陈海山, 孙建奇. 2023. 国家自然科学基金大气科学学科二级申请代码下设研究方向与关键词解读：D0502 气候与气候系统 [J]. 大气科学, 47(1): 111−118. CHEN Haishan, SUN Jianqi. 2023. Research Directions and Keywords under the Secondary Application Codes of the Atmospheric Sciences Discipline of the National Natural Science Foundation of China: D0502 Climate and Climate System [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 47(1): 111−118. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2212.22302

国家自然科学基金大气科学学科二级申请代码下设研究方向与关键词解读：D0502 气候与气候系统

陈海山[1] 孙建奇[2]

1 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044
2 中国科学院大气物理研究所竺可桢—南森国际研究中心, 北京 100029

摘 要 为了推动我国基础研究的高质量发展，国家自然科学基金委员会对学科布局和申请代码进行了优化调整。按照科学基金改革的总体部署，2019 年以来大气科学学科开展了申请代码调整工作并设置了 15 个二级申请代码。本文从申请代码调整的背景、逻辑框架、内涵构成等方面对二级申请代码 D0502“气候与气候系统”的 7 个研究方向及其对应的关键词进行解读。在此基础上，对近两年 D0502 申请代码下的面上项目、青年科学基金项目和地区科学基金项目的总体申请情况进行了分析，以帮助相关科研人员及时把握 D0502 申请代码的发展趋势，并充分理解研究方向与关键词的内涵和逻辑关系，从而为项目申请时更准确地选择相应的研究方向与关键词提供参考。

关键词 国家自然科学基金 气候与气候系统 分支学科 学科代码 关键词
文章编号 1006-9895(2023)01-0111-08 **中图分类号** P46 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2212.22302

Research Directions and Keywords under the Secondary Application Codes of the Atmospheric Sciences Discipline of the National Natural Science Foundation of China: D0502 Climate and Climate System

CHEN Haishan[1] and SUN Jianqi[2]

1 *School of Atmospheric Sciences*, *Nanjing University of Information Science and Technology*, *Nanjing* 210044
2 *Nansen–Zhu International Research Centre*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029

Abstract To promote the development of high-quality basic research, the National Natural Science Foundation of China (NSFC) has launched new reforms to optimize the layout of the discipline and its application codes. The discipline of atmospheric sciences in the Department of Earth Sciences of NSFC optimized the application code system and set up 15 application sub-codes since 2019 as its reform objectives. This article describes the background of the reforms, the logic structure, and the connotation for application code D0502 (Climate and Climate System), together with keywords for seven related research directions. Project application and funding of General Program, Young Scientists Fund and Fund

收稿日期 2022-11-10；**网络预出版日期** 2023-01-09
作者简介 陈海山，男，1973 年出生，教授，主要从事陆气相互作用、陆面过程与气候数值模拟、气候变化与短期气候预测研究。E-mail: haishan@nuist.edu.cn

for Less Developed Regions for application code D0502 during 2020–2021 are reviewed. This article aims to help researchers to learn about the development tendency of sub-discipline and to better understand the logical structure and connotation of D0502, providing a reference for a reasonable selection of research directions and corresponding keywords.

Keywords National Natural Science Foundation of China (NSFC), Climate and climate system, Sub-discipline, Application code, Keywords

1 引言

2018 年以来，为了推动我国基础研究的高质量发展，国家自然科学基金委员会（简称自然科学基金委）大力推进科学基金的改革，目标是构建理念先进、制度规范、公正高效的新时代科学基金治理体系，提出了“明确资助导向”“完善评审机制”“优化学科布局”等三项核心任务（李静海, 2020）。学科申请代码调整是“优化学科布局”任务的重要组成部分和切入点。2019 年大气科学学科（简称大气学科）开展了申请代码调整工作。依托各类评审会、学科工作会议、战略研讨会等共商学科申请代码调整问题，“上下”有机结合，深入研讨，并广泛征求意见，最终形成了申请代码调整方案（刘哲等, 2020, 2021）。

为了能让申请人在项目申请时更好的选择合适的申请代码和关键词、把握科学问题属性，本文基于自然科学基金委大气学科二级申请代码 D0502“气候与气候系统”学科发展的内在需求，从逻辑框架、内涵构成等方面对 7 个研究方向及相关关键词进行解读。此外，学科工作组梳理了 2020 年和 2021 年 D0502“面青地”（面上项目、青年科学基金项目、地区科学基金项目）基金项目的申请情况，从数量、科学问题属性占比、热门关键词等几个方面对 D0502 二级申请代码的情况进行了介绍，以便于相关科研人员及时了解 D0502 的总体申请情况、判断发展趋势，从而能更合理和准确地选择相应的研究方向与关键词。

