

# 天眼傲苍穹

——中国大射电望远镜贵州选址记

宋建波 等著

地质出版社

贵州省科学技术协会和贵州理工学院联合资助出版

# 天眼傲苍穹

——中国大射电望远镜贵州选址记

宋建波 刘宏 王文俊 向喜琼 著

地质出版社

·北京·

## 内 容 提 要

历经 23 年的研究和建设,2016 年 9 月 25 日,位于贵州省黔南州平塘县克度镇大窝凼的“中国天眼”——500 m 口径球面射电望远镜(FAST)正式“睁眼”运营,开启了巡航宇宙的新时代。如何在贵州众多的喀斯特洼地中寻找到最完美的眼窝“大窝凼洼地”作为 FAST 台址,是 FAST 工程建设中非常关键的一个科学难题,也是许多人关心的问题。本著作包括“天文学与浩瀚宇宙中的星球星云、射电天文学与射电望远镜的发展、中国天眼横空出世傲视苍穹、中国天眼聚焦贵州喀斯特峰丛洼地、中国天眼 13 年艰辛的贵州选址历程、中国天眼台址三维仿真与优化设计、中国天眼台址群雄俊秀成大窝凼、中国天眼 SKA 国际台址竞争虽败犹荣、中国天眼最美的眼窝大窝凼、中国天眼建设凝聚的 FAST 精神”共 10 章,力求以通俗生动的语言介绍大射电望远镜的前世今生和中国天眼 FAST 艰辛的选址历程。

本著作是宋建波等 2006 年出版的学术专著《大射电望远镜贵州选址理论与方法》的姊妹篇,是集科普性、学术性、纪实性为一体的著作。全书内容丰富、图文并茂,文字流畅,思路清晰,不仅可以作为天文学、工程地质、岩土工程等专业的大学和研究生教学参考书,而且可以供相关行业的工程技术人员参考,还可以作为天文爱好者和所有关心中国天眼的社会公众的科普读物。

### 图书在版编目(CIP)数据

天眼傲苍穹:中国大射电望远镜贵州选址记/宋建波等著. —  
北京:地质出版社,2016.12  
ISBN 978-7-116-10093-0

I. ①天… II. ①宋… III. ①射电望远镜—选址—  
研究—贵州 IV. TN16

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 288859 号

Tianyan Ao Cangqiong—Zhongguo Dashedian Wangyuanjing Guizhou Xuanzhiji

责任编辑:李惠娣 魏智如

责任校对:韦海军

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号,100083

电 话:(010) 66554528(邮购部);(010) 66554579(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

传 真:(010) 66554582

印 刷 厂:北京顺诚彩色印刷有限公司

开 本:700 mm×1000 mm  $\frac{1}{16}$

印 张:20.5

字 数:420 千字

印 数:1—5000 册

版 次:2016 年 12 月北京第 1 版

印 次:2016 年 12 月北京第 1 次印刷

定 价:68.00 元

书 号:ISBN 978-7-116-10093-0

(如对本书有建议或意见,请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

# 序 一

射电望远镜是天文学研究中以高分辨率、高灵敏度探索宇宙奥秘的重要观测设备，不仅可以捕捉星云等发出的低能量电波，而且可以观测有关银河系进化、星体形成机制等数据。中国月球探测工程——“嫦娥工程”就是用射电望远镜接收探月卫星发回的科学数据，参加对卫星位置的准确观测。因此，我国积极开展一平方千米阵大射电望远镜（简称 SKA）及其在中国的先导工程——500 m 口径球面射电望远镜（简称 FAST）的研究，并争取将世界上最大的射电望远镜（阵）建在中国，对推动和促进我国天文学及相关学科的发展均有重要意义。



我国的大射电望远镜设计方案需要利用贵州天然喀斯特洼地作为台址，并计划在贵州建造数十个甚至上百个呈对数螺旋线形式分布的台址组成的大射电望远镜阵。大射电望远镜选址不仅要考虑洼地口径、深度、平面形态、山峰峰数、闭合程度为主要特征的几何条件，以挖填方量和交通条件为主要内容的工程条件，以水文工程地质、地质灾害、地震灾害为主要特征的地质条件，而且要考虑以气温气压、冰雹霜冻为主要特征的气象条件，以宽频谱范围为特征的无线电波环境条件，及其独特的布局要求。因此，在贵州众多的喀斯特洼地中优选出适宜的 FAST/SKA 候选台址是一个复杂的系统分析过程，其本质就是在满足 SKA 台址布局要求的前提下，由喀斯特洼地的几何条件、工程条件、地质条件、气象条件和无线电波环境条件的相互制约中，找出适宜台址条件的最优组合的过程，这在一定程度上已完全不同于我国以区域地壳稳定性评价为主要内容的传统工程地质选址工作，具有特殊性。

