

乌梁素海

水环境状态特征及模拟研究

State Characteristics and Modelling of Water Environment of
Wuliangsohai Lake

李畅游 史小红 赵胜男 著



科学出版社

乌梁素海水环境状态特征及 模拟研究

李畅游 史小红 赵胜男 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是河湖湿地水环境保护与修复创新团队多年来在乌梁素海流域开展的系列科研工作的总结。本书就大型浅水湖泊的水环境演化及其机制、湖泊生态环境管理等目前人们关心的学科前沿问题进行详细探讨。主要内容包括：乌梁素海及河套灌区概况，乌梁素海水质污染特征及其演变，水环境综合评价，元素赋存形态及水质动态模拟，乌梁素海流域非点源污染负荷分析，乌梁素海生态环境需水及补水调水综合分析，乌梁素海生态系统服务功能与生态系统健康评价。

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

乌梁素海水环境状态特征及模拟研究/李畅游, 史小红, 赵胜男著. —北京: 科学出版社, 2019.8

ISBN 978-7-03-060278-7

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 296569 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

*

2019年8月第一版 开本: 787×1092 1/16

2019年8月第一次印刷 印张: 12

字数: 290 000

定价: 88.00 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 8 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。发表论文 200 余篇，其中近 30 篇被 SCI 或 EI 收录。拥有国家专利 6 项。以第一作者撰写出版专著 5 部。



史小红 教授，博士，硕士生导师，针对我国北方高纬度、高海拔的寒旱区河流与湖泊特征进行环境演化、水文过程等机理研究。国家林业和草原局生态定位研究站网的乌梁素海湿地生态系统定位研究站站长，《中国林业百科全书湿地保护与管理卷》编写委员会编委，中国水利学会冰工程委员会委员，湿地生态功能与恢复北京市重点实验室学术委员会委员，中国海洋湖沼学会湖泊分会理事会理事。

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，国家重点研发计划项目 1 项，内蒙古自治区自然科学基金项目 1 项，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，国际合作项目 2 项，其他省部级科研项目 13 项。2006 年获得内蒙古自治区科学技术一等奖，2013 年获得内蒙古自治区科学技术二等奖。以第一作者撰写和发表论文 11 篇，其中 5 篇被 SCI 和 EI 收录。拥有发明专利 1 项，实用新型专利 2 项。撰写专著 2 部，参编 3 部，参编图谱 1 部。



赵胜男 助理研究员，博士，从事湖泊水污染控制与水环境保护方面的研究。先后主持国家自然科学基金项目 1 项、内蒙古农业大学教育教学改革项目 1 项，参加国家自然科学基金项目 5 项、国家重点研发计划项目 1 项、国际合作项目 2 项、其他省部级科研项目 6 项。发表学术论文 18 篇，其中 4 篇被 SCI 收录。拥有国家专利 1 项。撰写专著 1 部，参编 3 部，参编图谱 1 部。

前 言

2018年3月5日,习近平总书记在参加第十三届全国人大一次会议内蒙古代表团审议时指出,要加强生态环境保护建设,统筹山水林田湖草治理,精心组织实施京津风沙源治理、“三北”防护林建设、天然林保护、退耕还林、退牧还草、水土保持等重点工程,实施好草畜平衡、禁牧休牧等制度,加快呼伦湖、乌梁素海、岱海等水生态综合治理,加强荒漠化治理和湿地保护,加强大气、水、土壤污染防治,在祖国北疆构筑起万里绿色长城。指示中突出了乌梁素海生态环境的重要性。

乌梁素海是黄河流域最大的湖泊湿地,是内蒙古河套灌区灌排体系的重要组成部分,也是黄河生态安全的“自然之肾”。乌梁素海生态环境保护对维系我国北方生态安全屏障、保障黄河水质和度汛安全、促进地区经济发展具有重要作用。因此,一直是中央环保督察关注的重点。2016年、2018年,中央环保督察组两次进入乌梁素海进行环保督察时指出,内蒙古自治区及巴彦淖尔市围绕乌梁素海生态环境保护做了一些工作,在分凌生态补水、环湖湿地建设、干渠河道管护、生态环境监测预警能力建设等方面取得了一些成效,水环境质量总体稳定,但仍然存在重视程度不够、工作统筹不力、治理进展缓慢等问题,乌梁素海生态环境形势仍然不容乐观,治理长效机制尚未形成。

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几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。首先介绍了乌梁素海及河套灌区概况,进一步从湖泊水体富营养化、有机污染、盐化、水化学、重金属分布、浮游植物分布六个方面分析了乌梁素海水质污染特征及其演变,继而给出乌梁素海水环境的综合评价,并详细进行了乌梁素海元素赋存形态及水质动态模拟,计算了乌梁素海流域非点源污染负荷,给出了乌梁素海生态环境需水及补水调水综合方案,最后对乌梁素海生态系统服务功能与生态系统健康状况进行了评价。本书主体内容对于读者了解乌梁素海水环境演化过程及相关湖泊环境研究具有重要的参考价值。就乌梁素海而言,本书对进一步制定湖泊水环境综合整治方案,完善环境治理长效机制,从而实现湖泊水质的逐步改善可提供科学依据和技术支撑。

全书共7章。第1章由李畅游和赵胜男撰写,第2章和第3章由赵胜男和孙标撰写,第4章由李畅游、史小红、赵胜男撰写,第5章由史小红和孙标撰写、第6章和第7章由李畅游、史小红和孙标撰写。初稿完成之后,又进行了若干轮的修订和统稿。李兴、姜忠峰、吴用、李建茹、宋爽、田伟东、孙驰、朱永华、杜蕾、郭子杨、杨朝霞、杜丹丹、蒋鑫艳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向

上的集体中团结互助、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。

本书由国家重点研发计划（2017YFE0114800）、国家自然科学基金（51339002，51509133，51669022，51811530388，51569019，51869020）、内蒙古自然科学基金（2016MS0406）、内蒙古农业大学教育教学改革项目（JGYB201817）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

2018年7月

于内蒙古农业大学

目 录

第 1 章	乌梁素海及河套灌区概况	1
1.1	乌梁素海概况	1
1.2	河套灌区概况	3
1.3	河套灌区与乌梁素海的补排水关系	6
	参考文献	6
第 2 章	乌梁素海水质污染特征及其演变	7
2.1	乌梁素海水体富营养化特征	7
2.2	乌梁素海水体有机污染特征	9
2.3	乌梁素海水体盐化特征	10
2.4	乌梁素海水体水化学特征	11
2.5	乌梁素海水体重金属分布特征	13
2.6	乌梁素海水体浮游植物分布特征	18
2.7	本章小结	29
	参考文献	29
第 3 章	乌梁素海水环境综合评价	31
3.1	基于灰色聚类法的乌梁素海水环境评价	31
3.2	基于 BP 神经网络法的乌梁素海不同季节水环境评价	35
3.3	乌梁素海生物评价模型	40
3.4	乌梁素海水环境重金属污染综合污染评价	42
3.5	本章小结	47
	参考文献	47
第 4 章	乌梁素海元素赋存形态及水质动态模拟	49
4.1	乌梁素海营养元素——氮、磷存在形态的地球化学模拟	49
4.2	乌梁素海重金属元素赋存形态的地球化学模拟	59
4.3	基于 EFDC 模型和 CE-QUAL-ICM 模型的水质模拟	85
4.4	乌梁素海生态模型模拟	102
4.5	本章小结	114
	参考文献	116

第 5 章	乌梁素海流域非点源污染负荷分析 ·····	118
5.1	SWAT 模型构建·····	119
5.2	SWAT 模型在河套灌区流域适用性评价·····	126
5.3	河套灌区流域径流和非点源污染的影响分析·····	135
5.4	本章小结·····	141
	参考文献·····	142
第 6 章	乌梁素海生态环境需水及补水调水综合分析 ·····	144
6.1	生态环境需水及补水调水概述·····	144
6.2	乌梁素海水量分析·····	144
6.3	生态环境需水量计算方法·····	160
6.4	乌梁素海生态需水量估算·····	162
6.5	优化调水补水模型·····	163
6.6	本章小结·····	166
	参考文献·····	166
第 7 章	乌梁素海生态系统服务功能与生态系统健康评价 ·····	167
7.1	乌梁素海生态系统服务功能评价·····	167
7.2	湖泊生态系统健康评价·····	175
7.3	本章小结·····	180
	参考文献·····	181

第 1 章 乌梁素海及河套灌区概况

1.1 乌梁素海概况

1.1.1 乌梁素海自然地理概况

乌梁素海位于我国内蒙古自治区巴彦淖尔市乌拉特前旗境内，其地理坐标为 $40^{\circ}36' \sim 41^{\circ}03'N$ ， $108^{\circ}43' \sim 108^{\circ}57'E$ ，是全球同纬度地区内最大的湖泊，也是中国的第八大淡水湖泊。乌梁素海现有水域面积 298km^2 ，其中芦苇区面积为 134.24km^2 ，明水区面积为 163.76km^2 。湖泊呈南北长、东西窄的狭长形态（图 1-1），其中南北长 $35 \sim 40\text{km}$ ，东西宽 $5 \sim 10\text{km}$ ，湖岸线长 130km 。湖水深度多数区域在 $0.5 \sim 3.5\text{m}$ ，最深能达到 3.9m ，多年平均水深为 0.9m ，2017 年平均水深为 1.5m 。湖泊所在地区四季更替明显，气温变化差异大，多年平均气温为 7.3°C ，全年日照时数为 3185.5h 。湖泊流域内降雨少而蒸发大，多年平均降雨量为 220mm ，蒸发量为 1502mm 。全年无霜期为 152 天，湖水于每年 11 月初结冰，直到翌年 3 月末到 4 月初开始融化，冰封期约为 5 个月。

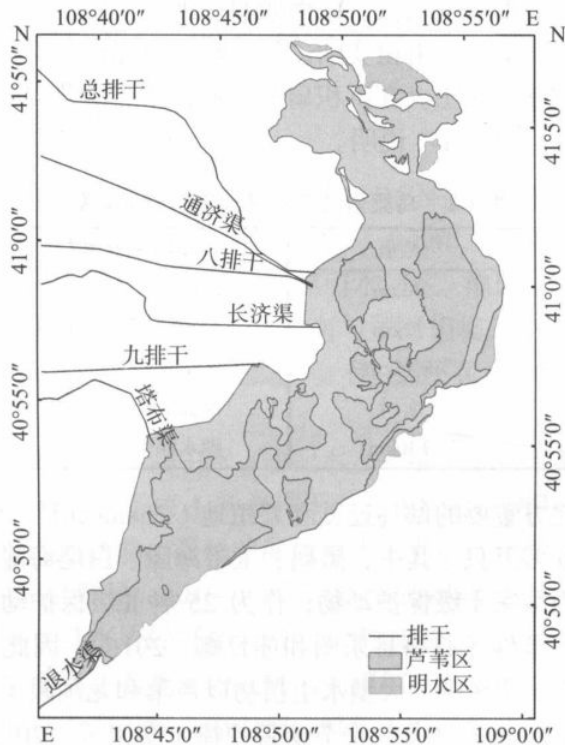


图 1-1 乌梁素海水系图

后套平原（包括乌梁素海）海拔在 1700m 以下，东西长 170km，南北宽 40km。由西南向东北微倾斜，至乌梁素海为最低。地下水比降也由西南向东北逐渐减小，导致地下水流动渐趋微弱，水分上升作用渐趋增强，含盐量增大，造成土壤盐碱化。乌梁素海是 1850 年由黄河改道而形成的河迹湖。由于狼山西部缺口，在西北风作用下，阿拉善沙地流沙向东蔓延，加上色尔腾山、乌拉山等流域山洪所携带泥沙的不断堆积，并不断向南扩展，促使河床不断抬高，到 1850 年将现在西山咀以北早期黄河主流隔断 15km 左右，造成黄河主流南移，留下故道一段，形成一半弧形的长条洼地，即乌梁素海的前身。整个河套平原在地质上是一个内陆断陷盆地，乌梁素海流域受狼山旋扭构造作用，形成扇面状。沉积层在本流域地层结构中分布十分广泛，沉积层上部是冲积层、洪积层和风积层，下部是新老第四纪湖相淤积层。

乌梁素海流域内部地貌形态包括山麓阶地、山前冲洪积平原、黄河冲积湖积平原及风成沙丘几个部分。黄河冲积湖积平原是河套平原的主体，土壤由细砂、粉砂、亚砂土和亚黏土组成。沉积物分布一般以黄河故道上土质较粗的砂质沉积物为主。在黄河沉积分选作用下，乌梁素海流域土质有由西向东颗粒渐细的分布趋势。风积物在本区的分布也很广泛，有些流动沙丘高度在 2~20m，半固定沙丘高 1~2m，固定沙丘很缓，呈波状起伏，长满沙蓬等耐旱植物。风蚀洼地主要分布于西北东南一线，一般面积为 0.5~2km²，深 0.5m 左右。山前冲洪积平原介于黄河冲积平原与山麓洪积平原之间，组成物质以砾石、碎石和砂为主，常夹有黏质砂土。在此地带也有许多沙丘，高度一般在 8m 左右，丘间洼地一般在 1km² 以内，多生长喜湿性植物，因而沙地趋于稳定。乌梁素海流域最北端为山麓洪积平原，地形坡度较大，向南倾斜，坡度一般在 3°~7°。组成物质有明显的分带性，由洪积扇顶向下土质由粗变细，分布顺序为砾石、碎石、小砾石、粗砂、细砂及粉砂、黏质砂土和砂质黏土。在洪积扇交接处，常有南北向凹地，是洪沟和干谷。乌梁素海湖泊形态特征可由表 1-1 说明。

表 1-1 乌梁素海多年平均形态特征参数

形态特征参数	数值	形态特征参数	数值
最大直线长度	36km	岛屿率	6%
最大宽度	12km	容积	3.3 亿 m ³
平均宽度	8.15km	平均水深	0.9m
湖岸线发展系数	2.14	湖盆形状特征系数	22.1
湖周岸线长度	130km	湖水滞留时间	160~200d

乌梁素海是我国北方重要的候鸟迁徙和繁殖地 (Zhang et al, 2012)，目前湖区内有各种鸟类 250 多种 600 多万只，其中，黑鹳、玉带海雕、白尾海雕、大鸨、遗鸥等世界珍贵、濒危鸟类被列为国家 I 级保护动物；作为 25 种 II 级保护动物之一的疣鼻天鹅是乌梁素海一道亮丽的风景线 (赵格日乐图和苏日娜, 2016)，因此，乌梁素海又有“草原上的天鹅湖”的美誉。湖区中的大型水生植物以芦苇和龙须眼子菜、穗花狐尾藻为优势种，浮游植物功能群存在较显著的季节演替规律 (李兴等, 2015)，是内蒙古自治区重要的经济芦苇产地，丰富的浮游动物为鱼类提供了充足的饵料 (王玉等, 2012)，使

乌梁素海成为巴彦淖尔市第一大渔业基地 (Zhao et al, 2014), 对其区域经济和环境具有重要的贡献。

1.1.2 水环境污染主要特征

乌梁素海补给水源主要是农田退水, 其次为工业废水和生活污水, 每年汇入乌梁素海大量的污染物质加速了乌梁素海水环境的恶化和湖泊的沼泽化, 导致乌梁素海成为世界上沼泽化发展速度很快的湖泊之一。乌梁素海水环境污染特征表现为:

(1) 河套灌区排入乌梁素海的污染物种类多、浓度高, 致使湖泊水环境遭受多种污染的破坏。

(2) 农业面源污染物氮、磷对水体的污染程度取决于从农田排出氮、磷的总负荷量, 总体上, 氮污染大于磷污染, 并使乌梁素海成为富营养化水体, 且各项富营养化指标有逐年上升的趋势。

(3) 芦苇和水草生长过于富集, 在湖底形成巨厚的生物淤积。

(4) 湖泊的水环境状态随每年排入污水水量、水质的变化而变化。湖水矿化度受灌区排水量、湖区水动力场及季节等因素的影响, 在年内和年际间有明显差异。

(5) 乌梁素海湖水透明度普遍较高, 尤其是边缘避风处, 这里是沉水植物茂密地区, 湖水清澈见底, 湖水透明度平均值在 1.02m (2017 年实测数据)。

(6) 枯水期湖水污染物浓度高, 丰水期相对较低。

1.2 河套灌区概况

1.2.1 河套灌区自然地理概况

内蒙古河套灌区是我国古三大灌区之一, 位于 $40^{\circ}15'N\sim 41^{\circ}18'N$ 、 $106^{\circ}20'E\sim 109^{\circ}19'E$, 东西长约 250km, 南北宽约 50km, 总土地面积约 188.93 万 hm^2 , 现有灌溉面积 55.83 万 hm^2 , 具有悠久历史的同时也是亚洲最大的一首制自流引水灌区。灌区位于黄河以北的冲洪积平原, 北与阴山山脉的狼山相抵, 东至乌拉山, 南与黄河相临, 西与乌兰布和沙漠相接。灌区农产丰富, 是国家重要的商品粮油基地之一, 有“天下黄河, 唯富一套”的美称 (郝芳华等, 2013; Wu et al, 2016)。

灌区由黄河三盛公水利枢纽控制引水, 输配水水系由 1 条总干渠和 13 条干渠组成, 其中总干渠长达 180km; 排水水系由 1 条总排干沟及 10 条干沟组成, 其中总排干沟长 220km, 输配水渠与排水沟控制整个灌区的灌溉排水, 形成一个网状的、有灌有排的一首制灌区, 图 1-2 (马龙和吴敬禄, 2010)。灌区以乌梁素海作为排水承泄区, 湖泊水量主要来自上游的农田退水, 其水质的好坏直接影响湖泊内的水质环境。河套灌区由 5 个灌域组成, 自西向东分别是乌兰布和灌域、解放闸灌域、永济灌域、义长灌域和乌拉特灌域。大量的人工渠系和排干沟贯穿平原内部, 每年丰富的灌水补给使河套灌区成为干旱区人工灌溉的“绿洲”。

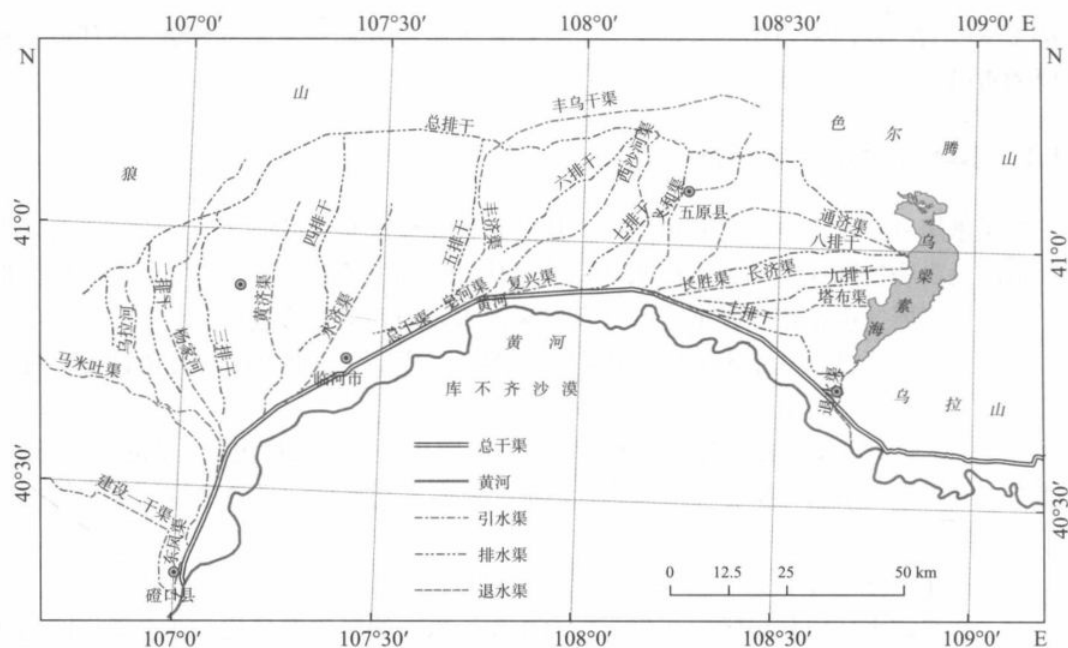


图 1-2 巴彦淖尔市河套灌区灌排系统

1.2.2 河套灌区水文地质概况

河套灌区地处干旱气候带，地质构造为封闭的断陷盆地，其具有明显的干旱气候带沉降盆地的水文地质特征（王伦平等，1993）。

河套平原发育在侏罗纪晚期，其所受到的东西向、北东向和北西向的三组断裂构造控制明显影响着盆地的发展和第四纪沉积特征。灌区平原属于断陷盆地，盆地呈西深东浅、北深南浅的不对称拗陷。地下径流没有天然的排泄路径，是一个封闭的沉降盆地。由于地层盐分富集的发生时间受气候干湿变化的影响，自更新世以来，河套灌区有三个相对的积盐期。特殊的地质构造和区域气候条件是造成河套灌区盐渍化严重的一个主要因素。

在地质构造特征上河套平原为长期下沉的断陷盆地，沉积层主要是富含盐分的湖相沉积层，但在漫长的地质时期里，黄河的多次泛滥致使黄河冲积层覆盖在湖相沉积层上，造成了河套平原呈现湖相咸水层和冲积淡水层的复杂特性。便利的引黄灌溉条件和其特有的上覆淡水层，才使河套灌区的农业得以建立和发展。但是河套灌区平原地势西南高、东北低，灌溉退水及排水必须从西南流向东北然后折向东南入黄河；同时由于地面坡降平缓、土壤颗粒细、灌区平原区域渗透性差，地势地貌特征上，灌区平原呈现西高东低的地势走向，地下水从西向东而行。但又由于灌区东南部乌拉山的隆起切断了地下水的流路，使地下水的流动受阻，致使河套平原的地下水排泄方式从水平方向转变为垂直方向，以垂直蒸发为主。灌区平原干旱少雨的气候条件，使得灌区土壤水的运动演变是以灌溉-入渗-蒸发为主的基本形式。

特有的地质构造使得河套灌区地下水以浅层地下水为主，补给来源主要包括 4 个部

分:引水渠道和排水沟的渗漏水、田间灌溉水的渗漏、大气降水和北部山洪的侧向补给,但灌溉水量是影响浅层地下水变化的主要因素。河套灌区作物生长期内的灌溉期从每年的4月持续到9月,期间的浅层地下水埋深1.0~1.5m,灌区秋浇期在每年的10月或11月,大量的灌溉水使得浅层地下水的埋深在0.5m左右。

灌区地下水水质按矿化度的大小可分为全淡型、上淡下咸型和全咸型三类。全淡型:矿化度小于1.5g/L,以 HCO_3^- 、Cl-Na、Mg型水为主,主要分布在永济渠以西、陕五公路以南的广大地区,含水层厚度60~200m。上淡下咸型:矿化度多小于2g/L,以 HCO_3^- 、Cl-Na及 HCO_3^- -Na型水为主。淡水层厚自东向西增厚,咸淡水界面由乌拉特前旗北部的10~30m,向西增深为50~110m,主要分布在永济渠以东至乌拉特前旗北部地区。全咸型:矿化度以5~10g/L为主,以Cl-Na型水为主。主要分布在灌区南北两条咸水带内,南部咸水带主要分布在景阳林至西山咀一带,北部咸水带西起大树湾,经份子地、梅林、红旗到广益站。

由于灌区内土壤水运动的主要方式是灌溉水入渗、蒸发/蒸腾,在潜水蒸发过程中,盐分不断积累使得河套平原土壤盐渍化越来越凸显。

河套灌区位于黄河北岸,土壤母质以黄河冲积物为主,灌区平原内广泛分布着栗钙土、棕钙土、灰漠土、灰棕漠土,其中北部山区以灰褐土为主。灌区平原内的土壤主要分为两类,一类是由气候条件和生物作用为主导的地带性土壤,如西部沙漠区的灰漠土和风沙土以及山区的粗骨土,另一类是以人为活动灌溉措施等因素为主导的非地带性土壤,如灌淤土。灌区平原土壤共分14个土类,32个亚类,94个土属,348个土种。

河套灌区主要分布在巴彦淖尔市内。依据巴彦淖尔市土壤普查化验结果,其土壤有机质含量偏低,大于20g/kg的土壤比例只占全区土壤的10%左右,有机质含量小于10g/kg的土壤占50%;有机质含量平均为11.5g/kg。全氮的平均含量为0.75g/kg,有效磷的平均含量为8.8mg/kg,土壤的速效钾含量平均为207mg/kg。参照全国土壤普查技术规程中土壤养分含量分级标准,巴彦淖尔市全市土壤有机质在四级以上的仅占19%左右;全氮五级以下的占71%,磷占26%;全氮四级以上的占19%,速效磷占51%。总体来看是氮磷含量偏低,但速效钾含量较丰富(张宝庆,2014)。

1.2.3 河套灌区社会经济概况

河套灌区覆盖巴彦淖尔市的临河、五原、磴口、乌拉特前旗和杭锦后旗5个区(县、旗)。灌区人口以农业户籍人口为主,且近些年人口数量增长较快。2013年,灌区总人口数为152.9万人,其中农业户籍人口109.2万人^①。灌区的农牧业是整个巴彦淖尔市经济增长的基础和支撑。其中灌区的农业以种植粮食和经济作物为主,粮食作物包括小麦、玉米和油葵,种植比例高达灌区总种植面积的70%左右,经济作物主要包括瓜果、甜菜和马铃薯以及饲用作物的苜蓿等。灌区的牧业以养殖大牲畜为主,据2013年统计年资料,灌区内大牲畜(马、牛等)共计20.48万头,还包括羊507.01万头,猪43.54万头。

^① 《内蒙古县域社会经济统计概要》,2014。

伴随着社会的发展、交通运输能力的提升,灌区的对外贸易能力得到了极大的提高,灌区的农牧业发展迅猛。以 2013 年经济指标计算,巴彦淖尔市河套灌区全年的 GDP 总值高达 644.77 亿元^①。与此同时,灌区不断地对生态环境进行治理和规划,旅游行业也开始逐步兴起,大大提高了灌区社会影响力(曹连海等,2014;张银辉等,2005)。

1.3 河套灌区与乌梁素海的补排水关系

乌梁素海位于河套灌区东北部的黄河古河道上,地势低洼,且灌区平原地势西南高东北低,因此乌梁素海是灌区内的农田退水、地下水及降水和山洪的主要承泄区。而乌梁素海的主要排泄方式是乌毛计泄水、渗漏和蒸发蒸腾,其南部乌毛计泄水口有水闸进行泄水量的控制,主要目的是维持乌梁素海总水量,控制并保证湖水水面高程稳定在 1018.5m 左右。

乌梁素海的补给水源主要来自三方面,分别是灌区农田退水、自然及北部山区的侧向补给。目前湖泊接受来自农业灌区 6900km² 农田灌溉退水,废水补给水进入湖泊水体后通过其自身的自净作用再由南段的乌毛计泄水渠排入黄河,每年以平均 20m³/s 的流量向黄河排水,年补给水量约在 2×10⁸m³。乌梁素海既是河套灌区排水系统中的受纳水体,同时也是灌区流域内污染物的积累区(汪敬忠等,2015)。乌梁素海的水质变化是整个灌区流域生态系统的健康指标。

参 考 文 献

- 曹连海,吴普特,赵西宁,等.2014.近50年河套灌区种植系统演化分析.农业机械学报,45(7):144-150
- 郝芳华,孙铭泽,张璇,等.2013.河套灌区土壤水和地下水动态变化及水平衡研究.环境科学学报,33(3):771-779
- 李兴,李建茹,徐效清,等.2015.乌梁素海浮游植物功能群季节演替规律及影响因子.生态环境学报,24(10):1668-1675
- 马龙,吴敬禄.2010.近50年来内蒙古河套平原气候及湖泊环境演变.干旱区研究,27(6):871-877
- 汪敬忠,吴敬禄,曾海鳌,等.2015.内蒙古主要湖泊水资源及其变化分析.干旱区研究,32(1):7-14
- 王伦平,陈亚新,曾国芳,等.1993.内蒙古河套灌区灌溉排水与盐碱化防治.北京:水利电力出版社,15-25
- 王玉,邓娴敏,吴东浩,等.2012.内蒙古典型湖泊夏季浮游动物群落结构特征及营养状况//中国水文科技新进展——2012中国水文学学术讨论会论文集,694-700
- 张宝庆.2014.黄土高原干旱时空变异及雨水资源化潜力研究.杨凌:西北农林科技大学,78-101
- 张银辉,罗毅,刘纪远,等.2005.内蒙古河套灌区土地利用与景观格局变化研究.农业工程学报,(1):61-65
- 赵格日乐图,苏日娜.2016.疣鼻天鹅(*Cygnus olor*)研究进展.内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版),45:76-79,83
- Wu Y, Li C Y, Zhang C F, et al. 2016. Evaluation of the applicability of the SWAT model in an arid piedmont plain oasis. Water Science and Technology, 73(6): 1341-1348
- Zhang Y M, Jia Y F, Jiao S W, et al. 2012. Wuliangshuai Wetlands: A critical habitat for migratory water birds. Journal of Resources and Ecology, 3(4): 316-323
- Zhao S N, Shi X H, Li C Y, et al. 2014. Seasonal variation of heavy metals in sediment of Ulansuhai Lake, China. Chemistry and Ecology, 22(5): 1101-1114

^① 内蒙古统计年鉴,2013。

第2章 乌梁素海水水质污染特征及其演变

目前乌梁素海水污染与富营养化严重,是我国污染较为严重的湖泊之一。乌梁素海是内蒙古自治区巴彦淖尔市河套灌区农田退水、生活污水及工业废水的承泄场所,亦是污染物质的储存地,对于缓解黄河下游污染、水土保持、流域环境改善都有极其重要的作用。内蒙古农业大学河湖湿地水环境保护与修复创新团队自2001年以来,每月对乌梁素海的水质状况进行监测,发现近年来乌梁素海湖泊水质一直处于Ⅳ类至Ⅴ类。

本章以团队2005~2014年对乌梁素海常年监测的水样采集点的水质数据进行统计,从富营养化、有机污染、盐化污染、水化学、重金属污染和浮游植物等多方面分析乌梁素海水水质污染特征及其演变,并分析乌梁素海水污染的主要成因,为深入推进乌梁素海水水质治理提供重要参考。

2.1 乌梁素海水体富营养化特征

2.1.1 乌梁素海水体总氮、总磷变化特征

水体富营养化是指在人类活动的影响下,生物所需的氮、磷等营养物质大量进入湖泊、河口、海湾等缓流水体,引起藻类及其他浮游生物迅速繁殖,水体溶解氧量下降,水质恶化,鱼类及其他生物大量死亡的现象。

总氮(TN)是衡量水体富营养化的重要指标之一。作为河套灌区生活污水的承泄地,乌梁素海每年接纳的大量生活污水是其TN的主要来源(何连生等,2013)。在2005~2014年,乌梁素海TN平均浓度变化范围为1.62~5.27mg/L,平均值为3.27mg/L,最大值出现在2005年,最小值在2014年(图2-1)。近十年间,乌梁素海TN平均浓度整体呈现下降的趋势。水质由十年前的劣Ⅴ类标准,上升到2014年接近Ⅳ类水标准,转好趋势明显。

总磷(TP)是造成水体富营养化的另一个重要指标,同时也是导致乌梁素海富营养化污染的限制性元素(史小红等,2007)。城镇生活污水及农田残留的大量磷及其化合物通过排干进入湖泊,是乌梁素海磷元素的主要来源。其中,城镇生活污水的贡献率为25.6%,农田排水的贡献率为23.2%,两者的贡献率总和接近50%(何连生等,2013)。在2005~2014年,乌梁素海TP平均浓度变化范围为0.09~0.23mg/L,最大值出现在2007年,最小值出现在2010年(图2-1)。由图2-1可见,乌梁素海TP浓度呈波动性变化,近十年来没有显著的下降,平均值为0.15mg/L,处于地表水环境质量标准中的Ⅳ类标准。

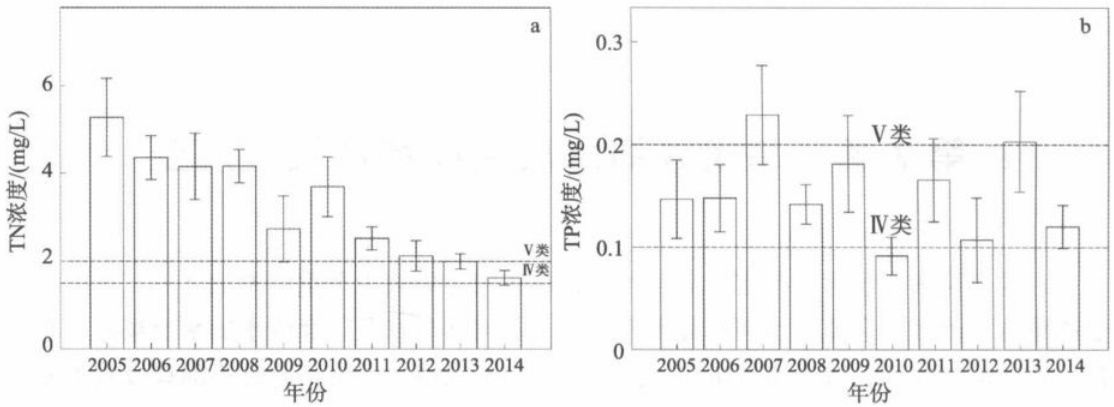


图 2-1 2005~2014 年乌梁素海 TN、TP 浓度的年际变化

2.1.2 乌梁素海水体叶绿素变化特征

叶绿素 a 含量可以表明水体中藻类现存数量的多少。从图 2-2 可以看出，叶绿素季节性空间分布并不明显，但各个季节叶绿素 a 分布均出现由北向南逐渐降低的趋势，这与总氮总磷的空间分布趋势十分相似，表明藻类生物量与氮磷等营养盐的浓度密切相关。从时间分布上看，2006 年 5 月、7 月、10 月和 2007 年 1 月各测点叶绿素 a 平均浓度分别为 $53.3\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $66.1\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $37.6\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $28.6\text{mg}/\text{m}^3$ 。5 月阳光充足，温度回升，水生植物处于营养生长阶段，不断从水中汲取养分，使得叶绿素 a 含量不断增加；7 月是水生植物生殖生长期，水体中藻类数量达到顶峰，参照相关研究（杨志岩等，2009），按叶绿素 a 含量评价水体富营养化的标准，乌梁素海已达到富营养化水平。随着秋季来临，温度降低，水生植物处于衰老死亡期，叶绿素 a 浓度不断降低，在冬季达到最低水平。

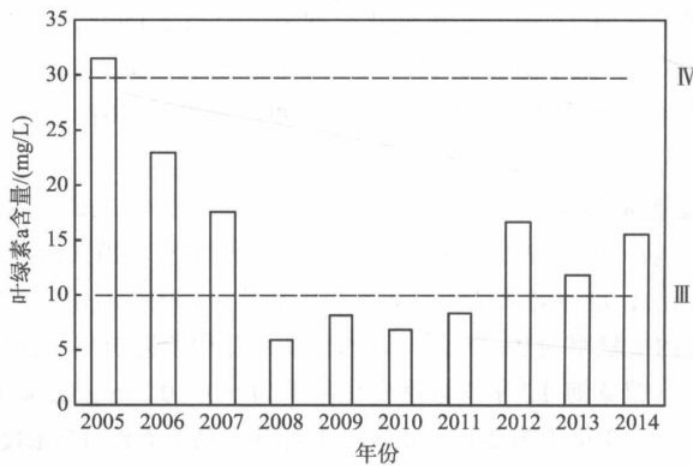


图 2-2 乌梁素海叶绿素 a 含量时空分布结果

2.2 乌梁素海水体有机污染特征

2.2.1 乌梁素海水体化学需氧量变化特征

作为河套灌区第一大湖泊,有机污染是乌梁素海水环境问题的又一大污染特征。灌溉退水含有大量的有机物质,生活污水及流域内的径流又携带大量的牲畜排泄物和植物残骸等有机含量高的污染物质,这些都是引起乌梁素海有机污染的重要原因。

化学需氧量(COD)浓度的大小常被用来表征地表水所受到的有机污染的程度。COD浓度过高,会导致水体中溶解氧(DO)浓度大幅下降,对水生动植物的生长产生不利影响。乌梁素海的COD主要来自工厂废水的排放(何连生等,2013)。2005~2014年COD平均浓度变化范围为23.88~104.93mg/L,平均值为67.14mg/L,低于地表水环境质量标准中V类标准的限值,为劣V类。由图2-3可见,2005~2014年乌梁素海COD平均浓度由2005年的90.74mg/L到2014年的23.88mg/L,10年间COD浓度下降了70%以上,降幅非常明显,已达到国家规定水质标准中的IV类水标准。

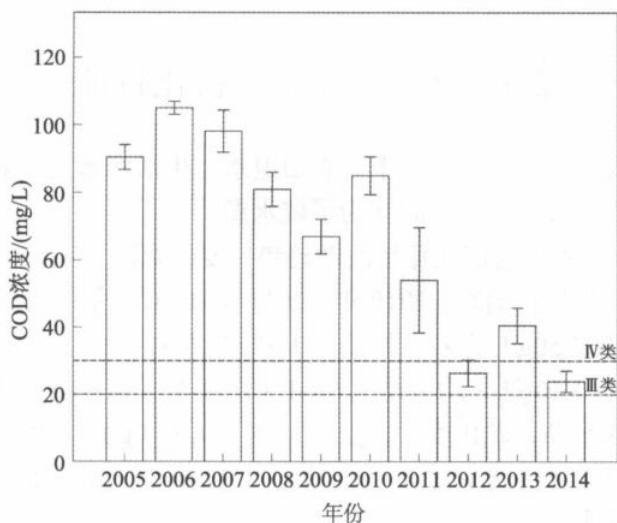


图 2-3 2005~2014 年乌梁素海 COD 浓度的年际变化

2.2.2 乌梁素海水体溶解氧含量变化特征

溶解氧(DO)是衡量湖泊水体环境质量的重要指标之一,是水体自净能力的重要标志,对于维持水生生态系统的健康具有重要的意义。2005~2014年,乌梁素海DO平均浓度变化范围为4.15~8.3mg/L,平均值为5.72mg/L,最小值出现在2007年,最大值出现在2014年(图2-4)。由图2-4可以发现,乌梁素海DO平均浓度在2005~2014年间呈现显著增加的趋势。2005~2008年,DO浓度变化相对稳定在一个较低的水平,2009年以后,DO浓度逐渐上升。近十年来,乌梁素海的DO平均浓度由2005年的IV类标准