第 21 卷 第 1 期 自 然 资 源 学 报 Vol.21 No.1
2006 年 1 月 JOURNAL OF NATURAL RESOURCES Jan.,2006

中国水面蒸发量的变化

任国玉[1], 郭 军[2]

(1.中国气象局 气候研究开放实验室,国家气候中心,北京 100081;2.天津市气象局 气候服务中心,天津 300074)

摘要:采用 600 余个台站资料,对全国及主要流域蒸发皿记录的蒸发量及相关气候要素变化趋势进行了分析。1956—2000 年期间,我国水面蒸发量呈显著下降趋势,东部、南部和西北地区下降更多。我国长江、海河、淮河、珠江以及西北诸河流域的年平均水面蒸发量均明显减少,海河和淮河流域减少尤为显著,黄河和辽河流域减少也较明显,但松花江和西南诸河流域未见明显变化。长江、淮河流域夏季减少速率最大,珠江、辽河以春季减少为主,海河、西北诸河流域春、夏两季都显著减少,黄河、东南诸河、西南诸河等流域四季均有轻度减少,松花江流域四季变化趋势都不明显。全国多数地区日照时数、平均风速和温度日较差同水面蒸发量具有显著的正相关性,并与水面蒸发呈同步减少,为引起大范围蒸发量趋向减少的直接气候因子;地表气温和相对湿度一般在蒸发减少不很显著的地区与蒸发量具有较好的相关性,绝大部分地区气温显著上升,相对湿度稳定或微弱下降,表明其对水面蒸发量趋势变化的影响是次要的。

关 键 词:水面蒸发;趋势变化;气候变化;气候因子;中国大陆

中图分类号:P332.2 文献标识码:A 文章编号:1000-3037(2006)01-0031-14

陆地水量平衡的分量主要包括降水、蒸发和径流。蒸发是水循环中重要组成部分。影响蒸发的因子非常多,但一般认为气温是影响蒸发的重要因子。在其它条件不变的情况下,当气温升高时,近地表的空气将变得干燥,陆面和水体的蒸发量也相应增加。在全球气候变暖的情况下,人们指望陆地地区的陆面和水面蒸发将明显增加,并可能引起更严重的干旱[1]。然而,尽管已经观测到全球和北半球近 50 年来年平均气温呈现显著上升,世界不少陆地地区观测到的水面蒸发量(蒸发皿记录的蒸发量)却出现持续下降趋势,这种情况在美国、前苏联、中国、印度、日本和澳大利亚等国家均有报道[2~10]。因此,观测事实与理论期望存在重大矛盾,这在气候变化和水循环领域被称为"蒸发悖论"。

目前,对"蒸发悖论"的解释大体可分为两种:一是认为太阳总辐射和净辐射减少是造成观测的水面蒸发减少的主要原因,而引起辐射减少的原因主要是云量或气溶胶含量增加[5,7,8];二是认为蒸发皿记录的蒸发与陆面实际蒸发存在互补的关系,当陆面实际蒸发增加时,作为蒸发皿环境的大气水汽含量会增多,记录的水面蒸发也就减少[4,11]。显然,这两种解释差别非常大。如果第一个解释成立,则说明气候学界对太阳辐射在蒸发中的作用重视还非常不够,气温变化的作用也被夸大了;如果第二个解释成立,则说明现有对实际陆面蒸发与大气温度间关系的理解基本上是准确的。

中国领土面积广大,环境条件多样,观测资料丰富,分析中国的蒸发观测资料不仅可以为水资源管理提供新的信息,而且也有助于加深对蒸发问题的理解。近年来,这方面的研究

收稿日期:2005-08-19;修订日期:2005-09-06。

基金项目:科技部"十五"科技攻关项目课题"全球与中国气候变化的检测和预测(2001BA611B-01)";水利部"全国水资源综合规划"专题研究项目"气候变化对我国水资源情势影响的综合分析"。

第一作者简介:任国玉(1958-),男,辽宁康平人,研究员,博士,主要从事气候变化和古气候学研究。

致谢:感谢课题组其他成员丁一汇、陈德亮、张莉、高歌、陈峪、徐铭志、王颖和曹建廷等的支持和帮助。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

已经开展很多[8~10,12~14],发现我国大部分地区观测的蒸发量呈明显下降趋势,并把这种变化和日照百分率或太阳辐射的变化联系起来[9,10]。但是,这些研究或者局限在某一个地区[10,12,13],或者采用了比较稀疏的台站观测资料[8],或者关注的重点不在气候变化或趋势分析上[14]。此外,已有的研究也没有从全国范围分析水面蒸发与其它相关气候要素变化的联系。本文利用更密集的气象台站观测资料,对全国及各主要流域蒸发皿记录的蒸发量及相关气候要素变化趋势进行分析,并对造成蒸发量变化的气候因子做进一步检测。

1 资料和方法

全国总共有 600 余个国家基准/基本台站在 1956—2000 年间使用蒸发皿观测水面蒸发量。观测记录保存在中国气象局国家气象信息中心气象资料室。其中,早期台站数量较少,1956 年只有 428 个站,20 世纪 60 年代以后数量较多且变化不大。还有一些台站存在缺测现象。整个记录时期均无缺测的台站有 222 个,缺测时间少于 2 年的有 304 个,1971—2000 年期间无缺测的台站有 466 个。本文对缺测严重的台站予以剔除,只选用不连续缺测少于 2 年的台站,并把缺测年的数据用 1971—2000 年 30 年平均值代替。从 2000 年开始,我国北方台站冬半年使用小型蒸发皿观测蒸发量,夏半年则采用大型蒸发池观测。由于一年内使用不同的观测仪器,无法计算年水面蒸发量。因此,本文分析时间截止到 2000 年。

小型蒸发皿由一种镀锌铁或其它合金制成,直径 20cm。用这种仪器观测的蒸发量,代表理想水体的蒸发,在湿润微风气候条件下与实际的水面蒸发量比较接近。尽管仍然比实际陆面蒸发量要大,因而代表了一种潜在蒸发能力,但相对干燥地区而言,湿润地区的蒸发皿观测蒸发量也比较接近实际陆面蒸发量;在干燥气候或干燥季节,由于蒸发皿中水体小,器皿外壁温度高,会使观测到的蒸发量比真实水面蒸发量显著偏大,比实际陆面蒸发量大得更多。虽然小型蒸发皿蒸发量不能确切地代表真实水体的蒸发,更不能代表实际陆面蒸发,但对于了解水面蒸发量的时间变化规律和趋势是有价值的。为了简化起见,本文统一把蒸发皿观测的蒸发量简称为水面蒸发量或蒸发量。

笔者对蒸发资料进行了质量检验,剔除了个别错误数据,但对于更换蒸发皿和台站迁移等造成的非均一性没有进行检验和订正。根据对天津塘沽站历史报表记载,该站在 1981、1983、1997、2000 年更换过蒸发皿,但型号未改,材质也没变。从塘沽站的年蒸发量时间序列看,检测不出有明显的断点。因此,仪器更换可能对蒸发量时间序列的均一性没有显著影响。迁站的影响可能很明显,今后需要加强分析。

