

# 柴达木盆地地表湿润特征及气候因子影响分析

张嘉琪, 任志远

(陕西师范大学 旅游与环境学院, 西安 710119)

**摘 要:**基于 Penman-Monteith 模型计算出的潜在蒸散量得出柴达木盆地各站点的湿润指数,运用 Sen 趋势, Mann-Kendall 检验, EOF 模型分析了 34 a 湿润指数的时空变化趋势,运用偏相关分析方法讨论了影响地表湿润程度变化的气候因子。结果表明:从时间变化来看,34 a 间柴达木盆地地表湿润指数表现为增加趋势,倾向率为  $0.00097 \text{ a}^{-1}$ ,并在 1987 年前后发生突变。从空间变化来看,主要表现为由东向西逐渐递减。异常空间分布模态主要分为“东西空间差异”和“南北反向差异”两个类型,且这两种分布型呈上升趋势。湿润指数与降水量、相对湿度、日照时数呈正偏相关,与平均气温、平均风速呈显著负偏相关。降水量和相对湿度是影响湿润指数上升最显著的因素。

**关键词:**湿润指数; EOF; 偏相关; 柴达木盆地

**中图分类号:** P468

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2015)01-0133-07

## Analysis on Surface Humidity Index and Climatic Impacting Factors in Qaidam Basin

ZHANG Jiaqi, REN Zhiyuan

(College of Tourism and Environmental Sciences, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** In this paper, potential evaporation was calculated by using Penman-Monteith model, which generates the surface humidity index for the Qaidam Basin of each station. The characteristics of spatiotemporal variations of the humidity index were analyzed by using the Sen's method, the Mann-Kendall test, Empirical Orthogonal Function(EOF) in Qaidam Basin during 34 years. Based on these, the climatic factors impacting the level of surface humidity were investigated by partial correlation methods. The results showed as follows: During the period of 34 years, the humidity index in Qaidam Basin presented an increasing trend with an interannual decrease rate of  $0.00097 \text{ a}^{-1}$ , and the abrupt change happened in 1987. The spatial distribution showed a decreasing trend from east to west. The abnormal spatial pattern resides in two aspects: the difference of spatial in the east to the west, and the opposite changes in the south and the north, and the tendency of these two kinds of distribution presented an increasing trend. The humidity index had positive partial correlations with precipitation, relative humidity and sunshine duration, but negative partial correlations with average temperature and average wind speed. Precipitation and relative humidity were the main factors affecting the humidity index.

**Keywords:** humidity index; EOF; partial correlation; Qaidam Basin

全球环境变化(特别是气候变化)是当前科学界和决策界的关注热点<sup>[1]</sup>。IPCC 第 5 次评估报告中指出:近 110 年(1901—2012 年)全球平均地表温度上升了  $0.89^\circ\text{C}$  (IPCC, 2013)。全球变暖使水循环过程变化速度加快,对地表的水热平衡状况产生影响,使地表干湿状况以及生态环境系统发生改变。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<sup>[2-4]</sup>。而研究湿润指数的长期变化有助于了解在全球变暖背景下气候干湿状况的演变特征,它能够客观地反映某一地区的水热平衡状况,优点在于综合考虑

温度、降水对水分收支的影响,在区域生态景观区划以及生态环境评价中具有重要意义。其有相关文献表明,湿润指数作为一个理想的指标在中国典型干旱区研究中得到较好的应用<sup>[5]</sup>。

柴达木盆地是我国的干旱半干旱气候区,地处西北内陆,受夏季风影响较弱,加之青藏高原的隆升阻挡了来自印度洋、孟加拉湾的水汽,使得该地成为青藏高原气候变化最为敏感的地区,其水热平衡状况必将会影响到整个青藏高原干湿状况的变化。近年来国内外基于湿润指数进行区域干湿状况的研究已取

得大量成果,并就暖湿化与暖干化趋势进行了广泛的讨论<sup>[6-8]</sup>。柴达木盆地湿润程度的变化趋势也得到了—定的关注,有大量文献表明自 20 世纪 80 年代中后期以来该区域正在由暖干化向暖湿化转型<sup>[9-12]</sup>,但大多数学者对该区域的干湿程度研究仅就气温降水的时空变化进行讨论,利用湿润指数讨论干湿变化空间差异的研究还很少。因此,本文以湿润指数来研究柴达木盆地地表干湿状况的时空演变特征,在研究 1977—2010 年时空变化的基础上,讨论各个气候因子的演变趋势,研究地表湿润状况特征与气象因子的关系,更好地揭示在气候变暖的背景下柴达木盆地干湿程度分布的空间差异性,为该区内区域变化甚至青藏高原气候的变化研究提供参考。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区概况

