

生态环境遥感评价模型库系统平台构建研究*

张永瀚¹ 孙瑞志¹ 李林¹ 李骞¹ 许允飞² 戴佚舟¹

(1. 农业部信息获取技术重点实验室, 北京 100083;

2. 中国科学院遥感与数字地球研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100094)

摘要: 在生态环境遥感评价系统构建过程中,以业务为核心的开发模式导致了多种业务模型与系统耦合度高、模型复用困难的问题。API库本身的开发平台限制导致了系统多平台调用能力欠缺。同时,在遥感大数据量计算的背景下,系统更是难以应对多用户的并发请求,广区域覆盖度计算造成了长延时和系统资源高占用的问题。针对以上模型复用、多平台调用、模型并发处理和大数据量计算4个问题,提出了基于SOA和OpenStack的生态环境遥感评价模型库,在模型复用和多平台调用问题方面,采用Web服务对生态环境遥感评价常用的20种专题算法模型进行统一封装、部署和并发调优;在模型并发处理和大数据量计算方面,采用OpenStack对多个服务进行动态负载均衡和任务分配。此外,还分析了模型库构建过程中核心的模型元数据接口设计和模型封装的实际问题,并提出了设计思路。最后,以三江源地区为例进行评价生产,证明了系统的可行性。

关键词: 生态环境遥感评价 模型库 Web服务 并发 大数据量

中图分类号: X820.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)S0-0267-07

Research of Remote Sensing Evaluation Model Library Platform of Ecological Environment

Zhang Yonghan¹ Sun Ruizhi¹ Li Lin¹ Li Qian¹ Xu Yunfei² Dai Yizhou¹

(1. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture, Beijing 100083, China

2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing & Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: In the process of constructing an ecological environment evaluation system of remote sensing, due to the business-core development mode, there is high degree of coupling between a variety of business models and the system, and the model reused could be a difficult problem. The development platform restriction of the API library itself leads to the lack of invoking ability for multi-platform. At the mean time, under the background of remote sensing of big data calculation, it is more difficult for the system to cope with the problem that multi-user concurrent requests, long time delay which is caused by wide area coverage calculation and the high system resources occupied. In the view of above problems, the paper puts forward an ecological environment evaluation model library that based on SOA and OpenStack. In terms of model reused and multi-platform invoking problem, 20 kinds of commonly used remote sensing thematic evaluation algorithm models were unified packaging, deployed and concurrent tuned as Web services. To solve the problem of model concurrent processing and large data computing, it utilized OpenStack to solve dynamic load balancing and task allocation for multiple services. On the other side, the paper analyzed the practical problems of core metadata interface design and encapsulates during the process of building a model library, and then provided new design idea. At the end, it developed

收稿日期: 2015-10-28 修回日期: 2015-11-12

* 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2015XD001)和国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2013AA12A302)

作者简介: 张永瀚, 硕士生, 主要从事智能信息处理研究, E-mail: severuszhang@qq.com

通讯作者: 孙瑞志, 教授, 博士生导师, 主要从事农业信息化技术、计算机支持的协同工作研究, E-mail: sunruizhi@cau.edu.cn

ecological environment production evaluation that based on Three-river Head Source of Qinghai Province as example, which proved a stable system operation results.

Key words: Evaluation of ecological environment based on remote sensing Model library Web service
Concurrency Massive data

引言

在当前环境问题愈发严重的背景下,及时、准确地获取整体和区域性的生态环境信息,并进行综合性评价,对环保部门及时发现环境问题、进行针对性的环境治理具有重要意义^[1]。

