

基于随机森林的极端气候事件对黄淮海地区小麦产量的影响

王英楠

曲阜师范大学地理与旅游学院, 山东 日照

收稿日期: 2022年5月25日; 录用日期: 2022年6月21日; 发布日期: 2022年6月30日

摘要

本文以黄淮海地区为主要研究区, 基于2001~2018年统计年鉴产量数据和生长季NPP数据, 选取了14个表征极端气候的指标, 运用随机森林模型和Spearman相关分析法, 评估了各气候指标对产量的重要性影响程度, 并依据评估结果建立了2~5月各月份主要影响指标与生长季NPP之间的关系。研究得出冬小麦产量对研究区各月份最重要影响指标的响应机制表现为: 2~4月份高温均有利于研究区部分地区的冬小麦生长; 而5月份的高温则不利于研究区中南部部分地区冬小麦的生长。2月份的强降水不利于研究区中部部分地区冬小麦的生长; 而3~5月份降水量和降水强度的增加均有利于研究区中南部部分地区旱情的缓解。4月份干旱整体不利于研究区中南部部分地区冬小麦的生长; 而2、3、5月份干旱的发生对产量的影响在空间上存在差异: 其中2、3月份适度干旱均有利于河北部分地区冬小麦的生长, 不利于河南西南部冬小麦的生长; 5月份, 干旱在一定程度上有利于研究区中部部分地区冬小麦的生长, 推测是以上地区5月份的降水强度呈上升趋势, 整体趋于湿润, 适当的干旱反而保证了小麦含水率下降、干重增长, 而研究区南部地区则显示干旱不利于冬小麦的生产。

关键词

冬小麦产量, 极端气候, 净初级生产力, 黄淮海地区

Effects of Extreme Climate Events Based on Random Forest on Wheat Yield in Huang-Huai-Hai Region

Yingnan Wang

College of Geography and Tourism, Qufu Normal University, Rizhao Shandong

Received: May 25th, 2022; accepted: Jun. 21st, 2022; published: Jun. 30th, 2022

Abstract

Taking the Huang-Huai-Hai region as the main research area, based on the yield data in the statistical yearbook and the NPP data in the growing season from 2001 to 2018, this study selects 14 indicators representing extreme climate, evaluates the importance and impact of various climate indicators on yield by using random forest model and Spearman correlation analysis method. Based on the evaluation results, the relationship between the main impact indicators and NPP in the growing season from February to May was established. The results show that the response mechanism of winter wheat yield to the most important impact index of each month in the study area is as follows: the high temperature from February to April is conducive to the growth of Winter Wheat in some areas of the study area; the high temperature in May is not conducive to the growth of Winter Wheat in some parts of the central and southern part of the study area. The heavy rainfall in February is not conducive to the growth of Winter Wheat in some parts of the central part of the study area; the increase of precipitation and precipitation intensity from March to May is conducive to the mitigation of drought in some parts of the central and southern part of the study area. The drought in April was not conducive to the growth of Winter Wheat in some parts of the central and southern part of the study area; there are spatial differences in the effects of drought on yield in February, March and May: moderate drought in February and March is conducive to the growth of Winter Wheat in some areas of Hebei, but not in the southwest of Henan; in May, drought is conducive to the growth of Winter Wheat in some parts of the central part of the study area to a certain extent. It is speculated that the precipitation intensity in the above areas in May shows an upward trend and tends to be humid as a whole. Appropriate drought ensures the decline of wheat moisture content and the growth of dry weight, while the southern part of the study area shows that drought is not conducive to the production of winter wheat.

Keywords

Winter Wheat Yield, Extreme Climate, Net Primary Productivity, Huang-Huai-Hai Region

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

小麦是中国第二大粮食作物,在农业生产和国民经济中占据重要地位。我国各地几乎均可种植小麦,但主要集中在黄淮海农业生产区。黄淮海地区是我国主要的商品粮基地,仅利用全国 7.7%的水资源生产了全国 39.2%的粮食,养育了 34.3%的人口,地区生产总值占全国的 32.4% [1]。据相关研究预测,到 2030 年,该地区平均温度将升高 1.1℃~1.4℃,人口净增加 1.04×10^8 人,城市化比率显著升高,随之而来的是水资源供需矛盾也将日益加剧[1] [2]。

IPCC 第五次报告[3]指出:自 1950 年以来,全球平均温度的上升速度大约在 0.13℃/10a,且在未来的 20~30 年间,全球变暖的升温幅度将大幅提高。到本世纪末,全球地表平均气温预计将比 1900 年上升 1.5℃~2℃。在此背景下,我国的气候也在发生显著变化,农业气候资源总体表现为热量资源显著增加,辐射资源减少,降水资源变化不显著[4]。在气温方面:自 20 世纪 80 年代以来,全国大部分地区春季(3~5

月)增温,且东部地区趋势显著[5];在降水方面:降水量变化呈现显著时间分异特征,表现为20世纪60至90年代呈下降趋势,20世纪90年代后期开始出现显著回升[6]。

全球气候变暖已广被世界所认知,温度平稳上升已使得干旱、极端高温、暴雨等极端天气发生频繁,而温度上升速度的加快势必会加剧极端天气的发生频率和强度[7],进而导致自然灾害的频发。已有研究表明,气候变暖将进一步降低作物产量[8],甚至可能使得农作物的叶绿体氧化受损[9],进而破坏其生殖结构[10]、加速衰老过程[11]。也有相关研究发现,黄淮海地区冬小麦气候生产力南部升高,北部降低,总体水平下降8.7%左右,而且降水减少可能是引起冬小麦气候生产力降低的主要原因[12]。黄淮海地区是我国冬小麦等农作物的重要产区,同时是我国重要的工业区和人口聚居区。随着城市化进程的加快,黄淮海地区的城市居民生活用水和城市工业用水等都对农业用水产生了严重威胁。加之黄淮海地区处在我国的季风气候区,降水的季节和年季差异大,干旱时有发生,所以对该地区的极端气候事件研究就变得尤为重要。因此,在全球气候变化的背景下预测未来该地区小麦产量对气候变化的响应,对指导和规划我国小麦的生产具有重要的意义[13][14]。

极端气候是指天气(气候)的状态严重偏离其平均态,在统计意义上属于不易发生的事件[15]。近年来,国内外学者针对全球变暖背景下极端气温、极端降水,以及极端干旱事件的发生发展开展了大量研究,并取得了丰硕成果。

王冀[16]等利用气象站点资料,定义计算了高低温、冷暖夜以及降水强度等多个表征极端气温和降水的指标,从时空角度分析了华北地区极端气温和降水的变化情况;王琼[17]等运用气候倾向率等方法,选取了16个极端气温指标,对长江流域50年的气温变化情况进行研究;汪宝龙[18]等以西北地区为研究区,通过分析1960~2009年的气温和降水情况,对未来的变化进行了预测;宋辞[19]等对青藏高原地区的气温变化展开研究,着重分析了其突变情况和影响因素;马柱国[20]等对1950~2000年中国北方的干湿条件展开研究,认为华北等地极端干旱频率显著增加,干旱对应了高温的发生;张彬[21]等对干旱、半干旱区的草原生态系统对极端气候事件的响应机制展开探究,取得了满意的成果;Tong [22]等以内蒙古为研究区,选取TX90p、TN90p、TX10p、TN10p等极端气候指标,分析了极端气温和降水的时空变异情况,并用Mann-Kendall检验证明,变异趋势明显且持续;余敦先[23]等研究了淮河流域50年间极端降水的时空变化情况,并良好模拟了淮河流域的极端降水序列情况。

