

DOI: 10.5846/stxb201309252366

吕明权, 吴胜军, 陈春娣, 姜毅, 温兆飞, 陈吉龙, 王雨, 王小晓, 黄平. 三峡消落带生态系统研究文献计量分析. 生态学报, 2015, 35(11): 3504-3518.

Lü M Q, Wu S J, Chen C D, Jiang Y, Wen Z F, Chen J L, Wang Y, Wang X X, Huang P. A review of studies on water level fluctuating zone (WLFZ) of the Three Gorges Reservoir (TGR) based on bibliometric perspective. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(11): 3504-3518.

三峡消落带生态系统研究文献计量分析

吕明权, 吴胜军*, 陈春娣, 姜毅, 温兆飞, 陈吉龙, 王雨, 王小晓, 黄平

中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 中国科学院水库水环境重点实验室, 重庆 400714

摘要: 三峡消落带生态系统是一条特殊的生态脆弱带, 其生态环境的特殊性及其对整个三峡库区的影响使得这一生态过渡区逐渐成为地学、环境科学、生态学等学科的研究热点。以 CNKI 和 Web of science 数据库为数据源, 检索 1989—2013 年国内外发表的有关三峡消落带研究的论文, 通过文献计量学方法, 从多个角度分析了三峡消落带研究现状、进展及发展趋势, 内容包括论文数量及发表年代分布、研究机构、发表期刊和重要主题等。1989—2013 年间, 国内外总共发表三峡消落带研究的论文 478 篇, 其中中文论文 436 篇, 英文论文 42 篇; 文章数量逐年递增, 特别是 2009 年以后, 增长速率明显加快; 消落带的研究机构主要分布在重庆、湖北和北京, 重庆大学、西南大学和中国科学院武汉植物园发表论文数量在研究机构中名列前三; 《生态学报》、《长江流域资源与环境》和《环境科学》3 种期刊的载文数量最多, 《生态学报》主要报道消落带植物研究成果, 《长江流域资源与环境》关注的领域较为宽泛, 《环境科学》主要报道土壤和环境问题的研究; 研究地点主要分布在长江支流上, 其中澎溪河流域的消落带面积比例最大, 以该区域为研究对象的论文相对更多; 生态是消落带研究最大的主题, 土壤和植被是消落带研究的主要生态要素, 磷、氮和重金属在土壤的循环过程是目前研究的主要生物地球化学过程; 如何生态重建消落带生态系统是目前遇到最大的挑战之一。以后, 需要加强三峡消落带的长时间序列的监测, 及加强特殊水位脉动下物质在消落带内部、水生与陆生生态系统迁移过程的研究。

关键词: 三峡库区; 消落带; 文献计量学

A review of studies on water level fluctuating zone (WLFZ) of the Three Gorges Reservoir (TGR) based on bibliometric perspective

LÜ Mingquan, WU Shengjun*, CHEN Chundi, JIANG Yi, WEN Zhaofei, CHEN Jilong, WANG Yu, WANG Xiaoxiao, HUANG Ping

Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Key Laboratory of Reservoir Aquatic Environment, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China

Abstract: The Three Gorges Dam on the Yangtze River in China has created a massive reservoir. The water level fluctuates between 145m and 175m, generating 348.9 km² of seasonally submerged riparian zone (Water Level Fluctuating Zone, WLFZ). This emergent WLFZ ecosystem is a type of transitional area between upland and water, and plays a significant role as exchange corridor of energy and substance between terrestrial and aquatic ecosystem. The reversal of hydrologic regime has dramatically altered environmental conditions including soil structure, plant community in WLFZ ecosystem. WLFZ ecosystem's health and stability are threatened in TGR, which has the potential to endanger the vegetation and ecosystem in both riparian and WLFZ. The sensitive WLFZ ecosystem is becoming an emerging issue in the Three Gorges Reservoir

基金项目: 重庆市科技攻关项目 (cstc2012ggB20001); 国家自然科学基金 (51309220); 重庆市科委“121”项目“三峡库区消落带湿地生态经济协同创新与关键技术攻关” (cstc2012jcsf-jfzhX0003)

收稿日期: 2013-09-25; **网络出版日期:** 2014-08-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wsj@cigit.cas.ac.cn

(TGR), where Chinese and other national government has established projects to understand and better manage the WLFZ. The status quo of WLFZ research in the TGR was assessed by critically reviewing current publication, which was collected from both CNKI database and Web of Science database. The key words used are three Gorges, water level fluctuating zone, riparian zone, drawdown zone, littoral zone, water level, hydro-change belt, Yangtze River, ecology restoration and management. Both Chinese and English literature reviews are included in this paper. The information collected was analyzed using bibliometrics, numbers of related papers per year, and details about institutions involved in the research. Furthermore, information extracted includes the research regions, trends and pilot studies. Our findings show that number of papers on WLFZ ecosystem gradually increased until 2008, however in post 2008 the growth rate of papers in this field rapidly increased and continues increase. To date, 436 papers in Chinese and 42 papers in English were published globally. The main research organizations are distributed among Chongqing Municipality, Hubei Province and Beijing Municipality. In terms of publication literature number, the first three organizations are Chongqing University, Northwest University and Chinese Academy of Sciences Wuhan Botanical Garden. The 14% of the papers in the field of WLFZ and ecology are present in the "Acta Ecologica Sinica", "Resource and Environment in the Yangtze Basin" and "Environmental Science", which are best ranked journals in field. "Acta Ecologica Sinica" mainly focuses on plants research, while publications from "Resource and Environment in the Yangtze Basin" cover a wide range of topics such as soil, ecological restoration and plants. Finally, "Environmental Science" is concerned with soil and environmental problems of WLFZ ecosystem. Ecology contains the broadest variety of subjects in WLFZ ecosystem research, however soil and plant subjects are commonly reported. Phosphorus, nitrogen and heavy metal transporting in soil environment is the main researched focus in biogeochemical process. Phosphorus and nitrogen forms, and sorption-release characteristics directly relate to environment problems such as eutrophication and algal bloom in the Three Gorges Reservoir areas. The majority of researchers are carrying field studies in the Pengxi River, which one of tributaries of TGR. The largest WLFZ in all tributaries of TGR is located on Pengxi River, which covers an area of 55.47 km² and accounts for 16.05% of the total area of WLFZ. Restoration and the long term sustainability of WLFZ ecosystem is a challenge for scientists and national governments. In the future, a long-term monitoring of WLFZ environments using remote sensing is needed in order to gain a deep understanding of the impact of water level change on the TGR region. Our review paper suggests that a concerted effort should be made by the research community in the following areas on studying mechanism of energy and nutrient dynamics among water, soil and plants coupled with the specific hydrologic regime, and biogeochemical cycle phenomenon.

Key Words: Three Gorges Reservoir; water level fluctuating zone; bibliometrical analysis

三峡工程是世界最大的水利大坝工程,建成后形成的三峡水库面积达 1080 km²。作为世界上最大的水利枢纽,三峡工程对库区生态环境的影响问题一直是国内外广泛关注的热点之一^[1-3],三峡库区消落带是比较明显,也是最近几年受学者关注较多的环境变化问题^[4-6]。

由于人为控制或自然降雨在时间尺度上的不均匀发生,江河湖泊水位会发生季节和时间性的波动,导致水体岸边的土地交替出现淹没和出露现象,其最高水位线与最低水位线之间的土地区域称为消落带^[7-8],亦称消落区、消涨区、涨落带、河岸带、湖岸带等。根据引起水位涨落的方式不同分为自然消落带和水库消落带,因自然因素导致的水位变化形成的叫自然消落带,水库消落带是由人为调控水库水位涨落而形成。自然消落带类似于河岸带生态系统,相较于水库消落带,受关注时间更早。随着水库数量建设的增加,特别是三峡工程建成形成世界最大的水库消落带,这类新生生态系统开始获得更多的关注。

三峡消落带的形成与水库的运行方式有关。为了减少泥沙淤积延长水库的使用寿命,水库采取“蓄清排浑”的运行调度方式。在每年汛期(6—9月),将水库水位降至 145m;而在汛期后(10月开始)开始蓄水至水位 175m(图 1)。这样,库区水位冬季最高保持在 175m,夏季最低保持在 145m,从而在 1a 内形成垂直落差