柴达木盆地位于青藏高原北部,海拔高度 2 675 ~ 3 350 m,是我国四大盆地海拔最高的高原型盆地,总面积约 275 000 km<sup>2</sup>。地处青海省西北部,东临青海省的海北和海南两个自治州,西达新疆,南通西藏,北抵甘肃,地理位置在东经 90°16′—99°16′、北纬 35°00′—39°20′,位于中纬度西风带和东亚季风系统的交界地带。属西北干旱区,典型的高原大陆性气候。盆地内年平均气温为 2℃,但年内变化差异较大,最低在 1 月份,平均为 -15~-10℃,最高在 7 月份,平均为 15~17℃。年降水量的地域分布不均匀,大部分地区在 150~300 mm,中心地区年降水量小于 50 mm,西北部仅为 25 mm 左右。盆地内太阳辐射强,日照时数在 3 100 h 以上。

### 1.2 数据来源

选取柴达木盆地 8 个气象站点(大柴旦、德令哈、都兰、格尔木、冷湖、茫崖、诺木洪、小灶火)1977—2010 年逐日平均气温、最高气温、最低气温、气压、相对湿度、风速、日照时数资料。统计基本气候要素的月、季、年平均序列资料,季节划分:3—5 月为春季、6—8 月为夏季、9—11 月为秋季、12 月—翌年 2 月为冬季。上述数据由中国气象局国家气象信息中心(<http://www.nmic.gov.cn>)提供。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 湿润指数(K) 湿润指数的计算基于下式:

$$K = R/ET$$

式中:R——月降水量(mm/d);ET——月潜在蒸散量(mm/d);其中对于 ET 的计算采用联合国粮农组织(FAO)推荐的计算蒸散量的标准方法 Penman-Monteith 模型。P-M 模型是目前公认的无论在湿润还

是干旱地区计算潜在蒸散量精度较高的方法之一。许多研究结果也表明在不同的气候条件下 P-M 公式计算的潜在蒸散量都与实测值非常接近<sup>[13-17]</sup>。

计算公式如下:

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

其中:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

$$R_{ns} = (1 - \alpha) \left( a + b \frac{n}{N} \right) R_a$$

$$R_{nl} = \sigma \left[ \frac{T_{\max,k}^4 + T_{\min,k}^4}{2} \right] \cdot (c - d \sqrt{e_a}) \left( e \frac{R_s}{R_{so}} - f \right) \quad (2)$$

$$G = 0.14(T_{i+1} - T_{i-1}) \quad (3)$$

式中:ET——潜在蒸散量(mm/d); $R_n$ ——净辐射[MJ/(m<sup>2</sup>·d)]; $R_{ns}$ ——净短波辐射; $R_{nl}$ ——净长波辐射; $G$ ——土壤热通量密度[MJ/(m<sup>2</sup>·d)]; $\gamma$ ——干湿常数(kPa/℃); $\Delta$ ——饱和水汽压曲线斜率(kPa/℃); $T$ ——月平均气温(℃); $U_2$ ——2 m 高处风速(m/s); $e_s$ ——饱和水汽压(kPa); $e_a$ ——实际水汽压(kPa); $\sigma$ ——Stefan-Boltzmann 常数( $4.903 \times 10^{-9}$  MJ/(K<sup>4</sup>·m<sup>2</sup>·d)); $R_a$ ——大气顶层的太阳辐射[MJ/(m<sup>2</sup>·d)]; $n$ ——实际日照时数(h); $N$ ——最大日照时数(h); $\alpha$ ——地表反射率,取值 0.23; $T_{\max,k}$ ——最高绝对气温(K); $T_{\min,k}$ ——最低绝对气温(K); $a$ ——云全部遮盖下( $n=0$ )大气外界辐射到达地面的分量; $b$ ——晴天( $n=N$ )大气外界辐射到达地面的分量。这里  $a$  和  $b$  的取值没有采用 FAO 推荐的值( $a=0.25, b=0.5$ ),而是根据祝昌汉的研究<sup>[18]</sup>按照青藏高原区给出经验系数,柴达木盆地属于青藏高原的一部分,这样取值更符合研究区实际情况( $a=0.183, b=0.681$ ),其余各项参数的计算均采用 FAO 的标准; $i$ ——月份; $T_{i+1}, T_{i-1}$ ——第  $i+1, i-1$  月的气温(℃)。

干湿状况的划分基于《联合国关于在发生严重干旱和/或荒漠化的国家特别是在非洲防治荒漠化的公约》<sup>[19]</sup>制定的中国干湿气候分区标准。其中: $K < 0.03$  极干旱气候区; $0.03 < K < 0.2$  干旱气候区; $0.2 < K < 0.5$  半干旱气候区; $0.5 < K < 1.0$  半湿润气候区; $K > 1$  湿润气候区。

1.3.2 EOF EOF (Empirical Orthogonal Function),称为经验正交函数分解,是一种分析矩阵数据结构特征,提取主要数据特征向量的方法。这种分析方法是对时空数据变量矩阵进行正交函数展开,将变量场分解为正交空间场与正交空间系数的乘积,实现给定模态的时空变化规律。公式如下:

$$S(x,y,t)=\sum V_n(x,y)T_n(t)$$

式中: $S(x,y,t)$ —— $m\times n$ 的矩阵,代表  $m$  个空间点  $n$  次观测值构成的变量; $V_n(x,y)$ —— $m\times n$  的空间特征向量; $T_n(t)$ —— $m\times n$  的时间系数特征向量; $n$ ——第  $n$  个模态的时空分布特征。本研究根据经验正交函数原理,将湿润指数分解成空间分布和时间系数并得出二者的特征值,将特征值由大到小排列,根据 North 检验方法对特征向量进行显著性检验,选取前 34 个主要模态,再根据 Scree 检验规则,选取其中 4 个主要模态来解释二者的时空变化。