干旱是世界各国,尤其是我国最为严重的自然灾害之一[24][25],干旱对于作物产量的影响一直是国内外学者关注的重点。随着干旱监测技术的不断深入研究,目前已经发展出很多干旱监测方法进行干旱的识别和监测[26][27]。目前常用的传统干旱监测方法主要有:帕默尔干旱指数(Palmer Drought Severity Index, PDSI)、标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI)、标准化降水蒸散指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI) [28][29][30]等。

随着极端天气事件在全球范围内的频发,国内外诸多学者都开始重点着眼于极端气候对作物产量的研究。邓振镛[31]等针对中国北方地区出现的暖干化现象,重点研究了小麦、水稻、玉米在内的7种粮食作物对该现象的响应,并提出了适应性措施;孙宁[32]等重点研究了干旱对于冬小麦产量的胁迫,并进行了作物生长模型对产量气候风险的评估;Mamrutha [33]等重点分析了夜间高温对于小麦生理特征和产量性状的影响,并取得了一定研究成果;史印山[34]等以河北平原为研究区,得出高温、低温都会对冬小麦造成减产,小麦产量与降水之间的呈正相关;普宗朝[35]等探讨了冬小麦不同生长发育阶段对气温、降水量和日照时数等气候条件的响应机制,认为乌鲁木齐的气候变化趋势愈加不利于冬小麦的生长;刘峻明[36]等将随机森林算法结合长时间序列气象数据应用于冬小麦产量估算,取得了较好拟合结果。国内外学者的探究丰富了相关领域的研究,也取得了一些现实成果。

2. 研究区概况、数据来源与方法

2.1. 研究区概况

黄淮海地区是我国的一个广大地理区域，位于华北、华东和华中三大地理区的范围内，一般指南起河南省与湖北省交界处的桐柏山和大别山北麓，北抵长城；西依河北省西侧的太行山和河南省西部的伏牛山，东至渤海和黄海。黄淮海地区群山环伺，西依我国二三级阶梯交界处，依山向海，海陆兼备，面向东北亚和太平洋，其主体为由黄河、淮河与海河三大流域河流冲积而成的黄淮海平原，以及与其相毗连的鲁中南丘陵和山东半岛，即主要由平原和低山丘陵组成，区域整体地势平坦。本文为方便研究区的划分，将研究区范围扩大至北京市、天津市、河北省、山东省、河南省、安徽省和江苏省，共 5 省 2 市的全部地区，经纬度范围为：110°21'E (河南省西部)~122°42'E (山东省东部)，29°41'N (安徽省南部)~42°40'N (河北省北部)。如无特别说明，本文之后提到的“黄淮海地区”即指本文划定的研究区范围。研究区的位置和高程情况如图 1 所示。

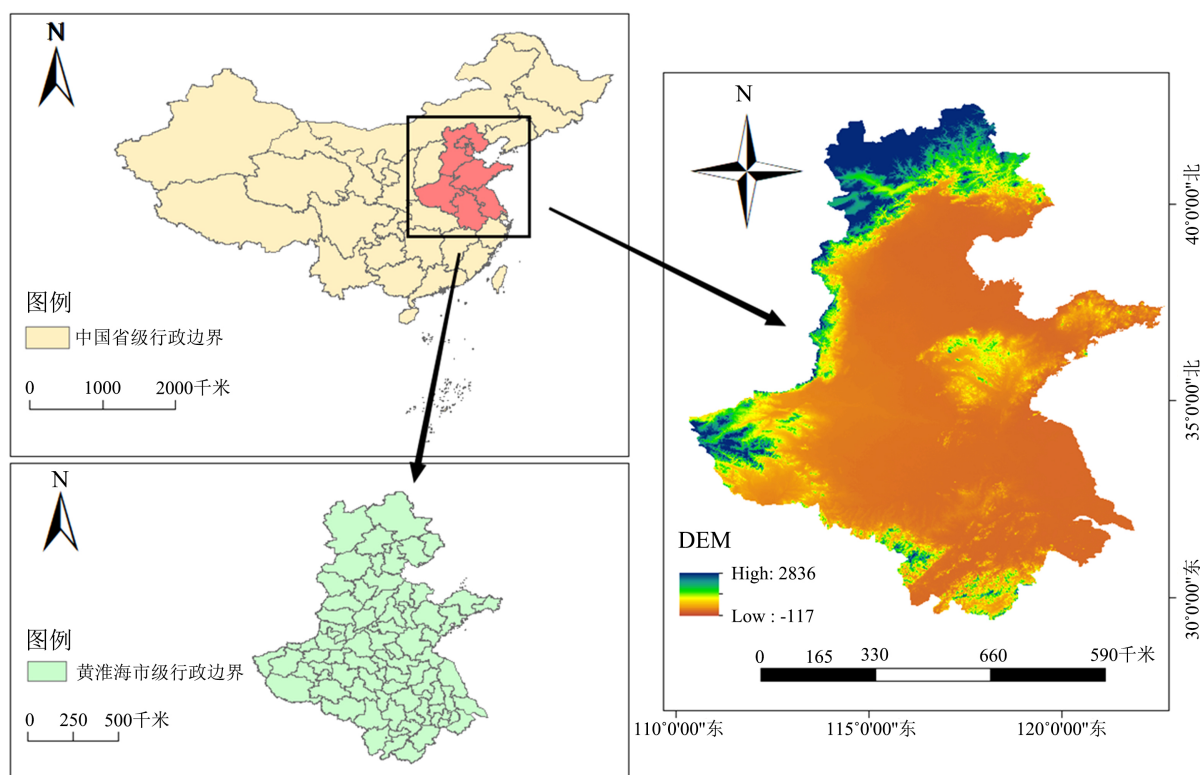


Figure 1. Location and elevation map of the study area

图 1. 研究区位置和高程图

2.2. 数据获取及数据处理

2.2.1. 遥感数据

考虑到研究区范围和研究需要，本文选择月尺度 NPP 数据作为遥感基础数据，数据来源于国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据中心 - 地理资源分中心(<http://gre.geodata.cn>)，数据为全球 5 km 8 天总、净初级生产力产品，包括全球植被总初级生产力(GPP)和植被净初级生产力(NPP)，时间分辨率为 8 天，每年包含 46 组全球数据，数据为 tif 格式，包含了数据的投影信息。该数据主要利用 GLASS 的

FPAR 与 LAI 数据、MODIS 全球 5 km 土地利用覆盖产品 MCD12C1 数据、ERA Interim 气象数据, 基于光能利用率模型 MuSyQ-NPP 生产, 算法通过引入晴空指数(CI)来改善 LUE 估算, 在此基础上估算 GPP 和 NPP [37] [38] [39]。数据的预处理过程主要包括对所需数据的选取、对数据进行裁剪等。

为使各指标计算更加精确, 本文还会用到中国冬小麦分布图, 空间分辨率为 30 m, 数据来源于 Figshare 在线数据知识库(<https://figshare.com/>)的公开分享数据, 预处理过程主要是统一坐标系等。

2.2.2. 产量数据

本文所采用的统计数据来源于 2002 年至 2019 年北京市、天津市、河北省、山东省、河南省、安徽省、江苏省及以上各省所辖地市统计年鉴, 使用的数据包括 2001 年至 2018 年各地市冬小麦产量数据。

