

基于 TSEB 模型的黄土高原蒸散发估算及其对 气候变化和生态恢复的响应

徐永康^{1,2}, 左德鹏^{1,2}, 韩煜娜^{1,2}, 刘素华³, 赵 晶³, 徐宗学^{1,2}

(1. 北京师范大学水科学研究院; 2. 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室;
3. 华北水利水电大学水资源学院)

摘要:基于双源能量平衡(TSEB)模型模拟了 2000—2020 年黄土高原蒸散发、植被蒸腾和土壤蒸发时空变化特征,采用岭回归和残差分析等方法揭示了蒸散发及其组分对气候和下垫面变化的响应机制。结果表明:研究时段内黄土高原蒸散发增长率为 9.25 mm/a,植被蒸腾增长率为 9.42 mm/a,气候与植被变化主导了蒸散发与植被蒸腾的增加,主要控制变量均为叶面积指数、气温和降水量;土壤蒸发增长率为-0.35 mm/a,气候与植被变化及非植被下垫面变化的共同作用使其呈减少趋势,叶面积指数、降水、气温以及风速是其主要控制变量;气候变化是影响黄土高原蒸散发及其组分变化最重要的驱动因素,植被变化影响次之,非植被下垫面变化影响最小。

关键词:蒸散发;TSEB 模型;岭回归;气候变化;生态恢复;黄土高原

Estimation of evapotranspiration in the Loess Plateau based on TSEB model and its response to climate change and ecological restoration//Xu Yongkang^{1,2}, Zuo Depeng^{1,2}, Han Yuna^{1,2}, Liu Suhua³, Zhao Jing³, Xu Zongxue^{1,2}
(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University; 2. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology; 3. College of Water Resources, North China University of Water Resources and Electric Power)

Abstract: Based on the two-source energy balance (TSEB) model, the spatiotemporal variations of evapotranspiration (ET), plant transpiration, and soil evaporation were simulated on the Loess Plateau from 2000 to 2020. The response mechanisms of evapotranspiration and its components to climate and underlying surface changes were revealed using methods such as ridge regression and residual analysis. The results indicated that the interannual increasing rate of ET on the Loess Plateau during the study period was 9.25 mm/a, and the interannual increasing rate of plant transpiration was 9.42 mm/a. Changes in climate and vegetation, along with non-vegetation underlying surfaces, dominated the increase in evapotranspiration and plant transpiration, with the main controlling factors were the leaf area index (LAT), temperature, and precipitation. The interannual decreasing rate of soil evaporation was -0.35 mm/a, with the combined effects of climate and vegetation changes and non-vegetation underlying surfaces change, and the main controlling factors were LAI, precipitation, temperature and wind speed. Climate change is the most significant driving factor affecting evapotranspiration and its components on the Loess Plateau, followed by vegetation changes, while changes in non-vegetated underlying surfaces have the least impact.

Key words: evapotranspiration; TSEB model; ridge regression; climate change; ecological restoration; the Loess Plateau

蒸散发(ET)在连接陆地生态系统的水分、能量和碳循环中发挥着关键作用^[1-2],其主要包括土壤蒸发(E_s)以及植被蒸腾(E_c)^[3]。蒸散发与蒸发能力、可利用水量^[4]以及植被状态^[5-6]等因素有关,不同气候类型与下垫面条件下的蒸散发量及其驱动因素存在明显差异^[7]。准确量化蒸散发变化及其驱动

因素对探究水文循环在全球变化的敏感性、评估水资源可利用性、维持区域水资源供需平衡和预测干旱变化等方面至关重要^[1,8-9]。近几十年来,由于气候变化剧烈与人类活动强度加剧,陆面蒸散发在不同时空尺度上发生显著变化^[10]。据估算,全球陆地蒸散发 1982—2011 年增速为(0.66±0.38) mm/a,

基金项目:国家自然科学基金项目(52479001);国家重点研发计划项目(2021YFC3201104,2021YFC3201502);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2253200030);水利部黄土高原水土保持重点实验室开放课题基金项目(WSCP202102)
作者简介:徐永康(2001—),男,硕士研究生,主要从事生态水文研究。E-mail:hydrokang@mail.bnu.edu.cn
通信作者:左德鹏(1985—),男,教授,博士,主要从事流域水文过程模拟研究。E-mail:dpzuo@bnu.edu.cn

在 2001—2020 年增速提高至 $(1.19 \pm 0.31) \text{ mm/a}$, 研究表明这一变化主要由温度上升和植被变绿导致^[11]。因此,探究气候与下垫面变化背景下多种环境因子对区域蒸散发及其组分时空变化的动态影响十分必要。

黄土高原是典型的干旱和半干旱地区,约 85% 的降水消耗于蒸散发过程^[9],蒸散发的准确模拟对于该地区的水资源管理和可持续发展具有重要意义。过去几十年,生态恢复工程的实施显著改善了黄土高原植被覆盖和生态环境。然而,在生态恢复的同时,水资源供需矛盾加剧,也使黄土高原下垫面条件和水碳循环过程变化显著,对蒸散发格局产生了深远影响^[13]。此外,随着蒸散发量显著增加,土壤含水量和径流量显著减少,部分地区水资源已接近可持续利用的临界阈值^[1,14]。然而,现有蒸散发研究大多利用缺乏空间信息的站点观测数据进行分析^[15-20],这会导致对黄土高原蒸散发空间异质性考虑不足;再者,现有蒸散发研究更关注蒸散发总量^[21-26],对于变化环境下黄土高原蒸散发各组分时空演变及其驱动机制仍缺乏深度理解和认识^[14,27-30]。因此,需要深入探究气象要素、植被及非植被下垫面变化对黄土高原蒸散发及其组分时空动态变化的贡献。

本文基于双源能量平衡 (two source energy balance, TSEB) 模型模拟了 2000—2020 年黄土高原蒸散发,采用岭回归模型和残差分析等方法,探究了该时段黄土高原蒸散发时空变化特征,分析了气候、植被及非植被下垫面变化对黄土高原蒸散发的动态响应机制,量化了不同气象和下垫面因子对蒸散发及其组分的相对贡献与绝对贡献。以期为保障区域

水安全、精准实施植被恢复工程提供理论依据。

1 研究区概况

黄土高原是世界上最大的高原之一,位于中国北部 ($33^{\circ}43'N \sim 41^{\circ}16'N$, $100^{\circ}54'E \sim 114^{\circ}33'E$), 海拔 $75 \sim 5149 \text{ m}$, 总面积约 64 万 km^2 , 年平均气温 $3.6 \sim 14.6^{\circ}\text{C}$ ^[27], 年降水量 $200 \sim 800 \text{ mm}$ ^[24]。该地区属于干旱和半干旱气候,是典型植被恢复区,降水是植被主要的供水来源,地表覆盖有草地、农田和林地等^[31-32],黄土高原概况与 2000—2020 年土地利用变化情况见图 1。自 1999 年以来,为了控制水土流失,恢复生态环境,提高生活质量,国家实施了“退耕还林(草)”等一系列生态恢复工程,将 1.6 万 km^2 的耕地转化为林草地^[33]。土地利用转移分析表明,黄土高原土地利用类型发生了巨大变化,2000—2020 年黄土高原土地利用变化面积共 87060.57 km^2 ,其中草地与林地的净转入较大。由于植被恢复需要消耗大量的水资源,有研究发现黄土高原的水资源已经接近其可持续利用的极限,可能对农业灌溉和居民生活用水造成潜在威胁^[31-32]。

2 数据和方法

2.1 数据来源和处理

2.1.1 模型驱动数据

TSEB 模型驱动数据包括地理、气象和植被数据。高程数据来自资源环境科学数据平台 (<https://www.resdc.cn/>), 空间分辨率为 250 m ; 土地利用数据采用 1990—2022 年逐年 30 m 分辨率中国土地覆盖数据集 (CLCD)^[34], 将土地利用类型重分类为农田、林地、草地、裸地和其他用地。气象要素包括降

