

中国东南丘陵山区水质良好水库现状与天目湖保护实践*

李恒鹏¹, 朱广伟¹, 陈伟民¹, 高荣平², 聂小飞^{1,4}, 虞左明³, 刁亚芹^{1,4}, 李新艳¹

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

(2: 天目湖水源地保护办公室, 溧阳 213333)

(3: 杭州市环境保护科学研究院, 杭州 310014)

(4: 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 东南丘陵山区是我国水库分布最为集中的区域之一, 这些水库在保障区域供水安全方面具有极其重要的作用, 应该优先保护。然而, 水库水环境保护正面临丘陵山区开发强度持续增加, 开发方式和空间布局不合理, 氮、磷污染及富营养化趋势严峻, 缺乏完善监测和管理体系等众多问题。本文以 2000 年以来天目湖水水库保护实践过程为例, 从库体水环境治理、流域污染物削减和综合管理 3 个方面介绍天目湖沙河水库保护的措施和成效, 在此基础上提出良好湖库优先保护的建: 建立具有部门协调能力的水库管理机构, 实行基于湖库水生态目标的水质目标管理, 治理丘陵山区茶果园的面源污染, 注重流域生态系统整体的恢复, 禁止上游水源涵养区和临湖地带的开发, 划定生态保护红线, 明确禁止和限制的开发类型与规模, 加强湖库及流域的监测和预警, 开展必要的水库水体治理工程, 并针对性地制定湖库管理条例。天目湖十几年的保护实践中有效地解决了流域开发与水库水质保护之间的矛盾, 使天目湖水质由快速恶化转为稳步好转, 为东南丘陵山区经济发展过程中水库的环境保护探索了一条道路。

关键词: 东南地区; 丘陵; 水库; 水质; 流域管理; 天目湖

Current situation of good water quality reservoirs in hilly region of south-east China: protection practices of Tianmuhu Reservoir

LI Hengpeng¹, ZHU Guangwei¹, CHEN Weimin¹, GAO Rongping², NIE Xiaofei^{1,4}, YU Zuoming³, DIAO Yaqin^{1,4} & LI Xinyan¹

(1: *State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China*)

(2: *Water Protection Office for Tianmuhu Reservoir, Liyang 213333, P. R. China*)

(3: *Institute of Environmental Protection Science, Hangzhou 310014, P. R. China*)

(4: *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China*)

Abstract: A lot of reservoirs are distributed in hilly region in south-east China. These reservoirs are vitally important in providing water resources and should be priorly protected. However, much problem exists in protecting reservoir water quality in the hilly region, including increased development intensity of land resource, unreasonable development approaches and spatial arrangements, serious nitrogen and phosphorus pollution and eutrophication, and lack of advanced monitoring and management systems, etc. Taking Tianmuhu reservoirs as an example, this paper introduced the measures taken to protect Shahe Reservoir (one of Tianmuhu reservoirs) since 2000 and their effect in reservoir treatment, watershed pollutant reduction and integrated watershed management. Based on these analyses, suggestions are made to protect the reservoirs or lakes with good water quality. These suggestions include establishing reservoir management organizations with good departmental coordination, carrying out water quality target management based on lake and reservoir water ecological objectives, controlling non-point source pollution from tea orchards in the hilly area,

* 国家自然科学基金项目(41030745, 51279194, 41271500)、中国科学院南京地理与湖泊研究所“一三五”重点布局项目(NIGLAS2012135005)、江苏省自然科学基金项目(SBK200920953)和溧阳市沙河水库管理处科研项目联合资助。2013-06-17 收稿; 2013-06-30 收修改稿。李恒鹏, 男, 1973 年生, 博士, 研究员; E-mail: hpli@niglas.ac.cn.

focusing on restoration of watershed ecological systems, prohibiting land exploitation in upstream hilly area and area close to the lake, determining the red line of ecological protection, defining clearly the prohibit and restrict development types and dimensions, strengthening the monitoring and pre-warning systems of lake, reservoir and watershed, carrying out necessary reservoir treatment, and developing management regulations of lake and reservoir accordingly. After more than ten-year protection practices of Tianmuhu Reservoir, the conflict between watershed development of land resource and reservoir water quality protection was moderated. The lake water quality is changing from rapid deterioration to steady improvement, which provides an effective way for reservoir water environment protection in hilly region of south-east China.

Keywords: South-east China; hilly region; reservoir; water quality; watershed management; Tianmuhu Reservoir

水库是用于拦洪蓄水和调节水流的人工湖泊,在饮用水供给、防洪与发电、保障农业灌溉与下游生态用水、发展旅游等方面发挥着极其重要的作用。水库一般位于流域上游,人口密度和经济活动强度低于中下游地区,其水质多优于中下游的河湖水体,是我国当前“水质良好湖泊”的重要组成部分。目前,在全国水污染形势日益严峻、污染的江河和大型湖泊短期治理难以奏效、突发污染事件频繁发生的背景下,大型水库一方面为下游城镇提供优质水源,部分水库还是周边城市应对突发污染事件、保障饮用水安全的重要应急备用资源,因此,加强水库水资源保护非常重要。我国从 1990s 开始重视水环境治理,污染严重的江河与大型湖泊受到主要关注,如 1996 年国务院提出实施“三河三湖”治理工程,将富营养化问题严重的太湖、巢湖、滇池等列入我国水污染治理的重点地区。国家在这些区域投入大量的资金加大污染处理力度,加强产业升级与改造,实施扩大水环境容量的引水工程。20 多年来的水污染治理实践证明,湖泊一旦被污染,治理成本巨大,甚至不可逆转,为避免众多湖泊再走“先污染、后治理”的老路,2010 年开始,财政部、环境保护部联合开展了水质良好湖泊生态环境保护工作,提出优先保护水质良好的湖泊^[1-2]。2011 年 7 月,两部联合印发《湖泊生态环境保护试点管理办法》支持开展湖泊生态环境保护试点;2012 年,将千岛湖、大伙房水库、水府庙水库、汾河水库等大型水库列入到首批 24 个水质良好湖泊生态环境保护试点。目前,针对水质良好湖库生态环境保护的实践过程中,多数试点湖库因科学数据缺乏和保护实践经验积累不足,在保护方案制定方面不可避免地存在较多的盲目性,因此亟需在数据基础良好、保护实践丰富的湖库总结良好湖泊的科学保护模式。本文在分析东南丘陵山区水库分布与水质现状的基础上,剖析东南丘陵山区水库保护面临的问题,通过评价 2000 年以来天目湖沙河水库保护实践与水质改善效果,总结东南丘陵山区水质良好湖库水环境保护的成功经验,为国家良好湖库保护的战略实施提供借鉴。

