

# 成组活动是中国大陆强地震 的一个基本特点<sup>\*</sup>

李钦祖 于利民 王吉易 万迪堃 陈绍绪

(中国石家庄 050021 河北省地震局)

## 摘 要

取有史以来至 1991 年底中国大陆东部 ( $\lambda \geq 108^\circ E$ ) 及其邻区的总共 259 次  $M \geq 6$  地震、中国大陆西部 ( $\lambda < 108^\circ E$ ) 及其邻区的总共 153 次  $M \geq 7$  地震为强地震，并取东部 1600 年、西部 1900 年之前的地震为前期地震，之后的为后期地震，对它们的时空分布进行了全面分析。这些强地震的大多数，被划分成在时间和空间中同时相对密集的 45 个地震集合，构成 45 个地震组。这些组在统一时空域中表现出比平均值高得多的发震概率。论述了成组活动是中国大陆地区强地震的一个基本特点。

**关键词** 中国大陆；强地震；地震集合；成组活动

## 1 引 言

在时空分布中弄清强地震之间的关系，对于研究地震的发生规律和地震预报都很重要。地震的时空分布令人感兴趣，是因为地震的时间分布和空间分布都不均匀，从中可以提取统计信息。最令人感兴趣的应当是，在地震活动图像演变中，研究强地震在时间和空间中同时出现相对密集的现象，总结出一定的统计规律，在统一时空域中提取强地震的高发概率。这就必须对全部资料进行系统分析，只由某些事例进行推测，是靠不住的。

李钦祖和于新昌(1980)曾得到华北地区大地震成组活动的研究结果。李钦祖等(1993)又提出了关于整个中国大陆地区强地震成组活动和概率预报的基本思路，但限于篇幅未能对成组活动的事实展开较为充分的讨论。本文拟对中国大陆地区强地震的成组活动是一个确凿事实、能作为一个基本特点，进行详细论证。

## 2 资料及来源

根据至 1991 年底的资料，我们编排而成《中国大陆东部及其邻区  $M \geq 6$  地震目录》和《中国大陆西部及其邻区  $M \geq 7$  地震目录》。这样做是由于中国大陆东部的地震活动强度

\* 地震科学联合基金资助项目。

1993 年 1 月 16 日收到初稿，1993 年 5 月 5 日决定采用。

和资料记载情况都与西部有很大差别。东西两部的分界取定为东经 108 度线。东部目录中共有地震 259 次，其中含邻区地震 96 次；西部共有 153 次，其中含邻区地震 58 次。这两个目录中的地震在本文称作强地震，是分析与研究中国大陆强地震成组活动的依据。东部  $M < 6$  地震和西部  $M < 7$  地震分布复杂，有较大随机性，本项工作不去涉及。

上述两个目录的资料来源：(1) 李全林等(1991)；(2) 国家地震局地球物理研究所编辑出版的 1985—1988 年中国地震台网观测报告；(3)《地震学报》刊登的 1989—1992 年的地震目录；(4)《中国地震》刊登的 1987—1992 年的地震目录；(5) 国家地震局情报资料室编辑出版的关于发生在中国大陆以外邻近地区的强地震的有关目录。

### 3 中国大陆地区强地震的成组活动

根据上述目录，对中国大陆东部及西部分别详细分析了强地震在时间和空间中分布图像的变化，发现可以把它们的大多数划分成在时间和空间中，同时都相对密集的若干地震集合。同一集合内的地震，显然应有比较直接的成因关系。我们把每个集合叫作一个地震组。

一组地震的持续时间叫作该组的活动期，它们占据的空间范围叫作该组的活动区。从实用角度，我们希望活动期的长度为几年到十几年，活动区的长轴(最长线度)为几百公里。不过有些特殊情况须予以考虑。

第一种情况：前期的记载不完整，时间越早、经济文化越不发达，地震丢失越多。这种情况使所定前期地震组的活动期，以及组内相继两次地震的时间间隔比后期的长，活动区也常限于文字记载较丰富的地区。根据资料情况，我们把东部 1600 年、西部 1900 年以前的地震叫作前期地震，东部自 1600 年、西部自 1900 年以来的地震叫作后期地震。