1.3.3 偏相关分析 偏相关分析是对其他变量的影响进行控制的条件下,研究多个变量中某两个变量之间的线性相关程度。此方法考虑了各变量之间的相互影响,比起相关分析能够合理地描述两个变量间实际的相关程度。本研究通过 Matlab 软件进行偏相关系数的计算。

2 结果与分析

2.1 湿润指数时空变化特征

2.1.1 湿润指数年际变化及四季变化特征 研究期间,柴达木盆地的湿润指数呈波状增加趋势,增加速率为  $0.000\ 97\ a^{-1}$ ,相关系数为  $0.120\ 8$ ,未通过显著性检验。7 a 滑动平均变化趋势大致可分为 3 个阶段,1990 年前上升趋势最为显著,90 年代有所下降,之后缓慢上升,最大的波峰值出现在 1989 年和 2003 年。湿润指数的变化受降水量和潜在蒸散这两个气

候因素变化速率的制约,计算得到研究区内平均降水量由 70 年代末的 82.3 mm 增加到 2000 年代的 106.6 mm,34 a 间增加速率达  $0.736\ mm/a$ 。蒸散量整体呈波浪型减小趋势,变化速率为  $-3.03\ mm/a$ ,自 1977—2000 年代平均潜在蒸散量下降了近 100 mm。可见蒸散量的下降速度比降水量增加的速度快,加之气温正在以每年  $0.077\ ^\circ C$  的速度在上升,使研究区内近年来暖湿化趋势愈加明显。对 1977—2010 年湿润指数进行 Mann-Kendall 突变检验可知,在  $\alpha=0.05$  的显著性水平下, $UF_k$  与  $UB_k$  相交于 1987 年左右,且交点在临界线之间,说明在 1987 年柴达木盆地发生了由湿向干的转变,这可能是由于当年的降水量偏少而气温较高造成蒸发旺盛所导致的。

不同季节的湿润指数( $K$  值)年际变化也存在着显著差异(图 1)。夏季的湿润指数最大,多年平均值为  $0.168\ 4$ ,其次是冬( $0.076\ 6$ )春( $0.074\ 3$ )季,秋季( $0.062\ 4$ )最低。相对于湿润指数的年际变化而言,夏季(倾向率为  $0.001\ 5\ a^{-1}$ )和冬季(倾向率为  $0.000\ 3\ a^{-1}$ )的变化趋势与年际变化相类似,先后经历了“增加—减少—增加”的趋势,变化幅度较为平缓。春季增减变化趋势相比夏季、冬季更为明显,各个阶段的变化速率较大,但整体变化速率却为  $0.000\ 3\ a^{-1}$ 。秋季的湿润指数变化倾向率最大( $0.001\ 5\ a^{-1}$ ),变化趋势与其他季节不同,先后经历了“减少—增加”的趋势。从整体来看,夏季是湿润程度最高的季节,秋季是湿润化程度最快的季节。

