



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2017.06.002

赵娜, 王治国, 张复明, 等. 海河流域潜在蒸散发估算方法及其时空变化特征[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(6): 11-16, 65. ZHAO N, WANG Z G, ZHANG F M, et al. Model evaluation and spatial temporal variations of potential evapotranspiration in Haihe Catchment[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(6): 11-16, 65. (in Chinese)

海河流域潜在蒸散发估算方法及其时空变化特征

赵娜¹, 王治国², 张复明², 李泽¹

(1. 华中科技大学 水电与数字化工程学院, 武汉 430074; 2. 湖北省交通规划设计院股份有限公司, 武汉 430051)

摘要: 根据1960-2012年海河流域45个站点平均气温、日照时数、相对湿度、风速等气象资料, 选取了4个潜在蒸散发计算模型, 以Penmar Monteith模型计算结果为依据, 采用平均绝对误差和平均相对误差评估模型精确程度, 并在此基础上研究海河流域潜在蒸散发的时空变异规律。结果表明: 基于能量的模型最适用于估算海河流域的潜在蒸散发; 从时间变化来看, 海河流域1960-2012年潜在蒸散发总体上呈显著下降趋势, 平均下降速率为2.04 mm/a, 说明海河流域存在蒸发悖论的现象; 潜在蒸散发在4个季节均呈现显著减少趋势, 其中夏季减少幅度较大, 冬季减少幅度最小。从空间分布来看, 海河流域潜在蒸散发呈现从西北地区到东南地区阶梯式上升趋势, 但大部分地区在1960-2012年时间范围发生潜在蒸散发减少现象, 其中山前平原区减少趋势最为明显(< -1 mm/a), 可能主要受太阳辐射减少(即全球变暗)的影响; 而太行山区北部高海拔地区潜在蒸散发呈现增加的趋势, 可能主要受气温升高(即全球变暖)的影响。

关键词: 潜在蒸散发; Penmar Monteith模型; 适用性评估; 蒸发悖论; 时空变化规律

中图分类号: P426 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)06-0011-06

Model evaluation and spatial temporal variations of potential evapotranspiration in Haihe Catchment

ZHAO Na¹, WANG Zhiguo², ZHANG Fuming², LI Ze¹

(1. School of Water Conservancy and Digital Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Hubei Institute of Transportation Planning and Design Co., Ltd., Wuhan 430051, China)

Abstract: Based on the observation data of average temperature, sunshine hours, wind speed, and relative humidity at 45 stations in Haihe Catchment during 1960-2012, we compared three potential evapotranspiration models with the Penmar Monteith model. The absolute and relative errors were used as the model evaluation indices. Hargreaves model based on energy balance proved to be the most suitable for potential evapotranspiration estimation in Haihe Catchment. The annual potential evapotranspiration declined at a mean rate of 2.04 mm/a in 1960-2012. The inter annual variations of potential evapotranspiration in the four seasons all showed a significant decreasing trend, with the largest decline in summer and the smallest decline in winter. Spatially, the average potential evapotranspiration during 1960-2012 tended to increase from the northwest part of the region to the southeast. Moreover, the decrease of potential evapotranspiration occurred in most part of the region, especially in the southeast, which means potential evapotranspiration may be mainly impacted by global dimming. However, potential evapotranspiration in the northwest part of the region showed an increasing trend, probably due to global warming.

Key words: potential evapotranspiration; Penmar Monteith model; applicability evaluation; evaporation paradox; spatial temporal variations

收稿日期: 2017-01-11 修回日期: 2017-07-02 网络出版时间: 2017-11-15

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20171115.0833.004.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0401004; 2016YFC0401005); 中央高校基本科研业务费专项资金(HUST: 2017KFYXJJ191)

Funds: National Key Research and Development Program(2016YFC0401004, 2016YFC0401005); Fundamental Research Funds for the Central Universities(HUST: 2017KFYXJJ191)

作者简介: 赵娜(1984), 女, 河北邯郸人, 讲师, 博士, 主要从事生态水文方面研究。E-mail: na.zhao.2011@hust.edu.cn

蒸散量是能量平衡和水量平衡的重要组成部分,是决定天气与气候条件的重要因子,在全球水循环和气候演变中具有举足轻重的作用^[13]。潜在蒸散发是指在一定气象条件下水分供应不受限制时,陆面可能达到的最大蒸发量。潜在蒸散发作为农田灌溉管理、作物需水量估算、稀缺资料地区水量平衡等研究中的重要参量,其时空分布及变化规律研究,对农业用水管理和区域水资源优化配置具有重要意义^[2]。在全球变暖的背景下,近 50 年来世界各地的蒸发皿蒸发量和潜在蒸散量大多呈下降趋势,这一现象被称作“蒸发悖论”^[4]。然而,蒸发悖论具有明显的区域特征,尽管中国^[5]、美国^[6]、加拿大^[7]、印度^[8]、西班牙^[9]、澳大利亚^[10]和新西兰^[11]等国家都被证实存在蒸发悖论,但个别国家也有反例^[12]。对中国来说,尽管总体来看存在蒸发悖论^[13-14],尤其是海河流域^[15-16]和黄河流域^[17],但蒸发皿蒸发量在中部地区无明显变化趋势^[13],而在东北地区反而呈上升趋势^[14]。

