

农村面源污染型湖滨带的生态修复

叶 春^{1,2}, 金相灿¹, 孔海南², 王中琼¹, 沈 兵³, 刘 滨³

(1. 中国环境科学研究院湖泊生态环境研究室, 北京 100012 ; 2. 上海交通大学环境科学与工程学院, 上海 200240 ; 3. 云南省大理白族自治州环境保护局, 云南 大理 671000)

摘要 : 分析了湖滨带水陆生态系统中过渡与缓冲区域的结构特点及其功能, 提出了湖滨带生态修复的目标和设计工艺流程。洱海小关邑湖滨带受人为活动的破坏和农村面源污染比较严重, 根据湖滨带的特征, 因地制宜地将退化湖滨带的生态修复与农村面源污染控制相结合。工程实施后, 大型水生植物恢复了, 水质改善了, 浮游植物和浮游动物结构得到了优化。

关键词 : 湖滨带 ; 生态修复 ; 农村面源污染 ; 洱海

中图分类号 : X52 **文献标识码** : A **文章编号** : 1004-6933(2007)03-0001-04

Ecological restoration of lakeshore damaged by rural non-point pollution

YE Chun^{1, 2}, JIN Xiang-can¹, KONG Hai-nan², WANG Zhong-qiong¹, SHEN Bing³, LIU Bin³

(1. Research Center of Lake Ecological Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China ; 2. School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China ; 3. Environmental Protection Bureau of Dali Bai Autonomous Prefecture in Yunnan Province, Dalizhou 671000, China)

Abstract : The object and technical process of ecological restoration of lakeshore were discussed based on the analysis of the structure, characteristics and function of lakeshore. The lakeshore at Xiaoguanyi of Erhai Lake is seriously damaged by human activity and suffered from rural non-point pollution. Based on the characteristics of the lakeshore, a feasible measure combining ecological restoration with control of rural non-point pollution was brought forward. After this measure was put into effect, the macrophytes were restored, the water quality was improved, and the system of phytoplankton and zooplankton was optimized.

Key words : lakeshore ; ecological restoration ; rural non-point pollution ; Erhai Lake

全国性的湖泊富营养化、水质恶化、生态系统退化等一系列环境问题不断出现, 致使湖泊生态系统的良性循环遭到破坏, 尤其是流域内最敏感和脆弱的湖滨带区域, 生态破坏更为严重^[1-4]。国内外的研究表明, 湖泊富营养化的控制与治理, 应当采取控源与生态修复相结合的综合技术。经过长期的努力, 城市生活污染源、集约化畜禽养殖废水与工业点源的治理在我国已经取得一定的效果, 但是村落和农田废水由于自身的治理难度和缺乏资金, 一直是一个难以解决的问题。在我国农村当前的社会发展水

平上, 有效地解决湖滨区村落和农田废水的污染, 并将其与湖滨带的生态修复相结合, 是十分值得探讨的问题。本文以洱海湖滨带生态修复示范工程为例, 试图在这方面做一点有益尝试。

1 湖滨带的结构和功能

1.1 结构

生态交错带^[5]是相邻生态系统间的过渡地带, 其特征由相邻生态系统之间相互作用的空间、时间及强度所决定。它把生态系统界面理论以及非稳定

的脆弱特征结合起来,可以作为辨识全球变化的基本指标。湖滨带可以定义为湖泊水陆生态交错带的简称,是湖泊流域中陆地生态系统和水域生态系统之间十分重要的过渡与缓冲区域,是健康的湖泊生态系统的重要组成部分,在一定程度上是湖泊的一道保护屏障。

生态系统有一定的结构。水生生态系统表现为水、水底土壤、大气 3 个自然体的特点,生境常表现出复杂的分层。陆地生态系统通常仅为土壤、空气 2 个自然体,生境分层现象不明显。水生生态系统和陆地生态系统的许多区别都由水这一生境因子所造成。水生生态系统中水的密度高、浮力大,使许多小型生产者可以营造悬浮生活,不需要附着器官和其他结构,整个身体都可以进行光合作用,具有极高的生产效率,物质循环的速度比陆地快得多。在陆生群落中生产者的生物量远高于消费者,在水生群落两者的差距缩小甚至有时后者反高于前者。

