

DOI: 10.5846/stxb201905110963

段艺芳,任志远,孙艺杰.陕北黄土高原植被生态系统水分利用效率气候时滞效应.生态学报,2020,40(10):3408-3419.

Duan Y F, Ren Z Y, Sun Y J. Time-lay effects of climate on water use efficiency in the Loess Plateau of northern Shaanxi. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(10):3408-3419.

陕北黄土高原植被生态系统水分利用效率气候时滞效应

段艺芳^{1,2}, 任志远^{1,*}, 孙艺杰¹

1 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119

2 聊城大学环境与规划学院, 聊城 252000

摘要:基于月尺度气温、降水以及 MODIS-GPP、MODIS-ET 遥感数据,采用基于像元的时滞偏相关分析,揭示了陕北黄土高原植被生态系统水分利用效率气候时滞效应及其影响因素。结果表明:①2000—2014 年,受退耕还林草生态工程和气候变化的双重影响,陕北黄土高原 WUE 呈波动变化趋势,2001—2003 年显著下降,2003—2005 年、2010—2013 年显著上升。受不同植被类型的影响,年内 WUE 呈急速双峰、缓速双峰和单峰型 3 种变化状态。②陕北黄土高原 WUE 对降水存在明显的时滞效应,滞后时间多为 3 个月,人为扰动较大的 I-1、I-2、II-2 生态区以及植被覆盖度较高的 III-3 生态区 WUE 对降水的时滞响应程度明显低于其他生态区;而对气温的时滞效应较弱,仅南部的 III-2、III-3 生态区 WUE 对气温存在 1—2 个月滞后时间。③不同植被类型 WUE 对降水的时滞效应较明显,荒漠类植被 WUE 对降水时滞响应程度最强,滞后时间近 3 个月,针叶林时滞响应程度最弱,滞后时间为 2.1 个月;但对气温的时滞效应总体较弱,针叶林 WUE 对气温滞后时间为 15 d,其余大多数植被类型 WUE 对气温不存在滞后时间。④WUE 气候时滞效应对植被覆盖度的敏感性存在一定的阈值效应,植被覆盖度高于阈值 62.3% 时,对降水的时滞效应开始逐渐减弱,而对气温的时滞效应逐渐显现。

关键词:水分利用效率;时滞效应;气候因子;陕北黄土高原

Time-lay effects of climate on water use efficiency in the Loess Plateau of northern Shaanxi

DUAN Yifang^{1,2}, REN Zhiyuan^{1,*}, SUN Yijie¹

1 College of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

2 College of Environment and Planning, Liaocheng University, Liaocheng 252000, China

Abstract: Based on the primary data such as temperature, precipitation, MODIS-GPP and MODIS-ET datasets at monthly scale from 2000 to 2014, using pixel-based time-lay patial correlation analysis, the climate time-lag effect of water use efficiency (WUE) and its effective factors on the Loess Plateau of northern Shaanxi were analyzed. The results showed that under the influence of the ecological project of converting farmland to forestry or grassland and the climate change, the interannual WUE in the Loess Plateau of northern Shaanxi showed a fluctuating trend, among which, 2001—2003 decreased significantly, 2003—2005 and 2010—2013 increased significantly, and the change ranged from 1.06 to 1.67 $\text{gCmm}^{-1}\text{m}^{-2}$ from 2000 to 2014. Influenced by different vegetation types, the intraannual WUE showed three kinds of changes: rapid double peak, slow double peak and single peak. WUE in the Loess Plateau of northern Shaanxi had obvious time-lag effect on precipitation, and the lag time was mostly 3 months. But the response degree and time-lag of WUE to

基金项目:国家自然科学基金项目(41371523);教育部人文社会科学重点研究基地项目(14JJD840004)

收稿日期:2019-05-11; 修订日期:2020-05-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: renzhy@snnu.edu.cn

precipitation in I-1, I-2, II-2 and III-3 eco-functional areas were significantly lower than those in other eco-functional areas. However, the time-lag effect of WUE to temperature was weak, and the lag time of WUE to temperature was 1—2 months, which only lied in III-2 and III-3 eco-functional areas. The time-lag effect of WUE to precipitation under different vegetation types was more significant. WUE of desert vegetation had the strongest time-lag effect to precipitation, with the lag time of nearly 3 months, while the lag time was the weakest under coniferous forest, with the lag time of 2.1 months. But the time-lag effect of WUE to temperature was generally weak. The time lag of WUE to temperature under coniferous forest was 15 d, and there was no time-lag under most other vegetation types. The sensitivity of time-lag effect on climate to vegetation coverage had a threshold effect. When the vegetation coverage was higher than 62.3%, the time-lag effect to precipitation gradually weakened, and that to temperature gradually appeared.

Key Words: water use efficiency; time-lag effect; climatic factor; Loess Plateau of northern Shaanxi

全球气候变化显著影响着陆地生态系统生产力状况及水分利用分布格局^[1-2],水分利用效率(Water Use Efficiency, WUE)成为碳-水循环耦合研究关键因子以及评估生态系统气候变化敏感性的重要指标^[3-5],生态系统 WUE 及其对气候变化的响应机制已成为当前国际上研究生态与气候相互作用的核心议题^[6-7],其对评估区域碳水循环耦合机制以及预测未来气候变化对生态系统的影响具有重要意义。

最初植被 WUE 研究主要在农学、植物生理学领域开展,且大多基于站点数据围绕农作物或自然群落中的植物进行,以指导农田管理或探索植物对环境的适应策略^[8-9]。在当前全球气候变化的大背景下,越来越多的学者从更大时空尺度研究草地、森林等自然生态系统以及区域综合生态系统 WUE 对气候变化的响应,并逐渐成为生态、地球等学科研究的热点。如张良侠^[10]研究了气候和土地利用变化对中国北方草原区 ET (Evapotranspiration, 生态系统蒸散量)和 WUE 的影响,发现气候变化导致 1981—2010 北方草原区 WUE 整体减少。张远东等^[11]对 1954—2010 年西南高山地区 WUE 气候响应分析后发现该地区 WUE 主要受气温影响;位贺杰等^[12]分析了渭河流域 WUE 时空特征及其与气温、降雨的关系,发现 WUE 随年内气温和降雨的变化均呈现 5 阶段的变化特征。黄小涛等^[13]发现 1979—2012 年新疆 WUE 与水热组合条件高度相关,不同草地 WUE 差异也较为显著。刘宪锋等^[14]发现降水量、日照时数和相对湿度是导致黄土高原植被生态系统 WUE 变化的主要气候因子。此外,已有学者研究发现生态系统 WUE 对干旱存在一定滞后效应^[15-16]。综上研究,温度、降水、太阳辐射等气候因子均会对 WUE 产生影响,且不同区域 WUE 主控气候因子亦有所不同,但目前对生态系统 WUE 气候时滞效应方面的研究涉及较少,已有的时滞研究多局限在站点尺度上,对于不同空间尺度上 WUE 气候时滞效应方面的研究尚不明确,对区域生态系统 WUE 研究的深度还需加强。

黄土高原承担着生态脆弱和气候干旱的双重压力,该地区降水量远不足植被需水量,但目前该区域有关生态系统 WUE 与气候因子的相关研究成果相对不足,WUE 气候时滞效应方面的研究更未见到。鉴于此,本研究基于 2000—2014 年逐月 GPP (总初级生产力, Gross Primary Productivity)、ET (蒸散发量, Evapotranspiration)、气温、降雨等数据,利用相关分析、偏相关分析、时滞偏相关分析等数理统计方法,探讨陕北黄土高原 WUE 时空变化特征、气候时滞效应及其影响因素,以期为该区域应对气候变化、水资源合理利用及区域生态环境可持续发展提供科学参考。

