

### 水环境规划案例 3: 四川邛海流域环境规划实例

邛海是四川省内最大的天然湖泊,是流域内的重要水源。同时,邛海—庐山景区也是国家级风景名胜区,对当地的社会和经济发展提供了重要支撑。但随着流域内开发强度的增大,使得入湖污染物总量激增,水质出现一定程度上的恶化和富营养化趋势。为恢复邛海水质,迫切需要从流域整体入手制定规划并实施水污染综合防治。在征询地方专家和相关部门意见的基础上,将规划的基准年设为 2004 年,污染控制的时段设定为 2005 年~2015 年。下面以邛海流域环境规划研究为例,来说明流域环境规划的编制过程。

#### 一、规划区域概况

##### (一) 研究范围

邛海流域地处中国西南亚热带高原山区、四川省凉山州境内,属长江流域雅砻江水系。流域位于  $27^{\circ}47' \sim 28^{\circ}01'N$ 、 $102^{\circ}07' \sim 102^{\circ}23'E$  之间,总面积为  $307.67\text{km}^2$ (含水域面积),辖西昌市的 5 乡 1 镇以及昭觉县和喜德县的部分地区。邛海湖泊周长 37.2km,南北长 10.3km,东西宽 5.6km,最大水深 18.32m,平均水深 10.95m。在正常蓄水位海拔 1510.30m 下,水量为  $2.891 \times 10^8\text{m}^3$ ,湖面面积为  $27.877\text{km}^2$ 。湖泊补给系数 9.97,湖水滞留时间约 834d,如受到污染极难被恢复。

邛海流域具有中亚热带高原山地气候的特点,流域的气候和地形、地质特征共同影响了水系的分布,使得溪沟密布、河沟比降大。流域的多年平均年径流深为 478.8mm,多年平均年径流量为 1.473 亿  $\text{m}^3$ 。年径流量集中于 6~10 月的洪水期,暴雨形成洪峰较快,洪水持续过程多在 6~12 小时内,洪水含沙量高。邛海汇水河流北有高沧河,东有官坝河,南有鹤掌河,次一级的河流有青河、干沟河、踏沟河、龙沟河等。以上河流汇入邛海后,由海河排泄入安宁河。流域内支沟、冲沟密布,长度大于 1km 的支沟众多,水系密度达  $0.68$  条/ $\text{km}^2$ (图 10-4)。

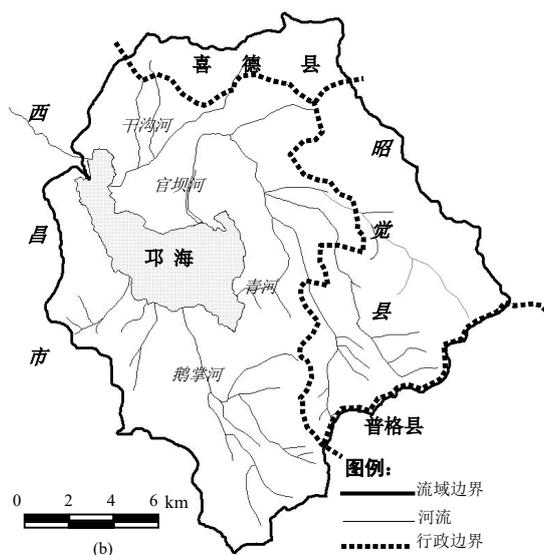


图 10-4 邛海流域及其水系构成

## (二) 流域陆地生态系统特征

邛海流域的陆地生态系统主要分为以自然植被为主形成的森林生态系统和以农田植被为主的农田生态系统，其中林业用地面积为 15582.6hm<sup>2</sup>，占流域总面积的 50.65%；森林覆盖率为 37.8%。湖盆区以农田生态系统为主要类型，集中分布以水田、旱地为主的农田植被，各类自然生态系统在湖滨区的景观结构中以嵌块体形式存在。

## (三) 流域社会经济系统特征

邛海流域辖西昌市西郊乡、大箐乡、海南乡、大兴乡、川兴镇、高视乡及昭觉县的普诗乡和玛增依乌乡、喜德县的东河乡。根据 2004 年的统计，流域总人口为 84153 人，其中农业人口占 80.5%；西昌市辖区内 68331 人，占流域总人口的 92.9%。流域人口分布的特点为农业人口所占比例大，其中：海南、大箐、大兴、川兴 4 乡镇农业人口比例达到 90%以上，高视乡、东河乡及昭觉县 2 乡镇则为 100%农业人口。

与农业人口比例高的特点相一致，邛海流域亦以农业经济为主。尽管工业占了总产值的 47%，但主要分布在西郊，其余乡镇工业基础和发展速度均很薄弱。在农业经济中，农牧比例大，渔业也占一定比例，林业所占比例较小。邛海湖盆

区 2004 年的农林牧渔业总产值为 13027 万元，其中，农业占 56.64%，畜牧业 32.45%，渔业 9.82%，林业 1.1%。邛海流域拥有邛海-庐山风景区以及螺髻山风景区，加之特殊的气候和民族特征，旅游资源丰富。旅游业也是邛海流域的重要经济来源，2004 年旅游收入 44130 万元，比 2003 年增长 13.5%。

## 二、流域水环境问题诊断与规划目标确定

环境问题的诊断是分析和判断流域环境系统现状和发展趋势的重要工具。在此基础上，根据与地方管理部门、公众、专家和利益相关者等的咨询商讨，并遵循国家和地方的相关法规要求，确定邛海流域环境规划目标。

### （一）流域环境问题诊断

#### 1. 湖体水质和富营养化评价

根据 GB3838-2002 推荐的单因子评价法，邛海枯水期和丰水期的水质为 III 类；平水期为 IV。且水质恶化的趋势明显，水质已经从 1990 年代的 II 类下降到目前的 III~IV 类，并且出现了水葫芦大面积爆发的现象。

富营养化评价是湖泊水质评价的重要内容，根据国内推荐的湖泊富营养化评价标准，邛海目前大体上为中营养状态，但已呈现中-富营养的趋势。在富营养化指数中，TP 和透明度指数较高。按现有趋势发展，邛海富营养化的程度将加剧，演变为中-富状态或富营养状态，且 P 是邛海富营养化的限制性因子。

此外，邛海的水生维管束植物已严重退化，目前的分布仅占全湖面积的 1/10 左右。尤其是邛海河口水域的数千亩水生高等植物正逐步退化，使得湖体的生物多样性丧失加剧、冬候鸟生活的栖息环境受到破坏。在湖滨带，除局部湖湾保留挺水植物外，其余地方多被人为占用。邛海湖滨带的乔木生态系统已被完全破坏，挺水植物群落大面积消亡，目前残留的仅有星散的乔木和少量挺水植物，湖滨带的生态功能丧失。根据 2003 年~2004 年的监测，在邛海的浮游植物中，铜绿微囊藻、水华微囊藻和色球藻的存在数量很多，是浮游植物的优势种，也表明邛海已进入富营养化的初级阶段。此外，由于近年来不当的外来鱼类引入，使得邛海的特有鱼种和土著鱼种锐减。