宋建波教授及其研究团队结合大射电望远镜工程的特点及台址评价中必须解决的 9 个关键科学问题，以系统工程地质学为理论指导、历时 4 载完成的学术专著——《大射电望远镜贵州选址理论与方法》，在以下方面取得突破和进展：①系统开展了“贵州区域构造稳定性评价及地震危险性预测”的专题研究；②系统开展了“贵州喀斯特及峰丛洼地分布规律”的专题研究；③系统开展了“大射电望远镜台址三维仿真及参数优选设

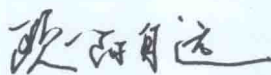
---

本序言是被誉为“嫦娥之父”的中国探月工程首席科学家、中国科学院院士欧阳自远在 500 m 口径球面射电望远镜（FAST）台址正式确定为贵州省平塘县克度镇大窝凼洼地之后，为宋建波博士等 2006 年 10 月出版的学术专著《大射电望远镜贵州选址理论与方法》而作。值中国天眼 FAST 于 2016 年 9 月 25 日在贵州省平塘县克度镇大窝凼洼地正式建成启用之际，经欧阳自远院士本人同意，以此作为本书之序。

计系统”研究，并开发了相应软件；④系统开展了“大射电望远镜  $n$  塔馈源支撑最优化系统”的专题研究，并开发了相应软件；⑤建立了“大射电望远镜台址评价指标和台址优选理论”，并在贵州优选了 FAST 候选台址；⑥按小  $N$  大  $D$  型和大  $N$  小  $D$  型两种方案布置了中国 SKA 台址布局方案，并开发了相应软件；⑦在对 SKA 台址核心区——大窝凼洼地及其周边进行  $400 \text{ km}^2$  野外地质调查的基础上，初步研究了“台址地震及动力响应、台址边坡稳定性评价理论、台址塌陷及顶板稳定”等关键工程地质问题。

本书是对大射电望远镜贵州选址工作的系统总结和理论升华，也是首部介绍大射电望远镜选址理论与方法的学术专著。全书内容丰富、图文并茂，文字流畅，思路清晰，研究成果可信度高，突破和创新点多，是一部优秀的学术著作。相信本专著的出版，对大射电望远镜及重大天文设施的选址工作，和我国及世界其他国家在喀斯特地区的选址工作均有重要价值。因时间仓促，谨将阅后感想写成上面的一点文字，并以之为序。

中国科学院院士  
中国探月工程首席科学家  
贵州省科学技术协会主席  
贵州大学名誉校长



二〇〇六年十月十日

## 序 二

我国岩溶(喀斯特)分布广泛,特别是西南和中南的云南、贵州、重庆、四川、广西、湖南和湖北这七个省、直辖市和自治区。在这片总面积 176 万多平方千米的面积内,厚层及夹层的碳酸盐岩分布面积占总面积的 43%,岩溶发育类型多而典型,为国内外所闻名。贵州就位于这片最集中分布的岩溶地区的核心,岩溶分布面积占全省国土面积 17 万多平方千米的 74%,主要发育湿热条件下以溶蚀为主的溶丘洼地型和峰丛洼地型这两种岩溶类型,二者是溶蚀丘陵和溶蚀峰丛的正态岩溶景观和负态洼地岩溶景观相结合而组成的。正是由于这类岩溶景观的广泛发育,贵州才有“地无三里平”之称。贵州的洼地多为圆形、椭圆形、长条形、不规则多边形等,洼地直径长度一般在几十米至数百米。这类溶丘洼地和峰丛洼地多为当地降水地表径流消落地下岩溶洞穴系统的通道,因而地表常干旱。相应地,在这类洼地中土层薄瘠,有落水洞发育,地下水位处于地下深处,农业生产也不发达,多数还是比较贫困的。为此,如何使洼地得以更有效地开发,一直是我们的岩溶研究者的一个心愿。



