

DOI: 10.5846/stxb201401190145

蒋冲, 穆兴民, 马文勇, 于新洋, 刘宪锋, 李建国, 刘思洁, 王飞. 秦岭南北地区绝对湿度的时空变化及其与潜在蒸发量的关系. 生态学报, 2015, 35(2): 378–388.

Jiang C, Mu X M, Ma W Y, Yu X Y, Liu X F, Li J G, Liu S J, Wang F. Spatial and temporal variation of absolute humidity and its relationship with potential evaporation in the northern and southern regions of Qinling Mountains. Acta Ecologica Sinica 2015, 35(2): 378–388.

秦岭南北地区绝对湿度的时空变化及其与潜在蒸发量的关系

蒋冲^{1,2}, 穆兴民¹, 马文勇³, 于新洋³, 刘宪锋⁴, 李建国⁵, 刘思洁⁶, 王飞^{1,*}

1 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100

2 北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

3 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

4 北京师范大学资源学院, 北京 100875

5 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000

6 北京大学遥感与地理信息研究所, 北京 100871

摘要: 基于秦岭南北地区 1960—2011 年的气象观测资料, 分别利用绝对湿度计算公式和 Penman-Monteith 公式估算大气绝对湿度和潜在蒸发量, 并进一步分析了绝对湿度的空间分布规律、时空变化特征及其与潜在蒸发量变化的响应关系。结果表明: (1) 秦岭南北地区绝对湿度由南向北顺次递减, 具有较好的海拔地带性和纬度地带性。季节平均湿度以夏季为最大, 冬季最小。(2) 近 52 年绝对湿度除巴巫谷地表现出不显著下降趋势外, 其它子区均呈现出增加趋势。1986 年和 1998 年是湿度变化的转折点, 1960—1986 年以微弱下降为主, 此后直至 1998 年震荡上升, 1998 年以后呈下降趋势。(3) 年尺度和春、秋两季, 除巴巫谷地外, 湿度和潜在蒸发量均表现出显著的负相关关系; 而在夏季和冬季, 除汉水流域和巴巫谷地不显著正相关以外, 其它区域也均为负相关。年度和春、秋两季两个指标负相关的紧密程度随着区域的南移而逐渐减弱。1960—2011 年间, 年度和季节尺度潜在蒸发和绝对湿度呈反向变化趋势; 而在 1960—1989 年间, 两者同向变化; 1990—2011 年间, 年度和春、冬两季潜在蒸发上升, 而同期的绝对湿度则是先上升再下降。(4) 实际蒸发量的增加导致空气中水汽含量(湿度)增加, 反过来抑制了水面蒸发(潜在蒸发量)。秦岭以北、秦岭南坡、汉水流域和巴巫谷地部分地区绝对湿度和潜在蒸发量为互补关系, 由北向南随着水分限制作用的不断减弱两者逐渐转化为不显著的正相关关系。

关键词: 秦岭南北; 绝对湿度; 时空变化; 潜在蒸发量; 互补关系

Spatial and temporal variation of absolute humidity and its relationship with potential evaporation in the northern and southern regions of Qinling Mountains

JIANG Chong^{1,2}, MU Xingmin¹, MA Wenyong³, YU Xinyang³, LIU Xianfeng⁴, LI Jianguo⁵, LIU Sijie⁶, WANG Fei^{1,*}

1 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

2 The State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

3 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

4 College of Resource Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

基金项目: 中国科学院知识创新工程重点部属项目(KZZD-EW-04); 中国-荷兰政府间联合主题研究项目(中国科学院对外合作重点项目, GJHZ1018 和 NOW, OND1339291); 国家自然科学基金面上项目(41171420); 中国科学院西部之光人才培养计划联合学者项目([2013]165)

收稿日期: 2014-01-19; **修订日期:** 2014-10-27

* **通讯作者** Corresponding author. E-mail: wafe@ms.iswc.ac.cn

5 Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

6 Institute of RS and GIS, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: Based on the meteorological data from weather stations in the northern and southern regions of Qinling Mountains (NSQ), we used absolute humidity estimating formula and Penman-Monteith equation to estimate absolute humidity and potential evaporation, respectively. Furthermore, we analyzed the spatial and temporal distribution and variation of absolute humidity, and tried to give the possible explanations for the reciprocal feedback between absolute humidity and potential evaporation, the result are as following. (1) Absolute humidity presented a clear pattern that high in south and low in north, the order of it was Bawu Valley (BWV), Han River Basin (HRB), northern and southern regions of Qinling Mountains (NSQ), southern slope of Qinling Mountains (SSQ) and northern regions of Qinling Mountains (NRQ), the order of seasonal absolute humidity was summer, autumn, spring and winter. (2) In the past 52a, absolute humidity in most regions, except for BWV, had increasing trend. 1986 and 1998 are the change point, in the period of 1960—1986, it had insignificant decreasing trend, and then increased significantly until 1998, and decreased since 1998. (3) On the annual scale, spring and autumn, in most regions, except for BWV, absolute humidity negatively correlated with potential evaporation, meanwhile, in summer and winter, except for HRB and BWV, absolute humidity and potential evaporation also had the similar correlation relationship. Beside from this, the correlation coefficients on the annual scale, spring and autumn became smaller with the latitude decreased. In the period of 1960—2011, on the annual and seasonal scale, absolute humidity and potential evaporation had contrary change trend, however, in the period of 1960—1989, they showed same change trend. From 1990 to 2011, potential evaporation in year, spring and winter increased significantly, meanwhile, absolute humidity increased initially and then decreased. (4) The contrary change trend of absolute humidity and potential evapotranspiration can be explained by the evaporation complementary theory. The actual evaporation increasing will lead to the increase of water vapor content in the air, also for the absolute humidity, which will inhibit water evaporation. Absolute humidity and potential evaporation had complementary relationship in NRQ, SSQ, HRB, and part of BWV, and the correlation relationship decreased with water limitation reducing, ranging from negative correlation to insignificant positive correlation.

Key Words: the northern and southern regions of Qinling Mountains; absolute humidity; spatial and temporal variation; potential evaporation; complementary relationship

全球变暖已经成为不争的事实^[1]。近年来,众多学者使用历史气象数据对全国和区域尺度气温的变化情况进行了广泛而深入的研究,研究区域包括中国全境^[2]、青藏高原^[3]、黄土高原^[4]、华北平原^[5]、黄河流域^[6]、长江流域^[7]、渭河流域^[8]、汉江流域^[9]、陕西关中^[10]、和陕南地区^[10]等。研究结果表明我国大部分地区存在显著升温趋势,但升温的快慢程度存在明显区域差异。根据气象学有关理论,气温升高会加速空气中水汽分子运动速度从而加速自然气候的蒸发能力^[11-13]。但事实却不尽如此,在全国尺度^[2,14]、干旱半干旱地区^[15]、黄土高原^[4]、黄河流域^[6]、长江流域^[7]、渭河流域^[8]、汉江流域^[9]、陕西关中^[10]等地,无论是蒸发皿蒸发量还是根据 Penman-Monteith 公式计算得到的潜在蒸发量都表现出了波动下降的趋势即所谓的“蒸发悖论”现象。部分学者还对蒸发下降的可能成因进行了探讨,他们发现与蒸发密切相关的气象要素的变化(风速减小和太阳辐射减少^[2-16]等)和人类活动(农业灌溉和下垫面变化^[9-16]等)可以导致蒸发量的变化。目前,关于“蒸发悖论”的机理尚无定论,对于蒸发下降的原因归纳起来主要包括:云量和气溶胶等污染物的增加引起的太阳辐射下降^[2-16],空气湿度的增加导致的水汽压差减小^[5-16],夏季风变化引起的风速下降等^[2-16]。但从全球范围来看,云量和气溶胶增加引起的辐射量(潜热通量)下降是蒸发减少的主要原因^[12-13]。

