

doi: 10.12029/gc20210506

林楠, 姜然哲, 刘强, 郭晓东, 杨航, 陈思. 2021. 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, 48(5): 1392–1407.

Lin Nan, Jiang Ranzhe, Liu Qiang, Guo Xiaodong, Yang Hang, Chen Si. 2021. Spatiotemporal characteristics and driving factors of surface evapotranspiration in Sanjiang Plain in recent 20 years [J]. *Geology in China*, 48(5): 1392–1407(in Chinese with English abstract).

近 20 年三江平原地表蒸散发时空特征及驱动因素分析

林楠¹, 姜然哲¹, 刘强², 郭晓东², 杨航¹, 陈思^{1,3}

(1. 吉林建筑大学测绘与勘查工程学院, 吉林 长春 130118; 2. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034; 3. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130102)

摘要:分析地表蒸散发时空变化规律及驱动因素,对促进区域水资源的科学分配、做好生态系统水源保护具有重要意义。本文基于MOD16蒸散发遥感数据产品,采用趋势分析及显著性检验法,深入分析了近20年三江平原地表蒸散量的时空变化特征,根据Penman–Monteith公式选取与地表蒸散量(ET)相关的驱动因子,分析各驱动因子对地表蒸散量变化的影响,并构建岭回归统计模型,分析研究地表蒸散量变化的主要驱动因子及其相对贡献率。结果表明:近20年三江平原地表蒸散发(ET)年际起伏特征明显,整体呈上升趋势;研究区内91.53%的地区ET呈增加趋势,且ET分布的地域差异逐年缩小;年内ET呈单峰型周期性变化,季节差异性明显;研究区坡度对ET有正向影响,高程和风速对ET有负向影响;气温、日照时数、降水量及NDVI与ET均呈正相关性,其中降水量与ET相关性最为显著;构建岭回归驱动分析模型的决定系数 R^2 为0.823,能够有效解释各驱动因素与ET的关系。模型计算结果表明:降水量和植被覆盖度对三江平原地表蒸散量影响较大,是影响地表蒸散量变化的主要驱动力。

关键词:地表蒸散发;时空特征;岭回归;驱动力分析;地质调查工程;三江平原

中图分类号:TV213.1 文献标志码:A 文章编号:1000–3657(2021)05–1392–16

Spatiotemporal characteristics and driving factors of surface evapotranspiration in Sanjiang Plain in recent 20 years

LIN Nan¹, JIANG Ranzhe¹, LIU Qiang², GUO Xiaodong², YANG Hang¹, CHEN Si^{1,3}

(1. School of Surveying and Surveying Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, Jilin, China; 2. Shenyang Geological Survey Center, China Geological Survey, Shenyang 110034, Liaoning, China; 3. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, Jilin, China)

Abstract: It is of great significance for analyzing the spatiotemporal variation law of surface evapotranspiration and its driving factors to promote the scientific allocation of regional water resources and to do a good job of ecological water source protection. Based on MOD16 ET remote sensing data, trend analysis and significance test method were adopted to analyze the spatial–temporal variation characteristics of surface evapotranspiration in Sanjiang Plain in recent 20 years. According to Penman–Monteith formula, driving factors related to surface evapotranspiration (ET) were selected to analyze the influence of driving factors on the change of

收稿日期:2021–04–13; 改回日期:2021–06–15

基金项目:中国地质调查局项目(DD20190340)和国家自然科学基金项目(41702357)联合资助。

作者简介:林楠,男,1984年生,博士,副教授,主要从事3S技术集成应用、生态环境与矿产资源评价研究;E-mail:linnanzc@126.com。

surface evapotranspiration. Ridge regression statistical model was built to analyze the main driving factors of evapotranspiration change and their relative contribution rates. The results show that the interannual fluctuation characteristics of surface evapotranspiration (*ET*) in the Sanjiang Plain were obvious in recent 20 years, and the overall trend of *ET* was increasing. *ET* in 91.53% of the study area shows an increasing trend, and the regional differences of *ET* distribution decreased year by year. The annual *ET* shows unimodal periodical variation, and the seasonal difference is obvious. Slope in the study area has a positive effect on *ET*, while elevation and wind speed have a negative effect. Temperature, sunshine duration, precipitation and *NDVI* are positively correlated with *ET*, and precipitation has the most significant correlation with *ET*. The determination coefficient R^2 of ridge regression driving analysis model is 0.823, which can effectively explain the relationship between various driving factors and *ET*. The results of model calculation show that precipitation and vegetation coverage have a great influence on the surface evapotranspiration in Sanjiang Plain and are the main driving forces for the change of surface evapotranspiration.

Key words: surface evapotranspiration; spatiotemporal characteristics; ridge regression; driving force analysis; geological survey engineering; Sanjiang Plain

About the first author: LIN Nan, male, born in 1984, associate professor, Ph D, engaged in 3S technology integration application, ecological environment and mineral resources evaluation; E-mail: linnanzc@126.com.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey(No.DD20190340) and National Natural Science Foundation of China(No. 41702357).

1 引言

地表蒸散发(Evapotranspiration, *ET*)是指水分从地表以气态进入大气的过程(Shukla et al., 1982; Jung et al., 2010; Sharma et al., 2016),包括地表土壤水分的蒸发和植物体内水分的蒸腾(王桐等, 2019),是土壤—植被—大气系统中能量、水分交换的主要途径(Nishida et al., 2003; 徐力刚等, 2013; Dong et al., 2015),也是全球气候变化和陆内水循环的重要参数(位贺杰等, 2015; 黄葵等, 2019),其变化直接影响着地区的水资源及生态状况(王莺等, 2016)。三江平原是中国重要的商品粮生产基地,每年农业灌溉用水量占三江平原总用水量的90%以上(姜秋香等, 2020; 杨佳佳等, 2020)。大规模的农业灌溉使得地下水位持续下降,严重威胁周边湿地的安全及农业可持续发展(刘伟朋等, 2021)。同时“三江连通”等一大批河湖连通工程的实施,改变了三江平原原有的水资源空间分布格局,为农业水土资源的高效利用带来新挑战。地表蒸散发作为水资源循环的重要途径,对区域水资源及水文生态均产生重要影响(杨秀芹等, 2015; 刘国栋等, 2021),因此了解区域蒸散量的时空格局变化,探究自然条件对地表蒸散量的影响,对促进区域水资源的科学分配、做好生态系统水源保护以及提高水资源利用效率等具有重要意义。

传统的蒸散发计算是基于点位观测尺度,利用蒸发皿、蒸渗仪、通量塔等仪器获取地球下垫面的*ET*,难以得到区域尺度的地表蒸散量(蒙雨等, 2020)。近年来,遥感技术凭借其覆盖范围广、时效性和周期性等优势,成为准确估算区域尺度蒸散量的有效手段(胡猛等, 2013),使得长时间序列、大区域尺度的地表蒸散发研究得以实现(刘春雨等, 2011; 陈少丹等, 2019; 刘静等, 2020)。王焕等(2020)基于2000—2014年的MOD16产品结合气象数据,运用相关性分析法,分析了贵州省*ET*时空变化特征及其与气象因子的关系;温媛媛等(2020)运用变异系数法、Sen趋势度法等研究了山西省2000—2014年地表蒸散发、潜在蒸散发的时空特征及影响因素;刘素华等(2016)对比分析了恒定蒸发比法和作物系数法等5种日尺度*ET*估算方法;冯飞等(2015)分析了三江平原2000—2014年地表蒸散量的时空变化状况,探讨了不同土地利用类型对地表蒸散量的影响。目前,学者们对蒸散发研究多集中于模型估算、时空变化特征及影响因素相关性分析等方面(王海波等, 2014; 张宝忠等, 2015; 邓兴耀等, 2017; 张永强等, 2021),而基于统计回归模型,从地形条件、气象因子等多个方面综合分析影响地表蒸散发量变化因素的研究尚不多见。本文以MOD16遥感数据产品为数据源,基于GIS软件平台分析研究2000—2019年三江平原地表蒸散量的时

空变化特征和演变规律,分别选取直接影响因素数据(风速、温度、日照时数、降水量和植被覆盖度)和间接影响因素(高程、坡度)共7个影响因子,构建岭回归统计分析模型,研究各驱动因素与地表蒸散量的相关关系和影响地表蒸散量变化的主要驱动力因素,为三江平原的水文生态保护和水资源的合理利用提供科学依据。

2 研究区概况

三江平原(129°30'E~135°05'E, 43°50'N~48°40'N)地处黑龙江省东北部,行政区域包括佳木斯市、鹤岗市、双鸭山市、七台河市和鸡西市等所属的23个县,总面积约10.89万km²(杜国明等,2019)。研究区内海拔为34~1100m,由西南向东北倾斜,地貌广阔平坦,土壤肥沃,以大豆、玉米和水稻为主要农作物(图1)。研究区内水资源丰富,黑龙江、乌苏里江和松花江3条大江汇流于此,多年平均水资源总量197.7亿m³(姜秋香等,2020)。研究区属温带湿润、半湿润大陆季风性气候,全年日照时数为2400~2500h,年均气温1~4℃(史晓亮等,2020),降水集中在夏秋季节,雨水径流缓慢,以及季节性冻融的黏重土质,促使地表长期过湿,积水过多,形成了约240万hm²的沼泽水体和沼泽化植被,是中国最大的沼泽分布区之一。

