

湖泊水位变动对水生植被的影响机理及其调控方法

刘 永, 郭怀成*, 周 丰, 王 真, 黄 凯

(北京大学环境学院, 北京 100871)

摘要: 水位的高低及其变动范围、频率、发生的时间、持续的时长和规律性等是影响湖泊水生植被的核心因子。水位变动有短期、年内季节性和年际变动 3 种, 对湖泊水生植被有不同的影响机理。水位短期变动通过对水体中的悬浮物、透明度、光衰减系数等的影响而对水生植被产生作用; 周期性的年内季节性和年际水位变动可对水生植被的生态适宜性产生影响, 并进而改变其时空分布; 长期的高水位和低水位以及非周期性的水位季节变动会破坏水生植被长期以来对水位周期性变化所产生的适应性, 从而影响了植被的正常生长、繁衍和演替。植被的极端深度和物种多样性是水位调控的核心表征指标, 可通过经验数据分析法、生态模型法和参照法等方法来确定湖泊的适宜水位变动范围和时间。研究对象选择、研究方法、管理中的应用以及重要环境变化所产生的影响等是今后相关研究的核心问题。

关键词: 水位; 水生植被; 影响机理; 水位调控; 沉水植被

文章编号: 1000-0933(2006)09-3117-10 **中图分类号:** P343.3, Q14, Q178, Q948.8 **文献标识码:** A

Role of water level fluctuation on aquatic vegetation in lakes

LIU Yong, GUO Huai-Cheng*, ZHOU Feng, WANG Zhen, HUANG Kai (College of Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(9): 3117~3126.

Abstract: This paper analyzes the impact of lake water level fluctuation on aquatic ecological systems based upon studies documented in a wide range of literatures throughout the world. Lake water level fluctuation (LWLF) plays a significant role in ecological restoration and ecosystem management. The impact of LWLF on aquatic ecological systems has been widely studied in recent years, with some of the more recent studies focused on the relationship between LWLF and aquatic vegetations, particularly submerged plants.

It is important to maintain an ecologically suitable water level to sustain a healthy lake ecosystem. An ecologically suitable water level is in general characterized by the magnitude, frequency, timing and duration of water level fluctuation. As suggested by many studies, LWLF impacts aquatic ecosystems in both direct and indirect ways, and at various scales from the very small to the ecosystem level scales. LWLF demonstrates different patterns, including short- and long-term LWLF, as well as long-term high and low water levels. Winds and waves are the dominant factors causing short-term LWLF with associated increase in total suspended solid (TSS) concentration and light extinction, which would leads to changes in aquatic and near shore vegetations. Seasonal and long-time LWLF is responsible for more significant changes in lake ecosystems. Long-term high and low water levels, and some abnormal changes in water levels can cause low species diversity or declined biomass. It is considered an important management tool for shallow lake restoration to integrate the role of LWLF into the water-level management framework. The

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2002AA601021); 国家重点基础研究发展计划项目(973)(2005CB724205)

收稿日期: 2005-11-25; **修订日期:** 2006-03-24

作者简介: 刘永(1980~), 男, 河南南阳人, 博士生, 主要从事水生态学与流域生态系统管理研究. E-mail: yongliu@pku.edu.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hcguo@pku.edu.cn

致谢: 感谢美国 Tetra Tech Inc 的 Zou Rui 博士对本文写作给予的帮助

Foundation item: The project was supported by National High Technology Research and Development Program of China (No. 2002AA601021); National Basic Research Program of China (No. 2005CB724205)

Received date: 2005-11-25; **Accepted date:** 2006-03-24

Biography: LIU Yong, Ph. D. candidate, mainly engaged in aquatic ecology and ecosystem management. E-mail: yongliu@pku.edu.cn

maximum bio-suitable water depth and species diversity index are taken as indicators for water level control. The magnitude, frequency, timing and duration of LWLF need to be adjusted for lake restoration. The main study methods, including statistical analysis of long-time historical data, ecological modelling approach and reference lake approach, are proposed in recent studies. The basic water level control measures include: (1) reducing frequency of flow variation; (2) increasing seasonal variation and avoid extreme conditions; (3) reintroducing seasonal flow peaks; (4) increasing seasonal high flows; (5) reducing high flows, especially those badly timed; and (6) reducing intensity of water-level change.

Several limitations in the past studies on this topic are identified as: (1) absence of studies on the effects of LWLF on overall aquatic ecosystems; (2) lack of comprehensive ecological modeling studies to quantify the impact of LWLF; (3) lack of sufficient attention to the role of water level control in lake management; and (4) lack of studies on the effects of global warming on LWLF and lake ecosystem. Based on the intensive literature review, this paper presents some potential research directions and methods for water level control and lake ecosystem response.

Key words: water level; aquatic vegetation; influence mechanism; water level management; submerged vegetation

湖泊的水文过程,如:水流、水温分层以及水位的时空变动等^[1~4],决定了湖泊生态系统的结构和功能,是生态恢复和生态管理研究中关注的重要问题之一。其中,水位变动是影响湖泊生态系统状态长期变化的最主要因素^[5]。

从 1940 年代开始,已有少部分学者以水位变动与水生生物的关系为对象开展研究^[6],如:水位降低与渔业管理^[7]。但受制于相关基础理论研究的局限以及在资料收集上的不足,这一时期的研究还主要侧重于对实验数据的简单分析。1980 年代中后期以来,随着淡水生态学研究的深入,以及对水文过程在湖泊生态恢复中重要性的认识,加之长时间序列的水文和湖泊生态系统方面基础数据的积累,相关方面的研究在美国、加拿大、荷兰、新西兰等国家得到了进一步的发展,关注的焦点转向自然的和人工调控的水文过程对湖泊生态系统的影响,并试图通过实验研究提出适宜的人工水文调控方法^[3,8~13]。在 2002 年 5 月匈牙利 Balatonf üed 举行的 ShallowLakes 2002 会议上,召开了一个有关“浅水湖泊生态系统中的水位变动”(water-level fluctuations in shallow lake ecosystems)的圆桌会议,以探讨目前在相关方面的研究和未来的可能进展以及气候变化的可能影响^[9]。在国内,从 1990 年代中后期开始,也有少数研究关注于确定湖泊的生态水位^[14~20]。

