

# The Research Status and Problems on Ecology and Environment of Lake Erhai\*

Yanfeng Cai<sup>1,2,3</sup>, Hucai Zhang<sup>1,2,3#</sup>, Guangjie Chen<sup>1,2,3</sup>, Lizeng Duan<sup>1,2,3</sup>, Ziqiang Zhang<sup>1,2,3</sup>, Xiongfei Wang<sup>1,2,3</sup>, Huayong Li<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>College of Tourism and Geography Science, Yunnan Normal University, Kunming

<sup>2</sup>Key Laboratory of Plateau Lake Ecology & Global Change, Kunming

<sup>3</sup>Yunnan Key Laboratory of Plateau Geography Process and Environment Changes, Kunming  
Email: caiyanfengmixiu@163.com, #hucaizhang@yahoo.com

Received: May 16<sup>th</sup>, 2013; revised: Jun. 2<sup>nd</sup>, 2013; accepted: Jun. 10<sup>th</sup>, 2013

Copyright © 2013 Yanfeng Cai et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Abstract:** There are wide concerns from scholars at domestic and overseas on the ecological environment of Lake Erhai recently as a consequence of worsening status, massive and rapid development on the catchment of Lake Erhai. This paper summarizes the research status of Lake Erhai which has been collected since 1950s, analyzes the current situation of the environment (including eutrophication, heavy metal pollution, and catchment development and vegetation status) and ecology (including biological diversity, food web change, and characteristics changes of ecological system), and makes a further analysis on the meteorological factors (including temperature, precipitation and wind speed). Through those data we point out that there are some problems still exist in the research of Lake Erhai, for instance, the Cyanophyta explosion history, the detailed research on zoo-plankton and food chain, the distinction of drive strength of multiple pressure on the process of eutrophication of Lake Erhai for the purpose that we can have a comprehensive understanding of the situation on ecology and environment of Lake Erhai. In this way we can have cognitive bases for the further relative work carried out in Lake Erhai and support some constructive opinions for ecological restoration work of Lake Erhai preferably.

**Keywords:** Lake Erhai; Ecology Environment; Research Status; Existed Problems

## 洱海生态环境研究现状及存在问题\*

蔡燕凤<sup>1,2,3</sup>, 张虎才<sup>1,2,3#</sup>, 陈光杰<sup>1,2,3</sup>, 段立曾<sup>1,2,3</sup>, 张自强<sup>1,2,3</sup>, 王熊飞<sup>1,2,3</sup>, 李华勇<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> 云南师范大学旅游与地理科学学院, 昆明

<sup>2</sup> 高原湖泊生态与全球变化实验室, 昆明

<sup>3</sup> 高原地理过程与环境变化云南省重点实验室, 昆明

Email: caiyanfengmixiu@163.com, #hucaizhang@yahoo.com

收稿日期: 2013年5月16日; 修回日期: 2013年6月2日; 录用日期: 2013年6月10日

**摘要:** 近年来, 随着洱海生态环境的日益恶化和流域大面积快速开发, 洱海的生态环境问题引起了国内外学者的广泛关注。本文对上世纪 50 年代以来在洱海所做的研究工作进行分析、总结, 对洱海环境(包括洱海富营养化、重金属污染、流域开发和植被状况)、生态(包括生物多样性、食物链变化、生态系统特征变化)方面的研究现状进行了分析, 结合所得数据进一步分析了气象因素(气温、降水与风速)与水质变化的关系, 指出洱海及流域研究中还存在许多问题与不足(如蓝藻爆发历史、对浮游动物和食物链的详细研究、区分多重压力对洱海富营养化的驱动强度)。以期对洱海生态、环境的情况有一个综合了解, 为以后在洱海继续开展相关科研工作提供一

\*基金资助: 云南省高端人才引进项目 2010CI1111、湖泊沉积与环境变化云南省创新团队资助研究成果。

#通讯作者。

定的认知基础,更好地为洱海的生态修复工作提供建设性意见。

**关键词:** 洱海; 生态环境; 研究现状; 环境问题

## 1. 引言

洱海(25°36'N~25°58'N, 100°06'~100°28')位于云南省大理白族自治州中部,跨大理市和洱源县(图 1)<sup>[1]</sup>,属澜沧江流域黑惠江支流的构造断陷湖泊,流域面积为 2565 km<sup>2</sup>,是云贵高原第二大淡水湖。湖面海拔高度为 1965.8 m,湖泊面积 251.35 km<sup>2</sup>,最深可达 19.5 m(据云南省环保厅 2000 年实测数据)。矿化度为 170~172 mg/L, pH 值在 8.4~8.5 之间<sup>[2]</sup>。湖水依赖地表径流和湖面降水补给,共有 117 条入湖河流,其中主要河流有 23 条。洱海东接凤尾箐,西汇苍山十八溪水,南纳波落江,北承弥直河、永安江、罗时江,西洱河是洱海唯一的天然出湖河流。湖区属中亚热带高原季风气候,年均温 15℃,年均降水量 1056.6 mm,径流的年内变化主要受气候因素的影响,雨季 5~10 月径流量占年径流量的 65%以上<sup>[3]</sup>。洱海湖泊属暖性湖泊,水温垂直分布具正温层的特点<sup>[1]</sup>。

## 2. 洱海环境现状研究

对于洱海环境的研究现状,可以从以下三个方面

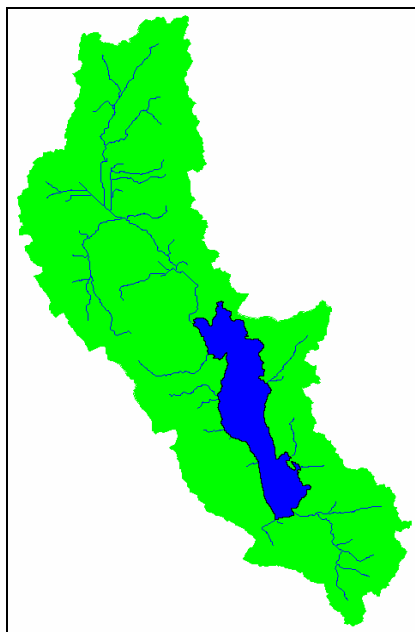


Figure 1. Catchment of Lake Erhai  
图 1. 洱海流域图

进行概括——洱海富营养化研究、重金属污染研究和流域开发和植被状况研究。

### 2.1. 富营养化研究

洱海富营养化的历史和趋势是社会经济发展和区域开发过程的一个缩影,20 世纪 70 年代以前,洱海的水质较好,其对洱海的研究也侧重于物种上;20 世纪 70 年代中期以后,随着对洱海开发活动的不断加剧,水质逐渐变差,其生态环境也发生了一系列变化,此时对洱海的研究也逐渐活跃和深入,主要针对其生态、水化学特征、水位、沉积物、地质演变、富营养化调查等作了初步研究<sup>[4]</sup>。20 世纪 90 年代以来,相关部门对洱海的研究工作更为重视,“八五”期间(1991~1993 年),由云南省科委与联合国区域开发中心(UNCRD)合作,完成了《中华人民共和国云南省大理洱海湖区综合开发和环境管理规划合作研究》,取得了诸多成果。1995~1996 年由联合国环境规划署(UNEP)和联合国开发计划署(UNDP)援助,实施了《洱海流域可持续发展的投资规划和能力建设》,内容包括:洱海流域生物多样性保护、洱海水质监测系统项目、洱海流域非点源污染管理项目、工业污染控制项目、污水管理项目、固体废弃物管理项目及洱海流域综合研究项目等,从多方面对洱海水体及流域环境开展了保护和综合研究<sup>[5]</sup>。

