DOI: 10.20103/j.stxb.202407241749
薛婷艺,姚珞一,王子君,刘洋洋,贾东升,赵英涵,王宗森,陈嘉轩.北洛河流域蒸散发时空变化及其对气候与植被演变的响应.生态学报,2025,45(12):5986-5999.
Xue T Y,Yao L Y,Wang Z J,Liu Y Y,Jia D S,Zhao Y H,Wang Z S,Chen J X.Temporal and spatial variations of evapotranspiration and its response to climate and vegetation evolution in the Beiluo River Basin.Acta Ecologica Sinica,2025,45(12):5986-5999.

北洛河流域蒸散发时空变化及其对气候与植被演变的响应

薛婷艺[1,2],姚珞一[2],王子君[3],刘洋洋[1,2,*],贾东升[4],赵英涵[2],王宗森[2],陈嘉轩[2]
1 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心自然资源要素耦合过程与效应重点实验室,北京 100055
2 西北农林科技大学 草业与草原学院,杨凌 712100
3 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院,杨凌 712100
4 河南省栾川县惠顿矿业有限公司,洛阳 471500

摘要:阐明气候与植被演变对区域蒸散发变化的驱动机制对于区域制定水资源可持续的植被恢复策略具有重要意义。本研究以黄土高原北洛河流域为研究区,基于遥感、气候数据等,辅以 PT-JPL (Priestley-Taylor Jet Propulsion Laboratory Model)模型模拟分析 1984—2018 年区域蒸散发的时空演变规律,并基于偏相关和多元回归分析探究气候变化与植被变绿对蒸散发变化的驱动机制和相对贡献。结果表明:(1)北洛河流域蒸散发以 3.11 mm/a 的速率呈极显著增加趋势($P<0.01$);(2)流域灌丛年均蒸散发最大,而耕地年均蒸散发最小。不同植被类型蒸散发年变化率依次为耕地>草地>灌木丛>林地;(3)北洛河流域叶面积指数呈极显著增加趋势($0.02\ m^2\ m^{-2}\ a^{-1}$;$P<0.01$)。对于气候因子而言,除降水量变化并不显著外,其余气候因子(平均气温、净辐射、饱和水汽压和风速)均呈现显著增加趋势。在年尺度上,流域蒸散发与叶面积指数、降水和气温呈极显著正相关,蒸散发与饱和水汽压之间呈不显著正相关,而与净辐射和风速间呈不显著负相关。不同驱动因子对流域蒸散发的相对贡献率由大到小依次为气温(29.9%)>叶面积指数(21.3%)>辐射(6.2%)>风速(4.9%)>降水(1.3%),表明近年来气候变暖和植被变绿是该区蒸散发增加的关键限制性因子。本研究结果有助于加深对气候-植被-蒸发互作过程的理解,同时对于北洛河流域乃至黄土高原地区的水资源管理和构建水资源可持续的生态恢复策略具有重要参考价值。

关键词:北洛河流域; 气候; 植被蒸散发; PT-JPL 模型

Temporal and spatial variations of evapotranspiration and its response to climate and vegetation evolution in the Beiluo River Basin

XUE Tingyi[1,2],YAO Luoyi[2],WANG Zijun[3],LIU Yangyang[1,2,*],JIA Dongsheng[4],ZHAO Yinghan[2],WANG Zongsen[2],CHEN Jiaxuan[2]
1 *China Geological Survey Command Center for Integrated Natural Resources Surveying and Investigation,Key Laboratory of Coupled Processes and Effects of Natural Resource Factors, Beijing* 100055, *China*
2 *College of Grassland Agriculture, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling* 712100, *China*
3 *College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling* 712100, *China*
4 *Henan Luanchuan Huidun mining industry limited company, Luoyang* 471500, *China*

Abstract: Elucidating the driving mechanisms of climate and vegetation evolution on regional evapotranspiration change is

基金项目:自然资源要素耦合过程与效应重点实验室开放课题(2022KFKTC004);国家自然科学基金(42107512);陕西省重点研发计划(2024SF-YBXM-621)
收稿日期:2024-07-24; **网络出版日期**:2025-04-15
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: hnlylcbtks@163.com

crucial for developing sustainable vegetation restoration strategies for water resources in the region. This study took the Beiluo River Basin of the Loess Plateau as the research area. Based on remote sensing and climate data, the spatiotemporal evolution of regional evapotranspiration from 1984 to 2018 was simulated using the PT-JPL Model (Priestley-Taylor Jet Propulsion Laboratory). Using partial correlation and multiple regression analysis, the study explored the driving mechanisms and relative contributions of climate change and vegetation greening to evapotranspiration change. The results showed that: (1) Evapotranspiration in the Beiluo River Basin increased significantly at a rate of 3.11 mm/a ($P<0.01$); (2) The average annual evapotranspiration was highest in the watershed scrub and lowest in the cultivated land. The annual evapotranspiration rates for different vegetation types were: cultivated land > grassland > shrub > forest land. (3) The leaf area index in the Beiluo River Basin showed a very significant increasing trend (0.02 $m^2\ m^{-2}\ a^{-1}$; $P<0.01$). For climate factors, except for precipitation, the other climate factors (mean temperature, net radiation, saturated water vapor pressure, and wind speed) showed significant increasing trends. On the annual scale, evapotranspiration is positively correlated with leaf area index, precipitation and air temperature, but not positively correlated with saturated water vapor pressure, and negatively correlated with net radiation and wind speed. The relative contribution rates of different driving factors to evapotranspiration in the basin were as follows: temperature (29.9%) > leaf area index (21.3%) > radiation (6.2%) > wind speed (4.9%) > precipitation (1.3%), indicating that climate warming and vegetation greening were the key limiting factors for the increase of evapotranspiration in this area in recent years. The results of this study help to deepen the understanding of climate-vegetation-evaporation interaction process, and have important reference value for water resources management and construction of sustainable ecological restoration strategies for water resources in the Beiluo River Basin and even the Loess Plateau.

Key Words: Beiluo River Basin; climate; vegetation evapotranspiration; PT-JPL Model

蒸散发是水循环过程中的重要组分,在连接地表水和大气水汽循环过程中扮演着重要角色。在地表水热变化过程中,能量传输是通过蒸散发过程进行,因而蒸散发对地表水循环和能量循环都发挥着关键作用[1—2]。蒸散发是由地表水分蒸发和植被蒸腾两部分组成,参与土壤-植被-大气连续体(SPAC)中水分的互相转换[3]。在全球约 60%的降水通过蒸散发的形式回归到大气中[4],在干旱半干旱地区比例高达 90%以上。由于干旱地区降水稀少,蒸散发量大于降水量,水资源供需不平衡,农业生产多采用节水灌溉,引起灌溉地区蒸散发的改变,从而影响局部地区生态环境[5]。黄土高原位于干旱/半干旱区,生态环境敏感脆弱,水分是限制该区域生态系统恢复的关键因素[6]。自国家实施退耕还林(草)政策以来,黄土高原植被恢复明显,产沙和黄河入沙量明显减少。而北洛河流域位于黄土高原腹地,地形地貌和植被分带较为典型[7]。北洛河流域地形多样,气候复杂,而气候引起的植被格局变化可能影响该区多种生态系统服务的供给,进而对当地社区和经济产生影响。因此,系统探究该区植被蒸散发时空变化规律,并揭示其对气候和植被格局演变的响应机制,不仅有助于预测和缓解气候变化对流域生态系统和社会的不利影响,还可以为区域土地利用规划、自然资源管理和气候适应策略提供信息,同时,对于理解生态系统动态、应对气候变化影响、增强生态系统和群落恢复力以及为可持续资源管理实践提供科学参考具有重要意义。

随着卫星遥感技术的兴起,凭借卫星观测技术成像频率高、探测范围大、获得信息快、空间分辨清晰、低成本高效益和几乎不受地面条件限制等优点,在排除了地表异质性对蒸散发观测的干扰基础上,为大尺度下的蒸散发观测提供便利条件。如近年来的 MODIS、GLEAM、PML-CSIRO 及 PLSH 等产品,通过依托先进的遥感数据源与复杂的算法模型,为全球及区域尺度的蒸散发研究提供了可靠的数据支撑。尽管这些产品均旨在精准量化地表蒸散发,但因所采用的监测基础数据来源各异,涵盖卫星传感器类型、分辨率、观测频次的不同,以及在模型反演过程中的物理机制、关键参数设定、算法结构均存在差别,导致不同产品间呈现显著差异。当下,运用这些产品深入剖析不同区域蒸散发量的时空变化特征、驱动机制及其生态效应,已然成为学术界广泛

