

# 我国双季稻种植分布的年代际动态

段居琦<sup>①②</sup>, 周广胜<sup>①③\*</sup>

① 中国气象科学研究院, 北京 100081;

② 南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044;

③ 中国科学院植物研究所, 植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093

\* 联系人, E-mail: gszhou@cma.gov.cn

2012-08-27 收稿, 2012-10-30 接受, 2013-04-09 网络版发表

国家重点基础研究发展计划(2010CB951303)、公益性行业(农业)科研专项经费(200903003)和中国气象局经常性业务经费资助

**摘要** 定量描述气候变化影响下水稻种植分布变化可为优化水稻生产布局及制定应对气候变化政策提供依据. 基于最大熵方法建立的双季稻种植分布与气候的关系模型, 本文研究了1961~2010年我国双季稻种植分布变化. 结果表明: 我国双季稻种植分布及其气候适宜性存在年代际变化. 低适宜等级以上总适宜区面积, 在20世纪60年代最高, 70年代到21世纪前10年呈先增后减的特点; 低适宜区面积呈减少趋势, 反映双季稻主产区的中、高适宜区面积之和呈增加趋势; 高气候适宜区面积在21世纪前10年增加较多, 是20世纪90年代的4.4倍, 是60年代的4倍. 我国双季稻种植分布受年代际气候变化影响较大的地区主要位于江苏、安徽中部、四川盆地东部、河南南部及贵州中部; 在浙江北部、安徽、湖北南部、广西北部地区, 存在双季稻低、中气候适宜等级之间的转换; 在江西中部、雷州半岛, 存在双季稻中、高气候适宜等级之间的转换. 20世纪70年代双季稻种植北界南移东退, 80年代双季稻种植界限北移, 21世纪前10年气温明显升高并没有使双季稻种植界限北移.

## 关键词

双季稻  
种植分布  
年代际  
动态

在全球变暖背景下, 我国气温存在着明显的增高趋势和年代际变化, 20世纪80年代以来增温幅度更大<sup>[1,2]</sup>; 气候变化也导致降水格局发生改变<sup>[3]</sup>. 年代际气候异常直接影响农业生产布局和人民生活, 使一些地区的自然生态系统退化<sup>[4,5]</sup>, 甚至影响社会稳定<sup>[6]</sup>. 因此, 年代际气候的变率及其影响已成为气候研究的热点之一<sup>[7-9]</sup>.

农作物种植制度的形成是气候适应性和社会因素综合作用的结果. 气候适应性是农作物生产布局的基础, 作物的气候适宜性区划和气候生态区划一直是农业气候研究的重点<sup>[10-12]</sup>. 水稻是我国乃至世界最主要的粮食作物之一, 是世界一半以上和我国65%以上人口的主食. 在全国空间尺度上, 丁颖<sup>[13]</sup>和中国农林作物气候区划协作组<sup>[10]</sup>在20世纪50年代

和80年代先后进行过两次系统的稻作区划及稻作气候条件分析, 对指导我国水稻生产发挥了重要作用. 最近, 我们从双季稻存在概率这一综合指标出发, 进行了全国尺度的双季稻气候适宜性区划<sup>[14]</sup>. 这些研究给出了多年平均或特定气候保证率条件下水稻的可能种植分布, 为科学布局水稻生产提供了依据.

当前我国气候变化明显, 现实的水稻种植格局出现了南减北增的现象, 种植区域呈向北扩张趋势<sup>[15,16]</sup>. 研究表明, 已经发生的气候变化有使物种分布向两极和高海拔地区移动的趋势<sup>[17,18]</sup>, 使植被类型发生变化<sup>[17]</sup>, 未来气候变化情景下植物分布、植物功能型区也将发生改变<sup>[19-21]</sup>. 杨晓光等人<sup>[22]</sup>从气温对双季稻种植分布的影响出发, 指出20世纪80年代后的气温升高导致了我国双季稻种植界限北移. 但

**引用格式:** 段居琦, 周广胜. 我国双季稻种植分布的年代际动态. 科学通报, 2013, 58: 1213-1220

**英文版见:** Duan J Q, Zhou G S. Dynamics of decadal changes in the distribution of double-cropping rice cultivation in China. Chin Sci Bull, 2013, 58, doi: 10.1007/s11434-012-5608-y

也有研究认为,水分平衡变化是影响物种分布变化的重要因子,甚至会引起与气温升高相反的结果<sup>[23]</sup>.研究表明,气候变率是影响植被,特别是一年生草本植物分布变化的重要因子<sup>[24]</sup>.因此,迫切需要弄清气候变化对水稻种植分布的影响,揭示水稻种植分布与气候变化之间的关系,为优化水稻生产布局及制定应对气候变化政策提供依据.

段居琦和周广胜<sup>[14]</sup>基于最大熵方法给出了影响我国双季稻种植分布的主导气候因子及其气候适宜性划分方法,但尚未分析双季稻种植分布对气候变化的响应.本研究将在此基础上,结合1999~2010年双季稻农业气象观测资料和1961~2010年气候资料,分析1961~2010年我国双季稻种植分布的年代际变化,揭示双季稻种植分布对年代际气候变化的响应,服务于水稻生产布局的优化及应对气候变化政策的制定.

