

基于蒸散演变驱动的宁夏绿洲平原生态系统耗水变化

吴宏玥^{1,2,3}, 杜灵通^{1,2,3}, 乔成龙^{1,2,3}, 钟艳霞^{1,2,3},
潘海珠^{1,2,3}, 张 祎^{1,2,3}, 施光耀^{1,2,3}, 易志远^{1,2,3}

(1.宁夏大学西北土地退化与生态恢复省部共建国家重点实验室培育基地, 银川 750021;
2.宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021; 3.宁夏大学生态环境学院, 银川 750021)

摘要: 为揭示宁夏绿洲平原蒸散水文过程演变引起的区域耗水变化规律, 在谷歌地球引擎平台下, 利用 2001—2020 年的 MOD16A2 蒸散数据, 基于 Sen 趋势度、重新标度极差分析、多元回归残差分析等时空分析手段, 对宁夏绿洲平原蒸散时空演变特征开展研究, 并分析其驱动因素。结果表明: (1) 2001—2020 年间, 宁夏绿洲平原的年平均蒸散量为 355.37 mm, 且呈 6.75 mm/a 的增加趋势 ($p < 0.01$), 其中, 耕地的年蒸散为 443.50~605.47 mm, 明显高于区域平均蒸散; 同时, 多年平均蒸散远高于同期降水量, 故维持绿洲生态系统平衡需要大量引黄灌溉水源。 (2) 宁夏绿洲平原蒸散在空间上有一定的异质性, 并与地表覆盖类型差异有关, 表现出耕地地区高、草地和城市建成区低的规律。 (3) 宁夏绿洲平原有 77.60% 的区域其蒸散呈显著增加, 但 2020 年后将有 93.90% 的区域蒸散变化趋势将发生逆转。 (4) 人类活动强烈地驱动宁夏绿洲平原蒸散的增强, 其中, 人类活动协同气候变化共同正向驱动的区域占 53.96%。 (5) 蒸散的逐渐增强, 导致宁夏绿洲平原流域内的水分亏缺显著, 即供给生态系统光合生产以及回补土壤储水在减少。综上, 近些年, 宁夏绿洲平原的人为垦殖活动显著增强生态系统的耗水量, 给区域水资源供给带来压力, 未来应控制合理的农业垦殖力度并加强农业结构调整, 以减缓水资源压力。

关键词: 蒸散; 绿洲平原; 人类活动; 水资源消耗; 谷歌地球引擎

中图分类号: P333; P426.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)03-0172-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.03.023

Water Consumption of Ecosystem Driven by Evapotranspiration Evolution in Ningxia Oasis Plain

WU Hongyue^{1,2,3}, DU Lingtong^{1,2,3}, QIAO Chenglong^{1,2,3}, ZHONG Yanxia^{1,2,3},
PAN Haizhu^{1,2,3}, ZHANG Yi^{1,2,3}, SHI Guangyao^{1,2,3}, YI Zhiyuan^{1,2,3}

(1. Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological
Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021; 2. Key Laboratory for
Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China of Ministry of Education, Ningxia
University, Yinchuan 750021; 3. School of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021)

Abstract: To reveal the change of regional water consumption caused by the hydrological process evolution of evapotranspiration in the Ningxia oasis plain, this study investigated the spatial and temporal evolution characteristics of evapotranspiration in the Ningxia oasis plain and analyzed its driving factors under the platform of Google Earth Engine using MOD16A2 evapotranspiration data from 2001 to 2020. The Sen trend, rescaled range analysis, and multiple regression residual analysis were used as the main methods in the study. The results showed that: (1) The annual average evapotranspiration of overall pixels over the oasis of Ningxia plain was 355.37 mm from 2001 to 2020 and showed a significant increasing trend of 6.75 mm/a ($p < 0.01$). The annual evapotranspiration of cultivated land was 443.50~605.47 mm, which is obviously higher than the regional average evapotranspiration. The annual average evapotranspiration over the oasis of Ningxia plain was much higher than its precipitation in the same period. Therefore, a large amount of

收稿日期: 2022-10-21

资助项目: 宁夏重点研发计划项目(2021BEG02010, 2022BEG02051); 宁夏生态状况遥感监测与评价项目(NXCZ20220203); 宁夏优秀人才支持计划项目(RQ0012); 中央引导地方科技发展专项(202008)

第一作者: 吴宏玥(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事生态过程监测与模拟研究。E-mail: wuhongyuede@163.com

通信作者: 杜灵通(1980—), 男, 博士, 研究员, 主要从事资源环境遥感研究。E-mail: dult80@qq.com

irrigation water was needed to maintain the water balance of the oasis ecosystem in Ningxia plain. (2) There was a spatial heterogeneity of evapotranspiration in the oasis of Ningxia plain, which is induced by the differences in land cover types, showing that the cultivated area is higher in evapotranspiration, while the grassland and urban built-up area are lower in evapotranspiration. (3) 77.60% of the areas showed a significant increase in evapotranspiration in the oasis of Ningxia plain. But 93.90% of the areas will had a reverse trend of evapotranspiration after 2020 when compared with the present trend. (4) Human activities strongly drove the increase of evapotranspiration over the oasis of Ningxia plain, and 53.96% of the areas were positively driven by both human activities and climate change. (5) With the gradual increase of evapotranspiration, the water budget in the oasis of Ningxia plain was significantly reduced, which induced the decreasing water supply for photosynthetic production, and soil water remediation in the ecosystem is decreasing. Based on the above results, it can be concluded that human reclamation activities in recent years in the oasis of Ningxia plain have significantly increased the water consumption of the ecosystem, which brought pressure on the regional water balance. In the future, the agricultural reclamation in the oasis of Ningxia plain should be controlled at a reasonable range and the agricultural structure adjustment should be strengthened to mitigate the water resource shortage.

Keywords: evapotranspiration; oasis plain; human activities; water consumption; google earth engine

蒸散(evapotranspiration, ET)是地气水汽交换中陆地向大气输送的水汽总量,包括植物蒸腾和土壤蒸发。作为地球表层水循环与能量转换的关键环节,蒸散在耦合陆地生态系统物质与能量循环方面发挥着非常重要的作用^[1],也是贯穿土壤—植物—大气连续体系(SPAC)的重要过程^[2],在大尺度上,维持着陆地生态系统的稳定性和水文循环的平衡^[3]。全球陆地约有60%的降水通过蒸散返回大气,在干旱区,比例甚至可高达90%^[4]。可见,干旱区的蒸散变化会对水循环过程产生深远影响,进而影响区域生态系统的稳定性和绿洲农业灌溉及生态需水。因此,掌握全球变化背景下干旱半干旱陆地生态系统的蒸散时空变化特征及其响应规律,对维持生态系统的稳定性和区域可持续发展具有重要的理论价值^[5-6],尤其是对农业水资源合理利用和解决区域水资源危机具有重要的指导意义^[7]。绿洲是干旱区重要的生态景观,也是其农业生产系统的基础,蒸散是绿洲区生态耗水的重要部分,干旱区的大气降水远远不能满足绿洲农田的蒸散耗水需求,其生态系统的水文平衡往往需要依靠外源河流或者地下水的补充。在水资源约束条件下,监测干旱区绿洲蒸散的时空演变,研究基于蒸散演变驱动的绿洲生态系统耗水规律,对绿洲农业可持续发展有重要意义。