基于对洱海富营养化的大量研究,杜宝汉(1992 年)参考美、日、苏、波兰等国家和国内太湖、东湖(武汉)、西湖(杭州)、滇池和大伙房水库等湖泊富营养化评价标准,结合洱海多年观测资料,拟定出以 SD、BOD<sub>5</sub>、TN、TP 等 8 项水质和生物参数为指标的洱海富营养化评价标准<sup>[6]</sup>,使得洱海水体环境保护及研究向标准化迈出了极大的一步。

#### 2.1.1. 洱海水体富营养化(TP、TN、透明度、叶绿素)研究

作为洱海富营养化的一个体现,对水体富营养化的变化趋势研究较多,本文对 1980 年至 2010 年来的洱海水质数据进行综合分析,以进一步探讨洱海水质

的年际变化趋势。洱海近 30 年的水质监测资料显示：1971~1999 年洱海水质呈不断恶化之势，且恶化程度逐渐加强。郑国强等<sup>[7]</sup>通过建立灰色 GM(1,1) 预测模型，对洱海 2000~2010 年水质演变趋势进行了预测：以当时营养状态发展下去，到 2010 年水质指标将达到 40.38，1996 年秋季洱海爆发“水华”的现象可能要在以后的 10 年内再次发生，洱海的旅游业优势将受到冲击。王云飞等<sup>[8]</sup>对 1981~1996 年来洱海水质数据进行了分析，指出湖水受污染日趋严重、湖水逐渐向富营养化趋势发展。韩涛等<sup>[5]</sup>指出：20 世纪 70 年代前，洱海水量充沛，水质优良，生物多样性丰度较高，20 世纪 70 年代中期以后，由于受人类活动影响，湖泊水位下降、面积缩小，水质受非点源污染严重，致使流域生态环境发生变迁，生物多样性遭到破坏，湖泊富营养化步伐加快<sup>[9-12]</sup>，到 1985 年，洱海水质已由贫营养级转到贫中营养级，1988 年洱海水质又进入中营养级<sup>[13]</sup>。通过对 1992~2001 年洱海水质监测数据进行分析，得出洱海富营养化的变化趋势：虽然富营养化水平处于中营养级阶段的同一级别，但总氮浓度、总磷浓度、高锰酸盐指数都呈上升趋势，藻类数量也明显增加，正处于中营养向中富营养化转变阶段。2004~2009 年洱海水质整体为 III 类水质，处于中营养化水平<sup>[14]</sup>。张态等<sup>[15]</sup>对相对长的时间尺度(1992~2008 年)的水质状况进行了分析，指出 1992~2008 年洱海总氮、总磷变化总体呈显著上升的趋势，尤其是 2002 年以后洱海总氮、总磷变化上升较快；高锰酸钾指数、生化需氧量呈现显著上升的趋势，特别是 2000 年后浓度上升较快；透明度 1992~2001 年呈现缓慢波动下降的趋势，直至 2002 年出现一个急剧下降的重要拐点，2003 年则出现历史最低的 0.88 米，随后基本保持着较低水平。洱海水体氮、磷营养盐浓度近年来逐步增加，化学需氧量上升；溶解氧(DO)急剧下降；藻类细胞数量增加，导致蓝藻型水华多次爆发。综合前面几位学者对洱海水质指标的研究，笔者将 1981~2009 年近 30 年间各时期各水质指标的变化趋势做了一个详细分析(图 2)，并对这近 30 年来的洱海水质变化趋势做一个整体概括。由图可看出，1980~1985 年，TN 快速上升，达到 1980~1992 年间其本身的最高值，与此同时，透明度(SD)不断下降，高锰酸钾指数(COD)不断上升，说明此阶段水质恶化，这与历史记载的

1980~1986 年由于西洱河水电站建成后使得洱海水位大幅下降和 1981、1982 两年枯水年因素一起导致的洱海长期低水位运行<sup>[8]</sup>，致使对水体中营养盐的稀释作用减小，进一步引起水质恶化的结果相符合。1986~1992 年，TN 持续下降至此阶段其本身的最低点，SD 也快速上升到此阶段它本身的最高值，说明这一时期洱海水质有所改善，这可能是人为对富营养化的控制有关，但此阶段 COD 处于上升趋势。1992~2001 年，TN、TP、COD、BOD 都在波动中上升，并且都在 1996 或 1997，1998 或 1999 这两个时间段达到高值，这与洱海 1996 年 9 月和 1998 年 9~11 月爆发藻类水华<sup>[8]</sup>的结果相一致。SD 在 1992~2001 阶段处于稳定范围内波动，其平均值为 3.5，并于 1995、1997 年达到相对低值，说明 SD 的降低要先于水华爆发时间，因此可认为 SD 的下降是水质恶化的征兆。藻量在此阶段内先是稳定中稍有上升，而在 1997 年突然急速增长，并于 1998 和 1999 年达到顶峰，这是藻类水华爆发的结果，2000 年虽下降至低值，但藻量比 1992~1997 年的平均值高了 3 个数量级(1992~1997 年平均值不到 200 万个，2000 藻量大于 600 万个)。2001~2009 年，TN、TP、COD 都处于波动中上升趋势，并于 2003 和 2006 水华爆发年份形成高值，但 BOD 呈下降趋势。SD 急速下降，2002 年为急剧下降的重要拐点，为 2003 年水华爆发的先兆。藻量此阶段一直在 2000 年的基础上高位波动，2006 年还形成了一个小高峰，这些说明了洱海富营养化程度进一步加强。DO 从 1992~2009 年间一直呈现波动趋势，并于 1996、1998、2002~2003、2006~2007 水华爆发年份形成谷值，从其波动曲线看，其变化有着 3~5 年的周期。整体分析结果显示：1981~1985 年洱海水质由贫营养级转至贫中营养级；1986~1992 年洱海水质虽有所改善，但 1988 年水质由贫中营养进入到中营养；1992~2001 年间，洱海水质处于中营养级阶段，但 TN、TP、COD 呈上升趋势，藻类数量也明显增加，说明洱海水质由中营养化向富营养化转变的趋势明显；2004~2009 年洱海水质整体上处于 III 类，处于中营养化水平。为研究气象因子在洱海水质变化中所起的作用，笔者下载到大理气象站 1981~2006 年际气温、降水、风速数据(图 2)。对比研究发现：1981~1985 年，洱海降雨量平均值为 947.42 mm；气温先下降后上上升，年均温为 14.8℃；风速