1 东南丘陵山区大型水库分布与水质现状

东南丘陵山区位于我国地势第三级阶梯上,高程一般在 500 m 以下,地形以丘陵山地为主,以南岭为界,向南为两广丘陵,向北以武夷山为界分别为江南丘陵和浙闽丘陵。行政区主要包括江苏与安徽南部、浙江、福建、江西、广东、广西和海南等。气候以亚热带季风气候为主,年平均气温为 16 ~ 24℃,年均降雨量自北向南为 1000 ~ 1600 mm,降雨强度大^[3]。丘陵山地植被类型为常绿阔叶林,覆盖度高,土壤自北向南依次为黄棕壤、黄壤与红壤、赤红壤和砖红壤,一旦植被破坏,极易造成大量的水土流失^[4]。河流水量大、汛期长、含沙量少,除了赣江、闽江、珠江等以外,分布有大量的独流入海河道。水热资源丰富,农业条件优越^[5],山间盆地和河谷平原多辟为农田,坡地栽培亚热带经济林木和作物,如柑桔、樟树、茶叶等。为合理调节水资源分配,兴利除害,该区 1950 年以来建成大量的大、中型水库,这些水库在水环境问题、流域土地利用、保护和管理等方面均存在一些共同的特征。

1.1 东南丘陵山区大型水库分布

东南丘陵山区是我国水库分布最为集中的区域之一,据《中华人民共和国水利部公报》^[6]、《中国水库名称代码》^[7]、国家 1:250000 基础地理信息数据以及地方水利部门的大型水库信息,统计江苏、安徽、浙江、福建、江西、广东、广西和海南 8 个省份大型水库数量、库容和水面积等特征(表 1)。目前,中国共有大型水库 567 座,总库容 $5602 \times 10^8 \text{ m}^3$;以上 8 省大型水库共 173 座,总库容 $1420 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上的 59 个, $1 \times 10^8 \sim 10 \times 10^8 \text{ m}^3$ 有 114 个,8 省大型水库占全国总数的 30.5%,库容占全国大型水库库容的 25.3%。该区水库数量最多的是广西省,其次是广东省;库容最大的是浙江省,其次是广西省,从水库水面来看,以江

西省最大(表1).

表1 中国东南丘陵山区8省大型水库统计数据

Tab. 1 Statistical data of large reservoirs in the eight provinces in hilly region of south-east China

省份	数量			总水面积/km ²	总库容/(×10 ⁸ m ³)
	>10×10 ⁸ m ³	1×10 ⁸ ~10×10 ⁸ m ³	总计		
福建省	3	15	18	186	116
广东省	7	27	34	674	283
海南省	2	5	7	164	67
江苏省	1	5	6	104	27
江西省	3	23	26	809	174
浙江省	4	25	29	676	325
广西省	6	35	41	394	292
安徽省	4	8	12	321	136

1.2 苏南和浙江丘陵山区水库水质

水库水质问题主要为氮、磷污染及富营养化,通过部分水库水质监测资料和文献资料,获得苏南和浙江18座水库的总氮、总磷和氨氮指标,评价该区的水质现状(表2).评价的18个水库中氨氮控制在I~II类水之间,但总氮、总磷污染较为严重,总氮仅有31%的水库达到I~III类,IV~V类的达到44%,还有25%甚至为劣V类,总磷以III~V类为主,其中III类占35%,IV~V类占35%,II类占30%.氮、磷浓度的升高必然导致藻类增殖和水华暴发风险增加,影响供水安全,因此目前需要加强丘陵山区水库水环境的保护.

表2 苏南和浙江18座大型水库水质评价^[8-17]

Tab. 2 Water quality assessment of 18 large reservoirs in south of Jiangsu and Zhejiang

水库	总氮		总磷		氨氮		数据年份	数据来源
	浓度/(mg/L)	类别	浓度/(mg/L)	类别	浓度/(mg/L)	类别		
分水江水库	2.080	劣V类	0.033	III类	0.065	I类	2008—2009年	文献[8]
富春江水库	2.190	劣V类	0.130	V类	0.280	II类	2008—2009年	
千岛湖	0.930	III类	0.021	II类	0.078	I类	2008—2009年	
青山水库	3.320	劣V类	0.086	IV类	0.420	II类	2008—2009年	
对河口水库	—	IV类	—	II类	—	I类	2008—2009年	
白溪水库	0.870	III类	0.020	II类	0.160	II类	2009年	文献[9]
横山水库	1.620	V类	0.030	III类	0.100	I类	2008年	文献[10]
石梁河水库	0.920	III类	0.090	IV类	0	—	2010年	文献[11]
皎口水库	2.011	劣V类	0.016	II类	0.093	I类	2009年	文献[12]
四明湖水库	—	—	0.150	V类	0.470	II类	2006—2007年	文献[13]
陈蔡水库	—	IV类	—	—	—	—	2008年	文献[14]
汤浦水库	—	—	0.016	II类	—	—	2006年	文献[15]
长诏水库	1.530	V类	0.050	III类	<0.05	I类	2010年	文献[16]
长潭水库	0.480	II类	0.060	IV类	—	—	2011年	文献[17]
沙河水库	1.147	IV类	0.036	III类	0.042	I类	2012年	
大溪水库	0.878	III类	0.026	III类	0.137	I类	2010年	
赋石水库	1.238	IV类	0.044	III类	0.067	I类	2009—2010年	
老石坎水库	1.359	IV类	0.054	IV类	0.081	I类	2009—2010年	

2 东南丘陵山区水库水质保护面临的挑战

2.1 丘陵山区开发强度持续增加,水库水环境保护压力不断加大

东南丘陵山区具有“七山一水二分田”的地貌特征,优质耕地和适宜建设的土地资源十分有限.近年来

随着城市化快速发展,耕地大幅度减少,建筑用地扩张和耕地保护的矛盾更加突出. 地方政府为缓解这种矛盾,保持农业持续发展,纷纷出台引导和鼓励丘陵山区农业开发的政策,加大丘陵山区农业开发力度,丘陵山区农业开发成为该区土地资源开发的主要趋势之一. 如江苏省“十二五”规划明确提出,加快全省丘陵山区农业综合开发,苏南丘陵山区重点发展优质果品、名优茶叶、花卉苗木、生态观光等;浙江省“十二五”将低山丘陵作为全省土地后备资源的重要发展区域,并提出加快建设“山上浙江”的战略;江西省“十二五”提出在上游山区建立特色水果、有机名茶、食用菌重点产业区,这些政策的推动必将带动丘陵山区开发强度大幅度增加.

