

几种蒸散产品在我国不同下垫面的适用性评估

侯鹏鹏^{1,2}

¹成都信息工程大学, 四川 成都

²泉州晋江国际机场, 福建 泉州

Email: 13880384434@163.com

收稿日期: 2020年10月6日; 录用日期: 2020年10月19日; 发布日期: 2020年10月26日

摘要

蒸散量(ET)是地球表面水循环研究的重要因素, 在能量循环、碳循环中也起到重要作用, 其数值大小与变化对区域农业发展及生态布局具有重大影响。本文将根据2004年到2010年FLUXNET、GLDAS、MERRA2三种蒸散模型分别对半湿润地区禹城、高寒草甸地区当雄、草原地区内蒙古和半干旱地区千烟州等空间上相隔较远的、不同类型的下垫面及气候条件的地区, 进行空间插值并于测站观测值相比较, 通过RMSE、 r 、BIAS三个指标分析了不同蒸散产品的蒸散量(ET)模拟值在中国不同区域的适用性。从而分析各蒸散产品的优劣势, 然后在此基础上利用最好的模型计算出全国蒸散量(ET)的平均值及其变化趋势。主要研究成果如下: 1) 基于空间插值法对禹城、当雄、内蒙古、千烟州四大区域内3种蒸散产品(FLUXNET、GLDAS、MERRA2)进行评估, 发现各产品模拟值差异较大、FLUXNET产品是综合表现最好的产品。2) 不同蒸散产品对春、冬两季的模拟较好, 对夏、秋两季的模拟较差。3) 中国地区的蒸散量分布呈现自南向北递减, 南方蒸散量大于北方的趋势。中国地区的蒸散量在纬度相同地区其ET平均值总体上呈自东部沿海向西部内地递减。有些地区ET平均值与其周围地区存在数量级上的差异, 产生这种现象有气候、地形等因素。

关键词

蒸散量, 蒸散模型, 涡动相关法

Applicability Evaluation of Several Evapotranspiration Products on Different Underlying Surfaces in China

Pengpeng Hou^{1,2}

¹Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan²Quanzhou Jinjiang International Airport, Quanzhou Fujian

Email: 13880384434@163.com

Received: Oct. 6th, 2020; accepted: Oct. 19th, 2020; published: Oct. 26th, 2020

Abstract

Evapotranspiration (*ET*) is an important factor in the study of the earth's surface water cycle. It also plays an important role in the energy cycle and carbon cycle. Its value and change have a significant impact on regional agricultural development and ecological layout. Based on FLUXNET, GLDAS and merra2 evapotranspiration models from 2004 to 2010, the spatial interpolation of different types of underlying surface and climatic conditions in Yucheng, Dangxiong of alpine meadow, Inner Mongolia of grassland and Qianyanzhou of semi-arid region are carried out by spatial interpolation, and the observed values are compared by *RMSE*, *r* and *BIAS*. The applicability of *ET* simulation values of different evapotranspiration products in different regions of China was analyzed. Based on the analysis of the advantages and disadvantages of each evapotranspiration product, the average value of national evapotranspiration (*ET*) and its change trend are calculated by using the best model. The main research results are as follows: 1) Three evapotranspiration products (FLUXNET, GLDAS and MERRA2) in Yucheng, Dangxiong, Inner Mongolia and Qianyanzhou were evaluated based on spatial interpolation method. It was found that the simulation values of FLUXNET, GLDAS and merra2 were quite different, and FLUXNET was the best product in comprehensive performance. 2) The simulation results of different evapotranspiration products were better in spring and winter than in summer and autumn. 3) The distribution of evapotranspiration in China is decreasing from south to north, and the evapotranspiration in South China is larger than that in North China. In general, the *ET* of evapotranspiration in China decreases from the eastern coast to the western inland in the same latitude. There is a difference of magnitude between the average *ET* value of some areas and its surrounding areas, which is caused by climate, topography and other factors.

Keywords

Evapotranspiration, Models, Eddy Covariance Method

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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

Open Access

1. 引言

近十几年来,随着地球整体环境的恶化,自然灾害发生的频率不断增加,极端天气现象也时有发生,对人类生活、经济发展、生态环境产生了很大的影响。而蒸散量作为其中的变化因素之一,对地表水循环、碳循环、能量循环等各因素都具有重大影响,也是干旱的影响因素之一。干旱是所有自然灾害中最严重的,也是最常见的[1][2]。其实干旱是所有自然灾害中最复杂也是人类最不了解的一种现象,通常它是由长时间的降水缺乏造成的,频率高、范围广、持续时间长[3]。据报道中国2019年南方地区夏秋冬连旱严重,全国因旱需生活救助人口增加65%,农作物受灾面积和直接经济损失分别减少22%和4%,虽然相比往年农作物受灾面积和经济损失有所减少,但仍造成也很大的直接经济损失。此外,根据国际灾

害数据库显示,干旱事件虽然只占全球所有自然灾害的 5%,但是其所影响的人口却达到了 30%,随着全球变暖,干旱造成的损失越来越大,因此也越来越受人们关注[4] [5]。

由于蒸散量对水、能量、碳循环和干旱等各方面的影响,所以对蒸散量的研究也是至关重要的,由于我国幅员辽阔,地势起伏受各种气候及地形的影响,所以现有模型对我国蒸散量的研究不能够做到一应俱全,不同模型具有不同的适用范围,只有因地制宜,才能够最好地模拟出正确的结果。

