

水体污染控制与治理科技重大专项“十一五”成果系列丛书

湖泊富营养化控制与治理主题

滇池流域水污染 治理与富营养化控制技术研究

郭怀成 贺 彬 宋立荣 段昌群 主编
徐晓梅 罗 毅 刘 永

INTEGRATED TECHNICAL FRAMEWORK FOR
WATER POLLUTION CONTROL AND
EUTROPHICATION RESTORATION OF
LAKE DIANCHI WATERSHED

中国环境出版社

水体污染控制与治理科技重大专项“十一五”成果系列丛书

① 湖泊富营养化控制与治理主题

滇池流域水污染治理与富营养化 控制技术研究

**Integrated Technical Framework for Water Pollution Control and
Eutrophication Restoration of Lake Dianchi Watershed**

郭怀成 贺 彬 宋立荣 段昌群
徐晓梅 罗 毅 刘 永 主编

中国环境出版社·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

滇池流域水污染治理与富营养化控制技术研究 / 郭怀成等主编.
—北京: 中国环境出版社, 2017.8

(水体污染控制与治理科技重大专项“十一五”成果系列丛书)
ISBN 978-7-5111-3307-6

I. ①滇… II. ①郭… III. ①滇池—流域—水污染防治—研究
②滇池—流域—富营养化—污染控制—研究 IV. ①X524

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 202049 号

出版人 王新程
责任编辑 陈金华 宾银平
责任校对 尹 芳
封面设计 岳 帅

出版发行 中国环境出版社
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
010-67113412 (教材图书出版中心)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京盛通印刷股份有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2017 年 8 月第 1 版
印 次 2017 年 8 月第 1 次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 13.75
字 数 275 千字
定 价 90.00 元

【版权所有。未经许可, 请勿翻印、转载, 违者必究。】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

水专项“十一五”成果系列丛书

指导委员会成员名单

主 任：周生贤

副主任：仇保兴 吴晓青

成 员：（按姓氏笔画排序）

王伟中	王衍亮	王善成	田保国	旭日干	刘 昆
刘志全	阮宝君	阴和俊	苏荣辉	杜占元	吴宏伟
张 悦	张桃林	陈宜明	赵英民	胡四一	柯 凤
雷朝滋	解振华				

环境保护部水专项“十一五”成果系列丛书

编著委员会成员名单

主 编：周生贤

副主编：吴晓青

成 员：（按姓氏笔画排序）

马 中	王子健	王业耀	王明良	王凯军	王金南
王 桥	王 毅	孔海南	孔繁翔	毕 军	朱昌雄
朱 琳	任 勇	刘永定	刘志全	许振成	苏 明
李安定	杨汝均	张世秋	张永春	金相灿	周怀东
周 维	郑 正	孟 伟	赵英民	胡洪营	柯 兵
柏仇勇	俞汉青	姜 琦	徐 成	梅旭荣	彭文启

《滇池流域水污染治理与富营养化控制技术研究》

编著成员名单

主编：郭怀成 贺 彬 宋立荣 段昌群 徐晓梅 罗 毅 刘 永

编委：

课题 1	周 丰	郑一新	朱 翔	冯长春	贺灿飞	邹 锐
	毛国柱	马 杏	孙佩石	杨常亮		
课题 2	何 佳	魏清伟	温东辉	王树东	赵海英	张怀宇
	谢曙光	冯传平	侯立柱	郑金龙		
课题 3	杨逢乐	吴为中	李清曼	叶 海	崔理华	金竹静
	张春敏	叶金利	王俊松	赵 磊		
课题 4	和树庄	刘嫦娥	张国盛	陆轶峰	李 元	杨树华
	洪丽芳	王崇云	付登高	范亦农		
课题 5	肖邦定	李根保	李 林	陈 静	刘贵华	厉恩华
	潘 珉	李宗逊	谢志才	庄惠如		
课题 6	嵇晓燕	张 迪	王永华	孙宗光	张榆霞	李晓铭
	周 洁	陈云波	李 楠	宫正宇		
项目组	黄 凯	梁中耀	阳平坚	盛 虎	王艺淋	杨永辉
	于书霞	郁亚娟				

