

任雪梅、高孟潭、张纳莉, 2012, 基于 MGR 模型的我国大陆地区各地震带 1970 年以来震级-频度关系和震级上限, 中国地震, 28(3), 320 ~ 327。

基于 MGR 模型的我国大陆地区各地震带 1970 年以来震级-频度关系和震级上限

任雪梅¹⁾ 高孟潭²⁾ 张纳莉³⁾

1) 宁夏回族自治区地震局, 银川市北京东路 244 号 750001

2) 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

3) 河北省地震局流动测量队, 河北保定 071000

摘要 本文利用两种常用的 NGR 和 MGR 模型, 对我国大陆地区 1970 年以来各地震带的震级-频度关系和震级上限进行了修定。结果表明, MGR 模型能很好地描述非线性的震级-频度关系, 因此该模型更适合于我国大陆地区各地震带 $M_L 3.0$ 以上地震的震级-频度关系, 用 MGR 方法拟合确定震级上限时, 样本量越高拟合的结果越准确。

关键词: 地震带 震级-频度关系 震级上限 非线性

[文章编号] 1001-4683(2012)03-0320-08 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

在地震区划工作中涉及震级-频度关系和震级上限问题时, 由于历史资料完备性的局限, 往往只能使用 $M_s 4.7$ 以上地震目录, 但由因地震资料的缺乏导致的计算样本量偏小, 会影响计算结果的可靠性。近来, 1970 年以来的弱震目录也被用于地震区划研究中。本文试图对 1970 年以来弱震目录的震级-频度关系进行研究, 以期得到的结果能为地震区划和相关研究提供参考。

在我国目前的地震活动性研究中, 常常依据《中国地震详目》(由中国台网中心提供) 来计算 b 值, 该目录从 1970 年以来数据完整, 样本量大, 其地震震级采用近震震级 M_L , 原目录中对于较大地震给出的 M_s 皆转换成了 M_L 。因该目录数据量丰富, 故通过它研究震级-频度关系可以弥补强震目录样本量小的缺点, 而对于震级-频度关系的非线性研究, 也可通过扩充研究区域的方式扩大样本量, 以求得较理想的结果。汪素云等 (2009、2010) 对 1990 ~ 2007 年、1990 ~ 2000 年《中国地震年报》和 2001 ~ 2008 年《中国数字地震台网观测报告》的大量数据进行了统计回归, 得到了全国和各地震分区的 M_s 与 M_L 之间的经验关系。结果表

[收稿日期] 2011-07-19

[项目类别] 宁夏回族自治区攻关项目“宁夏及邻区中强以上地震震后趋势判定及强余震的预测研究”(102164170) 资助

[作者简介] 任雪梅, 1968 年生, 博士, 宁夏地震局分析预报中心副研究员, 主要从事地震预测和工程地震等研究。

E-mail: rxn1025@163.com

明,自 20 世纪 70 年代使用至今的计算公式 $M_s = 1.13 \times M_L - 1.08$ 严重偏离数据组,已不适用于新的数据样本的处理,而新的震级转换关系更接近于 $M_s = M_L$ 。新的震级转换关系表明,利用《中国地震详目》研究震级-频度关系的非线性结果似可扩展到全国强震目录的应用研究中。

1 研究方法

震级上限被用于大量的地震区划和工程地震工作中,但对震级上限的估计方法的研究却较少,目前还没有通用的被广泛接受的震级上限的估计方法。本文讨论根据修正的古登堡-里克特模型来估计震级上限。

目前常用的计算地震发生率模型有 2 种:一个是经典的古登堡-里克特模型(The normal Gutenberg-Richter model,简称 NGR)(Gutenberg et al, 1954)

$$\lambda(M) = \begin{cases} \lambda_0 \exp[-\beta(M - M_0)] & M_0 \leq M < M_u \\ 0 & M \geq M_u \end{cases} \quad (1)$$

其中 $\lambda(M)$ 为地震发生率,即大于或等于 M 的地震年平均地震发生数目, λ_0 为 $M = M_0$ 时的地震发生率, M_0 为震级下限, M_u 为震级上限, $\beta = b \ln 10$ 。

