氣候與環境研究
Climatic and Environmental Research

1958～2018年永定河流域蒸发皿蒸发量的变化特征及其影响因子分析

李秀 郎琪 雷坤 程全国 孟翠婷 黄国鲜 孙明东 蔡文倩 吕旭波

Variation Characteristics of Pan Evaporation and the Influencing Factors in the Yongding River Basin during 1958–2018

LI Xiu LANG Qi LEI Kun CHENG Quanguo MENG Cuiting HUANG Guoxian SUN Mingdong CAI Wenqian L Xubo

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20108

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

1961～2013年中国蒸发皿蒸发量时空分布特征及其影响因素

Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Influencing Factors of Pan Evaporation in China from 1961 to 2013

气候与环境研究. 2020, 25(5): 483 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19130

年中国生态脆弱区气候变化特征分析

Climate Change Characteristics in Ecological Fragile Zones in China during 1980–2014

气候与环境研究. 2019, 24(4): 455 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18058

长江中下游地区近年暴雨变化特征研究

Variation Characteristics of Rainstorms in Middle-Lower Reaches of the Yangtze River in Recent 60 Years

气候与环境研究. 2019, 24(6): 755 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19075

青藏高原植被指数最新变化特征及其与气候因子的关系

The Latest Change in the Qinghai-Tibetan Plateau Vegetation Index and Its Relationship with Climate Factors

气候与环境研究. 2017, 22(3): 289 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.14247

基于多元数据分析的我国PM2.5浓度及其主控因子的时空分布特征研究

Spatiotemporal Distribution Characteristics of PM2.5 Concentration and Its Main Control Factors in China Based on Multivariate Data Analysis

气候与环境研究. 2018, 23(5): 596 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18013

西北太平洋季风槽的季节和年际变化特征及其与热带气旋生成大尺度环境因子的联系

Seasonal and Interannual Variability of the Western North Pacific Monsoon Trough and Its Relationship to Large-Scale Environmental Factors

气候与环境研究. 2017, 22(4): 418 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16065

关注微信公众号，获得更多资讯信息

李秀, 郎琪, 雷坤, 等. 2021. 1958～2018 年永定河流域蒸发皿蒸发量的变化特征及其影响因子分析 [J]. 气候与环境研究, 26(3): 323−332. LI Xiu, LANG Qi, LEI Kun, et al. 2021. Variation Characteristics of Pan Evaporation and the Influencing Factors in the Yongding River Basin during 1958–2018 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26 (3): 323−332. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20108

1958～2018 年永定河流域蒸发皿蒸发量的变化特征及其影响因子分析

李秀[1] 郎琪[2] 雷坤[2] 程全国[1] 孟翠婷[1] 黄国鲜[2]
孙明东[2] 蔡文倩[2] 吕旭波[2]

1 沈阳大学，沈阳 110866
2 中国环境科学研究院水生态环境研究所，北京 100012

摘 要 基于永定河流域 1958～2018 年 14 个气象站的逐日观测数据，采用气候倾向率、Mann–Kendall 趋势检验法分析蒸发皿蒸发量时空变化特征，并通过完全相关系数和多元回归分析识别气候因子与蒸发量的相关程度并定量计算其贡献率。结果表明：在全球气候变暖的背景下，60 年来永定河流域气温以 0.29°C/10 a 的速率上升，而蒸发皿蒸发量不增反减，以－48.88 mm/10 a 的速率显著下降（标准化统计量 Z=－4.5），该流域存在明显的“蒸发悖论”现象。流域蒸发量表现出显著的时空分布差异性，在季节上，春、夏季蒸发量分别占全年蒸发量的 35% 和 37%，且春、夏两季蒸发量下降趋势较为显著；在空间上，永定河流域下游平原区下降趋势较上游山区（天镇、蔚县等地区）更为显著。完全相关分析表明，净辐射、平均风速和空气饱和差与蒸发量具有较强的相关性；贡献率分析表明，与基准期 1958～1979 年相比，1980～2018 年平均风速和净辐射减少对蒸发量减少的贡献率分别为 77% 和 66%，空气饱和差的贡献率为－41%，净辐射和平均风速的减少是导致蒸发皿蒸发量下降的主要影响因素。

关键词 蒸发皿蒸发量 蒸发悖论 影响因子 贡献率
文章编号 1006-9585(2021)03-0323-10 **中图分类号** P426.2 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20108

Variation Characteristics of Pan Evaporation and the Influencing Factors in the Yongding River Basin during 1958–2018

LI Xiu[1], LANG Qi[2], LEI Kun[2], CHENG Quanguo[1], MENG Cuiting[1], HUANG Guoxian[2], SUN Mingdong[2], CAI Wenqian[2], and LÜ Xubo[2]

1 *Shenyang University*, *Shenyang* 110866
2 *Chinese Research Academy of Environmental Sciences*, *Institute of Water Ecology and Environment*, *Beijing* 100012

Abstract Based on the daily observation data of 14 meteorological stations in the Yongding River basin from 1958 to 2018, the variation characteristics of pan evaporation over 60 years were analyzed using climate tendency rate and Mann–Kendall trend test. Moreover, the main influencing factors were identified by complete correlation coefficient and multivariate regression analysis. Results showed that under the background of global warming, the temperature of the

收稿日期 2020-08-24；**网络预出版日期** 2021-01-22
作者简介 李秀，女，1995 年出生，硕士研究生，主要研究方向为水文水资源。E-mail: 747378848@qq.com
通讯作者 程全国，E-mail: chengqg2011@163.com
资助项目 水体污染控制与治理科技重大专项 2018ZX07111-002
Funded by National Water Pollution Control and Management Technology Major Projects (Grant 2018ZX07111-002)

Yongding River basin increased at the rate of 0.29°C/10 a in 60 years, while pan evaporation decreased significantly at the rate of −48.88 mm/10a (standardized statistics Z = −4.5). Evidently, an "evaporation paradox" phenomenon exists. There are significant differences in the spatial and temporal distribution of evaporation in the basin. Evaporation decreases significantly in spring and summer, accounting for 35% and 37% of the annual evaporation, respectively. The evaporation is unevenly distributed over an area, and the downtrend of the downstream of the Yongding River basin is more significant than that in the upper regions of the mountain area (Tianzhen, Yuxian, and other areas). Net radiation, average wind speed, and air saturation difference have a strong correlation with the decrease in evaporation. Compared with the base period of 1958–1979, the decrease in the average wind speed and net radiation during 1980–2018 contributed to 77% and 66% decrease in evaporation, respectively, and the contribution rate of the air saturation difference is −41%. The decrease in net radiation and average wind speed is the main factor leading to the decrease of evaporation. The air pollution problem and change in the underlying surface of the Yongding River basin cause the net radiation and average wind speed to decrease significantly, which may lead to serious water imbalance in the lower plains of the basin.