由于复杂的下垫面条件限制,导致蒸散的观测和估算均比较困难,现有蒸散观测方法可划分为两类,即站点尺度的蒸渗仪法、涡度协方差法和波文比—能量平衡法,区域尺度的大孔径激光闪烁仪法、遥感法和水量平衡法。其中,遥感技术被公认为是区域尺度上估算蒸散最可行的方法,具有较好的跨区域性和时效

性。目前,基于不同数据源和反演模型已开发 MOD16、GLEAM^[8]、GLASS^[9]等众多的遥感蒸散产品,其中,Mu等^[10]利用中分辨率成像光谱仪(moderate resolution imaging spectroradiometer,MODIS)数据开发的 MOD16 蒸散产品,在全球通量结果验证中的精度可达86%^[11-12],在我国也被广泛应用^[13]。贺添等^[14]在站点和区域尺度上对2001—2010年MOD16产品进行验证,认为其对农田生态系统蒸散的模拟精度较高,相关系数和均方根误差分别为0.82,0.59 mm/d;王鹏涛等^[15]利用MOD16对2000—2012年陕甘宁黄土高原区的蒸散时空分布进行研究,通过与盐池、同心、固原三地的蒸发皿数据相比较,相对误差较小,均为0.1;在省域尺度上,刘可等^[16]利用MOD16对2001—2014年宁夏草地蒸散的时空变化特征及影响因素研究发现,MOD16模型模拟可解释61%的实际蒸散量变化,其精度适用于干旱区生态系统的蒸散监测。由此可见,MOD16是开展干旱区蒸散监测和水文循环研究的重要空间数据。

位于我国西北干旱区的宁夏绿洲平原因黄河灌溉而兴盛,经过两千多年的发展,已成为宁夏重要的灌溉农业区。但由于宁夏绿洲平原开发过程中水资源的不合理利用,使宁夏绿洲平原呈现耗水量大,但用水效率低,水资源承载能力总体处于临界承载状态,水资源短缺已成为制约农业发展的重要因素^[17]。根本原因是缺乏区域蒸散耗水规律及其演变的科学认识,在气候变化和人类活动影响下,农业发展没有考虑区域供水能力与蒸散耗水间的平衡关系。为此,拟利用遥感技术和时空数据分析方法,对宁夏绿洲平原近20年的蒸散时空演变格局与特征进行研究,以

期揭示蒸散过程对生态系统耗水的影响作用,从而为宁夏黄河流域生态保护和高质量发展提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

宁夏绿洲平原位于宁夏回族自治区中北部(104.9°—106.9°E, 37.4°—39.2°N),沿黄河两岸呈“J”字形分布,由近东西走向的卫宁平原和近南北走向的银川平原组成,总面积约 8 955 km²,长约 280 km,宽为 10~60 km,海拔为 1 100~1 300 m,地势由平原两侧向黄河河道倾斜(图 1)。研究区属中温带干旱区,气候复杂多样,光照充足但降雨量少,年日照时间约 3 000 h,丰富的光照有利于作物的生长发育。然而不足 200 mm 的年均降水量和高达 1 600 mm 以上的年均水面蒸散导致宁夏绿洲平原的内源性水资源供给极度不足,而外源性的黄河输入水资源为该区域带来无限生机。宁夏绿洲平原是典型的引黄灌溉区域,从秦汉开始便开渠引流,孕育了“塞上江南”的绿洲景观。根据《宁夏水资源公报》^[18]统计,黄河宁夏段 2001—2020 年的年均过水量为 300×10^8 m³,其中,引黄灌溉用水 31.76×10^8 m³,是宁夏重要的农业自流灌区。区域内耕地面积约占 66%,以农田生态系统为主,少量分布草地、湿地和城市生态系统。

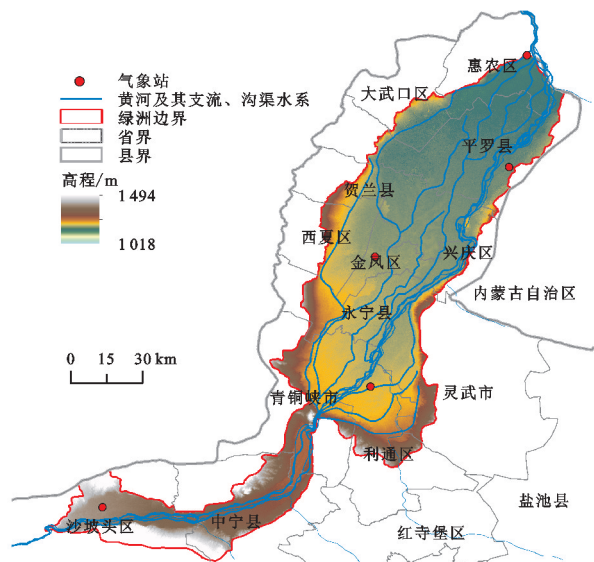


图 1 宁夏绿洲平原区位

1.2 数据来源与预处理

基于谷歌地球引擎(google earth engine, GEE)提供的 2001—2020 年 MODIS ET、土地利用类型、气象数据等对绿洲平原蒸散耗水规律及其影响因素进行分析。GEE 是一种基于云的遥感数据计算平台,其存储完整的对地观测影像和环境数据,并提供在线的运算和数据处理服务,极大地提高遥感技术应用效率。所使用的蒸散数据为 500 m 空间分辨率的

MODIS 蒸散产品(MOD16A2),时间分辨率为 8 天;土地利用类型数据为 500 m 空间分辨率的 MODIS 土地覆盖类型产品(MCD12Q1),时间分辨率为 1 年;用于残差分析的气象数据来源于 ECMWF 全球气候大气再分析产品,空间分辨率为 1 000 m,时间分辨率为 1 年,采用中国气象数据共享服务网(<http://data.cma.cn>)的地面气候资料日值数据集(V3.0)中 4 个典型气象站蒸发皿所实测的数据,验证 MOD16A2 数据集中的潜在蒸散,并对降水数据进行分析。

1.3 研究方法

1.3.1 Sen 趋势度分析和 Mann-Kendall 检验 Sen 趋势度分析及 Mann-Kendall(MK)检验是一种广泛用于气象及水文等领域的趋势分析和非参数检验方法^[19]。Sen 趋势度分析的优点在于对测量误差和离群数据不敏感,因此,非常适用长时间序列蒸散的趋势分析,计算公式为:

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{ET_j - ET_i}{j - i}\right) \forall j > i \quad (1)$$

式中:ET 为蒸散(mm); i, j 均为气候指标时间序列的序号, $1 < i < j < n$;Median 为中位数函数; β 为 Sen 趋势度,其值大于零表明蒸散为增长趋势,反之则为下降趋势。

MK 检验是一种非参数检验方法,对数据分布不作要求,能够不受数据缺失对分析结果的影响,使用 MK 检验来判断 Sen 趋势度的显著性。对于时间序列蒸散 $ET_i, i = 1, 2, 3, 4, \dots, n$,先确定所有对偶值 $(ET_j, ET_i, j > i)$ 中 ET_j, ET_i 的大小关系 S :

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(ET_j - ET_i) \quad (2)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & x_j - x_i > 0 \\ 0 & x_j - x_i = 0 \\ -1 & x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (3)$$

当 $n < 10$ 时,直接使用统计量 S 进行双边趋势检验,在给定显著性水平 α 下,如果 $|S| < S_{\alpha/2}$,则接受 H_0 ,认为时间序列 ET 变化趋势不显著,使用检验统计量 Z 进行趋势检验:

$$Z = \begin{cases} \frac{S}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & (S < 0) \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (5)$$

