

1956~2000 年中国潜在蒸散量变化趋势

高 歌^{1,2}, 陈德亮^{1,2}, 任国玉¹, 陈 峪¹, 廖要明¹

(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. Regional Climate Group, Earth Sciences Centre, Gothenburg University, Gothenburg, Sweden)

摘要: 利用 1956~2000 年全国 580 个气象站的逐月气候资料, 采用 FAO 推荐的彭曼—孟蒂斯公式计算潜在蒸散量, 对中国及十大流域这 45 年的潜在蒸散量时空分布特征和变化趋势进行了分析, 并采用偏相关分析方法, 对造成潜在蒸散量变化的主要气候影响因子进行了探讨。结果表明: 45 年中除松花江流域外, 全国绝大多数流域的年和四季的潜在蒸散量均呈现减少趋势, 南方各流域 (西南诸河流域除外) 年和夏季潜在蒸散量减少趋势尤其明显。1980~2000 年和 1956~1979 年两时段多年平均年潜在蒸散量差值表明, 我国大部地区 1980~2000 年时段较前一时段减少, 山东半岛、黄河和长江源区、西南诸河的中西部以及宁夏等地则增多。分析还表明, 全国及大多数流域的年和四季潜在蒸散量与日照时数、风速、相对湿度等要素关系密切, 但这 45 年日照时数和/或风速的明显减少可能是导致大多数地区潜在蒸散量减少的主要原因。

关键词: 中国; 潜在蒸散量; 彭曼—孟蒂斯公式; 变化趋势

文章编号: 1000-0585(2006)03-0378-10

1 引言

蒸发是水量平衡和热量平衡的重要组成部分, 植被地段的蒸发和蒸腾统称为蒸散。潜在蒸散量是实际蒸散量的理论上限, 通常也是计算实际蒸散量的基础, 广泛应用于气候干湿状况分析^[1~3]、水资源合理利用和评价^[4]、农业作物需水和生产管理^[5]、生态环境如荒漠化^[6]等研究中。在我国开展的第二次全国水资源综合评价中, 潜在蒸散量是水资源评价关注的主要内容之一。近几十年来气候发生明显变化, 潜在蒸散量也必然会随之发生变化, 其变化趋势如何将直接影响到水资源评价。因此, 开展我国近几十年来潜在蒸散量的时空变化及趋势研究是十分必要的。

Peterson 等人^[7~10]研究, 在北半球蒸发皿观测的蒸发量在过去几十年中的减少趋势具有普遍性, 但也有一些地区例外^[10]。许多研究^[11~14]也表明中国大部分地区的小型蒸发皿观测的水面蒸发量呈现减少趋势, 这些研究还从气候影响因子角度探讨了水面蒸发量减少的原因。蒸散发量的变化趋势研究对探讨气候变化和水循环领域若干重要科学问题具有重要意义。本文将采用估算方法对潜在蒸散量的时空分布及其变化趋势进行探讨。

估算潜在蒸散量的方法有许多, 多年来国内外开展了大量的对比分析研究^[15~17], 许

收稿日期: 2005-07-24; 修订日期: 2006-02-05

基金项目: 全国水资源综合规划专题研究“气候变化对中国水资源情势影响综合分析”子专题“我国十大水文流域近 50 年气候状况”及国家“十五”科技攻关项目 (2001BA611B), Sida 和 STINT 项目的联合资助。

作者简介: 高歌 (1972-), 女, 高级工程师。主要从事气候影响评价工作。E-mail: gaoge99@263.net

多工作一致认为: 考虑了能量平衡和水汽扩散理论的彭曼—孟蒂斯公式综合反映了蒸发必须具备的条件: 蒸发潜热所需要的能量和水汽移动必须具有的动力结构, 具有理论基础坚实、物理意义明确, 能够反映各气候要素的综合影响等特点, 而且计算结果准确, 适应于不同气候类型地区潜在蒸散量的计算。1990 年, 该方法被 FAO 专家组成员定为计算潜在蒸散量的标准方法加以推广并不断修正。我国学者利用此方法在生态环境、作物需水、北方干旱化等方面相继做了一些研究。但由于资料和研究区域的限制, 到目前为止, 以小区域的研究居多^[18~20], 即使有对全国范围的分析, 但因所选站点非常有限^[21], 尚无法给出细微的区域差异。

本文基于彭曼—孟蒂斯 (Penman-Monteith) 方法, 利用全国 1956~2000 年的多项气候要素观测资料, 对全国潜在蒸散量进行估算。同时, 为配合水资源综合规划, 也对全国及十大水文流域 (松花江、辽河、海河、黄河、淮河、长江、东南诸河、珠江、西南诸河、西北诸河流域) 的潜在蒸散量的时空分布特征及变化趋势进行了分析, 并进一步对影响潜在蒸散量变化的主要气候因子进行探讨。

2 资料和方法

2.1 资料

利用资料序列较长的全国 580 个气象站点 (分布图略) 1956~2000 年的月平均气温、平均最高气温、平均最低气温、日照时数、平均相对湿度、平均风速等气候要素观测资料, 进行月、季、年潜在蒸散量的统计。

2.2 潜在蒸散量的计算方法

采用彭曼—孟蒂斯公式计算潜在蒸散量^[22]。潜在蒸散量是指假设平坦地面被特定矮杆绿色作物 (高 0.12m, 地面反射率为 0.23) 全部遮蔽, 同时土壤保持充分湿润情况下的蒸散量, 也称可能蒸散量或参考蒸散量, 计算见式 (1):

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \frac{900}{T+273}U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

$$G_i = 0.07(T_{i+1} - T_{i-1}) \quad (2)$$

式中物理量分别为: ET_0 为潜在蒸散量 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); R_n 为参考作物表面净辐射 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); G 是土壤热通量密度 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), 其估算见式 (2), i 为月份, T_{i+1} 、 T_{i-1} 为第 $i+1$ 、 $i-1$ 月的气温 ($^{\circ}\text{C}$); T 是月平均气温 ($^{\circ}\text{C}$); U_2 为 2m 高处风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); e_s 为饱和水汽压 (kPa); e_a 为实际水汽压 (kPa); Δ 表示饱和水汽压—温度曲线的斜率 ($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$); γ 为干湿表常数 ($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)。

