

Long-Term Land Surface Evaporation and Its Changes Estimated by the Generalized Complementary Principle in China

Qu Li, Lei Cheng*, Linyuan Ye, Pan Liu, Lihua Xiong

Hubei Provincial Key Laboratory of Water System Science for Sponge City Construction, State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan Hubei
Email: *lei.cheng@whu.edu.cn

Received: Mar. 25th, 2020; accepted: Apr. 27th, 2020; published: May 25th, 2020

Abstract

Estimation of regional evaporation is one of the major challenges in hydrology and water resources management. In this paper, the applicability of the latest generalized complementary principle (GCR) is tested in China. Based on the China Meteorological Forcing Dataset (CMFD), long-term land surface daily actual evaporation in the past 37 years (1979~2015) is estimated using the GCR with a spatial resolution of 0.1°. Results show that the latest GCR established at the global scale performs well in China. The mean R^2 and root-mean-square error (RMSE) between the observed and estimated evaporation are 0.62 (0.39~0.83) and 1.04 (0.69~1.62) mm d⁻¹ at 9-flux stations, respectively. The 37-year mean annual evaporation of China estimated by GCR is 486.24 mm. Both spatial distribution and magnitude of estimated evaporation are well consistent with the other six independent evaporation products. Estimated evaporation indicates that land surface evaporation has increased significantly during the period of 1979~2015 with a rate of 1.33 mm a⁻¹. This study provides a method and data set for regional evaporation in China, which can support regional water cycle research and water resource management.

Keywords

Evaporation, Generalized Complementary Principle, Water Cycle Change Trend

基于广义蒸发互补关系的中国长期陆面蒸发量及其变化分析

李 曲, 程 磊*, 叶林媛, 刘 攀, 熊立华

武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北省海绵城市建设水系统科学重点实验室, 湖北 武汉
Email: *lei.cheng@whu.edu.cn

作者简介: 程磊(1982-), 湖北丹江口人, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事生态水文方向研究。
*通讯作者。

摘要

准确估算区域蒸发是水文与水资源领域的重大挑战之一。评估了广义蒸发互补关系在中国区域的适用性，基于中国区域高时空分辨率地面气象要素数据集，估算了中国过去37年(1979~2015年)时空分辨率分别为日和 0.1° 的蒸发量。研究表明，在全球建立的广义蒸发互补关系在中国区域通量站点模拟效果良好：9个站点观测值与实测值线性拟合 R^2 的均值为0.62 (0.39~0.83)，RMSE均值为1.04 (0.69~1.62) mm d⁻¹。由此估算的中国多年平均年蒸发量为486.24 mm，其空间分布特征及其大小与其他6种独立估算的蒸发产品和其他人在不同区域的研究结果一致。广义互补关系估算的蒸发结果显示在1979~2015年间中国蒸发量呈增加趋势，增加速率为1.33 mm a⁻¹。本文提供了一种中国区域蒸发估算方法和数据，可为区域水循环研究和水资源管理提供支撑。

关键词

蒸发，广义互补理论，水循环变化趋势

Copyright © 2020 by author(s) and Wuhan University.

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

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



Open Access

1. 引言

陆面蒸发约消耗了全球陆地 70%的降水和 60%的太阳入射能量[1]，是连接水循环和能量分配的核心变量。气候变化背景下，地球的水循环和能量分配都发生改变[2]，准确地估算陆地蒸发的长期变化对研究水循环、能量分配变化和评估未来气候变化具有十分重要的意义。随着中国人口的增长和经济高速发展的影响，人类活动深刻改变了下垫面条件和区域的水循环过程，给流域水循环模拟和需要下垫面信息来估算区域蒸发的方法带来了极大的挑战。

自 1802 年以来，蒸发的计算经过了 Dalton 蒸发计算公式、Penman 公式、Penman-Monteith 公式等发展，随着研究的不断深入，人们对微观尺度上蒸发过程和机理的认识不断完善。并且在田间尺度均一下垫面蒸发的测定也已有公认的方法，但是非均匀区域的蒸发研究目前仍是一个难点[3]。目前估算区域蒸发的主要方法，如 Penman-Monteith 方法和基于遥感反演蒸发的方法，不仅需要基于遥感获取的区域植被和辐射数据作为模型输入，而且需要下垫面特征参数和地面气象观测信息进行模型标定[4] [5] [6] [7]，难以准确地估算区域蒸发的长期变化趋势[4] [5]。越来越多的研究表明，基于区域蒸发与大气系统耦合关系而建立的蒸发互补理论，只依赖于地面常规气象观测资料，在准确估算区域长期蒸发及其趋势、及水文循环变化方面有巨大潜力[8]。自 1963 年 Bouchet 提出蒸发互补理论以来，经过半个多世纪的发展，蒸发互补理论不断被证明是一种有较强物理机制的蒸发理论[9] [10] [11] [12]。在过去的十多年里，对称的线性蒸发互补理论逐渐发展成非对称非线性的区域蒸发互补理论[12] [13] [14] [15] [16]。2015 年，在 Han 等[15]平流 - 干旱模型的基础上，结合蒸发互补理论的四个物理边界条件，Brutsaert [17]推导出了广义蒸发互补关系(Generalized Complementary Principle, GCR)，该关系被证实能够很好地估算区域蒸发量[18] [19]。但 GCR 中所含参数的时空变异性限制了其在更广泛区域上的应用。自 2015 年以来，许多学者致力于在全球尺度上推广广义蒸发互补理论的应用，并取得了一系列突破[12] [20]。Brutsaert 等人[20]在全球 500 多个流域上得到了适用于全球的广义蒸发互补关系。

GCR 方法仅需要基本气象数据来估算实际蒸发, 不仅能够有效克服因人类活动改变对下垫面造成蒸发难以估算的问题, 而且方法输入数据少, 能够估算大范围长期的实际蒸发。当前, 覆盖中国范围的蒸发展品, 大多时空分辨率较粗, 计算复杂, 而且不确定性较高。而基于互补理论的蒸发研究, 大多聚焦于某一区域或一些典型流域[21][22], 在全国范围内进行应用的研究较少。

