

# 近 40 a 中国气候变化趋势及其同蒸发皿观测的蒸发量变化的关系

左洪超 李栋梁 胡隐樵 鲍 艳 吕世华

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000. E-mail: [dblipa@ns.lzb.ac.cn](mailto:dblipa@ns.lzb.ac.cn))

**摘要** 利用中国 62 个设有太阳辐射观测的常规气象站观测资料, 详细分析了蒸发皿观测的蒸发量与环境因子的相互关系及其对全球气候变化的响应。结果表明, 近 40 a 中国西部相对湿度呈上升趋势, 每年最大上升达 0.20%/a。中国东部相对湿度呈下降趋势, 每年最大下降达 -0.22%/a; 61% 的观测站观测的降水量呈上升趋势, 最大上升达 10.52 mm/a<sup>2</sup>; 79% 的观测站观测的总云量呈下降趋势。全国 98% 的台站气温呈上升趋势, 最大上升达 0.11 /a; 76% 的台站地表温度亦呈上升趋势, 而 87% 的台站日温差呈下降趋势。85% 的观测站观测的总辐射和 77% 的观测站观测的 10 m 风速呈下降趋势。全国 66% 的台站蒸发皿观测的蒸发量呈下降趋势, 最大下降达 -24.9 mm/a<sup>2</sup>。蒸发皿观测的蒸发量与许多气象因子之间存在相关, 但与大气相对湿度的相关最好。各种气象要素呈现的变化是对全球气候变化的响应。

**关键词** 气候变化 蒸发皿 蒸发皿观测的蒸发量 趋势 环境因子

人们预期, 全球变暖可能会使大气变干, 导致陆地上水体蒸发量上升, 势必引起水循环的一系列变化<sup>[1~4]</sup>。但目前分析蒸发皿观测的蒸发量时, 却发现有些区域平均的蒸发皿观测的蒸发量存在稳定的下降趋势<sup>[1,5~13]</sup>, 这并不符合上述人们的预期, 并将这一现象称之为蒸发量佯谬<sup>[6]</sup>。1995 年, Peterson 等人<sup>[5]</sup>基于美国和前苏联在 1950~1990 年时段内观测的资料, 发现蒸发皿观测的蒸发量呈稳定下降的趋势, 并将之归因于云量的增加。1998 年, Brutsaert 等人<sup>[6]</sup>考虑地面蒸发与蒸发皿观测的蒸发量的区别, 认为蒸发皿观测的蒸发量的减少是由于地面蒸发量增加的结果。2002 年, Roderick 等人<sup>[7]</sup>对上述两种观点提出质疑, 通过进一步研究认为蒸发皿观测的蒸发量的下降主要是由太阳总辐射的下降引起。Cohen 等人<sup>[8,9]</sup>认为云量和气溶胶的增加是近年来全球太阳辐射下降的主要原因。2002 年, Ohmura 等人<sup>[11]</sup>对蒸发皿观测的蒸发量变化的研究进行了评述, 认为此项研究依然存在很大的争议。他们指出进一步开展此项研究应注意的问题, 特别强调地表实际蒸发量的变化趋势; 认为实际蒸发变化方向不是由温度惟一确定的; 并指出蒸发皿观测的蒸发量趋势仅仅提供了认识实际蒸发变化方向的线索; 还应注意蒸发皿观测的蒸发同水面蒸发、蒸发潜力、以及地表实际蒸发(陆面及海面)的关系和区别; 强调关注最近 10 a 间太阳辐射与蒸发皿观测的蒸发量之间的关系。

本文试图利用中国 62 个设有太阳辐射观测的常规气象站观测资料, 综合分析近 40 a 相对湿度、降水量、总云量、气温、地表温度、日温差、总辐射和风速等气象因子的变化趋势, 并探讨它们对全球气候变化的响应; 进一步研究蒸发皿观测的蒸发量与气象因子的关系及可能原因。这些分析可能对中国气候变化的预测研究是重要的。