聚焦、热烈研讨的前沿课题。王海波等[8]利用遥感数据,模拟 Penman-Monteith 模型对我国黑河流域高寒草地和干旱区农田生态系统蒸散发的估算;杨秀芹等[9]基于 GLEAM 遥感蒸散发模型,对淮河流域多年蒸散发的时空演变及其气候变化对水循环的响应机制进行了研究;符淑宜[10]结合长时间序列下的植被叶面积指数遥感产品,通过蒸散发模型估算黄土高原近 30 年的实际蒸散发,系统阐明区域土地利用变化格局以及植被与蒸散发的时空变化特征和关联机制;He 等[11]利用基于 Budyko 方程的偏微分方法,探究 1982—2014 年黄土高原土地蒸散发的时空变化及其驱动因子,发现降水是陆地蒸散发年际变化的主要驱动因子;Jin 等利用遥感蒸散发模型,探究 2000—2012 年低海拔地区蒸散发的变化及其驱动力,阐明植被恢复是蒸散发上升的主要驱动因素[12];Ning 等通过建立 Fu 经验方程研究黄土高原气候季节性对蒸散发的影响,以黄土高原 13 个流域为例揭示降水对蒸散发的影响不可忽视[13]。这些结果有助于进一步认识研究区植被与气候变化对陆地蒸散发的影响,并且可为未来水资源可持续利用决策提供支持。

在气候变化背景下,有关干旱和半干旱地区蒸散发影响因素的定量研究和定性分析,也一直是陆地水文循环过程中的热门话题[14]。在退耕还林(草)政策的实施过程中,黄土高原地区的植被得到了有效恢复,导致该地区的产沙量和入沙量显著降低。而北洛河流域地处黄土高原,因此也引起了各个学者的广泛关注。古明兴[15]通过论述北洛河流域泥沙的来源和沿程分配,揭示了北洛河流域各年代间降水呈丰枯交替状变化情况。董起广等[16]利用 Mann-Kendall 趋势检验分析北洛河流域年际径流量和季节变化趋势。蒋观涛等[17]定量分析了水文要素的变化趋势,结果表明 1971—2010 年间北洛河流域径流量和输沙量成显著减小趋势,并且阐明了人类活动是北洛河上游泥沙减少的主要驱动力。上述研究大多依据北洛河流域水沙情况对径流量进行了探讨,但流域内长时间序列下的气候、植被格局及蒸散发的时空演变特征及其驱动机理仍不明确。因此,本研究以北洛河流域为研究对象,基于 PT-JPL 模型探究 1984—2018 年间该区蒸散发时空变化规律,并揭示其对气候和植被格局演变的响应机制,旨在为区域水资源管理以及生态恢复策略的制定提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

北洛河流域位于陕西省中部和北部(34°57′13″—37°17′03″N,107°34′45″—110°01′37″E),途径黄土高原区和关中平原两大地形单元,流域面积约为 2.69 万 km^2。该地区属于大陆性气候,降水稀少,主要集中在夏季,年均降水量少。流域地形地貌复杂多样[18],地势东南低而西北高,海拔高度由 448 m 至 1882 m 逐步递增。在植被覆盖方面,自 1987 年的 41.10%增长至 2017 年的 68.50%,其中中游林区的植被覆盖度最高,而上游黄土丘陵沟壑区的植被覆盖度相对较低。总体而言,北洛河流域的植被覆盖度呈现出显著的增长趋势。由图 1 所得,北洛河流域以草地、耕地为主,占地面积大小:草地(41.55%)>耕地(28.97%)>林地(14.89%)>灌木丛(13.63%)>建设用地(0.96%)。

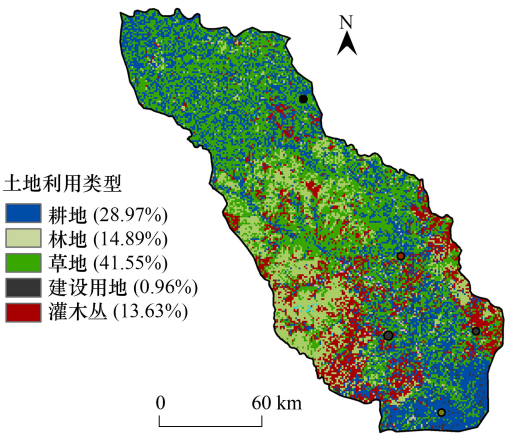

图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

1.2 数据来源

1.2.1 植被数据

NDVI 数据来源于 Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS) 提供的 NDVI3g V3.1 产品(https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/3g.v1/)。该产品数据覆盖时间范围为 1984—2018 年,时间分辨率为 15 d,空间分辨率为 0.05°。

本研究使用的全球地表卫星(GLASS)叶面积指数和蒸散发产品提供了有价值的高时空分辨率植被和能

量通量遥感信息。叶面积指数数据来源基于地面实测数据和多源遥感数据的全球地表卫星 GLASS 产品,该产品将中分辨率成像光谱仪(MODIS)MOD09A1 产品的预处理表面反射率与地面叶面积指数测量数据相关联,使用先进高分辨率辐射计(AVHRR)数据生成 1984—2018 年,时间分辨率为 8 d,空间分辨率 0.05°的长期全球叶面积指数产品(http://www.glass.umd.edu/LAI/AVHRR/)。

1.2.2　气象数据

本研究使用的气象数据来自中国气象强迫数据集(CMFD)(https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/8028b944-daaa-4511-8769-965612652c49/)。CMFD 是一套专为研究中国地表过程而开发的高时空分辨率网格近地表气象数据集,该数据集整合了多核来源的模拟和观测气象变量,为地表过程研究提供了 7 个主要的地面气象参数的网络数据集,包括 2 m 温度、降水、短波向下辐射、长波向下辐射、饱和水汽压、2 m 相对湿度和 10 m 风速,覆盖时间范围为 1979—2018 年,空间分辨率为 0.1°。为了保持气候数据和遥感数据之间分辨率的一致性,本研究采用双线性插值方法,将所有这些气象数据重新采样到 1 km 的空间分辨率。

本研究在原始数据的基础上,依据公式(1)计算近地表 2 m 风速[19]:

$$\mathrm{wind}_2 = \mathrm{wind}_{10}\frac{4.87}{\ln(67.8z-5.42)} \tag{1}$$

式中,wind_2和 wind_{10}分别代表近地面 2 m 和 10 m 风速,在此例中 $z=10$ m。

1.2.3　土地覆盖数据

本研究使用来自地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn/)的中国土地覆盖数据集[20]和 ASTER GDEM 30 m 分辨率高程数据。该产品的土地覆盖类型可将土地分为以下 9 个类型:耕地、林地、草地、水域、建设用地、裸地和灌木丛。

1.2.4　蒸散发数据

蒸散发产品利用贝叶斯模型平均方法整合来自五种不同潜热通量算法的蒸散发估计,以高精度和最小偏差提供 1km 分辨率的全球鲁棒蒸散发产品(http://www.glass.umd.edu/05D/ET)。这些产品捕获了植被动态和陆地-大气水和能量交换等关键方面,已广泛用于不同时空尺度的环境变化研究[21—22]。

1.3　研究方法

1.3.1　PT-JPL 模型

Fisher 等[23]开发的 PT-JPL 模型通过能量分布将实际蒸散发分为三部分,包括植被冠层(T)、土壤蒸发(ES)和植被冠层拦截蒸发(LE)。具体公式如下:

$$ET = E_c + E_s + E_i \tag{2}$$

$$T = (1-f_{\mathrm{wet}}) f_g f_t f_m \alpha \frac{\Delta}{\Delta+\gamma} R_{nc} \tag{3}$$

$$ES = (f_{wet} + f_{sm}(1-f_{wet}))\alpha \frac{\Delta}{\Delta+\gamma}(R_{ns}-G) \tag{4}$$

$$LE = f_{wet}\alpha \frac{\Delta}{\Delta+\gamma} R_{nc} \tag{5}$$

式中:α 和 γ 分别代表 PT 系数 1.26(无单位)和干湿常数 0.066 kPa/℃;Δ 表示饱和蒸汽压曲线斜率(kPa/℃);R_{ns}为土壤净辐射(W/m^2),可计算为:$R_{ns}=R_{ne}^{-kR_n\mathrm{LAI}}$,$kR_n$为消光系数(等于 0.6,无单位);$R_{nc}$为对冠层的净辐射(W/m^2),可表示为:$R_{nc}=R_n-R_{ns}$。

