

78-84

X524

# 西园隧洞引水工程对滇池 COD<sub>Mn</sub>的影响分析\*

李锦秀 刘树坤 李术军

(中国水利水电科学研究院水力学研究所,北京 100038)

**提 要** 本文在滇池湖流特性研究的基础上,建立了滇池平面二维 COD<sub>Mn</sub>输移扩散数学模型,利用模型对污染物进入滇池水体后的输移扩散规律进行模拟分析,对滇池周围西园隧洞引水工程等一系列污染控制工程措施对滇池主要污染指标 COD<sub>Mn</sub>的影响进行评价,为综合治理滇池提供了理论依据。

**关键词** 滇池, COD<sub>Mn</sub>, 数学模型, 西园隧洞, 环境效益

**分类号** Q948.12 P343.3

引水工程  
污染

当前,治理湖泊污染已成为世界各国共同关注的重大环境问题.治理措施基本可概括为生物措施、化学措施、物理措施、物理化学措施和水利工程措施.单靠生物、化学措施收效慢,一时难以改变滋生污染的环境,而控制污染源措施与水利工程措施并举,再辅以其它措施,可以改变不合理的格局,能够更快地达到治理污染的目的,因而普遍受到国内外的关注.美国的华盛顿湖、日本的琵琶湖、杭州的西湖均采用工程措施治山治水、清污分流、调整改变水流流向、加速水的流动和换水周期,获得了较大的环境效益.

滇池的西园隧洞引水工程也属水利环境工程,它既可增加滇池的出流量,提高滇池的防洪能力,又可加快滇池的换水周期,使严重污染的草海污水不再流向外海,直接由西园隧洞排走,从而保护了滇池主体——外海不受污染.该项工程已经完工,并正式投入使用,但由于到目前为止,尚未对工程的环境效益作深入的评价,人们对它的认识分歧较大.西园隧洞引水后,对滇池水质的影响如何,这是社会各界人士关注和争论的焦点,作者选取主要污染指标 COD<sub>Mn</sub>,采用数值模拟的方法,较全面地模拟分析了西园工程实施后对滇池水质的影响.

## 1 滇池水污染概况和西园隧洞工程简介

### 1.1 滇池水污染概况

滇池位于昆明市下游,它既是昆明市的主要水源地,又是昆明市生活污水和工业废水的主要排放地.再加上湖周的面源污染,滇池的有机污染及富营养化十分严重.尤其是草海,因靠近城区,受纳大部分城市生活污水及工业废水,湖水常年为黑色,有大量水葫芦生长.

目前滇池入湖河道有二十余条,呈向心状注入湖区,而出口只有一条海口河,且位于外海西南岸(图1).湖内水流较缓,流速为 cm/s 量级.这种水流特征与污染源的分布极不适应,主要表现在以下几方面:

- (1) 出流集中于外海,而外海单位面积上的污染负荷远小于草海,相应水质优于草海,造成出流浓度小于入流浓度,即所谓的“蓄浑排清”,使水体水质不断恶化;
- (2) 湖流流速较小,加

\* 收稿日期,1997-01-20,收到修改稿日期,1997-09-17. 李锦秀,女,1965年生,高级工程师.

之流程长的特点不利于污染的输出,污染物在湖区的滞留时间长;(3)汛期来临时,洪水会使大量草海极度污染的湖水流入外海,这使草海成为外海水水质不断恶化的潜在威胁,并对城市用水造成严重影响。

### 1.2 西园隧洞引水工程及其配套工程概况

针对目前滇池严重的水污染现状,以及现有不合理的水体出纳与污染源分布格局,云南省、昆明市两级政府投资兴建了滇池防洪保护及污水资源化一期工程,具体包括:

(1) 在草海西南岸新建西园隧洞引水工程,以增加滇池出流量,提高滇池防洪标准,同时在草海与外海连接处兴建节制闸和船闸(图 1),控制草海污水不流向外海,而到汛期,又可使外海相对较清洁的湖水注入草海,再由西园隧洞排走,从而缩短污染物在湖区的滞留时间. 节制闸最大过流量为  $36\text{m}^3/\text{s}$ ;西园隧洞最大过流量为  $40\text{m}^3/\text{s}$ .

