

基于 CART 算法的茶园精准灌溉方法

苗犇犇¹ 张武^{1,2*} 王志鸿^{1,3} 冯金磊¹ 王瑞卿¹ 江朝晖^{1,2} 饶元^{1,2} 金秀^{1,2}

1. 安徽农业大学 信息与计算机学院,合肥 230036;
2. 智慧农业技术与装备安徽省重点实验室,合肥 230036;
3. 四创电子股份有限公司,合肥 230036)

摘要 针对茶园灌溉系统中灌溉时机与灌溉量难以确定的问题,以黄山太平地区猴魁茶园为研究对象,先利用 CART 算法对环境因子与灌溉之间的相关性进行分析,并与逻辑回归、支持向量机等预测模型进行对比,后采用 Penman-Monteith 公式等对灌溉量进行精确计算,再通过田间试验对本研究获得的灌溉方法进行验证。结果表明:1)地下 20 cm、40 cm 和地下 60 cm 处土壤湿度与灌溉之间的相关性最大,分别达到 40.66%、12.74%、12.25%,因此,土壤湿度是判断灌溉时机最关键的环境因子;2)使用 CART 算法预测猴魁茶园的灌溉时机,其准确率、精确率、召回率、F1 值较逻辑回归模型(Logistic Regression model)、支持向量机模型(Support vector machine model)分别提升了 12%~16%、1.3%~1.4%、12%~16%、7%~9%;3)Penman-Monteith 公式对灌溉量的计算结果表明,黄山太平地区猴魁茶园年灌溉量为 200~500 mm,其中,夏梢期灌溉量最多,占全年灌溉量 70%以上。田间试验结果表明该灌溉方法节水率达到 30%~35%。因此,使用 CART 算法及 Penman-Monteith 公式所获取的灌溉策略对于该地区茶园精准灌溉有一定的借鉴意义。

关键词 灌溉时机;灌溉量;CART 算法;精准灌溉

中图分类号 S274.3

文章编号 1007-4333(2022)08-0208-13

文献标志码 A

Precision irrigation method for tea plantation based on CART algorithm

MIAO Benben¹, ZHANG Wu^{1,2*}, WANG Zhihong^{1,3}, FENG Jinlei¹, WANG Ruiqing¹,
JIANG Zhaohui^{1,2}, RAO Yuan^{1,2}, JIN Xiu^{1,2}

1. School of Information and Computer, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China;
2. Anhui Key Laboratory of Intelligent Agricultural Technology and Equipment, Hefei 230036, China;
3. Sichuang Electronics Co., Ltd., Hefei 230036, China)

Abstract Aiming at the problem that it is difficult to determine the irrigation timing and amount in the tea plantation irrigation system, Houkui tea plantation in Taiping area of Huangshan is taken as the research object. The CART algorithm is used to analyze the correlation between environmental factors and irrigation and compared with logistic regression and support vector machines prediction models. The Penman-Monteith formula was used to calculate the irrigation amount accurately and the irrigation method obtained in this study is then verified by field experiments. The results show that: 1) The correlation between soil moisture and irrigation is the largest at 20 cm, 40 cm and 60 cm underground, they are 40.66%, 12.74% and 12.25%, respectively. Therefore, soil moisture is the most critical environment factor in judging irrigation timing; 2) Using the CART algorithm of Taiping Houkui, The accuracy, precision, recall and F1 value by using the CART algorithm to predict the irrigation timing are increased by 12% - 16%.

收稿日期: 2021-12-28

基金项目: 2022 年安徽省重点研究和开发计划(202204C06020022);智慧农业技术与装备安徽省重点实验室开放基金(APKLSATE2019X001);2016 年农业部农业物联网技术集成与应用重点实验室开放基金(2016KL05);2019 年安徽省重点研发计划面上攻关项目(201904a06020056)

第一作者: 苗犇犇, 硕士研究生, E-mail: 642657541@qq.com

通讯作者: 张武, 教授, 主要从事农业水肥精准调控研究, E-mail: zhangwu@ahau.edu.cn

1.3% - 1.4%, 12% - 16% and 7% - 9% than those of the Logistic Regression and the support vector machine models, respectively; 3) The the irrigation amount calculated by Penman-Monteith formula on shows that the annual irrigation amount of Houkui tea tree in Taiping area of Huangshan is 200 - 500 mm, and the summer shoot irrigation amount is the largest, accounting for more than 70% of the annual irrigation amount. Field experiments verifies that the water-saving rate of this irrigation method reaches 30% to 35%. Therefore, the irrigation strategy obtained by the CART algorithm and the Penman-Monteith formula has certain references for the precise irrigation of tea plantations in this area.

Keywords irrigation timing; irrigation quantity; CART algorithm; precision irrigation

安徽黄山太平地区茶园种植面积广泛,是当地主要经济作物,但目前人们仍多采用个人经验进行浇灌,这一方面容易造成过度灌溉,浪费水源,同时,不合理的灌溉也会损害茶树本身,造成产量下降等问题。另一方面,由于茶树属于区域性作物,不如小麦与水稻等作物种植面积广,茶树精准灌溉研究的关注度较低。因此运用人工智能技术开展茶树的精准灌溉方法研究,改变人工凭经验进行灌溉的传统模式,这对提升茶叶产量、降低生产成本具有重要意义。

目前国内外主要从以下 3 个方面进行精准灌溉制度研究:1)分析环境与作物需水量之间的关系^[1-4];2)使用作物灌溉模型进行仿真试验^[5-9];3)利用专家知识获取灌溉规则^[10-12]。在分析环境与作物需水量之间的关系方面,Li 等^[1]通过分析环境因素对灌溉水分生产力(Irrigation water productivity, IWP)变化的贡献,确定最佳灌溉策略。Sánchez-Molina 等^[2]通过测量土壤湿度与作物灌溉之间的关系,确定合理的灌溉方法。Kourosh 等^[3]通过监测土壤湿度及使用水平衡方程式计算土壤水分渗透率,从而获取作物正常生长发育所需的灌溉量。朱小倩^[4]通过扩展的自回归模型(Auto regressive models with external input, ARX)预测下一时刻的土壤湿度,随后计算预测值与茶树最佳生长时的土壤湿度差值,最终实现茶园的自动化控制。然而上述研究主要分析土壤湿度对灌溉的影响,忽略了其他环境因素与灌溉之间的关系,且其所使用的部分传感器造价昂贵,不利于大面积推广;在使用作物灌溉模型进行仿真试验的研究方面,周始威等^[5]使用根区水质模型(Root zone water quality model, RZWQM)、王忠波等^[6]使用 CROPWAT 模型、邵光成等^[7]使用农业技术转移决策支持系统(Decision support system for agrotechnology transfer, DSSAT)、邵东国等^[8]使用 AquaCrop 模型、冯绍元等^[9]使用标准加权平均降水量(Standard

weighted average precipitation, SWAP)模型进行仿真研究。上述模型多通过往年环境数据模拟分配固定时间内的作物灌溉量,对于精准灌溉而言则缺少了一定的及时性;在利用专家知识获取灌溉规则的研究上,蒋再扬等^[10]、戚迎龙等^[11]使用专家经验等方式获取最佳灌溉制度,鲁旭涛等^[12]使用多种决策模型完成数据的处理,然后利用模糊控制完成作物精准灌溉系统的设计。然而,由于上述研究所使用的专家知识过于复杂,且不同作物之间专家灌溉决策所需要掌握的判断尺度难以把握。

