

甘肃河东地区地表湿润特征及其气候影响因子

赵一飞¹, 张 勃¹, 张多勇^{1,2}, 张建香¹, 何旭强¹, 孙力炜¹

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 2. 陇东学院, 庆阳 745600)

摘 要:利用甘肃河东地区13个气象站1960-2010年的逐日气象资料,选取FAO Penman-Monteith法计算了各站的潜在蒸散量,由此得出各站点的湿润指数;然后采用线性趋势法、Morlet小波、自然正交分解(EOF)和反距离加权插值等方法,对河东地区湿润指数的时空变化特征进行分析,进而探讨对影响其变化的气象要素。结果表明:①1992年之前,甘肃河东地区地表相对湿润,1992年之后变得干旱,年地表湿润指数的年际变化率为 $-0.02/10a$,相关系数为 $0.2946(P<0.05)$,季节上除冬季呈轻微增加外,其他各季都呈减少趋势,空间分布上表现出明显的南北差异,从南到北呈减少趋势;②年湿润指数空间异常分布主要表现为“全区一致性”和“南北反向变化”两种模态,同时也存在着19 a、5 a和11 a左右的变化周期,并于1994年发生了由湿向干的转变;③湿润指数与降水量、相对湿度呈显著正相关,与日照时数、潜在蒸散、风速和最高气温呈显著负相关。

关 键 词:Penman-Monteith法;潜在蒸散量;湿润指数;影响因素;河东地区;甘肃省

doi: 10.3724/SP.J.1033.2013.00095

1 引言

以变暖为显著特征的全球气候变化已成为水资源、农业、生态和其他学科领域研究的热点。IPCC第4次评估报告中指出:近100年(1906-2005年)全球平均地表温度上升了 0.74°C (IPCC, 2007)。全球变暖推动水循环发生变化,使水资源的总量时空分布不均,并对气候的干湿状况和水资源的供需平衡产生影响。因此,近年来有关干湿气候变化的研究受到学术界的广泛关注。研究指出:近30年来,中国变湿地区多于变干地区,但干旱化进程大于湿润化进程(申双和等, 2009);通过对比分析中国华北、西北近50年地表湿润指数变化特征表明,西北西部地表呈变湿趋势,而华北地区呈变干趋势,表现出相反变化趋势(马柱国等, 2001);1961-2000年,中国北方 100°E 以东地区半干旱区面积扩大,半湿润区面积缩小,气候趋向干旱化,但 100°E 以西地区极端干旱区面积在缩小,湿润指数有增大趋势(王菱等, 2005);新疆和柴达木盆地有明显变湿的趋势,西北地区东部呈变干趋势(靳立亚等, 2004)。同时,干湿变化也具有显著的区域性(吴绍洪等, 2005; 杜军等, 2006; 马柱国等, 2005),华北、柴达木

盆地和华南沿海地区湿润程度略有增加,新疆北部部分地区和藏东川西滇北地区增加趋势显著,其他地区有所降低。尽管干湿变化已经在大尺度上得到了一些确定性结论,但是,不同区域的变化规律仍存在差异。

湿润指数作为衡量某一区域气候干湿状况和反映某一区域水热收支情况的指标,在区域自然区划、农业区划和生态景观区划等研究中都有重要的意义。

甘肃河东地区($100.73^{\circ}\sim 108.73^{\circ}\text{E}$, $32.52^{\circ}\sim 37.30^{\circ}\text{N}$)位于黄河甘肃段以东以南地区,是黄土高原向青藏高原的过度地带,属于黄土高原沟壑丘陵带,在行政区上包括今天甘肃省兰州市、白银市、定西市、天水市、陇南市、庆阳市、平凉市、临夏回族自治州、甘南藏族自治州等地州市,面积 $1.78\times 10^5\text{ km}^2$,人口2195万。该区地处内陆,地形复杂,地势大致由西北向东南降低,海拔在600~4828 m之间,由甘南高原、陇南山地和中部的黄土高原与丘陵地形地貌组成。研究区除甘南高原为高寒湿润气候外,其他地区均属于季风气候,光照充足,太阳辐射强,冬冷夏热,昼夜温差大,降水少,雨热同期。由于东西、南北跨度大,加之地形起伏剧烈,气候的纬

收稿日期:2012-06; 修订日期:2012-08.

基金项目:国家自然科学基金项目(40961038);生态经济学省级重点学科项目(5002-021);西北师范大学知识与科技创新工程项目(NWNU-KJCXGC-03-66)。

作者简介:赵一飞(1988-),男,甘肃庆阳人,硕士研究生,主要从事区域环境与资源开发研究。E-mail: zhaoyifei1988@163.com

通讯作者:张勃(1963-),男,甘肃庆阳人,教授,主要从事区域环境与资源开发研究。E-mail: zhangbo@nwnu.edu.cn

向地带性和垂直地带性明显。在农业结构方面,这里既有农牧交错带,又是冬、春小麦种植的分界线,因此,该区不仅是气候变化的敏感区,同时也是生态环境的脆弱区(张旭东等, 2009)。地表湿润状况的变化不仅影响到该区的植被状况,而且影响工农业生产。因此,研究甘肃河东地区地表湿润状况变化特征及其与环境因子的关系,可以了解该区干湿状况的程度和分布,从而为改善生态环境、调整农业结构和区域经济建设提供依据。

2 研究资料与方法

2.1 研究资料

本文选用甘肃河东地区 13 个资料序列较长的气象站(图 1)1960-2010 年逐日平均气温、平均最高气温、平均最低气温、日照时数、平均风速、空气相对湿度、空气水汽压和降水量实测数据,用以分析近 51 年河东地区年湿润指数的变化特征并揭示其与气候因子的关系。上述数据均由中国气象局国家气象信息中心(<http://www.nmic.gov.cn>)提供,并且经过了较为严格的质量控制,包括极值检验和时间一致性检验。

湿润指数的计算有多种方法,本文采用最常用的方法,即联合国粮农组织(FAO)1998 年修正的 Penman-Monteith 模型(吴绍洪等, 2005),其表达式为(Gavilan et al, 2009):

$$W = P/ET_0 \tag{1}$$

式中: W 为湿润指数; P 为降水量(mm); ET_0 为潜在蒸散量(mm)。

当 $P > ET_0$ 时, $W > 1$, 地表相对湿润; 当 $P < ET_0$ 时,

$W < 1$, 地表相对干旱。

有关潜在蒸散量的计算方法很多, 1998 年联合国粮农组织(FAO)推荐的 P-M(Penman-Monteith)公式综合考虑了多个气候因子的影响, 能够真实反映实际气候的蒸散发能力, 因而在国内外广泛应用, 本文采用修订的 P-M 公式计算潜在蒸散量(吴绍洪等, 2005):

