

# 乌梁素海

## 湖冰环境特征及物质迁移规律研究

李畅游 史小红 赵胜男 著



科学出版社

# 乌梁素海湖冰环境特征及 物质迁移规律研究

李畅游 史小红 赵胜男 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书对乌梁素海湖冰环境特征及物质迁移规律进行了系统研究。主要包括:绪论,适用于冰封期研究的实验仪器及方法,湖冰生消过程观测研究,人工冻结冰单轴压缩强度研究,冰-水双介质中氮磷时空分布特征及迁移规律,冰-水双介质中盐分迁移规律,冰-水双介质中重金属环境特征,冰-水双介质中有机污染物环境特征及迁移规律,冰封期污染物迁移机理在水环境污染治理中的应用研究。

本书可供环境、资源、水利等相关专业的研究生、本科生及从事相应专业的科研、教学和工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

乌梁素海湖冰环境特征及物质迁移规律研究/李畅游,史小红,赵胜男著. —北京:科学出版社, 2016.9

ISBN 978-7-03-049919-6

I. ①乌… II. ①李… ②史… ③赵… III. ①淡水湖-结冰期-水环境-研究-乌拉特前旗 IV. ①X143

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 214437 号

责任编辑:何雯雯 王希挺/责任校对:刘凤英

责任印制:李 冬/封面设计:王 浩

**科学出版社** 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

**北京科信印刷有限公司** 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2016年9月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2016年9月第一次印刷 印张:9 3/4

字数:250 000

定价:78.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 作者简介

**李畅游** 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院教授、博士生导师。现任内蒙古农业大学校长、中国高等教育学会常务理事、内蒙古水利学会副理事长、教育部高等学校水利类专业教学指导委员会副主任、中国水利教育协会高等教育分会副理事长、中国农业工程学会副理事长、《农业环境科学学报》编委。

多年来一直从事水环境系统规划及管理、水资源最优化配置教学和科研工作。先后主持和参加了 40 余项国家和省部级重大科研项目，其中主持国家自然科学基金项目 7 项（重点项目 1 项），国际合作项目 3 项。

1993 年获“内蒙古自治区优秀青年知识分子”荣誉称号，1994 年被自治区授予“优秀科技工作者”荣誉称号，1996 年获“内蒙古自治区有突出贡献的中青年专家”荣誉称号，2012 年获国务院特殊津贴。1995 年获国家科技进步三等奖，2001 年与 2009 年分别获国家级教学成果二等奖，2013 年获内蒙古自治区教学成果一等奖，2013 年获得内蒙古自然科学二等奖。

发表论文 160 余篇。其中近 30 篇被 SCI 或 EI 收录。拥有国家专利 5 项。撰写专著 2 部。

**史小红** 教授，博士，内蒙古锡林郭勒盟人。现任乌梁素海湿地生态系统定位研究站站长，为中国水利学会水力学专业委员会第二届冰工程学组成员。

从 2001 年起开始参加教学和科研工作，从事水环境保护、水环境化学、岩土环境物理学专业课程的教学工作，并一直进行寒旱区河湖湿地环境研究与保护的科研及生产项目。主持国家自然科学基金项目 2 项，主持内蒙古自然科学基金项目 1 项，主持国家林业局湿地生态站建设工程项目 1 项，参加国家自然科学基金项目 9 项，参加国际合作项目 2 项，参加其他省部级科研项目 15 项。2005 年获得内蒙古自治区科技进步一等奖，2013 年获得内蒙古自然科学二等奖。

发表论文 16 篇。其中 3 篇被 SCI 和 EI 收录。拥有国家专利 1 项。撰写专著 1 部。

**赵胜男** 助理研究员，博士。从 2014 年起开始参加教学和科研工作，近年来主要研究方向为湖泊水污染控制与水环境保护。主持国家自然科学基金项目 1 项，参加国家自然科学基金项目 4 项，参加国际合作项目 2 项，参加其他省部级科研项目 6 项。

发表论文 9 篇。其中 2 篇被 SCI 收录。参与撰写专著 1 部。

## 前 言

寒区湖泊冰封期长、冰层厚度大,污染物在结冰过程中被排出并浓缩于冰下水层中,随着翌年融化过程又重新向上迁移转化,进而回到整个湖体中。这样,冻融过程中,由于冰介质的增加,对湖泊中物质的迁移、转化甚至环境的演替变化都会产生影响。因此掌握物质在冰、水多介质中的环境过程,对研究湖泊环境变化机理不容忽略。本书以内蒙古乌梁素海为研究对象,通过实地监测、冰冻模拟等方法进行了污染物在冰期多介质环境中分异规律研究并分析其机理,评价冻融作用对湖泊环境演化的影响效应,初步提出冷能资源的利用,为内陆寒区湖泊环境保护与修复选择最佳时间及最优方法提供科学依据。

本书以乌梁素海湖冰环境为研究对象,通过现场监测及系统采样,对乌梁素海湖冰生长与消融过程、冰体层理结构及冰封期的水文特性进行了系统分析。在对湖冰物理特性分析的基础上,进行人工冻结冰试验,探究冰的单轴压缩强度与加载速度、试件尺寸、试验温度之间的响应关系。利用自制的单向湖泊结冰模拟器进行室内实验,结合现场观测,分析乌梁素海冰封期氮磷营养物质、钠离子、氯离子的时空分布特征及其在冰-水双介质中的迁移规律,并通过分配系数来表征,进一步揭示冻融过程对湖泊环境变化的影响。通过对不同冰生长期及冰厚度下采样点的 TDS 进行定性及定量分析,研究冰-水双介质中盐分的迁移规律,以期为冰封期湖泊化学环境变化的研究及盐化治理提供基础数据和科学依据。在多介质背景条件下,对冰-水双介质中的重金属和有机污染物含量、分布规律、迁移转化机制进行系统探讨。将结冰过程中污染物的迁移机理应用到水处理中,结合乌梁素海实际环境条件,利用自制的冷冻浓缩实验装置,通过控制不同实验条件,测试冷冻浓缩法对乌梁素海水体中污染物的去除率,探索冰封期污染物迁移-冷冻浓缩机理,为湖泊水环境污染治理提供新思路。