1.3.2　变化趋势分析

Theil-Sen 估算方法是通过选择经过成对点的所有线的斜率的中值来将线拟合到平面中的采样点的一种非参数统计中的稳健模型。这种估计方法可以进行有效的计算且对异常值不敏感,适用与检验时间序列的变化趋势[24]。公式如下:

$$\beta = \mathrm{Median}\left(\frac{\mathrm{NDVI}_j - \mathrm{NDVI}_i}{j-i}\right),\ 1990 \leqslant i \leqslant j \leqslant 2018 \quad (i \neq j) \tag{6}$$

式中:β 表示蒸散发的变化趋势,ET_i代表第 i 年的蒸散发值,ET_j表示为第 j 年的蒸散发值。如果 $\beta<0$,则蒸散发在该时间段内呈下降趋势;如果 $\beta>0$,则蒸散发在该时间段内呈增加趋势;如果 $\beta=0$,则表明在该时间段内蒸散发保持基本不变。

Mann-Kendall 非参数检验是一种可以判断气候序列中是否存在气候突变的气候诊断与预测技术,其优点是它既不需要样本遵循一定的分布,也不受异常值的干扰,更适用于类型变量和顺序变量[25]。公式如下:

设定 $j=1984,\ 1985,\cdots,2018$,

定义 Z 统计量为:

$$Z = \begin{cases} \dfrac{S-1}{\sqrt{s(S)}}, & S>0 \\ 0, & S=0 \\ \dfrac{S+1}{\sqrt{s(S)}}, & S<0 \end{cases} \tag{7}$$

$$S = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^{n} \mathrm{sgn}(\mathrm{NDVI}_j - \mathrm{NDVI}_i) \tag{8}$$

$$\mathrm{sgn}(ET_j - ET_i) = \begin{cases} 1 & ET_j - ET_i > 0 \\ 0 & ET_j - ET_i = 0 \\ -1 & ET_j - ET_i < 0 \end{cases} \tag{9}$$

$$s(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \tag{10}$$

在给定的显著性水平 α 下,拒绝原假设(H_0)表明存在统计学上显著的趋势,置信水平为 $1-\alpha$。相反,接受零假设意味着观察到的趋势缺乏统计意义。正 Z 值表示数据集中的增加趋势,而负 Z 值表示数据集中的减少趋势。结合 Sen 斜率估计和 Mann-Kendall 检验两种方法,可以对长时间序列下的数据进行预测估算和趋势检验,呈现出变化趋势的显著性(Slope<0, $P<0.01$)、显著减少(Slope<0, $P<0.05$)、不显著变化($P>0.05$)、显著增加(Slope>0, $P<0.05$)和极显著增加(Slope>0, $P<0.01$)。

1.3.3 偏相关分析

与简单相关相比,偏相关考虑了多个因素之间的潜在影响,并采用特定的方法对其他变量进行控制,以关注两个特定变量之间的净相关性。因此,本研究采用偏相关分析法研究蒸散发与植被以及气象因素的关系。公式如下。

$$r_{xyz} = \frac{r_{xy} - r_{xy} r_{xz}}{(1-r_{xz}^2)(1-r_{yz}^2)} \tag{11}$$

式中:x 表示为蒸散发,y 和 z 代表各种气象因子。以研究蒸散发和气温、降水的关系为例,y 表示平均气温,z 表示降水量;r_{xy}表示为蒸散发与平均气温的相关系数;r_{xz}表示为蒸散发与降水量的相关系数;r_{yz}表示为平均气温与降水量的相关系数;r_{xyz}则表示在平均气温保持不变的条件下蒸散发与降水量之间的偏相关系数。

1.3.4 多元回归分析

本研究利用多元线性回归分析计算各驱动因素对蒸散发变化的贡献,以量化不同气候与植被类型对北洛河流域蒸散发的独立影响。依据公式(12-13)对原始数据和环境变量进行归一化处理,然后对蒸散发归因进行逐步多元回归计算[26]。

$$X_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \tag{12}$$

式中,x_i为归一化变量的值;$x_{\max}$和$x_{\min}$分别表示依次数据的最大值和最小值;x_i为序列数据的原始值。

$$Y_{ET}=b_0+b_1X_1+b_2X_2+\cdots+b_iX_i+\mu \tag{13}$$

$$\mathrm{Con}_i=\frac{\hat{\beta}_k\mathrm{Slope}_{X_si}}{\mathrm{Slope}_{Y_si}}\mathrm{Slope}_{Y_ci} \tag{14}$$

其中,Y_{ET}为标准化趋势;X_i表示归一化趋势气候变量和叶面积指数;b_0和μ分别表示恒定误差和系统误差;b_1-b_i是标准的回归系数。Con_i表示每个驱动因素对蒸散发变化趋势的贡献;$\hat{\beta}_k$为各驱动因素的系数回归;Slope_{X_si}表示驱动因素的标准变化率;Slope_{Y_si}表示因变量(蒸散发)的标准化变化率;Slope_{Y_ci}表示因变量(蒸散发)的真实变化率。

各驱动变量(降水、温度、辐射、饱和水汽压、风速)的相对贡献由式计算。

$$R_i=\frac{|\mathrm{Con}_i|}{|\mathrm{Con}_1|+|\mathrm{Con}_2|+\cdots|\mathrm{Con}_i|} \tag{15}$$

其中,R_i表示相对贡献率。

2　结果与分析

2.1　蒸散发模拟验证

为了验证 PT-JPL 模型模拟蒸散发的准确性,本研究基于 GLASS 产品对模拟的蒸散发(ET)进行验证。如图 2,结果表明 PT-JPL 模拟的蒸散发与 GLASS 蒸散发之间呈现极显著正相关($R^2=0.84$,$P<0.001$),说明 PT-JPL 模型模拟蒸散发(PT-JPL ET)精度高。为了进一步评估模拟蒸散发的精度,本研究通过计算区域的水量平衡蒸散发来进行验证。水量平衡蒸散发与 PT-JPL 模型模拟蒸散发之间同样具有高度的相关性($R^2=0.81$,$P<0.001$),也证实了本研究中 PT-JPL 的蒸散发模拟结果在北洛河流域是可靠的,可以用于后续的研究与分析。

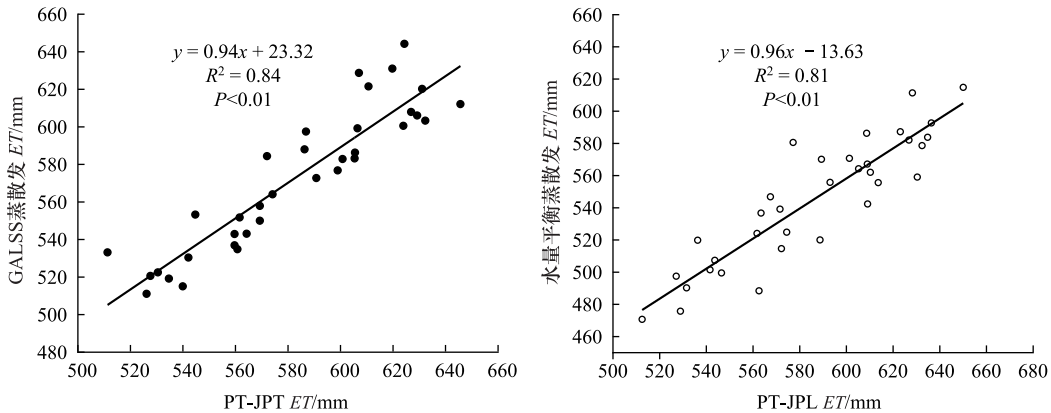

图 2　1984—2018 年北洛河流域模型模拟蒸散发与基于 GLASS 蒸散发产品的蒸散发的比较、模型模拟蒸散发与水量平衡蒸散发的比较

Fig.2　The comparison between evapotranspiration simulated by Beiluo River Basin model and evapotranspiration based on GLASS products from 1984—2018 and The comparison between evapotranspiration simulated by model and evapotranspiration based on water balance

2.2　北洛河流域植被蒸散发的年际变化特征

由图 3 可知,1984 至 2018 年间,北洛河流域的平均蒸散发量呈现波动性增长趋势,且增长趋势显著($P<0.01$),平均每年的蒸散发增加量约为 3.11 mm/a。在 1992—2015 年间,蒸散发的增长速率为 5.58 mm/a,整体增长较快;而在 1984—1993 年间,蒸散发增长较为缓慢,年均增长率为 1.85 mm/a。在 1984—2018 年间,北洛河流域年蒸散发最小值出现在 1992 年,为 511.71 mm,而年蒸散发最大值出现在 2015 年,645.52 mm。北洛河流域在 1984—2018 年间蒸散发年均趋势增长率为 3.11 mm/a($P<0.01$),这一显著增加与全球气候变暖以及 1980 年后实施的退耕还林还草政策导致的植被恢复密切相关。在不同土地利用类型中,耕地的年蒸散发