式中: n 为序列中数据的个数。给定显著性水平 $\alpha = 0.05$,则临界值 $Z - \alpha/2 = \pm 1.96$,当 Z 的绝对值

>1.96 和 2.58 时,表示趋势分别通过信度为 95% 和 99% 的显著性检验。根据 Sen 趋势度是否 >0 和 MK 检验的显著性水平组合,可以诊断出时间序列的5种变化趋势。

1.3.2 重新标度极差分析 利用英国水文学专家 Hurst^[20]提出的 R/S 分析方法(rescaled range analysis method),即重新标度极差分析法构建的赫斯特指数(hurst, H),能够判断时间序列数据是遵从随机游走还是有偏的随机游走,利用 R/S 分析方法研究宁夏绿洲平原蒸散的变化趋势是否具有持续性。Hurst 指数为 $0\sim1$,以 0.5 为间隔,当 $0<H<0.5$ 时,表征蒸散序列未来趋势将与现有变化趋势相反;当 $H=0.5$ 时,蒸散序列在未来将表现出随机游走特征,不具特定趋势;当 $0.5<H<1$ 时,表明蒸散时间序列在未来将表现出与现有趋势一致的持续性特征。 H 越接近于 0 ,其表现出的反持续性越强, H 越接近于 1 ,表现出的持续性越强。

1.3.3 多元回归残差分析 利用多元回归残差分析方法^[21]来揭示气候因素与人为活动对蒸散的变化贡献,其理论假设前提是气候因素对蒸散产生线性关系的驱动,剥离气候驱动的蒸散变化趋势后,剩余残差便是人为活动引起的蒸散变化。多元回归残差分析的计算步骤包括三部分:(1)基于2001—2020年蒸散以及插值后的气温和降水量时间序列数据,以蒸散为因变量,以气温和降水量为自变量,建立二元线性回归模型,计算模型中的各项参数;(2)基于气温和降水量数据以及回归模型的参数,计算得到蒸散的预测值(ET_{cc})用来表示气候因素对蒸散的影响;(3)计算蒸散观测值与(ET_{cc})之间差值,即蒸散残差 ET_{ha} ,用来表示人类活动对蒸散的影响。具体计算公式为:

$$ET_{cc} = a \times T + b \times P + c \quad (6)$$

$$ET_{ha} = ET_{obs} - ET_{cc} \quad (7)$$

式中: ET_{obs} 为基于遥感影像的蒸散实际观测值; a 、 b 和 c 为气象因子的回归系数与截距; T 和 P 分别为2001—2020年平均气温($^{\circ}\text{C}$)和累计降水量(mm)。

1.3.4 蒸散变化的驱动因素判定 利用公式(1)计算得到2001—2020年 ET_{cc} 的变化趋势(β_{cc})、 ET_{ha} 的变化趋势(β_{ha})和 ET_{obs} 的变化趋势(β_{obs}),若 β_{cc} 或 β_{ha} 数值为正,表示起到正向增强作用,若为负,表示起到负向减弱作用。根据 ET_{cc} 、 ET_{ha} 和 ET_{obs} 的变化趋势数值组合,可以判定每个像元蒸散的驱动因素及作用方向,当 $\beta_{obs}>0$ 、 $\beta_{cc}>0$ 、 $\beta_{ha}>0$ 时,气候变化和人类活动起共同正向驱动作用;当 $\beta_{obs}>0$ 、 $\beta_{cc}>0$ 、 $\beta_{ha}<0$ 时,气候变化正向驱动作用;当 $\beta_{obs}>0$ 、 $\beta_{cc}<0$ 、

$\beta_{ha}>0$ 时,人类活动起正向驱动作用;当 $\beta_{obs}<0$ 、 $\beta_{cc}<0$ 、 $\beta_{ha}<0$ 时,气候变化和人类活动共同负向驱动作用;当 $\beta_{obs}<0$ 、 $\beta_{cc}<0$ 、 $\beta_{ha}>0$ 时,气候变化起负向驱动作用;当 $\beta_{obs}<0$ 、 $\beta_{cc}>0$ 、 $\beta_{ha}<0$ 时,人类活动起负向驱动作用。

1.3.5 区域水量平衡分析 以宁夏绿洲平原为整体,对其降水和灌区引水等供水量与蒸散耗水、工业耗水、生活耗水及径流流出相减,即可分析宁夏绿洲平原的区域水量平衡,参考绿洲耗散水文模型,构造公式为:

$$\Delta W = (P + I) - (W_{ET} + W_i + W_l + W_r) \quad (8)$$

式中: ΔW 为宁夏绿洲平原的水量盈亏关系; P 为降水量(m^3); I 为灌溉量(m^3); W_{ET} 为区域蒸散消耗水量(m^3); W_i 为区域工业生产用水量(m^3); W_l 为区域生活用水量(m^3); W_r 为地表产生的径流并通过干流流出研究区的水量(m^3),以上数据通过《宁夏水资源公报》^[18]获得。

2 结果与分析

2.1 宁夏绿洲平原蒸散时空特征

2.1.1 蒸散年际、年内变化趋势 由图2可知,2001—2020年宁夏绿洲平原蒸散和降水量年际变化趋势。年降水量为 $83\sim265$ mm,多年平均降水为 185.95 mm,降水量少且年际波动较大($C \cdot V=0.2$),极端湿润年份的降水量超过极端干旱年份降水量的3倍。年蒸散在 $267.49\sim440.46$ mm,多年平均蒸散为 355.37 mm,蒸散虽然年际波动不如降水量大,但也表现出与降水波动较为一致的规律,即降水量充沛的年份其蒸散也相对高,反之亦然。从近20年的变化趋势来看,宁夏绿洲平原的降水量不具显著变化趋势,但蒸散呈增强趋势,年增加幅度为 6.75 mm/a ($p<0.01$)。从月平均蒸散的年内变化特征来看,3—5月是宁夏绿洲平原年内蒸散相对较低的时段,其中,4月达到年内最低(9.30 mm),随着宁夏绿洲平原灌区开闸灌溉,5月后蒸散急速增强;7月蒸散达到最大值,为 57.4 mm,8月继续维持着高蒸散,2个月的蒸散总量超过全年的 $1/3$;9月蒸散开始降低到 26.4 mm,之后一直保持微弱的降低趋势直至翌年2月。从月平均蒸散与月降水量的对比来看,全年所有月份的蒸散均高于同期降水量,只有4,5,9月的降水量接近同期蒸散,可见,宁夏绿洲平原生态系统的耗水明显高于天然降水供给,从年降水量和年蒸散量的对比来看,维持宁夏绿洲平原生态系统水分消耗的超半数水量来自引黄灌溉等外来补给。

