

DOI: 10.5846/stxb201709251728

胡春明, 娜仁格日乐, 尤立. 基于水质管理目标的博斯腾湖生态水位研究. 生态学报, 2019, 39(2): - .

Hu C M, Narengerile, You L. Study of ecological water levels of Bosten Lake for water quality management. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(2): - .

基于水质管理目标的博斯腾湖生态水位研究

胡春明^{1,*}, 娜仁格日乐², 尤立¹

1 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085

2 新疆巴音郭楞蒙古自治州博斯腾湖科学研究所, 库尔勒 841000

摘要: 人类开发活动导致湖泊生态功能严重退化, 研究湖泊生态水位对于维持湖泊生态系统健康意义重大。针对博斯腾湖化学需氧量(COD, chemical oxygen demand)浓度较高的水环境现状, 分析博斯腾湖水位和 COD 浓度关系, 研究提出基于水质管理目标的生态水位, 以期博斯腾湖水资源、水环境管理提供参考。结果表明, 博斯腾湖水位与水体 COD 浓度显著负相关, 但由于 COD 浓度空间差异较大以及影响因素不唯一, 水位与 COD 浓度两者之间曲线估计结果不理想。为实现博斯腾湖 COD 浓度小于 20 mg/L 的水质管理目标, 引入累计水位概念进行统计分析得到两个特征水位: 所有 COD 浓度大于等于 20 mg/L 的数据对应水位的平均值为 1046.02 m, 该水位在历史丰水期水位的频率为 60.83%, 可作为最小生态水位; 所有 COD 浓度小于等于 20 mg/L 的数据对应水位的平均值为 1046.4 m, 该水位在历史丰水期水位的频率为 44.70%, 可作为适宜生态水位。适宜生态水位 1046.4 m 与已有研究成果基本相符, 博斯腾湖在 1046.4 m 时既有利于水质管理, 也可保障湖泊整体生态系统健康。

关键词: 生态水位; 博斯腾湖; 化学需氧量; 累积水位

Study of ecological water levels of Bosten Lake for water quality management

HU Chunming^{1,*}, Narengerile², YOU Li¹

1 Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 Institute of Lake Bosten, Bayingolin Mongolia Autonomous Prefecture of Xinjiang Uyghur Autonomous Province, Korle 841000, China

Abstract: Human activities have led to serious degradation of lakes in terms of their ecological functions, making the study of the ecological water level of lakes exceedingly important. Based on the current water environment in Bosten Lake, where there is a high concentration of chemical oxygen demand (COD), a study of the ecological water level of Bosten Lake was conducted for water quality management, by analyzing the relationship between COD concentration and water level. Results showed a significant negative correlation between the water level and COD concentration. However, because of the large spatial variation in the COD concentration and multiple influencing factors, the curve estimation between COD concentration and water level was unsatisfactory. To realize water quality management objectives of Bosten Lake with a COD concentration of less than 20 mg/L, the concept of cumulative water level was introduced for statistical analysis to obtain two characteristic water levels: 1046.02 m was the average water level for all COD concentrations greater than or equal to 20 mg/L, and it can be used as the minimum ecological water level based on a 60.83% cumulative frequency in the flood season; 1046.4 m was the average water level for all COD concentrations less than or equal to 20 mg/L, and it can be used as the optimal ecological water level based on a 44.70% cumulative frequency in the flood season. The optimal ecological water level of 1046.4 m is consistent with previous studies, which means that it is conducive to both water quality management and overall ecosystem health of Bosten Lake.

基金项目: 中国科学院中斯海上丝绸之路联合科教中心子项目中斯水技术研究与示范联合中心; 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2013ZX07104-004)

收稿日期: 2017-09-25; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cmhu@rcees.ac.cn

Key Words: ecological water level; Bosten Lake; chemical oxygen demand; accumulative water level

湖泊及其流域是支持人类文明发展的重要场所,其生态服务功能对于社会经济发展极为重要,包括水资源提供、水产品提供、径流调节、气候调节、生物多样性维持、旅游等。随着流域开发活动不断加剧,江湖阻断以及围垦、围网、围堤、乱修乱建等导致湖泊生境破碎和生物栖息地减少,湖泊生态平衡破坏,生物多样性受损,生态功能退化。研究湖泊生态水位或生态需水量,对于维持湖泊生态系统健康意义重大。

对湖泊生态需水的研究始于 20 世纪末,Rashin 等^[1]提出为保证水资源的可持续利用,应满足湖泊生态系统对水量的需求,首次提出了湖泊生态需水量的概念。David 等^[2]提出,为了最大程度地实现湖泊的生态价值,须满足它本身所需要的水量。Ngana 等^[3]提出,保证一定水量来维持湖泊生态系统的需要、维持社会经济和生态环境协调发展。