本书为内蒙古农业大学河湖湿地水环境保护与修复团队成员十年研究成果的提炼和总结,是乌梁素海湿地水环境重要的研究积累,凝聚了团队科研人员的智慧与见解。内容着重于污染物在湖冰环境中的特性,将污染物的运移过程由以往在单项液态水环境介质中的迁移研究扩展到多项体系组成的复杂冰环境介质中的迁移,并从机理上明确冻结作用对湖泊环境的影响效应,对寒区湖泊环境污染控制与治理具有重要意义,并对寒区湖冰研究具有一定的学术参考价值。

全书共 9 章。第 1 章由赵胜男撰写,第 2 章由李畅游与赵胜男撰写,第 3 章由李畅游、史小红、孙标撰写,第 4 章由史小红撰写,第 5 章和第 6 章由李畅游、史小红、孙标撰写,第 7 章由史小红、孙标、赵胜男撰写,第 8 章由李畅游、史小红、孙标撰写,第 9 章由史小红、孙标撰写。初稿完成之后,李畅游教授、史小红教授、赵胜男助理研

究员又进行了若干轮的修订和统稿。张生、贾克力、张岩、杨芳、宋爽、姜慧琴、王爽、吕宏洲、毛晓明、郝亚洲、吴用、田伟东、孙驰、赵水霞、赵东源等博士和硕士研究生在资料的整理和后期的校稿工作中付出了辛勤的劳动。回顾多年来的研究历程，团队老师和同学们在这个奋进的集体中团结互助、和谐向上、忘我工作，既经历了无数的艰辛，也品尝到成功的喜悦。在此，笔者对所有为本书出版作出贡献的同事和朋友们致以衷心的感谢。

本书由国家自然科学基金（51339002、51269017、51269016、41263010、51169017、51569019、51509133）、国际合作项目（2011DFA90710）和内蒙古产业创新团队项目联合资助。

在撰写的过程中，笔者虽尽力而为，但限于知识水平以及对学科交叉综合性的把握，书中错误与不足在所难免，诚恳希望同行和读者批评指正，提出宝贵意见。

作 者

2016年7月

于内蒙古农业大学

# 目 录

|       |                      |    |
|-------|----------------------|----|
| 第 1 章 | 绪论                   | 1  |
| 1.1   | 研究背景                 | 1  |
| 1.2   | 研究区域                 | 2  |
| 1.3   | 湖冰环境特征及物质迁移规律研究的主要进展 | 9  |
|       | 参考文献                 | 20 |
| 第 2 章 | 实验仪器及方法              | 26 |
| 2.1   | 实验仪器                 | 26 |
| 2.2   | 实验方法                 | 28 |
|       | 参考文献                 | 30 |
| 第 3 章 | 湖冰生消过程观测研究           | 31 |
| 3.1   | 湖冰生消过程现场观测           | 31 |
| 3.2   | 湖冰生长过程与消融过程          | 34 |
| 3.3   | 湖冰生消过程中的冰形态          | 37 |
| 3.4   | 湖泊冰封期的水文特性           | 40 |
| 3.5   | 结论与讨论                | 43 |
|       | 参考文献                 | 44 |
| 第 4 章 | 人工冻结冰单轴压缩强度试验研究      | 46 |
| 4.1   | 人工冻结冰试样制备与试验方法       | 46 |
| 4.2   | 人工冻结冰单轴压缩强度试验分析      | 50 |
| 4.3   | 结论与讨论                | 57 |
|       | 参考文献                 | 57 |
| 第 5 章 | 冰-水双介质中氮磷时空分布特征及迁移规律 | 58 |
| 5.1   | 冰-水双介质中氮的存在形态及迁移规律   | 58 |
| 5.2   | 冰-水双介质中磷的存在形态及迁移规律   | 70 |
| 5.3   | 冻融作用对湖泊环境变化影响的量化研究   | 79 |
| 5.4   | 结论与讨论                | 84 |
|       | 参考文献                 | 84 |
| 第 6 章 | 冰-水双介质中盐分迁移规律        | 86 |
| 6.1   | 盐分在冰-水介质中的分配特征       | 86 |

|       |                                                             |     |
|-------|-------------------------------------------------------------|-----|
| 6.2   | 盐分在冰芯及冰下水中的分布模拟 .....                                       | 88  |
| 6.3   | 冰生长过程中盐分的迁移机理 .....                                         | 90  |
| 6.4   | 结论与讨论 .....                                                 | 94  |
|       | 参考文献 .....                                                  | 95  |
| 第 7 章 | 冰-水双介质中重金属环境特征 .....                                        | 97  |
| 7.1   | 冰封期乌梁素海重金属的分布规律 .....                                       | 97  |
| 7.2   | 重金属在冰-水介质中的分布规律 .....                                       | 103 |
| 7.3   | 冰体中重金属分布规律室内模拟试验研究 .....                                    | 107 |
| 7.4   | 结论与讨论 .....                                                 | 115 |
|       | 参考文献 .....                                                  | 116 |
| 第 8 章 | 冰-水双介质中有机污染物环境特征及迁移规律 .....                                 | 118 |
| 8.1   | 冰生长过程中化学需氧量的变化 .....                                        | 118 |
| 8.2   | 冰生长过程中生化需氧量的变化 .....                                        | 119 |
| 8.3   | 冰生长过程中 $\rho_{\text{BOD}_5}/\rho_{\text{COD}}$ 值的变化特征 ..... | 121 |
| 8.4   | 结论与讨论 .....                                                 | 125 |
|       | 参考文献 .....                                                  | 126 |
| 第 9 章 | 冰封期污染物迁移机理在水环境污染治理中的应用研究 .....                              | 127 |
| 9.1   | 冰封期污染物迁移机理——冷冻浓缩机理 .....                                    | 127 |
| 9.2   | 冷冻浓缩机理在水污染治理中的应用 .....                                      | 128 |
| 9.3   | 结论与讨论 .....                                                 | 144 |
|       | 参考文献 .....                                                  | 145 |



