罗孳孳，方立魁，武强，等，2024. 四川盆地东部再生稻高温伏旱区腋芽萌发期气象适宜度[J]. 气象，50(4)：461-474. Luo Z Z, Fang L K, Wu Q, et al, 2024. Meteorological suitability of axillary bud germination stage in the high temperature and summer drought areas of ratoon rice in eastern Sichuan Basin[J]. Meteor Mon, 50(4): 461-474(in Chinese).

四川盆地东部再生稻高温伏旱区腋芽萌发期气象适宜度*

罗孳孳[1,2] 方立魁[3] 武 强[1,2] 韩 旭[4] 李月臣[5]
朱玉涵[2] 陈 欢[1,6] 张 悦[2] 阳园燕[1,2]

1 中国气象局气候资源经济转化重点开放实验室，重庆 401147
2 重庆市气象科学研究所，重庆 401147
3 重庆市农业技术推广总站，重庆 401120
4 重庆市江津现代农业气象试验站，重庆 402260
5 西南大学地理科学学院，重庆 400715
6 重庆市气象服务中心，重庆 401147

提 要： 以四川盆地东部再生稻高温伏旱区为研究区，基于气象条件对腋芽萌发期再生稻生长发育的影响机理，采用结构方程模型探明了腋芽萌发的影响因素、影响路径及影响强度。进一步结合隶属函数和层次分析法，构建了再生稻腋芽萌发气象适宜度模型，并分析了1981—2021年研究区腋芽萌发期气象影响因素及气象适宜度的变化特征。结果表明：气温、空气湿度、降水是四川盆地东部再生稻高温伏旱区腋芽萌发的关键影响因素，基于以上因素的气象适宜度模型能较好地评价再生稻腋芽萌发期的气象影响。1981—2021年研究区气温适宜度、空气湿度适宜度及综合气象适宜度均呈下降趋势，降水适宜度没有表现出明显的变化趋势。气温适宜度、空气湿度适宜度及综合气象适宜度总体呈“西高东低”的空间分布特征，降水适宜度则表现为“东西高、中部低”。1981—2021年研究区气温上升趋势与空气湿度下降趋势显著，导致致害高温(日平均气温≥32℃)积温和致害低湿(日平均相对湿度≤65%)日数明显增加，这是再生稻腋芽萌发期气象适宜度总体呈下降趋势的诱因。

关键词： 再生稻，气象适宜度，腋芽，结构方程模型，高温伏旱

中图分类号： P49，S16 **文献标志码：** A **DOI：** 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.053002

Meteorological Suitability of Axillary Bud Germination Stage in the High Temperature and Summer Drought Areas of Ratoon Rice in Eastern Sichuan Basin

LUO Zizi[1,2] FANG Likui[3] WU Qiang[1,2] HAN Xu[4] LI Yuechen[5] ZHU Yuhan[2]
CHEN Huan[1,6] ZHANG Yue[2] YANG Yuanyan[1,2]

1 CMA Key Open Laboratory of Transforming Climate Resources to Economy, Chongqing 401147
2 Chongqing Institute of Meteorological Sciences, Chongqing 401147
3 Chongqing Municipal Agricultural Technology Extension Station, Chongqing 401120
4 Chongqing Jiangjin Modern Agrometeorology Experimental Station, Chongqing 402260
5 School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715
6 Chongqing Meteorological Service Centre, Chongqing 401147

* 重庆市自然科学基金项目(CSTB2022NSCQ-MSX0442)、科技部农业科技成果转化资金项目(2013GB24160637)共同资助
2022年11月4日收稿； 2023年12月26日收修定稿
第一作者：罗孳孳，主要从事农业气候资源开发利用、农业气象灾害影响评估研究. E-mail：29689257@qq.com
通讯作者：阳园燕，主要从事农业气象灾害监测预测技术研究. E-mail：469829427@qq.com

Abstract: Taking the high temperature and summer drought areas of ratoon rice in the eastern part of Sichuan Basin as the study area, and based on the mechanism of the influence of meteorological conditions on the growth and development of ratoon rice during the axillary bud germination stage, this article explores the impact factors, pathways, and degrees of axillary bud germination with a structural equation model. Furthermore, combined with the membership function and analytic hierarchy process, a meteorological suitability model for axillary bud germination of ratoon rice is constructed, and the meteorological impact factors and changes in meteorological suitability of axillary bud germination stage of ratoon rice in the study area from 1981 to 2021 are analyzed. The results indicate that temperature, air humidity, and precipitation are key impact factors for axillary bud germination in the high temperature and summer drought areas of ratoon rice in eastern Sichuan Basin. The meteorological suitability model based on these factors can effectively evaluate the meteorological impact of axillary bud germination of ratoon rice. From 1981 to 2021, the temperature suitability, air humidity suitability, and synthetical meteoro-logical suitability all showed a downward trend, while the precipitation suitability did not have a significant change trend. In general, the spatial distributions of temperature suitability, air humidity suitability, and synthetical meteorological suitability were characterized by "high in the west and low in the east", while the precipitation suitability was distributed in the pattern of "high in the east and west, and low in the middle". From 1981 to 2021, there was a significant upward trend in temperature and a downward trend in air humidity in the study area, resulting in significant increases in the accumulated temperature causing harmful high temperatures (daily mean temperature $\geqslant$32℃) and the days of harmful low humidity (daily average relative humidity $\leqslant$65%). This is major cause for the overall downward trend in meteorological suitability of axillary bud germination stage of ratoon rice.

Key words: ratoon rice, meteorological suitability, axillary bud, structural equation model (SEM), high temperature and summer drought

引 言

再生稻是在光温资源充足的地区,利用水稻的再生特性,由稻桩上的腋芽萌发,出苗成穗,形成产量的一季稻子。再生稻栽培在中国具有悠久的历史,可以追溯到两晋时期(郭文韬,1993)。我国云南、贵州、四川、重庆、湖北、湖南、广西、福建等南方稻区均具有适宜再生稻种植的气候条件。20世纪70年代末,随着三系杂交水稻的成功选育和栽培技术的示范推广,再生稻蓄留面积迅速扩大(徐富贤等,2015),1997年全国再生稻收获面积曾经达到75万hm^2(姚雄等,2013)。2000年以后,受农村劳动力大量涌向城市、种粮效益低下及人工收割成本高等多种因素的影响,再生稻蓄留面积大幅下降。四川盆地再生稻栽培区,包括四川、重庆的二十多个市、区(县),是我国再生稻的主要产区之一。该地区再生稻抽穗—灌浆期的气温比头季稻低7℃左右,昼夜温差大,灌浆时间长,养分积累比较充分,稻米品质和口感更佳。因此,在近二十年全国再生稻产业萎缩的大背景下,四川、重庆仍然保有较大的种植面积。近年来,粮食安全问题受到国家的高度重视,随着农机研发水平不断提高,低芽位优势水稻品种成功培育,再生稻的现代化产业链条逐步形成,再生稻有望"再生"。

再生稻腋芽萌发期茎叶生长与幼穗分化发育并进,是产量形成的关键期之一。期间若遇高温干旱,将出现腋芽萌发量少、发苗不整齐甚至死苗等问题,进而导致有效穗不足,最终影响产量。然而四川盆地东部位于重庆境内的平行岭谷与沿江河谷地区属于再生稻高温伏旱区气候生态类型(张洪等,1993),8月腋芽萌发期间,伏旱发生频率高(高阳华等,2011)。随着全球气候变暖,极端天气气候事件增多,该地区再生稻生产将面临更大的风险。例如,2022年夏季四川盆地东部地区发生极端高温干旱,最高气温达45℃,突破有气象记录以来的极值,再生稻腋芽萌发遭受严重影响,重庆地区的有效蓄留面积不足2021年的50%。因此,摸清气候变化背

景下影响再生稻腋芽萌发的主要气象因素及其适宜度变化特征,系统性地做好影响预报,进而有针对性地开展高温干旱期间的田间管理,对再生稻减灾增产具有重要意义。

随着现代气象科技的发展,农业气象服务已向定量化、精细化迈进。定性描述天气影响的服务产品,已不能满足现代农业对气象"服务精细"的要求。天气气候适宜度评价作为一种定量化方法已在作物产量预报(刘维和宋迎波,2021;邱美娟等,2018;魏瑞江等,2009;代立芹等,2012)、农业气候区划(刘聪等,2021;李凯伟等,2021)、农用天气预报(马树庆等,2013;屈振江等,2012)以及病虫害气象条件预报与评估(王纯枝等,2020;岳伟等,2021)等农业气象科研与业务工作中得到广泛应用。国内学者的研究大致可分为两类,分别是针对作物全生育期或多个发育期的气候适宜度研究和针对作物单个发育期或农事活动的气象适宜度研究。气候适宜度研究的时间尺度较大,通常以旬、月为单位,并考虑光、温、水等气象条件的综合影响。采用相关方法进行"短时间、高影响"天气评价时,往往会平滑气象要素的波动和关键因子的影响。而气象适宜度方法的研究主要集中在播种、施肥、喷药等农事活动和病虫害发生气象条件评价等方面(马树庆等,2013;王志春,2020),针对作物关键发育期的研究较少(任义方等,2018;高建文等,2018;赵玉兵等,2022)。另外,在综合气象适宜度集成时,通常采用专家打分法(屈振江等,2012;马树庆等,2013)、德尔菲法(赵玉兵等,2022)等主观方法确定权重系数。层次分析法虽能在一定程度上降低主观性影响(李德等,2016;肖玮钰等,2020),但在缺少数据支持的情况下,创建的层次结构和判断矩阵仍然可能偏离客观事实。

