

# FEM 绿色建筑自动化评价的集成框架——以中国绿色建筑评价为例

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/29026.html>

*本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！*

FEM 绿色建筑自动化评价的集成框架——以中国绿色建筑评价为例。论文标题：An integrated framework for automatic green building evaluation: A case study of China

期刊：Frontiers of Engineering Management

作者：Qiufeng HE, Zezhou WU, Xiangsheng CHEN

发表时间：16 Aug 2023

DOI：10.1007/s42524-023-0274-0

微信链接：[点击此处阅读微信文章](#)

作者：何秋凤<sup>1,2,3</sup>, 吴泽洲<sup>1,2,3\*</sup>, 陈湘生<sup>1,3</sup>

单位：

1 海城市韧性基础设施教育部重点实验室（深圳大学），深圳，中国。

2 深圳大学中澳BIM与智慧建造联合研究中心，深圳，中国。

3 深圳市地铁地下车站绿色高效智能建造重点实验室，深圳，中国。

\* 通讯作者；邮箱：[wuzezhou@szu.edu.cn](mailto:wuzezhou@szu.edu.cn)

引用：

Qiufeng HE, Zezhou WU, Xiangsheng CHEN. An integrated framework for automatic green building evaluation: A case study of China. Frontiers of Engineering Management, <https://doi.org/10.1007/s42524-023-0274-0>

文章链接：

<https://journal.hep.com.cn/fem/EN/10.1007/s42524-023-0274-0>

<https://link.springer.com/article/10.1007/s42524-023-0274-0>

导语：随着政府对可持续建造的日益重视，绿色建筑评价正面临着巨大的市场需求。绿色建筑评价工作主要包含两个部分：评价数据获取和绿色得分评估。这两项工作都需要耗费大量时间和精力。以往的研究主要关注于绿色评估的自动化，缺乏依据绿色建筑评价体系实现评价数据自动化获取的研究。此外，当前迫切需要更加简化的结构化标准知识管理，以促进更广泛的传播。对此，本文提出了一个集成建筑信息模型、本体和网络地图服务的概念框架，以提高绿色建筑整体评估过程的效率和对标准知识的管理。具体而言，依据中国绿色建筑评价标准（GB/T50378-2019），本研究创新性地采用了Autodesk Revit的可视化编程软件Dynamo，以及web地图服务的应用编程接口，以提高绿色建筑评价所需数据和地理信息的获取。随后，利用本体模型对绿色建筑评价标准知识进行可视化管理，并通过SWRL规则实现绿色评分的逻辑推理。最后，以一个住宅建筑为例，验证所提议的绿色建筑自动化评价概念框架在理论和技术方面的可行性。研究结果为绿色建筑标识申报单位提供了一种自审的方法，具有重要的实用价值。

关键词：自动评价，绿色建筑，BIM，网络地图服务，本体推理应用

## 1.引言

《巴黎协定》呼吁各国努力达到二氧化碳排放峰值（Qi 等人, 2020; Yu 等人, 2022）。建筑业被认为在协助各国实现这一目标方面承担着主要责任（Huo 等人, 2022; Li 等人, 2022）。据统计，2020年全球建筑业的能源消耗占总能源消耗的36%，与能源相关的二氧化碳排放量占37%（GABC, 2021）。绿色建筑被认为是推动建筑行业节能减排的关键（Qiu 等人, 2019; Wang 等人, 2019）。因为在设计、施工和运营阶段，绿色建筑在能源效率和环境友好性方面都优于传统建筑（Bampou, 2017）。通过在建筑设计和建设过程中利用绿色建筑评价标准中提到的先进的节能技术或措施，建筑业有望减少13%到28%的碳排放（Subramanyam 等人, 2017; Qin 等人, 2022）。因此，全球各国都在积极推动绿色建筑的发展。当前，美国已完成2.77亿平方米的绿色建筑建设。同时，中国新建绿色建筑面积从2012年的400万平方米已增长到2021年的20亿平方米（Y NET, 2022）。

衡量一栋建筑是否达到绿色建筑的标尺是通过绿色建筑评价体系进行认证（Wu 等人, 2021）。这一程序步骤被称为绿色建筑评价。随着未来绿色建筑的快速扩展，绿色建筑评价面临着巨大的市场需求（Jalaei 等人, 2020）。地方政府已开始督促申请人在申请绿色建筑认证之前进行设计方案自审，以减轻负责绿色建筑评价的专家的负担（JNHURDB, 2021）。然而，随着市场对绿色建筑评价需求的持续增加，人工评价的局限性日益显现，包括耗时费力且高度依赖专家判断（Jiang 等人, 2018）。过度依赖专家判断会导致额外的专家费用，从而可能阻碍绿色建筑的发展（Li 等人, 2020）。因此，迫切需要探索一种自动化评价方法，以提高绿色建筑评价过程得效率并减少对专家判断的依赖。

然而，要实现绿色建筑评价的自动化仍面临重大挑战。这一工作需要从绿色建筑生命周期的各个阶段收集多学科数据，并全面理解评价系统中所包含的知识和评分规则。目前，一些学者已经开展了绿色建筑自动化评价工具的研究。例如，Jalaei 等人（2020）开发了一个基于Autodesk Revit的插件，依据美国Leadership in Energy and Environmental Design（LEED）标准，实现对建筑可持续性进行综合预评价。Jiang 等人（2018）手动从建筑信息模型（BIM）中获取数据，然后将这些数据输入到既定的本体模型中，以根据《绿色建筑评价

标准》(GB/T50378-2014)的特定条文进行自动评分。总之,现有研究已经基于LEED这一世界主流的绿色建筑评价系统探索了相对全面的自动化评价方法。然而,关于中国的《绿色建筑评价标准》(ASGB)的自动化研究主要集中在评分原理上,数据获取的自动化研究相对较少。考虑到现有的综合自动化评价方法可能不符合中国的国内需求,特别是中国几乎强制规定所有新建建筑必须达到基于ASGB的最低星级标准,迫切需要进一步研究基于ASGB的更自动化的评价工具,以满足世界上最大建筑市场的需求(Zhu等人,2023)。

针对这一研究空白,本研究依据ASGB,集成了BIM、本体和网络地图服务(WMS),以建立一个用于数据自动获取和自动评分推理的概念框架。在这些组成部分中,BIM成为获取与建筑相关的多样化专业数据的有力工具(Lu等人,2017)。此外,研究人员可以使用Dynamo可视化编程语言直接从BIM中提取评估所需的建筑材料和构件属性信息,无需手动收集数据(Guo等人,2021b)。除了评估建筑性能外,ASGB还包括对建筑周围服务设施可达性的评估。利用WMS作为强大的地理信息库,研究人员可以通过调用其开放的应用程序接口(API)访问这些地理数据(Huang等人2022)。本体模型的使用代表了一种高效的知识管理方法(Zhang等人,2020;Zheng等人,2021),能够存储与绿色建筑评价标准相关的知识并促进分层推理。随后,通过一个工程实例验证了该理论框架的可行性。总而言之,本研究在先前研究基础上取得了显著进展,为申请者提供了一种更为用户友好的方式来优化其绿色建筑设计方案,并为其他国家探索适合的自动化评价工具提供了宝贵的参考。

本文的其余部分结构如下:第二部分对相关文献进行了广泛回顾,并概述了研究空白。第三部分阐明了集成BIM、本体和WMS的理论框架。第四部分通过一个选定的绿色建筑案例展示了自动化评价过程。第五部分讨论了研究结果、研究局限和未来可行的研究方向。

## 2.文献综述

### 2.1 绿色建筑评价体系

绿色建筑评价体系是评估建筑可持续性和将可持续性概念融入建筑建设和运营的有力工具(Illankoon等人,2017)。为了在建筑建设和运用中提高环境绩效,许多国家都根据其独特的地貌特征、气候条件和技术进步水平制定了合适的绿色建筑评估体系,详见表1。

表1 世界上主流的绿色建筑评价标准

绿色建筑评价标准	最开始实施时间	实施地区
BREEAM	1990	英国
BEAM Plus	1996	中国香港
LEED	1998	美国
CASBEE	2002	日本
Green Star	2003	澳大利亚
Green Mark	2005	新加坡
ASGB	2006	中国大陆
DGNB	2007	德国
BSAM scheme	2019	撒哈拉以南非洲国家

Building Research Establishment Environmental Assessment

Method (BREEAM)是英国建筑研究机构(BRE)于1990年建立的绿色建筑评价标准(Ding等人,2018)。BREEAM包括九个评估类别:能源、废物、水、材料、健康和福祉、运输、污染、土地利用和生态以及管理(BRE等人,2022)。随着时间的推移,BREEAM已经发展成为欧洲领先的评估体系,针对新建建筑、翻新建筑、使用中的建筑和社区建筑制定了四种不同的评估标准(Guo等人,2021b;BRE等人,2022)。LEED是由美国绿色建筑委员会于1994年发起,采用基于积分的评估框架(Ding等人2018;Ugur等人2018)。它已经从LEED v1.0升级到LEED v4.1,涵盖了能源和大气、材料和资源、可持续场地、水效率、室内环境质量、设计创新和区域优先级等基本信用类别(USGBC,