在一般的生态环境遥感评价过程中,需要基于地理信息确定评价区域及对应评价指标体系,之后在系统中直接查找或按需生产评价指标对应的专题产品数据,再采用层次分析法、灰色关联度等评价方法,确定指标权重,最后对栅格/遥感数据执行实际评价计算,得到最终的评价产品数据。在实际系统构建过程中,由于通用开发模式的限制、商业软件 API 的平台限制以及系统运行时用户量和数据量的提升,导致实际运行系统中存在以下问题:①系统模块的通用性和可扩展性未在设计时作为主要考虑因素,导致大量业务模型与系统耦合度高,模型复用困难。近年来出现的一些平台式解决方案,如 OpenRS-cloud(开放遥感云平台)等遥感云服务平台,在设计上充分考虑了系统扩展性和伸缩性^[2],然而并未对众多遥感实际应用场景提供针对性服务,因此无法作为特定应用场景下业务系统构建时高效可用的解决方案。②系统构建时使用的商业 API(如 ArcGIS 在桌面端提供的开发技术 ArcGIS Engine 和服务端端的开发技术 ArcGIS Server),为不同平台上问题的解决提供了有力支撑,然而由于 API 本身的限制,导致模型算法难以跨平台调用。③随着原有生态遥感系统数据量的持续递增与广泛应用,系统单项计算功能模块上存在着多用户并发请求和广区域覆盖度计算带来的大数据量处理时延的问题。

针对以上系统构建中存在的模型复用、多平台调用、并发处理以及大数据量计算问题,在对以上 4 个问题研究现状和技术手段进行充分分析的基础上,本文提出并设计基于 SOA 和 OpenStack 的生态环境遥感评价模型库系统,针对模型复用困难的问题,对模型进行抽象化描述和模型元数据接口设计,对模型的统一管理 with 复用进行探索;针对业务模块多平台调用困难的问题,采用 Web 服务对不同的模型进行统一封装。针对系统应用后期可能出现的多用户并发请求以及大数据量计算系统压力大、时延

长的问题,尝试基于 OpenStack 进行服务多实例动态扩展与负载均衡,以三江源地区为例进行生态环境遥感评价^[3-5],对系统的有效性进行验证测试。

1 生态环境遥感评价模型库概述

生态环境遥感评价模型库主要是为了对生态环境遥感评价中存在的大量业务模型进行统一管理^[6],方便业务使用和后期扩展,本文将从模型库本身发展和当前场景下模型执行遇到的几方面问题介绍相关研究现状。

1.1 遥感模型库

遥感模型库即在遥感场景下针对遥感业务封装和实现的具有通用性的遥感算法模型库,主要以“平台分布式+模型服务化”的形式来完成构建,便于遥感模型算法管理和调用。

面向云计算的遥感平台在近 5 年开始发展,如武汉大学建立的 OpenRS-Cloud^[2],基于 MapReduce + 插件扩展实现了遥感数据并行处理;加利福尼亚大学伯克利分校与微软合作,在 Windows Azure 平台上建立了 MODIS Azure,用于对 MODIS 影像进行处理^[7];广东中科遥感技术公司开发建设了一个遥感云服务平台原型,初步实现了遥感数据管理、数据处理一体化的云服务^[8];ENVI 云遥感系统搭建在亚马逊弹性云上,构建在 Amazon EC2 上的 ArcGIS Online 也提供了在线的影像处理和分析服务^[8]。李中元等探索并提出了农情遥感监测云服务平台建设框架^[9]。总结起来,以云平台为支撑,结合遥感应用,整合遥感计算模型,已成为当前的一种技术趋势。虽然目前已有一些直接基于 ArcGIS Online 的 GIS 线上项目,但对生态环境遥感评价业务而言,持续的专题模型开发、扩展和业务场景拓展,不可能完全依赖第三方技术平台托管。因此,在项目业务背景下,构建可扩展的生态环境遥感评价业务通用的模型库,具有重要意义。

1.2 多平台调用与 SOA

多平台调用是作为当前 IT 系统实现的一种技术需求存在的。在通用遥感应用构建中,通常只基于一类特定技术来构建和开发特定领域的系统,如基于 ArcGIS Engine 来构建大量的 C/S 分析、处理应用等。在需求变更和环境变更的情况下,原有系统功能无法被复用。在当前多设备、多平台的场景下,

多平台调用是一个必然趋势。

传统 GIS 计算场景下,无法实现功能模型的多平台调用,只能在不同平台上基于相应特定的 API 实现功能开发,如桌面版的 ArcGIS Engine API 和移动端的 ArcGIS API 以及服务端的 ArcGIS API 用来构建相应的 C/S(客户端/服务器)系统、移动设备和 B/S(浏览器/服务器)平台上的 GIS 处理应用程序。随着面向服务的体系架构(Service-oriented architecture, SOA)的发展,基于 Web Service 技术,对传统的功能组件进行一致性的封装,可以构建独立于实现平台的调用接口,从而实现多平台调用。