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \tag{2}$$

式中: ET_0 为潜在蒸发量(mm/d); Δ 为饱和水气压曲线在气温为 T 时的斜率(kPa/°C); R_n 为净辐射(MJ/m²·d); G 为土壤热通量(MJ/m²·d); γ 为干湿常数(kPa/°C); T 为平均气温(°C); U_2 为距地面 2 m 高处的风速(m/s); e_a 为饱和水气压(kPa); e_d 为实际水汽压(kPa)。其中 R_n 是以经验公式计算得来的, 其准确性取决于对经验系数的选取, 本文采用左大康等(1993)根据实测总辐射和日照百分率的月平均值及晴天状况下月总辐射的资料, 计算的经验系数, 得出 R_n 的计算公式为:

$$R_n = (1 - 0.23) \times \left(0.248 + 0.752 \frac{n}{N} \right) R_{so} - \sigma \left[\frac{T_{\max,K}^4 + T_{\min,K}^4}{2} \right] \times (0.56 - 0.08 \sqrt{e_a}) \left[0.1 + 0.9 \frac{n}{N} \right] \tag{3}$$

式中: n 为实际日照时数(h); N 为可照时数(h); R_{so} 为晴天辐射(MJ/m²); σ 为 Stefan-Boltzmann 常数(4.903×10⁻⁹ MJ/K⁴·m²·d); $T_{\max,K}$ 和 $T_{\min,K}$ 分别为绝对温标的最高、最低温度(K)。

干湿状况的划分采用中国气候区划和申双和等所应用的干湿指标(申双和等, 2009)(表 1)。

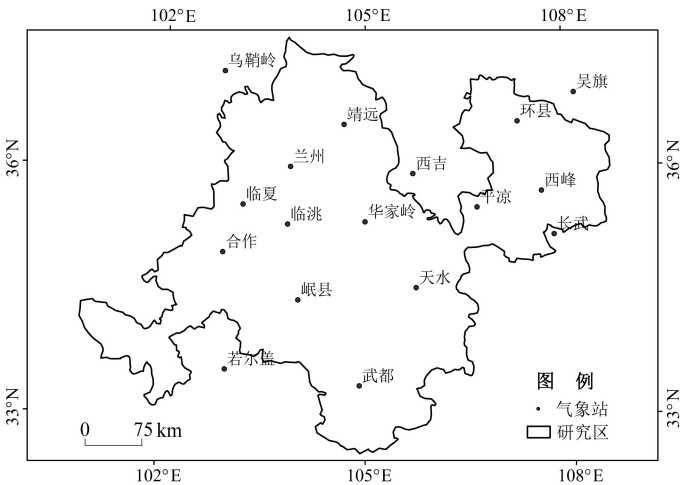


图 1 甘肃河东地区气象站点分布

Fig.1 Distribution of meteorological stations in Hedong region

表 1 湿润指数干湿气候划分标准

Tab. 1 Humidity indexes based on Chinese climate classification criterion

湿润指数	干湿气候区
$W<0.03$	极干旱气候区
$0.03<W<0.2$	干旱气候区
$0.2<W<0.5$	半干旱气候区
$0.5<W<1.0$	半湿润气候区
$W>1$	湿润气候区

2.2 研究方法

本文利用一元回归分析法进行地表干湿变化的趋势分析,在 ArcGIS 环境下通过反距离加权(Inverse Distance Weighted, IDW)插值法绘制地表湿润指数变化的空间分布图,进行地表干湿状况的空间差异分析,采用经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)分解法对湿润指数的空间异常分布特征进行分析,并采用 Morlet 小波和 Mann-Kendall 法进行了周期和突变分析,运用 SPSS 软件计算了地表湿润指数与各气象因子的相关系数。

经验正交函数(EOF)最早是由统计学家 Pearson 在 1901 年提出(Pearson, 1901),Lorenz 在 20 世纪 50 年代首次将其引入气象和气候研究领域。它是一种使用特征技术的统计方法,能够将变量场时间和空间变化分离,并用尽可能少的模态表达出主要的时间和空间变化,其优点是展开收敛速度快,比较容易浓缩集中大量资料信息,能在有限区域内对不规则分布的站点进行分解,且分解的空间结构具有明确的物理意义(魏凤英, 1999),其具体步骤如下(徐琼芳等, 2011):

(1) 对场序列原始资料矩阵标准化处理,建立

标准化资料阵(F_{mn}):
$$F_{mn} = (f_{ij})_{mn} \tag{4}$$

式中: f_{ij} 是第*i*测站在时间*j*的数据;*m*为测站数;*n*为场序列的时间。对 F_{mn} 求协方差阵:

$$A_{mn} = F_{mn} \cdot F_{mn}' \tag{5}$$

式中: F_{mn}' 为 F_{mn} 的转置阵。

用迭代法求解 A_{mn} 的特征值 R_i 及特征向量 V_i ;然后将 R_i 降序排列,并根据 R_i 的下标相应地调整特征向量的序列;然后求出时间系数矩阵,其公式为:

$$T_{mn} = F_{mn}' \cdot V_{mn} \tag{6}$$

式中: V_{mn} 为由 V_i 组成的特征向量矩阵。

第*k*个主要分量的方差贡献率为:

$$W_k = R_k / (R_1 + R_2 + \dots + R_m) \tag{7}$$

前*h*个主要分量($h < m$)对*m*(*k*)个分量总方差的贡献率,即累计方差贡献率为:

$$G_h = W_1 + W_2 + \dots + W_k \tag{8}$$

计算结果应进行显著性检验,通过显著性检验的特征向量最大限度的表征了某一区域气温变量场的变率分布结构。如果特征向量的各分量均为同一符号,则该区域变化趋势基本一致;如果特征向量的分量呈正负相间分布型式,则代表两种分布类型。

3 结果与分析

3.1 年平均气温、年降水量变化

从图2可以看出,近51年甘肃河东地区年平均气温呈明显的增加趋势,增温速率为0.32℃/10a,高于中国北方平均0.22℃/10a(任朝霞等, 2006)和全国平均0.25℃/10a(任国玉等, 2005)的增温速率,但低于西北地区平均0.37℃/10a的增温速率(王劲松等,

