北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

基于MOD16的银川地表蒸散量时空特征及影响因素分析

宋硕 赵婉凝 李少然 王亚飞 岳天泽 贾黎明 刘虎

Spatio-temporal characteristics and influencing factors of evapotranspiration in Yinchuan City of northwestern China Based on MOD16

Song Shuo, Zhao Wanning, Li Shaoran, Wang Yafei, Yue Tianze, Jia Liming, Liu Hu

引用本文:
宋硕, 赵婉凝, 李少然, 王亚飞, 岳天泽, 贾黎明, 刘虎. 基于MOD16的银川地表蒸散量时空特征及影响因素分析[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(7):18–26. doi: 10.12171/j.1000–1522.20220100
Song Shuo, Zhao Wanning, Li Shaoran, Wang Yafei, Yue Tianze, Jia Liming, Liu Hu. Spatio–temporal characteristics and influencing factors of evapotranspiration in Yinchuan City of northwestern China Based on MOD16[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(7):18–26. doi: 10.12171/j.1000–1522.20220100

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220100

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于土地利用变化的陕北地区生境质量时空演变及其驱动因素

Spatial–temporal evolution of habitat quality in northern Shaanxi Province of northwestern China based on land use change and its driving factors

北京林业大学学报, 2022, 44(6): 85–95. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210437

北洛河上游县域土地利用时空变化及其对水沙的影响

Spatiotemporal variation of land use in counties of the upper reaches of the Beiluo River and its impact on runoff and sediment

北京林业大学学报, 2024, 46(2): 95–104. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230121

河北坝上土地利用变化对生态服务价值的影响

Impacts of land use change on ecosystem service value in Bashang Area of Hebei Province, northern China

北京林业大学学报, 2019, 41(8): 94–104. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180244

基于LUCC追踪分析的生态系统服务价值时空变化研究

Spatio–temporal variation of ecosystem service value based on LUCC trajectories: a case study of Bosten Lake Watershed

北京林业大学学报, 2021, 43(7): 88–99. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210017

阿勒泰地区生境质量的时空演变及其驱动因素

Spatial–temporal evolution of habitat quality in Altay area and its driving factors

北京林业大学学报, 2024, 46(3): 27–39. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230189

1951—2020年黄河上中游径流变化特征及归因分析

Runoff variation characteristics and attribution analysis of the upper and middle reaches of the Yellow River from 1951 to 2020

北京林业大学学报, 2024, 46(1): 82–92. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230077

DOI:10.12171/j.1000−1522.20220100

基于 MOD16 的银川地表蒸散量时空特征及影响因素分析

宋 硕[1] 赵婉凝[2] 李少然[1] 王亚飞[1] 岳天泽[1] 贾黎明[1] 刘 虎[3]
（1. 省部共建森林培育与保护教育部重点实验室，北京林业大学，北京 100083；2. 林学实验教学中心，北京林业大学，北京 100083；
3. 银川市中山公园，宁夏 银川 750000）

摘要：【目的】阐明 2000—2020 年银川市地表蒸散量变化及其主要影响因素，为以水定市、以水定林提供理论依据。**【方法】**基于 MODIS 蒸散产品 MOD16，气温、降水量和归一化植被指数（NDVI），运用 slope 线性趋势、相关分析等方法，并采用 MOD16A3 数据进行作物缺水指数的计算，对银川市 2000—2020 年蒸散量时空变化特征、不同土地利用类型蒸散量差异及其影响因素进行分析。**【结果】**（1）2000—2020 年银川市蒸散量在 201.2 ~ 344.2 mm 之间，多年均值为 273.4 mm；在空间分布上，整体上呈围绕建成区的中部区域较高，西部贺兰山区域和东部区域较低的分布特征。（2）2000—2020 年银川市蒸散量呈增加趋势，倾向率为 5.093 mm/a，蒸散量增加的区域面积占比最高，为 88.30%，可见银川市大部分区域蒸散量变化趋势是增加的，显著增加的区域主要分布在围绕建成区的部分中部区域。蒸散量减少的区域面积占比为 2.44%，年蒸散量基本不变的区域面积占比为 9.26%。（3）与 2000 年相比，2020 年的耕地、林地、草地、灌木地、湿地、水体、人造地表、裸地的相对变化率为−6.73%、0.33%、−8.34%、−14.87%、21.95%、9.05%、230.45%、−2.08%。银川市蒸散量空间分布受土地利用类型影响显著，多年平均蒸散量由大到小依次为耕地（322.9 mm）、水体（268.5 mm）、人造地表（256.9 mm）、林地（240.0 mm）、湿地（220.3 mm）、灌木地（216.7 mm）、草地（201.9 mm）、裸地（196.4 mm）。（4）对银川市 2000—2020 年蒸散量与气温、降水量、NDVI（2000—2019 年）的相关分析表明，银川市蒸散量与气温、降水量和 NDVI 均呈显著正相关。**【结论】**2000—2020 年，气温、降水量、NDVI 都是影响银川市年均蒸散量上升的驱动因素，其中 NDVI 是最主要影响因子。本研究以期为银川市水资源的合理高效利用，银川市生态需水量研究和生态环境规划提供理论支撑。

关键词：银川；MOD16；蒸散量；土地利用；时空变化；NDVI；作物缺水指数
中图分类号：S715.4；P426.2 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2024)07−0018−09
引文格式：宋硕，赵婉凝，李少然，等. 基于 MOD16 的银川地表蒸散量时空特征及影响因素分析［J］. 北京林业大学学报，2024，46(7)：18−26. Song Shuo, Zhao Wanning, Li Shaoran, et al. Spatio-temporal characteristics and influencing factors of evapotranspiration in Yinchuan City of northwestern China Based on MOD16［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(7): 18−26.

Spatio-temporal characteristics and influencing factors of evapotranspiration in Yinchuan City of northwestern China Based on MOD16

Song Shuo[1] Zhao Wanning[2] Li Shaoran[1] Wang Yafei[1] Yue Tianze[1] Jia Liming[1] Liu Hu[3]
(1. Key Laboratory of Forest Cultivation and Protection of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Experimental Teaching Center of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
3. Zhongshan Park, Yinchuan 750000, Ningxia, China)

Abstract: ［**Objective**］This paper aims to elucidate the change of surface evapotranspiration and its main