湖滨带的生态结构介于两者之间,是一种过渡结构。由于水陆生态系统间水的作用,在交错带中存在着明显的环境梯度。空间上表现出明显的结构特点(见图 1),生物群落也表现出与水相关的层次性,水生植物群落表现得最为明显。大多数水体的近岸边缘都是大型水生植物(或湿生植物)占统治地位,带状分布十分明显。在典型的湖滨带内,有根水生植物随水环境因子的梯度变化,一个类群取代另一类群形成同心圆带,这些同心圆带从陆向辐射带到水向辐射带由浅入深依次分布着 湿生植物带、挺水植物带、浮叶植物带和沉水植物带(见图 2)。

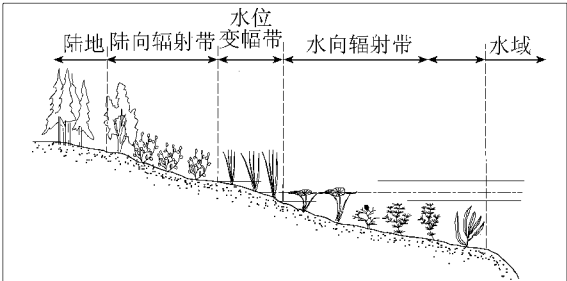


图 1 湖滨带横向结构示意图

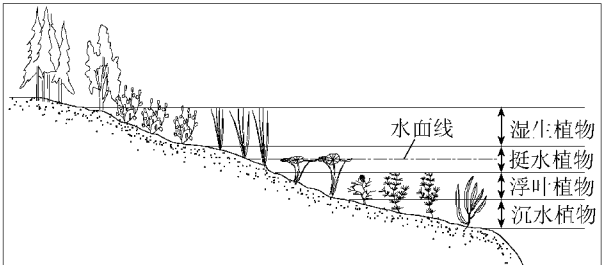


图 2 湖滨带内植物系统的垂直结构

1.2 功能

与陆地或海洋生态系统相比较,湖泊生态系统的脆弱性表现在易受岸上周边地区各种生命活动和自然过程的影响,而湖滨带是湖泊流域内对人类活动影响最敏感的部分。由于不同生态系统之间的相互作用,湖滨带有特别丰富的植物区系和动物区系,形成一个物种进化的基因库,起到景观调节和稳定的作用,在非生物生态因子的环境梯度、地形和水文学过程的作用下,矿物质、营养物质、有机物质和有毒物质必须通过各种物理、化学和生物过程经湖滨带才能从流域进入湖泊水体,水流是陆地生态系统与水生生态系统之间物质流动的主体和纽带。因此湖滨带的功能大体表现为 3 个方面 环境功能,生态功能和经济、美学价值。环境功能包括湖滨带的截污和过滤功能,改善水质功能,控制沉积和侵蚀的功能 生态功能包括湖滨带的保持生物多样性功能,提供鱼类繁殖和鸟类栖息的场所,调蓄洪水和稳定相邻的两个生态系统 经济 and 美学价值包括湖滨带为人类生产再生资源、改善环境,各类丰富的资源给人们带来的独特的经济、娱乐、美学、教育和科研价值。

2 湖滨带生态修复的目标与设计工艺流程

湖滨带生态恢复的目标是去除或减少人为干扰,降低入湖污染负荷,建立健全过渡带生态系统结构,维持湖滨带的生境及栖息其间的动植物群落,保持湖滨带功能尽可能高的多样性。多数情况下,湖滨带的许多功能是相互依存、相互促进、相互制约的,人们希望湖滨带发挥尽可能多的作用。生态功能和人类需求的有机结合是生态工程的基础,生态工程的设计必须充分利用现有条件,将湖滨带内的不利因素转化为有利因素,伴随流域内居民环境意识的提高,逐步实现湖滨带生态系统的恢复。