## 1 资料介绍

资料选用中国 62 个设有辐射观测的常规气象站观测的 1961~2000 年的年蒸发量(精度 0.1 mm, 下同)、地面接收的年平均太阳总辐射(0.01 MJ/m<sup>2</sup>)、年降水量(0.1 mm)、年平均总云量(10%), 10 m 处观测的年平均风速(0.1 m/s)、1.5 m 处(百叶箱)观测的年平均气温(0.1 )、日温差(0.1 )、相对湿度(1.0%)和年平均地表温度(0.1 )<sup>[14]</sup>。有关观测仪器和资料统计方法见文献<sup>[14]</sup>。

## 2 资料分析结果

### 2.1 近 40 a 气象要素的变化趋势

过去对中国气候变化研究, 多集中于气温上升和降水量以及旱涝灾害等方面<sup>[15,16]</sup>, 其他气象要素的变化较少分析。为了较全面理解中国气候变化, 全面分析气象要素的变化是必要的。在图 1 中给出了所选的中国 62 个站相对湿度、降水量、总云量、气温、地表温度、日温差、风速和总辐射等气象要素 40 a 变化趋势。有关它们的变化趋势统计情况列在表 1 中。

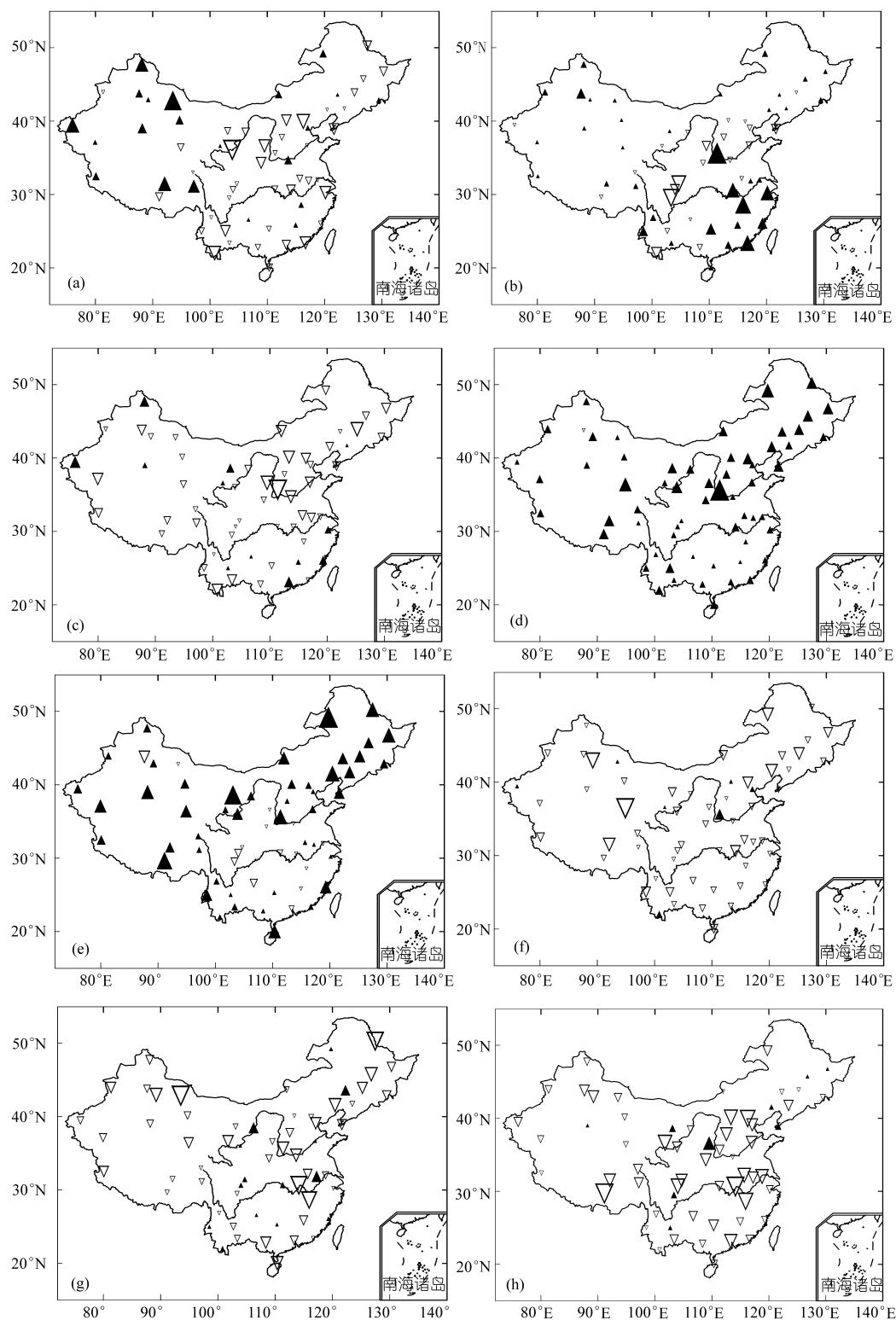


图1 中国近40 a相对湿度(a), 降水量(b), 总云量(c), 气温(d), 地表温度(e), 日温差(f), 10 m 风速(g)和太阳总辐射(h)的变化趋势

▲示气象要素40 a内上升趋势; ▽示气象要素40 a内下降趋势; 符号大小与气象要素升降幅度成正比

表 1 中国近 40 a 气候变化趋势

| 物理量     | 气候变化趋势范围                                         | 上升趋势<br>站数/% | 下降趋势<br>站数/% |
|---------|--------------------------------------------------|--------------|--------------|
| 蒸发潜力    | -24.91 ~ 10.44 mm/a <sup>2</sup>                 | 34           | 66           |
| 相对湿度    | -0.22 ~ 0.20 %/a                                 | 34           | 66           |
| 降水量     | -9.02 ~ 10.52 mm/a <sup>2</sup>                  | 61           | 39           |
| 总云量     | -0.036 ~ 0.016 10%/a                             | 21           | 79           |
