



近 20 年来黄土高原蒸散发变化规律及其驱动因素

宋进喜^{1,2}, 高隽清^{1,2}, 李晓鑫^{1,2}, 毛瑞晨^{1,2}, 史阿莹^{1,2}

(1. 西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710127; 2. 陕西省黄河研究院, 陕西 西安 710127)

摘要 由于气候变化与人类活动的影响,黄土高原蒸散发(evapotranspiration)及其组分发生了显著变化,进而影响了流域水文过程及其水资源可持续利用。该文基于多元数据融合,采用变化趋势分析和多元回归残差分析等方法,分析了2001—2020年黄土高原蒸散发及其组分的变化特征,以及其对气候变化和人类活动的响应机理。结果表明,2001—2020年黄土高原蒸散发年均增长2.869 4 mm($R^2=0.384\ 6$),影响其变化的因子主要有非植被下垫面、饱和水汽压差和降雨,贡献率分别为23.47%、21.31%和12.22%;植被蒸腾呈增长趋势,且占比增加,年均增长3.716 5 mm($R^2=0.527\ 1$),影响其变化的因子主要有非植被下垫面、饱和水汽压差和植被,贡献率分别为22.13%、19.43%和15.86%;截留蒸发也呈增长趋势,年均增长0.354 mm($R^2=0.694\ 6$),且占比增加,影响其变化的因子主要有非植被下垫面、植被和饱和水汽压差,贡献率分别为22.24%、13.85%和12.47%;土壤蒸发呈下降趋势,年均下降1.405 4 mm($R^2=0.741\ 5$),且占比减少,影响其变化的因子主要有非植被下垫面、植被和饱和水汽压差,贡献率分别为28.29%、19.15%和13.66%。整体来看,气候变化仍是影响黄土高原蒸散发变化最主要的因素,其中饱和水汽压差是影响蒸散发及其组分最大的气象要素,植被变化和非植被下垫面因子的作用也不可忽视。研究结论可为科学认识黄土高原蒸散发变化机理以及促进水资源可持续利用管理提供理论依据。

关键词 气候变化;人类活动;蒸散发;残差分析;黄土高原

中图分类号:P339 **DOI:**10.16152/j.cnki.xdxbzr.2023-06-008

Changes of evapotranspiration and its driving factors in the Loess Plateau in recent 20 years

SONG Jinxi^{1,2}, GAO Junqing^{1,2}, LI Xiaoxin^{1,2}, MAO Ruichen^{1,2}, SHI Aying^{1,2}

(1. College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an 710127, China;

2. Yellow River Institute of Shaanxi Province, Xi'an 710127, China)

Abstract Due to the influence of climate change and human activities, evapotranspiration and its components have changed significantly in the Loess Plateau, which has affected the hydrological process and sustainable utilization of water resources in the basin. Based on multivariate data fusion, trend analysis and multiple regression residual analysis are used to analyze the characteristics of evapotranspiration and its components in the Loess Plateau from 2001 to 2020 and their response mechanism to climate change and human activities. The av-

收稿日期:2023-10-29

基金项目:国家自然科学基金(42041004)

第一作者:宋进喜,男,教授,博士生导师,从事水文学、水资源及水环境研究,jinxisong@nwu.edu.cn。

average annual increase of evapotranspiration on the Loess Plateau from 2001 to 2020 was 2.869 4 mm ($R^2 = 0.384\ 6$), and the main factors affecting the change were non-vegetation underlying surface, saturated water vapor pressure and rainfall, with the contribution rates of 23.47%, 21.31% and 12.22%, respectively. Vegetation transpiration showed an increasing trend and its proportion increased, with an annual growth rate of 3.716 5 mm/a ($R^2 = 0.527\ 1$). The main factors affecting its change were non-vegetation underlying surface, saturated water vapor pressure and vegetation, and the contribution rates were 22.13%, 19.43% and 15.86%. The interception loss also showed a significant increase trend, increasing by 0.354 mm ($R^2 = 0.694\ 6$) per year, and its proportion increased. The main factors affecting its change were non-vegetation underlying surface, vegetation and saturated water vapor pressure, and the contribution rates were 22.24%, 13.85% and 12.47%. Soil evaporation decreased by 1.405 4 mm ($R^2 = 0.741\ 5$) year by year, and its proportion decreased. The main factors affecting its change were non-vegetation underlying surface, vegetation and saturated water vapor pressure, and the contribution rates were 28.29%, 19.15% and 13.66%. In conclusion, climate change is still the most important factor affecting evapotranspiration and its components on the Loess Plateau, and saturated water vapor pressure is the biggest meteorological factor, the role of vegetation change and non-vegetation underlying surface factors can not be ignored. This study can provide theoretical basis for scientific understanding of evapotranspiration change mechanism and promoting sustainable utilization and management of water resources on the Loess Plateau.

Keywords climate change; human activities; evapotranspiration; residual analysis; Loess Plateau

蒸散发 (evapotranspiration) 是指从地球表面输送到低层大气的总水蒸气通量,是水循环和表面能量平衡的关键组成部分^[1]。全球降雨近60%最终通过蒸散发回到大气,并且随着气候变暖这个比例仍在增长。气候变化对蒸散发的影响已经引起了关注,人为改变土地类型(生态恢复工程、城市化)也被发现对蒸散发有着一定程度的影响,并且影响着区域水资源的分配。

黄土高原是我国主要的半干旱地区,是我国水土流失最为严重的区域,是世界上严重缺水、生态系统脆弱的地区之一^[2-4]。为了改善黄土高原水土流失状况,自1999年以来,国家相继实施了一系列的生态修复治理工程,如退耕还林还草、封山育林、兴修梯田、淤地坝等工程。退耕还林工程是目前中国最大的植被恢复项目,16 000 km²的旱地已经被转为非作物植被,过去近20年来植被覆盖增加了25%,生态恢复效果显著^[5-6]。然而,大规模的生态修复工程带来了新的生态问题,包括径流减少、植被退化、过度种植导致有限的土壤水分消耗并增加了实际蒸散发,进一步加剧了水资源的短缺^[7-8]。

已有研究利用原位实验、蒸散发模型、全球蒸散发产品等对黄土高原蒸散发的时空变化及其驱动因素进行分析。原位实验受制于实验条件与实验方法,只能对黄土高原典型流域进行小范围的

研究^[9],例如涡度相关法^[10],大孔径闪烁仪^[11]、蒸渗仪^[12],并且这些实测方法通常只能在单株、样地或景观尺度上进行,无法解释区域尺度的水文变化情况。蒸散发模型可以模拟物理机理,但各类蒸散发模型的计算方法在物理过程、参数化方案以及驱动数据等方面都存在较大差异。相比较而言,多元回归方法对蒸散发产品进行统计分析简单易行,能够直观反映不同要素对于蒸散发的影响,并且对不同要素对蒸散发的影响进行量化。黄土高原退耕还林还草政策实施使得黄土高原植被覆盖发生了显著变化,对水文过程产生重要影响,但已有的研究更多集中在植被覆盖变化对河川径流等过程的影响,蒸散发变化及其驱动机理的研究仍有欠缺。研究表明,蒸散发与降雨、温度、日照时间、饱和水汽压差、风速等气象要素以及植被变化有关^[13-14],但是已有研究大多集中在其中2~3个要素对蒸散发的影响,并且这些要素对蒸散发组分的影响尚不明确。

鉴于此,本文基于黄土高原气象数据(降雨、温度、日照时间、饱和水汽压差、风速)、MOD13A3 EVI和GLEAM v3.7a遥感产品,采用趋势分析和多元回归残差分析等统计方法,分析2001—2020年黄土高原蒸散发及其组分的时空变化特征,探究气象、植被和非植被下垫面变化对蒸散发及其组分的影响,定量评估不同影响因素的相对贡献率,旨

在为科学认识黄土高原蒸散发变化机理以及促进水资源可持续利用管理提供理论依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

黄土高原位于黄河中上游(33°43′~41°16′N,100°54′~114°33′E)(见图 1),具有典型的大陆季风气候特征,春冬季寒冷干燥,夏季炎热多

雨,年均气温 3.6~14.6℃,降水 200~800 mm,日照时数 4~8 h,蒸发量 1 400~2 000 mm,蒸散发及其组分的分布具有明显的空间异质性,自东南向西北逐渐递减。从历史上大规模的农田开垦和乱砍滥伐,到如今生态修复措施的开展以及城镇化,都影响着黄土高原水资源的利用与分配。在气候变化和人类活动的共同影响下,黄土高原成为全球水土流失最严重的区域之一^[15]。

