



“十三五”国家重点出版物出版规划项目

黑河流域生态-水文过程集成研究

# 巴丹吉林沙漠的水文地质条件及 地下水循环模式

王旭升 胡晓农 金晓媚 侯立柱 钱荣毅 著

 科学出版社  龍門書局



“十三五”国家重点出版物出版规划项目

黑河流域生态-水文过程集成研究

# 巴丹吉林沙漠的水文地质条件及 地下水循环模式

王旭升 胡晓农 金晓媚 侯立柱 钱荣毅 著

贵州师范学院内部使用



科学出版社



龙门书局

北京

## 内 容 简 介

本书是巴丹吉林沙漠地下水科学调查、观测与研究成果的汇总。该沙漠地下水来源于何处?与黑河流域具有什么样的水文关系?这是长期困扰中外研究者的谜题。本书基于水文地质学的科学理论和方法,综合一系列最新调查观测成果,全面研究总结巴丹吉林沙漠的水文地质条件,取得了新的认识,确定了该沙漠地下水循环模式及其与黑河流域下游的关系。

本书可供地质学、水文学、地理科学领域的科技工作者使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

巴丹吉林沙漠的水文地质条件及地下水循环模式 / 王旭升等著. —北京: 龙门书局, 2019. 6

(黑河流域生态-水文过程集成研究)

国家出版基金项目 “十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-5088-5598-1

I. ①巴… II. ①王… III. ①巴丹吉林沙漠-水文地质条件-研究②巴丹吉林沙漠-地下水资源-水循环-研究 IV. ①P641

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 113964 号

责任编辑: 李晓娟 / 责任校对: 樊雅琼

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 黄华斌

科学出版社 龙门书局 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2019 年 6 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2019 年 6 月第一次印刷 印张: 13 插页: 2

字数: 350 000

定价: 168.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

本书由以下项目资助

国家自然科学基金重大研究计划“黑河流域生态-水文过程集成研究”重点支持项目  
“巴丹吉林沙漠地下水循环机理及其对沙漠湿地生态的支撑作用研究”  
(91125024)



## 《黑河流域生态-水文过程集成研究》编委会

主 编 程国栋

副主编 傅伯杰 宋长青 肖洪浪 李秀彬

编 委 (按姓氏笔画排序)

于静洁 王 建 王 毅 王忠静

王彦辉 邓祥征 延晓冬 刘世荣

刘俊国 安黎哲 苏培玺 李 双

李 新 李小雁 杨大文 杨文娟

肖生春 肖笃宁 吴炳方 冷疏影

张大伟 张甘霖 张廷军 周成虎

郑 一 郑元润 郑春苗 胡晓农

柳钦火 贺缠生 贾 立 夏 军

柴育成 徐宗学 康绍忠 尉永平

颌耀文 蒋晓辉 谢正辉 熊 喆

《巴丹吉林沙漠的水文地质条件及地下水循环模式》  
撰写委员会

主 笔 王旭升 胡晓农

成 员 金晓媚 侯立柱 钱荣毅

# 总 序

20 世纪后半叶以来, 陆地表层系统研究成为地球系统中重要的研究领域。流域是自然界的基本单元, 又具有陆地表层系统所有的复杂性, 是适合开展陆地表层地球系统科学实践的绝佳单元, 流域科学是流域尺度上的地球系统科学。流域内, 水是主线。水资源短缺所引发的生产、生活和生态等问题引起国际社会的高度重视; 与此同时, 以流域为研究对象的流域科学也日益受到关注, 研究的重点逐渐转向以流域为单元的生态-水文过程集成研究。

我国的内陆河流域占全国陆地面积 1/3, 集中分布在西北干旱区。水资源短缺、生态环境恶化问题日益严峻, 引起政府和学术界的极大关注。十几年来, 国家先后投入巨资进行生态环境治理, 缓解经济社会发展的水资源需求与生态环境保护间日益激化的矛盾。水资源是联系经济发展和生态环境建设的纽带, 理解水资源问题是解决水与生态之间矛盾的核心。面对区域发展对科学的需求和学科自身发展的需要, 开展内陆河流域生态-水文过程集成研究, 旨在从水-生态-经济的角度为管好水、用好水提供科学依据。

