

水位变化对湖泊(水库)消落带生态环境影响的研究进展

吴起鑫^{1,2}, 韩贵琳^{1*}, 唐 杨^{1,2}

(1. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 消落带是水域生态系统与陆地生态系统的交替控制地带, 具有生物的多样性、人类活动的频繁性和生态系统的脆弱性等特征。水位变化是影响湖泊特别是湖泊消落带生态系统主导因素, 水位变化的频度、大小、持续时间等因素对消落带水—陆交换过程有重要的影响。本文回顾了近年来水位变化影响研究的基本概况, 分析了水位变化对消落带物理因子、植物、动物、生物地球化学过程的影响, 并讨论了国内外的研究趋势以及存在的问题。

关键词: 消落带; 水位变化; 影响; 湖泊; 水库

中图分类号: X143; X826; X171. 1; P593 文献标识码: A 文章编号: 1672-9250(2009)04-0446-08

消落带, 又称消落区^[1]、涨落带^[2]、水陆交错区^[3], 是指由于湖泊、水库季节性水位变化或人为水位管理引起水面涨落而使滨岸周边被淹, 土地周期性出露于水面的一段特殊区域^[4]。消落带是水域生态系统与陆地生态系统的交替控制地带, 该地带两种生态系统的物种生命活动十分活跃, 具有生物的多样性、人类活动的频繁性和生态的脆弱性。无论是气候变化还是人类活动, 都会对其产生显著的影响。

水位变化, 按时间跨度可以分为长期水位变化(时间跨度从几年到百年), 年际水位变化, 和短时水位变化(时间跨度从秒到天)^[5]; 按是否受人为因素影响分为自然水位变化和人为调节水位变化。自然湖泊的水位变化受气候变化、季节变更控制, 其水位变化特征是雨季水位上涨, 旱季水位下降; 人为调节的水库、湖泊其水位变化受不同的经济社会目的控制, 水位变化差异很大。通常, 自然水位的变化具有暂时性、稳定性, 雨季或洪泛时期, 消落带被淹没, 洪水过后, 消落带便重新暴露出水面; 而人为控制的水位变化, 其消落带的淹水时间更为长久, 这使自然湖

泊和水库消落带生态系统具有很大的差异性^[6]。

水位变化是控制湖泊生态系统的重要力量, 特别在浅湖生态系统中, 其影响显得更为突出^[7, 8]。水位变化的范围、变化频度、持续时间是湖泊物理过程的重要影响因子, 和滨岸侵蚀、湖底沉积等密切相关。而湖泊生物群, 特别是湖滨生物群, 对水位变化都有着间接或者直接的反应, 这些反应又因生物的不同习性有很大的差异。水位变化是消落带生态系统健康和完整的主要影响因素。

本文归纳总结了目前国内水位变化对湖泊水库消落带影响的研究成果, 初步分析了水位变化对消落带物理因子、植物、动物、生物地球化学过程的影响, 并讨论了国内外的研究趋势以及存在的问题。

1 消落带研究现状

早在上个世纪五十年代, 就有学者注意到了水位变化对消落带的影响^[9], 研究了水位变化对水生植物的影响。但在随后的几十年里, 关于水位变化影响的研究主要在湿地环境, 湖泊水库消落带很少受到人们的关注。最近十几年以来, 随着大规模水

收稿日期: 2009-03-05; 改回日期: 2009-09-27

基金项目: 国际重点基础研究发展计划(973计划)项目(2006CB403206); 中国科学院知识创新重要方向项目(kzcx2-yw-306)

第一作者简介: 吴起鑫(1984—)男, 硕士研究生, 环境地球化学方向, E-mail: wuqixin@mails.gyig.ac.cn

* 通讯作者: 韩贵琳, 研究员, 博士, 从事环境地球化学研究, E-mail: hanguilin@vip.skleg.cn

库建设,以及自然湖泊水资源管理的累积效应出现,人们开始注意水位变化对湖泊水库影响的重要性;特别是在水资源短缺、全球气候变化的背景下,湖泊水库消落带水位变化更是吸引了大量学者的关注。2005年,首次水位变化学术会议在德国康斯坦茨举行,开始系统的研究水位变化对湖泊水库影响;而举世瞩目的三峡大坝的建成及其成功蓄水运行,使该领域的研究在国际范围引起广泛的关注与讨论^[10, 11]。

目前,水位变化对消落带影响研究主要集中在水位变化对生物(植物、动物)、滨岸侵蚀、生态环境、水质变化的影响,以及消落带综合利用讨论这几个方面^[12]。其中植物的研究主要以大型水生植物、浮游植物和藻类为主,动物的研究主要集中在大型无脊椎动物和鱼类,还有一些研究比较了水位变化对人为管理湖泊(水库)和自然湖泊影响的差异性^[13-15]。

