



沙丘水非平衡运移机理 及开发利用研究

张惠昌 石培泽 武秀珍 著

地震出版社

国家自然科学基金委员会 资助
西部资源环境科学研究中心

沙丘水非平衡运移机理 及开发利用研究

张惠昌 石培泽 武秀珍 著

地震出版社

1998

内 容 提 要

本书是兰州大学完成国家自然科学基金资助和西部资源环境科学研究中心资助项目的科学研究成果。它首次运用能量场和温度场系统研究沙丘水分运移特点。提出干沙屏蔽层作用机理；既重视沙丘液态水运移、又重视沙丘气态水运移机理的热力学研究；沙丘内部凝结水的形成及其重要意义；降水入渗沙丘内部后的积累与消耗、沙丘水与地下水的相互补给，及其对沙漠治理的作用等重要问题。该书的理论与实践将对沙漠研究、沙漠治理、防沙固沙、改善沙漠生态环境起到指导作用。

本书适于从事水文地质、农田水利、生态保护、环境工程等领域的科技工作者及有关大专院校师生、研究生阅读参考。

沙丘水非平衡运移机理 及开发利用研究

张德昌 石培泽 *武秀珍 著

责任编辑 商宏宽
责任校对 耿 艳

地 震 出 版 社 出版发行

北京民族学院南路9号

中国地质大学轻印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

*

787×1092 1/16 9.625印张 1插页 247千字

1998年10月第一版 1998年10月第一次印刷

印数 001—450

ISBN 7-5028-1588-0/P·968

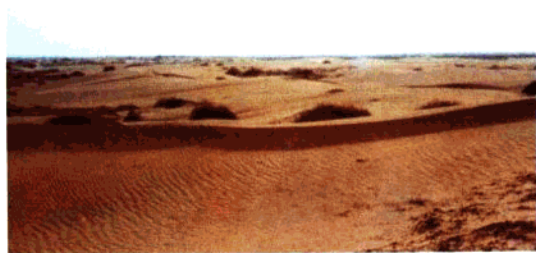
(2031) 定价：15.00元



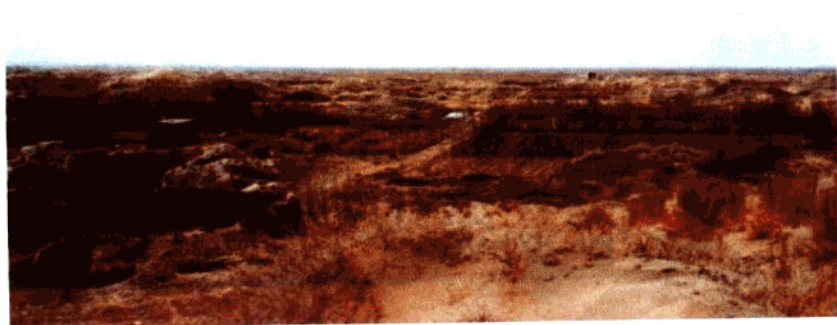
▲ 腾沙跃“海”(本书作者，左张惠昌，右石培泽)



▲ 天然沙生植物覆盖着的沙丘



▲ 腾格里沙漠西南缘



▲ 盖井实验场全景



▲ 正在活化的沙丘



▲ 麦草方格沙障在布设中



▲ 种植试验沙丘全景

▼ 治理后的沙丘(植被主要为梭梭、拐枣)



封底: 上图 沙海人家——科技示范户 左下 治沙植物——毛条 右下 治沙植物——梭梭

序

沙漠是人类未来的土地资源和水资源的储备地，它将为人类的持续发展提供生产和生活物质（如能源、轻工业原料、食物、水果、饲料和纤维等），从而满足人口日益增长的需要。沙丘治理和开发利用是人类向灾害环境争夺生存空间和资源，造福子孙后代的战略决策，是宏伟的改善生态环境，发展沙区经济的系统工程。它涉及面广，任务艰巨、难度很大，所以必须明智地实施均衡管理和合理地使用与改善天然水资源、土地资源和动植物资源及能源，才能达到改善沙区生态环境，发展沙区经济之目的。