收稿日期：2022−03−15 **修回日期：**2022−04−01
基金项目：宁夏回族自治区重点研发计划（2019BFG02024）。
第一作者：宋硕。主要研究方向：城市林业、森林培育。Email：1751744784@qq.com 地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学林学院。
责任作者：赵婉凝，博士，高级实验师。主要研究方向：森林培育。Email：furongzhuoqiuyu@bjfu.edu.cn 地址：同上。贾黎明，博士，教授。主要研究方向：森林培育理论与技术。Email：jlm@bjfu.edu.cn 地址：同上。
本刊网址：http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

influencing factors in Yinchuan City of northwestern China in 2000−2020, and provide theoretical basis for determining cities and forests based on water. [**Method**] Based on MODIS evpotranspiration product MOD16, temperature, precipitation, normalized vegetation index (NDVI), slope linear trend and correlation analysis methods were used to calculate crop water stress index by MOD16A3 data. The spatio-temporal variation characteristics of evapotranspiration in Yinchuan City from 2000 to 2020, the difference of evapotranspiration in different land use types and its influencing factors were analyzed. [**Result**] (1) From 2000 to 2020, evapotranspiration in Yinchuan City ranged from 201.2 to 344.2 mm, with an annual average of 273.4 mm. In terms of spatial distribution, the central region around the built-up area was higher, while the western Helan Mountain region and the eastern region were lower. (2) From 2000 to 2020, the evapotranspiration in Yinchuan City showed an increasing trend, with a tendency rate of 5.093 mm/year, and the area with increasing evapotranspiration accounted for the highest proportion (88.30%). It can be seen that the changing trend of evapotranspiration in most regions of Yinchuan City was increasing, and the significant increase area was mainly distributed in the central area around the built-up area. The area of evapotranspiration decreased was 2.44%, and the area of annual evapotranspiration basically remained unchanged was 9.26%. (3) Compared with 2000, the relative change rates of cultivated land, woodland, grassland, shrub land, wetland, water body, artificial surface and bare land in 2020 were −6.73%, 0.33%, −8.34%, −14.87%, 21.95%, 9.05%, 230.45% and −2.08%, respectively. The spatial distribution of evapotranspiration in Yinchuan City was significantly affected by land use type. The average evapotranspiration was cultivated land (322.9 mm), water body (268.5 mm), artificial surface (256.9 mm), forest land (240 mm), wetland (220.3 mm), shrub land (216.7 mm), grassland (201.9 mm) and bare land (196.4 mm) in descending order. (4) The correlation analysis of evapotranspiration with temperature, precipitation and NDVI (2000−2019) in Yinchuan City from 2000 to 2020 showed that evapotranspiration was significantly positively correlated with temperature, precipitation and NDVI. [**Conclusion**] It can be seen that from 2000 to 2020, temperature, precipitation and NDVI are all driving factors affecting the increase of annual evapotranspiration in Yinchuan City, and NDVI is the most important factor. This study is expected to provide theoretical support for the rational and efficient utilization of water resources in Yinchuan City and better research on ecological water demand and ecological environment planning in Yinchuan City of northwestern China.

Key words: Yinchuan City; MOD16; evapotranspiration; land use; spatio-temporal variation; NDVI; CWSI

西北区域是我国干旱情况最严重的区域，生态环境非常脆弱，因此，开展生态需水研究、实现水资源的合理高效利用尤为必要。宁夏沿黄城市带发展主要依靠限量分配的黄河水，近年来黄河水偏枯，缺水现象严重，且处于周边沙漠及干旱地带的包围之中，生态环境的压力日益增大。生态需水研究对区域生态建设、水资源合理利用、以水确定发展路径至关重要；宁夏沿黄城市带水资源来源有限，但区域人口不断增长，土地利用方式不断变化，城市森林建设不断增加，水资源是否能够支撑这些变化至关重要[1]。本研究的目的是阐明 2000—2020 年银川市地表蒸散量变化及其主要影响因素，为以水定市、以水定林提供理论依据。

对银川市水资源的利用情况进行精准估算，可为区域水资源的管理及合理利用提供参考，可有效缓解银川市水资源空间分布不均、干旱期延长的问题[2]。蒸散是水分从地球表面移向大气的一个过程，包括植被截流蒸发、植被蒸腾、土壤蒸发和水面蒸发[3]。蒸散通过影响土壤热通量、返回大气的显热通量和因蒸发进入到大气的潜热通量之间的分配关系来影响区域的生态地理环境状况和水分条件[4−5]。影响蒸散的因素有很多，包括太阳辐射、温度、湿度、风速等气候条件以及土壤、植物种类等。从水文循环的角度出发，蒸散是水资源最主要的消耗量，是进行区域水量平衡分析，流域水资源监测、评价和管理的控制要素，也是难以准确测定和评价的要素。如蒸渗仪法、涡动相关法、波文比法等大多数传统的蒸散监测方法只能提供点尺度的计算，考虑到地表异质性、传热过程的动态性等多方面的复杂因素，遥感技术作为现如今资源环境监测的重要工具，可有效地解决这些问题，进行区域尺度蒸散量的计算和时空动态变化的研究。

王卓月等[6]分析了 2004—2019 年银川平原地表蒸散量的变化特征及影响因素，预测了 2024 年地表蒸散量的发展趋势和土地利用结构对蒸散量变化的影响，并得出蒸散量的变化与气温、降水、日照时数呈正相关，与相对湿度呈负相关，并未分析植被生长与蒸散量的关系。赵卓文[7]分析了宁夏地区 1980—2014 年的气象数据，包括气温、日照时数、相对湿度和降水量，得出气候变化特征，并对 2000—2014 年的归一化植被指数（NDVI）的持续性进行分析，得出植被覆盖情况有所改善的结论，利用生长季累积降水量和 NDVI 计算出降水利用率，由此对宁夏地区 2000—2014 年土地荒漠化情况进行监测及其驱动因子分析。薛阳[8]利用 MODIS 数据和 TM 数据，分析了 2000、2003、2007、2010、2014 年沿黄经济区耕地及种植结构的变化，基于 SEBS 模型估算了沿黄经济区的蒸散发量，探讨了其时空动态变化规律和影响因素，得出蒸散量变化与气温、降水量、植被覆盖程度均呈正相关关系，结合沿黄经济区在 2014 年的生态需水量多年平均降水量，得出沿黄经济区在维持现有生态环境不变的条件下需引用黄河水量的最小值。

土地利用与人类的生活息息相关，是生态文明建设的重要组成部分[8–9]。因此，提高土地利用率对我国经济社会发展和生态环境保护具有重要意义。国际地圈生物圈计划、全球变化人文计划等，在进行环境质量和区域水循环研究、制定区域可持续发展的战略过程中，都将土地利用/覆被变化作为核心研究[10–11]。孙琪等[12]分析了新疆不同土地利用类型水分利用效率及其对气候因子的响应。张殿君[13]以黄土高原典型流域甘肃天水罗玉沟流域为研究区，进行了 SEBAL 模型区域优化及蒸散量与土地利用/覆被变化关系研究。