的变化量最大,约为 3.95 mm/a,林地的变化量最小,年平均蒸散发的增加量约为 1.79 mm/a,草地蒸散发的年变化速率为 3.28 mm/a,灌木丛蒸散发的年变化速率为 2.16 mm/a。结果表明,年平均蒸散发的变化量表现为:耕地>草地>灌木丛>林地。

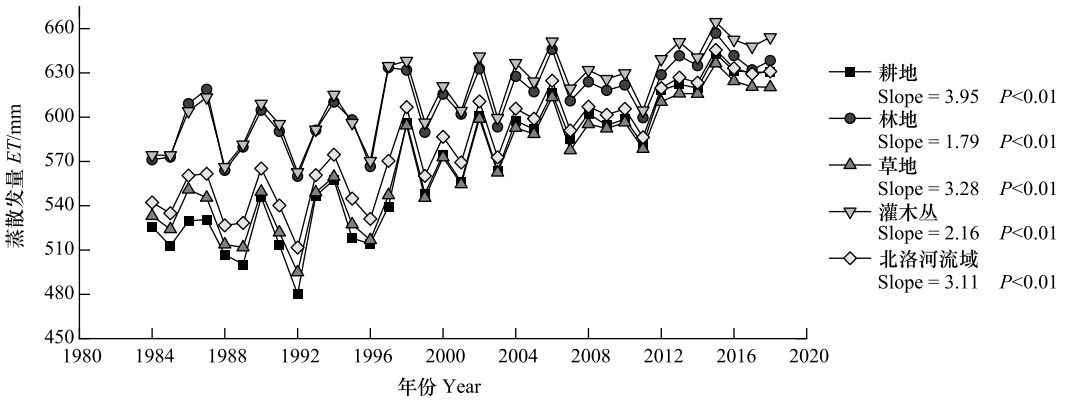

图 3 不同土地利用类型下蒸散发的年际变化

Fig.3 Inter-annual variation of evapotranspiration under different land use types

由图 4 可得,北洛河流域平均蒸散发为 540.76 mm。在四种不同植被类型中,灌木丛年平均蒸散量最高,为 616.06 mm,年平均蒸散量最低的是耕地,为569.28 mm。年平均蒸散量大小:灌木丛>林地>草地>耕地。

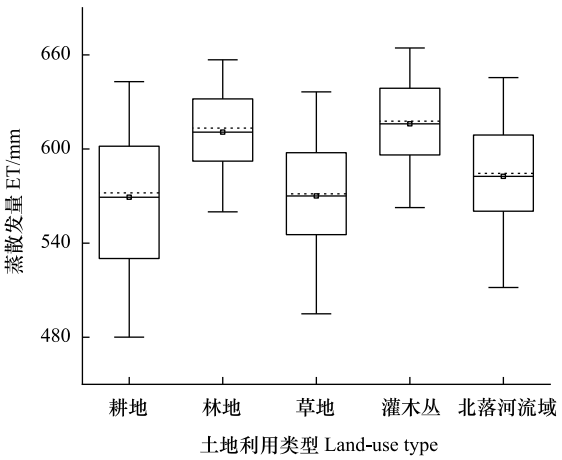

图 4 不同植被类型下蒸散发的年均值

Fig.4 Annual average evapotranspiration under different vegetation types

2.3 流域植被蒸散发的空间分布特征

结果表明,北洛河流域蒸散发多年均值在空间分布上呈现从西北向东南增大的趋势,其中高蒸发区集中在北洛河流域中下游地区(富县、黄陵县、黄龙县和白水县),而位于黄土丘陵沟壑区的定边县、吴起县、靖边县、志丹县和华池县等地区的蒸散发较低。蒸散发在北洛河流域总面积的 92.08%的区域上呈现为极显著增加的趋势,蒸散发在流域总面积的 4.04%的地区呈现为显著增加的趋势,蒸散发在流域总面积的 3.88%的地区蒸散发无显著变化(图 5)。

2.4 植被和气候因子的年际变化特征

北洛河流域植被和气候因子的时空变化规律如图 6 所示。具体而言,1984—2018 年北洛河流域年平均叶面积指数为 2.34 m^2/m^2,随着时间逐年增大,北洛河流域年叶面积指数(LAI)呈现极显著增加趋势($P<0.01$),年增加叶面积指数约为 0.02 m^2/m^2。1984—2018 年平均降水量(Pre)为 547.75 mm,随着时间逐年增大,北洛河流域年降水量呈现不显著增加趋势,年增加降水量约为 1.32 mm。总体呈缓慢增加趋势,可能是由于气候变化和人类活动导致的全球水文循环加剧,陆地表面水分循环过程发生改变[27]。1984—2018 年间,降水量最大出现在 2003 年,为 806.67 mm,而最小值出现在 1995 年,降水量为 373.41 mm。年平均气温(Temp)为 9.1℃,随着时间逐年增大,北洛河流域年平均气温呈现极显著增加趋势($P<0.01$),年增加平均气温约为 0.1℃。该趋势与全球气候变暖引起的气温上升的大趋势保持一致。1984—2018 年北洛河流域年平均净辐射(Rad)为 467.43 W/m^2,随着时间逐年增大,北洛河流域年净辐射呈现显著增加趋势($P<0.05$),年增加净辐射约为 0.29 W/m^2。1984—2018 年间,净辐射最大值出现在 1997 年,净辐射为 478.20 W/m^2。随着时间变化,北洛河流域年饱和水汽压(VPD)呈现极显著增加趋势($P<0.01$),年增加饱和水汽压约为 0.00381 MPa。

