

中国华北峰值加速度的衰减特性 及与北美东部的比较^{*}

王碧泉¹⁾ 吴大铭²⁾ 边银菊¹⁾

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) State University of New York, Binghamton, N. Y., U. S. A.

摘要 利用唐山强余震的强地面运动记录, 研究了近场强地面运动水平峰值加速度的衰减特性, 得到了唐山地区的衰减关系(土层、土层与基岩). 此外, 还得到了北美东部的衰减关系, 并将其与中国华北的衰减进行了比较, 认为两者的衰减趋势是比较一致的. 中国华北的衰减特性可供北美东部参考.

关键词 强地面运动 衰减 唐山地震

引言

1923 年 3 月 10 日, 在美国加州用强震仪记到了长滩地震, 这是世界上第 1 次破坏性强震的强地面运动记录. 随着科学技术的进步和强震记录台的增建, 关于强地面运动衰减的研究有了迅速的发展, 并取得了一系列成果, 尤其对美国西部和日本两地区衰减的研究比较充分.

在中国, 1962 年首次在广东省河源县布设了强震台, 用于记录新丰江水库的水库地震, 所用仪器是中国科学院工程力学研究所研制的 RDZ 型强震仪. 随之, 中国也开始了强地面运动的研究. 尤其近 10 多年来, 强地面运动衰减的研究取得了较多的成果, 例如, 彭克中等(Peng et al., 1985)系统地研究了中国华北和西南地区水平加速度的衰减特性, 并得到了这两地区的衰减关系; 胡聿贤(1988)全面地论述了包括强地面运动衰减特性在内的工程地震学问题; 霍俊荣(1989)着重研究了衰减模式(衰减公式)及回归方法, 并用美国西部资料进行了统计分析; 郭玉学和王国新(1990)则主要研究了华北地区基岩场地水平加速度的衰减关系; 王培德等(1993)详细介绍了中国西南地区地震的近场观测资料, 并给出了根据这些资料研究得到的加速度衰减和地面运动特性等. 此外, 国家地震局工程力学研究所还出版了有关强震记录的系列报告: “Report on strong earthquake motion records in China”.

加速度随距离的衰减关系, 对重要结构的抗震设计是十分重要的. 由于一次大地震破坏最严重的地区一般在几十公里的范围内(例如 7 级地震的Ⅶ度区即为几十公里左右), 因此, 近场衰减关系的研究就显得更重要了. 然而直至目前, 由于资料不够充足, 较之远场

* 中国地震局地球物理研究所论著 98A01027.

1998-04-20 收到初稿, 1998-10-14 收到修改稿, 1998-11-14 决定采用.

而言，近场衰减的研究仍不够充分。

本文主要研究了近场强地面运动水平峰值加速度的衰减特性，并得到了唐山地区的衰减公式；此外，还比较了中国华北和北美东部的衰减特性。

1 资料

对中国华北地区，本文主要取用唐山余震的强地面运动记录。唐山地震区处于华北断块的东北部位，它位于华北断块中冀渤海陷和燕山隆起的结合部位。在燕山隆起带主要发育了一系列近东西向断裂，它们形成于前中生代，但新生代均有不同的活动，多为断面倾向南的正断层。此外，还有北东向和北西向活动断裂在隆起带内穿插。图1示出了该区的主要构造（国家地震局地质研究所，1986）。

1976年7月28日唐山 $M_s=7.8$ 地震发生后，国家地震局工程力学研究所（以下简称工力所）在唐山余震区布设了一组强震台网，共21个台（见图1。图中台站数据取自Institute of Engineering Mechanics, SSB, 1989），以记录其强余震。所用仪器均为美国Kinematic公司生产的PDR-1数字地震仪和FBA-13力平衡式加速度计。在1982年7月至1984年12月期间，该台网共记到 $M_s \geq 3.5$ 或 $M_L \geq 4.0$ 地震9次，其中有3次地震发生在1984年12月10日，且

发生在几乎同一地点，因此本文只取了其中震级最大的（ $M_s=3.9$ ）一次地震记录；另外，1982年10月19日14时的 $M_L=4.2$ 地震与当日12时的 $M_s=4.9$ 地震亦发生在同一地点，且只有一个台记到，故亦未取此震的记录；余下地震均被选用。按上述方法本文共选用了6次唐山余震的数字加速度记录图作为研究的基础，这些地震的震源参数以及得到记录并予以利用的记录台的数目如表1所示。该表中的数据亦取自国家地震局工程力学研究