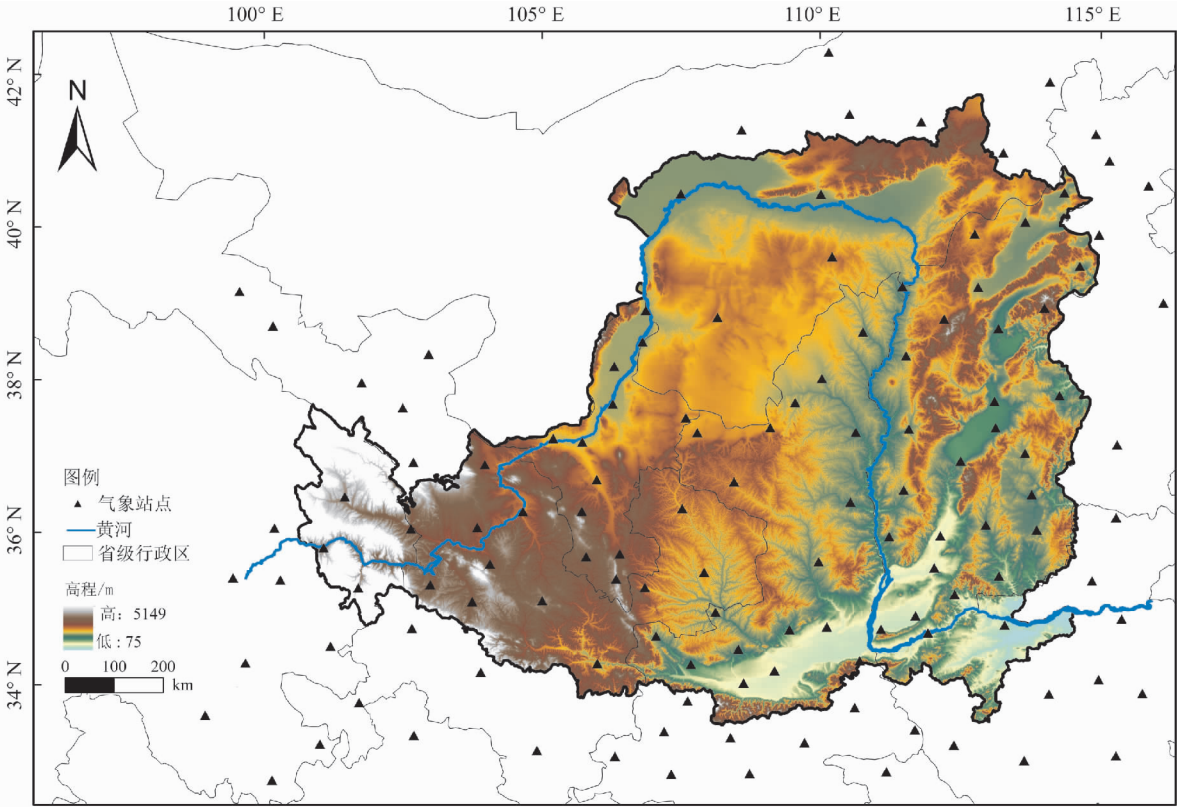


图 1 研究区概况及气象站点分布

Fig. 1 Overview of the study area and distribution of meteorological stations

1.2 数据来源

气温、湿度、降水等气象数据来自国家科技基础条件平台国家地球系统科学数据中心。2001—2020 年黄土高原及其周围 156 个气象站点日观测日照时数和风速数据来自中国气象数据网,利用 ArcGIS 10.7 空间分析模块的克里金插值方法对其进行插值。饱和水汽压差(vapor pressure deficit,VPD)采用袁瑞瑞^[16]等的方法进行计算。植被数据选择增强型植被指数 MOD13A3 EVI 产品,来源于美国航空航天局,空间分辨率为 1 km,时间分辨率为 30 d,MODIS 数据在全球及区域植被变化研究、生态环境监测等方面,有着广泛的应用前景。GLEAM(global land evaporation amster-

dam mode)数据产品利用降水、土壤水分和植被含水率作为限制条件对蒸散发进行估算,并且计算了全球陆面蒸散发不同组成部分。已有研究证实 GLEAM 数据在中国不同植被类型中的模拟精度较好^[17-18],因此本文选择 GLEAM v3.7a 产品 2001—2020 年蒸散发及其组分数据,并对其重采样至 5 km。

1.3 研究方法

1.3.1 趋势分析

采用基于像元的 Slope 一元线性回归计算 2001—2020 年蒸散发及其组分的年际变化趋势。Slope 的计算公式为

Slope =

$$\frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times ET_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n ET_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中:Slope 为蒸散发及其组分拟合的一元线性回归方程的斜率 (mm/a); n 为时间序列长度; ET_i 为第 i 年的蒸散发及其组分的观测值。Slope > 0 表示蒸散发及其组分随时间呈增长趋势,Slope < 0 表示呈减少趋势,Slope 绝对值越大,表明蒸散发及其组分变化越快。

1.3.2 多元回归残差分析

以气象要素、植被数据为自变量,蒸散发及其组分为因变量构建多元线性回归方程,

$$ET_i = \beta_0 + \sum \beta_i \times x_i \quad (2)$$

式中: x_i 为气象因子及植被因子(降雨、温度、日照时数、饱和水汽压差、风速、增长型植被指数); β_i 为回归系数。

基于气象要素、植被数据以及回归方程,计算得到 ET_i 的模拟值 $ET_{i\text{ sim}}$,用来表示气候和植被因子对蒸散发及其组分的影响;计算 ET_i 观测值 $ET_{i\text{ obs}}$ 和模拟值 $ET_{i\text{ sim}}$ 的差值,即 ET_i 残差 ($ET_{i\text{ others}}$),用来表示非植被下垫面因子对 ET_i 的影响,包括水土保持措施、水库调蓄等。计算公式为

$$ET_{i\text{ others}} = ET_{i\text{ obs}} - ET_{i\text{ sim}} \quad (3)$$

式中: $ET_{i\text{ sim}}$ 为多元回归方程的 ET_i 模拟值 (mm); $ET_{i\text{ others}}$ 为 ET_i 残差 (mm); $ET_{i\text{ obs}}$ 为观测值 (mm)。

1.3.3 ET_i 变化驱动因素判定及贡献率

根据公式 (1) 计算黄土高原 2001—2020 年 $ET_{i\text{ obs}}$ 、 $ET_{i\text{ sim}}$ 和 $ET_{i\text{ others}}$ 的 Slope 变化趋势。Slope ($ET_{i\text{ sim}}$) 和 Slope ($ET_{i\text{ others}}$) 分别代表在气候与植

被因子和非植被下垫面因子影响下蒸散发及其组分的变化趋势,趋势率为正表示气候与植被因子或非植被下垫面因子导致蒸散发及其组分的增加,对蒸散发及其组分具有促进作用;反之,表示会导致蒸散发及其组分的下降,对蒸散发及其组分具有抑制作用。为了更好地评价对蒸散发及其组分的影响,根据 Slope ($ET_{i\text{ sim}}$) 和 Slope ($ET_{i\text{ others}}$) 的变化趋势,将影响程度分为 8 个等级,即极大促进、明显促进、中度促进、轻微促进、轻微抑制、中度抑制、明显抑制、极大抑制 (见表 1)。

表 1 气候与植被因子和非植被下垫面因子对蒸散发及其组分的影响分级

Tab. 1 Classification of the impacts of the climate-vegetation factor and the non-vegetation underlying surface factor on evapotranspiration and its components

Slope ($ET_{i\text{ sim}}$) 或 Slope ($ET_{i\text{ others}}$)	影响程度
>6	极大促进
4~6	明显促进
2~4	中度促进
0~2	轻微促进
-2~0	轻微抑制
-4~2	中度抑制
-6~-4	明显抑制
≤-6	极大抑制

根据金凯^[19]的方法计算黄土高原气候与植被因子和非植被下垫面因子对 ET_i 变化的相对贡献率 (见表 2)。

对公式 (2) 拟合后的回归系数进行标准化处理,计算公式为

$$\bar{\beta}_i = \frac{\beta_i \times \text{std}(x_i)}{\text{std}(ET_i)} \quad (4)$$

表 2 ET_i 变化的驱动因子判定标准及贡献率

Tab. 2 The criteria for determining the driving factors of ET_i change and the contribution rate

Slope ($ET_{i\text{ obs}}$)	驱动因子	驱动因子判定标准		驱动因子相对贡献率/%	
		Slope ($ET_{i\text{ sim}}$)	Slope ($ET_{i\text{ others}}$)	气候与植被因子	非植被下垫面因子
>0	sim	>0	<0	100	0
	others	<0	>0	0	100
	sim and others	>0	>0	$\frac{\text{Slope}(ET_{i\text{ sim}})}{\text{Slope}(ET_{i\text{ obs}})}$	$\frac{\text{Slope}(ET_{i\text{ others}})}{\text{Slope}(ET_{i\text{ obs}})}$
<0	sim	<0	>0	100	0
	others	>0	<0	0	100
	sim and others	<0	<0	$\frac{\text{Slope}(ET_{i\text{ sim}})}{\text{Slope}(ET_{i\text{ obs}})}$	$\frac{\text{Slope}(ET_{i\text{ others}})}{\text{Slope}(ET_{i\text{ obs}})}$

式中: $\bar{\beta}_i$ 为标准化回归系数; β_i 为根据公式(2)得到的回归系数; $\text{std}(x_i)$ 为自变量 x_i 的标准差; $\text{std}(\text{ET}_i)$ 为因变量蒸散发及其组分的标准差。

标准化后的回归系数绝对值可以反映气象因子、植被因子对 ET_i 的变化的影响程度,通过运算,可以得到气象、植被单驱动因子对 ET_i 变化的相对贡献率^[20]。计算公式为

$$C_i = \frac{|\beta_i|}{|\beta_1| + |\beta_2| + |\beta_3| + |\beta_4| + |\beta_5|} \times C_{\text{sim}}$$

(5)

式中: C_i 为气象因子和植被对 ET_i 的相对贡献率(%) ; β_i 为各个驱动因子的标准化回归系数,无量纲; C_{sim} 为气候和植被的综合作用对 ET_i 的相对贡献率(%)。

2 结果

2.1 蒸散发模拟结果验证

根据公式(2)构建的蒸散发多元线性回归方程,输入气象因子和植被因子数据,得到 2001—2020 年黄土高原蒸散发模拟值,并将得到的栅格数据转化为点数据,与 GLEAM v3.7a 蒸散发数据进行比较,模拟值与 GLEAM v3.7a 数据比值越接近 1,说明模拟情况良好。结果表明,模拟值可以很好地模拟黄土高原蒸散发值($y = 0.884\ 6x + 49.352$, $R^2 = 0.708\ 9$),可以进行后续有关蒸散发时空变化特征、贡献率等研究(见图 2)。