3 数据来源与方法

3.1 数据来源及预处理

3.1.1 地表蒸散发量数据

MOD16A2/A3全球陆地蒸散发产品是Monteith等基于Penman-Monteith公式计算全球表面陆地蒸散发量而形成的遥感影像数据集(Mu et al., 2011),主要包括实际地表蒸散发(ET)、潜在地表蒸散发(PET)、潜热通量(LE)和潜在热通量(PLE),空间分辨率为500m,时间分辨率有8d合成与年合成两种尺度。由于MOD16蒸散发产品采用叶面积指数(LAI)间接反映土壤水分含量,因此在植被稀疏地区、水域、沙漠以及城市建筑区无数据。Penman-Monteith计算公式为:

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

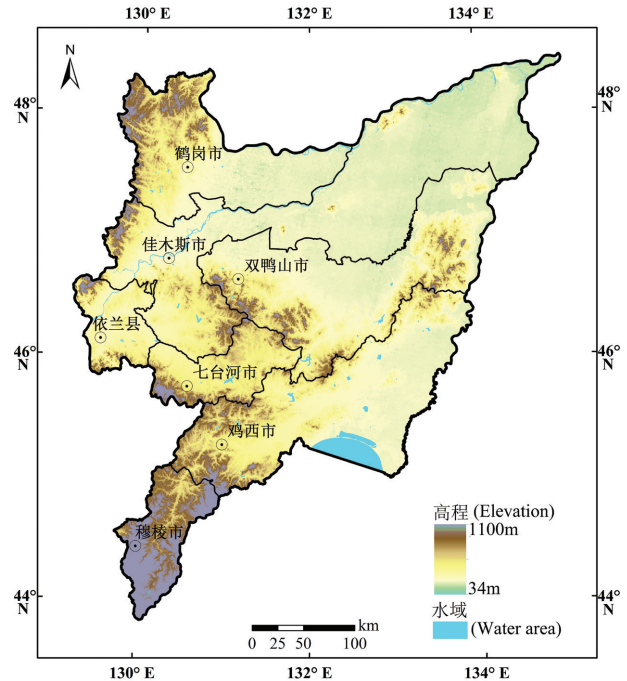


图1 研究区概况图

Fig.1 Survey map of the study area

式中: ET_0 为参考作物蒸发量(mm/d); Δ 为饱和水汽压曲线斜率(kPa/°C); R_n 为地表净辐射通量(MJ/(m²·d)); G 为土壤热通量(MJ/(m²·d)); T 为2m高处平均温度(°C); γ 为干湿表常数0.0646(kPa/°C); u_2 为2m高处风速(m/s); e_a 和 e_d 分别为饱和水汽压与实际水汽压(kPa)。

3.1.2 驱动因素分析数据

通过分析Penman-Monteith计算公式中各参数含义,结合研究区数据收集情况,选取风速、温度、降水量、日照时数与植被覆盖度作为影响地表蒸散发的直接影响因素,选取高程和坡度作为影响地表蒸散发变化的间接影响因素,主要包括:MOD13A3植被归一化指数数据、ASTER DEM地面数字高程数据和气象观测台站数据。MOD13A3全球陆地植被指数产品,内容为栅格归一化植被指数(NDVI)和增强型植被指数(EVI),该产品在计算前经过表面的双向反射率大气校正,除去水、云、重气溶胶和云影的影响,吸收全部16天覆盖全月的1km分辨率产品,本次研究选用2000—2019年8d合成、年合成的ET数据及月合成NDVI数据;ASTER DEM数据来源于地理空间数据云平台,空间分辨率为30m;

选取的气象数据为分布在三江平原内部及周边地区的21个气象站点的2000—2019年的风速(m/s)气温(℃)、日照时数(h)和降水量(mm)4种气象观测台站数据资料,数据来源于国家气象信息中心的中国地面气候资料的月值数据集(表1)。

基于GIS软件平台,将MOD16A2数据的时间分辨率从8 d转换为30 d,再对各驱动因素分别进行投影变换、空间插值、拼接、裁剪等数据预处理,并将各驱动因素以MOD16数据空间分辨率为基准,统一重采样为500 m,构建多源空间数据集。

3.2 研究方法

3.2.1 趋势分析

在研究蒸散发变化趋势时,学者们大多采用最小二乘线性回归法,通过计算回归方程的斜率,反应研究时段内的ET整体变化的线性趋势,当样品点较少时,该方法极易受噪声影响,本次研究采用Theil-sen Median趋势度逐像元分析ET的变化趋势(袁丽华等,2013),Sen趋势度分析以Median为中位数函数,对于测量误差和离群数据不敏感,能够较好的减少噪声的影响(方利等,2017)。Sen趋势度(β)计算公式:

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{ET_j - ET_i}{j - i} \right), j > i \quad (2)$$

式中:j和i为时间序数,ET_j和ET_i分别表示每个像元第j年和第i年的ET值。β表示变化趋势,β>0表示呈上升趋势,反之呈下降趋势。

3.2.2 显著性检验

研究中采用Mann-Kendall方法逐像元对Sen趋势度进行显著性分析,该方法不需要序列数据服从正态分布和线性趋势(蔡博峰等,2009),并且不受少数缺失值和异常值的干扰,在长时间序列数据的趋势显著性检验中应用广泛(田义超等,2015),

其统计检验方法如下:对于时间序列ET=(ET₁, ET₂, ..., ET_n),定义标准化检验通量Z:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, S > 0 \\ 0, S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(ET_j - ET_i) \quad (4)$$

$$\text{sgn}(ET_j - ET_i) = \begin{cases} 1, ET_j - ET_i > 0 \\ 0, ET_j - ET_i = 0 \\ -1, ET_j - ET_i < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{Var}(s) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (6)$$

式中:n为时间序列长度,定义α为显著性检验水平,Z_{(1-α)/2}为标准正态方差,当|Z| > Z_{(1-α)/2}时,则表示时间序列ET在α水平上存在显著变化。

3.2.3 相关性分析

采用Pearson相关系数,进行三江平原地表蒸散发与各气象因子、植被归一化指数(NDVI)间的相关性分析(范建忠等,2014),计算公式:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

式中:n为时间序列长度;i为年数x_i,y_i分别为x,y两个因子在第i年的值;̄x, ̄y分别为两个因子的n年平均值。

3.2.4 岭回归分析

岭回归是一种用于多重共线性数据分析的有偏估计回归方法(杨楠,2004),以损失部分信息或降低拟合精度为代价,舍弃了最小二乘法的无偏性,使得到的估计结果更加稳定,均方误差更小(张智韬等,2018;王海峰等,2018)。其原理为:当自变

表1 研究数据来源

Table 1 Introduction of research data sources

数据名称	数据来源	数据内容	时间分辨率	空间分辨率
MOD16A2	https://earthexplorer.usgs.gov/	实际地表蒸散发(ET)	8 d	500 m
MOD16A3	https://earthexplorer.usgs.gov/	实际地表蒸散发(ET)	年	500 m
MOD13A3	https://earthexplorer.usgs.gov/	植被归一化指数	月	1 km
DEM	地理空间数据云平台 http://www.gscloud.cn/	地面数字高程	-	30 m
气象数据	国家气象信息中心 http://www.nmic.cn/	气温;日照时数;降水量;风速	月	台站

量存在多重共线性时,即数学表示为 $|X'X| \approx 0$, 在相关矩阵 $X'X$ 的基础上加一个常数矩阵 $kI(k > 0)$, 使 $X'X+kI$ 接近奇异的程度大大降低, 即 $X'X+kI=0$ 的概率比 $X'X=0$ 的概率小很多, 从而使得均方误差更小, 设岭回归为:

$$\hat{\beta}(k) = (X'X + kI)^{-1} X'Y \quad (8)$$

式中: k 为岭参数, 其值不是唯一确定的, 所得到的岭参数是回归参数 β 的一个估计族, 理论上存在最优值。判断标准为, 通过岭迹图观察各回归系数的岭估计达到基本稳定, 选取最小 k 值作为岭参数, 得到回归方程为:

$$y_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_{i1} + \hat{\beta}_2 x_{i2} + \dots + \hat{\beta}_k x_{ik} \quad (9)$$

对 y_i 和 x_i 进行标准化处理, $z_y = \frac{y_i - \bar{y}}{\hat{\sigma}_y}$, $z_{xj} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\hat{\sigma}_j}$, 得到标准化方程为:

$$\hat{z}_y = \hat{b}_1 z_{x1} + \hat{b}_2 z_{x2} + \dots + \hat{b}_k z_{xk} \quad (10)$$

再由式(11)计算各驱动因子对 ET 的相对贡献率。

$$C_h = \frac{\hat{b}_h}{|\hat{b}_1| + |\hat{b}_2| + \dots + |\hat{b}_k|} \quad (11)$$

式中, C_h 为某一驱动因子对 ET 的相对贡献率; \hat{b}_k 为标准化方程中各驱动因子的系数, 其绝对值表示各驱动因子对 ET 的影响程度, 符号代表对 ET 的正负影响。

4 结果与分析

4.1 近20年三江平原 ET 时空变化特征

4.1.1 年际变化特征

利用2000—2019年三江平原MOD16地表蒸散量栅格数据, 统计分析20年 ET 均值的空间分布特征(图2), 并计算各年 ET 均值及其距平均值相对变化率(图3)。由图2可知, 近20年 ET 均值范围在320.88~833.36 mm, 地域差异显著, 南部、西北部及中部部分地区 ET 均值较高, 并且中部及中东部地区区域状边缘 ET 均值明显偏高, 其余地区 ET 均值较低。三江平原 ET 年际变化特征如图3所示, 2000—2019年研究区 ET 年际起伏明显, 整体呈中间年份高而两端年份低的特点, ET 最小值出现在2003年, 为475.91 mm, 最大值为2017年的586.87 mm, 相差110.96 mm。研究时段内, ET 年均值为544.03 mm, 相对年平均值变化率波动明显, 有13个年份 ET 值