本文以四川盆地东部再生稻高温伏旱区作为研究区域,根据已有的再生稻生态气象研究成果,从气象影响机理入手,构建腋芽萌发气象适宜度结构方程模型(structural equation model,SEM),筛选再生稻腋芽萌发的气象影响因素。采用隶属函数构建气象影响因素的适宜度模型,并基于 SEM 模型的气象影响路径和影响效应开展层次分析,确定各气象影响因素适宜度权重系数,进一步构建综合气象适宜度模型。在此基础上,分析了 1981—2021 年研究区再生稻腋芽萌发期气象影响因素及气象适宜度的时空变化特征,旨在为新形势下四川盆地再生稻产业"高产、高效、优质"发展提供参考。

1　资料与方法

1.1　资料来源与数据处理

气象资料为四川盆地东部 23 个区(县)地面气象观测站 1981—2021 年 8 月逐日平均气温(单位:℃)、空气相对湿度(单位:%)、降水量(单位:mm)数据,来源为重庆市气象信息技术保障中心。再生稻产量结构资料为 2013—2015 年重庆市再生稻百亩(1 亩≈666.7 m^2)攻关片大田观测数据,来源为重庆市农业技术推广总站。研究区及地面气象观测站位置见图 1。

气象资料序列较长,部分观测站因迁站,海拔高度变化较大。本文结合观测站历史沿革资料,采用 RHtest V5 软件基于惩罚最大 t 检验和惩罚最大 F 检验对日平均气温、日空气相对湿度数据序列进行了均一性检验,并对部分站点资料做了订正。

1.2　研究方法

1.2.1　统计分析

通过 Microsoft Excel 和 SPSS 统计软件,采用线性回归和 Spearman 相关分析对气象要素统计量进行时间序列分析、气象适宜度与产量结构的相关分析以及显著性水平检验。

时间序列分析的一次线性回归方程可表示为:

$$Y = at + b \tag{1}$$

式中:a 为回归系数,t 为时间序列,b 为常数项。以 10 年为气候倾向率,表示再生稻腋芽萌发期气象影

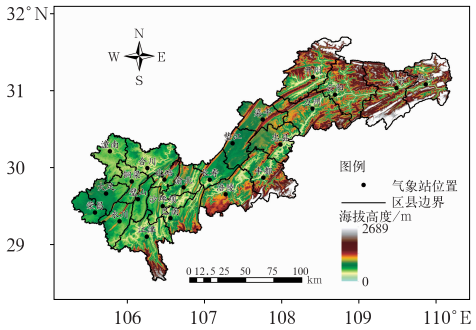


图 1　研究区与地面气象观测站地理分布

Fig. 1　Geographical distribution of the study area and meteorological observation stations

响因素每 10 年的变化率，其绝对值反映变化的幅度，正为增大，负为减小。

1.2.2 结构方程模型(SEM)

SEM 是融合传统多元统计分析法，用来测量多个因变量的实证分析模型方法，起源于社会科学，后也被用于生态学、气象学等自然科学研究中(杨文静等，2022)。与传统的多元统计分析相比，SEM 允许包含无法直接观测的潜在变量，且能反映变量间可能存在的间接效应(穆佳等，2014)。本研究基于问卷调查数据，采用结构方程模型的验证性因子分析和路径分析，筛选影响再生稻腋芽萌发的关键气象因素，并参考模型给出的各气象影响因素的标准化影响效应值，构建气象适宜度层次分析的递阶层次结构并建立判断矩阵。腋芽萌发气象适宜度 SEM 分析采用 Amos 软件完成。

1.2.3 隶属函数

气象条件对农作物的影响通常是非线性的(马树庆，2012)，具有模糊性和随机性，不能简单的以阈值对农作物生长发育的气象条件作适宜与不适宜的二元界定。本文根据已有的再生稻腋芽萌发的气候生态试验研究结论和研究区腋芽萌发期的多年气象条件，采用模糊数学理论的隶属函数，将气象要素对腋芽萌发期再生稻生长发育的非线性影响关系表达为分段线性的模糊集合，从而构建各个气象要素的适宜度模型。

1.2.4 层次分析

层次分析法是将一个复杂的多目标决策问题作为一个系统，分解成目标、准则、方案等多个层次，在此基础上进行定性和定量分析的决策方法。在分析多个气象要素对再生稻腋芽萌发的综合影响程度时，无法直接给定某个气象要素的权重，层次分析法提供了一种相较客观的、定量的解决方案。本研究采用 MATLAB 软件完成层次分析工作。

1.2.5 参考作物蒸散的计算

再生稻需水量(ET_0)分析，采用联合国粮农组织(FAO)推荐的 Penman-Monteith 公式计算：

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (2)$$

式中：Δ 为饱和水汽压-温度曲线的斜率(单位：kPa·℃$^{-1}$)，R_n 为净辐射(单位：MJ·m^{-1}·d^{-1})，G 为土壤热通量(单位：MJ·m^{-1}·d^{-1})，T 为日平均气温(单位：℃)，U_2 为 2 m 高度风速(单位：m·s^{-1})，e_a 为饱和水汽压(单位：kPa)，e_d 为实际水汽压(单位：kPa)，γ 为湿度计常数(单位：kPa·℃$^{-1}$)。

2 结果与分析

2.1 腋芽萌发的气象影响因素

头季稻齐穗后 15 天左右腋芽开始分化，营养生长与生殖生长并进，头季稻成熟收割时穗分化能够达到 4 期(冉茂林等，2002)。有研究表明，高温和土壤水分不足影响根系发育(周毓珩和马一凡，1991；马青荣等，2020)，根系干重和根系吸收面积减少(张玉屏等，2001；严小龙，2007)，不利营养物质吸收，进而对腋芽萌发造成影响。高温干旱胁迫下，水稻叶片叶绿素活性下降，呼吸速率加快，光合速率下降，光合产物的积累和向茎鞘的输送减少，再生腋芽成活率降低(黄新杰，2012)。另外，相关试验研究表明，气象条件也直接影响再生稻腋芽生长发育，日均温度低、湿度高或日均温度高、湿度低，对腋芽萌发均有抑制作用(方文等，1990a；1990b；任昌福和刘保国，1993；谢华安，2005)。

