

黑河流域参考蒸散量的时空变化特征 及影响因素的定量分析

马宁^a, 王乃昂^{a*}, 王鹏龙^a, 孙彦猛^b, 董春雨^a

(兰州大学 a. 资源环境学院, 干旱区气候变化与水循环研究中心; b. 信息科学与工程学院, 兰州 730000)

摘要: 利用黑河流域及周边地区 14 个气象站的 1960—2009 年逐日气象资料, 基于 FAO 推荐的 Penman-Monteith 模型分析了黑河流域近 50 a 来潜在年、季参考蒸散量 ET_0 的时空分布特征, 同时利用敏感分析计算了流域内不同区域典型气象站 ET_0 对各气候要素的敏感系数, 并结合各气候要素的多年相对变化定量探讨了导致 ET_0 变化的主导因素。结果表明: 黑河流域年 ET_0 表现出明显的南北差异, 亦即从南到北呈增大趋势, 上游祁连山区年 ET_0 约 568~700 mm, 中游走廊平原约 800~900 mm, 下游的金塔、鼎新一带约 1 000 mm, 额济纳地区则高达 1 150 mm 以上。各季节 ET_0 亦呈北多南少特征, 且 ET_0 的年内分布以夏季最多, 春季次之, 秋冬最少。近 50 a 来, 黑河流域年、季平均 ET_0 整体呈减小趋势, 但亦存在区域差异, 其中上游 ET_0 略有增加, 而中下游以减小趋势为主。就年平均敏感系数而言, 上游的托勒站和中游的高台站皆对相对湿度敏感性最强, 而下游的额济纳旗对平均风速最为敏感。不同站点各季节/月 ET_0 对气候要素的敏感性有所差异。风速是引起 ET_0 变化的主导因素, 相对湿度和日照时数的贡献则较小。

关键词: 参考蒸散量; 敏感系数; 风速; 黑河流域

中图分类号: P426.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3037(2012)06-0975-15

蒸散发作为地球系统热量交换与水量交换过程的主要联系, 是水文循环的重要环节^[1-2]。陆地上年降水量约 70% 都以蒸散发的形式返回大气^[3], 从水量损失角度而言, 蒸散量属于降水径流形成过程中的损失项, 亦是流域水量平衡研究的重要项目之一。另一方面, 由于蒸散量可作为潜热减小净辐射向感热的转化, 对调节空气温湿度有较大作用, 大尺度的地表蒸散量亦对降水和大气环流有重要影响^[4-5]。因此, 蒸散量的估算对于区域气候变化研究、水资源评价与合理利用、农业灌溉和水利工程建设均有重要意义。自从 1948 年 Penman 首次提出潜在蒸散量的概念^[6] 并从能量平衡和空气动力学角度解析出蒸发力的计算公式以来, Jensen 等^[7] 在此基础上结合植物的具体生理特征, 建立了参考作物潜在蒸散量的模型, 后来一些组织和个人对之又进行不断完善^[8-9], 1998 年联合国粮农组织 (FAO) 以假定参考作物为基础, 修订了 Penman-Monteith 模型^[10], 由于其较全面地考虑了影响蒸散量的气候要素, 适用于各种气候条件下参考蒸散量的估算, 故 FAO 将之推荐为计算参考作物蒸散量 (ET_0) 的标准方法^[10], 并得到国内外学者的广泛应用^[11-22], 亦已取得较好的模拟效果^[23-24]。与此同时, 关于我国青藏高

收稿日期: 2011-07-26; 修订日期: 2011-10-27。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40901021, 50879033); 高等学校博士学科点专项科研基金项目 (20090211110025); 兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金 [lzujbky-2011-71]; 博士点基金 (20100211120006)。

第一作者简介: 马宁 (1990-), 男, 安徽蒙城人, 硕士研究生, 主要从事陆面过程与气候变化研究。E-mail: ma.n2007@yahoo.com.cn

*** 通信作者简介:** 王乃昂 (1962-), 男, 山东鄄城人, 博士, 教授, 主要从事气候变化与水循环、环境变迁与历史地理研究。E-mail: wangna@lzu.edu.cn

原^[13-14]、东北地区^[15-16]、西北地区^[17-18]及长江流域^[20]、黄河流域^[21-22]等地参考蒸散量的时空分布研究已广泛开展,而就导致其变化的主导因素尚存在一些争议^[25-27],此外,部分研究在分析气候变化对 ET_0 的影响时所利用之方法^[18]亦有值得改进之处。位于我国西北干旱区的黑河流域,由于受干旱气候和特殊地形的制约,加之近几十年来全球变暖和人类活动的影响,区域水循环发生了显著变化,尤其是中游地区用水结构不合理、水资源利用率较低^[28],地下水位出现明显下降^[29],与此同时,进入下游的河川径流不断减少^[30],土地荒漠化趋势亦十分严峻^[31],水资源供需矛盾日益突出,生态环境急剧恶化^[32]。参考蒸散量的估算为水资源合理利用和加强灌溉效率提供了重要的理论依据^[33-34],而关于该流域的参考蒸散量研究目前尚不多见^[35-36],本文利用黑河流域主要气象站点近 50 a 来逐日观测资料,以 Penman-Monteith 模型为基础,结合 ArcGIS 反距离加权 (IDW) 空间插值,研究黑河流域参考蒸散量的空间分布及时间变化特征,同时利用敏感性分析和气候要素的相对变化,比较流域内不同区域典型气象站点年、季 ET_0 对各气候要素的敏感性,定量揭示不同气候要素变化对 ET_0 变化的贡献差异,是准确估算黑河流域作物需水量的前提,对加强农业灌溉效率、调整水资源利用结构及优化水资源配置有重要的现实意义,同时有助于揭示黑河流域水循环的特征及机制,是流域水科学集成研究的重要部分,亦可为建立流域水问题的应对策略、开发水资源管理决策系统提供理论依据。

1 资料与方法

1.1 资料

选取黑河流域的托勒、野牛沟、祁连、山丹、张掖、高台、酒泉、金塔、鼎新和额济纳旗 10 个气象站及周边地区的永昌、阿拉善右旗、玉门镇、拐子湖 4 个气象站(图 1)的 1960—2009

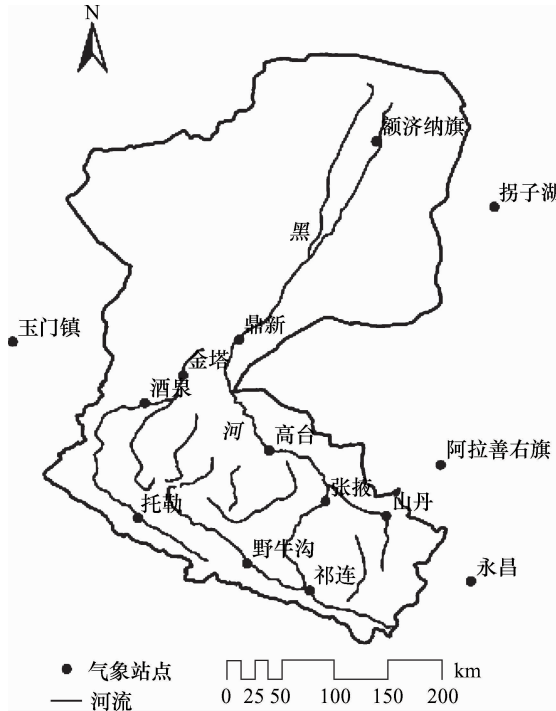


图 1 黑河流域及周边地区主要气象站点分布

年逐日平均气温、平均最高气温、平均最低气温、平均相对湿度、日照时数和平均风速观测数据(资料来源于中国气象科学数据共享服务网 <http://new-cdc.cma.gov.cn>),部分缺测数据由其邻近气象站按差值订正法^[37]予以插补,之后以 FAO-56 推荐的 Penman-Monteith 模型为基础,在 Matlab 7.1 环境下编程计算出近 50 a 来各站点的逐日参考作物潜在蒸散量,进而获得各站点逐季(季节划分以 3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12 月—次年 2 月为冬季)和年 ET_0 时间序列。在 ArcGIS 平台利用反距离加权(IDW)法插值得到黑河流域年、季节 ET_0 及其变化趋势的空间分布特征。需要指出的是,本文在插值时利用了包括周边地区的所有 14 个站点数据(目的在于提高插值精度),而讨论流域平均值时仅以流域内部的 10 个气象站数据为准。