MODIS 是搭载在 Terra 和 Aqua 两颗卫星上的中分辨率成像光谱仪，具有全球免费、光谱范围广、接受简单、更新频率高等特点。MOD16 是美国航空航天局（NASA）基于 MODIS 数据，考虑植被蒸腾、土壤表面蒸发等多种阻力算法提供的全球蒸散量数据集，近年来 MOD16 被国内外广泛应用于蒸散监测，具有较好的反演精度。Sebinasi Dzikiti 等[14]以南非的干旱区域为研究区，对比了蒸散量估算模型 MOD16 和 PT-JPL 的精度，结果表明，MOD16 的模拟精度更高。陈少丹等[15]利用 Penman-Monteith（P-M）模型，结合 1961—2013 年的气象站点资料计算出长江中下游的潜在蒸散量，与 MOD16A2 计算出的潜在蒸散量进行比对，得出二者相关性较高，MOD16A2 可用于区域遥感蒸散的研究。喻元等[16]采用关中地区及周边 28 个气象站点的小型蒸发皿数据，对 MOD16 数据进行了精度验证，并利用 MOD16 数据分析了关中地区的蒸散发时空特征。

本研究获取银川市 2000—2020 年 MOD16 数据，利用 ArcGIS10.2 的空间分析功能，量化银川市近 21 年来蒸散量变化情况与空间分异规律。对比 2000、2010、2020 年各土地利用类型的蒸散量，分析近 21 年来温度、降水量和植被变化对蒸散变化的影响。综合探讨银川地区蒸散量时空演变规律及其影响因素，为加强水资源的合理、高效利用，更好地进行生态需水量研究和生态环境规划提供参考。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

银川是宁夏回族自治区首府，中国西北地区重要中心城市、国家历史文化名城，是宁夏沿黄城市带的中心城市、首批“国际湿地城市”，全市下辖兴庆区、西夏区、金凤区、贺兰县、永宁县和灵武市。银川市位于黄河上游宁夏平原的中部，西靠贺兰山，与内蒙古阿拉善盟接壤，东临黄河。银川市海拔在 1 010 ~ 1 150 m 之间，地域范围在 37°29′ ~ 38°52′N、105°48′ ~ 106°52′E 之间，年均温在 10 ℃ 左右，年降水量在 210 mm 左右，属中温带干旱气候区，日照时间长，积温有效性高，有利于农作物的生长[17]。黄河流经银川 80 余 km，银川拥有自然湖泊 200 余处，湿地面积 531 km^2，素有“塞上江南”的美誉。

1.2 研究方法

1.2.1 数据来源

本文主要基于美国航空航天局提供的 MOD16 数据，结合气象数据（温度、降水量）、NDVI、土地利用数据等来探讨 2000—2020 年银川市蒸散量时空动态变化及其驱动因素。其中，MOD16 是 NASA 基于 MODIS 数据，利用 P-M 模型，综合考虑多种阻力算法提供的全球蒸散量数据集，包括蒸散量（T_E）、潜在蒸散量（T_{PE}）等数据，本文选用的是 2000—2020 年银川市的 MOD16A3 数据，空间分辨率 500 m，时间分辨率为年[18]（https://search.earthdata.nasa.gov）。2000、2010、2020 年 3 年土地利用数据（Globeland30）来自国家基础地理信息中心（http://www.ngcc.cn/ngcc/）。下载数据后利用 MRT 工具对 MOD16A3 数据集进行预处理，包括波段提取、投影转换，根据 MOD16 产品说明对无植被覆盖区（建筑用地、水体等）进行无值化处理，之后利用 ArcGIS10.2 平台的分析功能处理数据。气象数据源自中国气象数据共享网（https://data.cma.cn/），包括年均温（2000—2020 年）、年降水量（2000—2020 年）。NDVI 数据（2000—2019 年）来自中国科学院资源环境科学与数据中心

（https://www.resdc.cn/），利用 Origin2021、SPSS 进行处理。

1.2.2　slope 线性趋势法

通过 slope 线性趋势法，可以计算每个栅格单元的变化趋势，进而反映银川市蒸散量近 21 年来的变化趋势，计算公式为

$$S=\frac{n\sum_{i=1}^{n}i\times T_{\mathrm{E}}-\sum_{i=1}^{n}i\sum_{i=1}^{n}T_{i\mathrm{E}}}{n\sum_{i=1}^{n}i^{2}-\left(\sum_{i=1}^{n}i\right)^{2}} \tag{1}$$

式中：S 为线性倾向率；n 为 2000—2020 年时间序列长度（$n=21$）；T_{E} 代表实际蒸散，它是在实际气象及水分供应不足的条件下的蒸散，$T_{i\mathrm{E}}$ 为第 i 年的蒸散。S 为正时，该像元的蒸散量呈增加趋势；S 为负时，该像元的蒸散量呈减少趋势[19]。

1.2.3　作物缺水指数

作物缺水指数（crop water stress index，CWSI）最早是由 Idso 提出的，之后 Jackson 等对其进行了阐述[20–22]，并给出计算公式。

$$\mathrm{CWSI}=1-T_{\mathrm{E}}/T_{\mathrm{PE}} \tag{2}$$

式中：T_{PE} 代表潜在蒸散，它是在一定气象条件下水分供应充足条件下的蒸散，T_{E} 与 T_{PE} 二者之比为作物缺水的指标。CWSI 因其以热量平衡原理为基础，估算精度高、意义明确、适用范围大，在实际研究中被广泛应用[23–24]。CWSI 的值反映了研究区的干旱情况，它的值在 0 ~ 1 之间，值越小表示干旱程度越轻，值越大表示干旱情况越重。

2　结果与分析

2.1　银川市地表蒸散量时空变化特征

2.1.1　银川市地表蒸散量年际变化特征

2000—2020 年银川市年蒸散量总体上呈波动上升趋势（图 1）。其中 2016—2020 年，银川市蒸散量呈波动下降趋势，2020 年出现了明显程度的下降。线性拟合表明其倾向率为 5.093 mm/a。蒸散量最高的年份出现在 2016 年，为 344.2 mm；蒸散量最低的年份出现在 2000 年，为 201.2 mm。近 21 年来银川市多年平均蒸散量为 273.4 mm。

2.1.2　银川市地表蒸散量空间变化特征

银川市各区域近 21 年来平均蒸散量差异显著（图 2）。银川市各像元的近 21 年来平均蒸散量的空间取值在 187.9 ~ 557.7 mm 之间，整体上呈围绕建成区的中部区域较高、西部贺兰山区域和东部区域较低的特征。

利用线性趋势法计算银川市每个栅格单元的倾向率 S，分析 2000—2020 年的蒸散量变化趋势。根据倾向率 S 的变化范围，将蒸散量变化趋势分为 5 个等级区间，包括显著减少（$S\leqslant -10$）、轻微减少（$-10<S<-3$）、基本不变（$-3\leqslant S\leqslant 3$）、轻微增加（$3<S<10$）和明显增加（$S\geqslant 10$）。