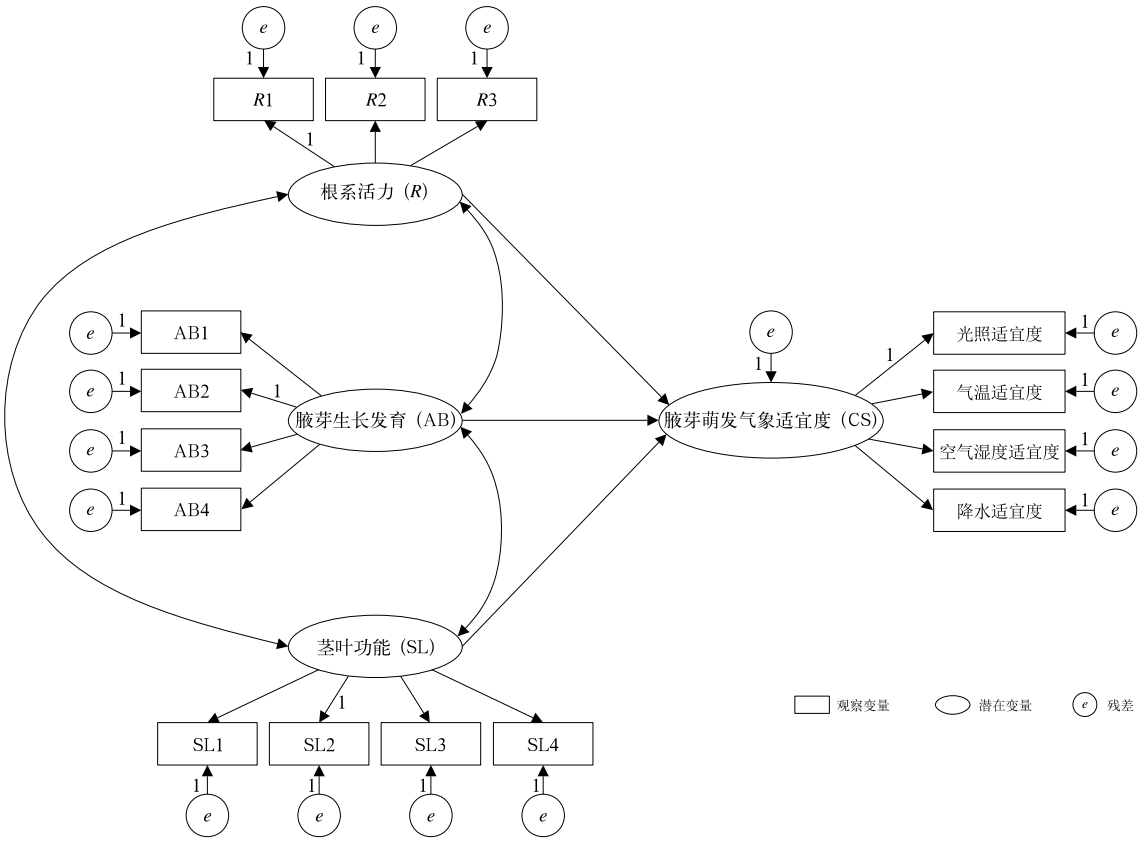
根据以上对再生稻腋芽萌发的理论认知，本研究提出 4 个潜在变量和 15 个观察变量(表 1)的再生稻腋芽萌发气象适宜度结构方程理论模型，如图 2 所示。模型假设如下：(1)气象条件直接影响再生稻腋芽生长发育，引起再生稻腋芽萌发气象适宜度的变化；(2)气象条件通过对再生稻根系活力的影响，引起再生稻腋芽萌发气象适宜度的变化；(3)气象条件通过对再生稻茎叶功能的影响，引起再生稻腋芽萌发气象适宜度的变化。观察变量利用利克特量表(Likert scale)7 级量表，选项包括“非常不同意”“不同意”“比较不同意”“一般”“比较同意”“同意”“非常同意”，分别赋值为 1～7 分。向以四川、重庆为主的农业气象与水稻栽培技术专家发放调查问卷，经筛选整理后得到有效调查数据 86 条。在完成数据的显著性水平和效度检验后，采用理论模型进行拟合，发现“假设(2)”不成立。因此，删除“根系活力”潜在变量，进一步对模型进行反复的拟合、修正，达到拟合优度要求，最终的标准化系数结构方程模型见图 3。

结构方程模型结果显示：研究区再生稻腋芽萌

表 1　结构方程理论模型变量

Table 1　Theoretical structural equation model variables

潜在变量	编号	观察变量
根系活力(*R*)	R1	气温是影响根系活力的关键气象因素
	R2	降水是影响根系活力的关键气象因素
	R3	光照是影响根系活力的关键气象因素
茎叶功能(SL)	SL1	气温是影响茎叶功能的关键气象因素
	SL2	空气湿度是影响茎叶功能的关键气象因素
	SL3	降水是影响茎叶功能的关键气象因素
	SL4	光照是影响茎叶功能的关键气象因素
腋芽生长发育(AB)	AB1	气温是影响腋芽生长发育的关键气象因素
	AB2	空气湿度是影响腋芽生长发育的关键气象因素
	AB3	降水是影响腋芽生长发育的关键气象因素
	AB4	光照是影响腋芽生长发育的关键气象因素
腋芽萌发气象适宜度(CS)	CS1	气温适宜度对腋芽萌发的影响大
	CS2	空气湿度适宜度对腋芽萌发的影响大
	CS3	降水适宜度对腋芽萌发的影响大
	CS4	光照适宜度对腋芽萌发的影响大

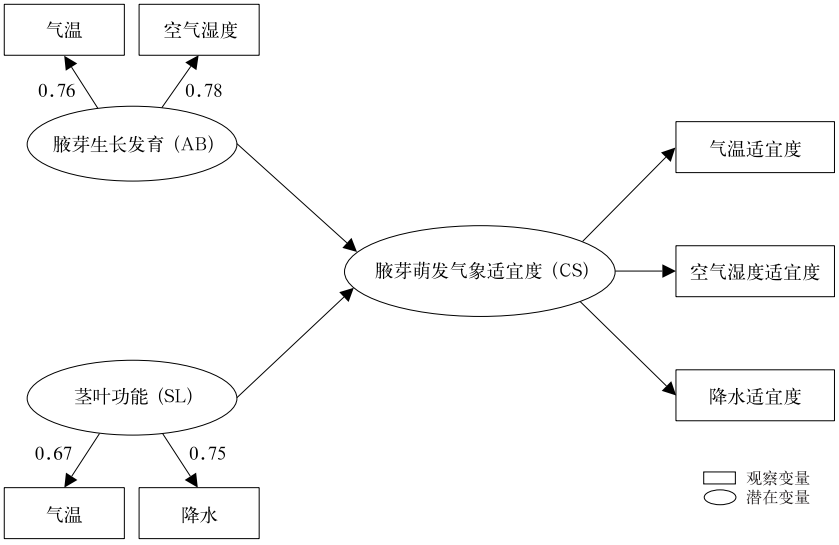


注:1 为模型系统默认值。

图 2　再生稻腋芽萌发气象适宜度结构方程理论模型

Fig. 2　Theoretical structural equation model of meteorological suitability for axillary bud germination of ratoon rice

发的主要气象影响因素为气温、空气湿度和降水,通过对腋芽生长发育和对茎叶功能的影响引起腋芽萌发气象适宜度的变化。其中,气温和空气湿度直接影响腋芽生长发育,标准化因素负荷分别为 0.76 和 0.78;气温和降水直接影响再生稻茎叶功能,标准化因素负荷分别为0.67和0.75。腋芽生长发育与茎



注：数字为标准化因素负荷。

图 3 再生稻腋芽萌发气象适宜度标准化系数修正模型

Fig. 3 Standardized coefficients correction model of meteorological suitability for axillary bud germination of ratoon rice

叶功能对腋芽萌发气象适宜度的路径系数分别为 0.65 和 0.45，二者的共同作用可以解释腋芽萌发气象适宜度的 63%（$R^2=0.63$）。以上影响关系均通过了 0.01 及以上显著性水平检验。

2.2 气象适宜度评价模型构建

2.2.1 单个气象要素适宜度

如果简单地以阈值为标准，通过指标判别法来评价腋芽萌发的适宜度，难以反映出各个气象要素在阈值区间内变化所引起的适宜程度差异。因此，本文采用隶属函数，建立单个气象要素的适宜度分段线性关系模型。在前人试验研究结论（方文等，1990a；1990b；熊洪和方文，1994）的基础上，根据研究区再生稻腋芽萌发期的天气特点，并综合考虑生产实际与气象观测存在的差异（黄友钦等，1995），确定了再生稻腋芽萌发气温、空气湿度的适宜区间及其上下限阈值。通过隶属函数构建的气温适宜度、空气湿度适宜度模型分别见式(3)和式(4)。

$$f(T)=\begin{cases}1 & T_{s2}\leqslant T\leqslant T_{s1}\\ \dfrac{T_{b1}-T}{T_{b1}-T_{s1}} & T_{s1}<T<T_{b1}\\ \dfrac{T-T_{b2}}{T_{s2}-T_{b2}} & T_{b2}<T<T_{s2}\\ 0 & T\leqslant T_{b2}\ 或\ T\geqslant T_{b1}\end{cases}\tag{3}$$

式中：$f(T)$为再生稻腋芽萌发气温适宜度指数；T为平均气温（单位：℃），T_{s1}、T_{s2}分别为平均气温适宜区间的上限值和下限值（单位：℃），T_{b1}、T_{b2}分别为平均气温上限阈值和下限阈值（单位：℃），$T_{s1}=28$℃，$T_{s2}=25$℃，$T_{b1}=32$℃，$T_{b2}=22$℃。

$$f(\mathrm{RH})=\begin{cases}1 & \mathrm{RH}_{s2}\leqslant \mathrm{RH}\leqslant \mathrm{RH}_{s1}\\ \dfrac{\mathrm{RH}_{b1}-\mathrm{RH}}{\mathrm{RH}_{b1}-\mathrm{RH}_{s1}} & \mathrm{RH}_{s1}<\mathrm{RH}<\mathrm{RH}_{b1}\\ \dfrac{\mathrm{RH}-\mathrm{RH}_{b2}}{\mathrm{RH}_{s2}-\mathrm{RH}_{b2}} & \mathrm{RH}_{b2}<\mathrm{RH}<\mathrm{RH}_{s2}\\ 0 & \mathrm{RH}\leqslant \mathrm{RH}_{b2}\ 或\\ & \mathrm{RH}\geqslant \mathrm{RH}_{b1}\end{cases}\tag{4}$$