洱海生态环境研究现状及存在问题

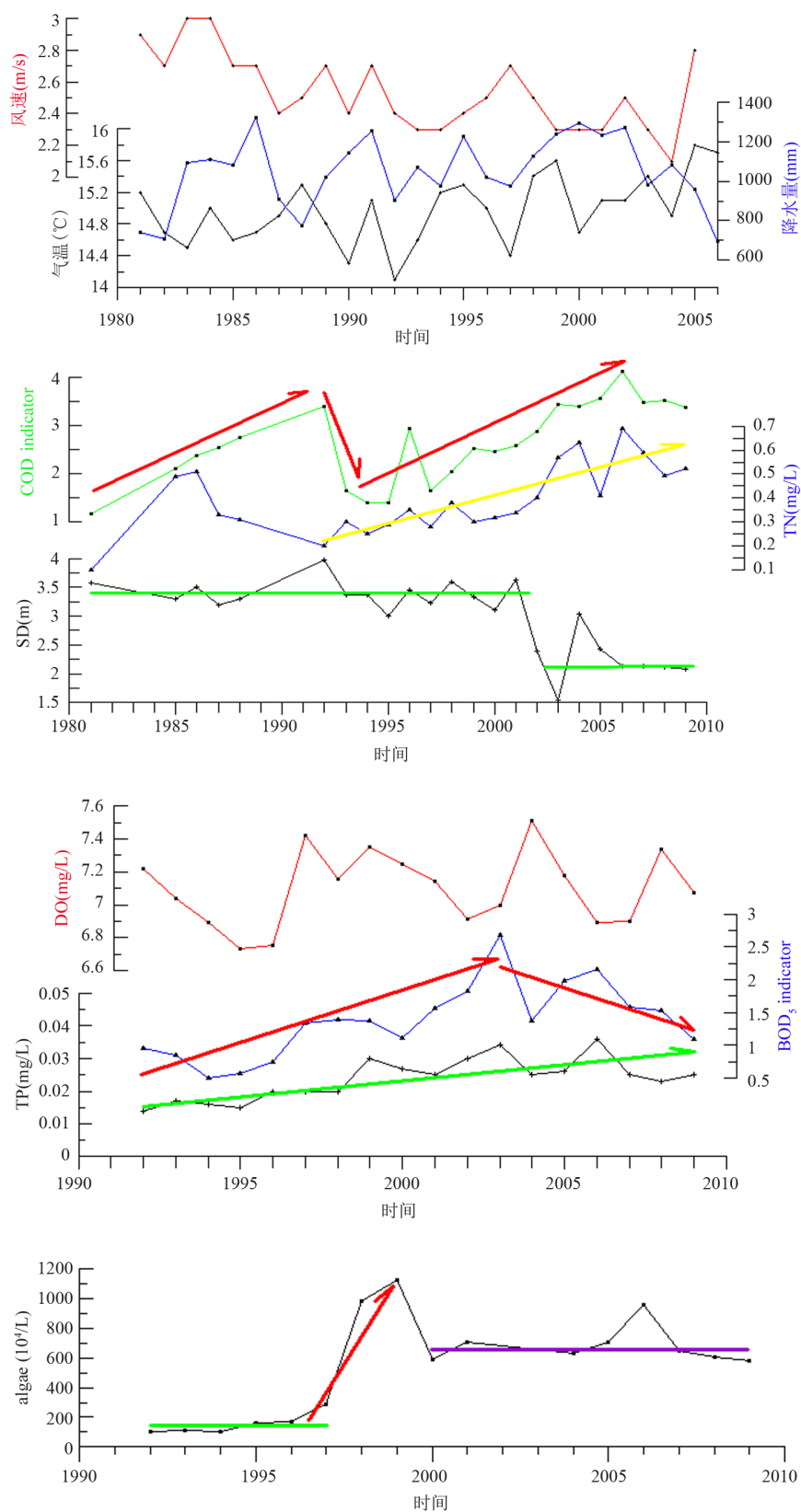


Figure 2. Represent the meteorological data of 1981-2006 years and SD, TN, TP, COD, BOD<sub>5</sub> and DO algae quantity respectively for Erhai between 1981 and 2009

图 2. 分别为洱海 1981~2006 年气象数据和 1981~2009 年 SD、TN、TP、COD、BOD<sub>5</sub>、DO、藻量水质指标

虽有波动,但一直处于高值,年均风速为 2.86 m/s。此阶段洱海水质因水电站建设导致的低水位而发生恶化,但并未发生水华,笔者认为:此阶段气温虽较高,但降水量较高,对营养盐起到稀释作用;风速也很高,通过对水体的强烈混合,导致了水质虽发生恶化但并未出现水华。1988年,降水量低至 777.3 mm,风速也低至 2.5 m/s,气温却升至 15.3℃的高值,因降水量和风速的降低而气温的升高导致此阶段洱海水质恶化,由贫中营养进入到中营养级。1992~2001年,洱海气温虽有波动但整体趋势上升,年均降水量为 1106.44 mm,风速虽有上升但年均较低,为 2.4 m/s,虽降雨量相对较高,但较高的气温和较低的风速使得水质恶化的趋势明显。2006年,非常低的降水(695.3 mm)和高的气温(15.7℃)使得洱海水华爆发。至此,我们发现这样一个规律:气温高、降水少、风速小的年份特别容易导致水质恶化。

洱海水体富营养的季节性变化研究结果表明:洱海 6~10 月份水质指数相对较高,且以 8 月最高,5 月份最低,年内水质波动幅度为 9.78 和 13.37<sup>[7]</sup>。尹延震等<sup>[16]</sup>对洱海全湖 128 km 湖滨带及其外围敞水区水质进行了为期 1 年(2009 年 7 月到 2010 年 6 月)的调查研究,结果表明,湖滨带水质季节性变化表现为:夏、秋季水质污染重于冬、春季,最重时期是 11 月,洱海水质的季节变化与降雨量和流域面源污染的程度有关。

### 2.1.2. 洱海富营养化引起的生物种类变化研究

洱海水体富营养化发生的同时,生物群落结构也同样发生着改变。根据历史资料:1996 年 9 月以螺旋鱼腥藻为主的蓝藻水华在洱海首次大面积爆发,1998 年 9~11 月以卷曲鱼腥藻为主的水华再次大面积爆发,2003 年 7~11 月以铜绿微囊藻为主的水华在局部海域爆发,2006 年 7 月螺旋鱼腥藻在水域大量出现,且于 8~10 月份形成水华,说明洱海营养化程度有所增加。例如,对 1992~2008 年洱海富营养化状况分析发现:随着洱海富营养化进程的加剧,洱海浮游藻类群落结构也发生了较大的变化,总的趋势是种类减少而密度和生物量急剧增加<sup>[15]</sup>。此外,洱海藻类群落结构也已经从 90 年代初由隐藻门、硅藻门占优势演变成为现在以蓝藻门占绝对优势的中富营养类型的群落结构,这种变化显示出洱海水生态系统已经受到损害,并呈

现出迅速退化的趋势,主要表现在:藻类数量剧增,浮游藻类群落多样性下降,生物量显著增加;浮游动物减少;鱼类种群数量减少,少数土著鱼类濒危或消失,洱海湖泊富营养化导致了生物多样性和种类的减少,湖泊系统食物链遭受破坏<sup>[17]</sup>。