蒸发是大气中水汽的重要来源,而绝对湿度则是衡量大气干湿程度(水汽含量)的物理量,具体是指单位体积空气中所含水蒸汽的质量,即水汽密度(g/m^3)。绝对湿度的变化可以从侧面反映蒸发能力的变化。土壤

水分蒸发理论表明,地表的蒸发能力与蒸发皿的蒸发能力成正比,蒸发皿蒸发量下降的情况下,地表的蒸发量也应相应减小,而地表蒸发又是大气水汽的重要来源^[17],进而造成大气绝对水汽含量的下降。秦岭南北地区主体位于我国东部季风区西缘,与青藏高原气候区和西北干旱区交汇,气候条件较为复杂。该区整体和各子区在 1960—2011 年间经历了明显的升温过程^[18],而潜在蒸发量却表现出了明显的下降趋势,即“蒸发悖论”现象^[10]。此外,该区干旱事件发生频率较高,气候、农业和水文干旱也日趋严重。过去 52 年间降水量微弱减少,以干旱指数(降水量比上蒸发量)度量的干旱程度有加重趋势,区域整体特别是秦岭以北地区有向暖干化发展的态势^[19]。到目前为止,关于秦岭南北地区蒸发量的已有研究^[7,9-10,16,19]更多地是考虑多个气象要素对蒸发过程的共同作用。通过相关分析、偏相关分析、敏感性分析、归因分析等方法探究蒸发下降的主导因子,所选用的指标也大多是降水、相对湿度和水汽压等,较少涉及到绝对湿度。绝对湿度、相对湿度和水汽压 3 个指标并不相同,所代表的含义也不一致。相对湿度与绝对湿度相比,前者只是表征空气中水汽的相对含量并不能反映出水汽密度的具体值,而且受温度影响较大。而绝对湿度则不然,其不受温度影响,可以较好地量化水汽密度的变化。基于上述认识,本研究利用秦岭南北地区的历史气象观测资料,分别计算了绝对湿度和潜在蒸发量,并分析了绝对湿度的变化趋势。重点探讨气候变暖和蒸发下降(“蒸发悖论”)背景下大气水汽资源(绝对湿度)的变化趋势,绝对湿度和潜在蒸发究竟是同向变化还是逆向变化,细节特征又如何,并尝试利用蒸发互补理论对其变化的可能成因给出了初步的说明和解释。

1 研究区概况

秦岭横亘于我国中部,东西走向,山脉以北属黄河流域,气候较为干旱;山脉以南为长江流域,气候温暖湿润。在气候、植被和土壤分布上,山脉南北存在明显差异,因而,秦岭一直被认为是我国境内的一条重要地理分界线。秦岭的范围有广义和狭义之分,狭义的秦岭只限于陕西南部、渭河与汉江之间的山区;而广义的秦岭东西长约 1500km,西接昆仑山,起自岷山以北,向东延伸经由甘肃境内、陕西南部到达河南境内伏牛山一带。本研究参考周旗等^[18]的研究成果,将研究区域划分成 4 个子区,以研究绝对湿度变化的区域分异特点。分别是秦岭北坡及其以北的暖温带地区(以下简称“秦岭以北”);伏牛山及其以东平原(因大部分区域属秦岭南坡山地,以下简称“秦岭南坡”);秦岭以南的汉水谷地、巴山、涇水谷地及淮河上游北亚热带地区(因大部分区域属汉水流域,下简称“汉水流域”);巴山南麓、巫山谷地及江汉平原西北部(下简称“巴巫谷地”),研究区域和气象站点的空间分布如图 1。秦岭地区具有大陆性季风气候特点,年均气温 12—17℃,≥10℃ 的年积温为 3700—4900℃,年均降水量 600—1200mm,降水变率大,季节分配不均匀,无霜期 200—250d^[18-19]。

2 数据及方法

基于气象观测资料的可获取性(比湿和露点温度资料不可得),选用逐日平均气温和水汽压实测资料推算绝对湿度。数据获取自中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>),主要包括 1960—2011 年间秦岭南北地区 45 个气象台站的逐日最高温度、最低温度、平均气温、相对湿度、水汽压、日照时数和平均风速数据。1960—2001 年 20cm 口径蒸发皿蒸发量逐日观测资料用于检验 Penman-Monteith 公式估算结果的准确性,获取自黄土高原地区气候数据库(<http://www.loess.csdb.cn/pdmp/foreground/viewMetadata.action?id=8>)。上述观测资料在整编发布过程中经过了严格的质量控制,本研究在数据预处理过

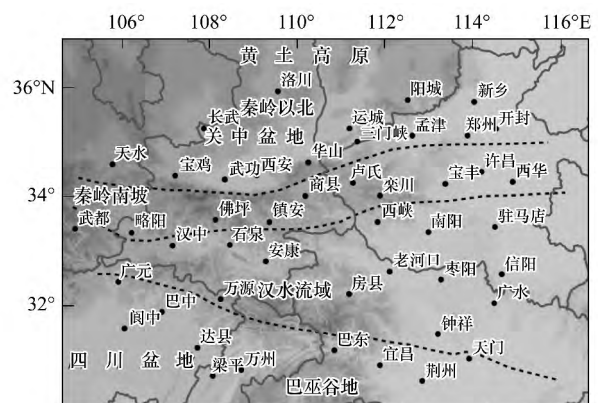


图 1 研究区范围及气象观测站点分布
Fig.1 Location of the study area and distribution of meteorological stations

程中剔除了缺测年份大于 10a 的站点,并用线性回归法和临近站点插补法对漏测数据进行了完善。

根据实际水汽压与温度的关系式^[20]计算绝对湿度,公式为 $a = A \frac{e}{T}$,式中 a 为绝对湿度,即湿空气的水汽密度 (g/m^3); e 为实际水汽压; A 为常数,取为 217; T 为温度 (K)。

依据上述方法分别计算各台站日均绝对湿度,采用算术平均值法分别统计各站点绝对湿度在不同时间尺度的平均值,并进一步求均值获得不同子区和区域整体绝对湿度的长期变化序列。季节划分按照惯例,以 3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12 月至次年 2 月为冬季。为了揭示绝对湿度和蒸发量的时变特征和响应关系,采用目前被广泛认可,准确性较高,由世界粮农组织 (FAO) 推荐的 Penman-Monteith 公式估算潜在蒸发量,估算结果与蒸发皿蒸发量观测数据进行了对比,以检验其估算准确性。Penman-Monteith 公式的具体计算过程和结果检验参见文献^[10,19]。

