

# 基于Forel-Ule指数的呼伦湖水色时空变化研究

阿娜尔, 史晓玲

内蒙古师范大学地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特

收稿日期: 2024年1月14日; 录用日期: 2024年2月24日; 发布日期: 2024年2月29日

## 摘要

Forel-Ule (FUI)指数可以反映湖泊水色变化, 从而得知水体水质状况。本文基于FUI指数, 利用Landsat影像数据, 分析了呼伦湖1986~2023年水色时空变化特征, 并探究了其影响因素。结果表明: 呼伦湖FUI指数整体上呈逐步升高的趋势, 且在2001年前后分别具有缓慢降低和波浪式升高的特征。空间上西部FUI值较低, 而东部较高。此外, 气温和降水与呼伦湖FUI指数月变化呈负相关关系。

## 关键词

呼伦湖, FUI指数, Landsat, 时空变化

## Study on Spatial-Temporal Changes of Water Color in Hulun Lake Based on Forel-Ule Index

Naer A, Xiaoling Shi

College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot Inner Mongolia

Received: Jan. 14<sup>th</sup>, 2024; accepted: Feb. 24<sup>th</sup>, 2024; published: Feb. 29<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

The Forel-Ule (FUI) index can reflect changes in lake water color and thus determine the water quality status of the water body. Based on the FUI index and Landsat image data, this paper analyzes the spatial-temporal change characteristics of water color in Hulun Lake from 1986 to 2023, and explores its changing factors. The results show that the FUI index of Hulun Lake shows a trend of gradual increase on the whole, and has the characteristics of slow decrease and wave-like increase before and after 2001. The spatial FUI index is lower in the west and higher in the east. In

addition, temperature and precipitation are negatively correlated with monthly changes of Hulun Lake FUI index.

## Keywords

Hulun Lake, FUI Index, Landsat, Spatial-Temporal Changes

Copyright © 2024 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

湖泊作为地球水资源的一部分,在生态系统的均衡与调节中发挥着重要的作用[1]。近半个世纪以来,全球经济飞速发展、人口迅速增长、气候持续变暖,对湖泊生态系统造成了严重威胁[2]。近年来水色研究成为了水质研究的重要手段。Forel-Ule (FUI)指数是反映湖泊水色变化的重要指标[3]。自19世纪90年代以来在海洋和湖沼学研究中被广泛应用[4]。FUI指数将水色分为从深蓝色到黄褐色的21种类型,其值越小代表水体越清澈,反之则浑浊[5][6]。Li等(2016)利用FUI指数检测中国十大湖泊的年际和季节变化及其对水体透明度和营养状态的响应,指出FUI指数可用于水体透明度及营养状态的评估[5]。此后,也有研究人员指出FUI指数可以很好地模拟湖泊的营养状态以及透明度[7]-[12]。Wagh等(2020)指出,FUI指数的变化可以指示总悬浮物浓度,它的增加表征总悬浮物的增加[13]。利用遥感FUI指数,还可以长期跟踪水体的颜色变化,分析年际和季节性变化特征[14][15],识别水体颜色异常[16]。因此,FUI在水质评估等方面展现出广阔的应用前景。

呼伦湖作为中亚草原区最大的淡水湖,内蒙古高原第一大湖[17],是我国北方生态安全屏障的重要组成部分[18]。近年来,呼伦湖地区经历了显著的气候变化,导致湖水和湿地面积减少,同时出现重金属污染如镉,加之水质富营养化问题突显,总氮、总磷含量超标,叶绿素a浓度变化明显,湖水透明度下降[19][20][21][22],因此对呼伦湖水质进行监测是有必要的。

本文使用Landsat-5/8遥感数据,监测了呼伦湖1986~2023年水体颜色变化过程,分析了呼伦湖水体颜色时空动态变化规律,监测呼伦湖水质变化,为呼伦湖水体的保护提供理论支撑。

## 2. 研究区与数据

### 2.1. 研究区概况

本文以呼伦湖为研究对象进行研究。呼伦湖(116°58'~117°48'E, 48°33'~49°20'N),位于内蒙古自治区呼伦贝尔草原西部的巴尔虎右旗、巴尔虎左旗以及扎赉诺尔区之间,呈不规则斜长方形,总面积约2339 km<sup>2</sup> [23]。该地区属于温带大陆性季风气候,夏季温暖,7月气温最高,8月气温开始下降,春季和冬季寒冷干燥,年均气温-0.6℃~1.1℃,年均降水量小于300 mm [24][25]。同时,呼伦湖是中国封冻时间最长的湖泊之一,封冻期从11月一直延续到次年5月中旬,长达约180天之久[26]。呼伦湖水补给主要来自河流的自然补给、大气降水以及地下水[25]。