(2) 在昆明城区已投资兴建了四个污水处理厂,用来处理昆明市的生活污水和工业废水,到 2000 年,昆明市的设计污水处理率达 60.65%。为了更大程度地减轻滇池主体——外海的污染负荷,云南地方政府还在规划兴建滇池北部的截污工程,将外海的主要污染源大清河污水经管道导入污水处理厂,再排入草海。

该项目的主体工程是西园隧洞工程,人们对其争议较大. 本文选取有机污染指标 COD<sub>Mn</sub>代表水质指标,以西园隧洞主体工程为重点,采用数学模型预测了西园隧洞等主要污染控制措施实施后对滇池水质的影响。

## 2 滇池 COD<sub>Mn</sub>水质数学模型

### 2.1 基本方程

作者等曾建立了滇池平面二维湖流模型,对滇池的水流特性进行了较深入的研究<sup>[1,2]</sup>,本文在湖流研究的基础上,建立相应的滇池平面二维 COD<sub>Mn</sub>水质模型. 基本方程为:

$$\frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial(UC)}{\partial x} + \frac{\partial(VC)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K_x h \frac{\partial C}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K_y h \frac{\partial C}{\partial y} \right] + S + \lambda \cdot h \cdot C \quad (1)$$

式中,  $h$  为水深(m);  $C$  为浓度( $\text{g}/\text{m}^3$ );  $U$  为横向单宽流量( $\text{m}^2/\text{s}$ );  $V$  为纵向单宽流量( $\text{m}^2/\text{s}$ );  $K_x, K_y$  分别为为横向和纵向扩散系数( $\text{m}^2/\text{s}$ );  $S$  为污染源(汇)项( $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ );  $\lambda$  为衰减系数( $1/\text{s}$ ).

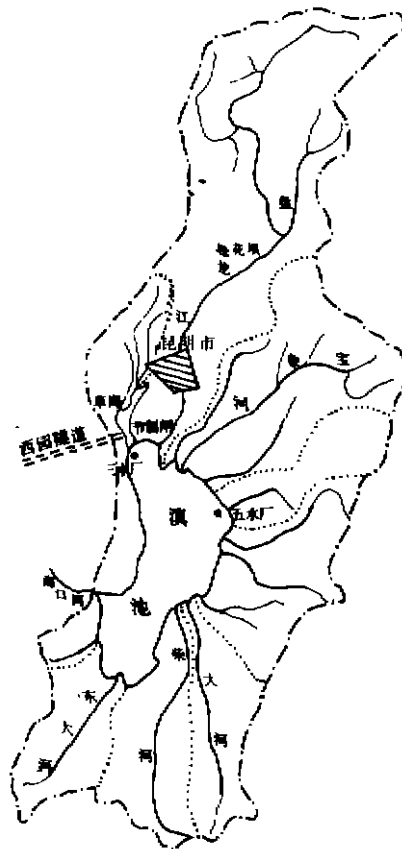


图 1 滇池水系及一些工程措施布置图

Fig. 1 Sketch map of water system and some projects layout in Dianchi lake

用  $500\text{m} \times 500\text{m}$  的正方形网格概化计算区域, 模型计算采用显式有限差分法, 对流项采用迎风格式, 扩散项采用中心差分, 计算网格采用交错布置, 浓度  $C$  计算结点在时间与空间上与水深  $h$  相重合。

## 2.2 水质模型的标定与验证

### 2.2.1 模型参数的选取

(1) 扩散系统  $K_x, K_y$ : 一般认为, 湖泊中的扩散以紊动扩散为主。关于紊动扩散系数计算的经验公式很多, Lerman<sup>[3]</sup>认为, 水平紊动扩散系数的量级一般在  $0.01-100\text{m}^2/\text{s}$  之间, 紊动扩散系数的选取与计算中所取的网格尺度有关, 他们提出如下公式<sup>[3]</sup>:  $K_x = K_y = 0.0056L^{1.3}$ , 其中,  $L$  为网格长度 (cm)。该公式曾在太湖水质模型<sup>①</sup>及其它水体中得到了广泛运用。对于滇池, 计算网格  $L=50000\text{cm}$ , 代入上式得  $K_x = K_y = 0.8\text{m}^2/\text{s}$ 。