国家自然科学基金重大研究计划, 是为了利于集成不同学科背景、不同学术思想和不同层次的项目, 形成具有统一目标的项目群, 给予相对长期的资助; 重大研究计划坚持在顶层设计下自由申请, 针对核心科学问题, 以提高我国基础研究在具有重要科学意义的研究方向上的自主创新、源头创新能力。流域生态-水文过程集成研究面临认识复杂系统、实现尺度转换和模拟人-自然系统协同演进等困难, 这些困难的核心是方法论的困难。为了解决这些困难, 更好地理解 and 预测流域复杂系统的行为, 同时服务于流域可持续发展, 国家自然科学基金 2010 年度重大研究计划“黑河流域生态-水文过程集成研究”(以下简称黑河计划) 启动, 执行期为 2011~2018 年。

该重大研究计划以我国黑河流域为典型研究区, 从系统论思维角度出发, 探讨我国干旱区内陆河流域生态-水-经济的相互联系。通过黑河计划集成研究, 建立我国内陆河流域科学观测-试验、数据-模拟研究平台, 认识内陆河流域生态系统与水文系统相互作用的过程和机理, 提高内陆河流域水-生态-经济系统演变的综合分析 with 预测预报能力, 为国家内陆河流域水安全、生态安全以及经济的可持续发展提供基础理论和科技支撑, 形成干旱区内陆河流域研究的方法、技术体系, 使我国流域生态水文研究进入国际先进行列。

为实现上述科学目标，黑河计划集中多学科的队伍和研究手段，建立了联结观测、试验、模拟、情景分析以及决策支持等科学研究各个环节的“以水为中心的过程模拟集成研究平台”。该平台以流域为单元，以生态-水文过程的分布式模拟为核心，重视生态、大气、水文及人文等过程特征尺度的数据转换和同化以及不确定性问题的处理。按模型驱动数据集、参数数据集及验证数据集建设的要求，布设野外地面观测和遥感观测，开展典型流域的地空同步实验。依托该平台，围绕以下四个方面的核心科学问题开展交叉研究：

①干旱环境下植物水分利用效率及其对水分胁迫的适应机制；②地表-地下水相互作用机理及其生态水文效应；③不同尺度生态-水文过程机理与尺度转换方法；④气候变化和人类活动影响下流域生态-水文过程的响应机制。

黑河计划强化顶层设计，突出集成特点；在充分发挥指导专家组作用的基础上特邀项目跟踪专家，实施过程管理；建立数据平台，推动数据共享；对有创新苗头的项目和关键项目给予延续资助，培养新的生长点；重视学术交流，开展“国际集成”。完成的项目，涵盖了地球科学的地理学、地质学、地球化学、大气科学以及生命科学的植物学、生态学、微生物学、分子生物学等学科与研究领域，充分体现了重大研究计划多学科、交叉与融合的协同攻关特色。

经过连续八年的攻关，黑河计划在生态水文观测科学数据、流域生态-水文过程耦合机理、地表水-地下水耦合模型、植物对水分胁迫的适应机制、绿洲系统的水资源利用效率、荒漠植被的生态需水及气候变化和人类活动对水资源演变的影响机制等方面，都取得了突破性的进展，正在搭起整体和还原方法之间的桥梁，构建起一个兼顾硬集成和软集成，既考虑自然系统又考虑人文系统，并在实践上可操作的研究方法体系，同时产出了一批国际瞩目的研究成果，在国际同行中产生了较大的影响。

该系列丛书就是在这些成果的基础上，进一步集成、凝练、提升形成的。

作为地学领域中第一个内陆河方面的国家自然科学基金重大研究计划，黑河计划不仅培育了一支致力于中国内陆河流域环境和生态科学研究队伍，取得了丰硕的科研成果，也探索出了与这一新型科研组织形式相适应的管理模式。这要感谢黑河计划各项目组、科学指导与评估专家组及为此付出辛勤劳动的管理团队。在此，谨向他们表示诚挚的谢意！



