

黄土塬面保护区潜在蒸发量时空变化 及其与气象、环流因子关系分析

孙从建^{1,2}, 郑振婧¹, 李新功¹, 孙九林^{1,3}

(1. 山西师范大学地理科学学院, 临汾 041000; 2. 中国科学院荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 黄土塬面是黄土高原地区主要的农业分布区和人口聚居地, 地位十分重要。黄土塬面潜在蒸发量(ET_0)的研究对于区域水循环研究、水土流失防治及农业的可持续发展具有重要意义。基于黄土塬面保护区 1960—2017 年的气象数据, 利用 Penman-Monteith 模型、小波分析、Mann-Kendall 非参数检验等方法研究了黄土塬面保护区 ET_0 的变化规律及其与气象、环流因子间的关系。结果表明: (1) 黄土塬面保护区多年平均 ET_0 为 1173.4 mm, 总体呈现增长趋势, 增长率为 21.1 mm/10 a; 其生长季平均 ET_0 值及增长率均高于非生长季平均 ET_0 。(2) 该区多年平均 ET_0 空间分布特征表现为东部高西部低, 西部甘肃塬区多年平均 ET_0 远低于东部山西塬区。(3) 过去 58 年来, 区域年均、生长季、非生长季 ET_0 均呈现出增长趋势, 但空间差异明显; 研究区年均 ET_0 存在着 10 年、30 年和 50 年的震荡周期, 其中以 30 年周期为主周期。(4) 气温是控制区域 ET_0 变化的最重要的气象因子, 但气温对 ET_0 的影响具有明显的空间差异, 在整个研究区内最低气温影响最显著; 而甘肃塬区和陕西塬区的 ET_0 变化主要受平均气温变化的控制, 在山西塬区最高气温的变化是区域 ET_0 变化的主要控制因子。(5) 遥相关分析结果显示太平洋/北美指数 (PNA) 与北大西洋年代尺度振荡 (AMO) 对该区域 ET_0 变化有一定影响, 西太平洋海温指数 (WPI) 的变化影响区域非生长季 ET_0 变化。

关键词: 潜在蒸发量; Penman-Monteith 模型; 时空分布; 影响因子; 黄土塬面保护区

潜在蒸发量 (ET_0), 是指在水分充足的情况下可蒸散到空气中的总水量, 其对区域水分分配具有显著的影响^[1,2]。作为全球水循环的重要环节, ET_0 的变化直接影响区域干湿状况、植物的生长及区域水资源供需平衡^[3]。准确地估算区域 ET_0 并探索其时空分布规律对于区域生态环境的保护、水土流失的防范及区域水资源的优化配置具有重要意义^[4]。

已有学者研究了部分区域 ET_0 的变化特征。其中, 伊朗地区^[5] ET_0 研究表明, 温度、相对湿度及风速对区域 ET_0 变化影响较大; 在澳大利亚, 气象因子对不同气候区的 ET_0 的影响存在显著差异^[6]。在中国, 大量的研究表明, 温度、湿度及风速等气象因子对我国北方地区 ET_0 变化有着直接影响^[7-11]。此外, 大气环流因子的改变也会引起区域 ET_0 的变化, 其中太平洋/北美指数 (PNA) 及西太平洋海温指数 (WPI) 等大气环流因子的变化被证明对我国北方地区降水、温度及 ET_0 的变化具有显著影响^[12-14], 长江源区的研究表明该区域 ET_0 变化与大尺度环流因子间存在显著的遥相关关系^[15]。在黄土高原地区, 以往

收稿日期: 2019-01-18; 修订日期: 2019-07-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41601317); 荒漠与绿洲生态国家重点实验室开放基金项目 (G2018-02-06)

作者简介: 孙从建 (1986-), 男, 河北沧州人, 博士, 副教授, 主要从事气候变化与水循环研究。

E-mail: suncongjian@sina.com

通讯作者: 李新功 (1967-), 男, 北京人, 博士, 研究员, 主要从事水循环研究。E-mail: lixi@ku.edu

8~15.6 °C, 年日照时数在 2099~2900 h 之间^[18]。黑垆土、黄绵土为研究区主要的土壤类型, 耐旱草本及松树、柏树、榆树等温带针叶落叶阔叶乔木为当地主要的植被。

1.2 数据来源

本文选取黄土塬面保护区内及其邻近的大宁、西峰、洛川等 13 个气象站点, 研究数据主要包括各站点 1960—2017 年间的风速 (m/s), 日平均气温 (°C), 日最低气温 (°C), 日最高气温 (°C), 日照时数 (h), 相对湿度 (%) 及平均水气压 (kPa), 经纬度和高程数据。气象数据下载自中国气象局国家气象信息中心 (<http://data.cma.cn/site/index.html>), 而大尺度环流因子数据来源于 NOAA 网站 (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices>)。为了评估农事活动与 ET_0 的关系, 本研究将年内分为生长季 (农事活动集中的 4-10 月) 及非生长季 (11 月至次年 3 月)。为了进一步验证计算结果的正确性, 本研究选取乡宁、蒲县、吉县和汾西 4 个站点的蒸发皿蒸发量数据与 ET_0 计算值进行了数据一致性检验。

1.3 研究方法

1.3.1 Penman-Monteith 模型

本文的 ET_0 计算选用 FAO 修订后 Penman-Monteith 模型^[20]。其模型如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

式中: ET_0 表示潜在蒸发量 ($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$); Δ 代表饱和水汽压曲线斜率 ($\text{KPa}\cdot\text{C}^{-1}$); R_n 是太阳净辐射 ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$); G 为土壤热通量 ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$); γ 为干湿常数 ($\text{KPa}\cdot\text{C}^{-1}$); u_2 表示离地面 2 m 高处的风速 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); T 为平均气温 (°C); e_s 是饱和水汽压平均值 (kPa); e_a 代表实际水汽压 (kPa); $(e_s - e_a)$ 为饱和水汽压差值 (kPa)。

