

岩石有限应变测量反向轮法的计算机 CSD 软件设计

周继彬 曾佐勋

(中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074)

摘要: 用计算机实现反向轮法测岩石有限应变的过程, 可提高有限应变测量的准确性和效率. 开发出了用 Visual Basic 5.0 编写的 CSD 软件, 利用岩石薄片图像或者矿物颗粒轮廓图测出岩石有限应变的大小及应变椭圆长轴方向, 同时测出矿物颗粒分布的优选方位. 其操作相当简便, 首先统计出图像中 $0^\circ \sim 180^\circ$ 各方向上矿物颗粒的边界数目; 然后在方位—边界坐标系中投点, 并利用最小二乘法进行数据点的多项式曲线拟合; 最后求出曲线的极值点坐标, 并根据坐标绘制相应的应变椭圆. 软件运行中, 统计出的边界数据和拟合曲线以及应变椭圆图形都是可视的, 并能进行相应的保存.

关键词: CSD 软件; 反向轮法; 应变测量; 优选方位; 最小二乘法拟合; 应变椭圆.

中图分类号: P553; TP314 **文献标识码:** A

文章编号: 1000-2383(2001)01-0105-05

作者简介: 周继彬, 男, 1976 年生, 1999 年毕业于中国地质大学(武汉), 获学士学位, 现攻读构造地质学硕士学位, 研究方向是构造物理和计算机模拟.

随着计算机和计算机图形学的发展, 地质构造的一些测量已经由手工向计算机自动测量发展. 如 AMIN 用计算机实现 Fry 法应变测量点图(见文献[1]), Allard 等[2]用计算机在岩石薄片图像上实现优选方位的自动测量. 本文应变自动测量基于的反向轮法[3]是由 Panozzo 在 1987 年提出的, 由于当时是手工进行测量, 所以未得到充分利用. 其基本理论是: 岩石在未变形时各种组构是随机的, 各向同性的, 但变形后将出现一定的优选方位, 在给定截面上可得有限应变椭圆. 假设变形前岩石中矿物颗粒随机分布, 则给定线段在任一方向与矿物边界相交机率不变, 即

$$n(\varphi) = N = \text{常数}.$$

式中: N 为变形前单位线段与颗粒边界交点个数, φ 为线段与参考轴 x 之间的夹角. 岩石变形后, 所选线段与矿物颗粒边界交点个数不变, 但线段长度以及交点间的距离发生了改变, x 轴变为 x' 轴, 所给线段与 x' 轴的夹角为 φ' . 当应变椭圆长轴与 x' 轴不平行时, 有一夹角 φ_i , 则单位长度线段与颗粒边界交点数为[3]:

$$n'(\varphi') =$$

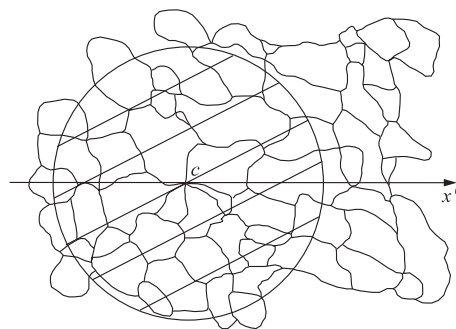


图1 反向轮法的手工测量示意

Fig. 1 Data collection by hand with the inverse SURFOR wheel

$$N \cdot \sqrt{\lambda'_1 \cdot \cos^2(\varphi' - \varphi_i) + \lambda'_3 \cdot \sin^2(\varphi' - \varphi_i)}.$$

其中 $\sqrt{\lambda'_1}$ 和 $\sqrt{\lambda'_3}$ 是倒易主长度比, 这实际上是一个椭圆公式, 于是, 应变椭圆轴比可表示成:

$$a/c = \sqrt{\lambda'_3} / \sqrt{\lambda'_1} = n'(\varphi')_{\max} / n'(\varphi')_{\min}.$$

应变椭圆长轴方向为: $\varphi_i = \varphi'_{\min}$.

实际手工操作时, 在一个圆内作一系列平行线制成轮状, 测量时将轮心固定在 x' 轴原点, 每次反向转动一个角度(图1), 平行线与 x' 轴的交角为 φ' , 统计对应不同 φ' 角时平行线与矿物颗粒边界交点总数, 直到转动 180° , 这便得到一系列数据, 在平面直角坐标系中, 作 $n'(\varphi')$ 对 φ' 的投点, 并进行曲线拟

合. 曲线最高点对应 $n'(\varphi')_{\max}$, 最低点对应 $n'(\varphi')_{\min}$.