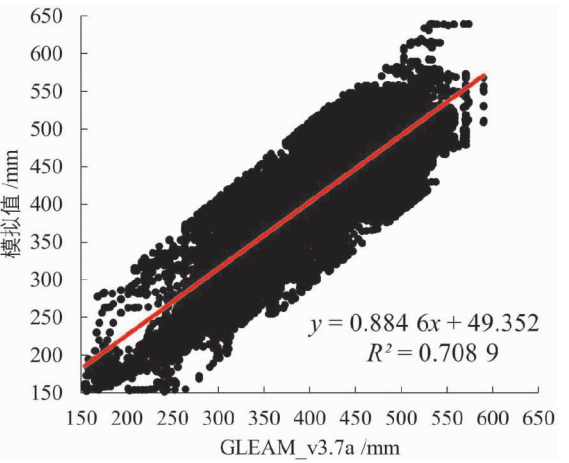


图 2 黄土高原蒸散发模拟值与 GLEAM v3.7a 数据比较验证

Fig. 2 Compared with the simulated evapotranspiration and GLEAM v3.7a data

2.2 蒸散发及其组分的时空变化特征

蒸散发(E)由土壤蒸发(Eb)、截留蒸发(Ei)、植被蒸腾(Et)、积雪升华(Es)、开放水域蒸发(Ew)等组成,对于黄土高原来说,积雪升华和开放水域蒸发可以忽略不计。对黄土高原蒸散发及其组分年蒸散量进行统计分析,如图 3 所示,黄土高原蒸散发随时间的变化呈现增长趋势,年均增长 2.869 4 mm($R^2 = 0.384\ 6$)。其中,土壤蒸发年均下降 1.405 4 mm($R^2 = 0.741\ 5$),且土壤蒸发占蒸散发的比重逐渐减少($R^2 = 0.591\ 3$),从 2001 年的 31.93% 下降到 2020 年的 20.82%。截留蒸发和植被蒸腾均随时间的变化呈现增长趋势,截留蒸发年均增长 0.354 mm($R^2 = 0.694\ 6$),且占比逐年增加($R^2 = 0.775\ 9$);植被蒸腾年均增长 3.716 5 mm($R^2 = 0.527\ 1$),且占比增长趋势明显($R^2 = 0.571$)。

利用 2001—2020 年 GLEAM v3.7a 栅格数据进行统计分析,得到黄土高原年均蒸散发及其组分的空间分布特征。如图 4(a)~(d)所示,黄土高原年均蒸散发为 412.30 mm,最高值为 645.06 mm,最低值为 141.58 mm,区域差异显著,自东南向西北蒸散发逐渐减少,陕西、山西、河南西北部、甘肃南部、宁夏南部蒸散发较大,内蒙古、宁夏北部蒸散发较小。从组分来看,年均土壤蒸发量为 96.11 mm,最高值为 244.32 mm,最低值为 3.03 mm,东南部蒸发量较低,西北部蒸发量较高。年均截留蒸发量为 12.25 mm,与其他蒸散发组分相比,分布较为平均,整体不高,仅有南部小部分地区超过 100 mm。植被蒸腾呈现与蒸散发相似的空间分布特征,从东南向西北逐渐递减,年均蒸腾量为 298.122 mm,最高值为 516.55 mm,最低值为 3.53 mm。

黄土高原蒸散发及其组分的变化趋势也具有明显的空间异质性,如图 4(e)~(h)所示,黄土高原 81.80% 的区域土壤蒸发呈现下降趋势,其中显著下降的区域占 65.85% ($p < 0.1$),主要分布在黄土高原中部、东部和南部,中部减少趋势最为明显。黄土高原 65.58% 的区域截留蒸发呈现增长趋势,且 57.66% 的区域通过了显著性检验 ($p < 0.1$),主要集中在黄土高原东南部,有 34.42% 的区域呈现下降趋势,且 4.46% 的区域通过显著性检验 ($p < 0.1$)。黄土高原 87.27% 的区域植被蒸腾呈现增长趋势,显著增加的区域占 70.21% ($p < 0.1$),12.73% 的区域呈现减少趋势,

显著减少的区域仅占 3.12% ($p < 0.1$), 主要分布在黄土高原南部。总体来看, 黄土高原 90.43% 的区域蒸散发呈现增长趋势, 显著增长的区域占比 60.55% ($p < 0.1$), 主要分布在中部及北部地区, 中部等区域年均增长超过了 4 mm, 9.57% 的区域呈现减少趋势, 显著减少的区域只占比 0.52%, 主要分布在陕西中部和山西南部。

蒸散发各组分的比例分配空间格局有所不同, 如图 4(i) ~ (k) 所示, 黄土高原西北部蒸散发

的主要组分为土壤蒸发, 东南部主要为植被蒸腾, 并且二者的比例分配空间格局呈现相反趋势, 从西北至东南, 土壤蒸发占比逐渐减少, 而植被蒸腾逐渐增加。截留蒸发的比例分配空间格局与其年均蒸发量的空间格局相同, 占比较低。植被蒸腾是黄土高原蒸散发最主要的组成部分, 占比 68.75%, 其次是土壤蒸发, 占比 27.34%, 截留蒸发占比最少, 仅为 0.02%。

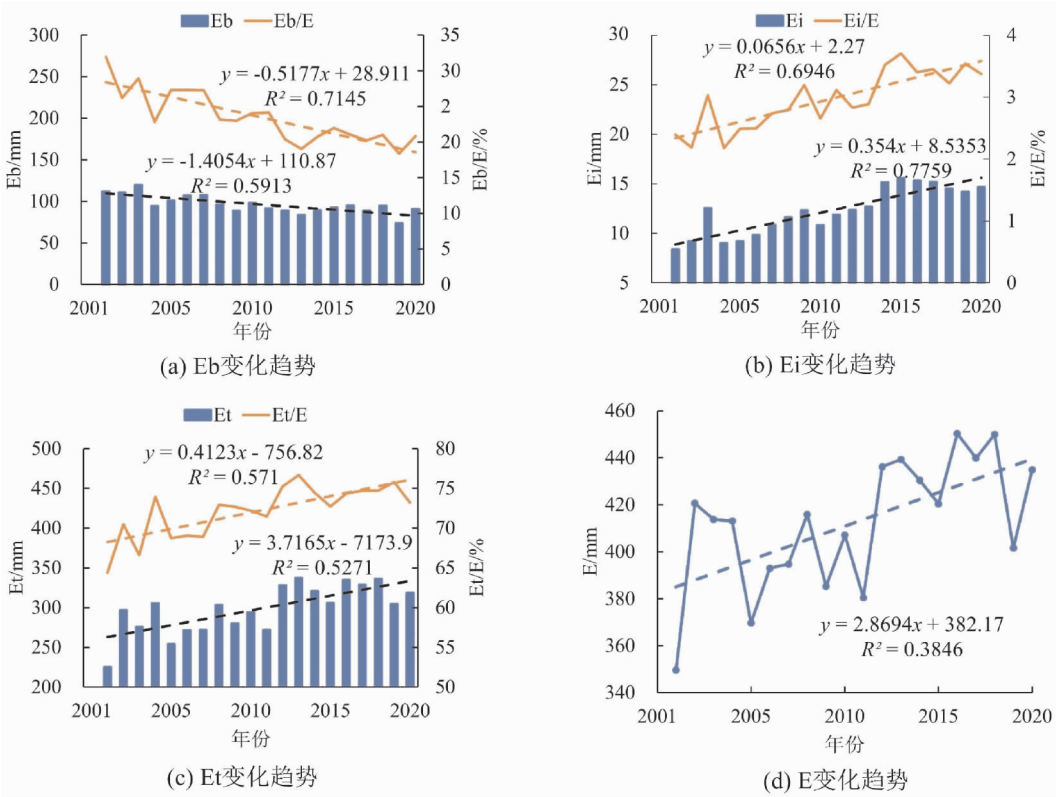


图 3 黄土高原蒸散发及其组分年际变化趋势

Fig. 3 Interannual variation trend of evapotranspiration and its components in the Loess Plateau

2.3 蒸散发及其组分变化驱动力分析

气候与植被因子和非植被下垫面因子对蒸散发及其组分的影响程度呈现显著的空间异质性, 且不同组分其影响因素也有所不同。如图 5 和表 3 所示, 对蒸散发而言, 气候与植被因子的影响在 $-3.71 \sim 7.25$ mm/a 之间, 非植被下垫面因子的影响在 $-3.03 \sim 6.63$ mm/a 之间。气候与植被因子主要为促进作用, 占黄土高原的 89.79%, 主要集中在中部和北部地区, 中度促进作用的占比最大, 占黄土高原的 37.49%; 非植被下垫面因子也主要起促进作用, 其中轻微促进作用占比最大, 占黄土高原的 69.08%。气候与植被因子对土壤蒸发的影响在 $-6.51 \sim 3.11$ mm/a 之间, 非植被下

垫面因子的影响在 $-3.82 \sim 2.76$ mm/a 之间, 土壤蒸发对气候与植被因子和非植被下垫面因子的响应呈现出与蒸散发相反的空间分布特征, 气候与植被因子主要为抑制作用, 且分布广泛, 轻微抑制占比最多, 为 60.57%, 在黄土高原中部地区甚至出现了极大抑制的情况, 仅有 18.59% 为促进作用, 非植被下垫面对土壤蒸发也主要为抑制作用, 轻微抑制占比 77.48%。气候与植被因子对截留蒸发的影响在 $-0.13 \sim 4.65$ mm/a 之间, 非植被下垫面因子的影响在 $-0.42 \sim 1.65$ mm/a 之间, 气候与植被因子和非植被下垫面因子对截留蒸发的影响空间分布情况相似, 促进作用主要分布在黄土高原东南部, 而抑制作用分布在西北部,

影响最大的为轻微促进作用,分别占比 66.48% 和 62.87%。气候与植被因子对植被蒸腾的影响在 $-5.84 \sim 12.5 \text{ mm/a}$ 之间,非植被下垫面因子的影响在 $4.09 \sim 7.59 \text{ mm/a}$ 之间,植被蒸腾与蒸散发的影响因素有着相似的空间分布特征,气候