1.3.2 趋势及周期分析方法

采用趋势分析及周期分析法来研究 ET_0 的时间变化, 空间分布主要采用 ArcGIS 地统计模块的克里金插值法^[21], 其中空间趋势变化选取在水文和气象数据研究中运用较多的 Mann-Kendall 检验^[22-23]。Morlet 小波被用于分析本研究的周期变化规律^[24]。

1.3.3 相关分析与贡献率计算

运用相关分析对 ET_0 的主要影响因素进行辨别, 并将各气象因子对区域 ET_0 变化的相对贡献率进行计算。各气象因子对 ET_0 的相对贡献率即其对应系数的绝对值除以所有回归系数绝对值的和^[25], 其公式如下:

$$Y = a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + \dots + a_n X_n \quad (2)$$

$$g_1 = \frac{|a_1|}{|a_1| + |a_2| + |a_3| + \dots + |a_n|} \quad (3)$$

式中: Y 表示 ET_0 的标准化值; X_1, X_2, \dots, X_n 分别为气象因子的标准化值; a_1, a_2, \dots, a_n 为序列标准化后的回归系数; g_1 为 X_n 变化对 Y 变化的相对贡献率。

2 结果分析

2.1 塬面保护区 ET_0 的时间变化特征

研究区 1960—2017 年间的平均 ET_0 值为 1173.4 mm, 年际倾向斜率为 21.1 mm/10 a, 总体呈增长趋势 (图 2)。在 1964 年观测到了区域 ET_0 最小值 (1031.4 mm), 而在 1997 年

观测到了该区域 ET_0 的最大值(1293.3 mm)。在1960—1994年间,年均 ET_0 整体保持低位震荡,年均 ET_0 除1986年、1987年接近1200 mm外,其余均在1200 mm以下。而在1995—2017年间,年均 ET_0 值除1996年和2003年外,其余年份均整体较大,大部分年份 ET_0 大于1200 mm。

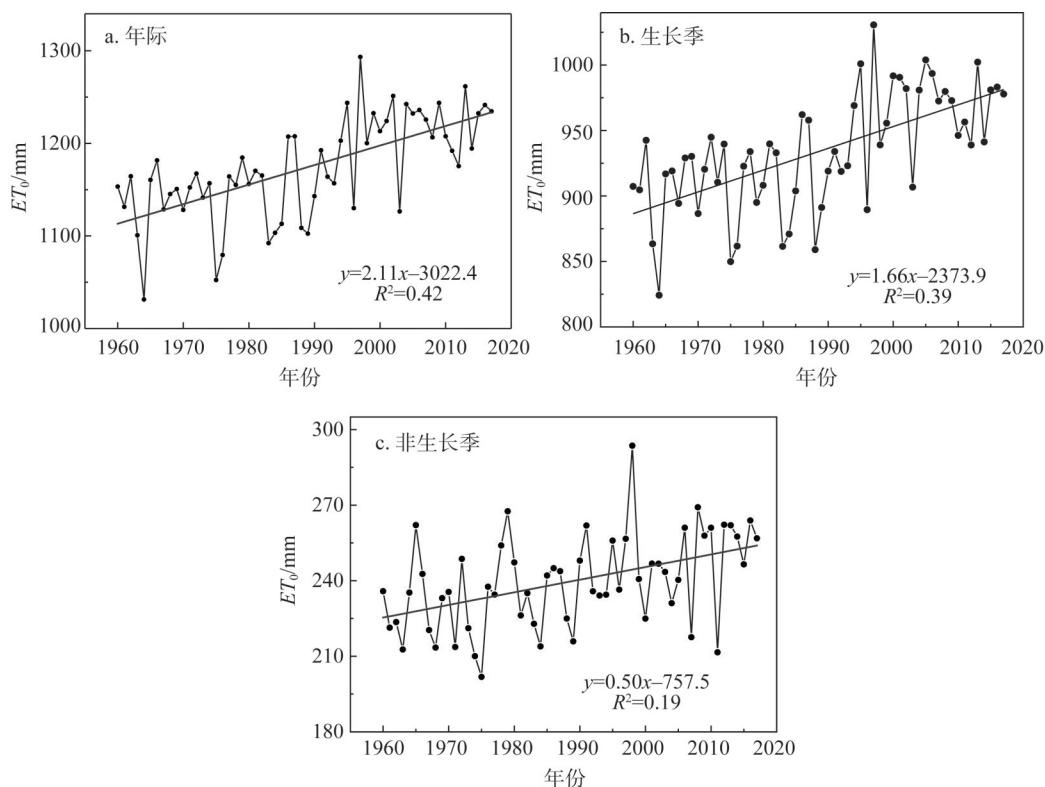


图2 1960—2017年间黄土塬面保护区 ET_0 变化趋势

Fig. 2 Variation of potential evapotranspiration in the tableland protected region of the Loess Plateau during 1960-2017

作物的生长已被证明对于区域 ET_0 的变化具有显著的影响^[26],为系统分析区域 ET_0 的变化规律,本文研究了1960—2017年生长季与非生长季 ET_0 的变化特征。结果表明,1960—2017年间生长季平均 ET_0 为933.9 mm,远高于非生长季的239.7 mm。 ET_0 在生长季和非生长季均呈现增长趋势,但是增长速率有所差异,其中生长季 ET_0 的年际增长率为16.6 mm/10 a,而非生长季 ET_0 的年际增长率为5 mm/10 a,二者均通过了0.01水平的显著性检验。此外,两个季节的 ET_0 极值的出现时间也呈现明显的差异,生长季 ET_0 最高值出现在1997年,为1030.7 mm,最低值出现在1964年,为824.2 mm。而非生长季 ET_0 最大值出现在1998年,为293.6 mm,这与生长季差异显著,非生长季 ET_0 最小值在1975年被观测到(201.8 mm)。

