

黄河三角洲地区蒸发量时空特征及预测模型

王峰^{1,2}, 任建成^{1,2*}, 卢晓宁³

(1.山东省气象防灾减灾重点实验室, 济南 250031; 2.滨州市气象局, 山东 滨州 256612; 3.成都信息工程大学, 成都 610225)

摘要:【目的】研究黄河三角洲地区蒸发量特征, 为该地区水资源利用等提供合理参考。【方法】利用黄河三角洲地区蒸发量资料, 采用气候统计方法及GIS系统, 探究黄河三角洲地区蒸发量时空特征, 探明蒸发量与气候因子之间的关系并建立预测模型。【结果】①黄河三角洲地区春季、夏季和年蒸发量呈显著下降趋势; 秋季和冬季蒸发量呈不显著上升趋势。蒸发量空间分布大致上均由东北向西南递减。②黄河三角洲地区蒸发量变化具有明显的周期性特征。春季蒸发量主循环周期为10a; 夏季蒸发量主循环周期为10a和5a; 秋季蒸发量主循环周期为13、6a和3a; 冬季蒸发量主循环周期为10~11a和5~6a; 年蒸发量主循环周期为10a。③黄河三角洲地区年蒸发量与年降水量、年日照时间、年平均风速、年平均云量和年平均气温日较差显著相关, 与年平均气温相关性不显著。各季节蒸发量与各季节降水量、日照时间、相对湿度、云量及气温日较差显著相关, 与其他因子相关性各有不同。④黄河三角洲地区相对湿度对各时段蒸发量影响效果均显著, 风速对春季、夏季、冬季蒸发量的影响均显著, 气温对春季和夏季蒸发量影响显著, 日照时间对年蒸发量的影响效果明显, 降水量对春季蒸发量的负向影响效果明显。模拟预测的各时段蒸发量实测值和模拟值都分布在拟合线附近, 模型预测效果均较好, 各时段蒸发量模拟值合格率与回归方程解释能力吻合度较高。【结论】黄河三角洲地区蒸发受多种气候因子共同影响, 存在一定的“蒸发悖论”现象, 蒸发量具有明显的周期性特征, 空间分布大致上由东北向西南递减, 回归预测模型效果较好。

关键词: 蒸发量; 变化特征; 模型研究; 黄河三角洲

中图分类号: P468

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023148

OSID: 

王峰, 任建成, 卢晓宁. 黄河三角洲地区蒸发量时空特征及预测模型[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(3): 52-60.

WANG Feng, REN Jiancheng, LU Xiaoning. Spatiotemporal variation in evaporation and its modelling in the Yellow River delta[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(3): 52-60.

0 引言

【研究意义】蒸发是物质从液态转化为气态的相变过程, 是地表热量平衡和水量平衡的重要组成部分, 研究蒸发对于了解一个地区气候状况和自然资源具有重要意义。蒸发皿是大气蒸发能力的直接观测器具, 气象部门器测蒸发量及其相关因子记录较为完整、观测期较长, 成为目前国内外研究蒸发量变化趋势及其影响因素的主要数据来源。气候变暖已成为学术界的共识, 但很多地区蒸发量却呈下降趋势, 这种蒸发与气温变化趋势相反的现象称为“蒸发悖论”^[1], “蒸发悖论”现象的分布及其形成机理存在明显的地区性。

【研究进展】从世界范围来看, Peterson等^[2]研究表明, 美国和前苏联地区1950—1990年蒸发量稳定下降, 造成这种现象的原因主要为云量的增加; 意大利^[3]、以色列^[4]等国家也存在“蒸发悖论”现象;

而墨西哥^[5]自1990年以后蒸发量呈现上升趋势, “蒸发悖论”现象不明显。目前学术界多认为全球太阳总辐射下降、云量和气溶胶增加是造成蒸发量下降的主要原因, 但不同地区的影响因素也有所不同。在中国, 曾燕等^[6]认为1960—2000年期间中国蒸发量呈下降趋势, 存在“蒸发悖论”现象, 造成中国蒸发量下降的主要原因是太阳总辐射的下降, 但左洪超等^[7]认为与中国蒸发量相关性最大的气候因子是相对湿度。安徽、江苏、海南岛、青海、山西、河北^[8-14]等地区也广泛存在“蒸发悖论”现象, 且存在明显的地区差异。

【切入点】黄河三角洲地区位于山东省北部, 渤海湾与莱州湾之间, 总体上属温带半湿润半干旱大陆性季风气候, 也兼具海洋性气候的特点。已有的研究认为“蒸发悖论”现象也广泛存在于山东省境内, 造成这种现象的主要原因是太阳净辐射和风速的下降^[15], 但对于黄河三角洲地区的蒸发特征, 目前尚无针对性的研究。【拟解决的关键问题】因此, 研究黄河三角洲地区蒸发量的变化特征及其与气象因子的相关性, 建立蒸发量与气象因子的预测模型, 可以对黄河三角洲地区水资源利用等提供合理参考。

收稿日期: 2023-04-04 修回日期: 2023-12-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41401103)

作者简介: 王峰(1968-), 女, 山东聊城人。高级工程师, 主要研究方向为农业气象、应用气象等。E-mail: 1877619047@qq.com

通信作者: 任建成(1984-), 男, 山东潍坊人。工程师, 硕士, 主要研究方向为中短期预报、人工影响天气等。E-mail: 19129512@qq.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

1 数据和方法

1.1 数据处理

本文使用黄河三角洲地区 19 个国家级气象台站

气候月值数据，数据来源于当地气象部门。本文所用数据均为器测数据，气象部门已对数据进行了质量控制，数据具有真实性、可靠性和可比性，蒸发量数据特征详见表 1，各站点地理分布见图 1。

表 1 黄河三角洲地区蒸发量数据特征

Tab.1 Data characteristics of evaporation in Yellow River delta

站点名称	站点类型	资料时段	缺测时段	蒸发器类型
惠民、垦利、寒亭	国家基本气象站	1961 年 1 月—2017 年 12 月	无	2002—2017 年 4—10 月为大型，1994 年 1 月—2001 年 12 月为大小型同时观测，其他时段为小型。
阳信、庆云	国家一般气象站	1981 年 1 月—2010 年 12 月	1990 年 1 月—1998 年 12 月	小型
利津、昌邑	国家一般气象站	1981 年 1 月—2010 年 12 月	1994 年 1 月—1998 年 12 月	小型
河口	国家一般气象站	1990 年 1 月—2010 年 12 月	无	小型
无棣、沾化、滨州、博兴、邹平、利津、东营、广饶、高青、乐陵、寿光、潍坊、莱州	国家一般气象站	1981 年 1 月—2010 年 12 月	无	小型

