

基于表面能量平衡模型的张承地区蒸散发研究

董祥旺, 金晓媚, 张绪财, 殷秀兰, 金爱芳, 郎捷, 罗绪富, 马靖宣

Research on regional evapotranspiration in the Zhangcheng area based on the SEBS model

DONG Xiangwang, JIN Xiaomei, ZHANG Xucai, YIN Xiulan, JIN Aifang, LANG Jie, LUO Xufu, and MA Jingxuan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202204007>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于自组织神经网络的污染场地多监测指标相关性分析

Correlation analysis of multiple monitoring indicators of contaminated site based on self-organizing map

马春龙, 施小清, 许伟伟, 任静华, 王佩, 吴吉春 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 191-202

玛纳斯河流域山前平原区蒸散发时空异质性分析

Analyses of the spatio-temporal heterogeneity of evapotranspiration in the piedmont of the Manas River Basin

席丹, 王文科, 赵明, 马稚桐, 侯昕悦, 张在勇 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 25-34

基于MOD16的银川平原地表蒸散量时空特征及影响因素分析

An analysis of spatio-temporal characteristics and influencing factors of surface evapotranspiration in the Yinchuan Plain based on MOD16 data

王卓月, 孔金玲, 李英, 张在勇, 刘慧慧, 蒋镒竹, 钟炎伶, 张静雅 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 53-61

蒸散发水源组成与测定方法研究进展

A review of the advances in water source composition and observation methods of evapotranspiration

王周锋, 王文科, 李俊亭 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 1-9

基于主成分分析法的Q2黄土湿陷特性研究

A study of the collapsibility of Q2 loess based on principal component analysis

王玉涛, 刘小平, 曹晓毅 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 141-148

基于地表水循环遥感观测的黑河流域水平衡分析

Water balance analysis based on remote sensing observation of surface water cycle in the Heihe River watershed

闫柏琨, 李文鹏, 甘甫平, 郑跃军, 祁晓凡, 白娟, 郭艺, 吴艳红, 王龙凤, 马燕妮 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 44-56



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202204007

董祥旺, 金晓媚, 张绪财, 等. 基于表面能量平衡模型的张承地区蒸散发研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(1): 13-20.
DONG Xiangwang, JIN Xiaomei, ZHANG Xucui, *et al.* Research on regional evapotranspiration in the Zhangcheng area based on the SEBS model[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(1): 13-20.

基于表面能量平衡模型的张承地区蒸散发研究

董祥旺¹, 金晓媚¹, 张绪财¹, 殷秀兰², 金爱芳², 郎捷¹, 罗绪富¹, 马靖宣¹

(1. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083;

2. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘要: 张家口承德地区是京津冀城市群生态安全的重要屏障, 针对该地区长时间序列实际蒸散的时空变化研究较少, 以张家口承德地区为研究区, 基于表面能量平衡模型(SEBS)结合 MODIS 和 GLDAS 数据反演了研究区 2001 年 1 月—2020 年 12 月逐月的蒸散量, 将反演结果与 MOD16A2 数据在趋势上进行了对比, 并用 2021 年 7 月的野外实测数据在像元尺度上对其进行验证, 利用 Sen+MannKendall 显著性检验方法对其时空趋势变化进行了分析, 用相关性分析研究了其影响因素。结果表明: 模型蒸散量反演结果与 MOD16A2 数据在月尺度上相关性良好, 与野外实测数据的相对误差小于 15%, 具有较高的可靠性; 研究区的年蒸散量在 20 a 间呈现波动上升趋势, 最大值为 2013 年的 545 mm, 最小值为 2002 年的 348 mm, 且承德地区的蒸散量明显高于张家口地区; 20 a 间研究区 75.41% 的区域蒸散量基本稳定不变, 5.13% 的区域蒸散量增加, 1.11% 的区域蒸散量显著降低, 18.35% 的区域蒸散量轻微降低; 气温、植被对蒸散量的影响具有显著的正相关性, 不同土地用地类型下蒸散量由高到低的顺序为: 林地>水体>草地>耕地>建设用地>未利用土地。

关键词: SEBS 模型; 蒸散发; Sen+MannKendall 显著性检验; 张家口承德地区; 相关性分析

中图分类号: P641.69

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)01-0013-08

Research on regional evapotranspiration in the Zhangcheng area based on the SEBS model

DONG Xiangwang¹, JIN Xiaomei¹, ZHANG Xucui¹, YIN Xiulan², JIN Aifang², LANG Jie¹,
LUO Xufu¹, MA Jingxuan¹

(1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China)

Abstract: Evapotranspiration (ET) is the main process of water and energy conversion in the hydrosphere, atmosphere and biosphere. Accurately estimation of ET is of great significance in ecological environment protection. The city of Chengde and Zhangjiakou, taken as the study area, is an important barrier for the ecological security of the Beijing-Tianjin-Hebei urban areas. There have been fewer studies of actual evapotranspiration for long-term sequences in the region. In this paper, the monthly actual ET in the study area from January, 2001 to December, 2020 is simulated based on the SEBS model using MODIS and GLDAS data. The SEBS results are compared with the MOD16A2 data in trend, and the field measurements on July 2021 are also used for validation

