

气候与下垫面变化对黄土高原蒸散发变化的影响评估

王凯利^{1,2}, 王志慧², 肖培青², 王铁生¹

(1.华北水利水电大学测绘与地理信息学院, 郑州 450045;

2.黄河水利科学研究院, 水利部黄土高原水土保持重点实验室, 郑州 450003)

摘要: 为了揭示近20年黄土高原蒸散发(evapotranspiration, *ET*)时空变化规律, 明晰气候和下垫面变化对蒸散发的影响作用。基于黄土高原295个气象站数据、PML_V2 *ET*产品及MOD13A1 EVI产品, 采用趋势分析和多元回归分析等统计方法, 分析了2000—2018年黄土高原蒸散发时空变化特征, 并评估了降雨、温度、日照时间、饱和水汽压差、植被和非植被下垫面等影响要素的相对贡献率。结果表明: (1) 2000—2018年黄土高原蒸散发年际变化率为4.47 mm/a, 62.8%的区域蒸散发呈显著增加趋势, 主要分布在山西、青海、陕西省北部地区; 不同土地覆盖*ET*为森林>农田>草地>灌木。(2) 植被显著增加是黄土高原*ET*变化的主导因子, 其相对贡献率最大(32.1%); 不同气象要素对黄土高原*ET*相对贡献率大小为降雨(14.6%)>饱和水汽压差(13.2%)>温度(12.4%)>日照时数(10.0%); 非植被下垫面变化(水土保持工程措施等)对*ET*变化的影响作用不容忽视。(3) 气象要素和增强型植被指数(enhanced vegetation index, EVI)对林草覆被*ET*影响作用>农田覆被*ET*, 而非植被下垫面要素对农田覆被*ET*的影响作用较大。研究结果为黄土高原生态建设、水资源消耗恢复和水资源可持续性评价提供科学支撑。

关键词: 蒸散发; 气候变化; 下垫面变化; 黄土高原

中图分类号: S161.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)03-0166-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.03.024

Assessment on the Impact of Climate and the Changes of Underlying Surface on the Evapotranspiration in the Loess Plateau

WANG Kaili^{1,2}, WANG Zhihui², XIAO Peiqing², WANG Tiesheng¹

(1.College of Surveying and Geo-Informatics, North China University of Water Resources and

Electric Power, Zhengzhou 450045; 2.Key Laboratory of Soil and Water Conservation on the Loess

Plateau of Ministry of Water Resources, Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003)

Abstract: This study aimed to reveal the spatial-temporal variation of evapotranspiration (*ET*) in the loess Plateau during the past two decades and clarify the effects of climate and underlying surface changes on *ET*. Based on the data of 295 meteorological stations on the Loess Plateau, PML_V2 *ET* products and MOD13A1 EVI products, this study used trend analysis and multiple regression statistical methods to study the spatial-temporal variation characteristics of *ET* from 2000 to 2018, and the relative contributions of rainfall, temperature, sunshine duration, vapor pressure difference, vegetation and non-vegetation underlying surface were also quantitatively evaluated. The results showed that: (1) From 2000 to 2018, the annual change rate of *ET* on the Loess Plateau was 4.47 mm/a. The *ET* increased significantly in Shanxi, Qinghai and northern Shaanxi Provinces, accounting for 62.8% of the total area. The contribution of different land covers to *ET* was forest, farmland, grassland and shrub in descending order. (2) The significant increase of vegetation was the leading factor of *ET* changes in the Loess Plateau, and its relative contribution rate was the largest (32.1%). The relative contribution rates of different meteorological factors to *ET* from high to low were rainfall (14.6%), saturated vapor pressure difference (13.2%), temperature (12.4%) and sunshine duration (10.0%). The influence of non-vegetation underlying surface change (such as soil and water conservation engineering measures) on *ET* change could not be ignored. (3) The effects of meteorological factors and enhanced vegetation index on *ET* of forest and grass cover were greater than that of farmland cover, while

收稿日期: 2021-10-27

资助项目: 国家自然科学基金项目(U2243210, 41701509); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(HKY-JBYW-2020-09)

第一作者: 王凯利(1997—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: 2529500133@qq.com

通信作者: 肖培青(1972—), 女, 博士, 教授级高工, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: peiqingxiao@163.com

non vegetation underlying surface elements had a greater impact on ET of farmland cover. The research results are expected to provide scientific support for water resources consumption, restoration and sustainability evaluation of ecological construction in the Loess Plateau.

Keywords: evapotranspiration; climate change; underlying surface changes; the Loess Plateau

黄土高原位于干旱/半干旱区,生态环境敏感脆弱,水分是限制区域生态系统发展的关键因素^[1]。随着退耕还林还草政策的实施,黄土高原生态环境得到明显改善^[2],但植被的增加导致蒸散发大幅度增加,对区域水文循环造成了直接或间接的影响^[3],部分区域植被恢复已接近水资源承载力阈值^[4],出现土壤干层和植被退化等生态环境问题^[5]。因此,在气候和下垫面变化的共同作用下,有效评估黄土高原不同影响要素对蒸散发的相对贡献率,对于科学评价黄土高原植被恢复可持续性以及水资源高效利用具有重要意义。