2005 年 10 月下旬,我受贵州大学邀请,出席在贵阳召开的“中国地质学会工程地质专业委员会 2005 年学术年会暨岩溶·工程·环境学术论坛”时,才初次见到宋建波博士,并听取了他作的“大射电望远镜(FAST/SKA)贵州选址”方面的学术报告,得到了不少启发。以峰丛洼地作为大射电望远镜(FAST/SKA)台址,不仅要考虑洼地口径、深度、平面形态、山峰峰数、闭合程度为主要特征的几何条件,以挖填方量和交通条件为主要内容的工程条件,以水文工程地质、地质灾害、地震灾害为主要特征的地质条件,以气温气压、冰雹霜冻为主要特征的气象条件,以宽频谱范围为特征的无线电波环境条件,而且要按照国际 SKA 台址特殊的布局要求,在贵州布置数十个甚至上百个由核心区、中央区、遥远区和外围区 4 个区组成,呈对数螺旋线形式分布,并连接云南、上海、北京、青海、乌鲁木齐 5 个射电天文基地的峰丛洼地,以组成一平方千米阵列射电望远镜(SKA)。显然,要在贵州岩溶地区选择考虑因素繁多、限制条件严格的大射电望远镜台址,是一件要求高而难

---

本序言是被誉为“喀斯特卢”的世界著名岩溶工程地质与环境地质学家、中国工程院院士卢耀如在 500 m 口径球面射电望远镜(FAST)台址正式确定为贵州省平塘县克度镇大窝凼洼地之后,为宋建波博士等 2006 年 10 月出版的学术专著《大射电望远镜贵州选址理论与方法》而作。值中国天眼 FAST 于 2016 年 9 月 25 日在贵州省平塘县克度镇大窝凼洼地正式建成启用之际,经卢耀如院士本人同意,以此作为本书之序。

度很大的科学研究工作，涉及岩溶发育、区域稳定性、地表稳定性、天文、气候、水文、地震与地质灾害、无线电环境等许多方面的研究内容，是以多学科交叉为特点的选址工作。

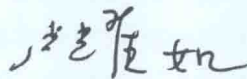
宋建波博士等年轻一代的地质学家，在胜利完成这项大射电望远镜（FAST/SKA）选址工作后，尚系统总结了《大射电望远镜贵州选址理论与方法》这本论著。这部论著在综合分析贵州的区域地质环境条件、气候环境以及经济条件等的基础上，尚深入体现了洼地台址三维仿真及台址参数优选系统、馈源支撑系统优化设计、台址评价及优选理论、SKA 台址布局方法等方面的研究成果。虽然目前通过调查研究在贵州所优选出的大射电望远镜台址已得到国内有关部门的肯定，但尚需与其他4个国家选出的台址进行比较，最后由国际有关方面决定这多国投资的大射电望远镜台址建在哪个国家。尽管如此，宋建波博士等年轻一代的地质学家，在我国于1994年才开始研究大射电望远镜、国内外都没有选择岩溶洼地作为射电望远镜台址的情况下，能够刻苦钻研、奋力创新，取得科技前沿的成果，合理选出大射电望远镜台址，这是值得祝贺的成就，显然，这方面的成就也应居于世界前列。如果真能利用贵州洼地建成大射电望远镜阵，在总体带动我国天文学及相关学科、贵州科技教育等发展的同时，必定会给贵州岩溶山区带来更多的发展机遇。

我研究岩溶已有50多年的时间，但没有选择大射电望远镜台址的任何经验。读了宋建波等青年优秀地质学家的这本论著，对我也是一个学习。因此，在看到这本优秀的论著之时，我很愿意为这部价值沉重的论著写此序言，并向读者推荐。执笔作序之时，不禁挥笔作七律一首，以表心意，权作序言之结语。