我国沙漠（包括戈壁和沙漠化土地）总面积为 $153.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，约占全国土地总面积的 15.9%。而其中沙漠总面积就有 $59.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，流动沙丘占 62.4%，半固定、固定沙丘占 33.6%，风蚀地占 4%。沙漠地区大都在内陆河下游，有限的水资源均在中上游被工农业所利用，而制止沙漠的扩张几乎没有方便而经济的外来水资源可资利用。但是沙漠的入侵已使大片良田被吞噬，全国有近 4 亿人口受到灾害环境的危害，每年因风沙危害造成的直接经济损失达 45 亿元。这一严峻的事实是刻不容缓非治理不可的现实问题。

在极端干旱的沙漠地区，如何充分发掘一切可以利用的水资源治理沙漠，防止沙漠入侵呢？根据我国实际情况，必须另辟新路来解决这一难题。作者在“七五”期间，运用非饱和水能量场的零通量面方法成功地完成了地矿部重点科技项目——腾格里沙漠边缘及其邻近绿洲包气带水分运移研究，为内陆干旱区的水资源开发，生态环境的保护积累了必不可少的经验，初步建立了基础理论和更新了思维。

沙丘水是非饱和水的特殊存在形式，沙丘水是改造沙害环境第一可选择的水源。研究中引用能量场和温度场研究沙丘水分的运移机理。并在沙丘水的水均衡研究及沙丘治理和开发利用等方面取得重要成果，尤其是明确推导出反映水分势能梯度作用下的液态水和汽态水通量及温度梯度作用下的液态水和汽态水通量四组参量组合，解决了势能与温度梯度作用下的水分运移机理。上述研究成果表明，对沙丘水运移研究，沙丘水均衡计算、干沙屏蔽层作用机理研究等均属首次研究并有突破性进展。

《沙丘水非平衡运移机理及开发利用研究》一书对沙丘水分研究的理论方法和测试技术等方面进行了系统深入的研究，是沙漠领域内的最新研究成果。本书的出版将对沙漠研究、沙漠治理、防沙固沙起到推动作用，具有重要意义。

为此，将此书介绍给水文地质、自然地理、水土保持、资源与环境保护、农业、林业和沙漠研究工作者，期望在相关领域的研究和应用工作中将会有理论参考和实际应用价值。



1997. 5. 12

前 言

非饱和带是维系自然环境和生态平衡的重要组成部分，它与人类的生活和生产活动有着极其密切的关系。非饱和带是由固、液、气三相物质组成，其中的液态水和汽态水是维持非饱和带自然环境和生态平衡的最积极的因素。非饱和水是地下水的存在形式之一，与饱和带水一起构成地下水的全部存在形式。它是联接地表水（雨水和灌溉水）和地下水的纽带，是陆地上植物和作物赖以生存的源泉。大气降水—地表水—非饱和带水—地下水（饱和带水）之间的相互转化关系是农业土壤、水文、水文地质、水土保持、生态环境等领域都与非饱和带水分运动研究分不开的。

近年来，经济发达国家（如美国、英国、法国、日本、荷兰等）都十分注意非饱和带水的研究，而处于干旱、半干旱地区的国家尤为重视。我国开始系统研究非饱和带水是1983年地矿部水文地质工程地质研究所执行国际合作项目，引进了零通量面方法并成功地运用到华北平原浅层地下水入渗补给量的研究之中，之后作者将该方法运用到石羊河流域水文地质参数的研究并发展引进温度场成功地完成了地矿部“七五”重点科技项目《腾格里沙漠边缘及其邻近绿洲包气带水分运移研究》（编号86015），获得了较为符合实地条件的参数，从而提高了石羊河流域地下水资源评价的精度，为进一步研究提供了必要的理论和实践资料，也为西北内陆干旱区的水资源开发利用、生态环境保护积累了必不可少的基础依据和新的思维，给今后研究工作指出了方向。

干旱区水资源匮乏，但如果做到合理利用，确能收到显著的经济效益和环境效益。而在极端干旱的沙漠地区如何充分发掘一切可以利用的水资源更是治理沙漠，固定沙丘，防止沙漠入侵的重大课题。根据我国实际条件，目前不可能大规模开发地下水资源用于改造沙漠，因而，必须另辟新路来解决这一难题。

