

武强, 罗孳孳, 郭安红, 等. 基于露点法空气相对湿度估算的马铃薯晚疫病始发期预报[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(8): 1658-1667.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2023.08.005

## 基于露点法空气相对湿度估算的马铃薯晚疫病始发期预报

武强<sup>1</sup>, 罗孳孳<sup>1</sup>, 郭安红<sup>2</sup>, 阳园燕<sup>1</sup>, 刘晓菱<sup>3</sup>, 张德军<sup>1</sup>, 韩旭<sup>4</sup>

(1. 中国气象局气候资源经济转化重点开放实验室, 重庆市气象科学研究所, 重庆 401147; 2. 国家气象中心, 北京 100081; 3. 重庆市巫溪县农业技术推广中心, 重庆 405800; 4. 重庆市江津现代农业气象试验站, 重庆 402260)

**摘要:** 为解决山地环境下马铃薯晚疫病等农业病虫害预报应用场景对近地空气相对湿度数据资料的切实需求, 本研究以连续性空气温度、湿度数据集为基础样本, 分析不同环境条件下露点法估算空气相对湿度的准确性, 讨论以环境温湿度条件为协同参照指标的露点法估算空气相对湿度的质量控制有效性。以马铃薯晚疫病始发期预报为例, 论证基于露点法空气相对湿度估算的马铃薯晚疫病始发期预报效果。结果表明, 露点法空气相对湿度估算值与实测值一致性较好, 决定系数、平均绝对误差、相对误差、一致性系数分别为 0.44、8.07%、0.11%、0.97, 但在实际环境空气相对湿度较小的情况下, 存在明显的高估。不同环境条件对露点法估算空气相对湿度准确性的影响不同, 估算准确性随环境湿度增大而提高, 实际空气相对湿度为 60% 以上时, 准确性较高; 估算准确性随环境温度的变化表现为环境温度在 10℃ 以上时, 准确性较高。应用露点法估算的空气相对湿度对马铃薯晚疫病始发期进行预报, 预报漏报率普遍在 30.0% 以下, 最低为 16.7%。结合作物病害发生与防控的实际情况, 露点法估算空气相对湿度在马铃薯晚疫病始发期预报中表现出良好的应用效果。

**关键词:** 露点法; 空气相对湿度; 马铃薯晚疫病; 始发期; 预报

**中图分类号:** S431.13 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2023)08-1658-10

## Prediction of potato late blight beginning period based on air relative humidity estimation by dew point method

WU Qiang<sup>1</sup>, LUO Zi-zi<sup>1</sup>, GUO An-hong<sup>2</sup>, YANG Yuan-yan<sup>1</sup>, LIU Xiao-ling<sup>3</sup>, ZHANG De-jun<sup>1</sup>, HAN Xu<sup>4</sup>

(1. China Meteorological Administration Key Open Laboratory of Transforming Climate Resources to Economy, Chongqing Institute of Meteorological Sciences, Chongqing 401147, China; 2. National Meteorological Center, Beijing 100081, China; 3. Agricultural Technology Promotion Center of Wuxi County in Chongqing City, Chongqing 405800, China; 4. Jiangjin Modern Agrometeorology Test Station of Chongqing City, Chongqing 402260, China)

**收稿日期:** 2022-11-03

**基金项目:** 中国气象局创新发展专项(CXFZ2021J073, CXFZ2021J068); 国家自然科学基金面上项目(42175193); 重庆市自然科学基金面上项目(2023NSCQ-MSX4516); 重庆市气象部门业务技术攻关项目(YWJSGG-202213)

**作者简介:** 武强(1989-), 男, 山西河曲人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为农田小气候与气象仪器。(E-mail) theodorus@yeah.net

**通讯作者:** 罗孳孳, (E-mail) showerluo@163.com; 郭安红, (E-mail) guoanh@cma.gov.cn

**Abstract:** To solve the practical demand for near-ground air relative humidity data in application scenarios of agricultural diseases and pests forecast such as potato late blight prediction in mountainous environment, in this study, the accuracy of air relative humidity estimated by dew point method under different environmental conditions was analyzed based on basic samples such as continuous air temperature and humidity data set. The quality control effectiveness of air relative humidity estimated by dew-point

method with environmental temperature and humidity conditions as co-reference indices was discussed. Taking the prediction of beginning date of potato late blight as an example, the prediction effect of the beginning date of potato late blight based on air relative humidity estimated by dew point method was demonstrated. The results showed that, the consistency between estimated air relative humidity by dew point method and measured value was good, the determination coefficient, mean absolute error, relative error and consistency index were 0.44, 8.07%, 0.11% and 0.97, respectively. The estimated values were obviously overestimated under the condition of low air relative humidity in actual environment. The influence of different environmental conditions on the accuracy of air relative humidity estimated by dew point method was different, and the estimation accuracy enhanced as the environmental humidity increased. The estimation accuracy was high when the practical air relative humidity was above 60%, or the environmental temperature was above 10 °C. The prediction omission rate of the beginning date of potato late blight based on air relative humidity estimated by dew point method was generally below 30.0%, with the minimum value 16.7%. In comprehensive consideration of the actual occurrence and prevention of crop diseases, the dew point method in estimating air relative humidity shows good application effect on the prediction of the beginning date of potato late blight.

