中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

安徽省沿江地区双季稻光热资源利用效率 变化特征及对气象产量的影响

岳伟, 陈金华, 阮新民, 陈曦, 陈砚涛, 王珍

引用本文:
岳伟, 陈金华, 阮新民, 等. 安徽省沿江地区双季稻光热资源利用效率 变化特征及对气象产量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(6): 929–940.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180865

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

冬季作物–双季稻轮作种植模式氮、磷、钾养分 循环与产量可持续性特征

Nitrogen, phosphorus and potassium cycling and sustainability of rice yield in a winter crop–double cropping rice rotation system

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(5): 705–716 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180767

江淮区域稻麦两熟制周年资源分配、利用特征

Characteristics of resource allocation and utilization of rice–wheat double cropping system in the Jianghuai Area

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(7): 1078–1087 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.181114

不同有机培肥模式下双季稻田碳汇效应与收益评估

Evaluation of net carbon sink effects and costs/benefits of double–cropped rice fields under different organic fertilizer applications

中国生态农业学报. 2017, 25(2): 157–165 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160725

华南双季稻主栽品种的光能利用效率及聚类分析

Radiation use efficiency and its classification of main varieties in double–cropping rice region of South China

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(11): 1714–1724 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190396

黑龙江省热量资源变化及其对作物生产的影响

Characteristics and effects on crop production of heat resources changes in Heilongjiang Province

中国生态农业学报. 2018, 26(2): 242–252 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170621

中国生态农业学报(中英文) 2019 年 6 月 第 27 卷 第 6 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jun. 2019, 27(6): 929−940

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.180865

岳伟, 陈金华, 阮新民, 陈曦, 陈砚涛, 王珍. 安徽省沿江地区双季稻光热资源利用效率变化特征及对气象产量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(6): 929−940

YUE W, CHEN J H, RUAN X M, CHEN X, CHEN Y T, WANG Z. Variation in characteristics of light and heat resource utilization efficiency of double-season rice and its impact on meteorological yield along the Yangtze River in Anhui Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(6): 929−940

安徽省沿江地区双季稻光热资源利用效率变化特征及对气象产量的影响*

岳 伟[1], 陈金华[1], 阮新民[2**], 陈 曦[1], 陈砚涛[3], 王 珍[1]

(1. 安徽省农业气象中心 合肥 230031; 2. 安徽省农业科学院水稻研究所 合肥 230031; 3. 安徽省石台县气象局 石台 245100)

摘 要: 为进一步了解安徽省沿江地区双季稻光温资源利用效率的变化特征及光温资源变化对双季稻气象产量的影响, 以安徽省沿江地区 19 个市县气象观测站 1961—2017 年逐日日平均气温、日照时数及 7 个双季稻主产市县 1961—2006 年早稻和晚稻产量为基础, 采用线性趋势、M-K 突变检验、相关分析、回归分析等方法, 分析了早稻、晚稻、双季稻生长季光热资源和利用效率变化特征及光热资源变化对气象产量的影响。结果表明, 1961—2017 年安徽省沿江地区早稻、晚稻和双季稻生长季太阳总辐射呈极显著下降趋势(P<0.01), 平均每 10 a 降幅分别为 30.5 MJ·m^{-2}、69.8 MJ·m^{-2} 和 86.6 MJ·m^{-2}; ≥10 ℃积温呈显著增加趋势, 平均每 10 a 增幅分别为 39.1 ℃·d、24.4 ℃·d 和 14.7 ℃·d。早稻、晚稻、双季稻光能和热量利用效率均呈显著增加趋势(P<0.01), 其中光能利用效率增幅分别为 0.040%·(10a)$^{-1}$、0.103%·(10a)$^{-1}$ 和 0.083%·(10a)$^{-1}$, 热量利用效率平均每 10 a 增幅分别为 0.141 kg·℃$^{-1}$·d^{-1}·hm^{-2}、0.39 kg·℃$^{-1}$·d^{-1}·hm^{-2} 和 0.315 kg·℃$^{-1}$·d^{-1}·hm^{-2}; 早稻、晚稻和双季稻光热资源利用效率显著增加主要源于其产量的大幅提升。太阳总辐射、≥10 ℃积温与早稻气象产量分别呈极显著(P<0.01)、显著(P<0.05)正相关; 晚稻气象产量与太阳总辐射呈显著(P<0.05)正相关, 但与≥10 ℃积温相关性不显著(P>0.05)。太阳总辐射是影响早稻和晚稻气象产量的主要因子, ≥10 ℃积温为次要因子; 光热资源变化对早稻气象产量的影响较晚稻更为明显。在太阳总辐射减少、≥10 ℃积温增加趋势下, 可通过选择光合效率高的品种, 并采用薄膜育秧或温室育秧方式, 增加早稻生长季积温, 适当延长晚稻生育期等途径, 提高安徽省沿江地区双季稻光热资源利用效率, 实现水稻周年产量的高产稳产。

关键词: 安徽; 双季稻; 光热资源; 利用效率; 产量

中图分类号: S162 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-6237(2019)06-0929-12

Variation in characteristics of light and heat resource utilization efficiency of double-season rice and its impact on meteorological yield along the Yangtze River in Anhui Province*

YUE Wei[1], CHEN Jinhua[1], RUAN Xinmin[2**], CHEN Xi[1], CHEN Yantao[3], WANG Zhen[1]

(1. Anhui Agricultural Meteorological Center, Hefei 230031, China; 2. Institute of Rice Research, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China; 3. Shitai County Meteorological Bureau, Shitai 245100, China)

* 国家重点研发计划课题(2017YFD0301304)和安徽省气象局科研项目(KM201807)资助

** 通信作者: 阮新民, 主要研究方向为水稻遗传育种。E-mail: ruan_xm@126.com

岳伟, 主要研究方向为农业气象。E-mail: yuewei925@163.com

收稿日期: 2018-09-21 接受日期: 2018-12-20

* This study was supported by the National Key Research and Development Project of China (2017YFD0301304) and the Scientific Research Project of Anhui Meteorological Bureau (KM201807).

** Corresponding author, E-mail: ruan_xm@126.com

Received Sep. 21, 2018; accepted Dec. 20, 2018

Abstract: To be further acquainted with the variation in characteristics of the light use efficiency and the heat use efficiency for double-season rice along the Yangtze River basin in the Anhui Province, and the effect of light resources and temperature resources on meteorological yield for double-season rice, this study analyzed the variation characteristics of light resources and heat resources, resource use efficiency, and the influence on meteorological yield on early-season rice, late-season rice, and double-season rice. To analyze these, methods including linear fitting, M-K mutation test, correlation analysis, and regression analysis, based on data for daily average temperature and daily sunshine hours from 1961 to 2017 from the nineteen meteorological stations along the Yangtze River basin in the Anhui Province, and the yield for both early-season rice and late-season rice from 1961 to 2006 in seven counties, which are the main production area for double-season rice, were used. The results showed that the amount of total solar radiation significantly decreased ($P < 0.01$) by 30.5 $MJ\cdot m^{-2}$, 69.8 $MJ\cdot m^{-2}$, and 86.6 $MJ\cdot m^{-2}$, on average, per decade, during the growth of early-season rice, late-season rice, and double-season rice, respectively; the accumulated temperature ≥ 10 ℃ showed a significant increasing trend, and increased, on average, by 39.1 ℃·d, 24.4 ℃·d, and 14.7 ℃·d per decade in early-season rice, late-season rice, and double-season rice, respectively; the light use efficiency and heat use efficiency both significantly increased ($P < 0.01$). The rise in light use efficiency was 0.040%, 0.103%, and 0.083% per decade for early-season rice, late-season rice, and double-season rice, respectively. And the heat use efficiency increased by 0.141 $kg\cdot ℃^{-1}\cdot d^{-1}\cdot hm^{-2}$ per decade for early-season rice, 0.39 $kg\cdot ℃^{-1}\cdot d^{-1}\cdot hm^{-2}$ per decade for late-season rice, and 0.315 $kg\cdot ℃^{-1}\cdot d^{-1}\cdot hm^{-2}$ per decade for double-season rice. Significant improvements in the utilization efficiency of light resources and heat resources of rice were mainly a result of the substantial increase in yield. For early-season rice, the meteorological yield showed an extremely significant positive correlation ($P < 0.01$) with total solar radiation and a significant positive correlation ($P < 0.05$) with accumulated temperatures above 10 ℃. Although the meteorological yield for late season rice was significantly positively correlated to total solar radiation, it was insignificantly correlated to the accumulated temperatures above 10 ℃ in their growth duration. The total solar radiation was the main factor that affected the meteorological yield of early-season rice and late-season rice, whereas the accumulated temperature above 10 ℃ was the second most influential factor. The effect on the change in light and heat resources on early-season rice was more obvious compared with that on late-season rice. Therefore, given the trend in decreasing total solar radiation and increasing accumulated temperatures above 10 ℃, for the purposes of improving the utilization efficiency of light resources and heat resources for double-season rice along the Yangtze River basin in the Anhui Province, to achieve a high and stable annual yield of rice, it is suggested that some field management measurements should be adopted, such as the selection of cultivars with high photosynthetic efficiency, or improved film seedlings or greenhouse seedling management, which can increase the accumulated temperatures in the early rice-growing season and appropriately prolong the growth period of late-season rice, and determining a suitable planting density.