丘陵山区农业开发主要为高收益的茶果园,且以规模化种植为主,是目前驱动丘陵山区土地利用变化的主要动力. 以天目湖流域为例,2000—2011年流域茶园开发总面积由6.2 km²增至26.5 km²,尤其是2008年以来增加更为迅速,以园地年均增长率来算,该区园地增长速率已经超过太湖流域城市化过程中建筑用地的增长速率^[18]. 茶园为坡地种植且施肥强度极高,2010年调查的结果显示,有机肥施用量达到958.5 kg N/hm²,约为耕作施肥强度的2倍^[19]. 茶园覆盖度低于竹林、马尾松等林地,且每年4—5月采茶后覆盖度下降到40%^[20],同期正值雨季来临,导致降雨对地表强烈冲刷并造成养分大幅度流失,增加河流与水库的氮、磷浓度. 流域不同用地类型氮、磷输出解析研究结果显示,与竹林和马尾松林地相比,茶园开发导致氮流失增加7~8倍^[21].

丘陵山区旅游资源丰富,以水库为重点的旅游开发正在呈现快速发展的趋势,一些条件优越的库区已经建成具有湖区观光、休闲度假、乡村旅游等众多功能的国家级重点风景名胜区,带动丘陵山区资源开发与区域经济快速发展. 如千岛湖被列入国家5A级旅游景区,天目湖为国家4A级旅游景区,广西百色水库和大王滩水库、福建东张水库和山美水库、广东省合水水库都被列入国家级旅游区. 近十年来,水库旅游发展迅速,以天目湖景区为例,2000年天目湖景区接待各类游客107万人次,到2011年接待游客达到630万人次. 旅游快速发展过程中如果不注重环境保护,可能对水库水环境产生显著的负面影响: 其一是游客增加导致库区污染物排放量增加,水库周边的宾馆、饭店增加地面暴雨径流和生活污水排放,即使经过污水处理厂再排入水库中,污水处理厂尾水氮、磷污染物浓度仍然较高,最终的增加入库氮、磷; 其二是旅游设施和道路开发过程中,造成地表裸露,水土流失强度加剧,并导致河流和水库磷污染加重,促进水库快速富营养化过程; 第三是水库观光旅游带动全流域的土地开发,上游山区农家乐旅游发展快速,同时道路改善还加大山区农业开发,而这些地区远离集镇和村落,污水处理设施建设薄弱,导致上游的水源受到破坏.

此外,随着该区经济快速发展和人均收入的提高,丘陵山区农村的生产与生活方式发生很大的变化,包括: 从事农业的劳动力减少,传统有机肥不再回田而是直接排放,畜禽养殖数量和规模持续增加等. 此类地区因人口分散,大型的污水处理设施难以发挥作用,生活污染和畜禽养殖的污染贡献量增加. 据第一次污染普查数据显示,生活污染是目前我国最大的污染来源之一,部分地区分类核算得出生活污染氨氮、总氮和总磷排放量已占污染物总排放量的50%以上^[22],这也是丘陵山区水环境保护压力增加的重要原因之一.

2.2 水库及其流域开发导向不清晰,产业结构与空间布局不合理问题突出

在丘陵山区资源开发过程中,处理好经济发展与水环境保护的关系至关重要. 近年来,该区地方政府已经认识到生态与环境保护地位的重要性,但是,在发展中“合理开发和生态优先”贯彻思路和导向仍不够清晰,具体表现在以下几个方面: ① 流域水环境与生态承载能力研究薄弱,丘陵山区开发仅考虑土地的适宜性,尚未确定基于流域水环境或生态承载力的开发总量约束,如水库岸线可开发的长度,流域坡地开发的最大比例等; ② 在开发布局方面,哪些地方具有重要的生态功能和价值而需要禁止开发,哪些需要限制开发,哪些需要优化开发还不够明确,河口湿地围垦、流域临湖岸坡开发、库湾重要湿地破坏、上游水源涵养区布局农家乐旅游等,不合理的开发布局普遍存在; ③ 在开发方式方面,如何贯彻生态的理念,最大限度地减少对生态和水环境影响的技术推广和监管还不完善; ④ 仅仅对部分破坏植被的采矿业进行禁止,但对企业行业类别尚未设置环境准入门槛,沿海高污染企业因环境准入门槛提高向上游经济相对落后的地区转移,造成源头水质发生污染. ⑤ 在处理农业开发、旅游和水源地保护方面还存在冲突,如坡地茶果园种植得到政策的鼓励和资金的补贴,而事实上,这种开发造成大量的氮、磷进入水体中.

2.3 坡地茶果园开发的环境整治规程缺乏,水库管理的制度和法规不完善

建立国家和行业标准规范,制定水源地管理制度和条例,可以规范丘陵山区的资源开发和生产经营活

动,促进和鼓励流域采用环境友好的开发方式,是库区环境保护的制度性保障.目前针对坡地开发,环境整治的依据为《水土保持综合治理技术规范》(GB/T 16453-2008),具体包括坡耕地治理技术、荒地治理技术、沟壑治理技术、小型蓄排引水工程、风沙治理技术、崩岗治理技术等.技术规范中,与坡地农业开发最为密切的是坡耕地的治理技术,该技术规范主要针对坡地农田的开发,防治的重点是地表径流和泥沙的输出,而对茶果园来说以下几个方面均不适用:其一,茶果园开发对水环境的不利影响不仅仅体现在地表径流泥沙和养分的流失,因为氮的迁移主要在壤中流中发生和输移,并且向下迁移进一步影响地下水;其二,地表流失为主的过程主要发生在茶园建设的早期,因为成熟茶园的植被覆盖度高,地表水土流失并不严重;因此要针对茶果园开发过程、种植方式、环境保护等多方面制定丘陵山区茶果园环境整治的技术规范.