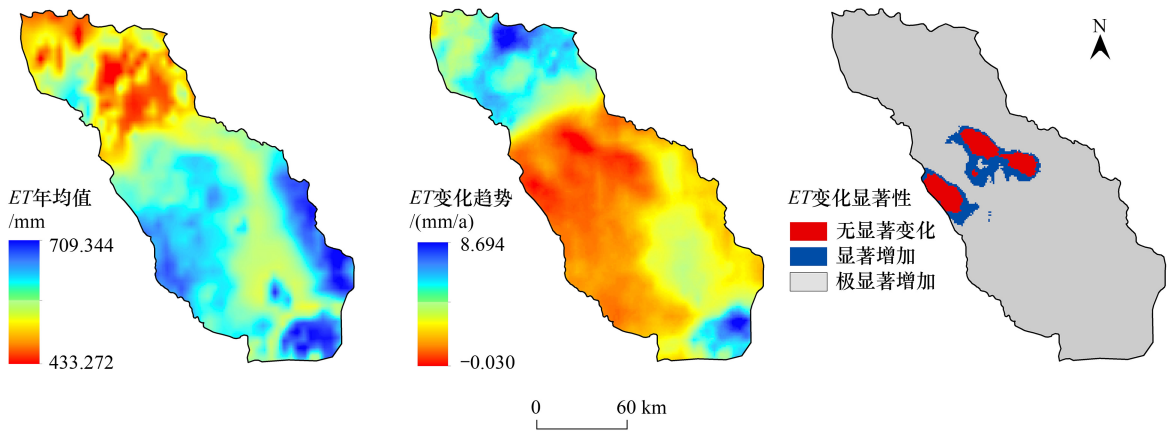

图 5　蒸散发年均值空间分布

Fig.5　Spatial distribution of annual mean evapotranspiration

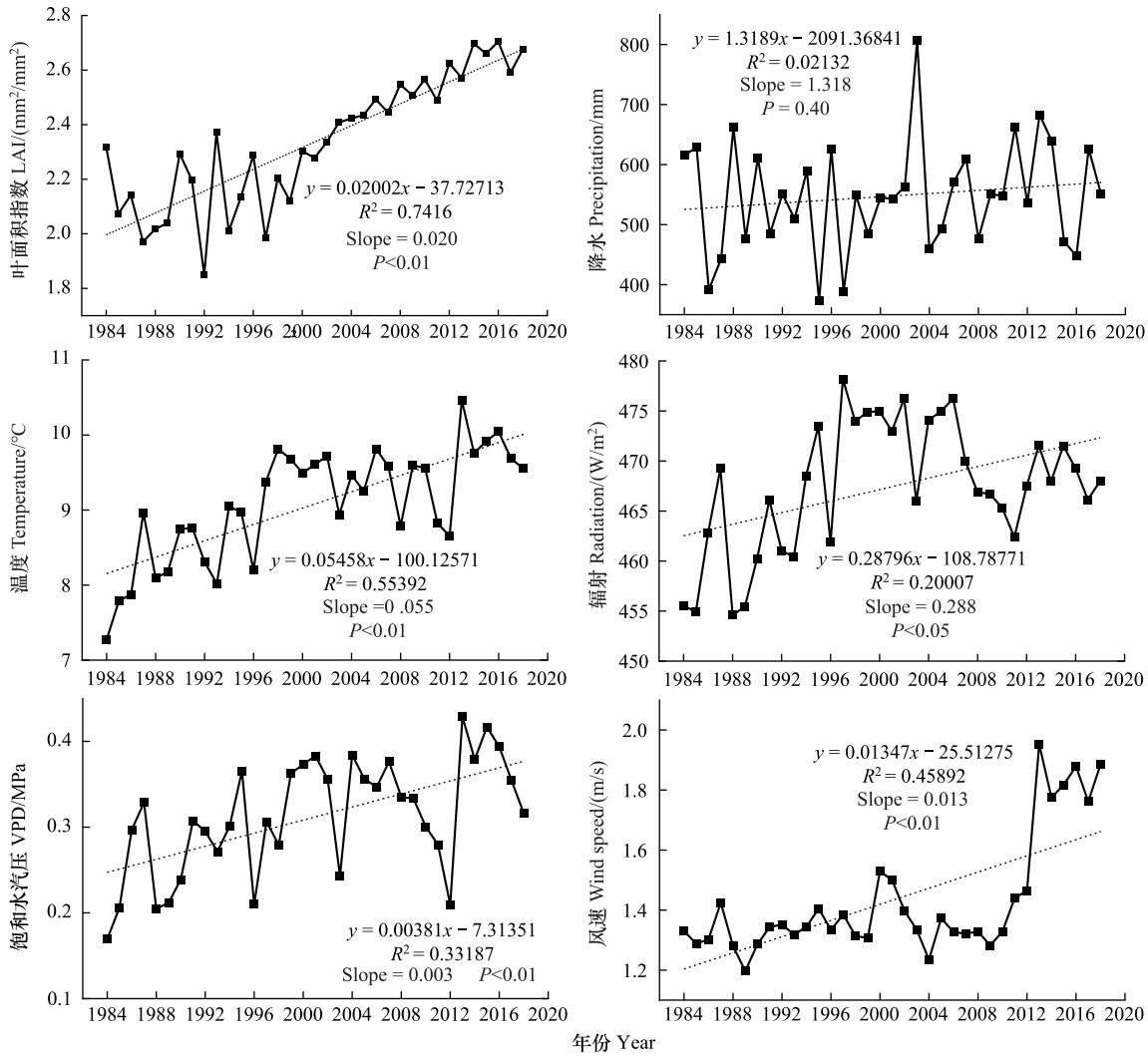

图 6　植被和气候因子的年际变化

Fig.6　Inter-annual variation of vegetation and climatic factors

1984—2018 年北洛河流域年平均风速(Wind)为 1.43 m/s,随着时间变化,北洛河流域年平均风速呈现极显著增加趋势(P<0.01),年增加风速约为 0.013 m/s。1984—2018 年间,风速最小出现在 1988 年,为 1.28 m/

s,而最大值出现在 2013 年,风速为 1.95 m/s。

2.5 植被和气候因子的空间分布特征

1984—2018 年,北洛河流域叶面积指数年变化在流域中游地区呈减小趋势,在流域上、下游地区呈极显著增加趋势。其中,北洛河流域有 1.42%的区域呈现极显著减小趋势,1.47%的区域呈现显著减小趋势,35.08%的区域无显著变化,7.45%的区域呈现显著增加的趋势,54.58%的地区叶面积指数在 1984—2018 年间呈现极显著增加趋势(图 7)。年均降水量由东南向西北递减,这与我国降水量总体变化规律(由西北向东南

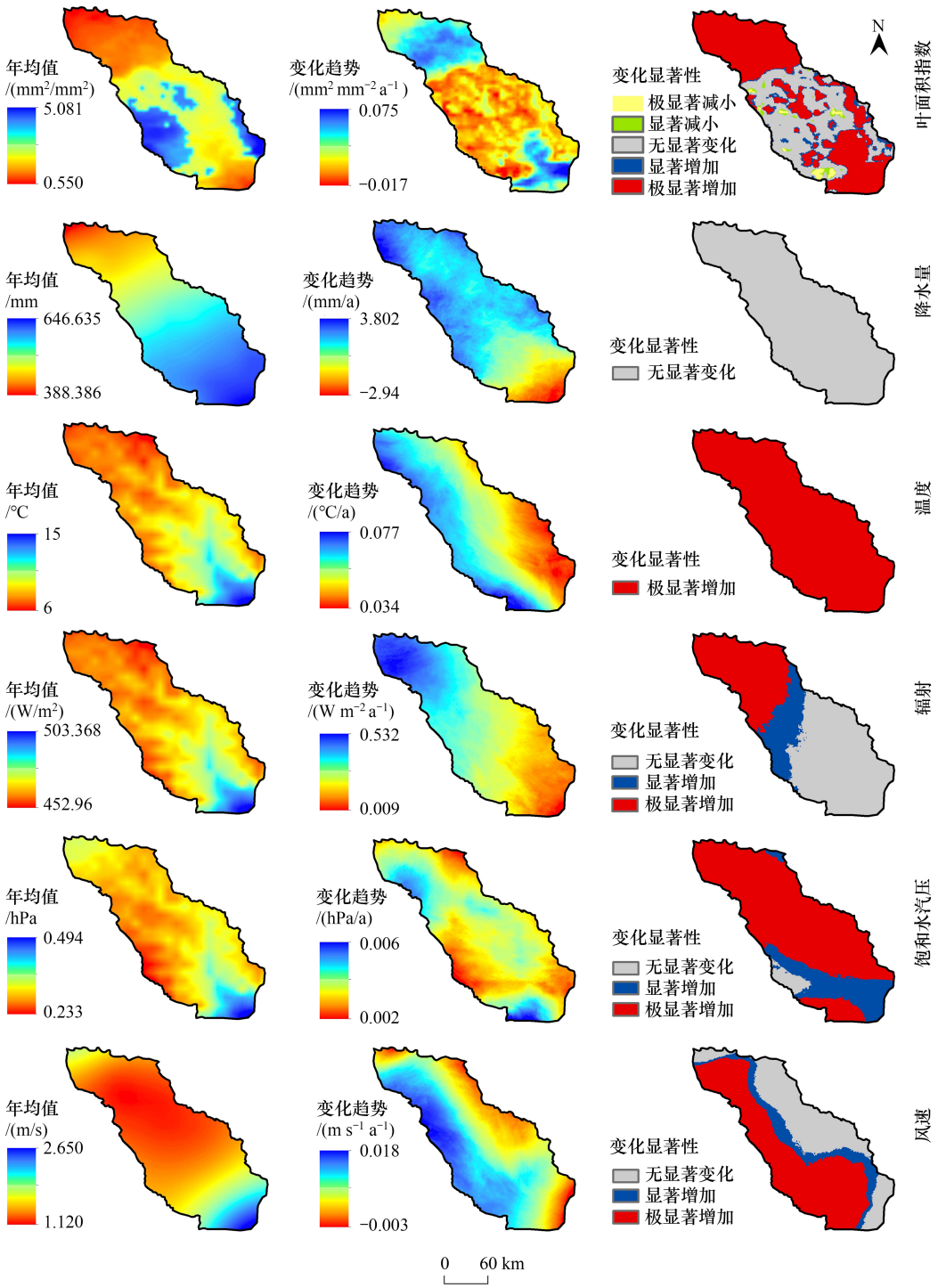

图 7 植被和气候因子的空间分布变化及显著性检验

Fig.7 Spatial distribution changes of vegetation and climatic factors and significance test

递增)保持一致。降水量年均值较低的地区位于北洛河流域上游地区,如:定边县和吴起县,年均值较高的地区位于北洛河流域下游地区,如:白水县和澄城县。流域年平均气温西北低、东南高,与降水年均值空间分布一致,即气温高的地区降水少,气温低的地区降水多。

此外,北洛河流域年均辐射西北低、东南高。北洛河流域上游地区(定边县、吴起县、志丹县和合水县等)净辐射年均值低于流域下游地区(白水县和澄城县),辐射与气温年均值空间分布一致,即气温高的地区辐射大,气温低的地区辐射小。辐射在北洛河流域总面积的 32.18%的地区呈现极显著增加的趋势,在流域总面积的 15.57%的区域呈现显著增加的趋势,在流域总面积的 52.24%的区域无显著变化。年均饱和水汽压西北低、东南高,也与气温年均值空间分布一致,其中有 3.57%的区域无显著变化,19.37%的区域呈现显著增加的趋势,77.06%的地区饱和水汽压在 1984—2018 年间呈现极显著增加趋势。该流域年均风速西北低、东南高。风速变化趋势空间分布与平均气温变化趋势空间分布特征一致,这也证实了温度是影响风速变化的主要因子之一。其中,北洛河流域有 34.8%的区域无显著变化,12.99%的区域呈现显著增加的趋势,52.21%的地区风速在 1984—2018 年间呈现极显著增加趋势。