其中, 辐射平衡计算中太阳总辐射 R_s 计算式如下:

$$R_s = (a_s + b_s \cdot S)R_a \quad (3)$$

式中, R_a 为天文辐射; S 为日照百分率; a_s 、 b_s 为线性参数, 这里我们没有采用 FAO 推荐的值 ($a_s=0.25$, $b_s=0.5$), 而是根据祝昌汉的研究^[23]分别按照东北区、东部平原区、西北干旱区和青藏高原区给出系数, 这样取值更符合我国实际情况。月潜在蒸散量为 ET_0 乘当月日数。

2.3 各气候要素年、季值和区域平均值的统计方法

如果月资料缺, 四季和年值的统计均按缺测处理。考虑到 50 年代站点少以及多缺测

的情况，为保证计算流域平均值时间序列的一致性，真实反映流域变化情况，我们假设区域内各要素距平变化具有一致性，区域平均值计算如下：

$$\overline{RX_n} = \overline{\Delta RX_n} + \overline{RX_{71-20}} \quad n = 1956, \dots, 2000 \tag{4}$$

式中， $\overline{RX_n}$ 为区域平均值； n 是年份； $\overline{\Delta RX_n}$ 为要素距平区域平均值（相对于1971~2000年）； $\overline{RX_{71-20}}$ 为1971~2000年多年平均值的区域平均。

3 结果分析

3.1 空间分布特征

3.1.1 年及四季潜在蒸散量多年平均值的空间分布 年潜在蒸散量，东北北部和东部、四川盆地、贵州北部及黄河和长江流域的上游等部分地区为低值区，一般有600~800mm（图1），其中大兴安岭北部最低，不足600mm；内蒙古中西部、新疆东部及南疆、青海西北部、云南大部、海南以及华南沿海等地为高值区，一般在1100~1400mm；全国其余大部一般有800~1100mm。

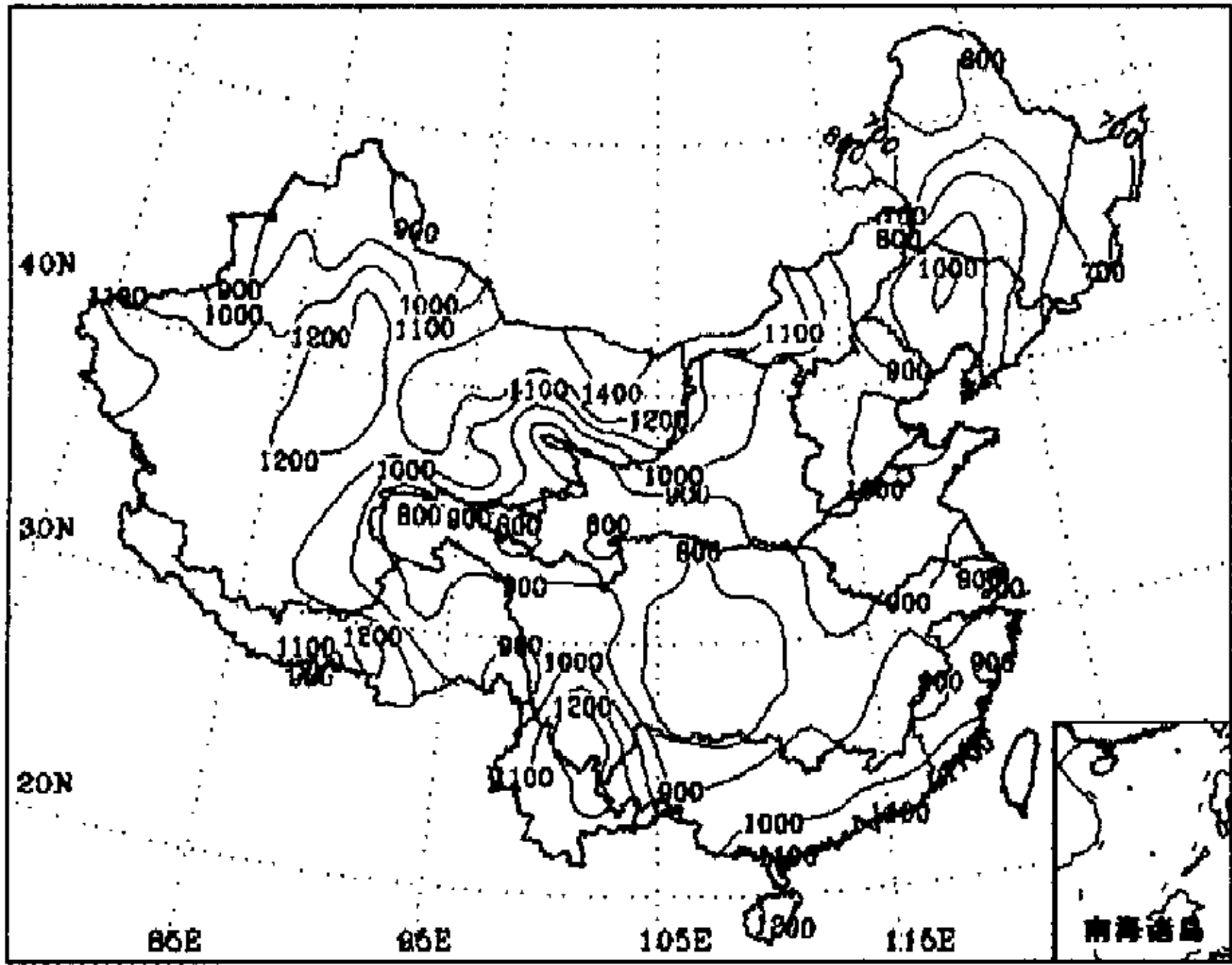


图1 1956~2000年多年平均年潜在蒸散量（mm）空间分布

Fig. 1 The pattern of annual potential evapotranspiration (mm) averaged from 1956 to 2000 estimated by Penman-Monteith method

