

近60年北京市通州区蒸发皿蒸发量变化特征及影响因子分析

赵志泉¹, 戴临栋^{1,2*}

¹北京市通州区气象局, 北京

²北京城市气象研究院, 北京

收稿日期: 2024年10月8日; 录用日期: 2024年11月8日; 发布日期: 2024年11月18日

摘要

蒸发是水循环的重要组成部分, 对农作物土地改良、土壤水分调节、灌溉等方面具有重要意义。本文利用1955~2013年北京市通州区气象站20 cm口径蒸发皿蒸发量、气温、相对湿度、日照时数、降水、风速六类气象要素观测资料记录, 用线性倾向估计方法分析相关气候要素变化, 进一步采用完全相关系数法对蒸发皿蒸发量变化的影响因子筛选, 由此获得通州区蒸发皿蒸发量气候变化特征及影响因素。研究发现, 通州区年平均蒸发皿蒸发量为1952.4 mm, 年最大蒸发皿蒸发量为2565.5 mm, 年最小蒸发皿蒸发量为1431.4 mm。从春到冬四季蒸发皿蒸发量占比依次为24.1%、40.2%、25.1%、10.6%, 蒸发皿蒸发量在夏季超过其他任何季节、秋季位列次席、而冬季蒸发量是最少的。4月至7月是蒸发皿蒸发量最为集中的时段, 约占全年蒸发皿蒸发量的52.5%, 同时月变化具有明显的单峰特征。蒸发皿蒸发量下降趋势明显, 1995年之前蒸发皿蒸发量的气候倾向率为 $-86.54 \text{ mm (10a)}^{-1}$, 日照时数、平均风速是该阶段的主要影响因子, 1995年之后为 $-155.70 \text{ mm (10a)}^{-1}$, 平均风速是该阶段的主要影响因子。

关键词

蒸发皿蒸发量, “蒸发悖论”现象, 变化特征, 影响因素, 北京市通州区

Analysis of Characteristics and Influencing Factors of Evaporative Capacity Changes in Tongzhou District, Beijing over the Past 60 Years

Zhiqun Zhao¹, Lindong Dai^{1,2*}

¹Beijing Tongzhou District Meteorological Bureau, Beijing

*通讯作者。

文章引用: 赵志泉, 戴临栋. 近 60 年北京市通州区蒸发皿蒸发量变化特征及影响因子分析[J]. 气候变化研究快报, 2024, 13(6): 1628-1636. DOI: 10.12677/ccrl.2024.136174

Abstract

Evaporation is an important component of the water cycle, which is of great significance for crop land improvement, soil moisture regulation, irrigation, and other aspects. This article uses the observation data of six meteorological elements, including 20 cm diameter evaporation capacity, temperature, relative humidity, precipitation, wind speed, and daily range, from the Tongzhou District Meteorological Station in Beijing from 1955 to 2013. The linear tendency estimation method is used to analyze the changes in relevant climate elements, and the complete correlation coefficient method is further used to screen the influencing factors of evaporation capacity changes. Therefore, the climate change characteristics and influencing factors of evaporation capacity in Tongzhou District are obtained. Research has found that the average annual evaporation in Tongzhou District is 1952.4 mm, with a maximum annual evaporation of 2565.5 mm and a minimum annual evaporation of 1431.4 mm. The proportion of evaporation in the four seasons from spring to winter is 24.1%, 40.2%, 25.1%, and 10.6%, respectively. The evaporation in summer exceeds any other season, followed by autumn, while the evaporation in winter is the lowest. April to July is the period with the most concentrated evaporation, accounting for about 52.5% of the annual evaporation, and the monthly variation has a clear unimodal characteristic. The decreasing trend of evaporation capacity of evaporating dishes is obvious. Before 1995, the climate tendency rate of evaporation capacity of evaporating dishes was $-86.54 \text{ mm (10a)}^{-1}$, and the sunshine hours and average wind speed were the main influencing factors in this stage. After 1995, it was $-15.70 \text{ mm (10a)}^{-1}$, and the average wind speed was the main influencing factor in this stage.

