

近 50 年中国蒸发皿蒸发量变化趋势及原因

刘 敏^{1,2}, 沈彦俊¹, 曾 燕³, 刘昌明⁴

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源中心, 石家庄 050021;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 江苏省气象科学研究所, 南京 210008;
3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 采用 Mann-Kendall 趋势检验方法、完全相关系数法及多元线性回归模型分析了中国全域及其各气候区近 50 年的蒸发皿蒸发量变化趋势及原因。结果表明, 中国蒸发皿蒸发量存在减少趋势, 区域平均减少速率为 17.2 mm/10a; 其中湿润区减少速率最大, 为 29.7 mm/10a; 半干旱半湿润区次之, 为 17.6 mm/10a; 干旱区最小, 为 5.5 mm/10a。四季中, 夏季减少速率最大, 全国平均减少速率为 16.2 mm/10a, 其次为春季, 为 9.7 mm/10a, 秋冬两季减少速率较小。中国蒸发皿蒸发量存在显著减少趋势的地区主要分布在湿润区的长江中下游地区、华南地区和云贵两省, 半干旱半湿润区的黄淮海地区、山东半岛和藏东地区, 以及干旱区的新疆、甘肃中部和青海省等。完全相关系数法分析表明, 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的相关性, 是蒸发皿蒸发量减少的影响因子。气温日较差的减小主要由云量和人类活动所引起的气溶胶及其他污染物的增加引起, 这导致到达地面的太阳辐射强度减弱; 而平均风速的减小则主要与全球变暖背景下亚洲冬季风和夏季风减弱导致我国平均风速的减小有关。

关键词: 中国; 蒸发皿蒸发量; 气温日较差; 平均风速; Mann-Kendall 趋势检验

蒸发是流域水循环和能量循环的关键环节。蒸发皿蒸发量的变化趋势在水文循环过程对气候变化响应研究中的指示意义已为广大水文学家认知, 并成为当今水文科学领域的热点问题。目前, 多数研究都发现蒸发皿蒸发量在全球^[1-5]尤其是北半球存在明显减少趋势^[6-8], 这一事实与全球变暖可能导致蒸发潜力增加的猜测相矛盾, 即蒸发悖反现象(pan evaporation paradox)^[9], 由此引发了更多关于蒸发皿蒸发量变化趋势及其原因分析和蒸发皿蒸发量与实际蒸散发的关系研究^[10-16]。

中国位于亚欧大陆东部, 地形复杂, 大陆性季风气候显著, 气候类型多样。独特的气候水文地理背景, 决定了中国气候变化研究的艰巨性和重要性, 因而中国蒸发皿蒸发量变化趋势研究不仅对中国、也对亚洲及全球的气候变化与水文循环研究具有极其重要的意义。与国外的研究结果一致, 中国的大部分地区也普遍存在蒸发皿蒸发量显著减少的趋势。邱新法等^[13]发现黄河流域蒸发皿蒸发量存在明显减少趋势。郭军等^[14]得出黄淮海流域 20 世纪 80 年代以后蒸发皿蒸发量存在减少趋势, 并将此减少趋势归因于平均风速和太阳辐射的影响。曾燕等^[15]发现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其减少的主要原因。刘波^[16]得出中国北方蒸发皿蒸发量变化与气温日较差和风速的关系最密切。左洪超等^[10]对中国气候变化趋势的研究则表明, 蒸发皿蒸发量与大气相对湿度的相关性最好。

收稿日期: 2008-10-27; 修订日期: 2009-01-05

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目 (KZCX1-YW-08; KZCX2-YW-448); 国家自然科学基金 (40871021)

[Foundation: Knowledge Innovation Project of CAS, No.KZCX1-YW-08; No.KZCX2-YW-44; National Natural Science Foundation of China, No.40871021]

作者简介: 刘敏 (1982-), 女, 河北邯郸人, 博士生, 主要从事气候变化与水文水资源等方面的研究。

E-mail: agnes0505@163.com

通讯作者: 沈彦俊 (1971-), 河北康保人, 博士, 研究员, 主要从事生态水文过程、资源环境遥感以及气候变化影响与适应方面的研究。E-mail: yjshen@sjziam.ac.cn

然而以上研究大多或针对某个流域 / 地区而进行, 或未对其变化原因进行深入研究, 本文在前期研究^[15]的基础上, 根据气候干燥指数按气候干湿程度将中国分为三个气候区, 利用 1955-2001 年的 47 年蒸发皿蒸发量观测资料, 采用 Mann-Kendall 趋势检验方法对中国 671 个气象站的蒸发皿蒸发量进行趋势分析; 并采用五点滑动平均法进一步分析全国及其各气候区平均蒸发皿蒸发量的变化趋势; 最后根据同期气温、降水、湿度、风速、日照时数、气温日较差、低云量等气候要素资料采用完全相关系数法分析中国蒸发皿蒸发量变化趋势的主要影响因子, 并建立主要影响因子对蒸发皿蒸发量的多元线性回归模型进行检验。现将结果报道如下, 以期为中国气候变化及水文循环研究提供参考和依据。

1 资料和方法

1.1 资料

数据来自国家气象局 680 个气象站的月观测资料, 包括 20 cm 口径蒸发皿蒸发量、平均气温、平均相对湿度、降水量、平均风速、日照时数、低云量、最高气温和最低气温, 气温日较差由最高气温和最低气温计算, 时段为 1955-2001 年。去掉资料连续长度不足 10 年的站点后, 剩下 671 个站点。

年资料统计按照自然年算法, 即每年的 1-12 月之和。四季资料以 3、4、5 月为春季, 6、7、8 月为夏季, 9、10、11 月为秋季, 12 月至次年 1、2 月为冬季来统计。全国和各气候区的蒸发皿蒸发量根据本区域内所有实测站点采用反距离加权法内插成 0.1 度网格数据求均值而得。

本文根据世界气象组织(WMO)设定的标准气候值时段 (1971-2000) 的年平均降水量和蒸发皿蒸发量数据计算干燥指数, 经对比分析后^[17, 18], 将中国分为三个气候区, 即湿润区、半干旱半湿润区和干旱区 (图 1), 其分界线与 800 mm 和 200 mm 降水量的分界线基本一致^[19, 20]。