第二种情况：在地震活动高潮期中，常有许多强地震相继发生，使地震组的活动区较大、活动期较长。

第三种情况：在地震少发地区，一旦出现地震成组活动，往往活动区较大、活动期以及地震的时间间隔较长。

第四种情况：两个互相远离的活动区可能是两个相对独立的孕震区，所以它们的活动期可以互相重叠甚至包容。

划分地震组时的实际做法是，选取各种不同的时间段来观察强地震的震中分布，把那些能保持震中分布相对密集的地震确定为一个地震集合，叫作一个地震组，把它们持续的时间和占据的空间范围，分别确定为该组地震的活动期和活动区。活动期之内，在活动区外可有最多不超过 2 次(不计前、余震)中国大陆本区的强地震，因发生在远离活动区的孤立地点而不划入组。这种地震称为组外地震。如果在中国大陆本区有了更多的组外地震，则认为该集合已经解体、该组地震活动已经结束。如果组外地震发生在中国大陆本区以外的邻区，则不受 2 次之限。总之，分组时掌握的根本原则是，把那些在时空一体分布中相对密集的中国大陆本区的各个地震集合划分出来。立足点是中国大陆本区的强地震成组活动，对邻区地震不单独分组。只在需要对本区地震进行分组时，才将符合条件的邻区地震划入该组。但中国东北深震的地点本来就很集中，它们的分组不具有典型意义，故本文中的分组以及所有分析与统计均不包括东北深震。

根据上述原则,对中国大陆东部及其邻区的  $M \geq 6$  地震共划分出 24 组,其中前期 7 组、后期 17 组。对西部及其邻区的  $M \geq 7$  地震共划分出 21 组,其中前期 9 组、后期 12 组。详细情况分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 中国大陆东部( $\lambda \geq 108^\circ E$ )及其邻区  $M \geq 6$  地震分组情况统计

| 组别          | 起止时间<br>(a) | 活动期<br>(a) | 活动区<br>长轴<br>(km) | 组内地震数 |     |    | 组外地震数 |     | 无震年 | 有震年 |    |
|-------------|-------------|------------|-------------------|-------|-----|----|-------|-----|-----|-----|----|
|             |             |            |                   | 含前余震  | 不含  | 邻区 | 本区    | 邻区  |     | 组内  | 组外 |
| 1           | 777—793     | 17         | 769               | 3     | 3   | 0  | 0     | 0   | 14  | 3   | 0  |
| 2           | 1022—1068   | 47         | 327               | 4     | 4   | 0  | 1     | 0   | 42  | 4   | 1  |
| 3           | 1181—1209   | 29         | 34                | 2     | 2   | 0  | 1     | 0   | 26  | 2   | 1  |
| 4           | 1291—1314   | 24         | 434               | 4     | 4   | 0  | 0     | 0   | 20  | 4   | 0  |
| 5           | 1481—1524   | 44         | 680               | 5     | 5   | 0  | 2     | 0   | 37  | 5   | 2  |
| 6           | 1536—1548   | 13         | 414               | 2     | 2   | 0  | 0     | 0   | 11  | 2   | 0  |
| 7           | 1556—1587   | 32         | 474               | 4     | 3   | 0  | 1     | 0   | 29  | 3   | 0  |
| 8           | 1600—1611   | 12         | 1084              | 8     | 4   | 0  | 0     | 0   | 8   | 4   | 0  |
| 9           | 1614—1642   | 29         | 1345              | 10    | 10  | 0  | 0     | 0   | 21  | 8   | 0  |
| 10          | 1652—1695   | 44         | 1036              | 8     | 8   | 0  | 0     | 1   | 35  | 8   | 1  |
| 11          | 1720—1730   | 11         | 95                | 2     | 2   | 0  | 0     | 0   | 9   | 2   | 0  |
| 12          | 1806—1815   | 10         | 564               | 3     | 3   | 2  | 0     | 0   | 7   | 3*  | 0  |
| 13          | 1815—1831   | 17         | 688               | 5     | 5   | 0  | 0     | 0   | 12  | 4*  | 0  |
| 14          | 1846—1853   | 8          | 107               | 8     | 4   | 0  | 0     | 1   | 3   | 4   | 1  |
| 15          | 1861—1888   | 28         | 581               | 3     | 3   | 0  | 2     | 1   | 20  | 5   | 3  |
| 16          | 1878—1881   | 4          | 295               | 3     | 3   | 2  | —     | —   | —   | —   | —  |
| 17          | 1895—1921   | 27         | 747               | 27    | 25  | 20 | 1*    | 4*  | 6*  | 18* | 3* |
| 18          | 1910—1937   | 28         | 764               | 9     | 7   | 0  | 0*    | 31* | 2*  | 9*  | 5* |
| 19          | 1918—1934   | 17         | 212               | 3     | 3   | 0  | —     | —   | —   | —   | —  |
| 20          | 1940—1945   | 6          | 662               | 5     | 5   | 0  | 2     | 1   | 1   | 5   | 0  |
| 21          | 1941—1942   | 2          | 15                | 2     | 2   | 0  | —     | —   | —   | —   | —  |
| 22          | 1962—1969   | 8          | 525               | 3     | 3   | 1  | 0     | 6   | 2*  | 4*  | 2  |
| 23          | 1966—1977   | 12         | 906               | 14    | 6   | 0  | 2     | 2   | 4*  | 4*  | 0  |
| 24          | 1979—1984   | 6          | 257               | 2     | 2   | 0  | 2     | 4   | 1   | 2   | 3  |
| 平均(所有 24 组) |             | 19.7       | 542               | 5.8   | 5.0 |    |       |     |     |     |    |
| (1600 年前)   |             | 29.4       | 447               | 3.4   | 3.3 |    |       |     |     |     |    |
| (1600 年后)   |             | 15.8       | 581               | 6.8   | 5.6 |    |       |     |     |     |    |
| 累计(所有 24 组) |             | 435        |                   | 139   | 118 | 25 | 12    | 51  | 310 | 103 | 22 |
| (1600 年前)   |             | 206        |                   | 24    | 23  | 0  | 5     | 0   | 179 | 23  | 4  |
| (1600 年后)   |             | 229        |                   | 115   | 95  | 25 | 7     | 51  | 131 | 80  | 18 |