传统蒸散发是基于点位尺度利用蒸发皿等仪器进行计算,难以获取区域尺度 ET 。近年来,遥感技术由于其覆盖范围广、周期性和时效性等优势,成为获取区域长时间序列 ET 的有效手段,而关于干旱/半干旱区蒸散发影响因素的定量研究,一直是陆地水文循环过程中的热门话题。Jin 等^[6]利用蒸散模型,通过控制变量分离出植被恢复和气候变化对 ET 影响发现,植被恢复是 ET 增加的主要驱动因素;He 等^[7]基于 Budyko 方程,分析降水、潜在蒸散发和植被恢复对 ET 变化的平均影响发现,降水是 ET 变化的主要驱动因素;Ning 等^[8]通过 Fu 方程分析黄土高原气象因子和植被覆盖度对 ET 的影响发现,在研究的 13 个流域中,9 个流域受到降水的主导;赵勇等^[9]采用 Choudhury-Yang 方程发现,降水是黄土高原泾河流域 ET 增加的主导因素。上述学者采用的蒸散和水文模型虽可以有效地分离气候和植被变化对 ET 变化的影响,但模型控制参数受到植被、气候和土壤等条件的影响,使得 ET 归因存在一定的误差。王雅舒等^[10]通过逐步回归发现,植被变化是 ET 增加的主要原因;Feng 等^[11]通过建立 ET 与降雨、潜在蒸散发、LAI 之间的回归模型发现,降水是黄土高原 ET 变化的主要驱动因素。相比较之下,回归统计方法相对简单,常用于 ET 驱动因素的定性分析,但对其影响因素贡献率的定量研究较少,难以科学评估黄土高原区生态水文效应。

鉴于此,本文基于黄土高原气象数据(温度、降雨、日照时间、饱和水汽压差)、PML_V2 ET 和 MOD13A1 EVI 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 2000—2018 年黄土高原 ET 变化特征,明晰气象和下垫面变化对 ET 的影响,定量评估不同影响因素的相对贡献率,对区域生态环境水资源

可持续性利用具有现实意义。

1 材料与方法

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),气候干旱,属于暖温带大陆性季风气候,夏季炎热多暴雨、冬季寒冷干燥,多年平均气温为 9.57℃,多年平均降水量为 443.93 mm。随降雨量的减少,植被从东南向西北依次由森林向草原过渡,植被覆盖度低,水源涵养能力差。近年来大规模植被恢复导致土壤水分大量流失,加剧了水资源短缺^[12]。

1.2 数据来源

气象数据(温度、降水、日照时间、相对湿度、风速)来源于中国气象数据网(<https://data.cma.cn/>),收集 2000—2018 年黄土高原 295 个气象站点日观测数据,利用 AUSPLINE 软件将所有气象站点数据进行空间插值,采用袁瑞瑞等^[13]的方法计算饱和水汽压差(vapor pressure deficit, VPD)。

ET 数据来源于 PML_V2 数据集,是全球首个 500 m 和 8 天分辨率的陆地蒸散发数据集,该产品在 PML 模型基础上,根据气孔导度理论耦合植被蒸腾与总初级生产力,提高了 ET 模拟精度^[14]。增长型植被指数选用 MOD13A1 EVI 产品,空间分辨率为 500 m,时间分辨率为 16 天,对植被冠层结构更为敏感,且已消除大气和土壤背景的影响,避免了高植被覆盖区的指数饱和效应问题^[15],能够较好地反映植被变化情况。地表覆盖数据采用 GLC_FCS30 产品,在 ArcGIS 中将其重分类为森林、农田、灌木、草地、其他。

1.3 研究方法

1.3.1 趋势分析 采用基于像元的 Slope 一元线性回归法^[16]计算黄土高原 2000—2018 年 ET 年际变化趋势。Slope 的计算公式为:

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

式中:Slope 为 ET 拟合的一元线性回归方程的斜率(mm/a); n 为研究时段的总年数, $n=19$; ET_i 为第 i 年 ET 观测值。Slope>0 表示 ET 随时间呈现增长趋势,Slope<0 表示 ET 随时间呈减少趋势。对 ET 趋势进行 F 检验,当显著性水平 $P<0.05$, ET 呈显著变化。

1.3.2 多元回归残差分析 为了消除蒸散发、不同

气象要素(降雨、温度、日照时间、饱和水汽压差)和植被(EVI)数据的量纲差异,首先利用 Z—score^[17]方法对所有数据进行标准化处理,计算公式为:

$$y_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}$$

(2)

式中: x_i 为蒸散发、不同气象要素和植被数据; $\bar{x}$ 为各要素的平均值; y_i 为各要素标准化后的值; n 为时间序列长度。

基于标准化后 2000—2018 年时间序列,以气象要素和植被为自变量、 ET 为因变量建立多元线性回归模型,计算各项标准化回归系数,多元线性回归方程为:

$$ET = \beta_0 + \beta_1 \times \text{Pre} + \beta_2 \times \text{Tem} + \beta_3 \times \text{Sun} + \beta_4 \times \text{VPD} + \beta_5 \times \text{EVI}$$

(3)

式中: ET 、Pre、Tem、Sun、VPD、EVI 分别为标准化后的 2000—2018 年蒸散发、降雨、温度、日照时间、饱

和水汽压差、增长型植被指数,均无量纲; β_i 为标准化回归系数。

根据 2000—2018 年气象、植被数据及多元线性回归方程(3),得到 ET 模拟值(ET_{sim}),表示气候和植被综合作用对 ET 的影响。采用残差法^[18]计算 ET 观测值(ET_{obs})与 ET 模拟值(ET_{sim})之间的差值,即 ET 残差(ET_{others}),表示非植被下垫面对 ET 的影响,非植被下垫面变化包括水土保持工程措施引起的微地形变化、水库调蓄和农业灌溉等。计算公式为:

$$ET_{\text{others}} = ET_{\text{obs}} - ET_{\text{sim}}$$

(4)