Keywords

Evaporation Volume of Evaporating Dish, “Evaporation Paradox” Phenomenon, Changing Characteristics, Influencing Factors, Tongzhou District, Beijing

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

蒸发是水循环中重要的组成部分, 对农作物土地改良、土壤水分调节、灌溉定额等方面具有重要意义[1]-[5]。目前测定蒸发的方法有很多种, 其中利用蒸发皿测定当地蒸发量应用最为广泛。IPCC 第六次评估报告指出自 1850 年以来, 全球气温升高 1.1°C , 全球变暖已经成为当前最为主要的气候特征[6]。受全球变暖影响, 人们预计蒸发皿蒸发量上升趋势将越发显著, 然而国内外对蒸发皿蒸发量变化的研究恰恰与人们的预计相反, 近 50 年观测资料表明蒸发皿蒸发量呈明显减少趋势, 这一现象被称为“蒸发悖论”[7]。

关于“蒸发悖论”为何产生, 学术界存在多种不同的解释和看法, 国外研究中, Brutsaert 等[8]认为地面蒸发上升是蒸发皿蒸发量降低的一个原因, Peterson 等[9]人发现云量增加阻止阳光到达地面引起气温日较差减少, 造成蒸发皿蒸发量下降。在国内, 左洪超等人[10]分析发现蒸发皿蒸发量与大气中水汽含量有着高度的关联性; 赵梓琨等[11]观察到黄河中下游蒸发皿蒸发量减少主要因为日照时间和风速的降低; 于占江等[12]的研究表明, 京津冀地区在过去 44 年中蒸发皿蒸发量呈现明显的下降趋势; 王素萍等

[13]的研究揭示, 风速的降低是近 40 年来江河源区蒸发皿蒸发量减少的首要原因。

通州区属于大陆性季风气候, 具有春季多风、夏季多雨、秋季凉爽、冬季干冷的气候特点, 年平均气温 11.3℃, 年降水量 620 mm 左右。通州区作为北京城市副中心所在地, 区位优势促进通州区农业由传统型向新型城镇化的示范区转变, 而大力发展都市型现代农业是建设新型城镇化示范区的重要基础[14]-[16]。目前关于北京市通州区蒸发皿蒸发量变化特征以及主要气象影响因子研究较少, 本研究利用 1955 至 2013 年北京市通州区气象站积累的蒸发皿蒸发量观测记录, 探究了该地区蒸发皿蒸发量变化的气候特征, 揭示造成蒸发皿蒸发量减少的关键气象因素, 以期为属地现代农业科学生产提供气象依据。

2. 资料与方法

《中国气象局关于县级综合气象业务改革发展的意见》(气发〔2013〕54 号)明确 2014 年 1 月 1 日起一般站取消蒸发观测, 故本研究采用资料为通州区气象站 1955~2013 年 59 年逐月观测资料, 包括 20 cm 口径小型蒸发皿蒸发量、日照时数、平均气温、平均风速、降水量、平均相对湿度。

采用线性倾向估计法来揭示气候要素随时间的长期演变趋势, 同时使用完全相关系数法从众多因子中剔除干扰因子, 从而分析得出影响蒸发皿蒸发量变化的主要气象因素。

2.1. 线性倾向估计

线性倾向估计法是一种统计方法, 它是基于观测到的气候要素数据序列 x_i (其中 i 从 1 到 n , n 为序列的总数)以及每个数据点对应的时间 t_i , 采用最小二乘法来构建一元线性回归方程, 方程的形式为: $x_i = a + bt_i$, 在这个方程中, a 所代表的为方程截距, b 所代表的是方程的斜率。线性方程斜率 b 的 10 倍又称作气候倾向率, 它反映了观测序列随着时间发生变化的线性趋势和速度, 通过计算气候倾向率, 可以更直观地了解气候要素随时间的变化, 从而有助于气候预测和应对气候变化的研究。气候倾向率的数值反映变化快与慢的剧烈程度; 正负则揭示变化的方向: 当 $b > 0$ 时, 表示趋势为增加, 当 $b < 0$ 时, 表示趋势为减少。选用滑动 t 检验法评估线性变化趋势是否明显。

2.2. 完全相关系数

本文采用完全相关系数方法, 量化不同气象要素与蒸发皿蒸发量之间的关系, 进而探讨识别对蒸发皿蒸发量产生主要影响的气象因子。根据文献[17]定义的完全相关系数 QC , 这一系数是由两部分乘积组成, 即 c_1 与 c_2 乘积, 其中, c_1 表示蒸发皿蒸发量与特定影响因子之间的相关关系, 而 c_2 则反映了该影响因子随时间变化的相关关系。该方法的核心思路是, 选取的影响因子不仅要与蒸发皿蒸发量存在显著相关性, 同时随时间也要呈现出显著的变化, 从而计算得到的完全相关系数才会显得尤为突出和重要, 这种方法提供了一个综合考量影响因子与蒸发皿蒸发量关系的新视角。