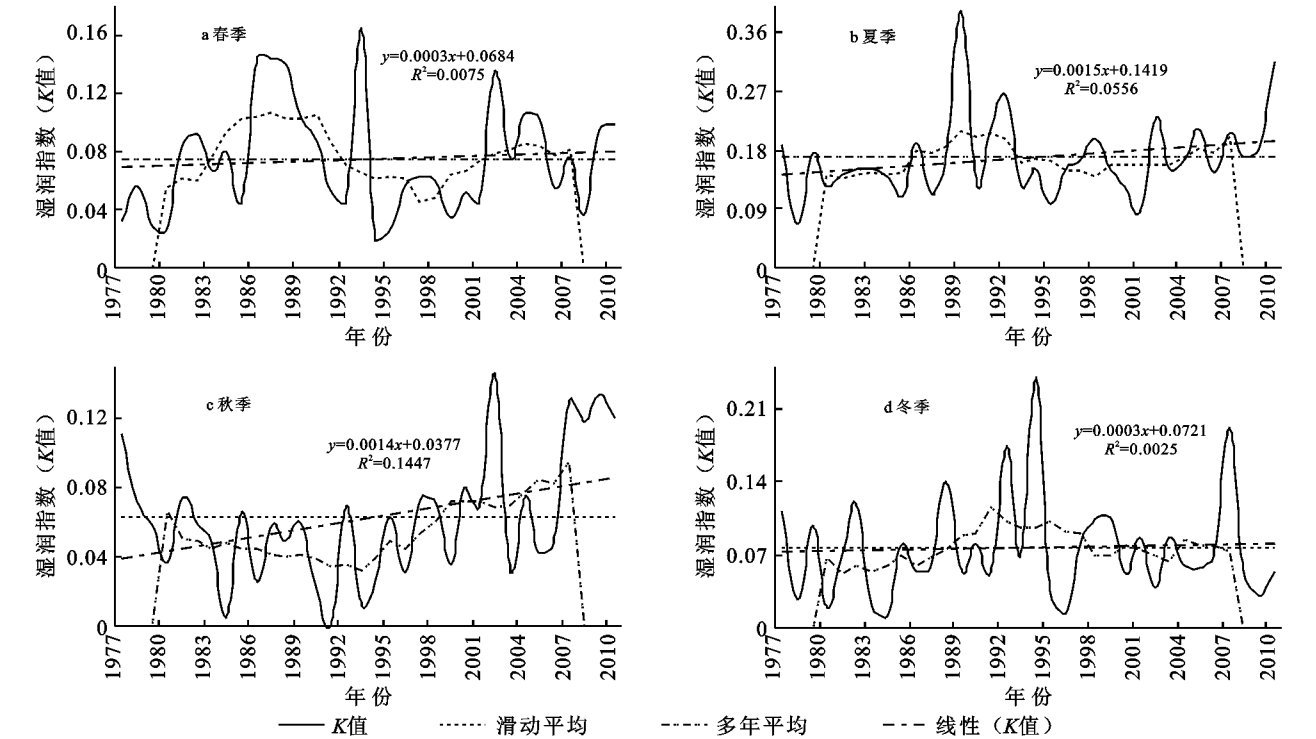


图 1 湿润指数四季变化趋势

2.1.2 湿润指数的空间分布特征及变化倾向率 柴达木盆地湿润指数的空间分布主要表现为东西部差异(图 2a),湿润程度由东向西逐渐递减,各站点平均湿润指数为 0.01~0.23。东部德令哈和都兰地区属干旱半干旱气候区,向西逐渐过渡为干旱气候区,冷湖和小灶火地区为极干旱区。这与降水量的分布规律基本一致。干湿程度的分布与当地地理位置和地理环境差异是密不可分的,由于该地盛行西风,西部受风速的影响较大,强化了该地的干旱程度。东部由于受青藏高原地形的影响,西风的北支气流与南支气流在青藏高原东部汇合,形成准静止气团,而柴达木盆地的东部处于青藏高原东北部,距离湿润气流较

近,因而湿润程度比西部高。

如图 2b 所示,柴达木盆地内湿润指数年际变化总体上呈弱的增加趋势,倾向率为  $0.000\ 97\ a^{-1}$  [ $0.000\ 13\ a^{-1}\sim0.003\ 43\ a^{-1}$ ]。其中东北部的德令哈地区湿润化程度最快,向西扩展湿润指数逐渐减小。对比图 2a 和图 2b 可以发现,东部湿润指数较高的地区倾向率增加幅度也较为明显,反之亦然。二者的空间变化分布型相一致。湿润指数较高的地区空间变化倾向率也较大,如德令哈,但变化不显著。中西部的湿润指数较低,空间变化率也较低。变化倾向率最小的茫崖显著性通过了 0.01,此外,小灶火、大柴旦、都兰倾向率稍高,变化也较为显著( $P<0.05$ )。

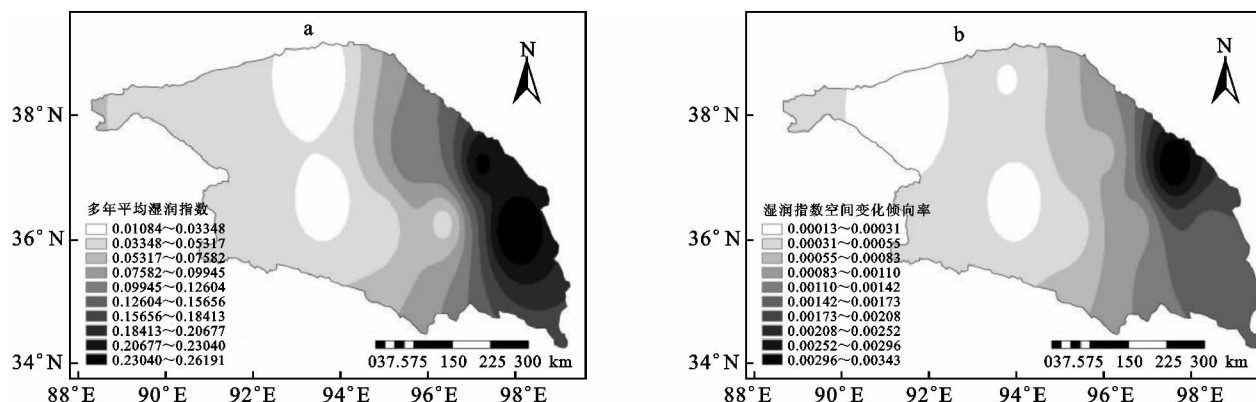


图 2 湿润指数空间分布及空间变化倾向率

2.1.3 湿润指数异常空间分布 图 3 为柴达木盆地湿润指数的 4 个主要 EOF 模态的空间分布型。图 3a 是第一特征场,是方差贡献率(95.43%)最大的空间分布型。从空间分布及时间系数(图略)来看,1977—2010 年柴达木盆地湿润指数常年保持着东到西逐渐递减的变化趋势,西部和南部出现负的高值区,并且这种分布型呈上升趋势,以 1989 年和 2002 年最为典型。对比图 3a 与图 2a 可以发现,EOF 异常空间分布第一模态与各站点湿润指数的空间分布极为相似。从地形分布来看,东部海拔较高,多盐湖与沼泽地,西部有大片沙漠,表明东部地表湿润程度确实比西部湿润程度高。

