

1960~2005年中国蒸发皿蒸发量 变化趋势及其影响因素分析

祁添垚^{1,2}, 张 强^{1,2}, 王 月^{1,2}, 肖名忠^{1,2}, 刘剑宇^{1,2}, 孙 鹏^{1,2}

(1. 中山大学水资源与环境系, 广东 广州 510275; 2. 中山大学华南地区水循环与
水安全广东省普通高校重点实验室, 广东 广州 510275)

摘要:针对蒸发悖论这一科学问题,对1960~2005年的蒸发皿蒸发资料进行系统研究,全面分析中国蒸发皿蒸发量变化特征、探究中国各气候区蒸发皿蒸发变化的敏感因子及主要影响因素。研究表明:① 利用模糊聚类FCM算法,将中国分成3个蒸发皿蒸发量变化差异区:东中南分区(中国南部、中部、西南部以及东部);西北分区(中国西北部)和中国东北至西南的狭长分布带;② 蒸发皿蒸发量变化趋势分布具有明显区域性:中国南部、东部、中部及西北部,蒸发皿蒸发量以显著下降趋势为主,其中显著上升站点零星分布于东南沿海、西南、洞庭湖及西北地区的西北部;中国东北部至西南狭长分布带中密集分布显著上升及无明显变化趋势的站点;③ 对蒸发皿蒸发量与4种气象要素进行敏感性分析,研究发现东南分区、西北分区和狭长分布带的敏感因子均为相对湿度。由此可知,相对湿度是影响中国蒸发皿蒸发量变化的关键因子。

关键词 蒸发皿蒸发量;蒸发悖论;时空分布;模糊聚类分析;Modified Mann-Kendall趋势检验

中图分类号: P426.2+1

文献标识码: A

文章编号: 1000-0690(2015)12-1599-08

蒸发是水文循环研究中极为重要的一环,其演变过程涉及能量平衡与水量平衡。不少研究表明,过去几十年中,地表温度在不同地区以不同速度上升^[1-3]。一般情况下,气温上升会导致蒸发量增加^[4-6]。然而,观测资料表明蒸发皿蒸发量呈现显著下降趋势^[7-9],这一现象称为蒸发悖论。Peterson^[7]等于1995年发现1950~1990年美国与前苏联地区的蒸发皿蒸发量呈下降趋势,并由此得出水循环中陆地蒸发减少的结论。Brutsaert等^[10]于1998年为解释蒸发悖论,认为蒸发皿蒸发量的减少恰恰是由于陆地蒸发量增加引起的。Roderick和Farquhar^[4]于2002年表明太阳总辐射下降致蒸发皿蒸发量下降,而云量和气溶胶的增加又是前者的成因。国内学者对此已有大量研究,盛琼^[11]利用全国468个气象站1957~2001年蒸发皿蒸发量及其他气象因子同步实测资料,研究得出,引起蒸发皿蒸发量下降的主要因子为辐射、气温日较差、

风速,而湿度因子影响最小。王艳君等^[12]利用长江流域115个气象站1961~2000年的观测数据,发现长江流域蒸发皿蒸发量、参照蒸发量和实际蒸发量的年平均变化均呈现显著下降趋势。左洪超^[13]认为蒸发皿蒸发量是多环境因子共同非线性相互作用的结果,并利用中国有长期太阳辐射观测的62个常规气象站1961~2000年的观测资料,通过蒸发皿蒸发量与气象因子的相关分析对其进行验证,表明只利用单个环境因子的变化来解释蒸发皿蒸发量的气候变化会产生偏颇。曾燕等^[14]通过对全国664个气象站20 cm口径蒸发皿资料的分析,发现就平均而言,1960~2005年中国蒸发皿蒸发量呈明显减少趋势,并认为日照百分率减少造成的太阳总辐射减少是主要原因。刘敏^[8]等挑选了全国671个站点1955~2001年的资料证明中国蒸发皿蒸发量存在减少趋势,气温日较差和平均风速的减小与蒸发皿蒸发量的减少具有最显著

收稿日期: 2014-12-09; **修订日期:** 2015-04-10

基金项目: 新疆维吾尔自治区科技计划项目(201331104)、国家自然科学基金项目(41071020)、国家杰出青年科学基金项目(51425903)和新世纪优秀人才支持计划项目资助。

作者简介: 祁添垚(1989-),男,广东东莞人,硕士,主要从事气象水文学研究。E-mail: qity@foxmail.com

通讯作者: 张 强,教授。E-mail: zhangq68@mail.sysu.edu.cn

的相关性,是蒸发皿蒸发量减少的影响因子。刘昌明等^[15]根据中国1960~2007年的653个气象站的常规气象观测资料,采用优化太阳辐射计算的Penman-Monteith潜在蒸散发计算方法,分析了中国10大流域片区的潜在蒸散发对最高气温、最低气温、风速、太阳辐射、水汽压的敏感性及其区域分异。而马雪宁^[16]等利用黄河流域72个气象站点1960~2010年的气象资料,系统分析了过去51 a间气温、降水量以及潜在蒸散量的变化趋势,得到近51 a来风速的明显减小是导致黄河流域潜在蒸散发减少的主导因素的结论。

