

基于水库流域非点源防治的用地规划

万 林 胡庆年 林 星 邱章龙

(台州市环境科学设计研究院 浙江 台州 318000)

摘要 水体富营养化的一个重要原因是非点源污染。相对于点源而言,非点源控制难度较大。试图从非点源防治的角度,采用线性规划模型进行流域用地规划。列举横岗水库流域的用地规划进行污染源预测以及环境容量计量。具体思路如下:①预测流域污染物产生量;②计算流域内纳污水体环境容量,分配点源与非点源环境容量;③通过线性规划,确定各种土地利用类型的面积大小;④根据纳污水体位置以及用地现状,确定各种用地类型的相对位置。

关键词 水体富营养化;非点源污染;用地规划

中图分类号:X592 文献标识码:A 文章编号:1004-693X(2007)05-0071-04

Land use planning based on control of non-point source pollution in reservoir watersheds

WAN Lin, HU Qing-nian, LIN Xing, QIU Zhang-long

(Taizhou Research and Design Institute of Environmental Science, Taizhou 318000, China)

Abstract Non-point source pollution is one of the most important causes of eutrophication. Compared with the point source pollution, the non-point source pollution is difficult to be controlled. The linear programming model was used to manage the land use of reservoir watershed for the control of non-point resources. Taking Henggang Reservoir Watershed as an example, the land use planning was used to predict pollution sources and calculate environmental capacity, that is, to predict the total amount of pollutions in the watershed, to calculate the water environmental capacity in the watershed and allocate for point sources and non-point sources, to determine the area of each land for different uses based on linear programming, to determine the relative locations for different land uses based on the location of waters accepting sewage and the present situation of land uses.

Key words water eutrophication; non-point source; land use planning

我国内陆湖泊污染严重,大部分湖泊水质为Ⅳ类或劣Ⅳ类。130余个湖泊调查资料显示,富营养化湖泊占调查总数的46.5%,中营养化湖泊占调查总数的45%^[1]。

农业非点源污染是指人们从事农业生产活动时通过使用农药、化肥、粪便及农田水土流失而产生的污染^[2]。据调查2002年滇池总氮污染源中,工业污染所占比重为2%,生活源所占比重为53%,农业非点源所占比重为45%;总磷污染源中,工业污染所占比重为4%,生活源所占比重为69%,农业非点源所占比重为27%^[3]。根据国家环保总局在太湖、巢

湖、滇池、三峡库区等流域的调查,工业废水对总氮、总磷的贡献率仅占10%~16%,而生活污水和农田的氮、磷流失是水体富营养化的主要原因^[4]。

1 研究思路

不同土地利用类型单位面积的非点源污染物产生量不同,因此在保证非点源污染物产生量在环境容量以内,可对不同的土地利用类型进行合理配置,并提出相应的控制措施。本文研究目标是保证非点源的污染物经过控制后,水体纳污量在环境容量之内,同时使各种土地类型所产生的经济效益最大。

2 实例应用 横岗水库流域的用地规划

2.1 水库概况

横岗水库水域面积 $4.256 \times 10^6 \text{ m}^2$,正常水位为 22.00 m ,相应库容为 $21.2 \times 10^6 \text{ m}^3$;平均水深为 4.981 m ,流域面积为 44.615 km^2 。横岗水库为当地后备饮用水源 ,属 II 类水功能区。目前水库水质劣于地表水 II 类水质标准 ,其主要超标项目为 COD_{Mn} 、 COD_{Cr} 、 BOD_5 、TN、TP 和大肠杆菌 ,TN 和 TP 超标情况严重。采用综合营养指数法评价 ,表明水库水质为中度营养化。

2.2 污染源预测以及环境容量计算

2.2.1 农业非点源污染预测

横岗水库流域非点源污染表现为降雨径流导致水土流失后的 COD_{Cr} 、N、P 等的释放 ,以及化肥农药的过量使用而流失的 COD_{Cr} 、N、P 等。由于生活污水以及养殖废水将集中处理 ,因此将生活污水和养殖废水看作点源。

非点源预测公式

$$W = \sum_{i=1}^n A_i Q_i C_i$$
$$Q_i = K_i h$$

式中 : W 为非点源污染的污染物输入量 , g/a ; A_i 为第 i 种土地利用类型的面积 , km^2 ; Q_i 为第 i 种土地利用类型径流量 , $\text{m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$; C_i 为第 i 种土地利用类型的径流污染物浓度 , g/m^3 ; K_i 为第 i 种土地利用类型的径流系数 ; h 为降雨量 mm 。