自 21 世纪起,国内陆续开展了湖泊生态水位或生态需水研究,并提出诸多生态水位计算方法,主要包括水文学法、水力学法以及功能法。水文学法认为湖泊生态系统在常年演变中与水文情势建立了相互适应关系,可基于湖泊系列水文资料分析提出生态水位,代表性方法有保证率法^[4]、水位资料法^[5]、水量平衡法^[6]及借鉴河流生态需水形成的水文变化指标法^[7]。水力学法主要从湖泊地形出发,基于水位、水面面积、库容等相互关系分析得出生态水位,代表性方法有湖泊形态分析法^[5]。功能法从维持和保证湖泊生态系统正常的生态环境功能或某项特定功能的角度出发,综合分析提出生态水位,在目前湖泊生态水位研究中得到了广泛应用,如:崔保山等^[8]根据湖泊水量与生态功能相关性计算生态需水量;王效科等^[9]从乌梁素海水量平衡、水质改善角度提出引黄河水补给的最小生态需水量;白元等^[10]以恢复塔里木河下游地下水位及植被面积为目标提出区域生态需水量;梁犁丽等^[11]基于乌伦古湖鱼类、盐度、水量关系提出生态水位;姜亮亮^[12]基于艾里克湖面积及周边湿地、河谷林水量需求提出艾里克湖流域生态需水量。还有研究在方法应用上做了一定探索:贺金等^[13]在丰平枯水年划分的基础上研究鄱阳湖生态水位;陈玥等^[14]在年内高、低水位期划分的基础上提出高邮湖生态水位;张华等^[15]综合应用保证率法、水量平衡法研究东居延海在不同湖面面积保证率时的生态需水。总体上,生态水位研究方法较成熟且各具特点,结合研究目标、湖泊特征、基础资料等情况在实际工作中进行选择、优化应用。

博斯腾湖是我国最大的内陆淡水湖,也是新疆维吾尔自治区巴音郭楞蒙古自治州“母亲湖”,但持续的流域开发给博斯腾湖水环境质量带来相应影响:一是污染源输入增多,湖泊水体化学需氧量(COD, chemical oxygen demand)不能达到地表水环境Ⅲ类标准限值,且空间差异明显^[16];二是湖泊水文情势发生改变,现状湖区水源输入口(开都河东支)与输出口(扬水站)距离过近,湖泊内循环能力较差,水文循环主要靠风力驱动^[17]。因此,从水质管理角度研究提出博斯腾湖生态水位对于博斯腾湖水环境保护及水资源利用具有现实意义。

湖泊水质通常受到水文情势影响:水位上升意味着更多污染物输入湖泊,另一方面也引起湖泊原有污染物的稀释、混合^[18];水位波动改变湖泊水动力条件以及营养盐的释放与富集^[19];水动力条件决定水体内污染物、泥沙和能量的输移与转化,并通过稀释水体和加快物质交换来影响污染物浓度分布^[20-21]。部分研究发现,水文情势因子与 COD、高锰酸盐指数、氮、磷等水质指标甚至存在显著相关性^[19,22]。

博斯腾湖水动力影响区域主要为西南湖区,即开都河东支入湖口与扬水站区域,其他湖区受水动力影响极弱^[17],这一水动力特征导致水位对整个湖区的影响远高于其他水文情势因子。已有研究表明博斯腾湖水位对营养盐^[16]、矿化度^[23]、生态系统健康状况^[24]均有较大影响,而水位对 COD 的影响尚无研究,若两者存在显著相关性,则可通过调控水位改善水体 COD 浓度。本研究拟分析博斯腾湖水位和 COD 浓度关系,研究提出基于水质管理目标的生态水位,以期为博斯腾湖水资源、水环境管理提供参考。

1 研究区域及研究方法

1.1 研究区域

博斯腾湖位于中国天山南麓焉耆盆地东南部低洼处,地理位置介于 86°19'—87°28'E,41°46'—42°08'N,

是开都河等水系的尾间,又是孔雀河水系的源头(图1)。流域属于干旱大陆性气候,干旱少雨、蒸发量大、日照时间长。根据博斯腾湖附近的焉耆气象站数据:多年平均降雨量 72.3 mm,多年平均蒸发量 1887 mm,多年平均气温 7.9℃,多年平均日照数 3111.5 h。