式中: ET_{sim} 为基于多元线性回归模型的 ET 模拟值(mm); ET_{obs} 为 ET 观测值(mm); ET_{others} 为 ET 残差(mm)。

1.3.3 ET 影响因素贡献率 根据公式(1)计算黄土高原 2000—2018 年 ET_{obs} 、 ET_{sim} 与 ET_{others} 的 Slope 变化趋势。根据金凯等^[18]的方法计算黄土高原气候和植被变化综合作用、非植被下垫面对 ET 变化的相对贡献率(表 1)。

表 1 ET 变化的驱动因子判定标准及贡献率

Slope (ET_{obs})	驱动因子	驱动因子判定标准		驱动因子相对贡献率 $C/\%$	
		Slope(ET_{sim})	Slope(ET_{others})	气候和植被综合作用(C_{sim})	非植被下垫面(C_{others})
>0	sim and others	>0	>0	$\frac{\text{Slope}(ET_{\text{sim}})}{\text{Slope}(ET_{\text{obs}})}$	$\frac{\text{Slope}(ET_{\text{others}})}{\text{Slope}(ET_{\text{obs}})}$
	sim	>0	<0	100	0
	others	<0	>0	0	100
<0	sim and others	<0	<0	$\frac{\text{Slope}(ET_{\text{sim}})}{\text{Slope}(ET_{\text{obs}})}$	$\frac{\text{Slope}(ET_{\text{others}})}{\text{Slope}(ET_{\text{obs}})}$
	sim	<0	>0	100	0
	others	>0	<0	0	100

公式(3)拟合后的标准化回归系数绝对值可以反映不同气象因子、植被因子对 ET 变化的影响程度^[17],将各单因子的标准化回归系数与气象和植被综合作用的贡献率结合起来进行分析运算,得到不同气象、植被单驱动因子对 ET 变化的相对贡献率。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 为降雨、温度、日照时间、饱和水汽压差、植被对 ET 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 的相对贡献率(%)。

2 结果与分析

2.1 蒸散发时空变化特征

2000—2018 年黄土高原 ET 变化趋势具有明显的空间异质性(图 1)。黄土高原约 92.2% 的区域 ET 呈现增加趋势,呈显著增加趋势的面积占比 62.8%,主要分布在青海、山西和陕西省北部,退耕还林还草效果显著。黄土高原 ET 呈现减少趋势的区域面积约占总面积的 7.8%,主要分布在内蒙古北部、陕西省

南部、宁夏北部、甘肃省西部、青海中部及山西省部分区域,与快速城镇化等人为活动有关。

2000—2018 年黄土高原平均 ET 呈波动上升趋势(图 2),2000—2012 年 ET 年增长速率为 6.34 mm/a,整体增长较快;而在 2013—2018 年增长缓慢,年均增长速率为 1.07 mm/a。在研究时段内,黄土高原平均 ET 为 362.97~494.94 mm,最小值和最大值分别出现在 2000 年和 2012 年。黄土高原 2000—2018 年 ET 年均趋势率为 4.47 mm/a($P<0.01$),蒸散发显著增加,与近些年全球气候变暖及黄土高原实行退耕还林还草政策后植被恢复有关。

由于不同土地覆盖受到的热力和动力因素的差异性,其对黄土高原 ET 的贡献不尽相同(图 2)。黄土高原农田 ET 年变化为 365.97~494.94 mm,年变化速率为 4.13 mm/a;森林 ET 年变化为 484.25~641.60 mm,年变化率为 4.97 mm/a;灌木和草地 ET 的年变化分别为 220.35~387.15,341.39~471.48 mm,年变化率分别为 3.71,5.33 mm/a。不同土地覆盖对蒸散发的贡献表现为森林>农田>草地>灌木。

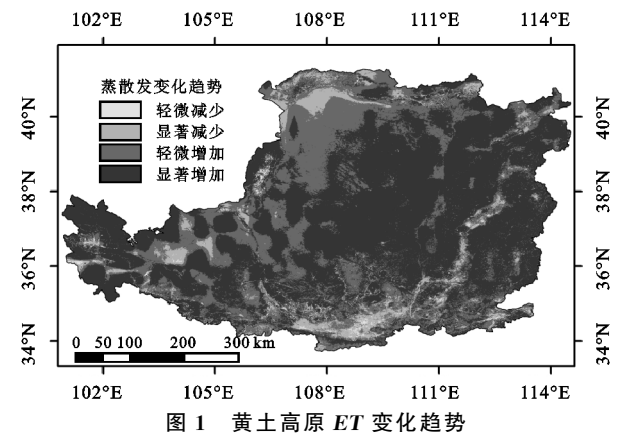


图 1 黄土高原 ET 变化趋势

2.2 蒸散发对气象要素与植被的敏感性分析

气象和植被变化对黄土高原 ET 的影响具有空间异质性。整体上,黄土高原区降雨对 ET 的敏感性系数为 0.16,表明降雨的增加对蒸散发产生促进作用

(图 3a)。其中,在黄土高原西部和北部区域降水的敏感性系数 >0 ,表明降水增加对 ET 产生促进作用,包括内蒙古、宁夏、甘肃、青海东部等干旱/半干旱地区,降水稀少,主要为草原、灌木等植被,水分利用较少且储水能力低,大部分降水以土壤蒸散发的形式消耗。