#### 2. 陆地生态系统现状评价

根据综合评价可知，邛海流域的陆地生态系统主要存在 3 方面的问题：①森林资源保护与开发矛盾突出，森林覆盖率低；②树种构成单一，年龄和高矮比较接近，林下缺乏中间的灌木层和地表植被，使得地表植被覆盖差、水土保持能力弱、生物多样性水平极低；③外来物种威胁生态安全，紫茎泽兰（*Crofton weed, Eupatorium adenophorum*）蔓延，所到之处寸草不生。物种多样性的减少使得邛海流域的生态平衡遭到破坏，生态脆弱度增加。

### 3. 水土流失和泥石流评价

#### (1) 水土流失分析

水土流失是邛海流域重要的入湖污染源。邛海流域内水土流失以水力侵蚀为主，流失的地类主要是坡耕地，分布在流域内的山坡上和河流两岸。由于地形地质等自然条件和人为活动的影响，流域尤其是外围山岭区水土流失严重，流域水土流失面积达 128.75km<sup>2</sup>，占流域面积的 45.51%，流域平均土壤侵蚀模数 2750.34t·km<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>，整体为中度侵蚀，土壤侵蚀量 77.81 万 t·a<sup>-1</sup>，并有如下特点：①水土流失区主要分布于各河流两岸岸坡、村寨及农业生产用地；②坡耕地水土流失现象严重；③流域上游山区植被破坏严重，局部水土流失尤为剧烈。

#### (2) 泥石流危险度评价

由于邛海流域特殊的气候和地质特征，是潜在的泥石流爆发区，加之人为活动的影响，使得泥石流成为邛海流域生态系统的重要胁迫因子。对泥石流的危险度评价是制定泥石流防治对策的基本前提。根据评价结果，邛海流域的泥石流危险等级很高，为减轻对流域生态系统以及社会经济系统的胁迫，需要对泥石流进行治理，并且在不同的子区根据危险程度的差异采用不同的开发模式。

#### (3) 水资源及生态需水量分析

水资源是邛海流域社会经济发展的物质基础，水资源的充裕或短缺不仅直接影响到邛海的水量、水质与水生态系统，而且关系到整个流域社会经济能否健康、持续的发展。根据湖泊水量平衡原理，湖泊水量（V）的变化处于动态平衡之中，其计算公式为：

$$dV/dt = (R + P + G_i) - (D + E + G_o) \quad (10-2)$$

其中：P 为降水量；R 为地表径流的入湖水量； $G_i$  为地下径流的入湖水量；D 为地表径流的出湖水量；E 为湖泊水面的蒸发量； $G_o$  为地下径流的出湖水量。

将邛海降水量、蒸发量、地表径流出湖及入湖数据代入公式 (10-2)，计算得到邛海水量平衡计算结果 (表 10-1)。由表 10-1 可知，水量平衡结果  $\Delta V$  为负值，说明邛海湖底存在地下水补给，水量为  $0.0726 \times 10^8 \text{m}^3$ 。随着社会经济的发展和人口的增加，邛海流域的水量需求将持续上升，而近年来邛海湖容、水位均已有缩小趋势，水体污染也在加重，水资源需求平衡形势严峻。

表 10-1 邛海水量平衡

V <sub>入湖</sub> 入湖量 (10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )				V <sub>出湖</sub> 出湖量 (10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )			水量平衡
V <sub>X</sub>	V <sub>B</sub>	V <sub>S</sub>	V <sub>E</sub>	V <sub>Z</sub>	V <sub>B'</sub>	V <sub>q</sub>	$\Delta V$ (10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )
0.293	1.1726	0.1954	0.105	0.2154	1.3478	0.2754	-0.0726

注：V<sub>X</sub> 为计算时段内的湖面降水量；V<sub>B</sub> 为计算时段内入湖地表径流量；V<sub>S</sub> 为计算时段内入湖地下径流量；V<sub>E</sub> 为计算时段内域外来水量及其它；V<sub>Z</sub> 为计算时段内的湖面蒸发量；V<sub>B'</sub> 为计算时段内出湖地表径流量；V<sub>q</sub> 为计算时段内工、农业及生活用水量。

## (二) 规划目标确定

### 1. 近中期目标 (2005-2010 年)

全面启动邛海流域综合治理工程，控制邛海周边第三产业的发展，完成北岸和南岸湖滨生态恢复的主体工程和“三退三还”措施，启动西岸、东岸的湖滨生态恢复工程，邛海主要污染区域的生态屏障基本建立，湖周村镇居民旅游生活污水的污染得到控制，农业结构和产业结构得到调整，实施农业生态建设和周山退耕还林，控制流域重点水土流失区，邛海水质达到国家地表水水环境质量 II 类标准，流域生态环境的建设和保护得到加强 (表 10-2)。

### 2. 远期目标 (2011-2015 年)

邛海水质保持国家地面水环境质量 II 类标准，流域内农业生态系统和森林生态系统得到基本完善，沿岸建设成集生态需求、景观需求、污染控制需求为一体的邛海湖滨生态保护区。基本治理好中度以上面蚀水土流失，基本控制住泥石流

和河岸崩塌侵蚀在较大范围内发生，使流域平均土壤侵蚀模数在轻度以下，减少泥沙入湖量；增加植被面积，改善林草面积分布格局，优化林草结构，改善生态环境，涵养水源。基本形成人与自然和谐相处的、以保护邳海水质及生态平衡为核心的生态功能保护区。流域内经济发展与环境保护相协调，基本步入可持续发展的正常轨道（表 10-2）。

表 10-2 邳海流域环境规划目标

指标类型	指标描述	基准年	近中期 2005-2010 年	远期 2010-2015 年
湖泊水环境	水质类别	III-IV 类	II 类	I-II 类
陆地生态 环境	森林覆盖率（含灌木林）（%）	37.8	45.0	52.0
	造林面积（hm <sup>2</sup> ）	-	1420	2187.7
	治理水土流失面积（hm <sup>2</sup> ）	-	48.01	12.08
	平均土壤侵蚀模数（t/km <sup>2</sup> .a）	2781.01	1502.91	1292.4
	水土流失治理率（以 2004 年为基准）（%）	-	45.9	53.5
	城镇污水处理率（%）	40	50	70
	农村生活污水处置利用率（%）	10	30	60
	农村化肥、农药污染削减率（以 2004 年为基准）（%）	-	30	50
	生活垃圾清运率（%）	50	80	95
	农村固废处置利用率（%）	10	50	80
	生态农业推广覆盖率（%）	-	50	70
	蔬菜作物的 N、P 化肥施用量削减率（以 2004 年为基准）（%）	-	50	65
水资源	水资源开发上限（万 m <sup>3</sup> ）	6596	7038	7446