1.2 方法

1.2.1 Mann-Kendall 趋势检验方法

Mann-Kendall 非参数检验方法常用于水质、径流量、温度、降水等水文气象时间序列变化趋势的显著性检验^[21, 22], 主要是通过计算统计量 τ , 方差 σ_i^2 和标准化变量 M , 来判断序列趋势是否显著。计算公式如下:

$$M = \tau / \sigma \tag{1}$$

其中: $\tau = \frac{4S}{N(N-1)} - 1 \tag{2}$

$$\sigma_i^2 = \frac{2(2N+5)}{9N(N-1)} \tag{3}$$

式中: S 为序列所有对偶观测值

$(X_i, X_j, i < j$ 中 $X_i < X_j)$ 出现的次数; N 为序列长度, 本文取 $\alpha = 0.05$ 的显著水平, 如果一时间序列在此置信水平下存在显著变化趋势, 则 $|M| > M_{\alpha/2} = 1.96$, M 值为正, 表明具有上升或增加趋势, M 值为负, 则意味着下降或减少的趋势。

1.2.2 完全相关系数^[16] 考虑到中国蒸发皿蒸发量普遍存在明显减少趋势^[10, 13-16], 为准确分析其主要影响因子, 即因子既与蒸发皿蒸发量之间有较高的相关性, 又随时间发生了

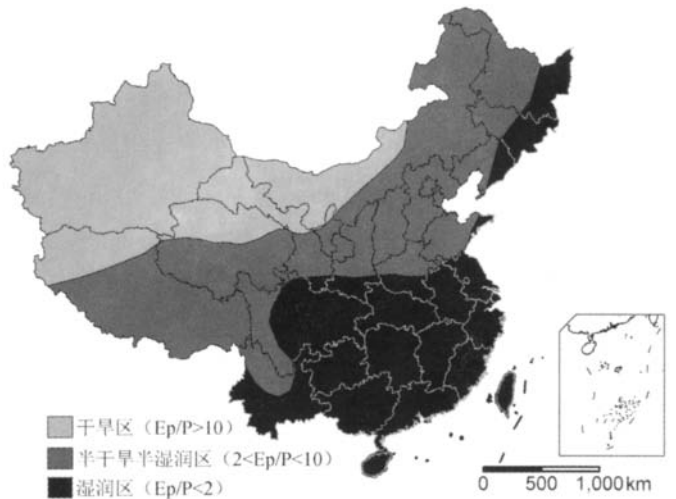


图 1 根据蒸发皿蒸发量 (Ep) 和降水量 (P) 的中国气候分区图
Fig. 1 Climate division of China as classified by arid index (Ep/P)

显著变化, 本文采用完全相关系数方法分析蒸发皿蒸发量变化的主要影响因子^[16], 完全相关系数 R 的计算公式如下:

$$R = r_e \cdot r_t \quad (4)$$

式中, R 为完全相关系数, r_e 为气候要素与蒸发皿蒸发量的相关系数, r_t 为气候要素与时间的相关系数。因而, 只有当某气候要素不仅与蒸发皿蒸发量相关性较强, 且随时间发生显著变化时, 它与蒸发皿蒸发量的完全相关系数才比较大。

2 蒸发皿蒸发量变化趋势分析

2.1 蒸发皿蒸发量变化趋势 Mann-Kendall 检验空间分布

本文采用 Mann-Kendall 趋势检验方法, 计算每个实测站点的 M 值, 并以置信水平 $\alpha = 0.05$ 查得的 $M_{\alpha/2} = 1.96$ 为界将其分为显著减少、不显著减少、不显著增加和显著增加四类, 其年及四季空间分布如图 2 所示。中国年蒸发皿蒸发量大部分地区普遍存在减少趋势(图 2a), 存在显著减少趋势的地区主要分布在湿润区的长江中下游地区、华南地区和云贵两省, 半干旱半湿润区的黄淮海平原、山东半岛及藏东地区, 干旱区的新疆、甘肃中部、青海省等。这与王艳君^[23]得出的长江中下游比上游减少趋势明显, 邱新法等^[13]得出的黄河流域上游和下游蒸发皿蒸发量呈减少趋势, 谢新民等^[24]得出的华北地区蒸发能力持续减少趋势, 安月改等^[25]得出的河北省蒸发皿蒸发量存在减少趋势, 苏洪超等^[26]得出的新疆蒸发皿蒸发量呈减少趋势结论较为一致。统计全国及各气候区蒸发皿蒸发量四种变化趋势占总站点数的比例(表 1)可知, 全国及各气候区存在减少趋势的站点数均占总站点数的 60% 以上。湿润区存在减少趋势的站点数最多, 占总站点数的 75%, 其中存在显著减少趋势的达 53%。由于站点数较多且分布较均匀, 故表 1 的统计也可从一定程度上表明我国大部分地区蒸发皿蒸发量存在减少趋势。

表 1 全国及各气候区年蒸发皿蒸发量不同变化趋势站点数所占比例 (单位: %)

趋势	全国	干旱区	半干旱半湿润区	湿润区
显著减少	46	50	37	53
不显著减少	25	24	28	22
不显著增加	20	14	24	18
显著增加	9	12	11	7

中国四季蒸发皿蒸发量总体上也存在减少趋势(图 2)。夏季存在减少趋势的站点数最多(表 2), 将近 70%, 其中存在显著减少趋势的为 35%, 远大于存在显著增加趋势的 7%。秋冬两季存在减少趋势的站点数相对较少, 但也都占总站点数的 50% 以上(表 2), 由此可知, 春夏两季蒸发皿蒸发量的减少对年蒸发皿蒸发量的减少贡献最大。春季蒸发皿蒸发量存在显著减少趋势的地区主要分布在湿润区的华南地区及云贵两省、半干旱半湿润区的黄淮海地区以及干旱区的甘宁青和新疆部分地区(图 2b)。夏季存在显著减少趋势的地区主要分布在湿润区的长江中下游地区、半干旱半湿润区的黄淮海地区, 以及干旱区的甘肃、青海与新疆部分地区(图 2c)。秋季存在显著减少趋势的地区较少, 零星分布在湿润区的华南地区及长江下游地区, 半干旱半湿润区的淮河流域, 以及干旱区的新疆北部及青海和甘肃中部地区(图 2d)。冬季存在显著减少趋势站点的分布范围最小, 零星分布在湿润区的华南地区和云南省, 半干旱半湿润区的淮河流域, 干旱区包括甘宁青三省(图 2e)。此外, 蒸发皿蒸发量变化也有呈增加趋势的站点, 主要分布在川陕晋一带、东北部分地区以及福建省中南部, 这些地区几乎四季也都呈现增加的趋势。