(2) 综合衰减系数  $\lambda$ :  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的衰减系数与底泥释放、悬浮物的吸附沉降、浮游植物的生长速率等很多因素有关, 十分复杂。在现有资料缺乏、又无条件进行室内模拟试验时, 若参数引入太多, 不但不能提高模型模拟精度, 相反会给模型带来更多的不确定因素而降低精度。本次针对滇池现有条件, 将  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的多因素作用概化为一个综合的衰减系数, 再根据湖区 1988 年实测的  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  浓度资料, 利用模型对衰减系数进行率定。这也是确定水质模型参数较为常用的方法。最后确定的  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  综合衰减系数  $\lambda=0.025/\text{d}$ 。

2.2.2 模型验证 受时间和资料的限制, 选择 1993 年滇池实测的 6 次共 7 个代表点的浓度场资料及相应的水文气象资料, 对模型进行验证。各点误差在  $0.67\%-52\%$  之间, 且  $83\%$  的测点误差在  $10\%$  左右。从目前的水质模型研究现状来看, 水质模型的相对误差大体在  $25\%-50\%$  之间<sup>[4]</sup>。因此, 可以认为, 所建立的滇池  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  水质模型基本能反映出滇池水质污染的变化规律。

## 3 滇池污染物输移扩散规律模拟

分析历年滇池污染源监测资料可知, 排入湖中的主要污染源可归为以下 5 个片区: 草海北部河道, 大清河和盘龙江, 宝象河, 柴河和大河, 东大河。

假定湖中初始浓度场为 0, 各排污口  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  入湖强度均取  $500\text{g}/\text{s}$ , 相应水文气象资料组合为: 选取具有代表性的西南风风向, 平均风速  $3.8\text{m}/\text{s}$ , 和丰水期主要出、入湖河道的流量资料, 将计算所得的滇池稳态流场, 作为浓度场计算的基础, 计算时段均取为一个月, 最后计算得各排污口单独作用下对滇池重点水域水质的影响值 (表 1)。

表 1 滇池五个主要排放口对滇池  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  浓度的影响值 单位:  $\text{mg}/\text{L}$

Tab. 1 The impact of five main pollutant sources on the  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  concentrations in Dianchi Lake

排污口	草海中心	三水厂	五水厂	外海中心	海口
草海北部	13.77	4.36	0.68	0.56	0.63
盘龙江	3.30	2.89	0.93	0.75	0.92
宝象河	2.06	1.97	1.12	0.82	1.00
柴河和大河	1.29	1.25	1.15	0.88	1.12
东大河	0.67	0.70	0.74	0.57	1.87

① 宿俊山等. 太湖水质模型研究及浓度场计算. 中国水利水电科学研究院研究报告, 1991.

可以看出,(1)草海排污口附近因流速小,污染物输移扩散慢,且该水域水浅,因而排污口附近 COD<sub>Mn</sub>浓度相对其他排污口为最大,达 32.85mg/L,草海污染物向外海输移扩散,对第三自来水厂水源地水质影响最大,(2)盘龙江排污口流速度较草海北部明显增大,排污口附近浓度相应减小,最大值为 6.0mg/L,该处水流由南向北沿逆时针环流流动,因而盘龙江排污口对第三自来水厂影响较大,对第五自来水厂也有一定影响,(3)宝象河口门处水流速度又较盘龙江大,水深也加大,排污口附近最大浓度减小为 2.79mg/L,水流由北向西南流动,污染物排入湖中输移较快,(4)柴河和大河排污口处湖流速度最大,水流由北向南运动,污染物排入湖中后很快影响到第五自来水厂,对外海中心水质影响最大,口门附近水域最大浓度仅为 1.27mg/L;(5)东大河排污口门附近水域流态较复杂,污染物排入湖中后对滇池南部水域的水质影响较大。昆明市两个自来水厂受各排污口的影响程度由大到小依次排列如下,三水厂;草海、盘龙江、宝象河、柴河和大河、东大河;五水厂;柴河和大河、宝象河、盘龙江、东大河、草海。

以上计算假定各排污口的污染物排放强度相同的条件下,对污染物进入滇池水体后的运动规律进行研究。实际上草海北部排污口集中了昆明市约 46%的生活污水和工业废水,如按表 1 的结果判断,草海对外海水质尤其是外海北部水质的影响是非常大的。