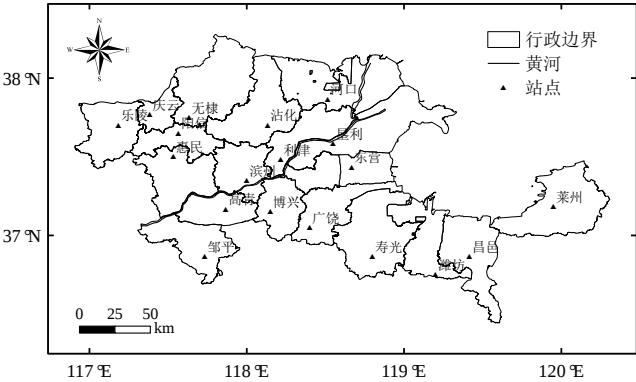


图 1 黄河三角洲地区气象站点分布

Fig.1 Distribution of meteorological stations in the Yellow River delta region

惠民、垦利、寒亭 3 站在研究期内应用了不同类型的蒸发器，为保持数据的一致性，依据 1994 年 1 月—2001 年 12 月大小型蒸发器同时观测数据进行对比分析，建立回归模型，将大型蒸发器观测数据转换为小型蒸发器观测数据。模型如下：

惠民： $E_{\min}=1.567E_{\max}-5.0,$ (1)

垦利： $E_{\min}=1.624E_{\max}-11.5,$ (2)

寒亭： $E_{\min}=1.484E_{\max}+10.96,$ (3)

式中： $E_{\min}$ 为小型蒸发器测量的蒸发量， $E_{\max}$ 为大型蒸发器测量的蒸发量。模型相关系数分别为 0.973、0.982、0.953，均通过了 $\alpha=0.01$ 的极显著性检验。

为确保时段的连续性，本文蒸发量时间变化特征和周期性变化特征分析使用惠民、垦利及寒亭 3 站 1961—2017 年逐月蒸发量资料，空间特征分析、气候因子分析及模型建立使用区域内 19 个国家级台站 1981—2010 年逐月气候资料。

根据黄河三角洲地区气候特点，季节的划分标准为春季（3—5 月）、夏季（6—8 月）、秋季（9—11 月）和冬季（12 月—次年 2 月）。

1.2 研究方法

1.2.1 逐步回归法

逐步回归法通过给定的显著性水平剔除变量中不太重要的变量，保留重要变量，并同因变量建立线性关系^[16]。一般采取向前法进行选元，主要过程如下：

1) 对 P 个回归自变量 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_P$ 分别同因变量 Y 建立一元回归模型 $Y=\beta_0+\beta_iX_i+\varepsilon, i=1, 2, \dots, P$ ，计算变量 X_i 以及相应的回归系数的 F 检验的统计量值，记为 $F_1^{(1)}, F_2^{(1)}, \dots, F_P^{(1)}$ ，取其中的最大值 $F_{i_1}^{(1)}$ ，对给定的显著性水平 α ，记临界值为 $F^1, F_{i_1}^{(1)} \geq F^1$ ，则将 X_{i_1} 引入回归模型，记 I_1 为选入变量指标集合。

2) 建立因变量 Y 与自变量子集 $\{X_{i_1}, X_{i_1}\}, \dots, \{X_{i_1}, X_{i_1-1}\}, \{X_{i_1}, X_{i_1+1}\}, \dots, \{X_{i_1}, X_P\}, \{X_{i_1}, X_{i_1}\}, \dots, \{X_{i_1}, X_{i_1-1}\}, \{X_{i_1}, X_{i_1+1}\}, \dots, \{X_{i_1}, X_P\}$ 的二元回归模型，共有 $P-1$ 个。计算变量的回归系数 F 检验的统计量值，记为 $F_k^{(2)} (k \neq I_1)$ ，选其中最大者，记为 $F_{i_2}^{(2)}$ ，对应自变量标记为 i_2 ，对给定的显著性水平 α ，记临界值为 $F^1, F_{i_2}^{(2)} \geq F^2$ ，则将 X_{i_2} 引入回归模型。否则，终止变量引入过程。

3) 考虑因变量对变量子集 $X_{i_1}, X_{i_2}, \dots, X_P$ 的回归，重复步骤 2。

回归方程的回归系数正负代表了因子对变量预测为正向或者负向，影响效果的显著性可以用 P 值进行检验。

1.2.2 其他方法

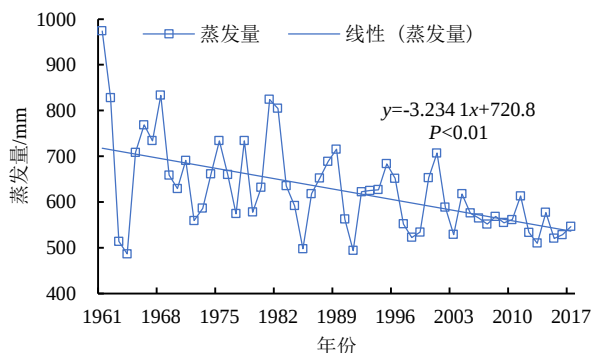
使用一元线性回归分析黄河三角洲地区蒸发量的趋势特征，采用 P 值 (P -value)^[17] 对气候倾向率进行显著性检验；使用小波分析方法^[18] 分析黄河三角洲地区蒸发量的周期性特征；借助 GIS 系统，采用距离反比插值法，分析统计量的空间变化特征。