区域 ET_0 与多种气象因子的关联性分析结果显示(表1),在整个研究时段,区域气温及相对湿度变化对区域年均 ET_0 的变化影响较大,其中相对湿度与年均 ET_0 的变化呈显著负相关,相关系数为-0.662;平均气温对区域年 ET_0 的变化影响最明显,呈显著正相关关系。生长季与非生长季的 ET_0 变化同样与区域气温变化的关联性显著,这说明研究区

表1 区域 ET_0 变化与多种气象因子的相关分析

Table 1 The relationship between potential evapotranspiration and meteorological factors in the study area

	平均风速	平均气温	最高气温	最低气温	日照时数	相对湿度
年	-0.478**	0.889**	0.809**	0.506**	0.215	-0.662**
生长季	-0.460**	0.754**	0.797**	0.477**	0.183	-0.569**
非生长季	-0.297*	0.537**	0.659**	0.316*	0.139	-0.344**

注: *、**分别表示在0.05、0.01水平上显著相关,下同。

ET_0 的变化主要受控于区域气温的变化,未来气温的变化有可能引起区域 ET_0 的改变。

2.2 塬面保护区 ET_0 的空间变化特征

图3显示,研究区东部的多年平均 ET_0 值大于西部,其中西部甘肃塬区 ET_0 值远低于东部山西塬区。多年 ET_0 均值由东部山西塬区的1568.5 mm减少至西部甘肃塬区的934.5 mm。此外,研究区的生长季和非生长季的 ET_0 空间分布特征也表现为东部高西部低的变化趋势,其中生长季 ET_0 的空间差异大于非生长季 ET_0 的空间差异。在生长季,山西塬区的 ET_0 最大值出现在大宁站,为1266.4 mm, ET_0 最小值出现在甘肃塬区的西峰站,为739.2 mm。在非生长季, ET_0 最大、最小值分别为316.8 mm和195.3 mm,分别出现在山西塬区的乡宁站和甘肃塬区的西峰站。

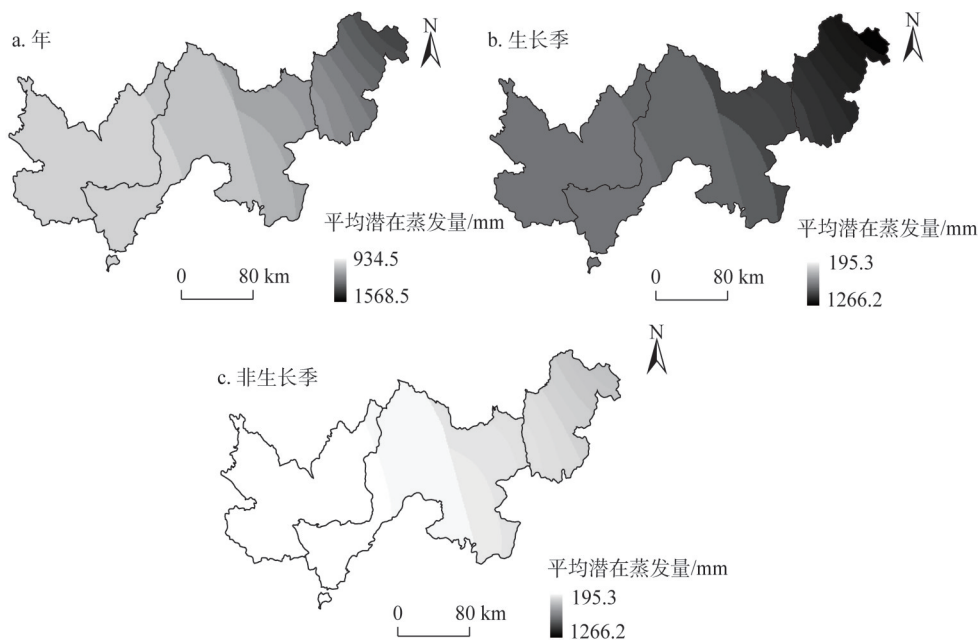
图3 黄土塬面保护区 ET_0 的空间分布特征

Fig. 3 Spatial distribution of potential evapotranspiration in the tableland protected region of the Loess Plateau during 1960-2017

对比分析三个不同的塬区发现(表2),影响其各自 ET_0 时空分布规律的气象因子不尽相同,其中最高气温变化对甘肃塬区与山西塬区的 ET_0 变化影响较为显著,相关系数达到了0.889和0.915;而在陕西塬区,区域 ET_0 的变化主要受控于区域相对湿度的变化。

表2 三塬区的 ET_0 变化与气象因子的相关分析

Table 2 The relationship between potential evapotranspiration and meteorological factors in the three tableland regions

	时段/年	风速	平均气温	最高气温	最低气温	日照时数	相对湿度
整体	1960-2017	0.478**	0.809**	0.889**	0.506**	0.215	0.662**
甘肃塬区	1960-2017	0.024	0.781**	0.889**	0.572**	0.613**	0.886**
山西塬区	1960-2017	0.562**	0.804**	0.915**	0.113	0.253	0.300*
陕西塬区	1960-2017	0.263*	0.652**	0.770**	0.436**	0.575**	0.827**

2.3 塬面保护区 ET_0 的趋势分析及周期分析

2.3.1 ET_0 的趋势分析

图4为研究区 ET_0 的Mann-Kendall统计量Z值空间分布图,如图所示,研究区年均 ET_0 均呈现出增长趋势,且地域差异明显。山西塬区除东北部呈现微弱上升趋势外,其余地区均为显著增加趋势,通过了0.01显著性检验;在陕西塬区,除东南部年均 ET_0 增长趋势不明显外,其余区域的年均 ET_0 均呈显著增长;在甘肃塬区,年均 ET_0 增长趋势整体上较为一致。三个区域中,山西塬区的乡宁站年均 ET_0 增长趋势最为显著,增长速率为6.31 mm/a;而陕西塬区的合阳站的年均 ET_0 增速最小,速率为1.99 mm/a。