3 结果与分析

3.1 绝对湿度的空间分布特征

秦岭南北地区年尺度和不同季节绝对湿度呈现南高北低的空间分布格局,具有较好的海拔地带性和纬度地带性,即随着海拔和纬度的上升(下降)而相应减少(增加)(图 2,图 3)。各子区湿度大小排序为巴巫谷地 ($12.0 \text{ g}/\text{m}^3$) > 汉水流域 ($10.6 \text{ g}/\text{m}^3$) > 秦岭南北 ($10.0 \text{ g}/\text{m}^3$) > 秦岭南坡 ($9.2 \text{ g}/\text{m}^3$) > 秦岭以北 ($8.3 \text{ g}/\text{m}^3$),各子区湿度相对较高的站点依次为万州 ($13.3 \text{ g}/\text{m}^3$) > 钟祥 ($11.8 \text{ g}/\text{m}^3$) > 西华 ($10.4 \text{ g}/\text{m}^3$) > 开封 ($9.7 \text{ g}/\text{m}^3$),相对较小的站点依次为广元 ($10.3 \text{ g}/\text{m}^3$) > 栾川 ($8.3 \text{ g}/\text{m}^3$) > 武都 ($8.1 \text{ g}/\text{m}^3$) > 洛川 ($6.7 \text{ g}/\text{m}^3$); 季节尺度上湿度的分布规律与年尺度基本相同(图略),排序为夏季 ($17.3 \text{ g}/\text{m}^3$) > 秋季 ($10.1 \text{ g}/\text{m}^3$) > 春季 ($8.8 \text{ g}/\text{m}^3$) > 冬季 ($4.1 \text{ g}/\text{m}^3$)。上述空间分布格局主要是由于秦岭南北的大部分地区受季风影响,冬季风来自高纬度大陆,水汽较少,而夏季风来自低纬度海洋,高温而潮湿,造成了湿度的年内变化^[21-23]。

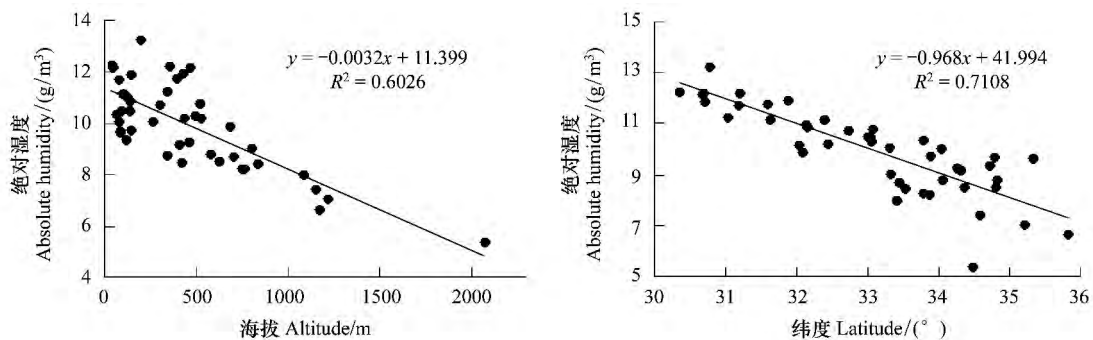


图 2 年平均绝对湿度的海拔地带性和纬度地带性

Fig. 2 The altitudinal and latitudinal zonality of yearly averaged absolute humidity

3.2 绝对湿度的时空变化

3.2.1 年平均绝对湿度年际变化

秦岭南北整体和各子区湿度变化趋势基本一致,除巴巫谷地 ($-0.04 \text{ g m}^{-3} 10\text{a}^{-1}$) 不显著下降外,其它子区均呈现出增加趋势(图 4),增加速率排序为秦岭南坡 ($0.080 \text{ g m}^{-3} 10\text{a}^{-1}$) > 秦岭以北 ($0.028 \text{ g m}^{-3} 10\text{a}^{-1}$) > 汉水流域 ($0.026 \text{ g m}^{-3} 10\text{a}^{-1}$) > 秦岭南北 ($0.023 \text{ g m}^{-3} 10\text{a}^{-1}$)。由时间变化曲线(图 4)和累积距平曲线(图 4)可知,研究区整体和各子区湿度呈现波动变化,各站点变差系数介于 0.05(长武)和 0.02(梁平)之间,区域平均变差系数分别为秦岭以北 0.033、秦岭南坡 0.034、汉水流域 0.025、巴巫谷地 0.019 和秦岭南北 0.024,其中以巴巫谷地的波动幅度最小。近 52 年间,绝对湿度最大值出现在 1998 年,最小值出现在 1966 年,1986 年和 1998 年是变化的转折点,1960—1986 年以微弱下降为主,此后直至 1998 年震荡上升,1998 年以后各子区变化步调基本保持一致,呈同步下降趋势。

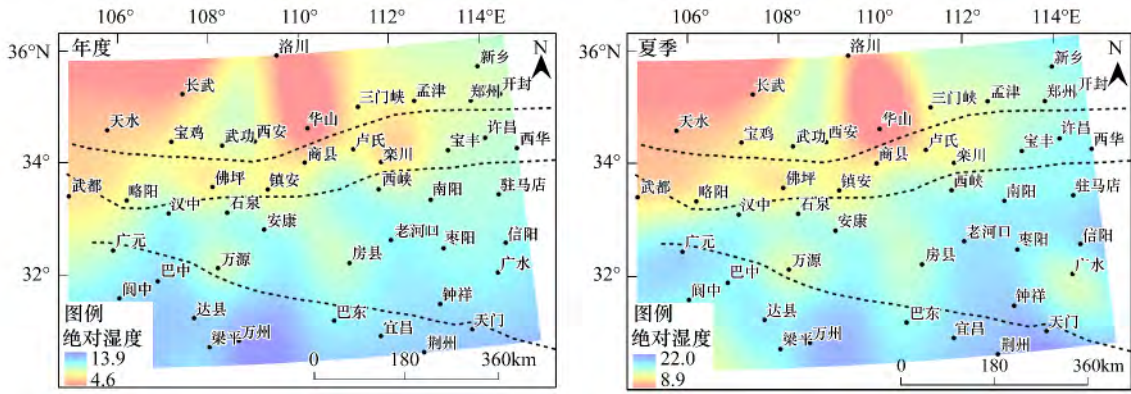


图 3 年度和夏季平均绝对湿度空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of yearly and summer averaged absolute humidity