总 序

我国作为一个发展中的人口大国，资源环境问题是长期制约经济社会可持续发展的重大问题。在经济快速增长、资源能源消耗大幅度增加的情况下，我国污染排放强度大、负荷高，主要污染物排放量超过受纳水体的环境容量。同时，我国人均拥有水资源量远低于国际平均水平，水资源短缺导致水污染加重，水污染又进一步加剧水资源供需矛盾。长期严重的水污染问题影响着水资源利用和水生态系统的完整性，影响着人民群众身体健康，已经成为制约我国经济社会可持续发展的重大瓶颈。

“水体污染控制与治理”科技重大专项（以下简称“水专项”）是《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020年）》确定的16个重大专项之一，旨在集中攻克一批节能减排迫切需要解决的水污染防治关键技术、构建我国流域水污染治理技术体系和水环境管理技术体系，为重点流域污染物减排、水质改善和饮用水安全保障提供强有力的科技支撑，是新中国成立以来投资最大的水污染治理科技项目。

“十一五”期间，在国务院的统一领导下，在科技部、国家发展改革委和财政部的精心指导下，在领导小组各成员单位、各有关地方政府的积极支持和有力配合下，水专项领导小组围绕主题主线新要求，动员和组织全国数百家科研单位、上万名科技工作者，启动了34个项目、241个课题，按照“一河一策”、“一湖一策”的战略部署，在重点流域开展大攻关、大示范，突破1000余项关键技术，完成229项技术标准规范，申请1733项专利，初步构建了水污染治理和管理技术体系，基本实现了“控源减排”阶段目标，取得了阶段性成果。

一是突破了化工、轻工、冶金、纺织印染、制药等重点行业“控源减排”关键技术200余项，有力地支撑了主要污染物减排任务的完成；突破

了城市污水处理厂提标改造和深度脱氮除磷关键技术，为城市水环境质量改善提供了支撑；研发了受污染原水净化处理、管网安全输配等 40 多项饮用水安全保障关键技术，为城市实现从源头到龙头的供水安全保障奠定科技基础。

二是紧密结合重点流域污染防治规划的实施，选择太湖、辽河、松花江等重点流域开展大兵团联合攻关，综合集成示范多项流域水质改善和生态修复关键技术，为重点流域水质改善提供了技术支持，环境监测结果显示，辽河、淮河干流化学需氧量消除劣 V 类；松花江流域水生态逐步恢复，重现大马哈鱼；太湖富营养状态由中度变为轻度，劣 V 类入湖河流由 8 条减少为 1 条；洱海水质连续稳定并保持良好状态，2012 年有 7 个月维持在 II 类水质。

三是针对水污染治理设备及装备国产化率低等问题，研发了 60 余类关键设备和成套装备，扶持一批环保企业成功上市，建立一批号召力和公信力强的水专项产业技术创新战略联盟，培育环保产业产值近百亿元，带动节能环保战略性新兴产业加快发展，其中杭州聚光研发的重金属在线监测产品被评为 2012 年度国家战略产品。

四是逐步形成了国家重点实验室、工程中心—流域地方重点实验室和工程中心—流域野外观测台站—企业试验基地平台等为一体的水专项创新平台与基地系统，逐步构建了以科研为龙头，以野外观测为手段，以综合管理为最终目标的公共共享平台。目前，通过水专项的技术支持，我国第一个大型河流保护机构——辽河保护区管理局已正式成立。

五是加强队伍建设，培养了一大批科技攻关团队和领军人才，采用地方推荐、部门筛选、公开择优等多种方式遴选出近 300 个水专项科技攻关团队，引进多名海外高层次人才，培养上百名学科带头人、中青年科技骨干和 5 000 多名博士、硕士，建立人才凝聚、使用、培养的良性机制，形成大联合、大攻关、大创新的良好格局。

在 2011 年“十一五”国家重大科技成就展、“十一五”环保成就展、全国科技成果巡回展等一系列展览中以及 2012 年全国科技工作会议和 2013 年初的国务院重大专项实施推进会上，党和国家领导人对水专项取得