因此, 本文在 Brutsaert 等人[20]最新研究的基础上, 验证并评估最新的广义蒸发互补关系在中国区域的适用性, 应用其在全球建立的 0.5°空间分辨率的广义蒸发互补关系来估算中国区域高时间(日尺度)和高空间(0.1° × 0.1°)分辨率的长期(1979~2015 年)实际蒸发, 探讨中国区域近 40 年来蒸发的变化趋势, 为估算中国区域长期蒸发和水循环研究提供借鉴。

2. 数据和方法

2.1. 研究方法

蒸发互补关系由 Bouchet [23]在 1963 年提出, 半个世纪以来, 已发展为估算区域蒸发的基础理论之一。蒸发互补理论能够解释陆面蒸发和大气系统之间的耦合关系, 比如: 当干热空气团经过充分供水的区域上方时, 陆面实际蒸发量会增加, 而空气团的潜在蒸发能力会降低。该理论描述了不同条件下定义的三种蒸发之间的关系。第一种蒸发是区域的实际蒸发(Actual Evapotranspiration), 记为 E ; 第二种是区域充分供水条件下发生的蒸发, 称为潜在蒸发(Potential Evapotranspiration)记为 E_{po} ; 第三种是实际条件下, 区域内一个小饱和表面上发生的蒸发, 可用蒸发皿测得, 称为表观潜在蒸发(Apparent Potential Evapotranspiration), 记为 E_{pa} 。

在水分充足的条件下, 所有的净辐射均由蒸发转化为潜热, 实际蒸发 E 、表观潜在蒸发 E_{pa} 与潜在蒸发 E_{po} 相等, 即: $E = E_{po} = E_{pa}$; 在水分亏缺时, 实际蒸发 E 减小, 部分未被蒸发耗散的净辐射将转化为显热而使得表观潜在蒸发 E_{pa} 增加, 三者之间关系为: $E < E_{po} < E_{pa}$ 。

2015 年 Brutsaert 基于四个边界条件, 推导出了广义的蒸发互补关系[17], 该关系表示为:

$$E = \left(\frac{E_{po}}{E_{pa}} \right)^2 (2E_{pa} - E_{po}) \quad (1)$$

Brutsaert 等人最新的研究中[20]指出当只有实际环境条件的可用信息和测量值时, E_{po} 很难估计, 因此建议在实际应用中, 采用更灵活的形式表示潜在蒸发, 即 $\alpha_c E_e$, 其中 α_c 为蒸发互补关系的参数, E_e 为平衡蒸发(Equilibrium Evaporation), 其如下:

$$E_e = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} Q_{ne} \quad (2)$$

式中: Δ 为饱和水气压随气温变化的斜率, 单位 $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$; γ 是湿度计常数, 单位 $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$; Q_{ne} 是可用能量, $Q_{ne} = (R_n - G)/L_e$, 用水深单位表示, R_n 为净辐射, G 为土壤热通量, L_e 为蒸发潜热。表观潜在蒸发 E_{pa} 可以用多种方法获得, 本文使用 Penman 公式进行估算, 即:

$$E_{pa} = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(u_2) D \quad (3)$$

式中: $f(u_2)$ 是风函数; u_2 是地面 2 m 的平均风速, 单位 m s^{-1} ; D 是地面 2 m 的饱和水气压差, 单位 hPa , 其余符号意义与式(2)相同。在(2)、(3)中, E_{po} 和 E_{pa} 用单位面积水深表示, 即 mm day^{-1} 。从式(2)和(3)中可以看出, 除常规气象观测变量(u_2 , R_n 和 G , D)及其他可以直接估算的参数(Δ , γ)之外, 蒸发互补理论还有两个参数需要确定, 即式(3)中风函数 $f(u_2)$ 和式(2)中的参数 α_c 。

风函数 $f(u_2)$ 采用 Penman 推荐式, 即: $f(u_2) = 0.26(1 + 0.54u_2)$, 式(2)中的参数 α_c , 采用 2020 年 Brutsaert

等在全球 500 多个流域数据基础上建立的统计模型[20], 即: $\alpha_c = 1.496 / \left(1 + (0.2948AI)^{0.6697}\right)$ 进行计算, 式中 AI 为干旱指数, 是年潜在蒸发量(E_{pa})与年降水量(P_{rain})的比值。对于干旱指数的计算, 本文也沿用 Brutsaert [20] 的计算方式, 即使用基于降雨的干旱指数, 即:

$$AI = E_{pa} / P_{rain} \quad (4)$$

式中: 降雨量(P_{rain})与月降水量之间的关系为: $P_{rain} = \left(1 + a \left\{ \tanh \left[b(T_a - c) \right] - d \right\} \right)$, 其中 $a = 0.496$, $b = 0.215$, $c = 0.622$, $d = 0.958$, T_a 为月平均温度, 当 T_a 小于 -8°C 时, P_{rain} 为 0, 当 T_a 大于 6°C 时, P_{rain} 等于 P 。基于以上方法, 利用中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集作为输入, 可以不需要率定参数而估算出中国的实际陆面蒸发。

2.2. 研究数据

本文估算实际蒸发所使用的气象数据为中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集(China Meteorological Forcing Dataset, CMFD, <http://westdc.westgis.ac.cn>), 该数据集包含近地面气温、近地面气压、近地面空气比湿、近地面风速、地面向下短波辐射、地面向下长波辐射、地面降水率 7 个要素。CMFD 是中国科学院青藏高原研究所开发的一套近地面气象与环境要素再分析数据集[25], 其时间分辨率为 3 小时, 空间分辨率 0.1° 。该数据集以国际上现有的资料为基础, 融合了中国气象局常规气象观测数据, 精度好于已有的其他再分析数据。