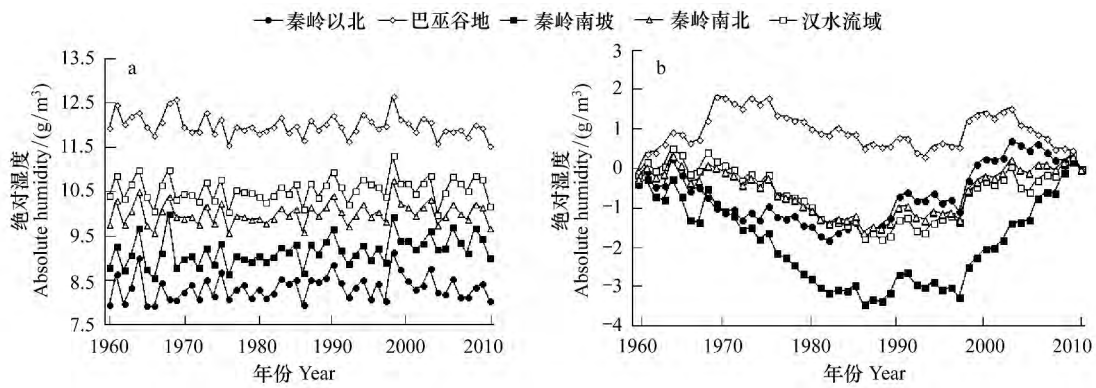


图 4 年平均绝对湿度和累积距平变化时间序列

Fig. 4 Time series of yearly averaged absolute humidity and its accumulative anomaly

年尺度上, 分别有 51%、30% 和 13% 的站点达到 95%、99% 和 99.9% 的显著水平(图 5)。秦岭以北上升速率为 $0.03 \text{ g m}^{-3} 10\text{a}^{-1}$, 上升和下降的站点分别占到 58% 和 42%, 以武功的上升速度最快; 秦岭南坡上升速率为 $0.08 \text{ g m}^{-3} 10\text{a}^{-1}$, 所有站点湿度都上升, 以镇安的上升速度最快; 汉水流域上升速率为 $0.03 \text{ g m}^{-3} 10\text{a}^{-1}$, 上升和下降的站点分别占到 86% 和 14%, 以石泉的上升速度最快; 巴巫谷地的下降速率为 $-0.04 \text{ g m}^{-3} 10\text{a}^{-1}$, 上升和下降的站点分别占到 30% 和 70%, 以阆中的上升速度最快, 巴中的下降速度最快。

3.2.2 季平均绝对湿度的年际变化

春季, 区域整体和秦岭南坡($0.041 \text{ g m}^{-3} 10\text{a}^{-1}$) 以外的各子区绝对湿度均表现出下降趋势, 下降速率排序为巴巫谷地($-0.070 \text{ g m}^{-3} 10\text{a}^{-1}$) > 秦岭以北($-0.034 \text{ g m}^{-3} 10\text{a}^{-1}$) > 汉水流域($-0.026 \text{ g m}^{-3} 10\text{a}^{-1}$) > 秦岭南北($-0.022 \text{ g m}^{-3} 10\text{a}^{-1}$)。其中巴巫谷地的下降趋势通过了 95% 的显著性检验。各子区湿度下降站点所占比例排序为巴巫谷地(80%) > 汉水流域(71%) > 秦岭南北(62%) > 秦岭以北(58%) > 秦岭南坡(33%)。其中 16% 站点的下降趋势达到 95% 及以上显著水平(图 5);

夏季, 区域整体和巴巫谷地($-0.112 \text{ g m}^{-3} 10\text{a}^{-1}$) 以外的各子区绝对湿度均表现出上升趋势, 上升速率排序为秦岭南坡($0.151 \text{ g m}^{-3} 10\text{a}^{-1}$) > 汉水流域($0.037 \text{ g m}^{-3} 10\text{a}^{-1}$) > 秦岭南北($0.020 \text{ g m}^{-3} 10\text{a}^{-1}$) > 秦岭以北($0.005 \text{ g m}^{-3} 10\text{a}^{-1}$)。其中秦岭南坡的上升趋势通过了 95% 的显著性检验。各子区湿度上升站点所占比例排序为秦岭南坡(100%) > 汉水流域(79%) > 秦岭南北(62%) > 秦岭以北(58%) > 巴巫谷地(10%)。其中 22% 站点的上升趋势达到 95% 及以上显著水平(图 5);

秋季, 各子区绝对湿度呈上升趋势, 上升速率排序为秦岭南坡($0.115 \text{ g m}^{-3} 10\text{a}^{-1}$) > 汉水流域($0.059 \text{ g m}^{-3} 10\text{a}^{-1}$) > 秦岭南北($0.051 \text{ g m}^{-3} 10\text{a}^{-1}$) > 秦岭以北($0.017 \text{ g m}^{-3} 10\text{a}^{-1}$) > 巴巫谷地(0.015 g m^{-3}

$10a^{-1}$) ,其中秦岭南坡的上升趋势通过了 95% 的显著性检验。各子区湿度上升站点所占比例排序为秦岭南坡(89%) > 汉水流域(79%) > 秦岭南北(64%) > 巴巫谷地(50%) = 秦岭以北(50%) ,其中 18% 站点的上升趋势达到 95% 及以上显著水平(图 5) ;

冬季 ,各子区绝对湿度均表现出上升趋势 ,上升速率排序为秦岭南坡($0.093 g m^{-3} 10a^{-1}$) > 秦岭南北($0.060 g m^{-3} 10a^{-1}$) > 汉水流域($0.056 g m^{-3} 10a^{-1}$) > 秦岭以北($0.048 g m^{-3} 10a^{-1}$) > 巴巫谷地($0.042 g m^{-3} 10a^{-1}$) ,其中秦岭南坡和秦岭南北整体的上升趋势通过了 95% 的显著性检验。各子区湿度上升站点所占比例排序为秦岭以北(100%) = 秦岭南坡(100%) > 秦岭南北(93%) > 巴巫谷地(90%) > 汉水流域(86%) ,其中 44% 站点的上升趋势达到 95% 及以上显著水平(图 5) 。