春季，空间分布与年潜在蒸散量相似，一般有200~400mm。长江流域南部地区、珠江流域北部以及松花江北部不足200mm；内蒙古西部、云南中部等地在400~500mm以上。夏季，潜在蒸散量明显较春季增大，西北诸河流域大部、黄河流域北部潜在蒸散量一般在400~500mm，其中内蒙古西部、新疆东部达500~700mm；其余大部分流域不足400mm，松花江、长江、西南诸河等流域的局部有200~300mm。秋季，潜在蒸散量全国大部地区小于春季。东北地区、海河流域北部和西部、黄河流域上中游、长江流域上游及中部、北疆有100~200mm，其余地区有200~300mm。冬季，潜在蒸散量为一年中最小，且呈现由南向北递减趋势，黄河流域以北大部及长江流域中部地区不足100mm，松花江流域、北疆等地有10~50mm；南方大部一般有100~200mm，云南及海南的部分地区达200~300mm（四季分布图略）。

3.1.2 全国及十大流域平均潜在蒸散量 图2为全国及十大流域的多年平均年及四季潜在蒸散量。全国平均年潜在蒸散量有941.5mm，年内变化，夏季最大，占全年的40%，其

次为春季和秋季, 分别占全年的 28%、22%, 冬季仅占全年的 10%。各流域平均年潜在蒸散量, 以西北诸河流域最大, 松花江流域最小, 二者相差超过 300mm; 辽河、长江流域平均年潜在蒸散量也较小。春季, 各流域平均潜在蒸散量以东南诸河最小, 其次为松花江和长江流域, 西南、西北诸河流域最大。夏季, 西南诸河和松花江流域平均潜在蒸散量最小, 北方大多数流域的平均潜在蒸散量大于南方, 其中西北诸河流域最大。秋季, 松花江流域最小, 珠江流域最大, 北方各流域平均潜在蒸散量大部分小于南方诸流域, 这个特点与春夏季节有所不同; 东南诸河、珠江流域, 由于秋季光照条件好于春季前汛期, 所以秋季潜在蒸散量大于春季, 其他各流域秋季潜在蒸散量均小于春季。冬季, 潜在蒸散量分布呈现明显由南向北递减态势。

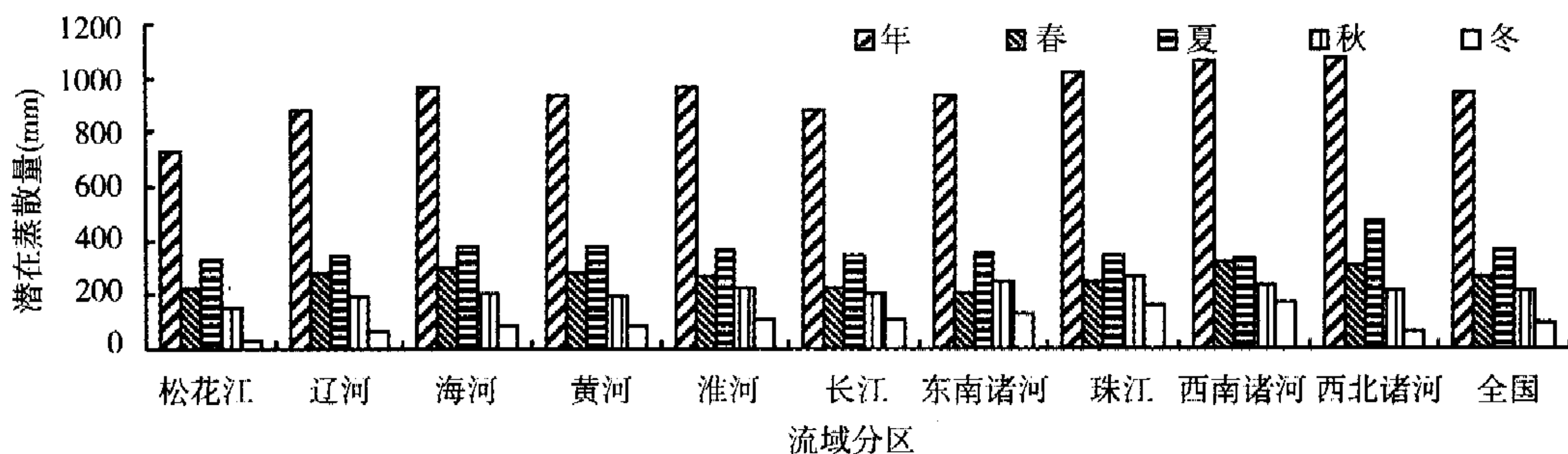


图2 全国及十大流域年和四季潜在蒸散量多年平均直方图

Fig. 2 The seasonal and annual potential evapotranspirations averaged from 1956 to 2000 of 10 basins and whole China

3.2 时间变化特征

3.2.1 年潜在蒸散量的时间变化 图3反映了全国平均及十大流域年潜在蒸散量各年代和历年变化情况。全国大多数流域20世纪60年代和70年代的平均年潜在蒸散量均较常年偏多, 但辽河、珠江和淮河流域70年代偏少, 西南诸河流域60年代偏少。80年代, 除西南诸河流域较常年偏多外, 其余流域均偏少, 其中松花江、黄河、淮河以及东南诸河流域80年代的平均年潜在蒸散量为近50年最小值。90年代, 除黄河流域较常年偏多外, 大多数流域较常年同期偏少, 辽河、海河、长江、珠江、西南诸河、西北诸河等流域及全国平均值均为近50年来最小值, 其余流域与80年代相比, 出现回升趋势。

3.2.2 年及四季潜在蒸散量的变化趋势 表1为1956~2000年全国及十大流域年和四季潜在蒸散量变化趋势。全国平均年潜在蒸散量随时间变化呈减小趋势, 变化速率为 -1.18mm/a , 45年共减少53.1mm, 相对变化量为5.7%。减少趋势通过了0.01的信度检验。全国平均年潜在蒸散量的减少趋势主要是由于夏、春、秋季的明显减少造成的。

在南方地区, 淮河、长江、东南诸河及珠江流域年和夏季的潜在蒸散量均呈现明显的减少趋势(通过0.01或0.05的信度检验), 其中, 长江、东南诸河秋季、珠江春季蒸散量减少趋势也十分明显。西南诸河流域, 四季及年值减少趋势均不很明显。北方各流域的变化情况稍微复杂一些。松花江流域因四季潜在蒸散量均呈现略增加趋势, 导致年潜在蒸散量也呈现增加趋势, 但趋势不明显。其他流域年和四季值的变化以减少趋势为主, 但从总体上看, 减少趋势不太明显。西北诸河流域年值及夏、秋、春季的值减少趋势均十分明显, 通过0.01的信度检验。辽河流域春季、海河流域年值减少趋势也较明显, 分别通过0.01或0.05的信度检验。黄河流域秋季、辽河流域冬季还略有增加趋势。