在水库管理方面,存在国家规范、地方的规范和条例等,但经常在分区方法和范围方面存在显著的差别.目前,可供参考的规范有国家环境保护总局《饮用水水源保护区划分技术规范》(HJ/T 338-2007),对一级、二级保护区和准保护区划定进行了说明,但这些划定方法并未从水库的环境容量出发,只是一般性的原则,如规定湖库一级保护区为取水口 500 m 范围和水库正常水位线向上游 200 m,而实施这一规定对水源的改善程度是不确定的.地方上针对本地水库保护的特点,还出台相关地方规范和标准,如 2011 年 7 月 16 日江苏省第十一届人民代表大会常务委员会代表大会通过了《江苏省水库管理条例》,提出了水库的管理范围及其管理措施,但管理范围划定的科学依据还需要进一步深入研究.此外,水库管理的规范和制度还缺乏必要的监管队伍,违反条例的一些开发活动未能被取缔.

2.4 缺乏系统的监控,数据积累不足,水环境管理科学决策难度大

水库藻类增殖受氮、磷浓度,天气与气候,水文水动力等众多因素综合影响,条件适宜时可以在一两周内完成.而水库中的氮、磷污染以流域来源为主,因此,水库水环境问题发生原因分析与管理决策制定均依赖于水库及流域的完整监测体系.目前东南丘陵山区大型水库尚未建立完整的监测体系,入库流域水文、水质、土地利用等方面监测非常薄弱,仅有的数据主要为按月或年获取的水库水质巡测资料,而且监测年数较少,在制定水环境管理保护政策方面,经常出现水库保护目标不明确、入库污染总量不清楚、水环境容量无法确定、减排量确定普遍缺乏科学依据等问题.近年来,在天目湖地区,利用遥感、气象、水文水质自动监测技术等先进手段对流域与水库的气象、生态、水文和水质进行实时监控,对流域开发、水质变化状况以及重点工程的实施效果开展定期跟踪评估,实时了解天目湖水库水质动态,及时发现问题和安全隐患,为水源地的科学治理和管理提供了有效保证.

3 天目湖水库水环境保护实践

3.1 天目湖流域概况

天目湖流域(图 1)位于江苏溧阳和安徽广德、郎溪境内,地貌类型多样,以低山丘陵为主,高程主要分布在 2~541 m,包括沙河、大溪两座国家级大型水库;其中,沙河水库水域面积 9 km²,流域面积 145 km²,大溪水库水域面积 12 km²,流域面积 80 km².天目湖流域属于亚热带

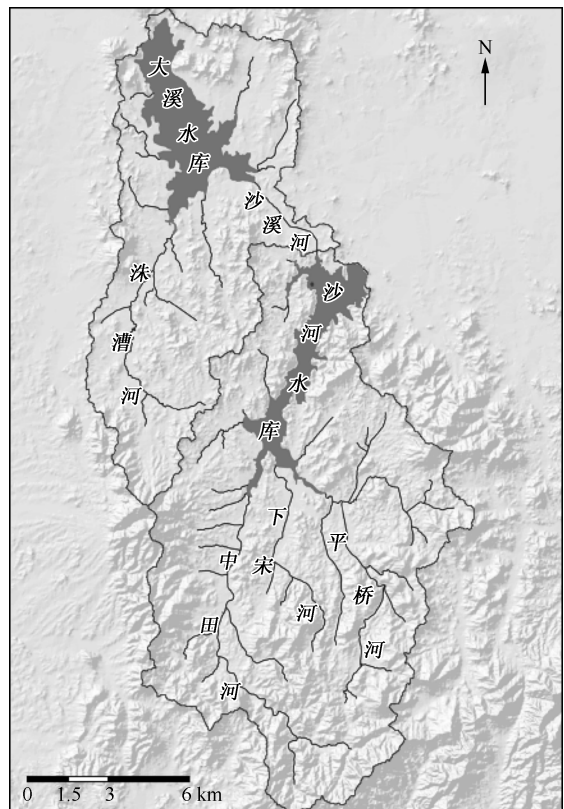


图 1 天目湖流域河流及水库分布
Fig. 1 Distribution of the rivers and reservoirs in Tianmuhu Reservoir watershed

带季风型气候,年均降水量 1149.7 mm,降水主要集中在 5—9 月;全年平均温度 17.5℃,1 月份平均温度最低,为 3.2℃,7 月份温度最高,平均为 31.1℃. 地带性土壤为黄棕壤,厚度为 50~80 cm,保水保肥性差,易被水冲刷导致水土流失,山间谷地、山间平原发育有渗育型水稻土. 天目湖水库是我国首批 4A 级风景区,是东南湿润区丘陵山区农业综合开发的代表性区域,集供水、旅游和农业于一体,是溧阳市建设旅游城市、推动经济快速发展的重要载体,同时也承担着供给溧阳市近 60 万人饮用水的重大任务.

3.2 天目湖水环境问题

2000 年以来,天目湖旅游和农业都进入快速发展时期,旅游人口由 2000 年的 107 万增加到 2006 年的 340 万,到 2009 年进一步增加到 455 万人次. 农业表现为规模化的茶园开发快速发展,2000—2005 年由 6.2 km²增加到 10.1 km²,2005—2011 年发展规模进一步加快,面积增加到 26.5 km²,2010—2011 年茶园面积的平均增长速率为 1.8 km²/a,每年增长面积约为流域总面积的 0.75%^[18]. 伴随着旅游业和农业快速发展,2000 年来沙河水库水质呈现快速下降的趋势. 2002—2006 年,总氮从Ⅲ类快速下降到Ⅳ类,2006—2010 年,由Ⅳ类下降到Ⅴ类;总磷 2006 年达到Ⅲ类水平;浮游植物生物量 2002 年仅为 22.694 mg/L,到 2006 年 5 月浮游植物生物量平均达到 127.142 mg/L,4 年增高 6 倍;水体透明度下降,水体二甲基异茨醇和土臭素超标,影响到供水安全^[23].

3.3 天目湖水库水环境保护进展

2005—2006 年天目湖水环境问题显现,供水受到威胁,引起了地方政府的高度重视,先后开展了库体内源污染控制与生物调控、流域污染控制和湿地生态恢复等各项工程,近年来更加强调整流域管理的重要作用,总结了 3 个方面的主要措施.