Keywords: Anhui; Double-season rice; Sunshine and heat resources; Utilization efficiency; Yield

IPCC 第 5 次评估报告指出，全球气候正发生着以变暖为主要特征的显著性变化，过去 100 多年来(1880—2012 年)，全球地表平均温度已升高 0.85 ℃(0.65~1.06 ℃)，2003—2012 年平均温度比 1850—1900 年平均温度上升 0.78 ℃[1]。1906—2005 年我国年平均气温上升(0.78±0.27) ℃[2-3]。农业是对气候变化最为敏感和脆弱的领域之一[4]，气候变化对农业生产的影响，首先表现为对农业气候资源的影响，农业气候资源的数量及其配置不仅直接影响农业生产过程[5]，对农作物种植制度和农业生产布局也有不同程度影响[6]。

水稻(*Oryza sativa* L.)是我国重要的粮食作物，水稻生产对保障我国粮食安全具有特别重要的地位，提高双季稻单产是提高水稻总产和粮食总产的重要途径之一[7]。了解并掌握气候资源的时间变化规律和空间分布特征，对于合理利用气候资源，科学安排生产布局，提高双季稻产量具有重要指导意义。关于气候变暖对双季稻生产气候资源的影响已引起众多学者的关注和研究。吕伟生等[8]研究发现，近 30 a 江西省双季稻安全生产期内温光资源总体呈温度明显升高、积温显著增加、日照时数无明显变化的趋势；近 50 a 长江中游地区(湖南、湖北、江西)早稻安全播种期提前 3~7 d，双季晚稻安全齐穗期延后 2 d，双季稻安全生长期平均延长 7 d，双季稻种植北界明显北移 200 km 左右[9]；湖南省 1980—2012 年双季稻全生育期内平均温度呈现升高趋势，早稻全生育期内降水量和辐射呈增加趋势，晚稻全生育期内降水量和辐射有所下降[10]；吴珊珊等[11]利用全球气候模式 ECHAM5/MPI-OM 在 SRES A1B 排放情景下 2015—2100 年全球气候模式的预测结果，对江西双季稻 2015—2100 年的气候产量进行定量预测，发现 2060 年以前，早稻气候产量基本以正值为主，2060 年后气候产量呈正负波动状态，晚稻气候产量整体变化幅度较早稻气候产量小。然而不同区域双季稻生产气候资源变化趋势并不完全一致，开展区域性研究对指导当地双季稻生产更具有针对性和实用性。

安徽省是我国种植双季稻北缘地区, 双季稻年播种面积在20万 hm^2左右, 对安徽省粮食总产发挥重要作用。目前, 关于气候资源变化及对安徽省农业生产的影响研究较多, 但多集中于安徽省周年气候资源变化对小麦(*Triticum aestivum*)、玉米(*Zea mays*)、一季稻等作物生产的影响[12-16], 而关于气候资源尤其是双季稻生长季光热资源变化及其对气象产量影响的研究较少。因此, 本研究利用安徽省沿江地区 19 个市县气象观测站 1961—2017 年逐日日平均气温、日照时数及 7 个双季稻主产市县 1961—2006 年早稻和晚稻产量资料, 分析该地区近 50 a 来双季稻生长季光热资源和利用效率的变化特征及光热资源变化对双季稻气象产量的影响, 以期为应对气候变化、充分利用气候资源、合理调整沿江地区双季稻种植结构提供理论依据。

1　研究资料与方法

1.1　研究区域概况

安徽省沿江地区属于亚热带湿润季风气候, 年平均气温 16~17.3 ℃, 常年无霜期达 220~250 d, 年平均降水量 770~1 700 mm, 地形以丘陵山地和平原为主[17]。降水丰富, 日照充足, 雨热同季; 河网密布, 灌溉条件好, 为农业发展提供了良好的条件。

1.2　研究资料

本研究使用的逐日气象资料来源于安徽省气象信息中心, 主要包括沿江地区 19 个市县(图 1)1961—2017 年的日平均气温(℃)、日照时数(h)。双季稻产量资料来自于《安徽省统计年鉴》, 主要包括枞阳、怀宁、望江、南陵、芜湖县、宣城、池州等沿江地区 7 个双季稻主产市县 1961—2006 年早稻和晚稻产量($kg\cdot hm^{-2}$)。

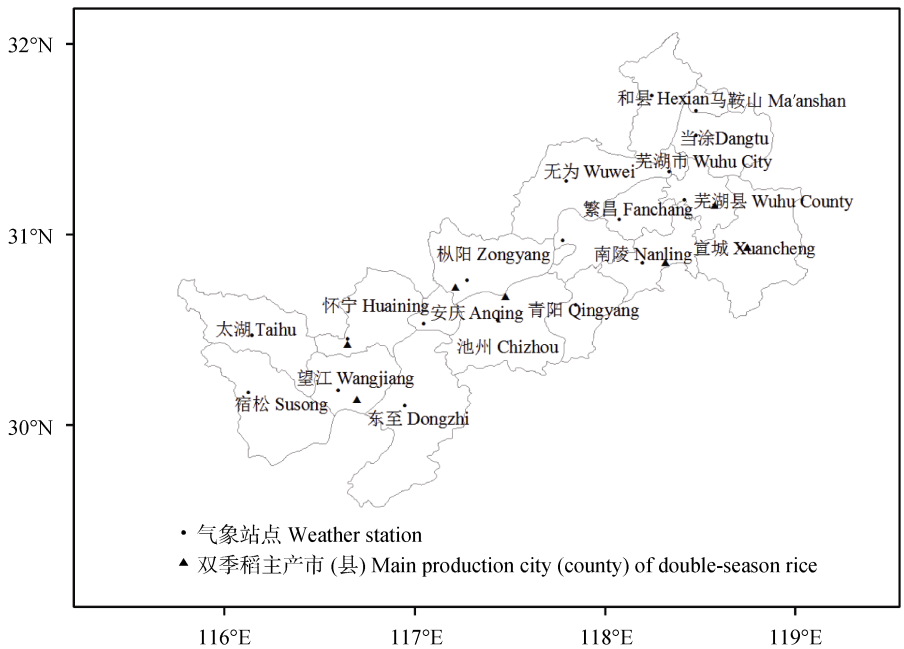

图 1　安徽省沿江地区气象站点分布图

Fig. 1　Distribution map of meteorological stations along the Yangtze River in Anhui Province

结合生产实际, 安徽省沿江地区双季早稻一般于 4 月上旬播种, 7 月中旬成熟; 双季晚稻一般 7 月上旬播种, 11 月中旬成熟。所以本文选取早稻生长季为 4 月上旬—7 月中旬, 晚稻生长季 7 月上旬—11 月中旬, 双季稻生长季为 4 月上旬—11 月中旬。

1.3　研究方法

1.3.1　光热资源及利用效率

气候资源在一定程度上决定了某一个地区的农业生产类型、农业生产率和农业生产潜力[18], 太阳辐射资源是重要的农业气候资源之一, 是植物进行光合作用的必要条件, 使植物能够正常生长、发育及形成产量[19]。本文采用曹雯等[20]修订的安徽太阳辐射公式计算沿江地区太阳总辐射。

$$R_s=R_0(0.172+0.521n/N) \quad (1)$$

$$N=24\omega_s/\pi \quad (2)$$

式中: R_s 为太阳总辐射($MJ\cdot m^{-2}$), R_0 为天文辐射($MJ\cdot m^{-2}$), n 为实际日照时数(h), N 为可能日照时数(h), ω_s为日落时的时角, π 取 3.141 592 6。

热量资源是农业生产的重要自然资源, 在正常水分条件下, 热量资源决定了作物的品种、熟型、产量及作物的生长发育[21], 本文统计双季稻生长期间≥10 ℃的积温作为双季稻的热量资源。