2.2.3. 气象数据

本文采用的 sc_PDSI (self-calibrating Palmer Drought Severity Index, 自适应帕默尔干旱指数)数据来源于由东英吉利大学(University of East Anglia, UEA)气候研究部(Climatic Research Unit, CRU)制作的 CRU TS 数据集(<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/drought/>), 该数据集提供全球尺度自 1901 年至 2020 年覆盖陆地表面的 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 分辨率的月度数据。sc_PDSI 是 PDSI 的一个变体, 由 Wells [40] 等在 2004 年基于 PDSI 提出, 通过对美国 7 个州的 761 个地点以及全部 344 个气候分区进行 sc_PDSI 评估, 旨在使不同气候状况的结果更具可比性, 提高空间可比性及适用性。与 PDSI 一样, sc_PDSI 是根据降水和温度的时间序列以及与每个位置的土壤或地表特征相关的固定参数计算得出的。

SPEI 数据来源于西班牙比利牛斯生态研究所官方数据下载网址(<https://spei.csic.es/database.html>), 该数据是基于 CRU TS 数据集的月降水量和潜在蒸散量数据、利用 Penman-Monteith 蒸散模型计算得到的 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 空间分辨率的全球月度干旱状况数据。该数据集目前涵盖的时间范围自 1901 年至 2018 年, 具有多尺度特征, 能提供 1 到 48 个月之间的 SPEI 时间尺度, 本文仅根据研究需要选取部分尺度进行研究。

本文用到的极端气温和极端降水数据来源于新南威尔士大学(The University of New South Wales, UNSW)研究中心网站(<https://www.climdex.org/>)发布的 HadEX3 数据集, 该数据集使用大约 7000 个温度站和 17,000 个降水站, 涵盖 1901~2018 年全球尺度的数据, 空间分辨率为 $1.875^\circ \times 1.25^\circ$ 。本文仅选取数据集中与研究相关的 10 个指标[41], 包括:

最高温极大值(TXx), 表征的是每日最高温度的月最高值和年最高值; 最低温极大值(TNx), 表征的是每日最低温度的月最高值和年最高值; 最高温极小值(TXn), 表征的是每日最高温度的月最低值和年最低值; 最低温极小值(TNn), 表征的是每日最低温度的月最低值和年最低值。以上 4 个指标的单位为摄氏度($^\circ\text{C}$)。

寒冷夜间(TN10p), 表征的是每日最低温度 $<10\%$ 日数的时间百分比; 寒冷日间(TX10p), 表征的是每日最高温度 $<10\%$ 日数的时间百分比; 温暖夜间(TN90p), 表征的是每日最低温度 $>90\%$ 日数的时间百分比; 温暖日间(TX90p), 表征的是每日最高温度 $>90\%$ 日数的时间百分比。以上 4 个指标的单位为百分比($\%$)。

最大 5 天降水量(Rx5day), 表征的是月和年最大连续 5 天降水量; 特大降水日数(R20mm), 表征的是每月降水量 ≥ 20 mm 的天数。其中 Rx5day 的单位为毫米(mm), R20mm 的单位为天(d)。

2.3. 研究方法

2.3.1. 随机森林模型

随机森林(Random Forest, RF)是由 Breiman [42] 在 2001 年结合其之前提出的 Bagging 集成学习理论 [43] 和 Ho [44] 提出的随机子空间方法(Random subspace method)总结得出的一种机器学习算法。

本文利用随机森林算法研究 14 个极端气候指标对冬小麦产量的重要性影响程度进行评析, 探究影响

黄淮海地区各月份冬小麦产量的气候指标重要性程度。对随机森林模型的建立过程如下：首先对训练集的数据进行处理，生成决策树，其次将产量设置为预测列，并同时随机生成 500 棵决策树，设置计算重要性时的重复次数为 1000 次，最后一步即可输出重要性评估结果。

2.3.2. Spearman 相关分析

Spearman 相关能对不服从正态分布的资料、原始资料等级资料总体分布类型未知的资料等不符合使用积矩相关系数来描述关联性。其属于一种秩相关，也称等级相关，可以用来描述两个变量之间的关联程度与方向。这类方法对原始变量分布不作要求，属于非参数统计方法。

3. 极端气候指标与小麦产量相关性的空间格局分析

综合 2 个评估体系(图 2、图 3)，本节在选取黄淮海地区研究时段内 2~5 月主要影响气候指标时，综合“IncNodePurity”、“IncMSE”两个评估体系得出的结果，对每个月份选取选取前 3 个最重要影响指标进行进一步研究。即选取 2 月份的 sc_PDSI 指标、Rx5day 指标、TNn 指标，3 月份的 sc_PDSI 指标、TNn 指标、R20mm 指标，4 月份的 R20mm 指标、TXx 指标、SPEI01 指标，5 月份的 sc_PDSI 指标、R20mm 指标、TNn 指标，运用 Spearman 相关分析方法分别与研究区生长季 NPP 建立空间相关关系，进一步分析产量对极端气候事件的响应关系。

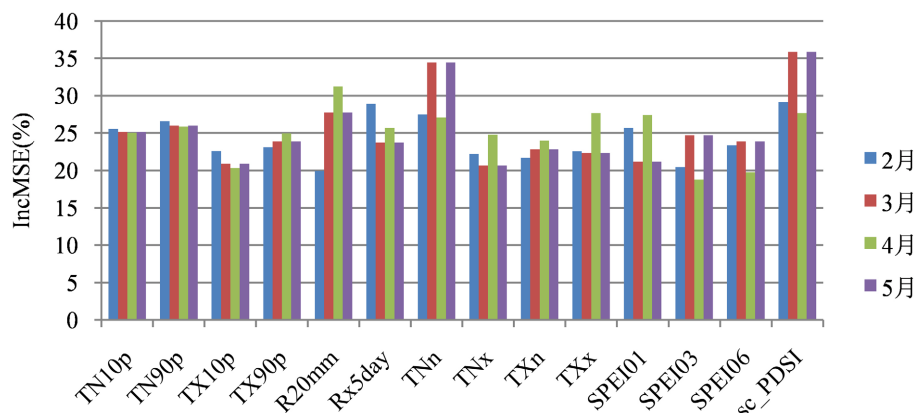


Figure 2. IncMSE assessment results of extreme climate indicators from February to May
图 2. 各极端气候指标 2~5 月份 IncMSE 评估结果

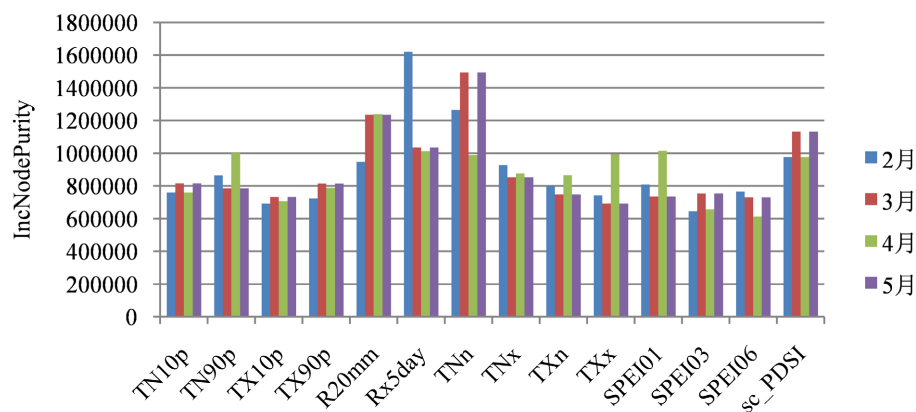


Figure 3. IncNodePurity assessment results of extreme climate indicators from February to May
图 3. 各极端气候指标 2~5 月份 IncNodePurity 评估结果