的积极进展都给予了充分肯定。这些成果为重点流域水质改善、地方治污规划、水环境管理等提供了技术和决策支持。

在看到成绩的同时，我们也清醒地看到存在的突出问题和矛盾。水专项离国务院的要求和广大人民群众期待还有较大差距，仍存在一些不足和薄弱环节。2011年专项审计中指出水专项“十一五”在课题立项、成果转化和资金使用等方面不够规范。“十二五”我们需要进一步完善立项机制，提高立项质量；进一步提高项目管理水平，确保专项实施进度；进一步严格成果和经费管理，发挥专项最大效益；在调结构、转方式、惠民生、促发展中发挥更大的科技支撑和引领作用。

我们也要科学认识解决我国水环境问题的复杂性、艰巨性和长期性，水专项亦是如此。刘延东副总理指出，水专项因素特别复杂、实施难度很大、周期很长、反复也比较多，要探索符合中国特色的水污染治理成套技术和科学管理模式。水专项不是包打天下，解决所有的水环境问题，不可能一天出现一个一鸣惊人的大成果。与其他重大专项相比，水专项也不会通过单一关键技术的重大突破，实现整体的技术水平提升。在水专项实施过程中，妥善处理好当前与长远、手段与目标、中央与地方等各个方面的关系，既要通过技术研发实现核心关键技术的突破，探索出符合国情、成本低、效果好、易推广的整装成套技术，又要综合运用法律、经济、技术和必要的行政手段来实现水环境质量的改善，积极探索符合代价小、效益好、排放低、可持续的中国水污染治理新路。

党的十八大报告强调，要实施国家科技重大专项，大力推进生态文明建设，努力建设美丽中国，实现中华民族永续发展。水专项作为一项重大的科技工程和民生工程，具有很强的社会公益性，将水专项的研究成果及时推广并为社会经济发展服务是贯彻创新驱动发展战略的具体表现，是推进生态文明建设的有力措施。为广泛共享水专项“十一五”取得的研究成果，水专项管理办公室组织出版水专项“十一五”成果系列丛书。该丛书汇集了一批专项研究的代表性成果，具有较强的学术性和实用性，可以说是水环境领域不可多得资料文献。丛书的组织出版，有利于坚定水专项科技工作者专项攻关的信心和决心；有利于增强社会各界对水专项的了解

和认同；有利于促进环保公众参与，树立水专项的良好社会形象；有利于促进专项成果的转化与应用，为探索中国水污染治理新路提供有力的科技支撑。

最后，我坚信在国务院的正确领导和有关部门的大力支持下，水专项一定能够百尺竿头，更进一步。我们一定要以党的十八大精神为指导，高擎生态文明建设的大旗，团结协作、协同创新、强化管理，扎实推进水专项，务求取得更大的成效，把建设美丽中国的伟大事业持续推向前进，努力走向社会主义生态文明新时代！

周济

2013年7月25日

前 言

滇池是我国云贵高原重污染湖泊的典型代表，在“九五”期间被列为国家重点治理的“三湖”之一。历经多年的治理，滇池水质恶化的趋势得到遏制，但仍未根本好转。为解决滇池流域长期治理中面临的环境与经济的压力大、水环境恶劣、水生态严重受损等问题和技术瓶颈，国家水专项在2008年启动了“滇池流域水污染治理与富营养化综合控制技术及示范”项目(2008ZX07102)，由北京大学牵头负责，郭怀成教授任项目负责人。项目在全流域、多尺度的系统大调查与监测基础上，主要开展了系统的评估及流域水污染治理与富营养化综合控制技术研究，制定了滇池治理的中长期规划，进行了有一定规模的技术工程示范，为实现滇池水污染物排放总量削减目标以及为滇池流域水污染综合治理工程提供全面技术支撑，为开创滇池治理新格局奠定了坚实的科技基础。