鉴于湖泊生态系统的复杂性,目前尚无法评价和分析水位变动对其所有的影响,而只能识别出影响的主要方面。根据湖泊生态系统的空间组成,主要选择生物多样性高、受水位变动影响大、处于食物链初级生产者地位的水生植被作为直接研究对象,进而分析对湖泊生态系统组成和功能的影响^[9]。此外,也有研究者以湿地和河流的滨水区为对象开展水文过程与生态系统适应性的相关研究^[10~12]。由于湖泊与湿地和河流在水生植被的空间分布和构成上的相似性,本文在研究湖泊水位对水生植被的影响时,也借鉴了湿地和河流在相关方面的研究成果^[13]。

目前的研究在水位变动与水生植被影响方面取得了一定的进展,但由于水位变动的非线性特征,尚存在许多问题^[9]。本文对湖泊中主要影响水生植被的水位过程进行了阐述,并重点分析其影响机理和湖泊水位的调控技术方法。

1 湖泊中的水位变动

水位是湖泊贮水量变化的度量^[16],对于湖泊生态系统而言,存在着一个适宜水位。在此水位下,湖泊中的物种和群落可正常生存、繁衍和演替,生态系统的结构和功能可得到维系,生物完整性和生态系统的健康状况能得以保障。适宜水位并非恒定值,而是一个数值区间,包含了水位变动的范围、频率、发生时间、持续时间及其他规律性等重要信息^[21~24]。

湖泊中的水位变动有很强的时空分布特征。就时间特征而言,可分为短期、年内季节性和年际变动 3 种,以此可将湖泊分为年内(Intra-annual)变化型和年际(Inter-annual)变化型两种^[7]。年内变化型的特点是湖泊在一个水文年内的季节间会有较大的水位落差,而年际间的平均水位变差并不十分明显;年际变化型则主要反

映在年际间的平均水位变差很大,但同一个水文年内则相差不大^[3,25]。

湖泊水位变动的空间特征集中体现在其所受外部条件影响在大空间尺度上的差异性,以及在同一个水文分区内的相对一致性。自然湖泊的水位变动主要受制于其流域面积、降水以及地形、地势等自然条件的影响^[9],因此不同的水文分区内,水位的变动会呈现出很大的差异性;而在自然条件相似的同一个水文分区内,水位的变动会遵循一定的规律性,如:Hill 等对加拿大境内地处温带的 37 个自然湖泊进行了研究,分析得到年内水位变幅 y (cm) 与流域面积 A (km^2) 的关系式^[26]:

$$y = e^{(2.72+0.45\log A)} \quad (N = 9, p < 0.001, R^2 = 0.86) \quad (1)$$

由式(1)可知,在同一个水文分区内,湖泊水位的年内变动与流域面积呈正相关关系。此外,湖泊的水位变动还受湖泊年龄的影响,对于存在时间长的湖泊,底质中主要是粘土,防渗的效果好,从而使得湖泊的水位变动要小于底质以沙土为主的、相对年龄小的湖泊^[27,28]。

但由于人为的扰动,在受人工调控的湖泊和水库中,流域面积、降水、地形和地势等自然要素只能影响入湖的水量,而人为的功能定位,如:发电、灌溉、防洪、供水等,才是最终影响水位及其变差范围和时空变化特征的决定性因子^[9]。

2 湖泊水位变动对水生植被的影响机理

2.1 影响分类

水位变动是影响湖泊水生植被的一种重要扰动因子^[5]。从植被演替的角度分析,湖泊中的植物需要外界在一定范围内的、有周期性的扰动,以维系其群落发展。目前现存的湖泊植被群落也同样是经历了长期的扰动适应后而形成的,具有特有的结构和功能时空分布^[29]。

湖泊水位变动的影响可涵盖从小的植物个体到大的种群和群落分布这一连续过程^[26],但其影响因物种而异^[7],主要表现为两方面:①直接影响,表现在对水生生物生长及对种群间竞争关系的影响^[3,8,30];②间接影响,由于水位变化导致了水体中的物化条件,如透明度、浊度、盐度、pH、悬浮与沉降以及 DO 等发生变化^[6,32],对那些以水生植被为食的生物产生了影响,进而间接地减小或增大了水生植被啃食的压力^[33,34],改变了水生植被的时空分布^[35~38]。就作用机理而言,主要是分析水位变动对植物生理生态适宜性的影响。

2.2 水位短期变动的影响机理

湖水周期性和非周期性的运动,如:重力流、风生流和密度流等,是水位短期发生变化的最重要影响因素。综合目前的研究,水位短期变动的机理主要是通过对湖泊水体和底质物理化学性质的影响而间接产生作用的。在上述的短期湖泊水文过程变动影响下,湖泊中的底质会发生再悬浮,使得水体中的悬浮物浓度增加、透明度降低、光衰减系数(k_d)增大,从而对沉水和浮游植物的生长产生负面影响,典型的例子有太湖^[39,40]和加拿大的 6 个湖泊^[41]等,如:在太湖富营养化程度相对较轻、藻类密度低的区域,透明度的变化基本上都取决于水位短期变化所引起的悬浮物浓度的变化^[39,40]。

2.3 水位年内和年际周期性变动的影响机理

根据目前的研究,水位年内和年际周期性变动的影响机理主要表现在:不同的水生植物对水位的年内和年际变动有不同的适应性,因此水位的变动可对水生植被的生态适宜性产生影响,并进而改变其时空分布。以植被分布最多的湖滨带为例,水位的周期性变动可显著影响湖滨带植物群落的组成和分布^[26]。当年内和年际变幅降低时,会减小湖滨带的宽度,使得水生和湿生生物的分布范围萎缩,木本植物则会挤占部分近岸地区^[4]。