上述研究对于科学理解区域水循环变化具有重要意义,但是,由于研究区域不同,站点数不同等诸多因素,研究结论多有差异。本文基于蒸发及水循环研究的重要性,基于1960~2005年全国588个气象站蒸发皿蒸发量数据及其他气象变量的观测资料,全面分析蒸发皿蒸发变化及可能影响因子,得出区域水汽循环特征与蒸发悖论在中国的具体体现,该研究对于理解中国区域水汽循环变化特征、对全球气候变化的区域响应相似性与差异性 & 水资源管理,均具有重要理论与现实意义。

1 数据与方法

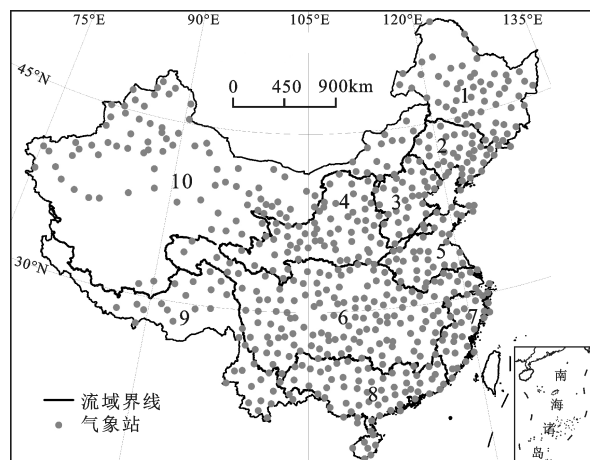
1.1 数据

本文采用中国588个气象站1960~2005年包括气压、气温、水汽压、相对湿度、低云量、风速、降水量、日照时数、20 cm蒸发皿蒸发量等14种气象观测量的气象要素观测值,研究蒸发量的年及季节变化。所分析资料由国家气象中心提供。对于缺测的蒸发皿蒸发量,通过建立其与本站干球气温、相对湿度及风速等多元线性回归模型进行插补(相关系数在0.82~0.98之间),能很好的满足分析对数据的质量要求。

1.2 方法

1.2.1 模糊聚类分析

聚类分析是根据数据相似性,将其归到不同集合中。而模糊聚类分析则是建立在模糊理论之上,超越“非此即彼”的传统聚类分析,更贴近实际数据内在结构。最常用模糊聚类为模糊 c 均值算法(Fuzzy C-Means算法,简称FCM)^[17],分类效果评定见表1所示。在实际应用中,须综合运用上述指标,从不同侧面反映分类的情况,假定不同 c 值,根据表1中7种指标进行判定衡量。特别地,当不



注:1 松花江流域;2 辽河流域;3 海河流域;4 黄河流域;5 淮河流域;6 长江流域;7 东南诸河流域;8 珠江流域;9 西南诸河流域;10 西北诸河流域。

图1 中国588个气象测站分布

Fig.1 Locations of 588 meteorological stations considered in this study

同 c 值表现出类似效果时,取 c 值较小者为宜。

1.2.2 Modified Mann-Kendall趋势检验

MK法假定样本独立随机分布^[18,19],而实际气象水文序列大多存在序列样本自相关性。对此,Hamed和Rao改进传统的MK趋势检验,即Modified Mann-Kendall (MMK)趋势检验方法^[20]。MMK根据序列自相关性情况,对统计量 S 的方差 $\text{Var}(S)$ 进行修正,分析结果表明,MMK于时间序列独立随机时与MK相近,而在序列存在显著自相关性情况下,可得到更为精确的结果。

分析了588个气象站年蒸发皿蒸发量自相关系数($\rho_s(1)$),其中 $\rho_s(1) > 0.6$ 的站点数量为90个, $\rho_s(1) > 0.5$ 的站点数量为184个。其他气象变量亦做此分析,由于篇幅,结果不做显示。章诞武等^[21]的研究也表明,年均气温和年蒸发皿蒸发量自相关性显著,需要剔除自相关性后进行趋势检验,否则序列自相关性会放大序列趋势的显著性。

2 结果与讨论

2.1 基于FCM的气候分区

2.1.1 分区数确定

假定分区数 $c=2,3,4,\dots,14$,对比由不同 c 值得出的结果。由于单独应用某一指标是不合理的,故此列出7种不同指标,通过对比判定出最合理的分区数。通过系统分析可知, $c=3$ 或 $c=4$ 较为合理。