1.2 参考蒸散量的计算方法

采用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 模型^[10],它以水分扩散理论和能量平衡为基础,综合了空气动力学和辐射项的同时,又考虑了植被的生理特征,有较好的物理依据,为非饱和下垫面蒸散发研究开辟了新的途径^[38],其形式如:

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

式中, ET_0 为参考蒸散量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$), Δ 为饱和水汽压温度曲线斜率($\text{kPa} \cdot \text{°C}^{-1}$),可利用平均气温 T (°C)得出, G 为地表以下的土壤热通量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$),可利用相近 2 个月的平均气温推算^[10], γ 为干湿常数($\text{kPa} \cdot \text{°C}^{-1}$), U_2 为 2 m 高处的风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), e_s 和 e_a 分别为饱和水汽压和实际水汽压(kPa), R_n 为净辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$),由净短波辐射 R_{ns} 与净长波辐射 R_{nl} 之差得出:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (2)$$

Yin 等^[39]采用我国 81 个气象站的逐月辐射观测资料建立了适用于我国的净短波辐射经验公式,同时指出 Penman 修正式^[6]计算我国净长波辐射的方法更为准确,即:

$$R_{ns} = (1 - \alpha) \left[0.2 + 0.79 \left(\frac{n}{N} \right) \right] R_{so} \quad (3)$$

$$R_{nl} = \sigma \left(\frac{T_{\max,k}^4 + T_{\min,k}^4}{2} \right) (0.56 - 0.25\sqrt{e_a}) \left[0.1 + 0.9 \left(\frac{n}{N} \right) \right] \quad (4)$$

式中: α 为地表反照率,FAO 推荐取 0.23^[10], R_{so} 为晴空太阳辐射, σ 为 Stefan-Boltzman 常数($4.903 \times 10^{-9} \text{ MJ} \cdot \text{K}^{-4} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), $T_{\max,k}$ 和 $T_{\min,k}$ 分别为日最高气温和最低气温, n 为日照时数, N 为可照时数。

1.3 敏感性分析及 ET_0 变化的主导因素

敏感性可定义为当其他因子不变时,某个因子一定量的变化(如百分比)所引起自变量的相应改变的大小^[40],其概念类似于数学中的偏导数。然而,考虑到 Penman-Monteith 模型中各气候要素的相对大小及单位有所差异,故这里利用无量纲化的相对敏感系数^[41-42]:

$$S_{X_i} = \lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta ET_0 / ET_0}{\Delta X_i / X_i} \right) = \frac{\partial ET_0}{\partial X_i} \cdot \frac{X_i}{ET_0} \quad (5)$$

式中, X_i 为气候要素(本文 i 取 1—5,分别代表平均最高气温、平均最低气温、平均相对

湿度、平均风速和日照时数), S_{X_i} 为 ET_0 对气候要素的敏感系数, 此相对敏感系数由于没有量纲, 故可用于直接比较不同气候要素对 ET_0 的影响。敏感系数的正/负, 意味着 ET_0 变化与气候要素的变化一致/相反, 其绝对值越大表示气候要素对 ET_0 的影响越大, 反之亦然。

气候要素 X_i 的相对变化与敏感系数 S_{X_i} 的乘积 G_{X_i} 表示该气候要素的变化所导致 ET_0 的相对变化^[27], 即:

$$G_{X_i} = \frac{\Delta X_i}{\bar{X}_i} \cdot S_{X_i} \tag{6}$$

式中: ΔX_i 为研究时间段(1960—2009 年)内气候要素 X_i 的变化量, \bar{X}_i 为气候要素在相应时间内平均值的绝对值, 二者之比即为 X_i 的相对变化^[27]。 G_{X_i} 绝对值愈大, 意味 X_i 相对变化所导致的 ET_0 变化的贡献愈大, G_{X_i} 绝对值最大者即为 ET_0 变化的主导因素。

而实际的 ET_0 相对变化量应近似等于所有气候要素引起的其相对变化之和^[43], 即:

$$\frac{\Delta ET_0}{ET_0} \approx \sum_{i=1}^5 G_{X_i} \tag{7}$$

本文主要探讨最高气温、最低气温、相对湿度、平均风速和日照时数 5 个气候要素在近 50 a 来的变化对 ET_0 变化的贡献。此外, 本文采用的统计方法主要有一元线性回归^[37]和 Mann-Kendall 突变检验^[44]。

2 ET_0 的空间分布特征

黑河流域位于欧亚大陆腹地, 为典型大陆性季风气候, 受流域内气候和地形等因素影响, 黑河流域年 ET_0 南北差异明显, 从上游至下游逐渐增大(图 2, 基于各站点 1960—2009 年平均值), 上游的祁连山区海拔较高, 属祁连山-青海湖气候区, 高寒冷湿^[45], 年 ET_0 约为 568 ~ 700 mm 之间, 中游的走廊平原为温带干旱气候, 年 ET_0 约 800 ~ 900 mm 之间, 下游的金塔、鼎新一带约 1 000 mm, 额济纳周边地区受荒漠极端干旱气候影响, 年 ET_0 高达 1 150 mm 以上。各季节 ET_0 亦整体呈北多南少的特征, 春季上游约 173 ~ 250 mm, 中游约

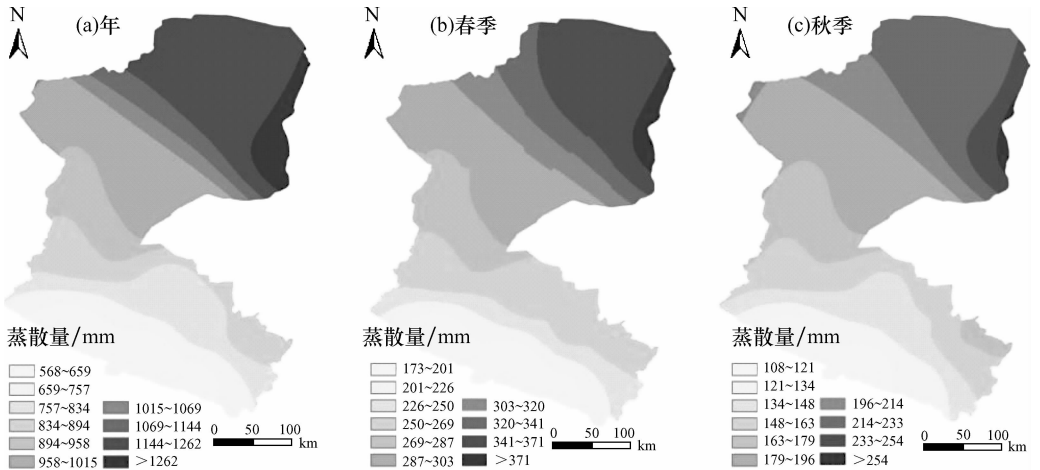


图 2 黑河流域年、春、秋季参考蒸散量的空间分布特征

Fig. 2 Spatial distribution of annual, spring and autumn reference evapotranspiration of the Heihe River Basin