## 1 数据与方法

### 1.1 数据收集与处理

本研究使用的数据主要有中国双季稻的地理分布数据和气候数据,来自于国家气象信息中心,包括1999~2010年46个具有地理信息(经纬度)记录的双季稻农业气象观测站,1961~2010年741个气象站点的中国地面气候资料日值数据集.考虑地形的影响,取气温垂直递减率为 $-0.006\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ,采用结合气象站点位置的截断高斯滤波算子作为距离权重方程的空间

卷积算法<sup>[25]</sup>,将日平均气温和日降水量插值到空间分辨率 $10\text{ km}\times 10\text{ km}$ 的格点,作为基础气候数据.研究区域、气象台站、双季稻农业气象观测站和研究区域地形如图1所示.数据处理软件为ArcGIS 9.3.

### 1.2 研究方法

本研究采用的最大熵模型是Phillips和Dudík<sup>[26]</sup>建立的模拟物种分布的MaxEnt模型3.3.3a版,来自于该软件的官方网站(<http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/>).最大熵模型是基于有限的已知信息对未知分布进行无偏推断的一种数学方法,该理论认为在无外力作用下,事物总是在约束条件下争取最大的自由权,在已知条件下,熵最大的事物最可能接近它的真实状态<sup>[27]</sup>.最大熵统计建模就是从符合条件的分布中选择熵最大的分布作为最优分布,详见文献[14,26].

研究表明,影响我国双季稻分布的主导气候因子有年降水量、最暖月平均气温和稳定通过 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 持续日数,可作为模型输入的环境变量<sup>[14]</sup>.最大熵模型预测结果给出的是作物在待预测区的存在概率( $P$ ),取值范围为 $0\sim 1$ ,参考政府间气候变化专门委员会(IPCC)关于评估可能性划分方法的报告,在此给出双季稻种植区及气候适宜性分区标准: $P < 0.05$ 为气候不适宜区, $0.05 \leq P < 0.33$ 为气候低适宜区, $0.33 \leq P < 0.66$ 为气候中适宜区, $P \geq 0.66$ 为气候高适宜区; $P \geq 0.05$ 为双季稻总适宜(可种植)区,以 $P=0.05$ 提取

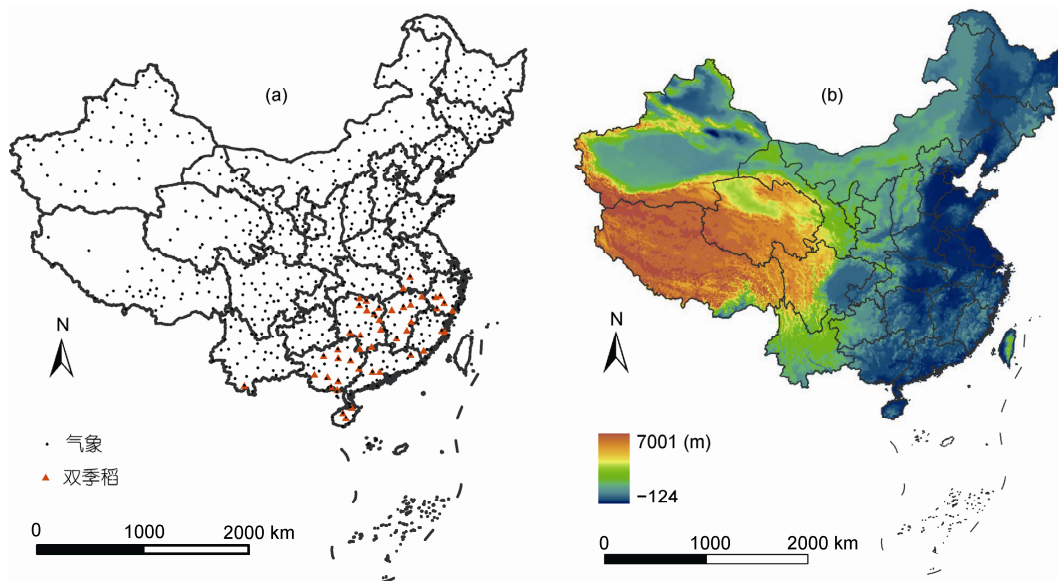


图1 研究区域、气象台站、双季稻农业气象观测站(a)和研究区域地形(b)

双季稻种植北界<sup>[14,28]</sup>. 以 1961~1970 年表示 20 世纪 60 年代, 记作 1960s; 类似地, 以 1971~1980 年、1981~1990 年、1991~2000 年、2001~2010 年表示 20 世纪 70 年代、80 年代、90 年代和 21 世纪的前 10 年, 分别记作 1970s, 1980s, 1990s 和 2000s. 以 1971~2000 年一个气候标准年的年降水量、最暖月平均气温和稳定通过 18℃ 持续日数作为模型训练的基准气候数据, 以 46 个具有地理信息(经纬度)记录的双季稻农业气象观测站作为样本站点, 其中 80% 作为训练数据, 20% 作为验证数据, 随机采样 10 次求平均值, 模拟 1961~2010 年我国双季稻种植分布的年代际变化. 进而在 ArcGIS 9.3 支持下分析 1961~2010 年双季稻种植区各气候适宜等级的面积及种植北界年代际变化.

## 2 结果分析

### 2.1 中国区域气候变化

1961~2010 年, 我国区域的年平均气温呈波动上升趋势, 平均上升速率为 0.046℃/a(图 2(a)). 从气温年代际变化看, 在 20 世纪 70 年代升高, 80 年代下降,

90 年代和 20 世纪的前 10 年持续升高. 稳定通过 18℃ 持续日数、最暖月平均气温变化趋势与年平均气温变化趋势具有较好的一致性, 年平均上升速率分别为 0.267 d/a 和 0.036℃/a(图 2(c)和(d)). 1961~2010 年, 我国区域降水量略有上升, 平均上升速率是 0.56 mm/a (图 2(b)), 年代际降水变化表现为 70 年代与 60 年代基本持平, 80 年代和 90 年代连续增加, 21 世纪的前 10 年有所下降. 区域年平均气温、降水变化与虞海燕等人<sup>[2]</sup>、任国玉等人<sup>[29]</sup>给出的这一时期我国地面气候变化特征结果基本一致.