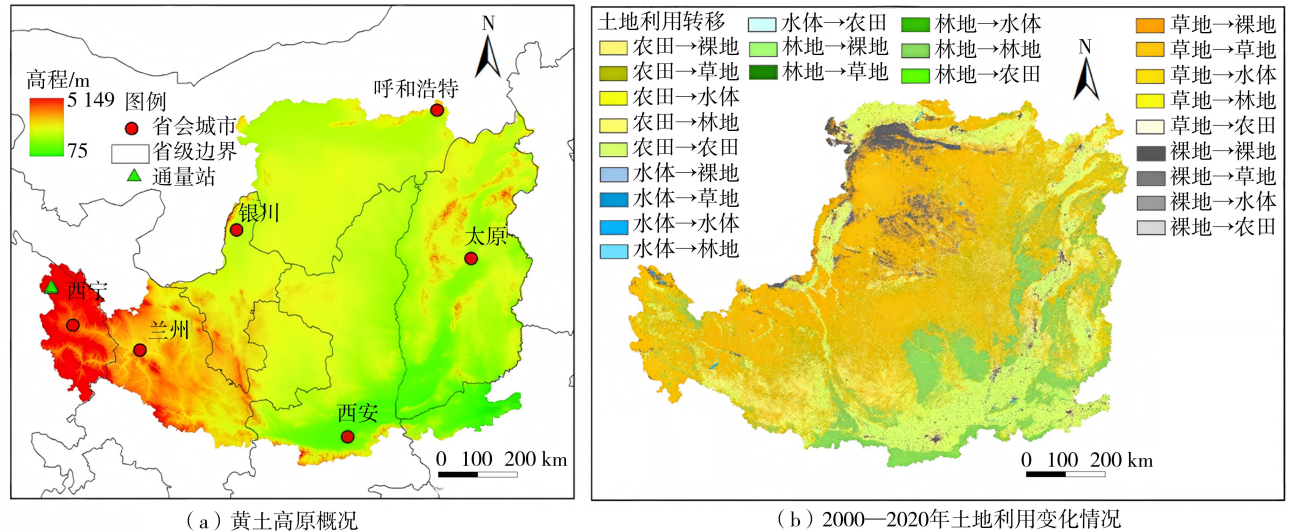


图 1 黄土高原概况与 2000—2020 年土地利用变化情况
Fig. 1 Overview of the Loess Plateau and land use changes from 2000 to 2020

水量(P)、气温(T)、风速(V_w)、日照时数(D_s)和气压(P_a)等,2000—2015 年 1 km 分辨率年平均风速、气压、日照时数和 1982—2022 年 1 km 分辨率降水数据来自国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>),2016—2020 年风速、气压、日照时数、降水量等数据采用全球每日地表摘要(GSOD)数据集,结合高程数据采用协同克里金方法将其插值至 1 km 空间分辨率。地表气温数据采用 2000—2022 年 1 km 分辨率 MOD11A1 产品。植被参数数据包括叶面积指数(leaf area index, I_{la})和植被覆盖度(fraction of vegetation cover,FVC),LAI 使用空间分辨率为 500 m、时间分辨率为 8 d 的 MOD15A2 产品,FVC 数据为 2000—2022 年中国逐年 250 m 植被覆盖度数据集,合成方式采用月最大值合成,数据来源于地球资源数据云(www.gis5g.com)。

2.1.2 模型验证数据与评价指标

模型验证数据包括通量站点数据和遥感蒸散发产品。通量站点数据来源于国家生态科学数据中心(<http://www.nesdc.org.cn/>),包括 2004—2009 年海北站湿地通量日值数据集和 2003—2010 年海北站灌丛通量日值数据集,用于黄土高原不同类型生态系统单点日尺度蒸散发量验证。遥感蒸散发产品采用 MOD16A2、GLEAM 和 PML_V2 数据集。采用多种遥感蒸散发数据集与 TSEB 模型模拟值在年际尺度上进行对比验证,评价指标为确定系数(R^2)、平均相对偏差(BIAS)以及均方根误差(RMSE)。

2.2 研究方法

2.2.1 TSEB 模型

TSEB 模型是在经典的 S-W (Shuttleworth-Wallace)模型基础上简化阻抗参数得出的一种双源能量平衡模型,其将地表看做一个由“土壤-植被”构成的双源蒸发体,充分考虑了植被与土壤之间的水热通量交换过程,将复合辐射温度与地表能量通量分离出植被与土壤组分,从而将地表蒸散发划分为植被蒸腾与土壤蒸发^[34-39]。本文采用融合多源数据的 TSEB 模型模拟黄土高原 2000—2020 年蒸散

发量,土壤和植被能量平衡分量的计算公式为:

$$R_{nc} = LE_c + H_c \tag{1}$$

$$R_{ns} = LE_s + H_s + G \tag{2}$$

其中 $LE_c = \alpha_{pr} f_g \frac{D}{D + \gamma} R_{nc}$ $H_c = \frac{r C_p (T_c - T_{ac})}{R_c}$

$$H_s = \frac{r C_p (T_s - T_{ac})}{R_s} \quad G = K R_{ns}$$

式中: R_{nc} 、 LE_c 、 H_c 、 T_c 和 R_c 分别为植被的净辐射、潜热通量、显热通量、温度和阻抗项; R_{ns} 、 LE_s 、 H_s 、 T_s 和 R_s 分别为土壤的净辐射、潜热通量、显热通量、温度和阻抗项, LE_s 由能量平衡残差获得^[37]; G 为土壤热通量; α_{pr} 为 P-T 系数,采用模型默认值 1.26; D 为饱和水气压-空气温度曲线的斜率; γ 为干湿计常数; r 为空气密度; C_p 为空气在定压下的热容量; T_{ac} 为空气动力温度; K 为比例系数,一般取值为 0.35^[39]。

2.2.2 变化趋势与相对贡献计算方法

本文结合线性回归^[23]和 Mann-Kendall 检验^[9]在像元尺度下计算 2000—2020 年黄土高原蒸散量的变化趋势。

采用岭回归模型在像元尺度上分析气象因素和植被因子之间由于相互作用造成的多重共线性问题^[10],将蒸散发及其组分作为因变量,叶面积指数和各气象要素作为自变量。

本文利用残差分析探究气象因素与植被变化和非植被下垫面变化对黄土高原蒸散发及其组分的影响,利用 TSEB 模型模拟值与岭回归模型模拟值之间的差值表征由城市化发展、灌溉和水利工程建设等人类活动引起的非植被下垫面变化对蒸散发及其组分的作用,从而量化气候与植被变化和非植被下垫面变化对黄土高原蒸散发及其组分的贡献率^[40]。蒸散发变化的驱动因素和贡献率计算结果见表 1。基于以上计算得到的气象因素与植被变化的贡献率,利用比例法计算不同气象因素对蒸散发及其组分的相对贡献;结合气象因素、植被因子等驱动因子标准化后的回归系数得到不同驱动因子的绝对贡献,计算公式为:

表 1 蒸散发变化的驱动因素和贡献率计算结果

Table 1 Driving factors and calculation results of contribution rate of changes in ET					
ET_B 线性回归	ET_R 线性回归	ET_B 与 ET_R 差值线性回归	驱动力	气候与植被变化贡献率/%	非植被下垫面变化贡献率/%
$k_B \geq 0$	$k_R \geq 0$	$k_{rr} < 0$	ET_R	100	0
	$k_R < 0$	$k_{rr} \geq 0$	ET_S	0	100
	$k_R \geq 0$	$k_{rr} \geq 0$	ET_B 和 ET_R	k_R / k_B	k_{rr} / k_B
$k_B < 0$	$k_R < 0$	$k_{rr} \geq 0$	ET_R	100	0
	$k_R \geq 0$	$k_{rr} < 0$	ET_S	0	100
	$k_R < 0$	$k_{rr} < 0$	ET_B 和 ET_R	k_R / k_B	k_{rr} / k_B

注: ET_B 为蒸散发 TSEB 模型模拟值; ET_R 为蒸散发岭回归模型模拟值; ET_S 为 ET_B 与 ET_R 差值; k_B 为 ET_B 线性回归斜率; k_R 为 ET_R 线性回归斜率; k_{rr} 为 ET_S 线性回归斜率。

$$C_{A_j} = \alpha_j k_j k_R / k_B \quad (3)$$

式中: C_{A_j} 为驱动因子 j 的绝对贡献; α_j 为驱动因子 j 的标准化岭回归系数; k_j 为驱动因子 j 的线性回归斜率。

3 结果与分析

3.1 TSEB 模型蒸散发模拟与验证

基于海北站不同生态系统实测蒸散数据的 TSEB 模型模拟结果验证见表 2。不同生态系统日蒸散量模拟值与实测值整体较为吻合。海北站湿地生态系统蒸散模拟值与实测值确定系数均大于 0.6, 平均为 0.808, 均方根误差基本都在 2 mm 以内, 平均相对偏差为 $-0.7 \sim 0.6$ mm。海北站灌丛生态系统蒸散模拟值与实测值确定系数基本大于 0.7, 平均为 0.714, 均方根误差小于 2 mm, 平均相对偏差为 $-0.8 \sim 1.3$ mm。这表明模型较好地模拟了不同生态系统日尺度蒸散发量。