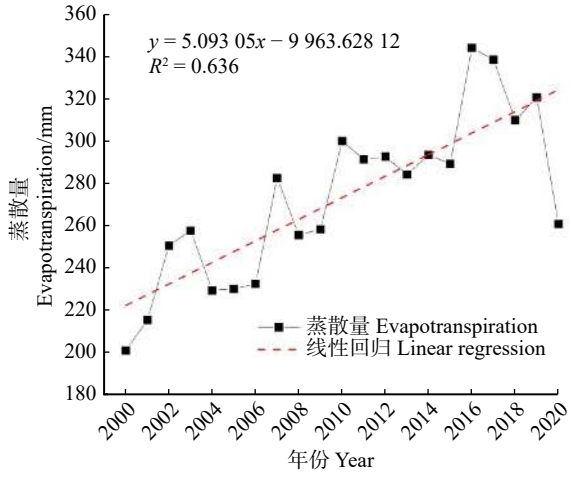


图 1　2000—2020 年银川市地表蒸散量年际变化

Fig. 1　Interannual variation of surface evapotranspiration in Yinchuan City from 2000 to 2020

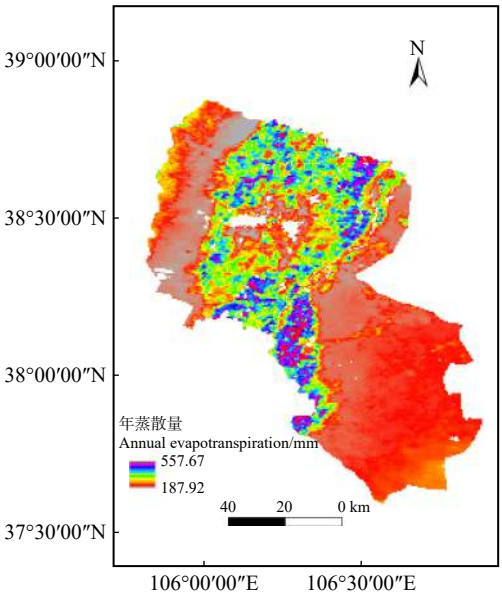


图 2　银川市 2000—2020 年平均蒸散量分布

Fig. 2　Distribution of annual evapotranspiration in Yinchuan City from 2000 to 2020

银川市年蒸散量呈增加的区域面积为 88.30%，占大部分，且以轻微增加为主（占比 81.54%），显著增加的区域主要分布在围绕建成区的部分中部区域（占比 6.76%）（图 3）。银川市年蒸散量基本不变的区域面积占比 9.26%，年蒸散量减少的区域面积占比为 2.44%，以轻微减少为主，占比 2.35%，减少的区域主要分布在建成区。

2.2　不同土地类型蒸散量变化特征

与 2000 年相比，2020 年的耕地、林地、草地、灌

木地、湿地、水体、人造地表、裸地的相对变化率为−6.73%、0.33%、−8.34%、−14.87%、21.95%、9.05%、230.45%、−2.08%(图 4);银川市 2000、2010、2020 年的平均蒸散量分别为 201.2、300.2、261.1 mm(图 5)。

利用 Arcgis10.2 平台的区域统计功能提取出不同土地利用类型的蒸散量,计算得出 2000、2010、2020 年各土地利用类型的平均蒸散量大小依次为耕地(322.9 mm)、水体(268.5 mm)、人造地表(256.9 mm)、林地(240 mm)、湿地(220.3 mm)、灌木地(216.7 mm)、草地(201.9 mm)、裸地(196.4 mm)(图 6)。其中,裸地最低,耕地最高,两者相差 126.5 mm,由此可见,蒸散量与土地利用类型关系密切。

2000、2010、2020 年银川市各土地利用类型蒸散量如表 1 所示。耕地、林地、草地、灌木地、湿地、水体、人造地表、裸地的蒸散量在 3 年间均呈先上升后减少的趋势。

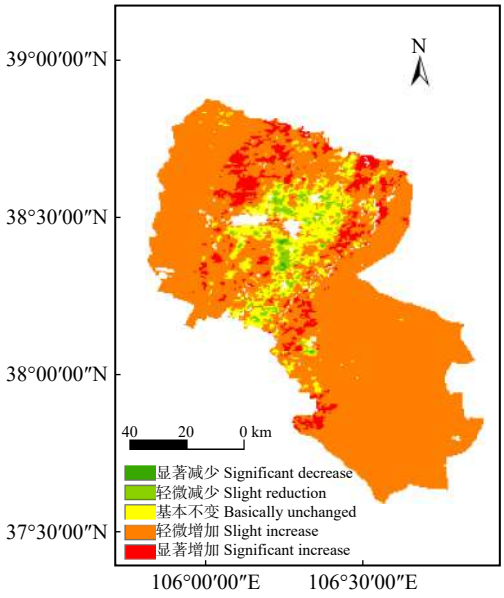


图 3 银川市 2000—2020 年蒸散量变化趋势

Fig. 3 Variation trend of evapotranspiration in Yinchuan City from 2000 to 2020

2.3 作物缺水指数(CWSI)变化趋势

近 21 年来,CWSI 随年份变化成波动下降趋势,干旱状况有所好转,最大值出现在 2000 年,为 0.892,干旱状态较严重;最小值出现在 2016 年,为 0.794。21 年 CWSI 的平均值为 0.841(图 7)。结合图 4 和图 7 结果发现:2000、2010、2020 年耕地的 CWSI 分别为 0.859、0.78、0.809;林地的 CWSI 分别