### 赞岩溶洼地选大射电望远镜台址

层层山岭间洼地，土层薄瘠水埋深；  
自古耕锄苦放羊，而今射电喜诱人。  
登山涉水探艰险，披荆斩棘揭奥秘；  
好梦成真靠科技，盛赞青年献身情！

中国工程院院士



2006年10月12日

# 前言

星汉灿烂，岁月多姿。

2016年9月25日，位于贵州省黔南州平塘县克度镇大窝凼洼地的“中国天眼”——500 m口径球面射电望远镜(FAST)落成启用仪式在平塘县克度镇FAST观测基地举行。FAST取代了美国Arecibo 350 m口径球面射电望远镜，成为新的射电望远镜之王，并开启了巡视苍穹的新时代，令世界瞩目，举国振奋。这既是中国乃至全球天文研究的一个重大事件，也是贵州在科学技术的推动下加速融入世界的标志性事件。中共中央总书记、国家主席、中央军委主席习近平发来贺信，向参加研制和建设的广大科技工作者、工程技术人员、建设者表示热烈的祝贺和诚挚的问候，并指出：“天文学是孕育重大原创发现的前沿科学，也是推动科技进步和创新的战略制高点。500 m口径球面射电望远镜被誉为‘中国天眼’，是具有我国自主知识产权、世界最大单口径、最灵敏的射电望远镜。它的落成启用，对我国在科学前沿实现重大原创突破、加快创新驱动发展具有重要意义。”中共中央政治局委员、国务院副总理刘延东在“中国天眼”启用仪式上宣读了习近平的贺信，希望广大科技工作者依托我国500 m口径球面射电望远镜的先进技术条件，瞄准科学前沿，加强国际合作，聚集拔尖人才，打造高端科研平台，努力取得重大原创性成果，为我国天文学跻身世界一流水平和建设世界科技强国做出贡献。21世纪，中国天眼承载着中国人仰望星空的梦想再次出发。

大射电望远镜建造计划始于国际无线电科学联盟在1993年的日本京都大会上，包括中国在内的10个国家的射电天文学家提出的“建造接收面积一平方千米的巨型射电望远镜”的国际合作计划，最初名为“Large Telescope计划”(简称“LT计划”)，后更名为“Square Kilometre Array计划”(简称“SKA计划”)。随后，中国科学院北京天文台(现国家天文台)开始主持SKA单元工程概念的预研究，并创造性地提出了利用贵州喀斯特洼地作





为台址建造世界上最大的射电望远镜,即 500 m 口径球面射电望远镜(Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope)的概念(简称 FAST);同时,计划在贵州全省建造数十个甚至上百个台址组成的阵射电望远镜(SKA)。大射电望远镜选址不仅要考虑洼地口径、深度、平面形态、山峰峰数、闭合程度为主要特征的几何条件,以挖填土石方量和交通条件为主要内容的工程条件,以水文地质、工程地质、地质灾害、地震灾害为主要特征的地质条件,而且要考虑以气温气压、冰雹霜冻为主要特征的气象条件,以宽频谱范围为特征的无线电波环境条件,以及呈对数螺线形式分布的独特的台址布局要求。因此,在贵州众多的喀斯特洼地中优选出适宜的 FAST/SKA 候选台址是一个十分复杂的系统分析过程,其本质就是在满足 SKA 台址布局要求的前提下,由喀斯特洼地的几何条件、工程条件、地质条件、气象条件、无线电波环境条件的相互制约中,找出适宜台址条件的最优组合的过程,是以多学科交叉为特点的系统综合分析过程,具有特殊性。

大射电望远镜第一轮贵州选址工作始于 1994 年 5 月,由中国科学院遥感应用研究所聂跃平博士主持,并在安顺市普定县(定名为 A 区)和黔南州平塘县(定名为 B 区)开展了台址普查工作,重点推荐了普定县尚家冲和平塘县鸡窝冲、党振等洼地。2002 年 11 月,原贵州工业大学宋建波博士(以下简称“我”)受贵州省科技厅和中国科学院国家天文台联合委托,开始主持“大射电望远镜第二轮贵州选址项目”,其工作目标是:“为了避免遗漏最佳的喀斯特洼地,在中国科学院遥感应用研究所第一轮选址工作的基础上,开展喀斯特洼地在贵州全省范围内的普查,实现 FAST/SKA 在贵州的合理布局及优化。”四载栉风沐雨,终于花开贵州。我的科研团队克服资料缺乏、经费不足、无成熟经验可借鉴,以及国家天文台对第一轮选址成果材料相对保密、持续增加研究内容或变革研究方案等困难,精诚协作,开拓创新,圆满完成了 FAST/SKA 台址优选任务。其中,排名第一推荐的大窝凼洼地被确定为我国首批投入建设的世界上最大的射电望远镜(FAST)台址,于 2016 年 9 月 25 日建成并正式运营;按照小 N 大 D 型(贵州 58 个台址)和大 N 小 D 型(贵州 121 个台址)两种方案布置的中国 SKA 台址布局方案,汇总到国家天文台编制的《SKA 中国选址项目建议书》(英文)后,2006 年开始与美国、澳大利亚、南非、阿根廷 4 个国家进行国际台址竞争时,最终以澳大利亚和南非联合共建胜出,从而与 SKA 国际合作项目失之交臂。