式中：$f(\mathrm{RH})$为再生稻腋芽萌发空气湿度适宜度指数；RH 为相对湿度（单位：%），RH_{s1}、RH_{s2}分别为相对湿度适宜区间的上限值和下限值（单位：%），RH_{b1}、RH_{b2}分别为相对湿度上限阈值和下限阈值（单位：%），$\mathrm{RH}_{s1}=80\%$，$\mathrm{RH}_{s2}=75\%$，$\mathrm{RH}_{b1}=90\%$，$\mathrm{RH}_{b2}=65\%$。

头季稻收获前后一段时间，稻田通常处于无蓄水状态，因此，除了降水量之外，蒸散发也是影响再生稻水分平衡的重要因素。参考国内学者关于降水适宜度的研究（王展等，2015；高建文等，2018），综合考虑降水量与作物需水量，构建降水适宜度模型：

$$f(R)=\begin{cases}1 & \mathrm{ET_c}<R+R_a\\ \dfrac{R}{\mathrm{ET_c}-R_a} & R+R_a<\mathrm{ET_c}\end{cases}\tag{5}$$

式中:$f(R)$为再生稻腋芽萌发降水适宜度指数;R为降水量(单位:mm),R_a为前期有效降水量(单位:mm);ET_c为再生稻需水量(单位:mm),根据作物系数法计算:

$$ET_c = K_c \cdot ET_0 \tag{6}$$

式中:K_c为作物系数,采用FAO推荐的标准作物系数;ET_0为参考作物蒸散量(单位:mm)。

R_a计算方式如下:

$$R_a = \sum_{i=1}^{n} R_i - ET_{ci} \tag{7}$$

式中:R_i为腋芽萌发期第i日的降水量(单位:mm),ET_{ci}为腋芽萌发期第i日的再生稻需水量(单位:mm),n为计算当日前一日在腋芽萌发期的日序。

2.2.2　综合气象适宜度

农作物不同生育阶段或不同生长状态下,光、温、水的重要性不是均等的,也不是一成不变的。因此,建立综合气象适宜度模型,需为气温适宜度、空气湿度适宜度、降水适宜度赋予不同的权重值。本文采用结构方程模型与层次分析法确定各气象要素适宜度的权重系数。根据腋芽萌发气象适宜度结构方程模型的验证性因子分析与路径分析结果,构建的腋芽萌发综合气象适宜度递阶层次结构如图4所示。

判断矩阵参考结构方程模型各气象要素对茎叶功能和腋芽生长发育影响以及二者对腋芽萌发气象适宜度影响的标准化影响效应值,结合Saaty(2001)提出的1~9级标度,两两比较构建。准则层的茎叶功能、腋芽生长发育2个因素对目标层的判断矩阵$\boldsymbol{A}$,以及指标层的气温、空气湿度、降水3个因素对准则层的腋芽生长发育、茎叶功能的判断矩阵$\boldsymbol{B}_1$、$\boldsymbol{B}_2$如下:

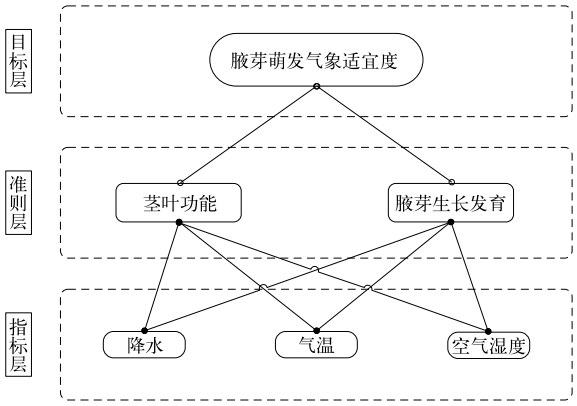


图4　再生稻腋芽萌发综合气象适宜度递阶层次结构

Fig. 4　Hierarchical structure of synthetical meteorological suitability for axillary bud germination of ratoon rice

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 1 & 4 \\ 0.25 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{B}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 7 \\ 1 & 1 & 8 \\ 0.143 & 0.125 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{B}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 7 & 0.5 \\ 0.143 & 1 & 0.143 \\ 2 & 7 & 1 \end{bmatrix}$$

经计算矩阵最大特征值,并判定一致性比率满足一致性要求后,得到指标层对准则层与准则层对目标层的权向量,通过矩阵乘法,计算得到气温、空气湿度、降水3个因素对腋芽萌发气象适宜度的组合权向量即为各气象要素适宜度权重系数。最终得到再生稻腋芽萌发综合气象适宜度模型,如式(8)所示:

$$F(T,RH,R) = 0.439f(T) + 0.396f(RH) + 0.165f(R) \tag{8}$$

式中:$F(T,RH,R)$为综合气象适宜度指数,$f(T)$为气温适宜度指数,$f(RH)$为空气湿度适宜度指数,$f(R)$为降水适宜度指数。

2.2.3　模型的检验

再生稻穗分化在腋芽萌发伸长期间进行,良好的气象条件有利于增加穗粒数。本文采用2013—2015年再生稻百亩攻关片的再生稻穗粒数资料,对气象适宜度模型进行适用性检验。各观测点再生稻穗粒数与气象适宜度见表2。气温适宜度、空气湿度适宜度、降水适宜度及综合气象适宜度分别为各观测点对应年份腋芽萌发期逐日适宜度值的算术平均值。

Spearman相关分析结果表明,本研究的腋芽萌发气温适宜度、空气湿度适宜度、降水适宜度、综合气象适宜度与再生稻穗粒数的相关性分别为0.645、0.620、0.673、0.755。气温适宜度、空气湿度适宜度、降水适宜度与穗粒数的相关性均通过了0.05的显著性水平检验,综合气象适宜度与穗粒数的相关性通过了0.01的显著性水平检验,证明该模型能较好地评价再生稻腋芽萌发的气象影响。

2.3　气象影响因素及适宜度变化特征

2.3.1　气象影响因素变化

本文筛选了再生稻腋芽萌发期(8月)的气温、

表 2 2013—2015 年研究区再生稻穗粒数与气象适宜度

Table 2 Grain number per year of ratoon rice and its meteorological suitability in the study area from 2013 to 2015

年份	区(县)	穗粒数/个	气温适宜度	空气湿度适宜度	降水适宜度	综合气象适宜度
2013	开州	69.0	0.323	0.294	0.052	0.280
	永川	71.7	0.490	0.197	0.112	0.321
	铜梁	58.9	0.415	0.371	0.210	0.383
2014	大足	73.5	0.458	0.484	0.218	0.500
	铜梁	58.3	0.367	0.287	0.272	0.410
	江津	81.9	0.485	0.332	1.000	0.592
2015	开州	74.1	0.642	0.384	0.170	0.485
	大足	80.5	0.526	0.523	0.783	0.659
	永川	78.6	0.535	0.539	0.869	0.675
	铜梁	76.2	0.580	0.458	0.807	0.639
	江津	85.4	0.564	0.484	0.506	0.580

空气湿度、降水量、降水日数、致害高温(日平均气温≥32℃)/低温(日平均气温≤22℃)的积温以及致害低湿(日平均相对湿度≤65%)/高湿(日平均相对湿度≥90%)的日数,共 8 个表征气象影响因素的特征因子,统计了 1981—2021 年研究区 23 个区(县)各项因子的气候均值及气候倾向率(表 3)。研究区再生稻腋芽萌发期平均气温多年均值为 28.0℃,达适宜区间上限,近 41 年呈上升趋势($P<0.1$),平均每 10 年升高 0.33℃。致害高温积温呈增加趋势($P<0.05$),速率为 38.66 ℃·d·(10 a)$^{-1}$;平均空气湿度多年均值为 74.0%,略低于适宜区间下限,近 41 年呈下降趋势($P<0.05$),平均每 10 年降低1.97%;致害低湿日数呈增加趋势($P<0.01$),速率为 2.30 d·(10 a)$^{-1}$;致害低温积温与致害高湿日数的增加趋势未通过显著性水平检验。降水量多年均值为 139.4 mm,平均每 10 年减少 0.66 mm;降水日数多年均值为 14.3 d,平均每 10 年减少 0.97 d;降水量与降水日数的减少趋势均未通过显著性水平检验。

表 3 1981—2021 年研究区再生稻腋芽萌发期气象影响因素特征因子气候均值及气候倾向率

Table 3 Mean value and climatic tendency of factors characterizing meteorological influences during axillary bud germination of ratoon rice in the study area from 1981 to 2021

项目	平均气温	日平均气温≥32℃积温	日平均气温≤22℃积温	平均空气湿度	日平均相对湿度≤65%日数	日平均相对湿度≥90%日数	降水量	降水日数
气候均值	28.0℃	108.4 ℃·d	25.0 ℃·d	74.0%	7.9 d	3.4 d	139.4 mm	14.3 d
气候倾向率	0.33 ℃·(10 a)$^{-1}$ *	38.66 ℃·d·(10 a)$^{-1}$ **	1.38 ℃·d·(10 a)$^{-1}$	−1.97 %·(10 a)$^{-1}$ **	2.30 d·(10 a)$^{-1}$ ***	−0.28 d·(10 a)$^{-1}$	−0.66 mm·(10 a)$^{-1}$	−0.97 d·(10 a)$^{-1}$