表1 评价模糊聚类分析分区的7种指标

Table 1 Definitions of 7 indices which describe the goodness of clustering by FCM algorithm

| 指标 | 定义 |
|---------------------------------|---|
| Partition Coefficient(PC) | $PC(c) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^N u_{ij}$ |
| Classification Entropy(CE) | $CE(c) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^N u_{ij} \log(u_{ij})$ |
| Partition Index(SC) | $SC(c) = \frac{\sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^N (u_{ij})^m \ x_j - v_i\ ^2}{N_i \sum_{k=1}^c \ v_k - v_i\ ^2}$ |
| Separation Index(S) | $S(c) = \frac{\sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^N (u_{ij})^2 \ x_j - v_i\ ^2}{N \min_{i,j} \ v_k - v_i\ ^2}$ |
| Xie and Beni's Index(XB) | $XB(c) = \frac{\sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^N (u_{ij})^m \ x_j - v_i\ ^2}{N \min_{i,j} \ v_k - v_i\ ^2}$ |
| Dunn's Index(DI) | $DI(c) = \min_{i \in c} \{ \min_{j \in c, i \neq j} \{ \frac{\min_{x \in C_i, y \in C_j} d(x, y)}{\max_{k \in c} \{ \max_{x, y \in C} d(x, y) \}} \} \}$ |
| Alternative Dunn Index(ADI) | $ADI(c) = \min_{i \in c} \{ \min_{j \in c, i \neq j} \{ \frac{\min_{x \in C_i, y \in C_j} d(y_i, v_i) - d(x_i, v_i) }{\max_{k \in c} \{ \max_{x, y \in C} d(x, y) \}} \} \}$ |

当由指标显示出来的结果相近时,我们认为较小者($c=3$)为较好的结果。

2.1.2 分区结果

根据3个分区结果可得相应隶属矩阵。事实上,隶属度最大并不意味着该点属于相应矩阵,还应根据实际情况判定。由于输入模糊聚类分析模型的数据常是多维的,本文使用 Sammon Mapping 将结果投影至二维平面。由图 2a 知,中国西藏、甘肃、青海、河北、内蒙古、辽宁、福建等地有相当一部分站点尚未加以分类。结合站点所处地理位置、气候条件及蒸发皿蒸发量变化趋势,对上述未分类站点重新分类(图 2b),研究结果与刘敏^[8]根据年降水量和蒸发皿蒸发量计算干旱指数,再对全国进行气候分区的分区结果,及张强等^[19]根据参照蒸发量变化性质得出的中国分区模式相一致,充分说明本文的分区结果具有可靠性与合理性。

2.2 蒸发皿蒸发量变化趋势分析

图 3 为中国蒸发皿蒸发量 MMK 趋势空间分布图。由图 3a 可知,位于中国西北部的新疆内流区、甘蒙内流区、青海内流区、西藏内流区及雅鲁藏布江流域,绝大部分地区蒸发皿蒸发量均呈显著下降趋势。海河、淮河、珠江、东南沿海、澜沧江与怒江、长江中下游及黄河中下游等流域,蒸发皿蒸发量均以显著下降趋势为主,其中显著上升的站点零星分布于澜沧江与怒江流域南部、东南沿海诸河流域及洞庭湖流域。而松花江、辽河、长江

上游和黄河上游等流域,蒸发皿蒸发上升趋势显著或者无明显变化。由此可识别出 3 个蒸发皿蒸发量变化差异区:① 东中南分区(中国西南、南部、中部、东部);② 西北分区(中国西北部);③ 位于以上 2 个分区之间、从东北延伸值西南的狭长分布带。可见如此通过蒸发皿蒸发量变化趋势识别得出的空间分布模式与基于 FCM 算法的分区成果相吻合。

夏季蒸发皿蒸发量变化趋势与年尺度的相差甚微(图 3b),所不同之处在于对比年尺度更多站点呈显著下降或无显著变化趋势,这些站点主要分布于东北地区、洞庭湖流域及珠江流域上游等区域(图 3a,图 4b),表明较年尺度而言,夏季蒸发皿蒸发量下降趋势更为显著。冬季蒸发皿蒸发量变化趋势与年尺度的亦相差不大(图 3c)。西北地区,很多在年尺度上表现显著下降的站点于冬季展现出显著上升趋势或无变化。东北地区变化尤其明显,冬季蒸发皿蒸发量显著下降的站点只有 6 个,而西南地区大部分站点变化趋势性质也发生转变,由年尺度的显著下降变成冬季的无明显变化。无论是狭长分布带还是西北、东中南分区,蒸发皿蒸发量相对于年尺度上升趋势更为明显。