表 2 TSEB 模型模拟结果验证

年份	湿地			灌丛		
	R^2	RMSE/ mm	BIAS/ mm	R^2	RMSE/ mm	BIAS/ mm
2003				0.750	1.923	-0.775
2004	0.904	1.296	-0.115	0.656	0.680	1.293
2005	0.844	1.444	-0.135	0.779	1.149	0.291
2006	0.825	1.432	0.049	0.708	1.556	0.526
2007	0.857	1.369	0.518	0.789	1.454	0.716
2008	0.653	2.042	-0.665	0.750	1.406	0.441
2009	0.762	1.765	-0.475	0.531	1.495	0.361
2010				0.749	1.305	0.306

注:海北湿地通量日值数据集未包含 2003 年和 2010 年实测数据; n 为每年实测日数,取 365 或 366。

TSEB 模型蒸散发模拟结果与 3 种遥感蒸散发产品的对比见图 2。由图 2 可见,模型模拟值 ET 与

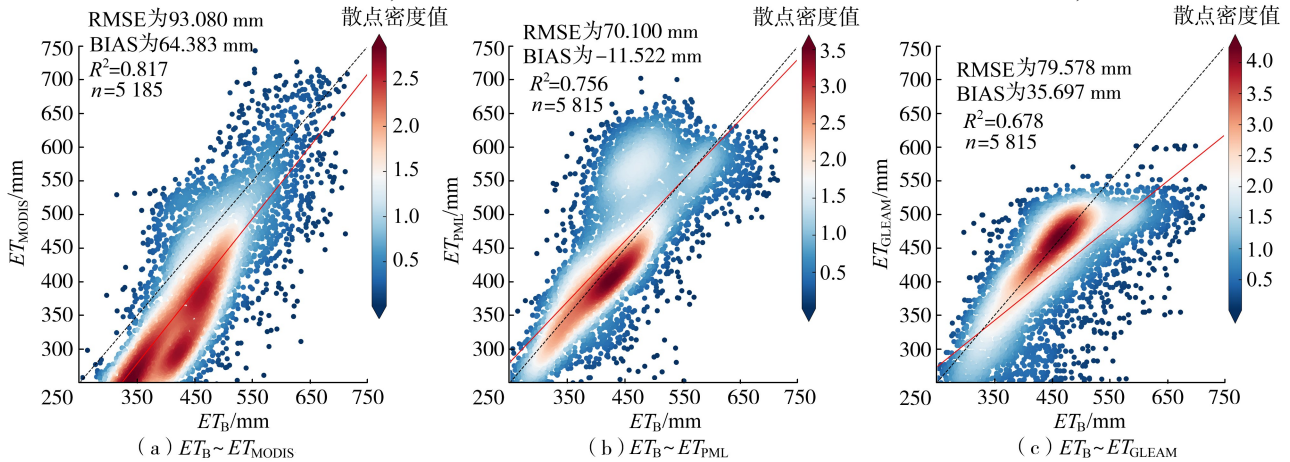


图 2 TSEB 模型蒸散发模拟结果与 3 种遥感蒸散发产品的对比

Fig. 2 Comparison of TSEB model evapotranspiration simulation results with three remote sensing evapotranspiration products

MODIS、PML_V2 和 GLEAM 等 3 种遥感蒸散发产品的参照值相关系数分别为 0.817、0.756 和 0.678,说明模拟结果与主流 ET 数据集一致性较高。模拟值与 3 种遥感产品的平均相对偏差分别为 64.383、 -11.522 和 35.697 mm,均方根误差分别为 93.080、70.100 和 79.578 mm。可以发现模型模拟值与 MODIS 的偏差较大,这可能与 MODIS 与 TSEB 模型对阻抗的参数化方案不同有关^[36],MODIS 采用的 Penman-Monteith 方程在半干旱区可能高估土壤蒸发。总体来看,基于 TSEB 模型的黄土高原蒸散发模拟结果具有较高可信度。

3.2 蒸散发及其组分时空演变特征

2000—2020 年黄土高原蒸散发及其组分的年际变化趋势见图 3。由图 3 可见,黄土高原蒸散量呈显著增长趋势,增速为 9.25 mm/a,其中 2001 年蒸散量最小,为 321.13 mm,2019 年蒸散量 562.60 mm 为最大值;2000—2020 年黄土高原植被蒸腾量及其占蒸散量比例呈明显增长趋势,植被蒸腾增速为 9.42 mm/a,占比年际增速为 0.77;2000—2020 年黄土高原土壤蒸发量呈减少趋势,减速为 0.35 mm/a,土壤蒸发量占比呈明显减少趋势,年际减速为 0.77。

2000—2020 年黄土高原蒸散发及其组分多年平均值及其时空演变特征见图 4。由图 4(a)~(c) 可知,研究时段内黄土高原多年平均蒸散量为 448.68 mm,区域最高值达 825.56 mm,最低值为 149.25 mm,由西北向东南逐渐增加,空间差异显著。蒸散发低值主要集中在宁夏北部、内蒙西南部和甘肃东北部等区域,高值主要分布在甘肃南部、宁夏南部以及河南西北部等区域。从组分上看,植被蒸腾空间分布特征与蒸散发类似,多年平均蒸腾量

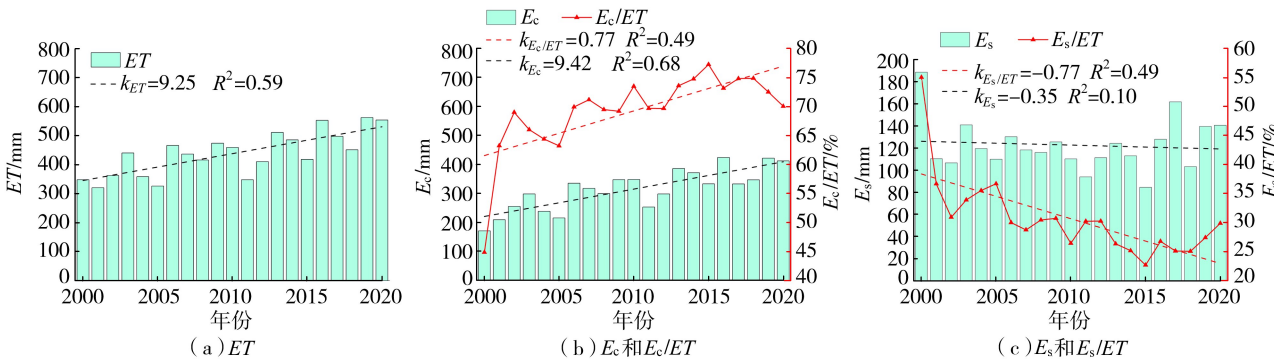


图 3 2000—2020 年黄土高原蒸发及其组分年际变化趋势

Fig. 3 Interannual changes of evapotranspiration and its components on the Loess Plateau from 2000 to 2020

