

武陵山区植被生长季 NDVI 时空变化及其对气候变化的响应

刘 恒¹, 汤弟伟¹, 孙 毅¹, 宋鄂平¹, 常 胜¹, 刘小芳²

(1.湖北民族大学 林学院园艺学院, 湖北 恩施 445000; 2.恩施土家族苗族自治州自然资源和规划局, 湖北 恩施 445000)

摘 要:为了厘清武陵山区植被覆盖变化及其对气候变化响应的特征,基于 MODIS NDVI 和同期气象数据,采用变异系数、Sen 趋势检验和 Hurst 指数等方法分析了该区 2000—2019 年植被生长季 NDVI 的时空变化特征,揭示了不同时空尺度 NDVI 对水热因子的响应特征。结果表明:(1) 近 20 年武陵山区植被生长季 NDVI 呈现波动增加态势,植被条件不断改善;武陵山区植被覆盖较好,生长季 NDVI 的空间格局总体表现为“东北高、东南和西部低”,空间变化整体处于较稳定状态,垂直变化特征为随海拔升高先增后减;NDVI 变化趋势多为不显著增加,增速仅 0.004/a,而退化区域主要集中在 2 000 m 以下;变化整体趋向反持续性,未来变化特征主要表现为下降。(2) 生长季尺度,武陵山区气候趋向暖湿,NDVI 与气温、降水均整体表现为正相关,且受降水影响更大;月尺度,NDVI 整体上对气温的响应未见明显滞后性,而对降水以滞后一个月为主,0—2 月滞后期主控气候因子依次是降水、气温和气温。研究结果能够为气候变化背景下该区的植被保护提供一定参考。

关键词:武陵山区; NDVI; 时空变化; 气候变化响应

中图分类号:P964;Q948

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)05-0245-09

Spatiotemporal Variation of NDVI in the Vegetation Growing Season of Wuling Mountainous Area and Its Response to Climate Change During 2000—2019

LIU Heng¹, TANG Diwei¹, SUN Yi¹, SONG Eping¹, CHANG Sheng¹, LIU Xiaofang²

(1.College of Forestry and Horticulture, Hubei Minzu University, Enshi, Hubei 445000, China;

2.Natural Resources and Planning Bureau of Enshi Tujia & Miao Autonomous Prefecture, Enshi, Hubei 445000, China)

Abstract: In order to clarify the spatiotemporal variation characteristics of vegetation covers in the Wuling Mountainous Area and their responses to climate change, based on the MODIS NDVI and the meteorological data of the same period, the coefficient of variation, Sen trend test, and Hurst index were used to analyze the spatiotemporal variation of NDVI during vegetation growing season from 2000 to 2019 in the Wuling Mountainous Area. Meanwhile, the response characteristics of NDVI to different scales of hydrothermal factors were revealed. The results show that: (1) as for the temporal pattern of the recent 20 years, vegetation conditions had shown the trend of increasing fluctuation and continuously improving; the vegetation coverage in the Wuling Mountainous Area was good, and its spatial pattern could be summarized as ‘high in the north-east, low in the southeast and west’; the spatial variation was in a relatively stable state, and its value increased first and then decreased with the elevation; the variation trend of NDVI was mostly insignificant with the annual growth rate of only 0.004, while the degradation area mainly concentrated below the altitude of 2 000 m; the overall spatial change tended to be anti-persistent, and the main characteristics of future change are decline; (2) during the vegetation growing season of the research period, the climate in the Wuling Mountainous Area was getting warmer and wetter; NDVI was positively correlated with temperature and precipitation as a whole, but it was more affected by the latter; on the monthly scale, the overall response of NDVI to temperature showed no obvious hysteresis, while the response to precipitation was mainly manifested as a lag of one month; in the lag period from 0 to 2 months, the main controlling climate factors were precipitation, temperature, and temperature in turn. The results can provide some reference for vegetation

收稿日期:2020-09-22

修回日期:2020-10-21

资助项目:国家自然科学基金(71663017);湖北民族大学博士启动金资助项目(4158002)

第一作者:刘恒(1995—),男,湖北钟祥人,硕士研究生,研究方向为资源环境评价与管理。E-mail:zxlh0601@163.com

通信作者:汤弟伟(1987—),男(土家族),湖北建始人,博士,讲师,主要从事资源环境评价与管理研究。E-mail:jstdw@163.com

protection in this area under the background of climate change.

Keywords: Wuling Mountainous Area; NDVI; spatiotemporal variation; climate change response

植被作为陆地生态系统的重要组成部分,是连接大气、水体和土壤等生态要素的自然纽带^[1],其动态变化能够表征地球表面的能量流动、碳循环和人类活动,在全球变化中起到“指示器”的作用^[2-3]。同时,植被是生态环境变化的承受者,很大程度上代表了生态环境总体状况^[4-5]。归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index,NDVI)与叶面积指数、生物量及净初级生产力等有较好的相关性^[1,6],能够很好的反映植被生长状况和植被覆盖变化,是大尺度植被研究的重要指标。

国内外学者利用 NDVI 数据分析了不同时空尺度下植被时空特征及其对气候变化的响应。全球变暖使得北半球中高纬度地区植被覆盖有增加趋势^[7],也有学者认为北半球中高纬度地区植被活动增强与温度有关,而降水减少导致了南半球干旱地区 NDVI 呈减少趋势^[8]。有研究表明欧亚大陆植被生长季 NDVI 显著增加^[9],而在不同数据源、不同时间尺度下我国植被 NDVI 整体也表现出增加趋势,并且地区差异明显,其中国家重点生态治理的青藏高原^[10]、黄土高原^[11]和三江源等^[3]地区显著增加。植被生长主要受到气候变化和人类活动的影响,其中气候变化是影响植被年际活动变化的重要影响因素^[12-13]。植被对气候变化响应研究聚焦于与水热因子关系,其关系具有高度的空间异质性,如青藏高原^[10]和北方地区^[14]植被生长对气温变化更敏感,而在宁夏^[15]降水和湿润指数的影响最为显著。因此,植被 NDVI 的变化特征及水热因子的决定力存在区域差异。