流域蒸散发过程通常不可见且很难测量,一般需要通过估算的方法来确定^[18]。潜在蒸散发估算方法较多,按照机理大致可分为基于能量的潜在蒸散发估算方法^[19]、基于温度的潜在蒸散发估算方法^[20]和基于空气动力学的潜在蒸散发估算方法^[21]。Penmar-Monteith 模型是世界粮农组织(FAO)1998 年推荐使用的潜在蒸散发估算方法^[22-23],其中参考下垫面为植被高度 0.12 m 的草地,具有固定的表面阻力 70 s/m,反照率为 0.23,其在水文循环模拟中被广泛应用。目前关于潜在蒸散发的时空变化规律研究一般都是以 Penmar-Monteith 模型计算结果为依据,如刘胜娅等^[2]采用 Penmar-Monteith 公式计算潜在蒸散发,研究了北京市潜在蒸散发及其影响因素的变化趋势,发现潜在蒸散发线性变化趋势为每年增加 0.54 mm,但增加趋势并没有通过显著性检测;刘小莽等^[24]基于 Penmar-Monteith 公式,分析了海河流域潜在蒸散发对气温、风速、水汽压和太阳辐射的敏感性及其时空变化规律。

然而,赵玲玲等^[18]对现有水文模型中蒸散发估算模块进行回顾,认为 Penmar-Monteith 方法并不是估算潜在蒸散发的最佳选择。这是因为 Penmar-Monteith 模型虽然具有较强的物理意义,但是存在需要资料众多,参数获取困难等问题,因此有必要开发具有一定物理意义但需要资料较少的潜在蒸散发估算方法。本研究以海河流域为例,一方面选取基于能量、温度和空气动力学的 3 种潜在蒸散发估算方法,采用 Penmar-Monteith 模型计算结果为依

据,评估 3 种方法在研究流域的适用性,为蒸发悖论归因分析提供依据;另一方面,进一步分析海河流域蒸散量时空分布特征及其变化规律,为了便于说明分析结果的合理性及与前人相关研究结果进行对比分析,采用 Penmar-Monteith 模型计算结果为标准。

1 数据与方法

1.1 数据

本文采用的气象资料来源于中国气象科学数据共享服务网,包括海河流域内及周边 45 个气象站点 1960-2012 年的月值数据(平均气温、日照时数、相对湿度和风速)。

1.2 潜在蒸散量的计算方法

(1) Hargreaves 模型。

Hargreaves 模型是以能量平衡原理为基础计算蒸散发能力的方法之一^[25],该方法适用于半干旱地区,其主要形式如下:

$$ET = 0.0135(T + 17.8)R_s/\lambda \quad (1)$$

式中: ET 为潜在蒸散量(mm/d); R_s 为日均太阳短波辐射量[MJ/(m²·d)]; T 为平均气温(°C); λ 为汽化潜热(MJ/kg)。

(2) Blaney-Criddle 模型。

Blaney-Criddle 模型是基于温度的潜在蒸散发估算方法之一^[26],主要适用于干旱半干旱地区,其形式为:

$$ET = kp(0.45T + 8.13) \quad (2)$$

式中: k 为反应物影响经验系数,取决于植被类型、地理位置和季节,本文取平均值 0.85^[26]; p 为日照百分比;其他参数含义同上。

(3) Rohwer 模型。

Rohwer 模型是基于空气动力学的潜在蒸散发估算方法之一^[27],主要考虑水汽压差和风速的影响,适用于干旱半干旱地区,其形式为:

$$ET = 0.44(1 + 0.27U_2)(e_s - e_a) \quad (3)$$

式中: e_s 、 e_a 分别为实际、饱和水汽压(kPa); U_2 为地面 2 m 处的风速(m/s)。

(4) Penmar-Monteith 模型。

Penmar-Monteith 模型是世界粮农组织推荐的计算潜在蒸散量的综合模型^[22],其形式为:

$$ET = \frac{0.408 \Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (4)$$

式中: Δ 为水汽压温度曲线斜率(kPa/°C); γ 为湿度计算常数(kPa/°C); R_n 为净辐射[MJ/(m²·d)]; G 为土壤热通量[MJ/(m²·d)];其他参数含义同上。