2.3 蒸发皿蒸发量对气象要素的敏感性分析

张强等^[22]在研究参照蒸发量敏感性因子的过程中,利用参照蒸发量与 4 种气象要素 MK 趋势检验量的相关关系进行探究,其机理在于因变量与

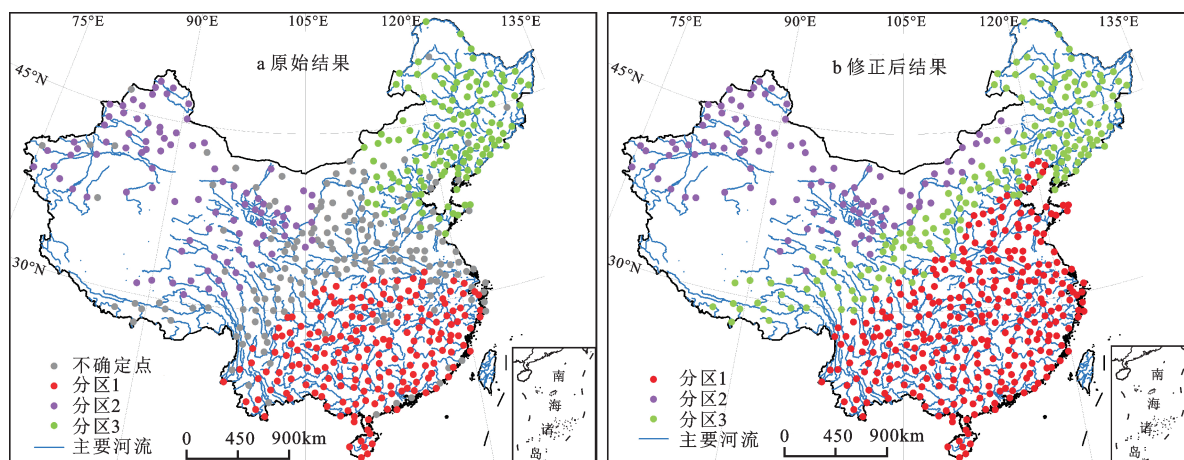


图2 模糊聚类分析分区结果

Fig.2 Results of Fuzzy clustering by Fuzzy C-Means algorithm

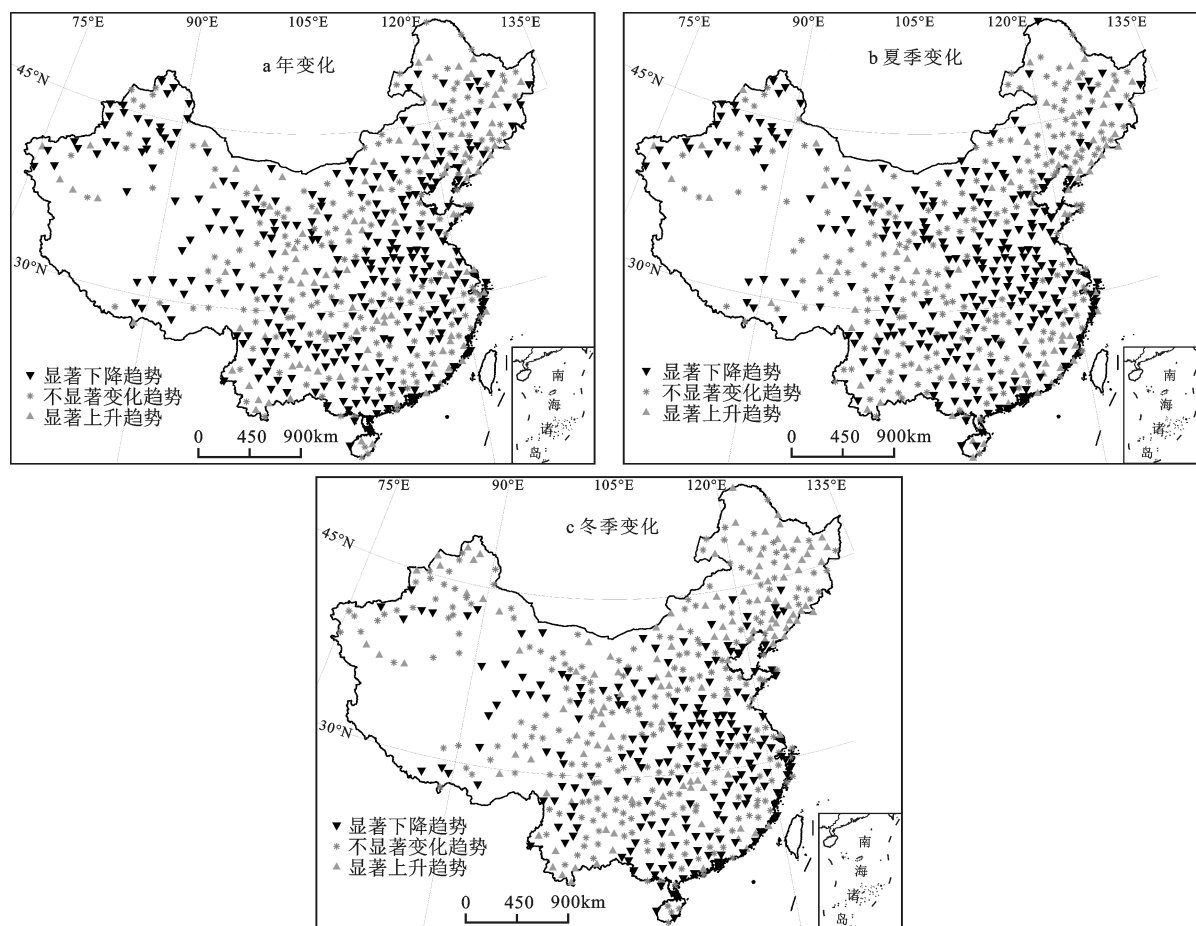
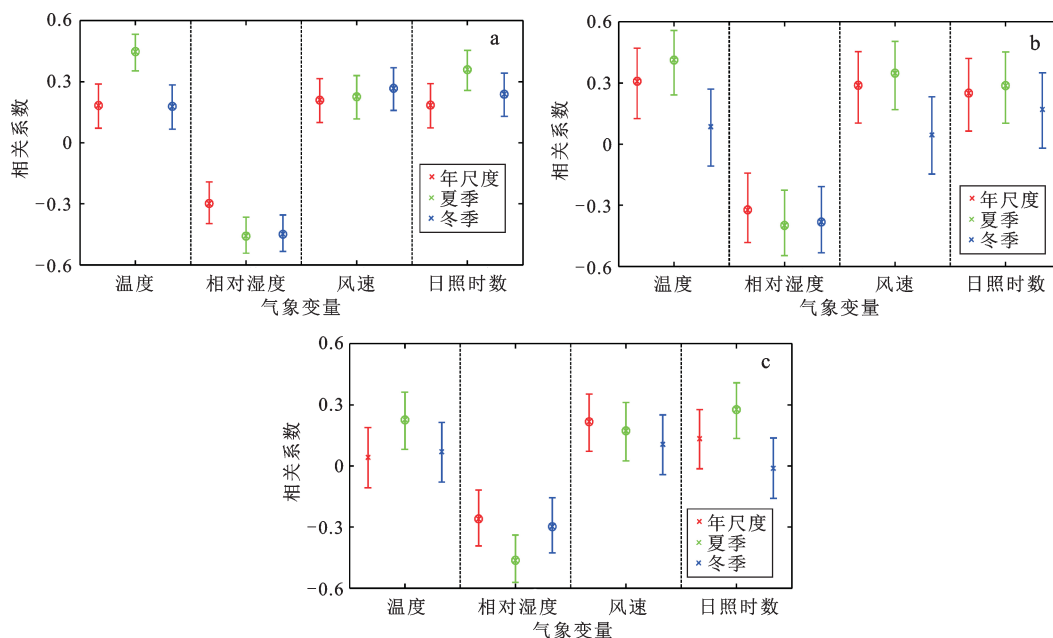