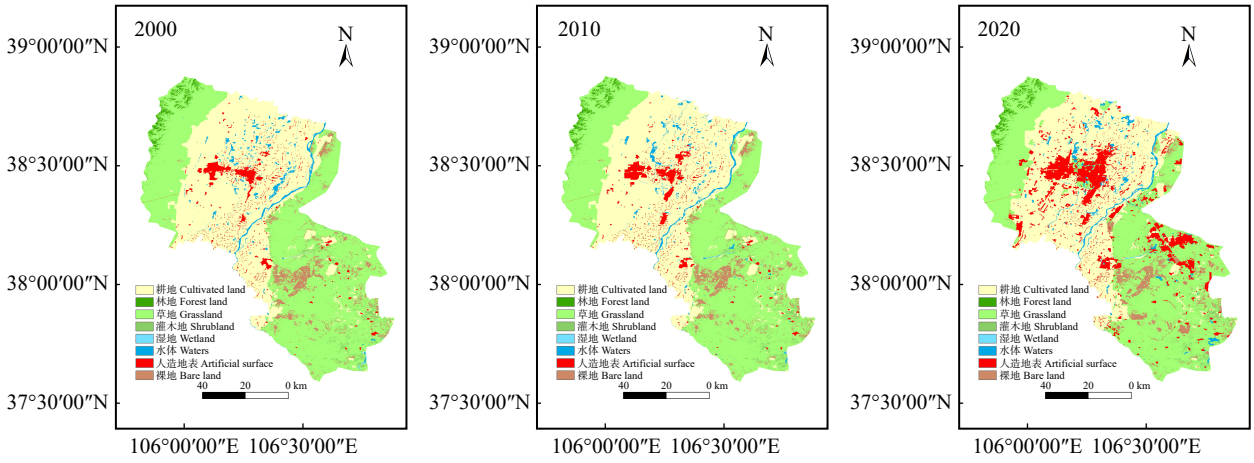


图 4 银川市 2000、2010、2020 年土地利用

Fig. 4 Land use maps of Yinchuan City in 2000, 2010 and 2020

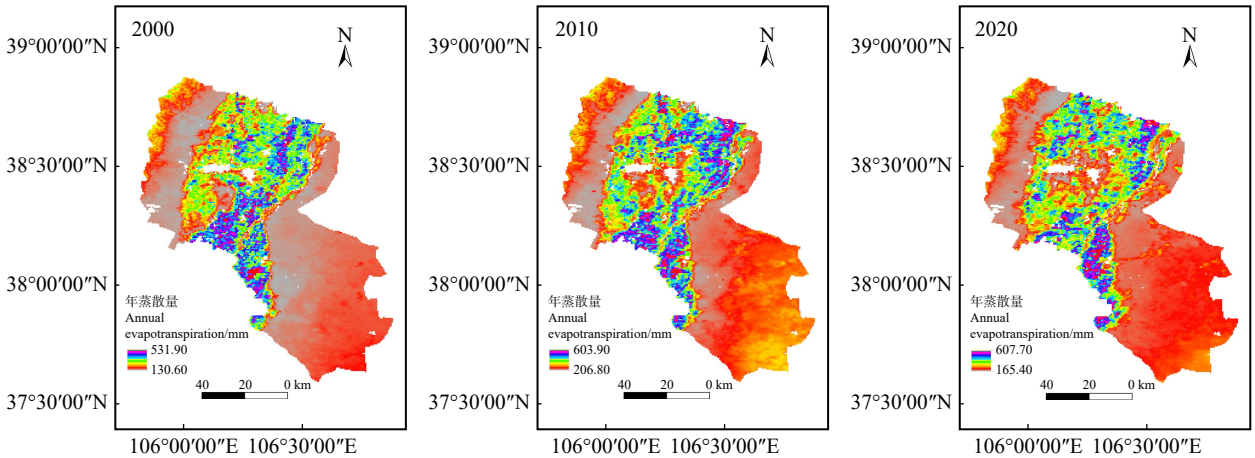


图 5 银川市 2000、2010、2020 年蒸散影像

Fig. 5 Annual evapotranspiration images of Yinchuan City in 2000, 2010 and 2020

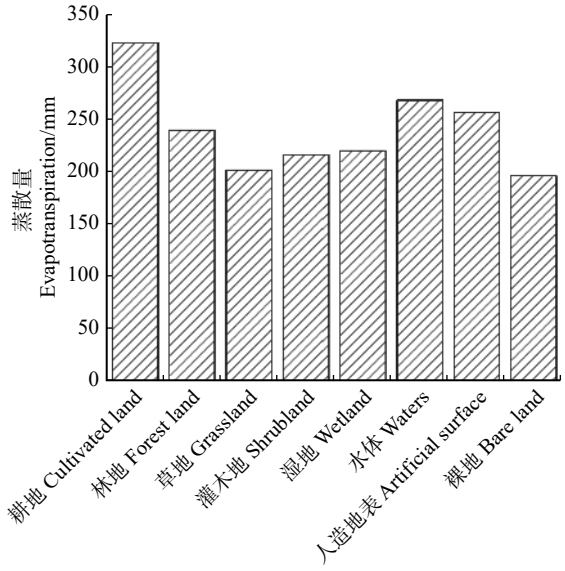


图 6　银川市各土地利用类型 2000、2010、2020 年平均蒸散量

Fig. 6　Average evapotranspiration of various land use types in Yinchuan City in 2000, 2010, and 2020

为 0.902、0.853、0.876；草地的 CWSI 分别为 0.919、0.852、0.884；灌木地的 CWSI 分别为 0.912、0.829、0.866。由此可见，4 种植被类型的 CWSI 在这 3 年中均呈先下降后上升的趋势，相对 2010 年，2000、2020 年植被的干旱状况更严重。

2.4　银川市蒸散量变化的影响因素分析

2.4.1　气温、降水和 NDVI 的线性趋势分析

2000—2020 年近 21 年来银川市的年均气温在 9.62 ~ 11.00 ℃ 之间，平均气温为 10.29 ℃，最低气温为 2012 年的 9.62 ℃，最高气温为 2013 年的 11.00 ℃（图 8）。

2000—2020 年近 21 年来银川市的年降水量在 90.1 ~ 288.5 mm 之间，平均降水量为 211.4 mm，最低降水量为 2005 年的 90.1 mm，最高降水量为 2002 年的 288.5 mm（图 9）。

2000—2019 近 20 年来银川市 NDVI 在 0.346 ~ 0.488 之间，平均 NDVI 为 0.416，最低 NDVI 为 2000 年的 0.346，最高 NDVI 为 2012 年的 0.488（图 10）。由此可见：2000—2020 年年均温、年降水量和 2000—2019 年 NDVI 均呈波动上升趋势，平均每年倾向率分别为 0.042、2.356、0.005，与银川市蒸散量变化趋势较为相似。

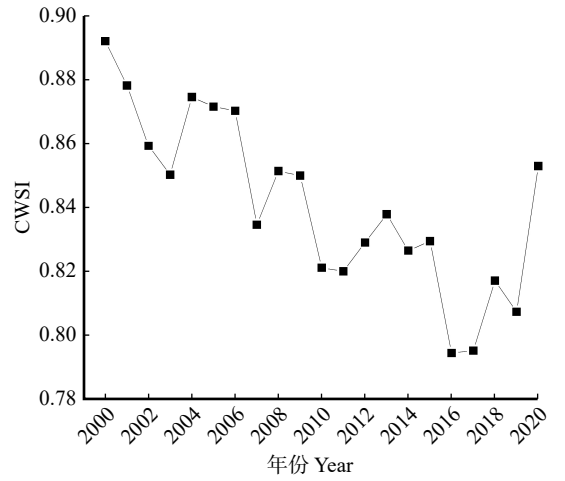
2.4.2　蒸散量与气温、降水和 NDVI 相关性分析

对银川市 2000—2020 年蒸散量、年均温、降水量和 2000—2019 年 NDVI 进行相关性分析，并进行皮尔逊相关性分析及显著性检验。表 2 显示：银川市蒸散量与 NDVI 相关性最强，相关系数最高，为