在年际变化型湖泊中,多年生的植物有更大的生存空间,因为它们相对 1 年生的植物而言更需要水位的短期稳定。而在年内变化型湖泊中,1 年生的植物对于有规律性的水位季节性变动而言有更强的适应性,在低水位萌芽、生长,在高水位发育,在一个水文年内完成生命周期;但对于多年生植物,只有那些能适应水位短期剧烈变动的物种才能在季节性的水位变动中生存下来,否则它们原有的生存范围将会萎缩并被相邻生态位的物种所占据^[3,25]。

2.4 水位非规律性变动的影响机理

如前所述,湖泊生态系统需要外界在一定范围内的扰动,但如果水位变化不适宜,则会带来负面后果,主要表现在长期的高、低水位以及水位的不正常变动。特别是为适应人类的某些特殊需要,如:水库发电和防洪而对水位进行的人工调控。由于这些扰动幅度过强且无规则,会严重破坏湖滨带水生植被的多样性和分布的稳定性^[3,16,26]。此外,水位的长期稳定,特别是人为控制使水位维持在一定的水平,会促使水生植被朝着某一方竞争和演替,从而在一定阶段后形成相对稳定的群落形态和组成;与同类湖泊相比,水位长期稳定而缺乏变动的湖泊中物种的多样性也相对较低^[27,28]。综上,非规律性水位变动的影响机理主要反映在对水生植被适应性的改变,当上述水位过程发生时,会破坏水生植被长期以来对水位周期性变化所产生的适应性,从而影响了植被的正常生长、繁衍和演替。

(1) 长期高水位 湖泊中的长期高水位可增加敞水区的面积,湿生、挺水和沉水植被的分布范围向近岸区域扩展,而从深水区域收缩,并引起一些适宜高水位的外来物种的大量繁衍,降低了物种多样性^[4],进而影响了依靠这些植被提供栖息环境和食物来源的其他生物。水位的上升还会增加波浪对堤岸的侵蚀^[3,16,42],降低底质中的 DO 含量、增大磷(P)的释放率,水体中的营养物质可能会随之增加。对于浮游植物而言,高水位会引致生物量的降低^[43]。此外,长时间的高水位还会影响陆生植被,导致耐水的草本和木本植物占据湖滨带浅水区,从而抑止了水生生物的萌芽和生长;而其他陆生植被的分布范围则会向陆域方向转移。

(2) 长期低水位 长期维持较低的水位会减小敞水区和湖滨带的面积,使得水温 and 盐度上升,陆生生态系统内移,沉水和挺水植被的分布向湖心方向扩展,无脊椎动物和鱼类等的栖息地范围减小,大型植物的生物量减小^[7,44],与此对应的是生物多样性和生产力的降低^[3]。

(3) 非周期性的水位季节变动 湖泊现存的植被类型是对水位长期变动的适应,因此不正常的水位变异将会产生负面的影响,如:早春的高水位会导致沉水植被的无法正常萌芽和生长^[24]。对于有冰期的湖泊,冬季不正常的高水位会导致冰面扩大,影响多年生植被种子的休眠和呼吸;而冬季不正常的低水位会破坏湖滨带的植物根系^[45]。

3 湖泊适宜水位及其调控方法

根据对水位影响机理的分析,水位对水生植被的影响非常复杂,因此在依据机理对水位进行调控时,需选择合适的评价对象和指标、分析主要的影响因素,并在此基础上提出确定适宜水位的研究方法以及水位调控的策略和技术方法。

3.1 水位调控的评价对象与指标选择

在目前湖泊普遍被人工干扰的情况下,对水位进行调控是湖泊生态恢复与管理中的重要技术^[7,9,20,46~49],主要包括水位及其变动的幅度和时间等。由于生态系统的复杂性,在分析水位变动与适应性管理对策时,需选定评价对象与指标。在目前的研究中,考虑到受水位变动的影响程度,多选用水生植被作为水位调控效果的评价对象,以生物量、生产力、丰度、极端水深(Z_c)和物种多样性等为评价指标,其中以 Z_c 和物种多样性指数为主^[50]。

3.2 水位调控的影响因素分析

在水位调控中,有 3 个重要的影响因素:①不同植被自身生存对水深的要求,也即适宜水深和 Z_c ,它们反映了植被的生理需求;②湖泊生态系统多样性的维系,在此以受水位变幅影响较大的物种多样性来表征;③人为需要。由于本文研究范围所限,仅以前两种因素为主进行分析,对人为需要不做过多阐释。

(1) 不同植物分布的适宜和极端水深 植物的适宜水深是其生存的最基本条件,不同的水生和陆生植被物种有不同的适宜水深,是直接影响水位调控方式和幅度的重要因素。沉水植物、大型挺水植物、浮水植物、湿草甸以及灌木/陆生植物的适宜水深分别为:60~200cm、-30~-50cm、30~60cm、-50~-80cm 和 -80~-100/-100cm(负值表示为水面以上)^[24]。由于沉水植被更易受到水位高低的影响,对其 Z_c 的分析更能反映植被分布水深对水位调控的影响。

根据在太湖五里湖^[51]、洪泽湖^[52]、美国 Okeechobee 湖^[48]、武汉东湖^[53] 的研究,沉水植被的 Z_c 取决于水位、浊度、有效的风浪区长度、地表辐射与水下光强、水体静压、水色、温度、被捕食的压力、底质类型以及周从生物量等因素,尤以水位和 underwater 光强最为重要^[48, 54~58],而水位又直接影响水下光强的大小。

光衰减系数(k_d)是反映水位与水下光强关系的重要参数,除水位外,它还受湖泊中物化和生物等多种因素的制约,其中水生植被和风力的影响具有季节性,而悬浮物质的影响则是永久的,但其影响程度的大小受气象条件的制约^[39, 59, 60],风浪也会在一定的时间段内对沉水植被的分布产生重要影响^[48]。据对 Okeechobee 湖所进行的一项为期 3a 的调查^[48],沉水植被与水深、总悬浮物、非挥发性悬浮固体颗粒、Chla 以及水色等之间存在负相关关系;与透明度和水温间存在正相关关系,上述结论同其他相关的研究结论^[40, 58] 是吻合的。另据对 45 个丹麦湖泊和 108 个非丹麦湖泊中 5 类沉水植被适宜水位的分析,沉水植被的光需求随纬度的增大而增加,纬度每增加 1° ,光需求平均增大值为地表辐射的 0.04%,而 Z_c 则降低 0.12m^[55]。因此对于处于严重富营养化和浊度较高的湖泊,改善水下光照条件以促进沉水植被恢复的最有效办法就是降低水位^[49, 53]。