1.3 精度评价标准

本研究采用平均绝对误差和平均相对误差^[28]评估检验潜在蒸散量和参考潜在蒸散量之间的差异程度,具体公式见文献[28]。本文采用 Penmar Monteith 模型计算结果作为参考潜在蒸散量。

2 潜在蒸散量计算方法适用性评估

由基于能量的算法(Hargreaves 模型)、基于温度的算法(Blaney-Criddle 模型)、基于空气动力学的算法(Rohwer 模型)分别计算得到的 45 个站点潜在蒸散量相对于 Penmar Monteith 模型的误差情况如表 1 所示。对不同站点而言,基于能量的 Hargreaves 模型的绝对误差变化范围是 0.26~0.48 mm,平均绝对误差为 0.35 mm;基于温度 Blaney-Criddle 模型的绝对误差变化范围是 2.19~4.76 mm,平均绝对误差为 4.08 mm;基于空气动力学的 Rohwer 模型的绝对误差变化范围是 1.55~2.67 mm,平均绝对误差为 2.24 mm。这说明基于能量的 Hargreaves 模型估算结果的绝对误差最小,且其在 45 个站点绝对误差的波动最小;其次是基于空气动力学的 Rohwer 模型;而基于温度 Blaney-Criddle 模型的绝对误差最大。

同样,从各个模型估算结果的平均相对误差来看,基于能量的 Hargreaves 模型明显表现最优,其相对误差范围是 0.15~0.37,平均相对误差为 0.21;基于空气动力学的 Rohwer 模型次之,其相对误差变化范围是 1.12~1.91,平均相对误差为 1.34;最差的是基于温度的 Blaney-Criddle 模型,其相对误差变化范围是 1.69~3.52,平均相对误差为 2.43。因此,不管是从平均绝对误差还是平均相对误差结果来看,基于能量的算法最适合用于估算海河流域的潜在蒸散量。

从公式(1)可以看出,基于能量的算法主要考虑太阳辐射和平均气温对潜在蒸散发的影响,这两个因素一般来说均是主导区域蒸发能力的关键指标,Hargreaves 模型模拟效果最好也验证了这一点。基于空气动力学的 Rohwer 模型表现较差,说明风速和水汽压虽然也是影响蒸散发的因素,但对于海河流域来说显然不及能量因素的影响力。基于温度的 Blaney-Criddle 模型由于主要考虑平均气温这一单独因素,其拟合效果最差说明海河流域蒸散发能力的变化受平均气温影响较小,这可能与全球范围的蒸发悖论有关。而 Penmar Monteith 模型是一种考虑了能量平衡和水汽输送的综合方法,从推导原理上来看,基于能量的 Hargreaves 模型误差最小

表 1 潜在蒸散量估算模型误差分析

Tab. 1 Errors in the results of potential evapotranspiration models

站点	平均绝对误差/mm			平均相对误差		
	基于能量算法	基于温度算法	空气动力学算法	基于能量算法	基于温度算法	空气动力学算法
化德	0.45	3.38	2.17	0.37	2.75	1.77
张北	0.47	3.25	2.12	0.34	2.37	1.55
右玉	0.31	3.65	2.03	0.25	2.97	1.66
集宁	0.39	3.50	2.13	0.28	2.47	1.50
大同	0.41	3.66	2.30	0.25	2.19	1.37
五台山	0.41	2.19	1.55	0.35	1.86	1.31
蔚县	0.28	4.34	2.14	0.21	3.31	1.63
五寨	0.33	3.44	2.11	0.23	2.39	1.46
原平	0.33	3.77	2.22	0.19	2.16	1.27
石家庄	0.32	4.55	2.24	0.18	2.57	1.26
太原	0.32	3.96	2.23	0.18	2.24	1.26
阳泉	0.36	4.16	2.23	0.18	2.13	1.14
榆社	0.26	3.82	2.06	0.16	2.44	1.32
邢台	0.27	4.36	2.28	0.15	2.44	1.27
安阳	0.33	3.75	2.22	0.18	2.02	1.20
阳城	0.29	3.95	2.31	0.15	2.10	1.23
新乡	0.30	4.21	2.26	0.16	2.23	1.20
多伦	0.32	4.02	2.31	0.16	2.05	1.18
赤峰	0.38	3.50	2.02	0.36	3.29	1.90
丰宁	0.40	4.22	2.26	0.25	2.60	1.39
围场	0.40	3.88	2.09	0.26	2.52	1.36
张家口	0.33	3.74	1.95	0.25	2.86	1.49
怀来	0.45	4.15	2.38	0.24	2.16	1.24
承德	0.48	4.68	2.50	0.23	2.19	1.17
遵化	0.35	4.42	1.98	0.28	3.51	1.57
青龙	0.33	4.53	2.12	0.22	3.00	1.47
秦皇岛	0.33	4.51	2.06	0.24	3.28	1.50
北京	0.41	4.34	2.18	0.23	2.38	1.20
廊坊	0.39	4.53	2.39	0.19	2.22	1.17
天津	0.32	4.50	2.35	0.18	2.52	1.31
乐亭	0.36	4.29	2.36	0.19	2.26	1.24
保定	0.32	4.36	2.27	0.18	2.44	1.27
饶阳	0.36	4.16	2.20	0.20	2.34	1.24
沧州	0.28	4.39	2.27	0.16	2.54	1.31
泊头	0.31	4.74	2.37	0.18	2.73	1.36
黄骅	0.36	4.76	2.52	0.18	2.39	1.26
南宫	0.35	4.40	2.47	0.18	2.22	1.25
德州	0.33	4.39	2.45	0.18	2.35	1.31
济南	0.34	4.61	2.45	0.18	2.43	1.29
菏泽	0.36	4.42	2.42	0.18	2.26	1.24
郑州	0.47	4.24	2.67	0.20	1.77	1.12
开封	0.34	4.56	2.34	0.17	2.45	1.25
惠民县	0.34	3.67	2.39	0.16	1.71	1.12
唐山	0.35	3.58	2.39	0.17	1.69	1.13
介休	0.45	3.38	2.17	0.37	2.75	1.77