第二个模型被认为是 NGR 模型的修正,由 Cornell and Vanmarcke (1969) 提出,其方程为

$$\lambda(M) = \begin{cases} \lambda_0 \frac{\exp[-\beta(M) - \exp(-\beta M_u)]}{\exp(-\beta M_0) - \exp(-\beta M_u)} & M_0 \leq M < M_u \\ 0 & M \geq M_u \end{cases} \quad (2)$$

这个模型被称为修正的古登堡-里克特模型(the modified Gutenberg-Richter model,简称 MGR),与 NGR 模型非常接近,但在 M 趋近 M_u 时, $\lambda(M) = 0$ 的曲线为渐近曲线,这与 NGR 模型的截断直线不同。

从以上公式可以看出,后一模型应与实际的震级-频度关系相适应,因为地震震级不可能无限增大,因此 NGR 模型不应再使用。在目前的国际地震危险性分析中,常用 MGR 模型计算 b 值和年平均发生率,但在地震预测分析中常用 NGR 模型计算 b 值。两个模型在计算震级-频度关系和震级上限的差别有多大,是本文研究的重点。

根据公式(1),可以得到下述形式

$$\lg N = a - b(M - M_0) \quad (3)$$

即常用的 NGR 模型的震级-频度关系,其中 $\lg N$ 和 M 间为线性关系,但 NGR 无法给出震级上限,因为直线外推震级上限是无限大。

根据公式(2),可以得到

$$\lg N = a + \lg \frac{10^{-bM} - 10^{-bM_u}}{10^{-bM_0} - 10^{-bM_u}} \quad (4)$$

即根据 MGR 模型得到的震级-频度关系,其中 $\ln N$ 和 M 间为非线性关系。公式(4)从理论上给出了震级上限 M_u 的确定方法,该公式确定的 M_u 具有明确的物理意义。

下面利用公式(3)、(4)来拟合中国大陆地区各地震带的震级-频度关系和震级上限。本文通过两变量的非线性回归,从任意随机值出发,既可求得最优解。优化算法采用麦夸特

法 (Levenberg-Marquardt) (Kijko, 2004) 结合通用全局优化法, 通过迭代, 当达到收敛判断标准时结束计算。

2 大陆地区1970年以来震级-频度关系的修正和震级上限的确定

2.1 各地震带震级-频度关系的修正和震级上限的确定

选取 1970 年以来中国大陆地区的 $M_L \geq 3.0$ 地震目录, 并删除余震。采用通用的 $K-K$ 法 (Keilis-Borok et al, 1980) 删除余震, 其中主震震级为 M_L (根据公式 $M_s = 1.13 \times M_L - 1.08$ 转换得到), 其删除余震的时间和空间窗范围见表 1。

表 1 $K-K$ 法删除余震的空间、时间窗

主震震级 M_L	R_0 (km)	T_0 (d)	主震震级 M_L	R_0 (km)	T_0 (d)
5.4 ~ 5.7	50	183	7.1 ~ 7.5	100	730
5.8 ~ 6.2	50	365	7.6 ~ 7.9	150	913
6.3 ~ 6.6	70	456	8.0 ~ 8.4	150	1095
6.7 ~ 7.0	100	548	8.5	150	1290