图 3b 是第二特征场,代表了南北空间差异,南部出现了负的高值区,北部出现了正的高值区,即北部地表湿润程度比南部高。时间系数正负交替出现且变化比第一模态较大,1993 年和 2008 年出现正向典型分布,1987 年,1998 年,2005 年出现了反向典型分布,即北部地表较干旱,南部地表较湿润。从长期变化趋势来看,这种分布型呈上升趋势。图 3c 是第三特征场。空间分布出现了明显的正负值中心区域。正值中心分布在大柴旦附近,负值中心分布在德令哈附近。时间

系数年际震荡较为明显,且正负交替变化频繁,1991 年和 2009 年正向分布型最典型,2009 年反向分布型最典型。这种分布趋势从长期变化看呈下降趋势。

图 3d 是第四特征场。代表了东西空间差异,东部出现了闭合的负高值区,西部出现正的高值区。时间系数震荡比其他模态更为明显,并且负值逐渐比正值有优势,典型性有所增加。正负空间分布型处于交替变化中,其中 2005 年和 2008 年正向空间分布非常典型。

## 2.2 湿润指数与气候因子影响分析

为分析研究区内影响湿润指数变化的主导气候因子,本文选取柴达木盆地各站点的气压、风速(动力因子)、气温、日照时数(热力因子)、相对湿度、降水量(湿度因子)等气候要素讨论对地表湿润特征的影响。由于各气候因子的单位、量纲和范围都不尽相同,所以对各个气候因子进行标准化处理并做趋势分析(图 4)。由于以上 6 个气候因子之间存在很强的自相关性,为避免多重共线性的影响,本文计算偏相关系数(图 5)。其结果在一定程度上可以表明湿润指数的变化是多种气候因子共同作用的结果。

1977—2010 年平均气压的标准化年际波动变化

不大(图 4a), 总体呈弱的减小趋势, 未通过显著性检验。最高值变化起伏不大, 只有在 1984 年出现一次最低值。平均风速(图 4b)的年际变化趋势在 34 a 间呈显著下降趋势(速率为  $-0.065/10$  a), 并通过了 0.01 水平的显著性检验。年际变化震荡相对平缓, 风速的减小使得空气中的水分容易聚集, 地表湿润指数增加。1977—1983 年风速的下降速率最大, 此外 2003 年的风速达最低。34 a 平均气温(图 4c)的变化趋势呈显著上升(速率为  $0.077/10$  a), 并通过了 0.01 水平的显著性检验。34 a 气温变化与湿润指数年际变化的走向相一致, 说明二者呈正相关。图 4d 为相

对湿度的变化趋势, 图中可以看出 34 a 间相对湿度年际起伏变化震荡相当明显, 但总体呈微弱上升的趋势, 最明显的波谷出现在 1985 年, 1991 年, 2001 年, 最明显的波峰出现在 1989 年, 1993 年, 2003 年。日照时数的年际变化趋势(图 4e)呈显著的下降趋势(速率为  $-0.055/10$  a), 通过 0.01 水平的显著性检验。1990 年和 1998 年出现两次明显的波动, 1990 年之前和 1998 年之后均为平稳下降趋势, 与湿润指数的增加呈负相关。降水量(图 4f)的变化在 2001 年出现了一次明显的转折, 自 2001 年之后呈现显著上升趋势。它与湿润指数呈正相关性, 并且相关系数高达 0.803。