30m 面积达 348.9km²的水库消落带。这种拥有节律性的水位变化必然会对三峡水库周围地貌、植被、土壤和其它生物要素产生深远影响。

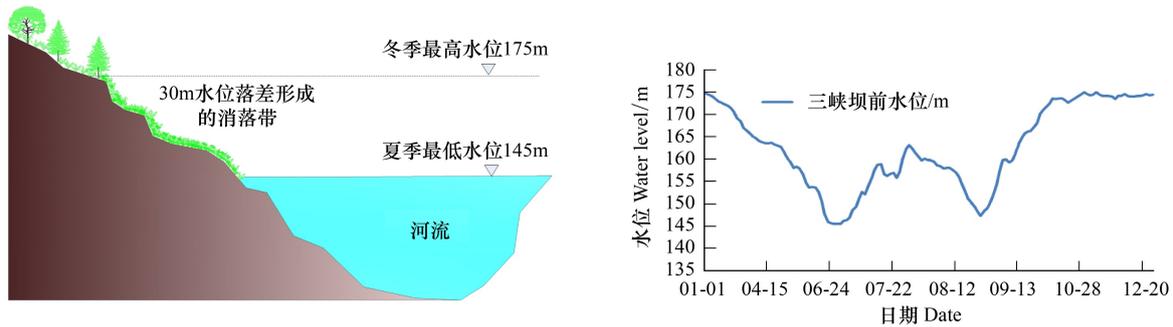


图1 三峡消落带形成及2012年水位变化

Fig.1 Forming process of water level fluctuating zone (WLFZ) and water level change in Three Gorges Reservoir Area in 2012

国际上,有关河岸带的定义较多^[9-10],1960年开始出现河岸带的概念,Lowrance^[11]认为河岸带是与水相邻的环境中的植物和其他有机物的复合体集合,是水生环境和山地间的过渡带,从Gregory^[12]开始认识到河岸带属于一种生态系统类型。消落带的定义借鉴了河岸带的定义,刘宗群^[13]最早提出水位涨落带,把水位涨落带按其水文特征分为库水涨落带和地下水涨落带,库水涨落带就是人们通常所说的消落带,地下水涨落带分布在175m以上的区域,由于库水位的变化,地下水位剧烈升降影响的区域。黄京鸿^[14]提出了涨落带生态系统的概念,由其地貌形态、组成物质与土壤、地下水与地表水、气候与植被等要素组成,是库区水域与周边环境系统之间的过渡地带。由于库区水位周期性涨落的影响,涨落带成为库区生态系统中能量、物质输移和转化最活跃地带,具有一定的脆弱性。程瑞梅^[15]总结其它学者的研究成果基础上,提出以下综合定义,消落带是水陆生态系统交错区域,具有水域和陆地双重属性,长期或者阶段性的水位涨落导致其反复淹没和出露的带状区域,长期为水分梯度所控制的自然综合体,是一类特殊的季节性湿地生态系统。在三峡工程阶段性评估报告中把水库消落带定义为水库季节性水位涨落而使周边被淹没土地周期性地出露于水面的一段特殊区域,是水生生态系统和陆生生态系统交替控制的过渡地带,是一类特殊的湿地生态系统^[16]。从消落带的定义我们可以总结出其特点:(1)该类生态系统是一种生态交错带,具体来说是水陆交错带(干湿交错带),根据生态交错带理论^[17-18],此类生态系统的抗干扰能力表现出明显的脆弱性,且作为水生生态系统和陆生生态系统物质、能量交换的通道,对于维持相邻的水陆生态系统动态平衡具有重要作用;(2)新生季节性的湿地生态系统,受相邻生态系统影响,水位涨落频繁,且水位落差大,淹水时间长有固定的节律,因水位涨落使消落带交替受水生和陆生生态系统的控制;(3)反季节水文情势的影响,我国处在季风气候区,汛期在夏季雨量较多,因此我国的河岸带表现为“夏淹冬陆”,而三峡水库的水位受人为调节表现为“夏陆冬淹”。

国内学者对新生、脆弱的消落带生态系统研究起步晚,但近几年来发展迅速,在植物、土壤、环境问题和生态修复等方面都已开展了一些研究。但目前还没有论文从文献计量角度对三峡消落带整体研究情况进行评述,在此背景下,本文对有关三峡消落带研究的文献进行了统计、分析和述评,回顾研究热点,分析研究特征和存在的主要问题,探寻消落带生态系统研究现状和发展趋势,希望能为三峡消落带后续研究提供参考。

1 三峡消落带文献统计分析

1.1 文献获取

中文文献以中国期刊全文数据库、中国学位论文全文数据库为数据源,以“篇名”、“主题”为检索项,以“三峡”、“消落带、消落区、湖岸带、消涨带、涨落带、河岸带”、“水淹、水位变化”为检索词。筛选与三峡库区消落带主题相关的论文,共检索到中文文献436篇,其中学位论文103篇。英文文献以Web of science为文献信息获取平台,以SCI数据库为数据源,以“Three Gorges”、“water level fluctuating zone(消落带)、riparian zone、

drawdown zone、littoral zone、water level”为检索词,共检索到相关期刊论文 42 篇。中英文文献检索及引用信息查询的截止时间是 2013 年 7 月。

1.2 文献统计分析

1.2.1 文献总体情况

国内以消落带为主题的第一篇论文出现在 1993 年,1994 年黄京鸿发表了“三峡水库水位涨落带的土地资源及其开发利用”,之后到 1998 年才开始陆续有关于消落带的论文发表。在前几年发表的论文的观点主要倾向于如何利用消落带的土地资源,学者们当时可能还没意识到消落带生态系统面临的重大问题。英文论文总体数量偏少,但保持较高的增长趋势。从发表的论文数量趋势来看(图 2),可以将研究时段分为 3 个阶段,2004 年以前为萌芽期,2005—2009 年为起步发展期,从 2010 年开始进入加速发展期,消落带获得更多的关注,论文数量明显增加。可以预见有关此主题的论文会不断的增加,因为库区这种新生的湿地生态系统脆弱,其系统结构、生态过程和演替趋势等问题还需要详细研究。

将所检索文献分为 4 个主题进行统计分析,4 个主题分别是:Ⅰ消落带的环境问题与脆弱性评价,包括富营养化、地质灾害和温室气体排放等,及三峡消落带研究的综述性论文;Ⅱ消落带土壤环境,包括 C、N、P 和重金属元素含量调查和循环特征;Ⅲ消落带植物,包括蓄水后植被群落特征的变化,植被对消落带环境变化的响应;Ⅳ消落带生态系统修复与利用,包括适生植物的选择,消落带功能与利用。其中,有关消落带植物的论文发表最多,其次是环境问题与脆弱性评价的论文,生态系统修复与利用的论文最少(图 3)。

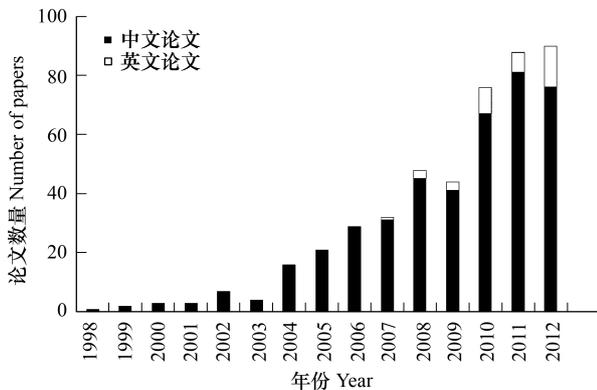


图 2 1998—2012 年间消落带发文量

Fig.2 Number of published papers on WLFZ worldwide between 1998 and 2012

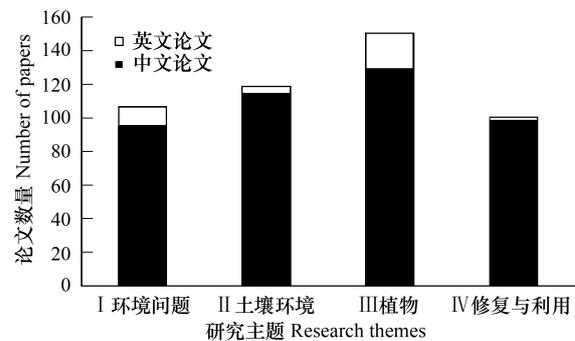


图 3 消落带不同研究主题论文数量统计

Fig.3 Number of published papers in 4 research themes on WLFZ

1.2.2 关键词分类统计

对不同的研究主题论文中出现的次数较多的关键词进行分类统计(表 1),可以发现每个主题研究的内容和对象。对所有论文中出现频次大于 5 次的关键词进行统计排序(表 2),消落带、三峡库区和三峡水库是出现频率最高的 3 个词汇,生态、土壤、植物是出现频次最高的研究对象。

三峡水库水位落差达 30 m 的区域有很多不同的表述,使用频率最高的是消落带,其次是消落区,也有使用涨落带、消涨带和河岸带。因为侧重点不同其英文的使用也有不同的表达方式,出现过 water level fluctuating zone^[5,19]、riparian zone^[3]、drawdown, area/zone^[20]、littoral zone^[6],以 water level fluctuating zone (WLFZ)使用频率最广。

三峡库区消落带研究地点主要分布在长江的支流上,从关键词统计中可以看出,除了三峡库区或三峡水库有关地点的词出现较多以外,长江支流澎溪河亦叫小江出现次数最多,其次是香溪河和大宁河。在澎溪河开展消落区研究成果较多,这主要与其特点有关。在所有支流中,澎溪河的消落带面积最大^[6],占 55.47km²,其中大部分分布在开县境内,开县消落带的面积 42.30 km²占 12.29%,在所有 26 个区县中消落带面积分布最

