

基于 ESHIPPO 模型的澜沧江中游大坝水生生物生态风险评价*

李小艳¹ 彭明春² 董世魁^{1**} 刘世梁¹ 李晋鹏¹ 杨志峰¹

(¹北京师范大学水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875; ²云南大学生态学与地植物学研究所, 昆明 650091)

摘要 通过小湾大坝蓄水前后 8 个采样断面的浮游植物、浮游动物和鱼类的对比调查, 筛选出适于 ESHIPPO 模型生态风险评价的广域属种、特有属种(稀有种、特有种、资源种和土著鱼), 并对其进行生态风险分析. 结果表明: 大坝建设对水生物种产生一定程度的生态风险, 尤其是对于澜沧江土著鱼类, 水文形势改变增加了其生态风险; 特有属种如浮游植物红毛藻、中华鱼子菜、溪菜, 浮游动物云南棘猛水蚤和西南荡镖水蚤等处于高风险状态, 必须对其加强监测并采取相应的保护措施; 浮游植物和浮游动物的广域属种均处于中度风险状态, 对其除监测外应做好保护准备; 小湾大坝蓄水后, 12 种土著鱼(光唇裂腹鱼、澜沧裂腹鱼、云南平鳅、黑线沙鳅、横斑原缨口鳅、拟鳃副鳅、云南四须鲃、宽头华鲮、长臀刀鲂、扎那纹胸鲃、无斑褶鲃、宽纹南鳅)处于高度风险状态, 应立即对其采取必要的保护措施, 防止其消失或灭绝.

关键词 澜沧江中游 小湾大坝 漫湾库区 水生物种 生态风险评价

文章编号 1001-9332(2013)02-0517-10 **中图分类号** Q142 **文献标识码** A

Ecological risk assessment of hydropower dam construction on aquatic species in middle reaches of Lancang River, Southwest China based on ESHIPPO model. LI Xiao-yan¹, PENG Ming-chun², DONG Shi-kui¹, LIU Shi-liang¹, LI Jin-peng¹, YANG Zhi-feng¹ (¹State Key Laboratory of Water Environment Simulation, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; ²Institute of Ecology and Geobotany, Yunnan University, Kunming 650091, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(2): 517-526.

Abstract: An investigation was conducted on the phytoplankton, zooplankton, and fish at 8 sampling sections in the Manwan Reservoir before and after the construction of Xiaowan Hydropower Dam. The modified ESHIPPO model was applied to study the changes of the featured aquatic species, including endangered species, endemic species, resource species, and native fish, aimed to make an ecological risk assessment of the dam construction on the aquatic species. The dam construction had definite ecological risk on the aquatic species, especially the endemic fish, in Lancang River, due to the changes of hydrological conditions. The endemic species including *Bangia atropurpurea*, *Lemanea sinica*, *Prasiola* sp., *Attheyella yunnanensis*, and *Neutrodiaptomus mariadvigae* were at high ecological risk, and thus, besides monitoring, protection measures were needed to be taken to lower the possibility of the species extinction. The widely distributed species of phytoplankton and zooplankton were at medium ecological risk, and protection measures besides monitoring should be prepared. Twelve kinds of native fish, including *Barbodes huangchuchieni*, *Sinilabeo laticeps*, *Racoma lantsangensis*, *Racoma lissolabiatu*, *Paracabitis anguillioide*, *Schistura latifasciata*, *Botia nigrolineata*, *Vanmanenia striata*, *Homaloptera yunnanensis*, *Platytrapius longianlis*, *Glyptothorax zanaensis*, and *Pseudecheneis immaculate*, were at high ecological risk, and protection measures needed to be developed to prevent the possibility of the species loss and extinction.

Key words: middle reaches of Lancang River; Xiaowan Hydropower Dam; Manwan Reservoir; aquatic species; ecological risk assessment.

* 国家自然科学基金重点项目(50939001)和环保公益项目(201209029-4)资助.

** 通讯作者. E-mail: dongshikui@sina.com

2012-06-11 收稿, 2012-11-30 接受.

人类发展过程中,大坝建设在提供饮用水资源、防洪、灌溉、供电、发电、航运等方面发挥了重要作用.截至 20 世纪末,全球范围内建设 15 m 以上的大坝超过 45000 座,其中,中国已建大坝 22000 座,约占全球大坝数量的 1/2^[1].全国范围内,水能资源丰富的西南地区是大坝建设的重点区域,云南省境内澜沧江干流河段规划梯级开发 14 座水电站,其中,已建 4 座,在建 2 座.大坝在缓解用电矛盾、改善航运条件、增强防洪能力和改善灌溉条件的同时^[2],也改变了河流的水生态过程,导致水文情势、水力学特征、水质、河床地形特征发生改变,破坏了水生生物栖息地、河岸带植被、河岸带动物群,给流域生态系统的健康发展带来一定生态风险^[3].

对水生生物而言,藻类的增长与流速、水温、无机氮磷含量等密切相关^[4-6].大坝建设后回水作用导致河流流速下降,低流速有利于绿藻生长^[5],河水中氮磷的富集促进绿藻增长和富营养化作用^[7].水库蓄水后水温升高,大量裸藻出现^[8].大坝削弱洪峰、调节水温、降低下游河水的稀释作用,使浮游生物数量大幅增加、微型脊椎动物的分布特征和数量(种类减少)变化显著,大量鹅卵石和砂石被大坝拦截造成河床底部的无脊椎动物(如昆虫、软体动物和贝类动物等)失去生存环境^[9].大坝阻隔了洄游性鱼类的洄游通道,影响物种的基因交流;河流流速(尤其是低流速)影响鱼类群落的组成和丰富度^[10-11].

针对大坝建设对水生生物造成的影响,很多学者提出了相关生态风险评级方法.自 1981 年 Karr^[12]首次提出生物完整性指数(index of biotic integrity, IBI)以来,不同学者提出了用于鱼类(F-IBI)、底栖动物(B-IBI)、浮游生物(P-IBI)等水生生物生态风险评价方法^[13].但这些方法均在水生生物群落的水平上开展,无法实现对关键水生物种(稀有种、特有种、资源种和土著种)的生态风险评价.2005 年, Brennan 和 Withgott^[14]提出了栖息地-入侵种-种群-污染-过度开采(HIPPO)模型;2007 年, Simić 等^[15]结合生态专属性(ecological specialization, ES)和保护优先权(protection priorities, PP)提出了 ESHIPPO-PP 模型,采用物种捕食、繁殖策略、生命周期等物种特征和栖息地特征,评价某一物种在区域或国家尺度的生态风险或濒危程度,并将此模型用于塞尔维亚国家层面水生物种的生态风险评价.此方法充分考虑了物种属性和栖息地属性,适于物种水平的生态风险评价.然而,目前鲜有学者在大

坝生态风险评价中使用这一方法.本研究以漫湾库区为案例研究区,以小湾电站蓄水前后的水生生物调查资料为基础,采用改进的 ESHIPPO-PP 模型(即区域水平的 ESHIPPO 模型)进行漫湾库区的水生物种生态风险评价,以实证物种水平上该模型应用于大坝生态风险的可行性,为该模型的广泛应用提供实证案例;阐明小湾、漫湾电站建设对关键水生物种造成的生态风险,为大坝建设的生态风险预警和生态安全调控提供科学依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

本研究在云南省澜沧江中游漫湾水电站库区(包括其小湾水坝上游,24°25′—24°40′ N、100°5′—100°25′ E)进行(图 1),流域面积 1163.72 km².该区山高谷深,属于典型峡谷河道型水库,水库所在的澜沧江河段两岸分水岭以内的区域,包括南涧、景东两县境内的无量山山脊以西及以南,云县、凤庆两县境内澜沧江与水坝下游支流罗厘河分水岭山脊线以北地区,上游到黑汇河入口附近.