CART 算法^[13-15]是一种使用二分递归分割技术构建预测模型的智能算法,该算法通过分析多种属性与决策之间的关系,从而生成易于理解的规则进行预测,目前已被广泛应用于节能降耗^[16]、医学预测^[17]等多个领域。

因此,为解决黄山太平地区茶园精准灌溉问题中合理灌溉时机的问题,本研究拟以猴魁为研究对象,采用 CART 算法对土壤湿度、生长期、降雨量等 9 个属性与灌溉需求之间的关系进行分析,并通过 Penman-Monteith 公式、有效降雨量公式等计算茶树所需灌溉量,从而确定精准灌溉问题中的灌溉量,以为黄山太平地区茶树的精准灌溉提供合理的控制策略。

1 茶园精准灌溉系统的构成

本研究融合 CART 算法与作物理论灌溉量公式,在能够获取灌溉时机的同时保证获得具体灌溉量。本算法流程主要包括 2 个部分,分别是 CART 预测灌溉模块和作物理论灌溉量计算模块。CART 预测灌溉模块利用数据之间的相关性构建相应的 CART 灌溉时机预测模型,其功能是获取在何种情况下需要灌溉的灌溉规则,并且能够输出新样本的预测结果。当输出结果为需要灌溉时机,作物理论灌溉量计算模块能够提供相应的灌溉量范围。其技术路线图如图 1 所示。

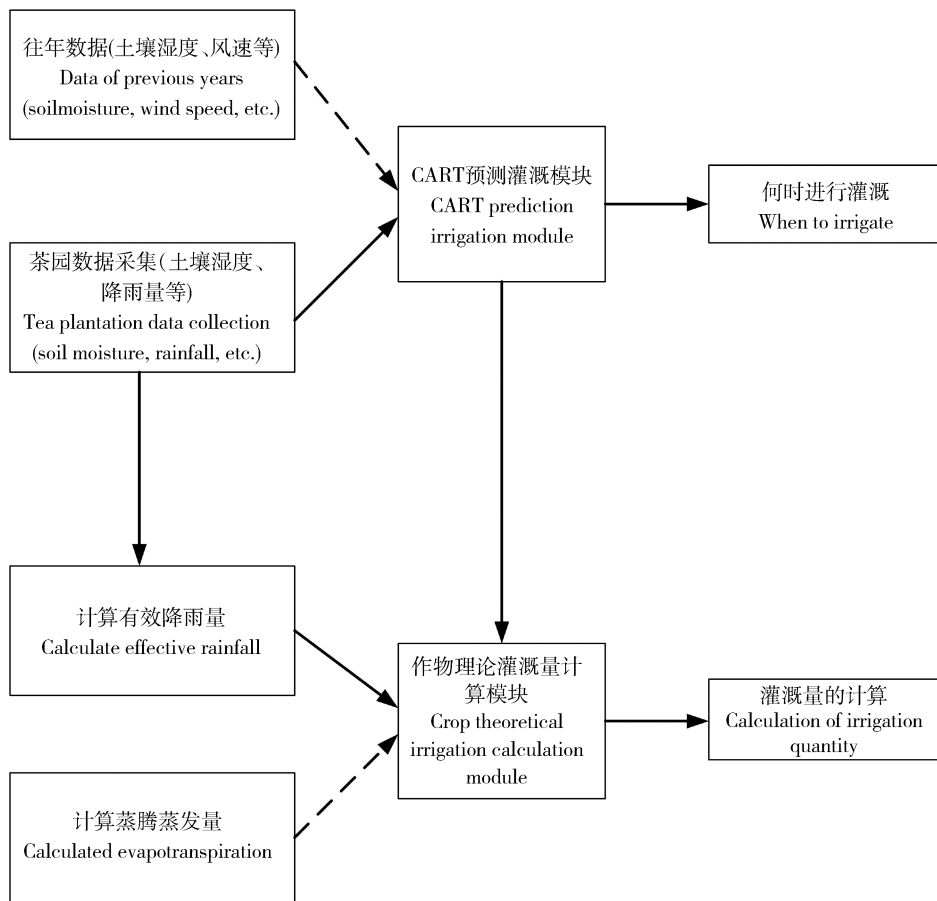


图1 茶园精准灌溉系统算法技术路线图

Fig. 1 Algorithm technology roadmap of tea plantation precision irrigation system

本研究首先利用往年数据构建 CART 预测模型,当新数据进入到 CART 预测模型后,模型会判断当前条件下是否需要灌溉。当模型判断当前条件下需要进行灌溉时,作物理论灌溉量计算模块通过计算需水差值得到需要的灌溉量,从而最终实现茶园的精准灌溉。

2 试验数据与方法

2.1 数据采集

数据来源于黄山市太平地区茶园物联网系统及中国气象局统计结果,采集 2014 年 2 月—2019 年 12 月底茶园环境信息、土壤湿度以及土壤电导率等 14 个指标数据,共计 26 160 条数据(表 1)。

表 1 中将用于精准灌溉的外界环境数据分别归类到 14 个指标,并将每个指标的数据按一定的标准再进行分类,比如:以生长期为例,一共采集到 2 114 d 的数据,将这套数据再按照茶树年生长发育期进行分类,从当年 2 月一次年 2 月,共计分为 7 类,分

别是:越冬萌发期、第 1 次生长(春梢)期、第 1 次休止期、第 2 次生长(夏梢)期、第 2 次休止期、第 3 次生长(秋梢)期、休眠期。

2.2 数据处理

由于自然环境因素及传感器自身的因素会导致产生异常数据及残缺数据,针对其中的异常数据,采用肖维勒准则^[18]进行判断。该准则首先计算样本中待测值与均值的绝对偏差,再将绝对偏差同对应倍数下的标准差做比较,从而判断数据是否异常,具体公式如下:

$$|\max H_m - \bar{H}| > S_m \cdot F' \quad (1)$$

$$|\min H_m - \bar{H}| > S_m \cdot F' \quad (2)$$

式中: H_m 为采集的样本集合; m 为样本集合中样本个数; $\max H_m$ 为样本集合 H_m 的最大值; $\min H_m$ 为样本集合 H_m 的最小值; \bar{H} 为样本集合 H_m 的均值; S_m 为检验系数; F' 为测量值的标准差。若 $\max H_m$ 或 $\min H_m$ 满足上述公式,则认为其为异常数据,其中 $m = 11, S_m = 2.00$ 。

