

洮河流域潜在蒸散发的气候敏感性分析

杨林山^{1,2}, 李常斌^{1,2*}, 王帅兵^{1,2}, 杨文瑾²

(1. 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000; 2. 兰州大学西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 潜在蒸散发 (ET_0) 的气候敏感性分析是变化环境下陆表能-水通量过程研究的重要内容, 对气候变化背景下区域水文循环和农业水资源有效利用具有重要的理论和实践指导意义。为探讨气候变化对区域潜在蒸散发的可能影响, 以洮河流域为研究区, 采用 Penman-Monteith 模式和 Beven 敏感性公式计算该区 ET_0 及其对关键气候要素的敏感系数, 按 Sen 斜率和 Mann-Kendall 方法对敏感系数的变幅和显著性进行检验, 基于此, 对洮河流域 ET_0 的气候敏感性进行了综合分析, 并探讨了 1981—2010 年间该区 ET_0 发生变化的气候原因。结果表明: 洮河流域 ET_0 对关键气候因素的敏感性排序为: 净辐射 > 相对湿度 > 最高气温 > 最低气温 > 风速, 其中, 净辐射、最高气温和风速的敏感系数与 ET_0 的相关性较强, 特别是前 2 个要素在敏感性和相关性方面均具有较高系数; 1981—2010 年间, 洮河流域 ET_0 敏感性以净辐射的降低和最高气温的增强为主, 净辐射和气温共同造就了洮河流域 ET_0 的增加, 且气温占主导。

关键词: 蒸散发; 气候变化; 敏感性分析; Penman-Monteith 模式; Beven 敏感性公式; 洮河流域

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.11.013

中图分类号: S161.4; P426.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2014)-11-0102-08

杨林山, 李常斌, 王帅兵, 等. 洮河流域潜在蒸散发的气候敏感性分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11): 102—109.

Yang Linshan, Li Changbin, Wang Shuaibing, et al. Sensitive analysis of potential evapotranspiration to key climatic factors in Taohe River Basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(11): 102—109. (in Chinese with English abstract)

0 引言

潜在蒸散发 (ET_0) 也称蒸发能力, 系充分供水状态下的实际蒸散发, 是衡量区域蒸发潜力的重要指标^[1], 也是开展气候变化、水资源综合评价、农作物需水、干旱监测预警、生态环境保护等领域研究的关键环节和重要内容^[2-4]。 ET_0 与大气边界层湍流扩散机制有关, 受气候变化及气象因素变迁主导, 下垫面因素影响相对较小, ET_0 的量化多见基于气象序列的直接计算^[5-6]。目前, 常见的 ET_0 计算方法有水量平衡法、物质传导法、综合法、气温法和辐射法等^[7-8]。其中, 由联合国粮农组织推荐的 Penman-Monteith (P-M) 方法综合了空气动力学和太阳辐射等关键因素的影响, 具有良好的水文气象物理基础, 在全球范围应用广泛^[9]。

在气候变化背景下, 因 ET_0 和气候要素之间复杂的非线性关系, ET_0 的变化呈高度复杂性和不确定性^[10]。过去几十年, 世界多个地区在升温背景下历经 ET_0 下降过程, 这一“蒸发悖论”引发学界广泛讨论^[11]。区域 ET_0 增减机制首先取决于 ET_0 和关键气候因子之间的关系, 核心工作是考察 ET_0 对上述因素变化的敏感性, 即 ET_0 如何响应关键气候要素的变化。Goyal^[12]发现印度干旱地区 ET_0 对温度和太阳净辐射非常敏感; Gong 等^[1]报道了中国长江流域相对湿度对 ET_0 的高敏感系数; 王炳亮等^[13]发现在辽河三角洲半干旱半湿润地区, 相对湿度对 ET_0 影响较大; 李斌等^[14]报道了澜沧江流域 ET_0 对日照时数的高敏感性; 刘昌明等^[5]对中国 ET_0 敏感性进行分析并做敏感性地域划分, 认为中国北方流域 ET_0 对最高气温敏感, 南方流域对水汽压敏感。上述针对 ET_0 开展的研究, 一方面为分布式水文计算中参数的区域优化提供了知识储备, 另一方面也丰富和发展了气候变化背景下区域水文循环和农业水资源安全研究相关内容, 具有重要的科学意义和实用价值^[15-16]。

洮河流域位于青藏高原和黄土高原 2 大地貌单元交汇区, 从上游至下游, 气候逐渐由高寒湿润半湿润过渡到半干旱^[17], 流域生态水文格局呈现明显

收稿日期: 2013-12-11 修订日期: 2014-04-17

基金项目: 兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金 (lzujbky-2014-118); 国家自然科学基金项目 (41001014); 高等学校博士学科点专项科研项目 (2011021110011)

作者简介: 杨林山, 男, 甘肃榆中人, 主要从事生态水文和流域水文研究。兰州 兰州大学资源环境学院, 730000。

Email: yanglsh12@lzu.edu.cn

*通信作者: 李常斌 (1976—), 男, 甘肃靖远人, 博士, 副教授, 主要从事旱区流域科学与水资源方面的研究。兰州 兰州大学资源环境学院, 730000。Email: licb@lzu.edu.cn

的地域分异, 是进行区域 ET_0 对比分析研究的天然平台。本文收集和整编洮河流域及临近站点水文气象观测序列, 采用 P-M 模式计算区域 ET_0 ; 对影响 ET_0 的关键气候要素进行敏感性分析, 界定敏感系数; 结合敏感系数的时空分布和变化特征, 探讨敏感系数和 ET_0 的关系, 讨论气候变化背景下的洮河流域 ET_0 发生变化的原因。