这一瞩目的课题被水资源和沙漠专家长期所关注，所以研究沙丘水分运移规律与沙生植物的关系，对防沙固沙改造沙漠具有重大科学意义和减灾护田护路的实际意义。

兰州沙漠研究所的专家，在沙坡头无地下水支持的高大深厚沙漠区，经过几代人的艰辛努力，总结出：阻固结合，以固为主，机械固沙与生物固沙结合，以生物固沙为主的防护模式，成功地实现无灌溉条件下植物固沙的创举。

沙丘水是非饱和水的特殊存在形式，因而将研究非饱和水的理论和先进手段拓宽引用到研究沙丘水的存在及其形成运移机理就显得非常重要。

荣幸的是这项研究得到了国家自然科学基金资助（批准号49272143），通过三年（1993～1995年）的实地监测研究获得大量第一手资料。鉴于国内尚无系统研究沙丘水分运移机理及开发利用的著作出版，我课题组在认真总结第一手资料的基础上，撰写了本书。本书首次系统介绍了沙丘水分运移机理研究的新理论和新方法。此项课题完成单位：兰州大学、武威地区水利科学研究所。

全书共分八章：第一章概述中国沙漠的一般特征，第二章介绍盖井试验场地环境，第三章介绍沙丘水分运动参数测定，第四章介绍沙丘水分变化规律，第五章介绍沙丘温度场变化

规律，第六章介绍沙丘水分势能变化规律，第七章介绍沙丘凝结水的形成机理，第八章介绍沙丘治理和开发利用。

本书由张惠昌执笔，武秀珍、易立新、石培泽完成数据处理和图表工作，马金珠、钱鞠、艾学山参加部分数据处理，张惠昌、石培泽、武秀珍等共同研究和修改。该书首次反映沙丘水分运移机理及开发利用研究领域取得的最新成果，是课题组集体努力合作的成果。参加工作的有张惠昌、石培泽、武秀珍、俞发宏、马金珠、易立新、杨秀英、钱鞠和艾学山等同志。在课题研究过程中，一直得到武威地区水利处领导和左凤章高级工程师的大力支持和帮助。

在编写此书过程中得到西部资源环境科学研究中心的基金资助(编号 08)。在本书出版期间，荣幸地受到陈梦熊院士的关怀，并为本书撰写了序言。在此一并表示由衷的感谢。

书中缺点错误之处，恳请读者批评指正。

目 录

1 中国沙漠一般特征概述	(1)
1.1 中国沙漠分布的一般特征	(1)
1.2 中国沙漠的一般自然特点	(3)
1.3 中国沙漠形成特征	(3)
1.4 沙丘水分运移机理研究的意义	(4)
2 试验场地环境概述	(6)
2.1 自然环境	(6)
2.2 地质水文地质特征	(7)
2.2.1 区域地质构造	(7)
2.2.2 水文地质特征	(9)
2.3 沙丘的一般特征	(10)
2.3.1 中国沙漠沙颗粒的一般特征	(10)
2.3.2 盖井观测场的特征	(11)
2.4 盖井观测场仪器安装和质量评价	(14)
2.4.1 ZG-1型中子水分密度仪质量评价	(14)
2.4.2 WM-1型负压计质量评价	(14)
2.4.3 电子测温器	(15)
2.4.4 仪器安装	(15)
3 沙丘水分运动参数测定简述	(16)
3.1 概述	(16)
3.2 水分特征曲线的测定	(16)
3.2.1 水分特征曲线的测定	(16)
3.2.2 实验分析	(17)
3.2.3 水分特征曲线的滞后现象	(18)
3.3 非饱和导水率的测定	(19)
3.3.1 瞬时剖面法	(19)
3.3.2 实验装置和实验程序	(20)
3.3.3 资料整理及 $K(\theta)$ 值的计算	(20)
3.3.4 影响导水率 $K(\theta)$ 的因素分析	(20)
3.4 非饱和扩散率的测定	(21)
3.4.1 非稳定流水平土柱入渗法	(21)
3.4.2 实验装置和实验程序	(21)
3.4.3 实验成果分析	(22)
4 沙丘水分变化规律	(24)

