

# 乌伦古湖水体矿化度时空分布特征及驱动因子解析

韩雪梅

阿勒泰生态环境监测站

DOI:10.32629/hwr.v10i3.6911

**[摘要]** 乌伦古湖作为重要的干旱区湖泊,其水体矿化度的变化对区域生态环境与水资源安全具有显著影响。本研究基于实地监测与历史数据,系统分析了乌伦古湖水体矿化度的时空分布格局与演变趋势。结果表明,湖体矿化度呈现显著的时空异质性,空间上表现为由入湖口向湖心及东部逐渐升高的特征,时间上则表现出明显的季节波动与长期变化趋势。驱动因子分析揭示,气候变化背景下的入湖径流量变化、湖面蒸发与降水平衡,以及日益增强的人类活动(如农牧业用水、湖区开发)是主导矿化度动态的关键因素。本研究为乌伦古湖的水资源管理与生态保护提供了科学依据。

**[关键词]** 乌伦古湖; 水体矿化度; 时空分布; 驱动因子

**中图分类号:** P536 **文献标识码:** A

## Temporal and spatial distribution characteristics and driving factors analysis of mineralization degree in Lake Ulungur

Xuemei Han

Altay Ecological Environment Monitoring Station

**[Abstract]** Wulungu Lake, as an important arid lake in northern Xinjiang, has a significant impact on the regional ecological environment and water resource security due to changes in its water mineralization degree. Based on field monitoring and historical data, this study systematically analyzed the spatiotemporal distribution pattern and evolution trend of mineralization degree in the water body of Lake Ulungu. The results show that the mineralization degree of the lake exhibits significant spatiotemporal heterogeneity, with a spatial characteristic of gradually increasing from the entrance to the center and east of the lake, and a clear seasonal and long-term trend in time. Driver factor analysis reveals that changes in lake runoff, balance between surface evaporation and precipitation, and increasing human activities (such as agricultural and animal husbandry water use, lake area development) under the background of climate change are key factors driving mineralization dynamics. This study provides a scientific basis for water resource management and ecological protection of Lake Ulungu.

**[Key words]** Wulungu Lake; water mineralization; spatiotemporal distribution; driving factor

### 引言

乌伦古湖位于亚欧大陆腹地,是新疆最大的内陆湖泊和渔业基地。近年来,由于全球变暖和区域人类活动的叠加作用,湖区水文过程发生了明显的变化,水体盐化问题越来越突出。矿化度是反映湖水盐分含量的指标,矿化度的时空变化直接影响到湖泊生态系统是否健康以及水资源是否可利用<sup>[1]</sup>。因此,弄清楚乌伦古湖矿化度的分布情况及其背后的原因,对认识干旱区湖泊水盐变化规律、制订合理的生态补水计划和水资源可持续利用政策有着十分紧迫的现实意义。本文主要研究其时空分异规律,分析主要的驱动因子,以弥补该区域湖泊水化学研究的不足。

### 1 乌伦古湖水体矿化度时空分布特征

#### 1.1 空间分布格局与异质性特征

乌伦古湖水体矿化度的空间分布是环带状和梯度性的。矿化度值由西部和北部河流入湖口地区向湖心、再向东南部湖岸地带依次增大,呈明显空间梯度。具体表现为乌伦古河主要入湖口(吉利湖库依尔河口附近)、布伦托海北岸近岸区等处,受淡水径流不断稀释的影响,矿化度一直保持在全湖最低水平,一般呈微咸水特征。湖心开阔水域是水体混合和交换的主要区域,矿化度处在中间位置,空间上变化比较平缓,但是受到湖流和环流的影响,存在局部水团结构上的差异。湖泊东部和东南部沿岸,特别是水体交换慢的湾汊、浅水区矿化度最高。高值区的产生

主要是由多种因素造成的,第一,该地区距离主要淡水补给源最远,稀释作用最弱;第二,浅水区有较大的表面积-体积比,在干旱气候下蒸发浓缩作用非常强烈;第三,局部地貌可能造成水体交换不畅,盐分容易积累。

### 1.2 时间动态变化与趋势分析

乌伦古湖水体矿化度的时间变化包括了季节内波动、年际变化和长期趋势等几个尺度,是湖泊水盐平衡过程对于气候波动和人类活动响应的直接反映。矿化度在季节上也存在着明显的周期性。春季随着冰雪融水汇入,入湖淡水增多,使湖水受到强烈的稀释,全湖平均矿化度一般在这个时候降到年最低值。夏季虽然降水可能会增多,但是强烈的蒸发作用占主导地位,再加上农业灌溉用水高峰期造成入湖径流减少,湖水矿化度开始逐渐回升<sup>[2]</sup>。秋季到初冬,由于蒸发减少、部分径流恢复,矿化度上升趋势变缓或者趋于稳定。冬季冰封期,湖水和大气之间水汽交换基本断绝,矿化度比较稳定,但是冰体析盐作用会使冰下水的盐度有所上升。这种季节循环同区域水文气候周期互相联系。年际和年代际尺度上的矿化度变化趋势就更能体现气候变化、水资源调配的影响。历史数据表明,20世纪后半叶由于入湖水量减少造成湖面萎缩、盐度急剧上升的时候,经过近几年来生态补水工程(引领济乌工程等)的实施,入湖水量得到一定的保证,湖面有所回升,全湖平均矿化度呈波动中略有下降或者趋于稳定的趋势。但是这种趋势在不同的湖区是不一样的,淡水补给影响大的区域改善明显,远离补水口的区域盐分累积的趋势还在继续。长期趋势分析显示,矿化度的变化对流域水资源总量及分配格局具有很强的敏感性,任何影响乌伦古河径流、湖区水量平衡的自然或者人为因素变化,在湖水矿化度的时间序列上都会留下痕迹,因此它是记录区域环境变化的“天然盐度计”。