本文搜集中国区域 9 个通量站数据和 6 种可以公开获取并广泛应用的蒸发产品数据对广义蒸发互补关系进行验证和比较分析。用于验证互补理论合理性所使用的站点数据是来自国家生态系统观测研究网络(CNERN)的共享通量站观测数据(<http://www.chinaflux.org/>), 该数据包括西双版纳、长白山、鼎湖山等 9 个通量观测站日通量观测值和常规气象观测资料, 站点信息见表 1。考虑到广泛存在于通量观测系统的能量平衡不闭合问题, 在使用通量数据时, 使用波温比法对观测通量进行能量平衡闭合处理, 将处理后的潜热通量作为实际蒸发的真值与互补理论估算结果进行比较。在站点对比分析中, GCR 方法的输入为站点的气象观测数据, 用观测值与估算值的均方根误差(RMSE)和线性拟合 R^2 作为评价指标。本文搜集的 6 种蒸发产品数据包括 E_{GLEAM} 、 E_{MTE} 、 E_{PML} 、 E_{ERA} 、 E_{MERRA} 和 E_{MTE-WB} 。 E_{GLEAM} (Global Land Evaporation Amsterdam Model)是一种遥感诊断蒸发产品, 该产品最大限度地使用了当前气候和环境卫星数据产品[24]。本文中使用的数据是 V3a 版本, 其时间跨度为 1980-2012 年, 水平空间分辨率 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。 E_{MTE} 是基于模型树集合方法(Model Tree Ensemble, MTE)将全球通量站网的观测数据升尺度到全球范围[26], 该数据包含 1982~2011 年的全球月蒸发, 空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。 E_{PML} 采用 Penman-Monteith-Leuning (PML)模型估测的过去 30 年陆面日蒸发产品[27], 该数据产品时间覆盖 1981~2012, 空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。 E_{MERRA} 是由 NASA 的再分析产品[28], 包含 1980~2014 年月蒸发数据, 空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。 E_{ERA} 是欧洲中期天气预报中心开发的全球大气再分析产品 ERA-Interim 同化数据[29], 产品包含全球 1979~2014 年的日蒸发数据, 空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。 E_{MTE-WB} 是基于模型集合树算法通过耦合水量平衡模型来估算的全球 1982~2013 年月蒸发数据[30], 空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。

3. 结果与讨论

3.1. 蒸发互补理论站点验证

广义蒸发互补理论的估算蒸发与 9 个通量站点的日尺度观测数据比较结果如图 1 所示, 站点信息和评价指标见表 1。从图 1 和表 1 可以看出, 蒸发互补理论模拟效果良好。在 9 个站点之中, 观测值与估算值的线性拟合 R^2 平均为 0.62, 最小为 0.39, 最大 0.83, 其中有 6 个站点在 0.53 以上。其中长白山、海北灌丛、千烟洲站的模拟效果很好, R^2 在 0.73 以上, 且估算值与观测值的回归系数在 0.83 到 1.12 之间, 估算值十分接近观测值; 相对而言, 西双版纳、禹城的模拟效果稍差, R^2 分别为 0.43、0.39。且所有观测值与估算值的均方根误差值均小于 1.62 mm d^{-1} , 9 个站点 RMSE 均值为 1.04 mm d^{-1} , 分布区间为 $0.69\sim 1.62 \text{ mm d}^{-1}$, 估算结果

可信。因此，在全球建立的蒸发互补关系在中国区域的通量站点的模拟结果良好，能够用来估算中国区域的日值蒸发量。

Table 1. Basic information and statistics of performance of the flux stations used in this paper
表 1. 本文用于验证的通量站点基本信息及评估指标

站点	生态系统类型	气候类型	经度	纬度	多年平均气温(°C)	降水量(mm)	R ²	RMSE (mm d ⁻¹)
西双版纳	热带雨林	热带季风气候	21°55'39"	101°15'55"	21.8	1493	0.43	1.39
长白山	温带针阔混交林	温带大陆性气候	42°24'9"	128°5'45"	3.6	713	0.73	0.81
鼎湖山	常绿阔叶林	亚热带季风湿润气候	23°10'24"	112°32'3.8"	20.9	1956	0.53	1.29
当雄	草甸	高原季风气候	30°29'50.21"	91°3'58.90"	1.3	450	0.70	1.04
海北灌丛	草甸	高原大陆性气候	37°39'54.6"	101°19'52.2"	-1.2	535.2	0.83	0.77
海北沼泽	草甸	高原大陆性气候	37°36'30.6"	101°19'38.4"	-1.2	535.2	0.56	0.95
内蒙古	温带典型草原	温带半干旱草原气候	43°19'31.8"	116°24'14.4"	-5.3	338	0.61	0.69
千烟洲	人工林	亚热带季风气候	26°44'29.1"	115°3'29.2"	17.9	1542.4	0.81	0.83
禹城	旱作农田	温带半湿润	36°49'44.4"	116°34'12.72"	13.1	582	0.39	1.62

进一步分析发现互补理论估算结果偏离观测值的情况与站点通量系统能量平衡不闭合情况相关。经过能量闭合校正后站点观测系统的能量闭合满足程度越好(如长白山、鼎湖山、千烟洲, 能量平衡校正拟合 R² 分别为 0.84、0.83、0.0.85), 互补理论的模拟效果越好; 反之, 观测系统的能量闭合满足程度差(如西双版纳和禹城, 能量平衡校正拟合 R² 分别为 0.49、0.68), 互补理论的模拟效果也较差。在能量平衡闭合效果差的站点, 净辐射通量与潜热、显热通量之和线性拟合的 R² 小, 数据离散, 大量偏离拟合线的观测值无法被有效校正, 能量闭合校正取得的效果有限, 观测数据的精度不能得到保障。