2022)。中国在2006年制定了第一版本的ASGB (Ye 等人, 2015)，随后在2014年和2019年对其进行了修订。最新版本的ASGB包含五个信用类别：安全性和耐久性，健康和舒适性，居住者便利性，资源节约和环境宜居性 (MHURD, 2019)。此外，其他国家也推出了自己的绿色建筑评估体系，如日本的Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency (CASBEE)，澳大利亚的Green Star，德国的Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) (Yu 等人, 2015)，以及撒哈拉以南非洲的Building Sustainability Assessment Method (BSAM) (Olawumi 等人, 2020)。虽然这些绿色建筑评估体系中的具体指标可能因国家而异，但它们主要包括材料、能源、水、土地和居住者便利性等方面 (Zhang 等人, 2017)。

## 2.2 绿色建筑自动化评估

鉴于BIM模型和相关的可持续性分析软件的仿真结果包含了丰富的几何、材料和能源消耗数据等元素，大多数先前的研究都将BIM模型作为探索绿色建筑系统自动化评估的基础工具 (Ilhan 等人 2016; Ansah 等人 2019; Guo 等人 2021a)，具体的使用情况如表2所示。

表2 与绿色建筑自动化评价相关的研究

参考文献	评价标准和评价信用类别	国家或地区	实现自动化评价的信 用类型
Nguyen 等人 (2016)	<b>LEED v4</b> •Materials and resources •Location and transportation •Sustainable sites •Water efficiency •Energy and atmosphere •Indoor environmental quality •Innovation in design •Regional Priority	美国	•Location and transportation
Abdelalim 等 人 (2019)	<b>LEED v4</b> •Materials and resources •Location and transportation •Sustainable sites •Water efficiency •Energy and atmosphere •Indoor environmental quality •Innovation in design •Regional Priority	美国	•Location and transportation •Sustainable sites
Olawumi 等 人 (2021)	<b>BSAM scheme</b> •Sustainable construction practices •Site and ecology •Energy •Water •Material and waste •Transportation •Indoor environmental quality •Building management	尼日利亚	•Sustainable construction practices •Site and ecology •Energy
Ilhan 等人 (2016)	<b>BREEAM Europe Commercial 2009</b> •Management •Health and wellbeing •Energy •Transport •Water •Materials •Waste •Land use and ecology •Pollution	英国	•Materials
Jiang 等人 (2018)	<b>ASGB (GB/T50378-2014)</b> •Land saving and land utilization •Energy saving and energy resource utilization •Water saving and water resource utilization •Material saving and material resource utilization	中国大陆	•Land saving and land utilization

最初，Azhar等人（2011）和Wong等人（2014）开展了研究，以确定BIM模型是否有可能作为评估建筑可持续性的工具。其研究表明，使用BIM可持续性分析软件生成的文件可以直接或间接地为绿色建筑评估系统中的某些信用评估做出贡献。例如，研究发现使用BIM可以对LEED v2.2中的五条信用条文和一个先决条件进行评估，以及使用BIM可以完成BEAM Plus中的26分得分。随后，Nguyen等人（2016）通过基于Autodesk Revit Architecture 2013创建一个名为LEED评估器的插件，进一步促进了基于BIM的自动化评估。这个插件基于LEED中选定的信用条文，为建筑可持续性提供了自动评分。Olawumi等人（2021）开发了一种基于BIM的工具，用于自动评估尼日利亚建筑的可持续性能，解决了与耗时、劳动密集型和成本密集型人工评估相关的问题。此外，Ilhan等人（2016）不仅在BREEAM中实现了基于特定信用条文的建筑绿色评分的自动计算，还实现了与不同绿色建筑技术相关的成本自动计算。对于中国的绿色建筑评价，Jiang等人（2018）作为该领域的研究先驱，通过手动从BIM模型中提取评估数据并将其集成到已建立的本体模型中，实现了对ASGB（GB/T50378-2014）中三个信用条文的自动评估。

然而，当前的研究依赖BIM模型或可持续性分析软件实现自动化绿色评估的信用条文范围有限。如2.1节所述，绿色建筑评估体系通常包含居住者便利性的信用类别，其评估数据无法直接从BIM中提取。Chen等人（2017）提出了一个开创性的解决方案，通过在Autodesk Revit软件中开发一个插件，利用谷歌地图的API来应对这一挑战。该插件促进了LEED中居住者便利信用类别评估数据的自动收集。最近，Jalaei等人（2020）为绿色建筑的自动评估引入了一个更全面和系统的框架，即创建了一个插件，能够使用Autodesk Revit API、能源分析工具、照明模拟工具、谷歌地图和相关库来计算和预测潜在的累积LEED积分。该插件采用k近邻数据挖掘方法来估计无法直接从设计规范中计算的缺失分数，最终为绿色建筑项目的评估提供了一个创新的、全面的界面。

总之，当前的研究在开发与LEED相关的相对全面的自动评估框架方面已经取得了显著的成绩。然而，由于不同国家的评估标准和评分规则存在差异，这些完善的自动评估方法并不符合中国的具体评估要求。此外，许多这些研究将评估系统的内容纳入编程语言，这可能会阻碍用户对系统知识的理解。Jiang等人（2018）利用本体技术并开创了适用于中国ASGB（GB/T50378-2014）的自动评分原理，在这方面取得了显著进展，但该研究缺乏对自动数据采集的探索。

基于这些考虑，本研究旨在以下关键领域做出贡献：（1）构建适合于中国ASGB（GB/T50378-2019）的自动评估框架，该框架能够自动评估目标建筑的绿色绩效；（2）利用本体将绿色建筑评价体系的知识进行可视化，从而增强用户对ASGB知识的了解；（3）利用编程技术从WMS和BIM中自主提取必要的评估数据，从而实现基于BIM的自动化数据获取和自动化得分评估。

### 3. 方法论

为了实现研究目标，本研究通过集成建筑信息模型（BIM）、网络地图服务（WMS）和本体来实现构建绿色建筑自动化评价的概念框架。在该概念框架中，BIM模型作为项目招标和项目验收所需的关键文件，在中国的应用已越来越普遍（BJMCHURD，2022；DHURDHP，2022；DHURDSZ，2022）。Autodesk Revit是当前主流的建筑建模软件（Shi等人，2021）。在本研究中，使用可视化编程软件Dynamo从Autodesk Revit中自动提取与建筑几何和施工信息相关的评估数据。ASGB还需要评估建筑周围服务设施可达性的信息，这些信息在BIM模型中无法获取。因此，利用当前普遍使用的地图来收集生活便利信用类别中的评估数据。本体作为确定绿色评分的依据，不需要将评估系统的内容编码成程序代码，而是将其以结构化和可视化的格式存储在本体模型中（Gohary等人，2010）。这种方式简化了知识的存储和理解，尤其适用于那些经验有限的用户。此外，用户可以直观地修改本体模型中的实例，以适应评估系统内容在新版本发布时的更新（Zhang等人，2019）。目前，本体论在建筑行业中广泛应用于知识存储和基于标准的推理，包括建筑

成本计算（Lee等人，2014）、环境质量监测（Zhong等人，2018）和施工安全（Zhang等人，2015；Shen、Xu等人，2022）等领域。

通过提供的目标建筑的经纬度，以及BIM模型的访问，所提出的方法可以直接计算目标建筑的绿色评分。这种能力简化了设计和施工单位自审其建筑设计方案是否达到所需星级的评价过程。提议的概念框架由两个不同的模块组成，如图1所示。