表 1　2000、2010、2020 年银川市各土地利用类型蒸散量

Tab. 1　Evapotranspiration of various land use types in Yinchuan City in 2000, 2010 and 2020　　mm

年份 Year	耕地 Cultivated land	林地 Forest land	草地 Grassland	灌木地 Shrubland	湿地 Wetland	水体 Waters	人造地表 Artificial surface	裸地 Bare land
2000	262.6	198.6	151.9	157.3	183.1	225.6	239.2	146.0
2010	368.1	277.0	248.4	270.8	256.9	318.4	296.9	240.1
2020	337.9	244.3	205.5	222.0	221.1	261.4	234.6	203.2



CWSI. 作物缺水指数。CWSI, crop water stress index.

图 7　2000—2020 年作物缺水指数 CWSI 变化趋势

Fig. 7　Variation trend of crop water stress index(CWSI) from 2000 to 2020

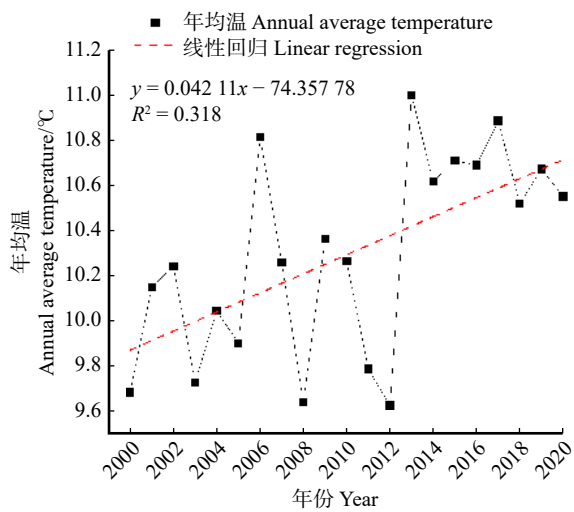


图 8　2000—2020 年年均温变化趋势

Fig. 8　Variation trend of annual mean temperature from 2000 to 2020

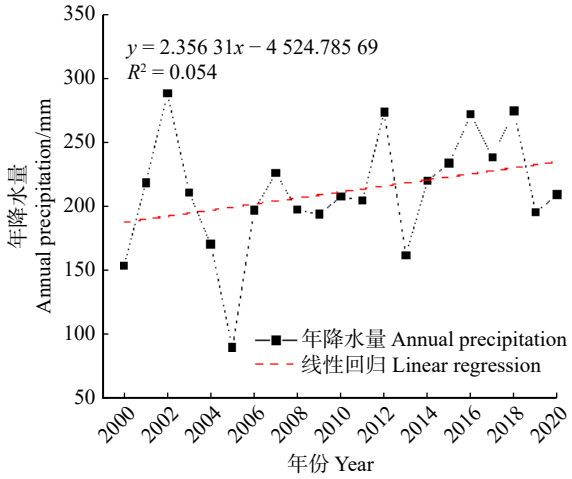


图 9 2000—2020 年降水量变化趋势

Fig. 9 Trend of precipitation change from 2000 to 2020

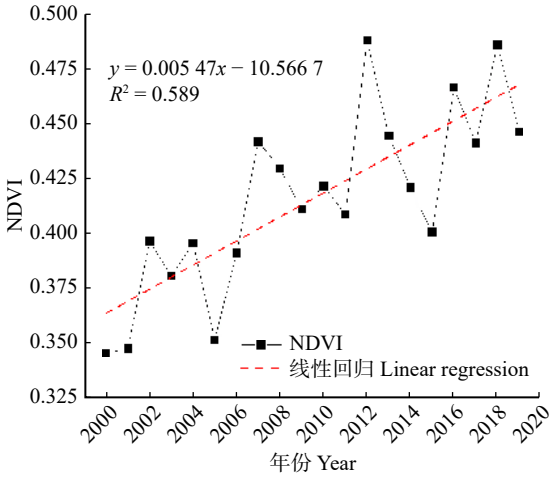


图 10 2000—2020 年 NDVI 变化趋势

Fig. 10 Changing trend of NDVI from 2000 to 2020

0.858，呈显著正相关，通过了 $P = 0.01$ 的显著性检验；银川市蒸散量与降水量的相关性次之，相关系数为 0.525，呈显著正相关，通过了 $P = 0.05$ 的显著性检验；银川市蒸散量与气温的相关性最低，相关系数为 0.485，呈显著正相关，通过了 $P = 0.05$ 的显著性检验。可见 2000—2020 年，气温、降水量、NDVI 均是影响银川市年均蒸散量上升的驱动因素，而其中 NDVI 是银川市蒸散量变化趋势的最主要影响因子。

3 讨 论

银川市地表蒸散量近 21 年来呈现波动上升趋势，多年平均蒸散量为 273.4 mm。近年来银川市地表蒸散量变化趋势与河南省[25]相似。21 年来，银川市年降雨量范围为 90.1 mm（2005 年）~ 288.5 mm（2002 年），年蒸散量范围为 201.2 mm（2000 年）~ 344.2 mm（2016 年）。CWSI 的大小反映了研究区的干旱情况，CWSI 的峰值变化受降水、气温、地形、作物生长期及作物蒸腾作用等的影响[26]。本研究分析得出近 21 年来银川市 CWSI 呈波动下降趋势，由此可知，近年来银川市的干旱情况有所好转。

表 2 银川市蒸散量与气温、降水量、NDVI 相关性分析

Tab. 2 Correlation analysis of evapotranspiration with temperature, precipitation and NDVI in Yinchuan City

影响因素 Influencing factor	相关系数 Correlation coefficient	*P*
蒸散量–气温 Evapotranspiration-air temperature	0.485*	0.026
蒸散量–降水量 Evapotranspiration-precipitation	0.525*	0.014
蒸散量–NDVI Evapotranspiration-NDVI	0.858**	< 0.01

注：**表示在 $P = 0.01$ 水平（双侧）上显著相关，*表示在 $P = 0.05$ 水平（双侧）上显著相关。Notes: ** indicates a significant correlation at $P = 0.01$ level (both sides), * indicates a significant correlation at $P = 0.05$ level (both sides).