### 1.3 重点区域与典型断面变化剖析

为了更好地认识乌伦古湖矿化度时空变化的内在原因,选择一些重要的地区和典型水文断面加以分析,具有重要意义。首先河口三角洲区是水盐交换的前沿地带。以乌伦古河入湖口为例,该地区矿化度梯度大,几公里内就可以从淡水突然变为咸水,形成一条特殊的生态过渡带。该区矿化度对入河流量的响应非常快、非常敏感,流量丰富时淡水楔深入湖内,低矿化度区域扩大;流量减少时,咸水就向河口倒灌,使河道内水质变坏。其次,湖心深水区矿化度的时间序列可以较好的反映全湖平均状态和长期趋势。该区域连续监测数据表明,其年际波动一般比沿岸浅水区小,在极端干旱年或者连续丰水年的时段内,其变化仍然较大,是判定湖泊整体盐化或者淡化趋势的关键指标。另外东部封闭或者半封闭的湾汊(比如一些盐沼湿地周围的水域),是盐分积聚的“热点”<sup>[3]</sup>。

## 2 乌伦古湖水体矿化度变化的驱动因子解析

### 2.1 自然驱动因子: 气候水文过程的主导作用

自然驱动因子是形成乌伦古湖水体矿化度长期背景和基本格局的主要力量,气候和水文过程的耦合作用起着主导的作用。

核心就是流域的水量平衡方程,湖泊储水量的变化等于入湖水量(地表径流、地下补给、降水)减去出湖水量(蒸发、渗漏、人工引水)。矿化度就是溶质浓度,它受控于这一水量平衡以及伴随的盐分输入输出过程。首先气温和蒸发起着重要的推动作用。乌伦古湖流域属于典型的温带大陆性干旱气候,年均降水量很少(约100毫米左右),但年潜在蒸发量却是降水量的十几倍以上。强烈的湖面蒸发使水体不断浓缩,这是引起矿化度升高的主要自然过程。气候变暖趋势会使得蒸发量增加,进而对矿化度起到正向作用。第二,入湖径流为抗衡蒸发浓缩、保持湖水淡化的主要因素。乌伦古河是主要补给源,它径流量年际、季节变化直接影响到湖泊的稀释能力。径流量受山区冰川积雪融水、降水等许多气候因素的影响。当流域发生干旱年份或者季节的时候,入湖淡水减少,蒸发浓缩效应增大,矿化度明显提高;反之,丰水期可以有效地抑制盐度的升高。由于气候变化引起的降水和融雪的格局发生变化,使得入湖径流的稳定性以及总量都受到了影响。湖面直接降水虽然总量不大,但是它属于淡水直接输入,在夏季对流性降水发生的时候,会对表层湖水造成局部短期稀释。但是降水也会通过地表径流把流域地表盐分冲刷入湖,成为另一个盐分输入源,在农业灌区尤其如此。最后,地下水交换是复杂的、常常被忽略的因子<sup>[4]</sup>。湖区地下水和湖水之间存在着不断的交换,方向和通量由水力梯度来控制。当地下水补给湖水的时候,其矿化度一般比地表径流高,会成为重要的盐分来源;反之,当湖水渗漏补给地下水的时候,就会带走水分,把大部分盐分留在湖里,从而加重浓缩。全球变暖之下,这些自然驱动因素不是孤立存在的,而是通过非线性的交互作用互相影响,一起形成一个动态变化的气候水文强迫系统,不断推动着乌伦古湖矿化度的自然演变轨迹。理解并量化出这些过程的相对贡献,是做出预测的前提。

### 2.2 人为驱动因子: 活动干扰与调控管理的关键影响

随着区域社会经济的发展,人类活动已经成为影响乌伦古湖水盐平衡不可忽视、越来越强的驱动力量,它常常与自然变化叠加在一起,使矿化度的变化更加复杂。第一,最直接、最直接的人为驱动因素就是流域水资源的大量开发。乌伦古河上游及支流修建的水库、塘坝等水利工程,虽然可以保证农业灌溉、工业和城镇用水,但是不可避免地改变了天然水文情势,减少了入湖径流量,特别是改变了洪峰流量和基流的自然节奏,削弱了湖泊的淡水补给和冲刷能力。农业灌溉是流域最大的用水部门,大量河水被引到灌区,直接减少了入湖水量,灌溉退水携带化肥、农药残留的同时,也溶解和淋滤了土壤中的盐分,部分返回河道或者通过地下径流进入湖泊,造成取走淡水、送回咸水的负面效应,改变了入湖盐分的通量和组成。另外湖区周围土地开发利用方式的变化也会产生影响。过度放牧、垦荒等都会破坏湖区周围植被覆盖,增大土壤侵蚀程度,使更多地表盐分、泥沙随径流进入湖泊,使水体透明度下降、光热条件变差,对蒸发、生物过程造成不良影响。旅游业发展过程中产生的生活污水排放,如果处理不当,会增加湖区的营养盐、有机物输入,虽然对矿化