项目系统全面总结了滇池治理的经验和教训，揭示了滇池富营养化的成因，指明了滇池治理存在的难点和关键点；针对识别的关键问题开展中长期规划设计、技术研发与示范，形成了“1+4”的研究成果：“1”即提出滇池流域水污染防治与富营养化控制的1整套中长期规划与路线图；“4”即形成了包含重污染排水区综合防控等4套高原重污染湖泊富营养化治理技术；并在滇池“十二五”水污染防治中得到规模化推广和应用。充分体现了重大专项以科技创新支撑引领滇池流域水污染防治及污染减排的作用。“十一五”水专项形成的研究成果，在滇池流域水污染防治“十二五”规划及治滇决策中起到了重要的科技支撑和引领作用。研究成果多角度、多层次、尽可能多地渗透和应用到滇池流域水污染防治“十二五”规划的目标、思路、控制单元确定、方案设计和重点工程设计等环节，在数据、结论、模型、关键技术、思路、方案以及规划建议等方面发挥了全面的科技支撑作用。形成的四大板块技术已经在“十二五”滇池治理中得到规模化推广，提供了强有力的科技支撑，并在抚仙湖、杞

麓湖等其他云南高原湖泊中进行了应用,得到了云南省昆明市相关部门的一致认可。

本书系统梳理了滇池的治理历程,阐明了水专项的立项依据和主要目的,分析了主要的技术研发、问题诊断和工程示范,全书主体内容共分三个部分:

(1) 第一部分为滇池概况及水污染治理回顾。主要分析了滇池流域的基本概况,梳理了滇池自“九五”以来的治理历程,指出了滇池水专项的立项依据、主要目的和任务。

(2) 第二部分对滇池的水质变化历程及富营养化趋势展开分析。剖析了滇池水质持续恶化的直接原因和滇池水质难以改善的根本原因,评估了滇池治理工程,综合诊断了滇池治理的进展与问题。

(3) 第三部分重点展示了滇池治理思路与技术实践。提出了滇池中长期治理理念与思路,构建了高原重污染湖泊富营养化治理技术,并对关键技术开展工程示范。构建的关键技术体系包括:高原湖泊流域营养盐迁移转化过程模拟预测及优化调控技术,高原湖泊城市重污染排水区综合控源及河道沿程削减技术,湖滨区设施农业集水区内部源污染防控技术,高原重度受损湖泊的“湖泊分区生态系统修复—湖滨带建设—湖滨区基底修复”技术。

本书是“十一五”滇池水专项团队集体智慧的结晶,主要参加单位有:北京大学、中国科学院水生生物研究所、云南省环境科学研究院、云南大学、云南高科环境保护科技有限公司、中国环境监测总站。在团队的共同努力下,几经修改并最终定稿。

在项目的研究和执行过程中,得到了国家科技重大专项办公室、昆明市人民政府、云南省环境保护厅、国家水专项管理办公室、云南省水专项领导小组办公室、昆明市水专项办公室及昆明市相关局(办)等的大力支持,得到了国家水专项总体专家组、湖泊主题专家组、流域专家组、三部委监督评估专家组及课题和项目验收专家组等的批评指导,由衷表示感谢!由于作者的知识 and 经验有限,书中难免出现疏漏,殷切希望各位同行不吝指正。

本书的研究与出版得到了国家水体污染控制与治理科技重大专项(编号:2008ZX07102)的资助。

目 录

第 1 章	概述.....	1
1.1	项目概要.....	1
1.2	研究成果简介.....	5
第 2 章	滇池流域系统调查与问题诊断.....	16
2.1	滇池流域概况.....	16
2.2	滇池水污染治理历程与评估.....	20
2.3	滇池流域污染源及其入湖特征.....	32
2.4	滇池水质、水生态特征.....	42
2.5	滇池主要水环境问题及其成因.....	48
第 3 章	滇池治理理论与方案.....	60
3.1	湖泊类型及其特征分析.....	60
3.2	高原重污染湖泊治理理论.....	61
3.3	滇池流域总量控制方案与分析.....	68
3.4	滇池流域水污染治理与富营养化控制方案.....	83
3.5	滇池富营养化治理“时间表—路线图—效果”.....	116
第 4 章	高原重污染湖泊（滇池）治理关键技术与示范.....	122
4.1	高原湖泊流域营养盐迁移转化过程模拟、预测及优化调控技术.....	123
4.2	高原湖泊城市重污染排水区综合防控及河道沿程削减技术.....	134
4.3	湖滨区设施农业集水区面源污染的防控技术.....	158
4.4	高原重度受损湖泊的“湖泊分区生态系统修复—湖滨带建设—湖滨区基底修复”的集成技术.....	176