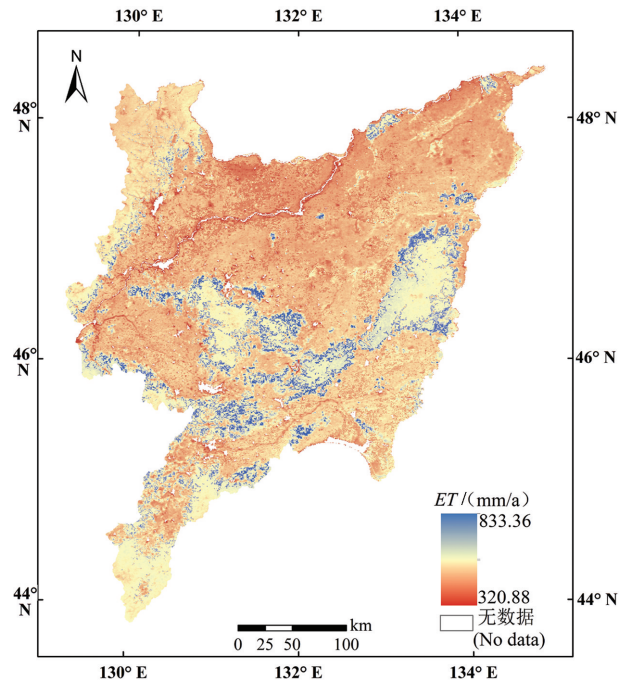


图2 近20年三江平原 ET 均值空间分布图
Fig.2 Spatial distribution of ET mean value in Sanjiang Plain in recent 20 years

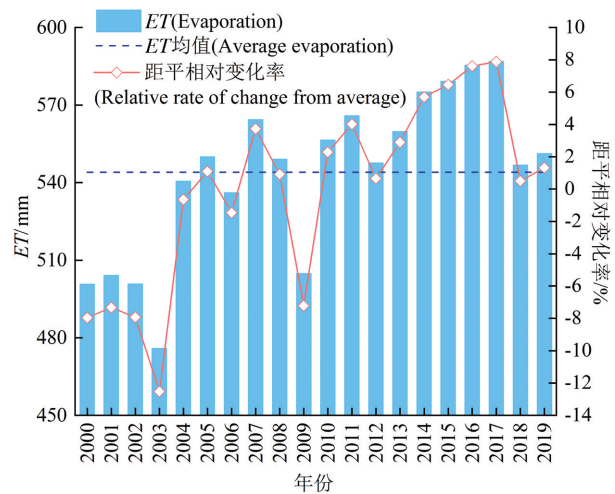


图3 近20年三江平原 ET 年际变化趋势图
Fig.3 Interannual variation trend of ET in Sanjiang Plain in recent 20 years

高于年均水平, 变化趋势为2002—2003年、2008—2009年及2017—2018年 ET 值急剧减少, 其余年份变化平缓且整体呈上升趋势, 到2019年 ET 恢复至平均水平。

基于2000—2019年三江平原MOD16A3栅格

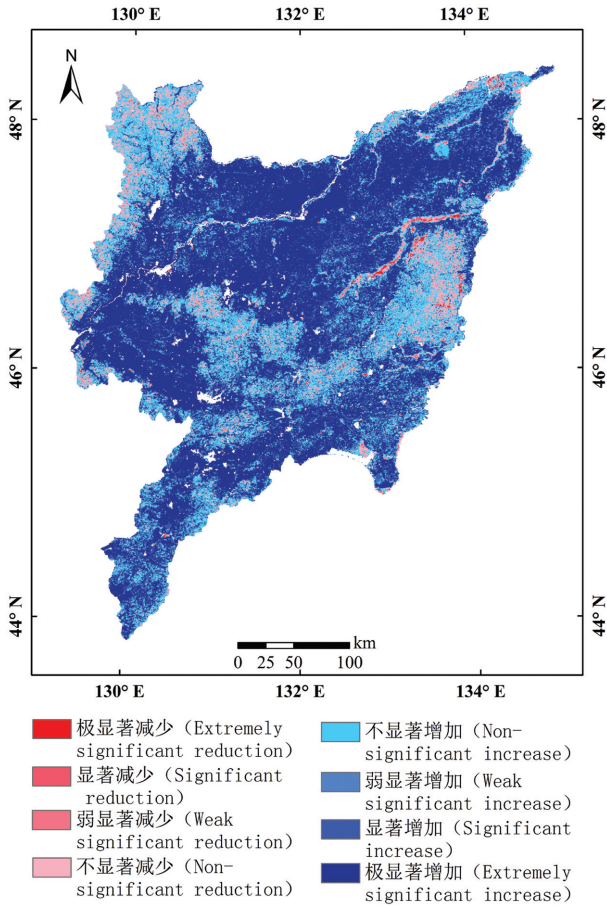


图4 近20年三江平原ET变化趋势空间分布图
Fig.4 Spatial distribution map of ET variation trend in Sanjiang Plain in recent 20 years

数据,利用Theil-sen Median趋势度分析ET的变化趋势,采用Mann-Kendall方法对Sen趋势度进行显著性分析,定义 α 为显著性检验水平,当 $\alpha=0.1$ 、0.05、0.01时,即 $|Z| > 1.645$ 、1.96、2.576时,表示研究序列分别通过了置信度为90%、95%和99%的显著性检验;其对应的显著性分别为弱显著、显著和极显著;当 $|Z| \leq 1.645$ 时,表示该研究序列未通过置信度为90%的显著性检验,即不显著变化。从近20年三江平原ET变化趋势的空间分布来看(图4),绝大部分地区呈增加趋势,占研究区总面积的91.53%,仅8.47%的地区出现减少趋势。三江平原西北部、东北部与西南部边际、中部及中东部地区ET增加趋势表现为弱显著或不显著,分别为研究区面积的5.38%和21.89%,并出现零星分布的减少趋势,其中不显著减少所占比例最大为7.57%,极显著减少所

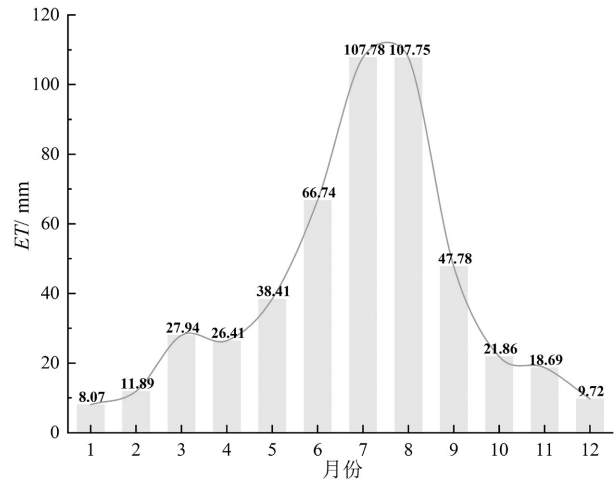


图5 近20年三江平原ET月均值变化趋势图
Fig.5 Change trend of monthly mean ET in Sanjiang Plain in recent 20 years

占比例最小仅为0.2%,其余地区ET呈显著或极显著增加趋势,分别占13.75%和50.61%。从近20年研究区ET均值空间分布和变化趋势的分布格局来看,近20年ET年均值较高地区ET增加趋势缓慢,并且少部分地区出现减少趋势,而年均ET低值区呈明显增加趋势,使得ET均值分布的地域差异逐渐缩小。

4.1.2 年内变化特征

利用MOD16地表蒸散量栅格数据,统计分析三江平原2000—2019年ET月均值变化趋势(图5),研究区近20年月平均ET在8.07~107.78 mm,呈单峰型变化,3—7月为上升区,8—11月为下降区,高峰出现在7—8月,分别为107.78 mm和107.75 mm,低值区为12月至次年2月,月平均值仅为10 mm左右,且波动不明显。

季节差异性为ET年内变化的重要特征,利用2000—2019年三江平原MOD16A2数据,统计计算各季节蒸散量均值,得到20年研究区季节平均ET分布情况(图6),研究区夏季ET均值为282.27 mm,为一年中ET最高的季节。其次为春季、秋季,冬季,分别为92.76 mm、88.33 mm和29.68 mm。春季、夏季与秋季ET的空间分布大致相同,从整体上看东南部地区高于西北部地区,而冬季ET的空间分布为从东北至西南递增。