## 4 滇池 COD<sub>Mn</sub>浓度预测分析

### 4.1 预测条件和预测方案

**4.1.1 代表水文气象资料的组合** 水质预测中分别考虑丰水年的丰水期、平水年的平水期、枯水年的枯水期作为水质预测的三种水文条件,再根据昆明市多年气象观测资料,统计得各水期的主导风向均为西南风,丰、平、枯三个水期的多年平均风速分别为 1.5m/s、2.2m/s、2.8m/s,将水文气象资料组合成三种计算工况:

**4.1.2 工程措施** 水质预测分有工程措施与无工程措施,无工程措施时,草海与外海连通,海口河为滇池的唯一出水口。有工程措施时考虑两种情况:

工程 1:仅考虑污水处理厂的作用,四个污水处理厂按设计能力投入正常运转,草海与外海仍然连通,四个污水处理厂位于滇池北部,只对点源的污水进行处理。

工程 2<sup>①</sup>:在污水处理厂正常运转的同时,增加西园隧洞的引水分流,草海与外海将被节制闸分隔为两个相对独立的水体。草海水体不再流向外海,并根据需要由人工控制实施外海向草海分流,大清河污水经污水处理厂处理后经截污管道排入草海。计算污染负荷时,经过污水处理厂处理的按设计出水水质计算,未经处理的按设计进水水质计算。

考虑水文气象条件与工程措施的组合,最后进行九种工况的水质预测,基本能反映滇池的水质极端状态。

**4.1.3 入湖污染负荷** 以 2000 年为预测水平年,到 2000 年,假定面源不变,点源增长根据《昆明市排水总体规划报告》<sup>②</sup>来确定。

**4.1.4 基础年** 选择 1994 年为预测基准年,1994 年滇池 COD<sub>Mn</sub>监测结果为,草海平均 16.2mg/L,外海平均 8.81mg/L。

<sup>①</sup> 昆明市水利水电勘测设计院等.滇池防洪保护及污水资源化工程第一期工程初步设计报告综合说明,1993.

<sup>②</sup> 昆明市环境保护科学研究所.滇池污水资源化工程可行性研究报告(二期工程)附件 4.环境影响报告书,1993.

## 4.2 水质预测及预测结果分析

首先根据各工况的水文气象资料,利用文献<sup>[1,2]</sup>的平面二维湖流模型,计算出各种条件下的稳态流场,以此为基础,再根据相应水文条件的  $COD_{Mn}$  入湖强度,利用水质模型进行水质预测.滇池在恒定流场及污染源作用下,水质模拟计算约需 13 个月左右时间达到动态平衡.将稳定时刻的浓度场代表 2000 年的水质状况.预测结果见表 2、表 3 和图 2、图 3(选两种预测工况为代表).有关西园隧洞引水后对滇池水流流态的影响将另外作论述.

表 2 2000 年各方案预测的  $COD_{Mn}$  浓度

单位:mg/L

Tab. 2 Predicted  $COD_{Mn}$  concentrations under different conditions in 2000 year

预 测 工 况		草 海 平 均	外 海 平 均	三 水 厂	五 水 厂
枯水年枯水期	无工程	22.14	12.85	23.80	10.06
	工程 1	17.76	10.98	17.90	9.37
	工程 2	20.43	7.88	13.19	7.11
平水年平水期	无工程	18.27	9.08	20.50	8.85
	工程 1	12.92	8.51	14.67	8.23
	工程 2	9.35	7.26	5.73	6.89
丰水年丰水期	无工程	20.04	8.69	17.16	8.84
	工程 1	17.34	7.95	15.15	8.50
	工程 2	16.24	5.34	6.72	5.19

表 3 2000 年工程 1 与工程 2 分别实施后与无工程相比滇池  $COD_{Mn}$  浓度下降率(%)Tab. 3 The decrease rate (%) of  $COD_{Mn}$  concentrations between the conditions of Project1 or Project2 and without project in 2000 year