(2) 水位变幅与水生植被的物种多样性 研究表明,人工过大或过小改变水位变差的幅度会引起水生植被的丰度和稀有物种的降低。Hellsten 和 Riihimaki 对芬兰的两个湖泊研究发现,相对于自然湖泊,受人工调控的湖泊中尽管物种丰度大,但多样性小^[61]。另据在加拿大和新西兰的研究,随着水位变动范围的增加,物种多样性呈上升趋势;但变动范围过大,则多样性又会下降^[3, 7, 26, 62]。由上,对于水生植被而言,存在着一个最适的水位变差,因此人工调控需要可能去模拟自然状态下的水位变动^[12],使其维持在一个适宜的范围之内^[32]。

van Geest 等以莱茵河流域内荷兰境内的 215 个洪泛湖泊为对象,对 1999~2000 年水生植被与湖泊水位的变动关系进行了分析^[27, 28]。通过统计处理,发现植被的多样性与湖泊形态、年龄以及外界干扰、河流洪水期的次数以及湖泊底质暴露在低水位中的时间等息息相关,其中湖泊年龄和低水位更为重要。对于物种分布而言,年轻湖泊湖滨带中主要是耐干旱的物种,而对于形成时间较长的湖泊,干旱敏感性的物种则占主导^[45]。

Nilsson 在分析瑞典北部的水库时发现,当河流中的水位被人为调控、变幅减小后,对比相邻区域的自由流动的河流而言,河岸带的物种数量明显下降。尽管物种密度基本相同,但物种类型有明显差异,由于水位和水流态的改变,使物种多样性发生了很大变化^[63]。同样,在 Hill 等的研究中,季节性水位变动幅度的增大会促进滨水区植被丰度的上升;与自然状态的湖泊相比,人工调控湖泊(水库)的物种丰度更高,外来种和草本植物的比例更大,但湖滨带灌木类植被和稀有物种的出现频率要低;就外来物种而言,自然湖泊中的外来物种数量要远低于受人工调控的湖泊和水库;流域面积小且农田比例大的湖泊要远高于流域面积大和森林覆盖率高的湖泊^[26]。

3.3 确定适宜水位的研究方法

对于有长时间序列监测数据的湖泊,适宜水位的确定可通过简单的绘制水位与水生植被的物种丰度或多样性指数、生产力等的相关关系图来经验确定^[3, 13, 16, 64, 65],如:美国大湖通过 1927~1980 年的水位与对应的植物分布来确定不同植被分布的水位。但在分析中,还需同时考虑到其他因素对水生植被的可能影响^[66]。水生植被多样性和生产力的相关数据需在收集一系列植被数据的基础上通过计算和分析得到,包括定位样方内通过连续取样获得的总的发芽密度、物种数量和丰度、Shannon 指数和 Simpson 指数等^[67]。

3.4 适宜水位的调控策略与技术方法

(1) 水位调控的基本策略 如上所述,水位变动的幅度、频率、时机、持续时间以及变化率等均会对水生植被产生影响,表 1 所示为水位调控的基本策略^[24, 64]。

(2) 水位调控的技术方法 确定适宜的水位变幅和变动时间是湖泊水位调控的首要目标,方法主要有经验数据分析法、生态模型法和参照法等。经验数据分析法是通过收集湖泊长期的水位和植被数据信息而得到湖泊的适宜水位,主要适用于受人工干扰相对较小的湖泊。

生态模型法需要建立水位与典型植被分布的关联模型,在模型验证的基础上为水位调控提供依据,如:Coops 等在对荷兰 Volkerak-Zoommeer 湖的研究中,根据实验数据建立了水位变化与芦苇分布的模型(2 式)^[68]。

由式(2)可知,芦苇的生物量随着水位的增加而降低,在芦苇生长季节里,水位的适度降低可为芦苇的生长提供稳定的生长和发育环境。但由于目前尚无法建立水位与所有水生植被间的关系模型,因而制约了生态模型法的适用范围。

表1 水位变动与湖泊水生植被的响应及基本调控策略

Table 1 Aquatic vegetation responses to water level fluctuation and the corresponding control measures			
指标 Indicator	水位变动特征 Water level fluctuation	水生植被的生态响应 Aquatic vegetation responses	调控与管理策略 Control measures
幅度、频率 Magnitude, frequency	变化幅度过大 Increased variation	对水生植被湖岸以及底质的冲刷加剧 Increased scour and washout of plants and organic matter	减小变化的幅度 Reduce frequency of flow variation
	水文过程过于稳定 Stabilized flow	外来物种入侵,物种多样性降低 Invasion of exotic plants; reduced diversity	增加年内季节性变幅,消除外来种 Increase seasonal variation; remove exotics
时机 Timing	季节性水位峰值次数减少 Loss of seasonal flow peaks	植被发育和生长率减小 Reduced plant recruitment and plant growth rates	重新调控使其出现季节性水位峰值 Reintroduce seasonal flow peaks
		外来物种入侵、湖滨带萎缩 Invasion of exotic plants; atrophied riparian areas	消除外来种,水位调控 Remove exotics; water level control
持续时间 Duration	长期维持在低水位 Prolonged low flows	减小植被覆盖度和多样性 Reduced plant cover and diversity	增加季节性的高流量 Increase seasonal high flows
	长期维持在高水位 Prolonged inundation	植被生长率下降、形态改变、死亡率增加;植被群落改变 Reduced plant growth rates, morphological change, and mortality; altered plant communities	减少高流量及其持续时间 Reduce high flows, especially when badly timed
变化率 Rate of change	过快 Rapid changes	湖滨带植被受到冲刷、幼苗难以存活 Washout of riparian plants, failed seedling establishment	减小水位变化率 Reduce rates of water-level change

$$\frac{dR}{dt} = rR \left(1 - \frac{R}{K} \right) - L \frac{D^p}{D^p + h_D^p} \quad (2)$$