在计算水面蒸发及其它要素区域平均时间序列时,首先把整个区域按经纬度划分为 2°×2°的网格,将每个网格里所有站点的数据做算术平均,得到各网格的平均值;然后将各网格的平均值应用面积加权平均方法,得到流域或全国的平均值,获得各要素的区域平均时间序列。气候变化趋势或速率的估计采用最小二乘法,计算样本与时间序号的线性回归系数。

影响水面蒸发的气候因素包括太阳辐射、风速、气温、气温日较差、空气湿度或饱和差等。本文统计了全国和各大江河流域平均年、季节水面蒸发量与上述气候要素之间的相关系数。湿度采用相对湿度,太阳辐射用日照时数替代,只分析年蒸发量与各要素之间的关系,季节情况不予讨论。为了解各气候要素与水面蒸发关系的空间分布情况,还计算了研究时段内各单站年、季节水面蒸发量与主要气候要素之间的相关系数,并以相关系数等值线形式表示。在处理日照时数、平均风速、相对湿度、平均气温、平均最高气温、平均最低气温时,采用距平的方法,即将各个站逐年值针对 1971—2000 年 30 年平均值计算差值。将缺测年剔除,再计算各网格内的距平平均值,得到各要素区域平均的距平值序列。

当然,简单的统计相关分析也有一定局限性。由于各个气候影响因子之间存在相互作用,简单相关统计分析可能会掩盖某些因子同水面蒸发的关系。本文进一步采取多元回归分析方法,建立全国十大流域各气候影响因子与蒸发的标准化多元回归方程,通过 F 统计量检

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnl

验各因子对蒸发量的方差贡献,来确定影响不同流域水面蒸发的主要气候因子。

四季的划分采用气象季节,即 12—2 月为冬季,3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季。一级流域区采用全国水资源综合规划的划分方法,把全国划分为长江流域、黄河流域、海河流域、淮河流域、珠江流域、辽河流域、松花江流域、西北诸河流域、东南诸河流域和西南诸河流域。

2　蒸发量的变化特征

年(1—12 月):全国多年平均蒸发量为 1 767.4mm。年蒸发量在 1980 年代末以前下降明显,由 1 840mm 以上持续下降到 1990 年代初期的 1 740mm 左右;1990 年代以后呈轻微上升趋势。长期变化速率为-30.7mm/10a,通过了 0.01 的信度检验。1980 年前后变化趋势有明显的差异,之前的变化速率为-24.0mm/10a,之后仅为-1.6mm/10a(图 1e)。

冬季蒸发量全国平均为 167.0mm,占全年总量的 9.5%。在分析时段内,冬季变化趋势不明显。1960 年代有一很小的下降趋势;1970、1980 年代在均值附近振荡;1990 年代起有一个较小的上升趋势。1956—2000 年期间变化速率仅为-1.6mm/10a(图 1a)。春季蒸发量全国平均为 547.1mm,占全年总量的 31.0%。春季变化明显,从 1960 年代最大值持续下降,1980 年代末期达到最小值,1990 年代起有一明显的回升趋势。1956—2000 年期间变化速率为-9.5mm/10a,通过了 0.01 的信度检验(图 1b)。夏季蒸发量全国平均为 681.7mm,占全年总量的 38.6%。夏季蒸发量变化幅度最大,由 1960 年代平均 710mm 持续下降到 1990 年代的 670mm。整个时段变化速率为-13.7mm/10a,通过了 0.01 的信度检验(图 1c)。秋季蒸发量全国平均为 366.1mm,占全年总量的 20.7%。秋季蒸发量变化与春季相似,从 1960 年代开始呈缓慢的下降趋势,1980 年代中期下降到最低值,而后呈平缓上升趋势,长期变化速率仅为-5.6mm/10a(图 1d)。

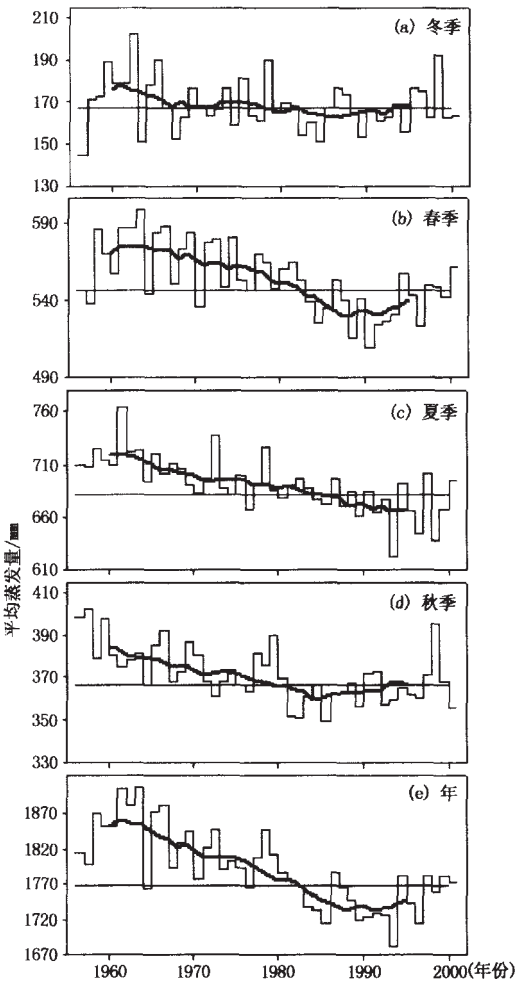

图 1　全国平均年和季节蒸发量变化(1956—2000 年)

Fig.1　Annual and seasonal mean pan evaporation of China: 1956-2000

图 2 给出全国年蒸发量变化趋势空间分布情况。除东北地区北部和西部、甘肃南部、西藏西部以及四川、云南、西藏交界地区显示增加趋势外,全国绝大部分地区年呈减少趋势。中国东部和南部减少速率较明显,其变化速率均在-20mm/10a 以下,特别是黄淮、江淮以及广西东部和广东西部,变化速率在-40mm/10a 以下。中国西北部为减少趋势最大的区域,除新疆西南部外,新疆、青藏高原以及甘肃北部,绝大部分地区变化速率都在-40mm/10a 以下,新疆东部和甘肃北部则达-150mm/10a 左右。

全国冬季蒸发量变化趋势在东北地区大部、内蒙古东部、青藏高原东部以及新疆西部表现为轻微上升,青藏高原大部为下降,塔里木盆地和西藏南部下降速率最大(图略)。其它地区均表现为下降,但不是很显著。春季全国大部分地区的蒸发量呈下降趋势,仅在东北地区