1 研究区概况

洮河流域位于青藏高原东缘(甘南高原)和黄土高原西南缘(陇西黄土高原)结合地带^[17], 介于 $101^{\circ}36' \sim 104^{\circ}20' E$ 、 $34^{\circ}06' \sim 36^{\circ}01' N$ 之间, 总面积 $25\,527\text{ km}^2$, 海拔介于 $1\,730 \sim 4\,560\text{ m}$ 之间。洮河发源于青海省河南县西倾山北麓, 由西向东至甘肃岷县北流, 穿九甸峡和海甸峡, 在甘肃永靖注入黄河。大致以白石山、太子山一线为界, 分属甘南高原和黄土高原。洮河甘南高原由地势平缓、河谷开阔的草原逐渐过渡为高山耸立、河流曲折的森林草原; 下游黄土高原植被覆盖度低, 生态环境较为脆弱。由上游至下游, 流域多年平均气温递增, 介于 $1 \sim 9^{\circ}\text{C}$ 之间; 降水量递减, 介于 $300 \sim 600\text{ mm}$ 之间(图 1)。受上述气候格局影响, 洮河流域具高寒湿润、半湿润(甘南高原)和温带半干旱(黄土高原)分异的气候特征。

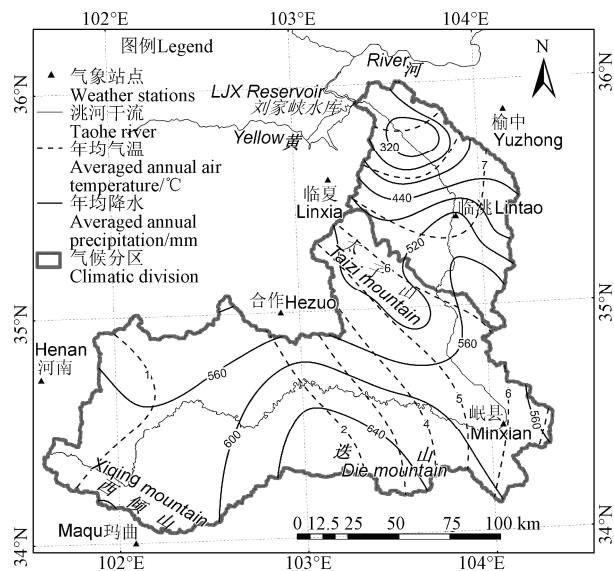


图 1 洮河流域多年平均气温降水等值线图

Fig.1 Isogram for multi-year average air temperature and precipitation across the Taohe River Basin

过去 30 a, 洮河流域以 $0.63\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的增幅升温, 降水以 $8.86\text{ mm}/10\text{a}$ 的速率递减, 径流则以 $21\text{ mm}/10\text{a}$ 的速率减少。洮河流域径流减少的速率大于降水, 和区域蒸散发过程不无关系^[18]。洮河流域 ET_0 的气候敏感性分析, 既是大流域尺度水文过

程综合研究的重要内容, 也是区域尺度 ET_0 变化及驱动力分析的基础工作, 可为气候变化背景下区域蒸散发的多样化研究提供范例。

2 数据与方法

2.1 数据

选取 1981—2010 年洮河流域及周边水文气象观测序列, 构建洮河流域气象要素日值空间数据库, 内容包括日平均最高和最低气温、气压、相对湿度、降水量、风速和日照时数等观测序列。该水文气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网。

2.2 研究方法

2.2.1 P-M 公式计算 ET_0

P-M 方法具有良好的水文学基础, 适宜于不同气候类型 ET_0 估算^[19]。本文采用基于 P-M 公式的参考作物蒸散发公式进行洮河流域 ET_0 的估算^[20]:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma(900/(T + 273)) * U_2 * (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

式中: Δ 为饱和水汽压曲线斜率, $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$; R_n 为净辐射, MJ/m^2 ; G 为土壤热通量, MJ/m^2 ; e_s 为饱和水汽压, kPa ; e_a 为实际水汽压, kPa ; γ 为干湿计常数, $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$; T 为平均气温, $^{\circ}\text{C}$; U_2 为离地面 2 m 处 24 h 平均风速, m/s 。

式 1 中, 饱和水汽压曲线斜率可由平均气温得出(公式略); 平均气温、饱和水汽压和实际水汽压系最低和最高气温的函数(公式略)^[21-22]。为提高气候要素敏感性分析的效率, 本文以日最高、最低气温的平均值代替日均气温, 再考虑辐射、相对湿度和风速等因素的影响, 最终确定敏感性分析的关键气候要素为日辐射、日最高气温、日最低气温、相对湿度和风速等 5 个因子。

2.2.2 敏感性分析

采用 Beven 提出的敏感系数公式计算 ET_0 对关键气候要素的敏感系数^[23]:

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

式中: Se_{vi} 为第 i 个气象因子 (V_i) 的敏感系数。敏感系数越大, ET_0 受该气象因子的影响越大。敏感系数是敏感性曲线切线的斜率。敏感性曲线为线性时, 敏感系数代表该气象因子任意区间变化对 ET_0 的影响。敏感性曲线为非线性时, 敏感系数的精度取决于所选气象因子的变化步长, 气象因子变化越小, 敏感系数精度越高。基于敏感性分析得到 ET_0 对气候因素变化的响应程度分异, 有利于区域气候要素影响 ET_0 的主导性分析^[24]。P-M 模式的 ET_0 输出为日值, 文中月、年尺度的敏感系数在日序列成果的基础上按均值计算。

