

# Meta 分析及其在生态学上的应用 \*

彭少麟 唐小焱

(中国科学院华南植物研究所,广州 510650)

**Meta-analysis and its Application in Ecology.** Peng Shaolin, Tang Xiaoyan (South China Institute of Botany, Academia Sinica, Guangzhou, 510650). *Chinese Journal of Ecology*, 1998, 17(5): 74 - 79.

The development of meta-analysis and its application in ecology are summarized in the paper. An example is used to illustrate the analysing processes of two main meta-analysis methodes. The role of meta-analysis in ecology is also discussed.

**Key words:** summarize, meta-analysis, ecology, application.

## 1 Meta 分析的概念和它的发展应用

Meta 分析 (Meta - Analysis) 是一种定量综合研究方法. 这种方法的思想起源于本世纪 30 年代, 60 年代用于教育、心理等社会科学领域, 1976 年由 Glass 命名为术语“Meta - Analysis”<sup>[1]</sup>. Glass 将 Meta 分析定义为: 对若干独立研究的统计结果进行综合、分析的统计方法<sup>[2]</sup>.

Meta 分析常用于心理学和医学, 很少在生态学中运用, 但近期有增加的趋势, 去年在美国生态学会年会学术交流中, 被单独列为一个专题. 这种方法的核心思想是认为科学的进步依赖于从一批研究里提炼普遍性结论的能力. 在传统的研究综述中, 对不同研究结果只作定性的比较, 而且往往根据综述者的主观评价来决定资料的取舍, 从而导致不同作者对同类研究的综述, 可得出不同的结论. 近年来, 也有一些定量生态学综述, 采用的方法通常是对一些有统计学数量结果的研究, 比较其出现的频率、效应的显著性和程度, 来进行定量综述. 然而, 由于结果通常是受效应大小和取样大小双重影响, 所以这种“数-表决 (vote-counting)”法有很严重的缺陷.

Meta 分析与以往的方法不同, 可以较客观地依据统计学原则进行定性、定量的综合分析, 可提高统计效能, 兼容相互矛盾的试验和统计分析结论, 获得综合性的分析结论<sup>[3]</sup>.

## 2 Meta 分析采用的统计学方法

通常, Meta 分析首先需要一定量指标, 它反映的是每一个实验结果的效应大小. 这个指标可以是实验组数据和对照组数据间的差异; 也可以是非独立变量与独立变量间的相关度, 这些变量在某种程度上与取样大小和实验中使用的测量尺度无关. 一种做法是, 将研究数据分成两组, 一组为对照组数据, 另一组为受控制组数据影响的实验组数据, 以这两组数据均值的差异与两组数据共有的标准离差相除. 这时, 效应大小也就是实验组和对照组间以标准离差为单位的差异. Cohen (1969) 提出了一个对效应大小的常规解释: 0.2 是“小”效应, 0.5 是“中”效应, 0.8 是“大”效应<sup>[2]</sup>.

\*国家自然科学基金重大项目 (编号: 39728102) 资助.

作者简介: 彭少麟. 见本刊 1998, 17(2): 32.

## 2.1 固定模型和混合模型

大多数 Meta 分析基于固定效应模型,这种模型假定有相似特性的多个研究在同一级别有一个共同的真实效应大小。并假定由于取样误差,导致在实际效应大小的测定中各研究间的差异。

混合效应模型假设一个级别内的各研究有一个共同的平均效应,在模型中除了有取样变量外,还有一个级别内的各研究间的随机变量。也可以这样来看混合效应模型:在分析中作专门研究的效应大小是由不同成分组成的,一部分是固定的,是一个级别中所有研究具有的特性,一部分是由于某一个研究的特殊性质引起,还有一部分是由于误差或取样变化所引起。

## 2.2 Meta 分析所用数据的准备

收集参考文献和选择用于 Meta 分析的研究是一个很复杂的过程。应该注意的是收集的论文是属于同一主题的;在选择发表物时不应带有倾向性,因为这将明显导致不正确的结论;应注意收集数据的质量,分析的结论会受到影响。对于以图的形式发表的生态学数据,可以通过用数值化仪与计算机相连使图数值化。

