

文想成,张 泰,王学梅,等. 长江中下游地区气候生产潜力及粮食产量响应[J]. 江苏农业科学,2021,49(6):196-203.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.06.035

# 长江中下游地区气候生产潜力及粮食产量响应

文想成<sup>1</sup>,张 泰<sup>1</sup>,王学梅<sup>2</sup>,郑梦蕾<sup>1</sup>,姚 瑶<sup>3</sup>,朱国良<sup>1</sup>,宣 普<sup>4</sup>,杨书运<sup>1</sup>

(1. 安徽农业大学资源与环境学院,安徽合肥 230036; 2. 安徽省宣城市气象局,安徽宣城 242074;  
3. 中国气象局干部培训学院湖北分院,湖北武汉 430070; 4. 安徽省池州市气象局,安徽池州 247100)

**摘要:**长江中下游地区是我国重要的粮食主产区,探讨长江中下游地区气候生产潜力时空分布及粮食产量响应,对于保证粮食稳产高产促进农业发展具有重要意义。基于 Miami 模型和 Thornthwaite Memorial 模型,利用长江中下游及周边 177 个气象站点 1960—2019 年降水与气温气象数据,运用 M-K 检验、IDW 插值法和 R/S 分析法探讨该区域气候生产潜力时空分布及未来变化。结果表明,在时间序列上,1960—2019 年长江中下游地区气温、降水分别以 0.22 °C/10 年、21.41 mm/10 年的速度上升; $y_t$ 、 $y_r$ 、 $y_e$  呈现波动上升趋势,60 年的均值分别为 1 966.9、1 712.2、1 526.9 g/(m<sup>2</sup>·年)。在空间分布上,气候生产潜力空间分布差异明显, $y_t$ 、 $y_r$ 、 $y_e$  均表现为自南向北递减的趋势,空间分布范围是 1 253~2 230、1 773~2 316、1 153~1 834 g/(m<sup>2</sup>·年)。气候生产潜力 Hurst 指数为 0.91,未来该区域气候生产潜力与过去 59 年变化趋势一致,呈上升趋势。气候资源利用率总体呈波动上升趋势,平均每 10 年以 4.8% 的速度增长,2010—2018 年的气候资源利用率达 38.4%。

**关键词:**长江中下游地区;气候生产潜力;时空变化;Thornthwaite Memorial 模型;Miami 模型

**中图分类号:** S162.5<sup>+</sup>3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2021)06-0196-07

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第 5 次评估报告称,1880—2012 年全球海陆表面平均温度呈线性上升趋势,升高了 0.85 °C,2003—2012 年平均温度比 1850—1900 年上升了 0.78 °C<sup>[1]</sup>。农业的发展取决于自然条件和社会条件水平,农业是受气候变化最敏感的系统之一<sup>[2]</sup>。气候变化对我国的作物气候生产潜力有很大的影响,受全球变暖的影响,我国作物的种植界线向高纬度、高海拔地区偏移<sup>[3]</sup>。当前我国粮食处于增长趋势<sup>[4]</sup>,但在气候变化影响下,极端天气灾害频发也可能造成粮食产量下降等问题,我国拥有世界 19% 的人口却只有 8% 的耕地,粮食安全是一个重要问题<sup>[5]</sup>。气候变化对农业的影响已经成为研究人员、各国政府和政策制定者最关心的问题<sup>[6]</sup>。气候生产潜力是衡量某个地区气候资源决定生物学产量的一项重要指标,是指作物品种、土壤肥力、耕作技术适宜时,由当地气候资源决定的一定时期内单位面积上的植

物生物学产量的最大值<sup>[7]</sup>。1981—2015 年以来,全球主要农业区的气候生产潜力呈波动上升趋势,变化范围是 7 680~8 280 kg/hm<sup>2</sup><sup>[8]</sup>。因此,在气候变化下研究某一区域的气候生产潜力变化规律及其影响因素,对指导农业发展具有重要的理论意义。近年来,关于气候生产潜力的研究很多,主要集中在对某一省份或区域进行研究,研究区域不同,气候生产潜力存在一定差异。卢玢宇等分析了 1986—2015 年黑龙江省作物生育期内气候生产潜力,发现其呈缓慢的降低趋势<sup>[9]</sup>;李振杰等发现,云南省 1961—2017 年气候生产潜力呈波动状态,无明显的升降趋势<sup>[10]</sup>;柴晨好等认为,1901—2000 年哈萨克斯坦气候生产潜力总体呈增长趋势,但时段不同,其气候生产潜力存在明显差异<sup>[11]</sup>;徐雨晴等认为,未来中国气候生产潜力在大部分区域呈增加趋势,增幅表现为北部大于南部,大部分地区增幅在 300 g/(m<sup>2</sup>·年)以下<sup>[12]</sup>。长江中下游地区是我国重要的粮食产区,2018 年该区域年生产总值占全国生产总值的 35%,农作物播种面积为 0.4 亿 hm<sup>2</sup>,总产量达 1.6 亿 t,均占全国播种面积和总产量的 24%<sup>[13]</sup>。有学者针对长江中下游地区某个省份的水稻、小麦和玉米等农作物气候生产潜力进行分析,如卢燕宇等分析安徽省 1961—2015 年冬小麦气