采用 Sen 斜率计算 ET_0 敏感系数的变化趋势 [25-26], 采用 Mann-kendall (M-K) 方法进行变化趋势的显著性检验 [27-30]。

3 结果与分析

3.1 洮河流域 ET_0 分布及变化特征

站点 ET_0 经空间插值得洮河流域区域 ET_0 分布

格局。洮河流域 ET_0 平均为 691 mm/a, 自上游至下游呈逐渐升高格局, 范围在 633~789 mm/a 之间, 下游黄土高原普遍高于上游甘南高原 (图 2a)。Sen 斜率统计结果表明, 1981—2010 年间, 洮河流域 ET_0 以 3.43 mm/a 的趋势上升, 中、上游甘南高原区增幅略小于下游黄土高原区, 前者为 3.39 mm/a, 后者为 3.54 mm/a (图 2b)。

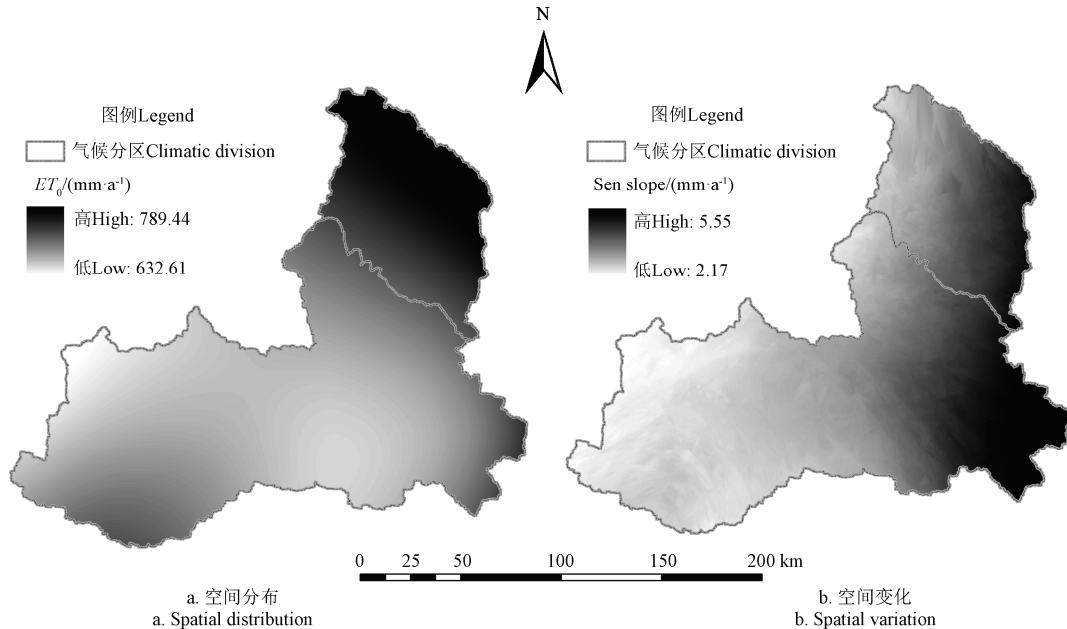


图 2 洮河流域 ET_0 空间分布及空间变化

Fig.2 Spatial distribution of evapotranspiration (ET_0) and its variation across the Taohe River Basin

3.2 敏感性分析

3.2.1 关键气候要素及年代变化

基于 Sen 斜率, 就洮河流域甘南高原和黄土高原 2 个气候片区的太阳净辐射、最高气温、最低气温、相对湿度和风速等 5 个关键气候要素在 1981—2010 年间的变化幅度进行估计, 结果列于表 1。

表 1 洮河流域两区气候要素变化趋势的 Sen 斜率估计
Table 1 Trend estimation of climatic factors based on Sen's slope in two divisions of the Taohe River Basin

气候分区 Climatic division	净辐射	最高气温	最低气温	相对湿度	风速
	Net Solar Radiation/ ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)	Maximum Air Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Minimum Air Temperature $/^{\circ}\text{C}$	Humidity/ %	Wind Speed/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
甘南高原 Gannan Plateau	0.09*	0.64*	0.54*	-0.01*	0.05
黄土高原 Loess Plateau	0.06†	0.62*	0.44*	-0.01	0.11†

注: * 和 † 分别为通过 0.05 和 0.1 显著性检验。

Note: The signs * and † represent significant test at the levels of 0.05 and 0.1, respectively.

洮河流域 2 个气候分区的 5 个关键气候要素变化明显。太阳净辐射、最高和最低气温以及风速均有所升高; 相对湿度发生降低。过去 30 a, 甘南高

原太阳净辐射以 $0.09 (\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1})/10\text{a}$ 的速度增强, 最高、最低气温分别以 $0.64 ^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.54 ^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的幅度升高, 相对湿度以 $0.01/10\text{a}$ 的速率减小, 风速则以 $0.05 (\text{m}/\text{s})/10\text{a}$ 的幅度增加; 黄土高原区太阳净辐射以 $0.06 (\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1})/10\text{a}$ 的速度增强, 最高、最低气温分别以 $0.60 ^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.44 ^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的幅度升高, 相对湿度以 $0.01/10\text{a}$ 的速率减小, 风速则以 $0.11 (\text{m}/\text{s})/10\text{a}$ 的幅度增加。总体来看, 辐射和气温的升幅在甘南高原更大, 风速以黄土高原区的增加更显著。

