

基于案例推理的森林抚育智能决策算法研究

李丹一,王武魁*,井 晖,樊 坤

(北京林业大学 经济管理学院,北京 100083)

摘 要:为帮助林业基层单位管理者摆脱在决策过程中对技术人员经验的过度依赖,实现森林抚育经理小班智能选取以及抚育方式的智能决策,使森林抚育决策过程更具科学性。以黑龙江省森工总局林口林业局为对象,收集2015—2018年度森林抚育作业设计数据为试验数据构建案例库,结合注水分配算法(water-filling assignment, WFA)对案例中各属性进行权重分配;结合基于“原点距”的KML-CB自组织机制优化推理效率,实现森林抚育经理小班的快速选取;采用归一化欧式距离来计算源案例和目标案例之间的相似度,参考“fish-and-shrink”算法思想进行案例推理。进而寻找与目标案例相似的源案例,以源案例的解作为目标案例的满意解,从而实现抚育方式的辅助决策。案例库中共有4 045条案例数据,从中随机抽取80%进行训练,20%的案例数据进行测试。经多次试验,算法的预测精度达到97.16%。研究提出的算法对传统的相似度推理算法进行了改进,提高了推理的精度和速度。与传统算法相比,计算复杂度从 $O(M \times N)$ 降低到 $O(M+N+4)$,在降低计算复杂度、优化推理效率方面有一定的意义。

关键词:经理小班选择;抚育方式确定;智能决策;林业大数据

中图分类号:S753

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2022)01-0211-06

Intelligent Decisional Gorithm of Forest Tending Based on Case Reasoning

LI Dan-yi, WANG Wu-kui*, JING Hui, FAN Kun

(College of Economics and Management, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: The objectives of this study were to help forestry grassroot unit managers get rid of the excessive dependence on the experience of technicians in the decision-making process, to realize the intelligent selection of forest tending subcompartments and intelligent decision-making of their tending methods, and to make the forest tending decision-making process more scientific and effective. Taking the administrative area of Linkou Forestry Bureau of Longjiang Forest Industry as the research object, the forest tending operation design data during 2015—2018 were collected to construct a case database. Combined with the water-filling assignment algorithm (WFA), the weight of each attribute in the case was assigned. The reasoning efficiency was optimized by using the KML-CB self-organization mechanism that was based on "origin distance" to realize the quick selection of forest tending subcompartments. The similarity between the source case and the target case was calculated by using normalized Euclidean distance, and to conduct case reasoning by referring to the "fish-and-shrink" algorithm idea. After finding out the source case that was similar to the target case, the solution of the source case was considered as the satisfactory solution of the target case, so as to realize the auxiliary decision-making of the tending method. Totally, 4 045 cases were collected in the case database, from which 80% of the case data were randomly selected for training, and 20% for testing. After many experiments, the prediction accuracy of the algorithm reached 97.16%. The algorithm

收稿日期:2021-03-05 修回日期:2021-05-07

基金项目:国家自然科学基金(71502015);国有林区林业局智慧管理决策信息化(200-661502149)。

第一作者:李丹一。研究方向:林业信息化。E-mail: lidanyi@bjfu.edu.cn

*通信作者:王武魁,教授,博士生导师。研究方向:信息管理与信息系统,林业信息化,数据挖掘。E-mail: wangwukui@bjfu.edu.cn

proposed in this research improves the traditional similarity inference algorithm, promotes the accuracy and speed of the inference. The algorithm reduces the computational complexity from traditional $O(M \times N)$ to $O(M + N + 4)$, which has some significance in reducing computational complexity and optimizing reasoning efficiency, compared with the one of classical similarity reasoning.

Key words: subcompartment selection; determination of tending methods; intelligent decision; forestry big data

近年来,林业经营管理越来越受到关注。从2013—2018年,中央下拨给林业营林造林的预算资金从1 265.6亿元提升到了1 949亿元^[1-2],尽管如此,我国森林经营效果仍不理想^[3]。林业基层单位专家欠缺,使得在实际进行森林抚育等林业经营活动时缺少专业化的指导^[4],这是我国森抚活动效率低下的一个重要原因。森抚管理受众多因素影响,管理过程中存在忽视抚育规程和标准的问题。尤其在森林抚育经理小班选取方面,目前许多国有林业局下辖林场都是依赖技术人员的经验进行决策^[5]。有经验的技术专家的缺乏对我国森林抚育的发展无疑是巨大的阻碍。因此,为了提高森林抚育经理小班决策的科学性,减少对技术人员经验的依赖,构建一个辅助林场及森调部门进行森抚经理小班位置选取及抚育类型确定的智能决策算法就显得尤为重要。