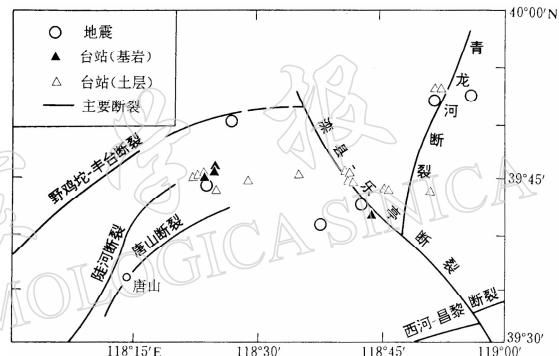


图1 唐山地区主要构造及强震台网图

表1 唐山地区地震震源参数

地震 序号	地震发生时间*		震中位置		深度 /km	震级		台站数	台站数 (土层)
	年-月-日	时:分:秒:	φ_N	λ_E		M_L	M_s		
1	1982-10-19	12: 46: 00.5	39°52.6'	118°55.4'	9.6	5.7	4.9	8	8
2	1983-05-28	08: 20: 30.8	39°40.8'	118°37.3'	12.9	4.2	(3.7)	9	7
3	1983-09-25	22: 25: 39.3	39°44.4'	118°23.4'	10.0	4.2	(3.7)	9	6
4	1983-10-04	16: 25: 18.4	39°52.2'	118°51.4'	7.5	4.3	(3.8)	6	4
5	1984-01-07	11: 18: 23.9	39°42.3'	118°42.5'	5.7	4.9	(4.5)	7	5
6	1984-12-10	21: 51: 05.3	39°50.3'	118°26.9'	9.6		3.9	8	5

注：* 为世界时。

所的系列报告VI (Institute of Engineering Mechanics, SSB, 1989)。表中有括号的 M_s 是按国家地震局震害防御司(1990)的下列公式由 M_L 转换而得的：

$$M_S = 1.13M_L - 1.08$$

下面需说明几点：

(1)由于本文所研究的地震较小，在 USGS 及 ISC 的报告中均未对这些地震的震源参数进行测定，这里选用工力所报告中所提供的参数。

(2)关于震级。该报告中这 6 次地震的震级均取自国家地震局地球物理研究所的报告。地球物理所测定的震级是中国统一的面波震级标度(参看 Peng *et al.*, 1985)，与世界范围的地震报告中的震级标度可能有系统的偏差；另外，震级测定误差也可能达到±0.5 级。

(3)关于震中。工力所的报告中未给出地震的定位精度。由于当时唐山地区尚没有很好的地壳速度模型，而且台网密度亦不够。一般说来定位误差不会小于 2 km。

图 1 示出了所选用地震的震中位置。由图 1 可见，震中与台站的距离只有几十公里，实际上我们所选用的资料都是近场记录，其中最大的震中距为 41.3 km。

为比较北美东部和中国华北地区的衰减，我们从美国 NCEER 获取了 3 次地震的数字化强震记录。这些地震的震源参数列于表 2，其震源参数(包括发震时间、震中位置、震级等)的资料来源见表中最后一列。表中有括号的 M_S 是由 m_b 按 Bath 的下列公式(国家地震局震害防御司, 1990)转换而得的：

$$M_S = 1.82m_b - 5.35$$

表 2 北美东部地震震源参数

地震序号	地震发生时间*		震中位置		深度 /km	震级		台站数	数据来源
	年-月-日	时:分:秒:	$\varphi_N/(\circ)$	$\lambda_E/(\circ)$		m_b	M_S		
1	1982-03-31	21: 02: 20.0	47.00	66.60	5.00	5.0	(3.8)	3	ISC**
2	1986-01-31	16: 46: 43.3	41.70	81.20	10.0	5.0	(3.8)	1	UCBSS***
3	1991-05-04	01: 18: 54.8	36.51	89.82	21.0	4.2	(2.3)	3	ISC

