

计算网格下的高性能 MODIS 蒸散发反演研究

李建勋^{1,2}, 解建仓¹, 陈田庆¹, 陈小龙¹
(1. 西安理工大学水资源研究所, 710048, 西安; 2. 西安理工大学信息管理系, 710048, 西安)

摘要: 针对 MODIS 蒸散发反演运算效率不高的问题,提出一种基于计算网格技术的并行处理方法,以提高水文预报的精度和时效. 通过给出原子的形式化定义,将蒸散发反演算法拆分为可在网格上调度执行的原子;建立标准化的参数引用关系和编排机制,形成基于地球表面能量平衡原理的反演作业图;根据作业拓扑结构和节点状况,以细粒度方式加以调度. 实验表明,该方法具有良好的高性能特征,反演速度快、稳定,并可合理地利用计算力资源.

关键词: 计算网格;MODIS;蒸散发反演

中图分类号: TP311 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)10-0036-06

An Approach for MODIS Evapotranspiration Inversion with High Performance Based on Computational Grid

LI Jianxun^{1,2}, XIE Jiancang¹, CHEN Tianqing¹, CHEN Xiaolong¹
(1. Water Resources Research Institute, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
2. Department of Information Management, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: According to the inefficiency of MODIS evapotranspiration inversion, a parallel processing method is proposed based on computational grid to improve the accuracy and timeliness of hydrological forecasting. A formal definition of atom is given, and then the MODIS evapotranspiration inversion algorithm is split into atoms that can be scheduled and executed on grid. Standard relations and arrangement mechanism of parameters are established and the inversion task graph is constructed based on the principle of the earth's surface energy balance. The schedule of the task is made by particles with small size, task topological structure and node state. Experimental results show that the algorithm has good characteristics of high-performance, fast and stable inversion, and reasonable use of node computing resources.

Keywords: computational grid; moderate-resolution imaging spectroradiometer; evapotranspiration inversion

目前在 MODIS(Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer)的蒸散发反演上,学者们已提出了多种方法模型,Ahmad 等^[1]和 Zhang 等^[2]分别采用 SEBAL 模型和基于土壤网格的水平衡模型,将 MODIS 数据进行整合,实现了蒸散发的简单计算. Nishida 等^[3]通过对植被指数和地表辐射温度的标准化,提出了一种 MODIS 蒸散发指数的估计方法. 文献^[4]采用气动表面阻力能量平衡模型和 Penman-Monteith 方程,实现了基于叶面积指数的蒸散发数据有效获取. 采用 Cleugh 等^[4]的方法, Mu 等^[5]给出了全球遥感蒸散发数据的可行性计算方案. Yu 等^[6]使用 MODIS 影像,根据地球表面的能量平衡原理,在热通量计算的基础上给出蒸散发反演方法. Pamela 等^[7]将 MODIS 植被指数和气象数据进行有效结合,提高了河岸蒸散发指数的预报精度. 纵观现有 MODIS 蒸散发反演算法,其主要特点

在于:①主要以系统化模型为主,有较强的理论支撑;②大多采用 MODIS 已有的不同级别产品来实现,如植被指数、叶面积指数等,避免了对影像数据的预处理耗时;③众多方案能够实现与气象数据、土壤实测数据、区域环境数据的结合,提高了蒸散发反演结果的精度.但是,现有算法处理一组 MODIS 蒸散发数据通常需要几个小时,过低的运算效率和巨大的数据量制约了 MODIS 影像数据的实时应用,因此水利行业急需一个高性能的 MODIS 蒸散发反演方法,以提高水文预报的精度和时效.