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnl

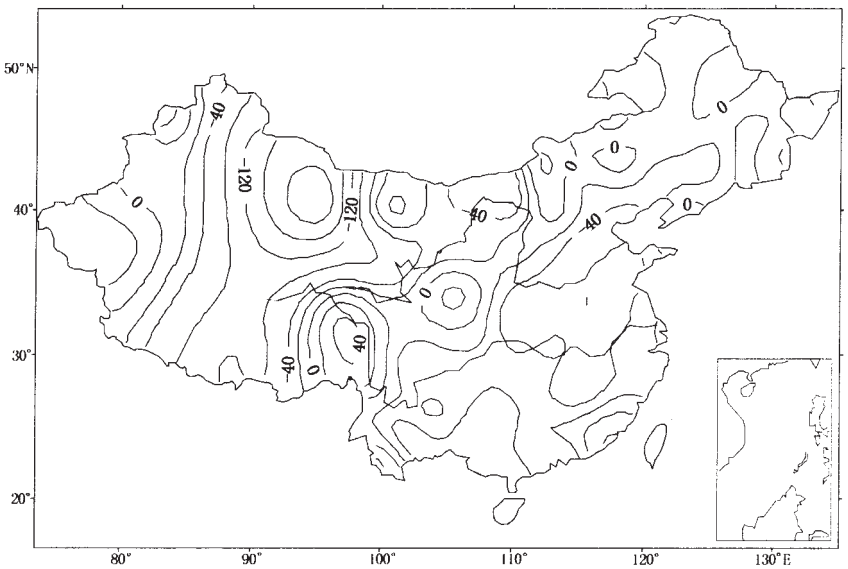

图 2 1956—2000 年全国年蒸发量变化速率(mm/10a)空间分布

Fig.2 Rate of change of annual pan evaporation from 1956 to 2000

北部、新疆西部以及青藏高原东部等地区有很小区域表现为增加。新疆的东部、青藏高原大部、海河流域下游、黄河流域下游、广西等地区减少趋势明显。夏季除松花江流域、辽河流域、新疆西部、西藏西部、四川东南部、云南以及西藏东部略有增加外,全国大部分地区都表现为减少趋势,其中新疆东部、甘肃西北部以及青海北部显著减少,海河流域南部、淮河流域、长江中下游减少趋势也很显著。秋季蒸发量变化趋势的空间分布与夏季较相似。

3 各流域蒸发量变化

长江流域:年平均蒸发量为 1 413.6mm。1950、1960 年代为历史最高时段,1970 年代起迅速下降,1980 年代初转至平均值以下,而后在均值附近振荡,并有微弱的上升趋势。线性变化速率为-37.5mm/10a,通过 0.01 信度检验。蒸发量的下降主要发生在 1956—1980 年期间,此后变化趋缓;变化主要发生在夏季和秋季(表 1)。

黄河流域:年平均蒸发量为 1 689.3mm。1960、1970 年代变化趋势不明显,1980 年代初

表 1 1956—2000 年平均蒸发量气候变化速率(mm/10a)

Table 1 Rate of change of area-averaged annual and seasonal pan evaporation for the country and the ten first-class discharge basins from 1956 to 2000

	冬	春	夏	秋	年
长江区	-3.5	-6.9	-17.9*	-7.4*	-37.5*
黄河区	-1.5	-9.7	-12.1	-2.0	-21.1
海河区	-2.3	-26.2*	-18.7*	-7.2	-51.7*
淮河区	-5.3	-11.0	-28.7*	-10.2	-54.6*
珠江区	-5.9	-14.3*	-6.0	-5.1	-35.9*
辽河区	3.5	-15.8*	-3.4	-0.6	-16.6
松花江区	1.3	-2.0	-2.6	0.7	-0.9
西北诸河区	-0.2	-13.6*	-23.2*	-8.0*	-38.2*
东南诸河区	-3.4	1.6	-10.7	-7.3	-19.8
西南诸河区	-1.7	-6.8	-4.8	-4.3	-22.8*
全国平均	-1.6	-9.5*	-13.7*	-5.6*	-30.7*

注:表中带 * 的表示通过 α =0.01 的信度检验。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnl

转为均值以下，并继续下降到 1990 年代初，而后呈现较明显的上升趋势。线性变化速率为-21.1mm/10a，通过 0.05 的信度检验。1956—1979 年的变化速率为-23.2mm/10a，而 1980—2000 年则以 57.5mm/10a 的速率上升。趋势变化主要发生在春季和夏季。

海河流域：年平均蒸发量为 1 754.5mm，春、夏季占全年总量的 70%以上。1960 年代变化趋势不明显，1970 年代初迅速下降，1980 年代初降到均值以下，并继续呈微弱减少趋势。线性变化速率为-51.7mm/10a，通过了 0.01 的信度检验。1956—1979 年的变化速率为-47.6 mm/10a，1980—2000 年的变化速率为-31.5mm/10a。春季减少最明显，其次是夏季。

淮河流域：年平均蒸发量为 1 509.9mm。1960 年代起蒸发量迅速下降，1980 年代初转为均值以下，1980 年代中期达到历史最低值。变化速率为-54.6mm/10a，为全国各流域之最，通过了 0.01 的信度检验。淮河流域年蒸发量的减少主要发生在 1956—1979 年期间，变化速率为-41.8mm/10a。夏季蒸发量的减少最明显。

珠江流域：年平均蒸发量为 1 615.6mm。1960 年代起蒸发量迅速下降，1980 年代初达均值以下，1990 年代初迅速下降到历史的最低点。变化速率为-35.9mm/10a，通过了 0.01 的信度检验。1956—1979 年的变化速率为-40.8mm/10a，而 1980—2000 年的变化速率仅为-17.7mm/10a，因此，淮河流域年蒸发量的减少主要发生在 20 世纪 80 年代以前。春季蒸发量的减少比较明显。

辽河流域：年平均蒸发量为 1 604.9mm。辽河流域蒸发量以春季为最显著，夏季无明显变化。1960 年代起年蒸发量迅速下降，1970 年代初到 1980 年代中在均值附近波动，1980 年代中开始迅速下降到历史的最低点，1990 年代有较明显的上升趋势。变化速率为-16.6mm/10a，通过了 0.05 的信度检验。1956—1979 年的变化速率为-22.5mm/10a，而 1980—2000 年变化速率为 3.3mm/10a。春季的趋势变化最为明显。

松花江流域：年平均蒸发量为 1 281.0mm。春、夏季蒸发量占全年总量的 70%以上。1956—2000 年的变化速率仅为-0.9mm/10a。1960 年代起蒸发量迅速上升，1970 年代末到达历史最高值，1956—1979 年的变化速率为 70.9mm/10a；1980 年代初期迅速下降到历史的最低点，1980 年代中期以来呈现较明显的上升趋势，1980—2000 年变化速率为 16.5mm/10a。松花江流域是全国惟一的年蒸发量减少不明显的大河流域。

西北诸河流域：年平均蒸发量为 2 275.3mm。年蒸发量变化速率为-38.2mm/10a，通过了 0.01 的信度检验。蒸发量的减少主要发生在春、夏两季。1956—1979 年的变化速率为-33.4mm/10a，1980—2000 年的变化速率为-25.9mm/10a，西北诸河流域年蒸发量为持续减少。

东南诸河流域：年平均蒸发量为 1 381.8mm。呈不显著下降趋势，变化速率为-19.8mm/10a。1980 年前后两个时期分别为较显著的减少和增加趋势，变化速率分别为-32.9mm/10a 和 59.7mm/10a。

西南诸河流域：年平均蒸发量为 1 381.8mm。各季蒸发量均呈较弱的下降趋势。年蒸发量下降趋势显著，变化速率为-22.8mm/10a，通过了 0.01 的信度检验。1956—1979 年期间的变化速率达-52.9mm/10a，而 1980—2000 年仅为-8.7mm/10a。