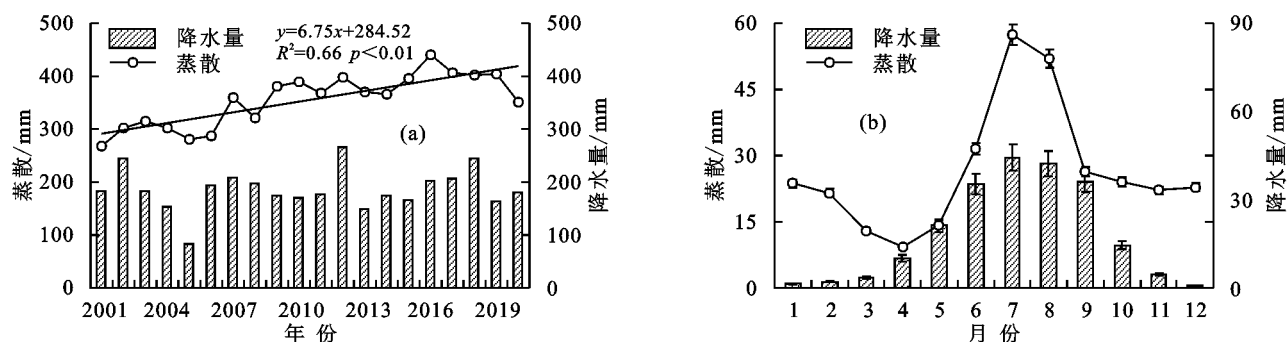


图 2 2001—2020 年宁夏绿洲平原年蒸散、年降水量变化趋势及多年月平均蒸散变化特征

2.1.2 蒸散空间分布特征 通过空间栅格运算得出宁夏绿洲平原 2001—2020 年的平均蒸散空间分布(图 3),宁夏绿洲平原高蒸散区主要集中在沿黄河两侧分布的农田区,越靠近黄河的区域蒸散越大,绿洲边缘草地区域的蒸散则相对较小;此外,银川、石嘴山、吴忠、中卫等城市建成区的蒸散也偏低。结合该区域的土地利用类型现状可知,蒸散较高区域的土地利用类型均为耕地、湿地湖泊等,而天然草地及荒地的蒸散较小,宁夏绿洲平原耕地、湿地湖泊是该区域蒸散耗水最强的生态系统类型,特别是上千年黄河自流灌溉的绿洲农田,其不仅盛产水稻、小麦、玉米等粮食作物,也是干旱区最大的水分消耗系统。利用 MODIS 土地覆盖类型产品 MCD12Q1 针对耕地进行分析,提取 2001 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年的耕地区域和面积,利用 GIS 的空间统计分析,得出区域耕地蒸散的总量(表 1),耕地蒸散年耗水量为 $24.24 \sim 34.33 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中 2015 年达到最高耗水量,占到区域年耗水量的 81.81%。

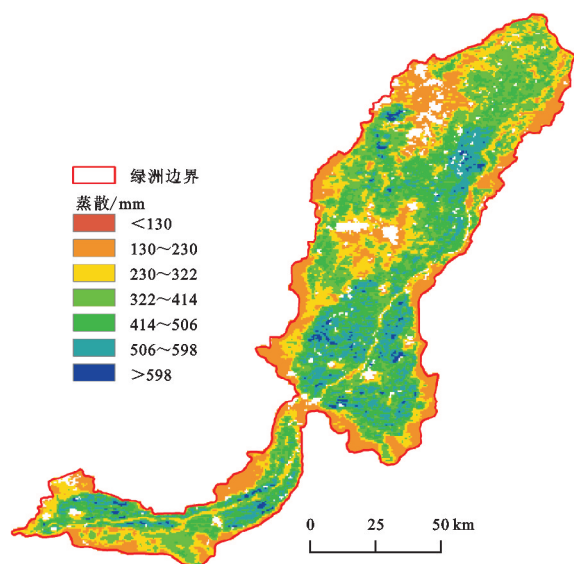


图 3 2001—2020 年平均蒸散空间变化

2.2 蒸散空间变化趋势

2.2.1 Sen 趋势度分析和 Mann-Kendall 检验 利用 Sen 趋势度分析 2001—2020 年宁夏绿洲平原蒸散的变化趋势,结合 Mann—Kendall 法进行变化趋势的

显著性检验,得出近 20 年宁夏绿洲平原蒸散变化趋势(图 4)。宁夏绿洲平原蒸散呈显著增加趋势的区域面积为 $6\,843.69 \text{ km}^2$,占绿洲面积的 77.60%,其中,有 69.40%的区域呈极显著增加($p < 0.01$),超过宁夏绿洲平原面积的 1/2。结果表明,近 20 年间宁夏绿洲平原大部分区域的蒸散在增强,驱动力可能来自于绿洲农业活动的增强和农业垦殖区的增大。宁夏绿洲平原蒸散处于显著减少趋势的区域面积只有 327.65 km^2 ,占绿洲面积的 3.70%,主要分布在城市及其周边的建设用地。整个绿洲平原呈现增加趋势的区域面积显著高于呈现减小趋势的区域面积,距离城市越远的地区,其蒸散显著增加越明显,距离城市越近的地区,其蒸散显著减小的趋势越明显。

表 1 宁夏绿洲平原耕地蒸散量及耗水量

年份	耕地 面积/ km^2	耕地 占比/%	耕地年平均 蒸散量/mm	耕地耗水量/ ($\times 10^8 \text{ m}^3$)	耗水量 占比/%
2001	5464.64	61.02	443.50	24.24	51.64
2005	5554.11	62.02	450.05	25.00	58.08
2010	5742.92	64.13	597.84	34.33	80.50
2015	5669.55	63.31	605.47	34.33	81.81
2020	5885.82	65.72	525.80	30.95	67.35

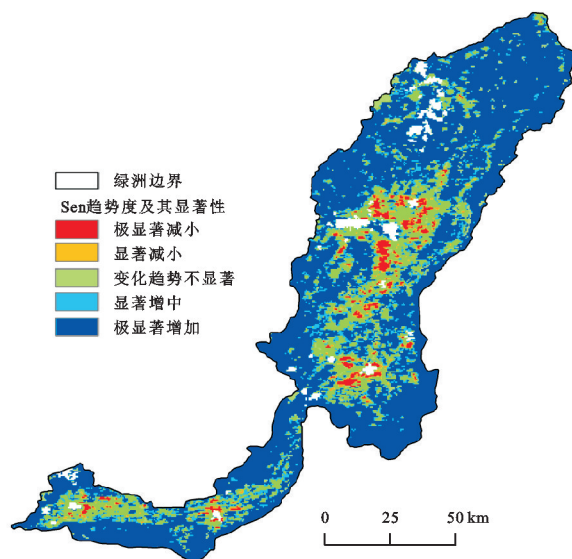


图 4 2001—2020 年宁夏绿洲平原蒸散变化趋势及显著性

2.2.2 蒸散长期演变特征 由图 5 可知,宁夏绿洲平原 2001—2020 年蒸散序列的 Hurst 指数空间分级

及 Hurst 指数的统计特征, 绿洲平原蒸散的 Hurst 指数范围为 0.16~0.87, 平均值为 0.44, Hurst 指数 < 0.5 的像元占比较大。从当前近 20 年宁夏绿洲平原蒸散序列变化趋势的持续性特征, 可以诊断出有 93.90% 的区域其蒸散变化趋势具有反持续性, 即区域的蒸散趋势在未来其将发生逆转, 结合当前宁夏绿洲平原蒸散变化趋势可知, 宁夏绿洲平原近 20 年表现出蒸散显著增强的区域, 其未来将停止增强或发生逆转。另外, Hurst 指数 > 0.5 的像元仅有 6.1%, 区域的蒸散

演变趋势具有持续性, 结合图 4 可知, 未来具有持续性演变趋势的像元多集中在当前显著或极显著减小的区域。由此可知, 绿洲城市开发等人为活动引起的地表蒸散减弱在未来还将继续。结合近 20 年宁夏绿洲平原蒸散变化趋势和其持续性特征分析可知, 未来宁夏绿洲平原农业活动垦殖区的蒸散增强趋势将发生逆转, 城市开发区减弱的蒸散趋势也将继续减弱, 将导致宁夏绿洲平原未来整体的蒸散减弱, 从而降低生态系统水分耗散量。