3.2. 多年平均蒸发的空间分布特征

采用 Brutsaert 等人[20]建立的广义蒸发互关系, 基于中国高精度气象场数据(CMFD)论估算了中国 1979~2015 年日尺度实际陆面蒸发量(记为 E_{GCR}), 多年平均陆面实际蒸发量空间分布如图 2 所示。互补理论估算结果表明中国 1979~2015 年多年平均年蒸发量为 482.64 mm, 在七大分区中, 东北、华北、华东、华南、华中、西北、西南分别为 449.87 mm、322.64 mm、807.73 mm、1049.92 mm、822.8 mm、246.99 mm、610.08 mm。从图 2 中可以看出, 在空间上, 中国年蒸发量自东南向西北递减, 蒸发量最低的地区在新疆塔里木盆地(<50 mm a⁻¹), 蒸发量最大的地区在海南岛(约 1300 mm a⁻¹)。

图 3 表示了互补理论估算蒸发量与其余六种蒸发产品在中国 7 大分区的多年平均年蒸发量的比较, 图中误差线的上下限分别为均值加、减年蒸发量方差。在中国 7 大分区中, 西北地区年蒸发量最小, 不到 300 mm a⁻¹, 而华南地区蒸发量最大, 大于 1000 mm a⁻¹。从 E_{GCR} 蒸发的方差范围来看, 互补理论的估算结果离散程度较小。从图中可以看出, 不论是在全国还是在七大分区中, 互补理论估算结果的大小处于其他六种产品所确定的区间内, 其结果与前人的研究有较好的一致性。

互补理论的估算结果在区域内的分布和区域平均值大小与已有的研究成果相符, LIU 等人[12] 2016 年在文章中报道的中国东部蒸发估算结果在空间上从南向北递减, 年均值从南部沿海的 1318 mm a⁻¹ 减少至黑龙江与内蒙古北部的 236 mm a⁻¹; 李婷婷[31]利用遥感模型对黄淮海地区陆面蒸发进行了反演, 其分布与互补理论估算结果分布相近。徐兴奎[32]利用遥感反演参数和气象观测数据计算西北地区蒸发, 其空间分布与年值量级互补理论估算结果一致。

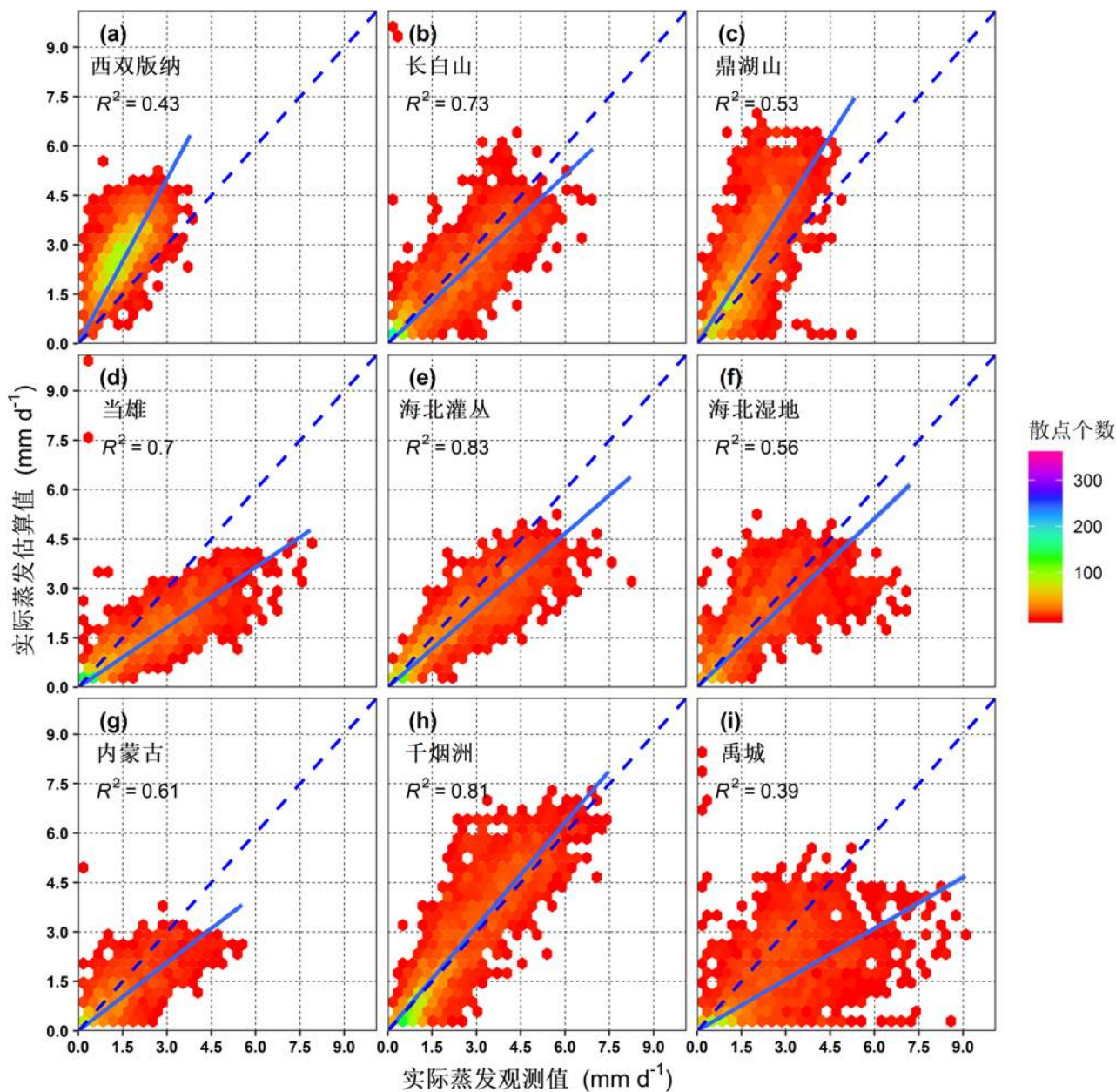


Figure 1. Hexagonal binning plots showing the comparison between estimated evaporation using the GCR method and observed evaporation using the eddy covariance technique at 9 flux stations. Color of hexagon indicates the number of points