### 三、流域社会经济发展战略分析

#### （一）流域发展战略

邳海流域的社会经济发展战略指导思想为：社会—经济—生态环境系统可持续发展；抓住西部开发的契机，依托资源，促进流域社会经济发展；依靠现代科学技术，统一规划，强化污染源管理。

#### （二）社会经济系统动态仿真模型

邳海流域社会经济系统是一个以人为中心,涉及社会、经济、环境和资源等多种因素的复杂系统。要实现该系统社会经济的可持续发展,就必须研究社会、经济、资源和环境子系统间的相互作用和影响,以协调经济发展与环境的关系。在邳海流域环境规划中,引入系统动力学模型(SD),综合分析流域的自然资源,经济区位及生态环境等状况,建立符合实际情况的动态模型,进行仿真运行,逐时逐段地展现出系统内部多变量之间相互作用、相互影响的动态行为,提出适合流域社会经济发展的规划方案,为规划方案的制定提供科学依据。

根据邳海地域特征和数据资料,将该流域作为研究系统的边界。利用1988年~2003年统计资料和相关研究报告,对流域进行社会经济系统分析和建模。根据SD模型设计的需要,将流域社会经济系统划分为人口、农业、工业及旅游服务业、水资源、环境保护6个子系统。这6个子系统的相互作用构成了邳海流域社会经济的主要行为,可反映整个系统的动态变化趋势,并根据流域实际对子系统做进一步划分。其中,粮食、经济作物、林业、畜牧业和渔业子模块构成农业子系统;工业及服务业子系统由一般工业、建筑业、交通运输业、服务及相关行业子模块组成;水资源子系统考虑了生活和生产对水资源的需求以及污染与破坏,由水资源和污水排放两个子模块组成;环境保护子系统包括由生活污水、工业废水、生活垃圾和固体废物等。

在系统分析的基础上,确定各子系统的变量,建立系统流程图,并利用VENSIM软件来完成动态仿真。邳海SD模型共有201个变量和方程,其中包括77个常量,14个状态变量,19个速率变量和91个辅助变量。模型建立之后,基于实地调查数据和统计资料,对模型的有效性进行检验。经检验,所建立的模型可有效反映邳海流域的系统发展,因此可作为预测工具用于规划方案的制定。

### (三) 流域社会经济发展预测与分析

利用邳海流域社会经济SD模型,根据情景的设计方法,筛选主要驱动因子。综合分析得到邳海流域的4种发展情景并加以模拟:①情景I,模型依照原始参数惯性运行发展,揭示在政策不发生重大变化前提下,系统的发展趋势和发展状态;②情景II,充分考虑决策者和专家的发展经济的倾向,将对高速发展经济的倾向性加入到模型当中;③情景III,强调邳海生态保护、控制工业发展速度,

促进旅游服务业发展；④情景 IV，在生态保护的基础上，全面促进工农业和旅游服务业发展。根据与地方专家、公众和决策者的访谈和评价，选定情景 III 为理想情景，并对其做详细分析。

### 1. 社会经济发展分析

大力发展旅游服务业能够充分利用邛海流域的旅游资源，保护生态环境。以旅游业带动商贸、交通、餐饮以及通讯等其它第三产业的发展，同时积极调整产业结构，大力、适量发展畜牧业，培育技术含量高、污染小的工业企业，使经济稳步增长。考虑资源与环境的约束，应将经济发展速度控制在一定水平。表 10-3 列出了情景 III 中邛海流域在不同发展阶段的社会总产值和各产业在社会总产值中所占的比例。

表 10-3 情景 III 下主要经济发展指标

年份	社会总产值 (万元)	农业产值的比例	工业总产值的比例	人均社会总产值 (万元/人)
2005	72,149	0.417	0.421	0.793
2010	120,978	0.308	0.344	1.19
2015	202,535	0.241	0.264	1.87

城市化发展所引发的人口变动是邛海流域社会经济发展的另一个重要特点 (表 10-4)。随着城镇化的发展，大量人口从土地中解放出来，加入服务业劳动力队伍，农村劳动力富余情况好转，但社会总体就业率仍不高。

表 10-4 情景 III 下主要经济发展指标

年份	总人口 (人)	城镇人口 (人)	农村人口 (人)	城市化水平
2005	91,040	43,288	47,752	0.4754
2010	101,442	66,933	34,509	0.6598
2015	108,536	80,734	27,802	0.7438

### 2. 农业发展分析

农业是流域经济的重要产业，并积极引导向生态农业方向发展。通过建立林果业生产基地和畜牧业生产基地，并使政策向畜牧业倾斜，形成“畜牧业、种植

业、饲料工业、养殖业、畜产品加工业和服务业”的生产链，提高牲畜出栏率和商品率，增加农民收入（图 10-5）。

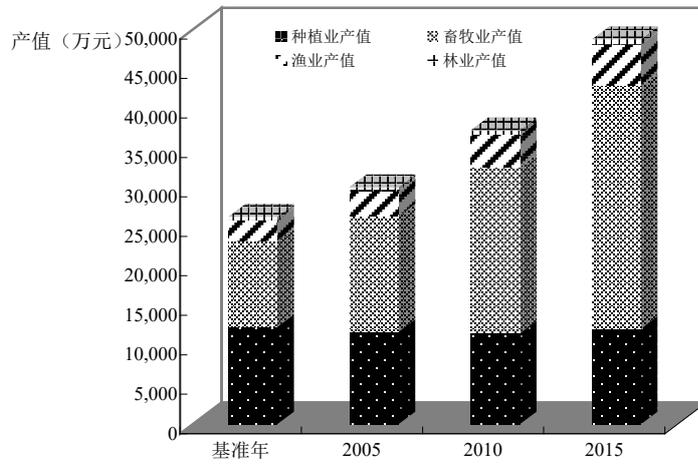


图 10-5 情景 III 下农业总产值的构成

### 3. 工业及服务业发展趋势分析

流域以良好的区位条件和优美的环境优势，利用邛海—庐山风景区以及相邻的螺髻山、西昌航天城的旅游资源和市场基础，优先发展旅游业，以促进第三产业尤其是房地产业和旅游业的发展，并带动服务业的整体发展。根据预测，服务业总产值的年增长速度可达 23.3%。

### 4. 资源开发利用分析

为保护邛海水资源，必须合理配置水资源，发展低耗水、轻污染的产业形式。因此，情景 III 选择偏向服务业的发展、严格控制工农业污染源，充分利用邛海周边的旅游资源，发展污染小、效益高的服务业。根据预测，农业用水仍是主要部分，工业用水增长了 60.4%，服务业用水增加了 8 倍，但总量不高，仅占非农业用水的 16.1%（表 10-5）。

表 10-5 情景三下水资源配置情况 (万 m<sup>3</sup>)