### 2.2 双季稻种植分布的年代际变化

根据图 3, 在不同年代气候条件下, 我国双季稻各气候适宜区面积存在年代际变化. 20 世纪 70 年代与 60 年代相比, 双季稻低气候适宜区在江苏、安徽、河南、湖北一带有南移趋势, 在贵州和四川内东退; 在湖南境内低气候适宜区东扩, 中气候适宜区减少; 雷州半岛双季稻高气候适宜区降低为中气候适宜区. 20 世纪 80 年代与 70 年代相比, 双季稻低气候适宜区在江苏、安徽、河南、湖北一带有北移趋势, 回复到

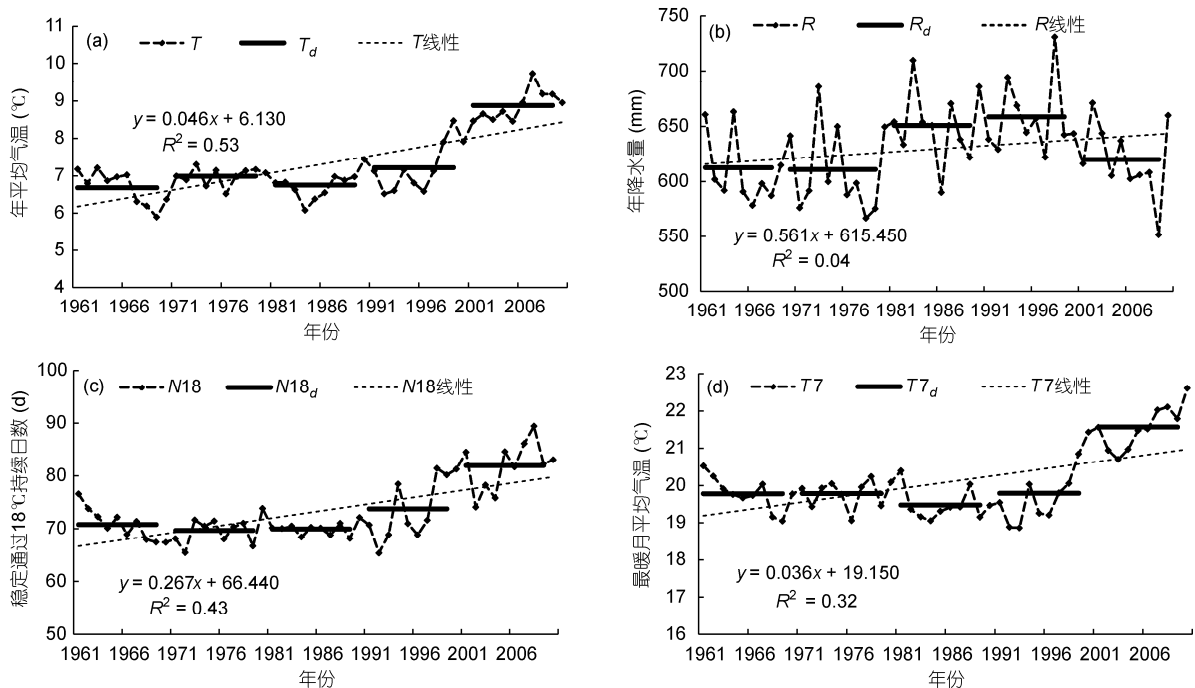


图 2 中国区域气候年际年代际变化

(a) 平均气温; (b) 年降水量; (c) 稳定通过 18℃ 持续日数; (d) 最暖月平均气温;  $T$ , 年平均气温;  $T_d$ , 年代平均年平均气温;  $T$  线性, 年平均气温线性趋势;  $R$ , 年降水量;  $R_d$ , 年代平均年降水量;  $R$  线性, 年降水量线性趋势;  $N18$ , 稳定通过 18℃ 持续日数;  $N18_d$ , 年代平均稳定通过 18℃ 持续日数;  $N18$  线性, 稳定通过 18℃ 持续日数线性趋势;  $T7$ , 最暖月平均气温;  $T7_d$ , 年代平均最暖月平均气温;  $T7$  线性, 最暖月平均气温线性趋势