随着遥感技术和数据同化技术的发展,人们可以用遥感来获得大范围长时间序列的蒸散量或者利用不同的陆面模式数据和再分析数据获得高精度长时间序列的蒸散量产品[6] [7]。但是由于每个 *ET* 产品的输入气象数据的差异,不同的模式结构和参数化的影响,不同 *ET* 产品间存在着明显的差异性。因此为了寻找出不同 *ET* 产品的适用范围,必须对他们进行评估比较工作。

蒸散发的研究始于 1802 年,道尔顿提出蒸发定理[8]之后,经由 Bowen [9]、Thorntwaite、Holzman、Monteith 等科学家的不断改进陆续提出了许多模型,目前最新的是土壤-植被-大气传输模型。

国内对蒸散发的研究始于 21 世纪初。贺添[10]根据 MODIS 数据分析了 2001 年~2010 年的蒸散发时空特征,邴龙飞[11]根据 Noah 数据研究了中国地区蒸散和土壤含水量的关系,王文[12]将 GLDAS 数据与实测数据相比较,发现 GLDAS 产品有着明显的高估现象,苏涛[13]在全国范围比较了 5 种再分析产品,发现不同产品的时空差异特别大。

目前国内外的学者们正在致力于打造一种更为精确的蒸散发产品,那么势必将借鉴现有产品的优劣势,集百家之长,根据不同产品在不同地区的适用性程度来选出适用性好的产品。这样,把各产品的优势结合起来研究,力争研究出一款最优产品,用以研究蒸散发的变化趋势,进而研究干旱等自然灾害,降低其危害性。

本文将根据 2004 年到 2011 年 FLUXNET、GLDAS、MERRA2 三种蒸散模型分别对半湿润地区禹城、高寒草甸地区当雄、草原地区内蒙古和半干旱地区千烟州进行空间插值并于测站观测值相比较,通过 *RMSE*、*r*、*BIAS* 三个指标分析了不同蒸散模型的蒸散量(*ET*)模拟值在中国不同区域的年际、季节适用性。从而分析各蒸散产品在不同区域的优劣势,然后在此基础上利用最好的模型计算出全国蒸散量(*ET*)的平均值并加以分析。

2. 研究区概况、数据和方法介绍

2.1. 研究区站点概况

2.1.1. 千烟州

千烟州地处赣中南吉泰盆地腹地,居赣江中游。地理坐标为东经 114°17′~115°20′,北纬 26°27′~26°58′之间。年均日照 1756.4 小时,气温 18.6℃,无霜期 281 天,降雨量 1726 毫米,光能充足,四季分明,热量丰富,雨量丰沛,属典型的中亚热带湿润季风气候。

2.1.2. 当雄

当雄隶属于西藏自治区,位于西藏自治区中部,藏南与藏北的交界地带,地理坐标为东经 90°45′~91°31′,北纬 29°31′~31°04′。面积 10,036 平方公里(2013 年),当雄县属高原大陆性气候,属于高寒草甸地区。年日照时数 2881 小时。年降水量 481 毫米。当雄县受大气环流和地形影响,当雄县气候的主要特点为:冬季寒冷、干燥,昼夜温差大;夏季温暖湿润,雨热同期,干湿季分明,天气变化大。年均温度 1.3℃,年均降雨量 456.8 mm,年均蒸发量 1725.7 m。

2.1.3. 内蒙古

内蒙古自治区,简称“内蒙古”,中华人民共和国省级行政区,首府呼和浩特。地处中国北部,地

理上位于北纬 37°24′~53°23′, 东经 97°12′~126°04′之间。内蒙古自治区地势由东北向西南斜伸, 呈狭长形, 全区基本属一个高原型的地貌区, 全区涵盖高原、山地、丘陵、平原、沙漠、河流、湖泊等地貌, 气候以温带大陆性气候为主, 地跨黄河、额尔古纳河、嫩江、西辽河四大水系。内蒙古自治区地域广袤, 所处纬度较高, 高原面积大, 距离海洋较远, 边沿有山脉阻隔, 气候以温带大陆性季风气候为主。有降水量少而不匀, 风大, 寒暑变化剧烈的特点。本实验研究区域为内蒙古草原区域(43.5458 N, 116.6750 E)。

2.1.4. 禹城

禹城, 山东省德州市下辖县级市, 地处山东省西北部, 是省会济南的卫星城, 属环渤海经济圈; 境内皆平原, 地势南高北低, 西高东低, 自西南向东北缓缓倾斜; 属暖温带大陆季风气候, 四季分明, 干湿季节明显, 光照充足。禹城市境内皆平原, 地势南高北低, 西高东低, 自西南向东北缓缓倾斜, 总坡降为 1/8000~1/10,000。海拔最高 26.1 米, 最低 17.5 米, 平均落差 5 至 7 米。由于古黄河泛流的影响, 微地貌比较复杂

2.2. 研究数据

为了完成本次实验, 我们选用了 3 种长时间序列的全球蒸散发数据集 FLUXNET、GLDAS、MERRA2, 分别在半湿润地区禹城、高寒草甸地区当雄、草原地区内蒙古和半干旱地区千烟州来进行评估。

Table 1. Description of ET products used in this study
表 1. 本研究使用的 ET 产品描述

数据集	类别	方案	空间分辨率	参考数据
GLDAS	CLM 陆面模式	湍流传输理论	1° × 1°	rodell 等[14]
FLUXNET	诊断模型	机器学习	0.5° × 0.5°	Jung, M.等
MERRA	再分析	彭曼方法	0.5° × 0.625°	Reichle 等[15]