| 气温      | -0.0017 ~ 0.11 /a                                | 98           | 2            |
| 地表温度    | -0.041 ~ 0.076 /a                                | 76           | 24           |
| 日温差     | -0.098 ~ 0.041 /a                                | 13           | 87           |
| 总辐射     | -37.70 ~ 21.52 MJ/m <sup>2</sup> ·a <sup>2</sup> | 15           | 85           |
| 10 m 风速 | -0.056 ~ 0.025 m/s·a                             | 23           | 77           |

图 1 表明, 近 40 a 内相对湿度和降水量在西北地区都是上升的趋势, 这与现在正研究的有关西部气候转型的研究结果一致<sup>[17~19]</sup>, 相对湿度在中国东部地区却呈下降趋势, 而降水量在东南沿海仍维持其上升的趋势. 但相对湿度总体趋势是下降的, 其中 66% 的台站观测的呈下降趋势, 每年最大下降达 -0.22%/a; 降水量总体趋势是上升的, 其中 61% 的台站观测的呈上升趋势, 最大上升达 10.52 mm/a<sup>2</sup>. 总云量总体上呈下降趋势. 气温几乎在全国都呈上升趋势, 其中 98% 的台站观测的呈上升趋势, 最大值达 0.11 /a; 地表温度东南沿海呈下降趋势, 但其他广大区域却呈上升趋势; 日温差总体趋势是下降的. 总辐射和风速基本上呈下降趋势. 图 1 和表 1 中各种气象要素呈现的变化趋势, 它们的变化应该是对全球气候变化的响应, 但难于分辨其因果关系.

2.2 蒸发皿观测的蒸发量的变化趋势

图 2 是所选中国 62 个观测站 1961~2000 年间蒸发皿观测的 40 a 平均的蒸发量分布. 它在某种程度上综合反映了大气干燥程度, 干旱地区荒漠上蒸发皿观测的蒸发量远大于湿润地区蒸发皿观测的蒸发量.

图 3 给出了所选 62 个观测站 1961~2000 年间蒸发皿观测的蒸发量的变化趋势. 由图 3 可见, 在所选的观测站中 41 个观测站蒸发皿观测的蒸发量有下降趋势(约为 66%), 下降趋势较大, 最大可达 -24.9 mm/a<sup>2</sup>; 而 21 个观测站蒸发皿观测的蒸发量有上升趋势(约为 34%), 上升趋势较小, 最大上升为 10.4 mm/a<sup>2</sup>. 全国平均蒸发皿观测的蒸发量呈下降趋势. 图 4 分别是以乌鲁木齐(站号 51463)和汕头(站号 59316)为代表的蒸发皿观测的蒸发量下降和上升趋势图. 其中乌鲁木齐是全国蒸发皿观测的蒸发量下降较强的站, 而汕头是全国蒸发皿观测的蒸发量上升较强的站.