特征年	草 海 平 均		外 海 平 均		三 水 厂		五 水 厂	
	工程 1	工程 2	工程 1	工程 2	工程 1	工程 2	工程 1	工程 2
枯水年枯水期	19.87	9.67	14.55	38.68	24.79	44.58	6.85	29.32
平水年平水期	29.28	48.82	6.27	20.04	38.36	72.05	7.00	22.14
丰水年丰水期	13.47	19.91	8.51	38.55	13.90	61.84	3.80	41.29

分析表 2、表 3 中的结果,除枯水年枯水期草海的  $COD_{Mn}$  浓度值异常外,其余工况下,工程 2 作用下的滇池  $COD_{Mn}$  浓度值均比工程 1 作用下要小,说明西园隧洞引水工程对改善滇池水质的作用是明显的.

在工程 2 条件下,外海大清河的污水将经污水处理厂处理后截流进入草海,由于大清河的污水量较大、浓度高,草海的  $COD_{Mn}$  污染负荷将比工程 1 条件下有所增加(但比无工程措施条件下小).又由于大清河的污水属生活污水,在不同年份其污水量认为是不变的(地方统计资料).因此,对于草海而言,大清河排入草海的  $COD_{Mn}$  后,在枯水年枯水期所增加的  $COD_{Mn}$  负荷百分量比在平水年平水期及丰水年丰水期要大得多.又由于在工程 2 条件下,除枯水年枯水期,外海水流不向草海分流外,在平水年平水期及丰水年丰水期,外海均有一定量水流需向草海分流,这部分相对于草海较清洁的水流而言,对草海水质有一定的稀释作用.因此,导致仅枯水年枯水期,工程 2 条件下草海  $COD_{Mn}$  浓度值比工程 1 条件下的浓度值高.

若以 GB3838-88 为标准,表 3 的  $COD_{Mn}$  模拟预测结果为:

(1) 若无工程措施,到 2000 年,草海  $COD_{Mn}$  平均值远超过五级水标准,外海  $COD_{Mn}$  平均值

也接近五级水标准.重点水源地三水厂处的 COD<sub>Mn</sub>值超过五级水,五水厂处的 COD<sub>Mn</sub>值在四级到五级水之间.滇池水质污染十分严重.

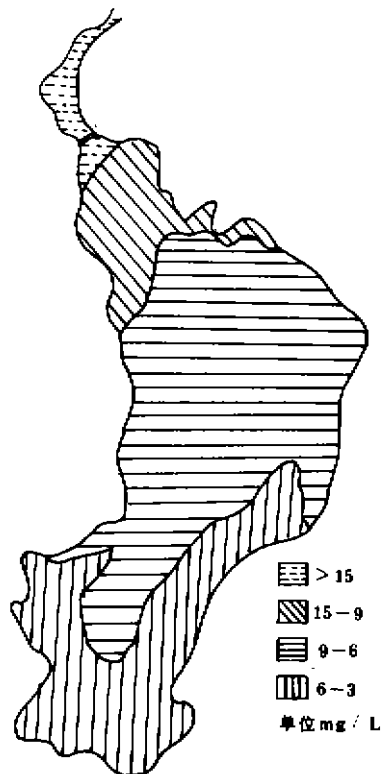


图2 预测 2000 滇池 COD<sub>Mn</sub>浓度分布  
(无工程+枯水年枯水期+西南风)  
Fig. 2 Simulated COD<sub>Mn</sub> concentration  
distribution of Dianchi Lake in  
2000 year under condition of dry year,  
SW wind and without project

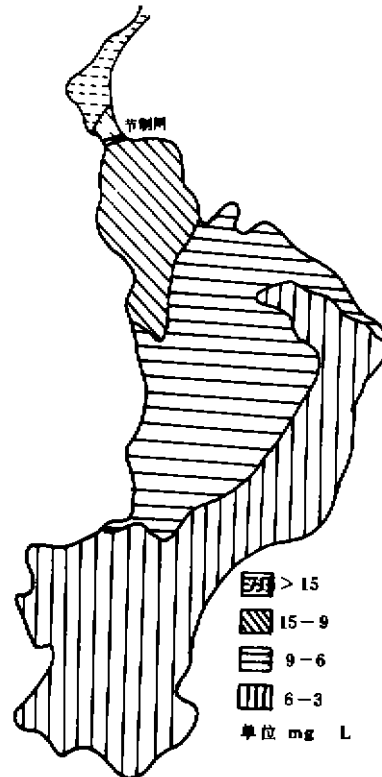


图3 预测 2000 年滇池 COD<sub>Mn</sub>浓度分布  
(工程 2+枯水年枯水期+西南风)  
Fig. 3 Simulated COD<sub>Mn</sub> concentration  
distribution of Dianchi Lake  
in 2000 year under condition of  
project2, dry year and SW wind