4.1	沙丘水分赋存形态	(24)
4.1.1	沙丘水的数量表示	(24)
4.1.2	沙丘水的赋存形态	(25)
4.1.3	水分特征常数	(26)
4.1.4	几点说明	(26)
4.2	沙丘水分含量的分层	(28)
4.2.1	干沙屏蔽层	(28)
4.2.2	凋萎层	(28)
4.2.3	湿沙层	(28)
4.2.4	开始有效层	(29)
4.2.5	很有效层	(29)
4.2.6	毛细水层	(29)
4.3	沙丘含水量的一般变化特征	(29)
4.3.1	沙丘水分动态规律	(29)
4.3.2	沙丘水分动态影响因素分析	(35)
5	沙丘温度场变化规律	(40)
5.1	热通量密度运动态势类型	(40)
5.1.1	沙丘南坡热通量密度运动态势类型	(41)
5.1.2	沙丘北坡热通量密度运动态势类型	(44)
5.2	沙丘温度场的垂直分带	(45)
5.2.1	温度同步变化带	(47)
5.2.2	温度迟后变化带	(47)
5.2.3	温度季节变化带	(47)
5.3	沙丘温度场变化的气象学原理	(49)
6	沙丘水分势能变化规律	(51)
6.1	非饱和水的能态——土水势	(51)
6.1.1	土水势概念的热力学基础	(51)
6.1.2	土水势的分势	(54)
6.2	非饱和土壤水分运动	(57)
6.2.1	非饱和土壤水流运动的达西定律	(57)
6.2.2	非饱和土壤水分运动基本方程	(58)
6.3	非饱和土壤水分运动通量法	(60)
6.3.1	零通量面(ZFP)基本概念与零通量面方法	(61)
6.3.2	定位通量法简介	(66)
6.3.3	表面通量法简介	(67)
6.4	沙丘零通量面形成发育规律	(68)
6.4.1	发散型零通量面 ZFP(D)的形成及发育特征	(68)
6.4.2	收敛型零通量面 ZFP(C)的形成及发育特征	(68)
6.4.3	零通量面(ZFP)变化的影响因素分析	(69)

6.5 沙丘水分势能一般变化特征和垂直分带	(72)
6.5.1 沙丘水分势能的一般变化特征	(72)
6.5.2 沙丘水分势能的垂直分带性	(74)
7 沙丘凝结水形成机理的研究	(76)
7.1 沙丘凝结水的形成特征	(76)
7.1.1 凝结水形成的一般性研究	(76)
7.1.2 沙丘水分运移机理的热力学研究	(80)
7.2 沙丘非饱和水、汽、热流运移的耦合模型	(96)
7.2.1 沙丘非饱和水、汽、热流运移耦合模型	(96)
7.2.2 参数确定	(100)
7.2.3 模拟计算与结果	(107)
7.2.4 有待深入研究的问题	(108)
7.3 沙丘水均衡研究	(112)
7.3.1 均衡期内沙丘蒸发量计算	(112)
7.3.2 潜水补给量计算	(112)
7.3.3 潜水蒸发量的计算	(113)
8 沙丘治理和开发利用	(115)
8.1 主要国家的沙丘治理与保护情况简介	(115)
8.1.1 日本海岸沙丘治理与保护	(115)
8.1.2 埃及沙丘治理与保护	(116)
8.1.3 阿拉伯联合酋长国沙丘治理与保护	(116)
8.1.4 利比亚沙丘治理与保护	(117)
8.1.5 沙特阿拉伯沙丘治理与保护	(117)
8.1.6 以色列沙丘治理与保护	(118)
8.1.7 伊朗沙丘治理与保护	(118)
8.1.8 印度的沙丘治理与保护	(119)
8.1.9 美国沙丘治理与保护	(120)
8.2 植物固沙的可能性研究	(121)
8.2.1 民勤群众的治沙造林的经验介绍	(121)
8.2.2 沙坡头沙丘治理经验的借鉴	(127)
8.2.3 茨湾沙生植物试种情况介绍	(133)
8.3 沙生植物资源的开发利用	(136)
8.3.1 开发沙区产业的意义和目的	(137)
8.3.2 沙生植物资源一般特征	(137)
8.3.3 开发利用前景预测	(140)
参考文献	(142)