# 第1章 绪 论

## 1.1 研究背景

湖泊是重要的地表水资源之一,是湖泊流域地区经济持续发展和人们赖以生存的基础,为人们提供了防洪、工农业及生活用水、水产养殖、旅游、调节气候、发电等多种功能,在我国国民经济发展中具有极为重要的意义。据统计,我国有2万多个湖泊,分布较广,现有面积大于 $1.0\text{km}^2$ 的天然湖泊2759个,合计面积达 $91019.63\text{km}^2$ ;大于 $10.0\text{km}^2$ 的有656个,合计面积 $85256.94\text{km}^2$ 。总储水量约 $7077\times 10^8\text{m}^3$ ,其中淡水储量 $2249\times 10^8\text{m}^3$ ,约占我国陆地淡水资源量的8%。我国地域辽阔,自然环境复杂、区域分异明显,从而使得我国的湖泊呈现显著的区域差异性,五大湖区分别为东北平原与山地湖区、蒙新高原湖区、青藏高原湖区、东部平原湖区和云贵高原湖区,其面积大约占湖泊总体面积99.8%。

在北方苔原、高纬度区及低纬度山地区的地表水资源,如湖泊,河流等,在冬季会发生结冻现象,并有数月覆有冰盖(Leppäranta, 2010)。在极地区及高纬度地区,甚至存在永冻冰盖湖泊,冰盖达数米厚(Ferris and Burton, 1988; Scott and Smith, 1997)。在3~4km厚的南极冰层区域也存在大面积的次级冰川湖泊。我国青藏高原湖区、蒙新高原湖区及部分东部平原湖区位于寒区,该区域面积约占全国总湖泊面积的2/3,冰封期长达半年左右,冰层厚,占湖泊水体比例大。其中,蒙新高原湖区共有大小湖泊879个,约占全国湖泊总面积的11.7%,其中,乌梁素海冰层厚0.3~0.6m(Zhang et al., 2012),呼伦湖冰层厚0.4~1.2m(张岩等, 2011),达理诺尔冰层厚0.4~1.0m(Zhen et al., 2015),博斯腾湖冰层厚0.5~1.0m,乌伦古湖冰层厚0.5~0.7m(迪丽努尔·阿吉和艾克巴尔, 2010),冰封期一般为5~6个月;东北平原与山地湖区共有大小湖泊192个,约占全国湖泊总面积的4.4%,其中,镜泊湖冰层厚0.6~1.0m,长白山天池冰层厚1.2m左右(孔庆文等, 2007),且冰封期长达6~7个月;青藏高原湖区共有大小湖泊1437个,约占全国湖泊总面积的49.6%,其中,青海湖冰层厚0.4~0.9m(陈贤章等, 1995),鄂陵湖冰层厚1.0m左右(王绍令和李位乾, 1990),冰冻期长达6~7个月。冰盖形成后,随着冰盖的增厚削弱了冰下水体的降温速度并将水温维持在 $0^\circ\text{C}$ 以上,减少了风力对于湖泊的扰动(Burch, 1988; Scott and Smith, 1997),隔绝了空气与湖水的气体交换,减弱了太阳辐射在垂向水柱方向上的透射深度(Leppäranta et al., 2003)。这种外在物理条件的改变将进一步影响湖泊化学及生物过程的进行(Petrova, 1986; Bowling, 1990),尤其在冰封期时间较长的寒区湖泊中,水深、冰厚、雪厚等都将使湖泊水环境发生变化,甚至一个湖泊的不同区域也会有明显的差异(Leppäranta, 1993; Tastula et al., 2012)。这

使得寒区湖泊在冬季存在着与南方湖泊不同的物质分配、迁移及转化规律，因此明确冰封期湖泊环境中物质迁移过程是十分必要的，对于寒区湖泊污染机理研究具有重要意义。

## 1.2 研究区域

### 1.2.1 研究区概况

河套灌区地处黄河河套平原，北抵阴山山脉的狼山及乌拉山，南临黄河，是典型的山区、平原复合地貌流域，不仅具有自然山区和平原区的特点，同时也是人为活动剧烈地区，是我国北方主要的产粮区，具有人工-自然流域的代表性（李畅游和孙标，2013）。灌区由三盛公拦河枢纽控制引水，输配水水渠由 180km 的总干渠及 13 条干渠组成。排水沟由 220km 的总排干沟及 10 条干沟组成，乌梁素海是河套灌区排水最大承泄区（图 1-1）。

乌梁素海（40°36′~41°03′N，108°43′~108°57′E）位于内蒙古自治区巴彦淖尔市乌拉特前旗境内（图 1-1），是内蒙古自治区黄河流域最大的淡水湖泊，也是国家八大淡水湖之一。作为乌拉尔山前冲洪积平原流域及河套灌区排水系统的重要组成部分，主要承接周边农业排水、工业废水及生活污水，是巴彦淖尔市最主要的排水承泄区和山洪滞纳区，也是黄河水系重要组成部分。湖区呈南北长、东西窄的狭长形态，其中南北长 35~40km，东西宽 5~10km，库容量为  $2.5 \times 10^8 \sim 3 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，湖面高程平均值为 1018.5m，水深为 1.6~2.7m，平均水深 1.9m。湖岸发育率为 2.15，岛屿率为 6.1%，湖盆特征形态系数为 22.2，湖泊水体的滞留时间为 160~220 天。