漫湾水坝在云县与景东县交界处的漫湾镇附近,坝长 418 m,坝高 132 m,在正常储水位 994.0 m

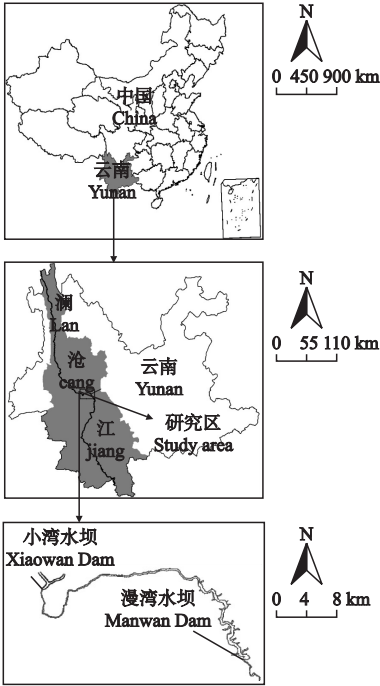


图 1 云南省内澜沧江中游漫湾库区(包括小湾水坝上游)示意图
Fig.1 Sketch map of Manwan Reservoir (including the upstream of Xiaowan Dam) in the middle reach of Lancang River in Yunnan Province.

时,总库容 $10.6\times10^8\text{ m}^3$ (小湾水坝建成之前),水库面积 23.6 m^2 ,干流回水可至小湾附近,长约 70.0 km .该水电站总装机容量 $150\times10^4\text{ kW}$,于 1986 年 5 月正式开工,1993 年 6 月第一台机组投产发电,1995 年 6 月一期工程全部投产.

小湾水坝位于南涧县和凤庆县交界的澜沧江中游河段与支流黑汇河交汇处下游 1.5 km 处,坝长 922.74 m 、坝高 292 m ,建成后总库容量 $15.13\times10^8\text{ m}^3$,装机容量 $420\times10^4\text{ kW}$.2002 年 1 月正式开工,2009 年 10 月第一台机组投产发电,2010 年全部建成.漫湾大坝建设后、小湾大坝建设前,云南大学对漫湾库区(包括小湾大坝上游)展开水生生物调查.

1.2 采样断面布设

本研究从上游至下游,代表性地布设澜沧江干流、黑惠江、小湾坝前、小湾坝下、库中、漫湾坝前、漫湾坝下和戛旧水文站 8 个水生采样断面.澜沧江干流断面和黑惠江断面分别位于小湾库区的澜沧江干流和支流,小湾坝前、小湾坝下、漫湾坝前和漫湾坝下断面的生物受水坝干扰最强烈,库中断面的生物受小湾水坝和漫湾水坝综合影响,戛旧水文站断面位于小湾和漫湾库区下游(图 2).

1.3 采样方法

1.3.1 采样点设置 对每个断面进行分层采样,根据断面水深设置采样点数量,当水深 $<3\text{ m}$ 时,仅在 0.5 m 水深处设置采样点;当水深 $\geq 3\text{ m}$ 时,分 3 层采样, 0.5 m 水深、透明度的 1.5 倍水深、距底部 0.5 m 水深.每层重复 3 次采样.

1.3.2 浮游植物样品采集与固定 浮游植物的定性样品用 25 号浮游生物网(网孔 0.064 mm) 在每个断面每层重复 3 次采集,采集到的样品当场加固定

液(鲁哥氏液)固定.着生生物用镊子或小刀刮取河边天然基质(如水中石头、泥地表面或枯树枝)上附着的生物,采集到的样品当场加固定液(鲁哥氏液)固定.

浮游植物的定量样品用有机玻璃采水器在距水面 0.5 m 处采集水样 2 L ,加鲁哥氏液固定(使水样中鲁哥氏液浓度达 1.5%).着生生物定量样品的采集:先准确测量被采样的天然基质的面积,用小刀将天然基质的该面积范围内生长的全部着生生物刮下,装入样品瓶中,加鲁哥氏液固定.

1.3.3 浮游动物调查采集与分类 浮游动物定性标本采样用口径 40 cm 浮游生物网重复多次捞取表层至底层标本,用鲁哥氏液固定一部分带回实验室观察,另一部分观察活体,并进行分类鉴定.

定量标本用 1000 mL 采水器采集后放入 1000 mL 广口瓶,加入鲁哥氏液固定,带回实验室静置 24 h 后,浓缩为 $100\sim 200\text{ mL}$,再静置 24 h 后,浓缩为 $30\sim 60\text{ mL}$.用 1 mL 计数框计数原生动物、轮虫、枝角类、桡足类和其他浮游动物,每个样品观察 3 次.

1.3.4 鱼类调查 渔业资源调查及各项测定均按《内陆水域渔业自然资源调查手册》^[16] 进行.在各个点采用不同的渔具和捕捞法(如撒网、刺网、钓钩、鱼床、电捕等)采集标本,或直接从鱼市购买,或聘请当地渔民捕捞.

1.4 水生物种生态风险评价方法

Simic 等^[15] 综合了物种的生态专属性(ES)和 HIPPO 风险因子系统中的栖息地转变因子(habitat alteration,H)、入侵物种因子(invasive species,I)、种群增长因子(population growth,PG)、污染因子(pollution,P)、过度开采因子(over exploitation,O)建立了 ESHIPPO-PP(后面的两个 P 分别代表 priority、protection)模型,此模型被用于国家水平上的濒危水生物种(包括藻类、无脊椎动物和鱼类)生态风险评价.本研究在 ESHIPPO-PP 模型基础上,充分考虑到漫湾库区海拔变化并不明显,未采用栖息地属性中的海拔指标,仅采用“生态因子”特性进行评价;针对漫湾库区的采样断面设置,生境范围属性指标采用水生物种在采样断面/独立生境出现的百分比替代原始模型中的特有范围和生境面积,并将生态风险评价分数修订为 $0\sim 100$.修改后的模型用于漫湾库区区域水平上的水生物种生态风险评价.对改动后“ESHIPPO”模型中的物种生态专属性(表 1)、HIPPO 风险因子系统的参数(表 2)以及物种的生态风险水平等级(表 3)分别进行描述.