**Key words:** dew point method; air relative humidity; potato late blight; beginning time; prediction

马铃薯晚疫病是由致病疫霉引起的典型气候流行性病害<sup>[1]</sup>,是马铃薯生产中最主要的病害类型,可导致马铃薯减产10%~20%,严重时减产50%以上,甚至绝收<sup>[2-3]</sup>,在世界各马铃薯主产区均有发生和流行<sup>[4]</sup>。马铃薯晚疫病属于喜低温潮湿型病害<sup>[5]</sup>,马铃薯生长环境空气湿度满足晚疫病病菌孢子侵染条件的时段称作湿润期,晚疫病潜在的病菌侵染程度和湿润期持续时间及湿润期温度条件有关,在一定温度范围内,湿润期时间越长,温度越高,马铃薯晚疫病的侵染程度越重。

随着气象观测网络的布局发展,近地气温、降水量的观测覆盖面不断扩大,而近地空气相对湿度的观测却明显不足。近地空气相对湿度的模拟在农作物生长发育<sup>[6-7]</sup>、品质形成<sup>[8]</sup>、病虫害发生发展<sup>[9-11]</sup>等有关科学研究与农业服务中具有切实需求,常用的空气湿度数值模拟方法在天气过程分析、水循环研究等方面有广泛应用<sup>[12-13]</sup>,对大尺度水汽输送过程有良好的模拟性能<sup>[14-15]</sup>,但在农业病虫害预报等近地面小尺度湿度应用场景下,往往分辨率不足,难以满足实际需求。

露点法是在缺乏空气湿度观测资料的情况下,利用日最低空气温度近似于露点温度的特性,将实际水汽压估算为日最低气温下饱和水汽压的空气湿度的估算方法<sup>[16-17]</sup>。基本原理是在有足够水汽的闭合系统,且昼夜水汽变化很小的情况下,由于近地表大气辐射冷却,夜间气温与露点温度之间差距逐渐减小,气温降至露点温度,空气达到饱和,如气温继续下降,大气中水分则发生冷

凝<sup>[18]</sup>,进一步减缓气温下降,使露点温度与夜间最低气温趋于平衡<sup>[19]</sup>,且在一天中保持相对稳定<sup>[20-21]</sup>。但研究结果显示,在干燥环境条件下,日最低气温可能较露点温度偏高,使得露点法估算空气湿度的准确性降低<sup>[18,22]</sup>。实际应用中,需进一步细化明确干燥环境条件对露点法估算空气湿度准确性的影响,论证露点法估算空气湿度在不同干湿条件的适用性。

本研究拟以梯度气象站观测得到的连续性空气湿度数据集为基础样本,研究露点法估算空气相对湿度的可行性,分析不同环境条件下露点法估算空气相对湿度的准确性,讨论以环境温湿度条件为协同参照指标的露点法估算空气相对湿度的质量控制有效性。进而基于露点法对空气相对湿度的估算结果开展马铃薯晚疫病始发期预报效果研究。本研究旨在明确露点法估算空气相对湿度的适用环境条件,通过间接估算实现对晚疫病等高湿型农业病虫害发生的预报预警,并为用露点法估算空气相对湿度在其他应用场景的适用条件判定等提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域与数据来源

研究区域为大巴山地区代表性区域重庆市巫溪县(108°44'~109°58'E,31°14'~31°44'N),地处大巴山东段南麓,重庆东北部,境内最低海拔1.39 hm,最高海拔27.97 hm,主要为喀斯特作用及流水作用形成的中低海拔中小起伏山地地形<sup>[23-24]</sup>。

气象数据资料来源于巫溪县东部沿山南坡建设的 9 套自动气象站组成的梯度站,分布于沿山麓至接近山顶的 4~22 hm 处,以及 5 套分布于不同海拔的马铃薯田间小气候站,位置分布如图 1、表 1 所示。空气温度、空气湿度随海拔增加呈递进变化,梯度站可为本研究提供连续性良好的空气温度、湿度数据集,因此将梯度站作为研究样本的基础站点,所采集数据用于开展不同气象条件下露点法估算空气相对湿度的规律性与适用性研究。5 套马铃薯田间小气候站作为应用试验验证站点,所采集数据作为空气湿度推算方法在马铃薯晚疫病始发期预报的应用有效性验证数据集,其中,验证站 B1 所处海拔低于梯度气象站最低海拔 409 m,沿用 400~600 m 气温直减率近似处理。所有气象站观测要素均包含距

地表 1.5 m 处平均空气温度、最高空气温度、最低空气温度、空气相对湿度,数据采集及存储时间间隔为 1 h。计算得到日平均气温 ( $T_{avg}$ , °C)、日最高气温 ( $T_{max}$ , °C)、日最低气温 ( $T_{min}$ , °C)、日平均空气相对湿度 ( $RH$ , % )。

由于山地环境下,不同海拔热量条件的差异,马铃薯种植出苗时间从 2 月上旬至下旬不等,收获时间从 6 月上旬至下旬不等。为统一分析数据量标准,基础数据采集时间为 2019 年 12 月-2021 年 11 月;验证数据集选择 2021 年马铃薯出苗到收获的生长周期(2-6 月);马铃薯晚疫病始发期预报由实际观测的马铃薯出苗开始计算,至收获期停止。

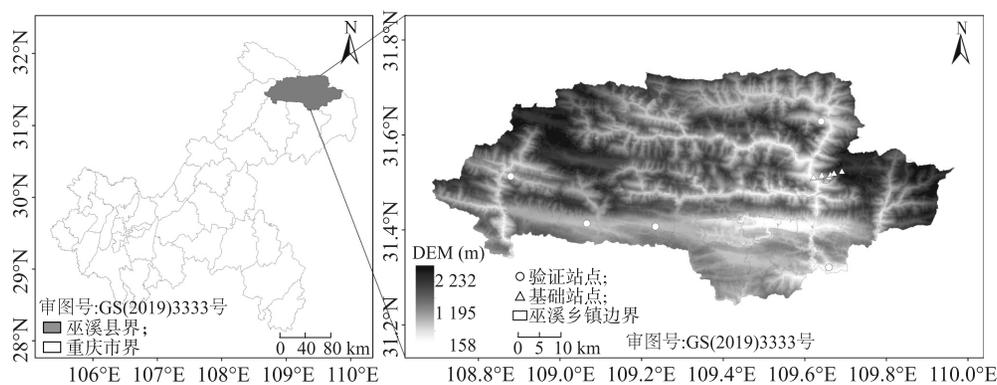


图 1 研究区域及气象站点分布  
Fig.1 Study area and distribution of meteorological stations

表 1 气象站点地理位置

Table 1 Geographical distribution of meteorological stations

数据集	站号	经度	纬度	海拔(m)	数据集	站号	经度	纬度	海拔(m)
研究样本基础站点	A1	109°37'45"E	31°30'3"N	409	应用试验验证站点	B1	110°6'18"E	31°31'0"N	173
	A2	109°38'48"E	31°30'5"N	619		B2	109°39'2"E	31°37'5"N	633
	A3	109°38'57"E	31°30'18"N	840		B3	109°4'9"E	31°24'36"N	740
	A4	109°39'38"E	31°29'39"N	1 065		B4	109°14'17"E	31°24'6"N	831
	A5	109°39'48"E	31°29'53"N	1 222		B5	108°53'0"E	31°30'40"N	979
	A6	109°40'2"E	31°30'3"N	1 394					
	A7	109°40'15"E	31°30'20"N	1 670					
	A8	109°40'46"E	31°30'31"N	1 931					
	A9	109°41'57"E	31°30'43"N	2 181					