注：* 世界时；** 国际地震中心目录；*** 加利福尼亚大学地震台站目录。

2 唐山地区近场加速度衰减

2.1 唐山地区近场水平峰值加速度的回归分析

关于加速度随震级、距离的衰减关系，已有很多人进行了研究，例如，Esteva 和 Rosenblueth(1964)、Boore 等(1982)、Bolt 和 Abrahamson(1982)、Peng 等(1985)、霍俊荣(1989)以及王培德等(1993)。本文采用 Peng 等(1985)所用的函数关系进行拟合，我们认为此函数关系比较合理，既考虑了震级对衰减的影响(有 $b M_S$ 项)，又考虑了几何扩散($c \lg R$)和吸收的影响($d \times R$)。其公式为

$$\lg A = a + bM_S + c\lg R + d \times R$$

式中， A 为强地面运动水平分量峰值加速度($PGA, \text{cm/s}^2$)； M_S 为地震的面波震级； R 为震中距(km)； a, b, c, d 为待定参数，可由对资料的回归得到。

采用上述 6 次地震的数字加速度记录图，先对每个台站的两水平分量分别选取加速度的峰值，然后取两者最大值作为该台的水平分量峰值加速度(以下凡未特殊指明，均如此)。考虑到震中测定误差不小于 2 km，故舍弃 $\Delta < 2 \text{ km}$ 的资料，共舍弃了 1983 年 9 月 25 日地震的 3 个台记录，如此，共有 44 个资料点。需要说明的是，若不舍弃 $\Delta < 2 \text{ km}$ 的资料，则拟合误差增大，有时还可能出现不合理的结果，如 $c\lg R$ 项接近于 0 或出现负值。由

于拟合时考虑的是 $\lg R$ 而不是 R , 在近距离, 本文所取用地震的震中测定误差引起的震中距计算误差, 就可能较大地影响了结果, 故舍弃 $\Delta < 2 \text{ km}$ 的资料是合理的。按上述公式进行回归, 得到衰减关系如下:

$$\lg A = -0.122 + 0.452M_s - 0.311 \lg R - 0.0111R \quad (1)$$

拟合该公式的资料范围如下。区域: 唐山地区; $R: 2.1 \sim 41.3 \text{ km}$; $M_s: 3.7 \sim 4.9$; 场地: 土层及基岩。表 3 第 1 行列出了此公式, 同时还列出了与回归结果有关的各种参数。其中, Q 为偏差平方和, S 为平均标准偏差, r 为复相关系数, $V(1)、V(2)、V(3)$ 分别为 3 个自变量的偏相关系数。

表 3 回归分析结果

回 归 公 式	Q	S	r	V(i)			地区	场 地	地 震 数
				$V(1)$	$V(2)$	$V(3)$			
$\lg A = -0.122 + 0.452M_s - 0.311 \lg R - 0.0111R$ (1)	3.366	0.277	0.676	0.989	0.805	0.637	唐山	土层, 基岩	6
$\lg A = 0.430 + 0.428M_s - 0.764 \lg R - 0.00480R$ (2)	2.426	0.271	0.723	0.989	0.962	0.353	唐山	土层	6
$\lg A = -1.184 + 0.849M_s - 0.737 \lg R - 0.0231R$ (3)	0.186	0.120	0.959	0.999	0.992	0.978	唐山	土层	2
$\lg A = 1.877 + 0.197M_s - 0.128 \lg R - 0.0316R$ (4)	0.125	0.133	0.987	0.979	0.734	0.989	北美东部		3

图 2 示出了拟合的衰减曲线及所用资料。由图可以看出, M_s 在 $3.7 \sim 3.9$ 之间的 4 次地震资料较离散, 比较明显地显示出是由于震级的测定误差所引起的。在使用此公式时, 应考虑到这一点。

拟合上式所用资料的场地既有土层又有基岩, 不便于应用, 在此仅供参考。本应将两种地基的资料分别拟合, 但基岩的资料较少, 大多数为土层上的记录(参看表 1), 故仅对土层资料进行了拟合。从拟合上式的资料中选出全部在土层上的记录, 共 33 个资料点进行拟合, 结果如下:

$$\lg A = 0.430 + 0.428M_s - 0.764 \lg R - 0.00480R \quad (2)$$

拟合式(2)的资料范围如下。区域: 唐山地区; $R: 2.1 \sim 41.3 \text{ km}$; $M_s: 3.7 \sim 4.9$; 场地: 土层。比较拟合式(1)与式(2)的偏差和相关系数(表 3), 可以看出, 式(2)的偏差均比式(1)小, 而各种相关系数除 $V(3)$ 外, 均比式(1)的大。由图 3 也可以看出资料点的离散比图 2 小一些。这表明对同一种场地拟合误差较小时, 结果会好一些。