2 气候与气候系统研究的发展历程与最新态势

气候是自然环境的重要组成部分，是人类生存和经济社会发展的基础条件和重要资源。传统气候学是描述大气某种统计平均状态及其变化的学科；20 世纪 70 年代，国际上提出气候系统的概念，将气候学从单一大气圈层的研究，提升为综合考虑大气圈、水圈、冰冻圈、岩石圈和生物圈相互作用与影响的学科。

1980 年，世界气象组织和国际科学理事会设立了世界气候研究计划（WCRP），其总目标是要确定气候的可预测性以及人类活动对气候的影响程度。1988 年，世界气象组织和联合国环境规划署建立了政府间气候变化专门委员会（IPCC），定期科学评估气候变化的现状及其对社会和经济的潜在影响，提出适应和减缓气候变化的可能对策等。IPCC 自成立以来，已先后发布了六次科学评估报告，为各国政府和国际社会提供了重要气候变化信息和决策参考（IPCC, 2021）。2013 年，由国际科学理事会、国际社会科学联盟发起，联合国教科文组织、联合国环境规划署、联合国大学和国际全球变化研究资助机构等联合提出了“未来地球”（Future Earth）计划，该计划旨在应对全球环境变化给各区域、国家和社会带来的挑战，加强自然科学与社会科学的沟通与合作，为全球可持续发展提供必要的理论知识、研究手段和方法。

中国也十分重视气候与气候变化研究，科学技术部、自然科学基金委、中国科学院和中国气象局等部门先后组织实施了多个国家重大科技计划，围绕东亚季风、极端天气气候事件、海—陆—气相互作用、气溶胶的气候效应、干旱化与人类适应、冰冻圈过程及其对气候的影响、青藏高原的气候效应、气候动力学与预测理论、土地利用与覆被变化及其影响、气候变化预估、社会经济影响和减缓对策、地球系统模式发展等方面进行了系统研究，取得了许多重要进展，极大地提升了中国的气候研究水平，深化了对气候系统变异规律的认识。

随着全球变化的加剧，气候与气候系统变化呈现出新的特点，例如，极端气候事件频发、气候变化区域差异增大、气候变得更加异常，预测也更加困难。此外，人类活动在整个气候系统变化中的作用和影响也日益凸显，高速经济社会发展对气候服务提出更高要求。2022 年，国务院颁布《气象高

质量发展纲要（2022～2035 年）》，明确提出加强气候规律、气候变化及影响、气象灾害发生机理和地球系统多圈层相互作用、地球系统数值模式、气候预测等基础研究，增强气候研究服务社会的能力。

对于东亚地区，季风性气候是该地区最主要的气候特点，季风的异常对东亚地区旱涝、冷暖等气候异常存在重要的影响，近些年亚洲季风的变化呈现出新的特点，在全球变化背景下的变化规律、机理与影响仍是当前和未来十分重要的科学方向（Huang et al., 2019）。气候系统能量和物质循环是多圈层相互联系与作用的重要纽带，但受观测、基础理论和数值模式等的限制，目前对多圈层相互作用过程及其对气候影响的认识还不够深入和系统（张人禾等, 2021）。人类活动在气候变化中的作用还需要更多的确凿证据，其中的物理过程还需深入剖析（翟盘茂等, 2021）。极端气候事件愈发频繁、影响日益加剧，针对极端气候的发生、发展和演变规律与机理的研究愈加迫切（Tippett, 2018; Fischer et al., 2021）。气候预测是服务国家发展和防灾减灾的重要手段，为减轻灾害造成的损失，急需加强气候预测理论和方法的研究，加快地球系统模式的发展，提升预测准确率（王会军等, 2012; 穆穆等, 2017; Wang et al., 2022）。

依据现阶段大气科学学科二级申请代码设置的总体方案（刘哲等, 2020, 2021），结合大气科学研究的前沿和热点，充分考虑国家重大现实大需求，将 D0502 定位为大气科学的分支学科，重点研究气候系统与气候变化的基本特征、演变机理及其预测问题，深入理解大气圈、水圈、冰雪圈、生物圈和岩石圈等气候系统多圈层变化的关键过程及其相互作用机制。