随着我国林业信息化不断发展,人工智能决策越来越多地应用于林业经营活动中^[6-8],各类林业专家系统不断涌现^[9-11]。基于知识库的林业专家系统通过构建合适的规则表、事实表和推理机来推理,进而做出较为权威的决策^[6]。但对于专家系统来说,知识的结构化表述是进行推理的必备条件^[12]。森林抚育经理小班智能决策是个半结构化问题,涉及的因素众多,关系复杂,如果只单纯基于现有抚育规章构建规则库,进行规则推理,在多数情况下是困难的。在这种技术理论模型较弱、领域知识结构化表述较难而实践经验丰富的领域中,基于案例推理技术(CBR)具有较为明显的特点和优势^[13]。CBR是一种基于过往知识的推理求解方法,目前,其已经发展成为一种用于解决决策推理问题的方法论^[14]。该方法的主要思想是通过修改或复用过往解决相似问题的方案来求解新问题。目前,我国已有学者将CBR技术应用于农林行业。例如,温亮宝等^[15]基于CBR的思想在森林病虫害诊断、防治方面做了相关研究;温继文等^[16]基于过往鱼病病例,对鱼病诊断推理模型的构建进行了研究。然而在森林抚育方面,基于案例推理的研究仍较少。

鉴于此,本研究采用基于案例推理的方法来解决森抚智能决策问题。以黑龙江林口林业局为对

象,构建辅助林场及森调部门进行森林抚育经理小班选取以及抚育类型确定的智能决策算法,辅助开展森林抚育活动。提出基于案例推理的森林抚育智能决策算法,使森林抚育决策更具科学性。

1 材料与方法

1.1 材料

林口林业局位于黑龙江省东南部,下辖16个林场,施业区总面积27.3万 hm^2 ,有林地面积21.37万 hm^2 ,活立木蓄积1 410万 m^3 ,森林覆盖率78.9%。本研究主要涉及三部分的数据:森林经理二类调查数据、林场基本信息数据及林场历史抚育作业设计数据。

森林经理二类调查数据为林口林业局2015年实地调查的经理小班全样本数据,共74 595条。数据包含经理小班的基本信息、立地、林分、森林健康等级等数据,被用作案例库清洗和缺失数据填补的输入数据。林场基本信息数据主要为林场地理信息空间数据,包括林场、林班、经理小班和道路等SHP文件。历史抚育作业设计数据源于林口林业局2015—2018年度的森林抚育作业设计数据,是经过审批并已实施森抚作业的统计数据,共4 045条,此部分数据是案例库的基本构成内容。

1.2 基于案例推理的智能决策算法

采用案例推理方法,利用历史案例结合相似度计算来解决半结构化决策问题——“森林抚育经理小班选择及抚育方式决策”。按照案例推理的“4-R”原则^[13](Retrieve、Reuse、Revise and Retain)开始推理工作。总体推理流程见图1。

1.2.1 构建抚育案例库 案例推理的第一步是构建案例库,构建抚育案例库要考虑案例的描述、表示以及存储等问题。案例的描述也叫作案例的特征提取,一般包括对源案例各属性以及解决方案的描述^[13]。案例的表达方式一般有框架表示法、产生式表示法和面向对象表示法等^[17]。本研究使用框架表示法和面向对象表示法共同进行,这样既可表述案例的属性结构信息,又可表述基本客观信息。在构建抚育案例库时,视每个案例为一个实体,每个实体都包含案例的基础信息,即案例属性和解决方案。

收集林口林业局 2015—2018 年度的森林抚育作业设计数据构建案例库, 案例库中各源案例用 C_i 表示, 每个案例有 18 个属性(林地质量、地类、龄组、郁闭度等级、立地条件、林分类型、覆盖度等级、郁闭度/覆盖度等级、森林类别、林种、优势树种、起源、群落结构、伐前株树、伐前蓄积、平均树高、平均胸径、人工幼苗幼树公顷株数), 为方便说明用 $A_1 - A_{18}$ 表示。案例的解决方案为其所采用的抚育方式, 本案例库中共 5 大类, 即割灌除草、全面补植、生长伐、透光伐和综合抚育。