表 1 本研究所采用的 14 种外界环境数据

Table 1 Fourteen kinds of external environment data used in this study

指标 Index	样本数 Number of samples	分类数 Classification number
生长期 Growing period	2 114	7
天气状况 Weather condition	2 114	11
地下 20 cm 处土壤湿度 Soil moisture at 20 cm underground	1 711	113
地下 40 cm 处土壤湿度 Soil moisture at 40 cm underground	1 548	107
地下 60 cm 处土壤湿度 Soil moisture at 60 cm underground	1 577	111
电导率 Conductivity	1 647	26
光照强度 Light intensity	1 839	165
降雨量 Precipitation	2 114	19
风速 Wind speed	1 728	4
平均空气温度 Average air temperature	2 002	121
空气湿度 Air humidity	1 606	73
最高空气温度 Maximum air temperature	2 114	136
最低空气温度 Minimum air temperature	2 114	112
光照时长 Light duration	1 932	39

针对公式(1)、(2)判断而得的异常数据及残缺数据,采用前后均值填充法进行修复,具体公式如下:

$$\bar{X}^* = \frac{1}{2n_i} \sum_{i=m-n}^{m+n} X_i \quad (3)$$

式中: X_i 为数据集; \bar{X}^* 为修复后的数据; m 为其中异常数据或残缺数据的位置; n 为异常数据或残缺数据前后数据的个数。根据上述方法修复异常数据及残缺数据后,得到 29 596 条数据,其中 $n = 5$ 。

由于 CART 算法属于有监督学习方法,需要对样本进行标签标记,因此本研究依据黄山市太平地区茶园物联网系统下 2018 年 12 月至 2019 年 12 月底灌溉的记录,结合茶树种植专家知识、天气状况等属性合理推测茶树灌溉决策信息,并将茶树灌溉决策信息与已有的灌溉次数信息共同构成茶园灌溉决策信息。样本集以灌溉决策数据为标签,属性信息为输入,本研究使用上述表 1 中的生长期、天气状况、地下 20、40、60 cm 处土壤湿度、电导率、光照强

度、降雨量、平均空气温度 9 个属性作为 CART 预测灌溉模块的输入。光照强度、降雨量、风速、平均空气温度、空气湿度、最高空气温度、最低空气温度、光照时长 8 个属性作为作物理论灌溉量模块的输入。

2.3 试验方法

2.3.1 CART 算法

CART 算法使用 Gini 公式作为划分模型中分支及节点的依据,具体公式如下:

$$\text{Gini}(p) = 1 - \sum_{k=1}^K p_k^2 \quad (4)$$

式中: K 为不同属性的个数; p_k 为属于第 k 类的概率。

对样本集合计算 Gini 值时的具体公式如下:

$$\text{Gini}(C) = \frac{C_1}{C} \text{Gini}(C_1) + \frac{C_2}{C} \text{Gini}(C_2) \quad (5)$$

$$C_1 = \{(x, y) \in C / F(x) = \alpha\}, C_2 = C - C_1 \quad (6)$$

式中: C 为样本集合; F 为 C 上某一可能值 α ; C_1 和 C_2 为样本集合 C 根据 F 分割形成的 2 个子样本集合。

2.3.2 作物理论灌溉量计算方法

Penman-Monteith 公式^[19]一般用于计算当前的蒸腾蒸发量 ET_0 , 其原理是依据外界各种参数计算该环境下的蒸腾蒸发量 ET_0 , 具体公式如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} \mu_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 \mu_2)} \quad (7)$$

式中: R_n 为作物表面净辐射量, $MJ/m^2/d$; G 为土壤通热量密度, $MJ/m^2/d$; T 为日平均温度, $^{\circ}C$; e_s 为饱和条件下的水气压, KPa ; e_a 为实际条件下的水气压, KPa ; μ_2 为平均风速, M/s ; Δ 为饱和条件下的水气压与温度的曲线斜率; γ 为温度计常数, KPa/K 。

作物实际需水量 ET_c 由蒸腾蒸发量 ET_0 与作物系数 K_c 相乘而得, 具体公式如下

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (8)$$

中: ET_c 为作物实际需水量, mm ; K_c 为作物系数; ET_0 为作物理论需水量, mm 。

有效降雨量测算 EffP (Effective precipitation) 由美国农业部土壤保持公式计算而得, 具体公式如下:

当总降雨量 $< 250 \text{ mm}$ 时,

$$EffP = P \times (125 - 0.2P) / 125 \quad (9)$$

$$\text{当总降雨量} \geq 250 \text{ mm 时, } EffP = 125 + 0.1P \quad (10)$$

式中: EffP 为有效降雨量, mm ; P 为实际降雨量, mm 。

作物理论灌溉量 IWR 由作物正常生长的需水量与有效降雨量的差值计算而得, 具体公式如下:

$$IWR = ET_c - EffP \quad (11)$$

式中: IWR 为满足作物生长所需的理论灌溉量, mm ; ET_c 为作物需水量; EffP 为有效降雨量。

2.3.3 田间试验方法

针对上述试验获取到的灌溉规则在安徽省黄山市六百里茶园进行现场试验, 试验条件如下: 试验田为 9° 试验区、 20° 试验区、 45° 试验区 3 块不同坡度的茶树种植区域, 每块区域长约 630 m , 宽约 6 m , 其中每块区域中又划分 3 小区域, 分别进行茶树不进行灌溉、茶树人工灌溉和精准灌溉试验, 试验田示意图如图 2 所示。