广,这些区域已成为消落带研究的热点区域。

表 1 关键词的分类统计

Table 1 Keywords from different subjects on WLFZ research papers

研究主题 Research themes	关键词 Key word
环境问题与脆弱性评价 Fragility assessment and environmental problems	生态环境问题、地质灾害、滑坡、土壤侵蚀、温室气体、CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O、通量、排放、富营养化、水华爆发、浮游植物、藻类群落
土壤 Soil	氮、磷、重金属、土壤、底泥、土壤-水体系统、形态、迁移转化、吸附、释放、解吸、有效磷、干湿交替、淹水、落干、回水区、释放动力学、富集、时空分布、生态风险
植物 Plant	苍耳、狗牙根、秋华柳、野古草、枫杨、桑树、水淹胁迫、土壤水分变化、干旱胁迫、形态适应、生理特性、通气组织、抗氧化酶活性、形态性状、光合响应、生长响应、非结构性碳水化合物、存活、土壤种子库、种子萌发、植物群落、物种多样性、空间分布格局、群落演替、群落结构、RS、典范对应分析(CCA)
生态修复与利用 Utilization and restoration of ecosystem	生态友好型利用、适生植物、生态设计、基塘工程、植被恢复、反季节周期涨落、恢复生态学、生态重建、生态恢复、防治对策、土地资源(利用)
共有 Common	三峡库区、三峡水库、小江(澎溪河)、回水区、水位、香溪河、消涨带、涨落带、大宁河、开县、河岸带、淹没区

表 2 消落带研究论文中高频率关键词

Table 2 Keywords of high frequency in WLFZ research papers

关键词 Key word	词频 Frequency number	关键词 Key word	词频 Frequency number	关键词 Key word	词频 Frequency number	关键词 Key word	词频 Frequency number	关键词 Key word	词频 Frequency number
消落带 water level fluctuating zone	156	重金属	30	释放	13	对策	10	涨落带	7
三峡库区 Three Gorges Region	138	氮	21	沉积物	12	湿地	10	磷释放	7
三峡水库 Three Gorges Reservoir	83	形态	20	通量	12	生态重建(修复)	9	秋华柳	7
生态 Ecology	61	回水区	19	种子库	12	CO ₂	9	河岸带	6
土壤 Soil	58	群落	17	生物多样性	12	狗牙根	9	消涨带	6
消落区 water level fluctuating zone	56	光合作用(响应)	15	香溪河	12	生理特征	9	解吸	6
植物(植被) Plant	55	吸附	14	富营养化	12	开县	8	物种	6
磷 Phosphorus	41	植物群落	13	植被恢复	11	磷形态	8	土壤水分	6
淹水(水淹) Flooding	36	水位	13	生态环境	11	藻类	8	水华	6
小江(澎溪河) Penxi River	32	土地资源(利用)	13	温室气体	11	蓄水	8	大宁河	5

1.2.3 消落带研究的重要期刊

对载文期刊进行统计,这些论文分布在 123 种期刊上,其中排名前 20 的期刊统计如表 3 所示,载文较多的期刊有《生态学报》、《长江流域资源与环境》、《环境科学》和《重庆师范大学学报(自然科学版)》。前 20 种期刊发表的论文数量占了所有论文数量的 60%。英文期刊中 Environmental Science and Pollution Research, Acta Ecologica Sinica 和 Ecological Engineering 这 3 种期刊的论文数量排名前三。《生态学报》是生态学领域最重要的综合性期刊,该期刊刊载的消落带论文最多,发表在该期刊上的论文中有 25 篇是植物研究的成果,主要是消落带植物群落变化和生理生态响应的论文。发表在《长江流域资源与环境》的论文分布在消落带的环境问题、土壤和植物主题,各主题的论文数量比较均衡。《环境科学学报》、《环境科学》和《环境科学研究》是国内环境研究领域影响力较大的期刊,主要报道了消落带温室气体排放与富营养化的环境问题的成果,以及土壤的研究成果。《水科学进展》主要报道水资源、水环境等领域科学技术的最新成果、重要进展,发表在该

期刊上的论文主要是温室气体排放的论文(4篇)。《湖泊科学》和《湿地科学》和消落带生态系统关联性较强,但这两种期刊上有关消落带的论文数量不多,前者主要关注消落带的生态环境问题,后者主要刊载的是植物主题的论文。

表 3 刊载消落带论文较多的期刊

Table 3 Journals with most published papers on WLFZ ecosystem

发表期刊 Journals	发表论文数量 Number of papers	发表期刊 Journals	发表论文数量 Number of papers
生态学报 Acta Ecologica Sinica	26	湖泊科学 Journal of Lake Sciences	7
长江流域资源与环境 Resource and Environment in the Yangtze Basin	20	生态学杂志 Chinese Journal of Ecology	7
环境科学 Environmental Science	19	水科学进展 Advances in Water Science	6
重庆师范大学学报(自然科学版) Journal of Chongqing Normal University: Natural Science	17	水土保持学报 Journal of Soil and Water Conservation	6
环境科学学报 Acta Scientiae Circumstantiae	9	西南师范大学学报(自然科学版) Journal of Southwest China Normal University: Natural Science	6
武汉植物学研究 Journal of Wuhan Botanical Research	9	植物生态学报 Journal of Plant Ecology (Chinese Version)	6
人民长江 Yangtze River	9	水生态学杂志 Journal of Hydroecology	6
环境科学研究 Research of Environmental Sciences	8	环境科学与技术 Environmental Science & Technology	5
西南大学学报(自然科学版) Journal of Southwest University: Natural Science Edition	8	水土保持通报 Bulletin of Soil and Water Conservation	5
林业科学 Scientia Silvae Sinicae	8	湿地科学 Wetland Science	5
Environmental Science and Pollution Research	9	Ecological Engineering	4
Acta Ecologica Sinica	5		

1.2.4 引用频次高的论文

中文论文引用次数大于 40 次和英文论文大于 10 次的论文如表 4 所示,引用次数最多的论文是“三峡水库水位涨落带土地资源的初步研究”。引用频次较高的论文中和植物研究有关的论文数量最多,有 8 篇,其次是有关土地资源利用的论文。有关土地资源利用的论文发表时间较早,且引用频次较高,主要原因是在这些论文之中较早的提出了消落带的概念。在三峡消落带形成之前和形成初期,有学者提出利用消落带进行农业开发,但随着消落带的形成环境问题不断显现,学术界更注重如何生态友好的利用消落带^[21]。

1.2.5 消落带研究机构分布

对论文所属的研究机构统计,发表论文数量在前 20 的研究机构如表 5 所示,这些研究机构发表论文的数量占了 84.1%。地域特征分布明显,发表论文数量在前 20 的研究机构全分布在长江流域重庆、湖北、四川、上海以及北京,其中,重庆和湖北的高校和研究机构是消落带研究的主要力量。西南大学和重庆大学占有绝对的优势,这两所大学发表的论文占了总论文数量的 39.8%,中国科学院武汉植物园的英文论文发文量第一,其次是重庆大学和西南大学。不同的研究机构的学科优势和研究的侧重点不一样。重庆大学研究主题较为广泛,包括消落带温室气体排放、富营养化,植物群落特征变化和土壤。西南大学的研究则主要集中在消落带植物的微观生理变化响应和土壤重金属。中国科学院武汉植物园和中国科学院植物研究所的研究兴趣主要是消落带的植物主题。中国科学院成都山地灾害与环境研究所则主要致力于消落带的地质灾害及土壤侵蚀和结构的研究。

2 消落带重要主题研究进展

2.1 消落带生态环境问题

脆弱的消落带生态系统直接表现出环境问题。该主题的论文数量是 107 篇,图 4 给出了该主题主要关键

表 4 引用频次较高的论文

Table 4 Research papers with the highest cited frequency

篇名 Name of papers	发表时间 Year	发表期刊 Journal	被引用次数 Times Cited	所属主题 Research subject
三峡水库水位涨落带土地资源的初步研究	1999	长江流域资源与环境	192	IV
三峡库区消落带土地整理利用——以重庆市开县为例	2002	山地学报	83	IV
三峡库区消落带的生态环境问题及其调控	2004	长江科学院院报	82	I
三峡库区水库消落区水土资源开发利用的前期思考	1998	科技导报	54	IV
三峡库区岸生植物野古草光合作用对水淹的响应	2006	生态学报	51	III
模拟三峡库区消落带土壤水分变化对落羽杉幼苗光合特性的影响	2005	生态学报	46	III
三峡库区(重庆段)涨落带土地资源的开发利用模式初探	2005	自然资源学报	46	IV
三峡水库消落区淹水后土壤性质变化的模拟研究	2004	水土保持学报	46	II
三峡水库消落区土壤磷吸附特征	2004	西南农业大学学报	46	II
三峡库区消涨带植物群落的数量分析	2004	武汉植物学研究	43	III
三峡库区淹没区与自然消落区现存植被的比较	2005	西南农业大学学报	41	III
三峡库区消涨带植被重建	2005	植物学通报	40	III
Impacts of large dams on riparian vegetation: applying global experience to the case of China's Three Gorges Dam	2008	Biodiversity and Conservation	29	III
Methane emissions from newly created marshes in the drawdown area of the Three Gorges Reservoir	2009	Journal of Geophysical Research	24	I
Can the soil seed bank contribute to revegetation of the drawdown zone in the Three Gorges Reservoir Region?	2010	Plant Ecology	18	III
Assessing soil heavy metal pollution in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China	2011	Journal of Hazardous Materials	10	II
Plant biodiversity and its conservation strategy in the inundation and resettlement districts of the Yangtze Three Gorges, China	2007	Acta Ecologica Sinica	10	III