年份	每年水资源需求量	农业用水量	工业需水量	服务业用水量	生活用水量
2005	5,224	4,410	243.06	46.76	523.53
2010	5,147	4,044	312.07	126.22	664.19

2015	5,349	4,003	379.14	217.11	749.06
------	-------	-------	--------	--------	--------

## 5. 生态建设和污染治理分析

情景 III 在追求经济快速发展的同时，重视对生态环境建设的投入，控制污染、退耕还林还草，人工草场面积和绿化面积增加。同时，加强植树造林，防止草场退化和水土流失，使生态环境得到保护。随着经济的发展，情景 III 中工业废水和工业固体废物增多。到 2015 年，工业废水排放量达到 303 万 t，固体废物达到 26.8 万 t。城镇生活污水和垃圾也随人口的增加而增长，到 2015 年产生量分别达到 526 万 t 和 3.96 万 t。由于重视环境保护，需要相应地增加污染治理的投入。

## 四、流域环境规划基础研究

### (一) 子流域划分与污染负荷分析

鹤掌河和官坝河是邛海流域内的主要入湖河流，其所属的子流域是入湖污染物的主要产出源，且上游主要为山地。为全面反映邛海流域的污染特征，根据流域内的水系分布和景观格局分析，以流域的景观斑块类型和入湖河道的自然水文特征为基础确定子流域边界，共分为 6 个子区（图 10-6）：干沟河子流域（I）、官坝河子流域（II）、青龙寺区（III）、鹤掌河子流域（IV）、西南汇流区（V）和庐山坡面漫流区（VI）。子流域边界以等高线图确定，以保证其在水文单元上的完整性和独立性。其中，子流域 I~V 为主要的河流汇入区，VI 区则无明显的河道，地表径流多以漫流形式入湖。城镇人口多集中在 VI 区，而农村人口和农业活动主要分布在 I、II 区，山地和林地则主要位于 II 区和 IV 区的上游，流域内基本无工业。

流域的水污染防治需从物理、化学、生物等多种污染风险上进行综合考虑，并从中筛选出优先控制污染物，从而进行综合控制。P 是邛海富营养化的限制性元素，本节的污染负荷以 TP 为分析对象，其他的污染物也可同样分析。TP 的主要污染源有城镇生活和工业点源、农业和农村面源、水土流失以及湖面的大气降尘和降水。污染源现状调查采用统计和实测校正的方法。对不同来源的污染物的输移过程进行分析，以此建立污染负荷计算的公式，加总得到基准年总的污染负

荷；然后建立系统动力学（SD）模型模拟流域 2015 年的变化情况，并将影响污染负荷的数值，如：2015 年的城镇人口、化肥使用量等，输入污染负荷的计算公式中，从而得到 2015 年的 P 污染负荷（图 10-7）。根据实测，邛海在基准年的湖面沉降所带来的 P 污染负荷为 0.65t/a，2005~2015 年假定该值不变。

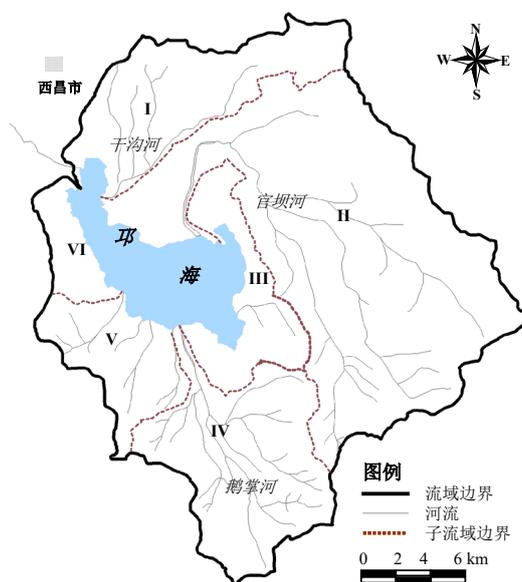


图 10-6 邛海流域及其 6 个子流域划分

为分析所设计的方案对污染负荷的削减效果，需首先对邛海的 TP 环境容量进行计算，在此选用完全均匀混合的箱体模型，在不考虑外源和漏以及 TP 仅发生衰减反应并且符合一级反应动力学的情况下，得到 TP 的环境容量 ( $W$ ) 为：

$$W=C_s(Q_{out}+kV) \quad (10-3)$$

其中： $C_s$  为 TP 的目标浓度，根据邛海的地表水功能区划和《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)，取值  $0.025\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ； $Q_{out}$  表示出湖水量，为  $2.325\times 10^8\text{m}^3$  (P=50%)； $k$  为降解系数，根据邛海的水质模拟和验证，取值  $0.023\text{d}^{-1}$ ； $V$  取  $2.93\times 10^8\text{m}^3$ 。经计算，2015 年邛海的 TP 环境容量为  $0.188\text{t}\cdot\text{d}^{-1}$  或  $68.6\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$  (P=50%)。预测入湖量为  $89.7\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$  (表 10-6)，因此需削减  $21.1\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