与植被因子的促进程度以黄土高原中部为中心向外逐渐递减,中心为极大促进作用,占比高达 15.88%,非植被下垫面因子对植被蒸腾的影响主要为轻微促进作用,占比为 74.34%。

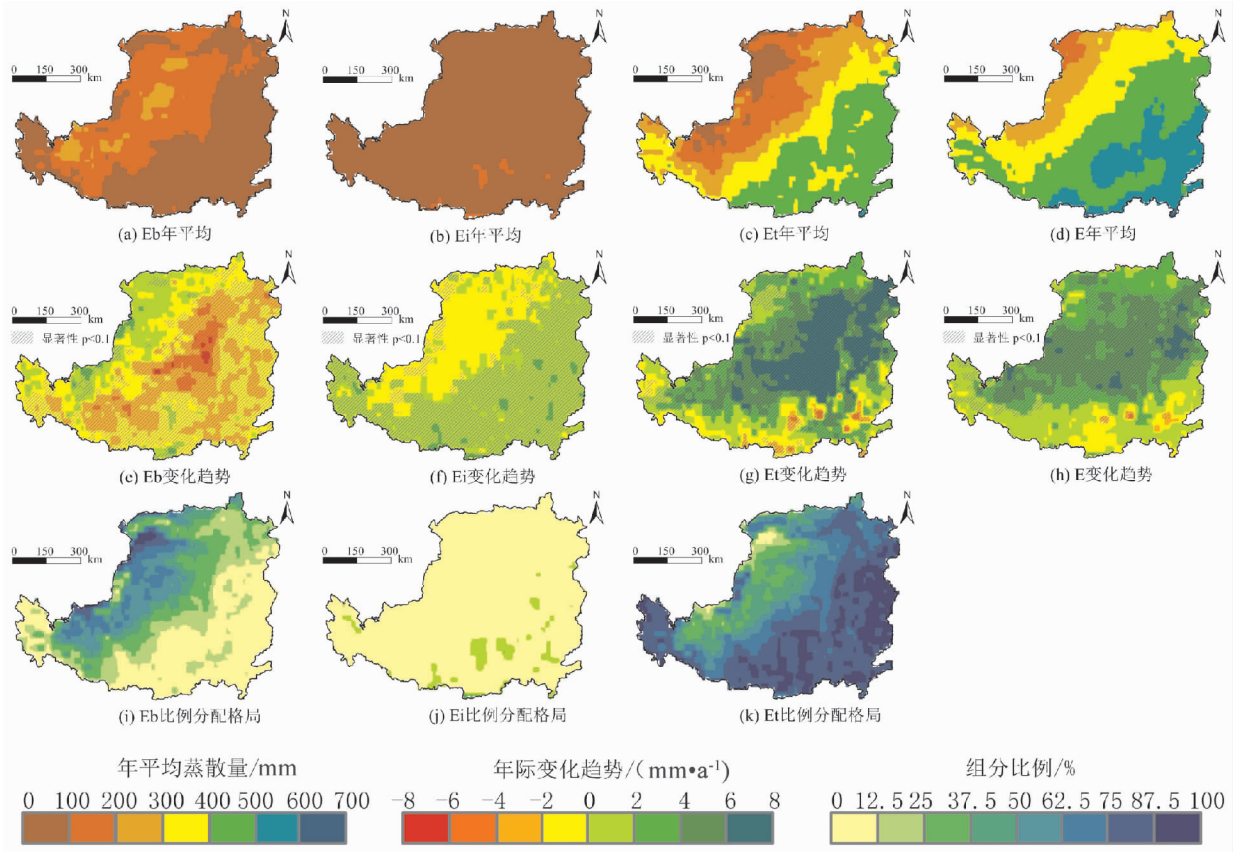


图4 黄土高原蒸散发及其组分年平均、变化趋势、比例分配空间格局图

Fig.4 Spatial pattern of evapotranspiration and its components in the Loess Plateau (multi-year average, variation trend and proportion distribution)

综合分析黄土高原蒸散发及其组分变化的影响因素可以看出(见图 6 和表 4),气候与植被因子和非植被下垫面因子的综合作用是黄土高原蒸散发及其组分变化最大的驱动因素。导致黄土高原蒸散发增长的因素中,气候与植被因子和非植被下垫面因子的综合作用影响区域最大,占黄土高原面积的 66.16%,分布在东部和西部;其次是气候与植被因子,占黄土高原面积的 19.96%,主要分布在北部;最小的是非植被下垫面因子,占黄土高原面积的 3.52%,主要分布在南部。导致黄土高原蒸散发减少的驱动因素中,气候与植被因子和非植被下垫面因子的综合作用区域占 3.58%,单独由气候与植被因子和非植被下垫面因子导致蒸散发减少的区域分别占 2.85% 和 1.48%,主要集中在南部的城市群周围。气候与

植被因子和非植被下垫面因子的共同作用是导致黄土高原土壤蒸发减少的主要驱动因素,占比 68.93%,气候与植被因子和非植被下垫面因子及其共同作用导致土壤蒸发增加的区域分别占 4.88%、3.89% 和 9.29%,集中分布在西北部。影响截留蒸发的驱动因素中,气候与植被因子和非植被下垫面因子的共同作用影响区域最大,增长作用占黄土高原面积的 57.72%,分布在黄土高原东部及南部,减少作用占 10.09%。导致植被蒸腾增加的驱动因素中,气候与植被因子和非植被下垫面因子的共同作用影响最大,占黄土高原面积的 72.67%,气候与植被因子、非植被下垫面因子及其共同作用导致植被蒸腾减少的区域分别占 3.85%、1.31% 和 5.95%。

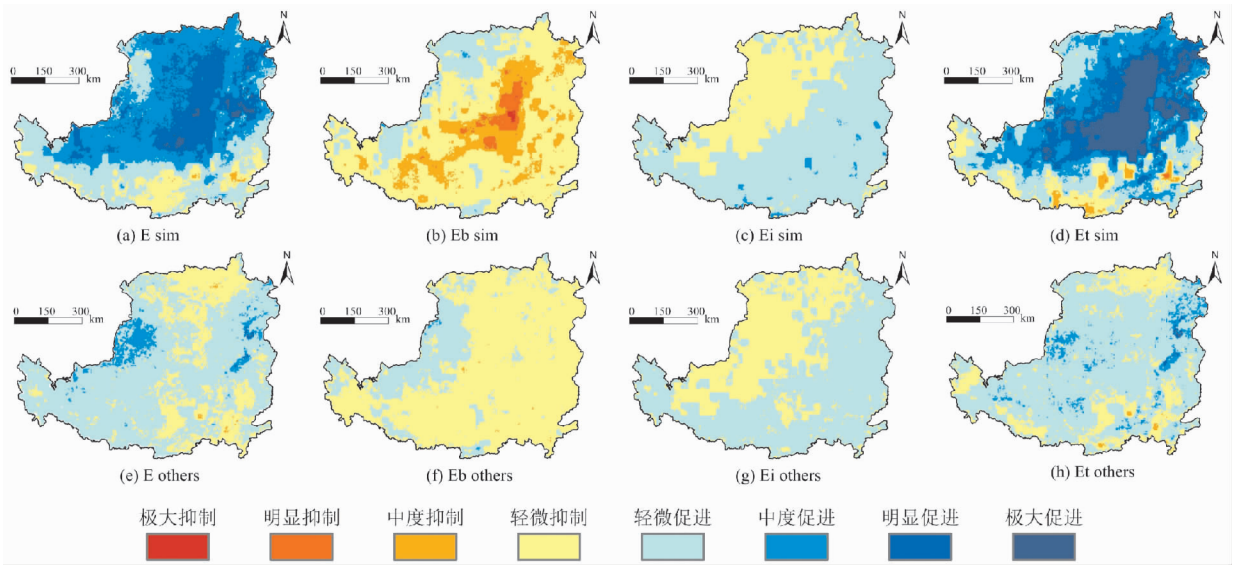


图5 气候与植被因子和非植被下垫面因子对蒸散发及其组分影响程度空间分布图

Fig.5 Spatial distribution of the influence degree of climate-vegetation factors and non-vegetation underlying surface factors on evapotranspiration and its components

表3 气候与植被因子和非植被下垫面因子对蒸散发及其组分影响程度像元统计表

Tab.3 Statistical table of the impacts of the climate-vegetation factor and the non-vegetation underlying surface factor on evapo- transpiration and its components

蒸散发及其组分		像元统计/%							
		极大抑制	明显抑制	中度抑制	轻微抑制	轻微促进	中度促进	明显促进	极大促进
E	sim			0.31	9.89	29.60	37.49	21.73	0.97
	others			0.20	25.45	69.08	5.04	0.22	0.02
Eb	sim	0.21	3.45	19.01	60.57	16.54	0.22		
	others			0.25	77.48	22.05	0.21		
Ei	sim				32.38	66.48	1.12	0.02	
	others				37.03	62.87	0.10		
Et	sim		0.10	1.74	11.77	25.43	26.42	18.64	15.88
	others		0.01	0.32	19.58	74.34	5.20	0.43	0.13

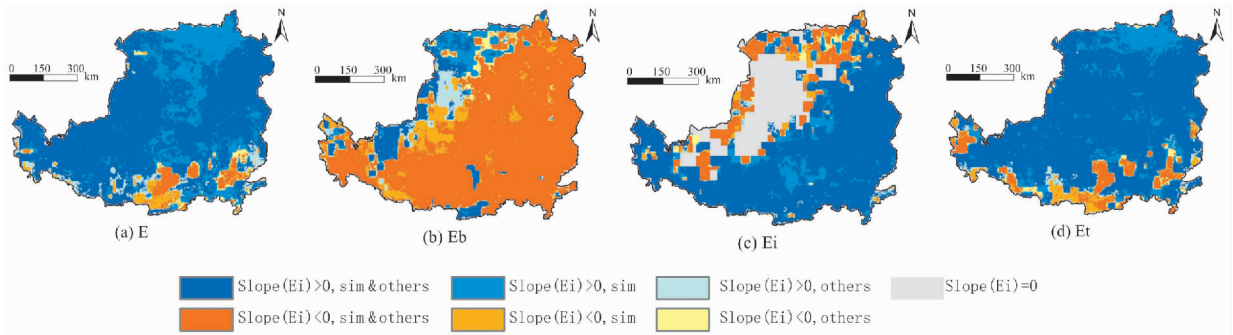


图6 蒸散发及其组分驱动因素空间分布图

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

表 4 蒸散发及其组分驱动因素像元统计表

Tab. 4 Statistical table of driving factors to evapotranspiration and its components