作物光温利用率可以用来评价一个地区作物生产的基本生产状况和潜力[22]，本文采用公式(3)计算沿江地区双季稻光能利用率。

$$E=H\times Y/\sum Q\times 100\% \tag{3}$$

式中: E 为光能利用率(%); Y 为单位面积早稻或晚稻产量(kg·hm^{-2}); H 为单位面积上干物重燃烧热(J·g^{-1}), 取 1.799×10^{7} J·kg^{-1}; $\sum Q$ 为早稻或晚稻生长期间(播种至成熟)的太阳总辐射(MJ·m^{-2})。

热量资源利用效率可以评价一个地区的农业生产水平[22]，采用公式(4)计算热能利用效率。

$$\mathrm{HUE}=Y/\sum T \tag{4}$$

式中: HEU为热量利用率，Y为单位面积双季稻产量(kg·hm^{-2})，$\sum T$ 为双季稻生长期间(播种至成熟)≥10 ℃的有效积温(℃·d)。HUE即积温每1 ℃·d所生产的粮食单产，单位为 kg·℃$^{-1}$·d^{-1}·hm^{-2}。

1.3.2 气候倾向率

将气候要素的趋势变化用一次线性方程表示，利用最小二乘法拟合一元线性方程 $X=at+b$(a 为回归系数, b 为回归常数, X 为气象要素, t 为时间)计算各气象要素的年趋势变化率，其斜率(a)表示气象要素变化倾向率, a 值的符号正或负反映趋势上升或下降，a×10 为气候要素倾向率，表示气象要素每 10 年的变化率[23]。

1.3.3 M-K 突变检验

用 Mann-Kendall(M-K)方法对各气象要素时间序列进行突变检验[24-25]，该种方法可以检验序列变化趋势、突变点和突变时间区域等，不需要样本遵从一定的分布，也不受少数异常值的干扰。

1.3.4 气象产量

作物产量是各种自然因素和非自然因素综合影响的结果，一般把作物的实际产量 y 分解为趋势产量 y_t、气象产量 y_w 和随机误差因素造成的产量 Δy 3 部分[26]，即:

$$y=y_t+y_w+\Delta y \tag{5}$$

趋势产量主要是反映历史时期生产力发展水平的长周期产量分量，气象产量主要是受以气象要素为主的短周期变化因子影响的产量分量。由于 Δy 是一些偶然因素影响造成的产量随机变化，在作物产量中占的比例较小，一般在实际计算中可不做考虑。因此, (5)式可以简化为:

$$y=y_t+y_w \tag{6}$$

本研究采用分段模拟法对实际产量数据进行模拟以求得趋势产量，实际产量减去趋势产量，得到气象产量。

$$y_w=y-y_t \tag{7}$$

2 结果与分析

2.1 双季稻生长季光热资源变化特征

2.1.1 光能资源变化特征

1961—2017 年，安徽省沿江地区早稻、晚稻和双季稻生长季太阳总辐射均值分别为 1 911.8 MJ·m^{-2}、2 325.2 MJ·m^{-2} 和 3 861.1 MJ·m^{-2}。其中早稻生长季太阳总辐射最大值为 2 139.3 MJ·m^{-2}，出现在 1981 年；最小值为 1 586.7 MJ·m^{-2}，出现在 2016 年。稻和双季稻生长季太阳总辐射最大值分别为 2 830.9 MJ·m^{-2} 和 4 376.4 MJ·m^{-2}，均出现在 1966 年；最小值分别为 1 934.7 MJ·m^{-2} 和 3 347.9 MJ·m^{-2}，均出现在 2014 年。由图 2a-2c 可见, 1961—2017 年，安徽省沿江地区早稻、晚稻和双季稻生长季内太阳总辐射均呈明显下降趋势(P<0.01)，平均每 10 a 降幅分别为 30.5 MJ·m^{-2}、69.8 MJ·m^{-2} 和 86.6 MJ·m^{-2}。从年代际变化看，从 1960s 至 2000s 后，早稻生长季内太阳总辐射在波动中下降，晚稻和双季稻逐年代际下降，尤其近年来双季稻生长季太阳总辐射下降明显, 2000s 后较 2000s 下降 142.8 MJ·m^{-2}，显著高于历年均值(86.6 MJ·m^{-2})。

由 M-K 检测可以看出, 1961—2017 年安徽省沿江地区早稻生长期辐射资源的 UF(按时间序列顺序计算的统计量序列)曲线在 0 值以下，说明辐射资源呈减少趋势，UF 和 UB(按时间序列逆序计算的统计量序列)出现多个交点，其中 2003—2004 年的交点突破了 $P_{0.05}$=±1.96 临界线(图 3a)，突变后(1 688.8 MJ·m^{-2})较突变前(1 926.5 MJ·m^{-2})减少 29.7 MJ·m^{-2}。晚稻生长季辐射资源在 1996 年发生突变，突变后(2 196.5 MJ·m^{-2})较突变前(2 406.0 MJ·m^{-2})减少 209.5 MJ·m^{-2}, UF 曲线在 1999 年突破了 $P_{0.05}$=±1.96 临界线(图 3b)。双季稻生长季辐射资源在 1995 年发生突变，突变后(3 711.4 MJ·m^{-2})较突变前(3 962.4 MJ·m^{-2})减少 251.0 MJ·m^{-2}，UF 曲线在 1993 年和 1995 年突破了 $P_{0.05}$=±1.96 临界线(图 3c)。

2.1.2 热量资源变化特征

水稻是喜温作物，生长发育的起点温度要求在日平均气温 10 ℃以上[11]。1961—2017 年，安徽省沿江地区早稻、晚稻和双季稻生长季内≥10 ℃积温分别为 2 310.3~2 665.2 ℃·d、3 024.2~3 454.5 ℃·d 和 4 864.2~5 431.7 ℃·d，均值分别为 2 454.2 ℃·d、3 238.0 ℃·d 和 5 131.3 ℃·d。近 60 a，安徽省沿江地区早稻、晚稻和双季稻生长季内≥10 ℃积温均呈增加趋势，平均每 10 a 增幅分别为 39.1 ℃·d、24.4 ℃·d 和 14.7 ℃·d，其中早稻和晚稻增加趋势通过了 P<0.01 显著性水平检验，双季稻增加趋势通过了 P<0.05 显著

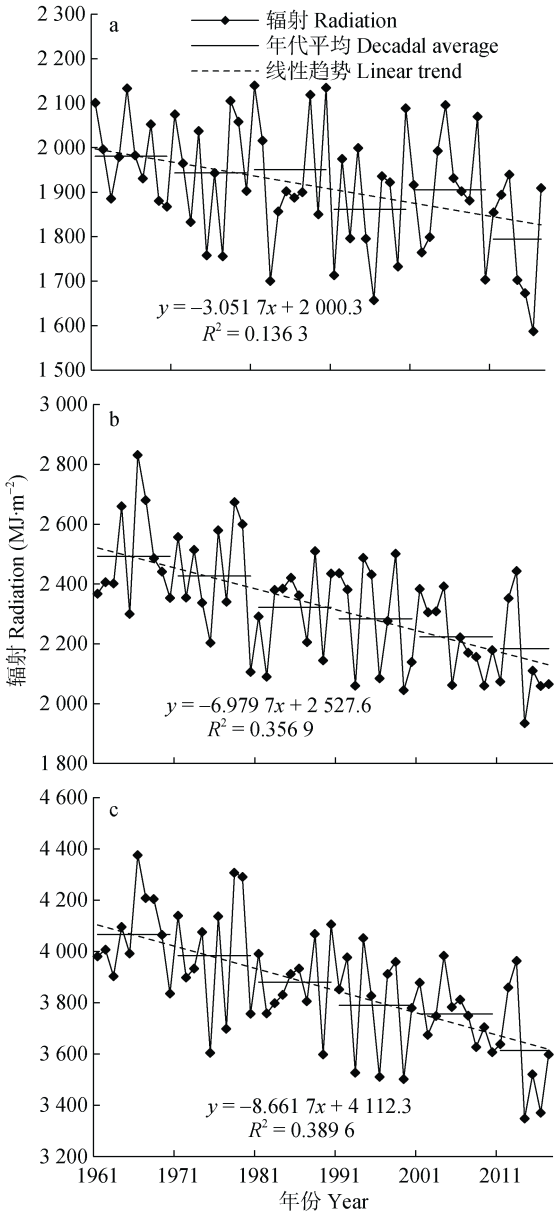

图 2　1961—2017 年安徽省沿江地区早稻(a)、晚稻(b)和双季稻(c)生长季光能资源变化趋势

Fig. 2　Variation trends of light energy resources during growing seasons of early-season rice (a), later-season rice (b) and double-season rice (c) from 1961 to 2017 along the Yangtze River in Anhui Province