收稿日期: 2022-04-05; 修订日期: 2022-06-18

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372250); 行政事业类专项项目(121201014000150003)

第一作者: 董祥旺(1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事工程地质与水文地质方面的研究。E-mail: 553741735@qq.com

通讯作者: 金晓媚(1968-), 女, 博士, 教授, 主要从事水环境遥感和生态水文学方面的研究。E-mail: jinxm@cugb.edu.cn

at the pixel scale. The method of Sen+MannKendall test is used to analyze the temporal and spatial trend changes, and the correlation analysis was used to discuss the influencing factors on ET change. The results show that the monthly SEBS ET has a good correlation with the mod16A2 data, and the relative error with the field measurement is less than 15%. Therefore, the reliability of the SEBS result is validated to be relatively high. The actual ET of the study area has shown a fluctuating upward trend in the past 20 years. The maximum value of ET appeared in 2013 with the value of 545 mm, and the minimum value was 348 mm in 2002; and the evapotranspiration in Chengde was significantly higher than that in Zhangjiakou; In the past 20 years, the ET of 75.41% of the study area was basically stable, 5.13% of the area increased, 1.11% of the region was significantly decreased and 18.35% of the area was slightly decreased. The temperature and vegetation change have a significant positive correlation with evapotranspiration variation. The ET of different land use types is: forest land>water>grass land>arable land>construction land>unused land.

Keywords: SEBS; evapotranspiration (ET); Sen+MannKendall test; Zhangjiakou-Chengde; correlation analysis

蒸散发包括来自土壤、水域、冠层表面等各类地表的蒸发,也包括植物气孔的蒸腾^[1],准确的估算蒸散量对于水资源合理利用及生态环境保护具有极其重要的意义^[2]。蒸散量估算方法大致可以分为实测法和模型法 2 类。实测法主要包括波文比法、涡度相关法、液流法、蒸发皿和蒸渗仪等方法,但是传统实测方法难以获得区域尺度的蒸散发^[3]。随着遥感技术的兴起,出现许多与遥感相结合估算蒸散量的模型,主要分为与传统方法相结合的模型(如彭曼公式、互补相关理论模型、Priestley-Taylor 模型)、经验统计模型、特征空间法、垂向能量平衡模型(如 SEBAL、SEBS、TSEB)^[4]。其中, Su^[5-6]提出的表面能量平衡模型(Surface Energy Balance System, SEBS)已被证明能够在各种尺度上以可接受的精度估计湍流通量和蒸发比,众多学者^[7-10]将该模型应用于不同空间和时间尺度上,均得到了较好的验证。

近年来,随着遥感云计算平台的发展,发布了众多地表蒸散量遥感产品,如 MOD16A2(8 d, 500 m)、GLASS-ET(8 d, 1 km)、GLEAM(1 d, 0.25°)等蒸散发遥感产品^[11],其中 GLASS-ET, GLEAM 等数据空间分辨率较低,不适用于空间面积较小的地区;而时空分辨率较高且应用广泛的 MOD16A2 数据产品在无植被覆盖区域进行了无值化处理,对于植被覆盖不是很高的地区也不能完全反映区域实际蒸散的空间分布。

张家口承德地区(简称“张承地区”)作为京津冀城市群生态安全的重要屏障,是生态环境关注的热点地区,2015 年《全国生态功能区划(修编版)》将河北省的张家口、承德以及北京市北部城区等地区划为京津冀北部水源涵养重要区,并指出该地区存在水资源过度

开发等生态环境问题。在京津冀协同发展的战略中,以往的蒸散研究多将京津冀作为一个整体进行探究,如于占江^[12]等基于高桥公式对京津冀地区的实际蒸散开展了研究,发现京津冀地区的蒸散量呈现不显著上升趋势,但并未对其空间变化特征进行分析;少数学者对张家口部分地区的蒸散量曾进行过研究,如石嘉丽^[13]等基于 GLASS 蒸散产品分析了河北坝上地区蒸散量的时空变化趋势,研究发现坝上地区的蒸散量呈略微下降趋势并且受土地利用变化影响显著。虽然前人的研究取得了一些重要成果,但是就张承地区而言,仍然缺少对该地区长时间序列的实际蒸散量空间变化规律以及影响因素的分析,不能完全反映该地区实际蒸散的时空分布特征。

因此,本文以张承地区为研究区,基于连续的 MODIS 产品数据和 GLDAS 气象数据,应用 SEBS 模型计算 2001 年 1 月—2020 年 12 月逐月的区域蒸散量,与 MOD16A2 产品数据时间序列的变化趋势进行对比,通过野外实测数据在像元尺度上对蒸散量计算结果进行验证。在此基础上,对研究区 20 a 间的蒸散量时空变化特征及影响因素进行分析,所得结果期望为张承地区水资源的可持续利用以及生态环境保护提供参考。