Slope(ET _i)	驱动力	像元统计/%			
		E	Eb	Ei	Et
>0	sim & others	66.17	9.29	57.69	72.67
	sim	19.96	4.88	7.92	12.25
	others	3.52	3.89	1.35	2.01
<0	sim & others	3.58	68.93	10.06	5.95
	sim	2.85	8.53	2.58	3.85
	others	1.48	2.52	1.85	1.31
0	不明确	2.43	1.96	18.55	1.96

2.4 不同驱动因素对蒸散发及其组分变化的相对贡献

分析不同驱动因素对黄土高原蒸散发及其组分变化的相对贡献(见图 7 和表 5),对于蒸散发而言,气候变化的贡献率较大,有 88.21% 的区域贡献率大于 40%,贡献率主要集中在 60% ~

80%,占黄土高原总面积的 37.18%,分布在中部和北部地区;植被变化的贡献率为 0 ~ 20%,占黄土高原总面积的 79.75%,主要分布在中部;非植被下垫面的贡献率主要为 0 ~ 20%,在黄土高原西部、南部、东部贡献较大,南部有 9.59% 地区出现贡献率大于 80% 的情况。

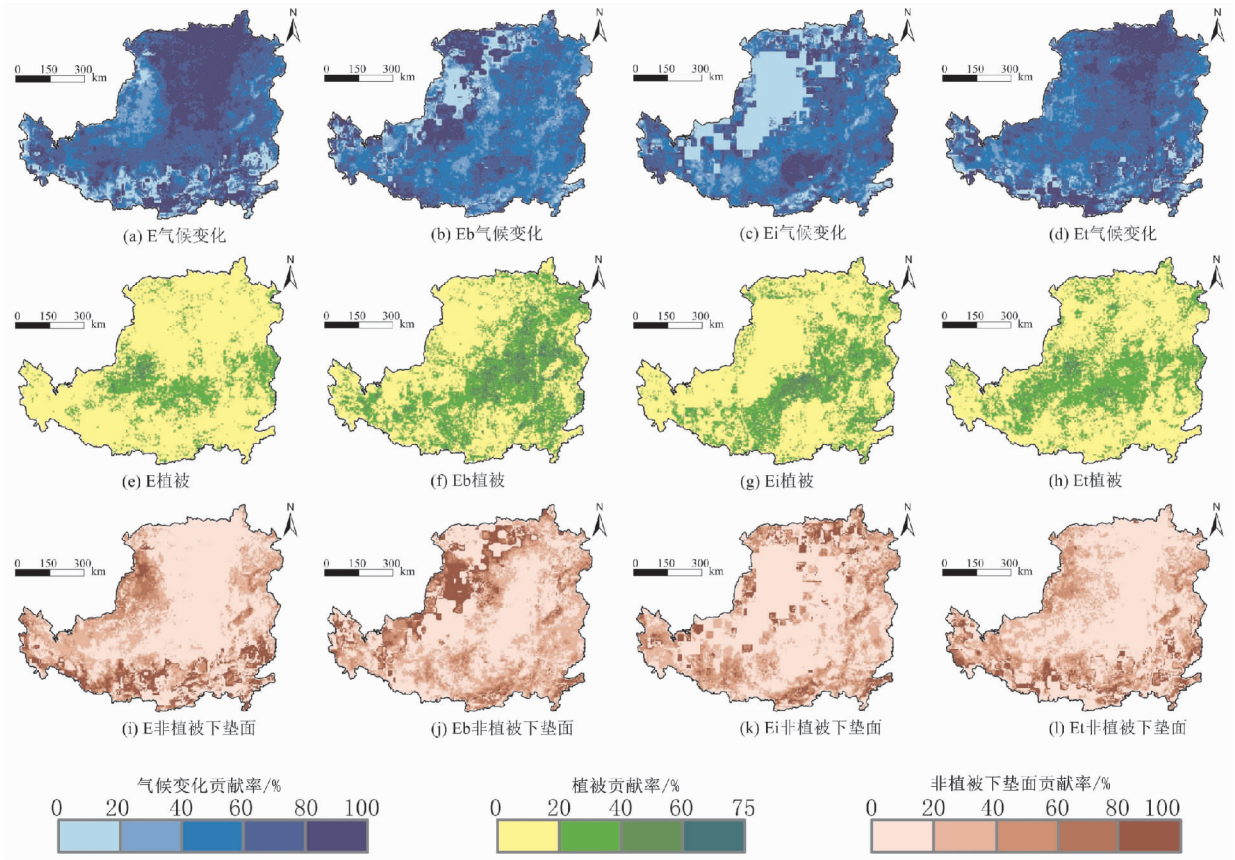


图 7 蒸散发及其组分驱动因素相对贡献率空间分布图

Fig. 7 Spatial distribution of relative contribution rate of evapotranspiration and its component driving factors

表 5 蒸散发及其组分驱动因素相对贡献率像元统计表
Tab.5 Statistical table of the relative contribution rate of driving factors to evapotranspiration and its components

贡献率/%		像元统计/%			
		E	Eb	Ei	Et
气候变化	0 ~ 20	8. 24	9. 75	23. 99	5. 18
	20 ~ 40	8. 35	14. 9	9. 96	7. 31
	40 ~ 60	18. 65	40. 34	30. 47	28. 81
	60 ~ 8	35. 21	23. 89	25. 42	40. 91
	>80	29. 55	11. 11	10. 16	17. 79
植被变化	0 ~ 20	80. 83	55. 91	69. 95	66. 04
	20 ~ 40	17. 73	34. 76	25. 25	32. 16
	40 ~ 60	1. 41	8. 99	4. 71	1. 75
	60 ~ 8	0. 03	0. 33	0. 09	0. 05
非植被下垫面	0 ~ 20	58. 54	49	57. 94	59. 25
	20 ~ 40	20. 75	26. 55	22. 64	23. 19
	40 ~ 60	9. 15	11. 07	10. 34	9. 59
	60 ~ 8	4. 45	4. 83	4. 15	3. 41
	>80	7. 1	8. 56	4. 93	4. 56

气候变化对黄土高原土壤蒸发的贡献率主要为 40% ~ 60%, 占总面积的 43. 19%, 主要分布在东部、中部、南部; 与蒸散发相似, 植被变化对土壤蒸发的贡献率也为 0 ~ 20%, 占总面积的 52. 57%; 非植被下垫面的贡献较少, 贡献率为 40% 以下占总面积的 71. 21%。

气候变化对黄土高原截留蒸发的贡献率也主要为 40% ~ 60%, 占总面积的 38. 89%, 其次是 60% ~ 80%, 占总面积的 32. 14%, 大于 80% 贡献率的地区主要集中在南部, 占总面积的 12. 92%; 植被变化贡献率的分布与土壤蒸发类似, 贡献率主要为 0 ~ 20%; 非植被下垫面贡献率主要为 0 ~ 20%, 占总面积的 41. 06%, 其次是 20% ~ 40%, 占总面积的 31. 68%。

植被蒸腾贡献率的分布与蒸散发大体相似, 气候变化对其贡献较大, 贡献率主要为 60% ~ 80%, 占总面积的 42. 09%; 植被变化的贡献率与蒸散发相比有所增加, 黄土高原 33. 88% 的区域贡献率为 20% ~ 40%, 分布也更为广泛; 非植被下垫面贡献率为 0 ~ 20%, 占总面积的 50. 68%, 28% 的区域贡献率为 20% ~ 40%, 大于 80% 的贡献率占 5. 60%。

不同气象要素对黄土高原蒸散发及其组分变化的贡献率也有所不同(见图 8 和表 6)。对于蒸散发而言, 降雨和温度的贡献率主要为 10% ~ 20%, 分别占总面积的 48. 53% 和 53. 66%, 分布在中部地区; 日照时间和风速的贡献率主要为

0 ~ 10%, 分别占总面积的 52. 36% 和 65. 33%, 北部和南部有贡献率较高的区域; 饱和水汽压差贡献率大于 30% 的区域占总面积的 29. 74%, 且主要集中在分布在中部及北部地区。气象要素对土壤蒸发的贡献率主要为 0 ~ 10%, 覆盖黄土高原大部分地区。对截留蒸发而言, 饱和水汽压差的贡献率主要为 10% ~ 20%, 占总面积的 34. 95%, 主要分布在中部和南部, 除此之外, 其余气象要素的主要贡献率均为 0 ~ 10%。对植被蒸腾而言, 温度、日照时间和风速的贡献率主要为 0 ~ 10%, 占总面积分别为 49. 68%、54. 65% 和 59. 45%, 降雨的贡献率主要为 10% ~ 20%, 占总面积的 51. 96%, 饱和水汽压差贡献率整体较高, 其贡献率的空间分布与蒸散发相似。

不同要素对蒸散发及其组分的贡献也有所不同(见图 9), 对蒸散发相对贡献率大小排序为非植被下垫面(23. 47%) > 饱和水汽压差(21. 31%) > 降雨(12. 22%) > 温度(11. 84%) > 植被(11. 83%) > 日照时间(9. 98%) > 风速(8. 06%), 对土壤蒸发相对贡献率大小排序为非植被下垫面(28. 29%) > 植被(19. 15%) > 饱和水汽压差(13. 66%) > 风速(11. 72%) > 日照时间(9. 69%) > 降雨(9. 07%) > 温度(7. 29%), 对截留蒸发相对贡献率大小排序为非植被下垫面(22. 24%) > 植被(13. 85%) > 饱和水汽压差(12. 47%) > 风速(9. 40%) > 日照时间(9. 17%) > 温度(7. 93%) > 降雨(6. 26%), 对植被蒸腾相对贡献率大小排序为非植被下垫面