2 结果分析

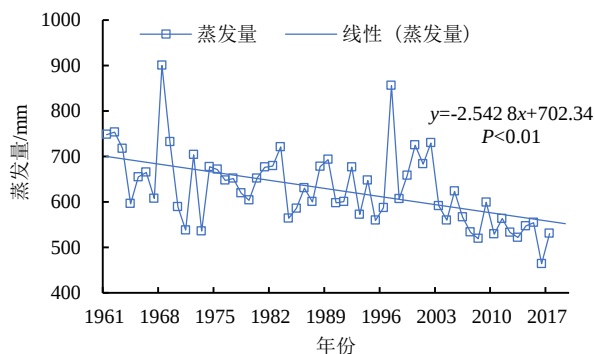
2.1 黄河三角洲地区蒸发量时空变化特征

2.1.1 年蒸发量和季节蒸发量的时间趋势特征

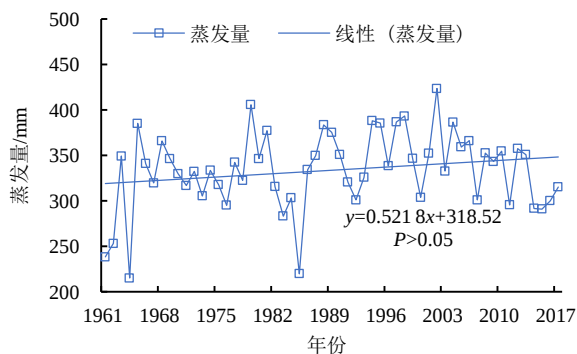
图 2 为黄河三角洲地区季和年尺度蒸发量年际变化,由图 2 可知,黄河三角洲地区春季和夏季蒸发量呈显著下降趋势,趋势率分别为 $-32.3 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 和 $-25.4 \text{ mm}/10 \text{ a}$,春季蒸发量最大和最小的年份分别出现在 1961 年(974 mm)和 1964 年(486 mm),夏季蒸发量最大和最小的年份分别出现在 1968 年(900 mm)和 2016 年(464 mm);秋季和冬季蒸发量呈不显著上升趋势,趋势率分别为 $5.2 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 和 $1.5 \text{ mm}/10 \text{ a}$,秋季蒸发量最大和最小的年份分别出现在 2002 年(423 mm)和 1964 年(215 mm),冬季蒸发量最大和最小的年份分别出现在 2001 年(220 mm)和 2012 年(91 mm)。黄河三角洲地区年蒸发量呈显著下降趋势,趋势率为 $-53.0 \text{ mm}/10 \text{ a}$,蒸发量最大和最小的年份分别出现在 1968 年(2 255 mm)和 1964 年(1 377 mm)。



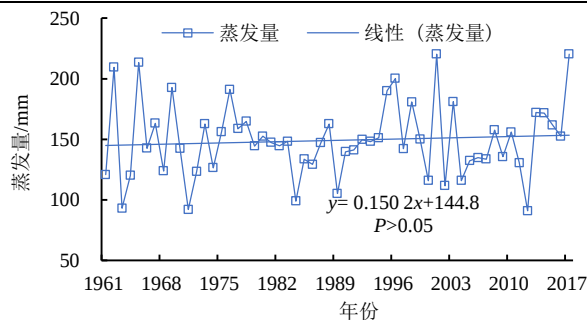
(a) 春季



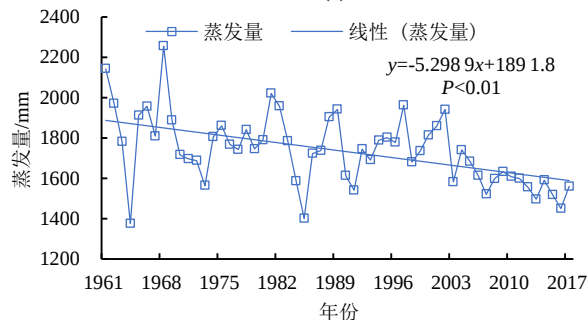
(b) 夏季



(c) 秋季



(d) 冬季



(e) 年

图 2 黄河三角洲地区季和年尺度蒸发量年际变化

Fig.2 Seasonal and annual scale interannual variation of evaporation in the Yellow River delta region

2.1.2 年蒸发量和季节蒸发量的空间分布特征

图 3 为黄河三角洲地区季和年尺度蒸发量空间分布,由图 3 可知,黄河三角洲地区年尺度和季节尺度蒸发量空间分布大致上均由东北向西南递减,东北部地区降水偏少,受渤海海洋气候影响,风力偏大,蒸发量也较多。其中春季蒸发量最大的地区为中北部,夏季蒸发量最大的地区为北部中东部部分地区,秋季蒸发量最大的地区为北部中部局部地区,冬季蒸发量最大的地区为东南部局部地区,年蒸发量最大的地区为北部偏东小部地区。

2.1.3 年蒸发量和季节蒸发量的周期性特征

图 4 为黄河三角洲地区年尺度和季节尺度蒸发量小波实部等值线图和小波方差图,由图 4 可知,春季蒸发量主循环周期为 10 a,几乎贯穿整个研究期,大约经历了 8 个循环过程;夏季蒸发量主循环周期为 10 a 和 5 a,其中 10 a 左右的循环周期几乎贯穿整个研究期,大约经历了 7.5 个循环过程,5 a 左右周期在 1970 年以前和 1995—2000 年最明显,大约经历了 10 个循环周期;秋季蒸发量主循环周期为 13.6 a 和 3 a,13 a 周期几乎贯穿整个研究期,大约经历了 6.5 个循环过程,6 a 周期在 1971—1975 年和 1995 年以后最明显,大约经历了 9 个循环过程,3 a 周期在 1983—1988 年、2010—2020 年最明显;冬季蒸发量主循环周期为 10~11 a 和 5~6 a,2 种周期都几乎贯穿整个研究期,分别大约经历了 7.5 个和 12 个循环过程;年蒸发量主循环周期为 10 a,几乎贯穿整个研究期,大约经历了 7.5 个循环过程。