可见，长江、海河、淮河、珠江以及西北、西南各流域的年平均蒸发量均呈明显下降趋势。特别是海河和淮河流域，其减少速率达 50mm/10a 以上，为东部地区蒸发量减少最明显的区域。黄河和辽河流域的年蒸发量也在减少，但变化速率较小。松花江流域的年蒸发量没有明显趋势变化。从四季变化趋势上看，长江、淮河流域夏季减少速率最大，冬季最小；珠江以春季显著减少为主，冬、夏、秋季均以相近的速率减少；辽河流域也以春季显著减少为特色，但夏、秋季减少速率很小；海河、西北诸河流域春、夏两季蒸发量都表现为显著减少；黄河、松花江、东南诸河、西南诸河等流域的四季蒸发量变化趋势以减少为主，但均不很显著，其中黄河流域的蒸发量在春、夏季减少较多，西南诸河流域春、夏、秋季的变化差异不大；松花江流域

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnl

四季蒸发量变化趋势都不明显。

4 影响蒸发变化的气候因子

无论水面蒸发还是陆面蒸发,都受到多种气候因子的综合影响。大气温度、湿度或水汽压差、太阳辐射、风速、气温日较差等都会对蒸发量造成影响。

日照时数:全国平均蒸发量与日照时数呈显著正相关,相关系数高达 0.75,通过 99%信度检验(图 3)。全国平均的日照时间与水面蒸发量时间序列曲线变化形式也十分相似(图 4),说明二者之间的关系较好。从单站来看,海河流域、淮河流域、黄河中下游、长江中下游以及东南诸河等地区的相关系数均在 0.38 以上(图 5,表 2),为显著相关区域。新疆北部的正相关也是显著的。这些显著正相关区域是年蒸发量减少最明显的地区。在蒸发量减少较小的地区,如松花江流域、黄河上游、长江上游以及西南诸河等地区蒸发量与日照时数的相关系

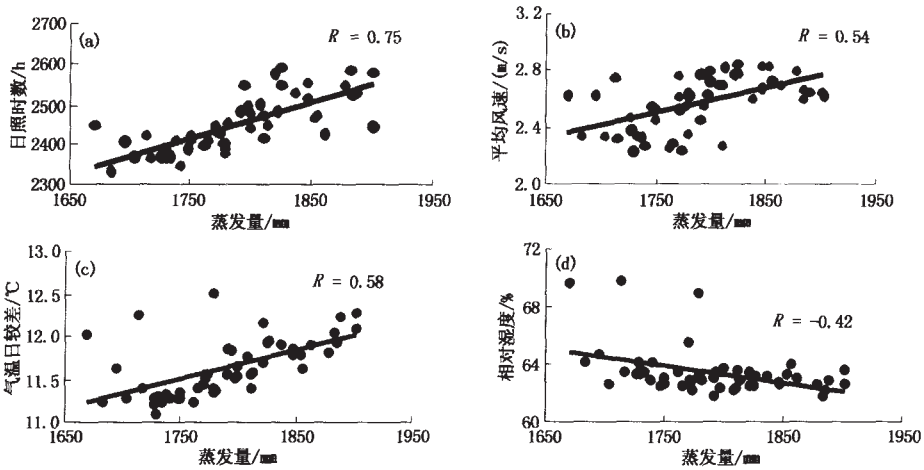

图 3 全国平均年蒸发量与日照时数、平均风速、气温日较差和相对湿度的关系

Fig.3 Relationship of country-averaged pan evaporation with sunshine duration, average wind speed, daily temperature range and relative humidity

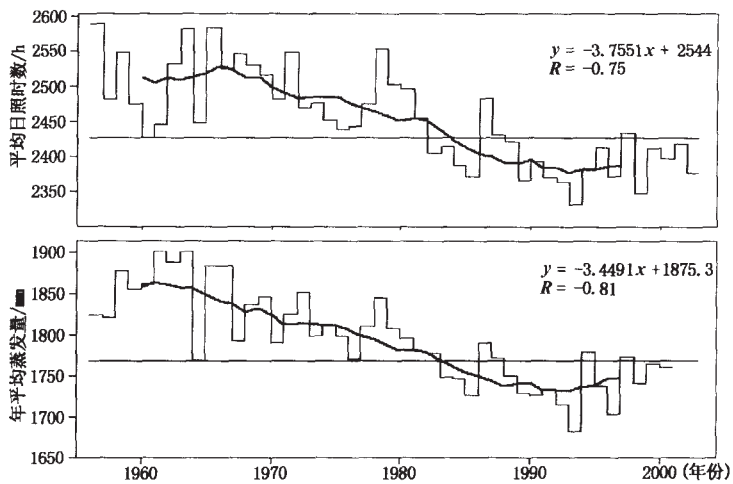

图 4 全国平均日照时数与蒸发量变化时间序列的比较

Fig.4 Comparison of change between country-averaged pan evaporation and sunshine duration

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnl

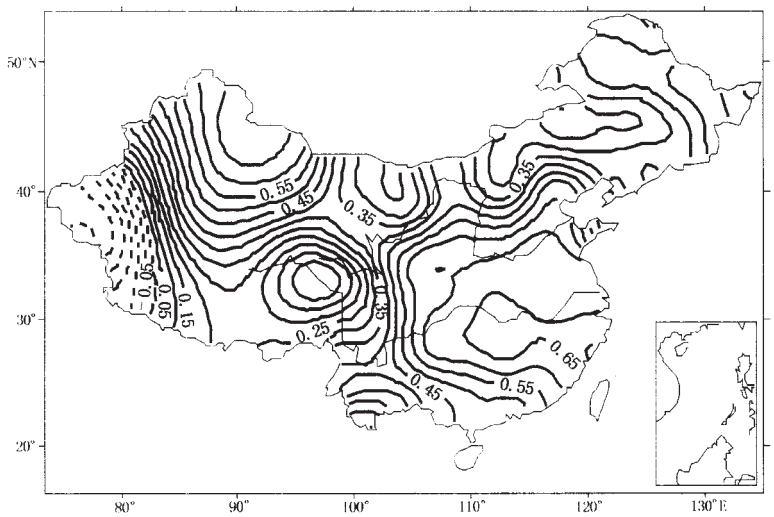

图 5　全国年蒸发量与日照时数相关系数

Fig.5　Correlation coefficient between pan evaporation and sunshine duration

表 2　各流域年蒸发量与气候要素的相关系数

Table 2　Correlation coefficient of pan evaporation with sunshine duration, average wind speed, mean temperature, daily temperature range and relative humidity

	日照时数	平均风速	相对湿度	平均气温	气温日较差
长江区	0.79	0.54	–0.69	0.25*	0.81
黄河区	0.67	0.55	–0.67	0.17*	0.78
海河区	0.79	0.58	–0.58	0.02*	0.86
淮河区	0.85	0.62	–0.47	0.12*	0.82
珠江区	0.87	0.55	–0.57	0.01*	0.82
辽河区	0.68	0.36*	–0.6	0.16*	0.81
松花江区	0.52	0.26*	–0.69	0.2*	0.71
西北诸河区	0.67	0.6	–0.66	–0.15*	0.79
东南诸河区	0.73	0.44	–0.57	0.19*	0.69
西南诸河区	0.09*	0.13*	–0.68	0.21*	0.58