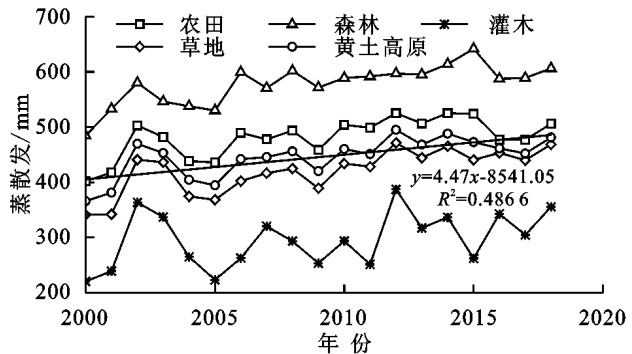


图 2 不同土地覆盖 ET 年际变化

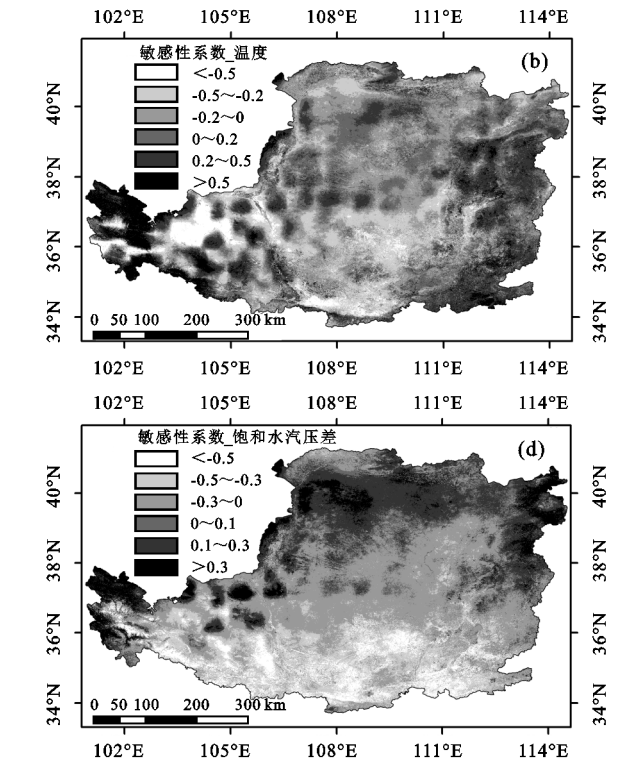
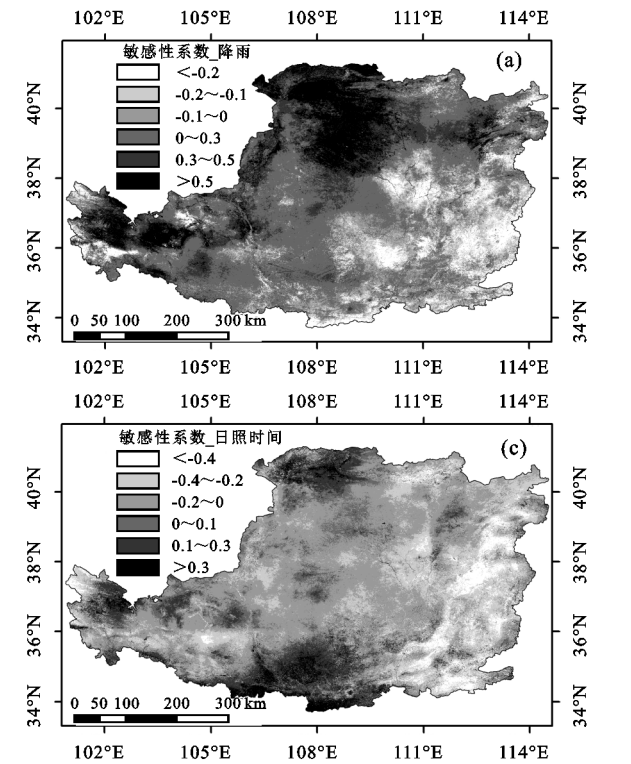


图 3 气象因子对 ET 的影响

在山西省和陕西省南部、青海省西部等地降水的敏感性系数 <0 ,表明降水增加对蒸散发产生抑制作用,区域主要植被类型为森林、灌草,对降雨截留形成地表径流补给地下水,有效减少了土壤蒸发。黄土高原温度对 ET 的敏感性系数为 0.02,温度增加对蒸散发产生促进作用(图 3b)。其中,温度增加导致蒸散发减少的区域主要分布在黄土高原南部和西北部地区。而在山西省东部、内蒙古中部、宁夏东北部、甘肃省西南部和青海北部地区温度增加对 ET 产生促进作用。黄土高原日照时间对 ET 的敏感性系数为 -0.10 ,日照强度的增加对蒸散发产生抑制作用(图 3c),主要分布在山西省、陕西省北部、宁夏、内蒙古东部和西南部、甘肃

省和青海省西部地区,干旱加剧了区域植被的光抑制作用,植被蒸腾减弱,导致蒸散发降低。黄土高原 VPD 对 ET 的敏感性系数为 -0.10 ,VPD 的增加对蒸散发产生抑制作用(图 3d),主要分布在黄土高原南部,包括甘肃省、陕西省、山西省和宁夏省南部,以及青海省东部地区,植被长期处于水分匮乏的条件下,饱和水汽压差增加可能会导致气孔导度降低,抑制植被生长,降低植被蒸腾作用,蒸散发降低。黄土高原植被对 ET 的敏感性系数为 0.49,植被增加对蒸散发产生促进作用(图 4),占全区面积的 91.9%。在内蒙古和青海省北部、甘肃省西部等零星地区 EVI 增加对 ET 表现为抑制作用,该区域降水稀少,土壤含水量低,植