乌梁素海地处荒漠半荒漠地区，年均降水量不足 300mm，却拥有非常丰富的水生生物、鸟类和湿地生态系统及旅游业资源。乌梁素海是我国北方重要的候鸟迁徙和繁殖地，目前湖区内有各种鸟类 250 多种 600 多万只，其中被列入国家 I 级保护动物 5 种，即

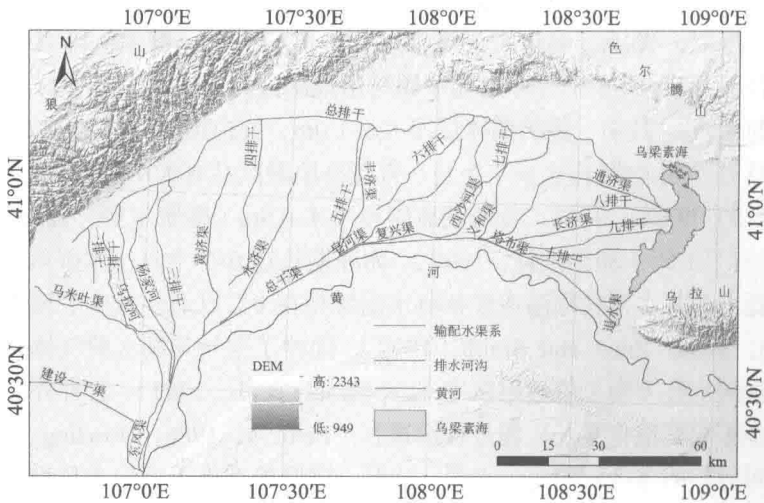


图 1-1 乌梁素海地理位置

黑鹳、玉带海雕、白尾海雕、大鸨、遗鸥等世界珍贵、濒危鸟类(贾新艳, 2010; 张雅棉等, 2012); 有Ⅱ级保护动物 25 种, 其中疣鼻天鹅在乌梁素海既是旅鸟, 又是繁殖鸟, 每年 3 月到 10 月在此栖息繁衍, 且种群数量较多, 近十几年种群数量一直在上百只到上千只之间变动, 最多达 1300 多只(2004 年), 近几年基本保持 500~800 只(赵格日乐图和苏日娜, 2016)。因此, 乌梁素海又有“塞外白洋淀”、“草原上的天鹅湖”的美誉, 是亚洲重要的湿地系统生物多样性保护区, 2002 年被国际湿地公约组织正式列入国际重要湿地名录。湖区共有 6 科 6 属 11 种大型水生植物, 2011 年 6 月~2013 年 8 月, 共发现浮游植物 7 门 110 属 281 种, 其中, 绿藻为 47 属 126 种(45%), 硅藻和蓝藻分别为 25 属 64 种(23%) 和 22 属 46 种(16%), 绿藻、硅藻以及蓝藻是乌梁素海的主要浮游植物种类(84%); 其他如裸藻、金藻、隐藻及甲藻类群出现的种属相对较少, 分别为 9 属 30 种、4 属 8 种、2 属 4 种、1 属 3 种, 其中以芦苇和龙须眼子菜、穗花狐尾藻为优势种, 且浮游植物功能群存在较显著的季节演替规律(李兴等, 2015)。乌梁素海浮游动物共有 48 种, 隶属于 40 个属, 其中原生动物最多, 共计 17 种, 隶属于 15 个属, 占浮游动物物种组成的 35.4%; 其次是轮虫, 13 种 9 属, 占 27.1%; 桡足类 12 种 10 属, 占 25.0%; 枝角类 6 种 6 属, 占 12.5%。原生动物的优势种为球形砂壳虫、匕口虫、突口虫、钟形钟虫, 轮虫的优势种为裂痕龟纹轮虫、卵形鞍甲轮虫、蓼花臂尾轮虫, 枝角类的优势种为长肢秀体溞, 桡足类的优势种为无节幼体、英勇剑水蚤、小星猛水蚤(张晓雅, 2014; 李建茹, 2014; 徐静, 2014; 王玉等, 2012)。

### 1.2.2 地质地貌特征

在古代, 乌梁素海是黄河的一部分, 它的形成与黄河主河道变迁有很大关系, 是黄河改道后形成的河迹湖。早期黄河的主流是狼山以南的乌加河, 后来由于地壳隆起, 黄河水流受阻急转向南流, 冲刷出一个较大的低凹区域, 形成了乌梁素海的早期形态。后来, 由于风沙向东入侵以及狼山南部的洪积扇不断延展等原因, 导致黄河河床抬高, 大量的泥沙淤积阻断乌加河的水流, 河水外流到低凹区域形成了乌梁素海。从地质方面分析, 河套平原地区是一个典型的内陆断陷盆地, 由于狼山旋扭状构造作用, 致使乌梁素海流域形成扇面形状。在乌梁素海流域地层结构中沉积层分布的范围非常大, 沉积层上部分布着冲积层、洪积层和风积层, 下部是厚度非常大的新老第四纪湖相淤积层。山麓阶地、山前冲洪积平原、黄河冲积湖积平原及风成沙丘四个模块构成了乌梁素海流域内部的地貌形态。河套平原的主要部分是黄河冲积湖积平原, 土壤主要由细砂、粉砂、亚砂土和亚黏土组成。沉积物分布一般以土质较粗的砂质沉积物为主。乌梁素海流域北部地形坡度非常大, 总体向南倾斜, 坡度范围为  $3^{\circ}\sim 7^{\circ}$ , 为山麓洪积平原, 由洪积扇顶部至下土壤组成物质具有显著的分带性, 土质由粗颗粒逐渐变为细颗粒, 分别为砾石、碎石、小砾石、粗砂、细砂及粉砂、黏质砂土和砂质黏土。