2018年9月

# 序

我国西北地区光热条件优越、矿产资源丰富，但是受气候干旱与水资源短缺的影响，也长期面临荒漠化、盐碱化、沙尘暴等生态环境问题。科学合理地规划利用水资源，是保持西北地区社会经济可持续发展的关键对策，不同区域既要协调用水，又要留下足够的生态用水。党中央和国家各部门对西北地区的经济发展与环境保护都十分重视，“十五”计划以来，投入巨资陆续实施新疆塔里木河流域、黑河流域、石羊河流域、三江源区、甘南和青海湖流域等地区的生态环境治理和水资源保护工程。作为古丝绸之路的发源地，我国西部地区在实施新时代“一带一路”倡议上具有重要的支撑作用，防治沙漠化、进行生态环境与水资源保护的任务更加紧迫。为此，需要大力发展面向干旱区的流域科学，从流域单元的整体角度认识生态-水文过程的关键机理，产生对水资源管理及生态环境保护具有关键指导作用的新知识和新理论。

干旱区流域具有相对复杂的地表水-地下水转化关系。关于这一点，30多年来科学家在研究我国第二大内陆河流域——黑河流域的过程中，已经深有体会。来自祁连山的河流在进入河西走廊的山前冲洪积扇时，发生大规模的渗漏，接近1/3的地表水转化为地下水，到平原区地下水又重新溢出形成地表水。在黑河流域的下游盆地，这种地表水-地下水转化过程再次发生，而且在时空分布上更加复杂。作为黑河流域地表水的最终消耗地，额济纳旗地区的水资源和生态环境不仅仅依赖于黑河的地表水文过程，还受到区域地下水位升降的强烈影响。因此，研究查明水文地质条件是算清黑河流域水账的一个重要前提。

2010年度国家自然科学基金重大研究计划“黑河流域生态-水文过程集成研究”启动，按不同阶段分培育项目、重点支持项目与集成项目三个层次对相关的研究进行资助，涉及地理、大气、生态、水利、管理等多个学科。其中，中国地质大学（北京）的国家“千人计划”特聘学者胡晓农教授牵头组织水文地质团队，承担“巴丹吉林沙漠地下水循环机理及其对沙漠湿地生态的支撑作用研究”这一重点支持项目。这个项目的设立是有意义的，因为巴丹吉林沙漠正是黑河流域下游水账计算中存在的盲点之一，应该想办法解决。过去有学者认为黑河流域祁连山上游的水源可直接通过深大断裂输送到巴丹吉林沙漠，继而向下游的额济纳旗盆地输送大量地下水，也有学者持相反的观点，认为巴丹吉林沙漠的地下水来源于黑河下游的河道渗漏补给。传统的黑河流域范围限定在巴丹吉林沙漠

的西侧边缘，2010年根据宏观地形对黑河流域的汇水范围进行初步调整，向西扩大北山（马鬃山）在黑河流域的面积，向东把巴丹吉林沙漠及其附近的部分山区划入流域盆地之内。然而，这样做未必能够确保黑河流域的闭合性，可能边界移动过大或某些地方又有不足，因为当时巴丹吉林沙漠地下水的情况仍然是很模糊的。由胡晓农教授、王旭升教授等水文地质专家组成的团队专门对此加以研究，可以推动巴丹吉林沙漠地下水来源之谜与黑河流域-巴丹吉林沙漠水文关系问题的解决。

该书就是这些水文地质专家近几年在巴丹吉林沙漠开展专业调查观测和研究的成果。他们所做的工作是扎实的，成果相当丰富，具有重要的学术和应用价值。首先，该书通过大量的、多方面的基础调查资料全面展示了巴丹吉林沙漠的水文地质特征，证明该沙漠是一个包含巨厚含水层的地下水盆地，而且其中的地下水以侧向径流的方式输送到黑河流域下游地区，主体部分在水文关系上属于黑河流域盆地。其次，作者提出了巴丹吉林沙漠地下水循环的新模式，认为本地大气降水入渗与附近山前侧向径流补给都是地下水的重要来源，发现沙山形成的巨厚包气带具有很强的气候缓冲效应，还发现洼地潜水蒸发耗损量甚至超过湖泊的蒸发耗水量。该书的另一个特色，在于通过长期观测与定量模型相结合，分析了沙漠环境中地下水与湖泊在水量水质方面的相互作用，结论对同类地区的研究具有启发意义。书中认真探讨了巴丹吉林沙漠地下水开发利用的潜力和可能造成的环境影响，对阿拉善右旗的水资源管理意义重大。