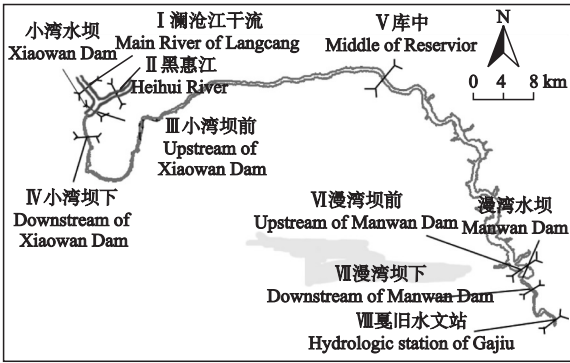


图 2 澜沧江中游漫湾水坝库区(包括小湾水坝上游)水生采样断面示意图

Fig. 2 Sketch map of aquatic sampling in Manwan Reservoir (including the upstream of Xiaowan Dam) in the middle reach of Lancang River.

表 1 水生物种生态专属性评价参数及评分等级
Table 1 Parameters and scores for evaluation of ecological specialization of aquatic species

分数 Score	栖息地 Habitat (a, a1, a2, a2. 1)	捕食 Diet (b, b1, b2)	繁殖对策 Reproduction strategy (c1, c1. 1, c1. 2, c2)	生命周期/体型大小 Life cycle (history)/Body size (d1 ~ d5. 2)	生境范围 Range (e)
1	广域	杂食动物(没有专门的、专一的食物)、广食性	广栖:与条件和影响繁殖因子有关,和/或高繁殖速率(一个个体繁殖很多倍,>2 倍),和/或幼体数量较多>1000	生命周期较长,多于 5 年. 变态缺失,较强的迁移能力和/或没有固定生命周期. 体型较小	多于 50% 调查断面/独立生境. 亚种群可能交流但十分困难
3	狭域:各自生态因子至少有一个特性	食草动物或食肉动物或至少有一个相关食物的特点、中食性	中栖:至少与一个条件或影响繁殖因子有关. 繁殖速率 1 ~ 2 年. 幼体数量 100 ~ 1000	生命周期 1 ~ 5 年. 出现变态. 迁移受限制,至少有一个生命周期特性. 体型中等	介于 10% ~ 50% 调查断面/独立生境. 亚种群交流可能性很小
5	狭域:各自生态因子最多有一个特性	仅一种类型食物,更多和狭食性专门相关	狭栖:与多于一个条件或影响繁殖因子有关. 繁殖速率很小(2 年一次),和/或幼体数量<100	相当短的生命周期,1 年. 出现变态. 固定的和/或十分受限制的迁移,和/或更多的生命周期特性. 体型较大	仅存 10% 调查断面/独立生境. 由于大的距离亚种群不存在自然交流的可能性或根本不存在

a) 水生生境的形态测定:深度(m),底部特性(%),水生植被(%),水流动特性;a1) 物理因子:流速、温度、光、电导率;a2) 化学因子:氧气($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,%)、pH、全部硬度(dH)、BOD($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、特殊化学物质专门采用或灵敏性、毒性或放射物质;a2. 1) 指示特性:营养(贫营养、中营养、富营养、无营养)、水环境腐殖程度($x, o, \alpha, \beta, \rho$). b) 捕食:自养、自养/异养、异养(食草动物、食肉动物、杂食动物). 专门捕食:食泥动物、腐蚀性动物、食植物动物、食底栖动物、食鱼动物;b1) 捕食方式(雏虫、幼虫、成熟个体):掠食者、食草动物、杂食、碎食者、食肉者、寄生者;b2) 取食时间:夜间、黄昏、早上、白天、永久.c) 繁殖对策;c1) 繁殖类型:有性、无性;c1. 1) 孵化方式:水里、基质上、基质里、巢里、在另一个有机体里面或上面、在水里、水外;c1. 2) 变形:完全、部分、持续很久、蜕皮;c2) 繁殖速度和幼体数量. d) 生命方式和体型大小;d1) 生命的长度;d2) 代:同构体、异构体;d3) 移动和生命形式:固定、缓慢移动、周期性移动、快速移动;d4) 停留位置:底部、流动水、表面、停留地变化、隐蔽场所;d4. 1) 群体(集群)的适应性;d4. 2) 领域:有领域、无领域;d4. 3) 性变态:存在、不存在;d4. 4) 幼体照顾:存在、不存在;d5) 体型大小:小(<1 cm 对于藻类和脊椎动物,<5 cm 对于鱼类),中等(1 ~ 5 cm 对于藻类和脊椎动物,5 ~ 30 cm 对于鱼类),大(>5 cm 对于藻类和脊椎动物,>30 cm 对于鱼类);d5. 1) 雌雄性体型存在差异:存在、不存在、存在但不能表达;d5. 2) 对疾病和寄生虫的敏感性.

表 2 HIPPO 系统中水生物种栖息地评价因子及评分等级
Table 2 Parameters and scores for evaluation of factors from the HIPPO system in habitats of aquatic species

评价因子 Evaluation factors	描述 Description		分数 Score
栖息地改变 Habitat alteration	变化(不包括破碎化)	几乎不可行,一些可能和由于自然和(或)人类活动(野生自然保护和/或为保护)	1
		可能,自然和人类的影响(在不久将来能够预测)	3
		非常可能,之前的人类影响或者人类影响已经存在	5
	破坏	几乎不可行,一些可能和由于自然和(或)人类活动(保护区域)	1
		可能,自然和人类的影响(如果计划的活动引起反应或预测自然的改变是可能的)	3
		非常可能,由于人类的原因和/或如果已经注意到敏感生态系统的变化	5
入侵物种 Invasive species	破碎化和隔离	不存在和在未来的可能性很小(保护区域)	1
		由于人类活动过程不断进行,但是种群之间没有交流	3
		已经存在和种群间不可能有任何交流	5
	之前已经被引入	没有任何影响	1
		轻弱影响	3
		严重的后果	5
	偶然引入新物种	不可能	1
		可能存在	3
		已经引入,影响已经存在	5
污染 Pollution ^a	有目的性引入新物	一定可能性	1
		计划中	3
		已经引入,影响已经存在	5
		富营养化、有机污染、毒性污染、放射性污染、酸化、混合污染的机会很小	1
		富营养化、有机污染、毒性污染、放射性污染、酸化、混合污染可能出现和/或中度影响	3
		富营养化、有机污染、毒性污染、放射性污染、酸化、混合污染已经出现了负面影响	5
种群增长 Population growth ^b	没有大量变化或有下降的趋势(在物种出现的所有生境)		1
	在所有生境/至少物种生活一个生境/种群最重要的生境中,种群缓慢(中度)增长		3
	在所有生境/至少物种生活一个生境/种群最重要的生境中,种群快速增长		5
过度利用 Over exploitation	人为	目前没有兴趣开发并且没有实施	1
		对于开发有兴趣但是没有实施或在控制下实施	3
		对开发有兴趣,在未控制下实施	5
	自然	非常小	1
		可能,因为捕食者增加/同类相食出现/疾病/竞争	3
		已经存在负面影响,因为捕食者增加/同类相食出现/疾病/竞争	5

a) 每种类型的污染分别评价;b) 将能考虑一种可能性.