4.2 影响因素相关性分析

4.2.1 地形因素与ET相关性

高程和坡度是反映区域地形地貌的基本特征

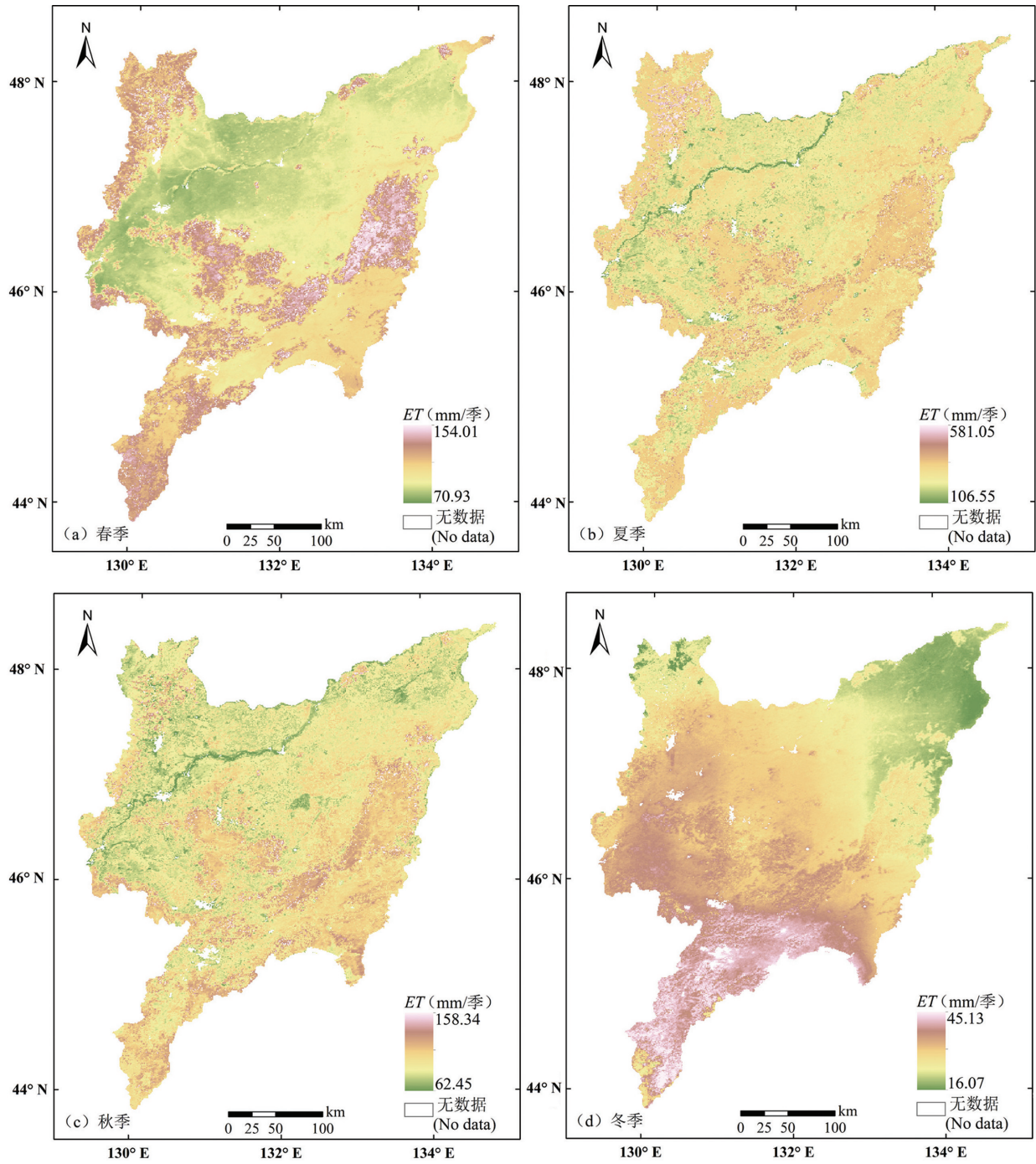


图 6 近 20 年三江平原四季平均 ET 空间分布图

Fig.6 Spatial distribution of seasonal mean ET in Sanjiang Plain in recent 20 years

因素,也是影响植被类型、生长状态及空间分布的主要原因,高程和坡度的变化会引起地表水系分布和土壤含水量等自然条件的改变,从而对地表蒸散量产生一定影响,因此本文选取高程和坡度作为地形因素,分析地形因素对 ET 的影响。基于 ASTER DEM 数据制作三江平原高程分布图,根据高程分布

特征,将研究区高程以 100 m 为间隔分为 10 个等级,分别统计不同高程等级的地表蒸散量 20 年均值,如图 7 所示,三江平原地势低平,由西南向东北倾斜,平均高程为 172.99 m,平原地区(0~200 m)广泛分布在研究区东北部及东南部,ET 年均值为 524.94 mm;山区(200~1100 m)主要集中在研究区

表2 高程分级地表蒸散发量统计
Table 2 Statistics of surface evapotranspiration in elevation classification

级别	高程区间/m	面积/km ²	百分比/%	年均蒸散量/mm	相对变化率/%
I	0~100	53280.19	48.93	515.32	-5.28
II	100~200	20900.38	19.19	549.46	1.00
III	200~300	13752.35	12.63	582.44	7.06
IV	300~400	8598.55	7.90	596.96	9.73
V	400~500	5749.72	5.28	586.67	7.84
VI	500~600	3449.801	3.17	577.56	6.16
VII	600~700	1970.97	1.81	580.70	6.74
VIII	700~800	934.97	0.86	573.79	5.47
IX	800~900	213.28	0.20	567.86	4.38
X	>900	49.78	0.05	565.86	4.01

西南部及西北部, *ET*年均值为585.81 mm,明显高于平原地区。各高程等级的*ET*均值呈单峰分布, 30~400 m高程地区的20年*ET*均值最大,为596.96 mm,在0~400 m高程地区,*ET*均值随高程增加而增加,在400~1100 m高程地区,*ET*均值随高程增加而减少。

计算各高程等级的地表蒸散发量距平均值相对变化率(表2),从表中可以看出:0~100 m高程地区*ET*低于研究区平均地表蒸散发量,距平相对变化率为-5.28%,300~400 m高程地区*ET*距平相对变化率最大,为9.73%,低于400 m高程地区的相对变化

率呈显著增加趋势,高于400 m高程地区的*ET*相对变化率呈缓慢减小趋势。通过分析可以看出:在研究区内高程小于400 m的地区,高程对地表蒸散发量产生正向影响,在高程大于400 m的地区产生负向影响,高程为300~400 m地区的地表蒸散发量受高程影响最显著。

根据国际地理学联合会指定的地貌坡度分级标准,将三江平原坡度划分为平地、微斜坡、缓斜坡、斜坡和陡坡5个等级(0°~0.5°,0.5°~2°,2°~5°,5°~15°,15°~35°),如图8所示,研究区内坡度分异显著,北部和东南部地区多为平地或微斜坡,

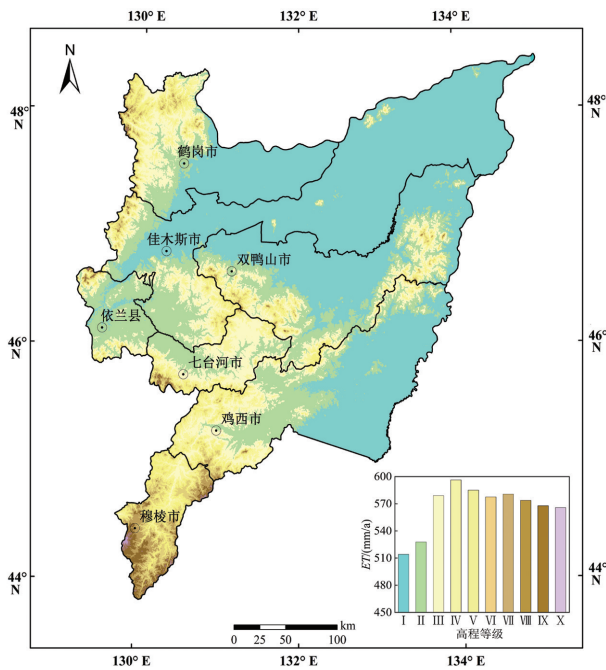


图7 三江平原高程分级*ET*统计图

Fig.7 *ET* statistics of elevation classification in Sanjiang Plain

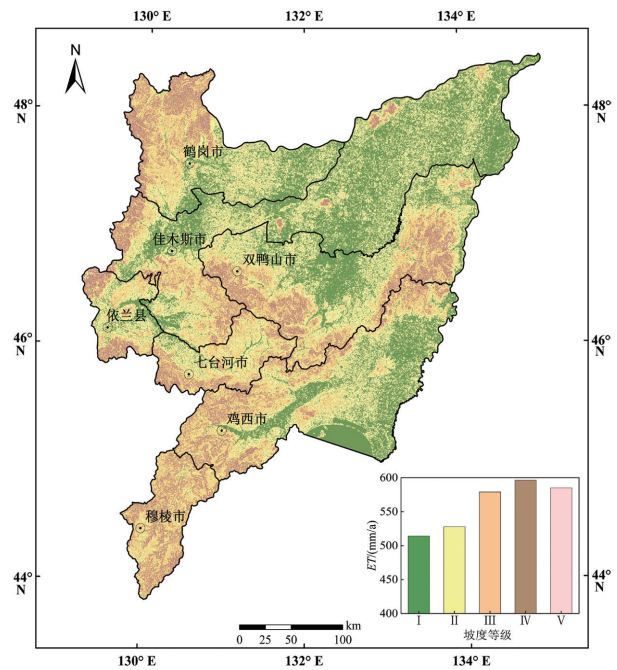


图8 三江平原坡度分级*ET*统计图

Fig.8 *ET* statistics of slope classification in Sanjiang Plain

表3 坡度分级地表蒸散量统计

Table 3 Statistics of surface evapotranspiration by slope classification

级别	坡度区间/(°)	面积/km ²	百分比/%	年平均蒸散量/mm	相对变化率/%
平地	0~0.5	31198.49	28.65	514.17	-5.49
微斜坡	0.5~2	39381.48	36.16	527.83	-2.98
缓斜坡	2~5	23396.92	21.48	579.06	6.44
斜坡	5~15	14845.68	13.63	596.32	9.61
陡坡	15~35	77.42	0.07	585.07	7.54

中东部、西北部及西南部地区坡度较大。平地地区的20年 ET 均值最低,为514.17 mm,斜坡地区的20年 ET 均值最高,为596.32 mm,在坡度小于15°的地区 ET 均值随坡度增加而显著提高,当坡度大于15°时, ET 均值呈减少趋势。

计算各坡度等级的地表蒸散量距平相对变化率(表3),平地及微斜坡地区的 ET 低于研究区平均 ET ,距平相对变化率分别为-5.49%和-2.98%,斜坡地区的 ET 距平相对变化率最大,为9.61%,微斜坡地区 ET 相对变化率最小。说明在坡度小于15°的地