第 5 章 成果应用与成效..... 185

 5.1 规模示范区及其效果 185

 5.2 水专项支撑下的滇池流域水环境的改善效果 191

 5.3 水专项技术推广应用及其效果..... 191

第 6 章 总结与展望..... 196

 6.1 标志性成果..... 196

 6.2 研究展望..... 199

参考文献..... 200

第 1 章

概述

1.1 项目概要

1.1.1 立项背景

滇池是我国云贵高原重污染湖泊的典型代表，在“九五”期间被列为国家重点治理的“三湖”之一。尽管自“七五”计划以来，滇池流域的水污染治理投入已达数百亿元，但滇池流域的水环境质量状况没有得到根本性的逆转。究其原因，一方面是滇池流域的社会经济发展速度迅猛，人口密度大，对流域造成的水环境压力远超其自身承载能力；另一方面，过去的污染治理方案和工程措施没有统一规划、综合实施，没有形成自上而下、配置合理的滇池流域水污染防治与富营养化控制的整体方案。为此，“十一五”期间，国家重大科技专项“水体污染控制与治理科技专项”下属的“湖泊富营养化控制与治理”主题专门开展了“滇池流域水污染治理与富营养化综合控制技术及示范项目”（2008ZX07102），由北京大学作为第一责任单位与中国科学院水生生物研究所、云南省环境科学研究院、云南大学、云南高科环境保护工程有限责任公司、中国环境监测总站等科研院所共同承担研究任务。

本专项选择昆明滇池作为我国云贵高原湖区重污染湖泊的典型研究对象，针对其位居江河之首、环境保护与经济建设协调发展压力大、水动力条件差、水环境恶劣、水生态严重受损和富营养化程度高与蓝藻水华发生严重的问题，在流域层次上，开展流域水污染治理与富营养化综合控制技术研究，并进行规模化工程示范，以科技进步引导建立严格、有效的全流域污染控制的管理体系。为实现“十一五”期间滇池水污染物排放总量削减 10%及滇池流域水污染综合治理工程提供技术支撑；达到逐步改善湖泊水质，提高水环境等级，加强水生态健康，为湖周边的经济建设与社会和谐发展服务，为我国高原重污染湖泊的水环境、水生态综合治理提供技术支撑。

1.1.2 项目目标和分阶段任务

滇池水专项针对滇池的湖沼学特征和现状,围绕当前迫切需要解决的关键科学问题,研究流域经济社会发展与滇池水环境保护的相互作用机理与调控,识别营养物在滇池流域系统中迁移转化的关键过程,制定滇池流域经济社会发展战略与水污染防治中长期战略规划与方案设计,开发科学有效的高原湖泊容量总量控制管理技术体系,揭示滇池富营养化特征和蓝藻水华周年发生的特殊规律,发展适应滇池流域的节水、控源技术方法,建立水环境、水土资源、水生态、经济社会数据库和系统管理的技术平台。最终以科技进步引导建立严格、有效的高原湖泊流域污染控制的管理体系,实现示范区污染负荷入湖量削减 20%以上,为实现“十一五”期间滇池水污染物排放总量削减 10%以及滇池流域水污染综合治理工程提供技术支撑。

1.1.3 项目研究任务设置

围绕项目目标,共设计了 6 个课题(表 1-1):

课题一,“流域社会经济结构调整及水污染综合防治中长期规划研究”,主要的研究任务是对滇池流域的水环境与社会经济系统进行了详细调查与诊断,依据调查收集到的资料和数据对滇池流域的水环境承载力与主要污染物的总容量进行核算和优化分配,并基于承载力与总容量制定了“滇池流域社会经济结构调整与区域发展战略规划”与“滇池流域水污染综合防治中长期战略规划研究”,以缓解滇池流域水环境质量与人类活动带来的压力之间的矛盾。

课题二,“滇池北岸重污染区节水控源技术方法体系研究与工程示范”,针对滇池北岸昆明主城区水污染特征,以削减城市水污染负荷和控源减排为主要目的,开展城市源污染控制技术研发及集成;以滇池草海流域的船房河排水系统为工程示范研究重点,建立截污系统完善、配置调控优化合理、处理系统体系完备的城市源水污染控制示范区,为滇池流域城市水污染控制提供有效、实用的集成技术及系统控制方案。