### 2.2. 数据

本研究利用了Landsat-5/8 C2 L2级地表反射率产品数据,以推导呼伦湖水体颜色变化。Landsat-5搭

载了多光谱扫描仪(MSS)和专题制图仪(TM)。Landsat-8 装备有陆地成像仪(OLI)和热红外传感器(TIRS)。这两颗卫星的重访周期均为 16 天, 提供了 30 米的空间分辨率数据。本文中收集了 1986~2020 年间非冰封期(5 月中旬~10 月)呼伦湖地区的 Landsat 地表反射率数据, 但因条带问题缺乏 2012 年的数据。所有的 Landsat 地表反射率产品数据均来自美国地质调查局的官方网站(<https://earthexplorer.usgs.gov/>)。本文用到的气象数据来自中国气象数据网(<https://data.cma.cn/>), 用于分析呼伦湖水色变化的影响因素。

### 3. 研究方法

#### 3.1. 水色指数(FUI)计算

本文采用了基于红(R)、绿(G)、蓝(B)三波段的 FUI 计算模型[27]。首先, 将遥感影像中的 R, G, B 波段作为国际照明委员会(CIE)色度系统的红绿蓝值, 将其合成的真彩色图像作为实际颜色, 然后利用 CIE 色度系统中的三原色 RGB 与三刺激值 XYZ 之间的转换关系得到 R, G, B 波段对应的三刺激值 X, Y, Z。公式如下:

$$\begin{aligned} X &= 2.7689 * Rrs(R) + 1.7517 * Rrs(G) + 1.1302 * Rrs(B) \\ Y &= 1.0000 * Rrs(R) + 4.5907 * Rrs(G) + 0.0601 * Rrs(B) \\ Z &= 0.0000 * Rrs(R) + 0.0565 * Rrs(G) + 5.5934 * Rrs(B) \end{aligned} \quad (1)$$

其次, 将三刺激值 X, Y, Z 归一化到二维色度坐标(x, y):

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{X+Y+Z} \\ y &= \frac{Y}{X+Y+Z} \end{aligned} \quad (2)$$

再基于色调坐标(x, y), 建立新的坐标系(x', y'), 公式如下:

$$\begin{aligned} x' &= y - \frac{1}{3} \\ y' &= x - \frac{1}{3} \end{aligned} \quad (3)$$

基于新坐标系, 色度角计算公式如下:

$$\alpha = \arctan 2(x', y') \quad (4)$$

式中, arctan2 函数为双变量反正切函数, 色度角  $\alpha$  范围为(0°, 360°)。为了消除卫星传感器和人眼对颜色感知的差异, 使用了 Van der Woerd 和 Wernand (2015)等提出的基于国际海洋颜色协调组(IOCCG)的合成遥感反射率(Hydrolight)数据集的多项式校正公式的校正方法[28]。表 1 为五阶多项式系数。

最后, 通过 Novoa (2013)等建立的 FUI 指数查找表[4] (见表 2), 寻找与色度角  $\alpha$  最邻近的色度值, 从而得到水体的 FUI 水色指数。

**Table 1.** MODIS, Landsat TM and OLI sensor chromaticity angle correction polynomial coefficients  
**表 1.** MODIS、Landsat TM 以及 OLI 传感器色度角校正多项式系数(a =  $\alpha/100$ )

传感器	$a^5$	$a^4$	$a^3$	$a^2$	$a$	常数项
Landsat TM	-47.744	311.40	-720.37	682.68	-222.13	21.678
Landsat OLI	-20.831	148.99	-388.11	441.39	-204.47	31.569

**Table 2.** FUI index lookup table**表 2.** FUI 指数查找表

FUI	$\alpha$	FUI	$\alpha$	FUI	$\alpha$
1	40.467	8	170.4629	15	222.1153
2	45.19626	9	181.4983	16	227.6293
3	52.85273	10	191.8352	17	232.8302
4	67.16945	11	191.8352	18	237.3523
5	91.29804	12	205.0622	19	241.7592
6	122.5852	13	210.5766	20	245.5513
7	151.4792	14	216.5569	21	248.9529