3.1. 2 月份代表性指标与 NPP 的相关性分析

2 月份 sc_PDSI 指标与生长季 NPP 之间的相关性如图 4、图 5 所示，在通过 $p < 0.05$ 检验的地区中，河北中南部部分地区及河南西南部的 $|r|$ 普遍在 0.6 以上，说明 2 月份的 sc_PDSI 指标与生长季 NPP 之间的相关关系在以上地区呈现中等强度以上的显著相关，即 2 月份的干旱条件对于研究区以上地区的冬小麦产量存在显著影响；对应地区 r 值在河南西南部为负，在河北中南部为正，即干旱不利于河南西南部冬小麦的生长，有利于河北中南部冬小麦的生长。

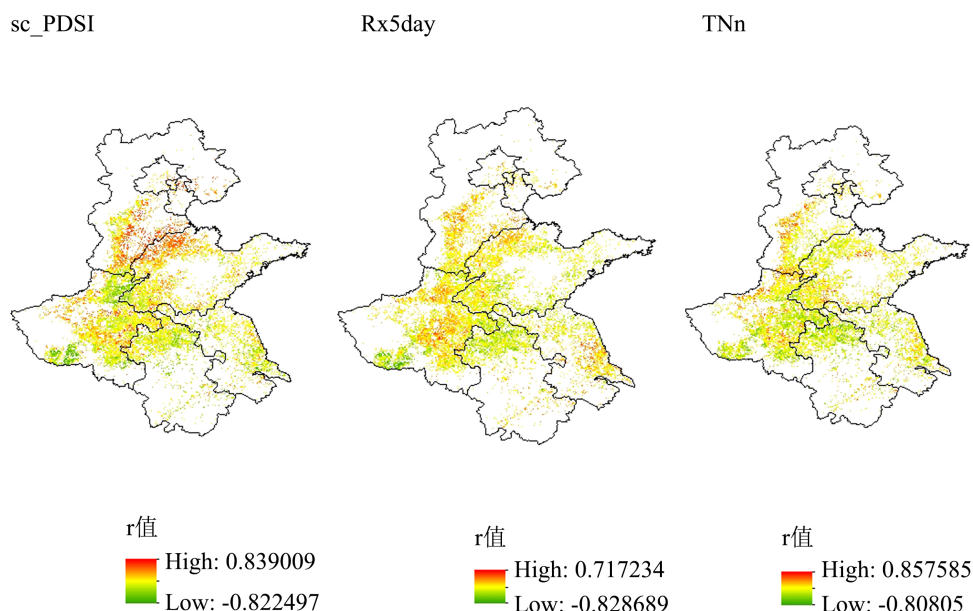


Figure 4. Distribution of r value of each index in February

图 4. 2 月份各指标 r 值分布情况

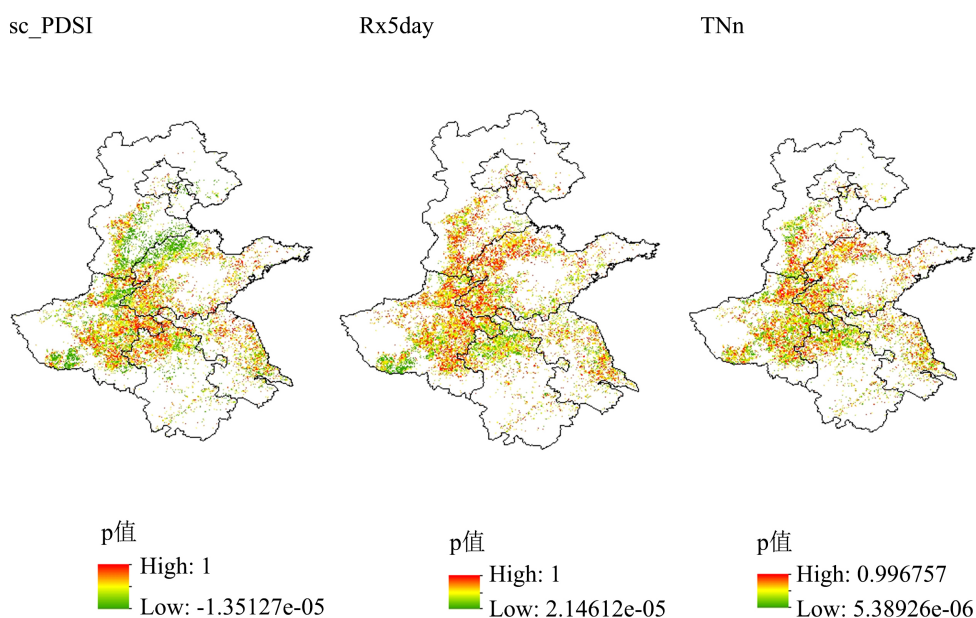


Figure 5. Distribution of p value of each index in February

图 5. 2 月份各指标 p 值分布情况

2 月份 Rx5day 指标与生长季 NPP 之间相关性如图 4、图 5 所示, 通过 $p < 0.05$ 检验的区域主要集中在安徽北部、河南中部和西南部地区, 其次在其他地区也有比较分散的分布。通过 p 检验相对应地区的 $|r|$ 普遍在 0.6 以上, 说明 2 月份的 Rx5day 指标与生长季 NPP 之间的相关关系在以上地区呈现中等强度以上的显著相关, 即 2 月份的水分条件对于研究区中部地区的冬小麦产量存在显著影响; 对应地区 r 值基本为负, 说明 2 月份的 Rx5day 指标与生长季 NPP 之间呈负相关, 即 2 月份的集中强降水不利于以上地区冬小麦的生长。

2 月份 TNn 指标与生长季 NPP 之间的相关性如图 4、图 5 所示, 在通过 $p < 0.05$ 检验的地区中, 山东西北部及江苏东南部的 $|r|$ 普遍在 0.6 以上, 说明 2 月份的 TNn 指标与生长季 NPP 之间的相关关系在以上地区呈现中等强度以上的显著相关, 即 2 月份的高温条件对于研究区以上地区的冬小麦产量存在显著影响; 对应地区 r 值均为正值, 即夜间温度的升高有利于山东西北部和江苏东南部冬小麦的生长。

3.2.3 月份代表性指标与 NPP 的相关性分析

3 月份 sc_PDSI 指标与生长季 NPP 之间的相关性如图 6、图 7 所示, 在通过 $p < 0.05$ 检验的地区中, 河北极少部分地区及河南西南部的 $|r|$ 普遍在 0.6 以上, 说明 3 月份的 sc_PDSI 指标与生长季 NPP 之间的相关关系在以上地区呈现中等强度以上的显著相关, 即 3 月份的干旱条件对于研究区以上地区的冬小麦产量存在显著影响; 对应地区 r 值在河南西南部为负, 在河北部分地区为正, 即干旱不利于河南西南部冬小麦的生长, 有利于河北部分地区冬小麦的生长。