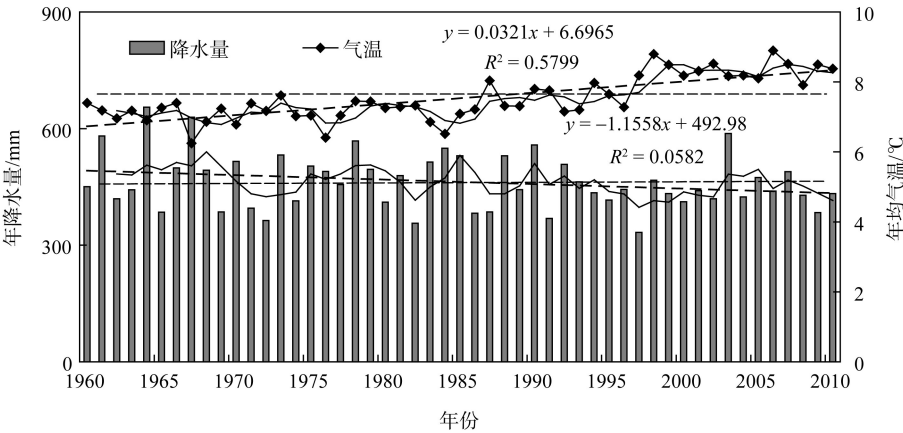


图2 1960-2010年甘肃河东地区气温、降水年际变化趋势

Fig. 2 Inter-annual variations of temperature and precipitation in Hedong region from 1960 to 2010

2008)。年平均气温在1987年之前偏低,以负距平为主,20世纪90年代中期以后,气温明显升高,基本都为正距平,特别是2001-2010年平均气温正距平达到0.76℃。通过5年滑动分析可知,最冷年出现在1967年,年均温为6.2℃,最暖年份出现在2006年,年均温为8.72℃。

在全球变暖的背景下,1960-2010年区内年降水量以11.56 mm/10a的倾向率减少($P>0.05$)(图2)。全区多年平均降水量为462.93 mm,平均降水量最低值为1997年的372.77 mm,比多年平均值低90.16 mm,最高值为1964年的677.51 mm,比多年平均值高214.6 mm,最高降水量与最低降水量相差达304.74 mm,可见,区域内降水差异比较显著。其中,1984年以前以正距平为主,1984年以后以负距平为主,说明自20世纪80年代中期以来降水显著减少。

3.2 年潜在蒸散量变化

甘肃河东地区年平均潜在蒸散量为873.68 mm,介于全国潜在蒸散量349~1490 mm/a之间,但区内差异较为明显,各地在728~1028 mm之间变化,其空间分布格局表现为“东部大于西部,山区大于高原”(图3a)。陇南山区为潜在蒸散的高值区,为900~1020 mm,以武都为主要代表站点;甘南草原、陇中高原南部潜在蒸散量较小,以合作和岷县为代表站点,其值在728~820 mm之间,是河东地区潜在蒸散量最小的区域。其他地区潜在蒸散量为:陇东高原900~980 mm,陇中高原800~920 mm。

从图3b可以看出,1960-2010年区内各地年潜在蒸散量(除环县外,倾向率为-0.92 mm/10a)均呈增加趋势,倾向率1.5~20.2 mm/10a之间,这与全国潜在蒸散量变化趋势相反,其中以武都为代表的陇南山区和以靖远为代表的陇中高原东北部潜在蒸

散量增加趋势比较明显。对比图3b和3a可以发现,河东地区潜在蒸散量高的区域也是蒸散趋势增加较明显的区域,平均年潜在蒸散量以10.63 mm/10a的速率增加,通过了0.01的显著性水平检验。

3.3 地表湿润指数的时空变化

3.3.1 湿润指数年际变化

1960年以来,甘肃河东地区年湿润指数呈波状减少趋势(图4),1992年之前以正距平为主,之后以负距平为主,表明在1992年以前地表相对湿润,之后相对干旱。不同季节的湿润指数年际变化也呈现不同的趋势。春季,湿润指数在20世纪60年代增大,之后减小,80年代中后期又增大,1992年之后呈减少趋势;60年代和80年代中后期以正距平为主,其他时段为负距平,表明1992年以来地表相对干旱。夏季,湿润指数在1996年之前变化平稳,之后呈波状下降趋势;60年代、80年代中后期和90年代以正距平为主,其他时段以负距平为主,表明70年代和1996年之后地表相对干旱。秋季,在1985年之前以正距平为主,之后以负距平为主,表明1985年之前地表相对湿润,之后相对干旱。冬季,在60年代和70、80、90年代后期以负距平为主,表明这些时段地表相对干旱,其他时段相对湿润。

区内年湿润指数的年际变化率为-0.02/10a, $R=0.2946$,通过了0.05的显著性水平检验,表明近51年来该区地表湿润状况呈轻微的下降趋势。春、夏、秋、冬4季湿润指数的年际变化率分别为-0.015/10a、-0.019/10a、-0.066/10a、0.08/10a,表明除冬季湿润指数变化趋势略有增加外,其他季节均呈减少趋势,其中秋季减少幅度最大,春季最小;春、夏、秋、冬4季湿润指数年际相关系数分别为0.1677、0.1522、0.3493和0.1888,表明河东地区地表湿润状况在秋季减少最为明显,春、夏季减少趋势不太明显。

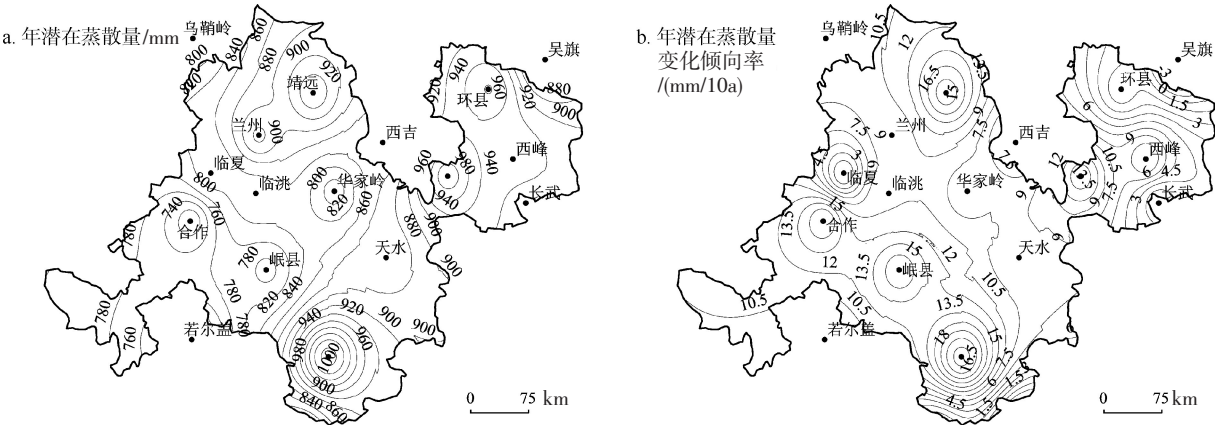


图3 1960-2010年甘肃河东地区地表潜在蒸散量(a)及其变化倾向率(b)空间分布
Fig. 3 Spatial pattern of annual ET_0 (a) and the trend of rate change (b) in Hedong region from 1960 to 2010