近年来,计算网格研究的深入为分布式协同解决复杂科学与工程问题提供了便捷、有效的途径^[8].如果将 MODIS 蒸散发反演算法移植到计算网格上来,则能够更加合理地利用系统内部的计算资源,依靠网格的分布式计算能力实现影像数据的高效处理,提高产品数据的实时性和实用性.但是,在现有计算网格中,计算作业通常是一个能够在网格节点上独立运行并产生业务成果的最小应用单元,作业整体粒度过大,并行化逻辑不强,因而并不能够体现 MODIS 蒸散发处理作业中可并行化的逻辑结构,也无法实现作业的细粒度高效运行.本文提出一种面向水利业务逻辑并具有一定独立性、可扩展性或可复用性的算法结构单元(称为原子操作,简称原子),根据 MODIS 蒸散发反演算法结构的特点,把处理作业按照其内在算法模型进行拆分,以更小的粒度和算法结构表现作业本体,并将原子编排为可在网格中得以运行的作业,使得原子编排模式中的并行部分可以按照用户既定目标在网格调度中得以优化,进一步提高了 MODIS 蒸散发反演效率.

1 计算模型原子化

1.1 原子形式化定义

定义(原子) MODIS 蒸散发反演系统中的每个原子定义一个四元组 $A=(P_1,P_0,F_{Action},P)$,其中:输入参数 P_1 和输出参数 P_0 均通过原子参数类型 K 来构建,是有限个 K 子集的笛卡尔积, K 是对系统所需的 Bean 或结构体的抽象表述,由集合 $\{S_i\}$ 给定, $S_i=(ID_S^i,F_{store}^i,F_{access}^i,F_{Serialize}^i,F_{Deserialize}^i)$ 是一个参数基本类型定义,它规范了系统内可使用的原子参数的类型、数量以及存储、访问、序列化方法; F_{Action} 是 MODIS 蒸散发反演各算法环节中输入参数到输出参数的消息映射,对应于一段并行算法逻辑,它负责将输入数据进行处理并将其按照规范化格式进行输出,以实现对影像信息的处理,并且原子参数也可

以通过标准化的定义在原子间进行传递,从而能够通过多个原子快速地搭建一个复杂的业务应用,即 MODIS 蒸散发反演作业; P 代表原子的属性值集合,为计算网格的并行化调度提供重要的信息参考,以便于提高原子操作在调度过程中的处理效率,通常 $P=\{ID_A,N_{expireTime},N_{maxErrorNum},N_{Timecost}\}$,其中, $ID_A\in ID$ 是为每个原子操作分配一个唯一的 UUID (Universally Unique Identifier) 号,它是该原子的标识,具有唯一性, $N_{expireTime}$ 和 $N_{maxErrorNum}$ 分别是处理系统给该原子限定的最大出错数和超时限制,兼容对各节点中外部操作的影响,确保 MODIS 蒸散发反演系统在有限次数内正常的运转, $N_{Timecost}$ 是由计算网格调度中心估计的原子运行时间代价,是初始的调度依据.

1.2 MODIS 反演作业图(MTG)

在一个给定的 MODIS 蒸散发反演系统中,原子的数量虽然可以在系统扩展时予以扩充,但总体是有限的,可以使用 Q 表述系统中所有原子的集合. MODIS 蒸散发反演作业采用 $G_{MT}=(T,F)$ 来描述. G_{MT} 基于 DAG(Directed Acyclic Graph)建立,其中 T 是 Q 的一个非空子集,是作业中可调用的原子的集合; $F:T\rightarrow T$ 是按照原子之间的标准化参数引用方式建立的一个有向流关系,并且 $dom(F)\cup cod(F)=T$,即在 T 中不存在孤立的没有流关系的原子. MTG 图的等价二元谓词形式化表示为 $(T\neq\emptyset)\wedge(F\in T\times T)\wedge(dom(F)\cup cod(F)=T)$,也可以看作是一个有向图,在该图中 T 可以看作是图中的点集,而 F 可以看作是图中的边集.这样,将复杂的 MODIS 蒸散发反演过程按照原子化的思想,经过拆分和再次组合形成了一个在计算网格上运行的细粒度模型,从而可在高性能计算力的基础上提高 MODIS 蒸散发反演作业的执行效率.