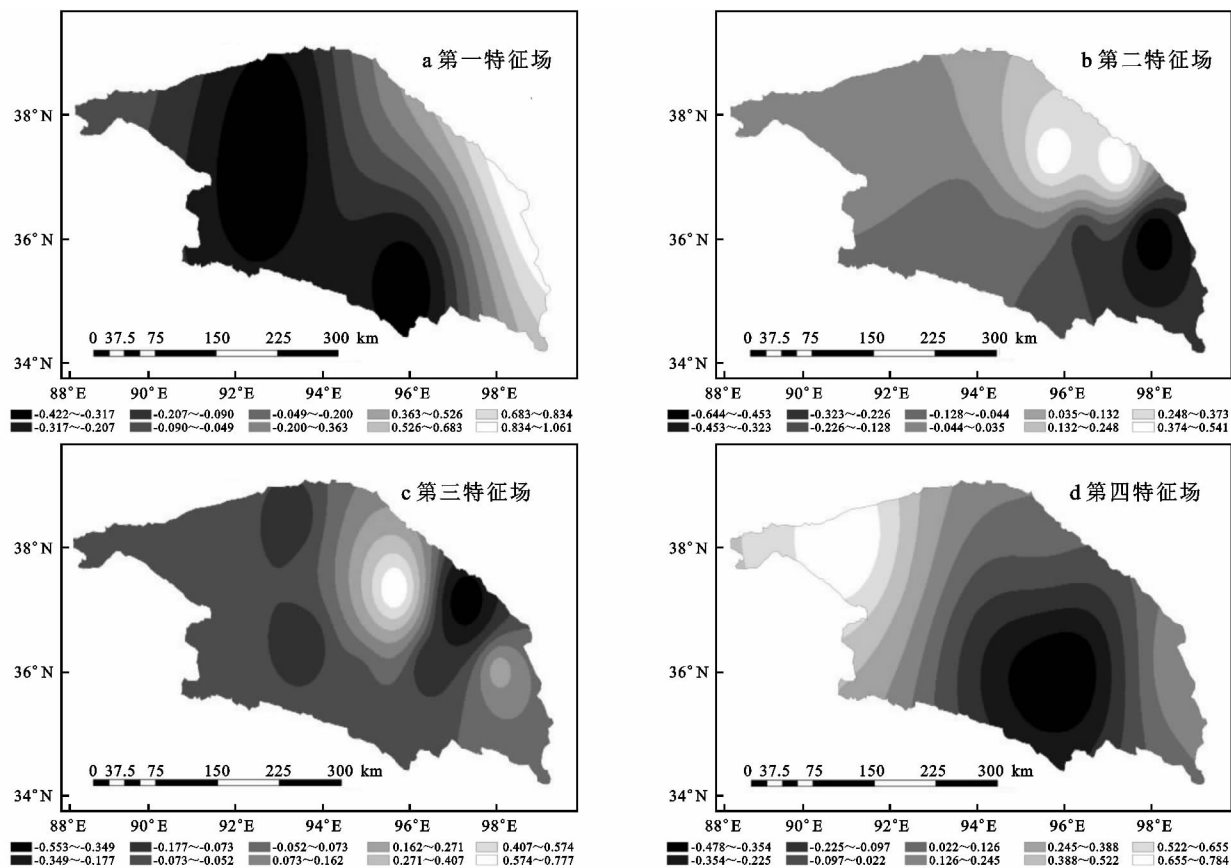


图 3 湿润指数主要 EOF 模态空间分布

从湿润指数与各气象因子的偏相关系数(表略)可以得出, 湿润指数与降水量(系数为 0.751)、相对湿度(系数为 0.319)的显著正偏相关( $P < 0.01$ ), 对湿润指数的上升起到了关键性的作用, 与平均气温(系数为  $-0.254$ )呈显著负偏相关( $P < 0.01$ ), 与平均风速的偏相关系数为  $-0.054$ (未通过检验), 与日照时数的偏相关系数为 0.040(未通过检验), 这些气候因素的增加导致湿润指数的减小, 反之则增加。综上所述, 降水量、气温、相对湿度等因素对湿润指数的影响较大, 但由于各个因素对其影响程度存在差异, 降水量和平均相对湿度的偏相关系数远远大于平均气温的上升以及平均气压下降对湿润指数的影响, 加

之风速的显著降低, 日照时数的减少, 导致降水量和相对湿度的上升是湿润程度上升最显著的因素。此外, 平均气压的下降与气温的上升虽然会使地表湿润程度降低, 但是偏相关的结果说明其他气候因子给湿润程度带来的影响远远超过了这两个气象因子的影响。

各个气候因子偏相关系数的空间分布如图 5 所示。湿润指数与降水量的偏相关(图 5a)呈明显的南北空间差异分布型, 与湿润指数 EOF 的第二空间模态极为相似。南部相关系数较高在诺木洪(0.913)和都兰(0.868)地区形成两个高值闭合中心, 北部的冷湖(0.553)出现闭合的低值中心。湿润指数与日照时

数的偏相关(图 5b)空间分布与降水量的偏相关分布具有反向分布特征,高值区集中在大柴旦(0.191)附近,低值区与降水偏相关的高值区分布一致,分布在诺木洪(-0.057)和都兰(-0.050)。湿润指数与湿度的偏相关(图 5c)空间分布大致呈中部向东西递减的分布

状况,并在东南部的诺木洪(0.094)形成低值闭合中心。湿润指数与气温的偏相关(图 5d)空间分布大致呈现从东南向西北递减的负相关分布。东南形成一个高值反相关闭合区,分布在都兰(-0.402);西北形成一个低值反相关闭合区,分布在冷湖(-0.135)。