### 1.2.3 气象气候条件

乌梁素海地处我国干旱半干旱高纬度地区, 属于温带大陆性季风气候。因受到地理

位置和大气环流的影响,气候四季分明、昼夜温差大、日照时间长、蒸发量大、降水量较少且年内分配不均匀。湖水于每年 11 月初结冰,直到翌年 4 月末至 5 月初开始融化,冰封期为 5~6 个月。太阳辐射强、降雨稀少、蒸发强烈、干湿期差异大,并且经常出现大风和多风天气,蒸发和风力对湖泊水环境会产生一定的影响。本文中的气象数据来自在乌梁素海西岸建立的气象监测站及国家气象信息中心中国地面气候资料月值数据,根据收集到的数据主要选取乌梁素海气温、降水、湿度、日照时数、风速及蒸发进行气象气候条件分析。

1. 气温

大气温度,简称气温,作为衡量区域冷热状况的重要指标,是造成区域自然环境差异的主要因素之一。根据图 1-2 乌梁素海 1977~2015 年的气温数据统计结果显示,乌梁素海气温从整体上呈现以年为周期的变化规律。其中年内最高气温出现在 7 月,多年平均高温约为 29.2℃;年内最低气温出现在 1 月,平均低温约为-22.2℃;多年平均气温为 7.2℃。乌梁素海冰封期一般从每年 10 月中下旬到第二年 4 月末(图 1-3),冰盖从形成到完全消融使湖泊的物理条件发生改变,进而改变了化学成分的年内分配过程,并影响生物活动条件及湖泊环境状态。

2. 降水

降水是影响一个地区的干旱程度的决定因素,降水量则反映了一个地区降水的多少。降水指从大气降落到地面的液态水和固态水的总称。通过对乌梁素海 1957~2011 年的降水数据进行统计分析可知,乌梁素海水量逐年减少且年际、年内分配不均匀。由这 50 多年的降水数据可知,乌梁素海因受到大陆季风影响,80%的降水主要集中在每年的 7~8 月,多年年均降水量为 145mm,年内变化呈现出明显的先上升后下降的趋势,年际

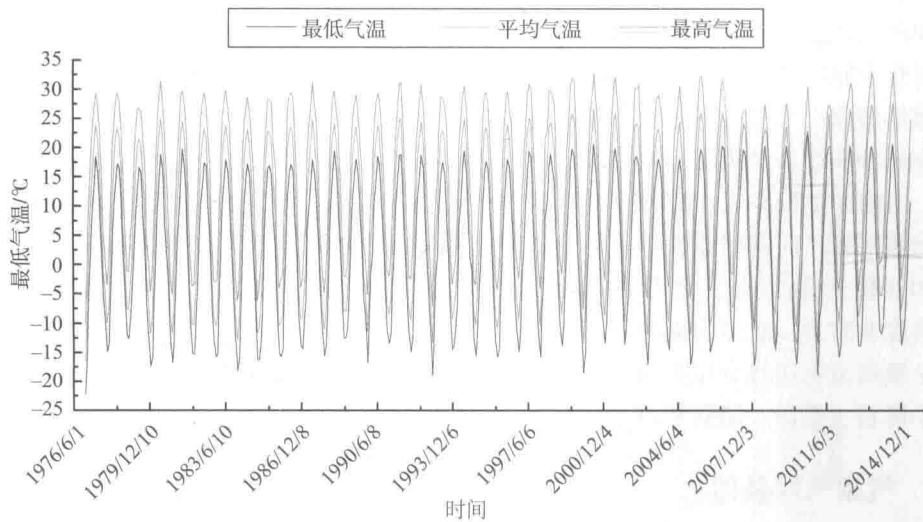


图 1-2 1977 年 1 月~2015 年 6 月气温月值变化过程

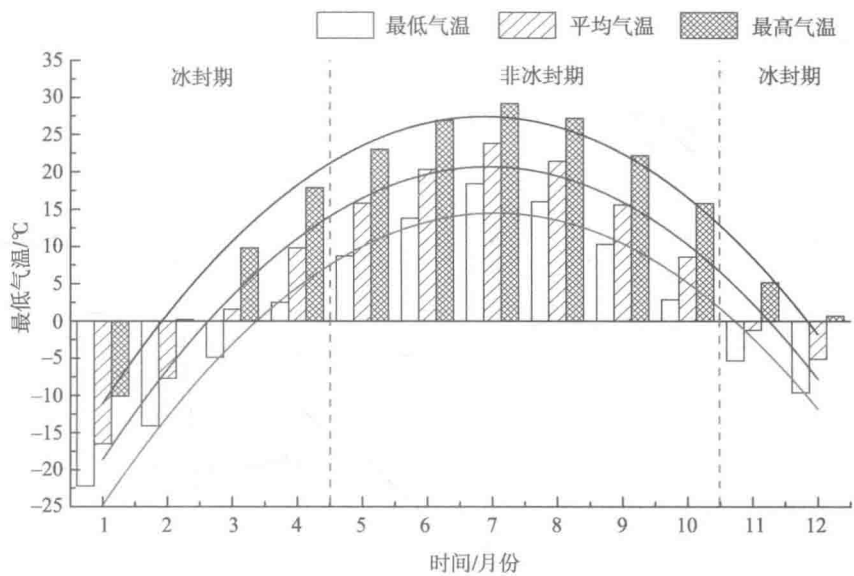


图 1-3 1977 年 1 月~2015 年 6 月气温年内变化过程

变化呈现先下降后上升的趋势。冰封期内总体降水较少,所以冰盖上基本没有雪盖,冰封期多年平均降水量为 32mm,主要集中在 4 月,使得冰盖消融速度加快。图 1-4 为 1957~2011 年乌梁素海降水量年内变化曲线图。

3. 湿度

湿度是表示空气中水汽含量和湿润程度的气象要素,表征了大气干燥程度。根据对 1977~2015 年乌梁素海气象监测资料分析,乌梁素海多年平均湿度为 52.9%(图 1-5),每年 8 月到翌年 1 月相对湿度较大,2 月至 7 月相对湿度较低(图 1-6)。