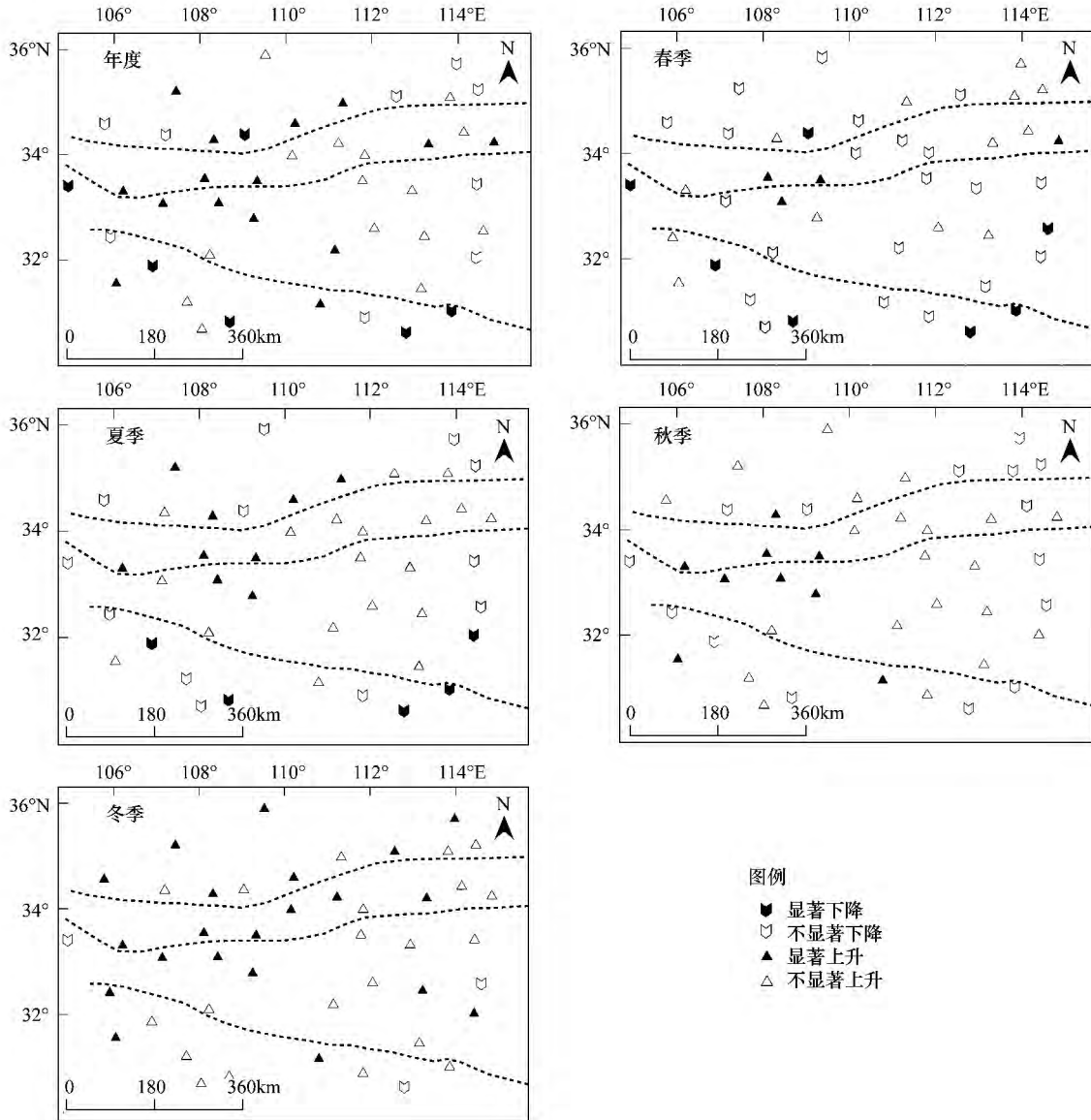


图 5 近 52 年年度和季节平均绝对湿度变化的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of yearly and seasonal averaged absolute humidity variation in recent 52a

3.3 绝对湿度和潜在蒸发量变化的比较分析

蒸发是大气中水汽的重要来源 ,而绝对湿度则是衡量大气干湿程度(水汽含量) 的物理量 ,因此 ,绝对湿度的变化可以从侧面反映蒸发能力的变化。在存在明显“蒸发悖论”现象的背景下 ,本研究试图从绝对湿度角度分析大气水汽资源的变化趋势 ,以及绝对湿度和潜在蒸发变化的响应关系。参考 3.2.1 小节的结果

将绝对湿度变化划分为 3 个时间段,即 1960—1986 年、1987—1998 年和 1999—2011 年。同理根据潜在蒸发量累积距平曲线将其划分为 1960—1989 年和 1990—2011 年两个时间段进行分析。区域整体和各子区潜在蒸发量和绝对湿度相关系数见表 1,两者不同时段气候倾向率及其显著性检验结果见表 2。由表 1 可知,年尺度上,除巴巫谷地外,绝对湿度和潜在蒸发量均表现出显著的负相关关系,即反向变化趋势;季节尺度上,春季和秋季的相关系数都是负值,各子区无一例外,且大部分达到显著水平;夏季和冬季的规律较为接近,汉水流域和巴巫谷地呈不显著正相关,其它区域均为负相关。此外,年度、春季和秋季两个指标的相关系数都表现出由北向南顺次递减的变化规律,说明湿度和蒸发的紧密程度有明显地域差异,随着子区的南移而顺次减弱。

表 1 潜在蒸发量与绝对湿度相关系数

Table 1 Correlation coefficients between potential evaporation and absolute humidity

研究区域 Research area	年度 Year	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
秦岭以北 NRQ	-0.60**	-0.72**	-0.08	-0.59**	-0.09
秦岭南坡 SSQ	-0.44*	-0.62**	-0.37*	-0.64**	-0.10
汉水流域 HRB	-0.24*	-0.44*	0.02	-0.40*	0.01
巴巫谷地 BWV	0.04	-0.07	0.29	-0.14	0.09
秦岭南北 NSQ	-0.33*	-0.52*	-0.02	-0.46*	-0.02

* *0.01 显著水平 0.01 significant level; * 0.1 显著水平 0.1 significant level

NRQ: northern regions of Qinling Mountains; SSQ: southern slope of Qinling Mountains; HRB: Han River Basin; BWV: Bawu Valley; NSQ: northern and southern regions of Qinling Mountains

由表 2 可知,1960—2011 年间,年度、春季和冬季的潜在蒸发量经历了先降后升的变化阶段,1960—1989 年下降,1990—2011 年上升。年尺度上,前 30a 蒸发量的下降速率要明显大于后 22a 的上升速率;春季则刚好相反,后 22a 的速率大于前 30a;冬季蒸发变化在这两个时段的差异相对较小;夏季和秋季的蒸发量变化与年尺度不同,两个时段和 52a 整体都表现出了下降趋势。对于夏季而言,前 30a 的下降速率要大于 52a 整体和后 22a;秋季,不同时段间速率变化差异不大。绝对湿度方面,近 52 年经历了“降—升—降”的变化过程,除春季外,其他季节和年尺度的倾向率均为正值,1960—1986 年和 1999—2011 年下降,而 1986—1998 年增加。其中,后 13a 的下降速度要明显大于前 27a,各季节和子区的变化规律基本一致。

表 2 年度和季节潜在蒸发量和绝对湿度变化倾向率

Table 2 The slope ratio of annual and seasonal potential evaporation and absolute humidity

尺度 Scale	时段 Period	潜在蒸发量 Potential evaporation/(mm/10a)				
		秦岭以北 NRQ	秦岭南坡 SSQ	汉水流域 HRB	巴巫谷地 BWV	秦岭南北 NSQ
年度 Year	1960—1989	-28.13*	-40.65**	-38.45**	-26.67**	-33.47**
	1990—2011	22.83	-3.47	22.30	13.96	13.90
	1960—2011	-6.63	-16.74***	-9.62*	-9.87**	-10.71**
春季 Spring	1960—1989	-4.38	-6.35	-3.16	-1.05	-3.74
	1990—2011	28.09**	16.08*	22.40**	12.64*	19.80**
	1960—2011	4.12	0.54	3.71*	0.99	2.34
夏季 Summer	1960—1989	-22.06**	-26.68**	-27.24**	-18.04**	-23.50**
	1990—2011	-8.18	-10.94	-1.67	-3.47	-6.06
	1960—2011	-10.56***	-12.47***	-11.81***	-9.66***	-11.12***
秋季 Autumn	1960—1989	2.47	-1.64	-3.44	-3.90	-1.63
	1990—2011	-5.47	-11.02*	-4.45	0.24	-5.17
	1960—2011	0.52	-2.01	-0.53	-0.19	-0.55
冬季 Winter	1960—1989	-4.85	-5.52	-4.74*	-2.94*	-4.51*
	1990—2011	4.02	0.91	5.22	2.72	3.22
	1960—2011	-1.36	-1.93	-0.52	-0.68	-1.12