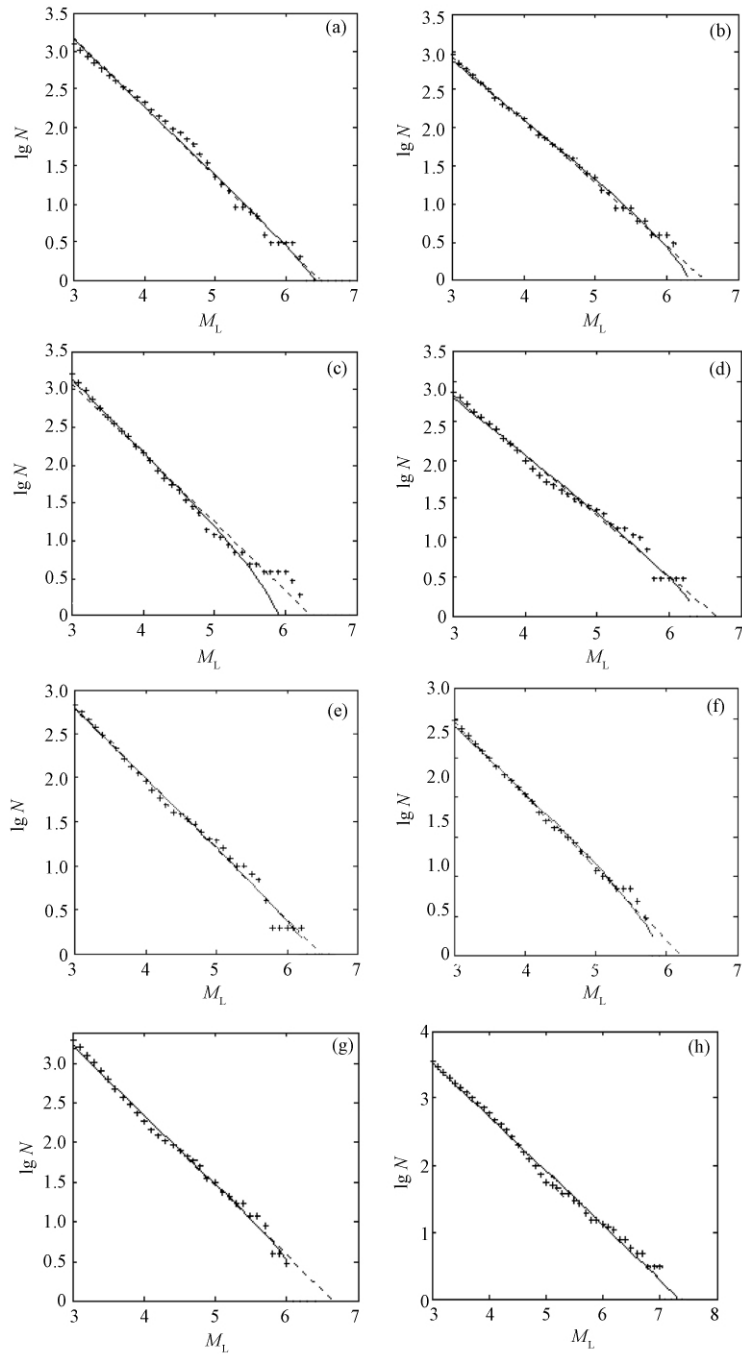
注: R_0 为空间窗, T_0 为时间窗

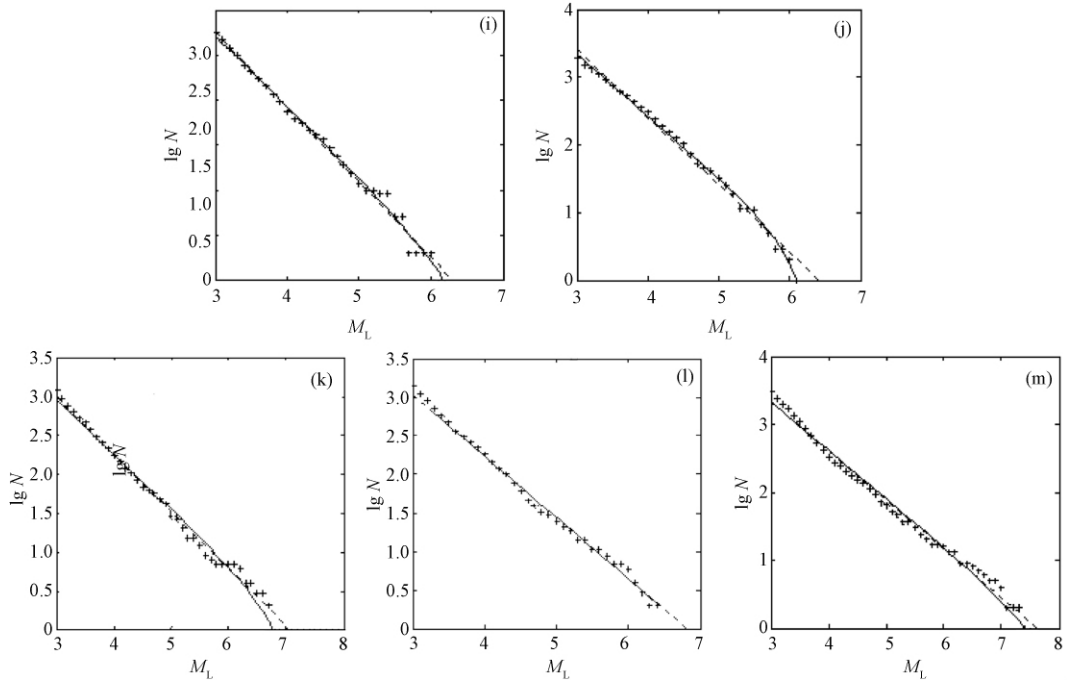
表 2 各研究区不同样本目录的参数拟合结果

地震带名称	$M_L 3.0$ 以上地震完整记录的起始时间	样本量 (个)	拟合模型	残差平方和	相关系数	a	b	M_x	m_x
华北平原带	1970	1258	MGR	0.2199	0.9966	3.1648	0.8916	7.9	7.14
			NGR	0.2373	0.9964	5.9327	0.9151		
汾渭带	1970	952	MGR	0.1506	0.9967	2.8935	0.7757	6.4	6.70
			NGR	0.2064	0.9955	5.4303	0.8303		
郟庐带	1971	1585	MGR	2.3250	0.9764	3.1400	0.9575	7.4	6.20
			NGR	0.3742	0.9925	5.8037	0.9095		
长江下游-南黄海带	1970	748	MGR	0.2692	0.9932	2.8062	0.7362	6.4	6.89
			NGR	0.2949	0.9926	5.1665	0.7759		
银川-河套带	1979	681	MGR	0.1926	0.9951	2.7885	0.7865	6.6	7.13
			NGR	0.1989	0.9949	5.2209	0.8057		
长江中游带	1979	967	MGR	0.1894	0.9946	2.9233	0.8635	5.9	6.19
			NGR	0.2235	0.9936	5.7417	0.9252		
华南沿海带	1975	2031	MGR	0.1429	0.9964	3.2237	0.8625	6.4	6.74
			NGR	0.1507	0.9962	5.9047	0.8874		