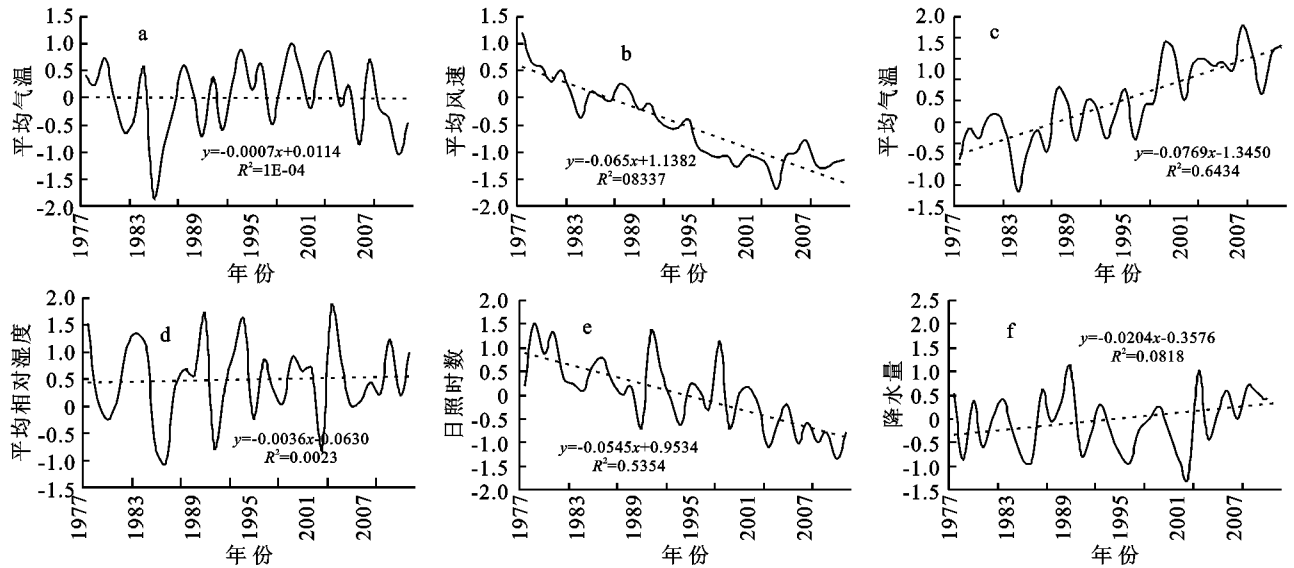


图 4 各气候因子的年际变化趋势

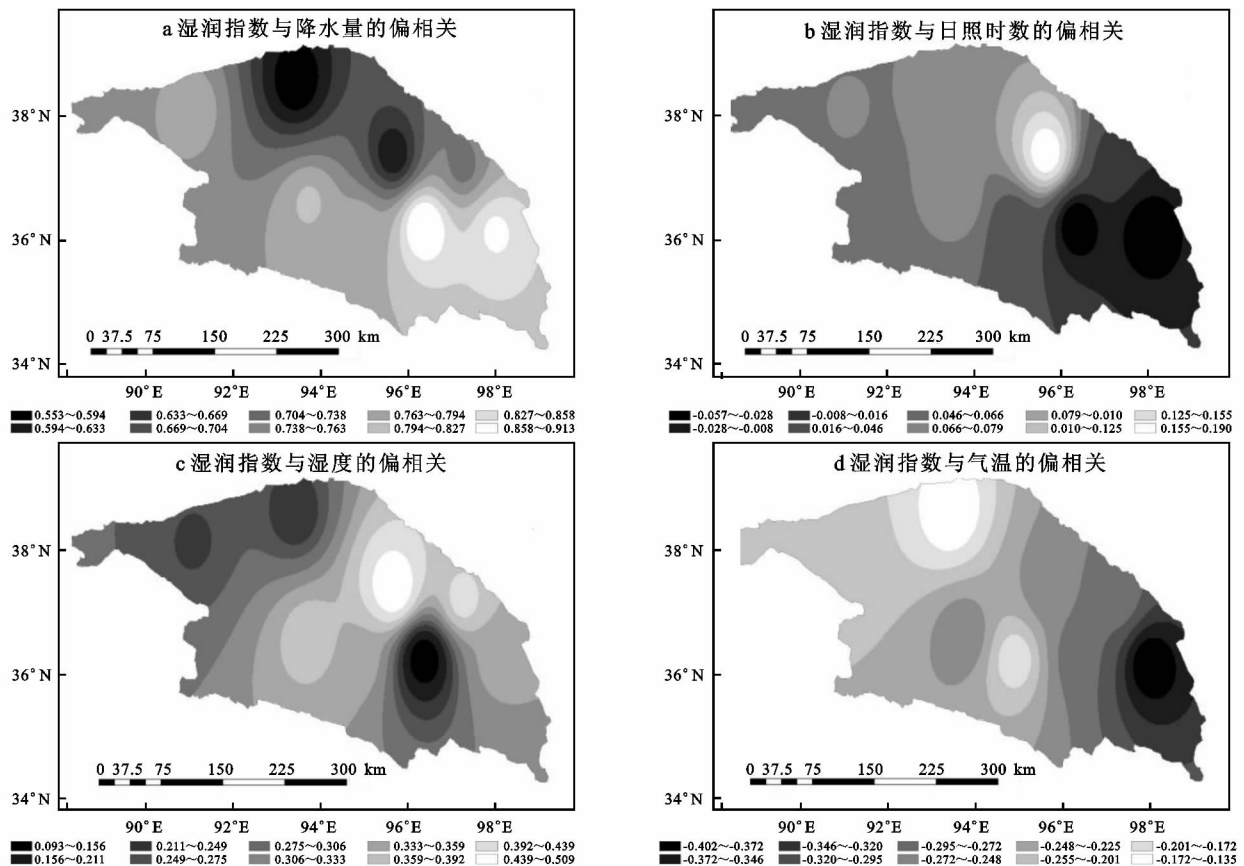


图 5 各气候因子的偏相关系数空间分布

### 3 结论

本文基于 Penman-Monteith 模型, Sen 趋势,

Mann-Kendall 检验, Hurst 指数以及 EOF 模型计分析了 34 a 柴达木盆地地表湿润程度的时空变化特征以及未来变化趋势,并运用偏相关分析方法讨论了影