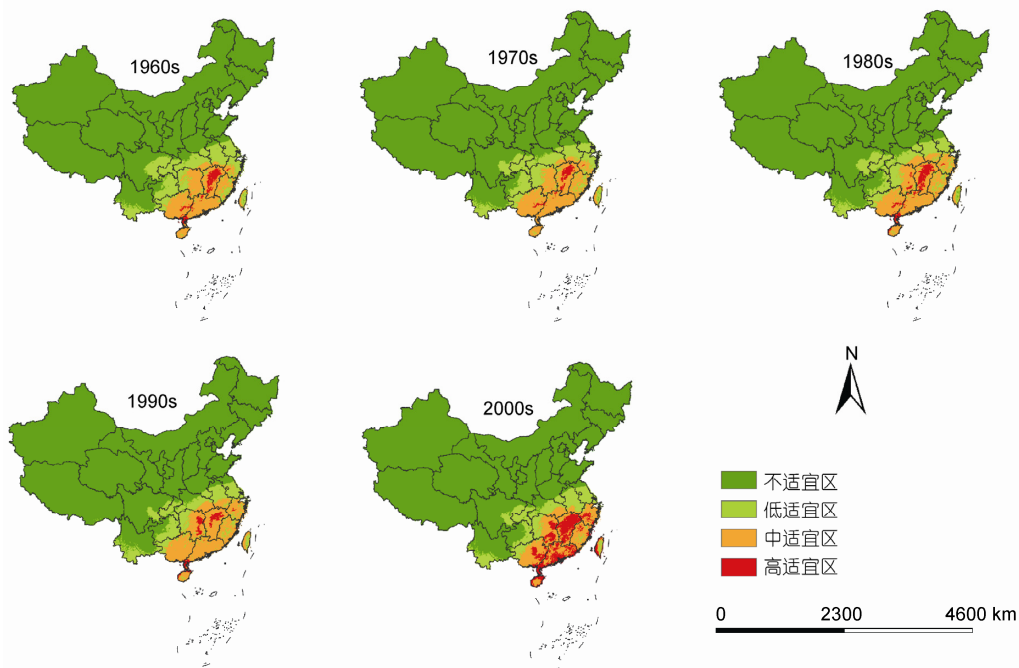


图3 我国双季稻种植各气候适宜区的年代际变化

60年代的位置;在贵州省内,不适宜区东扩,占据了原来的低适宜区;在浙江省,中适宜区北移,占据了原来的低适宜区;雷州半岛双季稻气候适宜等级提高,由中适宜区转换为高适宜区.20世纪90年代与80年代相比,低适宜区北界在江苏、安徽、河南、湖北一带基本保持稳定,但是在贵州省内西移;在广西,中适宜区代替了高适宜区,在江西,部分气候高适宜区也为气候中适宜区所代替.21世纪前10年,有较大面积的气候适宜区被高气候适宜区所代替,引起高气候适宜区面积增加.

### 2.3 双季稻种植分布适宜性变化

双季稻种植各气候适宜区分布的变化,必然会引起各气候适宜区面积的变化.根据表1,从20世纪60年代到21世纪前10年,我国双季稻气候不适宜区面积表现为60年代最低,70年代升高,之后降低,进入21世纪后又升高的特点;低适宜等级以上适宜区面积则与之相反,在60年代最高,达到 $1953.0 \times 10^3 \text{ km}^2$ ,之后呈现先增后减的特征.低适宜区面积呈现减少趋势,从60年代的 $1067.7 \times 10^3 \text{ km}^2$ 减少到 $738.3 \times 10^3 \text{ km}^2$ .中、高适宜区,是我国双季稻生产的主产区,种植分布面积之和呈现出递增趋势,从60年代的 $885.3 \times 10^3 \text{ km}^2$ 增加到 $1067.4 \times 10^3 \text{ km}^2$ .高适

表1 我国双季稻各气候适宜区面积年代际变化 (单位:  $\times 10^3 \text{ km}^2$ )

适宜等级	1960s	1970s	1980s	1990s	2000s
不适宜	7764.7	7932.6	7886.7	7862.0	7912.0
低适宜	1067.7	895.3	874.1	833.8	738.3
中适宜	795.2	835.9	839.3	938.6	701.0
高适宜	90.1	53.9	117.6	83.3	366.4

宜区面积呈年代际波动,但在21世纪前10年呈现较大幅度增加,其面积是20世纪90年代的4.4倍,是60年代的4倍.

20世纪70年代不适宜区面积增加,中适宜区面积也增加,与它们面积增加相对应的是低适宜区和高适宜区面积减少;80年代不适宜区面积减少,低适宜区面积也减少,与它们面积减少相对应的是高适宜区面积增加1倍以上,从 $53.9 \times 10^3 \text{ km}^2$ 增加到 $117.6 \times 10^3 \text{ km}^2$ ,而中适宜区面积变化不大;90年代不适宜区面积持续减少,与它相对应的是中适宜区面积的增加,同时低、高适宜区面积也减少;21世纪前10年,不适宜区和高适宜区面积增加,特别是高适宜区面积与20世纪90年代相比,增加了3.4倍,同时中、低适宜区面积有所减少.