博斯腾湖分为大湖区和小湖区,湖区及周边水系见图2。大湖区是湖体主要部分,水位 1047.00 m 时,湖面面积 1064.1 km²,容积 73.03 亿 m³,平均水深约 7.5 m,最深处约 16 m。小湖区位于大湖区西南部,由诸多浅小湖泊和大片芦苇沼泽湿地组成。大、小湖区之间有大小湖隔堤工程,由设置的生态涵管保持水力联系。

历史上汇入博斯腾湖的河流有开都河、黄水沟、清水河、曲惠沟、乌拉斯台河。目前黄水沟、清水河、曲惠沟、乌拉斯台河随着流域农业用水需求增大,已无径流汇入。而开都河经宝浪苏木分水枢纽控制,东支汇入博斯腾湖大湖区,西支汇入小湖区。流域各类污水汇入黄水沟湿地、小湖区湿地及其他人工湿地进行净化。

博斯腾湖唯一出水口是位于大湖区西南角的扬水站,包括建成于 1983 年的西泵站和建成于 2008 年的东泵站,出水进入下游孔雀河,水量由人为控制,

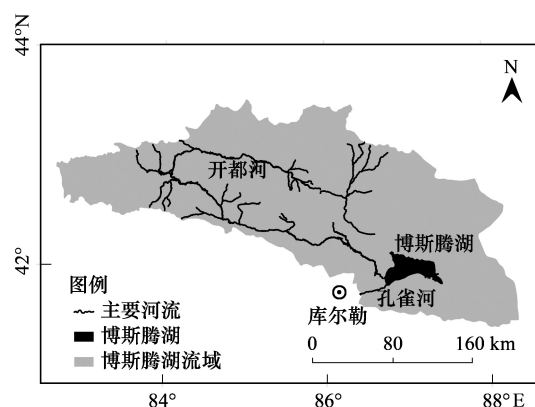


图1 博斯腾湖地理位置图

Fig.1 The geographical location of Bosten Lake

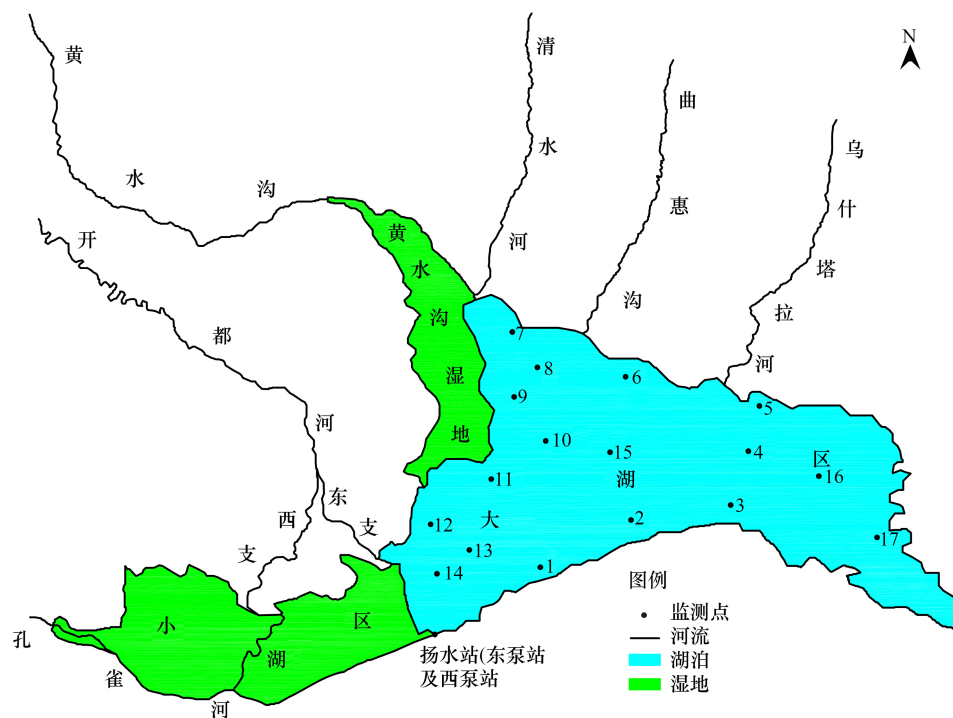


图2 博斯腾湖水系图

Fig.2 Water system of Bosten Lake

1.2 基础数据

博斯腾湖 2008 年前有 14 个国家地表水环境质量监测点,2009 年后增加 15、16、17 号监测点(图2)。巴音郭楞蒙古自治州环境监测站于每年 4—10 月份每月采样、监测一次,监测包括 COD 在内的 32 项指标,同时从新疆维吾尔自治区塔里木河流域管理局获取采样当日的水位数据。