续表

尺度 Scale	时段 Period	绝对湿度 Absolute humidity/(g m ⁻³ 10a ⁻¹)				
		秦岭以北 NRQ	秦岭南坡 SSQ	汉水流域 HRB	巴巫谷地 BWV	秦岭南北 NSQ
年度 Year	1960—1986	0.02	-0.01	-0.08	-0.13*	-0.05
	1987—1998	0.13	0.22	0.34	0.31	0.25
	1999—2011	-0.49**	-0.20	-0.25	-0.44**	-0.35*
	1960—2011	0.03	0.08**	0.03	-0.04	0.02
春季 Spring	1960—1986	0.03	0.01	-0.12	-0.16	-0.06
	1987—1998	0.18	0.29	0.40*	0.49*	0.34
	1999—2011	-0.90*	-0.53	-0.60	-0.55*	-0.65*
	1960—2011	-0.04	0.03	-0.03	-0.07*	-0.03
夏季 Summer	1960—1986	-0.08	0.07	-0.12	-0.17	-0.07
	1987—1998	0.30	0.43	0.55	0.50	0.45
	1999—2011	-0.67*	-0.26	-0.21	-0.78*	-0.48
	1960—2011	0.01	0.15**	0.04	-0.11**	0.02
秋季 Autumn	1960—1986	-0.06	0.01	-0.06	-0.10	-0.05
	1987—1998	0.08	0.16	0.28	0.24	0.19
	1999—2011	-0.14	0.13	0.10	-0.07	0.01
	1960—2011	0.02	0.12*	0.06	0.02	0.05
冬季 Winter	1960—1986	0.01	0.03	-0.02	-0.03	0.01
	1987—1998	-0.04	0.01	0.14	0.01	0.03
	1999—2011	-0.19	-0.01	-0.17	-0.17	-0.14
	1960—2011	0.07*	0.11***	0.09**	0.07*	0.08**

***0.001 显著水平; **0.01 显著水平; * 0.1 显著水平

近 52 年年度和季节潜在蒸发和绝对湿度呈反向变化趋势, 区域整体和各子区基本一致。其中, 年度和春季以外的其它季节湿度上升, 蒸发下降, 而春季表现出来的规律则相反, 湿度下降而蒸发上升; 1960—1989 年间, 年度和季节尺度的蒸发都在下降, 同期的湿度也在下降(个别区域上升), 两者基本保持同向变化趋势; 1990—2011 年间, 年度和春、冬两季的蒸发都在上升, 而同期的湿度则是先同向变化(上升)再反向变化(下降), 区域整体和各子区的规律基本一致。空间分布特征方面(图 6), 52a 整体两者呈反向变化趋势的站点所占比例分别为年度 69%、春季 80%、夏季 62%、秋季 67% 和冬季 78%。春季、秋季和冬季的湿度和蒸发反向变化站点均匀分布, 没有明显的区域聚集特征; 而在年尺度上, 同向变化的站点主要集中于巴巫谷地; 在夏季, 湿度和蒸发同时下降的站点也集中于这一区域。

3.4 绝对湿度和潜在蒸发量反向变化的成因分析

1960—2011 年间, 潜在蒸发量呈下降趋势, 而绝对湿度表现出上升趋势。潜在蒸发与绝对湿度负相关关系明显的现象, 反映出了蒸发皿蒸发量和潜在蒸发量的代表性问题。事实上, 蒸发皿蒸发只是有限水面的自由蒸发, 严格意义上它只代表一个地区接受太阳能量多少, 而不能代表实际蒸发量, 这一点在干旱和半干旱地区体现得尤为明显。绝对湿度反映了空气中的实际水汽含量, 而水汽含量的高低又直接取决于地表实际蒸发量, 换言之, 绝对湿度反映了地面实际蒸发量。蒸发互补理论假定(图 7), 在给定的辐射条件下, 当充分供水时实际蒸散发量与潜在蒸散发量相等; 当下垫面供水量减少时, 实际蒸散发量会减少, 从而释放出更多的能量成为显热, 从而导致潜在蒸散发增加^[24-30]。实际蒸发量受水分与能量条件的控制。如果能量条件固定, 互补关系成立; 如果能量条件变化不大, 互补关系仍然成立; 如果能量条件变化较大, 互补关系可能发生改变^[28-30]。

就全国而言, 在以干旱为主的区域决定实际蒸发最重要的因子是水分, 而在以湿润为主的区域, 则是能量^[24]。王艳君等^[7]分析了长江流域实际蒸发量和潜在蒸发量的关系, 并利用干燥度指数 R (潜在蒸发量与降