应该考虑如何记录每一个实验,要确定实验中作为控制组的数据和受控制组数据影响的实验组数据;还必须确定评估效应的单位、识别每一研究中合适的度量。

在同一 Meta 分析中不应该包括非独立的测量数据,如果非独立性数据占有的比例较少,那么将对 Meta 分析描述的结论有小的影响。如果存在着大量的非独立性,将会增加试验的统计学重要性水平,并低估置信区间。

一个实验的结果可以用许多不同的统计学方法来试验和报道。然而,在一个 Meta 分析中通常不包括用不同的统计数据(例如均值、斜率、相关)报道的结果。在

生态学研究,最普通的数据报道形式是均值和在假定变量是正态分布的条件下对方差的测定。大多数 Meta 分析方法假定数据是正态分布的。

## 3 实例

### 3.1 数据和基本统计

这里陈述的例子,选择了大量野外实验竞争效应的研究数据集的一部分以便示范所涉及的模型。例子检查的是初级生产力对竞争的反应,其反应为新个体的补充(个体数量的增加)和生长(个体大小的增加)。选择的研究以生境分为希望比较的三个级别:陆生、淡水生和海洋生。从研究获取的基本信息记于表 1。

从基本信息计算出的一些基本统计数据记于表 2。

### 3.2 固定效应模型

固定效应模型的一些统计量见表 2。

固定效应模型里, $d_{i+}$ 是第  $i$  个级别内对各研究效应大小的加权平均:

$$d_{i+} = \frac{\sum_{j=1}^{K_i} W_{ij} d_{ij}}{\sum_{j=1}^{K_i} W_{ij}}$$

$W_{ij}$  是用于联合效应大小的权重,是取样方差的倒数,即  $W_{ij} = 1/V_{ij}$ 。

$K_i$  是第  $i$  级别中研究的数量。 $d_{i+}$  的方差为:

$$S^2(d_{i+}) = 1 / \sum_{j=1}^{K_i} W_{ij}$$

$d_{i+}$  的 95% 置信区间上下限  $d_u$  和  $d_l$  分别为:

$$d_l = d_{i+} - [Z/2 S(d_{i+})]$$

$$d_u = d_{i+} + [Z/2 S(d_{i+})]$$

式中, $Z$  是标准正态分布的双界临界值,各级别包括的所有研究的总平均效应  $d_{++}$  是:

$$d_{++} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{K_i} W_{ij} d_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{K_i} W_{ij}}$$