注 :带 * 号的为没有通过 0.01 信度检验。

数一般没有通过统计显著性检验。日照时数减少速率最大的区域与蒸发量–日照时数相关系数高值区域大体吻合,而在相关性较差的地区也是日照时数变化较小的区域(表 3)。因此,在蒸发量减少较大的地区,日照时数或太阳辐射对蒸发量趋势变化具有重要的影响,而对于蒸发量变化较小或者略有增加的区域日照时数或太阳辐射的影响不明显。

相对湿度 :从全国平均来看,蒸发量与相对湿度呈负相关,相关系数为–0.42,通过了 99%信度检验(图 3)。全国几乎所有单站的年蒸发量与相对湿度均呈显著的负相关,并均通过了 99%信度检验(图 6,表 2)。从区域上看,在黄河上游、长江上游地区和松花江流域以及内蒙古东部等地区负相关系数的绝对值在 0.6 以上。这些地区基本为蒸发量呈现微弱上升趋势或变化不明显的区域。西北诸河区的负相关也很显著,相关系数绝对值在 0.5 以上 ;而海河、淮河、黄河中下游、长江中下游地区的相关程度相对较弱,这些地区也是蒸发量减少最显著的地区。同时,从全国平均来看,相对湿度变化趋势不明显,没有表现增加趋势,大部分地区的趋势变化实际上呈现微弱减少,与蒸发量变化方向相同(表 3)。因此,相对湿度在松、辽流域及河套地区和西北诸河区对蒸发量趋势变化有影响,而在其它地区作用较小。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnl

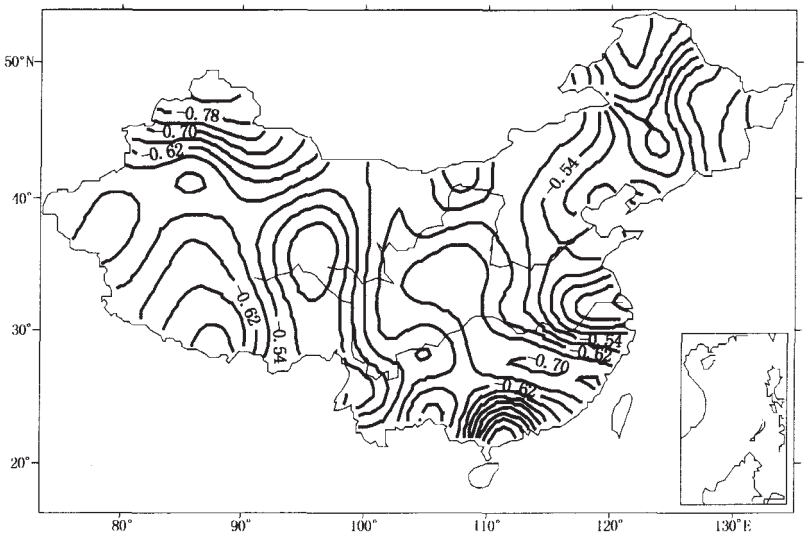

图 6 全国年蒸发量与相对湿度相关系数

Fig.6 Correlation coefficient between pan evaporation and relative humidity

Table 3 Rate of change of climate variables for the ten first-class discharge basins from 1956 to 2000

	日照时数	平均风速	相对湿度	平均气温	气温日较差
长江区	–37.05	–0.07	0.14*	0.06*	–0.12
黄河区	–17.19	–0.05	–0.07*	0.17	–0.12
海河区	–46.12	–0.13	–0.33*	0.28	–0.19
淮河区	–63.58	–0.11	–0.23*	0.14	–0.11
珠江区	–45.12	–0.08	–0.09*	0.1	–0.11
辽河区	–43.17	–0.17	–0.35*	0.31	–0.18
松花江区	–24.76	–0.13	–0.46	0.34	–0.2
西北诸河区	–16.18	–0.14	0.23*	0.24	0.18
东南诸河区	–51.96	–0.07	–0.13*	0.08	–0.09
西南诸河区	2.46*	–0.03	0.23	0.1	–0.1

注:带 * 号的为没有通过 0.01 信度检验。

平均风速:全国平均年蒸发量与平均风速呈正相关,相关系数为 0.54,通过了 99%信度检验(图 3)。西北诸河区、黄河中游、长江下游相关系数较高,一般在 0.4 以上(图 7,表 2)。黄河下游、海河流域、淮河流域、辽河流域相关系数在 0.3~0.4。其它地区相关系数较小。在蒸发量增加或变化较小的地区,蒸发量与平均风速的相关程度通常较低,四川盆地和松花江流域等地区相关系数最小(表 3);而在蒸发量减少明显的区域,蒸发量与平均风速的相关性也较好。同时,高相关区平均风速的减少趋势也较大,而低相关区平均风速变化不明显。因此,平均风速变化对我国一些地区蒸发量的减少具有明显的作用。

平均气温:全国年平均气温与蒸发量的相关性没有指望的那样明显。但从单站来看,绝大多数台站年蒸发量与年平均气温呈正相关。甘肃南部、陕西、四川东部、重庆、贵州中部、广西西部等地区为相对高相关区,相关系数在 0.4 以上,通过了 99%信度检验;其它地区包括大部分蒸发量下降明显的地区,相关系数均在 0.3 以下,西北地区以及黄河下游相关系数更低。1956 年以来,全国平均气温呈现显著上升趋势,与蒸发量的明显下降趋势形成对照(表 3)。因此,在多数情况下,气温对我国蒸发量变化的影响是比较弱的,但对部分地区蒸发量的增加趋势或年际间波动仍具有明显的作用。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnl

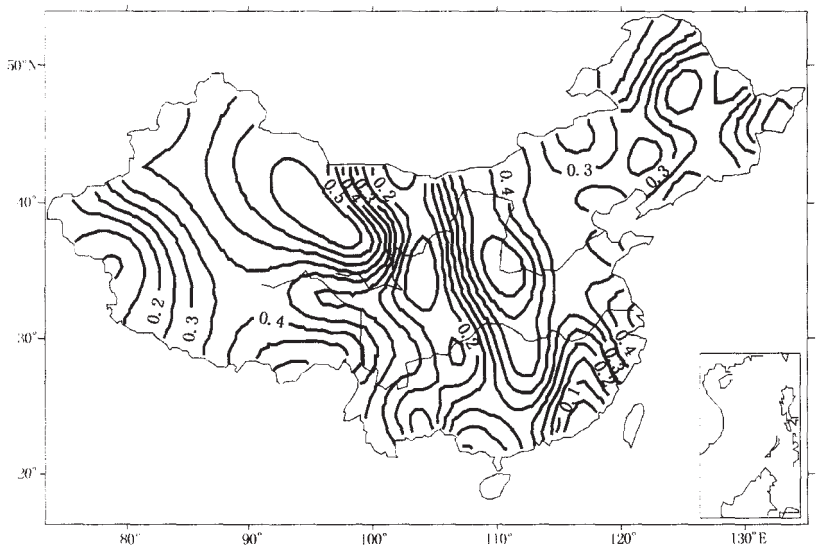

图 7　全国年蒸发量与平均风速相关系数

Fig.7　Correlation coefficient between pan evaporation and average wind speed

气温日较差:全国平均年蒸发量与气温日较差呈显著正相关,相关系数为 0.58,通过了 99%信度检验(图 3)。除了西北地区相关系数在 0.3 以下外,其它地区均在 0.3 以上,海河流域、黄淮流域、长江中下游、珠江流域等地区的相关系数在 0.5 以上(图 8)。这些地区多数也是蒸发量减少比较明显的区域(表 3)。气温日较差在西北地区对蒸发量的变化影响较小,但在全国其它地区对蒸发量变化的影响比较显著。