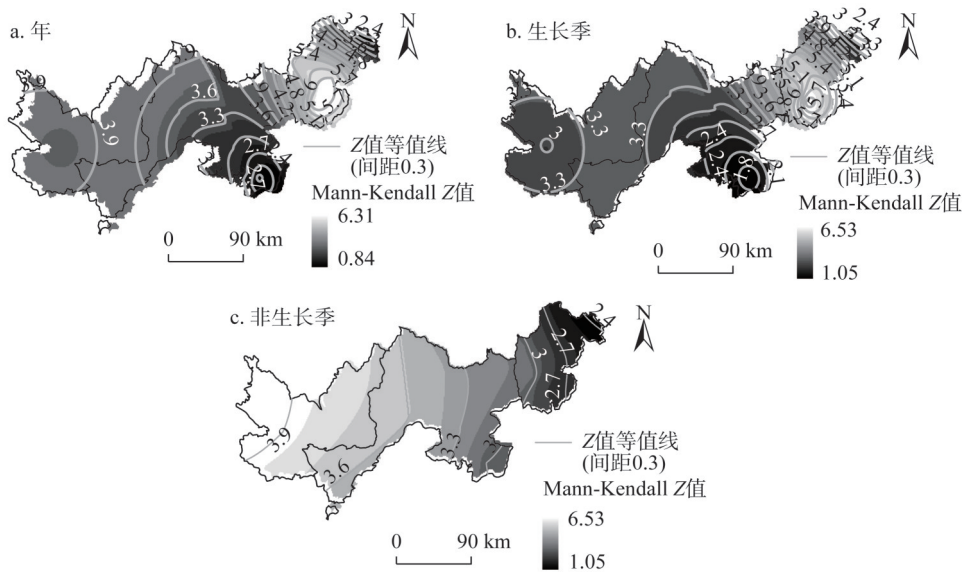
图4 黄土塬面保护区 ET_0 的Mann-Kendall Z值空间分布特征

Fig. 4 Spatial distribution of Mann-Kendall's Z value for potential evapotranspiration in the tableland protected region of the Loess Plateau during 1960-2017

研究区内生长季和非生长季的 ET_0 变化趋势与年 ET_0 变化趋势较为相似,均呈现增长趋势,但是空间差异也较显著(图4)。生长季 ET_0 增长趋势以山西塬区最为显著,甘肃塬区其次,陕西塬区最小。增长速率最快的是山西塬区的乡宁站,达到6.53 mm/a,增长速率最小的是陕西塬区的合阳站,为1.54 mm/a。非生长季 ET_0 增长趋势以甘肃塬区最为显著,其次为陕西塬区,山西塬区不明显。其中甘肃塬区的崆峒站增速最大,通过了0.01显著性检验($|Z| > 2.58$);山西塬区的乡宁站最小,为1.99 mm/a。

2.3.2 ET_0 的周期变化

图5为1960—2017年间研究区 ET_0 的Morlet小波实部时频分布等高线图及小波方差图。由图可知,研究区年均 ET_0 在30年左右的震荡最为明显,其次是10年和50年;年均 ET_0 具有三个明显的小波方差峰值,分别对应着周期为10年、30年和50年,表明研究区年均 ET_0 变化存在着10年、30年和50年的震荡周期,其中30年为研究区多年 ET_0 变化的主周期(图5a)。而研究区生长季和非生长季 ET_0 的周期变化与年均 ET_0 变化周期大体一致,也表现出30年的主周期变化规律,但在两个季节的 ET_0 的50年左右周期中均有小幅度的提前。

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) 1960—2017年间,黄土塬面保护区多年平均 ET_0 为1173.4 mm,年际倾向斜率为21.1 mm/10 a,总体呈现增长趋势。其中生长季平均 ET_0 (933.9 mm)值远高于非生长季(239.7 mm),生长季 ET_0 增长速率大于非生长季。