收稿日期:2020-07-01

基金项目:国家重点研发计划(编号:2017YFD0301301)。

作者简介:文想成(1996—),女,安徽芜湖人,硕士研究生,主要从事应用气象学研究。E-mail:wexch1996@163.com。

通信作者:杨书运,教授,主要从事应用气象学研究。E-mail:yangshy@ahau.edu.cn。

候生产潜力,发现该区域气候生产潜力均值为 $12\ 391\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ,其中沿淮和江淮之间最高<sup>[14]</sup>;邢兰芹等分析江苏省沿海地区作物气候生产潜力,发现水稻和玉米气候生产潜力呈现自南向北递减趋势,小麦南北差异小<sup>[15]</sup>;王继人等认为,2000—2017年湖南省气候生产潜力为 $19\ 530\sim 40\ 375\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ,整体呈东南高西北低<sup>[16]</sup>;刘丹等分析1961—2014年江西省双季晚稻的气候生产潜力,发现其呈上升趋势<sup>[17]</sup>。但目前对于长江中下游地区整个区域的研究却很少。气候生产潜力的模型主要有 Thornthwaite Memorial<sup>[18]</sup>、Miami<sup>[19-20]</sup>、AEZ<sup>[21]</sup>、Chikugo<sup>[22]</sup>、Wagenigen<sup>[23]</sup>等模型。由于 Thornthwaite Memorial 模型和 Miami 模型计算方便,所需参数少,应用于区域气候生产潜力变化研究较广。因此,本研究以长江中下游地区为研究对象,利用该区域及周边共 177 个气象站点 1960—2019 年的降水量与气温历史数据,基于 Miami 模型和 Thornthwaite Memorial 模型计算出气温生产潜力、降水生产潜力和气候生产潜力,探讨长江中下游地区气候生产潜力时空变化特征及未来变化趋势,以期对长江中下游地区粮食生产提供一定的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料来源

本研究区域为长江中下游 6 省 1 市( $24^{\circ}29'\sim 35^{\circ}07'\text{N}$ 、 $108^{\circ}22'\sim 122^{\circ}30'\text{E}$ ),包括湖北省、湖南省、安徽省、江西省、江苏省、浙江省、上海市(图 1)。大部分地区属于北亚热带,少部分属中亚热带北缘。年降水量为 $1\ 000\sim 1\ 400\ \text{mm}$ ,降水主要集中于夏季。该区域降水相对丰沛,雨热同期,年均气温为 $14\sim 18\ ^{\circ}\text{C}$ , $\geq 10\ ^{\circ}\text{C}$ 的年积温为 $4\ 300\sim 5\ 500\ ^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 。该地区是我国重要的商品粮基地。

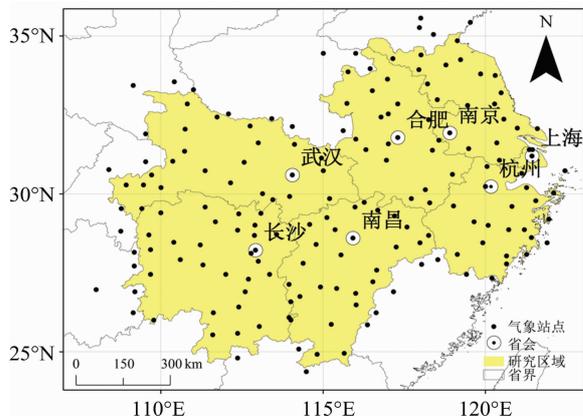


图1 研究区域及气象站点分布

本研究数据包括气象数据与粮食单位面积产量(简称单产)数据。气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),主要有长江中下游地区 6 省 1 市及周边地区 1960—2019 年 177 个气象站点(其中周边地区 31 个站点)的降水量与气温数据;粮食单位面积产量数据来源于《中国统计年鉴》,包含 1960—2018 年长江中下游地区 6 省 1 市的年粮食单位面积产量数据。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 气候生产潜力模型

##### 1.2.1.1 Miami 模型<sup>[19-20]</sup>

$$y_t = 3\ 000 / (1 + e^{1.315 - 0.119t}); \quad (1)$$

$$y_r = 3\ 000(1 - e^{-0.00064r}). \quad (2)$$

式中: $y_t$ 为气温决定的气温生产潜力, $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{年})$ ; $t$ 为年均气温, $^{\circ}\text{C}$ ; $y_r$ 为降水决定的降水生产潜力, $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{年})$ ; $r$ 为年降水量, $\text{mm}$ 。

##### 1.2.1.2 Thornthwaite Memorial 模型<sup>[18]</sup>

$$y_e = 3\ 000[1 - e^{-0.0009695(V-20)}]. \quad (3)$$

其中

$$V = \frac{1.05r}{\sqrt{1 + \left(\frac{1.05r}{L}\right)^2}}; \quad (4)$$

$$L = 300 + 25t + 0.05t^2. \quad (5)$$

式中: $Y_e$ 表示蒸散决定的气候生产潜力; $V$ 表示年均蒸散量, $\text{mm}$ ; $L$ 表示年均蒸发量, $\text{mm}$ 。

1.2.2 R/S 分析 重标极差分析(rescaled range analysis, 记为 R/S 分析),最初是由英国科学家赫斯特归纳尼罗河水位水文观测资料时提出<sup>[24]</sup>。R/S 分析法能将 1 个随机序列与 1 个非随机序列区分开来,利用 R/S 分析通过对气候要素时间序列而计算出 Hurst 指数,揭示气候要素时间序列的趋势性。当 $H=0.5$ 时,表明未来时间序列与过去变化无关;当 $0 < H < 0.5$ 时,表明未来时间序列与过去变化负相关, $H$ 值越接近 0,负相关越强;当 $0.5 < H < 1$ 时,说明未来时间序列与过去变化正相关, $H$ 值越接近 1,正相关越强。

1.2.3 气候资源利用率 气候资源利用率为实际单产与气候生产潜力之比<sup>[25]</sup>。

$$\text{气候资源利用率} = \frac{\text{实际单产}}{\text{气候生产潜力}} \times 100\%. \quad (6)$$

1.2.4 其他分析方法 本研究还采用气候倾向率、M-K 突变检验与 IDW 插值等分析方法<sup>[26]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 气候生产潜力时间变化分析