CSD 软件就是用计算机来实现反向轮法测量岩石有限应变的这一系列手工操作, 以实现应变测量的自动化和提高数据统计的精度和测量效率.

1 软件设计

1.1 边界统计

本软件的主要步骤之一就是统计图像上 $0^\circ \sim 180^\circ$ 各方向颗粒边界数目. 在该步骤中怎样判别矿物边界是关键问题. 当前, 关于计算机判别颗粒对象边界的文献较多^[4,5]. 这些文献主要是针对颗粒对象进行边界提取, 而本文中的边界判断是对任一直线方向上的矿物颗粒边界进行判断, 其原理如下:

岩石矿物颗粒一般是紧密接触的, 在薄片通常也是如此. 由于相邻矿物的种类和光性不一样, 所以在正交显微镜下相邻矿物的颜色是不同的, 这一点就为我们提供了判别边界的依据. 如图 2, 计算机沿直线 AB 方向读取点(像素点)的颜色可以利用颜色分解函数把读取到的颜色分解为 RGB 三原色, 如果在直线 AB 方向上前后相邻两点(像素点)的 RGB 三原色值中存在一个大于 10 的差值(这是为了排除矿物颗粒内部干涉色不均引起的误差, 实际相邻矿物的 RGB 三原色值一般至少会存在一个大于 10 的差值), 即判断存在一个矿物颗粒边界. 当判断出一个边界后, 须忽略掉 5 个点(像素点)的判断结果, 即为了避免重复判断同一边界, 实际颗粒边界

一般是小于 5 个像素点. 但值得注意的是, 沿直线方向读点, 不能用数学上三角函数来计算像素点的坐标, 因为那样会产生较多间隙, 很多点会读取不到. 本文采用了 Bresenham 直线算法^[6]来读取像素点的坐标, 该算法可以连续画点而绘出直线, 但是作者并没有用其画点功能, 而是把画点改进为读点的坐标, 以达到不间断地读取直线上像素颜色的目的.

为了统计出图像上 $0^\circ \sim 180^\circ$ 各方向颗粒边界的数目, 须进行以下几步: (1) 建立坐标系(图 3), 原点 $(0,0)$ 定在反向轮中心, 半径 R 由矩形图像短边长度的一半确定. (2) 用一些简单的三角函数便可从反向轮的半径和直线数目算出各直线与 x' 轴平行时的初始端点坐标. (3) 由各直线初始端点坐标可求出反向轮中平行线反向转动 φ' 角度后的端点坐标. (4) 有了 φ' 角度下各直线端点的坐标, 便可以利用改进的 Bresenham 算法函数, 比较相邻两点在 RGB 三原色上的差值来判断是否为边界. 最后累加各直线方向上的矿物边界数目, 得到 φ' 角度对应的矿物边界总数 $n'(\varphi')$. (5) 从 0° 到 180° 之间递增变化, 且循环(3)和(4)步骤便可得出 0° 到 180° 各方向上的边界统计结果.

为了实现统计意义, 软件中设置了确定反向轮直线数目和每次反向转动角度大小的对话框, 可以根据输入的薄片图像大小(该软件可以接受 WINDOWS 的 BMP 格式、JPEG 格式和 GIF 格式的图像)、颗粒粗细来设置反向轮直线数, 一般图像越大颗粒越细, 则直线数少; 图像越小颗粒越粗, 则直线数多.