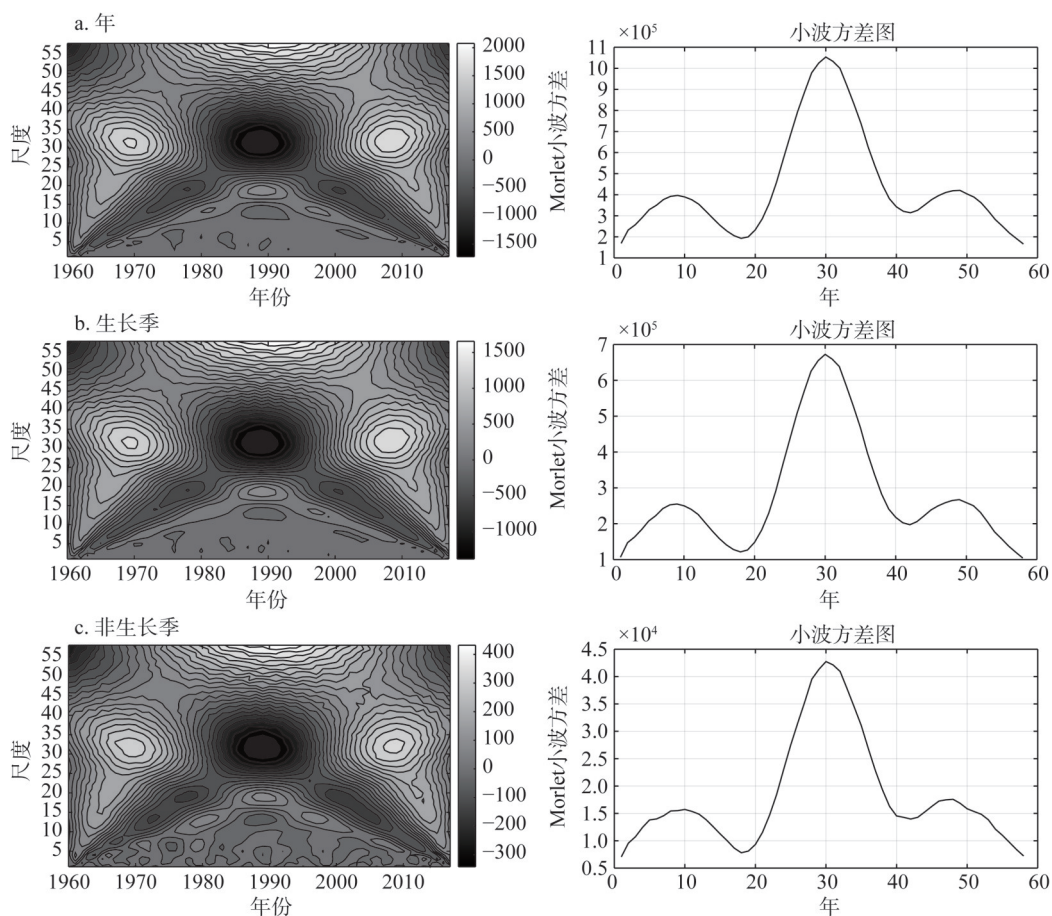


图5 研究区 ET_0 动态变化的小波分析

Fig. 5 The wavelet analysis of the variation of potential evapotranspiration in the study area

(2) 研究区多年平均 ET_0 值在空间上表现为东部高西部低,西部甘肃塬区 ET_0 远低于东部山西塬区;研究区三个塬区的年均 ET_0 呈现出增长趋势,但是地域差异明显。生长季和非生长季的 ET_0 与年 ET_0 变化一致,呈增加趋势,其中生长季 ET_0 增长趋势以山西塬区最为显著,非生长季 ET_0 增长趋势以甘肃塬区最为显著。研究区 ET_0 变化存在着10年、30年和50年的震荡周期,其中30年左右周期为主周期。

(3) 气温是影响研究区 ET_0 变化的主导因素,其中对于整个研究区的 ET_0 变化,贡献率最大的是最低气温;而在甘肃塬区和陕西塬区,平均气温对区域 ET_0 变化贡献率最大;最高气温的变化对山西塬区 ET_0 的变化贡献最明显。除此之外,相对湿度对陕西塬区 ET_0 变化具有较高的贡献率。遥相关分析结果显示,太平洋/北美震荡指数(PNA)与北大西洋年代尺度振荡(AMO)波动会影响区域 ET_0 变化,北大西洋年代尺度振荡(AMO)的相关性更强,西太平洋海温指数(WPI)的变化对区域非生长季 ET_0 变化产生影响。

3.2 讨论

3.2.1 区域 ET_0 影响因素分析

(1) 气象因子对年 ET_0 的贡献

表3为黄土塬面保护区各气象因子对 ET_0 变化的贡献率。在1960—2017年间,气温对于整个研究区、甘肃、山西和陕西塬区的区域 ET_0 变化的贡献率均最大,但不同区域,气温的贡献率存在差异。最低气温对整体研究区的 ET_0 变化的贡献率最高。而在甘肃塬区和陕西塬区,平均气温变化对其区域 ET_0 变化贡献率最大。在山西塬区,最高气温对 ET_0 变化贡献率最大。除此之外,相对湿度对陕西塬区的 ET_0 变化具有较高的贡献率。

表3 气象因子对年 ET_0 变化的贡献率

Table 3 The contribution of meteorological factors to the regional potential evapotranspiration

	时段/年	风速	平均气温	最高气温	最低气温	日照时数	相对湿度
整体	1960—2017	0.02	0.23	0.14	0.31	0.05	0.05
甘肃塬区	1960—2017	0.02	0.48	0.11	0.29	0.01	0.09
山西塬区	1960—2017	0.13	0.19	0.38	0.10	0.02	0.18
陕西塬区	1960—2017	0.12	0.28	0.07	0.20	0.06	0.27

(2) 大气环流指数与区域 ET_0 的遥相关分析

遥相关是指远距离的两个地点大气环流变化存在相关性^[27]。1950年以来发现的北大西洋涛动(NAO)、南方涛动(SO)、太平洋/北美指数(PNA)均为典型的遥相关现象。此后,众多学者开展了有关遥相关的研究,并且在理论和数据等方面取得了许多重要的成果。如龚道溢等^[28]证明NAO、北太平洋涛动(NPO)及SO均影响北半球气温变化;李沛等^[29]发现北极涛动(AO)会影响流域降水结构的变化;丁一汇等^[13]发现北大西洋年代尺度振荡(AMO)对东亚季风产生影响;李春辉等^[14]指出西太平洋海温指数(WPI)与中国冬季气候异常相关。在黄土高原的研究表明,区域气候水文过程亦存在遥相关现象。如蓝永超等^[30]发现厄尔尼诺/南方涛动(ENSO)现象与黄河上游的径流丰枯关系密切;赵强等^[12]发现PNA对陕西地区的降水产生影响。基于以上学者的研究,本文选取可能对区域 ET_0 变化存在遥相关关系的NAO、AO、ENSO、PNA、AMO与WPI等6个大尺度环流因子,分析其与研究区 ET_0 的关联性。根据主要大尺度环流因子与 ET_0 的遥相关分析结果显示(表4),研究区年均 ET_0 变化与太平洋/北美指数(PNA)、北大西洋年