注: (1) “\*”为同邻组具有重迭的部分,只统计一次。

(2) “—”为完全落在邻组时间内,相应数字由邻组统计,以保证只统计一次。

(3) 东部 24 组共占时间 435 年,占自 777 至 1984 年总时间的  $435/1208=36.0\%$ 。共有地震数: 若包含邻区为 139, 占同期同区地震总数的  $139/232=60.0\%$ ; 若不含邻区为 114, 占同期同区地震总数的  $114/136=83.8\%$ ; 再扣除前余震为 93, 占同期同区地震总数的  $93/115=80.9\%$ ; 其中 1600 年后为 70, 占同期同区地震总数的  $70/78=89.7\%$ 。

(4) 邻区地震数为 96, 其中被划入组的为 25, 占 26.0%。

从多数情况看,前期地震组的活动期不超过 40 年,组内相继两次地震的时间间隔不超过 20 年。后期地震组的活动期,绝大多数为几年到十几年,组内相继两次地震的时间间

隔都不超过 10 年。后期东部组的活动期除一个特殊情况外，最长都不超过 30 年。这个特殊情况是，1652—1695 年这个组处于地震活动的异常高潮期，包含华北有史以来的若干次特大地震，使活动期长达 44 年。后期西部组的活动期最长不超过 20 年。