3.2.2 气候要素敏感系数的空间分布

洮河流域 ET_0 对各气候要素敏感系数的空间分布由站点敏感系数经空间插值得到 (图 3)。净辐射对应的敏感系数范围为 $0.66\sim 0.77$, 中游山地森林区敏感系数较大, 上游草原和下游农耕区较低; 最高和最低气温敏感系数范围分别为 $0.23\sim 0.35$ 和 $0.20\sim 0.31$, 空间分布及变化规律相似, 均表现为自上游至下游的增加趋势; 相对湿度的敏感系数变化范围为 $-0.62\sim -0.47$, 高值分布在中游山地森林一带, 低值主要分布在上游草原区; 风速的敏感系数较小, 范围在 $0.09\sim 0.18$ 。

分别在甘南高原和黄土高原 2 个片区进行统计，发现净辐射敏感系数相等，均为 0.73；最高气温敏感系数分别为 0.30 和 0.32，黄土高原片较高；两区最低气温敏感系数相等，均为 0.26；相对湿度敏感系数分别为-0.56 和-0.52，绝对值以甘南高原

为高；风速敏感系数分别为 0.11 和 0.14，黄土高原区较高。从流域平均的各要素敏感系数来看， ET_0 对各要素的敏感性存在明显差异，按敏感系数大小排序为：净辐射>相对湿度>最高气温>最低气温>风速。

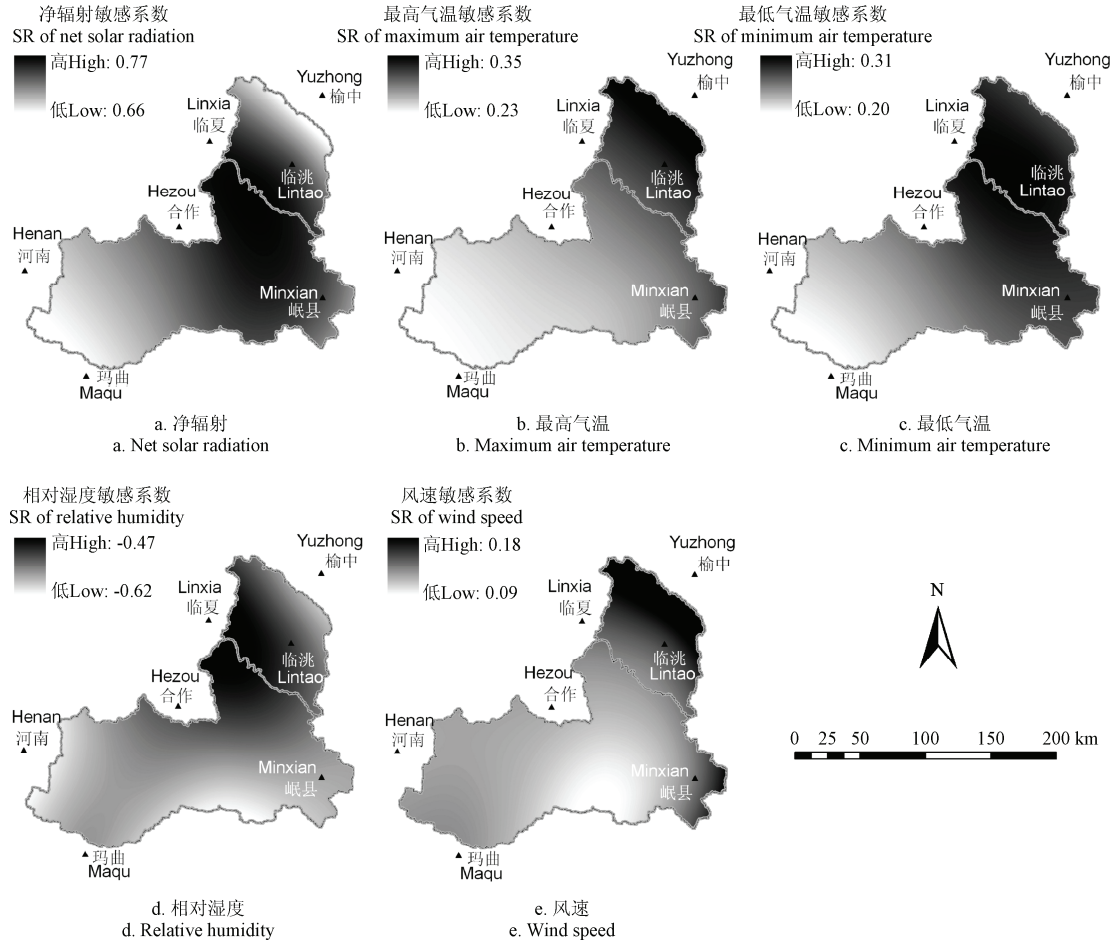


图 3 关键气候因子敏感系数空间分布
Fig.3 Distribution of sensitive coefficients (SR) of key climatic factors

3. 2. 3 敏感系数月尺度特征

由式 (2) 计算前述 5 个关键气候要素关于月 ET_0 的敏感系数。计算结果表明，除相对湿度外，其余各要素所对应的敏感系数均为正值。为对照直观，取相对湿度敏感系数的绝对值进行对比分析。两区各气候要素多年平均的月敏感系数如图 4 所示。从图中可知，洮河甘南高原片和黄土高原片各气候要素对区域 ET_0 的影响以净辐射和相对湿度为主，敏感系数均在 0.40 以上； ET_0 对净辐射的敏感性高于相对湿度，两者在年内各月的表现有所不同，净辐射呈现夏秋季高、冬春季低的“单峰型”现象，相对湿度敏感系数在甘南高原片与净辐射趋同，但在黄土高原片，出现夏秋季低、冬春季高的“两头翘”的现象。最高、最低气温和风速对应的敏感系数较小，气温敏感系数在年内呈“单峰型”，风速敏感系数呈“两头翘”。