2.2 全国及各气候区平均蒸发皿蒸发量变化规律

然而, 如果从逐年变化来看, 全国和各气候区年平均蒸发皿蒸发量自 60 年代起基本处于稳定减少趋势, 90 年代以后开始又出现增加趋势, 但干旱区在 60-70 年代间蒸发皿蒸发量处于波动状态, 到 70 年代才出现稳定减少趋势, 90 年代以后也开始增加(图 3)。

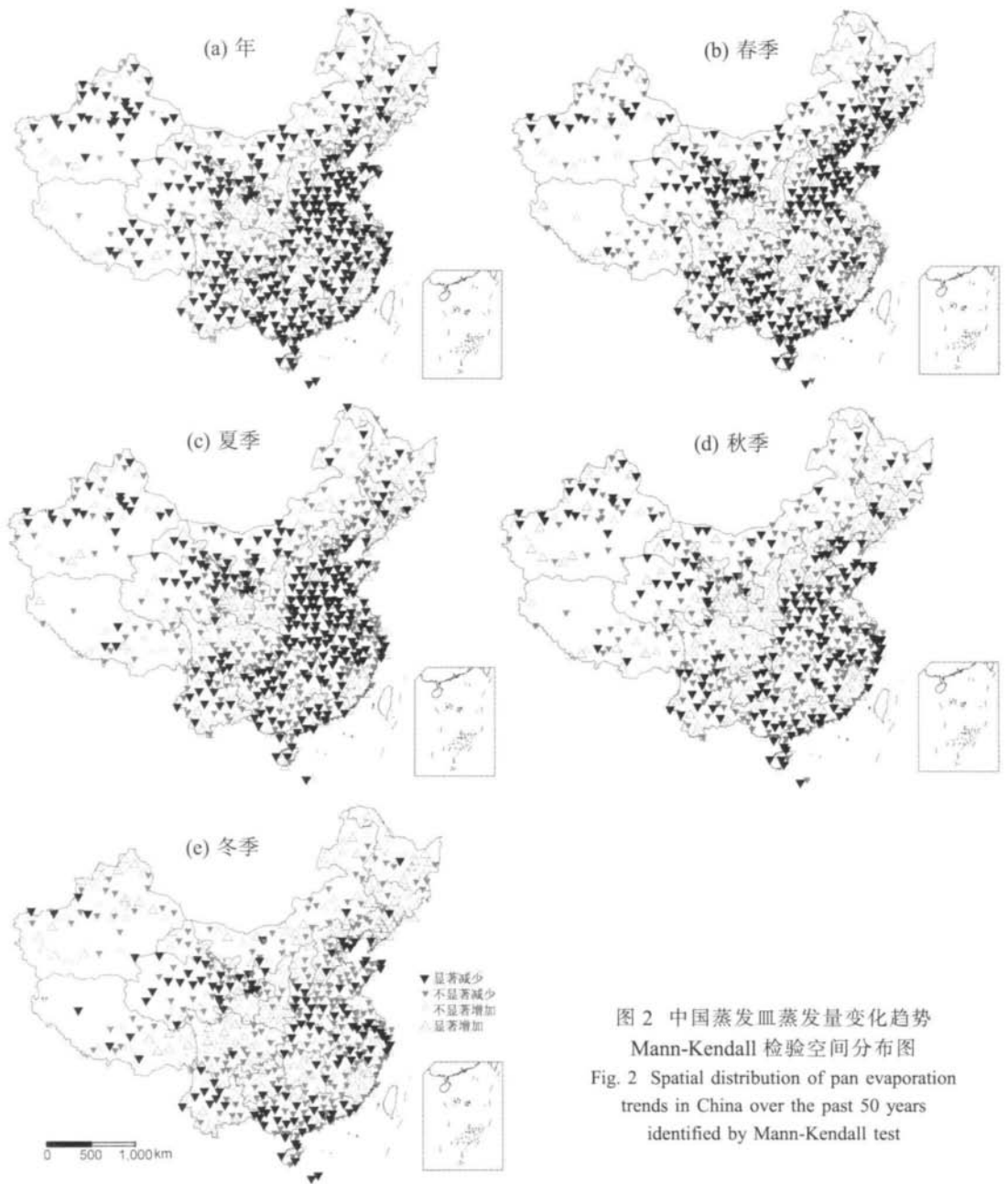


图 2 中国蒸发皿蒸发量变化趋势 Mann-Kendall 检验空间分布图
 Fig. 2 Spatial distribution of pan evaporation trends in China over the past 50 years identified by Mann-Kendall test

全国、湿润区、半干旱半湿润区和干旱区蒸发皿蒸发量的线性趋势拟合均通过了置信水平 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验，即在研究时段内蒸发皿蒸发量总体呈显著减少趋势。各气候区中，湿润区的平均减少速率最大，达到 29.7 mm/10a，占湿润区平均蒸发皿蒸发量的 2.09%；半干旱半湿润区和干旱区的平均减少速率分别为 17.6 mm/10a 和 5.5 mm/10a，分别占两区平均蒸发皿蒸发量的 1.03% 和 0.26%；全国平均的减少速率为 17.2 mm/10a，占中国全域平均蒸发皿蒸发量的 0.98%，

表 2 中国四季蒸发皿蒸发量不同变化趋势站点数所占比例 (单位: %)

Tab. 2 Proportions of stations with different trends in seasonal Ep in China (unit: %)

趋势	春季	夏季	秋季	冬季
显著减少	33	35	25	20
不显著减少	36	34	32	34
不显著增加	24	24	32	31
显著增加	7	7	11	15

