

## 滇池流域水污染特征(1988—2014年)及防治对策\*

徐晓梅, 吴雪, 何佳\*\*, 王丽, 张英, 杨艳, 陈云波, 叶海云  
(昆明市环境科学研究院, 昆明 650032)

**摘要:** 为明确滇池流域水污染特征并提出有针对性的污染控制对策, 对流域污染变化规律及其组成和空间分布特征进行分析。研究表明, 近二三十年, 滇池流域点源污染负荷的产生量和削减量显著增加, 入湖量有所削减; 城市面源入湖量随建成区面积的扩张而持续上升; 农业面源入湖量在 1990s 出现峰值, 随后下降。目前, 滇池流域化学需氧量主要来源于城市面源; 总氮主要来自污水处理厂尾水; 总磷主要来自农业面源和未收集的点源; 各控制单元入湖污染负荷已基本演变为以未收集的点源和城市面源为主。针对流域目前存在的问题, 应继续坚持点源污染治理, 高度重视城市面源污染治理, 加强农业面源治理, 进一步完善流域截污治污体系, 为滇池水质改善创造条件。

**关键词:** 滇池流域; 污染特征; 组成; 空间分布; 问题; 对策

## Research on the pollution characteristics of Dianchi watershed (1988–2014) and identification of countermeasures

XU Xiaomei, WU Xue, HE Jia\*\*, WANG Li, ZHANG Ying, YANG Yan, CHEN Yunbo & YE Haiyun  
(*Kunming Institute of Environmental Science, Kunming 650032, P.R.China*)

**Abstract:** In order to understand the pollution characteristics of Dianchi watershed and to propose targeted countermeasures, the study investigated the variation of pollutant load into Lake Dianchi as well as the composition and spatial distribution characteristics. The result showed that the generated and reduced amounts of point source pollutant increased continually during 1988 and 2014, and the discharged amount was decreased. The pollutant load of urban non-point source grew as a result of the expansion of built-up areas. The pollutant load of agricultural non-point source peaked in the 1990s and then decreased. In the Dianchi watershed, COD was mainly from urban non-point source, total nitrogen was mainly from effluent of wastewater treatment plants, and total phosphorus was mainly from agriculture non-point source and point source but without the pollutant collection. Urban non-point source and non-collected point source had become the main sources of pollutants for most watershed sections. To solve the pollution problems of the Dianchi watershed, the local government should persist in point-source control, pay high attention to urban non-point source control and make good effort in agriculture non-point source control, so as to build a sound pollutant collection and treatment system.

**Keywords:** Dianchi watershed; pollution characteristics; composition; spatial distribution; problems; countermeasures

滇池是我国“三河三湖”治理的难点, 连续 4 个“五年”被列入国家重点流域规划。经过多年综合治理, 滇池水体水质明显改善, 周边环境明显改观<sup>[1]</sup>。但是, 滇池水环境保护依旧形式严峻: 水质改善压力巨大, 水资源缺乏<sup>[1]</sup>, 生态系统退化<sup>[2]</sup>, 治理成效与公众期望仍有较大差距。入湖污染负荷超过水环境承载力是滇池流域水污染的主要原因之一<sup>[3-4]</sup>。对滇池流域污染特征进行深入分析, 是构筑滇池流域完善的控源截污体系的基础。然而, 现阶段对滇池流域污染特征的研究, 多从水质响应入手<sup>[5-6]</sup>, 或是仅针对部分污染源<sup>[7]</sup>, 却鲜有从组成和空间上全面分析入湖污染负荷特征及变化趋势的研究。本研究针对不同污染源采用不同的调查评价方法, 系统分析了滇池流域污染特征, 提出了完善流域治污体系的对策, 研究成果对于滇池流域基础数

\* 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07102)资助。2015-07-13 收稿; 2015-09-22 收修改稿。徐晓梅(1965~), 女, 高级工程师; E-mail: deszxb@163.com。

\*\* 通信作者; E-mail: hj19830204@163.com。

据的积累和流域管理措施的探索有一定的意义。

## 1 研究方法 with 数据资料

### 1.1 点污染源核算

点源是以点状形式排放污染物而使水体污染的发生源,主要包括生活源和企业源<sup>[8]</sup>。其中企业污染源包括工业和第三产业,其产生量采用昆明市环境统计数据 and 污染源普查数据确定<sup>[9]</sup>。生活污染源产生量采用经验排污系数法核算<sup>[10]</sup>,计算公式为:

$$W = POP_u \cdot \alpha \quad (1)$$

式中, $W$  是居民生活污染物产生量; $POP_u$  是居民人口数,来自昆明市及下属各县区统计年鉴; $\alpha$  是城镇居民人均生活污水排放量,参考《第一次全国污染源普查城镇生活源排污系数手册》以及水专项调查结果确定,所采用排放系数(表 1)与高伟等的研究结果相似<sup>[9]</sup>。