Keywords Pan evaporation, Evaporation paradox, Influencing factors, Contribution rate

1 引言

蒸散发作为连接地表热量平衡和水量平衡的重要枢纽，不仅对空气湿度、温差等气候变化具有调节作用，还对区域水循环，水资源合理利用和农业灌溉等方面具有重要的影响（鲍振鑫等，2014）。据气象组织最新报告显示，2015～2019 年全球平均气温较工业化前升高 1.1°C，全球气候变暖速度远超人类预期。在气温持续升高的背景下，人们普遍认为气温升高可能使大气持续变干，进而导致陆地水体蒸发量增大，加速全球水循环（祁栋林等，2015）。但研究发现全球许多地区的蒸发量存在显著下降趋势（Limjirakan and Limsakul, 2012；Ji et al., 2012；Breña‐Naranjo et al., 2017）。蒸发皿蒸发量（以下简称蒸发量）随温度增加而下降的现象被称为"蒸发悖论"，这一现象引起了国内外学者的广泛关注，并对蒸发量下降原因展开了大量研究（王艳君等，2005；岳元等，2017；杨司琪等，2019）。Peterson et al.（1995）发现美国和前苏联的蒸发皿蒸发量出现随着温度升高而稳定下降的现象，并通过与气温日较差对比分析得出蒸发皿蒸发量的下降主要受低云量上升的影响。Roderick et al.（2007）等研究发现 1975～2004 年澳大利亚蒸发皿蒸发量的减少原因主要为风速的变化。朱晓华等（2019）对全国 751 个气象站 1961～2017 年的气象资料分析发现，1961～1993 年中国地区存在"蒸发悖论"现象，其主导因素为风速。祁添垚等（2015）利用中国 1960～2005 年气象资料研究发现大气相对湿度增加，水汽压减少，水循环加剧是蒸发悖论在中国的主要体现。熊玉琳和赵娜（2020）通过对海河流域日照时数、平均气温、风速和相对湿度与蒸发皿蒸发量回归分析发现，日照时数对蒸发量的贡献值更大，全球变暗比全球变暖对蒸发量的影响更显著。综上所述，基于不同地区和研究方法得出的蒸发量关键影响因子有所差异。此外，多数研究将日照时数和相对湿度作为太阳辐射和水汽压差的替代指标并不准确，且多缺乏对蒸发悖论本身形成原因的定量考虑。因此，蒸发量的驱动机制仍缺乏深入阐释，对蒸发悖论现象的驱动成因研究仍然是气象、水文循环与水资源利用领域关注的热点问题之一。

永定河作为北京的"母亲河"，对京津冀地区的生态环境及社会可持续发展具有重要作用。气候变化和人为活动的剧烈影响，使永定河流域 20 世纪 80 年代以后，水资源严重短缺，下游河道常年断流，生物多样性降低，水生态系统严重退化，水资源时空分布和水量平衡关系发生显著改变（丁爱中等，2013）。蒸发量是水量平衡中的唯一支出项和水循环的关键因子。因此，研究永定河流域蒸发皿蒸发量变化对解决水资源短缺、水生态系统退化及水量平衡问题具有十分重要的现实意义。

因此，本文基于永定河流域 1958～2018 年 14 个气象站的蒸发皿蒸发量及气象数据，全面分析蒸发量时空变化特征，采用完全相关系数识别气候因子与蒸发量的相关程度，并根据多元回归分析定量计算气候因子对蒸发量的贡献率，探讨影响永定河流域蒸发能力的驱动机制与关键影响因子。

2 研究区概况

永定河地处（39°N～41°20'N，112°E～

117°45'E），由上游桑干河和洋河在河北省怀来县汇流而成，流经北京、河北、天津，最终流入渤海，全长约 747 km，流域总面积约为 4.7×10^4 km^2，其中山区面积约为 4.5×10^4 km^2，平原面积约为 0.2×10^4 km^2。永定河流域气象站点基本信息见表 1。永定河流域属于温带半湿润、半干旱大陆性气候类型，地势西高东低，多年平均降雨量 360～650 mm，平均气温 6.9°C。

3　资料与方法

3.1　资料来源及处理

所用气象站数据来源于中国气象局国家气象信息中心（www.data.cma.cn[2020-02-15]），数据类型包括逐日小型蒸发皿蒸发量、最高/最低及平均气温、相对湿度、日照时数、平均风速（10 m）。其中，10 m 处的风速采用对数风速转换模型公式转化为 2 m 的风速（刘小莽等，2009）。为满足数据的完整性、准确性和代表性要求，对数据进行预处理，开展了缺测值和异常值检验，剔除有明显错误的数据，由于 1958 年以前天镇等气象站缺测天数超过 31 天，因此，选取了 1958～2018 年间无地理迁移、连续无缺测且使用小型蒸发皿观测的气象站数据进行统计分析，确保计算结果的准确性和有效性。选取 14 个永定河流域内及相邻近气象站，气象站点分布见图 1。季节划分按水文年统计为春季（3～5 月）、夏季（6～8 月）、秋季（9～11 月）、冬季（12 月至次年 2 月）。

3.2　研究方法

3.2.1　气候倾向率

将气象要素的趋势变化用一次性方程表示，即：

$$X(t) = a_0 + a_1 t, \qquad (1)$$

其中，t 为时间，$a_1>0$ 表示气象要素随时间增加；$a_1<0$ 则相反；将 $10a_1$ 定义为气候倾向率，表示气象要素每 10 年的变化率。

3.2.2　Mann–Kendall 趋势检验

Mann–Kendall 趋势检验（以下简称 M–K）通

表 1　永定河流域气象站点基本信息

Table 1　Information of meteorological observatories in the Yongding River basin

气象站	纬度	经度	海拔/m
大同	40.1°N	113.33°E	1067.2
朔州	39.3°N	112.43°E	1114.8
右玉	40.0°N	112.27°E	1345.8
代县	39.01°N	112.54°E	859.7
蔚县	39.83°N	114.57°E	909.5
张家口	40.78°N	114.88°E	772.8
怀来	40.4°N	115.5°E	570.9
延庆	40.45°N	115.95°E	487.9
北京	39.8°N	116.47°E	31.3
天津	39.08°N	117.07°E	3.5
乌兰察布	41.3°N	113.07°E	1419.3
灵丘	39.27°N	114.11°E	938.7
天镇	40.43°N	114.05°E	1014.7
张北	41.09°N	114.42°E	1393.3