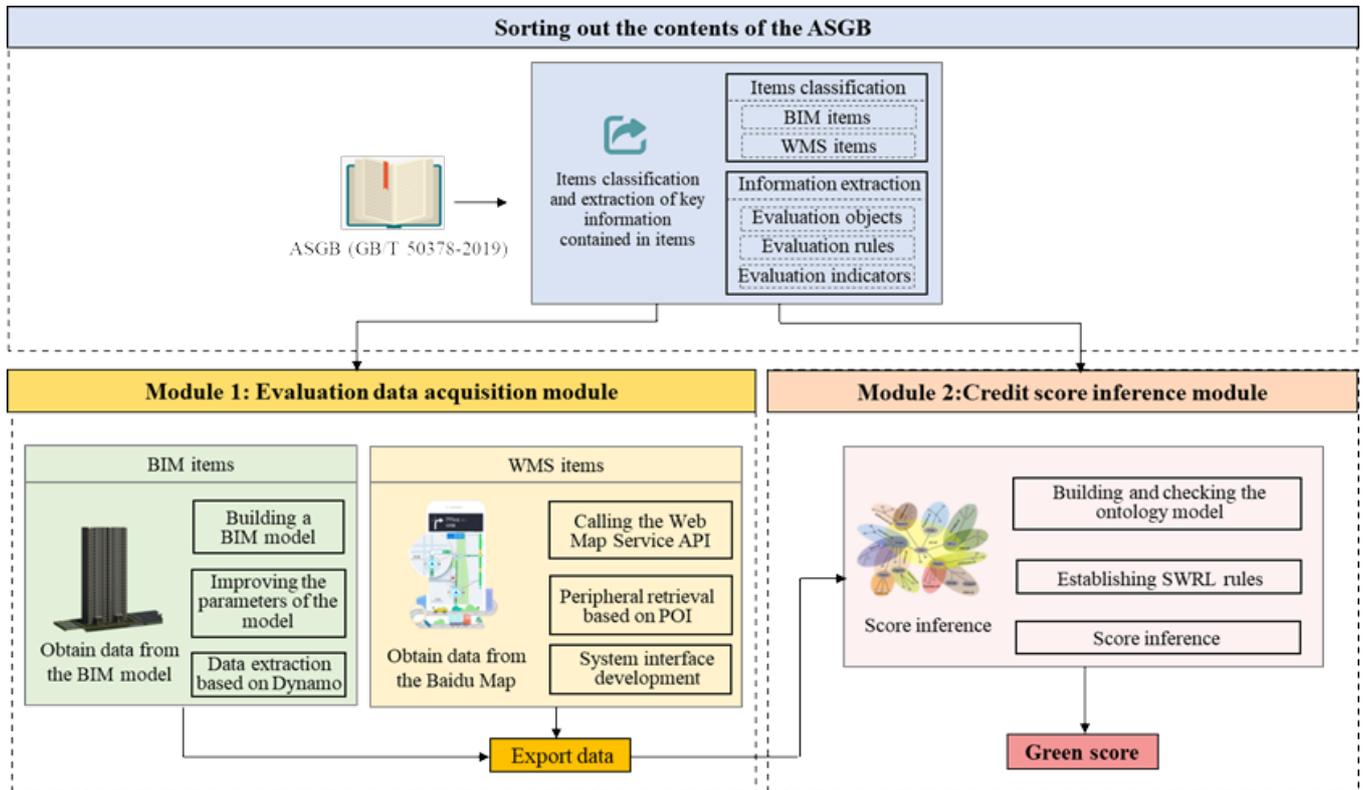


图 1 绿色建筑自动化评估的概念框架

为了执行这一过程，招募了三位精通BIM、本体论和地图API的专家，仔细梳理ASGB的内容。首先，将所有ASGB包含的所有条文分为两类：BIM条文（从BIM模型中获取评估数据）和WMS条文（依赖WMS获取数据）。随后，对这些条文中的评估对象、评估指标和评估规则进行深入分析。例如，不同条文包含特定的评估对象，如室内健身区、电梯和建筑与幼儿园之间的距离。评估指标为这些评估对象制定标准，例如室内健身区的最小面积为60平方米，电梯需要能够容纳轮椅并适合担架使用。评估规则则详细说明了如果满足条文中的评估指标应获得的分数，以及不满足时应扣除的分数。

为了获得目标建筑在各条文上的性能评估结果，必须详细说明通过BIM或地图获取评估数据的步骤。例如，可以通过在Dynamo中建立节点来访问BIM模型中电梯的特定属性。

基于ASGB内容分析，使用Autodesk Revit和地图开发了评估数据获取模块。对于BIM条文，Dynamo自定义节点以从BIM模型中提取所需评估数据。Dynamo解决了Autodesk Revit只能导出固定格式数据的问题，这些数据格式与ASGB的个性化要求不符。此外，Dynamo通过与外部软件接口，促进了实时数据导出。

对于WMS条文，使用Java编程语言调用地图提供的开放API。通过利用代码包，包括周边数据检索和步行距离计算，迅速获取与建筑周边服务设施可达性相关的评估数据。

基于ASGB内容分析，在Protégé中建立了本体模型和语义网规则语言（SWRL）规则，以创建评分推理模块。首先，定义实例、数据属性、对象属性和类，构建一个存储绿色建筑评价系统知识的本体模型。随后，根据ASGB评分规定编写SWRL规则。最后，使用Pellet推理引擎将本体和规则转换为兼容格式，从而实现绿色建筑评价标准知识的存储、管理和应用。

### 3.1 评价数据获取

#### 3.1.1 基于BIM的评价数据获取

BIM模型包含了建筑几何、材料信息和施工属性等大量信息。利用BIM模型获取绿色建筑评估数据可以显著简化评估过程，提高其效率。首先，需要人工分析BIM条文中包含的关键信息，如评估对象、评估标准、数据获取方法以及模型的精度要求。评估对象应与BIM模型中的构件相匹配，涵盖外墙、房间和平开窗等元素。评估标准对应这些构件的属性细节，这些属性可能是软件构件本身固有的，也可能需要手动添加，例如检查栏杆的长度。用户可以通过目视检查、基于Dynamo的开发等方法访问所需的参数信息。需要特别注意的是，模型的开发精度（LOD）对于数据获取的可靠性至关重要。更高的LOD意味着更详细和精确的模型，但也需要更多的时间和人力资源进行建模。因此，必须明确各BIM项目中的模型精度要求。LOD

100表示模型的精度足以描绘建筑的形状、面积和方向。LOD

200相较于以前的模型，包含了更精确定位的建筑构件。LOD

300规定了构件属性信息的要求，包括其固有属性和更复杂的参数细节。LOD

400表示模型应详细展示构件或设备的性能，包括制造商信息等。LOD

500要求模型应包含所有相关信息，以支持建筑的运营管理。

在明确了BIM条文包含的关键信息后，本研究使用Dynamo快速提取评估数据。Dynamo作为一种可视化编程软件，便于在Autodesk Revit数据库中执行各种必要的编程功能，如提取、集成、修改和计算。基于Dynamo的数据提取过程如图2所示。首先，使用String和Category.ByName按名称从BIM模型中提取类别，然后使用All Elements of Category获取属于指定类别的所有元素。随后，使用Element.GetParameterValueByName从元素中提取参数信息，并通过String指示要检索的参数类型，如长度、面积或体积。此外，在Element.GetParameterValueByName之前，使用Element.ElementType获取所选元素的构件类型。通过将Element.ElementType连接到All Elements of Category，可以提取元素的类型参数。最后，使用List.Create将提取的参数组织成一个列表，并使用List.Transpose进行转置。BIM数据随后通过Excel.WriteToFile导出到Excel。生成的可视化程序可以进一步保存在本地服务器上。如果需要从新的BIM模型中获取相关评估数据，可以直接执行可视化脚本来提取数据。

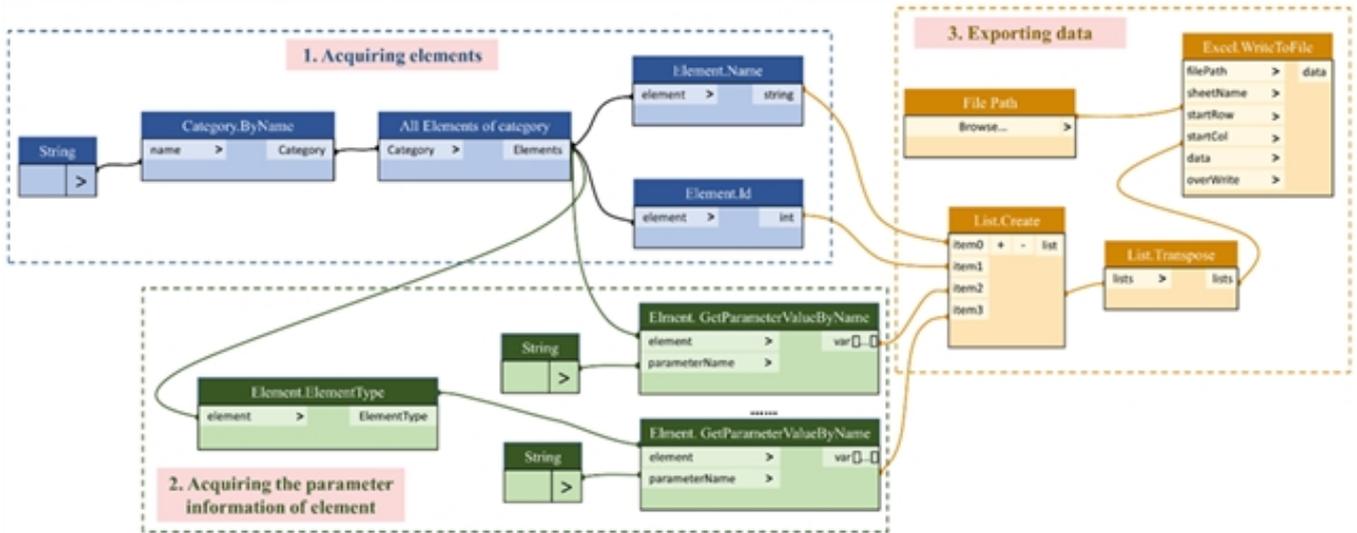


图2 基于Dynamo的BIM模型参数化数据提取过程

### 3.1.2 基于WMS的评价数据获取

手动收集与地理信息相关的评估数据是一项劳动密集且耗时的工作。在本研究中，使用Java编程语言构建了一个高效的地理数据收集平台。该平台通过调用地图API，并使用Android Studio 4.3开发软件将WMS条文集成到算法中。地理数据收集平台的架构如图3所示。

