

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221460

淮河流域极端气象事件与植被时空演变及响应关系研究

常俊超, 崔亚军

(河南省水文水资源局, 河南 郑州 450003)

摘要: 植被是陆生生态系统的重要组成部分, 极易受极端气象事件影响, 探究极端气象事件与植被的时空演变及动态响应关系, 对科学应对气候异常、预防自然灾害具有重要意义。为此, 结合 RCLimDex 软件、变化趋势分析、消除趋势波动分析等方法, 分析了 1998~2019 年以来淮河流域极端气候和 NDVI 时空演变规律, 探讨了其成因及未来变化趋势, 明确了 NDVI 对极端气候的响应。结果表明, 1998~2019 年淮河流域 NDVI 呈上升趋势, 增幅为 0.0025 a^{-1} , 极端气候指数中暖温指数上升, 冷温指数和降水指数(除 RX1day 外)均下降; 淮河流域 NDVI “西高东低”的分布与区域内城市化分布密切相关; NDVI 对极端气候存在 1 个月左右的滞后响应, 未来一段时间内, NDVI 将在极端气候的作用下继续上升; 流域内年际 NDVI 变化与自然和人为因素密不可分, 年内 NDVI 变化主要受耕地内农作物生长节律影响。

关键词: 淮河流域; 极端气候; 归一化植被指数; 时空演变; 消除趋势波动分析

中图分类号: TV12; P344

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)06-0017-05

1 引言

极端气候事件指某一地区在一定时间内出现的历史罕见的气象事件, 可分为极端气温、极端干旱、极端降水等^[1]。在全球变暖的大背景下, 我国极端气象事件频发, 而植被在陆地生态系统中发挥着重要作用, 受极端气象事件影响极大。王晓利等^[2]探讨了归一化植被指数(NDVI)对极端气温和极端降水年尺度、月尺度的响应特征; 冯磊等^[3]借助相关分析和 Lasso 回归模型分析了川渝地区 NDVI 与极端气候指数的关系。淮河流域(图 1(a))位于东经 $111^{\circ} \sim 122^{\circ}$ 、北纬 $30^{\circ} \sim 37^{\circ}$, 流域面积 $27.47 \times 10^4 \text{ km}^2$, 干流全长 1 000 km。受自然地理条件和人类活动的双重影响, 淮河流域极端气候对植被分布(图 1(b))的影响较平均态气候的影响更明显。其次, 不同区域不同尺度下的极端气候与植被之间的关系存在差异^[4,5], 且目前缺乏对淮河流域极端水文气象与植被响应的系统性研究。鉴于, 本文基于淮河流域 1998~2019 年 30 个气象站点气温、降水资料及长序列 NDVI 数据集, 结合软件处理、变化趋势分析、未来时空演变等方法, 分析了 1998~2019 年研究区内极端气候和 NDVI 时空演变规律, 探讨了其成因及未来变化趋势, 明确了 NDVI 对极端气候的

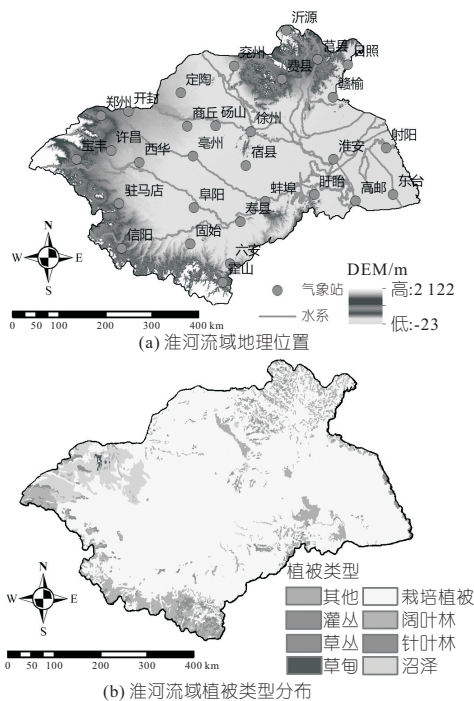


图 1 淮河流域水系及植被类型分布

Fig. 1 Distribution of river system and vegetation type in Huaihe River Basin

响应关系, 对科学应对气候异常、预防自然灾害具有重要意义。

2 资料与方法

收稿日期: 2022-07-16, 修回日期: 2022-08-25

作者简介: 常俊超(1975-), 男, 硕士、高级工程师, 研究方向为水文水资源勘测和水文信息化等, E-mail: 3493408246@qq.com

2.1 数据来源与预处理

采用淮河流域气象、植被、DEM 等资料,并基于 ArcGIS 实现制图与可视化。其中信阳等 30 个气象站 1998~2019 年逐日降水、最高气温、最低气温数据由中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>) 整理发布,采用 RCLimDex 软件剔除不合格数据,并提取 27 个极端气候指数。月度 1 km NDVI 数据集来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>),序列长度为 1998~2019 年。DEM 数据分辨率为 90 m×90 m,下载自地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn/>)。