表 5 发文章排名前 20 研究机构地域分布和数量统计

Table 5 20 institutes with most published papers on WLFZ ecosystem and their ranking and locations

论文数量排名 Ranking of paper quantity	研究机构 Research Institute	区域分布 Province	论文数量 Paper quantity	论文数量排名 Ranking of paper quantity	研究机构 Research Institute	区域分布 Province	论文数量 Paper quantity
1	重庆大学	重庆	75(8)	10	重庆环境科学研究院	重庆	6
2	西南大学	重庆	74(7)	10	中国科学院生态环境研究中心	北京	6(1)
3	中国科学院武汉植物园	湖北	34(10)	10	同济大学	上海	6(2)
4	三峡大学	湖北	19(3)	14	重庆文理学院	重庆	5
5	重庆三峡学院	重庆	14(1)	14	中国环境科学研究院	北京	5
6	中国林业科学研究院	北京	13	14	长江水利委员会	湖北	5
7	重庆师范大学	重庆	10	14	中国科学院水工程生态研究所	湖北	5
7	中国科学院植物研究所	北京	10(2)	14	中国科学院遥感应用研究所	北京	5(1)
7	中国科学院水生生物研究所	湖北	10(4)	19	长江师范学院	重庆	4
10	中国科学院成都山地灾害与环境研究所	四川	6	19	重庆市园林绿化科学研究所	重庆	4

括号里的数字表示研究机构发表的英文论文数量

词的年际变化。由于水文情势的节律性的变化使脆弱的生态系统出现一系列的生态环境问题,与该主题相关的关键词主要有生态环境问题、地质灾害、滑坡、土壤侵蚀、温室气体、CO₂、CH₄、通量、富营养化、水华爆发、浮游植物、藻类群落等。本文关注的一些生态环境问题并非只有消落带才存在的问题,对于整个库区水生生态系统也会面临的环境问题,包括温室气体排放,富营养化、水华爆发等。由于消落带作为三峡水生与陆生生态系统的交错带,为水生生态系统提供了营养物质间接导致了这些环境问题的发生^[22-23],因此,检索的论文中涉及到有三峡消落带生态系统和水位变化引起的环境问题都统计在内。

库区水位变化对于消落带陆生生物以及整个库区生态系统的稳定和生物多样性都将产生深远的影响^[16]。根据消落带生态环境问题的特点和可能面临的生态环境问题,进行消落带崩塌滑坡脆弱性、水力侵蚀脆弱性、污染脆弱性和景观脆弱性的评价,发现 70% 的消落带至少面临一种生态问题,其余部分则同时面临两种以上的环境问题^[24],压力-状态-响应模型评价三峡水库消落带的生态环境综合状况得出其生态环境综合评价指数处于中等^[25]。

三峡库区土壤侵蚀问题较为严重,消落区由于受水位涨落的影响使土壤侵蚀更为严峻。消落带土壤侵蚀影响水库水质安全,而且加剧库岸的失稳,对水库运行产生严重影响^[26]。但目前,针对消落区土壤侵蚀问题开展研究很少,大部分论文只是陈述消落区土壤侵蚀严重这一事实,对消落区土壤侵蚀的量化较少。2008 年三峡水库 156m 水位运行周期内消落带土壤侵蚀监测数据显示,干流消落带土壤侵蚀强度为 71mm/a,库湾受水位波动影响较小侵蚀强度为 11 mm/a,整个消落区侵蚀强度空间分布明显,侵蚀的厚度在 0—54cm 之间波动^[27]。

整个三峡水库消落带大部分区域地形陡峻,河岸地层稳定性差,是我国环境地质灾害的多发区。三峡水库蓄水后,由于库岸两侧岩石周期性浸泡在水中,库岸山体吃水比重加大,使两岸坡地稳定性减弱,从而诱发崩塌和滑坡^[24],一些研究也证实了消落带水位涨落及其涨落的速率和周期性是引发滑坡产生明显变形的主要外在因素^[28]。三峡库区消落带 82% 区域的崩塌滑坡脆弱性处于轻度到中等脆弱水平^[24]。

温室气体研究虽然开始较晚 2010 年,但近几年发展非常迅速,在 2012 年有 11 篇有关温室气体的论文发表,随着一些研究成果的发表,引起了世界学术界和公众的关注。但目前,学者主要关注的还是库区温室气体排放的通量,对排放机理研究很少,温室气体中,CH₄和 CO₂的研究较多。Chen^[20,29]较早发表三峡消落带的温室气体排放研究成果,观测澎溪河消落带湿地灯心草、水烛、蘆草及双穗雀稗湿地群落的 CH₄和 N₂O 的排放通量,分别为 6.7 mg m⁻² h⁻¹和 0.031 mg m⁻² h⁻¹,CH₄排放通量较大。该结果立刻在学术界引起了热议,也引起了质疑,主要被质疑的是作者实验点的消落带不能代表整个库区消落带的温室气体的排放,消落带存在不同的土地利用,它们的排放能量不尽相同,论文结论简单外推分析缺乏合理性。Yang^[30]发现消落带不同的土地利用的 CH₄的排放通量不尽相同,且远比 Chen 的研究结果小。Lu^[31]观测消落带在落干期的 CH₄的排放通量,发现消落带落干期处于有氧环境下,其排放通量很小,甚至还有从源转汇的趋势。总的来说,从不同学者的结果来看,温室气体排放通量的变异性很大,这可能和同一水库温室气体排放有很大的空间和时间异质性有关。

消落区既是温室气体排放源,又发挥着碳汇功能,这与三峡水库采用“蓄清排浑”的运行机制有关,在夏季出露期间植被生长吸收了大量的 CO₂并积累许多生物量,库区消落带内碳储量约为 514 862.3t^[32],在三峡开始蓄水后,消落带生长的植被开始分解并向水体中释放营养元素,实验^[33]发现植物淹水后营养元素的释放

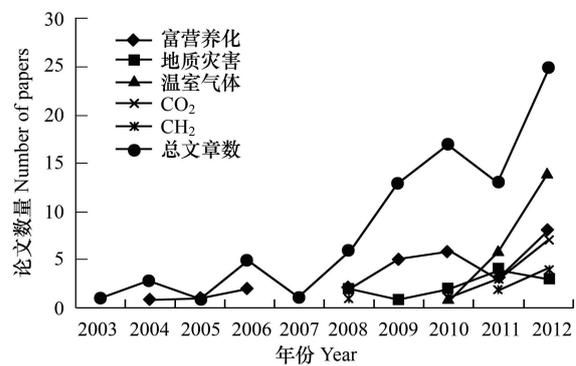


图 4 消落带生态环境问题主要关键词年际变化

Fig.4 Frequency changes of main keywords on "environmental problems" between 2003 and 2012

负荷惊人, TN 平均达 125.2 kg/hm^2 , TP 为 21.0 kg/hm^2 , 这些营养元素为库区整个水生生态系统的温室气体排放提供了丰富的 C 和 N 源, 但是有多少释放进入水体的 C 和 N 源转化为温室气体, 占了消落带在落干期植物生长吸收的碳的多少比例还不得而知, 消落带是源大于汇还是汇大于源, 现在还没法对其下结论, 需要在以后研究中加强野外观测。

2.2 消落带土壤

土壤是消落带生态系统的重要部分。该主题总共有 119 篇论文发表, 占了 24.9%, 从 2003 年开始出现有关消落带土壤的论文, 数量稳步增长, 2009 年以后增加更为明显。该主题主要关键词的年际变化如图 5 所示, 出现频率较高的关键词有土壤、氮、磷、沉积物、吸附、解吸、释放、形态、磷形态、磷释放。从出现的关键词可以看出, 研究中主要涉及三类化学元素, 分别是氮、磷和重金属元素, 这些元素在消落带系统内的形态和迁移转化是研究热点。