表 1 滇池流域城镇居民人均生活污水排放系数

Tab.1 The per capita domestic sewage discharge coefficient of urban residents in Dianchi watershed

分类	污水量/(L/(人·d))	化学需氧量 COD/(g/(人·d))	总氮 TN/(g/(人·d))	总磷 TP/(g/(人·d))
城市	220	60.9	12.26	1.02
集镇	135	30.0	7.04	0.46

点源污染负荷削减量采用污水处理厂进出水水质监测数据核算。点源产生量与削减量的差值,即为点源入湖量。

### 1.2 面污染源核算

面源是指在水体的集水面上因降雨冲刷形成污染径流而使水体污染的发生源,可以分为城市面源和农业面源<sup>[8]</sup>。

城市面源污染主要来自于降雨径流对累积在城市不透水下垫面上的污染物冲刷作用,城市面源核算方法为输出系数模型法<sup>[11]</sup>,根据公式(2)进行估算:

$$L = 0.001EMC_i \cdot R \cdot A \cdot P \quad (2)$$

式中, $EMC_i$  为第  $i$  种下垫面的降雨径流事件平均浓度(mg/L),通过对滇池流域 3 种不同下垫面,即屋顶、庭院和道路的 5 场降雨水质样品的检测得到<sup>[11]</sup>;  $R$  为年径流系数,无量纲;  $P$  为降雨量(mm),数据来自昆明市气象局;  $A$  为集水区面积(km<sup>2</sup>),通过遥感卫星影像图解译和 GIS 空间分析技术获取不同年份滇池流域建成区面积及分布情况。

农业面源主要包括农业生产过程中施用化肥的流失和农田废弃物中氮、磷元素的流失以及农村散养牲畜粪便流失导致的污染。农业面源用流失系数法和排放系数法计算<sup>[12]</sup>。化肥施用带来的农业面源用各县区统计年鉴中的农田化肥施用量和化肥折纯流失系数计算。农田固体废弃物通过耕地面积和农业生产植物残体产生系数以及固废中各类污染物占植物残体的比例计算。牲畜粪便通过统计年鉴中的各县区牲畜饲养量和畜禽养殖污染排放系数计算。农业面源的相关计算参数来源于《滇池流域水污染防治“十二五”规划研究报告》<sup>[12]</sup>,其中 TN 和 TP 农田化肥施用(折纯)量流失系数分别为 0.10 和 0.05 t/折纯量 t;农业生产植物残体的产生量为 1000 kg/(亩·年)<sup>①</sup>,TN 和 TP 占植物残体的比例分别为 0.39% 和 0.05%;畜禽粪便产污排放系数见表 2。

### 1.3 污染负荷组成及空间分布

从污染负荷的组成来看,滇池流域入湖污染物主要由尾水负荷、未收集的点源、农业面源和城市面源构成。其中尾水负荷来自流域内污水处理厂处理后达标排放的污水,采用污水处理厂运行数据核算。未收集的点源即为城镇生活污染源和企业污染源产生量与收集量之差,其核算借鉴徐晓梅等的方法<sup>[13]</sup>,结合流域污

① 1 亩=0.666667 hm<sup>2</sup>

表2 滇池流域畜禽粪便产污排放系数  
Tab.2 The discharge coefficient from livestock in Dianchi watershed

畜禽	粪便/(g/(头·d))	尿液/(g/(头·d))	COD/(g/(头·d))	TN/(g/(头·d))	TP/(g/(头·d))	饲养周期/d
猪	2	15	90	5.7	2	199
大牲畜	15	10	665	42.6	15.5	365
家禽	0.12	—	2	0.3	0.1	210
羊	1.23	0.62	12.0	3.1	1.1	199

污染源普查数据进行. 为分析随着流域社会经济发展和治理措施推进情况下污染负荷组成的变化情况, 选择1988、2005、2014年为代表年进行分析.

滇池流域面积 2920 km<sup>2</sup>, 包括昆明市五华、盘龙、官渡、西山、呈贡五区及晋宁县<sup>[1]</sup>. 流域土地利用结构复杂多样, 其中林地占 36%, 草地占 20%, 耕地占 25%, 城乡建设用地占 8%, 水域面积占 11%<sup>[12]</sup>. 根据《重点流域水污染防治规划(2011—2015年)》, 滇池流域除湖体外的陆域可分为 5 个控制单元(图 1), 即草海陆域、外海北岸、外海东岸、外海南岸和外海西岸<sup>[14]</sup>. 污染负荷空间分布分析时按照流域控制单元划分情况, 借助 GIS 空间分析技术核算各控制单元主要污染物分布情况. 同样, 以 1988、2005、2014 年为代表年, 分析污染负荷空间分布随时间的变化情况.

