
论文精读：非线性奇异强迫向量 在二维准地转模型中的应用

2021 年秋季 学术道德与学术写作-分论

庄逸¹

目录

1 引言	2
2 论文的结构	2
2.1 引入	2
2.2 方法	3
2.3 结果	4
2.4 讨论总结	5
3 论文的语言及修辞	6
3.1 引言第二段	6
3.2 方法第 2 节最后一段	6
3.3 结果部分 4.1.1 节第二段	7
3.4 讨论部分倒数第二段	7
3.5 点评	8
4 总结与评价	8

¹学号：202118005811057；培养单位：大气物理研究所；邮箱：zhuangyi17@mailsucas.ac.cn

1 引言

选择的论文为《Nonlinear forcing singular vector of a two dimensional quasi geostrophic model》^[1]，选择的原因是这是导师所给的推荐阅读列表中的第一篇，应具有比较重要的地位，并且它通过一个简单模型来阐述课题组的研究方法，适合作为课题组的入门读物。

论文的研究背景在第一部分中介绍。大气与海洋科学研究中的一个中心问题是可预报性，即预报误差的评估。而预报误差的来源有两方面：初始场的误差，和模式本身的误差。两种误差都已经有了不少研究，其中一种研究模式误差的方法为强迫奇异向量方法（Forcing Singular Vector, FSV）。但是，FSV 方法对模型作了线性近似，但实际大气海洋的运动是复杂的非线性系统，这就导致 FSV 方法的可靠性有待商榷。因此，论文研究了非线性框架下的 FSV 方法（Non-linear FSV, NFSV）。

论文的研究内容包括 NFSV 的定义介绍，计算方法及其在二维准地转模型（Quasi-Geostrophic, QG）中的应用。在 QG 模型中的应用又分为经向基流和纬向基流两个情形，在每个情形中对 FSV 和 NFSV 的结果进行对比。创新点在于将非线性效应引入了模式误差的研究。研究发现相较于 FSV，NFSV 能够抑制非线性对误差的耗散效应，从而在确定最优模式误差模态（即最敏感结构）中能发挥更大的作用，揭示了可预报性中的非线性效应，能够作为模式误差研究的一个可靠方法。

2 论文的结构

论文各部分包括：引入，方法，结果，讨论总结。

2.1 引入

引入部分的模板为：

1. 阐明研究领域的重要性，提供研究背景，解释名词，点明当前研究的领域。
2. 说明前人的相关工作。
3. 指出之前研究工作中的缺陷，并说明本研究所着眼的问题。
4. 对本研究进行描述。

在引入部分，所选择的论文完全和模板相符合。在文章开头，就指出了“可预报性是大气与海洋科学研究中的中心问题。”然后文章对不确定性作了一个解释，将其分为初始误差和模型误差两类，并用两段文字分别梳理了这两类误差的前人研究工作。在梳理过程中，也对相应的名

词作了解释。在此之后，文章点明了 FSV 方法没有考虑非线性性的问题，并由此导出文章研究的问题——研究非线性框架下的 FSV 方法。而引入部分的最后一段，对文章的结构进行了概述。

2.2 方法

方法部分的模板为：

1. 简要介绍方法，包括重申目标，说明所采用的器材和材料，提供相应的背景信息等。
2. 详细介绍方法，说明其中的细节，分析一些做法的合理性。
3. 联系其他研究采用的方法。
4. 解释可能存在的问题。

文章的方法主要分为概念解释（第 2 节），计算方法（第 3 节），模型和参数选取（第 4 节开头）。由于只是数值实验，故不需要说明实验器材和材料等。

在概念解释部分，文章并未遵循先简要后详细的顺序，而是直接从基本原理出发，给出了模型，初始误差和模型误差的具体数学表达式。在给出基本表达式后，文章对 FSV 方法进行了解释，指明了它与 NFSV 方法在数学上的区别。在第 2 节最后，文章也解释了可能存在的两个问题：

- 文章联系了前人的方法 (Roads, 1987)，说明可以在确定扰动限制之前，预先计算合理的扰动矢量的大小。
- 实际中模型误差是随时间变化的，文章说明 NFSV 方法可以应用于随时间变化情况的研究，但是由于目的是和 FSV 方法进行对比，而 FSV 方法考虑的是不随时间变化的误差，故这里也只考虑不随时间变化的情况。

在计算方法这一部分，文章先简要介绍了方法，即这是一个条件最优化问题，需要数值求解。接着，文章通过较为详细的数学分析，给出了最优化问题的数学表达式，并在之后说明了可采用的最优化算法（SPG2，SQP，L-BFGS 等）。在这一节最后，文章也给出了一些注记。

- 求解 NFSV 需要在物理模型的伴随模型基础上作一些修改（计算 λ_2 ），除了 QG 模型之外，其他模型例如三层 QG 模型和 ZC 模型也有现成的伴随模型。因此文章说明了需要如何作修改，以方便读者研究其他模型 NFSV。
- 对方法的总结：Lagrange 乘子揭示了目标函数对初始扰动的梯度和伴随模型的联系。也简单提了一下其他计算梯度的方法 (Shutyaev, 2008)。