2 水位变化对消落带物理因子的影响

水位变化将改变湖泊的地形学和沉积学特征^[16],进而影响消落带的侵蚀、物质输送和沉积特性,并有可能在根本上改变消落带的生物地球化学特性^[13]。长期的水位变化将改变湖岸线,对生物没有影响;短期的水位变化不改变湖岸,但对湖滨区生物和沉积物表层非生物部分都有影响,湖滨、海岸的地形和沉积粒度分布就是短期—长期水位变化的结果,前者为侵蚀提供能量,后者决定了被侵蚀的部位^[5]。水位下降时,降水溅击、坡面汇流冲刷、水库水位涨退和风浪等外营力直接作用于坡面土壤,导致表土很快流失,坡面沟壑丛生;水位上升后,水体的浸泡、扰动对消落带坡面植物和土壤结构进一步破坏,将加剧消落带土壤的重力侵蚀和冲刷作用^[17]。Furey 等对相邻的一个饮用水水库(Sooke, 水位变化超过6米)和自然湖泊(Shaw nigan, 水位变化小于1米)消落带时空变化特征进行比较分析,研究表明:远离滨岸,两个水库物理化学特征非常相似,而近岸两者则有很大的差别;水位下降后,Sooke 水库有更大的消落带面积,更大的陆水混合面积,接收更多的太阳能、更高的光合有效辐射(PAR);然而,Sooke 水库暴露区植物丰度却更小,优质沉积物、营养元素、有机质流失明显,即水位下降使消落带侵蚀更为强烈和集中;对两个湖泊有机质碳、氮同位素分析也发现,Sooke 水库明显具有更

强的外源性^[13]。另外,水位上升后消落带水流较缓,径流中的颗粒物进入湖泊后很快就在消落带沉积下来,而水位下降后,这些不稳定沉积物可能被冲刷随径流再次进入湖泊水体,造成消落带水质恶化。Rhodes 曾报道水位下降可能引起沉积物重新悬浮,并指出这将引起水质恶化,带来潜在的长期的环境修复问题^[18]。

水位变化引起的一个主要变化是光线穿透率的变化^[19],光线穿透率的变化引起沉水植物的光合作用效率改变,这将引起远岸和近岸初级生产力分布的转变。Loiselle 研究表明,水位下降时,消落带的淹水环境更适宜藻类的生长,而暴露的新底泥则可能促进一些挺水植物的扩张。Thompson 对新西兰湖泊的研究发现,水位降低,绿色丝状菌取代了中低水位原有的大型植物^[20];Hudon 对劳伦斯河下游的圣劳伦斯水库的研究也发现,水位变化和挺水植物的面积成强烈的负相关关系^[21]。

水位变化对湖泊另一个重要影响是改变湖泊的温度分层结构,水位下降会引起变温层加深,温度分层时间延长。有研究表明,湖泊的物理过程对短期的水文变化非常敏感,短期气候变化和人为水文管理活动的联合作用对浅水库有很大的影响^[22]。湖泊温度结构改变对鱼类迁移、取食、产卵等行为还可能潜在的影响。

3 水位变化对消落带植物的影响

水位变化对消落带大型水生植物、浮游植物、陆生植物都会产生显著的影响。按植物分布的地理特征,通常把消落带植物分为四种基本类型:森林和灌丛,湿草甸,沼生植物,水生植物,其中湿草甸和沼生植物很大程度上是水位变化的产物,受水位变化特征控制^[23]。其中大型水生植物是研究最多的消落带植物,其生长范围与水位变化的关系受到很多学者的关注^[24, 25]。

湖泊滨岸通常有一系列不同的植物群落随着消落带的环境坡度变化而动态变化。淹水的深度、持续时间、频度影响着植物群落的组成,每次洪水的持续时间在分开不同的植物群落显得非常重要^[26]。持续的水位升高会导致一些植物落叶、死亡,而水位下降之后其他的植物种类就有机会扩张生长,引起植物组合的改变^[31],最终还会引起一系列其它相关生物群体变化^[27, 28]。太大和太小的水位变化都会引起生物多样性的减少^[29],许多研究表明水位变动