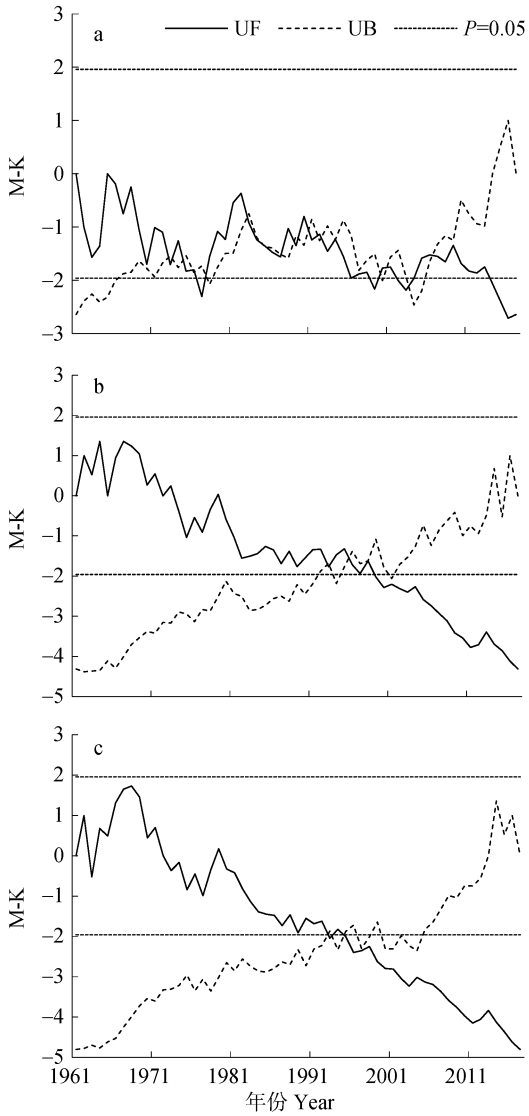

图 3　1961—2017 年安徽省沿江地区早稻(a)、晚稻(b)和双季稻(c)生长季光能资源 M-K 突变检验
(直线为 *P*=0.05 显著性水平临界值)

Fig. 3　M-K test mutation detection of light energy resources during growing seasons of early-season rice (a), later-season rice (b) and double-season rice (c) from 1961 to 2017 along the Yangtze River in Anhui Province (Dotted lines show critical value at P = 0.05 significance level)

性水平检验。从年代际变化看(图 4a-4c), 早稻、晚稻和双季稻生长季内≥10 ℃积温变化趋势基本一致, 总体呈“降低-升高-降低”趋势, 即从 1960s 开始, 至 1970s 或 1980s 达到最低, 1990s 开始上升, 至 2000s 达到最高, 之后开始下降。进入 21 世纪, 早稻、晚稻和双季稻生长季内≥10 ℃积温增加较为明显, 2000s 较 1990s 分别增加 88.0 ℃·d、102.9 ℃·d 和 162.9 ℃·d, 积温的增加为双季稻生长提供了充足的热量条件。

由 M-K 检测可以看出, 1961—2017 年安徽省沿江地区早稻生长季热量资源的 UF 和 UB 曲线相交于 1996—1997 年之间, UF 曲线在 2005 年超过了 $P_{0.05}$=±1.96 临界线(图 5a), 表明早稻生长季热量资源在 1997 年发生突变, 突变后(2 521.3 ℃·d)较突变前(2 415.0 ℃·d)增加 106.3 ℃·d。晚稻生长季热量资源在 2005 年发生突变, 突变后(3 311.6 ℃·d)较突变前 (3 216.3 ℃·d) 增加 95.3 ℃·d, UF 曲线在 1972—1977 年和 1980—1994 年突破了 $P_{0.05}$=±1.96 临界线(图 5b)。双季稻生长季热量资源在 2001 年发

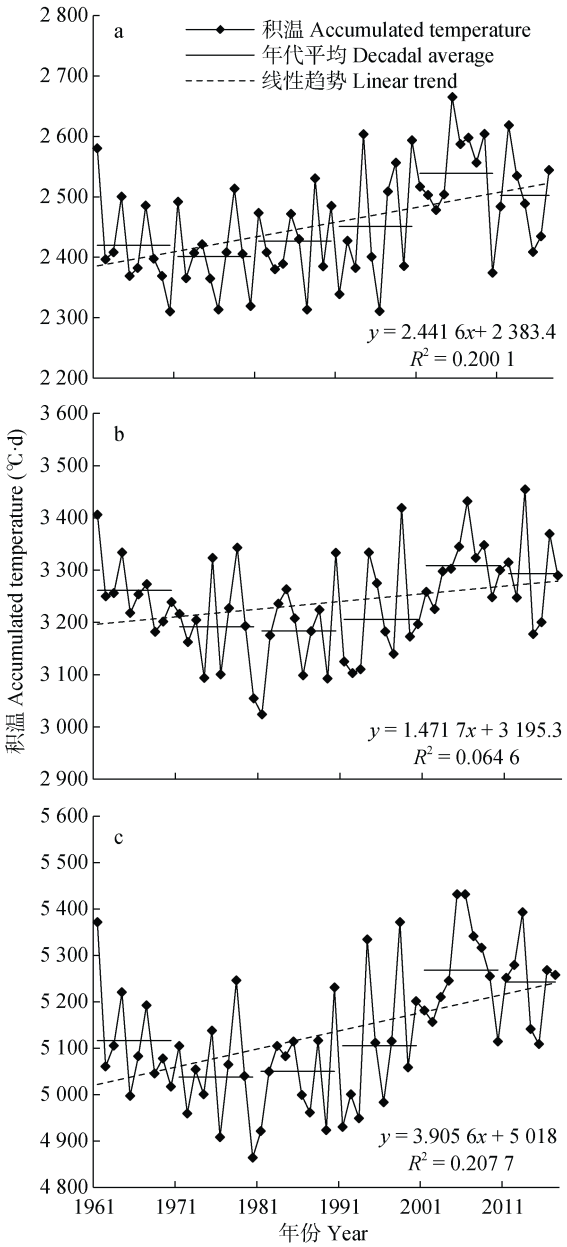

图 4 1961—2017 年安徽省沿江地区早稻(a)、晚稻(b)和双季稻(c)生长季热量资源(≥10 ℃积温)变化趋势

Fig. 4 Variation trend of heat resources (accumulated temperature ≥10 ℃) during growing season of early-season rice (a), later-season rice (b) and double-season rice (c) from 1961 to 2017 along the Yangtze River in Anhui Province

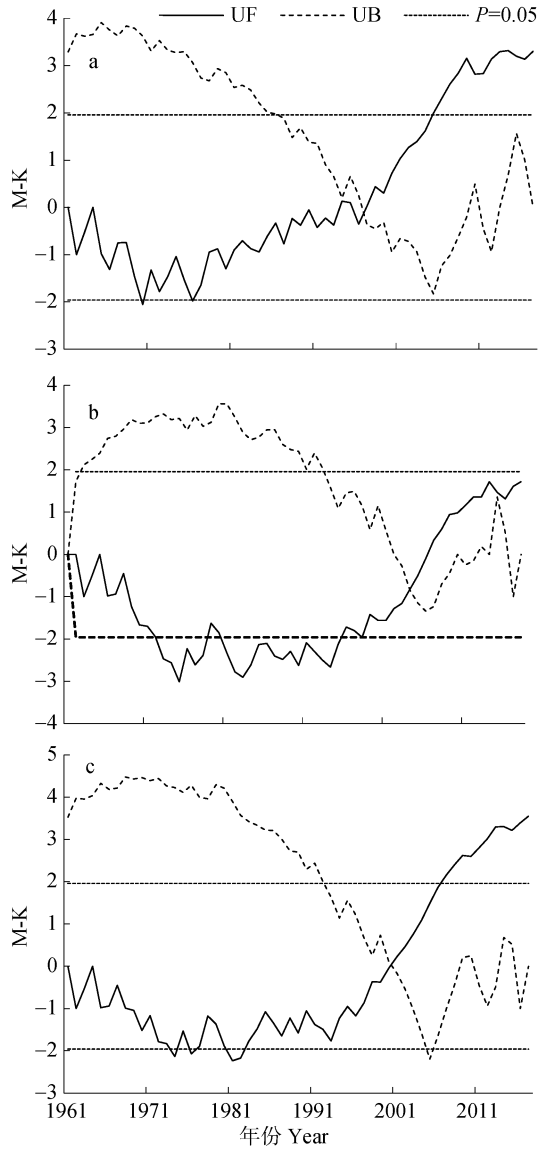

图 5 1961—2017 年安徽省沿江地区早稻(a)、晚稻(b)和双季稻(c)生长季热量资源 M-K 突变检验 (直线为 *P*=0.05 显著性水平临界值)