湖滨带或水边带的生态恢复,在日本、欧洲、美国 and 韩国都有一些成功的实践,他们都是在污染源得到有效控制的前提下,进行生态修复的。中国的湖泊大部分都是多功能湖泊,对湖泊生态环境的保护与流域经济的发展并重,并且以经济发展为中心,在经济的快速发展过程中,污染源尤其是农村面源的有效控制是一个长期的过程,如何在这种特殊情况下进行有效的湖滨带生态恢复,国内外成熟的成功经验比较少。在洱海湖滨带生态修复总体工艺流程按图 3 设计,为协调湖滨区经济发展与生态修复之间的关系,将湖滨带分为功能区和过渡区两大部分,湖滨功能区作为保护区来考虑,该区内以生态恢复为基础,对湖滨带陆向辐射区内保护性开发的土地利用形式进行管理和优化设计,以使功能区少产

废、少排污,以达到减少湖滨带的污染负荷,减轻湖滨带净化污染物压力的目的。

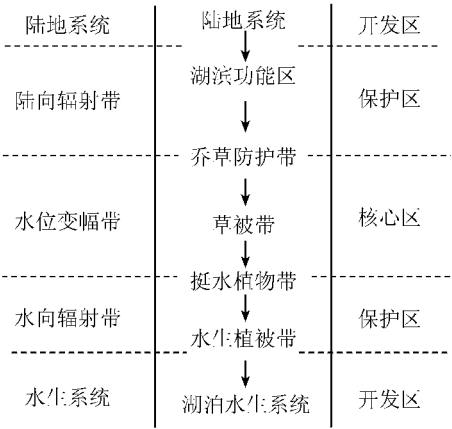


图3 湖滨带生态修复的总体工艺流程

3 洱海湖滨带生态修复区的环境状况

3.1 洱海流域及工程区湖滨带环境概况

洱海流域地处滇中高原与横断山脉交界处,位于澜沧江、金沙江和元江三大水系分水岭地带,地处25°25′~25°16′N,99°32′~100°27′E之间,流域面积2565 km²。洱海是受人工控制的多功能高原淡水湖泊,位于云南省大理白族自治州境内,在高水位1974.0 m(海防高程)时,湖面面积250 km²,平均水深11.7 m,湖容量28.8亿 m³,湖岸线长117 km,湖岸线发达程度2.3,湖泊补给系数10.43,是一个典型的中等深度的内陆断陷湖泊。

洱海流域属低纬高原亚热带季风气候,日照充足。气候温和,四季春秋,流域年平均气温15.1℃。夏雨冬干,干湿季节分明,降水强度小,雨量有效性高,降水多年平均1048 mm,西部多雨,东部少雨,风能资源丰富。

洱海湖滨带生态修复示范区位于洱海西岸南部小关邑村附近的湖滨滩地内,紧临新大丽公路,地势平坦开阔,耕地集中连片,平均坡度为2°~4°。土壤主要为冲积性水稻土。示范工程实施前的土地利用类型主要为村落、码头、农田和湖滨滩地,其中有稀疏的防护林,植被稀少,湿生乔木主要是滇杨。

3.2 湖滨带破坏与污染物来源

示范工程区内有一个滨湖村庄(小关邑村)、一个小码头和大量农田。引起示范工程区湖滨带破坏的主要原因是人类活动的强烈干扰。在小关邑村南边,大量的建筑及生活垃圾,宅基地和码头侵占了湖滨滩地,污水直接进入湖滨带,季节性临时侵占滩地的农业活动则更为严重,逐水而作,水退到哪里,农

业活动就跟到哪里,大量的人类活动,如放牧、捕鱼、休闲、游泳、人为无序割草等各种行为不仅破坏了湖滨带植被,致使正常晒滩和氧化还原电位变化过程对湖滨带正常功能的调节作用被破坏,而且还在滩地上留下大量营养盐和农业废弃物质,并随湖泊水位的上升进入湖泊水体,导致天然湖滨带的污染严重和功能的丧失,加快了洱海水环境质量的下降速度。