响地表湿润程度变化的气候因子,主要结论如下:

(1) 研究期间,柴达木盆地地表湿润指数表现为增加趋势,增幅为  $0.000\ 97\ a^{-1}$ ,蒸散量的下降速度比降水量增加的速度快,加之气温的快速上升,使研究区内近年来暖湿化趋势愈加明显。经 Mann-Kendall 突变检验得出柴达木盆地内湿润指数在 1987 年前后发生突变。从季节变化来看,夏季是湿润程度最高的季节,秋季是湿润化程度最快的季节。

(2) 研究期间,柴达木盆地湿润程度的空间分布表现为由东向西逐渐递减,各站点平均湿润指数为  $0.01\sim0.23$ 。湿润指数年际变化总体上呈弱的增加趋势,倾向率为  $0.000\ 97\ a^{-1}$ ,其中东北部湿润化程度最快,向西扩展湿润指数逐渐减小。

(3) 研究期间,柴达木盆地湿润指数的异常空间分布模态主要分为“东西空间差异”和“南北反向差异”两个类型,且这两种分布型呈上升趋势。其中空间分布的主要趋势是从东向西逐渐递减。

(4) 影响柴达木盆地地表湿润特征的气候因素有很多。其中降水量和相对湿度的上升是影响湿润指数上升最显著的因素。湿润指数与降水量、相对湿度呈显著正偏相关,与日照时数呈弱的正偏相关,与平均气温、平均风速呈显著负偏相关。

#### 参考文献:

- [1] 蔡运龙,李双成,方修琦.自然地理学研究前沿[J].地理学报,2009,64(11):1363-1374.
- [2] 徐维新,古松,苏文将,等.1971—2010年三江源地区干湿状况变化的空间特征[J].干旱区地理,2012,35(1):46-55.
- [3] 赵一飞,张勃,张多勇,等.甘肃河东地区地表湿润特征及其气候影响因子[J].地理科学进展,2013,32(1):95-104.
- [4] 蒋冲,王飞,喻小勇,等.秦岭南北近地面水汽时空变化特征[J].生态学报,2013,33(12):3805-3815.
- [5] 马柱国,符淙斌.中国北方干旱区地表湿润状况的趋势分析[J].气象学报,2001,59(6):737-746.
- [6] 蒲金涌,姚小英,马鹏里,等.甘肃黄土高原地表湿润状况时空变化特征[J].干旱区地理,2010,33(4):588-592.
- [7] 赵志平,刘纪远,邵全琴.近30a来中国气候湿润程度变化的空间差异及其对生态系统脆弱性的影响[J].自然资源学报,2010,25(12):2091-2100.
- [8] 刘德坤,王军邦,齐述华.基于湿润指数的近35a青海省干湿状况变化分析[J].水土保持研究,2014,21(2):246-250,256.
- [9] 戴升,申红艳,李林,等.柴达木盆地气候由暖干向暖湿转型的变化特征分析[J].高原气象,2013,32(1):211-220.
- [10] 鄂崇毅,侯光良,吴成永,等.柴达木盆地近50年气温变化时空分布特征分析[J].干旱区资源与环境,2013,27(10):94-99.
- [11] 徐浩杰,杨太保.1981—2010年柴达木盆地气候要素变化特征及湖泊和植被响应[J].地理科学进展,2013,32(6):868-879.
- [12] 张娟,肖宏斌,徐维新,等.1971—2010年柴达木盆地可降水量变化特征及其与气象条件分析[J].资源科学,2013,35(11):2289-2297.
- [13] 马雪宁,张明军,王圣杰,等.“蒸发悖论”在黄河流域的探讨[J].地理学报,2012,67(5):645-656.
- [14] 尹鹤,吴绍洪,戴尔阜.1971—2008年我国潜在蒸散时空演变的归因[J].科学通报,2010,55(22):2226-2234.
- [15] 卓玛兰草,刘普幸,张亚宁,等.甘肃黄土高原区潜在蒸散量时空变化与成因研究[J].水土保持研究,2012,19(1):70-75.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 祝昌汉.再论总辐射的气候学计算方法(二)[J].南京气象学院学报,1982(2):196-206.
- [19] 中华人民共和国林业部防治荒漠化办公室.联合国关于在发生严重干旱和/或荒漠化的国家特别是在非洲防治荒漠化的公约[M].北京:中国林业出版社,1994.