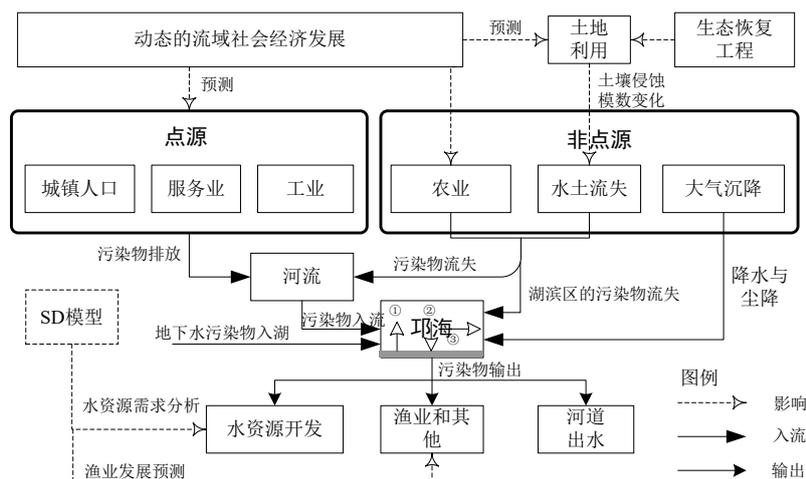


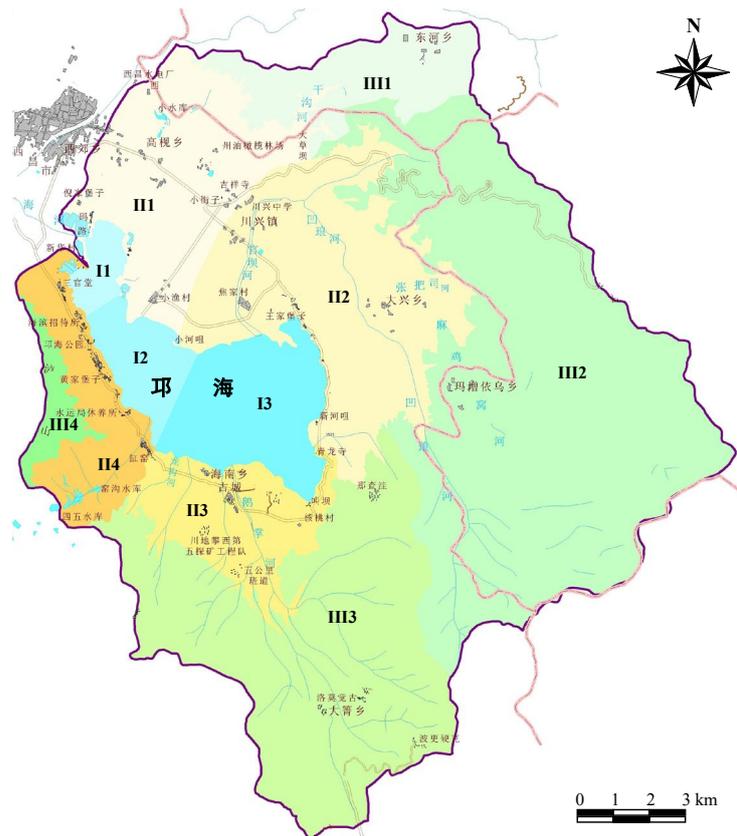
图 10-7 邛海流域 P 污染负荷预测方法

表 10-6 2015 年邛海 TP 的入湖污染负荷

子流域	面积/km <sup>2</sup>	点源/ (t·a <sup>-1</sup> )	面源/ (t·a <sup>-1</sup> )	水土流失/ (t·a <sup>-1</sup> )
I 区	40.98	0.00	14.60	0.62
II 区	133.43	0.45	26.84	11.40
III 区	21.97	0.56	4.54	1.63
IV 区	50.45	0.00	4.08	4.73
V 区	23.33	0.05	5.52	1.18
VI 区	9.61	12.54	0.00	0.32
合计	279.77	13.60	55.58	19.88

## (二) 流域环境功能区划

根据对邛海流域的问题诊断，为实现规划目标，需提出针对性的流域生态修复与污染控制方案。基于邛海流域的陆地生态和社会经济布局，提出邛海流域的 3 个分区（图 10-8）：邛海水体核心保护区、邛海湖滨生态经济区以及邛海湖滨外围陆地生态恢复区。



分区	子区	子区名称
邛海水体 核心保护 区 (I)	I1	邛海主水体重点保护亚区
	I2	邛海未来主要开发利用亚区
	I3	邛海主要控制污染亚区
邛海湖滨 生态经济 区 (II)	II1	邛海湖滨西北岸城镇生态经济亚区
	II2	邛海湖滨东北岸生态农业旅游亚区
	II3	邛海湖滨南岸生态农业亚区
	II4	邛海湖滨西岸旅游亚区
邛海湖滨 外围陆地 生态恢复 区 (III)	III1	邛海东北部干沟河生态恢复亚区
	III2	邛海东部官坝河陆地生态恢复亚区
	III3	邛海南部鹅掌河陆地生态恢复亚区
	III4	邛海西部泸山天然林保护亚区

图 10-8 邛海流域环境功能区划

## 五、流域环境规划方案

### (一) 规划方案总体思路

在邛海流域环境功能分区的前提下，结合规划目标，提出邛海流域生态修复与污染控制方案设计的基本方法：以流域分析方法为指导，在子流域划分的基础上，建立系统的、立体的、多层次的“源头→途径→末端”相结合的污染物削减体系，并设计陆地、河岸带以及湖滨带的生态修复技术（表 10-7），主要包括：污

污染源治理工程（点源和农业面源）、湖区生态环境修复工程、河道生态环境恢复工程以及陆地生态建设与水土保持工程等 4 部分。

**表 10-7 邳海流域生态修复与污染控制总体方案框架**

分区	海拔	面积	方案类型	方案描述
邳海水体核心保护区	<1510.3m	27.87 km <sup>2</sup>	湖滨带生态修复	退塘、退田还湖，湖岸整治与湖滨带修复，河流入湖口生态修复，湖区生态恢复
			湖区污染治理	生活点源治理
邳海流域湖滨生态经济区	1510.3~1800.0m	116.25km <sup>2</sup>	农村面源治理	农村生活污水处理、农村固体废物处置、能源替代
			农业面源治理	农业面源治理与生态农业
邳海流域陆地生态恢复区	>1800m	175.14km <sup>2</sup>	森林生态修复与管护	退耕还林、森林管护
			河岸带生态修复与管理	建设河流缓冲带
			水土流失控制	小流域治理
			重点泥石流区域控制	监测与预警体系建立、工程与管理措施

## (二) 备选方案及其优选

由上述 TP 的污染负荷可知，子流域 I 和 II 是主要的污染物输出地。点源主要集中在子区 VI；农业和农村面源多分布在子区 I 和 II；由水土流失引致的 TP 则主要发生在子区 II 和 IV；不同子区内的污染问题和景观格局决定了需分别采取适宜性的污染防治对策。

依据图 10-2 中的技术路线和表 10-7，在实地调研和综合分析国内外湖泊水污染防治措施的基础上，针对邳海的污染特点，识别出不同污染控制对策类型的备选技术（表 10-8）。

**表 10-8 邳海流域水污染综合防治中的备选技术**

污染控制对策	备选技术
(1) 水土流失防治	顺水坝、拦砂坝、谷坊、潜坝、生态移民、退耕还林、森林生态恢复
(2) 城镇点源控制	清洁生产、污水管网系统完善、污水处理厂、人工湿地、固废收集与处置、污染企业搬迁
(3) 农业和农村面源控制	平衡施肥（营养物和有害物质管理）、保护性耕作与作物轮作、等高耕作、条状种植、植物覆盖、植草水道、人工湿地、氧化塘、固废处置、卫生厕所、畜禽养殖业废物综合利用和资源化、沼气池
(4) 河道修复与污染控制	生态堤岸、缓冲带、前置库、河道疏浚、人工增氧、水生植被恢复
(5) 河流入湖口治理	人工湿地、湖滨带修复、河道疏浚
(6) 底泥疏浚	水利疏浚、环保疏浚

在表 10-8 的基础上，对各子流域内同一类型的备选技术进行优选。由于水

污染防治需达到污染削减的目标,并兼顾经济和环境效益的最优化以及工程和管理措施的可操作性和可持续性,在技术优选时选择4项指标来对技术进行评价:削减能力(环境效益)、经济效益、单位投资和单位维护成本(式10-4)。

$$V_j = \sum_{i=1}^4 W_i \cdot T_{j,i} \quad (10-4)$$

其中,  $V_j$  表示技术  $j$  的总得分;  $W_i$  是技术评价指标的权重,由专家和地方相关利益者打分确定;  $T_{j,i}$  为不同技术取值的归一化结果。以子流域 III 内的农村和小城镇低浓度生活污水处理为例进行说明,建设二级污水处理厂和人工湿地是专家组提出的备选方案。根据式(10-4)对2种技术进行了比较优选,比较结果表明人工湿地较为适宜,其余技术的优选方法同此。