干湿交替、淹水、落干是该主题论文中经常出现的词汇, 消落区受固定水位涨落的影响, 其土壤环境会发生

变化, 在这种背景下土壤中的氮、磷会与水体发生迁移转化、吸附、释放、解吸等一系列的过程。氮磷的形态决定了其在环境中的迁移、转化、沉积规律。考察消落带土壤中氮磷的不同化学形态及其含量, 对研究水-沉积物界面上的氮磷的迁移与转化等地球化学行为有重要的现实意义。消落区土壤氮、磷的研究出现较早的论文分别是 2005 年和 2004 年, 研究氮元素的论文有 12 篇, 有关土壤磷元素的论文更多有 31 篇, 这可能和磷更易导致富营养化问题有关, 磷在土壤与水体界面之间的迁移转化是消落区研究的热点。马利民^[34]进行土壤磷释放的模拟试验, 发现在淹水时土壤磷形态有一定的变化, 土壤 Fe-P 减少, Al-P 增加, 土壤 TP 减少, 土壤磷有一定的释放, 而有研究发现消落带淹水后磷会积累^[35]。土壤进行周期性“淹水-落干”处理发现有趣结果, 土壤有效磷水平在淹水时增加, 干燥后降低, 但有研究得到相反的结论, 朱强^[36]发现淹水后黄壤和紫色土的有效磷含量逐渐降低, Fe-P 和 Al-P 都有 8.2% 以上的增幅。

消落区土壤中的重金属是库区潜在的污染源, 它们通过溶解、交换、扩散等方式进入水体而引起水质变化, 而江水中的重金属通过土壤吸附、沉淀等形式迁移至消落区土壤中引起土壤环境的改变。研究重金属元素的论文比研究氮和磷元素的论文数量要多, 有 46 篇。但这些研究中, 对消落带重金属的现状调查研究报道较多, 偏重重金属的生态风险评价、时空分布, 对重金属的形态研究和水-土壤-植物之间的迁移转化等地球化学行为涉及较少。消落区高程差异意味着淹水时间和频率的不同, 这是否影响重金属含量在消落区的差异。有的研究结果认为高程对重金属含量并没有显著的影响^[37-38], 有研究得出了相反的结论, 发现长期淹水土壤重金属含量显著高于短期淹水土壤与未淹水土壤, 淹水时间越长, 重金属在土壤中的累积越严重^[39], 也有认为消落带土壤重金属的含量普遍上部偏高^[40]。

2.3 消落带植物

植物是消落带生态系统中变化最为剧烈的生态要素, 该主题共计 151 篇论文, 占了 31.59%。目前, 三峡库区植物研究主要从宏观和微观两个层面开展, 一是从植物生理生态方面, 存活下来的植被是怎么通过改变自身的形态和生理响应来适应固定节律的水位变化胁迫, 这部分出现频率较高的关键词有生理特性、通气组织、抗氧化酶活性、形态性状、光合响应、生长响应、非结构性碳水化合物、存活; 另一方面, 从植物群落组成、结构和种子库的变化探讨植物群落的演替趋势, 这部分出现的关键词有土壤种子库、种子萌发、植物群落、物种多样性、空间分布格局、群落演替、群落结构、RS、典范对应分析(CCA)。植物研究出现频次较多的关键词的年际变化趋势如图 6 所示。

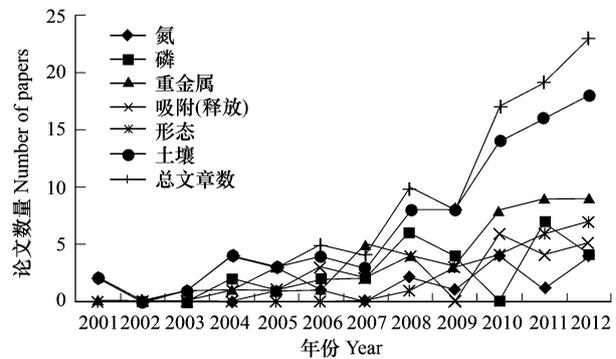


图 5 消落带土壤研究主题重要关键词年际变化

Fig. 5 Frequency changes of main keywords on WLFZ soil subjects between 2001 and 2012

消落带生态系统受周期性反季节的水淹影响,植物主要受水淹、土壤水分变化和干旱胁迫,很多植被因不能适应这种环境的变化而消亡,导致植被群落结构发生剧烈的变化,三峡库区河岸带的植物群落研究时间较早 2000 年^[41],这为后面水淹后消落区的群落结构对比变化提供了数据基础,2009 年水库消落区植被数量,与三峡工程建成前的河岸带相比,消落区内分布的维管植物的科减少 26.51%,属减少 29.58%,种减少 42.96%^[42]。消落带生态系统还不够稳定,其优势物种年际间存在变化,以白夹溪为例,2008 年,156m 水淹线以下植物以苍耳和双穗雀稗为主,2009 年,狗牙根替代双穗雀稗和苍耳成为优势物种^[43]。对忠县的调查发现 160m 高程优势种为多年生狗牙根而在 170 m 高程被一年生白酒草替代,这和消落带高程不同导致淹水时间和深度上的差异有关。

消落带植被群落组成发生了变化,逐渐由原来的乔灌群落转变为草本群落,并且草本群落所占的比例不断提高。反季节性水淹对于乔灌木和多年生草本植物的冲击十分剧烈,长期水淹环境对于三峡地区原有的很多多年生草本和灌木有着致命的影响,导致这种现象的主要原因可能与不同生活型植物对水淹的响应和适应不同有关^[44]。一年生草本植物主要靠种子繁殖,并且植物生活周期短,其生长繁殖期正好与消落带成陆期一致,在水库退水后蓄水前完成其生活史,次年依靠土壤种子库开始新的生长周期。

消落区土壤种子库出现频次共 13 次。消落区种子库的研究开始于 2007 年,在 2010 和 2011 年发表的研究成果最多。有学者从消落带的土壤种子库特征^[45]和消落带水文情势的剧烈变化对种子萌发影响^[46]进行了详细研究。研究者更关心的是,消落带的种子库对消落带的植被生态恢复的贡献率有多少,不同水文干扰条件下消落带的植被和种子库的相关性大小^[47-48]。

从关键词出现的频次来看,苍耳、狗牙根、秋华柳、野古草、枫杨、桑树是三峡库区植物研究中涉及较多的植物种类,狗牙根和秋华柳分别是草本和灌木中较为耐淹的物种,在以关键词出现的频次分别达 10 次和 9 次,它们的形态变化、生理和适应策略等是研究的重点。狗牙根应对水陆生境变化特有的适应策略是加速伸长生长,增加茎生物量分配、增加分蘖数量和地下生物量分配^[49],除了形态上的适应,还通过增加酶的活性来在生理上适应水淹的胁迫^[50]。秋华柳的适应策略更为多样,水下光合作用、通气组织的形成、酶活性增强,物质的储存都对适应水淹胁迫有帮助。水淹处理下秋华柳在较低的 CO₂ 浓度条件下仍具有一定的水下光合能力,这是它们具有较高水淹耐受性的重要原因之一^[51-52]。茎通气组织是野古草和秋华柳适应河岸区水淹环境的对策之一,对减小气体在植物体内运输和扩散的阻力、改善低氧环境中植物体内的氧供给状况非常有利^[53]。秋花柳当遭受水淹胁迫时,还可通过提高保护酶活性以加强清除活性氧、减少后者对细胞膜伤害^[54]。

2.4 消落带生态系统修复与重建

水库消落带形成初期,生境承受着干湿交替的剧烈变化,原生植物的消失,消落带生态系统产生了严重的退化。如何快速恢复和重建消落带植被,恢复消落带的基本生态功能,已经成为消落带建设成功与否的关键。这部分从实施的一系列生态工程和适生植物选择试验两方面总结修复消落带所做的努力。该主题共有 101 篇论文发表,占了 21.1%。出现频率比较高的关键词有:生态友好型利用、适生植物、生态设计、基塘工程、植被恢复、生态重建、生态恢复等。目前,消落带治理中应用比较广泛的生态工程包括基塘工程、林泽工程、生态浮床工程等^[55-56],这些工程都涉及植物的运用。

适生植物的选择是生态系统修复的基础。通过试验选择了一些适合在消落带环境中生长的植物(表 6),其中以草本植物为主,狗牙根已被很多的研究证实是适合消落带生境特点的一种多年生植物。

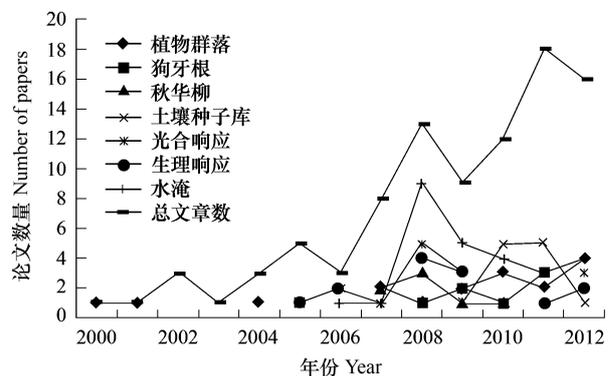


图 6 消落带植物研究主题重要关键词年际变化

Fig. 6 Frequency changes of main keywords on WLFZ plants subjects between 2000 and 2012