基于 SOA 的遥感模型库已经有不少探索和实现,但尚未形成一致化的标准。魏向旺等探索并提出了基于 SOA 的遥感模型库的总体框架^[10]。ArcGIS Online 提供了一套基于 REST 和 SOAP 的矢量、遥感数据服务技术框架,并提供了部分 ArcGIS ModelBuilder 工具的服务封装、发布方案,提供了部分常用遥感处理功能的服务接口^[11],这些探索和方案为采用 SOA 来构建专用的业务模型库提供了很好的借鉴,然而由于业务领域的特定性,针对生态评价业务特定的计算、评价等多类别模型,仍然需要基于 SOA 构建具有业务领域通用性的业务模型库。

1.3 大数据量计算与并发、负载均衡

在对广区域度下的生态区执行专题模型计算时,出现了大数据量的问题,如同时计算全国范围内所有生态区的生态敏感性指数,需要跨多个生态区划,基于坡度、植被覆盖指数等多个指标的数据来计算,采用单机单线程的方式,由于数据量和机器硬件性能而必然导致耗时过长。此外,在采用 SOA 对专题模型进行服务封装的前提下,由于多用户和多个专题模型计算需求的存在,带来了服务并发和系统单点负载过高的问题。为了应对以上的问题,模型库必须采用特定策略执行大数据量的计算。

在 GIS 大数据处理的研究和探索过程中,从单机单线程到多机多线程,从 MPI 等网格并行计算方式^[12]到大数据时代基于 MapReduce 的遥感数据的存储和快速处理方式^[13-15],这些分布式/高性能计算的技术体系都为遥感影像特定类型的快速处理提供了良好的思路。然而,在生态评价过程中,多类型的业务模型决定了模型库构建时需要优先考虑通用性,因此本文主要采用多服务实例和任务划分的方法完成大数据量处理,并未借助 MapReduce/GPU 等算法并行化技术。

此外,一般系统后期面临的多用户请求同时结合遥感大数据量计算问题,要求生态环境遥感评价系统设计时,必须预先考虑并发请求和负载均衡策

略。

服务并发作为一个 Web 服务技术必然会遇到的问题,已经有不少技术方案和探索。如.NET 环境下的 WCF 框架和 Java 环境下的各种 Web Service 框架,均在框架层上提供了对于并发服务的一些支持,而代码级的并发可以采用多线程的方式来对多个请求和计算中间步骤进行并行处理。此外,无论 Apache 或是 IIS 等 Web 服务器,均在服务器层面提供了请求排队机制和其他并发配置选项,便于充分利用单机性能,解决并发问题。

而大量请求导致的时延和单机工作负载过高的问题,目前 IT 技术界也有不少解决方案,如采用“硬件负载均衡器+多个并行 Web Server”的方式,作为传统的负载均衡方案,广泛应用于电信等行业。随着数据量和请求数的进一步增大,以及从成本考虑,采用“负载均衡软件+多个 Web Server”的方式,逐渐成为互联网领域的主流,从早期的 LVS 软件到目前最流行的 nginx,在 HTTP 负载均衡方面均可以做到有效降低单个服务器的请求负载。

OpenStack 作为云计算时代一套开源和开放式云技术方案,可以使得任何人建立起自己的云端和云端计算方案。OpenStack 由多家厂商共同参与、提出并开发了大量组件,涵盖了网络、虚拟化、对象存储、操作系统、服务器、镜像管理等多个方面^[16]。利用 OpenStack 对现有机器集群进行管理,构建云端上的多个虚拟机,部署多服务实例,并借助其负载均衡功能组件进行开发,可以在任务级层面上同时有效解决生态环境遥感评价模型库中存在的大数据量和并发、负载均衡问题。