### 2.1.3. 洱海富营养化的原因

洱海从 1985 年的贫中营养型湖泊向中营养型湖泊过渡,其营养状况的变化与流域气候、湖泊水位及非点源污染有关,而洱海水位及蓄水量的变化又与流域的降水量、入湖水量及人为对水资源的开发利用密切相关<sup>[6]</sup>。1996 年 9 月洱海蓝藻爆发导致湖泊从 8 月以前的中营养突变为富营养化湖泊,主要是由于引种太湖银鱼,酷渔滥捕,发展网箱养鱼,围湖滩养鱼等因素导致<sup>[13]</sup>,影响因素主要有以下几个方面:流域面源污染严重;湖泊长期维持低水位运行;不合理的资源开发<sup>[10]</sup>。洱海富营养化不仅与营养盐的积累有关,而且与环境因子、生物因子密切相关,三者共同作用导致了洱海呈现富营养化特征<sup>[18]</sup>。综合以上研究,可大致得出洱海富营养化的原因:自然原因包括流域的气候状况(包括降雨量),人为原因包括了引进外来物种、人类活动导致的流域面源污染、对湖泊资源的不合理开发,人类活动导致的湖泊富营养化占据着主导地位。因此可得出这样的结论:为预防和治理湖泊的富营养化问题,我们必须养成正确的人类活动习惯,适当地对湖泊资源进行开发,以保护湖泊的生态环境。

## 2.2. 洱海重金属污染研究

对洱海重金属的研究主要侧重于以下几个方面:湖泊中(水体和沉积物)中金属含量的变化及湖泊中重金属的污染历史、重金属来源及其赋存方式和迁移方式。上世纪 90 年代初期洱海水质和沉积物中重金属元素含量不高<sup>[19]</sup>,水体中重金属元素平均值以  $10^{-9}$  计算:Fe 为 33、Zn 为 9.8、Mn 为 4.5、Cu 为 1.6、Pb 为 0.59、Cr 为 0.24、Ni 为 0.24、Co 为 0.12、Cd 为 0.009。沉积物中平均值以  $10^{-6}$  计算,Cu 为 111、Pb 为 60、Zn 为 127、Cd 为 0.591、Ni 为 80、Co 为 29、Cr 为 130,而 Mn 为 1.406 (mg/g)、Fe 为 54.22 (mg/g)。对于重金属元素的迁移富集而言,水体中 Mn、Fe、Ni、Co、Pb 除一部分赋存于 0.45  $\mu\text{m}$  以上的悬浮

微粒外,均溶于水或赋存于  $0.45\ \mu\text{m}$  以下的微粒上进行迁移。一般而言,重金属元素的来源较多,而不同来源的重金属,其赋存状态往往不同;反过来,对重金属的存在形式(也称地球化学相)进行研究,则有助于识别其来源。因此,研究沉积物中特定层位重金属的存在形式,就可了解特定时期湖泊重金属污染物的主要来源,而对整个沉积物柱的研究则可重建在这一段历史时期中湖泊的重金属污染史<sup>[20]</sup>。洱海 1960 年前沉积物中重金属含量变化可能反映的是元素的自然背景值,1970 年后洱海南部一些元素如 Cu、Zn、Mn、Cd 含量快速上升<sup>[21]</sup>。通过调查表明:重金属元素含量上升与人类活动有关,如快速工业化、城市化和土地利用的开发,尤其是城市工业和生活废水的排放<sup>[20]</sup>。

### 2.3. 洱海流域开发和植被变化研究

长期以来,因对洱海及其流域的资源开发引发了洱海生态系统和流域植被的变化,洱海流域超强度的水资源开发对资源环境造成了严重的损害<sup>[8]</sup>,西洱河水电站建设使得洱海湖泊水位急剧下降,导致仅存于洱海的生物特有种洱海裂民鱼(弓鱼)、洱海四须鲃(鲃鱼)、油四须鲃(油鱼)、大理鲤等 9 种鱼类和海菜花、黄藻门黄丝藻等植物因其生存和繁殖条件破坏数量急剧减少、消亡,洱海生物多样性遭严重破坏。洱海流域规模化养殖使得大量的畜禽粪便随水流入海,严重污染了洱海水质<sup>[15]</sup>;近年来洱海旅游业已进入高速增长期,环湖而设的众多的水上餐厅、度假村、农家乐的污水、固体垃圾和人畜粪便未能得到有效处理,旅游船只频繁行驶在洱海上,旅游线路点附近水域往往呈现出较重的旅游污染,给洱海的保护也带来巨大的压力。洱海流域开发一度导致植被破坏<sup>[22]</sup>,流域原生型的植被十分的稀少,直到近 25 年前因为植树造林活动才使得森林植被得以恢复。

## 3. 洱海生态系统研究

本文对洱海生态系统的研究包括了洱海生物群落结构与生物多样性研究;洱海生态系统特征变化研究两个方面。

### 3.1. 洱海生物群落结构与生物多样性研究

#### 3.1.1. 浮游植物群落结构变化研究

浮游植物作为湖泊中主要的初级生产者,在食物链中起着重要作用,同时也影响着湖泊的水质状况;浮游植物的生长繁殖演替变化与湖泊生态系统的变化息息相关,其群落的组成和分布对湖泊环境的变化起指示作用<sup>[23]</sup>。本文主要对蓝藻、绿藻、硅藻三大类变化进行分析,并主要对 1957 年来浮游植物群落结构和优势种属的年际和年内变化加以解剖。对于浮游植物群落和优势种的年际变化,吴庆龙等<sup>[11]</sup>指出从 1957~1997 年近 40 年来发生了很大变化(表 1),总的趋势是种类减少而密度和生物量增加。洱海藻类总的变化趋势是硅藻、蓝藻的数量和生物量所占比例不断扩大,而绿藻则逐渐减少。优势种常见属种变化较大:1957 年洱海藻类优势种有单角盘星藻(*Pediastrum simplex* Meyer)、水华束丝藻(*Aphanizomenon flos-aquae*)和小环藻(*Cyclotella*),常见的还有云南飞燕角甲藻(*Ceratium handellii*)、暗丝藻(*Pseudonema aenigmaticum*)、湖生鞘丝藻(*Lyngbya limnetica*)和球空星藻(*Coelastrum cambricum*)等<sup>[24]</sup>。到了 80 年代中期,喜清洁水的云南飞燕角甲藻、暗丝藻已不复存在,而蓝隐藻(*Chroomonas* sp.)和直链藻(*Melosira granulata*)则成为常见种,小环藻、水华束丝藻在这 30 年里一直是优势种属,该变化显示洱海水质有一定程度下降。到了 90 年代中期,洱海常见有蓝藻门的色球藻(*Chroococcus* sp.)、微囊藻(*Microcystis* sp.)和水华束丝藻,隐藻门的隐藻(*Cryptophyta* sp.)和蓝隐藻,硅藻门的小环藻、直链藻、脆杆藻(*Fragilaria* sp.)和星杆藻

Table 1. Density and biomass of phytoplankton in Erhai Lake from 1957 to 1997  
表 1. 1957~1997 洱海浮游藻类密度、生物量比较

	1957 年	1980 年	1987 年	1992 年	1997 年
密度( $10^4$ 个/L)	64.9	123.6	132.9	115.6	562.3
生物量/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.547*	1.005	1.086	1.1337	4.6582

\*此生物量依据优势种估算得出(据吴庆龙等, 1999)。



(*Asterionella* sp.)。小环藻,微囊藻、水华束丝藻和螺旋鱼腥藻(*Anabaena spiroides*)等高温季节在局部湖区成为优势种,并形成“水华”。2008~2010年洱海藻种共检出8门61属,蓝藻、绿藻门数目占总数的80%以上,其次为硅藻,约10%左右,洱海的藻类植物群落组成主要为蓝藻-绿藻-硅藻类型<sup>[25]</sup>。