根据气象统计结果 ,横岗水库周边年降雨量为 1819.9 mm。结合上述资料 ,可计算单位面积污染物产生量 ,见表 1 表 2。

表 1 各种用地类型径流系数及径流污染物浓度

用地类型	径流系数	$\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{TN})$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{TP})$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
林地	0.25	48.40	2.16	0.14
园地	0.15	62.93	2.58	0.21
一般耕地	0.15	70.73	3.72	0.89
农田保护区	0.15	46.48	3.97	0.27
未利用土地	0.25	55.33	2.13	0.23
草地	0.10	53.35	2.37	0.07
工业园	0.70	71.00	2.13	0.33
工矿用地	0.55	36.50	1.56	0.15
居民用地	0.55	36.50	1.56	0.15

表 2 各种用地类型年径流产污量 kg/hm^2

用地类型	COD_{Cr}	TN	TP	用地类型	COD_{Cr}	TN	TP
林地	220.21	9.83	0.64	草地	97.09	4.31	0.13
园地	171.79	7.04	0.57	工业园	904.49	27.13	4.20
一般耕地	193.08	10.16	2.43	工矿用地	365.34	15.61	1.50
农田保护区	126.88	10.84	0.74	居民用地	365.34	15.61	1.50
未利用土地	251.74	9.69	1.05				

根据当地调查的结果进行了化肥的过量施用所释放的氮磷预测 ,各种用地施肥量为 ,园地(果园) :氮肥 375 kg/hm^2 、磷肥 30 kg/hm^2 ;一般耕地(菜园) :氮肥 750 kg/hm^2 、磷肥 60 kg/hm^2 ;农田保护区 :氮肥 300 kg/hm^2 、磷肥 22.5 kg/hm^2 。这里氮、磷肥均为折纯量。

据调查^[5] ,进入农田的化肥不能被作物完全利用 ,一部分经过硝化、反硝化而损失 ,另一部分则是通过农田径流而流失。磷肥的利用率一般为 15% ~ 20%。氮肥的流失率为 8% ~ 20% ,平均流失 10% ,磷可被土壤强烈吸附 ,其流失较少 ,平均流失率为 3% ,因此可计算得到各种用地类型总的非点源污染物单位面积总产污量 ,见表 3。

表 3 各种用地类型非点源年总产污量 kg/hm^2

用地类型	COD_{Cr}	TN	TP	用地类型	COD_{Cr}	TN	TP
林地	220.21	9.83	0.64	草地	97.09	4.31	0.13
园地	171.79	44.54	2.07	工业园	904.49	27.13	4.20
一般耕地	193.08	85.16	5.43	工矿用地	365.34	15.61	1.50
农田保护区	126.88	33.34	1.87	居民用地	365.34	15.61	1.50
未利用土地	251.74	9.69	1.05				

2.2.2 环境容量计算与分配

根据箱式完全混合模型计算 COD_{Cr} 的环境容量为 1765.99 t/a ;营养物质采用 Dillon 模型计算得到总氮、总磷的环境容量分别为 92.89 t/a 、 10.84 t/a 。将各污染物的环境容量的 15% 作为预留容量 ,余下 85% 的环境容量分配给点源和非点源。生活源和养殖源经过处理后 ,污染物输入量为总量的 10% ,环境容量分配见表 4。

表 4 横岗水库环境容量分配情况 t/a

分类	环境容量	可用容量	点源产污量	排放量	非点源容量
COD_{Cr}	1765.99	1501.09	1401.32	140.13	1360.96
TN	92.89	78.96	352.67	35.27	43.69
TP	10.84	9.21	57.09	5.71	3.50

2.3 用地类型规划

2.3.1 线性规划模型建立及求解

a. 目标函数的确定。目标函数的建立原则为各种用地类型经济价值、生态价值总和最大化。根据当地调查 ,林地、园地、一般耕地、农田保护区和草地的每公顷年纯收入分别为 0.75 万元、2.25 万元、3 万元、1.2 万元、0.75 万元。湿地按照 10% 的面积用于养鱼 ,其每公顷年纯收入为 0.45 万元。