由上述 4 个问题的研究现状可以了解,虽然在单个问题域都有一系列问题解决方案和最新研究,然而构建能应对高并发、快速数据处理、大数据量计算、多平台调用和多模型管理的业务领域具有通用性的生态环境遥感评价模型库需要借助多项技术组合,构建平台型的解决方案,本文在对问题场景进行综合分析的基础上,借鉴了多种问题解决方案和研究思路,提出并设计了基于 SOA 和 OpenStack 的生态环境遥感评价模型库,对 4 个问题的解决进行了初步探索。

2 基于 SOA 和 OpenStack 的生态环境遥感评价模型库系统框架设计

为了有效解决生态环境遥感评价业务中的模型变更、管理困难,以及模型多平台调用、大数据量计算和并发、负载均衡等问题,本文提出并设计实现了一种基于 SOA 和 OpenStack 的生态环境遥感评价模

型库系统,充分利用现有各项技术手段对业务中模型进行封装、管理,提供外部接口调用。下文将对模型库的整体框架进行介绍,并对关键技术进行说明。

模型库的总体框架如图1所示,共分为应用层、模型管理层、模型服务层和基础设施运维层4个层次。

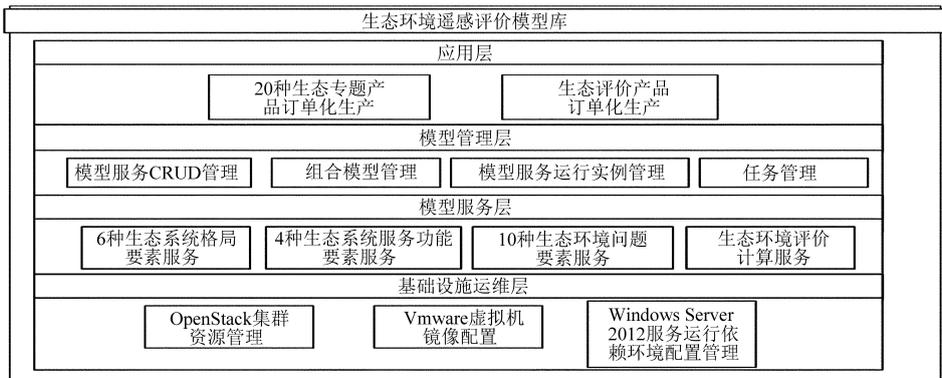


图1 生态环境遥感评价模型库结构框架图

Fig.1 Framework of model library for remote sensing evaluation of ecological environment

基础设施运维层:作为系统最底层,建立了一套计算资源动态管理的机制,在 Windows Server 2012 的虚拟机镜像中配置了各项服务算法运行依赖环境,并将相应的镜像作为模板资源交付给 OpenStack 平台软件,便于根据任务负载动态开启镜像资源执行计算。

模型服务层:按照生态环境遥感评价专题产品类型,将计算服务分为4类:生态格局要素服务、生态功能要素服务、生态问题要素服务、生态评价计算服务。模型服务层完成了服务的封装和部署管理,并结合运维层,以多实例服务的形式应对并发和大数据量计算带来的工作负载。

模型管理层:结合数据库,对服务形式存在的模型进行统一管理,包括模型服务的 CRUD 操作管理,针对业务流程的组合模型管理,应对大数据量计算和并发、负载均衡的模型服务运行实例管理,以及针对模型服务运行过程监控和资源调配的任务管理4个模块。

应用层:主要通过 C/S 客户端,结合系统上游的订单生产需求,调用模型服务执行数据生产。

2.1 模型元数据及接口设计

对多类型原始程序进行模型封装和管理时,首先需要将不同逻辑和实现的程序抽象成一致化的模型,以简洁统一的形式进行描述^[17]。

在生态环境评价模型库中对模型进行描述,主要通过设计模型元数据及接口参数完成。生态模型库中主要包括完成不同功能的专题模型服务和完成评价流程的组合服务。专题服务与原子模型是一一对应的关系,组合服务对应组合模型,由多个专题服务按照执行顺序组成。

原子模型对应的基础元数据主要包括:模型标

识 (Model_id)、模型名称 (Model_name)、模型基本类型 (Model_type)、模型描述信息 (Model_description)、模型程序类型 (Model_programType)、模型服务地址 (Model_url)、模型创建时间 (Model_createTime)、模型输入参数个数 (Model_inputNum)、模型输出参数个数 (Model_outputNum),以上基础元数据对一个模型进行了简单的抽象化,便于系统对不同实现的服务模型进行统一管理。