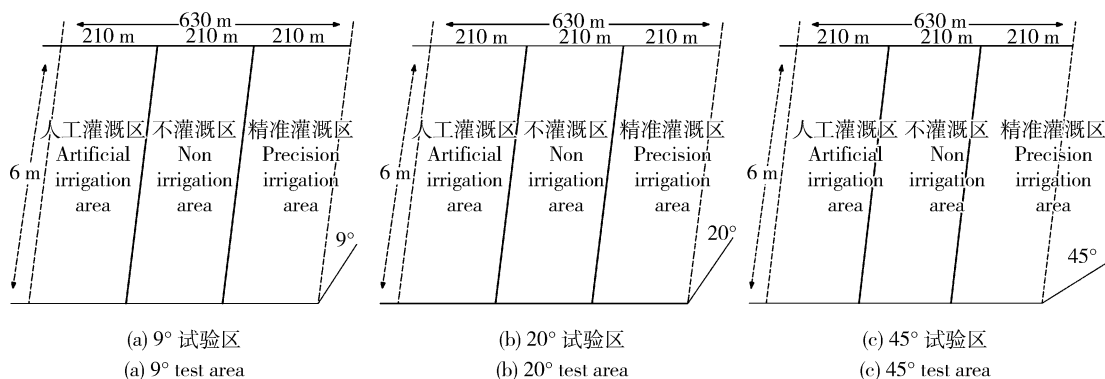


图 2 田间试验区示意图

Fig. 2 Schematic diagram of field test area

3 结果与分析

3.1 CART 预测灌溉时机模型检测

本研究将样本集随机按照 7 : 3 比例划分训练样本集和测试样本集, 使用 CART 算法建立精准灌溉系统中灌溉时机预测模型。为避免模型出现过拟合现象, 本研究采用“预剪枝”的方法防止过拟合现象的发生。预剪枝是指在决策树生成过程中, 对每个节点在划分前进行估计, 若不能带来决策树的性

能提升, 则停止划分。使用网格搜索对模型进行参数调优, 获得参数最优取值(表 2)。

表 2 中 Splitter 为特征划分点选择的标准, 一般使用“Best”或者“Random”作为标准。前者在特征的所有划分点中找出最优的划分点, 后者是随机的在部分划分点中找局部最优的划分点。Random_state 为预设的随机树种子, 表 2 中 Random_state = 28 用于划分数据集时, Random_state = 40 用于建模调参时, Max_depth 为决策树的最大深度, Min_

表 2 CART 灌溉时机预测模型主要参数最优取值

Table 2 Optimal value of main parameters of CART irrigation timing prediction model

参数 Parameter	最优取值 Optimal value
Splitter	Best
Random_state	28
Random_state	40
Max_depth	5
Min_samples_leaf	1
Min_samples_split	2
Max_feature	None
Min_weight_fraction_leaf	0

samples_split 为模型内部节点再划分时,节点中包含的最小样本数,Min_samples_leaf 为叶子节点中样本所包含的最少的数目,叶子节点最小的样本权重和为 Min_weight_fraction_leaf,Max_features 为建立模型时模型中的特征数目。通过预剪枝构建模型后,构建模型的部分分支如图 3 所示。

如图 3 所示,该分支表示在起始节点上有 254 个样本数据,其中分别包括了 236 个“不灌溉”类数据,18 个“灌溉”类数据。分支下的 1 个叶子节点中包含 142 个样本数据,其中分别包括了 136 个“不灌溉”类数据,6 个“灌溉”类数据,此时的 Gini 值为 0.088。Gini 值低则说明节点内数据趋于一致,对应的规则具有更高的准确性,因此该节点以上的规则可作为合理灌溉的主要规则。

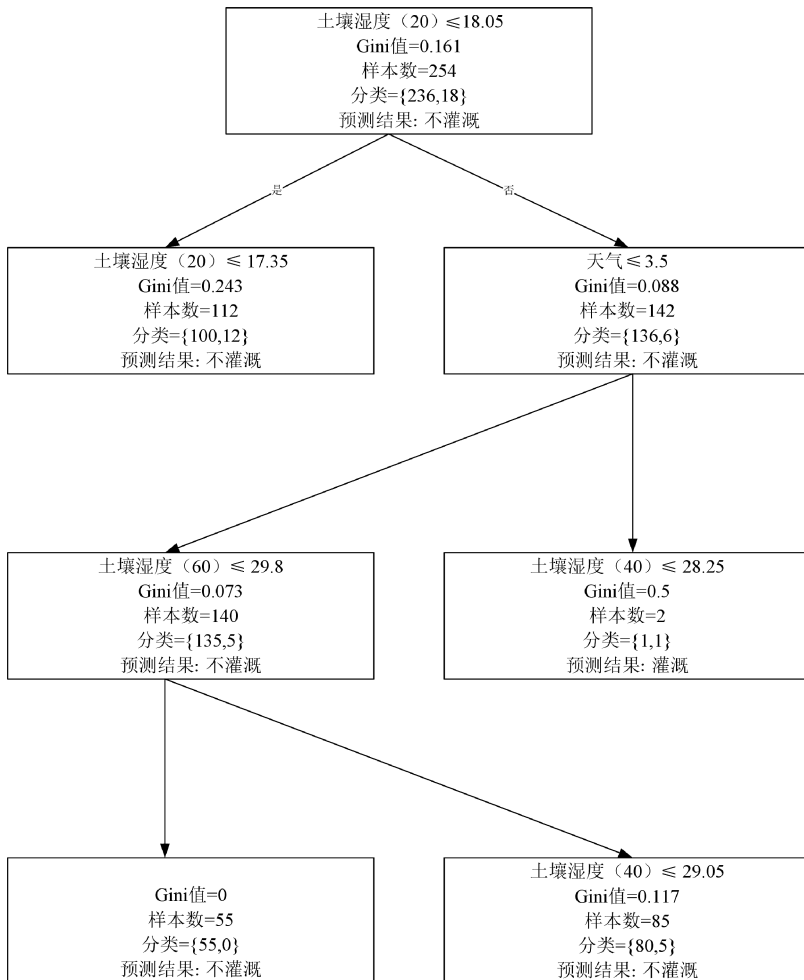
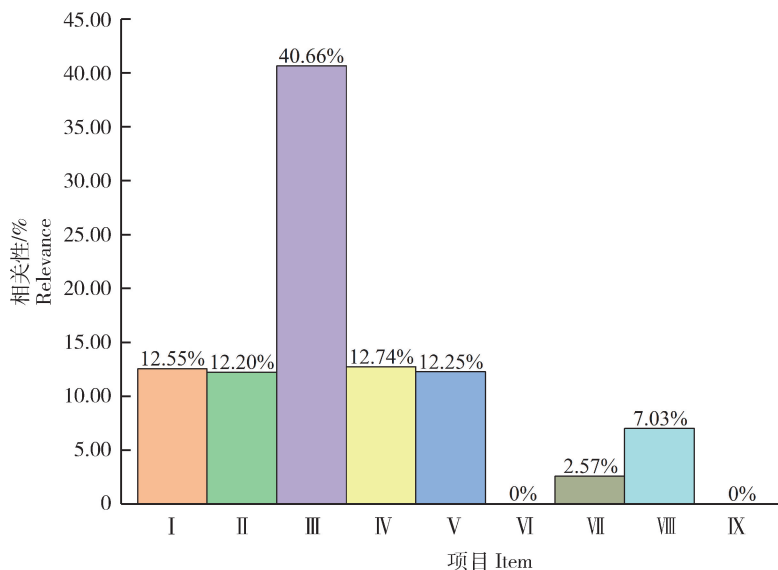