表 3 根据 ESHIPPO-PP 模型决定水生物种生态风险水平的评分限制区间

Table 3 Approximate limits to determine the level of risk of extinction of the aquatic species according to the ESHIPPO-PP model

生态专属性 Ecological specialization (ES)		HIPPO 因子影响 Effects of HIPPO factors		生态风险 Ecological risk	
分数	水平	分数	水平	分数	等级
<5	小	<35	小	<40	低风险
6 ~ 15	中等	35 ~ 45	中等	41 ~ 60	中风险
16 ~ 25	显著	46 ~ 65	显著	61 ~ 90	高风险
26 ~ 30	严重	66 ~ 70	严重	91 ~ 100	极高风险

ESHIPPO 模型的物种生态风险等级中,低风险表示要对物种进行必要的监测;中风险表示除对物种监测外,必须进行监管以及准备好保护措施;高风险表示物种处于极度危险的状态,除进行监测外,必须立即采取保护措施;极高风险表示物种在自然状态下已经灭绝,必须采取迁移保护措施.

2 结果与分析

2.1 水生物种调查与评价物种选取

2.1.1 浮游植物选取 本研究选取广域属种和特有属种(稀有种、特有种和资源种)作为生态风险评价

的对象.广域属种指建坝前出现在全部采样断面上的物种.小湾水坝建设前后的广域种和特有属种变化显著,筛选出建坝后仅在≤4 个采样断面出现的广域属种和所有特有属种,将其作为生态风险评价的浮游植物物种.生态风险评价广域种包括硅藻门的直链藻(*Melosira*)、脆杆藻(*Fragilaria*)、桥弯藻(*Cymbella*),绿藻门的空球藻(*Eudorina elegans*)、水绵藻(*Spirogyra*)、角星鼓藻(*Staurostrum*)以及裸藻门的裸藻(*Euglena*)(表 4);特有属种包括稀有种红毛藻(*Bangia atropurpurea*)、中华鱼子菜(*Lemanea sinica*)、奥杜藻(*Andouinella* sp.),特有种空盘藻(*Jaoa prasina*)和资源种溪菜(*Prasiola* sp.)(表 5).

2.1.2 浮游动物选取 小湾水坝建设前后浮游动物广域属种(表 6)和特有属种(表 7)的变化明显.筛选生态风险评价的浮游动物物种方法如上述筛选浮游植物方法,最终筛选出的广域属种包括原生动物类的球形砂壳虫(*D. globulosa*)、瓶累枝虫(*Epistylis urceolata*)、褶累枝虫(*E. plicatilis*)、纤毛虫(*Peritrichida*)、轮虫类的转轮虫及枝角类的透明溞(*Daphnia hyalina*);稀有物种为云南棘猛水蚤(*Attheyella yunnanensis*)和西南荡镖水蚤(*Neutrodiaptomus mariadvigae*).

表 4 小湾水坝建设前后浮游植物广域属种分布

Table 4 Extensive species distribution of plankton between before and after Xiaowan Dam construction

种类 Category	物种 Species	建坝前/后 Before/after dam construction	采样断面 Sampling section							
			I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
硅藻门 Bacillariophyta	直链藻	前 Before	+	+	+	+	+	+	+	+
	<i>Melosira</i>	后 After	+	+	+	—	—	—	+	—
	颗粒直链藻最窄变种	前 Before	+	+	+	+	+	+	+	+
	<i>Melosira varians</i>	后 After	+	+	+	+	—	—	+	+
	等片藻	前 Before	+	+	+	+	+	+	+	+
	<i>Diatoma</i>	后 After	+	+	—	+	+	+	—	—
	脆杆藻	前 Before	+	+	+	+	+	+	+	+
	<i>Fragilaria</i>	后 After	—	—	+	+	—	—	—	—
	针状杆	前 Before	+	+	+	+	+	+	+	+
	<i>Synedra</i>	后 After	+	+	+	+	+	+	+	+
	舟形藻	前 Before	+	+	+	+	+	+	+	+
	<i>Navicula</i>	后 After	+	+	—	—	+	+	+	+
	桥弯藻	前 Before	+	+	+	+	+	+	+	+
	<i>Cymbella</i>	后 After	—	—	+	+	+	—	—	+
绿藻门 Chlorophyta	空球藻	前 Before	+	+	+	+	+	+	+	+
	<i>Eudorina elegans</i>	后 After	—	—	+	+	—	—	—	—
	水绵藻	前 Before	+	+	+	+	+	+	+	+
	<i>Spirogyra</i>	后 After	—	—	—	—	—	—	—	—
	角星鼓藻	前 Before	+	+	+	+	+	+	+	+
裸藻门 Euglenophyta	<i>Staurostrum</i>	后 After	—	+	+	+	—	—	—	—
	裸藻	前 Before	+	+	+	+	+	+	+	+
	<i>Euglena</i>	后 After	—	+	—	—	—	+	—	—
蓝藻门 Cyanophyta	颤藻	前 Before	+	+	+	+	+	+	+	+
	<i>Oscillatoria</i>	后 After	—	+	—	—	+	+	+	+
甲藻门 Pyrrophyta	多甲藻	前 Before	+	+	+	+	+	+	+	+
	<i>Peridinium</i> sp.	后 After	+	+	—	+	—	+	+	+

+存在 Appearance; —消失 Disappearance. 下同 The same below.