### 1.2 露点法估算空气相对湿度

常用的空气湿度度量方式有水汽压( $e$ )、露点

温度( $T_{dew}$ )和空气相对湿度( $RH$ )。 $e$ 是空气中水汽所产生的分压强,空气中水汽达到饱和时的水汽压

强称为饱和水汽压( $e_s$ ),超过这一限度,水汽将开始凝结。饱和水汽压大小与温度直接相关,Magnus 饱和水汽压计算公式:

$$e_s = e_0 e^{\frac{at}{b+t}} \quad (1)$$

式中: $e_s$ 为温度为 $t$ 时的饱和水汽压, $e_0$ 为 $0^\circ\text{C}$ 时的饱和水汽压, $e$ 为自然常数, $a$ 、 $b$ 为常数,水面情况下, $e_0=6.108\text{ hPa}$ , $a=17.27$ , $b=273.3$ 。

$RH$ 是空气中实际水汽压( $e_a$ )与当时气温下 $e_s$ 的百分比,关系式为:

$$RH = \frac{e_a}{e_s} \times 100\% \quad (2)$$

露点法估算空气湿度的理论基础是,在有足够水汽的闭合系统,且昼夜水汽变化很小时, $T_{\min}$ 下的饱和水汽压近似为 $T_{\text{avg}}$ 下的实际水汽压,即:

$$e_{aT_{\text{avg}}} \approx e_{sT_{\min}} \quad (3)$$

因此,在获取到 $T_{\text{avg}}$ 与 $T_{\min}$ 观测资料的情况下,利用 $T_{\min}$ 与 $T_{\text{dew}}$ 近似相等的特性,基于公式(1)、公式(2)、公式(3)便可对当日空气相对湿度进行估算。

### 1.3 马铃薯晚疫病始发期预报

根据比利时 CARAH 马铃薯晚疫病监测预警模型,对马铃薯田间空气相对湿度大于 90%的时间段进行标记,定义为马铃薯晚疫病发生的湿润期,根据湿润期持续时长以及湿润期内平均气温,确定是否达到马铃薯晚疫病发生条件<sup>[25]</sup>。达到马铃薯晚疫病发生条件的日期确定为 1 次马铃薯晚疫病发生的始发期。达到晚疫病始发期,且植株发生病菌侵染以后,病害发展不再依赖环境湿度条件,因为此时叶片等植物组织内水分条件可视为饱和,仅依赖温度条件即可在植物组织内部完成病菌代次的更迭发展,故在此仅讨论病害的始发期预报情况。

### 1.4 评价指标

1.4.1 空气湿度估算质量评价 空气湿度估算效果的质量评价指标包括决定系数( $R^2$ )、平均绝对误差(MAE)、相对误差(BIAS)、一致性系数(CI)<sup>[26]</sup>。

$$CI = 1 - \frac{\sum (F_i - O_i)^2}{\sum (|F_i - O| + |O_i - O|)^2} \quad (4)$$

式中: $F_i$ 为空气湿度估算值; $O_i$ 为空气湿度实际值; $O$ 为空气湿度实际值的平均值。

1.4.2 马铃薯晚疫病始发期预报质量评价 以马铃薯种植田间实测空气相对湿度为标准,评价以田间空气湿度监测数据基于露点法估算得到的空气相

对湿度准确性以及马铃薯晚疫病始发期预报质量。预报晚疫病始发期与实测晚疫病始发期日期重合,定义为命中;预报达到晚疫病始发期,但实测并未达到,定义为空报;实测达到晚疫病始发期,但预报并未达到,定义为漏报。

以漏报率( $PO_k$ )、空报率( $FAR_k$ )评价晚疫病始发期预报质量:

$$PO_k = \frac{NC_k}{NA_k + NC_k} \times 100\% \quad (5)$$

$$FAR_k = \frac{NB_k}{NA_k + NB_k} \times 100\% \quad (6)$$

式中, $NA_k$ 为预报命中次数, $NB_k$ 为空报次数, $NC_k$ 为漏报次数。

## 2 结果与分析

### 2.1 露点法估算空气相对湿度的可行性

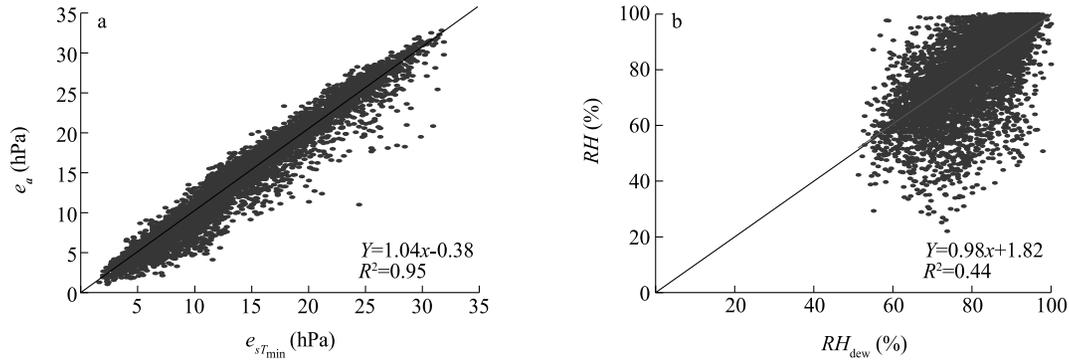
以 2019 年 12 月-2021 年 11 月的日平均空气温度、日最低空气温度、日平均空气相对湿度为数据集,采用日最低空气温度下的饱和水汽压( $e_{sT_{\min}}$ )对实际水汽压进行近似估算,结果见图 2a, $e_{sT_{\min}}$ 与 $e_a$ 拟合得到线性方程 $Y=1.04x-0.38$ , $R^2$ 为 0.95,拟合直线接近 1:1 线,计算得到 MAE、BIAS、CI 分别为 1.18 hPa、1.06%、0.99。可见 $e_{sT_{\min}}$ 对 $e_a$ 有较好的估算效果,总体偏差较小。进一步采用露点法得到的日平均空气相对湿度( $RH_{\text{dew}}$ )对日平均空气相对湿度实测值进行估算,结果如图 2b 所示, $RH_{\text{dew}}$ 与 $RH$ 拟合得到线性方程 $Y=0.98x+1.82$ , $R^2$ 为 0.44,拟合直线接近 1:1 线,计算得到 MAE、BIAS、CI 分别为 8.07%、0.11%、0.97。可见露点法估算空气相对湿度具有可行性,但由图 2b 可见,在 $RH$ 较小的情况下,存在 $RH_{\text{dew}}$ 被明显高估的情况。