2.1.1 气象因子时间变化特征 依据长江中下游地区59年(1960—2019年)的气温和降水量数据,气温、降水量均呈现波动上升趋势,气候倾向率分别为 $0.22\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{年}$ 、 $21.41\text{ mm}/10\text{年}$ (图2)。59年的年均气温为 $16.51\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年均气温最低值、最高值分别为 $15.57\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1984年)、 $17.55\text{ }^{\circ}\text{C}$ (2007年),最值相差 $1.98\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;年降水量均值为 $1\ 326.4\text{ mm}$ ,年降水最低值、最高值依次为 $954.0\text{ mm}$ (1978年)、 $1\ 664.8\text{ mm}$ (2016年),差值为 $710.8\text{ mm}$ 。

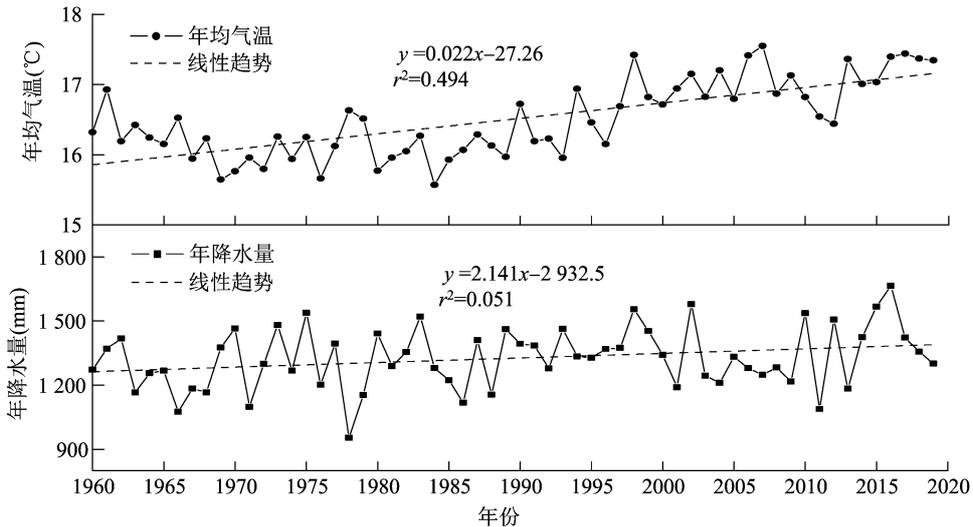


图2 1960—2019年长江中下游地区气温与降水变化趋势

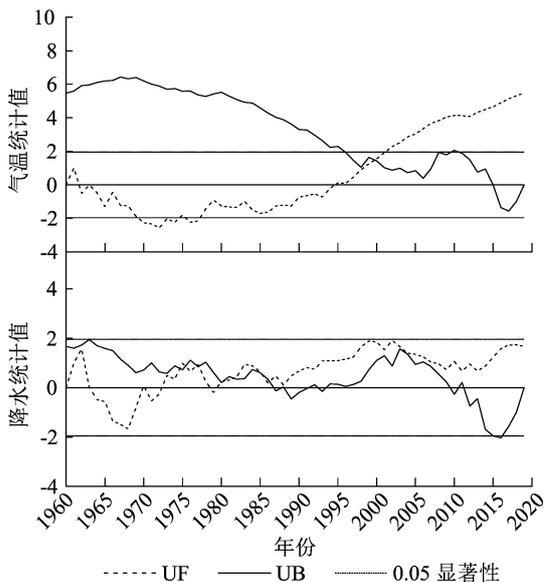


图3 气温与降水突变检验

2.1.2 气候生产潜力变化特征及突变检验 由图4可知,气温生产潜力( $y_t$ )、降水生产潜力( $y_r$ )、气

候生产潜力( $y_e$ )呈现波动上升趋势,气候倾向率依次为 $17.55$ 、 $15.71$ 、 $15.94\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot 10\text{年})$ 。 $y_t$ 均值为 $1\ 966.9\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ ,最低值、最高值分别为 $1\ 891.5$ (1984年)、 $2\ 049.0\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ (2007年),最值相差 $157.5\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ 。 $y_r$ 均值为 $1\ 712.2\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ ,最低值、最高值分别为 $1\ 371.0$ (1978年)、 $1\ 959.2\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ (2016年),最值相差 $588.2\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ 。 $y_e$ 均值为 $1\ 526.9\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ ,最低值、最高值分别为 $1\ 379.6$ (1978年)、 $1\ 651.8\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ (2016年),最值相差 $272.2\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ 。

由图5可知, $y_t$ 的UF统计值在1964—1994年小于0,在1960—1961、1995—2019年大于0,且UF和UB于2000年相交,UF统计值在2002年超过1.96,说明 $y_t$ 在1964—1994年呈下降趋势,在1960—1961、1995—2019年呈上升趋势,突变点为2000年,在2002—2019年上升趋势显著。 $y_r$ 的UF

统计值在1964—1994年小于0,说明该时段的气温总体呈现下降趋势;而在1961、1995—2019年大于0,表明该时段气温呈上升趋势,且UF和UB在2000年相交,UF统计值于2002年大于1.96(0.05显著性水平),表明2000年为突变点,2002—2019年上升趋势显著。降水的UF与UB统计存在多个交点,但未通过显著性检验,故降水不存在突变点;1969—1992年降水的UF统计值在0附近波动,说明该时期降水保持稳定;UF统计值在1964—1969年小于0,表明降水呈下降趋势;而在1960—1963、1993—2019年处于 $0 \sim 1.96$ ,说明降水呈上升趋势(图3)。