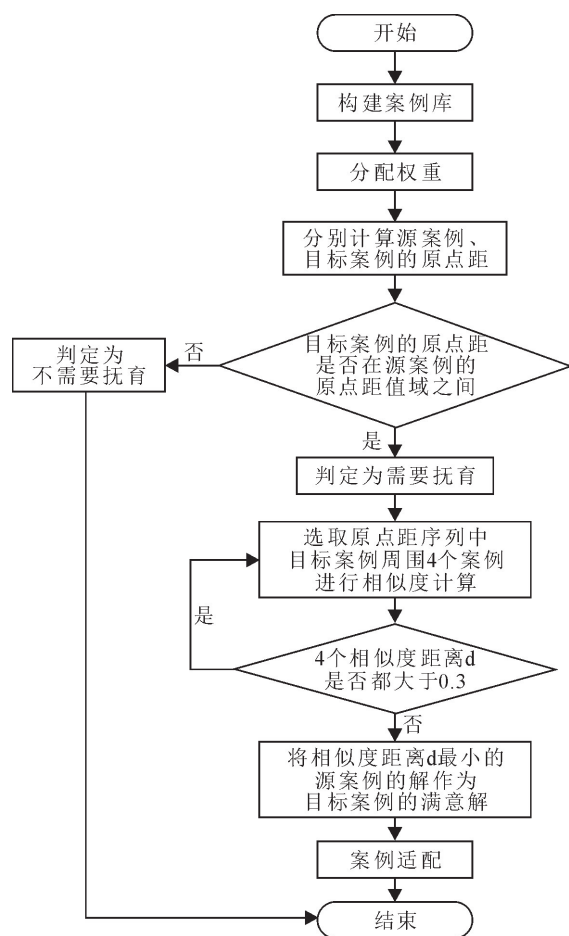


图 1 算法流程

Fig. 1 Algorithm flowchart

1.2.2 案例各属性权重计算 为在案例库中寻找与目标案例相似的源案例, 需要进行案例间相似度计算。确定案例各属性的权重是相似度计算中一个重要的步骤。目前, 权重的确定方法主要有主、客观分析法两大类。主观分析法常用的是相关分析法、德尔菲打分法和层次分析法等^[18]。客观分析法主要有注水分配算法(water-filling assignment, WFA)、遗传算法、神经网络法和模拟退火算法等^[18]。为降低对专家主观经验的依赖, 增加决策的科学性, 本研究使用客观分析法分配属性权重。

WFA 以通信领域的注水理论(WFT)为参考,

该理论认为:“各个子信道(属性)的衰减特性不同, 应该按照信噪比(重要度)的高低来分配功率(权重)。”^[19]。WFA 分配权重的思想与森抚相似(每个经理小班有多个属性, 每个属性有不同的特性, 更重要的属性应该分到更大的权重)。因此, 在综合考虑求解质量和算法自身特点的基础上, 采用 WFA 求解森林抚育中属性权重分配问题。

根据“注水分配算法”, 通过计算案例各属性与决策结果之间的相关系数, 并以 $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ (属性权重之和为 1, n 表示案例属性个数) 为约束可推导得到权重计算公式:

$$w_j = \left[\epsilon - \frac{1}{\alpha_j} \right]^+ \quad (1)$$

式中: $[\cdot]^+$ 表示 0 和 Z 的最大值 ($Z = \epsilon - \frac{1}{\alpha_j}$); α_j 表示第 j 个属性的重要程度(由该属性和决策结果之间的相关系数来确定); ϵ 为门限值, 计算公式如下:

$$\epsilon = \frac{1}{n} \left(1 + \sum_{j=1}^n \frac{1}{\alpha_j} \right) \quad (2)$$

结合(1)式、(2)式可计算出每个案例 $A_1 - A_{18}$ 的属性权重, 以供后续相似度计算使用。部分属性的权重值见表 1。

表 1 案例各属性权重分配(部分)

Table 1 Weight distribution of each attribute of the case (partial)

属性	林分类型	...	郁闭度等级	...	平均树高
权重	0.060 8	...	0.089 0	...	0.008 3

1.2.3 判定目标案例是否需要抚育 多个多属性案例间(M 个目标案例, N 个源案例)相似度计算的传统思路是遍历案例库中所有案例(例如最近邻法、K-NN 等), 逐个求解各案例之间的相似度, 再进行相似度比较, 最终寻找到最为相似的源案例, 其计算复杂度为 $O(M \times N)$ 。本研究的目标案例数量众多(施业区所有经理小班), 若按照传统计算方法, 计算效率较低。为优化计算效率, 需要寻找一种算法快速筛选出需要抚育的经理小班。