式中, R 为根茎生物量 (g DW m^{-2}); r 为最大生长率 (d^{-1}); K 为承载力 (g DW m^{-2}); L 为生物量损失的最大深度 (m); D 为水深 (m); h_D 为生物量损失的半饱和深度 (m); p 为常数, 该研究中取值 4。

对于缺乏历史监测数据的湖泊而言, 可通过参照法来确定适宜的水位变幅和变动的时间。根据相关的研究, 水位在年际之间应该保持波动, 水生植被也更易适应年内型湖泊的水位季节性变化^[8,65]。根据相关研究^[8,24,36,65], 要维系湖滨带的植物多样性和丰度, 可参照并采用如下的调控方法: ①水位年内变动, 最适宜的水位变幅为 1.0m, 变化时间 1 个月为宜, 最大不能超过 2 个月; ②水位年际变动, 小型湖泊 10a 间的年际变幅可限定在 1.0~4.0m, 大型湖泊可稍大些; ③水位变差, 年内要维持在 1.0~2.0m, 年际维持在年内变差幅度的 25% 之内; ④水位峰值, 季节性的水位峰值会对水生植被的生长产生影响, 在春季, 高水位可有效抑制灌木和木本植物等对湖滨区的侵占, 但在水生植物的生长期, 水位需降低 0.5~1.0m; 在夏季, 与夏末相比, 夏初出现高水位更能促进挺水植被的生长。参照法可以为粗略确定水位调控策略提供支持, 但精确度较差且缺乏针对性。

3.5 植被恢复过程中的水位调控

对于植被退化的湖泊, 水生植被的恢复需要同水位的调控结合起来实施, 而且需要较长时间的调控。在 Okeechobee 湖的研究中发现, 经历了长期的高水位后, 水位的降低并不会带来沉水植被的直接和快速恢复; 水位降低后首先经历的是藻类(如轮藻 *Chara*) 的优势期, 使水质得以净化, 透明度得以提升, 悬浮颗粒物的浓度得以下降, 其后由于外界因素(如: 风力) 的干扰结束了藻类的优势期后, 才会有沉水植被的恢复(表 2)^[69,70]。

4 讨论与研究展望

上述研究为了解水位变动对湖泊水生植被的影响奠定了基础, 也为在管理中实施水位调控提供了决策依据, 但仍存在一些问题: (1) 研究对象的选择以水生植被为核心、多局限于沉水植被, 尚缺乏在生态系统层次上的综合研究^[6,36,68]; (2) 研究方法上以定性分析和简单的数理统计为主, 定量模型的研究不足; (3) 在水生植被

的水分胁迫方面^[71]的研究进展不大,对重要物种的关注不够^[72]; (4) 水位调控在湖泊生态恢复和管理中的重要作用亟需加强^[73~75]; (5) 需加强重大环境变化对水位与湖泊生态系统的影响研究^[24, 32]。

表2 Okeechobee 湖 1995~2003 年水位变动与适应性的水生植被恢复

Table 2 Hydrologic changes and aquatic vegetation responses in Lake Okeechobee from 1999 to 2003			
年份 Year	水位特征 Water level	水深(m) Water depth	水生植被的响应 Aquatic vegetation responses
1995~1999	持续高水位 Prolonged deep water	5.2	生物量降低;沉水植被向陆域方向扩展;挺水植被萎缩;高浊度;藻类暴发 Reduced biomass; reduced extent of emergent plants; high turbidity, algal blooms
2000	浅水 Shallow water	3.7(春季 Spring)	轮藻盛行;透明度增加;稀疏的维管束植物萌芽 Ddevelopment of Chara lawns; increased transparency; sparse vascular plant germination
2001	极端低水位 Extreme shallow water	2.8 (夏季 Summer)	轮藻继续占据主导;挺水植被和陆地植被开始发育 Ccontinued Chara dominance; germination of emergent aquatics and terrestrials
2002	适宜水深 Moderate water depths	4.0	轮藻生物量下降;维管束沉水植被的急剧增长;挺水植被范围延展 Decline of Chara; dramatic increase of vascular submerged aquatic vegetation (SAV); development of emergent stands
2003	深水 Deeper water	4.5~5.0	沉水植被空间范围萎缩 Some loss of SAV spatial extent

根据上述分析,需在研究对象选择、研究方法、对重要物种的影响机理、管理中的应用以及重要环境变化产生的影响等方面开展深入研究。

(1) 研究对象选择。从以水生植被为核心向水生生物和整个生态系统扩展。水位变动会改变湖泊水体和底质的物理化学特征和基本水文过程,并进而影响 N、P 等营养物质的循环和一些主要的生态过程,因此可通过建立生态模型,模拟水位变动对营养物质循环和关键生态过程所产生的影响,以此来定量分析水位变动对湖泊生态系统的整体效应。

(2) 研究方法。在目前的经验数据分析法、生态模型法和参照法的基础上,进一步探究水位变动与生态系统响应的基本机理,从生态水文学的角度分析不同生物种群生长发育以及生态系统演替与水位和水分胁迫的直接关系,并建立概念模型和定量模型。此外,要加强对不同水文分区内湖泊适宜水位的收集和数据库的建立,完善参照法的参考依据。

(3) 重要物种影响机理的研究。水位变动对物种的影响有其相似性和差异性,因此在不同的湖泊中需单独识别对重要物种的影响机理以及适应性的调控机理。此外,也可以通过上述研究,根据不同物种对水位变动的反应所存在的差异,利用水位调控来改变部分物种的分布和数量,并通过食物网以达到改变湖泊生态系统结构和功能的目的。