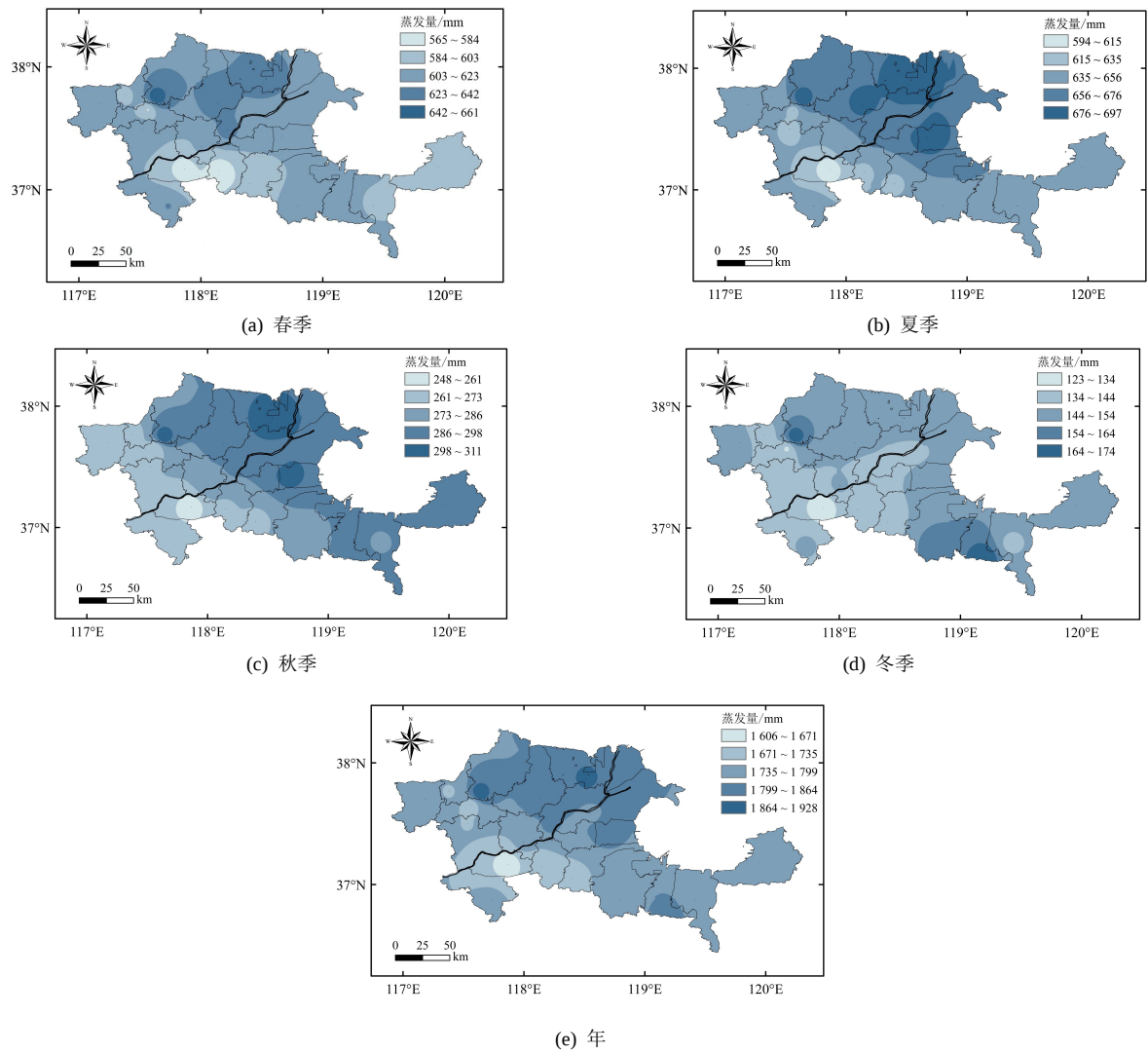
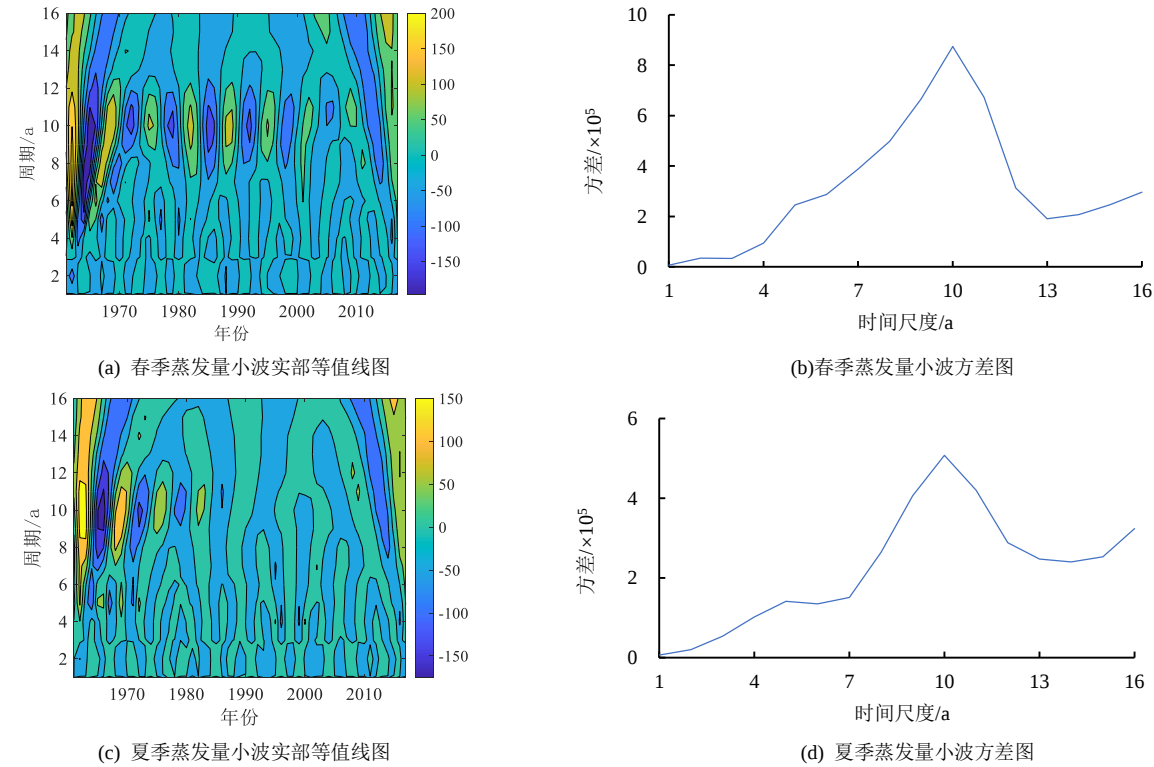


图 3 黄河三角洲地区季和年尺度蒸发量空间分布

Fig.3 Spatial distribution of seasonal and annual scale evaporation in the Yellow River delta region