在 1.5 米到 2.0 米之间是最佳的变动水平, 在这个变动范围下, 消落带达到最大的植物生物多样性^[29-31]。对新西兰 21 个湖泊低生长大型植物群落研究也有相似的结果, 其研究结果表面 1.1 米的水位变化在这个区域产生最高的生物种类丰度^[32]。有研究表明, 自然未受水位管理湖泊系统中, 水位年内变化的湖泊物种多样性比水位年际变化的湖泊丰度低得多^[33]。因而, 消落带少有多年生植物存活, 优势种群绝大多数都是一年生的植物^[33]。在加拿大实验性湖泊 226 湖的实验研究中发现, 水生植物群体、滨岸植物群体和藻类都受到水位降低的影响^[34], 水位降低, 滨岸藻类由于丧失合适的栖息地(如: 岩石和植物的表面)而减少, 大型植物覆盖度下降了 1/3; 水位恢复后, 植物开始恢复, 但其物种类型发生了变化, 苔属植物几乎绝迹, 狐尾藻 (*Myriophyllum spp.*) 没有受到影响, 水池草 (*Potamogeton spp.*) 的生物量和数量都有增加。对莱茵河下游平原的 70 个浅湖泊研究发现, 挺水植物的生长和水位降低成正比, 与湖泊面积、平均水深成反比^[35]。McGowan 对冬季湖泊水位下降之后消落带的浮游植物和大型植物研究表明, 水位下降 50% 时, 对浮游植物和浮游动物的食物链结构没有影响, 然而, 大型植物组合发生了变化, 从以金鱼藻 (*Ceratophyllum demersum*) 为优势种变成了以眼子菜 (*Potamogeton pectinatus*) 为优势种, 且大型植物的数量增加了 2.5 倍^[27]。Hudon (2004) 也发现在圣劳伦斯河, 低水位时眼子菜 (*Potamogeton spp.*) 数量比正常水位时高^[26]。植物群落的改变也可能会引起植被覆盖减少^[36], 减少鱼类、无脊椎动物的栖息地以及鸟类的觅食场所^[37]。

水位变化对湖泊消落带的藻类也有影响, 在岩石表面生长的硅藻类的组成和结构随水深的变化成明显的带状分布。在碳酸盐高山湖泊, 硅藻对自然水位变化有显著的反应^[38], 通过硅藻的质量、生理特征、功能和群体结构半径可以确定三个不同深度区域。对沉积物表面的硅藻研究发现, 受水位变化影响最大的浅部区域的生物多样性最大^[39]。而浮游藻类对水位变化的影响有一定的适应能力, 在 226 湖的研究发现, 水位下降, 浮游植物的总数量发生减少, 但水藻单位体积密度保持不变, 因此总数的变化只是简单的与湖水体积减少变化相对应而已^[34, 40, 41]。

4 水位变化对消落带动物的影响

水位变化对消落带动物的影响包括水生动物和陆生动物, 通常, 由于动物的可移动性, 这种影响不是很大, 而且大多数的影响是间接的。其中研究最多的动物是无脊椎动物、其次是鱼类和水鸟。

大型无脊椎动物对水位变化敏感, 是消落带研究最多的动物。大型无脊椎动物有以下特征: ①摄食多样性; ②水生系统食物链的重要组成部分; ③对水质敏感, 只生活在特殊区域; ④容易采样^[42], 因而其对水位变化非常敏感, 很适合用来评估水位变化对水生生态系统的影响。大型无脊椎动物以消落带某些植物为栖息地、产卵场所和食物来源, 因此水位的任何变化都会使无脊椎动物的数量大量减少^[43]。通常经过任何异常的水位变化的湖泊, 无脊椎动物的数量都会发生部分减少甚至灭绝, 之后需要很多年才能恢复, 而且恢复后其种群组合也往往发生变化^[43, 44]。Rigler 还发现, 除了摇蚊之外, 暂时还没有证据证明水位下降时, 北极湖泊消落带的无脊椎动物会向深湖迁移来躲避暴露底泥的严寒冰冻环境^[45]。Valdovinos 对智利安第斯地区人工湖和自然湖无脊椎动物比较研究发现, 人工湖泊的无脊椎动物数量和种类要远远小于自然湖泊, 他们认为消落带水位变化的影响是其驱动因素, 如: 水位的变化使消落带干燥、冰冻, 水动力冲刷剥离有机质, 缺少大型水生植物^[14]。Furey 对一个季节性波动的水库和一个波动很小的自然湖泊的比较研究却观测到相反的结果, 人工湖的无脊椎动物无论种类或数量都要高于自然湖泊, 他们解释为水位变化引起变温层的扩大, 进而增加底栖生物的栖息范围。这些不同的无脊椎动物群体同时也说明水位变化对湖底食物链以及能量和营养向远水区的传递有很大的影响^[46]。由于大型无脊椎动物的移动性, 而移动性又不如鱼类那么迅速, 因而其对水位变化相对于大型植物更为敏感, 更重要的是无脊椎动物是鱼类、鸟类、两栖类的食物来源, 他们最终通过食物链对很多物种都有潜在的影响, 大型无脊椎动物群落结构和丰度应该作为研究水位变化对环境影响的一项重要指标^[42]。

在淡水系统, 水生昆虫是大型无脊椎动物的主要类型, 它们中的大多数都要借助挺水植物来完成幼虫到成虫的转化; 在变形过程中, 很多昆虫, 包括蜉蝣、蜻蜓、蜻蛉, 都要爬到或飞上挺水植物, 找到合

