基于长时间序列 (1975—2020 年) 生态耗水的岱海动态生态需水分析*

马佳丽¹, 刘东伟^{1,2,3**}, 王杰¹, 程英楠¹, 刘华民¹, 王立新^{1,2,3}

(1: 内蒙古大学生态与环境学院, 呼和浩特 010021)

(2: 内蒙古自治区河流与湖泊生态重点实验室, 呼和浩特 010021)

(3: 蒙古高原生态学与资源利用教育部重点实验室, 呼和浩特 010021)

摘要: 生态需水是湖泊生态系统的重要指标, 维持着湖泊生态系统的良性循环。以内蒙古中部半干旱湖泊岱海为研究对象, 对湖泊动态生态需水进行分析。本研究在遥感和气象数据的基础上, 获得 1975—2020 年长时间序列高精度水文要素数据, 分析岱海水文要素时空演变规律; 通过天然生态水深分析法、水深经验频率分析法和湖泊形态分析法分析岱海的水深随面积变化的关键水深; 构建基于生态耗水规律的湖泊生态需水模型, 计算自然状态下岱海生态需水动态变化范围。研究结果如下: 岱海地区 6—9 月为丰水期, 10 月至次年 5 月为枯水期; 45 a 以来岱海水面面积呈显著下降趋势, 近年来下降速率减缓; 枯水期岱海适宜生态水深为 8.72~9.92 m, 丰水期为 9.40~10.69 m, 适宜生态需水量为 5.62 亿~7.71 亿 m³, 适宜湖面面积为 70.92~84.77 km²。本文构建了长时间序列气候水文数据库, 确定岱海动态生态需水范围可以实现对湖泊生态健康的实时监测, 为相关规划与管理提供科学依据及可操作性指导, 从而为岱海湖泊治理提供理论参考。

关键词: 生态需水; 遥感; 干旱区湖泊; 经验频率分析; 修正全年偏差指数; 湖泊形态分析; 岱海

Dynamic ecological water demand based on long-term ecological water consumption in Lake Daihai, 1975–2020*

Ma Jiali¹, Liu Dongwei^{1,2,3**}, Wang Jie¹, Cheng Yingnan¹, Liu Huamin¹ & Wang Lixin^{1,2,3}

(1: School of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, P.R.China)

(2: Inner Mongolia Key Laboratory of River And Lake Ecology, Hohhot 010021, P.R.China)

(3: Key Laboratory of Ecology and Resource Use of the Mongolian Plateau, Ministry of Education of China, Hohhot 010021, P.R.China)

Abstract: Ecological water demand is an important indicator of lake ecosystems, maintaining a virtuous cycle of lake ecosystems. Taking Lake Daihai as the research object, a semi-arid lake in central Inner Mongolia, the dynamic ecological water demand of the lake is analyzed. Based on remote sensing and meteorological data, this research obtains long-term series of high-precision hydrological element data from 1975 to 2020, and analyzes the temporal and spatial evolution of hydrological elements in Lake Daihai; Through the natural ecological water level analysis method, the water level experience frequency analysis method and the lake morphology analysis method, the key water relative depth of the Lake Daihai water level changing with the area is analyzed; Construct a lake ecological water demand model based on the law of ecological water consumption, and calculate the dynamic range of ecological water demand in Lake Daihai under natural conditions; The results of the study are as follows: June to September in Lake Daihai area is the wet season, October to May of the following year is the dry season; Over the past 45 years, the area of Lake Daihai has shown a significant decline, with a rate of decline of 2.3 km²/a, but the rate of decline has slowed in recent years; The suitable ecological water relative depth for Lake Daihai is 8.72–9.92 m in the dry season, and 9.40–10.69 m in the wet season. The suitable ecological water demand is 5.62–7.71 million m³, and the suitable area is 70.92–84.77 km². This paper uses remote

* 2021-05-14 收稿; 2021-07-06 收修改稿。

内蒙古自治区科技重大专项项目 (ZDZX2018054) 和国家自然科学基金项目 (42067013) 联合资助。

** 通信作者; E-mail: liudw@imu.edu.cn.

sensing technology to obtain hydrological data, build a long-term climatic and hydrological database, and determine the range of dynamic ecological water demand in Lake Daihai can realize real-time monitoring of lake ecological health, and provide scientific basis and operability guidance for related planning and management of Lake Daihai.

Keywords: Ecological water demand; remote sensing; arid zone lakes; empirical frequency analysis; amended annual proportional flow deviation; lake morphology analysis; Lake Daihai

湖泊是干旱和半干旱地区重要的水资源,对调节区域气候、维持区域生态平衡起着重要的作用^[1-2]. 同时,区域生态环境改变也会作用于湖泊导致其水文情势发生变化^[3]. 湖泊水文情势在一定程度上可以表征区域生态环境质量. 近年来,由于气候变化及人类活动的影响,湖泊面临着越来越多的生态环境问题,如萎缩干涸、水质变差、生态退化^[4-7]等,尤其是在干旱半干旱地区表现更为明显. 适宜生态水深是维护湖泊生态系统正常运行的合理水深^[8],湖泊水深低于最低生态水深,不仅影响湖泊水量水质,加剧污染,鱼类植被大量死亡,破坏湖泊生态环境质量,也会威胁到区域健康发展^[9]. 湖泊生态需水与湖泊适宜生态水深具有密切关系,保障湖泊生态需水是恢复和维持区域及湖泊生态健康的一个关键措施^[10].