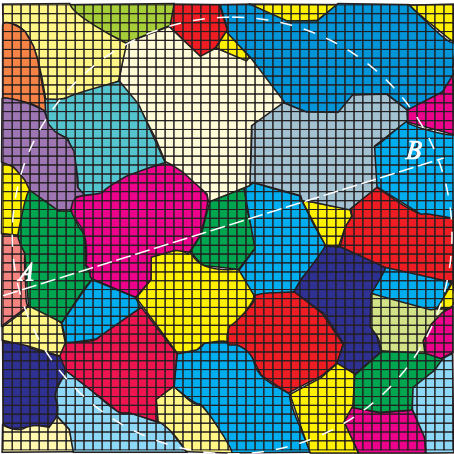


图 2 边界判断示意
Fig. 2 Sketch showing the boundary detection

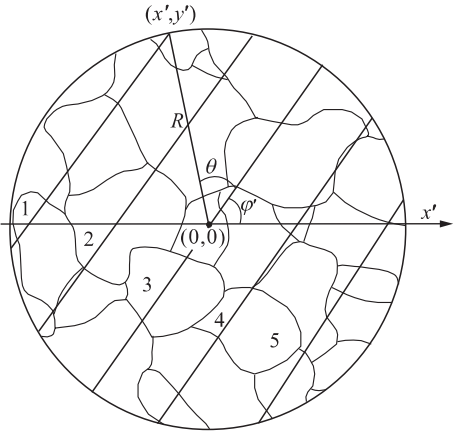


图 3 反向轮法统计各方向边界示意
Fig. 3 Computer collection of the boundary data with the inverse SURFOR wheel

表 1 CSD 软件统计出的边界数据和方向
Table 1 The boundary data and orientation collected by the software CSD

$x_i/(^{\circ})$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
$y_i/\text{个}$	85	89	88	90	86	89	91	92	86	85	87	81	73	72	70	77	85	85	84

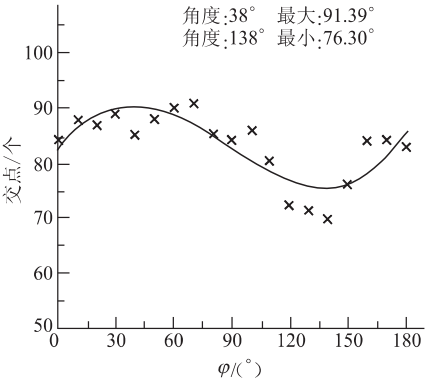


图 4 最小二乘法多项式拟合曲线

Fig. 4 The polynomial curve fitting using the least-squares

1.2 最小二乘法曲线拟合

Hart 等^[7]对各向异性极点数据进行过椭圆拟合;Thompson 等^[8]用最小二乘法进行过多项式曲线拟合. 本文是对 0°~180°各方向上边界数据进行投点、最小二乘法多项式曲线拟合,并求出曲线的最大值与最小值坐标. 下面是该软件测出的一组数据(表 1)和对它进行的最小二乘法多项式拟合曲线(图 4).

关于边界数目和方向的增广矩阵 $\mathbf{A}^{(N)}$ 是从最小残差平方和理论^[7]

$$S = \sum_{i=1}^M (y_i - y(x_i))^2$$

求得,其中 (x_i, y_i) 是数据点中的第 i 点,如 $M > N$

则有拟合多项式 $y(x_i) = \sum_{n=0}^N a_n x_i^n$. 其中, M 表示数据点的数目, N 表示多项式拟合次数. 得出关于边界数目和方向的增广矩阵 $\mathbf{A}^{(N)}$ 后,利用高斯-亚当解方程组法便可解出方程组,得到多项式的系数. 但值得注意的是,该过程中运算数据的精度要为双精度型,这是由于 x_i 是从 0°到 180°之间变化, $\mathbf{A}^{(N)}$ 中的有些高次项可能会很大,产生溢出错误. 本文则采取了一种先缩小再放大的方法来解决数据过大溢出的问题. 在计算 $\mathbf{A}^{(N)}$ 中每一项时,都先把 x_i 缩小 10 倍,即 x_i 从 0°到 18°取值,这样便不会产生溢出问题. 当在方向一边界坐标系中投点及拟合曲线时,再把 x_i 放大 10 倍,让 x_i 还原到从 0°到 180°. 由上面

的拟合曲线也可看出先缩小再放大的方法是可行的,有效的.

当拟合出多项式曲线后,便可根据求出的多项式 $y(x_i) = \sum_{n=0}^N a_n x_i^n$ 求出边界数目最大与最小坐标. 从拟合曲线可看出矿物的边界分布情形及矿物分布的优选方位. 值得注意的是,曲线的拟合次数在该软件中是低次拟合效果较好(3~5 次). 反向轮法应变测量中,判断拟合次数好的标准是,拟合曲线接近于正弦状,曲线最高与最低(波峰与波谷)点角度相差近于 90°,这是因为数据点理论上服从椭圆公式.