图 1. 广义蒸发互补关系估算的日蒸发量与通量站点观测值比较散点图。图中六边形的颜色显示在该区域散点的个数

3.3. 蒸发年际波动特征及趋势比较分析

将估算蒸发产品与广泛使用的蒸发产品进行比较, 探讨 1979~2015 年中国蒸发量的年际变化, 结果如图 4(a) 所示。由图 4(a) 可知, 全国范围内, 7 种产品在 2000 年前蒸发变化趋势一致, 均出现增加趋势, 在 2000 年后, E_{MERRAa} 、 E_{ERA} 、 E_{MTE_WB} 产品表现出明显地下降趋势, 而其余产品依然表现出上升趋势。图 4(b) 展现了七种产品 1982~2011 (共有时段) 年蒸发量年际波动的 CV 值, E_{GCR} 产品在全国的波动为 0.034, 小于 E_{PML} (CV 值为 0.04) 和 E_{MTE_WB} (CV 值为 0.059)。在华北、西北、东北、西南 E_{GCR} 产品波动较在全国更为剧烈(0.04~0.10), 而在华东、华中分区波动较小(小于 0.03)。与其他产品相比, 1979~2015 年间, GCR 产品在干旱、半湿润地区年蒸发

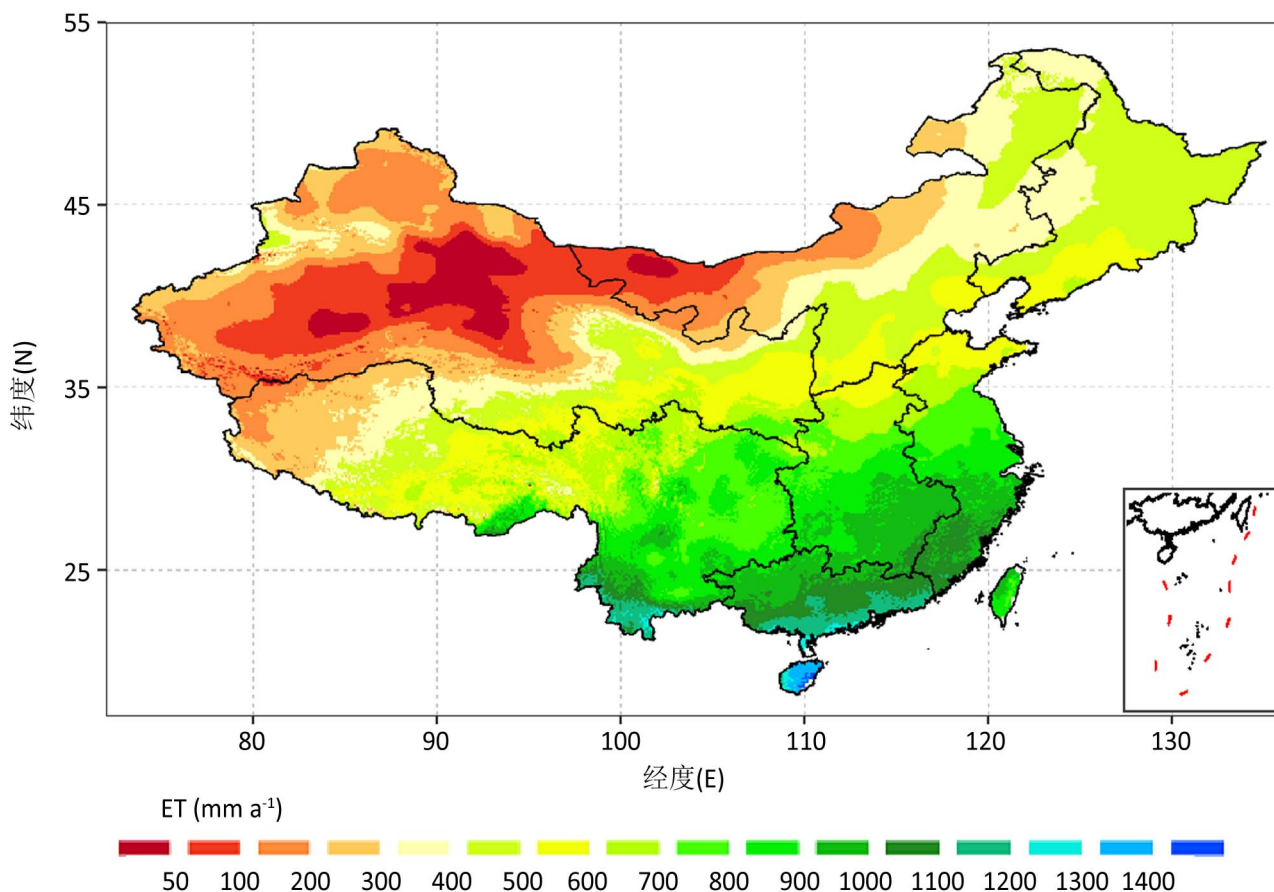


Figure 2. Estimated mean annual evaporation in China by the GCR method during the period of 1979~2015
图 2. 基于广义蒸发互补关系估算的中国多年平均(1979~2015 年)实际蒸发量空间分布