被增加导致土壤水分过度消耗,进而出现植被退化的现象,蒸散发随之减弱。

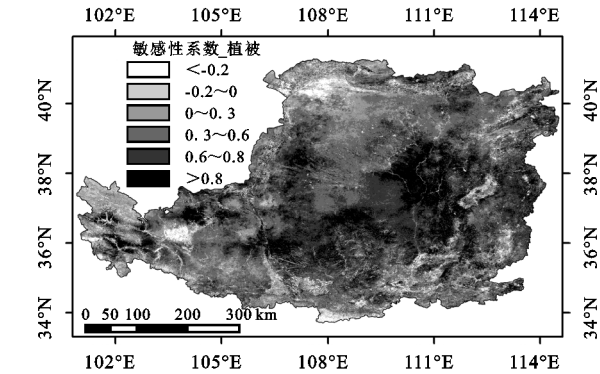


图 4 植被因子对 ET 的影响

2.3 不同驱动力因素贡献率分析

降雨对黄土高原 ET 的相对贡献率在 $0\sim5\%$, $5\%\sim10\%$ 范围的区域面积较大,分别占总面积的 27.6% , 20.4% ,集中分布在黄土高原东南部(图 5a)。而在内

蒙古、宁夏北部、青海省东部、甘肃省西部部分地区及陕西省西北角地区降雨相对贡献率 $>15\%$,占比 37.0% ,该区域干旱,植被多为灌草、稀疏植被,降水直接以蒸散发的形式消耗。温度对 ET 相对贡献率在 $0\sim10\%$ 的区域面积为 48.6% ,分布在黄土高原北部和南部部分区域;相对贡献率 $>15\%$ 的区域占 32.5% ,分布在山西省中部、陕西省南部、宁夏、青海和甘肃省西部地区(图 5b)。日照时间对 ET 的相对贡献率在 $0\sim5\%$, $5\%\sim10\%$, $10\%\sim15\%$ 范围的区域面积较大,面积占比分别为 31.5% , 24.5% , 21.0% ;在山西省东部、内蒙古北部、青海省西北角、宁夏和陕西省少部分地区的相对贡献率 $>15\%$,面积占比 23.0% (图 5c)。饱和水汽压差对 ET 的相对贡献率在 $0\sim5\%$, $5\%\sim10\%$, $10\%\sim15\%$ 范围的区域面积均超过总面积的 20% ;而黄土高原南部和内蒙古中部约 37.3% 的区域 VPD 相对贡献率 $>15\%$ (图 5d)。