3.3.1 天目湖库体水环境治理措施 库体水质保护措施是水库水环境保护的末端治理对策. 理论上,是应该在流域入库污染得到有效控制之后采取的技术措施. 但是根据水库管理的具体情况和污染历史与程度,库体水质保护措施可以和流域治理措施同步实施. 天目湖的库体水质保护措施和流域旅游污染整治就是同步开始的^[23-24]. 天目湖库体的水环境保护措施主要从 3 个方面实施:水上旅游污染控制、渔业养殖调控和底泥疏浚.

1) 水上旅游项目污染控制:目的是减少景区旅游活动对水库营养盐的输入,降低旅游活动对水库生态系统的扰动. 采取的主要方法包括制定限制旅游活动区域、线路与规模,禁止旅游船只污水排入水库,禁止旅游垂钓等. 为了使旅游环境保护有法可依,天目湖管理部门于 2003 年组织专家制定天目湖的旅游规划,重点对旅游规模、旅游点布设、旅游方式、旅游船只管理等进行研究,出台天目湖旅游规划. 对于旅游活动区域,将旅游活动集中区域放在天目湖下游沙溪河出水口的库湾,既不会对上游水域造成污染,也便于通过水库下泄放水调整该水域水质. 对于旅游线路,船只只能从旅游码头到水库中部的抽水蓄能电站景点码头,其余景点不设水上交通线,这样减少了旅游船只扰动对水体生态系统的影响. 对于旅游船只污水排放,规定所有旅游船只的污水必须在码头泵到污水收集车上,运送到污水处理厂. 禁止水库垂钓,这一方面避免了投饵性垂钓带来的污染,也为渔业养殖管理提供了保障. 通过对天目湖水面上旅游活动进行上述一系列管理措施,避免了天目湖水面上旅游活动的无序发展,大大降低了旅游活动带来的污染,还营造了宁静、自然的水库环境,提高了旅游品质.

2) 渔业养殖调控:主要目的是改善天目湖的水生态系统结构,减少渔业养殖污染,增加食物链下行效应对富营养化指标藻类生物量的控制. 采取的措施主要分 3 个方面:第一,降低养殖鱼类的库存量. 天目湖渔业养殖从 1960 年开始,主要养殖鱼类是鳊鱼和鲢鱼,占捕捞鱼中的 95%,其余为鲤鲫鱼. 1999 年至 2005 年,天目湖由于“天目湖砂锅鱼头”旅游品牌的带动,大力发展鳊鱼放养. 水库中鲢鳊鱼年产量超过 30 万斤,另外还有大量的网箱暂养鳊鱼,导致水体浮游动物生物量很低,增加了藻类疯长的风险. 2006 年以来,通过逐年降低鳊鱼放养量,逐步将鱼类年产量降低到 20 万斤左右,降低了鳊鱼对浮游动物的牧食压力. 第二,促进野杂鱼的繁育. 2006 年以来,天目湖严格执行禁渔期与禁渔区制度,将上游入湖河口区近 2 km²的湖面列为野杂鱼繁育保护区,并将上游河口区近 1 km²的鱼塘与水库联通,建成入湖河口湿地,增加野杂鱼繁育. 还专门购置高背鲫、黄尾密鲴鱼苗,投放到天目湖. 野杂鱼大多为杂食性鱼,对于水库有机碎屑物质的清扫起到很好的作用. 第三,增加鳊鱼比例. 从经济价值上看,鳊鱼的价格比鲢鱼高数倍,但从水质保护的效益看,鲢鱼食性中更多地滤食浮游植物^[25],所以鲢鱼的生态保护价值则明显高于鳊鱼. 2006 年以前,天目湖渔

业养殖的重点是鳊鱼,较少关注鲢鱼.从2006年起,天目湖渔业捕捞队的经济效益职能完全转向水质效益管理,渔业养殖为水质管理服务,投放的鲢鳊鱼苗中,鲢鳊比例一度维持在8:2~9:1,鲢鱼比例大幅度增高.结合总放养量的下降,有效改善了天目湖渔业种群结构.

3) 底泥疏浚:主要目的是清除长期积累在水库下游深水区的有机质和营养盐,降低氮、磷的内源负荷,控制浮游植物的生长.天目湖是个季节性分层湖泊,每年的4—10月,下游坝前的深水区底层形成厌氧区^[26].而该区域又是水库有机碎屑的堆积区,随着温度升高,不但会释放土臭素类的异味物质,还大量释放氮、磷等营养盐,为下游水库浮游植物的疯长提供了营养盐基础^[27].经前期勘测,天目湖湖底沉积物总氮含量平均值为2598 mg/kg,总磷含量平均值为323 mg/kg,但下游坝前总氮含量最高达9890 mg/kg,总磷含量最高达894 mg/kg,明显高于其他库区^[28].2007年4月,天目湖实施清淤一期工程,对下游库区1.5 km²范围内表层30~50 cm深度的淤泥进行绞吸式清淤,清淤土方量约450000 m³;共清除总氮约1250 t、总磷250 t,清淤后短期水体总氮下降了15%,总磷下降了40%^[29].底泥疏浚耗资一千多万元,在水库治理措施中属于末端方案.

3.3.2 流域污染物削减与环境整治 流域是水库之源,水库水质的改善程度依赖于流域入库污染负荷的削减量.没有流域污染的削减,库地治理措施的效果很难保证.从流域污染物来源和输移过程来看,入库污染物负荷一方面需要从排放源头进行削减,如工业点源、生活污水处理、小流域面源污染控制等,另一方面可以通过提升河流系统对污染物的拦截和降解能力来削减.天目湖流域污染削减与环境整治措施主要包括:上游企业搬迁和流域污染控制、集镇和分散式农村生活污染治理、退耕还林还草与湖滨生态隔离带建设、河道生态改造与河流漫滩湿地恢复、茶园氮磷流失的小流域整治措施.

1) 上游企业搬迁和旅游污染控制:目的是最大程度地减少流域内工业点源污染,减少宾馆、饭店等旅游接待产生的生活污染源.2006年前天目湖上游分布有23家矿山企业,一家食品企业和2家机械制造企业.矿山企业在开矿过程中破坏上游水源涵养区的原生态,加剧水土流失,还可能造成重金属污染加重,对水源影响极大,到2011年关闭了上游水源涵养区的所有采石厂,并对矿山造成的裸露区进行了生态修复.食品企业和两家机械制造企业搬迁到水库坝下的工业园区,对污水进行集中处理.旅游业污染是天目湖流域主要污染源之一,贡献较大的有沿湖宾馆饭店和上游的农家乐污染排放;生活污水经过一级A标准的污水处理厂处理,排放尾水氨氮仍达到5 mg/L、总磷0.5 mg/L,是重要的点源污染,因此沿湖宾馆和饭店采用污水外排处理的方法,建设污水收集管网并通过泵站输往水库坝下天目湖镇污水处理厂.