表 1 为做 Meta 分析选择的研究的原数据  
Tab. 1 Data taken for Meta-analysis

生境	+ / -	N <sup>c</sup>	N <sup>e</sup>	X <sup>c</sup>	X <sup>e</sup>	S <sup>c</sup>	S <sup>e</sup>	作者	种类
陆生	+	7	7	78.14	79.71	40.650	40.650	Fo1	<i>Bouteloua rigidiseta</i>
陆生	+	7	7	18.86	26.00	9.170	9.170	Fo2	<i>Aristida longiseta</i>
陆生	-	6	6	- 1.80	- 2.10	0.490	0.490	Pl1	<i>Mirabilis hirsuta</i>
陆生	-	5	5	- 2.20	- 2.80	0.224	0.447	Pl2	<i>Verbena stricta</i>
陆生	+	3	3	85.30	285.7	115.008	153.806	Gr1	<i>Verbascum thapsus</i>
陆生	+	3	3	0.00	3.00	0.000	2.425	Gr2	<i>Oenothera biennis</i>
陆生	+	5	5	17.00	17.00	7.603	5.367	Po1	<i>Plantago major</i>
陆生	+	5	5	47.00	37.00	10.286	9.391	Po2	<i>Plantago lanceolata</i>
陆生	+	4	4	87.00	272.00	37.712	183.532	Bu1	<i>Metrosideros polymorpha</i>
陆生	+	18	20	- 0.113	0.294	0.255	0.215	Gu1	<i>Stipa neomexicana</i>
陆生	+	20	20	- 0.163	0.412	0.588	0.218	Gu2	<i>Stipa neomexicana</i>
淡水生	-	4	4	281.11	- 201.03	158.038	27.520	Mc1	<i>Eleocharis acicularis</i>
淡水生	-	4	4	187.31	- 155.32	80.163	41.252	Mc2	<i>Juncus pelocarpus</i>
海生	+	7	7	11.80	16.00	3.080	3.370	St1	<i>Acropora spp.</i>
海生	+	3	10	0.4	9.5	1.470	7.230	St2	<i>Pocillopora verrucosa</i>
海生	+	20	20	0.0	14.1	7.603	7.603	Re1	<i>Pterygophora californica</i>
海生	+	20	20	0.0	7.1	3.130	3.130	Re2	<i>Macrocystis pyrifera</i>
海生	+	2	2	3.63	18.5	3.352	4.257	Jo1	<i>Laminaria longicuris</i>
海生	+	2	2	0.0	0.25	0.000	0.354	Jo2	<i>Laminaria longicuris</i>
海生	+	4	4	0.0	34.80	0.000	58.200	Tu1	<i>Rhodemela larix</i>
海生	+	4	4	0.0	8.7	0.000	17.000	Tu6	<i>Fucus distichus</i>
海生	+	4	4	21.25	37.25	9.540	22.020	Du1	<i>Ralfsia pacifica</i>
海生	+	4	4	40.25	20.25	8.780	9.00	Du2	<i>Ralfsia pacifica</i>

注: + / - 为方向标记; N<sup>c</sup>是控制组中的个体总数; N<sup>e</sup>是在实验组中的个体总数; X<sup>c</sup>是控制组的均值; X<sup>e</sup>是实验组的均值; S<sup>c</sup>是控制组中个体的标准离差; S<sup>e</sup>是实验组中个体的标准离差。

式中  $m$  是级别总数 (这里  $m = 3$ : 陆地、淡水和海洋)。总的平均方差是:

$$S^2(d_{++}) = 1 / \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{K_i} W_{ij}$$

可以通过均匀统计量  $Q$  来检验, 是原假说所有效应大小相等成立, 还是对立假说 (在一系列研究中至少有一个真实效应大小不同于其它效应大小) 成立。  $Q$  有大概的  $\chi^2$  分布, 自由度等于比研究总数小的数。  $Q$  值越大, 研究效应大小的异质性越大。总异质性  $Q_T$  能分成级别内的异质性  $Q_W$  和级别间的异质性  $Q_B$ :

$$Q_T = Q_B + Q_W$$

$Q_W$  是级别内多个研究变化量的测定:

$$Q_W = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{K_i} W_{ij} (d_{ij} - d_{i+})^2$$

$Q_B$  是有平均效应大小的级别间变化量的测定:

$$Q_B = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{K_i} W_{ij} (d_{i+} - d_{++})^2$$

$Q_B$  为  $\chi^2$  分布, 自由度等于级别数减去 1。  $Q_T$  统计量的一个计算公式是:

$$Q_T = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{K_i} W_{ij} d_{ij}^2 - \frac{(\sum_{j=1}^{K_i} W_{ij} d_{ij})^2}{\sum_{j=1}^{K_i} W_{ij}}$$