2013 年, 一种基于“原点距”的 KML-CB 自组织机制被提出, 该方法适用于数量大、属性多的案例库。其核心思路是使用“原点距”来标识案例, 将案例的各个属性视为案例的不同维度, 每个案例表示为多维空间的一个点。原点距就是计算各案例与空间原点之间的距离, 例如三维空间就是计算空间中一点与坐标原点(0,0,0)之间的距离, 这个原点就是假定的坐标为零的点。如此, 就可以使用原点距将案例进行逻辑定位, 在某一确定的维度空间中, 每个案例具有唯一的原点距, 案例相似度越高, 其原点距越相近^[20]。

本研究运用“原点距”的思想,把每个案例映射为 18 维空间的一个点,每个点具有唯一的原点距。计算案例库中所有源案例的原点距,并按数值升序保存在数据表中,即可得到源案例的原点距值域。当目标案例的原点距落在该值域之内,即判定为需要进行抚育,再进行后续案例相似度的精确计算(决策该经理小班需要何种抚育方式);若落在该值域之外,则判定为不需要进行抚育,结束推理。因为只需要计算所有源案例和目标案例的原点距,所以优化后算法计算复杂度为 $O(M+N)$ 。

在计算原点距时,为解决案例同一属性因数量级、量纲等差异造成的计算错误,需要对数据进行归一化处理,本研究采用线性归一化方法(表 2)。 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$ 表示源案例, C_i 指第 i 个源案例; $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ 表示案例的各个属性, A_j 指该案例的第 j 个属性。由此可以构建属性矩阵(公式 3),其中, As_{ij} 代表第 i 个案例的第 j 个属性值。

$$As = \begin{bmatrix} As_{11} & \cdots & As_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ As_{m1} & \cdots & As_{mn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(4)对案例各属性值进行归一化处理:

$$As'_{ij} = \frac{As_{ij} - \min(As_{1j}, As_{2j}, \dots, As_{mj})}{\max(As_{1j}, As_{2j}, \dots, As_{mj}) - \min(As_{1j}, As_{2j}, \dots, As_{mj})} \quad (4)$$

由此,案例 C_i 的原点距(od_i)为:

$$od_i = \left\{ \sum_{j=1}^n As'^2_{ij} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

表 2 案例原点距(部分)

Table 2 Case origin distance (partial)

编号	273	275	q	276	280	...	4
原点距	0.161 7	0.161 8	0.162 4	0.162 4	0.162 5	...	0.243 8

1.2.4 判定抚育类型 多维空间中原点距相同的点可能处于不同空间位置,多个案例可能具有相同原点距。引入“原点距”之后案例的原信息可能会部分丢失,导致“原点距”形式的相似度结果存在误差,不能满足抚育类型的准确判断。所以要判定目标案例的具体的抚育类型需要更精准的案例相似度计算。

欧式距离是目前最常用的相似度计算方法,在计算前同样需要对案例属性进行归一化处理。本研究参考罗忠良等^[19]提出的“归一化欧式距离”计算方法对案例相似度进行计算,该算法在保证推理精度的条件下简化了计算过程,其优越性在实际工程应用中得到证明。计算公式为:

$$d_i = \left\{ \sum_{j=1}^n (C_{ij} - T_j)^2 \cdot W_j \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

式中: T 为目标案例; C 为源案例; n 代表案例属性

个数; W_j 表示属性 j 的权重(根据公式 1、2 计算); d_i 表示目标案例与第 i 个源案例的相似距离。代入归一化的属性值进行计算,若计算得到的 d 越小,则表示 2 个案例间的相似度越高。

通过前期对案例库数据的模拟试验,发现同类抚育方式的 2 个源案例之间的相似度在 $[0, 0.3]$ 之间,所以将 0.3 设为 1 个阈值。参考“fish-and-shrink”算法思想^[22],每次在原点距排序中选取目标案例周围 4 个源案例计算相似度。若得出的目标案例与 4 个源案例的相似度皆超出阈值(0.3),则扩大源案例范围,再取 4 个源案例计算,如此迭代直至寻找到相似的源案例(若一直未能找到相似的源案例,则标记该目标案例,进行后续案例适配性调整)。若相似度在阈值之间,则取相似度最大(即距离 d 最小)的源案例作为目标问题的“满意解”,即以该源案例中经理小班的抚育方式作为目标案例中经理小班的抚育方式。