利用 RCLimDex 软件对气象数据进行预处理后,计算获得 30 个气象站点的 27 个极端气候指数;计算各站点 NDVI 与极端气候指数之间的相关性,筛选导致 NDVI 变化的关键气候指数;利用淮河流域边界矢量文件裁剪极端气候指数和 NDVI 数据,将数据可视化。

2.2 RCLimDex 软件

RCLimDex 是基于 R 语言的极端气候研究工具,通过输入逐日降水、最高气温、最低气温即可计算 CDD(持续干燥指数)、RX1day(最大 1 d 降水量)等 27 个极端气候指数。此外,该软件还可消除明显的错误以控制气象数据质量。

2.3 线性回归分析法

采用线性回归分析法计算趋势线变化率,分析气候指数与 NDVI 的时空变化趋势,并采用 Pearson 相关系数 S_{Slope} 衡量极端气候指数与 NDVI 之间的相关性。计算公式为:

$$S_{Slope} = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \sum_{i=1}^n y_i^2}} \quad (1)$$

式中, x_i 为第 i 年的 NDVI 平均值; y_i 为第 i 年的极端气候指数; n 为研究期总年数,本文取 22。

2.4 消除趋势波动分析法

消除趋势波动分析法(DFA)是一种分析幂律函数关系的方法^[6]。通过该方法可预估淮河流域 NDVI 及各极端气候指数的未来变化趋势。

对于给定的降水和气温序列 x_k ($k = 1, 2, \dots, N$), 计算步骤如下。

步骤 1 首先计算序列 x_k ($k = 1, 2, \dots, N$) 的累计离差 $y(i)$:

$$y(i) = \sum_{k=1}^i (x_k - \bar{x}) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

式中, \bar{x} 为序列均值。

步骤 2 在此基础上,将 $y(i)$ 分割成长度为 s 的 N_s 个互不相交的区域:

$$N_s = \text{int}N/s \quad (3)$$

步骤 3 考虑到序列长度 N 不一定是 s 的整数倍,为充分利用数据,对 $y(i)$ 再次逆序分类,共产生 $2N_s$ 个区间。对每个区间的数据进行多项式拟合从而得到 $y_v(i)$, 利用下式去除原始序列 $y(i)$ 的趋势成分:

$$y_s(i) = y(i) - y_v(i) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

步骤 4 计算各区间的均方误差 $F^2(v, s)$:

$$F^2(v, s) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \{y[(v-1)s+i] - y_v(i)\}^2 \quad i = 1, 2, \dots, N_s \quad (5)$$

$$F^2(v, s) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \{y[N - (v - N_s)s + i] - y_v(i)\}^2 \quad i = N_s + 1, N_s + 2, \dots, 2N_s \quad (6)$$

步骤 5 对 $2N_s$ 个区间,求 $F^2(v, s)$ 的均值,得到波动函数 $F(s)$:

$$F(s) = \sqrt{\frac{1}{2N_s} \sum_{v=1}^{2N_s} F^2(v, s)} \quad (7)$$

步骤 6 若序列 x_k 具有长程相关性,则 $F(s)$ 与 s 满足以下幂律关系:

$$F(s) \sim s^a \text{ 或 } \ln F(s) = a \ln s + b \quad (8)$$

在对数坐标系中,利用最小二乘法拟合得到表征序列相关性的标度指数 a 。当 a 介于 0~0.5 时,说明未来时间序列的趋势与现有趋势相反;当 $a = 0.5$ 时,说明序列是随机分布的独立过程;当 a 介于 0.5~1.0 时,说明现阶段趋势是连续的,未来的趋势与现阶段趋势类似;当 $a \geq 1$ 时,表明该序列具有非幂律相关的长程相关性。

3 结果与分析

3.1 极端气候指数筛选

表 1 为 27 个极端气候指数与 NDVI 在年尺

表 1 RCLimDex 指数与 NDVI 的 Pearson 相关系数统计

Tab. 1 Statistics of Pearson correlation coefficient between extreme climate indices and NDVI