1 中国沙漠一般特征概述

1.1 中国沙漠分布的一般特征

所谓沙漠是指分布在干旱荒漠地区的大面积风成沙丘覆盖的沙质荒漠, 也包括了沙漠化土地和半干旱地区的沙地。所谓沙漠化土地是指干旱半干旱地区在人类历史时期内, 由于人为因素和自然条件的影响, 使原非沙漠的地区形成类似沙漠的环境, 这一变化过程称之为沙漠化。沙漠化所影响的范围称之为沙漠化土地。

根据资料, 全国沙漠(包括戈壁和沙漠化土地)总面积为 $153.3 \times 10^4 \text{ km}^2$, 约占全国土地总面积的 15.9%, 其中沙质荒漠 $59.3 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占 39.8%; 石质荒漠(戈壁) $56.9 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占 38.2%; 沙漠化土地大于 $17.6 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占 11.8% 以上; 潜在沙漠化土地大于 $15.2 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占 10.2%。

在沙质荒漠及沙地的总面积中, 流动沙丘占 62.4%, 半固定、固定沙丘占 33.6%, 风蚀地占 4%。以剥蚀作用为主的戈壁占戈壁总面积的 32%, 以洪积作用及洪积-冲积作用为主的戈壁占戈壁总面积的 68%。

沙漠主要分布在新疆、甘肃、青海、宁夏西部及内蒙古西部。而沙漠化土地主要分布在半干旱地区的内蒙古东部、陕西北部及辽宁、吉林、黑龙江三省的西部及干旱地区一些大沙漠边缘等地, 共 11 个省(区) 212 个县(旗), 断续分布绵延 5500km, 严重影响 5000×10^4 人民的生存环境和生活的改善。需要指出的是, 沙漠化土地空间分布的范围, 随着继续强度土地开发利用与持续干旱及风力作用下而逐渐扩大, 根据 50 年代与 70 年代两次航片对比分析估计, 沙漠化土地从原来的 $13.7 \times 10^4 \text{ km}^2$, 增加到目前的 $17.6 \times 10^4 \text{ km}^2$, 近 25 年来增加了 $3.9 \times 10^4 \text{ km}^2$, 每年平均扩大 1560 km^2 。

我国沙漠(包括戈壁)分布特点概述如下:

①多分布在内陆深处, 即乌鞘岭和贺兰山一线以西分布的沙漠占全国沙漠总面积的 90%, 且绝大部分以流动沙丘为主。该线以东的沙漠分布零散, 面积较小, 仅占全国沙漠总面积的 10%, 绝大部分以固定、半固定沙丘为主。

②新疆分布面积最大, 约占全国沙漠面积的 55% 左右, 其次是内蒙古、青海、甘肃、陕西、宁夏、吉林、辽宁和黑龙江等省(表 1-1)。

我国主要沙漠也各有特色。塔克拉玛干沙漠是我国第一大沙漠, 约占沙质荒漠总面积的一半, 是流动沙丘分布最广的沙漠, 达 $27.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。古尔班通古特沙漠是我国第二大沙漠, 是最大的固定、半固定沙漠。巴丹吉林沙漠是第三大沙漠, 也是沙丘最高大的沙漠, 一般高度 200~300m, 最高可达 500m。柴达木盆地的(库木库里)沙漠是风蚀地分布最广的沙漠, 风蚀地面积达 $2.24 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。腾格里沙漠中湖盆草滩占 7%, 残山约占 22%, 沙丘占 71% (其中 93% 是流动沙丘, 7% 为固定、半固定沙丘), 尽管流动沙丘所占面积达 66% 之多, 但被固定、半固定沙丘、湖盆和残山所分割, 对沙漠的治理极为有利, 其中湖盆草滩可作为沙漠治理的基地, 因此, 它是西北开发利用条件较好的沙漠之一。我国十大沙漠基本状况统计

见表 1-2。

表 1-1 中国沙漠（戈壁）分布面积（ 10^4km^2 ）

次序	省（区）	总面积	沙漠（沙丘及风蚀地）	戈壁
1	新疆	71.3	42.0	29.3
2	内蒙古	40.1	21.3	18.8
3	青海	7.5	3.8	3.7
4	甘肃	6.8	1.9	4.9
5	陕西	1.1	1.1	0
6	宁夏	0.65	0.4	0.25
7	吉林	0.36	0.36	0
8	黑龙江	0.26	0.26	0
9	辽宁	0.17	0.17	0
合 计		128.24	71.29	56.95