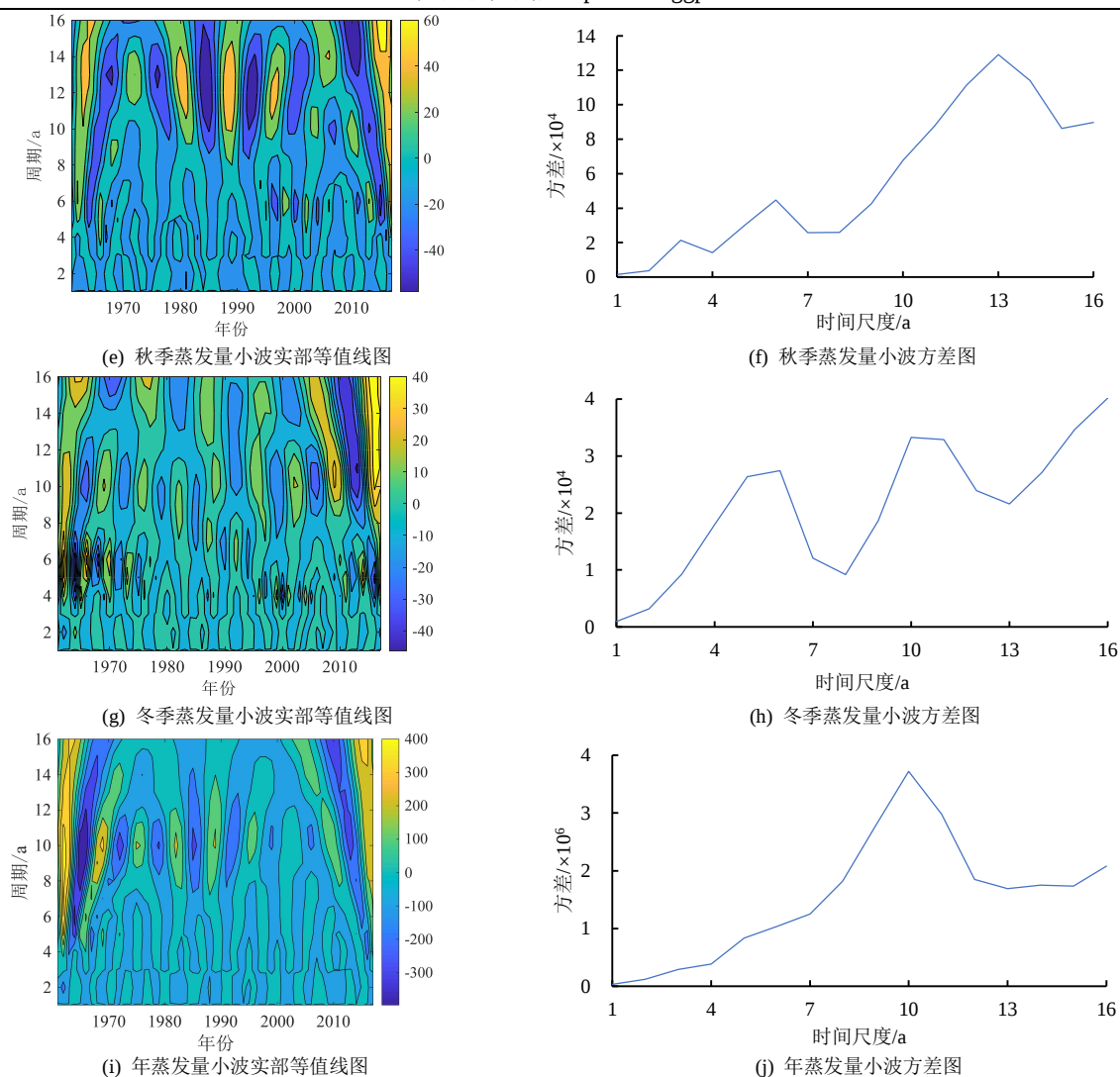


图 4 黄河三角洲地区年尺度和季节尺度蒸发量小波实部等值线图和小波方差图

Fig.4 Wavelet real part contour map and wavelet variance map of annual and seasonal evaporation in the Yellow River delta region

2.2 黄河三角洲地区蒸发量相关气候因子分析

2.2.1 蒸发量与气候因子的相关性分析

选用代表热力的气温、日较差、日照时间,代表水汽的相对湿度、降水量、降水时间,代表动力的平均风速等气候因子,与蒸发量进行偏相关分析,找出影响蒸发量的主要气候因子(表 2)。

由表 2 可知,黄河三角洲地区年蒸发量与年降水量、年日照时间、年平均风速、年平均云量和年平均

气温日较差相关性达到极显著水平,与年平均气温相关性不显著。各季节蒸发量与各季节降水量、日照时间、相对湿度、云量及气温日较差相关程度均达到显著水平,另外,春、夏、冬季蒸发量与平均气温相关性显著,春、夏、秋季蒸发量与平均风速相关性显著,但秋季蒸发量与平均气温相关性不显著,冬季蒸发量与平均风速相关性不显著。

表 2 黄河三角洲地区蒸发量与气候因子的偏相关分析

Tab.2 Partial correlation analysis of evaporation and climate factors in the Yellow River delta region

气候因子	气温/℃	降水量/mm	日照时间/h	相对湿度/%	平均风速/(m s ⁻¹)	云量	气温日较差/℃
年	0.026	-0.644**	0.778**	-0.496**	0.474**	-0.535**	0.719**
春季	0.396*	-0.580**	0.733**	-0.699**	0.527**	-0.641**	0.818**
夏季	0.558**	-0.651**	0.626**	-0.841**	0.689**	-0.770**	0.848**
秋季	0.031	0.422*	0.523**	-0.696**	0.440*	-0.714**	0.666**
冬季	0.394*	-0.558**	0.530**	-0.791**	0.140	-0.621**	0.707**

注 *和**分别表示达到了 0.05、0.01 的显著和极显著性水平,下同。

2.2.2 气候因子的变化特征

对黄河三角洲地区气候因子进行线性趋势分析,各气候因子气候倾向率见表 3。其中气温、云量均呈上升趋势,相对湿度、平均风速、日照时间、气温日较差均呈下降趋势,秋季降水量呈显著下降趋势,其

他时段降水量均呈不显著上升趋势。由分析可知,黄河三角洲地区蒸发量受动力因子、热力因子、水分因子和其他因子的共同影响,但不同时段的影响因子也有所不同。

表 3 黄河三角洲地区年平均气候因子变化趋势

Tab.3 Climate factor change trends in the Yellow River delta region							
时段	气温/℃	降水量/mm	日照时间/h	相对湿度/%	平均风速/(m s ⁻¹)	云量	气温日较差/℃
年	0.044**	4.000	-12.241	-0.071**	-0.019**	0.023**	-0.049**
春季	0.041*	1.251	-1.700	-0.106	-0.017**	0.008	-0.048**
夏季	0.021	3.394	-5.286**	-0.048	-0.013**	0.030**	-0.044**
秋季	0.044*	-3.501**	-12.241**	-0.058	-0.012**	0.023	-0.047**
冬季	0.066**	0.129	-2.352	-0.044	-0.006	0.037*	-0.060**

2.2.3 蒸发量与气候因子回归模型

进一步分析蒸发量变化与气候因子之间的关系，采用逐步回归法，建立各时段蒸发量与各时段蒸发量显著相关的气候因子回归模型（表 4）。表 4 中Y为

蒸发量，X₁ 为平均气温，X₂ 为降水量，X₃ 为日照时间，X₄ 为相对湿度、X₅ 为平均风速、X₆ 为云量，X₇ 为气温日较差。

表 4 黄河三角洲地区蒸发量与气候因子回归模型

Tab.4 Regression model between evaporation and climate factors in the Yellow River delta	
时段	回归方程
年	Y=886.109-0.215X ₂ +0.666X ₃ -13.893X ₄ +14.850X ₅ +61.203X ₆ -12.177X ₇
春季	Y=165.009+18.142X ₁ -0.303X ₂ +0.075X ₃ -5.212X ₄ +86.447X ₅ -7.197X ₆ +18.423X ₇
夏季	Y=201.750+25.194X ₁ -0.050X ₂ -0.053X ₃ -7.444X ₄ +90.836X ₅ -17.770X ₆ +30.033X ₇
秋季	Y=533.747-0.023X ₂ +0.015X ₃ -5.171X ₄ +48.259X ₅ -10.982X ₆ +8.047X ₇
冬季	Y=218.368+10.222X ₁ +0.095X ₂ +0.024X ₃ -2.258X ₄ +21.256X ₅ -5.252X ₆ +3.293X ₇