表 5 小湾水坝建设前后浮游植物特有属种(稀有种、特有种和资源种)分布
Table 5 Special species distribution of plankton before and after Xiaowan Dam construction

种类 Category	物种 Species	建坝前/后 Before/after dam construction	采样断面 Sampling section							
			I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
稀有种 Endangered species	红毛藻	前 Before	+	—	—	+	—	—	+	—
	<i>Bangia atropurpurea</i>	后 After	—	—	—	—	—	—	—	—
	中华鱼子菜	前 Before	+	—	—	—	—	—	—	—
	<i>Lemanea sinica</i>	后 After	—	—	—	—	—	—	—	—
	奥杜藻	前 Before	—	+	+	+	—	—	+	—
	<i>Andouinella</i> sp.	后 After	—	—	—	—	—	—	—	—
特有种 Endemic species	空盘藻	前 Before	+	+	+	—	—	—	—	—
	<i>Jaoa prasina</i>	后 After	—	—	—	—	—	—	—	—
资源种 Resource species	溪菜	前 Before	+	—	—	—	—	—	—	—
	<i>Prasiola</i> sp.	后 After	—	—	—	—	—	—	—	—

表 6 小湾水坝建设前后浮游动物广域属种分布
Table 6 Extensive species distribution of zooplankton before and after Xiaowan Dam construction

种类 Category	物种 Species	建坝前/后 Before/after dam construction	采样断面 Sampling section							
			I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
原生动物 Protozoa	球形砂壳虫	前 Before	+++	+	++	++	+	+	+	+
	<i>Diffugiaglobulosa</i>	后 After	—	—	—	—	++	+++	+	—
轮虫类 Rotifers	瓶累枝虫	前 Before	+++	+	++	++	+	+	+	+
	<i>Epistylis urceolata</i>	后 After	—	—	—	—	—	—	—	—
	褶累枝虫	前 Before	++	++	++	+++	+	+	+	+
	<i>Epistylis plicatilis</i>	后 After	—	—	—	—	—	—	—	—
	浮游累枝虫	前 Before	++	+++	++	++	++	+	++	++
	<i>Epistylis rotans</i>	后 After	—	—	—	—	—	—	—	—
	纤毛虫	前 Before	++	++	+	+	+++	++	++	++
	<i>Peritrichida</i>	后 After	—	—	—	—	—	—	—	—
枝角类 Cladocera	转轮虫	前 Before	+	+	+	+	+	+	+	+
	<i>Rolaria rotaroria</i>	后 After	—	—	—	—	—	—	—	—
	螺形龟甲轮虫	前 Before	+	+	+	+	+++	++	+	++
	<i>Keratella cochlearis</i>	后 After	+	+++	++	+	—	—	—	—
桡足类 Copepod	曲腿龟甲轮虫	前 Before	+	+	+	+	+++	+++	+++	+++
	<i>Keratella valga</i>	后 After	+	+++	++	+	—	—	—	—
	透明蚤	前 Before	+++	++	+	+	+	+	+	+
	<i>Daphnia hyalina</i>	后 After	—	—	—	—	—	—	—	—
无节幼体 Nauplius	长额象鼻蚤	前 Before	+	+	+	+	+++	+++	++	++
	<i>Bosmina longirostris</i>	后 After	++	++	+++	+++	+	+	+	+
	广布中剑水蚤	前 Before	+	+	+	+	+	+	+	+
	<i>Mesocyclops leuckarti</i>	后 After	—	—	—	—	+	+	+	+
无节幼体 Nauplius	无节幼体	前 Before	+	+	+	+	+	+	+	++
	<i>Nauplius</i>	后 After	—	+++	+++	+	+	+	+	+

+++数量非常多 Extremely many; ++数量很多 Many; +数量较少 A few.

表 7 小湾水坝建设前后浮游动物特有属种分布
Table 7 Special species distribution of zooplankton before and after Xiaowan Dam construction

物种 Species	建坝前/后 Before/after dam construction	采样断面 Sampling section							
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
云南棘猛水蚤 <i>Attheyella</i> (<i>Mrazekiella</i>) <i>yunnanensis</i>	前 Before	+	+	+	+	—	—	—	—
	后 After	—	—	—	—	—	—	—	—
西南荡镖水蚤 <i>Neutrodiaptomus mariadvigae</i>	前 Before	—	+	—	—	—	—	—	—
	后 After	—	—	—	—	—	—	—	—

2.1.3 鱼类选取 根据调查结果,小湾水坝蓄水后上下游的 15 种土著鱼类消失. 本研究将 15 种土著鱼作为生态风险评价的鱼类物种:云南四须鲃(*Barbodes huangchuchieni*)、宽头华鲮(*Sinilabeo laticeps*)、澜沧裂腹鱼(*Racoma lantsangensis*)、光唇裂腹鱼(*Racoma lissolabiatu*s)、拟鳗副鳅(*Paracobitis anguillio*ides)、横纹南鳅(*Schistura fasciolatus*)、短尾高原鳅(*Triplophysa brevice*auda)、宽纹南鳅(*Schistura latifasciata*)、黑线沙鳅(*Botia nigrolineata*)、横斑原缨口鳅(*Vanmanenia striata*)、云南平鳅(*Homaloptera yunnanensis*)、长臀刀鲂(*Platytrapius longianlis*)、扎那纹

胸鲃(*Glyptothorax zanaensis*)、无斑褶鲃(*Pseudeche-neis immaculate*)、黄斑褶鲃(*Pseudecheneis sulcatus*)。

2.2 水生物种专属性和栖息地评分

浮游植物中,对稀有种红毛藻和中华鱼子菜、特有种空盘藻、资源种溪菜的评分较高,为 27~29;其他浮游植物的总分数均小于 20. 浮游动物中,对稀有种云南棘猛水蚤和西南荡镖水蚤的评分较高,分别为 31 和 29. 土著鱼类中,除黄斑褶鲃(*Pseudecheneis sulcatus*)、横纹南鳅(*Schistura fascio-lata*)和短尾高原鳅(*Trilophysa brevii*uda)外,其他物种的评分均≥19(表8). 3类物种综合比较而言,高

表 8 浮游植物、浮游动物和土著鱼类生态专属性评分
Table 8 Score of ecological specialization of plankton, zooplankton and native fish