武陵山区位于我国中南部,区内森林覆盖率高、自然资源丰富,《全国主体功能区规划》将其规划为限制开发区,基本功能为生物多样性及水土保持。由于多山、地形起伏大,恶劣的自然条件和人类不合理的开发活动使得该区面临着生物多样性受到威胁、土壤侵蚀严重、地质灾害多等问题,同时作为亚热带森林生态系统核心区、长江流域重要的水源涵养区和生态屏障,武陵山区具有重要的生态保护和科学研究价值。然而,目前鲜有武陵山区植被覆盖的相关研究,随着该区区域性的扶贫开发,以及退耕还林(草)、石漠化治理等工程的实施,其植被生长和分布状况必然发生变化,该区植被覆盖的变化特征及对气候变化的响应特征有待厘清。基于此,本研究旨在利用 MODIS NDVI 数据揭示武陵山区近 20 a 植被生长季 NDVI 的时空变化特征,分析影响植被生长的关键气

候因子及其滞后性,以期为气候变化背景下该区的植被保护、生态治理和合理开发提供科学参考。

1 研究区域及数据

1.1 研究区概况

武陵山区地跨湖南省、湖北省、重庆市和贵州省,包含 71 个县(市、区),总面积约 17.18 万 km²,地理范围为 25°52′—31°24′ N,107°04′—112°02′ E,是云贵高原的东部延伸地带,在我国地形阶梯分级中,属二、三级阶梯过渡带,地势西北高、东南低(图 1A),平均海拔 1 000 m 左右。其位于季风区,气候属亚热带向暖温带过渡类型的山区类型气候,夏凉冬冷。区内土地利用多为林地和耕地(图 1B),森林覆盖率平均达 56%,植被类型以常绿阔叶林和落叶阔叶林为主。

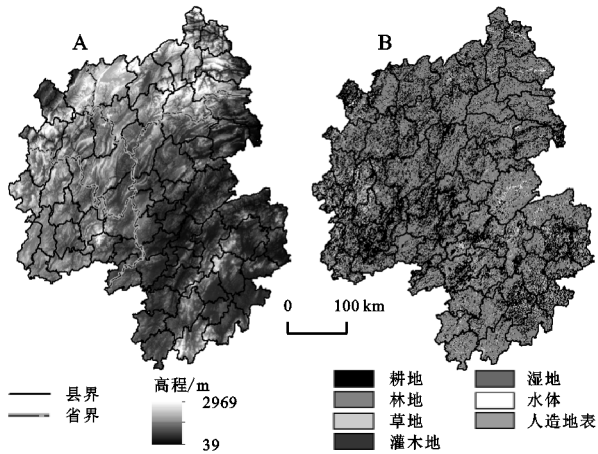


图 1 武陵山区地形及土地利用

1.2 数据来源及处理

MODIS NDVI 数据采用 NASA 发布的 2000—2019 年 MOD13Q1 植被指数数据集,时间和空间分辨率分别为 16 d 和 250 m。利用 MRT 软件对数据进行格式转换、重投影等操作,采用最大值合成法消除异常值影响并剔除 NDVI 值小于 0.1 的无植被区域,生成 NDVI 月值数据集,进一步选取植被生长季(4—10 月)NDVI 平均值作为年 NDVI 平均值,最后利用研究区边界裁剪获得 NDVI 逐年、逐月数据。

气象数据(气温、降水)为国家气象科学数据中心提供的 2000—2019 年中国地面气候资料月值数据集。选取研究区内及周围共 49 个气象站点,其中 44 个用于插值,5 个用于验证。气象数据插值采用 Anusplin 软件,以经纬度为自变量,并引入高程作为协变量来提高插值精度。交叉验证法用于评估插值结果,选用平均绝对误差(MAE)、平均相对误差

(MRE)和均方根误差(RMSE)作为检验标准^[16-17]。验证结果见表 1,气温插值精度高于降水,两者的插值精度均能够满足研究需求。

表 1 气象插值交叉验证结果

月份	气温			降水		
	MRE	MAE	RMSE	MRE	MAE	RMSE
1	0.83	0.19	0.44	4.17	0.19	6.34
2	0.79	0.12	0.35	3.76	0.12	5.88
3	1.09	0.09	0.30	4.00	0.07	6.30
4	0.98	0.06	0.24	9.78	0.09	14.16
5	1.25	0.06	0.24	9.75	0.07	14.49
6	0.98	0.04	0.20	11.08	0.06	16.88
7	0.83	0.03	0.17	12.79	0.27	19.85
8	0.82	0.03	0.17	18.31	0.25	24.18
9	1.13	0.05	0.22	10.52	0.24	14.21
10	1.08	0.06	0.25	7.99	0.11	11.11
11	0.98	0.08	0.28	5.34	0.14	8.13
12	0.82	0.12	0.35	3.98	0.16	5.88
平均	0.96	0.08	0.27	8.46	0.15	12.28

表 2 研究数据来源

数据	时间	分辨率	来源	网址
MOD13Q1	2000—2019	250 m	NASA	https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov
气象数据	2000—2019		国家气象科学数据中心	http://data.cma.cn
GlobaLand30	2010	30 m	全国地理信息资源目录服务系统	http://www.webmap.cn
DEM		90 m	地理空间数据云	http://www.gscloud.cn

2.2 趋势分析与检验

Sen 趋势分析的优点是不需要数据服从特定的分布,并且不受异常值的干扰,对测量误差或离散数据具有较强的规避能力^[18-19]。其计算公式为:

$$\beta=\text{median}\left(\frac{\text{NDVI}_j-\text{NDVI}_i}{j-i}\right)$$
$$2000\leqslant i<j\leqslant 2019$$

(2)

式中: β 为 NDVI 变化趋势; $\beta>0$ 说明植被覆盖呈上升趋势, $\beta<0$ 则为下降趋势。变化趋势的显著性通过 Mann-Kendall 统计检验法判断,相关公式如下:

检验统计量

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

(3)

符号函数

$$\text{sgn}(\text{NDVI}_j-\text{NDVI}_i)=\begin{cases}1&\text{NDVI}_j-\text{NDVI}_i>0\\0&\text{NDVI}_j-\text{NDVI}_i=0\\-1&\text{NDVI}_j-\text{NDVI}_i<0\end{cases}$$

(4)

标准化统计量

$$Z=\begin{cases}\frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}}&S>0\\0&S=0\\\frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}}&S<0\end{cases}$$

(5)

地表覆盖数据 GlobaLand30(2010 年)来源于全国地理信息资源目录服务系统,在该分类体系中,研究区主要包括耕地、林地、草地、灌木地、湿地、水体和人造地表等 7 种类型(图 1B)。此外,DEM 数据(分辨率 90 m)来源于地理空间数据云(表 2)。所有数据定义相同的空间参考(UTM WGS 84 49N)和分辨率(250 m),数据处理与分析通过 ArcGIS 和 Python 完成。