图 3 CART 模型部分分支图

Fig. 3 Partial branch diagram of CART model

根据“灌溉”分支的数据,可以获取在该数据下能够合理进行灌溉的控制方式。从该决策树的根节点开始一直到最后的叶子节点,其节点中的分支标准与路径上的规则构成了本研究需要的结论。以上述图3为例,在判断茶树是否进行灌溉的1条规则中首先考虑土壤湿度(20)(地下20 cm处的土壤湿度)的大小,其

次考虑天气是否属于1(大雨)、2(中雨)、3(大雪)、4(小雨)等状况以及土壤湿度(40)(地下40 cm处的土壤湿度)的情况。当传感器采集到的信息满足上述条件时,可以判断当前需要进行灌溉。为了更直观显示各种属性与是否需要灌溉之间的关系,对各种数据与是否需要灌溉之间的相关性绘图表示,如图4所示。



I. 生长期; II. 天气状况; III. 地下20 cm处土壤湿度; IV. 地下40 cm处土壤湿度; V. 地下60 cm处土壤湿度; VI. 电导率; VII. 光照强度; VIII. 降雨量; IX. 平均空气温度。

I, Growth period; II, Weather condition; III, Soil moisture 20 cm underground; IV, Soil moisture 40 cm underground; V, Soil moisture 60 cm underground; VI, Electroconductivity; VII, Light intensity; VIII, Precipitation; IX, Average air temperature.

图4 茶园外界环境与灌溉需求之间相关性

Fig. 4 Correlation coefficient between external environment attributes of tea plantation and irrigation demand

由图4可见:在影响灌溉的属性中,地下20 cm处土壤湿度对其影响最大,其次是地下40 cm、60 cm处土壤湿度以及天气状况和生长期,而平均空气温度和电导率对其没有任何影响,因此后续可以不对该类数据进行采集,减少该类数据传感器的部署,进一步降低生产成本。另外通过此图可以了解到在决定是否需要进行灌溉时,应着重考虑地下不同深度的土壤湿度以及天气状况和生长期这些属性。

本研究选用准确率(Accuracy)、精确率(Precision)、召回率(Recall)和F1值^[20]作为CART算法性能评价指标(表3)。

表3中精确率为在模型预测是正常数据的所有结果中,模型预测对的比重。召回率表示在真实值为正常数据的结果中,模型预测对的比重。F1指标综合精确率和召回率的产出结果,代表模型的性能

表3 CART算法性能评价指标

Table 3 Performance evaluation index of CART algorithm

指标 Index	公式 Formula
准确率 Accuracy	$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$
精确率 Precision	$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP}$
召回率 Recall	$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN}$
F1值 F1 value	$F1 = \frac{2 \times P \times R}{P + R}$

注: TP表示预测正确的正例; TN表示预测正确的反例; FP表示预测错误的正例; FN表示预测错误的反例。

Note: TP, positive example of correct prediction; TN, counter example of correct prediction; FP, positive example of prediction error; FN, counter example of prediction error.

高低。F1 的取值 0~1, 1 代表模型性能最好, 0 代表模型性能最差。

本研究为了验证 CART 决策树模型针对此类数据的预测能力, 选取逻辑回归模型 (Logistic Regression)^[21]、支持向量机模型 (Support vector machine)^[22]、随机森林模型 (Random Forests)^[23] 进行对比分析。为保证参数选取的合理性, 对支持向

量机、随机森林均使用网格搜索法进行调参。以随机森林参数为例, 其主要参数与 CART 参数一致, 多出的 $n_estimators$ 参数, 即树的个数设置为 47。通过调参后性能对比结果 (表 4) 显示 4 种模型中支持向量机模型在此类数据中预测能力最差, 其次是逻辑回归模型, 预测能力最好的是 CART 与 RF 模型。

表 4 4 种预测模型的灌溉预测性能评价对比

Table 4 Evaluation and comparison of irrigation prediction performance of four prediction models

预测模型 Prediction model	准确率 Accuracy	精确率 Precision	召回率 Recall	F1 值 F1 value
逻辑回归 LR	0.854	0.977	0.862	0.916
支持向量机 SVM	0.816	0.976	0.823	0.893
CART 决策树 CART	0.974	0.990	0.980	0.985
随机森林 RF	0.974	0.990	0.980	0.985

为了直观显示 4 种模型针对此数据的处理能力, 现对 4 种模型绘制混淆矩阵图, 如图 5 所示。图 5 中显示, 在 109 条测试集中包括 102 条不灌溉数据以及 7 条灌溉数据, 以逻辑回归模型为例, 图中表示在逻辑回归模型中, 预测值为不灌溉且真实值为不灌溉的条数为 88 条, 预测值为不灌溉且真实值为灌溉的条数为 2 条, 预测值为灌溉且真实值为不灌溉的条数为 14 条, 预测值为灌溉且真实值为灌溉的条数为 5 条。对比 4 种模型的混淆矩阵结果, CART 与 RF 模型处理该类数据的能力最优。综上所述, 本研究最终选用 CART 决策树作为茶园预测灌溉的模型。

为避免模型产生过拟合现象, 导致其在实际应用中使用效率低下, 因此需要使用 CART 决策树对往年数据进行预测, 通过分析模型预测结果来判断其是否适应于该地区预测灌溉的调控。具体步骤为调取该茶园物联网系统中 2014—2018 年的历史数据作为检验。将 2014—2018 年数据进行预处理后, 输入到 CART 模型中, 最终输出预测结果 (表 5)。

表 5 中显示, 依据 CART 模型预测的结果, 2014—2018 年 5 年间平均每年预测结果为需要灌溉的次数为 12 次左右, 其中以越冬萌发期和秋梢期最多, 平均需进行 3~4 次灌溉。这与吴丹^[24] 研究发现满足茶树正常年所需水灌溉次数为 8~13 次吻

合。因此可以使用 CART 决策树模型预测后续的灌溉时机。

3.2 作物理论灌溉量模型检测

当 CART 预测灌溉模块判断当前需要进行灌溉时, 调取作物理论灌溉量计算模块计算当前情况下的灌溉范围。本研究以 2019 年为例, 其具体结果如下所示:

1) 蒸腾蒸发量 ET_0 的计算。

通过对黄山太平地区 2019 年气候数据的计算得出具体的 ET_0 值。黄山太平地区 2019 年气候数据基本信息显示。该地区该年平均最低温度为 $0.7\text{ }^\circ\text{C}$, 平均最高温度为 $18.7\text{ }^\circ\text{C}$, 平均湿度为 80%, 这些表示该地区茶树所处的生长环境适宜, 除冬季需防范茶树冻害, 其余时节较适合茶树进行生长。但由于该地区处于山区, 多大风, 其平均风速达到了 463 km/d , 因此该地区蒸发量较大。该地区平均日照时间为 4.8 h , 平均辐射量为 $13.9\text{ MJ/m}^2/\text{d}$ 。通过计算得到该地区月 ET_0 在 $2.52\sim 6.00\text{ Mm/d}$, 平均 ET_0 为 4.22 Mm/d 。

