

DOI: CNKI 32.1309.P.20110709.1619.007

乌伦古湖最低生态水位及生态缺水量

梁犁丽, 王 芳, 汪党献, 王 浩

(中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038)

摘要: 确定乌伦古湖的生态保护目标是流域水资源合理、高效配置的前提和基础。针对乌伦古湖冷水系淡水鱼类的生存繁殖特征, 提出了基于干旱区湖泊鱼类~盐度~水量关系的湖泊最低生态水位计算方法, 并根据该方法计算得到布伦托海和吉力湖的最低生态水位分别为 476.12 m 和 478.12 m。由水量平衡关系进一步计算了湖泊最小生态需水量和接近 95%、75%、50% 降水频率年和多年平均降水条件下另需补充的水量, 即乌伦古湖除定量调水外的缺水量分别是 6.44 亿 m^3 、5.33 亿 m^3 、2.20 亿 m^3 和 1.06 亿 m^3 。实际应用和相关佐证表明, 该结论可信度较高。

关键词: 乌伦古湖; 干旱区; 最低生态水位; 生态缺水量; 盐度

中图分类号: TV 122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2011)04-0470-09

乌伦古湖是乌伦古河的尾间湖泊, 为中国十大淡水湖之一, 也是新疆第二大湖和重要的渔业基地, 它不但具有重要的经济效益, 还有防止垦地沙化、调节局部气候、承载珍稀濒危鱼类等巨大的生态环境效益。确定乌伦古湖合理的保护目标是乌伦古河流域水资源合理配置、高效利用的前提, 也是新疆水资源综合规划的基本要求之一。另外, 开展乌伦古湖最低生态水位和生态需水、缺水研究, 对于促进干旱区湖泊生态水文过程的科学研究和生产实践都具有重要意义。

湖泊最低生态水位的计算方法有天然水位资料统计法、湖泊形态分析法和生物空间最小需求法^[1]等。天然水位资料法属于水文学方法, 为经验公式法, 易操作, 适用于对计算结果精度要求不高、湖泊天然逐日水位资料不少于 20 年的湖泊, 但它对湖泊实际情况进行了简化, 没有直接考虑生物需求和生物间的相互影响。湖泊形态分析法属于水力学方法, 为半经验方法, 该方法只需要湖泊水位、水面面积关系资料, 生态资料要求不多, 资料易取得, 缺点是不能体现水位的季节变化, 对生态系统机理的研究较粗略, 适用于缺乏天然水文和生物资料的湖泊^[2]。最小生物空间法属于栖息地法的范畴, 该方法对湖泊相关生物的生态机理进行了一定研究, 但缺乏系统性和整体性。

国外对水位和生态环境需水的研究主要集中在河流方面, 其它生态系统如湖泊、湿地及河口三角洲等还没有形成完整的指标体系和计算方法^[3], 其需水量多以水资源管理部门的配水来确定^[4], 湖泊最小生态需水计算主要依据所要保护的敏感指示物种, 如鱼类对水环境指标的需求, 在计算时更加注重水位的涨落限制^[5]。也有不少学者研究了水位和水质变化对生态系统、藻类、浮游生物的影响^[6-7], 水位变动与生态过程的关系^[8-9], 北半球沿海地区水位变动对鱼类数量的影响^[10], 春汛水位的上升对某些鱼类繁殖的重要性^[11]等。国内计算湖泊生态环境需水量的主要方法有: 水量平衡法、最小水位法和功能法等。最小水位法适用于急需保护和濒临干枯的湖泊^[12], 杨柳等^[13]利用面积/需水量变化率与水位的关系研究了洪河国家自然保护区的最低生态水位和最小生态补水量, Gao 等^[14]提出了基于生态水力半径和最小生态水深关系的最小需水量计算方法, 并在太湖流域进行了应用。

收稿日期: 2010-09-08 网络出版时间: 2011-07-09

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20110709.1619.007.html>

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划资助项目 (2008BA B42B09)

作者简介: 梁犁丽 (1982-), 女, 河南许昌人, 博士研究生, 主要从事生态水文、水资源合理配置等研究。

1 研究区概况及研究思路

乌伦古湖位于 $87^{\circ}01'E \sim 87^{\circ}52'E$, $46^{\circ}50'N \sim 47^{\circ}28'N$, 新疆维吾尔自治区阿勒泰地区福海县境内, 距离福海县城 10 km 左右。乌伦古湖湖水清澈、微咸, 湖周芦苇遍生, 适宜鱼类的生长繁殖, 因而鱼类繁多, 渔产丰富, 20 世纪 90 年代有鱼类 29 种, 其中土著鱼类有贝加尔雅罗鱼 (*Leuciscus baicalensis*)、河鲈 (*Perca fluviatilis*)、银鲫 (*C. auratus gibelio*)、丁鲈、花丁鲈 (*Flowers small squil*)、西伯利亚花鳅 (*Cobitis granoel Rendahl*)、北方高原鳅 (*Triplophysa siluroides*) 7 种, 占该水系鱼类总种类数的 24%, 主要经济鱼类为贝加尔雅罗鱼、东方真鲷 (*Abramis brama orientalis*) 和河鲈 3 种, 产量占全湖总产的 90% 左右。乌伦古湖由南北相对独立的布伦托海和吉力湖两个湖泊组成, 北为布伦托海, 又称福海、大海子; 南为吉力湖, 又称波特港、小海子。在全新世时期, 两湖本为一体, 乌伦古河首先流入吉力湖, 后经狭长的水道流入布伦托海, 见图 1。