贵州处于世界三大连片喀斯特发育区之一的东亚片区中心,是世界喀斯特发育最典型、类型最复杂、景观类型最齐全的片区。贵州之美在于山奇水秀和独特的喀斯特地貌,也正是这个原因,贵州才有“地无三里平”之称,并给大射电望远镜选址工作带来了许多困难。我在 2006 年出版的学术专著《大射电望远镜贵州选址理论与方法》的“结语”中写道:“至今仍难以忘却承担大射电望远镜第二轮贵州选址工作的艰难岁月。为不遗



照片提供 / 苏孝良

漏贵州任何一个适宜作为台址的洼地，我们亲驻贵州测绘资料档案馆1月有余，查阅了贵州全省8000多幅1:1万的地形图，圈定了所有可供选择的洼地；我们在刚出校门囊中羞涩、科研经费极其紧张的情况下，节衣缩食、咬紧牙关购买了长城塞弗越野车，作为交通工具跑遍黔山万水，考察了作为候选台址的每一个洼地！我们在承担大射电望远镜选址项目的1000多个日子里，已记不清长城塞弗到底跑了多远的路、摸了多少黑、经历了多少险情，恰如大射电望远镜项目首席科学家南仁东研究员发自内心的感慨：‘你们这些孩子，坐这样的车跑野外太危险了！若真出事，叫我为心何忍，让我如何交代。’到大射电望远镜选址项目接近尾声的2006年初，越野车已几近报废。在将长城塞弗越野车当作废铁贱卖的那几日，真如同送别了一位生死相依的手足兄弟，心中何等不是滋味。研究是寂寞的，做地质研究更是如此。莽莽黔山上坡下坎，大射电望远镜选址组丈量着日复一日的孤独；漫漫长夜通宵达旦，博士们演算了夜复一夜的寂寞；国家天文台每一次变更研究方案或追加研究任务之时，我等付出多少艰辛，虽心力交瘁但仍豁达乐观、甘于奉献；为保守选址工作的秘密，我们始终徘徊在人群的背后，隐匿在新闻的盲区，游走在学界的边缘（4年基本未实质性发表学术论文），白天潜心实验室，夜晚加班喀斯特，掐指算来，历经4载……而今忆来，倍感欣慰的是，我们怀着对科学求真务实境界的不懈追求，秉承勤恳工作之作风、踏实做人之理念，终究人事。”

大射电望远镜第二轮贵州选址工作胜利完成后，我和团队成员默默回到校园，再没有参加FAST项目的勘察、设计、施工等后续工作，再没有踏入历尽千辛万苦寻找并

排名第一推荐的大窝凼洼地，但我们一直通过媒体报道关心着 FAST 项目的进展。2016 年 9 月 19 日是全国科普日，贵州省科学技术协会（以下简称“贵州省科协”）邀请我为黔南州惠水县民族中学的高中生作了“大射电望远镜贵州选址理论与方法”的科普报告，反响热烈，并邀请我撰写介绍 FAST 选址工作的科普著作。2016 年 9 月 25 日“中国天眼”启用仪式前后，贵州日报、贵州电视台、当代贵州、中国青年报、贵州先锋网等主流媒体又开始寻访中国天眼最美的眼窝——“大窝凼洼地”的推荐者，没有忘记我的科研团队的艰辛付出，采访报道并且还以网络和微信的形式被大量转载和广泛传播，引起了广泛的社会关注。西南科技大学、河北地质大学、贵州大学、贵州理工学院、贵州工程应用技术学院等高校，也邀请我宣讲与 FAST 选址有关的知识。我每次在为大家讲解 FAST 的前世今生和选址工作的来龙去脉，与听众分享 FAST 选址工作的艰辛和成功的快乐，尤其看到广大学生好奇和求知的眼神时，内心深处产生了一种冲动——如果能够让更多的人了解 FAST 及选址成果，不也是一件功德无量的事情么？随后，为了答复贵州省科协希望我撰写介绍 FAST 选址工作的科普读物的要求，我与团队成员协商后，决定不惧文笔笨拙，以 10 年前出版的学术专著《大射电望远镜贵州选址理论与方法》为基础，结合 FAST 的最新报道，在大量查阅相关文献的基础上，执笔撰写《天眼傲苍穹——中国大射电望远镜贵州选址记》。