226~269 mm,下游约 269~371 mm;夏季上游约 240~346 mm,中游约 346~425 mm,下游约 383~600 mm;秋季上游约 108~148 mm,中游约 134~179 mm,下游约 179~254 mm;冬季上游约 30~50 mm,中游约 36~58 mm,下游约 54~70 mm。同一区域季节 ET_0 表现为夏季最多,春季次之,秋冬最少,这与我国参考蒸散量呈秋冬季北少南多、春夏季北多南少的特征^[34]较为一致。

3 参考蒸散量的变化特征

3.1 年参考蒸散量的变化

近 50 a 来,黑河流域平均年 ET_0 以 $-7.3 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 的速率呈减小趋势,这与刘昌明等^[46]关于我国西北诸河流域年参考蒸散量呈下降趋势的结果相一致。就年 ET_0 的阶段变化而言,20 世纪 60—70 年代 ET_0 有所增大,1981 年之后至 21 世纪初期则呈明显的减小趋势(图 3)。Mann-Kendall 突变检验结果也表明(图略),黑河流域年平均 ET_0 于 1981 年发生显著突变减小(通过 0.01 显著性水平),突变后变化量(即后段与前段的均值之差)为 -42.9 mm 。从年 ET_0 变化的空间分布(图 2)可见,上游地区祁连山中部的走廊南山—托来山—托勒站一带呈增加趋势,其中托勒站以 $14.1 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 的速率(通过信度为 0.001 的显著性检验)显著增加,而祁连和野牛沟呈微弱增加趋势(表 1)。中游的走廊平原和下游的阿拉善荒漠区则呈减小趋势,其中高台(中游)和额济纳旗(下游)减小趋势分别达 $-23.1 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 和 $-34.4 \text{ mm}/10 \text{ a}$ (表 1),需要指出的是,下游的东北边缘地区却呈增加趋势,亦即古居延泽以南至古日乃一带年 ET_0 在近 50 a 来有所增大。

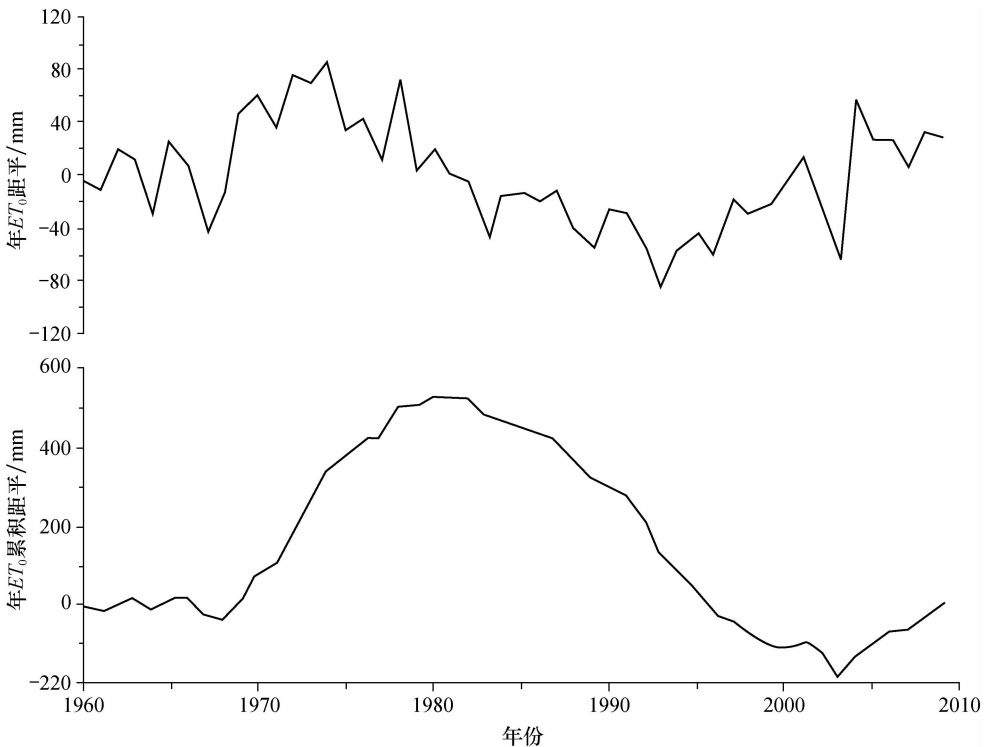


图 3 1960—2009 年黑河流域平均年 ET_0 的距平与累积距平曲线

表 1 黑河流域主要气象站年参考蒸散量年代际距平及变化趋势

Table 1 Interdecadal anomalies and trends of annual reference evapotranspiration of the stations in the Heihe River Basin	托勒	野牛沟	祁连	山丹	张掖	高台	酒泉	金塔	鼎新	额济纳旗
1960 年代距平/mm	-31.1	-8.5	-10.1	4.4	19.9	26.1	-2.5	-11.2	-21.8	46.3
1970 年代距平/mm	-4.3	6.1	18.1	30.3	27.0	90.2	42.4	98.8	79.9	106.9
1980 年代距平/mm	-1.6	-1.4	-10.6	-1.9	-63.3	-30.6	3.1	-12.7	-24.6	-37.9
1990 年代距平/mm	3.4	-2.5	3.1	-28.8	-6.6	-80.4	-63.2	-89.9	-68.6	-93.6
2000—2009 年距平/mm	34.1	6.2	-0.2	-4.2	22.8	-5.2	20.3	14.8	35.0	-21.8
变化趋势/(mm/10 a)	14.1*	1.0	0.1	-7.7	-3.4	-23.1*	-5.3	-12.1	-2.1	-34.4*

注:距平值基于 1960—2009 年平均值计算; * 表示通过信度为 0.01 的显著性检验。

3.2 季节参考蒸散量的变化

1960—2009 年黑河流域各季节平均 ET_0 亦整体呈减小趋势,其中夏季以 $-3.6 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 的速率显著减小(通过信度为 0.05 的显著性检验),春、秋和冬季分别以 $-1.3 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 、 $-1.8 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 和 $-0.4 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 的速率呈微弱减小趋势,表明近 50 a 来黑河流域年平均 ET_0 的减小主要由夏季贡献。Mann-Kendall 突变检验结果表明,黑河流域春、夏、秋和冬季 ET_0 分别于 1983、1976、1981 和 1987 年发生显著突变减小(显著性水平 0.05),突变后变化量分别为 -12.3 、 -18.2 、 -8.4 和 -3.8 mm 。就各季节 ET_0 变化的空间分布而言(图 4),春季, ET_0 在上游的走廊南山—托来山一带有增加趋势,其增加速率约为 $0 \sim 7.8 \text{ mm}/10 \text{ a}$;中游的走廊平原普遍呈减小趋势,减小速率约 $0 \sim -6.7 \text{ mm}/10 \text{ a}$;下游除鼎新盆地以及古日乃地区略有增加外,亦整体呈减小趋势,额济纳部分地区减小速率较大,达 $-6.7 \sim -9.7 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 。夏季, ET_0 在绝大部分地区呈减小趋势,其中走廊平原减小速率约 $0 \sim -12.9 \text{ mm}/10 \text{ a}$,额济纳地区减小速率更是高达 $-17.9 \text{ mm}/10 \text{ a}$,而上游的托勒—祁连一带则以 $0 \sim 6.1 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 的速率略有增加。秋季, ET_0 在上游整体以 $0 \sim 5.6 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 呈增大趋势,中下游除古日乃地区略有增大外,其余均呈明显的减小趋势,其中高台地区和额济纳旗一带减小速率较大,达 $-5.6 \sim -7.1 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 。