是合理的,说明基于能量平衡的潜在蒸散发算法是在资料缺乏的情况下替代 Penmar Monteith 模型的最佳选择。以下为了进一步说明分析结果的合理性,并方便与已有相关研究进行对比验证,采用 Penmar Monteith 模型的计算结果进行潜在蒸散量时空变化分析。

3 潜在蒸散量时空变异规律

3.1 潜在蒸散量年际变化趋势分析

图 1 是海河流域平均潜在蒸散量变化趋势图。海河流域平均潜在蒸散多年平均值为 936 mm,从 1960 年到 2012 年,海河流域整体蒸散发量呈下降趋势,平均下降速率为 2.04 mm/a,蒸散发量波动范围为 797~1 050 mm,蒸散发量最小的年份为 2003 年,蒸散发量最大的年份为 1965 年。尽管潜在蒸散发与年份的相关系数 R^2 仅为 0.379 5,但其下降趋势通过了显著性检验,并达到极显著水平 ($P < 0.001$)。通过分析平均气温和日照时数的时间变化趋势(图 2)可知,平均气温整体呈上升趋势,符合全球变暖的大背景,而日照时数整体呈现下降趋势,也与全球变暗的趋势相符合。这说明海河流域存在蒸发悖论的现象,且潜在蒸散发的减少趋势很可能是太阳辐射减少造成的,但两者之间的定量关系需要进一步研究。

散的变化趋势,根据 3 月-5 月为春季,6 月-8 月为夏季,9 月-11 月为秋季,12 月-次年 2 月为冬季的划分标准,海河流域潜在蒸散量季节变化如图 3 所示。潜在蒸散发在 4 个季节均呈现显著减少趋势,其中夏季减少幅度最大,平均下降速率为 0.35 mm/a,冬季减少幅度最小,平均下降速率仅为 0.07 mm/a。从蒸散发与年份的拟合关系来看, R^2 从大到小依次为夏季 > 冬季 > 秋季 > 春季,但从趋势检验结果来看,4 个季节均通过了显著性检验,其中夏季达到了极显著水平 ($P < 0.001$)。由于夏季的蒸散量在全年 4 个季节中最大,故夏季蒸散量的减少显然是年平均蒸散发减少的主要原因。而日照时数同样在夏季减少速率最大,进一步说明了太阳辐射减少可能是海河流域蒸发悖论的主导因素。

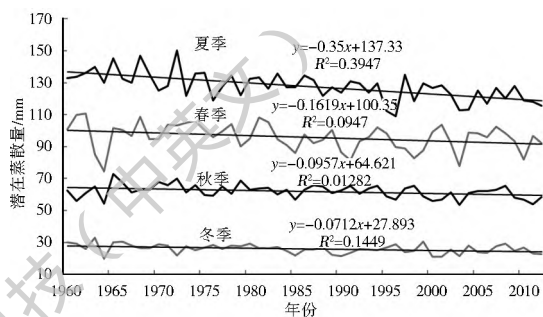


图 3 1960-2012 年海河流域潜在蒸散量季节变化
Fig. 3 Seasonal variations of potential evapotranspiration in Haihe Catchment during 1960-2012