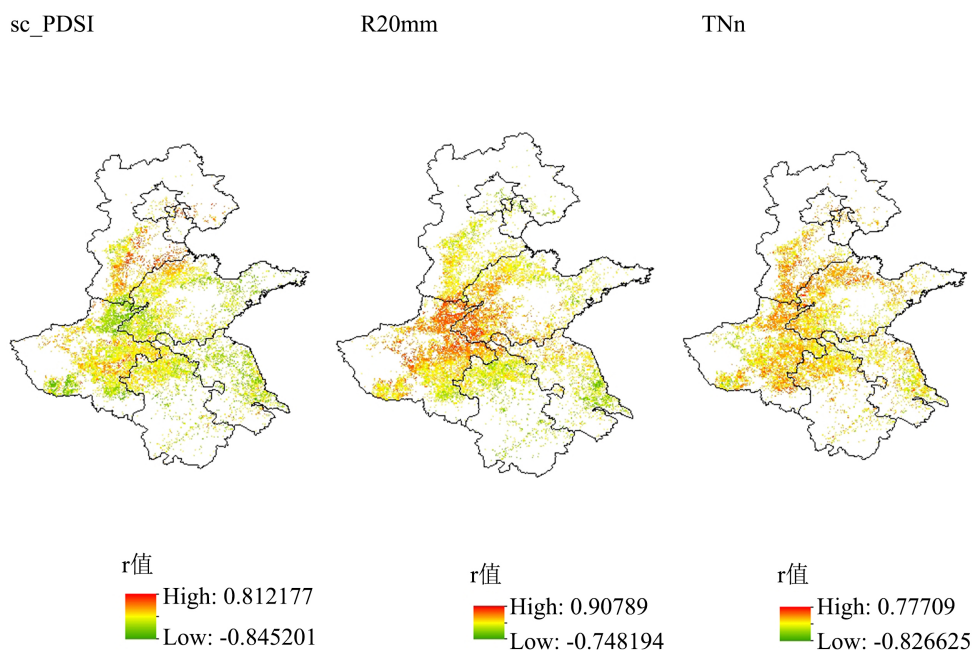


Figure 6. Distribution of r values of various indicators in March

图 6. 3 月份各指标 r 值分布情况

3 月份 R20mm 指标与生长季 NPP 之间的相关性如图 6、图 7 所示, 在通过 $p < 0.05$ 检验的地区中, 河南中东部及山东西部的 $|r|$ 普遍在 0.6 以上, 说明 3 月份的 R20mm 指标与生长季 NPP 之间的相关关系在以上地区呈现中等强度以上的显著相关, 即 3 月份的水分条件对于研究区以上地区的冬小麦产量存在显著影响; 对应地区 r 值均为正值, 即 3 月份集中强降水有利于以上地区冬小麦的生长。

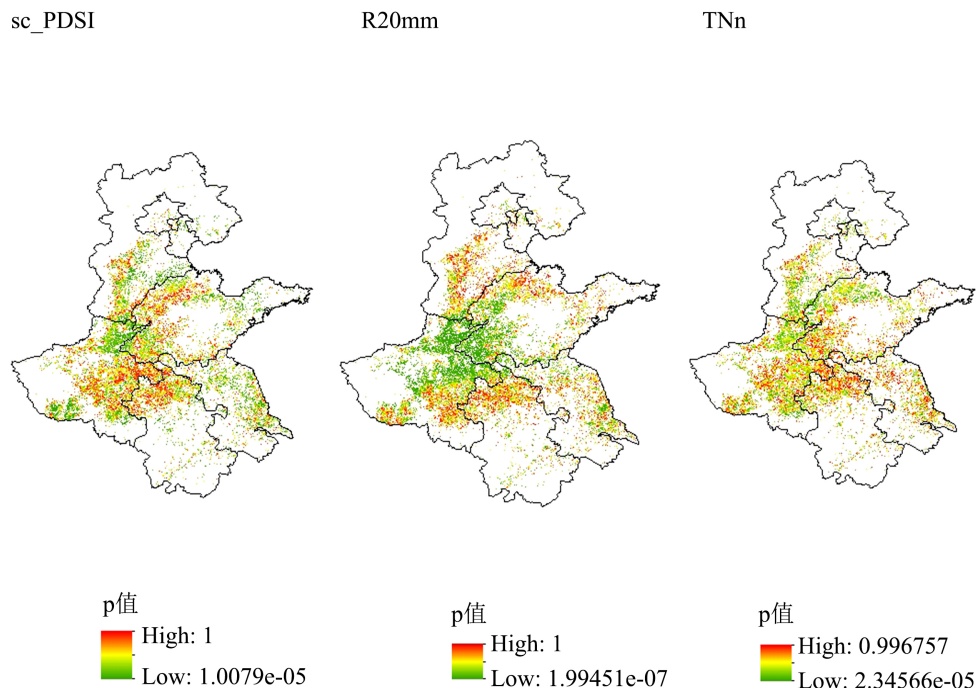


Figure 7. Distribution of p value of each index in March
图 7. 3 月份各指标 p 值分布情况

3 月份 TNn 指标与生长季 NPP 之间相关性结果如图 6、图 7 所示，通过 $p < 0.05$ 检验的区域主要集中在河北中南部、山东西北部、河南南部和西南部地区。通过 p 检验相对应地区的 $|r|$ 普遍高于 0.6，说明 3 月份的 TNn 指标与生长季 NPP 之间的相关关系在以上地区呈现中等强度以上的显著相关；对应地区 r 值基本为正，说明 3 月份 TNn 指标与生长季 NPP 之间呈正相关，即夜间低温越高越有利于以上地区冬小麦的生长。

3.3.4 4 月份代表性指标与 NPP 的相关性分析

4 月份 TXx 指标与生长季 NPP 之间的相关性如图 8、图 9 所示，在通过 $p < 0.05$ 检验的地区中，河北及山东部分地区的 $|r|$ 普遍在 0.6 以上，说明 3 月份的 TXx 指标与生长季 NPP 之间的相关关系在以上地区呈现中等强度以上的显著相关，即 4 月份的高温条件对于研究区以上地区的冬小麦产量存在显著影响；对应地区 r 值均为正值，即 4 月份日间高温有利于以上地区冬小麦的生长。

4 月份 R20mm 指标与生长季 NPP 之间相关性如图 8、图 9 所示，通过 $p < 0.05$ 检验的区域主要集中在山东西部、河南中部和西南部、河北中南部、江苏东南部、安徽南部地区。通过 p 检验相对应地区的 $|r|$ 普遍在 0.6 以上，说明 4 月份的 R20mm 指标与生长季 NPP 之间的相关关系在以上地区呈现中等强度以上的显著相关关系，即水分条件仍是制约 4 月份冬小麦生长的重要影响因子；对应地区 r 值基本为正，说明 4 月份的 R20mm 指标与生长季 NPP 之间呈正相关，即降水量、降水强度越大越利于以上地区冬小麦的生长。

4 月份 SPEI01 指标与生长季 NPP 之间的相关性如图 8、图 9 所示，在通过 $p < 0.05$ 检验的地区中，河北中南部及江苏东南部的 $|r|$ 普遍在 0.6 以上，说明 4 月份的 SPEI01 指标与生长季 NPP 之间的相关关系在以上地区呈现中等强度以上的显著相关，即 4 月份的干旱条件对于研究区以上地区的冬小麦产量存在显著影响；对应地区 r 值均为负值，即 4 月份干旱不利于以上地区冬小麦的生长。