由图 3 还可以看出, $M_L = 4.2 \sim 4.3$ 的 3 次地震的资料点非常分散, 这显然与震级测定误差有关。本文所取用的国家地震局地球物理研究所测定的震级是多台平均的结果, 当震级较大时记录的台站较多, 一般说来震级测定误差会小一些。为考察震级测定误差的影

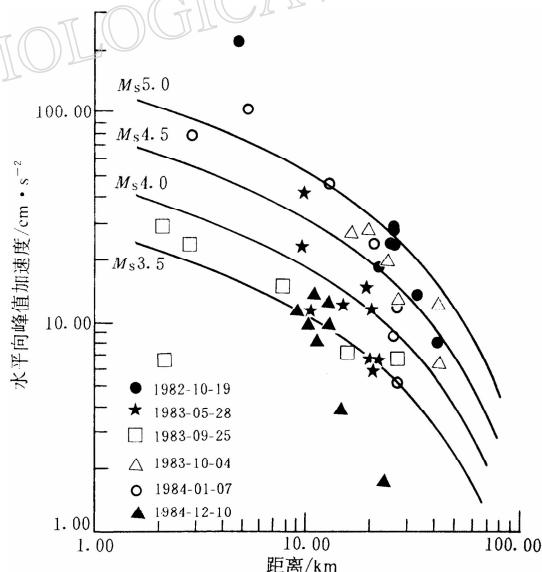


图 2 唐山地区水平向峰值加速度的衰减
曲线(土层和基岩, $M_s = 3.7 \sim 4.9$)

响, 从拟合式(2)的资料中选出 $M_s \geq 4.0$ 的两次地震资料进行拟合, 结果如下(图 4):

$$\lg A = -1.184 + 0.849 M_s - 0.737 \lg R - 0.0231 R \quad (3)$$

拟合式(3)的资料如下. 区域: 唐山地区; R : 2.8 km~41.1 km; M_s : 4.5~4.9; 场地: 土层. 比较表明(见表 3), 式(3)的拟合误差比前两式小得多. 例如, 偏差平方和 Q 小一个量级, 而各种相关系数则均在 0.95 以上. 因此, 对 4~5 级多的地震, 这一公式比较接近实际. 而且此公式未用震级误差较大的 4 级以下地震, 在与用国际统一震级标度的结果进行比较时, 使用这一公式较为合理. 但也应注意用 2 次地震拟合时, 震级误差可能给回归结果带来系统误差.

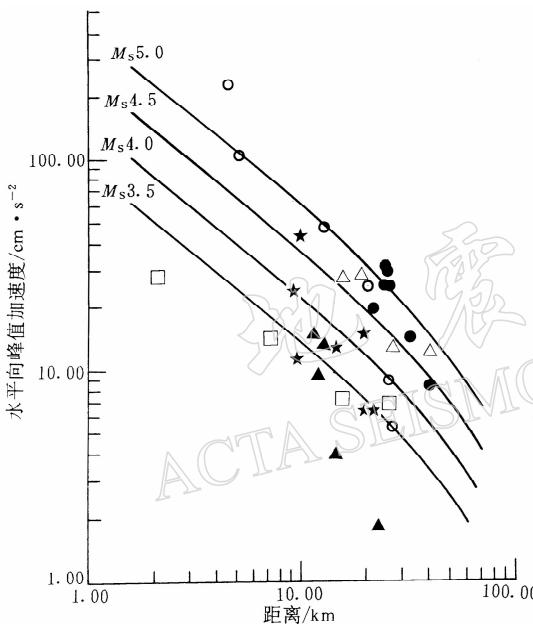


图 3 唐山地区水平向峰值加速度的衰减曲线
(土层, $M_s = 3.7 \sim 4.9$, 图例同图 2)