指数	Pearson 相关系数	指数	Pearson 相关系数	指数	Pearson 相关系数
TN90p	0.599 5	ID	0.209 2	RX5day	0.109 8
TR	0.533 1	PRCPTOT	0.203 0	CWD	0.089 8
TNx	0.520 8	R99p	0.202 2	WSDI	0.082 2
SU	0.467 2	R95p	0.165 8	TNn	-0.041 9
R20	0.379 1	Rnn	0.162 6	GSL	-0.077 9
TX90p	0.346 4	RX1day	0.162 0	CSDI	-0.276 1
FD	0.320 4	TXx	0.159 0	TXn	-0.398 0
SDII	0.317 3	R10	0.155 2	TX10p	-0.460 8
DTR	0.295 5	CDD	0.125 6	TN10p	-0.484 6

度上的 Pearson 相关系数。由表 1 可知,与极端降水指数相比,极端温度指数与 NDVI 的相关性更强。对各气候指数根据 Pearson 相关系数由高至低排序,最终筛选出与 NDVI 变化相关性较强的 8 个极端气候指数。由于所筛选的指标中仅包含 R20 单个极端降水指数,不能全面反映淮河流域极端降水特征。参考以往研究^[7],引入 RX1day、RX5day、PRCPTOT,最终确定 11 个极端气候指数,分别包含 4 个降水指数(RX1day、RX5day、R20、PRCPTOT)及 7 个温度指数(TR、TN_x、SU、TX10p、TX90p、TN10p、TN90p)。其中,除 TX10p、TN10p 与 NDVI 呈负相关外,其余指数与 NDVI 均呈正相关。

3.2 极端气候指数和 NDVI 的时空演变规律

1998~2008 年,淮河流域 NDVI 呈显著增加趋势,但在 2008 年后,NDVI 波动较大,呈下降趋势。总体而言,1998~2019 年淮河流域 NDVI 呈增加趋势,涨幅为 $0.0025 a^{-1}$,说明在气候条件和水保措施的共同作用下,流域内植被恢复效果显著。极端降水指数除 RX1day 外,其余 3 个指

数均呈下降趋势。极端温度指数除冷温指数 TX10p、TN10p 呈下降趋势外,其余均呈上升趋势。此外,NDVI 在年尺度上与极端暖温指数(TX90p、TN90p、TR、TN_x、SU)变化趋势相似,而冷温指数的下降侧面反映了淮河流域整体变暖的事实,表明温度上升是促进淮河流域植被改善的原因之一。

图 2 为 NDVI、极端气候指数的空间分布及各站点的年际变化趋势。由图 2(a)可知,淮河流域 NDVI 呈“西高东低”分布,这与流域内“东强西弱”的经济格局相吻合。相关研究表明,NDVI 与人口和 GDP 之间均呈负相关性,在一定程度上会侵占植被的生长空间^[8]。具体到站点而言,大部分站点 NDVI 呈上升趋势或维持原状,而在郑州、开封、日照呈下降趋势,这与三地相对较高的人口密度和经济水平密切相关。极端降水指数呈“南高北低”的空间分布特征,符合淮河流域降水“南高北低”的常规认识。极端气温指数中 SU 和 TN10p 下降趋势明显,其他指数则无明显变化趋势。