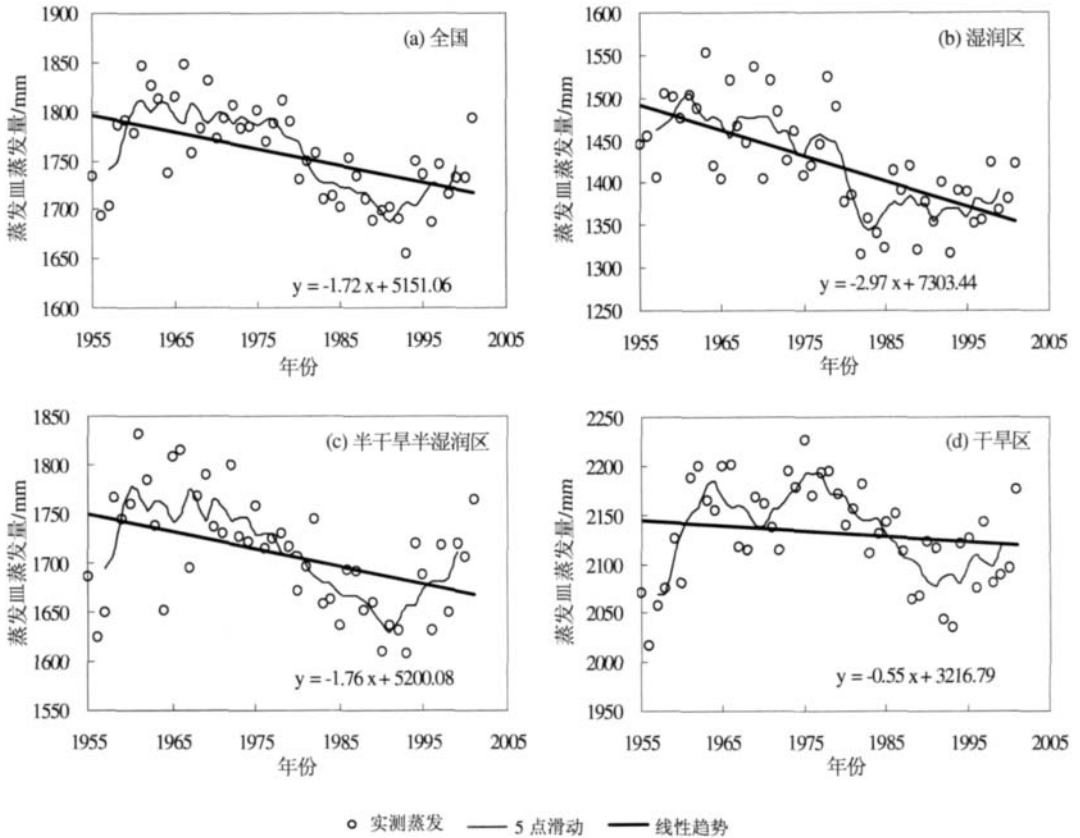


图 3 全国及各气候区年蒸发皿蒸发量的时间变化趋势

Fig. 3 Temporal changes of annual Ep in China and its three climate regions

略小于半干旱半湿润区。

从四季的变化趋势来看，自 60 年代起全国平均蒸发皿蒸发量在不同季节都普遍存在减少趋势，线性趋势拟合均通过了置信水平 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验 (图 4)。其中夏季减少速率最大，达 16.2 mm/10a，占夏季平均蒸发皿蒸发量的 2.24%，其次为春季，减少速率达到 9.7 mm/10a，占春季平均蒸发皿蒸发量的 1.69%，秋冬两季减少速率较小，分别为 4.6 和 1.8 mm/10a，占两季蒸发皿蒸发量的百分比分别为 1.26%和 1.14%。可见，蒸发皿蒸发量的减少主要以春夏两季为主。此外，春季在 60 年代前 90 年代后有增加趋势。

3 蒸发皿蒸发量变化趋势原因分析

3.1 影响因子的完全相关系数及多元回归模型

影响蒸发皿蒸发量变化的因子很多，可分为动力因子、热力因子和水分因子三类。为深入分析中国全域及各气候区与全年及四季不同时空组合蒸发皿蒸发量变化的主要影响因子，本文采用完全相关系数法将主要气象因子分成上述三类，并分别计算其与蒸发皿蒸发量的完全相关系数 (表 3)，最后选出代表三类因子中的最主要要素并与蒸发皿蒸发量建立多元回归模型进行检验，为保证自变量之间相互独立，每类因子中最多选一个要素。