2) 集镇和分散式农村生物污染治理:目的是最大程度地减少生活污染,集镇和大的村落是人口聚集区,有利于集中处理,为最大程度减少集镇生活污染对水库的影响,建设污水处理厂,铺设管网排放到坝下天目湖镇污水处理厂处理,污水收集输送管网于2009年9月竣工验收并投入运行,污水主管全长11.87 km,支管1.54 km,天目湖上游平桥镇集镇生活污水不再入湖.乡村因丘陵地形复杂,管网建设难度大,天目湖地区目前采用生态户厕建设对分散居民点生活污染进行处理.生态户厕采用整体式钢化玻璃,出水口进行人工湿地栽培,体积约2 m³,湿地表面植被种了美人蕉和麦冬草,通过过滤、微生物消化、植物根系吸收等作用降解污水中的有机质等,同时可以形成小绿地,美化环境.自2007年开始建设,到2009年建成10894套,覆盖沿湖的平桥村、杨村村等20个村庄.依据生态户厕的技术参数,进入水体的氮、磷可削减60%.

3) 退耕还林还草与湖滨生态隔离带建设:临湖地带是水库保护的关键地带,可分河口、湖岸和临湖岸坡(湖泊周边第一分水岭以内坡地)三类地区,河口和湖岸湿地是维持河湖水质净化功能的重要生态系统,临湖岸坡多分布有独流入库的沟壑,因输移距离短,这一区域的污染物入库比例高,属于流域面源污染的敏感性地区.退耕还林还草与湖滨生态隔离带建设的目的是减少湖滨地带的面源污染,提升湖滨地区对氮、磷的拦截和净化能力.2007年天目湖退耕还林还草工程正式落实,水库设计水位线(沙河水库23 m、大溪水库14 m)外延300 m范围农田还林还草,改为种植生态防护林.据初步估算,退耕还林后每年可减少250 t尿素、250 t复合肥以及22 t农药的使用,减少了农业面源污染,提升湖滨带对氮、磷的拦截作用,改善了临湖地区的景观和旅游价值.此外,退耕还林期间,还取缔了周边的畜禽养殖场.退耕后在适宜的地带恢复湿地,如中田河河口湿地建设、平桥河河口湿地公园已经建成,主要库湾和大溪水库南岸入库河口的湿地建设项目也已列入规划,目前基本形成由河口和湖滨湿地组成的生态隔离带,在磷拦截与氮降解方面发挥着重要作用.

用,是近年来库体泥沙减少、水体透明度增加以及磷浓度下降的主要贡献者. 目前为进一步恢复库区库周生态,已将临湖岸坡的退茶还林列入未来实施的重要生态建设工程.

4) 河道生态改造与河流漫滩湿地恢复:主要通过工程改造,扩大河流水面,形成浅滩湿地,提高河道对污染物的自然拦截和净化能力. 天目湖包括2个水库:沙河水库有3条主要的入湖河道,分别为中田河、平桥河和下宋河;大溪水库上游为洙漕河. 中田河已经实施了滚水坝建设工程抬高水位30~40 cm,导致水面展宽,河流湿地发育,成为天目湖流域河流净化功能最强的河道,源头氮污染物经过中田河到达河口减少70%以上,中田河全流域氮污染经过河流输送和河口湿地降解34.7%;总磷的拦截作用更加明显,源头磷污染经过河流与河口湿地拦截掉90%以上,中田河全流域磷污染经过河流与河口湿地拦截量达到84.31%^[21]. 平桥河上游建有石坝水库,一年中除了暴雨期间和石坝水库放水期间,下游河道流量较小,因此中游已不具备改造恢复河流湿地的条件;2009年2月,在下游建立2座滚水坝,有助于恢复下游河流湿地并和河口连片,同时在平桥河支流杨村河实施河流湿地恢复工程.

5) 茶果园氮、磷流失的小流域整治措施:茶园是丘陵山区坡地的主要开发类型,具有很好的经济效益,同时也是单位面积氮、磷排放量最多的用地类型,茶园氮流失是耕地的2倍,茶园替代林地导致总氮和总磷排放量分别增加8.8倍和7.6倍^[21]. 对茶园种植区进行小流域整治,对流域面源氮、磷削减具有重要的意义. 根据坡面径流实验的研究结果,茶园氮流失以壤中流为主,磷流失以坡面地表径流为主,因此通过传统的针对地表径流的水土流失综合整治并不能有效地控制氮污染,这也是近年来天目湖氮污染持续增高的原因. 依据茶园氮、磷流失的途径,针对茶园氮、磷污染的小流域整治主要包括3个方面:第一是避免在产流量较高的坡地部位进行开发,以减少磷流失,如坡脚和坡地沟壑源头;第二是坡脚建设生态隔离带. 如果土壤透水性能好,还可以挖沟增加碳源,促进坡脚生态隔离带的反硝化作用;坡长较大的坡地还需要在坡顶保留水源涵养区,避免坡顶产流较多增加坡面冲刷;第三是依据小流域建立塘坝拦截茶园径流,通过塘坝的反硝化作用去除氮污染.

3.3.3 流域综合管理进展 流域综合管理是以流域整体为管理单元,在利益相关方参与下,应用行政、经济和制度等手段,对流域内资源开发与环境保护进行全面协调,促进可持续发展^[30]. 流域综合管理是开展流域和库体水环境治理的政策保障,是解决水环境问题的根本方式. 天目湖流域综合管理主要通过成立水源保护的协调机构和制定全流域的水源地生态与环境保护规划、建立协调土地开发与生态保护的制度3个方面来推进.