岱海是我国半干旱地区重要的内陆湖之一^[11],是候鸟迁徙途径中一个重要的停歇地^[12]. 自 1970s 以来,岱海出现湖面水位持续下降,湖面逐渐萎缩^[13-14],矿化度增大,湖水质变差,生物多样性遭到严重破坏等现象. 对于岱海生态环境遭到破坏这一现状,早期部分学者从湖泊沉积方向进行研究,初步推断岱海湖泊萎缩的一个重要原因是人类活动影响^[15];部分学者借助测年技术推断历史时期长时间过程中岱海水位波动的主要原因是气候变化,20 世纪末期的水位变化受人类不合理利用影响较大^[16-17];黄群等^[18]通过水量平衡分析确定近年来导致岱海水位波动的主要因素已经从气候变化转为人为影响;Chen^[19]和 Wang 等^[20]发现大量开采地下水是导致湖泊退化的主要原因;孙占东等^[21]从水盐平衡方面分析岱海环境变化,分析人类活动对其的影响效果. 近年来岱海湖面萎缩现象较为严重,岱海生态恢复与治理任务紧迫,对于岱海的研究更多的集中在水质变化^[11]、水量变化^[14]、生物量变化^[12]以及与合作的相互影响^[13,22]上,就岱海维持生态系统正常运行所需水质水量合理变化范围方面的研究较少. 岱海适宜生态需水范围的确定不仅能为相关的补水工程提供科学依据及可操作性指导,并且也能作为相关生态环境评价的指标,对湖泊健康状态实施实时监测. 国际上生态需水方面的研究多集中在河流湿地生态需水的研究上,湖泊生态需水方面的研究较少. 在湖泊生态需水方面,Tilley 等^[23]基于水产养殖提出湖泊最低生态需水量方案;王明净等^[24]以滇池流域为例将河湖生态系统联系起来构建湖泊生态需水模型,研究湖泊生态用水规律. 何山等^[25]以白洋淀为例对湖泊生态需水进行不确定性分析. 湖泊生态需水量常见的研究方法主要有水量平衡法、换水周期法、最小水位法及功能法. 对于岱海而言,早期黄群等^[18]借助水量平衡法对水位进行分析研究;换水周期法对来水水量有一定要求,最小水位法需要确定湖泊敏感物种受水位变化的影响程度,功能法对生态各需水组分有一定的要求,这 3 种方法需要足够的资料支撑,其应用在资料较少的岱海存在一定的困难^[26]. 相比而言,天然生态水深分析法、水深经验频率分析法和湖泊形态分析法在计算湖泊生态需水时对资料要求小于以上 3 种方法,故本文采取这 3 种方法对岱海生态需水进行研究,分析生态需水和耗水有利于干旱区有限的水资源进行合理的分配、保护湖泊生态系统的正常生长,为岱海修复和治理提供参考.

本研究采用遥感影像数据,结合数字高程数据构建 1975—2020 年长时间序列的高分辨率岱海湖泊水文情势数据集,分析岱海多年水文情势发展及变化趋势;同时,结合多种生态需水方法寻找湖泊生态水深,构建基于生态耗水的湖泊生态需水模型,确定岱海水面面积变化的关键水深,通过水深水量关系确定维持湖泊生态环境健康所需生态水量的变化范围,为岱海治理和恢复提供参考.

1 研究区概况

岱海位于内蒙古自治区乌兰察布市凉城县境内($40^{\circ}32' \sim 40^{\circ}36'N$, $112^{\circ}37' \sim 112^{\circ}45'E$),是半干旱地区向干旱地区过渡地带的地堑型构造湖^[17]. 岱海长 11 km 左右,宽 7.3 km 左右,地势较为平坦,湖形走向为 SWW-NEE,湖面海拔 1225 m,地下水埋深较浅. 岱海年降水量 400 mm 左右^[27],年内分布不均匀,年际变化大,气候干旱,流域年均蒸发可达 1938 mm,蒸发强烈^[28],属于典型的中温带半干旱大陆性季风气候^[29],75% 的降雨集中在每年的 6—9 月. 近年来,水体污染严重,多项水质因子存在不同程度的超标现象. 岱海周围有

22 条季节性河流,主要的补给来源为降水和径流,排泄以蒸散发和渗漏为主^[30]. 周边工农业的兴起,地下水的过量开采导致岱海湖面萎缩现象明显^[31],水位波动较大,湖泊生态环境状况堪忧.

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本研究所用的数据主要由 3 部分构成,分别为遥感影像和数字高程数据、气象观测数据及水质数据. 其中,遥感数据主要为美国地质调查局(<https://glovis.usgs.gov/>)的 Landsat MSS、Landsat TM、Landsat ETM+和 Landsat OLI 的 6—9 月的影像数据,共计 97 景(表 1);数字高程数据选取 ASTER GDEM 数据;气象观测数据来源于中国气象网(<http://data.cma.cn>),主要为 1981—2018 年月均降水量;水质数据主要为 2000—2017 年三苏木、苜花、石门、五苏木和白庙子站点(图 1)测量的相关岱海水质数据.

表 1 遥感影像参数
Tab.1 Remote sensing image parameters

卫星/传感器	时间	分辨率/m	波段数	影像数量
Landsat MSS	1975—1985 年	78	4	6
Landsat TM	1986—2011 年	30	7	75
Landsat ETM+	1999—2012 年	30	8	8
Landsat OLI	2013—2020 年	30	9	8

图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

2.2 研究方法

2.2.1 遥感图像解译 采用 Landsat 卫星遥感数据,选取研究区 1975—2020 年无云量遮挡的影像共 97 幅,对遥感影像预处理后再进行自动解译和目视解译双重处理,提取出岱海近 45 a 的湖泊面积,结合岱海 ASTER GDEM 高程数据,借助 ENVI 通过直方图调整排除其高程异常点的干扰,获得湖心高程值,利用与湖面高程的差值来确定湖心处水深,统计出多年来岱海的水面面积,水深以及水量等水文数据资料. 其中,自动解译采用 2015 年 Fisher 等^[32]创建的水体指数——线性判别分析水体指数(WI_{2015})来提取本研究区水体信息.

$$WI_{2015} = 1.7204 + 171GREEN + 3RED - 70NIR - 45SWIR1 - 71SWIR2 \tag{1}$$

式中, WI_{2015} 为线性判别分析水体指数;GREEN 为绿波段;RED 为红波段;NIR 为近红外波段;SWIR1 为短波

红外 1; SWIR2 为短波红外 2.

2.2.2 经验频率分析方法 对降水和湖泊水深进行经验频率分析,寻找多年降水、湖泊多年天然水深的分布规律,从而进一步分析获得岱海多年演变的规律.通过皮尔逊Ⅲ型曲线(P-Ⅲ型曲线)更加直观地观测到研究区多年水文要素的分布规律.将获得的样本数据作为样本从大到小排序,获得序列: $x_1, x_2, x_3, \dots, x_m, x_n$ ($m < n$),再通过公式(2)计算各个样本的经验频率 P ,在海森机率格纸上点绘经验点距.选取 P-Ⅲ型曲线选配理论频率曲线,通过调整变差系数及偏差系数使得频率曲线与经验点距拟合较好,此时频率曲线的各项参数可近似认为是总体参数的估值,从经验频率曲线上就可以很方便地获取到指定频率相对应的水文要素设计值.为了计算方便,本次计算借助武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室开发的水文频率分布曲线适线软件进行频率曲线的调整拟合及参数确定^[33].

$$P = \frac{m}{n+1} \times 100\% \quad (2)$$

式中, P 为经验频率; m 为样本序号; n 为样本总量.