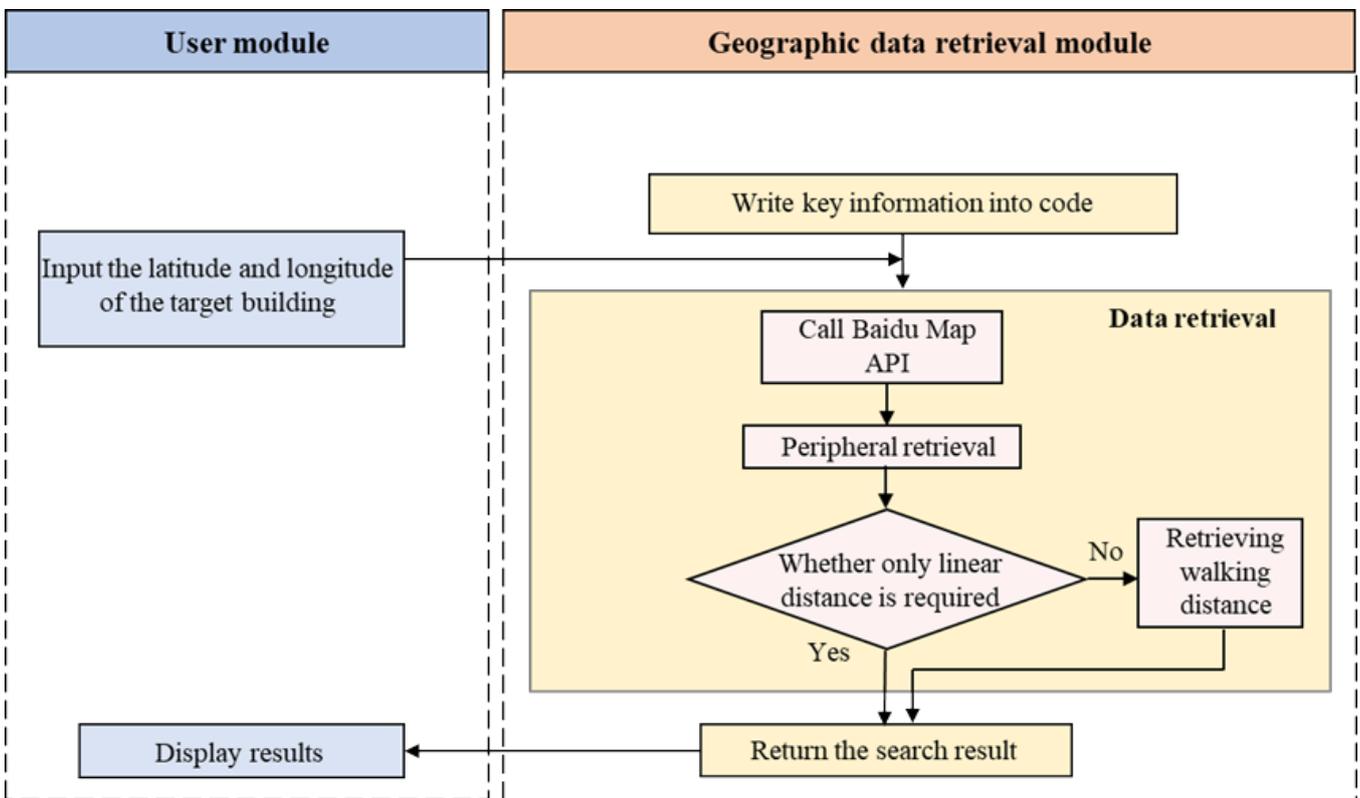


图3 地理信息数据获取平台的设计架构

地理信息数据获取平台包含两个模块：用户模块和地理数据检索模块。以下是每个模块的详细介

绍。

### (1) 用户模块

该模块由两个主要部分组成。第一部分允许用户输入建筑物的经纬度。用户输入这些坐标并启动搜索后，APP客户端将查询发送到服务器。第二部分处理检索结果的展示，负责展示每个WMS条文相关的目标值、结果值和参考数据。目标值是指WMS条文规定的要求，结果值是实际获得的结果。通过比较目标值和结果值，用户可以确定是否满足项目要求。当在既定范围内无法检索到结果时，服务器会继续扩大距离范围，最多可达2000米，以获取参考数据。除了上述结果外，该部分还提供更详细的信息，例如检索到的建筑名称、地址及其与目标建筑的具体距离。

### (2) 地理数据检索模块

该模块的开发涉及三个关键步骤。第一步是将WMS条文中的评估对象和评估参数等关键信息纳入代码中。第二步是数据检索，通过利用地图API的周边检索功能，确定目标建筑周围服务设施的数量或到这些设施的直线距离。如果条文要求评估值为步行距离，平台还将利用地图的路线规划功能计算目标建筑与服务设施之间的步行距离。最后一步是构建平台以展示检索结果。通过使用Android Studio设计平台界面，并使用Java将检索到的结果集成到相应的界面元素中。随后，通过数据线连接计算机终端和移动设备终端，在Android Studio中进行性能验证和调试，直到反馈结果与预期结果一致为止。

## 3.2 信用得分推理

### 3.2.1 基于本体的知识存储

建立本体模型通常遵循七步法 (Gao 等人, 2022)。本研究采用改进的方法来构建本体模型，该方法包括五个步骤。用于构建本体模型和推理应用的软件选择为Protégé 5.2.0。

#### (1) 确定本体的领域和范围

在本研究中，所开发的本体模型属于绿色建筑领域。其主要目标是涵盖与中国绿色建筑评估体系相关的知识，并辅助目标建筑的绿色评分推理。

#### (2) 定义类及类层次结构

本研究采用自上而下的方法系统地列举和定义类。为了系统和全面地存储ASGB的知识，本体类结构主要由三类组成：EvaluatedBuildingType（被评估建筑类型）、EvaluationProvision（评估条款）和EvaluationType（评估类型）。每个类别都包含各种子类，从而在父类与其子类之间建立层次关系。具体细节如表3所示。

表3 对ASGB建立类

类	类的定义	子类	子类的定义
EvaluatedBuildingType	评估的建筑类型	PublicBuilding	评估的对象是公共建筑
EvaluationProvision	评估的ASGB条文	EvaluationControl	决定项
EvaluationType	评估的阶段	EvaluationScore	评分项
		PreAssessment	预评估
		PostAssessment	建成后运营一年评估

### (3) 定义类的数据属性和对象属性

对象属性用于定义类之间的关系。在Protege软件中，预定义的is\_a作为默认对象属性（Shen, 等人 2022），表示类与其包含类之间的所有权关系。例如，ResidentialBuilding（住宅建筑）属于更广泛的类EvaluatedBuildingType（被评估建筑类型）。另一方面，数据属性用于建立类与数据之间的联系。在本研究中，数据属性用于表示与实例对应的评估数据。这些数据属性包括多种类型，如整数、字符串、浮点数等。这意味着输入的评估数据可以包含多种信息类型，而不受格式限制。例如，室内健身场地的面积被分类为浮点类型，而电梯的可达性属性则分类为字符串类型，等等。

### (4) 创建实例

实例代表一个更具体的对象，是实现自动推理的关键。实例创建过程包括选择一个类，然后根据相应条款的评估对象和评估指标构建实例。例如，条款6.2.1.1的评估对象是从入口到公交站的步行距离，评估指标是步行距离。因此，在类EvaluationScore6\_2\_1\_1下建立的实例包含上述评估对象和评估指标。最后，将所建立的属性与相应的实例链接。

### (5) 本体验证

由于本体模型是包含各种层次关系的领域知识的具体抽象表示，通过检查本体的一致性来评估其构建的合理性。该验证过程使用Pellet推理机进行（Zhang 等人, 2015）。

## 3.2.2 基于本体的知识推理

为了实现本体的应用推理，有必要基于已建立的本体模型制定SWRL规则。SWRL是一种能够表达规则和逻辑的语言，与本体模型中的类、关系和实例兼容。本研究中每条SWRL规则包含三个基本组成：实例的数据属性、判断条件和判断结果。当实例的数据属性被赋予特定值后，就可以进行比较。利用SWRL规则中的比较逻辑，比较实例的数据属性，最终得出每条款项下目标建筑的评分。

Protégé软件中的SWRL Tab插件无缝连接了SWRL规则环境和本体编辑环境（Shen, 等人 2022），极大地提高了创建SWRL规则的便利性。通过可视化界面，用户可以选择相关的数据属性和比较逻辑来构建ASGB规则库。此规则库简化了流程，消除了繁琐的手动查找规范和计算分数的需求。最后，将本体Web语言（OWL）和SWRL规则转换为Drools规则。使用Rete算法匹配Drools规则进行推理，自动更新本体模型中的绿色评分，从而实现绿色建筑评分的自动推理。

## 4. 案例研究

### 4.1 项目介绍

为了验证所提出的框架，选择了一栋住宅楼作为案例研究。本研究应用理论框架，根据ASGB指南对其在居住便利性评分类别中的绿色评分进行了预评估。通过将评估结果与绿色建筑评估专家的结果进行比较，可以确认该理论框架的可行性和有效性。该建筑的地理坐标为东经106.696757，北纬29.519323，共有地上33层和地下2层。图4展示了案例建筑的土建BIM模型和机电BIM模型。基于之前对BIM模型精度的分析，本研究使用的BIM模型满足自动预评估的要求。