小关邑村总人口600人,常住人口300人,耕地面积20 hm²,村落占地5.3 hm²。进入小关邑湖滨带的面源污染源主要来自于小关邑村村落污水和湖滨带西边流域内的农田径流。调查表明村落污水排放量为21 m³/d,农田最大排水量400 L/s,旱季农田排水量153 L/s。据估算,每年进入小关邑湖滨带的污染负荷量为总氮约10.3 t,总磷约为1.1 t。

4 洱海小关邑湖滨带生态修复

洱海湖滨带示范工程用地规模为100 m×1200 m,水位变幅为3 m(洱海最低水位为1971.00 m;正常蓄水位为1974.00 m,防洪水位为1974.20 m)^①,湖滨宽度较宽,为50~100 m不等,景观物理稳定性较好。示范工程在1999年和2000年分别实施,主要实施内容包括:基底修复工程、配水工程、植被恢复工程和试验场建设工程。

基底修复工程的主要工作内容是清理湖滨带中的垃圾和建筑弃土,拆除人为形成的硬质陡坎和田埂。参照历史原貌和现状,依自然岸坡走势,简单修复湖滨带岸坡,岸坡总体平缓渐变,保持自然高低错落沿岸地貌和基质的异质性,为植被恢复创造生境条件。

在目前洱海地区农村经济和生活条件下,还没有能力采取有效措施处理村落污水和农田废水,在加强农村环境管理的前提下,作为应急措施,在村落排水和农田废水进入湖滨带之前,修建配水工程,将集中的污水分散均匀进入湖滨带,消除集中沟渠排水对湖滨带的冲击,改善水流和物质循环状况,加强湖滨带的环境功能,有利于湖滨带结构的建立和功能的发挥。主要措施是:现状为Φ300水泥管和5 m明渠,将水泥管加长,接入集水配水渠(渠高×渠宽=600 mm×300 mm),集水配水渠总长245 m,通过花墙排水,每隔2.5 m设置1个泄水口,入口处及前后2.5 m不设泄水口,泄水口宽为240 mm,高与设计渠道高相等。由于出水量相同、间距相同,可认为是均匀出流进入洱海湖滨带。

植被恢复工程是湖滨带示范工程的核心,所有

① 大理白族自治州洱海管理局. 云南省大理白族自治州洱海管理条例(修订). 1998.

其他工程都是为了更好地进行湖滨带的植被恢复。湖滨带中的植物分为 4 个带:乔草带、草被带、挺水植物带和沉水植物带。其中沉水植物带采取自然恢复方式(主要指海防高程 1970.5 m 以下的沉水植物)。另外在平坦的原垃圾堆放地进行绿化,建设稀树草坪,供附近村民休闲。工程平面布置见图 4。工程设计和实施情况见表 1。

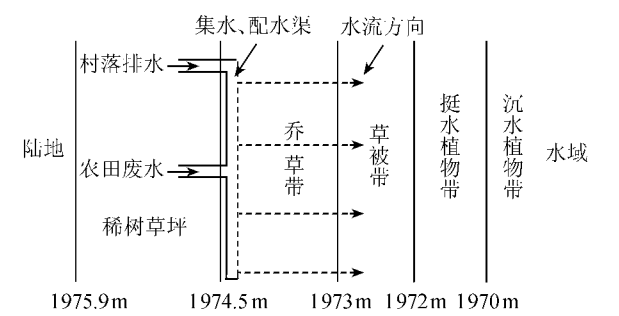


图 4 工程平面布置示意图

另外,为了研究示范工程的生态环境效益,优化工程设计参数和运行参数,在示范工程建设的同时,建设示范工程运行试验场,以便于现场取样监测。

5 湖滨带修复的生态环境效益

5.1 水质净化作用

根据 2000 年 7 月、9 月、10 月对洱海湖滨带示范工程的监测结果(图 5),不难看出湖滨带具有较强的污染物净化能力,主要污染物 TN、TP、COD_{Mn} 和 SS 的浓度经过湖滨带的净化作用后都明显下降,并且湖滨带对 N、P 污染物的净化能力略高于有机污染物和 SS。湖滨带对农田排水的去除率要低于对