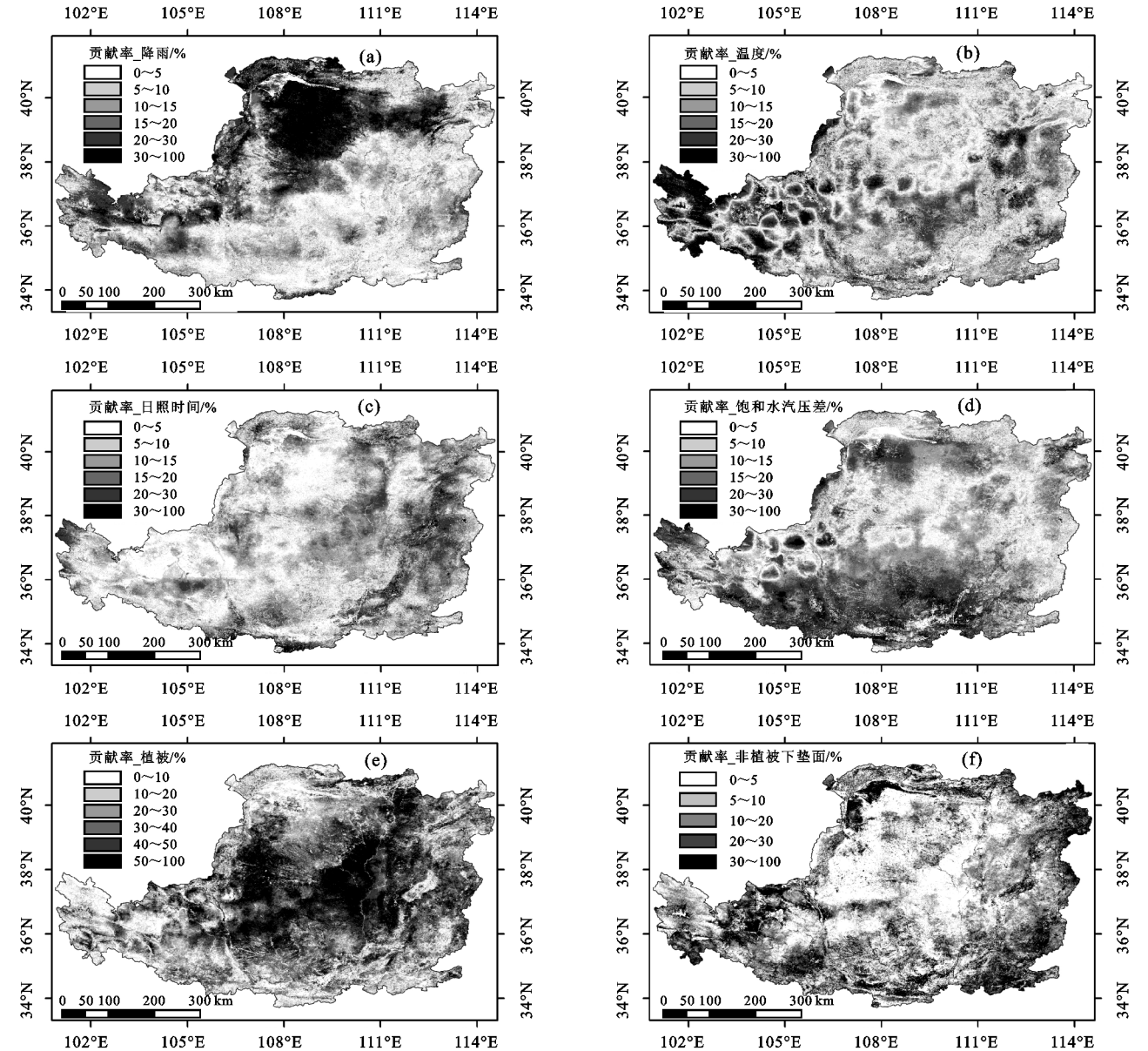


图 5 气象、下垫面各因子对 ET 的相对贡献率

下垫面变化主要包括植被和非植被下垫面变化。其中,植被通过蒸腾直接影响区域 ET 。植被对 ET 的相对贡献率在 30%~40%,40%~50%,50%~100% 范围的区域面积较大,占总面积的 55.2%;主要分布在河口—龙门、龙门—三门峡流域北部、兰州—河口流域南部地区,植被恢复良好,植被蒸腾强烈。内蒙古北部、青海省、甘肃省西部及陕西省南部部分地区植被对 ET 相对贡献率为 0~30%,占全区面积的 44.8%(图 5e)。非植被下垫面变化对黄土高原 ET 变化的平均相对贡献率为 17.7%(图 5f)。非植被下垫面的相对贡献率在 0~5% 的区域面积最大,占全区总面积的 37.5%,主要分布在黄土高原西北部,包括陕西省北部、内蒙古东南部、宁夏东部、山西省西部和青海省北部部分地区;相对贡献率在 5%~20% 的区域面积占比 32.7%,主要集中在山西省、陕西省中西部、内蒙古东南部、宁夏北部、甘肃省中部和东部地区。非植被下垫面相对贡献率超过 20% 的区域主要分布在陕西省和青海省南部、甘肃省西部、山西省东部及内蒙古北部地区,占比 29.8%。非植被下垫面主要通过水土保持工程措施(梯田、谷坊、淤地坝等)改造微地形,有效拦截地表径流,增加土壤水分含量,一方面增加了植被蒸腾,同时也提高了地表水面蒸发与土壤蒸发。此外,农业灌溉也会显著增加土壤蒸发和农作物蒸腾量,导致 ET 大幅度增加。

根据统计结果,各气象因子及下垫面变化对黄土高原 ET 的相对贡献率为植被(32.1%)>非植被下垫面(17.7%)>降雨(14.6%)>饱和水汽压差(13.2%)>温度(12.4%)>日照时间(10.0%)(图 6)。各影响因素对黄土高原不同土地覆盖 ET 的影响程度也不相同。由于灌木多分布于较为干旱的黄土高原西北地区,该区域 ET 对降雨变化较为敏感,降雨对灌木 ET 的相对贡献要大于其他覆被类型。由于农田受到人类活动的扰动较大,气象要素和 EVI 对林草覆被类型 ET 的影响作用大于对农田覆被类型的影响作用。非植被下垫面要素对农田覆被类型 ET 的影响作用最大(20.9%),是由于坡改梯等水保工程措施的大面积实施,坡耕地大幅度减少,而分布在梯田区域的农田面积比例显著增加。

3 讨论

本研究结果表明,2000—2018 年黄土高原蒸散发整体呈现显著增长的趋势,但空间差异性较大。气候和下垫面变化的共同作用是 ET 变化的原因。一方面,20 世纪 80 年代以来,气候暖干化趋势明显^[19],导致蒸散发增加,径流减少,水资源短缺;另一方面,

黄土高原区大规模实行退耕还林还草政策,植被恢复效果显著,通过蒸腾和降水截留,导致蒸散发显著增加^[20]。除此之外,农业灌溉、水土保持工程等人类活动也导致 ET 增加。