在不同土地利用类型下,耕地中净辐射极显著增加的面积占比最少,为 39.04%;草地与灌木丛的饱和水汽压分别有 85%和 65.71%的面积极显著增加,叶面积指数分别有 1.61%和 1.83%的面积极显著减小;建设用地与其他土地利用类型极显著增加面积占比最大的影响因素不同,建设用地的叶面积指数有 76.42%的面积呈极显著增加。如图 8 所示,特别地,草地的饱和水汽压较其他土地利用类型的饱和水汽压的极显著面积占比最大,建设用地中净辐射的极显著面积占比为 3.49%,比其他土地利用类型下的净辐射面积占比小。

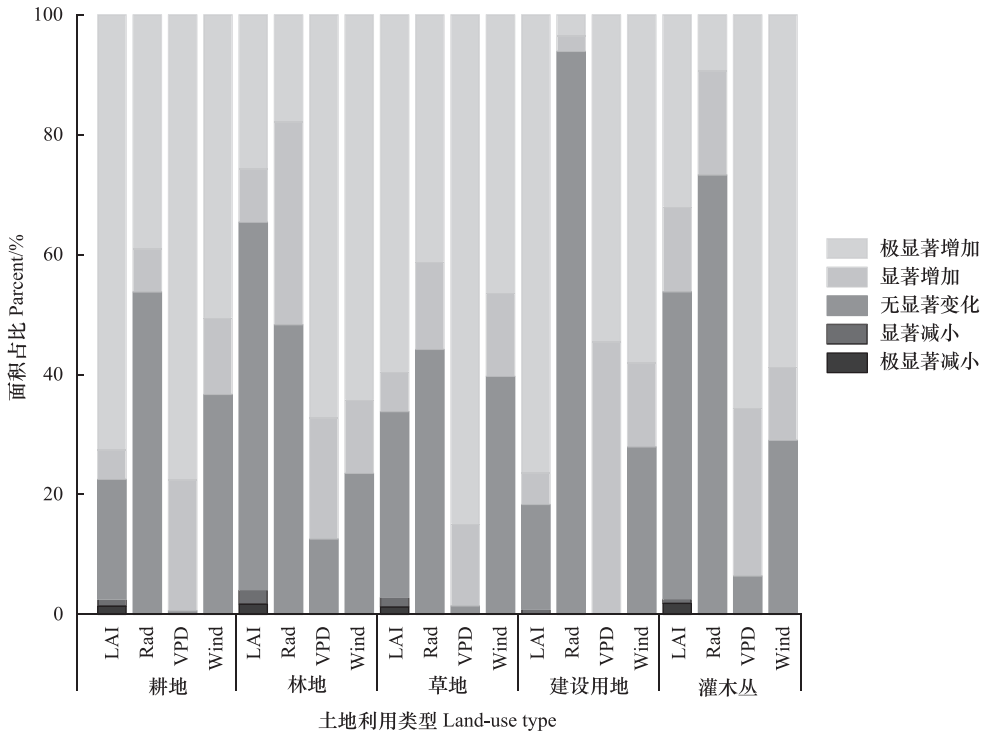

图 8　不同土地利用类型下植被和气候因子显著性变化的区域面积占比

Fig.8　Regional area proportion of significant changes of vegetation and climatic factors under different land use types

2.6　植被与气候变化对蒸散发的影响

2.6.1　蒸散发与影响因素的相关性分析

北洛河流域蒸散发和各驱动因素的相关性如图 9 所示。1984—2018 年间北洛河流域蒸散发与叶面积指数呈极显著的正相关,偏相关系数介于-0.46—0.83 之间,特别是在北洛河流域上游地区(定边县、吴起县),

偏相关系数处于 0.6 至 1.0 的范围内,呈现较强的正相关性。相对而言,北洛河流域中游地区(合水县、富县和黄陵县)的偏相关性较弱,可能的原因是这些区域原有的植被生长较为茂盛,资源丰富,导致 35 年间叶面积指数的变化较小,进而影响了蒸散发的变化量。此外,蒸散发与降水量和平均气温均呈现极显著的正相关,但降水对蒸散发的影响主要集中于北洛河流域下游地区,而平均气温对蒸散发的最大影响则位于上游地区(靖边县、吴起县),偏相关系数介于 0.4 至 0.6,表现为中等强度的正相关。由图 9 可得,1984—2018 年间北洛河流域蒸散发与净辐射、风速呈不显著的负相关,净辐射的偏相关系数在-0.69—0.18 之间,风速的偏相关系数在-0.53—0.45 之间,净辐射偏相关系数在-0.4—-0.6 之间的区域主要集中在北洛河流域中游地区东部(甘泉县南部和富县东部),呈现中等强度的负相关。风速偏相关系数在-0.2—-0.4 之间主要分布在北洛河流域东部地区,在 0—0.2 之间的区域分布在流域西部地区。1984—2018 年北洛河流域植被蒸散发与饱和水汽压呈不显著的正相关,偏相关系数在-0.74—0.61 之间。

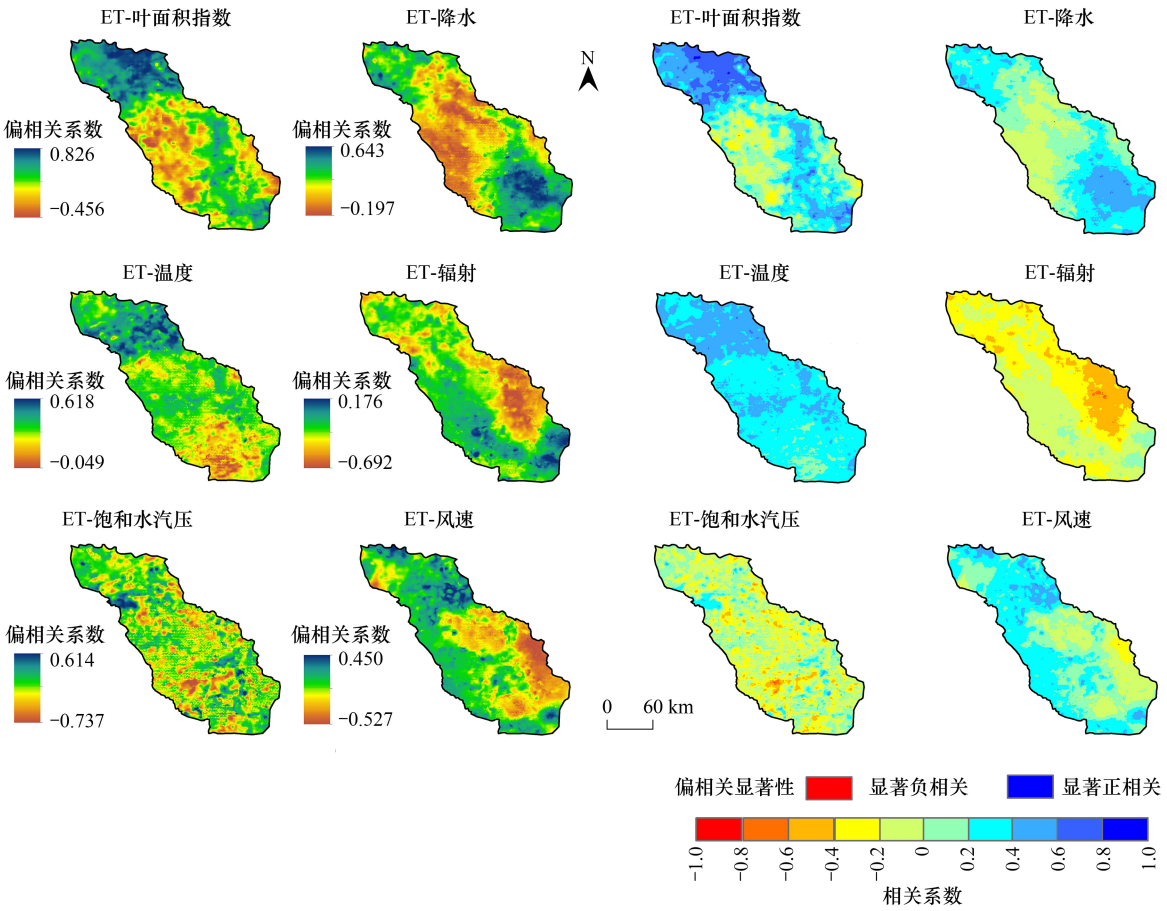

图 9 蒸散发与植被和气候因子的相关关系(叶面积指数、降水、温度、辐射、饱和水汽压和风速)