3.3 潜在蒸散量空间变化趋势分析

海河流域多年平均潜在蒸散量空间分布情况如图 4 所示,从图中可以看出海河流域潜在蒸散量存在明显的空间异质性。从流域的西北部到东南部,潜在蒸散发逐渐增大,其值由 639 mm/a 增加到 1 154 mm/a。西北山区,即海河流域上游地区的多年平均潜在蒸散量最低,其中最小值出现在山西省五台山站,即海河流域海拔最高的站点。随着海拔的降低和年均气温的上升,海河流域中下游潜在蒸散量逐渐增加,最大值出现在山东省济南站。按省份统计的话,海河流域境内山东省的潜在蒸散最高,其次是京津冀地区和河南省,山西省最低。潜在蒸散量的这种东高西低的空间分布格局与海拔关系密切,考虑到平均气温随海拔上升而减少的规律,本研究认为海河流域潜在蒸散量空间分布主要是受平均气温的影响,平均气温越高,蒸散发能力越强。

1960-2012 年海河流域潜在蒸散量平均变化率空间分布如图 5 所示,从图中可以看出海河流域大部分地区潜在蒸散量呈现减少趋势,其中减少趋势最明显的是东南部地区,即海河流域山前平原区,

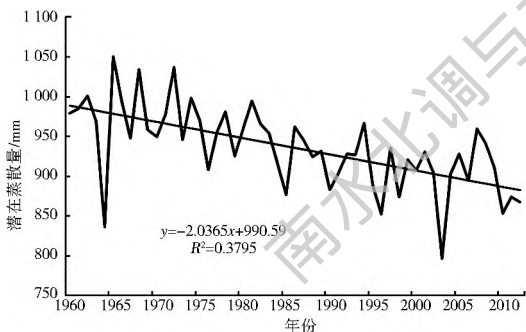


图 1 1960-2012 年海河流域潜在蒸散量年际变化
Fig. 1 Annual variations of potential evapotranspiration in Haihe Catchment during 1960-2012

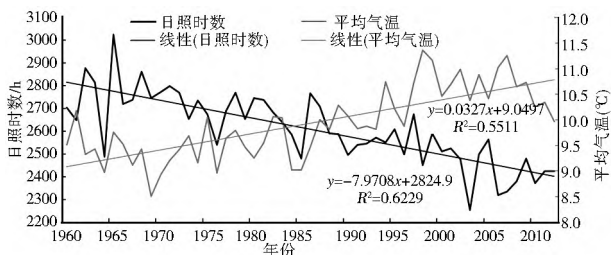


图 2 1960-2012 年海河流域日照时数和平均气温年际变化
Fig. 2 Annual variations of sunshine hours and average temperature in Haihe Catchment during 1960-2012

3.2 潜在蒸散量季节变化趋势分析

为进一步评估不同时间尺度上海河流域潜在蒸

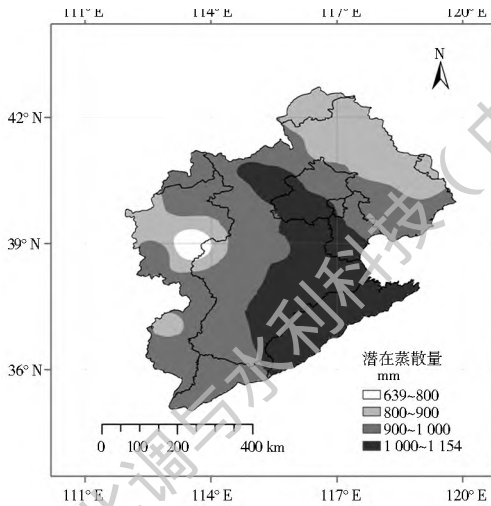


图4 1960-2012年海河流域潜在蒸散发空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of potential evapotranspiration in Haihe Catchment during 1960-2012

减少趋势普遍低于 -1 mm/a , 局部地区变化率超过 -2 mm/a , 这种趋势与太阳辐射在同一时期同一区域内显著减少趋势^[24]一致, 说明这个区域的潜在蒸散量普遍减少可能主要受太阳辐射减少(即全球变暗)的影响; 而西北山区潜在蒸散发变化率较小, 普遍维持在 $-1\sim 1\text{ mm/a}$ 之间, 局部地区如太行山区北部高海拔地区甚至出现潜在蒸散发增加的趋势, 最大变化率可达 4 mm/a , 这可能是因为太阳辐射在这个区域减少幅度较小, 而气温在整个流域均呈现显著上升趋势, 说明高海拔地区潜在蒸散发增加可能与全球范围内气温升高(即全球变暖)有关。