1 研究区域与数据处理

1.1 研究区概况

陕北黄土高原地处黄土高原中部,位于 35°02'—39°35'N 和 107°15'—110°15'E 之间,总面积约 9.25×10^4 km²。地势西北高东南低,基本地貌类型有黄土塬、梁、峁、沟、壑;气候上,属于温带大陆性半湿润向半干旱气候过渡区,夏秋季多雨、冬春季干旱少雨,年均温 8.1—11.3℃,年均降水量 325—625 mm;主要分布着阔叶林、针叶林、落叶灌丛、草甸、草原、荒漠等植被类型(图 1)。全境属黄河水系,主要分布着无定河、延河等支流。

该区域水土流失严重,人地矛盾加剧,生态环境十分脆弱。

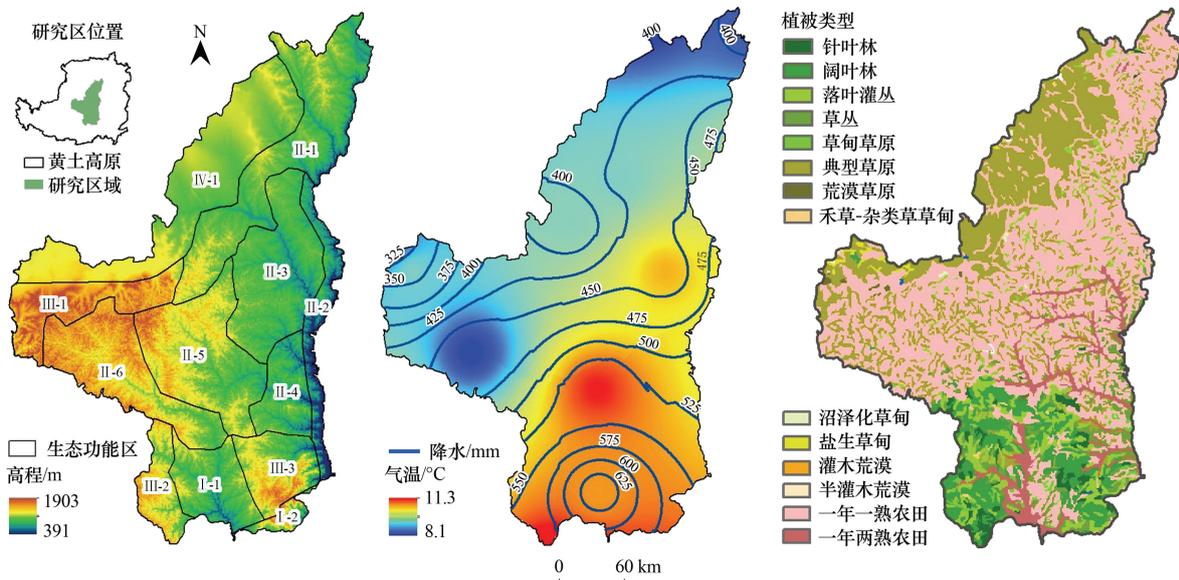


图1 研究区概况

Fig.1 The overview of study area

I-1:洛川黄土塬农业生态功能区;I-2:渭河两侧黄土台塬农业生态功能区;II-1:榆神府黄土梁水蚀风蚀控制生态功能区;II-2:黄河沿岸土壤侵蚀敏感生态功能区;II-3:米缓子黄土崩状丘陵沟壑水土流失敏感生态功能区;II-4:宜延黄土梁土壤侵蚀敏感生态功能区;II-5:安塞黄土梁崩沟壑水土流失控制生态功能区;II-6:白于山南侧水土保持控制生态功能区;III-1:白于山河源水源涵养生态功能区;III-2:子午岭水源涵养生态功能区;III-3:黄龙山、崂山水源涵养生态功能区;IV-1:定横榆防风固沙生态功能区

1.2 数据来源与处理

GPP 和 ET 数据来源于蒙大拿大学数字地球动态模拟研究组发布的 MOD17A2 和 MOD16A2 数据产品 (<http://files.ntsug.umt.edu>),空间分辨率 1 km,时间分辨率 8 d,经验证,均具有较好的精度,且广泛应用于全球和区域等相关研究中^[17-18]。NDVI 数据来源于美国国家航空航天局(NASA)的 MODIS13Q1-NDVI 数据,空间分辨率 250 m,时间分辨率 16 d,采用最大值合成法(MVC)合成 NDVI 年值序列,并将其重采样为 1km 空间分辨率。植被类型采用土地利用覆盖数据,空间分辨率 1km,源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>)。通过 IDL 程序批量处理上述所有产品数据的拼接、裁切和投影转换,以保证所有数据的空间匹配。生态区划数据来源于中国生态系统评估与生态安全数据库(www.ecosystem.csdb.cn/index.jsp)。气象数据为 2000—2014 年陕北黄土高原及周边 17 个气象台站的逐月数据,包括月均气温和月总降水量,源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)。

2 研究方法

2.1 WUE 计算方法

文中 WUE 指的是损失植物冠层和土壤单位质量水分(ET)所生产的干物质的量(GPP),计算公式为^[19]:

$$WUE = GPP/ET \quad (1)$$

式中,WUE 为水分利用效率($g C mm^{-1} m^{-2}$),GPP 为生态系统总初级生产力($g C m^{-2}$),ET 为生态系统蒸散发量(mm)。

2.2 时滞偏相关分析

本研究引入基于像元的时滞偏相关分析法计算 2000—2014 年陕北黄土高原月均 WUE 与月降水量、月均温之间的最大时滞偏相关系数及滞后时间,分析 WUE 对降水和气温的时滞效应。计算过程^[20]:

1) 计算不同时滞下 WUE 与月降水量和月均温之间的相关系数:

$$R_{WT} = \frac{\sum_{i=1}^{n-k} (T_i - \bar{T}_i) (W_{i+k} - \bar{W}_{i+k})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n-k} (T_i - \bar{T}_i)^2 \sum_{i=1}^{n-k} (W_{i+k} - \bar{W}_{i+k})^2}} \quad (2)$$

$$R_{WP} = \frac{\sum_{i=1}^{n-k} (P_i - \bar{P}_i) (W_{i+k} - \bar{W}_{i+k})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n-k} (P_i - \bar{P}_i)^2 \sum_{i=1}^{n-k} (W_{i+k} - \bar{W}_{i+k})^2}} \quad (3)$$

$$R_{TP} = \frac{\sum_{i=1}^{n-k} (T_i - \bar{T}_i) (P_{i+k} - \bar{P}_{i+k})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n-k} (T_i - \bar{T}_i)^2 \sum_{i=1}^{n-k} (P_{i+k} - \bar{P}_{i+k})^2}} \quad (4)$$