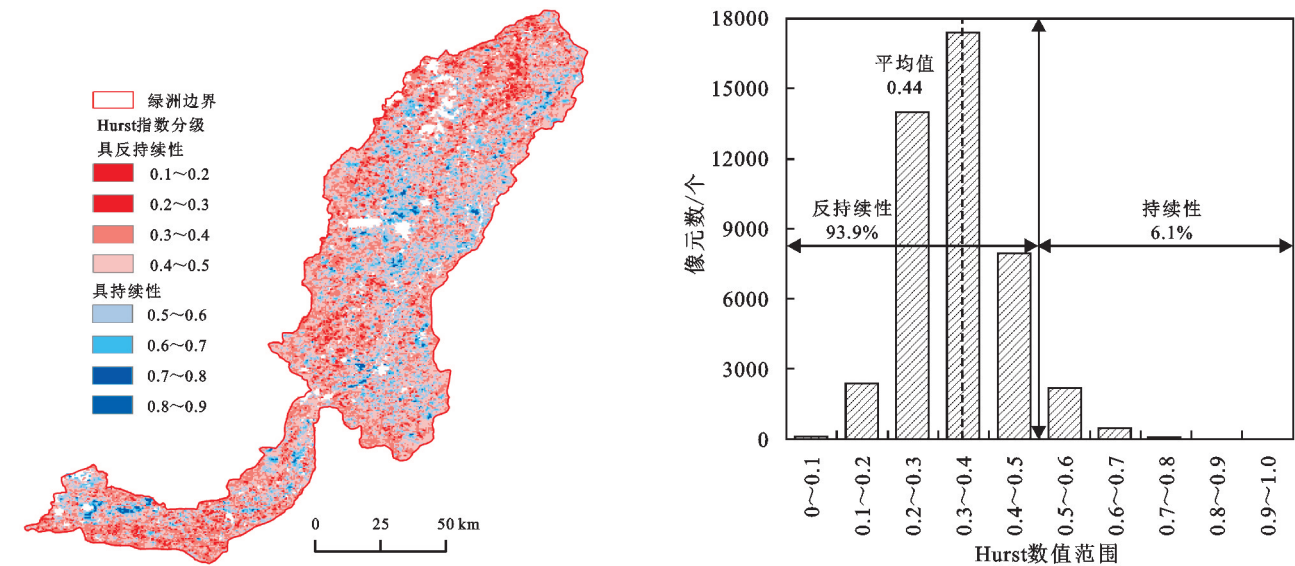


图 5 宁夏绿洲平原蒸散的 Hurst 指数分级及统计

2.3 蒸散演变的驱动因素分析

由图 6 可知, 宁夏绿洲平原大部分区域的蒸散残差为正值, 在不考虑气候驱动作用的情况下, 蒸散残差为正值区域其蒸散受人类活动影响而增强。只有围绕银川、吴忠、中卫和石嘴山等中心城市和县城等城镇、工矿区才出现蒸散残差负值, 其蒸散受人类活动影响而减弱, 与城市建成区不透水面增加, 减弱地气水汽交换过程, 从而减弱蒸散有关。结合蒸散演变、人类活动和气候变化影响的变化趋势组合, 诊断出宁夏绿洲平原蒸散演变的驱动因子。

外在因素正向驱动蒸散增强的区域占宁夏绿洲平原总面积的 89.84%, 其中, 由气候变化和人类活动共同正向驱动蒸散增强的区域占 53.96%, 由人类活动正向驱动蒸散增强的区域占 35.84%, 由气候变化正向驱动蒸散增强的区域只占 0.04%, 几乎可以忽略。总体来看, 外在因素正向驱动蒸散增强的区域主要分布在农业耕作区。与之相反, 外在因素负向驱动蒸散减弱的区域仅占宁夏绿洲平原总面积的 10.16%, 其中, 由气候变化和人类活动共同负向驱动蒸散减弱的区域占 8.33%, 由人类活动负向驱动蒸散减弱占 0.27%, 由气候变化负向驱动蒸散减弱的区域

占 1.56%。外在因素负向驱动蒸散减弱的区域主要分布在城市建成区及其周边, 表明宁夏绿洲平原的蒸散增加主要受人类活动正向驱动或人类活动协同气候变化共同正向驱动。

2.4 宁夏绿洲平原的水分耗散规律

如果将宁夏绿洲平原看作一个系统整体分析, 从区域尺度上来看, 其水分输入主要有 2 个渠道: 一是天然降水, 二是引黄灌溉用水。而水分消耗主要为蒸散, 水分供给和消耗之差, 便是宁夏绿洲平原内生态系统生产力消耗及土壤、地下水交换水量, 为此, 从水量均衡的角度, 分析近 20 年宁夏绿洲平原生态系统耗水规律(图 7)。从 2002—2020 年的均值可知, 宁夏绿洲平原年灌溉用水量(卫宁灌区与青铜峡灌区总引水减去灌区总排水之差)为 $32.44 \times 10^8 \text{ m}^3$, 年降水量为 $12.24 \times 10^8 \text{ m}^3$, 水分输入总量为 $44.68 \times 10^8 \text{ m}^3$, 而利用 MODIS 蒸散产品计算出来的区域蒸散耗水为 $37.60 \times 10^8 \text{ m}^3$, 工业、生活用水及地表径流等其他水分消耗方式年平均消耗水量达 $5.38 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。虽然, 利用水量平衡方程(式 8)计算出宁夏绿洲平原年平均水分盈余 $1.71 \times 10^8 \text{ m}^3$, 但水分盈余量需要供给宁夏绿洲平原生态系统光合生产以及补充土壤水

和地下水的水量,按照植物蒸腾水分约 5%用于光合生产的比例,造成宁夏绿洲平原的水分供需关系失衡。从多年平均值来看,蒸散耗水量以 $0.64 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ($p < 0.01$) 的幅度在逐年增加,导致 2010 年以后水分亏

缺明显(图 7)。这种农业开发背景下的宁夏绿洲平原蒸散耗水量增加,给区域水分平衡带来巨大压力,若继续保持高强度的蒸散,未来可能会消耗区域土壤储水并持续引起地下水水位下降等不良后果。