### 2.2 不同环境条件下露点法估算空气相对湿度的准确性

为明确不同环境条件下露点法估算空气相对湿度的准确性,对 2019 年 12 月-2021 年 11 月的空气温湿度数据取整统计出现日次,分析研究区域样本数据分布规律(图 3)。基础数据集有效数据 6 290 d,其中, $RH$ 小于 40%的情况均不足 10 d,随着 $RH$ 增大,数据日次数增多, $RH$ 为 80%~95%的数据日次数达到 150~200 d, $RH$ 为 99%左右的数据达 408 d。说明研究区域环境条件以湿润空气为主,空气干燥

的条件出现频次较低(图 3a)。 $T_{\text{avg}}$  为 0 °C 以下时,数据日次数均不足 100 d,其中,−5 °C 以下数据不足 30 d, $T_{\text{avg}}$  最低值为−11 °C,仅出现 1 d。随着  $T_{\text{avg}}$  逐

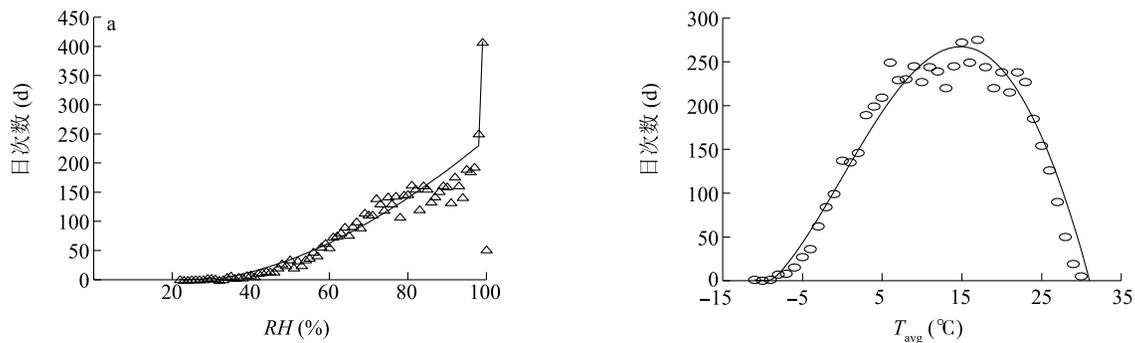
渐增大,数据日次数呈现单峰变化趋势, $T_{\text{avg}}$  为 5~21 °C 时,数据日次数均在 200 d 以上,17 °C 左右达 275 d。 $T_{\text{avg}}$  最大值为 30 °C,仅出现 5 d(图 3b)。



a: 露点法估算水汽压与实际水汽压的比较;b: 露点法估算空气相对湿度与实际空气相对湿度的比较; $e_{sT_{\text{min}}}$ 、 $e_a$ 、 $RH_{\text{dew}}$ 、 $RH$  分别为日最低空气温度下的饱和水汽压、实际水汽压、露点法估算的日平均空气相对湿度、日平均空气相对湿度实测值。

图 2 露点法估算水汽压与空气相对湿度效果

Fig.2 Effect of water vapor pressure and air relative humidity estimated by dew point method



a: 基础数据集日平均空气相对湿度取整统计出现日次数;b: 基础数据集日平均空气温度取整统计出现日次数; $RH$ 、 $T_{\text{avg}}$  分别为日平均空气相对湿度、日平均空气温度。

图 3 基础数据集温湿条件分布

Fig.3 Distribution of temperature and humidity conditions in the basic data set

将基础数据集分别按照环境条件  $RH$  与  $T_{\text{avg}}$  数值升序排列,按照约 105 为步长进行数据组分类,计算分类后数据组的平均空气相对湿度( $RH'$ )或平均空气温度( $T'_{\text{avg}}$ ),以及各数据组  $RH_{\text{dew}}$  与  $RH$  的  $MAE$ 、 $BIAS$ 、 $CI$ 。

2.2.1 环境空气湿度对露点法估算空气相对湿度准确性的影响 以数据组平均空气相对湿度为标准,分析不同空气湿度下露点法估算空气相对湿度( $RH'_{\text{dew}}$ )的准确性。如图 4a 所示, $RH'_{\text{dew}}$  与  $RH'$  的  $MAE$  随着  $RH'$  的增大呈先迅速减小,而后趋于平稳,在空气较为干燥, $RH'$  为 40%~60% 的条件下, $MAE$  由约 30% 下降至 10%;在空气较为湿润, $RH'$  为