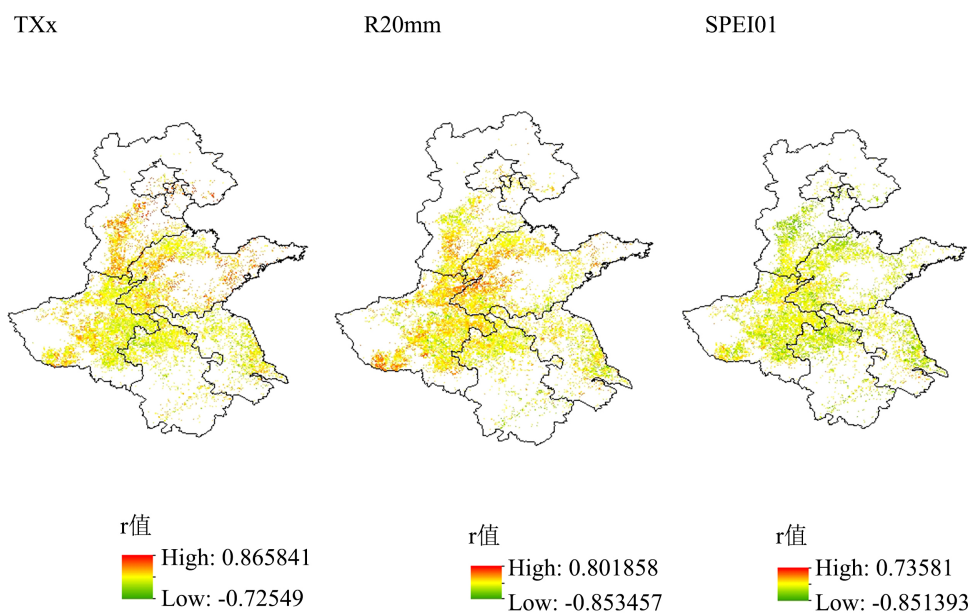


Figure 8. Distribution of r value of each index in April

图 8. 4 月份各指标 r 值分布情况

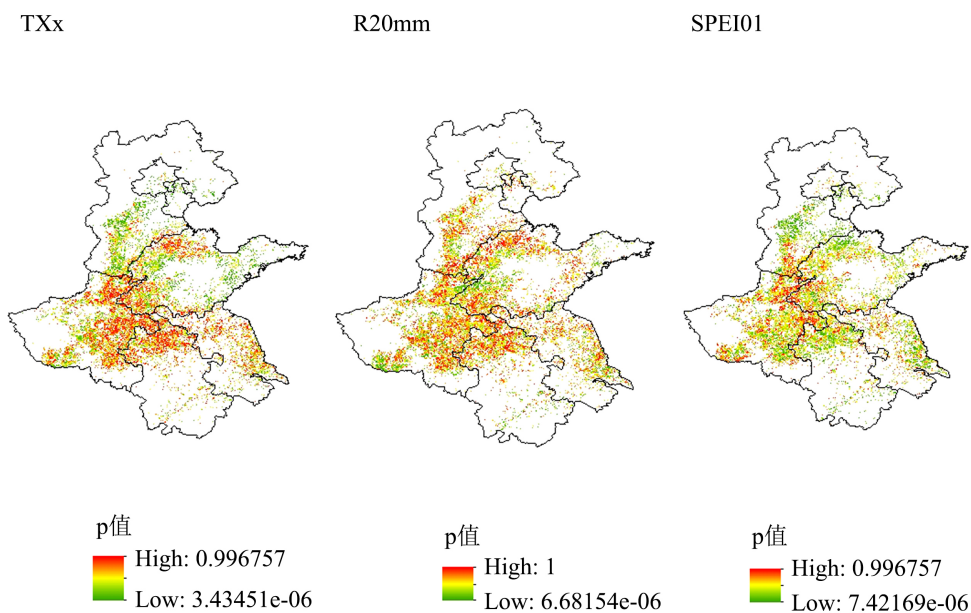


Figure 9. p value distribution of each index in April

图 9. 4 月份各指标 p 值分布情况

3.4.5 5 月份代表性指标与 NPP 的相关性分析

5 月份 sc_PDSI 指标与生长季 NPP 之间相关性如图 10、图 11 所示, 通过 $p < 0.05$ 检验的区域主要集中在山东西部、河南中部和西南部、河北中南部、江苏东南部、安徽南部地区。通过 p 检验相对应地区的 $|r|$ 普遍在 0.6 以上, 说明 5 月份的 sc_PDSI 指标与生长季 NPP 之间的相关关系在以上地区呈现中等强度以上的显著相关关系, 即 5 月份的干旱对于山东、河南和河北中南部地区的冬小麦产量存在显著影响。对应地区的 r 值有正有负, 其中在山东西部、河南中部和西南部、河北中南部地区的 r 值为正, 即

干旱有利于以上区域冬小麦的生长；而在江苏东南部、安徽南部的 r 值为负，即干旱不利于以上区域冬小麦的生长。

5 月份 R20mm 指标与生长季 NPP 之间的相关性如图 10、图 11 所示，在通过 $p < 0.05$ 检验的地区中，安徽南部及江苏南部的 $|r|$ 普遍在 0.6 以上，说明 5 月份的 R20mm 指标与生长季 NPP 之间的相关关系在以上地区呈现中等强度以上的显著相关，即 5 月份的水分条件对于研究区以上地区的冬小麦产量存在显著影响；对应地区 r 值均为负值，即 5 月份强降水不利于以上地区冬小麦的生长。

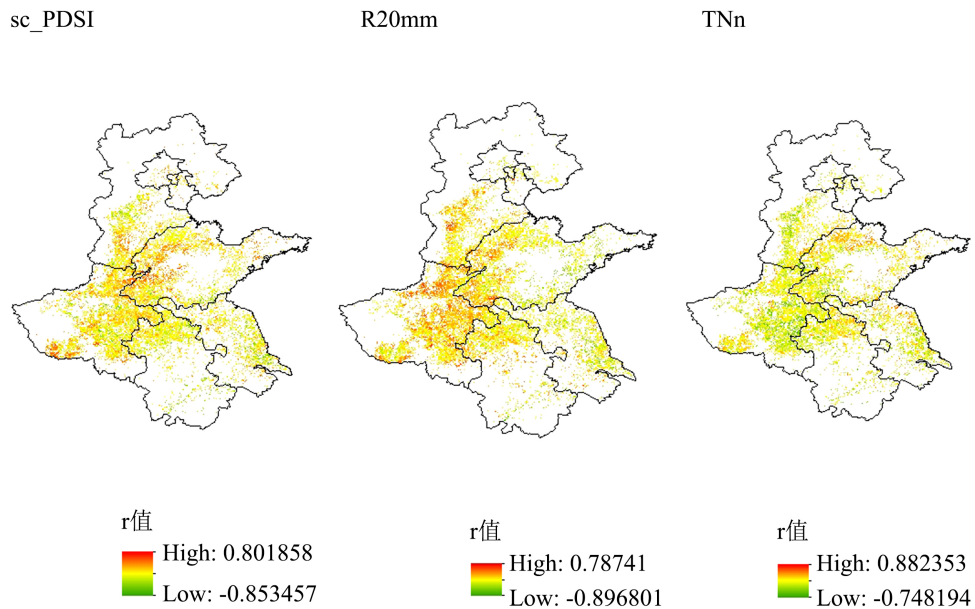


Figure 10. Distribution of r values of various indicators in May
图 10. 5 月份各指标 r 值分布情况