### 3.2. 分析方法

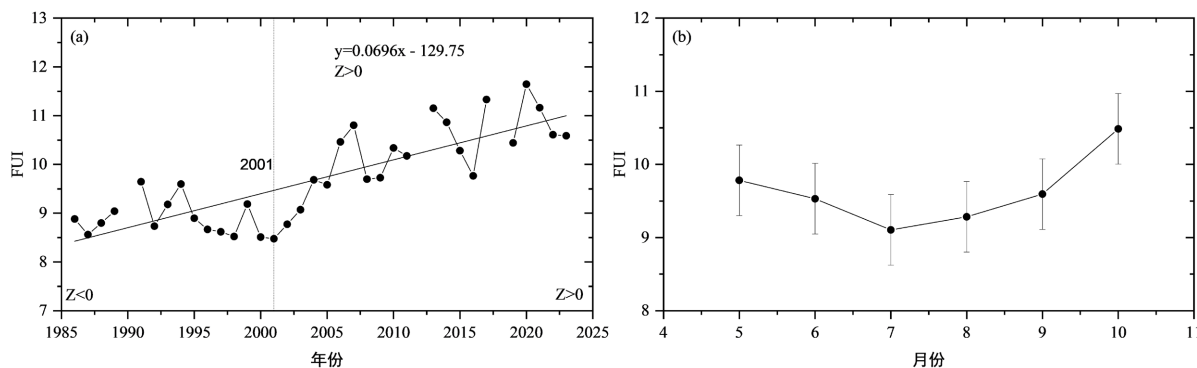
在本研究中首先通过目视解译的方法对所有影像进行筛选, 选出没有被云或阴影遮蔽的影像。然后采用归一化水体指数提取水体, 再将 FUI 计算方法应用于影像, 得到长时间序列呼伦湖水体颜色变化结果。在此基础上, 计算 FUI 月均值和年均值来分析呼伦湖水色长时序变化规律。因呼伦湖有较长的冰冻期, 因此在这里只计算每年非冰封期(5~10月) FUI 平均值作为其年平均值。最后使用 Mann-Kendall (M-K) 趋势检验分析了呼伦湖 FUI 的时间变化趋势。分析空间变化的时候将每 5 年的水色空间变化作为一周期来研究, 即每 5 年计算一次其平均值。

为了分析呼伦湖水色变化的影响因素, 使用 Pearson 相关性分析方法。计算每个影响因素与 FUI 之间的相关系数, 并使用 t 检验获得显著性水平。

## 4. 结果分析

### 4.1. 时间变化分析

1986~2023 年呼伦湖 FUI 年际变化如图 1(a)所示。由于 Landsat 数据的时间间隔为 16 天, 而且在卫星通过期间有可能会云覆盖, 因此有些年份的数据因数据量不够而存在一些缺失。结果表明, 从 1985 年到 2023 年, 总体呈波动上升趋势( $Z > 0$ , 且  $Z = 2.9$ ), 且有显著的上升趋势, 但在 2001 年出现了一个最小值。2001 年前后 FUI 分别呈下降趋势( $Z < 0$ )和上升趋势( $Z > 0$ )。图 1(b)显示了 5~10 月 FUI 的月际变化, 可以看出 FUI 在前几个月减少, 7 月为最低值, 然后再开始增加, 到 10 月达到最高。



**Figure 1.** (a) 1986~2023 Hulun Lake FUI interannual change; (b) monthly change, the vertical line represents the standard deviation

**图 1.** (a) 1986~2023 年呼伦湖 FUI 年际变化; (b) 月际变化, 竖线表示标准差

通过 M-K 检验方法来分析 1986~2023 年呼伦湖 FUI 的变化趋势, 并试图找出突变产生的时间。如图 2 所示, UB 曲线与 UF 曲线并没有在显著性区间内相交, 表明 1986~2023 年呼伦湖水色指数并未发生显著的突变。