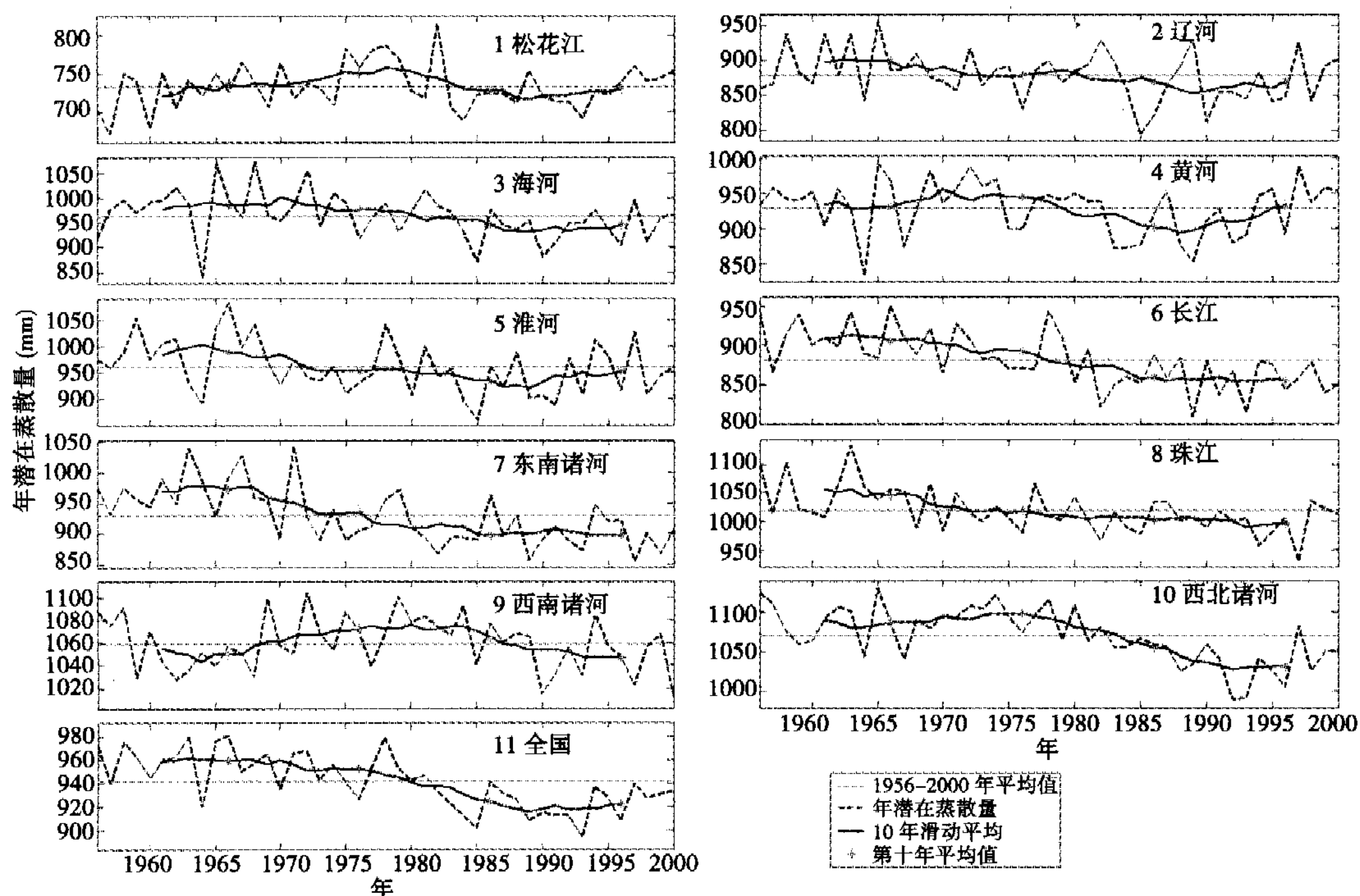


图 3 1956~2000 年全国及十大流域年潜在蒸散量历年变化曲线图

Fig. 3 The time series of annual potential evapotranspiration of 10 basins and whole China during 1956 to 2000

表 1 1956~2000 年全国及十大流域年和四季潜在蒸散量变化趋势分析

T: 变化趋势 (mm/a); RT: 相对变化值 (%)

Tab. 1 Trends of seasonal and annual potential evapotranspirations for 10 basins and whole China during 1956 to 2000 (T: Rate of change (mm/a); RT: Relative changes (%))

流域片名称	松花江	辽河	海河	黄河	淮河	长江	东南诸河	珠江	西南诸河	西北诸河	全国
年											
T	0.21	-0.73	-1.2 [#]	-0.43	-1.3 [#]	-1.73 [*]	-2.2 [*]	-1.57 [*]	-0.28	-1.67 [*]	-1.18 [*]
RT	1.3	-3.7	-5.6	-2.1	-6.1	-8.8	-10.6	-6.9	-1.2	-7.0	-5.7
春											
T	0.05	-0.43 [*]	-0.45	-0.1	-0.01	-0.16	-0.15	-0.6 [*]	-0.01	-0.47 [*]	-0.25 [#]
RT	1.0	-7.0	-6.8	-1.6	-0.1	-3.1	-3.4	-10.9	-0.1	-6.7	-4.2
夏											
T	0.04	-0.26	-0.54	-0.34	-1.08 [*]	-1.15 [*]	-1.31 [*]	-0.46 [#]	-0.07	-0.77 [*]	-0.65 [*]
RT	0.5	-3.4	-6.4	-4.0	-13.4	-15.3	-16.7	-6.1	-0.9	-7.3	-7.9
秋											
T	0.06	-0.09	-0.14	0.02	-0.15	-0.3 [*]	-0.51 [*]	-0.3	-0.1	-0.39 [*]	-0.21 [*]
RT	1.9	-2.1	-3.0	0.5	-2.9	-6.6	-9.3	-5.1	-1.9	-8.1	-4.4
冬											
T	0.06	0.04	-0.07	-0.01	-0.03	-0.12	-0.2	-0.23	-0.06	-0.02	-0.07
RT	9.8	2.9	-3.5	-0.6	-1.3	-4.9	-7.1	-6.4	-1.6	-1.0	-3.2