表 2 中国大陆西部( $\lambda < 108^{\circ}\text{E}$ )及其邻区  $M \geq 7$  地震分组情况统计

| 组别          | 起止时间<br>(a) | 活动期<br>(a) | 活动区<br>长轴<br>(km) | 组内地震数 |     |    | 组外地震数 |    | 无震年 | 有震年 |    |
|-------------|-------------|------------|-------------------|-------|-----|----|-------|----|-----|-----|----|
|             |             |            |                   | 含前余震  | 不含  | 邻区 | 本区    | 邻区 |     | 组内  | 组外 |
| 1           | -193—186    | 8          | 236               | 2     | 2   | 0  | 0     | 0  | 6   | 2   | 0  |
| 2           | 839—842     | 4          | 137               | 2     | 2   | 0  | 0     | 0  | 2   | 2   | 0  |
| 3           | 1500—1536   | 37         | 366               | 3     | 3   | 0  | 0     | 0  | 34  | 3   | 0  |
| 4           | 1609—1654   | 46         | 794               | 3     | 3   | 0  | 2     | 0  | 41  | 3   | 2  |
| 5           | 1709—1739   | 31         | 1425              | 6     | 6   | 0  | 1     | 0  | 24  | 6   | 1  |
| 6           | 1786—1789   | 4          | 640               | 2     | 2   | 0  | 0     | 0  | 2   | 2   | 0  |
| 7           | 1816—1850   | 35         | 746               | 3     | 3   | 0  | 2     | 0  | 31  | 3   | 1  |
| 8           | 1870—1896   | 27         | 1077              | 5     | 5   | 0  | 1     | 0  | 17  | 9   | 1  |
| 9           | 1882—1895   | 14         | 1005              | 4     | 4   | 0  | —     | —  | —   | —   | —  |
| 10          | 1902—1906   | 5          | 838               | 3     | 3   | 1  | 0     | 4  | 2   | 2   | 1  |
| 11          | 1908—1913   | 6          | 667               | 4     | 4   | 2  | —     | —  | —   | —   | —  |
| 12          | 1908—1918   | 11         | 856               | 3     | 3   | 1  | 2     | 7  | 1   | 5   | 5  |
| 13          | 1920—1933   | 14         | 1056              | 6     | 5   | 0  | 4     | 4  | 2   | 7   | 5  |
| 14          | 1923—1932   | 10         | 1160              | 8     | 8   | 7  | —     | —  | —   | —   | —  |
| 15          | 1934—1936   | 3          | 614               | 3     | 3   | 2  | 0     | 0  | 1   | 2   | 0  |
| 16          | 1944—1949   | 6          | 77                | 2     | 2   | 0  | 0     | 3  | 1   | 4*  | 1  |
| 17          | 1947—1952   | 6          | 902               | 6     | 6   | 0  | 0     | 5  | 0   | 3*  | 0  |
| 18          | 1954—1967   | 14         | 1031              | 5     | 4   | 4  | 3     | 3  | 7   | 4   | 3  |
| 19          | 1970—1976   | 7          | 1034              | 7     | 5   | 0  | 2     | 0  | 3*  | 4*  | 0  |
| 20          | 1974—1990   | 17         | 1336              | 4     | 4   | 2  | 0     | 4  | 7*  | 5*  | 2  |
| 21          | 1983—1991   | 9          | 434               | 4     | 3   | 2  | 0     | 1  | 0   | 1   | 0  |
| 平均(所有 21 组) |             | 14.9       | 782               | 4.0   | 3.8 |    |       |    |     |     |    |
| (1900 年前)   |             | 22.9       | 714               | 3.3   | 3.3 |    |       |    |     |     |    |
| (1900 年后)   |             | 9.0        | 834               | 4.6   | 4.2 |    |       |    |     |     |    |
| 累计(所有 21 组) |             | 270        |                   | 85    | 80  | 21 | 17    | 31 | 181 | 67  | 22 |
| (1900 年前)   |             | 192        |                   | 30    | 30  | 0  | 6     | 0  | 157 | 30  | 5  |
| (1900 年后)   |             | 78         |                   | 55    | 50  | 21 | 11    | 31 | 24  | 37  | 17 |

注：(1) “\*”为同邻组具有重迭的部分，只统计一次。

(2) “—”完全落在邻组时间内，相应数字由邻组统计，以保证只统计一次。

(3) 西部 21 组共占时间 270 年，为自 -193 至 1991 年总时间的  $270/2185=12.4\%$ 。共有地震数：若包含邻区为 85，占同期同区地震总数的  $85/152=55.9\%$ ；若不含邻区为 64，占同期同区地震总数的  $64/94=68.1\%$ ；再扣除前余震为 59，占同期同区地震总数的  $59/89=66.3\%$ ；其中 1900 年后为 29，占同期同区地震总数的  $29/41=70.7\%$ 。

(4) 邻区地震数为 58，其中被划入组的为 21，占 36.2%。

东部活动区的长轴，除 17 世纪处于地震活动异常高潮中的 3 个组超过一千公里外，其余都为几百公里。有 11 组小于 500 km，3 组小于 100 km。其平均值，总的为 542 km、前期为 447 km、后期为 581 km。西部活动区长轴大于 1000 km 的有 8 组，小于 500 km 的有 5 组、小于 100 km 的只有 1 组。其平均值，总的为 782 km、前期为 714 km、后期为

834 km. 这些数值表明,由于西部强地震的起始震级比东部大,故活动区也比东部大.