表4 大尺度环流因子与 ET_0 的关联性分析

Table 4 The relationship between potential evapotranspiration and the circulation factors

不同类型 ET_0	NAO	AO	ENSO	PNA	AMO	WPI
年	-0.055	-0.038	0.002	0.278*	0.597**	-0.081
生长季	-0.326*	-0.136	0.094	0.046	0.577**	-0.308
非生长季	0.109	-0.167	0.019	0.18	0.402**	0.433**
甘肃塬区	-0.122	-0.128	0.008	0.293*	0.487**	-0.004
山西塬区	-0.007	0.010	-0.01	0.321*	0.673**	-0.114
陕西塬区	-0.088	-0.064	0.016	0.167	0.440**	-0.052

代尺度振荡(AMO)存在遥相关关系,这表明PNA与AMO对区域蒸散发的变化有一定影响。当PNA为正位相时,夏季西太平洋副高增强并西向位移,我国夏季降水增多,进而导致研究区潜在蒸散发的变化;而AMO处于正位相时,北大西洋温度升高导致热带中太平洋地区降水减少,从而带来西太平洋的东风和北半球其他区域的西风发生改变,使得北半球夏季风环流及降水增强。并且其为正位相也对东亚冬季风产生影响,我国大部分地区冬季温度升高,进而对研究区年均 ET_0 变化产生影响。

研究区两个季节的 ET_0 变化都与AMO存在较为显著的遥相关关系,而非生长季 ET_0 变化还与WPI的变化存在一定关联性。WPI的正负异常往往会改变副热带高压西向影响的强度,当WPI为正时,北太平洋西部区域海温值比同一时期的多年平均值要高^[31],西太平洋副高向西强度减弱,对应的研究区的非生长季气温偏低,进而导致该时期区域 ET_0 值偏低。在三个塬区中,山西塬区的年均 ET_0 变化与AMO波动间的关联性最高,甘肃塬区次之,陕西塬区较低,但均通过了0.01水平的显著性检验。

3.2.2 ET_0 结果验证

对比已有的研究发现,在过去58年来,陕西塬区年均 ET_0 变化趋势与陕北黄土高原区的研究结果^[7]较为相似,区域年均 ET_0 均呈增长趋势,但是增长率较低。而在甘肃塬区,区域 ET_0 变化趋势与刘普幸^[32]等学者在甘肃等地区的研究结果相似。这些都进一步验证了本文计算的 ET_0 结果的准确性。

此外,本文选取乡宁、蒲县、吉县和汾西4个站点的蒸发皿蒸发量均值与区域 ET_0 估算值进行了比较。数据误差检验结果显示(表5),各站点误差均保持在(-18, 16)之间,误差相对较小,这表明本文计算的 ET_0 值可信度较高。此外研究时段内 ET_0 的估算值与蒸发皿蒸发量变化趋势相似,表明本文 ET_0 估算值可以反映出黄土塬面保护区 ET_0 的时空变化特征。

表5 ET_0 的估算值和蒸发皿蒸发量的比较

Table 5 Comparison of estimated and observed values of potential evapotranspiration

	乡宁	蒲县	汾西	吉县
ET_0 估算值/mm	56.3	52.4	52.8	40.7
蒸发皿蒸发量/mm	47.9	47.0	47.1	48.3
误差/%	-17.6	-11.4	-12.1	15.6

参考文献(References):

- [1] CHONG J, MU X, FEI W, et al. Analysis of extreme temperature events in the Qinling Mountains and surrounding area during 1960-2012. *Quaternary International*, 2016, 392(4): 155-167.
- [2] 黄会平,曹明明,宋进喜,等. 1957—2012年中国参考作物蒸散量时空变化及其影响因子分析. *自然资源学报*, 2015,