2 研究方法

2.1 稳定性分析

变异系数可用于表示 NDVI 的相对波动程度,其值越大,说明植被受到的干扰多、不稳定,反之,植被处于相对稳定状态。其计算公式为:

$$C_v=\frac{1}{\overline{\text{NDVI}}}\sqrt{\frac{1}{(n-1)}\sum_{i=1}^n(\text{NDVI}_i-\overline{\text{NDVI}})^2}$$

(1)

式中: C_v 为变异系数; $\overline{\text{NDVI}}$ 为多年 NDVI 均值; n 为时间长度; NDVI_i 为 i 年 NDVI 值。

$$\text{var}(S)=\frac{n(n-1)(2n+5)}{18}$$

(6)

趋势检验的方法^[20]:零假设 $H_0,\beta=0$,当 $|Z|>Z_{1-\alpha/2}$,拒绝零假设。 $Z_{1-\alpha/2}$ 为标准正态方差, α 为置信度水平。

2.3 Hurst 指数

基于重标极差(R/S)分析方法的 Hurst 指数是定量描述时间序列信息长期依赖性的有效方法^[3, 19],它能够依据长时间序列数据的过去趋势预测未来发展趋势。其基本原理是:

考虑一个 NDVI 时间序列 $\{\text{NDVI}(\tau)\}$,对于任意正整数,计算公式如下所示。

均值序列:

$$\overline{\text{NDVI}(\tau)}=\frac{1}{\tau}\sum_{\tau=1}^{\tau}\text{NDVI}(\tau)\quad \tau=1,2,\cdots,n$$

(7)

累计离差:

$$X(t,\tau)=\sum_{t=1}^t(\text{NDVI}(t)-\overline{\text{NDVI}(\tau)})$$
$$1\leqslant t\leqslant \tau$$

(8)

极差:

$$R(\tau)=\max_{1\leqslant t\leqslant \tau}X(t,\tau)-\min_{1\leqslant t\leqslant \tau}X(t,\tau)$$
$$\tau=1,2,\cdots,n$$

(9)

标准差:

$$S(\tau)=\left[\frac{1}{\tau}\sum_{t=1}^{\tau}(\text{NDVI}(t)-\overline{\text{NDVI}(\tau)})^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

$(\tau=1,2,\cdots,n)$ (10)

若存在 $R/S\propto\tau^H$,说明时间序列存在 Hurst 现象, H 称为 Hurst 指数, H 值在双对数坐标系($\ln\tau$, $\ln(R/S)$)中用最小二乘法拟合获得。

3 结果与分析

3.1 植被生长季 NDVI 变化特征分析

3.1.1 植被生长季 NDVI 的时间变化特征 武陵山区近 20 a 植被生长季 NDVI 的变化范围为 0.64~0.76(图 2),多年 NDVI 均值是 0.71,整体呈现波动增加态势,增速为 0.52%/a($p<0.01$),植被条件不断改善。NDVI 的年际变化存在 2001 年(0.64),2006 年(0.66)和 2014 年(0.71)3 个明显谷值,其中 2001 年为研究时段最低值,而 2019 年(0.76)为最高值。

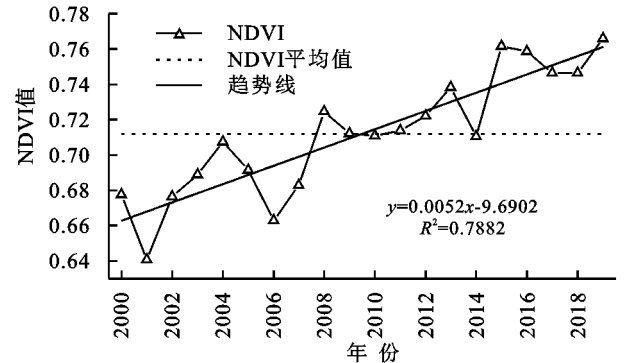


图 2 武陵山区植被生长季 NDVI 年际变化趋势

3.1.2 植被生长季 NDVI 的空间变化特征 2000—2019 年,武陵山区各地多年植被生长季 NDVI 均值的范围为 0.1~0.86,其中 NDVI>0.6 的地区比例达到 94.65%,表明该区植被覆盖整体较好。但从图 3A 可以看出,区内 NDVI 空间差异明显,空间格局总体表现为“东北高、东南和西部低”。高值区主要是湖北境内的鹤峰、五峰和长阳等地,该区气候湿润,植被长势好、覆盖度高,同时建有国家级自然保护区,植被不易受到侵扰。而区域的东南和西部多以耕地为主(图 1B),特别是西部喀斯特地貌分布广泛,存在严重的石漠化问题,致使植被稀疏、NDVI 低值集中。

武陵山区植被生长季 NDVI 变异系数的变化范围为 0.01~0.62(图 3B),均值是 0.07。变异系数低于 0.15 的区域比例达到 99.54%,表明研究时段武陵山区植被生长季 NDVI 空间变化整体处于较稳定状态。区域东北部海拔高、以林地为主,受到的干扰少,变异系数低值聚集。区域西部,尤其是贵州境内,可能是进行退耕还林(草)、封山育林等生态工程治理石漠化,致使 NDVI 变化

相对剧烈、高值集中,但植被生态系统趋向良性循环。东南部整体变化较稳定,由于城镇化建设对植被的破坏,少数不稳定区域零散分布于城镇周围。

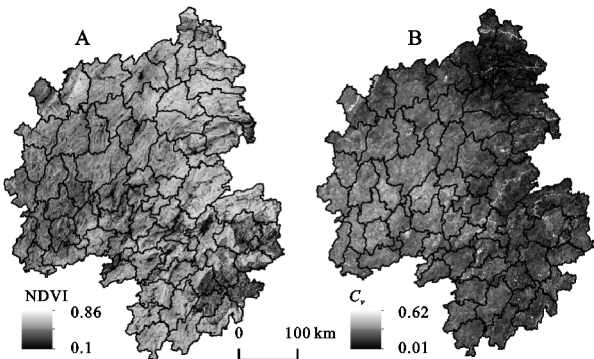


图 3 武陵山区多年生长季 NDVI 及变异系数空间分布

NDVI 的垂直变化特征可以分为 3 个阶段(图 4):第一段(≤ 500 m),低海拔地区人类活动剧烈,用地多为耕地,植被覆盖低,随着海拔的升高,植被类型变得多样,NDVI 急剧上升;第二段(500~2 100 m),人类活动的影响减弱,耕地比例减少而林草地增多,NDVI 平稳上升;第三段($>2\ 100$ m),高海拔地区虽然林地占比多,但植被类型单一,同时生境变恶劣、植被生长受到限制,NDVI 下降。总体而言,NDVI 随着海拔上升表现出先增后减的特征。