在地震目录中,后期有前震和余震,前期除 1556 年陕西华县 8 级地震有一次 6 级余震外,其它均无前震或余震. 为对比准则的统一. 在表中列出不含前、余震的组内地震数一栏,它代表组内强地震的地点数或地震序列数. 还列有组内地震数中包括的邻区地震数一栏,将它扣除即为大陆东部或西部本区中的地震数. 含有邻区地震的,东部有 4 组,西部有 8 组. 组内地震数若包括前、余震和邻区地震,则东部最多的为 27,其中 20 次发生在台湾海峡及台湾西部,西部最多的为 8; 若不包括前、余震和邻区地震,则东部最多的为 10,西部最多的为 6; 最少的都为 2 次.

由表 1 和表 2 看到,在东部 24 组中 9 组和西部 21 组中 8 组的活动期内,发生有因远离活动区而未划入组的所谓组外地震. 其中发生在中国大陆本区者,东部的都不超过 2 次. 西部第 13 组有 4 次,包含 1924 年 7 月 12 日新疆民丰和 1931 年 8 月 18 日新疆富蕴两次 7.3 级余震; 第 18 组有 3 次,包含 1955 年 4 月 15 日新疆乌恰 7.0 级余震. 所以,若不计余震,也都不超过 2 次. 邻区的组外地震比本区多.

东部的地震组活动期平均值,总的为 19.7 年、前期为 29.4 年、后期为 15.8 年; 每组地震数的平均值分别为 5.8, 3.4, 6.8. 若扣除前、余震则分别为 5.0, 3.3, 5.6; 相应的平均年频度分别为 0.29, 0.12, 0.43 和 0.25, 0.11, 0.35. 西部的地震组活动期平均值,总的为 14.9 年、前期为 22.9 年、后期为 9.0 年; 每组地震数的平均值分别为 4.0, 3.3, 4.6. 若扣除前、余震则分别为 3.8, 3.3, 4.2; 相应的平均年频度分别为 0.29, 0.14, 0.51 和 0.26, 0.12, 0.47. 由这些数值看到,对东部取  $M \geq 6$ 、对西部取  $M \geq 7$  地震为强地震,使东西两部划分出的地震组数彼此接近; 对东部取 1600 年、对西部取 1900 年为前期与后期的分界,无论包括不包括前、余震,使求出的所有组、前期组、后期组的平均年频度,东部的值和西部的值也都彼此接近. 总体看,西部地震组的活动期比东部短、组内地震比东部少. 这意味着西部地震组的转换比东部快.

虽然表 1 和表 2 中所列时间都是活动期,但在大多数情况下,其中的无震年仍然多于有震年. 统计数据表明,东部 24 组的活动期共占据时间 435 年,无震年就占 310 年,为  $310/435=71.3\%$ , 其中前期为  $179/206=86.9\%$ , 后期为  $131/229=57.2\%$ ; 在有震的 125 年中,划入组的地震占用 103 年,未划入组的地震占用 22 年. 西部 21 组的活动期共占据时间 270 年,无震年就占 181 年,为  $181/270=67.0\%$ , 其中前期为  $157/192=81.8\%$ , 后期为  $24/78=30.8\%$ ; 在有震的 89 年中,划入组的地震占用 67 年,未划入组的地震占用 22 年. 至于活动期以外的时期,无震年份占的比例就更大了. 但总趋势是后期无震年的比例比前期小.

由于前期的资料不如后期完整,所以与后期相比,前期地震组的活动期长、活动区小、组内地震少、活动期内的无震年多、地震频度低,东部和西部都是如此.

从表中数据得到的统计结果表明,在由首组首震和末组末震所界定的总时间跨度内,东部 24 组的持续时间和为 435 年,只占总跨度 1208 年的 36.0%, 而各组内大陆东部本区地震数(不含前余震、不含邻区地震,下同)的和为 93, 却占该跨度内大陆东部本区地震总数 115 的 80.9%; 西部 21 组的持续时间和为 270 年,只占总跨度 2185 年的 12.4%, 而各组内大陆西部本区地震数的和为 59, 却占该跨度内大陆西部本区地震总数

89 的 66.3%. 若为资料的完整性和结果的可靠性, 只计后期大陆本区成组地震的比例, 则东部为 89.7%, 西部为 70.7%.