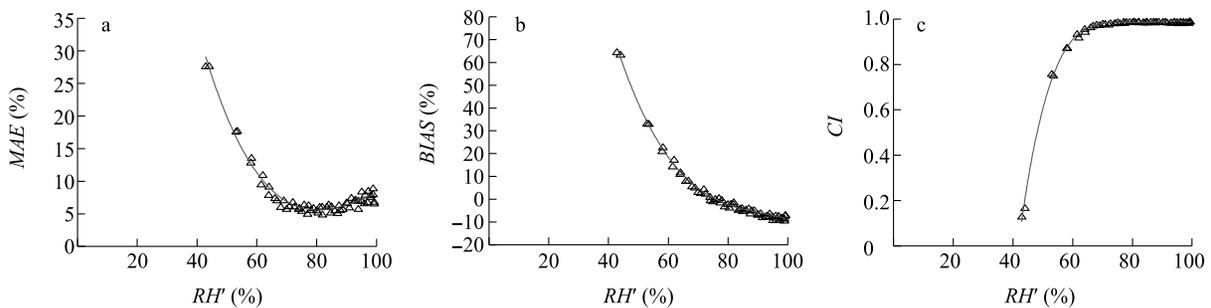
70%~90% 的条件下, $MAE$  最小,维持在 5%~6%;在  $RH' > 90%$  的偏湿环境条件下,随着  $RH'$  增大, $MAE$  略增大至 8%~9%。如图 4b 所示, $RH'_{\text{dew}}$  与  $RH'$  的  $BIAS$  随  $RH'$  的增大呈减小趋势,在  $RH'$  为 40% 的干燥环境下, $BIAS$  可以达到 60% 以上的高值;随着  $RH'$  的增大, $BIAS$  迅速减小,至  $RH'$  达到 65% 时, $BIAS$  降低至 10% 以下;在  $RH'$  为 75% 左右时, $BIAS$  的绝对值最小,在 0 左右;随着  $RH'$  继续增大, $BIAS$  表现为负值,且绝对值略增大,即  $RH'_{\text{dew}}$  对  $RH'$  的估算结果偏小,至空气湿度趋于饱和时, $BIAS$  接近−9%。如图 4c 所示, $CI$  随着  $RH'$  增大而增大,在空气干燥环境条件下, $CI$  处于较低水平;在  $RH'$  达到 60% 以

上时,  $CI$  即表现为接近 0.90 的较高水平。

2.2.2 环境空气温度对露点法估算空气相对湿度准确性的影响 以数据组平均空气温度为标准, 分析不同空气温度下露点法估算空气相对湿度的准确性。如图 5a 所示,  $RH'_{dew}$  与  $RH'$  的  $MAE$  随  $T'_{avg}$  增大而减小, 当  $T'_{avg} < 0$  °C 时,  $MAE$  较大, 在 10% 以上;  $T'_{avg}$  增大到 20~27 °C 时,  $MAE$  降低至 3%~5%。如图 5b 所示,  $RH'_{dew}$  与  $RH'$  的  $BIAS$  随  $T'_{avg}$  增大的变化情况较为复杂, 当  $T'_{avg} < 0$  °C 时,  $BIAS$  为 -5%~6%, 绝对值较大, 且变化较为剧烈, 即既可能出现  $RH'_{dew}$  对  $RH'$  低估, 也可能出现高估;  $T'_{avg}$  为 0~10 °C 时,  $BIAS$  普遍表现为正值, 且在一定范围内  $BIAS$  随  $T'_{avg}$  的增大而减小至趋于 0, 即  $RH'_{dew}$  对  $RH'$  普遍高估, 但随环境空气温度升高, 准确性增加;  $T'_{avg}$  为 12~27 °C 时,  $BIAS$  普遍为负

值, 且  $BIAS$  的绝对值随  $T'_{avg}$  的增大先增大后减小, 即  $RH'_{dew}$  对  $RH'$  表现为低估, 但  $BIAS$  绝对值总体低于  $T'_{avg}$  为 0~10 °C 的情况, 且变化趋势逐渐收敛。如图 5c 所示,  $CI$  在不同  $T'_{avg}$  条件下均维持在较高水平,  $T'_{avg} < 0$  °C 时,  $CI$  变化趋势不明显;  $T'_{avg}$  为 0 °C 以上时,  $CI$  随  $T'_{avg}$  增大而增大, 10 °C 以上时,  $CI$  达到 0.98 以上的较高水平。

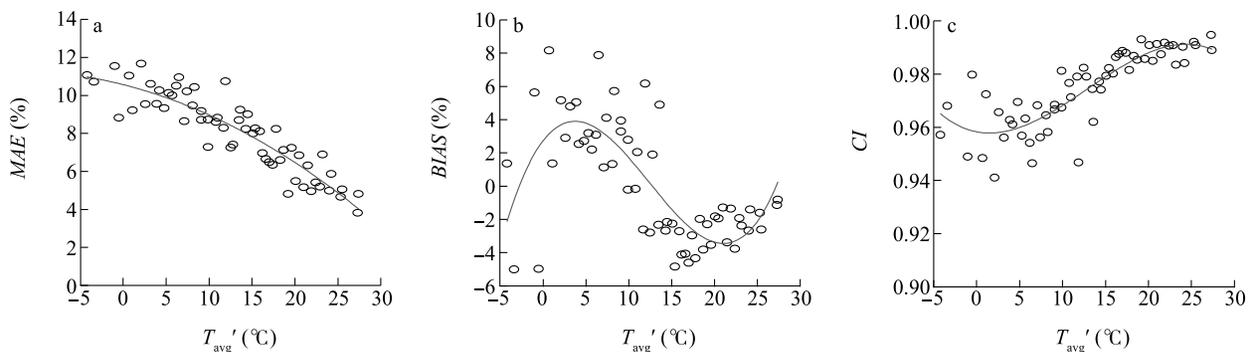
2.2.3 控制环境温湿度条件的露点法估算空气相对湿度的效果 环境空气温度、湿度与露点法估算空气相对湿度的准确性表现出明显的相关关系, 因此在利用露点法进行空气相对湿度估算的实际应用中, 在空气温度、湿度适宜的环境条件下, 基于露点法估算空气相对湿度将具有更强的适用性。



a: 不同环境空气湿度下露点法估算空气相对湿度的平均绝对误差; b: 不同环境空气湿度下露点法估算空气相对湿度的相对误差; c: 不同环境空气湿度下露点法估算空气相对湿度的一致性系数;  $RH'$  为基础数据集按照约 105 步长进行数据组分类后每个数据组的平均空气相对湿度。  $MAE$ : 平均绝对误差;  $BIAS$ : 相对误差;  $CI$ : 一致性系数。