因 COD 指标自 2003 年开始监测,本研究采用 2003 年至 2016 年博斯腾湖 COD 监测数据及其对应的水位

数据,共计 1183 组数据。数据在各点位及各月份的统计情况见表 1。

此外,从塔里木河流域管理局获取 1964 年至 2016 年博斯腾湖月均水位数据。

表 1 博斯腾湖基础数据量统计
Table 1 Details of date of Bosten Lake

月份 Month	基础数据量 Amounts of basic data				
	1—3 号监测点	5—14 号监测点	4 号监测点	15—16 号监测点	17 号监测点
4 月 April	8	8	7	1	0
5 月 May	11	11	11	7	6
6 月 June	12	12	12	8	8
7 月 July	9	9	9	8	8
8 月 August	11	11	11	9	9
9 月 September	11	11	11	8	8
10 月 October	12	12	12	9	9

1.3 数据分析与制图

利用 PASW Statistics 18 对基础数据进行统计分析、相关分析及回归分析,利用 OriginPro 8.5 及 ArcGIS 10.2 制图。

2 博斯腾湖水位-COD 关系研究

2.1 博斯腾湖 COD 特征

由于空间位置及边界条件差异,博斯腾湖 17 个监测点的 COD 浓度差别较大(图 3)。14 号监测点位于博斯腾湖西南部,由于临近开都河东支入湖口,受开都河 II 类地表水补给,COD 浓度最低((20.42 ± 7.31) mg/L),类似的有 1、12、13 号监测点。7 号监测点位于博斯腾湖西北部,由于毗邻黄水沟湿地,受污染物输入影响,COD 浓度最高((26.47 ± 4.26) mg/L),类似的有 8、9 号监测点;17 号监测点位于博斯腾湖东部,远离水源输入及出口导致水动力条件较差,与开都河 II 类地表水的交换也最弱,COD 浓度较高((25.12 ± 3.94) mg/L),类似的有 16 号监测点;其他区域的各监测点 COD 浓度平均值普遍为 23—25 mg/L。

2.2 博斯腾湖水位特征

自 1964 年以来,博斯腾湖水位可大致分为 3 个阶段(图 4):1964—1987 年为水位下降期,年均水位由 1047.95 m 下降至 1045.00 m;1987—2002 年为水位上升期,年均水位逐渐上升至 1048.66 m;2002—2013 年为水位下降期,年均水位逐渐下降至 1045.12 m;2014 年起,博斯腾湖水位呈现上升趋势。

伊丽努尔·阿力甫江^[25]认为:影响博斯腾湖水位的主要自然因素有气温、入湖径流量以及降水量,主要人为因素是灌溉耗水量、灌区引水量与耕地面积;1958—2002 年,水位变化主要驱动因素呈自然因素向人类活动的变化趋势,2003 年以后人类活动对水位影响显著增加。

博斯腾湖年内水位变化存在一定趋势(图 4):3—10 月水位较高,可视为流域丰水期;而 11 月至次年 2 月则水位较低,可视为流域的枯水期。但年内水位差异较小,多年平均水位 9 月份最高为 1046.58 m,1 月份最低为 1046.40 m。原因在于博斯腾湖容积远大于地表径流补给量,湖泊调蓄作用削弱了流域不同水文期的影响;大湖区容积 73.03 亿 m^3 (水位 1047.00 m 时),而开都河东支多年平均径流量约 17 亿 m^3 。

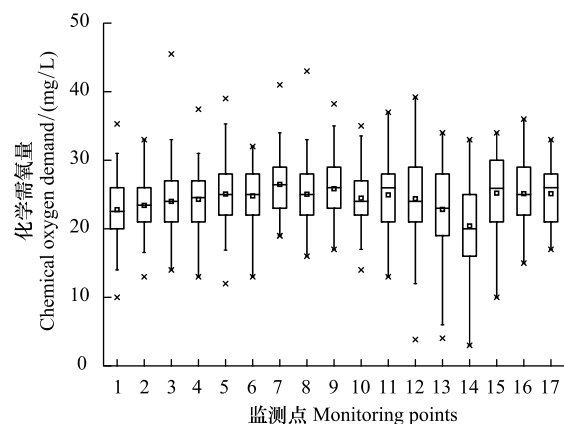


图 3 博斯腾湖水体 COD 浓度空间差异
Fig.3 Spatial difference of COD concentration in Bosten Lake