乌伦古湖主要依赖地表径流补给, 降雨补给量仅占总补给量的 10%。20 世纪 50~60 年代, 随着乌伦古河流域社会经济的发展, 经济用水挤占生态用水, 使得入湖径流量逐年减少, 造成湖水矿化度增大。1992 年以后, 由于乌伦古河顶山水文站到入湖口之间断流, 乌伦古河的来水仅能维持吉力湖的蒸发, 布伦托海河与吉力湖切断了联系, 只有乌伦古河水量充沛时才流入布伦托海。2007 年、2008 年乌伦古河下游 2~8 月断流分别达到 127 d 和 151 d, 导致吉力湖水位下降, 并出现了布伦托海咸水倒灌的情况, 致使具有洄游及溯河产卵特性的土著鱼类生存及繁殖环境发生变化, 珍稀鱼类濒危。

针对湖泊生态水位研究中对生态系统机理考虑较粗略的问题, 本文根据干旱区湖泊盐度积累与水量、水生生态系统的关系, 提出了基于鱼类~盐度~水量关系确定湖泊最低生态水位的方法, 并在该方法的基础上, 研究了乌伦古湖的水文特征及其最低生态水位和相应的生态需水量, 利用水量平衡法计算了在最低水位条件下典型降水频率年湖泊另需补充的生态水量。具体研究思路见图 2。

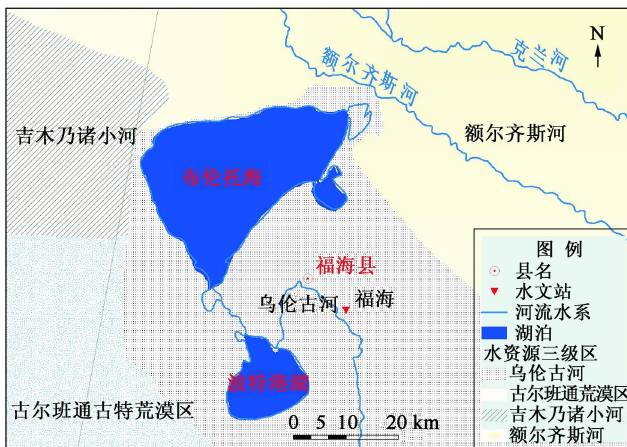


图 1 乌伦古河流域示意图

Fig 1 Sketch of the Uluungur Lake

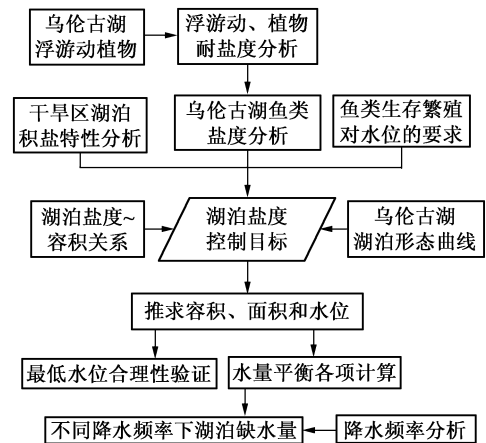


图 2 研究思路

Fig 2 Study process

2 鱼类~盐度~水量关系与最低水位确定方法

乌伦古湖土著鱼类属于淡水冷水系鱼种, 贝加尔雅罗鱼、湖拟鲤 (*Rutilus rutilus lacustris*)、高体雅罗鱼 (*Leuciscus idus*)、裂腹鱼 (*Schizothorax (Racma) pseudaxiensis Herzenstein*) 等均有洄游习性, 一般在 5~6 月繁殖季节从河湖中集群溯河洄游到中上游产卵场产卵, 之后陆续返回河湖中。决定其生存繁殖的两个基本条件是: 鱼类生存的湖水盐度限制及其繁殖产卵的水位要求。淡水鱼类在繁殖期对盐度较敏感, 湖水盐度增大, 鱼类生存繁殖受到影响, 种群将发生变化, 另外盐度也影响到鱼类的食饵淡水浮游动物、植物的生存; 水位下

降, 沿湖岸的浅水区变成干地, 湖泊周围挺水植物衰败, 破坏鱼类产卵场。

2.1 乌伦古湖鱼类生存繁殖条件分析及湖泊积盐特性

乌伦古湖浮游动物及底栖动物生物量大, 在整个生态系统中占有重要地位, 浮游动物中原生动物占 63.9%, 轮虫 32.5%, 桡足类 16.8%, 枝角类 1.7%^[15]。乌伦古湖东方欧鳊食物组成主要以水生昆虫(毛翅目、蜉蝣目)及底栖动物(摇蚊幼虫、小螺、钩虾)为食, 其次为浮游动物、水生植物碎屑^[16]; 0⁺ ~ 2⁺ 龄的河鲈主要进食浮游和底栖动物, 3⁺ 龄及其以上完全以鱼类为食^[15]; 白斑狗鱼(*Esox lucius*)食物组成主要以鱼类为主, 其次为水生昆虫^[17]; 贝加尔雅罗鱼主要以浮游动物为饵料, 最常见的有桡足类和枝角类, 也有水生昆虫。盐度 5~8 g/L 是淡水生物从高渗转为低渗的过渡期, 在这个范围内生物种类最少, 种类多样性也最低, 因此, 多数淡水生物的耐盐上限为 5~8 g/L, 一旦超过这个范围, 一些淡水生物将由于渗透压平衡被破坏而死亡。6 g/L 以上的盐度对藻类有不同程度的抑制作用^[18], 在盐碱池塘水的研究表明, 嗜蚀隐藻、针簇多肢轮虫、卜氏晶囊轮虫等在等于或高于 (6.76±0.40) g/L 的盐度下消失, 轮虫、桡足类、浮游动植、物总生物量等都有明显的下降趋势^[19]。