种类 Category	物种 Species	栖息地 Habitat			捕食 Diet	繁殖对策 Reproduction strategy	生命周期/ 体型大小 Life cycle (history)/ Body size	生境范围 Range	总计 Total score
		水生生境 的形态 Habitat condition	物理因子 Physical factor	化学因子 Chemical factor					
浮游植物 ^[17-21] Plankton	直链藻 <i>Melosira</i>	1	3	3	1	1	1	1	11
	脆杆藻 <i>Fragilaria</i>	1	3	3	1	1	1	3	13
	桥弯藻 <i>Cymbella</i>	1	3	3	1	1	1	1	11
	空球藻 <i>Eudorina elegans</i>	1	3	3	1	1	1	3	13
	角星鼓藻 <i>Staurastrum</i>	1	3	3	1	1	1	3	13
	裸藻 <i>Euglena</i>	1	3	3	1	1	1	3	13
	水绵藻 <i>Spirogyra</i>	1	3	3	1	1	1	5	15
	奥杜藻 <i>Andouinella</i> sp.	3	3	3	1	3	5	5	18
	红毛藻 <i>Bangia atropurpurea</i>	5	5	5	1	3	3	5	27
	中华鱼子菜 <i>Lemanea sinica</i>	5	5	5	1	3	5	5	29
	空盘藻 <i>Jaoaprasina</i>	5	5	5	1	3	3	5	27
	溪菜 <i>Prasiola</i> sp.	5	5	3	1	3	5	5	27
浮游动物 ^[22-26] Zooplankton	球形砂壳虫 <i>Diffugia globulosa</i>	3	3	3	3	1	1	3	17
	瓶累枝虫 <i>Epistylis urceolata</i>	3	3	3	1	1	1	5	17
	褶累枝虫 <i>Epistylis plicatilis</i>	3	3	3	1	1	1	5	17
	纤毛虫 <i>Peritrichida</i>	3	3	3	3	1	1	5	19
	转轮虫 <i>Rolaria. rotaroria</i>	3	3	3	3	1	1	5	19
	透明蚤 <i>Daphnia</i>	3	3	3	1	3	3	5	21
	云南棘猛水蚤 <i>Attheyella (Mrzeikiella) yunnanensis</i>	5	5	5	5	3	3	5	31
	西南荡镖水蚤 <i>Neutrodiaptomus mariadvigae</i>	5	5	5	3	3	3	5	29
	光唇裂腹鱼 <i>Schizothorax lissolabiatu</i> s	5	5	5	1	5	3	5	29
	澜沧裂腹鱼 <i>Schizothorax lantsangensis</i>	3	3	3	1	5	3	3	21
土著鱼类 ^[27-28] Native fish	云南平鳅 <i>Homaloptera yunnanensis</i>	5	5	5	1	3	5	3	27
	黑线沙鳅 <i>Botia nigrolineata</i>	5	5	5	1	3	3	3	25
	横斑原缨口鳅 <i>Vanmanenia striata</i>	3	3	3	1	3	3	3	19
	拟鳗副鳅 <i>Paracobitis anguillio</i> ides	5	5	5	3	3	3	3	27
	横纹南鳅 <i>Schistura fasciolata</i>	1	1	1	3	3	3	1	13
	云南四须鲃 <i>Barbodes huangchuchieni</i>	3	3	3	1	3	3	3	19
	宽头华鲮 <i>Sinilabeo laticeps</i>	5	5	5	3	1	3	5	27
	长臀刀鲂 <i>Platytrapius longianlis</i>	5	5	5	3	3	3	5	29
	扎那纹胸鲃 <i>Glyptothorax zanaensis</i>	5	5	5	3	3	1	5	27
	黄斑褶鲃 <i>Pseudecheneis sulcatus</i>	1	1	1	1	3	1	1	9
	无斑褶鲃 <i>Pseudecheneis immaculatus</i>	3	3	3	3	3	1	3	19
	短尾高原鳅 <i>Trilophysa brevii</i> uda	1	1	1	3	3	3	1	13
	宽纹南鳅 <i>Schistura fasciolata</i>	3	3	3	3	3	1	3	19

表 9 HIPPO 模型因子对水生物种栖息地评分
Table 9 Score of aquatic species habitats based on factors from the HIPPO system

因子 Factor		浮游植物 Plankton	浮游动物 Zooplankton	鱼类 Native fish
栖息地改变 Habitat alteration	变化	5	5	5
	破坏	5	5	5
入侵物种 Invasive species	破碎化和隔离	5	5	5
	之前已经被引入	1	1	5
	偶然被引入新物种	1	1	5
污染 Pollution	有目的性引入新物种	1	1	5
	富营养化	1	1	1
	有机污染	1	1	1
	毒性污染	1	1	1
种群增长 Population growth	放射性污染	1	1	1
	酸化	1	1	1
	混合污染	3	3	3
过度利用 Over exploitation		3	3	3
总分 Total	人为	5	5	5
	自然	1	1	1
总分 Total		35	35	47

营养级物种的生态属性评分高于低营养级物种。

用“HIPPO”模型因子对水生物种栖息地的评分结果表明,鱼类的栖息地评分高于浮游植物和浮游动物(表 9)。

2.3 水生物种生态风险评价

2.3.1 浮游植物生态风险 浮游植物中,澜沧江稀有种红毛藻、中华鱼子菜、特有种空盘藻及资源种溪菜在小湾水坝建设后处于高度风险状态,表明对其除监测外,必须立即采取相应的保护措施;稀有种奥杜藻、直链藻、裸藻等广域属种均处于中度风险状态,对其在澜沧江中游区域而言,除了监测外,必须准备好保护措施。

2.3.2 浮游动物生态风险 浮游动物中,特有种云南棘猛水蚤和西南荡镖水蚤在小湾水坝建设后均处于高风险状态,对其应立即采取相应的保护措施;广域属种砂壳虫、瓶累枝虫、褶累枝虫、纤毛虫、转轮虫和透明溞均处于中度生态风险等级,对其除监测外,应做好采取必要保护措施的准备。

2.3.3 鱼类生态风险 土著鱼类中,云南裂腹鱼、云南平鳅、光唇裂腹鱼等 12 种土著鱼在小湾水库蓄水后处于高度风险状态,应立即对其采取必要的保护措施,防止其消失或灭绝;黄斑褶鲃、横纹南鳅和短尾高原鳅处于中度风险状态,对其除监测外,应做好必要的保护措施准备(图 3)。

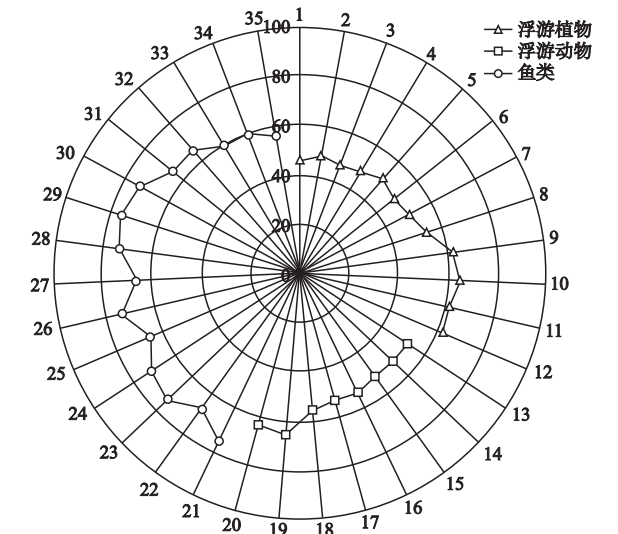


图 3 漫湾水库浮游植物、浮游动物及小湾水库土著鱼类生态风险评价等级
Fig. 3 Ecological risk assessment levels of phytoplankton, zooplankton in Manwan Reservoir and native fish in Xiaowan Reservoir.