由博斯腾湖年内水位变化趋势也可发现人类活动影响的痕迹:3 月份流域冰川融水开始为博斯腾湖带来径流补给,4 月份湖泊出现一个水位峰值;5 月至 8 月期间是流域主要灌溉季节,灌溉用水需求高于径流量,湖泊水位略有降低;9 月进入非灌溉期,而地表径流仍较为充沛,湖泊水位达到峰值;10 月中下旬流域开始冬灌,且地表径流减少,水位持续下降。

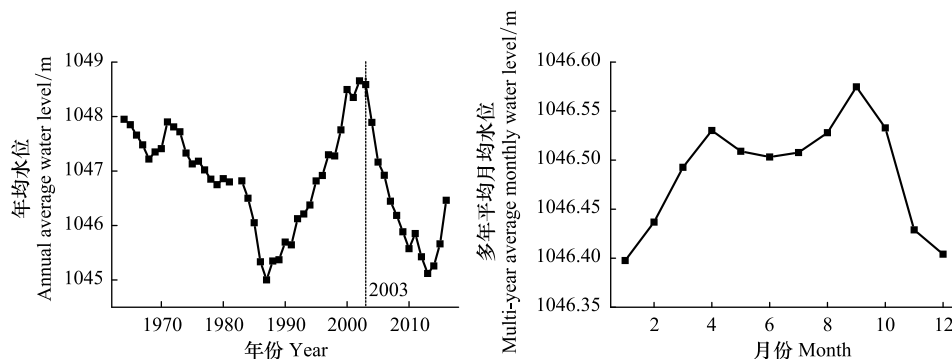


图 4 博斯腾湖水位变化

Fig.4 Water level variation of Bosten Lake

2.3 水位-COD 相关分析

将 COD 数据与其相应的水位数据进行相关分析,采用 Pearson 简单相关系数的双侧检验,结果表明两者之间具有显著负相关(表 2)。

表 2 博斯腾湖水位-COD 相关系数

Table 2 Correlation coefficient between COD_{Cr} concentration and water level of Bosten Lake

因子 Parameters	化学需氧量 COD chemical oxygen demand	水位 Water level
化学需氧量 COD chemical oxygen demand	1	-0.304 **
水位 Water level	-0.304 **	1

* * $P < 0.01$

2.4 水位-COD 回归分析

对 COD 浓度及水位尝试进行回归分析,选择一元线性、对数等六种函数模型进行曲线估计,结果显示各模型的拟合结果均不理想, R^2 值最高仅 0.193(表 3)。其原因主要有两方面:一是博斯腾湖水质空间分布不均,虽然各监测点 COD 浓度均与水位显著相关,但相关关系不尽相同;二是水位仅为 COD 浓度的影响因素之一。

3 博斯腾湖生态水位分析

3.1 累计水位分析

鉴于博斯腾湖水位与 COD 浓度的显著相关性,基于水位控制实现 COD 浓度管理成为可能。若两者之间存在某种函数关系,根据 COD 目标浓度即可得出相应的生态水位,但水位与 COD 浓度曲线估计结果却不理想。因此,引入累计水位概念进行统计分析,即:大于等于或小于等于某浓度的 COD 数据所对应水位的平均值。

基于 COD 浓度降序排列得出的累计水位统计结果如图 5。以地表水Ⅲ类标准限值的 COD 浓度 20 mg/L 为目标值,在 1183 组数据中,COD 浓度大于等于 20 mg/L 的数据共有 995 组,该 995 组数据的水位平均值为 1046.02 m。同理,基于 COD 浓度升序排列得出的累计水位统计结果如图 5,COD 浓度小于等于 20 mg/L 的数据共有 208 组,水位平均值为 1046.40 m。

表 3 博斯腾湖水位-COD 曲线估计结果

Table 3 Curve estimation between COD concentration and water level of Bosten Lake

曲线模型 Curve model	估计结果 Estimation results	R^2
一元线性 Linear	$y = 1048.503 - 0.095x$	0.160
对数函数 Logarithmic	$y = 1052.897 - 2.111 \ln x$	0.144
二次函数 Quadratic	$y = 1043.216 + 0.356x - 0.009x^2$	0.193
复合函数 Compound	$y = 1048.505(1.000)^x$	0.160
幂函数 Power	$y = 1052.920x^{-0.002}$	0.144
指数函数 Exponential	$y = 1048.505e^{-0.00009126x}$	0.160

x 为水位, y 为 COD.