(22.13%) > 饱和水汽压差(19.43%) > 植被(15.86%) > 降雨(12.42%) > 日照时间(10.03%) > 温度(9.91%) > 风速(9.21%)。

整体分析各因素对蒸散发及其组分的贡献,气候变化是蒸散发及其组分的主要贡献因素,对蒸散发、土壤蒸发、截留蒸发、植被蒸腾的贡献分别为 63.41%、51.43%、45.23%、61%,其次是非植被下垫面,贡献率分别为 23.47%、28.29%、22.24%、22.13%,植被变化也是不可忽视的要

素,贡献率分别为 11.83%、19.15%、13.85%、15.86%。饱和水汽压差是影响蒸散发及其组分最主要的气象要素,降雨对蒸散发和植被蒸腾影响较大,风速对土壤蒸发和截留蒸发影响较大,温度对蒸散发影响较大,日照时间对植被蒸腾影响较大。由于蒸散发及其组分的栅格数据精度不高,导致一些数值较小的栅格在计算过程中缺失,进而在分析中出现贡献率之和不等于 100% 的情况。

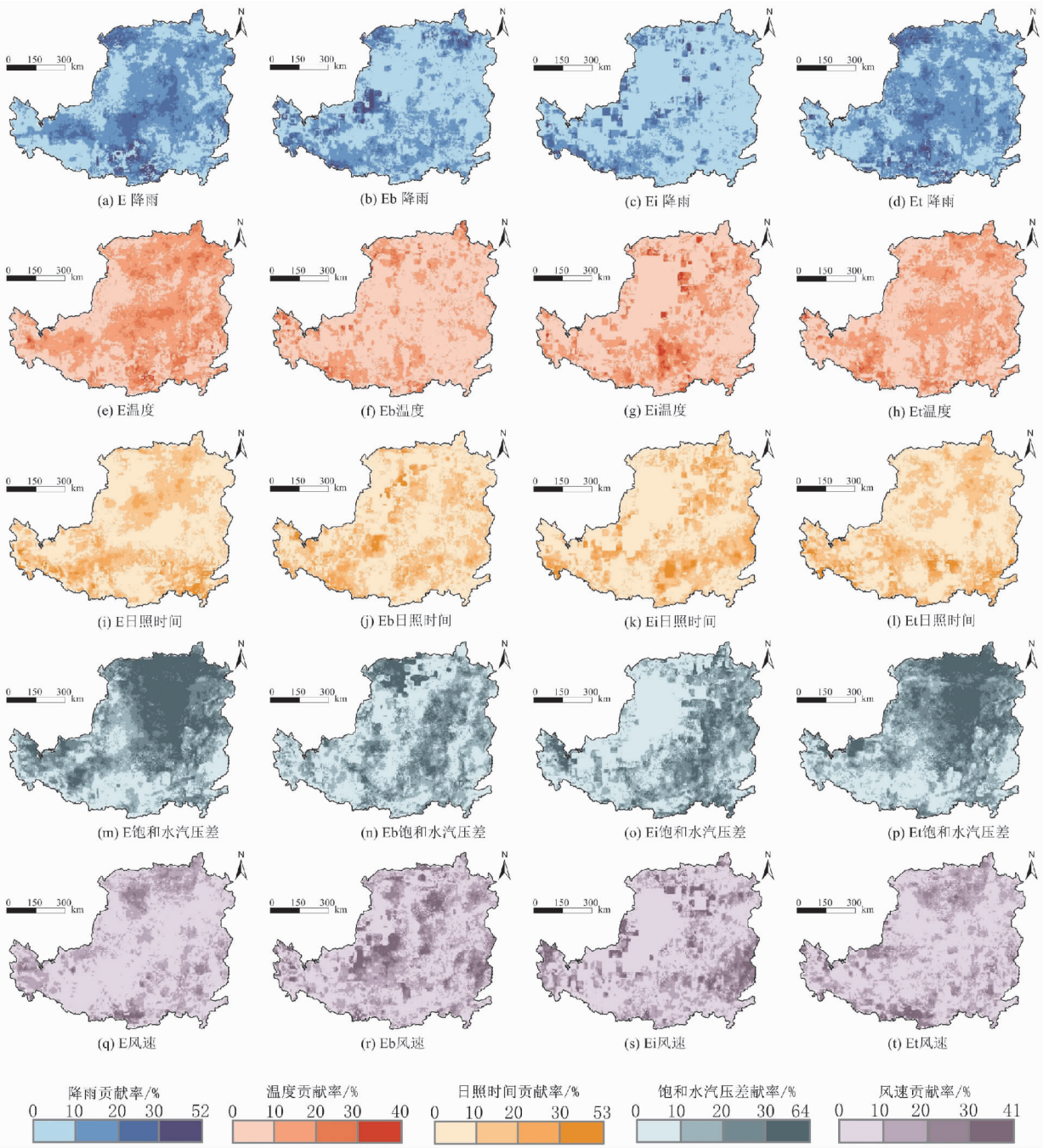


图 8 气象因素对蒸散发及其组分相对贡献率空间分布图

Fig. 8 Spatial distribution of relative contribution rate of meteorological factors to evapotranspiration and its components

表 6 气象因素对蒸散发及其组分相对贡献率像元统计表

Tab.6 Statistical table of the relative contribution rate of meteorological factors to evapotranspiration and its components

贡献率/%		像元统计/%			
		E	Eb	Ei	Et
降雨	0 ~ 10	35. 38	58. 47	69. 29	34. 33
	10 ~ 20	48. 53	32. 10	23. 83	51. 96
	20 ~ 30	14. 43	7. 53	5. 91	12. 25
	> 30	1. 66	1. 90	0. 97	1. 46
温度	0 ~ 10	34. 25	69. 17	55. 43	49. 68
	10 ~ 20	53. 66	27. 20	34. 37	44. 68
	20 ~ 30	11. 69	3. 34	8. 26	5. 32
	> 30	0. 40	0. 47	1. 94	0. 33
日照时间	0 ~ 10	52. 36	53. 97	48. 26	54. 65
	10 ~ 20	36. 37	34. 52	34. 59	34. 93
	20 ~ 30	9. 39	9. 79	14. 15	8. 22
	> 30	1. 88	1. 72	3. 00	2. 20
饱和水汽压差	0 ~ 10	18. 70	37. 41	32. 11	23. 51
	10 ~ 20	25. 30	34. 35	34. 95	28. 16
	20 ~ 30	26. 26	19. 66	23. 52	25. 71
	> 30	29. 74	8. 58	9. 42	22. 63
风速	0 ~ 10	65. 33	46. 90	51. 50	59. 45
	10 ~ 20	27. 88	32. 88	29. 47	30. 85
	20 ~ 30	6. 09	13. 96	12. 61	8. 13
	> 30	0. 71	6. 26	6. 42	1. 57

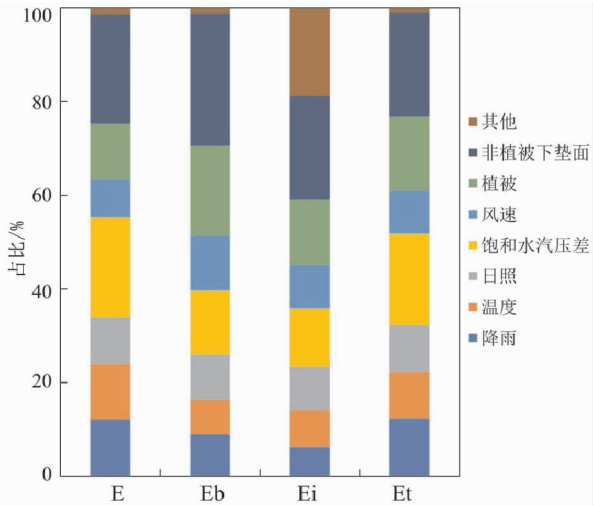


图 9 蒸散发及其组分影响因素贡献比例图

Fig. 9 Contribution ratio of evapotranspiration and its components

3 讨论

研究结果表明,2001—2020 年黄土高原蒸散发整体呈现增长趋势,而其各组分呈现出不同的变化趋势,土壤蒸发及其占比呈现下降趋势,截留

蒸发和植被蒸腾及其占比呈现增长趋势,且不同地区的变化有所不同,这与已有研究结论相同^[21-22]。分析气候与植被因子和非植被下垫面因子及其综合作用对蒸散发及其组分影响可知,气候变化和非植被下垫面变化的共同作用是导致蒸散发及其组分变化的主要原因。

气候变化是影响蒸散发最主要的因素,王凯利等采用多元回归残差分析^[23],Qiu 等通过 GLEAM 数据和 CLM 模型均得到该结论^[24],气候变化导致区域水热条件发生变化,从而对蒸散发产生影响。饱和水汽压差是影响蒸散发及其组分变化的主要气象要素^[25],它可以反映大气水分亏缺程度,通过加大下垫面与空气间的水汽梯度对蒸散产生影响,在暖干化明显的黄土高原,饱和水汽压差也在逐渐增大,蒸散发及其组分对水汽变化响应十分敏感^[26],特别是截留蒸发^[27]。黄土高原属于半干旱地区,降雨是黄土高原水分的重要来源,也是蒸散发水分的直接来源,尤其是对蒸散发和植被蒸腾来说,一部分停留在叶片上形成截留蒸发,更多的是进入土壤,而植被会从土壤中直接获取水分。在植物生长过程中,植被蒸腾是其必要的水分消耗,并且由于黄土高原大规模植