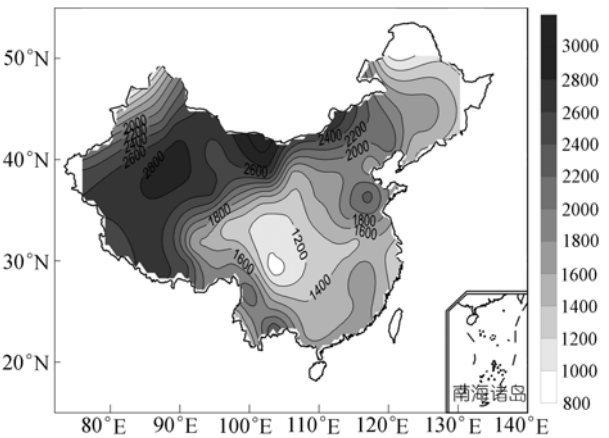


图 2 40 a 平均的蒸发皿观测的蒸发量分布

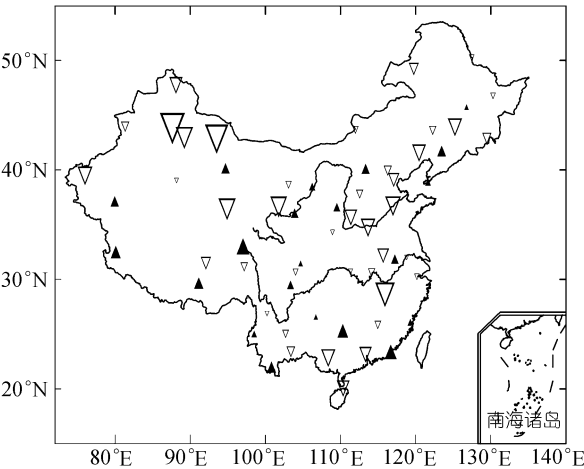


图 3 62 个站蒸发皿观测的蒸发量近 40 a 的变化趋势  
图例说明同图 1

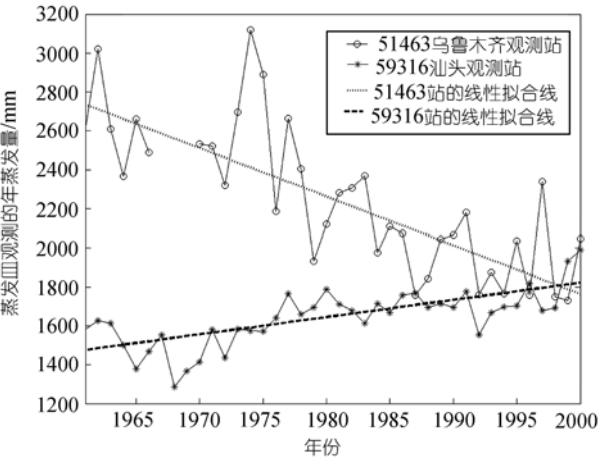


图 4 乌鲁木齐和汕头站蒸发皿观测的蒸发量 40 a 变化

### 2.3 蒸发皿观测的蒸发量的定义及其与气象要素关系的理论分析

用蒸发皿观测蒸发量时,蒸发皿所处的环境与实际地表相同,只是人为地设置了统一的、有限的、特殊的水面。由于蒸发皿很小,加之环境是开放的,蒸发皿对环境的影响可以忽略不计。蒸发皿观测的蒸发量实质上是有限水面蒸发量,它并不代表地表实际的蒸发量,它表征本站地表可能的最大蒸发量,即表征本站地表蒸发潜力,也简称为蒸发潜力。蒸发潜力和陆面地表实际蒸发量是两个不同的概念。蒸发量( $E$ )可用梯度输送理论参数化,