1 研究区概况

张家口承德地区位于河北省西北部,北邻蒙古高原,南接华北平原,总面积约为 $7.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 1)。研究区内以阴山山脉为界,分为坝上和坝下地区,在地势上呈现出西北高东南低的地势特点,研究区属于温带季风性气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,据张家口和承德 2 个气象站统计,多年平均降水量约为 460 mm,

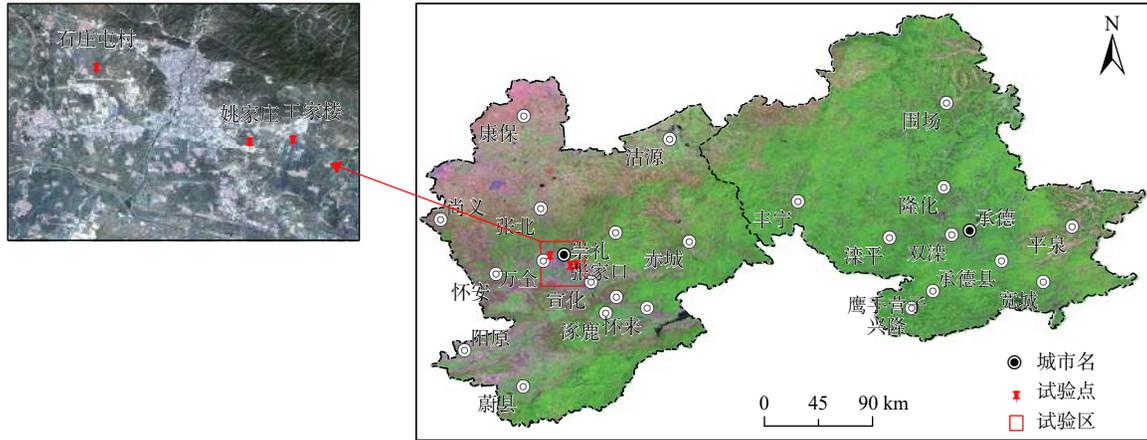


图1 研究区及野外试验点位置示意图

Fig. 1 Location of the study area and the test site

年均气温 9 ~ 12 °C, 年日照率约为 60%, 日照充足。

2 研究方法 with 数据

2.1 SEBS 模型

SEBS 模型是 Su^[6] 利用卫星观测数据结合当地的气象信息, 基于表面能量平衡原理估算大气湍流量和蒸发比的方法。任意时刻的表面能量平衡方程为:

$$R_n = G_0 + H + \lambda E \quad (1)$$

式中: R_n ——净辐射通量/($W \cdot m^{-2}$);

G_0 ——土壤热通量/($W \cdot m^{-2}$);

H ——感热通量/($W \cdot m^{-2}$);

λ ——汽化潜热/($J \cdot kg^{-1}$);

E ——实际水分蒸散总量/($mm \cdot d^{-1}$)。

根据能量平衡在极干和极湿状态下的感热通量特征计算蒸发比:

$$\Lambda_r = 1 - \frac{H - H_{wet}}{H_{dry} - H_{wet}} \quad (2)$$

式中: Λ_r ——相对蒸发比;

H_{dry} 、 H_{wet} ——干、湿极限状态下的感热通量/($W \cdot m^{-2}$)。

日蒸散量计算公式为:

$$E_{daily} = 8.64 \times 10^7 \times \Lambda \times \frac{\bar{R}_n - \bar{G}_0}{\lambda \rho_w} \quad (3)$$

式中: E_{daily} ——每天的实际蒸发量/($mm \cdot d^{-1}$);

Λ ——平均蒸发比;

\bar{R}_n ——日净辐射通量/($W \cdot m^{-2}$);

\bar{G}_0 ——土壤热通量/($W \cdot m^{-2}$);

ρ_w ——水的密度/($10^3 \text{ kg} \cdot m^{-3}$)。

2.2 Sen+Mannkendall 趋势分析

Sen 趋势度可以很好地减少噪声的干扰, 并判断

趋势的上升或是下降^[14], Mannkendall 检验是评估趋势显著性的非参数性检验, 在水文趋势检验研究中得到了广泛的应用^[15-16], 其优点是不需要测量值服从正态分布, 也不要趋势是线性的, 并且不受缺失值和异常值的影响。采用上述 2 种方法结合可以增强方法的抗噪性, 并在一定程度上提高检验结果的准确性^[17]。

Sen 趋势度计算公式为:

$$\beta = \text{median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right), \forall j > i \quad (4)$$

式中: x_i 、 x_j ——时间序列数据。

β 大于 0 表示时间序列呈现上升趋势, 反之处于下降趋势。

MK 检测过程如下:

假设 H_0 : 数据样本 $\{x_i, i = 1, 2, 3, \dots, n\}$ 是独立且同分布的, H_1 : 序列存在单调趋势。M-K 的统计量 S 定义为:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (5)$$