综上所述，该专著为我国沙漠水文地质调查研究和黑河流域的集成研究做出了独特的贡献，在此向各位作者表示衷心的祝贺！希望他们能够继续推动干旱区地下水的研究，取得更大成就，为我国西北地区的水资源和生态环境保护贡献科学智慧。



中国科学院院士

2018年5月31日

# 前 言

谈起巴丹吉林沙漠，大多数人都很陌生，甚至不知道它坐落在中国境内，远不如大家对非洲撒哈拉沙漠的了解程度。15年前，本书的作者要么只是听过这个沙漠的名字，要么根本不知道有这个沙漠，谁也没有预料到自己会与阿拉善高原上的巴丹吉林沙漠结缘。然而，只要您第一次进入这个沙漠，看到雄伟的沙山和明镜般的湖泊，就会被它深深地震撼，觉得全世界的人都应该来体验一下。2005年，随着阿拉善沙漠国家地质公园的成立，巴丹吉林沙漠作为其中的一个重要景区逐渐被旅游爱好者所熟悉，入选中国最美沙漠之一。站在沙山之巅俯瞰壮美的湖泊，游客一般会问：“这么多的水是从哪儿来的？”同样的问题其实也困扰着前来考察的一批又一批中外科学家。他们当然知道湖水的水是从地下涌出的，因为茫茫大漠没有河流向这里补水，问题的关键在于地下水又是从哪里来的。大家纷纷开动脑筋，有的认为是几万年前遗留的，还有人说是从青藏高原远道而来，众说纷纭，似乎各有各的道理。令人不解的是，沙漠中的地下水往往甘甜可口，而就在沙漠南部附近的阿拉善右旗行政中心（巴丹吉林镇）打出来的地下水却都是咸苦的。长期严重缺水的局面迫使当地政府来不及等科学家给个最终的说法，就已经在沙漠里建立了水源地，把可饮用的地下淡水抽取出来输送到60km外的城镇。随之，人们开始等待另一个问题的答案：在沙漠里规模化开采地下水，会有什么不良后果吗？

实际上，围绕巴丹吉林沙漠的未解之谜还有很多，必须开展大量的调查观测和深入的研究才能得到科学的解答。2010年度国家自然科学基金重大研究计划“黑河流域生态-水文过程集成研究”启动，弄清楚黑河流域下游荒漠绿洲带与相邻的巴丹吉林沙漠之间的水文关系，是众多科学目标之一。为此，该重大研究计划批准设立“巴丹吉林沙漠地下水循环机理及其对沙漠湿地生态的支撑作用研究”作为重点支持项目（91125024），项目执行期限为2012年1月至2015年12月，由中国地质大学（北京）承担，主持人为国家“千人计划”特聘学者胡晓农教授，本书其他作者为参与该项目的骨干研究人员。通过这个项目的资助，研究者在巴丹吉林沙漠建立了沙丘-湖泊-地下水环境监测站，同时开展了沙漠腹地的区域水文地质勘探调查和地下水循环模式的深入研究。项目组还与北京大学、香港大学、中国科学院以及美国佛罗里达州立大学和康涅狄格大学的研究者开展联合观测调查，对一些焦点问题进行了合作研究。2012~2014年，中国科学院地质与地球物理研究

所承担了国家国防科技工业局（简称国防科工局）高放废物地质处置研究开发项目“内蒙阿拉善高放废物地质处置备选场址预选及评价研究”，委托中国地质大学（北京）对涉及巴丹吉林沙漠的阿拉善右旗地区进行了区域地下水系统调查研究。