区,坡度对地表蒸散量产生正向影响,斜坡地区 ET 受坡度影响最大,微斜坡地区受影响最小。

4.2.2 气象因子与 ET 相关性

气象要素作为环境因素中的重要组成部分,对生态系统中的各个环节都起到了不可替代的影响作用,其中风速、气温、日照时数和降水量是影响陆内水循环的重要气象因子,为探究其对地表蒸散量的影响,统计分析2000—2019年三江平原年内风速、气温、降水量和日照时数变化特征(图9)。从图中可以看出:风速、气温、日照时数及降水量的20年

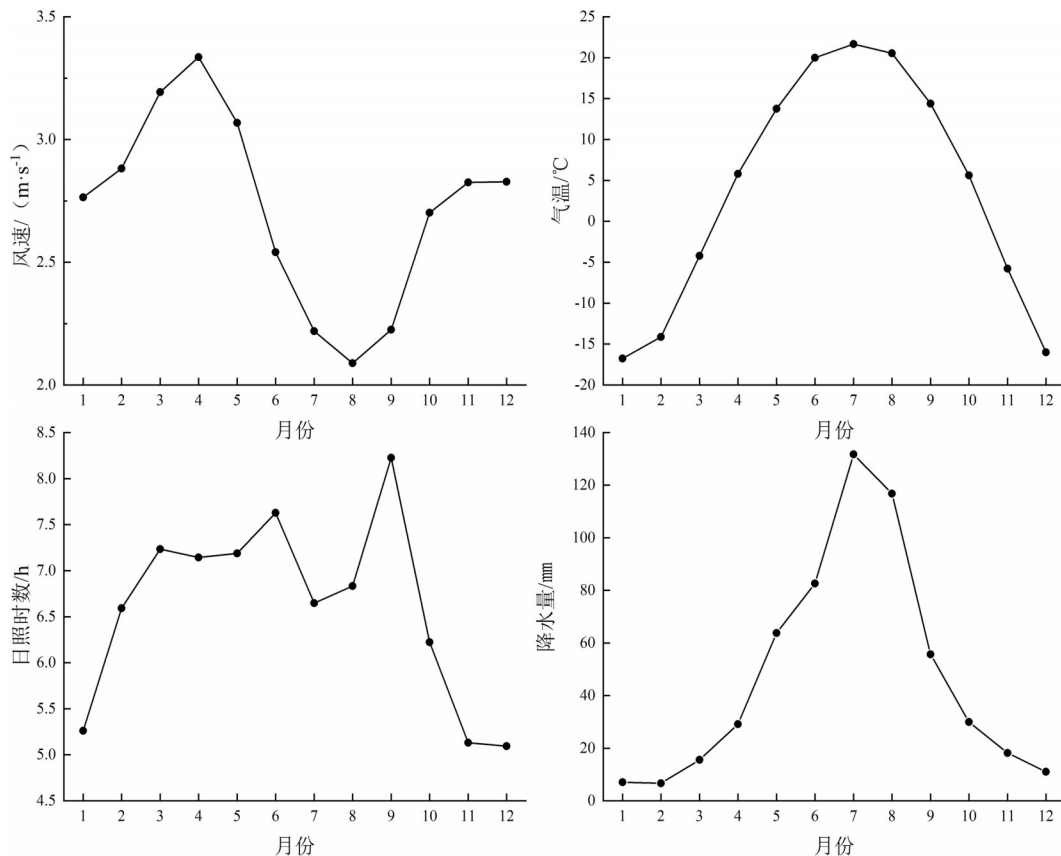


图9 近20年三江平原风速、气温、日照时数及降水量月均值变化趋势图

Fig.9 Monthly mean changes of wind speed, temperature, sunshine duration and precipitation in Sanjiang Plain in recent 20 years

月均值变化范围分别为:2.09~3.34 m/s、-16.77~21.65 °C、5.09~8.23 h、6.62~131.74 mm。三江平原年内风速变化起伏明显,1—4月、8—11月呈上升趋势,4—8月呈下降趋势,峰值出现在4月,低值区为8月;气温与降水量的变化趋势相同,均呈周期性单峰变化,在7—8月达到峰值,低值区为12月至次年

2月,且无明显波动;日照时数呈双峰型变化,峰值出现在6月和9月,分别为7.63 h和8.23 h。

利用ET和气象因子逐年栅格数据,基于GIS软件平台,计算ET和各气象因子间的Pearson相关系数,得到三江平原ET与风速、气温、日照时数和降水量相关性系数空间分布(图10)。从图中可以看出:

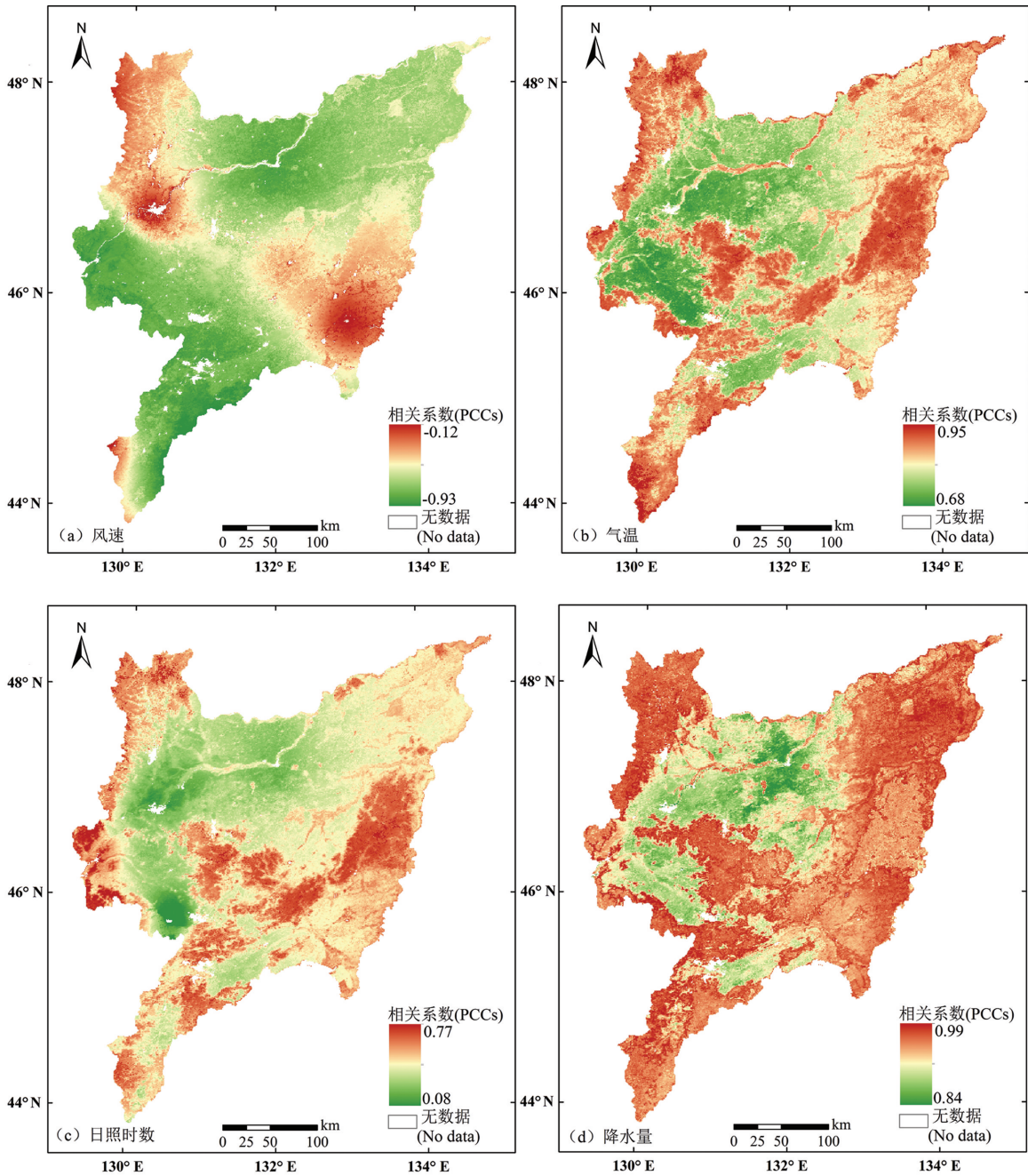


图10 三江平原ET与风速(a)气温(b)、日照时数(c)、降水量(d)相关性系数空间分布图

Fig.10 Spatial distribution of correlation coefficients between ET and wind speed (a), temperature (b), sunshine duration (c) and precipitation (d) in Sanjiang Plain

ET与降水量空间平均相关系数最高,为0.95,其次为气温、风速和日照时数,分别为0.82、-0.71、0.43;从相关系数空间分布情况可以看出:ET与风速的相关性分布差异较大,呈显著负相关性($p < 0.01$)的区域占研究区总面积的73.69%,集中分布在研究区东北部和西南部地区;ET与气温和日照时数的相关性分布较为一致且分异显著,呈显著正相关性($p < 0.01$)的区域分别占研究区总面积的88.72%和11.32%,集中分布在研究区西北部、东北部与西南部、中部及中东部地区;ET与降水量的相关性分布差异较小,在整个研究区均为显著正相关($p < 0.01$)。

4.2.3 植被覆盖度与ET相关性

植被覆盖度直接影响土壤水分涵养能力和区域植物体内水分含量,从而影响地表蒸散量,NDVI是植物生长状态以及植被空间分布密度的最佳指示因子,与植被分布密度呈线性相关,可以有效地反映地表植被覆盖度。本次研究分别绘制了近20年三江平原ET与NDVI年内变化曲线(图11)。从图中可以看出:植被覆盖度对地表蒸散量呈现正向影响,两条曲线均为周期性单峰曲线,3—8月随着植物的生长,植物体内水分增加,植被覆盖密度增加,为地表蒸散发提供了水分条件,ET与NDVI呈显著上升趋势,在8月达到峰值,此时为植物最茂盛且蒸散量最大的季节,8—12月受气候条件影响,植物开始衰落,NDVI与ET呈下降趋势,低值区为12月