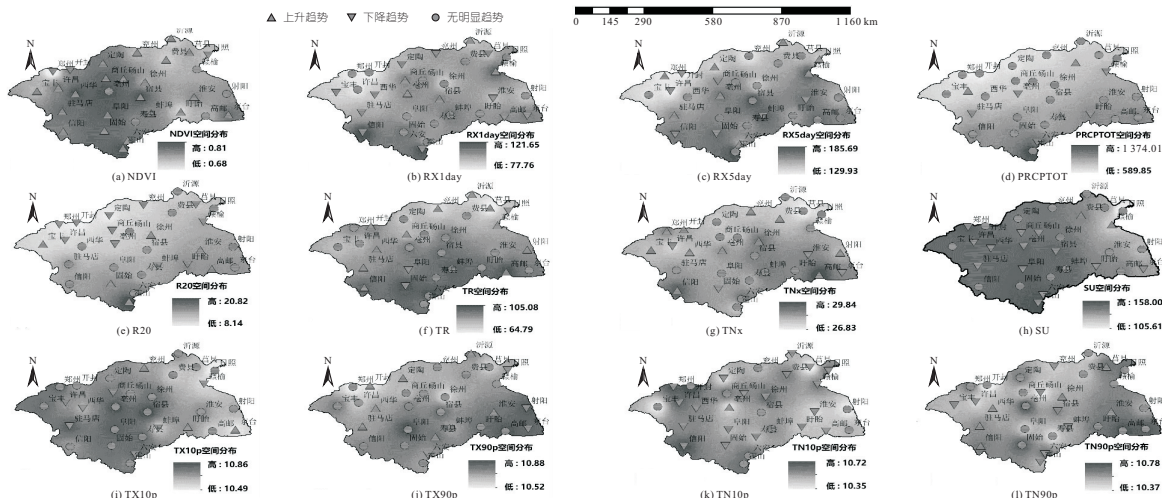


图 2 1998~2019 年 NDVI 与各极端气候指数的时空分布

Fig. 2 Spatio-temporal distribution of NDVI and extreme climate indices from 1998 to 2019

当标度指数 a 在 0.5~1.0 范围内即可认为未来趋势与 2008~2019 年的变化一致。结果表明,NDVI 将与过去变化趋势相反并呈上升趋势;极端降水指数中 RX1day 将与过去上升趋势一致,而其他降水指数均将呈下降趋势。极端温度指数中冷温指数 TX10p、TN10p 将继续下降,暖温指数除 TR、SU 继续上升外,其余指数将呈下降趋势。PRCPTOT、R20、SU、TX10p、TN90p 的 a 值接近 1,意味着以上序列具有持久的长程相关性,但值得注意的是,TX10p、TN90p 虽具有持久的长程相关性,但非幂律相关。

3.3 极端气候指数与 NDVI 的响应关系

图 3 为月尺度 NDVI 与极端指数之间的响应关系。由图 3 可知,在冬季(12 月~次年 2 月)、

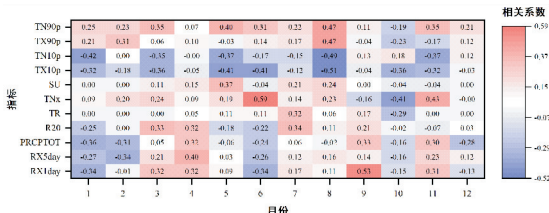


图 3 极端气候指数与 NDVI 的 Pearson 相关系数热图
Fig. 3 Heat map of Pearson correlation coefficient of extreme climate index and NDVI

春末夏初(5~6月)及秋季10月,NDVI与极端降水指数基本呈负相关;而在春季的3~4月、夏末秋初(7~9月)、秋末11月呈正相关。极端温度指数中,冷温指数TX10p、TN10p在全年基本与NDVI呈负相关,表明低温是植被动态变化的抑制因素之一。此外,按月统计了NDVI与极端气候指数在不同滞后时段的相关性系数(表2),发现除TX10p、TN10p、TX90p、TN90p外,其余指数(包含RX1day等4个极端降水指数和TR等3个极端气温指数)与滞后1个月的NDVI相关系数较同期均有不同程度的提高,表明NDVI对极端气候存在1个月左右的滞后响应。

表 2 NDVI 与极端气候指数不同滞后时段的相关性统计

Tab. 2 Statistics of correlation coefficient between extreme climate indices and NDVI at different lag periods

时段	同期	滞后 1 个月	滞后 2 个月	滞后 3 个月
RX1day	0.486 1	0.542 5	0.343 5	-0.014 1
RX5day	0.529 7	0.549 5	0.264 8	-0.159 9
PRCPTOT	0.581 6	0.595 8	0.272 0	-0.162 9
R20	0.433 9	0.501 3	0.253 5	-0.131 1
TR	0.572 3	0.678 6	0.321 1	-0.169 8
TNx	0.606 9	0.771 1	0.232 8	-0.178 9
SU	0.579 1	0.710 3	0.347 6	-0.040 5
TX10p	-0.079 8	-0.066 1	-0.057 1	-0.035 9
TN10p	-0.032 2	-0.041 3	-0.046 9	-0.029 1
TX90p	0.005 0	0.008 1	0.023 9	0.001 0
TN90p	0.084 4	0.087 6	0.065 8	0.051 2