需要说明的是,本研究基于历史监测数据得出的累计水位具有统计学意义,但与博斯腾湖 COD 浓度没有必然关系。以累积水位 1046.4 m 为例,得出该水位的 208 组数据中有 106 组数据的水位低于 1046.4 m;而在 1183 组数据中水位大于等于 1046.4 m 数据的 COD 平均值为 21.85 mg/L,仍高于 20 mg/L。

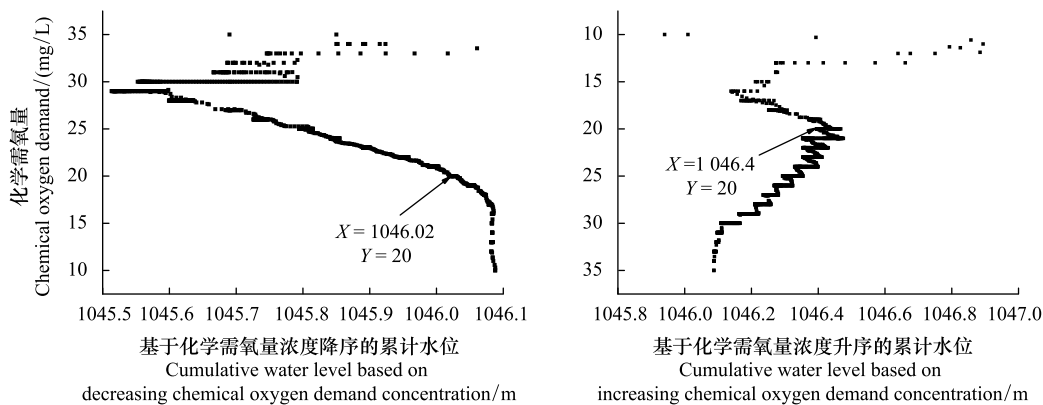


图 5 博斯腾湖累计水位

Fig.5 Cumulative water level of Bosten Lake

3.2 生态水位分析

1964—2016 年博斯腾湖月均水位的累积频率如图 6 所示。由于博斯腾湖丰水期及枯水期的水位差别不大,特征水位在不同水文时期的累积频率也较为接近;两个特征水位 1046.02、1046.40 m 在历史水位的频率分别为 59.19%、44.05%;在历史丰水期(3—10 月)水位的频率分别为 60.83%、44.70%。鉴于本研究采用的 COD 数据实际为 4—10 月份,故采用丰水期水位频率分析结果。

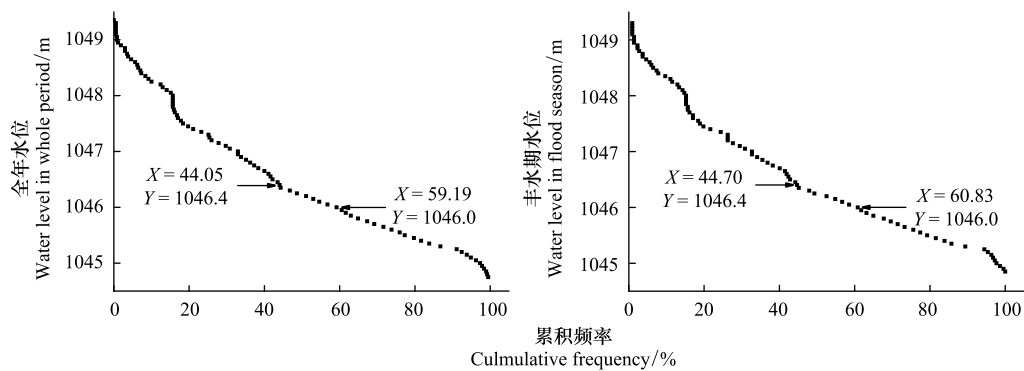


图 6 博斯腾湖水位累积频率分布图

Fig.6 Cumulative frequency distributing graph of water level in Bosten Lake

保证率法通常采用 90%、75%、50% 特征频率分析湖泊、河流生态水位^[4,26]。本研究以实现博斯腾湖水体 COD 浓度达标为目标,两个特征水位的频率与水文学法有所差异,但仍较具有代表性:特征水位 1046.02 m 在历史丰水期水位的频率为 60.83%,属于偏枯水月频率;特征水位 1046.4 m 在历史丰水期水位的频率为 44.70%,属于平水月频率。因此,将 1046.02 m 以及 1046.4 m 分别作为博斯腾湖的最小生态水位、适宜生态水位是较合理的。

4 讨论

水文学法、水力学法、功能法三大类方法在生态水位研究中各有优劣^[27]:水文学法基础数据容易获得,且不需要现场测量,但精度往往不够,主要适用于初步确定生态水位;水力学法需要开展现场测量,较适合于河湖床相对稳定的浅滩式水体,缺点是忽略了水体季节变化,不适用于时令河湖;功能法思路清晰、理论性强,但资料需求普遍较多,应用难度相对较大。