前者意味着 ET_0 对夏秋季气温比冬春季更敏感，反映了水热条件对 ET_0 的季节性影响；后者表明 ET_0 对冬春季风速的敏感性高于夏秋季，与研究区冬季盛行西北风的气候特征相适应。

两区对比而言，洮河流域黄土高原区净辐射的敏感系数在冬春季高于甘南高原，在夏秋季低于甘南高原。由于该区陆表通量过程以夏秋两季为主，说明净辐射的变化对甘南高原 ET_0 的影响更明显。 ET_0 的年内变化对相对湿度的敏感性在两区差别较大，黄土高原“两头翘”，甘南高原呈“单峰型”，表明两区空气湿度环境的差异，反映了甘南高原水汽含量的相对丰沛。敏感系数（绝对值）在黄土高原片冬季较高，在甘南高原片春季较高，一定程度反映了年初大气水分循环东-西向渐进的纬向效应。两区相对湿度敏感系数高值均出现在 10 月，表明

秋冬之际大气水分含量波动剧烈， ET_0 对该期相对湿度的敏感性更高。气温要素和风速的敏感系数在

黄土高原片普遍较高，表明半干旱气候环境下 ET_0 对上述要素的变化更为敏感。

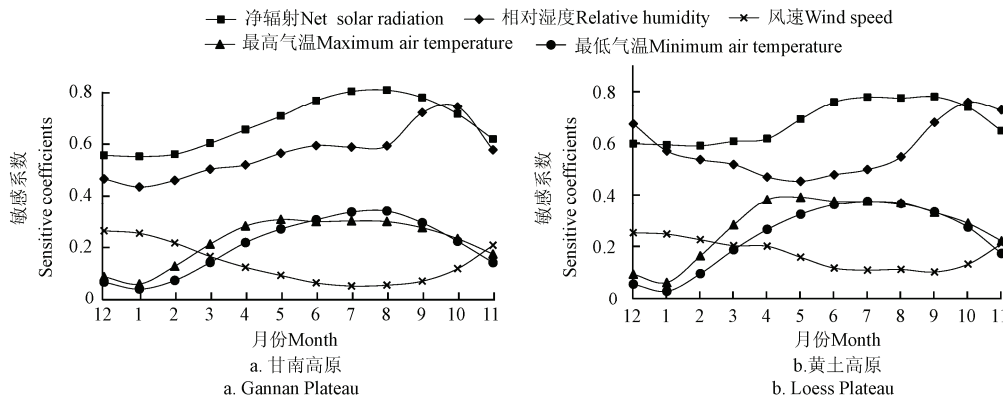


图 4 洮河流域两区气候要素月敏感系数年内变化

Fig.4 Inter-annual distribution of monthly sensitive coefficients for climatic factors in the two divisions of the Taohe River Basin

3.2.4 月敏感系数的年代际变化

要素月敏感系数的年代际变幅进行统计，结果列于

基于 Sen 斜率方法就 1981—2010 年间各气候

表 2。

表 2 1981-2010 年间基于 Sen 斜率的 2 区气候要素月敏感系数的年代际变化

Table 2 Sen's slope trend estimation for decadal variability of monthly sensitive coefficients in the Gannan and Loess Plateau during the period of 1981-2010

月份 Month	甘南高原 Gannan Plateau					黄土高原 Loess Plateau				
	净辐射 Net Solar Radiation/ (MJ·m ⁻² ·d ⁻¹)	最高气温 Maximum Air Temperature/ °C	最低气温 Minimum Air Temperature/ °C	相对湿度 Relative Humidity/ %	风速 Wind Speed/ (m·s ⁻¹)	净辐射 Net Solar Radiation/ (MJ·m ⁻² ·d ⁻¹)	最高气温 Maximum Air Temperature/ °C	最低气温 Minimum Air Temperature/ °C	相对湿度 Relative Humidity/ %	风速 Wind Speed/ (m·s ⁻¹)
12	-0.04*	0.02	-0.01	-0.02	0.03*	-0.03*	0.01	-0.02 [†]	-0.03	0.02*
1	-0.04*	0.03*	0	-0.03	0.03*	-0.05*	0.02 [†]	0	-0.04	0.03*
2	0	0.03*	0.02*	-0.01	0.01	-0.01	0.04*	0.02*	-0.04	0
3	-0.02	0.03*	0.01 [†]	0.01	0.02 [†]	-0.03*	0.04*	0.01	0	0.02*
4	-0.02*	0.03**	0.01	0.02	0.02*	-0.03*	0.03*	0.00	0.02	0.02*
5	-0.02*	0.01*	0	0.00	0.01*	-0.03*	0.02 [†]	-0.01 [†]	-0.02	0.02*
6	-0.01*	0.01*	0	0.02	0.01*	-0.05*	0.03*	-0.01*	-0.01	0.03*
7	-0.02*	0.02*	0	-0.02	0.01*	-0.04*	0.03**	-0.01*	-0.04*	0.02*
8	-0.01*	0.01 [†]	-0.01	-0.03 [†]	0.01*	-0.01	0.01	0	-0.05 [†]	0
9	-0.02*	0.02*	0.01*	-0.03	0.01*	-0.01	0.01*	0	-0.07 [†]	0
10	-0.01 [†]	0.01	0	-0.03	0.01 [†]	-0.01	0.01	0	-0.09*	0
11	-0.02 [†]	0.02*	0	-0.02	0.01*	-0.02	0.03*	0	-0.07*	0.01 [†]

注：* 和 [†] 分别为通过 0.05 和 0.1 显著性检验。

Note: The signs * and [†] represent significant tests at the levels of 0.05 and 0.1, respectively.