为了详细表示各气候适宜性分区年代际的变化,设计了详细表示年代际气候条件下各气候适宜区转

换的表格(表 2), 左边数第一列是前一年代气候条件下的双季稻气候适宜等级, 上面数第一行表示的是后一年代气候条件下的双季稻气候适宜等级。

根据表 2, 相邻气候适宜等级之间年代际互相转换, 引起了各气候适宜区面积年代际的增减. 20 世纪 70 年代与 60 年代相比, 从不适宜到高适宜各气候适宜等级保持不变的面积分别为  $7763.8 \times 10^3$ ,  $850.2 \times 10^3$ ,  $750.1 \times 10^3$  和  $53.0 \times 10^3 \text{ km}^2$ . 70 年代气候条件下双季稻不适宜区面积从  $7764.7 \times 10^3 \text{ km}^2$  增加到  $7932.6 \times 10^3 \text{ km}^2$ , 增加了  $167.9 \times 10^3 \text{ km}^2$ (表 1), 增加的面积来源于低适宜区转化而来的  $168.8 \times 10^3 \text{ km}^2$  与其自身转化为低适宜区的  $0.9 \times 10^3 \text{ km}^2$  之差(表 2); 低适宜区面积(第二列之和)降低, 是由不适宜区转化为低适宜区的面积  $0.9 \times 10^3 \text{ km}^2$  和中适宜区转化为低适宜区的面积  $44.2 \times 10^3 \text{ km}^2$  之和( $45.1 \times 10^3 \text{ km}^2$ ), 比其转化为不适宜区的面积  $168.8 \times 10^3 \text{ km}^2$  和中适宜区的面积  $48.7 \times 10^3 \text{ km}^2$  之和( $217.5 \times 10^3 \text{ km}^2$ )少  $172.4 \times 10^3 \text{ km}^2$  引起的. 中适宜区面积略有增加, 是由于前一年代由低适宜区和高适宜区转换为中适宜区的面积分别为  $48.7 \times 10^3$  和  $37.1 \times 10^3 \text{ km}^2$ , 它们的总面积  $85.8 \times 10^3 \text{ km}^2$  高于由中适宜区转换为低适宜区和高适宜区的  $44.2 \times 10^3$  和  $0.9 \times 10^3 \text{ km}^2$  的总面积  $45.1 \times 10^3 \text{ km}^2$ . 高适宜区的面积减少了近一半, 是由于 60 年代高适宜区面积  $90.1 \times 10^3 \text{ km}^2$  中有  $37.1 \times 10^3 \text{ km}^2$  转换成了中适宜区, 但是由其他适宜等级转换成高适宜区的面积仅有  $0.9 \times 10^3 \text{ km}^2$ . 80 年代与 70 年代相比, 从不适宜到高适宜各气

候适宜等级保持不变的面积分别为  $7843.2 \times 10^3$ ,  $752.9 \times 10^3$ ,  $740.3 \times 10^3$  和  $53.8 \times 10^3 \text{ km}^2$ ; 面积增加比例最大的是高适宜区, 从  $53.9 \times 10^3 \text{ km}^2$  增加到  $117.6 \times 10^3 \text{ km}^2$ , 增加了 1 倍以上, 增加的面积主要来自中适宜区; 不适宜区面积减少了  $45.9 \times 10^3 \text{ km}^2$ , 主要是转换为了低适宜区; 低适宜区面积略有减少, 减少区域主要转换为了中适宜区; 中适宜区面积变化不大, 是由于由中适宜区向低、高适宜区转换的面积和由低适宜区转换而来的面积相当. 90 年代与 80 年代相比, 从不适宜到高适宜各气候适宜等级分别有  $7810.6 \times 10^3$ ,  $756.1 \times 10^3$ ,  $815.8 \times 10^3$  和  $61.4 \times 10^3 \text{ km}^2$  保持面积不变, 占国土面积的 97.2%; 低适宜区面积降低, 是由于低适宜区转化为不适宜区的面积  $51.4 \times 10^3 \text{ km}^2$  与中适宜区的面积  $66.6 \times 10^3 \text{ km}^2$  比从不适宜区和中适宜区转化得来的面积  $77.7 \times 10^3 \text{ km}^2$  多  $40.3 \times 10^3 \text{ km}^2$ ; 中适宜区面积增加, 是由于低、高适宜区向其转换的面积  $66.6 \times 10^3$  和  $56.2 \times 10^3 \text{ km}^2$  比其向低、高适宜区转换的面积  $1.6 \times 10^3$  和  $21.9 \times 10^3 \text{ km}^2$  多; 高适宜区面积减少了近 1/3, 这部分地区被中适宜区取代. 21 世纪前 10 年与 20 世纪 90 年代相比, 从不适宜到高适宜各气候适宜等级分别有  $7827.2 \times 10^3$ ,  $662.1 \times 10^3$ ,  $609.3 \times 10^3$  和  $78.5 \times 10^3 \text{ km}^2$  保持面积不变, 占国土面积的 94.4%; 不适宜区增加, 是由于低适宜区向其转换的面积  $84.8 \times 10^3 \text{ km}^2$  较其向高适宜区转换的面积  $34.8 \times 10^3 \text{ km}^2$  多  $50.0 \times 10^3 \text{ km}^2$ ; 高适宜区面积增加比例最多, 是 90 年代的 4.4 倍, 是由于中适宜区向

表 2 我国双季稻各气候适宜区间年代际转换<sup>a)</sup>(单位:  $\times 10^3 \text{ km}^2$ )

	1960s 和 1970s				1970s 和 1980s			
	不适宜	低适宜	中适宜	高适宜	不适宜	低适宜	中适宜	高适宜
不适宜	7763.8	0.9	0	0	7843.2	89.4	0	0
低适宜	168.8	850.2	48.7	0	43.5	752.9	98.9	0
中适宜	0	44.2	750.1	0.9	0	31.8	740.3	63.8
高适宜	0	0	37.1	53.0	0	0	0.1	53.8
	1980s 和 1990s				1990s 和 2000s			
	不适宜	低适宜	中适宜	高适宜	不适宜	低适宜	中适宜	高适宜
不适宜	7810.6	76.1	0	0	7827.2	34.8	0	0
低适宜	51.4	756.1	66.6	0	84.8	662.1	86.9	0
中适宜	0	1.6	815.8	21.9	0	41.4	609.3	287.9
高适宜	0	0	56.2	61.4	0	0	48	78.5

a) 表内的第  $i$  行  $j$  列数值  $y_{ij}$  表示的是前一年代由  $i$  类气候适宜性分区占据的  $y$  面积的区域, 在后一年代气候条件下由  $j$  类气候适宜性分区占据. 每行之和表示的是前一年代气候条件下, 气候适宜等级  $i$  所占据的面积; 每列之和表示的是气候适宜等级  $j$  在后一年代气候条件下占据的面积