注：①引用《中国沙漠概论》资料；②上述数字中未包括现代沙漠化土地。

表 1-2 中国主要沙漠的面积（ 10^4km^2 ）

次序	名 称	所在省（区）	面 积	流动沙丘 所占比例/%	固定半固定沙 丘所占比例/%
1	塔克拉玛干沙漠	新疆	33.7	85	15
2	古尔班通古特沙漠	新疆	4.88	3	97
3	巴丹吉林沙漠	内蒙古	4.43	83	17
4	腾格里沙漠	内蒙古、甘肃	4.27	66	5
5	科尔沁沙地	内蒙古、吉林、辽宁	4.23	10	90
6	柴达木盆地沙漠与风蚀地	青海	3.49	70	30
7	毛乌素沙地	内蒙古、宁夏、陕西	3.21	64	36
8	浑善达克沙地	内蒙古	2.14	2	98
9	库姆塔格沙漠	新疆	1.95	100	0
10	乌兰布和沙漠	内蒙古	0.99	39	61

③分布有暖温带（塔克拉玛干沙漠）、温带（准噶尔盆地的沙漠）和高寒带（柴达木盆地沙漠）干旱沙漠；也有温带荒漠草原和半干旱草原地带的沙地（鄂尔多斯沙地西部及东部）；还有温带半湿润草原地带的沙地（科尔沁沙地）所以，各地沙漠（沙地）的自然特征有明显的差异。

④我国沙漠（沙地）除科尔沁沙地分布海拔较低（100~300m）之外，大部沙漠分布在较高的高原及内陆山间盆地中，平均海拔 1000~1800m 之间；青海新疆的沙漠则在 2600m 以上，最高分布在 4000m 左右的高山河谷盆地之中。

1.2 中国沙漠的一般自然特点

中国沙漠有以下自然特点:

1) 气候干旱, 雨量稀少

沙漠区降水量自东向西递减, 内蒙东部和东北平原西部的沙地年降水量在 250~400mm, 宁夏及甘肃西部的阿拉善地区都在 50~150mm, 巴丹吉林沙漠则在 50mm 以下, 新疆东部与南部均在 25mm 以下。与降水量相一致的是东部沙地植物生长较好, 固定及半固定沙丘占绝对优势, 东经 108°以西地区除准噶尔盆地古尔班通古特沙漠降水量 100~200mm, 植物生长较好外, 绝大部分的沙漠都为流动沙丘。蒸发度一般在 1400~3000mm, 甚至更高, 干燥度从东向西逐渐增加, 东部一般 1.5~4.0, 而贺兰山以西为 4.0 以上, 新疆东部和南部则高达 20~60。

2) 热量资源丰富, 气温较差大

全年日照时间在 2500~3000h, 无霜期 120~300d, 大于等于 10℃的积温, 除东部沙地外, 一般在 3000~5000℃。气温变化较大, 平均年温差一般在 30~50℃, 特别是沙漠地表温度变化尤为剧烈, 最高可达 60~80℃。

3) 风沙频繁

风沙日一般在 20~100d 左右, 一般风速 5~6 级以上。沙暴频繁, 如腾格里沙漠边缘的民勤, 1959 年风沙日可达 148d, 其中 3~6 月风沙日高达全月的一半, 持续时间最长可达 17~48h, 一般在 10h 以上。沙暴风速极大, 如 1993 年 5 月 5 日河西地区特大沙暴的风速达 $34\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

4) 沙漠地表起伏较大且不断变化

由于沙丘覆盖致使地面起伏较大, 高大沙丘可达 100~300m, 一般也都在 10~25m, 低矮者也在 5m 以下。活动沙丘在风力作用下都有顺主风方向, 沙丘体向前移动的现象, 但移动速度的大小, 在其他条件相同时, 与沙丘体积有直接的关系, 沙丘愈高大, 移动速度愈慢, 但在水分植被条件较好的地区, 大部为固定半固定沙丘, 移动就不很显著。