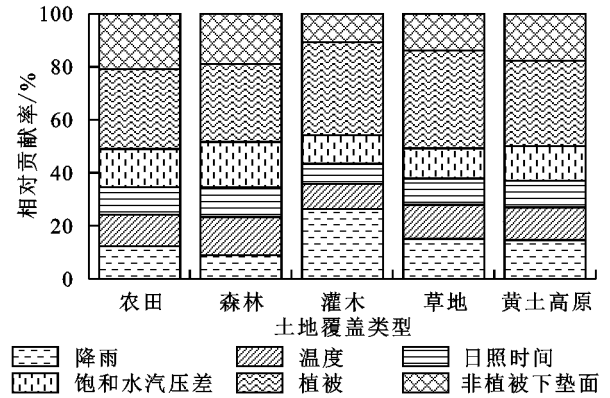


图 6 各影响因素对黄土高原、不同土地覆盖类型 ET 的相对贡献率

气候变化、下垫面变化对 ET 的相对贡献率分别为 50.1%,49.9%,气候变化是 ET 变化的主要影响因素。Jin 等^[6]基于蒸散发模型,通过控制变量的方法分离出植被恢复和气候变化对 ET 的影响发现,植被恢复是黄土高原 ET 变化的主要原因,与本研究结果不一致。而赵勇等^[9]和 Feng 等^[11]分别通过 Choudhury-Yang^[21]方程、 ET 预测模型发现, ET 变化的主要控制因素为气象因子,与本研究结果相吻合。降水是影响 ET 变化的主要气象因子,与 He 等^[7]的研究结果一致。邵蕊^[22]通过 PT-JPL 模型模拟对比分析发现,植被恢复是引起黄土高原 ET 增加的主要原因,贡献率高达 59.7%,本研究结果表明,植被变化对 ET 的相对贡献率为 32.1%,结果的差异可能是其没有考虑研究时段内气候的变化和气候对植被的影响作用,使得植被变化贡献率偏大。Zhang 等^[23]基于 ET 、径流、土壤水分实测资料和 Grace 产品,利用水文模型定量评估以农业灌溉为主的人类活动对 ET 的最大贡献率为 16%,与本研究非植被下垫面变化对 ET 变化的贡献率(17.7%)较为接近,非植被下垫面对唐乃亥—青铜峡、内蒙古北部、陕西省南部区域 ET 影响较大,农业灌溉和水土保持工程建设等人类活动剧烈。本研究计算的各因子对 ET 变化的相对贡献率为影响程度的大小,并没有考虑其对 ET 变化的正负作用,使得研究结果与其他研究有所不同。此外,由于不同水文模型与数学统计方法作用机制不同,及选择的影响因素不同,导致最终结果也有所差别。

以往关于影响 ET 气象因素的研究^[22,24]一般仅考虑了降雨与温度,全面性不足,对其影响因素贡献率的定量研究较少,难以有效评估黄土高原区生态工程水文效应。本研究虽全面考虑了影响 ET 变化的气象要素,

但研究方法也存在一些不足。实际上,气候变化与植被之间存在交互影响,本研究仅考虑了 ET 与气象、植被的线性作用,假设各驱动因子之间是独立的,而忽略了气象与植被间复杂相互作用,可能减弱气候对 ET 的影响,使研究结果存在一定的不确定性;此外,地形地貌、不同植被类型对 ET 的贡献同样存在差异性。未来研究可结合地形、植被类型等数据,综合考虑气象与植被之间的交互作用,对 ET 影响因素及贡献率做进一步研究,减少上述关系的不确定性。

植被恢复是黄土高原 ET 增加的主要影响因素之一,相对贡献率高达 32.1%。未来黄土高原的植被建设应在遵循土壤水资源可持续利用原则的前提下,基于不同立地条件下植被耗水量与土壤补给量之间的动态平衡关系,确定不同区域植被恢复承载力阈值,结合不同植被类型蒸发耗水规律,因地制宜实施退耕还林还草政策,提高水资源利用效率,促进黄土高原生态恢复,推进黄河流域生态保护和高质量发展^[25]。

4 结论

(1)2000—2018 年黄土高原蒸散发年际变化率为 4.47 mm/a。 ET 变化空间分异明显,62.8%的区域 ET 呈显著增加趋势,主要分布在山西省、陕西省北部等退耕还林还草重点区域。

(2)黄土高原蒸散发对气候和植被变化的敏感性程度不同。降雨、温度和植被的增加对黄土高原 ET 产生促进作用,日照时间和饱和水汽压差的增加对 ET 产生抑制作用。

(3)气候和下垫面变化对黄土高原 ET 的贡献率大致相同,分别为 50.1%,49.9%。植被是 ET 变化的主导因子,相对贡献率为 32.1%,降雨是 ET 变化的主要气象因子,相对贡献率为 14.6%。

(4)水土保持工程、农业灌溉等非植被下垫面变化是黄土高原 ET 变化的重要原因,贡献率高达 17.7%。气象要素和 EVI 对林草覆被 ET 的影响作用较大,而农田覆被 ET 受到非植被下垫面的影响作用较大。

参考文献:

[1] 韩典辰,张方敏,陈吉泉,等.半干旱区草地站蒸散特征及其对气象因子和植被的响应[J].草地学报,2021,29(1):166-173.

[2] 刘晓燕,刘昌明,杨胜天,等.基于遥感的黄土高原林草植被变化对河川径流的影响分析[J].地理学报,2014,69(11):1595-1603.

[3] 李宗善,杨磊,王国梁,等.黄土高原水土流失治理现状、问题及对策[J].生态学报,2019,39(20):7398-7409.

[4] 赵广举,穆兴民,田鹏,等.黄土高原植被变化与恢复潜力预测[J].水土保持学报,2021,35(1):205-212.

[5] Liu Y, Miao H T, Huang Z, et al. Soil water depletion patterns of artificial forest species and ages on the Loess Plateau (China) [J].Forest Ecology Management,2018,417(15):137-143.

[6] Jin Z, Liang W, Yang Y T, et al. Separating vegetation greening and climate change controls on evapotranspiration trend over the Loess Plateau [J].Scientific Reports, 2017,7(1):e8191.

[7] He G H, Zhao Y, Wang J H, et al. Attribution analysis based on Budyko hypothesis for land evapotranspiration change in the Loess Plateau, China [J].Journal of Arid Land,2019,11(6):939-953.

[8] Ning T T, Li Z, Liu W Z. Vegetation dynamics and climate seasonality jointly control the interannual catchment water balance in the Loess Plateau under the Budyko framework [J].Hydrology and Earth System Sciences,2017,21(3):1515-1526.

[9] 赵勇,何国华,李海红,等.基于 Choudhury-Yong 公式的泾河流域蒸散发归固分析 [J].南水北调与水利科技, 2019,17(1):8-14.

[10] 王雅舒,李小雁,石芳忠,等.退耕还林还草工程加剧黄土高原退耕区蒸散发[J].科学通报,2019,64(增刊): 588-599.

[11] Feng X M, Sun G, Fu B J, et al. Regional effects of vegetation restoration on water yield across the Loess Plateau, China [J].Hydrology and Earth System Sciences,2012,16(8):2617-2628.

[12] Zastrow M. China's tree-planting drive could falter in a warming world [J].Nature,2019,573(7775):474-475.

[13] 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.