- 30(2): 315-326. [HUANG H P, CAO M M, SONG J X, et al. Temporal and spatial changes of potential evapotranspiration and its influencing factors in China from 1957 to 2012. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(2): 315-326.]
- [3] 董煜, 海米提·依米提. 1961—2013年新疆潜在蒸散量变化特征及趋势. *农业工程学报*, 2015, 31(1): 153-161. [DONG Y, HAIMITI Y. Spatio-temporal variability and trend of potential evapotranspiration in Xinjiang from 1961 to 2013. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(1): 153-161.]
- [4] 叶红, 张廷斌, 易桂花, 等. 2000—2014年黄河源区ET时空特征及其与气候因子关系. *地理学报*, 2018, 73(11): 2117-2134. [YE H, ZHANG T B, YI G H, et al. Spatio-temporal characteristics of evapotranspiration and its relationship with climate factors in the Source Region of the Yellow River from 2000 to 2014. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(11): 2117-2134.]
- [5] MOHAMMAD V. Analysis of potential evapotranspiration using limited weather data. *Applied Water Science*, 2017, 7(14): 187-197.
- [6] DANLU G, SETH W, MAIER H. Sensitivity of potential evapotranspiration to changes in climate variables for different Australian Climatic Zones. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(4): 2107-2126.
- [7] 韩盟伟, 赵广举, 穆兴民, 等. 黄土高原1959—2015年潜在蒸发量的时空变化. *干旱区地理: 汉文版*, 2017, 40(5): 997-1004. [HAN M W, ZHAO G J, MU X M, et al. Spatial and temporal variations of potential evapotranspiration on the Loess Plateau during 1959-2015. *Arid Land Geography*, 2017, 40(5): 997-1004.]
- [8] LI C, WU P T, LI X L, et al. Spatial and temporal evolution of climatic factors and its impacts on potential evapotranspiration in Loess Plateau of Northern Shaanxi, China. *Science of the Total Environment*, 2017, 589(2): 165-172.
- [9] NING T, LI Z, LIU W, et al. Evolution of potential evapotranspiration in the Northern Loess Plateau of China: Recent trends and climatic drivers. *International Journal of Climatology*, 2016, 36(12): 135-144.
- [10] 梅星, 沈冰, 莫淑红, 等. 黄土高原丘陵沟壑区蒸发量的模拟及其变化趋势和影响因素分析. 见: 西安理工大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室. 第八届中国水论坛论文集. 西安: 西安理工大学, 2010: 534-538. [MEI X, SHEN B, MO S H, et al. Simulation and variation trend of evapotranspiration in hilly and gully region of Loess Plateau and influence factor analysis. In: Key Laboratory of Northwest Water Resource and Environment Ecology of Ministry of Education, Xian University of Technology. *The Proceedings of 8th China water BBS abstract collection*. Xi'an: Xian University of Technology, 2010: 534-538.]
- [11] 孙从建, 郑振婧, 李伟, 等. 1964—2017年山西省潜在蒸发量时空变化及其影响因素分析. *水土保持研究*, 2019, 26(5): 229-235. [SUN C J, ZHENG Z J, LI W, et al. Spatial and temporal variation characteristics of potential evapotranspiration and its impact factors of Shanxi province during 1964-2017. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(5): 229-235.]
- [12] 赵强, 严华生, 张谨文. 影响陕西夏季旱涝的北半球前期大气环流特征. *干旱气象*, 2012, 30(4): 546-554. [ZHAO Q, YAN H S, ZHANG J W. Preceding atmospheric circulation characteristics over northern hemisphere innuencing on droughts and floods in summer of Shaanxi. *Journal of Arid Meteorology*, 2012, 30(4): 546-554.]
- [13] 丁一汇, 柳艳菊, 梁苏洁, 等. 东亚冬季风的年代际变化及其与全球气候变化的可能联系. *气象学报*, 2014, 72(5): 835-852. [DING Y H, LIU Y J, LIANG S J, et al. Interdecadal variability of the East Asian winter monsoon and its possible links to global climate change. *Acta Meteorologica Sinica*, 2014, 72(5): 835-852.]
- [14] 李春晖, 管兆勇, 何金海, 等. 西太平洋海温和南方涛动与中国冬季气候异常关系年代际变化的对比分析. *应用气象学报*, 2005, 16(1): 105-113. [LI C H, GUAN Z Y, HE J H, et al. Contrast analysis of the interdecadal variation of the relation among the Western Pacific/the Southern Oscillation and the winter climate anomalies in China. *Journal of Applied Meteorological Science Original Article*, 2005, 16(1): 105-113.]
- [15] 唐见, 曹慧群, 陈进. 长江源区水文气象要素变化及其与大尺度环流因子关系研究. *自然资源学报*, 2018, 33(5): 840-852. [TANG J, CAO H Q, CHEN J. Changes of hydro-meteorological factors and the relationships with large-scale circulation factors in the source region of the Yangtze River. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(5): 840-852.]
- [16] 毕华兴, 刘立斌, 刘斌. 黄土高原沟壑区水土流失综合治理范式. *中国水土保持科学*, 2010, 8(4): 27-33. [BI H X, LIU L B, LIU B. Integrated management paradigm of soil and water loss in gully region of Loess Plateau. *Science of Soil and Water Conservation*, 2010, 8(4): 27-33.]
- [17] 孟宪玲, 孙从建, 尹慧敏. 谈谈黄土高原面治理问题. *山西水土保持科技*, 2017, 12(4): 35-36. [MENG X L, SUN C