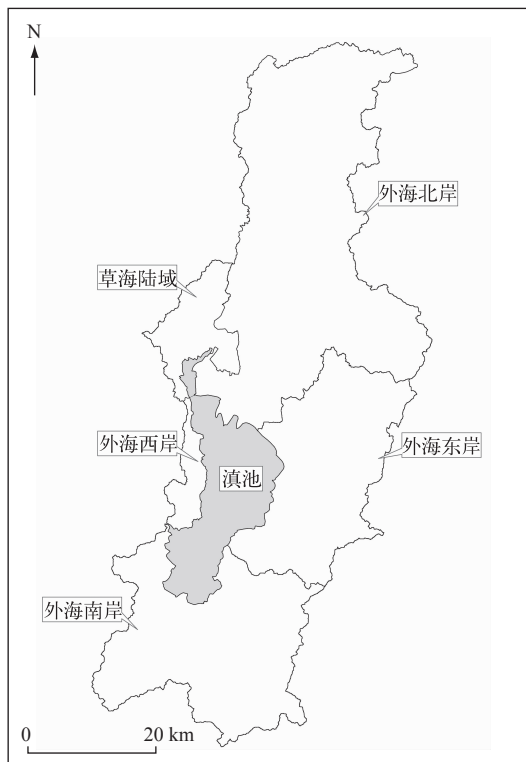


图1 滇池流域控制单元分区

Fig.1 Division of control units in Dianchi watershed

## 2 结果与分析

### 2.1 滇池流域点污染源现状及变化趋势

滇池流域是昆明市社会经济最发达、人口最密集的区域. 经核算, 2014 年, 滇池流域点源污水产生量达  $41367 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 污染负荷 COD、TN 和 TP 的产生量分别为 101578、16448 和 1760 t(图 2), 以生活源为主, 企业源仅占 20%. 1988—2014 年滇池流域点源污染产生总量呈持续上升趋势, 2014 年相对于 1988 年增长了 4~6 倍. 点源污染负荷产生量主要受人口、经济、人民生活习惯等因素影响. 1988—2014 年, 滇池流域人口数量从 173 万人<sup>[1]</sup>剧增至 377 万人, 增长了 1.2 倍; 滇池流域 GDP 从约 45 亿元<sup>[1]</sup>增长至 2960 亿元, 增长了 65 倍. 此外, 随着人民生活水平的提高, 1980s—1990s 洗衣机、抽水马桶及洗浴设施基本普及, 家庭生活用水量猛增<sup>[15]</sup>, 污水产生量随之增加.

为保护滇池水环境, 昆明市政府自 1991 年建成第一污水处理厂<sup>[16]</sup>. 截至 2014 年底, 建成并投运 13 座城镇污水处理厂, 总处理规模达到  $143.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 出水水质均达到一级 A 标准; 敷设 5569 km 市政排水管网, 早季的主城建成区的污水收集率达到 92%, 流域污水收集率达到 75%; 建成 97 km 环湖截污主干管渠及 10 座配套雨污混合污水处理厂, 处理规模为  $55.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ; 建成 17 座雨污调蓄

池, 可收集储存  $21.24 \times 10^4 \text{ m}^3$  雨污混合水, 减少了合流溢流排放. 随着昆明市污水收集处理系统的完善, 至 2014 年, 流域内点源污染负荷 COD、TN 和 TP 的削减量分别为 86151、11182 和 1407 t(图 2), 分别较 1993 年增加了 55、62 和 107 倍<sup>[17]</sup>.

滇池流域点源入湖污染负荷呈现波动变化. 在流域人口、经济持续增长的情况下,流域内污水收集处理能力不断提高,此外,1999年开展了“零点行动”,一批污染企业被关停,产业布局与结构不断优化,工业污染源得到有效控制<sup>[17]</sup>. 1988年以来,点源入湖污染负荷呈上升趋势,到20世纪末达到峰值,随后下降. 2014年滇池流域点源COD、TN和TP污染负荷入湖量为15427、5267和353 t,相对于2000年削减了26%~46%,相对于“十二五”初期(2010年)削减了7%~9%(图2). 从点源入湖污染负荷占产生量的比例看,2014年入湖COD、TN和TP污染负荷占产生量的比例分别为15%、32%和20%,相比1988年的100%下降了近80%. 可见,尽管污染负荷产生量在不断增加,但是滇池治理力度不断加大,既控制了点源增量,又削减了存量,点源入湖污染负荷占点源污染产生量的比例不断降低,点源污染控制成效显著.