(4) 加强水位调控在湖泊管理中的重要作用。在全球湖泊富营养化和污染加重的情况下,生态修复和生态系统管理成为新的研究热点,加强水位调控在湖泊和湖滨湿地恢复与治理中的作用,建立确定适宜水位的技术方法,以及在水文和生态分区内确定适宜水位和人工调控水位的标准,是今后一定时期内研究的前沿问题。在湖泊的生态修复和植被恢复中,要研究并分析水位变动所可能产生的影响,通过不同时段的水位调控来辅助于生态恢复进程。

(5) 重要环境变化的影响研究。全球气候变化会极大地改变湖泊所在区域的降水、蒸发、水文循环过程以及人为的水资源开发强度,从而改变湖泊中的水量和水位。因此要在在全球气候变化的背景下,关注和分析全球变化对湖泊水位变异以及生态系统的影响,如:水温升高、蒸发量加大、夏季降雨减少等自然现象所导致的湖泊水位下降,从而可能对水生生物群落的分布格局、多样性,乃至对生态系统的结构和功能产生不可逆的影响。

References :

[1] Keddy P A. Shoreline vegetation in Axe lake , Ontario : effects of exposure on zonation patterns. Ecology , 1983 , 64 (2) : 331~344.
[2] Keddy P A , Constabel P. Germination of ten shoreline plants in relation to seed size , soil particle size and water level : an experimental study. The Journal

- of Ecology, 1986, 74(1) : 133~141.
- [3] Keddy P A, Reznicek A A. Great lakes vegetation dynamics: the role of fluctuating water levels and buried seeds. *Journal of Great Lakes Research*, 1986, 12:26~36.
- [4] Toner M, Keddy P. River hydrology and riparian wetlands: A predictive model for ecological assembly. *Ecological Applications*, 1997, 7:236~246.
- [5] Nöges T, Nöges P. The effect of extreme water level decrease on hydrochemistry and phytoplankton in a shallow eutrophic lake. *Hydrobiologia*, 1999, 409: 277~283.
- [6] Harris S W, Marshall W H. Ecology of water-level manipulations on a northern marsh. *Ecology*, 1963, 44(2) : 331~343.
- [7] Cooke G D, Welch E B, Peterson S. Restoration and management of lakes and reservoirs (2nd). Boca Raton, Fla. : Lewis Publishers, 1993. 269~293.
- [8] Tenna R, Ian H. Relationships between water level fluctuations and vegetation diversity in shallow water of New Zealand lakes. *Aquatic Botany*, 2002, 74 (2) : 133~148.
- [9] Coops H, Beklioglu M, Crisman T L. The role of water-level fluctuations in shallow lake ecosystems-workshop conclusions. *Hydrobiologia*, 2003, 506 (1-3) : 23~27.
- [10] Laine J, Vasander H, Laiho R. Long-term effects of water level drawdown on the vegetation of drained pine mires in Southern Finland. *The Journal of Applied Ecology*, 1995, 32(4) : 785~802.
- [11] Keeland B D, Sharitz R R. The effects of water-level fluctuations on weekly tree growth in a southeastern usa swamp. *American Journal of Botany*, 1997, 84(1) : 131~139.
- [12] Jansson, R, Nilsson C, Dynesius M, *et al.* Effects of river regulation on river-margin vegetation: a comparison of eight boreal rivers. *Ecological Application*, 2000, 10: 203~224.
- [13] Keddy P A. Wetland ecology: principles and conservation. New York: Cambridge University Press, 2000. 178~221.
- [14] Ma D M, Zhang Y T, Zhao Y K, *et al.* Ecological control of Baiyangdian Lake. *Geography And Territorial Research*, 1996, 12:17~21.
- [15] Hu X Y, Xiong X Y. Water level character and wetland ecological conservation of Poyang Lake. *Jiangxi Forestry Science and Technology*, 2002, 5:1~4.
- [16] Xia J, Zuo Q T, Shao M C. Sustainable usage of water resource for Bositeng Lake. Beijing: Science Press, 2003.
- [17] Xiong X Y, Hu X Y. The Poyang Lake control project and wetland ecosystem protection. *Tropical Geography*, 2003, 23:105~109.
- [18] Yu D Y, Jia L. Discussion of water level in Hongze Lake. *Water Resources Planning and Design*, 2005, 2:56~60.
- [19] Xu Z X, Chen M J, Dong Z C. Researches on the calculation methods of the lowest ecological water level of lake. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(10) : 2324~2327.
- [20] Zhao X, Cui B S, Yang Z F. A study of the lowest ecological water level of Baiyangdian Lake. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25 (5) : 1033~1040.
- [21] De Emiliani M O G. Effects of water level fluctuations on phytoplankton in a river-floodplain lake system (Parana River, Argentina). *Hydrobiologia*, 1997, 357: 1~15.
- [22] Wang H Y, Chen J K, Zhou J. Influence of water level gradient on plant growth, reproduction and biomass allocation of wetland plant species. *Acta Phytocologica Sinica*, 1999, 23(3) :269~274.
- [23] Lenssen J P M, Menting F B J, van der Putten W H, *et al.* Effects of sediment type and water level on biomass production of wetland plant species. *Aquatic Botany*, 1999, 64 (2) : 151~165.
- [24] Andrea J H. Implementation of a GIS to assess the effects of water level fluctuations on the wetland complex at Long Point, Ontario. Waterloo: University of Waterloo, 2003.
- [25] Fernández-Alcázar Camino, Fernández-Alcázar Margarita, Bécáres Eloy. Influence of water level fluctuation on the structure and composition of the macrophyte vegetation in two small temporary lakes in the northwest of Spain. *Hydrobiologia*, 1999, 415: 155~162.
- [26] Hill N M, Keddy P A, Wisheu I C. A hydrological model for predicting the effects of dams on the shoreline vegetation of lakes and reservoirs. *Environmental Management*, 1998, 22 (5) : 723~736.
- [27] van Geest G J, Coops H, Roijackers R M M, *et al.* Succession of aquatic vegetation driven by reduced water-level fluctuations in floodplain lakes. *Journal of Applied Ecology*, 2005, 42 (2) : 251~260.
- [28] van Geest G J, Wolters H, Roozen F C J M, *et al.* Water-level fluctuations affect macrophyte richness in floodplain lakes. *Hydrobiologia*, 2005, 539:239~248.
- [29] White P S. Pattern, process and natural disturbance in vegetation. *The Botanical Review*, 1979, 45: 229~299.
- [30] Wilson S D, Keddy P A. Plant zonation on a shoreline gradient: physiological response curves of component species. *Journal of Ecology*, 1985, 73:851~860.
- [31] Nöges P, Tuvikene L, Nöges T, *et al.* Primary production, sedimentation and resuspension in large shallow Lake Võrtsjärv. *Aquatic Sciences*, 1999, 61 (2) : 168~182.
- [32] Limno-Tech, Inc. (LTI), Michel Slivitzky. Ecological impacts of water use and changes in levels and flows: a literature review. The Great Lakes