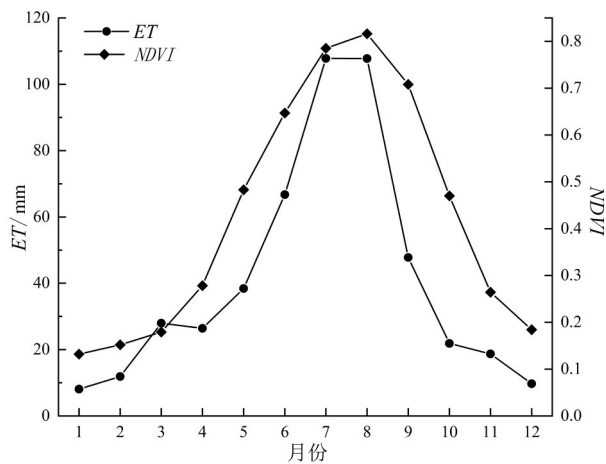


图 11 近 20 年三江平原 ET 与 NDVI 月均值变化趋势图
Fig.11 Changes of monthly mean values of ET and NDVI in the Sanjiang Plain in recent 20 years

至次年2月,且无明显波动。

三江平原近 20 年 NDVI 均值分布如图 12a 所示,NDVI 均值为 -0.08 ~ 0.77,其空间分异与近 20 年三江平原 ET 均值空间分异大致相同,研究区西北部、西南部、中部及中东部地区多为自然林地,植被空间分布密度大,土壤含水量较高,所以地表植物蒸腾和土壤水分蒸发量高于其余地区。基于 GIS 软件平台计算 ET 与 NDVI 相关性系数,并制作相关性系数空间分布图(图 12b),从图中可以看出,ET 与 NDVI 均呈正相关性,空间平均相关性系数为 0.87,整体上看研究区东部地区相关性略高于西部地区,其中呈显著正相关($p < 0.01$)区域占研究区总面积的 73.58%,多分布于研究区东部、南部及西部边际地区,说明东部、南部及西部边际地区的地表实际蒸发量受植被覆盖度影响更大。

4.3 基于岭回归模型计算相对贡献率

为定量分析各驱动因子对 ET 影响程度,利用三江平原 2000—2019 年月均 ET(mm)、风速(m/s)、气温(°C)、降水量(mm)、日照时数(h)和 NDVI,及研究区高程(m)、坡度(°)栅格数据,创建多源空间数据集,以 5 km 为间隔进行空间平衡抽样,共抽取 1587 个样品单元。由于选取的驱动因子之间存在相互影响,致使特征变量间会产生多重共线性,采用标准线性回归会导致回归方程过度拟合,使自变量系数不符合实际意义。因此在构建驱动因子回归模型前,需对各驱动因子进行共线性诊断,通常以方差膨胀系数(VIF)作为共线性诊断的标准,VIF 大于 10,则表示回归模型存在严重的多重共线性(杨楠,2004)。从驱动因子共线性诊断结果(表 4)可以看出:气温、降水与 NDVI 的方差膨胀系数分别为 13.44、11.59、12.15,均大于 10,表示气温、降水与 NDVI 间存在多重共线性。为了减弱变量间多重共线性对模型精度的影响,本次研究选取岭回归模型构建驱动因子统计回归模型,选取风速(W)、气温(T)、降水量(P)、NDVI(N)、日照时数(S)、高程(H)和坡度(D)作为岭回归模型的输入端 X_i ,以 ET 作为模型输出端 Y_i ,构建训练样本集 (X_i, Y_i) 。根据岭迹

表 4 驱动因子共线性诊断

Table 4 Driving factors collinearity diagnosis

驱动因子	T	P	N	S	W	H	D
VIF	13.44	11.59	12.15	1.79	3.62	1.98	1.23

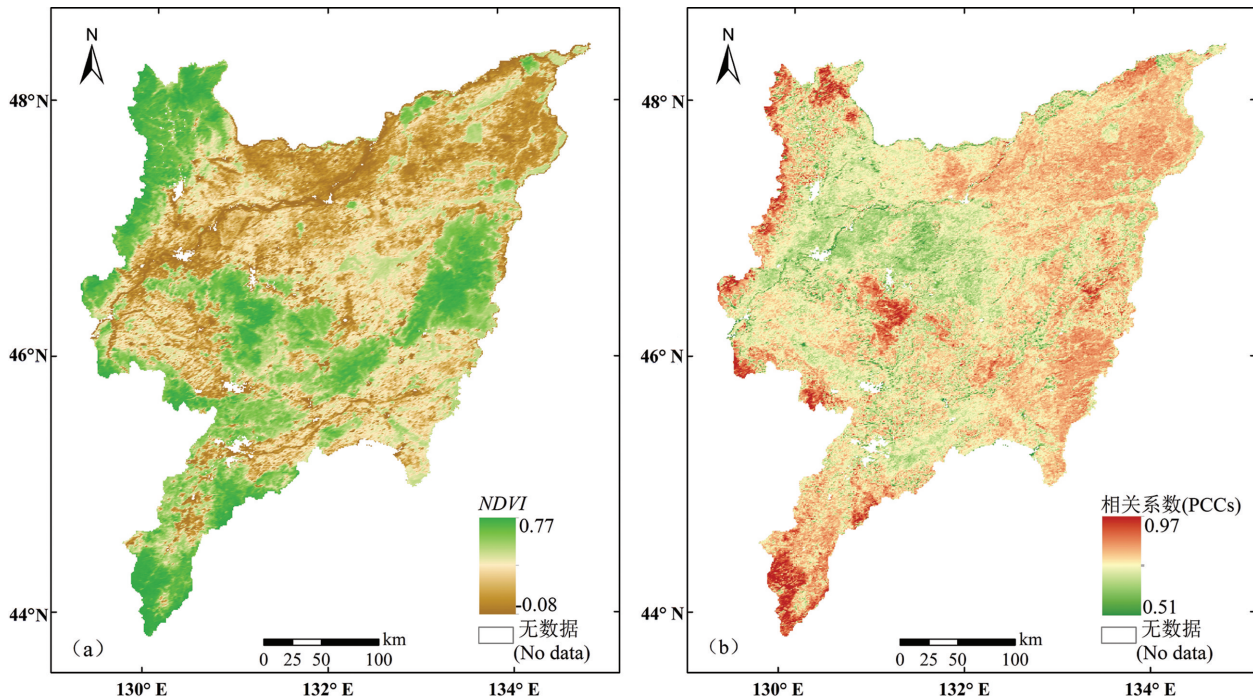


图12 三江平原NDVI均值空间分布图(a)及ET与NDVI相关性系数空间分布图(b)

Fig.12 Spatial distribution of mean NDVI in Sanjiang Plain (a) and spatial distribution of correlation coefficient between ET and NDVI (b)

图(图13),选取 $K=0.2$ 作为岭参数,建立三江平原地表蒸散发岭回归分析模型。

从岭回归分析结果(表5)可知,各驱动因子间多重共线性已经明显减弱($VIF < 10$),对模型进行F检验($F=1052.586, P=0.001 < 0.01$),模型决定系数 $R^2=0.823$,说明风速、气温、NDVI、降水量、日照时数、高程和坡度均对ET产生影响,模型能够有效解释ET的82.3%的变化原因。风速、气温、NDVI、降水量和日照时数通过显著性检验($P < 0.01$),高程和

坡度通过显著性检验($P < 0.05$)。说明气温、植被覆盖度、降水量和日照时数会对ET产生显著正向影响,风速会对ET产生显著负向影响,高程会对ET产生负向影响,坡度对ET产生正向影响。

统计分析各驱动因子对ET的相对贡献率,如图14所示,比较各驱动因子的相对贡献率大小($P > N > T > W > D > S > H$),其中降水量对ET的相对贡

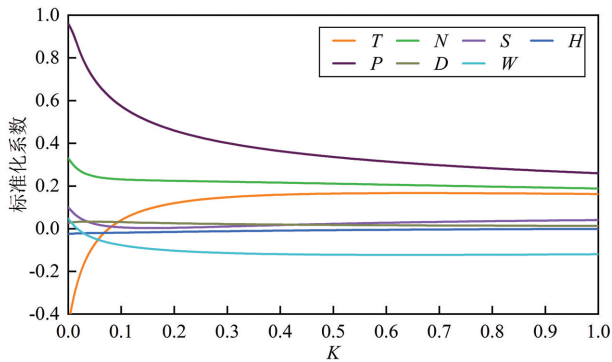


图13 岭回归路径图

Fig.13 Ridge regression trace

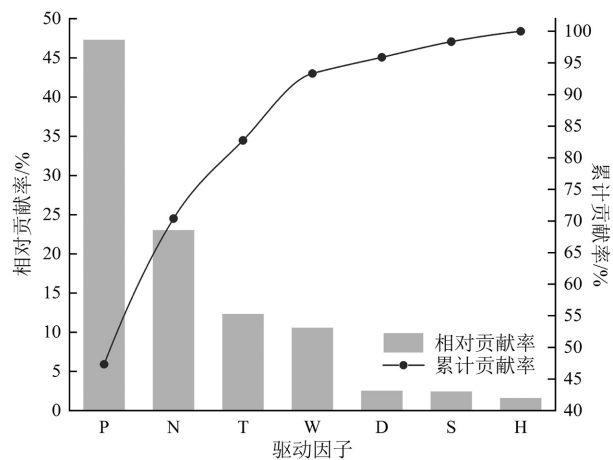


图14 驱动因子贡献率统计图

Fig.14 Statistical chart of the contribution rate of driving factors

表5 岭回归分析结果
Table 5 Ridge regression analysis results

驱动因子	非标准化系数B	标准化系数Beta	显著性P	贡献率C/%	VIF	R ²	F
T	0.030	0.120	0.001	12.35	7.19		
N	28.859	0.224	0.001	23.05	6.54		
P	1.281	0.460	0.001	47.33	6.36		F(7,1587)=
S	0.114	0.024	0.004	2.47	1.42	0.823	1052.586,
W	-7.367	-0.103	0.001	10.60	2.95		P=0.001
H	-0.004	-0.016	0.029	1.64	1.32		
D	0.380	0.025	0.025	2.56	1.09		