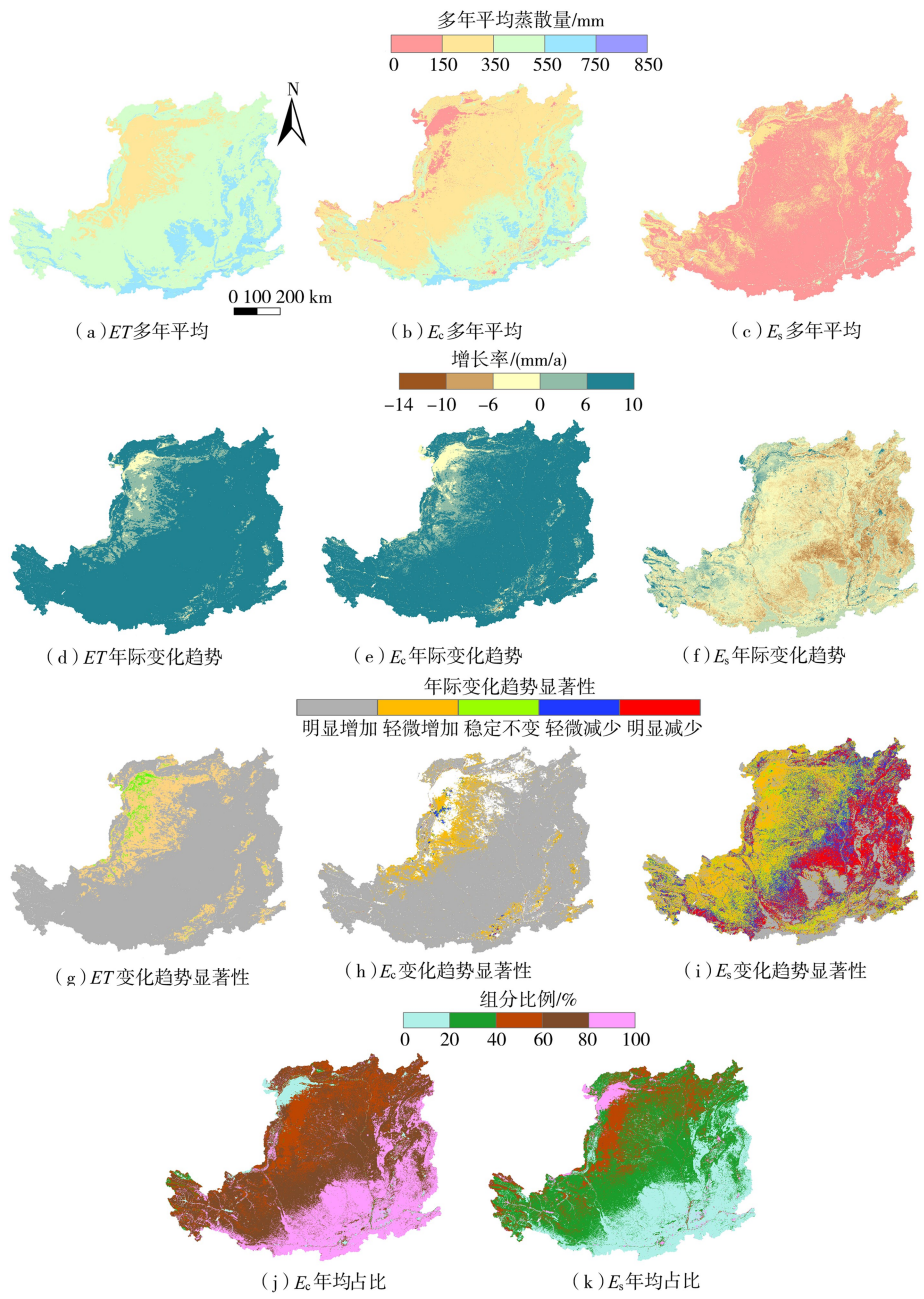


图 4 2000—2020 年黄土高原蒸发及其组分多年平均值和时空演变特征

Fig. 4 Multi-year average values and spatiotemporal evolution characteristics of evapotranspiration and its components on the Loess Plateau from 2000 to 2020

为 623.25 mm。多年平均土壤蒸发量为 122.81 mm,高值主要分布在内蒙古、甘肃、青海以及山西西北部和陕西中部区域。由图 4(d)~(i)可知,黄土高原蒸散发及其组分年际变化呈明显空间分异性,95.55%的面积蒸散发呈增长趋势,85.88%的区域蒸散发显著增加,主要分布在青海、山西、内蒙古东南部以及甘肃和陕西大部分地区。此外,4.45%的区域年蒸散量呈减少趋势,主要分布在甘肃西部和内蒙古北部。从组分上看,黄土高原 93.12%的面积植被蒸腾呈增长趋势,75.56%的区域显著增加,主要分布在甘肃、陕西以及山西和内蒙古部分地区。此外,2.25%的区域植被蒸腾量轻微减少,主要集中在宁夏北部和内蒙古南部地区,这可能与当地城市化和工业化快速发展有关。黄土高原 60.56%的区域年土壤蒸发呈减少趋势,其中 55.24%的区域显著减少,主要分布在山西西部与中部、陕西中部与甘肃中部等区域。黄土高原蒸散发的主要组分为植被蒸腾,占比达 69.29%,土壤蒸发占比为 20.78%。黄土高原东南部蒸散发组分主要为植被蒸腾,西北部主要为土壤蒸发(图 4(j)~(k))。

3.3 蒸散发对气候变化与生态恢复的响应

3.3.1 蒸散发及其组分驱动力分析

不同驱动力对黄土高原蒸散发及其组分驱动影响的空间分布见图 5。利用线性回归斜率 k 表征驱动影响的程度,极大抑制、明显抑制、轻微抑制、轻微促进、明显促进、极大促进的斜率范围分别为 ≤ -6 、 $>-6\sim -2$ 、 $>-2,0$ 、 $>0\sim 2$ 、 $>2\sim 6$ 、 $>6\text{ mm/a}$ 。表 3 为不

		表 3 不同驱动影响的像元比例					
		Table 3 Proportion of pixels affected by different driving factors					
蒸散发 组分	驱动力	像元比例/%					
		极大抑制	明显抑制	轻微抑制	轻微促进	明显促进	极大促进
ET	ET_R	0	0.10	0.42	25.56	25.54	48.38
	ET_S	0.01	0.05	0.57	45.46	30.01	23.90
E_c	ET_R	0.02	0.18	2.22	24.56	32.67	40.35
	ET_S	0.02	0.12	5.46	44.58	29.81	20.01
E_s	ET_R	0.02	0.32	18.50	65.96	10.67	4.53
	ET_S	0	0.01	18.67	74.00	3.34	3.98

同驱动影响的像元比例。表 3 中 ET_R 表征气候与植被变化驱动力, ET_S 表征非植被下垫面变化驱动力。由图 5 及表 3 可知,对于蒸散发,气候与植被变化驱动的影响为 7.39 mm/a,非植被下垫面变化驱动的影响为 3.80 mm/a。气候与植被变化对黄土高原蒸散发主要呈促进作用,占总面积的 99.48%,其中极大促进占比最大,达 48.38%,主要分布在青海、甘肃、陕西以及山西中部地区。从蒸散发组分看,气候与植被变化对植被蒸腾的影响为 7.32 mm/a,非植被下垫面变化驱动的影响为 4.10 mm/a。气候与植被变化及非植被下垫面变化对植被蒸腾均主要呈促进作用,气候与植被变化驱动占比最大的为极大促进,达 40.35%,主要分布在宁夏、甘肃、山西以及陕西中部与北部,非植被下垫面驱动占比最大的是轻微促进,达 44.58%,主要分布在宁夏北部、内蒙古南部以及陕西北部。气候与植被对土壤蒸发的影响为 -0.06 mm/a ,非植被下垫面驱动的影响为

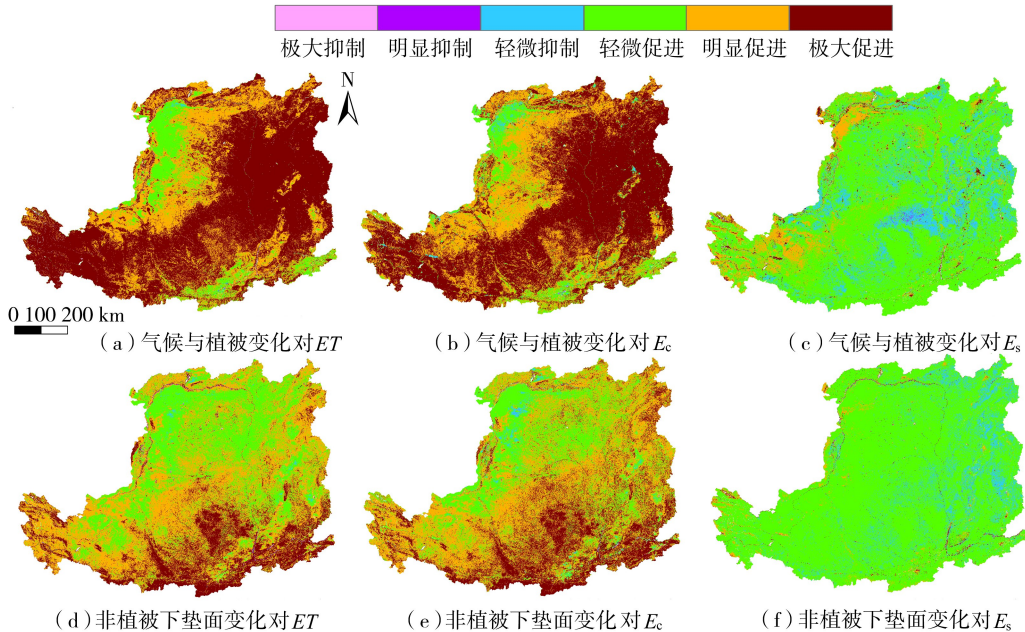


图 5 不同驱动力对黄土高原蒸散发及其组分驱动影响的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of driving effects of different driving forces on evapotranspiration and its components on the Loess Plateau