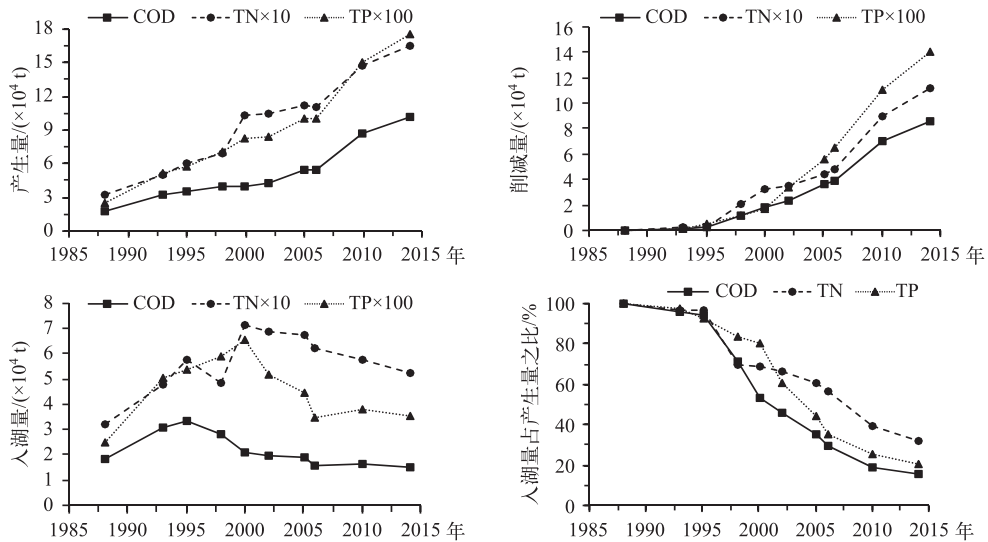


图2 1988—2014年滇池流域点源污染负荷产生量、削减量和入湖量变化趋势

Fig.2 The generated, reduced and discharged point source pollution load from Dianchi watershed from 1988 to 2014

## 2.2 滇池流域面污染源现状及变化趋势

从1988年以来,滇池流域农业面源入湖量先升后降,在1990s达到峰值. 2014年滇池流域农业面源COD、TN和TP污染负荷入湖量分别为1800、829和175 t,比1988年分别下降了39%、15%和34%,比2000年下降了48%、27%和44%(图3). 农业面源污染物入湖量受耕地面积、化肥施用量、产业结构以及畜禽养殖数量变化的影响,根据统计资料和实地调研,滇池流域内耕地面积逐年减少;1995年后,氮肥施用(折纯)量逐渐增加,但磷肥施用(折纯)量逐渐减少;畜禽养殖主要受市场影响而波动,但2009年,滇池流域实施“全面禁养”,流域内畜禽养殖数量呈缓慢下降趋势.

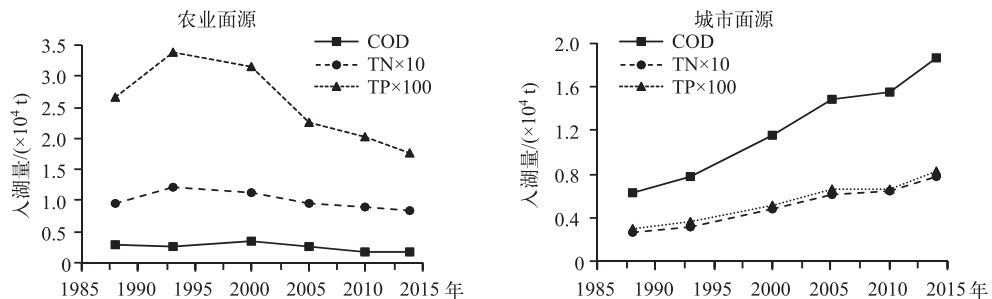


图3 1988—2014滇池流域面源污染负荷入湖量变化趋势

Fig.3 Discharge of non-point source pollutant load from Dianchi watershed from 1988 to 2014

1988—2014年间,滇池流域城市面源污染负荷排放量呈现持续上升的趋势. 2014年滇池流域城市面源COD、TN和TP污染负荷入湖量分别为18669、773和83 t,比1988年增加了近两倍(图3). 导致滇池流域城市面源污染的原因主要是建成区的扩张. 根据卫星影像图分析,自1980s起,随着昆明市的开发建设,滇池流域建成区面积迅速增长,1988—2014年,26年内滇池流域建成区面积从142.25 km<sup>2</sup>增加到371.12 km<sup>2</sup>,增长了1.6倍. 2014年屋顶、庭院和道路3种下垫面占比分别为33%、26%和13%,剩余28%的面积为绿地等其他用地类型.

### 2.3 滇池流域入湖污染负荷组成特征

1988年滇池流域无污水处理设施,流域内污水全部进入滇池. 入湖COD和TN主要来自于未收集的点源,分别占整个滇池流域入湖污染负荷总量的70%和74%;TP主要来自农业面源和未收集的点源,约占整个滇池流域TP入湖污染负荷总量的94%(图4).

