

三峡库区生态环境效应研究进展*

程 辉^{1,2,3} 吴胜军^{1,2**} 王小晓^{1,2} 姜 毅^{1,2}
陈春娣^{1,2} 王 雨^{1,2} 吕明权^{1,2}

(1. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院 重庆 400714; 2. 中国科学院水库水环境重点实验室 重庆 400714;
3. 中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 随着三峡工程的全面竣工,三峡库区已进入正常蓄水运行阶段,三峡工程对三峡库区生态环境带来了广泛而深远的影响。本文通过文献计量学方法统计了近20年来三峡库区生态环境效应研究的国内外文献,分析了目前三峡库区生态环境效应研究文献的主要分布特征,得出库区生态环境效应主要研究领域及主要研究内容。在此基础上,对三峡库区生态环境效应具体研究内容及进展进行详细阐述。首先,文章对三峡工程蓄水前后产生的最直接的生态环境变化,即库区土地利用变化的研究进展进行分析;接下来,对库区土地利用变化所引起的生态环境效应,包括气候、土壤、水环境、生物多样性等生态环境因子的研究进展展开评述;然后对上述生态环境因子变化最终所带来的生态环境质量和生态系统服务变化进行探讨;最后提出当前库区生态环境效应研究中存在的一些问题与不足,同时给出相关方面的研究展望:建议在今后的研究中更加注重生态环境效应的动态研究,建立长期观测数据库,结合宏观与微观研究,综合评价库区生态环境。

关键词 三峡库区 生态环境效应 文献计量 土地利用变化 生态环境因子 生态环境质量 生态系统服务
中图分类号: X171.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2015)02-0127-14

Research progress on the effects of the Three Gorges Reservoir on the ecological environment

CHENG Hui^{1,2,3}, WU Shengjun^{1,2}, WANG Xiaoxiao^{1,2}, JIANG Yi^{1,2},
CHEN Chundi^{1,2}, WANG Yu^{1,2}, LYU Mingquan^{1,2}

(1. Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China;
2. Key Laboratory of Reservoir Aquatic Environment, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract With the completion of the Three Gorges Project, water impoundment operations have been smoothly for some years now. The Three Gorges Project has also had a broad and far-reaching impact on the ecological environment, with tremendous social and economic benefits. This paper analyzed the progress of research on the effects of the Three Gorges Reservoir (TGR) on the ambient ecological environment using domestic and foreign research publications in recent 20 years. Firstly, the progress of research on the characteristics of land use change in the TGR area was analyzed. Then changes in environmental factors (e.g., reservoir-related climate change, change in soil and water environment and change in biodiversity) were determined. The study also summarized the effects of environmental quality and ecosystem services in the TGR area. Finally, the study put forward the existing problems and shortcomings of current research works and proposed the prospects of future research. It was recommended to pay more attention to the dynamics of the effects of reservoir project on the ecological environment in the TGR area. There was also need to establish a long-term observation database, integrate macroscopic with microscopic research and carry out a comprehensive evaluation of the ecological environment in the TGR area.

Keywords Three Gorges Reservoir area; Ecological environment effect; Literature statistic; Land use change; Ecological

* 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB3-14)、国家自然科学基金项目(51408584)和重庆市科技攻关项目(cstc2012ggB20001)资助

** 通讯作者: 吴胜军, 主要研究方向为地理信息工程与环境生态。E-mail: wsj@cigit.ac.cn

程辉, 主要研究方向为环境生态与自然地理学。E-mail: jayefaye@163.com

收稿日期: 2014-06-19 接受日期: 2014-11-28

factor; Ecological quality; Ecosystem service

(Received Jun. 19, 2014; accepted Nov. 28, 2014)

三峡库区是指按三峡大坝蓄水到 175 m 方案, 因水位升高而受淹没影响地区, 包括湖北省的 4 个县和重庆市的 22 个县(区)^[1]。三峡库区地形十分复杂, 以山地和丘陵为主, 滑坡、塌方、泥石流等自然灾害频发。三峡工程建成后, 在防洪、发电、航运、旅游、供水灌溉等方面产生了巨大经济社会效益, 但同时应该看到, 它对整个长江流域造成了广泛而深远的生态环境影响, 尤其对三峡库区生态环境的影响作用巨大。三峡水库形成后, 淹没陆地面积巨大, 同时改变了天然水流条件, 河水流速变缓, 不利于污染物的扩散自净; 加上大量移民活动, 如耕地开垦、大兴土木、破坏植被等, 致使水土流失加剧, 污染物排放量加大, 农业非点源污染加剧, 库区土地资源及生态环境的压力日益加重, 环境承载力降低, 人地矛盾更加突出^[2]。加强三峡库区的生态环境保护是三峡工程建设和成功利用的关键, 而三峡库区生态环境效应研究是库区生态环境保护 and 三峡工程建设的理论基础, 对于深入了解三峡库区生态环境现状以及对未来三峡库区生态环境的合理利用和治理具有重要作用。

本文通过文献计量学方法, 统计近 20 年来三峡库区生态环境效应研究的国内外文献, 分析文献分布特征及主要研究领域。在此基础上, 归纳总结出三峡库区生态环境效应主要研究内容及研究进展, 提出当前研究中存在的问题与不足, 并对未来三峡库区生态环境效应研究提出建议展望, 以期提高库区生态环境领域研究的重点与针对性, 为库区生态环境治理及生态恢复提供参考。

1 文献检索统计

1.1 研究方法

根据中外文献来源的不同, 分别选取不同数据库进行检索。

对于中文文献, 在中国知网(CNKI)检索包含中国学术期刊网络出版总库、中国学术辑刊全文数据库、中国博士学位论文全文数据库、中国优秀硕士学位论文全文数据库、中国重要会议论文全文数据库、国际会议论文全文数据库、中国重要报纸全文数据库, 以及中国学术期刊网络出版总库—特刊, 搜索主题词含“三峡库区”和“生态环境效应”, 检索时间从 1990 年 1 月 1 日到 2014 年 6 月 1 日, 得到统计文献 520 篇。

对于外文文献, 在 Web of Science 上检索 Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED)索引数据库和 Conference Proceedings Citation Index-Science (CPCI-S)1990 年至今, 统计检索 1: 输入检索词“主题(three gorges reservoir) AND 主题(environmental effect)”, 得到统计文献 24 篇。统计检索 2: 输入检索词“主题(three gorges reservoir) AND 主题(environmental evaluation)”, 得到统计文献 19 篇。

1.2 结果与分析

1.2.1 国内文献检索统计

根据中国知网数据库检索结果, 分别从文献数量年际变化、期刊源统计、学科分类 3 个方面来分析三峡库区生态环境效应研究的国内文献统计学特征。

从中国知网数据库检索结果中, 统计得到近 20 年来三峡库区生态环境效应国内研究文献的年际变化图(图 1)。分析可知, 1990—2014 年(截至 2014 年 6 月 1 日), 发表文献数量大致呈递增趋势, 其中 20 世纪 90 年代(1990—1999 年)年均发表文献数量普遍较少, 均低于 5 篇, 且逐年变化不明显。进入 2000 年以后年均发表文献数量开始急速增长, 开始突破 10 篇, 从 2003 年开始年均发表文献数量大于 20 篇, 2006—2008 年达到一个小高峰, 年均发表文献数量突破 40 篇。2009 年和 2011 年稍有回落, 2012—2013 年起, 发表文献数量又继续呈增长趋势。截止到统计日期, 发表文献数量在 2013 年达到最大值 54 篇。由此不难看出, 国内各领域专家学者对三峡库区生态环境效应研究的关注正逐年得到提高, 研究成果也逐年增多。随着 2010 年三峡水库正式蓄水到 175 m 方案

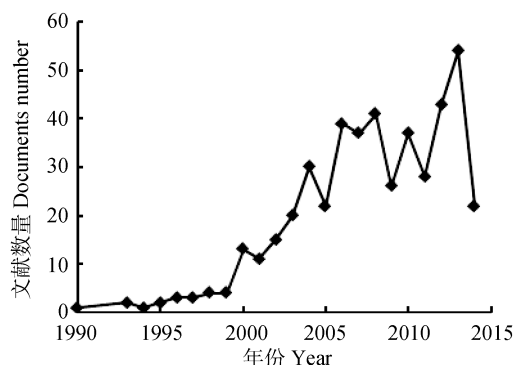


图 1 三峡库区生态环境效应研究相关的国内文献年际变化统计(1990—2014)

Fig. 1 Interannual variability of domestic literatures about the ecological environmental effect researches in the Three Gorges Reservoir area from 1990 to 2014