-0.33 mm/a。气候与植被变化及非植被下垫面变化对土壤蒸发的促进作用中轻微促进面积占比最大。气候与植被变化对土壤蒸发的抑制主要呈现为轻微抑制,面积占比达 18.50%,主要分布在黄土高原中部、东北部及西部地区。

由表 4 与图 6 可知,黄土高原蒸散量呈增加趋势的因素中,气候与植被变化以及非植被下垫面变化的协同影响面积占比最大,占总面积的 71.66%;其次是气候与植被变化,占 12.55%;最小的是非植被下垫面,占 4.67%。气候与植被变化、非植被下垫面变化导致黄土高原植被蒸腾增加的面积分别为 6.47%、3.91%。气候与植被变化、非植被下垫面变化之间的综合作用是造成植被蒸腾减少的主要原因,有 8.22%的面积受到影响,非植被下垫面变化导致植被蒸腾减少的面积大于气候与植被变化引起的;气候与植被变化、非植被下垫面变化以及二者共同作用导致土壤蒸发增加的区域分别占 5.34%、3.09%和 16.73%。

表 4 蒸散发及其组分不同驱动力的像元占比
Table 4 Proportion of pixels driven by different driving forces of evapotranspiration and its components

<i>k</i>	像元占比/%			
	驱动力	<i>ET</i>	<i>E_c</i>	<i>E_s</i>
>0	<i>ET_s</i> 和 <i>ET_R</i>	71.66	75.45	16.73
	<i>ET_R</i>	12.55	6.47	5.34
	<i>ET_s</i>	4.67	3.91	3.09
<0	<i>ET_s</i> 和 <i>ET_R</i>	4.89	8.22	43.28
	<i>ET_R</i>	1.56	2.37	18.56
	<i>ET_s</i>	4.22	4.56	12.88
0	不明确	0.45	0.07	0.12

3.3.2 不同驱动力对蒸散发及其组分的贡献

不同类型驱动力对黄土高原蒸散发及其组分的相对贡献率空间分布见图 7。就蒸散发而言,气候与植被变化的贡献最大,黄土高原有 70.44%的面积气候变化的贡献率大于 60%,主要分布在黄土高原东北部和西南部。植被变化对黄土高原蒸散发的贡献率主要集中在 10%~20%,占黄土高原面积的

80.78%,主要分布在黄土高原东部和北部地区。非植被下垫面变化对蒸散发的贡献率主要在 0~40%,面积占比达 51.4%,主要分布在黄土高原西南部与东北部,其中东北部太原-晋中城市群快速发展,不透水面增加使非植被下垫面变化巨大,也有部分区域贡献率达到 80%以上,主要集中在黄土高原东南部,该区域近 20 年出现了少量裸地向农田转移的情况(图 1),渭河流域农田灌溉面积扩张导致下垫面变化对蒸散发的影响增大,反映了非植被下垫面变化的复合效应。对于植被蒸腾而言,不同驱动力对植被蒸腾的贡献率分布与对蒸散发的类似。气候变化对其贡献最大,贡献率主要集中在 60%~100%,所占面积达 69.66%,主要分布在黄土高原东北部。植被变化的贡献率主要集中在 10%~20%,所占面积达 61.44%,主要分布在黄土高原东北部和西南部。非植被下垫面变化的贡献率主要集中在 0~40%,所占面积达 51.40%,主要分布在黄土高原东北部和西南部。气候变化对土壤蒸发的贡献率主要为 60%~100%,占总面积的 82.08%,主要分布在黄土高原西北部。与植被蒸腾相似,植被变化对土壤蒸发的贡献率也主要集中在 10%~20%,面积占 62.44%,主要分布在黄土高原西部。非植被下垫面变化对土壤蒸发的贡献率较少,贡献率 40%以下的面积占 60.15%。

气象和植被驱动因子对蒸散发及其组分相对贡献的频率分布(图 8)形式不同。就蒸散量而言,植被因子与气温呈“双峰”分布,植被的相对贡献主要集中在 60%与 5%附近,气温的相对贡献主要集中在 25%与 5%附近,其他因子均呈“单峰”分布。对于植被蒸腾,各驱动因子的相对贡献率均为“单峰”分布,主要集中在 5%附近。对于土壤蒸发,植被因子的相对贡献呈明显“双峰”分布,主要集中在 45%与 5%附近,其他因子的相对贡献呈“单峰”分布。各驱动因子对蒸散量的平均相对贡献率排序为植被(41.74%)、气温(28.58%)、降水(20.18%)、日照

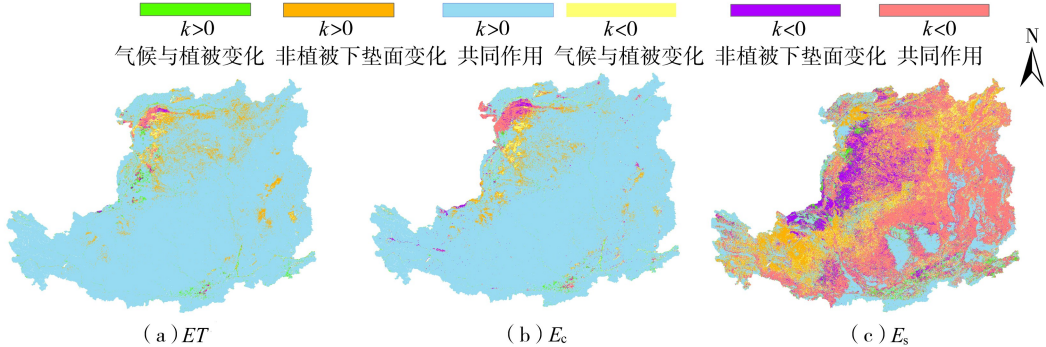


图 6 蒸散发及其组分驱动力的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of evapotranspiration and its component driving forces

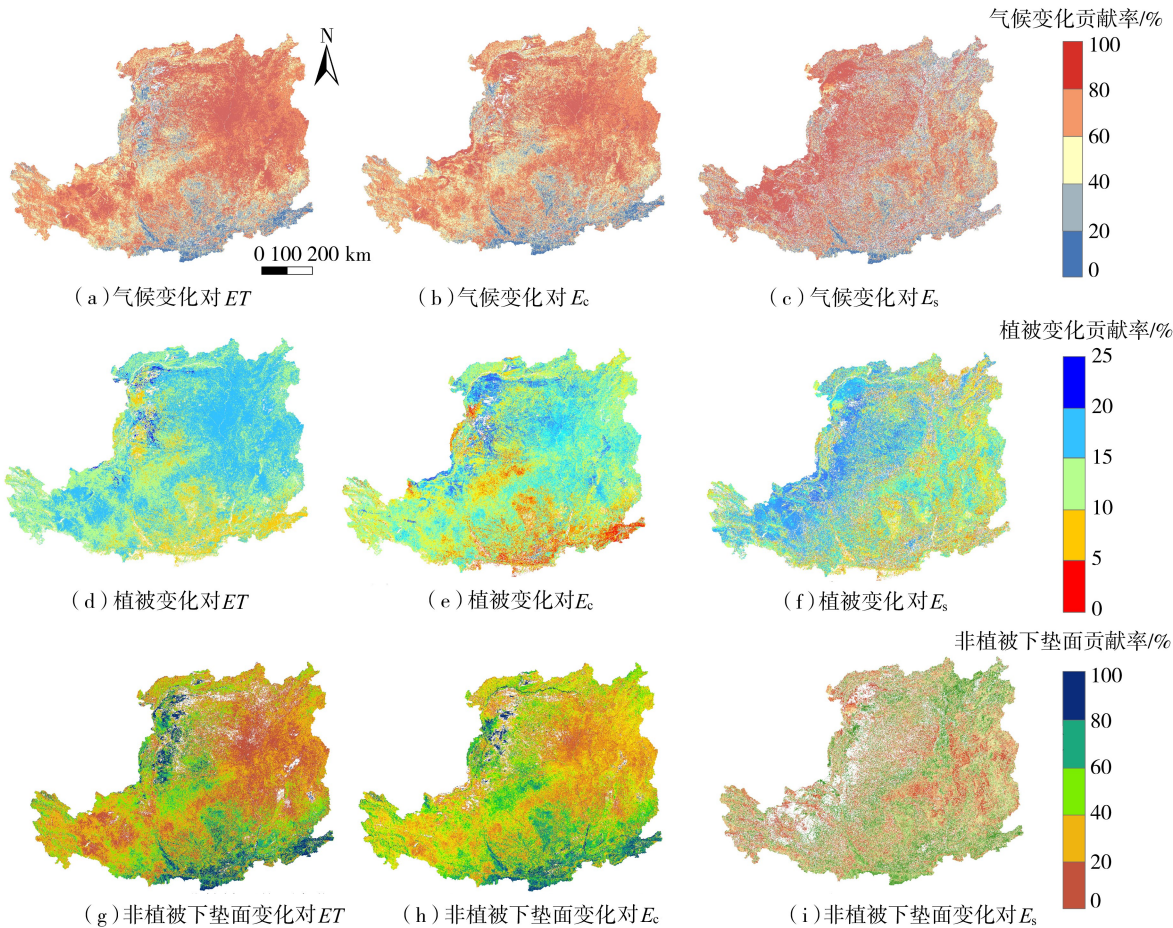


图 7 不同驱动力对黄土高原蒸散发及其组分相对贡献率的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of relative contribution rates from different driving forces to evapotranspiration and its components on the Loess Plateau