在模型和参数选取部分，文章给出了 QG 模型的表达式，解释了其中的符号，并将之前抽象的 NFSV 表达式应用到 QG 模型中。接着，文章解释了数值模式的差分格式和最优化方案参数的设定。在两种基本流的选取中，文章结合前人工作阐述了选取的原因。最后，文章给出了模拟区域和参数选取的具体值。这一部分交代了数值实验的实验方案，提高了可信度，也方便了其他研究者参考。

总体而言，文章的方法部分包含了模板中的要点。虽然没有完全按照模板的顺序，但是这对阅读理解的逻辑并没有造成太大影响。

2.3 结果

结果部分的模板为：

1. 重申研究目标，回顾其他研究，回顾所采用的方法，对结果作一初步总结。
2. 结合图表进行说明，仔细说明关键结果，和其他研究的结果，模型预测的结果进行对比。
3. 结果部分存在的问题。
4. 由结果可推得的潜在结论。

结果部分为文章第 4 节的后半部分，可分为纬向基流情况和经向基流情况，每种情况研究的内容类似。在行文时，作者边给出更详细的参数设定，边阐述结果，而非完全分离。因此，结果部分一开始就是模板中的第二部分。

在纬向基流情况中 (Fig. 2 - Fig. 7)，文章给出了以下的图表结果。

Fig. 2. 控制扰动幅度不变，对比不同的优化时间（即设置不同的模式模拟时间）下 NFSV 和 FSV 的结果，发现模拟时间短时结果接近，时间长时差别较大。

Fig. 3. 控制优化时间不变，对比不同的扰动幅度下 NFSV 和 FSV 的结果，发现扰动小时结果接近，扰动大时差别较大。

以上两个数值实验及其结果，提供了对 NFSV 与 FSV 差异的一个初步认识，即它们之间的差异随模拟时间的增加，扰动幅度的增大而增大，同时和 FSV 保持对称结构相比，NFSV 将变得不对称，并产生了小尺度结构。

Fig. 4. 在特定优化时间和扰动幅度下，给出流函数的预报误差。此处对比三种情况：线性 QG 模型下的 FSV，非线性 QG 模型下的 FSV，非线性 QG 模型下的 NFSV。

在了解了 FSV 和 NFSV 的性状之后，读者自然会想知道预报时刻流函数的变化，而此图就给出了这一信息。从图中可以很清楚地看到非线性地情况下流函数的误差分布包含小尺度的结构如涡旋，这暗示了非线性效应的影响。

Fig. 5. 给出了在 2 天和 7 天的模拟时间下，三种情况扰动能量随模型扰动幅度大小的变化。图中可看出 2 天时三种情况的结果类似，而 7 天时，线性模型下的 FSV 产生最大的扰动能量，而非线性模型下的 FSV 却产生最小的扰动能量，低于非线性模型下的 NFSV。此时文章结合这一结果给出了分析，即非线性效应具有一种耗散效应，使得 FSV 扰动能量减小。相对应地，NFSV 方法则能一定程度上克服这一耗散效应，从而给出更好的结果。

Fig. 6. 在特定优化时间和扰动幅度下，给出了三种情况纬向平均的流函数预报误差和相应的纬向风，在不同的纬度上，在七天中的变化。

Fig. 7. 在特定优化时间和扰动幅度下，对比 FSV 和 NFSV 在线性 QG 模型中的结果，和在线性 QG 模型与线性 QG 模型中的结果的差值。

此二图则是为了进一步的分析研究而作。作者参考 Riviere (2008) 的方法来研究纬向平均的流函数预报误差。由于扰动引起反向切变，总的不稳定切变应当逐渐减小，进一步限制扰动的发展。Fig. 6 验证了这一点，并且显示了 NFSV 引起的切变小于 FSV 引起的切变，从而 NFSV 的发展受到更小的限制。此后文章作了一些推导进行分析，点明了非线性效应是由对流引起，并作了 Fig. 7 来说明这一点。

而在经向基流情况中，文章所采用的分析方法，给出的图表，结论与纬向基流的情况类似，故不再赘述。和模板相比，文章的结果部分主要由对结果图的详细解释分析与潜在推论组成，并且具有计算考察值-结果-结论-分析-确定新的考察值这样结果与分析相交织的结构。关于结果部分存在的问题，文章则并没有着重描述。

2.4 讨论总结

讨论部分的模板为：

1. 回顾之前的部分，总结关键结果。
2. 讨论和前人研究的联系。
3. 研究所作的贡献，揭示的原理。
4. 研究的不足之处，展望未来的工作以及研究结果相应的应用。

文章的讨论部分可分为三部分：回顾研究工作，阐述结果的意义和应用，结合其他研究讨论缺陷和意义。首先，文章花了略多的篇幅来详细回顾介绍研究工作，包括研究所用的模型等，并在最后强调了 NFSV 相较于 FSV，能产生更大的扰动这一结果，说明 NFSV 是一个研究模式误差的有力工具。

接着，文章具体阐述了 NFSV 的意义及其应用，例如找到对模式误差最敏感的区域，从而进行改善；也可用于研究不确定的外强迫对模拟结果的影响等，并总结 NFSV 是研究模式误差的有力工具。