图3 蒸发皿蒸发量变化空间分布

Fig.3 Spatial and temporal distribution of changes of pan evaporation

自变量变化趋势越相似,因变量与自变量之间的敏感性越强。特别地,这种考虑因变量变化趋势和自变量变化趋势之间的相关关系敏感性分析方

法又是与 McCuen^[23]1974年提出敏感性系数的概念(即蒸发的变化率与气象变量的变化率的比率)本质是相同的。但相比之下研究两者相关关系所



注:a,东南分区;b,西北分区;c,狭长分布带。带圆圈的星号表示显著相关。

图4 各分区中MMK趋势值与4种气象变量(气温、相对湿度、风速以及日照时数)相关系数

Fig.4 Correlation coefficients between MMK trends of pan evaporation and the four meteorological variables in each partition

涉及的计算更为便捷,因而,本文将采用张强等^[22]所用的敏感性分析方法进行敏感性分析。

表2列出了3大分区内蒸发皿蒸发量与4种气象要素MMK趋势检验量的相关系数。因其他气象变量与蒸发皿蒸发量的相关关系极小,因此本文只考虑4种主要气象变量。分析结果表明,在东南分区相关系数最大的为相对湿度($r=-0.30$),其次为风速($r=0.21$),日照时数以及气温($r=0.18$)(图4a,表2)。与年尺度变化均相一致:4种变量均通过了95%置信水平检验,且相对湿度的相关系数最大,故相对湿度可为东南区蒸发皿蒸发量变化的敏感性因子。在西北区,与蒸发皿蒸发量年变化相关的气象因子,按相关性由大到小分别为相对湿度($r=-0.32$),气温($r=0.31$),风速($r=0.29$)和日照时数($r=0.25$)(图4b,表2)。但在冬季,气温($r=0.09$)、风速($r=0.04$)及日照时数($r=0.17$)没有通过95%置信水平检验,因而相对湿度为西北区蒸发皿蒸发量的敏感因子。在狭长分布带,敏感气象因子主要为相对湿度($r=-0.30$)和风速($r=0.26$)之间(图4c,表2)。然而风速在夏季与蒸发皿蒸发量的相关性没有通过95%置信度水平检验,因而,风速不是该区域内影响蒸发皿蒸发量变化的敏感性因子。刘闻等^[24]对渭河流域关中段潜在蒸发量进行研究,也发现年均潜在蒸发量与日较差、平均气温、