2.2.3 适宜生态水深 通过天然生态水深分析法、水深经验频率分析法和湖泊形态分析法计算岱海生态水深值^[34-36].依据生态环境健康全面发展的原则,选择最大的水深值作为适宜的生态水深值,再结合水深水量关系进一步推求出满足岱海生态环境健康发展的生态需水量.

天然生态水深法^[34]是基于湖泊自然演变过程可随环境变化能自我调节的原则,多年最低水深是保障湖泊天然系统不产生严重衰退的基础.通过对长时间序列的湖泊水深值进行分析,选取多年最小值作为湖泊生态系统不被破坏所能允许的最小生态需水量值.

水深经验频率分析法^[35]是指对多年水深值进行经验频率分析,借助皮尔逊Ⅲ型曲线寻找一定水深值发生的频率,也可定义在一定发生频率下的多年一遇的水深值.依据经验,生态需水即某一发生频率下的水深值.

湖泊形态分析法是基于保障湖泊生态系统不退化,必须保障湖水子系统和地形子系统不产生严重退化的原理来确定湖泊生态水深^[36].由于水文和地形存在一定的相关性,正常情况下一定水深对应着一定的湖泊面积,但是由于地形的原因,湖泊水深与面积之间的关系为非线性关系,即湖泊面积随水深下降的减少量是不同的.这种情况下,至少存在一个位置水深,在该水深处湖泊面积会因为水深的变化而发生急剧变化,若将生态水深设在该水深位置处,则表明湖泊生态服务功能会在该水深位置左右发生急剧的变化,该处位置即为湖泊的生态水深值.

2.2.4 生态需水评价方法 为保障湖泊健康发展,湖泊生态水深应满足各项要求,即选取 3 种计算方法中的最大水深为初始生态水深,把初始生态水深向两个方向离散得到一系列的情景水深方案,作为岱海具有可操作性的生态水深方案(表 2);然后通过对岱海周围环境变化的分析,确定受人为影响较小的自然状态时段,将自然状态下的水深作为方案评价中的基础水深;采用修正全年偏差指数^[37](amended annual proportional flow deviation, AAPFD)分别对不同情景水深方案与自然水深状态的差异程度做出评价,找出岱海生态健康的适宜生态水深;通过与自然状态下的水深进行分析对比,实现对各个生态水深方案的评价;结合岱海历年水量与水深之间的相关关系,得出能够满足生态系统健康要求的一系列年内生态需水量方案. AAPFD 指数计算公式为:

$$AAPFD = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left[\sum_{i=1}^{12} \left(\frac{H_i - h_{ij}}{\bar{h}_{ij}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

式中, n 为评价年数, H_i 为第 i 月生态水深, h_{ij} 为第 j 年第 i 月水深, $\bar{h}_{ij}$ 为第 j 年平均水深, $i=1, 2, \dots, 12$; $j=1, 2, \dots, n$.

AAPFD 指数越大,说明生态系统受到的影响越大,生态系统的健康状况也越差.但是 AAPFD 指数多为小数,观察起来有一定的难度,故可通过水文指数进行进一步的对比分析,这样可以对湖泊的水文情况及生态情况有一个更加直观明确的了解.澳大利亚资源与环境部对 AAPFD 指数给定了一个相应的健康程度得分值,这个水资源健康程度视为水文指数,当水文指数大于 0 时,说明该分值的水质健康状况是可以接受的;水文指数越大,表明生态系统的健康状况越好;等于 0 即人为生态系统受损^[38]. AAPFD 指数与水文指数

之间的关系见表 3 所示.

表 2 生态水深方案
Tab.2 Ecological water depth plan

月份	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6	方案 7
i 月	$1.3H_i$	$1.2H_i$	$1.1H_i$	H_i	$0.9H_i$	$0.8H_i$	$0.7H_i$

$i=1, 2, \dots, 12.$

表 3 AAPFD 指数与水文指数的关系
Tab.3 The relationship between AAPFD index and hydrological index

AAPFD	<0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.5	0.5~1	1~1.5	1.5~2	2~3	3~4	4~5	>5
水文指数	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0

2.2.5 生态需水计算 生态需水量是一个动态变化的值,并非一个定值. 不同年份的补给量和排泄量各不相同,枯水年年内降水量少,水量损失大,生态需水量就较大;丰水年反之,生态需水量较小. 岱海生态需水量包括两个部分,一部分为初始生态水深和目标生态水深之间的差值,另一部分为湖泊的月水量损失量(蒸散发、渗漏等)扣除降水补给后的净损失量. 湖泊净损失量的计算考虑降水补给的影响,可将无降水年的月湖水深度统一概化为规划年的无降水影响的各月水深值,借助水深差值可以确定各月降水量对湖水量的影响,方便对岱海月水量净损失量的计算;本次研究选取历史上多年一遇的最大干旱年视为无降水年,利用干旱年的水深与规划年的水深之间的差值确定降水对湖水量的影响,结合月初初始生态水深和目标生态水深之间的差值,即消耗水深,借助公式(4)进行岱海的生态需水量的计算.

$$Q_i = 2f(h_i) - f(h_i - hh_i) - f(h_{0i}) \tag{4}$$

其中, Q_i 为第 i 月生态需水量; h_i 为第 i 月生态水深; hh_i 为最大干旱年第 i 月生态水深; h_{0i} 为第 i 月月月初水深; f 为水量—水深关系.

3 结果分析

3.1 岱海流域多年降水变化趋势

选取距离岱海最近的凉城站 1981—2018 年的水文气象数据进行分析,确定多年降水均值,分析降水变化率的变化趋势,见图 2a;对 1981—2018 年月降水量进行分析,确定年内降水分布规律,见图 2b;对多年降水进行经验频率分析,绘制 P-Ⅲ型经验频率曲线,见图 2c.