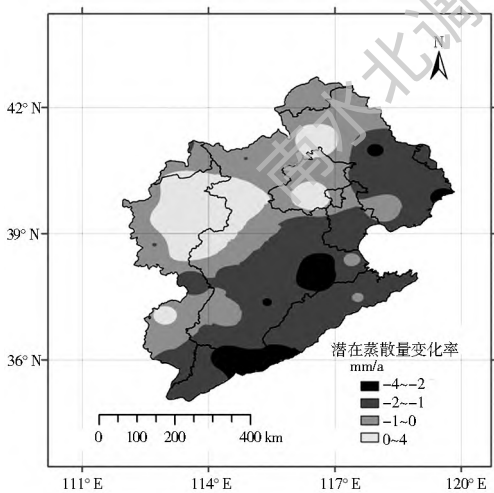


图5 1960-2012年海河流域潜在蒸散发变化率空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of potential evapotranspiration change rate in Haihe Catchment during 1960-2012

结合图4和图5可以发现, 蒸散发能力较强的区域, 如山前平原低纬度地区, 其潜在蒸散量显著减少且变化率较大; 而蒸散发能力较弱的区域, 如高海拔山区, 其潜在蒸散发变化率较小甚至转为增加趋

势。从整个流域来讲, 这种变化对水循环良性发展是有利的。潜在蒸散发是农田灌溉管理和作物需水量估算的重要参量, 海河流域是我国重要粮食产区之一, 山前平原是海河流域的粮食高产区, 其潜在蒸散量减少可能导致作物需水量减少, 这对水资源极为短缺的华北地区而言是非常有利的, 因此本研究的结果可作为海河流域水资源管理的重要科学基础。然而, 潜在蒸散发与地形、植被、土壤、大气以及实际蒸散量有着复杂的反馈机理, 它们之间的定量关系有待进一步探讨。

潜在蒸散发或蒸发皿蒸发量呈现下降趋势, 即蒸发悖论现象, 已经在世界各地引起广泛关注^[13], 本研究进一步验证了海河流域蒸发悖论现象的存在, 与鲍振鑫等^[15]的研究结论一致, 而且, 鲍振鑫等^[15]认为平均气温对海河流域蒸发皿蒸发量的增加作用要小于日照时数的减少作用, 这与本研究中太阳辐射对潜在蒸散发影响更大的结论也是一致的, 这个结论不仅体现在基于能量的算法误差更小, 还体现在占较大面积的山前平原区潜在蒸散发显著减少, 与太阳辐射在同一时期同一区域的减少趋势有关。另外, 刘小莽等^[24]发现潜在蒸散发对太阳辐射和气温的敏感程度都有增大的趋势, 这说明在全球变暖和全球变暗的复合影响下, 海河流域的潜在蒸散发将来的变化率可能更大, 说明有必要进一步定量研究各个气候因子对潜在蒸散量的贡献, 为气候变化背景下流域水资源规划和管理提供重要的科学依据。

4 结论

(1) 引入基于能量的算法、基于温度的算法和基于空气动力学的算法3种简单计算模型估算海河流域潜在蒸散发, 以Penmar Monteith模型结果为基准, 根据平均绝对误差和平均相对误差评估模型适用性, 结果表明基于能量的算法最接近于Penmar Monteith模型估算结果, 故该模型最适用于资料不足情况下估算海河流域的潜在蒸散。

(2) 1960-2012年海河流域潜在蒸散总体上呈显著下降趋势, 平均下降速率为 2.04 mm/a , 该趋势与全球范围内蒸发悖论相符。海河流域潜在蒸散量在4个季节均呈现显著减少趋势, 其中夏季减少幅度较大, 冬季减少幅度最小。

(3) 从空间分布来看, 海河流域潜在蒸散发呈现从西北地区到东南地区阶梯式上升趋势。受全球变暗和全球变暖的复合影响, 大部分地区在1960-2012年时间范围发生潜在蒸散发减少现象, 其中山

前平原区减少趋势最为明显, 而太行山区北部高海拔地区潜在蒸散发呈现增加的趋势。

参考文献(References):