献率最大,占比为47.33%;其次为NDVI对ET的相对贡献率,占23.05%,降水与植被覆盖度为地表蒸散发的水分条件,累计贡献率达到70.38%,气温与日照时数为地表蒸散发的能量条件,累计贡献率为14.82%,风速对地表蒸散发相对贡献率为10.60%,高程、坡度和日照时数对ET的影响较小,所占比重均未超过3%。结果表明,降水是三江平原地表蒸散量变化的主控因子,植被覆盖度也对地表蒸散量产生较大影响,其次为气温和风速,高程、坡度和日照时数对地表蒸散量影响程度较小。

5 结论

本文利用MOD16蒸散发遥感数据产品,分析近20年三江平原地表蒸散量的时空变化特征及地表蒸散量与各驱动因素的相关关系,并通过建立岭回归模型,分析研究地表蒸散量变化的主要驱动因子及其相对贡献率,得出主要结论如下:

(1)近20年三江平原地表蒸散量整体呈上升趋势,起伏变化明显,波动范围为475.91~586.87 mm/a;研究区91.53%的地区ET呈增加趋势,仅8.47%的地区出现减少趋势,且ET均值分布的地域差异性逐渐缩小;年内ET均值变化呈单峰型周期性变化,高峰出现在7—8月,季节差异性明显,夏季ET最高,其次为春季、秋季,冬季最低。

(2)在三江平原内高程小于400 m的地区,高程对地表蒸散量有正向影响,而在高程大于400 m的地区产生负向影响;在坡度小于15°的地区,坡度对地表蒸散量产生正向影响,斜坡地区ET受坡度影响最大。研究区风速与ET呈负相关性,气温、日照时数、降水量及ET与NDVI均呈正相关性,空间分布差异明显。

(3)岭回归统计分析模型可以有效解决驱动因

子间的多重共线性问题,使回归方程系数更符合实际意义,模型R²=0.823有效解释了各驱动因子与ET的关系。比较各驱动因子的相对贡献率可知,三江平原蒸散发类型属于水分条件控制型,降水是ET变化的主控因子,植被覆盖度、气温和风速对ET也有较大影响,而区内ET受高程、坡度等地形条件控制较小。

References

- Cai Bofeng, Yu Rong. 2009. Advance and evaluation in the long time series vegetation trends research based on remote sensing [J]. National Remote Sensing Bulletin, 13(6): 1170–1186 (in Chinese with English abstract).
- Chen Shaodan, Zhang Liping, Tian Xiangyong, Tang Rouxin, Liu Xin. 2019. Comparative analysis of potential evapotranspiration estimation between Penman–Monteith model and MOD16 data in Middle and Lower Yangtze River Basin[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 52(4): 283–289, 296 (in Chinese with English abstract).
- Deng Xingyao, Liu Yang, Liu Zhihui, Yao Junqiang. 2017. Temporal-spatial dynamic change characteristics of evapotranspiration in arid region of Northwest China [J]. Acta Ecologica Sinica, 37(9): 2994–3008 (in Chinese with English abstract).
- Dong Q, Zhan C, Wang H, Wang F, Zhu M. 2015. A review on evapotranspiration data assimilation based on hydrological models[J]. Acta Geographica Sinica, 26(2): 230–242.
- Du Guoming, Liu Wenqi, Yu Jiaxing, Zhang Shuang. 2019. Influence of paddy field and dry field distribution on local surfacetemperature by remote sensing inversion in Sanjiang Plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 35(5): 259–267 (in Chinese with English abstract).
- Fang Li, Wang Wenjie, Jiang Weiguo, Chen Min, Wang Yong, Jia Kai, Li Yansen. 2017. Vegetation cover, spatio-temporal change and its response to climate change in the Heilongjiang River Basin (China)

- from 2000 to 2014 [J]. *Scientia Geographica Sinica*,37(11):1745–1754(in Chinese).
- Fan Jianzhong, Li Dengke, Gao Maosheng. 2014. Spatio-temporal variations of evapotranspiration in Shaanxi Province using MOD16 products[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 23(09):1536–1543(in Chinese with English abstract).
- Feng Fei, Yao Yunjun, Zhang Yanbing, Li Xianglan. 2015. Spatio-temporal variations of evapotranspiration in Sanjiang Plain using MOD16 products [J]. *Ecology and Environmental Sciences*,24(11): 1858–1864(in Chinese with English abstract).
- Huang Kui, Lu Yimin, Wei Zheng, Chen He, Zhang Baozhong, Ma Wenjin. 2019. Effects of land use and climate change on spatiotemporal changes of evapotranspiration in Haihe River Basin [J]. *Journal of Geo-information Science*,21(12):1888–1902 (in Chinese with English abstract).
- Hu Meng, Feng Qi, Xi Haiyang. 2013. Progress of monitoring soil moisture by remote sensing in Arid Areas [J]. *Chinese Journal of Soil Science*,44(5):1270–1275(in Chinese with English abstract).
- Jiang Qiuxiang, Zhang Shunkai, Zhang Xu, Wang Zilong. 2020. Assessment of variations and driving factors of water resources development and utilization in the Sanjiang Plain [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*,18(1):74–81(in Chinese with English abstract).
- Jung M, Reichstein M, Ciais P, Seneviratne S I, Sheffield J, Goulden ML, Bonan G, Cescatti A, Chen J, Jea R D. 2010. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply[J]. *Nature*,467(7318): 951–954.
- Liu Chunyu, Zhao Jun, Liu Yingying, Wei Wei. 2011. Remote sensing estimation of evapotranspiration quantity and analysis of space-time structure over Shiyang River Basin [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, (3):117–122(in Chinese with English abstract).
- Liu Guodong, Zhang Li, Yang Ze, Dai Huimin, Zhao Chuandong. 2021. Distribution characteristics of heavy metal in the water and suspended substance of Nenjiang River Basin: Environmental Implication[J]. *Geology and Resources*, 30(1): 53–61(in Chinese with English abstract)
- Liu Jing, Liu Tiejun, Du Xiaofeng, Wu Yongsheng, Bao Yulong. 2020. Simulation on spatio-temporal stability of ET based on MOD16A2 in Mu Us sandy land [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*,38 (2):243–250(in Chinese with English abstract).
- Liu Suhua, Tian Jing, Mi Sujuan. 2016. Review of methods on estimation of daily evapotranspiration from one time-of-day remotely sensed transient evapotranspiration [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 28(4): 10–17 (in Chinese with English abstract).
- Liu Weipeng, Cui Huqun, Liu Weipo, Cheng Xuxue, Li Zhihong. 2021. An analysis of the evolution trend and influencing factors of the groundwater flow field in the Sanjiang Plain [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 48(1): 10–17 (in Chinese with English abstract).
- Meng Yu, Dan Wenhong, Wang Huan. 2020. Spatiotemporal characteristics of evapotranspiration and its affecting factors in Wujiang Basin based on MOD16 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 27(6): 139–145(in Chinese with English abstract).
- Mu Q, Zhao M, Running S W. 2011. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm[J]. *Remote Sensing of Environment*, 115(8): 1781–1800.
- Nishida K, Nemani R R, Glassy J M, Running SW.2003. Development of an evapotranspiration index from Aqua/MODIS for monitoring surface moisture status[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*,41(2): 493–501.
- Sharma V, Kilic A, Irmak S. 2016. Impact of scale/resolution on evapotranspiration from Landsat and MODIS images[J]. *Water Resources Research*,52(3):1207–1221.
- Shi Xiaoliang, Wu Mengyue, Zhang Na, Ding Hao. 2020. Spatial and temporal variation of vegetation water use efficiency and its response to meteorological factors in Sanjiang Plain [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 39(5):1651–1663 (in Chinese with English abstract).
- Shukla J, Mintz Y. 1982. Influence of Land-Surface Evapotranspiration on the Earth's climate[J]. *Science*, 215(4539):1498–1501.
- Tian Yichao, Liang Mingzhong, Hu Baoqing. 2015. Temporal-spatial dynamic change characteristics of evapotranspiration in Beibu Gulf Coastal Zone during 2000–2013 [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 46(8): 146–158 (in Chinese with English abstract).
- Wang Haibo, Ma Mingguo. 2014. Estimation of transpiration and evaporation of different ecosystems in an inland river basin using remote sensing data and the Penman-Monteith equation [J]. *Acta Ecologica Sinica*,34(19):5617–5626 (in Chinese with English abstract).
- Wang Haifeng, Zhang Zhitao, Karnieli Arnon, Chen Junying, Han Wenting. 2018. Hyperspectral estimation of desert soil organic matter content based on gray correlation-ridge regression model [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 34(14): 124–131(in Chinese with English abstract).
- Wang Huan, Mei Zaimei. 2020. Spatiotemporal changes of evapotranspiration and their relationship with climate factors in Guizhou Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 27 (5): 221–229(in Chinese with English abstract).
- Wang Tong, Tang Ronglin, Li Zhaoliang, Jiang Yazhen, Liu Meng, Tang Bohui, Wu Hua. 2019. Temporal upscaling methods for daily