式中, R_{WT} 、 R_{WP} 分别为不同时滞下 WUE 与月均温和月降水量之间的相关系数; R_{TP} 为不同时滞下月均温和月降水量之间的相关系数; W_i 为 WUE 月均序列值; T_i 和 P_i 分别为月均温序列和月降水量序列值; i 为序列长度, 本研究中 $i \in (1, 2, \dots, 15)$; k 为滞后时间, 根据经验其值应小于 $i/4$, 由于该研究分析的是月时间尺度数据, 故 $n=12$, 因此 k 最大值取 3; 又因 $n=12 < 30$, 难以满足大数定律, 因此, 利用无偏互相关系数加以校正, 其公式为:

$$R^* = R \left[1 + \frac{1 - R^2}{2(n - 4)} \right] \quad (5)$$

2) 根据偏相关系数计算公式, 结合不同时滞下的相关系数, 得到不同时滞下的偏相关序列。计算公式如下:

$$R_{WT-P} = \frac{R_{WT} - R_{WP}R_{TP}}{\sqrt{(1 - R_{WP}^2)(1 - R_{TP}^2)}} \quad (6)$$

$$R_{WP-T} = \frac{R_{WP} - R_{WT}R_{TP}}{\sqrt{(1 - R_{WT}^2)(1 - R_{TP}^2)}} \quad (7)$$

式中, R_{WT-P} 为不同时滞下剔除降水影响下 WUE 与气温的偏相关系数; 同理, R_{WP-T} 为不同时滞下剔除气温影响下 WUE 与降水的偏相关系数。之后计算得到各个时滞下的最大偏相关系数及对应的滞后时间。以上全部计算过程均通过 MATLAB R2014a 软件编程实现。

3 结果与分析

3.1 WUE 年际时空变化

2000—2014 年, 研究区年际 WUE 呈波动变化趋势, 年变化率仅为 $-0.005 \text{ g C mm}^{-1} \text{ m}^{-2}$, 变化范围介于 $1.06\text{—}1.67 \text{ g C mm}^{-1} \text{ m}^{-2}$ 之间, 多年均值为 $1.37 \text{ g C mm}^{-1} \text{ m}^{-2}$, 其中, WUE 显著下降期为 2001—2003 年, 显著上升期为 2003—2005 年以及 2010—2013 年(图 2)。GPP 和 ET 整体均呈增长趋势, WUE 与 ET 相关系数为 -0.720 , 与 GPP 的相关系数仅 -0.313 , 故陕北黄土高原水分利用效率主要受蒸散量 ET 的控制。

近 15 年研究区生态系统 WUE 具有较明显的空间分异规律, 整体上呈现北高南低空间格局及东南增加而西北降低变化趋势(图 3)。植被 WUE 介于 $0.63\text{—}2.19 \text{ g C mm}^{-1} \text{ m}^{-2}$ 之间, 均值为 $1.37 \text{ g C mm}^{-1} \text{ m}^{-2}$ 。空间上 IV-1 生态区最高($1.52 \text{ g C mm}^{-1} \text{ m}^{-2}$), 而 II-6、I-2 生态区最低, 仅 $1.22 \text{ g C mm}^{-1} \text{ m}^{-2}$ 。从 WUE 变化趋势来看(图 3), 位于东南部的 I-1、I-2、II-2 及 III-2、III-3 生态区 WUE 呈增加趋势, 而西北部的 III-1、II-6、IV-1 生态区 WUE 则呈降低趋势。

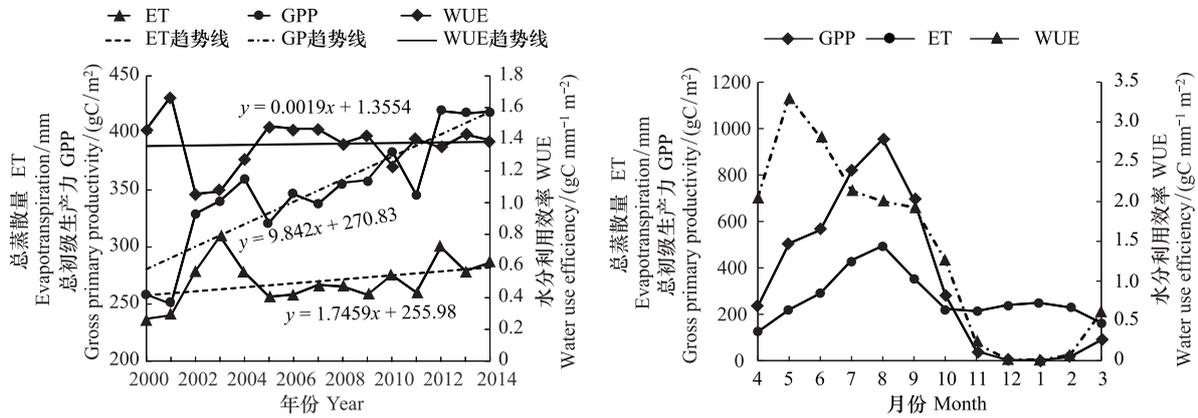


图2 2000—2014年GPP、ET和WUE年际与年内变化

Fig.2 The interannual and intraannual variations of GPP、ET and WUE in the Loess Plateau of Northern Shaanxi from 2000 to 2014

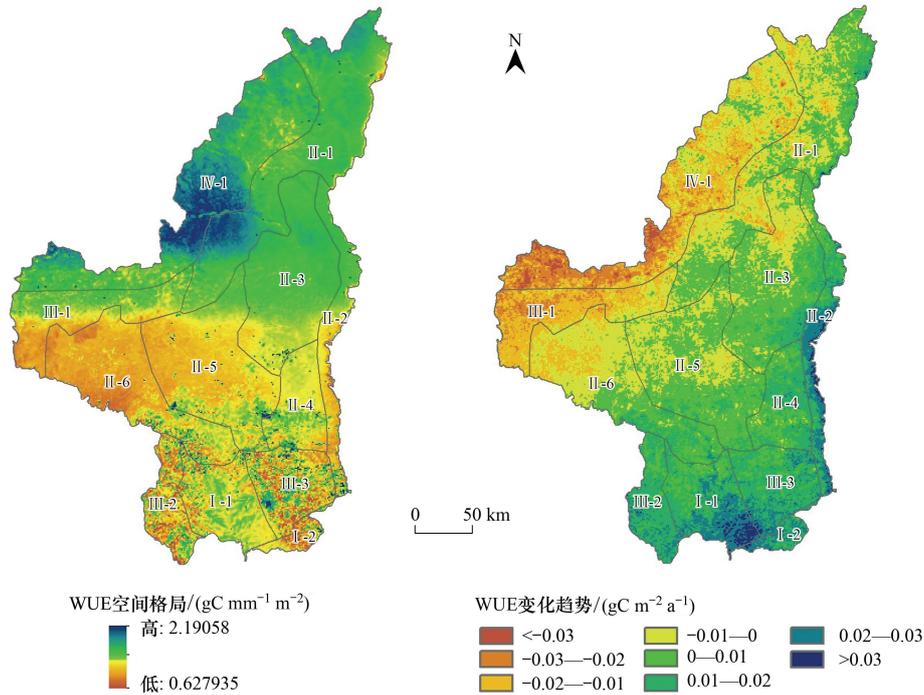


图3 2000—2014年研究区WUE空间格局及变化趋势分布图

Fig.3 The spatial pattern and variation tendency of WUE in the Loess Plateau of Northern Shaanxi from 2000 to 2014