5) 沙漠(沙地)下垫面特征

除小部分分布在内陆高原上外, 绝大部分都位于巨大内陆山间盆地之中或河流的下游冲积平原, 沉积着大厚度松散河流冲积或湖积相沙质沉积物, 因而决定着干旱风力作用下的沙漠形成的物质来源; 几乎完全没有当地地表径流所形成的河流, 只有过境河流和冰雪水补给的内陆河流。除东经 108°以东沙区为外流水系外, 其他沙漠区均为内陆水系。

6) 沙漠区的地下水

由于沙漠所处的特殊的地质构造特征, 地表水虽然很缺乏, 但大部分沙漠地区都分布有地下水资源, 如沙漠边缘山前平原潜水; 沙漠内部河谷潜水; 沙漠内部沙丘覆盖下的冲积-湖积层承压水或自流水。

1.3 中国沙漠形成特征

我国沙漠的形成可以概言之有有丰富的沙漠沙性物质来源的地质环境, 在干燥气候的条

件下,人为因素积极影响长期作用发展演化的必然结果。

沙漠是干燥气候的产物,就全球而论,干旱气候区域与纬度、环流因子有关。在南北纬 $15^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 之间,为副热带高压带的控制范围,终年为信风吹刮的区域。副热带大气稳定、温度低、少云寡雨,控制着地球上雨量稀少的干旱区,故而世界上大多沙漠皆位此带,如撒哈拉、阿拉伯、澳大利亚等大沙漠。

我国沙漠(沙地)主要分布在西北、内蒙古温带与暖温带的干旱、半干旱地区,大约是北纬 $35^{\circ}\sim 50^{\circ}$,东经 $75^{\circ}\sim 125^{\circ}$ 之间。造成我国干旱区的主要地理因素是远离海洋和高大的青藏高原阻隔,冬季受西伯利亚-蒙古冷高压控制,气候异常干燥寒冷,夏季高原屏障,湿润季风难以达到,高温少雨,因此,处于极端干旱造成世界上最巨大,具有典型干燥大陆性气候温带、暖温带干旱区。该区具有干燥少雨,日照强烈,冷热剧变和风大频繁四大特点,强烈的风蚀和吹蚀作用着疏松裸露的沙质地表,使沙大面积堆积而形成沙漠。

1.4 沙丘水分运移机理研究的意义

沙漠约占全球陆地面积的20%,中国沙漠约占土地的15.9%,如此大的面积是陆地生态环境的重要组成部分。因此,各国科学家为了探索沙漠的奥秘,为人类持续发展的需要,研究沙丘的形态、运移、成因和沙害防治,多年来做了大量的工作,取得了触目的成就。

当今世界沙漠的基础研究,大致遵循三个方向,一是风沙地貌学方向,它是通过野外实地调查,结合定位、半定位观测和部分室内分析实验,着重研究沙漠的分布,地貌形态类型,运移规律及其成因;二是风沙物理学方向,它是根据野外调查和观测资料,运用实验物理学(主要是空气动力学)的方法和原理,通过模拟实验,以揭示风沙现象和过程的物理机制,并使有关物理参数定量化;三是风沙沉积学方向,它是将沙漠当作风成沙相沉积物的亚类研究其沉积特征、形成时代,从而恢复古沙漠及其沉积环境。

但是,现代沙漠的研究,除上述三个方向外,还必须从沙漠水的方向进行深入研究,从自身水资源的赋存、开发利用的研究方向,闯出利用和改造沙漠的新途径,也是改造沙漠的必由之路,进而探索沙漠生态经济开发的模式。

西北干旱地区水资源短缺,将十分匮乏的水资源合理地应用于发展农业和工业,能收到显著的经济效益和环境效益。而在极端干旱的沙漠地区(如腾格里沙漠)如何充分发掘一切可以利用的水资源更是治理沙漠、固定沙丘、防止沙漠入侵及为21世纪的持续发展,争夺生存空间的重大课题。

沙漠地区大都在内陆河下游,有限的水资源均在中上游被工农业所利用,而治理沙漠的扩张几乎没有经济的外来水源可用;目前还不具备打井抽水防沙固沙的经济工程技术条件和自然条件。荒漠化治理工作虽然取得一定成就,但是荒漠化扩大的趋势仍在继续,沙漠的入侵已使大片良田被吞噬,造成生态环境进一步恶化,这一严峻的事实也是刻不容缓非治理不可的现实问题。沙丘固定防治沙漠入侵可以收到环境效益和社会效益,同时也具有潜在的经济效益。为了达到上述目的,根据我国具体国情和实际自然条件,不可能大规模开发地下水资源用于改造沙漠(除个别试验点例外),因而必须另辟新路来解决这一难题。于是沙丘凝结水的存在及其形成运移机理的研究,就显得非常重要和具有实际意义。