Fig. 5 M-K test mutation detection of heat resources during growing seasons of early-season rice (a), later-season rice (b) and double-season rice (c) from 1961 to 2017 along the Yangtze River in Anhui Province (Dotted lines show critical values at $P = 0.05$ significance level)

生突变，突变后(5 257.8 ℃·d)较突变前(5 077.6 ℃·d)增加 180.2 ℃·d，UF 曲线在 2007 年突破了 $P_{0.05}$=±1.96 临界线(图 5c)。

2.2 双季稻光热资源利用效率变化特征

2.2.1 光能资源利用效率变化特征

1961—2006 年，安徽省沿江地区早稻、晚稻和双季稻光能利用效率均呈显著增加趋势(P<0.01)，平均增幅分别为 0.04%·(10a)$^{-1}$、0.103%·(10a)$^{-1}$ 和 0.083%·(10a)$^{-1}$，光能利用效率均值分别为 0.41%、0.30%和 0.38%。但不同年份间差别明显，早稻光能利用效率最大值为 0.55%(2002 年)，最小值为 0.2%(1961 年)；晚稻最大值为 0.53%(1996 年)，最小值为 0.07%(1962 年)；双季稻最大值为 0.58%(2002 年)，最小值为 0.15%(1961 年)。其主要原因是由于不同年份间产量差异较大造成的[27]。从年代际变化看(图 6a-6c)，从 1960s 至 2000s 后，早稻生长季内光能利用效率在波动中上升，1990s 代略有下降，晚稻和双季稻呈逐年代际上升趋势，尤其 1980s 晚稻生长季光能利用效率明显上升，较

1970s 增加 0.13%, 而同时期早稻生长季光能利用效率仅增加 0.02%。

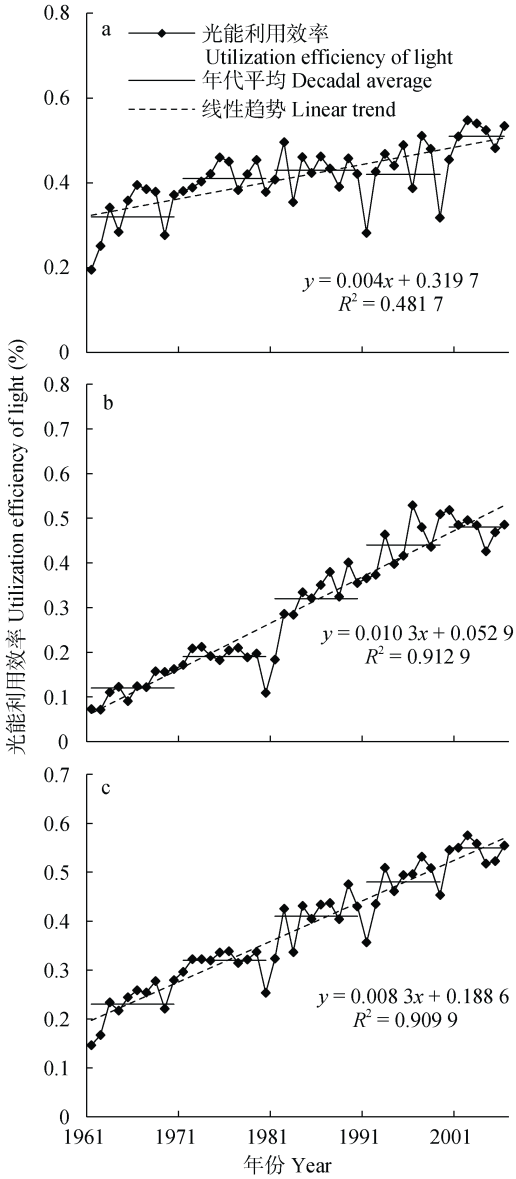

图 6　1961—2006 年安徽省沿江地区早稻(a)、晚稻(b)和双季稻(c)光能利用率变化趋势

Fig. 6　Variation trend of solar energy utilization rate of early-season rice (a), late-season rice (b) and double-season rice (c) from 1961 to 2006 along the Yangtze River in Anhui Province

2.2.2　热量资源利用效率变化特征

1961—2006 年安徽省沿江地区早稻、晚稻和双季稻热量利用效率呈显著增加趋势(P<0.01), 平均每 10 a 分别增加 0.141 kg·℃$^{-1}$·d^{-1}·hm^{-2}、0.39 kg·℃$^{-1}$·d^{-1}·hm^{-2} 和 0.315 kg·℃$^{-1}$·d^{-1}·hm^{-2}。早稻、晚稻和双季稻热量利用效率分别为 0.88~2.33 kg·℃$^{-1}$·d^{-1}·hm^{-2}、0.28~1.99 kg·℃$^{-1}$·d^{-1}·hm^{-2} 和 0.6~2.29 kg·℃$^{-1}$·d^{-1}·hm^{-2}, 年平均值分别为 1.83 kg·℃$^{-1}$·d^{-1}·hm^{-2}、1.20 kg·℃$^{-1}$·d^{-1}·hm^{-2} 和 1.63 kg·℃$^{-1}$·d^{-1}·hm^{-2}。从年代际变化看(图 7a-7c), 早稻、晚稻和双季稻热量利用效率与光能利用效率变化趋势基本一致, 早稻热量利用效率除 1990s 下降外, 其他年代际均呈上升趋势。晚稻和双季稻光能利用效率呈逐年代际上升趋势, 其中晚稻热量利用效率在 1980s 和 1990s 增幅相对明显, 较上一年代际分别增加 0.5 kg·℃$^{-1}$·d^{-1}·hm^{-2} 和 0.48 kg·℃$^{-1}$·d^{-1}·hm^{-2}, 均超过了历年增幅均值(0.39 kg·℃$^{-1}$·d^{-1}·hm^{-2})。

2.3　光热资源变化对双季稻气象产量的影响

2.3.1　光热资源与双季稻气象产量的相关分析

为了解安徽省沿江地区双季稻生长季光温资源变化对气象产量的影响, 按照杨继武[26]作物产量分

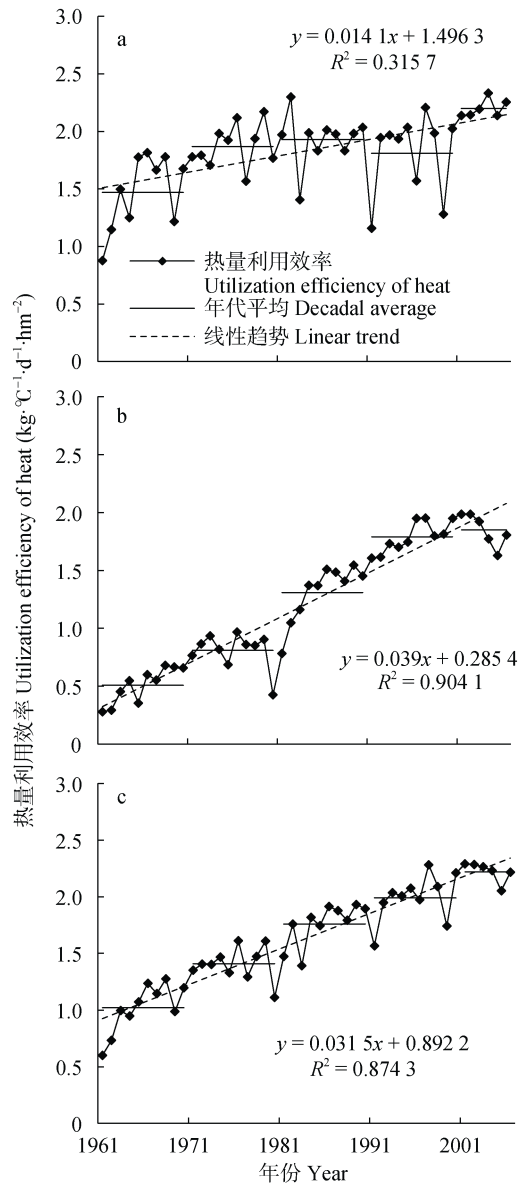

图 7　1961—2006 年安徽省沿江地区早稻(a)、晚稻(b)和双季稻(c)热量利用率变化趋势

Fig. 7　Variation trend of heat utilization rate of early-season rice (a), late-season rice (b) and double-season rice(c) from 1961 to 2006 along the Yangtze River in Anhui Province