适用于季节性水位变动的基塘工程模式,就是在三峡水库消落带的平缓区域构建水塘系统,塘内筛选适应于消落带季节性水位变动,同时具有观赏价值、环境净化功能、经济价值的湿地作物,充分利用消落带自身丰富的营养物质,构建消落带基塘系统^[71]。林泽工程主要的实施点是消落带的上部区域,该区域水淹较浅,而且水淹时间短。筛选种植耐淹且具有经济利用价值的乔木、灌木,通过乔、灌配置,营建消落带生态屏障带,保护库区水生系统免于陆生系统的干扰^[56],并在白夹溪大湾实验了该生态工程。

表 6 三峡库区消落带适生植物的选择试验

Table 6 Selection of suitable plants in WLFZ

植物名称 Plants	试验设计 淹水天数/d Duration of submerged	试验设计 淹水深/m Depth of submerged	试验结果 Results	文献来源 References
狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	191	0—25	保持存活,存活率不详	[57]
	180	25	恢复盖度 63.33%	[58]
	180	2	存活率 100%	[59]
	210	25	存活率 100%	[60]
秋华柳 <i>Salix variegata</i>	90	2	存活率为 100%	[51, 61]
	180	10	恢复盖度 32.33%	[62]
	120	2	存活率 100%	[63]
香根草 <i>Vetiveria zizanioides</i>	180	2	存活率 87.5%	[59]
	120	9	能够存活 野外调查	[64]
菖蒲 <i>Acorus calamus</i>	180	2	100%	[59]
空心莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i>	180	2	存活率 50%	[59]
硬秆子草 <i>Capillipedium assimile</i>	210	25	存活率 80%	[60]
双穗雀稗 <i>Paspalum distichum</i>	210	25	存活率 80%	[60]
羊茅 <i>Festuca ovina</i>	180	20	恢复盖度 91.33%	[58]
香附子 <i>Cyperus rotundus</i>	180	20	恢复盖度 27%	[58]
芦苇 <i>Phragmites australis</i>	180	20	恢复盖度 28%	[58]
野古草 <i>Arundinella anomala Steud.</i>	60	2		[65-66]
地果 <i>Ficus tikou</i>	180	10	恢复盖度 58%	[62]
桑树 <i>Morus alba</i>	214	13	能存活并发芽展叶	[67]
水蓼 <i>Polygonum hydropiper</i>	30	水淹根部处理	光合作用没有变化	[68]
枸杞 <i>Lycium chinense</i>	60	0.15	地上部分恢复迅速,根系生长受抑制	[69]
牛鞭草 <i>Hemarthria altissima</i>	180	2	存活率 90%	[70]

实验淹水天数只是文献中淹水天数最长的时间,不代表是该植物类型的极限耐淹的天数

根据三峡消落区“冬水夏陆”新生地理景观特点,在消落区正实施“沧海桑田生态经济工程”的示范项目,目的是要在三峡库区形成种植—养殖—加工—营销产业链,在有效地保护和净化三峡库区国家战略水资源、促进消落带水土保持与生态修复的同时,拉动库区经济发展。2010年初进入试验阶段,选择重庆市开县渠口镇小河作为试验区,进行 175m 线下、线上的饲料桑种植、桑饲料加工、饲料桑养殖草食畜禽、饲料桑耐淹、运作机制研究。根据目前的结果显示,桑树具有极强的耐水淹特性^[67]。目前,因为这些措施的实验时间有限,其治理消落带的长期效果究竟如何,还不敢过早的下确定性的结论。

3 结论与讨论

三峡水库水位周期涨落形成脆弱的生态系统三峡消落带。针对消落带的研究虽然起步较晚,但是发展很快,尤其是从三峡水库蓄水形成世界最大的消落带后,获得关注度日益增加。在统计分析已发表的学术论文的基础上,得到以下结论:

(1) 消落带论文数量逐年递增,特别是 2009 年以后,论文数量增长很快,共检索到中英文文献 478 篇,其中英文论文数量较少 42 篇。

(2) 消落带的研究机构主要分布在重庆、湖北和北京,重庆大学,西南大学和中国科学院武汉植物园发表论文数量在研究机构中名列前三。

(3) 有关消落带的论文主要发表在 123 类期刊上,排名前 20 的期刊发表的论文占了 60% 的论文。《生态学报》、《长江流域资源与环境》和《环境科学》的载文数量最多,《生态学报》主要报道的是消落带植物研究的成果,《长江流域资源与环境》关注的领域较为宽泛,《环境科学》主要报道土壤和环境问题的研究。

(4) 论文引用频次较高的论文中关于植物研究占的比例较大,消落带植物是比较热的研究方向。

(5) 生态是消落带研究最大的主题,土壤和植被是消落带研究的主要生态系统组成要素,磷、氮和重金属在土壤的迁移循环过程是目前研究的主要生物地球化学过程。元素的形态,元素的吸附、释放和解吸规律直接影响到消落带的环境,如富营养化和水华发生,特别是磷释放和上述问题息息相关。如何对消落带进行生态重建是目前遇到最大的挑战之一。温室气体排放也是学者们关心的重要的环境问题,其中 CO₂ 研究最多;消落带的研究地点主要在长江的支流上,其中以澎溪河流域为研究区的成果最多。

虽然在三峡消落带各方面的研究取得了一些进展,但依然有很多问题摆在从事三峡库区消落带研究工作者面前:

(1) 消落带生态系统形成时间短,功能结构还不够稳定,植物群落的次生演替还没完成,其它生物群落都还没适应环境的变化,需要加强长期、系统的消落带生态试验观测,建立消落带生态监测网络。消落带的研究中要加强原位监测,因为各种条件限制,目前很多研究都是从消落带取样在实验室内模拟,如营养元素在消落带土壤中的吸附-释放^[34, 72-73],植物对淹水胁迫的适应机理研究^[60-66]。加强遥感技术在认识消落带景观变化的作用。目前消落区遥感应用研究主要集中于消落去面积变化监测^[74-75]、消落区土地利用景观动态与分析^[76]、消落区植被恢复与植被覆盖^[77]等,而从群落尺度进行遥感监测研究尚处于探索初期阶段,主要原因是消落区特殊的自然地理条件(山地/丘陵地貌、多云雾、形状狭长导致横向延伸面积较小)及水文条件(夏季出露,冬季淹没),导致遥感技术的应用无论从数据源的获取还是方法的选择上都存在着一定的特殊性。因此,加强消落带植被监测遥感研究,形成一套相应的技术方法体系,对于消落带植被管理与恢复重建具有重要意义。

(2) 从对库区消落带各物质迁移研究动态来看,主要侧重现象的描述,对营养元素的迁移和循环的机制研究涉及较少。在以后,消落带的物质循环研究要更加重视消落带独特的水位脉动特点因素。以 C、N 循环为例,水位脉动影响主要表现在以下几个方面:①消落带淹水深度周期性剧烈波动会引起土壤环境氧气含量(DO)与氧化还原电位(ORP)的变化,进而影响 C、N 循环各个过程作用强度,乃至整个循环的方向;②其次,三峡水库独特的运行方式使得消落带出露期植物大量生长,大量植物在淹没期会腐烂,释放大量的营养元素^[32],这其中最明显结果是增加了消落带土壤中 C 素含量,进而导致 C 循环速率的增大。而消落带随后产生的厌氧环境也将使有机质在 C 循环过程中倾向于向甲烷的方向转化^[78];③除此之外,消落带水位剧烈波动将影响 C、N 循环过程中参与微生物的生长环境^[79-80]。三峡库区消落带的独特水文与环境变化特点对其中的 C、N 循环过程有着复杂的影响过程,国内文献中此类研究还少见报道,国外文献对干湿交替环境的物质循环过程有一定的研究历史^[81-83]。然而需要注意的是,三峡水库的水位变化幅度之大是国内外其他环境中少见的,同时三峡水库建成后还具有较为复杂的水文过程直接影响着消落带的沉积与冲刷。因而消落带的物质循环过程不是仅仅受到水位变化的影响,其物质循环过程不是各种影响结果的简单累加。如何将宏观的水文过程影响完整而又具体的反应到微观的物质循环过程中,将是全面而透彻的了解三峡库区消落带物质循环过程的关键。

(3) 消落带湿地生态系统演化的驱动因素需要深入解剖。水位涨落引起消落带的水文条件、土壤物理化学特征、微地形地貌等诸因子发生变化,这些生态因子的变化怎么推动消落带湿地系统演变和演化方向,其中

关键控制过程和关键驱动因子是什么。消落带湿地生态系统特征、结构对生态水文周期性变化的响应方式是什么,还有人类活动的干扰在消落带生态系统的演化中扮演什么角色。

(4) 消落带适生植物的选择关系到植被生态恢复的关键,在干湿环境交替变化环境中,植物在形态结构、能量代谢、激素水平及有关酶活力动态变化等方面研究较多。后期需要扩大耐淹植物筛选和研究范围,同时运用分子生物学手段找出由水淹胁迫诱导的相关基因并对其进行繁殖与培育具有耐水淹的植物品种。