Fig.9 Evaporation and the vegetation and climatic factors of correlation (leaf area index, precipitation, temperature, radiation, saturated vapor pressure and wind speed)

2.6.2 植被和气候因子对蒸散发的贡献分析

植被(叶面积指数)与气象要素(温度、降水、辐射、饱和水汽压和风速)对北洛河流域 1984—2018 年蒸散发的贡献如图 10 所示。其中叶面积指数对蒸散发的增长贡献最大,为 1.70 mm/a,相对贡献率为 21.3%。在北洛河流域上游吴起县可以观测到较高的数值,最高可达 9.68 mm/a。降水对蒸散发的贡献最小,为-0.03 mm/a。气温是影响蒸散发的主要因子,气温使北洛河流域的蒸散发年增加了 1.05 mm/a,相对贡献率为 29.9%,在北洛河流域上游定边县可以观测到较小的数值,最低可达-8.19 mm/a。净辐射使蒸散发年平均增

加0.33 mm/a,相对贡献率为 6.2%。风速使蒸散发年平均增加 0.05 mm/a,相对贡献率为 4.9%。降水使蒸散发年减少 0.03 mm/a,相对贡献率为 1.3%。不同影响因素对流域蒸散发的相对贡献率大小:气温(29.9%)>叶面积指数(21.3%)>辐射(6.2%)>风速(4.9%)>降水(1.3%)。

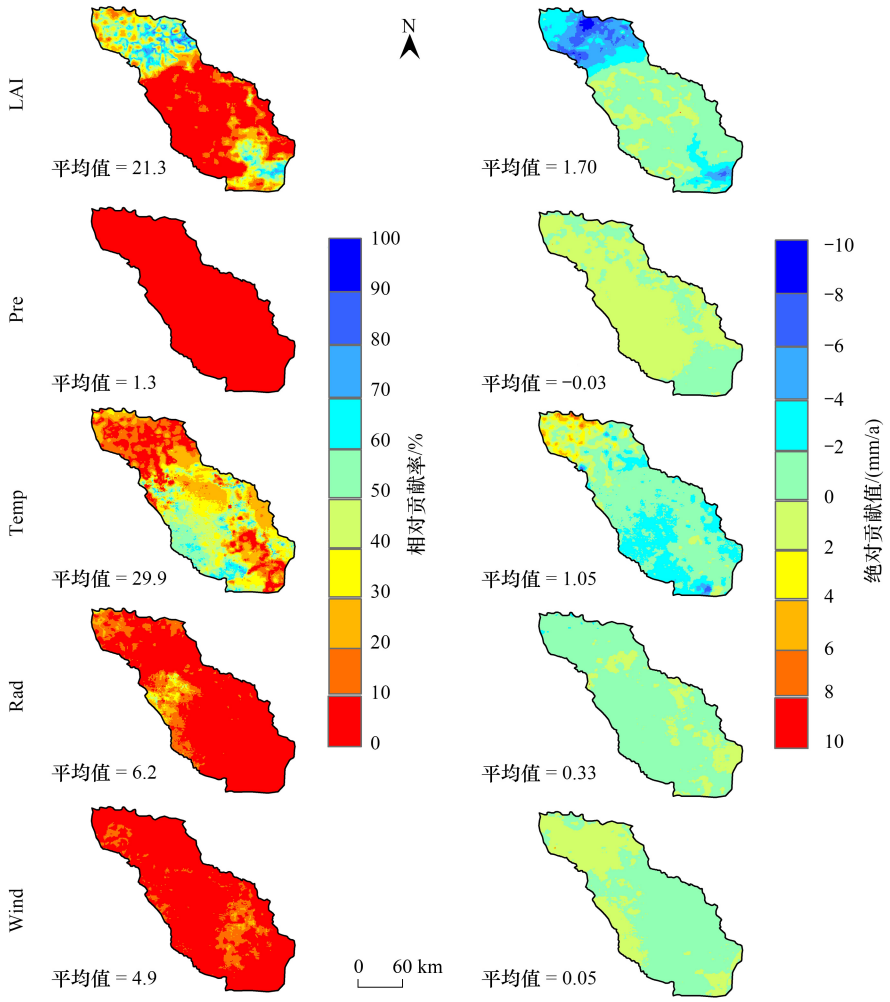

图 10　植被和气候因子对北洛河流域蒸散发的贡献

Fig.10　Contribution of vegetation and climatic factors to evapotranspiration in Beiluo River Basin

3　讨论

自 1980 年提出并实施退耕还林(草)工程以来,北洛河流域植被覆盖率逐步提升。退耕还林还草可以改善生态环境、减少流域上游水土流失、调节气候、涵养水源和增加生物多样性,但是从某种程度上,植被覆盖率增大,区域蒸散发也逐步增加,那么如何平衡植树造林与水资源利用两者的关系成为一个热门话题。

本研究得出 1984—2018 年北洛河流域蒸散发西北低于东南地区原因可能受地形地貌、气候要素和不同土地类型的影响[28]。北洛河流域西北部为黄土丘陵沟壑区,地质疏松、沟深坡陡、水土流失严重,植被覆盖率低,而流域东南部地势平坦、水土流失轻微,草深林密,水资源充沛,蒸散量大。1980 年实施退耕还林还草等生态保护工程,北洛河上游地区恰处黄土高原丘陵区,实施力度较大,因此年蒸散值较东南地区变化量大。1984—2018 年北洛河流域植被蒸散发以 3.11 mm/a 的速率极显著增加,这和郝晓慧等[18]研究所得 2001—2014 年北洛河流域蒸散发的增加趋势结论一致。然而,张宝庆等[29]结合双源蒸散发模型和遥感技术所构建出的区域尺度植被蒸散发模型研究表明,黄土高原地区蒸散发以 4.39 mm/a 速率增加,高于本研究中北洛河

流域植被蒸散发的增加速率,造成这一差异的原因可能在于北洛河流域上游地区位于黄土高原,受退耕还林还草政策影响,植被恢复效果显著,导致蒸发速率较为明显地增加。相比之下,流域中下游地区林深草茂,植被资源丰富,植被覆盖率高,原本的蒸散发值较高,且受退耕还林(草)措施影响较小,因此蒸散发速率增加并不明显,总体低于上述研究结果[30]。

本研究发现北洛河流域各植被类型分布比例草地最大,占北洛河流域总面积的 41.55%,耕地次之,再次为林地和灌木丛,而建设用地所占比例最小,为 0.96%。这一结果与邹亚东等[31]的结论有所差异,差异主要体现在耕地、草地和林地的占比上,可能是由于不同地表覆盖产品对土地类型的划分不同所造成的[32]。同一时期在退耕还林还草工程实施的影响下,北洛河流域的土地利用结构持续发生变化,草地和林地面积逐渐增加,而耕地面积逐渐减少,土地利用类型从耕地转变为林地和草地的情况较为普遍,这一趋势与易海杰[33]关于径流过程对土地利用响应机制的研究结果相一致。

从群落水平上,由于林地总生物量较高且可以有效吸收土壤深层水分用于蒸腾,所以林地年蒸散发大于其他土地利用类型的蒸散发。Jin 等[12]研究结果表明灌木的年蒸散发量高于耕地和草地是由于灌木的活跃蒸腾期比草本植物季节性生长周期长。本研究中北洛河流域不同土地利用类型年均蒸散表现为:灌木丛>林地>草地>耕地。这与邓兴耀等[34]在干旱/半干旱区总结的规律有所出入,差异主要表现在灌木丛与林地的年蒸散发大小,其可能原因是受到植被因素(叶面积指数)和气象因素,如:温度、辐射、饱和水汽压和风速等影响。北洛河流域各植被类型蒸散发年变化情况表现为:耕地>草地>灌木丛>林地。通过比较发现,四种植被类型年平均蒸散量大小排序除灌木丛和林地,与年平均蒸散变化量排序相反,出现这种情况的原因可能由于不同植被对不同环境条件的响应机制不同[35]。

由于北洛河流域没有公开共享的通量站观测数据,通量数据无法得到直接验证,即使已经采用优化改良的模型,但仍需将该模型的模拟验证与通量站的真实数据进行比对验证。本研究通过 Sen 斜率估计和 M-K 趋势检验分析了流域各影响因素与蒸散发在 1984—2018 年间的变化趋势与显著性,但缺乏在时间序列上对其未来变化趋势的预测与探究。通过偏相关分析法分析了北洛河流域蒸散发的植被与气象因素,结果得到在年际尺度上植被蒸散发与叶面积指数、降水和气温间呈极显著正相关关系,但缺乏采用通径分析探讨各变量之间的相关关系。未来可以通过 Hurst 指数分析和预测流域在时间序列上的未来变化趋势,并且基于偏相关系数,采用通径分析法探究各变量之间的关系,更深层次地揭示内在联系与影响机制,从而更加清晰控制和影响北洛河流域植被蒸散发的直接和间接因素。