候生产潜力( $y_e$ )呈现波动上升趋势,气候倾向率依次为 $17.55$ 、 $15.71$ 、 $15.94\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot 10\text{年})$ 。 $y_t$ 均值为 $1\ 966.9\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ ,最低值、最高值分别为 $1\ 891.5$ (1984年)、 $2\ 049.0\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ (2007年),最值相差 $157.5\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ 。 $y_r$ 均值为 $1\ 712.2\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ ,最低值、最高值分别为 $1\ 371.0$ (1978年)、 $1\ 959.2\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ (2016年),最值相差 $588.2\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ 。 $y_e$ 均值为 $1\ 526.9\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ ,最低值、最高值分别为 $1\ 379.6$ (1978年)、 $1\ 651.8\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ (2016年),最值相差 $272.2\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ 。

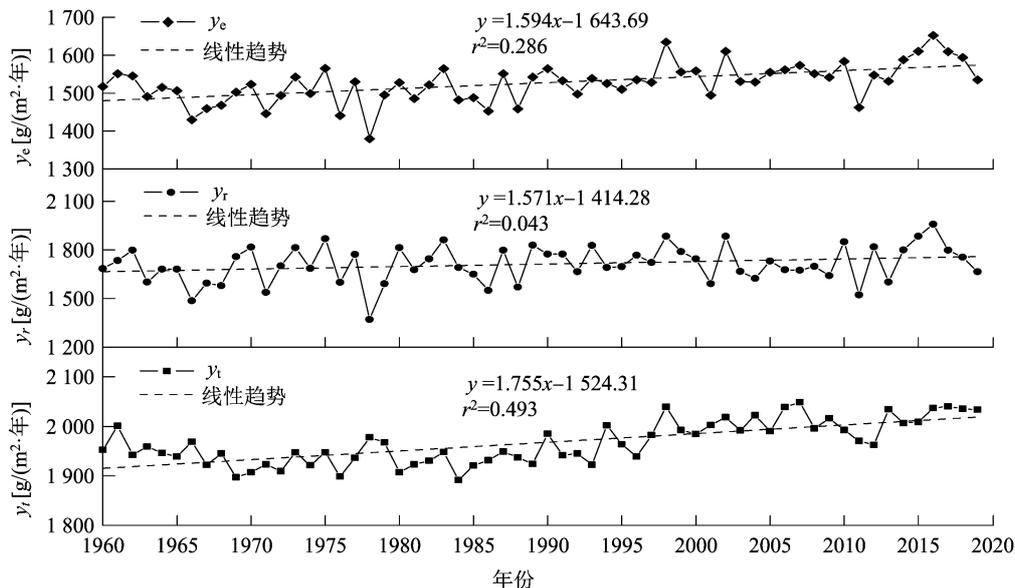


图4 1960—2019年气候生产潜力变化趋势

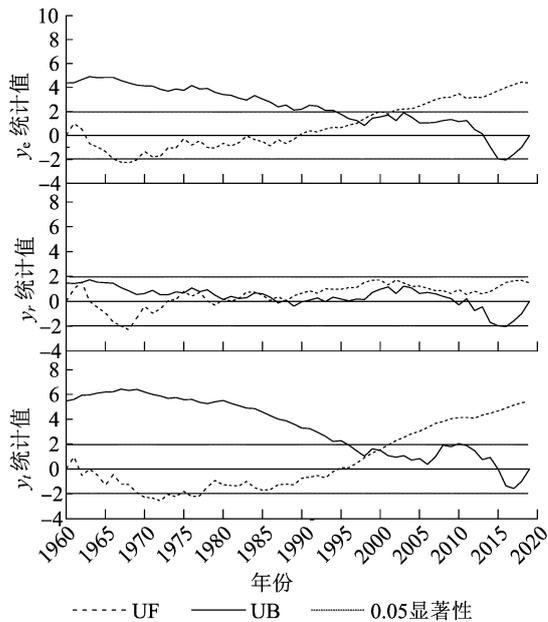


图5 1960—2019年气候生产潜力突变检验

与UB统计值存在多个交点,但都未超过显著性水平,说明不存在突变点;UF在1964—1972年小于0,说明该时段呈下降趋势;UF统计值在1964—1988年在0附近波动,说明该时期较稳定;而在1961—1962、1990—2019年大于0,表明该时段呈下降趋势。 $y_e$ 的UF值在1963—1989年小于0,说明呈现下降趋势;而在1961—1962、1990—2019年大于0,说明该时段 $y_e$ 呈上升趋势,且UF与UB统计值于1998年相交,并在2003年超过1.96,表明1998年为突变点,在2003—2019年上升趋势显著。

## 2.2 气候生产潜力空间分布及未来变化

### 2.2.1 气候生产潜力空间分布特征

由图6可知, $y_r$ 年均空间变化范围是1 253~2 230 g/(m<sup>2</sup>·年),总体呈南高北低、自南向北递减趋势;高值区[2 051~2 230 g/(m<sup>2</sup>·年)]主要分布在湖南省南部、浙江省南部、江西省中南部,最高值位于江西省赣州市;低值区[1 253~1 670 g/(m<sup>2</sup>·年)]分布在安徽省北部及黄山地区、江苏省中南部以及湖北省西部,最低值为安徽省黄山市(图6-a)。 $y_r$ 气候倾向率空间分布主要呈现自东北向西南递减趋势;高值区为上海市中部及湖北省南部,最高值位于湖北省五峰县,为43.00 g/(m<sup>2</sup>·10年);低值区为湖北省十堰市、恩施州、神农架林区、宜昌市等,湖南省张家界市、湘西州吉首市,最低值位于湖北省宜昌市,为2.07 g/(m<sup>2</sup>·10年)(图6-b)。 $y_r$ 、 $y_e$ 平均空间分布基本一致,均呈现自南向西递减趋势,两者空间分布范围是1 773~2 316、1 153~1 834 g/(m<sup>2</sup>·年)(图6-c、图6-e); $y_r$ 、 $y_e$ 在低值区分布一致,为湖北、安徽及江苏3省南部,高值区存在一定差异, $y_r$ 高值区分布在江西省绝大部分地区、安徽省南部、浙江省西部及湖南省东部,最高值位于安徽省黄山市,而 $y_e$ 高值区分布在江西省绝大部分地区、浙江及湖南2省南部,最高值位于江西省鹰潭市。 $y_r$ 、 $y_e$ 的气候倾向率分布也较一致,总体表现为东部高、北部西部低,两者空间分布范围是-37.00~63.02、-10.36~46.43 g/(m<sup>2</sup>·10年),均出现气候倾向率负值(图6-d、图6-f); $y_r$ 、 $y_e$ 气候倾向率