注:*、**、*** 分别表示通过 0.1,0.05 和 0.01 的显著性水平检验。

在研究区再生稻腋芽萌发期气象因子空间分布上,平均气温表现出东部总体高于西部的特征,东部平均气温普遍超过 28℃的腋芽萌发适宜气温上限,西部除北碚、璧山、沙坪坝、江津外的大部地区在 28℃以下的适宜范围(图 5a)。平均空气湿度呈西高东低的空间分布特征,开州、云阳、奉节一带为低值区,湿度值在 72.5 %以下;西部偏西为高值区,湿度值在 75%以上,在腋芽萌发空气湿度的适宜区间内(图 5b)。致害高温积温大部地区在 125 ℃·d 以上,仅潼南、荣昌、大足、垫江、梁平等地在 100 ℃·d 以下(图 5c)。致害低湿日数总体呈东高西低的空间分布特征,西部偏西地区在 5 d 以下,中部的部分地区和东部超过 9 d (图 5d)。

2.3.2 气象适宜度变化

从 1981—2021 年研究区再生稻腋芽萌发期气象适宜度变化趋势(图 6,表 4)可以看到,近 41 年气温适宜度、空气湿度适宜度、降水适宜度、综合气象适宜度均表现为下降趋势,下降的速率分别为 0.05、0.05、0.01、0.04 (10 a)$^{-1}$。气温适宜度、空气湿度适宜度、综合气象适宜度的下降趋势均通过了 0.01 的显著性水平检验。近 41 年气温适宜度、空气湿度适宜度、降水适宜度、综合气象适宜度平均值

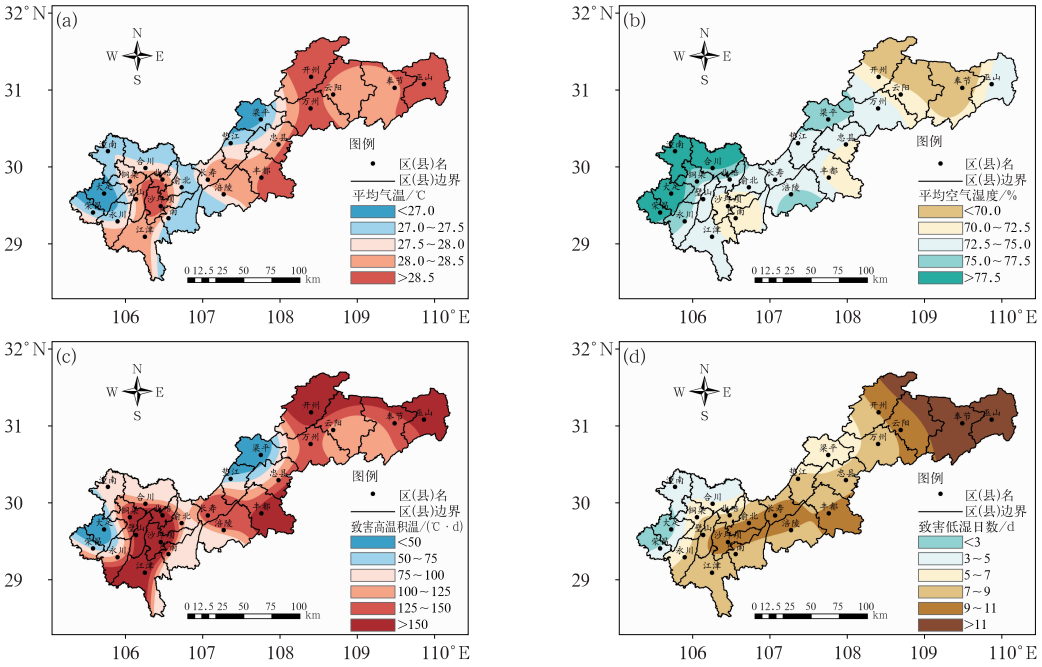


图 5　1981—2021 年研究区再生稻腋芽萌发期(a)平均气温,(b)平均空气湿度,(c)致害高温积温和(d)致害低湿日数空间分布

Fig. 5　Spatial distribution of (a) mean temperature, (b) average relative humidity, (c) cumulative temperature of harmful high temperature and (d) harmful low humidity days during axillary bud germination of ratoon rice in the study area from 1981 to 2021

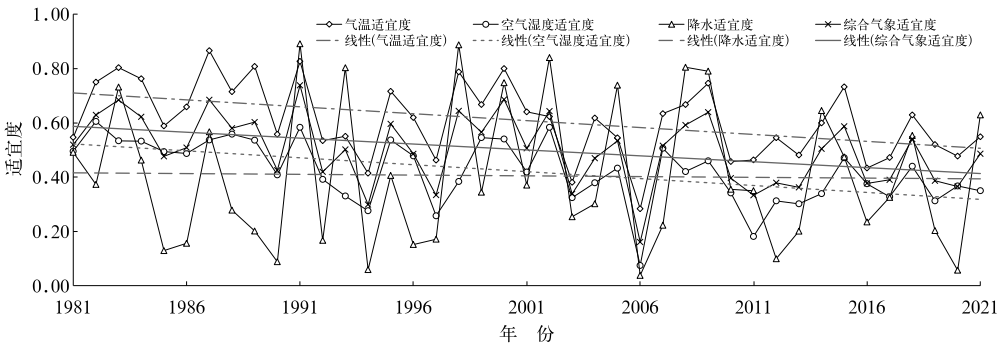


图 6　1981—2021 年研究区再生稻腋芽萌发期气象适宜度年际变化

Fig. 6　Interannual variation of meteorological suitability during axillary bud germination of ratoon rice in the study area from 1981 to 2021

表 4　1981—2021 年研究区再生稻腋芽萌发期气象适宜度及其气候倾向率

Table 4　Meteorological suitability and climatic tendency during axillary bud germination of ratoon rice in the study area from 1981 to 2021

适宜度	均值	最大值	最小值	气候倾向率/(10 a)$^{-1}$	相关系数
气温适宜度	0.61	0.87	0.28	−0.05	0.443***
空气湿度适宜度	0.42	0.60	0.07	−0.05	0.521***
降水适宜度	0.40	0.89	0.04	−0.01	0.027
综合气象适宜度	0.50	0.74	0.16	−0.04	0.404***

注:*** 表示通过 0.01 的显著性水平检验。

分别为 0.61、0.42、0.40、0.50。各项适宜度的最小值均出现在 2006 年，气温适宜度的最大值出现在 1987 年，空气湿度适宜度的最大值出现在 1982 年，降水适宜度和综合气象适宜度的最大值出现在 1991 年。

从气象适宜度年际变化空间分布来看（图 7），23 个区（县）气温适宜度、空气湿度适宜度、综合气象适宜度均表现为下降趋势，降水适宜度变化趋势的方向不一致。研究区西部气温适宜度下降的速率普遍在 -0.04 $(10\ a)^{-1}$ 以上，合川、铜梁、璧山、永川、江津等区（县）达 -0.06 $(10\ a)^{-1}$；中东部大部地区在 -0.04～-0.02 $(10\ a)^{-1}$（图 7a），共有 19 个区（县）气温适宜度的下降趋势通过显著性水平检验，其中 11 个达 0.01 显著水平检验。研究区西部偏东及丰都、开州、万州空气湿度适宜度的下降速率在 -0.08 $(10\ a)^{-1}$ 以上，中部普遍在 -0.08～-0.04 $(10\ a)^{-1}$，潼南、大足、云阳、奉节、巫山等区（县）下降速率小于 -0.04 $(10\ a)^{-1}$（图 7b），共有 17 个区（县）空气湿度适宜度下降趋势通过显著性水平检验，其中 15 个区（县）达 0.01 显著性水平检验。研究区中部与西部偏东为主的 10 个区（县）降水适宜度呈上升趋势，其余 13 个区（县）呈下降趋势（图 7c），各区（县）的变化趋势均未通过显著性水平检验。大部分区（县）综合气象适宜度下降速率在 -0.06～-0.04 $(10\ a)^{-1}$，大足、长寿、涪陵、奉节、巫山等区（县）在 -0.04～-0.02 $(10\ a)^{-1}$（图 7d），共有 17 个区（县）综合气象适宜度下降趋势通过显著性水平检验，其中 10 个区（县）达 0.01 显著性水平检验。