注: * 代表通过 0.01 的信度检验, # 代表通过 0.05 的信度检验。

通过对比, 采用 Penman-Monteith 方法估算的潜在蒸散量的变化趋势与小型蒸发器年蒸发量变化情况基本一致^[24,25], 全国平均值及大多数流域也是以减少为主。

3.3 1980~2000 年与 1956~1979 年两时段潜在蒸散量的对比

以 1980 年作为分界点, 将 1956~2000 年分为 1956~1979 年和 1980~2000 年前后两

个时段。时间段的选取主要考虑到全国第一次水资源综合评价时段为 1956~1979 年; 另一方面, 进入 80 年代后, 气候较前期发生明显变化, 尤其气候变暖趋势显著^[26], 在这种情况下, 潜在蒸散量变化如何, 也是水资源研究非常关注的问题。

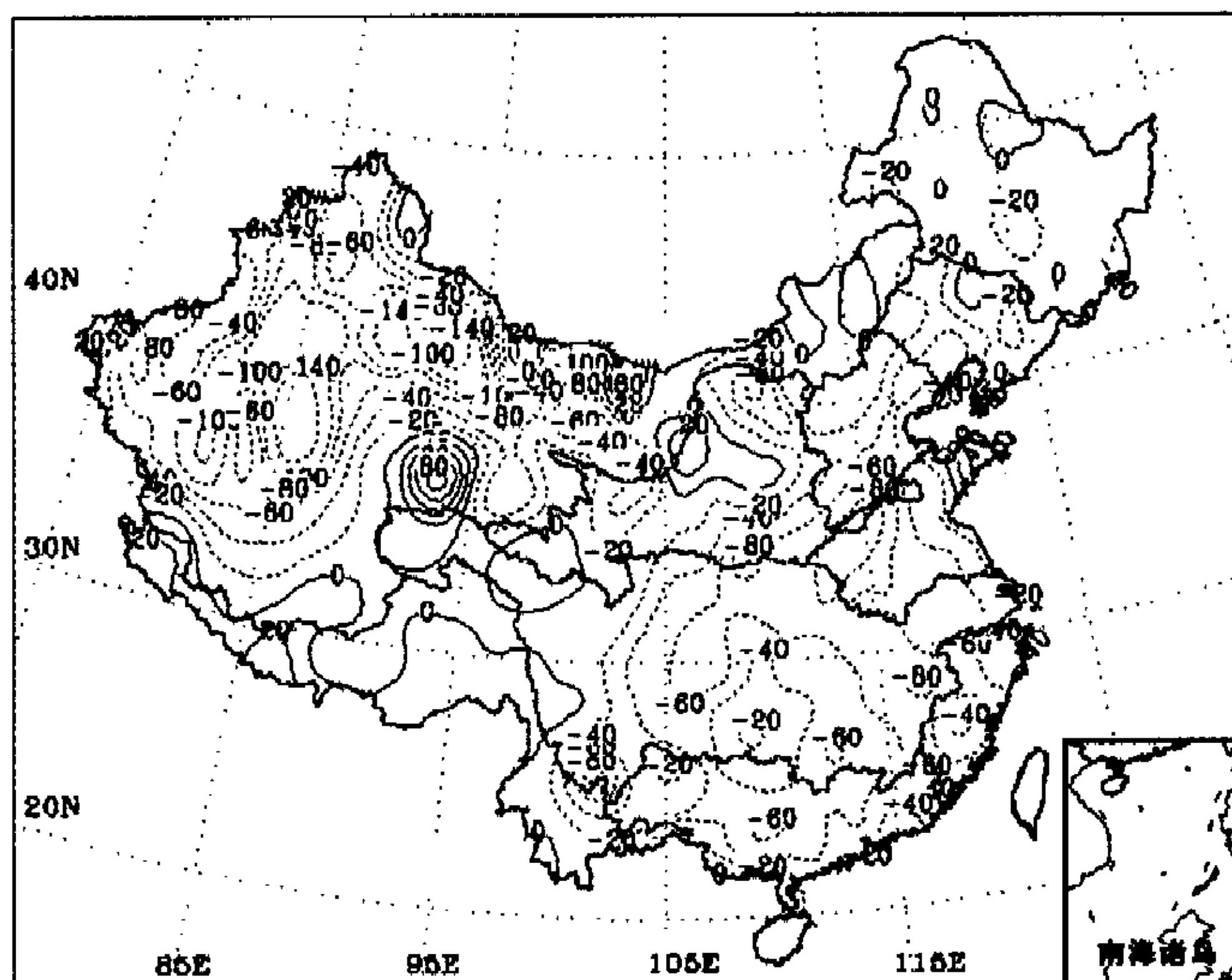


图 4 1980~2000 年与 1956~1979 年两时段年潜在蒸散量差值 (mm) 分布

Fig. 4 Difference of mean annual potential evapotranspiration (mm)
between periods of 1980~2000 and 1956~1979

1980~2000 年平均年潜在蒸散量, 全国大部地区较 1956~1979 年时段有所减少, 其中海河流域南部、黄河中下游、淮河流域西部、长江流域中下游、东南诸河流域北部、珠江流域北部及新疆大部、河西走廊地区西部减少幅度较大, 达 40~100mm (图 4)。山东半岛、长江和黄河的源区、西南诸河流域的中西部及宁夏等地的部分地区潜在蒸散量略有增加。黄河源区自 1980 年以来潜在蒸散量的增加趋势与李林等人研究结果一致^[27]。