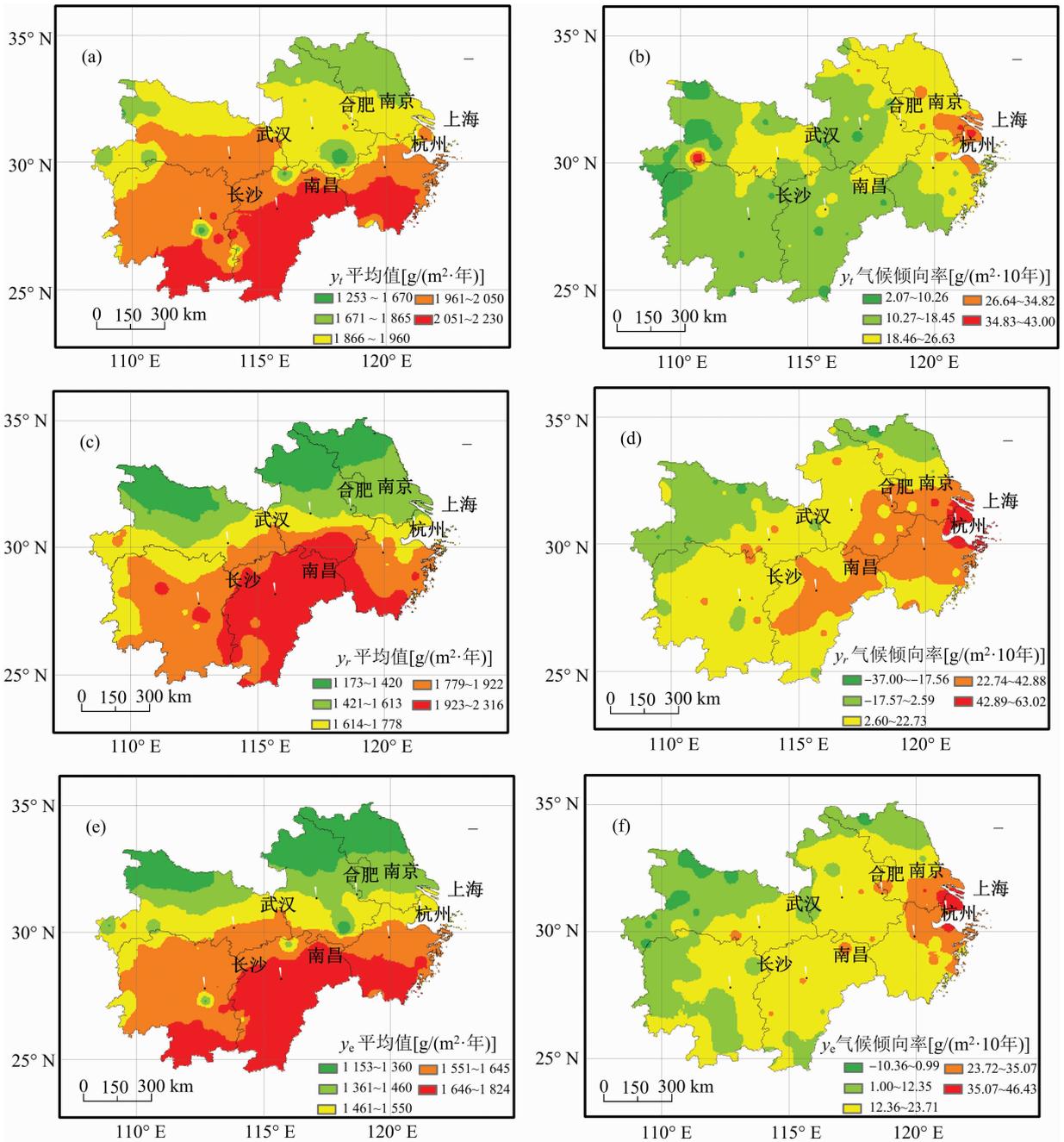


图6 长江中下游地区气候生产潜力年均值及气候倾向率空间分布

高值区均主要为上海市、浙江省宁波市、江苏省苏州市,最高值均位于上海市; $y_i$  气候倾向率负值主要位于安徽省北部、江苏省东北部、湖北省西北部以及湖南省东部, $y_e$  气候倾向率负值出现在湖北省十堰市、襄阳市、神农架昆区以及江苏省徐州地区。

2.2.2 气候生产潜力未来变化 利用 R/S 分析,计算出长江中下游地区气候生产潜力 Hurst 指数为  $0.91 > 0.5$ ,说明总体上该区域未来气候生产潜力与过去 59 年(1960—2019 年)变化趋势一致,表现为上升趋势(图 7)。由图 8 可知,江苏省徐州市邳州

市和湖北省襄阳市枣阳市、恩施州建始县、神农架等地区的 Hurst 值介于  $0.43 \sim 0.48$  之间,说明未来气候生产潜力与过去 59 年变化趋势有较弱的负相关性;湖北省襄阳市老河口市、江西省赣州市寻乌县 Hurst 值为  $0.49 \sim 0.51$ ,即该地区未来气候生产潜力与过去变化无联系;除了以上个别地区,长江中下游地区其他地区的未来气候生产潜力与过去变化趋势具有不同程度的正相关性,其中浙江省和上海市全部、江苏省东南部、安徽省南部、江西省北部、湖南省中部及湖北省南部个别地区 Hurst 值大