2) 作物实际需水量 ET_c 的计算。

鉴于该地区茶园为多年生茶树, 通过联合国 FAO (联合国粮农组织)-56 推荐表^[25] 中查询其 K_c 值为 1.0, 因此作物实际需水量 ET_c 与蒸腾蒸发量 ET_0 结果一致。

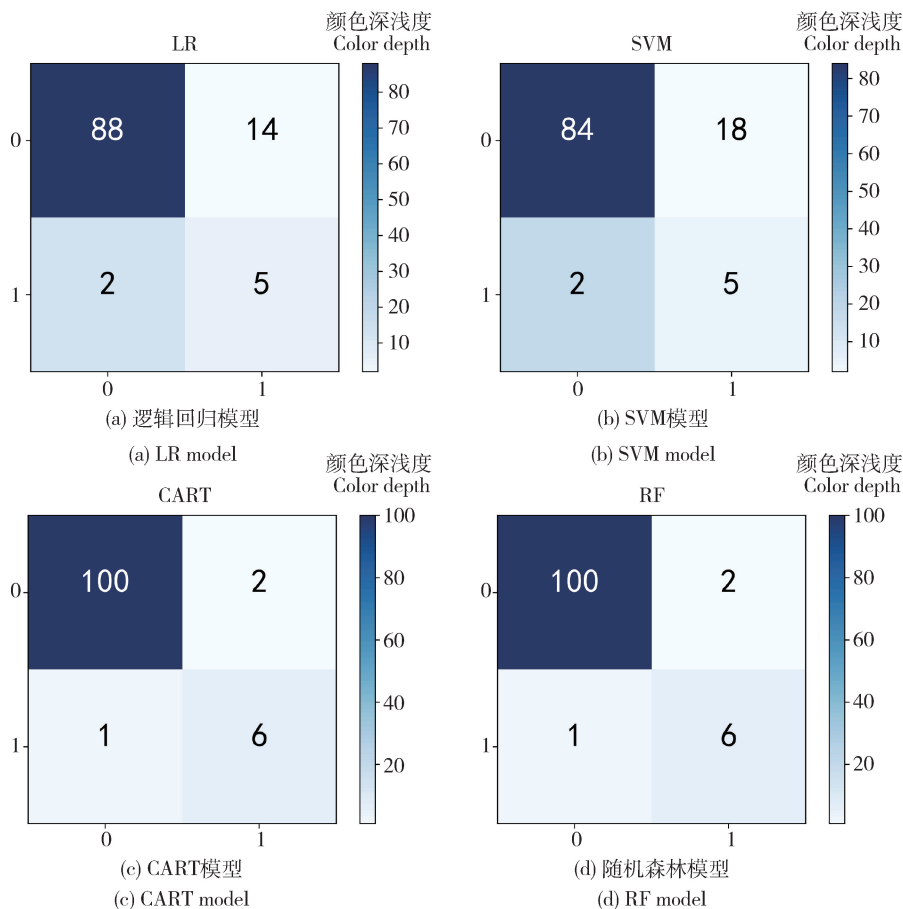


图5 4种茶园灌溉预测模型的混淆矩阵图

Fig. 5 Confusion matrix of four kinds of tea plantation irrigation prediction models

表5 猴魁茶园所需要灌溉次数预测结果

Table 5 Prediction results of irrigation times required for Houkui tea plantation

发育期 Period	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年
越冬萌发期 Overwintering germination period	3	2	4	6	4
春梢期 Spring shoot stage	3	1	2	1	2
第1次休止期 First rest period	2	1	1	2	2
夏梢期 Summer shoot stage	1	0	0	0	1
第2次休止期 Second resting period	1	0	1	0	1
秋梢期 Autumn shoot stage	2	2	4	3	3
休眠期 Dormancy period	2	1	2	1	1

3) 有效降雨量 EffP 的计算

月总降雨量数据来自于安装在该试验地区的气象传感器,有效降雨量通过美国农业部土壤保持公式计算而得。通过数据采集及计算可知,该地区茶园 2019 年总降雨量为 2 094 mm,总有效降雨量为 1 229 mm,月有效降雨量在 16.73~167.94 mm,有效降雨量占降雨量的 58.69%,其中以 5 月、6 月、

7 月、8 月降雨量最多,降雨量均在 226 mm 以上。10 月、11 月、12 月降雨量最少,降雨量均在 46 mm 以下。这表明作物在秋冬季节更易出现缺水的状况。另外本研究通过计算得知该地区 2014—2018 年平均 ET_0 与 2019 年间类似,这表明该地区外界环境较为稳定,但不同年份中降雨量存在差异,因此需要对不同年份的有效降雨量进行分析(表 6)。

表 6 2014—2018 年间平均 ET_0 与有效降雨量

Table 6 Average ET_0 and effective precipitation range from 2014 to 2018

年份 Particular year	平均 ET_0 /(mm/d) Average ET_0	有效降雨量/mm Effective precipitation
2014	4.17	32.6~184.6
2015	4.26	53.9~185.1
2016	4.32	54.4~185.4
2017	4.11	40.8~177.4
2018	4.24	41.8~162.2

表 6 中显示不同年份之间该地区 ET_0 平均变化程度在 5% 之内,但 2014 年、2016 年、2018 年、2019 年之间该地区存在较大有效降雨量变化。因此需要综合分析,以期提供准确的具体灌溉量。

4) 作物理论灌溉量 IWR 的计算

通过查阅茶树种植资料,茶树在不同时期需水

量的比例不同^[26],其中以夏梢需水量最高,约占总需水量的 37.5%,春梢及秋梢其次,约占总需水量的 22.4%,越冬萌发期约占总需水量的 10%,其余时期约占总需水量的 7.7%。按该地区茶树年需水总量为 1 539 mm 计算,结合近 6 年该地区降雨量推算茶树不同时期灌溉情况(表 7)。

表 7 茶树生长发育期内不同时期灌溉量

Table 7 Irrigation scale at different periods of tea growth and development

茶树生长时期 Tea growing period	生长月份 Growing month	需水量/mm Water demand	有效降雨量/mm Effective precipitation	茶园灌溉量/mm Tea plantation irrigation	灌溉次数 Irrigation times
春梢期 Spring	3 月上旬—5 月上旬 Early March to early May	345	265~345	0~80	1~4
夏梢期 Summer	6 月上旬—7 月下旬 Early June to late July	577	217~377	200~360	0~1
秋梢期 Autumn	8 月中旬—10 月上旬 Mid August to early October	345	245~345	0~100	2~5
越冬萌发期 Winter	12 月上旬—2 月上旬 Early December to early February	150	130~150	0~20	2~7
其余时期 Other time		119	79~119	0~40	1~3