村落污水的去除率,可能的原因是农田排水的浓度较低,排放量大,在湖滨带中的停留时间短。

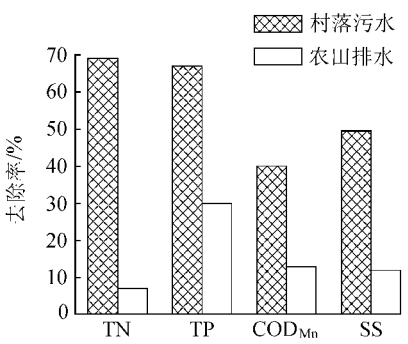


图 5 湖滨带对农村污水的去除率

5.2 大型水生植物的变化

根据 2001 年 8 月调查,洱海小关邑湖滨带中分布有广义水生植物 49 种,占洱海水生植物种类的 86%。在小关邑湖滨带植物区系组成中,除滇杨、河柳、茭草、芦苇和黑麦草为人工引种外,其他都是在自然条件下恢复的,沿水位梯度变化形成从陆地生态系统到水生生态系统演替的全系列结构。湖滨带示范工程实施后水生植物的种类由 22 种增加到 49 种,生物量增大,平均生物量达 5.4 kg/m²,且优势种发生变化,各群落结构趋于复杂,示范工程的实施明显提高了湖滨带的生物多样性,促进了湖滨带生态系统的稳定。

5.3 浮游植物的变化

小关邑湖滨带中藻类种类几乎占了洱海所有藻类种类的一半以上,共有 106 种,隶属 8 门 23 科 43 属,主要以绿藻、硅藻、蓝藻为主。从藻类生物量来

表 1 洱海湖滨带生态修复示范工程设计及实施情况

工程带	工程设计	工程实施	
		1999 年	2000 年
稀树草坪	范围 海防高程 1974.5~1975.9 m,面积 300 m×45 m。 营造方式 修建稀树草坪。草本植物选用暖地性草坪植物,如多年生黑麦草、中华结缕草。树种可选悬铃木、橡皮树等。	撒种黑麦草籽,其他草本植物采取自然恢复方式。	撒种黑麦草籽,其他草本植物采取自然恢复方式。
乔草带	范围 海防高程 1973.0~1974.5 m。 营造方式 沿 1973.0 m 和 1974.5 m 两条高程线及两条高程线之间营造香根草生物篱,初植密度行距 4 m,株距 15 cm,两行香根草生物篱之间种植一行乔灌木,树种选红柳、滇杨、河柳、池杉。间种中华结缕草,铁线草或其他本地草本植物。	沿 1973 m 和 1974 m 两条高程线之间营造 2~3 行香根草生物篱,间种滇杨、河柳。其他草本植物靠自然恢复。	沿码头两侧种植河柳 沿配水渠种植铁线草。
草被带	范围 海防高程 1972.0~1973.0 m。 配置方式 铁线草、中华结缕草 1:1 间种。 特殊地形处理 带内低洼地可以种植漂浮植物和挺水植物。漂浮植物可选择满江红、浮萍等 挺水植物可选择观赏莲、莲藕、慈菇、茭白等。	选择本地草种狗牙根、铁线草为恢复物种,其他草本植物靠自然恢复。	自然恢复
挺水植物带	范围 海防高程 1970.0~1972.0 m。 配置方式 芦苇、茭草、香蒲分片种植,湖湾地区可选种观赏莲。初植密度为 0.5 m×0.5 m。	引种挺水植物芦苇和茭草。初植密度为 0.5 m×0.5 m。	在 1972.3~1972.35 m 范围内种植茭草;在 1972.4~1972.5 m 范围内种植芦苇。
沉水植物带	范围 1970.5 m 以下,直到有水生植被的地方。	自然恢复,仅海菜花人工植入。	自然恢复,仅海菜花人工植入。

雨雪的形式落下。因此,可以选择在适宜的云水条件下,进行人工增雨作业。以该地区现实状况而言,只有开发空中水资源,实施人工增雨战略工程,才有希望从根本上解决水资源短缺的危机。相比抽取江河水或地下水来说,人工增雨成本很低。2001 年 7 月湖北省 6 次实施人工增雨,增加降水 4 亿余 t,平均每吨水仅为人民币 0.125 分。据河北省 1995 年测算,人工增雨投入与产出效益比为 1:30 以上。北京市的数据显示,增雨的投入产出比超过 1:90。事实上,我国的人工增雨虽然已经搞了几十年,但基本上是作为一种抗旱减灾的应急手段,未能上升到开发水资源的战略层面。因此,应当转变观念,把开发空中水资源作为一项水资源开发利用的长期机制,以解决水资源短缺这一关键性制约因素。