- 1) 直链藻; 2) 脆杆藻; 3) 桥弯藻; 4) 空球藻; 5) 角星鼓藻; 6) 裸藻; 7) 水绵藻; 8) 奥杜藻; 9) 红毛藻; 10) 中华鱼子菜; 11) 空盘藻; 12) 溪菜; 13) 球形砂壳虫; 14) 瓶累枝虫; 15) 褶累枝虫; 16) 纤毛虫; 17) 转轮虫; 18) 透明溞; 19) 云南棘猛水蚤; 20) 西南荡镖水蚤; 21) 光唇裂腹鱼; 22) 澜沧裂腹鱼; 23) 云南平鳅; 24) 黑线沙鳅; 25) 横斑原缨口鳅; 26) 拟鳊副鳅; 27) 云南四须鲃; 28) 宽头华鲮; 29) 长臀刀鲂; 30) 扎那纹胸鲃; 31) 无斑褶鲃; 32) 宽纹南鳅; 33) 短尾高原鳅; 34) 横纹南鳅; 35) 黄斑褶鲃。

3 讨论

本研究根据漫湾库区地理条件及采样设置,对 Simic 等^[15]提出的 ESHIPPO-PP 模型进行修订,充分反映了研究区实际状况,具有客观性;本研究在物种的选取及生境范围等指标的评价过程中参考了漫湾库区水生物种的调查结果,通过调研结果对水生物种生态风险的定性评价与 ESHIPPO 模型定量评价结果相符,表明了采用 ESHIPPO 模型的科学性和合理性。

“硅藻-桡足类-鱼类”被认为是水生生态系统的经典食物链,它是水生生态系统物质循环和能量流动的主要途径,硅藻是水生生态系统中生产者的重要组成部分,也是水生生态系统初级生产力的主要来源,藻类的生物量将直接决定水生生态系统次级生产力及渔业资源量的大小,将硅藻初级生产转化为次级生产进而传递到更高营养级的任务主要由浮游动物来完成,而桡足类是其中重要的消费群体^[29-32],桡足类等浮游动物是水生生态系统的主要消费者和高层捕食者的重要饵料来源,浮游动物的

摄食和数量变动将直接对水生生态的能流、物流产生影响^[33]。水坝建设引起的外来鱼类入侵会通过“下行效应”产生食物链的连锁生态效应^[34]。1979年,太湖新银鱼(*Neosalanx taihuensis*)引入云南滇池后,逐渐扩展到抚仙湖、洱海等高原湖泊和众多的水库,太湖新银鱼在漫湾库区引种放养成功,并带来良好的经济效益^[27]。然而,太湖新银鱼摄食的“下行效应”导致桡足类浮游动物和藻类发生生态风险。研究表明,在滇池,太湖新银鱼主要捕食西南荡镖水蚤(桡足类),导致其密度明显下降^[35];与1980年相比,2005年抚仙湖浮游甲壳动物群落结构的桡足类优势种西南荡镖水蚤消失,演替为舌状叶镖水蚤^[36],浮游植物群落绝对优势种由1957年的菱形圆盘硅藻(*Cyclotella rham boideo-elliptica*)逐渐演替为2005年的大型丝状藻类转板藻(*Mougeotia* sp.),除转板藻较强的竞争优势外,与太湖新银鱼的“下行效应”密切相关。从上述研究结果类推可知,太湖新银鱼的放养可能是导致漫湾库区水坝建设后西南荡镖水蚤和云南棘猛水蚤处于高度风险状态的主要原因。浮游动物有其特定的摄食藻类,如透明溞作为温带及北亚热带地区常见的大型滤食性浮游动物以微型和小型浮游植物为食,但红毛藻、空盘藻等藻类的高生态风险是否与某类浮游动物的摄食特征有关尚待进一步实证研究。

鱼类的分布与生境因子关系密切。大坝不仅导致河流生态系统破碎化,还改变了河流水文及存在的生物群系^[10,37-38],其中,鱼类种群的变化与水文的改变密切相关。水文变化河流中的鱼类以综合性摄食策略为主,且适应于低流速、泥沙及综合基质的栖息环境,水文稳定河流中的鱼类主要是对泥沙和营养具有狭域性的物种^[39]。Freeman等^[10]指出,幼年鱼类的丰富度与河流水文和栖息地的变化显著相关,原因在于水文调控极大地减少栖息地时间上的稳定性,另外,河流的波动决定了鱼类庇护所和食物的可用性、繁殖、增长、死亡、竞争、捕食和寄生。受大坝影响的水文要素(包括幅度、持续长短、发生时间和变化速率)的年变化明显影响鱼类的繁殖策略,其决定了鱼类群落组成和结构变化^[40]。Marchetti和Moyle^[11]研究表明,土著鱼类喜欢低温、低传导性、高流速、非水洼性及高隐蔽性河流表面的河流,其与河流流速呈正相关性,非土著鱼类与河流流速呈负相关性;水文的年度、季节性变化表明,水文格局极大地影响鱼类群落。本研究中的多数土著鱼类分布具有地域性和水文专属性,如光唇裂腹鱼分布于澜

沧江中、上游水流湍急的中下层河流中,海拔在902~1023 m;宽纹南鳅分布于云南南部的澜沧江及其支流等,常栖息于水流湍急的砾石底质河段;短尾高原鳅适于在山溪流水环境中生活,主要摄食生藻类,分布于青藏高原及其毗邻地区的溪流中^[27]。小湾水库蓄水后,小湾水坝上游至漫湾水坝形成了狭长型的水库,水面升高,河流流速下降。水文改变影响土著鱼类的繁殖、捕食、竞争等生物因素,进而导致适于高流速的土著物种迁移至支流或消失,其在澜沧江中游处于高度或中度的生态风险等级,需要进行特殊保护。

参考文献

- [1] World Commission on Dams. Dams and Development: A New Framework for Decision-making. London: Earthscan, 2000
- [2] Wu JG, Huang JH, Han XG, *et al.* The Three Gorges Dam: An ecological perspective. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2004, **2**: 241-248
- [3] McCartney MP, Sullivan C, Acreman MC. Ecosystem Impacts of Large Dams: Thematic Review II: Dams, Ecosystem Functions and Environmental Restoration. Capetown, South Africa: World Commission on Dams, 2000
- [4] Adams MS, Stone W. Field studies on photosynthesis of *Cladophora glomerata* (Chlorophyta) in Green Bay, Lake Michigan. *Ecology*, 1973, **54**: 853-862
- [5] Bergey EA, Boettiger CA, Resh VH. Effects of water velocity on the architecture and epiphytes of *Cladophora glomerata* (Chlorophyta). *Journal of Phycology*, 1995, **31**: 264-271
- [6] Hawes I, Smith R. Effect of current velocity on the detachment of thalli of *Ulva lactuca* (Chlorophyta) in a New Zealand estuary. *Journal of Phycology*, 1995, **31**: 875-880
- [7] Cloern JE. Our evolving conceptual model of the coastal. *Marine Ecology Progress Series*, 2001, **210**: 223-253
- [8] Li XY, Dong SK, Zhao QH, *et al.* Impacts of Manwan Dam construction on aquatic habitat and community in Middle Reach of Lancang River. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, **2**: 706-712
- [9] Qi J-Y (祁继英), Yuan X-H (阮晓红). Dam construction-induced environmental impact on riverine ecosystem. *Journal of Hohai University* (Natural Sciences) (河海大学学报·自然科学版), 2005, **33**(1): 37-40 (in Chinese)
- [10] Freeman MC, Bowen ZH, Bovee KD, *et al.* Flow and habitat effects on juvenile fish abundance in natural and altered flow regimes. *Ecological Applications*, 2001, **11**: 179-190
- [11] Marchetti MP, Moyle PB. Effects of flow regime on fish assemblages in a regulated California stream. *Ecological Applications*, 2001, **11**: 530-539
- [12] Karr JR. Assessment of biotic integrity using fish communities. *Fisheries*, 1981, **6**: 21-27