其转换的面积  $287.9 \times 10^3 \text{ km}^2$  较其向中适宜区转换的面积  $48.0 \times 10^3 \text{ km}^2$  多  $239.9 \times 10^3 \text{ km}^2$ 。

## 2.4 双季稻种植区对气候变化的敏感区及种植北界动态

用 ArcGIS 将前一年代气候条件下的潜在双季稻各气候适宜区图和后一年代气候条件下的双季稻各气候适宜区图(图 3)相比较,可以清晰地看出双季稻种植各气候适宜区对年代际气候变化的敏感区(图 4)。根据图 4,结合图 3 可知,有 2.8%~5.6% 国土面积的双季稻气候适宜等级会发生改变,面积改变最多的年代为 21 世纪的前 10 年,是国土面积的 5.6%。在江苏、安徽中部、四川盆地东部、贵州中部及河南南部等地区,存在可否种植双季稻的转换;在浙江北部、安徽、湖北南部、广西北部地区,存在双季稻低、中气候适宜等级之间的转换;在江西中部、雷州半岛,存在双季稻中、高气候适宜等级之间的转换。

水稻种植北界直接影响生产布局,对调整和引导水稻生产布局具有重要意义。研究表明,基于最大熵方法的  $P=0.05$  可有效表示双季稻种植北界<sup>[13]</sup>。图 5 显示,我国双季稻种植北界位于江苏—安徽—河南—湖北—四川—贵州—云南一线,在不同年代际气候条件下存在波动。20 世纪 70 年代与 60 年代相比,双季稻种植北界在江苏、安徽、河南南部南移 0.5~1.5 个纬度,在四川盆地东部南移 0.5 个纬度,在贵州东退 0.5~1 个经度;80 年代,双季稻种植北界在大部回

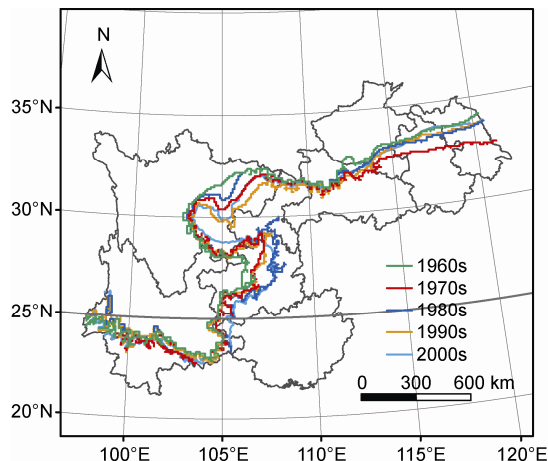


图 5 双季稻种植北界对年代际气候变化的响应

复到 60 年代界限附近,但是在贵州继续东退 1 个经度;90 年代与 80 年代相比,双季稻种植北界大部相近,但是在四川东部南移 1 个纬度,在贵州西进 0.5 个经度。21 世纪前 10 年与 90 年代相比,双季稻种植北界仅在四川东部略有北移,在贵州境内略有东退;与气候变暖发生前的 60 年代相比,双季稻种植北界相近或略有南移。

## 2.5 双季稻种植面积年代际动态与气候的关系

区域尺度上,植物分布主要受热量和水分气候条件制约。本研究以影响水稻安全齐穗的稳定通过  $18^\circ\text{C}$  持续日数表示影响双季稻种植分布的热量资源,以年降水量表示水分资源,分析双季稻种植分布年代际动态面积与气候的关系。双季稻种植各气候适宜区与稳定通过  $18^\circ\text{C}$  持续日数和年降水量之间相关系数的大小及正负不一致表明(表 3),热量和水分条件共同影响着双季稻种植分布,且其影响结果可能相反。特别地,高适宜区面积与热量资源之间具有显著的正相关性,与年降水量呈负相关,表明热量资源的增加可显著促进中国双季稻高适宜区种植范围的扩大,但是这种促进作用受降水资源的制约。

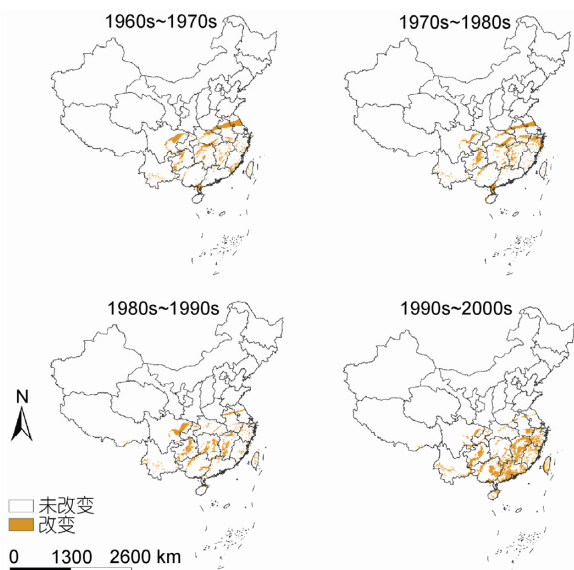


图 4 双季稻种植区对气候变化的敏感区

表 3 双季稻种植面积年代际动态与气候的相关性

适宜区	稳定通过 $18^\circ\text{C}$ 持续日数		年降水量	
	相关系数	显著水平	相关系数	显著水平
低适宜区	-0.71	0.18	-0.33	0.58
中适宜区	-0.59	0.3	0.66	0.22
高适宜区	0.93	0.02	-0.16	0.79
中高适宜区	0.85	0.07	0.45	0.44
总适宜区	-0.26	0.68	-0.06	0.93

### 3 讨论

本研究基于最大熵原理构建的双季稻气候适宜性区划方法,给出了双季稻种植的气候适宜性年代际区划及其面积变化.低适宜等级以上总适宜区面积,在20世纪60年代最高,70年代到21世纪前10年呈现先增加后减少的特点;低适宜区面积呈减少趋势;反映双季稻主产区的中、高适宜区面积呈增加趋势;高气候适宜区面积在21世纪前10年增加较多,是20世纪90年代的4.4倍,是60年代的4倍.