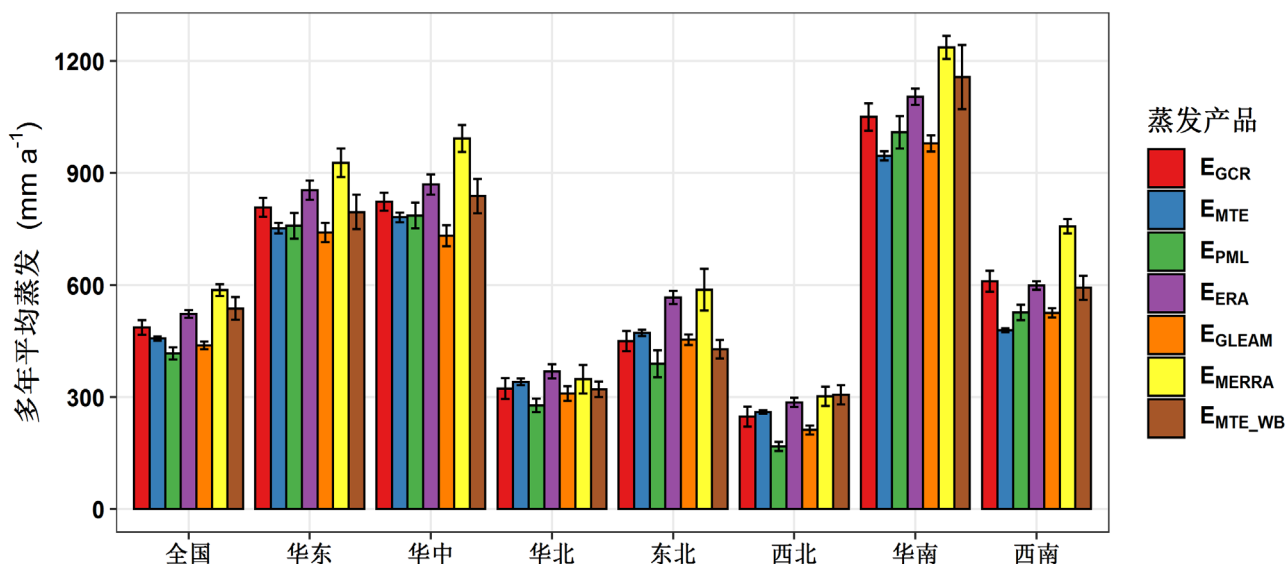


Figure 3. Bar and error-bar plots showing the comparison of mean annual evaporation estimated by the GCR method (E_{GCR}) with other six independent evaporation products in both China and seven regions of China. The error bar represents the standard deviation of annual evaporation
图 3. 广义蒸发互补关系估算的蒸发(E_{GCR})与其他 6 种独立估算的蒸发在中国及各分区多年平均实际年蒸发量比较图。误差线代表年蒸发量的标准差

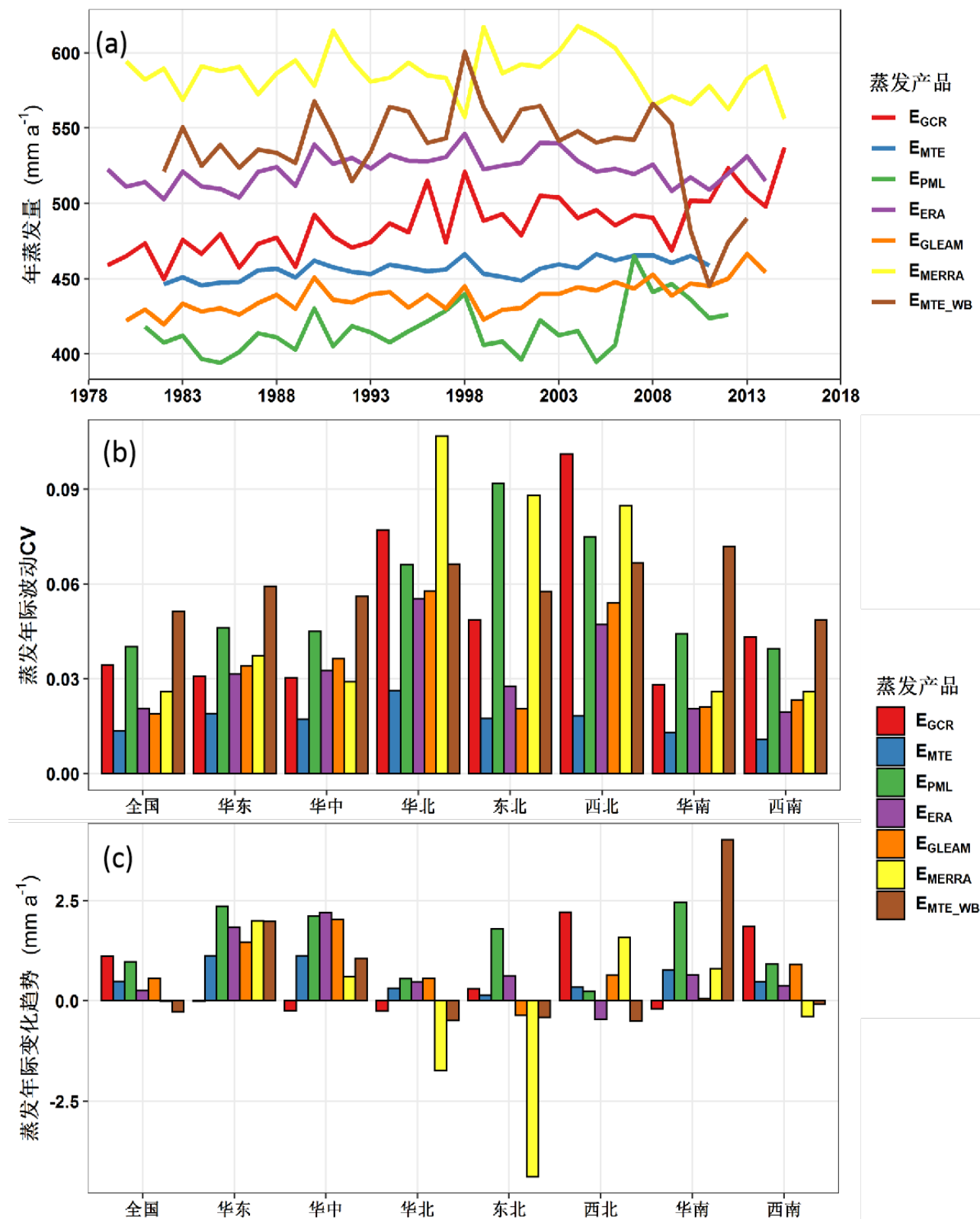


Figure 4. Comparison of the interannual fluctuation and trends of annual evaporation estimated by the GCR method (E_{GCR}) with the other six independent evaporation products