$$E = -\rho C_D (U - U_s)(e_{\text{suf}} - e), \quad (1)$$

式中,  $\rho$ 为大气密度;  $U$ 和 $U_s$ 分别为风速和下垫面移动速度,陆地表面移动速度为零,  $U_s=0$ ;  $e$ 为某一高度上的空气水汽压,  $e_{\text{suf}}$ 为地表面水汽压;  $C_D$ 为曳力系数,它是地表粗糙度、摩擦速度以及大气热力层结稳定度的函数<sup>[20]</sup>。利用公式(1)计算陆面蒸发量时,  $e_{\text{suf}}$ 为实际地表水汽压。但当表述蒸发潜力时,地表面设定为特殊的水面,即地表面水汽压等于饱和水汽压 $e_{\text{suf}}=e_s$ ,这时 $(e_s-e)$ 是大气中水汽距离饱和的程度。饱和水汽压是温度的函数,

$$e_s = e_0 \exp \left\{ \frac{L_V}{R_V} \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right\}, \quad (2)$$

式中,  $T$ 是绝对温度;  $T_0=273.15$  K;  $L_V$ 是水相变潜热;  $R_V$ 是水汽的气体常数;  $e_0$ 是 $T_0$ 时的饱和水汽压。公式(2)表明饱和水汽压是一个温度的升函数。蒸发潜力( $E_{\text{pan}}$ )可用相对湿度表示为

$$E_{\text{pan}} = -\rho C_D U e_s (1 - f). \quad (3)$$

公式(2)和(3)表明,蒸发潜力是空气相对湿度的降函数,而是温度、风速、饱和水汽压和曳力系数的升函数。更重要的是蒸发潜力决定于诸多气象要素,它同这些气象要素的关系不是一种简单因果关系,有些关系是隐式的,甚至各个气象要素之间也会相互牵制。比如,地表辐射加热的加强能导致大气热力层结更加不稳定,这有利于发展湍流从而增大 $C_D$ ,亦即将增强湍流输送能力,所以蒸发潜力也是辐射的升函数;云和降水也可以影响蒸发潜力,当总云量和降水量增加时,它们将减小地表辐射加热,从而抑制湍流发展,导致蒸发潜力降低。再如,由于风速能迅速吹散蒸发皿上的水汽从而增强蒸发,所以蒸发潜力也是风速的升函数;但另一方面风又能使平流作用加

强,如果这种平流属于冷湿平流的话,它又会抑制蒸发。可见蒸发潜力是空气相对湿度、温度、辐射和风速等气象要素的非线性复杂函数,所以蒸发潜力只能是各气象要素之间相互作用的综合效应。各种气象因素的综合效果最终产生了图3、4和表1中近40 a中国蒸发潜力所表现的总体变化趋势。

### 2.4 观测的蒸发潜力与气象要素之间的线性回归分析

为了进一步理解蒸发潜力与各种气象因子之间的复杂关系,下面进一步分析蒸发潜力与各种气象因子的相关性。将资料分析所得近40 a来中国蒸发潜力同各种气象因子之间的相关系数统计特征列于表2中。由表2可见,蒸发潜力与许多气象因子之间存在相关,并且相关的性质随地域而变化。蒸发潜力与大气相对湿度的相关最好,90%的观测站都通过了 $\alpha=0.05$ 的置信度检验,而且都为负相关。蒸发潜力与降水量和总云量的相关通过了 $\alpha=0.05$ 置信度检验的站分别为76%和50%,通过检验的均为负相关。蒸发潜力与气温、日温差和地温的相关通过了 $\alpha=0.05$ 的置信度检验的站分别为66%、74%和73%,但相关的性质随地域变化,由于正相关的站数占优势,所以平均相关显示为正。蒸发潜力与地面接收的太阳总辐射和10 m高处风速的相关通过 $\alpha=0.05$ 置信度检验的站分别占65%和73%,相关的性质也随地域变化,平均相关也显示为正。这些分析表明,蒸发潜力由多个气象因子共同作用所决定,这与蒸发皿观测的蒸发量与气象要素关系的理论分析相一致。