- [1] MAIDMENT D R. Handbook of hydrology[M]. R. R. Donnelley & Sons Company, New York, USA, 1993.
- [2] 刘胜娅, 王会肖, 王艳阳, 等. 北京市潜在蒸散发量的时间序列变化特征分析[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(4): 13-16. (LIU S Y, WANG H X, WANG Y Y, et al. Variation characteristics analysis of time series of potential evapotranspiration in Beijing[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(4): 13-16. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2013.04013.
- [3] 胡雪瑛, 武胜利, 刘强吉, 等. 54 年来和田地区潜在蒸散量的变化特征及影响因素[J]. 水土保持研究, 2017(1): 145-150. (HU X Y, WU S L, LIU Q J, et al. Variation characteristics and influence factors of potential evapotranspiration in Hotan region in recent 54 years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017(1): 145-150. (in Chinese)) DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.20160918.001.
- [4] RODERICK M L, FARQUHAR G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years[J]. Science, 2002, 298(15): 1410-1411. DOI: 10.1126/science.1075390-a.
- [5] LIU B, XU M, HENDERSON M, et al. A spatial analysis of pan evaporation trends in China, 1955-2000[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984-2012), 2004, 109: D15102. DOI: 10.1029/2004JD004511.
- [6] LAW RIMORE J H, PETERSON T C. Pan evaporation trends in dry and humid regions of the United States[J]. Journal of Hydrometeorology, 2000, 1(6): 543-546. [http://dx.doi.org/10.1175/1525-7541\(2000\)001<0543:PETIDA>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1525-7541(2000)001<0543:PETIDA>2.0.CO;2).
- [7] BURN D H, HESCH N M. Trends in evaporation for the Canadian Prairies[J]. Journal of Hydrology, 2007, 336(1): 61-73. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.12.011>.
- [8] CHATTOPADHYAY N, HULME E M. Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1997, 87(1): 55-73. [http://dx.doi.org/10.1016/S0168-1923\(97\)00006-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-1923(97)00006-3).
- [9] MORATIEL R, DURAN J M, SNYDER R L. Responses of reference evapotranspiration to changes in atmospheric humidity and air temperature in Spain[J]. Climate Research, 2010, 44(1): 27-40. <https://doi.org/10.3354/cr00919>.
- [10] RODERICK M L, FARQUHAR G D. Changes in Australian pan evaporation from 1970 to 2002[J]. International Journal of Climatology, 2004, 24(9): 1077-1090. DOI: 10.1002/joc.1061.
- [11] RODERICK M L, FARQUHAR G D. Changes in New Zealand pan evaporation since the 1970s[J]. International Journal of Climatology, 2005, 25(15): 2031-2039. DOI: 10.1002/joc.1262.
- [12] 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. [http://dx.doi.org/10.1016/S0168-1923\(02\)00016-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00016-3).
- [13] 丛振涛, 倪广恒, 杨大文, 等. "蒸发悖论" 在中国的规律分析[J]. 水科学进展, 2008, 19(2): 147-152. (CONG Z T, NI G H, YANG D W, et al. Evaporation paradox in China[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(2): 147-152. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1001-6791.2008.02.001.
- [14] 祁添垚, 张强, 王月, 等. 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, 2015(12): 1599-1606. (QI T Y, ZHANG Q, WANG Y, et al. Spatiotemporal patterns of pan evaporation in 1960-2005 in China: Changing properties and possible causes[J]. Scientia Geographica Sinica, 2015(12): 1599-1606. (in Chinese))
- [15] 鲍振鑫, 严小林, 王国庆, 等. 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, 2014(3): 1-7. (BAO Z X, YAN X L, WANG G Q, et al. Mechanism of effect of meteorological factors in paradox theory of pan evaporation of Haihe River basin[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2014(3): 1-7. (in Chinese)) DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2014.03.01.
- [16] 姜姗姗, 占车生, 王会肖, 等. 地下水开采对海河流域水循环过程影响的模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(4): 54-59, 98. (JIANG S S, ZHAN C S, WANG H X, et al. Simulation of the impacts on water cycle by groundwater exploitation in the Haihe River Basin[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(4): 54-59, 98. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2016.04.009.
- [17] 马雪宁, 张明军, 王圣杰, 等. "蒸发悖论" 在黄河流域的探讨[J]. 地理学报, 2012(5): 645-656. (MA X N, ZHANG M J, WANG S J, et al. Evaporation paradox in the Yellow River Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2012(5): 645-656. (in Chinese))
- [18] 赵玲玲, 夏军, 许崇育, 等. 水文循环模拟中蒸散发估算方法综述[J]. 地理学报, 2013, 68(1): 127-136. (ZHAO L L, XIA J, XU C Y, et al. A review of evapotranspiration estimation methods in hydrological models[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(1): 127-136. (in Chinese))
- [19] XU C Y, SINGH V E. Evaluation and generalization of radiation-based methods for calculating evaporation[J]. Hydrological Processes, 2000, 14(2): 339-349. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1085(20000215)14:2<339::AID-HYP928>3.0.CO;2-O.
- [20] XU C Y, SINGH V P. Evaluation and generalization of temperature-based methods for calculating evaporation[J]. Hydrological Processes, 2001, 15(2): 305-319. DOI: 10.1002/hyp.119.
- [21] SINGH V P, XU C Y. Evaluation and generalization of 13 equations for determining free water evaporation[J]. Hydrological Processes, 1997, 11(3): 311-323. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1085(19970315)11:3<311::AID-HYP446>3.0.CO;2-Y.
- [22] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements FAO irrigation and drainage paper 56[M]. Rome: FAO, 1998.