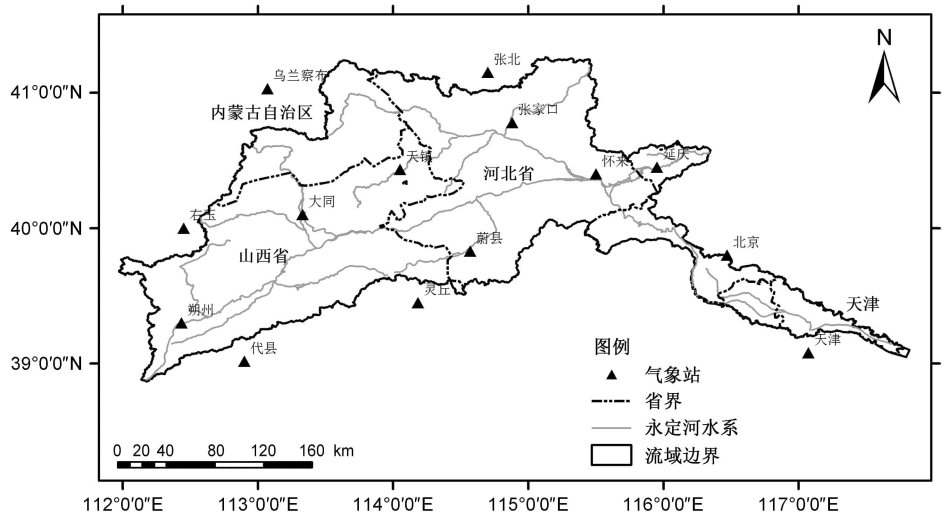

图 1　永定河流域气象站点分布

Fig. 1　Distribution of meteorological stations in the Yongding River basin

过统计量 Z 来判别趋势变化，当 Z 的绝对值大于 1.64 和 2.32，表明通过了置信度 95% 和 99% 的显著性检验，Z 值的正负代表上升和下降趋势（Mann, 1945）。

3.2.3 反距离权重插值法

采用 ArcGIS 地理统计模块中的反距离权重插值法（简称 IDW）将各测站的点数据插值成面数据，来分析流域年蒸发量的空间分布特征（王新宇等, 2020）。

3.2.4 完全相关系数

气象因子与蒸发量紧密相关，同时在 60 年中发生显著变化，才可能成为影响蒸发量变化的气候因子。因此本文采用皮尔逊相关分析计算完全相关系数（刘波等，2006）。完全相关系数公式为

$$|r| = r_t \times r_e, \quad (2)$$

其中，r 为完全相关系数，r_t 为气象因子与时间的相关系数，r_e 为气象因子与蒸发量的相关系数。r_t 和 r_e 必须大于 0.2732（95% 置信度的临界值）。

3.2.5 贡献率分析

由陈伏龙等（2017）研究可知，通过多元线性回归方法，求出气候因子的回归系数，可计算不同气候因子对蒸发量变化的贡献率 Q_x（单位：%），表示为

$$Q_x = \Delta E_x / \Delta E, \quad (3)$$

其中，ΔE_x 为气候因子变化导致的蒸发量的变化值，ΔE 为实测蒸发量的变化值。

4 结果与分析

4.1 蒸发量的时间变化趋势

图 2a 为年蒸发量变化趋势图，从中可知永定河流域 60 多年蒸发量呈波动下降趋势，多年均值为 1752.1 mm，最大值为 2048 mm（1972 年），最小值为 1282.2 mm（2018 年）。从线性趋势线可知，年蒸发量的呈明显下降趋势，下降速率达到-48.88 mm/10 a，通过了 α=0.01 的显著性检验。从图 2b 年均距平和累积距平曲线可知，1958～2001 年蒸发量以正距平为主，蒸发量基本大于均值，2001 年出现转折点，2002～2018 年蒸发量以负距平为主，基本小于平均值。

图 2c 为四季蒸发量变化情况，四季蒸发量均表现为下降趋势，其中夏季蒸发量下降速率为 23.6 mm/10 a，下降趋势最为明显，多年均值为 655.8 mm，约占全年 37%，其次为春季，下降速率为−14.3 mm/10 a，多年均值为 618 mm，约占全年 35%，秋季的下降速率为 10.03 mm/10 a，多年

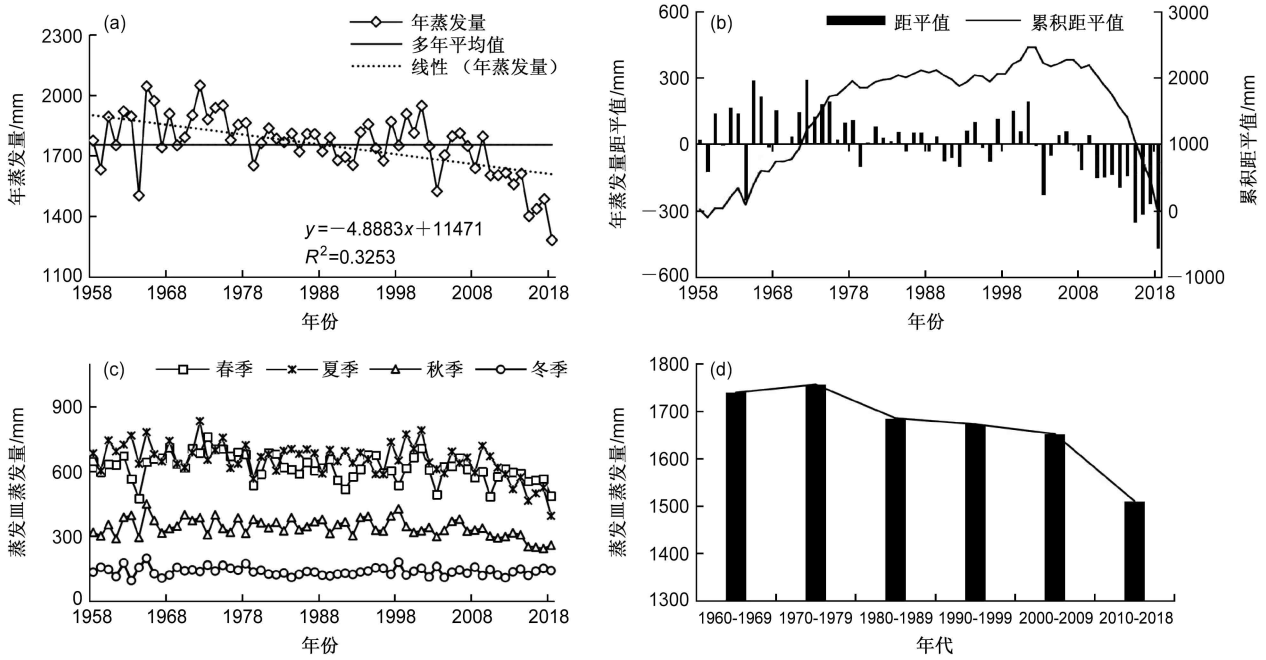

图 2 1958～2018 年永定河流域（a）年平均、（b）距平和累积距平、（c）四季及（d）不同年代年平均蒸发皿蒸发量变化

Fig. 2 Variation curves of (a) annual mean, (b) anormaly and cumulative anormaly, (c) season average, and (d) interdecadal annual mean of pan evaporating in the Yongding River basin during 1958–2018