式中: n ——数据集的长度。

$\text{sgn}\theta$ 定义为:

$$\text{sgn}\theta = \begin{cases} 1, & \theta > 0 \\ 0, & \theta = 0 \\ -1, & \theta < 0 \end{cases} \quad (6)$$

根据数据集的长度 n 值选取显著性检验统计量: 当 $n < 10$ 时, 使用统计量 S 进行双边趋势检验, 在给定显著性水平 α 下, 如果 $|S| \geq S_{\alpha/2}$ 则拒绝 H_0 , 认为原序列存在显著趋势; 否则接受 H_0 , 认为序列趋势不显著^[15]。当 $n \geq 10$ 时, 使用检验统计量 Z 进行趋势检验, Z 值计算如下:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}S}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}S}}, & S < 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{Var}S = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (8)$$

式中： m ——序列中结(重复出现的数据组)的个数；

t_i ——结的宽度(第 i 个重复数据组中的重复数据个数)。

统计量 Z 值同样采用双边趋势检验, 当 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$ 时, 则拒绝 H_0 , 认为原序列存在显著趋势; 否则接受 H_0 , 认为序列趋势不显著。

2.3 相关性分析

(1) Pearson 相关性分析

Pearson 相关性分析是分析 2 个变量间线性相关的方法, 并且要求 2 个变量都呈正态分布, 而且是随机变量。

(2) 偏相关性分析

偏相关系数是衡量多个变量中某 2 个变量之间的线性相关程度的指标^[18], 偏相关系数绝对值愈大, 表明变量之间的线性相关程度愈高; 反之愈低。样本的偏相关系数 $r_{ij \cdot h}$ 计算公式为:

$$r_{ij \cdot h} = \frac{r_{ij} - r_{ih}r_{jh}}{\sqrt{(1-r_{ih}^2)(1-r_{jh}^2)}} \quad (9)$$

式中： r_{ij} ——变量 x_i 和 x_j 的简单相关系数；

r_{ih} —— x_i 和 x_h 的简单相关系数；

r_{jh} —— x_j 和 x_h 的简单相关系数。

计算样本的检验统计量 t , 确定 P 值, 做出推断结论, 统计量 t 计算公式为:

$$t = \frac{r\sqrt{k-q-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (10)$$

式中： r ——偏相关系数；

k ——样本数；

q ——偏相关阶数。

统计量服从 $k-q-2$ 个自由度的分布。

2.4 研究数据

(1) MODIS 数据

本文选取 2001—2020 年中分辨率连续序列的 MODIS 数据, 其中包括 MOD09A1 数据(地表反照率, 8 d, 500 m), MOD11A2 数据(地表比辐射率和地表温度, 8 d, 1 000 m), MOD16A2 数据(全球蒸散量数据集, 8 d,

500 m), 数据均来源于 APPEARS 网站 (<https://appears.earthdatacloud.nasa.gov/>)。

(2) 气象数据

由于研究区只有张家口承德 2 个气象站, 所以本文采用 2001—2020 年间 GLDAS 数据中的气温、气压、风速、相对湿度、总降雨量 5 个波段, 该数据的时间分辨率为 1 月、空间分辨率为 25 km, GLDAS 数据来源于 GES DISC(<https://disc.gsfc.nasa.gov/>)。

(3) 高程数据

本文选取高程 SRTMDEM 90 m 分辨率原始高程数据、SRTMSLOPE 90 m 分辨率坡度数据、SETMA-SPECT 90 m 分辨率坡向数据, 数据来源为地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>)。

(4) 土地利用数据

为研究用地类型对蒸散发的影响, 本文选取 2000、2005、2010、2015、2020 年 5 期中科院的中国土地利用遥感监测数据, 空间分辨率为 30 m, 数据来源为资源环境与科学数据中心 (<https://www.resdc.cn/>)。

为保证数据的一致性, 所有数据均重采样为 0.005° (约为 500 m), 地理坐标系为 WGS84。

3 研究成果

3.1 蒸散量的时空分布特征

从张承地区 2020 年蒸散量 (ET) 的空间分布图 (图 2) 可以看出, 坝下地区的蒸散量明显高于坝上地区, 其中承德地区的中部和西南部地区以及张家口的东南部地区蒸散量较高, 年蒸散量主要在 800~1 300 mm 变化; 而在阴山以北的坝上地区, 包括承德围场北部靠近内蒙古的区域、张家口北部的康保和尚义以及沽源等地区的蒸散发相对较小, 年蒸散量在 60~700 mm 之间变化。

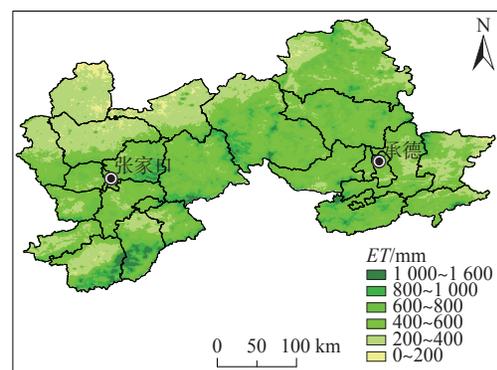


图 2 2020 年研究区蒸散量空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution map of evapotranspiration in the study area