两个目录中的所有邻区强地震均为后期地震, 前期资料全部缺失. 东部的邻区地震数为 96, 其中被划入组的为 25, 占 26.0%; 西部的邻区地震数为 58, 其中被划入组的为 21, 占 36.2%. 由于对邻区地震不单独进行分组, 所以成组地震的比例都很小.

#### 4 结论和讨论

经过上述分析看到, 中国大陆东部  $M \geq 6$ 、西部  $M \geq 7$  地震的大多数是以成组形式发生的; 每一组地震由在时间和空间中同时都密集分布的地震集合所构成, 即具有在统一时空域中密集分布的特点. 这是一个确凿的事实. 成组活动能够作为中国大陆地区强地震活动的一个基本特点.

分析结果表明, 取东经 108 度线为界, 把中国大陆分为东西两部, 取东部  $M \geq 6$ 、西部  $M \geq 7$  地震作为强地震成组活动的研究对象, 对东部取 1600 年、对西部取 1900 年为界, 把时间分为前期与后期, 都是合理的, 得到的结果是可比的. 后期资料比较完整, 强地震的成组活动特点表现得更为充分.

就中国大陆本区强地震而言, 无震年远远多于有震年. 因此, 在统计意义上, 大陆强地震的年度预报是个困难的小概率事件预报问题. 强地震的年发生概率, 在不划分成组活动的情况下, 东部为  $115/1208 = 0.095$ , 西部为  $89/2185 = 0.041$ ; 在划分的成组活动情况下, 东部为  $93/435 = 0.214$ , 是前一情况下的  $0.214/0.095 = 2.3$  倍; 西部为  $59/270 = 0.219$ , 是前一情况下的  $0.219/0.041 = 5.3$  倍. 关于在划分和不划分成组活动两种情况下, 估算发生强地震的空间概率的差异, 现在还难于给出定量表达. 不过从情况看, 无论在东部还是西部, 每个地震组的活动区只占大陆东部或西部总面积的很小一部分. 空间概率的差异可能比时间概率的差异还要大. 所以, 在划定的地震组内估算的发生强地震的时间概率和空间概率, 比不划分地震组情况下估算的概率, 可有至少成倍、甚至几倍的增大.

由地震成组活动得到一个重要推论. 按照目前地震工作者的普遍看法, 异常是孕震过程的某种反映、出现在地震之前、可用来预报地震. 根据中国大陆强地震成组活动的事实, 每组地震是在时间和空间中同时表现为相对密集分布的一个地震集合, 同一集合中各次地震的孕育过程是密不可分的. 即成组地震应当经历有成组孕育过程. 相应地, 应当存在反映该过程的地震组异常. 所以, 应当有两类异常, 一类是一次地震的异常, 另一类是地震组的异常. 人们最好冲破以前只从一次地震的异常这个角度分析问题的思想局限. 一旦打开思路, 也许会感到出现了一个新的前景: 根据异常不但预报一次地震是可能的, 而且预报一组地震或一组中的若干次地震也是可能的. 事实上, 万迪塑等(1992)的确从大量观测资料中识别出了地震组异常, 并且描述了它们的基本特征, 提出了判别准则. 这个问题, 对于我们拓宽思路、扩大视野、更加切合实际地进行中国大陆地区强地震预报, 应当是很重要的.

在本文工作和成稿过程中, 曾得到李全林、刁桂苓、胡新亮、孙佩卿等同志的许多帮助, 并与张四昌、罗兰格同志进行了十分有益的讨论, 谨一并致谢.

## 参 考 文 献

- 李钦祖、于新昌,1980. 华北地区大地震的成组活动特点. 地震科学的研究,第一辑,1—9.
- 李钦祖、于利民、王吉易、万迪堃、陈绍绪,1993. 中国大陆强地震的成组活动和概率预报. 中国科学, B辑, 23, 5, 519—526.
- 李全林、宋锐、陈锦标、白金成、庄灿涛、陈佩燕,1991. 中国地震各时期目录汇编,107—112. 地震出版社,北京.
- 万迪堃、王吉易、陈绍绪、李钦祖、于利民,1992. 地震组异常及其判别. 华北地震科学,10, 4, 1—18.