从气象适宜度均值（图 8）可见，研究区西部偏西的荣昌、大足与中部的梁平气温适宜度值最高，在 0.66 以上；西部的沙坪坝、中部的长寿以及东部的开州、巫山适宜度值最低，在 0.58 以下（图 8a）。西部偏西空气湿度适宜度值最高，在 0.48 以上；东部的奉节、巫山适宜度值最低，在 0.36 以下（图 8b）。西部偏西的荣昌、大足、铜梁降水适宜度值最高，在 0.48 以上；江津、巴南、渝北、丰都适宜度值低于 0.36（图 8c）。西部偏西的荣昌、大足与中部的梁平综合气象适宜度值最高，在 0.55 以上；沙坪坝、渝北、长寿、奉节、巫山适宜度值低于 0.47（图 8d）。

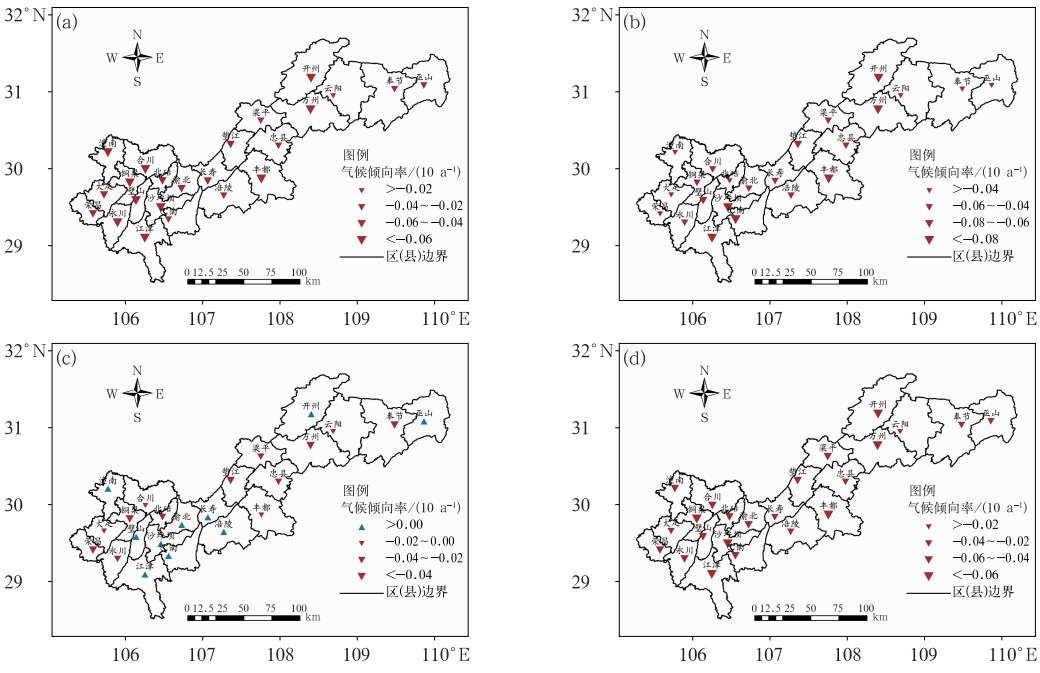


图 7 1981—2021 年研究区再生稻腋芽萌发期（a）气温适宜度，（b）空气湿度适宜度，（c）降水适宜度，（d）综合气象适宜度年际变化趋势空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of interannual variation trend of (a) temperature suitability, (b) air humidity suitability, (c) precipitation suitability and (d) synthetical meteorological suitability during axillary bud germination of ratoon rice in the study area from 1981 to 2021

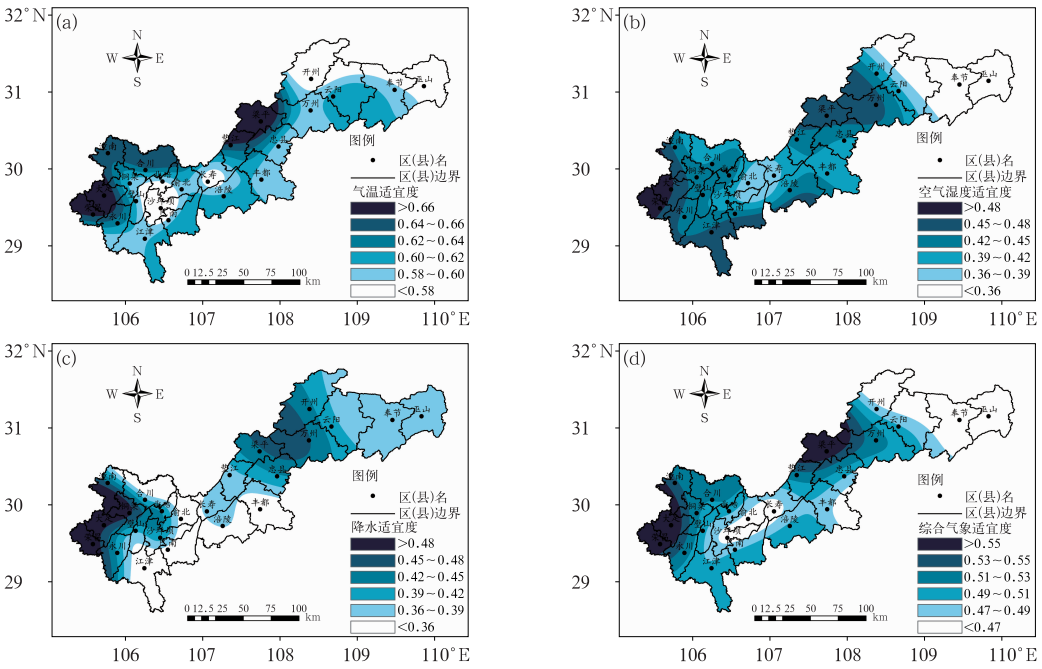


图 8　1981—2021 年研究区再生稻腋芽萌发期(a)气温适宜度,(b)空气湿度适宜度,(c)降水适宜度,(d)综合气象适宜度均值空间分布

Fig. 8　Spatial distribution of mean value of (a) temperature suitability, (b) air humidity suitability, (c) precipitation suitability and (d) synthetical meteorological suitability during axillary bud germination of ratoon rice in the study area from 1981 to 2021

3　结论与讨论

3.1　结　论

本文结合结构方程模型、隶属函数、层次分析等多种方法,在探明四川盆地东部再生稻高温伏旱区腋芽萌发气象影响因素的基础上,构建了再生稻腋芽萌发的气象适宜度模型。分析了气候变暖背景下,该区域腋芽萌发期气象适宜度的时空变化特征。主要研究结论如下:

(1)以气象-作物影响机理和专家经验知识为基础,采用结构方程模型,能有效探明并验证气象条件对作物的影响路径与影响强度,筛选出作物生长发育的气象影响因素。气温、空气湿度、降水是影响四川盆地东部再生稻高温伏旱区腋芽萌发的关键气象因素。结合结构方程模型、隶属函数、层次分析的气象适宜度模型构建方法,为难以直接客观量化的气象适宜度评价给出一种理想的解决方案。经检验,基于气温、空气湿度、降水的腋芽萌发气象适宜度模型对四川盆地东部再生稻高温伏旱区腋芽萌发期气象条件的优劣能做出较为准确的评价,具有较高的可靠性。

(2)1981—2021 年四川盆地东部再生稻高温伏旱区腋芽萌发期气温适宜度、空气湿度适宜度、综合气象适宜度均表现为下降趋势,总体上,西部地区适宜度的下降速率大于中东部地区。降水适宜度的变化趋势不显著。1981—2021 年再生稻腋芽萌发期气温的上升趋势和空气湿度的下降趋势显著,致害高温(日平均气温≥32℃)和致害低湿(日平均相对湿度≤65%)天气呈增长趋势。因此可以认为,气候变化导致该区域气候趋于干热,并造成再生稻腋芽萌发期气象适宜度总体呈现出下降趋势。

(3)1981—2021 年四川盆地东部再生稻高温伏旱区腋芽萌发期气温适宜度、空气湿度适宜度、降水适宜度、综合气象适宜度的高值区均位于西部偏西地区;东部地区为气温适宜度、空气湿度适宜度、综合气象适宜度的低值区。降水适宜度的低值区位于中部地区,西部、东部为高值区。

3.2　讨　论

(1)本文在构建结构方程理论模型时,提出了根

系活力、茎叶功能、腋芽生长发育3个潜在变量及其与再生稻腋芽萌发气象适宜度的假设关系。经验证性因子分析,“气象条件通过对再生稻根系活力的影响,引起再生稻腋芽萌发气象适宜度的变化”假设不成立。而事实上,高温干旱对根系的影响是客观存在的。究其原因,根系耐高温能力较强,36℃以下的高温对根系的影响小(周毓珩和马一凡,1991);气象条件对根系的影响机理复杂,再生稻生长发育主要依赖头季稻根系(易镇邪等,2005)还是再生根系(任万军等,2007)尚存争论。以上认知差别可能造成专家对高温干旱与再生稻根系活力的影响关系不能做出一致的评判。