4 结论

(1)1984—2018 年北洛河流域蒸散发呈现极显著增加趋势(3.11 mm/a; $P<0.01$),年均蒸散量为 540.76 mm。空间分布上呈现由西北向东南增大的趋势。

(2)北洛河流域不同植被类型年均蒸散发灌木丛最大,耕地最小。不同植被类型蒸散发年变化量由大到小依次为:耕地>草地>灌木丛>林地。

(3)对于流域植被而言,研究期间内叶面积指数呈现极显著增加趋势($0.02\ m^2\ m^{-2}\ a^{-1}$; $P<0.01$);对于气候要素而言,除降水量呈不显著增加外(1.32 mm/a);其余气候因子如气温、净辐射、饱和水汽压和风速均呈现显著增加趋势。在年际尺度上,北洛河流域蒸散发与叶面积指数、降水和气温间呈现极显著正相关,与饱和水汽压之间呈现不显著正相关,而与净辐射和风速之间呈现不显著负相关。不同驱动因子对流域蒸散发的相对贡献率大小:气温>叶面积指数>辐射>风速>降水。本研究结果对于区域水资源管理和制定水资源可持续的植被恢复策略具有重要参考价值。

参考文献(References):

[1] 魏炜, 莫崇勋. 基于遥感数据的中国东南沿海地区蒸散发时空演变特征分析. 节水灌溉, 2023(4): 9-17.

[2] Lili Y, Dingbao W. Hydrological Basis of Different Budyko Equations: The Spatial Variability of Available Water for Evaporation. Water Resources

Research, 2022, 58(2).
[3] 王远征, 马启民, 贾晓鹏. 柴达木盆地灌木林地和高寒草甸蒸散发特征研究. 高原气象, 2023, 42(3): 785-794.
[4] Rivas R, Caselles V. A simplified equation to estimate spatial reference evaporation from remote sensing-based surface temperature and local meteorological data. Remote Sensing of Environment, 2004, 93(1): 68-76.
[5] 张振宇, 刘丽娟, 李小玉. 干旱区膜下滴灌向日葵农田蒸散发特征. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(8): 1195-1204.
[6] 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. 草地学报, 2021, 29(1): 166-173.
[7] 何亮, 吕渡, 郭晋伟, 雷斯越, 贺洁, 张晓萍, 杨希华. 基于 MODIS 的北洛河流域植被盖度变化研究. 人民黄河, 2020, 42(2): 67-71+76.
[8] 王海波, 马明国. 基于遥感和 Penman-Monteith 模型的内陆河流域不同生态系统蒸散发估算. 生态学报, 2014, 34(19): 5617-5626.
[9] 杨秀芹, 王国杰, 潘欣, 张余庆. 基于 GLEAM 遥感模型的中国 1980—2011 年地表蒸散发时空变化. 农业工程学报, 2015, 31(21): 132-141.
[10] 符淑宜, 黄土高原植被覆盖与实际蒸散发时空变化规律研究. 西安: 陕西师范大学, 2020.
[11] He G H, Zhao Y, Wang J H, Gao X R, He F, Li H H, Zhai J Q, Wang Q M, Zhu Y N. Attribution analysis based on Budyko hypothesis for land evapotranspiration change in the Loess Plateau, China. Journal of Arid Land, 2019, 11(5): 939-953.
[12] Zhao J, Wei L, Yuting Y, et al. Separating Vegetation Greening and Climate Change Controls on Evapotranspiration trend over the Loess Plateau. Scientific reports, 2017, 7(1-4): 8191.
[13] Ning T, Li Z, Liu W. Vegetation dynamics and climate seasonality jointly control the interannual catchment water balance in the Loess Plateau under the Budyko framework. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21(3): 1515-1526.
[14] 王凯利, 王志慧, 肖培青, 王铁生. 气候与下垫面变化对黄土高原蒸散发变化的影响评估. 水土保持学报, 2022, 36(3): 166-172+180.
[15] 古明兴, 北洛河流域水沙演变情势分析. 水资源与水工程学报, 2008(5): 120-122.
[16] 董起广, 周维博, 刘雷, 等. 北洛河径流量变化特征分析. 人民黄河, 2014, 36(2): 20-22+29.
[17] 蒋观滔, 高鹏, 穆兴民, 等. 退耕还林(草)对北洛河上游水沙变化的影响. 水土保持研究, 2015, 22(6): 1-6.
[18] 赫晓慧, 梁冰洁, 郭恒亮, 田智慧. 基于 MOD16 的北洛河流域蒸散发空间格局演变研究. 水土保持通报, 2017, 37(1): 177-182.
[19] Zhao F B, Ma S, Wu Y P, Qiu L J, Wang W K, Lian Y Q, Chen J, Sivakumar B. The role of climate change and vegetation greening on evapotranspiration variation in the Yellow River Basin, China. Agricultural and Forest Meteorology, 2022, 316.
[20] Yang J, Huang X. The 30m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907-3925.
[21] Juan L, Zhiqiang X. Evaluation of the version 5.0 global land surface satellite (GLASS) leaf area index product derived from MODIS data. International Journal of Remote Sensing, 2020, 41(23): 9140-9160.
[22] Xiao Z Q, Liang S L, Wang J D, Xiang Y, Zhao X, Song J L. Long-Time-Series Global Land Surface Satellite Leaf Area Index Product Derived From MODIS and AVHRR Surface Reflectance. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(9): 5301-5318.
[23] Fisher J B, Tu K P, Baldocchi D D. Global estimates of the land-atmosphere water flux based on monthly AVHRR and ISLSCP-II data, validated at 16 FLUXNET sites. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(3): 901-919.
[24] 桑国庆, 唐志光, 邓刚, 管庆丹, 陈浩, 李朝奎, 王晓茹. 基于 MODIS NDVI 时序数据的湖南省植被变化研究. 长江流域资源与环境, 2021, 30(5): 1100-1109.
[25] 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 刘颖慧, 王文杰, 陶亮亮, 郑华, 刘孝富. 2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化. 生态学报, 2013, 33(24): 7798-7806.
[26] Liu Y Y, Lin Z Q, Wang Z J, Chen X, Han P D, Wang B, Wang Z Q, Wen Z M, Shi H J, Zhang Z X, Zhang W. Discriminating the impacts of vegetation greening and climate change on the changes in evapotranspiration and transpiration fraction over the Yellow River Basin. Science of The Total Environment, 2023, 904: 166926.
[27] 王银龙, 高瑞忠, 房丽晶, 张旭, 李宝群. 内蒙古草原内陆河流域水文循环要素时空演变及驱动因素. 水土保持研究, 2024, 31(5): 279-287.
[28] 高建伦, 王晶晶, 白玥, 申永丽, 马锋, 高娟, 李超, 魏孝荣. 退耕还林工程对陕西省气候的影响及其驱动机制. 中国: 水土保持研究, 2024: 1-8.
[29] 张宝庆, 邵蕊, 赵西宁, 吴普特. 大规模植被恢复对黄土高原生态水文过程的影响. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(3): 594-606.
[30] 尼格娜热·阿曼太, 孟媛媛, 唐志尧. 人工林种植和生长对黄土高原生态系统固碳和水文调节功能的影响——基于遥感时序分析证据. 生态学报, 2024, 44(16): 7322-7333.
[31] 邹亚东, 何亮, 张晓萍, 马宝有, 王浩嘉, 王妙倩, 薛帆, 贺洁. 基于 GEE 数据平台的北洛河流域 1970—2019 年土地利用结构变化特征. 水土保持通报, 2021, 41(6): 209-219.
[32] 白萌, 莫淑红, 莫兴国, et al. 退耕还林背景下黄土高原蒸散量时空演变特征及归因. 生态学报, 2023;43(20):8344-8358.
[33] 易海杰, 黄土高原北洛河流域径流过程对土地利用/覆被变化的响应及模拟预测. 北京: 中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2023.
[34] 邓兴耀, 刘洋, 刘志辉, 姚俊强. 中国西北干旱区蒸散发时空动态特征. 生态学报, 2017, 37(9): 2994-3008.
[35] 李蓝君. 黄土高原沟壑区典型植被作用下水平衡要素及水相关生态服务的变化机理研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.