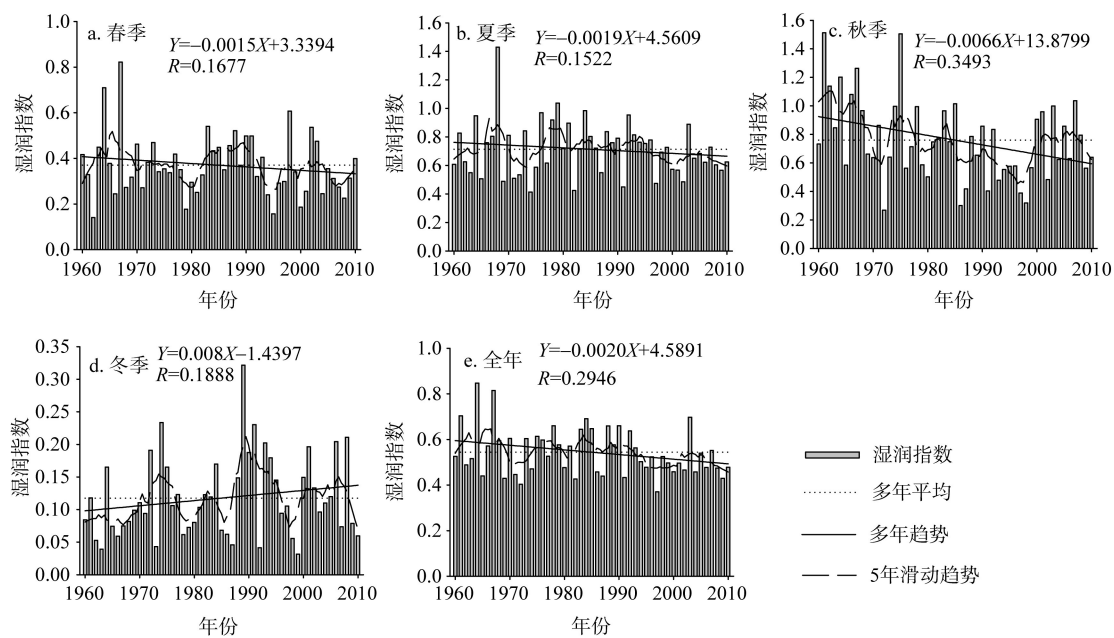


图4 1960-2010年甘肃河东地区地表湿润指数年际变化

Fig. 4 Inter-annual trends of the humidity index changes in different seasons and years in Hedong region from 1960 to 2010

3.3.2 湿润指数年代际变化

以湿润指数变化的突变年1994年(图5b)将甘肃河东地区湿润指数变化划分为1960-1993年和1994-2010年两个不同的时期,进行年代际变化分析(表2)。结果发现:在1994年以前甘肃河东地区年湿润指数表现为正距平,之后为负距平,且自20世纪60年代以来湿润指数有逐年减少的趋势,表明在1994年以前地表相对比较湿润,之后相对干旱,地表有逐年变干的趋势。对湿润指数分布函数进行研究(图5a),可以发现湿润指数也有同样的发展趋势,即在20世纪70、80年代呈上升趋势,地表相对湿润,90年代以后呈下降趋势,地表相对干旱。就各季节而言,春季、夏季和秋季湿润指数距平变化与全年变化基本一致,都呈变干趋势,但夏秋季湿润指数变干趋势明显快于全年和春季,冬季

湿润指数表现出与全年和其他季节湿润指数相反的趋势,湿润指数距平在1994年以前为负距平,之后为正距平,表明在1994年以前相对干旱,之后相对湿润,且地表有逐年变湿的趋势。河东地区地表湿润指数的季节变化趋势略有差异,但总体上呈现变干的趋势,这与贾文雄等(2010)、黄小燕等(2011)研究的地表干湿变化相反,表明西北地区干湿变化各区域和整体存在着一定的差异。

表2 1960–2010年间年湿润指数的季节和年代际距平
Tab. 2 Inter-decadal departure of the seasonal and annual average humidity index in Hedong region from 1960 to 2010

年代	全年	春季	夏季	秋季	冬季
1960-1993	0.024208	0.022858	0.027926	0.042175	-0.00133
1994-2010	-0.04842	-0.04572	-0.05585	-0.08435	0.00266

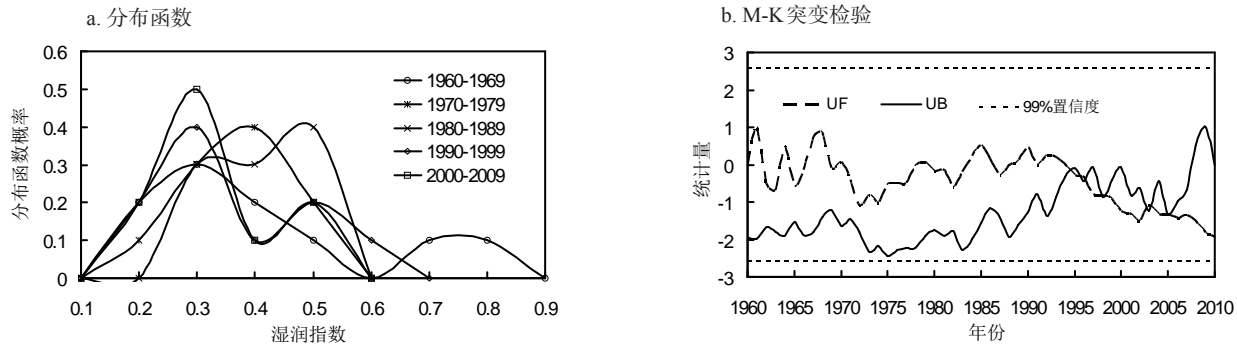


图5 1960-2010年河东地区地表湿润指数分布函数(a)和Mann-Kendall突变检验(b)

Fig 5. Probability distribution function of percentile-based annual humidity index and abrupt changes in Hedong from 1960 to 2010