1.3 应变椭圆的绘制

从反向轮法原理中,可知应变椭圆主轴比是 $a/c = \sqrt{\lambda_3} / \sqrt{\lambda_1} = n'(\varphi')_{\max} / n'(\varphi')_{\min}$,长轴方向是 $\varphi_i = \varphi'_{\min}$,所以在曲线拟合步骤中求出主轴比 e 和长轴方向 ω ,下一步便是怎样把它显示到计算机的屏幕上的问题. 椭圆的一般参数方程为:

$$\begin{cases} x = N \cdot e \cdot \cos \theta, \\ y = N \cdot \sin \theta. \end{cases} \quad (0^{\circ} \leq \theta \leq 360^{\circ})$$

但是该方法只能绘出水平放置的椭圆,不能满足实际需要. 作者的解决方法是:椭圆上的每一点都绕原点反时针旋转 ω 角度,这样才能得到实际需要的应变椭圆. 实现旋转的方法如下:

$$\begin{cases} x_i = N \cdot e \cdot \cos \theta, \\ y_i = N \cdot \sin \theta. \end{cases} \quad (0^{\circ} \leq \theta \leq 360^{\circ}) \Rightarrow$$

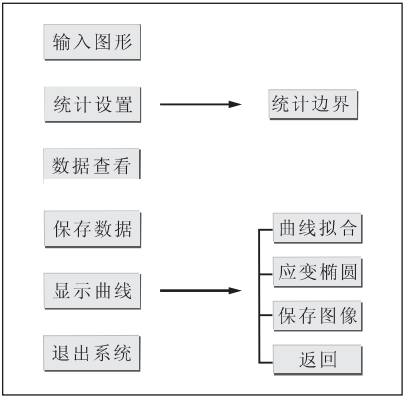


图 5 程序功能菜单及框架结构

Fig. 5 Function menu and frame of software CSD

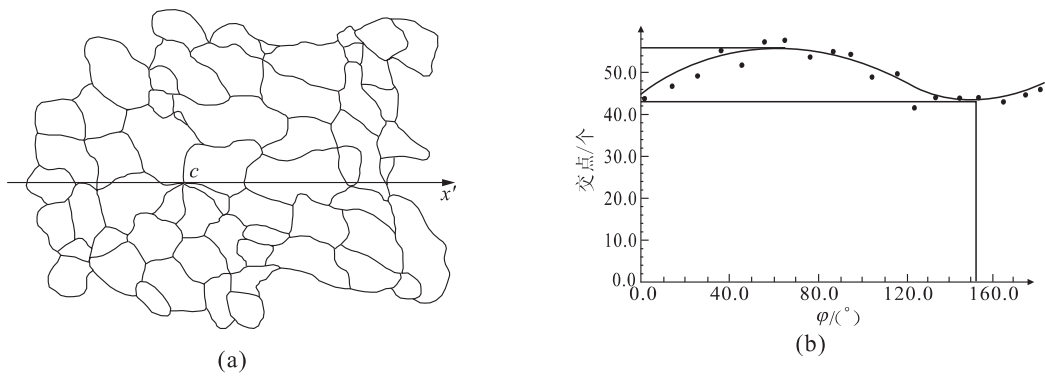


图 6 砂岩矿物颗粒轮廓图(a)及手工拟合曲线(b)^[3]
Fig. 6 Outlines of grain boundaries in a quartzite and its curve fitted by hand

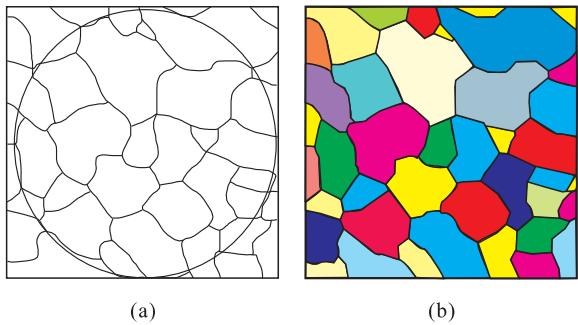


图 7 检验 CSD 的矩形区域轮廓图(a)和填充图(b)
Fig. 7 Outline sketch and filled sketch for examining the software CSD

$$\begin{cases} x'_i = x \cdot \cos \omega - y \cdot \sin \omega, \\ y'_i = x \cdot \sin \omega + y \cdot \cos \omega. \end{cases} \quad (i=0,1,2,\dots,360),$$

按 (x_i, y_i) 坐标点连线绘出的椭圆就完全符合实际应变椭圆形状. 按上述设计步骤采用可视化编程工具 Visual Basic 5.0 开发的 CSD 软件运行良好, 其功能菜单及程序结构如图 5 所示.