此后文章联系 Riviere (2008) 的文章，指出研究得出的结论与前人的结论不符，但是说明“非线性效应对模式误差和初始误差的影响不同”这一问题仍然需要进一步研究。文章在此处又解释了选取 L_2 范数的原因。其后文章联系前人 CNOP-P 方法，对比说明 NFSV 方法更具有一般性。

和模板相比，文章基本包含了模板的全部内容，但是顺序不完全一致。文章主要从研究过程和结果，结果的应用和与对比前人工作三个角度来说明研究意义，解决了引言中提出的“非线性框架下研究 FSV 方法”的问题。

3 论文的语言及修辞

3.1 引言第二段

开始于第 1 页右下角。

Prediction uncertainties are generally caused by initial errors and model errors. To study the roles of initial errors and model errors in yielding prediction uncertainties ...

这一段介绍预报误差的分类和部分前人工作。首句的主题位置和强调位置分别对应了预报误差及其包含的两个类型，并承接下一句具体解释这两个类型。接着文章以总起句“The former has been largely explored”开始，以时间顺序简要介绍了 SV，CNOP，CNOP 扩展方法。在此之后，文章同样以时间顺序，介绍了另一条考虑非线性效应方法的发展道路，如 Bred 向量等。在这一段最后，作者肯定了这些工作的贡献。

3.2 方法第 2 节最后一段

开始于第 4 页左下角。

We notice that the NFSV defined by eq. (2.7) is established on the assumption that the tendency perturbation does not change with time. Therefore, in predictability studies, the tendency errors are assumed to be constant in time ...

这一段需要交代以下信息：

1. 实际中模式扰动是时变的，前面的推导没有考虑这一点，但是 NFSV 可以研究时变的情况。
2. 在后面的研究中不考虑时变的情况，因为研究的目的是与 FSV 方法对比，而 FSV 方法没有考虑时变的情况。

这一段包含的逻辑较多。在段落开头，文章连用了“Therefore”，“However”，“Thus”，“Actually”四个词，组成四个短句，来表述第一部分信息及其中的逻辑联系。在简要介绍完时变 NFSV 方法后，再通过一句话交代第二部分信息。在一句话中结合了两个原因“FSV 是常量”，“研究目的是对比”和由此得到的方案“只考虑常值的 NFSV”。

3.3 结果部分 4.1.1 节第二段

开始于第 7 页左下角。

We note that the NFSVs have patterns similar to the FSVs only for short optimisation times...

这一段结合结果图描述 NFSV 和 FSV 的初步结果。总起句对 Fig. 2 作定性总结，接着用“More precisely”承接描述了在较长的模拟时间下，NFSV 和 FSV 结构的具体不同之处。然后以一句过渡句承上启下，引出介绍 Fig. 3 体现的不同扰动幅度下 NFSV 与 FSV 的结果。同样，紧跟其后的也是一句定性总起句，用“That is”承接具体描述。在段落最后，通过“In summary”来总结 NFSV 与 FSV 的不同之处。

3.4 讨论部分倒数第二段

开始于第 18 页右上角。

To study the effects of the model parameter errors on predictability, Mu et al. (2010) proposed the CNOP-P approach to solve the optimal model parameter perturbation. Although...

这一段的目的是进行 NFSV 方法与 CNOP-P 方法的对比，并说明 NFSV 方法更具有一般性。在介绍 CNOP-P 及其与 NFSV 的联系之后，文章在转折之后点明了其中的关键，即“需要不同的理解”。紧接着文章利用对比解释了“不同的理解”，并将 NFSV 的理解后置强调。在给出 NFSV 的另外两个优点之后，总结得到 NFSV 方法比 CNOP-P 方法更具有一般性。

3.5 点评

文章的大部分语句采用了主动语态，在段落开头以短句为主，在对比 NFSV 和 FSV，以及阐述道理时以长句为主。在用词上没有使用高深艰涩的词汇，而是注重逻辑关系的表达，读起来理解较为顺畅。

4 总结与评价

文章值得借鉴的优点不限于以下几点：

1. 对研究背景交代得十分清楚，梳理了几条研究路线。
2. 提供了较详细的概念介绍，原理分析及数学表达。
3. 结果分析由浅入深，并基于结果中的分析推导进一步设置了数值实验方案。
4. 没有采用艰深的词汇，注重分析的逻辑，通过多种角度来分析 NFSV 方法的意义。

当然，文章也存在一些改进的空间，例如在结果部分最开始，没有对结果作简要总结，且结果部分并未和方法完全分离（如其中还有推导的部分），使得结果部分更像实验过程描述。个人认为，可以将 QG 模型中两种情况的介绍及相应的推导放到结果部分前面，作为背景知识。

参考文献

- [1] DUAN W, ZHOU F. Non-linear forcing singular vector of a two-dimensional quasi-geostrophic model[J/OL]. Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography, 2013, 65(1):18452. eprint: <https://doi.org/10.3402/tellusa.v65i0.18452>. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v65i0.18452>. DOI: 10.3402/tellusa.v65i0.18452.