(5) 消落带研究系统性不强,还是沿用原有河岸带和湿地学的理论研究方法,消落带属于新生生态系统,它的发育演化方向人们无从得知,不能直接借用已用的理论指导消落带的重建,亟需探索适合我国的水库消落带湿地理论。

参考文献 (References):

- [1] Stone R. Three Gorges Dam; into the unknown. *Science*, 2008, 321(5889): 628-632.
- [2] 蔡庆华, 孙志禹. 三峡水库水环境与水生态研究的进展与展望. *湖泊科学*, 2012, 24(2): 169-177.
- [3] New T, Xie Z Q. Impacts of large dams on riparian vegetation: applying global experience to the case of China's Three Gorges Dam. *Biodiversity and Conservation*, 2008, 17(13): 3149-3163.
- [4] Mitsch W J, Lu J J, Yuan X Z, He W S, Zhang L. Optimizing Ecosystem Services in China. *Science*, 2008, 322(5901): 528-528.
- [5] Zhang Q F, Lou Z P. The environmental changes and mitigation actions in the Three Gorges Reservoir region. *China. Environmental Science & Policy*, 2011, 14(8): 1132-1138.
- [6] Yuan X Z, Zhang Y W, Liu H, Xiong S, Li B, Deng W. The littoral zone in the Three Gorges Reservoir, China: challenges and opportunities. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(10): 7092-7102.
- [7] 王勇, 刘义飞, 刘松柏, 黄宏文. 三峡库区消涨带植被重建. *植物学通报*, 2005, 22(5): 513-522.
- [8] 王勇, 吴金清, 黄宏文, 松柏. 三峡库区消涨带植物群落的数量分析. *武汉植物学研究*, 2004, 22(4): 307-314.
- [9] Verry E S, Dolloff C A, Manning M E. Riparian Ecotone: A functional definition and delineation for resource assessment. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*, 2004, (4): 67-94.
- [10] Naiman R J, Décamps H. The ecology of interfaces: riparian zones. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1997, 28: 621-658.
- [11] Lowrance R, Leonard R, Sheridan J. Managing riparian ecosystems to control nonpoint pollution. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1985, 40(1): 87-91.
- [12] Gregory S V, Swanson F J, McKee W A, Cummins K W. An ecosystem perspective of riparian zones-focus on links between land and water. *BioScience*, 1991, 41(8): 540-551.
- [13] 刘宗群. 三峡水库水位涨落带的景观生态分析及其对策. *重庆环境科学*, 1993, 15(2): 24-28.
- [14] 黄京鸿. 三峡水库水位涨落带的土地资源及其开发利用. *西南师范大学学报: 自然科学版*, 1994, 19(5): 528-533.
- [15] 程瑞梅, 王晓荣, 肖文发, 郭泉水. 消落带研究进展. *林业科学*, 2010, 46(4): 111-119.
- [16] 中国工程院三峡工程阶段性评估项目组. 三峡工程阶段性评估报告: 综合版. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [17] 牛文元. 生态环境脆弱带 ECOTONE 的基础判定. *生态学报*, 1989, 9(2): 97-105.
- [18] 尹澄清. 内陆水-陆地交错带的生态功能及其保护与开发前景. *生态学报*, 1995, 15(3): 331-335.
- [19] Ye C, Cheng X L, Zhang Y L, Wang Z X, Zhang Q F. Soil nitrogen dynamics following short-term revegetation in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China. *Ecological Engineering*, 2012, 38(1): 37-44.
- [20] Chen H, Wu Y Y, Yuan X Z, Yuan X Z, Gao Y H, Wu N, Zhu D. Methane emissions from newly created marshes in the drawdown area of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, 114(D18): 78-84.
- [21] Willison J H M, Li R X, Yuan X Z. Conservation and ecofriendly utilization of wetlands associated with the Three Gorges Reservoir. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(10): 6907-6916.
- [22] 程炳红, 郝庆菊, 江长胜. 水库温室气体排放及其影响因素研究进展. *湿地科学*, 2012, 10(1): 121-128.
- [23] 李哲, 白镭, 郭劲松, 蒋滔, 孙志禹, 陈永柏. 三峡不同蓄水阶段澎溪河 CO₂ 通量的初步研究. *水科学进展*, 2012, 23(6): 851-860.
- [24] 周永娟, 仇江啸, 王姣, 王效科, 吴庆标. 三峡库区消落带生态环境脆弱性评价. *生态学报*, 2010, 30(24): 6726-6733.
- [25] 周谐, 杨敏, 雷波, 张晟, 杨春华. 基于 PSR 模型的三峡水库消落带生态环境综合评价. *水生态学杂志*, 2012, 33(5): 13-19.
- [26] 鲍玉海, 贺秀斌. 三峡水库消落带土壤侵蚀问题初步探讨. *水土保持研究*, 2011, 18(6): 190-195.
- [27] 鲍玉海. 三峡水库消落带土壤侵蚀特征研究 [D]. 四川: 中国科学院水利部成都山地灾害研究所, 2009.
- [28] 高连通, 易夏玮, 李喜, 詹敏, 代永力, 晏鄂川. 三峡库区典型滑坡变形与高水位涨落关系研究. *地质科技情报*, 2011, 30(4): 132-136.

- [29] Chen H, Yuan X Z, Gao Y H, Wu N, Zhu D, Wang J X. Nitrous oxide emissions from newly created littoral marshes in the Drawdown Area of the Three Gorges Reservoir, China. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2010, 211(1/4): 25-33.
- [30] Yang L, Lu F, Wang X K, Duan X N, Song W Z, Sun B F, Chen S, Zhang Q Q, Hou P Q, Zheng F X, Zhang Y, Zhou X P, Zhou Y J, Ouyang Z Y. Surface methane emissions from different land use types during various water levels in three major drawdown areas of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117(D10), doi: 10.1029/2011JD017362.
- [31] Lu F, Yang L, Wang X K, Duan X N, Mu Y J, Song W Z, Zheng F X, Niu J F, Tong L, Zheng H, Zhou Y J, Qiu J X, Ouyang Z Y. Preliminary report on methane emissions from the Three Gorges Reservoir in the summer drainage period. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, 23(12): 2029-2033.
- [32] 孙荣, 袁兴中. 三峡水库消落带湿地碳储量及空间格局特征. *重庆师范大学学报: 自然科学版*, 2012, 29(3): 75-78.
- [33] 张志永, 彭建华, 万成炎, 郑志伟, 仇登高. 三峡库区澎溪河消落区草本植物的分布与分解. *草业学报*, 2010, 19(2): 146-152.
- [34] 马利民, 唐燕萍, 滕衍行, 赵建夫. 三峡库区消落区土壤磷释放的环境影响因子. *地学前缘*, 2008, 15(5): 235-241.
- [35] 曹琳, 吉芳英, 林茂, 黎司, 王图锦. 三峡库区消落区表层沉积物磷吸附特征. *水科学进展*, 2011, 22(1): 89-96.
- [36] 朱强, 安然, 胡红青, 万成炎, 胡莲, 王素梅. 三峡库区消落带土壤对磷的吸附和淹水下磷的形态变化. *土壤学报*, 2012, 49(6): 1128-1135.
- [37] 王业春, 雷波, 杨三明, 张晟. 三峡库区消落带不同水位高程土壤重金属含量及污染评价. *环境科学*, 2012, 33(2): 612-617.
- [38] 程瑞梅, 王晓荣, 肖文发, 郭泉水, 封晓辉. 三峡库区消落带水淹初期土壤物理性质及金属含量初探. *水土保持学报*, 2009, 23(5): 156-161.
- [39] 储立民, 常超, 谢宗强, 熊高明. 三峡水库蓄水对消落带土壤重金属的影响. *土壤学报*, 2011, 48(1): 192-196.
- [40] 张艳敏, 刘海, 魏世强, 江韬, 刘丽琼, 钱龙, 刘翼, 龚明艳. 三峡库区消落带不同垂直高程土壤重金属污染调查与评价. *中国农学通报*, 2011, 27(8): 317-322.
- [41] 江明喜, 蔡庆华. 长江三峡干流河段河岸植物群落的初步研究. *水生生物学报*, 2000, 24(5): 458-463.
- [42] 刘维璋, 杨帆, 王杰, 王勇. 三峡水库干流和库湾消落区植物物种动态分布研究. *植物科学学报*, 2011, 29(3): 296-306.
- [43] 王强, 刘红, 张跃伟, 熊森, 袁兴中. 三峡水库蓄水后典型消落带植物群落时空动态—以开县白夹溪为例. *重庆师范大学学报: 自然科学版*, 2012, 29(3): 66-69.
- [44] 王业春, 雷波, 张晟. 三峡库区消落带不同水位高程植被和土壤特征差异. *湖泊科学*, 2012, 24(2): 206-212.
- [45] 王晓荣, 程瑞梅, 封晓辉, 郭泉水, 肖文发. 三峡库区消落带回水区水淹初期土壤种子库特征. *应用生态学报*, 2009, 20(12): 2891-2897.
- [46] 李连发, 廖建雄, 江明喜, 黄汉东, 何东. 干藏和淹水对三峡库区 21 种草本植物种子萌发的影响. *武汉植物学研究*, 2010, 28(1): 99-104.
- [47] 王欣, 高贤明. 模拟水淹对三峡库区常见一年生草本植物种子萌发的影响. *植物生态学报*, 2010, 34(12): 1404-1413.
- [48] Lu Z J, Li L F, Jiang M X, Huang H D, Bao D C. Can the soil seed bank contribute to revegetation of the drawdown zone in the Three Gorges Reservoir Region?. *Plant Ecology*, 2010, 209(1): 153-165.
- [49] 洪明, 郭泉水, 聂必红, 康义, 裴顺祥, 金江群, 王祥福. 三峡库区消落带狗牙根种群对水陆生境变化的响应. *应用生态学报*, 2011, 22(11): 2829-2835.
- [50] 谭淑端, 朱明勇, 党海山, 王勇, 张全发. 三峡库区狗牙根对深淹胁迫的生理响应. *生态学报*, 2009, 29(7): 3685-3691.
- [51] 罗芳丽, 曾波, 陈婷, 叶小齐, 刘巖. 三峡库区岸生植物秋华柳对水淹的光合和生长响应. *植物生态学报*, 2007, 31(5): 910-918.
- [52] 陈芳清, 郭成圆, 王传华, 许文年, 樊大勇, 谢宗强. 水淹对秋华柳幼苗生理生态特征的影响. *应用生态学报*, 2008, 19(6): 1229-1233.
- [53] 陈婷, 曾波, 罗芳丽, 叶小齐, 刘巖. 外源乙烯和 α -萘乙酸对三峡库区岸生植物野古草和秋华柳茎通气组织形成的影响. *植物生态学报*, 2007, 31(5): 919-922.
- [54] 类淑桐, 曾波, 徐少君, 任秋芳. 水淹对三峡库区秋华柳抗性生理的影响. *重庆师范大学学报: 自然科学版*, 2009, 26(3): 30-33.
- [55] 袁兴中, 熊森, 李波. 三峡水库消落带湿地生态友好型利用探讨. *重庆师范大学学报: 自然科学版*, 2011, 28(4): 23-25.
- [56] Li B, Yuan X Z, Xiao H Y, Chen Z L. Design of the dike-pond system in the littoral zone of a tributary in the Three Gorges Reservoir, China. *Ecological Engineering*, 2011, 37(11): 1718-1725.
- [57] 刘云峰, 刘正学. 三峡水库消落区极限条件下狗牙根适生性试验. *西南农业大学学报: 自然科学版*, 2005, 27(5): 96-98.
- [58] 秦洪文, 刘云峰, 刘正学, 刘仁华, 胡莲, 万成炎, 王敬. 三峡水库消落区模拟水淹对 4 种草本植物生长的影响. *生物学杂志*, 2012, 29(5): 52-55.
- [59] 王海锋, 曾波, 乔普, 李娅, 罗芳丽, 叶小齐. 长期水淹条件下香根草 (*Vetiveria zizanioides*)、菖蒲 (*Acorus calamus*) 和空心莲子草 (*Alternanthera philoxeroides*) 的存活及生长响应. *生态学报*, 2008, 28(6): 2571-2580.
- [60] 谭淑端, 张守君, 张克荣, 党海山, 黎明, 张全发. 长期深淹对三峡库区三种草本植物的恢复生长及光合特性的影响. *武汉植物学研究*,