2005年滇池流域昆明主城区建成第一至第六污水处理厂,污水处理能力达 $55.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ . 入湖COD主要来自于未收集的点源和城市面源,约占整个滇池流域COD入湖污染负荷总量的81%;TN和TP主要来自未收集的点源,分别占整个滇池流域TN、TP入湖污染负荷总量的58%和48%(图4).

2014年滇池流域污水处理能力达 $143.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,滇池流域污水收集处理率显著提高. 2014年入湖COD主要来自于城市面源,约占整个滇池流域COD入湖污染负荷总量的45%;TN主要来自尾水负荷,占整个滇池流域TN入湖污染负荷总量的54%;TP主要来自农业面源和未收集的点源,约占整个滇池流域TP入湖污染负荷总量的70%(图4).

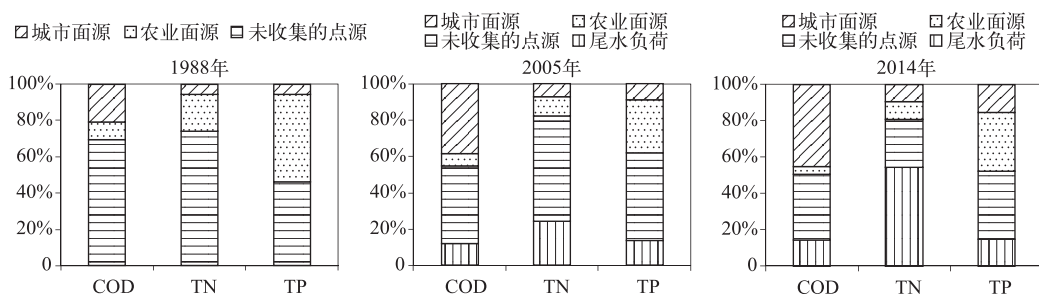


图4 1988、2005和2014年滇池流域污染负荷组成

Fig.4 Composition of pollutant load into Dianchi watershed in 1988, 2005 and 2014

可以看出,随着昆明主城以及呈贡新区和晋宁县城的快速发展,可透水的地表面积越来越小,降雨径流冲刷不透水地面产生的城市面源污染不容忽视. 2014年入湖的COD、TN和TP总量中,其城市面源污染物已分别占到45%、9%和15%,成为入湖污染的主要来源;近年来影响滇池考核的COD,城市污染贡献率相比1988年增长了一倍以上. 随着流域污水处理厂和管网的建设,流域内点源污水收集率大大提升,未收集的点源贡献的污染负荷逐渐减小,但是由于污水厂TN处理的技术瓶颈,来源于尾水负荷的TN占比有所增长.

### 2.4 滇池流域入湖污染负荷空间分布特征

草海陆域和外海北岸控制单元是昆明市主城区,区内人口密度和建成度高,点源污水收集率达到90%以上<sup>[14]</sup>. 由于历史原因,昆明主城排水系统基本依托河道沟渠形成,为合流制排水体制,雨季存在合流污水溢流污染. 草海陆域位于草海北部,是污染物汇入草海的唯一陆域单元;外海北岸位于外海北部,是外海主要的污染来源. 外海东岸是昆明市的新开发区——呈贡新城所在地. 随着呈贡新城的建设,污染负荷产生量将急剧增加. 新城区雨污分流排水系统目前尚不完善,存在污水收集系统建设与新城建设不同步、片区管网与河道截污管未有效衔接的问题. 另外,随着该区域内建成区的扩张,城市面源污染将不容忽视. 外海南岸主要位于晋宁县辖区,以农业人口为主,发展速度相对缓慢,是流域内农业面源污染的主要输入区域. 此外,昆阳镇、晋城镇等区域内主要集镇尚无系统的污水收集管网,污水收集处理率较低. 外海西岸控制单元主要涉及昆明市西山区,多为山地,地势陡峭. 受山地约束,面积最小. 区域内没有城镇分布,人口稀少,无工业污染源. 该区域内也没有较大的入湖河流,污染负荷通过散流入湖. 该区污染程度相对最轻,存在的主要问题

是生态环境退化.

从入湖污染负荷空间分布来看,草海陆域和外海北岸对滇池外源污染的贡献率最高,2014年该区域COD、TN、TP入湖量分别占到滇池流域入湖污染物总量的58%、70%和45%. 外海西岸污染程度较轻,2014年该区污染物入湖量约占滇池流域入湖污染物总量的2%~4%. COD和TN主要来源于外海北岸,分别占COD和TN总入湖量的41%和48%. TP主要来源于外海北岸和外海南岸,占TP总入湖量的64%. 从1988年与2014年的对比来看,外海北岸和草海陆域一直是滇池流域重污染区域,也是重点治理的控制单元,这2个区域对流域总体污染负荷的贡献呈下降趋势;外海东岸和外海南岸近年来发展进程加快,对流域总体污染负荷的贡献呈上升趋势(图5).