解方法，将早稻、晚稻实际产量分解为趋势产量和气象产量(图 8a、8b)，再将气象产量与其生长季太阳总辐射、≥10 ℃积温进行线性相关分析(图 9a、b)。沿江地区早稻气象产量与其生长季太阳总辐射相关性达极显著(P<0.01)，与≥10 ℃积温呈显著相关(P<0.05)，相关系数分别为 0.578 1 和 0.301 5，即在一定范围内太阳总辐射和≥10 ℃积温增加对早稻气象产量的增加有明显作用，太阳总辐射每增加 100 MJ·m^{-2}、≥10 ℃积温每增加 100 ℃·d，早稻气象产量分别增加 271 kg·hm^{-2}、209 kg·hm^{-2}。晚稻气象产量与其生长季太阳总辐射相关性达显著水平(P<0.05)，相关系数为 0.317 2(图 10a)，与≥10 ℃积温相关系数为 0.132 8，相关性未达 P=0.05 显著性水平(图 10b)，即一定范围内太阳总辐射的增加利于晚稻气象产量的提升，每增加 100 MJ·m^{-2}，晚稻气象产量增加 80 kg·hm^{-2}，但≥10 ℃积温的增加对晚稻气象产量的增产作用不明显。

2.3.2 光热资源与双季稻气象产量的通径分析

为揭示光热资源对双季稻气象产量的作用途径，对 1961—2006 年安徽省沿江地区早稻和晚稻生长季太阳总辐射、≥10 ℃积温与其气象产量进行通径分析。由表 1 可见，太阳总辐射、≥10 ℃积温对早稻和晚稻气象产量的作用方向均为正向的，且太阳总辐射、≥10 ℃积温通过相互间接作用增强了对气象产量的影响，太阳总辐射对气象产量直接作用大于≥10 ℃积温对气象产量的作用，表明在光热资源中，太阳总辐射是影响早稻和晚稻气象产量的主要因子，≥10 ℃积温是次要因子。

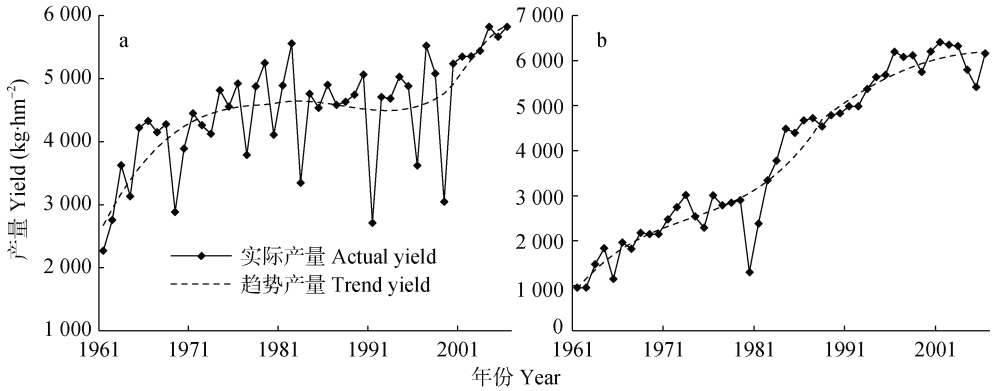

图 8 1961—2006 年安徽省沿江地区早稻(a)、晚稻(b)实际产量和趋势产量

Fig. 8 Actual yield and trend yield of early-season rice (a), late-season rice (b) from 1961 to 2006 along the Yangtze River in Anhui Province

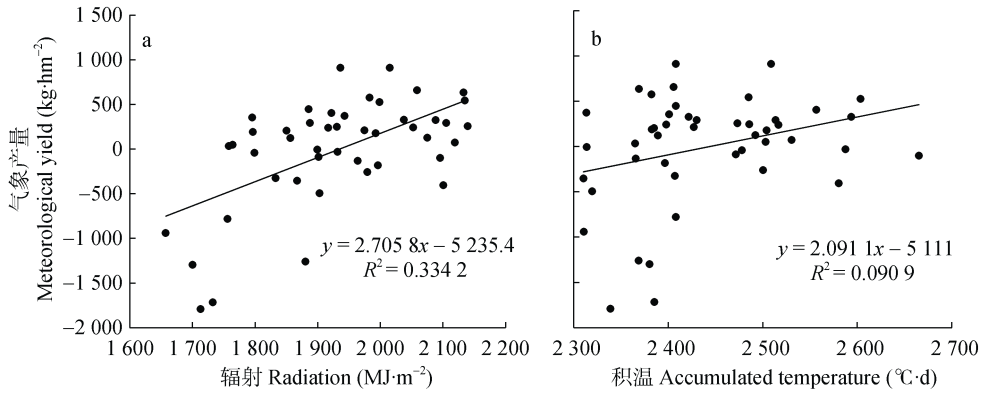

图 9 1961—2006 年安徽省沿江地区早稻生长季太阳总辐射(a)、≥10 ℃积温(b)与气象产量的关系

Fig. 9 Relationship of meteorological yield with global solar radiation (a), accumulated temperature ≥10 ℃ (b) during early-season rice growing season from 1961 to 2006 along the Yangtze River in Anhui Province

2.3.3 光热资源与双季稻气象产量的回归分析

为综合反映安徽省沿江地区辐射和热量资源对双季稻气象产量的影响，分别以早稻和晚稻生长季太阳总辐射(x_1)、≥10 ℃积温(x_2)为自变量，以气象产量(y)为因变量，采用线性回归分析，建立早稻气象产量回归方程 y=–5 610.912 3+2.638 5x_1+0.297 2x_2，相关系数 r=0.578 7，显著水平 P<0.01，表明早稻气象产量与生长季太阳总辐射、≥10 ℃积温存在显著的线性关系，且太阳总辐射和≥10 ℃积温对早稻气象产量的综合影响大于对气象产量的独立影响。建

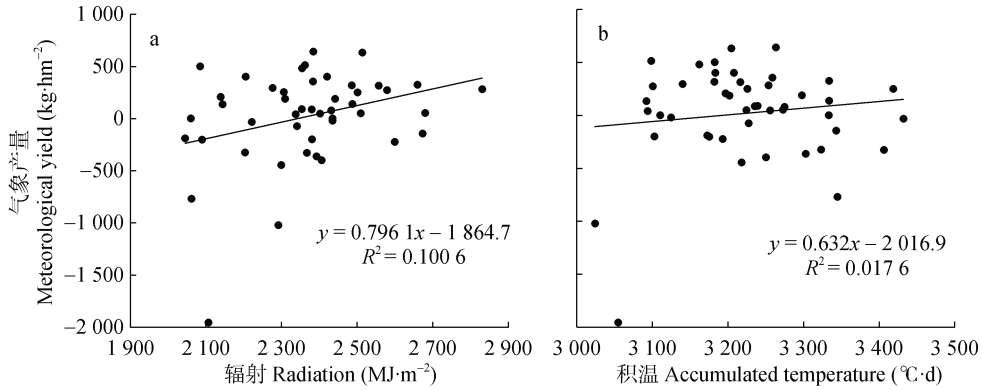

图 10　1961—2006 年安徽省沿江地区晚稻生长季太阳总辐射(a)、≥10 ℃积温(b)与气象产量的关系

Fig. 10　Relationship of meteorological yield with global solar radiation (a), accumulated temperature ≥10 ℃ (b) during late-season rice growing season from 1961 to 2006 along the Yangtze River in Anhui Province

表 1　1961—2006 年安徽省沿江地区早稻和晚稻气象产量与太阳总辐射、≥10 ℃积温的通径分析

Table 1　Path analysis between meteorological yield and global solar radiation, accumulated temperature ≥10 ℃ of early-season rice and late-season rice from 1961 to 2006 along the Yangtze River in Anhui Province

	作用因子 Acting factor	直接作用 Direct action	间接作用 Indirect effect		相关系数 Correlation coefficient
			x_1	x_2	
早稻 Early-season rice	太阳总辐射 Global solar radiation (x_1)	0.563 7		0.014 4	0.578 1
	≥10 ℃积温 Accumulated temperature ≥10 ℃ (x_2)	0.029 9	0.271 6		0.301 5
晚稻 Late-season rice	太阳总辐射 Global solar radiation (x_1)	0.303 3		0.013 9	0.317 2
	≥10 ℃积温 Accumulated temperature ≥10 ℃ (x_2)	0.053 0	0.079 8		0.132 8