在水域盐化状况下, 鱼类食饵受到影响的同时, 其生存繁殖也受到不同程度的影响。如湖水盐度升高时, 丁鲈(*Perca fluviatilis*)反应最敏感, 银鲤鱼和白斑狗鱼数量消退, 东方真鳊鱼繁殖能力下降, 而赤鲈(*Perca fluviatilis linnaeus*)和贝加尔雅罗鱼的抗盐能力较强, 能保持种群优势。在盐度 2~3 g/L 的水域, 家鱼性腺成熟状况及卵的受精率和孵化率都较差, 淡水鱼难以自然繁殖^[20]。

干旱区水体的生物系统由于受独特的水文、地貌和气候条件的制约, 湖泊生物群落的大部分, 包括经济鱼类都集中在近岸地带, 茂密的挺水植物丛中、浅水湾和湖滨湖汊^[21], 以避免大风及强烈的太阳辐射。这些地方为鱼类生长和繁殖提供了良好的场所, 而长周期的水位涨落和水的更新对这些地方的影响也最大。据汪宪枢等^[22]的研究, 草上产卵鱼类只有在产卵场经常被涨水淹没的情况下进行产卵, 所有草上产卵鱼类, 特别是鲤鱼和狗鱼, 对水位变动非常敏感, 在水位稍许下降的情况下就迅速停止产卵。水利工程的修建使得乌伦古河的入湖水量剧减, 乌伦古湖依赖于春汛的涨水过程相应消失, 严重影响到鲤、银鲫、东方真鳊、丁鲈和狗鱼等草上产卵鱼类的繁殖。

对于干旱区湖泊的盐度, 其一系列独特的水文物理化学和水文生物学性质决定了其有别于湿润区湖泊。湿润区湖泊在盐分浓度较高(超过 10 g/L)的条件下才出现自行沉降过程, 而干旱区内陆湖泊盐类沉降过程发生在极小的矿化度条件下, 这也是干旱区水体为摆脱多余盐量而表现出的自我保全机制^[21]。干旱区水体盐类提前沉积的化学机理已经有学者作了研究, 其机理是水体的水浅、大风、日照强烈、气候干燥、水作垂直运动等, 是地形和气候因子综合作用的结果。赵景峰^[23]等对新疆博斯腾湖湖水盐分交换率 r 的研究也表明, 水量年际的丰枯变化对 r 值影响不大, 风动力可能是其主要影响因素, 湖水矿化度稳定状态时盐度仅为 1.1 g/L。

2.2 最低生态水位确定方法

通过对干旱区湖泊鱼类生存繁殖和封闭湖泊积盐特性的分析, 提出基于湖泊鱼类~盐度~水量关系确定湖泊最低生态水位的方法。由于吉力湖与布伦托海通道关闭, 随着乌伦古河入湖水量减少, 布伦托海仅靠外流域调水不能实现收支平衡, 湖水盐度就会有所增大, 根据上述分析, 乌伦古湖鱼类的生存繁殖与湖泊盐度存在一定的关系。而根据积盐特性, 湖泊盐度在一定范围内与水量关系密切, 则找出鱼类生存繁殖的盐度限制和乌伦古湖的盐度~水量关系以及容积~水位特征曲线, 就能确定在保护鱼类生存繁殖环境目标下的湖泊最低生态水位; 而后根据鱼类所要求的产卵场和产卵条件, 验证所得最低生态水位的合理性, 本文采用鱼类产量间接验证。

3 最低生态水位确定及生态水量计算

由于布伦托海和吉力湖本身特性的差别, 确定乌伦古湖生态水位时应分别考虑其生态保护目标。吉力湖的保护目标是维持现状, 其盐度控制在 1 g/L 内; 布伦托海的保护目标是满足盐度和水位对湖水体积的最低要求, 以维持湖区土著和经济鱼类的种群稳定, 其中最低水位根据湖泊盐度和容积确定, 生态需水量及缺水

量根据最低生态水位和水量平衡原理计算。

3.1 基于鱼类~盐度~水量关系的最低生态水位确定

3.1.1 乌伦古湖盐度现状

乌伦古湖属氯化物钠组 II 型水^[24]。根据自治区环境监测中心站 2000 年 9 月测定结果, 布伦托海 pH 值为 8.8, 吉力湖为 8.4, 当年 12 月测定结果, 布伦托海为 9.19, 吉力湖为 8.62。吉力湖是连接乌伦古河和布伦托海的通道, 矿化度较低 (0.4~0.6 g/L), 20 世纪 90 年代以前未超过 0.5 g/L; 布伦托海湖盆长期以来为积盐中心, 20 世纪 60 年代以前乌伦古河每年补给水量 8 亿~10 亿 m³, 积盐过程缓慢; 但 60 年代以后补给来源减少, 湖水位明显下降, 湖水矿化度迅速增加。1959 年平均矿化度为 2.72 g/L, 1978 年为 3.43 g/L, 1980 年则为 3.8 g/L^[25], 1986 年为 3.74 g/L, 之后由于外流域引水补给而使布伦托海盐度有所下降 (部分年份乌伦古湖盐度的变化见表 1)。