3　D0502 二级申请代码的研究方向与关键词及其内涵

3.1　研究方向总体框架

D0502 重点针对季风、极端气候两个重要气候学研究对象的变异特征及其机理，紧扣热带海气相互作用、中高纬度气候系统、气候系统关键过程和多圈层相互作用等气候学研究的关键科学问题，充分考虑自然变率和人类活动对气候系统影响这一科学前沿和气候预测这一重要出口，设置了 7 个研究方向，总体构架见图 1。

D0502 的主要研究内容包括：季风系统的演变规律、物理机制及其影响；极端气候事件的变化特征及机理；热带大气海洋相互作用及其对全球/区域气候的影响；极地和中高纬度大气、海洋、海冰、陆面多尺度变化机理及其气候效应；气候系统能量、物质循环的关键过程与多圈层相互作用；人类活动的生物物理、生物化学等关键过程及其气候效应；气候变异的多尺度可预测性及相关的预测理论和方法。

D0502 现有的方向设置充分考虑了“气候与气候系统”研究的核心科学问题，以“气候与气候系

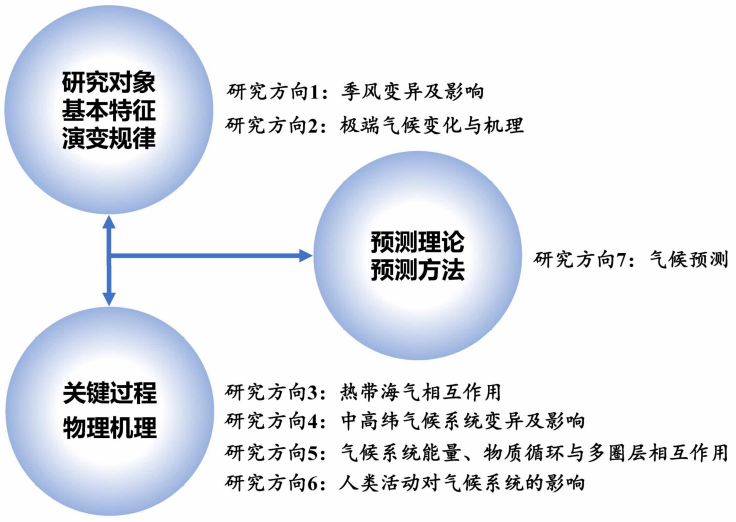

图 1　D0502 申请代码的研究方向设置总体构架

Fig. 1　Framework of research directions setting for application code D0502 Climate and Climate System

统”研究的重要对象、关键过程、物理机理、预测理论和方法为主线，既体现了方向间的内涵联系和科学逻辑，也更好地体现了该学科方向的系统性。此外，方向的设置强化了“气候与气候系统”的基础研究特性，也充分考虑了其学科的前沿性。

3.2 研究方向的主要内容及关键词

以下围绕 D0502 二级申请代码下设 7 个研究方向的主要研究内容和各个方向的关键词做简要介绍，重点解读各方向关键词设置的基本考虑和总体情况（表 1）。

（1）研究方向 1——季风变异及影响

D0502 研究方向 1“季风变异及影响”主要研究季风及系统成员的演变特征、变异规律、物理机制及其气候影响。研究方向 1 的关键词主要从季风系统、关键成员、主要影响因子和季风变异的时间尺度来设置。具体包括：季风、东亚季风、南亚季风、南海季风、高原季风、西非季风、北美季风、亚澳季风等 8 个季风系统关键词；副热带高压、东亚急流、南亚高压、越赤道气流、西伯利亚高压、东亚大槽等 6 个关键成员关键词；海表温度、海冰、陆面过程等 3 个主要影响因子关键词；此外，考虑了次季节变化、年际变化、年代际变化等 3 个季风变异时间尺度关键词。

（2）研究方向 2——极端气候变化与机理

D0502 研究方向 2“极端气候变化与机理”主要研究不同时间尺度、不同类型极端气候事件的变化特征及其形成演变机理。研究方向 2 的关键词主要包括极端气候事件的分类、特征、影响因子和相应的研究方法等 5 个方面的关键词。具体包括：极端温度、极端降水、高温热浪、寒潮、暴雪、干旱、暴雨、热带气旋和强对流等 9 个反映主要极端气候事件的关键词；频率、强度、重现期、突变和趋势等 5 个反映极端气候基本特征的关键词。此外，从影响因子和研究方法的角度，分别设置了大气环流、外强迫因子和内部变率以及统计降尺度、动力降尺度和预估等 3 个关键词。