适庇护所, 经过孵化, 最终才能成虫^[47]。假如这个时期水位比平时高, 消落带挺水植物就可能被淹没, 从而减少无脊椎动物的孵化场所, 这个理论也被人们用来减少水库消落带的病虫害。

鱼类移动迅速, 可能导致人们认为水位变化在大多数情况下对其只有很小的直接影响。但在一些特殊时期, 鱼类对水位的变化却十分敏感, 如在产卵期, 水位降低将鱼卵直接暴露于水面之上, 影响鱼类繁殖^[48]。水位下降还使鱼类失去庇护所, 更容易暴露给捕食者^[49]。大的水位变动影响大型植物的深度分布, 然后进一步作用于鱼类^[50], 甚至对鱼类的质量也有重要影响^[51]。另外, 水位变化引起水体的浊度变化也影响鱼类的生存和分布^[52]。有研究提到, 北欧高山贫营养水库的水位变化引起沿岸栖息地减少, 北极嘉鱼, 棕鲮数量减少^[53], 鱼群的变化又会导致其捕食者鱼鹰和水鸟减少。水位变化除了影响部分鸟类的食物来源外, 还影响鸟类的栖息地(如减少鸟类栖息地); 而孵化期水位上升淹没鸟巢, 则直接影响着鸟类的生存和繁殖^[54, 55]。

5 水位变化对消落带生物地球化学的影响

人工控制的水位变化也影响和改变湖泊的生物地球化学过程。水位的正弦变化改变温度分层作用、混合作用, 改变营养物质的循环, 影响主要生产者的生长与分布^[56]。在很多研究中都提到, 消落带可以通过植物吸收营养物质^[57-59]、沉积作用截留营养物质^[60]以及减少沉积物的二次悬浮^[61]来提高水质。通常, 在低水位时期, 不管营养状况如何, 水体普遍都出现水质下降的现象^[62-63]。Sanchez 研究墨西哥西北部半干旱区水库发现, 根据氮和磷浓度以及叶绿素 a 的特征, 水库是中营养的, 但是在水位下降时成为了富营养; 研究区营养元素的浓度很高, 磷的含量增加, N:P 比降低。然而该地区没有密集的农业作业, 没有城市开发活动, 也没有工业活动, 这表明: 水位降低改变了营养元素的循环机制, 营养元素从水-泥界面的释放以及有机质矿化作用增加了^[56]。高水位时期, 洪水淹没至湖岸区, 淹没植物, 引起植物死亡分解释放甲烷气体^[66]。洪水冲刷湖岸, 改变湖岸的物理特征, 冲刷出新的沟壑, 改变有机质, 沉积物, 和水生动物的分配^[67]。这种改变同时会引起 DOC 浓度的变化, DOC 的浓度与许多的控制湖泊水质的生物地球化学过程紧密相关

(如, 金属离子的吸附、污染物的生物利用率、营养循环), 同时还改变光线透过率^[68]。Watts 对水位下降后经历不同程度干燥湖泊底泥在有氧条件下释放磷的潜力研究发现, 对于自然湖泊, 底泥化学特性对磷的吸收与释放非常重要; 而对于水库, 物理化学过程(干燥, 氧化)显得更为重要; 而自然湖泊消落带大型植物提供了大量的有机质, 其有机磷的吸收和释放过程非常明显^[69]。然而, Dierberg 研究却发现, 消落带的沉水植物的腐烂分解产生的磷对湖泊磷的贡献很小, 因此沉水植物分解不是消落带磷释放的主要贡献者^[70]。马利民的研究表明, 外源磷的加入将大大增加消落带土壤释放磷的风险^[71]。

在北美, 为发电兴建的水库增加了 DOC 和汞从滨岸湿地、土壤的释放, 经常导致受纳生物体内富集汞^[72]。水库的人工运作方式对当地的环境有重要的影响, 通过减小自然水位极限时期(如仲夏、冬季)的水位变化来达到减少其负面影响的目的, 但这种水位的调节方式往往和经典的水电运作模式相反(夏冬两季发电量)。因此, 尽管一定范围的调整水库管理策略可以减轻其负面效应, 但是实际运行还是根据经济利益来调节水库的运作^[73]。