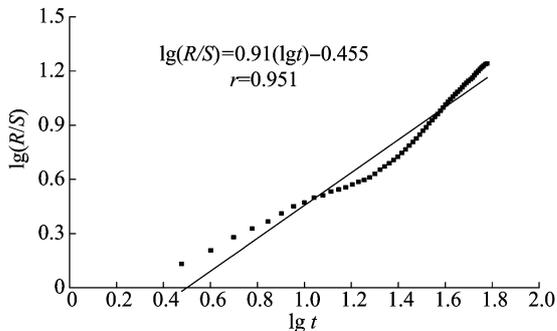


图7 长江中下游地区气候生产潜力 R/S 分析

于 0.8, 表明这些区域的过去气候生产潜力变化趋势很好地反映了未来的变化趋势。

### 2.3 粮食产量对气候生产潜力响应

1960—2018 年长江中下游地区的气候资源利用率、气候生产潜力、粮食单产总体呈波动上升趋势, 平均每 10 年分别以 4.8%、16.6 g/(m<sup>2</sup>·10 年)、78.8 g/m<sup>2</sup> 的速度增长(图 9)。气候资源利用率与

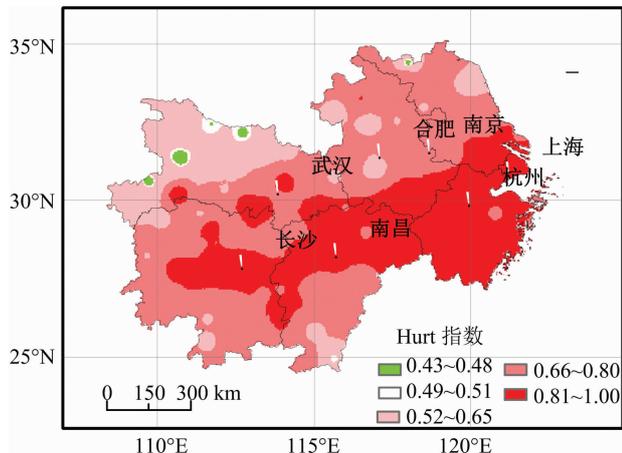


图8 长江中下游地区气候生产潜力 Hurst 指数空间分布

气候生产潜力的相关系数为 0.147, 呈正相关但不显著, 气候资源利用率与粮食单产相关系数为 0.989, 呈现显著的正相关性, 说明提高粮食单产是提高气候资源利用率的主要措施(图 10)。

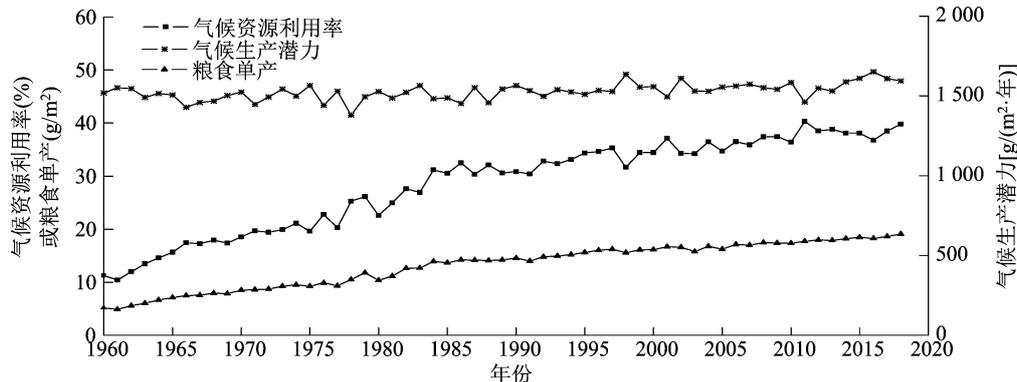


图9 1960—2018 年气候资源利用率、气候生产潜力及粮食单产年际变化

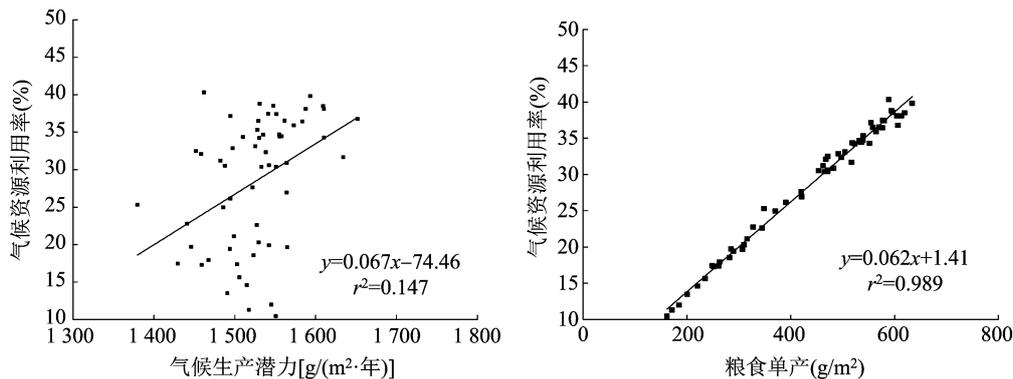


图10 1960—2018 年气候生产潜力、粮食单产与气候资源利用率相关性

在 20 世纪 60 年代, 粮食单产、气候资源利用率均值分别为 225.6 g/m<sup>2</sup>、15.08%, 在 21 世纪 10 年代分别上升至 603.9 g/m<sup>2</sup>、38.36%, 21 世纪 10 年代的粮食单产、气候资源利用率分别比 20 世纪 60 年代增加了 1.7、1.5 倍(表 1)。1960—1990 年气候