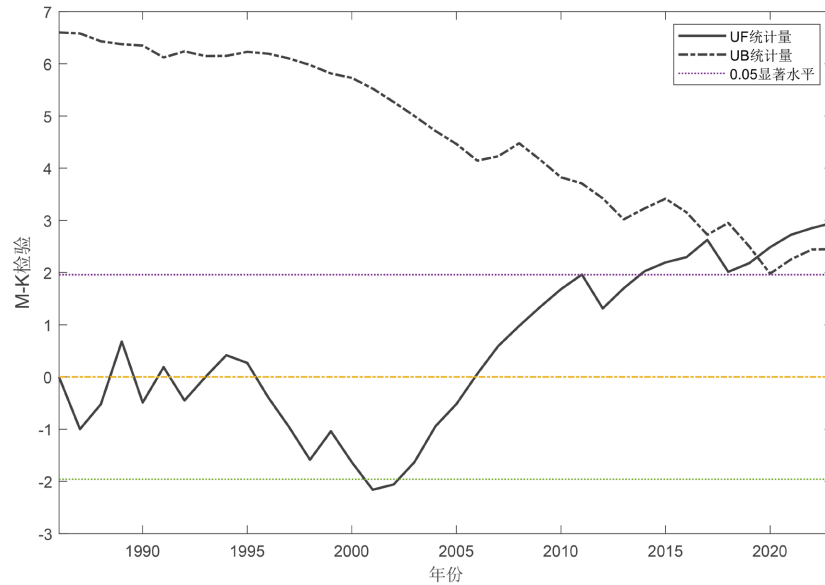


Figure 2. Test results of change trend of Hulun Lake FUI from 1986 to 2023

图 2. 1986~2023 年呼伦湖 FUI 变化趋势检验结果

#### 4.2. 空间变化分析

图 3 展示了 1986~2023 年呼伦湖水色指数空间分布情况, 每五年为一组计算它们的平均值。可以看出呼伦湖 FUI 值大致从西北到东南逐渐增大, 即呼伦湖东部水质比西部浑浊。1986~2005 年呼伦湖 FUI 值基本在 9~10 之间, 并未发生太大的变化。而 2006~2023 年大致 FUI 范围在 10~12, 水色指数较之前增大, 且空间差异较大。

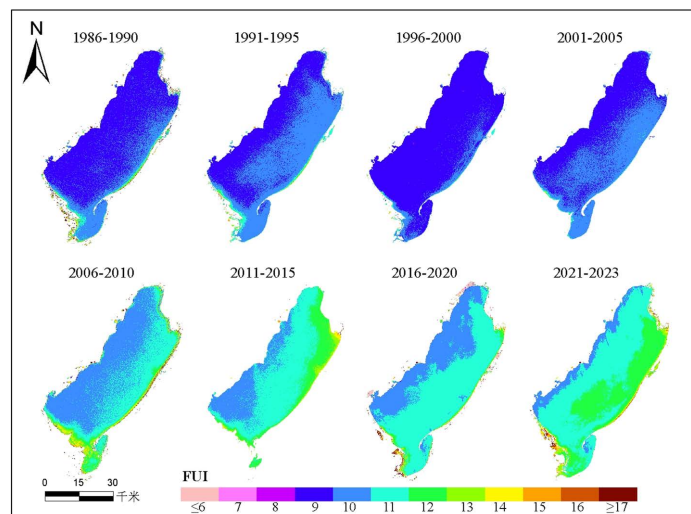


Figure 3. Spatial distribution of Hulun Lake FUI from 1986 to 2023

图 3. 1986~2023 年呼伦湖 FUI 空间分布图

FUI 可以分为 5 个颜色等级, 它们分别对应不同的营养等级和水质成分[29], 如表 3 所示。结合图 4 和表 3 可知, 1986~2005 年呼伦湖大部分区域为蓝绿色, 水体以藻类为主, 溶解物质开始增加。2006~2023 年呼伦湖水体呈绿色, 水体营养水平和浮游植物含量增加, 同时也含有矿物质和溶解有机物。