均值为 341.1 mm，占全年的 9%，冬季蒸发量未发生显著变化，仅占全年 8%，除冬季外，其它季节均通过 α=0.01 的显著性检验。因此说明春、夏两季蒸发量的下降对年蒸发量的变化起重要作用。

图 2d 为年代际变化过程，20 世纪 60 至 70 年代蒸发量呈上升趋势，且在 20 世纪 70 年代达到峰值，20 世纪 80 年代到 2000 年代呈持续减小趋势，但变化幅度较小，2010～2018 年代际蒸发量大幅度下降，这种现象考虑为进入 20 世纪以后气候变化和人为活动对蒸发皿蒸发量的影响更为剧烈。

4.2　蒸发量的空间分布特征

从蒸发量及趋势变化空间分布图 3 中可看出，14 个测站的年蒸发量空间分布不均，总体上为上游河北省（怀来、张家口等地区）蒸发量较大，上游中部山西省部分地区（天镇、蔚县）蒸发量较小。从趋势变化看出，14 个测站的倾向率在−2.4～−8.7 mm/10 a，其中$|Z|$>2.32，通过 0.01 显著性检验的有 10 个测站，主要分布在流域河北、北京、天津等地区，Z 值在 1.64<$|Z|$<2.32 范围内，通过 0.05 显著性检验的有 3 个站点，主要分布在山西省，上游右玉站未通过显著性检验。总体而言，流域河北、北京等人口密集地区下降趋势较上游蔚县、天镇、大同等山区更为显著。

4.3　蒸发量变化影响因素分析

4.3.1　蒸发量与气候因子相关性分析

蒸发量是受多种因子共同影响的气候要素，蒸发过程中的能量供给主要源于太阳辐射，水汽输送条件取决于空气饱和差和风速，而随着气温的变化，蒸发量也会发生变化。因此，为了准确识别永定河流域蒸发量的主要影响因子，基于 Penman-Monteith 公式结合气象资料准确计算净辐射和空气饱和差（Allen et al., 1998）。选取 1958～2018 年平均气温、平均风速、净辐射和空气饱和差作为影响永定河流域蒸发量的主要气候因子，详细研究气候因子的变化趋势以及与蒸发量的相关性并建立气候因子与蒸发量之间的多元回归模型。

图 4 和表 2 分别为 4 种气象因子的年均趋势变化和四季倾向率。60 年来，永定河流域年均气温呈升高趋势，上升速率为 0.29°C/10 a，四季中春季和冬季的变化相对剧烈，上升速率分别为 0.387 和 0.37°C/10 a，且通过了 0.01 的置信度检验，而年均蒸发量以−48.88 mm/10 a 的速率显著下降，说明该流域出现明显的“蒸发悖论”现象。空气饱和差呈显著上升趋势，上升速率为 0.02 kPa/10 a，其中，春、夏两季的上升最大，速率分别为 0.038 和 0.032 kPa/10 a，平均风速和净辐射存在显著下降趋势，下降速率分别为−0.12 m s^{-1}(10 a) $^{-1}$ 和 0.08 MJ m^{-2}(10 a) $^{-1}$，其中风速在春季和冬季变化更为剧烈，而净辐射在夏季下降最为明显，速率为 −0.175 MJ m^{-2} (10 a) $^{-1}$，四季和年均气候因子变化均通过 0.01 置信度检验。

表 3 为永定河流域 1958～2018 年均及四季气

表 2　1958 ~ 2018 年永定河流域各气象要素四季和年均气候倾向率

Table 2　Annual climatic inclinations for each meteorological element in the Yongding River basin during 1958–2018

	气候倾向率			
	平均气温/°C (10 a)$^{-1}$	平均风速/m s^{-1}(10 a)$^{-1}$	净辐射/MJ m^{-2}(10 a)$^{-1}$	空气饱和差/kPa (10 a)$^{-1}$
春季	0.387	−0.153	−0.067	0.032
夏季	0.200	−0.067	−0.175	0.038
秋季	0.190	−0.050	−0.050	0.012
冬季	0.370	−0.172	−0.017	0.006
年均	0.286	-0.124	-0.079	0.022

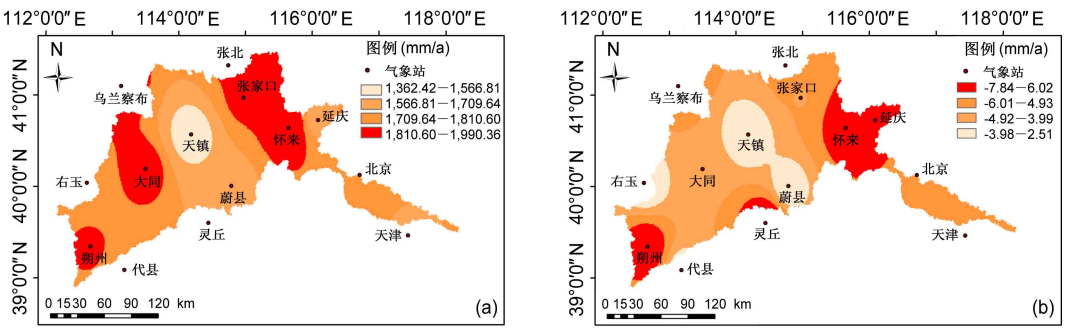

图 3　1958～2018 年永定河流域（a）蒸发皿蒸发量及（b）变化趋势分布

Fig. 3　Distribution of (a) pan evaporation volume and (b) its change trend in the Yongding River basin during 1958–2018

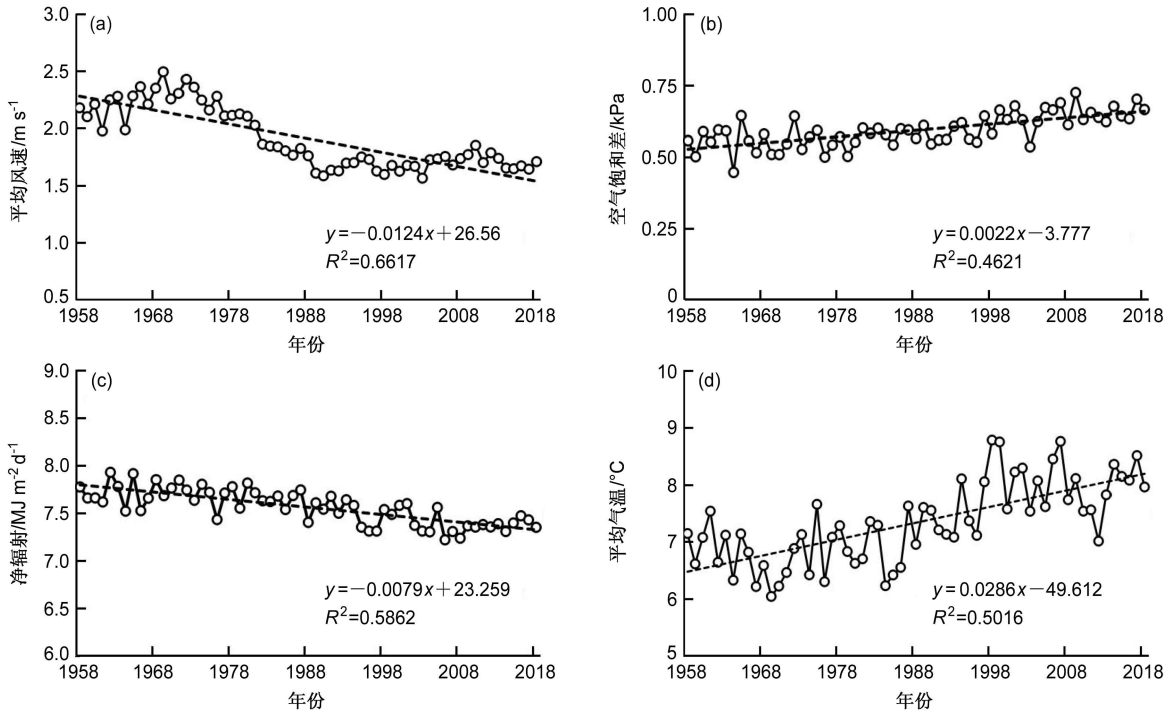

图 4 1958～2018 年永定河流域 4 种气象要素历史变化趋势：（a）平均风速；（b）空气饱和差；（c）净辐射；（d）平均气温

Fig. 4 Historical trends of four meteorological elements in the Yongding River basin during 1958–2018: (a)Average wind speed; (b) air vapor pressure deficit; (c) net radiation; (d) average temperature

表 3 1958 ~ 2018 年永定河流域气象因子与时间相关系数 r_t、与蒸发皿蒸发量的相关系数 r_e 和完全相关系数 r 绝对值

Table 3 Complete relationship between the meteorological elements and time r_t, pan evaporation r_e, and complete correlation coefficient r in the Yongding River basin during 1958–2018

	r_t				r_e				$\|r\|$			
	平均气温	风速	净辐射	饱和差	平均气温	风速	净辐射	饱和差	平均气温	风速	净辐射	饱和差
春季	0.621**	−0.768**	−0.515**	0.609**	−0.069	0.614**	0.617**	0.291**	—	0.472	0.318	0.177
夏季	0.459**	−0.720**	−0.679**	0.499**	−0.069	0.614**	0.617**	0.291**	—	0.259	0.422	0.142
秋季	0.394**	−0.712**	−0.658**	0.372**	0.137	0.414**	0.473**	0.570**	—	0.295	0.311	0.212
冬季	0.471**	−0.769**	−0.370**	0.438**	0.385**	0.166	−0.127	−0.021	0.181	—	—	—
年平均	0.708**	−0.813**	−0.766**	0.68**	−0.23	0.514**	0.587**	−0.024	—	0.418	0.450	—

*、**分别表示通过0.05、0.01显著性检验。

象因子与时间和蒸发量的相关系数和完全相关系数。从完全相关系数|r|可知，春、夏和秋季蒸发量与平均风速、净辐射和空气饱和差相关性较好，均通过 0.01 显著性检验。其中春季完全相关系数由高到低分别为平均风速（0.472）>净辐射（0.318）>空气饱和差（0.177），平均风速的显著变化是春季蒸发量下降的主要因素。夏季和秋季的完全相关系数最大为净辐射，其次为平均风速和空气饱和差。说明在此期间，随着净辐射、平均风速的显著下降和空气饱和差的显著上升，蒸发量发生了显著变化，其中净辐射对夏、秋两季蒸发量的影响占主导作用。冬季蒸发量只与平均气温具有相关性，且相关系数仅为 0.181，说明冬季蒸发量受气象因子的影响较小，这与冬季蒸发量未发生显著变化现象相符。年均蒸发量与净辐射和平均风速具有较强的相关性，完全相关系数分别为 0.45 和 0.42。平均气温虽然随时间呈显著上升趋势，但是与蒸发量的相关性并不显著，与其他气候因子相比，对蒸发量的影响贡献被完全抵消，因此该流域出现“蒸发悖论”现象。综上所述，净辐射、平均风速和空气饱和差都是蒸发量的重要影响因子。其中，年均、夏季和秋季蒸发量的主导因素为净辐射，春季蒸发量的主导因素

表 4　1958 ~ 2018 年永定河流域蒸发皿蒸发量与 3 种因子复相关系数变化情况

Table 4　Multiple correlation coefficients of pan evaporative and three factors in the Yongding River basin during 1958–2018

	R	R^2	调整R^2	估计标准误差
模型1	0.675	0.456	0.417	116.17

表 5　1958 ~ 2018 年永定河流域蒸发皿蒸发量与 3 种因子偏回归系数及其 t 检验

Table 5　Partial regression coefficients and t-test of pan evaporative and three factors in the Yongding River basin during 1958–2018

	非标准化系数				
	B回归系数	标准误差	标准系数	t检验值	显著性值p
常量	−2025.49	788.76		−2.568	0.013
年净辐射	383.45	109.29	0.462	3.514	0.001
年饱和差	834.32	297.78	0.315	2.802	0.007
年均风速	202.58	78.66	0.360	2.575	0.013

为平均风速。

从相关分析可知，净辐射、平均风速和空气饱和差是蒸发量的主要影响因子，因此本文运用 SPSS（Statistical Product and Service Solutions）软件建立因变量（蒸发皿蒸发量）与自变量（净辐射、平均风速和空气饱和差）的多元线性回归模型。由表 4 和表 5 可知，模型的拟合优度 R^2 值为 0.42，说明自变量可以解释因变量约 42% 的变化，B 表示自变量中各因子的回归系数，净辐射、空气饱和差和平均风速所对应的显著性值（p）分别为 0.001、0.007 和 0.013，均小于 0.05，表明气候因子的回归检验具有显著性。即得到多元线性回归方程为

$$y = 383.45x_1 + 202.58x_2 + 834.32x_3 - 2025.49, \quad (4)$$

其中，x_1 为年净辐射，x_2 为平均风速，x_3 为空气饱和差，y 为蒸发皿蒸发量。

根据公式（4）计算得到年蒸发量的模拟值，以年蒸发量的实测值为横坐标，以对应年份的模拟值为纵坐标制作散点图，检验两者的对应关系，见图 5。可知实测值与模拟值对应的点大部分均匀分布在 45°斜线两侧，总体上，模拟值的相对误差为 0.04%～32.02%，平均相对误差为 4.92%，若以相对误差在 ±20% 以内为模拟合格值，则合格率为 98%。说明多元回归方程对蒸发量拟合效果较好，可以用来分析气候因子对蒸发量变化的贡献量。

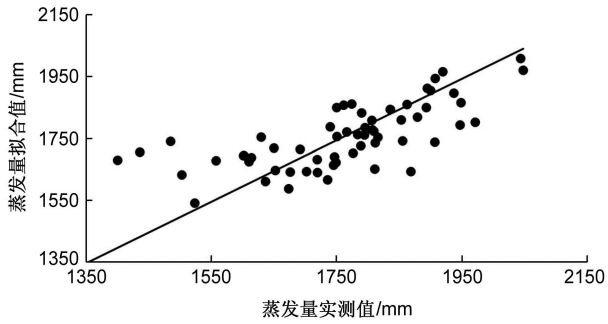

图 5　1958～2018 年永定河流域年蒸发量实测值与拟合值对应关系

Fig. 5　Relationship between the measured and simulated evaporation in the Yongding River basin during 1958–2018

表 6　永定河流域 1980 ~ 2018 年与 1958 ~ 1979 年相比影响因子对蒸发皿蒸发量的影响量及贡献率

Table 6　Influence quantity and contributions of the control factors to pan evaporation in the Yongding River basin during 1980–2018 compared with 1958–1979

影响因子	影响因子变化	蒸发量相应变化量/mm	对蒸发量变化贡献率
风速	−0.5 m/s	−101.9	77%
净辐射	−0.2 MJ m^{-2} d^{-1}	−87.4	66%
空气饱和差	0.1 kPa	54.2	−41%

注：其他因素对蒸发量变化的贡献率为−2%。

4.3.2　气候因子贡献程度分析

根据不同年代蒸发量分析可知，年蒸发量呈先升高后下降趋势，因此将年蒸发量上升阶段 1958～1979 年划分为基准期，分析 1980～2018 年蒸发量下降时期各气候因子相较于基准期对蒸发量变化的贡献程度。由公式（3）和（4）得出气候因子变化对蒸发量变化的贡献程度见表 6。从表中可知 1980～2018 年与 1958～1979 年相比，蒸发量共减少了 131.5 mm，其中平均风速减弱 0.5 m/s，导致蒸发量下降 101.9 mm，净辐射下降 0.23 MJ m^{-2} d^{-1}，导致蒸发量下降 87.4 mm，而空气饱和差上升 0.06 kPa，导致蒸发量上升 54.2 mm。平均风速和净辐射的减少对蒸发量下降的贡献率分别为 77% 和 66%，空气饱和差的增加使蒸发量增加了 54.2 mm，其对蒸发量的贡献率为−41%。其他因素对蒸发量的贡献率为−2%。综上所述，平均风速和净辐射变化是导致永定河流域蒸发量减少的主要因素。

5　讨论

随着全球水资源紧缺形势的日趋严峻，学者针

对水文水资源循环过程展开大量研究，多数研究往往重点关注降水径流对区域水量平衡的影响，而蒸发是水循环的重要环节，研究表明全球陆地表面的蒸发量约占降水量的 60%～65%（高蓓等，2012），因此，针对长时间序列蒸发量的演变趋势展开研究，对于揭示流域水循环特征，缓解水资源短缺问题具有十分重要的意义。永定河属于海河流域北系，据统计，永定河流域在 2011～2016 年水资源总量呈下降趋势，多年平均值为 25.99×10^9 m^3，平均用水量为 25.65×10^9 m^3，水资源利用率高达 98%，下游平原区河道常年干涸断流，生态水量严重不足，水资源短缺问题异常严峻。因此，针对永定河流域水文循环过程尤其是水量平衡关系中水量支出项—蒸发量演变趋势的研究意义重大，本文对永定河流域 1958～2018 年蒸发皿蒸发量的变化趋势及成因分析结果表明：永定河流域多年蒸发量呈显著下降趋势，年际蒸发量在 2010～2018 年间较 20 世纪 70 年代平均下降 1.07×10^9 m^3。这与熊玉琳和赵娜（2020）及于占江和杨鹏（2018）学者对海河流域和京津冀地区蒸发皿蒸发量的趋势变化研究结果一致，其中海河流域和京津冀地区下降速率分别为 −22.89、−55.9 mm/10 a。蒸发皿蒸发量表征大气环境促使极小尺度水面蒸发的综合能力，可通过折算系数估算潜在蒸发量，二者具有较好的相关性（焦丹丹等，2018）。目前基于对潜在蒸发量的不同理解存在两种相反的蒸发理论，即：蒸发正比理论和蒸发互补理论。从能量平衡角度分析，Penman（1948）认为实际蒸发量是一定比例的潜在蒸散发量，净辐射的持续下降导致大气运动驱动力减弱，潜在蒸发量减少导致实际蒸发量也相应减少。从水量平衡角度分析，Bouchet（1963）认为在不同的湿润条件下，潜在蒸发量与陆地蒸发量关系有所差异，当下垫面水分减少时，实际蒸散发会减少，从而释放出更多的能量成为显热，大气对陆面的反馈作用使该地区空气湍流加强，温度升高，湿度降低等，从而导致潜在蒸散发增加。在区域降水量维持稳定、水资源过度利用的情况下，蒸发皿蒸发量的持续减少，无论从蒸发量正比假设还是互补假设来看，都会对自然水系统水量平衡产生显著的影响。因此，有必要深入揭示蒸发皿蒸发量下降的驱动机制及关键影响因子。

本研究发现，永定河流域蒸发量下降的主要影响因子为净辐射和平均风速。太阳净辐射是蒸发过程中的能量供给因子，近 60 年来呈显著下降趋势，其中云量和气溶胶是太阳辐射下降的主要原因（查良松，1996；齐月等，2015）。大量的空气污染物排放使空气中悬浮颗粒的浓度增大和云层的相对厚度增加，使太阳辐射很难到达地表面，直接发生了散射现象，使太阳的有效利用率降低，而云层厚度的增加，在一定程度上削弱了太阳辐射（邓娟华等，2016）。京津冀地区作为我国经济发展核心区域，人口十分密集且自身地势不利于污染物的扩散，且上游大同、朔州等地区丰富的煤炭资源会产生大量煤灰、粉尘等气溶胶粒子，因此永定河流域空气污染情况一直不容乐观。2013 年国家发布《空气污染防治行动计划》对全国城市的大气污染进行治理后，京津冀地区 2013～2018 年空气质量有所改善但仍超标严重，且 O_3 浓度逐年增加，2018 年 PM2.5、PM10、NO_2 和 O_3 浓度均未达标，分别超标 0.57 倍、0.42 倍、0.21 和 0.08 倍（郭鑫等，2019）。从蒸发量时空分布情况也可验证流域东南部北京、河北等人口密集、工业和居民生活污染的排放量较大，PM2.5 和 PM10 浓度偏高等空气污染严重区域的蒸发量下降趋势更为显著。

蒸发皿蒸发量下降的另一主要影响因素为平均风速。平均风速是蒸发过程中水汽输送的主要条件。王楠等（2019）研究表明 1979～2014 年中国地面风速显著下降，且春季下降趋势最为显著，并提出气温持续升高可能导致风速的减弱。地面风速减弱导致气流交换速度变慢，蒸发面的水汽不易被带到大气中，最终导致蒸发量减小。此外，风速的减弱也不利于空气污染物的扩散，使空气污染更为严重。

本研究基于永定河流域近 60 年蒸发皿蒸发量的变化趋势及成因分析，揭示了净辐射与平均风速对蒸发皿蒸发量下降起主要贡献，但并未针对云量和气溶胶等因子对蒸发皿蒸发量下降的贡献进行定量离析，后续研究建议围绕空气污染加剧等人为活动因素对蒸发量的影响进行深入分析。

6 结论

本文利用 1958～2018 年永定河流域的气象观测资料，分析蒸发皿蒸发量及影响因子的趋势变化，识别主要驱动因子，并定量分析主要气候因子对蒸发量的贡献率，得出结论如下：

（1）永定河流域平均气温以 0.29°C/10 a 的速

率上升，而蒸发皿蒸发量以－48.88 mm/10 a 速率下降，存在明显“蒸发悖论”现象，春、夏两季蒸发量分别占全年的 35% 和 37%，且下降趋势较为显著，年蒸发量的下降主要体现为春、夏两季蒸发量的下降，20 世纪 70 年代蒸发 20 世纪 80 年代 80 年代以后持续下降，2010 年代下降幅度最大。

（2）蒸发量的分布具有明显的空间差异，下游怀来、张家口等地区与上游天镇、蔚县地区相比蒸发量较大。M–K 趋势分析表明下游平原区较上游山区下降趋势更为显著。

（3）通过完全相关系数和多元回归模型定量分析可知，平均风速、净辐射和空气饱和差与蒸发量具有显著相关性。与基准期 1958～1979 年相比，1980～2018 年平均风速和净辐射减少对蒸发量减少的贡献率分别为 77%、66%，空气饱和差上升对蒸发量减少的贡献率为－41%。总体来看，净辐射和平均风速的减少是导致蒸发量减少的主要因素。

在全球气候变暖的背景下，蒸发皿蒸发量一定程度的减少，蒸发能力减弱，但无法基于此推断实际蒸发量的变化趋势，因此，蒸发皿蒸发量和实际蒸发量的相互关系及对水量平衡的影响机制，以及人为活动造成的空气污染等因素对蒸发量的影响有待进一步研究。

参考文献（References）

Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. 1998. Crop Evapotranspiration–guidelines for computing crop water requirements [R]. FAO Irrigation and Drainage Paper 56.

鲍振鑫, 严小林, 王国庆, 等. 2014. 气象因子在海河流域蒸发悖论中的作用机理 [J]. 水资源与水工程学报, 25(3): 1−7.　Bao Zhenxin, Yan Xiaolin, Wang Guoqing, et al. 2014. Mechanism of effect of meteorological factors in paradox theory of pan evaporation of Haihe River basin [J]. J. Water Resour. Water Eng. (in Chinese), 25(3): 1−7. doi:10.11705/j.issn.1672-643X.2014.03.001

Bouchet, R. J. 1963. Évapotranspiration réelle et potentielle signification climatique[C]. International Association of Hydrological Sciences Publicication: Proceedings of General Assembly.Berkeley: California Symposium, 134-142.

Breña‐Naranjo J A, Laverde‐Barajas M Á, Pedrozo‐Acuña A. 2017. Changes in pan evaporation in Mexico from 1961 to 2010 [J]. Int. J. Climatol., 37(1): 204−213. doi:10.1002/joc.4698

陈伏龙, 冯平, 吴泽斌. 2017. 三工河流域平原区蒸发量变化特征及影响因素 [J]. 干旱区地理, 40(1): 45−53.　Chen Fulong, Feng Ping, Wu Zebin. 2017. Changes of evaporation and impact factors in the plain region in Sangong River basin [J]. Arid Land Geogr. (in Chinese), 40(1): 45−53. doi:10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2017.01.006

邓娟华, 张郸, 王晓东. 2016. 探讨城市发展对太阳辐射的影响 [J]. 科技尚品, (12): 13−14.　Deng Juanhua, Zhang Dan, Wang Xiaodong. 2016. Discussion on the influence of urban development on solar radiation [J]. Premiere. (in Chinese), (12): 13−14.

丁爱中, 赵银军, 郝弟, 等. 2013. 永定河流域径流变化特征及影响因素分析 [J]. 南水北调与水利科技, 11(1): 17−22.　Ding Aizhong, Zhao Yinjun, Hao Di, et al. 2013. Analysis of variation characteristics of runoff and their influencing factors in the Yongding River Basin [J]. South North Water Transf. Water Sci. Technol. (in Chinese), 11(1): 17−22. doi:10.3724/SP.J.1201.2013.01017

高蓓, 范建忠, 景毅刚, 等. 2012. 近 33 年来渭河流域蒸发皿蒸发量的变化特征及原因分析 [J]. 成都信息工程学院学报, 27(1): 77−82.　Gao Bei, Fan Jianzhong, Jing Yigang, et al. 2012. Changing trend of pan evaporation and its cause over the past 33 years in the Weihe watershed [J]. J. Chengdu Univ. Inf. Technol. (in Chinese), 27(1): 77−82. doi:10.3969/j.issn.1671-1742.2012.01.012

郭鑫, 李红柳, 杨崙鉉, 等. 2019. 2013-2018 年京津冀地区环境空气质量变化趋势研究 [J]. 环境与发展, 31(12): 119−120, 122.　Guo Xin, Li Hongliu, Yang Yuhong, et al. 2019. The study on the change trend of ambient air quality in Beijing−Tianjin−Hebei region during 2013−2018 [J]. Environ. Dev. (in Chinese), 31(12): 119−120, 122. doi:10.16647/j.cnki.cn15-1369/X.2019.12.067

Ji X J, Wang J J, Gu W L, et al. 2012. Trends in annual and seasonal pan evaporation in the lower Yellow River basin from 1961 to 2010 [J]. Adv. Climate Change Res., 3(4): 195−204. doi:10.3724/SP.J.1248.2012.00195

焦丹丹, 吉喜斌, 金博文, 等. 2018. 干旱气候条件下多种潜在蒸发量估算方法对比研究 [J]. 高原气象, 37(4): 1002−1016.　Jiao Dandan, Ji Xibin, Jin Bowen, et al. 2018. Comparison of different methods for estimating potential evaporation in an arid environment [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 37(4): 1002−1016. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00048