6 问题与展望

在欧洲, 水位变化是欧盟近几十年在水资源领域颁布的最重要的指令—欧盟水框架指令里一个重要的议题。欧洲大约有 5×10^5 个自然湖泊, 其消落带的湿地和栖息地对欧洲的生物多样性有重要的意义, 消落带的研究已经引起欧洲学者的广泛关注。在中国, 世界最大的水利工程三峡水库的建成运行后, 库区的蓄水将达到 175 m, 淹没陆地面积达 632 km², 届时, 在 145 m 至 175 m 水位之间将会形成与天然河流涨落季节相反、涨落幅高达 30 m 的水库消落带, 根据统计分析其面积达 300 km²^[74]。三峡水库的反季节性水位调度操控将会对库区甚至整个流域的生态环境影响有怎样的影响引起国内外学者的激烈讨论^[10, 11], 而受水位调节影响直接影响最大且生态最脆弱的消落带系统的综合利用问题更是引起各界的广泛关注^[75]。许多中外科学家对三峡消落带的可利用性持消极态度, 也有科学家认为它将会成为一块“风水宝地”^[10]; 在国内, 已经有不少学者在探讨三峡水库消落带的综合利用^[76-80]。

目前, 对湖泊水库消落带的研究主要存在以下几个问题: 一, 大多数的研究针对的是某一个物种,

虽然说生态系统多样性的目标包括很多的物种,且这些趋势对环境政策和策略有很重要的社会影响,但是这些单独的研究很难建立一个综合的生态系统方法。二,很多水位变化的影响要在很多年之后才显现出来,对这些影响的评估需要多年的连续监测。因而在一系列代表性的区域对湖泊进行监测来客观评价水位变化对环境的长期影响是必要的。三,目

前对水位变化对水库消落带生物地球化学过程影响的研究较少。生物地球化学过程是控制水质变化,动植物生长、迁移的重要影响因子,对理解消落带各种变化,保护消落带生态环境有重要的指导意义。因而,加强水库消落带生物地球化学研究,特别是加强对C、N、P、Si等营养元素在水位变化条件下的循环机理研究是非常必要的。

参 考 文 献

- [1] 江刘其, 陈煜初. 新安江水库消落区种槭挺水树木林研究初报[J]. 浙江林业科技, 1992 (1): 40—43.
- [2] 佟磊, 王佐成. 深圳市西丽水库涨落带治理对策初探[J]. 中国农村水利水电, 2006 (9): 103—104.
- [3] 熊建新, 陈端吕, 董明辉. 东洞庭湖区水陆交错带的复杂性分析及防洪对策[J]. 安徽农业科学, 2008, (14): 6023—6024, 6027.
- [4] 许川, 舒为群, 曹佳, 等. 三峡库区消落带富营养化及其危害预测和防治[J]. 长江流域资源与环境, 2005, (4): 440—444.
- [5] Hofmann H, Lorke A, Peeters F. Temporal scales of water—level fluctuations in lakes and their ecological implications [J]. *Hydrobiologia*, 2008 613: 85—96.
- [6] Baxter R M. Environmental Effects of Dams and Impoundments[J]. *Annual reviews in ecology and systematics*, 1977, 8 (1): 255—283.
- [7] Coops H, Bekkioglu M, Crisman T L. The role of water—level fluctuations in shallow lake ecosystems — workshop conclusion[A]. *International Conference on Limnology of Shallow Lakes*[C]. Balatonfured, Hungary: Kluwer Academic Publ, 2002; 23—27.
- [8] Poff N L, Allan J D, Bain MB, *et al.* The natural flow regime: a paradigm for river conservation and restoration[J]. *BioScience*, 1997, 47(11): 769—784.
- [9] Quennerstedt N. Effect of water level fluctuation on lake vegetation[J]. *Verhandlungen internationalen vereiningung limnologie*, 1958, 13: 6.
- [10] Mitsch W J, Lu J, Yuan X, *et al.* Optimizing Ecosystem Services in China[J]. *Science*, 2008, 322(5901): 528.
- [11] Stone R. China's Environmental Challenges: Three Gorges Dam; Into the Unknown[J]. *Science*, 2008, 321(5889): 628—632.
- [12] Leira M, Cantonati M. Effects of water-level fluctuations on lakes: an annotated bibliography[J]. *Hydrobiologia*, 2008 613: 171—184.
- [13] Furey P C, Nordin R N, Mazumder A. Water level drawdown affects physical and biogeochemical properties of littoral sediments of a reservoir and a natural lake[J]. *Lake and Reservoir Management*, 2004, 20(4): 280—295.
- [14] Valdovinos C, Moya C, Olmos V, *et al.* The importance of water—level fluctuation for the conservation of shallow water benthic macroinvertebrates: an example in the Andean zone of Chile[J]. *Biodiversity and Conservation*, 2007, 16 (11): 3095—3109.
- [15] Sollie S, Coops H, Verhoeven J T A. Natural and constructed littoral zones as nutrient traps in eutrophicated shallow lakes[J]. *Hydrobiologia*, 2008 605: 219—233.
- [16] Hakanson L. The influence of wind fetch and water depth on the distribution of sediments in Lake Vanern, Sweden [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1977, 14(3): 397—412.
- [17] 吴良喜, 曾红娟. 水库消落带应算作破坏水土保持设施面积[J]. *水土保持通报*, 2007, (4): 141—143.
- [18] Rhodes S L, Wiley K B. Great Lakes toxic sediments and climate change. Implications for environmental remediation [J]. *Global Environmental Change*, 1993, 3(3): 292—305.
- [19] Loiselle S A, Bracchini L, Cózar A, *et al.* Extensive spatial analysis of the light environment in a subtropical shallow lake, Laguna Ibeá, Argentina[J]. *Hydrobiologia*, 2005 534(1): 181—191.
- [20] Thompson R M, Ryder G R. Effects of hydro—electrically induced water level fluctuations on benthic communities in Lake Hawea, New Zealand[J]. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 2008, 42(2): 197—206.