洱海硅藻群落结构季节性变化显著<sup>[3]</sup>,冬季主要优势种为 *Fragilaria crotonensis*,春季 *Aulacoseira ambigua* 与 *F. crotonensis* 的组合占优势地位,夏季以 *Cyclotella ocellata* 为主,秋季则 *A. ambigua* 与 *Cyclostephanos dubius* 组合为优势种。王芸<sup>[26]</sup>对2006年洱海浮游植物状况及蓝藻种群数量变动进行研究,指出2006年6月洱海藻类主要优势种为铜绿微囊藻、螺旋鱼腥藻,7月螺旋鱼腥藻演变为第一优势种,并在局部水域形成了水华<sup>[26]</sup>。2006年1月份至12月份蓝藻种群密度与硅藻、绿藻数量的时间变化关系如图3所示,蓝藻密度1~5月份相对稳定,6~10月份细胞密度较高,最高点出现在7月,到9月,虽然细胞数量有所下降,但密度仍然较高;而硅藻和绿藻在7~8月份密度也相对较高,与蓝藻峰值同时出现,但细胞数量远低于蓝藻。随后逐渐降低,处于稳定态势。分析与气温、降水和风速的关系发现,藻量最高的6~7月份也是气温最高的时候,虽然此时降水量也较多,但蒸发量要远大于降水量;秋季和冬季洱海气温稍有下降但仍然较高,但此时的降水量急剧下降,导致此时的藻量也处于相对高值;春季4~5月降水量达到一个相对高的峰值,此时大理4~5月风速很高,很高的风速使得水体混合强烈,加上高的降水量对营养盐的

稀释,导致此时期的藻量很低。因此,藻类的发展与气温存在正相关关系,与降水量存在反相关关系,很高的气温、低的降水量和低的风速条件(因气候适宜)有利于藻类的大量繁殖。对2007~2009年连续3年的洱海藻类季节变化监测数据研究表明:冬季,洱海藻类以绿藻和硅藻为主,蓝藻较少,尤其是微囊藻和鱼腥藻不常见,但水华束丝藻的比例开始逐渐增加,至翌年3~4月,成为洱海藻类群落的优势种。4月以后水华束丝藻消退,微囊藻逐渐成为优势类群。7月后,鱼腥藻也逐渐成为优势类群。11月后,微囊藻和鱼腥藻逐渐消退,硅藻和绿藻再次成为优势类群<sup>[27]</sup>。由此可以看出,洱海藻类群落的演替方向是硅藻和绿藻-水华束丝藻-微囊藻-鱼腥藻-硅藻和绿藻。卫志宏等<sup>[28]</sup>从2011年4月至2012年3月对洱海浮游植物群落结构及季节演替进行了年际调查,结果表明,洱海常见浮游植物有7门80属115种(图4),优势种的季节变化见表2。与历史资料相比,近年来洱海浮游植物生物量呈上升趋势,多样性指数降低,蓝藻水华优势种由鱼腥藻转变为微囊藻和乌龙藻,绿藻门细胞数量占浮游植物细胞总数的比例持续增加。

### 3.1.2. 浮游动物和底栖动物研究

浮游和底栖动物作为淡水湖泊中的中级生产者,对食物链的变化起着非常重要的作用。吴庆龙等<sup>[11]</sup>对洱海生物群落的研究后指出,1957~1997年间洱海浮游动物群落有两个显著变化阶段,一是从1957~1980年,浮游动物总密度下降,但生物量增加,主要表现在原生动物密度减少,而轮虫、枝角类、桡足类密度则有不同程度增加,此时期优势种为西南荡镖水

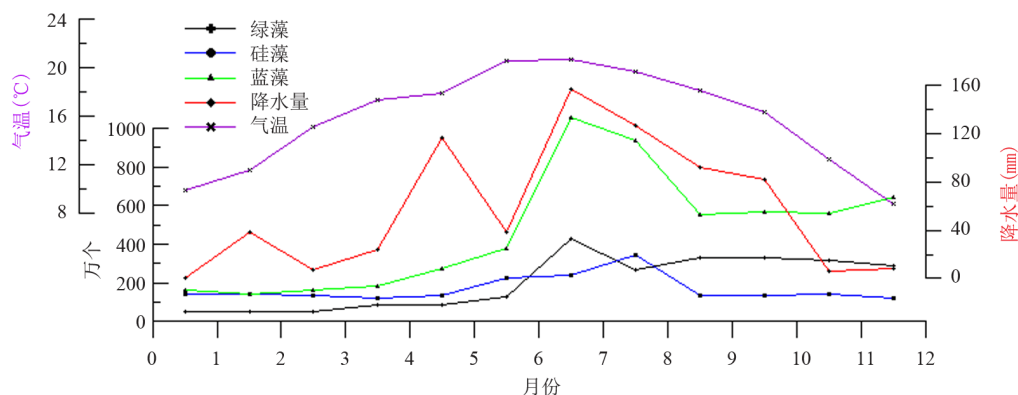


Figure 3. Temperature, precipitation and their relationship with density variations of algae species in the year of 2006 of Erhai—according to Wangyun (2008) and Dali meteorological station (2006)

图3. 2006年洱海气温、降水和藻类种群密度的变化关系——整合王芸2008和大理气象站数据(2006)

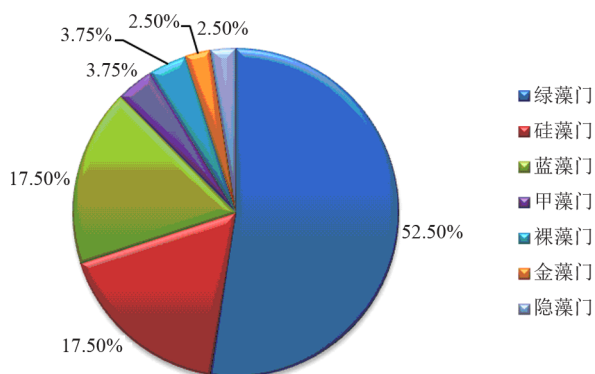


Figure 4. Composition of all phytoplankton species in Lake Erhai from 2011.4 to 2012.3—according to Zhihong Wei et al., 2012  
图 4. 2011 年 4 月至 2012 年 3 月洱海浮游植物各门类的种数比例——来源于卫志宏等 2012

Table 2. Seasonal variations of the dominant species of phytoplankton in Erhai Lake  
表 2. 洱海浮游植物优势种的季节变化

时间	优势种
2001 年 4~5 月	钝脆杆藻( <i>Fragilaria capucina</i> ); 直链藻( <i>Melosira</i> sp.); 尖尾蓝隐藻( <i>Chroomonas acuta</i> )
2011 年 6 月	直链藻( <i>Melosira</i> sp.); 尖尾蓝隐藻( <i>Chroomonas acuta</i> )
2011 年 7 月	小环藻( <i>Cyclotella</i> sp.); 转板藻( <i>Mougeotia</i> sp.); 尖尾蓝隐藻( <i>Chroomonas acuta</i> )
2011 年 8 月	乌龙藻( <i>Woronichinia</i> sp.); 惠氏微囊藻( <i>Microcystis wesenbergii</i> )
2011 年 9 月	乌龙藻 <i>Woronichinia</i> sp.
2011 年 10~12 月	游丝藻 <i>Planctonema lauterbornii</i>
2012 年 1~2 月	游丝藻( <i>Planctonema lauterbornii</i> ); 水华束丝藻( <i>Aphanizomenon flosaquae</i> )
2012 年 3 月	钝脆杆藻( <i>Fragilaria capucina</i> )