表 1 乌伦古湖盐度变化

g/L

Table 1 Salinity variety of Ulnungur Lake

年份	布伦托海	吉力湖	年份	布伦托海	吉力湖
1959	2.72 ^[22]	0.176 ^[26]	1979	3.97	0.485
1960	3.01	0.183	1980	3.80	0.408
1970	3.63	0.324	1986	3.74	0.382
1978	3.43 ^[22]	0.426 ^[22]	2000	2.55	0.696

注: 除说明外, 其余部分资料来源文献[27]。

3.1.2 盐度控制目标

由 2.1 节可知, 盐度不仅影响淡水鱼类的食饵量, 而且对其本身的生存繁殖也有一定的限制。实际上布伦托海的盐度未超过 6 g/L 的阈值, 综合考虑布伦托海的历史盐度变化、现状和流域规划, 以及鱼类生存繁殖条件, 确定布伦托海的盐度目标为不超过 5 g/L。

3.1.3 湖泊形态特征曲线

乌伦古湖是浅碟式的地堑构造湖, 布伦托海形似三角, 东西长 41 km, 南北最大宽 27 km, 平均宽 18.37 km, 最大水深 12.25 m^[24], 平均水深 8.0 m; 吉力湖南北长 17.5 km, 东西宽 16.5 km, 最大水深 14.7 m。由于自然和人类活动的影响, 布伦托海自 1950 年直到 90 年代中期一直呈现水位下降及面积萎缩的趋势。50 年代以前布伦托海面积为 840.5 km², 1959 年减少为 827 km², 1993 年则为 736 km², 比 50 年代前减少了 12.4%。1995 年以后水位和面积基本变化不大, 面积在 770 km² 左右。吉力湖有乌伦古河径流补给, 面积基本不变。两湖泊部分年份的面积、水位及库容变化见表 2。

表 2 不同年份乌伦古湖水位、面积

Table 2 Water levels and their correspondent areas of Ulnungur Lake in the different years

年份	布伦托海			吉力湖			总面积 /km ²
	水位 /m	面积 /km ²	库容 亿 m ³	水位 /m	面积 /km ²	库容 亿 m ³	
1950	482.0	840.5	97.8	486.0	198.7	22.9	1010.0
1959	482.8	827.0	89.1	484.8	173.8	17.2	1001.0
1960	482.0	820.9	88.0	484.9	182.4	21.1	1003.3
1972	479.5	778.9		482.7			
1979	479.1	774.4			165.8		940.2
1980	478.9	770.6	62.7	482.5	164.8	15.0	935.4
1986	478.6	753.1	60.2	482.8	166.0	15.8	919.1
1993		736.0	58.5	482.4	164.7	15.0	900.7
1995~2000 年以来		湖泊基本维持 930~1035 km ² 的总面积 (从各期土地利用资料中获得)					

注: 数据来自参考文献[24, 28]等。

分别根据表 1 和表 2 数据拟合出两湖泊的面积~水位、面积~库容曲线和盐度~库容曲线, 如图 3~图 5 所示。作图时参考了汪宪枢等^[22]乌伦古湖等深线图, 当布伦托海水位为 466.8 m 时 (湖底高程约为 466.6 m), 湖泊面积很小, 容积可以忽略; 当吉力湖水位为 471.9 m 时 (湖底高程约为 470 m), 容积和水面面积几

乎为零，即两湖泊形态曲线考虑了时序数据的延展性。从图中可以看出，曲线与实测或文献数据拟合较好。布伦托海和吉力湖面积~水位关系分别为

$$H_1 = 0.00004S_1^2 - 0.0116S_1 + 466.6 \quad H_2 = 0.0007S_2^2 - 0.045S_2 + 470 \quad (1)$$