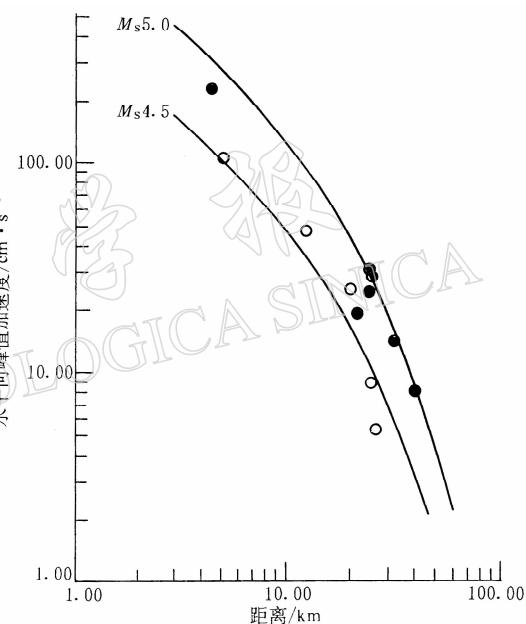


图 4 唐山地区水平向峰值加速度的衰减曲线
(土层, $M_s = 4.5 \sim 4.9$, 图例同图 2)

2.2 回归公式和水平峰值加速度分量的选取

王培德等(1993)在研究西南地区近场水平峰值加速度衰减时, 采用的拟合公式为

$$\lg A = a + b M_s - c \lg(R + R_0)$$

其中, A , M_s , R 的意义同前; a , b , c 亦为待定参数, 由对资料的回归求得. R_0 代表深度的影响, 该文中取为 10, 本文取为 9.

用前述拟合公式(2)的资料, 对上式拟合, 得到

$$\lg A = 1.730 + 0.443 M_s - 1.672 \lg(R + 9.0)$$

且有 $Q=2.390$, $S=0.269$, $R=0.728$, $V(1)=0.989$, $V(2)=0.994$. 将它们与表 3 中式(2)的偏差和相关系数比较可见, 两种公式的拟合误差相差并不很大, 用此公式拟合误差还略小些. 但 Peng 等(1985)的公式考虑了吸收的影响, 似比上公式略合理些. 总的说来, 在近场采用这两个公式均可, 本文选用 Peng 等(1985)的公式.

如何选取水平峰值加速度的分量为好？作为比较，对拟合式(1)~(3)的记录，分别改为选用最大的两水平分量合成值作为 A 值，仍用同样的公式拟合，并比较用合成值与最大值的拟合结果及误差，发现两者相差不多。因此，本文中均采用最大值的拟合结果。这里仅举例示出用水平分量合成值的一个结果（对拟合式(2)的资料），以供参考。

$$\lg A = 0.513 + 0.415M_s - 0.768\lg R - 0.00460R$$

且有 $Q=2.492$ 、 $S=0.275$ 、 $R=0.714$ 、 $V(1)=0.988$ 、 $V(2)=0.961$ 和 $V(3)=0.334$ 。

2.3 北美东部的加速度衰减

对表 2 所示北美东部 3 次地震的资料，其水平峰值加速度的回归分析结果如下（图 5）：

$$\lg A = 1.877 + 0.197 M_s - 0.128\lg R - 0.0316R \quad (4)$$

表 3 中也列出了拟合误差，由于资料很少，这一衰减公式仅供参考。拟合该公式的资料范围如下。区域：北美东部， Δ ：3.9~61.6 km； M_s ：2.3~3.8。

2.4 回归结果的检验

为考察回归结果的显著性及合理性，对所得回归公式分别进行了 F 检验，见表 4。例如，对回归公式(1)（表 4 中第 1 行），计算得到其 F 值为 11.21。由 F 分布表查得：当 α 分别为 0.05 和 0.01 时，其 F_{α} 值分别为 2.84 和 4.31，可见 $F > F_{\alpha}$ ，因而，回归公式(1)在 $\alpha=0.05$ 和 0.01 的显著性水平上均可通过检验。由表 4 可见，本文所得的全部结果[公式(1)~(4)]，包括文中讨论回归公式和水平峰值加速度分量选取时得到的另两个回归结果（表 4 中最后两个公式），也都通过了 F 检验。