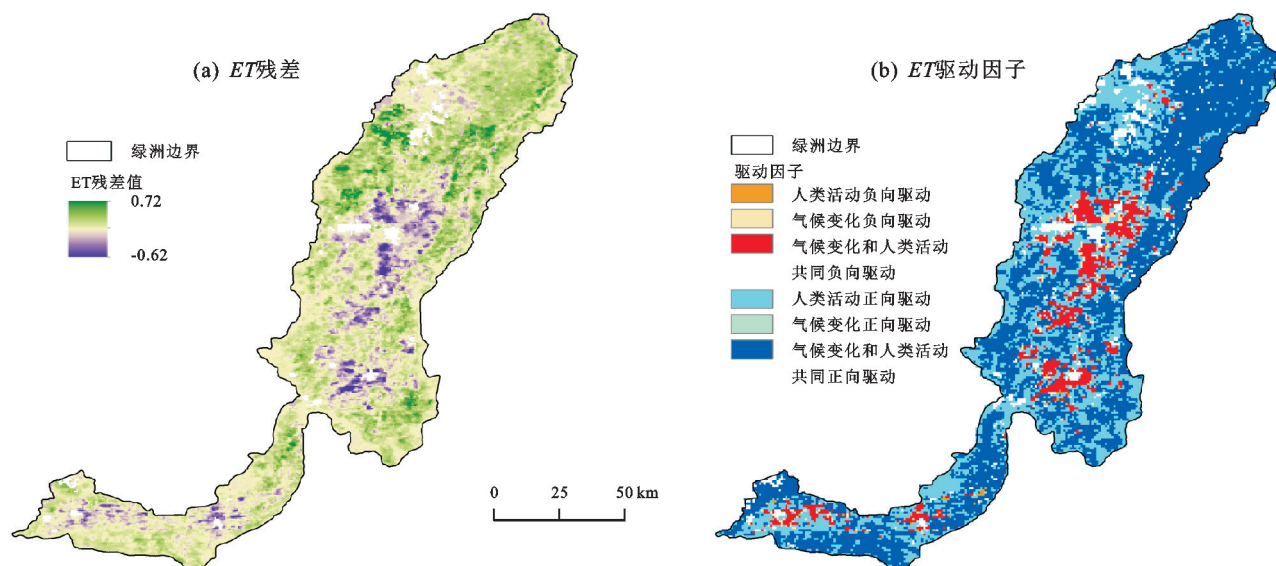


图 6 2001—2020 年绿洲平原蒸散残差及驱动因子

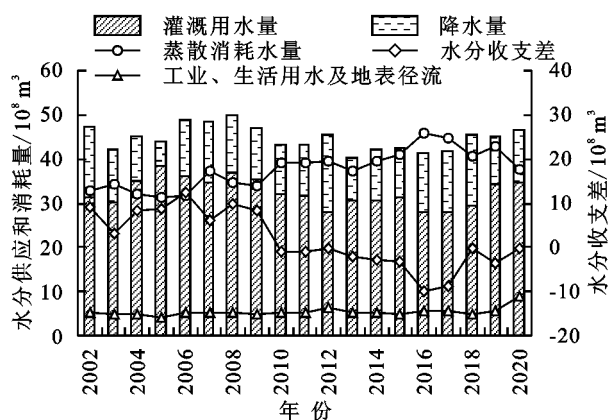


图 7 宁夏绿洲平原 2002—2020 年水分供应、蒸散消耗及其平衡关系

3 讨论

3.1 遥感监测区域生态系统蒸散及估算耗水量的精度

遥感蒸散产品准确度高低,决定区域生态系统蒸散耗水量估算的误差大小,虽然 MOD16 产品算法成熟,数据已发布并公开使用多年,刘可等^[16]利用 MOD16 数据研究宁夏草地蒸散时空特征及演变规律,也有学者^[22]对比 MOD16 数据与同类其他数据的差异。对于宁夏绿洲平原这一特定区域的耗水量估算,遥感蒸散数据 MOD16 的精度至关重要。蒸发皿所测蒸发量与潜在蒸散发之间具有很好的线性关系,因此,基于 MOD16 数据集中潜在蒸散与蒸发皿实际蒸散之间的关系强弱,一定程度上可反映 MOD16 的准确度,因此,本研究对比 MOD16 数据集中的潜在蒸散(potential evapotranspiration, PET)与银川平原主要气

象站实测蒸发皿蒸发量间的关系(图 8)。总体来看,MOD16 的潜在蒸散与气象站实测蒸发量具有显著的相关性($p < 0.01$),从北到南的惠农、银川、吴忠和中卫 4 个站点的相关系数均超过 0.80,且线性斜率为 0.68~0.78。前人^[23]研究也表明,银川平原 MOD16 蒸散与实测蒸散的相关系数可达到 0.88,其中,耕地对该地区的蒸散量贡献显著,且 2004—2014 年间耕地蒸散呈显著增加趋势,与本研究的结果一致。可见,MOD16 潜在蒸散与使用气象站实测蒸散的变化趋势非常一致,即 MOD16 数据集能够满足研究区生态系统蒸散及估算耗水量的需求。

3.2 绿洲扩张开发与蒸散演变的关系

灌溉绿洲的扩张会引起区域土地利用类型和植被覆盖的转变,植被的变化直接影响叶面蒸腾和土壤的蒸发,也改变地表反照率和粗糙度,进而影响潜热输送。已有研究^[24]表明,灌区农业垦植面积的不断扩大明显增强蒸散耗水,植被变化是影响黄河流域蒸散的主要因素。宁夏绿洲平原作为重要的农业生产区和沿黄经济带,近 20 年的开发强度巨大,特别是以贺兰山东麓葡萄产业发展为引领,带动贺兰山东麓山前洪积扇的葡萄种植园开发,大量荒漠草原变成葡萄园耕地;同时,中卫腾格里沙漠草方格治理,也将荒地转变成为草地^[25]。从 2001 年和 2020 年宁夏绿洲平原的土地利用现状对比(图 9)来看,经过 20 年的绿洲开发,草地面积减少 116.44 km^2 ,裸地减少 439.68 km^2 ,但耕地增加 421.18 km^2 ,城市及建设用地增加

134.94 km²。其中,耕地增加是导致区域蒸散及耗水增加的一个主要原因(图 2、图 7);同时,裸地生态治理转变为草地也增强蒸散。本研究发现,人类活动和气候变化正向驱动宁夏绿洲平原蒸散的增强,且以人类活动驱动为主(图 6),但人类绿洲开发活动背

景下的土地利用变化驱动区域蒸散演变的动力学机制尚需深入研究,特别是贺兰山东麓葡萄产业发展对绿洲水文循环过程和未来水资源的压力,不仅是亟须解决的科学问题,也对区域可持续发展的决策至关重要。