南天山带	1979	3661	MGR	0.3045	0.9968	3.5345	0.8085	7.4	8.94
			NGR	0.3049	0.9968	5.9717	0.8113		
中天山带	1979	566	MGR	0.1427	0.9966	2.7135	0.7873	6.3	6.67
			NGR	0.1866	0.9956	5.2610	0.8359		
北天山带	1979	1919	MGR	0.0625	0.9989	3.3298	0.9025	6.1	6.27
			NGR	0.2852	0.9948	6.4012	0.9972		
龙门山带	1979	1194	MGR	0.3587	0.9938	2.9629	0.7054	8.0	7.21
			NGR	0.2099	0.9961	5.2064	0.7381		
祁连山-六盘山带	1979	1386	MGR	0.1024	0.9970	3.0337	0.7952	6.4	9.66
			NGR	0.1024	0.9970	5.4177	0.7949		
滇西南带	1979	3048	MGR	0.4651	0.9945	3.3327	0.7106	7.6	7.98
			NGR	0.3565	0.9955	5.4854	0.7191		

注: M_x 指目录中的最高震级, m_x 为拟合得到的最大震级

根据吴开统等(1981)、邓明德(1988)、焦远碧等(1990)、黄玮琼等(1994)和詹明等(2001)的研究,得到本文所研究的各地震带的 $M_L 3.0$ 以上地震资料的完整时间(表 2)。青藏高原和东北地震区因为目前监测能力还不能完全监测 $M_L 3.0$ 地震,因此对这两个区的部分地震带不做分析,另外,其它数据较少的地震带因用 MGR 模型无法拟合出合理的结果,因此也不作讨论。根据以上两种拟合方法可得到图 1 及表 2 中的结果。