$Q_W$  用  $m$  个级别内统计量  $Q_{W1}, Q_{W2}, \dots, Q_{Wm}$  的总和计算。每一个级别内的统计

表 2 对各研究计算的效应值  
Tab. 2 Sample statistics: effect values for each study

研究	级别	<i>J</i>	<i>S<sub>pool</sub></i>	<i>D</i>	95%置信区间 95% CI	<i>V</i>	<i>W</i>	<i>W *</i>
Fo1	陆生	0.936	40.650	0.036	- 1.012 1.084	0.286	3.499	1.369
Fo2	陆生	0.936	9.170	0.729	- 0.353 1.811	0.305	3.282	1.334
Pl1	陆生	0.923	0.490	0.565	- 0.589 1.719	0.347	2.885	1.263
Pl2	陆生	0.903	0.354	1.533	0.123 2.943	0.517	1.932	1.039
Gr1	陆生	0.800	135.800	1.181	- 0.554 2.915	0.783	1.277	0.814
Gr2	陆生	0.800	1.715	1.400	- 0.386 3.185	0.830	1.205	0.784
Po1	陆生	0.903	6.581	0.000	- 1.240 1.240	0.400	2.500	1.183
Po2	陆生	0.903	9.849	- 0.917	- 2.220 0.386	0.442	2.262	1.127
Bu1	陆生	0.870	132.488	1.214	- 0.294 2.722	0.592	1.689	0.964
Gu1	陆生	0.979	0.235	1.697	0.955 2.440	0.143	6.970	1.699
Gu2	陆生	0.980	0.443	1.271	0.591 1.950	0.120	8.320	1.769
Mc1	淡水生	0.870	113.431	3.696	1.416 5.977	1.354	0.739	0.556
Mc2	淡水生	0.870	63.749	4.674	1.997 7.350	1.865	0.536	0.433
St1	海生	0.936	3.228	1.218	0.077 2.359	0.339	2.953	1.276
St2	海生	0.930	6.570	1.288	- 0.094 2.671	0.497	2.011	1.061
Re1	海生	0.980	7.603	1.818	1.081 2.554	0.141	7.077	1.706
Re2	海生	0.980	3.130	2.223	1.435 3.012	0.162	6.181	1.648
Jo1	海生	0.571	3.831	2.218	- 0.273 4.709	1.615	0.619	0.485
Jo2	海生	0.571	0.250	0.571	- 1.429 2.570	1.041	0.961	0.673
Tu1	海生	0.870	41.154	0.735	- 0.697 2.167	0.534	1.873	1.022
Tu6	海生	0.870	12.021	0.629	- 0.790 2.049	0.525	1.906	1.031
Du1	海生	0.870	16.969	0.820	- 0.623 2.263	0.542	1.845	1.013
Du2	海生	0.870	8.891	- 1.956	- 3.641 - 0.271	0.739	1.353	0.845

注:其中: $d_{ij}$ 是第*i*级别中第*j*个研究的无偏效应大小。 $d_{ij} = (X_{ij}^e - X_{ij}^c) / S_{ij}$ ,  $J, S_{ij}$ 是控制和实验两组的标准误差; $S_{ij} = \sqrt{\frac{(N_{ij}^e - 1)(S_{ij}^e)^2 + (N_{ij}^c - 1)(S_{ij}^c)^2}{N_{ij}^e + N_{ij}^c - 2}}$ ;  $J$ 是一项对小取样大小误差的改正<sup>[7]</sup>: $J = 1 - 3 / [4(N_{ij}^e + N_{ij}^c - 2) - 1]$ 。随着取样大小的增加, $J$ 向1靠近。在对第*i*级别中的第*j*个研究的效应中的方差由下式估计<sup>[7]</sup>: $V_{ij}$ 为第*j*个研究的第*i*级别的方差,它可能被直接用于比较研究间的效应大小,用于估计效应大小的量,以及联合研究间的效应大小。 $V_{ij} = (N_{ij}^e + N_{ij}^c) / (N_{ij}^e N_{ij}^c) + d_{ij}^2 / [2(N_{ij}^e + N_{ij}^c)]$ 。

量  $Q_{wi}$ 能够用以下的公式计算:

$$Q_{wi} = \sum_{j=1}^{K_i} W_{ij} d_{ij}^2 - \frac{\left( \sum_{j=1}^{K_i} W_{ij} d_{ij} \right)^2}{\sum_{j=1}^{K_i} W_{ij}}$$