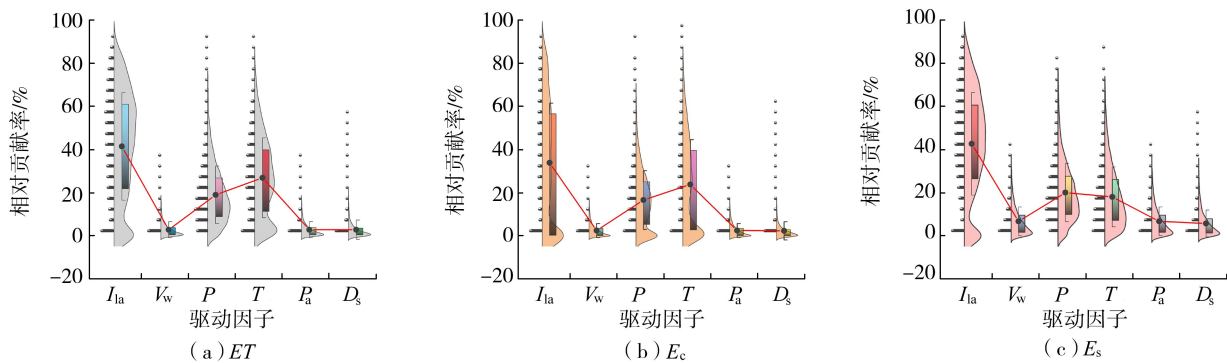


图 8 不同驱动因子对黄土高原蒸散发及其组分相对贡献率的频率分布

Fig. 8 Frequency distribution of relative contribution rates from different driving factors to evapotranspiration and its components on the Loess Plateau

时数(3.17%)、气压(3.17%)、风速(3.16%);对植被蒸腾的平均相对贡献率排序为植被(39.59%)、气温(29.92%)、降水(20.80%)、气压(3.29%)、风速(3.29%)、日照时数(3.11%);对土壤蒸发的平均相对贡献率排序为植被(38.88%)、降水(21.23%)、气温(19.27%)、气压(7.24%)、风速(7.24%)、日照时数(6.14%)。驱动因子对黄土高原蒸散发及其组分绝对贡献的频率分布见图9。由

图9(a)~(c)可知,不同驱动因子对蒸散发及其组分绝对贡献的频率分布大体相似,正贡献与负贡献基本呈对称形式。由图9(d)可知,植被、降水以及气温对蒸散发及其组分均具有较大的绝对贡献,风速、气压以及日照时间的绝对贡献相对较小。

4 讨论

2000—2020年,由于各种生态恢复工程的实

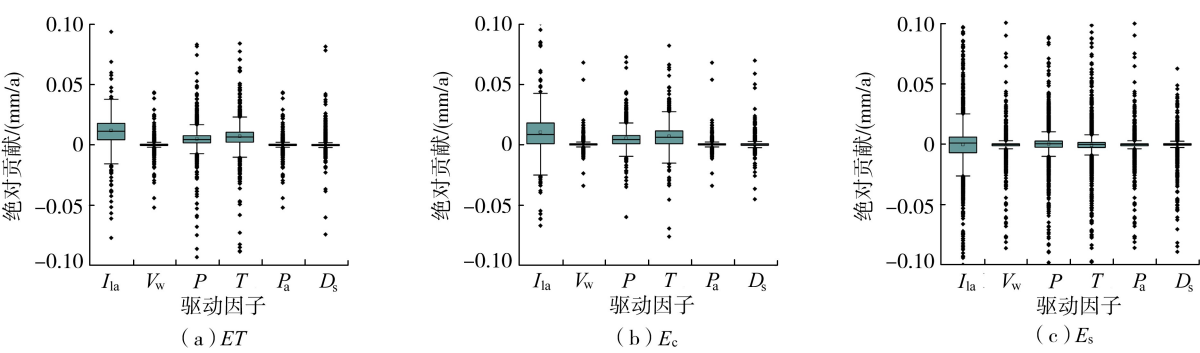


图9 不同驱动因子对黄土高原蒸散发及其组分绝对贡献率的频率分布

Fig. 9 Frequency distribution of absolute contribution rates from different driving factors to evapotranspiration and its components on the Loess Plateau

施,黄土高原下垫面变化巨大,对土地利用格局产生了深刻影响^[25]。蒸散发不仅受到气温、降水等气候因素影响,而且对土地利用变化也极具敏感性^[41]。2000—2020 年黄土高原土地利用发生显著改变,对区域下垫面条件与生态系统水分传输造成了不同程度影响,进而影响蒸散发及其组分变化^[42]。基于黄土高原重分类后的土地利用数据结合模拟的蒸散量,提取得到黄土高原土地利用变化引起的蒸散发及其组分变化量(图 10)。从图 10 可见,5 种土地利用类型变化均导致蒸散发与植被蒸腾增长。2000—2020 年,林地面积变化使蒸散发与植被蒸腾增加最多,分别为 393. 18 mm 和 334. 36 mm;裸地面积变化使蒸散发与植被蒸腾增加最少,分别为 95. 30 mm 和 97. 00 mm。对于土壤蒸发而言,草地、林地与农田面积变化会使土壤蒸发减少,减少量分别为 66. 89 mm、3. 71 mm 和 62. 40 mm;水体与裸地面积变化使土壤蒸发增加,分别达 225. 36 mm 与 18. 39 mm。可见,土地利用类型转变会导致区域蒸散发及其组分改变。近 20 年来,由于人为植被恢复活动,黄土高原大量耕地转变为草地和林地,这在区域尺度上强烈地改变了植被类型与状态,从而影响了蒸散量。在其他条件不变的情况下,人工造林通常会通过产生更密集的树冠和更深的根系来增加蒸

散发^[1]。此外,人工造林可能通过降低土壤温度和光照强度,减少土壤蒸发,并且过多的植被种植可能会引起水资源短缺^[31]。为了维持黄土高原生态水文平衡,应在生态恢复工程中充分结合区域水资源情势来制定合理的土地管理政策,如精准配置退耕还林与还草比例以优化植被类型,推广森林间伐技术,动态调整种植密度,分析草地和林地恢复的空间适宜性,探索林草复合型生态恢复路径以减轻由人为干扰造成对生态环境与水资源管理的负面作用,最大化生态与水资源效益。

5 结 论

a. TSEB 模型在站点和区域尺度上对黄土高原蒸散发模拟均具有良好效果,其中模型蒸散量站点模拟值与海北站湿地和灌丛生态系统实测值多年平均相关系数分别为 0. 808 和 0. 714;区域上与 MODIS、PML_V2 和 GLEAM 等遥感产品参照值的确定系数分别为 0. 817、0. 756 和 0. 678。

b. 2000—2020 年黄土高原蒸散量整体呈增长趋势,植被蒸腾及其占比显著增长,土壤蒸发及其占比呈减少趋势。植被蒸腾空间分布特征与蒸散发类似,自东南向西北逐渐减少,土壤蒸发则反之。气候与植被变化对蒸散发和植被蒸腾主要为极大促进,非植被下垫面变化为轻微促进。气候与植被变化对土壤蒸发主要为轻微促进,非植被下垫面变化为轻微抑制。

c. 驱动因子对黄土高原蒸散发及其组分的贡献程度具有显著差异,叶面积指数、气温和降水的相对贡献与绝对贡献较大,风速、气压和日照时数则较小。未来黄土高原生态恢复应综合考虑区域气候变化效应与水资源承载力,以维持植被恢复与水资源利用之间的动态平衡。

参考文献:

[1] Yang Yuting, Roderrick M L, Guo Hui, et al.