3.3.3 湿润指数空间分布

从图 6a 可以看出,河东地区总体处于半湿润、半干旱气候区,气候湿润状况自东南向西北由半湿润向半干旱气候区过渡。河东地区多年平均湿润指数在 0.25~0.75 之间,表现出了明显的南北差异,从南到北呈减少趋势;南部高原、山区相对湿润,北部地区相对干旱,这与降水的分布规律基本一致。甘南高原东北部、陇南山区气候湿润指数在 0.5~0.72 之间,是河东最湿润的地区,主要是由于其所处纬度较低,较易受东南季风影响,降水量较多;陇中高原东北部的湿润指数在 0.25~0.40 之间,地表相对干旱,主要与降水量少、蒸发旺盛有关。湿润指数同时也表现出东西差异,即从东到西湿润程度减少,干旱趋势增加,如以西峰、平凉为代表站点的陇东地区湿润指数在 0.5~0.59 之间,明显高于陇中高原中北部。

如图 6b 所示,区内大部分地区年湿润指数表现为不显著的减少趋势,倾向率变化为 $-0.039 \sim 0/10a$ 。其中,陇中高原北部递减倾向率较小,以靖远、兰州和临夏为主要代表站点,倾向率为 $-0.014 \sim 0/10a$;陇东、陇中和甘南高原地区湿润指数相对减少明显。对照年湿润指数的空间分布(图 6a)可以发现,湿润指数较高的地区,其减少幅度相对较为明显,反之亦然。

3.3.4 湿润指数异常空间分布

图 7 是对河东地区 13 个站点 1960~2010 年湿润指数进行经验正交函数 EOF 分解的结果,可以发现其收敛性较快,EOF 两个载荷向量的累计方差为 70.75%,因此,前两个载荷向量场的分布情况可以反映河东地区湿润指数空间异常分布的基本特征。

图 7a 是第 1 特征向量空间分布图,方差贡献率为 59.41%,远远高于其他场的贡献率,说明第 1 特

征是河东地区湿润指数变化主要的分布型。全区的载荷向量一致为正,其载荷向量的高值区主要集中在甘南高原和陇中高原,说明河东地区的湿润指数变化表现为整体一致性。

图 7b 是第 2 特征向量空间分布图,方差贡献率为 11.34%,也明显高于之后其他场的贡献率。第 2 典型场的正值主要分布在研究区的中北部,即陇中高原区,兰州、靖远是两个显著的正值中心;其他地区均为负值,最主要的负值中心分布在陇东地区,以西峰、平凉站点最为明显,说明陇中高原区与其他区的湿润指数变化具有相反分布型式。

3.3.5 湿润指数周期分析和突变检验

图 8 为 1960~2010 年河东地区年地表湿润指数复值 Morlet 小波变换图和小波方差图,从图中对比可以看出,年湿润指数序列在 19 a 左右的周期为第一主周期,其次是 5 a、11 a,其中湿润指数在 19 a 左右振荡最为显著,并且贯穿于整个时间序列,5 a 左右的周期在 20 世纪 60 年代振荡较明显,11 a 左右的周期主要表现在 80 年代。

对 1960~2010 年湿润指数进行 Mann-Kendall 突变检验(图 5b),在 $\alpha=0.01$ 显著性水平下,UF 与 UB 相交于 1994 年左右,且交点在临界线之间,说明在 1994 年,河东地区发生了由湿向干的转变。这可能是由于西北地区东部自 20 世纪 80 年代中期以来降水量持续偏少所导致(宋连春等, 2003)。就季节突变而言,春季与年检验一致;夏季在 1997 年左右发生突变;秋、冬季在 1970 年附近有突变点。

4 地表湿润指数气候影响因子分析

湿润指数的变化很大程度上取决于降水和潜在蒸散量两个分量的变化。近 51 年来,甘肃河东

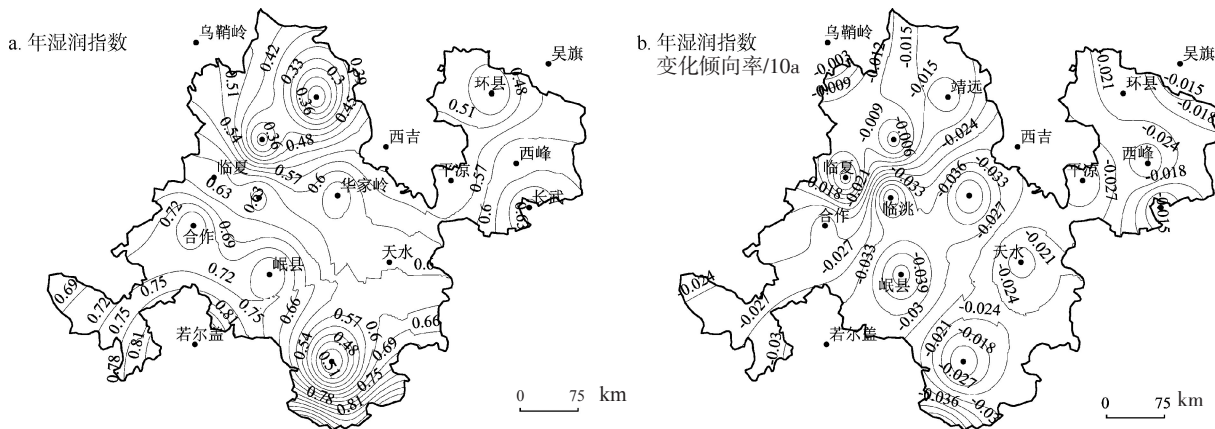


图 6 1960~2010 年河东地区地表湿润指数(a)及其变化倾向率(b)空间分布

Fig. 6 Spatial pattern of annual humidity index (a) and the trend of rate change (b) in Hedong region from 1960 to 2010

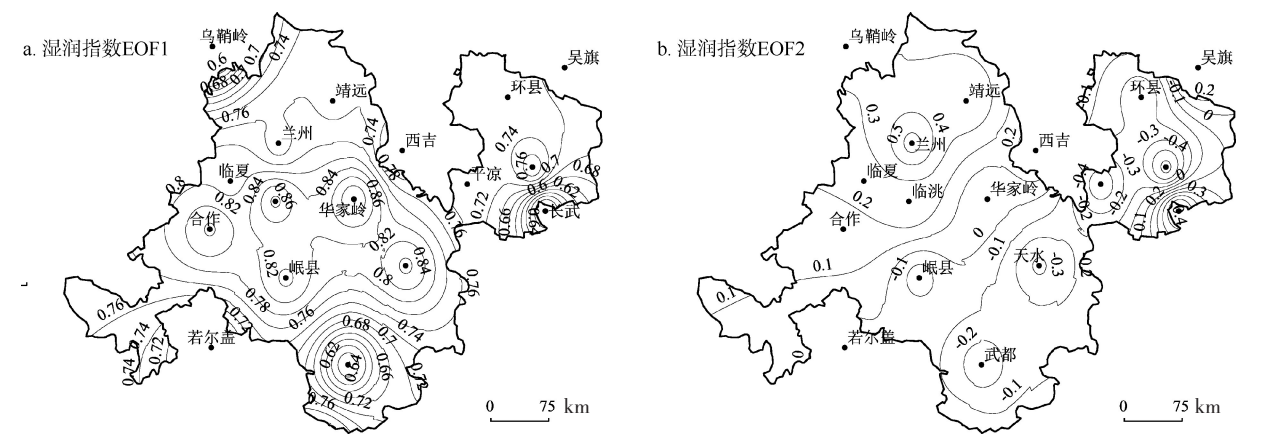


图7 甘肃河东地区湿润指数EOF分解前2个方差最大的载荷向量场

Fig. 7 The first two loading vector fields in EOF analysis for annual humid index in Hedong region