2.2.1. FUXNET 数据集

如表 1 所示, FLUXNET 是全球采集的通量和气象数据, 全球长期通量观测网络的概念是由国际地圈 - 生物圈计划于 1993 年提出的。并在 1995 年的 La Thuile 研讨会之后建立了全球通量观测塔, 并于 1998 年由美国航空航天局决定, 成立了全球规模的 FLUXNET, 将其作为检验 EOS 产品的一种方法。本实验所用的 FLUXNET 数据集, 其数据类型为诊断模型, 其所运用的研究方案是机器学习方案, 其空间分辨率为 0.5° × 0.5°。在本次实验中, FLUXNET 数据集将被运用于半湿润地区禹城、高寒草甸地区当雄、草原地区内蒙古和半干旱地区千烟州这四个不同地区的模拟。

2.2.2. GLDAS 数据集

如表 1 所示, GLDAS 是全球陆地数据同化系统, 其目标是利用先进的陆地表面建模、同化技术, 吸收卫星和地面观测数据产品, 以产生最佳的陆地表面状态和通量场。该系统在全球范围内用高分辨率下执行所获得的大量集成观测数据来产生接近实时的结果。本实验所用的 GLDAS 数据集, 其数据类型为陆面模式, 其研究方案为湍流传输理论, 其空间分辨率为 1° × 1°。在本次实验中, GLDAS 数据集将被运用于半湿润地区禹城、高寒草甸地区当雄、草原地区内蒙古和半干旱地区千烟州这四个不同地区的模拟。

2.2.3. MERRA2 数据集

如表 1 所示, MERRA2 是戈达德地球观测系统的资料同化系统的产品, METTA2 产品是为了现代的回顾性分析研究和应用。MERRA 是 NASA 为了研究天气和气候时间尺度与水循环相关领域而为卫星时

代提供的大气在分析资料。本实验所用的 MERRA2 数据集,其数据类型为再分析数据,其研究方案为彭曼方法,其空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.625^{\circ}$ 。在本次实验中, MERRA2 数据集将被运用于半湿润地区禹城、高寒草甸地区当雄、草原地区内蒙古和半干旱地区千烟州这四个不同地区的模拟。

2.3. 研究方法介绍

2.3.1. ET 统计指标

由于本次实验涉及了许多新生成数据与原有数据的比较、评估,所以引进统计指标来进行评估是产品的适用性是非常有必要的,本次实验中引进的统计指标有:

$$BIAS = \sum_{i=1}^{i=n} (y_i - \hat{y}_i) / N \quad (1)$$

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3)$$

其中, y_i 与 $\hat{y}_i$ 分别为各蒸散发产品估算的每月蒸散量值和测站值, $\bar{y}$ 为测站的月平均值。偏差(BIAS)与标准差(RMSE)能够很好地反映出测量的精密度,两者的绝对值越小,表明两组数据之间拟合情况越好。相关系数表示一元多项式回归方程拟合度的高低,相关系数(r)越接近 1 表示,表示拟合情况越好。

3. 基于多种统计指标对三种蒸散发产品的评估

由于蒸散量对水、能量、碳循环和干旱等各方面影响,所以对蒸散量的研究也是至关重要的,由于我国幅员辽阔,地势起伏受各种气候及地形的影响,所以现有模型对我国蒸散量的研究不能够做到一应俱全,不同模型具有不同的适用范围,只有因地制宜,才能够最好的模拟出正确的结果。

对于本次实验数据,我们分别选取了半湿润地区禹城、高寒草甸地区当雄、草原地区内蒙古和半干旱地区千烟州等四个地区的数据,通过 GLDAS、MERRA、FLUXNET 三种蒸散发产品对其进行模拟,并将模拟结果分别进行年际评估和季节评估。通过对主要驱动数据的研究来观察不同驱动数据对不同地形的适用程度,从而根据不同地形选择出其最适合的驱动数据,并最终选择出最合适的蒸散发产品。

FLUXNET、GLDAS、MERRA2 产品对半湿润地区禹城、高寒草甸地区当雄、草原地区内蒙古和半干旱地区千烟州等四个地区的年际评估。

3.1. 年际评估

综合对图 1、图 2、图 3 的分析,在年际评估中: FLUXNET 产品在三个产品中对四个地区的 RMSE 指数相对偏小,表示模拟结果的离散程度较小,数据更集中。FLUXNET 产品在三个产品中对四个地区的 r 指数也相对更接近于 1,表示根据 FLUXNET 产品的模拟结果与测站观测值之间相关性更好。FLUXNET 产品在三个产品中对四个地区的 BIAS 指数也相对较小,表示 FLUXNET 产品的预报值与测站观测值更加接近,表示其模拟结果更好。综合对以上三图的分析,在年际评估中, FLUXNET 产品具有明显的优越性,在不同地形的适用性皆强与其他两个产品。