十字线代表原始数据, 实线代表 MGR, 虚线代表 NGR

图 1 各地震带不同样本目录的拟合结果

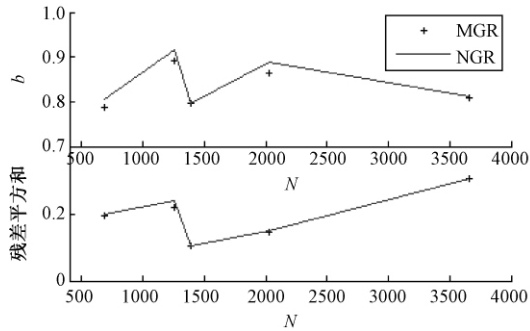
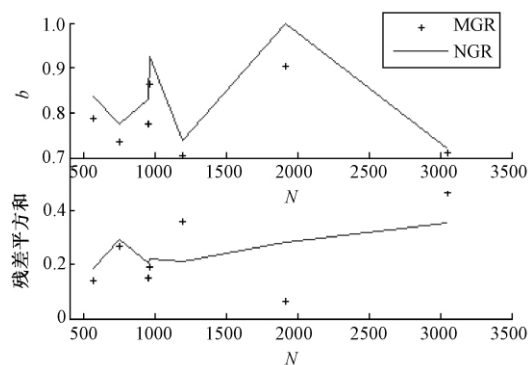
(a) 华北平原带, $N = 1258$; (b) 汾渭带, $N = 952$; (c) 郟庐带, $N = 1585$; (d) 长江下游-南黄海带, $N = 748$; (e) 银川-河套带, $N = 681$; (f) 长江中游带, $N = 967$; (g) 华南沿海带, $N = 2031$; (h) 南天山带, $N = 3661$; (i) 中天山带, $N = 566$; (j) 北天山带, $N = 1919$; (k) 龙门山带, $N = 1194$; (l) 祁连山-六盘山带, $N = 1386$; (m) 滇西南带, $N = 3048$

2.2 拟合结果分析

从图 1 中可以发现以下规律:

(1) 在我国大陆地区各地震带的 $M_L 3.0$ 以上地震震级-频度关系拟合中, 当原始数据 $\lg N$ 和 M 之间为线性关系时, 例如银川-河套、华北平原、六盘山-祁连山、华南沿海和南天山等地震带, 用两种方法拟合得到的残差平方和及 b 值相差不大 (图 2)。当原始数据 $\lg N$ 和 M 之间表现为非线性时, 例如汾渭、郟庐、长江下游-南黄海、长江中游、中天山、北天山、龙门山和滇西南等地震带, 利用传统的 NGR 方法拟合的残差平方和和 b 值大于 MGR 方法拟合的残差平方和和 b 值 (图 3) (由于郟庐地震带 MGR 拟合的残差平方和太大, 因此图 3 中没有给出其结果), 个别地震带利用传统的 NGR 方法拟合的残差平方和小于 MGR 方法拟合的残差平方和 (郟庐地震带和龙门山地震带), 这主要是因为高端震级的震级-频度关系不规则造成。以上结果表明, 本文的 MGR 模型拟合的数据能表现非线性关系, 而传统的 NGR 方法不能很好地呈现该非线性关系, 进而说明 MGR 模型似适合用来确定我国各地震带的 $M_L 3.0$ 以上地震震级-频度关系 (图 1~3)。

(2) 震级-频度关系表述的是研究区在研究时段内已经发生的地震数目和震级之间的关系, 因此根据拟合关系得到的震级上限应该大于实际已经发生的最大地震。但由于本文

图 2 线性震级-频度关系拟合的残差平方和 b 值图 3 非线性震级-频度关系拟合的残差平方和 b 值

使用的资料时间太短,从表 2 可以看出,本文中用 MGR 模型拟合得到的震级上限仅有华北平原、郟庐和龙门山等地震带小于实际已经发生的最大地震,其它地震带 MGR 模型拟合得到的震级上限都大于实际已经发生的最大地震。

从表 2 可以看出,在各地震带中仅有 5 个有大于 7 级以上的地震,即华北平原、郟庐、龙门山、南天山和滇西南地震带等,其样本量分别为 1258、1585、1194、3661 和 3048。其中前 3 个地震带的样本量都小于 2000,其震级-频度关系曲线在高震级段中表现较为复杂,没有较好的延伸趋势,其 MGR 模型拟合的震级上限小于实际已经发生的最大地震。而南天山和滇西南地震带的样本量都大于 3000,其震级-频度关系曲线在高震级段表现为线性关系, MGR 模型拟合的震级上限大于实际已经发生的最大地震。这表明在含有高震级的拟合中样本量对拟合结果的影响较大,因此在含有大于 7.0 级以上地震的地震带 MG 模型拟合震级上限时其样本量应该大于 3000。