的运行, 三峡库区生态环境变化及其生态环境效应研究工作得到愈来愈多的研究项目支持。

从中国知网数据库文献检索结果中, 统计得出近 20 年来三峡库区生态环境效应国内研究文献发表数量排名前 20 位的期刊以及学位论文发表数量排名前 20 位研究机构, 如表 1 所示。分析统计结果可知, 目前国内对三峡库区生态环境效应研究成果主要以核心期刊文献及高等院校学位论文研究为主。从发表文献主要期刊来源看, 《长江流域资源与环境》期刊上发表的文献数量最多, 达到 11 篇, 接下来是《生态经济》、《人民长江》、《三峡环境与

生态》和《水土保持研究》, 发表文献数量均达到 5 篇以上。从主要学位论文单位分布来看, 西南大学发表学位论文数量最多, 达到 64 篇, 其次是重庆大学 30 篇, 其他高校学位论文数量均小于 10 篇。分析国内文献期刊源可知, 目前三峡库区生态环境效应研究成果主要集中于资源与环境利用科学、生态学等学科较有影响力的刊物上; 同时从研究单位来看, 重庆市高校因地理区位因素, 对三峡库区生态环境效应研究工作开展较多, 取得大量研究成果, 国内其他研究单位主要分布于农林、地质、水利等学科领域的高校和研究所。

表 1 三峡库区生态环境效应研究相关的国内文献期刊源和学位论文分类统计

Table 1 Source statistic of the domestic journal papers and theses about the ecological environmental effect research in the Three Gorges Reservoir area

排序 Ranking	主要期刊名称 Journal name	文章 篇数 Number	主要学位论文单位 Thesis source	文章 篇数 Number
1	长江流域资源与环境 Resources and Environment in the Yangtze Basin	11	西南大学 Southwest University	64
2	生态经济 Ecological Economy	8	重庆大学 Chongqing University	30
3	人民长江 Yangtze River	6	华中农业大学 Huazhong Agricultural University	8
4	三峡环境与生态 Environment and Ecology in the Three Gorges	5	重庆师范大学 Chongqing Normal University	6
5	水土保持研究 Research of Soil and Water Conservation	5	北京林业大学 Beijing Forestry University	5
6	重庆行政 Chongqing Administration	5	山东大学 Shandong University of Science and Technology	5
7	重庆师范大学学报: 自然科学版 Journal of Chongqing Normal University: Natural Science Edition	5	福建师范大学 Fujian Normal University	3
8	安徽农业科学 Journal of Anhui Agricultural Sciences	4	华中师范大学 Central China Normal University	3
9	环境保护 Environmental Protection	4	中国地质大学 China University of Geosciences	3
10	农业现代化研究 Research of Agricultural Modernization	4	第三军医大学 Third Military Medical University	2
11	中国三峡建设 China Three Gorges Construction	4	吉林大学 Jilin University	2
12	中国水土保持 Soil and Water Conservation in China	4	南京林业大学 Nanjing Forestry University	2
13	重庆社会科学 Chongqing Social Science	4	武汉大学 Wuhan University	2
14	重庆市人民政府公报 Gazette of Chongqing Municipal People's Government	4	西南政法大学 Southwest University of Political Science and Law	2
15	热带医学杂志 Journal of Tropical Medicine	3	中国林业科学研究院 Chinese Academy of Forestry	2
16	生态经济: 学术版 Ecological Economy	3	中国水利水电科学研究院 China Institute of Water Resources and Hydropower Research	2
17	生态学报 Acta Ecologica Sinica	3	成都理工大学 Chengdu University of Technology	1
18	现代农业科技 Modern Agricultural Science and Technology	3	东北林业大学 Northeast Forestry University	1
19	重庆大学学报: 社会科学版 Journal of Chongqing University: Social Science Edition	3	河海大学 Hehai University	1
20	重庆三峡学院学报 Journal of Chongqing Three Gorges University	3	昆明理工大学 Kunming University of Science and Technology	1

按照中国知网数据库设置的学科分类标准, 目前国内三峡库区生态环境效应研究文献的学科领域统计结果可分为 40 类, 见表 2。其中发表 20 篇以上文献的学科有 9 个, 包括环境科学与资源利用 226 篇, 农业经济 64 篇, 宏观经济管理与可持续发展 46 篇, 经济体制改革 46 篇, 农业基础科学 37 篇, 生物学 34 篇, 林业 20 篇, 农艺学 22 篇, 旅游 20

篇, 其他学科统计结果分布不均。国内研究文献中, 环境科学与资源利用学科类的刊物最多, 其次是农业经济和经济管理类的刊物, 而像地质学、自然地理学、气象学、水产渔业等与生态环境有密切关系的学科, 研究文章相对较少, 今后对三峡库区生态环境效应的研究还需加强基础自然科学领域的研究工作。

1.2.2 国外文献检索统计

表 3 为外文文献主要期刊分布及数量统计。分

析检索结果可知, 目前针对三峡库区生态环境效应的国外研究文献数量还不多, 研究文献主要发表于

表 2 三峡库区生态环境效应研究相关的国内文献类别和学科分类篇数统计

Table 2 Domestic literatures categories and subject types about the ecological environmental effect research in the Three Gorges Reservoir area

文献类别 Literature category	学科分类 Subject category								合计 Total
	A	B	C	D	E	F	G	H	
期刊 Journals	141	44	30	38	21	17	15	17	323
博士论文 Doctoral thesis	12	3	3	0	2	8	0	3	31
硕士论文 Master's thesis	44	13	7	3	12	6	5	16	106
国内会议 National conference papers	12	2	2	1	1	3	0	0	21
国际会议 International conference papers	5	1	1	0	1	0	0	4	12
报纸 Newspaper	12	1	3	4	0	0	0	7	27
合计 Total	226	64	46	46	37	34	20	47	520

A: 环境科学与资源利用; B: 农业经济; C: 宏观经济管理与可持续发展; D: 经济体制改革; E: 农业基础科学; F: 生物学; G: 林业; H: 其他学科。A: environmental science and resource usage; B: agricultural economy; C: macroeconomic management and sustainable development; D: economic system reform; E: agricultural basic science; F: biology; G: forestry; H: other subjects.

表 3 三峡库区生态环境效应研究相关的国际刊物类别检索及数量统计

Table 3 International literature sources retrieve and quantity statistic about the ecological environmental effect research in the Three Gorges Reservoir area

检索 1 期刊统计 Journal of retrieve 1	文章篇数 Number	检索 2 期刊统计 Journal of retrieve 2	文章篇数 Number
Environmental Earth Sciences	1	Hydrological Processes	1
Environmental Science and Pollution Research	2	Environmental Science and Pollution Research	3
Earth-Science Reviews	1	Environmental Earth Sciences	1
Science China-Technological Sciences	1	Remote Sensing	1
Remote Sensing	1	Agricultural Water Management	1
International Journal of Remote Sensing	1	Journal of Food Agriculture & Environment	2
Journal of Freshwater ecology	1	Journal of Geographical Sciences	1
Agricultural Water Management	1	Hydrological Cycle and Water Resources Sustainability in Changing Environments	1
Safety Science	1	Frontiers of Green Building, Materials and Civil Engineering, PTS	1
Disaster Advances	1	2011 International Conference on Energy, Environmental Science-ICEES 2011	1
Water Resources Management	1	Progress in Physical Geography	1
Hydrology and Earth System Sciences	1	Journal of Materials in Civil Engineering	1
Environmental Science & Policy	1	Ecohealth	1
International Journal of Environmental Science and Technology	1	Chinese Journal of Analytical Chemistry	1
Hydrological Cycle and Water Resources Sustainability in Changing Environments	1	IAWA Journal	1
Frontiers of Green Building, Materials and Civil Engineering, PTS	1		
2010 International Conference on Energy, Environment and Development	1		
Journal of Earth Science	1		
Progress in Physical Geography	1		
Conference on Environmental Pollution and Public Health	1		
Ecohealth	1		
Journal of Environmental Management	1		
Hydropower	1		

检索 1: 输入检索词“主题(*three gorges reservoir*) AND 主题(*environmental effect*)”; 检索 2: 输入检索词“主题(*three gorges reservoir*) AND 主题(*environmental evaluation*)”。Retrieve 1: input the retrieve data “Theme (*three gorges reservoir*) AND Theme (*environmental effect*)”; Retrieve 2: input the retrieve data “Theme (*three gorges reservoir*) AND Theme (*environmental evaluation*)”.