通过对蒸散量统计结果进行分析可知, 张承地区年蒸散量呈现略微波动上升趋势见图 3, 最大值为 2013 年的 545 mm, 最小值为 2002 年的 348 mm; 研究区内张家口承德 2 个地区在 20 a 间的蒸散变化趋势较为一致, 且承德地区的蒸散量明显高于张家口地区, 承德地区在 2013 年达到其最大值 583 mm, 张家口地区在 2003 年达到最大值 508 mm。研究区多年平均的年内月蒸散量分布见图 4, 6—8 月的蒸散量较高, 12 月至次年 2 月的蒸散量最小。

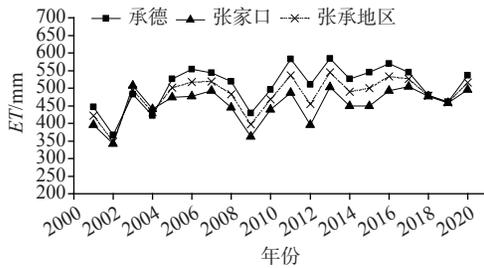


图 3 张承地区 2001—2020 年蒸散量值

Fig. 3 Evapotranspiration values of Zhangjiakou and Chengde from 2001 to 2020

3.2 蒸散量结果验证

(1) 与 MOD16A2 数据对比

由于 MOD16A2 数据在无植被覆盖区域进行了无值化处理, 因此本文仅将计算结果与其做趋势上的对比。从图 5 可以看出, SEBS 计算的月蒸散量值与 MOD16A2 数据在趋势上具有较强的一致性, 确定系数为 0.79, 吻合较好, 说明 SEBS 反演结果具有较高的可靠度。

(2) 与野外实测数据对比验证

本文利用自制蒸渗仪在研究区内选取了石家庄(果园)、姚家庄(高植被覆盖)、王家楼(中等植被覆

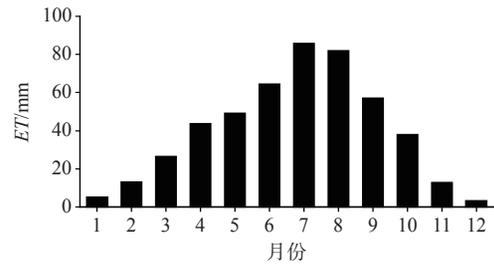


图 4 研究区月均蒸散量值

Fig. 4 Average monthly evapotranspiration values in the study area

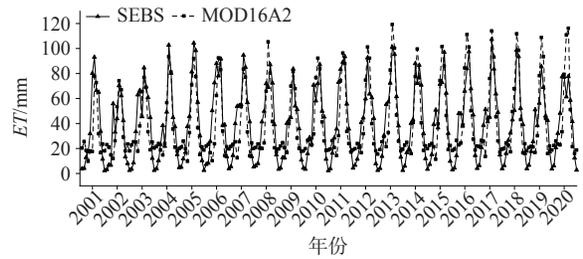


图 5 研究区 2001—2020 年 SEBS 与 MOD16A2 数据对比

Fig. 5 Comparison of the SEBS and MOD16A2 data from 2001 to 2020 in the study area

盖)3 个地点进行了现场蒸发试验, 对模型反演结果进行验证, 试验期为 2021 年 7 月 9—23 日。

为保证验证结果的准确性, 本文选取了 2021 年 7 月的 MODIS 数据以及 GLDAS 数据基于 SEBS 模型计算出 7 月的蒸散量与试验结果进行对比验证(表 1), 从结果可以看出, 王家楼、姚家庄试验点的观测值与反演值的误差约为 0.3 mm, 石家庄试验点的误差较小, 仅为 0.12 mm, 相对误差为 5.77%, 其他 2 个试验点的误差均小于 15%, 总体来说 SEBS 模型反演的结果与现场实测值吻合相对较好。

表 1 3 个野外蒸发试验日蒸散发结果统计

Table 1 Statistics of daily evapotranspiration results of three field evaporation tests

地点	A筒		B筒		平均值/mm	反演值/mm	误差/mm	相对误差/%
	最大值/mm	最小值/mm	最大值/mm	最小值/mm				
王家楼	5.64	1.64	4.52	1.35	2.70	2.4	0.30	11.11
石家庄	4.56	0.99	3.99	0.92	2.08	2.2	0.12	5.77
姚家庄	5.53	1.21	4.46	1.12	2.86	2.5	0.36	12.59

3.3 Sen+MannKendall 的蒸散量变化趋势分析

为进一步探究研究区蒸散量的变化趋势, 本文基于 Sen+Mannkendall 趋势检测方法对 20 a 研究区的蒸散量变化趋势进行分析。利用 Sen 斜率计算的 β 值作为变化斜率。根据经验判断, 取 $0 \leq \beta \leq 10$, 蒸散量呈稳定趋势, 由于研究序列长度为 20, 采用统计量 Z 进行检验, 取显著水平 $\alpha=0.05$, $Z_{1-\alpha/2}=Z_{0.975}=1.96$, 按照表 2