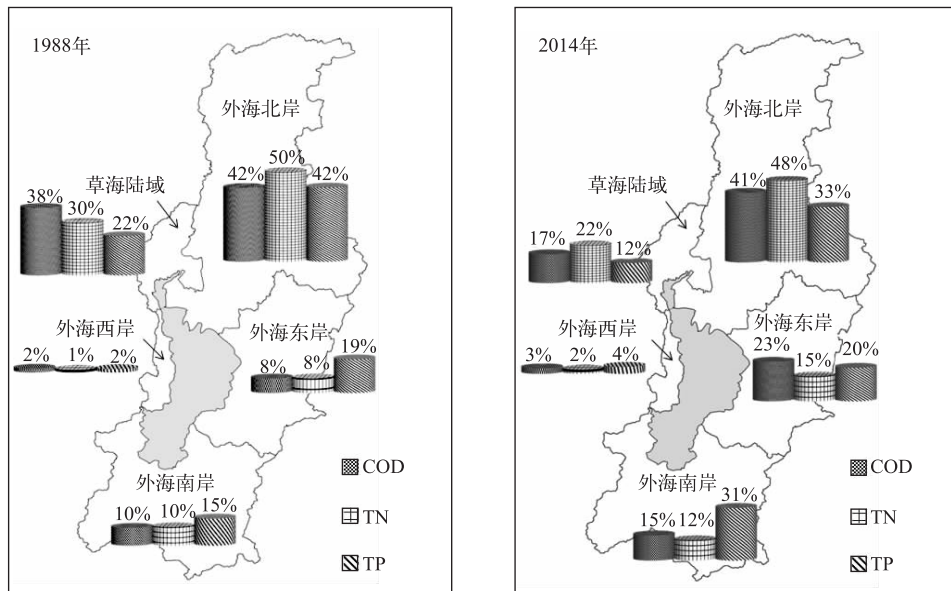


图5 1988和2014年入湖污染负荷空间分布

Fig.5 Spatial distribution of pollutant load into Lake Dianchi in 1988 and 2014

1988年至今,随着城市化进程的加快,滇池流域各控制单元入湖污染物组成呈现不同的特点. 昆明主城区建成度高,是滇池流域城市面源污染负荷的主要来源,同时由于集中了滇池流域大部分生活污水处理厂,也是流域尾水负荷的主要来源. 1988—2014年,昆明主城区农业面源和未收集的点源呈下降趋势,尾水负荷和城市面源呈上升趋势,入湖污染物组成由“未收集的点源为主”转变成“尾水负荷和城市面源为主”. 外海东岸是新开发区,是流域内入湖污染负荷新的增长点. 1988—2014年,外海东岸尾水负荷、未收集的点源和城市面源均呈上升趋势,污染物组成由“农业面源为主”逐渐转变为“未收集的点源和城市面源为主”. 外海南岸尾水负荷、未收集的点源呈上升趋势,该控制单元入湖污染物组成由“农业面源为主”逐渐转变为“未收集的点源为主”. 外海西岸随着人口密度的增大,入湖污染物逐渐增加,污染负荷组成以“未收集的点源为主”(图6).

### 3 讨论

#### 3.1 流域污染控制问题识别

昆明城市临湖而建,滇池处于城市下游,是污染物唯一的受纳水体. 滇池流域污染严重,水质恶化.这与湖泊进入老龄化,水面缩小,湖盆变浅<sup>[3]</sup>;地处磷矿区,大量磷质进入滇池<sup>[18]</sup>;入湖河流源近流短、自净能力弱<sup>[19]</sup>;陷落构造使其成为流域纳污点<sup>[15]</sup>等客观条件有一定关联. 但流域社会经济迅速发展,污染物排放超过水环境承载力是滇池水污染最根本的原因. 2014年,滇池流域以约占云南省0.75%的土地面积承载了全