### (三) 点源与农业面源治理

在技术优选的基础上,结合邛海流域污染源现状诊断和动态的污染负荷分析,以及专家咨询意见,得到邛海流域点源和面源治理工程的初步方案(表10-9)。

表 10-9 邛海流域污染源治理方案

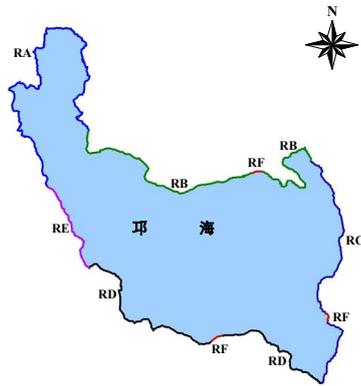
方案类型	初步方案描述	投资(万元)
<b>(1) 点污染控制</b>	环湖截污治污、生活污水处理	5300
邛海西岸	禁止建设新的排污口、完善污水收集管网系统、建设干管支管10km, 扩建邛海污水处理厂及完善污水收集管网, 扩建规模1万 m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup>	3000
邛海东岸	川兴镇污水收集管道建设污水管道20km, 大兴乡污水处理系统规模2000 m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> , 川兴镇污水收集管道建设污水管道10km	2000
邛海南岸	海南乡污水处理系统规模1000 m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup>	300
<b>(2) 农村和农业生态建设</b>	实行农业清洁生产方式, 发展循环农业经济, 降低农业面源污染负荷	13000
农业生态工程	平衡施肥技术、建立化肥农药监测点20个以及农作物病虫害鼠害控制体系建设	1000
	高效生态农业科技示范; 重点在盆地和沿湖地区实施	4000
生态村建设示范	重点在大兴乡、海南乡、大箐乡, 实施农村环境和农业产业生态工程	700
农村人居环境整治	在盆地和沿湖区推广沼气池8500户、生态卫生厕所3000户	2800
农村生活垃圾收集、清运	新建垃圾收集池200座、垃圾收集箱5000个、配备垃圾清运车40辆、新建密闭式中转运站10座、封闭垃圾专用车6辆、新建1座无害化垃圾处理场	3000
农业可利用固体废物资源化处置	建设产业化有机肥基地20 m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> , 规模有机肥产业化基地4座、农户型堆沤系统11330套	2000

表 10-9 中的措施实施后, 点源排放可全部达到二级排放标准(GB18918-2002), 以此值乘以SD模型预测得到的点源污水排放量可知, 城镇生活和工业污染负荷将削减1.9 t·a<sup>-1</sup>。根据SD模型的模拟结果, 流域内的水田和旱地将分别减少到流域总面积的9.72%和9.34%, 此外平衡施肥技术又可减少

单位农田用肥量 50%，农村卫生旱厕、沼气池等可削减农村污染排放 30%，将此结果输入农业面源污染负荷计算的公式中可知，农业和农村面源污染负荷的削减量为  $9.4 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

#### (四) 邛海湖区生态修复

湖区是指邛海及其湖滨带、河流入河口、临近的庐山、农田、农村等区域。湖区污染主要来自于旅游业的生活污水与生活垃圾、农村农田污染物等。针对邛海及其周边区域的污染情况和生态破坏状况，通过系统分析，从污染控制、生态修复与景观设计 3 方面入手对邛海进行湖区生态修复方案设计。邛海湖滨带的上、下限分别为海拔 1510.3m 以上陆域 200 m 的范围以及邛海最低蓄水位（海拔 1509.30m）条件下水深小于等于 2.0m 的水域。根据邛海湖滨带的现状、恢复目标以及湖滨带不同分区的污染特点，在规划中将其划分为 6 个分区加以研究（图 10-9 和表 10-10）。



分区	名称	长度(km)	面积(hm <sup>2</sup> )
RA	西北岸湖滨带建设与渔业污染控制亚区	9.83	179.5
RB	北岸湖滨带建设与农业、旅游污染控制区	8.57	174.9
RC	东岸湖滨带生态修复区	6.62	40.5
RD	南岸湖滨带重建与农业污染控制区	7.16	121.1
RE	西岸湖滨带建设与生活污水污染控制区	4.63	53.6
RF	主要入湖河口恢复区	1.31	20.3

图 10-9 邛海湖滨带分区

表 10-10 邛海湖滨带生态修复方案

分区	方案描述	投资(万元)
RA	湖滨带定界林 8.49 km，湖滨退田水质净化林 21.3hm <sup>2</sup> ，湖滨退塘天然湿地 74.9 hm <sup>2</sup> ，湖泊生态恢复 14.0 hm <sup>2</sup> ，人工湿地 2 个，入湖河口改道工程 25 条	1100
RB	湖滨带定界林 7.39 km，湖滨退田水质净化林 96.3 hm <sup>2</sup> ，人工湿地 1 个，沟渠入湖口改道工程 29 条	1300

RC	湖滨带定界林 5.9km, 陡坡造林 17.9 hm <sup>2</sup> , 人工湿地 2 个	370
RD	湖滨带定界林 6.63km, 湖滨退塘天然湿地 15.9 hm <sup>2</sup> , 湖滨退田水质净化林 28.2 hm <sup>2</sup> , 人工湿地 3 个, 沟渠入湖口改道 28 条	600
RE	湖滨带定界林 3.91km, 湖滨退塘天然湿地 1.8 hm <sup>2</sup> , 人工湿地 4 个, 沟渠入湖口改道 11 条	240
RF	官坝河入湖口天然湿地恢复 3.9 hm <sup>2</sup> , 青河入湖口湿地 0.53 hm <sup>2</sup> , 鹤掌河入湖口湿地 1.7 hm <sup>2</sup>	40

根据 2003 年~2004 年对邛海底质的实测, 自上而下可分为 3 层: 污染底泥层、植物根系层和粘土层。污染底泥层形成于 1980 年代初, 有机质、N、P 等污染物的含量较正常沉积层有明显增加, 与下部沉积层界线截然, 是疏浚的目的层。根据勘测, 邛海的沉积物主要分布在湖泊的西北、北部、西南部和中部, 需在上述地方实施环保疏浚 (表 10-11)。根据实测, 邛海疏浚区域的 TP 平均浓度为  $1.1\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 容重为  $1.97\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$ , 疏浚可减少内源  $0.2\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

表 10-11 邛海沉积层疏浚的设计参数

	设计平均挖泥厚度 (m)	初步疏浚底面积 (m <sup>2</sup> )	疏浚土方量 (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )
西北浅湾	3.5~4	500	2000
北部	2~2.5	400	1000
西南部	2~2.5	500	1300
中部	1~2.5	400	1200