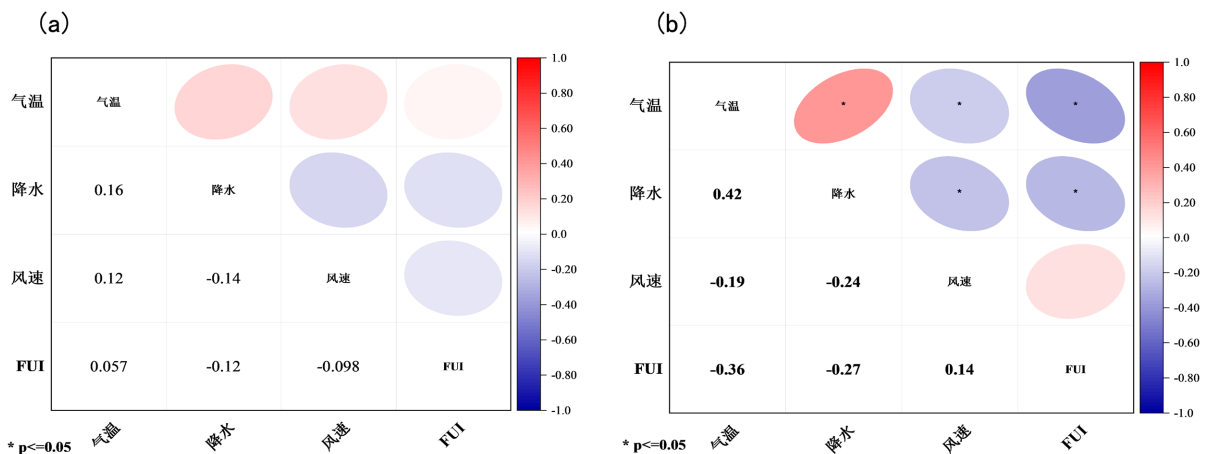
**Table 3.** Five color levels of FUI and chromaticity angle, corresponding nutritional status, and description of main body components [13]

**表 3.** FUI、色度角的 5 个颜色等级和相应的营养状态、主要准体成分描述[13]

FUI	颜色	描述
1~5	靛蓝色 - 青绿色	低营养状态: 以微型藻类为主
6~9	青绿色 - 蓝绿色	以藻类为主; 溶解物质增加
10~13	绿色	营养水平和浮游植物含量增加; 同时含有矿物质和溶解有机物
14~17	绿棕色 - 棕绿色	高营养水平和高浮游植物含量; 沉积物和溶解有机物含量增加
18~21	棕绿色 - 可乐棕色	高浓度腐殖酸

### 4.3. 气候因素对 FUI 的影像分析

在本文利用 Pearson 相关性分析了 1986~2020 年气温, 降水和风速对呼伦湖 FUI 的影响, 见图 4。分析发现, 气温、降水、风速等因素对呼伦湖 FUI 的年变化上没有显著影响, 见图 4(a)。而在 FUI 的月变化上气温和降水呈显著负相关( $P < 0.05$ ), 见图 4(b)。即气温和降水的升高、增多会导致青海湖 FUI 值的降低, 这与呼伦湖夏季(6~8 月)FUI 值比春季和秋季低较符合。



**Figure 4.** Correlation analysis of FUI with temperature, precipitation, and wind speed (a) interannual; (b) monthly  
**图 4.** FUI 与气温、降水、风速的相关性分析图。(a) 年际; (b) 月际

## 5. 结论

本研究基于 FUI 水色指数, 利用 Landsat-5/8 影像数据, 分析了呼伦湖 1986~2023 年水体颜色时空变化, 并结合气象数据分析了其影响因素。得到如下结果:

在时间上, 1986~2023 年呼伦湖水色指数呈波浪式增加的趋势, 这与前面提到的呼伦湖水质出现恶化的现象一致。在月变化上 5~10 月水色指数先减少后增加, 但变化不是很大。

在空间上, 1986~2005 年呼伦湖水色的空间差异较小基本为 9~10 之间, 水体颜色基本为蓝绿色且水中以藻类为主。而 2005 年之后呼伦湖水色空间差异较大, 自西北到东南水色指数逐渐升高, 水色指数范

围为 10~12, 水体呈绿色, 水体的营养水平和浮游植物及矿物质和溶解有机物含量增加。

研究气象因素对水色指数的影响发现: 风速与水色指数之间的相关性并不明显; 气温和降水与水色指数的月变化呈现出负相关关系, 即随着气温的升高和降水量的增加水体指数减少, 表明水质有变好的趋势, 这可能是由于气温的升高使水体中的浮游植物和浮游动物更活跃, 促进水体中有机物的分解, 有助于净化水质, 同时降水可以将水体中的溶解物、悬浮物和污染物稀释, 减少它们的浓度, 降低水体中有害物质的浓度, 改善水质。

综合以上研究结果, 我们发现呼伦湖水体颜色在时空上呈现出明显的变化趋势, 并且这些变化与气象因素之间存在一定的关系。这对于理解湖泊生态系统的动态变化和水质管理至关重要。未来的研究可以进一步从多个方面探讨具体的影响机制, 如社会经济等, 并提出更全面的水资源管理策略, 以确保湖泊生态系统的可持续发展。