2 计算网格下的 MODIS 反演模型

2.1 参数类型标准化及反演数据源

在 MODIS 蒸散发反演过程中,由于影像分析过程主要是在像素与成果数据之间进行的运算,因而 MODIS 反演模型中将主要包含 3 个基本类型定义:① $ID_S^1=C_{RGB}$,用于描述像素,以 6 位十六进制方式存储来自成果影像中的影像的红绿蓝三分量值;② $ID_S^2=L$,用以描述色阶,通过 2 个线性列表存储不同 C_{RGB} 与实际成果数据之间的对应关系,根据 L 可以快速地通过插值方式计算出某一像素所对应的指数值;③ $ID_S^3=double$ 用以存储各种中间结果和

关键数据,如土壤热通量、经纬度值等。据此,原子参数类型 K 便可被定义为集合 $\{ID_S^1, ID_S^2, ID_S^3\}$, 亦即 $\{C_{RGB}, L, double\}$ 。在系统服务时,各基本类型定义的 F_{store}^i 和 F_{access}^i 映射主要依靠数据结构实现,而 $F_{Serialize}^i$ 和 $F_{Deserialize}^i$ 则采用类似 WebServices 方式进行序列化和反序列化,且序列化后的字符串可以通过 SOAP(Simple Object Access Protocol)表转化协议在不同网格节点之间传递。

另外在 K 中,MODIS 蒸散发反演作业将主要依据二、三级 MODIS 数据产品成果来完成,其数据资源分别由 MOD09、MOD11、MOD13 3 个投影方式相同的成果产品构成,分别代表地表反射(SR)、地表温度(LST)和植被指数(NDVI),存储方式均为同经纬度幅度的位图。为了便于在网格上进行运算操作,3 种数据源均从不同等级的瓦片金字塔中提取,其计算原子分别命名为 A_1 、 A_2 、 A_3 。

2.2 反演原子构建

网格下的 MODIS 反演模型主要依靠地球表面的能量平衡原理,即地球表面所获得的净辐射能等于土壤热通量、感热通量和潜热通量之和

$$R_n = G_0 + H + \lambda E \quad (1)$$

式中: R_n 为净辐射通量; G_0 为土壤热通量; H 为感热通量; λE 为潜热通量(蒸发蒸腾所用能量)。若采用原子化的思想对 R_n 、 G_0 、 H 三个分量建立一系列原子模型,则能在原子中通过高性能计算确定地表物理数、热传导粗糙度、边界尺度等参量,并形成蒸散发反演作业图。下面给出 SEBS^[9] 模型的原子设定方案。

(1)净辐射通量原子 A_4 。净辐射通量 R_n 是指地表短波和长波辐射的收入与支出的差值, A_4 、 P_1 为参考高度温度 T 以及 MOD09、MOD11 数据, A_4 、 P_0 为测算点的净辐射通量 R_n , A_4 、 P 、 $N_{\maxErrorNum} = 3$, A_4 、 P 、 $N_{Timecost} = 8 \text{ ms}$, A_4 、 P 、 $N_{expireTime} = 40 \text{ ms}$, A_4 、 F_{Action} 是地表反射率和地表温度到净辐射通量 R_n 的映射。

$$(1 - SR(l_a, l_o))R_{swd} + 9.2 \times 10^{-6} (T + 273.15)^2 \varepsilon T^4 - \varepsilon (LST(l_a, l_o))^4 \quad (2)$$

式中: R_{swd} 为下行太阳辐射; ε 为地表比辐射率; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数;算子 $SR(\cdot)$ 和 $LST(\cdot)$ 分别用来从 MOD09 和 MOD11 成果影像中提取地表反射率和地表温度; l_a 、 l_o 为测算点所在的经纬度。

(2)土壤热通量子 A_5 。土壤热通量是指被地表吸收和释放到空气中的那部分辐射能量, A_5 、 P_1 为 MOD13 数据和 A_4 、 P_0 ; A_5 、 P_0 为测算点的土壤热

通量 G_0 , A_5 、 P 、 $N_{\maxErrorNum} = 3$, A_5 、 P 、 $N_{Timecost} = 3 \text{ ms}$, A_5 、 P 、 $N_{expireTime} = 20 \text{ ms}$, A_5 、 F_{Action} 是植被指数和叶面积指数到土壤热通量 G_0 的映射。

$$G_0 = R_0 \lfloor \Gamma_c + (1 - NDVI(l_a, l_o))(\Gamma_s - \Gamma_c) \rfloor \quad (3)$$