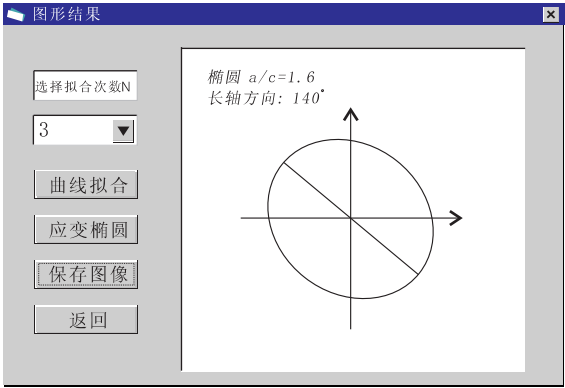


图 8 CSD 软件据统计边界数据得到的拟合曲线
Fig. 8 Fitted curve of the boundary data

2 检验

该软件适用于矿物颗粒的轮廓图和岩石薄片整体图像, 但整体图像要进行预处理. 由于图像上单个矿物颗粒的颜色一般不均一, 所以要在图像处理软件如 Adobe PhotoShop 等中, 把矿物颗粒颜色处理均匀, 并把解理去掉. 作者利用 Panozoo 的砂岩矿物颗粒轮廓图^[3]中的一个矩形区域和其颗粒充添颜色后的图像(图 7)来检验该 CSD 软件的正确性.

图 6 是 Panozoo 的砂岩矿物颗粒轮廓图^[3]及其手工拟合曲线^[3]. 对比其结果和 CSD 软件得出的结果(如图 8 及图 9)显示了由 CSD 软件得到的应变椭圆, 两者十分相近, 这可以证明 CSD 软件的正确性和有效性.

3 结论

CSD 软件可实现有限应变的自动测量, 同时可

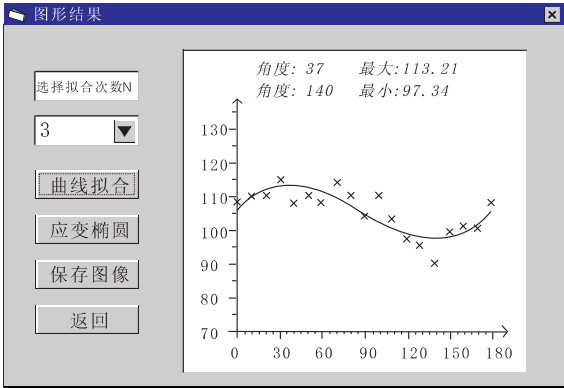


图 9 CSD 软件据拟合曲线坐标得到的应变椭圆
Fig. 9 Strain ellipse from extremums of the fitted curve

得出矿物分布优选方位且这些结果可以保存. CSD 软件实现了反向轮法原理和最小二乘法对数据点进行多项式曲线拟合,以及椭圆图形绕原点的旋转. 这些功能的实现是地质和计算机图形学相结合而完成的. 该软件能够增强反向轮法的实用性和扩大反向轮法的应用范围,减少岩石有限应变测量中人为因素的干扰,提高工作效率.

参考文献:

- [1] Ghaleb A R, Fry N. CSTRAIN: A Fortran77 program to study Fry's plots in two-dimensional simulated models [J]. *Computers & Geosciences*, 1995, 21(7): 825~831.
- [2] Allard B, Benn K. Shape preferred-orientation analysis using digitized images on a microcomputer [J]. *Computers & Geosciences*, 1989, 15(3): 441~448.
- [3] Panozzo R. Two-dimensional strain determination by the inverse SURFOR wheel [J]. *Journal of Structural Geology*, 1987, 9(1): 115~119.
- [4] Goodchild J S, Fueten F. Edge detection in petrographic images using the rotating polarizer stage [J]. *Computers & Geosciences*, 1998, 24(8): 745~751.
- [5] Knappertsbusch M W. A simple Fortran77 program for outline detection [J]. *Computers & Geosciences*, 1998, 24(9): 897~900.
- [6] 刘振安, 苏仕华. C 语言图形设计[M]. 北京: 人民出版社, 1995. 16~18.
- [7] Hart D, Rudman A J. Least-squares fit of an ellipse to anisotropic polar data: application to azimuthal resistivity surveys in karst regions [J]. *Computers & Geosciences*, 1997, 23(2): 189~194.
- [8] Thompson G T, Balch S J. An efficient algorithm for polynomial curve fitting [J]. *Computers & Geosciences*, 1988, 14(5): 547~556.