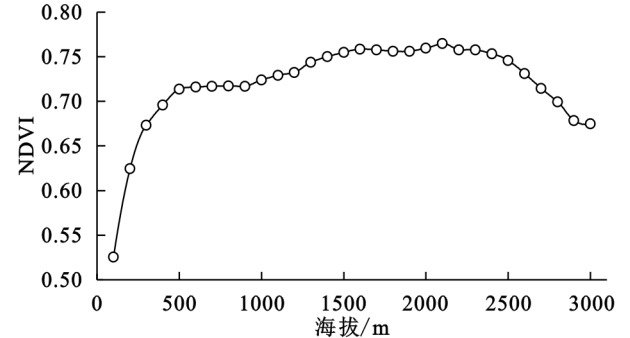


图 4 不同海拔 NDVI 的分布

3.1.3 植被生长季 NDVI 空间变化的趋势 图 5 将 Sen 趋势与 Mann-Kendall 检验结合,分析武陵山区植被生长季 NDVI 变化趋势的空间分布:趋势分析 β 值介于 0.033~0.022/a,均值是 0.004/a,其中 94.79% 的区域植被覆盖呈上升趋势($\beta>0$),说明武陵山区植被生长季 NDVI 总体趋势为微弱上升,与 3.1.1 线性变化趋势结论一致。

表 3 呈现了 NDVI 变化趋势的分级标准及结果,可以看到植被覆盖虽然以上升趋势为主,但多为不显著上升(80.58%),而下降趋势也主要表现为不显著(4.96%)。从空间分布上看,不显著上升广泛分布于整个区域,显著上升区域集中于研究区中、西部,极显著上升和不显著下降区域分布均较为零散,其中不显著下降区域主要在城镇周围及低植被覆盖地区,而显著下

降和极显著下降区域较少。结合高程来看,下降趋势主要发生在海拔1 000 m以下的地区(62.39%),其次是1 000~2 000 m(37.29%)。

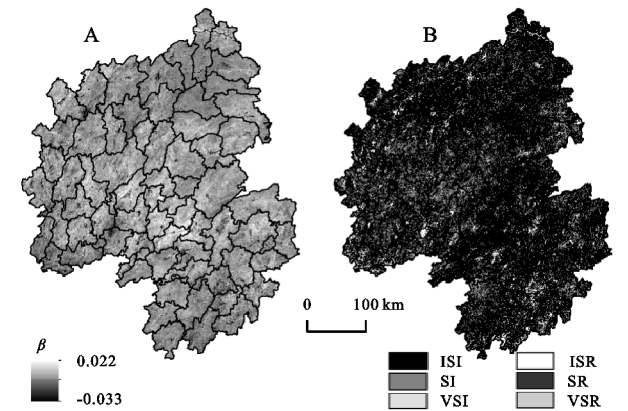


图5 NDVI变化趋势及其显著性的空间分布

表3 NDVI变化趋势统计

NDVI	Z	变化趋势 显著性	面积 百分比/%
$\beta > 0$	$ Z \geq 2.58$	极显著上升	1.41
	$1.96 \leq Z < 2.58$	显著上升	12.90
	$0 \leq Z < 1.96$	不显著上升	80.58
$\beta < 0$	$ Z \geq 2.58$	极显著下降	0.03
	$1.96 \leq Z < 2.58$	显著下降	0.12
	$0 \leq Z < 1.96$	不显著下降	4.96

为分析不同用地类型NDVI的变化特征,统计其变异系数及变化趋势(表4)。各用地类型变异系数均较小,从小到大排序为林地、草地、耕地、灌木地和湿地;林地较稳定、抗干扰力强,NDVI变化最小;而湿地易受干扰、NDVI变化相对大,但整体上NDVI处于稳定状态。退耕还林(草)等生态工程实施以后,不同用地类型NDVI都有上升趋势,最多的是林地(95.82%),然后依次是耕地(94.16%)、草地(93.86%)、灌木地(90.22%)和湿地(76.47%),但多为不显著上升。

3.1.4 植被生长季NDVI空间变化的可持续性 由Hurst指数空间分布图可知(图6),武陵山区生长季NDVI的Hurst指数介于0.09~0.98,均值为0.41。Hurst指数大于0.5表明NDVI变化趋势是持续的上升或下降,小于0.5则是反持续,未来趋势与过去趋势相反。参考相关研究^[21],进一步将变化趋势的持续性划分为强反持续($0 < H \leq 0.25$)、弱反持续($0.25 < H < 0.5$)、弱持续($0.25 < H < 0.75$)和强持续($0.75 \leq H < 1$)4个等级进行统计(图7)。结果表明,生长季NDVI以弱反持续性为主(82.38%),广泛分布于各地,其次是弱持续性(15.86%),集中在区域东南和东北部,空间变化整体趋向反持续性(84.06%),即未来大部分区域NDVI变化趋势将会发生改变,但改变幅度比较小。

表4 不同用地类型的变异系数及变化趋势统计

	耕地	林地	草地	灌木地	湿地
显著性	0.075	0.066	0.074	0.076	0.14
极显著下降	0.04	0.01	0.03	0	0.37
显著下降	0.18	0.07	0.17	0.08	2.21
不显下降	5.62	4.10	5.94	9.71	20.96
极显著上升	1.70	1.27	1.41	0.15	2.57
显著上升	15.62	11.62	12.95	5.19	5.88
不显著上升	76.84	82.93	79.50	84.88	68.01