- [21] Hudon C. Impact of water level fluctuations on St. Lawrence River aquatic vegetation [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1997, 54(12): 2853—2865.
- [22] Nowlin W H, Davies J M, Nordin R N, *et al.* Effects of water level fluctuation and short-term climate variation on thermal and stratification regimes of a British Columbia Reservoir and Lake [J]. Lake and Reservoir Management, 2004, 20(2): 91—109.
- [23] Keddy P A, Reznicek A A. Great Lakes vegetation dynamics: The role of fluctuating water levels and buried seeds [J]. Journal of Great Lakes Research, 1986, 12(1): 25—36.
- [24] Schmieder K, Dienst M, Ostendorp W, *et al.* Effects of water level variations on the dynamics of the reed belts of Lake Constance [J]. International Journal of Ecohydrology & Hydrobiology, 2004, 4(4): 469—480.
- [25] Hudon C, Gagnon P, Amyot J P, *et al.* Historical changes in herbaceous wetland distribution induced by hydrological conditions in Lake Saint—Pierre (St. Lawrence River, Quebec, Canada) [J]. Hydrobiologia, 2005, 539(1): 205—224.
- [26] Casanova M T, Brock M A. How do depth, duration and frequency of flooding influence the establishment of wetland plant communities? [J]. Plant Ecology, 2000, 147(2): 237—250.
- [27] McGowan S, Leavitt P R, Hall R I. A Whole-Lake Experiment to Determine the Effects of Winter Droughts on Shallow Lakes [J]. Ecosystems, 2005, 8(6): 694—708.
- [28] Townsend G H. Impact of the Bennett Dam on the Peace—Athabasca Delta [J]. Journal of The Fisheries Research Board of Canada, 1975, 32(1): 171—176.
- [29] Wilcox D., Meeker J. Disturbance effects on aquatic vegetation in regulated and unregulated lakes in northern Minnesota [J]. Canadian Journal of Botany, 1991, 69(7): 1542—51.
- [30] 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 [J]. Environmental Management, 1998, 22(5): 723—36.
- [31] Wagner T, Falter C M. Response of an aquatic macrophyte community to fluctuating water levels in an oligotrophic lake [J]. Lake and Reservoir Management, 2002, 18(1): 52—65.
- [32] Riis T, Hawes I. Relationships between water level fluctuations and vegetation diversity in shallow water of new zealand lakes [J]. Aquatic Botany, 2002, 74(2): 133—48.
- [33] Riis T, Hawes I N. Effect of wave exposure on vegetation abundance, richness and depth distribution of shallow water plants in a New Zealand lake [J]. Freshwater Biology, 2003, 48(1): 75—87.
- [34] Turner M A, Huebert D B, Findlay D L, *et al.* Divergent impacts of experimental lake—level draw down on planktonic and benthic plant communities in a boreal forest lake [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2005, 62(5): 991—1003.
- [35] Van Geest G J, Coops H, Scheffer M, *et al.* Long transients near the ghost of a stable state in eutrophic shallow lakes with fluctuating water levels [J]. Ecosystems, 2007, 10(1): 36—46.
- [36] Bodaly R A, Lesack LFW. Response of a boreal northern pike (*Esox lucius*) population to lake impoundment: Wupaw Bay, Southern Indian Lake, Manitoba [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1984, 41(4): 706—714.
- [37] Euliss Jr N H, LaBaugh J W, Fredrickson L H, *et al.* The wetland continuum: a conceptual framework for interpreting biological studies. [J]. Wetlands, 2004, 24(2): 448—458.
- [38] Cantonati M, Angeli N. New findings on the ecology and ultrastructure of *Cymbella ancyli* Cleve [J]. Diatom Research, 2003, 18(2): 377—384.
- [39] Angeli N, Cantonati M. Depth—distribution of surface sediment diatoms in Lake Tovel, Italy [J]. Internationale Vereinigung fur Theoretische und Angewandte Limnologie Verhandlungen, 2005, 29(1): 539—544.
- [40] Jansen W, Central, Arctic R, *et al.* Experimental Drawdown of Lake 226 in the Experimental Lakes Area, Ontario: Implications for Fish Habitat Management in Lakes and Reservoirs with Fluctuating Water Levels [M]; Wolfgang Jansen, 2000.
- [41] Mills K H, Chalanchuk S M, Allan D J, *et al.* Abundance, survival, condition, and recruitment of lake whitefish (*Coregonus clupeaformis*) in a lake subjected to winter drawdown [J]. Ergebnisse der Limnologie, 2002, 57: 209—219.
- [42] White M S, Xenopoulos M A, Hogsden K, *et al.* Natural lake level fluctuation and associated concordance with water quality and aquatic communities within small lakes of the Laurentian Great Lakes region [J]. Hydrobiologia, 2008, 613:

- [43] Hunt P C, Jones J W. The effect of water level fluctuations on a littoral fauna[J] . *Journal of Fish Biology*, 1972, 4(3): 385—394.
- [44] Smith L C, Sheng Y, MacDonald G M, *et al.* Disappearing Arctic Lakes[J] . *American Association for the Advancement of Science*, 2005; 1429—1429.
- [45] Andrews D, Rigler F H. The effects of an Arctic winter on benthic invertebrates in the littoral zone of Char Lake, Northwest Territories[J] . *Canadian Journal of Zoology/ Revue Canadienne de Zoologie*, 1985, 63(12): 2825—2834.
- [46] Furey P C, Nordin R N, Mazumder A. Littoral benthic macroinvertebrates under contrasting drawdown in a reservoir and a natural lake[J] . *Journal of the North American Benthological Society*, 2006, 25(1): 19—3.
- [47] Thorp J H, Covich A P. *Ecology and Classification of North American Freshwater Invertebrates*[M] : Academic Press, 2001.
- [48] Grabowski T B, Isely J J. Effects of flow fluctuations on the spawning habitat of a riverine fish[J] . *Southeastern Naturalist*, 2007, 6(3): 471—478.
- [49] Jackman R E, Hunt W G, Hutchins N L, *et al.* Bald eagle foraging and reservoir management in northern California [J] . *Journal of Raptor Research*, 2007, 41(3): 202—211.
- [50] Rowe D, Graynoth E, James G, *et al.* Influence of turbidity and fluctuating water levels on the abundance and depth distribution of small benthic fish in New Zealand alpine lakes[J] . *Ecology of Freshwater Fish*, 2003, 12(3): 216—227.
- [51] Sorensen J A, Kallemeyn L W, Sydor M. Relationship between Mercury Accumulation in Young—of—the—Year Yellow Perch and Water—Level Fluctuations[J] . *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(23): 9237—9243.
- [52] Trebitz A S, Brazner J C, Brady V J, *et al.* Turbidity tolerances of great lakes coastal wetland fishes[J] . *North American Journal of Fisheries Management*, 2007, 27(2): 619—633.
- [53] Rydin E, Vrede T, Persson J, *et al.* Compensatory nutrient enrichment in an oligotrophicated mountain reservoir—effects and fate of added nutrients[J] . *Aquatic Sciences*, 2008, 70(3): 323—336.
- [54] Hake M, Dahlgren T, Ahlund M, *et al.* The impact of water level fluctuation on the breeding success of the Black-throated Diver *Gavia arctica* in South-west Sweden[J] . *Ornis Fennica*, 2005, 82(1): 1—12.
- [55] Desgranges J L, Ingram J, Drolet B, *et al.* Modelling Wetland Bird Response to Water Level Changes in the Lake Ontario—St. Lawrence River Hydrosystem[J] . *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, 113(1): 329—365.
- [56] Sanchez-Carrillo S, Alatorre L C, Sanchez-Andres R, *et al.* Eutrophication and sedimentation patterns in complete exploitation of water resources scenarios: An example from Northwestern semi—arid Mexico[J] . *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, 132(1—3): 377—393.
- [57] Verhoeven J, Meuleman A, Wetlands for wastewater treatment: Opportunities and limitations [J] . *Ecological Engineering*, 1999, 12(1—2): 5—12.
- [58] Coveney M F, Stites D L, Lowe E F, *et al.* Nutrient removal from eutrophic lake water by wetland filtration [J] . *Ecological Engineering*, 2002, 19(2): 141—59.
- [59] Meuleman A, Beekman J, Verhoeven, J *et al.* Nutrient retention and nutrient-use efficiency in phragmites australis stands after wastewater application [J] . *Wetlands*, 2002, 22(4): 712—21.
- [60] Johnston C, Bubbenzer G, Lee G, *et al.* Nutrient trapping by sediment deposition in a seasonally flooded lakeside wetland [J] . *Journal of Environmental Quality*, 1984, 13(2): 283.
- [61] James W F, Best E P, Barko J W. Sediment resuspension and light attenuation in peoria lake: Can macrophytes improve water quality in this shallow system?[J] . *Hydrobiologia*, 2004, 515(1): 193—201.
- [62] Arfi R. The effects of climate and hydrology on the trophic status of selingue reservoir, mali, west africa [J] . *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 2003, 8(3—4): 247—57.
- [63] Geraldine A M, Boavida M J. Distinct age and landscape influence on two reservoirs under the same climate [J] . *Hydrobiologia*, 2003, 504(1): 277—88.
- [64] Kangur K, Mõls T, Milius A, *et al.* Phytoplankton response to changed nutrient level in lake peipsi (estonia) in 1992—2001 [J] . *Hydrobiologia*, 2003, 506—509(1): 265—72.
- [65] N ges T, N ges P, Laugaste R. Water level as the mediator between climate change and phytoplankton composition in a large shallow temperate lake [J] . *Hydrobiologia*, 2003, 506—509(1): 257—63.
- [66] Juutinen S, Alm J, Martikainen, P, *et al.* Effects of spring flood and water level draw—down on methane dynamics in

