加^[13],这些物质在屏蔽了外空辐射的同时也导致了地球散热不畅,平均气温持续升高。IPCC 数据发布中心的若干 GCMs 模型结论表明,未来气温总体呈升温趋势,但不同模型对最高气温、最低气温升幅的预测有一定差别,二者之间的差值是表征太阳辐射项的重要物理量,也是控制扎龙湿地地区未来蒸散量变化的主要因素。

致谢: 采用数据来自 中国气象局气象信息中心资料室 [http //cdc. cma. gov. cn](http://cdc.cma.gov.cn) 及黑龙江省气象局。

参考文献:

[1] RAO A R, AL-W AGDANY A. Effects of climatic change in Wabash river basin[J]. **J Irrigation and Drainage Eng**, 1995, **121**(2): 207-215

[2] HERRINGTON P. Climate change and the demand for water [D]. London: Department of the Environment, HM SO, 1996

[3] YU Pao-shan, YANG Tao-chang, CHOU Chien-chih. Effects of climate on evapotranspiration from paddy fields in southern Taiwan [J]. **Climatic Change**, 2002, **54**: 165-179

[4] 邱新法,刘昌明,曾 燕. 黄河流域近 40 a 蒸发皿蒸发量的气候变化特征 [J]. 自然资源学报, 2003, **18**(4): 438-442

[5] 徐宗学,和宛琳. 黄河流域近 40 a 蒸发皿蒸发量变化趋势分析 [J]. 水文, 2005, **25**(5): 6-11

[6] 徐宗学,张 楠. 黄河流域近 50 a 降水变化趋势分析 [J]. 地理研究, 2006, **25**(1): 27-34

[7] 刘晓英,林而达. 气候变化对华北地区主要作物需水量的影响 [J]. 水利学报, 2004(2): 77-87

[8] 李兴春,张延坤,赵立华,等. 扎龙湿地水资源规划生态需水量专题研究报告 [R]. 吉林: 松辽水环境科学研究所, 2003

[9] LIBISELLER C. Visual basic program for multivariate and partial Mann-Kendall tests [EB/OL]. [2005-08-08] [http // www. mai. liu. se/ ~ cllib /welcome /Mann-Kendall. xls](http://www.mai.liu.se/~cllib/welcome/Mann-Kendall.xls)

[10] LIBISELLER C. Multivariate and partial

Mann-Kendall tests manual [EB/OL].
[2004-11-15] [http // www. mai. liu. se/ ~](http://www.mai.liu.se/~cllib/welcome/Manual.doc)
cllib /w elcome /Manual. doc

[11] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D. Crop
evapotranspiration Guidelines for computing crop
water requirements [R] // FAO Irrigation and
drainage paper NO. 56. Rome FAO, 1998

[12]王昊,许士国. 扎龙湿地芦苇沼泽蒸散发计算与
分析 [J]. 水利水电技术, 2005, 36(2): 22-24

[13] STANHILL G, COHEN S. Global dimming: a
review of the evidence for a widespread and
significant reduction in global radiation with
discussion of its probable causes and possible
agricultural consequences [J]. **Agricultural and
Forest Meteorology**, 2001, 107: 255-278

Analysis of effects of climate change on evapotranspiration
in Zhalong wetland in recent 40 years

WANG Hao¹, XU Shi-guo^{* 1}, SUN Le-shi²

(1.School of Civil and Hydraul. Eng. , Dalian Univ. of Technol. , Dalian 116024, China ;
2.Weather Bur. of Qiqihar , Qiqihar 161000, China)

Abstract By using the meteorological data from 1961 to 2000, the change trends of four meteorological factors, the maximum temperature ($\theta_{\max}$), the minimum temperature ($\theta_{\min}$), wind speed at 2 meters (U_2) and precipitation (P) were detected, and the effects of climate change on evapotranspiration (E) from reed swamp of Zhalong wetland were analyzed. The trend analyses are performed by univariate Mann-Kendall test, a well-performed experiential model is introduced for E calculating. The results show that significant increasing trend is found of $\theta_{\min}$ in recent 40 years in Zhalong wetland region, the climatic tendency is $0.74^{\circ}\text{C} / 10 \text{ a}$, however, no significant increasing trend is found of $\theta_{\max}$, the climatic tendency is $0.15^{\circ}\text{C} / 10 \text{ a}$, the U_2 shows significant degressive trend, and no evident change of P in the region studied is detected, the annual E on reed swamp shows degressive tendency, the decrease in recent 40 years is 92 mm. The trend analysis and sensitivity analysis of meteorological factors illuminate that $\theta_{\max}$ and $\theta_{\min}$ are two key factors which influence E markedly, the difference of the change speed between them results in the decrease of E , the records of $\theta_{\max}$ and $\theta_{\min}$ mean the augment of greenhouse gas and aerosol in the atmosphere, these substances serve as a screen to prevent the heat transferring to outer space and at the same time reduce extraterrestrial radiation, consequently, decrease net radiation, the most correlative variable to E .

Key words Zhalong wetland region; univariate Mann-Kendall test; sensitivity analysis of meteorological variables; actual evapotranspiration on reed swamp