1) 成立天目湖水源地保护管理机构:管理机构是水库及流域管理与治理政策的制定者和执行者,在水库和流域中发挥着非常重要的作用. 早在2004年,为强化水库和流域、资源开发与保护的一体化管理,溧阳市将天目湖镇、平桥镇与天目湖旅游度假区合并,促进了资源整合和环境保护. 2006年,溧阳市政府成立了由主要领导负责,分管领导和相关镇、市有关部门主要负责人参加的天目湖水源地生态环境保护工作领导小组,设立水源地保护办公室,办公室由天目湖旅游度假区管委会、市环保局、水利局、农林局、旅游局、卫生局等部门分管领导、业务科室负责人组成. 同时,市环保局还在天目湖旅游度假区设立天目湖旅游度假区环保分局,提升了天目湖水源地保护管理的协调能力. 目前天目湖水源地生态环境保护办公室具有流域内开发建设项目、农业项目的审批权,可执行一票否决制,具有水源地保护规划的组织制定和实施权,同时设立每年1000万元以上的天目湖水源地生态环境保护专项基金,这些管理职能保障了天目湖水源地保护工作的持续推进,保障了污水处理厂建设、污水收集管网铺设、退渔还湖、退耕还林、湿地建设等各项政策的全面实施.

2) 制定天目湖流域生态与环境保护规划:该规划以饮用水水质安全为主线,以水库及其流域整体为对象,依据不同时期的水质保护目标,采用治本与治标相结合的手段,因地制宜实施工程整治,强化和落实空间管制,引导天目湖地区的保护与开发,实现水质安全目标下流域发展与保护的高效和协调. 该规划系统分析了天目湖水源地土地利用过程及水环境变化的关系,明确了入库污染的主要来源、分布,揭示出天目湖水质的主要问题和原因;提出不同时期水污染综合控制与流域生态保护的措施,明确了分区管制的思路和方案,制定了天目湖水源地管理办法. 该规划于2012年底报批通过,推动天目湖由湖内治理为主转向全流域治理,由专项治理为主转向综合治理和管理,促进了天目湖水源地管理由传统水污染控制向水质目标管理的思路转变.

3) 划定生态保护红线,明确土地开发的限制:天目湖在大力发展旅游和特色农业的过程中,如何处理好土地开发与生态保护的关系对供水安全非常重要. 然而,因生态保护的约束不明确,导致近年土地非生态流

转比例大,如:流域茶果园、建筑用地、农田等用地已经达到 36.6%^[18],超过国外丘陵地区 30% 的开发警戒线;流域内林地扣除经济林覆盖度已经下降到 40%。作为水源地,生态失衡的问题非常突出。在开发过程中建设用地和茶园的空间布局无序问题也非常突出,水库周边成为茶果园开发最集中的区域。为了解决开发空间布局无序和生态失衡的问题,2012 年出台的规划从保护水质目标出发,依据环境容量和生态功能,以评价生态约束和开发适应性为基础,将上游水源涵养区和水库周边具有重要生态功能的地带划分为禁止开发的红线区,其它区域划分为限制开发区和保护性开发区,明确可以开发的方式、规模和限制,作为天目湖地区日常管理的规范和依据。并据此进行环湖退茶,布局生态恢复工程,确定是否批准建设和开发农业项目,避免了以往地方在发展经济过程中,经常先通过鼓励政策把企业请进来,出现污染之后再花高价补偿送出去的低效管理行为,引导天目湖地区向生态经济的方向发展。

4 天目湖水环境保护成效与经验总结

为评价天目湖水环境治理的成效,2006—2012 年以来对天目湖流域沙河水库 8~10 个监测点进行了长期的逐月监测。比较结果显示,2006—2012 年,浮游植物生物量呈现快速下降的趋势,年平均值由 25.225 mg/L 下降到 9.885 mg/L,目前已经低于 2001 年的 15.364 mg/L;透明度 2008—2012 年逐年升高,年均透明度由 91 cm 增加到 120 cm;总磷浓度自 2006—2010 年出现下降趋势,近两年的浓度已经低于 2001 年,基本趋于稳定,但总体仍为Ⅲ类水平;总氮浓度一直到 2010 年仍呈上升趋势,近两年开始下降,但总体属于Ⅳ类水平^[23]。由此可见,经过 2006 年以来库区内源控制、渔业调控、流域污染削减、河流与湖泊湿地建设、强化流域综合管理等措施,天目湖水环境得到大幅度改善,治理成效非常明显,藻类大量增殖的问题基本得到控制。但考虑到氮、磷浓度仍然较高,尤其是氮以溶解态为主,削减难度大,藻类增殖的隐患仍然存在,因此需要继续加强水环境保护。

天目湖的水环境保护经历了从末端到顶端的过程:当水质出现快速恶化的时候,首先考虑的是库体治理措施,如旅游污染控制、渔业调控、底泥疏浚等;然而通过对治理效果的评价及水质状况的监测发现,仅仅依靠库体治理措施效果有限,库体的问题根源在流域,进而开展大量的流域保护措施,如污染企业的整治、河道缓冲带构建、茶园等农业污染治理等;但是在流域污染治理的推进过程中,发现协调各部门利益、有效实施治理工程必须有制度保障,制定流域生态 and 环境保护规划、划定保护红线是推进环境保护措施、保障水环境治理成果的根本。这样一个末端到顶端的实践道路尽管最终达到了效果,是流域开发与水质保护不断博弈的过程,但是如果能从一开始走顶端到末端的路线,效果可能会更好。

东南丘陵山区在流域资源开发利用、水环境问题和治理对策方面均有一些共同特征。纵观近 10 年来天目湖水库水质变化和水环境保护实践,天目湖经历了先污染后治理、边污染边治理,正转向水环境与经济协调发展的实践探索阶段,同期水库治理经历单一污染控制措施向综合治理和管理的转变,有许多经验可供东南丘陵山区水库水质保护提供参考,并为中国目前正在实施的良好湖泊保护战略提供借鉴,具体总结以下几个方面:(1) 丘陵山区湖库应实行基于湖库水生态目标的水质目标管理,依据湖库水生态目标确定水质管理指标和环境容量,依据环境容量确定流域污染限排量,科学解析各类污染物来源和分布,全面削减流域污染,利用各项措施控制湖库富营养化灾害,由减排目标考核转变为水质改善目标考核。(2) 通过水源涵养区保护、河流系统生态改造、河口与湖滨湿地建设和湖库周边岸坡林草恢复,可以提升流域对氮、磷的自然拦截能力,对湖库富营养化控制具有重要的作用。(3) 划定生态保护红线,依据湖库水环境容量和生态保护重要性在不同分区实行差别化管理,设定不同的开发限制,有助于协调流域资源开发与环境保护的关系,引导区域经济与环境协调发展。(4) 丘陵山区茶园开发是重要的氮、磷污染源,且氮污染以溶解态为主,迁移方式主要通过壤中流,传统的以地表径流削减为主的水土保持措施难以奏效,需要采用坡脚生态隔离带建设、塘坝拦截等促进反硝化的综合措施来实施污染削减。(5) 建立包括利益相关方在内的、具有部门协调能力的湖库管理机构有利于湖库综合管理,该机构需要对湖库水质和供水安全承担责任,对危害水质安全的土地实施变更,对企业建设或其它类似行为具有审批和否决权。此外,应该将湖库水质安全列入当地政府主管领导的考核目标。(6) 制定湖库管理条例,并定期依据环境条件变化进行更新,实现湖库管理制度化。湖库管理条例要具体化,贯彻“一湖一策”的管理办法,明确湖库的保护目标和减排目标,依据减排目标明确