本书就是在总结吸收上述科研工作成果的基础上完成的，共分8章。第1章主要介绍巴丹吉林沙漠科学研究的历史和现状，细述关于沙漠水分来源的三个典型假说，明确沙漠地下水研究方面存在的科学问题。第2章阐述巴丹吉林沙漠的地理、气候与地质背景特征，将沙漠湖泊的分布归纳在6个湖泊群之中，根据最新的基础地质研究指出巴丹吉林沙漠是银根—额济纳旗盆地的一部分。第3章从一般方法的角度研究讨论沙漠水文地质调查的方案，详细说明在巴丹吉林沙漠开展调查观测的各种技术手段及其针对的关键科学问题，介绍以往深部地质勘探与区域水化学调查得到的基本认识。第4章根据最新的调查观测成果阐述巴丹吉林沙漠区域尺度上的含水介质特征，进行详细的分类研究和水文地质单元划分，并且分析沙丘包气带的物质结构与水分特征，从水动力机理上辨析了深大断裂导水理论的缺陷。第5章专门针对巴丹吉林沙漠地下水来源问题，从山前侧向径流、沙丘包气带水、水体同位素和咸淡水分布四个角度提出新的认识和证据，肯定了邻近山区侧向径流与本地降水入渗对地下水的补给作用，强调对地下水补给的认识必须考虑较大的时空尺度。第6章构建巴丹吉林沙漠的地下水循环模式，开展多层结构含水层区域地下水流的数值模拟，在此基础上划分出11个相对独立的地下水系统并进行水均衡分析，对沙漠地下水资源属性、演化趋势和可利用性也进行了研究。第7章系统性研究巴丹吉林沙漠地下水与湖泊的相互作用，分别建立封闭湖泊与半封闭湖泊的水均衡与盐分动态模型，定量解释湖水位和盐分多年变化机理，从三维空间角度分析湖泊群对地下水流场的扰动作用。第8章从古文献记载出发，回顾认识黑河流域与巴丹吉林沙漠水文关系的曲折历史，以最新的调查研究为基础，从含水层介质连续性和地下水动力学连续性上证明巴丹吉林沙漠与黑河流域下游盆地存在水力联系，评估发现巴丹吉林沙漠每年向黑河流域下游贡献的水量超过1亿 $\text{m}^3$ ，并进一步提出黑河流域边界东移的新方案。书中对一些有争议的或公众关切的问题没有采取回避的态度，而是从专业的角度提出我们的分析和判断，力求科学严谨，做到既有理论依据又有数据资料支撑。尽管如此，某些结论可能还受到我们认识上局限性的影响，存在纰漏，欢迎广大同行批评指正。

全书的结构安排由王旭升设计，各章节由不同作者分工合作完成。其中：第1章由王旭升、胡晓农撰写；第2章由金晓媚、王旭升、胡晓农撰写；第3章由王旭升、金晓媚、钱荣毅撰写；第4章由王旭升、胡晓农、侯立柱撰写；第5章由胡晓农、王旭升、侯立柱撰写；第6~8章由王旭升、胡晓农撰写。书中的部分图件由博士生周燕怡、韩鹏飞、巩艳萍、吴秀杰协助绘制，硕士生姜赫男也对部分图表制作有贡献。