环境科学、地理学、生态学等领域的外文期刊上,在水文、遥感、农业安全等领域也有少量文献发表。总体来看,针对三峡库区生态环境效应具有国际影响力的外文研究目前还相对较少,今后对三峡库区生态环境效应研究需注重研究内容和研究领域的拓展,加强库区生态环境领域的基础研究水平和研究深度,提高三峡库区生态环境研究的国际影响力。

1.3 文献检索结论

综合上述国内外文献检索统计分析可知,目前国内外学者对三峡库区生态环境效应开展了很多基础研究和评价工作,在生态环境研究领域取得了大量基础数据和研究成果,对三峡库区生态环境效应研究做出了重要贡献。随着最近几年三峡水库正式蓄水到 175 m,三峡工程对库区生态环境的影响效应得到愈来愈多国内外专家学者的关注,但总体来看,现有研究主要还是以国内文献研究为主,缺少较有影响力的外文文献。根据文献检索中期刊源分布及学科分类统计结果,目前三峡库区生态环境效应研究领域主要集中在环境与资源利用、地理学与生态、农业经济管理等学科领域,研究范围涉及自然资源利用、生态环境现状特征、生态环境治理以及生态系统影响评价等不同方面。

2 三峡库区生态环境效应研究进展

三峡工程取得了巨大的社会经济效益,但也对库区生态环境带来了巨大影响。从文献检索统计中可知,目前国内外学者主要是从资源环境领域对三峡库区生态环境效应进行研究,并对库区生态环境的改变及其环境效应有了初步认识。从现有文献研究内容来看,三峡工程对库区生态环境带来的影响效应主要包括库区土地利用变化、生态环境因子变化、生态环境质量变化以及生态系统服务变化等方面。三峡工程建设以来,库区土地利用方式发生根本性改变,库区自然环境特征与蓄水前显著不同,生态环境因子受自然环境变化和人类土地利用影响产生极大改变,库区生态环境质量受此影响亦发生巨大变化,生态系统服务功能与蓄水前也有所不同,生态环境的改变在三峡库区产生显著的环境影响。本文将从以下几个方面对目前三峡库区生态环境效应研究进展加以探讨。

2.1 土地利用变化

三峡工程修建完成及水库蓄水以后,对库区土地利用产生了很大影响,土地利用类型空间分布和景观格局特征发生改变,土地利用方式和利用程度也产生很大变化。库区移民迁移导致新的农田开垦,

植被整体上处于退化状态,森林面积由于天然林的保护,总量有所增加。库区蓄水导致水位发生周期性涨落变化,形成面积广大的消落带,从而产生消落带土地利用方式的特殊变化过程。

通过比较建坝前和建坝后库区不同土地利用类型的面积发现,建坝后三峡库区各土地利用类型中,林地、湿地、旱地和建筑用地面积增加,草地、水田和荒地面积减少^[3]。研究 1975—2005 年 30 年间三峡库区土地利用类型的变化特征发现,耕地、林地、草地面积减少,水域和建设用地的面积增加,库区土地利用程度的指数逐渐上升,且最近 10 年来土地利用强度明显加大^[4]。Zhang 等^[5]利用遥感数据研究三峡库区 1977—2005 年不同土地利用类型的变化特征,结果表明:1977—2005 年三峡库区坡度大于 25°的耕地面积变化不大,而坡度小于 25°的耕地面积急剧减少,每年平均 2 km²的耕地转化为其他土地利用类型,林地面积减少程度较大,草地面积变化较小。由此可见,三峡水库建成蓄水后,库区土地利用类型发生明显改变,不同类型土地面积产生很大变化,其中耕地、林地和草地面积呈减少趋势,而建设用地和水域面积显著增加。

三峡工程建成以来库区土地利用方式发生了明显改变,由此导致土地利用类型的变化。陈书卿和刁承泰^[6]研究重庆市梁平县土地利用结构的变化及演变趋势,发现梁平县土地利用变化以农用地转化为交通用地和居民点及工矿用地的趋势最强,今后一段时期内农用地将持续减少,耕地保护与建设用地扩张的矛盾继续深化。余瑞林等^[7]研究了 20 世纪 90 年代三峡库区土地利用时空变化特征及驱动力因素,发现库区土地利用动态变化主要是耕地、林地和草地相互间转化及向建设用地转化,土地利用变化的驱动力主要是人口、社会经济发展和宏观经济政策等。分析库区土地利用结构转变原因可知,三峡水库蓄水以来,库区一些城镇建设用地因淹水转变为水域,而库区人口基数庞大,库区人民不断增长的建设用地需求导致耕地、林地和草地被大量占用。

土地利用类型的改变不仅使三峡库区土地利用结构和土地利用方式发生改变,也对三峡库区生态环境质量以及土地利用生态风险产生影响。敖崑鯨等^[8]对三峡库区丰都县 1997—2004 年土地利用变化对生态环境的影响评价研究表明,近几年丰都县土地利用变化对生态环境的影响正效应显著,但其生态环境质量还处于相对较低水平。刘晓等^[9]研究三峡库区重庆市开县消落区不同土地利用的综合生态

风险值,并对其进行高低划分级别,结果表明,在消落区内,土地利用风险等级随着土地出露水面海拔高度的增加而加大,在海拔达到 170 m 以上的消落区生态系统受到的伤害更大。Schönbrodt-Stitt 等^[10]对三峡库区香溪河流域梯田退化程度的研究表明,库区梯田退化呈不同空间分布状况,人类活动与自然地形特征共同影响了三峡库区梯田和坡地等土地利用方式的退化水平。三峡工程的建设使库区土地利用结构发生巨大改变,影响库区长期以来的土地利用方式,最终影响到库区土地利用生态风险,但对其生态风险的评价目前还没有统一的标准,未来需更加注重考虑库区土地利用变化及其生态风险评价。

三峡工程的建设对三峡库区土地利用产生了不同程度的影响,目前研究表明在三峡库区土地利用变化过程中,耕地向建设用地的流转是当前土地利用变化的主导方向^[11]。库区土地利用类型的变化以及土地利用程度的加深导致三峡库区生态环境总体上呈现恶化趋势,耕地、林地和草地被大量用于满足新增的建设用地需求。随着近年三峡水库的蓄水,库区土地利用方式也相应发生了变化,库区土地利用空间格局在人类活动扰动下发生显著变化,土地利用生态风险日益加剧。未来应加强三峡库区土地利用变化研究,深入分析库区水位波动条件下土地利用变化对生态环境的影响及反馈机制。

2.2 生态环境因子变化

土地利用变化与生态环境密切相关,它既受自然环境因子的制约,反过来亦对生态环境因子的变化产生不同程度影响。三峡库区土地利用变化不仅对库区土地利用方式产生巨大影响,也导致库区不同生态环境因子发生巨大改变,并带来各自不同的生态环境效应。三峡工程的建设使库区土地利用格局发生前所未有的改变,给原本就处于失衡状态的生态和经济系统增加更大压力,生态环境因子受自然因素和人为活动双重影响,变化尤为明显。目前针对三峡库区生态环境因子变化及其生态效应的研究,主要包括水环境变化及影响、土壤环境变化及评价、气候变化及影响和生物多样性研究等方面。

2.2.1 水环境变化及影响

三峡工程作为我国有史以来最大的水利枢纽工程,对我国的经济建设和社会发展有着重要意义,在防洪、发电、灌溉、航运、旅游等方面产生了巨大的综合效益,但同时也对长江流域的环境安全尤其是对三峡库区的环境造成了极大影响。三峡库区的生态环境问题特别是水环境问题近年来得到了社

会的普遍重视^[12],库区水环境质量、水生态以及水环境安全评价等方面的研究工作得到大力开展。

三峡水库自 2003 年蓄水以来,水质发生显著改变。长期监测结果表明,三峡库区水污染物排放量稳中有升,库区江段水环境质量基本稳定,总体水质保持在Ⅲ类水质标准,部分主要城市江段岸边出现污染带,支流部分水域出现“水华”现象^[13]。大量研究^[14-16]表明,目前三峡库区水量基本能满足库区人民生活和生产需求,但干流水体水质污染程度严重,同时库区水土流失加剧农业面源污染,造成干支流水质进一步恶化。水质问题是三峡库区居民生活用水供应及用水安全的一个至关重要的影响因素,也是确保库区可持续发展的重要因子^[17]。

三峡工程对库区水生态带来巨大影响,当前研究内容主要涉及水库水污染及水体富营养化等问题。三峡库区蓄水后,部分江段和次级河流水体局部河段的水文特征、地质条件、水环境容量以及纳污特性随之改变,主要表现为回水段流速显著降低、水体自净能力下降、纳污容量降低,由此导致水体富营养化程度加大,局部河段“水华”频繁爆发^[18]。Dai 等^[19]研究发现库区蓄水后水体藻类种群数量较之蓄水前显著上升,水库河流支流地区营养元素含量显著上升,呈集聚效应。水体富营养化不仅严重影响库区水质,对生活用水安全带来隐患,同时也使库区水体生态系统受到极大干扰,河流水生态系统营养元素物质循环过程与自然状态下显著不同。