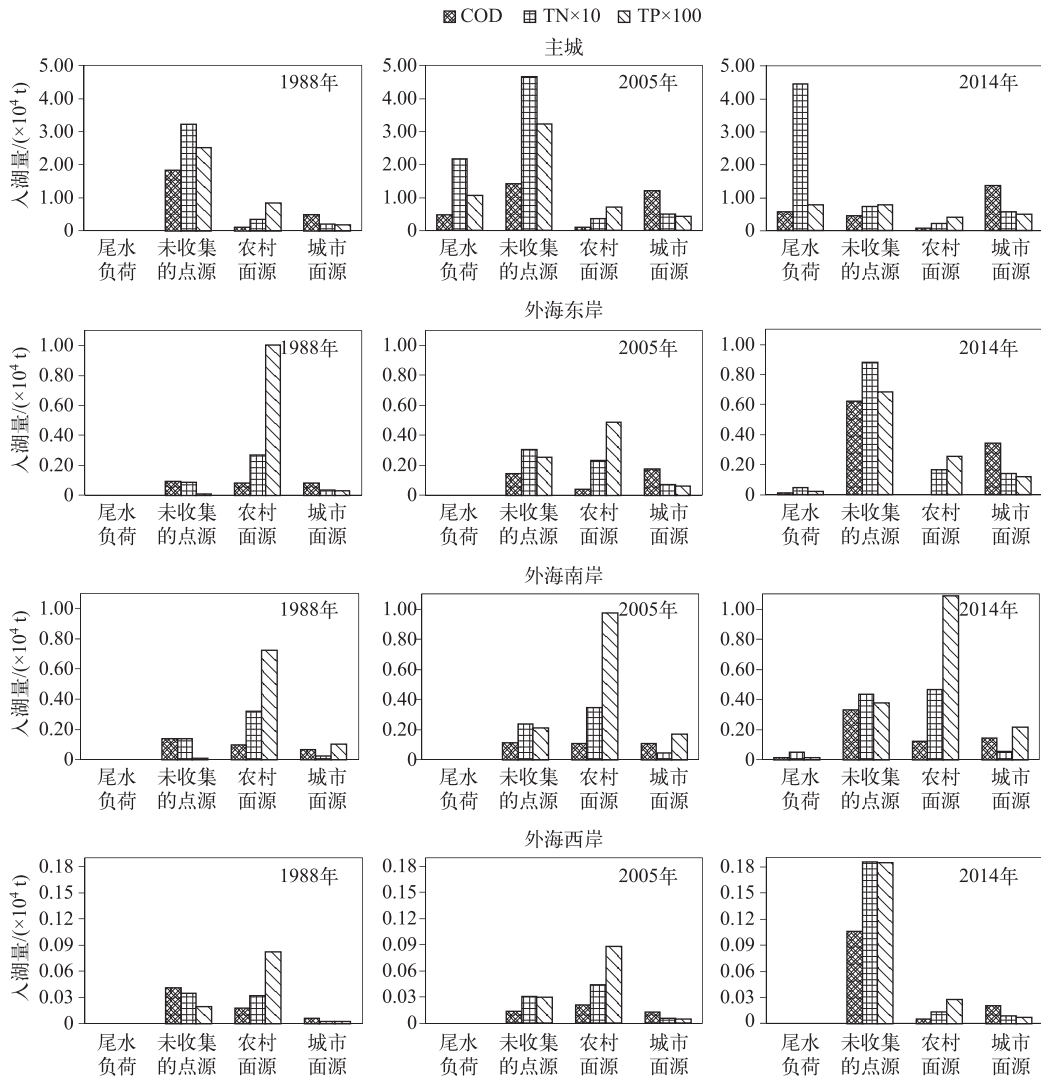


图 6 1988、2005 和 2014 年滇池流域不同陆域单元入湖污染物组成及变化

Fig.6 Composition of pollutant load into Lake Dianchi from different parts of the watershed in 1988, 2005 and 2014

省约 23% 的 GDP 和 8% 的人口,流域内人口和经济的高速增长导致流域内污水产生量大幅增加,在污水处理规模不断提高,污染负荷削减能力得到大幅提升的形势下,滇池流域入湖污染负荷仍远超滇池水环境承载力。

#### 1) 点源收集处理效率还需提高。

由于污水处理规模的剧增,滇池流域入湖污染负荷基本能够达到规划总量控制要求,但随着流域内社会经济的发展,点源产生量呈持续上升趋势,将带来越来越大的污染减排压力。未收集的点源已经成为外海东、南、西岸主要入湖污染物来源。目前流域内污水处理厂执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级 A 标,但部分出水水质指标仍劣于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中的 V 类水。污水处理厂尾水污染负荷占流域污染总负荷的比例逐年升高,庞大的污水处理厂尾水已经成为主要的人湖污染源之一。

#### 2) 面源污染治理重视不足。

我国对面源污染的研究起步较晚,且长期以来认为点源污染负荷控制比面源污染负荷控制具有更高的成本效益,缺乏对面源污染的研究和控制措施<sup>[20]</sup>。滇池流域也呈现出对点源和面源污染控制力度的不平衡。从“七五”开始昆明市保护和治理滇池的工作力度不断加强,污水处理能力显著提高,点源入湖量呈下降趋势。随着建成区面积的扩张,城市面源对入湖污染负荷的贡献率逐年上升,已经成为入湖污染的主要来源,特别对于 COD 的贡献已经占到了 45%。通过“四退三还”、“禁花减菜”、“全面禁养”等工作的实施,农业面源污染得到了一定的控制,但仍然是流域主要污染源之一,对氮、磷入湖污染负荷的贡献占到了约 30%。面源污染受气象条件影响较大,其核算和评价相对困难,且末端治理技术不能有效控制面源污染,滇池流域面源污染控制需要更大的重视及投入。