（3）研究方向 3——热带海气相互作用

D0502 研究方向 3“热带海气相互作用”主要研究热带海洋、大气主要模态的时空变化，热带大气海洋的耦合过程和相互作用机理，热带海气相互作用对全球气候的影响及机制。研究方向 3 的关键词主要从热带海气相互作用的关键区域、主要现象、重要指标和关键过程 4 个方面来考虑。具体包括：太平洋、大西洋、印度洋、暖池、黑潮等 5 个热带海气相互作用的关键区域；季节内振荡（MJO）、准两年振荡（QBO）、厄尔尼诺与南方涛动（ENSO）、印度洋偶极子（IOD）、哈德莱（Hadley）环流、沃克（Walker）环流等 6 个热带海气相互作用的重要现象，以及热含量、热通量、混合层、温跃层和海洋锋等 5 个指标关键词；此外还选择了热带波动、对流活动、风应力和海气耦合等 4 个相关的重要过程作为关键词。

表 1 D0502 申请代码下设研究方向及关键词

Table 1 Research directions and keywords for application code D0502

序号	研究方向	关键词
1	季风变异及影响	季风、东亚季风、南亚季风、南海季风、高原季风、东亚夏季风、东亚冬季风、亚澳季风、副热带高压、急流、南亚高压、西伯利亚高压、东亚大槽、海表温度、海冰、陆面过程、青藏高原、次季节变化、年际变化、年代际变化
2	极端气候变化与机理	极端温度、极端降水、高温热浪、寒潮、暴雪、干旱、暴雨、热带气旋、强对流、频率、强度、重现期、突变、趋势、大气环流、外强迫因子、内部变率、统计降尺度、动力降尺度、预估
3	热带海气相互作用	太平洋、大西洋、印度洋、暖池、黑潮、季节内振荡(MJO)、厄尔尼诺与南方涛动(ENSO)、印度洋偶极子(IOD)、哈德莱(Hadley)环流、沃克(Walker)环流、热含量、热通量、混合层、温跃层、海洋锋、热带波动、对流活动、风应力、海气耦合、机理
4	中高纬气候系统变异及影响	西风急流、阻塞高压、冷空气活动、极涡、北极涛动、南极涛动、遥相关、北极增暖、大西洋多年代际振荡(AMO)、太平洋年代际振荡(PDO)、经向翻转环流、积雪、冻土、冰盖、冰—气相互作用、海—气相互作用、陆—气相互作用、大气内部过程、对流层—平流层相互作用、机制
5	气候系统能量、物质循环与多圈层相互作用	大气、海洋、陆地、植被、冰雪、湖泊、能量循环、水分循环、生物地球化学循环、碳氮循环、土壤水热传输、地气交换、海气交换、湍流通量、感热通量、潜热通量、碳通量、淡水通量、参数化、地球系统模式
6	人类活动对气候系统的影响	人类活动、自然强迫、全球变暖、排放情景、大气成分、温室气体、气溶胶、城市化、土地利用/土地覆盖变化、辐射强迫、云物理过程、生物物理过程、气候变化、气候响应、气候反馈、检测与归因、地球工程、数值模拟、气候敏感性、不确定性
7	气候预测	温度、降水、延伸期预报、次季节预测、季节预测、年代际预测、可预测性、气候异常、物理机制、预测因子、预测方法、回报试验、降尺度、资料同化、集合预报、统计预测、动力预测、概率预测、气候模式、预测系统

（4） 研究方向 4——中高纬气候系统变异及影响

D0502 研究方向 4“中高纬气候系统变异及影响”主要研究极地和中高纬度大气、海洋、海冰、陆面过程的多尺度变化特征、机理及其气候效应。研究方向 4 的关键词主要从中高纬气候系统变异的系统成员与重要现象、影响影子和重要过程等 3 个方面来选择关键词。具体包括：西风急流、阻塞高压、冷空气活动、极涡、北极涛动、南极涛动、遥相关、北极增暖、大西洋多年代际振荡（AMO）、太平洋年代际振荡（PDO）和经向翻转环流等 11 个气候系统成员与重要现象相关的关键词；积雪、冻土、陆地冰川和冰盖等 4 个关键气候系统影响因子，以及冰—气相互作用、海—气相互作用、陆—气相互作用、大气内部过程和对流层—平流层相互作用等 5 个主要过程关键词。