3.2 WUE年内时空变化

2000—2014年研究区年内WUE整体呈单峰变化状态(图2),年内最低值($0.005 \text{ g C mm}^{-1} \text{ m}^{-2}$)出现在1月份,此时GPP最低,ET却为小峰期;年内最高值($3.31 \text{ g C mm}^{-1} \text{ m}^{-2}$)出现在5月份,主要是受物候期影响GPP增加显著,但ET变化速度较慢;7—9月份WUE相对平稳,介于 $1.93\text{—}2.13 \text{ g C mm}^{-1} \text{ m}^{-2}$ 之间,此时GPP和ET变化趋势较为一致。

研究区不同植被类型年内WUE存在3种变化类型:第一类为急速双峰变化型,针叶林、阔叶林、禾草-杂类草草甸和草甸草原属于此类,此类植被盖度较大,WUE于4月份出现首个峰值,之后迅速下降,至6月份因强烈的蒸腾作用致使WUE降至谷点,之后又迅速上升,至9—10月份植被蒸腾作用下降迅速,光合作用下降

缓慢,出现第二个峰值,之后进入深秋和冬季,土壤冻结,植被光合和蒸腾作用继续下降,WUE 逐渐减弱至 0 值附近(图 4)。第二类为缓速双峰变化型,落叶灌丛、草丛和一年两熟农田属于此类,此类植被受人为影响较大,WUE 于 5 月份出现第一峰值,此时植被繁盛,GPP 最大,而 5—9 月间植被状况和气候状况相对稳定,使得 WUE 变化相对较为缓慢;至 9—10 月为秋季作物生长期,GPP 略有增加,WUE 出现第二个峰值,之后随着温度降低,土壤封冻,WUE 逐渐减弱(图 4)。第三类为单峰变化型,灌木荒漠、半灌木荒漠、荒漠草原、典型草原、盐生草甸、沼泽化草甸和一年一熟农田属于此类,此类植被较稀疏,峰值出现在植被生长旺盛的 5 月份,之后,受温度上升影响 ET 增加或受植被凋落影响 GPP 下降,导致 WUE 呈下降态势(图 4)。

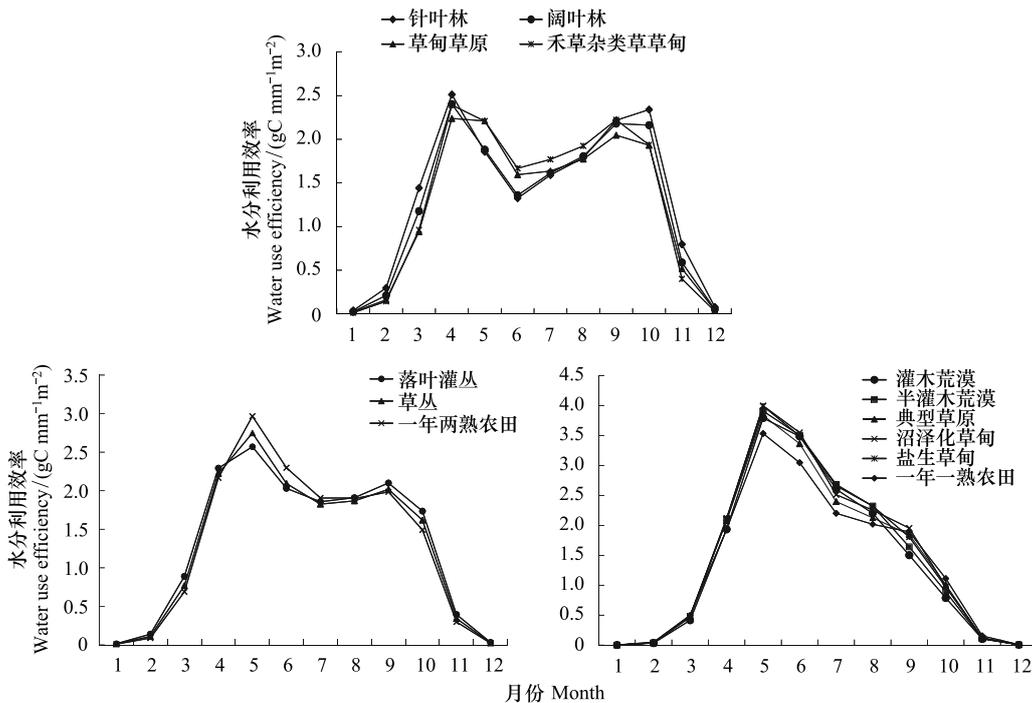


图 4 研究区不同植被类型 WUE 年内变化趋势

Fig.4 The intraannual variation tendency of WUE under different vegetation types in Loess Plateau of Northern Shaanxi

3.3 WUE 气候时滞效应

3.3.1 气候因子变化特征

2000—2014 年,研究区年内气温和降水波动性较强,1 月份气温最低,多年均温为 -6.59°C ,7 月份气温最高,多年均温为 23.46°C ;降水量最低值出现在 12 月份,7 月份降水量最大,且 7—9 月降水量较稳定,均保持在 90—100 mm(图 5)。年际变化来看,降水量多年均值为 470.24 mm,2000 年降水量最小,2013 年最大;多年均温为 9.7°C ,且呈下降趋势,降速为 $0.04^{\circ}\text{C}/\text{a}$ (图 5)。

3.3.2 WUE 与同期气候相关性

通过 WUE 与同期气温、降水数据相关和偏相关分析发现(表 1),各植被类型 WUE 与气温的显著性水平明显高于降水,说明研究区 WUE 对气温更敏感,且不同植被类型 WUE 对气温的敏感程度差异较大,其中,荒漠草原、盐生草甸和半灌木荒漠等植被 WUE 对气温的敏感程度最大,而针叶林最小。分析结果表明,荒漠草原、半灌木荒漠、灌木荒漠、盐生草甸、沼泽化草甸以及一年一熟农田等植被 WUE 与气温的相关和偏相关分析均通过了 0.01 显著性检验,说明这几种植被类型 WUE 对气温的敏感性较大,而其余植被类型 WUE 与气温的相关或偏相关分析均未通过显著性检验。虽部分植被类型 WUE 与降水的相关性通过了 0.05 显著性检验,但所有植被类型 WUE 与降水的偏相关性均未通过显著性检验,说明植被 WUE 对降水的敏感性较弱。

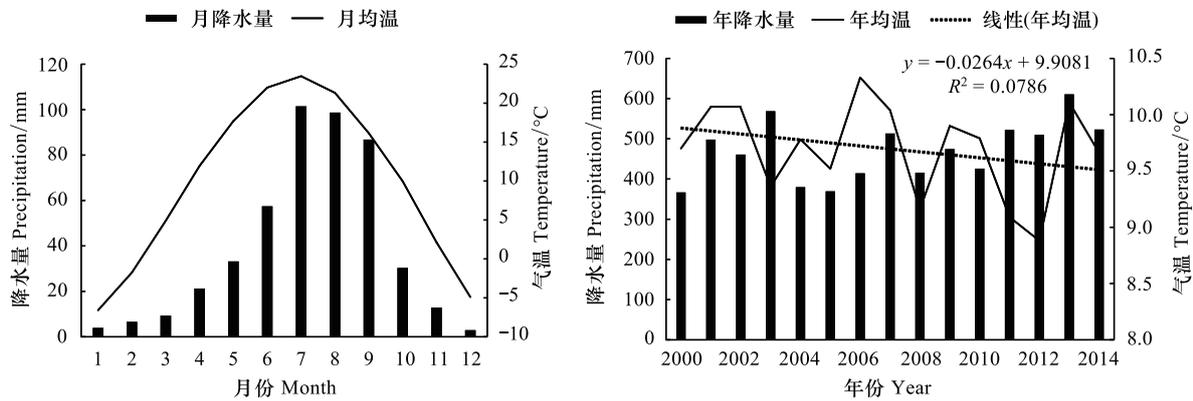


图5 2000—2014年研究区气温和降水年内及年际变化

Fig.5 The intraannual and interannual variation of temperature and precipitation from 2000 to 2014