表 3 显示，热力因子中的气温日较差和动力因子中的平均风速与蒸发皿蒸发量的完全相关系数远大于其他要素 (表 3)，这表明它们既与蒸发皿蒸发量的相关性较强，且随时

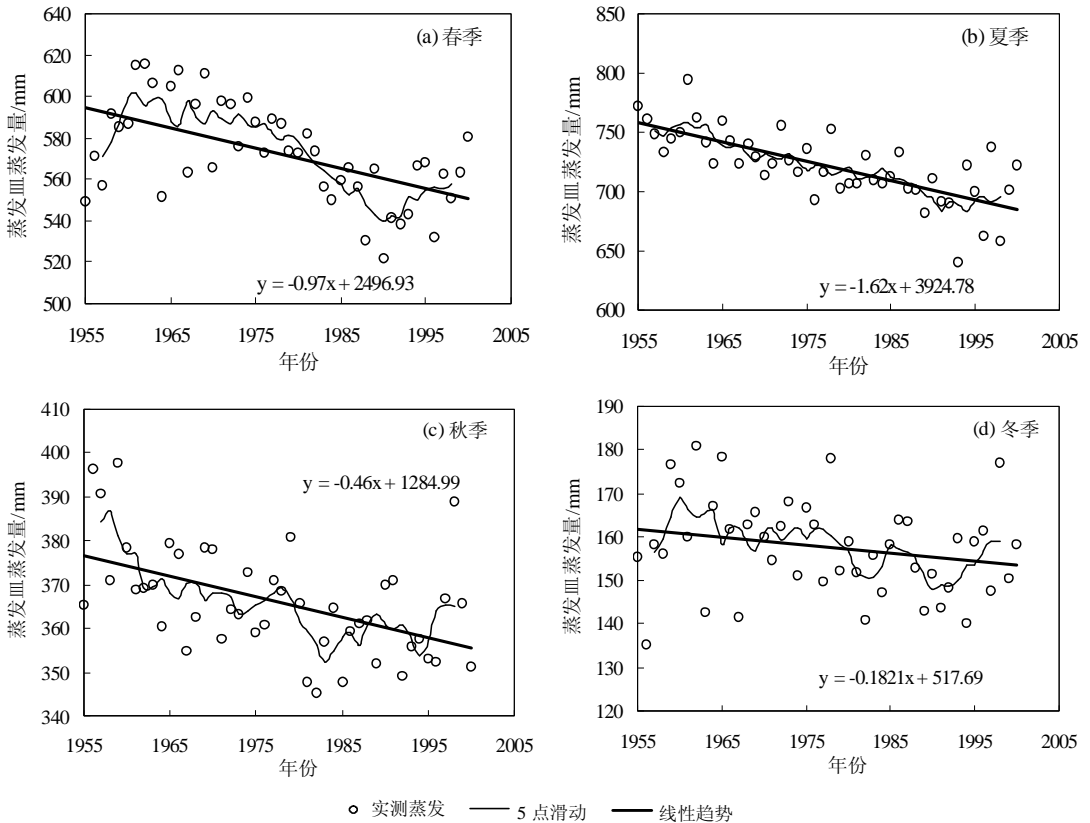


图 4 中国四季蒸发皿蒸发量变化趋势

Fig. 4 Temporal changes of seasonal Ep trends for China

间发生了显著变化趋势，因而是与影响我国蒸发皿蒸发量减少因素中关联性最强的主要两类因子，其中气温日较差的关联度更大。而其他气象要素如降水、云量、湿度、日照时数、气温等对蒸发皿蒸发量变化趋势的影响相对较小。经分析，中国同期平均风速和气温日较差大部分地区也存在显著减小趋势(图 6)。与蒸发皿蒸发量 Mann-Kendall 趋势检验空间分布图对比后，我们发现，蒸发皿蒸发量存在显著减少趋势的长江中下游地区、华南地区、黄淮海地区、新疆、青海和甘肃中部地区，气温日较差和风速也存在显著减小趋势。水分因子中，夏季相对湿度与蒸发皿蒸发量的完全相关系数相对较大。在干旱区，它与蒸发皿蒸发量的完全相关系数甚至大于气温日较差；在年尺度上，降水量与蒸发皿蒸发量的完全相关系数远大于其他水分因子。

从以上的分析中我们得知 20 世纪近 50 年中国蒸发皿蒸发量变化的主要影响因子是气温日较差和平均风速，通过建立蒸发皿蒸发量与其主要影响因子的多元线性回归模型，一方面进一步检验上述结论，另一方面也可为预测蒸发皿蒸发量提供一条新的途径。由于篇幅所限，这里仅检验年尺度蒸发皿蒸发量的回归模型。对于干旱区，考虑到水分因子也是蒸发皿蒸发量减少一个重要原因，而降水量在年尺度上与蒸发皿蒸发量的完全相关系数是水分因子中最大的，因此，在干旱区回归模型建立时，我们分别对不引入降水量因子和引入降水量因子两种情况进行比较分析。

全国、湿润区和半干旱半湿润区拟合值与实测值之间无论在变化趋势上还是在数值上都具有较高的精度，误差较小；实测值与拟合值的相关系数 r 分别达到 0.82、0.89 和 0.82，精度满足要求(图 5)。经计算，全国、湿润区、半干旱半湿润区和干旱区的二元回

表 3 中国及各气候区全年及四季气候因子与蒸发皿蒸发量完全相关系数表
 Tab. 3 Annual and seasonal complete correlation coefficients between Ep and its climatic factors in China and its three climate regions

	Ret	水分因子			热力因子			动力因子	
		低云量	降水	相对湿度	日照时数	气温	气温日较差	平均风速	
全国	年	0.50	0.05	0.02	0.02	0.02	0.10	0.53	0.41
	春	0.55	0.02	0.04	0.18	0.01	0.00	0.41	0.40
	夏	0.73	0.02	0.04	<u>0.27</u>	0.19	0.01	0.33	0.32
	秋	0.50	0.01	0.03	0.16	0.03	0.01	0.35	0.21
湿润区	冬	0.22	0.02	0.04	0.09	0.13	0.00	0.24	0.29
	年	0.64	0.08	0.07	0.02	0.04	0.01	0.47	0.56
	春	0.50	0.12	0.02	0.02	0.03	0.06	0.38	0.52
	夏	0.60	0.03	0.18	<u>0.25</u>	0.33	0.01	0.47	0.40
半干旱区	秋	0.43	0.14	0.06	0.03	0.01	0.00	0.28	0.17
	冬	0.34	0.10	0.12	0.05	0.02	0.06	0.32	0.27
	年	0.42	0.06	0.09	0.03	0.02	0.10	0.56	0.34
	半湿润区	春	0.50	0.08	0.04	0.01	0.04	0.08	0.58
干旱区	夏	0.50	0.13	0.06	0.13	0.00	0.05	0.36	0.23
	秋	0.30	0.07	0.13	0.06	0.07	0.01	0.41	0.21
	冬	0.12							
	年	0.15	0.01	<u>0.15</u>	0.03	0.21	0.08	0.28	0.29
	春	0.50	0.08	0.14	0.11	0.03	0.00	0.27	0.25
	夏	0.66	0.08	0.02	0.28	0.00	0.07	0.09	0.30
	秋	0.39	0.02	0.05	0.07	0.10	0.07	0.18	0.15
	冬	0.10							

注: 表中第三列为蒸发皿蒸发量与时间的相关系数 Ret, 黑体表示相关系数较大者; 其余各列为各影响因子与蒸发皿蒸发量的完全相关系数。其中, 黑体为完全相关系数远大于其他气候要素的两组值; 下划线表示水分因子中与蒸发皿蒸发量完全相关系数较大者。由于半干旱半湿润区和干旱区冬季蒸发皿蒸发量的减少趋势很小, 不再计算其影响因子。

归模型的计算 F 值分别为 47.66、79.16 和 46.57, 均远大于查得的 $F_{0.01}(2, 44) = 5.51$; 通过了置信水平 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验。而干旱区蒸发皿蒸发量与气温日较差和平均风速的二元线性回归模型拟合值与实测值相关系数 r 仅为 0.62, 均方根误差 $RMSE = 46.2$ mm, 模型精度较低; 引入降水量后的回归模型精度得到明显提高, 拟合值与实测值的相关系数 r 达到 0.76, 而均方根误差减小为 39.0 mm, 对实测值的拟合无论在变化趋势上还是数值上效果都较好(图 5)。经计算, 引入降水量后的干旱区蒸发皿蒸发量回归模型计算 F 值为 31.17, 远大于查得的 $F_{0.01}(3, 43) = 4.30$, 通过了置信水平 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验。