(3) 各地震带的地震样本量在 500 ~ 3700 之间,计算得到的 b 值在 0.70 ~ 1.00,表明高样本计算得到的 b 值较正常,这不同于历史地震低样本计算的 b 值为 0.40 ~ 0.81 (任雪梅等,2012);当震级-频度关系为非线性时, MGR 模型计算得到的 b 值小于 NGR 模型计算得到的 b 值。

3 结论和讨论

综合以上分析,可以得出以下几点:

(1) 1970 年以来至今各地震带的弱震资料时间仅有约 40 年,利用 40 年的地震目录拟合震级-频度关系和震级上限,显然资料时间尚显太短,因此得到的震级-频度关系和震级上限显然具有局限性,尤其对于一个地震带的震级上限,研究时段应该越长越好,因此在利用弱震目录研究震级上限时,其结果可靠性差,仅具参考价值。

(2) 本文研究结果表明,传统的 NGR 模型只适合线性的震级-频度关系,不适合非线性的震级-频度关系,而 MGR 模型适合非线性和线性的震级-频度关系,表明 MGR 模型更适合确定我国大陆地区各地震带的 $M_L 3.0$ 以上地震震级-频度关系。

(3) 在应用 MGR 模型对 $M_L 3.0$ 以上地震震级-频度关系计算拟合 b 值和地震带震级上限时,应该注意选取较高的样本量。

(4) 本文的样本量较高,计算得到的 b 值也较正常,表明利用历史地震资料计算出的低 b 值是由于地震样本量低的缘故。因此地震区划工作使用现代弱震目录资料可以提高计算的精度。

参考文献

- 邓明德,1988,测震台网监测能力的评价研究及其在西北四省区台网建设中的应用,西北地震学报,10(2),48~55。
- 黄纬琼、李文香、曹学锋,1994,中国大陆地震资料完整性研究之二——分区地震资料基本完整的起始年份分布图象,地震学报,16(4),423~432。
- 焦远碧、吴开统等,1990,我国地震台网监测能力及台网观测条件质量评定,中国地震,6(4),1~7。
- 任雪梅、高孟潭、俞言祥,2012,基于 MGR 模型修正我国大陆中强以上地震的震级-频度关系和确定震级极限值,地震学报,34(3),331~338。
- 汪素云、俞言祥,2009,震级转换关系及对地震活动性参数的影响研究,震灾防御技术,4(2),141~149。
- 汪素云、高阿甲、冯义钧等,2010,中国地震目录间的对比及标准化,地震,30(2),38~45。
- 吴开统、焦远碧,1981,论中国地震台网的监测效能,地震研究,4(1),21~26。
- 詹明、李良、刘仕锦,2001,四川甘孜州测震台网的监测能力评估,地震地磁观测与研究,22(5),58~62。
- Cornell C A, Vanmarcke E, 1969, The major influences on seismic risk, Proc 4th World Conference on Earthquake Engineering, Santiago de Chile, 15~19, January.
- Gutenberg B, Richter C F, 1954, Seismicity of the earth (and associated phenomena), Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
- Kijko A, 2004, Estimation of the Maximum earthquake magnitude, m_{max} , Pure Appl. Geophys, 161, 1655~1681.
- Keilis-Borok V I, Knopoff L, 1980, Bursts of aftershock of strong earthquakes, Nature, 238(P5744), 259~263.

Magnitude-frequency relation and magnitude limit of seismic zones based on the MGR model in Chinese mainland since 1970

*Ren Xuemei*¹⁾ *Gao Mengtan*²⁾ *Zhang Nali*³⁾

1) Earthquake Administration of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750001, China

2) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

3) Mobile Survey Team of Earthquake Administration of Hebei Province, Baoding 071000, China

Abstract In this paper, modification on magnitude frequency relation and magnitude limit determination based on NGR and MGR (commonly used models) are studied in various seismic zones in Chinese mainland since 1970. The results indicate that the MGR model can be used to describe the nonlinear frequency relations so that the magnitude frequency relations of MGR model is more suitable to magnitude frequency relation of $M_L \geq 3.0$ earthquakes of various seismic zones in Chinese mainland. The result of the fitting high sample size of the magnitude limit determination based MGR model is accurate.

Key words: Seismic zone Magnitude-frequency relations Magnitude limit Nonlinearity