[14] Zhang Y Q, Kong D D, Gan R, et al. Coupled estimation of 500 m and 8-day resolution global evapotranspiration and gross primary production in 2002—2017 [J].Remote Sensing of Environment,2019,222(22): 165-182.

[15] 尚雪,何钊全,张铜会.增强型植被指数时空变化特征及其驱动机理[J].森林与环境学报,2020,40(5):478-485.

[16] 赵一蕾,黄文婕,曹明,等.1961—2019 年黄土高原植被潜在蒸散及影响因子[J].环境科学研究,2021,34(9): 2208-2219.

[17] 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.

[18] 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.

- ception: A comparison of native forest sites in Kona, Hawaii[J].Agricultural and Forest Meteorology,2010,150(2):265-275.
- [23] 马昌坤.黄土高原人工刺槐林地生态水文过程研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [24] Barbier S, Balandier P, Gosselin F. Influence of several tree traits on rainfall partitioning in temperate and boreal forests: A review[J].Annals of Forest Science, 2009,66(6):e602.
- [25] Dong L L, Han H R, Kang F F, et al. Rainfall partitioning in Chinese Pine (*Pinus tabulaeformis* Carr.) stands at three different ages[J].Forests,2020,11(2):e243.
- [26] Muzyło A, Llorens P, Domingo F. Rainfall partitioning in a deciduous forest plot in leafed and leafless periods[J].Ecohydrology,2012,5(6):759-767.
- [27] 田娜,古君龙,杨新国,等.中间锦鸡儿冠层降雨再分配特征[J].干旱区研究,2019,36(4):854-862.
- [28] Shachnovich Y, Berliner P R, Bar P. Rainfall interception and spatial distribution of throughfall in a pine forest planted in an arid zone[J].Journal of Hydrology, 2008,349(1/2):168-177.
- [29] 邓文平,郭锦荣,邹芹,等.庐山日本柳杉林下穿透雨时空分布特征[J].生态学报,2021,41(6):2428-2438.
- [30] Carlyle-Moses D E. Throughfall, stemflow, and canopy interception loss fluxes in a semi-arid Sierra Madre Oriental matorral community[J].Journal of Arid Environments,2004,58(2):181-202.
- [31] 李衍青,张铜会,赵学勇,等.科尔沁沙地小叶锦鸡儿灌丛降雨截留特征研究[J].草业学报,2010,19(5):267-272.
- [32] 刘章文,陈仁升,宋耀选,等.祁连山典型灌丛降雨截留特征[J].生态学报,2012,32(4):1337-1346.
- [33] Su L, Zhao C M, Xu W T, et al. Hydrochemical fluxes in bulk precipitation, throughfall, and stemflow in a mixed evergreen and deciduous broadleaved forest[J].Forests,2019,10(6):e507.
- [34] 孙素琪,王玉杰,王云琦,等.缙云山 3 种典型森林降雨过程及其氮素输入[J].环境科学,2014,35(3):1081-1090.

(上接第 165 页)

- [18] 赵宽,吴沿友.根系分泌的有机酸及其对喀斯特植物、土壤碳汇的影响[J].中国岩溶,2011,30(4):466-471.
- [19] 邹厚远,刘国彬,王晗生.子午岭林区北部近 50 年植被的变化发展[J].西北植物学报,2002,22(1):1-8.
- [20] 许小明,邹亚东,孙景梅,等.黄土高原北洛河流域主要林地枯落物特征及水分吸持效应[J].生态学报,2021,43(13):5153-5165.
- [21] 周印东,吴金水,赵世伟,等.子午岭植被演替过程中土壤剖面有机质与持水性能变化[J].西北植物学报,2003,23(6):895-900.
- [22] 雷利平,王孝安,郭华,等.子午岭地区辽东栎和油松林建群种的更新生态位宽度分析[J].西北植物学报, 2007,27(7):1446-1453.
- [23] 栾莉莉,张光辉,孙龙,等.黄土高原区典型植被枯落物蓄积量空间变化特征[J].中国水土保持科学,2015,13(6):48-53.
- [24] 汪建芳,王兵,王忠禹,等.黄土高原典型植被枯落物坡面分布及持水特征[J].水土保持学报,2018,32(4):139-144.
- [25] 肖胜生,方少文,杨洁,等.水土流失区植被恢复过程中土壤碳汇的形成机理[J].中国水土保持,2011(12):25-28.
- [26] Deng L, Wang K B, Chen M L, et al. Soil organic carbon storage capacity positively related to forest succession on the Loess Plateau, China [J].Catena,2013,110:1-7.

(上第 172 页)

- [19] 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.
- [20] Shen M G, Piao S L, Jeong S J, et al. Evaporative cooling over the Tibetan Plateau induced by vegetation growth [J].Proceedings of the National Academy of Sciences,2015,112(30):9299-9304.
- [21] Yang H B, Yang D W, Lei Z D, et al. New analytical derivation of the mean annual water-energy balance equation [J].Water Resources Research,2008,44(3):893-897.
- [22] 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.
- [23] Zhang M, Yuan X. Crucial role of natural processes in detecting human influence on evapotranspiration by multisource data analysis [J].Journal of Hydrology, 2020,580(3):e124350.
- [24] 郭晓彤,孟丹,蒋博武,等.基于 MODIS 蒸散量数据的淮河流域蒸散发时空变化及影响因素分析[J].水文地质工程地质,2021,48(3):45-52.
- [25] 张宝庆,邵蕊,赵西宁,等.大规模植被恢复对黄土高原生态水文过程的影响[J].应用基础与工程科学学报, 2020,28(3):594-606.