(2) 如果仅上污水处理厂,不考虑其它工程措施,与无工程措施相比,草海 COD<sub>Mn</sub>浓度有一定的下降,而外海的下降幅度很小.到 2000 年滇池以 COD<sub>Mn</sub>为代表的总体水质状况仍与无工程措施的水质属同一等级.

(3) 如果西园隧洞引水工程与污水处理厂及大清河截污改排工程同时发挥作用,滇池水质将有明显好转,与无工程措施相比:① 对于外海,因草海污水和大清河污水不再排入外海,到 2000 年以 COD<sub>Mn</sub>为代表指标的水质状态将改善为三—四级水,外海平均 COD<sub>Mn</sub>浓度的下降率为 20%—40%.滇池重要水源地的 COD<sub>Mn</sub>浓度值也有较大幅度的下降,三水厂处的 COD<sub>Mn</sub>浓度下降率为 45%—61.5%,五水厂处的 COD<sub>Mn</sub>浓度下降率为 29.3%—41.3%.② 对于草海,接纳大清河污水,考虑污水处理厂的处理率后,草海污染负荷仍有增加,但污染物排放浓度则有所下降,水体改由西园隧洞外排.到 2000 年,草海 COD<sub>Mn</sub>浓度也有一定幅度的下降.

下降率为 10%—49%。由于草海水质污染十分严重,降低后的  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  浓度值仍超过五级水标  
准值。

## 5 结论与建议

以上研究成果表明,滇池水体内污染物的输移扩散规律与水流流态关系较密切,草海污水  
对外海水质影响较大。西园隧洞引水工程的实施,将大大减少污染物在湖区的沉积量及扩散范  
围。污水处理工程及大清河截污改排工程的配套实施,使草海与外海的水质得到更为明显的改  
善,尤其是对改善滇池主体外海的水质,西园隧洞工程的作用是其它工程所无法替代的。

滇池的水体污染经历了一个相当长的时期,滇池的污染治理也是一项长期的综合治理工  
程。西园隧洞引水工程和四个污水处理厂及大清河截污工程的实施,将使滇池水质明显好转。  
即便如此,滇池水质状态离《滇池保护条例》尚有一定距离。目前,滇池湖周围已建成的或即将  
建设的水利工程不少,如何充分发挥这些水利工程的调度功能,使其在满足水利工程本身使用  
要求的同时,能最大限度地发挥其环境功效,这也是需要开展研究的课题。

## 参 考 文 献

- 1 李畴秀等. 滇池水动力特性模拟分析. 见: 第三届全国计算水力学会议论文集, 成都: 成都科技大学出版社, 1996
- 2 李术军等. 西山遮挡对风生潮流影响的数值模拟研究. 湖泊科学, 1998, 10(1), 5—10
- 3 G L Bowie, *et al.* Rates, constants and kinetics formulation in surface water quality modeling. New York: John Wiley & Sons Inc, 1983
- 4 R V Thoman. Verification of water quality models. ASCE, Joun Eng Div. 1982

## The Simulating and Analyzing of the Effects of the Project Xiyuan Tunnel on the $\text{COD}_{\text{Mn}}$ Concentrations in Dianchi Lake

Li Jinxiu Liu Shukun Li Shujun

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038)

### Abstract

Based on the previons study of the hydrodynamics of Dianchi Lake, a 2D  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  water  
quality model was built up in this paper. By the model, the transport and the dispersion of  
effluents in Dianchi Lake were simulated and analyzed, and the environmental effects of the  
Xiyuan Tunnel Project etc. on the  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  concentrations in Dianchi Lake were evaluated.  
The results of research are conducive to the water pollution control of Dianchi Lake.

**Key Words** Dianchi Lake,  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  model, Xiyuan Tunnel Project, environmental effect