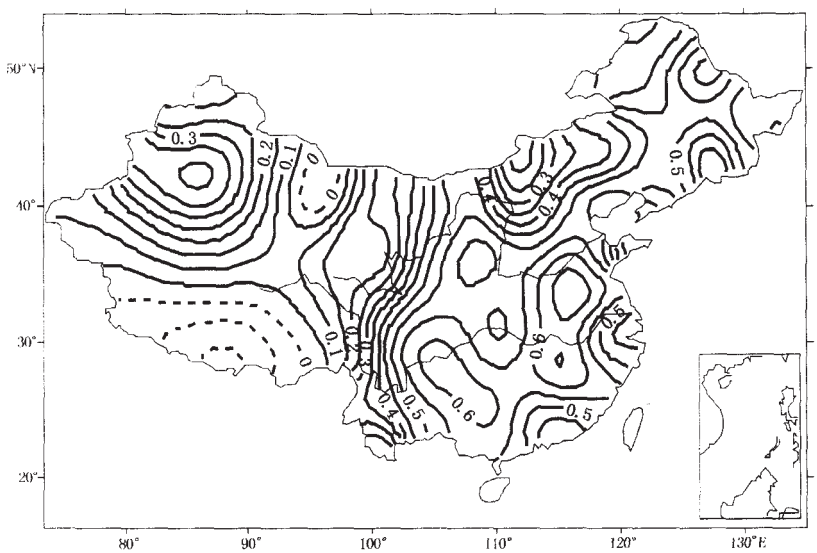

图 8　全国年蒸发量与气温日较差相关系数

Fig.8　Correlation coefficient between pan evaporation and daily temperature range

当然,由于影响蒸发量的因子很多,各因子之间的关系又非常复杂,流域平均的蒸发量与气候要素相关系数好不一定表明该要素是影响蒸发量的主要因子。为此,笔者又应用多元回归分析方法,建立全国十大流域各要素标准化的多元回归方程,通过 F 统计量检验各要素

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnl

对蒸发量的方差贡献，来确定影响不同流域水面蒸发的主要气候因子。

表 4 是各流域主要气候要素与蒸发量的多元回归系数。表 5 给出各流域年蒸发量多元回归各自变量回归效果的检验统计量。可以看出，平均风速对蒸发量的贡献最大，而其它要素对蒸发量的影响在各个流域有不同的特征。平均气温和气温日较差与蒸发的关系一般也比较好。日照时间对蒸发的影响在淮河流域、珠江流域、东南和西南诸河流域比较明显，但在海河和黄河等流域其影响并不大。

表 4 各流域主要气候要素与年蒸发量的多元回归系数

Table 4 Multivariate regression coefficients between pan evaporation and climate variables

	常数项	日照时数	平均风速	相对湿度	平均气温	日较差	复相关系数
长江区	0.1	0.17	0.48	–0.24	0.46	0.34	0.89
黄河区	0.1	–0.07	0.41	–0.10	0.31	0.54	0.88
海河区	0.0	0.05	0.49	–0.21	0.42	0.49	0.92
淮河区	0.1	0.51	0.27	–0.17	0.31	0.19	0.91
珠江区	–0.1	0.50	0.25	–0.19	0.27	0.11	0.92
辽河区	0.0	0.11	0.17	–0.36	0.29	0.46	0.91
松花江区	–0.1	0.04	0.19	–0.47	0.28	0.54	0.92
西北诸河区	0.1	0.08	0.50	–0.31	0.34	0.39	0.91
东南诸河区	0.0	0.58	0.39	–0.61	0.48	–0.33	0.90
西南诸河区	0.0	–0.51	–0.26	–0.88	0.36	0.41	0.87

表 5 各流域年蒸发量多元回归自变量回归效果检验统计量（F）

Table 5 F testing of multivariate regression coefficients

	日照时数	平均风速	相对湿度	平均气温	平均日较差
长江区	0.62	10.94	2.80	15.48	4.34
黄河区	0.23	20.03	0.94	11.53	15.98
海河区	0.09	16.19	6.54	16.96	11.32
淮河区	8.15	11.27	1.44	10.77	0.94
珠江区	14.12	15.64	4.65	8.19	0.65
辽河区	1.16	2.72	20.90	8.48	13.97
松花江区	0.16	2.86	43.39	13.08	24.26
西北诸河区	0.45	18.91	9.63	13.04	36.99
东南诸河区	14.95	15.27	20.91	32.23	3.20
西南诸河区	22.47	4.80	38.33	12.88	9.09

注：信度为 0.05 的 Fa=4.11；大于或等于 4.11 的为方差贡献显著，用下划线数字表示。

表 6 按照对于方差贡献的大小顺序给出各个流域影响水面蒸发量的主要气候因子。气温、风速、日较差对长江、黄河、海河以及西北诸河流域的年蒸发量的方差贡献是显著的；而在淮河、珠江、西南诸河、东南诸河流域影响蒸发量的主要气候因子则是日照、风速、气温和相对湿度，日较差的影响较小；在辽河和松花江流域，相对湿度、日较差、气温对蒸发量的影响是显著的，日照和

表 6 各流域影响水面蒸发量的主要气候因子

Table 6 Main influential factors for pan-evaporation in the ten first-class discharge basins

流域名称	主要影响因子
长江区	气温、风速、日较差
黄河区	风速、日较差、气温
海河区	气温、风速、日较差、相对湿度
淮河区	风速、气温、日照
珠江区	风速、日照、气温、相对湿度
辽河区	相对湿度、日较差、气温
松花江区	相对湿度、日较差、气温
西北诸河区	日较差、风速、气温、相对湿度
东南诸河区	气温、相对湿度、风速、日照
西南诸河区	相对湿度、日照、气温、日较差、风速

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnl

风速的作用较小;西南诸河流域所有这些因子都有明显影响,但相对湿度、日照、气温更重要。

气温对于所有流域区域的蒸发量均具有明显影响;除辽河和松花江流域外,风速的影响在各个流域也是显著的;相对湿度和日较差对多数流域内的水面蒸发量有影响;日照时间对淮河、珠江、东南和西南诸河流域蒸发量的影响比较大。值得提出的是,采用多元回归分析可能更好地反映各主要气候要素年际间变化对蒸发量的影响,这可能是平均气温作用得到更明显反映,而日照时间作用得到削弱的原因之一。但是,对于蒸发量的长期趋势变化,气温的影响显然是微弱的,而日照或太阳辐射的作用则相对增大。多元回归分析方法对于检测趋势变化的主要影响因子可能是有局限性的。