式中 H_1 、 H_2 分别为布伦托海和吉力湖的水位，m； S_1 、 S_2 分别为布伦托海和吉力湖面积， km^2 。

由于缺乏实测资料的佐证，本文所确定的大小湖泊特征曲线关系式在已有数据范围内比较精确，曲线外延时计算数据可能存在一定偏离，需收集相关数据对计算结果加以验证。

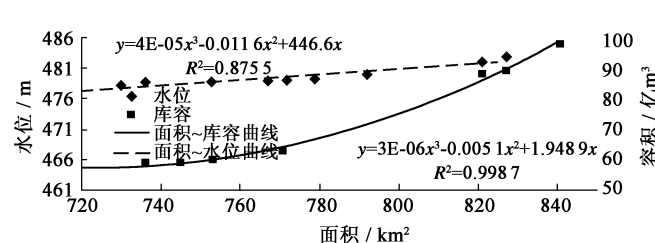


图 3 布伦托海面积~水位和面积~库容曲线

Fig. 3 Relationships of the area, water level and volume of Buluntuo Lake

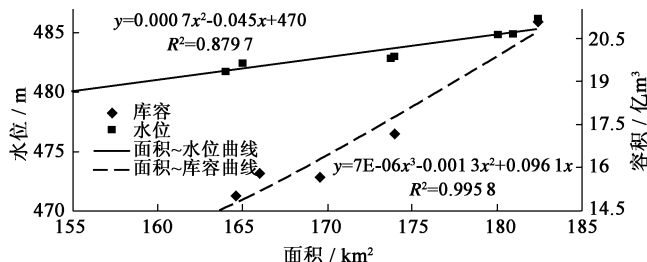


图 4 吉力湖面积~水位和面积~库容曲线

Fig. 4 Relationships of the area, water level and volume of Jili Lake

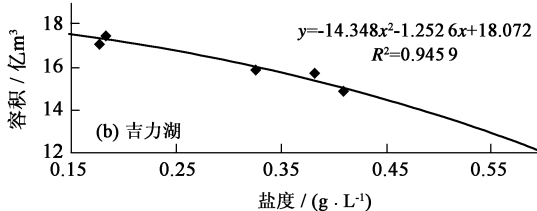
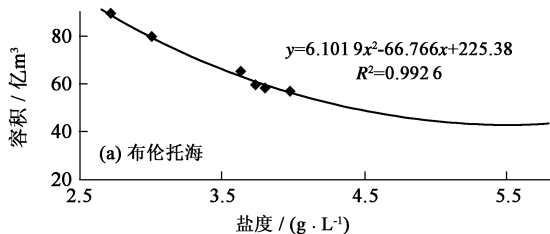


图 5 布伦托海和吉力湖盐度~库容曲线

Fig. 5 Relationships of the salinity and volume of Buluntuo and Jili Lakes

3.1.4 最低生态水位确定及其合理性检验

经验证，布伦托海和吉力湖盐度~容积曲线分别在盐度为 2~5.5 g/L 和 0.1~1 g/L 的范围内适合。将布伦托海的盐度控制目标 5 g/L 代入其盐度~容积曲线，得到相应的湖泊体积为 44.10 亿 m^3 ，然后代入其面积~库容和面积~水位曲线，反算得到相应的湖泊面积和水位分别为 653.85 km^2 和 476.12 m。

若保持洄游鱼类通道畅通，吉力湖水水位应比该水位高，并且福海水库应在鱼类洄游期适度放水，使乌伦古湖洄游鱼类能够溯河产卵和沿河孵化。历史资料表明，吉力湖水水位通常比布伦托海高 2~4 m，本文取吉力湖水水位高于布伦托海 2 m，即 478.12 m，此时吉力湖面积为 139.58 km^2 ，盐度小于 1 g/L。

近年来对乌伦古湖最低生态水位、适宜水位及需水量的研究较少，张秀善等^[29]认为布伦托海和吉力湖的适宜水位分别为 481~482 m 和 481.5~483 m。本文计算得到布伦托海的最低生态水位为 476.12 m，推算得到吉力湖的最低生态水位为 478.12 m，均低于张秀善等推荐的两湖适宜水位。最低水位已是生态系统将近破坏的水位，对同一湖泊来说，最低生态水位低于适宜水位是合理的。

乌伦古湖近 50 多年来水位呈现“U”字型变化，1974~1986 年持续低水位，鱼类产卵场遭到严重破坏，鱼产量不断下降，1970 年以前年产量 3000 t，占全疆鱼产的 50% 以上，1970 年后年产量逐渐下降至 1500~2000 t，1978 年仅 350 t，1988 年后外流域引水量增加才使其水位逐渐恢复，1990~2001 年鱼产量已回升至 2500~3000 t，2005 年淡水捕捞量达 3094 t，1986 年的水位 478.6 m，略高于本文的结果，鱼产量已降至 1000 左右，在一定程度上也证明了提出的方法和结果的合理性。

3.2 生态需水量及缺水水量计算

根据确定的两湖最低水位相应的水面面积和水量平衡原理推算不同降水频率下, 湖泊的需水量和还需补充的水量。

3.2.1 水量平衡各项分析

(1) 降水 根据距离湖区 12 km 的福海水文站 1958~2008 年的降水资料分析, 湖区多年平均降水量 109.4 mm, 其中降雪量 50~70 mm, 占降水量的 42%~60%。多年平均降水量呈现增加趋势。1980 年以后降水比较丰沛, 多在 110 mm 以上, 其中 1984 年为 50 多年来的最大降水年份。

(2) 蒸发 根据文献 [30] 的研究结论: 福海水文站冰期 (11~3 月)、非冰期 (4~10 月) 的蒸发皿与 E601 大水面蒸发折算系数分别取 0.79 和 0.63, 由此蒸发折算系数, 并根据福海水文站 1957~1998 年的小水面蒸发资料、1998~2005 年的非冰期大水面蒸发资料及冰期小水面蒸发资料, 计算得到湖区多年平均大水面蒸发量为 1152.5 mm。

(3) 福海站年径流量 乌伦古河福海水文站以下 1956~2008 年平均年径流量为 3.92 亿 m^3 , 20 世纪 50 年代乌伦古河入湖水量为 6.5 亿 m^3 , 60 年代减为 4.2 亿 m^3 , 1970 年前后只有 2.4 亿 m^3 , 1974~1983 年间, 由于福海站以上引水灌溉面积的快速增加而径流量迅速减少, 年平均径流量小于 0.2 亿 m^3 的有 5 年。由于福海水文站以下 1976 年福海水库建成蓄水, 其降水~实测径流关系与 1976 年之前有所改变, 故各降水频率年径流量均采用 1976 年以前接近各频率年的年份径流量代替, 其值分别为 92%、81%、46% 降水频率年的径流量 1.83 亿 m^3 、0.62 亿 m^3 和 2.34 亿 m^3 。