表7中显示茶树在越冬萌发期及秋梢期需要进行多次的灌溉,这可能是由于该时期降雨量较低,需要多次灌溉防止茶树缺水,但由于茶树在该时期需水量并不大,因此不需要进行大额灌溉,茶树该时期灌溉量在0~100 mm。夏梢期降雨量虽高,但蒸发蒸腾量高且作物在该时期需水量较大,因此需要进行较大额灌溉,茶树灌溉量在200~360 mm。

表8 不同坡度下试验区灌溉量及茶叶产量

Table 8 Irrigation amount and tea yield in the experimental area of different slopes

灌溉方式 Irrigation method	有效降雨 量/mm Effective precipi- tation	坡度 9° Slope 9°			坡度 20° Slope 20°			坡度 45° Slope 45°		
		灌溉量/ mm Irrigation amount	节水率/ % Water saving rate	鲜茶产 量/kg Fresh tea yield	灌溉量/ mm Irrigation amount	节水率/ % Water saving rate	鲜茶产 量/kg Fresh tea yield	灌溉量/ mm Irrigation amount	节水率/ % Water saving rate	鲜茶产 量/kg Fresh tea yield
不进行灌溉 No irrigation	173.0	0.0	—	38.1	0.0	—	38.6	0.0	—	40.5
人工灌溉 Artificial watering	173.0	258.0	—	44.8	266.0	—	47.3	287.0	—	48.8
精准灌溉 Precision irrigation	173.0	176.4	31.6	44.3	183.8	30.9	48.0	187.4	34.7	49.1

由表8可知,茶树如果不进行灌溉,则会影响茶叶的产量,而且精准灌溉较人工灌溉,在不影响产量的条件下,精准灌溉的需水量低于人工灌溉,节水率为30%~35%。本试验说明基于CART算法的茶园精准灌溉方法的研究能够满足该地区茶树需水要求,也能实现水资源的高效利用,符合精准灌溉的要求。

4 讨论与结论

本研究从灌溉时机与灌溉量2个方面对安徽黄山太平地区茶园的精准灌溉方式进行综合分析,初步阐明茶园精准灌溉系统中影响灌溉的关键属性。一方面发现不同深度的土壤湿度对精准灌溉影响最大,这与Li等^[1]、Sánchez-Molina等^[2]、Kourosh等^[3]、朱小倩^[4]认为土壤湿度与灌溉之间的关系最为紧密的结论相似,但是通过试验发现天气状况与生长期同样对灌溉有着重要的影响;另一方面通过预测得出该地区茶树的年灌溉次数为12次,这与吴丹^[24]的研究得出的茶树年需水灌溉次数为8~13次结论基本一致。

3.3 田间试验结果

2021年2月—2021年5月,在安徽省黄山市六百里茶园进行现场试验。其中精准灌溉区采用地下铺管输水方式进行灌溉,茶树品种均为太平猴魁,灌溉水源均来自水库,每块区域内环境基本相同,9°试验区、20°试验区、45°试验区试验结果(表8)来自黄山太平地区六百里茶园基地。

通过对当地气候环境及降雨量分析后,发现茶树夏梢期需补充的灌溉量达到200~360 mm,这与谌介国等^[26]研究认为茶树仅在7月份灌溉需水量就达到176.2 mm的结论略有不同,这可能是由于长沙与黄山地区气候条件不同所导致。同时针对田间试验发现随着坡度的上升,茶树的产量也在逐步上升,后续可以增加坡度属性进一步完善本研究。

本研究主要结论如下:

1)用CART算法与逻辑回归、支持向量机等算法并进行对比预测茶树灌溉时机,总体性能较好,准确率、精确率、召回率、F1值分别达到97.4%、99.0%、98.0%、0.985;

利用本研究构建的CART茶园预测灌溉模型与作物理论灌溉量模型计算得出茶树在夏梢期需要补充的灌溉量最大,在秋梢期以及越冬萌发期需要进行多次小额灌溉,避免茶树出现缺水情况。