（5） 研究方向 5——气候系统能量、物质循环与多圈层相互作用

D0502 研究方向 5“气候系统能量、物质循环与多圈层相互作用”主要研究气候系统能量、物质循环的关键过程，系统认识大气圈、水圈、冰雪圈、生物圈和岩石圈相互作用机理、耦合过程及其对气候系统的影响。研究方向 5 的关键词主要从气候系统涉及的圈层、关键过程、关键指标和研究手段来选定。具体包括：大气、海洋、陆地、植被、冰雪和湖泊等反映气候系统不同圈层的 6 个关键词；能量循环、水分循环、生物地球化学循环、碳氮循环、土壤水热传输、地气交换和海气交换等 7 个过程关键词；湍流通量、感热通量、潜热通量、碳通量和淡水通量等 5 个指标关键词，以及参数化和地球系统模式 2 个反映研究手段的关键词。

（6） 研究方向 6——人类活动对气候系统的影响

D0502 研究方向 6“人类活动对气候系统的影响”主要研究温室气体排放、大气成分变化、土地覆盖/土地利用变化（城市化）、地球工程等人类活动对区域和全球气候的影响及机理，重点关注相关的生物物理、生物化学等关键过程及其气候效应。研究方向主要从气候系统的重要强迫因子、关键过程和方法手段来确定相应的关键词。具体包括：人类活动、自然强迫、全球变暖、排放情景、大气成分、温室气体、气溶胶、城市化和土地利用/土地覆盖变化等 9 个强迫因子；辐射强迫、云物理过程、生物物理过程、生物化学过程、气候响应和气候反馈等 6 个重要过程，以及检测与归因、地球工程、数值模拟、气候敏感性和不确定性等研究方法与手段相关的 5 个关键词。

（7） 研究方向 7——气候预测

D0502 研究方向 7“气候预测”主要研究不同时间尺度气候变异的可预测性，发展相关的预测理论和方法，开展次季节—年际—年代际尺度的气候预测。研究方向 7 的关键词主要从气候预测的时间尺度、主要研究内容和方法手段等来设置。具体包括：延伸期预报、次季节预测、季节预测和年代际预测 4 个与预测时间尺度有关的关键词；可预测性、气候异常、物理机制、预测因子、预测方法、预测理论和回报试验等 7 个与气候预测核心内容相关的关键词，以及气候预测涉及的降尺度、资料同化、集合预报、统计预测、动力预测、概率预测、实时预测、气候模式和预测系统等 9 个方法手段相关的关键词。

4　基金申请情况的统计分析

为了更好地了解二级申请代码 D0502 下设研究方向及关键词的采用情况，并帮助申请人对 D0502 申请代码的学科方向定位、资助重点和研究方向内涵等有深入的了解，以下重点分析 2020 年和 2021 年 D0502“面青地”项目（面上项目、青年科学基金项目和地区科学基金项目）的申请情况和各方向关键词的使用概况。

4.1　项目申请情况分析

自 2020 年使用 D0502 新的申请代码分类以来，2020 年、2021 年“面青地”项目的申请总数分别为 245、268 项，分别占大气学科项目总申请数 16.1%、15.8%（何建军等, 2020, 2021）。D0502 项目申请数量居 15 个代码之首；2020 年面上项目与青年基金的申请项目数量大致相当，2021 年青年项目申请数量明显高于面上项目；而地区基金项目申请数量基本维持在 10 项左右（表 2）。

从项目申请的四类科学问题属性（图 2）来看，D0502 的申请项目中，B 类（前沿类）项目为主体，占 D0502 项目总数的 65%～70%；C 类（需求类）项目次之，占 D0502 项目总数的 20%左右；A 类（原创类）申请项目占比为 5%～8%；D 类（交叉类）申请项目的占比最低，占 D0502 项目总数的 3%～5%。总体而言，D0502 的 A 类（原创类）

表 2 2020～2021 年度 D0502 申请代码“面青地”项目申请与资助情况

Table 2 Overview of project application and funding of General Program, Young Scientists Fund, and Fund for Less Developed Regions for application code D0502 during 2020–2021