3.2 蒸发皿蒸发量变化趋势的原因浅析

蒸发皿蒸发量作为大气蒸发潜力的一个重要指标, 其变化对于检测气候和水文循环变化有重要指示意义。虽然世界不同地区都有关于蒸发皿蒸发量减少趋势的报道, 但是对于其归因问题仍然存在一些争论。这主要是由于蒸发皿蒸发量是水分、热力和动力三类气象因子综合作用的结果, 在现有观测资料的基础上很难准确区分各类因子对蒸发皿蒸发量变化的贡献大小。综合以上分析结果, 中国蒸发皿蒸发量的减少主要与气温日较差和风速的减小有关。

然而, 对于干旱区而言, 除气温日较差和风速外, 水分因子的影响也很重要。夏季蒸发皿蒸发量与相对湿度有较强的完全相关性, 这可能是由于干旱区测站大部分分布于绿洲, 绿洲灌溉率的提高引起了相对湿度的增加, 而相对湿度的增加降低了大气的蒸发潜势。在年尺度上, 干旱区降水量和低云量普遍存在增加的趋势(图 6), 这也是影响年蒸发皿蒸发量减少的重要因子。此外, 年降水量除西部干旱区有普遍增加趋势外, 青藏高原和湘鄂赣滇地区也呈现增加的趋势, 这也是干旱区和华南云南等地蒸发皿蒸发量减少

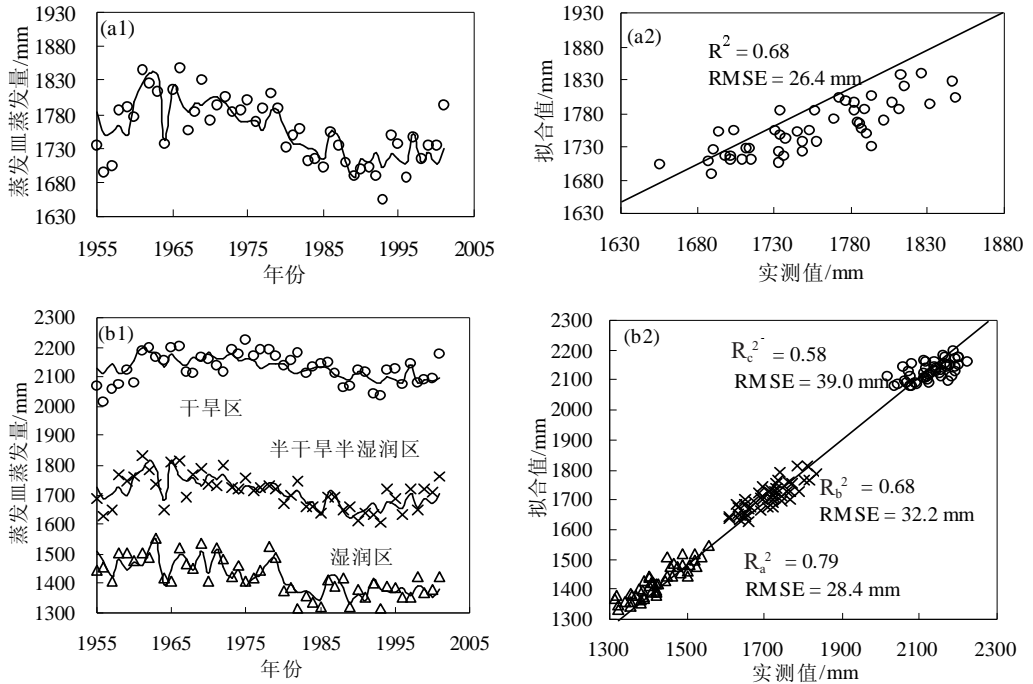


图 5 全国及三个气候区蒸发皿蒸发量与其影响因子的回归模型精度检验

Fig. 5 Precision tests of multiple linear regression model of E_p for China as a whole and its three climate regions

注：全国、湿润区和半干旱半湿润区模型仅考虑了气温日较差和平均风速两种因子，而干旱区模型的因子中还引入了降水量。(a1)、(b1)分别为全国和各气候区蒸发皿蒸发量拟合图，其中散点为实测值，线型为拟合值；(a2)、(b2)分别为模型拟合值与实测值 R^2 检验图，(b2)中 R^2 的下标 a、b、c 分别指湿润区、半干旱半湿润区和干旱区

的重要原因之一。

经分析，气温日较差减少主要是由于最低气温的增幅大于最高气温增幅引起。Roderick 将这归因于云量和气溶胶等污染物的增加，因为云量和气溶胶及各种污染物的增加减少了白昼到达地面的太阳辐射量，同时也减少了夜间地表长波辐射向大气层外的损失^[9]。由图 6d 可知，华南地区、云南、新疆大部分地区低云量存在增加趋势，这些地区与降水的增加和蒸发皿蒸发量的减少地区相吻合，因而低云量的增加引起的太阳辐射减少可能是该地区蒸发皿蒸发量减少的一个原因。

然而黄淮海平原大部分地区低云量却普遍存在显著减少趋势，而且降水量也存在减少趋势(图 6c)，这些趋势都应该是有利于蒸发皿蒸发量的增加。因此，在黄淮海地区风速的显著减小可能是蒸发皿蒸发量减少的主要原因。同时，气温日较差的减小可能是因为大气气溶胶浓度增多的结果，这也可能导致太阳辐射量的减少，从而引起该地区蒸发皿蒸发量向减少的趋势发展。但由于缺乏气溶胶资料，此原因还有待进一步证实。

风速减小的原因比较复杂，有文献倾向于认为是全球变暖情况下的大气环流变化所引起^[27, 28]，在全球和亚洲变暖的背景下，近 50 年来，亚洲纬向环流指数增强、经向环流指数减弱所引起的亚洲冬季风和夏季风减弱，导致了我国平均风速的减小。但是，另一方面，城市化发展导致大多数建在城镇周边地区的气象站点附近的粗糙度增加也可能是引起观测到的风速下降的一个不可忽略的因素。由于资料和观测手段的限制，目前对风速与气温日较差减少的分析和原因探究仍然不足，应该是今后蒸发皿蒸发量减少和气候变化归因研究中应重点加强的领域。