## 参考文献

- [1] Xu, Y., Feng, L., Hou, X., Wang, J. and Tang, J. (2021) Four-Decade Dynamics of the Water Color in 61 Large Lakes on the Yangtze Plain and the Impacts of Reclaimed Aquaculture Zones. *Science of the Total Environment*, **781**, Article ID: 146688. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146688>
- [2] Zhang, G., Yao, T., Chen, W., Zheng, G., Shum, C.K., Yang, K., Piao, S., Sheng, Y., Yi, S., Li, J. and O'Reilly, C.M. (2019) Regional Differences of Lake Evolution across China during 1960s-2015 and Its Natural and Anthropogenic Causes. *Remote Sensing of Environment*, **221**, 386-404. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.038>
- [3] Zhang, W., Wang, S., Zhang, B., Zhang, F., Shen, Q., Wu, Y., Mei, Y., Qiu, R. and Li, J. (2022) Analysis of the Water Color Transitional Change in Qinghai Lake during the Past 35 Years Observed from Landsat and MODIS. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, **42**, Article ID: 101154. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101154>
- [4] Novoa, S., Wernand, M.R. and Woerd, H.J. (2013) The Forel-Ule Scale Revisited Spectrally: Preparation Protocol, Transmission Measurements and Chromaticity. *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, **8**, Article No. 13057. <https://doi.org/10.2971/jeos.2013.13057>
- [5] Li, J., Wang, S., Wu, Y., Zhang, B., Chen, X., Zhang, F., Shen, Q., Peng, D. and Tian, L. (2016) MODIS Observations of Water Color of the Largest 10 Lakes in China between 2000 and 2012. *International Journal of Digital Earth*, **9**, 788-805. <https://doi.org/10.1080/17538947.2016.1139637>
- [6] Pitarch, J., van der Woerd, H.J., Brewin, R.J. and Zielinski, O. (2019) Optical Properties of Forel-Ule Water Types Deduced from 15 Years of Global Satellite Ocean Color Observations. *Remote Sensing of Environment*, **231**, Article ID: 111249. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111249>
- [7] Wang, S., Li, J., Zhang, B., Spyarakos, E., Tyler, A.N., Shen, Q., Zhang, F., Kuster, T., Lehmann, M.K. and Wu, Y. (2018) Trophic State Assessment of Global Inland Waters Using a MODIS-Derived Forel-Ule Index. *Remote Sensing of Environment*, **217**, 444-460. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.026>
- [8] Wang, S., Li, J., Zhang, B., Lee, Z., Spyarakos, E., Feng, L., Liu, C., Zhao, H., Wu, Y. and Zhu, L. (2020) Changes of Water Clarity in Large Lakes and Reservoirs across China Observed from Long-Term MODIS. *Remote Sensing of Environment*, **247**, Article ID: 111949. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111949>
- [9] Chen, Q., Huang, M. and Tang, X. (2020) Eutrophication Assessment of Seasonal Urban Lakes in China Yangtze River Basin Using Landsat 8-Derived Forel-Ule Index: A Six-Year (2013-2018) Observation. *Science of the Total Environment*, **745**, Article ID: 135392. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135392>
- [10] Zhou, Y., He, B., Fu, C., Giardino, C., Bresciani, M., Liu, H., Feng, Q., Xiao, F., Zhou, X. and Liang, S. (2021) Assessments of Trophic State in Lakes and Reservoirs of Wuhan Using Sentinel-2 Satellite Data. *European Journal of Remote Sensing*, **54**, 461-475. <https://doi.org/10.1080/22797254.2021.1960201>
- [11] Chen, X., Liu, L., Zhang, X., Li, J., Wang, S., Liu, D., Duan, H. and Song, K. (2021) An Assessment of Water Color for Inland Water in China Using a Landsat 8-Derived Forel-Ule Index and the Google Earth Engine Platform. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, **14**, 5773-5785. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3085411>
- [12] Wagh, P., Sojan, J.M., Babu, S.J., Valsala, R., Bhatia, S. and Srivastav, R. (2020) Indicative Lake Water Quality Assessment Using Remote Sensing Images-Effect of COVID-19 Lockdown. *Water*, **13**, Article No. 73. <https://doi.org/10.3390/w13010073>
- [13] Topp, S.N., Pavelsky, T.M., Dugan, H.A., Yang, X., Gardner, J. and Ross, M.R.V. (2021) Shifting Patterns of Summer