在地表全部被植被覆盖时, $\Gamma_c = 0.05$,而对于裸土, $\Gamma_s = 0.315$,算子 $NDVI(\cdot)$ 用来从 MOD13 成果影像中提取植被指数,以参数植被覆盖率方式来描述植被的不同覆盖程度。

感热通量的计算十分复杂,其运算过程中不仅有 MODIS 数据源的参与,而且还包含了部分气象数据的处理过程,需要依靠以下非线性方程组的求解来完成

$$\left. \begin{aligned} u &= u_* [\ln(h/z_{0m} - d_0/z_{0m}) - \Psi_m(h/L - d_0/L) + \Psi_m(z_{0m}/L)]/k \\ LST(l_a, l_o) &= T_a + H [\ln(h/z_{0h} - d_0/z_{0h}) - \Psi_h(h/L - d_0/L) + \Psi_h(z_{0h}/L)]/(k\rho C_p) \\ L &= -\rho C_p u_*^3 T_v/(kgH) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中:摩擦速度 $u_* = (\tau_0/\rho)^{1/2}$;奥布霍夫长度 L 、感热通量 H 均为未知量,需要在计算过程中联立求解,最终确定 H ;已知量有距地表的高度 h 、空气密度 ρ 、von Karman 常数 $k = 0.4$ 、零平面位移高度 d_0 、参考高度温度 T_a 、重力加速度 g 、近地表虚位温 T_v ,这些常量或基本参量在设计原子的时候可以大部分固化在 F_{Action} 内部;待确定的参量有动量传输粗糙度 z_{0m} 、热传导相对粗糙度 z_{0h} 、动量和显热传输稳定度订正函数 Ψ_m 和 Ψ_h 。参量是运算过程的中间量,并不能作为输出结果。鉴于感热通量的计算复杂性,本文采用 3 个原子来实现,它们分别是热传导相对粗糙度原子、稳定度订正函数 Ψ_m 和 Ψ_h 原子、遗传算法原子。

(3)热传导相对粗糙度原子 A_6 。热传导相对粗糙度 z_{0h} 是计算 Ψ_m 和 Ψ_h 的关键参量, A_6 、 P_1 为 MOD13 数据和周围环境的压力 P 、温度 T 、参考高度 h ; A_6 、 P_0 为 z_{0h} , A_6 、 P 、 $N_{\maxErrorNum} = 5$, A_6 、 P 、 $N_{Timecost} = 15 \text{ ms}$, A_6 、 P 、 $N_{expireTime} = 100 \text{ ms}$, A_6 、 F_{Action} 是植被指数以及周围环境信息到总体热输送系数的映射。

$$z_{0h} = 0.136h/\exp\left(\frac{kC_d u(h)}{4C_t u_* (1 - e^{-n_{ex}/2})} f_s + \frac{0.136k u_*}{C_t^* u(h)} f_s f_c + k B_s^{-1} f_c\right) \quad (5)$$

式中: $f_s = \text{NDVI}(l_a, l_o)^2$; $f_c = (1 - \text{NDVI}(l_a, l_o))^2$; $u(h)$ 为植被冠层顶端的垂向风速; $C_d = 0.2$; C_i 的取值范围介于 $0.005N \sim 0.0075N$ 之间 (N 为参与热传导的植被叶面数); 土壤热传导系数 C_t^* 经引入土壤热传导系数和空气动力粘滞系数, 并多次仿真实验模拟后, 确定为 $1.793 \times 10^{-6} (h, u_*)^{-0.5} T^{-0.905} \cdot P^{0.5}$ 。另外, 根据植被株高信息, 可利用近似公式 $d_0 = 0.667h$ 和 $z_{om} = 0.136h$ 来求解 d_0 和 z_{om} 。