年度	申请类型	申请数	占D05申请总数比例	获资助数	获资助率
2020	面上	115	/	31	27.0%
	青年	118	/	32	27.1%
	地区	12	/	3	25.0%
	面青地	245	16.1%	66	26.9%
2021	面上	115	/	39	33.9%
	青年	145	/	29	20.0%
	地区	8	/	3	37.5%
	面青地	268	15.8%	71	26.5%

和 D 类（交叉类）低于 D05 的总体水平情况。

从项目获资助的情况（表 2）来看，2020 年度“面青地”项目总的资助率为 26.9%，面上、青年、地区资助率基本接近；2021 年度，“面青地”项目总的资助率为 26.5%，其中面上、地区的资助率均高于 30%，而青年项目的资助率有所下降，仅为 20%。总体来说，D0502 的资助率在 15 个二级申请代码中处于中间水平，略高于 D05 的整体资助率（2020、2021 年度分别为 22.4%、22.7%，何建军等，2020, 2021）。

4.2 方向关键词的计量统计

对 2020～2021 年度“面青地”项目申请的关键词采用情况做了计量统计分析，以期为项目申请人和自然科学基金委申请代码改革工作提供一定的参考。

D0502 代码 7 个研究方向共设置了 140 个关键词，被采用关键词 129 个，占全部关键词的 92.2%；另外，暴雪、冰盖、碳氮循环、湍流通量、淡水通量、大气成分、云物理过程、地球工程、回报试验、集合预报、概率预测等 11 个关键词在近两年 D0502 的项目申请中没被采用，占全部关键词的 7.8%。图 3 给出了 2021～2022 年 D0502 采用频次最高的 30 个关键词（采用频次不少于 15 次），其中降水这一关键词被采用 112 次，也就是说 22% 的项目选择了该关键词；季风、大气两个关键词被采用超过 60 次；极端降水、干旱、遥相关、青藏高原、大气环流、厄尔尼诺与南方涛动（ENSO）、数值模拟、年代际变化、机制、太平洋、季节预测等 11 个关键词被采用均超过 30 次。

5 总结

通过自然科学基金委申请代码改革工作以来（2020～2021 两年）项目申请的统计分析，发现在申请代码设置和申请过程中还存在如下问题：

（1）申请人对项目的科学问题属性定位不准确，没有充分考虑项目研究主题与四类科学问题属性的吻合度，不能很好发挥项目分类评审的作用。

（2）申请人对关键词的选择不够合理，相当数量的项目没有严格按照基金申请的要求，从申请代码关键词中选择。自行给定的关键词存在科学表述不当、含义不清、界限模糊等问题，例如在申请项目中出现高温高湿热浪、不同型厄尔尼诺；人类活动与气候变化、不一致变化、部分侧边界强迫、区域哈德莱环流边界、第六次耦合模式比较计划等关键词，无法为基于申请代码关键词的专家评审提供有效的信息。当然，在申请代码的修订过程中，也需要关注申请人自行给定的可能反映最新研究热点和新学科增长点的关键词，在关键词的动态优化中合理采用。此外，不少项目，提供的关键词不

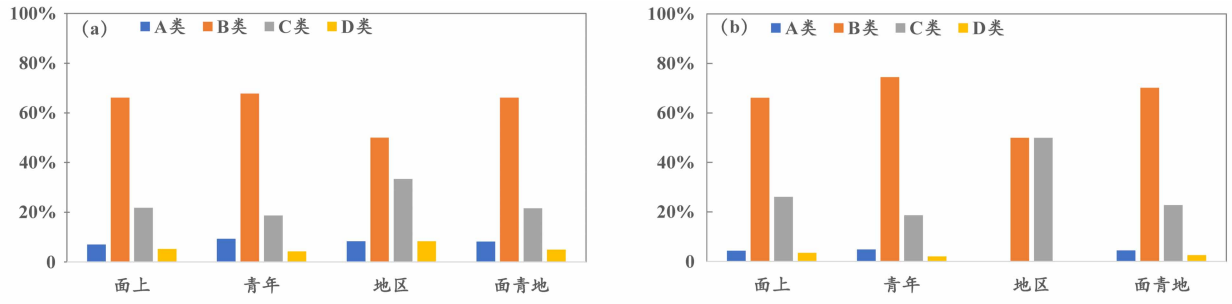

图 2 （a）2020、（b）2021 年度 D0502 申请代码“面青地”项目申请 4 类科学科学问题属性占比

Fig. 2 Proportion of project funding of General Program, Young Scientists Fund, and Fund for Less-Developed Regions with four scientific natures of research for application code D0502 in (a) 2020 and (b) 2021