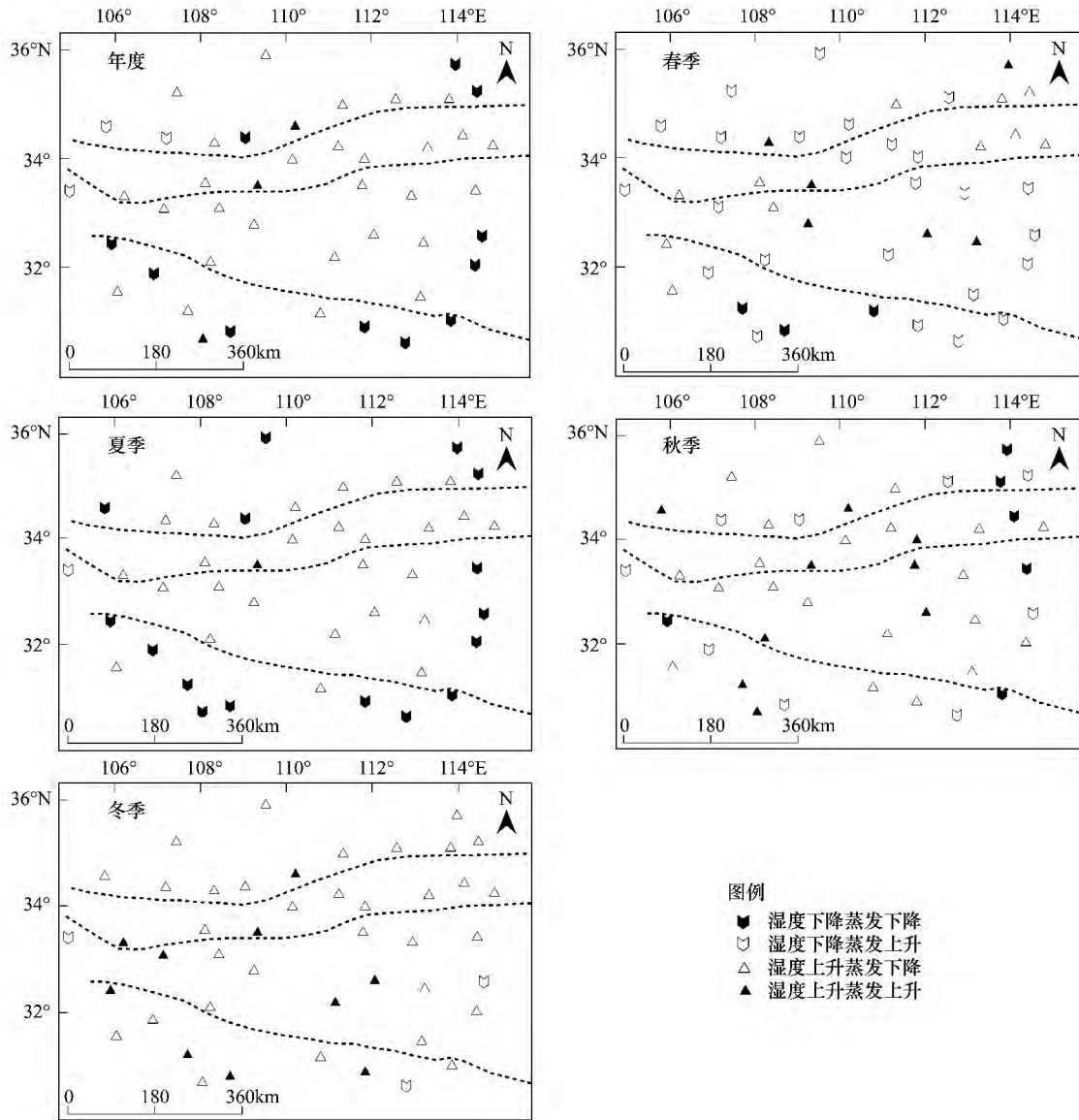


图 6 近 52 年年度和季节绝对湿度和潜在蒸发量变化趋势的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of absolute humidity and potential evaporation change trend in recent 52a and seasons

水的比值) 来判定研究区域的干湿条件。当 $R < 0.8$ 时, 实际蒸发量与潜在蒸发量为明显的正相关关系, 此时气候为湿润条件, 实际蒸发量主要受制于其它气象要素的变化, 与降水关系不大; 当 $R > 1.0$ 时, 即干旱环境, 实际蒸发量与潜在蒸发量为明显的互补关系, 实际蒸发量主要受降水控制。Golubev 等^[25] 通过对美国和前苏联 8 个区域的蒸发皿蒸发量和实际蒸发量的变化研究得到类似的结论, 认为当 $R < 0.7$ 时, 蒸发皿蒸发量与实际蒸发量的变化表现为一致趋势; 当 $R \geq 0.8$ 时, 两者为互补关系。Cong 等^[26] 对中国十大流域水文变化趋势的研究结果表明, 在我国北方干旱区实际蒸发量的下降主要由降水变化引起, 南方湿润区实际蒸发量的下降主要受潜在蒸发量的影响。Teuling 等^[27] 和 Roderick 等^[11] 指出, 在能量受限条件下, 下降的蒸发皿蒸发量通常意味着实际蒸发量的下降; 在水分受限条件下, 即干旱缺水地区, 下降的蒸发皿蒸发量常常意味着实际蒸发量的增加。

本研究所关注的秦岭南北地区地跨两个气候带, 秦岭以北的黄河流域(黄土高原) 属于典型的干旱半干旱地带, 而秦岭以南和汉水流域为半干旱半湿润地区, 巴巫谷地严格意义上讲属于湿润易旱地区(降水充沛但季节性干旱频发)。参考蒋冲等^[19] 的研究成果和王艳君等^[7] 对区域干湿条件的划分标准, 界定当 $R < 0.8$

时为湿润条件,而 $R > 1.0$ 时为干旱环境,由此可知巴巫谷地 ($R = 0.86$) 为湿润区,而汉水流域 (1.06)、秦岭南坡 (1.25) 和秦岭以北 (1.64) 为干旱环境,各子区由北向南潜在蒸发量受水分的限制作用不断减弱,能量限制不断加强。结合干旱指数和表 1 可知,秦岭以北、秦岭南坡、汉水流域和巴巫谷地部分站点绝对湿度(实际蒸发量)和潜在蒸发量为互补关系(显著负相关),由北向南随着水分限制作用的不断减弱两者的负相关关系也逐渐减弱,直至巴巫谷地的正相关,各子区潜在蒸发和绝对湿度变化趋势相反的站点个数也随着区域的南移而逐渐减少;季节尺度上,干燥度指数由北向南顺次递减,蒸发和湿度的相关关系也基本上由(显著)负相关转变为正相关或不显著负相关。上述结果符合蒸发互补理论,也和王艳君等^[7]和 Cong 等^[26]的研究结果趋势上基本一致。

4 结论

(1) 秦岭南北地区年尺度和不同季节绝对湿度由南向北顺次递减,具有较好的海拔地带性和纬度地带性,各子区按湿度大小排序为巴巫谷地 > 汉水流域 > 秦岭南坡 > 秦岭以北。季节平均湿度以夏季为最大,冬季最小。

(2) 秦岭南北整体和各子区绝对湿度变化趋势基本一致,除巴巫谷地表现出不显著的下降趋势外,其它子区均呈现出增加趋势,增加速率排序为秦岭南坡 > 秦岭以北 > 汉水流域 > 秦岭南坡。1986 年和 1998 年是绝对湿度变化的转折点,1960—1986 年以微弱下降为主,此后直至 1998 年震荡上升,1998 年以后呈下降趋势。

(3) 年尺度和春、秋两季,除巴巫谷地外,绝对湿度和潜在蒸发量均表现出显著的负相关关系,而在夏季和冬季,除汉水流域和巴巫谷地呈不显著正相关以外,其它区域均为负相关。年度和春、秋两季两个指标负相关的紧密程度随着区域的南移而逐渐减弱。

(4) 1960—2011 年间,年度和季节尺度潜在蒸发和绝对湿度反向变化;而在 1960—1989 年间,两者同向变化;1990—2011 年间,年度和春、冬两季潜在蒸发上升,而同期的绝对湿度则是先上升再下降。

(5) 潜在蒸发和绝对湿度变化的相反趋势验证了“蒸发悖论”的普遍存在,可以用蒸发互补理论来解释。实际蒸发量的增加导致空气中水汽含量增加,反过来抑制了水面蒸发(潜在蒸发量)。秦岭以北、秦岭南坡、汉水流域和巴巫谷地部分地区绝对湿度和潜在蒸发量为互补关系,由北向南随着水分限制作用的不断减弱两者逐渐转化为不显著的正相关关系;季节尺度上,潜在蒸发和绝对湿度的相关关系也基本上由(显著)负相关转变为正相关或不显著负相关。

参考文献(References):

- [1] Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt K B, Tignor M, Miller H L. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press, 2007: 10-10.
- [2] Yin Y H, Wu S H, Chen G, Dai E F. Attribution analyses of potential evapotranspiration changes in China since the 1960s. Theoretical and Applied Climatology, 2010, 101(1/2): 19-28.
- [3] Liu X M, Zheng H X, Zhang M H, Liu C M. Identification of dominant climate factor for pan evaporation trend in the Tibetan Plateau. Journal of Geographical Sciences, 2011, 21(4): 594-608.
- [4] Li Z, Zheng F L, Liu W Z. Spatiotemporal characteristics of reference evapotranspiration during 1961-2009 and its projected changes during 2011-2099 on the Loess Plateau of China. Agricultural and Forest Meteorology, 2012, 154-155: 147-155.