度直接贡献不大,但是会对生态系统功能产生影响,从而间接干扰水盐平衡。第三,直接对湖泊进行调控和管理的措施属于另一类重要的人为因素。近几年来实施的跨流域调水工程(如“引领济乌”工程)属于对乌伦古湖开展主动生态补水、对抗盐化的重大人为干预手段。这些工程在某个时期向湖区注入大量的淡水,可以迅速有效地降低全湖或者局部区域的矿化度,在观测数据中也得到了体现。但是补水的水量、时机、水质、持续性等都会影响到它长期效果的发挥。渔业活动、航运等都会对水体、底泥造成扰动,从而影响到盐分的垂向分布以及沉积释放的过程。人为驱动因子影响具有很强的时空变异性、政策相关性,强度在短期内远大于自然变化,使得湖泊盐度响应更加难以预测。

### 2.3 综合作用与反馈机制解析

乌伦古湖水体矿化度的变化不是由单一因素单独决定的,是自然和人为驱动因子之间复杂相互作用、反馈作用共同导致的。这些因子就构成了一个气候、水文、人类活动三者相互作用的耦合系统。一方面自然因子和人为因子之间存在着很强的交互作用。由于气候变化造成的干旱化趋势(自然因素)会加重农业灌溉需求(人为因素),进而缩减入湖径流,水利工程的调节(人为因素)能缓冲或者放大气候引发的径流自然波动给湖泊带来的影响。生态补水工程(人为干预)直接改变湖泊天然的水量平衡,在不同的气候背景下(丰水年和枯水年)会产生不同的叠加或者抵消的效果。另一方面,矿化度的变化还会引起一系列的生态和环境反馈,而这些反馈又反过来影响着驱动过程。矿化度上升到某一数值时,就会造成湖水密度分层结构发生改变,进而影响湖流的产生和强弱,进而影响到盐分自身空间分布及混合的过程(物理反馈)。更重要的是生态反馈,盐度升高会对湖泊水生生态系统造成胁迫,使耐盐性差的物种减少,耐盐性好的物种(例如某些卤虫、藻类)增加,改变食物网结构和生物地球化学循环。初级生产力和群落结构的变化会对水体有机碳的产生和分解造成影响,从而对沉积物-水界面附近的氧化还原状况产生影响,改变营养盐以及某些盐类矿物的溶解和沉淀平衡,间接地影

响矿化度(生物地球化学反馈)。另外高矿化度的湖水用于灌溉会造成土壤次生盐渍化,使农业增加灌溉用水来洗盐,从而形成盐化、用水增多、入湖淡水减少、进一步盐化的恶性循环(社会经济反馈)。因此,认识乌伦古湖矿化度的形成机理,必须从系统思维入手,创建起可以表现这些多因子相互影响和非线性反馈的概念模型或者数值模型。这就需要把气象、水文、水质、生态和社会经济等各种各样的数据结合起来进行综合分析,定量地评价各个驱动力对水资源的影响程度,并且还要考察它们在不同的时空尺度上所占的比重。

### 3 结语

乌伦古湖水体矿化度的时空分异就是它的脆弱水盐平衡系统对于多种环境压力的集中反映。从空间上看,其空间上存在由淡水补给区向封闭水域递增的清晰格局,时间上也表现出受气候周期和人类调控共同塑造的季节波动和长期趋势。驱动机制分析认为,气候因素主导的蒸发、降水、径流过程是变化的自然背景,流域水资源开发、土地利用变化、直接的生态补水等人类活动在此基础上起着决定性的作用,二者在复杂的物理、生态和社会经济反馈作用下互相交织。在气候变化不断变化、区域发展需求不断增加的背景之下,乌伦古湖的盐化风险依然存在。

### [参考文献]

- [1] 窦乾明. 基于底栖动物完整性指数及综合生物指数的乌伦古湖生态健康评价[J]. 生态学报, 2025, 45(16): 7723-7738.
- [2] 赵巍, 普文森. 新疆乌伦古湖浮游植物群落对季节性环境变化的响应与演替机制[J]. 湖泊科学, 2025, 37(05): 1495-1510.
- [3] 连艺霏. 新疆乌伦古湖雅丹地质公园视觉景观评价及优化设计研究[D]. 大连理工大学, 2025.
- [4] 窦乾明, 王乐. 乌伦古湖大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 生态学杂志, 2025, 44(07): 2132-2141.

### 作者简介:

韩雪梅(1974--), 女, 汉族, 辽宁沈阳人, 大学本科, 高级工程师, 研究方向: 生态环境监测。