图 2 降水变化趋势:(a) 1981—2018 年降水量及其变化率;
(b) 多年月降水量变化;(c) 降水经验频率分析

Fig.2 Analysis of precipitation trend: (a) Annual precipitation and its rate of change from 1981 to 2018;
(b) Changes in monthly precipitation over many years;(c) Analysis of precipitation experience frequency

1981—2018 多年平均降水量为 403.98 mm,1981—2018 有 16 a 年降水量超过均值,有 14 a 年降水量低

于 350 mm, 多年变化幅度较大, 降水年际分布不均匀; 1981—2018 年月均降水年内大降水值多集中在 6—9 月, 年内小降水值多集中在 1—3 月, 降水年内分布极度不均匀, 且差异较大. 由于降水是岱海的主要补给源, 岱海丰水期和枯水期受降水影响较大, 故选取 6—9 月为岱海丰水期, 10 月—次年 5 月为岱海枯水期; 以 1981—2018 年年均降水作样本, 做降水经验频率曲线, 由图 2c 可知, $P=99\%$ 和 $P=90\%$ 时对应的降水量分别为 223 和 285 mm, 即百年一遇枯水年年均降水量为 223 mm, 10 年一遇枯水年年均降水量为 285 mm, 结合降水资料可知 2011 年年降水量为 264.4 mm, 2016 年年降水量为 269.9 mm 和 1986 年年均降水量为 270 mm, 1997 年年均降水量为 275.6 mm, 均为超过 10 年一遇的干旱年.

3.2 湖泊面积及水质变化趋势

3.2.1 湖泊面积变化趋势 通过对遥感影像的分析及处理, 获得岱海 1975—2020 年湖泊面积、水量和水深等相关水文数据. 由于高程数据的精度有限, 提取数据容易出现不合实际的异常值, 故借助 ENVI 做了直方图调整, 通过将直方图统计单元亮度值中高频率的数值减去一个偏置量来减少误差, 将其作为湖泊湖面高程, 湖面与湖底高程之间的差值即为水深. 结合野外实测的岱海水深 2018 年为 7.39 m 和 2019 年为 6.6 m 进行验证, 选取占比 0.5% 的值作为偏置量时计算得水深与实测值误差值在 $\pm 1.1\%$ 之间, 拟合度较好, 在 ArcGIS 中计算每年岱海的水量值和面积值, 从而获得岱海多年水深、水量和湖泊面积等相关水文数据. 对 1975—2020 年岱海水面面积分析, 拟合面积多年变化曲线并分析面积变化率变化趋势, 见图 3a; 选取 2000—2003 年岱海月面积进行分析, 见图 3b.

图3 岱海面积变化: (a) 1975—2020 年岱海面积变化趋势; (b) 2000—2003 年岱海月面积变化趋势

Fig.3 The area changes of Lake Daihai: (a) Change trend of Lake Daihai from 1975 to 2020; (b) The monthly area change trend of Lake Daihai from 2000 to 2003

1975—2020 年, 岱海的水面面积约以 $2.3 \text{ km}^2/\text{a}$ 的速率下降, 45 年内湖泊面积从 151.24 km^2 逐渐萎缩到 49.1 km^2 , 共减少了 102.14 km^2 , 减幅为 67.54%, 湖面呈显著性萎缩趋势 ($P \leq 0.01$), 若不采取相应治理措施, 预计 20 a 后岱海将完全干涸; 统计年中岱海湖泊面积有增大的表现, 如 1977、1995 和 2002—2004 年岱海面积就较上年增大. 统计年中岱海湖面积下降速率有所不同, 1983—1984 年的下降速率最大, 为 $6.11 \text{ km}^2/\text{a}$, 2004 年以后湖泊面积表现为逐年下降, 尤其以 2008—2009 年下降速率最快, 达到 $3.8 \text{ km}^2/\text{a}$. 近 10 a 来, 岱海的湖泊面积整体上虽然仍在下降, 但是下降速率在减少, 尤其是 2012—2013 年和 2017—2018 年下降速率减缓趋势相当明显. 结合降水资料可知, 2012—2013 年是降水量较大的丰水年, 湖泊面积下降速率减缓可能与降水补给有较强的相关性, 但是 2017—2018 年并非丰水年, 湖泊面积下降速率有所减缓, 这与当地政府于 2016 年开始人为干预治理湖泊湿地有着不可分割的关系; 湖面面积年内波动较大, 总体上呈现年初面积大于年末, 丰水期 (6—9 月) 水面面积值较大; 2000 和 2002 年面积年内起伏较为平缓, 6—9 月岱海水面均表现为年内较大的面积值; 2001 年则从 4 月起湖面面积表现为急剧下降; 2003 年 7—10 月面积表现为急增; 依据岱海地区气象数据可知岱海年降水量多集中在 6—9 月, 2001 和 2003 年分别是多年一遇的枯水年和丰水年, 所以不同频率降水年岱海湖面面积年内变化受降水影响非常明显, 尤其在夏、秋季面积变化更显著.

3.2.2 湖泊水质变化趋势 整理 2000—2017 年岱海 6—9 月丰水期各站点水质因子(COD_{Mn} 、 BOD_5 、TP)平均值变化规律,以及各项水质因子与水深之间的相关关系,见图 4。

图 4 岱海水质因子变化:(a) COD_{Mn} 变化趋势;(b) BOD_5 变化趋势;(c) TP 变化趋势;
(d) 水深与 COD_{Mn} 的相关关系;(e) 水深与 BOD_5 的相关关系;(f) 水深与 TP 的相关关系

Fig.4 Water quality factor changes in Lake Daihai: (a) COD_{Mn} change trend;
(b) BOD_5 change trend; (c) TP change trend; (d) Correlation between water depth and COD_{Mn} ;
(e) Correlation between water depth and BOD_5 ; (f) Correlation between water depth and TP