(4) 动量和感热通量稳定度订正函数原子 A_7 。 Ψ_m 、 Ψ_h 的求解采用一个可复用原子, A_7 。 P_1 为参考高度 h 和订正函数类型 T_y (T_y 取值为 1 或 -1, 分别表示求解 Ψ_m 和 Ψ_h); A_7 。 P_0 为 Ψ_{T_y} ; A_7 。 P 。 $N_{\max\text{ErrorNum}} = 5$, A_7 。 P 。 $N_{\text{Timecost}} = 96 \text{ ms}$, A_7 。 P 。 $N_{\text{expireTime}} = 400 \text{ ms}$, A_7 。 F_{Action} 根据 T_y 取值做不同的订正函数映射。

$$\Psi_{T_y}(y) = \int_0^y \left[1 - (T_y + 1) \frac{(0.33 + 0.41y^{m+1/3})}{0.66 + 2y^m} - (T_y - 1) \frac{(0.33 + 0.057y^n)}{0.66 + 2y^n} \right] \frac{dx}{x} \quad (6)$$

式中: $y = -(h - 0.057)/L$; 常数项 $m = 1.0$, $n = 0.78$; 订正函数的求解采用蒙特卡罗法。

(5) 遗传算法原子 A_8 。 遗传算法原子用于求解式(4), A_8 。 P_1 为 A_6 。 P_0 , A_8 。 P_0 为 H , A_8 。 P 。 $N_{\max\text{ErrorNum}} = 5$, A_8 。 P 。 $N_{\text{Timecost}} = 452 \text{ ms}$, A_8 。 P 。 $N_{\text{expireTime}} = 2000 \text{ ms}$, 种群数量 M 设定为 20000。 目标函数定义为

$$\Omega(u_*, H, L) = |u - u_* [\ln(h/z_{om} - d_0/z_{om}) - \Psi_m(h/L - d_0/L) + \Psi_m(z_{om}/L)]/k| \quad (7)$$

在给定精度要求 $\xi = 1 \times 10^{-7}$ 的情况下, 式(4) 转化为一个函数优化问题 $\min \Omega(u_*, H, L)$, s. t. $u_*, H, L \in R^n$, 它满足 $\xi - \Omega \rightarrow 0$, 其解向量 $\mathbf{X}^* = (x_1^*, x_2^*, x_3^*) = (u_*^*, H^*, L^*) \in R^n$ 。 A_8 。 F_{Action} 主要包含遗传编码、适应度函数、选择算子、交叉算子、变异算子 5 部分内容。 遗传编码采用浮点数编码, 编码结果为 $C = \max(u)(u_*/2^L - 1)$; 适应度函数为 $F = |L + \rho C_p u_*^3 T_v / (kgH)|$, 使得遗传过程趋向于获得高精度的 L 值, 减少对 H 的影响; 选择算子定义为 $p_k = (F_k / \sum_{k=1}^m F_k + \theta H_k / \sum_{k=1}^M H_k) / 2$, 若在研究区域靠近沿海或夏季则 $\theta = 1$, 否则取 -1, 其中 $H_k / \sum_{k=1}^M H_k$ 的目的是在选择过程中尽可能适应研究区域的气象环境, 以获得最为贴切的感热通量值; 交叉算子采用多点交叉算法, 依靠其较强的破坏性促

进解空间搜索, 避免过早收敛, 增强搜索健壮性; 变异算子为 $X' = X \pm \Delta$, 其中 $\Delta = \sum \frac{a(i)}{2^i}$, $i = 1, \dots, 3$, $a(i)$ 以概率 $1/\tau$ 取值 1, 以 $1 - 1/\tau$ 的概率取值 0, τ 为区间 $[10, 18]$ 内的随机整数。

(6) 日蒸散发量统计原子 A_9 。 根据文献[10], 若将 24 小时内的蒸散发量加以统计整理, 则可以获得测算点的日蒸散发量。 A_9 。 P_1 为 A_4 。 P_0 、 A_5 。 P_0 和 A_8 。 P_0 , A_9 。 P_0 为 ET_{daily} , A_9 。 P 。 $N_{\max\text{ErrorNum}} = 3$, A_9 。 P 。 $N_{\text{Timecost}} = 1 \text{ ms}$, A_9 。 P 。 $N_{\text{expireTime}} = 5 \text{ ms}$, A_9 。 F_{Action} 为

$$E_{\text{daily}} = 8.64 \times 10^7 \Delta \frac{\overline{R_n}}{\lambda \rho_w}, \Delta = \frac{\lambda E}{H + \lambda E} \quad (8)$$