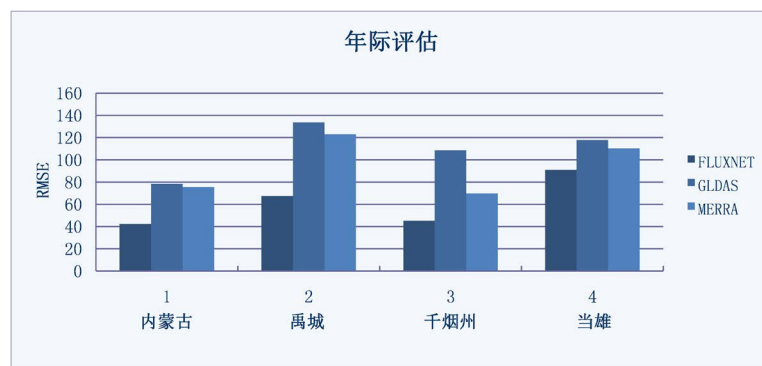


Figure 1. Interannual assessment of *RMSE* in each district

图 1. 各地区 *RMSE* 的年际评估

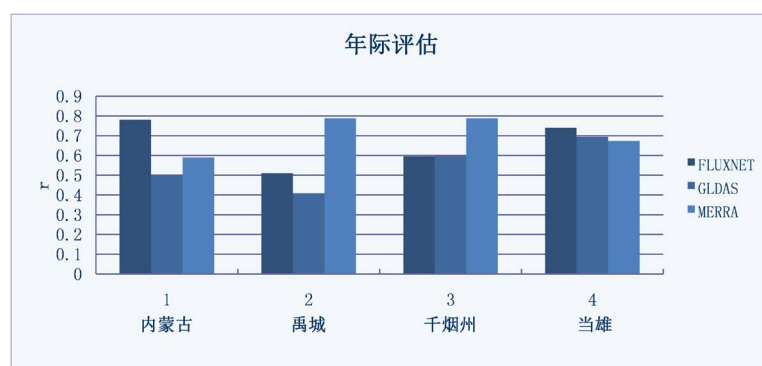


Figure 2. Interannual assessment of *r* in each region

图 2. 各地区 *r* 的年际评估

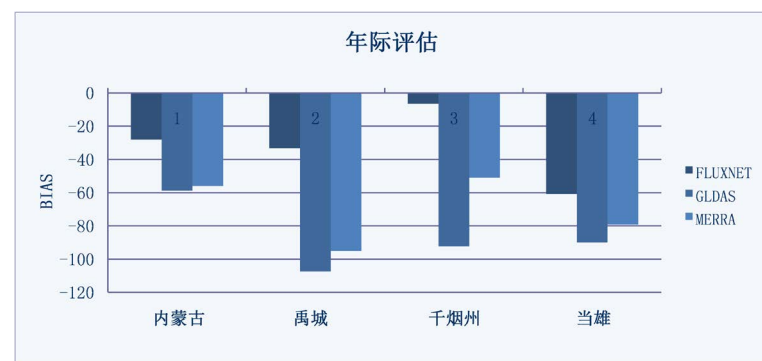


Figure 3. Interannual assessment of *BIAS* by region

图 3. 各地区的 *BIAS* 的年际评估

3.2. 季节评估

3.2.1. 内蒙古

综合对图 4、图 5、图 6 的分析, 不同的产品对内蒙古地区模拟结果有差异, 但每个产品春、冬两季的 *RMSE* 和 *BIAS* 都小于夏、秋两季, 春、冬两季的 *r* 相比夏冬两季都更接近于 1, 即每个产品对内蒙古冬、春两个季节的模拟结果都相对优于对夏、秋两个季节。FLUXNET 产品的 *RMSE* 和 *BIAS* 都小于 GLDAS 和 MERRA, *r* 相比另外两者也更接近与 1, 即 FLUXNET 产品对内蒙古地区四个季节的模拟结果也都优越与另外两个产品。故 FLUXNET 相对于另两个产品而言更适用于内蒙古地区的预报。