- evapotranspiration estimation from remotely sensed instantaneous observations [J]. National Remote Sensing Bulletin, 23(5): 813–830 (in Chinese with English abstract).
- Wang Ying, Zhang Lei, Wang Jinsong. 2016. Response of the hydrological process to land–use/cover change in Taohe River basin [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 38(1): 200–210 (in Chinese with English abstract).
- Wei Hejie, Zhang Yanfang, Zhu Ni, Wang Pengtao, Yu Yuan. 2015. Spatial and temporal characteristic of ET in the Weihe River Basin Based on MOD16 Data [J]. Journal of Desert Research, 35(2):414–422 (in Chinese with English abstract).
- Wen Yuanyuan, Zhao Jun, Wang Yanqiang, Wang Yuchun, Wang Jianbang. 2020. Spatiotemporal variation characteristics of surface evapotranspiration in Shanxi Province based on MOD16 [J]. Progress in Geography, 39(2):255–264 (in Chinese with English abstract).
- Xu Ligang, Xu Jiaying, Dong Lei, Feng Wenjuan, Jiang Jiahu. 2013. Research advance in process and modeling of water transfer in soil–plant–atmosphere continuum [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 31(1):242–248 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jiajia, Zhang Yihe, Feng Yulin, Gao Tie, Xiao Hongye, Liu yang, Yang ze, Wei Minghui, Zhang Zhehuan. 2020. Patiotemporal dynamic change analysis of land use in eastern songnen plain [J]. Geology and Resources, 29(06): 627–634, 602 (in Chinese with English abstract).
- Yang Nan. 2004. The unique role of ridge regression analysis in solving the multicollinearity problem [J]. Statistics & Decision, (3): 14–15 (in Chinese).
- Yang Xiuqin, Wang Lei, Wang Kai. 2015. Spatio–temporal distribution of terrestrial evapotranspiration in Huaihe River basin based on MOD16 ET data [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 37(5): 1343–1352 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Lihua, Jiang Weiguo, Shen Wenming, Liu Yinghui, Wang Wenjie, Tao Liangliang, Zheng Hua, Liu Xiaofu. 2013. The spatio–temporal variations of vegetation cover in the Yellow River Basin from 2000 to 2010 [J]. Acta Ecologica Sinica, 33(24): 7798–7806 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Baozhong, Xu Di, Liu Yu, Chen He. 2015. Review of multi–scale evapotranspiration estimation and spatio–temporal scale expansion [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 31(6):8–16 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yongqiang, Kong Dongdong, Zhang Xuanze, Tian Jing, Li Congcong. 2021. Impacts of vegetation changes on global evapotranspiration in the period 2003–2017 [J]. Acta Geographica Sinica, 76(3): 584–594 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhitao, Wang Haifeng, Karnieli Arnon, Chen Junying, Han Wenting. 2018. Inversion of soil moisture content from hyperspectra based on ridge regression [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 49(5): 240–248 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 蔡博峰,于嵘. 2009. 基于遥感的植被长时序趋势特征研究进展及评价[J]. 遥感学报, 13(6):1170–1186.
- 陈少丹, 张利平, 田祥勇, 汤柔馨, 柳鑫. 2019. 基于 P–M 模型和 MOD16 数据的长江中下游潜在蒸散量比较分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 52(4):283–289,296.
- 邓兴耀, 刘洋, 刘志辉, 姚俊强. 2017. 中国西北干旱区蒸散发时空动态特征[J]. 生态学报, 37(9):2994–3008.
- 杜国明, 刘文琦, 于佳兴, 张爽. 2019. 三江平原水旱田分布对遥感反演局地地表温度的影响[J]. 农业工程学报, 35(5):259–267+320.
- 范建忠, 李登科, 高茂盛. 2014. 基于 MOD16 的陕西省蒸散量时空分布特征[J]. 生态环境学报, 23(9):1536–1543.
- 方利, 王文杰, 蒋卫国, 陈民, 王永, 贾凯, 李延森. 2017. 2000—2014 年黑龙江流域(中国)植被覆盖时空变化及其对气候变化的响应[J]. 地理科学, 37(11):1745–1754.
- 冯飞, 姚云军, 张彦彬, 李香兰. 2015. 基于 MOD16 产品的三江平原蒸散量时空分布特征分析[J]. 生态环境学报, 24(11):1858–1864.
- 胡猛, 冯起, 席海洋. 2013. 遥感技术监测干旱区土壤水分研究进展[J]. 土壤通报, 44(5):1270–1275.
- 黄葵, 卢毅敏, 魏征, 陈鹤, 张宝忠, 马文津. 2019. 土地利用和气候变化对海河流域蒸散发时空变化的影响[J]. 地球信息科学学报, 21(12):1888–1902.
- 姜秋香, 张舜凯, 张旭, 王子龙. 2020. 三江平原水资源开发利用程度变化与驱动因素[J]. 南水北调与水利科技, 18(1):74–81.
- 刘国栋, 张立, 杨泽, 戴慧敏, 赵传冬. 2021. 嫩江流域水体及悬浮物重金属元素分布特征及环境指示意义[J]. 地质与资源, 30(01): 53–61.
- 刘春雨, 赵军, 刘英英, 魏伟. 2011. 石羊河流域蒸散发量遥感估算及时空格局分析[J]. 国土资源遥感, (3):117–122.
- 刘静, 刘铁军, 杜晓峰, 吴永胜, 包玉龙. 2020. 基于 MOD16A2 的毛乌素沙地实际蒸散量时空稳定性模拟[J]. 干旱地区农业研究, 38(2): 243–250.
- 刘素华, 田静, 米素娟. 2016. 遥感估算蒸散发量的日尺度扩展方法综述[J]. 国土资源遥感, 28(4):10–17.
- 刘伟朋, 崔虎群, 刘伟坡, 程旭学, 李志红. 2021. 三江平原地下水流场演化趋势及影响因素[J]. 水文地质工程地质, 48(1):10–17.
- 蒙雨, 但文红, 王焕. 2020. 基于 MOD16 的乌江流域地表蒸散发时空特征及影响因素[J]. 水土保持研究, 27(6):139–145.
- 史晓亮, 吴梦月, 张娜, 丁皓. 2020. 三江平原植被水分利用效率时空变化及其对气象因子变化的响应[J]. 生态学杂志, 39(5):1651–

- 1663.
- 田义超, 梁铭忠, 胡宝清. 2015. 2000—2013年北部湾海岸带蒸散量时空动态特征[J]. 农业机械学报, 46(8):146-158.
- 王海波, 马明国. 2014. 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[J]. 生态学报, 34(19):5617-5626.
- 王海峰, 张智韬, Arnon Karnieli, 陈俊英, 韩文霆. 2018. 基于灰度关联—岭回归的荒漠土壤有机质含量高光谱估算[J]. 农业工程学报, 34(14):124-131.
- 王焕, 梅再美. 2020. 贵州省地表蒸散发时空变化及其与气候因子的关系[J]. 水土保持研究, 27(5):221-229.
- 王桐, 唐荣林, 李召良, 姜亚珍, 刘萌, 唐伯惠, 吴骅. 2019. 遥感反演蒸散发的日尺度扩展方法研究进展[J]. 遥感学报, 23(5):813-830.
- 王莺, 张雷, 王劲松. 2016. 洮河流域土地利用/覆被变化的水文过程响应[J]. 冰川冻土, 38(1):200-210.
- 位贺杰, 张艳芳, 朱妮, 王鹏涛, 喻元. 2015. 基于MOD16数据的渭河流域地表实际蒸散发时空特征[J]. 中国沙漠, 35(2):414-422.
- 温媛媛, 赵军, 王炎强, 王玉纯, 王建邦. 2020. 基于MOD16的山西省地表蒸散发时空变化特征分析[J]. 地理科学进展, 39(2):255-264.
- 徐力刚, 许加星, 董磊, 冯文娟, 姜加虎. 2013. 土壤-植物-大气界面中水分迁移过程及模拟研究进展[J]. 干旱地区农业研究, 31(1):242-248.
- 杨佳佳, 张一鹤, 冯雨林, 高铁, 肖红叶, 刘洋, 杨泽, 魏明辉, 张哲寰. 2020. 松嫩平原东部土地利用时空动态变化分析[J]. 地质与资源, 29(06): 627-634+602.
- 杨楠. 2004. 岭回归分析在解决多重共线性问题中的独特作用[J]. 统计与决策, (3):14-15.
- 杨秀芹, 王磊, 王凯. 2015. 基于MOD16产品的淮河流域实际蒸散发时空分布[J]. 冰川冻土, 37(5):1343-1352.
- 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 刘颖慧, 王文杰, 陶亮亮, 郑华, 刘孝富. 2013. 2000—2010年黄河流域植被覆盖的时空变化[J]. 生态学报, 33(24):7798-7806.
- 张宝忠, 许迪, 刘钰, 陈鹤. 2015. 多尺度蒸散发估测与时空尺度拓展方法研究进展[J]. 农业工程学报, 31(6):8-16.
- 张永强, 孔冬冬, 张选泽, 田静, 李聪聪. 2021. 2003—2017年植被变化对全球陆面蒸散发的影响[J]. 地理学报, 76(3):584-594.
- 张智韬, 王海峰, KARNIELI Arnon, 陈俊英, 韩文霆. 2018. 基于岭回归的土壤含水率高光谱反演研究[J]. 农业机械学报, 49(5): 240-248.