1.2.5 案例适配性调整 案例适配是指对案例推理中得到的源案例的解决方案进行调整,从而使结果更符合目标案例的实际需求。根据推理求得的解的个数,可将案例适配分为:单案例适配(仅得到 1 个相似源案例)和组合案例适配(得到多个相似度相同的源案例)^[23-25]。本研究对推理结果进行了适配性调整,主要分为下述几种情况。

情况 1:单案例适配。将推理得到的源案例的解作为目标案例的解。

情况 2:组合案例适配。若匹配到的各源案例抚育方式相同,则按照情况 1 处理;若不同,则辅助规则推理进行求解(规则来源于森林抚育国家标准^[26]及地方性规程^[27])。

情况 3:目标案例未匹配到源案例。使用规则推理对目标案例进行匹配,判定其是否需要抚育,需要何种抚育方式。

2 结果与分析

2.1 算法实例

案例库中共有源案例 4 045 条,以目标案例 q 为例进行算法模拟。

步骤 1:计算案例各属性的权重值(表 1)。

步骤 2:计算各案例的“原点距”(表 2)。

步骤 3:判断目标案例 q 是否需要抚育。根据表 2 可知, q 的原点距在所有源案例原点距的范围之间,所以判定 q 需要进行抚育。

步骤 4:选取 q 左右 4 个相邻源案例。由表 2 可知,其 CaseID 分别为:273、275、276、280。

步骤 5:计算 q 与 4 个源案例的归一化欧式距

离 d 。计算结果依次为: 0. 132、0. 204、0. 424、0. 402。

步骤 6:去除 d 超过试验阈值的源案例。由于试验阈值设置为 0. 3,所以去除编号 276 和 280 的 2 个源案例。

步骤 7:选择 d 最小的源案例作为目标案例 q 的满意解。由于 q 与编号 273 号案例之间的欧式距离最小,所以选取 273 号源案例的抚育方式(综合抚育)作为目标案例 q 的抚育方式。

本研究提出的算法最终解决 2 个问题,即判定目标案例(森林经理小班)是否需要抚育,若需要,则决策适合该案例的抚育方式。在案例中,最终判定目标案例 q 需要进行抚育,适合该案例的抚育方式为综合抚育。

2.2 算法运行结果分析

案例库中源案例的抚育类型可分为以下五大类:割灌除草、全面补植、生长伐、透光伐和综合抚育。随机抽取 20% 的源案例作为测试数据(809 条),80% 作为训练数据(3 236 条),经多次训练,预测精度达到 97. 16%,详细结果见表 3。森林抚育智能决策算法模拟的总体准确率为 97. 16%,其中,全面补植的推理精度为 81. 82%,综合抚育和割灌除草的推理精度为 100%。由结果可知,本算法能根据历史数据推理得出较为准确的森林抚育决策方案。

表 3 模拟结果
Table 3 Simulation results

抚育方式	错误数量	正确数量	正确率/%
综合抚育	0	189	100. 00
割灌除草	0	270	100. 00
透光伐	5	139	96. 53
生长伐	10	152	93. 83
全面补植	8	36	81. 82
总计	23	786	97. 16

从表 3 中结果来看,森抚业务中与其他作业方式有交集的抚育活动(例如综合抚育)以及抚育技术要求相对较低的活动(例如割灌除草)的算法推理精度较高。全面补植的推理精度较低,主要有两方面的原因,一个是案例库中全面补植的数据较少,算法训练不足;另一个原因是全面补植不仅需要抚育历史数据,还需要造林历史数据。因此,后续可以通过扩充不同类型的案例库来改进算法精度。

在算法计算复杂度方面,若依照传统思路直接将 M 条目标案例与案例库中所有 N 条源案例进行相似度计算,其计算复杂度为 $O(M \times N)$ 。本研究提出的算法进行前期的数据处理(计算源案例与目标案例的原点距)之后,仅需要将目标案例与最少 4