从单要素敏感系数变化趋势来看，两区净辐射敏感系数在全年以变小（斜率值为负）为主，最高气温和风速敏感系数则以变大（斜率值为正）为主，上述 3 要素敏感系数在部分月份未发生变化（斜率值为 0）。最低气温敏感系数在冬春季略有增大，夏秋季略有变少。相对湿度敏感系数的变化在甘南高原表现为春末和夏季变大，其余时间均变小；在黄土高原仅 4 月份变大，其余月份中绝大多数有明显变小。总体来看，洮河流域 ET_0 对相对湿度的敏感系数呈变小趋势，由于 ET_0 对相对湿度为负敏感，过去 30 a， ET_0 对相对湿度的敏感性实际上为增强趋势。

两区对比来看， ET_0 对净辐射敏感性的降低，以及对最高气温和相对湿度敏感性增加的程度，在黄土高原区更为明显，说明相对于甘南高原高寒湿润及半湿润区，黄土高原半干旱区的气候环境具有更高的变异性，对该区水文过程的影响也更显著。

3.3 气候因素、敏感系数和 ET_0 之间的关系

相关性分析表明，除相对湿度外，其他气候因素与 ET_0 均为正相关，即 ET_0 随着相对湿度增加而减少，随净辐射、最高、最低气温和风速的增加而增加。 ET_0 和各气候因素敏感系数之间散点对应及趋势如图 5 所示，净辐射、最高气温和风速的敏感

系数与 ET_0 之间的相关系数分别为 -0.84 , 0.96 和 0.92 ($P < 0.01$), 相关性强; 最低气温和相对湿度的敏感系数与 ET_0 的相关系数分别为 -0.35 和 -0.47 , 呈弱相关。通过气候因素、 ET_0 及敏感系数之间相关性分析可知, 敏感性和相关性并非严格对应, 5 个关键要素中, 敏感性较高、相关性较强的有净辐射和最高气温, 两者正向驱动 ET_0 变化, 但敏感系数变化趋势则相反, 即随着净辐射增强和温度升高, ET_0 会增加, 但其对净辐射的敏感性降低, 对最高气温的敏感性增加, 表明敏感系数随净辐射增强而降低、随最高气温升高而增加的实质。计算表明, 相同变幅 ($+1\%$) 的太阳净辐射和最高气温, 前者所致的 ET_0 相对增量为 0.73% , 后者为 0.31% 。过去 30 a, 洮河流域太阳辐射的变幅 (1%) 小于最高气温 (5%), 最高气温对 ET_0 变化的贡献大于太阳净辐射, 气温升高是洮河流域 ET_0 增加的主导原因。

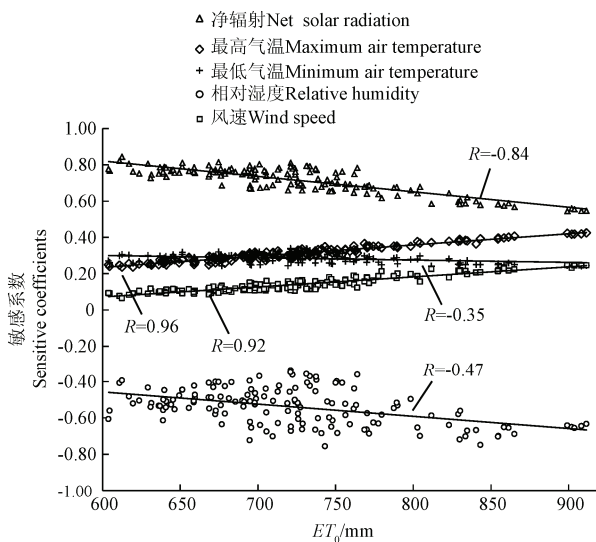


图 5 敏感系数与 ET_0 关系散点图 ($P < 0.01$)

Fig.5 Relation between sensitivity coefficients and ET_0

4 结论

本文基于 P-M 模式计算了洮河流域潜在蒸散发 ET_0 , 基于 Beven 敏感性公式计算了 ET_0 对 5 个关键气候要素的敏感系数, 采用 Sen 斜率和 Mann-Kendall 方法统计了各要素敏感系数的变幅, 并分析了气候因素、敏感系数和 ET_0 之间的关系。主要结论如下:

ET_0 对洮河流域各气候要素的敏感性差异明显, 按敏感系数大小排序为: 净辐射 $>$ 相对湿度 $>$ 最高气温 $>$ 最低气温 $>$ 风速。

受洮河流域水文气象时空格局控制和影响, 各气候要素敏感系数在年内分布迥异。流域 2 个气候区的风速敏感系数和黄土高原区的相对湿度敏感系数呈“两头翘”的线型, 其余各要素均为“单

峰型”; 5 类气候要素中, 净辐射和最高气温具有较高敏感性和较强相关性; 1981—2010 年间, ET_0 敏感性以对太阳净辐射的降低和最高气温的升高为主要特点。

洮河流域 ET_0 对关键气候要素的敏感性及其年代变化分析表明该区不存在“蒸发悖论”现象, 该结论与刘昌明等在黄河流域关于蒸发悖论的研究结果一致。净辐射和最高气温 2 个要素的增升, 是过去 30 a 洮河流域 ET_0 增加的主要原因, 其中气温升高对 ET_0 的贡献占主导。

[参 考 文 献]