表1 不同植被类型 WUE 与同期气温和降水相关性

Table 1 Correlation between climatic variables and WUE for different vegetation types

植被类型 Vegetation type	相关分析 Correlation analysis		偏相关分析 Patial correlation analysis		
	Temperature	Precipitation	T/P	P/T	P
针叶林 Needleleaf forest	0.651	0.471	0.563	-0.247	0.495
阔叶林 Broadleaf forest	0.714	0.539	0.604	-0.232	0.507
落叶灌丛 Deciduous shrubby desert	0.798	0.582	0.727	-0.359	0.328
灌木荒漠 Shub desert	0.884**	0.647*	0.852**	-0.52	0.102
半灌木荒漠 Semi-shrubby desert	0.891**	0.647*	0.866**	-0.539	0.089
草甸草原 Meadow grassland	0.784	0.566	0.712	-0.364	0.352
典型草原 Typical grassland	0.881*	0.618	0.864**	-0.534	0.104
荒漠草原 Desert grassland	0.903**	0.665*	0.868**	-0.496	0.126
禾草-杂类草草甸 Grass meadow	0.774	0.592	0.657	-0.235	0.493
沼泽化草甸 Swampy meadow	0.886**	0.635*	0.857**	-0.505	0.13
盐生草甸 Salt meadow	0.892**	0.645*	0.866**	-0.527	0.101
草丛 Grass	0.851*	0.595	0.818*	-0.484	0.181
一年一熟农田 One-harvest farmland	0.886**	0.623	0.867**	-0.534	0.107
一年两熟农田 Two-harvest farmland	0.876*	0.604	0.859**	-0.539	0.113

*、** 分别表示在 0.05、0.01 水平 (双侧) 上显著相关; 偏相关分析中“T/P”表示在降水固定条件下, WUE 与温度的相关性; 同理, “P/T”表示在温度固定条件下, WUE 与降水的相关性

3.3.3 WUE 对降水的时滞效应

研究区 WUE 对降水的时滞响应程度自东向西逐渐增强, 最大时滞偏相关系数介于 -0.924—0.709 之间 (图 6)。其中, 西北部的 III-1、II-6 和 IV-1 生态区 WUE 对降水时滞响应程度最大, 相关系数在 -0.924—-0.822 之间, 面积占比 18.36%; II-5、II-3、II-1 南部、IV-1 东北部等地, 相关系数也较大 (-0.822—-0.751), 且占比最大 (43.81%)。主要与以上区域内禾草类典型草原与一年一熟农田交错分布, 植被覆盖度相对较低, 且受季节影响较大有关。II-1 东北部、II-2 南部和 II-4 生态区 WUE 对降水的时滞响应程度略低, 相关系数介于 -0.751—-0.642 之间, 面积占比为 21.06%; I-1 生态区时滞响应程度更低, 相关系数介于 -0.642—-0.476 之间, 面积占比仅为 7.24%; III-2、III-3 和 I-2 生态区相关系数介于 -0.476—0.709 之间, 面积占比 9.53%。该区域 WUE 对降水的时滞响应程度总体较弱, 主要原因为: II-1 东北部、II-2 南部和 II-4 生态区为黄河沿岸水蚀风蚀侵蚀区, 地下水供给相对充足, 受降水影响较弱; III-2、III-3 生态区均为生物多样性和水源涵养生态区, 气候较湿润, 植被以针叶林、阔叶林和落叶灌丛为主, 随季节变化不大; I-1、I-2 则为农业生态

区,受人类活动影响较大,时滞效应不明显。

从滞后时间来看(图 6),92.51%区域 WUE 对降水的滞后时间为 3 个月,分布于各生态功能区;黄龙山生态功能区及子午岭生态功能区东南部滞后时间为 2 个月,区域占比较低,仅为 1.92%;子午岭生态功能区和汾渭盆地生态功能区滞后时间为 1 个月,占比 3.73%。而洛川生态功能区南部、黄河沿岸生态功能区存在少量对降水无明显滞后响应的区域,占比 1.83%,该区域主要分布着草丛和农田,受人类活动影响最频繁,WUE 对降水的实时响应速度更快。

3.3.4 WUE 对气温的时滞响应

研究区生态系统 WUE 与气温的最大时滞偏相关系数介于-0.664—0.920 之间,呈南北低中部高的空间格局(图 6)。II-1 南部、II-2、II-3、II-4、II-5、II-6 北部、IV-1 南部以及 III-1 生态区相关系数最大,介于 0.859—0.920 之间,面积占比最大(62.96%);最大时滞偏相关系数介于 0.772—0.858 之间的区域主要分布在 II-1 北部、IV-1 北部和 I-1 等生态区,面积占比为 25.10%;以上区域植被类型多样,且随季节变化较大,与气温时滞偏相关性相对较大。而 III-2、III-3 和 I-2 生态区气候相对湿润,植被类型以针叶林、阔叶林为主,全年植被覆盖变化不大,WUE 受气温影响较小,最大时滞偏相关系数最小。

研究区整体滞后效应并不明显(图 6),其中,占研究区面积 97.95%的区域不存在滞后效应,仅 III-2 南部和 III-3 内占全区面积 1.69%的区域 WUE 存在 1—2 个月的滞后时间,而 I-2 内占全区面积 0.37%的区域 WUE 对气温的滞后时间为 3 个月。

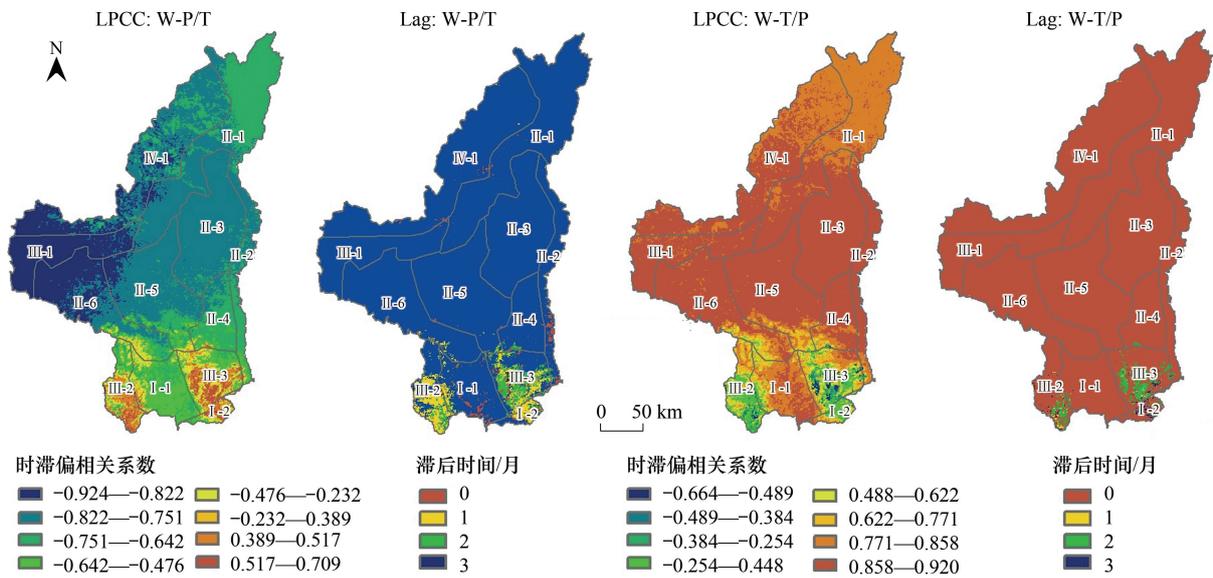


图 6 2000—2014 年研究区 WUE 与降水、气温的最大时滞偏相关系数及滞后时间

Fig.6 Maximum time-lag partial correlation coefficient and lag time between WUE and climatic variables from 2000 to 2014