表2 观测的蒸发潜力与影响因子的相关系数统计分析

| 相关因子    | 过 $\alpha=0.05$<br>检验站数/% | 最大正<br>相关系数 | 最大负<br>相关系数 | 平均<br>相关系数 |
|---------|---------------------------|-------------|-------------|------------|
| 相对湿度    | 90                        | 无           | -0.83       | -0.53      |
| 降水量     | 76                        | 0.19        | -0.77       | -0.38      |
| 总云量     | 50                        | 0.26        | -0.69       | -0.27      |
| 气温      | 66                        | 0.65        | -0.65       | 0.26       |
| 总辐射     | 65                        | 0.82        | -0.63       | 0.28       |
| 10 m 风速 | 73                        | 0.87        | -0.40       | 0.31       |
| 地表温度    | 73                        | 0.80        | -0.55       | 0.34       |
| 日温差     | 74                        | 0.80        | -0.69       | 0.35       |

### 2.5 蒸发潜力与气象要素的多元回归分析

云、风、相对湿度、降水量、气温、日温差、地面接收的太阳总辐射和地温对蒸发潜力的影响能力,可用蒸发潜力与气象要素的多元回归加以说明。表3给出8个气象要素的全国平均的偏相关和复相关系

数. 可以看出, 在所列影响蒸发潜力的 8 个气象因子中, 相对湿度的关系最为密切, 其平均偏相关系数为 0.964; 关系最差的是降水量, 平均偏相关系数仅为 0.63. 这 8 个气象因子按其属性可划分为 3 类, 即包括云、相对湿度和降水量等反映湿度的因子; 包括气温、日温差和地面接收的太阳总辐射等热力因子; 风代表动力因子. 图 5 是 3 类因子的代表(相对湿度、日温差和风)的偏相关系数分布.

在蒸发潜力与相对湿度的偏相关系数图上(图 5(a)), 除新疆东部的哈密(0.56)、青藏高原的玉树(0.21)和广州(0.41)的小范围区域偏相关系数较小外, 其余绝大部分偏相关系数都比较大(0.9 以上). 相对湿度影响蒸发潜力最显著的区域有 3 个, 这 3 个区域偏相关系数均接近于 1.0. 第一个为自新疆北部到西藏西部的南北带状区域; 第二个是河套南部到滇桂交界的南北带状区域; 第三个在福建. 对哈密、玉树和广州 3 地而言, 影响蒸发潜力的最重要的气象因子分别是日温差、云和地温, 而不是相对湿度. 平均而言, 降水量对蒸发潜力的影响较小.

日温差是仅次于相对湿度的影响蒸发潜力的热力因子(图 5(b)). 全国绝大多数地方其偏相关系数在 0.9 以上, 关系最密切的区域在青藏高原东部和河套

地区. 有两个站(西宁和宜昌)反映出该地影响蒸发潜力的主要因子不是日温差. 对青藏高原东部的西宁来说, 温度本身对蒸发潜力的影响比气温日较差更大; 而对于处长江中游的宜昌, 空气湿度和温度是最重要的.

风是影响蒸发潜力的动力因子. 由于全球气候变暖, 北半球大气活动中心 and 西风急流向北推移<sup>[21]</sup>, 地面风速减小是蒸发潜力下降的一个主要原因. 从蒸发潜力与风速的偏相关系数图上(图 5(c))可以看出, 有 3 个地方(敦煌、兰州和桂林)风对蒸发潜力的变化起不了多大作用, 或者说风不是关键因子. 这 3 个地方位于小盆地或是山区, 风都比较小, 如敦煌和兰州平均静风频率分别为 33%和 62%. 影响蒸发潜力的关键因子是温度, 以及影响温度的相关要素, 如云和辐射.

根据上述分析, 就不难理解表 2 列出的蒸发潜力同相对湿度、降水量和总云量成负相关, 同温度、辐射、风速成正相关, 以及蒸发潜力与相对湿度、温度、辐射、风速等各种气象因子之间存在复杂的非线性关系. 事实上, 这就是蒸发潜力同这些气象要素的相关属性随地域变化的本质原因. 图 1 观测事实也表明, 近 40 a 来气象要素变化趋势存在一些主调, 气温是上升趋势, 日温差是下降趋势, 总云量、总辐射和风