- [1] 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.
- [2] 李常斌, 杨林山, 王帅兵, 等. 洮河流域潜在蒸散发估算-模式遴选及应用[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2013, 49(6): 727—732.
Li Changbin, Yang Linshan, Wang Shuaibing, et al. Estimation of the potential evapotranspiration based on module test and application in the Tao River basin[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Science Edition, 2013, 49(6): 727—732. (in Chinese with English abstract)
- [3] 蔡锡填, 徐宗学, 苏保林, 等. 区域蒸散发分布式模拟及其遥感验证[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 154—160.
Cai Xitian, Xu Zongxue, Su Baolin, et al. Distributed simulation for regional evapotranspiration and verification by using remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(10): 154—160. (in Chinese with English abstract)
- [4] 邸苏闯, 吴文勇, 刘洪禄, 等. 基于遥感技术的绿地耗水估算与蒸散发反演[J]. 农业工程学报, 2012, 28(10): 98—104.
Di Suchuang, Wu Wenyong, Liu Honglu, et al. Water consumption estimation and evapotranspiration inversion based on remote sensing technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(10): 98—104. (in Chinese with English abstract)
- [5] 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 with English abstract)
- [6] 刘振华, 赵英时, 李笑宇, 等. 基于蒸散发模型的定量遥感缺水指数[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 114—120.
Liu Zhenhua, Zhao Yingshi, Li Xiaoyu, et al. Quantitative remote sensing of water deficit index based on evapotranspiration[J]. Transactions of the Chinese

- Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(2): 114—120. (in Chinese with English abstract)
- [7] 宋璐璐, 尹云鹤, 吴绍洪. 蒸散发测定方法研究进展[J]. 地理科学进展, 2012, 13(9): 1186—1195.
Song Lulu, Yin Yunhe, Wu Shaohong. Advancements of the metrics of evapotranspiration[J]. Progress in Geography, 2012, 13(9): 1186—1195. (in Chinese with English abstract)
- [8] 杨永民, 冯兆东, 周剑. 基于 SEBS 模型的黑河流域蒸散发[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2008, 44(5): 1—6.
Yang Yongmin, Feng Zhaodong, Zhou Jian. Evapotranspiration in Heihe River Basin based on SEBS model[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Science Edition, 2008, 44(5): 1—6. (in Chinese with English abstract)
- [9] 梁丽乔, 李丽娟, 张丽, 等. 松嫩平原西部生长季参考作物蒸散发的敏感性分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 1—5.
Liang Liqiao, Li Lijuan, Zhang Li, et al. Sensitivity of the reference crop evapotranspiration in growing season in the West Songnen Plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(5): 1—5. (in Chinese with English abstract)
- [10] Chahine T M. The hydrological cycle and its influence on climate[J]. Nature, 1992, 359(6394): 373—380.
- [11] 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.
Cong Zhentao, Ni Guangheng, Yang Dawen, et al. Evaporation paradox in China[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(2): 147—152. (in Chinese with English abstract)
- [12] Goyal R K. Sensitivity of evapotranspiration to global warming: A case study of arid zone of Rajasthan India[J]. Agricultural Water Management, 2004, 69(1): 1—11.
- [13] 王炳亮, 李国胜. 辽河三角洲不同干湿气候区潜在蒸散发敏感因子时空变化[EB/OL]. 地理科学, <http://www.cnki.net/kcms/detail/22.1124.P.20130730.1504.002.html>, 2013-07-30.
Wang Bingliang, Li Guosheng. Spatial and temporal change of reference evapotranspiration sensitivity in different dry and wet climate zones in Liaohe Delta [EB/OL]. Scientia Geographica Sinca, <http://www.cnki.net/kcms/detail/22.1124.P.20130730.1504.002.html>, 2013-07-30. (in Chinese with English abstract)
- [14] 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 with English abstract)
- [15] 杨邦, 任立良, 王贵作, 等. 基于水文模型的流域蒸散发规律[J]. 农业工程学报, 2009, 25(增刊 2): 18—22.
Yang Bang, Ren Liliang, Wang Guizuo, et al. Estimation of evapotranspiration in catchment based on distributed watershed hydrological model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(Supp.2): 18—22. (in Chinese with English abstract)
- [16] 韩松俊, 胡和平, 杨大文, 等. 塔里木河流域山区和绿洲潜在蒸散发的不同变化及影响因素[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009, 39(8): 1375—1383.
Han Songjun, Hu Heping, Yang Dawen, et al. Differences in changes of potential evaporation in the mountainous and oasis regions of the Tarim Basin, northwest China[J]. Science China Series E: Technological Sciences, 2009, 39(8): 1375—1383. (in Chinese with English abstract)
- [17] 李常斌, 杨林山, 杨文瑾, 等. 洮河流域土地利用/土地覆被变化及其驱动机制研究[EB/OL]. 地理科学, <http://www.cnki.net/kcms/detail/22.1124.P.20131015.1602.003.html>, 2013-10-15.
Li Changbin, Yang Linshan, Yang Wenjin, et al. Land use and land cover change in Taohe River Basin and its driving forces[EB/OL]. Scientia Geographica Sinca, <http://www.cnki.net/kcms/detail/22.1124.P.20131015.1602.003.html>, 2013-10-15. (in Chinese with English abstract)
- [18] 李常斌, 王帅兵, 杨林山, 等. 1951—2010 年洮河流域水文气象要素变化的时空特征[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1259—1266.
Li Changbin, Wang Shuaibing, Yang Linshan, et al. Spatial and temporal variation of main hydrologic meteorological elements in the Taohe River basin from 1951 to 2010[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(5): 1259—1266. (in Chinese with English abstract)
- [19] Pirkner M, Dicken U, Tanny J. Penman-Monteith approaches for estimating crop evapotranspiration in screen houses—a case study with table-grape[EB/OL]. International Journal of Biometeorology, <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00484-013-0653-z>, 2013-12-08.
- [20] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements//FAO Irrigation and Drainage paper 56[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [21] Yang X, Ren L, Singh V P, et al. Impacts of land use and land cover changes on evapotranspiration and runoff at Shalamulun River watershed, China[J]. Hydrology Research, 2012, 43(1—2): 23—37.
- [22] Kite G. Using a basin-scale hydrological model to estimate crop transpiration and soil evaporation[J]. Journal of Hydrology, 2000, 229(1): 59—69.
- [23] Beven K. A sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration estimates[J]. Journal of Hydrology, 1979, 44(3): 169—190.
- [24] Bormann H. Sensitivity analysis of 18 different potential evapotranspiration models to observed climatic change at German climate stations[J]. Climatic Change, 2011, 104(3—4): 729—753.
- [25] Sen, P K. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau[J]. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63(324): 1379—1389.
- [26] 殷贺, 李正国, 王仰麟, 等. 基于时间序列植被特征的内蒙古荒漠化评价[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 653—661.