LPCC 表示时滞偏相关系数;Lag 表示滞后时间;W-T/P 表示 WUE 与气温的时滞偏相关;W-P/T 表示 WUE 与降水的时滞偏相关

3.4 植被类型对时滞效应的影响

研究区内农田、草原、草丛、落叶灌丛、阔叶林、针叶林、荒漠 7 个植被大类及其不同生长期需水量均存在差异,故不同植被类型 WUE 对气温和降水时滞效应必然不同。研究表明,区域内不同植被类型 WUE 对降水时滞效应明显强于气温(图 7)。不同植被类型 WUE 与降水、气温最大时滞偏相关系数差别不大,但对降水的滞后时间(2.1—3 个月)远大于对气温的滞后时间(0—15 d)。

不同植被类型 WUE 与降水最大时滞偏相关系数介于-0.869—-0.045 之间,荒漠类植被(半灌木荒漠、灌木荒漠)WUE 与降水时滞相关程度最大,平均时滞偏相关系数为 0.859,但滞后时间相对较短,平均为 2.4 个月;荒漠草原、盐生草甸、沼泽化草甸、典型草原 WUE 与降水时滞相关程度略低于荒漠类植被,相关系数介于

0.787—0.845 之间,且滞后时间最长,接近 3 个月;一年一熟农田、一年两熟农田和草丛 WUE 与降水时滞相关程度居中,相关系数介于 0.599—0.767 之间,滞后时间较长,介于 2.7—3 个月之间;落叶灌丛、草甸草原和禾草-杂类草草甸 WUE 与降水时滞偏相关程度较小,介于 0.357—0.463 之间,滞后时间略短,介于 2.4—2.6 个月之间;阔叶林和针叶林 WUE 与降水时滞偏相关程度最小,介于 0.045—0.181 之间,且滞后时间最短,分别为 2.3 和 2.1 个月。

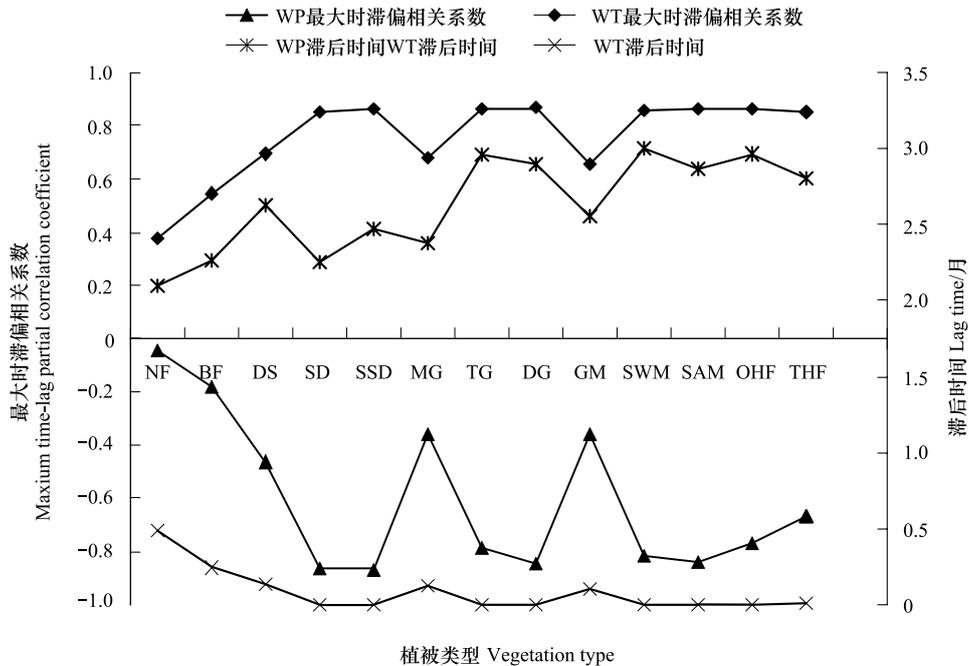


图 7 不同植被类型 WUE 与气温、降水最大时滞偏相关系数及滞后时间

Fig. 7 Maximum time-lag partial correlation coefficient and lag time between WUE and climatic variables under different vegetation types

植被类型: NF: 针叶林, Needleleaf forest; BF: 阔叶林, Broadleaf forest; DS: 落叶灌丛, Deciduous shrubland; SD: 灌木荒漠, Shrub desert; SSD: 半灌木荒漠, Semi-shrubby desert; MG: 草甸草原, Meadow grassland; TG: 典型草原, Typical grassland; DG: 荒漠草原, Desert grassland; GM: 禾草-杂类草草甸, Grass meadow; SWM: 沼泽化草甸, Swampy meadow; SAM: 盐生草甸, Salt meadow; GR: 草丛, Grass; OHF: 一年一熟农田, One-harvest farmland THF: 一年两熟农田, Two-harvest farmland

不同植被类型下 WUE 与气温最大时滞偏相关系数介于 0.373—0.868 之间,其中,荒漠草原、半灌木荒漠、盐生草甸、典型草原、沼泽化草甸、灌木荒漠 6 种植物 WUE 与气温最大时滞偏相关系数最大(0.857—0.868),但其对气温不存在滞后效应;一年一熟农田、一年两熟农田、草丛 3 种植物 WUE 与气温最大时滞偏相关系数较大(0.805—0.865),其滞后时间最长为 1.5 d;落叶灌丛、草甸草原、禾草-杂类草草甸 3 种植物 WUE 与气温最大时滞偏相关系数较小(0.659—0.695),滞后时间为 3—4 d;阔叶林、针叶林 WUE 与气温最大时滞偏相关系数最小,分别为 0.55 和 0.38,但滞后时间却最长(7—15 d)。

3.5 植被覆盖度对时滞效应的影响

植被覆盖度的高低会直接影响植被 GPP 和 ET 大小,从而间接影响 WUE 分布及变化情况。基于 NDVI 数据,运用像元二分模型^[21]计算得到 2000—2014 年多年平均植被覆盖度,采用自然断点法按由低到高的顺序将其划分为 10 个等级(<28.1%、28.1%—36.7%、36.7%—40.7%、40.7%—44.7%、44.7%—49.3%、49.3%—55.2%、55.2%—62.3%、62.3%—69.4%、69.4%—76.2%、>76.2%),进而分析不同植被覆盖度等级下 WUE 与气温、降水的时滞效应(图 8)。

研究表明,植被覆盖度低于 62.3%时,降水对植被 WUE 负面效应较大,且降水滞后效应明显,而高于 62.3%时,降水对植被 WUE 的正面效应逐渐显现,且滞后效应减弱。当植被覆盖度低于 62.3%(1—8 级)时,