在执行国家自然科学基金项目“巴丹吉林沙漠地下水循环机理及其对沙漠湿地生态的

支撑作用研究”的过程中，我们的研究工作得到中国科学院院士程国栋研究员、国家“千人计划”特聘专家郑春苗教授、中国科学院肖洪浪研究员和李新研究员的特别关注与指导，这对完成本书起到了巨大的推动作用。中国科学院的李国敏研究员是国防科工局项目“内蒙阿拉善高放废物地质处置备选场址预选及评价研究”的负责人，对我们在阿拉善右旗沙漠地区的水文地质调查工作给予了大力支持，遗憾的是他在2015年突然去世，我们只能以本书告慰他的关心和付出。中国地质大学（北京）蒋小伟教授也通过全国优秀博士学位论文作者专项资金对我们的部分研究工作进行了资助。美国佛罗里达州立大学的王杨（Wang Yang）教授和康涅狄格大学的刘澜波（Liu Lanbo）教授分别在沙漠水体同位素与地球物理探测方面提供了协助与合作支持。香港大学的焦赳赳（Jiao J. Jimmy）教授、北京大学的刘杰副教授、中国科学院的周剑副研究员带领他们的团队与我们在巴丹吉林沙漠进行了联合调查观测，提出了很多建设性的意见，为本书的研究贡献了一部分宝贵的数据资料。在本书撰写过程中，德国柏林自由大学的Dieter Jäkel和Jürgen Hofmann两位先生慷慨地提供了他们早期研究巴丹吉林沙漠的部分资料。我们的研究工作还得到很多同行的指导和帮助，主要包括：中国地质大学（北京）的万力教授、胡伏生教授、王广才教授、曹文炳教授、梁四海副教授、郝春博副教授等；中国地质环境监测院的李文鹏研究员、李海涛教授级高级工程师；西北大学的康卫东教授；中国科学院地质与地球物理研究所的董艳辉副研究员；兰州大学的王乃昂教授；香港大学的罗新博士；荷兰UNESCO-IHE学院的周仰效（Zhou Yangxiao）教授；荷兰Twente大学的苏中波（Su Bob）教授和曾亦键（Zeng Yijian）博士。参与巴丹吉林沙漠野外调查与试验观测的还有大量研究生，包括博士生陈添斐、张竞、李建、周燕怡、韩鹏飞、巩艳萍、吴秀杰、谢洪宇、齐蕊等，硕士生钱静、许飞、贾凤超、卢会婷、欧阳波罗、宋斌、张德朋、柯珂、高萌萌、商洁、代建翔、郑瑞兰、张高强、董岩岩等，他们在艰苦的环境中付出了宝贵的体力和智力劳动。阿拉善右旗的王永芳先生以及当地很多牧民为我们在巴丹吉林沙漠的野外工作提供了热情周到的后勤保障服务。没有他们的帮助，我们这么多年的沙漠之旅是不可能安全顺利地进行的。此外，还有很多帮助和支持我们工作的人士，无法一一列举。

在此，作者诚挚地向以上所有为我们科研工作提供支持的机构和个人表示感谢！特别感谢程国栋院士在百忙之中为本书作序！同时也要感谢科学出版社李晓娟女士在书稿编辑和出版事宜方面的大力协助！

作 者

2018年4月于北京

# 目 录

总序	
序	
前言	
第 1 章 神秘面纱、探秘队伍与科学假说 .....	1
1.1 巴丹吉林沙漠的神秘面纱 .....	1
1.2 科学考察研究的先锋队 .....	3
1.3 关于沙漠水分来源的若干假说 .....	7
1.4 沙漠地下水研究亟待解决的科学问题 .....	13
第 2 章 区域地理、气候与地质背景 .....	14
2.1 自然地理特征 .....	14
2.2 气候条件和气象特征 .....	18
2.3 地表水分布特征 .....	22
2.4 阿拉善地层与地质构造 .....	25
第 3 章 沙漠水文地质调查研究方法 .....	31
3.1 水文地质学的研究对象、理论和方法概述 .....	31
3.2 问题导向的沙漠水文地质调查方案 .....	40
3.3 以往地球物理和水化学调查成果 .....	61
第 4 章 区域尺度含水介质特征 .....	66
4.1 含水层的类型和特点 .....	66
4.2 水文地质单元划分 .....	72
4.3 沙丘包气带特征 .....	79
4.4 阿拉善地区断裂带的水文地质意义 .....	84
第 5 章 地下水来源的新认识和证据 .....	86
5.1 地下水补给的时空尺度问题 .....	86
5.2 从地下水流向判断山前侧向径流补给 .....	87
5.3 沙丘包气带水下渗补给模式的推测 .....	91
5.4 水体同位素蒸发效应对水分来源的指示意义 .....	102