被恢复措施的开展,导致植被蒸腾呈现显著增加的趋势,而植被蒸腾又是蒸散发主要的组成部分,因此,蒸散发也随之增加。黄土高原地处我国东部季风区向西北干旱区的过渡地带,平均风速高于全国平均风速^[28],即使开展了大规模植被恢复,增加了地表的粗糙度,但较大的风速仍使得空气发生扰动带走水蒸气,土壤表面的大气湿度下降,进而影响水汽压差,水汽压差越大,土壤蒸发越剧烈^[29]。除此之外,风速也会加剧冠层扰动,促进冠层截留雨水转化,空气动力学阻力减小,在一定程度上促进蒸发的形成^[27,29],而黄土高原退耕还林的开展,进一步扩大了风速对截留蒸发的影响,因此,风速对黄土高原土壤蒸发和截留蒸发影响较大。温度通过影响地表温度、植物的生理活动和叶面温度影响蒸散发^[30]。一方面,黄土高原气候变暖,升高的温度会影响土壤温度,直接影响土壤蒸发和植被蒸腾;另一方面,温度升高提高了饱和水汽压差和空气需水量,进而通过影响气孔导度影响植被蒸腾。但是过高的温度也会导致植被气孔闭合,甚至减弱植被蒸腾,这可能是温度并不作为黄土高原蒸散发及其组分主要影响因素的原因^[31]。日照时间与植被生长有着密不可分的联系,日照通过影响与植物生长有关的因素,如净辐射、温度等,为植物提供能量,影响植物生长,而黄土高原所处纬度较高,日照时间充足,再加上植被大规模地恢复,进而影响了黄土高原蒸散发及其组分的变化,尤其是植被蒸腾。

越来越多的研究表明,土地利用变化对区域水文变化具有重要影响,如通过改变下垫面透水性、植被截留量、地表反照率、地表粗糙度等影响区域气候和水文过程^[32]。退耕还林还草对区域气候和水文过程的影响引起广泛关注,自 2000 年以后,黄土高原“变绿”速度明显加快,黄土高原植被恢复导致地区蒸散发量增加的基本结论基本达成共识^[32-34]。退耕还林还草后,植被蒸腾和截留蒸发占比增加,土壤蒸发占比减小的现象,可能是由植被恢复、太阳辐射、温度变化等多种因素共同导致^[35]。一方面,黄土高原气候暖干化趋势明显,导致蒸散发增加,径流减少,降雨补给不充分,水资源短缺;另一方面,大规模的植被恢复,增加了植被生物量和耗水量,植被蒸腾和截留蒸发相应增加,土壤表面的阴影增加导致土壤蒸发减少。此外,非植被下垫面变化也对蒸散发的变化有着不可忽视的作用^[36]。农业灌溉活动对区域水文

过程的影响已经得到证实,而且黄河流域的农业用水量占用水总量的比例超过 60%,且灌溉方式以漫灌为主,对蒸散发有着重要影响^[32]。梯田、淤地坝等水土保持措施也会通过拦蓄地表径流^[37],增加土壤水分含量的形式,导致黄土高原蒸散发的增加。

以往关于气候变化和人类活动对蒸散发影响的研究,考虑因素较少,本文考虑要素较为全面,但也存在一些不足。蒸散发数据已有精度更高更准确的产品(PML_V2-ET)^[38],而且本文已发现气候变化与植被、非植被下垫面之间存在一定的耦合效应,但对其具体的贡献并未充分讨论。此外,地形地貌、土壤水含量、植被类型等也对蒸散发有着重要影响^[39-41]。未来,可综合考虑这些影响因素,对不同要素及其之间耦合关系对蒸散发的贡献做进一步研究,提高研究的准确性。

4 结论

本研究基于气象数据(降雨、温度、日照时间、饱和水汽压差、风速)、EVI 数据及蒸散发及其组分数据,采用 Slope 趋势分析和多元回归残差分析等方法,对 2001—2020 年黄土高原蒸散发及其组分变化的驱动因素及相应贡献进行了多尺度分析。主要结论如下。

1) 2001—2020 年黄土高原蒸散发量由东南向西北递减,并呈现逐年增加趋势,年均增长 2.869 4 mm($R^2 = 0.384\ 6$),黄土高原 90.43% 的区域呈现增长趋势,主要分布在中部和北部地区,9.57% 的区域呈现减少趋势,主要分布在陕西中部和山西南部。土壤蒸发量较大的区域主要集中在西北部,年均减少 1.405 4 mm($R^2 = 0.384\ 6$),占蒸散发的比重也逐渐减少($R^2 = 0.714\ 5$),在中部、东部和南部显著减少,中部减少趋势最为明显。截留蒸发量不大,占比不高,但随年际变化呈现增长趋势,57.66% 的区域为显著增长($p < 0.1$),主要分布在东南部。植被蒸腾是蒸散发最主要的组分,占比 68.75%,且逐年增长,空间分布与蒸散发相似,东南高西北低,有 87.27% 的区域呈现增长趋势,显著增长的区域占 70.21% ($p < 0.1$)。

2) 气候与植被因子和非植被下垫面因子对蒸散发及其组分的影响程度有所不同。气候与植被因子对蒸散发、截留蒸发、植被蒸腾主要为促进

作用,其中对蒸散发主要为中度促进,对截留蒸发和植被蒸腾主要为轻微促进,对土壤蒸发主要为轻微抑制作用。除对土壤蒸发是轻微抑制作用外,非植被下垫面因子对蒸散发、截留蒸发和植被蒸腾主要起轻微促进作用。气候与植被因子和非植被下垫面因子共同作用是近 20 年来导致蒸散发、土壤蒸发、植被蒸腾增长和土壤蒸发减少的主要原因。

3)整体来看,气候变化是黄土高原蒸散发最主要的影响因素,其中,饱和水汽压差是影响蒸散发及其组分最主要的气象要素,降雨对蒸散发和植被蒸腾影响较大,风速对土壤蒸发和截留蒸发影响较大,温度对蒸散发影响较大,日照时间对植被蒸腾影响较大。其次是非植被下垫面因素对蒸散发及其组分的影响,对土壤蒸发影响最大。黄土高原大规模植被恢复措施使得植被变化也成为不可忽视的影响因素,对土壤蒸发和植被蒸腾影响较大,在黄土高原中部等地区出现了对蒸散发及其组分高贡献率的情况。

参考文献

[1] FISHER J B, MELTON F, MIDDLETON E, et al. The future of evapotranspiration: Global requirements for ecosystem functioning, carbon and climate feedbacks, agricultural management, and water resources [J]. *Water Resources Research*, 2017, 53 (4) : 2618-2626.

[2] 刘静,温仲明,刚成诚. 黄土高原不同植被覆被类型 NDVI 对气候变化的响应 [J]. *生态学报*, 2020, 40 (2) : 678-691.

LIU J, WEN Z M, GANG C C. Normalized difference vegetation index of different vegetation cover types and its responses to climate change in the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40 (2) : 678-691.

[3] WANG Y Q, SHAO M A, ZHU Y J, et al. Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151 (4) : 437-448.

[4] ZHANG B Q, HE C S, BURNHAM M, et al. Evaluating the coupling effects of climate aridity and vegetation restoration on soil erosion over the Loess Plateau in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 539: 436-449.

[5] FENG X M, FU B J, PIAO S L, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable

water resource limits [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6 (11) : 1019-1022.

[6] CHEN Y P, WANG K B, LIN Y S, et al. Balancing green and grain trade [J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8 (10) : 739-741.

[7] ZHANG B Q, WU P, ZHAO X N, et al. Assessing the spatial and temporal variation of the rainwater harvesting potential (1971—2010) on the Chinese Loess Plateau using the VIC model [J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28 (3) : 534-544.

[8] CAO S, CHEN L, YU X. Impact of China's grain for green project on the landscape of vulnerable arid and semi-arid agricultural regions: A case study in northern Shaanxi Province [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2009, 46 (3) : 536-543.

[9] 王丽霞,夏鹏宇,杨潇,等. 渭河流域蒸散发时空反演及其对人类活动的响应 [J/OL]. *水利水电技术 (中英文)*, 1-18 [2023-10-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1746.TV.20230705.1251.004.html>.

WANG L X, XIA P Y, YANG X, et al. Spatial-temporal inversion of evapotranspiration in the Weihe River basin and its response to human activities [J/OL]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 1-18 [2023-10-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1746.TV.20230705.1251.004.html>.

[10] 杨凡,刘小飞,刘战东,等. 基于 Priestley-Taylor 模型的豫北玉米生长季水热通量研究 [J]. *节水灌溉*, 2023 (11) : 115-120.

YANG F, LIU X F, LIU Z D, et al. Research on the changes in water and heat flux summer corn season in northern Henan Province based on Priestley-Taylor model [J]. *Water Saving Irrigation*, 2023 (11) : 115-120.

[11] 唐家琦,王成杰. 荒漠草原区显热通量变化特征及源区分布 [J]. *草地学报*, 2023, 31 (1) : 239-251.

TANG J Q, WANG C J. Characterization of variations of sensible heat flux and its source area distribution over the desert steppe [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31 (1) : 239-251.

[12] 王韦娜,张翔,张立锋,等. 蒸渗仪法和涡度相关法测定蒸散的比较 [J]. *生态学杂志*, 2019, 38 (11) : 3551-3559.

WANG W N, ZHANG X, ZHANG L F, et al. A comparison study of the evapotranspiration measured by lysimeter and eddy covariance [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38 (11) : 3551-3559.