WUE 与降水的最大时滞偏相关系数较大 (-0.8 — -0.6), 对降水的滞后时间稳定在 3 个月左右; 当植被覆盖度高于 62.3% (9、10 级) 时, WUE 与降水的最大时滞偏相关系数显著减弱至 0 附近, 滞后时间亦逐渐缩短至 1.6 个月左右, 且第 10 等级时两者呈正相关关系。

不同植被覆盖度下 WUE 对气温均呈正面效应, 且植被覆盖度低于 62.3% 时, WUE 对气温基本不存在滞后效应, 而高于 62.3% 时, 滞后效应逐渐增强。第 1—8 等级下 WUE 与气温的最大时滞偏相关系数基本稳定在 0.8 左右, 但基本不存在滞后时间; 第 9、10 等级下 WUE 与气温的最大时滞偏相关程度逐渐减弱, 直至第 10 等级下相关系数接近于 0, 滞后时间却逐渐延长至 1 个月。

4 讨论

陕北黄土高原生态系统 WUE 年际变化呈波动变化趋势, 2000—2003 年为其显著下降期, 2003—2005、2010—2013 年为显著上升期, 多年 WUE 均值为 $1.37 \text{ g C mm}^{-1} \text{ m}^{-2}$, 这与刘宪锋^[14]及裴婷婷^[22]等人的研究结果基本一致。分析其原因主要与蒸散量 ET 的控制性影响、退耕还林工程的开展及其政策的变动关系密切。具体来看, 2000—2003 年处于退耕还林工程实施初期阶段, 植被覆盖度相对较低, GPP 变化不大, 但 ET 增长趋势最明显, 故植被 WUE 显著降低; 2003 年开始退耕还林效果显现, GPP 显著增加, ET 亦显著降低, 使得 2003—2005 年植被 WUE 显著增加; 经过 10 多年的林(草)培育, 2010—2013 年植被覆盖度已明显增加, 加之该时期降水量较大、气温较低, 植被 GPP 增加幅度大于 ET, 故植被 WUE 呈明显增加趋势。

年内 WUE 整体呈单峰变化状态, 介于 1.93 — $2.13 \text{ g C mm}^{-1} \text{ m}^{-2}$ 之间, 峰值出现在 5 月份, 此结论与刘宪锋等^[14]人的研究结果基本一致。所不同的是, 本文基于不同的植被分类方法将不同植被类型 WUE 变化过程归纳为急速双峰、缓速双峰和单峰型, 并发现农田耕作制度也对 WUE 有一定影响, 其中, 一年一熟农田 WUE 年内呈单峰变化, 而一年两熟农田呈双峰变化状态, 这与区域农耕方式关系密切, 一年一熟农田植被 GPP 升高而 ET 降低的情况仅出现在春季作物繁盛期, 而一年两熟农田植被在春季作物繁盛期和秋季作物生长期出现两次, 此结论更能反映研究区实际耕作状况。

WUE 与气候因子时滞偏相关分析发现, 研究区不同植被类型 WUE 对气温与降水的时滞响应程度差异较大。子午岭、黄龙山和汾渭盆地生态功能区对气温和降水均存在 1—2 个月滞后期, 但最大时滞偏相关系数最低; 而其他生态功能区对降水的时滞偏相关系数高, 且滞后时间长达 3 个月, 对温度的最大时滞偏相关系数虽大, 但基本不存在滞后时间, 这与通过同期数据相关与偏相关分析得到“WUE 对气温更敏感、对降水的敏感性较弱”的结论基本一致, 却能更详细地通过滞后时间长短揭示 WUE 对气温、降水的敏感与否问题, 研究结论更细致深入。另外, 研究表明各植被类型 WUE 对气温的敏感程度均高于降水, 其中灌木荒漠和半灌木荒漠 WUE 对温度和降水的显著性水平及相关系数均高于针叶林、阔叶林及草地, 此结论与裴婷婷^[22]的研究结果较一致, 但与 Zhang 等^[23]研究中“森林、草地 WUE 对降水敏感, 而温度主导灌丛 WUE”的研究结果存在一定差异, 主要由 WUE 计算方法不同所致, Zhang 等运用净初级生产力 NPP 计算 WUE, 而本研究及裴婷婷等均采用总初级生产力 GPP 计算 WUE。

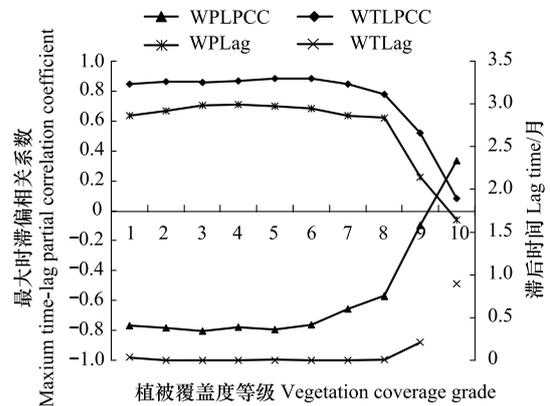


图 8 不同植被覆盖度等级下 WUE 与气温、降水的最大时滞偏相关系数及滞后时间

Fig.8 Maximum time-lag partial correlation coefficient and lag time between WUE and climatic variables under different vegetation coverage grades

WPLPCC: WUE 与降水的时滞偏相关系数, time-lag partial correlation coefficient; WTLPCC: WUE 与气温的时滞偏相关系数, time-lag partial correlation coefficient; WPLag: WUE 对降水的滞后时间, the lag time of WUE to precipitation; WTLag: WUE 对气温的滞后时间, the lag time of WUE to temperature

受植被类型和覆盖度的影响,WUE 气候时滞效应存在一定的时空分异规律。荒漠类植被 WUE 对降水时滞响应程度最强,且滞后时间相对较长,接近 3 个月,而针叶林时滞响应程度最弱,滞后时间也最短,为 2.1 个月,说明降水虽然与同期 WUE 相关性不大,并非区域 WUE 变化的主导因子,但其会显著影响到更长时间内 WUE 变化,特别是荒漠类植被 WUE 时滞效应更强,主要是由荒漠类植被物候期及需水量与同期降水量不同步造成的,在半干旱区的陕北黄土高原这种现象更为常见,使得降水后期径流及地下水成为植被水分供给的主要途径,故呈现降水滞后效应;而针叶林植被耐寒,与降水的偏相关性较弱,这与刘宪锋、裴婷婷、Zhang、冯朝阳等^[14,22-24]发现“降水不是区域 WUE 主要决定因子”的结论基本一致,在此基础上,本研究更进一步验证了降水会在更长时间内对 WUE 产生影响,即 WUE 存在较强降水滞后效应。另外,随着植被覆盖度的增加,WUE 对气温的滞后时间逐渐延长,但对降水的滞后时间却趋于缩短。值得一提的是,WUE 气候时滞偏相关程度对植被覆盖度的敏感性存在阈值效应,当植被覆盖度低于 62.3%时,WUE 对降水的时滞效应相对稳定,滞后时间稳定在 3 个月左右,但对气温不在滞后效应;当植被覆盖度高于 62.3%时,WUE 对降水的时滞效应逐渐减弱,滞后时间缩短至 1.6 个月,而对气温的时滞效应却逐渐显现。因此,提高植被覆盖度,能促进降水的及时利用,极大地提高水分利用效率,并能有效降低极端气温对水分利用效率的负面影响。这与裴婷婷研究得出的“WUE 对 NDVI 的敏感性存在阈值效应”这一结论较一致,区别就在于本研究明确了 WUE 气候时滞效应对植被覆盖度的敏感性,可为区域制定应对气候变化措施提供一定的理论依据。