资源利用率偏低, 主要是因为当时科技水平受限, 肥料利用率低、作物品种品质低; 1990 年以后, 农业科技快速发展, 气候资源利用率显著提高。自 2010 年以来, 长江中下游地区气候资源利用率达 38.2%, 说明未来粮食产量还有很大的提升空间, 气

候资源利用率有待进一步提高。

### 3 结论与讨论

1960—2019年长江中下游地区的气温与降水呈波动上升趋势,分别以 $0.22\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{年}$ 、 $21.41\text{ mm}/10\text{年}$ 的趋势上升。 $y_i$ 、 $y_r$ 、 $y_e$ 也呈现波动上升趋势,59年均值分别为 $1\ 966.9$ 、 $1\ 712.2$ 、 $1\ 526.9\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{年})$ ,依次为 $y_i > y_r > y_e$ , $y_e$ 值与侯西勇关于1951—2000年中国区域内长江中下游地区的年气候生产潜力均值为 $1\ 250\sim 1\ 750\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{年})$ <sup>[27]</sup>基本一致。气温与 $y_i$ 自1995年开始上升,并于2001年起上升趋势显著,降水与 $y_r$ 自1989年开始呈现增加趋势,但增加趋势不显著, $y_e$ 自2003年开始上升趋势显著。

长江中下游地区气候生产潜力空间分布差异明显,总体来看,南部地区气候生产潜力高于北部地区。 $y_i$ 、 $y_r$ 、 $y_e$ 均表现为自南向北递减的趋势,空间分布范围分别是 $1\ 253\sim 2\ 230$ 、 $1\ 773\sim 2\ 316$ 、 $1\ 153\sim 1\ 834\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{年})$ 。 $y_i$ 、 $y_e$ 的高值区主要位于湖南、浙江2省南部及江西省绝大部分地区, $y_r$ 高值区主要位于安徽省南部、浙江省西南部以及江西省绝大部分区域; $y_i$ 低值区主要位于安徽、江苏2省北部, $y_r$ 、 $y_e$ 低值区位于安徽省、江苏省以及湖北3省北部地区。褚荣浩等认为,江苏省一季稻气候生产潜力高值区位于江苏省西南部<sup>[28]</sup>,这与本研究江苏省气候生产潜力高值区位于江苏西南部结果一致。

长江中下游地区气候生产潜力Hurst指数为 $0.91$ ,气候生产潜力倾向率为 $15.94\text{ g}/(\text{m}^2\cdot 10\text{年})$ ,说明未来该区域气候生产潜力与过去59年(1960—2019年)变化趋势一致,呈现上升趋势,这与徐雨晴等认为的2021—2099年中国气候生产潜力在大部分地区(包含长江中下游地区)都呈增加趋势<sup>[12]</sup>一致。从空间分布来看,江苏省徐州市邳州市和湖北省襄阳市枣阳市、恩施州建始县、神农架等地区与过去气候生产潜力呈现负相关趋势;湖北省襄阳市老河口、江西省赣州市寻乌县Hurst值为 $0.49\sim 0.51$ ,与过去气候生产潜力变化趋势无关;长江中下游其他地区的气候生产潜力与过去59年变化趋势一致。

1960—2018年长江中下游地区的气候资源利用率、粮食单产总体呈波动上升趋势,平均每10年分别以 $4.8\%$ 、 $78.8\text{ g}/\text{m}^2$ 的速度增长。2010—2018年长江中下游地区气候资源利用率达 $38.4\%$ ,气候资源利用率与粮食单产呈显著正相关性,说明提高

表1 粮食单产、气候生产潜力及气候资源利用率年代际变化

年代	粮食单产 ( $\text{g}/\text{m}^2$ )	气候生产潜力 [ $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{年})$ ]	气候资源利用率 (%)
1960—1969	225.6	1 500.7	15.08
1970—1979	316.5	1 491.5	21.27
1980—1989	435.6	1 507.4	28.93
1990—1999	508.7	1 542.3	33.00
2000—2009	555.7	1 550.6	35.85
2010—2018	603.9	1 575.3	38.36

粮食单产是未来提高气候资源利用率的主要措施。

#### 参考文献:

- [1] IPCC. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]//Climate change 2013—the physical science basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] Gay C, Estrada F, Conde C, et al. Potential impacts of climate change on agriculture: a case of study of coffee production in Veracruz, Mexico [J]. Climatic Change, 2006, 79(3): 259–288.
- [3] 周广胜. 气候变化对中国农业生产影响研究展望[J]. 气象与环境科学, 2015, 38(1): 80–94.
- [4] 郑亚楠, 张凤荣, 谢臻, 等. 中国粮食生产时空演变规律与耕地可持续利用研究[J]. 世界地理研究, 2019, 28(6): 120–131.
- [5] Yang X G, Chen F, Lin X M, et al. Potential benefits of climate change for crop productivity in China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 208: 76–84.
- [6] Kang Y, Ma X, Khan S. Predicting climate change impacts on maize crop productivity and water use efficiency in the loess plateau [J]. Irrigation and Drainage, 2014, 63(3): 394–404.
- [7] 欧阳海. 农业气候学 [M]. 北京: 气象出版社, 1990.
- [8] 赵俊芳, 孔祥娜, 姜月清, 等. 基于高时空分辨率的气候变化对全球主要农区气候生产潜力的影响评估 [J]. 生态环境学报, 2019, 28(1): 1–6.
- [9] 卢玢宇, 杨波, 裴占江, 等. 黑龙江省气候生产潜力时空演变特征研究 [J]. 生态环境学报, 2017, 26(10): 1659–1664.
- [10] 李振杰, 段长春, 金莉莉, 等. 云南省气候生产潜力的时空变化 [J]. 应用生态学报, 2019, 30(7): 2181–2190.
- [11] 柴晨好, 周宏飞, 朱薇. 气候变化背景下哈萨克斯坦气候生产潜力时空特征分析 [J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(1): 217–226.
- [12] 徐雨晴, 於刚, 周波涛, 等. 气候变化背景下未来中国气候生产潜力时空动态格局 [J]. 干旱区资源与环境, 2019, 50(9): 72–80.
- [13] 国家统计局. 中国统计年鉴 2018 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [14] 卢燕宇, 孙维, 唐为安, 等. 气候变化背景下安徽省冬小麦气候生产潜力和胁迫风险研究 [J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(1): 17–30.