农业生态系统受天气气候制约,气候变暖、变干或变湿都会引起农业生产布局的变化.全球变暖背景下,我国气候变化明显,总体呈增暖趋势并存在年代际变化(图2)<sup>[2,30]</sup>.本研究指出了我国双季稻种植分布受年代际气候变化影响较大的地区,主要位于江苏、安徽中部、四川盆地东部、河南南部、贵州中部和云南南部.林而达和王京华<sup>[31]</sup>考虑干湿度及气温变化影响,指出气候变暖可能会引起亚热带作物种植区的北移,但北部水分不足,不能保证引进亚热带作物的高效生长;云南中南部高原地区位于亚热带易旱地区,气候变暖,水分供求差增大,会对需水较多的水稻生产产生负面影响.本研究指出,在浙江北部、安徽、湖北南部、广西北部地区,存在双季稻低、中气候适宜等级之间的转换;在江西中部、雷州半岛存在双季稻中、高气候适宜等级之间的转换.林而达和王京华<sup>[31]</sup>指出长江中下游地区在气候变暖情况下,降水进一步增多,会使高效的农业生态体系受到损害;杨修等人<sup>[32]</sup>认为淮河流域、长江中下游及其以南广大水稻主产区对未来气候变化的响应以减产为主,是负敏感区;朱红根和周曙东<sup>[33]</sup>研究表明江西水稻为气候变化脆弱性的低度敏感和中度敏感区.同时,基于统计资料分析表明<sup>[34]</sup>,我国水稻生产对已有气候变化的响应存在很大的时空差异性.本研究指出,21世纪的前10年,在长江中下游以南的大部分地区,随着气温升高,降水减少<sup>[2]</sup>,该地区双季稻气候适宜性升高.

与20世纪60年代相比,70年代双季稻可种植区北界南移,在四川盆地东退.水稻是喜湿作物,双季稻种植可能性与年降水量呈正比,且年降水量在影响水稻种植中所占的比例较大<sup>[14]</sup>,这一时期气温没有明显升高,在江淮和黄淮地区降水减少<sup>[2]</sup>,因而引

起双季稻种植北界南移东退.长江中下游地区自1979年以后气温升高,降水增多,具有暖湿化趋势<sup>[35,36]</sup>,因而引起80年代双季稻种植北界北移.21世纪前10年是我国近60年来最暖的10年,宋艳玲等人<sup>[37]</sup>考虑活动积温、水稻生长季长度和年降水量因素,对我国双季稻可种植区变化分析表明,随着气候变暖,双季稻可种植区北移西进,其指出的新扩展地区比本文得到的受气候变化影响较大的地区略偏南.杨晓光等人<sup>[22]</sup>以 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 $5300^{\circ}\text{C}$ 为双季稻种植界限依据,指出近年来气候变暖使双季稻理论种植界限在浙江、安徽、湖北和湖南境内北移 $34\sim 60\text{ km}$ .本研究表明,在气温变暖和水分变化共同作用下,21世纪前10年与气候变暖发生前20世纪60年代相比,双季稻种植北界并没有发生明显的北移.有研究指出,在气候变暖条件下,有些物种分布界限出现了上移较少甚至下移现象<sup>[23]</sup>,其可能原因是水分因子也影响了物种的生态位轨迹变化.本研究综合考虑了水分和热量因子的共同作用,其是气候变暖条件下双季稻种植界限移动幅度与已有研究结果<sup>[22,37]</sup>不同的可能原因.

### 4 结论

(i) 我国双季稻种植分布及其气候适宜性存在年代际变化.总适宜区面积在20世纪60年代最高,70年代到21世纪前10年呈现先增加后减少的特点;低适宜区面积呈减少趋势;反映双季稻主产区的中、高适宜区面积之和呈增加趋势;高气候适宜区面积在21世纪前10年增加较多,是20世纪90年代的4.4倍,是60年代的4倍.

(ii) 我国双季稻种植分布受年代际气候变化影响较大的地区主要位于江苏、安徽中部、四川盆地东部、河南南部及贵州中部;在浙江北部、安徽、湖北南部、广西北部地区存在双季稻低、中气候适宜等级之间的转换,在江西中部、雷州半岛,存在双季稻中、高气候适宜等级之间的转换.

(iii) 气温和降水变化共同影响我国双季稻种植北界,考虑到水分作用下的气候变暖并没有使我国双季稻产生明显北移.20世纪70年代双季稻种植北界南移东退,种植面积减少;80年代双季稻种植界限北移,种植面积增加;21世纪前10年气温明显升高并没有使双季稻种植界限北移.