(4) 灌溉用水 福海水文站以下河道径流的主要用水户为农业灌溉, 利用 ArcGIS 软件对 2000 年乌伦古河流域土地利用图进行空间统计分析, 得到福海站以下灌溉面积为 7833 hm^2 。目前乌伦古河流域的灌溉用水量在 12000~15000 m^3/hm^2 之间, 通过节水改造后灌溉定额约为 9000 m^3/hm^2 左右。按照 9000 m^3/hm^2 计算, 则福海水文站以下灌溉用水量约为 0.71 亿 m^3 。

3.2.2 典型降水频率年生态缺水水量计算

典型降水频率年湖泊最小需水量按其最低水位确定的水面面积及典型年蒸发量、降水量和净入湖量确定, 缺水水量 ΔV 由下式计算:

$$\Delta V = V_{需} - V_{引} = V_{蒸} + V_{渗} - V_{降} - V_{入} - V_{引} \quad (2)$$

式中 $V_{需}$ 为湖泊最小需水量; $V_{引}$ 为外流域引水量; $V_{蒸}$ 为湖面蒸发量; $V_{降}$ 为湖面降水量; $V_{入}$ 为乌伦古河净入湖水量; $V_{渗}$ 为湖泊渗漏量, 乌伦古湖属于断陷湖, 此项忽略不计。

由上述盐度要求和繁殖需求得到布伦托海维持最小水位 476.12 m、吉力湖维持 478.12 m 时, 代入水位~面积曲线求得布伦托海和吉力湖相应的湖面面积分别是 653.85 km^2 和 139.58 km^2 。若保持现状耕地面积和外流域引水量不变, 即福海水文站以下的灌溉面积用水量为 0.71 亿 m^3 , 外流域年均引水 4 亿 m^3 , 得到乌伦古湖区在最低生态水位时各典型频率年生态缺水水量见表 3。

表 3 不同降水频率年湖泊生态缺水水量

Table 3 Ecological water shortage of the Ulnghur Lake in the different frequency years of precipitation

降水频率年	年份	降水量 /mm	蒸发量 /mm	需水量 /亿 m^3	福海站以下径流量 /亿 m^3	灌溉用水量 /亿 m^3
92%	1963	55.7	1513.55	11.44	1.83	0.71
81%	1967	76.5	1241.30	9.33	0.62	0.71
46%	1972	112.8	1100.48	6.20	2.34	0.71
多年平均		109.44	1152.49	5.06	3.92	0.71

注: 乌伦古湖最低水位下相应的水面面积为 793.43 km^2 。

在维持大小湖泊最低水位、现状耕地面积和外流域年均引水量不变条件下, 92%、81%、46% 和多年平均降水年乌伦古湖最小需水量分别为 11.44 亿 m^3 、9.33 亿 m^3 、6.20 亿 m^3 和 5.06 亿 m^3 , 缺水分别为 6.44 亿 m^3 、5.33 亿 m^3 、2.20 亿 m^3 和 1.06 亿 m^3 。

4 结 论

(1) 基于干旱区淡水湖泊鱼类~盐度~水量关系,从生态系统稳定的角度提出了一种确定湖泊最低生态水位的新方法,该方法与其它方法相比,具有较可靠的生态学依据,适合干旱区闭合性湖泊生态水位的确定,为干旱区湖泊生态需水量计算提供了一种新途径。

(2) 根据最低水位和水量平衡原理,计算了乌伦古湖生态缺水。在维持湖泊最低水位和相应面积时,多年平均条件下乌伦古湖缺水为 1.06 亿 m^3 ,但平水年和枯水年分别存在不同程度的缺水。

(3) 以上计算结果表明,在降水和蒸发条件不变的情况下,解决乌伦古湖平水年和枯水年缺水问题的主要措施有:进一步加大流域内农业灌溉节水力度,减小灌溉定额;减少乌伦古河流域灌溉耕地面积,增加入湖流量;在枯水年增加外流域引水量,以调节乌伦古湖水位。

参考文献:

- [1] 徐志侠,王浩,董增川,等.南四湖湖区最小生态需水研究[J].水利学报,2006,37(7):784-788.(XU Zhixia WANG Haq DONG Zengchuan et al Minimum ecological water requirement for Nansi Lake[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(7): 784-788. (in Chinese))
- [2] 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[J].生态学报,2005,25(7):1788-1795.(CUI Bao-shan ZHAO Xiang YANG Zhifeng. Eco-hydrology-based calculation of the minimum ecological water requirement for lakes [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(7): 1788-1795. (in Chinese))
- [3] 姜德娟,王会肖.生态环境需水量研究进展[J].应用生态学报,2004,15(7):1271-1275.(JIANG Dejuan, WANG Huixiao Research advance in ecological and environmental water requirement [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(7): 1271-1275. (in Chinese))
- [4] LANKFORD B A. Environmental water requirements: A demand and management perspective [J]. Journal of the Chartered Institution of Water and Environmental Management, 2003, 17(1): 19-22.
- [5] 徐志侠,王浩,唐克旺,等.吞吐型湖泊最小生态需水研究[J].资源科学,2005,27(3):140-144.(XU Zhixia WANG Haq TANG Kewang et al Minimum ecological water requirements for lakes taking in-sending out water [J]. Resources Science, 2005, 27(3): 140-144. (in Chinese))
- [6] LU G IN F, ROSSELLA B. Importance of water level fluctuation on population dynamics of cladocerans in a hypertrophic reservoir (Lake A Lancio south west Sicily, Italy) [J]. Hydrobiologia, 1997, 360: 223-232.
- [7] YOLANDA Z D. Effect of fluctuations in water level on phytoplankton development in three lakes of the Paraná river floodplain (Argentina) [J]. Hydrobiologia, 2003, 510: 175-193.
- [8] HOFMANN H, LORKE A, PEETERS F. Temporal scales of water-level fluctuations in lakes and their ecological implications [J]. Hydrobiologia, 2008, 613: 85-96.
- [9] WANTZEN K M, ROTHHAUPT K O, MORTLM, et al Ecological effects of water-level fluctuations in lakes: an urgent issue [J]. Hydrobiologia, 2008, 613: 1-4.
- [10] TAPIO S, TEPPON V. Effects of water-level regulation on the nearshore fish community in boreal lakes [J]. Hydrobiologia, 2008, 613: 13-20.
- [11] PROBST W N, STOLL S, PETERS L, et al Lake water level increase during spring affects the breeding success of bream Abramis brama (L.) [J]. Hydrobiologia, 2009, 632: 211-224.
- [12] 刘静玲,杨志峰.湖泊生态环境需水量计算方法研究[J].自然资源学报,2002,17(5):604-609.(LIU Jingling YANG Zhifeng A study on the calculation methods of the minimum eco-environmental water demand for lakes [J]. Journal of Natural Resources, 2002, 17(5): 604-609. (in Chinese))
- [13] 杨柳,马克明,白雪,等.洪河国家级自然保护区最小生态需水量与补水分析[J].生态学报,2008,28(9):4501-4507.(YANG Liu MA Keming BAI Xue et al The least ecological water demand and water supplement for wetland in Honghe National Nature Reserve [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(9): 4501-4507. (in Chinese))

- [14] GAO Jun-feng GAO Yong-nian ZHAO Guang-zhu, et al Minimum ecological water depth of a typical stream in Taihu Lake basin China [J]. *Quaternary International* 2010, 226(1-2): 136-142.
- [15] 黄诚, 孟文新, 陈建秀, 等. 河鲈食性分析及其摄食生态策略 [J]. *水产学报*, 1998, 22(4): 309-313. (HUANG Cheng MENG Wen-xin CHEN Jian-xiu, et al The food analysis and feeding ecological strategy of perca fluviatilis [J]. *Journal of Fisheries of China* 1998, 22(4): 309-313. (in Chinese))
- [16] 阿达可白克·可尔江, 刘军, 陈钦勇. 乌伦古湖东方欧鳊的生物学及开发利用研究 [J]. *上海水产大学学报*, 2003, 12(4): 366-372. (KARJAN A, LIU Jun CHEN Qin-yong Studies on the biology and exploitation of Abramis brama Berg in the Ulungur Lake [J]. *Journal of Shanghai Fisheries University* 2003, 12(4): 366-372. (in Chinese))
- [17] 苏德学, 阿达可白克·可尔江. 乌伦古湖白斑狗鱼的生物学研究 [J]. *新疆农业科学*, 2002, 39(5): 259-263. (SU De-xue KARJAN A. Research of *Esox lucius linnaeus* biology in the Ulungur Lake [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences* 2002, 39(5): 259-263. (in Chinese))
- [18] 刘春光, 孙红文, 朱琳, 等. 两种无机盐形成的盐度对淡水藻类生长的影响 [J]. *环境科学学报*, 2006, 26(1): 157-161. (LIU Chun-guang, SUN Hong-wen, ZHU Lin, et al Effects of salinity formed with two inorganic salts on freshwater algae growth [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae* 2006, 26(1): 157-161. (in Chinese))
- [19] 申屠青春, 董双林, 赵文, 等. 盐度、碱度对浮游生物和水化因子的影响 [J]. *应用生态学报*, 2000, 11(3): 449-454. (SHENTU Qing-chun, DONG Shuang-lin, ZHAO Wen, et al Effects of salinity and alkalinity on plankton and water chemical factors [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* 2000, 11(3): 449-454. (in Chinese))
- [20] 何志辉, 赵文. 三北地区内陆盐水资源及其渔业利用 [J]. *大连水产学院学报*, 2002, 17(3): 157-166. (HE Zhi-hui ZHAO Wen. Biological resource in inland saline waters in North China [J]. *Journal of Dalian Fisheries University* 2002, 17(3): 157-166. (in Chinese))
- [21] 胡汝骥, 姜逢清, 王亚俊, 等. 亚洲中部干旱区的湖泊 [J]. *干旱区研究*, 2005, 22(4): 424-430. (HU Ru-ji JIANG Feng-qing WANG Ya-jun, et al Study on the lakes in arid areas of Central Asia [J]. *Arid Zone Research* 2005, 22(4): 424-430. (in Chinese))
- [22] 汪宏枢, 王洪道, 张开翔, 等. 新疆乌伦古湖的自然条件及其渔业生物学基础的初步研究 [J]. *海洋湖沼通报*, 1981(4): 18-28. (WANG Xian-chen, WANG Hong-dao, ZHANG Kai-xiang, et al On the natural conditions and biological basis of fishery in Xinjiang Ulenge lake [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology* 1981(4): 18-28. (in Chinese))
- [23] 赵景峰, 秦大河, 长岛秀树, 等. 博斯腾湖的咸化机理及湖水矿化度稳定性分析 [J]. *水科学进展*, 2007, 18(4): 475-482. (ZHAO Jing-feng, QIN Da-he, NAGASHIMA H, et al Analysis of mechanism of the salinization process and the salinity variation in Bosten lake [J]. *Advances in Water Science* 2007, 18(4): 475-482. (in Chinese))
- [24] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志 [M]. 北京: 科学出版社, 1998 346-347. (WANG Su-min, DOU Hong-shen. Records of Chinese lakes [M]. Beijing: Science Press, 1998 346-347. (in Chinese))
- [25] 刘雪芬. 乌伦古湖水化学特征及环境因素分析 [J]. *海洋湖沼通报*, 1996(2): 1-10. (LIU Xue-fen. Hydrochemical characteristics and environmental factor analysis of wulungu lake [J]. *Transaction of Oceanology and Limnology* 1996(2): 1-10. (in Chinese))
- [26] 马桂珍. 乌伦古湖的生态平衡及其与渔业关系的探讨 [J]. *干旱区研究*, 1985(1): 39-43. (MA Gui-zhen. The ecological balance of Ulungur Lake and its relationship with fisheries [J]. *Arid Zone Research* 1985(1): 39-43. (in Chinese))
- [27] 刘志辉, 王建军, 杨天明. 阿勒泰地区水资源开发利用中的环境问题研究 [J]. *新疆大学学报: 自然科学版*, 1996, 13(4): 62-66. (LIU Zhi-hui, WANG Jian-jun, YANG Tian-ming. Research on the environment problems in water resources exploitation and utilization in Altai Region [J]. *Journal of Xinjiang University: Natural Science Edition* 1996, 13(4): 62-66. (in Chinese))
- [28] 樊自立, 李疆. 新疆湖泊的近期变化 [J]. *地理研究*, 1984, 3(1): 77-86. (FAN Zi-li, LI Jiang. Recent changes in the lakes of Xinjiang [J]. *Geographical Research* 1984, 3(1): 77-86. (in Chinese))
- [29] 张秀善, 张华, 张风华, 等. 乌伦古湖水位调控研究 [J]. *新疆环境保护*, 1997, 19(2): 1-4. (ZHANG Xiu-shan, ZHANG Hua, ZHANG Feng-hua, et al Regulation of Ulungur Lake [J]. *Environmental Protection of Xinjiang* 1997, 19(2): 1-4. (in Chinese))
- [30] 阿孜古丽·卡哈尔, 阿不力克木·阿不力孜. 新疆水面蒸发量折算系数及时空分布分析 [C] // 中国水利学会. 中国水利学会 2003 学术年会论文集. 北京: 中国三峡出版社, 2003, 14-18. (KAHAR A, ABLIZ A. Analysis of surface evaporation and