图 4 不同环境空气湿度下露点法估算空气相对湿度的准确性

Fig.4 Accuracy of air relative humidity estimated by dew point method with different air humidities



a: 不同环境空气温度下露点法估算空气相对湿度的平均绝对误差; b: 不同环境空气温度下露点法估算空气相对湿度的相对误差; c: 不同环境空气温度下露点法估算空气相对湿度的一致性系数;  $T'_{avg}$  为基础数据集按照约 105 步长进行数据组分类后每个数据组的平均空气温度。  $MAE$ 、 $BIAS$ 、 $CI$  见图 4 注。

图 5 不同环境空气温度下露点法估算空气相对湿度的准确性

Fig.5 Accuracy of air relative humidity estimated by dew point method with different environmental air temperatures

基础数据集分别按照环境条件  $RH$  与  $T_{avg}$  数值升序排列,由于在  $RH$  较低或  $T_{avg}$  较低条件下,露点法估算空气相对湿度准确性低,将数据集  $RH$  与  $T_{avg}$  数值升序的前 25% 数据剔除,重新进行估算准确性分析。以  $RH$  为数据筛选依据, $RH$  数值升序前 25% 数据量的划分界限为  $RH=71\%$ ,分析环境条件  $RH \geq 71\%$  的数据集, $RH_{dew}$  与  $RH$  的  $R^2$ 、 $MAE$ 、 $BIAS$ 、 $CI$  分别为 0.42、6.56%、4.62%、0.99。以  $T_{avg}$  为数据筛选依据, $T_{avg}$  数值升序前 25% 数据量的划分界限为  $T=7\text{ }^\circ\text{C}$ ,分析环境条件  $T_{avg} \geq 7\text{ }^\circ\text{C}$  的数据集, $RH_{dew}$  与  $RH$  的  $R^2$ 、 $MAE$ 、 $BIAS$ 、 $CI$  分别为 0.50、7.25%、1.12%、0.98。相较于基础数据集整体分析结果,以空气湿度条件作为协同参照指标对露点法估算空气相对湿度质量控制后仅  $MAE$  有所减小, $CI$  略增加,其余评价参数所指示的估算准确性反而降低;以温度作为协同参照指标进行质量控制后除  $BIAS$  略增大以外,其余评价参数所指示的估算准确性均有提升。在实际应用中,结合环境温湿度条件变化的连续性与可预测性,以温度作为协同参照指标对露点法估算空气相对湿度的质量控制以及应用场景适宜性判定具有指示意义。

### 2.3 基于露点法空气相对湿度估算的马铃薯晚疫病始发期预报效果

以不同海拔马铃薯田块 B1~B5 为应用验证试验点,分析马铃薯生育期露点法估算空气相对湿度的准确性以及基于露点法估算空气相对湿度在马铃薯晚疫病始发期预报的适用性,结果见图 6,统计的实际病害始发期日次与预报质量见表 2。可见,2~6 月马铃薯生育期内,露点法得到的日平均空气相对湿度与田间实测空气相对湿度表现出良好的一致性,但随着马铃薯种植区海拔升高,生育期平均气温降低,露点法估算空气相对湿度的准确性有所降低,如 B1(海拔 173 m),研究时段平均气温为  $18.7\text{ }^\circ\text{C}$ , $RH_{dew}$  与  $RH$  拟合线性方程为  $Y=0.80x+19.17$ , $R^2=0.86$ ,一致性表现最好;B5(海拔 979 m),研究时段平均气温为  $15.2\text{ }^\circ\text{C}$ , $RH_{dew}$  与  $RH$  拟合线性方程为  $Y=0.66x+27.37$ , $R^2=0.51$ ,一致性略差。

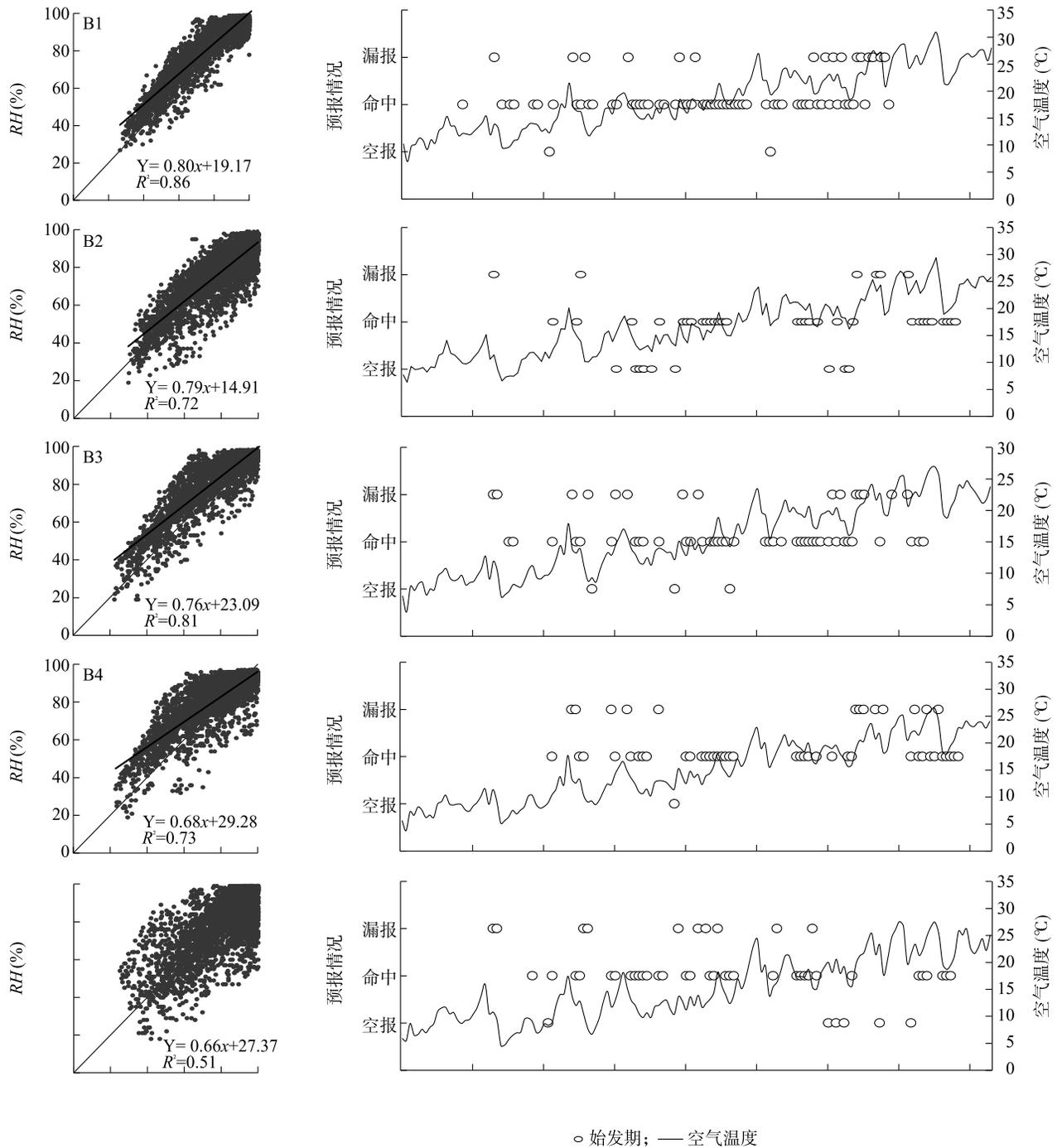
马铃薯晚疫病的始发期由环境空气温湿度条件协同作用决定,不同海拔马铃薯田块(B1~B5)  $T_{avg}$  在生育期内(2~6 月)表现出明显的随海拔降低而降低的趋势,但是  $RH_{avg}$  变化规律较为复杂,如 B2 的  $RH_{avg}$  仅为 77.2%,主要由于下垫面环境的局地小气