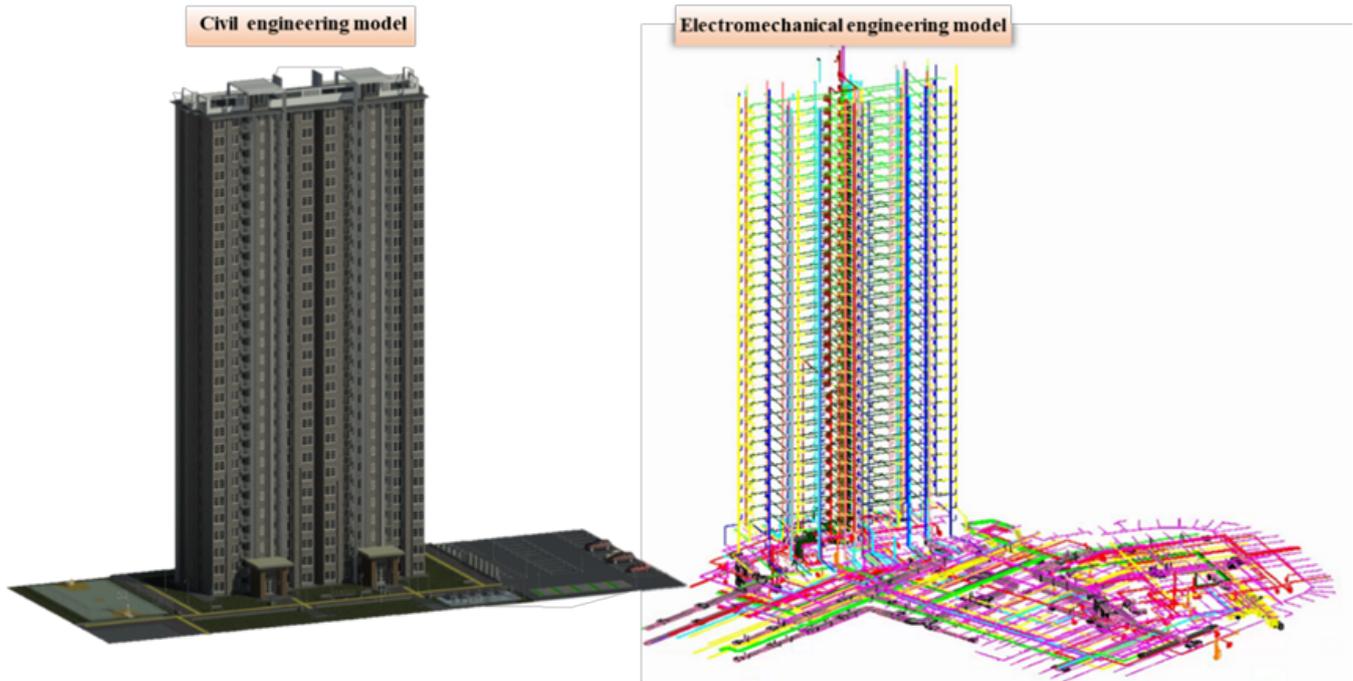


图4 案例项目的BIM模型

#### 4.2 案例项目的评价数据获取

本研究选择《绿色建筑评价标准》(GB/T50378-2019)的第六章,即生活便利信用类别,来验证所提出的概念框架。该类别包括一条控制项和四条评分项。生活便利类别中的评分项包括:(1)出行与无障碍;(2)服务设施;(3)智能运行;(4)物业管理。鉴于本研究提出的概念框架旨在用于建筑设计阶段,而(4)物业管理评分项为运营阶段的评估内容,因此本研究重点关注生活便利信用类别的前一条控制项和前三条评分项。具体来说,使用所提出的概念框架进行数据采集的过程如下。

##### 4.2.1 基于BIM的案例项目的评价数据获取

生活便利信用类别中的条文被分为BIM条文和WMS条文。附录A的表A1提供了所有BIM条文中关键信息的分析,并明确了每个条文对BIM模型的精度要求。值得注意的是,BIM条文允许通过对BIM模型的可视化查看或利用Dynamo进行开发来获取评估数据。若通过可视化查看BIM模型可以满足某一条文的评估标准,则评估数据的值为1;否则,值为0。基于这一规则,生活便利信用类别中通过可视化查看BIM模型所得的得分统计情况如图5所示。如条文6.1.1规定,必须为场地的高差、建筑物的室外场地、建筑物的主要出入口及场地上的公共道路交接处提供无障碍坡道和视障人士通道。通过检查三维BIM模型中的无障碍设施配置,可以明显看出,案例建筑符合这一要求,因此评估数据赋值为1。

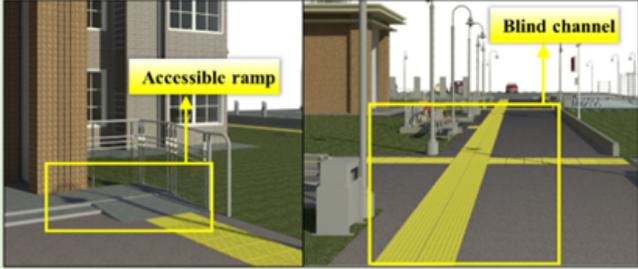
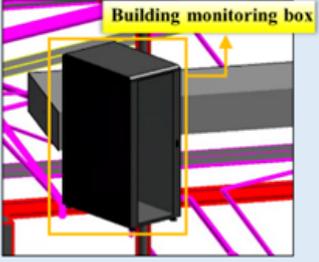
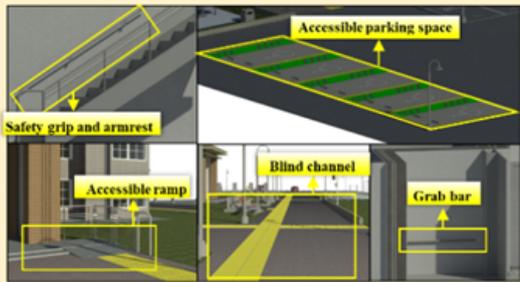
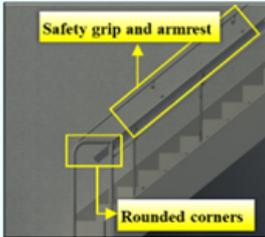
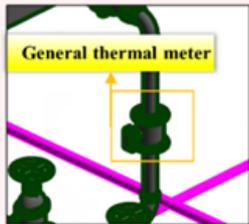
Number of items	6.1.1		6.1.6	
Visual viewing				
Evaluation data	1		1	
Number of items	6.2.2.1	6.2.2.2	6.2.6	
Visual viewing				
Evaluation data	1	1	1	

图 5 基于BIM的评估数据获取可视化展示

对于其余的BIM条文，可以在Dynamo平台内通过编程选择特定的元素参数，从而实现评估数据的自动提取。例如，条款6.2.5.4要求建筑物楼梯与主要出入口之间的距离不得超过15米。为满足这一要求，使用Category.ByName函数从BIM模型中提取建筑楼梯元素。随后，利用All Elements of Category函数检索该元素的长度属性，该属性格式为浮点数。最后，通过Element.GetParameterValueByName和Excel.WriteToFile函数提取获得的数据，并将其存储在指定位置的Excel文件中。通过Dynamo开发获得的案例建筑评估数据如图6所示。