将研究区蒸散量变化趋势分为 5 类, 得到研究区蒸散量变化趋势空间分布(图 6)。

对研究区蒸散量变化趋势进行统计(表 3), 从结果可以看出: 蒸散量基本稳定的区域占总面积的 75.41%; 蒸散量显著增加的区域占据了研究区的 5.12%, 主要分布在张家口东部和南部地区以及承德的中部地区; 蒸散量轻微降低的区域占研究区的 18.35%, 主要分布

表 2 研究区蒸散量变化趋势分类标准

Table 2 Classification criteria for the trend of evapotranspiration in the study area

类型	$ Z > 1.96$	$ Z \leq 1.96$
$\beta > 10$	显著增长	轻微增长
$0 \leq \beta \leq 10$	基本不变	
$\beta < 0$	显著降低	轻微降低

表 3 研究区蒸散发空间变化趋势面积统计

Table 3 Area statistics of evapotranspiration spatial change trend in the study area

类别	面积/km ²	占比/%
显著降低	842.91	1.11
轻微降低	13 991.36	18.35
基本稳定	57 498.81	75.41
轻微增长	7.36	0.01
显著增长	3 901.95	5.12

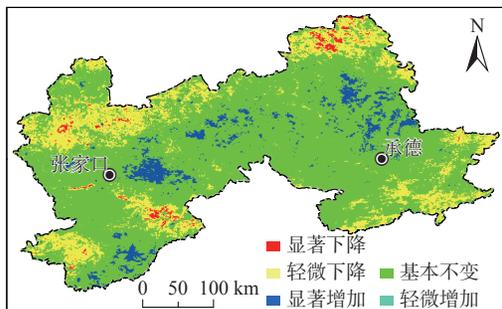


图 6 研究区 20 a 实际蒸散量时空变化趋势图

Fig. 6 Trend of the actual evapotranspiration over the period of 20 years

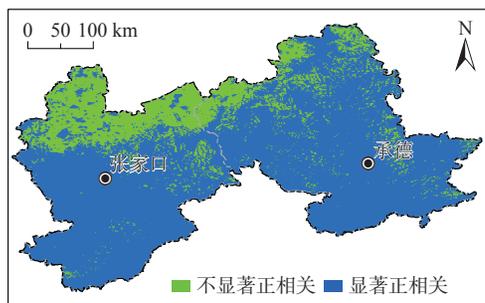
在张家口的张北北部、九连城、沽源北部、蔚县和怀来地区以及承德的围场北部地区、承德的南部地区；显著降低的区域占总面积的 1.11%，主要分布在承德围场北部靠近内蒙古的地区，以及张家口安固里淖附

近地区、怀来的部分地区。

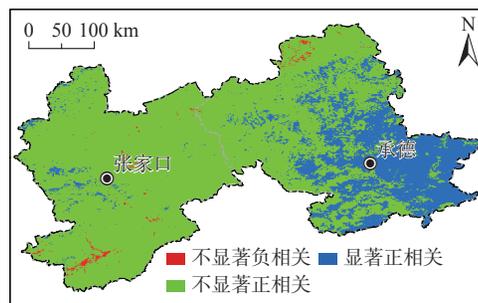
4 影响因素分析

4.1 气象因素

本文利用 GLDAS 2001—2020 年 20 a 间每月的气温降水数据与 SEBS 反演的月蒸散量，基于偏相关分析分别分析气温、降水与蒸散量的相关程度，并进行 T 检验，得到气温和降水与蒸散量的偏相关性检验空间分布图(图 7)，结果表明：研究区内气温与蒸散量具有较强的正相关性，特别是坝下地区，说明气温是蒸散量极其重要的影响因素，气温越高蒸散量越大；降水对于区域蒸散量也有一定的影响，其中承德东南部地区降水与蒸散量具有显著正相关性，张家口大部分地区与承德西部地区具有不显著正相关性。



(a) 气温与蒸散量



(b) 降水与蒸散量

图 7 气温与蒸散量和降水与蒸散量的偏相关性检验空间分布图

Fig. 7 Spatial distribution plots for the partial correlation between air temperature and evapotranspiration (a) and for the partial correlation between precipitation and evapotranspiration (b)

4.2 植被因素

植被蒸腾是蒸发的一种方式，通常情况下，植被覆盖越大，植被指数越高，区域蒸散量越大，反之，植被覆盖越低或无植被区域，区域蒸散量越小。为探究研究区内植被对蒸散发的影响，本文利用 MOD09A1 的近红外波段和红外波段计算每月的归一化植被指数 NDVI，然后逐像元的计算 NDVI 与每月的 SEBS 反演的蒸散量的相关系数，得到植被指数与蒸散量的相关系数空间分布(图 8)。从图中可以看出，以阴山山