赵守强,迟大群,贾付诚,等. 不同地区盐渍土壤颗粒的分形特征[J]. 江苏农业科学,2021,49(6):203-207.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.06.036

# 不同地区盐渍土土壤颗粒的分形特征

赵守强,迟大群,贾付诚,邓亚鹏,孙池涛

(山东农业大学水利土木工程学院,山东泰安 271018)

**摘要:**通过野外调查、室内试验、模型分析等方法研究了新疆石河子、新疆阿拉尔、内蒙临河、吉林白城、河北海兴及江苏盐城6个地区表层0~20 cm土壤颗粒分形维数、土壤质地、粒径组成及盐分含量变化特征。结果表明,各地区土壤质地以壤土为主,土壤颗粒分形维数为2.59~2.78,且呈自南向北、自东向西递增趋势;土壤颗粒分形维数与黏粒(<0.002 mm)相对含量呈极显著幂指数关系( $y=2.323 2x^{0.058 3}$ ,  $r^2=0.981 9$ ,  $P<0.01$ )。受海拔、气候条件等因素影响,不同地区土壤颗粒分形维数与沙粒(0.05~2 mm)和粉粒(0.002~0.05 mm)相对含量、平均质量半径、土壤盐分之间相关性不同,但总体拟合决定系数低于0.2。土壤分形维数主要与黏粒相对含量有关,同时受海拔、气候等因素共同影响。

**关键词:**盐渍土;土壤质地;颗粒组成;分形维数

**中图分类号:**S152.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2021)06-0203-05

分形理论是描述自然界中不规则空间形体特征的重要工具,分形体内任何一个独立的分形单元在某种程度上都是整体的再现与浓缩<sup>[1]</sup>。土壤是

由大小不同、形状各异的固体颗粒及孔隙所形成的多孔介质,具有一定的分形特性<sup>[2-4]</sup>。分形理论被引用到土壤学研究以来,土壤结构特征实现了量化描述,这为量化土地利用方式对土壤结构的影响、农田土壤荒漠化演变过程、耕层土壤结构特性变化等研究的快速发展提供了可靠的理论支撑<sup>[5-7]</sup>。王艳艳等指出土壤分形结构对其水力学性质具有指示作用,可通过构建相关水力特性参数的分形模型预估土壤水力特性参数<sup>[8]</sup>;张德谦等指出分形维数可作为坡面侵蚀产沙中泥沙粒级分布的重要评价指标<sup>[9]</sup>;杜雅仙等指出荒漠草原微斑块土壤颗粒粒径分形维数与土壤含盐量呈显著正相关,

收稿日期:2020-06-03

基金项目:山东省自然科学基金(编号:ZR2018BEE048);农业部作物需水过程与调控重点实验室开放基金(编号:FIRI202004-0201);山东省重点研发计划(重大科技创新工程)(编号:2019JZZY010727)。

作者简介:赵守强(1998—),男,山东潍坊人,主要从事盐碱地改良及农田水分高效利用。E-mail:1620378443@qq.com。

通信作者:孙池涛,博士,讲师,主要从事盐碱地改良及农田水分高效利用。E-mail:chitaosun@sdau.edu.cn。

[15] 邢兰芹,姚众众. 江苏省1971—2010年气候生产潜力变化特征[J]. 水土保持通报,2018,38(1):252-255.

[16] 王继人,钟昌标,王玲玲,等. 2000—2017年湖南省土地耕作适宜性、气候生产潜力与LUCC过程动态特征[J]. 山地学报,2019,37(2):252-262.

[17] 刘丹,李迎春. 气候变化背景下江西省双季晚稻气候生产潜力的时空变化特征[J]. 西南农业学报,2018,31(1):184-191.

[18] Lieth H. Modeling the primary productivity of the world[J]. Soviet Journal of Ecology,1975,5(2):107.

[19] Lieth H. Primary production; terrestrial ecosystems[J]. Human Ecology,1973,1(4):303-332.

[20] 陈国南. 用迈阿密模型测算我国生物生产量的初步尝试[J]. 自然资源学报,1987,2(3):270-278.

[21] 赵安,赵小敏. FAO-AEJ法计算气候生产潜力的模型及应用分析[J]. 江西农业大学学报,1998,20(4):120-125.

[22] Uchijima Z, Seino H. Agroclimatic evaluation of net primary

productivity of natural vegetations: (1) Chikugo model for evaluating net primary productivity [J]. Journal of Agricultural Meteorology, 1985,40(4):343-352.

[23] Bouman B, van Keulen H, van Laar H H, et al. The 'school of de wit' crop growth simulation models: a pedigree and historical overview[J]. Agricultural Systems,1996,52(2):171-198.

[24] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京:高等教育出版社,1996.

[25] 吴宜进,熊安元,杨荆安,等. 湖北的气候生产力与农业持续发展[J]. 长江流域资源与环境,1999,8(4):405-410.

[26] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,1999.

[27] 侯西勇. 1951—2000年中国气候生产潜力时空动态特征[J]. 干旱区地理,2008,31(5):723-730.

[28] 褚荣浩,申双和,吕厚荃,等. RegCM3下1951—2100年江苏省热量资源及一季稻气候生产潜力[J]. 江苏农业学报,2015,31(4):779-785.