5.5 咸淡水分布的指示意义 .....	106
<b>第6章 区域地下水循环模式与水资源属性 .....</b>	<b>108</b>
6.1 巴丹吉林沙漠地下水循环模式的构建 .....	108
6.2 区域地下水流场的模拟分析 .....	110
6.3 地下水流系统分区及其水均衡特征 .....	117
6.4 地下水资源的属性与演化趋势 .....	121
6.5 地下水资源可利用性初探 .....	124
<b>第7章 地下水与湖泊的相互作用 .....</b>	<b>127</b>
7.1 地下水向湖泊的排泄 .....	127
7.2 封闭盐湖的水盐动态变化 .....	136
7.3 半封闭湖泊的水盐均衡模式 .....	147
7.4 湖泊群对地下水流场的扰动作用 .....	155
<b>第8章 巴丹吉林沙漠与黑河流域的水文关系 .....</b>	<b>165</b>
8.1 从《水经注》说起 .....	165
8.2 水力联系的基础条件 .....	169
8.3 巴丹吉林沙漠对黑河下游盆地的水量贡献 .....	173
8.4 黑河流域的东部边界问题 .....	176
<b>参考文献 .....</b>	<b>180</b>
<b>附录 .....</b>	<b>189</b>
<b>索引 .....</b>	<b>193</b>

## 第 1 章 | 神秘面纱、探秘队伍与科学假说

### 1.1 巴丹吉林沙漠的神秘面纱

《中国国家地理》在 2005 年举办了一次“中国最美的地方”评选活动，按照大山、湖泊、冰川、沙漠等类型分别评选最美的 5~10 个景点（刘亭文，2005）。其中，在 5 个最美的沙漠中，巴丹吉林沙漠腹地排第 1 名（董培勤和高东风，2005）。从规模上来讲，巴丹吉林沙漠的面积还不到塔克拉玛干沙漠（我国最大的沙漠）的 1/6，何以会成为最美的沙漠呢？因为这里有极为高大的沙山，有星罗棋布的湖泊，还有徜徉在湖边湿地草滩的羊群，它们组成了巴丹吉林沙漠独特的壮美风景。笼罩在巴丹吉林沙漠壮美风景背后的，是它的神秘面纱：为什么有世界上相对高度最大的沙山？为什么有这么多的湖泊存在于如此干旱的沙漠里？这里的水是从哪里来的？诸如此类的问题增添了巴丹吉林沙漠的神秘感。

巴丹吉林沙漠密集分布复合型新月形沙丘，沙丘与洼地组合形成波浪状起伏的地貌。相对附近的洼地和湖泊，沙山一般高 200~300m（图 1-1），局部高度达到 400~500m。其中，位于沙漠腹地的必鲁图沙山最高，被称为沙漠中的“珠穆朗玛峰”。沙丘排列而成的沙垄总体走向为北东 30°~40°，迎风坡较陡，最大坡度可达 27°，反映了当地气候带西北风的长期作用（朱震达等，1980）。这里的沙山为什么如此高大？地理学界对这个问题还没有形成统一的解答。不少学者认为沙山下部原本就有隆起的基底（王涛，1990），但证据不足。从地质背景、沙山形态与风场发育关系上分析，王涛（1990）认为高大沙山是在不同历史气候时期经历多次固定叠加形成的，而且与东部山脉对西北风的阻隔有关。

常年有水的湖泊在世界各地的沙漠中并不罕见，然而巴丹吉林沙漠的独特之处在于湖泊的数量多、分布具有一定的规则，而且很多湖泊具有较大的规模。在 20 世纪 70 年代，研究者统计的巴丹吉林沙漠湖泊数量为 144 个（朱震达等，1980）。近年来研究者利用遥感数据识别的湖泊为 78~109 个，冬春季较多，夏秋季较少（朱金峰等，2011；金晓媚等，2014）。这些湖泊集中在沙漠东南部的高大沙山之间，大小不一，少数面积超过 1km<sup>2</sup>。它们近似呈棋盘状分布，显然与沙丘链的排列有关系。这些湖泊是什么时候开始出现在巴丹吉林沙漠的？与沙山的形成是什么关系？湖泊的水是从哪里来的？最终湖泊会不会全部消失？这些问题目前在科学界没有公认的解答。

巴丹吉林沙漠的湖泊大部分为盐湖，即湖水的溶解性总固体（TDS）大于 35g/L，只有极少数小型湖泊是微咸水湖或淡水湖。这说明该沙漠中的湖泊大多数处于长期的封闭状态，没有地表水的流入和流出，在蒸发积盐作用下演变成盐湖。这些盐湖在某个历史时期