1）模型摘要是判断二者之间线性关系的重要指标，也反映了回归的拟合程度（表 5）。R² 与调整后 R² 反映模型的解释能力，越接近 1，说明效果越好，经调整，春季、夏季的回归方程 R² 解释能力最好，均可以解释 90.0%以上的蒸发量特征，其次为冬季，可以解释 87.7%的蒸发量特征，而年和秋季回归方程的 R² 解释能力相对较差，均不足 80.0%；另外根据 F 检验判断，方程是否具有线性关系，可以看到各时段回归方程的 Significance F<0.01,说明方程均通过了 F 检验，即黄河三角洲地区各时段蒸发量与显著相关的平均气候因子具有线性关系。

其他因子对蒸发量的影响不明显，气温和日照时间为正向影响，相对湿度为负向影响；秋季只有相对湿度对蒸发量的影响显著，为负向影响，其他因子对蒸发量影响不显著；冬季气温、相对湿度和平均风速对蒸发量影响显著，其他因子影响不显著，气温和云量为正向影响，相对湿度为负向影响；日照时间和相对湿度对年蒸发量的影响为显著，其他因子影响不显著，日照时间为负向影响，相对湿度为正向影响。

综上，相对湿度对各个时段蒸发量影响效果均显著，均为负向影响，是影响黄河三角洲地区蒸发量最明显的因素，其次为风速，对春、夏、冬季蒸发量的影响均显著，且均为正向影响，再次为气温，对春季和夏季蒸发量影响显著，均为正向影响。日照时间对年蒸发量的负向影响效果明显，降水对春季蒸发量的负向影响效果明显。

表 5 黄河三角洲地区蒸发量预测模型摘要

Tab.5 Summary of evaporation prediction model in the Yellow River delta				
时段	R ²	调整 R ²	F	Significance F
年	0.792	0.738	14.610	0.000
春季	0.925	0.901	38.611	0.000
夏季	0.973	0.965	113.801	0.000
秋季	0.737	0.668	20.039	0.000
冬季	0.908	0.877	29.483	0.000

2）方差分析主要探讨模型是否成功建成。从表 6 可以看出，黄河三角洲地区各时段蒸发量预测模型的 P 值（显著性）均<0.001，结合表 5 中 F 检验结果，说明至少有一个自变量解释了一部分因变量的变异，从而使得回归变异变大，残差变异减少，模型成功建立。

2.2.4 黄河三角洲地区蒸发量影响因子分析

表 7 为黄河三角洲地区影响蒸发量的气候因子显著性检验，由表 4 和表 7 可知，春季的气温、降水量、日照时间、相对湿度、平均风速均会影响蒸发量，其他因子对蒸发量影响不明显，其中气温、日照时间和平均风速为正向影响，而降水和相对湿度为负向影响；夏季气温、相对湿度、平均风速会影响蒸发量，

表 6 黄河三角洲地区蒸发量预测模型方差分析

Tab.6 Analysis of variance of evaporation prediction model in the Yellow River delta					
	模型	平方和	自由度	均方	显著性
年	回归	354 681.835	6	59 113.639	0.000
	残差	93 058.721	23	4 046.031	
	总计	447 740.556	29		
春季	回归	95 623.655	7	13 660.522	0.000
	残差	7 783.631	22	353.801	
	总计	103 407.286	29		
夏季	回归	124 382.649	7	17 768.950	0.000
	残差	3 435.083	22	156.140	
	总计	127 817.732	29		
秋季	回归	25 892.032	6	4 315.339	0.000
	残差	9 235.684	23	401.551	
	总计	35 127.715	29		
冬季	回归	10 044.613	7	1 434.945	0.000
	残差	1 022.091	21	48.671	
	总计	11 066.704	28		

表 7 黄河三角洲地区影响蒸发量的气候因子显著性检验

Tab.7 Significance test of climate factors affecting evaporation in Yellow River delta

因子	P 值				
	年	春季	夏季	秋季	冬季
气温	-	0.001	0.000	-	0.000
降水量	0.091	0.021	0.173	0.784	0.556
日照时间	0.005	0.435	0.241	0.694	0.512
相对湿度	0.028	0.000	0.000	0.002	0.000
平均风速	0.897	0.000	0.000	0.058	0.023
云量	0.331	0.532	0.094	0.450	0.118
日较差	0.839	0.108	0.007	0.522	0.287

根据回归模型公式, 计算各时段蒸发量的模拟值, 将模拟值与实测值进行对比分析, 建立对应关系 (图5)。可以看出, 各时段蒸发量实测值和模拟值都分布在拟合线附近, 模型预测效果均较好。总体

上, 春季蒸发量模拟值的相对误差介于0.05%~5.62%之间, 平均误差为2.15%, 相对误差在 $\pm 5\%$ 的模拟值合格率为96.70%; 夏季蒸发量模拟值的相对误差介于0.10%~3.76%之间, 平均误差为1.26%, 相对误差在 $\pm 5\%$ 的模拟值合格率为100.00%; 秋季蒸发量模拟值的相对误差介于0.05%~12.08%之间, 平均误差为3.68%, 相对误差在 $\pm 5\%$ 的模拟值合格率为70.00%; 冬季蒸发量模拟值的相对误差介于0.22%~11.38%之间, 平均误差为3.11%, 相对误差在 $\pm 5\%$ 的模拟值合格率为82.8%; 年蒸发量模拟值的相对误差介于0.27%~7.48%, 平均相对误差为2.72%, 若定义相对误差在 $\pm 5\%$ 的模拟值为合格, 则合格率为86.70%。各时段蒸发量模拟值合格率与回归方程解释能力吻合度较高。