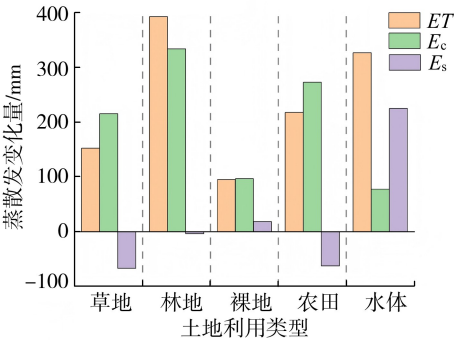


图 10 土地利用变化引起的蒸散发及其组分变化量

Fig. 10 Changes in evapotranspiration and its components caused by land use changes

- Evapotranspiration on a greening Earth [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2023, 4(9): 626-641.
- [2] 陈图强, 李晗, 黄津辉, 等. 基于机器学习的遥感蒸散发估算研究进展[J]. 水资源保护, 2025, 41(6): 95-104. (Chen Tuqiang, Li Han, Huang Jinhui, et al. Research progress on remote sensing-based evapotranspiration estimation using machine learning [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(6): 95-104. (in Chinese))
- [3] 宋立生, 刘绍民, 徐同仁, 等. 土壤蒸发和植被蒸腾遥感估算与验证[J]. 遥感学报, 2017, 21(6): 966-981. (Song Lisheng, Liu Shaomin, Xu Tongren, et al. Soil evaporation and vegetation transpiration; remotely sensed estimation and validation [J]. Journal of Remote Sensing, 2017, 21(6): 966-981. (in Chinese))
- [4] 刘永伟, 王文, 刘元波, 等. 水文模型模拟预报的多源数据同化方法及应用研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(6): 483-491. (Liu Yongwei, Wang Wen, Liu Yuanbo, et al. Advances in multi-source data assimilation approach and application in simulation and forecast of hydrological model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(6): 483-491. (in Chinese))
- [5] 陈永喆, 崔艳红, 张才金, 等. 变化环境下黄河流域内蒙古段植被与水文要素的时空协同演变[J]. 水资源保护, 2024, 40(2): 141-149. (Chen Yongche, Cui Yanhong, Zhang Caijin, et al. Spatio-temporal co-evolution of vegetation and hydrological elements under a changing environment in the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(2): 141-149. (in Chinese))
- [6] 张珂, 戴钰, 刘林鑫, 等. 考虑植被根系深度动态变化的VIC径流模拟模型[J]. 水资源保护, 2024, 40(3): 28-34. (Zhang Ke, Dai Yu, Liu Linxin, et al. VIC model for runoff simulation considering dynamic changes of vegetation root depth [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(3): 28-34. (in Chinese))
- [7] Jiang Fuxiao, Xie Xianhong, Wang Yibing, et al. Vegetation greening intensified transpiration but constrained soil evaporation on the Loess Plateau [J]. Journal of Hydrology, 2022, 614: 128514.
- [8] 王钊, 张润润, 章阳. 基于SWH双源模型的鄱阳湖流域蒸散发组分时空变化特征及归因分析[J]. 中国农村水利水电, 2023(11): 52-63. (Wang Zhao, Zhang Runrun, Zhang Yang, et al. Temporal and spatial variation characteristics and impact analysis of evapotranspiration and its components in Poyang lake basin based on SWH Dual-Source Model [J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(11): 52-63. (in Chinese))
- [9] 饶文波, 李子怡, 谭红兵, 等. 格尔木河水氢氧稳定同位素与Cl-含量年内变化特征及对河水补给与蒸发的指示[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(5): 34-46. (Rao Wenbo, Li Ziyi, Tan Hongbing, et al. Inter-annual variation characteristics of stable hydrogen and oxygen isotopes and Cl- concentration in the Golmud River and implications for river recharge and evaporation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(5): 34-46. (in Chinese))
- [10] Zhao Yang, Chen Yanan, Yang Chao, et al. Exploring the contribution of environmental factors to evapotranspiration dynamics in the Three-River-Source region, China [J]. Journal of Hydrology, 2023, 626: 130222.
- [11] 刘俊国, 刘明欢, 徐沙沙, 等. 气候变化背景下的水资源管理与粮食安全保障[J]. 中国水利, 2024(17): 21-28. (Liu Junguo, Liu Minghuan, Xu Shasha, et al. Water resource management and food security in the context of climate change [J]. China Water Resources, 2024(17): 21-28. (in Chinese))
- [12] Feng Xiaoming, Fu Bojie, Lu Nan, et al. How ecological restoration alters ecosystem services: an analysis of carbon sequestration in China's Loess Plateau [J]. Scientific Reports, 2013, 3(1): 2846.
- [13] Wohlfart C, Liu Gaohuan, Huang Chong, et al. A river basin over the course of time: multi-temporal analyses of land surface dynamics in the Yellow River Basin (China) based on medium resolution remote sensing data [J]. Remote Sensing, 2016, 8(3): 186.
- [14] 王宣宣, 刘欢, 胡鹏, 等. 基于水量平衡原理和Budyko假设的强人类活动干扰下西辽河流域径流衰减归因分析[J]. 水资源保护, 2024, 40(6): 165-172. (Wang Xuanxuan, Liu Huan, Hu Peng, et al. Attribution analysis of runoff attenuation in the Xiliao River Basin under significant human interference based on water balance principle and Budyko hypothesis [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(6): 165-172. (in Chinese))
- [15] Ye Xuchun, Li Xianghu, Liu Jian, et al. Variation of reference evapotranspiration and its contributing climatic factors in the Poyang Lake catchment, China [J]. Hydrological Processes, 2014, 28(25): 6151-6162.
- [16] Ding Risheng, Kang Shaozhong, Vargas R, et al. Multiscale spectral analysis of temporal variability in evapotranspiration over irrigated cropland in an arid region [J]. Agricultural Water Management, 2013, 130: 79-89.
- [17] 董颢, 杜军凯, 俞发康, 等. 1960—2020年千岛湖流域蒸散发演变特征及驱动因素解析[J]. 湖泊科学, 2024, 36(3): 901-912. (Dong Hao, Du Junkai, Yu Fakang, et al. Evolution characteristics and influencing factors of evapotranspiration in Lake Qiandao Basin from 1960 to 2020 [J]. Journal of Lake Sciences, 2024, 36(3): 901-912. (in Chinese))
- [18] 王芊予, 粟晓玲, 褚江东, 等. 基于GRACE数据重建的黄河流域实际蒸散发及其时空演变特征分析[J]. 水资源保护, 2024, 40(5): 112-121. (Wang Qianyu, Su Xiaoling, Chu Jiangdong, et al. Analysis of actual evapotranspiration and its spatio-temporal evolution