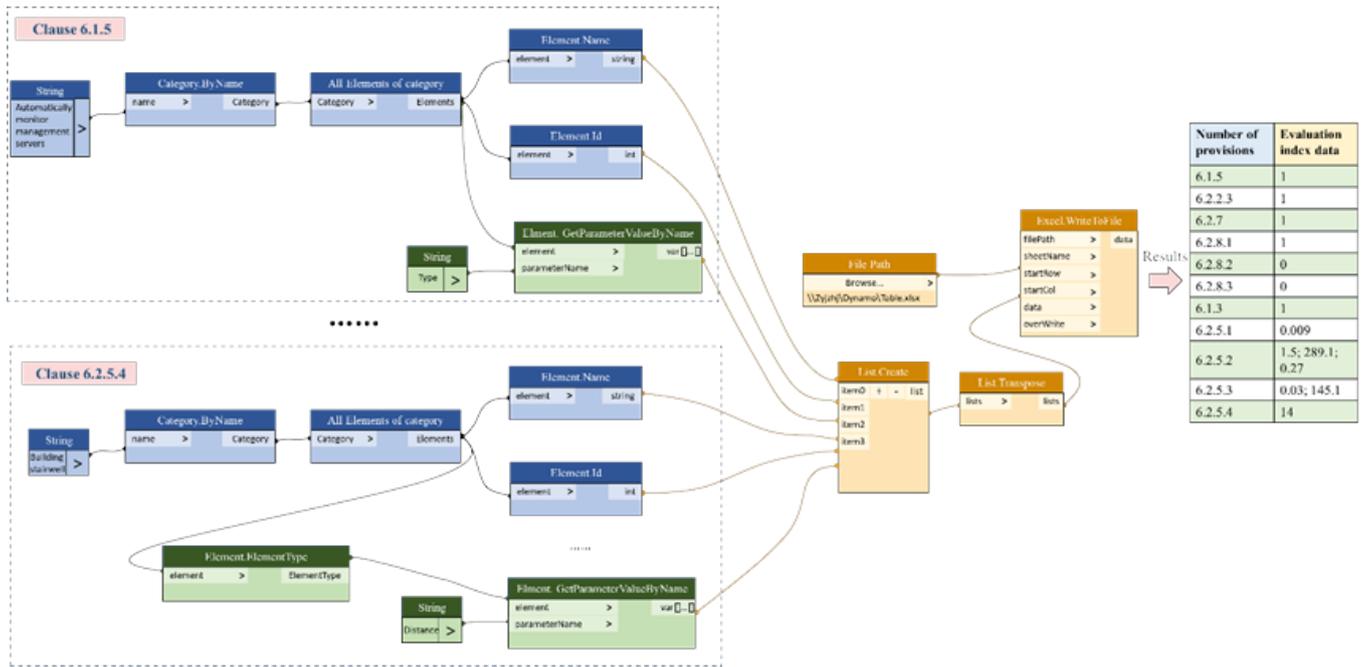


图6 基于Dynamo获取评价数据的可视化编程过程

#### 4.2.2 基于WMS的案例项目的评价数据获取

对于WMS条文，本研究通过开发一个地理数据集成与获取平台来获取相关评估数据。该平台能够自动搜索建筑周围服务设施的距离、数量和名称。此外，平台还集成了中国最广泛使用的互联网地图服务之一——地图，确保数据的有效性和实时准确性。通过在平台中输入建筑的经纬度坐标，可以获取所有WMS条文的评估数据，如图7所示。只需从案例建筑的施工设计图中输入明确标注的经度（106.696757）和纬度（29.519323），然后点击开始搜索，即可检索评估数据。

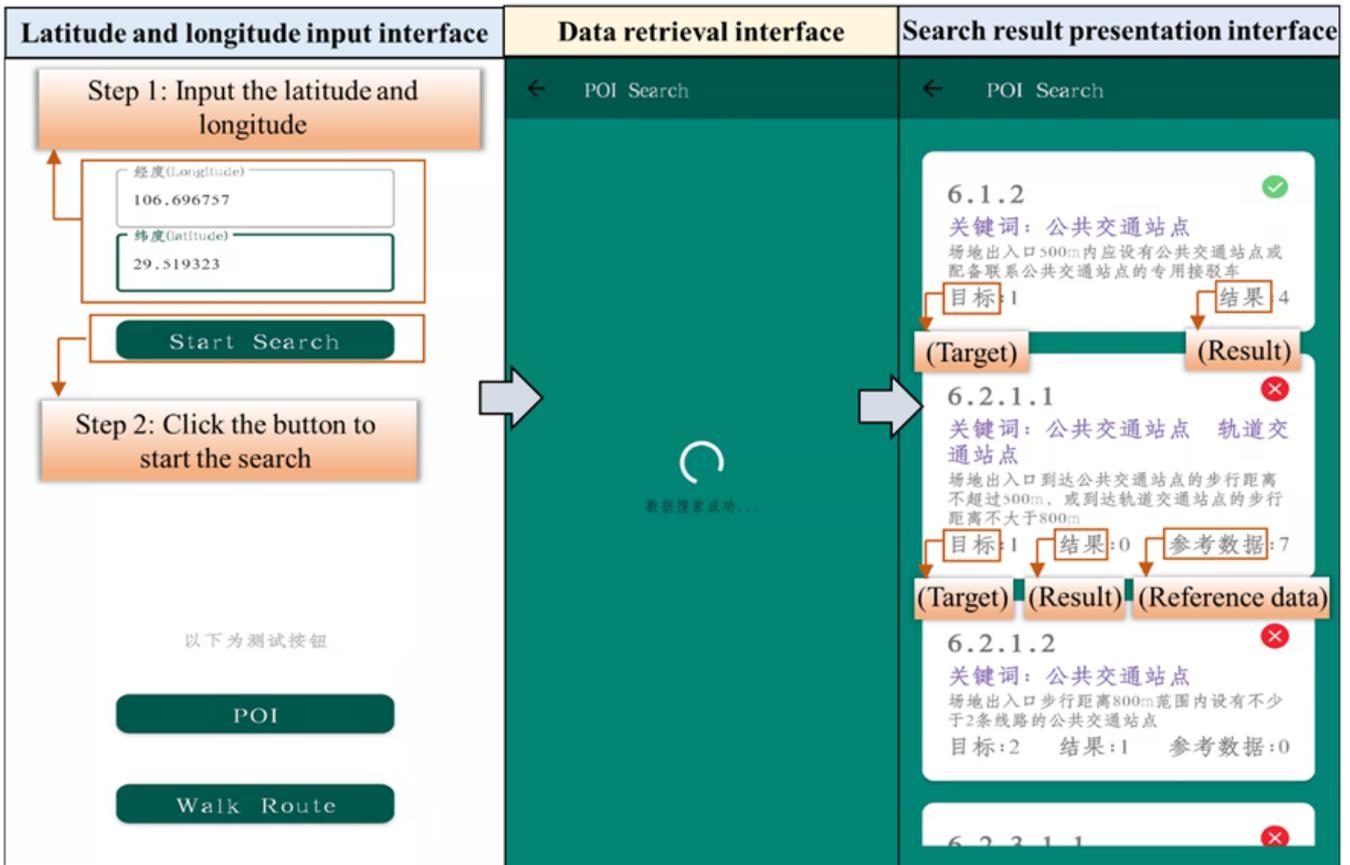


图7 用于检索WMS条文下评估数据的平台

在检索结果呈现界面中，结果和参考数据提供了评价指标数据的结果值。结果处显示为0，表示在条文的要求下并未找到合适的POI数据。但APP会给出参考数据，该参考数据为距离目标建筑2000米范围内条文中要求的特定服务设施的POI个数，此时条文的评价指标数据赋值则为参考数据中的某一个距离值。结果处有值，表示在条文的要求下找到了合适的POI数据，此时条文的评价指标数据赋值则为结果中某一个距离值。

如图8所示，对于条文6.1.2，目标是1，而结果是4，这表明条文6.1.2要求在特定条件下至少有一个公共交通运输站，而案例建筑周围有4个符合条件的公共交通运输站。点击条款6.1.2的框，可以查看所有检索结果的详细信息。可以选择距离最短的数据作为条款6.1.2的评估数据，最终距离值为224米。

对于条文6.2.1.1，目标为1，结果为0，参考数据为7，表明文款6.2.1.1要求在特定条件下至少检索到一个公共交通运输站或轨道交通站，但最初没有符合条件的站点。在这种情况下，平台将检索半径扩展至2000米，结果检索到7个公共交通运输站作为参考数据。同样，可以从参考数据中选择任意一个距离值作为条文6.2.1.1的评估数据。