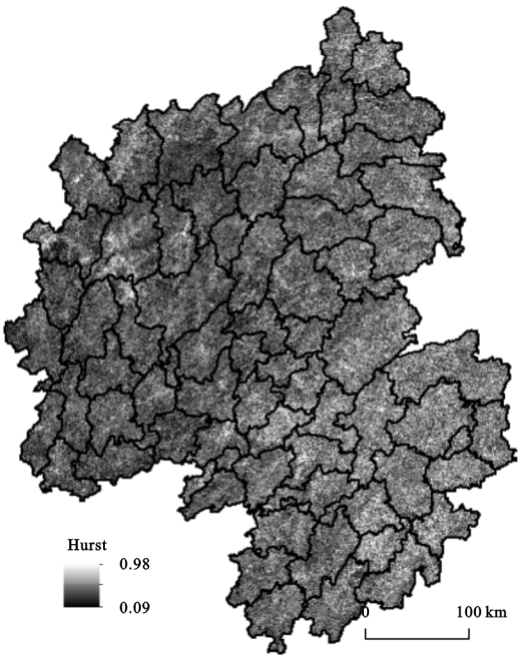


图6 Hurst指数空间分布

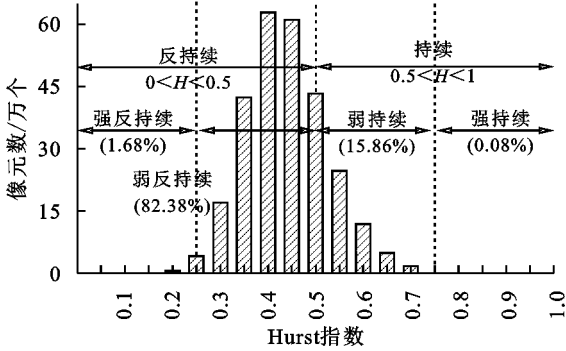


图7 Hurst指数分级及统计

将空间变化趋势与可持续性图层叠加,分析植被覆盖的未来变化特征。由图8可以看出,武陵山区生长季植被NDVI未来趋势主要表现为下降(81.55%),其中上升一下降占比80.27%,意味着80.27%的区域上升趋势将转变为下降,全区广泛分布。未来表现为上升趋势的区域占比18.45%,持续上升的区域多在湖南境内,而由下降转变为上升的主要为重庆的丰都、彭水、武陵及贵州的江口、余庆、湄潭、石阡等地。值得注意的是,1.28%的区域过去和未来都将处于下降状态,主要分布于湖南的怀化、洞口、武冈、邵阳和湖北

的恩施等地,多集中在城镇用地周边,城镇化建设大量侵占耕地和林草地导致 NDVI 持续下降。

总体而言,武陵山区生长季植被覆盖虽然以上升为主,生态保护工作取得了一定成效,但未来变化特征却主要表现为下降。这些区域多为海拔 1 000 m 以下(76.78%),坡度相对平缓($<15^{\circ}$ 占比 78.58%),容易受到人类活动的影响,可能是未来下降趋势的原因。需在巩固现有保护成果基础上,持续关注重点区域,防止植被覆盖下降趋势的发生。

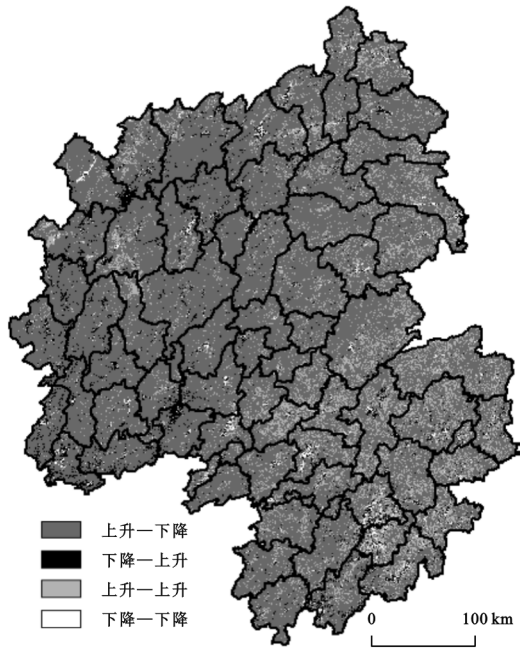


图 8 NDVI 的未来变化特征

3.2 植被生长季 NDVI 对气候因子的响应

3.2.1 气温和降水时空变化格局 2000—2019 年,武陵山区植被生长季平均气温变化范围为 $-0.03\sim0.07^{\circ}\text{C}/\text{a}$ (图 9A),平均值是 $0.017^{\circ}\text{C}/\text{a}$,呈不显著增温趋势。除中部和东北部少数地区气温呈下降趋势

外,大部分地区气温增加,北部和西南部相对明显,空间差异显著。植被生长季累积降水量变化介于 $-21.56\sim17.31\text{ mm}/\text{a}$ (图 9B),平均值是 $1.70\text{ mm}/\text{a}$,呈不显著增加趋势。降水变化趋势也存在明显的空间差异,东北、西南部降水减少,湖南中部降水增加显著。总的来说,不同用地类型水、热均有所增加,武陵山区植被生长季气候趋向暖湿。

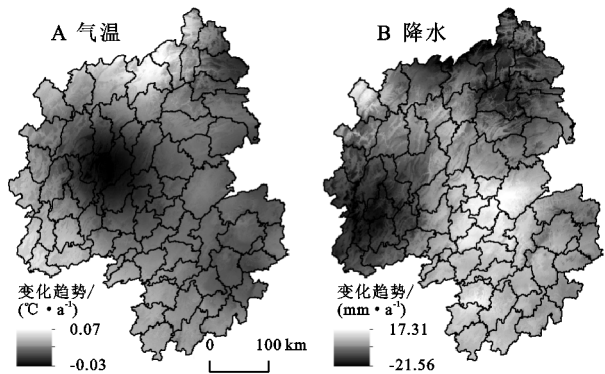


图 9 2000—2019 年武陵山区生长季气温、降水变化趋势的空间分布

3.2.2 植被生长季 NDVI 与气温、降水的相关性 采用偏相关性分析,定量识别植被生长季 NDVI 对气候因子的响应。NDVI 与气温的偏相关系数介于 $-0.84\sim0.89$ (图 10A),均值是 0.07,大部分区域(62.75%)表现为正相关。NDVI 与降水的偏相关系数在 $-0.90\sim0.87$ (图 10B),均值为 0.1,正相关区域占比 66.64%。NDVI 与气温和降水均以正相关为主,且与降水的关系更密切,区域差异显著:NDVI 与气温呈负相关主要是重庆的秀山、酉阳、黔江与贵州的沿河等地,在湖南的会同、芷江、靖州、通道、洪江和辰溪等地明显正相关;NDVI 与降水在贵州的务川、德江、沿河、印江和重庆的酉阳、秀山等地以负相关为主,明显正相关主要集中于湖南的怀化、溆浦、洪江、辰溪、麻阳和重庆的丰都等地。