- Commission, 2002. http://www.glc.org/waterruse/wrmdss/finalreport/pdf/Final_Review.pdf
- [33] Geraldes A M, Boavida M J. Seasonal water level fluctuations seasonal water level fluctuations: implications for reservoir limnology and management. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 2005, 10: 59~69.
- [34] Naselli F L, Barone R a. Importance of water level fluctuation on population dynamics of cladocerans in a hypertrophic reservoir (Lake Arancio, southwest Sicily, Italy). *Hydrobiologia*, 1997, 360: 223~232.
- [35] Liu J K. *Advanced Hydrobiology*. Beijing: Science Press, 1999.
- [36] Zalocar de Domitrovic. Effect of fluctuations in water level on phytoplankton development in three lakes of the Paran^a river floodplain (Argentina). *Hydrobiologia*, 2003, 510: 175~193.
- [37] Carvalho P, Thomaz S M, Bini L M. Effects of water level, abiotic and biotic factors on bacterioplankton abundance in lagoons of a tropical floodplain (Paran^a River, Brazil). *Hydrobiologia*, 2003, 510: 67~74.
- [38] Kisand V, Nöges T. Abiotic and biotic factors regulating dynamics of bacterioplankton in a large shallow lake. *Fems Microbiology Ecology*, 2004, 50 (1): 51~62.
- [39] Zhang Y L, Qin B Q, Chen W M, *et al.* Distribution, seasonal variation and correlation analysis of the transparency in Taihu Lake. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2003, 2: 30~36.
- [40] Zhang Y L, Qin B Q, Chen W M, *et al.* Regression analysis of beam attenuation coefficient under water in Lake Taihu. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2004, 35(3): 209~213.
- [41] Scott D W, Paul A K. Plant Zonation on a Shoreline Gradient: Physiological Response Curves of Component Species. *The Journal of Ecology*, 1985, 73 (3): 851~860.
- [42] Wallsten M, Forsgren P O. The effects of increased water level on aquatic macrophytes. *Journal of Aquatic Plant Management*, 1989, 27: 32~37.
- [43] Nöges T, Nöges P, Laugaste R. Water level as the mediator between climate change and phytoplankton composition in a large shallow temperate lake. *Hydrobiologia*, 2003, 506: 257~263.
- [44] Richardson S M, Hanson J M, Locke A. Effects of impoundment and water-level fluctuations on macrophyte and macroinvertebrate communities of a dammed tidal river. *Aquatic Ecology*, 2002, 36: 493~510.
- [45] van Geest G J, Roozen F C J M, Coops H, *et al.* Vegetation abundance in lowland flood plain lakes determined by surface area, age and connectivity. *Freshwater Biology*, 2003, 48 (3): 440~454.
- [46] Coops H, Hoeser S H. Water-level management as a tool for the restoration of shallow lakes in the Netherlands. *Lake and Reservoir Management*, 2002, 18: 292~297.
- [47] Flynn K M, Mendelsohn I A, Wilsey B J. The effect of water level management on the soils and vegetation of two coastal *Louisiana marshes*. *Wetlands Ecology and Management*, 1999, 7: 193~218.
- [48] Havens K E. Submerged aquatic vegetation correlations with depth and light attenuating materials in a shallow subtropical lake. *Hydrobiologia*, 2003, 493: 173~186.
- [49] Gu B H. Eutrophication and restoration of Lake Apopka, USA. *Journal of Lake Sciences*, 2005, 17(1): 1~8.
- [50] Hill N M, Keddy P A. Prediction of rarities from habitat variables. Coastal plain plants of Nova Scotian lakeshores. *Ecology*, 1992, 73(5): 1852~1859.
- [51] Li W C. Ecological restoration of shallow eutrophic lakes-experimental studies on the recovery of aquatic vegetation in Wuli Lake. *Journal of Lake Sciences*, 1996, 8(Supp): 1~10.
- [52] Zhou W P, Guo X M, Chen W M, *et al.* Prediction of effects of first stage project of eastern route south-to-north water transfer from the Changjiang River on aquatic organism and ecological environment in Hongze Lake. *Journal of Lake Sciences*, 1994, 6(2): 131~135.
- [53] Qiu D R, Wu Z B, Liu B Y, *et al.* Ecological studies on aquatic macrophytes in Lake Donghu, Wuhan. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 1997, 15 (2): 123~130.
- [54] Ren N, Yan G A, Ma J M, *et al.* The study on the influence of environmental factors of the submerged macrophytes in the East Lake. *Journal of Wuhan University (Natural Science Edition)*, 1996, 42(2): 213~218.
- [55] Middelboe A L, Markager S. Depth limits and minimum light requirements of freshwater macrophytes. *Freshwater Biology*, 1997, 37 (3): 553~568.
- [56] Zhang Y L, Qin B Q, Chen W M. Advances and main applications of lake optics research. *Advances in Water Science*, 2003, 14(5): 653~659.
- [57] van den Berg M S, Joosse W, Coops H. A statistical model predicting the occurrence and dynamics of submerged macrophytes in shallow lakes in the Netherlands. *Hydrobiologia*, 2003, 506: 611~623.
- [58] Zhang Y L, Qin B Q, Chen W M, *et al.* Chlorophyll a content and primary productivity of phytoplankton in Meiliang Bay of Taihu Lake. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 25(11): 2127~2131.
- [59] Yang Q X. Studies on the interaction of submerged plant and phytoplankton in eutrophic waters. *Journal of Lake Sciences*, 1996, 8(Supp): 17~24.
- [60] Li W C. A conceptual model for predicting and managing vegetative types in shallow lakes. *Ecological Engineering*, 1998, 10: 165~178.