- J, YIN H M. Talk about the Loess Plateau Table-land governance issues. *Soil and Water Conservation Science and Technology in Shanxi*, 2017, 12(4): 35-36.]
- [18] 陈绍宇, 许建民, 王文龙, 等. 黄土高原沟壑区董志塬沟头溯源侵蚀特征及其防治途径. *水土保持通报*, 2009, 29(4): 37-41. [CEHN S Y, XU J M, WANG W L, et al. Characteristics of source erosion of Dongzhi Tableland Gully Head and its prevention and control methods. *Water and Soil Conservation Bulletin*, 2009, 29(4): 37-41.]
- [19] 胡振华, 冯慧敏, 王电龙, 等. 晋西黄土残塬沟壑区塬坡坡面土壤水分特征分析. *山西农业大学学报: 自然科学版*, 2009, 29(3): 257-260. [HU Z H, FENG H M, WANG D L, et al. Analysis of soil moisture characteristics on the slopes of the Loess Plateau in the gully region of Western Shanxi province. *Journal of Shanxi Agricultural University: Nature Science*, 2009, 29(3): 257-260.]
- [20] 唐登银, 程维新, 洪嘉琏. 我国蒸发研究的概况与展望. *地理研究*, 1984, 3(3): 84-97. [TANG D Y, CHENG W X, HONG J L. Overview and prospect of evapotranspiration research in China. *Geographical Research*, 1984, 3(3): 84-97.]
- [21] 李晗, 赵娜, 岳天祥, 等. 基于HASM方法的黑河流域ET₀的模拟. *地球信息科学学报*, 2017, 19(11): 66-74. [LI H, ZHAO N, YUE T X, et al. Simulation of potential evapotranspiration in Heihe River Basin based on HASM method. *Journal of Geo-Information Science*, 2017, 19(11): 66-74.]
- [22] 张东艳, 吴运卿, 李妮. 基于Mann-Kendall检验的尼洋河流域水文变量演变趋势分析. *中国农村水利水电*, 2017, (12): 86-89. [ZHANG D Y, WU Y Q, LI N. Analysis on the evolution trend of hydrological variables in Niyang River Basin based on Mann-Kendall Test. *China Rural Water Conservancy and Hydropower*, 2017, (12): 86-89.]
- [23] 孙从建, 李伟, 李新功, 等. 青藏高原西北部近地表气温直减率时空分布特征. *自然资源学报*, 2018, 33(7): 1270-1282. [SUN C J, LI W, LI X G, et al. Spatio-temporal variation of near-surface temperature lapse rates over the North-western Tibetan Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(7): 1270-1282.]
- [24] 徐克兵. 雅鲁藏布江干流河川径流变化的小波分析. *东北水利水电*, 2014, 32(1): 38-40. [XU K B. Wavelet analysis of runoff change in main stream of Yarlung Zangbu River. *Northeast Water Conservancy and Hydropower*, 2014, 32(1): 38-40.]
- [25] 郭晓英, 陈兴伟, 陈莹, 等. 气候变化与人类活动对闽江流域径流变化的影响. *中国水土保持科学*, 2016, 14(2): 88-94. [GUO X Y, CEHN X W, CHEN Y, et al. Impacts of climate variability and human activities on runoff of Minjiang River Basin. *Science of Soil and Water Conservation*, 2016, 14(2): 88-94.]
- [26] 赵春雨, 王颖, 张玉书, 等. 近50年辽宁省作物生长季气候条件变化及对农业生产的影响. *灾害学*, 2009, 24(4): 102-106. [ZHAO C Y, WANG Y, ZHENG Y S, et al. Climate conditions of crop growth season and its effect on agricultural production in the recent 50 years in Liaoning province. *Journal of Catastrophology*, 2009, 24(4): 102-106.]
- [27] 陶祖钰. 大气的遥相关现象. *广西气象*, 1988, 2(9): 3-7. [TAO Z Y. Remote correlation of the atmosphere. *Journal of Guangxi Meteorology*, 1988, 2(9): 3-7.]
- [28] 龚道溢, 王绍武. 大气环流因子对北半球气温变化影响的研究. *地理研究*, 1999, 18(1): 31-38. [GONG D Y, WANG S W. Influence of atmospheric oscillations on northern hemispheric temperature. *Geographical Research*, 1999, 18(1): 31-38.]
- [29] 李沛, 黄生志, 黄强, 等. 大通河流域降水结构的演变特征及其驱动力探究. *自然资源学报*, 2018, 33(9): 1588-1598. [LI P, HUANG S Z, HUANG Q, et al. Study on the evolution characteristics and driving forces of rainfall structure in Datong River Basin. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(9): 1588-1598.]
- [30] 蓝永超, 马全杰, 康尔泗, 等. ENSO循环与黄河上游径流的丰枯. *中国沙漠*, 2002, 22(3): 262-266. [LAN Y C, MA Q J, KANG E S, et al. Relationship between ENSO cycle and abundant or low runoff in the Upper Yellow River. *Journal of Desert Research*, 2002, 22(3): 262-266.]
- [31] 罗亚松, 黄凯, 于攀. 流域降水与大尺度气候因子关系识别. *海河水利*, 2017, 4(8): 38-41. [LUO Y S, HUANG K, YU H. Identification of relationship between watershed precipitation and large-scale climate factors. *Haihe Water Resources*, 2017, 4(8): 38-41.]
- [32] 刘普幸, 卓玛兰草. 甘肃省1960—2008年潜在蒸散量时空变化及其影响因子. *自然资源学报*, 2012, 27(9): 1561-1571. [LIU P X, ZHUOMA L C. Temporal and spatial change of the potential evaporation and its impact factors in Gansu province. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(9): 1561-1571.]

Spatio-temporal distribution of the potential evapotranspiration and its controlling factors in the tableland protected region of the Loess Plateau

SUN Cong-jian^{1,2}, ZHENG Zhen-jing¹, LI Xin-gong¹, SUN Jiu-lin^{1,3}

(1. School of Geographical Sciences, Shanxi Normal University, Linfen 041000, Shanxi, China; 2. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi 830011, China; 3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: The tableland protected region, as a major region for agriculture and habitation, plays an important role in the Loess Plateau. The information of the regional potential evapotranspiration (ET_0) and its distribution on the Loess Plateau are beneficial to the reorganization in regional water cycle, control on the soil erosion and sustainable development of agriculture. Based on the meteorological data of the tableland protected regions of the Loess Plateau during 1960-2017, the spatial and temporal distribution of the ET_0 and its controlling factors were analyzed by using the Penman-Monteith model, wavelet analysis, Mann-Kendall test and ArcGIS. The results are shown as follows: (1) The average ET_0 of the study area is 1173.4 mm, which shows a significant increasing trend with a rate of 21.1 mm/10 a. The average ET_0 in growing season is much higher than that in the non-growing season. (2) The spatial distribution of the multi-year annual average ET_0 in the study area decreased from the east to the west, and the multi-year average ET_0 in the western Gansu tableland is far lower than that in the eastern Shanxi tableland. (3) Over the past 58 years, the average ET_0 of the whole study area, growth season and non-growth season showed a significant increasing trend, but the spatial variations are remarkable. There were 10-year, 30-year and 50-year oscillation periods in the variation of average ET_0 in the study area, of which the 30-year oscillation is the main oscillation period during the past 58 years. (4) Air temperature is the most important meteorological factor controlling ET_0 change in the region, but the influence of air temperature on ET_0 change shows an obvious spatial difference. The lowest temperature has the most significant effect on the ET_0 change of the whole study area. The changes of ET_0 in the Gansu tableland and Shaanxi tableland are mainly affected by the change of average temperature. The change of maximum temperature in Shanxi tableland has significant influence on regional ET_0 . (5) The Pacific/North America index (PNA) and the Atlantic Multi-decadal Oscillation (AMO) are associated with the regional ET_0 change, while the ET_0 change of the non-growing season is related to the change of the WPI.

Keywords: potential evapotranspiration; Penman-Monteith model; spatio-temporal distribution; influencing factor; the tableland protected region of the Loess Plateau