[13] 常晓格,王志慧,肖培青,等. 黄土高原生态系统水分利用效率演变及驱动因素空间分异规律 [J]. *水*

- 土保持研究,2022,29(5):244-252.
- CHANG X G, WANG Z H, XIAO P Q, et al. Spatial variation patterns of water use efficiency of ecosystem and its drivers on the Chinese Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation,2022,29(5):244-252.
- [14] LI X Y, ZOU L, XIA J, et al. Untangling the effects of climate change and land use/cover change on spatio-temporal variation of evapotranspiration over China[J]. Journal of Hydrology, 2022, 612: 128189.
- [15] 蔡依霏,陈琳舒,吕世轩,等. 基于 Google Earth Engine 的黄土高原植被变化对蒸散发分量影响研究[J]. 地理科学,2023,43(9):1649-1658.
- CAI Y F, CHEN L S, LYU S X, et al. Impact of vegetation change on evapotranspiration components in the Loess Plateau based on google earth engine[J]. Scientia Geographica Inica,2023,43(9):1649-1658.
- [16] 袁瑞瑞,黄萧霖,郝璐. 近 40 年中国饱和水汽压差时空变化及影响因素分析[J]. 气候与环境研究,2021,26(4):413-424.
- YUAN R R, HUANG X L, HAO L, et al. Spatio-temporal variation of vapor pressure deficit and impact factors in China in the past 40 years[J]. Climatic and Environmental Research,2021,26(4):413-424.
- [17] YANG X Q, YONG B, REN L L, et al. Multi-scale validation of GLEAM evapotranspiration products over China via China flux ET measurements[J]. International Journal of Remote Sensing,2017,38(20):5688-5709.
- [18] 杨泽龙,李艳忠,白鹏,等. 1980—2020 年中国九大流域蒸散发及其组分时空评估[J]. 地球信息科学学报,2022,24(5):889-901.
- YANG Z L, LI Y Z, BAI P, et al. Spatial-temporal dynamics of evapotranspiration and its components in nine river basins in China from 1980 to 2020 based on GLEAM-ET products[J]. Journal of Geo-information Science, 2022,24(5):889-901.
- [19] 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 K, WANG F, HAN J, 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.
- [20] 林楠,姜然哲,刘强,等. 近 20 年三江平原地表蒸散发时空特征及驱动因素分析[J]. 中国地质,2021,48(5):1392-1407.
- LIN N, JIANG R Z, LIU Q, et al. Spatio-temporal characteristics and driving factors of surface evapotranspiration in Sanjiang Plain in recent 20 years[J]. Geology in China, 48(5):1392-1407.
- [21] 邵蕊. 黄土高原大规模植被恢复的区域蒸散耗水规律及其生态水文效应[D]. 兰州:兰州大学,2020.
- [22] 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 M, MO S H, MO X G, 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.
- [23] 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 K L, WANG Z H, XIAO P Q, 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):166-172.
- [24] QIU L J, WU Y P, SHI Z Y, et al. Quantifying the responses of evapotranspiration and its components to vegetation restoration and climate change on the Loess Plateau of China[J]. Remote Sensing,2021,13(12):2358.
- [25] 韩典辰,张方敏,陈吉泉,等. 内蒙古半干旱区蒸散估算和归因分析[J]. 干旱区地理,2022,45(4):1071-1081.
- HAN D C, ZHANG F M, CHEN J Q, et al. Evapotranspiration of a semi-arid landscape in Inner Mongolia: Estimation and attribution[J]. Arid Land Geography,2022,45(4):1071-1081.
- [26] LI S J, WANG G J, SUN S L, et al. Long-term changes in evapotranspiration over China and attribution to climatic drivers during 1980—2010[J]. Journal of Hydrology,2021,595:126037.
- [27] 赵文玥,吉喜斌. 干旱区稀疏树木冠层降雨截留蒸发的研究进展与展望[J]. 地球科学进展,2021,36(8):862-879.
- ZHAO W Y, JI X B. A review of research advances and future perspectives of evaporation of intercepted rainfall from sparse tree canopy in drylands[J]. Advances in Earth Science,2021,36(8):862-879.
- [28] 肖薇薇,安彬. 1960—2017 年黄土高原地区风速时空变化特征[J]. 水土保持研究,2023,30(4):103-109.
- XIAO W W, AN B, et al. Spatio-temporal variability of wind speed in the Loess Plateau during 1960—2017[J]. Research of Soil and Water Conservation,2023,

- 30(4):103-109.
- [29] 祝晨佳,高吉喜. 土壤蒸发影响因素及抑制途径研究综述[J/OL]. 环境保护科学,1-11[2023-10-14]. <https://doi.org/10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.202305026>.
- ZHU C J, GAO J X. A review of the factors affecting soil evaporation and its inhibition methods[J/OL]. Environmental Protection Science,1-11[2023-10-14]. <https://doi.org/10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.202305026>.
- [30] 陈林,杨新国,王磊,等. 荒漠草原不同植物群落蒸散组分特征及其环境因子影响分析[J/OL]. 生态学报,1-14[2023-10-14]. <https://doi.org/10.20103/j.stxb.202211293445>.
- CHEN L, YANG X G, WANG L, et al. Characteristics of evapotranspiration components of different plant communities in desert steppe and its relationship with environmental factors[J/OL]. Acta Ecologica Sinica, 1-14[2023-10-14]. <https://doi.org/10.20103/j.stxb.202211293445>.
- [31] ZHAO F B, MA S, WU Y D, et al. The role of climate change and vegetation greening on evapotranspiration variation in the Yellow River Basin, China[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2022,316.
- [32] 吕美霞,马柱国,李明星. 气候变化、植被改变及人类用水与黄河流域水循环的研究进展[J/OL]. 大气科学学报,1-14[2023-10-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1803.P.20231007.0914.002.html>.
- LYU M X, MA Z G, LI M X. Research progress on climate change, vegetation change, human water use and water cycle in the Yellow River Basin[J/OL]. Transactions of Atmospheric Sciences,1-14[2023-10-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1803.P.20231007.0914.002.html>.
- [33] 陈惠玲. 基于SiTH模型的全球陆地蒸散发时空变化特征及其驱动机制研究[D]. 兰州:兰州大学,2023.
- [34] 姚楠,董国涛,薛华柱. 基于Google Earth Engine的黄土高原植被覆盖度时空变化特征分析[J/OL]. 水土保持研究,1-9[2023-10-14]. <https://doi.org/10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.045>.
- YAO N, DONG G T, XUE H Z. Analysis on the characteristics of the spatiotemporal change in vegetation coverage on the Loess Plateau using the google earth engine[J/OL]. Research of Soil and Water Conservation,1-9[2023-10-14]. <https://doi.org/10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.045>.
- [35] YANG Z L, BAI P, LI Y Z. Quantifying the effect of vegetation greening on evapotranspiration and its components on the Loess Plateau[J]. Journal of Hydrology,2022,613:128446.
- [36] 崔泽鹏,王志慧,肖培青,等. 2000—2018年黄河上中游地区蒸散发年际时空变化及其影响因素分析[J]. 遥感技术与应用,2022,37(4):865-877.
- CUI Z P, WANG Z H, XIAO P Y, et al. Analysis of spatio-temporal dynamics of interannual evapotranspiration and its influencing factors in the upper and middle reaches of the Yellow River from 2000 to 2018[J]. Remote Sensing Technology and Application,2022,37(4):865-877.
- [37] 白乐,殷会娟,李昭悦,等. 黄土丘陵区淤地坝作用下地下水位动态演化特征[J]. 人民黄河,2021,43(3):74-77.
- BAI L, YIN H J, LI Z Y, et al. Dynamic evolution characteristics of groundwater level under the action of warping dam in loess hilly area[J]. Yellow River, 2021,43(3):74-77.
- [38] 刘宏鑫,杨永民,龙爱华,等. 基于站点观测和水量平衡的四种蒸散发产品在我国的评价与对比[J]. 水利水电技术(中英文),2023,54(3):72-84.
- LIU H X, YANG Y M, LONG A H, et al. Verification and comparison of four evapotranspiration products based on eddy covariance observations and water balance method[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(3): 72-84.
- [39] 王亚琴,杨巍,邢博,等. Budyko框架下黄河流域蒸散发时空变化影响因素研究[J]. 水文地质工程地质,2023,50(2):23-33.
- WANG Y Q, YANG W, XING B, et al. A study of influencing factors of spatio-temporal evapotranspiration variation across the Yellow River basin under the budyko framework[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(2): 23-33.
- [40] 赵卓怡,郝兴明. 基于Priestley-Taylor方法的中亚干旱区实际蒸散特征及归因[J]. 干旱区研究,2023,40(7):1085-1093.
- ZHAO Z Y, HAO X M. Actual evapotranspiration characteristics and attribution in arid central asia based on the Priestley-Taylor method[J]. Arid Zone Research,2023,40(7):1085-1093.
- [41] 杨洁,裴婷婷. 气候和植被变化对黄土高原蒸散发的影响[J]. 草原与草坪,2018,38(2):61-65.
- YANG J, PEI T T. The impacts of climate and vegetation change on evapotranspiration in Loess Plateau, China[J]. Grassland and Turf,2018,38(2):61-65.

作者简介:



宋进喜,博士,二级教授,博士生导师。西北大学城市与环境学院院长,陕西省黄河研究院执行院长,西北大学秦岭研究院常务副院长。入选国家百千万人才工程、国家有突出贡献中青年专家、中国科学院“百人计划”、教育部“新世纪优秀人才支持计划”、陕西省“高层次人才特殊支持计划”科技创新领军人才。陕西省重点科技“旱区流域水文-生态-经济过程与调控创新团队”带头人。主要从事水文学、水资源、水生态及水环境研究。主持国家自然科学基金重点项目等国家和省部级科研课题20余项。发表学术论文180余篇(其中SCI论文120余篇)。研究成果分别荣获陕西省科学技术一等奖(第一完成人)和陕西省自然科学奖一等奖(第一完成人)。《地理学报》、*Journal of Environmental Management*、《南水北调与水利科技》《中国生态农业学报》《人民黄河》《地域研究与开发》等学术期刊编委。担任陕西省地理学会理事长,中国地理学会水文地理专业委员会副主任、陕西省环境科学学会副理事长、陕西省油气田环境污染控制技术与储层保护重点实验室学术委员会主任等学术职务。