四季情况, 1980~2000 年与 1956~1979 年两时段相比, 春季, 全国潜在蒸散量普遍减少, 其中珠江流域东部、新疆南部等地减少 20~40mm; 松花江流域北部、淮河流域南部、山东半岛及长江中下游沿江一带、长江和黄河上游地区等地略有增加。春季为农作物生长需水关键期, 潜在蒸散量的加大, 表明干旱将更易发生, 农业需水增大, 对农业生产及水资源的利用不利。夏季, 全国普遍减少的情况依然存在, 其中黄河中下游、淮河大部、长江中下游、东南诸河北部及新疆大部减少达 20~80mm; 青藏高原东部和南部, 包括长江、黄河源区及海南岛、西北诸河流域东部等地有 10mm 左右的增加。秋季, 全国仍以减少为主; 仅东北平原、黄河上游、西南诸河西部及内蒙古西部有增加。冬季, 除松花江流域、辽河流域北部和东部、黄河源区及四川西部、内蒙古西部等地略有增加外, 其余大部则有 20mm 左右的减少 (图略)。

从两时段流域平均值对比来看 (表 2), 全国及各流域年和四季 1980~2000 年时段的多年平均值较前一时段普遍减少, 减少程度有明显的空间和季节差异。年潜在蒸散量, 海河、淮河、长江、东南诸河、珠江、西北诸河等流域及全国平均值, 较前一时段有明显减少, 通过信度为 0.05 或 0.01 的 t 检验, 其中大部分地区年内潜在蒸散量的减少主要发生在夏季, 海河和珠江流域则为春季。其他流域后一时段的年和四季的潜在蒸散量除辽河春

季和黄河夏季减少明显外，总体上减少不是很明显。松花江流域冬季和黄河流域秋季则略有增加。

表 2 全国及十大流域 1980~2000 年与 1956~1979 年两时段潜在蒸散量的比较 (差值: mm, 相对值: %)

Tab. 2 Comparison of seasonal and annual mean potential evapotranspiration between periods
1980~2000 and 1956~1979 for 10 basins and whole China (Difference: mm; relative difference: %)

流域名称	松花江	辽河	海河	黄河	淮河	长江	东南诸河	珠江	西南诸河	西北诸河	全国	
年	差值	-7.4	-17.6	-31.5 [#]	-19.9	-36.2 [#]	-46.9 [*]	-56.4 [*]	-34.2 [*]	-5.3	-44.2 [*]	-32.6 [*]
	相对值	-1.0	-2.0	-3.2	-2.1	-3.7	-5.2	-5.9	-3.3	-0.5	-4.0	-3.4
春	差值	-1.2	-10.0 [#]	-13	-5.5	-0.9	-4.6	-5.9	-15.3 [*]	-1.1	-13.5 [*]	-7.5 [*]
	相对值	-0.5	-3.6	-4.2	-2.0	-0.3	-2.0	-2.9	-6.0	-0.4	-4.2	-2.8
夏	差值	-6.2	-5.7	-12.3	-13.8 [#]	-29.3 [*]	-29.1 [*]	-28.1 [*]	-6.2	-0.3	-19.7 [*]	-16.8 [*]
	相对值	-1.9	-1.6	-3.2	-3.6	-7.8	-8.3	-7.7	-1.8	-0.1	-4.1	-4.5
秋	差值	-1.4	-1.7	-3.7	0.2	-4.1	-9.5 [*]	-16.7 [*]	-7.2	-0.9	-9.7 [*]	-6.0 [*]
	相对值	-1.0	-0.9	-1.8	0.1	-1.8	-4.6	-6.6	-2.7	-0.4	-4.4	-2.8
冬	差值	1.6	-0.4	-2.9	-0.7	-1.9	-3.6 [#]	-5.2	-5.9	-2.4	-0.9	-2.3
	相对值	5.6	-0.6	-3.3	-0.8	-1.7	-3.2	-3.9	-3.6	-1.4	-1.4	-2.3

注: 同表 1

3.4 年及四季潜在蒸散量与各气候因子的关系分析

影响潜在蒸散量的因子很多，究竟哪个要素对中国近 45 年来的潜在蒸散量的变化起主要作用？我们采用对各流域年及四季的潜在蒸散量与同期各气候要素求偏相关的方法，排除要素间的相互影响，选择与潜在蒸散量关系密切的气候要素。表 3 为全国及十大流域年和四季潜在蒸散量与各气候因子的关系，可以看出，潜在蒸散量与日照时数、风速、最高气温、最低气温呈正相关，与相对湿度则呈负相关。对全国平均值以及大多数流域来讲，日照时数或风速或相对湿度是年和四季潜在蒸散量的主要影响因子，而最高气温和最低气温影响相对较弱。

表 3 近几十年影响潜在蒸散量变化的主要气候因子分析

Tab. 3 Relationships between climate factors and annual/seasonal potential evapotranspiration of
10 river basins and whole China

流域片名称	年	春	夏	秋	冬
松花江	-Hu, Su, Tm	-Hu, Wn, Su, Tm	-Hu, Su, Wn, Tm	-Hu, Tm, Wn	-Hu, Wn, Tm, Tn
辽河	-Hu, Su, Tm, Wn	Wn, -Hu, Tm, Su	Su, -Hu, Wn, Tm	-Hu, Wn, Tm	-Hu, Wn, Tm
海河	Wn, -Hu, Su, Tm	-Hu, Wn, Tm, Su	Su, -Hu, Wn, Tm	-Hu, Wn	-Hu, Wn, Tm
黄河	Wn, Su, -Hu	-Hu, Wn, Su, Tm, Tn	Su, -Hu, Wn, Tn	Wn, -Hu, Tm, Su	-Hu, Wn, Tm, Su
淮河	Su, -Hu, Wn	-Hu, Su, Wn, Tm	Su, -Hu, Wn, Tm	-Hu, Wn, Tm	-Hu, Wn, Tm, Su
长江	Su, Tn, -Hu, Wn	-Hu, Su, Wn	Su, -Hu	Wn, -Hu, Su	-Hu, Wn
东南诸河	Su, -Hu, Wn, Tn	Su, -Hu, Tn	Su, -Hu, Wn, Tm	-Hu, Wn, Su	-Hu, Wn, Su, Tn
珠江	Su, -Hu, Wn, Tn	Su, Wn, -Hu, Tn	Su, -Hu, Wn, Tn	Su, -Hu, Wn, Tn	-Hu, Wn, Su
西南诸河	Su, Wn, -Hu, Tm	Su, Wn, -Hu, Tm, Tn	Su, -Hu, Wn, Tn	Su, Wn	Wn, Su, Tm, -Hu
西北诸河	Wn, -Hu, Tm, Su	Wn, Tm, -Hu, Su	Wn, -Hu, Tm, Su	Wn, -Hu, Tm	Wn, -Hu, Tn, Tm
全国	Su, Wn, -Hu, Tm	-Hu, Wn, Su, Tm	Su, Wn, -Hu, Tm	Su, -Hu, Wn	-Hu, Wn, Su, Tn