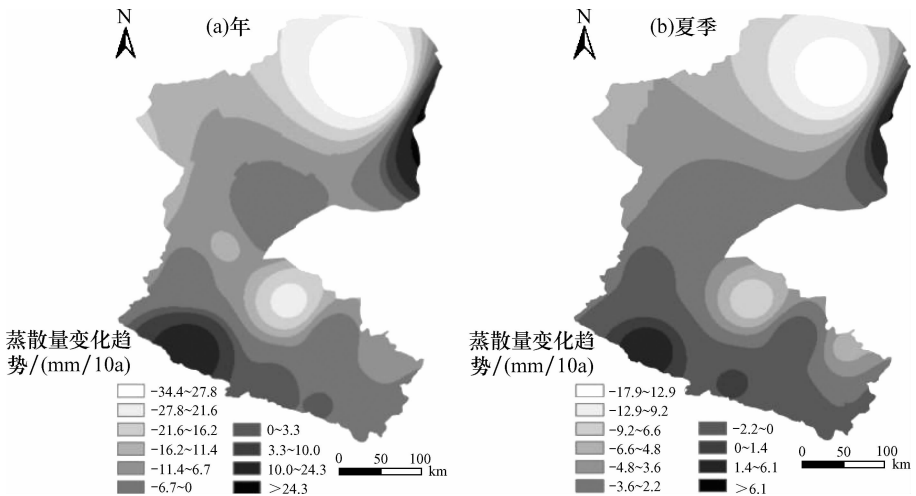


图 4 1960—2009 年黑河流域年、夏季参考蒸散量变化趋势的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of the change rates of annual and summer reference evapotranspiration from 1960 to 2009 in the Heihe River Basin

冬季,高台、金塔地区 ET_0 以 $-2.1 \sim -2.8 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 呈减小趋势,其他地区变化幅度不大,上游的托勒地区和下游古日乃以北部分地仍呈增加趋势。

4 参考蒸散量的变化原因分析

4.1 参考蒸散量对气候要素的敏感性

为了探讨黑河流域气候要素变化对 ET_0 的影响,分别选取上、中、下游的托勒、高台和额济纳旗 3 个 ET_0 变化较为显著的气象站作为分析对象。考虑到站点代表性,首先对上、中、下游各自站点年 ET_0 作相关性分析,上游的托勒站与野牛沟、祁连的相关系数分别为 0.455 和 0.447,中游的高台站与张掖、山丹、酒泉的相关系数分别为 0.466、0.500、0.670,下游的额济纳旗与金塔、鼎新的相关系数分别为 0.686、0.577,所有相关系数均通过信度为 0.01 的显著性检验,故分别用托勒、高台、额济纳旗代表上、中、下游参考蒸散的变化是较为合理的。根据式(5),计算 ET_0 对各气候要素的相对敏感系数。就年平均敏感系数而言(表 2),各站 ET_0 均对相对湿度呈负敏感,而对最高气温、最低气温、平均风速呈正敏感。敏感系数绝对值大小表明,上游的托勒站和中游的高台站年 ET_0 均对相对湿度敏感性最强(分别为 -0.389 和 -0.534),而下游的额济纳旗则对平均风速最为敏感(0.644)。就季节而言(表略),上游的托勒站冬季和夏季 ET_0 分别对风速和日照时数最为敏感,春、秋季相对湿度敏感性最强;中游的高台站春、夏季 ET_0 对最高气温最为敏感,秋、冬季相对湿度敏感性最强;下游的额济纳旗站春、夏季 ET_0 亦对最高气温敏感性最强,秋、冬季则对风速最为敏感。综上所述,流域内不同区域、不同时间尺度参考蒸散量对气候要素的敏感性略有差异。

表 2 三个典型站气候要素年均敏感系数和多年相对变化

Table 2 Sensitivity coefficients and relative changes of climate elements of the three stations

	敏感系数			多年相对变化/%		
	托勒	高台	额济纳旗	托勒	高台	额济纳旗
最高气温	0.168	0.404	0.583	25.17	20.40	29.79
最低气温	0.020	0.093	0.163	31.15	31.36	41.25
相对湿度	-0.389	-0.534	-0.376	-21.99	1.09	-9.11
日照时数	0.121	0.051	-0.054	1.53	-3.53	-3.40
平均风速	0.322	0.470	0.644	26.40	-57.51	-43.45

4.2 参考蒸散量对气候要素敏感性的年内变化

从各站点 ET_0 对 5 种气候要素敏感性的年内变化(图 5)可见,最高气温的敏感性在上游托勒站年内变化幅度较小,其中 5—9 月和 12—1 月敏感性较强;中游的高台和下游的额济纳旗变化幅度较大,且以 4—10 月较强,其余月份较弱。最低气温的敏感性在托勒站年内变化亦不明显,以 3 月最强(0.102);中游的高台和下游的额济纳旗最低气温敏感性则表现出冬、夏季较强,春、秋季较弱的特点。风速和日照时数的敏感性在 3 个站点的年内变化趋势较为一致,其中风速的敏感系数呈单谷型分布,以 1 月或 12 月最大,7 月最小(0.1~0.414),日照时数则与之相反。相对湿度的敏感性在各月份皆为负值,且各站点均以 12 月最强($-0.597 \sim -1.153$),4—10 月敏感性变化不大。