$Q_{wi}$ 自由度为  $K - 1$ ,  $Q_B$  由  $Q_T$  减去  $Q_W$  而得到。

实例计算的结果如表 3,表 4。

根据表 3 结果,对陆生、淡水生、海生植物都有平均的竞争统计学重要效应。效应值的重要性大于 0。对陆生植物的竞争

效应是大的,对淡水生、海生植物的竞争效应是非常大的。

表 4 结果说明在淡水生植物级别内的

表 3 固定效应模型方式中关于类群的 Meta 分析结果  
Tab. 3 Calculations for the Fixed Model

级别	研究数	$d_+$	95%置信区间 95% CI	$Q_{wi}$
陆生	11	0.9125	0.5850 1.2400	19.4391
淡水生	2	4.1072	2.3713 5.8432	0.2969
海生	10	1.3503	0.9715 1.7290	24.3747
$d_{++} = 1.159781$				
$Q_B = 14.236734$				
$Q_W = 44.110721$				
$Q_T = 58.347455$				

表 4 固定效应模型最终统计结果  
Tab.4 Final statistics for the Fixed Model

级别	$Q_{wi}$	自由度 DF	$F$ 检验 P 值
陆生	19.4391	10	0.03503
淡水生	0.2969	1	0.58585
海生	24.3747	9	0.00375
$Q_B$	14.236734	自由度 2	$F$ 检验 P 值 0.00081
$d_{++}$ 95% 置信区间	0.914544		1.405019

研究是同质的,效应大小的差异是由于随机取样引起,而在陆生植物级别内和海生植物级别内效应大小的差异不能归于取样误差。但是在生态学研究实际上级别内多研究的差异是十分少的。

三个级别间有很高的异质性 ( $Q_B = 14.24, 2df, P < 0.001$ )。因此,当用生长或增加来测定的话,在这些研究中,陆地、淡水和海洋生产者对竞争的反应有统计学的重要性差异。

3.3 混合模型

$d_{ij}$ (或  $V_{ij}$ )的固定效应方差实际上是一个条件方差,因为它依赖于假定:同一级别的多个研究共享一个真实效应大小。而在混合模型中,  $d_{ij}, V_{ij}^*$  的非条件方差假定在感兴趣的效应中,各研究间有随机变量,因此,不共享一个共同的真实效应大小。要获得  $V_{ij}^*$ ,需要为普通的  $V_{ij}$ 增加一项级别内共有的变量成分  $\hat{\Lambda}_{pooled}^2$

为进行混合模型分析,必须计算一些增加项。

首先,计算每一级别的一个常数  $C_i$ :

$$C_i = \frac{\sum_{j=1}^{K_i} W_{ij}^2}{\sum_{j=1}^{K_i} W_{ij}}$$

这里  $i$  是级别,而  $K_i$  是在级别  $i$  中的实验数。这时我们计算  $\hat{\Lambda}_{pooled}^2$  的估计值:

$$\hat{\Lambda}_{pooled}^2 = [Q_w - \sum_{i=1} (K_i - 1) C_i] / \sum_{i=1} C_i$$

这里  $m$  是级别数,而  $Q_w$  是固定效应分析中级别内的异质性。现在能够计算每一个研究的  $V_{ij}^*$

$$V_{ij}^* = V_{ij} + \hat{\Lambda}_{pooled}^2$$

混合效应模型中权重是随机效应方差的倒数,

$$W_{ij}^* = 1/V_{ij}^*$$

混合效应模型的每一级别效应大小  $d_{i+}^*$  与其方差  $S^2(d_{i+}^*)$  的计算与固定效应模型相同。

总积累效应大小  $d_{++}^*$  和它的方差  $S^2(d_{++}^*)$  的计算:

$$d_{++}^* = \sum_{i=1}^m W_{i+}^* d_{i+}^* / \sum_{i=1}^m W_{i+}^*$$

$$S^2(d_{++}^*) = 1 / \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{K_i} W_{ji}^*$$

各级别的同质性用如下公式检验:

$$Q_B^* = \sum_{i=1}^m W_{i+}^* d_{i+}^{*2} - \frac{(\sum_{i=1}^m W_{i+}^* d_{i+}^*)^2}{\sum_{i=1}^m W_{i+}^*}$$