(下转第 65 页)

- [12] 徐珊,夏丽华,陈智斌,等.基于生态足迹法的广东省水资源可持续利用分析[J].南水北调与水利科技,2013,11(5):11-15. 98. (XU S, XIA L H, CHEN Z B, et al. Analysis of sustainable utilization of water resources in Guangdong Province based on ecological footprint theory[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(5): 11-15, 98. (in Chinese))
- [13] 郑泳杰,张强,张生,等.基于信息熵的淮河流域降水时空变异特征研究[J].水电能源科学,2016(1):1-5. (ZHENG Y J, ZHANG Q, ZHANG S, et al. Entropy-based investigation on variability of precipitation in Huaihe River Basin[J]. Water Resources and Power, 2016(1): 1-5. (in Chinese))
- [14] 郭鹏,邹春辉,王旭.淮河流域水资源与水环境问题及对策研究[J].气象与环境科学,2011(S1):96-99. (GUO P, ZHOU C H, WANG X. Study on the problems and solutions of water resources and water environment in the Huaihe Basin[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2011(S1): 96-99. (in Chinese)) DOI: 10.16765/j.cnki.1673-7148.2011.s1.012.
- [15] 王振龙.淮河流域水资源问题与建议[J].水利水电技术,2011(8):78-81. (WANG Z L. Issues of water resources in Huaihe River Basin and relevant suggestions[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011(8): 78-81. (in Chinese)) DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2011.08.009.
- [16] 刘友春,何庆平,闫芳阶,等.山东省淮河流域洪水资源利用思路探讨[J].南水北调与水利科技,2014,12(2):25-28,40. (LIU Y C, HE Q P P, YAN F J, et al. Discussion on flood resources utilization in Huaihe River Basin of Shandong Province based on network construction[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(2): 25-28, 40. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbddqk.2014.02.006.
- [17] 王翔.淮河流域及山东半岛水资源综合规划概要[J].中国水利,2011(23):112-114. (WANG X. Summary of Huaihe River Basin and Shandong peninsula integrated water resource plan[J]. China Water Resources, 2011(23): 112-114. (in Chinese))
- [18] 许应石,李长安,张中旺,等.湖北省水资源短缺风险评价及对策[J].长江科学院院报,2012(11):5-10. (XU Y S, LI C A, ZHANG Z W, et al. Risk assessment of water shortage of Han River Drainage in Hubei Province[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012(11): 5-10. (in Chinese))
- [19] 田华,杨明华.河南省浅层地下水动态演变分析[J].人民黄河,2012(3):45-46,51. (TIAN H, YANG M H. Analysis of development of shallow groundwater trend in Henan Province[J]. Yellow River, 2012(3): 45-46, 51. (in Chinese))
- [20] 刘俊阁,张金萍.河南省2008年水足迹分析[J].人民黄河,2011(9):62-64. (LIU J G, ZHANG J P. Analysis of water footprint of Henan Province in 2008[J]. Yellow River, 2011(9): 62-64. (in Chinese))

(上接第16页)

- [23] 金菊良,宋占智,蒋尚明,等.基于云模型的淮北平原参考作物蒸散量时空分布[J].南水北调与水利科技,2017(1):1-8. (JIN J L, SONG Z Z, JIANG S M, et al. Characteristics analysis of temporal-spatial potential evapotranspiration distribution in Huaibei plain based on cloud model[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017(1): 1-8. (in Chinese))
- [24] 刘小莽,郑红星,刘昌明,等.海河流域潜在蒸散的气候敏感性分析[J].资源科学,2009,31(9):1470-1476. (LIU X M, ZHENG H X, LIU C M, et al. Sensitivity of the potential evapotranspiration to key climatic variables in the Haihe River Basin[J]. Resources Science, 2009, 31(9): 1470-1476. (in Chinese))
- [25] HARGREAVES G H. Moisture availability and crop production[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers ASAE, 1975, 18(5): 980-984.
- [26] BLANEY H F, CRIDDLE W D. Determining water requirements in irrigated area from climatological irrigation data [M]. US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Tech, 1950, 96: 48.
- [27] ROHWER C. Evaporation from free water surface[R]. US Department of Agriculture, Economic Research Service, 1931.
- [28] 邹磊,夏军,马细霞,等.潜在蒸散发量估算方法在河南省的适用性分析[J].水文,2014,34(3):17-23. (ZOU L, XIA J, MA X X, et al. Applicability of potential evapotranspiration methods in Henan province[J]. Journal of China Hydrology, 2014, 34(3): 17-23. (in Chinese))