立晚稻气象产量回归方程为 y=–2 594.037 1+0.761 1x_1+0.251 9x_2, 相关系数 r=0.321 3, 显著水平 P>0.05, 表明晚稻生长季辐射资源和热量资源的增加虽然利于其气象产量的提升, 但影响不明显。

3　讨论

1961—2017 年安徽省沿江地区早稻、晚稻及双季稻生长季太阳总辐射均呈显著下降趋势(P<0.01), 卢燕宇等[13]对近 50 a 安徽周年太阳总辐射变化特征的研究结果也证实了这一结论, 且安徽省太阳总辐射下降趋势大于全国平均。近 60 a, 安徽省沿江地区早稻、晚稻及双季稻生长季≥10 ℃积温呈增加趋势, 其中早稻和晚稻增加趋势超过 P=0.01 显著性水平, 双季稻增加趋势达 P=0.05 显著性水平, 这与艾治勇等[28]对长江中游地区近 50 a 双季稻生长季气候资源变化的研究结论较为一致。在全球变暖背景下, 不同地区双季稻生长季≥10 ℃积温均表现增加趋势[8-9,29]。而叶清等[30]研究发现, 江西省早稻和双季稻生长季平均气温呈增加趋势, 但晚稻生长季平均气温呈下降趋势, 可能与研究的时间尺度和区域气候特点不同有关。

近年来不同地区农作物光能和热量利用效率上升趋势明显[27,31-32], 其主要原因为作物产量的大幅提升, 虽然生育期内热量资源呈增加趋势, 但农作物产量的增加速率远高于热量资源的增加速率, 另一方面在作物生长期不变情况下产量显著增加而太阳总辐射明显减少[27]。安徽省沿江地区晚稻光能资源利用率显著高于早稻, 主要原因是近 50 a 早稻与晚稻生长季光能资源变幅相差不大情况下, 而晚稻产量增幅是早稻的 3 倍之多。

光热资源通过影响双季稻的气象产量造成双季稻产量不同年代间的变化, 由于太阳总辐射与早稻和晚稻气象产量分别呈极显著(P<0.01)、显著(P<0.05)正相关, 因此安徽省沿江地区双季稻种植过程中, 可选择光合速率高、光呼吸弱、株叶形态好的品种以适应光能资源的逐渐减少。此外, ≥10 ℃积温与早稻气象产量呈显著(P<0.05)正相关。因此, 早稻可采用薄膜育秧、温室育秧等方式, 提前播种期, 以增加生育期积温, 进而提高气象产量。

从双季稻生长季光热资源月变化看, 早稻从播种到收获, 光热资源呈逐渐增加趋势, 尤其在产量形成关键期, 光热资源为整个生长季最优, 而晚稻随着生长发育光热资源逐渐降低, 灌浆后期光温资源下降尤为明显(图 11)。要充分利用光热资源, 实现周年产量的提升, 挖掘早稻前期及晚稻后期的光温资源显得十分关键。但近年来, 由于劳动力成本的提高, 轻简化栽培方式被大面积应用, 而直播稻和

机插稻等轻简化栽培较常规移栽稻播栽期一般要推迟 15 d 以上[33-34]，晚稻遭遇寒露风气象灾害风险增加[35]，光热资源的充分利用由于播栽方式的转变而面临挑战。因此，安徽省沿江地区双季稻采用直播、机插等栽培方式，可结合本文分析的光温资源变化特点，选择光合效率高、耐寒性好的品种，并合理安排生育期如适当延长晚稻生育期，以充分利用光热资源，实现周年产量的高产稳产。

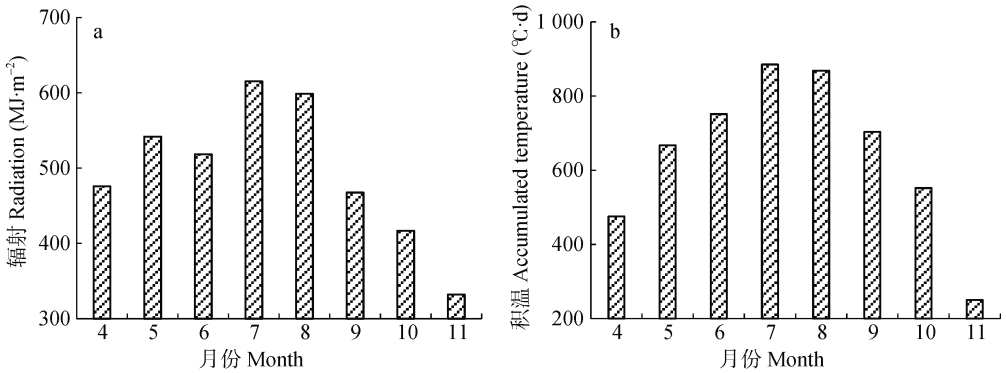

图 11 1961—2017 年安徽省沿江地区双季稻生长季太阳总辐射(a)和≥10℃积温(b)月变化

Fig. 11 Monthly variation of global solar radiation (a) and accumulated temperature ≥10 ℃ (b) of double-season rice growing season from 1961 to 2017 along the Yangtze River in Anhui Province

本文仅分析了安徽省沿江地区早稻、晚稻和双季稻生长季辐射和热量资源对其气象产量的影响，双季稻安全生长界限温度变化[35]及双季早稻育秧期的低温冷害和“倒春寒”、灌浆乳熟期高温热害及晚稻抽穗扬花期“寒露风”等对双季稻生产也造成不同程度影响[36-38]，该区双季稻种植综合性研究有待进一步加强。

4 结论

安徽省沿江地区早稻、晚稻和双季稻生长季太阳总辐射极显著下降，≥10 ℃积温显著增加，光能和热量利用效率均显著增加，太阳总辐射是影响早稻和晚稻气象产量的主要因子。通过选择光合效率高的品种和以增加积温为主的栽培技术来提高双季稻光热资源利用效率，可实现水稻周年高产稳产。

参考文献 References

[1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group Ⅰ to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013

[2] 高晓荻，江志红，杨金虎. 全球变暖情景下中国气温分区的未来变化[J]. 气象与环境学报, 2009, 25(5): 1–6
GAO X D, JIANG Z H, YANG J H. Future changes of air temperature division in China under global warming[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2009, 25(5): 1–6

[3] 唐国利，丁一汇，王绍武，等. 中国近百年温度曲线的对比分析[J]. 气候变化研究进展, 2009, 5(2): 71–78
TANG G L, DING Y H, WANG S W, et al. Comparative analysis of the time series of surface air temperature over China for the last 100 years[J]. Advances in Climate Change Research, 2009, 5(2): 71–78

[4] 周曙东，周文魁，朱红根，等. 气候变化对农业的影响及应对措施[J]. 南京农业大学学报：社会科学版, 2010, 10(1): 34–39
ZHOU S D, ZHOU W K, ZHU H G, et al. Impact of climate change on agriculture and its countermeasures[J]. Journal of Nanjing Agricultural University: Social Sciences Edition, 2010, 10(1): 34–39

[5] 李萌，申双和，褚荣浩，等. 近 30 年中国农业气候资源分布及其变化趋势分析[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(21): 1–11
LI M, SHEN S H, CHU R H, et al. The analysis of agricultural climate resources distribution and its change trends over 30 years in China[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(21): 1–11

[6] 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
LIU D, LI Y C. Characteristics of spatial-temporal of late rice production potential in Jiangxi Province under background of climate change[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2018, 31(1): 184–191

[7] 朱德峰，陈惠哲，徐一成，等. 我国双季稻生产机械化制约因子与发展对策[J]. 中国稻米, 2013, 19(4): 1–4
ZHU D F, CHEN H Z, XU Y C, et al. Constraints and countermeasures of the mechanization of double rice production in China[J]. China Rice, 2013, 19(4): 1–4

[8] 吕伟生，曾勇军，石庆华，等. 近 30 年江西双季稻安全生产期及温光资源变化[J]. 中国水稻科学, 2016, 30(3): 323–334
LYU W S, ZENG Y J, SHI Q H, et al. Changes in safe production dates and heat-light resources of double cropping rice

in Jiangxi Province in recent 30 years[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2016, 30(3): 323–334

[9] 谢远玉, 黄淑娥, 田俊, 等. 长江中下游热量资源时空演变特征及其对双季稻种植的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(9): 2950–2958
XIE Y Y, HUANG S E, TIAN J, et al. Spatial-temporal characteristics of thermal resources and its influence on the growth of double cropping rice in the middle and lower reaches of the Yangtze River, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(9): 2950–2958

[10] 刘胜利, 薛建福, 张冉, 等. 气候变化背景下湖南省双季稻生产的敏感性分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 246–252
LIU S L, XUE J F, ZHANG R, et al. Sensitivity analysis of double-rice yield under climate change in Hunan Province[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6): 246–252