- [13] Zhu D (朱迪), Chang J-B (常剑波). Evaluation on temporal and spatial changes of biological integrity for shallow lakes in the middle reach of the Yangtze River. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2004, **24**(12): 2761–2767 (in Chinese)
- [14] Brennan SR, Withgott J. *Essential Environment: The Science behind the Stories*. San Francisco: Pearson/Benjamin Cummings, 2004
- [15] Simić V, Simić S, Paunović M, *et al.* Model of the assessment of the critical risk of extinction and the priorities of protection of endangered aquatic species at the national level. *Biodiversity and Conservation*, 2007, **16**: 2471–2493
- [16] Zhang J-M (张觉民), He Z-H (何志辉). *Natural Resources Investigation Manual for Inland Fishery*. Beijing: China Agriculture Press, 1991 (in Chinese)
- [17] Qi Y-Z (齐雨藻), Li J-Y (李家英). *Flora of China*. Beijing: Science Press, 2004 (in Chinese)
- [18] Meng S-L (孟顺龙), Chen J-Z (陈家长), Fan L-M (范立民), *et al.* Eco-characteristics of phytoplankton in Lake Wuli, Lake Taihu in 2007. *Journal of Lake Sciences* (湖泊科学), 2009, **21**(6): 845–854 (in Chinese)
- [19] Xie SL, Shi ZX, Wang RN. Taxonomy of the Lemaeneaceae (Batrachospermales, Rhodophyta) in China. *Acta Botanica Sinica*, 2004, **46**: 883–888
- [20] Shao H (邵华), Hu H-J (胡鸿钧). Isolation, purification and characterization of polysaccharides from *Prasiola Yunnanica*. *Journal of Wuhan Botanical Research* (武汉植物学研究), 2000, **18**(2): 127–130 (in Chinese)
- [21] Zheng J (郑江), Gao Y-H (高亚辉), Wang W-X (王文星), *et al.* Separation of multiple-phyco-biliproteins and its subunits from *Bangia fusco-purpurea*. *Journal of Fishery Sciences of China* (中国水产科学), 2003, **10**(4): 277–281 (in Chinese)
- [22] Shen J-R (沈嘉瑞). *Zoography of China*. Beijing: Science Press, 1979 (in Chinese)
- [23] Chen S-Z (陈受忠). Description of microcrustacea in Yangtze River. *Sichuan Journal of Zoology* (四川动物), 1983(4): 22–26 (in Chinese)
- [24] Shen J-R (沈嘉瑞), Dai A-Y (戴爱云). On two new species of fresh water copepoda. *Acta Zootaxonomica Sinica* (动物分类学报), 1979, **4**(3): 233–237 (in Chinese)
- [25] Lin Q-Q (林秋奇), Zhao S-Y (赵帅营), Han B-P (韩博平). Rotifer distribution in tropical reservoirs, Guangdong Province, China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2005, **25**(5): 1123–1131 (in Chinese)
- [26] Lin X (林娴), Han B-P (韩博平). The effect of food from a eutrophic lake on the growth and reproduction of *Daphnia hyaline*. *Ecologic Science* (生态科学), 2006, **25**(2): 116–121 (in Chinese)
- [27] Wang Z-Z (王忠泽), Jin Z-Z (金振洲), Chuan Y-M (钊毅民), *et al.* The Ecological Environment and Biological Resources of Manwan Hydropower Station Reservoir along Lancang River in Yunnan, China. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2000 (in Chinese)
- [28] Chu X-L (褚新洛), Chen Y-R (陈银瑞). *Ichthyography of Yunnan*. Beijing: Science Press, 1990 (in Chinese)
- [29] Zhou Q (周庆), Ou X-K (欧晓昆), Zhang Z-M (张志明), *et al.* Spatial-temporal land use pattern changes in Manwan Hydropower Station Reservoir of Lancang River, Yunnan, China. *Journal of Mountain Science* (山地学报), 2008, **26**(4): 481–489 (in Chinese)
- [30] Lebour MV. The food of plankton organism. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 1922, **12**: 644–677
- [31] Mann KH. Physical oceanography, food chains, and fish stocks: A review. *ICES Journal of Marine Science*, 1993, **50**: 105–119
- [32] Mashall SM, Orr AP. The Biology of a Marine Copepod, *Calanus finmarchicus* (Gunnars). London: Oliver and Boyd, 1995
- [33] Li C-L (李超论), Wang R (王荣). Copepods feeding activities in the Laizhouwan Bay, Bohai Sea, in summer. *Oceanologia et Limnologia Sinica* (海洋与湖沼), 2000, **31**(1): 15–22 (in Chinese)
- [34] Xiong F (熊飞), Li W-C (李文朝), Pan J-Z (潘继征). Present status of alien fishes and analysis of relative problems in Fuxian Lake in Yunnan Province. *Acta Agriculturae Jiangxi* (江西农业学报), 2008, **20**(2): 92–94 (in Chinese)
- [35] Liu Z-W (刘正文), Zhu S-Q (朱松泉). Food and feeding behavior of ice-fish (*Neosalanx taihuensis* Chen) in Dianchi Lake. *Acta Zoologica Sinica* (动物学报), 1994, **40**(3): 253–261 (in Chinese)
- [36] Pan J-Z (潘继征), Xiong F (熊飞), Li W-Z (李文朝), *et al.* Community structure and spatial distribution of crustacean zooplankton in Lake Fuxian, Yunnan, China. *Journal of Lake Sciences* (湖泊科学), 2009, **29**(10): 5376–5385 (in Chinese)
- [37] Ye S-W (叶少文), Li Z-J (李钟杰), Cao W-X (曹文宣). Species composition, diversity and density of small fishes in two different habitats in Niushan Lake. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(7): 1589–1595 (in Chinese)
- [38] Yang K (杨昆), Deng X (邓熙), Li X-L (李学灵), *et al.* Impacts of hydroelectric cascade exploitation on river ecosystem and landscape: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(5): 1359–1367 (in Chinese)
- [39] Bunn SE, Arthington AH. Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environmental Management*, 2002, **30**: 492–507
- [40] Agostinho AA, Gomes LC, Veríssimo S, *et al.* Flood regime, dam regulation and fish in the Upper Parana River: Effects on assemblage attributes, reproduction and recruitment. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2004, **14**: 11–19

作者简介 李小艳,女,1985年生,硕士研究生.主要从事生态风险评价与生态系统管理研究,发表论文3篇. E-mail: lxynmu.2008@163.com

责任编辑 杨弘