3. 蒸发皿蒸发量的变化特征

3.1. 蒸发皿蒸发量的年际变化

1955~2013 年通州区蒸发皿蒸发量变化趋势整体呈现上升变化(见图 1), 其中 1995 年蒸发皿蒸发量上升趋势尤为明显, 达 671.4 mm, 发生突变, 呈现逆“蒸发悖论”现象, 究其原因, 1995 年后通州区气象站因站址环境改变, 气压、气温、相对湿度、降水、风向、风速、蒸发等设备调整到观测场北侧办公楼六层楼顶, 设备高于地面 17.6 m, 探测环境受周边树木、建筑影响因素明显降低, 同时下垫面由草坪变更为沥青混合砂石面, 原有的自然土壤下垫面结构不复存在, 这一变化导致一系列气象要素的显著变动, 包括蒸发皿蒸发量显著增大、平均气温升高、平均风速变大、平均相对湿度变小等(见表 1)。为了更加科

学的加以分析, 本文对蒸发皿蒸发量变化及影响因子从两个阶段研究, 第 1 阶段分析 1955~1994 年累计 40 年气象要素, 第 2 阶段分析 1995~2013 年累计 19 年气象要素。

Table 1. Mean variation of meteorological elements at Tongzhou District Meteorological Station from 1955 to 2013

表 1. 1955~2013 年通州区气象站气象要素均值变化

年份	蒸发量/mm	平均气温/°C	日照/h	平均风速/(m·s ⁻¹)	年降水量/mm	相对湿度/%
1955~1964	1887.5	11.4	2695.4	2.5	752.0	60
1965~1974	1989.9	11.2	2793.6	3.1	539.8	59
1975~1984	1702.5	11.5	2708.5	2.5	567.7	61
1985~1994	1661.5	11.9	2483.4	2.0	597.6	60
1995~2004	2318.3	13.4	2425.8	2.9	487.4	53
1995~2013	2177.5	13.5	2355.0	2.7	543.7	51
平均	1956.2	12.2	2577.0	2.6	581.4	57