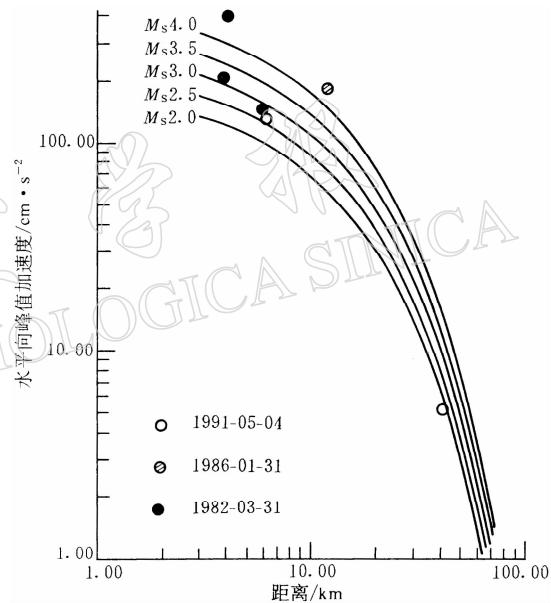


图 5 北美东部水平向峰值加速度的衰减曲线

表 4 回归结果的 F 检验

回 归 公 式	自变量 数 m	观 测 点 数 M	F	$\alpha=0.05$		$\alpha=0.01$	
				F_{α}	是否通过检验	F_{α}	是否通过检验
$\lg A = -0.122 + 0.452M_s - 0.311\lg R - 0.0111R$ (1)	3	44	11.21	2.84	通过	4.31	通过
$\lg A = 0.430 + 0.428M_s - 0.764\lg R - 0.00480R$ (2)	3	33	10.59	2.93	通过	4.54	通过
$\lg A = -1.184 + 0.849M_s - 0.737\lg R - 0.0231R$ (3)	3	13	34.61	3.86	通过	6.99	通过
$\lg A = 1.877 + 0.197M_s - 0.128\lg R - 0.0316R$ (4)	3	7	38.82	9.28	通过	29.46	通过
$\lg A = 1.730 + 0.443M_s - 1.672\lg(R+9.0)$	2	33	16.90	3.33	通过	5.42	通过
$\lg A = 0.513 + 0.415M_s - 0.768\lg R - 0.00460R$	3	33	10.04	2.93	通过	4.54	通过

3 比较和讨论

3.1 唐山地区与华北地区衰减的比较

Peng 等(1985)较系统地研究了华北地区的衰减，得到水平峰值加速度的衰减公式为

$$\lg A = -0.474 + 0.613M_s - 0.873\lg R - 0.00206R$$

本文用不同的资料(只有一次地震相同), 主要研究唐山地区在近场的衰减。将本文对土层的拟合结果[公式(2)]与上式比较可见, 两者的 $\lg R$ 项比较接近, 只相差 0.1 左右, 表明与几何扩散有关的衰减, 两者是比较一致的。由图 6 也可看出, 在本文所研究的距离范围内, 两者的衰减关系是接近的。郭玉学和王国新(1990)得到华北地区的衰减公式为

$$A = 214.5 e^{0.819M_s} (R + 15)^{-1.639}$$

取对数后得

$$\lg A = 2.331 + 0.356 M_s - 1.639\lg(R + 15)$$

图 6 中也示出了该衰减曲线。由图可见, 与本文所得衰减曲线[公式(2)]相比, 此曲线在震中距小于 4 km 处略低一些, 在大于 4 km 处略高一些, 但大体上相差不多; 曲线形状的差异可能是由于拟合公式不同而引起, 所用资料为基岩可能也是引起差异的因素之一。

以上比较表明, 本文所得衰减关系, 尤其是土层的衰减关系可以补充和验证 Peng 等(1985)对华北地区的结果, 也表明公式(2)是比较符合实际衰减情况的。

3.2 唐山地区与北美东部衰减的比较

前已述及, 华北为一个大断块地区, 唐山位于华北断块的东北部。北美东部和中国华北都是板内地区, 按地质年龄其地壳有一定相似性, 而且较之有剧烈构造活动的地区, 如

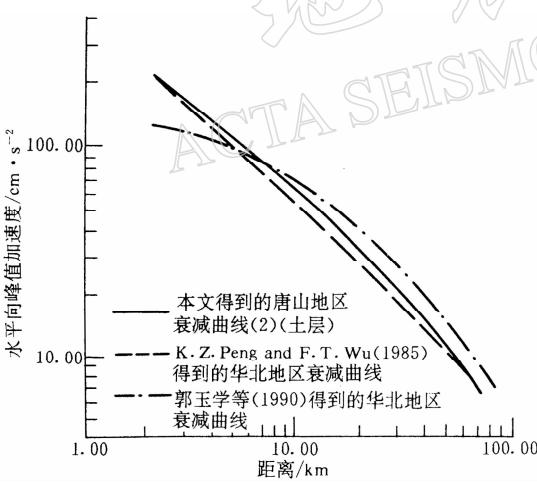


图 6 唐山地区和中国华北衰减的比较($M_s = 5.0$)