根据 Constanza^[6] 研究所得的各种用地类型每公顷年生态服务价值分别为 :热带亚热带林 2 008 美元、草地 242 美元、耕地 92 美元、湿地 19 580 美元、河流或湖泊 8 498 美元、城市 0 美元、荒漠 0 美元 ;其中草地和湿地的废物处理价值分别为 87 美元和

1659 美元。在约束条件中考虑了草地和湿地的环境净化功能,因此草地和湿地的生态服务价值分别为 157 美元、17 921 美元。将其按照汇率 1:8.01 转化为人民币,另外根据目前中国的生活水平处于温饱和小康之间,取比例系数为 0.5 转化为实际生态服务价值^[7]。

工业园主要用于出租给私有企业,每公顷土地年租金为 21.6 万元。工矿用地主要用于房地产开发,每公顷地平均售价为 150 万元,其使用期确定为 50 a,则每公顷土地价值为 3.0 万元。居民用地主要用于当地居民住房,在此不计算其经济价值。因此,可以确定林地、园地、一般耕地、农田保护区、未利用土地、草地、湿地、工业园和工矿用地的每公顷经济价值分别为 1.52 万元、3.03 万元、3.02 万元、1.24 万元、0 元、0.81 万元、4.68 万元、21.6 万元、3.0 万元。

将林地、园地、一般耕地、农田保护区、未利用土地、草地、湿地、工业园、工矿用地、居民用地的面积分别用 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 、 x_6 、 x_7 、 x_8 、 x_9 、 x_{10} 表示,单位为 hm^2 。则目标函数:

$$\max(Z) = 1.52x_1 + 3.03x_2 + 3.02x_3 + 1.24x_4 + 0x_5 + 0.81x_6 + 4.68x_7 + 21.6x_8 + 3.0x_9 + 0x_{10}$$

b. 总面积约束。横岗水库流域总面积除去水库水域面积外的剩余面积应为各种用地类型的总面积的总和。因此,可以得到总面积约束方程:

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10} = 4034.38$$

c. 污染物总量控制约束。水库流域非点源主要采取植被过滤带和湿地系统进行控制。研究表明,植被过滤带一般呈带状分布,植被过滤带的去污效果随着带宽增加而提高^[8]。植被过滤带对地下径流中的氮、磷有着较好的去除效果,宽度达到 20 m,可以拦截过境径流中 50% 左右的氮、磷和 80% 以上的泥沙^[9]。我国南方的丘陵农业区,占流域面积 4.9% 的多水塘系统即能够截留、去除 95% 以上来自村庄和农田的氮、磷等营养物质^[10-12]。

横岗水库周长为 22.4 km,兴建 20 m 宽的条带状植被过滤带需要 44.8 hm^2 ;假设兴建植被过滤带对非点源的截污氮、磷的截污能力均为 40%(按照保守估计),则植被过滤带的截污率为 $x_6/44.8 \times 50\%$ 。湿地系统的处理效果与容积相关,当一次暴雨所产生的径流能够被湿地系统全部收集,则其去除率为径流产生的污染物的 90%(按照保守估计)。根据气象资料统计,当地单次暴雨的降雨强度平均为 77.3 mm/h,单次暴雨平均历时 1 h。通常湿地具有一定的积水量,按照 0.3 m 深度的蓄水能力进行计算,要全部收集单次暴雨形成的径流需要整个流域

面积 5.96%(即 265.9 hm^2)的湿地系统,则实际湿地的污染物去除率为 $x_7/265.9 \times 90\%$ 。

COD_{Cr} 的环境容量较大,经过点源治理后,除去点源环境容量外的剩余非点源的环境容量较高,在此不考虑 COD_{Cr} 环境容量约束的情况。非点源先经过湿地处理后,再经过植被过滤带,因此先计算湿地削减量,然后计算余下污染物被草地的截除量。污染物 TN、TP 产生量分别 A_1 、 A_2 ,污染物 TN、TP 削减量分别为 A_3 、 A_4 。

$$A_1 = 9.83x_1 + 44.54x_2 + 85.16x_3 + 33.34x_4 + 9.69x_5 + 4.31x_6 + 15.61x_8 + 15.61x_9 + 27.07x_{10}$$

$$A_2 = 0.64x_1 + 2.07x_2 + 5.43x_3 + 1.87x_4 + 1.05x_5 + 0.13x_6 + 1.50x_8 + 1.50x_9 + 4.20x_{10}$$