针对三峡库区水环境安全问题,目前研究多从社会经济政策等方面展开。张彦春等^[20]提出将三峡库区及其上游作为特殊水域予以保护,改革流域管理体制,完善水环境保护法律法规以及加强应急机制建设等战略建议。为营造库区良好安全的水环境,今后应加强库区城镇污水处理、控制城镇发展和农村面源污染,加强水质监测与管理^[17]。

三峡库区水环境问题目前已经得到社会各界人士的关注与研究,库区干支流水质的好坏不仅关系到当地老百姓的生活生产,而且也关系到三峡库区乃至长江流域经济社会和环境的可持续发展,这也是三峡水利枢纽工程是否成功的一个重要标志^[21]。目前对三峡库区水环境的评价和研究工作主要还是以分析库区水体化学特征及水体富营养化等方面的内容为主,各领域专家学者大部分都是通过试验分析研究三峡库区水环境问题。而对于三峡库区水环境在库区生态系统中的过程与作用目前还很少有研究报道,从生态系统角度来研究三峡库区水环境问题也是值得今后关注的一大科学视点。三峡库区水

环境与库区自然生态系统过程密切相关, 了解水环境在其中的作用机制是极其重要的一环, 也是库区生态环境评价工作中的重要问题。今后宜从不同学科角度对三峡库区水环境进行评价分析, 为库区生态环境恢复及可持续发展做好理论支撑。

2.2.2 土壤环境变化及评价

三峡库区土地利用变化对生态环境影响的一个重要方面就是土壤环境变化。土地利用变化不仅改变了土地利用方式, 也改变了土地的承载体——土壤环境。三峡库区土地类型多样, 三峡工程蓄水后土地利用变化巨大, 土壤环境及质量均受到巨大影响。目前三峡库区土壤环境变化及其评价研究主要包括土壤侵蚀和土壤重金属污染评价等方面。

三峡库区是我国水土流失最为严重的地区之一^[22], 土壤侵蚀是这一地区最为严重的生态问题, 土壤侵蚀导致大量泥沙进入库区, 威胁到三峡工程及下游的生态安全。有研究发现, 三峡库区年均土壤侵蚀量达 $19\ 364.71 \times 10^4\ \text{t} \cdot \text{a}^{-1}$, 平均土壤侵蚀模数为 $2\ 741.48\ \text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 属于中度侵蚀。土壤侵蚀严重的地区主要分布在库区东部, 面积占库区的 14.43%, 侵蚀量却占总侵蚀量的 58.67%, 是预防和加强水土流失治理的重点区域^[23]。三峡库区地处亚热带, 以亚热带季风气候为主, 植被覆盖和降雨变化对土壤侵蚀影响较大。从库区植被覆盖和降雨侵蚀力的变化来看, 三峡库区东部长江两岸大部分地区植被出现增长趋势, 库区降雨侵蚀力总体呈增加趋势, 并且降雨侵蚀力年际变化存在较明显的空间差异性^[24], 这也导致库区土壤侵蚀分布表现出明显的空间差异性。

三峡库区土壤侵蚀强度与土地利用变化密切相关, 不同类型土地利用方式下土壤侵蚀强度呈现出不同特征。通过 ^{137}Cs 示踪法对三峡库区土壤侵蚀速率进行初步研究表明, 不同土地利用方式 ^{137}Cs 的剖面分布呈现明显差异, 土壤侵蚀强度的大小顺序表现为耕地>园地>草地>荒地>林地, 其中耕地为中度侵蚀, 园地、草地和荒地为轻度侵蚀, 林地为微度侵蚀^[25]。Xu 等^[26]研究发现三峡库区土壤侵蚀程度与地形、气候、植被覆盖、土地利用等环境因素密切相关, 建议通过生态工程手段和退耕还林还草等措施保障库区生态环境, 以预防库区土壤侵蚀的加剧。土壤侵蚀从一定程度上反映了土壤环境的退化水平, 随着库区土地利用程度的改变, 三峡库区土壤侵蚀量和土壤侵蚀强度发生显著变化, 土壤退化程度也随着土地利用程度的加深而发生改变, 库区土壤侵蚀的预防和治理已刻不容缓。

土壤重金属污染评价是三峡库区土壤环境变化及评价的另一个重要方面。土壤重金属元素含量的分布能够反映特定地区土壤环境的健康状况, 对土壤重金属元素含量的分析研究是评价土壤环境质量的重要组成部分。目前研究发现三峡库区土壤环境质量总体较好, 表层土壤中 As、Cu、Hg、Pb、Zn 等重金属元素含量水平较低的一类土占全区面积均在 90%以上^[27]。对土壤重金属背景值的研究发现, 三峡库区土壤 As、Hg 含量低于全国背景值, Pb、Zn 含量略低于全国背景值, Cd、Cr 含量高于全国背景值, Cu、Ni 含量略高于全国背景值^[28]。对库区农林土壤重金属的形态分布与环境风险研究表明, 三峡库区农林土壤重金属污染的空间变异性较强, 处于消落带的土壤污染较严重, 潜在生态风险较大^[29]。

消落带土壤重金属评价是三峡库区土壤重金属评价研究的重要组成部分, 消落带是水生生态系统与陆生生态系统的过渡地带, 其土壤重金属污染具有隐蔽性强、形态多变、无法被生物降解、容易在生物体内累积等特征, 并通过生物链产生富集, 最终危害人类健康^[30-31]。对云阳段消落带土壤重金属含量特征的研究发现, 该区域消落带土壤不受 Pb 污染, 而受 Cd、Cu、Zn 和 Cr 不同程度的污染, 尤以 Cd 污染最为严重^[32]。针对三峡库区支流香溪河消落带土壤重金属的研究发现, 该区域基本处于轻度污染状态, 部分处于安全或警戒线状态^[33]。对小江流域消落带土壤重金属污染评价表明, 该流域土壤环境整体处于轻微污染, 局部存在中度污染, 其中 Cd 元素含量超标最为严重^[34]。三峡库区消落带蓄水前土壤重金属(As 和 Cd)污染主要由生活污水和工业废水产生, 而蓄水后土壤污染物(Hg、Cd 和 Pb)主要由交通排放和工业污水排放引起^[35]。综合分析目前研究成果可知, 三峡水库蓄水后, 多数消落带地区因受到周期性淹水影响, 土壤环境与自然状态下明显不同, 土壤重金属含量在库区各支流均表现出上升趋势, 土壤重金属污染程度也有所提高, 库区土壤环境生态风险较大。

总体来看, 目前三峡库区土壤环境变化及评价研究主要以土壤侵蚀研究和土壤重金属质量风险评估为主, 并且在库区不同区县开展了较多试验研究, 对于认识库区土壤环境的变化及其健康状况具有重要指导意义。但是目前对于库区土壤重金属来源、污染机理还缺乏深层次的研究, 同时在时间尺度上缺乏蓄水前后土壤重金属的对比资料和数据, 今后还有很大空间值得深入探讨。

2.2.3 气候变化及影响

三峡工程建成后,库区水位上升,常年水面面积也大大增加,这都会对局地气候造成影响。下垫面的变化引起局地天气系统的形成、演变和表现特征的变化,从而影响局地气候特征的变化,由此导致局地气象灾害频率、程度、分布特征产生变化,继而引起库区生态环境的变化,并影响人类的农业生产活动^[36]。目前国内外学者通过研究气温、降水量、空气湿度等气象要素的变化特征,对三峡库区近 50 年来的气候变化规律有了大致了解,并对三峡工程蓄水后库区气候变化进行了初步评价研究。

对三峡库区气温的时空变化特征研究表明,自 1951 年以来,三峡库区夏季气温显著降低,冬季气温显著升高。近 50 年来,三峡库区夏季平均气温降低了 $0.16\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$,冬季平均气温升高了 $0.10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 。库区中东部地区夏季的降温幅度略高于西部地区,冬季的增温幅度也大于西部地区^[36]。三峡水库建设以来,库区中东部地区由于地处三峡水库腹部核心地带,水面面积相对增幅较大,大面积的水体对库区气候影响显著,库区气温年较差逐渐减小,由此导致夏季平均气温降低,冬季升高,且对库区中东部地区影响更为明显。