2)田间试验验证发现精准灌溉较人工灌溉节水效果明显,在保证产量的条件下,节水率达到30%~35%。

参考文献 References

- [1] Li X L, Zhang X T, Niu J, Tong L, Kang S Z, Du T S, Li S E, Ding R S. Irrigation water productivity is more influenced by agronomic practice factors than by climatic factors in Hexi Corridor, Northwest China[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 37971
- [2] Sánchez-Molina J A, Rodríguez F, Guzmán J L, Ramírez-Arias J A. Water content virtual sensor for tomatoes in coconut coir substrate for irrigation control design [J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 151: 114-125
- [3] Kourosh M, Ebrahim A, Shahrzad S. Assessment of agricultural water productivity for tea production in tea fields of Guilan Province[J]. *Bām/Shināsī Kishāvarzī*, 2016, 7 (2): 190-201
- [4] 朱小倩. 基于扩展自回归模型的茶园土壤含水量预测方法研究 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2017
Zhu X Q. Study on prediction method of soil moisture content in tea garden based on extended autoregressive model [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2017 (in Chinese)
- [5] 周始威, 胡笑涛, 王文娥, Andale A, 张亚军. 基于 RZWQM 模型的石羊河流域春小麦灌溉制度优化[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 121-129
Zhou S W, Hu X T, Wang W E, Andales A, Zhang Y J. Optimization of irrigation schedule based on RZWQM model for spring wheat in Shiyang River Basin[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32 (6): 121-129 (in Chinese)
- [6] 王忠波, 王欣亮, 聂堂哲. 基于 CROPWAT 模型水稻需水量及灌溉制度研究[J]. 东北农业大学学报, 2019, 50(7): 87-96
Wang Z B, Wang X L, Nie T Z. Study on water requirement and irrigation schedule of rice base on CROPWAT model[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2019, 50(7): 87-96 (in Chinese)
- [7] 邵光成, 王志宇, 王小军, 汤树海, 姚怀柱. 基于 DSSAT 模型的冬小麦最优灌溉制度研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50 (10): 289-297
Shao G C, Wang Z Y, Wang X J, Tang S H, Yao H Z. Optimal irrigation schedule based on DSSAT model for winter wheat[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(10): 289-297 (in Chinese)
- [8] 邵东国, 乐志华, 徐保利, 胡能杰, 田旖旎. 基于 AquaCrop 模型的有机稻灌溉制度优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34 (19): 114-122
Shao D G, Le Z H, Xu B L, Hu N J, Tian Y N. Optimization of irrigation scheduling for organic rice based on AquaCrop[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(19): 114-122 (in Chinese)
- [9] 冯绍元, 蒋静, 霍再林, 张超波. 基于 SWAP 模型的春小麦咸水非充分灌溉制度优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(9): 66-75
Feng S Y, Jiang J, Huo Z L, Zhang C B. Optimization of irrigation scheduling under deficit irrigation with saline water for spring wheat based on SWAP model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30 (9): 66-75 (in Chinese)
- [10] 蒋再扬, 王贝贝, 李明放, 刘文辉. 基于作物生长环境监测的大田水肥一体化系统设计[J]. 农业工程技术, 2019, 39(27): 47-49
Jiang Z Y, Wang B B, Li M F, Liu W H. Systemic design of field water and fertilizer integration system based on crop growth environment monitoring[J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2019, 39(27): 47-49 (in Chinese)
- [11] 戚迎龙, 李彬, 赵举, 张建华, 李敏, 李经纬, 包额尔敦噶, 冯晔, 杨玉芬. 西辽河流域春玉米节水灌溉模式评价与优选[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(3): 44-50
Qi Y L, Li B, Zhao J, Zhang J H, Li M, Li J W, Baoerdunga, Feng Y, Yang Y F. Evaluation and optimal selection of water-saving irrigation mode for spring maize in West Liao River Basin[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(3): 44-50 (in Chinese)
- [12] 鲁旭涛, 张丽娜, 刘昊, 智超群, 李静. 智慧农业水田作物网络化精准灌溉系统设计[J]. 农业工程学报, 2021, 37(17): 71-81
Lu X T, Zhang L N, Liu H, Zhi C Q, Li J. Design of the networked precision irrigation system for paddy field crops in intelligent agriculture[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37 (17): 71-81 (in Chinese)
- [13] 杨明, 张载鸿. 决策树学习算法 ID3 的研究[J]. 微机发展, 2002(5): 6-9
Yang M, Zhang Z H. Research on decision tree learning algorithm of ID3[J]. *Microcomputer Development*, 2002(5): 6-9 (in Chinese)
- [14] 李楠, 段隆振, 陈萌. 决策树 C4.5 算法在数据挖掘中的分析及其应用[J]. 计算机与现代化, 2008(12): 160-163
Li N, Duan L Z, Chen M. Research and application of data mining algorithm based on decision tree[J]. *Computer and Modernization*, 2008(12): 160-163 (in Chinese)
- [15] 陈辉林, 夏道勋. 基于 CART 决策树数据挖掘算法的应用研究[J]. 煤炭技术, 2011, 30(10): 164-166
Chen H L, Xia D X. Applied research on data mining based on CART decision tree algorithm[J]. *Coal Technology*, 2011, 30 (10): 164-166 (in Chinese)
- [16] 张俊玉, 胡家豪, 黄嵩. CART 决策树方法在煤电厂节能降耗中的应用[J]. 控制与决策, 2021, 36(5): 1232-1238
Zhang J Y, Hu J H, Huang S. Application of CART decision tree model in reducing coal consumption in coal power plant [J]. *Control and Decision*, 2021, 36 (5): 1232-1238 (in Chinese)
- [17] 李治, 李国琳. C4.5 和 CART 算法在医学数据挖掘中的对比

- 研究[J]. 电子技术与软件工程, 2013(10): 47-48
- Li Z, Li G L. Comparative study of C4.5 and cart algorithm in medical data mining[J]. *Electronic Technology & Software Engineering*, 2013(10): 47-48 (in Chinese)
- [18] 赵海霞, 周少娜, 肖化. 四种判别粗大误差准则的比较与讨论[J]. 大学物理实验, 2017, 30(5): 105-107, 129
- Zhao H X, Zhou S N, Xiao H. The comparison and discussion of four criterions of gross-error detection [J]. *Physical Experiment of College*, 2017, 30(5): 105-107, 129 (in Chinese)
- [19] 王海波, 马明国. 基于遥感和Penman-Monteith模型的内陆河流域不同生态系统蒸散发估算[J]. 生态学报, 2014, 34(19): 5617-5626
- Wang H B, Ma M G. Estimation of transpiration and evaporation of different ecosystems in an inland river basin using remote sensing data and the Penman-Monteith equation [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(19): 5617-5626 (in Chinese)
- [20] 张亮, 宁芊. CART决策树的两种改进及应用[J]. 计算机工程与设计, 2015, 36(5): 1209-1213
- Zhang L, Ning Q. Two improvements on CART decision tree and its application [J]. *Computer Engineering and Design*, 2015, 36(5): 1209-1213 (in Chinese)
- [21] Su G M, Gao H Y, Wang Z F, Liao X J, Zhang Y, Zhang M W, Hu X S, Wu J H. Model for identifying apple juice authenticity based on binary logistic regression[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(6): 349-356 (in Chinese)
- [22] 丁世飞, 齐丙娟, 谭红艳. 支持向量机理论与算法研究综述[J]. 电子科技大学学报, 2011, 40(1): 2-10
- Ding S F, Qi B J, Tan H Y. An overview on theory and algorithm of support vector machines [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2011, 40(1): 2-10 (in Chinese)
- [23] 李德, 陈文涛, 乐章燕, 范孝玲, 孙义, 孟雅婷, 杨健. 基于随机森林算法和气象因子的砀山酥梨始花期预报[J]. 农业工程学报, 2020, 36(12): 143-151
- Li D, Chen W T, Le Z Y, Fan X L, Sun Y, Meng Y T, Yang J. Forecast method for the first flowering date of Dangshansu pear based on random forest algorithm and meteorological factors [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(12): 143-151 (in Chinese)
- [24] 吴丹. 合理灌溉对茶园高产优质的影响分析[J]. 广东茶业, 2019(6): 32-35
- Wu D. Effects of reasonable irrigation on the high yield and quality of tea plantation[J]. *Guangdong Tea Industry*, 2019(6): 32-35 (in Chinese)
- [25] 吴慧蓉, 崔远来, 高明利. 作物系数影响因素分析[J]. 节水灌溉, 2016(8): 149-152, 156
- Wu H R, Cui Y L, Gao M L. Analysis of influencing factors of crop coefficient [J]. *Water Saving Irrigation*, 2016(8): 149-152, 156 (in Chinese)
- [26] 谌介国, 刘志明, 张振德. 茶树需水规律和茶园喷灌的研究[J]. 中国农业科学, 1985(2): 36-43
- Shen J G, Lu Z M, Chang C T. Studies on the water requirement pattern of tea plants and the technique of sprinkling irrigation on tea field [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1985(2): 36-43 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东