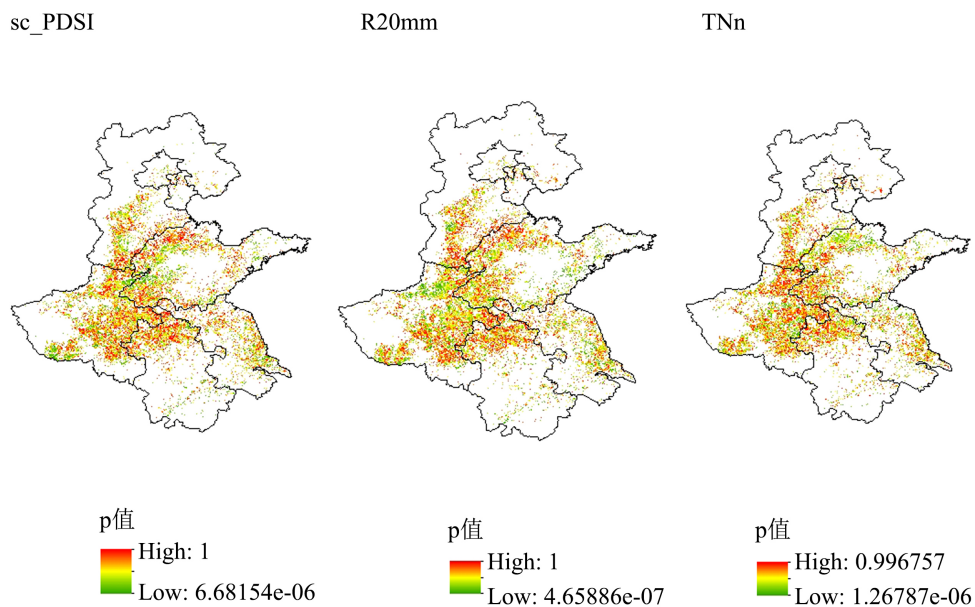


Figure 11. p value distribution of each index in May
图 11. 5 月份各指标 p 值分布情况

5 月份 TNn 指标与生长季 NPP 之间的相关性如图 10、图 11 所示, 在通过 $p < 0.05$ 检验的地区中, 安徽南部及山东西部的 $|r|$ 普遍在 0.6 以上, 说明 5 月份的 TNn 指标与生长季 NPP 之间的相关关系在以上地区呈现中等强度以上的显著相关, 即 5 月份的高温条件对于研究区以上地区的冬小麦产量存在显著影响; 对应地区 r 值均为负值, 即 5 月份夜间高温不利于以上地区冬小麦的生长。

4. 结论

本文为探究黄淮海地区的小麦产量对极端气候事件的响应, 分两步探究得出研究结果。首先, 建立随机森林模型选取各月份对产量影响最重要的代表性指标; 其次, 利用 Spearman 相关分析法进一步分析各月份关键极端气候指标与生长季 NPP 在空间上的相关关系情况。通过以上一系列研究, 本文得出以下主要结论:

1) 综合随机森林模型的两个评估体系得到的结果, 在 2~5 月各选取 3 个相应月份代表性指标。运用 Spearman 相关分析法探究冬小麦产量对极端气候事件的时空响应机制, 分析得出: 对于温度指标 TNn 和 TXx, 2~4 月份高温均有利于研究区部分地区的冬小麦生长, 且随着月序推移, 呈正相关的区域向北推移; 而 5 月份的高温则不利于研究区中南部部分地区冬小麦的生长。对于降水指标 Rx5day 和 R20mm, 2 月份的强降水不利于安徽北部、河南中部和西南部地区冬小麦的生长; 而 3~5 月份降水量和降水强度的增加均有利于研究区中南部部分地区旱情的缓解。对于干旱指标 sc_PDSI 和 SPEI01, 4 月份干旱整体不利于研究区中南部部分地区冬小麦的生长; 而 2、3、5 月份干旱的发生对产量的影响在空间上存在差异: 其中 2、3 月份适度干旱均有利于河北部分地区冬小麦的生长, 不利于河南西南部冬小麦的生长; 5 月份, 干旱在一定程度上有利于山东西部、河南中部和西南部、河北中南部地区冬小麦的生长, 推测是以上地区 5 月份的降水强度呈上升趋势, 整体趋于湿润, 适当的干旱反而保证了小麦含水率下降、干重增长, 而江苏东南部、安徽南部地区则显示干旱不利于冬小麦的生产。

2) 针对研究区极端气候事件发生情况, 提出如下几条抗灾减灾建议: 第一, 分地区选育合适种植的小麦品种。如黄淮海地区整体呈现暖干化趋势, 尤其在江苏、安徽为代表的的研究区南部比较典型, 在选育小麦品种时, 应选择耐旱、耐高温的品种; 对于河南中部、西南部等为代表的研究区中部地区, 由于 5 月份相对降水强度大, 在选育品种时除考虑耐旱、耐高温, 还应考虑抗倒伏品种。第二, 适期灌溉。进入 4、5 月份, 研究区温度大幅上升, 蒸发增强, 整体干旱、高温情况开始显现, 可根据不同地区高温、干旱频繁的时间选择适宜的灌溉时间。

参考文献

- [1] 田展, 刘纪远, 曹明奎. 气候变化对中国黄淮海农业区小麦生产影响模拟研究[J]. 自然资源学报, 2006, 21(4): 598-607.
- [2] 王远征. 基于物候调整的华北平原冬小麦产量遥感估测[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南大学, 2020.
- [3] Jefferson, M. (2015) IPCC Fifth Assessment Synthesis Report: "Climate Change 2014: Longer Report": Critical Analysis. *Technological Forecasting & Social Change*, **92**, 362-363. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2014.12.002>
- [4] 郭建平. 气候变化对中国农业生产的影响研究进展[J]. 应用气象学报, 2015, 26(1): 1-11.
- [5] 董李丽, 李清泉, 丁一汇. 全球变暖背景下我国春季气温的时空变化特征[J]. 气象, 2015, 41(10): 1177-1189.
- [6] 王英, 曹明奎, 陶波, 李克让. 全球气候变化背景下中国降水量空间格局的变化特征[J]. 地理研究, 2006, 25(6): 1031-1040+1148.
- [7] Murray, V. and Ebi, K.L. (2012) IPCC Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation (SREX). *Journal of Epidemiology and Community Health*, **66**, 759-760. <https://doi.org/10.1136/jech-2012-201045>
- [8] Stefan, R. and Dim, C. (2011) Increase of Extreme Events in a Warming World. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **108**, 17905-17909. <https://doi.org/10.1073/pnas.1101766108>