(2)机械化收割使再生稻腋芽萌发期存在无水和蓄水两种田间状态,它们之间的小气候条件存在差异(何佳敏等,2020;林聃等,2021)。无水稻田温湿度接近气象观测环境,而蓄水稻田温湿度分别较无水稻田下降和升高。本研究在设定气象要素阈值时,对已有试验研究得到的阈值(方文等,1990a;1990b;熊洪和方文,1994)进行了调整,如将空气湿度适宜区间从[80,85]调整至[75,80]。检验证明,调整后的阈值较为合理。因此,在开展再生稻田蓄水后的气象服务时,也应根据理论经验或大田观测结果,对气象观测值或预报值进行小气候校准。

(3)随着水稻育种技术水平的提高,新品种不断涌现,四川、重庆地区适于蓄留再生稻的主导中稻品种较多(方立魁等,2016),品种间耐热耐旱特性差异较大。而再生稻气候生态方面的研究相较头季稻相当有限,难免出现因气象要素阈值界定不准确而导致的气象适宜度评价结果偏差。所以,要针对不同抗逆性品种建立更加精确的气象适宜度模型,还需要大量的基础试验和理论研究支撑。

(4)1981—2021年四川盆地东部再生稻高温伏旱区降水适宜度与气温适宜度、空气湿度适宜度的时空分布特征有较大的差异,降水适宜度年际变化趋势不显著。这可能与四川盆地东部夏季降水在不同年代并不一致的表现为减少趋势有关(郑然等,2022)。而降水适宜度在空间分布上和不同区域间变化趋势上呈现的特征,与“区域夏季西部降水强,总降水呈两高(西部、东部)一低(中部)分布”的研究结论较为吻合(方德贤等,2020)。

(5)目前水稻收割已普遍机械化,需提前排水露田,若再生稻腋芽萌发期间气温升高、空气湿度降低的气候趋势持续,将导致气象适宜度的下降,蓄留再生稻的气象风险将进一步增大。因此,四川盆地东部再生稻栽培应在适宜品种筛选、生育期调整、肥水管理等方面加强技术研发和集成,形成一套完整的、适应区域气候特点的再生稻优质高效技术体系,为再生稻产业的健康发展提供保障。

参考文献

代立芹,李春强,康西言,等,2012. 基于气候和土壤水分综合适宜度指数的冬小麦产量动态预报模型[J]. 中国农业气象,33(4):519-526. Dai L Q,Li C Q,Kang X Y,et al,2012. Dynamic forecast model of winter wheat yield based on climate and soil moisture suitability[J]. Chin J Agrometeorol,33(4):519-526(in Chinese).

方德贤,董新宁,邓承之,等,2020. 2008—2016年重庆地区降水时空分布特征[J]. 大气科学,44(2):327-340. Fang D X,Dong X N,Deng C Z,et al,2020. Temporal and spatial distribution of precipitation in Chongqing during 2008－2016[J]. Chin J Atmos Sci,44(2):327-340(in Chinese).

方立魁,丛云飞,刘丽,等,2016. 重庆市再生稻产区主导品种筛选[J]. 贵州农业科学,44(12):6-9. Fang L K,Cong Y F,Liu L,et al,2016. Screening of dominant rice cultivars in Chongqing ratoon rice production areas[J]. Guizhou Agric Sci,44(12):6-9(in Chinese).

方文,熊洪,姚文力,1990a. 提高再生稻产量的气象条件探讨[J]. 中国农业气象,11(1):35-38. Fang W,Xiong H,Yao W L,1990a. Discussion on meteorological conditions for increasing the yield of ratooning rice[J]. Chin J Agrometeorol,11(1):35-38(in Chinese).

方文,熊洪,姚文力,1990b. 再生稻腋芽萌发的生态条件研究[J]. 生态学杂志,9(5):4-9. Fang W,Xiong H,Yao W L,1990b. Ecological conditions for the sprouting of axillary bud of ratooning rice[J]. J Ecol,9(5):4-9(in Chinese).

高建文,王连喜,刘静,等,2018. 宁夏马铃薯主产区关键生育期气象适宜度评价[J]. 广东农业科学,45(9):9-13. Gao J W,Wang L X,Liu J,et al,2018. Evaluation of meteorological suitability for key growth stage of main potato producing areas in Ningxia[J]. Guangdong Agric Sci,45(9):9-13(in Chinese).

高阳华,陈志军,杨世琦,等,2011. 基于GIS的重庆市再生稻光热资源适宜性区划[J]. 长江流域资源与环境,20(6):672-676. Gao Y H,Chen Z J,Yang S Q,et al,2011. GIS-based sunshine and heat resources adaptive regionalization of ratoon rice in Chongqing Area[J]. Resour Environ Yangtze Basin,20(6):672-676(in Chinese).

郭文韬,1993. 略论中国再生稻的历史发展[J]. 中国农史,12(4):1-6. Guo W T,1993. On the historical development of ratooning rice in China[J]. Agric Hist China,12(4):1-6(in Chinese).

何佳敏,景元书,韩丽娟,等,2020. 喷灌与漫灌对稻田系统小气候影响分析[J]. 节水灌溉,(10):26-33,40. He J M,Jing Y S,Han L J,et al,2020. Effects of sprinkling irrigation and flooding irrigation on microclimate of rice field system[J]. Water Sav Irrig,

(10)：26-33，40(in Chinese).

黄新杰，2012. 再生稻根芽萌发对母体营养与激素的响应[D]. 长沙：湖南农业大学. Huang X J，2012. Response of regeneration of root and bud to maternal nutrition and hormone in ratooning rice[D]. Changsha：Hunan Agricultural University(in Chinese).

黄友钦，刘仕琳，王贵学，等，1995. 伏旱期土壤水分对再生稻的影响[J]. 西南农业大学学报，17(6)：481-485. Huang Y Q，Liu S L，Wang G X，et al，1995. An influence of different soil moistures on ratoon rice in hot summer days[J]. J Southwest Agric Univ，17(6)：481-485(in Chinese).

李德，杨霏云，孙义，等，2016. 基于云模型的淮北平原麦田喷药(肥)气象适宜度评价[J]. 生态学杂志，35(1)：259-268. Li D，Yang F Y，Sun Y，et al，2016. Meteorological suitability evaluation based on cloud model for spraying pesticide/fertilizer in wheat fields of Huaibei Plain[J]. Chin J Ecol，35(1)：259-268(in Chinese).

李凯伟，张继权，魏思成，等，2021. 东北春大豆精细化气候区划[J]. 应用气象学报，32(4)：408-420. Li K W，Zhang J Q，Wei S C，et al，2021. Refined climatic zoning of spring soybean in Northeast China[J]. J Appl Meteor Sci，32(4)：408-420(in Chinese).

林聃，孙汪亮，宣守丽，等，2021. 稻田与邻近气象站温湿度差异及其对水稻高温热害损失评估的影响[J]. 江苏农业科学，49(20)：248-252. Lin D，Sun W L，Xuan S L，et al，2021. Differences in temperature and humidity between paddy fields and nearly meteorological stations and their effects on heat injury loss assessment of rice[J]. Jiangsu Agric Sci，49(20)：248-252(in Chinese).

刘聪，李凯伟，张继权，等，2021. 基于气候适宜度的南方柑橘种植精细化气候区划[J]. 应用气象学报，32(4)：421-431. Liu C，Li K W，Zhang J Q，et al，2021. Refined climatic zoning for citrus cultivation in southern China based on climate suitability[J]. J Appl Meteor Sci，32(4)：421-431(in Chinese).

刘维，宋迎波，2021. 农业气象观测站冬小麦观测产量资料在产量预报业务中的应用研究[J]. 气象，47(12)：1546-1554. Liu W，Song Y B，2021. Operational application of observed yield of winter wheat from agrometeorological stations in yield prediction[J]. Meteor Mon，47(12)：1546-1554(in Chinese).

马青荣，刘荣花，胡程达，等，2020. 干旱及灌溉对冬小麦根系和产量的影响研究[J]. 气象，46(7)：971-981. Ma Q R，Liu R H，Hu C D，et al，2020. Impacts of drought and irrigation on root and yield of winter wheat[J]. Meteor Mon，46(7)：971-981(in Chinese).

马树庆，2012. 现代农用天气预报业务及其有关问题的探讨[J]. 中国农业气象，33(2)：278-282，288. Ma S Q，2012. Overview on modern agricultural weather forecast service and relative issues[J]. Chin J Agrometeorol，33(2)：278-282，288(in Chinese).

马树庆，陈剑，王琪，等，2013. 东北地区玉米整地、播种和收获气象适宜度评价模型[J]. 气象，39(6)：782-788. Ma S Q，Chen J，Wang Q，et al，2013. Evaluation model of meteorological suitability for maize soil preparation，sowing and harvesting in Northeast China[J]. Meteor Mon，39(6)：782-788(in Chinese).