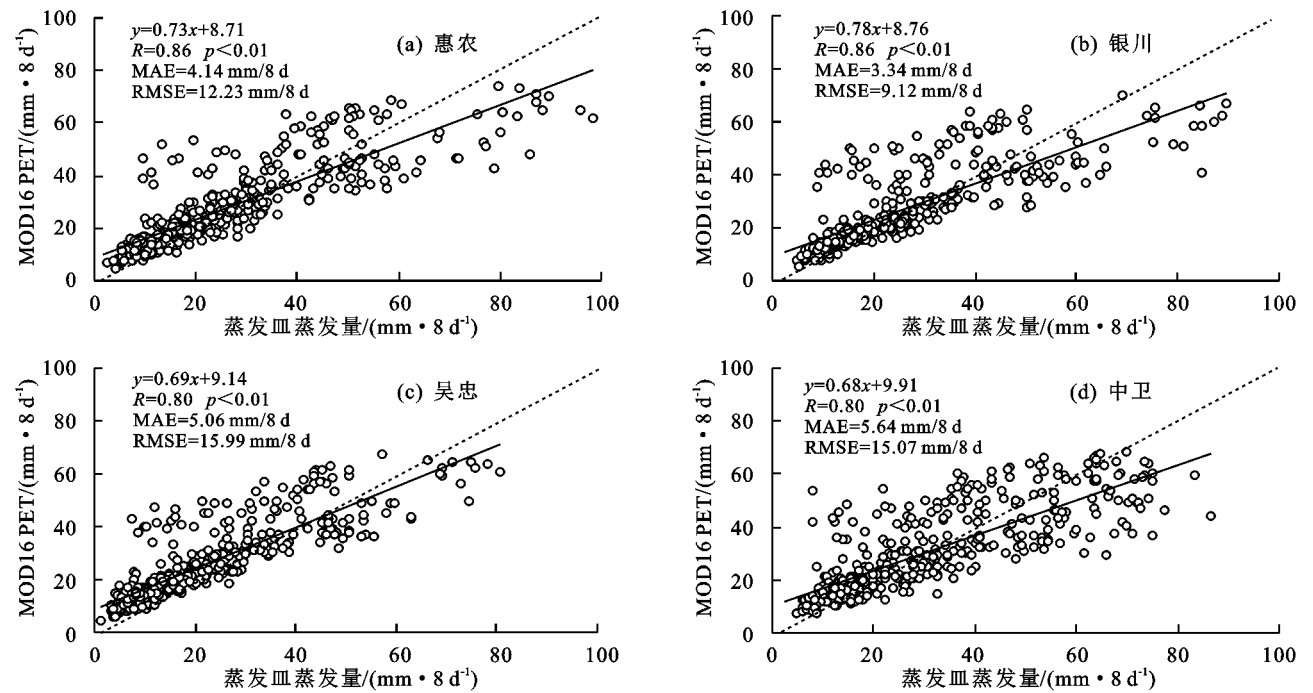


图 8 MOD16 潜在蒸散与气象站点蒸发皿实测蒸散间的关系

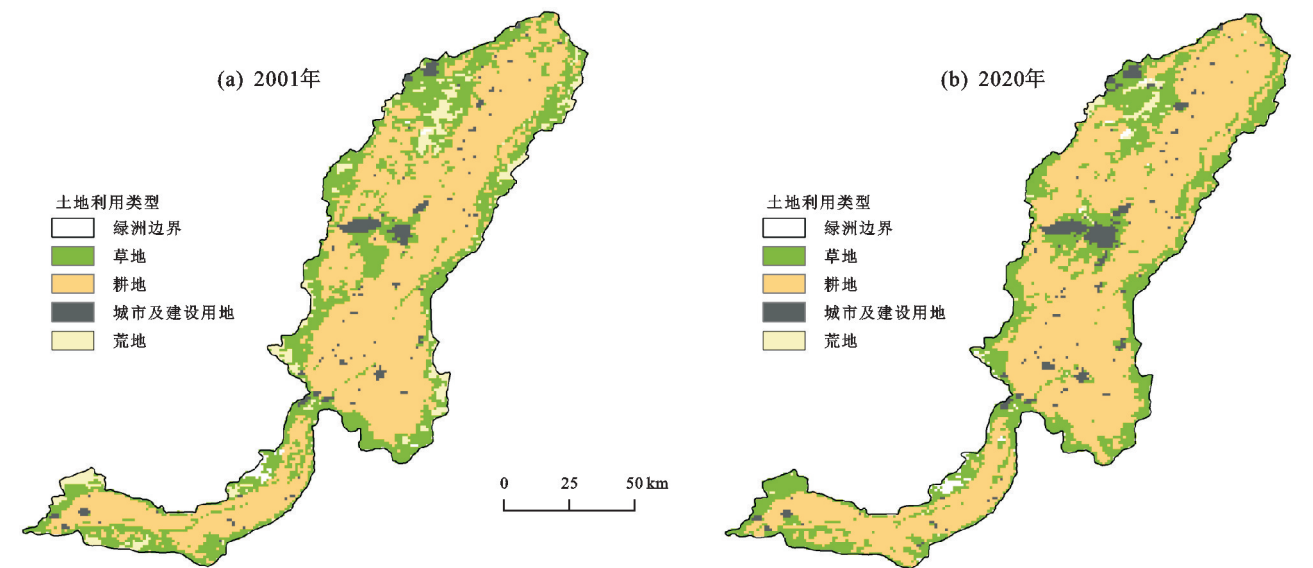


图 9 宁夏绿洲平原 2001 年与 2020 年土地利用

3.3 农业结构调整适当减缓了蒸散耗水

宁夏绿洲平原的农业耕作面积虽然在增加,但是在水资源紧张的情况下,灌区开始进行作物种植结构调整,对蒸散也产生深远影响。近 20 年来,宁夏灌区三大作物的种植总面积^[26]以每年 0.45×10^4 hm² 的速度在显著增加 ($y = 0.45x + 42.81$, $R^2 = 0.52$, $p < 0.01$),但基本上保持水稻面积、增加玉米面积、压减小麦面积的原则,进行作物结构调整(图 10)。因不

同作物对水分蒸散的强度不同,导致区域整体蒸散量发生变化。根据郑方等^[27]对 2007—2014 年宁夏灌区内小麦、玉米和水稻蒸发水量的研究显示,每公顷小麦、玉米和水稻在全生育期向空气中输送的水量分别为 3 661,5 283,7 510 m³,基于此标准和每年的作物种植面积,换算出的各作物及其总耗水量。由图 10 可知,2001 年 3 种作物总蒸散耗水量为 14.60×10^8 m³,到 2020 年则降低到 13.90×10^8 m³,由于作物种植结构

调整,已改变宁夏绿洲平原的作物蒸散总耗水量,其随时间变化的最优拟合方程为 $y = -0.03x^2 + 0.57x + 13.73$ ($R^2 = 0.88$, $p < 0.01$),并在 2011 年达到理论上的极大值。当然,以上耗水量仅仅考虑三大作物的全生育期,而并未对非生育期的土壤蒸发水量进行计算。同时,蒸散在作物生育期变化以及生育期和非生

育期转换的复杂性,导致年内蒸散变化较大,也是影响宁夏绿洲平原蒸散演变的重要动力学机制之一。此外,宁夏绿洲平原自 2012 年起逐步将灌溉方式从大水漫灌向节水灌溉转变,到 2016 年已有明显提升,节水产业和技术的发展也使得水分利用效率提升,减缓单位面积的蒸散强度。

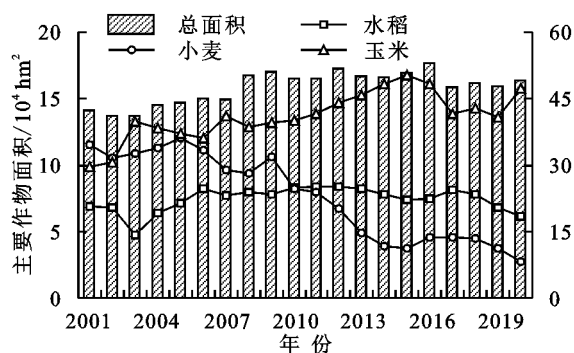
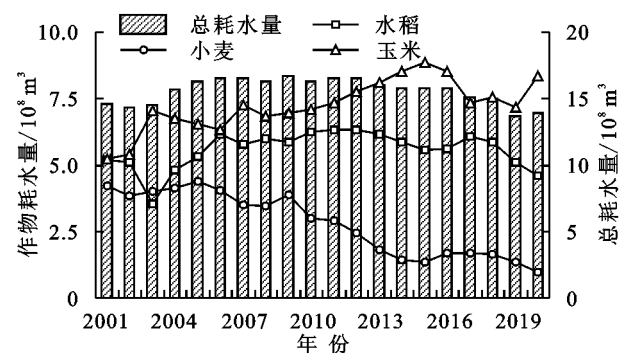


图 10 宁夏绿洲平原 2001—2020 年作物种植面积及其耗水量



4 结论

(1)宁夏绿洲平原区 2001—2020 年平均蒸散为 355.37 mm,降水量不具显著变化趋势,但蒸散呈现增强趋势,年增加幅度为 6.75 mm/a ($p < 0.01$),蒸散年内变化与降水变化较为一致,作为典型的农业区,受农业灌溉活动影响,蒸散远高于降水量,引黄灌溉等外来水分的补给是维持区域生态系统水分消耗的重要水源。

(2)宁夏绿洲平原多年的平均蒸散在空间上有一定的异质性,整体表现出耕地高、草地和城市建成区低的规律。在过去 20 年,宁夏绿洲平原有 77.60% 的区域的蒸散呈现显著增加,残差分析得出,人类活动对蒸散的增加起到重要驱动作用。

(3)从水量平衡来看,显著增强的区域蒸散导致宁夏绿洲平原水分出现显著亏缺,供给生态系统光合生产以及回补土壤水和地下水的水量在减少,高强度的蒸散未来可能过渡消耗区域土壤储水并持续引起地下水水位下降等不良后果,有效的节水措施和合理的水资源利用方式将降低不利发生的可能性,农业结构调整及灌溉方式的改变,使宁夏绿洲平原蒸散自 2016 年开始已有明显的下降,蒸散长期演变特征表明,未来有 93.90% 的区域蒸散将从显著增加转变为降低。

参考文献:

- [1] Bhattarai N, Wagle P. Recent advances in remote sensing of evapotranspiration[J]. Remote Sensing, 2021, 13 (21): e4260.
- [2] Feddes R A, Hoff H, Bruen M, et al. Modeling root water uptake in hydrological and climate models[J]. Bul-

letin of the American Meteorological Society, 2001, 82 (12): 2797-2810.