2000—2017 年,岱海水质整体上呈现富营养化状态, COD_{Mn} 、 BOD_5 和 TP 整体呈现上升趋势; COD_{Mn} 变化范围为 6.16~16.19 mg/L,多年平均值为 10.9 mg/L,为地表 V 类水标准,但是 2012—2015 年岱海 COD_{Mn} 为地表水劣 V 类标准; BOD_5 变化范围为 1.02~9.15 mg/L,多年平均值为 3.95 mg/L,为地表 III 类水标准,但是 2012 年以来岱海 BOD_5 为地表水 V 类标准;TP 变化范围为 0.005~0.404 mg/L,多年平均值为 0.093 mg/L,为地表 IV 类水标准,但是 2012 年以来岱海 TP 为地表水 V 类标准,2015 和 2017 年达到地表水劣 V 类标准;结合相关资料可以发现,2012—2013 年降水量较大,湖泊周边农田施用的农药、化肥以及禽畜养殖排放废水,营养物质及污染物随雨水大量冲刷流入湖内,可能导致湖内 COD_{Mn} 、 BOD_5 和 TP 浓度发生大幅度上升现象。

3.3 岱海生态需水

3.3.1 生态水深的确定 岱海天然生态水深通过对岱海历史资料进行分析研究,在 1980s 之前,浮游植物种类最多 38 属,数量较多,浮游动物生物量也较多,挺水植物生长旺盛,鱼类组成复杂^[39]。结合提取的岱海多年水文要素的多年变化,1980s 湖泊水面面积约 140 km²,水深 14 m,水量较多,水源充足,生态结构较为合理,接近天然状态。结合遥感提取数据,选择已有的且人为影响较小的 1975—2005 年共 30 a 水深资料进行分析,统计多年最低水深。经过统计分析发现,已有数据中岱海天然状态下的最低水深为 8.95 m,出现在 2003 年 3 月,当时的湖泊面积为 78.54 km²,所以选择 8.95 m 为岱海天然最低生态水深。基于经验频率的岱海生态水深,对 1975—2005 年的岱海水深数据进行经验频率分析,通过计算各水深样本的经验频率,用实际的水深数据拟合理论频率曲线,然后借理论频率公式向两侧外推,绘制皮尔逊 III 型曲线(P-III 型曲线)(图 5)。由经验频率曲线可以直观明了地观察到不同频率状态下的水深值。可以定义一定频率下的水深为最低生态水深,结合常见的经验频率分析,本次研究选取经验频率为 90% 的水深作为岱海的最低生态水深,由经验频率曲线分析发现 90% 时对应的水深为 9.03 m,对应的湖泊面积约为 79 km²。

基于湖泊形态分析的岱海生态水深,湖泊面积是由地形和水文条件共同决定的,与湖泊生态系统健康有着很大的相关性,所以湖泊面积是湿地生态系统研究的重要指标。对岱海湖泊水量水深进行分析研究(图 6a),确定其水量水深关系,见公式(5);对岱海面积水深进行分析(图 6b);由面积水深关系推算岱海水面面

图 5 水深经验频率曲线

Fig.5 Water depth experience frequency curve

积随水深变化的变化率,做水面面积变化率曲线(图 6c). 由水面面积变化率曲线可知,水面面积变化率最大值对应的水深分别为 10.90 和 11.75 m,故这两个水深是岱海水面面积变化的关键水深.

$$y=1.33-0.39x+0.11x^2 \quad (R^2=0.997) \quad (5)$$

3.3.2 岱海适宜的生态水深方案及评价 对比天然生态水深、水深经验频率分析和湖泊形态分析 3 种方法,为满足湖泊各项指标要求,选择最大水深作为生态水深,即将 10.9 m 作为岱海枯水期生态水深,11.75 m 作为丰水期生态水深,构建初始生态水深方案,即方案 4. 再将方案 4 分别向两个方向扩散,构建方案 1~7 共 7 个具有可操作性的生态水深方案(表 4). 方案 1~7 分别为方案 4 的 1.3、1.2、1.1、1、0.9、0.8 和 0.7 倍. 通过对关键水深的离散,对引起岱海湖面面积发生突变的水深进行细化研究,确定更为详细的生态水深. 岱海湖周围人为水量影响最大的是岱海电厂,岱

海电厂是 2005 年 10 月投产发电的,故选取 2000—2003 年为自然年,对生态水深各个方案进行评估.

图 6 岱海水深与水量(a)、面积(b)以及水面面积变化率(c)的关系

Fig.6 The relationship between the water depth and the water volume (a), area (b) and the change rate of water surface area (c) of the Lake Daihai

由各方案的评价可知,方案 5 和方案 6 的水文指数为 8,相邻的方案 4 和方案 7 的水文指数为 6,故而在方案 4 和方案 5 之间、方案 6 和方案 7 之间依据上述方法进一步离散,发现当方案设定为 $0.8H_i$ 和 $0.91H_i$ 时 AAPFD 指数首次表现为 8,结合 AAPFD 指数意义确定岱海适宜生态水深为这两个方案所包括的水深范围,即枯水期(10 月—次年 5 月)为 8.72~9.92 m,丰水期(6—9 月)为 9.40~10.69 m.

表 4 各生态水深方案及方案评价

Tab.4 Various ecological water depth schemes and scheme evaluation

	水深/m						
	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6	方案 7
1—5 月	14.17	13.08	11.99	10.9	9.81	8.72	7.63
6—9 月	15.275	14.1	12.925	11.75	10.575	9.4	8.225
10—12 月	14.17	13.08	11.99	10.9	9.81	8.72	7.63
AAPFD	1.809	1.406	1.004	0.606	0.259	0.271	0.643
水文指数	4	5	5	6	8	8	6

3.3.3 岱海生态需水量 生态耗水是通过蒸散和渗漏消耗掉的水分,是生态需水的一部分. 分析湖泊生态需

水量要排除降水对湖泊水量的影响,分析湖泊耗水情况确定满足湖泊正常演变的生态需水量. 将降水量对湖泊水量的影响转化为降水对湖泊水深的影响. 选取 20 年一遇的枯水年(2011 年)为最大干旱年,对水量损失进行概化处理,将各月水量净损失转化为损失深度进行计算,再利用公式(4)进行计算,得出自然状态下岱海生态需水量(表 5). 通过计算得出自然状态下,枯水期岱海适宜水深表现为 8.72~9.92 m,丰水期为 9.40~10.69 m,年均生态水深为 8.95~10.18 m;枯水期适宜生态需水量表现为 3.97 亿~6.96 亿 m³,丰水期为 6.10 亿~9.64 亿 m³,年均生态需水量为 5.62 亿~7.71 亿 m³. 若考虑岱海不发生极端天气和污染等方面的变化,按照以往的发展变化规律,结合图 4d~f 中的水深与各项水质因子的对应关系,预计满足湖泊生态需水量要求时,对应适宜水深可以发现 COD_{Mn} 可达到 7.45~10.16 mg/L,为地表水 V 类水标准,BOD₅ 达到 1.04~3.33 mg/L,为地表水 III 类水标准,TP 达到 0.015~0.075 mg/L,为地表水 IV 类水标准. 由水质变化发现,若不进行人为水质修复,达到生态需水要求时岱海水质状况会有一定程度的改善,但是依旧达不到湖泊健康发展的水质需求. 水质变化不仅与水量相关,与研究区人类活动也有紧密的联系. 为了岱海更好地修复与治理,未来生态需水保障机制不仅需要满足岱海水量要求,还要在水质方面保持更多的重视.