这一瞩目的问题也是水文地质工作者和沙漠专家长期以来十分关注的,所以,研究沙丘

水分运移与沙生植物的关系，继而确定植物固沙的可能性，对防沙固沙，改造沙漠具有重大科学意义和减灾护田的实际意义。植物固沙是治理流动沙丘的根本性措施，也是改造利用沙漠，发展沙区生态经济的重要途径。

沙丘水分的研究从 60 年代以来国内外有所涉及，但受当时测试手段和技术条件的限制，绝大多数都转向了用外调水源改造沙丘的试验工作。对于沙漠的改造只依赖外来水源是不现实的，只有依靠沙丘自身的水分调节才是可行的。沙丘内部水分（降水入渗和凝结水）的存在，能够支持沙生植物的生长，得到切实可行的水分保证，从而达到国家重点建设工程——防沙治沙规划的顺利执行的目的，是符合实际的，也是可行的。

2 试验场地环境概述

2.1 自然环境

沙丘水分定点观测试验场——盖巴子井试验场（以下简称盖井试验场）位于民勤县南东 54km 的腾格里沙漠之中，阿拉古山南东 12km，九墩乡北东 48km 的邓马营湖（以下简称邓湖）的北部。地理坐标 $x=4235060$ ， $y=18346180$ ，北纬 $38^{\circ}13'$ ，东经 $103^{\circ}15'$ ，地面平均高程 1477~1478m，交通位置见图 2-1。

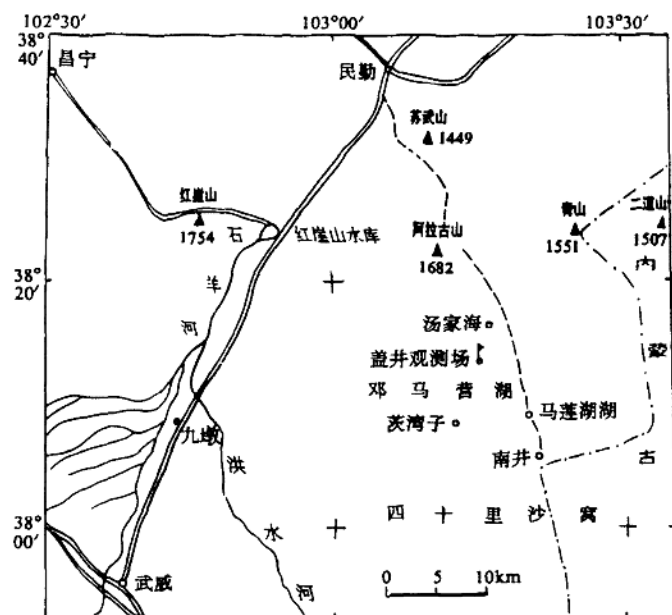


图 2-1 盖井试验场交通位置图

盖井试验场位于腾格里沙漠腹地的邓湖北端，气候干燥，降水量稀少，蒸发强烈，属典型干旱大陆性气候。据该场气象资料统计表明，多年平均降水量 130~160mm，最大一年（1994 年）降水量 204mm，且多集中 6、7、8 三个月，占全年降水量的 50%~80%；多年平均蒸发力为 2030mm，5 月份最大占全年蒸发力的 15%，5、6、7 三个月占全年蒸发力的 44%；干燥度 4~8；年平均气温 9.1°C ，年最高气温 38.6°C ，最低气温 -28°C （图 2-2，图 2-3）；平均相对湿度为 45%，无霜期 150~155 天，最大冻土层深度 115cm，每年 11 月上旬开始出现冻土，2 月份达到最大深度，（图 2-4），3 月中旬开始融解，4 月中旬融完。该地区终年盛行北风，平均风速 $1.6\sim 2.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，风力 2 级；最大风速 $24\sim 34\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，最大风力超过 9 级；日照时数 2885.2h。属典型干旱荒漠气候类型，日照时数大热量丰富。