4 讨论

4.1 NDVI 时空变化成因分析

年际变化上,淮河流域NDVI总体呈上升趋势,这与1990年代开始推行的退耕还林、还草措施密不可分。此外,植被覆盖度变化是自然因素

和人为因素共同作用的结果。自然因素中,气候变化是引起淮河流域植被覆盖变化的重要影响因素,其中水热因子对植被控制的主要途径是通过提高温度和降水量,促进植物体内无机盐和水分的运输,从而促进植被生长。人为因素对植被变化的负面影响在大城市群地区更明显,这通常是由于城市化发展对农田和林、草地的侵占造成的。

图4为淮河流域年内NDVI变化、耕地与非耕地空间分布及耕地和非耕地5~10月NDVI变化。由图4(a)可知,NDVI在年内总体呈“先上升后下降,再上升再下降”的趋势变化,但在6、10月存在大幅减少的现象。考虑到淮河流域广泛分布的人工栽培植被,这可能与植被物候特别是农作物的物候有关。为此,基于淮河流域耕地和非耕地的空间分布(图4(b)),分别统计了两种土地利用类型在6~10月前后的NDVI变化(图4(c))。由图4(c)可看出,耕地年内NDVI的变化与流域整体NDVI走势基本一致,而非耕地在6月的NDVI较5月并未大幅降低,因此耕地在6月NDVI的变化是导致流域整体NDVI在6月大幅降低的主要原因,而10月NDVI的变化是耕地和非耕地NDVI共同减少的结果。淮河流域农作物主要以冬小麦、夏玉米及淮河以南的一季稻为主。以冬小麦为例,每年6月为成熟收割季节,由此导致NDVI大幅降低,而随着夏玉米的播种,其一般在7~10d后即可出苗,因此在7月,NDVI仍会恢复至较高水平。而秋季10月为夏玉米的收割季节,同时伴随非耕地中林地植被等草木枯黄、树叶凋蔽,由此导致NDVI大幅降低。

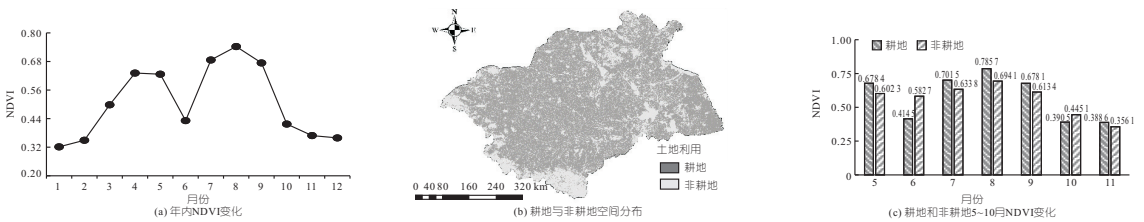


图 4 淮河流域年内 NDVI 变化、耕地与非耕地空间分布及耕地和非耕地 5~10 月 NDVI 变化

Fig. 4 Intra-annual NDVI variation, spatial distribution of cultivated land and non-cultivated land and its NDVI variation from May to October in Huaihe River Basin

4.2 NDVI 与极端气候指数的响应机制

(1)对降水指数的响应。淮河流域NDVI与降水指数呈正相关,表明降水在该区域对植被生长起到促进作用。相对于我国南方地区,淮河流域较低的土壤含水率导致植被对水分需求较高,因此降水是影响该地区植被生长的因子之一且总体对植被生长有利。

(2)对气温指数的响应。淮河流域NDVI与极端暖温指数呈正相关,表明气温升高有利于该

区域植被生长。淮河流域多年平均降水量为920mm,处于我国半湿润和湿润地区的过渡地带,气温升高会加快植物蒸腾,从而降低叶片温度并促进根系生长。对于极端冷温指数而言,其与NDVI呈负相关,低温会抑制光合作用同时导致积温不足,最终对植被生长产生负面影响。

5 结论

a. 1998~2019年淮河流域NDVI以 $0.0025 a^{-1}$

涨幅增加,极端暖温指数与 NDVI 变化趋势相同,极端冷温指数与大部分极端降水指数均呈下降趋势。空间上,淮河流域 NDVI 呈“西高东低”分布,极端降水指数呈“南高北低”的空间分布。

b. 未来一段时间内 NDVI 呈上升趋势;极端降水指数中 RX1day 将与过去上升趋势一致,而其他降水指数均将呈下降趋势;极端温度指数中冷温指数将继续下降,暖温指数除 TR、SU 继续上升外,其余均将呈下降趋势。

c. 淮河流域 NDVI 对极端气候存在 1 个月左右的滞后响应;年际 NDVI 变化与退耕还林、还草措施及城市化建设密不可分,年内变化主要与区域内农作物生长节律有关。

参考文献:

[1] MORSS R E, WILHELMI O V, MEEHL G A, et al. Improving societal outcomes of extreme weather in a changing climate: An integrated perspective [J]. *annual review of environment & resources*,

2011,36(1): 1-25.