课题三,“城市型污染河流入湖负荷削减及水环境改善技术与工程示范”,主要是深入开展城市型污染河流的基础调研工作,充分掌握流域内径流面源对河流水质污染造成的影响以及流域内点源截污完善后水质的变化情况,针对河流两岸截污后的低污染特征的河水,开展河道原位、易位强化处理高效脱氮除磷的技术模拟实验研究,针对城区、城郊地表径流的调蓄、处理技术的模拟实验研究,以及生态河道构建方法的研究和生态修复植物群落选育的研究,最后根据实验研究成果指导示范工程、技术及设计、施工,并进一步开展规模性的示范工程研究,提出城市型污染河流入湖负荷削减及水环境改善技术的方案。

课题四,“滇池流域面源污染调查与系统控制研究及工程示范”,主要开展滇池流

域面源污染负荷产生输移贡献的调查解析、滇池流域面源污染负荷削减方案的研究、滇池流域湖滨区农村面源污染负荷削减关键技术与工程示范和滇池流域过渡区农村面源污染削减关键技术与工程示范4项研究任务,对滇池流域已开展面源污染研究工作的回顾调查和评析,根据流域面源污染状况基础调查和面源污染特征进行区划并以此构建数据共享平台,结合示范区基础资料调查结果及滇池流域面源污染控制的关键技术研究,设计滇池流域湖滨区设施农业重污染集水区和过渡区面源污染削减的关键技术与工程示范。

课题五,“湖泊生态系统退化调查与修复途径关键技术研究及工程示范”的主要研究目的是形成适合我国经济基础与管理水平、具有自主知识产权的严重受损湖泊分区分步生态系统修复、湖滨带建设、湖滨区基底修复的成套技术,在滇池外海南部建成河—湖复合生态系统修复示范工程、种子库恢复示范区、自然生态修复示范区,在滇池草海西岸建成以水生植物生态结构为主体的,以物种、群落多样性为特征的湖滨湿地示范工程,在滇池外草海西岸水域建成湖滨基底修复技术示范工程,示范区域自然生态景观得到根本改善,滨湖水陆交错带多层次植被群落得到全面恢复。

课题六,“滇池流域水环境综合管理支撑技术与平台建设课题”,主要以建设流域水环境综合管理决策支持系统为主线,设计流域水环境状况的监测监控系统方案,研究湖泊流域水环境状况信息表征指标体系,开展流域水环境特征关键指标监测技术研究,开展流域水环境模型集成和流域水环境数据整合与共享机制等信息化技术的相关研究;在此基础上,利用3S技术和网络技术等手段,整合滇池流域水环境相关信息及水专项滇池项目各课题的研究成果,综合运用系统理论和模拟技术,构建流域水环境信息共享基础平台,进而建设流域水环境实时监控、入湖污染总量动态监控、水质预测预报、污染治理项目综合评估等业务功能的流域水环境综合管理决策支持应用平台。

湖泊生态系统的修复是一个长期而又复杂的过程。对于滇池这样一个人口密集、经济规模巨大、城市化率又高达90%以上的高原浅水湖泊而言,其治理难度是很大的。总结滇池污染治理经验和教训,滇池水专项提出了以“控源减排”为主导,以“综合治理”为手段,牢牢把握流域经济社会发展战略与水污染防治的协调规划,联合调控,着重开展流域范围内水文气象、水质、污染源及经济社会的系统调查与监测,摸清流域社会经济与环境污染,开展流域水环境污染和湖泊富营养化全过程诊断;识别流域经济社会与滇池水环境的特征,探讨流域经济社会发展与滇池水环境保护的相互关系,量化滇池流域水环境承载力,提出滇池流域社会经济结构调整与区域发展战略规划;开发高原湖泊容量总量控制管理技术体系,完成流域“控源—减排—截污—治污—生态修复”多级削减技术系统的设计,提出滇池流域水污染综合防治中长期规划,最终为滇池治理提供战略决策支持,也为我国高原湖泊流域水污染控制与治理提