注: Hu—相对湿度; Su—日照时数; Wn—平均风速; Tm—平均最高气温; Tn—平均最低气温。(表中给出偏相关系数显著的因子(通过 0.05 信度检验), 并按照相关系数递减顺序排列; “-”代表因子与潜在蒸散量的偏相关系数为负; 斜体字符代表在过去 45 年中, 该因子呈现减少变化趋势, 否则为增加趋势; 粗体表示因子变化趋势通过水平为 0.05 的信度检验)

年潜在蒸散量的主要影响因子随纬度变化而变化, 松花江和辽河流域为相对湿度, 海河、黄河和西北诸河流域为风速, 其余南方各流域, 日照时数为主要影响因子。对全国平均值而言, 日照时数为主要的影响因子。春季, 主要影响因子随纬度变化的情况依然明显, 北方大多数流域, 相对湿度或风速与潜在蒸散量关系密切, 而南方各流域潜在蒸散量受日照时数影响较大; 夏季, 受夏季风的影响, 除西北诸河流域外, 日照时数和相对湿度为主要的因子; 秋冬季节, 相对湿度和风速为主要影响因子, 仅在少数流域如珠江、西南诸河流域, 潜在蒸散量主要受日照时数的影响。

究竟哪一个因子的变化对近 45 年来潜在蒸散量的变化趋势起决定性作用, 我们进一步分析了同期每个气候因子的变化趋势。从表 3 可见, 大多数流域和全国平均值的年和四季的日照时数和平均风速在 1956~2000 年期间呈现显著的减少趋势。日照时数和平均风速的减少趋势分别与陈隆勋等^[28]和王遵亲^[29]等的研究一致。日照时数与太阳总辐射关系密切, 二者变化趋势基本一致, 李晓文等^[30]认为 1960~1990 年期间中国大部地区观测的太阳总辐射和直接辐射呈现的减少趋势主要是由于大气混浊度的增加和气溶胶的增多造成的。王遵亲等认为中国过去 50 年风速的显著减少趋势主要与冬夏季风不断减弱有关。除了大气环流因子外, 下垫面的变化特别是城市化可能也是造成观测风速显著减少的原因之一。显著减少的日照时数(或太阳总辐射)和风速有可能是大多数流域潜在蒸散量近几十年呈现减少的主要原因。对各流域和各季节来说, 相对湿度的变化并不一致, 并且变化趋势总体上也不明显, 因此, 可认为它对多数地区潜在蒸散量变化趋势的影响是次要的。但是在松花江流域, 一年四季中相对湿度与潜在蒸散量关系非常紧密, 在不断减少的相对湿度和不断增高的最高气温或最低气温共同影响下, 潜在蒸散量呈现一定增加趋势。

总体上来讲, 每个流域年和四季的潜在蒸散量的变化是各种气候因子综合作用的结果。在这些因子中, 主要影响因子的变化对潜在蒸散量的变化起到了关键性的作用, 其他因子则因其与潜在蒸散量关系的紧密程度和其本身变化趋势起到增加或抵消趋势的作用。

4 结论与讨论

通过上述分析, 可以得到以下几点结论:

(1) 1956~2000 年多年平均年潜在蒸散量, 十大流域中以西北诸河流域为最大, 松花江流域最小。

(2) 全国平均值及大多数流域 20 世纪 60 年代和 70 年代的平均年潜在蒸散量均较常年偏多, 80、90 年代则偏少, 其中松花江、黄河、淮河以及东南诸河流域 80 年代的平均年潜在蒸散量为近 45 年最小, 其他流域及全国平均值以 90 年代的平均年潜在蒸散量为近 45 年最小。

(3) 1956~2000 年, 全国平均值和西北诸河流域的年及春、夏、秋三季潜在蒸散量呈现明显减少趋势, 冬季减少趋势不明显。松花江流域的年及四季的潜在蒸散量略有增加, 但趋势不明显。其余流域的年及四季潜在蒸散量以减少趋势为主, 尤其是南方各流域(西南诸河流域除外)年和夏季潜在蒸散量减少趋势明显。

(4) 1980~2000 年与 1956~1979 年两段时期潜在蒸散量差值表明, 无论年总量还是四季值, 全国大部地区 1980~2000 年时段的潜在蒸散量都较前一时段减少。山东半岛、黄河和长江的源区、西南诸河流域的中西部以及宁夏 1980~2000 年时段年潜在蒸散量有增加。

(5) 影响我国大多数流域年和四季的潜在蒸散量近 45 年变化趋势的主要气候因子可能是日照时数(太阳总辐射)和风速。1980 年以来,中国大部地区气温呈不断增高趋势,然而由彭曼—孟蒂斯公式计算的潜在蒸散量并没有按照气温增高、蒸散量也增大的规律变化。这表明,过去 45 年中,气温变化可能不是影响我国潜在蒸散量变化的主导因子,太阳辐射、相对湿度或风速等因子的影响可能更为重要。

鉴于潜在蒸散量这种变化趋势,实际蒸散发的变化将更为引人关注。

另外,考虑到目前使用的气候资料尚存在一定的非均一性问题^[31],主要受来自非气候因素变化对观测记录数据的影响,如:城市化对风速、气温的影响等,因此,文章中的分析结果可能还存在一定程度的不确定性和局限性。关于城市化对气候要素变化趋势的影响及所起作用气候变化研究中另一个复杂的课题,还有待我们深入的探讨。

参考文献:

- [1] 杨建平,丁永建,陈仁升,等. 近 50 年来中国干湿气候界线的 10 年际波动. 地理学报,2002,57(6):655~661.
- [2] 马柱国,华丽娟,任小波. 中国近代北方极端干湿事件的演变规律. 地理学报,2003,58(增刊):69~74.
- [3] 王菱,谢贤群,李运生,唐登银. 中国北方地区 40 年来湿润指数和气候干湿带界线的变化. 地理研究,2004,23(1):45~54.
- [4] 水利部水资源研究及区划办公室全国水资源初步成果汇总技术小组. 中国水资源初步评价,1981. 48~51.
- [5] Doorenbos J, Pruitt W O. Guidelines for predicting crop water requirements. Food and Organization United Nations, FAO Irrigation and Drainage Paper 24, 2nd edn. Rome. 1977.
- [6] 周晓东,朱启疆,孙中平,等. 中国荒漠化气候类型划分方法的初步探讨. 自然灾害学报,2002,11(2):125~131.
- [7] Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y, Evaporation losing its strength. Nature, 1995, 377: 687.
- [8] Brutsaert W, Parlange M B. Hydrologic cycle explains the evaporation paradox. Nature, 1998, 396: 30.
- [9] Roderick M L, Farquhar G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years. Science, 2002, 298(15): 1410~1411.
- [10] Linacre E T. Evaporation trends. Theoretical and Applied Climatology, 2004, 79: 11~21.
- [11] 杨建平,丁永建,陈仁升,刘连友. 近 40a 中国北方降水量与蒸发量变化. 干旱区资源与环境, 2003, 17(2): 6~11.
- [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. 自然资源学报, 2003, 18(4): 437~442.
- [13] Liu Binhui, Xu Ming, Mark Henderson, *et al.* A spatial analysis of pan evaporation trends in China, 1955—2000. Journal of Geophysical Research, 2004, 109, D15102, doi:10.1029/2004JD004511:1~9.
- [14] 郭军,任国玉. 黄淮海流域蒸发量的变化及其原因分析. 水科学进展, 2005, 16(5): 46~52.
- [15] Jensen M E, Burman R D, Allen R G. Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, 1990, No. 70: 332.
- [16] 李玉霖,崔建垣,张铜会. 参考作物蒸散量计算方法的比较研究. 中国沙漠, 2002, 22(4): 372~376.
- [17] 刘绍民,孙中平,李小文,刘昌明. 蒸散量测定与估算方法的对比研究. 自然资源学报, 2003, 18(2): 161~167.
- [18] 郭建平,高素华,毛飞. 中国北方地区干旱化趋势与防御对策研究. 自然灾害学报, 2001, 10(3): 32~36.
- [19] 封志明,杨艳昭,丁晓强,郑海霞. 甘肃地区参考作物蒸散量时空变化研究. 农业工程学报, 2004, 20(1): 99~103.
- [20] Xu C Y, Gong L, Jiang T, *et al.* Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration in Changjiang catchment. J. Hydrology, 2006 (in press).
- [21] Axel T H. Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration trends over China. International Journal of Climatology, 2000, 20: 381~396.
- [22] Allen R G, Pereira L S, Raes D, *et al.* Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements FAO Irrigation & Drainage Paper 56. FAO, 1998. ISBN 92-5-104219-5.
- [23] 祝昌汉. 再论总辐射的气候学计算方法(二). 南京气象学院学报, 1982, (2): 196~206.
- [24] Chen Deliang, Gao Ge, Xu Chongyu, Guo Jun, *et al.* Comparison of Thornthwaite method and Pan data with the standard Penman-Monteith estimates of potential evapotranspiration for China. Climate Research, 2005, 28: 123~

132.

- [25] 任国玉, 郭军. 中国水面蒸发量的变化, 自然资源学报, 2006, 21(1): 31~44.
- [26] 魏凤英, 曹鸿兴, 王丽萍. 20 世纪 80—90 年代我国气候增暖进程的统计事实. 应用气象学报, 2003, 14(1): 79~86.
- [27] 李林, 张国胜, 汪青春, 时兴合. 黄河上游流域蒸散量及其影响影子研究. 地球科学进展, 2000, 15(3): 256~259.
- [28] 陈隆勋, 朱文琴, 王文, 等. 中国近 45 年来气候变化的研究. 气象学报, 1998, 56(3): 257~271.
- [29] 王遵娅, 丁一汇, 何金海, 虞俊. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析. 气象学报, 2004, 62(2): 228~236.
- [30] 李晓文, 李维亮, 周秀骥. 中国近 30 年太阳辐射状况研究. 应用气象学报, 1998, 9(1): 24~31.
- [31] 吴增祥. 气象台站历史沿革信息及其对观测资料序列均一性影响的初步分析. 应用气象学报, 2005, 16(4): 461~467.

Trend of potential evapotranspiration over China during 1956 to 2000

GAO Ge^{1,2}, CHEN De-liang^{1,2}, REN Guo-yu¹, CHEN Yu¹, LIAO Yao-ming¹

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

2. Regional Climate Group, Earth Sciences Centre, Gothenburg University, Gothenburg, Sweden)

Abstract: This study aims at providing a climatological reference of potential evapotranspiration for the second comprehensive assessment of water resources and water resource planning of China. Based on the climatic data from 580 stations throughout the country during 1956 and 2000, potential evapotranspirations are calculated using the Penman-Monteith Method recommended by FAO. The spatial and temporal distributions of the potential evapotranspiration over China and the temporal trends of the regional averages for 10 major river basins and whole country are analyzed. Through a partial correlation analysis, the major climate factors which affect the temporal change of the potential evapotranspiration are also analyzed. Major results are as follows: 1) The seasonal and annual potential evapotranspiration for China as a whole and for most of the basins show declining tendencies during the past 45 years; for the Songhua River Basin there appears a slightly increasing trend. 2) Consequently, the annual potential evapotranspirations averaged over 1980-2000 are lower than those for the first water resources assessment period (1956-1979) in most parts of China. Exceptions are found in some areas of Shandong Peninsula, river basins in central and western parts of Southwest China, Ningxia Hui Autonomous Region as well as source regions of the Yangtze River and the Yellow River, which may have brought about disadvantages to the exploitation and utilization of water resources. 3) Generally, sunshine duration, wind speed and relative humidity have greater impact on the potential evapotranspiration than temperature. Decline tendencies of sunshine duration and/or wind speed at the same period appear to be the major causes for the negative trend of the potential evapotranspiration in most areas.

Key words: potential evapotranspiration; Penman-Monteith formula; trend; China