三峡工程的建设也对库区降水量年变化规律和季节变化规律带来一定程度的影响。研究表明,自 1951 年以来,三峡库区年降水量和季节降水量变化趋势较为显著,年降水量在 20 世纪 50—80 年代后期有增多趋势,90 年代初降水量有减少趋势。90 年代后期以后,由于三峡工程的开工建设,库区年平均降水量变化幅度较大,1997—2001 年降水偏少,1998 年降水偏多,达到近 54 年来的最高值,该现象产生的原因主要是由于夏季平均降水量在三峡工程建设以来变化幅度较大引起的。对降雨量的季节变化研究发现,三峡库区夏季降水量变化幅度较大,偏差在 80 mm 以内,冬季降水量的变化幅度较小,偏差一般小于 10 mm;三峡工程建成后,库区冬季和夏季降雨量变幅正逐渐缩小^[37]。

三峡工程的建设从根本上改变了库区的立地条件,影响了库区局地气候变化,其中气温、相对湿度、风速、降水量及雾日都有所下降,而蒸发量有所上升,局地气候表现为河流型向湖库型转变的趋势^[38]。对三峡库区气候的综合评价表明,三峡库区水热资源丰富,年均温为 $12.0\sim 19.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,年降水量主要为 $1\ 100\sim 1\ 500\text{ mm}$,年降水变率较小,为 $10\%\sim 15\%$,气候综合评价等级平均为 5.3 级,其中库区西

南部、中部地区气候条件较东部地区好,东部地区气候评价等级最低,小于 5 级^[39]。有研究发现,自 2000—2009 年蓄水以来,库区年平均气温处于上升状态,而相对湿度呈下降趋势,三峡水库蓄水对库区气温起到一定调节作用^[40]。

分析目前研究不难看出,尽管三峡工程建设以来库区部分气候要素的起伏变化较大,但从长时间尺度来看,其变化仍在三峡地区的气候年际变率范围之内,气候变化本身有一个波动过程,三峡库区蓄水后近几年的资料还相对较少,对其气候影响的评价研究还需要进一步的气象观测数据来进行验证分析,库区局地气候的某些变化是由更大尺度上的气候变化与三峡工程的影响叠加在一起形成的^[3],对其变化规律的探索还需要长期观测资料的佐证,特别是对蓄水后库区气候的变化过程还需要加强实地观测验证研究。

2.2.4 生物多样性研究

生物多样性是生物及其环境形成的生态复合体以及与此相关的各种生态过程的总和,包括动物、植物、微生物和它们所拥有的基因,以及它们与其生存环境形成的复杂生态系统^[41]。三峡工程建成蓄水后,库区生态环境发生根本改变,土地利用方式和土地类型与蓄水前差别显著,动植物生境遭受不同程度干扰和破坏,生物多样性较蓄水前发生显著改变。目前对三峡库区生物多样性的研究包括森林群落植物多样性研究、生物量研究,以及库区生物多样性保护等方面。

三峡库区森林群落类型较多,其丰富度、多样性、均匀度指数在群落梯度上呈规律性波动,乔木层植物多样性指数小于灌木层和草本层多样性指数,但是各指数在海拔梯度上并未表现出明显规律性^[42]。对三峡库区物种多样性的垂直分布格局研究表明,水分-能量的动态变化是影响三峡库区植物多样性垂直分布格局的最重要机制,地形异质性也在一定程度上影响了库区植物多样性的垂直分布特征^[43]。

生物量的研究也能从一定程度上反映生态系统生物多样性的变化。有研究估算出三峡库区 2008 年的生物量为 $1.34\times 10^8\text{ t}$,碳储量为 $6.37\times 10^8\text{ t}$ ^[44]。库区森林生物量的估算定量地反映出库区植被与生态环境变化之间的关系,也反映出库区森林群落初级生产力的实际情况,对于定量研究生物多样性具有极其重要的指导意义。

三峡工程蓄水后,库区陆生生物和水生生物的

栖息环境发生根本改变,物种类型、数量、多样性等均与蓄水前明显不同,生物多样性受自然环境和人为活动影响愈加脆弱,生物多样性安全正成为三峡库区生态环境安全的重要内容之一^[3]。因此库区生物多样性的保护工作逐渐得到社会各界人士的关注,蒋佩华等^[45]提出建立陆生动植物和水生生物监测站网,加强对受影响物种的保护生物学研究,并建立自然保护区以保护生物栖息地,减少三峡工程对生物多样性的不利影响。

目前,针对三峡库区生物多样性的研究相对其他领域而言还相对较少,特别是针对库区动物、微生物多样性的研究很少见诸报道。三峡工程这一巨大的水利建设工程对库区生物多样性的影响作用极大,对库区生物多样性的研究工作还需更加注重基础理论的研究以及野外生态调查工作的开展,拓展生物多样性研究领域和研究内容。

2.3 生态环境质量评价

三峡库区生态环境原本就十分脆弱,三峡工程建成后三峡水库淹没面积大,移民人口数量多,大量基础设施需要重建,土地资源紧缺,环境承载力加大,人地矛盾突出,水土流失进一步加剧^[45],生态环境质量因此日趋恶化。三峡库区土地利用方式的改变不仅影响到土地类型空间分布格局,同时也引起库区水环境、土壤环境、气候、生物多样性等生态环境因子发生改变,而生态环境因子的改变最终导致库区生态环境质量发生变化。对三峡库区生态环境质量进行综合评价能够弄清库区生态环境质量现状及生态脆弱性程度,也为今后库区生态环境建设和保护工作提供一定的理论指导。

目前,各方面学者主要是通过建立模型对三峡库区生态环境质量进行评价研究。通过选取水热条件、地形地貌、土地利用和土壤侵蚀等生态因子,建立生态环境质量综合评价模型,对三峡库区生态环境质量空间分异格局进行评价发现,目前三峡库区生态环境质量整体较差,良好等级区域比例低,生态环境质量的空间分异比较明显,中海拔地区生态环境质量最为脆弱^[46]。通过层次分析法和模糊综合评价法对三峡工程蓄水前后库区局地气候、土地利用变化、水土流失、库区动植物多样性、水文泥沙以及水质等指标进行评价对比发现,三峡工程的建设从根本上更改了库区的立地条件,从而较为深远地影响了库区局地气候的变化,对于库区生态环境带来了不可避免的影响^[38]。周谐等^[47]基于 PSR 模型对三峡水库消落带生态环境进行了综合评价,得出

三峡水库消落带总体生态环境综合评价指数为 0.47,处于一般等级,三峡水库消落带各区域的生态环境综合指数分布在 0.37~0.65,83.3%的区域消落带生态环境综合状况等级为一般,消落带地区生态环境质量从研究区域上游到下游依次递减。马泽忠等^[48]采用生态环境质量动态变化模型,对三峡库区大宁河流域 30 年间的生态环境质量变化情况进行分析研究,得出研究区近 30 年来的生态环境质量以中等和较差为主,区域内生态环境中度变化区及较强度变化区所占面积比重较大,需要当地相关部门采取一定措施对其进行生态环境保护建设,以促使生态环境质量向好的方向发展。

三峡库区生态环境质量评价还包括库区生态环境敏感性研究和生态安全研究。对三峡库区重庆段生态环境敏感性研究揭示出目前该地区生态环境敏感性类型以高度敏感为主,其次为中度敏感区和不敏感区,东北部和南部生态环境敏感性高,中西部地区生态环境敏感性低^[49]。三峡库区重庆段自直辖以来的生态安全问题近年来也得到相关学者的关注,有研究发现三峡库区重庆段 1997—2003 年生态安全度为很不安全状况,2004—2007 年生态安全度为不安全状况^[50]。

目前,三峡库区生态环境质量评价的研究工作主要是通过建立生态评价模型这一研究手段来得到评价结果,而对于生态环境评价指标的选取难以有统一标准,因此不同领域研究者对三峡库区生态环境质量的评价工作及评价结果还难以进行横向比较。怎样客观评价三峡库区生态环境质量还是一个亟待解决的科学难题。三峡库区生态环境质量评价的具体研究工作涉及到土地利用、水土流失、气候变化、水质、生物多样性等多方面的指标和因子,怎样建立合适的指标体系及评价标准还有待进一步研究。与此同时,在今后的研究中还应加强对三峡库区生态环境质量变化的影响因素研究,从根源上找出影响三峡库区生态环境质量的主要影响因子,深入分析三峡库区生态环境质量变化的驱动力和机制,针对库区当前主要生态问题采取科学合理的治理和应对方案,为保证三峡水库的永续正常运行和库区社会经济的可持续发展提供支持^[51]。