图 4. 广义蒸发互补关系估算的蒸发(E_{GCR})与其他 6 种独立估算的蒸发的年际波动特征及趋势性比较图

量波动较为剧烈,而在湿润地区的蒸发年际变化较小。图 4(c)展示了七种产品 1982~2011 年间蒸发的年际变化趋势的大小,多数产品(E_{PML} , E_{MTE} , E_{ERA} , E_{GCR} , E_{GLEAM})年蒸发量在各区域呈现增加趋势,增加速率与地区和产品有关($0.14\sim 2.46\text{ mm a}^{-1}$)。在全国范围内, E_{PML} 、 E_{MTE} 、 E_{ERA} 、 E_{GCR} 、 E_{GLEAM} 四种产品呈现增加趋势,其中,1982~2011 年,增加速率分别为 0.97, 0.48, 0.24, 1.11, 0.56 mm a^{-1} 。在整个时段(1979~2015 年)里 E_{GCR} 的增加速率为 1.33 mm a^{-1} 。在七大分区中,华北地区增加最少,增加速率低于 0.56 mm a^{-1} ,华中($0.65\sim 2.11\text{ mm a}^{-1}$)、华东($1.46\sim 2.35\text{ mm a}^{-1}$)地区增加较多。

图 4 比较了互补理论计算结果与其他产品的年际变化趋势和波动特征,结果表明 GCR 估算结果变化趋势与大多数产品一致,但是年际波动在华北、西北、东北地区比其他产品更为剧烈,而在华东、华中地区则表现得更为平稳。互补理论可以合理的估算蒸发的年际变化趋势,但年际波动的大小与地区有关。

4. 结论

高时空分辨率的蒸发数据是水循环模拟和水资源管理的基础之一。本文搜集了 9 个通量站的数据验证和评估了最新的广义蒸发互补关系在中国区域的适用性,基于中国区域高时空分辨率地面气象要素数据集,使用广义蒸发互补关系估算了中国 1979~2015 年日尺度陆面蒸发量。主要研究结论是:

1) 广义蒸发互补理论在中国区域通量站点模拟效果良好。在 9 个验证站点中,有 6 个站点观测值与估算值的线性拟合 R^2 在 0.53 以上。长白山、海北灌丛、千烟洲站的模拟 R^2 在 0.73 以上。在所有验证站点估算值与观测值的回归系数在 0.83 到 1.12 之间, RMSE 均值为 1.04 mm d^{-1} , 结果表明在全球建立的广义蒸发互补关系在中国模拟效果良好。

2) 基于广义蒸发互补关系估算了中国过去 37 年(1979~2015 年)时空分辨率分别为日和 0.1° 的蒸发产品(E_{GCR})。该产品显示中国多年平均年蒸发量为 486.24 mm , 在空间上,中国年蒸发量自东南向西北递减。空间分布特征及其大小与搜集的其他 6 种独立估算的蒸发产品和其他区域研究结果一致。

3) 在年际波动和趋势方面, E_{GCR} 与其他产品在全国和不同区域表现基本一致。在 1979~2015 年间, E_{GCR} 结果显示中国蒸发量呈增加趋势,增加速率为 1.33 mm a^{-1} 。

基金项目

国家自然科学基金(51879193; 41890822; 51961145104); 科技部重点研发项目(2017YFC1502503); 以及中央高校基本科研业务费专项资金资助(2042019kf0308)。

参考文献

- [1] TRENBERTH, K. E., FASULLO, J. T., KIEHL, J. T., et al. Earth's global energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90(3): 311-323. <https://doi.org/10.1175/2008BAMS2634.1>
- [2] ZHU, Z., PIAO, S., MYNENI, R. B., et al. Greening of the earth and its drivers. *Nature Climate Change*, 2016, 6(8): 791-795. <https://doi.org/10.1038/nclimate3004>
- [3] 莫兴国. 区域蒸发研究综述[J]. *水科学进展*, 1996(2): 180-185.
MO Xingguo. Review on regional evaporation. *Advances in Water Science*, 1996(2): 180-185. (in Chinese)
- [4] JIMENEZ, C., PRIGENT, C., MUELLER, B., et al. Global intercomparison of 12 land surface heat flux estimates. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116: D02102. <https://doi.org/10.1029/2010JD014545>
- [5] WANG, K., DICKINSON, R. E. A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability. *Reviews of Geophysics*, 2012, 50, RG2005. <https://doi.org/10.1029/2011RG000373>
- [6] MUELLER, B., HIRSCHI, M., JIMENEZ, C., et al. Benchmark products for land evapotranspiration: LandFlux-EVAL multi-data set synthesis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17(10): 3707-3720. <https://doi.org/10.5194/hess-17-3707-2013>
- [7] PEEL, M. C., MCMAHON, T. A. Estimating evaporation based on standard meteorological data progress since 2007. *Progress in Physical Geography*, 2014, 38(2): 241-250. <https://doi.org/10.1177/0309133314522283>