5　结论与讨论

1956—2000 年期间,我国水面蒸发量呈现明显下降趋势。除东北地区北部和西部、甘肃南部、西藏西部以及四川、云南、西藏交界地区显示增加趋势外,全国绝大部分地区年蒸发量呈减少趋势,东部和南部减少更多,黄淮、江淮以及广西东部和广东西部减少速率高于 40mm/10a。我国西北地区水面蒸发量减少趋势同样显著。从各主要流域来看,长江、海河、淮河、珠江以及西北各流域的年平均蒸发量均呈明显下降趋势。海河和淮河流域为我国东部蒸发量减少最明显的区域,黄河和辽河流域的年蒸发量减少也比较明显。松花江流域的年蒸发量没有明显趋势变化。在季节上,长江、淮河流域夏季减少速率最大,冬季最小;珠江、辽河以春季减少为主;海河、西北诸河流域春、夏两季蒸发量都表现为显著减少;黄河、东南诸河、西南诸河等流域四季蒸发量均有减少,但程度较弱;松花江流域四季蒸发量变化趋势都不明显。

在研究时段内,我国大部分地区的日照时数、平均风速和温度日较差都同蒸发量具有很好的正相关关系,同时,这些气候要素也呈现出明显的减少趋势,说明它们对蒸发量的趋势变化产生了较大影响,是造成我国蒸发量长期趋向减少的主要气候因子;而大气温度和相对湿度则比较复杂,它们一般在蒸发量减少不很显著的地区与蒸发量具有更好的相关性,全国绝大部分地区气温呈现显著增加趋势,相对湿度呈现稳定或微弱减少趋势,与蒸发量的趋势变化相互矛盾,表明其对蒸发量的作用主要发生在年际时间尺度上,而对蒸发量的长期趋势变化可能没有明显影响。

日照时数是地面接受的太阳总辐射的良好代用指标,日照时数减少表明太阳总辐射下降。太阳辐射对蒸发的影响具有清晰的物理机制,以至长期以来许多学者一直在应用总辐射或净辐射资料计算蒸发潜力和蒸发量[15]。日照时间减少可以由云量增加引起,也可以由人为气溶胶含量增加造成。最近的分析表明,我国全国平均的总云量在过去的 40 多年内呈现减少趋势[16],我国东部日照时数和蒸发减少最明显的华北地区总云量减少也比较显著,说明云量变化不是我国东部地区日照时间或太阳辐射下降的主要原因;另一方面,观测表明,近 40~50 年,特别是 20 世纪 80 年代初以来,我国东部地区大气中气溶胶含量已经显著增高[17~20],同时近地面层雾日数量也已显著增多[20],因此,气溶胶含量或烟雾日数的增多很可能是造成我国东部地区大范围日照时间和太阳辐射下降的主要原因。

位于海河流域的天津地区,近 40 年来日照时数呈明显的下降趋势,20 世纪 80 年代初以来下降尤为迅速。与 60 年代相比,90 年代天津站每年日照时间减少了 424h。1980—2003 年 14 时天津站地面能见度也呈显著下降趋势,80 年代平均在 10km 左右,到了 90 年代平均下降了 1.7km,降幅为 15.2%。地面能见度与日照时间之间的相关系数达到 0.59 以上。地面能见度的变化主要是受低层大气气溶胶状况的影响,其显著减少说明低层大气的气溶胶浓度明显增多,并进而导致日照时间和太阳辐射量下降。

近地面平均风速对水面蒸发的影响主要是通过湍流交换作用实现的。风速减弱将明显减少水面蒸发量。在最近的 50 年,我国大范围地区平均风速呈现显著下降趋势[21],这是观测到的水面蒸发量减少的重要原因之一。值得注意的是,平均风速减弱对近地面层气溶胶含量

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnl

和烟雾日数增加可能也有不可忽视的作用,这可以通过太阳辐射作用间接影响水面蒸发量。风速下降可能在一定程度上与台站所在地城镇化过程及其观测环境的变化有关，但大量乡村台站平均风速也明显减小,说明大范围背景地面气流场出现了变化。实际上,观测的平均风速下降现象是我国过去几十年内冬、夏季风均呈减弱趋势的反映。

气温日较差的作用颇引人瞩目。我国大范围气温日较差减小已被广泛认识[22],尽管其减小的原因还没有搞清楚。本文的分析表明,导致我国大范围日照时间或太阳辐射明显减少的气溶胶或云量增多可能是我国气温日较差显著下降的重要原因，因为它们均可减少白天的日照和夜间的外射长波辐射。文献[7]指出,由于日最低气温增加更明显,以及由此引起的日较差的下降,导致露点温度比平均气温上升迅速,平均水汽压差因之减小。这可能是气温日较差与水面蒸发量呈显著相关的主要原因。

回到本文开始对“蒸发悖论”的两种解释,显然,笔者的分析有利于支持第一种解释,即太阳总辐射和净辐射减少是造成观测的蒸发减少的主要原因，而引起我国东部大范围辐射减少的主要原因可能是气溶胶含量的增加,但长江中下游地区云量的增多可能也是重要的。在我国西北地区,云量和降水也有比较明显的增多,但气溶胶含量没有东部地区那样明显升高,因此,云量对太阳辐射和水面蒸发的影响应当更为重要。由于在多数地区相对湿度没有展示明显增加趋势,笔者的分析不支持第二种解释,即蒸发皿记录的蒸发量减少可能主要不是由于陆面实际蒸发量增多造成的。

长期以来,气候变化学界一般认为,气温增暖会引起更强的蒸发,容易造成干旱[1,23]。本文的分析也不支持这一流行观点。至少在过去的半个世纪,气温对我国大部分地区水面蒸发量趋势变化的影响没有太阳辐射和风速等因子重要。但是,在蒸发的年内和年际尺度变化上,气温的影响的确也是非常显著的。为了更好地预测、预估未来的气候趋势及其对水资源的影响,当前的气候和水文模式可能还需要进行重要改进。另一方面,我国大范围蒸发减弱可能已对气温增暖产生了一定贡献，因为近地面层目前与过去比较有更多的热量被用于加热空气,而不是用于水面和陆面的蒸发。这一认识对于区域温度变化的检测和原因识别具有一定意义。

在流域水资源规划和综合管理中,了解蒸发量变化及其原因十分必要。我国大范围水面蒸发量的减少无疑已经对区域水循环和水资源产生了重要影响,值得进一步探讨。例如,华北地区蒸发的减弱可能在一定程度上缓解了由于降水明显下降引起的干旱，而长江中下游地区蒸发减弱则可能在一定程度上加重了降水增多引起的洪涝灾害威胁。但是,如果华北地区蒸发减弱确由人为气溶胶排放增多及太阳辐射减少引起，在降水量和陆面特征不变化的条件下,未来的空气污染控制则可能增加这个地区的水面和陆面蒸发,加重干旱化趋势。

参考文献(References)：

[1] Houghton J,Ding Y,*et al*.Climate Change: Scientific Basis [M].IPCC TAR Working Group 1 Cambridge University Press, 2001.

[2] Peterson T C,Golubev V S,Groisman P Ya.Evaporation losing its strength [J].*Nature*,1995,377:687-688.

[3] Chattopadhyay N,Hulme M.Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change [J].*Agricultural and Forest Meteorology*,1997,87,55-73.

[4] Brutsaert W,Parlange M B.Hydrological cycle explains the evaporation paradox [J].*Nature*,1998,396:30.

[5] Golubev V S,Lawrimore J H,Groisman P Ya,*et al*.Evaporation changes over the contiguous United States and the former USSR:A reassessment [J].*Geophysical Research Letters*,2001,28:2665-2668.