Limjirakan S, Limsakul A. 2012. Trends in Thailand pan evaporation from 1970 to 2007 [J]. Atmos. Res., 108: 122−127. doi:10.1016/j.atmosres.2012.01.010

刘波, 马柱国, 丁裕国. 2006. 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, 25(5): 840−848.　Liu Bo, Ma Zhuguo, Ding Yuguo. 2006. Characteristics of the changes in pan evaporation over northern China during the past 45 years and the relations to environment factors [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 25(5): 840−848. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2006.05.010

刘小莽, 郑红星, 刘昌明, 等. 2009. 海河流域潜在蒸散发的气候敏感性分析 [J]. 资源科学, 31(9): 1470−1476.　Liu Xiaomang, Zheng Hongxing, Liu Changming, et al. 2009. Sensitivity of the potential evapotranspiration to key climatic variables in the Haihe River basin [J]. Resour. Sci. (in Chinese), 31(9): 1470−1476. doi:10.3321/j.issn:1007-7588.2009.09.003

Mann H B. 1945. Nonparametric tests against trend [J]. Econometrica, 13(3): 245−259. doi:10.2307/1907187

Penman H L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass [J]. Proc. Roy. Soc. A, 193(1032): 120−145. doi:10.1098/rspa.

1948.0037

Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y. 1995. Evaporation losing its strength [J]. Nature, 377(6551): 687−688. doi:10.1038/377687b0

齐月, 房世波, 周文佐. 2015. 近 50 年来中国东、西部地面太阳辐射变化及其与大气环境变化的关系 [J]. 物理学报, 64(8): 089201. Qi Yue, Fang Shibo, Zhou Wenzuo. 2015. Correlative analysis between the changes of surface solar radiation and its relationship with air pollution, as well as meteorological factor in eastern and western China in recent 50 years [J]. Acta Phys. Sinica (in Chinese), 64(8): 089201. doi:10.7498/aps.64.089201

祁栋林, 李晓东, 肖宏斌, 等. 2015. 近 50a 三江源地区蒸发量的变化特征及其影响因子分析 [J]. 长江流域资源与环境, 24(9): 1613−1620. Qi Donglin, Li Xiaodong, Xiao Hongbin, et al. 2015. Study on changing characteristics and impact factor of evaporation over three-river source area in recent 50 years [J]. Resour. Environ. Yangtze Basin (in Chinese), 24(9): 1613−1620. doi:10.11870/cjlyzyyhj201509024

祁添垚, 张强, 王月, 等. 2015. 1960～2005 年中国蒸发皿蒸发量变化趋势及其影响因素分析 [J]. 地理科学, 35(12): 1599−1606. Qi Tianyao, Zhang Qiang, Wang Yue, et al. 2015. Spatio−temporal patterns of pan evaporation in 1960−2005 in China: Changing properties and possible causes [J]. Sci. Geogr. Sinica (in Chinese), 35(12): 1599−1606. doi:10.13249/j.cnki.sgs.2015.12.014

Roderick M L, Rotstayn L D, Farquhar G D, et al. 2007. On the attribution of changing pan evaporation [J]. Geophys. Res. Lett., 34(17): L17403. doi:10.1029/2007GL031166

王新宇, 黄鹏程. 2020. 基于 GIS 的气象要素插值方法比较研究 [J]. 测绘与空间地理信息, 43(5): 167−170.

Wang Xinyu, Huang Pengcheng. 2020. Comparative study of interpolation methods of meteorological factors based on GIS [J]. Geomat. Spat. Inf. Technol. (in Chinese), 43(5): 167−170.

王艳君, 姜彤, 许崇育, 等. 2005. 长江流域 1961-2000 年蒸发量变化趋势研究 [J]. 气候变化研究进展, 1(3): 99−105. Wang Yanjun, Jiang Tong, Xu Chongyu, et al. 2005. Trends of evapotranspiration in the Yangtze River basin in 1961−2000 [J]. Adv. Climate Change Res. (in Chinese), 1(3): 99−105. doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2005.03.001

王楠, 游庆龙, 刘菊菊. 2019. 1979-2014 年中国地面风速的长期变化趋势 [J]. 自然资源学报, 34(7): 1531−1542. Wang Nan, You Qinglong, Liu Juju. 2019. The long-term trend of surface wind speed in China from 1979 to 2014 [J]. J. Nat. Resour. (in Chinese), 34(7): 1531−1542. doi:10.31497//zrzyxb.20190715

熊玉琳, 赵娜. 2020. 海河流域蒸发皿蒸发量变化及其影响 [J]. 南水北调与水利科技, 18(2): 22−30. Xiong Yulin, Zhao Na. 2020. Analysis of variation in pan evaporation and its influencing factors in Haihe River basin [J]. South North Water Transf. Water Sci. Technol. (in Chinese), 18(2): 22−30. doi:10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0024

杨司琪, 张强, 奚小霞, 等. 2019. 中国夏季风影响过渡区与其他地区蒸发皿蒸发量趋势相反的原因 [J]. 大气科学, 43(6): 1441−1450. Yang Siqi, Zhang Qiang, Xi Xiaoxia, et al. 2019. The reason of trends in pan evaporation in the summer monsoon transition region contrary to those of other regions in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(6): 1441−1450. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1904.18255

于占江, 杨鹏. 2018. 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, 46(6): 1180−1187. Yu Zhanjiang, Yang Peng. 2018. Variation characteristics of pan evaporation capacity and influencing factors in Beijing−Tianjin−Hebei region in recent 40 years [J]. Meteor. Sci. Technol. (in Chinese), 46(6): 1180−1187. doi:10.19517/j.1671-6345.20170800

岳元, 申双和, 金宇, 等. 2017. “蒸发悖论”在吉林省的表现及成因分析 [J]. 生态学杂志, 36(7): 1993−2002. Yue Yuan, Shen Shuanghe, Jin Yu, et al. 2017. Indications and causes of "evaporation paradox" in Jilin Province [J]. Chin. J. Ecol. (in Chinese), 36(7): 1993−2002. doi:10.13292/j.1000-4890.201707.030

查良松. 1996. 我国太阳辐射量区域性变化特征研究 [J]. 地理研究, 15(2): 21−27. Zha Liangsong. 1996. Regional variations of solar radiation in China [J]. Geogr. Res. (in Chinese), 15(2): 21−27.

朱晓华, 徐芳, 姬祥祥, 等. 2019. 基于 PenPan 模型中国蒸发皿蒸发量的时空变化及成因分析 [J]. 节水灌溉, (7): 87−100. Zhu Xiaohua, Xu Fang, Ji Xiangxiang, et al. 2019. Spatio−temporal variation and causes of pan evaporation in China based on PenPan model [J]. Water Saving Irrigation (in Chinese), (7): 87−100. doi:10.3969/j.issn.1007-4929.2019.07.018