

基于遥感的内蒙古“一湖两海”近35年水域动态变化监测研究

贾静^{1,2}, 迟文峰^{1,2*}, 李玉刚³, 娄雨欣^{1,2}, 李鑫^{1,2}

¹内蒙古财经大学资源与环境经济学院, 内蒙古 呼和浩特

²祖国北疆资源利用与环境保护协调发展院士专家工作站, 内蒙古 呼和浩特

³内蒙古自治区人力资源和社会保障厅, 内蒙古 呼和浩特

Email: *chiwenfeng2005@126.com

收稿日期: 2021年4月16日; 录用日期: 2021年5月24日; 发布日期: 2021年5月31日

摘要

“一湖两海”(呼伦湖、乌梁素海和岱海)是内蒙古三大淡水湖,在维持区域生态系统服务方面发挥着重要的作用,也是我国北方生态安全屏障的重要组成部分。本文基于遥感手段,采用归一化水体指数(NDWI)与人机交互式解译方式,获取1985~2020年每5年间隔的水体分布数据,对“一湖两海”湖泊水体变化与降水量、平均气温和人类活动进行相关分析,结果表明:“一湖两海”湖泊水体面积总体呈减少态势,尽管呼伦湖、乌梁素海没有出现严重水域面积萎缩现象,但周边大小的湖泊明显消失;气候暖干化是湖泊水体萎缩的主要原因,工业开发、城市建设、旅游开发等人类活动加剧了湖泊环境变化。“一湖两海”是中国北方湖泊干渍化的“缩影”,科学开展国土空间规划布局,实施“山水林田湖草沙”重大修复工程,对筑牢祖国北方重要生态安全屏障具有重要的意义。

关键词

遥感监测, 水体面积, 时空变化, 影响因素, “一湖两海”

Research on Monitoring Change in Lake Water Areas of “One Lake and Two Seas” Based on Remote Sensing in Inner Mongolia in the Past 35 Years

Jing Jia^{1,2}, Wenfeng Chi^{1,2*}, Yugang Li³, Yuxin Lou^{1,2}, Xin Li^{1,2}

¹College of Resources and Environmental Economics, Inner Mongolia University of Finance and Economics,

*通讯作者。

Hohhot Inner Mongolia

²Resource Utilization and Environmental Protection Coordinated Development Academician Expert Workstation in the North of China, Inner Mongolia University of Finance and Economics, Hohhot Inner Mongolia

³Office of Human Resources and Social Security of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot Inner Mongolia
Email: *chiwenfeng2005@126.com

Received: Apr. 16th, 2021; accepted: May 24th, 2021; published: May 31st, 2021

Abstract

“One lake and Two seas” (Hulun Lake, Wuliangsumai Lake and Daihai Lake) are three major freshwater lakes in Inner Mongolia, which play an important role in maintaining the ecosystem service function of the region, and are also an important part of the ecological security barrier in northern China. Based on remote sensing, normalized water body index (NDWI) and human-computer interactive interpretation method were used to obtain the water distribution data every five years from 1985 to 2020. The correlation analysis between water body change and precipitation, average temperature and human activities in “One lake and Two seas” lake was carried out. Although Hulun Lake and Wuliangsumai Lake have no serious water area shrinkage phenomenon, the lake bubbles around have disappeared obviously; climate warming and drying are the main factor of lake water shrinking, and human activities such as industrial development, urban construction, tourism development have intensified the lake environmental change. “One lake and Two seas” is the “epitome” of the dry and waterlogged lakes in northern China. It is of great significance to scientifically carry out the land space planning and layout, and implement the major restoration project of “mountains, rivers, forests, fields, lakes, grass and sand” to build an important ecological security barrier in northern China.

Keywords

Remote Sensing Monitoring, Water Area, Spatiotemporal Change, Influencing Factors, One Lake and Two Sea

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

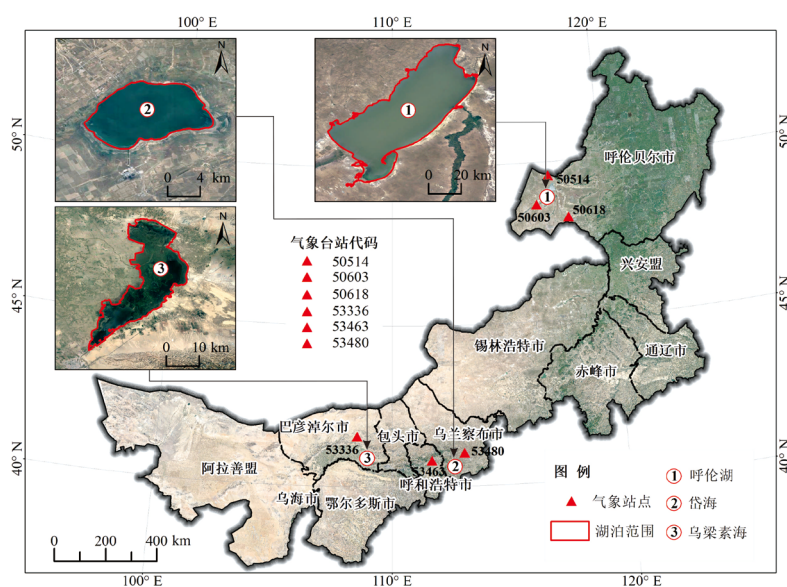
在全球气候变化和高强度人类活动的双重因素影响下，尤其是快速的城镇化、工业化、农业设施化进程，湖泊萎缩与生境退化已成为不可忽视的国际问题之一[1] [2] [3]，湖泊保护对维持区域生态系统平衡具有重要的意义[4]。联合国可持续发展目标(SDGs 2030)更加强调水资源保护问题[5] [6] [7]，“未来地球”(Future Earth)科学计划中水资源可持续利用是全球发展(Global Development)关注的重要问题[8]。中国的新时代发展强调绘制未来 2035 年和 2050 年“美丽中国”愿景目标，加强水资源保护在建设美丽中国中发挥至关重要的作用[9]。湖泊是重要的自然资源，具有重要的调节和支持生态服务功能[10] [11]，湖泊环境保护直接关系到国家生态安全，是环境保护工作的一项重要任务[12]。湖泊作为区域陆地水循环中的一个重要载体，对区域的水量平衡发挥重要作用[13]。因此，研究长时间序列湖泊水域动态变化，及时掌握水域演变规律，对增进区域水量平衡认知及水资源可持续利用提供重要支撑。

研究湖泊水域动态演变规律对于有效开展区域水资源管理具有重要的意义[14], 精准、迅速地开展湖泊动态监测, 揭示其变化驱动因素成为关键环节[15]。随着遥感技术的发展, 给湖泊水域高时空动态监测和相关参数反演提供了便利条件[16] [17], 成为湖泊研究最有效的技术手段。Landsat MSS、TM、ETM、8OLI 系列及哨兵、高分系列等多波段信息源不仅分辨率较高, 而且逐渐面向大众免费应用, 逐步成为最主要的遥感数据信息源[3]。湖泊动态变化监测, 重点开展水域面积信息提取和动态变化检测两个方面, 多波段卫星影像数据是最常用的数据源, 利用遥感可见光和近红外波段可方便解决相应问题[17] [18]。基于遥感参数反演与人机交互解译相结合的方式有效提升陆表信息提取时空精度[18] [19], 为湖泊信息获取具有重要的意义。

中国北方生态环境脆弱, 由于高强度人类活动和气候的剧烈变化导致湖泊萎缩现象明显, 内蒙古区域表现最为突出[1]。湖泊的萎缩和干涸加剧了区域环境的恶化, 直接影响了区域社会经济的发展。呼伦湖、岱海、乌梁素海是内蒙古三大淡水湖, 具有调节气候、修复生态、涵养水源的重要生态功能作用[10] [11]。“一湖两海”环境污染和生态治理问题, 是 2016 年中央环保督察组和 2018 年中央环保督察“回头看”对内蒙古自治区的反馈意见中整改的重要内容。习近平总书记在参加内蒙古代表团审议时强调, “加快呼伦湖、乌梁素海、岱海等水生态综合治理”, 对于构筑我国北方生态安全屏障具有重要的意义[20]。为了准确掌握和揭示内蒙古“一湖两海”湖泊水域时空格局和动态特征, 分析主要影响驱动机制, 以探索“一湖两海”生态治理和环境保护协调发展路径。本文以卫星遥感影像数据为基础, 开展 1985~2020 年“一湖两海”湖泊水域动态监测, 收集气象、社会经济等资料, 揭示湖泊水域动态变化与影响驱动机制。借鉴成熟的国土空间规划及“山水林田湖草沙”治理模式实现相关地区的湖泊保护与土地资源的可持续利用。

2. 研究区概况

内蒙古“一湖两海”地域分布跨度大, 毗邻区域地理背景、生境环境、生态系统结构各异。呼伦湖(又名达赉湖、达赉诺尔)位于呼伦贝尔草原西部区域(图 1(①)), 属于中温带大陆性草原气候, 地理位置介于



注: 该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2016)2932 号的标准地图制作, 底图无修改。

Figure 1. The geographical location of the study area

图 1. 研究区地理位置示意图

N48°30'40"~49°20'40"、E117°00'10"~117°41'40"，跨新巴尔虎左旗、右旗及扎赉诺尔区之间，是中国第四大淡水湖，是地壳运动形成的构造湖，处于海拉尔盆地的最低部位，周边以沼泽、典型草原和草甸草原为主。岱海是内蒙古第三大内陆湖(图 1(②))，属于中温带大陆性季风气候，地理位置介于N40°38'55"~40°38'59"、E112°33'37"~112°46'58"，位于乌兰察布市凉城县辖区内，周边以滩涂、草地及耕地为主。乌梁素海是中国八大淡水湖之一(图 1(③))，属于半干湿的中温带季风气候，地理位置介于N40°45'27"~41°8'42"、E108°40'10"~108°58'27"，位于内蒙古巴彦淖尔市乌拉特前旗境内，是黄河改道形成的河迹湖，周边以农田生态系统为主。

3. 数据与方法

3.1. 数据源

本文采用的遥感数据基于美国地质调查局(USGS) (<https://www.usgs.gov/>)和地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)下载获取，涉及 1985、1990、1995、2000、2005、2010、2015 及 2020 年 Landsat 卫星数据，选择覆盖“一湖两海”(呼伦湖 125026、岱海 126032、乌梁素海 128032)范围的无云、无条带影像数据。内蒙古高原地表水体面积变化受季节影响较大，相关研究表明在每年的 9 月至次年 2 月湖泊水面积相对稳定[1] [21] [22]。本文选取的数据均为当年 9 月至次年 2 月的遥感影像(表 1)。气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn/>)及内蒙古生态与农业气象中心，收集 6 个气象站点的年平均气温、年降水量等数据开展分析。为了揭示人为扰动对湖泊的影响，基于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)获取土地利用/覆盖变化数据[23]，报道精度超过 95% [23] [24]。

Table 1. Description of remote sensing image data

表 1. 遥感影像数据说明

轨道号	影像时相信息							
	1985年MSS	1990年TM	1995年TM	2000年TM	2005年TM	2010年TM	2015年TM	2020年OLI
125026	1985-10	1990-10	1995-11	2000-09	2005-09	2010-10	2015-09	2020-12
126032	1985-09	1990-10	1995-10	2000-09	2005-10	2010-09	2015-10	2020-9
128032	1985-10	1990-09	1995-11	2000-09	2005-09	2010-11	2015-09	2020-10

3.2. 水体面积提取方法

本研究中，采取如下处理方式对内蒙古“一湖两海”水域信息进行提取。

首先，利用归一化水体指数法(*NDWI*) [25]进行水域信息提取，该指数能够有效的增强水域及抑制非水体信息，*NDWI* 计算公式为：

$$NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR) \quad (1)$$

式中，*Green* 为遥感影像绿色波段波长，*NIR* 为近红外波段波长，分别对应 Landsat TM 4-5(2 与 4 波段)及 Landsat 8OLI (2 与 5 波段)相应波段信息。

其次，基于人机交互解译方式[23]对分类结果的矢量文件再次进行校核确认，有效提升地表覆盖信息提取精度[26]。

最后, 将核查后的数据统一投影和坐标系, 其投影方式均为 Albers (图 1), 投影的主要参数: 单位为 m; 参考椭球体为 Krasovsky。将不同时相的水体图相互叠置, 获取动态图斑。

4. 内蒙古“一湖两海”时空演变规律

4.1. “一湖两海”水体面积年际变化分析

基于 NDWI 与人机交互式解译方式获取 1985~2020 年每 5 年间隔的“一湖两海”水体分布数据, 结果显示, 内蒙古“一湖两海”水体面积总体呈下降趋势(图 2(a4)), 前期(1985~1995 年)增加明显, 后期(1995~2020 年)下降态势显著。近 35 年, 呼伦湖存在部分水域萎缩状况; 1985~2005 年, 呼伦湖面积基本维持在 2100 km²之上, 2010 年后, 水体面积下降到 2100 km²之下。1985~2020 年, 岱海水体面积呈现逐年缩小趋势, 面积从 1985 年的 133 km² 逐年缩小到 2020 年的 48.18 km²。地处河套平原的乌梁素海, 由于农田排水等因素影响, 湖泊水体面积总体呈增加态势, 从 2010 年以来水域面积明显减少。

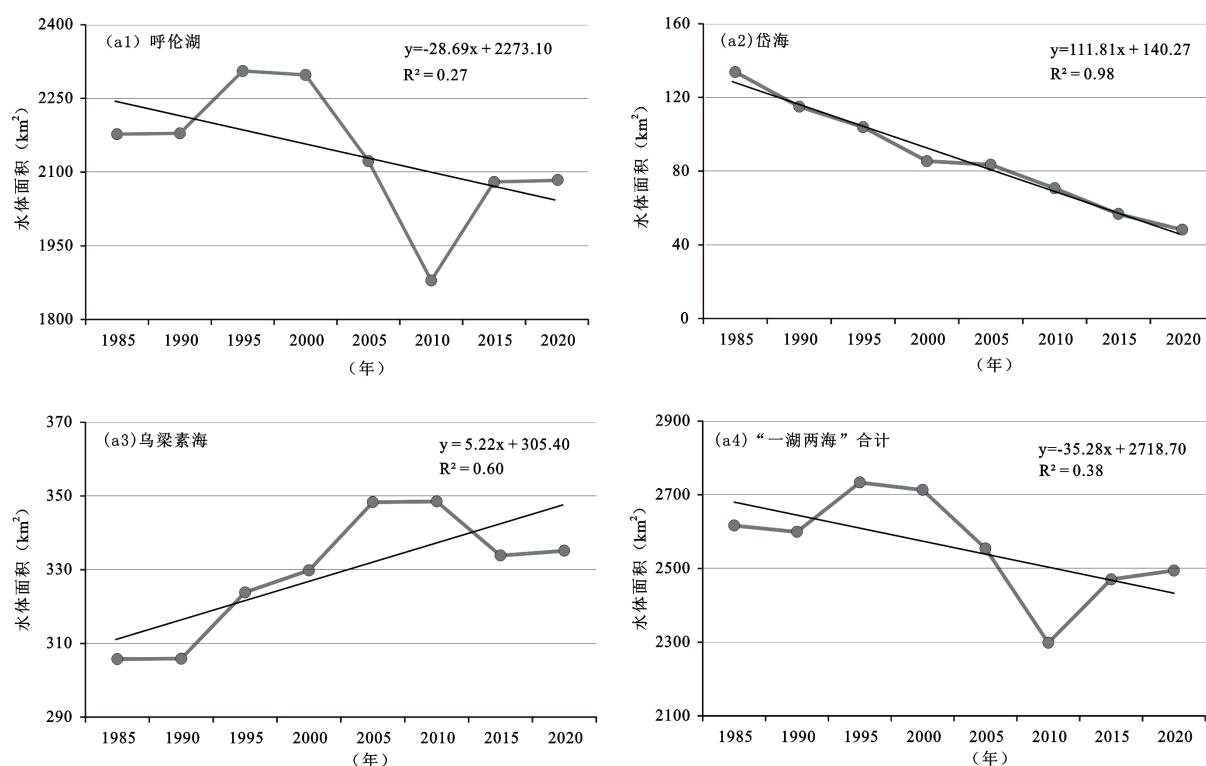


Figure 2. The change trend of “One lake and Two seas” water area in Inner Mongolia from 1985 to 2020

图 2. 1985~2020 年内蒙古“一湖两海”水体面积变化趋势

4.2. “一湖两海”水体面积空间变化分析

内蒙古“一湖两海”1985~2020 年水体面积空间变化差异明显(图 3)。呼伦湖存在部分区域水域面积萎缩状况, 其面积萎缩主要位于东部、南部及周围湖泊, 2015 年以来表现最为突出; 岱海水域面积萎缩严重, 水域面积呈逐年下降态势, 如果不采取相应有效措施, 岱海将会彻底消失; 地处河套灌区的乌梁素海, 其主要补给来源于农田排水, 河套地区引黄济湖水利工程以及灌区渠系工程的建设与完善, 水量得以控制, 但之后排入黄河水量减小, 灌溉用水的退入导致湖面扩大, 湖泊北部、西部空间变化明显。

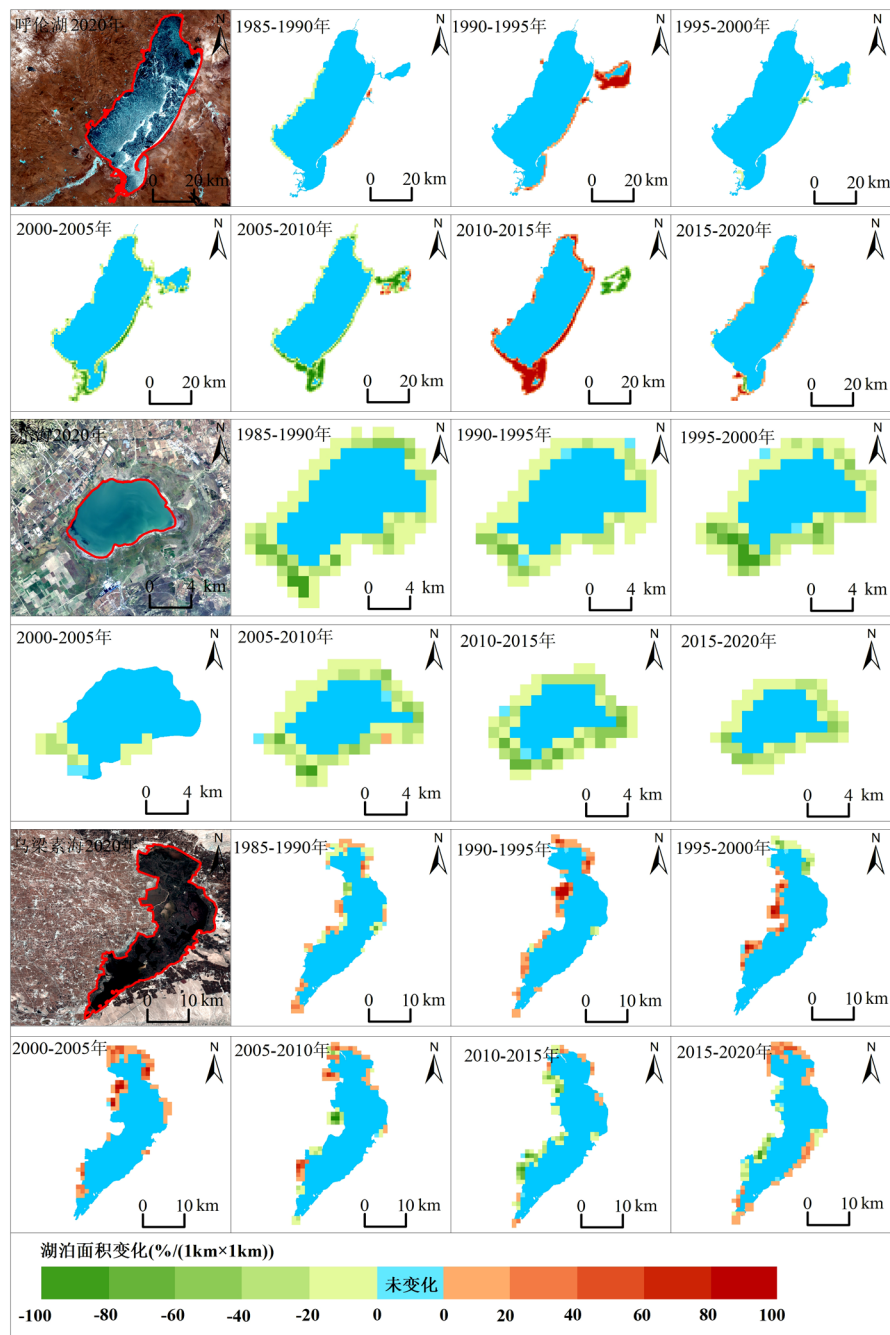


Figure 3. Spatial variation of “One lake and Two seas” water area in Inner Mongolia from 1985 to 2020
 图 3. 1985~2020 年内蒙古“一湖两海”水体面积空间变化

5. 内蒙古“一湖两海”水域面积变化影响因素分析

5.1. 气象因素

湖泊水体面积对气候变化较为敏感，分析湖泊水体面积变化与气温、降水、蒸发等指标的相关性，进而探究内蒙古“一湖两海”水体面积变化影响因素。根据气象台站监测数据显示，内蒙古气温变化趋势基本呈现为西南增温显著，东北部略有降温，其中乌梁素海所在的巴彦淖尔市平均增温在 0.32℃，

岱海所在乌兰察布市平均增温 0.51°C 。乌梁素海、岱海及呼伦湖周边气象站监测数据显示从 1961 年开始, 年均气温呈波动增加趋势。根据年份与年平均气温、年降水总量的线性拟合, “一湖两海” 近 35 年来气温呈增加、降水量呈减少态势。其中, 乌梁素海周边年平均气温由 1985~2000 年的平均 5.64°C 上升到 2000 年至今的平均 6.27°C (图 4(c)); 岱海周边年平均气温由 1985~2000 年平均 4.16°C 上升到 2000 年至今平均 5.06°C (图 4(b)); 呼伦湖周边年平均气温由 1985~2000 年平均 0.67°C 上升到 2000 年至今平均 0.82°C (图 4(a))。气温上升的同时, 区域内降水出现不同程度的下降趋势。其中, 岱海周边年降水量由 1985~2000 年平均 364.66 mm 下降到 2000 年至今平均 349.41 mm (图 4(b)), 呼伦湖周边年降水量由 1985~2000 年平均 294.01 mm 下降到 2000 年至今平均 251.88 mm (图 4(a))。因此, 气候暖干态势条件是造成湖泊缩减的主要因素之一。

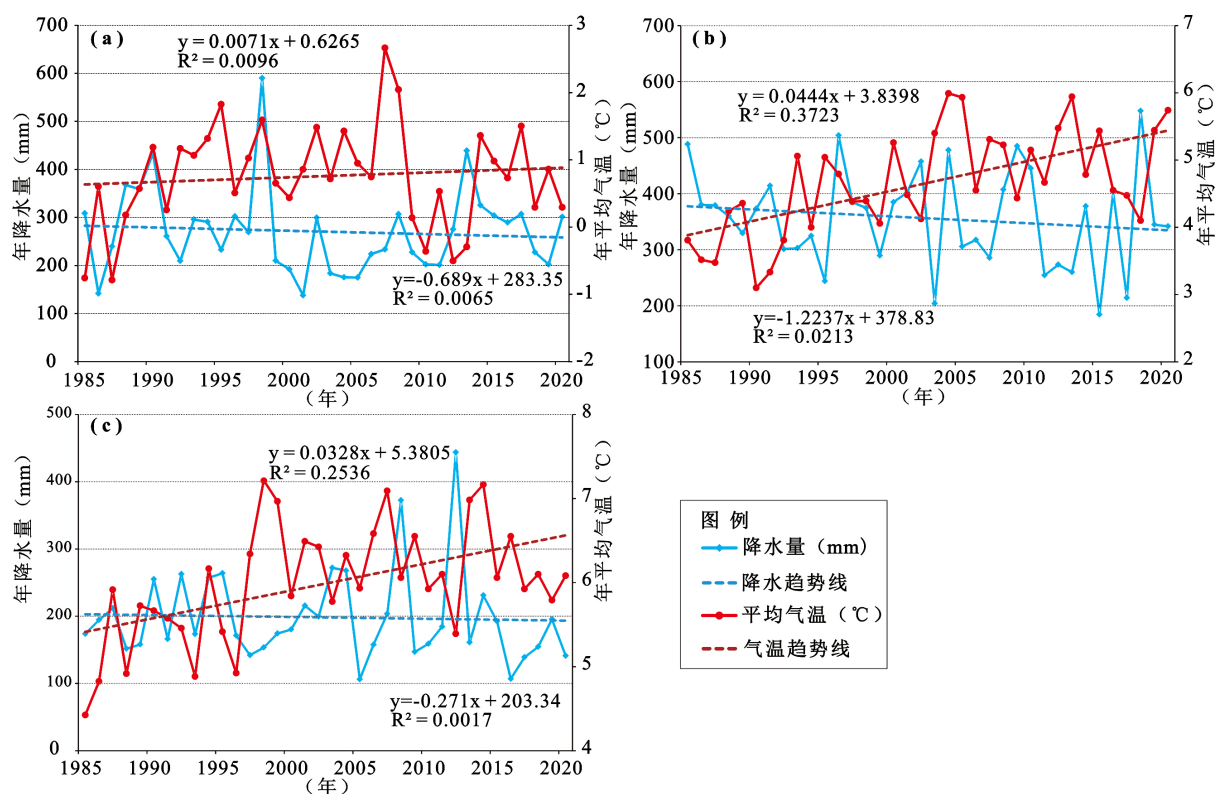


Figure 4. Statistics of regional meteorological data (temperature and precipitation) around “One lake and Two seas” from 1985 to 2020 in Inner Mongolia

图 4. 1985~2020 年内蒙古“一湖两海”周边区域气象资料(气温、降水)统计

5.2. 人为因素

人类活动是影响湖泊水体面积变化的重要因素之一, 尤其是工矿开发、农业灌溉等人类活动, 对地下水资源的消耗加剧了湖泊的萎缩, 内蒙古表现最为突出[1]。近 35 年, 随着社会经济的发展, 内蒙古“一湖两海”涉及行政范围内(图 1)的土地利用发生巨大的变化, 各区域建设用地面积逐年增长(图 5)。呼伦湖所在的新巴尔虎左旗、右旗及扎赉诺尔区, 1985 年三区域水体面积占土地总面积的 5.93%; 到 2020 年, 三个区域内耕地、草地以及水体面积明显减少, 建设用地和未利用地面积增加, 水体面积比例降至 5.61%; 1985~2020 年, 呼伦湖水体面积略有萎缩, 缩减面积主要分布在扎赉诺尔区, 建设用地面积从 1985 年的 91.57 km^2 增加到 2020 年的 204.91 km^2 (图 5(a2))。岱海所在的凉城县(图 1), 1985 年土地利用类型以

耕地和草地为主,建设用地的主要集中于湖泊河流沿线,大面积耕地及建设用地沿岱海四周分布(图 5(b1));1985~2020 年,建设用地迅速扩张(图 5(b2)),岱海周围水体逐渐转变为未利用地;另一方面,旱地转水田现象明显,加剧地下水资源开采,加剧了岱海水面逐年萎缩趋势。乌梁素海所在的乌拉特前旗,土地利用类型主要为草地和耕地(图 5(c1)),沿乌梁素海东西两侧分布大面积耕地,水域面积占县域土地总面积的 6.41%;1985~2020 年,乌拉特前旗建设用地面积从 251.17 km²增加到 284.07 km²;近 35 年,土地利用变化以区域内建设用地、未利用地面积增加为主,耕地、草地和水域类型面积比例有所下降,其中水体面积降至土地总面积的 5.01%。乌梁素海和岱海周边农业生产和工业开发、呼伦湖旅游开发等人为活动加剧了“一湖两海”水体面积及周边生态环境演变。

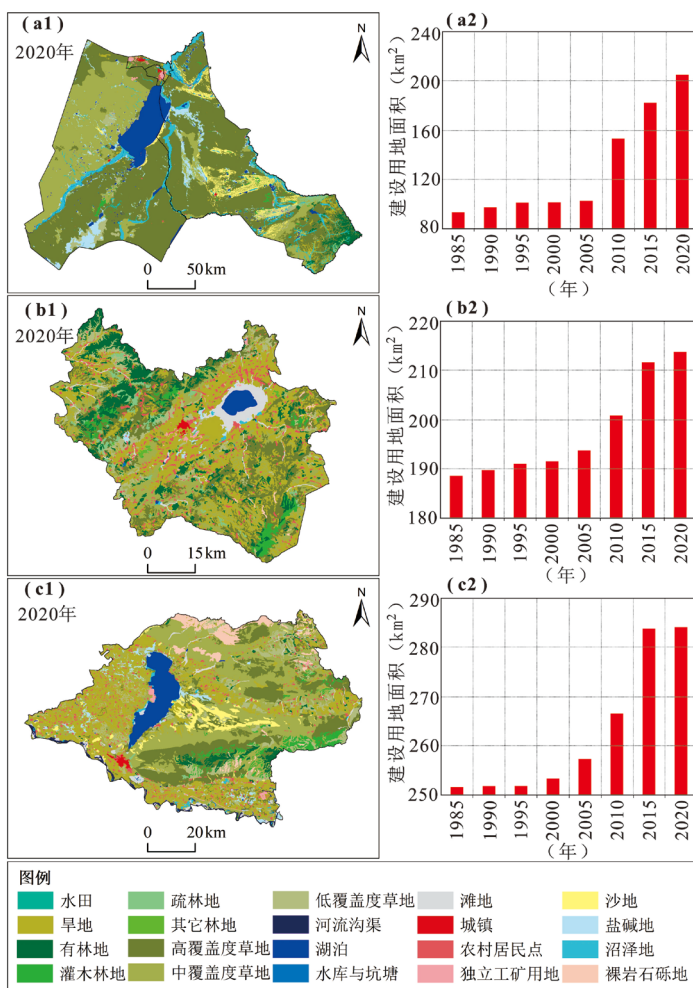


Figure 5. The current situation of land use and the change trend of construction land in Inner Mongolia
图 5. 内蒙古“一湖两海”涉及行政区范围土地利用现状及建设用地变化态势

6. 结论与建议

近 35 年,内蒙古“一湖两海”湖泊水体总面积呈现减少的趋势,除乌梁素海水体较 1985 年有所上升,呼伦湖、岱海水体面积都有不同程度的下降趋势,其中岱海水体面积萎缩最为严重;尽管呼伦湖没有出现严重的水域面积萎缩,但周边大小的湖泊明显消失;主要因素是近 35 年气候暖干及人为因素影响湖泊环境。内蒙古湖泊在气候和人类活动的共同作用下,湖泊水体面积波动变化较大,水位下降、面积

缩小、水体咸化(浓度超标)等问题突出,对湖泊周边生态环境造成重大影响。在气候暖感化胁迫下,工矿开发、城市建设、农田灌溉等人类开发活动加剧,正引发地下水位持续下降,草原生态恶化,农牧民饮用水短缺等一系列问题,实质上属于国家国土空间规划和“山水林田湖草沙”整治大范围的区域性问题。

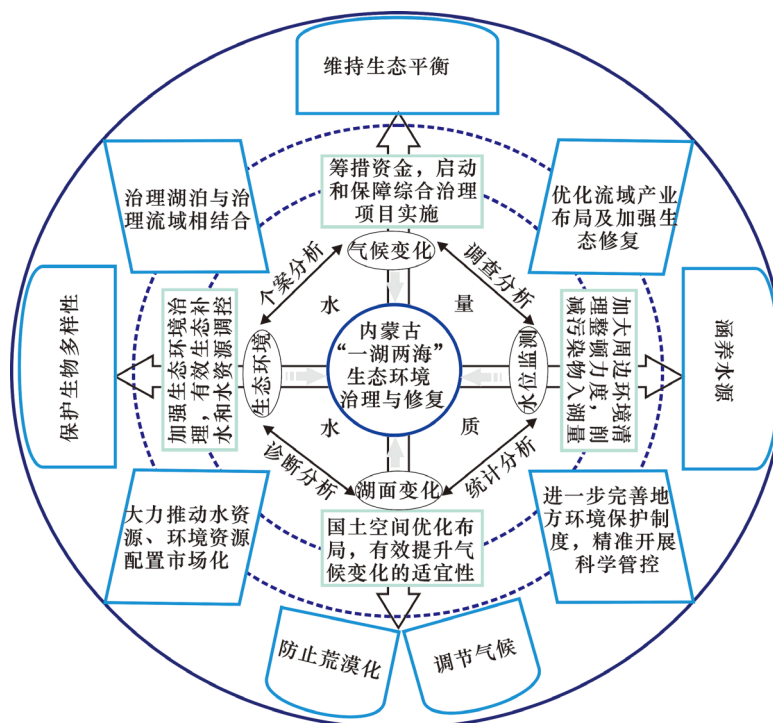


Figure 6. Analysis of ecological environment management and restoration path of “One lake and Two seas” in Inner Mongolia
图 6. 内蒙古“一湖两海”生态环境治理与修复路径分析

针对内蒙古“一湖两海”湖泊萎缩(水量)与水环境污染(水质)现状及特点,生态环境综合治理与修复(图6)路径具体建议如下: 1) 以“生态文明建设”为指导思想,以国土空间规划布局为导向,科学划定“一湖两海”保护生态红线,优化区域的产业布局,积极发展现代服务业,促进和发展循环经济,从根本上解决“一湖两海”生态环境问题。2) 开展多尺度协同治理体系,充分将“治理湖泊”与“治理流域”相结合,将流域作为一个完成的生态系统,通过生态途径解决环境治理问题,逐步划定保护区、建设生态林、开展清淤、治理水土流失等措施,维护完整的湖泊生态系统结构,有效提升气候变化的适宜性。3) 大力推动水资源、环境资源配置市场化进程,适度增加黄河用水配额指标,推进“引黄济岱”工程,调整水资源、环境资源中各种因素之间的关系;筹措中央与地方专项经费,拓宽融资渠道,推动重大治理工程项目实施。4) 严格落实河湖长制政策,进一步完善地方环境保护制度,精准开展科学管控,关停和淘汰高污染产业,消减污染物入湖总量,对“一湖两海”周边地区实施农田节水灌溉、面源污染防治及工矿企业用水管控措施;不断推进“一湖两海”生态文明建设的传宣教育工作,建立社会全员参与的体系。

基金项目

国家自然科学基金“库布齐沙漠地区增绿过程及其对区域生态系统服务作用机制”(42061069);内蒙古自治区科技计划项目“美丽内蒙古”生态质量诊断与综合管理关键技术及应用研究(2019GG010); 2019年度内蒙古自治区高等学校“青年科技英才支持计划”(B类)项目(NJYT-19-B29)。

参考文献

- [1] Tao, S.L., Fang, J.Y., Zhao, X., Zhao, S.Q., Shen, H.H., Hu, H.F., *et al.* (2015) Rapid Loss of Lakes on the Mongolian Plateau. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **112**, 2281-2286. <https://doi.org/10.1073/pnas.1411748112>
- [2] 柯长青. 湖泊遥感研究进展[J]. 海洋湖沼通报, 2004(4): 81-86.
- [3] 王海波, 马明国. 基于遥感的湖泊水域动态变化监测研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(5): 674-684.
- [4] 崔宁, 于恩逸, 李爽, 唐明方, 吴钢. 基于生态系统敏感性与生态功能重要性的高原湖泊分区保护研——以达里湖流域为例[J]. 生态学报, 2021, 41(3): 949-958.
- [5] Gao, L. and Bryan Brett, A. (2017) Finding Pathways to National-Scale Land-Sector Sustainability. *Nature*, **544**, 217-218. <https://doi.org/10.1038/nature21694>
- [6] Pretty, J., Benton, T.G., Bharucha, Z.P., Dicks, L.V., Butler Flora, C., Godfray, H.C.J., *et al.* (2018) Global Assessment of Agricultural System Redesign for Sustainable Intensification. *Nature Sustainability*, **1**, 441-446. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0114-0>
- [7] Harini, N., Bai, X., Brondizio, E.S. and Lwasa, S. (2018) The Urban South and the Predicament of Global Sustainability. *Nature Sustainability*, **1**, 341-349. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0101-5>
- [8] International Council for Science; ICSU Launches New Program to Understand the Human Impact on Earth's Life-Support Systems. NewsRx Health & Science, 2008. <https://schlr.cnki.net/en/Detail/index/SPODLAST/SPOD00001001274>
- [9] 程清平, 钟方雷, 左小安, 杨春林. 美丽中国与联合国可持续发展目标(SDGs)结合的黑河流域水资源承载力评价[J]. 中国沙漠, 2020, 40(1): 204-214.
- [10] 傅伯杰, 于丹丹. 生态系统服务权衡与集成方法[J]. 资源科学, 2016, 38(1): 1-9.
- [11] 傅伯杰, 于丹丹, 吕楠. 中国生物多样性与生态系统服务评估指标体系[J]. 生态学报, 2017, 37(2): 341-348.
- [12] 张海霞. 我国生态环境保护的现状与展望[J]. 资源节约与环保, 2021(2): 34-35.
- [13] 宋春桥, 詹鹏飞, 马荣华. 湖泊水情遥感研究进展[J]. 湖泊科学, 2020, 32(5): 1406-1420.
- [14] 赵玉玲. 现代水资源管理新思想及和谐理念应用分析[J]. 农业科技与信息, 2021(2): 22-23.
- [15] 张洪恩, 施建成, 刘素红. 湖泊亚像元填图算法研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(3): 376-382.
- [16] 季维. 利用遥感技术进行湖泊水质研究[J]. 环境科学, 1982(4): 78.
- [17] 程筱茜, 洪友堂, 陈劲松, 叶宝莹. 基于 ESTARFM 的内陆湖泊遥感动态变化监测[J]. 国土资源遥感, 2020, 32(3): 183-190.
- [18] Schultz, G.A. and Engman, E.T. (2006) Remote Sensing in Hydrology and Water Management. Han, M., Trans., Chinese Water Conservancy and Hydropower Press, Beijing, 206-208.
- [19] 刘纪远, 邓祥征. LUCC 时空过程研究的方法进展[J]. 科学通报, 2009, 54(21): 3251-3258. <https://doi.org/10.1360/csb2009-54-21-3251>
- [20] 李建国, 王智. 内蒙古: 全力抓好“一湖两海”生态治理整改[J]. 内蒙古水利, 2019(2): 2.
- [21] 王敏杰. 近 30 年内蒙古西部沙漠面积、边界及沙漠湖泊变化研究[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2019.
- [22] 肖茜, 杨昆, 洪亮. 近 30a 云贵高原湖泊表面水体面积变化遥感监测与时空分析[J]. 湖泊科学, 2018, 30(4): 1083-1096.
- [23] 刘纪远, 宁佳, 匡文慧, 徐新良, 张树文, 颜长珍, 等. 2010~2015 年中国土地利用变化的时空格局与新特征[J]. 地理学报, 2018, 73(5): 789-802.
- [24] Zhang, Z., Wang, X., Zhao, X., Liu, B., Yi, L., Zuo, L., *et al.* (2014) A 2010 Update of National Land Use/Cover Database of China at 1:100000 Scale Using Medium Spatial Resolution Satellite Images. *Remote Sensing of Environment*, **149**, 142-154. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.04.004>
- [25] Mcfeeters, S.K. (1996) The Use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features. *International Journal of Remote Sensing*, **17**, 1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- [26] 迟文峰, 匡文慧, 党晓宏, 潘涛, 刘正佳. 基于遥感的内蒙古地级市土地覆盖结构时空变化特征分析[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(1): 33-45.