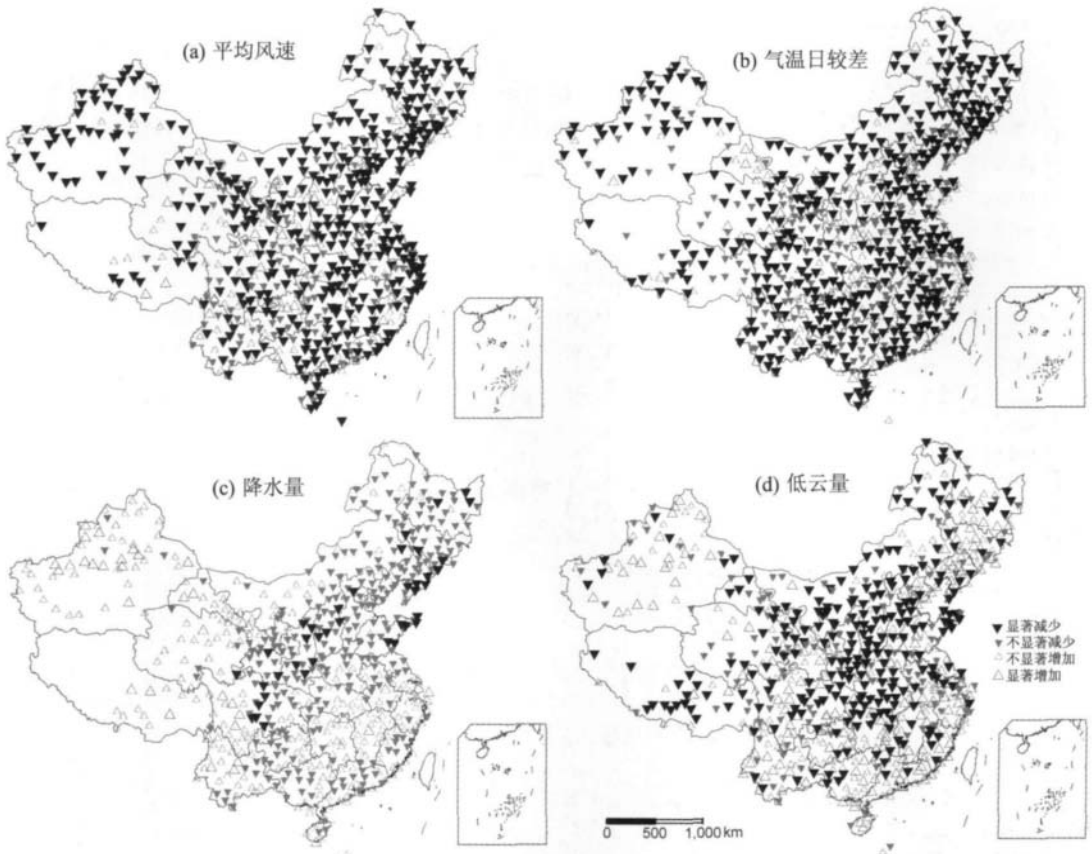


图 6 蒸发皿蒸发量主要影响因子年变化趋势 Mann-Kendall 检验空间分布图

Fig. 6 Annual variations of major climate factors identified by Mann-Kendall test in China

4 结论

本文采用 Mann-Kendall 趋势检验方法和五点滑动平均法对中国蒸发皿蒸发量 20 世纪近 50 年蒸发皿蒸发量变化趋势进行研究, 并采用完全相关系数法及多元线性回归模型分析、检验其主要影响因子, 主要结论如下:

(1) 中国蒸发皿蒸发量存在显著减少趋势的地区主要分布在湿润区的长江中下游地区、华南地区和云贵两省, 半干旱半湿润区的黄淮海地区、山东半岛和藏东地区, 以及干旱区的新疆、甘肃中部和青海省等。

(2) 在中国各气候区中湿润区减少速率最大, 为 27.9 mm/10a; 半干旱半湿润区次之, 为 17.6 mm/10a; 干旱区最小, 为 5.5 mm/10a。

(3) 20 世纪 60-90 年代是蒸发皿蒸发量的稳定减少时期。四季蒸发皿蒸发量变化趋势分析表明, 夏季减少速率最大, 每 10 年减少速率为 16.2 mm/10a, 其次为春季, 为 9.7 mm/10a, 秋冬两季减少速率较小, 分别为 4.6 mm/10a 和 1.8 mm/10a。

(4) 中国蒸发皿蒸发量减少的主要影响因子是热力因子气温日较差和动力因子平均风速。但在干旱区, 水分因子也很重要。西北地区和长江中下游以南地区气温日较差的减小可能与降水和低云量的增加有关, 而黄淮海地区则可能与全球变暖背景下人类活动所引起的气溶胶及其他污染物的增加有关, 低云量及气溶胶等污染物的增加导致的太阳辐射量减少而引起蒸发皿蒸发量的较少; 平均风速的减小则主要可能由全球变暖背景下

亚洲冬季风和夏季风减弱导致我国平均风速的减小引起。

(5) 本文建立了全国、湿润区、半干旱半湿润区年蒸发皿蒸发量与气温日较差和平均风速的二元回归模型以及干旱区年蒸发皿蒸发量与气温日较差、平均风速和降水量的回归模型,模型拟合精度较高,均通过了置信水平 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验,这进一步证实了以上结论。

参考文献 (References)