2.4 生态系统服务变化

三峡工程建成后,由于人工的调控,三峡库区的水位涨落速度、幅度和频率都与原来的天然河道明显不同,当蓄水水位至 175 m 以后,水库两岸形成落差达 30 m、面积约 290 km²的消落带,并形成

了河道型周期性湿地生态系统^[1]。目前,三峡库区重庆段生态系统正处于急剧变化的过渡阶段,库区生态系统的生产、调节和服务功能分异明显,库区东段生态系统的健康程度总体上好于西段,但东段内部空间分异明显,生态系统服务功能空间差异显著^[52]。李月臣等^[53]通过 RS 和 GIS 技术对三峡库区重庆段生态系统服务功能进行综合研究,结果显示三峡库区生态系统服务功能极重要和高度重要区的面积占研究区总面积的近 50%,极重要区基本沿主要江河两侧第 1 层分水岭和西部平行岭谷区的山脊呈条带状分布,高度重要区基本沿极重要区两侧呈环带状分布,少部分零散分布。

土地利用变化是三峡库区生态系统服务变化最为重要的影响因素,三峡工程的建设引起库区土地利用结构发生变化,加上库区自身建设需求、人口增长以及库区移民安置等发展需求,导致库区草地和林地面积减少较多,耕地和建筑用地增加,库区城市化加速。对三峡库区(重庆段)土地利用类型变化与库区生态系统服务价值变化关系研究发现,1995 年研究区林地、草地大面积减少,水域和难利用地面积减少,耕地和建设用地大面积增加,而同期生态系统服务价值由 1995 年的 549 亿元减少到 2000 年的 546 亿元,5 年减少了 3 亿元^[54]。对近 25 年来库区生态系统服务价值的研究则发现,三峡库区生态系统服务价值呈先降后增的“V”字型趋势,自 20 世纪 90 年代初期到 2000 年持续下降,2000—2010 年又大幅增加,其中林地是库区生态服务价值最高的土地利用类型^[55]。这种变化趋势说明,进入 21 世纪后,库区土地利用对生态系统的影响从不利状态逐渐转变为有利状态,这主要得益于近年来政府采取的一系列生态恢复措施得以实施,林地、草地和水体等生态服务价值较高的土地利用类型数量增加,库区整体生态系统服务价值亦随之升高。

三峡库区生态系统服务变化影响到库区生态系统的健康和稳定,同时也是库区生态环境质量好坏的重要衡量标准。在库区未来生态环境效应研究中,应更多地考虑生态系统服务功能,合理规划调整土地利用结构,多保护天然林地、草地和水体等生态服务价值系数高的土地类型,控制城市用地无序扩张,确定生态保护关键区,建立有效的生态环境保护机制,发挥库区生态系统服务功能的最大价值。

3 问题与展望

目前,三峡库区生态环境效应研究工作得到大力

开展,研究领域多、范围广,大到整个库区,小到库区支流小流域,都有不同学科领域的相关研究报道,研究内容涉及库区土地利用变化、生态环境因子变化、生态环境质量评价,以及生态系统服务变化等不同方面,但当前研究还存在一些不足之处,有待进一步完善。

3.1 存在问题

目前主要针对三峡库区土地利用方式和利用类型的时空变化进行了大量研究,但是土地利用变化对三峡库区生态环境的影响研究相对较少,水位波动条件下的土地利用方式对库区生态环境的扰动机制还不清楚,三峡库区蓄水前后的土地利用变化对生态环境带来的生态风险还鲜有研究报道。

库区生态环境因子研究侧重于不同环境因子各自的现状特征和变化过程,而对于不同生态环境因子之间相互作用的探讨相对较少。三峡库区受自然环境变化和人工调控水位的影响,具有特殊的生态环境特征,库区土壤、水、气候、生物等不同生态环境因子的变化会对彼此产生巨大的生态效应,如何评价研究土壤环境、水环境、气候环境以及生物多样性等因素的相互作用机制值得探讨。

对库区生态环境质量的综合评价工作还缺乏统一的指标衡量体系,各方面学者提出的基于现有研究目标的指标体系和评价标准难以进行横向比较。由于不同学科领域研究侧重点和关注点不同,产生对库区生态环境评价不同的理解,从而导致不同的指标选择和权重分配。在今后的研究中,必须建立一套应用范围广泛的生态环境评价指标标准,以便于不同学科之间的交叉研究和交流。

三峡库区生态环境效应研究目前主要是对宏观上的生态环境质量评价和生态系统服务变化的研究,以及微观上不同生态环境因子的生态效应分析,怎样将二者结合起来还需要进一步探讨,生态环境因子与生态系统的结合研究需要完善的理论支持和方法验证,例如对于库区生态系统景观格局的分析评估工作,怎样与生态系统中的土壤环境、生物因子进行结合评估还需要更深入的研究支持才能得出准确结论。

目前,针对三峡库区消落带生态系统的研究相对较少,研究领域主要集中于消落带植被、土壤环境的变化及生态系统服务的改变等方面,对于消落带地区土地利用的环境影响评价工作很少见诸文献,今后宜对消落带生态系统研究投入更多精力。

3.2 研究展望

三峡工程的建设完成使得三峡库区具有其他地

区所不具备的独特生态环境, 库区生态环境同时受到自然因素和人类活动的干扰影响, 对外界因子的敏感性强, 生态环境稳定性相对较弱, 土地利用对库区生态环境效应较其他地区显著。三峡工程夏排冬蓄的水位调度方案使三峡水库水位波动与自然状态下河流的水文特征相反, 三峡库区水位独特的周期性涨落对库区生态环境的影响与其他地区也明显不同, 怎样分析水位波动条件下库区的生态环境效应是当前的研究热点, 也是今后很长一段时期内值得深入探讨的科学问题。

针对库区生态环境的空间异质性研究目前也还比较缺乏, 三峡库区土地面积广阔、地貌类型多样, 不同地理单元生态环境背景差异大, 怎样针对库区不同的自然地理环境选择合适的研究区域和研究指标也是今后需要考虑的问题。

在生态环境评价的方法上, 生态环境评价模型有待进一步开发, 库区现有的生态环境评价模型大部分是基于静态的数学统计分析模型, 侧重于对库区生态环境因子的结构、组成部分、功能、状态的评估研究, 而对生态过程变化的评价研究极少。对库区生态环境和生态系统的评价工作必然涉及生态过程的调控和管理, 因此今后需重点开展对生态过程变化的长期观测及其模型开发工作。

对库区生态环境的动态监测也是一个值得开展的研究方向, 目前的传统监测方法都是基于静态数据的分析, 数据来源主要基于调研统计、野外观测、实验分析, 以及遥感数据解译等途径, 未来需要建立库区长时动态数据库, 对三峡库区生态环境各指标建立数据仓库, 以便进行更长时间尺度上的研究。

由于三峡库区生态环境系统是一个自然-社会-经济的复合系统, 它受到多种因素的影响, 表现出复杂性和不确定性, 因此, 对库区生态系统的评价应当是综合评价^[56], 今后应加强对库区不同尺度生态系统的研究工作, 对其生态系统的健康程度和生态效应做出正确评估。同时, 对于库区生态环境效应的研究工作不应该仅仅停留于科研层次, 对于科研成果的实际应用应加大关注力度, 将科学研究与生产应用结合起来, 合理布局库区生态环境的健康发展格局。

参考文献

- [1] 翟俨伟. 三峡库区生态环境面临的主要问题及治理对策[J]. 焦作大学学报, 2012, 26(1): 90-93
Zhai Y W. The main ecological environmental problems and