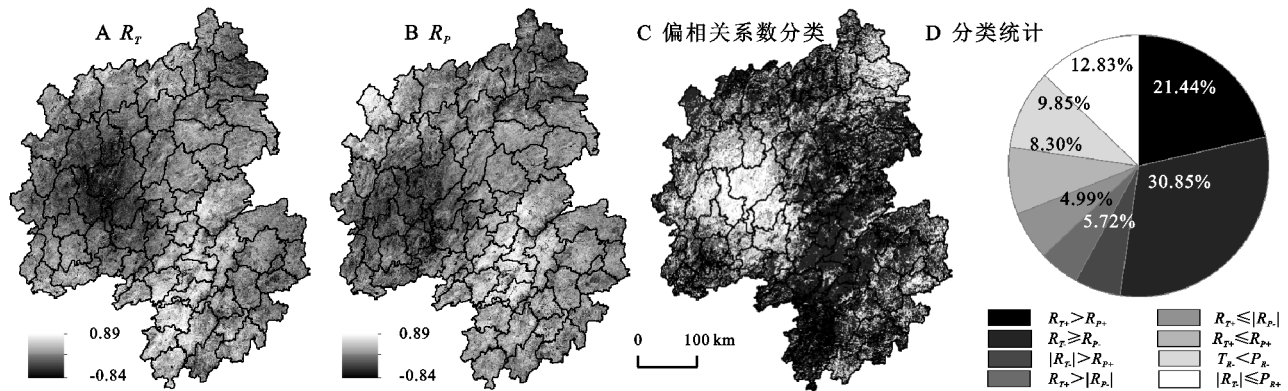


图 10 植被生长季 NDVI 与气温、降水偏相关性

根据 NDVI 与气候因子偏相关系数正负及大小,将偏相关系数分为 8 个类别(图 10C,D),分析区域 NDVI 主要气候因子,结果表明:

$R_{T+}>R_{P+}, R_{T+}>|R_{P-}|, |R_{T-}|>R_{P+}$ 和

$R_{T-}<R_{P-}$ 表示气温为该地主要气候因子。 $R_{T+}>R_{P+}$ 主要是湖北北部、湖南东北和西南部及贵州西南部分地区,NDVI 与气温、降水均为正相关,占整个区域的 21.44%,这些区域气温呈上升趋势(图 9A),少

数地区(湖北、贵州境内)降水呈下降趋势(图 9B),适当增温能够促进植被光合作用,气温是主要气候因子。湖北北部和贵州西部等地, $R_{T+} > |R_{P-}|$, NDVI 与气温和降水分别为正、负相关,比例为 5.72%,多为高海拔地区,气温低而降水充足,气温对植被生长的影响高于降水。重庆中部、贵州东部及湖北东部, $|R_{T-}| > R_{P+}$, NDVI 与气温和降水分别为负、正相关,比例为 6.02%,该区气温高,进一步升温会增强植被呼吸作用从而加速营养物质消耗,同时加快地面水分蒸发不利于干物质积累,为主要限制因子。重庆南部和湖北东北部, $R_{T-} < R_{P-}$, 气温、降水对区域 NDVI 具有抑制作用,占比 12.83%,气温、降水均呈下降趋势,NDVI 趋向增加,气温影响更大。

降水主导包括 $R_{T+} \leq R_{P+}$, $R_{T+} \leq |R_{P-}|$, $|R_{T-}| \leq R_{P+}$ 和 $R_{T-} \geq R_{P-}$ 。30.85%的区域 $R_{T+} \leq R_{P+}$, 包括湖南大部分地区(尤其是中部)及重庆西北部,该区降水量较少,气温与降水均呈增加趋势,水热条件改善,特别是充足的水分利于植被生长。 $R_{T+} \leq |R_{P-}|$ 零散分布于贵州中部和湖北中部,占比 4.99%,水分增加对植被生长起抑制作用,降水是主要气候因子。重庆北部和湖南东南部, $|R_{T-}| \leq R_{P+}$, 比例为 8.30%,水分增加促进植被生长,降水是主要影响因素。贵州中部和湖北东部, $R_{T-} \geq R_{P-}$, NDVI 与气温和降水均为负相关,比例为 9.85%,水热因子对 NDVI 具有负效应且主要受水分影响。

综合来看,气温和降水作为武陵山区生长季 NDVI 主导气候因子的比例分别为 46.01%, 53.99%,整体上降水的影响范围更大。此外,气温或降水主导的区域与 NDVI 的关系以正相关为主(63%),两者的比例分别为 27.16%和 35.84%。

3.2.3 植被生长季 NDVI 对气候响应的时滞效应
植被生长对气候响应具有一定时滞效应,滞后程度对于不同气候因子、不同地区存在差异。计算植被生长季 NDVI 与气候因子当月(4—10月)、前1月(3—9月)、前2月(2—8月)的偏相关系数,分析植被对气候响应的时滞效应。由图 11 可知,月尺度上,武陵山区植被生长季 NDVI 整体上对气温的响应未见明显滞后性,占比达到 98.50%,对降水则以滞后1个月为主,比例为 63.79%。但仍有 1.13%的区域 NDVI 对气温响应存在1个月滞后期,主要位于湖南的城步、隆回等地,响应滞后2个月的区域则零星分布。同时湖北东北部及重庆的丰都等地 NDVI 对降水响应没有滞后性,比例为 7.23%;高于1个月响应滞后期的区域主要集中在湖北利川、恩施、来凤、咸丰及重庆的石柱、黔江等地,占整个区域的 28.98%。

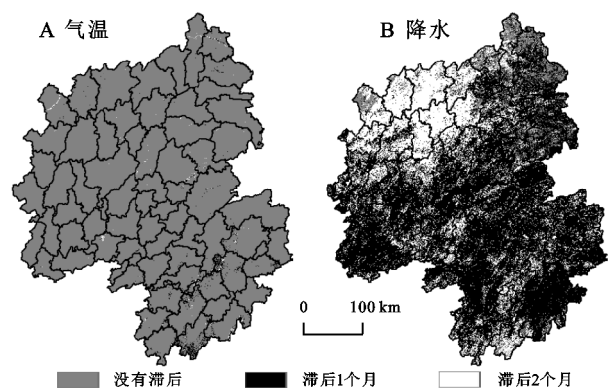


图 11 NDVI 对气候响应滞后性的空间分布

将 NDVI 与当月、前1月、前2月气候因子的偏相关系数分类,得到 0~2 个月滞后期主控气候因子的空间分布(图 12)。当月,降水为 NDVI 主控气候因子,类型以 $R_{T+} \leq R_{P+}$ 为主(79.01%),整个区域广泛分布,其次是 $|R_{T-}| \leq R_{P+}$ (20.27%),主要包括贵州的务川、湄潭、道真和重庆的彭水、酉阳及湖南的城步、通道等地。前1月,NDVI 与气温、降水均以正相关为主,58.28%的区域气温主控($R_{T+} > R_{P+}$ 占 56.63%),主要位于研究区中部和南部,而降水主控比例为 41.72% ($R_{T+} \leq R_{P+}$ 占 39.91%),集中在区域北部和东南部。前2月,NDVI 主控气候因子为气温,类型主要是 $R_{T+} \leq |R_{P-}|$ (52.90%),包括北部的大部分区域,其次是 $R_{T+} > R_{P+}$ (37.72%),主要分布在湖南,尤其是东南部。总体而言,0~2 个月滞后期主控气候因子依次是降水、气温和气温,降水的影响随着时间推移逐渐减弱,而气温逐渐增强。