候作用造成的空气湿度差异。由于空气相对湿度偏低,B2 处马铃薯晚疫病始发期达标日次也最少,为 36 d,其余试验点  $RH_{avg}$  均大于 80.0%,晚疫病始发期达标日次为 43~69 d。基于露点法空气相对湿度估算的不同海拔田块马铃薯晚疫病始发期预报结果  $PO_k$  普遍在 30.0% 以下,B2 的  $PO_k$  最低(16.7%)。具体分析可知,漏报的情况多发生于湿润期长度较短的轻等级侵染,或者由于对较长湿润期的预报持续日数偏短,对于此类情况,如果是在较长湿润期的后期发生漏报,一般在晚疫病发生侵染以后达到防治期的早期会开展及时防治,不会造成更大的病害危害;如果是在较长湿润期的前期发生漏报,一般可能导致预报的晚疫病在马铃薯组织内循环代次比实际偏慢,严重的则可由保护性防治转为治疗性防治,影响较为有限。而空报的情况则普遍发生较少,仅 B2 种植区  $FAR_k$  略高,说明在空气相对干燥的环境下采用露点法估算空气相对湿度会高估,使其在晚疫病始发期预报中的适用性降低。

## 3 讨论与结论

露点法采用日最低空气温度下的饱和水汽压对实际水汽压进行估算,具有良好的准确性,估算值与实测值的  $R^2$ 、 $MAE$ 、 $BIAS$ 、 $CI$  分别为 0.95、1.18 hPa、1.06%、0.99。在实际水汽压较大的情况下有所高估。露点法对日平均空气相对湿度的估算准确性较好,估算值与实测值的  $R^2$ 、 $MAE$ 、 $BIAS$ 、 $CI$  分别为 0.44、8.07%、0.11%、0.97。但在实际空气相对湿度较小的情况下,存在更为明显的高估。不同环境条件对露点法估算空气相对湿度的准确性随环境湿度增大而增大,实际空气相对湿度为 60% 以上时,估算准确性较好;估算准确性随环境温度的变化表现为环境温度在  $10\text{ }^\circ\text{C}$  以上时空气相对湿度的估算效果好。在实际应用中,以温度作为协同参照指标对露点法估算空气相对湿度的质量控制以及应用场景选定具有指示意义。

应用露点法估算空气相对湿度对马铃薯晚疫病始发期进行预报,预报漏报率普遍在 30.0% 以下,最低为 16.7%。结合作物病害发生与防控的实际情况,露点法估算空气相对湿度结果对马铃薯晚疫病始发期具有良好的实际应用效果。但随着马铃薯种植区海拔升高,生育期平均气温降低,马铃薯晚疫病始发期预报准确性有所降低。



B1、B2、B3、B4、B5 为马铃薯田块编号,见表 1;对应图为不同海拔马铃薯田块露点法估算空气相对湿度效果马铃薯晚疫病始发期预报结果;  
 $RH_{dew}$ 、 $RH$ 、 $T_{avg}$  分别为露点法估算的日平均空气相对湿度、日平均空气相对湿度、日平均空气温度。

图 6 露点法估算空气相对湿度的马铃薯晚疫病始发期预报结果

Fig.6 Prediction results of the potato late blight beginning date estimated by dew point method

为得到连续性空气温度、湿度样本数据集,本研究选取山地梯度观测资料作为分析样本,对露点法估算空气相对湿度的准确性与适用条件研究起到有效的数据支撑作用。但是重庆地处四川盆地东部,

属中亚热带湿润季风气候区,常年空气温暖湿润<sup>[27]</sup>,样本数据集虽然表现出良好的递变规律,但偏湿样本占比较大,空气干燥条件样本偏少,使得进一步开展干燥环境条件下露点法估算空气相对湿度

的算法优化以及适用条件判定受到一定局限。为提高露点法估算空气相对湿度在不同环境条件下的适用性,需扩充样本数据集中偏干环境条件的空气温湿度观测样本,进而在影响估算准确性的空气干湿

条件阈值以及偏干空气湿度条件下露点法估算的优化做进一步研究,从而提升其在作物病虫害发生发展预测等应用场景中的适用性。

表2 露点法估算空气相对湿度的马铃薯晚疫病始发期预报环境条件与预报质量

Table 2 Environmental meteorological conditions and prediction quality of the potato late blight beginning date estimated by dew point method