本研究所采用的时滞偏相关分析可在一定程度上反映出生态系统 WUE 对气温、降水的时滞效应,与传统相关分析和偏相关分析相比,该研究方法不仅可以揭示 WUE 与气候因子之间的相关特性,而且可以获取 WUE 与气象因子在不同空间尺度上的时滞相关程度及响应时间,但仍然存在一些不确定性。首先,由于分析的是月尺度数据,故样本数据小于 30,难以满足大数定律,文中已运用无偏互相关系数加以校正,但仍存在不确定性。其次,由于研究区站点较少,插值结果精度也会导致存在一定的不确定性。此外,研究区地貌类型复杂多样,西北部长城沿线是风沙滩地,北部是以峁为主的峁梁沟壑丘陵区,中部是以梁为主的梁峁沟壑丘陵区,西部多梁状丘陵,南部是以塬为主的塬梁沟壑区,这种复杂破碎的地形地貌,也不可避免地会对 WUE 气候时滞效应产生一定的影响,因此,今后进行该区域 WUE 分异规律研究时,也可从高程、坡度以及坡向对水热条件的敏感性方面着手,找出 WUE 对水热条件组合的时滞效应临界点及阈值,以期揭示出生态系统 WUE 与气候因子之间更细致深刻的时空响应机制。

5 结论

受退耕还林草生态工程和气候变化的双重影响,2000—2014 年,陕北黄土高原 WUE 呈波动变化趋势,2000—2003 年显著下降,2011—2014 年显著上升。受不同植被类型的影响,年内 WUE 则呈现出急速双峰、缓速双峰和单峰型三种变化状态。空间上,陕北黄土高原 WUE 呈现北高南低的空间分布格局和东南部增加而西北部降低的变化趋势。陕北黄土高原 WUE 对温度的敏感性较强,而对降水的时滞效应较明显。受植被类型和植被覆盖度的影响,研究区 WUE 气候时滞效应存在一定分异规律,荒漠类植被 WUE 的降水时滞效应最强,滞后时间接近 3 个月,而针叶林 WUE 的降水时滞效应最弱,滞后时间为 2.1 个月,并且 WUE 气候时滞效应对植被覆盖度的敏感性存在一定的阈值效应,植被覆盖度敏感性阈值为 62.3%。

参考文献 (References):

- [1] Leemans R, Eickhout B. Another reason for concern; regional and global impacts on ecosystems for different levels of climate change. *Global Environmental Change*, 2004, 14(3): 219-228.
- [2] Huang M T, Piao S L, Sun Y, Ciais P, Cheng L, Mao J F, Poulter B, Shi X Y, Zeng Z Z, Wang Y P. Change in terrestrial ecosystem water-use efficiency over the last three decades. *Global Change Biology*, 2015, 21(6): 2366-2378.
- [3] Gang C C, Wang Z Q, Chen Y Z, Yang Y, Li J L, Cheng J M, Qi J G, Odeh I. Drought-induced dynamics of carbon and water use efficiency of global grasslands from 2000 to 2011. *Ecological Indicators*, 2016, 67: 788-797.

- [4] 胡中民, 于贵瑞, 王秋风, 赵风华. 生态系统水分利用效率研究进展. 生态学报, 2009, 29(3): 1498-1507.
- [5] Klein T, Shpringer I, Fikler B, Elbaz G, Cohen S, Yakir D. Relationships between stomatal regulation, water-use, and water-use efficiency of two coexisting key Mediterranean tree species. *Forest Ecology and Management*, 2013, 302: 34-42.
- [6] 《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第二次气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2011: 26-31.
- [7] Ito A. Water-use efficiency of the terrestrial biosphere: a model analysis focusing on interactions between the global carbon and water cycles. *Journal of Hydrometeorology*, 2012, 13(2): 681-694.
- [8] 王会肖, 刘昌明. 作物水分利用效率内涵及研究进展. 水科学进展, 2000, 11(1): 99-104.
- [9] 张永强, 沈彦俊, 刘昌明, 于强, 孙宏勇, 贾金生, 唐常源, Kondoh A. 华北平原典型农田水、热与 CO₂ 通量的测定. 地理学报, 2002, 57(3): 333-342.
- [10] 张良侠, 胡中民, 樊江文, 邵全琴, 唐风沛. 区域尺度生态系统水分利用效率的时空变异特征研究进展. 地球科学进展, 2014, 29(6): 691-699.
- [11] 张远东, 庞瑞, 顾峰雪, 刘世荣. 西南高山地区水分利用效率时空动态及其对气候变化的响应. 生态学报, 2016, 36(6): 1515-1525.
- [12] 位贺杰, 张艳芳, 董孝斌, 鲁纳川, 王雪超. 渭河流域植被 WUE 遥感估算及其时空特征. 自然资源学报, 2016, 31(8): 1275-1288.
- [13] 黄小涛, 罗格平. 新疆草地蒸散与水分利用效率的时空特征. 植物生态学报, 2017, 41(5): 506-518.
- [14] 刘宪锋, 胡宝怡, 任志远. 黄土高原植被生态系统水分利用效率时空变化及驱动因素. 中国农业科学, 2018, 51(2): 302-314.
- [15] 邹杰, 丁建丽, 秦艳, 王飞. 遥感分析中亚地区生态系统水分利用效率对干旱的响应. 农业工程学报, 2018, 34(9): 145-152.
- [16] Liu D, Yu C L, Zhao F. Response of the water use efficiency of natural vegetation to drought in Northeast China. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(5): 611-628.
- [17] Turner D P, Ritts W D, Cohen W B, Gower S T, Running S W, Zhao M S, Costa M H, Kirschbaum A A, Ham J M, Saleska S R, Ahl D E. Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 102(3/4): 282-292.
- [18] Mu Q Z, Zhao M S, Kimball J S, McDowell N G, Running S W. A remotely sensed global terrestrial drought severity index. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013, 94(1): 83-98.
- [19] 邹杰, 丁建丽, 杨胜天. 近 15 年中亚及新疆生态系统水分利用效率时空变化分析. 地理研究, 2017, 36(9): 1742-1754.
- [20] 田义超, 梁铭忠. 北部湾沿海地区植被覆盖对气温和降水的旬响应特征. 自然资源学报, 2016, 31(3): 488-502.
- [21] 王朗, 傅伯杰, 吕一河, 曾源. 生态恢复背景下陕北地区植被覆盖的时空变化. 应用生态学报, 2010, 21(8): 2109-2116.
- [22] 裴婷婷, 李小雁, 吴华武, 吴秀臣, 陈英, 谢保鹏. 黄土高原植被水分利用效率对气候和植被指数的敏感性研究. 农业工程学报, 2019, 35(5): 119-125.
- [23] Zhang T, Peng J, Liang W, Yang Y T, Liu Y X. Spatial-temporal patterns of water use efficiency and climate controls in China's Loess Plateau during 2000-2010. *Science of the Total Environment*, 2016, 565: 105-122.
- [24] 冯朝阳, 王鹤松, 孙建新. 中国北方植被水分利用效率的时间变化特征及其影响因子. 植物生态学报, 2018, 42(4): 453-465.