- the littoral zone of boreal lakes [J] . *Freshwater Biology*, 2001, 46(7): 855—69.
- [67] Bonetto A. The increasing damming of the parana basin and its effects on the lower reaches [J] . *Regulated Rivers: Research & Management*, 1989, 4(4): 333—46.
- [68] Prowse T D, Buttle J M, Dillon P J, *et al.* Impacts of dams/ diversions and climate change [A] . IN *Threats to Sources of Drinking Water and Aquatic Ecosystems Health in Canada* [M] Scientific Assessment Report Series, 2001: 69—72
- [69] Watts C J. Seasonal phosphorus release from exposed, re-inundated littoral sediments of two australian reservoirs [J] . *Hydrobiologia*, 2000, 431(1): 27—39.
- [70] Dierberg F E. The littoral zone of lake okeechobee as a source of phosphorus after drawdown. [J] . *Environmental Management*, 1992, 16(3): 371—80.
- [71] 马利民, 张明, 刘丛, 等. 外源磷对消落区土壤性质及磷释放的影响 [J] . *环境化学*, 2008, (1): 73—76.
- [72] Rosenberg D M, Bodaly R A, Hecky R E, *et al.* The environmental assessment of hydroelectric impoundments and diversions in Canada [J] . *Canadian Aquatic Resources*, 1987, 215: 71—104.
- [73] Hellsten S, Marttunen M, PalomaeKi R, *et al.* Towards an ecologically based regulation practice in Finnish hydroelectric lakes [J] . *Regulated Rivers Research & Management*, 1996, 12(45): 535—545.
- [74] 张虹. 三峡库区消落带土地资源特征分析 [J] . *水土保持通报*, 2008, (1): 46—49.
- [75] 徐元刚, 孙锐锋, 李剑, 等. 水库消落区利用研究进展 [J] . *人民长江*, 2008, (3): 102—103.
- [76] 孙海兵. 三峡库区消落区农业利用初探 [J] . *安徽农业科学*, 2007, (34): 11168—11169.
- [77] 司亚东, 薛应春, 田隆祥, 等. 三峡水库上游消落区生态渔业模式研究 [J] . *水利渔业*, 2005, (2): 35—37.
- [78] 张虹. 三峡重庆库区消落区基本特征与生态功能分析 [J] . *长江流域资源与环境*, 2008, (3): 374—378.
- [79] 戴方喜, 许文年, 刘德富, 等. 对构建三峡库区消落带梯度生态修复模式的思考 [J] . *中国水土保持*, 2006, (1): 34—36.
- [80] 吴江涛, 许文年, 陈芳清, 等. 库区消落带植被生境构筑技术初探 [J] . *中国水土保持*, 2007, (1): 27—30.

Effects of Water Level Fluctuations on Ecological Environment of Lake/Reservoir Riparian Zone: A Review

WU Qi-xin^{1,2}, HAN Gui-Lin¹, TANG Yang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese of Academy of Sciences Guiyang 550002, China; 2. Graduate School of the Chinese of Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The riparian zone is an ecotone between the aquatic ecosystem and the terrestrial ecosystem, which is characterized as biodiversity, frequent human activities and vulnerability. Water level fluctuations, especially their extent, frequency and duration, are the main factors affecting the ecosystem of lake/ reservoir. This paper summarizes the results of current research on the effects of water level fluctuations on lake/ reservoir riparian zone, analyzes the effects that affect the flora and fauna and biogeochemical processes in riparian zones, and discusses the research trend and existing problems in this field both at home and abroad.

Key words: riparian zone; water level fluctuation; effect; lake/ reservoir