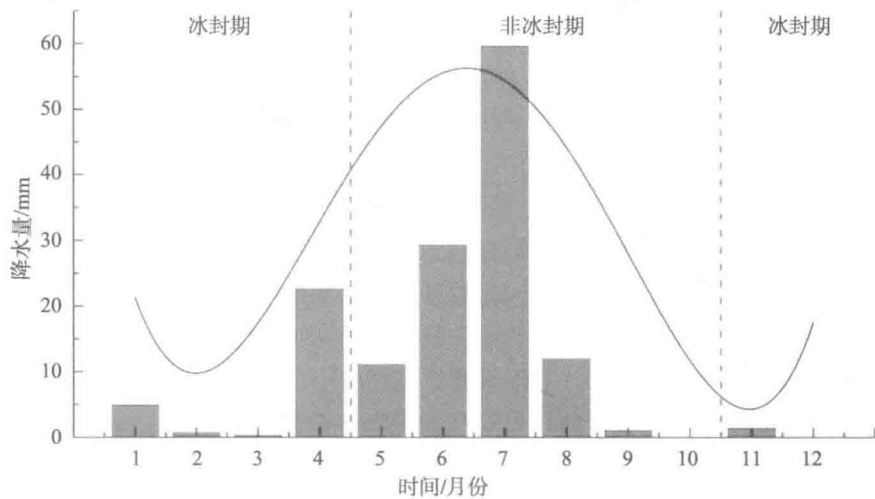


图 1-4 1957 年 1 月~2011 年 10 月降水量年内变化过程

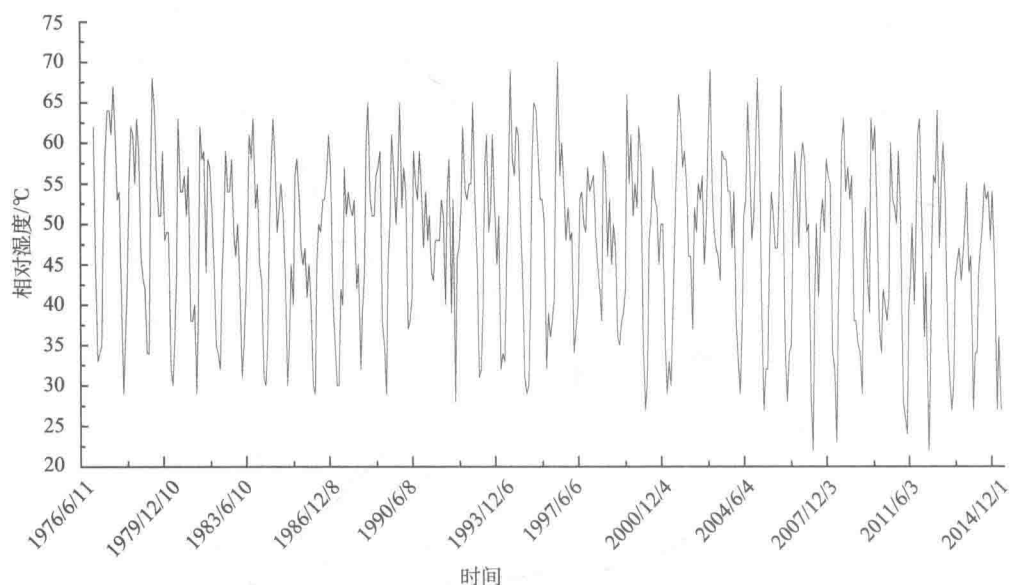


图 1-5 1977 年 1 月~2015 年 6 月相对湿度月值变化过程

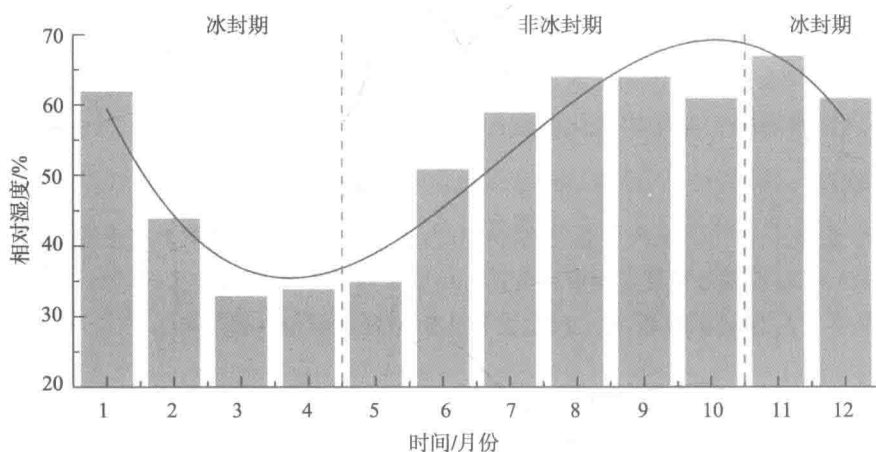


图 1-6 1977 年 1 月~2015 年 6 月相对湿度年内变化过程

#### 4. 日照时数

日照时数同样属于气象要素的重要组成部分。根据对 1977~2015 年乌梁素海气象监测资料的分析(图 1-7),乌梁素海日照时数月值数据呈现类似正弦曲线的周期规律性变化,波动范围为 200.6~330.2h,多年平均日照时数为 265h,其中最高值出现在每年的 5 月,最低值出现在每年的 12 月,多年年变化幅度较小,呈现显著的冰封期与非冰封期差异(图 1-8)。由多年风速统计曲线可知乌梁素海年内最大风速为 3.2m/s,每年 3 月到