2.3 反演作业及其调度机制

如图 1 所示, MODIS 蒸散发反演作业在调度时, 首先由调度中心按照 MTG 的拓扑结构计算作业中各原子的前提集 P , 若某原子 A 的 P 为空或 P 内均为已完成原子, 则将 A 标识为可执行原子, 在同等条件下处于 MTG 关键路径上的原子优先被调度执行; 然后分析网格中可使用节点的计算力, 判断节点的系统指标是否在容许原子执行的范围之内, 指标评价方法使用多元线性回归拟合的方程来实现; 其后将各原子分配到节点, 依照线程方式进行执行, 确保各节点用户的自治任务不会直接影响到原子的执行, 执行时按照前驱、后继关系将所需的输入参数数据经过 $F_{\text{Deserialize}}$ 传递给原子的 P_1 接口, 并将执行结果 $F_{\text{Serialize}}$ 返回到调度中心; 最后, 当网格中任一原子执行完成后, 自动触发调度中心的再次运行, 由调度中心继续执行该作业的轮询调度工作, 直到所有原子均已被执行成功则作业执行结束, 其结果通过 $F_{\text{Deserialize}}$ 向作业的提交者进行反馈。 若在调度过程中, 某原子执行在时间范围 N_{Timecost} 内超时而并未返回, 则记录该原子执行失败一次, 当失败次数达到 $N_{\max\text{ErrorNum}}$ 上限时, 该作业被认定执行失败。 通常这种失败是由于节点用户频繁下线或执行大量自治任

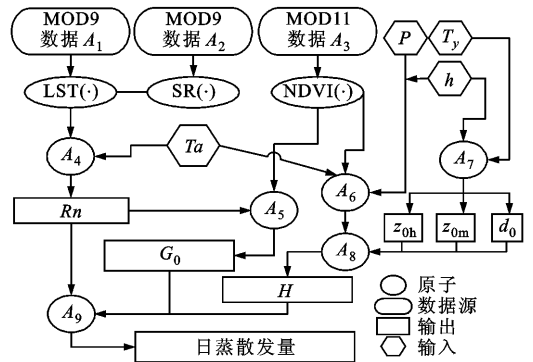


图 1 MODIS 蒸散发反演作业图

务所导致的,为了进一步确保网格对 MODIS 反演的安全性和稳定性,可以在调度中定义惩罚系数和复活机制而迫使稳定性不高的节点逐渐退出计算服务,同时保证新接入节点的运行以及性能完善后节点的再次正常启用.

3 MODIS 蒸散发反演结果与分析

3.1 实验环境

为了验证本文提出的基于计算网格的高性能 MODIS 蒸散发反演方案,在国家“863 计划”项目“面向水利信息化的高性能计算与网格应用”中以渭河流域水文预报为应用方向,采用中国国家网格 CNGrid 的 GOS 作为系统环境^[11],重点对魏家堡、咸阳、临潼、华县 4 个水文测站流域区域进行蒸散发反演.在实验中,采用 512×512 像素瓦片、分辨率 1 000 m(经影像金字塔处理后)的 MOD9、MOD11、MOD13 产品作为数据源,4 测站覆盖瓦片 286 个,像素点 146 432 个,采样后用于反演作业共计 13 560 个,作业在单机上执行的平均耗时(ATCSM)为 1 135 ms,节点编号为 $n_1 \sim n_{12}$.