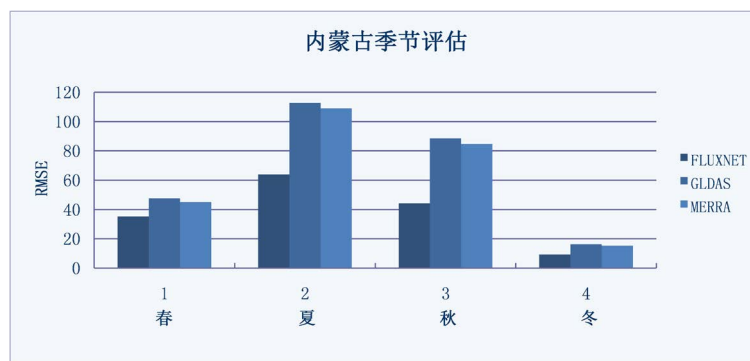


Figure 4. Seasonal evaluation of *RMSE* in Inner Mongolia

图 4. 内蒙古 *RMSE* 的季节评估

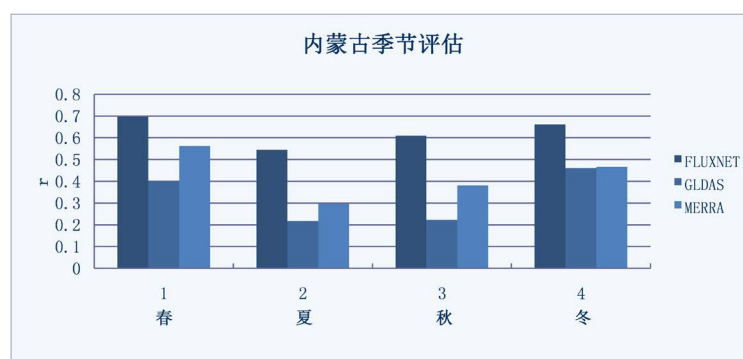


Figure 5. Seasonal evaluation of *r* in Inner Mongolia

图 5. 内蒙古 *r* 的季节评估

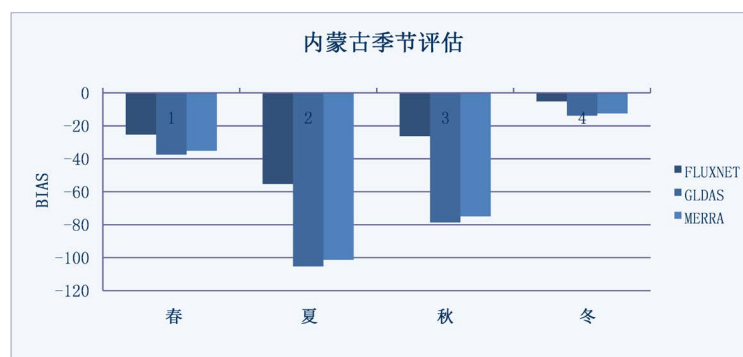


Figure 6. Seasonal evaluation of *BIAS* in Inner Mongolia

图 6. 内蒙古 *BIAS* 的季节评估

3.2.2. 禹城

综合对图 7、图 8、图 9 的图格分析, 不同的产品对禹城地区模拟结果有差异, 但每个产品春、冬两季的 *RMSE* 和 *BIAS* 都小于夏、秋两季, 春、冬两季的 *r* 相比夏冬两季都更接近于 1, 即每个产品对禹城冬、春两个季节的模拟结果都相对优于对夏、秋两个季节。FLUXNET 产品秋季的 *BIAS* 和 *RMSE* 也较小, 即 FLUXNET 产品对禹城秋季模拟的准确度也较高, FLUXNET 产品的 *RMSE* 和 *BIAS* 都小于 GLDAS 和 MERRA, *r* 相比另外两者也更接近与 1, 即 FLUXNET 产品对禹城地区四个季节的模拟结果也都优越与另外两个产品。故 FLUXNET 相对于另两个产品而言更适用于禹城地区的预报。此外, MERRA2 产品与 GLDAS 产品两者之间差距不大, MERRA2 产品略优于 GLDAS 产品。

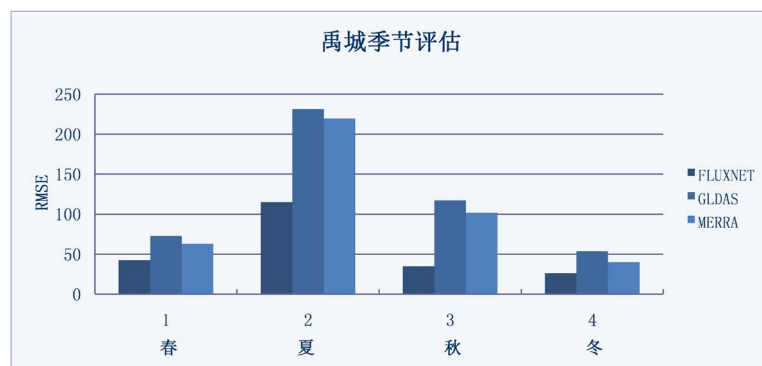


Figure 7. Seasonal evaluation of $RMSE$ in Yucheng

图 7. 禹城 $RMSE$ 的季节评估

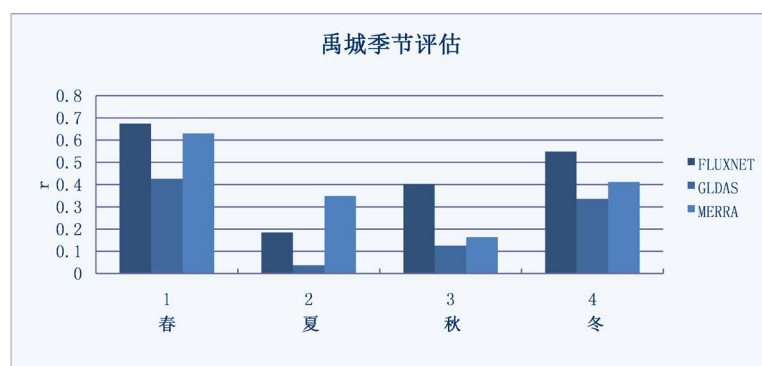


Figure 8. Seasonal evaluation of r in Yucheng

图 8. 禹城 r 的季节评估

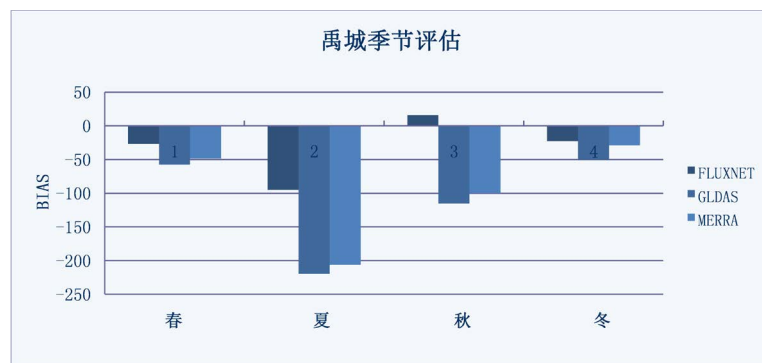


Figure 9. Seasonal evaluation of $BIAS$ in Yucheng

图 9. 禹城 $BIAS$ 的季节评估

3.2.3. 千烟州

综合对图 10、图 11、图 12 的分析：FLUXNET 产品与 MERRA2 产品对千烟州春季模拟的较好，因为两者春季的 $BIAS$ 和 $RMSE$ 较小。FLUXNET 产品对千烟州夏、冬两季的模拟也较为成功，因为其 $BIAS$ 和 $RMSE$ 较小。对千烟州秋季模拟结果相对不如其它季节，但在三个产品中还是模拟的最成功的，因为其 $RMSE$ 和 $BIAS$ 较小，表示其误差较小。综上所述 FLUXNET 产品是三个产品中最适合模拟千烟州蒸散量的产品。此外，MERRA2 产品对千烟州四季的模拟结果次于 FLUXNET 产品但优于 GLDAS 产品。