### (五) 陆地生态修复与水土流失防治

目前国内的森林生态建设与水土流失防治主要是以恢复生态学为理论基础, 多采用退耕还林、改造低效林、建设人工林和保护水源涵养林等手段。根据邛海流域环境功能区划, 提出不同区域的陆地生态修复和水土流失防治策略。

#### 1. 陆地与河岸带生态修复

邛海流域的陆地生态修复主要包括邛海上游山区森林生态系统修复与管护、邛海湖滨区生态修复与景观恢复建设以及主要河流河岸带建设 3 部分。

##### (1) 邛海湖滨区生态修复与景观恢复

主要包括邛海水体核心区与环湖周边面山区及海拔 1800m 以下的区域, 面积  $106.66\text{km}^2$ 。主要包括: 邛海西岸庐山森林生态修复与管护区、邛海南岸农田景观保护区、邛海东岸、北岸森林生态修复与管护区。泸山区森林覆盖率较高、水土流失面积小, 根据技术优选的结果, 需采用天然林保护以及景观保护与修复 2

种方案。邛海南岸区主要陆地生态类型为农田，宜采用退耕还林以及河岸带生态恢复等措施。邛海东岸和北岸区森林覆盖低，人为活动对生态环境的影响极为明显，主要采用河岸带生态恢复以及生态景观林建设等措施。根据上述的方案优选提出邛海湖滨区生态修复与景观恢复的技术方案（表 10-12）。

**表 10-12 邛海湖滨区生态修复与景观恢复方案**

分区	分区自然生态景观特征概述	恢复重点	恢复方案
泸山区	森林景观、人文景观	生态景观保护	天然林保护工程
邛海南岸	农田景观	生态景观恢复	退耕还林工程、河岸带修复
邛海东、北岸	农田景观为主，并有森林及城镇	生态景观恢复	面山生态景观林建设工程，河岸带修复

### (2) 邛海上游森林生态系统修复与管护

邛海上游山区的生态保护极其重要。区内的森林覆盖率在全流域中最高，但树种结构简单。因此生态修复的目的在于提高森林覆盖率和森林生态系统功能，主要采用天然林保护、坡耕地退耕还林、生态移民以及低效林分改造等方案（表 10-13）。

**表 10-13 邛海上游森林生态系统修复与管护方案**

方案类型	方案描述	投资（万元）
天然林保护	森林管护 13914 hm <sup>2</sup> ，人工造林 3607.7 hm <sup>2</sup>	910
退耕还林	25 <sup>0</sup> 以上耕地退耕还林 1454 hm <sup>2</sup>	4254
生态移民	玛增依乌乡、普诗乡、大箐乡，100 户	230
云南松低效林分改造	官坝河和鹤掌河上游，620 hm <sup>2</sup>	396

### (3) 主要河流河岸带生态修复

目前国内外对河道的治理主要从 2 方面着手：控制污染物入河、河流生态系统修复。根据对技术方案的比较和评价，优选得到河流生态系统修复的适宜技术：生态河堤和生态缓冲带。其中，生态河堤是河堤内的修复技术，生态缓冲带是河道外的生态修复技术。

根据对邛海流域主要河流的实地调查，对河道的生态修复应该主要采用如下的模式：①河流的上游，河堤采用自然原型，利用植被保护河岸，保持自然的河岸特性，重点区域为官坝河和鹤掌河的上游；②河流的中游，除植被保护外，还应采用石材、木材等天然材料，增强河岸的抗洪能力，重点区域为清河、干沟河、

大沟河、踏沟河、龙沟河和红眼沟；③河流下游，尤其是经过城镇以及人为干扰严重的区域，在自然型护岸的基础上，采用混凝土，钢筋混凝土等材料，确保护岸的抗洪能力，重点是官坝河、干沟河和鹅掌河；④河流的入湖口，与邛海的湖滨带生态修复相结合，恢复天然湿地。

## 2. 水土流失与泥石流防治

邛海流域水土流失与泥石流防治的主要目标为：控制住泥石流和河岸崩塌侵蚀在较大范围内发生，使流域平均土壤侵蚀模数在轻度以下，减少泥沙入湖量；增加植被面积、优化林草结构，涵养水源、增加各入湖河流的旱季水源。

根据邛海流域不同子流域的特点，综合配置植物、工程和农耕等各种措施，坡沟兼治，形成一个完整的水土流失防治防御体系。其中，面蚀区域以退耕还林、农耕措施为主；治沟工程以顺水坝、拦砂坝、谷坊和潜坝为主，并配套植物措施。在空间布局上，在沟头区域布置植物措施和谷坊，在中游区域以拦砂坝、潜坝和顺水坝为主，部分区域按需要建设河堤，并布置相应的植物措施，下游以完善河堤为主。总体布置从源头到下游，从支沟到主河道，进行自上而下的综合防治整体布置。

### (1) 邛海流域水土保持及泥石流防治整体框架

邛海流域水土保持及泥石流防治体系包括各小流域的综合防治措施、森林生态防治措施和水土保持监督管理体系建设，综合治理以水土流失较为严重的各小流域为主要对象，并加强水土保持监督管理能力建设（图 10-10）。

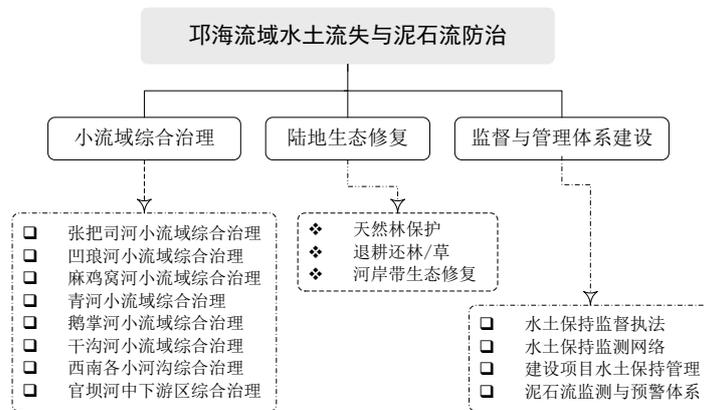


图 10-10 邛海流域水土流失与泥石流防治体系

## (2) 典型小流域治理模式

在水土保持措施优化配置的基础上，对邛海流域内的典型小流域进行综合防治，并在防治的基础上建立小流域的生态经济系统，从而体现生态系统管理对陆地生态系统和社会经济系统的多目标特征（图 10-11）。通过上述分析，提出邛海流域水土流失和泥石流防治的方案体系以及预计投资计划（表 10-14）。