- [9] Crafts-Brandner, S.J. and Salvucci, M.E. (2002) Sensitivity of Photosynthesis in a C4 Plant, Maize, to Heat Stress. *Plant Physiology*, **129**, 1773-1780. <https://doi.org/10.1104/pp.002170>
- [10] Commuri, P.D. and Jones, R.J. (2001) High Temperatures during Endosperm Cell Division in Maize: A Genotypic Comparison under *in Vitro* and Field Conditions. *Crop Science*, **41**, 1122-1130. <https://doi.org/10.2135/cropsci2001.41411122x>
- [11] Lobell, D.B., Sibley, A. and Ortiz-Monasterio, J.I. (2012) Extreme Heat Effects on Wheat Senescence in India. *Nature Climate Change*, **2**, 186-189. <https://doi.org/10.1038/nclimate1356>
- [12] 刘建栋, 王石立, 于强, 金之庆, Farahani, M.M. CO₂倍增对黄淮海气候生产力影响的数值模拟[J]. 自然灾害学报, 2001, 10(1): 17-23.
- [13] 雷水玲. 全球气候变化对宁夏春小麦生长和产量的影响[J]. 中国农业气象, 2001, 22(2): 34-37+40.
- [14] 郑有飞, 万长建, 缪启龙, 张富存. 气候变化对小麦生产影响的数值模型研究[J]. 南京气象学院学报, 1999, 22(4): 645-651.
- [15] 戴建玲, 雷明堂, 蒋小珍, 罗伟权. 极端气候与岩溶塌陷[J]. 中国矿业, 2020, 29(z2): 402-404.
- [16] 王冀, 蒋大凯, 张英娟. 华北地区极端气候事件的时空变化规律分析[J]. 中国农业气象, 2012, 33(2): 166-173.
- [17] 王琼, 张明军, 王圣杰, 骆书飞, 汪宝龙, 朱小凡. 1962-2011年长江流域极端气温事件分析[J]. 地理学报, 2013, 68(5): 611-625. <https://doi.org/10.11821/xb201305004>
- [18] 汪宝龙, 张明军, 魏军林, 王圣杰, 马潜, 李小飞. 西北地区近 50a 气温和降水极端事件的变化特征[J]. 自然资源学报, 2012, 27(10): 1720-1733.
- [19] 宋辞, 裴韬, 周成虎. 1960 年以来青藏高原气温变化研究进展[J]. 地理科学进展, 2012, 31(11): 1503-1509. <https://doi.org/10.11820/dlkxjz.2012.11.011>
- [20] 马柱国, 华丽娟, 任小波. 中国近代北方极端干湿事件的演变规律[J]. 地理学报, 2003(z1): 69-74.
- [21] 张彬, 朱建军, 刘华民, 潘庆民. 极端降水和极端干旱事件对草原生态系统的影响[J]. 植物生态学报, 2014, 38(9): 1008-1018.
- [22] Tong, S.Q., Li, X.Q., Zhang, J.Q., Bao, Y., Bao, Y., Na, L., *et al.* (2019) Spatial and Temporal Variability in Extreme Temperature and Precipitation Events in Inner Mongolia (China) during 1960-2017. *Science of the Total Environment*, **649**, 75-89. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.262>
- [23] 余敦先, 夏军, 张永勇, 杜鸿. 近 50 年来淮河流域极端降水的时空变化及统计特征[J]. 地理学报, 2011, 66(9): 1200-1210.
- [24] Vasiliades, L. and Loukas, A. (2009) Hydrological Response to Meteorological Drought Using the Palmer Drought Indices in Thessaly, Greece. *Desalination*, **237**, 3-21. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.12.019>
- [25] 刘庚山, 郭安红, 安顺清, 刘巍巍. 帕默尔干旱指标及其应用研究进展[J]. 自然灾害学报, 2004, 13(4): 21-27.
- [26] Lloyd, C.E.M., Freer, J.E., Collins, A. and Johnes, P.J. (2013) Using High-Resolution Water Quality Monitoring to Investigate Hysteretic Behaviour of Nutrients at Catchment Scale. *AGU Fall Meeting 2013*, San Francisco, 9-13 December 2013, 1-9.
- [27] Brown, J.F., Wardlow, B.D., Tadesse, T., Hayes, M.J. and Reed, B.C. (2008) The Vegetation Drought Response Index (Veg DRI): A New Integrated Approach for Monitoring Drought Stress in Vegetation. *GIScience & Remote Sensing*, **45**, 16-46. <https://doi.org/10.2747/1548-1603.45.1.16>
- [28] Mishra, A.K. and Singh, V.P. (2011) Drought Modeling: A Review. *Journal of Hydrology*, **403**, 157-175. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.049>
- [29] Benitez, J.B. and Domecq, R.M. (2014) Analysis of Meteorological Drought Episodes in Paraguay. *Climatic Change*, **127**, 15-25. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1260-7>
- [30] Wang, Q., Shi, P., Lei, T., Geng, G., Liu, J., Mo, X., *et al.* (2015) The Alleviating Trend of Drought in the Huang-Huai-Hai Plain of China Based on the Daily SPEI. *International Journal of Climatology*, **35**, 3760-3769. <https://doi.org/10.1002/joc.4244>
- [31] 邓振镛, 王强, 张强, 倾继祖, 杨启国, 袁志鹏, 等. 中国北方气候暖干化对粮食作物的影响及应对措施[J]. 生态学报, 2010, 30(22): 6278-6288.
- [32] 孙宁, 冯利平. 利用冬小麦作物生长模型对产量气候风险的评估[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 106-110.
- [33] Mamrutha, H.M., Rinki, K., Venkatesh, K., Gopalareddy, K., Khan, H., Mishra, C.N., *et al.* (2020) Impact of High Night Temperature Stress on Different Growth Stages of Wheat. *Plant Physiology Reports*, **25**, 707-715. <https://doi.org/10.1007/s40502-020-00558-w>

- [34] 史印山, 王玉珍, 池俊成, 魏瑞江. 河北平原气候变化对冬小麦产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(6): 1444-1447.
- [35] 普宗朝, 张山清, 宾建华, 窦新英, 宫恒瑞, 曹兴. 气候变化对乌鲁木齐市冬小麦产量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(3): 115-123.
- [36] 刘峻明, 和晓彤, 王鹏新, 黄健熙. 长时间序列气象数据结合随机森林法早期预测冬小麦产量[J]. 农业工程学报, 2019, 35(6): 158-166.
- [37] Wang, M.J., Sun, R., Zhu, A.R. and Xiao, Z. (2020) Evaluation and Comparison of Light Use Efficiency and Gross Primary Productivity Using Three Different Approaches. *Remote Sensing*, **12**, Article No. 1003. <https://doi.org/10.3390/rs12061003>
- [38] Yu, T., Sun, R., Xiao, Z.Q., Zhang, Q., Liu, G., Cui, T., *et al.* (2018) Estimation of Global Vegetation Productivity from Global Land Surface Satellite Data. *Remote Sensing*, **10**, Article No. 327. <https://doi.org/10.3390/rs10020327>
- [39] Cui, T.X., Wang, Y.J., Sun, R., Qiao, C., Fan, W., Jiang, G., *et al.* (2016) Estimating Vegetation Primary Production in the Heihe River Basin of China with Multi-Source and Multi-Scale Data. *PLOS ONE*, **11**, Article ID: e0153971. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0153971>
- [40] Wells, N., Goddard, S. and Hayes, M.J. (2004) A Self-Calibrating Palmer Drought Severity Index. *Journal of Climate*, **17**, 2335-2351. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017%3C2335:ASPDSI%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017%3C2335:ASPDSI%3E2.0.CO;2)
- [41] Dunn, R.J.H., Alexander, L.V., Donat, M.G., Zhang, X., Bador, M., Herold, N., *et al.* (2020) Development of an Updated Global Land *in Situ*-Based Data Set of Temperature and Precipitation Extremes: HadEX3. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **125**, e2019JD032263. <https://doi.org/10.1029/2019JD032263>
- [42] Breiman, L. (2001) Random Forests. *Machine Learning*, **45**, 5-32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- [43] Breiman, L. (1996) Bagging Predictors. *Machine Learning*, **24**, 123-140. <https://doi.org/10.1007/BF00058655>
- [44] Ho, T. (1998) The Random Subspace Method for Constructing Decision Forests. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **20**, 832-844. <https://doi.org/10.1109/34.709601>