对擅长撰写科技论文和学术专著的博士教授来说，用通俗而亲切的语言向广大读者介绍 FAST 在贵州开花结果的详细过程，真的是一件非常困难的事情。如大窝凼洼地在贵州数以万计的喀斯特洼地中排名第一被推荐出来的过程，本身就是一个非常复杂的数学问题；呈对数螺旋线形式分布的中国 SKA 台址布局方案，也是通过数学方法和计算机编程来实现的。因此，对这些科学问题的介绍，是很难用通俗的语言来讲述的。最终还是各新闻媒体对大射电望远镜选址工作的采访启发了我，因为记者们对我采访过程中最关心的是：

- (1) FAST 到底是干什么的？能够给贵州带来什么？
- (2) FAST 台址到底需要什么条件？
- (3) 大窝凼洼地是怎么从贵州数以万计的喀斯特洼地中找出来的？
- (4) 大窝凼洼地是什么时候进入你的视野，你第一眼见到大窝凼的感觉是什么？
- (5) 大窝凼洼地被称为中国天眼最美的眼窝，到底好在哪里？
- (6) 如果大窝凼洼地不被确定为 FAST 台址，还能够做什么？
- (7) 长达 4 年的选址过程中，最艰难的事情和最难忘的事情是什么？有没有叫你最兴奋和最高兴的事情发生？

其实，这 7 个问题已经涵盖了大射电望远镜贵州选址工作的全部。随后，我结合上

述采访内容和所作学术报告的提纲，几易其稿，终于制定出了《天眼傲苍穹——中国大射电望远镜贵州选址记》的写作提纲。但在写作过程中，并没有完全按照贵州省科协的要求，将本书完全定义为“科普著作”，而是定义为“集科普性、学术性、纪实性于一体的著作”，从而确定了写作风格，并作为10年前出版的《大射电望远镜贵州选址理论与方法》的姊妹篇。科普性是为了确保著作的可读性和由浅到深的写作风格，学术性是为了介绍选址中的关键科学问题，纪实性则是为了如实记录选址的过程和发生的事情。

本著作除前言和结语外，共由10章组成。第1章主要介绍天文学的诞生和发展，以及望远镜的发明对现代天文学的贡献；第2章主要介绍射电天文学的诞生和射电望远镜的发展历史，并盘点世界上著名的射电望远镜，为介绍FAST做好铺垫；第3章主要介绍中国天眼FAST的建设背景、技术参数、系统构成、工作原理、建设历程、功能用途和重要创新；第4章主要解释“中国那么大，为什么选中贵州省的喀斯特峰丛洼地作为大射电望远镜台址”“贵州省的喀斯特峰丛洼地数以万计，到底具有什么样的形成机理和分布规律”这两个读者关心的问题；第5章主要介绍FAST/SKA第一轮选址工作及其贡献和第二轮选址工作及其完成情况，并结合FAST的台址条件和SKA的台址布局要求，详细介绍FAST/SKA第二轮选址工作的思路、方法、创新性成果和相关评价；第6章主要介绍两个自主研发的重要可视化软件——“大射电望远镜台址三维仿真及参数优选系统FASTV”和“ $n$ 塔馈源支撑系统优化设计可视化软件FASTT”，它们是影响着射电望远镜台址评价和台址设计参数优选的关键，直接决定着大射电望远镜贵州选址项目的成败；第7章主要用于解释“如何在贵州数以万计的喀斯特峰丛洼地中，合理优选出FAST/SKA台址，并排名第一推荐平塘县大窝凼洼地作为我国首批建设的500 m口径射电望远镜台址”这一读者关心的问题；第8章主要阐述数十个甚至上百个由核心区、中央区、外围区、遥远台站组成，包括北京密云、上海佘山等5个已建或计划建设的射电天文基地在内，呈对数螺线形式分布的台址组成的中国SKA台址布局方案；第9章主要阐述大窝凼洼地作为FAST台址所满足的几何条件、地质条件、地震条件、无线电环境条件和气象条件；第10章介绍中国天眼建设凝聚的FAST精神，主要在阐述FAST精神提出的时代背景和深刻内涵、大射电望远镜工程和贵州人民弘扬的FAST精神的基础上，重点介绍中华民族大力弘扬FAST精神的意义和价值。

因为本著作涉及范围广，由学术专著撰写成通俗易懂和集科普性、学术性、纪实性于一体的著作的时间仓促，且限于作者的写作水平，书中难免有不完善之处；尤其是在以地质科技工作者的身份撰写第1章到第3章，并为介绍大射电望远镜13年艰辛的贵州选址历程作铺垫时，虽然大量查阅了天文学、射电天文学、射电望远镜等相关文献和与FAST有关的新闻报道，也由百度图片和昵图网引用了部分图片进行说明，但仍受到