系统在业务流程层面上针对一项业务流程进行描述时,涉及多个专题服务,组合服务即是一种描述和实现业务流程的手段, workflow 中涉及了大量的流程编排和组合调用,也有诸如 BPMN、BPEL 等流程设计和流程组合的技术,本系统中只采用自定义的简单方式完成了业务流程的定制化。

组合模型对应的元数据除了包括元模型中大部分的字段,最核心的便是描述其本身与多个元模型的关系及元模型之间的顺序关系,本系统采用 xml 来描述模型组合,组合模型元数据中的 Composite_xml 字段即代表模型组合。xml 的核心内容包括业务流程中涉及的元模型 id、模型输入输出参数及执行顺序,在此不一一罗列。

此外,模型封装、调用最核心的部分便是模型参数,也是系统模型的核心接口。生态环境评价模型库中主要以输入参数、输出参数元数据设计来实现接口设计。输入、输出参数元数据字段比较相似,都包括参数标识 (id)、对应模型标识 (Model_id)、参数名称 (Para_name)、参数值类型 (Para_valueType)、参数默认值 (Para_defaultValue)、参数当前值 (Para_currentValue)、参数范围 (Para_range)、输入参数信息描述 (Para_description)。

原子模型元数据及组合模型元数据,以及模型

相应的输入、输出参数元数据,三者构成了模型管理的核心,系统对模型的 CRUD 及任务管理、执行日志等都是基于核心的元数据和接口完成的。

2.2 模型服务封装

生态环境遥感评价中涉及的功能模型逻辑上分为 3 类,即专题产品生产模型、评价权重计算模型和评价计算模型。其中专题产品生产模型包括生态系统格局要素、服务功能要素和问题要素 3 类服务模型,共有 20 个具体实现的专题模型服务,评价权重计算模型指根据专题数据,读取已存在的分级权重表或通过专家打分或数据计算得到的不同生态区、不同指标的权重的计算过程,在逻辑上,属于模型库范畴,在实际实现时,并未采用服务形式进行封装。评价计算模型,即得到某生态区评价指标及对应权重的条件下,获取指标对应专题数据,执行相应的归一化、加权融合和重分类等系列 GIS 计算的过程,最终得到评价结果数据产品。

服务封装的核心即是接口定义和服务实现。本系统采用 .NET 的 WCF 进行服务封装和实现,首先在 WCF 服务端通过代码形式定义专题模型(如景观破碎度、分离度等)的服务参数和实现接口,即可在部署时自动转换为 WSDL 形式的标准服务描述文档,从而实现跨平台的调用与访问。然后继承相应的服务接口,进行代码实现,完成对遥感或矢量数据的相应处理,并采用单机多线程的方式进行计算优化。在生态专题算法模型服务的具体实现中,部分自定义实现的算法采用“ArcGIS Objects 库 + WCF”的形式完成,核心的环境评价诊断计算,则直接借助 ArcGIS Server 提供的 SOE(服务器对象扩展)技术进行开发和部署。

2.3 并发配置及任务管理和负载均衡

为应对生态环境遥感评价模型库实际运行中的大量请求和服务耗时过长的问题,本系统主要在代码和服务端两端做了相应的并发配置。首先在代码实现时,采用异步形式进行服务封装,使得后端的长耗时影像或矢量计算不至于影响客户端的前端调用。此外,基于 WCF 框架进行了并发数配置,并针对同一个服务实例的多个不同请求,采用多线程的形式进行独立的请求处理和文件、资源分配。其次,在 IIS 服务器端也对服务进行了并发优化,主要通过配置服务的资源占比和最大请求数等完成,经实际测试,得到了较好的结果。

在实际任务生产时,针对广区域度计算的场景,系统提供了任务管理的功能,通过手动或自动配置产品生产所需的服务实例数及对应关系,有效拆分了单一服务的计算负载。如在对全国生态区执行植