脉为界，阴山以南大部分区域，包括张家口地区的尚义县南部、下花园区、怀安县、阳原县以及蔚县东南部，承德地区的丰宁、承德县、承德市、滦平、隆化、兴隆的大部分地区的蒸散发都与植被有较强的相关性；区域蒸散发与植被覆盖不明显的区域主要分布在阴山以北地区，包括康保、沽源、张北以及承德的围场北部，这些地区大部分属于坝上地区，气候较为寒冷，除了夏季植被发育较好外，其他季节的植被覆盖均较差，因此蒸散发的变化与植被的相关性不明显。

4.3 人为因素

人类活动对区域蒸散发的分布也有较大的影响,这主要体现在用地类型的变化上。为探究用地类型对蒸散发的影响,本文根据 2000、2005、2010、2015、2020 年 5 期的中科院土地利用空间分布图,并依据中科院土地利用一级分类标准分为耕地、林地、草地、水体、建设用地和未利用土地 6 类,统计得到研究区不同土地用地类型的面积(表 4),结果显示,2020 年不同用地类型面积从大到小依次为:林地>耕地>草地>建设用地>水体>未利用土地;研究区内耕地面积明显减少,主要转化为林地和草地;研究区建筑用地的面积增长了近一倍,使得城市及周边地区的蒸散量出现了明显的下降,特别是张家口、宣化以及怀来城市带地区;研究区的未利用土地面积很少,零星分布于坝上地区,主要分布于康保和沽源地区,在各类用地类型中占比最小。利用 2020 年中科院土地利用数

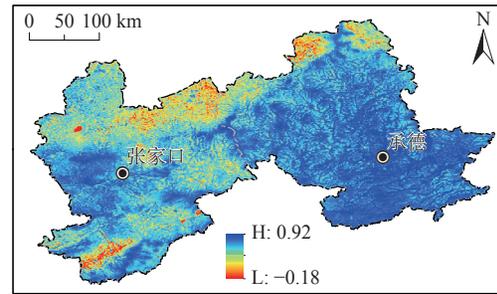


图 8 研究区植被指数与蒸散量的 Pearson 相关系数空间分布图
Fig. 8 Spatial distribution of Pearson correlation coefficients of vegetation index and evapotranspiration in the study area

据对研究区 20 a 蒸散量的平均值进行统计,结果显示,不同用地类型的蒸散量从大到小依次为:林地>水体>草地>耕地>建设用地>未利用土地。受城市热岛效应的影响^[19],一般情况下建设用地的表面温度高于未利用土地,因此建设用地的蒸散量略高于未利用土地。

表 4 张承地区 2000—2020 年不同土地利用类型的面积以及年均蒸散量统计

Table 4 Area statistics of different land use types from 2000 to 2020 and average annual evapotranspiration statistics of different land use types in the ZhangCheng area

地类	土地利用类型的统计面积/ km ²					变化量/km ²	年均蒸散量/mm
	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年		
耕地	25 729.5	25 776.2	25 143.9	25 091.2	24 734.7	-994.8	395.8
林地	26 612.1	26 623.0	26 992.3	26 938.1	26 935.3	323.2	554.5
草地	20 389.4	20 312.5	20 060.4	19 941.2	19 983.5	-405.9	483.2
水体	1 099.7	1 071.2	952.1	963.8	1 046.2	-53.5	488.3
建设用地	1 118.8	1 160.4	2 180.3	2 392.8	2 641.2	1 522.4	356.4
未利用地	1 327.4	1 335.0	949.5	950.2	935.9	-391.5	253.3

5 结论

(1) SEBS 反演结果与 MOD16A2 数据、野外现场实测数据吻合度较好,验证了 SEBS 模型在研究区反演的结果具有较高的可靠性。

(2) 研究区内张家口承德地区 2001—2020 年的蒸散量变化趋势较为一致,均呈现略微上涨的趋势,其中张家口市的多年平均蒸散量为 454 mm,承德市的多年平均蒸散量为 506 mm。

(3) 研究区蒸散量与气温具有较强的正相关性,温度越高,蒸散量越大,降雨对蒸散量的变化也有一定的影响,但是影响没有气温显著;植被与蒸散量的变化呈现较强的正相关性,植被指数越高,蒸散量越大;不同用地类型的蒸散量从大到小依次为:林地>水体>草地>耕地>建设用地>未利用土地。

(4) 人类活动会改变下垫面以及用地类型情况,间接影响蒸散量的空间分布,而蒸散作为水均衡中的

重要组成部分,其长序列的变化研究对于了解张承地区区域水循环,提高水资源的高效利用和管理以及生态环境的保护具有重要的意义。

参考文献 (References) :