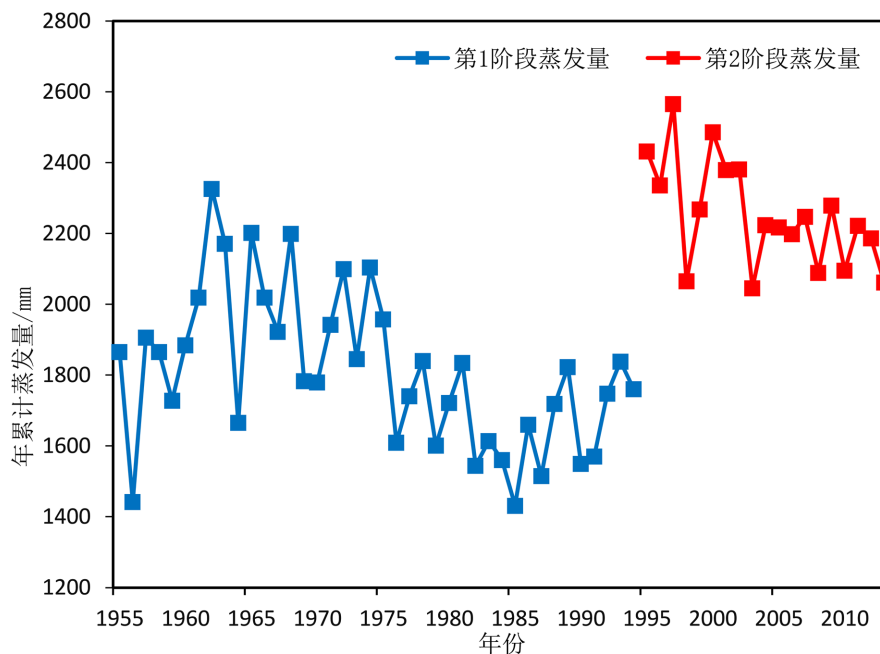


Figure 1. Trend of evaporation in Tongzhou District from 1955 to 2013

图 1. 1955~2013 年通州区蒸发量变化趋势

第 1 阶段蒸发皿蒸发量记录显示, 平均蒸发量为 1810.3 mm, 1962 年出现最大蒸发量, 为 2326.1 mm, 1985 年出现最小蒸发量, 为 1431.4 mm, 年蒸发量气候变化率为 $-86.54 \text{ mm} (10\text{a})^{-1}$; 第 2 阶段蒸发皿蒸发量下降趋势表现更为明显, 年蒸发量气候变化率扩大到 $-155.70 \text{ mm} (10\text{a})^{-1}$, 平均蒸发量增至 2251.6 mm, 1997 年出现的最大蒸发量高达 2565.5 mm, 而 2003 年出现的最小蒸发量也达到 2045.8 mm。尽管两个阶段蒸发皿蒸发量各统计值存在较大差异, 但下降趋势一致, 即都出现“蒸发悖论”现象。

3.2. 蒸发皿蒸发量的季节及月变化

在蒸发皿蒸发量季节分布中, 春夏秋冬四个季节的蒸发皿蒸发量依次分别是 471.0 mm、784.1 mm、490.2 mm、207.1 mm, 年蒸发量的四个季节占比依次分别是 24.1%、40.2%、25.1%、10.6%, 显然夏季蒸发量最大, 冬季最小, 春秋两季大体一样。在第 1 阶段, 蒸发皿蒸发量最高 734.9 mm, 依旧是夏季, 约

占全年 40.6 %，最少蒸发量 190.8 mm，同样是在冬季，占全年的 10.5 %，春季和秋季分别是 440.5 mm 和 444.5 mm，分别占全年的 24.3 %和 24.5%，且相差不大。第 2 阶段表现出相似的分布特点，但四个季节蒸发皿蒸发量明显上升，其中夏季达到 887.6 mm，冬季达到 225.3 mm，春季、秋季蒸发皿蒸发量分别升至 535.3 mm 和 586.4 mm，春夏秋冬蒸发量全年占比分别是 24.0%、39.7%、26.2%、10.1%。可见蒸发皿蒸发量占比第 1 阶段、第 2 阶段季节差异不明显。

从各季蒸发皿蒸发量趋势系数看(见表 2)，四个季蒸发皿蒸发量均表现出降低趋势，其中第 1 阶段夏季、冬季下降趋势显著,通过信度 0.05 检验。夏季蒸发量下降趋势最为明显,其变化率为 $-54.83 \text{ mm (10a)}^{-1}$ ，其次为冬季 $-10.79 \text{ mm (10a)}^{-1}$ ，春秋两季表现为不显著下降，分别为 $-12.78 \text{ mm (10a)}^{-1}$ 和 $-5.05 \text{ mm (10a)}^{-1}$ ，显然蒸发皿蒸发量减少主要是夏季蒸发量的下降所致。第 2 阶段虽然同样是夏季蒸发皿蒸发量下降趋势最大，但变幅相比第 1 阶段变化较小，其变化率为 $-59.33 \text{ mm (10a)}^{-1}$ ，反观春秋冬三季较第 1 阶段都有很大幅度的提升，其中春季 $-46.42 \text{ mm (10a)}^{-1}$ ，冬季和秋季分别为 $-32.73 \text{ mm (10a)}^{-1}$ 和 $-22.16 \text{ mm (10a)}^{-1}$ 。两个阶段蒸发量季节变化由高到低的次序一致，即为夏、春、冬、秋。

Table 2. Trend coefficient of evaporation in each season

表 2. 各季蒸发量趋势系数

季节	第 1 阶段/(mm a ⁻¹)	第 2 阶段/(mm a ⁻¹)
春	-1.278	-4.642
夏	-5.483**	-5.933
秋	-0.505	-2.216
冬	-1.079*	-3.273

注：**表示通过 0.01 信度检验，*表示通过 0.05 信度检验。

通州区的蒸发皿蒸发量在月度变化上展现出明显的单峰型特点，具体来说，蒸发皿蒸发量主要集中在 4 月到 7 月这段期间，占到全年蒸发皿蒸发量的 52.5%。其中 5 月蒸发皿蒸发量 292.5 mm 且是全年最高，约占全年的 15.0 %，12 月蒸发皿蒸发量为 60.3 mm 且是最低，约占全年 3.1%(见图 2)。从各月蒸发皿蒸发量气候倾向率分布来看，第 1 阶段蒸发皿蒸发量仅在 3 月略有上升，其他月份都为下降，尤其 1、5、6、7 月蒸发皿蒸发量下降趋势极为显著，通过 0.05 信度检验，气候倾向率依次分别是 -8.13 、 -28.54 、 -16.05 、 $-10.24 \text{ mm (10a)}^{-1}$ 。第 2 阶段蒸发皿蒸发量的变化趋势则有不同，5 月和 8 月的蒸发皿蒸发量是上升趋势，而其他月份是下降趋势，仅 2 月蒸发量下降趋势显著，通过了 0.05 信度检验，气候倾向率为 $-21.15 \text{ mm (10a)}^{-1}$ ，大部分月份的蒸发皿蒸发量变化趋势并不明显(见图 3)。

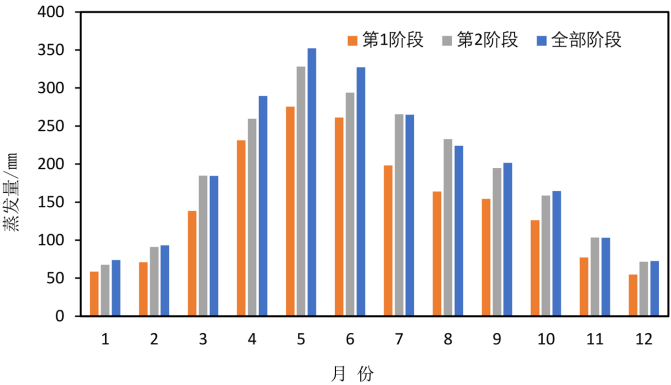


Figure 2. Trend of monthly evaporative capacity in Tongzhou District from 1955 to 2013
图 2. 1955~2013 年通州区月蒸发皿蒸发量变化趋势

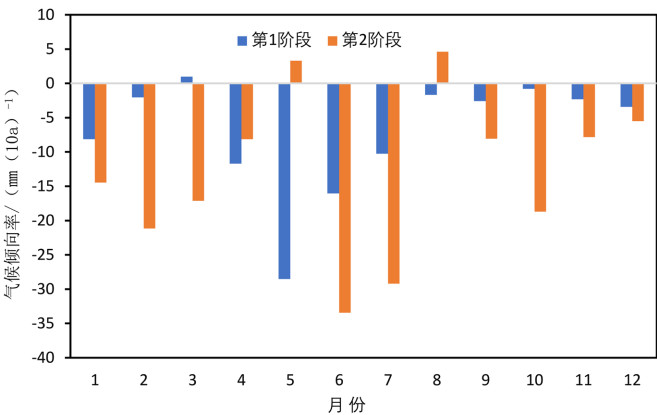


Figure 3. Trend of climate tendency for monthly evaporative plate evaporation in Tongzhou District from 1995 to 2013
图 3. 1995~2013 年通州区月蒸发皿蒸发量气候倾向率变化趋势

3.3. 年代际变化特征

从通州区年及四季蒸发皿蒸发量的年代际变化可以看出(见表 3), 蒸发皿蒸发量年代际变化整体呈现下降趋势, 20 世纪 60~70 年代, 年蒸发皿蒸发量降低 167.8 mm, 70~80 年蒸发皿蒸发量降低 212.1 mm。年代际变化的季节特征表明, 只有春季表现出增加 - 减少趋势, 其他季节则是连续减少的趋势。60~70 年代春季的蒸发皿蒸发量增幅不大, 仅增加 5 mm, 70~80 年代蒸发皿蒸发量减少 78 mm; 60~70 年代夏季蒸发皿蒸发量减幅最大, 减少了 135.5 mm, 70~80 年代蒸发皿蒸发量减少 65.6 mm; 60~70 年代秋季蒸发皿蒸发量减幅最小, 减少了 12.2 mm, 70~80 年代减少 34 mm; 60~70 年代冬季蒸发皿蒸发量减少 25.2 mm, 70~80 年代减少 34.5 mm。

Table 3. Inter decadal variation of evaporation capacity of evaporating dishes in each season of the first stage
表 3. 第 1 阶段各季蒸发皿蒸发量年代际变化

年代	年/mm	春/mm	夏/mm	秋/mm	冬/mm
1960~1969	2020.3	476.0	854.2	465.4	224.8
1970~1979	1852.5	481.0	718.7	453.2	199.6
1980~1989	1640.4	403.0	653.1	419.2	165.1
2000~2009	2256.8	546.5	892.3	582.6	235.4

4. 蒸发皿蒸发量影响气象因子

影响蒸发皿蒸发量变化的气象因子可归纳为三类, 热力因子, 包括气温、日照时数等, 它们是蒸发能够顺利进行的关键因子, 直接决定了蒸发过程中所需的能量供应; 动力因子, 如风速、气压等, 通过影响空气的流动和热量交换过程, 间接地对蒸发速率产生影响; 湿度因子, 如降水、空气相对湿度、云量等, 它们通过调节大气中的水分含量, 对蒸发过程产生重要影响[18]-[22]。本研究从气象因子的各种相关系数和气候倾向率两个方面, 来详细分析三类因子的气候特点, 进而了解这些因子的变化对蒸发皿蒸发量的影响。

4.1. 影响蒸发皿蒸发量的气象要素变化趋势

4.1.1. 热力因子的变化

首先分析日照时数的影响, 气象因子的各种相关系数(见表 4)和气候倾向率(见表 5)表明, 第 1 阶段

日照时数的气候倾向率是 $-68.6 \text{ h (10a)}^{-1}$, 通过 0.01 信度检验, 日照时数随时间推进变化而减少的特征表现得极为显著。然而第 2 阶段的气候倾向率虽然增至 $-84.19 \text{ h (10a)}^{-1}$, 却未通过 0.05 信度检验, 其随时间明显减少的趋势未得以延续。另外, 两个阶段的日照时数都与蒸发皿蒸发量存在显著的正相关关系, 其相关系数分别为 0.613 和 0.757, 且通过 0.01 信度检验。

其次分析平均气温的变化。在第 1 阶段, 通州区的气温随时间呈现显著增加趋势, 气温与时间的相关系数为 0.405, 且通过 0.01 信度检验, 气候倾向率为 $0.22^{\circ}\text{C (10a)}^{-1}$ 。然而, 在第 2 阶段气温随时间显著增加的趋势却未出现, 它与时间的相关系数降到 0.179, 气候倾向率也降到 $0.1^{\circ}\text{C (10a)}^{-1}$, 未通过 0.05 信度检验。两个阶段气温与蒸发皿蒸发量相关性都不高, 第 1 阶段相关系数为 0.187, 第 2 阶段则为 -0.117 。

4.1.2. 动力因子的变化

影响蒸发皿蒸发量变化的主要动力因子是平均风速, 两个阶段的平均风速随时间而减少的趋势都表现得极为显著, 气候倾向率分别达到 $-0.23 \text{ m s}^{-1} (10\text{a})^{-1}$ 和 $-0.24 \text{ m s}^{-1} (10\text{a})^{-1}$, 而且都通过了 0.01 信度检验。同时, 平均风速的增大和减少对比蒸发皿蒸发量变化存在着显著的正相关, 相关系数分别为 0.366 和 0.492, 且通过 0.05 信度检验。

4.1.3. 湿度因子的变化

从降水量和平均相对湿度两方面来分析湿度因子对蒸发皿蒸发量的影响。在 1、2 阶段, 降水量与时间的相关性不仅出现前后负正相反的变化, 而且未通过显著性检验, 其相关系数分别为 -0.137 、 0.1 , 气候倾向率为 -46.67 、 $28.15 \text{ mm (10a)}^{-1}$ 。两个阶段降水量与蒸发皿蒸发量都是负相关关系, 第 1 阶段降水量对蒸发皿蒸发量影响明显, 相关系数为 -0.379 , 且通过了 0.05 信度检验, 但第 2 阶段降水量对蒸发皿蒸发量影响不明显, 相关系数为 -0.327 , 未通过 0.05 信度检验。另外, 平均相对湿度与时间在 1、2 阶段均是负相关关系, 但其随时间减少的趋势同样不显著, 相关系数依次为 -0.002 和 -0.454 , 气候倾向率分别为 -0.02 、 $-2.1 \% (10\text{a})^{-1}$, 都未通过 0.05 信度检验。平均相对湿度与蒸发皿蒸发量是负相关关系, 但仅在第 1 阶段显示出对蒸发皿蒸发量有明显影响, 相关系数为 -0.653 , 通过了 0.01 信度检验。

Table 4. Various correlation coefficients and climate tendency rates of meteorological factors in the first stage
表 4. 第 1 阶段气象因子的各种相关系数及气候倾向率