- Yin He, Li Zhengguo, Wang Yanglin, et al. Assessment of desertification using time series analysis of hyper-temporal vegetation indicator in Inner Mongolia[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(5): 653–661. (in Chinese with English abstract)
- [27] Hamed K H, Ramachandra Rao A. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data[J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 204 (1): 182–196.
- [28] Hamed K H. Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scalling hypothesis[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 349(3): 350–363.
- [29] 盛琼, 申双和, 顾泽. 小型蒸发器的水面蒸发量折算系数[J]. *南京气象学院学报*, 2007, 30(4): 561–565.
- Sheng Qiong, Shen Shuanghe, Gu Ze. Conversion coefficient between small evaporation pan and theoretically calculated water surface evaporation in China[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2007, 30(4): 561–565. (in Chinese with English abstract)
- [30] 李常斌, 李文艳, 杨文瑾, 等. 黄土高原祖厉河流域日降雨-径流过程模拟[J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2012, 48(4): 20–26.
- Li Changbin, Li Wenyan, Yang Wenjin, et al. Daily rainfall runoff simulation across the Zuli river basin in the loess plateau[J]. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences Edition*, 2012, 48(4): 20–26. (in Chinese with English abstract)

Sensitive analysis of potential evapotranspiration to key climatic factors in Taohe River Basin

Yang Linshan^{1,2}, Li Changbin^{1,2*}, Wang Shuaibing^{1,2}, Yang Wenjin²

(1. College of Earth and Environment Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. Key Laboratory of Western China's environmental Systems (Ministry of Education), Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Sensitive analysis of potential evapotranspiration (ET_0) to main climatic factors is an important content of the land surface vapor flux research, which has remarkable theoretical and practical significance for understanding regional hydrological cycle and for effective use of agricultural water resources in the context of climate change. Over the past few decades, many parts of the world experienced a decline of ET_0 under a warming-up background. Relationship between ET_0 and the climatic factors has once again become people's attention. The Taohe River Basin (TRB) is located in the transition zone of the two major geomorphic units of China, the Qinghai-Tibet Plateau and the Loess Plateau. Area of the upstream of the TRB (Gannan Plateau) features an altitudinal cold humid and semi-humid climate, while the downstream of that (Loess Plateau) presents a temperate and semi-arid climate. Natural pattern of the regional climate differentiation provides a good platform for studies on sensitive analysis of ET_0 to climatic factors. In this study, the Penman-Monteith (P-M) equation and the Beven sensitivity method were used to estimate the ET_0 and sensitivity coefficient related to the main climatic factors. The Sen's slope and Mann-Kendall approaches were used to quantitatively test the amplitude and significance of the sensitivity from year 1981 to 2010. Based on above studies, we comprehensively analyzed the sensitivity of ET_0 to climatic factors and discussed the reasons of the ET_0 variability under a changeable regional climate in the TRB over the past 30 years. The P-M module outputs indicated a spatially gradual increase of ET_0 from the upper reaches to the lower reaches of the TRB. The multi-yearly averaged annual ET_0 across the basin was in a range of 633–789 mm. During the period from 1981 to 2010, there was an up-growing tendency of ET_0 at a rate of 3.43 mm per year. In the upper reach area of Gannan Plateau, the increase of ET_0 was less obvious than that in the lower reach area of Loess Plateau, with an increase rate of 3.39 mm per year and 3.54 mm per year, respectively. Application of Beven method resulted in an obvious differences of ET_0 sensitivity to climatic factors. According to the sensitivity coefficients, the sensitive significance was in an order of net solar radiation > relative humidity > maximum air temperature > minimum air temperature > wind speed, while there were relatively high correlation between ET_0 and the sensitivity coefficient of the net solar radiation, the maximum air temperature and the wind speed, respectively. Especially, higher values of sensitivity and correlation coefficients were found with the first two factors. The results showed that given the same increasing amplitude (+1%) of net solar radiation and maximum air temperature, the relative increment of ET_0 due to the net solar radiation was 0.73%, while that due to the maximum temperature was 0.31%. Over the past 30 years, change of net solar radiation (1%) was less than that of the maximum air temperature (5%), thus, the sensitivity of ET_0 to the regional climate was dominated by a weakness to net solar radiation and an enhancement of maximum air temperature. Therefore, the increase of ET_0 during the studied period was mainly due to increment of the air temperature in the area.

Key words: evapotranspiration; climate change; sensitivity analysis; Penman-Monteith module; Beven sensitivity method; Taohe River Basin