表 5 自然状态下岱海适宜水深及生态需水量

Tab.5 Suitable water depth and ecological water demand of Lake Daihai under natural conditions

时间	适宜水深/m	生态耗水量/(亿 m ³)	生态需水量/(亿 m ³)	适宜面积/km ²
1 月	8.72~9.92	0.99~1.09	4.94~6.96	66.41~79.80
2 月	8.72~9.92	0.99~1.10	4.93~6.96	66.34~79.80
3 月	8.72~9.92	0.99~1.10	4.93~6.96	66.34~79.80
4 月	8.72~9.92	0.99~1.08	4.95~6.96	66.47~79.80
5 月	8.72~9.92	0.99~1.08	4.95~6.96	66.47~79.80
6 月	9.40~10.69	1.08~1.11	7.14~9.64	80.99~97.57
7 月	9.40~10.69	0.99~1.15	6.10~8.21	74.10~88.09
8 月	9.40~10.69	0.99~1.16	6.10~8.20	74.10~88.02
9 月	9.40~10.69	0.99~1.20	6.10~8.16	74.10~87.76
10 月	8.72~9.92	1.02~1.03	3.97~5.53	59.98~70.32
11 月	8.72~9.92	1.02~1.03	5.01~6.93	66.87~79.60
12 月	8.72~9.92	1.02~1.03	5.01~6.93	66.87~79.60
均值	8.95~10.18	1.04~1.05	5.62~7.71	70.92~84.77

4 结论

本研究借助遥感图像数据及降水数据,采用生态耗水与形态分析相结合的方式计算湖泊生态需水,借助水文指数与修正全年偏差指数共同评价选择最优需水方案,较单一的生态需水方案更加合理,避免了传统生态需水计算方法可操作性差的缺点. 本研究探寻自然状态下的岱海湖泊适宜水深和生态需水范围,分析岱海湖泊水文要素多年变化规律,预测未来发展趋势,结论如下:

1975—2020 年,岱海湖泊面积呈显著下降趋势($P\leq 0.01$),湖泊面积共减少 102.14 km²,减幅为 67.54%,面积下降速率为 2.3 km²/a,若以此速率继续发展下去,预计 20 a 后岱海将彻底干涸;从整体上看,岱海湖泊水面面积多年来呈现下降趋势,但从 2000 年开始,岱海面积变化率较之前的变化率有所减少,2016 年以后湖泊变化幅度更小;通过构建基于生态耗水和形态分析的湖泊生态需水模型,寻找出枯水期(10 月—次年 5 月)和丰水期(6—9 月)岱海水面面积变化关键水深分别为 8.72~9.92 m 和 9.40~10.69 m,年均生态水深为 8.95~10.18 m. 自然年状态下枯水期岱海适宜生态需水量表现为 3.97 亿~6.96 亿 m³,丰水期为 6.10 亿~9.64 亿 m³,年均生态需水量为 5.62 亿~7.71 亿 m³. 不考虑增加污染源,预计满足湖泊生态需水量要求时,COD_{Mn} 可达到地表水 V 类水标准,BOD₅ 达到地表水 III 类水标准,TP 达到地表水 IV 类水标准,水质和生态环境状况会得到一定程度的改善.

5 附录

附表 I 见电子版 (DOI: 10.18307/2022.0117).