水土流失防治工程实施后，尤其是对 58.66km<sup>2</sup>的重点水土流失区治理，森林覆盖面积的比例将增加到 48.07%，荒草地将下降到 1.65%，水土流失面积降低到 70.21km<sup>2</sup>，减少土壤流失量 40.76 万 t·a<sup>-1</sup>，结合河道生态修复技术，流域内的平均土壤侵蚀模数预计将下降为 1500t·km<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>，输入水土流失污染负荷计算的公式可知，水土流失防治和河道生态修复可削减 TP 负荷 11.0 t·a<sup>-1</sup>。

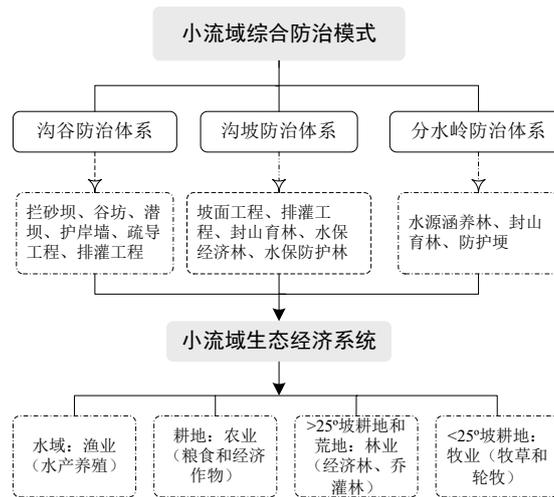


图 10-11 邛海流域小流域综合防治模式与生态经济系统

表 10-14 邛海流域水土流失与泥石流防治方案

方案类型	方案描述	投资（万元）
张把司河小流域综合治理工程	河堤、顺水坝、拦砂坝、谷坊、潜坝、植物	4500
小鹤掌景观生态林工程	植树、景观造型	450
邛海东岸面景观生态林建设工程	退耕还林、营造景观林、防护林和经济林	850
水土保持监督管理能力建设	监督监测人员培训、仪器和资料购置	600
清河小流域综合治理工程	河堤、顺水坝、拦砂坝、谷坊、潜坝、植物	1300
官坝河中下游区综合防治工程	河堤、顺水坝、拦砂坝、谷坊、潜坝、植物	2000
鹤掌河小流域综合治理工程	顺水坝、拦砂坝、谷坊、潜坝、植物措施等	1800
邛海西南河沟综合治理工程	河堤、顺水坝、拦砂坝、谷坊、潜坝、植物	1600
凹琅河小流域综合治理工程	顺水坝、拦砂坝、谷坊、潜坝、植物措施等	1800
麻鸡窝河小流域综合治理工程	顺水坝、拦砂坝、谷坊、潜坝、植物措施等	1200

## 六、方案评价与优选

总结上述的方案,得到不同子流域内的生态修复与污染控制对策。综合分析,分别估算6个子流域的TP削减量依次为 $2.8\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $10.9\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $1.8\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $3.3\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $1.6\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $1.9\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ ,加上疏浚对TP的去除,初步估算上述方案总的TP削减量为 $22.5\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ ,达到了预期的TP控制目标,表明整体技术方案可行,但在时空布局上仍需进一步的优化。此外,当枯水年份(P=90%)时,邛海TP的环境容量为 $66.9\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ ,需削减 $22.8\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ ,超过了所实施项目的总削减量,因此需特别加大对农业面源的污染削减力度。此外,综合考虑到资金投入等方面的原因,确定湖滨带恢复、缓冲带、退耕还林、沼气池、氧化塘和人工湿地为优先实施的技术方案。

### 复习思考题

- [1] 流域环境规划的发展经历了哪些主要的变化,请查阅相关参考文献简述。
- [2] 简答流域环境规划的理论和方法基础。
- [3] 简述流域环境规划的主要步骤。
- [4] 结合前面的章节和相关参考文献,简述流域社会经济预测的方法。
- [5] 流域环境经济系统优化和规划方案优化的目的分别是什么?
- [6] 简述流域环境规划方案的组成。
- [7] 如何评估规划方案的可行性?
- [8] 阐述对于我国流域环境规划的看法以及对未来发展方向的展望。

### 参考文献

1. Brady DJ. The watershed protection approach. Water Science and Technology, 1996, 33(4-5): 17-21
2. Haith DA. Systems analysis, TMDLs and watershed approach. Journal of

- Water Resources Planning and Management-ASCE, 2003, 129 (4): 257-260
3. Heathcote IW. Integrated Watershed Management: Principles and Practice. New York: John Wiley & Sons, 1998
  4. Liu Y, Guo HC, Wang LJ, *et al.* Dynamic phosphorus budget for lake-watershed ecosystems. Journal of Environmental Sciences, 2006, 18(3):596-603
  5. Liu Y, Guo HC, Zhang ZX, *et al.* An optimization method based on scenario analyses for watershed management under uncertainty. Environmental Management, 2007, 39(5):678-690.
  6. Montgomery DR, Grant GE, Sullivan K. Watershed analysis as a framework for implementing ecosystem management. Water Resources Bulletin, 1995, 31 (3): 369-386
  7. USEPA. Watershed Approach Framework. Washington DC, 1996, <http://www.epa.gov/owow/watershed/framework/>
  8. USEPA. Moving the NPDES Program to a Watershed Approach. Washington DC: USEPA, 1994, <http://www.epa.gov/npdes/pubs/owm0148.pdf>
  9. 傅国伟, 程声通. 水污染控制系统规划. 北京: 清华大学出版社, 1985
  10. 傅国伟. 环境工程手册 环境规划卷. 北京: 高等教育出版社, 2003
  11. 郭怀成. 环境规划方法与应用. 北京: 化学工业出版社, 2006
  12. 郭怀成, 刘永, 贺彬. 流域环境规划典型案例. 北京: 北京大学出版社, 2007
  13. 国家环保局计划司《环境规划指南》编写组. 环境规划指南. 北京: 清华大学出版社, 1994
  14. 国家环境保护总局环境规划院. 重点流域水污染防治“十一五”规划编制技术细则. 北京, 2005
  15. 金相灿. 湖泊富营养化控制和管理技术. 北京: 化学工业出版社, 2001
  16. 刘永, 郭怀成, 王丽婧, 等. 环境规划中情景分析方法及应用研究. 环境科学研究, 2005, 18 (3): 82-87
  17. 刘永, 郭怀成, 周丰, 等. 基于流域分析方法的湖泊水污染综合防治研

- 究. 环境科学学报, 2006, 26 (2): 337-344
18. 刘永, 郭怀成. 湖泊-流域生态系统管理研究. 北京: 科学出版社, 2007
19. 尚金城. 环境规划与管理. 北京: 科学出版社, 2005
20. 王丽婧, 郭怀成, 王吉华, 等. 基于 IFMOP 的流域环境-经济系统规划. 地理学报, 2005, 60 (2): 219-228.
21. 韦保仁. 美国的流域保护方法 (WPA). 环境科学进展, 1998, 6(6): 56-60
22. 云南省环境科学研究所, 北京大学环境学院. 2004. 邛海流域环境规划研究. 昆明: 云南省环境科学研究所