平均风速、日照时数呈正相关,与相对湿度和水汽压呈负相关,说明文中表2具有适用性。

表2 蒸发皿蒸发量与4种主要气象变量MMK统计量的相关系数

Table 2 Sensitivity of pan evaporation to meteorological variables evaluated by correlation coefficients between MMK trends of pan evaporation and the four meteorological variables

| | 东南分区 | | 西北分区 | | 狭长分布带 | |
|------|-------|------|-------|------|-------|------|
| | 相关系数 | P值 | 相关系数 | P值 | 相关系数 | P值 |
| 年变化 | | | | | | |
| 气温 | 0.18 | 0.00 | 0.31 | 0.00 | 0.04 | 0.58 |
| 相对湿度 | -0.30 | 0.00 | -0.32 | 0.00 | -0.26 | 0.00 |
| 风速 | 0.21 | 0.00 | 0.29 | 0.00 | 0.22 | 0.00 |
| 日照时数 | 0.18 | 0.00 | 0.25 | 0.01 | 0.13 | 0.08 |
| 夏季 | | | | | | |
| 气温 | 0.45 | 0.00 | 0.41 | 0.00 | 0.23 | 0.00 |
| 相对湿度 | -0.46 | 0.00 | -0.40 | 0.00 | -0.46 | 0.00 |
| 风速 | 0.23 | 0.00 | 0.35 | 0.00 | 0.17 | 0.02 |
| 日照时数 | 0.36 | 0.00 | 0.29 | 0.00 | 0.28 | 0.00 |
| 冬季 | | | | | | |
| 气温 | 0.18 | 0.00 | 0.09 | 0.38 | 0.07 | 0.36 |
| 相对湿度 | -0.45 | 0.00 | -0.38 | 0.00 | -0.30 | 0.00 |
| 风速 | 0.27 | 0.00 | 0.04 | 0.65 | 0.11 | 0.16 |
| 日照时数 | 0.24 | 0.00 | 0.17 | 0.08 | -0.01 | 0.88 |

总言,中国蒸发皿蒸发量变化的敏感因子为

相对湿度。刘昌明等^[15]的研究也表明,全国范围内,潜在蒸散发对气象因子的敏感性为:水汽压>最高气温>太阳辐射>风速>最低气温。尽管水汽压与相对湿度之间存在一定差异,但它们之间的一致性可以表明水分因子对蒸发皿蒸发变化的显著影响。

2.4 蒸发皿蒸发量的影响因子分析

影响蒸发皿蒸发量变化的因子众多,可将其分为动力因子、热力因子和水分因子。通过对气象因子的敏感性分析可知,风速、日照时数及相对湿度分别是上述3种类型气象变量中最敏感的。因而,通过对比风速、日照时数及相对湿度3种不同类型的气象因子,探讨不同地区引起蒸发皿蒸发量变化的影响因子。

由于相对湿度为中国蒸发皿蒸发变化的关键影响因子,对其时空分布特征进行分析(图5)。对于年尺度的分布,中国西北、28°N~32°N地区,相对湿度均呈显著上升趋势,而无显著变化趋势站

点的分布与显著上升的站点呈交叉出现,且在长江中下游、珠江和东南诸河流域部分地区集中分布(图5a)。在35°N以北、100°E以东区域,相对湿度以下降趋势为主。上述区域与蒸发皿蒸发量的变化在空间呈相反模态,显示上述区域相对湿度的变化对蒸发皿蒸发变化的显著影响。西北地区降水增多,潜在蒸发量大,因而相对湿度增加;而华北与东北地区,降水量减少,从而导致相对湿度减少^[25]。而在中国东南部地区,如长江中下游及珠江流域,蒸发皿蒸发与相对湿度变化的空间模态相近,由此可推断,在中国东南部地区,除相对湿度以外,其他因素也可能对蒸发皿变化有显著影响,下文将对此进行进一步讨论。夏季相对湿度变化(图5b)与相对湿度年尺度变化相近,不同的是,在东北地区、长江中下游地区,相对湿度变化趋势不显著或有显著上升。在30°N以北区域,夏季相对湿度(图5b)显著上升(下降)站点基本与蒸