6 参考文献

- [1] Song CQ, Zhan PF, Ma RH. Progress in remote sensing study on lake hydrologic regime. *J Lake Sci*, 2020, **32**(5): 1406-1420. DOI: 10.18307/2020.0514. [宋春桥, 詹鹏飞, 马荣华. 湖泊水情遥感研究进展. 湖泊科学, 2020, **32**(5): 1406-1420.]
- [2] Jiang HL, Wang CH, Bai LL *et al.* Advances and prospects in lake environment science and engineering: A review. *J Lake Sci*, 2020, **32**(5): 1278-1296. DOI: 10.18307/2020.0507. [江和龙, 王昌辉, 白雷雷等. 湖泊环境科学与工程技术研究进展探讨. 湖泊科学, 2020, **32**(5): 1278-1296.]
- [3] Zhang Q, Liu YB, Yao J *et al.* Lake hydrology in China: Advances and prospects. *J Lake Sci*, 2020, **32**(5): 1360-1379. DOI: 10.18307/2020.0511. [张奇, 刘元波, 姚静等. 我国湖泊水文学研究进展与展望. 湖泊科学, 2020, **32**(5): 1360-1379.]
- [4] Zhuo J, Zhu YN, Wang J *et al.* Spatio-temporal change of water area in Hongjiannao Lake and the effectiveness of protection measure. *Journal of Desert Research*, 2019, **39**(4): 195-203. [卓静, 朱延年, 王娟等. 红碱淖面积时空演变规律及保护措施成效. 中国沙漠, 2019, **39**(4): 195-203.]
- [5] Liu YZ, Yang SQ, Jiang CB *et al.* Study on the effect of Dongting Lake's shrinkage on the flooding. *Advances in Water Science*, 2019, **30**(4): 485-495. [刘易庄, 杨树清, 蒋昌波等. 洞庭湖萎缩对湖内洪水影响. 水科学进展, 2019, **30**(4): 485-495.]
- [6] Tian W, Yang ZS, Shao KQ *et al.* Effect of a comprehensive improvement project on water quality in urban lakes: A case study of water quality variation in Lihu Lake over the past 30 years. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 183-193. DOI: 10.13227/j.hjxx.201906022. [田伟, 杨周生, 邵克强等. 城市湖泊水环境整治对改善水质的影响: 以蠡湖近 30 年水质变化为例. 环境科学, 2020, **41**(1): 183-193.]
- [7] Wang ZQ, Cui AH, Miao JQ *et al.* Research progress on the driving factors of freshwater lake ecosystem degradation and associated restoration techniques. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **8**(18): 6253-6264. DOI: 10.5846/stxb201606281269. [王志强, 崔爱花, 缪建群等. 淡水湖泊生态系统退化驱动因子及修复技术研究进展. 生态学报, 2017, **8**(18): 6253-6264.]
- [8] Wang HX, Zhu YW, Zha HF *et al.* Ecological water level and its safeguard measures in Lake Dongting. *J Lake Sci*, 2020, **32**(5): 1529-1538. DOI: 10.18307/2020.0524. [王鸿翔, 朱永卫, 查胡飞等. 洞庭湖生态水位及其保障研究. 湖泊科学, 2020, **32**(5): 1529-1538.]
- [9] Wu JL, Ma L, Zeng HA. Water quality and quantity characteristics and its evolution in Lake Bosten, Xinjiang over the past 50 years. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, **33**(2): 231-237. [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.]
- [10] Liu JY, Zhang Q, Sun P *et al.* Minimum ecological water requirements of the Poyang Lake. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2014, **53**(4): 149-153. [刘剑宇, 张强, 孙鹏等. 鄱阳湖最小生态需水研究. 中山大学学报: 自然科学版, 2014, **53**(4): 149-153.]
- [11] Zhao L, Chen JY, Jiang X *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics and difference analysis of nitrogen and phosphorus in Daihai Lake. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1676-1683. DOI: 10.13227/j.hjxx.201909090. [赵丽, 陈俊伊, 姜霞等. 岱海水体氮、磷时空分布特征及其差异性分析. 环境科学, 2020, **41**(4): 1676-1683.]
- [12] Liang CX, Li B, Zhang YW *et al.* Bird community structure and seasonal variation in Wulanchabu, Inner Mongolia, China. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, **36**(1): 94-103. DOI: 10.13292/j.1000-4890.201701.002. [梁晨霞, 李波, 张雨薇等. 内蒙古乌兰察布地区鸟类群落结构及季节变化. 生态学杂志, 2017, **36**(1): 94-103.]
- [13] Chen HY, An LJ, Zhang JL. Characteristics of water surface area evolution and correlation analysis with meteorological factors in Bohai Lake. *Environmental Science and Management*, 2018, **43**(12): 62-65. [陈海英, 安莉娟, 张锦龙. 岱海湖水面积演变特征及与气象因子关联度分析研究. 环境科学与管理, 2018, **43**(12): 62-65.]
- [14] Wang JZ, Wu JL, Zeng HA *et al.* Changes of water resources of the main lakes in Inner Mongolia. *Arid Zone Research*,

- 2015, **32**(1): 7-14. DOI: 10.13866/j.azr.2015.01.02. [汪敬忠, 吴敬禄, 曾海鳌等. 内蒙古主要湖泊水资源及其变化分析. 干旱区研究, 2015, **32**(1): 7-14.]
- [15] Cao JT, Wang SM, Shen J *et al.* The paleoclimate changes during the past millennium Inferred from the lacustrine core in Daihai Lake, Inner Mongolia. *Scientia Geographica Sinica*, 2000, **20**(5): 391-396. [曹建廷, 王苏民, 沈吉等. 近千年来内蒙古岱海气候环境演变的湖泊沉积记录. 地理科学, 2000, **20**(5): 391-396.]
- [16] Wang YF. Lacustrine carbonate chemical sedimentation and climatic-environmental evolution—a case study of Qinghai Lake and Daihai Lake. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1993, **24**(1): 31-36. [王云飞. 青海湖、岱海的湖泊碳酸盐化学沉积与气候环境变化. 海洋与湖沼, 1993, **24**(1): 31-36.]
- [17] Li HZ, Liu QS, Wang JX. Study of evolution of Huangqihai and Daihai lakes in Holocene in Inner Mongolia plateau. *J Lake Sci*, 1992, **4**(1): 31-39 DOI: 10.18307/1992.0104. [李华章, 刘清泗, 汪家兴. 内蒙古高原黄旗海、岱海全新世湖泊演变研究. 湖泊科学, 1992, **4**(1): 31-39.]
- [18] Huang Q, Jiang JH. Analysis of water level descent in Daihai Lake. *J Lake Sci*, 1999, (4): 304-310. DOI: 10.18307/1999.0403. [黄群, 姜加虎. 岱海水位下降原因分析. 湖泊科学, 1999, (4): 304-310.]
- [19] Chen JQ, Lv J, Li N *et al.* External groundwater alleviates the degradation of closed lakes in semi-arid regions of China. *Remote Sensing*, 2019, **12**(1): 45. DOI: 10.3390/rs12010045.
- [20] Wang T, Chen JS, Xu Y *et al.* Isotopes and hydrochemistry of Daihai Lake recharging sources, Northern China. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2017, **312**(3): 615-629. DOI: 10.1007/s10967-017-5241-y.
- [21] Sun ZD, Wang R, Huang Q. Comparison of water level changes during the past 20 years between Daihai and Bositen lakes. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2006, **20**(5): 56-60. [孙占东, 王润, 黄群. 近20年博斯腾湖与岱海水位变化比较分析. 干旱区资源与环境, 2006, **20**(5): 56-60.]
- [22] Zhang Zf, You GY, Zhao YJ. Application of Markov chain model in study on periodicity of climate change in Daihai region. *Geography and Geo-Information Science*, 2010, **26**(3): 82-86. [张振锋, 游广永, 赵元杰. 基于马尔科夫链模型的岱海地区气候变化周期研究. 地理与地理信息科学, 2010, **26**(3): 82-86.]
- [23] Tilley DR, Badrinarayanan H, Rosati R *et al.* Constructed wetlands as recirculation filters in large-scale shrimp aquaculture. *Aquacultural Engineering*, 2002, **26**(2): 81-109. DOI: 10.1016/S0144-8609(02)00010-9.
- [24] Wang MJ, Du ZP, Duan ZZ *et al.* Estimating the eco-environmental water demand of a river and lake coupled ecosystem: A case study of Lake Dianchi Basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(4): 1341-1348. DOI: 10.5846/stxb201908121685. [王明净, 杜展鹏, 段仲昭等. 河湖生态系统生态用水优化研究——以滇池流域为例. 生态学报, 2021, **41**(4): 1341-1348.]
- [25] He S, Yin XA, Li H *et al.* Estimating the ecological water demand in lakes and the degree of certainty based on the Markov process. *Journal of Hydroecology*, 2020, **41**(5): 13-20. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2020.05.002. [何山, 尹心安, 李浩等. 基于马尔科夫过程的湖泊生态需水保障不确定性研究. 水生态学杂志, 2020, **41**(5): 13-20.]
- [26] Zhang L, Li LJ, Liang LQ *et al.* Progress on the research of theory and calculation method of ecological water requirement. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, **24**(7): 307-312. [张丽, 李丽娟, 梁丽乔等. 流域生态需水的理论及计算研究进展. 农业工程学报, 2008, **24**(7): 307-312.]
- [27] Liang WJ, Chun X, Liu JY *et al.* Research on the area change processes in the past 40a of Daihai Lake. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, **31**(4): 93-98. [梁文军, 春喜, 刘继遥等. 近40a 岱海湖面动态变化研究. 干旱区资源与环境, 2017, **31**(4): 93-98.]
- [28] Chen JS, Ji BC, Liu Z *et al.* Isotopic and hydro-chemical evidence on the origin of groundwater through deep-circulation ways in Lake Daihai region, Inner Mongolia plateau. *J Lake Sci*, 2013, **25**(4): 521-530. DOI: 10.18307/2013.0409. [陈建生, 季弼宸, 刘震等. 内蒙古高原岱海接受远程深循环地下水补给的环境同位素及水化学证据. 湖泊科学, 2013, **25**(4): 521-530.]
- [29] Tang CC, Zhong LS, Yang CD *et al.* Evaluation and development model for tourism resources in Liangcheng, Inner Mongolia. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, **26**(9): 195-200. [唐承财, 钟林生, 杨存栋等. 内蒙古凉城旅游资源评价与开发模式研究. 干旱区资源与环境, 2012, **26**(9): 195-200.]
- [30] Zhou YK, Jiang JH. Changes in the ecological environment in the Daihai Lake Basin over the last 50 years. *Arid Zone Research*, 2009, **26**(2): 162-168. DOI: 10.13866/j.azr.2009.02.017. [周云凯, 姜加虎. 近50年岱海生态与环境变化分析. 干旱区研究, 2009, **26**(2): 162-168.]