个源案例进行相似度的计算即可获得“满意解”,计算复杂度为 $O(M+N+4)$ 。因此,本研究提出的算法在降低计算复杂度上有一定意义。

3 结论与讨论

为帮助林业基层单位管理者降低在决策过程中对技术人员经验的过度依赖,减弱因林业基层专业人员缺乏对森林抚育活动的影响,本研究对森林抚育经理小班智能选取及其抚育类型的智能决策进行了研究,提出基于案例推理的森抚智能决策算法。

本研究以黑龙江林口林业局历史抚育数据为基础构建抚育案例库;使用案例推理的方法,结合注水分配算法计算各案例的属性权重;结合基于“原点距”的 KML-CB 算法思想对森林经理小班进行选取;结合 fish-and-shrink 算法思想、使用归一化欧式距离计算案例之间的相似度,对经理小班的抚育类型进行决策。提出的案例相似度推理机制,解决了森林抚育中的关键决策问题,使森抚决策更具科学性。提出的算法对传统的相似度推理算法进行了改进,提高了推理的速度,实现了较为准确的森抚经理小班选取及抚育方式的辅助决策。传统的相似度推理算法,其计算复杂度为 $O(M \times N)$,本研究提出的森林抚育智能决策算法计算复杂度仅为 $O(M+N+4)$,预测准确度达 97. 16%,由此可见,提出的算法在计算精度和计算复杂度上皆有一定的意义。

本研究将构建的森林抚育智能决策算法应用于决策支持系统(DSS)之中。目前,该系统部署在京东云平台上,客户端可以通过 Web 浏览器访问系统(<http://114.67.250.30>)。

研究中还存在一些不足,提出的算法仅能辅助管理者进行经理小班层级的决策。但在实际抚育作业时,由于林场抚育资金和抚育面积的限制,技术人员需要在经理小班内或跨经理小班选取更小一级的抚育单位(作业小班)进行抚育,所以在作业小班层级上的决策更符合实际业务需求。本研究提出的算法只能帮助决策者确定作业小班所属的经理小班,不能对确定的作业小班进行决策。未来将考虑引入遥感卫星图像辅助,以期能够帮助决策者确定作业小班的具体位置(带经纬度的多边形区域),使抚育决策更接近实际管理需求。

参考文献:

[1] 国家林业和草原局. 中国林业统计年鉴 2013[M]. 北京:中国统计出版社,2013:166.
[2] 国家林业和草原局. 中国林业和草原统计年鉴 2018[M]. 北京:中国统计出版社,2018:158-159.
[3] 井晖,王武魁,张靖然. 森林抚育作业计划决策支持系统设计与