气象因子	与时间相关系数	与蒸发量相关系数	完全相关系数	气候倾向率
平均气温	0.405**	0.188	0.076	$0.22^{\circ}\text{C (10a)}^{-1}$ **
日照时数	-0.439 **	0.613**	-0.269	$-68.62 \text{ h (10a)}^{-1}$ **
平均风速	-0.531 **	0.366*	-0.194	$-0.23 (\text{m}\cdot\text{s}^{-1}) (10\text{a})^{-1}$ **
降水量	-0.285	-0.379 *	0.108	$-46.67 \text{ mm (10a)}^{-1}$
平均相对湿度	-0.002	-0.653 **	0.001	$-0.02\% (10\text{a})^{-1}$

注: **表示通过 0.01 信度检验, *表示通过 0.05 信度检验。

Table 5. Various correlation coefficients and climate tendency rates of meteorological factors in the second stage
表 5. 第 2 阶段气象因子的各种相关系数及气候倾向率

气象因子	与时间相关系数	与蒸发量相关系数	完全相关系数	气候倾向率
平均气温	0.179	-0.117	-0.021	$0.1^{\circ}\text{C (10a)}^{-1}$
日照时数	-0.438	0.757**	-0.332	$-84.19 \text{ h (10a)}^{-1}$
平均风速	-0.763 **	0.492*	-0.375	$-0.24 (\text{m}\cdot\text{s}^{-1}) (10\text{a})^{-1}$ **
降水量	0.100	-0.327	-0.033	$28.15 \text{ mm (10a)}^{-1}$
平均相对湿度	-0.454	-0.146	0.066	$-2.21\% (10\text{a})^{-1}$

注: **表示通过 0.01 信度检验, *表示通过 0.05 信度检验。

4.2. 蒸发皿蒸发量与影响因子的完全相关系数

相关性显著不足以说明气象因素变化就会导致蒸发皿蒸发量变化, 需要采用完全相关系数的方法进一步梳理分析, 揭示影响蒸发皿蒸发量的主要因素, 本质是当影响因子与时间和蒸发皿蒸发量都存在显著相关性时, 才能判断其通过完全相关系数的检验, 进而表明其是导致蒸发皿蒸发量变化的主要因素[23]-[25]。从气象因子的各种相关系数可以看出, 第 1 阶段中日照时数和平均风速的完全相关系数较高, 分别为-0.269 和-1.94, 两个因子与蒸发皿蒸发量的相关系数高, 且随时间变化在显著减少; 第 2 阶段只有平均风速不仅与蒸发显著相关, 而且随时间变化表现极为显著, 其完全相关系数-0.375 为最大。由此来看, 第 1 阶段中, 通州区蒸发皿蒸发量变化的主要影响因子是日照时数和平均风速, 到了第 2 阶段仅有平均风速是主要影响因子, 平均气温、降水以及平均相对湿度对蒸发皿蒸发量变化影响较弱。

5. 结论

本文采用北京市通州区气象站 1955~2013 年 59 年蒸发皿蒸发量及相关气象要素记录, 应用线性倾向估计和完全相关系数方法, 分析了通州区蒸发皿蒸发量气候变化特征及主要影响因素, 得到以下结论。

(1) 通州区年平均蒸发皿蒸发量为 1952.4 mm, 1997 年出现年最大蒸发皿蒸发量, 为 2565.5 mm, 1985 年出现年最小蒸发皿蒸发量, 为 1431.4 mm。春夏秋冬四季蒸发皿蒸发量分别是 471.0 mm、784.1 mm、490.2 mm、207.1 mm, 全年占比分别是 24.1%、40.2%、25.1%、10.6%, 蒸发皿蒸发量由高到低依次为夏、秋、春、冬, 蒸发皿蒸发量气候倾向率降幅从高到低依次为夏、春、冬、秋。

(2) 蒸发皿蒸发量月变化曲线单峰分布形态明显, 4 月至 7 月最为集中, 全年占比 52.5%。5 月月蒸发皿蒸发量全年占比 15.0%为最大, 12 月月蒸发皿蒸发量全年占比 3.1%为最小。从气候倾向率趋势看, 两个阶段内绝大部分月份的蒸发皿蒸发量都呈现出下降趋势。

(3) 通州区蒸发皿蒸发量年代际变化总体是下降趋势, 从年代际季节特征看, 除春季是增加到减少趋势外, 其他季节则是一致下降趋势。

(4) 蒸发皿蒸发量下降主要受动力因子和热力因子影响, 1955~1994 年日照时数和平均风速是蒸发皿蒸发量下降的主要影响因子, 而 1995~2013 年蒸发皿蒸发量下降主要受平均风速影响。