- [1] Roderick M L, Rotstajn L D, Farquhar G D. On the attribution of changing pan evaporation. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34, L17403.
- [2] Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y. Evaporation losing its strength. *Nature*, 1995, 377: 687-688.
- [3] Roderick M L, Farquhar G D. Changes in Australian pan evaporation from 1970 to 2002. *Int. J. Climatol.*, 2004, 24(9): 1077-1090.
- [4] Ohmura A, Wild M. Is the hydrological cycle accelerating? *Science*, 2002, 298: 1345-2004.
- [5] Roderick M L, Farquhar G D. Changes in New Zealand pan evaporation since the 1970s. *Int. J. Climatol.*, 2005, 25: 2031-2039.
- [6] Chattopadhyay N, Hulme M. Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions on recent and future climate change. *Agric. Forest Meteorol.*, 1997, 87: 55-73.
- [7] Brutsaert W, Parlange M B. Hydrologic cycle explains the evaporation paradox. *Nature*, 1998, 396: 30.
- [8] Cohen S, Ianetz A, Stanhill G. Evaporative climate changes at Bet Dagan, Israel, 1964-1998. *Agric. For. Meteorol.*, 2002, 111: 83-91.
- [9] Roderick M L, Farquhar G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years. *Science*, 2002, 298: 1410-1411.
- [10] Zuo Hongchao, Li Dongliang, Hu Yinjiao. Change trend of climate in China over the past 40 years and its relationship with the change of pan evaporation. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(11): 1125-1130. [左洪超, 李栋梁, 胡隐樵. 近四十年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. *科学通报*, 2005, 50(11): 1125-1130.]
- [11] Burn D H, Hesch N M. Trends in evaporation for the Canadian prairies. *Journal of Hydrology*, 2007, 336: 61-73.
- [12] Sun Fubao. Study on watershed evapotranspiration based on the Budyko Hypothesis. PhD Dissertation of Tsinghua University, 2007. [孙福宝. 基于 Budyko 水热耦合平衡假设的流域蒸发研究. 清华大学博士学位论文, 2007.]
- [13] Qiu Xinfu, Liu Changming, 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. [邱新法, 刘昌明, 曾燕. 黄河流域近四十五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.]
- [14] Guo Jun, Ren Guoyu. Recent change of pan evaporation and possible climate factors over the Huang-Huai-Hai watershed, China. *Advances in Water Science*, 2005, 16(5): 666-672. [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): 666-672.]
- [15] Zeng Yan, Qiu Xinfu, Liu Changming et al. Changes of pan evaporation in China in 1960-2000. *Advances in Water Science*, 2007, 18(3): 311-318. [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. *水科学进展*, 2007, 18(3): 311-318.]
- [16] Liu Bo, Ma Zhuguo, Ding Yuguo. Characteristics of the changes in pan evaporation over northern China during the past 45 years and the relations to environment factors. *Plateau Meteorology*, 2006, 25(5): 840-848. [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.]
- [17] Yang Jianping, Ding Yongjian, Chen Rensheng et al. The interdecadal fluctuation of dry and wet climate boundaries in China in recent 50 years. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(6): 655-661. [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.]
- [18] Liu Bo, Ma Zhuguo. Area change of dry and wet region in China in the past 45 years. *Arid Land Geography*, 2007, 30(1): 7-15. [刘波, 马柱国. 过去45年中国干湿气候区域变化特征. *干旱区地理*, 2007, 30(1): 7-15.]
- [19] Editorial Committee of Physical Geography of China, CAS. *Physical Geography of China: Climate*. Beijing: Science Press, 1984. 161. [中科院《中国自然地理》编辑委员会. *中国自然地理: 气候*. 北京: 科学出版社, 1984. 161.]
- [20] Shanghai Normal University, Jilin Normal University, Beijing Normal University et al. *Physical Geography of China*. Beijing: People's Education Press, 1979. 148. [上海师大, 吉林师大, 北京师大等. *中国自然地理*. 北京: 人民教育出版社, 1979. 148.]
- [21] Liu Changming, Zheng Hongxing. Trend analysis of hydrological components in the Yellow River Basin. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(2): 129-135. [刘昌明, 郑红星. 黄河流域水循环要素变化趋势分析. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 129-135.]
- [22] Yue S, Pilon P, Phinney B et al. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *J. Hydrology*, 2002, 259: 254-271.
- [23] Wang Yanjun, Jiang Tong, Xu Chongyu. Spatial-temporal change of 20cm pan evaporation over the Yangtze River Basin. *Advances in Water Science*, 2006, 17(6): 830-833. [王艳君, 姜彤, 许崇育. 长江流域20cm蒸发皿蒸发量的时空变化. *水科学进展*, 2006, 17(6): 830-833.]

- [24] Xie Xinmin, Guo Hongyu, Yin Mingwan et al. Evaporation capacity and its changing trend analysis in North China. *Water Resources Planning and Design*, 2001,(4): 24-28. [谢新民, 郭洪宇, 尹明万等. 我国华北地区蒸发能力及其变化趋势分析. *水利规划设计*, 2001,(4): 24-28.]
- [25] An Yuegai, Li Yuanhua. Change of evaporation in recent 50 year in Hebei region. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2005, 19(4): 159-162. [安月改, 李元华. 河北省近 50 年蒸发量气候变化特征. *干旱区资源与环境*, 2005, 19(4): 159-162.]
- [26] Su Hongchao, Wei Wenshou, Han Ping. Changes in air temperature and evaporation in Xinjiang during recent 50 years. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(2): 174-178. [苏洪超, 魏文寿, 韩萍. 新疆近 50a 来的气温和蒸发变化. *冰川冻土*, 2003, 25(2): 174-178.]
- [27] Wang Huijun. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's. *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, 18: 376-38.
- [28] Wang Zunya, Ding Yihui, He Jinhai et al. An updating analysis of the climate change in China in recent 50 years. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, 62(2): 228-236. [王遵娅, 丁一汇, 何金海等. 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.]

Changing Trend of Pan Evaporation and Its Cause over the Past 50 Years in China

LIU Min¹, SHEN Yanjun¹, ZENG Yan², LIU Changming³

(1. *Agricultural Resources Research Center, CAS, Shijiazhuang 050021, China;*

2. *Jiangsu Institute of Meteorological Sciences, Nanjing 210008, China;*

3. *Key Laboratory of Water Cycle & Related Surface Process,*

Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Pan evaporation, as a measurement of atmospheric evaporative demand, has traditionally been used for agricultural water management. The changing trend of pan evaporation also attracts attentions from the hydrological community worldwide due to its indicative meaning in hydrological cycles. In this study, the changing trend of pan evaporation in China over the past 50 years was analyzed by using Mann-Kendall test method. The results show that there is a decreasing trend in most of the observations on pan evaporation in China, with an average rate of 17.2 mm/10a in China. In the humid region, the decreasing rate was 29.7 mm/10a, presenting the most significantly decreasing trend, while the decreasing rate were 17.6 mm/10a and 5.5 mm/10a in the semi-arid/sub-humid region and arid region, respectively. Temporally, most significant decreases occur in summer with a rate of -16.2 mm/10a; then, -9.7 mm/10a in spring; the decreasing rates in autumn and winter are relatively low. On the attribution, we calculated the complete correlation coefficients of 7 climate factors with pan evaporation. And decreases in diurnal temperature range and wind speed were found to be the main influencing factors leading to the decrease of pan evaporation. The decrease in diurnal temperature range might relate to the increase of aerosol as well as the other pollutants under the circumstance of global warming, which is one of the main features in the context of climate change; and the lowering of wind speed might be associated with the weakening of the Asian winter and summer monsoon under the global climate warming.

Key words: China; pan evaporation; diurnal temperature range; wind speed; Mann-Kendall test