3.2 反演高性能特征分析

(1)反演速度分析.经过对 MODIS 蒸散发反演作业图的分析,其关键路径为 $a_3 \rightarrow a_6 \rightarrow a_8 \rightarrow a_9$,依据关键路径计算得作业最小耗时为 574 ms(不计网络通信耗时).将单个作业调度到网格中执行后调度结果为 $\{a_3 \rightarrow n_2, a_2 \rightarrow n_3, a_1 \rightarrow n_{12}, a_7 \rightarrow n_4\}, \{a_6 \rightarrow n_3, a_5 \rightarrow n_2, a_4 \rightarrow n_{12}\}, \{a_8 \rightarrow n_2\}, \{a_9 \rightarrow n_3\}$,仅使用了网格中的 $n_2、n_3、n_{12}$ 和 n_4 共 4 个节点,总体耗时为 598 ms,略高于关键路径作业最小耗时.若在网格各节点无其他负载的条件下同时执行 13 506 个作业,由于计算网格对多个作业和原子均实行并行化处理,因而反演速度大大提高,此时平均耗时(Average Time Cost on Grid, ATCG)仅为 152 ms,加速比 R ($R = ATCSM / ATCG$)为 7.47,13 560 个作业的总体耗时(TTCG)为 34 min,而单机运算时则需要花费 257 min.可见计算网格下的反演效率要远高于单机执行,这为以小时为单位的短期水文预报以及

高精度在线水文预报服务奠定了良好的基础.另外,当网格节点中存在有自治任务时,平均预报耗时将由节点上自治任务负载的影响而逐步变大,如图 2 所示,各节点平均自治任务负载率(ATLR)达到 72%时 ATCG 才等价于 ATCSM,而在单机系统负载率达 70%时反演作业的执行将十分缓慢,有时甚至无法正常执行.

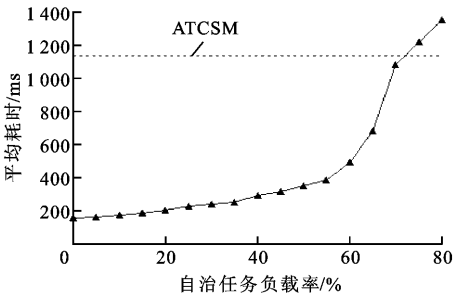


图 2 ATLR 对 ATCG 的影响

(2)反演稳定性分析.在网格系统自治任务负载率 ATLR 达到 65%时,13 560 个作业平均耗时为 680 ms,其原子运行超时总数为 328 个,原子失败总数为 49 个,作业失败总数为 0 个.当 ATLR 达到 75%时,则作业平均耗时为 1 353 ms,其原子运行超时总数为 474 个,原子失败总数为 103 个,作业失败总数为 0 个.若在系统中将节点 $n_8、n_9$ 等更换为性能低下的节点,则当 ATLR 达到 65%时,作业平均耗时 722 ms,原子运行超时总数为 365 个,原子失败总数为 70 个,作业失败总数为 0 个,各原子被执行次数如表 1 所示,表中数据采用“超时次数/出错次数”方式来表示.由此可见,若计算网格中自治任务负载率不高时,部分节点性能的降低对蒸散发反演耗时和系统的稳定程度影响甚小,这是由于调度中的惩罚机制自动地避免了性能较低节点的使用,保证了系统的高效运转.但是,如果 ATLR 过高,则对 MODIS 蒸散发反演服务的稳定性影响较大,因此运行时应保证 ATLR 在 70%以下.

(3)资源利用度为了确保 MODIS 蒸散发反演服务能够有效的利用计算网格中各节点的计算力资

表 1 MODIS 蒸散发反演原子运行稳定性对比

测试方案	原子执行情况								
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9
ATLR 为 65%	3/1	5/1	2/0	16/3	14/2	38/6	42/5	199/30	9/1
ATLR 为 75%	11/3	10/2	17/4	26/8	39/10	51/9	68/11	252/51	16/5
ATLR 为 65%更换节点 $n_8、n_9$	4/1	6/1	3/1	18/3	15/2	38/7	50/9	212/43	10/3

注:表中数据采用“超时次数/出错次数”方式来表示.