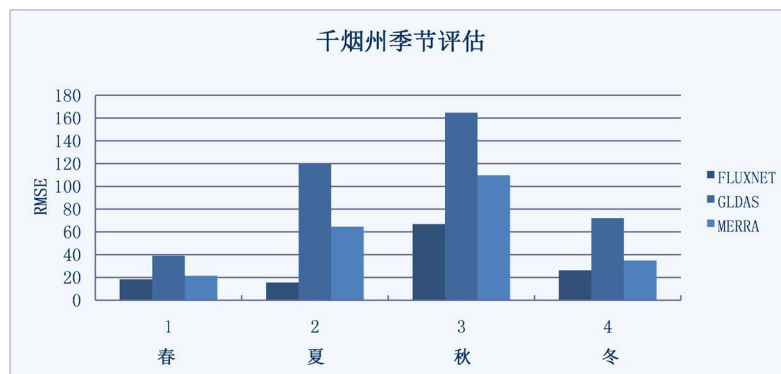


Figure 10. Seasonal evaluation of $RMSE$ in Qianyanzhou

图 10. 千烟州 $RMSE$ 的季节评估

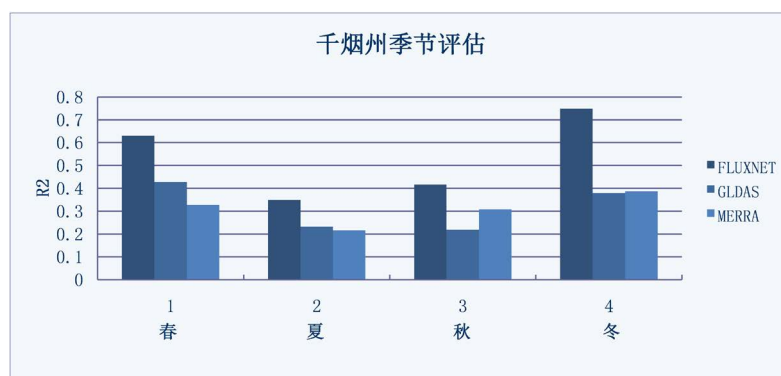


Figure 11. Seasonal evaluation of r in Qianyanzhou

图 11. 千烟州 r 的季节评估

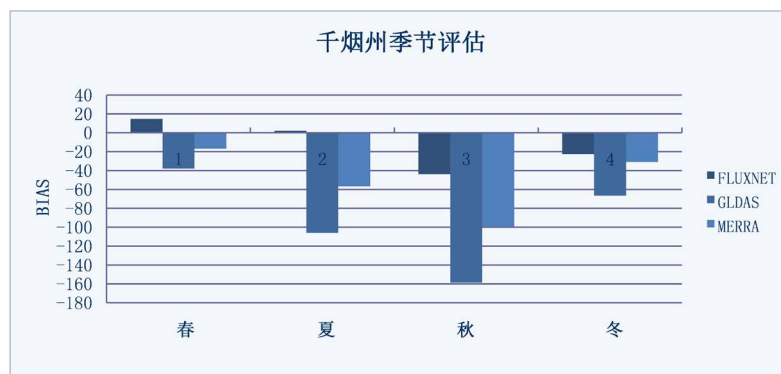


Figure 12. Seasonal assessment of $BIAS$ in Qianyanzhou

图 12. 千烟州 $BIAS$ 的季节评估

3.2.4. 当雄

综合对图 13、图 14、图 15 的分析：三个蒸散量产品对当雄的地区春、冬两季的模拟要优于夏、秋两季，因为春、冬两季的 $RMSE$ 和 $BIAS$ 小于夏、秋两季，即春、冬两季模拟的误差较小。其中 FLUXNET 产品的模拟结果要优于 GLDAS 产品和 MERRA2 产品，因为其 $BIAS$ 和 $RMSE$ 较小， $BIAS$ 也更接近于 1。而 MERRA2 产品又略优于 GLDAS 产品。综上所述，FLUXNET 产品是三个产品中最适合用于预报当雄地区蒸散量的产品。