蚤(*Neurodiaptomus mariadvigae*)、长刺蚤(*Daphnia longispina*)、针簇多肢轮虫(*Polyarthra triga*)、螺形龟甲轮虫(*Keratella cochlearis*)<sup>[24]</sup>;二是从 1980~1997 年,浮游动物密度和生物量急剧下降,其中轮虫、枝角类和桡足类等大中型浮游动物的减少幅度最大,没有明显优势种,这可能是洱海渔业活动导致了浮游动物数量的剧烈波动(如从 1984 年开始移植银鱼,导致了浮游动物的锐减)。洱海 1997 年有底栖动物 30 个属种,隶属 8 科、16 属,优势种是螺蛳、河蚬、苏氏尾鳃蚓,平均密度 1219.4 个/m<sup>2</sup>,平均生物量 827.22 g·m<sup>-2</sup>,与 1981 年调查结果相比,底栖动物密度和生物量显著增加。王丑明等<sup>[29]</sup>于 2009 年 5 月和 12 月在洱海湖滨带对大型底栖动物的群落结构开展调查,共采集到底栖动物 30 个分类单元;其中,寡毛类摇蚊科幼虫

和软体动物等主要类群为 11 种、7 种和 9 种,其它动物 3 种。在密度方面,群落结构以寡毛类为主;而在生物量方面则以软体动物占优势。

### 3.1.3. 洱海鱼类研究

到目前为止,对洱海鱼类的研究主要集中于对鱼类的种类组成、鱼类群落结构的动态变化、优势种变化、鱼产量变化、鱼类分布的空间格局及鱼类濒危机制和对策分析。对于洱海的鱼类组成和群落结构变化,杜宝汉等<sup>[30]</sup>论述了 50~90 年代洱海鱼类的动态变化:50 年代洱海有鱼类 17 种(表 3),隶属 4 科 9 属。洱海渔产量高达 1500 t 以上,此时的洱海生态系统处于平衡状态。60~70 年代:1961 年,在洱海人工放养草、鲢、鳙鱼种等其他多种小杂鱼<sup>[31]</sup>,使洱海的鱼类从 17 种增至 30 种,鱼类区系组成发生了巨大的变化,增加了鱼类种间关系的复杂性,抑制了洱海土著鱼类的繁殖。70 年代,云南裂腹鱼、光唇裂腹鱼、灰裂腹鱼、洱海鲤、大理鲤等土著鱼类已经消亡。小杂鱼在洱海形成了一个庞大的优势类群,它们消耗了大部分饵料生物,影响了土著鱼类的增殖和发展,洱海的鱼类区系组成向着不合理的方向改变<sup>[32]</sup>。80 年代:鲫鱼种群数量猛增,其产量在洱海渔业中占首位。1984 年,在洱海开始引进太湖新银鱼,致使鳢虎鱼的种群数量大幅度下降,中华鳊和麦穗鱼等小杂鱼种群数量增加。90 年代:随着太湖新银鱼引种成功及其产量的逐年增加,土著鱼类逐渐灭绝,鱼类多样性出现严重危机。2009 年研究结果显示:洱海有鱼类 23 种,隶属于 6 目 9 科,仅 5 种为原有种,其余 19 种均为外来种,并且外来种中有 5 种已经成为入侵种<sup>[33]</sup>。在种类组成上以鲤科鱼类最多;在数量组成上以鳢虎鱼种群最为庞大,大湖新银鱼次之;重量组成上以鲢、鳙渔获量最高,其次为鳢虎鱼和太湖新银鱼;鲫、鲤等原有定居型鱼类渔获量下降;外来鱼类成为洱海渔业主体。

对于洱海鱼类的濒危机制和对策分析研究表明,围湖造田和沼泽化造成的栖息环境破坏;引种产生的物种生存空间及食物的竞争;污染引起的生存环境质量下降;过度捕捞导致的种群减小和灭绝等因子往往对鱼类的生存产生协同威胁作用,最终造成鱼类物种的濒危或灭绝<sup>[34]</sup>。重视湿地生态系统中生物各大类群的研究、加强鱼类物种灭绝内在机制的研究(遗传多样



洱海生态环境研究现状及存在问题

Table 3. Dynamic change in fish species in Lake Erhai (from 1950s to 1990s)  
表 3. 洱海鱼类动态变化表(50~90 年代)

科目	名称	年代				
		50	60	70	80	90
	1) 大理裂腹鱼( <i>Schizothorax tallensis</i> )	+++	++	±	±	-
	2) 云南裂腹鱼( <i>Schizothorax Yunnanensis</i> )	++	+	-	-	-
	3) 光唇裂腹鱼( <i>Schizothorax lissolabiatu</i> s)	+	+	-	-	-
	4) 灰裂腹鱼( <i>Schizothorax griseus</i> )	+	+	-	-	-
	5) 洱海鲤( <i>Cyprinus barbatus</i> )	+	+	-	-	-
	6) 大理鲤( <i>Cyprinus daliensis</i> )	++	+	-	-	-
	7) 大眼鲤( <i>Cyprinus megalophthalmus</i> )	++	++	+	±	-
	8) 杞麓鲤( <i>Cyprinus carpiochilia</i> )	+++	++	+	±	-
	9) 春鲤( <i>Cyprinus longipectoralis</i> )	+	+	+	±	-
	10) 华南鲤( <i>Cyprinus carpiorubrofuscus</i> )	-	+	+	±	-
鲤科( <i>Cyprinidae</i> )	11) 洱海四须鲃( <i>Barbodes daliensis</i> )	+++	++	+	±	-
	12) 油四须鲃( <i>Barbodes exogua</i> )	+	+	-	-	-
	13) 鲫( <i>Carassius auratus</i> )	++	++	++	+++	±
	14) 青鱼( <i>Mylopharyngodonpiceus</i> )	-	+	++	+	±
	15) 草鱼( <i>Ctenopharyngodonidellus</i> )	-	++	++	++	±
	16) 鲢鱼( <i>Hypophthalmichthys molitrix</i> )	-	++	++	+	±
	17) 鳊鱼( <i>Aristichys nobilis</i> )	-	++	++	+	±
	18) 团头鲂( <i>Megalobramaamblycephala</i> )	-	-		++	±
	19) 麦穗鱼( <i>Pseudorasboraparva</i> )	-	-	++	+++	+++
	20) 中华鲮( <i>Rhodeus sinensis</i> )	-	+	++	+++	+++
	21) 兴凯鲮( <i>Acheilognathus chankaensis</i> )	-	+	++	+++	++
	22) 棒花鱼( <i>Abbottinarivularis</i> )	-	+	+	++	±
	23) 泥鳅( <i>Misguenus anguilicaudatus</i> )	++	++	++	+	±
鳅科( <i>Cobitidae</i> )	24) 侧纹云南鳅( <i>Yunnanilus pleurotaenia</i> )	±	±	±	±	±
	25) 拟鳊副鳅( <i>Paracobitis anguilliodes</i> )	±	±	±	±	±
青鲮科( <i>Oryziidae</i> )	26) 中华青鲮( <i>Ortizias latipes sinensis</i> )	+	+	+	±	±
合鳃科( <i>Synbranchidae</i> )	27) 黄鳝( <i>Monopterus albus</i> )	++	++	+	±	±
塘鲺科( <i>Eleotridae</i> )	28) 黄魮( <i>Hypseleotris swinhonis</i> )	-	+	+	+	+
鰕虎鱼科( <i>Gobiidae</i> )	29) 波氏栉鰕虎鱼( <i>Ctenogobius cliffordpopei</i> )	-	+	+++	++	+++
	30) 子陵栉鰕虎鱼( <i>Cteengobius giurinus</i> )	-	+	+	+	++
银鱼科( <i>Salangidae</i> )	31) 太湖新银鱼( <i>Neosalanx taihuensis</i> )	-	-	-	++	+++