在最初的湖泊生态水位研究中,通常采用不同方法分别计算生态水位,然后比选确定最终的生态水位^[4-6]。随着人类对湖泊生态服务功能的需求日益增长,生态水位研究更多从维持湖泊某项功能或保护湖泊生态系统角度出发,功能法也成为了主要研究方法。本研究以维持博斯腾湖 COD 浓度达标为主要目标,基于水位与 COD 浓度统计分析研究提出生态水位,属于功能法应用范畴,但在数据统计分析以及生态水位分析过程中,借鉴了水文学法研究手段。

影响博斯腾湖 COD 浓度的因素有很多,气温、降雨、风力风向、地表径流、水位、湖泊生态系统等自然因素以及人口、耕地面积、灌溉制度、用水量、水利开发等人为因素均与 COD 浓度有着相关关系。水位与 COD 浓度显著负相关还易于调控,这使得通过控制生态水位实现博斯腾湖水质管理具有理论意义和可操作性。已有研究从不同角度分析了博斯腾湖生态水位:夏军^[28]综合考虑博斯腾湖水位对水质、生态环境以及社会经济的影响,建议控制水位 1046.0—1047.5 m 以减少水体矿化度上升、有机质污染、周边湿地退化、渔业资源减少等问题。李新虎^[29]基于天然水位资料、湖泊形态和芦苇研究,建议博斯腾湖最低生态水位 1047.16 m。周孝德^[24]构建包括 10 项指标的博斯腾湖评估体系,评估认为博斯腾湖水位低于 1046.2 m 时健康生态状况较差,水位高于 1046.8 m 时健康生态状况较好。侯佳文^[30]以博斯腾湖滨柽柳为对象,研究提出柽柳年轮指数相应敏感的湖水位范围为 1045.3—1046.3 m。

本研究提出适宜生态水位 1046.4 m 基本符合夏军、周孝德及侯佳文的生态水位研究成果,说明博斯腾湖在水位 1046.4 m 时既有利于水质管理,也可保障湖泊整体生态系统健康。在具体生态水位数据上各研究成果有所差异,主要原因在两方面:一是关注的功能目标不同,本研究以水体 COD 浓度控制为目标;二是采用的水文基础数据不同,本研究采用 2003—2016 年数据,李新虎采用 1956—1970 年数据,夏军采用 1955—2000 年数据,周孝德采用 1993—2012 年数据。

5 结论

1) 博斯腾湖水位与水体 COD 浓度显著负相关,但由于 COD 浓度空间差异较大以及影响因素不唯一,水位与 COD 浓度两者曲线估计结果不理想。

2) 为实现博斯腾湖 COD 浓度小于 20 mg/L 的水质管理目标,引入累计水位概念进行统计分析得到两个特征水位:所有 COD 浓度大于等于 20 mg/L 的数据对应水位的平均值为 1046.02 m,该水位在历史丰水期水位的频率为 60.83%,可作为最小生态水位;所有 COD 浓度小于等于 20 mg/L 的数据对应水位的平均值为 1046.4 m,该水位在历史丰水期水位的频率为 44.70%,可作为适宜生态水位。

3) 本研究综合应用功能法与水文学法进行博斯腾湖生态水位分析,研究结论与已有研究基本相符,博斯腾湖在适宜生态水位 1046.4 m 时既有利于水质管理,也可保障湖泊整体生态系统健康。

参考文献 (References):