- [1] PENMAN Howard Latimer. Natural evaporation from open water, bare soil and grass[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A Mathematical and Physical Sciences, 1948, 193(1032): 120 - 145.
- [2] SEGUIN B, ITIER B. Using midday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal IR data[J]. International Journal of Remote Sensing, 1983, 4(2): 371 - 383.
- [3] 高彦春, 龙笛. 遥感蒸散发模型研究进展[J]. 遥感学报, 2008, 12(3): 515 - 528. [GAO Yanchun, LONG Di. Progress in models for evapotranspiration estimation using remotely sensed data[J]. Journal of Remote Sensing, 2008, 12(3): 515 - 528. (in Chinese with English

- abstract)]
- [4] 尹剑, 欧照凡, 付强, 等. 区域尺度蒸散发遥感估算: 反演与数据同化研究进展[J]. 地理科学, 2018, 38(3): 448 - 456. [YIN Jian, OU Zhaofan, FU Qiang, et al. Review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation: Inversion and data assimilation[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(3): 448 - 456. (in Chinese with English abstract)]
- [5] SU Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2002, 6(1): 85 - 100.
- [6] SU Z. Remote sensing of land use and vegetation for mesoscale hydrological studies[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(2): 213 - 233.
- [7] 郑倩倩, 代鹏超, 张金燕, 等. 基于SEBS模型的精河流域蒸散发研究[J]. 干旱区研究, 2020, 37(6): 1378 - 1387. [ZHENG Qianqian, DAI Pengchao, ZHANG Jinyan, et al. Evapotranspiration in the Jinghe River Basin based on the surface energy balance system[J]. *Arid Zone Research*, 2020, 37(6): 1378 - 1387. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 朱晓倩, 金晓媚, 张绪财, 等. 格尔木河流域山前平原区蒸散量的分布特征[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(5): 55 - 64. [ZHU Xiaolian, JIN Xiaomei, ZHANG Xucai, et al. Distribution characteristics of evapotranspiration in the valley piedmont plain of the Golmud River Basin[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(5): 55 - 64. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 薛阳, 金晓媚, 朱晓倩. 宁夏沿黄经济区蒸散量变化特征及水均衡方法验证[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(3): 27 - 32. [XUE Yang, JIN Xiaomei, ZHU Xiaolian. Variation of evapotranspiration of Ningxia Yellow River economic zone and the validation using water budget method[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(3): 27 - 32. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 金晓媚, 万力, 梁继运. 水均衡法验证蒸散量计算的可靠性: 以张掖盆地为例[J]. 现代地质, 2008, 22(2): 299 - 303. [JIN Xiaomei, WAN Li, LIANG Jiyun. Accuracy verification of evapotranspiration result using hydrological budget method—A case study of the Zhangye Basin[J]. *Geoscience*, 2008, 22(2): 299 - 303. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 张圆, 贾贞贞, 刘绍民, 等. 遥感估算地表蒸散发真实性检验研究进展[J]. 遥感学报, 2020, 24(8): 975 - 999. [ZHANG Yuan, JIA Zhenzhen, LIU Shaomin, et al. Advances in validation of remotely sensed land surface evapotranspiration[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2020, 24(8): 975 - 999. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 于占江. 气候变化对京津冀水资源的影响及对策[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2019. [YU Zhanjiang. Impacts of climate change on water resources in jing-Jin-ji region and countermeasures[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 石嘉丽, 张晓龙, 李红军, 等. 河北坝上地区绿水时空变化及其驱动因素研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(6): 1030 - 1041. [SHI Jiali, ZHANG Xiaolong, LI Hongjun, et al. Spatial-temporal changes in green water and its driving factors in the Bashang area of Hebei Province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(6): 1030 - 1041. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 王佃来, 刘文萍, 黄心渊. 基于Sen+Mann-Kendall的北京植被变化趋势分析[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(5): 13 - 17. [WANG Dianlai, LIU Wenping, HUANG Xinyuan. Trend analysis in vegetation cover in Beijing based on Sen+Mann-Kendall method[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2013, 49(5): 13 - 17. (in Chinese with English abstract)]
- [15] HELSEL Dennis R, FRANS Lonna M. Regional Kendall test for trend[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(13): 4066 - 4073.
- [16] LIBISELLER Claudia, GRIMVALL Anders. Performance of partial Mann-Kendall tests for trend detection in the presence of covariates[J]. *Environmetrics*, 2002, 13(1): 71 - 84.
- [17] YUE Sheng, PILON Paul, PHINNEY Bob, et al. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series[J]. *Hydrological Processes*, 2002, 16(9): 1807 - 1829.
- [18] 严丽坤. 相关系数与偏相关系数在相关分析中的应用[J]. 云南财贸学院学报, 2003, 19(3): 78 - 80. [YAN Likun. Application of correlation coefficient and biased correlation coefficient in related analysis[J]. *Journal of Yunnan Finance and Trade Institute*, 2003, 19(3): 78 - 80. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 肖荣波, 欧阳志云, 李伟峰, 等. 城市热岛的生态环境效应[J]. 生态学报, 2005, 25(8): 2055 - 2060. [XIAO Rongbo, OUYANG Zhiyun, LI Weifeng, et al. A review of the eco-environmental consequences of urban heat Islands[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8): 2055 - 2060. (in Chinese with English abstract)]