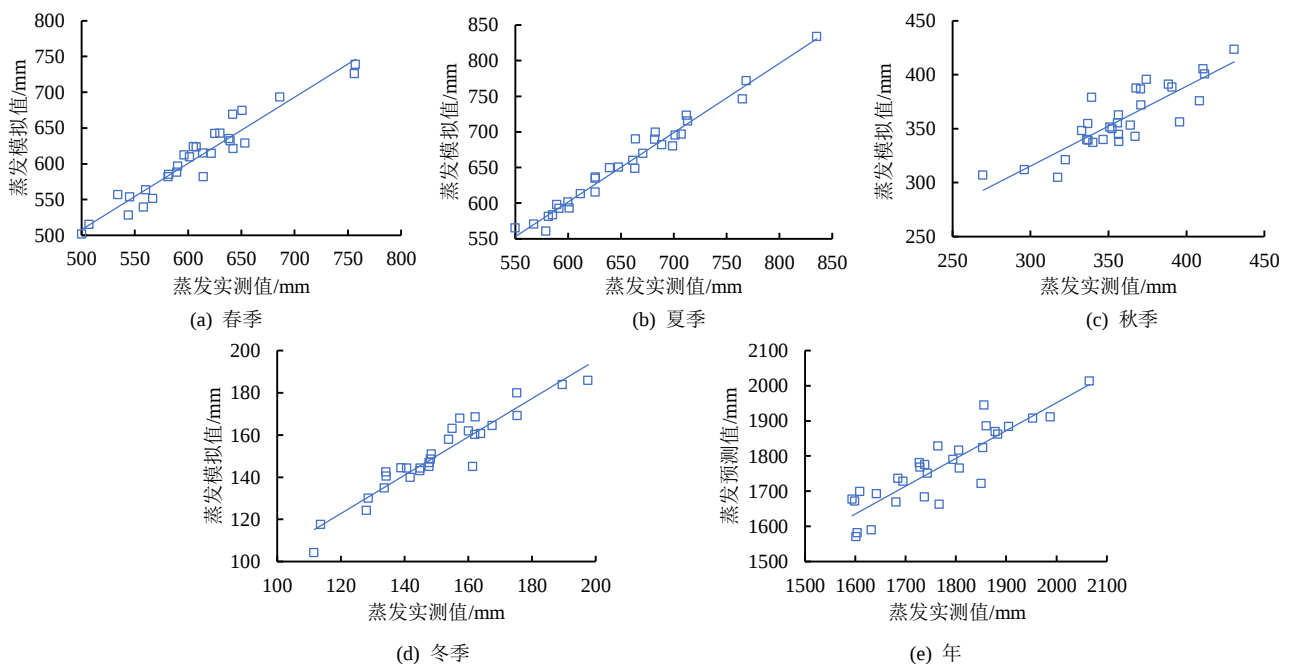


图 5 黄河三角洲地区蒸发量实测值与模拟值对应关系

Fig.5 The correspondence between the measured and simulated values of evaporation in the Yellow River delta region

3 讨论

山东省境内存在比较明显的“蒸发悖论”现象^[13], 而黄河三角洲地区除秋、冬季外, 也存在比较明显的“蒸发悖论”现象, 其中的差异可能是研究期和驱动因素的不同造成的。相对湿度一定程度上通过水汽输送影响蒸发过程, 相对湿度的下降会引起黄河流域蒸发量上升^[19], 这与本文秋、冬季蒸发量研究结果较为一致。黄河三角洲地区秋季只有相对湿度对蒸发量的影响为显著, 因此相对湿度的减少可能是造成该地区秋季蒸发量上升的主要原因; 随着中国城市化进程的不断加快, 地表粗糙度增加削弱了近地表风速^[20-21], 造成中国大部分地区地面风速均呈下降趋势^[22-23], 而风速的减弱导致空气中污染物扩散速度减慢, 进而造成气流交换速度变慢和大气污染加重, 蒸发面水汽进

入大气中变得更加困难, 这可能是黄河三角洲地区年、春季、夏季蒸发量下降的重要原因; 蒸发过程所需的能量主要来源于太阳辐射^[24], 日照时间的减少可能与大气污染物排放引起的气溶胶光学厚度增加有关^[25], 日照时间的减少可能也是造成黄河三角洲地区年蒸发量下降的重要原因。大气中的水分经常处于没有饱和的状态, 于是无论是海洋还是陆地都缓慢进行着水分从下垫面“蒸发”而进入大气的物理过程, 自然界中蒸发现象颇为复杂, 因此必然受到多种因素的影响。对于温带大陆性气候区, 一般认为气温驱动模型具有最优的表现^[26], 即气温是影响蒸发量变化最主要的驱动因素。全球气候变暖已成为学术界的共识, 黄河三角洲地区气温也呈显著上升趋势, 气温的进一步上升如何影响蒸发量, 将是未来研究的重要课题。

4 结论

1) 黄河三角洲地区春季、夏季和年蒸发量呈显著下降趋势, 存在“蒸发悖论”现象; 秋季和冬季蒸发量呈不显著上升趋势。蒸发量空间分布大致上由东北向西南递减, 其中春季蒸发量最大的地区为北部的中部地区, 夏季蒸发量最大的地区为北部中东部部分地区, 秋季蒸发量最大的地区为北部中部局部地区, 冬季蒸发量最大的地区为东南部的局部地区, 年蒸发量最大的地区为北部偏东小部地区。

2) 黄河三角洲地区蒸发量具有明显的周期性特征。春季蒸发量主循环周期为 10 a; 夏季蒸发量主循环周期为 10 a 和 5 a; 秋季蒸发量主循环周期为 13、6 a 和 3 a; 冬季蒸发量主循环周期为 10~11 a 和 5~6 a; 年蒸发量主循环周期为 10 a。

3) 黄河三角洲地区年蒸发量与年降水量、年日照时间、年平均风速、年平均云量和年平均气温日较差相关性达到极显著水平。各季节蒸发量与各季节降水量、日照时间、相对湿度、云量及气温日较差相关程度均达到显著水平, 春、夏、冬季蒸发量与平均气温相关性显著, 春、夏、秋季蒸发量与平均风速相关性显著。

4) 黄河三角洲地区相对湿度对各个时段蒸发量影响效果均显著, 其次为风速, 对春季、夏季、冬季蒸发量的影响均显著, 再次为气温, 对春季和夏季蒸发量影响显著。各时段模型预测效果均较好。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- BRUTSAERT W, PARLANGE M B. Hydrologic cycle explains the evaporation paradox[J]. *Nature*, 1998, 396: 30.
- PETERSON T C, GOLUBEV V S, GROISMAN P Y. Evaporation losing its strength[J]. *Nature*, 1995, 377: 687-688.
- MOONEN A C, ERCOLI L, MARIOTTI M, et al. Climate change in Italy indicated by agrometeorological indices over 122 years[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 111(1): 13-27.
- COHEN S, IANETZ A, STANHILL G. Evaporative climate changes at Bet Dagan, Israel, 1964—1998[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 111(2): 83-91.
- BREÑA-NARANJO J A, LAVERDE-BARAJAS M Á, PEDROZO-ACUÑA A. Changes in pan evaporation in Mexico from 1961 to 2010[J]. *International Journal of Climatology*, 2017, 37(1): 204-213.
- 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[J]. *水科学进展*, 2007, 18(3): 311-318.
- ZENG Yan, QIU Xinfu, LIU Changming, et al. Changes of pan evaporation in China in 1960—2000[J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(3): 311-318.
- 左洪超, 李栋梁, 胡隐樵, 等. 近 40 a 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): 1 125-1 130.
- 吴必文, 温华洋, 叶朗明, 等. 安徽地区近 45 年蒸发皿蒸发量变化