- Lake Color Phenology in over 26,000 US Lakes. *Water Resources Research*, **57**, e2020WR029123. <https://doi.org/10.1029/2020WR029123>
- [14] Lehmann, M., Nguyen, U., Allan, M. and Woerd, H.V.D. (2018) Colour Classification of 1486 Lakes across a Wide Range of Optical Water Types. *Remote Sensing*, **10**, Article No. 1273. <https://doi.org/10.3390/rs10081273>
- [15] Gardner, J.R., Yang, X., Topp, S.N., Ross, M.R.V., Altenau, E.H. and Pavelsky, T.M. (2021) The Color of Rivers. *Geophysical Research Letters*, **48**, e2020GL088946. <https://doi.org/10.1029/2020GL088946>
- [16] Zhao, Y., Shen, Q., Wang, Q., Yang, F., Wang, S., Li, J., Zhang, F. and Yao, Y. (2020) Recognition of Water Colour Anomaly by Using Hue Angle and Sentinel 2 Image. *Remote Sensing*, **12**, Article No. 716. <https://doi.org/10.3390/rs12040716>
- [17] Sun, B., Yang, Z., Zhao, S., Shi, X., Liu, Y., Ji, G. and Huotari, J. (2023) Water Balance Analysis of Hulun Lake, a Semi-Arid UNESCO Wetland, Using Multi-Source Data. *Remote Sensing*, **15**, Article No. 2028. <https://doi.org/10.3390/rs15082028>
- [18] Cai, Z., Jin, T., Li, C., Offerdinger, U., Zhang, S., Ding, A. and Li, J. (2016) Is China's Fifth-Largest Inland Lake to Dry-Up? Incorporated Hydrological and Satellite-Based Methods for Forecasting Hulun Lake Water Levels. *Advances in Water Resources*, **94**, 185-199. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.05.010>
- [19] 杨朝霞, 李畅游, 史小红, 孙标, 杜丹丹, 全栋. 呼伦湖水体营养状态特征及其主要影响因子研究[J]. 生态环境学报, 2019, 28(11): 2273-2280.
- [20] 付尧, 贾克力, 梁丽娥, 孙标, 史小红, 赵胜男. 呼伦湖不同季节水质现状评价及主要影响因子分析[J]. 环境监测管理与技术, 2019, 29(1): 25-29.
- [21] 团良, 岳彩英. 呼伦湖 2005 年-2014 年水质状况及防治对策研究[J]. 环境科学与管理, 2015, 40(5): 123-126.
- [22] 梁丽娥, 李畅游, 孙标, 等. 内蒙古自治区呼伦湖水质变化特征及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2017, 37(2): 102-106.
- [23] 钱玺亦, 李金彪, 敖文, 庞博, 包萨茹, 王琪, 刘波, 王增龙. 呼伦湖浮游植物群落季节动态及其与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 2022, 34(6): 1814-1827.
- [24] Wang, X., Fang, C., Song, K., Lyu, L., Li, Y., Lai, F., Lyu, Y. and Wei, X. (2023) Monitoring Phycocyanin Concentrations in High-Latitude Inland Lakes Using Sentinel-3 OLCI Data: The Case of Lake Hulun, China. *Ecological Indicators*, **155**, Article ID: 110960. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110960>
- [25] 苏宇, 党晓宏, 袁立敏. 基于 ENVI 和 ArcGIS 的呼伦湖面积动态变化及影响因素研究[J]. 内蒙古林业科技, 2023, 49(3): 1007-4066.
- [26] Chen, J., Wang, J., Wang, Q., Lv, J., Liu, X., Chen, J. and Li, N. (2021) Common Fate of Sister Lakes in Hulunbuir Grassland: Long-Term Harmful Algal Bloom Crisis from Multi-Source Remote Sensing Insights. *Journal of Hydrology*, **594**, Article ID: 125970. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.125970>
- [27] 王胜蕾. 基于水色指数的大范围长时序湖库水质遥感监测研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所), 2018.
- [28] Woerd, H. and Wernand, M. (2018) Hue-Angle Product for Low to Medium Spatial Resolution Optical Satellite Sensors. *Remote Sensing*, **10**, Article No. 180. <https://doi.org/10.3390/rs10020180>
- [29] Skandaraja, S.S. (2015) Lesson 16: Determination of Water Quality Parameters Such as Temperature, Colour, Turbidity and Total Solids by Physical Methods.