$$A_3 = 0.90A_2x_7/265.9 + 0.1A_2 \times 0.4x_6/44.8$$

$$A_4 = 0.90A_3x_7/265.9 + 0.1A_3 \times 0.4x_6/44.8$$

TN、TP 的约束方程中含有变量的 2 次方,属于非线性规划,给方程求解带来困难。考虑到在类型变化较小的情况下,非点源污染物的产生总量变化不大,因此,污染物排放量以现状污染物产生量计算。当求解所得污染物排放量在环境容量以内,则表明达到最优,否则以求解得出污染物产生量,重新计算草地和湿地的污染物消除量,求解线性规划,直到所得污染物排放量在环境容量以内。现状情况下,非点源污染物的排放总量为 TN 为 172.65 t/a,TP 为 9.89 t/a。

因此,总氮总量控制约束方程:

$$9.83x_1 + 44.54x_2 + 85.16x_3 + 33.34x_4 + 9.69x_5 - 3847.48x_6 - 616.52x_7 + 15.61x_8 + 15.61x_9 + 27.07x_{10} \leq 43690$$

$$0.64x_1 + 2.07x_2 + 5.43x_3 + 1.87x_4 + 1.05x_5 - 220.63x_6 - 35.33x_7 + 1.50x_8 + 1.50x_9 + 4.20x_{10} \leq 3500$$

d. 技术约束。根据植被过滤带和湿地的处理特性来看,在只控制氮磷污染物时植被过滤带的宽度不需超过 10 m,即总面积不超过 22.4 hm^2 ;湿地的水域面积按照收集一次暴雨径流量来计算也只需要流域面积的 5.96%,即总面积不超过 265.9 hm^2 。因此,技术约束方程:

$$x_6 \leq 22.4 \quad x_7 \leq 265.9$$

e. 政策约束。根据国家政策,农田保护区不允许占用,林业用地由于地势较高、坡度较大,改变用地类型将导致严重的水土流失和植被破坏,因此,农田保护区和林业用地面积不允许减少。水库周边工业总产值增长率平均 5%,工业园的面积增长率小于该值,在此确定为 1.5% ~ 3%,20 a 后其值在 174.82 ~ 234.43 hm^2 之间。人口增长比例为 1.5%,居民用地增长率确定为 1% ~ 1.5% 之间,则 20 a 后

其值在 144.84 ~ 159.87 hm² 之间 ,工矿用地目前为 356.8 hm² ,将其转化为农业用地成本较高 ,因此至少要保持该用地面积。约束方程 :

$$x_1 \geq 313.3 ; x_4 \geq 218.2 ; 174.82 \leq x_8 \leq 234.43 ; x_9 \geq 356.8 ; 144.84 \leq x_{10} \leq 159.87 ;$$

线性规划方程组 :

目标函数

$$\max(Z) = 1.55x_1 + 3.05x_2 + 3.04x_3 + 1.24x_4 + 0.82x_6 + 4.83x_7 + 21.6x_8 + 3.0x_9$$

约束条件

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10} = 4034.38$$

$$9.83x_1 + 44.54x_2 + 85.16x_3 + 33.34x_4 + 9.69x_5 - 1508.8x_6 - 584.37x_7 + 15.61x_8 + 15.61x_9 + 27.07x_{10} \leq 43690 ;$$

$$0.64x_1 + 2.07x_2 + 5.43x_3 + 1.87x_4 + 1.05x_5 - 82.87x_6 - 15.88x_7 + 1.50x_8 + 1.50x_9 + 4.20x_{10} \leq 3500 ;$$

$$x_1 \geq 313.3 \quad x_4 \geq 218.2 \quad x_6 \leq 22.4 \\ x_7 \leq 265.9 \quad 174.82 \leq x_8 \leq 234.43 \quad x_9 \geq 356.8 \\ 144.84 \leq x_{10} \leq 159.87$$

$$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10} \geq 0$$

按照单纯行法 ,可以解出上述线性方程组

$$x_1 = 313.30 ; x_2 = 2502.91 ; x_3 = 0.00 ; x_4 = 218.20 ; \\ x_5 = 0.00 ; x_6 = 0.00 ; x_7 = 265.90 ; x_8 = 223.43 ; \\ x_9 = 365.80 ; x_{10} = 144.84 ; Z = 15498.50 \text{ 万元}$$