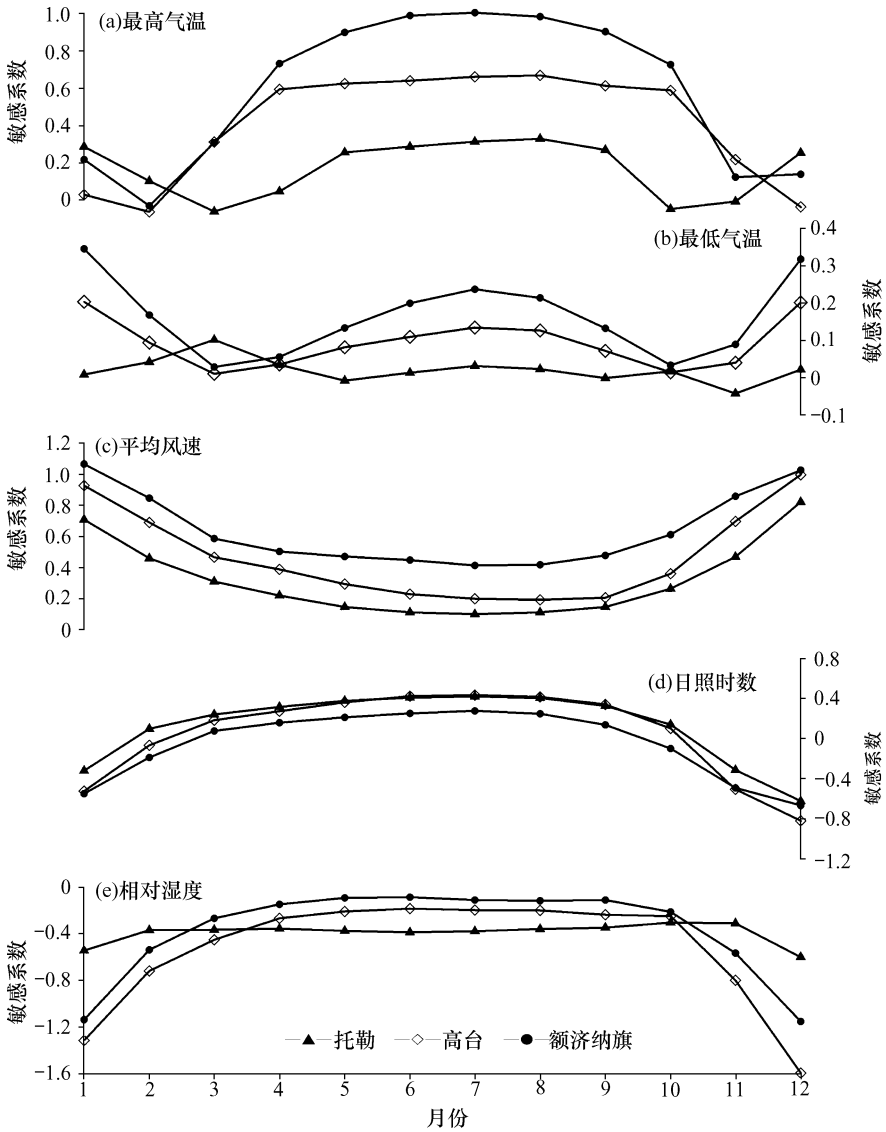


图5 三个站点参考蒸散对气候要素的敏感系数的年内变化

Fig. 5 Variation of monthly mean sensitivity coefficient of three stations

4.3 参考蒸散量变化的主导因素

上游的托勒站尽管年 ET_0 对相对湿度敏感性最强,但由于平均风速的增大幅度高达 26.40% (表 2),故对 ET_0 的增加贡献最大,达 11.71%,相对湿度的贡献次之(7.90%),最低气温和日照时数对潜在蒸散的贡献最小。中游的高台站,相对湿度在近 50 a 来变化较为微弱(仅 1.09%),对 ET_0 变化的贡献较小;最高气温和最低气温则显著升高,可分别使潜在蒸散增大 2.05% 和 1.42%,然而由于平均风速相对减小了 57.51%,可导致的年 ET_0 减小达 -25.22%,成为该站年 ET_0 呈减少趋势的主要因素。综合 5 个气候要素的影响,年 ET_0 相对减少 21.99%,接近年 ET_0 的实际相对减小 -20.47% (表 3)。下游的额济纳旗,由于年 ET_0 对风速的敏感性最强,加之其近 50 a 来减小了 43.45%,故对 ET_0 的贡献最大,达 -27.99%,与此同时,由于其他气候要素对年 ET_0 的贡献皆为正,抵消了部分由于风速的

显著减小而导致的 ET_0 减小,使其年 ET_0 减小的估计值 -16.34% 与年 ET_0 实际减小 -16.30% 相近(表 3)。从 3 个典型气象站点气候变化对年 ET_0 变化的影响而言,无论年 ET_0 在近 50 a 来变化趋势如何,皆主要受风速的变化所致,其他气候要素对潜在蒸散的贡献大小随区域气候条件而有所不同,这与 Thomas^[26] 和尹云鹤等^[27] 关于西北地区参考蒸散量变化的主要原因相一致。就各季节 ET_0 变化而言(表 3),尽管不同站点各季节 ET_0 对各气候要素的敏感性有所差异(图 5),但由于中游的高台站和下游的额济纳旗因风速的减小幅度在所有季节均较大,进而导致 ET_0 的减小较为显著,故是其各季节 ET_0 变化的主导因素。与此同时,上游的托勒站在春、冬季 ET_0 的增加亦主要受风速的影响;夏季 ET_0 增大的主导因素则为最高气温;秋季由于相对湿度变化较大,加之敏感性较强,对 ET_0 的贡献达 11.75% ,是 ET_0 增加的主导因素。

表 3 三个典型站气候要素变化所导致的 ET_0 变化 G_{xi} 及参考蒸散量的实际相对变化

Table 3 Contribution of climate elements to ET_0 and actual relative change for ET_0 of the three stations (%)

		最高气温	最低气温	相对湿度	日照时数	平均风速	估计总贡献	实际变化
年	托勒	3.34	0.43	7.90	0.02	11.71	23.40	23.92
	高台	2.05	1.42	-1.59	1.35	-25.22	-21.99	-20.47
	额济纳旗	4.24	4.67	2.03	0.71	-27.99	-16.34	-16.30
春	托勒	0.61	0.19	2.26	1.58	3.34	7.98	12.22
	高台	3.57	1.37	0.92	1.90	-19.13	-11.37	-12.17
	额济纳旗	4.22	3.59	1.90	-0.12	-19.41	-9.82	-9.61
夏	托勒	2.16	1.19	-0.14	-0.38	1.60	4.44	6.28
	高台	1.98	0.70	-0.16	-1.54	-13.72	-12.74	-11.99
	额济纳旗	3.42	3.42	1.44	-0.53	-21.14	-13.40	-16.11
秋	托勒	0.73	0.08	11.75	-0.92	10.45	22.09	20.51
	高台	5.03	0.97	-1.17	-0.91	-25.60	-21.68	-21.79
	额济纳旗	4.50	3.74	0.07	0.53	-30.44	-21.61	-19.20
冬	托勒	9.85	0.24	17.73	-0.19	31.46	59.10	56.66
	高台	-2.39	2.63	-5.96	5.97	-42.44	-42.19	-35.93
	额济纳旗	4.83	7.95	4.70	2.96	-40.95	-20.53	-20.29

5 讨论

尽管本文在计算 ET_0 时使用了分辨率较高的逐日数据,并且在净辐射模型中运用了我国实测辐射拟合所得之最新参数^[39],然而黑河流域内景观分异较为鲜明,不同地区植被分布状况和地表反射率有所差异,其对 Penman-Monteith 公式中假定的参考作物模型^[10] 的实际适应程度必然会导致 ET_0 的计算存在误差,与此同时,流域内气象站点较少且分布不均匀亦可能对 IDW 插值所得区域 ET_0 的空间分布产生影响,故进一步结合遥感方法分析流域内典型区域植被分布状况和下垫面反射率对更为准确地估算 ET_0 有重要意义。

一般认为,近几十年来的气候变暖会加速水分循环,进而使蒸散量增加^[47-48],然而更多的研究则表明,在 20 世纪后半叶的太阳辐射下降^[56-57] 和风速减小^[58] 的影响下,全球许多区域参考蒸散量和蒸发皿蒸发量在过去几十年来呈明显的减少趋势^[49-54]。基于此,Brutsaert 和 Parlange 根据实际蒸发量与潜在蒸散之间的互补理论,推论出蒸发皿蒸发量的减少实际