#### 5. 风速

根据对 1977~2015 年风速数据进行统计可知(图 1-9),乌梁素海常年盛行西北风。

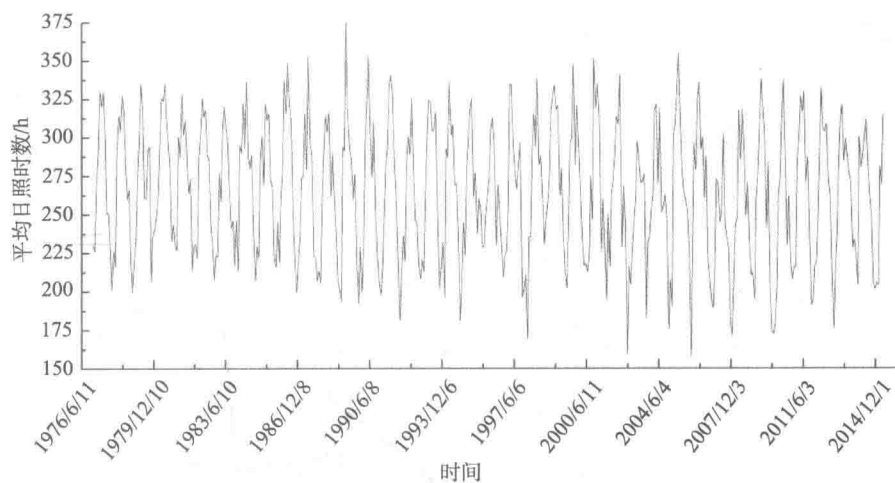


图 1-7 1977 年 1 月~2015 年 6 月日照时数月值变化过程

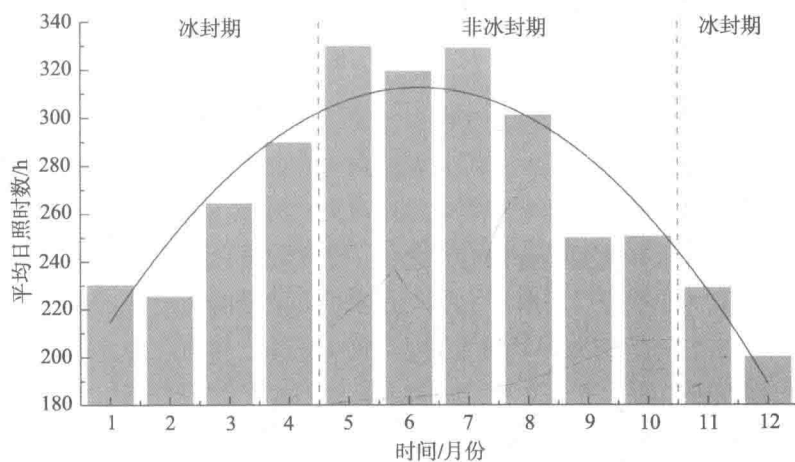


图 1-8 1977 年 1 月~2015 年 6 月日照时数年内变化过程

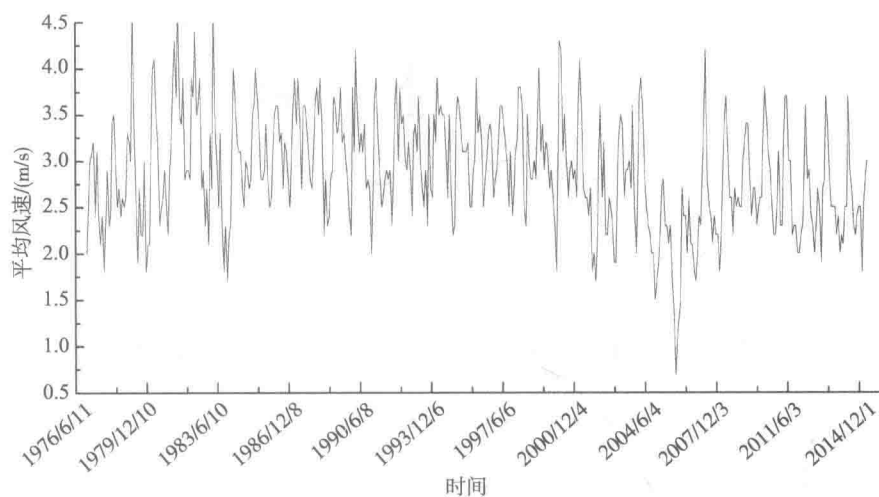


图 1-9 1977 年 1 月~2015 年 6 月平均风速月值变化过程

5 月为大风的高发期（图 1-10），全年风力侵蚀严重。

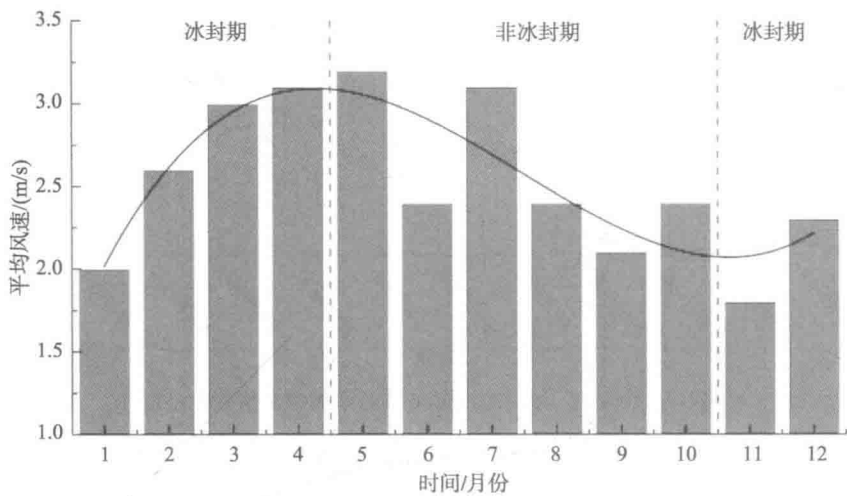


图 1-10 1977 年 1 月~2015 年 6 月平均风速年内变化过程

6. 蒸发

蒸发是内陆地表水体重要的排泄方式之一，受气温及风速影响较大，随季节呈现类似正弦曲线的周期规律变化。根据对 1977~2015 年乌梁素海气象监测资料分析，太阳辐射在 299~4044mm 波动，多年平均蒸发量为 2029.3mm，其中最高值出现在每年的 6~7 月，最低值出现在每年的 1 月、12 月，冰盖阻隔了水体与大气的接触，减小了水面蒸发，湖面蒸发量具有显著的冰封期与非冰封期差异（图 1-11）。