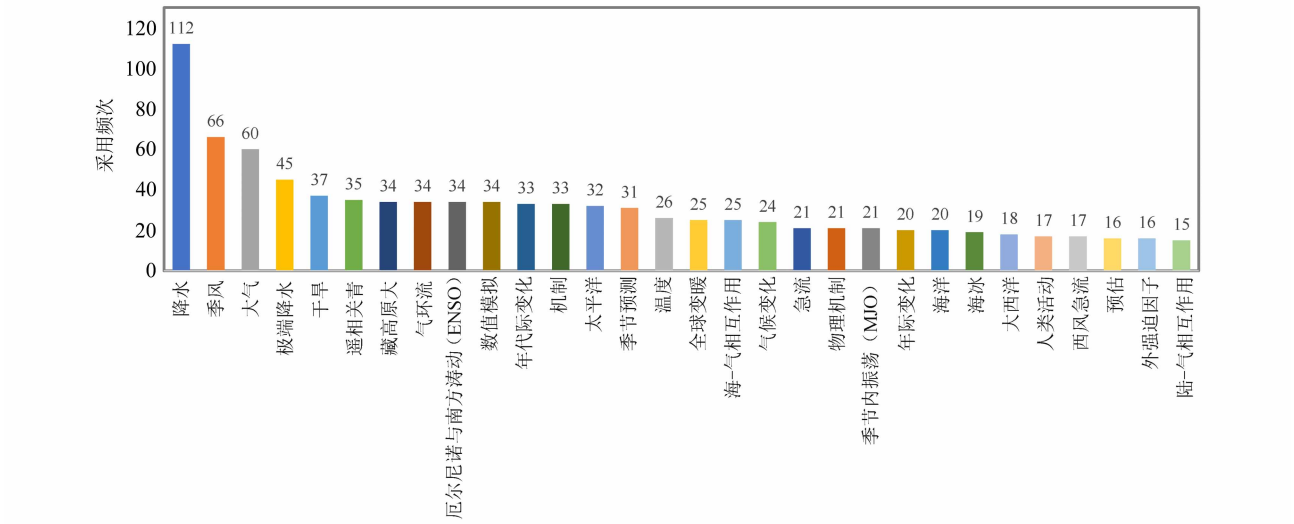

图 3　2020～2021 年 D0502 申请代码前 30 个关键词出现频次统计

Fig. 3　Frequency statistics for top 30 keywords for application code D0502 in the years 2020–2021

足 5 个，少数项目甚至只提供 2～3 个关键词，不能发挥关键词匹配专家的作用。

（3）由于“气候与气候系统”的研究涉及面广，研究方向较多，虽然前期做了大量的调研，对申请代码的方向设置和关键词选择很难面面俱到，还存在一些不足之处，比如，少量的关键词在近两年的申请中未被采用。因此，有必要根据“气候与气候系统”的研究动态来进行适度优化和调整，更好发挥关键词的作用。

总的来说，自然科学基金委申请代码改革工作在推动学科资助体系中发挥了十分重要的引领作用，从实施情况来看也取得明显的效果。希望通过本文的解读使得申请人对申请代码 D0502 的改革背景、方向设置、关键词设定等有更为深入的了解，从而避免项目申请过程中存在的一些问题。与此同时，建议在今后的工作中，根据学科发展的动态适当优化和动态调整申请代码的关键词更好指导项目申请和大气科学的基础研究。

致谢　衷心感谢国家自然科学基金委员会“申请代码和关键词”战略研究工作组 D0502 小组的陈活泼、段安民、管晓丹、郭维栋、哈遥、华维、贾晓静、简茂球、孟宪红、孙颖、武炳义、徐邦琪、杨若文、周波涛、左志燕等的支持。

参考文献（References）

Fischer E M, Sippel S, Knutti R. 2021. Increasing probability of record-shattering climate extremes [J]. Nat. Climate Change, 11(8): 689−695. doi:10.1038/s41558-021-01092-9