就意味着陆面蒸发量的增加^[55],而 Peterson 则认为蒸发皿蒸发量下降直接指示了陆面蒸发量的减少^[50]。在中国,青藏高原^[13-14]、西北^[18,46]、华北^[59]和长江流域^[20]等地参考蒸散量在近几十年来亦呈明显的下降趋势,而华南^[27]、东北大部^[15-16]和黄河流域部分地区^[21-22]则有所增大。不同地区参考蒸散量变化的主导因素亦有所差异:曹雯等^[17]通过敏感性分析表明,风速对西北地区 ET_0 变化贡献最大,河西走廊^[18]、天山^[19]等地的研究结果亦支持这一结论,与此同时,青藏高原 ET_0 的降低亦与风速的关系最大^[14,27]。此外,学者们普遍认为日照时数或净辐射的减小是导致我国南方地区 ET_0 变化的主要原因^[20,25-27]。然而对于影响东北地区 ET_0 的主导因素尚有部分争议,相对湿度^[25]、最高气温^[26]、风速^[27]可能皆有较大贡献。本文根据敏感性分析和气候要素的相对变化,得到了黑河流域 3 个典型气象站点逐月 ET_0 的估计相对变化和实际相对变化(估计值相对于实际值的平均误差为 -2.1% ,估计效果较好),定量探讨了各气候要素变化对参考蒸散的影响。结果表明,尽管风速并非整个流域敏感性最强的因子,但由于其在近 50 a 来变化幅度较大,是黑河流域参考蒸散量变化的主导因素,而相对湿度和日照时数在研究时段内变化并不显著,对参考蒸散量变化的贡献较小。另一方面,黑河流域内南北纬度和地形差异较大,上游祁连山区海拔较高,气候阴湿寒冷,中游走廊平原地带,属温带干旱气候,下游靠近巴丹吉林沙漠西侧,气候极端干旱。受地形和气候的共同影响,流域内 ET_0 的空间分布及影响其变化的主导因素均有明显的区域差异。

已有研究表明,我国大部分地区平均风速近几十年来显著减小^[60],而本文位于上游的托勒站风速却呈增大趋势,这可能是因该站处于祁连山区,受地形影响较大所致。叶笃正等^[61]认为,厄尔尼诺现象会通过改变赤道太平洋大气状况而大范围扰动大气环流,在厄尔尼诺年东亚冬季风强度较弱,而拉尼娜年则较强,亦即在 20 世纪 70 年代拉尼娜事件占优,冬季风势力较强,80—90 年代厄尔尼诺事件占优,冬季风势力较弱。施能和朱乾根^[62]的研究结果亦表明,亚洲地区 20 世纪 80 年代以来经向环流出现明显减弱。与此同时,我们认为,在全球变暖背景下,高纬度地区的升温幅度大于低纬度地区^[63-64],自由大气中的热成风随气温的纬向梯度减小(即等温线变疏)而明显减弱,可能是解释近几十年来风速减小的合理原因之一。此外,下垫面的状况诸如土地利用变化和风电场的建立亦有可能对风速产生影响^[65],然其具体过程尚需进一步探讨。

6 小结

本文基于 FAO 推荐的 Penman-Monteith 模型,结合 ArcGIS 反距离权重插值方法,同时根据敏感性分析和气候要素的相对变化,分析了近 50 a 来黑河流域参考蒸散量的时空变化特征,并定量揭示了参考蒸散量变化的主导因素,结果表明:

(1) 受气候和地形等因素的影响,黑河流域年 ET_0 呈明显的南北差异,从南至北呈增大趋势。上游年 ET_0 约 568~700 mm 之间,中游的走廊平原约 800~900 mm 之间,下游的金塔、鼎新一带约 1 000 mm,额济纳地区则高达 1 150 mm 以上。各季节 ET_0 亦呈现北多南少的特征,且同一区域夏季参考蒸散量最大,春季次之,秋冬最少。

(2) 近 50 a 来,黑河流域平均年 ET_0 以 -7.3 mm/10 a 的速率呈减小趋势,各季节平均 ET_0 亦整体减小,其中夏季减小速率最大。参考蒸散量的变化在空间上存在明显的区域差异,主要表现为上游略有增大,中、下游以减小趋势为主。

(3) 流域内不同区域、不同时间尺度 ET_0 对各气候要素的敏感性有所差异。各站年

ET_0 均对相对湿度呈负敏感,而对最高气温、最低气温、平均风速呈正敏感。上游的托勒站、中游的高台站年 ET_0 皆对相对湿度敏感性最强,下游的额济纳旗则对风速最为敏感。就季节而言,上游的托勒站冬季和夏季 ET_0 分别对风速和日照时数最为敏感,春、秋季相对湿度敏感性最强;中游的高台和下游的额济纳旗在春、夏季 ET_0 均对最高气温最为敏感,秋、冬季前者对湿度敏感性最强;后者则对风速最为敏感。

(4) 利用敏感性分析与气候要素相对变化来定量分析 ET_0 变化的主导因素有较好的效果。上游的托勒站年、春、冬季 ET_0 变化的主要受风速影响,夏季和秋季 ET_0 变化的主导因素则分别为最高气温和相对湿度。中游的高台和下游的额济纳旗年、季节 ET_0 变化的主导因素皆为风速。

参考文献 (References):

- [1] 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 [J]. 水科学进展, 1999, 10(3): 251-259. [LIU Chang-ming, SUN Rui. Ecological aspects of water cycle: Advances in soil vegetation atmosphere of energy and water fluxes. *Advances in Water Science*, 1999, 10(3): 251-259.]
- [2] 谭绩文, 沈永平, 张发旺, 等. 水科学概论 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 83-206. [TAN Ji-wen, SHEN Yong-ping, ZHANG Fa-wang, et al. Outline of Water Science. Beijing: Science Press, 2010: 83-206.]
- [3] Rosenberg N J, Blad B L, Verma S B. Microclimate: The Biological Environment [M]. New York: Wiley-Interscience Press, 1983: 1-528.
- [4] Shukla J, Mintz Y. The influence of land surface evapotranspiration on earth's climate [J]. *Science*, 1982, 215: 1498-1501.
- [5] 孙岚, 吴国雄. 陆面蒸散对气候变化的影响 [J]. 中国科学 D 辑, 2001, 31(1): 59-69. [SUN Lan, WU Guo-xiong. Impact of land surface evapotranspiration to climate change. *Science in China Series D*, 2001, 31(1): 59-69.]
- [6] Penman H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass [J]. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 1948, 193: 120-146.
- [7] Jensen M E, Wright J L, Pratt B J. Estimation soil moisture depletion from climate, crop and soil data [J]. *Transaction of the ASAE*, 1971, 14(5): 954-959.
- [8] Doorenbos J, Pruitt W O. Guidelines for Prediction Crop Water Requirements [M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1977: 1-179.
- [9] Allen R G, Jensen M E, Wright J L, et al. Operational estimates of reference evapotranspiration [J]. *Agronomy Journal*, 1989, 81: 650-662.
- [10] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration—Guidelines for Computing Crop Water Requirements [M]. Rome: United Nations Food and Agriculture Organization, 1998.
- [11] Espadafor M, Lorite I J, Gavilan P, et al. An analysis of the tendency of reference evapotranspiration estimates and other climate variables during the last 45 years in southern Spain [J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98: 1045-1061.
- [12] Naoum S, Tsanis I K. Hydroinformatics in evapotranspiration estimation [J]. *Environmental Model & Software*, 2003, 18(3): 261-271.
- [13] 吴绍洪, 尹云鹤, 郑度, 等. 青藏高原近 30 年气候变化趋势 [J]. 地理学报, 2005, 60(1): 3-11. [WU Shao-hong, YIN Yun-he, ZHENG Du, et al. Climate changes in the Tibetan Plateau during the last three decades. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(1): 3-11.]
- [14] Zhang Y Q, Liu C M, Tang Y H, et al. Trends in pan evaporation and reference and actual evapotranspiration across the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112, D12110, doi: 10. 1029/2006JD008161.
- [15] 孙小舟, 封志明, 杨艳昭. 西辽河流域 1952 年—2007 年参考作物蒸散量的变化趋势 [J]. 资源科学, 2009, 31(3): 479-484. [SUN Xiao-zhou, FENG Zhi-ming, YANG Yan-zhao. Change tendency of reference crop evapotranspiration in Xiliaohe Basin. *Resources Science*, 2009, 31(3): 479-484.]
- [16] 曾丽红, 宋开山, 张柏, 等. 近 60 年来东北地区参考作物蒸散量时空变化 [J]. 水科学进展, 2010, 21(2):