4.6 逐步加大利用海水资源

海水可直接用于工业生产中的冷却水、消防用水、冲厕所等。日本海水利用量占整个工业用水量的 1/4,其中电力工业的冷却水全部利用海水,化学工业用水量的 1/3 是海水。香港从 20 世纪 60 年代

就开始用海水冲厕,每年可节约食用淡水两成。现在我国海水淡化技术已经成熟,海水淡化与晒盐、工业用水相结合大大降低了海水淡化成本,效益显著。沧州市沿海地域优势明显,位置特殊,利用海水资源前景广阔,在工业布局上应优先考虑利用海水资源,逐步加大海水的利用率。

参考文献：

[1] 宋文玉. 沧州水环境现状调查分析[J]. 河北水利水电技术,1996(2) 26-29.
[2] 刘春葵. 中国水资源响应全球气候变化的对策建议[J]. 中国水利,2000(2) 36-38.
[3] 张桂平. 沧州水资源短缺原因分析[J]. 河北水利水电技术,1996(2) 35-36.
[4] 王洪彬. 沧州地区利用地下微咸水灌溉分析[J]. 河北水利水电技术,1998(4) 4-5.
[5] 张利. 沧州地区土壤水资源研究[J]. 自然资源学报,1990,5(3) 230-236.

(收稿日期 2005-10-15 编辑 舒 建)

(上接第 4 页)

说,有所下降,修复工程实施前藻类生物量最高为 0.497 亿个/L,最低为 0.1 亿个/L 而工程实施后藻类生物量最高为 0.171 亿个/L,最低为 0.029 亿个/L。藻类种类增多,数量减少,表明了生态系统向良性循环的转化趋势^[2]。

5.4 浮游动物的变化

小关邑湖滨带内浮游动物主要由枝角类、桡足类、轮虫和原生动物构成,以原生动物为主,其次为轮虫类。示范工程实施后,浮游动物的生物量由 721 个/L 提高到 1 338 个/L,喜好清水型的枝角类、轮虫类数量增多,表明湖滨带内的生境条件得到一定程度的改善。

6 结 语

湖滨带是水陆生态系统间的一个过渡和缓冲区域,其界面特点使得它具有保持物种多样性、拦截物质流和能量流、稳定相邻生态系统、净化水体和减少污染等功能。将湖滨带的生态修复工程与农村面源污水处理相结合,强化湖滨带的环境功能,是当前缓

解农村面源污染的行之有效的应急措施。同时示范工程表明,小关邑湖滨带生态系统得到较好的恢复,各项生态指标都有好转的趋势。

参考文献：

[1] 许木启,黄玉瑶. 受损水域生态系统恢复与重建研究[J]. 生态学报,1998,18(5) 547-558.
[2] PIECZYNSKA E. Lentic aquatic-terrestrial ecotones :Their structure, function and importance [C]//NAIMAN R J, DÉCAMPS H. The Ecology and Management of Aquatic-terrestrial Ecotones (MAB-series 4). Paris : UNESCO & the Parthenon, Publishing Group, 1990 :103-140.
[3] STANLEY V G, FREDERICK J S, MCKEE W A, et al. An ecosystem perspective of riparian zones-focus on links between land and water[J]. Bioscience,1991,41(8) 540-551.
[4] 叶春,金相灿,王临清,等. 洱海湖滨带生态修复设计原则与工程模式 [J]. 中国环境科学,2004,24(6) 717-721.
[5] HOLLAND M. SCOPE/MAB technical consultation on landscape boundaries :report of a SCOPE/MAB workshop on ecotones[J]. Biology International,1988,Special Issue 17 47.

(收稿日期 2006-06-06 编辑 舒 建)