- countermeasures in Three Gorges Reservoir area[J]. Journal of Jiaozuo University, 2012, 26(1): 90-93
- [2] 杜逢彬, 陈继平, 石金胡. 三峡库区消落带环境问题及生态环境评价治理[J]. 城市勘测, 2009(2): 150-152
Du F B, Chen J P, Shi J H. Three Gorges Reservoir Area of the environment charged with evaluation and management of the ecological environment[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2009(2): 150-152
- [3] 沈国舫. 三峡工程对生态和环境的影响[J]. 科学中国人, 2010(S1): 48-53
Shen G F. The Three Gorges Project's impact on ecology and environment[J]. Scientific Chinese, 2010(S1): 48-53
- [4] 曹银贵, 王静, 刘正军, 等. 三峡库区近 30 年土地利用时空变化特征分析[J]. 测绘科学, 2007, 32(6): 167-170
Cao Y G, Wang J, Liu Z J, et al. Analyses on temporal-spatial traits of land use in Three Gorges during 30 years[J]. Science of Surveying and Mapping, 2007, 32(6): 167-170
- [5] Zhang J X, Liu Z J, Sun X X. Changing landscape in the Three Gorges Reservoir Area of Yangtze River from 1977 to 2005: Land use/land cover, vegetation cover changes estimated using multi-source satellite data[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2009, 11(6): 403-412
- [6] 陈书卿, 刁承泰. 三峡库区生态经济区用地结构变化及演变趋势——以重庆市梁平县为例[J]. 水土保持通报, 2009, 29(5): 160-173
Chen S Q, Diao C T. Land use structure change and its evolving tendency of ecological economic zone in the Three Gorges Reservoir Area — A case study of Liangping County, Chongqing Municipality[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29(5): 160-173
- [7] 余瑞林, 王新生, 张红. 三峡库区土地利用时空变化特征及其驱动力分析[J]. 湖北大学学报: 自然科学版, 2006, 28(4): 429-432
Yu R L, Wang X S, Zhang H. Analysis on spatial-temporal characters and driving force of land use change in Three Gorges Region[J]. Journal of Hubei University: Natural Science, 2006, 28(4): 429-432
- [8] 敖崑鯨, 刘秀华, 杨朝现. 县域土地利用变化的生态环境效应评价——以三峡库区丰都县为例[J]. 西南农业大学学报: 社会科学版, 2007, 5(4): 1-5
Ao K Q, Liu X H, Yang C X. Assessment of the effects of change in land use on intra-country eco-environments: A case study in Fengdu County of the Three-Gorges Reservoir Area[J]. Journal of Southwest Agricultural University: Social Sciences Edition, 2007, 5(4): 1-5
- [9] 刘晓, 苏维词, 王铮, 等. 基于 RRM 模型的三峡库区重庆开县消落区土地利用生态风险评价[J]. 环境科学学报, 2012, 32(1): 248-256
Liu X, Su W C, Wang Z, et al. Regional ecological risk assessment of land use in the flooding zone of the Three Gorges Reservoir Area based on relative risk model[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(1): 248-256

- [10] Schönbrodt-Stitt S, Behrens T, Schmidt K, et al. Degradation of cultivated bench terraces in the Three Gorges Area: Field mapping and data mining[J]. *Ecological Indicators*, 2013, 34: 478–493
- [11] 李阳兵, 邵景安, 李月臣. 三峡库区土地利用/土地覆被变化研究现状与展望[J]. *重庆师范大学学报: 自然科学版*, 2010, 27(2): 31–35
Li Y B, Shao J A, Li Y C. The status and prospect of land use/land cover changes in Three Gorges Reservoir Area[J]. *Journal of Chongqing Normal University: Natural Science Edition*, 2010, 27(2): 31–35
- [12] 张颖, 刘凌, 燕文明. 三峡库区水环境安全评价研究[J]. *中国科技论文在线*, 2007, 2(9): 666–672
Zhang Y, Liu L, Yan W M. Study on water environment security of the Three Gorge Reservoir Region[J]. *Science Paper Online*, 2007, 2(9): 666–672
- [13] 曹广晶, 陈永柏. 三峡库区水环境现状与对策建议[J]. *科技导报*, 2005, 23(10): 25–29
Cao G J, Chen Y B. Water environment actuality and protected countermeasures of Three Gorges Reservoir[J]. *Science & Technology Review*, 2005, 23(10): 25–29
- [14] 李蜀庆, 宋福忠, 任宏阳, 等. 三峡库区水环境安全战略研究[J]. *中国软科学*, 2003(12): 5–11
Li S Q, Song F Z, Ren H Y, et al. Strategic study about the water environmental safety of Three Gorges Reservoir Area[J]. *China Soft Science*, 2003(12): 5–11
- [15] 国家环保总局. 2005 年长江三峡工程生态与环境监测公报 [EB/OL]. <http://www.zhb.gov.cn/lsm/hjjc09/jcxs/sxgb/2005sx/>, 2006
The State Environmental Protection Administration. The ecology and environment monitoring bulletin of Three Gorges Reservoir, Yangtze River, 2005[EB/OL]. <http://www.zhb.gov.cn/lsm/hjjc09/jcxs/sxgb/2005sx/>, 2006
- [16] 李崇明, 黄真理. 三峡水库入库污染负荷研究()——蓄水后污染负荷预测[J]. *长江流域资源与环境*, 2006, 15(1): 97–106
Li C M, Huang Z L. Study on the pollutant loads into three gorges reservoir.() — Pollutant load predictions after impoundment[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2006, 15(1): 97–106
- [17] Xu X B, Tan Y, Yang G S. Environmental impact assessments of the Three Gorges Project in China: Issues and interventions[J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 123: 115–125
- [18] 肖铁岩, 许晓毅, 付永川, 等. 三峡库区次级河流富营养化及其生态治理[J]. *重庆大学学报: 社会科学版*, 2009, 15(1): 5–8
Xiao T Y, Xu X Y, Fu Y C, et al. Discussion on the eutrophication and ecological engineering technologies for secondary rivers in the Three-Gorges Reservoir[J]. *Journal of Chongqing University: Social Science Edition*, 2009, 15(1): 5–8
- [19] Dai H C, Zheng T G, Liu D F. Effects of reservoir impounding on key ecological factors in the Three Gorges Region[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 2: 15–24
- [20] 张彦春, 王孟钧, 戴若林. 三峡库区水环境安全分析与战略对策[J]. *长江流域资源与环境*, 2007, 16(6): 801–804
Zhang Y C, Wang M J, Dai R L. Analysis and strategy countermeasures of Three-Gorges-Reservoir-Area water environment safety[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2007, 16(6): 801–804
- [21] 李孝坤. 重庆三峡库区水环境研究[J]. *地域研究与开发*, 2005, 24(4): 109–112
Li X K. Actualities and problems of water environment and its protecting countermeasures in the Three-Gorges Reservoir of Chongqing[J]. *Areal Research and Development*, 2005, 24(4): 109–112
- [22] 何丙辉. 重庆市三峡库区土壤侵蚀分级分类标准的探讨[J]. *水土保持研究*, 2003, 10(4): 63–65
He B H. Discussion on criterion of classification of soil erosion in the Three Gorges Reservoir Area of Chongqing[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2003, 10(4): 63–65
- [23] 龙天渝, 乔敦, 安强, 等. 基于 GIS 和 RULSE 的三峡库区土壤侵蚀量估算分析[J]. *灌溉排水学报*, 2012, 31(2): 33–37
Long T Y, Qiao D, An Q, et al. Estimating soil erosion in Three Gorges Reservoir Area based on GIS and RUSLE[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2012, 31(2): 33–37
- [24] 范建容, 刘飞, 郭芬芬, 等. 基于遥感技术的三峡库区土壤侵蚀量评估及影响因子分析[J]. *山地学报*, 2011, 29(3): 306–311
Fan J R, Liu F, Guo F F, et al. Soil erosion assessment and cause analysis in Three Gorges Reservoir Area based on remote sensing[J]. *Journal of Mountain Science*, 2011, 29(3): 306–311
- [25] 董杰, 杨达源, 周彬, 等. ^{137}Cs 示踪三峡库区土壤侵蚀速率研究[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(6): 1–5
Dong J, Yang D Y, Zhou B, et al. Study on soil erosion rates in the Three Gorges Reservoir Area using ^{137}Cs tracing method[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(6): 1–5
- [26] Xu X H, Xu X F, Lei S, et al. Soil erosion environmental analysis of the Three Gorges Reservoir Area based on the “3S” technology[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 10: 2218–2225
- [27] 唐将, 王世杰, 付绍红, 等. 三峡库区土壤环境质量评价[J]. *土壤学报*, 2008, 45(4): 601–607
Tang J, Wang S J, Fu S H, et al. Soil environment quality evaluation of the Three-Gorges Reservoir Region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(4): 601–607
- [28] 唐将, 钟远平, 王力. 三峡库区土壤重金属背景值研究[J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16(4): 848–852
Tang J, Zhong Y P, Wang L. Background value of soil heavy metal in the Three Gorges Reservoir District[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(4): 848–852
- [29] 牟新利, 郭佳, 刘少达, 等. 三峡库区农林土壤重金属形态分布与污染评价[J]. *江苏农业科学*, 2013, 41(9): 314–317
Mou X L, Guo J, Liu S D, et al. Heavy metal distribution and contamination assessment of agricultural and forestry soil in