- [8] BRUTSAERT, W., PARLANGE, M. B. Hydrologic cycle explains the evaporation paradox. *Nature*, 1998, 396(6706): 30. <https://doi.org/10.1038/23845>
- [9] RAMIREZ, J. A., HOBBS, M. T., BROWN, T. C., et al. Observational evidence of the complementary relationship in regional evaporation lends strong support for Bouchet's hypothesis. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(15): L15401. <https://doi.org/10.1029/2005GL023549>
- [10] YANG, D., SUN, F., LIU, Z., et al. Interpreting the complementary relationship in non-humid environments based on the Budyko and Penman hypotheses. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(18): L18402. <https://doi.org/10.1029/2006GL027657>
- [11] HAN, S., HU, H., YANG, D., et al. A complementary relationship evaporation model referring to the Granger model and the advection-aridity model. *Hydrological Processes*, 2011, 25(13): 2094-2101. <https://doi.org/10.1002/hyp.7960>
- [12] LIU, X., LIU, C., BRUTSAERT, W., et al. Regional evaporation estimates in the eastern monsoon region of China: Assessment of a nonlinear formulation of the complementary principle. *Water Resources Research*, 2016, 52(12): 9511-9521. <https://doi.org/10.1002/2016WR019340>
- [13] KAHLER, D. M., BRUTSAERT, W. Complementary relationship between daily evaporation in the environment and pan evaporation. *Water Resources Research*, 2006, 42: W05413. <https://doi.org/10.1029/2005WR004541>
- [14] SZILAGYI, J. On the inherent asymmetric nature of the complementary relationship of evaporation. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34: L02405. <https://doi.org/10.1029/2006GL028708>
- [15] HAN, S., HU, H., TIAN, F., et al. A nonlinear function approach for the normalized complementary relationship evaporation model. *Hydrological Processes*, 2012, 26(26): 3973-3981. <https://doi.org/10.1002/hyp.8414>
- [16] AMINZADEH, M., RODERICK, M. L., OR, D., et al. A generalized complementary relationship between actual and potential evaporation defined by a reference surface temperature. *Water Resources Research*, 2016, 52(1): 385-406. <https://doi.org/10.1002/2015WR017969>
- [17] BRUTSAERT, W. A generalized complementary principle with physical constraints for land-surface evaporation. *Water Resources Research*, 2015, 51(10): 8087-8093. <https://doi.org/10.1002/2015WR017720>
- [18] ZHANG, L., CHENG, L., BRUTSAERT, W., et al. Estimation of land surface evaporation using a generalized nonlinear complementary relationship. *Journal of Geophysical Research*, 2017, 122(3): 1475-1487. <https://doi.org/10.1002/2016JD025936>
- [19] BRUTSAERT, W., LI, W., TAKAHASHI, A., et al. Nonlinear advection-aridity method for landscape evaporation and its application during the growing season in the southern Loess Plateau of the Yellow River basin. *Water Resources Research*, 2017, 53(1): 270-282. <https://doi.org/10.1002/2016WR019472>
- [20] BRUTSAERT, W., CHENG, L., ZHANG, L., et al. Spatial distribution of global landscape evaporation in the early twenty first century by means of a generalized complementary approach. *Journal of Hydrometeorology*, 2020, 21: 287-298. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-19-0208.1>
- [21] 李修仓. 中国典型流域实际蒸散发的时空变异研究[D]. 博士学位论文. 南京: 南京信息工程大学, 2013.
LI Xiucang. Spatio-temporal variation of actual evapotranspiration in the Pearl, Haihe and Tarim river basins of China. PhD Thesis. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [22] 余欣, 杨汉波, 吕华芳, 黄飞燕. 基于广义蒸发互补理论的塔里木河流域绿洲实际蒸散发变化及其归因分析[J]. *水利水电技术*, 2020(3): 1-17.
YU Xin, YANG Hanbo, LV Huafang, and HUANG Feiyan. Generalized evapotranspiration complementarity theory-based analysis on variation of actual evapotranspiration in oases of Tarim River basin and its attribution. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020(3): 1-17. (in Chinese)
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1757.TV.20191014.1634.008.html>
- [23] BOUCHET, R. J. Évapotranspiration réelle évapotranspiration potentielle, signification climatique. Wallingford: IAHS Publications, 1963, 62: 134-142.
- [24] MARTENS, B., MIRALLES, D. G., LIEVENS, H., et al. GLEAM v3: Satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture. *Geoscientific Model Development*, 2017, 10: 1903-1925. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-1903-2017>
- [25] HE, J., YANG, K., TANG, W. LU, H., QIN, J., CHEN, Y. Y., and LI, X. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China. *Scientific Data*, 2020, 7: 25. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0369-y>
- [26] JUNG, M. M., REICHSTEIN, H. A., MARGOLIS, A., CESCATTI, A. D., RICHARDSON, A. RAIN, M. A., et al. Global patterns of land-atmosphere fluxes of carbon dioxide, latent heat, and sensible heat derived from eddy covariance, satellite, and meteorological observations. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116: G00J07. <https://doi.org/10.1029/2010JG001566>
- [27] ZHANG, Y., PEÑA-ARANCIBIA, J. L., MCVICAR, T. R., CHIEW, F. H. S., VAZE, J., LIU, C., et al. Multi-decadal trends in global terrestrial evapotranspiration and its components. *Scientific Reports*, 2016, 6: 19124. <https://doi.org/10.1038/srep19124>
- [28] RIENECKER, M. M., SUAREZ, M. J., GELARO, R., et al. MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications. *Journal of Climate*, 2011, 24(14): 3624-3648. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00015.1>

-
- [29] DEE, D. P., UPPALA, S. M., SIMMONS, A. J., et al. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2011, 137(656): 553-597.
<https://doi.org/10.1002/qj.828>
- [30] ZENG, Z., PIAO, S., LIN, X., YIN, G., PENG, S., CIAIS, P., et al. Global evapotranspiration over the past three decades: Estimation based on the water balance equation combined with empirical models. *Environmental Research Letters*, 2012, 7(1): 014026. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/1/014026>
- [31] 李婷婷. 中国黄淮海地区土壤蒸发和植被蒸腾的遥感反演[D]. 硕士学位论文. 天津: 天津大学, 2014.
LI Tingting. Retrieval of evaporation and transpiration by using remote sensing model for Huang-Huai-Hai Region in China. Master's Thesis. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese)
- [32] 徐兴奎. 西北干旱和半干旱地区地表蒸发计算方法评估应用[J]. *气候与环境研究*, 2011, 16(3): 329-336.
XU Xingkui. Evaluation for a method of evapotranspiration in arid and semi-arid regions of northwest China. *Climatic and Environmental Research*, 2011, 16(3): 329-336. (in Chinese)