- [1] Raskin P D, Hansen E, Margolis R M. Water and sustainability: global patterns and long-range problems. *Natural Resources Forum*, 1996, 20(1): 1-15.
- [2] Tilley D R, Badrinarayanan H, Rosati R, Son J. Constructed wetlands as recirculation filters in large-scale shrimp aquaculture. *Aquacultural Engineering*, 2002, 26(2): 81-109.
- [3] Ngana J O, Mwalyosi R B B, Madulu N F, Yanda P Z. Development of an integrated water resources management plan for the Lake Manyara sub-basin, Northern Tanzania. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2003, 28(20/27): 1033-1038.
- [4] 赵翔, 崔保山, 杨志峰. 白洋淀最低生态水位研究. *生态学报*, 2005, 25(5): 1033-1040.
- [5] 徐志侠, 陈敏建, 董增川. 湖泊最低生态水位计算方法. *生态学报*, 2004, 24(10): 2324-2328.
- [6] 徐志侠, 王浩, 唐克旺, 王研. 吞吐型湖泊最小生态需水研究. *资源科学*, 2005, 27(3): 140-144.
- [7] 淦峰, 唐琳, 郭怀成, 高伟. 湖泊生态水位计算新方法与应用. *湖泊科学*, 2015, 27(5): 783-790.
- [8] 崔保山, 赵翔, 杨志峰. 基于生态水文学原理的湖泊最小生态需水量计算. *生态学报*, 2005, 25(7): 1788-1795.
- [9] 王效科, 赵同谦, 欧阳志云, 范秀英. 乌梁素海保护的生态需水量评估. *生态学报*, 2004, 24(10): 2124-2129.
- [10] 白元, 徐海量, 张青青, 叶茂. 基于地下水恢复的塔里木河下游生态需水量估算. *生态学报*, 2015, 35(3): 630-640.
- [11] 梁犁丽, 王芳, 汪党献, 王浩. 乌伦古湖最低生态水位及生态缺水量. *水科学进展*, 2011, 22(4): 470-478.
- [12] 姜亮亮, 焦键, 程艳, 王晓愚, 刘江, 李燕. 艾里克湖流域湖泊及植被生态需水研究. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(4): 108-114.
- [13] 贺金, 夏自强, 黄峰, 吴瑶, 郭利丹, 鄢波, 张潇. 基于丰平枯水年的湖泊生态水位计算. *水电能源科学*, 2017, 35(5): 33-36.
- [14] 陈玥, 管仪庆, 苗建中, 张丹蓉. 基于长期水文变化的苏北高邮湖生态水位及保障程度. *湖泊科学*, 2017, 29(2): 398-408.
- [15] 张华, 张兰, 赵传燕. 极端干旱区尾间湖生态需水估算——以东居延海为例. *生态学报*, 2014, 34(8): 2102-2108.
- [16] 谢贵娟, 张建平, 汤祥明, 蔡永萍, 高光. 博斯腾湖水质现状(2010-2011年)及近50年来演变趋势. *湖泊科学*, 2011, 23(6): 837-846.
- [17] 宋杰红. 博斯腾湖风生流平面二维数值模拟[D]. 西安: 西安理工大学, 2005.
- [18] 黄群芳, 张运林, 陈伟民, 董雅文. 天目湖水文特征变化及其对上游湿地和湖泊生态环境的影响. *湿地科学*, 2007, 5(1): 51-57.
- [19] 杨兵, 何丙辉, 王德宝. 三峡前置库汉丰湖试运行年水文水质变化特征. *环境科学*, 2017, 38(4): 1366-1375.
- [20] 梁培瑜, 王烜, 马芳冰. 水动力条件对水体富营养化的影响. *湖泊科学*, 2013, 25(4): 455-462.
- [21] 张琍, 陈晓玲, 张媛, 陈莉琼, 张鹏. 水文地貌分区下鄱阳湖丰水期水质空间差异及影响机制. *中国环境科学*, 2014, 34(10): 2637-2645.
- [22] 盛海燕, 吴志旭, 刘明亮, 何剑波, 虞左明, 韩铁才, 张银龙. 新安江水库近10年水质演变趋势及与水文气象因子的相关分析. *环境科学学报*, 2015, 35(1): 118-127.
- [23] 吴敬禄, 马龙, 曾海鳌. 新疆博斯腾湖水质水量及其演化特征分析. *地理科学*, 2013, 33(2): 231-237.
- [24] 周孝德, 郭梦京, 陈勇民, 程圣东. 博斯腾湖生态系统健康状态与水位关系研究. *西安理工大学学报*, 2014, 30(4): 386-391.
- [25] 伊丽努尔·阿力甫江, 海米提·依米提, 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 玉素甫江·如素力. 1958-2012年博斯腾湖水位变化驱动力. *中国沙漠*, 2015, 35(1): 240-247.
- [26] 陈茜, 邵东国, 吴俊校, 王庆. 广东省河道生态基流定量分析研究. *南水北调与水利科技*, 2011, 9(1): 92-95.
- [27] 胡德胜, 左其亭. 澳大利亚河湖生态用水量的确定及其启示. *中国水利*, 2015, (17): 61-64.
- [28] 夏军, 左其亭, 邵民诚. 博斯腾湖水资源可持续利用——理论·方法·实践. 北京: 科学出版社, 2003: 292-326.
- [29] 李新虎, 宋郁东, 张奋东, 叶茂. 博斯腾湖最低生态水位计算. *湖泊科学*, 2007, 19(2): 177-181.
- [30] 侯佳文, 海米提·依米提, 叶茂. 博斯腾湖滨怪柳(*Tamarix ramosissima*)生长对湖水位敏感性. *中国沙漠*, 2015, 35(3): 667-673.