这种情况下污染物产生量 ,总氮 :138.658 t/a ;总磷 :7.14 t/a ;经过湿地处理后总氮和总磷的排放量分别为 13.87 t/a、0.714 t/a ,非点源污染物的排放量在环境容量之内 ,规划结果达到最优。

2.3.2 用地规划成果

从规划求解结果来看 ,规划期一般耕地、未利用土地和草地的面积均为 0 hm² ,园地、湿地和工业园的面积达到最大值分别为 2502.91 hm²、265.90 hm²和 234.43 hm² ;林地、工矿用的和居民用地分别为最小值 ,流域内林地、园地、一般耕地、农田保护区、未利用土地、草地、湿地、工业园、工矿用地、居民用地所占比例分别为 7.77%、62.04%、0.00%、5.41%、0.00%、0.00%、6.59%、5.54%、9.07%。

横岗水库流域内林地处于坡度较大、地势较高的丘陵 ,其面积和位置应位置现状不变。流域内园地主要位于水库周边地区 ,用于果林种植 ,规划期面积有所增加 ,应将部分靠近水库的一般耕地(主要用于蔬菜种植)转化为园地。湿地建在园地附近的地势较低处 ,用于收集地表径流 ,并可用于农业灌溉 ;在水库的径流入口处建造容量较高、面积较大的人

工湿地系统 ,作为地表径流的缓冲区。目前工矿用地大部分为房地产开发 ,部分居民小区与水库相隔较近 ,应在居民小区与水库的间隔地带种植林草地 ,并在低洼处建造湿地 ;在水库岸边合适地方可适当兴建植被过滤带。

3 结 论

从规划结果来看 :单位面积价值较高的用地类型如工业园、湿地和园地可适度发展 ,而单位面积产污量高而价值较低的一般耕地、未利用土地应有所减少。居民用地、工矿用地主要用于住房建设 ,其单位面积产污量较高 ,不宜发展过快。房地产开发虽然短期利益很高 ,但从长远生态和环境建设来看 ,应适度控制。草地植被过滤带具有一定的截污能力和生态效益 ,但均劣于湿地 ,进行污染物控制时 ,当湿地面积达到流域的 5.96% 时 ,只需结合湿地种植少量植被过滤带。湿地建造在农业用地周边的低洼出以及水库的入口处 ,在房地产用地与水库之间应种植少量植被过滤带。

参考文献 :

[1] 国家环境保护局. 2001 年中国环境状况公报[R]. 北京: 国家环境保护局, 2002.

[2] 陈红, 王声跃, 刘俊. 抚仙湖流域农业非点源污染控制研究[J]. 云南环境科学, 2002, 21(3): 27-29.

[3] 刘润堂, 许建中, 冯绍元, 等. 农业面源污染对湖泊水质影响的初步分析[J]. 中国水利, 2002(6): 54-57.

[4] 李贵宝, 尹澄清, 周怀东. 中国“三湖”的水环境问题和防治对策与管理[J]. 水问题论坛, 2001(3): 36-39.

[5] 陆雍森. 环境评价[M]. 2 版. 上海: 同济大学出版社, 1999.

[6] CONSTANZA R. The value of the world's ecosystem service and nature capita[J]. Nature, 2003, 22(4): 25-29.

[7] 李金昌. 生态价值论[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1999.

[8] MUSCUTT A D, HARRIS G L, BAILEY S W, et al. Buffer zones to improve water quality: a review of their potential use in UK agriculture Ag[J]. Ecosyst And Environ, 1993, 45: 59-77.

[9] UUSI-K M, BRASKERUD B, JANSSEN H, et al. Buffer zones and constructed wetlands as filters for agricultural phosphorus[J]. Envi-ron Qual, 2000, 29: 151-158.

[10] YAN W, YIN C, TANG H. Nutrient retention by multi-pond systems: mechanisms for the control of non-point source pollution[J]. Environ Qual, 1998, 27: 1009-1017.

[11] YIN C, ZHAO M, JIN W, et al. A multi-pond system as a protective zone for the management of lakes in China[J]. Hydrobiologia, 1993, 251: 321-329.

[12] 高超, 朱继业, 窦贻伦, 等. 基于非点源污染控制的景观格局优化方法与原则[J]. 生态学报, 2004, 1(24): 109-116.

(收稿日期: 2006-05-13 编辑: 高渭文)