2000、2010、2020 年 3 年土地利用变化相比：耕地、林地、草地、灌木地、湿地、水体、人造地表、裸地的相对变化率为−6.73%、0.33%、−8.34%、−14.87%、21.95%、9.05%、230.45%、−2.08%；2000、2010、2020 年森林绿地（含灌木）、草地和耕地等植被的年蒸散量分别为 202.3、302.7、266.5 mm，分别占全市年总蒸散量的 92.56%（2000 年）、92.46%（2010 年）、86.79%（2020 年），所占比例逐渐降低主要是由于人造地表面积的大幅增加，2000 年、2010 年、2020 年人造地表的年蒸散量分别占银川市总蒸散量的 2.51%、2.49% 和 7.93%，湿地、水体、裸地的年蒸散量占全市总蒸散量的比例变化幅度不大。

王卓月等[6]发现：耕地的蒸散量是银川平原区域蒸散量的主要组成部分，2000 年、2014 年两期土地利用类型的年蒸散量均呈现出水田 > 旱田 > 林地 > 草地 > 荒漠的规律，且 2014 年各土地类型的蒸散量均高于 2004 年。张丽平等[27]发现：三江源地区最主要的土地利用类型草地平均蒸散发值为 551.98 mm，较接近三江源蒸散发的平均值，由于森林位于温度和降水量都相对较高的南部，所以森林的平均蒸散发值最大，为 569.98 mm。孔晶晶等[28]发现，新疆玛纳斯河流域的各土地利用类型平均蒸散发量表现为林地 > 水域 > 耕地 > 未利用地 > 建设用地 > 草地。可见在大部分研究区中，均呈现林地的年蒸散量大于草地的年蒸散量的规律特点，这与本研究的结论类似。而林地年蒸散量与耕地年蒸散量的比较因地区而异。本研究结果表明：湿地、水体、人造地表的面积增加，而耕地、草地、灌木地面积均在减少，林地面积略有增加。林地的年均蒸散量（240.0 mm）、灌木地的年均蒸散量（220.3 mm）、草地的年均蒸散量（201.9 mm）远小于耕地的年均蒸散量（322.9 mm）。

由此可见，适当增加林地、灌木地、草地的面积，有利于降低银川市的蒸散量，进而缓解银川市的干旱状况。2016—2020 年，银川市蒸散量呈波动下降趋势，2020 年出现了明显程度的下降，推测是由于银川市的造林绿化工作在近年来有显著推进，导致蒸散量下降。

3 年 NDVI 分别为 0.346(2000 年)、0.422(2010 年)、0.446(2019 年)。银川市地表蒸散变化趋势的主要影响因子为 NDVI，NDVI 可反映植物的生长状况和营养信息状况，由此可知，银川市近 21 年来的植物生长状况越来越好。NDVI 的上升由多种因素共同作用，包括近年来植被的生长状况的改善和土地利用类型的优化，体现在近年来银川市造林绿化工作、植被养护工作的推进、林地面积的增加等方面。MOD16A3 产品的空间分辨率为 500 m，时间分辨率为年，Globeland30 提供的土地利用数据的空间分辨率为 30 m，基本满足本研究需求，但在林地和草地的影像判读上，可能会存在一定误差。本研究以期为银川市水资源的合理利用、土地利用类型优化等提供参考。

4 结　　论

(1)2000—2020 银川市蒸散量在 201.2～344.2 mm 之间，多年均值为 273.4 mm。在空间分布上，整体上呈围绕建成区的中部区域较高、西部贺兰山区域和东部区域较低的分布特征。

(2)2000—2020 年银川市蒸散量呈增加趋势，倾向率为 5.093 mm/a，蒸散量增加的区域面积占比最高，为 88.30%，可见银川市大部分区域蒸散量呈增加的变化趋势，显著增加的区域主要分布在围绕建成区的部分中部区域。蒸散量减少的区域面积占比为 2.44%，年蒸散量基本不变的区域面积占比为 9.26%。

(3)银川市蒸散量变化与土地利用类型关系密切，2000、2010、2020 年平均蒸散量由大到小依次为耕地(322.9 mm)、水体(268.5 mm)、人造地表(256.9 mm)、林地(240.0 mm)、湿地(220.3 mm)、灌木地(216.7 mm)、草地(201.9 mm)、裸地(196.4 mm)。

(4)银川市 2000—2020 年蒸散量与气温、降水量、NDVI(2000—2019 年)的相关分析表明：银川市蒸散量与气温、降水量和 NDVI 相关系数分别为 0.485、0.525、0.858，与气温、降水在 $P = 0.05$(双侧)上显著正相关，与 NDVI 在 $P = 0.01$(双侧)上显著正相关。可见，气温、降水量、NDVI 都是引起银川市年均蒸散量上升的驱动因素，其中 NDVI 是最主要影响因子。

参　考　文　献

[1] 商庆凯, 阴柯欣, 樊新刚, 等. 银川市生态经济可持续发展研究 [J]. 生态经济, 2021, 37(5): 86−91.
Shang Q K, Yin K X, Fan X G, et al. Study on sustainable development of ecological economy in Yinchuan City[J]. Ecological Economy, 2021, 37(5): 86−91.

[2] Wood E F, Su H, Mccabe M, et al. Estimating evaporation from satellite remote sensing[J]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003, 2: 1163−1165.

[3] 李建新, 李鑫. 基于耗水控制的吐鲁番水资源管理实践分析 [J]. 海河水利, 2019(3): 10−13.
Li J X, Li X. Practice analysis of water resources management in Turpan based on water consumption control[J]. Haihe Water Conservancy, 2019(3): 10−13.

[4] 王浩, 杨贵羽, 贾仰文, 等. 以黄河流域土壤水资源为例说明以“ET 管理”为核心的现代水资源管理的必要性和可行性 [J]. 中国科学 (E 辑: 技术科学), 2009, 39(10): 1691−1701.
Wang H, Yang G Y, Jia Y W, et al. A case study of soil water resources in the Yellow River Basin illustrates the necessity and feasibility of modern water resources management based on “ET management”[J]. Science in China (Series E: Technical Sciences), 2009, 39(10): 1691−1701.

[5] 薛明慧. 基于 MOD16 数据的河南省和山东省干旱的时空分布特征 [J]. 亚热带资源与环境学报, 2020, 15(2): 81−87.
Xue M H. Temporal and spatial distribution characteristics of drought in Henan and Shandong provinces based on MOD16 data[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2020, 15(2): 81−87.

[6] 王卓月, 孔金玲, 李英,等. 基于 MOD16 的银川平原地表蒸散量时空特征及影响因素分析 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(3): 53−61.
Wang Z Y, Kong J L, Li Y, et al. Temporal and spatial characteristics of surface evapotranspiration and its influencing factors in Yinchuan Plain based on MOD16[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2021, 48(3): 53−61.