- 特征及影响因素初探[J]. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(7): 620-624.
- WU Biwen, WEN Huayang, YE Langming, et al. Variation and influencing factors of pan evaporation in Anhui Province in latest 45 years[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, 18(7): 620-624.
- 买苗, 火焰, 项瑛, 等. 1960—2012 年江苏地区蒸发量变化及影响因素分析[J]. *气象与环境学报*, 2015, 31(5): 134-140.
- MAI Miao, HUO Yan, XIANG Ying, et al. Variation of evaporation and its impact factors from 1960 to 2012 in Jiangsu Province[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2015, 31(5): 134-140.
- 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素分析[J]. *气象科技*, 2019, 47(3): 439-449.
- SHI Chenxiao, YANG Qingwen, WANG Xiaojie, et al. Variation of pan evaporation over Hainan Island and its influence factors[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2019, 47(3): 439-449.
- 祁栋林, 肖宏斌, 李晓东, 等. 1964—2013 年青海省不同生态功能区蒸发皿蒸发量的变化特征[J]. *干旱气象*, 2016, 34(2): 234-242.
- QI Donglin, XIAO Hongbin, LI Xiaodong, et al. Variation characteristics of pan evaporation in different ecological function areas of Qinghai Province during 1964—2013[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2016, 34(2): 234-242.
- 解建强, 蔡霞, 宁松瑞, 等. 1960—2019 年山西右玉降水、气温及蒸发量变化特征分析[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(S1): 124-128.
- XIE Jianqiang, CAI Xia, NING Songrui, et al. Characteristics of precipitation, air temperature and evaporation in Youyu, Shanxi during 1960—2019[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(S1): 124-128.
- 王怡宁, 杨秒, 王兵, 等. 五道沟地区“蒸发悖论”及成因探析[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(3): 126-133.
- WANG Yining, YANG Miao, WANG Bing, et al. The “evaporation paradox” in Wudaogou area and its underlying mechanisms[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(3): 126-133.
- 齐燕. 大柴旦地区降雨、温度及蒸发变化特征分析[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(11): 115-121.
- QI Yan. Variation of rainfall, temperature and evaporation in the region of Da Chaidan[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(11): 115-121.
- 刘健, 曹升乐, 翟建青, 等. 近 50 年山东省蒸发皿蒸发量变化趋势及影响因素分析[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2010, 40(6): 129-133, 138.
- LIU Jian, CAO Shengle, ZHAI Jianqing, et al. Change of evaporation in Shandong Province over the past 50 years and associated influencing factors[J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2010, 40(6): 129-133, 138.
- 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 2 版. 北京: 气象出版社, 2007.
- 高娟. 假设检验中 P 值的深入分析[J]. *统计理论与实践*, 2021(6): 17-19.
- 王文圣, 丁晶, 李跃清. 水文小波分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- WANG Wensheng, DING Jing, LI Yueqing. Hydrology wavelet analysis[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- WANG W G, SHAO Q X, PENG S Z, et al. Reference evapotranspiration change and the causes across the Yellow River Basin during 1957—2008 and their spatial and seasonal differences[J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(5): W05 530.
- VAUTARD R, CATTIAUX J, YIOU P, et al. Northern Hemisphere atmospheric stilling partly attributed to an increase in surface roughness[J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(11): 756-761.
- BANDYOPADHYAY A, BHADRA A, RAGHUWANSHI N S, et al. Temporal trends in estimates of reference evapotranspiration over

- India[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2009, 14(5): 508-515.
- [22] 张晓龙, 沈冰, 黄领梅. 基于 ITPCAS 再分析资料中国近地面风速时空变化特征[J]. *干旱区研究*, 2020, 37(1): 1-9.
- ZHANG Xiaolong, SHEN Bing, HUANG Lingmei. Spatiotemporal variation of near surface wind speed over China based on ITPCAS reanalyzed dataset[J]. *Arid Zone Research*, 2020, 37(1): 1-9.
- [23] 任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 近 50 年中国地面气候变化基本特征[J]. *气象学报*, 2005, 63(6): 942-956.
- REN Guoyu, GUO Jun, XU Mingzhi, et al. Climate changes of China's mainland over the past half century[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63(6): 942-956.
- [24] 刘珂, 安智伟, 刘吉峰. 黄河内蒙古河段首凌前期水气界面热通量特征[J]. *人民黄河*, 2021, 43(2): 53-57.
- LIU Ke, AN Zhiwei, LIU Jifeng. Study on air-water heat fluxes for first streaming ice prophase in Inner Mongolia reach of Yellow River[J]. *Yellow River*, 2021, 43(2): 53-57.
- [25] 齐月, 房世波, 周文佐. 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*, 2015, 64(8): 398-407.
- QI Yue, FANG Shibo, ZHOU Wenzuo. Correlative analysis between the changes of surface solar radiation and its relationship with air pollution, as well as meteorological factor in East and West China in recent 50 years[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(8): 398-407.
- [26] FENG Y, JIA Y, ZHANG Q W, et al. National-scale assessment of pan evaporation models across different climatic zones of China[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 564: 314-328.

Spatiotemporal variation in evaporation and its modelling in the Yellow River delta

WANG Feng^{1,2}, REN Jiancheng^{1,2*}, LU Xiaoning³

(1. Shandong Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Jinan 250031, China;

2. Binzhou Meteorological Bureau, Binzhou 256612, China; 3. Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: 【Objective】The Yellow River delta is a distinctive ecosystem in China, fostering a rich array of plant and animal species. Evaporation is a main component of the hydrological process in the delta. In this paper, we study the spatiotemporal variation in evaporation in the region and present a model to elucidate its relationship with meteorological factors. 【Method】The study is based on evaporation and meteorological factors measured in the region; their relationship is analyzed using climate statistics method and GIS. 【Result】① Temporarily, annual change of evaporation in spring and summer had been decreasing at significant level, while its change in autumn and winter did not show identifiable trends. Spatially, the evaporation decreased from the northeast to the southwest. ② Seasonal evaporation in the delta showed periodicity. In spring, the primary cycle spanned 10 years, and in summer the periodicity was 5 and 10 years. Autumn displayed cycles of 3, 6, and 13 years, while winter showcased periods of 5-6 and 10-11 years. Overall, the annual evaporation cycle manifested a 10-year period. ③ Annual evaporation was significantly correlated with precipitation, sunshine period, average wind speed, average cloud coverage and average daily temperature, but not correlated to average temperature. Seasonal evaporation was significantly related to precipitation, sunshine duration, relative humidity, cloud coverage and daily temperature. ④ The relative humidity had a significant impact on evaporation regardless of seasons. In contrast, wind speed impacted evaporation only in spring, summer and winter; temperature impacted evaporation in spring and summer; sunshine duration impacted annual evaporation; precipitation negatively impacted evaporation in spring. The measured and modelled evaporation in all seasons agreed well. 【Conclusion】Evaporation in the Yellow River delta is affected by a variety of climate factors, and it shows the “evaporation paradox” phenomenon. Evaporation shows both seasonal and annual periodicity; spatially, it decreases from the northeast to the southwest. The regression model can accurately predict the change in evaporation with meteorological factors.

Key words: evaporation; change characteristics; model research; Yellow River delta

责任编辑: 赵宇龙