- characteristics in the Yellow River Basin based on GRACE data reconstruction [J]. *Water Resources Protection*, 2024,40(5):112-121. (in Chinese))
- [19] Lyu Yihe, Zhang Liwei, Feng Xiaoming, et al. Recent ecological transitions in China: greening, browning and influential factors [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5 (1): 8732.
- [20] Ma Xuening, Zhang Mingjun, Li Yaju, et al. Decreasing potential evapotranspiration in the Huanghe River Watershed in climate warming during 1960—2010 [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, 22: 977-988.
- [21] 周志鹏, 孙文义, 穆兴民, 等. 2001—2017 年黄土高原实际蒸散发的时空格局 [J]. *人民黄河*, 2019, 41(6): 76-80. (Zhou Zhipeng, Sun Wenyi, Mu Xinmin, et al. Temporal and spatial pattern of actual evapotranspiration in the Loess Plateau from 2001 to 2017 [J]. *Yellow River*, 2019, 41(6): 76-80. (in Chinese))
- [22] 刘丽丽. 陕北黄土高原蒸散发变化及其影响因素研究 [D]. 西安: 长安大学, 2018.
- [23] 韩宇平, 徐丹, 黄会平, 等. 近 20 年黄土高原 NDVI/气象要素对实际蒸散发的影响研究 [J]. *人民珠江*, 2022, 43(9): 78-89. (Han Yuping, Xu Dan, Huang Huiping, et al. Effects of NDVI/Meteorological elements on actual evapotranspiration in Loess Plateau over last 20 Years [J]. *Pearl River*, 2022, 43(9): 78-89. (in Chinese))
- [24] Zhou Jialiang, Liang Liqiao, Liu Qiang, et al. More portion of precipitation into soil water storage to maintain higher evapotranspiration induced by revegetation on China's Loess Plateau [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 615: 128707.
- [25] Bai Peng, Liu Xiaomang, Zhang Yongqiang, et al. Assessing the impacts of vegetation greenness change on evapotranspiration and water yield in China [J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(10): e2019WR027019.
- [26] 王凯利, 王志慧, 肖培青, 等. 气候与下垫面变化对黄土高原蒸散发变化的影响评估 [J]. *水土保持学报*, 2022, 36(3): 166-172. (Wang Kaili, WANG Zhihui, Xiao Peiqing, et al. Assessment on the impact of climate and the changes of underlying surface on the evapotranspiration in the Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(3): 66-172. (in Chinese))
- [27] 宋进喜, 高隽清, 李晓鑫, 等. 近 20 年来黄土高原蒸散发变化规律及其驱动因素 [J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2023, 53(6): 974-990. (Song Jingxi, Gao Junqing, Li Xiaoxin, et al. Changes of evapotranspiration and its driving factors in the Loess Plateau in recent 20 years [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2023, 53(6): 974-990. (in Chinese))
- [28] 白萌, 莫淑红, 莫兴国, 等. 退耕还林背景下黄土高原蒸散量时空演变特征及归因 [J]. *生态学报*, 2023, 43(20): 8344-8358. (Bai Meng, Mo Shuhong, Mo Xingguo, et al. Spatio-temporal variation of evapotranspiration and its attribution over the Loess Plateau since the implementation of the Grain for Green Project [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(20): 8344-8358. (in Chinese))
- [29] Zhuang Jiacheng, Li Yanzhong, Bai Peng, et al. Changed evapotranspiration and its components induced by greening vegetation in the Three Rivers Source of the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 633: 130970.
- [30] Chen Ziyang, Nong Xiaomin, Zang Chuanfu, et al. Evolution of evapotranspiration in the context of land cover/climate change in the Han River catchment of China [J]. *Hydrological Processes*, 2024, 38(8): e15265.
- [31] Feng Xiaoming, Fu Bojie, Piao Shilong, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1019-1022.
- [32] 薛联青, 王文壮, 刘远洪, 等. 黄河流域植被总初级生产力对持续性干旱水分亏缺的响应 [J]. *水资源保护*, 2024, 40(3): 44-51. (Xue Lianqing, Wang Wenzhuang, Liu Yuanhong, et al. Response of gross primary productivity of vegetation to persistent drought-induced water deficit in the Yellow River Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(3): 44-51. (in Chinese))
- [33] Deng Lei, Yan Weiming, Zhang Yongwang, et al. Severe depletion of soil moisture following land-use changes for ecological restoration: evidence from northern China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2016, 366: 1-10.
- [34] Huang Xin, Yang Jie. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13: 3907-3925.
- [35] Priestley C H B, Taylor R J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters [J]. *Monthly Weather Review*, 1972, 100(2): 81-92.
- [36] Kustas W P, Humes K S, Norman J M. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1995, 77: 263-293.
- [37] Castelli M, Anderson MC, Yang Y, et al. Two-source energy balance modeling of evapotranspiration in Alpine grasslands [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 209: 327-342.
- [38] 崔要奎. 水循环关键要素遥感反演研究进展 [J]. *中国水利*, 2024(11): 67-72. (Cui Yaokui. Progress of studies on remote sensing inversion of key elements of water cycle [J]. *China Water Resources*, 2024(11): 67-72. (in Chinese))
- [39] 丁忠昊, 宋立生, 徐同仁, 等. 不同下垫面 DTD 模型与 TSEB 模型比较 [J]. *地球信息科学学报*, 2020, 22(11): 2152-2165. (Ding Zonghao, Song Lisheng, Xu Tongren, et al. Evaluating two source energy balance and dual temperature difference models under various landcovers and environment conditions [J]. *Journal of Geo-*

information Science, 2020, 22 (11): 2152-2165. (in Chinese))

[40] 金凯,王飞,韩剑桥,等. 1982—2015 年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响[J]. 地理学报, 2020, 75(5): 961-974. (Jin Kai, Wang Fei, Han Jianqiao, et al. Contribution of climatic change and human activities to vegetation NDVI change over China during 1982-2015 [J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(5): 961-974. (in Chinese))

[41] 陈厚兵,陈耀亮,宋清海,等. 2001—2020 年澜湄流域热带地区土地覆被变化对蒸散发的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38 (22): 113-122. (Chen Houbing, Chen Yaoliang, Song Qinghai, et al. Effects of land cover change on evapotranspiration in the tropical Lancang-Mekong River Basin from 2001 to 2020 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38 (22): 113-122. (in Chinese))

[42] 赵勇,董义阳,翟家齐,等. 考虑生态耗水的干旱区绿洲灌溉用水效率评价指标与方法[J]. 水资源保护, 2024, 40(3): 78-89. (Zhao Yong, Dong Yiyang, Zhai Jiaqi, et al. A new evaluation indicator and method for oasis irrigation water use efficiency in arid regions considering ecological water consumption [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(3): 78-89. (in Chinese))

(收稿日期:2025 - 02 - 24 编辑:徐娟)

+++++

(上接第 58 页)

[18] 方国华,郭玉雪,闻昕,等. 改进的多目标量子遗传算法在南水北调东线工程江苏段水资源优化调度中的应用[J]. 水资源保护, 2018, 34(2): 34-41. (Fang Guohua, Guo Yuxue, Wen Xin, et al. Application of improved multi-objective quantum genetic algorithm on water resources optimal operation of Jiangsu Section of South-to-North Water Transfer East Route Project [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(2): 34-41. (in Chinese))

[19] 方国华,赵文萃,李鑫,等. 南水北调东线工程江苏段水资源调配研究[J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 1-8. (Fang Guohua, Zhao Wencui, Li Xin, et al. Study on water resources dispatching and allocation in Jiangsu Section of Eastern Route Project of South-to-North Water Diversion Project [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 1-8. (in Chinese))

[20] 闻昕,黄抒艺,谭乔凤,等. 江苏省南水北调多工程多目标联合优化调度方法[J]. 水资源保护, 2023, 39(5): 118-124. (Wen Xin, Huang Shuyi, Tan Qiaofeng, et al. Study on joint operation of multiple projects and multiple objectives for the South-to-North Water Transfer in Jiangsu Province [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(5): 118-124. (in Chinese))

[21] 徐纪翔,马晶洁,闻昕,等. 南水北调东线二期工程江苏段对苏北地区供水模式的影响[J]. 水资源保护, 2025, 41(4): 115-124. (Xu Jixiang, Ma Jingjie, Wen Xin, et al. Effect of Jiangsu section of second phase of the South-to-North Water Diversion Eastern Route Project on water supply pattern in northern Jiangsu Province [J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (4): 115-124. (in Chinese))

[22] 方国华,钟华昱,闻昕,等. 考虑湖泊互济互调运行的江苏省南水北调工程优化调度[J]. 水科学进展, 2023, 34(5): 776-787. (Fang Guohua, Zhong Huayu, Wen Xin, et al. Optimal operation of the Jiangsu Province section of the South-to-North Water Diversion Project under the operational mode of mutual transfer and diversion among lakes [J]. Advances in Water Science, 2023, 34(5): 776-787. (in Chinese))

[23] 何立新,高炳享,夏浩顺,等. 江苏省江水北调工程水量调度[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(5): 896-908. (He Lixin, Gao Bingxiang, Xia Haoshun, et al. Water quantity dispatch of Jiangsu Province ' s water diversion from the Yangtze River to the North [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(5): 896-908. (in Chinese))

[24] Zhong Huayu, Wu Shuyue, Yan Min, et al. Derivation of optimal scheduling strategies for large-scale inter-basin water transfer projects considering streamflow wet-dry encounter uncertainty of multiple reservoirs[J]. Journal of Hydrology, 2025, 662: 133784.

[25] Ming B, Zhong Huayu, Zhang Wei, et al. Deriving operating rules for inter-basin water transfer projects incorporating a scenario reduction strategy[J]. Journal of Hydrology, 2023, 624: 129854.

[26] 刘欣,赵雪花,武雯昱,等. 基于 NSGA- II + ARSBX 算法的太原市水资源优化配置[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(1): 79-86. (Liu Xin, Zhao Xuehua, Wu Wenyu, et al. Optimal allocation of water resources based in Taiyuan City on NSGA- II + ARSBX algorithm [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(1): 79-86. (in Chinese))

[27] Zhang Shuo, Kang Yan, Gao Xuan, et al. Optimal reservoir operation and risk analysis of agriculture water supply considering encounter uncertainty of precipitation in irrigation area and runoff from upstream[J]. Agricultural Water Management, 2023, 277: 108091.

(收稿日期:2025 - 04 - 22 编辑:王芳)