自己所学和所从事专业的限制，可能理解不够全面，表述不够准确，恳请同行专家学者和广大读者批评指正！

衷心感谢贵州省科技厅和中国科学院国家天文台对我的科研团队的高度信任和亲切关怀，使我们有机会展现才华、服务于国家重大基础设施建设项目！诚挚感谢中共贵州省委组织部常务副部长（原贵州省科技厅厅长）于杰教授，贵州省科协主席张美圣、副主席钱斌、科普部部长廖京生，以及贵州理工学院党委书记曾羽教授、校长龙奋杰教授等院领导班子成员对我撰写本著作的支持！衷心感谢贵州省平塘县代传富、岑龙武和贵州省科技厅苏孝良为本著作出版提供了大量与FAST建设和喀斯特地貌有关的精美照片，为本书增色添彩！诚挚感谢贵州理工学院郑波、杨宏涛、沈逸菲、夏雍、黎安茹等同事做了大量的图片处理、文字校对等工作！衷心感谢著名书法家杨凡为本著作挥毫题写了书名！感谢贵州省管专家、贵州理工学院郑波高级工艺美术师手书了我为中国天眼建成启用所作的诗！诚挚感谢贵州省科学技术协会和贵州理工学院提供经费，资助本著作出版！此外，还要感谢我的妻子詹玉枝和爱女宋艾娣对我的理解和支持！尤其是我10岁的女儿宋艾娣，为本著作出版画了6幅插图。还要说明的是，本著作中部分图片来自互联网，因条件所限未能署名，谨向原作者表示歉意和诚挚的感谢！

古有十年磨一剑，今有廿载铸天镜。国家加大对天文观测设施的投入，既是我国综合国力提升的体现，又是我国工业制造水平的缩影。天眼作杯，银河有酒谁能饮？电波当笔，宇宙行云我狂书！华夏重器，雄踞贵州震天下。观天巨眼，傲视苍穹耀神州！谨以此书，献给为中国天眼FAST默默奉献了23年的科技工作者和建设者，以及所有关心FAST的人们！

宋建波

2016年11月8日于贵州理工学院

# 目 录

序 一

序 二

前 言

1 天文学与浩瀚宇宙中的星球星云	1
1.1 天文学的诞生	1
1.2 天文学的发展历史	2
1.3 浩瀚宇宙中的星球星云	12
2 射电天文学与射电望远镜的发展	17
2.1 射电天文学的诞生	17
2.2 射电望远镜的工作原理	18
2.3 射电望远镜的发展历史	20
2.4 盘点世界上著名的射电望远镜	22
3 中国天眼横空出世傲视苍穹	35
3.1 中国天眼的建设背景	35
3.2 中国天眼的主要技术参数	40
3.3 中国天眼长什么样	43
3.4 中国天眼的艰辛建造历程	50
3.5 中国天眼的重要功能	60
3.6 中国天眼的四大独门绝技	64
3.7 中国天眼的三大突破	65
3.8 中国天眼给我们带来什么	66
4 中国天眼聚焦贵州喀斯特峰丛洼地	71
4.1 喀斯特的定义及发育特征	71
4.2 贵州喀斯特地貌类型与地域结构	73
4.3 贵州喀斯特发育强度分区	78
4.4 峰丛洼地形成机理及动力过程	83
4.5 贵州峰丛洼地发育规律	88
5 中国天眼 13 年艰辛的贵州选址历程	99
5.1 FAST/SKA 第一轮贵州选址工作及其贡献	99
5.2 FAST/SKA 第二轮贵州选址工作及完成情况	108
5.3 FAST/SKA 独特的台址条件和布局要求	112