表 5 的结果很相似于固定效应模型,置信区间稍微大些,因为包括了增加的方差成分。这里的结论基本与固定效应模型相同。

这里(表 6)得到的结论与固定效应模型相同,对陆地、淡水和海洋生产者来说,竞争效应是不相同的。

在以上例子中,可以看到固定效应模型与混合模型结果在总体上是是一致的。正

表 5 混合效应模型结果  
Tab.5 Calculations for the Mixed Model

级别	研究数	$d_{+}^*$	95% 置信区间 95% CI		$\hat{\Lambda}_{pooled}^2$
陆生	11	0.7985	0.2620	1.3350	0.3038
淡水生	2	4.1240	2.1530	6.0951	-1.1317
海生	10	1.0898	0.4923	1.6873	0.6835
$d_{++}^*$		1.054417			
$Q_B^*$		10.204628			

表 6 混合效应模型最终统计结果  
Tab. 6 Final statistics for the Mixed Model

级别	$Q_{wi}$	自由度 $DF$	$\chi^2$ 检验 $P$ 值
陆生	19.4391	10	0.03503
淡水生	0.2969	1	0.58585
海生	24.3747	9	0.00375
$Q_B$	14.236734	自由度 2	2 检验 $P$ 值 0.00081
$Q_B^*$	10.204628	自由度 2	2 检验 $P$ 值 0.00608
$d_{++}$ 95%置信区间	0.914544		1.405019
$d_{++}^*$ 95%置信区间	0.663177		1.445657

如有人预料的那样,两者之间的主要差别在于混合模型中较大的置信区间,它反映了包括在模型中误差的增加源。混合模型关于一个级别内多研究间的随机变化量的假设,在许多情况下比固定模型的一个级别内所有研究享有共同的效应大小的假设要合理得多。由于这一点,更主张使用混合模型。

#### 4 对 Meta 分析在生态学中的潜在作用的总看法

统计学工具对于生态学家分析实验的结果是有效的,它的精确性在近几年呈指数地增加。然而过去的一些使生态学数据资源的最有用的工具已变得粗糙、不准确和不适用于分析任务。Meta 分析建立了一种新的标准,能有效地对不同研究的数据进行归纳。但 Meta 分析本身,特别是在生态学中的应用研究还处于发展初期。应用于生态学和其它领域中的 Meta 分析

模型有待于发展和提高。

今后几年在生态学领域中,Meta 分析将会得到进一步的重视。生态学家正开始改变对这些技术的看法。这种方法并不难用,而且已经有了一些成功的应用。同时,生态学大量亚分支实验研究的数量极多,有丰富的材料可以归纳。此外,人类对自然增加的压力,使得需要对随着增加的整体数据进行的各种争论进行归纳。Meta 分析的出现使人相信有机会在积累的生态学实验研究整体上揭示更广泛的信息。

#### 参考文献

- [1] 赵宁,俞顺章. Meta-analysis (元分析). I. Meta-analysis 基本概念与内容. 山西医学院学报, 1995, 26(3): 203.
- [2] Eric Vander Werf. Lack's clutch size hypothesis: An examination of the evidence using meta-analysis. *Ecology*, 1992, 73(5): 1699 - 1705.
- [3] 胡克震. Meta 分析简介——同类研究结果综合再分析的统计方法. 大连医科大学学报, 1995, 17(3): 229.
- [4] Arnqvist, G. and Wooster, D. Meta-analysis: synthesizing research findings in ecology and evolution. *Tree*, 1995, 10(6): 236 - 240.
- [5] Gurevitch, J. and Hedges, L. V. Meta-analysis. Combining the results of independent experiments. In S. M. Scheiner and J. Gurevitch (eds). *Design and Analysis of Ecological Experiment*. Chapman & Hall, New York, 1993. 378 - 398.
- [6] Gurevitch, J. et al. A meta-analysis of competition in field experiments. *The American Naturalist*, 1992, 140(4): 539 - 572.
- [7] Hedges, L. V. and I. Olkin. *Statistical methods for meta-analysis*. Academic Press, Orlando, 1985.

(收稿:1997年12月15日,改回:1998年2月23日)