CSD SOFTWARE DESIGN FOR FINITE-STRAIN DETERMINATION WITH INVERSE SURFOR WHEEL

Zhou Jibin Zeng Zuoxun

(*Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*)

Abstract: Computer simulation of finite-strain determination with the inverse SURFOR wheel may improve the preciseness and efficiency of the strain determination. The CSD softwre, programmed in Visual Basic 5.0 and very simple for its friendly interface, can be used to measure the size of the finite strain and the direction of the long axis of the finite strain ellipse in deformed rocks by means of section images or mineral grain sketches. At the same time, this software can also be used to measure the preferred orientation of the mineral grain distribution. Firstly, the CSD software collects boundaries of mineral grains in the image at all directions from 0° — 180° . Secondly, the boundary data dots are distributed in the orientation-boundary coordinate system, and the polynomial curve fitting is made by means of the least-squares. Lastly, the extreme point coordinate of the fitted curve is obtained, and the corresponding strain ellipse is drawn up in line with the coordinate. During the operation of the CSD software, all the collected data of mineral grain boundaries and the resulting fitted curve, and the strain ellipse images can be both visible and saved in the corresponding files.

Key words: CSD software; inverse SURFOR wheel; strain determination; preferred orientation; least-squares fitting; strain ellipse.

《地球科学——中国地质大学学报》1999 年影响因子
位居高校学报第一位

2000 年 12 月 13 日,国家科学技术部在北京主办了“1999 年中国科学技术论文统计结果新闻发布会”,会上我校学报《地球科学》喜获中国高校学报影响因子和被引频次第一的荣誉,并捧回奖励证书(仅前 3 名的期刊颁发证书).这是《地球科学》2000 年继荣获首届“国家期刊奖”后,又一高级别殊荣.

多年来,《地球科学》的影响因子和被引频次在全国高校学报中一直稳居第一,而且在 1994~1998 年总被引频次排名中《地球科学》也位居全国高校学报第一(如附表).从自身发展看,《地球科学》影响因子逐年稳步增长,1997 年为 0.354,1998 年为 0.386,1999 年为 0.515,尤其是 1998 年到 1999 年,影响因子提高了 0.129,被引频次 1999 年相对 1998 年提高了 79.3%.

与同类期刊(地学)对比,《地球科学》多年来也一直位居前列,1999 年《地球科学》被引频次位居全国同类期刊的第二位,而且在影响因子前几名的期刊中,他引率《地球科学》为 0.85,位居第二.

附表 影响因子、被引频次位居前 3 名的全国高校学报和地学期刊

1999 年影响因子(高校学报)				1999 年被引频次(高校学报)		
名次	刊名	影响因子		名次	刊名	被引频次
1	地球科学——中国地质大学学报	0.515		1	地球科学——中国地质大学学报	538
2	第四军医大学学报	0.349		2	华中理工大学学报	483
3	第二军医大学学报	0.335		3	清华大学学报	449
1999 年被引频次及他引率(地学期刊)				1994~1998 年总被引频次(高校学报)		
名次	刊名	被引频次	他引率	名次	刊名	被引频次
1	地球物理学报	793	0.85	1	地球科学——中国地质大学学报	1 128
2	地球科学——中国地质大学学报	538	0.85	2	厦门大学学报	1 035
3	大气学报	483	0.38	3	华中理工大学学报	927

附表及文中所有数据均摘自 1999 年中国科技期刊引证报告.

根据中国科技期刊引证报告分析数据表明:评价一个期刊的整体质量水平,不是任何一个单一的因素所能决定的,而是多个因素:被引频次、影响因子、他引率及出版质量等共同决定的.近年来,《地球科学》在校党委、校行政的大力支持和编委会及广大专家学者的指导下,稳扎稳打,不断开拓创新,通过与国际化标准接轨,通过因特网广泛征集前沿选题,尤其是国际性的前沿课题来提高学报的质量.同时申请了一个国际顶级域名,自办“地球科学在线”网站,将学报全文上网;从网上听取广大读者、作者的意见,注意作者与读者的反馈和“回头率”,形成了一个让作者、读者自己主动关注《地球科学》的良性循环.新世纪,地球科学网络在线版将问世,我们将进一步巩固发展已有的成果,向更高的目标进军.

本刊编辑部