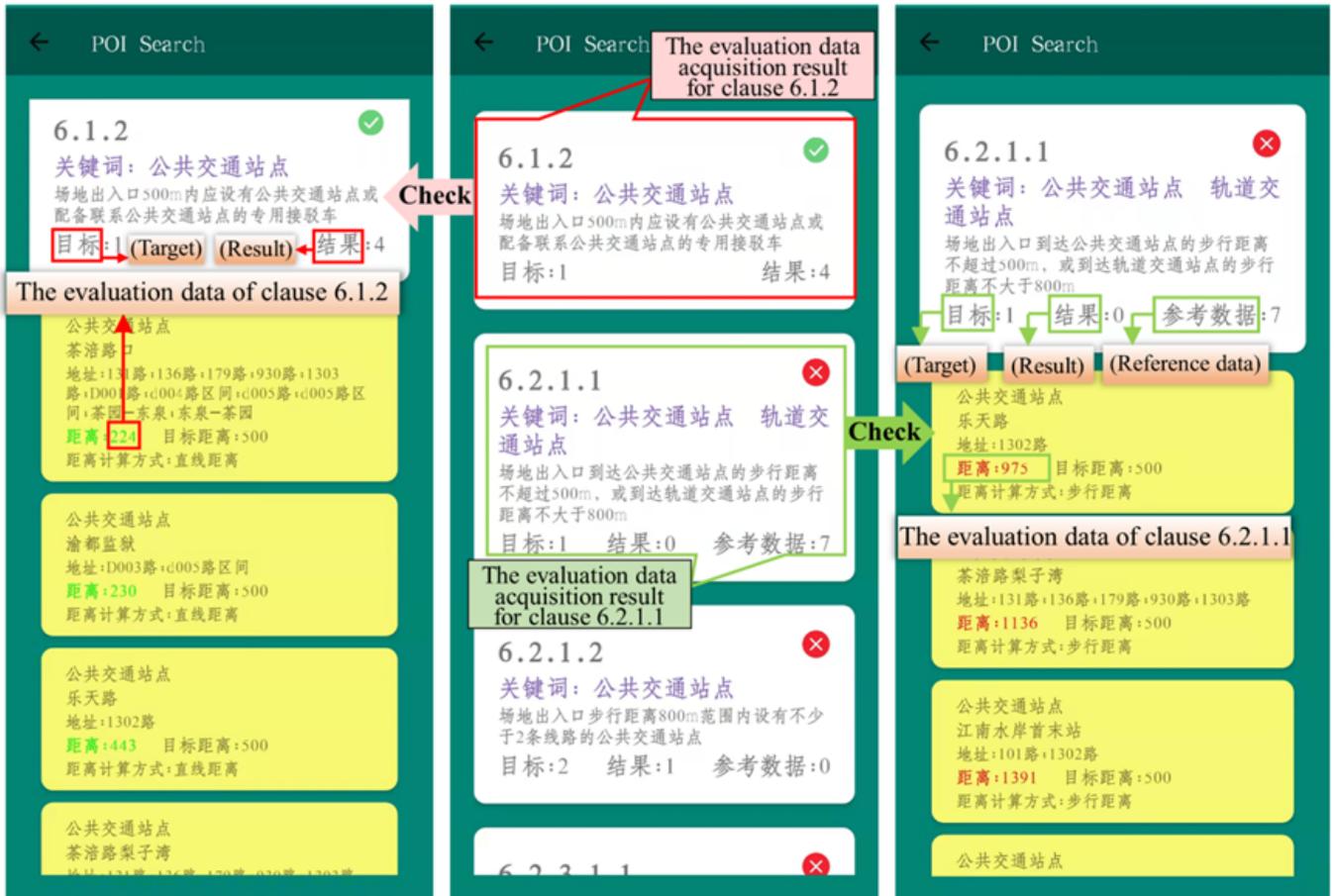


图8 在APP中关于条文6.1.2和条文6.2.1.1的评价数据获取结果

类似地，以相同的方式获得其他所有POI应用点条文的评价指标数据，具体结果如表4所示。

表4 对于WMS条文的评价数据

条文编号	条文要求的评价指标结果数量	评价数据
6.1.2	1	224
6.2.1.1	1	975
6.2.1.2	2	708, 2000
6.2.3.1	1	572
6.2.3.2	1	1357
6.2.3.3	1	2000
6.2.3.4	1	1264
6.2.3.5	1	1915
6.2.3.6	1	1003
6.2.3.7	3	210, 315, 273
6.2.4.1	1	1407
6.2.4.2	1	2000

### 4.3 案例项目的信用得分推理

#### 4.3.1 基于本体的知识存储

通过分析所有包含在使用者便利性评分类别中的条款，手动建立了本体模型，如图9所示。Classes部分展示了本体模型的结构。第一层类包括评估建筑对象（EvaluatedBuildingType）、评估条款（EvaluationProvision）和评估类型（EvaluationType）。第二层类涵盖了公共建筑（PublicBuilding）、住宅建筑（ResidentialBuilding）、前置条款（EvaluationControl）、评分条款（EvaluationScore）和预评估（PreAssessment）。第二层类又包含更多的子类。Object attributes表示类之间的关系，例如hasBuildingType将评估建筑类型（EvaluatedBuildingType）与公共建筑（PublicBuilding）和住宅建筑（ResidentialBuilding）连接起来。Instance属于每个子类下的实例，根据评分条款的具体内容构建，可用于后续的本体应用推理。Instance具有数据属性，用于分配评估数据。



图9 本体模型

#### 4.3.2 基于本体的知识推理

基于已建立的本体模型，通过分析条文的意义和隐含的评分规则，进一步建立了SWRL规则。控制项的评估结果与评分项的评估结果不同，前者为字符类型，后者为整数类型。因此，本研究以一个控制项，即条文6.1.2和一个评分项，即条文6.2.5.3为例，详细阐述了SWRL规则的建立过程。

对于条文6.1.2：步行入口500米范围内应设有公共交通站点或有前往公共交通站点的专用班车。在本体模型中，条文6.1.2的数据属性是`hasSpecialShuttleCar6_1_2`，当距离小于或等于500米时，满足限制条件，否则不满足。因此，在SWRL规则中，应将条款6.1.2的数据属性与500进行比较。lessThan表示小于或等于。如果操作成功，则返回是，表示满足前置条文6.1.2。条文6.1.2的SWRL规则如下：

```
swrlb:lessThan (?b, 500^^xsd:int) ^ EvaluationControl6_1_2 (?a) ^
hasSpecialShuttleCar6_1_2 (?a,?b) hasEvaluationGrade6_1_2 (?a, Yes)
```

对于条文6.2.5.3：室内健身空间面积不得小于地上建筑楼层面积的0.3%，且不得小于60平方米，得3分。在本体模型中，条文6.2.5.3具有两个数据属性：`hasIndoorSpaceRate6_2_5_3`和`hasIndoorSquare6_2_5_3`。根据条文6.2.5.3的内容，在SWRL规则中，应将室内健身空间面积比率（`hasIndoorSpaceRate6_2_5_3`）与0.003进行比较，室内健身空间面积（`hasIndoorSquare6_2_5_3`）与60进行比较。greaterThan表示大于或等于。如果操作成功，则获得3分；否则，不得分。条文6.2.5.3的SWRL规则如下：

```
swrlb:greaterThan (?c, 60^^xsd:int) ^ hasIndoorSpaceRate6_2_5_3 (?a,?b) ^ swrlb:greaterThan (?b, 0.003^^xsd:float) ^ EvaluationScore6_2_5_3 (?a) ^ hasIndoorSquare6_2_5_3 (?a,?c) hasEvaluationGrade6_2_5_3 (?a, 3^^xsd:int)
```

采用类似的分析方法，在Protégé 5.2.0软件中建立其余项目的SWRL规则，结果如图10所示。



图10 SWRL规则

在建立的本体模型和SWRL规则的基础上，案例项目在生活便利类别下的信用得分将被具体确定。首先，需要对本体模型中所有实例的数据属性的值进行修改。以条文6.2.4.1为例，如图11所示，双击实例es6\_2\_4\_1的数据属性hasWalkingDistancetoCityPark6\_2\_4\_1 0.0f，修改0.0的值为APP得出的建筑场地出入口到达周边公园或广场的直线距离值1047.0。其余实例以相同的方式，修改数据属性的值。



图11 修改实例es6\_2\_4\_1的数据属性

利用已建立的本体模型、SWRL规则和赋予特定值的数据属性，进一步通过Protégé中的SWRLTab插件进行本体推理。如图12所示，该过程始于执行OWL+SWRL -> Drools，将OWL规则转换为规则引擎，并耗时1794毫秒。接下来执行Run Drools来运行规则引擎，得到467个规则。这一步耗时570毫秒。最后，执行Drools -> OWL将推理得出的规则转换为OWL知识，需时18毫秒。据此计算，使用已建立的本体模型和SWRL规则评估案例建筑在这些条文中的得分所需时间为2382毫秒。