[6] Lawrimore J H,T C Peterson.Pan evaporation trends in dry and humid regions of the United States [J].*Journal of Hydrometeorology*,2000,1(6):543-546.

[7] Roderick M L,G D Farquhar.The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years[J].*Science*,2002,298:1410-1411.

[8] Liu B,M Xu,M Henderson,W Gong.A spatial analysis of pan evaporation trends in China,1955-2000 [J].*Jour.Geophys.Res*.,

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnl

2004,109,D15102,doi:10.1029/2004JD004511.

[9] 刘昌明.黄河流域水循环演变若干问题的研究 [J].水科学进展,2004,15(5):608~614.[LIU Chang-ming.Study of some problems in water cycle changes of the Yellow River basin.*Advances in Water Science*,2004,15(5):608–614.]

[10] 郭军,任国玉.黄、淮、海河流域蒸发量变化特征及其可能原因 [J].水科学进展,2005,16(5):666~672.[GUO Jun,REN Guo-yu.Recent change of pan evaporation and the possible climate factors over the Huang-Huai-Hai watersheds,China. *Advances in Water Science*,2005,16(5):666–672.]

[11] Hobbins M T, J A Ramírez, T C Brown. Trends in pan evaporation and actual evapotranspiration across the conterminous U S:Paradoxical or complementary? [J] *Geophys. Res. Lett.*,2004,31,L13503,doi:10.1029/2004GL019846.

[12] 邱新法,刘昌明,曾燕.黄河流域近 40 年蒸发皿蒸发量的气候变化特征 [J].自然资源学报,2003,18(4):437~442.[QIU Xin-fa,LIU Chang-ming,ZENG Yan.Changes of pan evaporation in the recent 40 years over the Yellow River Basin.*Journal of Natural Resources*,2003,18 (4):437–442.]

[13] 杨建平,丁永建,陈仁升,等.近 40a 中国北方降水量与蒸发量变化 [J].干旱区资源与环境,2003,17(2):6~11. [YANG Jian-ping,DING Yong-jian,CHEN Ren-sheng,*et al*.Change in precipitation and evaporation of northern China over the past 40 years.*Arid Land Resource and Environment*,2003,17 (2):6–11.]

[14] Chen D,Gao G,Xu C,*et al*.Comparison of the Thornthwaite method and pan data with the standard Penman-Monteith estimates of reference evapotranspiration in China [J].*Climate Research*,2005,28:123–132.

[15] Penman H L.Natural evaporation from open water,bare soil and grass [J].*Proc.Roy.Soc.A*,1948,193:120–145.

[16] 王伯民,刘小宁,王颖,等.中国云分布研究课题技术报告 [R].北京:中国气象局,2004.[WANG Bo-min,LIU Xiao-ning, WANG Ying,*et al*.Study on Cloud Distribution of China,Report of Project.Beijing:China Meteorological Administration,2004.]

[17] 王自发,黄美元,高会旺,等.关于我国和东亚酸性物质的输送研究 II.硫化物浓度空间分布特征及季节变化 [J].大气科学,1998,22 (5):693~700.[WANG Zi-fa,HUANG Mei-yuan,GAO Hui-wang,*et al*.Concentration and the seasonal variation of sulfate aerosols in China and East Asia.*Chinese Journal of Atmospheric Sciences*,1998,22 (5):693–700.]

[18] 王喜红,石广玉.东亚地区人为硫酸盐的直接辐射强迫 [J].高原气象,2001,20(3):258~263.[WANG Xi-hong,SHI Guang-yu.Estimation of the direct radiative forcing due to anthropogenic sulfate over Eastern Asia.*Plateau Meteorology*, 2001,20 (3):258–263.]

[19] 罗云峰,吕达仁,周秀骥,等.30 年来我国大气气溶胶光学厚度平均分布特征分析 [J].大气科学,2002,26(6):721~730. [LUO Yun-feng,LÜ Da-ren,ZHOU Xiu-ji,*et al*.Analyses on the spatial distribution of aerosol optical depth over China in recent 30 years.*Chinese Journal of Atmospheric Sciences*,2002,26(6):721–730.]

[20] 徐祥德,周秀骥,翁永辉,等.星载 MODIS 资料与地面光度计探测气溶胶变分场[J].科学通报,2003,48(15):1680~1684. [XU Xiang-de,ZHOU Xiu-ji,WENG Yong-hui,*et al*.Study on variational aerosol fields over Beijing and its adjoining areas derived from Terra-MODIS and ground sunphotometer observation.*Chinese Science Bulletin*,2003,48 (18):2010–2017.]

[21] 任国玉,郭军,徐铭志,等.五十年来中国大陆近地面气候变化的基本特征 [J].气象学报,2005,63(6).[REN Guo-yu,GUO Jun,XU Ming-zhi,*et al*.Climate changes of mainland China over the past half century.*Acta Meteorologica Sinica*,2005,63 (6).]

[22] 翟盘茂,任福民.中国近四十年最高最低温度变化 [J].气象学报,1997,55(4):418~429.[ZHAI Pan-mao,REN Fu-min. Change in maximum and minimum temperatures in the past 40 years over China.*Acta Meteorologica Sinica*,1997,55(4): 418–429.]

[23] Ohmura A,M Wild.Is the hydrological cycle accelerating?[J].*Science*,2002,298:1345–1346.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnl

Change in Pan Evaporation and the Influential Factors over China: 1956–2000

REN Guo-yu[1], GUO Jun[2]

(1. Laboratory for Climate Studies of China Meteorological Administration, National Climate Center, Beijing 100081,China;

2. Tianjin Climate Service Center, Tianjin Meteorological Bureau,Tianjin 300074,China)

Abstract: Trend of pan evaporation and the related climate factors for the entire country and ten discharge basins of China are analyzed using a data set of total 600 stations.A significant decreasing trend in pan evaporation for the country as a whole has been found for the period from 1956 to 2000,with eastern,southern and northwestern China experiencing the most marked decrease.Eight of the ten discharge basins are found to be weaker in evaporating presently as compared to 1950 's and 1960 's,while two of them,the Songhuajiang Basin and the rivers of southwestern China,witnessed no significant change.The most significant decline occurred in the Yangtze River,Haihe River,Huaihe River,Zhujiang River,and northwestern rivers basins.The decrease is most obvious in summertime in the Yangtze and Huaihe rivers,in springtime in the Zhujiang and Liaohe rivers,and in both summertime and springtime in the Haihe River and northwestern rivers.The Yellow River,southeastern rivers and southwestern rivers are characterized by a decrease with no season being dominant,and the Songhuajiang River has no season when pan evaporation decreased significantly.In most parts of the country,a significant positive correlation of pan evaporation with sunshine duration,average wind speed and daily temperature range can be found.With the change of pan evaporation, these variables also experienced an evident negative change,indicating that they might have played an important role in the change of pan evaporation.It is more uncertain for air temperature and relative humidity, which show a good relationship with pan evaporation only in areas where no significant decrease occurred,indicating that they are generally not the main climate factors affecting pan evaporation. Possible causes for the evident decrease of sunshine duration and mechanisms for the climate factors to affect pan evaporation are also discussed in the paper.

Key words: pan evaporation; trends; factors; climate change; China

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnl