

呼伦湖流域生态安全评价及时空分布格局变化趋势研究

曹秉帅^{1,3}, 单楠^{1,3}, 顾羊羊^{1,3}, 敖文^{2,3}, 庞博^{2,3}, 窦华山^{2,3}, 王文林^{1,3}, 邹长新^{1,3*}

- 1.生态环境部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042
- 2.呼伦贝尔市北方寒冷干旱地区内陆湖泊研究院, 内蒙古 呼伦贝尔 021000
- 3.生态环境部南京环境科学研究所呼伦湖研究中心, 江苏 南京 210042

摘要: 呼伦湖是我国北方第一大湖,具有涵养水源、生物多样性维护、气候调节等重要生态功能,对于维系我国北方生态安全屏障具有重要作用.近年来,随着气候暖干化加剧,呼伦湖面临着湖体面积萎缩、芦苇湿地大面积消失、局部草原区退化严重、土地沙化面积扩大、关键种群缺失等生态安全问题.该研究围绕“水资源-水环境-水生态”三水共生目标,以“山水林田湖草沙”系统观为指导,基于遥感和GIS技术对呼伦湖流域1990—2018年的生态安全时空分布格局进行评价.结果表明:①2018年呼伦湖及其流域的生态安全指数分别为0.495和0.774,分别处于预警和良好状态.②呼伦湖流域生态安全自1990年以来分别经历了骤降期、稳定期和恢复期等3个时期,呈现“一林一草一湖”的生态安全分布格局.③2010年呼伦湖生态安全水平最低,主要分布在新开河入湖口、湖西岸大部分区域、湖中心以及湖东南方向的湾口区域;流域则在2015年的生态安全状况最差,主要位于新左旗中部、海拉尔河流域以及呼伦沟等地,尤其是沿乌尔逊河上游东侧地带表现最为突出.④影响呼伦湖流域生态安全水平的主要因素为入湖径流量、蓝藻水华面积占比和水源涵养量,而长期超载过牧、水体污染物浓缩效应以及湿地面积萎缩是限制生态安全水平进一步提升的重要因素.研究显示,呼伦湖流域生态安全与水资源状况密切相关,湖面面积维持在2036 km²以上能保障流域较高的生态安全水平.此外,蓝藻水华面积、放牧强度与湿地面积均关系着区域生态安全,建议通过建立蓝藻水华风险防控体系、合理核定载畜量、保护与修复芦苇湿地以改善局部区域生态安全状况.

关键词: 呼伦湖;生态安全评价;时空分布格局;变化趋势

中图分类号: X524

文章编号: 1001-6929(2021)04-0801-11

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2021.02.13

Evaluation of Ecological Security in Hulun Lake Watershed and Its Spatio-Temporal Distribution Trend

CAO Bingshuai^{1,3}, SHAN Nan^{1,3}, GU Yangyang^{1,3}, AO Wen^{2,3}, PANG Bo^{2,3}, DOU Huashan^{2,3}, WANG Wenlin^{1,3}, ZOU Changxin^{1,3*}

- 1.Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China
- 2.Administration Bureau of Inner Mongolia Hulun Lake National Nature Reserve, Hulunbuir 021000, China
- 3.Hulun Lake Research Center, Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China

Abstract: As the largest lake in northern China, Hulun Lake has important ecological functions, such as water conservation, biodiversity maintenance and climate regulation, and it plays an important role in maintaining the ecological security barrier in north China. In recent years, with the intensification of the warm and dry climate, Hulun Lake is facing ecological security problems, such as the shrinking of lake area, the disappearance of large reed wetland areas, local grassland degradation, the expansion of land desertification area, and the loss of major populations. The research aimed at water resources, water environment and water ecology. The spatial and temporal distribution pattern and succession of ecological security were evaluated based on remote sensing and GIS technology to call Hulun lake basin from 1990 to 2018. The results showed that the ecological security index of Hulun Lake and its basin was 0.495 and 0.774,

收稿日期: 2020-11-22 修订日期: 2021-03-09

作者简介: 曹秉帅(1988-),男,新疆克拉玛依人,助理研究员,博士,主要从事生态保护修复与生态安全研究, cbs@nies.org.

* 责任作者, 邹长新(1977-),男,辽宁朝阳人,研究员,博士,主要从事生态保护修复与生态安全研究, zcx@nies.org

基金项目: 国家重点研发计划(No.2017YFC0506601); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(No.GYZX190307); 呼伦湖生态安全调查评估项目(No.D03150701100216)

Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2017YFC0506601); Basal Research Fund of the Central Public Welfare Scientific Research Institutes, China (No.GYZX190307); Ecological Safety Investigation and Evaluation Project of Hulun Lake, China (No.D03150701100216)

respectively, which were in early warning and good state in 2018. Since 1990, the ecological security of the Hulun Lake Basin has experienced three periods of precipitous decline, stable period and recovery period. The ecological security level of Hulun Lake was the lowest, which was mainly distributed in the mouth of Xinkai River, most areas on the west bank of the lake, the center of the lake and the bay mouth area to the southeast of the lake in 2010. The ecological security status of Hulun Lake Basin was the worst in 2015, mainly located in the central part of New Left Banner, the Hailar River Basin and Hulun Valley, especially distributed in the east side of the upper reaches of the Wuexun River. The main factors affecting the ecological security level of the Hulun Lake Basin were the lake runoff, the proportion of cyanobacteria bloom area and the water resource conservation, while long-term overgrazing, water pollutant concentration and wetland area shrinkage were important factors that limit the further improvement of ecological security. The study revealed that the ecological security of the Hulun Lake Basin is closely related to the water resources, and maintaining the lake surface area of more than 2036 km² can guarantee the higher ecological security level of the basin. In addition, the regional ecological security was affected by the area of cyanobacteria bloom, grazing intensity and wetland area. It is suggested to establish a risk prevention and control system for cyanobacteria blooms, rationally check the livestock capacity, and protect and restore reed wetland to improve the ecological security of local areas.

Keywords: Hulun Lake; ecological security assessment; spatial and temporal distribution pattern; change trend

呼伦湖是我国北方第一大湖泊,也是我国第五大湖泊,历史上水域面积曾达到2 339 km²,具有涵养水源、生物多样性维护、气候调节等重要生态系统功能^[1],且其生态系统所能提供的生态价值远大于经济价值^[2].然而,近20年来,随着气候暖干化加剧,呼伦湖流域生态系统表现出湖泊湿地面积萎缩^[3-4]、草地退化^[5-9]、土地沙化^[10-12]、鱼类小型化^[13]等生态问题,对我国北方生态安全屏障造成威胁,不容忽视.因此,研究呼伦湖生态安全状况,对于补齐短板、精准施策乃至维持区域可持续发展具有重要意义.

生态安全评价是生态安全研究的基础和前提^[14],准确可靠的生态安全评价结果能够反映生态环境所存在的安全问题及隐患^[15].目前,国内关于湖泊的生态安全评价研究多集中于太湖^[16]、洞庭湖^[17-18]、巢湖^[19]、滇池^[20]等南方受人类活动影响较大的湖泊,评价关注的重点也更多在水环境[如化学需氧量(COD)、总磷(TP)、总氮(TN)等]、水生态(如生物多样性指数、水华指数等)以及社会经济类指标.也有学者对东北湖区(山口湖流域)^[21]、新疆博斯腾湖^[22]等开展了生态安全评价研究,但评价指标依然采用南方湖泊评价指标体系,如水质、人口、经济、社会指标等,过于强调人为因素影响.然而,以呼伦湖为代表的北方寒冷干旱区内陆湖泊,受人类活动影响有限,其水体生态环境质量受背景值影响较大,水质变化主要受自然因素影响,且不具备饮用水源等功能.有研究^[23]表明,呼伦湖水体COD与总有机碳浓度呈显著正相关,表明水体有机物以含碳有机物为主,含碳有机物主要为难降解腐殖质,主要来源于本地及河流输入草原难分解有机物.因此,在评价这一类湖泊的生态安全状况时应“陆-湖”统筹,充分考虑

陆域生态要素的变化对湖泊、河流生态环境的影响,而不仅是关注水体本身.

该文以“山水林田湖草沙”系统观为指导思想,通过压力-状态-响应(PSR)模型建立涵盖水资源、水环境、水生态及陆域生态等多要素的呼伦湖生态安全综合评价指标体系,并基于遥感和GIS技术分别从湖泊和流域等多尺度对呼伦湖1990—2018年的生态安全格局进行评价,以期科学指导呼伦湖综合治理、保障呼伦湖生态安全底线提供技术支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区呼伦贝尔草原西部的呼伦湖流域,117°00'10"E~117°41'40"E、48°30'40"N~49°20'40"N,是我国中高纬度温带半干旱区数千公里内唯一的大泽,其流域呈放射状分布,包括呼伦湖、贝尔湖局部、乌尔逊河、克鲁伦河、额尔古纳河、海拉尔河、新开河、辉河、伊敏河等主要河流

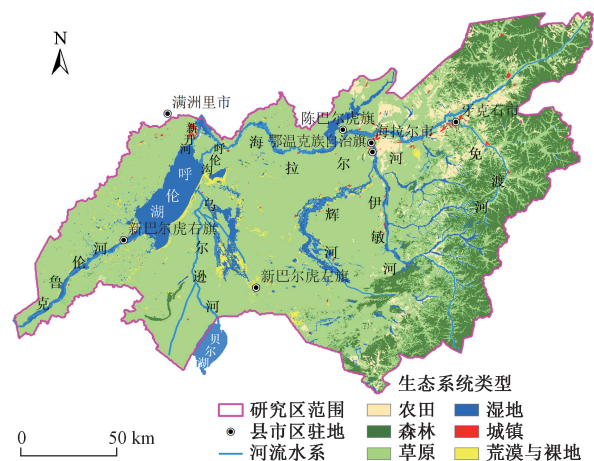


图1 呼伦湖流域生态系统类型

Fig.1 Ecosystem type map of Hulun Lake Basin

及周边沼泽地,面积约 $7.9 \times 10^4 \text{ km}^2$. 研究区内生态系统类型以草原、森林和湿地为主,三者分别占研究区总面积的65%、19%和9%.

1.2 呼伦湖生态安全评价指标体系

1.2.1 指标筛选原则及体系构建

笔者通过前期调查研究初步概括了呼伦湖流域各生态安全影响因子及其相互作用(见图2)^[24],并对呼伦湖生态安全问题及其成因进行了全面诊断,研究发现:①2000年以来,呼伦湖流域气候暖干化趋势加剧,在长期超载过牧等人类活动压力下,草地退化显著,土地沙化、盐碱化面积扩大;②受气候暖干化和人类活动的交织作用,湿地面积萎缩,水生生态系统紊乱,蓝藻水华频发^[24]. 在此基础上,结合指标构建的可操作性、系统性、科学性、针对性以及数据的可获得性等原则,该研究采用通用的压力-状态-响应

(Pressure-State-Response, PSR)模型^[25],以气候条件、人口、水资源及放牧强度等因素构成压力子系统;以水环境、水生态、陆域生态、生态系统服务功能与敏感性以及景观格局等因素组成状态子系统,以生态恢复措施和生态治理投入作为响应子系统,共同组建呼伦湖生态安全评价指标体系(见表1).

1.2.2 指标权重确定原则与方法

层次分析法作为指标赋权的常用方法,在处理难以定量分析的复杂问题时能够充分利用专家经验,具有一定权威性^[31],已被广泛应用于生态安全评价指标权重的计算中. 该研究紧密围绕呼伦湖水生态-水环境-水资源“三水”共生目标,基于生态安全问题及其成因分析结果,结合专家先验知识,采用专家打分法与层次分析法相结合的方式计算指标权重,结果如表1所示.

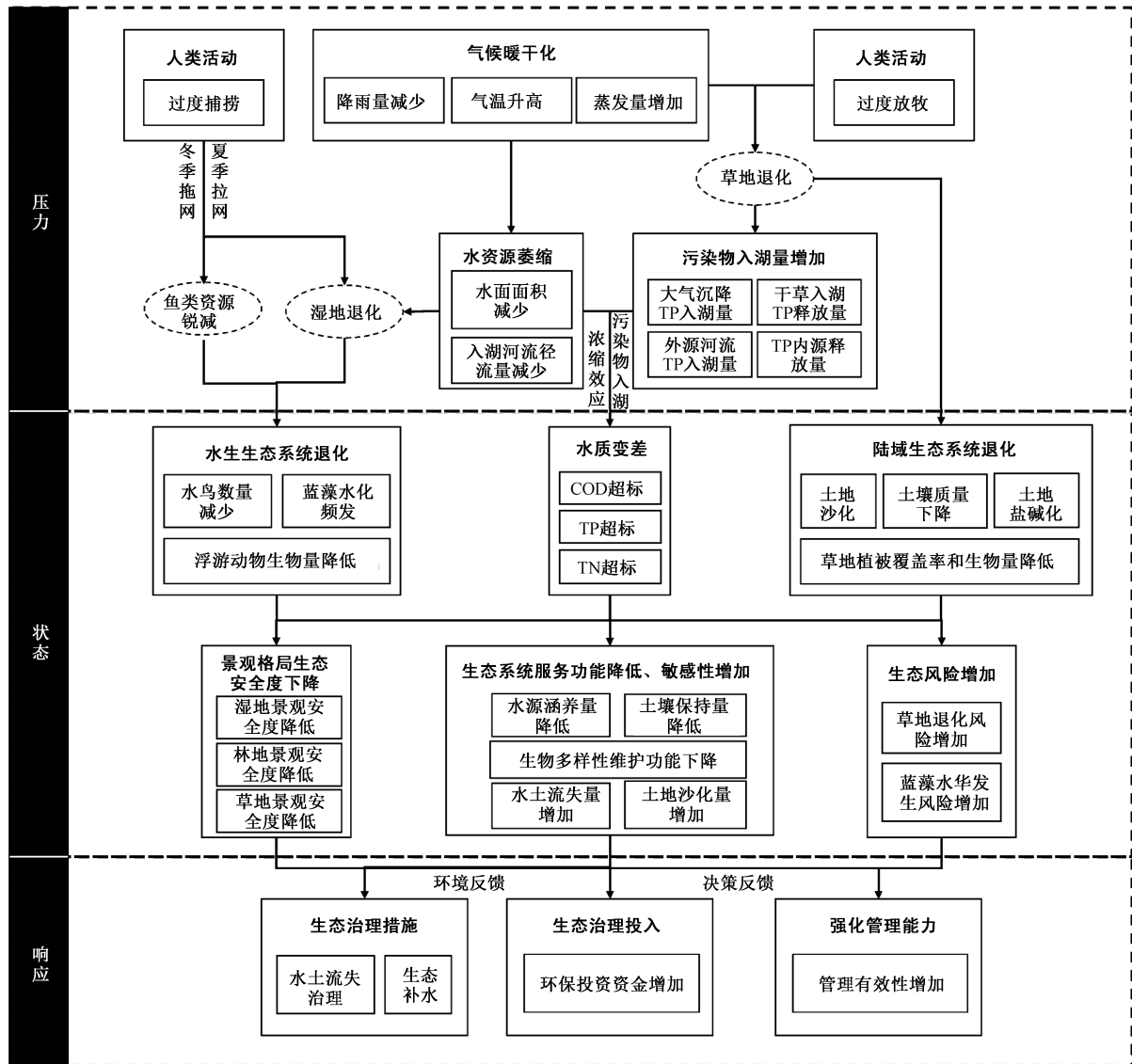


图2 呼伦湖流域生态安全影响因子及其作用机制示意^[24]

Fig.2 Schematic diagram of ecological security influencing factors and their mechanism in Hulun Lake Basin^[24]

表1 呼伦湖流域生态安全评价指标体系及指标权重和标准值

Table 1 Index system, index weight and standard value of ecological security assessment in Hulun Lake Basin

准则层	要素层	指标层	综合权重	标准值	依据	指标属性	
气象条件(0.15)		年降雨量(mm)(0.61)	0.052	212.42	高强度高频次干旱集中发生年份的平均值	+	
		年平均气温(℃)(0.27)	0.023	1.24		不安全值	-
		年蒸发量(10^8 m^3)(0.12)	0.010	13.79		-	
压力(0.56)	人口(0.05)	人口密度(人/ km^2)(0.60)	0.017	20	联合国制定的半干旱区人口密度临界值 ^[26]	安全值	-
		人口自然增长率(0.40)	0.011	6.4	1985—2017年平均值	-	
水资源(0.53)		湖泊面积(km^2)(0.75)	0.223	2 036	频率分析法 ^[27]	不安全值	+
		入湖径流量(10^8 m^3)(0.25)	0.074	3.1		+	
放牧强度(0.27)		草地载畜强度(羊单位/ 10^4 亩)(1.00)	0.151	372.75	文献 ^[28]	安全值	-
水环境(0.39)		化学需氧量浓度(mg/L)(0.17)	0.021	69.9	环境流体动力学模型(EFDC)模拟呼伦湖水质能达到的理想值	-	
		总磷浓度(mg/L)(0.39)	0.048	0.121		安全值	-
		总氮浓度(mg/L)(0.44)	0.055	1.479		-	
水生态(0.24)		蓝藻水华面积占比(%) (0.56)	0.043	10	《水华遥感与地面监测评价技术规范(试行)》(HJ 1098—2020)	不安全值	-
		水鸟数量(只/a)(0.32)	0.025	46 600	2009—2018年平均值	安全值	+
		浮游动物生物量(mg/L)(0.12)	0.010	4.0	1981—2010年平均值	安全值	+
状态(0.32)	陆域生态(0.18)	土地沙化率(%) (0.45)	0.026	3.30	1990—2018年平均值	不安全值	-
		土地盐渍化率(%) (0.32)	0.018	2.10	1990—2018年平均值	不安全值	-
		植被覆盖度(%) (0.16)	0.009	0.28	自然间断点分级法 ^[29]	安全值	+
		地上部生物量(g/m^2)(0.08)	0.005	204		安全值	+
生态系统服务功能与敏感性(0.10)		水源涵养量($10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$)(0.46)	0.015	34	自然间断点分级法 ^[29]	安全值	+
		土壤保持量(t/hm^2)(0.05)	0.002	475		安全值	+
		生物多样性维护(0.08)	0.002	42		安全值	+
		水土流失(0.15)	0.005	0.91		不安全值	-
		土地沙化(0.26)	0.008	1.95		不安全值	-
景观格局(0.09)		湿地景观生态安全度(0.64)	0.019	0.085	1990—2018年间最低值	+	
		草地景观生态安全度(0.28)	0.008	0.179		不安全值	+
		林地景观生态安全度(0.07)	0.002	0.356		+	
生态恢复措施(0.69)		水土流失治理面积(10^4 hm^2)(0.30)	0.024	2.7	2005—2018年间最低值	不安全值	+
		引河济湖工程引水量(10^8 m^3)(0.70)	0.057	3.2	工程实施以来(2009—2018年)最低值	不安全值	+
响应(0.12)	生态治理投入(0.31)	环保投资占GDP比例(%) (1.00)	0.037	1.24	2016年全国平均值 ^[30]	安全值	+

注:括号内数值表示各指标权重。“+”表示正向指标,“-”表示负向指标。

1.2.3 指标标准值(阈值)确定原则

为了能够突出呼伦湖的地域性特征,该文指标标准值的获取原则是:①优先采用实地调查法;②有国家标准的实行国家标准;③没有国家标准的实行地方标准;④采用参考文献中使用的标准;⑤采用往年平均值或相似区域的平均值;⑥参考类似发达地区的水平标准或采用科学研究已判定的标准。指标体系标准值及其依据如表1所示。

1.2.3.1 气候条件

呼伦湖流域草地植被的生长受降水、温度与人类活动的共同影响。干旱气候条件下牧草产量不足丰水年的70%,且随着干旱强度和频次的增加,土地沙

化、裸露逐渐加重,草地植被有进一步退化的风险。而降水少、气温高是干旱气候条件的典型特征,且随干旱程度的加大而更加明显。通过部门访谈与文献资料调研^[8,32-34]得知,呼伦湖历史上高强度、高频次干旱发生年份为1987年、1994年、2000—2012年,而受气候暖干化影响,呼伦湖降水量2000—2012年急剧下降(见图3)。将历史上高频干旱发生年份与降雨量急剧下降的年份进行叠加,最终确定2000—2012年的气候条件为对呼伦湖生态安全影响最大的时期。因此,该研究将年降雨量、年均气温和年蒸发量在2000—2012年间的平均值作为其各自标准值。

1.2.3.2 水资源

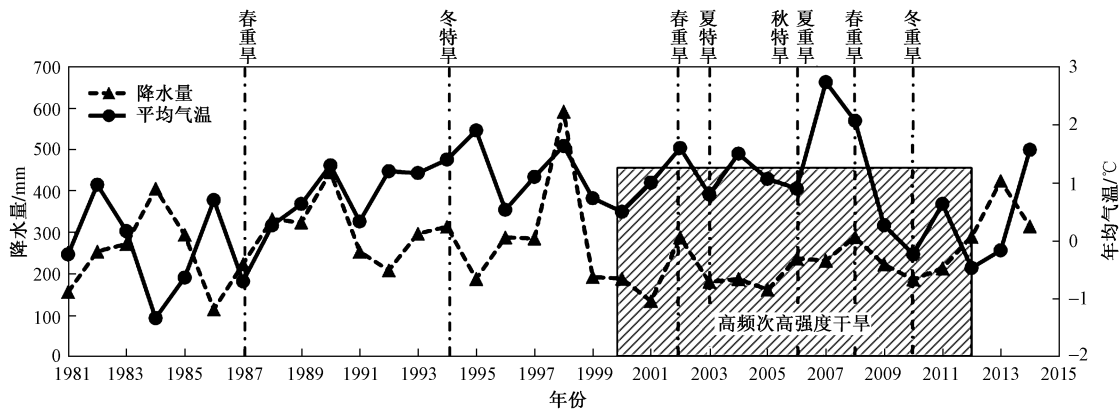


图3 1981—2014年呼伦湖流域降水量和年均气温的变化

Fig.3 The variation of precipitation and temperature in the Hulun Lake Basin from 1981 to 2014

有研究表明生态水面法能够较为客观地确定湿地最小生态水面面积^[27]。生态水面法认为,对于高频率出现的水面面积,是湿地适应自然的稳态表现,一般其生态系统健康状况较为良好;而湿地最小生态水面面积是维持湿地自身存在的水面积,必然出现在低频率的年份中^[27]。该文通过分析呼伦湖长时间序列的水面面积数据,得到不同水面面积的频率直方图(见图4)。可以看出,近60年呼伦湖湖面面积低于2 036 km²的次数占比不足30%,即70%以上的时间湖面面积都维持在2 036 km²以上,如果时间尺度扩大,该比例会更高。因此,以2 036 km²水面面积作为该指标的标准值。采用同样的方法,确定入湖径流量指标的标准值为3.1×10⁸ m³。

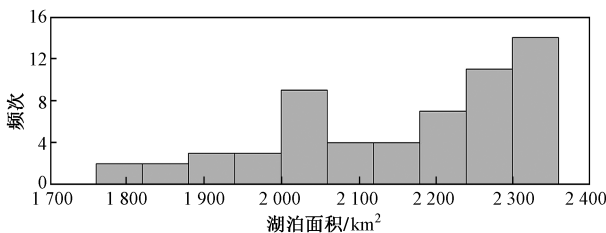


图4 1961—2019年呼伦湖湖面面积频率直方图

Fig.4 Frequency histogram of Hulun Lake area from 1961 to 2019

1.3 关键指标数据来源及获取方法

1.3.1 气象数据

该文使用的降雨量和气温数据来自英国东英格利亚大学气候研究所(Climatic Research Unit, CRU)全球气象数据产品,该产品是基于中国气象局和其他外部代理商每天或次日数据计算得出的每月观测数据的每月网格字段,数据分辨率为0.5°×0.5°。该研究通过获取1990年、2000年、2010年、2015年和2018年5个时间节点的流域逐月降水量和平均气

温,在ArcGIS中使用栅格计算器得到逐年气象数据(年降水量、年均气温),采用IDW反距离权重插值重采样成250 m×250 m分辨率,并根据呼伦湖流域气象站点实测数据进行验证。该文使用的蒸发量数据采用中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn>)提供的1990年、2000年、2010年、2015年和2018年满洲里(117°26'E,49°34'N)、新巴尔虎右旗(116°49'E,48°40'N)及新巴尔虎左旗(118°16'E,48°13'N)等气象站点的月均值。

1.3.2 水资源、水环境、水生态数据

该文使用的水资源数据(包括湖泊面积和入湖量)主要来自呼伦湖水文站1961—2019年的长期监测数据,由当地水利部门提供;水环境数据(包括COD、TP、TN浓度)来源于呼伦湖流域小河口、甘珠花、拴马桩等18个“十三五”国控重点流域河流水质监测断面的长时间序列(1987—2018年)水质监测数据;水生态指标中蓝藻水华面积参考HJ 1098—2020《水华遥感与地面监测评价技术规范》计算,水鸟数量历年数据参照《生物多样性观测技术导则 鸟类》标准,分别在小河口、五一、拴马桩、嘎拉达白辛、乌兰诺尔、乌都鲁、甘珠花等地观测获得,浮游动物生物量数据根据《淡水浮游生物研究方法》^[35]采用25#的浮游生物网(网孔直径0.064 mm)采集获取。

1.3.3 放牧强度数据

草地载畜量数据采用《呼伦贝尔市统计年鉴2020》^[36]中的呼伦贝尔市历年(1949—2017年)大牲畜和羊的统计数据,并基于NY/T 635—2015《天然草地合理载畜量的计算》中的成年家畜折算系数将牲畜统计数据统一折算为标准家畜单位,即绵羊单位。草地载畜强度是指单位面积的羊单位数量。

1.3.4 陆域生态数据

土地沙化与盐碱化面积是利用1990年、2000年、2010年、2015年和2018年的高分一号、高分二号等高空分辨率卫星遥感影像以及Landsat TM/ETM等中分辨率遥感影像,采用人机交互和面向对象分类方法,通过地面核查进行复核、完善提取得到,空间分辨率达5 m。植被覆盖度和地上部生物量数据来源于MODIS植被指数产品中的MOD13Q1产品,空间分辨率为250 m,时间分辨率为16 d,时间范围为1990年、2000年、2010年、2015年和2018年。

1.3.5 景观格局数据

该文参考陈昆仑等^[37]通过计算景观指数来概括景观格局的方法,选取景观类型斑块密度、平均斑块形状指数、聚集度指数和斑块所占景观面积比例为主要指标,建立景观指数与景观生态安全度的定量化描述。针对呼伦湖区域1990年、2000年、2010年、2015年和2018年共5个时期的Landsat TM/ETM中等分辨率卫星遥感影像,通过影像校正、影像裁剪、影像拼接等数据预处理后,经ENVI软件计算分别获取草地、湿地、林地等景观类型的斑块密度、平均斑块形状指数、聚集度指数和斑块所占景观面积比例。

1.4 生态安全综合评价方法

1.4.1 评价尺度

为了能够充分反映呼伦湖流域生态安全在时空尺度上的变化特征,考虑到指标数据的易获得性和可靠性,该研究以1990年、2000年、2010年、2015年和2018年为评价时段,空间分辨率为250 m。

1.4.2 指标归一化方法

多指标体系中,由于各指标的单位、量纲、数量级不同,不具备可比性,为了消除这一差异,应对指标进行无量纲处理。该文运用阈值标准化法对指标原始数据进行标准化处理。

对于正向型指标(值越大越安全的指标),若以安全值为标准值:

$$X_{ij}' = \begin{cases} 1 & X_{ij} \geq X_b \\ \frac{X_{ij}}{X_b} & X_{ij} < X_b \end{cases} \quad (1)$$

若以不安全值为标准值:

$$X_{ij}' = \begin{cases} 0 & X_{ij} \leq X_b \\ 1 - \frac{X_b}{X_{ij}} & X_{ij} > X_b \end{cases} \quad (2)$$

对于负向型指标(值越小越安全的指标),若以安全值为标准值:

$$X_{ij}' = \begin{cases} 1 & X_{ij} \leq X_b \\ \frac{X_b}{X_{ij}} & X_{ij} > X_b \end{cases} \quad (3)$$

若以不安全值为标准值:

$$X_{ij}' = \begin{cases} 0 & X_{ij} \geq X_b \\ 1 - \frac{X_{ij}}{X_b} & X_{ij} < X_b \end{cases} \quad (4)$$

式中, X_{ij} 和 X_{ij}' 分别为第*i*年第*j*项指标的原始值和标准化指, X_b 为第*j*项指标的标准值。

1.4.3 生态安全评价综合指数计算

指标无量纲化后,采用式(5)计算第*i*年生态安全指数(ESI):

$$ESI = \sum_{j=1}^n (X_j \times w_j) \quad (5)$$

式中, X_j 为第*j*个指标的标准化值, w_j 为第*j*个指标权重, n 为指标个数。

1.4.4 生态安全等级划分

该文采用均分法将生态安全状态等比例划分为很差、较差、预警、良好、理想等5个等级,生态安全指数得分越高,表明生态安全状况越好,具体分级标准如表2所示。

表2 生态安全综合评估分级标准

Table 2 Classification standard of comprehensive ecological security assessment

等级	生态安全状态	得分区间	特征
I级	理想 (很安全)	[0.8,1)	生态系统服务功能完整,生态环境基本没有受到破坏,生态系统结构完整,有很好的调节功能,没有生态问题,可视为可持续发展的理想状态
II级	良好 (较安全)	[0.6,0.8)	生态系统服务功能较为完善,生态环境很少受到破坏,生态系统结构尚完整,生态问题基本不大,一般干扰下可恢复
III级	预警 (基本安全)	[0.4,0.6)	生态系统服务功能已有退化,生态环境受到一定破坏,生态系统结构有变化,但尚可维持基本功能,生态问题显现,受干扰后易恶化
IV级	较差 (较不安全)	[0.2,0.4)	生态系统服务功能严重退化,生态环境受到较大破坏,生态系统结构破坏较大,环境污染与资源消耗比较严重,生态问题较大,受外界干扰后恢复困难
V级	很差 (很不安全)	[0,0.2)	生态系统服务功能几近崩溃,生态环境受到严重破坏,生态系统结构残缺不全,环境污染与资源消耗严重,生态恢复与重建很困难,生态环境问题严重

2 结果与讨论

2.1 呼伦湖及其流域生态安全格局

呼伦湖及其流域 1990—2018 年生态安全指数平均值如图 5 所示. 结果显示, 1990—2018 年, 呼伦湖与其流域生态安全变化趋势均呈现先降低后逐步向好的态势, 且流域的生态安全水平提升更加明显, 2018 年其生态安全指数分别为 0.495 和 0.774, 分别处于预警和良好状态. 根据不同时期呼伦湖及其流域生态安全状况, 可进一步将其生态安全变化趋势划分为 3 个时期: ①1990—2000 年为骤降期, 呼伦湖生态安全指数由 1990 年的 0.548 降至 2000 年的 0.472, 降幅达到 13.9%, 而其流域生态安全指数也下降了 2.2%; ②2000—2015 年为稳定期, 这一时期呼伦湖及其流域生态安全状况基本保持稳定, 生态安全指数分别维持在 0.470 和 0.718 左右; ③2015—2018 年为恢复期, 呼伦湖生态安全指数由 0.478 提升至 0.495, 增幅约 3.6%, 而其流域生态安全水平更是提高了 8.1%, 恢复态势明显.

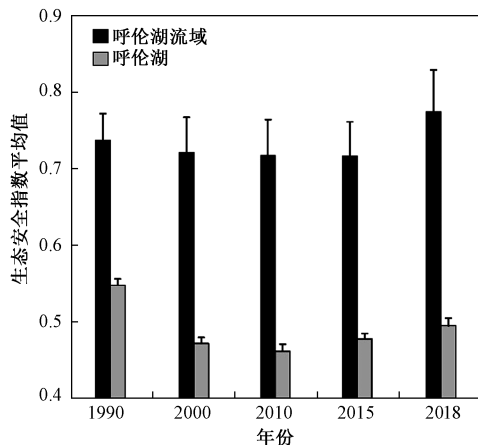


图 5 1990—2018 年呼伦湖及其流域范围生态安全指数平均值

Fig.5 The mean value of ecological security index of Hulun Lake and its watershed from 1990 to 2018

根据生态安全等级划分标准, 将 2018 年呼伦湖流域生态安全水平进行等级划分, 结果如图 6 所示. 从图 6 可以看出, 呼伦湖流域生态安全呈“一林一草一湖”分布格局, 即东部大兴安岭森林生态功能区—中部呼伦贝尔草原草甸生态功能区—西部呼伦湖湖区等“三区”分布格局. 从生态安全等级来看, 东部林区生态安全水平最好, 为 I 级理想状态, 占评价区面积的 33.7%, 生态系统服务功能和结构完整, 生态环境基本没有受到破坏; 中部草原区生态安全水平适中, 为 II 级良好状态, 占评价区面积的 63.5%; 西部湖区生态安全水平最低, 为 III 级预警状态, 仅占评价

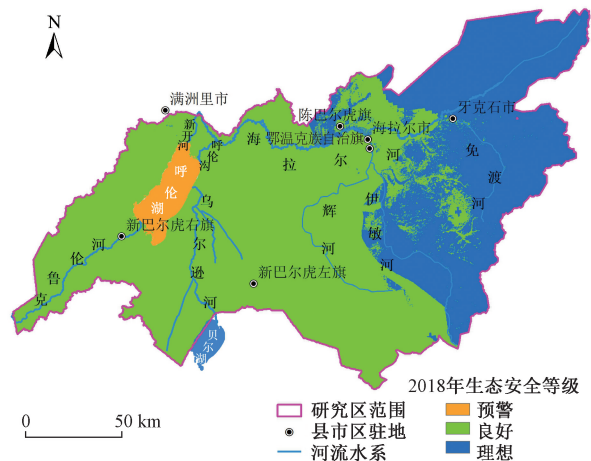


图 6 2018 年呼伦湖流域生态安全格局

Fig.6 The ecological security pattern of the Hulun Lake Basin in 2018

区面积的 2.8%, 生态系统服务功能已有退化, 生态系统结构有变化, 但尚可维持基本功能, 生态问题显现, 受干扰后易恶化.

2.2 呼伦湖及其流域生态安全时空分布格局变化趋势

呼伦湖 1990—2018 年生态安全时空变化如图 7 所示. 由图 7 可见, 呼伦湖生态安全经历了骤降 (1990—2000 年)、稳定 (2000—2015 年) 和恢复 (2015—2018 年) 等 3 个时期. 其中, 最低生态安全水平发生在 2010 年, 95.8% 的湖体生态安全指数低于 0.48, 较差区域分布在新开河入湖口、湖西岸大部分区域、湖中心以及湖东南方向湾口周围; 而较好区域主要分布在乌拉逊河入湖口. 2010—2015 年, 呼伦湖生态安全状况有所恢复, 但沿湖滨岸带以及呼伦沟周围生态安全水平仍较低. 到 2018 年, 全湖区生态安全已有明显回升, 生态安全指数基本维持在 0.48~0.54 之间, 仅有东南部湾区少量区域 (不足 3.1%) 生态安全水平 (<0.48) 较低.

呼伦湖生态安全的上述变化规律在其流域范围内则表现得更为明显, 如图 8 所示, 根据生态安全变化分布格局可将呼伦湖流域分为沿海拉尔河上游—免渡河流域的东部林区、新巴尔虎左旗境内的中部草原区 (沙带) 及位于新巴尔虎右旗境内沿克鲁伦河两岸的西部草原区等 3 个区域. 其中, 东部林区生态安全水平较高, 基本维持在 0.74 以上; 西部草原区次之, 绝大部分区域生态安全指数在 0.70 以上, 少部分低于 0.70 的区域零星分布在沿克鲁伦河两岸; 而生态安全水平下降最为严重的区域主要位于新左旗中部、海拉尔河流域以及呼伦沟等地, 尤其是沿乌拉逊

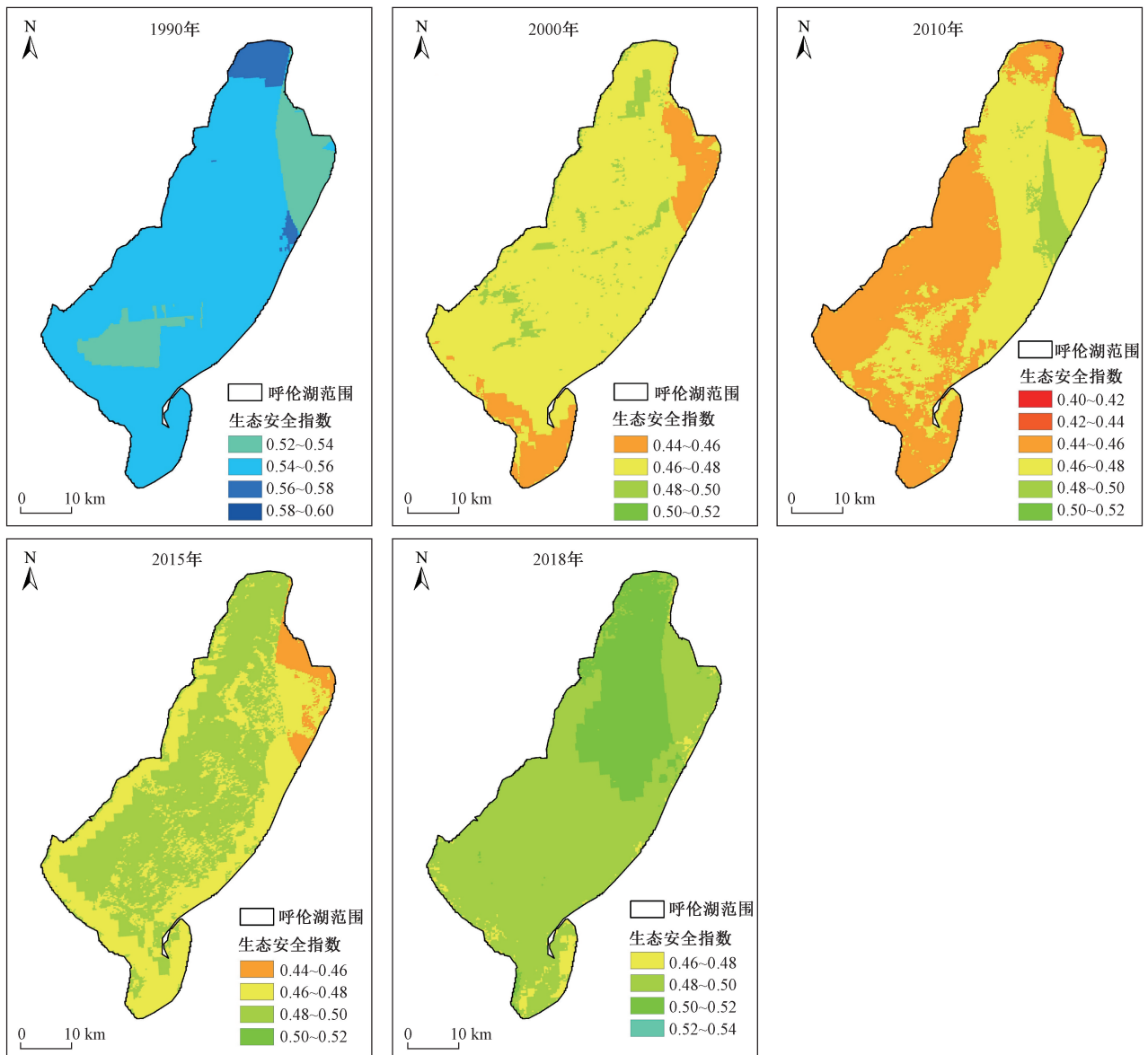


图7 1990—2018年呼伦湖生态安全时空分布格局变化趋势

Fig.7 The spatial and temporal distribution pattern of ecological security in Hulun Lake from 1990 to 2018

河上游东侧地带,生态安全指数低于0.68.

2.3 呼伦湖流域生态安全影响要素分析

为指导完善呼伦湖生态安全体系建设,找准“痛点”问题,挖掘呼伦湖流域生态安全水平提升途径,计算得到1990—2018年呼伦湖流域生态安全影响要素的变化趋势如图9所示.从图9可以看出:①水资源、水生态和生态系统服务功能与敏感性的生态安全变化趋势与流域生态安全变化趋势相似,均呈现出先骤降、再稳定、后恢复的变化趋势.通过进一步分析指标层生态安全指数变化可知,对上述3项要素生态安全影响最大的指标分别为入湖径流量、蓝藻水华面积占比和水源涵养量,说明水资源保障与蓝藻水华治理对提升呼伦湖生态安全水平具有重要作用.②放牧

强度、水环境和景观格局生态安全呈下降趋势,亟须采取有效措施加以控制和恢复.这主要与超载过牧、水质恶化及湿地景观生态安全度下降有关.据调查,2000—2010年,位于呼伦湖流域境内的呼伦贝尔市牧业四旗(包括新巴尔虎左旗、新巴尔虎右旗、陈巴尔虎旗和鄂温克旗),单位面积放牧强度增加了176%;呼伦湖COD浓度由1990年的81.6 mg/L升至2018年的102.4 mg/L,而2015年出现短暂好转主要与当年入湖径流量增大从而导致入湖污染物稀释有关(2015年入湖径流量比2018年多45.6%);1998—2011年,随着水位的快速降低,湿地面积由140.72 km²萎缩到5.49 km²,随着海拉尔河引水工程的实施,2013年湿地面积才恢复至21.58 km²[24].

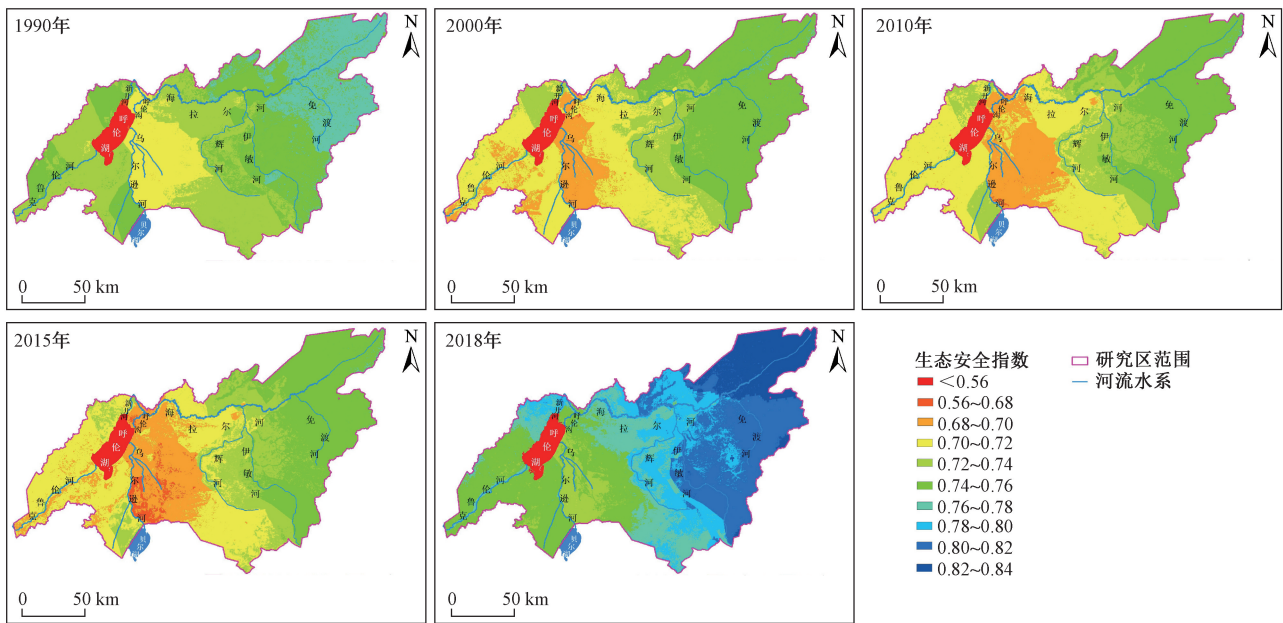


图8 1990—2018年呼伦湖流域生态安全时空分布格局变化趋势

Fig.8 The spatial and temporal distribution pattern of ecological security in Hulun Lake Basin from 1990 to 2018

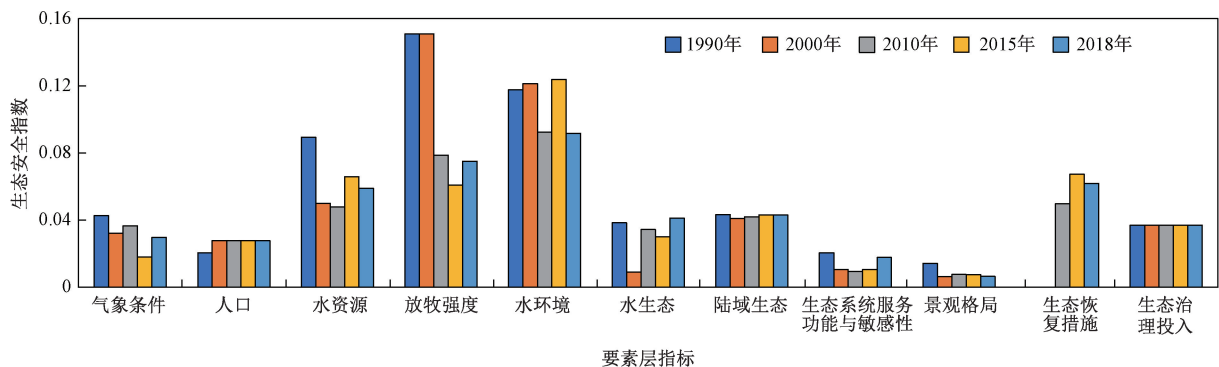


图9 1990—2018年呼伦湖流域生态安全影响要素变化趋势

Fig.9 The variation trend of ecological security impact factors in Hulun Lake Basin from 1990 to 2018

3 结论

a) 近30年来,呼伦湖流域生态安全状况经历了1990—2000年的骤降期、2000—2015年的稳定期和2015—2018年的恢复期等3个时期,目前正处于稳中向好的恢复期,呈现“一林一草一湖”的生态安全分布格局。

b) 呼伦湖生态安全水平最低值出现在2010年,95.8%的湖体生态安全指数低于0.48,主要分布在新开河入湖口、湖西岸大部分区域、湖中心以及湖东南方向湾口周围;流域生态安全水平最低值出现2015年,较差区域主要位于新左旗中部、海拉尔河流域以及呼伦沟等地,尤其是沿乌尔逊河上游东侧地带。

c) 影响呼伦湖流域生态安全水平的主要因素为入湖径流量、蓝藻水华面积占比和水源涵养量,而长期超载过牧、水体污染物浓缩效应以及湿地面积萎缩

是限制生态安全水平进一步提升的另一重要因素。因此,通过保障水资源供给、建立蓝藻水华风险防控体系,坚持以水定牧、以草定牧、草畜平衡,以资源环境承载力为基础,合理核定载畜量,开展芦苇湿地生态保护与修复等一系列措施,对于有效提升呼伦湖生态安全恢复潜力具有重要作用。

参考文献 (References):

[1] 郝伟罡,魏永富,郭中小,等.典型牧区湖泊湿地生态服务价值量化评估[C]//中国环境科学学会,2010中国环境科学学会学术年会论文集(第一卷).北京:中国环境科学学会,2010:659-662.

[2] 石益丹,李玉浸,杨殿林,等.呼伦贝尔草地生态系统服务功能价值评估[J].农业环境科学学报,2007,26(6):2099-2103.

SHI Yidan, LI Yujin, YANG Dianlin, et al. Evaluation on the service function of Hulunbeier grassland ecosystem[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(6): 2099-2103.

- [3] 孙瑞,王洪光,张云涛,等.基于多源遥感的呼伦湖动态监测[J].地理空间信息,2019,17(9):83-85.
- [4] 王志杰,李畅游,张生,等.基于水平衡模型的呼伦湖湖泊水量变化[J].湖泊科学,2012,24(5):667-674.
WANG Zhijie, LI Changyou, ZHANG Sheng, *et al.* Hydrological changes in Lake Hulun based on water balance model[J]. Journal of Lake Sciences, 2012, 24(5): 667-674.
- [5] 刘东霞,卢欣石,李文红.呼伦贝尔退化草地植被演替特征研究[J].干旱区资源与环境,2008,22(8):103-110.
LIU Dongxia, LU Xinshi, LI Wenhong. A study on vegetation succession of degradation grassland in Hulunbeier steppe[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(8): 103-110.
- [6] 苏日古嘎,苏根成,杨朝斌.近25年呼伦贝尔地区草地变化时空分布特征分析[J].西部资源,2017(1):73-76.
- [7] 张戈丽,徐兴良,周才平,等.近30年来呼伦贝尔地区草地植被变化对气候变化的响应[J].地理学报,2011,66(1):47-58.
ZHANG Geli, XU Xingliang, ZHOU Caiping, *et al.* Responses of vegetation changes to climatic variations in Hulunbuir grassland in past 30 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(1): 47-58.
- [8] 杨久春,张树文.近50年呼伦湖水系草地退化时空过程及成因分析[J].中国草地学报,2009,31(3):13-19.
YANG Jiuchun, ZHANG Shuwen. The spatial and temporal progress in grassland degradation and causes in Hulun Lake Basin in the past 50 years[J]. Chinese Journal of Grassland, 2009, 31(3): 13-19.
- [9] 乌力吉,李国海,张娜,等.气候变化对呼伦贝尔克氏针茅草原植被的影响[J].草地学报,2013,21(2):230-235.
WU Liji, LI Guohai, ZHANG Na, *et al.* Effect of climate change on the *Stipa krylovii* grassland vegetation of Hulunbuir [J]. Acta Agrestia Sinica, 2013, 21(2): 230-235.
- [10] 杨久春,张树文.近50年来呼伦湖水系土地利用/覆被变化及其生态环境效应[J].干旱区资源与环境,2009,23(2):41-46.
YANG Jiuchun, ZHANG Shuwen. Land use/cover change and its eco-environmental effects in Hulun-lake Basin during the past 50 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, 23(2): 41-46.
- [11] 王治良,路春燕.呼伦贝尔草原区土地利用及景观格局变化特征分析[J].干旱区资源与环境,2015,29(12):91-97.
WANG Zhiliang, LU Chunyan. Dynamic change of land use and landscape pattern in Hulunbuir grassland, China [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(12): 91-97.
- [12] 李莹,张峰,王桥.呼伦贝尔盟草原植被覆盖状况时空演变特征分析[J].干旱区资源与环境,2010,24(6):126-131.
LI Ying, ZHANG Feng, WANG Qiao. Analysis of dynamic change of Hulunbeier grassland vegetation coverage[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(6): 126-131.
- [13] 毛志刚,谷孝鸿,曾庆飞.呼伦湖鱼类群落结构及其渔业资源变化[J].湖泊科学,2016,28(2):387-394.
MAO Zhigang, GU Xiaohong, ZENG Qingfei. The structure of fish community and changes of fishery resources in Lake Hulun [J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(2): 387-394.
- [14] GAUDRY K. Regional co-development and security: a comprehensive approach [J]. Ocean and Coastal Management, 2002, 45(11/12): 761.
- [15] ALCAMO J, ENDEJAN M B, KASPAR F, *et al.* The GLASS model: a strategy for quantifying global environmental security [J]. Environmental Science and Policy, 2001, 4(1): 1-12.
- [16] 毛锋,李晓阳,张安地,等.湖库生态安全综合评估的方法探析[J].北京大学学报(自然科学版),2009,45(2):327-332.
MAO Feng, LI Xiaoyang, ZHANG Andi, *et al.* Research on comprehensive assessment methods for ecological security of lakes and reservoirs [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2009, 45(2): 327-332.
- [17] 刘明,刘淳,王克林.洞庭湖流域生态安全状态变化及其驱动力分析[J].生态学报,2007,26(8):1271-1276.
LIU Ming, LIU Chun, WANG Kelin. Eco-security in dongting lake watershed: its changes and relevant driving forces [J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(8): 1271-1276.
- [18] 钟振宇,柴立元,刘益贵,等.基于层次分析法的洞庭湖生态安全评估[J].中国环境科学,2010,30(1):41-45.
ZHONG Zhenyu, CHAI Liyuan, LIU Yigui, *et al.* Ecological security evaluation based on AHP of Lake Dongting [J]. China Environmental Science, 2010, 30(1): 41-45.
- [19] 田炯,王振祥,王翠然.巢湖流域生态安全评价研究[J].生态科学,2011,30(6):650-658.
TIAN Jiong, WANG Zhenxiang, WANG Cuiran. Study on ecological security evaluation of the Chaohu Lake Basin [J]. Ecological Science, 2011, 30(6): 650-658.
- [20] 冯宁,毛锋,李晓阳,等.滇池生态安全综合评估研究[J].环境科学,2010,31(2):282-286.
FENG Ning, MAO Feng, LI Xiaoyang, *et al.* Research on ecological security assessment of Dianchi Lake [J]. Environmental Science, 2010, 31(2): 282-286.
- [21] 刘丽娜,马春子,张靖天,等.东北湖区典型流域生态安全评估[J].环境科学研究,2019,32(7):1108-1116.
LIU Lina, MA Chunzi, ZHANG Jingtian, *et al.* Ecological security assessment of typical watershed in northeast China [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(7): 1108-1116.
- [22] 焦键,刘江.新疆博斯腾湖生态安全综合评估[J].新疆环境保护,2018,40(3):1-6.
JIAO Jian, LIU Jiang. Comprehensive assessment of ecological security for Bosten lake in Xinjiang [J]. Environmental Protection of Xinjiang, 2018, 40(3): 1-6.
- [23] WANG Wenlin, LI Wenjing, YAN Yan, *et al.* Correction to: organic matter pollution during the spring thaw in Hulun Lake Basin: contribution of multiform human activities [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2020, 105(2): 181.
- [24] 曹秉帅,徐德琳,窦华山,等.北方寒冷干旱地区内陆湖泊生态安全评价指标体系研究:以呼伦湖为例[J].生态学报,2021. doi:10.5846/stxb202004301059.
CAO Bingshuai, XU Delin, DOU Huashan, *et al.* Index system of ecological security of inland lakes in cold arid region: a case study of Hulun Lake, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021. doi: 10.5846/stxb202004301059.

- [25] OECD. Core set of indicators for environmental performance reviews; a synthesis report by the group on the state of the environment [R]. Paris, France: OECD, Organisation for Economic Co-Operation and Development, 1993; 83.
- [26] 王小敏, 赵军, 王建华, 等. 基于农业生态区域模型的黑河流域土地资源承载力 [J]. 干旱区研究, 2014, 31(6): 991-997.
WANG Xiaomin, ZHAO Jun, WANG Jianhua, *et al.* Agro-ecological assessment for land resources and carrying capacity of the Heihe River Basin [J]. *Arid Zone Research*, 2014, 31(6): 991-997.
- [27] 周林飞, 许士国, 李青山, 等. 扎龙湿地生态环境需水量安全阈值的研究 [J]. 水利学报, 2007(7): 845-851.
ZHOU Linfei, XU Shiguo, LI Qingshan, *et al.* Safety threshold of eco-environmental water requirement in wetland [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007(7): 845-851.
- [28] 许宏斌. 不同放牧强度对呼伦贝尔草甸草原群落特征及群落生物量分布的影响 [D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2018: 25-27.
- [29] CHEN Jian, YANG Shengtian, LI Hongwei, *et al.* Research on geographical environment unit division based on the method of natural breaks (Jenks) [J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2013. doi: 10.5194/isprsarchives-XL-4-W3-47-2013.
- [30] 国家统计局, 环境保护部. 中国环境统计年鉴(2017) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [31] 曹秉帅, 邹长新, 高吉喜, 等. 生态安全评价方法及其应用 [J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(8): 953-963.
CAO Bingshuai, ZOU Changxin, GAO Jixi, *et al.* Review on methodology and application of ecological security assessment [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(8): 953-963.
- [32] 徐方奎, 姜凤友, 梁占武, 等. 呼伦贝尔草原 35 年干旱统计分析 [J]. 内蒙古气象, 2007(6): 22-23.
- [33] 梁超, 高永, 党晓宏, 等. 呼伦贝尔市季节性干旱演变特征 [J]. 内蒙古林业科技, 2018, 44(2): 7-13.
LIANG Chao, GAO Yong, DANG Xiaohong, *et al.* Evolution characteristics of seasonal drought in Hulunbuir City [J]. *Journal of Inner Mongolia Forestry Science and Technology*, 2018, 44(2): 7-13.
- [34] 秦伯强, 王苏民. 呼伦湖的近期演变及其与气候的关系 [J]. 干旱区资源与环境, 1993(2): 1-9.
QIN Boqiang, WANG Sumin. Hulun lake's recent changes and their responses to the climate [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 1993(2): 1-9.
- [35] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [36] 姜宏, 及永乾, 等. 呼伦贝尔市统计年鉴 2020 [M]. 呼伦贝尔: 呼伦贝尔市统计局, 2018.
- [37] 陈昆仑, 齐漫, 王旭, 等. 1995—2015 年武汉城市湖泊景观生态安全格局演化 [J]. 生态学报, 2019, 39(5): 1725-1734.
CHEN Kunlun, QI Man, WANG Xu, *et al.* Study of urban lake landscape ecological security pattern evolution in Wuhan [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(5): 1725-1734.

(责任编辑: 周巧富)