被水分利用效率专题产品生产时,如果按照全国范围进行直接生产,由于数据量庞大和单机计算资源限制,单一服务必然会直接崩溃。基于多服务实例的方式,通过 OpenStack 的插件和脚本执行方式,根据计算需求,动态开启所需数目的虚拟机,基于同一服务的多个运行实例来完成分生态区的计算,即每个服务实例完成单个或少量生态区的专题产品的生产计算,有效解决了问题。基于 OpenStack 的相关组件和服务实际执行时,也可完成对计算过程所需资源占用的监控。

此外,采用动态的方式基于 OpenStack 来开启虚拟机和多服务实例,并基于 OpenStack 的负载均衡组件,也可实现系统服务访问时的负载均衡,使得模型库中的模型服务能以一种长期稳定运行的公共调用接口形式,供其他后期项目或生态遥感评价系统其他模块长期调用,共享平台资源。

通过上述针对业务的模型元数据和接口设计、实现和服务封装以及并发配置和任务管理、负载均衡配置,本文实现了生态环境遥感评价模型库系统。

3 应用实例

以三江源地区为例,通过综合运行生态环境遥感评价系统的模型库和其他模块,有效实现了相应专题和评价产品的生产。

三江源地区属于典型的森林类生态区,其生态环境评价指标体系如表 1 所示。

表 1 森林类生态区生态环境评价指标体系
Tab.1 Ecological evaluation index system of forest ecoregion category

准则层	因素层	指标层
压力指标	压力	人类干扰强度
		人口密度
状态指标	活力	NPP
		森林覆盖率
		水文调节指数
		碳功能固定量
		防风固沙指数
		景观多样性指数
	组织	景观破碎度指数
		生态系统稳定性指数
响应指标	弹性	森林扰动/变化
		响应

对该生态区进行生产时,模型库根据输入参数获取生态区名称和评价时间段、对比时间段等信息,首先根据生态区划,找到对应的生态区指标体系,即表 1 所列的 11 种评价指标,然后并行调用 11 种指标对应计算模型服务,11 种计算模型根据输入参数,获取所需的原始遥感影像或者反演得到的专题

栅格作为数据源,执行计算后,11种指标对应的专题影像自动入库;之后模型库根据指标体系查找对应知识库,获取到该生态区对应指标体系不同层级相对权重,调用层次分析法计算服务,计算得到11种指标数据对应的权重;最后,模型库系统调用评价计算服务,输入11种指标数据源地址及对应权重,计算后得到最终评价分级的结果数据,表2为评价结果对应的生态健康指数(EEHI)和健康级别对照。

表 2 生态环境健康指数和健康级别对照

Tab.2 Ecological health of index value and health level

级别	EEHI 值	生态环境状态描述
好	[0.8,1)	生态环境处于正常状态,未受到干扰破坏,生态系统结构完整,功能性强 生态环境呈现轻微脆弱性,生态系统受到干扰,生态系统结构尚完善,功能尚好,在自身调节下可恢复
较好	(0.6,0.8)	生态环境呈现中度脆弱性,生态系统受到较少破坏,系统结构有恶化趋势,但尚能维持基本功能
中	[0.4,0.6]	生态环境呈现强度脆弱性,严重影响了生态系统功能的实现,生态问题较大,生态灾害较多
较差	(0.2,0.4)	生态环境呈现极强脆弱性,生态系统结构残缺不全,功能低下,发生退化性变化
差	[0,0.2]	