- [31] Cheng YQ, Zheng LJ, Fu ZQ. Analysis of cause of Daihai Lake shrinkage and water conservation recommendations. *Meteorology Journal of Inner Mongolia*, 2017, (5): 24-26. [程玉琴, 郑丽娟, 付志强. 岱海湖泊萎缩原因分析及流域生态环境保护建议. 内蒙古气象, 2017, (5): 24-26.]
- [32] Fisher A, Flood N, Danaher T. Comparing Landsat water index methods for automated water classification in eastern Australia. *Remote Sensing of Environment*, 2016, **175**: 167-182. DOI: 10.1016/j.rse.2015.12.055.
- [33] Wan B, Gao Sc, Fu X *et al.* Practical research on L-moment method of hydrologic frequency analysis. *China Rural Water and Hydropower*, 2009, (6): 63-66. [万飏, 高仕春, 付湘等. 水文频率分析的线性矩法实用化研究. 中国农村水利水电, 2009, (6): 63-66.]
- [34] Xu ZX, Chen MJ, Dong ZC. Researches on the calculation methods of the lowest ecological water level of lake. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(10): 2324-2328. [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.]
- [35] He J, Xia ZQ, Huang F *et al.* Lake ecological water level calculation based on wet, normal and dry years. *Water Resources and Power*, 2017, **35**(5): 33-36. [贺金, 夏自强, 黄峰等. 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.]
- [36] Xu ZX, Wang H, Dong ZC *et al.* Minimum ecological water requirement for Nansi Lake. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, **37**(7): 784-788. [徐志侠, 王浩, 董增川等. 南四湖湖区最小生态需水研究. 水利学报, 2006, **37**(7): 784-788.]
- [37] Yang ZF, Chen H. A dynamic hydrological method to calculate instream flow and its application. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, **26**(9): 2989-2995. [杨志峰, 陈贺. 一种动态生态环境需水计算方法及其应用. 生态学报, 2006, **26**(9): 2989-2995.]
- [38] Ladson AR, White LJ eds. An index of stream condition; reference manual. Melbourne; Department of Natural Resources and Environment, 1999.
- [39] Lan XH, Zhang XY, Zhang F *et al.* Evolution of biological community and fisheries development in Daihai Lake, Inner Mongolia. *J Lake Sci*, 2001, **13**(2): 180-186. DOI: 10.18307/20010213. [蓝学恒, 张翔宇, 张帆等. 岱海生物群落结构的演变及其对渔业发展的影响. 湖泊科学, 2001, **13**(2): 180-186.]

附表 I 基础原始图像信息
Attached Tab. I Basic original image information

卫星/传感器	遥感影像日期					
Landsat MSS	19750719	19760731	19770831	19830719	19840830	19850809
Landsat TM	19860608	19870830	19890803	19900822	19910809	19920804
	19930807	19940810	19950921	19980828	20000818	20010820
	20020823	20030819	20040828	20050925	20060912	20070814
	20080831	20090815	20110104	20110214	20110309	20110403
	20110505	20110606	20110715	20110917	20111003	20000106
	20000223	20000326	20000427	20000506	20000614	20000630
	20000826	20000902	20001004	20001105	20001207	20010124
	20010202	20010322	20010423	20010516	20010601	20010719
	20010921	20011023	20011117	20011203	20020120	20020221
	20020325	20020410	20020519	20020620	20020715	20020816
	20020917	20021026	20021111	20021205	20030224	20030328
	20030413	20030515	20030616	20030709	20030803	20030920
	20031013	20031114	20031209			
Landsat ETM+	19990824	20100713	20110808	20120819	20111112	20111207
	20021205	20030106				
Landsat OLI	20130821	20140821	20150804	20160728	20170731	20180803
	20190815	20200707				