[7] 赵卓文. 宁夏地区 2000-2014 年土地荒漠化遥感监测及驱动因子分析 [D]. 徐州: 江苏师范大学, 2017.
Zhao Z W. Remote sensing monitoring and driving factors of land desertification in Ningxia from 2000 to 2014[D]. Xuzhou: Jiangsu Normal University, 2017.

[8] 薛阳. 宁夏沿黄经济区绿洲与蒸散量的时空分布特征 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2017.
Xue Y. Spatial and temporal distribution of oases and evapotranspiration in Ningxia along the Yellow River Economic Zone[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017.

[9] Costanza R, D’arge R, Groot R D, et al. The value of the world’s ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387(15): 253−260.

[10] 李秀彬. 全球环境变化研究的核心领域: 土地利用/土地覆被变化的国际研究动向 [J]. 地理学报, 1996, 51(6): 553−558.
Li X B. The core domain of global environmental change

research: international research trends of land and land use/land cover change[J]. Acta Geographica Sinica, 1996, 51(6): 553−558.

[11] 李振, 黄海军. 胶州湾海岸带土地利用/覆被变化研究 [J]. 国土资源遥感, 2010, 22(4): 71−76.
Li Z, Huang H J. Study on land use/cover change in Jiaozhou Bay[J]. Remote Sensing of Land and Resources, 2010, 22(4): 71−76.

[12] 孙琪, 徐长春, 罗映雪. 新疆不同土地利用类型 WUE 的时空变化及其对气候因子的响应 [J]. 水土保持研究, 2020, 27(5): 237−243.
Sun Q, Xu C C, Luo Y X. Spatial and temporal changes of WUE of different land use types and their responses to climate factors in Xinjiang[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(5): 237−243.

[13] 张殿君. SEBAL 模型区域优化及蒸散量与土地利用/覆被变化关系研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
Zhang D J. Study on regional optimization of SEBAL model and relationship between evapotranspiration and land use/cover change[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011.

[14] Dzikiti S, Jovanovic N Z, Bugan R D, et al. Comparison of two remote sensing models for estimating evapotranspiration: algorithm evaluation and application in seasonally arid ecosystems in South Africa[J]. Journal of Arid Land, 2019(4): 495−512.

[15] 陈少丹, 张利平, 田祥勇, 等. 基于 P-M 模型和 MOD16 数据的长江中下游潜在蒸散量比较分析 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2019, 52(4): 283−289, 296.
Chen S D, Zhang L P, Tian X Y, et al. Comparative analysis of potential evapotranspiration in the middle and lower reaches of Yangtze River based on P-M model and MOD16 data[J]. Journal of Wuhan University (Engineering Science), 2019, 52(4): 283−289, 296.

[16] 喻元, 白建军, 王建博, 等. 基于 MOD16 的关中地区实际蒸散发时空特征分析 [J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(3): 245−253.
Yu Y, Bai J J, Wang J B, et al. Temporal and spatial characteristics of actual evapotranspiration in Guanzhong Region based on MOD16[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(3): 245−253.

[17] 张银霞, 全卓, 王娟, 等. 4 种园林绿化树种在银川地区的生态适应性评述 [J]. 内蒙古林业科技, 2021, 47(1): 45−49.
Zhang Y X, Quan Z, Wang J, et al. Ecological adaptability of four landscaping tree species in Yinchuan Region[J]. Inner Mongolia Ancient Forestry Science and Technology, 2021, 47(1): 45−49.

[18] 钟昊哲, 徐宪立, 张荣飞, 等. 基于 Penman-Monteith-Leuning 遥感模型的西南喀斯特区域蒸散发估算 [J]. 应用生态学报, 2018, 29(5): 1617−1625.
Zhong H Z, Xu X L, Zhang R F, et al. Estimation of evapotranspiration in Southwest karst region based on Penman-Monteith-Leuning remote sensing model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(5): 1617−1625.

[19] 胡泽银, 王世杰, 白晓永, 等. 贵州省地表温度的遥感反演评价及时空分异规律 [J]. 生态学杂志, 2018, 37(9): 2794−2807.
Hu Z Y, Wang S J, Bai X Y, et al. Remote sensing inversion evaluation and spatiotemporal differentiation of land surface temperature in Guizhou Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(9): 2794−2807.

[20] Idso S B, Jackson R D, Pinter Jr P J, et al. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability[J]. Agricultural Meteorology, 1981, 24: 45−55.

[21] Jackson R D, Idso S B, Reginato R J, et al. Canopy temperature as a crop water stress indicator[J]. Water Resources Research, 1981, 17(4): 1133−1138.

[22] 蒋桂芹, 裴源生, 翟家齐. 农业干旱形成机制分析 [J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(6): 84−88.
Jiang G Q, Pei Y S, Zhai J Q. The formation mechanism of agricultural drought[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(6): 84−88.

[23] Sezen S M, Yazar A, Dasgan Y, et al. Evaluation of crop water stress index (CWSI) for red pepper with drip and furrow irrigation under varying irrigation regimes[J]. Agricultural Water Management, 2014, 143: 59−70.

[24] Kullberg E G, Dejonge K C, Chávez J L. Evaluation of thermal remote sensing indices to estimate crop evapotranspiration coefficients[J]. Agricultural Water Management, 2017, 179: 64−73.

[25] 张志高, 邵亚军, 郭超凡, 等. 基于 MOD16 的河南省地表蒸散量时空变化特征 [J]. 西南师范大学学报 (自然科学版), 2021, 46(9): 128−135.
Zhang Z G, Shao Y J, Guo C F, et al. Temporal and spatial variation of surface evapotranspiration in Henan Province based on MOD16[J]. Journal of Southwest Normal University (Natural Science Edition), 2021, 46(9): 128−135.

[26] 汪左, 王芳, 张运. 基于 CWSI 的安徽省干旱时空特征及影响因素分析 [J]. 自然资源学报, 2018, 33(5): 853−866.
Wang Z, Wang F, Zhang Y. Temporal and spatial characteristics of drought and its influencing factors in Anhui Province based on CWSI[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(5): 853−866.

[27] 张丽平, 敖洋钎, 徐龙坤, 等. 三江源地区蒸散发时空特征及其原因分析 [J]. 科技创新与应用, 2021(11): 1−8.
Zhang L P, Ao Y Q, Xu L K, et al. Spatio-temporal characteristics of evapotranspiration and its causes in Sanjiangyuan Region[J]. Science & Technology Innovation and Application, 2021(11): 1−8.

[28] 孔晶晶, 昝梅, 张振东. 新疆玛纳斯河流域蒸散发时空分布格局研究 [J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(10): 117−124.
Kong J J, Zan M, Zhang Z D. The spatial and temporal pattern of evapotranspiration in Manas River Basin, Xinjiang[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(10): 117−124.

（责任编辑 赵田芸
责任编委 马履一）