- 194-200. [ZENG Li-hong, SONG Kai-shan, ZHANG Bo, *et al.* Spatiotemporal variability of reference evapotranspiration over the northeast region of China in the last 60 years. *Advances in Water Science*, 2010, 21(2): 194-200.]
- [17] 曹雯, 申双和, 段春峰. 西北地区生长季参考作物蒸散变化成因的定量分析[J]. 地理学报, 2011, 66(3): 407-415. [CAO Wen, SHEN Shuang-he, DUAN Chun-feng. Quantification of the causes for reference crop evapotranspiration changes in growing season in Northwest China. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(3): 407-415.]
- [18] 贾文雄, 何元庆, 王旭峰, 等. 祁连山及河西走廊潜在蒸发量的时空变化[J]. 水科学进展, 2009, 20(2): 159-167. [JIA Wen-xiong, HE Yuan-qing, WANG Xu-feng, *et al.* Temporal and spatial change of the potential evaporation over Qilian mountains and Hexi corridor from 1960 to 2006. *Advances in Water Science*, 2009, 20(2): 159-167.]
- [19] 张明军, 李瑞雪, 贾文雄, 等. 中国天山山区潜在蒸发量的时空变化[J]. 地理学报, 2009, 64(7): 798-806. [ZHANG Ming-jun, LI Rui-xue, JIA Wen-xiong, *et al.* Temporal and spatial changes of potential evaporation in Tianshan Mountains from 1960 to 2006. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(7): 798-806.]
- [20] Xu C Y, Gong L B, Jiang T, *et al.* Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 327: 81-93.
- [21] 史建国, 严昌荣, 何文清, 等. 黄河流域潜在蒸散量时空格局变化分析[J]. 干旱区研究, 2007, 24(6): 773-778. [SHI Jian-guo, YAN Chang-rong, HE Wen-qing, *et al.* Study on spatiotemporal change of evapotranspiration in the Yellow River Basin. *Arid Zone Research*, 2007, 24(6): 773-778.]
- [22] 左德鹏, 徐宗学, 程磊, 等. 渭河流域潜在蒸散量时空变化及其突变特征[J]. 资源科学, 2011, 33(5): 975-982. [ZUO De-peng, XU Zong-xue, CHENG Lei, *et al.* Spatial-temporal variations and mutations of potential evapotranspiration in the Weihe River Basin. *Resources Science*, 2011, 33(5): 975-982.]
- [23] 刘钰, Pereira L S, Teixeira J L, 等. 参照腾发量的新定义及计算方法对比[J]. 水利学报, 1997, 28(6): 27-33. [LIU Yu, Pereira L S, Teixeira J L, *et al.* Comparison of the new definition and calculation method of reference evapotranspiration. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997, 28(6): 27-33.]
- [24] 刘绍民, 孙中平, 李小文, 等. 蒸散量测定与估算方法的对比研究[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 161-167. [LIU Shao-min, SUN Zhong-ping, LI Xiao-wen, *et al.* A comparative study on models for estimating evapotranspiration. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(2): 161-167.]
- [25] Gao G, Chen D L, Ren G Y, *et al.* Spatial and temporal variations and controlling factors of potential evapotranspiration in China: 1956-2000 [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2006, 16(1): 3-12.
- [26] Thomas A. Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration trends over China [J]. *International Journal of Climatology*, 2000, 20: 381-396.
- [27] YIN Yun-he, WU Shao-hong, DAI Er-fu. Determining factors in potential evapotranspiration changes over China in the period 1971-2008 [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(29): 3329-3337.
- [28] 金蓉, 石培基, 王雪平, 等. 张掖绿洲水循环经济发展探讨[J]. 中国沙漠, 2004, 24(6): 802-808. [JIN Rong, SHI Pei-ji, WANG Xue-ping, *et al.* Study on oasis sustainable use of water resources applying circular economy. *Journal of Desert Research*, 2004, 24(6): 802-808.]
- [29] 肖生春, 肖洪浪, 蓝永超, 等. 近 50a 来黑河流域水资源问题与流域集成管理[J]. 中国沙漠, 2011, 31(2): 529-535. [XIAO Sheng-chun, XIAO Hong-lang, LAN Yong-chao, *et al.* Water issues and integrated water resource management in Heihe River Basin in recent 50 years. *Journal of Desert Research*, 2011, 31(2): 529-535.]
- [30] 王钧, 蒙古军. 黑河流域近 60 年来径流量变化及影响因素[J]. 地理科学, 2008, 28(1): 83-88. [WANG Jun, MENG Ji-jun. Characteristics and tendencies of annual runoff variations in the Heihe River Basin during the past 60 years. *Scientia Geographica Sinica*, 2008, 28(1): 83-88.]
- [31] 李森, 李凡, 孙武, 等. 黑河下游额济纳绿洲现代荒漠化过程及其驱动机制[J]. 地理科学, 2004, 24(1): 61-67. [LI Sen, LI Fan, SUN Wu, *et al.* Modern desertification process in Ejina Oasis and its dynamic mechanism. *Scientia Geographica Sinica*, 2004, 24(1): 61-67.]
- [32] 程国栋, 肖洪浪, 徐中民, 等. 中国西北内陆河水问题及其应对策略——以黑河流域为例[J]. 冰川冻土, 2006, 28(3): 406-413. [CHENG Guo-dong, XIAO Hong-lang, XU Zhong-min, *et al.* Water issue and its countermeasure in the inland river basins of Northwest China—A case study in Heihe River Basin. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(3): 406-413.]