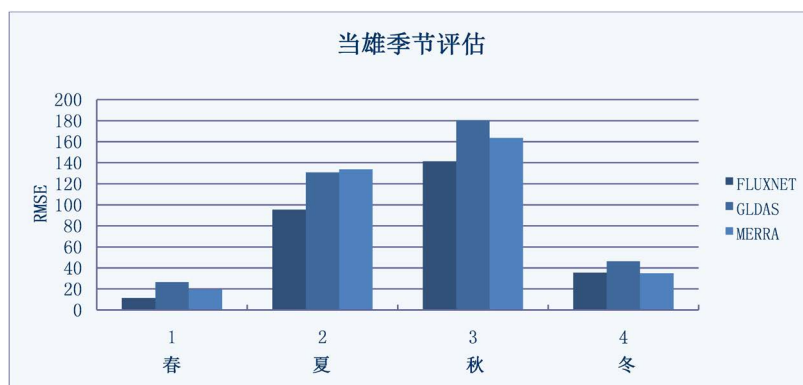


Figure 13. Seasonal evaluation of $RMSE$ in Dangxiong

图 13. 当雄 $RMSE$ 的季节评估

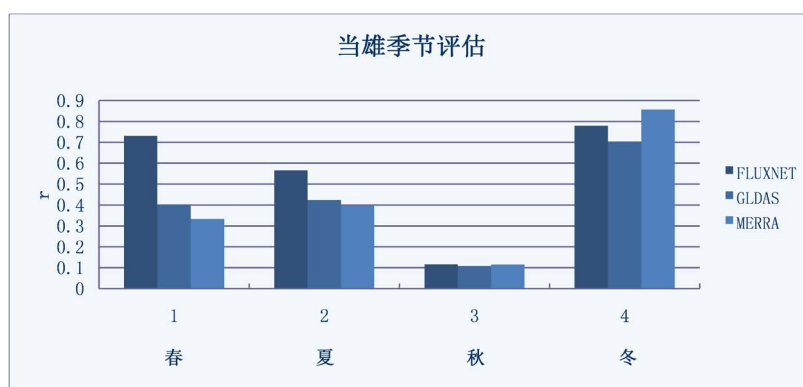


Figure 14. Seasonal evaluation of r in Dangxiong

图 14. 当雄 r 的季节评估

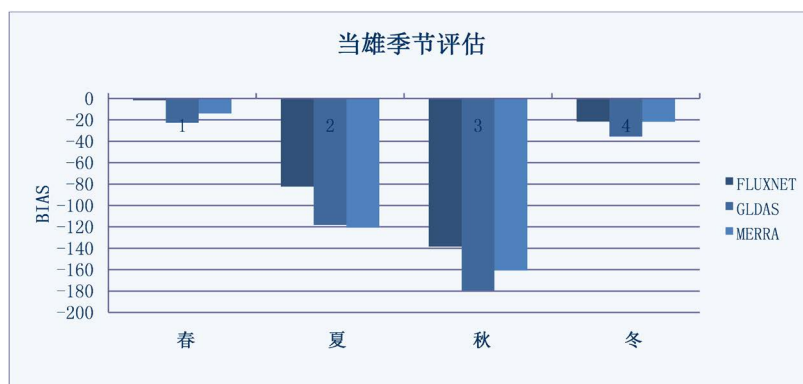


Figure 15. Seasonal assessment of $BIAS$ in Dangxiong

图 15. 当雄 $BIAS$ 的季节评估

3.3. 总评

根据以上的年际评估和季节评估, FLUXNET 产品是三个产品中适用性最高的。其可以适用于各种半湿润地区禹城、高寒草甸地区当雄、草原地区内蒙古和半干旱地区千烟州等不同的地区与地形, 其对夏、秋两季的模拟情况较差, 但在三者之中又是最优选项。MERRA2 产品相对适用程度弱一些, GLDAS 是三个产品中适用性最弱的。

4. 利用最好模型算出全国 ET 平均值

经过评估, FLUXNET 产品是三个蒸散量产品中最适用于中国的产品, 故用其对中国的蒸散量进行模拟是最合适的。现用其计算出全国 ET 的多年平均值如下图 16:

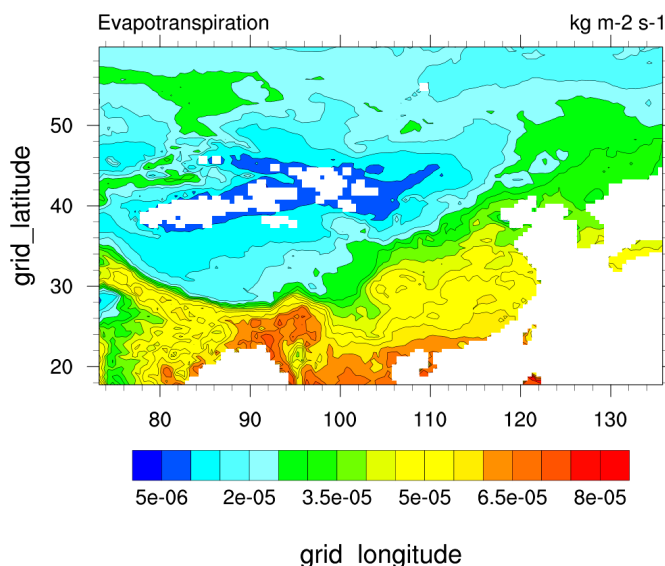


Figure 16. Perennial average of evapotranspiration

图 16. 蒸散量多年平均值

根据全国 ET 多年平均值分析可知, 中国蒸散量的最大值为 $6.7327 \times 10^{-5} \text{ kg} \times \text{m}^{-2} \times \text{s}^{-1}$ 位于海南省临高县(109.75°E , 19.75°N)该地区属热带季风气候, 境内高温多雨, 光照充足, 年平均雨日为 135.9 天, 降雨量为 1417.8 毫米。蒸散量的最小值为 $0.4672671 \times 10^{-6} \text{ kg} \times \text{m}^{-2} \times \text{s}^{-1}$ 位于新疆吐鲁番(91.25°E , 42.25°N)该地区吐鲁番市属于典型的大陆性暖温带荒漠气候, 日照充足, 热量丰富但又极端干燥, 降雨稀少且大风频繁, 干旱少雨, 年平均降水量仅有 16.4 毫米。图示区域的平均值为 $2.871415 \times 10^{-5} \text{ kg} \times \text{m}^{-2} \times \text{s}^{-1}$ 。中国地区的蒸散量分布呈现自南向北递减, 南方蒸散量大于北方的趋势。在纬度相同地区其 ET 平均值总体上呈自东部沿海向西部内地递减。有地区 ET 平均值与其周围地区存在数量级上的差异, 产生这种现象有气候、地形等因素。