生态保护红线,明确不同分区准入企业类别、土地开发限制,编制管理条例要通过地方人民代表大会审议,并成为管理部门项目审批的依据。(7) 建立完整的流域水环境监测与预警体系,实时了解水质动态,及时诊断水质问题和安全隐患,预防水污染事件发生,是湖库进行科学治理和管理的有效保证。需要利用先进的手段开展流域、湖库的水文、水质定期监测,通过遥感进行流域土地利用和生态系统的监测,建立流域信息平台 and 模型系统,并通过预警系统与管理系统的开发,提升流域水环境管理的能力。

5 参考文献

- [1] 吕忠梅,熊晓青. 环境法视野下的“良好湖泊优先保护”. 环境保护,2012,14:16-20.
- [2] 赵华林. 以生态文明建设理论指导深入推进湖泊环境保护工作. 环境保护,2013,(2):8-12.
- [3] 《中国自然地理图集》编委会. 中国自然地理图集. 北京:科学出版社,1998.
- [4] 阮伏水,蔡志发,王维明等. 闽东南丘陵区水土保持生态景观模式的构建与实践——以霞美示范区为例. 亚热带水土保持,2005,17(4):9-13.
- [5] 孙波,张桃林,赵其国. 我国东南丘陵山区土壤肥力的综合评价. 土壤学报,1995,32(4):362-369.
- [6] 中华人民共和国水利部. 中华人民共和国水利部公报 2009. <http://www.mwr.gov.cn/zwzc/hygh/2009,3:18-35>.
- [7] 中国水库名称代码. SL259—2000.
- [8] 刘其根,查玉婷,陈立侨等. 浙江分水江水库大型底栖动物群落结构及水质评价. 应用生态学报,2012,23(5):1377-1384.
- [9] 周立峰. 大气气沉降对白溪水库饮用水源水质影响研究[学位论文]. 宁波:宁波大学,2012.
- [10] 谢福林,于涛. 横山水库水源地水质现状及保护对策. 水生态学杂志,2009,2(5):136-139.
- [11] 韩照祥,李璋韬,胡小明. 石梁河水库水质评价与变化趋势及防治对策. 江苏农业科学,2012,40(12):348-350.
- [12] 徐春峰. 宁波市皎口一周公宅水库流域水质模拟与水环境管理研究[学位论文]. 宁波:宁波大学,2012.
- [13] 周志明,朱俊杰,顾志敏等. 四明湖水库浮游生物现状调查及评价. 水生态学杂志,2011,32(3):104-107.
- [14] 周芬,马海波,姜伟. 陈蔡水库水源保护与防治对策研究. 浙江水利水电专科学校学报,2009,21(2):55-60.
- [15] 周晓燕,沈雁,蔡海江等. 绍兴市饮用水源汤浦水库水质特征研究. 给水排水,2008,(1):38-42.
- [16] 刘金殿,顾志敏,杨元杰等. 长诏水库浮游植物群落结构及水质评价. 生态学杂志,2012,31(11):2865-2871.
- [17] 王俊,姜翠玲,孙佳佳等. 长潭水库底泥氮磷释放对水质的影响研究. 见:中国科学技术协会,江苏省科学技术协会编. 首届中国湖泊论坛论文集. 南京:东南大学出版社,2011:5.
- [18] 刁亚芹,韩莹,李兆富. 2000年以来天目湖流域茶园分布变化及趋势预测. 湖泊科学,2013,25(6):799-808.
- [19] 韩莹,李恒鹏,聂小飞等. 太湖上游低山丘陵地区不同用地类型氮、磷收支平衡特征. 湖泊科学,2012,24(6):829-837.
- [20] 聂小飞,李恒鹏,黄群彬等. 天目湖流域丘陵山区典型土地利用类型氮流失特征. 湖泊科学,2013,25(6):827-835.
- [21] 李恒鹏,陈伟民,杨桂山等. 基于湖库水质目标的流域氮、磷减排与分区管理——以天目湖沙河水库为例. 湖泊科学,2013,25(6):785-798.
- [22] 张利民,王水,韩敏. 太湖流域望虞河西岸地区氮磷污染来源解析及控制对策. 湖泊科学,2010,22(3):315-320.
- [23] 杨桂山,于秀波,李恒鹏等. 流域综合管理导论. 北京:科学出版社,2006.
- [24] 朱广伟,陈伟民,李恒鹏等. 天目湖沙河水库水质对流域开发与保护的响应. 湖泊科学,2013,25(6):809-817.
- [25] 张运林,陈伟民,杨顶田等. 天目湖水环境现状及生态旅游可持续发展对策. 生态环境,2003,12(4):405-408.
- [26] 唐汇娟,谢平,刘丽等. 武汉东湖浮游植物群落结构的时空变化与环境因子的关系. 中山大学学报:自然科学版,2008,(3):100-104.
- [27] 贺冉冉,罗激葱,朱广伟等. 天目湖溶解氧变化特征及对内源氮释放的影响. 生态与农村环境学报,2010,30(4):344-349.
- [28] 成晓奕,李慧赞,朱广伟等. 天目湖沙河水库溶解氧分层的季节变化及其对水环境影响的模拟. 湖泊科学,2013,25(6):818-826.
- [29] 贺冉冉,高水霞,王芳等. 天目湖水体与沉积物中营养盐时空分布及成因. 农业环境科学学报,2009,29(2):353-360.
- [30] 许朋柱,秦伯强,Horst Behrendt等. 太湖西南部河流流域的营养盐排放. 湖泊科学,2007,19(5):544-551.