注: +++很多, ++多, +有, ±少, -无(据杜宝汉等, 2001)。

性丰富程度、系统发育年龄、形态性状与生理功能研究)、引种的法律化等措施来对洱海湖泊中鱼类多样性进行保护显得十分必要。盲目引种、酷渔滥捕、对水资源过度开发导致产卵场所遭破坏等因素对洱海鱼类的多样性造成了危机,通过制止酷渔滥捕、恢复滩地、控制水位、恢复鱼类洄游通道、人工繁殖和放流濒危鱼类等措施对鱼类多样性进行恢复和保护<sup>[30]</sup>。

### 3.2. 洱海生态系统特征变化研究

近年来,对洱海富营养化的研究已有大量报道,但对于洱海所处的稳态转变阶段研究为数不多。稳态转变理论现已被广泛应用于湖泊生态系统研究,以便对湖泊生态系统发生的本质、渐进和持续的转变过程进行描述<sup>[35]</sup>,这将有助于研究湖泊生态系统的变化过程及驱动因子,理解湖泊当前的水环境问题,为生态修复提供理论支撑<sup>[36]</sup>。汪贞等<sup>[37]</sup>应用模糊评价法分析洱海所处的稳态转换阶段,选取4个指标作为洱海稳态阶段评价的标准(表4),对洱海稳态阶段作了评价:洱海1985~2001年处于清水稳态,2002年系统发生跃迁,2003年退化到藻草共存、草藻共存的过渡态。从2009~2010年洱海各阶段的隶属度来看,系统仍有可能转化为藻型浊水稳态。Wang等<sup>[38]</sup>结合1950~2009年来各方面的历史资料,结合磷循环模型显示洱海湖泊系统转变到稳定富营养化状态的时间为2003年,并且在模型结果中可看到不断上升的方差和不断下降的自相关系数与偏态在早于湖泊系统向富营养化转变的前10~30年就已经出现(图5)。因此,我们得知:如果环境系统被外部因素影响显著,那么社会-生态系统中出现稳态转化的早期信号可能会更强,因此这些信号也会比我们以前想象的更容易发现。在以后的实际湖泊生态系统中,我们也可以通过模糊评价

法和通过各种指标与模型对湖泊生态系统进行研究,以期对湖泊水环境有更好地了解并进一步为生态恢复提供参考建议。

### 4. 洱海生态、环境研究中存在的问题

综上所述,我们可看出在洱海生态环境研究中还存在着一些有待研究和解决的问题。首先,洱海富营养化不仅与营养盐的积累有关,而且与环境因子、生物因子密切相关。虽然导致洱海富营养化的因素有很多,如自然原因包括流域的气候状况(包括降雨量),人为原因包括了引进外来物种、人类活动导致的流域面源污染、对湖泊资源的不合理开发,但各影响因子在驱动富营养化进程中的强度并未被准确地区分出来。并且从关于洱海稳态转变的图5中可发现一个作者并未进行深入解释的问题,即:1200~1750年间DCA分析的方差值从 $-2\sigma$ 上升到 $+2\sigma$ ,其波动范围并不比作者指出的洱海生态系统向富营养化稳态转变的开始时间(20世纪后期)的方差值变动幅度小。尽管20世纪后期方差波动剧烈,但也有必要对20世纪之前的洱海稳态进行分析,以准确认识洱海稳态转变的阶段,并区分各因子在驱动洱海富营养化进程中的强度。因此,通过相关的数理统计分析,区分各驱动因子对富营养化的贡献大小及各因子间的相互作用显得十分

Table 4. Evaluation criterion for regime shift phases of Lake Erhai  
表 4. 洱海稳态阶段转变评价标准

阶段	TP/mg·L <sup>-1</sup>	TN/mg·L <sup>-1</sup>	SD/m	CC/万个·L <sup>-1</sup>
清水稳态	<0.03	<0.05	3	≤10
草藻共存	0.05	2.0	2	100
藻草共存	0.08	4.0	1	1000
藻型浊水稳态	>0.10	>0.5	<0.5	>10,000

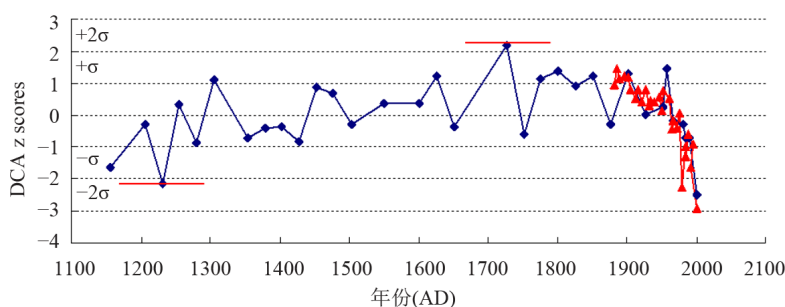


Figure 5. Variability (z scores) of DCA values in long core EH2 1250-2001 and short core EH1 1883-2001 (after Wang Rong et al., 2012)  
图 5. 洱海长孔 EH2(1250~2001 年)和短钻 EH1(1883~2001 年)中 DCA 分析的方差值(据 Wang Rong 等, 2012)

必要和迫切。

其次,蓝藻水华爆发是洱海富营养化的一个极其重要的表现。因洱海富营养化问题日趋严重,蓝藻水华先后于1996、1998、2003、2006年大规模爆发<sup>[15]</sup>。水华发生期间,水体透明度急剧下降,水环境急剧恶化,严重影响了湖泊多种功能的正常发挥<sup>[9]</sup>。近几年来尽管大规模藻类水华没有发生,但洱海蓝藻藻类细胞数量却并没有减少,反而有所增加,甚至在局部湖湾经常发现有蓝藻堆积现象<sup>[27]</sup>。以上研究只是基于政府监测数据记录的规模较大的蓝藻水华爆发事件,因此有些规模较小、没被报道的蓝藻爆发时期可能被忽视。虽然很多学者对蓝藻种类组成及其群落结构进行了研究,但并未对蓝藻的爆发历史进行重建和详细分析。对于洱海这一已经向富营养化转变的湖泊来说,研究其蓝藻水华爆发历史对该湖泊未来富营养化现象的预防和预测显得尤为重要。因此,可通过对洱海水体和沉积物中色素含量研究对蓝藻爆发历史进行重建并分析不同阶段蓝藻爆发的机制和主要诱发因素,以揭示洱海蓝藻种群增殖以及水华发生的环境条件,为洱海蓝藻水华发生的预防、预测提供理论依据<sup>[27]</sup>。