its temporal distribution of conversion coefficient of Xinjiang[C]// The Collection of Annual Academic Conference of Chinese Hydraulic Engineering Society, Beijing: China Three Gorges Press, 2003: 14-18. (in Chinese)

Research on the lowest ecological water level and ecological water quantity of Ulungur Lake^{*}

LIANG Lili, WANG Fang, WANG Dang-xian, WANG Hao

(Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract Setting ecological protection goal of Ulungur Lake is the foundation of the rational and efficient allocation of water resources in this watershed. Based on the characteristics of breeding of freshwater fish in cold water, the paper puts forward a new approach suitable for the lake in arid area on how to determine the lowest ecological water level subject to the relationship among the lake salinity, fishes and water quantity. According to the new approach, the ecological water demands for reserving the lowest ecological water level in typical years are calculated. The result shows that the lowest ecological water level of Buluntuo Lake is 476.12 m, while Jili lake is 478.12 m. Deducting the precipitation and 400 million m^3 of water diverted from outside river basin, there is still a deficit with an amount of 644 million m^3 , 533 million m^3 , 220 million m^3 and 106 million m^3 respectively by the year with precipitation frequency of 92%, 81%, 46% and the normal. Finally, an analysis on the reliability of results is done.

Key words Ulungur lake, arid area, the lowest ecological water level, the volume of water shortage, salinity

著作权使用声明

本刊所登论文的中、英文摘要或全文同时被有关文摘刊物、检索系统、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社等有关网上期刊转载、传播,作者将稿件交本刊登载的同时也将数字化汇编权、数字化复制权、数字化制品形式(包括光盘、互联网出版物)发行权、信息网络传播权等著作权授予本刊编辑部,作者著作权使用费随本刊稿酬一次性给付。凡有不同意见者,可另投他刊。2010年起,《水科学进展》许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社独家使用上述中文版著作权,任何其他第三方不得使用。

作者来稿文责自负,不得一稿多投。收到本刊收稿通知后3个月未收到稿件处理意见者,若无其他约定,可自行处理稿件。论文出版后,按国家有关规定酌付稿酬,并赠阅当期期刊两份。受编辑部人力所限,退稿稿件恕不返审稿意见,敬请谅解。

《水科学进展》编辑部

* The study is financially supported by the National Key Technologies R&D Program of China during the 11th Five-year Plan Period (No. 2008BA B42B09).