图2、3为调用碳固定量和水蚀区土壤侵蚀模数专题计算模型服务生产的评价指标对应的部分专题产品数据。

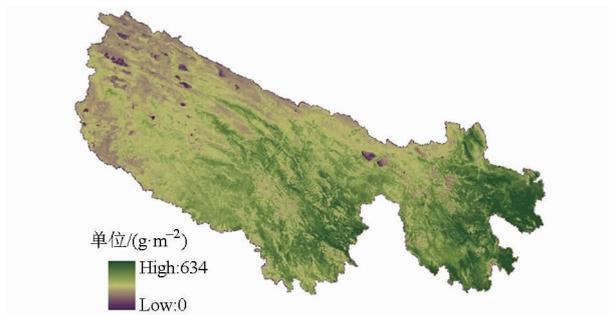


图 2 1 km 碳固定量专题产品

Fig.2 1 km carbon fixation thematic product

图4为基于11种指标对应专题产品,调用评价计算服务生产的评价产品数据。

通过实际配置和运行测试表明,采用基于SOA和OpenStack的生态环境遥感评价模型库可以完成

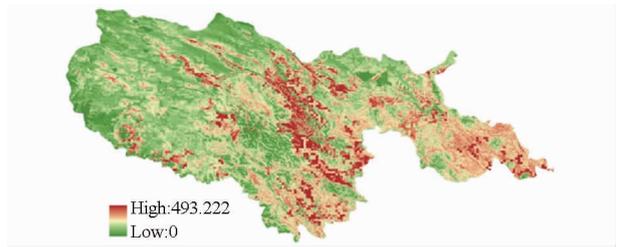


图 3 1 km 水蚀区土壤侵蚀模数专题产品

Fig.3 1 km soil erosion modulus of erosion thematic product

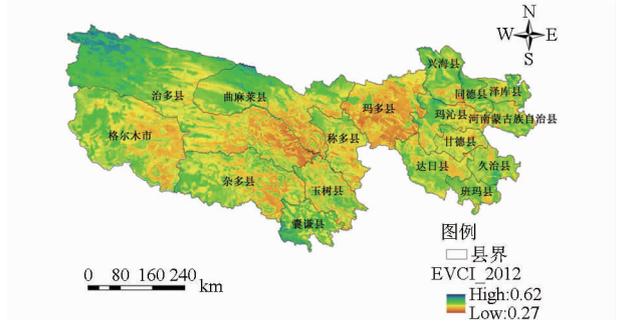


图 4 1 km 评价产品数据

Fig.4 1 km evaluation results product

全国生态区划中指定生态区的评价生产和专题产品生产。

由于整体过程中涉及多种不同计算模型的统一集成和多种原始遥感数据到中间数据的转换、存储过程,实验中得到的计算时间并不稳定,故在此未详细列举。因此,提高整体系统集成的稳定性和多服务组合、任务精细调度优化是进一步需要研究的问题。

4 结束语

分析了生态环境遥感评价业务中计算模型管理存在的多个问题,并分析和介绍了模型库、多平台调用与SOA、大数据量计算、并发处理和负载均衡4个研究点的研究现状,提出了一种基于SOA和OpenStack的生态环境遥感评价模型库,并对实现过程中模型元数据和接口设计、模型服务封装、并发配置和任务管理等关键技术实现细节进行了说明。最终,基于提出的生态环境遥感评价模型库系统,以三江源地区为例进行评价计算,得到了相应的专题和评价产品数据。该系统对于相关业务的后期开发、扩展以及相关系统的实际设计,具有一定意义。

参 考 文 献

- 贾慧聪,曹春香,马广仁,等. 青海省三江源地区湿地生态系统健康评价[J]. 湿地科学, 2011, 9(3): 209-217. Jia Huicong, Cao Chunxiang, Ma Guangren, et al. Assessment of wetland ecosystem health in the source region of Yangtze, Yellow and Yalu Tsangpo Rivers of Qinghai Province[J]. Wetland Science, 2011, 9(3): 209-217. (in Chinese)
- Guo W, Gong J Y, Jiang W S, et al. Open RS-Cloud: a remote sensing image processing platform based on cloud computing environment[J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(1): 221-230