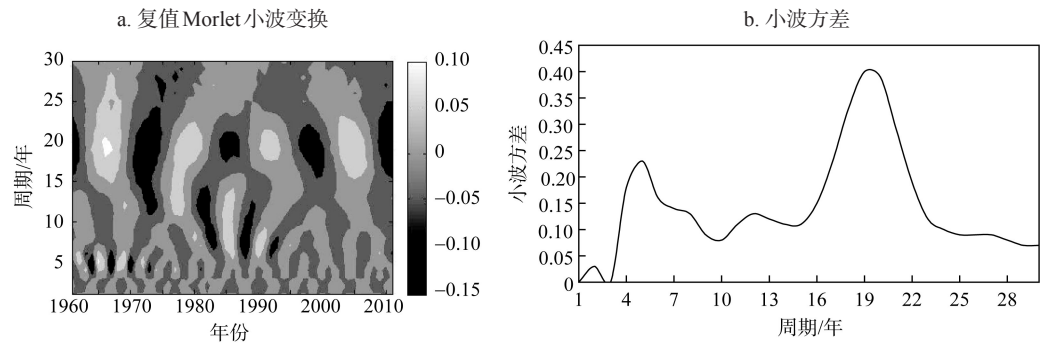


图8 1960-2010年地表湿润指数序列的复值Morlet小波变换(a)和小波方差(b)图

Fig. 8 Complex Morlet wavelet and the vavelet variance of humidity index in Hedong region from 1960 to 2010

地区年降水量和蒸散量发生了明显的变化,而气候的干湿程度很大程度上取决于这两个分量的变化速率,同时潜在蒸散量的变化也受到各种气象要素的综合作用,为了分析河东地区湿润指数变化的原因,需对各要素和湿润指数综合分析。

表3是对河东地区湿润指数与各气候因子作的相关分析。湿润指数与降水量、相对湿度呈显著正相关,且都通过了0.01的显著性水平检验,与降水量相关性最大的发生在冬季, $R=0.989$;与相对湿度相关性最大的发生在夏季, $R=0.737$,说明降水量和相对湿度的增加都会导致湿润指数的增大,同时与最低气温(除夏季)也呈正相关,但相关性不显

著。湿润指数与日照时数、潜在蒸散、和最高气温呈显著负相关,与日照时数的相关系数在 -0.574 (除夏季)以上,秋季相关系数最大,为 -0.798 ,并通过了0.01的显著性水平检验;与潜在蒸散量的相关系数最大也发生在秋季,为 $-0.846(P<0.01)$,说明日照时数在湿润指数减少趋势中起着重要的作用,同时潜在蒸散和最高气温的减少也有利于湿润指数的提高。湿润指数与平均风速在冬季呈正相关,但没有通过显著性水平,其他3季为负相关,特别是夏季相关系数为 $-0.363(P<0.01)$,说明风速增大,使空气中的水分容易失去,地表湿润指数减少。湿润指数与平均气温也呈负相关,夏季相关系数最大,

表3 1960–2010年河东地区地表湿润指数与各要素的相关系数

Tab. 3 Correlation coefficient between humidity index and meteorological elements in Hedong region from 1960 to 2010

	降水量	平均气温	最高气温	最低气温	相对湿度	平均风速	日照时数	潜在蒸散量
年	0.979**	-0.462**	-0.602**	0.024	0.522**	-0.342*	-0.577**	-0.749**
春季	0.986**	-0.248	-0.415**	0.363**	0.511**	-0.259	-0.574**	-0.648**
夏季	0.971**	-0.61**	-0.647**	-0.26	0.737**	-0.363**	-0.414**	-0.665**
秋季	0.987**	-0.311*	-0.695**	0.335*	0.542**	-0.147	-0.798**	-0.846**
冬季	0.989**	-0.226	-0.509**	0.064	0.502**	0.164	-0.783**	-0.651**

注:*表示通过了0.05置信度检验;**表示通过了0.01置信度检验。

为 $-0.61(P<0.01)$,说明气温升高,蒸散量增大,湿润指数下降。从相关程度分析得出:湿润指数的变化是气候各因子综合作用的结果,降水量、相对湿度的增加和日照时数、潜在蒸散的减少对湿润指数的增加起着重要的作用,其次是风速和气温。

5 结论与讨论

5.1 结论

应用 Penman-Monteith 公式计算近 51 年甘肃河东地区潜在蒸散量和地表湿润指数,分析了湿润指数的变化特征,并讨论影响地表湿润指数变化的气象因子,得出以下结论:

(1) 近 51 年河东地区气温表现为显著的增加趋势,其增幅为 $0.32^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,特别是近 10 年来增幅尤为明显;年降水量以 $11.56\text{ mm}/10\text{a}$ 的速率呈下降趋势,且区域内降水差异比较明显;潜在蒸散量空间分布上表现为“东部大于西部,山区大于高原”的格局,且年潜在蒸散量以 $10.63\text{ mm}/10\text{a}$ 的速率增加,并通过 0.01 的置信度检验。

(2) 1960-2010 年间,河东地区年地表湿润指数以 $0.02/10\text{a}$ 的速率呈下降趋势,空间分布上表现出明显的南北差异,从南到北呈减少趋势;就季节而言,春、夏、秋、冬 4 季湿润指数的年际变化率分别为 $-0.015/10\text{a}$ 、 $-0.019/10\text{a}$ 、 $-0.066/10\text{a}$ 、 $0.08/10\text{a}$,除冬季湿润指数呈增加趋势外,其他季节均呈减少趋势,其中秋季减少幅度最大,春季最小。