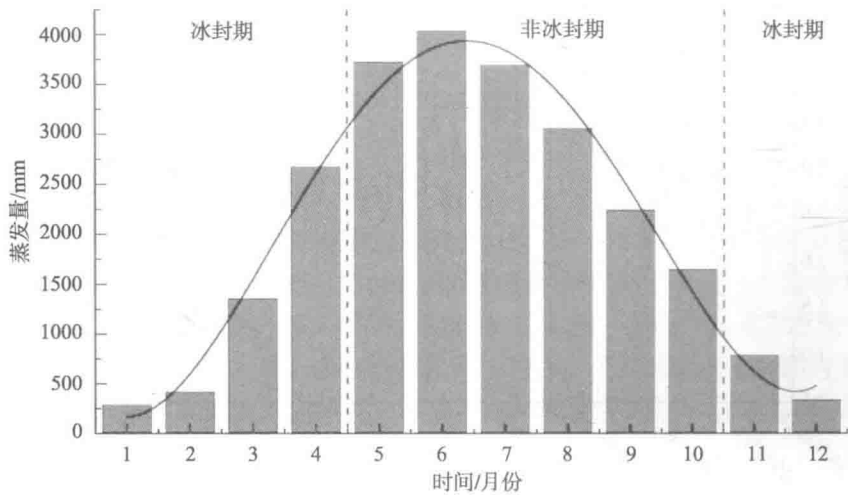


图 1-11 1977 年 1 月~2015 年 6 月蒸发量年内变化过程



## 1.3 湖冰环境特征及物质迁移规律研究的主要进展

### 1.3.1 湖冰生消过程研究的主要进展

湖冰的物理特性及其与全球气候变化的关系是目前湖冰研究的热点,并且取得了一定的成果。早在1891年,Stefan就得出冰生长的计算模式:

$$\frac{dH_i}{dt} = -\frac{k_i}{H_i \rho_i L_i} (T_0 - T_f) \quad (1-1)$$

式中,  $H_i$  为冰厚度 (cm);  $k_i$  为冰的热传导系数 [ $W/(cm \cdot ^\circ C)$ ];  $\rho_i$  为冰密度 ( $g/cm^3$ );  $L_i$  为冰的融解潜热 (J/g);  $T_0$  是表面温度 ( $^\circ C$ );  $T_f$  是冰底温度 ( $^\circ C$ ), 也就是水体的冻结温度。

湖冰的热传导系数主要依赖于冰温度, Yen (1981) 给出了淡水冰的热传导系数关于温度的函数:

$$k_i = 1.16(1.91 - 8.66 \times 10^{-3} T_i + 2.97 \times 10^{-5} T_i^2) \quad (1-2)$$

式中,  $T_i$  为冰温度 (K)。

Shen 和 Yapa (1985) 曾报道, 斯蒂芬模型的系数随着表面是否存在积雪和吹风条件, 在 1.4~2.7 变化。上限包络线为有风无雪的湖泊冰, 下限包络线为少风而有雪的湖泊冰。Shirasawa 等 (2006) 发展的淡水冰热力学数值模式强调了降雪、融雪、雪变质和湿雪层的形成对冰层热力系统的影响, 以及雪冰的形成对冰层厚度增加的贡献。Reid 和 Crout (2008) 对 Launiainen 和 Cheng (1998) 给出的有关海冰热力学的模式作了如下修改: ①排除了冰内盐度的影响; ②采用了适用于湖冰表面辐射通量的参数优化方案; ③优化了冰底水体热通量的参数方案; ④建立了适用于湖冰的冰面反照率和冰内消光系数的参数优化方案; ⑤进而发展了适合于湖冰的数值模式。近年来, 湖冰对湖泊生态系统及周围气候变化的影响越来越被人们重视, 因此湖冰热力学数值模式发展迅速。淡水冰热力学生消过程与海冰热力学生消过程最大的区别是水体不含有盐分, 生消过程不会伴随有盐的排泄和迁移, 冰内部也不会发生卤水与结晶盐之间的相转换, 后者会对冰内热力平衡产生“热库效应”。另外, 淡水冰来自冰下水体的热通量主要源于冰下水体以及水体底部沉积物储存的热量。对于淡水冰, 与冰层生消过程能量平衡相关的光学性质, 无论是冰面反照率还是冰消光系数都与海冰的有所不同 (Leppäranta, et al., 2003)。最早的淡水冰热力学数值模式是基于冰冻度日原理的半经验模式 (Ashton, 1996)。Heron 和 Woo (1994) 模拟计算了北极湖冰春季的消融过程, 春季融冰期, 75%的冰融化发生在冰上表面, 25%发生在冰-水界面。Vavrus 等 (1996) 应用 LIMNOS 湖冰模式和 1961~1990 年的日常观测气象数据模拟得到 Mendota 湖 30 年间的平均结冰日和融冰日, 对比观测数据平均误差分别为 4 天和 6 天。Stefan 和 Fang (1997) 将湖冰模式和 CCC GCM (Canadian Climate Center Global Circulation Model) 气象模式耦合, 将  $CO_2$  含量提高 1 倍, 模拟“温室效应”下湖冰结冰日将推迟 20 天, 最大冰厚和雪厚将减小 50%, 冰期将缩短 60 天。Mironov (2008) 简化湖水混合层热力学过程, 发展了湖泊模型的参数化模式, 并将其与气候预报模式和日常气象观测数据结合, 模拟湖水全年的热力学