5.4	FAST/SKA 第二轮贵州选址工作的关键科学问题	115
5.5	FAST/SKA 第二轮贵州选址工作思路与方法	118
5.6	FAST/SKA 第二轮贵州选址工作创新性成果及相关评价	122
<b>6</b>	<b>中国天眼台址三维仿真与优化设计</b>	<b>131</b>
6.1	概 述	131
6.2	喀斯特洼地数字地形模型	132
6.3	中国天眼台址三维仿真及参数优选系统	133
6.4	中国天眼馈源支撑系统优化设计	144
6.5	本章小结	163
<b>7</b>	<b>中国天眼台址群雄俊秀功成大窝凼</b>	<b>165</b>
7.1	概 述	165
7.2	台址评价指标体系	166
7.3	台址适宜性评价的单因素指标法	169
7.4	台址适宜性评价的模糊综合评判法	172
7.5	台址适宜性评价的神经网络法	184
7.6	台址适宜性评价的灰色关联分析法	194
7.7	FAST 台址评价与优选	204
7.8	本章小结	208
<b>8</b>	<b>中国天眼 SKA 国际台址竞争虽败犹荣</b>	<b>211</b>
8.1	概 述	211
8.2	中国 SKA 台址布局原理与方法	212
8.3	中国小 N 大 D 型 SKA 台址布局	215
8.4	中国大 N 小 D 型 SKA 台址布局	224
8.5	中国 SKA 台址核心区及中央区简介	227
8.6	中国 SKA 基础设施支撑中心城市	229
8.7	中国 SKA 站址中心城市	231
8.8	贵州 SKA 台址建造价格及运营成本	232
8.9	本章小结	237
<b>9</b>	<b>中国天眼最美的眼窝大窝凼</b>	<b>239</b>
9.1	新闻媒体对中国天眼大窝凼台址的关注	239
9.2	大窝凼台址优越的区域地质环境条件	241
9.3	大窝凼台址区优越的水文地质条件	250
9.4	大窝凼台址不惧怕地震	254
9.5	大窝凼台址边坡无坍塌之忧	259

9.6 大窝凼台址无洼底塌陷和被淹没之忧 .....	264
10 中国天眼建设凝聚的 FAST 精神 .....	269
10.1 FAST 精神提出的时代背景 .....	269
10.2 FAST 精神的深刻内涵 .....	271
10.3 大射电望远镜工程弘扬的 FAST 精神 .....	274
10.4 贵州人民弘扬的 FAST 精神 .....	281
10.5 中华民族要大力弘扬 FAST 精神 .....	286
结 语 .....	292
参考文献 .....	301
图 版 .....	306



# 1 天文学与浩瀚宇宙中的星球星云

## 1.1 天文学的诞生

我们小时候，每天看到日出日落、月圆月缺，看到繁星闪闪、时隐时现，常常在想，天上到底有几颗星星呢？该怎么辨别它们呢？茫茫天际外是否还有生命存在呢？人们对浩瀚宇宙的好奇和探索，催生了一门古老的学科——天文学。

顾名思义，天文学（Astronomy）就是研究宇宙空间天体、宇宙的结构和发展的学科，研究内容包括天体的构造、性质和运行规律等；主要通过观测天体发射到地球的辐射，发现并测量它们的位置，探索它们的运动规律，研究它们的物理性质、化学组成、内部结构、能量来源及其演化规律。

天文学的研究对于我们的生活有着很大的实际意义，对于人类的自然观也有着很大的影响。古代的天文学家通过观测太阳、月球和其他一些天体及天象，确定了时间、方向和历法，这也是天体测量学的开端。如果从人类观测天体、记录天象算起，天文学的历史至少已经有五六千年了。可以说，天文学在人类早期的文明史中，已经占据了非常重要的地位。埃及的金字塔和欧洲的巨石阵，都是非常著名的史前天文遗址。

《文子·自然》中说：“往古来今谓之宙，四方上下谓之宇。”《尸子》中说：“上下四方曰宇，往古来今曰宙。”《淮南子·原道训》中说：“四方上下曰宇，古往今来曰宙，以喻天地。”现代天文学认为：“宇宙是广漠空间和其中存在的各种天体以及弥漫物质的总称，是我们这个物质世界的整体，是物理学和天文学的最大研究对象。”（图 1.1）宇宙是物质世界，并处于不断的运动和发展中，在空间上无边无际，在时间上无始无终。宇宙是多样而又统一的，它的多样性在于物质的表现形态，它的统一性在于其物质性。由此，宇宙一般当作“天地万物的总称”，而解释宇宙的科学方法和理论，则构成了具有现代意义的宇宙学。时至今日，宇宙学已经成为一门精确的科学。

德国哲学家康德有一句名言：“世界上有两件东西能够深深地震撼着人们的心灵，一件是我们心中崇高的道德准则，另一件是我们头顶上灿烂的星空。”波兰天文学家哥

---

本章是在大量查阅网上资料的基础上撰写而成的，主要介绍天文学的诞生和发展简史、光学望远镜的发明与天文望远镜的类型，以及天文望远镜的诞生对现代天文学发展产生的影响，为使读者更好地了解射电望远镜做铺垫。