穆佳，赵俊芳，郭建平，2014. 近 30 年东北春玉米发育期对气候变化的响应[J]. 应用气象学报，25(6)：680-689. Mu J，Zhao J F，Guo J P，2014. Response of spring maize growth stage to climate change in Northeast China over the past 30 years [J]. J Appl Meteor Sci，25(6)：680-689(in Chinese).

邱美娟，郭春明，王冬妮，等，2018. 基于气候适宜度指数的吉林省大豆单产动态预报研究[J]. 大豆科学，37(3)：445-451，457. Qiu M J，Guo C M，Wang D N，et al，2018. Study of soybean yield forecast in Jilin Province based on climate suitability index method [J]. Soybean Sci，37(3)：445-451，457(in Chinese).

屈振江，刘新生，王景红，等，2012. 陕西省林果业农用天气预报业务系统研究[J]. 气象，38(10)：1301-1306. Qu Z J，Liu X S，Wang J H，et al，2012. Study on the agro-weather forecast system for the forest fruits of Shaanxi Province[J]. Meteor Mon，38(10)：1301-1306(in Chinese).

冉茂林，熊洪，洪松，等，2002. 再生稻幼穗分化特性及发苗技术研究[J]. 西南农业学报，15(2)：28-33. Ran M L，Xiong H，Hong S，et al，2002. Study on the young ear differentiation character and the technology of sprouting for ratooning rice[J]. Southwest China J Agric Sci，15(2)：28-33(in Chinese).

任昌福，刘保国，1993. 再生稻培植技术[M]. 北京：农业出版社：104. Ren C F，Liu B G，1993. Cultivation Techniques of Ratooning Rice[M]. Beijing：Agricultural Press：104(in Chinese).

任万军，杨文钰，樊高琼，等，2007. 剪根稻苗移栽后叶鞘 3H-同化物的运转分配特点[J]. 核农学报，21(4)：401-403. Ren W J，Yang W Y，Fan G Q，et al，2007. Characteristics of 3H-assimilate translocation and distribution of root-pruned seedlings of rice after transplanting[J]. J Nucl Agric Sci，21(4)：401-403(in Chinese).

任义方，朱凤，高苹，等，2018. 稻曲病气象适宜度等级精细化预报技术[J]. 植物保护，44(5)：217-223. Ren Y F，Zhu F，Gao P，et al，2018. Fine forecast technique for meteorological suitability grade of rice false smut[J]. Plant Prot，44(5)：217-223(in Chinese).

王纯枝，霍治国，张蕾，等，2020. 北方地区小麦蚜虫气象适宜度预报模型构建[J]. 应用气象学报，31(3)：280-289. Wang C Z，Huo Z G，Zhang L，et al，2020. Construction of forecasting model of meteorological suitability for wheat aphids in the Northern China[J]. J Appl Meteor Sci，31(3)：280-289(in Chinese).

王展，刘荣花，薛明，等，2015. 基于气候适宜度的夏玉米发育期模拟模型[J]. 气象科学，35(1)：77-82. Wang Z，Liu R H，Xue M，et al，2015. Simulation model of summer maize phenology based on climatic suitability[J]. J Meteor Sci，35(1)：77-82(in Chinese).

王志春，2020. 内蒙古大田作物播种气象适宜度评价模型[J]. 北方农业学报，48(4)：121-125. Wang Z C，2020. Evaluation model of meteorological suitability for field crops sowing in Inner Mongolia[J]. J North Agric，48(4)：121-125(in Chinese).

魏瑞江，宋迎波，王鑫，2009. 基于气候适宜度的玉米产量动态预报方法[J]. 应用气象学报，20(5)：622-627. Wei R J，Song Y B，Wang X，2009. Method for dynamic forecast of corn yield based on climatic suitability[J]. J Appl Meteor Sci，20(5)：622-627(in Chinese).

肖玮钰，张丽文，刘志雄，等，2020. 湖北省夏玉米适播期分析[J]. 中国农业资源与区划，41(3)：36-45. Xiao W Y，Zhang L W，Liu Z X，et al，2020. Spatial analysis of optimum seeding time of summer maize in Hubei[J]. Chin J Agric Resour Reg Plann，41(3)：36-45(in Chinese).

谢华安，2005. 汕优63选育理论与实践[M]. 北京：中国农业出版社：92-107. Xie H A，2005. Theory and Practice of Shanyou 63 Breeding[M]. Beijing：China Agricultural Press：92-107(in Chinese).

熊洪，方文，1994. 再生稻腋芽萌发与产量形成的生态研究[J]. 生态学报，14(2)：161-167. Xiong H，Fang W，1994. Study on ecological conditions of axillary bud sprouting and yield of the ratooning rice[J]. Acta Ecol Sin，14(2)：161-167(in Chinese).

徐富贤，熊洪，张林，等，2015. 再生稻产量形成特点与关键调控技术研究进展[J]. 中国农业科学，48(9)：1702-1717. Xu F X，Xiong H，Zhang L，et al，2015. Progress in research of yield formation of ratooning rice and its high-yielding key regulation technologies[J]. Sci Agric Sin，48(9)：1702-1717(in Chinese).

严小龙，2007. 根系生物学原理与应用[M]. 北京：科学出版社：114. Yan X L，2007. Principle and Application of Root Biology[M]. Beijing：Science Press：114(in Chinese).

杨文静，赵建世，赵勇，等，2022. 基于结构方程模型的蒸散发归因分析[J]. 清华大学学报(自然科学版)，62(3)：581-588. Yang W J，Zhao J S，Zhao Y，et al，2022. Factors affecting evapotranspiration analyzed based on a structural equation model[J]. J Tsinghua Univ(Sci Technol)，62(3)：581-588(in Chinese).

姚雄，唐永群，文明，等，2013. 西南生态区再生稻研究进展及发展建议[J]. 南方农业学报，44(6)：1059-1064. Yao X，Tang Y Q，Wen M，et al，2013. Research progress and developing strategies of ratoon rice in southwest ecotope[J]. J South Agric，44(6)：1059-1064(in Chinese).

易镇邪，屠乃美，陈平平，2005. 留桩高度对再生稻根系的影响[J]. 杂交水稻，20(1)：56-59. Yi Z X，Tu N M，Chen P P，2005. Effects of stubble height on roots of ratooning rice[J]. Hybrid Rice，20(1)：56-59(in Chinese).

岳伟，陈曦，刘瑞娜，等，2021. 安徽省沿江地区油菜菌核病气象等级评估方法[J]. 气象，47(10)：1246-1254. Yue W，Chen X，Liu R N，et al，2021. Meteorological grade evaluation method of sclerotinia sclerotiorum for oilseed rape in the region along the Yangtze River in Anhui Province[J]. Meteor Mon，47(10)：1246-1254(in Chinese).

张洪，陈国惠，刘仕琳，等，1993. 四川省再生稻气候生态区划研究[J]. 西南农业大学学报，15(6)：483-488. Zhang H，Chen G H，Liu S L，et al，1993. Studies on eco-climatical regional assignment for ratooning rice cultivation in the Sichuan Basin[J]. J Southwest Agric Univ，15(6)：483-488(in Chinese).

张玉屏，李金才，黄义德，等，2001. 水分胁迫对水稻根系生长和部分生理特性的影响[J]. 安徽农业科学，29(1)：58-59. Zhang Y P，Li J C，Huang Y D，et al，2001. Effect of water stress on the growth and some physiological characteristics of root system in rice[J]. J Anhui Agric Sci，29(1)：58-59(in Chinese).

赵玉兵，李武龙，陈利英，等，2022. 河北省太行山区核桃萌芽-幼果期温度适宜度模型构建及应用[J]. 气象科技，50(1)：155-160. Zhao Y B，Li W L，Chen L Y，et al，2022. Establishment and application of temperature suitability model of walnut from germination stage to young fruit stage in Taihang Mountain Area of Hebei Province[J]. Meteor Sci Technol，50(1)：155-160(in Chinese).

郑然，陈丽娟，李维京，等，2022. 四川盆地夏季降水年际变化的主模态分析[J]. 大气科学，46(6)：1454-1468. Zheng R，Chen L J，Li W J，et al，2022. Interannual variation of the leading modes of summertime precipitation in the Sichuan Basin[J]. Chin J Atmos Sci，46(6)：1454-1468(in Chinese).

周毓珩，马一凡，1991. 水稻栽培[M]. 沈阳：辽宁科学技术出版社：15-20. Zhou Y H，Ma Y F，1991. Rice Cultivation[M]. Shenyang：Liaoning Science and Technology Press：15-20(in Chinese).

Saaty T L，2001. Deriving the AHP 1-9 scale from first principles[C]. Bern：ISAHP 2001 Proceedings.

（本文责编：何晓欢）