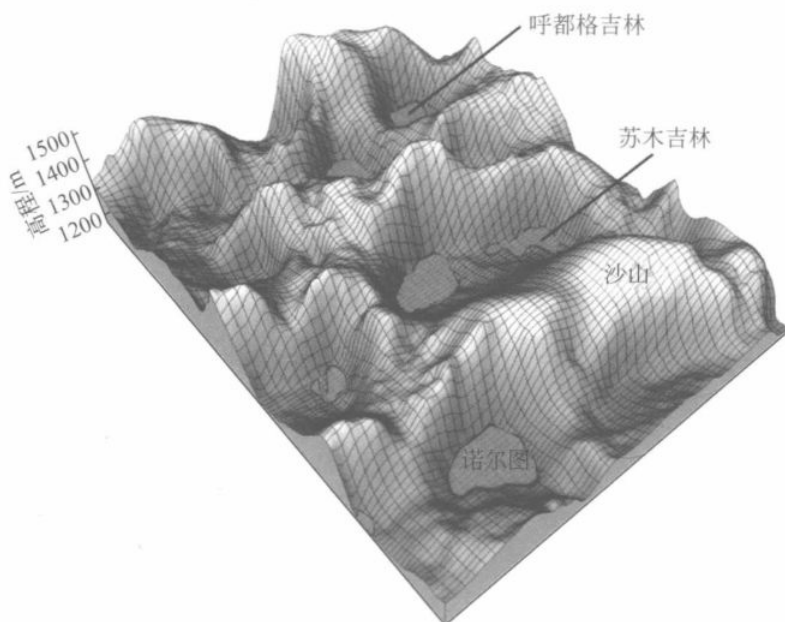


图 1-1 巴丹吉林沙漠局部三维地形  
诺尔图、苏木吉林和呼都格吉林为湖泊名称

是不是淡水湖？经历多长时间变成盐湖？这也属于未解之谜。而且，为什么有些湖中的水又是微咸水或淡水呢？它们会不会演变为盐湖？例如，作为巴丹吉林沙漠地质公园的一个著名景点，巴丹东湖 TDS 约为  $1.8\text{g/L}$ （杨小平，2002），属于微咸水湖，水草茂盛，还有鱼群生长。一旦将来巴丹东湖变得越来越咸，类似风景也会逐渐消失。更加奇怪的是，就在离巴丹东湖不到 200m 远的巴丹西湖，其湖水 TDS 接近  $400\text{g/L}$ （杨小平，2002）。为什么相隔如此之近的两个湖泊盐分浓度却相差如此之大？巴丹东湖会不会最终变成和巴丹西湖一样的盐湖？对于这些问题，人们目前还没有找到明确的答案。

如果没有淡水，沙漠和盐湖只会是死亡之海，不会有羊群和骆驼，更不会有牧民生活在那里。实际上，在巴丹吉林沙漠的很多湖泊附近，都有牧民长期居住从事畜牧业（现今多从事沙漠旅游服务）。牧民在湖边凿井，获取淡水用于日常所需。当地有可饮用的井水，说明存在于湖岸的地下水为淡水。除此之外，人们也可以在湖边的草滩上发现一些甘甜的泉水，从泉口源源不断地流出地下淡水，为牲畜和野生动物提供了饮用水源。在苏木吉林（又被称为苏敏吉林），还有一座修建于 1755 年的古庙坐落在湖岸，清朝时曾有数十名喇嘛在此诵经，生活用水靠的就是紧贴湖边的一口淡水井。该井中水面比湖面高，地下水至今尚可自然涌出，流到湖中。在这 200 多年里，苏木吉林的盐湖水并没有侵蚀井中的地下水，地下水也没有停止涌出，可见地下水的来源和环境条件都是相当稳定的。从现象上来讲，这些地下水应当隐藏在高大的沙山下，向着湖泊持续流动，抵抗着沙漠湖泊的巨大蒸发量，成为支撑沙漠生态系统不可替代的基础资源。那么，沙山之中的地下水又来自于哪里？会不会流干？会不会变成咸水？这些问题，可能是巴丹吉林沙漠最为隐秘、最难以解决的问题。