4 讨论与结论

4.1 讨论

植被在区域生态保护和恢复中扮演着重要角色,武陵山区生态环境脆弱,复杂的地形地貌和多变的自然环境,对植被覆盖产生了巨大影响,因此,对该区植被进行长时间监测和分析具有重要的现实意义。随着退耕还林、天然林保护、石漠化治理和水土保持等重点生态修复工程的实施,武陵山区生长季植被 NDVI 整体呈现波动增加态势,植被条件不断改善,与相关研究结果一致^[22-23]。空间上,绝大多数区域(94.79%)植被覆盖呈上升趋势,下降区域主要是城镇周围及低植被覆盖地区。2001年、2006年和2014年3个明显 NDVI 谷值可能与该年份水热不匹配有关:2001年气温低、降水少,干冷不利于植被生长;2006年气温多年最高、蒸发旺盛,但降水少,缺水抑制了植被生长;2014年气温低、降水过多,达到 1 319.42 mm,易引起植被根系缺氧。

植被受地形因素影响在垂向结构上呈现明显的空间分异特征^[24],武陵山区 NDVI 随海拔升高表现为先增

后减,与植被 NPP 随海拔变化节点大致相同^[25]。低海拔地区易受城镇化建设和农业生产等人类活动的影响,

是植被退化易发生区,研究区的退化区域主要集中于 2 000 m 以下,特别是 1 000 m 以下。

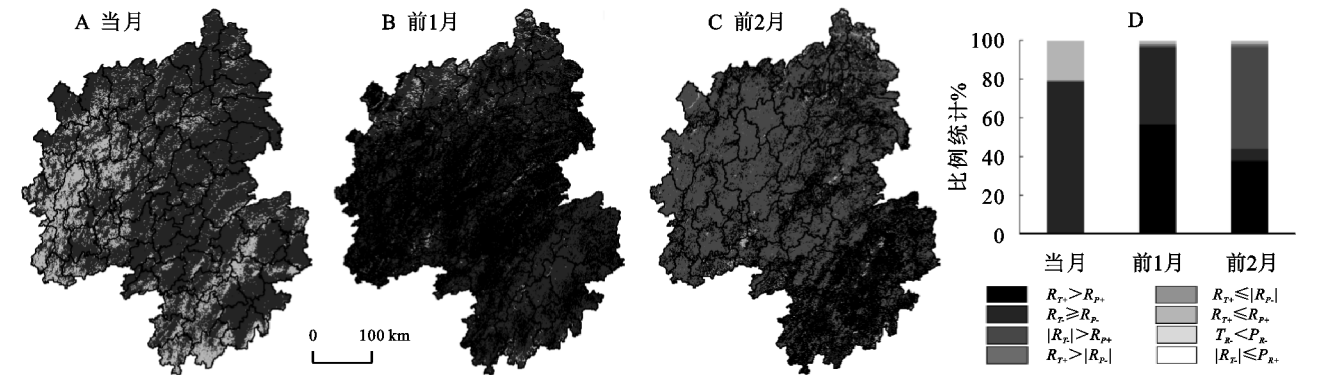


图 12 NDVI 对气候响应滞后性主控因子的空间分布及统计

气温和降水通过影响有效积温和可利用水分来调控植物光合作用、呼吸作用及土壤有机碳分解等进而影响植物的生长和分布^[26],是主要的非生物因素。受季风气候和地形分异的影响,武陵山区气温和降水时空差异明显,研究时段内气候总体趋向暖湿,有利于植被生长。生长季尺度,近 20 a 武陵山区植被生长季 NDVI 与气温、降水的关系均整体表现为正相关。NDVI 与气温呈较显著正相关主要是西南部(湖南西部)和高海拔的湖北北部,这些区域气温相对低,气温呈升高趋势促进了植被生长。研究区中部和西北部多为低海拔地区,气温高而降水不足,水分成为制约植被生长的主要因素,而降水在研究时段呈明显增加趋势,因此 NDVI 与降水具有较显著的正相关关系。武陵山区 NDVI 最大值多为 7 月,而 7 月是最高气温月份,此外降水多集中在 5—9 月,特别是 6 月,月尺度而言,武陵山区对气温未见明显滞后性,对降水以滞后一个月为主。

4.2 结论

- (1) 植被生长季 NDVI 的变化范围为 0.64~0.76,多年 NDVI 均值是 0.71,整体呈现波动增加态势,增速为 0.52%/a($p<0.01$),植被条件不断改善。
- (2) 武陵山区各地多年植被生长季 NDVI 均值的介于 0.1~0.86,94.65% 的区域 NDVI>0.6,植被覆盖整体较好。NDVI 空间差异明显,空间格局呈现“东北高、东南和西部低”的特点。空间变化整体处于较稳定状态,东北部低值聚集,高值主要位于西部。NDVI 的垂直变化特征分为急剧上升、平稳上升和下降 3 个阶段,随海拔升高总体表现出先增后减。
- (3) 绝大多数区域(94.79%)植被生长季 NDVI 呈上升趋势,但多不显著,而呈下降趋势的区域也以不显著为主。下降主要发生在海拔 1 000 m 以下,其次是 1 000~2 000 m。NDVI 空间变化整体趋向反持续性,未来大部分区域 NDVI 变化趋势将会发生改变,但改变幅

- 度比较小。未来变化特征主要表现为下降。
- (4) 生长季尺度,武陵山区气候趋向暖湿,NDVI 与气温、降水均以正相关为主。气温和降水对区域 NDVI 的影响有明显的空间差异性,整体上看降水的影响范围更大。
- (5) 月尺度,NDVI 整体上对气温的响应未见明显滞后性,而对降水的响应大都滞后一个月。0~2 个月滞后期主控气候因子依次是降水、气温和气温,其中降水的影响随着时间推移逐渐减弱,而气温的影响逐渐增强。

参考文献:

[1] 金凯,王飞,韩剑桥,等.1982—2015 年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响[J].地理学报,2020,75(5):961-974.

[2] Zhang W, Wang L C, Xiang F F, et al. Vegetation dynamics and the relations with climate change at multiple time scales in the Yangtze River and Yellow River Basin, China[J]. Ecological Indicators, 2020,110:105892.