[11] 吴珊珊, 王怀清, 黄彩婷. 气候变化对江西省双季稻生产的影响[J]. 中国农业大学学报, 2014, 19(2): 207–215
WU S S, WANG H Q, HUANG C T. Influence of climate change on double-harvest rice yield in Jiangxi Province[J]. Journal of China Agricultural University, 2014, 19(2): 207–215

[12] 岳伟, 曹雯, 杨太明, 等. 安徽省一季稻生长季热量资源变化特征及其对产量的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(11): 222–228
YUE W, CAO W, YANG T M, et al. Variable characteristics of heat resources of single-season rice growing seasons in Anhui Province and its impacts on rice yield[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(11): 222–228

[13] 卢燕宇, 田红, 鲁俊, 等. 近 50 年安徽省太阳总辐射的时空变化特征[J]. 气象科技, 2016, 44(5): 769–775
LU Y Y, TIAN H, LU J, et al. Spatial temporal variation characteristics of gross solar radiation in Anhui Province from 1961 to 2010[J]. Meteorological Science and Technology, 2016, 44(5): 769–775

[14] 许信旺, 孙满英, 方宇媛, 等. 安徽省气候变化对水稻生产的影响及应对[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9): 1755–1763
XU X W, SUN M Y, FANG Y Y, et al. Impact of climatic change on rice production and response strategies in Anhui Province[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(9): 1755–1763

[15] 王胜, 徐敏, 宋阿伟, 等. 1961—2012 年安徽省 24 节气气候变化及冬小麦和一季稻物候期的响应[J]. 生态学杂志, 2013, 32(9): 2390–2397
WANG S, XU M, SONG A W, et al. Climate changes in 24 solar terms and responses of winter wheat and single-season rice phenophases in Anhui Province of East China in 1961–2012[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(9): 2390–2397

[16] 高金兰, 马晓群, 许莹. 安徽省气候变化背景下降水量对粮食产量的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(18): 112–118
GAO J L, MA X Q, XU Y. Effect of precipitation on grain yield on the background of climate changes in Anhui Province[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(18): 112–118

[17] 欧阳海. 农业气候学[M]. 北京: 气象出版社, 1990
OUYANG H. Agricultural Climatology[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1990

[18] 程先富, 王诗晨, 路明浩, 等. 安徽沿江地区洪涝灾害风险的空间格局演变[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(2): 129–136
CHENG X F, WANG S C, LU M H, et al. Spatial-temporal change of flood disaster risk of area along the Yangtze River in Anhui Province[J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(2): 129–136

[19] 王馥棠, 赵宗慈, 王石立, 等. 气候变化对农业生态的影响[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 6–11
WANG F T, ZHAO Z C, WANG S L, et al. Effects of Climatic Change on Agricultural Ecology[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003: 6–11

[20] 曹雯, 许莹, 段春锋. 安徽省太阳总辐射参数化模型的适用性研究[J]. 中国农学通报, 2014, 30(26): 207–212
CAO W, XU Y, DUAN C F. Research on applicability of solar radiation parametric model in Anhui Province[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(26): 207–212

[21] 冯喜媛, 王宁, 刘实. 1961—2014 年东北三省热量资源变化特征[J]. 气象与环境学报, 2018, 34(1): 91–98
FENG X Y, WANG N, LIU S. Variation characteristics of thermal resources over the three northeastern provinces in China from 1961 to 2014[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2018, 34(1): 91–98

[22] 崔读昌. 中国粮食作物气候资源利用效率及其提高的途径[J]. 中国农业气象, 2001, 22(2): 25–32
CUI D C. Climatic resources utilization coefficiency of cereal crops in China and development measures[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2001, 22(2): 25–32

[23] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 第 2 版. 北京: 气象出版社, 2007: 40–67
WEI F Y. Modern Technology of Climate Statistical Diagnosis and Prediction[M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 40–67

[24] 符淙斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学, 1992, 16(4): 482–493
FU C B, WANG Q. The definition and detection of the abrupt climatic change[J]. Scientia Atmospherica Sinica, 1992, 16(4): 482–493

[25] 王铮, 吴静. 计算地理学[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 73–75
WANG Z, WU J. Quantitative Methods in Geography[M]. Beijing: Science Press, 2011: 73–75

[26] 杨继武. 农业气象预报和情报[M]. 北京: 气象出版社, 1994: 247–258
YANG J W. Agrometeorological Forecast and Intelligence[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1994: 247–258

[27] 刘晓迎, 陈罗成, 赵巧梅, 等. 豫北主要农作物光热资源利用效率研究[J]. 河南农业科学, 2012, 41(4): 29–33
LIU X Y, CHEN L C, ZHAO Q M, et al. Light and heat utilization efficiency of winter wheat and summer maize in northern region of Henan Province[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2012, 41(4): 29–33

[28] 艾治勇, 郭夏宇, 刘文祥, 等. 农业气候资源变化对双季稻生产的可能影响分析[J]. 自然资源学报, 2014, 29(12): 2089–2102
AI Z Y, GUO X Y, LIU W X, et al. Analysis on possible influences of agricultural climate resources change on double-season rice production[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(12): 2089–2102

[29] 程理君, 谌晓玲, 彭梦霜, 等. 长沙市早稻生长季≥10 ℃积温变化特征[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(5): 187–188
CHENG L J, CHEN X L, PENG M S, et al. ≥10 ℃ accumulated temperature variation characteristics in early rice growing season in Changsha City[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017, 45(5): 187–188

[30] 叶清, 杨晓光, 李勇, 等. 气候变化背景下中国农业气候资源变化Ⅷ. 江西省双季稻各生育期热量条件变化特征[J]. 应用生态学报, 2011, 22(8): 2021–2030
YE Q, YANG X G, LI Y, et al. Changes of China agricultural climate resources under the background of climate change. Ⅷ. Change characteristics of heat resources during the growth period of double cropping rice in Jiangxi Province[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(8): 2021–2030

[31] 钱锦霞, 胡良温. 山西省玉米气候资源利用效率分析[J]. 玉米科学, 2008, 16(4): 192–195
QIAN J X, HU L W. Analysis of climatic resources utilization efficiency of maize in Shanxi Province[J]. Journal of Maize Sciences, 2008, 16(4): 192–195

[32] 徐长哲, 曹蕊. 海城市大豆光能利用率分布特征[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(19): 6142
XU C Z, CAO R. Distribution characteristics of soybean light energy utilization efficiency in Haicheng[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014, 42(19): 6142

[33] 李世峰, 徐云, 刘蓉蓉. 气候变化对粳稻安全齐穗和安全成熟期的影响[J]. 上海农业学报, 2015, 31(4): 110–114
LI S F, XU Y, LIU R R. Climate change impacts on safe dates for full heading and maturity in Japonica rice[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2015, 31(4): 110–114

[34] 张祖建, 张洪熙, 杨建昌, 等. 江苏近 50 年粳稻安全齐穗期的变化[J]. 作物学报, 2011, 37(1): 146–151
ZHANG Z J, ZHANG H X, YANG J C, et al. Changes of safe dates for full heading in japonica rice over past 50 years in Jiangsu Province[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(1): 146–151

[35] 艾治勇, 郭夏宇, 刘文祥, 等. 长江中游地区双季稻安全生产日期的变化[J]. 作物学报, 2014, 40(7): 1320−1329
AI Z Y, GUO X Y, LIU W X, et al. Changes of safe production dates of double-season rice in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(7): 1320−1329

[36] 肖宇龙, 邱在辉, 林洪鑫, 等. 苗期低温对早稻品种产量相关性状的影响[J]. 江西农业学报, 2014, 26(7): 1–4
XIAO Y L, QIU Z H, LIN H X, et al. Effects of low temperature at seedling stage on yield-related traits of early rice varieties[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2014, 26(7): 1–4

[37] 田俊, 崔海建. 江西省双季早稻灌浆乳熟期高温热害影响评估[J]. 中国农业气象, 2015, 36(1): 67–73
TIAN J, CUI H J. Impact assessment on high temperature damage to early rice at filling-milk stage in Jiangxi Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2015, 36(1): 67–73

[38] 林洪鑫, 胡启锋, 肖宇龙, 等. 寒露风对双季晚稻品种产量构成和品质的影响[J]. 江西农业学报, 2016, 28(5): 20–23
LIN H X, HU Q F, XIAO Y L, et al. Effect of cold dew wind on quality, yield and yield components of double cropping late rice varieties[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2016, 28(5): 20–23