(3) 就年代际而言,自 20 世纪 60 年代以来湿润指数有逐年减少的趋势,90 年代以前地表相对湿润,之后相对干旱,且地表有逐年变干的趋势;年湿润指数空间异常分布主要表现为“全区一致性”和“南北反向变化”两种模态,并以“全区一致性”为主;年地表湿润指数存在着 19 a、5 a 和 11 a 左右的变化周期,并以 19 a 左右的周期最为显著,年际振荡特征明显,并于 1994 年左右发生了由湿向干的转变。

(4) 影响地表湿润指数的气候因素很多,湿润指数与降水量、相对湿度呈显著正相关,与日照时数、潜在蒸散和最高气温呈显著负相关。不同因素在不同季节对地表湿润指数影响程度不同,冬季降水量和夏季相对湿度的变化对地表湿润指数的升降有重要影响,秋季日照时数和秋季潜在蒸散量变化对湿润指数的影响也较大。此外,也与人类的过度开发,天然植被覆盖率下降相关。

5.2 讨论

潜在蒸散量是指充分供水条件下的区域蒸散发的能力(Allen et al, 1998),在全球变暖的背景下,近 50 年来世界各地的潜在蒸散量大多呈下降趋势(Peterson et al, 1995)。刘昌明等(2011)分析了中国地表潜在蒸散发敏感性时空变化特征,指出中国除松花江和黄河流域片区外,年平均蒸散量均呈下降趋势;高歌等(2006)、尹云鹤等(2005)、曾燕等(2003)也指出我国蒸散量呈减少趋势;靳亚等(2004)指出中国西北地区蒸散量减少趋势显著。而本文对河东地区潜在蒸散发分析的结果与此有所不同,即 1960-2010 年河东地区潜在蒸散量以 $10.63\text{ mm}/10\text{a}$ 的速率增加,这与近 51 年来中国西部地区东部降水量减少和气温升高有关(施雅风等, 2002; 张翀等, 2010),也与本地区人口增加,过度开发、天然植被覆盖率下降有关。

本文研究了近 51 年甘肃河东地区地表湿润指数变化特征。整体来说,地表湿润指数呈下降趋势,半干旱区面积扩大,半湿润面积缩小,气候呈干旱化趋势发展。这与王菱等(2004)、王鹏祥等(2007)的研究结果是一致的。甘肃河东地区地表湿润指数变化规律表明,它与全国尺度上平均气温升高和降水量减少有密切关系,这可能直接影响潜在蒸发和地表水分亏缺状况,将进一步导致地表干燥程度加剧,水分亏缺量加大。同时,空气湿度、日照时间、平均风速都是影响湿润指数的重要因素,相关分析显示:日照时数与湿润指数呈显著负相关,随着河东地区降雨量的减少,日照时间延长,这将加强地表蒸散和干旱的程度。此外,地表的干旱化趋向导致农作物受旱面积扩大,病虫害繁衍加速,引起农作物产量下降,对未来农业生产和自然环境有一定的影响,因此必须加强研究,采取相应措施提高应对干旱化的能力,促使河东地区农业得到持续稳定的发展。

参考文献(References)

- Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. 1998. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO.
- Du J, Hu J, Chen H, et al. 2006. Trend of surface humid index in the middle reaches of the Yarlung Zangbo River over Tibet in recent 40 years. *Journal of Natural Resources*, 21 (2): 196-204. [杜军, 胡军, 陈华, 等. 2006. 雅鲁藏布江中游地表湿润状况的趋势分析. *自然资源学报*, 21(2): 196-204.]

- Gao G, Chen D L, Ren G Y. 2006. Trend of potential evapotranspiration over China during 1956 to 2000. *Geographical Research*, 25(3): 378-387. [高歌, 陈德亮, 任国玉. 1956-2000年中国潜在蒸散量变化趋势. 地理研究, 25(3): 378-387.]
- Gavilan P, Castillo-Llanque F. Estimating reference evapotranspiration with atmometers in a semiarid environment. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(3): 465-473.
- Huang X Y, Zhang M J, Jia W X, et al. 2011. Variations of surface humidity and its influential factors in northwest China. *Advances in Water Science*, 22(2): 151-159. [黄小燕, 张明军, 贾文雄, 等. 2011. 中国西北地区地表干湿变化及影响因素. 水科学进展, 22(2): 151-159.]
- IPCC. 2007. Summary of Policymakers of Synthesis Report of the IPCC Forth Assessment Report. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Jia W X, He Y Q, Li Z X, et al. 2010. Temporal and spatial characteristics of dry-wet conditions from 1960 to 2006 in Qilian mountains and Hexi corridor. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 35(2): 265-276. [贾文雄, 何元庆, 李宗省, 等. 2010. 祁连山及河西走廊地表干湿变化的时空分布. 地球科学: 中国地质大学学报, 35(2): 265-276.]
- Jin L Y, Li J, Wang X, et al. 2004. The temporal and spatial distribution of surface dry-wet conditions over Northwestern China in recent 50 years. *Acta Geographica Sinica*, 59(6): 847-854. [靳立亚, 李静, 王新, 等. 2004. 近50年来中国西北地区干湿状况时空分布. 地理学报, 59(6): 847-854.]
- Liu C M, Zhang D. 2011. Temporal and spatial change analysis of the sensitivity of potential evapotranspiration to meteorological influencing factors in China. *Acta Geographica Sinica*, 66(5): 579-588. [刘昌明, 张丹. 2011. 中国地表潜在蒸散敏感性的时空变化特征分析. 地理学报, 66(5): 579-588.]
- Ma Z G, Fu Z B. 2001. Trend of surface humid index in the arid area of northern China. *Meteorologica Sinica*, 59(6): 737-746. [马柱国, 符淙斌. 2001. 中国北方干旱区地表湿润状况的趋势分析. 气象学报, 59(6): 737-746.]
- Ma Z G. 2005. Dry/wet variation and its relationship with regional warming in arid-regions of northern China. *Chinese Journal of Geophysics*, 48(5): 1011-1018. [马柱国. 2005. 我国北方干湿演变规律及其与区域增暖的可能联系. 地球物理学报, 48(5): 1011-1018.]
- Pearson K. 1901. On lines and plans of closet fit system of points in space philos. *Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, (2): 33-41.
- Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y. 1995. Evaporation losing its strength. *Nature*, 377: 687-688.
- Ren G Y, Chu Z Y, Zhou Y Q, et al. 2005. Recent progresses in studies of regional temperature changes in China. *Climatic and Environmental Research*, 10(4): 701-716. [任国玉, 初子莹, 周雅清, 等. 2005. 中国气温变化研究最新进展. 气候与环境研究, 10(4): 701-716.]
- Ren Z X, Yang D Y. 2006. Climate change trend of northwest arid area in recent 50 years. *Quaternary Sciences*, 26(2): 299-300. [任朝霞, 杨达源. 2006. 近50a西北干旱区气候变化趋势研究. 第四纪研究, 26(2): 299-300.]
- Shen S H, Zhang F M, Sheng Q. 2009. Spatio-temporal changes of wetness index in China from 1975 to 2004. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 25(1): 11-15. [申双和, 张方敏, 盛琼. 2009. 1975-2004年中国湿润指数时空变化特征. 农业工程学报, 25(1): 11-15.]
- Shi Y F, Shen Y P, Hu R J. 2002. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in northwest China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 24(3): 199-225. [施雅凤, 沈永平, 胡汝骥. 2002. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前进初步探讨. 冰川冻土, 24(3): 199-225.]
- Song L C, Zhang C J. 2003. Changing features of precipitation over northwest China during the 20th century. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 25(2): 143-148. [宋连春, 张存杰. 2003. 20世纪西北地区降水量变化特征. 冰川冻土, 25(2): 143-148.]
- Wang J S, Fei X L, Wei F. 2008. Further study of temperature change in Northwest China in recent 50 years. *Journal of Desert Research*, 28(4): 724-732. [王劲松, 费晓玲, 魏锋. 2008. 中国西北近50a来气温变化特征的进一步研究. 中国沙漠, 28(4): 724-732.]
- Wang P X, He J H, Zheng Y F, et al. 2007. Aridity-wetness characteristics over Northwest China in recent 44 years. *Journal of Applied Meteorological Science*, 18(6): 771-773. [王鹏祥, 何金海, 郑有飞, 等. 2007. 近44年来我国西北地区干湿特征分析. 应用气象学报, 18(6): 771-773.]
- Wang L, Xie X Q, Li Y S, et al. 2004. Changes of humid index and borderline of wet and dry climate zone in northern China over the past 40 years. *Geographical Research*, 2004, 23(1): 45-54. [王菱, 谢贤群, 李运生, 等. 2004. 中国北方地区40年来湿润指数和气候干湿带界线的变化. 地理研究, 23(1): 45-54.]
- Wei F Y. 1999. Modern climate statistical diagnosis and prediction technology. Beijing: China Meteorological Press, 115-112. [魏凤英. 1999. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社: 115-112.]
- Wu S H, Yin Y H, Zheng D, et al. 2005. Climate changes in the Tibetan Plateau during the last three decades. *Geographica Sinica*, 60(1): 3-11. [吴绍洪, 尹云鹤, 郑度, 等. 2005. 青藏高原近30年气候变化趋势. 地理学报, 60(1): 3-11.]
- Yin Y H, Wu S H, Zheng D. 2005. Dry/wet conditions change