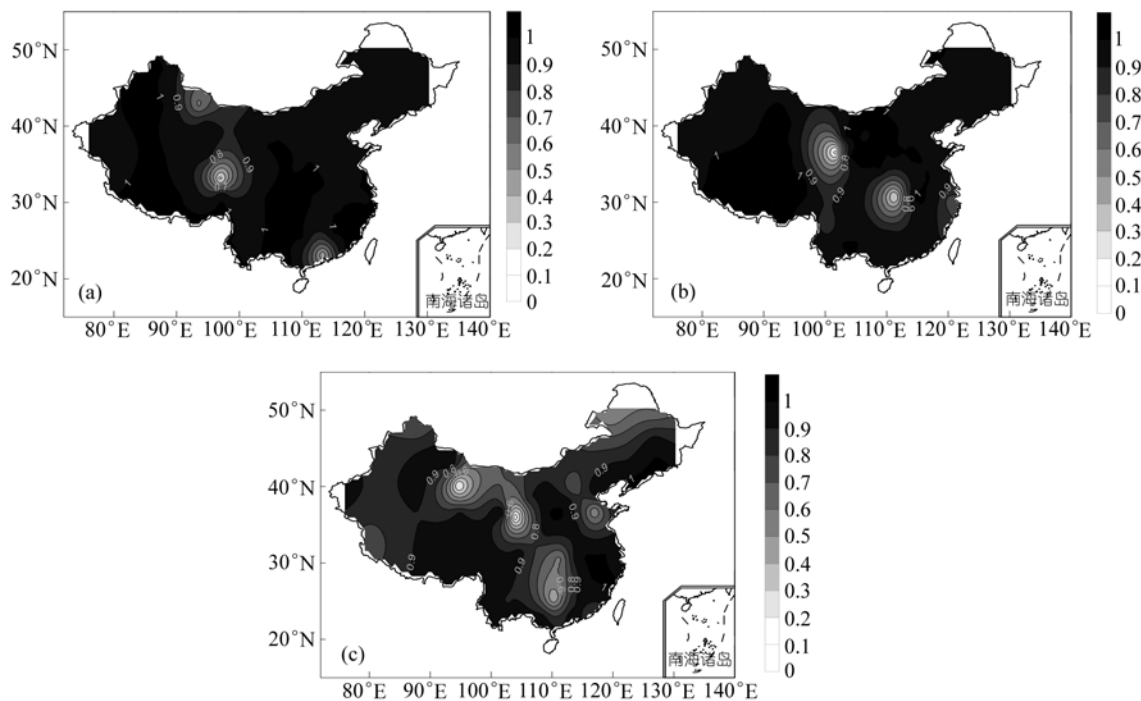


图 5 蒸发潜力和相对湿度(a),日温差(b)及风(c)的偏相关系数分布

速也是下降趋势。图3、4和表1中近40 a中国蒸发潜力所表现的总体变化趋势就是它们共同作用的结果。蒸发潜力是多种环境因子通过非线性相互作用的结果,其中大气水汽距离饱和程度是主导因子。如果仅仅考虑单个环境因子对蒸发潜力的影响肯定会产生各种偏颇。引言中所述“全球变暖可能会使近地面层变干,导致陆地上水体蒸发潜力上升。资料分析表明有些区域平均的蒸发潜力存在稳定的下降趋势,这不符合上述人们的预期,并将这一现象称之为蒸发量佯谬”的结论,可能是仅考虑单个环境因子对蒸发潜力的影响而造成的一种误解。

表3 全国平均的蒸发潜力与气象因子多元回归的偏相关及复相关系数

| 要素 | 云     | 风     | 相对湿度  | 降水量   | 气温    | 日温差   | 总辐射   | 地温    | 复相关系数 |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 系数 | 0.909 | 0.868 | 0.964 | 0.630 | 0.929 | 0.954 | 0.850 | 0.918 | 0.863 |

### 3 结论与讨论

蒸发(散)既是地表热量平衡的组成部分,又是水量平衡的组成部分,是水循环中最直接受土地利用和气候变化影响的一项;反过来,蒸散(发)又可减小辐射向感热的转化,增加空气湿度,提高最低气温及降低最高气温,起到调节气候的作用。再者,蒸发潜力是水文、气象台站的常规观测项目之一,是水资源评价、水文研究、水利工程设计和气候区划的重要参考指标。因此,进行蒸发(散)变化的研究,对深入了解气候变化规律及探讨气候变化的原因具有十分重要的意义。本文的主要结论可归纳如下:

1) 常规气象资料分析表明,近40 a内中国66%的台站相对湿度呈下降趋势,每年最大下降达 $-0.22\%/a$ ; 61%的台站降水量呈上升趋势,最大上升达 $10.52\text{ mm}/a^2$ ; 79%的台站的总云量呈下降趋势; 98%的台站的气温呈上升趋势,最大上升达 $0.11\text{ }^{\circ}\text{C}/a$ ; 76%的台站的地表温度呈上升趋势; 87%的台站的日温差是下降的; 85%的台站的总辐射和77%的台站的风速呈下降趋势。同期66%台站的蒸发潜力呈下降趋势,最大下降达 $-24.9\text{ mm}/a^2$ 。

2) 物理分析表明蒸发潜力与许多气象因子之间存在相关。蒸发潜力与气象环境因子的线性相关系数的属性随地域变化正好印证了物理分析的结果。多元线性回归结果表明蒸发潜力确实是各种气象要素综合作用的效应,而且蒸发潜力与大气相对湿度的相关最好。仅用单个环境因子难以解释蒸发潜力

的变化。

致谢 本工作受中国科学院知识创新工程重大项目(批准号:KZCX1-SW-04)和中国科学院寒区旱区环境与工程研究所知识创新项目(批准号: CACX2004117)资助。

### 参 考 文 献

- Ohmura A, Wild M. Is the hydrological cycle accelerating? *Science*, 2002, 298: 1345~1346 [DOI]
- IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the International Panel on Climate Change. In: Houghton J T, ed. New York: Cambridge Univ Press, 2001. 193~227
- 叶笃正. 中国的全球变化与可持续发展. *地球科学进展*, 1999, 14(4): 317~318
- 姚檀栋, 徐柏青, 蒲健辰. 青藏高原古里雅冰芯记录的轨道、亚轨道时间尺度的气候变化. *中国科学, D辑*, 2001, 31(增刊): 287~294 [摘要] [PDF]
- Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y. Evaporation losing its strength. *Nature*, 1995, 377: 687~688 [DOI]
- Brutsaert W, Parlange M B. Hydrological cycle explain the evaporation paradox. *Nature*, 1998, 396: 30~31 [DOI]
- Roderick M L, Farquhar G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years. *Science*, 2002, 298: 1410~1411
- Cohen S, Stanhill G. Evaporative climate changes at Bet-Dagan, Israel, 1964~1998. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 111(2): 83~91 [DOI]
- Stanhill G, Cohen S. Global dimming: A review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107(4): 255~278 [DOI]
- Chattoopadhyay N, Hulme M. Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, 87(1): 55~72 [DOI]
- 邱新法, 刘昌明, 曾燕. 黄河流域近40 a蒸发量的气候变化特征. *自然资源学报*, 2003, 18(4): 437~441
- Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, et al. Aerosols, climate, and the hydrological cycle. *Science*, 2001, 294: 2119~2124 [DOI]
- Thomas A. Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration trends over China. *International Journal of Climatology*, 2000, 20(4): 381~396 [DOI]
- 中国气象局. 地面气象观测规范. 北京: 气象出版社, 2003. 11~79
- 符淦斌, 董文杰, 温刚, 等. 全球变化的区域响应和适应. *气象学报*, 2003, 61(2): 245~250
- 王绍武, 龚道溢. 中国气候变化的研究. *气候与环境研究*, 2002, 7(2): 137~145
- 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨. *冰川冻土*, 2002, 24(3): 219~226
- 左洪超, 吕世华, 胡隐樵. 中国近50年气温及降水量的变化趋势分析. *高原气象*, 2002, 24(2): 137~145
- 黄玉露, 李栋梁, 王宝鉴, 等. 西北地区近40 a降水异常的时空特征分析. *高原气象*, 2004, 23(2): 245~252
- 左洪超, 胡隐樵. 黑河试验区沙漠和戈壁的总体输送系数. *高原气象*, 1992, 11(4): 371~380.
- 钟海玲, 李栋梁. 中国北方4月沙尘暴与西风环流的关系. *高原气象*, 2005, 24(1): 104~111

(2004-08-26 收稿, 2005-01-17 收修改稿)