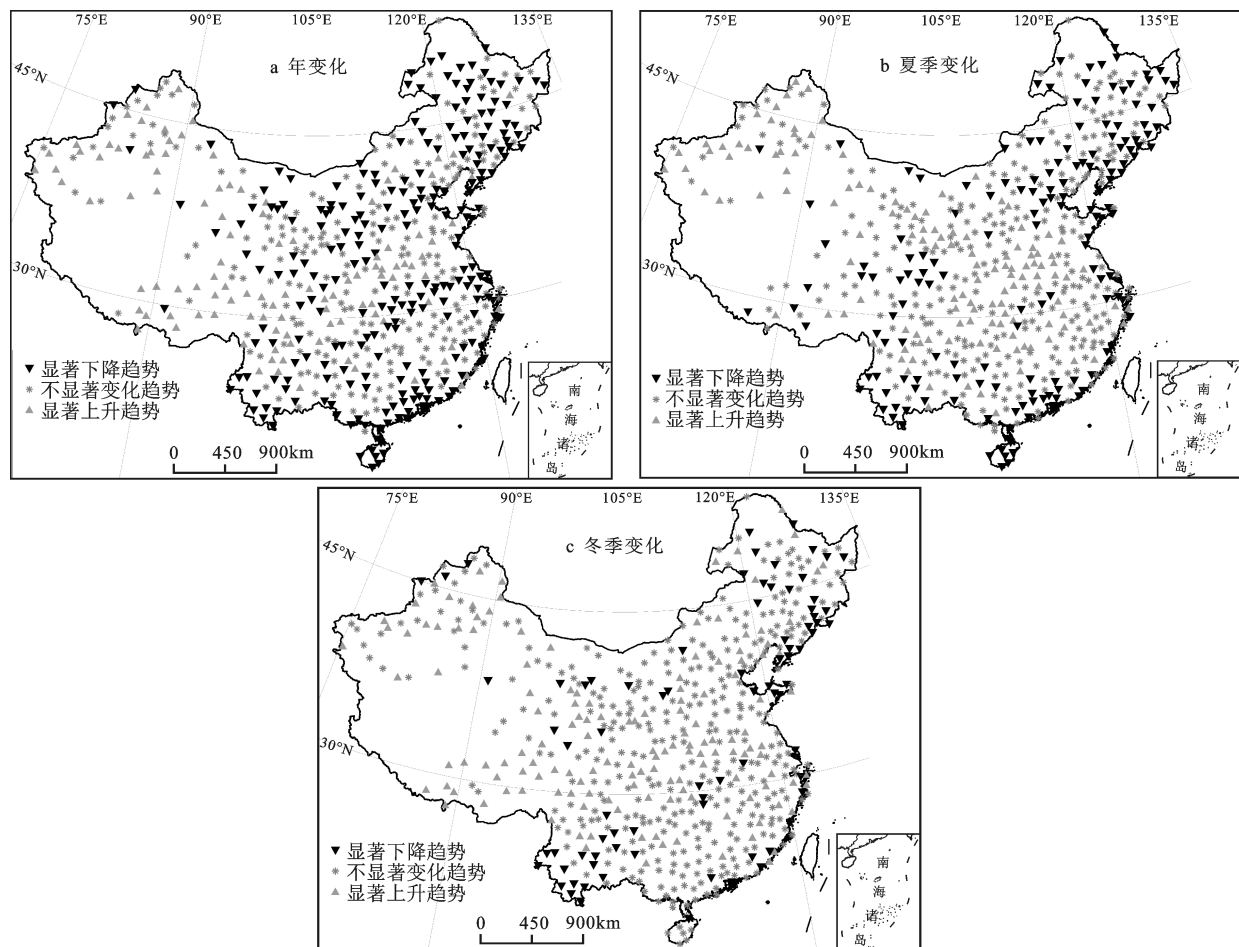


图5 相对湿度变化的空间分布

Fig.5 Spatiotemporal distribution of changes of relative humidity

发皿蒸发量夏季显著下降(上升)站点的空间分布相吻合。而在冬季,相对湿度变化趋势与年尺度和夏季变化相比,上升趋势显著,尤其在中国东北及东南沿海一带,更多站点相对湿度呈显著上升或无明显变化(图5c)。图5c与图4c对比分析可见,蒸发皿蒸发量在西北分区和狭长分布带的关键影响因子为相对湿度。

3 结 论

利用FCM算法对中国进行气候分区,并应用MMK趋势检验法对中国1960~2005年蒸发皿蒸发量进行趋势分析,并对蒸发皿蒸发量与4种气象要素MMK趋势检验结果进行相关分析,辨识各分区蒸发皿蒸发变化的敏感性因子,主要结论如下:

1) 根据蒸发皿蒸发量变化趋势的空间分布将中国分成3大区域:东中南分区(中国南部、中部、西南部以及东部);西北分区(中国西北部)和中国东北至西南的狭长分布带。

2) 蒸发皿蒸发量的年变化趋势空间分布具有明显区域性:中国南部、东部、中部以及西北部,蒸发皿蒸发量以显著下降趋势为主,其中显著上升的站点零星分布于东南沿海、西南地区、洞庭湖以及西北地区的西北部;中国东北部至西南的狭长分布带,蒸发皿蒸发呈显著上升及无明显变化趋势。

3) 在中国,影响蒸发皿蒸发变化的关键影响因子是相对湿度,中国境内蒸发皿蒸发下降的主要原因是大气相对湿度增加,这正是陆地/水面蒸发增加、水循环加剧的重要表现,也是蒸发皿蒸发悖论在中国的主要体现。由于影响蒸发皿蒸发变化的影响因子同时也受其他因素影响,如日照时数与气温,受区域雾霾天气、云量、阴雨天气等影响,因而,导致不同区域蒸发皿蒸发变化成因辨识的难度增加,这也是水循环研究的难点之所在。研究对于理解在全球气候变化与人类活动影响下,区域水循环对全球气候变化的响应特征与差异性,具有重要理论与科学意义;同时,也为区域水资源管理与农业规划,提供重要科学依据。

参考文献:

- [1] 丁一汇,戴晓苏.中国近一百年来温度变化[J].气象,1994,20(12):19~26.
- [2] 王绍武,叶瑾琳.近百年全球气候变暖的分析[J].大气科学,1995,19(5):544~553.
- [3] 唐红玉,翟盘茂.1951~2002年中国东、西部地区地面气温变化

对比[J].地球物理学报,2005,48(3):526~534.