[3] 刘宪锋,任志远,林志慧,等.2000—2011 年三江源区植被覆盖时空变化特征[J].地理学报,2013,68(7):897-908.

[4] 刘海,郑粮,黄跃飞,等.鄱阳湖生态经济区成立前后 NDVI 时空动态变化及其驱动因素[J].生态学杂志,2020,39(1):11-22.

[5] 信忠保,许炯心,郑伟.气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响[J].中国科学 D 辑,2007,37(11):1504-1514.

[6] 孙锐,陈少辉,苏红波.2000—2016 年黄土高原不同土地覆盖类型植被 NDVI 时空变化[J].地理科学进展,2019,38(8):1248-1258.

[7] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991[J]. Nature, 1997,386(6626):698-702.

[8] Ichii K, Kawabata A, Yamaguchi Y. Global correlation analysis for NDVI and climatic variables and NDVI trends:1982—1990[J]. International Journal of Remote Sensing, 2002,23(18):3873-3878.

[9] Piao S L, Wang X H, Ciais P, et al. Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006[J]. *Global Change Biology*, 2011,17(10):3228-3239.

[10] 张戈丽,欧阳华,张宪洲,等.基于生态地理分区的青藏高原植被覆被变化及其对气候变化的响应[J].*地理研究*,2010,29(11):2004-2016.

[11] 赵安周,张安兵,刘海新,等.退耕还林(草)工程实施前后黄土高原植被覆盖时空变化分析[J].*自然资源学报*,2017,32(3):449-460.

[12] 周伟,刚成诚,李建龙,等.1982—2010 年中国草地覆盖度的时空动态及其对气候变化的响应[J].*地理学报*,2014,69(1):15-30.

[13] Piao S L, Mohammad A, Fang J Y, et al. NDVI-based increase in growth of temperate grasslands and its responses to climate changes in China[J]. *Global Environmental Change*, 2006,16(4):340-348.

[14] 何航,张勃,侯启,等.1982—2015 年中国北方归一化植被指数(NDVI)变化特征及对气候变化的响应[J].*生态与农村环境学报*,2020,36(1):70-80.

[15] 黄悦悦,杨东,冯磊.2000—2016 年宁夏植被覆盖度的时空变化及其驱动力[J].*生态学杂志*,2019,38(8):2515-2523.

[16] 封志明,杨艳昭,丁晓强,等.气象要素空间插值方法优化[J].*地理研究*,2004,23(3):357-364.

[17] 许民,王雁,周兆叶,等.长江流域逐月气温空间插值方法的探讨[J].*长江流域资源与环境*,2012,21(3):327-334.

[18] 袁丽华,蒋卫国,申文明,等.2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化[J].*生态学报*,2013,33(24):7798-7806.

[19] 刘宪锋,潘耀忠,朱秀芳,等.2000—2014 年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因[J].*地理学报*,2015,70(5):705-716.

[20] 徐建华.现代地理学中的数学方法[M].3 版.北京:高等教育出版社,2017.

[21] 王耀斌,赵永华,韩磊,等.2000—2015 年秦巴山区植被净初级生产力时空变化及其趋动因子[J].*应用生态学报*,2018,29(7):2373-2381.

[22] 张亮,丁明军,张华敏,等.1982—2015 年长江流域植被覆盖度时空变化分析[J].*自然资源学报*,2018,33(12):2084-2097.

[23] 肖建勇,王世杰,白晓永,等.喀斯特关键带植被时空变化及其驱动因素[J].*生态学报*,2018,38(24):8799-8812.

[24] 荣欣,易桂花,张廷斌,等.2000—2015 年川西高原植被 EVI 海拔梯度变化及其对气候变化的响应[J].*长江流域资源与环境*,2019,28(12):3014-3028.

[25] 孙庆龄,冯险峰,肖潇.武陵山区植被净第一性生产力的时空格局及其与地形因子的关系[J].*地球信息科学学报*,2014,16(6):915-924.

[26] 穆少杰,李建龙,陈奕兆,等.2001—2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J].*地理学报*,2012,67(9):1255-1268.

(上接第 244 页)

[26] Roderick M L, Farquhar G D. Changes in Australian pan evaporation from 1970 to 2002[J]. *International Journal of Climatology*, 2004,24(9):1077-1090.

[27] Thomas A. Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration trends over China[J]. *International Journal of Climatology*, 2000,20(4):381-396.

[28] Nouri M, Bannayan M. Spatiotemporal changes in aridity index and reference evapotranspiration over semi-arid and humid regions of Iran:trend, cause, and sensitivity analyses[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019,136(3):1073-1084.

[29] Silva V D. On climate variability in Northeast of Brazil[J]. *Journal of Arid Environments*, 2004,58(4):575-596.

[30] 温姗姗,姜彤,李修仓,等.1961—2010 年松花江流域实际蒸散发时空变化及影响要素分析[J].*气候变化研究进展*,2014,10(2):79-86.

[31] 钟巧,焦黎,李稚,等.博斯腾湖流域潜在蒸散发时空演变及归因分析[J].*干旱区地理*,2019,42(1):103-112.

[32] 刘钰,李王成,谭军利,等.吉林平原地区参考作物蒸散发量变化趋势及主要影响要素分析[J].*灌溉排水学报*,2015,34(S2):112-115.

[33] Wang Z, Xie P, Lai C, et al. Spatiotemporal variability of reference evapotranspiration and contributing climatic factors in China during 1961—2013[J]. *Journal of Hydrology*, 2017,544:97-108.

[34] 邱美娟,刘布春,刘园,等.吉林省参考作物蒸散量的时空变化特征及影响因素[J].*干旱气象*,2019,37(1):119-126.

[35] 孙福宝.基于 Budyko 水热耦合平衡假设的流域蒸散发研究[D].北京:清华大学,2007.

[36] 刘志娟,杨晓光,王文峰,等.气候变化背景下我国东北三省农业气候资源变化特征[J].*应用生态学报*,2009,20(9):2199-2206.

[37] 刘玉汐,任景全,王冬妮,等.吉林省参考作物蒸散量时空分布及成因分析[J].*生态环境学报*,2019,28(11):2208-2215.

[38] 岳元,申双和,金宇,等.“蒸发悖论”在吉林省的表现及成因分析[J].*生态学杂志*,2017,36(7):1993-2002.

[39] 刘昌明,张丹.中国地表潜在蒸散发敏感性的时空变化特征分析[J].*地理学报*,2011,66(5):579-588.