- 2009, 27(4): 391-396.
- [61] 罗芳丽, 曾波, 叶小齐, 陈婷, 刘巖. 水淹对三峡库区两种岸生植物秋华柳(*Salix variegata* Franch.)和野古草(*Arundinella anomala* Steud.)水下光合的影响. 生态学报, 2008, 28(5): 1964-1970.
- [62] 秦洪文, 刘云峰, 刘正学, 周大祥, 李彦杰, 刘仁华, 杨俊年, 石汝杰, 甘丽萍, 胡莲, 万成炎, 王敬. 三峡水库消落区模拟水淹对2种木本植物秋华柳 *Salix variegata* 和地果 *Ficus tikoua* 生长的影响. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2012, 47(10): 77-81.
- [63] 李娅, 曾波, 叶小齐, 乔普, 王海锋, 罗芳丽. 水淹对三峡库区岸生植物秋华柳(*Salix variegata* Franch.)存活和恢复生长的影响. 生态学报, 2008, 28(5): 1923-1930.
- [64] 郭泉水, 洪明, 裴顺祥, 王祥福, 聂必红, 杨永明, 梁洪海. 香根草形态性状和光合特性对三峡库区消落带水陆生境变化的响应. 西北植物学报, 2012, 32(11): 2328-2335.
- [65] 罗芳丽, 王玲, 曾波, 叶小齐, 陈婷, 刘巖, 张艳红. 三峡库区岸生植物野古草(*Arundinella anomala* Steud.)光合作用对水淹的响应. 生态学报, 2006, 26(11): 3602-3609.
- [66] 张小萍, 曾波, 陈婷, 叶小齐, 罗芳丽, 刘巖. 三峡库区河岸植物野古草(*Arundinella anomala* var. *depauperata* Keng)茎通气组织发生对水淹的响应. 生态学报, 2008, 28(4): 1864-1871.
- [67] 张建军, 任荣荣, 朱金兆, 宋闯, 刘杰锋, 傅建强, 胡海波, 王建修, 李慧敏, 徐佳佳. 长江三峡水库消落带桑树耐水淹试验. 林业科学, 2012, 48(5): 154-158.
- [68] 陈芳清, 李永, 鄯光武, 许文年. 水蓼对水淹胁迫的耐受能力和形态学响应. 武汉植物学研究, 2008, 26(2): 142-146.
- [69] 秦洪文, 刘正学, 钟彦, 向丽霞, 刘锐, 余建, 张立冬. 三峡库区岸生植物枸杞对短期水淹的恢复响应. 福建林学院学报, 2013, 33(1): 43-47.
- [70] 王海锋, 曾波, 李娅, 乔普, 叶小齐, 罗芳丽. 长期完全水淹对4种三峡库区岸生植物存活及恢复生长的影响. 植物生态学报, 2008, 32(5): 977-984.
- [71] 熊森, 李波, 肖红艳, 袁兴中, 陈忠礼. 三峡水库消落带生态友好型利用途径探索——以基塘工程为例. 重庆师范大学学报: 自然科学版, 2010, 27(6): 23-26.
- [72] 马利民, 张明, 滕衍行, 赵建夫. 三峡库区消落区周期性干湿交替环境对土壤磷释放的影响. 环境科学, 2008, 29(4): 1035-1039.
- [73] 王里奥, 黄川, 詹艳慧, 袁辉. 三峡库区消落带淹水——晾干过程土壤磷吸附——解吸及释放研究. 长江流域资源与环境, 2006, 15(5): 593-597.
- [74] 周娟. 基于RS和GIS技术的三峡库区消落带动态监测[D]. 四川: 西南交通大学, 2010.
- [75] 周月敏, 张磊, 吴炳方, 李伟萍. 基于HJ-A/B星CCD/SPOT5三峡消落带生态环境监测与分析//自主创新与持续增长第十一届中国科协年会论文集(1). 重庆: 中国科学技术协会, 2009: 858-867.
- [76] 邓聪. 三峡库区消落带景观格局特征及时空演变研究——以重庆市开县为例[D]. 重庆: 西南大学, 2010.
- [77] 李伟萍, 曾源, 吴炳方, 张磊, 赵炎, 王强. 三峡水库156m蓄水位消落区植被恢复遥感动态监测研究. 长江流域资源与环境, 2011, 20(3): 332-338.
- [78] Crozier C R, Devai I, DeLaune R D. Methane and reduced sulfur gas production by fresh and dried wetland soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1995, 59(1): 277-284.
- [79] 李飞, 张文丽, 刘菊, 夏会娟, 王建柱. 三峡水库泄水期消落带土壤微生物活性. 生态学杂志, 2013, 32(4): 968-974.
- [80] 邱权, 陈雯莉. 三峡库区小江流域消落区土壤微生物多样性. 华中农业大学学报, 2013, 32(3): 15-20.
- [81] Moore T R, Knowles R. Methane emissions from fen, bog and swamp peatlands in Quebec. *Biogeochemistry*, 1990, 11(1): 45-61.
- [82] Knorr K H, Blodau C. Impact of experimental drought and rewetting on redox transformations and methanogenesis in mesocosms of a northern fen soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(6): 1187-1198.
- [83] Wilson D, Alm J, Laine J, Byrne K A, Farrell E P, Tuittila E S. Rewetting of cutaway peatlands: Are we re-creating hot spots of methane emissions?. *Restoration Ecology*, 2009, 17(6): 796-806.