5. 结论

本文将 2004 年到 2010 年半湿润地区禹城、高寒草甸地区当雄、草原地区内蒙古和半干旱地区千烟州的蒸散量数值通过 FLUXNET、GLDAS、MERRA2 三种蒸散模型进行空间插值并与测站观测值相比较, 通过 RMSE、 r 、BIAS 三个指标分析了不同蒸散模型的蒸散量(ET)模拟值在中国不同区域的适用性。从而分析各蒸散产品的优劣势, 然后在此基础上利用最好的模型计算出全国蒸散量(ET)的平均值及其变化趋势。主要研究成果如下:

1) 基于空间插值法对禹城、当雄、内蒙古、千烟州四大区域内 3 种蒸散产品(FLUXNET、GLDAS、MERRA2)进行评估, 发现各产品模拟值差异较大、FLUXNET 产品是综合表现最好的产品。

2) 不同蒸散产品对春、冬两季的模拟较好, 对夏、秋两季的模拟较差。

3) 中国蒸散量的最大值为 $6.7327 \times 10^{-5} \text{ kg} \times \text{m}^{-2} \times \text{s}^{-1}$, 位于海南省临高县(109.75°E , 19.75°N)。中国蒸散量的最小值为 $0.4672671 \times 10^{-6} \text{ kg} \times \text{m}^{-2} \times \text{s}^{-1}$, 位于新疆吐鲁番(91.25°E , 42.25°N)。中国地区的蒸散量

分布呈现自南向北递减,南方蒸散量大于北方的趋势。中国地区的蒸散量在纬度相同地区其 ET 平均值总体上呈自东部沿海向西部内地递减。有些地区 ET 平均值与其周围地区存在数量级上的差异,产生这种现象有气候、地形等因素。

参考文献

- [1] Hao, C. and Zhang, J.F. (2015) Combination of Multi-Sensor Remote Sensing Data for Drought Monitoring over Southwest China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **35**, 270-283. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.09.011>
- [2] Ji, L. and Peters, A.J. (2003) Assessing Vegetation Response to Drought in the northern Great Plains Using Vegetation and Drought Indices. *Remote Sensing of Environment*, **87**, 85-98. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00174-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00174-3)
- [3] 费振宇, 孙宏巍, 金菊良. 近 50 年中国气象干旱危险性的时空格局探讨[J]. 水电能源科学, 2014(32): 5-10.
- [4] Jin, J.-L., Wei, Y.-M., Zou, L.-L., Liu, L. and Fu, J. (2012) Risk Evaluation of China's Natural Disaster Systems: An Approach Based on Triangular Fuzzy Numbers and Stochastic Simulation. *Natural Hazards*, **62**, 129-139. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-0005-4>
- [5] Wilhelmi, O.V. and Wilhite, D.A. (2002) Assessing Vulnerability to Agricultural Drought: A Nebraska Case Study. *Natural Hazards*, **25**, 37-58. <https://doi.org/10.1023/A:1013388814894>
- [6] Cai, X.T., Yang, Z.L., Xia, Y.L., Huang, M.Y., Wei, H.L., Leung, R. and Ek, M.B. (2014) Assessment of Simulated Water Balance from Noah, Noah-MP, CLM, and VIC over CONUS Using the NLDAS Test Bed. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **119**, 13751-13770. <https://doi.org/10.1002/2014JD022113>
- [7] Kobayashi, S., Ota, Y., Harada, Y., Ebata, A., et al. (2015) The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **93**, 5-58. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2015-001>
- [8] 刘德辉, 梁珍海, 李荣锦. 蒸发研究的概况与进展[J]. 江苏林业科技, 1998(25): 54-57.
- [9] Bowen, I.S. (1926) The Ratio of Heat Losses by Conduction and Evaporation from Any Water Surface. *Physical Review*, **27**, 779-798. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.27.779>
- [10] 贺添, 邵全琴. 基于 MOPI6 产品的我国 2001~2010 年蒸散发时空格局变化分析[J]. 地球信息科学学报, 2014(16): 979-988.
- [11] 邴龙飞, 苏红波, 邵全琴, 等. 近 30 年来中国陆地蒸散量和土壤水分变化特征分析[J]. 地球信息科学学报, 2012(14): 1-13.
- [12] 王文, 崔巍, 王鹏. GLDASNoah 模型水文产品与中国地面观测及卫星观测数据的对比[J]. 水电能源科学, 2017: 1-6.
- [13] 苏涛. 基于多套再分析资料的全球蒸发量时空变化特征及其成因研究[D]: [博士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- [14] Rodell, M., Houser, P.R., Jambor, U., et al. (2004) The Global Land Data Assimilation System. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **85**, 381-394. <https://doi.org/10.1175/BAMS-85-3-381>
- [15] Reichle, R.H., Koster, R.D., Lannoy, G.D., Forman, B.A., Liu, Q., Mahanama, S.P.P. and Toure, A. (2011) Assessment and Enhancement of MERRA Land Surface Hydrology Estimates. *Journal of Climate*, **24**, 6322-6338. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-10-05033.1>