何建军, 郭郁葱, 刘哲, 等. 2020. 2020 年度大气科学领域项目评审与资助成果简析 [J]. 地球科学进展, 35(11): 1201−1210.　He J J, Guo Y C, Liu Z, et al. 2020. An introduction to the projects managed by division of atmospheric sciences, department of earth sciences, National Natural Science Foundation of China in 2020 [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 35(11): 1201−1210. doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2020.093

何建军, 李香钰, 刘哲, 等. 2021. 2021 年度大气科学领域项目评审与资助成果简析 [J]. 地球科学进展, 36(11): 1204−1214.　He J J, Li X Y, Liu Z, et al. 2021. General analysis of project review and funding results in atmospheric science in 2021 [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 36(11): 1204−1214. doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2021.104

Huang J P, Chen W, Wen Z P, et al. 2019. Review of Chinese atmospheric science research over the past 70 years: Climate and climate change [J]. Sci. China: Earth Sci., 62(10): 1514−1550. doi:10.1007/s11430-019-9483-5

IPCC. 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC [M]. Cambridge: Cambridge University Press.

李静海. 2020. 深化科学基金改革推动基础研究高质量发展 [J]. 中国科学基金, 34(5): 529−532.　Li J H. 2020. Deepen the reform of the National Natural Science Fund to promote the high-quality development of basic research [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China (in Chinese), 34(5): 529−532. doi:10.16262/j.cnki.1000-8217.2020.05.001

刘哲, 丁爱军, 张人禾. 2020. 调整国家自然科学基金申请代码, 优化大气学科资助布局 [J]. 科学通报, 65(12): 1068−1075.　Liu Z, Ding A J, Zhang R H. 2020. Adjusting application codes and optimizing funding layout for the discipline of atmospheric sciences in the National Natural Science Foundation of China [J]. Chinese Sci. Bull. (in Chinese), 65(12): 1068−1075. doi:10.1360/TB-2020-0146

刘哲, 何建军, 郭郁葱. 2021. 基于大气科学学科发展特点, 解读项目

分类评审改革新举措 [J]. 科学通报, 66(2): 187−192. Liu Z, He J J, Guo Y C. 2021. Category-specific evaluation reform by the National Natural Science Foundation of China benefits the basic research of atmospheric sciences: A policy interpretation [J]. Chinese Sci. Bull. (in Chinese), 66(2): 187−192. doi:10.1360/TB-2020-1444

穆穆, 段晚锁, 唐佑民. 2017. 大气—海洋运动的可预报性: 思考与展望 [J]. 中国科学: 地球科学, 47(10): 1166–1178. doi:10.1007/s11430-016-9101-x. Mu M, Duan W S, Tang Y M. 2017. The predictability of atmospheric and oceanic motions: Retrospect and prospects [J]. Sci. China: Earth Sci. , 60(11): 2001–2012. doi:10.1007/s11430-016-9101-x

Tippett M K. 2018. Extreme weather and climate [J]. npj Climate Atmos. Sci., 1(1): 45. doi:10.1038/s41612-018-0057-1

王会军, 范可, 郎咸梅, 等. 2012. 我国短期气候预测的新理论、新方法和新技术 [M]. 北京: 气象出版社. Wang H J, Fan K, Lang X M, et al. 2012. Advances in Climate Prediction Theory and Technique of China (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.

Wang H J, Dai Y J, Yang S, et al. 2022. Predicting climate anomalies: A real challenge [J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 15(1): 100115. doi:10.1016/j.aosl.2021.100115

翟盘茂, 周佰铨, 陈阳, 等. 2021. 气候变化科学方面的几个最新认知 [J]. 气候变化研究进展, 17(6): 629−635. Zhai P M, Zhou B Q, Chen Y, et al. 2021. Several new understandings in the climate change science [J]. Climate Change Research (in Chinese), 17(6): 629−635. doi:10.12006/j.issn.1673-1719.2021.201

张人禾, 刘哲, 穆穆, 等. 2021. 气候系统和气候变化研究获 2021 年诺贝尔物理学奖的启示 [J]. 中国科学基金, 35(6): 1013−1016. Zhang R H, Liu Z, Mu M, et al. 2021. Enlightenment from the 2021 Nobel prize in physics for research on climate system and climate change [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China (in Chinese), 35(6): 1013−1016. doi:10.16262/j.cnki.1000-8217.20211217.002