- 3 史舟,梁宗正,杨媛媛,等. 农业遥感研究现状与展望[J]. 农业机械学报,2015,46(2):247-260.
Shi Zhou, Liang Zongzheng, Yang Yuanyuan, et al. Status and prospect of agricultural remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(2):247-260. (in Chinese)
- 4 尚松浩,蒋磊,杨雨亭. 基于遥感的农业用水效率评价方法研究进展[J]. 农业机械学报,2015,46(10):81-92.
Shang Songhao, Jiang Lei, Yang Yuting. Review of remote sensing-based assessment method for irrigation and crop water use efficiency[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(10):81-92. (in Chinese)
- 5 韩鹏鹏,黄进良,李仁东,等. 基于面向对象的坑塘遥感监测与动态分析[J]. 农业机械学报,2015,46(1):272-277.
Han Pengpeng, Huang Jinliang, Li Rendong, et al. Remote sensing monitoring and dynamic analysis of ponds based on object-oriented rules[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(1):272-277. (in Chinese)
- 6 杨宁,张荣标,张永春,等. 基于微生物生态效益的土壤肥力综合评价模型[J]. 农业机械学报,2013,44(5):108-112.
Yang Ning, Zhang Rongbiao, Zhang Yongchun, et al. Soil fertility synthesis evaluation model based on ecological benefit of microorganism [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(5):108-112. (in Chinese)
- 7 Humphrey M, Hill Z, van Ingen C, et al. Assessing the value of cloudbursting: a case study of satellite image processing on windows azure[C]//Proceedings of the 2011 IEEE 7th International Conference on e-Science, 2011: 126-133.
- 8 任伏虎,王晋年. 遥感云服务平台技术与实验[J]. 遥感学报,2012,16(6):1331-1346.
Ren Fuhu, Wang Jinnian. Turning remote sensing to cloud services: technical research and experiment[J]. Journal of Remote Sensing, 2012, 16(6): 1331-1346. (in Chinese)
- 9 李中元,吴炳方,张森,等. 农情遥感监测云服务平台建设框架[J]. 遥感学报,2015,19(4):578-585.
Li Zhongyuan, Wu Bingfang, Zhang Miao, et al. Turning remote sensing to cloud services: technical research and experiment[J]. Journal of Remote Sensing, 2015, 19(4): 578-585. (in Chinese)
- 10 魏向旺,龚建华,郭亮. 基于 SOA 的遥感模型库研究[C]//2010 遥感国际研讨会论文集,2010.
Wei Xiangwang, Gong Jianhua, Guo Liang. Study on remote sensing model library based on SOA[C]//Proceedings of 2010 International Conference on Remote Sensing (ICRS 2010), 2010. (in Chinese)
- 11 郭婧,张立朝,王科伟. 基于 ArcGIS Server 构建地理信息服务[J]. 测绘科学,2007,32(3):91-93.
- 12 沈占锋,骆剑承,陈秋晓,等. 基于 MPI 的遥感影像高效能并行处理方法研究[J]. 中国图象图形学报,2007,12(12):2132-2136.
Shen Zhanfeng, Luo Jiancheng, Chen Qiuxiao, et al. High-efficiency remotely sensed image parallel processing method study based on MPI[J]. Journal of Image and Graphics,2007, 12(12):2132-2136. (in Chinese)
- 13 Lü Zhenghua, Hu Yingjie, Zhong Haidong, et al. Parallel K-means clustering of remote sensing images based on MapReduce [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2010,6318:162-170.
- 14 周海芳,赵进. 基于 GPU 的遥感图像配准并行程序设计与存储优化[J]. 计算机研究与发展,2012,49(增刊):281-286.
Zhao Haifang, Zhao Jin. Parallel programming design and storage optimization of remote sensing image registration based on GPU [J]. Journal of Computer Research and Development,2012,49(Supp.):281-286. (in Chinese)
- 15 尹芳,冯敏,诸云强,等. 基于开源 Hadoop 的矢量空间数据分布式处理研究[J]. 计算机工程与应用,2013,49(16):25-29.
Yin Fang, Feng Min, Zhu Yunqiang, et al. Research on vector spatial data distributed computing using Hadoop projects[J]. Computer Engineering and Applications,2013,49(16):25-29. (in Chinese)
- 16 赵少卡,李立耀,凌晓,等. 基于 OpenStack 的清华云平台构建与调度方案设计[J]. 计算机应用,2013,33(12):3335-3338,3349.
Zhao Shaoka, Li Liyao, Ling Xiao, et al. Architecture and scheduling scheme design of Tsinghua Cloud based on OpenStack[J]. Journal of Computer Applications, 2013,33(12):3335-3338,3349. (in Chinese)
- 17 赵春江. 农业遥感研究与应用进展[J]. 农业机械学报,2014,45(12):277-293.
Zhao Chunjiang. Advances of research and application in remote sensing for agriculture [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(12):277-293. (in Chinese)