参考文献

- [1] 吴普特, 赵西宁. 气候变化对中国农业用水和粮食生产的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 1-6.
- [2] 操信春, 吴普特, 王玉宝, 等. 中国灌区水分生产率及其时空差异分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 1-7.
- [3] 朱秀芳, 赵安周, 李宜展, 等. 农田灌溉对气候的影响研究综述[J]. 生态学报, 2014, 34(17): 4816-4828.
- [4] 王贺奎, 范凤翠, 耿计申, 等. 非水分亏缺条件下设施茄子蒸散量变化特征及其影响因子分析[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(18): 150-154.
- [5] 周开胜. 厌氧还原土壤灭菌对设施蔬菜地连作障碍土壤性质的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(6): 1497-1502.
- [6] IPCC (2023) Sections. In: Core Writing Team, Lee, H. and Romero, J., Eds., *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC, 35-115.
- [7] Roderick, M.L. and Farquhar, G.D. (2002) The Cause of Decreased Pan Evaporation over the Past 50 Years. *Science*, **298**, 1410-1411. <https://doi.org/10.1126/science.1075390-a>
- [8] Brutsaert, W. and Parlange, M.B. (1998) Hydrologic Cycle Explains the Evaporation Paradox. *Nature*, **396**, 30. <https://doi.org/10.1038/23845>
- [9] Peterson, T.C., Golubev, V.S. and Groisman, P.Y. (1995) Evaporation Losing Its Strength. *Nature*, **377**, 687-688. <https://doi.org/10.1038/377687b0>
- [10] 左洪超, 李栋梁, 胡隐樵, 等. 近 40a 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[J]. 科学通报, 2005, 50(11): 1125-1130.

-
- [11] 赵梓琨, 孙文义, 穆兴民, 等. 黄河流域水文站和气象站蒸发皿蒸发量时空变化及其差异[J]. 人民黄河, 2023, 45(6): 24-31.
 - [12] 于占江, 杨鹏. 近 40 年京津冀蒸发皿蒸发量变化特征及影响因子[J]. 气象科技, 2018, 46(6): 118-125.
 - [13] 王素萍. 近 40a 江河源区潜在蒸散量变化特征及影响因子分析[J]. 中国沙漠, 2009, 29(5): 960-965.
 - [14] 李伶俐. 北京市通州区都市型现代农业发展研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国农业科学院, 2014: 22-25.
 - [15] 孙鑫帅. 北京市休闲农业时空布局及影响因素研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国农业科学院, 2019: 40-41.
 - [16] 王宏燕, 孙立. 北京市通州区宜居新城评价体系研究[J]. 城乡建设, 2010(3): 44-47.
 - [17] 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[J]. 高原气象, 2006, 25(5): 840-848.
 - [18] 施晨晓, 羊清雯, 王小洁, 等. 海南岛蒸发量的变化特征及其影响因子分析[J]. 气象科技, 2019, 47(3): 439-449.
 - [19] 顾人颖, 周锁铨, 宋洁, 等. 江西省近 46 年蒸发皿蒸发量变化特征及其影响因素分析[J]. 中国农业气象, 2010, 31(3): 388-394.
 - [20] 徐士琦, 梁洪海, 傅帅, 等. 1951-2015 年吉林省蒸发量变化特征[J]. 气象与环境学报, 2018, 34(3): 71-77.
 - [21] 汪莹莹. 皖西丘陵地区水面蒸发量变化特征及影响因素分析[J]. 水利技术监督, 2022(5): 135-139.
 - [22] 吉文娟, 杨晓鹏, 张加云. 滇池流域蒸发量时空变化特征及趋势分析[J]. 气象科技, 2016, 44(4): 631-639.
 - [23] 胡军, 杜军, 袁雷. 1971-2017 年羌塘国家级自然保护区蒸发量变化特征及影响因素分析[J]. 气候变化研究快报, 2019, 8(3): 356-364.
 - [24] 戴临栋. 逆“蒸发悖论”现象个例分析[J]. 干旱气象, 2017, 35(6): 998-1003.
 - [25] 韩军彩, 张秉祥, 高祺, 等. 石家庄市蒸发皿蒸发量的变化特征及其影响因子分析[J]. 干旱气象, 2010, 27(4): 340-345.