田块编号	2-6月 $T_{avg}$ (°C)	2-6月 $RH_{avg}$ (%)	实际始发期(日次)	$PO_K$ (%)	$FAR_K$ (%)
B1(173 m)	18.7	84.0	69	23.2	3.6
B2(633 m)	16.7	77.2	36	16.7	23.1
B3(740 m)	15.5	83.6	54	27.8	7.1
B4(830 m)	15.0	82.7	50	26.0	2.6
B5(979 m)	15.2	80.8	43	23.3	15.4

马铃薯田块编号对应括号内数据为海拔。 $T_{avg}$ 、 $RH_{avg}$ 、 $PO_K$ 、 $FAR_K$ 分别为平均空气温度、平均空气相对湿度、漏报率、空报率。

## 参考文献:

- [1] 路粉,孟润杰,吴杰,等. 马铃薯晚疫病菌对霜脲氧抗性动态监测及药效验证[J]. 中国农业科学, 2022, 55(18): 3556-3564.
- [2] 李洁,闫硕,张芳,等. 近年来中国马铃薯晚疫病的时空演变特征及防控情况分析[J]. 植物保护学报, 2021, 48(4): 703-711.
- [3] 马旭洁,张文解,杨海玲,等. 临夏州马铃薯晚疫病始发期的预测预报[J]. 中国农业气象, 2011, 32(4): 627-631.
- [4] JING D P, GUO J F, JIANG Y Y, et al. Initial detections and spread of invasive *Spodoptera frugiperda* in China and comparisons with other noctuid larvae in cornfields using molecular techniques [J]. *Insect Science*, 2020, 27(4): 780-790.
- [5] 祝藿澄,梁静思,张佩,等. 基于 qPCR 和 LAMP 技术的马铃薯晚疫病菌快速检测方法[J]. 作物杂志, 2019(6): 168-176.
- [6] 王小燕,赵晓宇,陈恢富,等. 江汉平原小麦孕穗期空气相对湿度升高的产量效应[J]. 中国农业科学, 2014, 47(19): 3769-3779.
- [7] 李睿,董立强,商文奇,等. 水稻苗期不同喷淋间隔处理对其生长发育及产量的影响[J]. 作物杂志, 2022(5): 249-254.
- [8] 武强,王旭,罗攀攀,等. 巴南银针产区茶叶气候适宜性与气候品质评价[J]. 气象科技, 2021, 49(3): 475-482.
- [9] SHAKYWAR R C, DEVI N S, RAJA P, et al. Epidemiology and management of late blight of potato in foot hills of arunachal pradesh[J]. *Annals of Plant Protection Sciences*, 2021, 29(3): 231-235.
- [10] KARKI H S, HALTERMAN D A. *Phytophthora infestans* (Late blight) infection assay in a detached leaf of potato[J]. *Bio-protocol*, 2021, 11(4): e3926.
- [11] 张蕾,霍治国,姜燕,等. 典型区域小麦白粉病发生气象等级动态预警模型[J]. 中国农业气象, 2015, 36(5): 631-639.
- [12] 于贵瑞,伏玉玲,孙晓敏,等. 中国陆地生态系统通量观测研究网络(China FLUX)的研究进展及其发展思路[J]. 中国科学 D 辑:地球科学, 2006(S1): 1-21.
- [13] 谢云,张汝正,殷水清,等. 1961-2010 年全球变暖背景下中国空气湿度长期变化特征[J]. 水科学进展, 2020, 31(5): 674-684.
- [14] 赵丹,张丽霞,周天军. CMIP6 模式对中国东部地区水循环的模拟能力评估[J]. 大气科学, 2022, 46(3): 557-572.
- [15] 周括,冉令坤,蔡仁,等. 地形追随垂直运动方程在南疆极端暴雨中的诊断分析[J]. 大气科学, 2022, 46(3): 745-761.
- [16] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing water requirements-FAO Irrigation and drainage 56[R]. Rome, Italy: FAO, 1998.
- [17] LOBIT P, PEREZ L L, LHOMME J P, et al. Retrieving air humidity, global solar radiation, and reference evapotranspiration from daily temperatures: development and validation of new methods for Mexico[J]. Part I: Humidity. *Theoretical and Applied Climatology*, 2018, 133(3/4): 751-762.
- [18] KIMBALL J S, RUNING S W, NEMANI R R. An improved method for estimating surface humidity from daily minimum temperature [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, 85(1/2): 87-98.
- [19] MAJIDI M, ALIZADEH A, VAZIFEDOUST M, et al. Analysis of the effect of missing weather data on estimating daily reference evapotranspiration under different climatic conditions. [J]. *Water Resources Management*, 2015, 29(7): 2107-2124.
- [20] LOBIT P, GÓMEZ T, BAUTISTA F, et al. Retrieving air humidity, global solar radiation, and reference evapotranspiration from daily temperatures: development and validation of new methods for

- Mexico. Part III: reference evapotranspiration[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2018, 133(3/4):787-797.
- [21] GLASSY J M, RUNNING S W. Validating diurnal climatology logic of the MT-CLIM model across a climatic gradient in oregon[J]. *Ecological Applications*, 1994, 4(2):248-257.
- [22] HUBBARD K G, MAHMOOD R, CARLSON C. Estimating daily dew point temperature for the northern great plains using maximum and minimum temperature[J]. *Agronomy Journal*, 2003, 95(2):3935-3943.
- [23] 姜雨璇, 查小春. 基于 DEM 的巴山地区地貌区划研究[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(1):127-132, 139.
- [24] 武 强, 张德军, 郭安红, 等. 基于站点资料的中小起伏山地近地气温推算研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(10):142-150.
- [25] 谢开云, 车兴壁, CHRISTIAN D, 等. 比利时马铃薯晚疫病预警系统及其在我国的应用[J]. *中国马铃薯*, 2001(2):67-71.
- [26] WILLMOTT, CORT J. Some comments on the evaluation of model performance[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1982, 63(11):1309-1369.
- [27] 罗攀攀, 杨世琦, 高阳华, 等. 重庆秋马铃薯气候影响因子与种植气候区划[J]. *西南农业学报*, 2014, 27(1):374-379.

(责任编辑:陈海霞)