参考文献

- 1 王绍武, 叶瑾林, 龚道溢, 等. 近百年中国气温序列的建立. 应用气象学报, 1998, 9: 392-401
- 2 虞海燕, 刘树华, 赵娜, 等. 1951-2009年中国不同区域气温和降水量变化特征. 气象与环境学报, 2011, 27: 1-11
- 3 司东, 丁一汇, 柳艳菊. 中国梅雨雨带年代际尺度上的北移及其原因. 科学通报, 2010, 55: 68-73
- 4 Fye F K, Stahle D W, Cook E R. Paleo climatic analogs to twentieth-century moisture regimes across the United States. Bull Am Meteorol Soc, 2003, 84: 901-909
- 5 Woodhouse C A, Overpeck J T. 2000 years of drought variability in the central United States. Bull Am Meteorol Soc, 1998, 79: 2693-2714
- 6 马宗晋, 高庆华. 中国第四纪气候变化和未来北方干旱灾害分析. 第四纪研究, 2004, 24: 245-251
- 7 王绍武, 朱锦红. 国外关于年代际气候变率的研究. 气象学报, 1999, 57: 376-384
- 8 马柱国. 华北干旱化趋势及转折性变化与太平洋年代际振荡的关系. 科学通报, 2007, 52: 1199-1206
- 9 Yue T X, Fan Z M, Liu J Y. Changes of major terrestrial ecosystems in China since 1960. Glob Planet Change, 2005, 48: 287-302
- 10 中国农林作物气候区划协作组. 中国农林作物气候区划. 北京: 气象出版社, 1987. 36-55
- 11 李世奎. 中国农业气候资源和农业气候区划. 北京: 科学出版社, 1988. 1-7
- 12 何奇瑾, 周广胜. 我国玉米种植区分布的气候适宜性. 科学通报, 2012, 57: 267-275
- 13 丁颖. 中国水稻栽培学. 北京: 农业出版社, 1961. 101-180
- 14 段居琦, 周广胜. 中国双季稻种植区的气候适宜性研究. 中国农业科学, 2012, 45: 218-227
- 15 钟甫宁, 刘顺飞. 中国水稻生产布局变动分析. 中国农村经济, 2007, (9): 39-44
- 16 Gao J, Liu Y S. Climate warming and land use change in Heilongjiang Province, Northeast China. Appl Geogr, 2011, 31: 476-482
- 17 Hickling R, Roy D B, Hill J K, et al. A northward shift of range margins in British Odonata. Glob Change Biol, 2005, 11: 502-506
- 18 Joshua J L, Shafer S L, White D, et al. Projected climate-induced faunal change in the Western Hemisphere. Ecology, 2009, 90: 588-597
- 19 Hamann A, Wang T. Potential effects of climate change on ecosystem and tree species distribution in British Columbia. Ecology, 2006, 87: 2773-2786
- 20 Weng E S, Zhou G S. Modeling distribution changes of vegetation in China under future climate change. Environ Model Assess, 2006, 11: 45-58
- 21 Esteve-Selma M A, Martínez-Fernández J, Hernández-García I, et al. Potential effects of climatic change on the distribution of *Tetraclinis articulata*, an endemic tree from arid mediterranean ecosystems. Clim Change, 2011, 113: 663-678, doi: 10.1007/s10584-011-0378-0
- 22 杨晓光, 刘志娟, 陈阜. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响 I. 气候变暖对中国种植制度北界和粮食产量可能影响的分析. 中国农业科学, 2010, 43: 329-336
- 23 Crimmins S M, Dobrowski S Z, Greenberg J A, et al. Changes in climatic water balance drive downhill shifts in plant species' optimum elevations. Science, 2011, 331: 324-327
- 24 邵璞, 曾晓东. 气候年际变率对全球植被平均分布的影响. 生态学报, 2011, 31: 1494-1505
- 25 Thornton P E, Running S W, White M A. Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain. J Hydrol, 1997, 190: 214-251
- 26 Phillips S J, Dudík M. Modeling of species distributions with Maxent: New extensions and a comprehensive evaluation. Ecography, 2008, 31: 161-175
- 27 Jaynes E T. Information theory and statistical mechanics. Phys Rev, 1957, 106: 620-630
- 28 IPCC. Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva. 2007
- 29 任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 近 50 年中国地面气候变化基本特征. 气象学报, 2005, 63: 942-956
- 30 范孟泽, 岳天祥, 陈传法, 等. 中国气温与降水的时空变化趋势分析. 地球信息科学学报, 2011, 13: 526-533
- 31 林而达, 王京华. 我国农业对全球变暖的敏感性和脆弱性. 农村生态环境, 1994, 10: 1-5
- 32 杨修, 孙芳, 林而达, 等. 我国水稻对气候变化的敏感性和脆弱性. 自然灾害学报, 2004, 13: 85-89
- 33 朱红根, 周曙东. 南方水稻对气候变化的脆弱性分析——以江西为例. 农业现代化研究, 2010, 31: 208-211
- 34 Zhang T, Zhu J, Wassmann R. Responses of rice yields to recent climate change in China: An empirical assessment based on long-term observations at different spatial scales (1981-2005). Agr Forest Meteorol, 2010, 150: 1128-1137
- 35 Gong D Y, Ho C H. Shift in the summer rainfall over the Yangtze River valley in the late 1970s. Geophys Res Lett, 2002, 29: 1436, doi: 10.1029/2001GL014523
- 36 Zhang Q, Wu G Q. The large area flood and drought over Yangtze River valley and its relation to the South Asia High. Acta Meteorol Sin, 2001, 59: 569-577
- 37 宋艳玲, 刘波, 钟海玲. 气候变暖对我国南方水稻可种植区的影响. 气候变化研究进展, 2011, 7: 259-264