- Three Gorges Reservoir Area[J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2013, 41(9): 314–317
- [30] Sastre J, Rauret G, Vidal M. Effect of the cationic composition of sorption solution on the quantification of sorption-desorption parameters of heavy metals in soils[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 140(2): 322–339
- [31] Shi W, Bischoff M, Turco R, et al. Long-term effects of chromium and lead upon the activity of soil microbial communities[J]. *Applied Soil Ecology*, 2002, 21(2): 169–177
- [32] 莫福孝, 秦宇. 三峡库区消落带土壤重金属含量特征及污染评价[J]. *安徽农学通报*, 2013, 19(15): 16–18
Mo F X, Qin Y. The characteristics and assessment of heavy metal concentrations in fluctuation zone of Three Gorges Reservoir Area[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2013, 19(15): 16–18
- [33] 熊俊, 王飞, 梅朋森, 等. 三峡库区香溪河消落区土壤重金属生态风险评价[J]. *环境科学研究*, 2011, 24(11): 1318–1324
Xiong J, Wang F, Mei P S, et al. Ecological risk assessment of heavy metal pollution in soils from the fluctuation belt of Xiangxi River in the Three Gorges Reservoir[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, 24(11): 1318–1324
- [34] 王晓阳. 三峡库区小江流域消落带土壤重金属环境质量评价[D]. 重庆: 西南大学, 2011
Wang X Y. Environmental quality evaluation with heavy metals in water-level-fluctuating zones of the Xiaojiang River Valleys[D]. Chongqing: Southwest University, 2011
- [35] Ye C, Li S Y, Zhang Y L, et al. Assessing soil heavy metal pollution in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 191(1/3): 366–372
- [36] 郭志华, 刘祥梅, 郑刚, 等. 基于 GIS 的三峡库区生态环境综合评价: 1951 年以来的气温变化[J]. *气象科学*, 2010, 30(3): 324–331
Guo Z H, Liu X M, Zheng G, et al. Integrated assessment of eco-environment in Three Gorges Reservoir Area based on GIS and DEM. . Temperature change assessment since 1951[J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2010, 30(3): 324–331
- [37] 郑刚, 刘祥梅, 郭志华, 等. 基于 GIS 的三峡库区生态环境综合评价: 降水量变化(1951—2004 年)[J]. *中国农业气象*, 2009, 30(4): 486–491
Zheng G, Liu X M, Guo Z H, et al. Integrated assessment of eco-environment in Three Gorges Reservoir Areas based on GIS and DEM. . Assessment of precipitation changes (1951—2004)[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2009, 30(4): 486–491
- [38] 王波. 三峡工程对库区生态环境影响的综合评价[D]. 北京: 北京林业大学, 2009
Wang B. Comprehensive assessment of the Three Gorges Project's impact on the eco-environment in reservoir area[D]. Beijing: Beijing Forest University, 2009
- [39] 刘祥梅, 郭志华, 肖文发, 等. 基于 GIS 的三峡库区生态环境综合评价. 气候评价[J]. *自然资源学报*, 2007, 22(4): 613–622
Liu X M, Guo Z H, Xiao W F, et al. Integrated assessment of eco-environment in the Three Gorges Reservoir Area based on GIS and DEM. . Climate assessment[J]. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(4): 613–622
- [40] Yao Y, Ruan L, Li H, et al. Changes of meteorological parameters and lightning current during water impounded in Three Gorges area[J]. *Atmospheric Research*, 2013, 134: 150–160
- [41] 李旭光. 长江三峡库区生物多样性现状及保护对策[J]. *中国发展*, 2004(4): 13–18
Li X G. The biodiversity status and protection countermeasures of Three Gorges Reservoir Area[J]. *China Development*, 2004(4): 13–18
- [42] 程瑞梅, 肖文发, 李建文, 等. 三峡库区森林植物多样性分析[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(1): 35–40
Cheng R M, Xiao W F, Li J W, et al. Analysis on forest plant diversity in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(1): 35–40
- [43] 李巧燕, 王襄平. 长江三峡库区物种多样性的垂直分布格局: 气候、几何限制、面积及地形异质性的影响[J]. *生物多样性*, 2013, 21(2): 141–152
Li Q Y, Wang X P. Elevation pattern of species richness in the Three Gorges Region of the Yangtze River: Effect of climate, geometric constraints, area and topographical heterogeneity[J]. *Biodiversity Science*, 2013, 21(2): 141–152
- [44] 郑冬梅. 三峡库区森林生物量和碳储量的遥感估测研究[J]. *遥感信息*, 2013, 28(5): 95–98
Zheng D M. Forest biomass and carbon estimation in Three Gorges Region based on remote sensing[J]. *Remote Sensing Information*, 2013, 28(5): 95–98
- [45] 蒋佩华, 谢世友, 熊平生. 长江三峡库区生态环境退化及其恢复与重建[J]. *国土与自然资源研究*, 2006(2): 54–55
Jiang P H, Xie S Y, Xiong P S. Ecological degeneration and ecological environment restoration at the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2006(2): 54–55
- [46] 申文明, 张建辉, 王文杰, 等. 基于 RS 和 GIS 的三峡库区生态环境综合评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2004, 13(2): 159–162
Shen W M, Zhang J H, Wang W J, et al. Ecological environmental quality assessment of the Three Gorges Reservoir Area based on remote sensing and GIS[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2004, 13(2): 159–162
- [47] 周谐, 杨敏, 雷波, 等. 基于 PSR 模型的三峡水库消落带生态环境综合评价[J]. *水生态学杂志*, 2012, 33(5): 13–19
Zhou X, Yang M, Lei B, et al. Comprehensive assessment of eco-environmental quality of the water-level-fluctuating zone in the Three Gorges Area based on PSR model[J]. *Journal of Hydroecology*, 2012, 33(5): 13–19
- [48] 马泽忠, 翟建松, 张海珍. 三峡库区大宁河流域生态环境质量动态变化研究[J]. *三峡环境与生态*, 2008, 1(1): 6–10
Ma Z Z, Zhai J S, Zhang H Z. Study on ecological environmental quality dynamical assessment of Daninghe River watershed in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Environment*

- and Ecology in the Three Gorges, 2008, 1(1): 6–10
- [49] 刘春霞, 李月臣, 杨华, 等. 三峡库区重庆段生态与环境敏感性综合评价[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 631–642
Liu C X, Li Y C, Yang H, et al. RS and GIS-based assessment for eco-environmental sensitivity of the Three Gorges Reservoir Area of Chongqing[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(5): 631–642
- [50] 魏兴萍. 基于 PSR 模型的三峡库区重庆段生态安全动态评价[J]. 地理科学进展, 2010, 29(9): 1095–1099
Wei X P. Ecological safety evaluation of Three Gorges Reservoir Area in Chongqing with the pressure-state-response model[J]. Progress in Geography, 2010, 29(9): 1095–1099
- [51] 谭淑端, 王勇, 张全发. 三峡水库消落带生态环境问题及综合防治[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(Z1): 101–105
Tan S D, Wang Y, Zhang Q F. Environmental challenges and countermeasures of the water-level-fluctuation zone (WLFZ) of the Three Gorges Reservoir[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17(Z1): 101–105
- [52] 李建国, 刘金萍, 刘丽丽, 等. 基于灰色极大熵原理的三峡库区(重庆段)生态系统健康评价[J]. 环境科学学报, 2010, 30(11): 2344–2352
Li J G, Liu J P, Liu L L, et al. Ecosystem health evaluation of Three Gorges reservoir area (Chongqing) based on the theory of maximum entropy and grey system[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(11): 2344–2352
- [53] 李月臣, 刘春霞, 闵婕, 等. 三峡库区生态系统服务功能重要性评价[J]. 生态学报, 2013, 33(1): 168–178
Li Y C, Liu C X, Min J, et al. RS/GIS-based integrated evaluation of the ecosystem services of the Three Gorges Reservoir Area (Chongqing section)[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(1): 168–178
- [54] 姜永华, 江洪, 曾波, 等. 三峡库区(重庆段)土地利用变化对生态系统服务价值的影响分析[J]. 水土保持研究, 2008, 15(4): 235–243
Jiang Y H, Jiang H, Zeng B, et al. Effects of land use change on the ecosystem services value of Three Gorges Reservoir Area (the part of Chongqing)[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(4): 235–243
- [55] 马骏, 马朋, 李昌晓, 等. 基于土地利用的三峡库区(重庆段)生态系统服务价值时空变化[J]. 林业科学, 2014, 50(5): 17–26
Ma J, Ma P, Li C X, et al. Temporal and spatial variation of ecosystem service value in the Three Gorges Reservoir Region (Chongqing Section) based on land use[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50(5): 17–26
- [56] 田永中, 岳天祥. 生态系统评价的若干问题探讨[J]. 中国人口·资源与环境, 2003, 13(2): 17–22
Tian Y Z, Yue T X. Discuss of several issues on ecosystem assessment[J]. China Population, Resources and Environment, 2003, 13(2): 17–22