最后,对于洱海食物链研究很少,还没有人对洱海生态系统食物链及营养级进行过系统的研究,因此以后这方面的工作可以进一步加强。有研究显示,洱海因引种太湖银鱼对浮游动物和浮游植物产生的 top-down 效应,使得因银鱼的捕食压力而导致枝角类、桡足类及轮虫等浮游动物大量减少,导致浮游植物至鱼类中间的食物链隔断,浮游植物因失去了摄食者而数量剧增,由此导致洱海的生物多样性减少<sup>[13]</sup>。浮游和底栖动物作为淡水湖泊中的中级生产者,对食物链的变化起着非常重要的作用。现代生态学常通过浮游动物生物量的变化开展食物链和营养级研究。然而到目前为止还缺乏对洱海湖泊中浮游和底栖动物的详细研究,这就进一步限制了洱海食物链和营养级研究的深入和系统化。因此要了解近年来食物链和营养级的变化,对浮游和底栖动物的研究就显得非常重要。由此看来有必要加强对洱海浮游动物的研究以进一步完善洱海生态系统食物链和营养级研究。

从以上几点不难看出,洱海生态环境研究中还有很多方面急待加强和完善,洱海的生态环境及其修复工作任重而道远。

## 5. 致谢

本研究为云南省高端人才引进项目 2010CI111、湖泊沉积与环境变化云南省创新团队资助研究成果。

## 参考文献 (References)

- [1] 李兆林,岑华. 洱海流域环境现状分析[J]. 云南地理环境研究, 2002, 14(1): 54-60.
- [2] S. Xu, G. Zheng. Variations in radiocarbon ages of various organic fractions in core sediments from Erhai Lake, SW China. *Geochemical Journal*, 2003, 37(1): 135-144.
- [3] 胡竹君,李艳玲,李嗣新. 洱海硅藻群落结构的时空分布及其与环境因子间的关系[J]. 湖泊科学, 2012, 24(3): 400-408.
- [4] 杜宝汉. 洱海科研的回顾与前瞻[J]. 大理科技, 1999, 2: 48-50.
- [5] 韩涛,彭文启,李怀恩等. 洱海水体富营养化的演变及其研究进展[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2005, 3(1): 71-73, 78.
- [6] 杜宝汉. 洱海富营养化研究(1)[J]. 湖泊科学, 1992, 4(2): 30-34.
- [7] 郑国强,于兴修,江南等. 洱海水质的演变过程及趋势[J]. 东北林业大学学报, 2004, 32(1): 99-102.
- [8] 王云飞,潘红玺,吴庆龙等. 人类活动对洱海的影响及对策分析[J]. 湖泊科学, 1999, 11(2): 123-128.
- [9] 董云仙. 洱海蓝藻水华研究[J]. 云南环境科学, 1999, 18(4): 28-31.
- [10] 潘红玺,王云飞,董云生. 洱海富营养化影响因素分析[J]. 湖泊科学, 1999, 11(2): 184-188.
- [11] 吴庆龙,王云飞. 洱海生物群落的历史演变分析[J]. 湖泊科学, 1999, 11(3): 267-273.
- [12] 倪长健. 洱海的营养状态发展趋势的灰色预测[J]. 成都信息工程学院学报, 2001, 16(2): 117-118.
- [13] 杜宝汉. 洱海富营养化研究[J]. 云南环境科学, 1997, 16(2): 30-34.
- [14] 费骥慧,唐涛,邵晓阳. 洱海渔业资源与渔业发展模式[J]. 湿地科学, 2011, 9(3): 277-283.
- [15] 张杰. 洱海氮磷时空分布特征及其外源负荷研究[D]. 大理学院, 2011.
- [16] 尹延震,储昭升,赵明等. 洱海湖滨带水质的时空变化规律[J]. 中国环境科学, 2011, 31(7): 1192-1196.
- [17] 马艳,董利民. 洱海流域农村面源污染对水环境的影响及其控制对策[J]. 华中师范大学研究生学报, 2011, 1: 150-153.
- [18] 李杰君. 洱海富营养化探析及防治建议[J]. 湖泊科学, 2001, 13(2): 187-192.
- [19] 黎秉铭,万国江. 滇池、洱海水及沉积物中重金属元素的行为[J]. 环境科学, 1995, 16(2): 50-52.
- [20] 陈敬安,万国江,黄荣贵. 洱海沉积物重金属地球化学相及其污染历史研究[J]. 地质地球化学, 1998, 26(2): 1-8.
- [21] X. Zhang, S. Zhang, W. Ying, et al. Heavy metals pollution on the sediments in lakes Dianchi, Erhai and Poyanghu and historical records. *GeoJournal*, 1996, 40(1-2): 201-208.
- [22] 杜芳芳. 湖泊流域土地利用变化与湖泊水质关系研究[D]. 昆明理工大学, 2011.
- [23] 沈会涛,存歧. 白洋淀浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析[J]. 湖泊科学, 2008, 20(6): 773-779.
- [24] 黎尚豪,俞敏娟,李光正等. 云南高原湖泊调查[J]. 海洋与湖沼, 1963, 2: 87-114.
- [25] 文红星,马根连. 2008-2010年洱海水质及藻类初步分析[J]. 环境科学与管理, 2011, (11): 44-48.
- [26] 王芸. 洱海夏秋季蓝藻种群动态变化及水华成因分析[J]. 大

- 理学院学报, 2008, 12: 39-42.
- [27] 吕兴菊, 朱江, 孟良. 洱海水华蓝藻多样性初步研究[J]. 环境科学导刊, 2010, 29(3): 32-35.
- [28] 卫志宏, 张利仙, 杨四坤等. 洱海浮游植物群落结构及季节演替[J]. 水生态学杂志, 2012, 33(4): 21-25.
- [29] 王丑明, 张君倩, 蒋小明等. 洱海湖滨带大型底栖动物的群落结构[J]. 水生态学杂志, 2011, 32(2): 25-30.
- [30] 杜宝汉, 李永安. 洱海鱼类多样性危机及解危对策[J]. 环境科学研究, 2001, 14(3): 42-44.
- [31] G. McClatchie. An epidemiological database system. *International Journal of Bio-Medical Computing*, 1978, 9(1): 11-24.
- [32] R. C. Martin. *Agile software development: Principles, patterns, and practices*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002.
- [33] 费骥慧. 洱海流域鱼类资源现状、空间格局及其生长特性研究[D]. 杭州师范大学, 2012.
- [34] 周伟. 云南湿地生态系统鱼类物种濒危机制初探[J]. 生物多样性, 2000, 8(2): 163-168.
- [35] C. Folke. Regime shifts, resilience, and biodiversity in ecosystem management. *Annual Reviews*, 2004, 35: 557-581.
- [36] A. Etzioni. The functional differentiation of elites in the kibbutz. *American Journal of Sociology*, 1959, 64(5): 476-487.
- [37] 汪贞, 李根保, 王高鸿等. 基于模糊评价法的洱海稳态阶段分析[J]. 水生态学杂志, 2011, 32(3): 53-58.
- [38] J. A. Dearing, R. Wang, P. G. Langdon, et al. Flickering gives early warning signals of a critical transition to a eutrophic lake state. *Nature*, 2012, 492(7429): 419-422.