- 应用[J]. 林业资源管理, 2019(5):136-144.
- JING H, WANG W K, ZHANG J R. Design and application of decision supporting system for forest tending operation plan [J]. Forest Resources Management, 2019(5):136-144. (in Chinese)
- [4] 陈栋, 吴保国, 刘建成, 等. 基于框架表示法的森林经营知识服务系统设计与实现[J]. 浙江农林大学学报, 2017, 34(3): 491-500.
- CHEN D, WU B G, LIU J C, *et al.* Design and implementation of forest management knowledge service system based on frame representation[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2017, 34(3): 491-500. (in Chinese)
- [5] 王建明. 华北落叶松人工林抚育作业决策技术研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2017.
- [6] 刘合翔, 吴斌. 人工智能技术在精准林业中的运用与发展[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(1): 183-188.
- LIU H X, WU B. Application and development of artificial intelligence technology in the precision forestry[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2006, 21(1): 183-188. (in Chinese)
- [7] 杨雪春, 刘东兰, 郑小贤. 基于 GIS 的森林采伐辅助决策系统研究[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(4): 217-222.
- YANG X C, LIU D L, ZHENG X X. Decision and development of support system for deforestation based on GIS[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(4): 217-222. (in Chinese)
- [8] 范军, 邵崇斌, 赵文英. 数字林业基础建设中应用 Web 服务技术的构想[J]. 西北林学院学报, 2004, 19(3): 171-174.
- FAN J, SHAO C B, ZHAO W Y. Method and proposition on application of web service technology in digital forestry basic construction[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2004, 19(3): 171-174. (in Chinese)
- [9] 吴保国, 马驰. 森林培育专家系统中造林决策知识库设计与推理机求解算法研究[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(Supp. 2): 9-13.
- WU B G, MA C. Design of afforestation and decision-making knowledge base and research of inference engine algorithm in the silviculture expert system[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2009, 31(Supp. 2): 9-13. (in Chinese)
- [10] 魏丽娜, 周冠军, 孙海龙, 等. 氮磷施肥对水曲柳叶片光合特征及体内非结构性碳的影响[J]. 森林工程, 2021, 37(5): 20-27.
- WEI L N, ZHOU G J, SUN H L, *et al.* Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on photosynthetic characteristics and non-structural carbohydrate of *Fraxinus mandshurica* [J]. Forest Engineering, 2021, 37(5): 20-27. (in Chinese)
- [11] 关追追, 赵江宁, 邱权, 等. 楸树人工林生长规律及其最优生长模型研究: 以河南省洛宁县楸树为例[J]. 森林工程, 2021, 37(2): 1-10.
- GUAN Z Z, ZHAO J N, QIU Q, *et al.* Growth law and optimal growth model of *Catalpa bungei* plantation—a case study of *Catalpa bungei* in Luoning County, Henan Province[J]. Forest Engineering, 2021, 37(2): 1-10. (in Chinese)
- [12] 谢小华, 唐丽玉, 邹杰, 等. 基于本体规则和案例推理相结合的树木生长模拟——以杉木为例[J]. 林业科学, 2012, 48(9): 68-75.
- XIE X H, TANG L Y, ZOU J, *et al.* Integrating rule-based and case-based reasoning for simulation of tree growth: a case of *Cunninghamia lanceolata* [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(9): 68-75. (in Chinese)
- [13] 李光, 寇应展, 杨牧, 等. 基于案例推理的知识库系统设计[J]. 科学技术与工程, 2006, 6(8): 1085-1087.
- [14] WATSON I. Case-based reasoning is a methodology not a technology[J]. Knowledge-Based Systems, 1999, 12: 303-308.
- [15] 温亮宝, 刘红霞. 基于案例推理的森林病害诊断方法探讨[J]. 安徽农学通报, 2007, 13(18): 173-175.
- [16] 温继文, 傅泽田, 李道亮, 等. 鱼病诊断过程模拟及其推理模型的构造[J]. 水产科学, 2003, 22(2): 46-48.
- [17] 曹洁. 基于案例推理的数据挖掘算法搜索策略的研究[J]. 电脑开发与应用, 2010, 23(5): 44-46, 49.
- [18] 胡帆, 袁蓓. 信息系统评价方法的研究与改进[J]. 科技创新与应用, 2015(21): 45.
- [19] 严爱军, 钱丽敏, 王普. 案例推理属性权重的分配模型比较研究[J]. 自动化学报, 2014, 40(9): 1896-1902.
- YAN A J, QIAN L M, WANG P. Comparative research on the distribution models of attribute weights in case-based reasoning[J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(9): 1896-1902. (in Chinese)
- [20] 张建华. 知识管理自学习案例的自组织机制与检索算法研究[J]. 情报杂志, 2013, 32(12): 194-199.
- [21] 罗忠良, 王克运, 康仁科, 等. 基于案例推理系统中案例检索算法的探索[J]. 计算机工程与应用, 2005, 41(25): 230-232.
- LUO Z L, WANG K Y, KANG R K, *et al.* Study on a case retrieval algorithm in case-based reasoning system[J]. Computer Engineering and Applications, 2005, 41(25): 230-232. (in Chinese)
- [22] SCHAAF J, WALTER R. A next step towards efficient case retrieval in large scaled case bases[J]. Springer Berlin Heidelberg, 1996: 362-376.
- [23] 侯玉梅, 许成媛. 基于案例推理法研究综述[J]. 燕山大学学报: 哲学社会科学版, 2001, 12(4): 102-108.
- [24] 常春光, 崔建江, 汪定伟, 等. 案例推理中案例调整技术的研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(6): 1260-1265, 1283.
- CHANG C G, CUI J J, WANG D W, *et al.* Research on case adjustment technology in case reasoning[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(6): 1260-1265, 1283. (in Chinese)
- [25] 陈宗海, 许志诠. 过程系统训练仿真器的面向对象分析与设计[J]. 系统仿真学报, 1998, 10(3): 50-54.
- [26] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 中华人民共和国国家标准森林抚育规程: GB/T15781-2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015: 1-14.
- [27] 黑龙江省森林工业总局. 黑龙江省国有林区营林技术系列标准[M]. 黑龙江: 东北林业大学出版社, 2003: 187-240.