- [3] Chahine M T. The hydrological cycle and its influence on climate[J]. Nature, 1992, 359(6394): 373-380.
- [4] 赵文智,程国栋.干旱区生态水文过程研究若干问题评述[J].科学通报, 2001, 46(22): 1851-1857.
- [5] Agam N, Evett S R, Tolk J A, et al. Evaporative loss from irrigated interrows in a highly advective semi-arid agricultural area [J]. Advances in Water Resources, 2012, 50: 20-30.
- [6] Javadian M, Behrangi A, Smith W K, et al. Global trends in evapotranspiration dominated by increases across large cropland regions[J]. Remote Sensing, 2020, 12(7): e1221.
- [7] Cha M X, Li M M, Wang X Q. Estimation of seasonal evapotranspiration for crops in arid regions using multi-source remote sensing images[J]. Remote Sensing, 2020, 12(15): e2398.
- [8] Miralles D G, Holmes T R H, De J R A M, et al. Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15(2): 453-469.
- [9] Yao Y J, Liang S L, Li X L, et al. Bayesian multimodel estimation of global terrestrial latent heat flux from eddy covariance, meteorological, and satellite observations [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, 119(8): 4521-4545.
- [10] Mu Q Z, Zhao M S, Running S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm [J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(8): 1781-1800.

(下转第 189 页)

- event scale in scattered tree woodland of Mediterranean climate[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 529: 951-961.
- [13] 邵明安. 土壤物理与生态环境建设研究文集[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2000: 145-148.
- [14] 刘亚玲, 信忠保, 李宗善, 等. 河北坝上樟子松人工林径向生长及其对气候因素的响应[J]. *生态学报*, 2022, 42(5): 1830-1840.
- [15] 付强, 马梓昇, 李天霄, 等. 覆盖物对冻融土壤热量空间分布与传递效率的影响[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(2): 292-298.
- [16] 赵玉峰, 罗专溪, 于亚军, 等. 京津冀西北典型区域地下水位时空演变及驱动因素[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(6): 1301-1313.
- [17] 何志明, 李月臣, 金贤锋, 等. 考虑太阳辐射修正的重庆山地气温空间化模拟[J]. *资源科学*, 2019, 41(6): 1131-1140.
- [18] 马稚桐, 王文科, 张在勇, 等. 浅层包气带土壤水昼夜分布变化规律模拟研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(2): 245-251, 260.
- [19] Sun L B, Chang X M, Yu X X, et al. Effect of freeze-thaw processes on soil water transport of farmland in a semi-arid area [J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 252: e106876.
- [20] 张旭, 塔娜, 甄琦, 等. 寒旱区双层膜日光温室南侧不同保温结构土壤水热试验与模拟[J]. *中国农业大学学报*, 2022, 27(8): 175-185.
- [21] 田梦, 高伟达, 任图生, 等. 条带覆盖免耕下吉林南部玉米行间土壤水分和温度的时空动态[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(7): 1297-1307.
- [22] Zhang R, Wang D, Yang Z Q, et al. Changes in rainfall partitioning and its effect on soil water replenishment after the conversion of croplands into apple orchards on the Loess Plateau [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2021, 312: e107342.
- [23] 王铁浩, 王彦辉, 李振华, 等. 重庆铁山坪马尾松天然次生林降雨截持与贮水特征[J]. *生态学报*, 2021, 41(16): 6542-6551.
- [24] 张鹏飞, 王融融, 戴燕燕, 等. 山西榆次不同植被土壤水分有效性与干燥化效应[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(5): 192-198.
- [25] 奚宏, 唐继斗, 史东梅, 等. 坡度对紫色土坡耕地产流产沙特征的影响[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2022, 20(4): 19-25.
- (上接第 180 页)
- [11] Mu Q Z, Heinsch F A, Zhao M S, et al. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 111(4): 519-536.
- [12] Dzikiti S, Jovanovic N Z, Bagan 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, 11(4): 495-512.
- [13] 吴桂平, 刘元波, 赵晓松, 等. 基于 MOD16 产品的鄱阳湖流域地表蒸散量时空分布特征[J]. *地理研究*, 2013, 32(4): 617-627.
- [14] 贺添, 邵全琴. 基于 MOD16 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(6): 979-988.
- [15] 王鹏涛, 延军平, 蒋冲, 等. 2000—2012 年陕甘宁黄土高原区地表蒸散时空分布及影响因素[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(2): 499-507.
- [16] 刘可, 杜灵通, 候静, 等. 2000—2014 年宁夏草地蒸散时空特征及演变规律[J]. *草业学报*, 2018, 27(3): 1-12.
- [17] 云龙, 段超宇, 李海霞. 宁夏水资源承载能力评价研究[J]. *中国农村水利水电*, 2019(1): 36-40, 50.
- [18] 吴洪相, 白耀华. 宁夏水资源公报(2001—2020 年)[R]. 银川: 宁夏回族自治区水利厅, 2001—2020.
- [19] Jiang W G, Yuan L H, Wang W J, et al. Spatio-temporal analysis of vegetation variation in the Yellow River basin[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 51: 117-126.
- [20] Hurst H E. The long-term storage capacity of reservoirs[J]. *Transactions of the American Society of Civil Engineer*, 1951, 116: 770-799.
- [21] 皮贵宁, 贺中华, 游漫, 等. 2001—2020 年贵州省气候变化及人类活动对植被变化的影响[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(4): 160-167.
- [22] 宫菲, 杜灵通, 刘可, 等. 两种遥感蒸散产品在干旱半干旱地区的应用对比[J]. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(1): 197-202.
- [23] 马小燕, 朱晓雯, 赵金涛, 等. 1995—2015 年宁夏沿黄城市带蒸散发时空变化特征[J]. *水资源与水工程学报*, 2022, 33(2): 216-224.
- [24] 王志成, 李稚, 张辉, 等. 阿克苏河流域灌区土地利用变化对蒸散耗水的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(6): 79-85.
- [25] 赵芸, 贾荣亮, 滕嘉玲, 等. 腾格里沙漠人工固沙植被演替生物土壤结皮盖度对沙埋的响应[J]. *生态学报*, 2017, 37(18): 6138-6148.
- [26] 宁夏回族自治区统计局. 宁夏统计年鉴(2001—2020 年)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001—2021.
- [27] 郑方, 马力文, 赵慧. 宁夏灌区压减水稻面积对水环境的影响[J]. *湖北农业科学*, 2021, 60(19): 25-29.