- [33] 陆桂华, 吴志勇, 何海. 水文循环过程及定量预报[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 1-359. [LU Gui-hua, WU Zhi-yong, HE Hai. Process of Water Cycle and Quantitative Forecast. Beijing: Science Press, 2010: 1-359.]
- [34] 倪广恒, 李新红, 丛振涛, 等. 中国参考作物腾发量时空变化特性分析[J]. 农业工程学报, 2006, 22(5): 1-4. [NI Guang-heng, LI Xin-hong, CONG Zhen-tao, et al. Temporal and spatial characteristics of reference evapotranspiration in China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(5): 1-4.]
- [35] 李星敏, 卢玲, 李新, 等. 黑河流域日蒸散发遥感估算研究[J]. 高原气象, 2010, 29(1): 109-114. [LI Xing-min, LU Ling, LI Xin, et al. Remote sensing retrieval of daily evapotranspiration over the Heihe River Basin. *Plateau Meteorology*, 2010, 29(1): 109-114.]
- [36] 吴锦奎, 丁永建, 王根绪, 等. 干旱区人工绿洲间作农田蒸散研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(9): 16-20. [WU Jin-kui, DING Yong-jian, WANG Gen-xu, et al. Evapotranspiration of intercropping field in an artificial oasis in arid region. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(9): 16-20.]
- [37] 马开玉, 丁裕国, 屠其璞, 等. 气候统计原理与方法[M]. 北京: 气象出版社, 1993: 462-464. [MA Kai-yu, DING Yu-guo, TU Qi-pu, et al. Climate Statistics Principles and Methods. Beijing: China Meteorological Press, 1993: 462-264.]
- [38] 左大康, 覃文汉. 国外蒸发研究的进展[J]. 地理研究, 1988, 7(1): 86-94. [ZUO Da-kang, QIN Wen-han. A review of evaporation study in the world. *Geographical Research*, 1988, 7(1): 86-94.]
- [39] YIN Yun-he, WU Shao-hong, ZHENG Du, et al. Radiation calibration of FAO56 Penman-Monteith model to estimate reference crop evapotranspiration in China [J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95: 77-84.
- [40] 林本达, 黄建平. 动力气候学引论[M]. 北京: 气象出版社, 1994: 41-51. [LIN Ben-da, HUANG Jian-ping. Introduction of Dynamic Climatology. Beijing: China Meteorological Press, 1994: 41-51.]
- [41] McCuen R H. A sensitivity and error analysis of procedures used for estimating evaporation [J]. *Water Resource Bulletin*, 1974, 10(3): 486-498.
- [42] Coleman G, DeCoursey D G. Sensitivity and model variance analysis applied to some evaporation and evapotranspiration models [J]. *Water Resource Research*, 1976, 12(5): 873-879.
- [43] Gong L B, Xu C Y, Chen D L, 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: 620-629.
- [44] 符滨斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学, 1992, 16(4): 482-493. [FU Cong-bin, WANG Qiang. The definition and detection of the abrupt climatic change. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1992, 16(4): 482-493.]
- [45] 李林, 王振宇, 汪青春. 黑河上游地区气候变化对径流量的影响研究[J]. 地理科学, 2006, 26(1): 40-46. [LI Lin, WANG Zhen-yu, WANG Qing-chun. Influence of climatic change on flow over the upper reaches of Heihe River. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 26(1): 40-46.]
- [46] 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 Chang-ming, 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.]
- [47] Hulme M, Zhao Z C, Jiang T. Recent and future climate change in East Asia [J]. *International Journal of Climatology*, 1994, 14: 637-658.
- [48] Robock A, Vinnikov K Y, Srinivasan G, et al. The global soil moisture data bank [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2000, 81: 1281-1299.
- [49] Roderick M L, Farquhar G D. Changes in Australian pan evaporation from 1970 to 2002 [J]. *International Journal of Climatology*, 2004, 24(9): 1077-1090.
- [50] Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y. Evaporation losing its strength [J]. *Nature*, 1995, 377: 687-688.
- [51] Bandyopadhyay A, Bhadra A, Raghunwansi N S, et al. Temporal trends in estimates of reference evapotranspiration over India [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2009, 14(5): 508-518.
- [52] Roderick M L, Farquhar G D. Changes in New Zealand pan evaporation since the 1970s [J]. *International Journal of Climatology*, 2005, 25(15): 2031-2039.
- [53] Gan T W. Hydroclimatic trends and possible climatic warming in the Canadian prairies [J]. *Water Resources Research*,

- 1998, 34(11): 3009-3015.
- [54] Tebakari T, Yoshitani J, Suvanpimol C. Time-space trend analysis in pan evaporation over Kingdom of Thailand [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2005, 10(3): 205-215.
- [55] Brutsaert W, Parlange M B. Hydrologic cycle explains the evaporation paradox [J]. *Nature*, 1998, 396: 30.
- [56] Stanhil G, Cohen S. Global dimming: A review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable cause and possible agricultural consequence [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107(4): 255-278.
- [57] Wild M, Gilgen H, Roesch A, *et al.* From dimming to brightening: Decade changes in solar radiation at earth's surface [J]. *Science*, 2005, 308: 847-850.
- [58] McVicar T, Roderick M, Donohue R, *et al.* Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.10.024.
- [59] 刘园, 王颖, 杨晓光, 等. 华北平原参考作物蒸散量变化特征及气候影响因素[J]. *生态学报*, 2010, 30(4): 923-932. [LIU Yuan, WANG Ying, YANG Xiao-guang, *et al.* Trends in reference crop evapotranspiration and possible climatic factors in the North China Plain. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(4): 923-932.]
- [60] Jiang Y, Luo Y, Zhao Z C, *et al.* Changes in wind speed over China during 1956-2004 [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2010, 99(3): 421-430.
- [61] 叶笃正, 丑纪范, 刘纪远, 等. 关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策[J]. *地理学报*, 2000, 55(5): 513-521. [YE Du-zheng, CHOU Ji-fan, LIU Ji-yuan, *et al.* Causes of sand-stormy weather in northern China and control measures. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(5): 513-521.]
- [62] 施能, 朱乾根. 北半球大气环流特征量的长期趋势及年代际变化[J]. *南京气象学院学报*, 1996, 19(3): 283-289. [SHI Neng, ZHU Qian-gen. Secular trends and interdecadal variation of characteristic quantities of atmospheric circulations for northern winter. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 1996, 19(3): 283-289.]
- [63] Dixon K W, Delworth T L, Knutson T R. A comparison of climate change simulations produced by two GFDL coupled climate models [J]. *Global and Planetary Change*, 2003, 37: 81-102.
- [64] 卢爱刚, 庞德谦, 何元庆, 等. 全球升温对中国区域温度纬向梯度的影响[J]. *地理科学*, 2006, 26(3): 345-350. [LU Ai-gang, PANG De-qian, HE Yuan-qing, *et al.* Impact of global warming on latitudinal temperature gradients in China. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 26(3): 345-350.]
- [65] 赵宗慈, 罗勇, 江滢. 全球大风在减少吗? [J] *气候变化研究进展*, 2011, 7(2): 149-151. [ZHAO Zong-ci, LUO Yong, JIANG Ying, *et al.* Is global strong wind declining? *Advances in Climate Change Research*, 2011, 7(2): 149-151.]

Temporal and Spatial Variation Characteristics and Quantification of the Affect Factors for Reference Evapotranspiration in Heihe River Basin

MA Ning^a, WANG Nai-ang^a, WANG Peng-long^a, SUN Yan-meng^b, DONG Chun-yu^a

(a. College of Earth and Environmental Science, Center for Climate Change and Hydrologic Cycle in Arid Region,

b. College of Information Science & Engineering, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Based on the daily data from 1960 to 2009 of 14 meteorological stations in Heihe River Basin and the surrounding areas, spatial and temporal distributions of the reference evapotranspiration in the Heihe River Basin were analyzed after calculation with the Penman-Monteith method recommended by FAO. Nondimensional relative sensitivity coefficients of reference evapotranspiration to climate elements of three representative stations in different regions were calculated to research the dominant factor of ET_0 's change combined with the relative change of the climate element. The results showed that obvious regional difference of annual and seasonal ET_0 in the Heihe River Basin and the former is estimated to be about 568 – 700 mm in the upper course, 800 – 900 mm in the Hexi corridor plain and over 1000 mm in the lower course. The ET_0 of summer is the most in a year, followed by spring, autumn and winter is the least. In general, the annual and seasonal ET_0 all decreased in past the 50 years, but also with regional difference, which increased slightly in the upper course and decreased in middle and lower course. The relative humidity is the most sensitive variable to annual ET_0 in Tuole and Gaotai which belong to the upper and middle course, however, wind speed is the most sensitive variable in Ejina which belongs to the lower course. The seasonal and monthly sensitivity of climate elements in the three sites have a little difference. Wind speed is the dominant factor causing change of ET_0 , however, the relative humidity and sunshine duration contributed little.

Key words: reference evapotranspiration; sensitivity coefficient; wind speed; Heihe River Basin