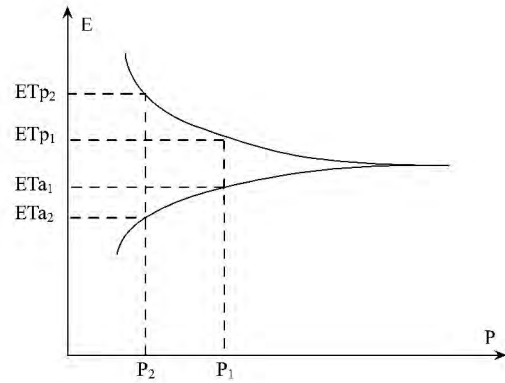


图7 蒸发互补关系曲线

Fig. 7 Curve of evaporation complementary relationship

- [5] Gao G, Xu C Y, Chen D L, Singh V P. Spatial and temporal characteristics of actual evapotranspiration over Haihe River basin in China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2012, 26(5): 655-669.
- [6] Wang W G, Shao Q X, Peng S Z, Xing W Q, Yang T, Luo Y F, Yong B, Xu J Z. Reference evapotranspiration change and the causes across the Yellow River basin during 1957-2008 and their spatial and seasonal differences. *Water Resources Research*, 2012, 48(5): 27-35.
- [7] 王艳君, 刘波, 翟建青, 苏布达, 罗勇, 张增信. 长江流域潜在蒸发量和实际蒸发量的关系. *气候变化研究进展*, 2011, 7(6): 393-399.
- [8] Zuo D P, Xu Z X, Yang H. Spatiotemporal variations and abrupt changes of potential evapotranspiration and its sensitivity to key meteorological variables in the Wei River basin, China. *Hydrological Processes*, 2011, 26(8): 1149-1160.
- [9] 张东, 张万昌, 徐全芝. 汉江上游流域蒸散量计算方法的比较及改进. *资源科学*, 2005, 27(1): 97-103.
- [10] 蒋冲, 王飞, 穆兴民, 李锐. 秦岭南北潜在蒸散量时空变化及突变特征分析. *长江流域资源与环境*, 2013, 22(5): 573-580.
- [11] Robock A, Konstantin V Y, Srinivasan G, Entin J K, Hollinger S E, Speranskaya N A, Liu S, Namkhai A. The global soil moisture data bank. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2000, 81(6): 1281-1299.
- [12] McVicar T R, Roderick M L, Donohue R J, Li L T, Van Niel T G, Thomas A, Grieser J, Jhajharia D, Himri Y, Mahowald N M, Mescherskaya A V, Kruger A C, Rehman S, Dinpashoh Y. Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation. *Journal of Hydrology*, 2012, 416-417: 182-205.
- [13] Roderick M L, Farquhar G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years. *Science*, 2002, 298(5597): 1410-1411.
- [14] Yang H B, Yang D W. Climatic factors influencing changing pan evaporation across China from 1961 to 2001. *Journal of Hydrology*, 2012, 414-415(2): 184-193.
- [15] Han S J, Xu D, Wang S L. Decreasing potential evaporation trends in China from 1956 to 2005: Accelerated in regions with significant agricultural influence. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 154-155: 44-56.
- [16] 李鹏飞, 孙小明, 赵昕奕. 近 50 年中国干旱半干旱地区降水量与潜在蒸散量分析. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(7): 57-63.
- [17] 徐彦伟, 康世昌, 张玉兰, 张拥军. 夏季纳木错湖水蒸发对当地大气水汽贡献的方法探讨: 基于水体稳定同位素的估算. *科学通报*, 56(13): 1042-1049.
- [18] 周旗, 卞娟娟, 郑景云. 秦岭南北 1951-2009 年的气温与热量资源变化. *地理学报*, 2011, 66(9): 1211-1218.
- [19] 蒋冲, 王飞, 穆兴民, 李锐. 气候变化对秦岭南北植被净初级生产力的影响(I)——近 52 年秦岭南北气候时空变化特征分析. *中国水土保持科学*, 2012, 10(5): 56-63.
- [20] 王名才. 大气科学常用公式. 北京: 气象出版社, 1994: 2-382.
- [21] 刘国纬. 水循环的大气过程. 北京: 科学出版社, 1997: 45-50.
- [22] 钱璇, 姚永强, 李俊荣, 尹佳, 张永婧, 刘立勇, 王红帅, 周云贺, 李林, 尤显龙, 马江龙. 全国大气水汽含量分布. *天文学报*, 2012, 53(4): 325-340.
- [23] 张丹, 刘昌明, 付永锋, 邱新法, 刘小莽. 基于 MODIS 数据的中国地面水汽压模拟与分析. *资源科学*, 2012, 34(1): 74-80.
- [24] 刘波, 马柱国, 丁裕国. 中国北方近 45 年蒸发变化的特征及与环境的关系. *高原气象*, 2006, 25(5): 840-848.
- [25] Golubev V S, Lawrimore J H, Groisman P Y, Speranskaya N A, Zhuravin S A, Menne M J, Peterson T C, Malone R W. Evaporation changes over the contiguous United States and the former USSR: a reassessment. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(13): 2665-2668.
- [26] Cong Z T, Yang D W, Ni G H. Does evaporation paradox exist in China. *Hydrology and Earth System Science*, 2009, 13: 357-366.
- [27] Teuling A J, Hirschi M, Ohmura, Wild M, Reichstein M, Ciais P, Buchmann N, Ammann, Montagnani L, Richardson D, Wohlfahrt G, Seneviratne S I. A regional perspective on trends in continental evaporation. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(2), L02404, doi: 10.1029/2008GL036584.
- [28] 杨汉波, 杨大文, 雷志栋, 孙福宝, 丛振涛. 蒸发互补关系在不同时间尺度上的变化规律及其机理. *中国科学 E 辑: 技术科学*, 2009, 39(2): 333-340.
- [29] 韩松俊, 胡和平, 杨大文, 刘群昌. 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. *中国科学 E 辑: 技术科学*, 2009, 39(8): 1375-1383.
- [30] 杨汉波, 杨大文, 雷志栋, 孙福宝, 丛振涛. 蒸发互补关系的区域变异性. *清华大学学报: 自然科学版*, 2008, 48(9): 1413-1416.