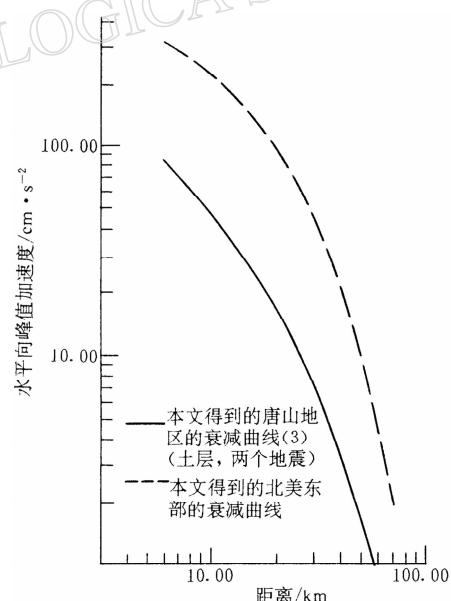


图 7 唐山地区和北美东部衰减的比较($M_s = 4.5$)

美国西部和中国西部, 这两者的构造都较为完整。而中国华北地区是地震较为活跃的地区, 1966 年以来, 相继发生了邢台和唐山等大地震, 因此能获得一些强地面运动记录, 并得到衰减曲线。而北美东部地震活动较低, 强震资料有限。将华北的结果与北美东部所收集到的加速度记录结果进行比较, 可能会获得一些有用的信息。

图 7 示出了唐山地区在土层上的衰减公式(3) 和北美东部的衰减公式(4)。图中取 M_s

=4.5。由图可见，两条曲线的高度不同，但衰减的趋势是比较一致的。两条曲线衰减趋势的一致可能提示了两点信息：①两条曲线的高度不一样主要与震级的测定有关。北美东部地震的震级主要取自国际报告，而唐山地震是采用中国的震级标度，两种震级标度存在系统的偏差。一般中国测定的震级较 ISC 测定的震级平均低 0.3 级左右。另外，两条曲线分别对不同震级区间的资料拟合，可能也是影响曲线高低的原因之一；②两曲线衰减趋势一致（图 7）提示我们：中国华北地区与北美东部可能有较类似的衰减特性。由于中国华北和唐山地区已有较多的强地面运动记录，并已得到衰减公式，而中国华北和北美东部在地质年龄及地壳上又有相似性，因此，中国华北（包括唐山地区）的衰减特性是可以供北美东部参考的。若进一步研究两地区震级标度的差异，也许能提供更多的信息。

参 考 文 献

- 郭玉学，王国新。1990. 华北地区基岩场地水平加速度的衰减规律。地震工程与工程振动，**10**(1): 41~50
- 国家地震局地质研究所。1986. 河北平原及其周围地区新构造图。北京：地震出版社
- 国家地震局震害防御司。1990. 地震工作手册。北京：地震出版社，633
- 胡聿贤。1988. 地震工程学。北京：地震出版社，692
- 霍俊荣。1989. 近场强地面运动衰减规律的研究：[学位论文]。北京：国家地震局地球物理研究所
- 王培德，陈运泰，王鸣。1993. 中国西南地区近震源强地面运动特征。北京：地震出版社，120
- Bolt B A, Abrahamson N A. 1982. New attenuation relation of strong ground motion. *Bull Seism Soc Amer*, **72**(6A): 2 307~2 321
- Boore D M , Xie L L, Iwan W D, et al. 1982. USA-PRC cooperative project on strong ground motion. *Proceedings of the US-PRC Bilateral Workshop Earthquake Engineering*. Harbin: Institute of Engineering Mechanics
- Institute of Engineering Mechanics, SSB. 1989. *Report on Strong Earthquake Motion Records in China (VI)*. Beijing: Seismological Press, 273
- Esteva L , Rosenblueth E. 1964. Spectra of earthquakes at moderate and large distances. *Soc Mex Ing Seismica (Mexico)* II, 1~18
- Peng K Z, Wu F T, Song L Y. 1985. Attenuation characteristics of peak horizontal acceleration in northeast and southwest China. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **13**(3): 337~350