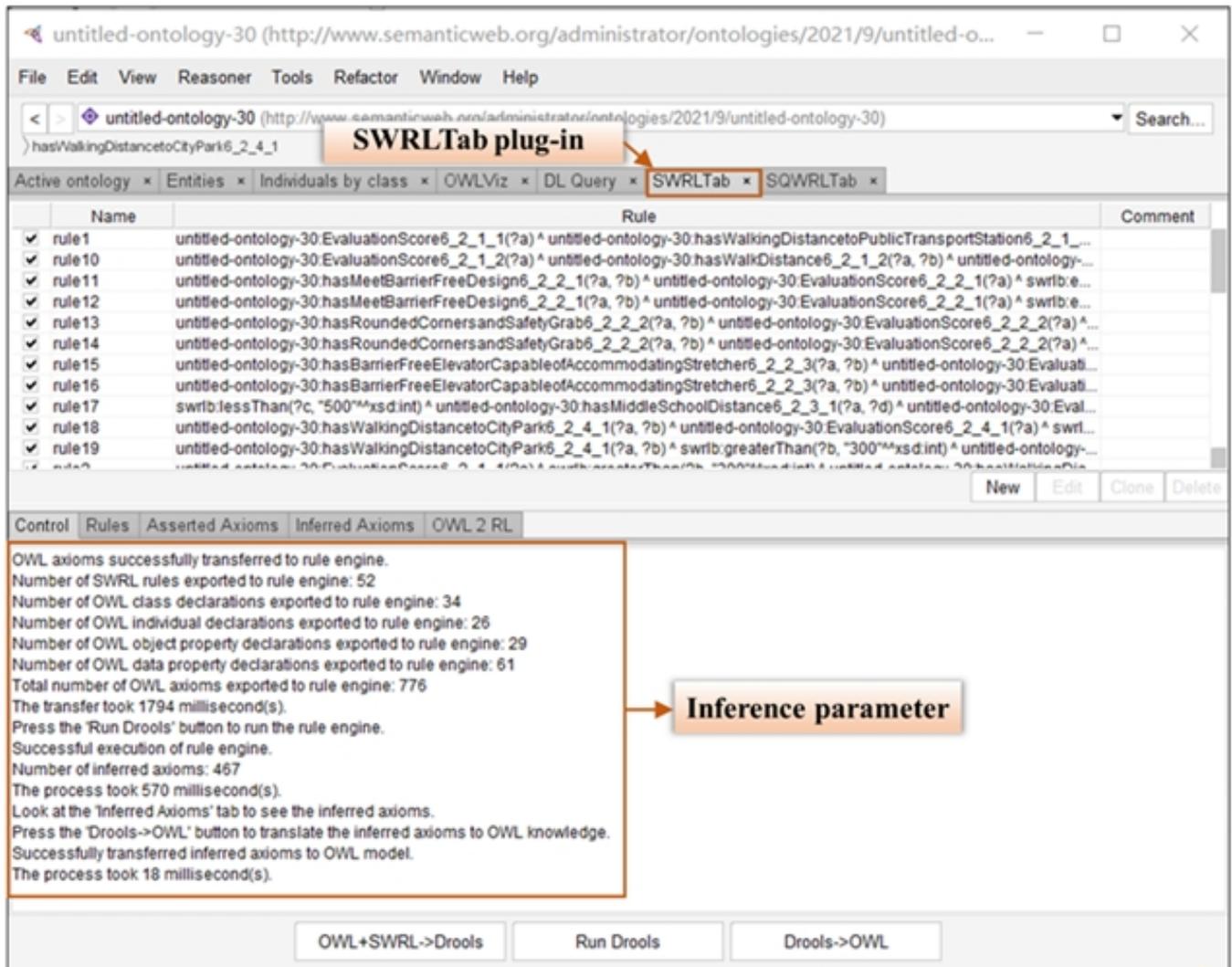


图12 本体推理

案例建筑在生活便利信用类别方面的绿色得分如图13所示。该案例建筑满足此信用类别中的所有控制项，并获得33分。通过将评估结果与获得的案例建筑评估证书进行比较，可以得出，通过本研究提出的概念框架获得的评估结果与专家进行的评估相符。这一验证证实了本研究提出的概念框架的可行性。

此外，将本研究所消耗的时间与第三方评估咨询机构的顾问和中国建筑局第四局的设计师的评估所消耗的时间进行比较，得出的结论是，提出的框架在数据收集和评估这些项目方面所需时间较少。这突显了提出的框架显著提高了绿色建筑评估的效率。此外，当评估更多条文时，提出的框架将实现更大的时间节省。

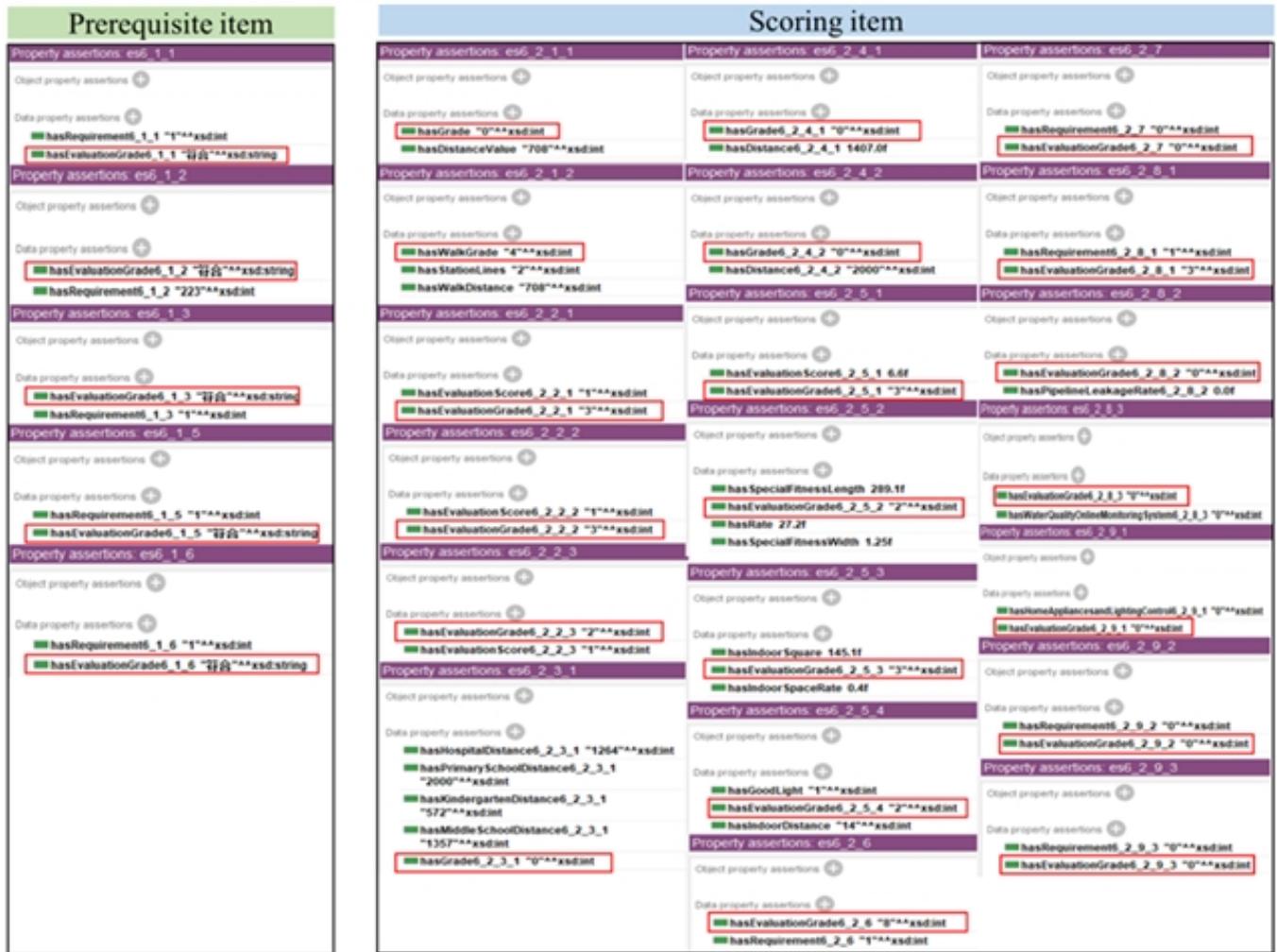


图 13 案例项目的绿色得分

## 5. 讨论和总结

绿色建筑评价标准是评估建筑环境性能的重要标准。随着中国对新建筑绿色性能的重视日益增加，开发用于绿色建筑评价的自动化工具变得越来越重要。本研究提出了一个新颖的理论框架，将BIM、本体论和WMS集成到绿色建筑自动化评价中，该概念通过工程案例研究得到验证。BIM和WMS被用于自动化数据收集，而本体模型则用于存储绿色建筑评价知识和评分逻辑。

最近，本体作为存储规范或标准知识的一种手段，在研究中日益受到关注（Zhang等人, 2015; Du等人, 2016）。这是由于本体可使得规范或标准知识的变得结构化和逻辑化。此外，本体有助于组织和管理此类知识。在以往的研究中，Jiang等人（2018）将本体技术引入绿色建筑评价领域，为评分项中的三个条文创建了本体模型和SWRL规则，最终实现基于这些条文的评分。与以往的研究不同，本研究在实现对评分项的本体模型和SWRL规则建立的基础上，还进一步探讨了控制项进行本体模型和SWRL规则的建立，其中的控制项的数据属性为字符串格式。本研究证明了本体技术在更广泛范围的绿色建筑评价系统中的适用性。

BIM模型作为获取绿色建筑评价数据的丰富数据源。然而，先前的研究主要集中在通过二次开发从BIM模型中提取LEED的评价数据上（Jalaei等人，

2020)，而忽视了对中国这个全球最大建筑市场的评价数据获取的重要性。在本研究中，Dynamo编辑程序被用于从BIM模型中提取评价数据，通过将其导出到Excel实现实时数据交互。此外，互联网地图服务提供商为获取绿色建筑评价数据提供了可靠途径。过去的研究局限于基于Google地图的LEED的数据获取。通过使用地图的API和其地理数据检索代码库，本研究开发了一个平台，快速获取符合ASGB规定的周围服务设施的信息。这丰富了关于绿色建筑自动评价研究。

本研究的理论意义在于增强了现有中国绿色建筑评价系统自动化研究。此外，本研究结果可能为其他国家开发适合其相应绿色建筑评价系统的自动化评价工具提供有价值的指导。在实际应用方面，本研究结果可以被设计和施工公司用于自审其设计方案是否符合所需的绿色评级。

然而，研究仍存在一些局限性，需要在未来的研究中进一步探讨。例如，所提出的自动评估框架仅适用于绿色建筑评价系统的定量方面，不适用于缺乏评价标准的定性条文。虽然评价系统中的定性条文相对较少，但研究一个能够同时容纳定量和定性方面的全面自动评估框架仍然是值得的。此外，应该探索开发自动化程序以便将数据导入到本体模型中。其次，本研究提出的框架的成功实施取决于具有足够精确的BIM模型。目前，中国对BIM模型的重视程度很高，并且政府已经开始要求在建筑施工开始之前提交BIM模型。然而，本研究并未深入探讨评估系统对BIM模型的具体精度要求，为确保自动化评估工具的有效运行需进一步在这方面进行深入探索。

总之，本研究对现有研究进行了扩展，不仅丰富了当前关于绿色建筑自动化评估的知识体系，而且为其他领域提供了有价值的见解。例如，它可以作为在本体模型中存储与建筑安全标准相关的知识的参。

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](http://www.iikx.com)转发