- [4] Roderick M L, Farquhar G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years[J]. Science, 2002, 298(5597): 1410-1411.
- [5] Robock A, Konstantin V Y, Srinivasan G. The global soil moisture data bank[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2000, 81(6): 1281-1299.
- [6] Ohmura A, Wild M. Is the hydrological cycle accelerating? [J]. Science, 2002, 298(5597): 1345-1346.
- [7] Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y. Evaporation losing its strength [J]. Nature, 1995, 337: 687-688.
- [8] 刘敏, 沈彦俊, 曾燕, 等. 近50年中国蒸发皿蒸发量变化趋势及原因[J]. 地理学报, 2009, 64(3): 259~269.
- [9] 曾燕, 邱新法, 刘昌明, 等. 1960~2000年中国蒸发皿蒸发量的气候变化特征[J]. 水科学进展, 2007, 18(3): 311~318.
- [10] Brutsaert W, Parlange M B. Hydrological cycle explains the evaporation paradox [J]. Nature, 1998, 396: 30-31.
- [11] 盛琼. 近45a来我国蒸发皿蒸发量的变化及原因分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2006.
- [12] 王艳君, 姜彤, 许崇育. 长江流域20cm蒸发皿蒸发量的时空变化[J]. 水科学进展, 2006, 17(6): 830~833.
- [13] 左洪超, 鲍艳, 张存杰, 等. 蒸发皿蒸发量的物理意义、近40年变化趋势的分析和数值试验研究[J]. 地球物理学报, 2006, 49(3): 680~688.
- [14] 曾燕, 邱新法, 刘昌明, 等. 1960~2000年中国蒸发皿蒸发量的气候变化特征[J]. 水科学进展, 2007, 18(3): 311~318.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Bezdek J C. A convergence theorem for the fuzzy ISODATA clustering algorithm[J]. IEEE trans PAMI, 1980, 2(1): 1-8.
- [18] Kendall M G. Rank Correlation Methods[M]. Griffin, London. 1975.
- [19] Mann H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica, 1945, 13(3): 245-259.
- [20] Hamed K H, Rao R A. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data[J]. Journal of Hydrology, 1998, 204: 182-196.
- [21] 章诞武, 丛振涛, 倪广恒. 基于中国气象资料的趋势检验方法对比分析[J]. 水科学进展, 2013, 24(4): 490~496.
- [22] Zhang Qiang, Xu Chong-Yu, Chen Xiaohong. Reference evapotranspiration changes in China: natural processes or human influences[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2011, 103: 479-488.
- [23] McCuen R H. A sensitivity and error analysis of procedures used for estimating evaporation[J]. Water Resource Bulletin, 1974, 10(3): 486-498.
- [24] 刘闻, 曹明明, 邱海军, 等. 渭河流域关中段潜在蒸发量时空变化特征[J]. 地理科学, 2014, 34(9): 1145~1152.

[25] Zhang Qiang,Xu Chong-Yu,Chen Xiao-hong,et al.Statistical behaviors of precipitation regimes in China and their links with at-

mospheric circulation 1960-2005[J].International Journal of Climatology,2011,**31**(11):1665-1678.

Spatiotemporal Patterns of Pan Evaporation in 1960-2005 in China: Changing Properties and Possible Causes

QI Tian-yao^{1,2}, ZHANG Qiang^{1,2}, WANG Yue^{1,2}, XIAO Ming-zhong^{1,2}, LIU Jian-yu^{1,2}, SUN Peng^{1,2}

(1.Department of Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou,Guangdong 510275, China;

2.Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in Southern China of Guangdong High Education Institute, Sun Yat-sen University, Guangzhou,Guangdong 510275, China)

Abstract: Taking pan evaporation paradox as a key scientific assumption, this study collected and analyzed daily meteorological data from 588 rain stations over China using FCM regionalization method and Modified Mann-Kendall trend test. The results indicate that: 1) China is divided into 3 homogeneous climate regions with the help of FCM algorithm of fuzzy clustering: East-middle-south region (the south, middle, southwest and east China); West-north region(the northwest China); A long and narrow strip between the cluster a and b extending from northeast to southwest China; 2) significant decreasing pan evaporation can be found in southern, central, southwestern, eastern and northwestern China. Stations with significant increasing pan evaporation seem to be distributed sporadically across China. Besides, the strip zone extending in the NE-SW direction is dominated by significant/non-significant increasing trends of pan evaporation; 3) Sensitivity analysis indicates that relative humidity is the principal influencing factor for pan evaporation. Generally, in northwestern, northern and northeastern China, relative humidity has an adverse relation with pan evaporation, implying pan evaporation paradox in China and also intensifying hydrological cycle in these regions. In southeastern China, particularly the middle and lower Yangtze River basin and the Pearl River basin, relations between pan evaporation and relative humidity are relatively complex, showing that more factors than relative humidity can have impacts on pan evaporation changes, such as cloud coverage, temperature and aerosol concentration. Local features of aerodynamic and radiative drivers of the hydrological cycle and their regional responses to climate changes, and also different features of underlying ground may play considerable roles in pan evaporation changes.

Key words: pan evaporation; pan evaporation paradox; spatiotemporal patterns; Fuzzy clustering; Modified Mann-Kendall test