- [61] Hellsten S, Riihimäki J. Effects of lake water level regulation on the dynamics of littoral vegetation in northern Finland. *Hydrobiologia*, 1996, 340: 85~92.
- [62] Wilcox D A, Meeker J E. Disturbance effects on aquatic vegetation in regulated and unregulated lakes in northern Minnesota. *Canadian Journal of Botany*, 1991, 69:1542~1551.
- [63] Nilsson C, Roland J, Ursula Z. Long-term responses of river-margin vegetation to water-level regulation. *Science*, 1997, 276: 798~800.
- [64] Nilsson C, Svedmark M. Basic principles and ecological consequences of changing water regimes: Riparian plant communities. *Environmental Management*, 2002, 30 (4): 468~480.
- [65] Keddy P A, Fraser L H. Four general principles for the management and conservation of wetlands in large lakes: the role of water levels, nutrients, competitive hierarchies and centrifugal organization. *Lakes and Reservoirs: Research and Management*, 2000, 5:177~185.
- [66] McCord S A, Kollar Johanna L, Huang Te-Chou A. Lake and reservoir management. *Water Environment Research*, 1998, 70(4): 767~780.
- [67] van der Valk A G, Squires L, Welling C H. Assessing the impacts of an increase in water level on wetland vegetation. *Ecological Applications*, 1994, 4 (3): 525~534.
- [68] Coops H, Vulink J T, van Nes E H. Managed water levels and the expansion of emergent vegetation along a lakeshore. *Limnologia*, 2004, 34: 57~64.
- [69] Havens K E, Sharfstein B, Brady M A, *et al.* Recovery of submerged plants from high water stress in a large subtropical lake in Florida, USA. *Aquatic Botany*, 2004, 78 (1): 67~82.
- [70] Havens K E, Fox D, Gornak S, *et al.* Aquatic vegetation and largemouth bass population responses to water-level variations in Lake Okeechobee, Florida (USA). *Hydrobiologia*, 2005, 539:225~237.
- [71] Andrew J B, Robert L W. *Eco-hydrology: plants and water in terrestrial and aquatic environments*. New York: Routledge, 1999.
- [72] Naiman R J, Decamps H, Pollock M. The role of riparian corridors in maintaining regional biodiversity. *Environmental Applications*, 1993, 3:209~212.
- [73] Pan H X, Wang Y f, Dong Y S. Factor Analysis of Eutrophication in Erhai Lake. *Journal of Lake Sciences*, 1999, 11(2):184~188.
- [74] Naiman R J, Magnuson J J, McKnight D M, *et al.* Freshwater ecosystems and their management: a national initiative. *Science*, 1995, 270: 584~585.
- [75] Harker D F, Gary L, Harker K, *et al.* *Landscape restoration handbook (2nd)*. Boca Raton: Lewis Publishers, 1999. 74~76.

参考文献:

- [14] 马大明, 张玉田, 赵英魁, 等. 白洋淀生态调控研究. *地理学与国土研究*, 1996, 12:17~21.
- [15] 胡细英, 熊小英. 鄱阳湖水位特征与湿地生态保护. *江西林业科技*, 2002, 5:1~4.
- [16] 夏军, 左其享, 邵民诚. 博斯腾湖水资源可持续利用. 北京: 科学出版社, 2003.
- [17] 熊小英, 胡细英. 鄱阳湖人工控制与湿地生态保护. *热带地理*, 2003, 23:105~109.
- [18] 郁丹英, 贾利. 关于洪泽湖生态水位的探讨. *水利规划与设计*, 2005, 2:56~60.
- [19] 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):2324~2327.
- [20] 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.
- [22] 王海洋, 陈家宽, 周进. 水位梯度对湿地植物生长、繁殖和生物量分配的影响. *植物生态学报*, 1999, 23(3):269~274.
- [35] 刘建康. *高级水生生物学*. 北京: 科学出版社, 1999.
- [39] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 太湖水体透明度的分析——变化及相关分析. *海洋湖沼通报*, 2003, 2:30~36.
- [40] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 太湖水体光学衰减系数的特征及参数化. *海洋与湖沼*, 2004, 35(3):209~213.
- [49] 古滨河. 美国 Apopka 湖的富营养化及其生态恢复. *湖泊科学*, 2005, 17(1):1~8.
- [51] 李文朝. 浅型富营养湖泊的生态恢复——五里湖水生植被重建实验. *湖泊科学*, 1996, 8(增刊):1~10.
- [52] 周万平, 郭晓鸣, 陈伟民, 等. 南水北调东线一期工程对洪泽湖水生生物及生态环境影响的预测. *湖泊科学*, 1994, 6(2):131~135.
- [53] 邱东茹, 吴振斌, 刘保元, 等. 武汉东湖水生植物生态学研究 II. 后湖水生植被动态与水体性质. *武汉植物学研究*, 1997, 15(2):123~130.
- [54] 任南, 严国安, 马剑敏, 等. 环境因子对东湖几种沉水植物生理的影响研究. *武汉大学学报(自然科学版)*, 1996, 42(2):213~218.
- [56] 张运林, 秦伯强, 陈伟民. 湖泊光学研究动态及其应用. *水科学进展*, 2003, 14(5):653~659.
- [58] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 太湖梅梁湾浮游植物叶绿素 a 和初级生产力. *应用生态学报*, 2004, 25(11):2127~2131.
- [59] 杨清心. 富营养水体中沉水植物与浮游藻类相互竞争的研究. *湖泊科学*, 1996, 8(增刊):17~24.
- [73] 潘红玺, 王云飞, 董云生. 洱海富营养化影响因素分析. *湖泊科学*, 1999, 11(2):184~188.