源,在实验中对不同的自治任务负载情况下各节点的整体负载率(TLR)进行了评测,实验结果如图 3 所示,调度时整体负载率阈值为 70%。可见节点性能越高(如 n_2 、 n_3),在网格运行过程中负载率越大,这有利于高性能资源的利用;相同性能的节点之间的整体负载率差别不大,性能较高的节点 n_2 、 n_3 的最大落差为 0.67%,性能较低的节点 n_9 、 n_{12} 的最大落差为 0.72%,且各节点随着自治负载率的增大增幅逐步减小,当自治任务负载率达到 0%时, n_2 的整体负载率为 74.3%,该负载全部由反演作业产生,而当自治任务负载率达到 60%时,则在惩罚机制和复活机制的引导下避免了作业对节点资源的过度消耗,此时 n_2 的整体负载率为 68.2%,作业所产生的负载率仅为 8.2%。由此可见,本反演方案能够更好地根据各节点内部的自治任务情况来调节计算力资源的分派,优化计算力资源的利用,驱使计算网格的负载均衡,避免反演运算时负载过大、占用系统资源过多的现象。

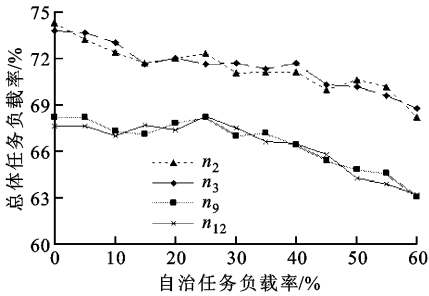


图 3 ATLR 对 TLR 的影响

4 总 结

本文在计算网格环境下,提出了原子化思想,通过作业编排将 MODIS 蒸散发反演放置在网格上加以执行,并探讨了网格环境下的反演速度、反演稳定性和资源利用度问题,为高精度的水文预报在线服务奠定了一定的技术基础。下一步的研究工作主要在以下三个方面:①在容错机制上,将同一原子放置到多个节点上实施多份原子同时执行,保证原子被正确执行并有结果反馈;②节点数量的提升必然降低作业的执行耗时,但还需要进一步分析是否存在一个阈值,当节点数量超过该阈值后耗时的改良将不再显著变化;③网格中节点的性能对反演过程的影响程度也是值得再探讨的一个问题,这关系到反演过程的稳定程度和系统资源的合理规划。

参考文献:

[1] AHMAD M, BIGGS T, TURRAL H, et al. Applica-

tion of SEBAL approach and MODIS time-series to map vegetation water use patterns in the data scarce Krishna river basin of India[J]. Water Science & Technology, 2006,53(10):83-90.

[2] ZHANG Y Q, MARTIN W. Integration of MODIS data into a simple model for the spatial distributed simulation of soil water content and evapotranspiration [J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 22(5): 393-408.

[3] NISHIDA K, NEMANI R, RUNNING S, et al. Development of an evapotranspiration index from aqua/ MODIS for monitoring surface moisture status [J]. IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing, 2003,41(2):493-501.

[4] CLEUGH H, LEUNING Q, RUNNING S. Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 106:285-304.

[5] MU Q, HEINSCH F, ZHAO M, et al. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data[J]. Remote Sensing of Environment, 2007,111(4):519-536.

[6] YU J H, LIOU Y, CHANG T Y. Using MODIS imagery to estimate of evapotranspiration over Paddy Field in ChaiYi Plain[J]. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2007,12(4):334-339.

[7] PAMELA L, JAMES C, EDWARD G, et al. Predicting riparian evapotranspiration from MODIS vegetation indices and meteorological data[J]. Remote Sensing of Environment, 2005,94:17-30.

[8] 桂小林, 钱德沛. 基于 Internet 的网格计算模型研究 [J]. 西安交通大学学报, 2001,35(10):1008-1011.

GUI Xiaolin, QIAN Depei. Grid computing prototype based on internet[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2001,35(10):1008-1011.

[9] SU Z. The surface energy balance system (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2002,6(1):85-99.

[10] CHEN Y H, LI X B, JING G F, et al. An estimation model for daily regional evapotranspiration[J]. International Journal of Remote Sensing, 2003,24:199-205.

[11] 杨华, 朱骥, 陆忠华, 等. 基于 GOS 的国家网格集成环境及应用实例开发[J]. 计算机应用研究, 2007(2): 196-198.

YANG Hua, ZHU Ji, LU Zhonghua, et al. CNGrid integrated environment and application development base on GOS [J]. Application Research of Computers, 2007(2):196-198.

(编辑 武红江)