- of China regional differences in recent 30 years. Chinese Science Bulletin, 50(15): 1636-1642. [尹云鹤, 吴绍洪, 郑度. 2005. 近30年我国干湿状况变化的区域差异. 科学通报, 50(15):1636-1642.]
- Xu Q F, Gao Q J, Shi Y, et al. 2011. Analysis on total cloud cover change of five provinces in central China last 47 years based on EOF method. Chinese Journal of Agrometeorology, 32(4): 507-513. [徐琼芳, 高庆九, 石燕, 等. 2011. 基于EOF方法的华中五省近47年总云量变化分析. 中国农业气象, 32(4): 507-513.]
- Zhang C, Li J, Ren Z Y, et al. 2010. Spatial and temporal characteristics of precipitation changes from 1962 to 2000 in northwestern China. Resources Science, 32(12): 2298-2304. [张翀, 李晶, 任志远. 2010. 西北地区1962年至2000年降水量变化的时空特征分析. 资源科学, 32(12): 2298-2304.]
- Zuo D K, Wang Y X, Chen J S. 1993. The space distribution characteristic of China solar total radiation//Zheng D, Zuo D K. Geographical research paper. Beijing: Science Press: 168-185. [左大康, 王懿贤, 陈建绥. 1993. 中国地区太阳总辐射的空间分布特征//郑度, 左大康地理研究论文选. 北京: 科学出版社: 168-185.]
- Zhang X D, Mi X D, Xin J W, et al. 2009. Analysis of the agriculture index temperature based on DEM: A case study in Hedong region of Gansu province. Journal of Glaciology and Geocryology, 31(5): 880-884. [张旭东, 秘晓东, 辛吉武, 等. 2009. 基于DEM的农业指标温度分析. 冰川冻土, 31(5): 880-884.]
- Zeng Y, Liu C M, Qiu X F. 2003. Water resources analysis based on climatic indices. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Science, 20(4): 458-463. [曾燕, 刘昌明, 邱新发. 2003. 从气候角度分析西北地区水资源状况. 中国科学院研究生院学报, 20(4): 458-463.]

Surface humidity index and the impacting climatic factors in Hedong region of Gansu province

ZHAO Yifei¹, ZHANG Bo¹, ZHANG Duoyong^{1,2}, ZHANG Jianxiang¹, HE Xuqiang¹, SUN Liwei¹

(1. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;

2. Longdong University, Qingyang 745600, China)

Abstract: Based on the climatic factors, such as daily maximum temperature, minimum temperature, precipitation, relative humidity, wind speed and sunshine duration, measured daily at 13 stations from 1960-2010 in Hedong region of Gansu province, potential evaporation is calculated for the region using the UN Food and Agriculture Organization(FAO) Penman-Monteith model, which allows the calculation of the surface humidity index for the location of each station. The characteristics of spatial-temporal variations of the humidity index are then analyzed by using the linear regression, Morlet wavelet, Empirical Orthogonal Function(EOF) and Inverse Distance Weighted(IDW) methods, and the climatic factors impacting the surface humidity index are investigated. The results indicate that the study region was wetter before 1992, and the humidity index has been in a downward trend since 1960s, with an interannual decreasing rate of 0.02/10a in the last 51 years and a correlation coefficient of 0.2946($P < 0.05$). With the exception of slight increase in winter season, the humidity index decreased in other three seasons. The spatial pattern of the change of humidity index of the study region showed clear difference between the south and the north, with the humidity index decreasing from south to north. The abnormal spatial pattern resides in two aspects: the uniformity of the whole area, and the opposite changes in the south and the north. In the meantime, the periods of 19a, 5a and 11a also existed for interannual changes of the humidity index, with the turning point from wet to dry in the year of 1994. Furthermore, in the past 51 years, the climatic factors showed different impacts on the humidity index change in different seasons; the humidity index had positive correlations with precipitation and relative humidity, but negative correlations with sunshine duration, potential evaporation, wind speed and maximum temperature.

Key words: Penman-Monteith model; potential evapotranspiration; humidity index; impacting factor; Hedong region; Gansu province