- [2] 王晓利,侯西勇. 1982-2014 年中国沿海地区归一化植被指数(NDVI)变化及其对极端气候的响应[J]. *地理研究*,2019,38(4):807-821.
- [3] 冯磊,杨东,黄悦悦. 2000-2017 年川渝地区植被 NDVI 特征及其对极端气候的响应[J]. *生态学杂志*,2020,39(7):2316-2326.
- [4] 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.
- [5] 丁瑞,王兆礼,陈晓宏. 西南河流域源区归一化植被指数时空动态变化及其与气候因子的关系[J]. *水电能源科学*,2018,36(2):15-19.
- [6] 吕继强,莫淑红,沈冰,等. 新疆和田降雨小波分析和非趋势波动分析[J]. *水电能源科学*,2008,26(5):7-9.
- [7] 张磊磊,康颖,张建云,等. 近 50 年来黄河源区极端气候事件趋势分析[J]. *水电能源科学*,2015,33(2):6-9,36.
- [8] 韩贵锋,徐建华. 长江三角洲地区城市化与植被活动之间的时空相关性[J]. *生态科学*,2008,27(1):1-5.

Study on Spatio-temporal Evolution and Response Relationship of Extreme Climate Events and Vegetation in Huaihe River Basin

CHANG Jun-chao, CUI Ya-jun

(Hydrology and Water Resources Bureau of Henan Province, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Vegetation is an important part of terrestrial ecosystem and is vulnerable to extreme climate events. It is of great significance to explore the spatio-temporal evolution and dynamic response relationship between extreme climate events and vegetation for scientific response to climate anomalies and prevention of natural disasters. Therefore, the RCLimDex, trend analysis and detrended fluctuation analysis were used to analyze the spatio-temporal evolution of extreme climate and NDVI in the Huaihe River Basin from 1998 to 2019, and discuss their causes and future variation tendency as well as clarify the response of NDVI to extreme climate. The results demonstrate that the NDVI shows an increasing tendency with an increase of 0.0025 a^{-1} from 1998 to 2019. Among the extreme climate indices, warm temperature indices showed an increasing tendency, while the cold temperature indices and precipitation indices (except RX1day) showed a decreasing tendency. The distribution of NDVI in the Huaihe River Basin was closely related to the distribution of urbanization in the region. The NDVI has a lag response of about one month to extreme climate and will continue to rise. The annual variation of the NDVI is closely related to natural and human factors, and the intra-annual variation of the NDVI is mainly affected by the growth rhythm of crops in the cultivated land.

Key words: Huaihe River Basin; extreme climate; normalized difference vegetation index; spatio-temporal evolution; detrended fluctuation analysis

(上接第 53 页)

A Reservoir Scheduling Benefit-risk Equilibrium Optimization Model Considering Runoff Uncertainty and Its Application

PENG Jing-ping¹, ZHANG Chao¹, TAO Yi-tao^{2a,2b,2c}, HE Xing-yao¹,
YANG Xu^{1,3}, XU Xiao-tian¹, MO Li^{2a,2b,2c}

- (1. China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443002, China; 2a. School of Hydropower and Information Engineering; 2b. Hubei Key Laboratory of Digital River Basin Science and Technology; 2c. Institute of Water Resources and Hydropower, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. Hubei Key Laboratory of Intelligent Yangtze River and Hydropower Science, Yichang 443002, China)

Abstract: Due to the uncertainty of runoff, there are certain risks when formulating hydropower station power generation plans. In this paper, the concept of spectral risk measurement in economics was introduced in reservoir dispatch to quantify risk, and a benefit-risk equilibrium optimization model was established, which can reflect the attitude of decision makers to risk through different risk aversion coefficients and confidence values according to the actual situation of the power station. Taking the Three Gorges Power Station as an example, the results show that compared with the traditional model of maximum power generation benefit, the proposed benefit-risk equilibrium optimization model can effectively reduce the risk caused by the uncertainty of inflow in hydropower stations under the condition that the loss of power generation income is extremely small.

Key words: reservoir operation; spectral risk measure; risk quantification; lightning search algorithm