### 3.2 完善流域截污治污体系的对策

1) 继续坚持点源污染控制:以滇池北岸主城区、东岸新城、南岸晋宁片区为重点,进一步完善支次管网系统;加快东岸和南岸城镇管网建设,紧密衔接环湖干渠截污系统,提高东岸和南岸污水收集处理率;开展调蓄池-污水处理厂的优化调度,研究并利用污水处理厂雨季运行模式提高雨季合流污水处理率,减少合流污水溢流污染;实施污水处理厂污泥处置工程,实现资源化利用;加大污水资源化利用力度,强调“分质供水”,加大再生水工程设施及管网的建设力度。

2) 高度重视城市面源污染治理:以昆明主城区为重点,积极推行低影响开发模式。根据滇池流域自身降雨径流特点构建低影响开发雨水系统,并将低影响开发雨水系统与城市雨水管渠系统及初期雨水处理系统有机衔接;形成排水管网清淤机制,减少雨季初期冲刷带来的污染负荷;利用下凹式绿地、绿色屋顶、透水铺装、植被浅沟等低影响开发工程措施<sup>[21-22]</sup>,开展城市面源污染治理。

3) 加强农业面源污染治理:因地制宜地利用现有塘库设施,对农村农业污水进行收集处理和回用;发展清洁农业、农村循环经济、生态经济,减轻滇池流域对化肥的过度依赖,促进农村肥效、碳源的充分利用,从末端治理转变为源头控制;在入滇河道的径流区建设生态沟渠,在农业生产区域周边建立生态隔离带,以控制地表径流,减少氮、磷等营养物质的排放<sup>[23]</sup>。

## 4 结论

滇池治理是我国生态环境保护和水质治理的标志性工程。经过 20 多年的努力,滇池流域点源污染控制成效显著,点源入湖量呈下降趋势;农业面源控制已经取得了一定的成效,入湖量呈缓慢下降趋势。但随着建成区面积的持续扩张,城市面源入湖量持续上升。2014 年,滇池流域外源 COD、TN 和 TP 污染负荷产生量分别为  $12.9 \times 10^4$ 、 $1.9 \times 10^4$  和  $0.2 \times 10^4$  t。进入滇池的分别为  $3.6 \times 10^4$ 、 $0.7 \times 10^4$  和  $0.06 \times 10^4$  t。目前,城市面源已经成为 COD 的主要来源,尾水则是入湖 TN 的主要来源,TP 主要来源于农业面源和未收集的点源。草海陆域和北海北部是重污染区,也是治理投资的重点。外海东岸和南岸污染特征以未收集的点源为主,需尽快完善环湖截污系统,提高污水收集处理率。目前,滇池治理已经到了关键时期,必须继续加大治理力度,进一步完善流域截污治污体系,有机衔接点源面源控制,因地制宜地采取污染控制措施,统一思想,长远谋划,坚持不懈地做好滇池水污染治理工作。

## 5 参考文献

- [1] 李中杰,郑一新,张大为等.滇池流域近 20 年社会经济发展对水环境的影响.湖泊科学,2012,24(6):875-882. DOI 10.18307/2012.0610.
- [2] 李根保,李林,潘珉等.滇池生态系统退化成因、格局特征与分区分步恢复策略.湖泊科学,2014,26(4):485-496. DOI 10.18307/2014.0401.
- [3] 马巍,李锦秀,田向荣等.滇池水污染治理及防治对策研究.中国水利水电科学研究院学报,2007,5(1):8-14.
- [4] 邓伟明,雷坤,苏会东等.2008 年滇池流域水环境承载力评估.环境科学研究,2012,25(4):372-376.
- [5] 郝晓雷,杨常亮,魏勤等.滇池污染现状的综合评价及分析.云南大学学报:自然科学版,1998,20(S4):589-592.
- [6] 李益敏,彭永岸,王玉朝等.滇池污染特征及治理对策.云南地理环境研究,2003,15(4):32-38.
- [7] 黎巍,何佳,徐晓梅等.滇池流域城市降雨径流污染负荷量化研究.环境监测管理与技术,2011,23(5):



- 37-42.
- [ 8 ] 逢 勇. 水环境容量计算理论及应用. 北京: 科学出版社, 2010: 26.
- [ 9 ] 高 伟, 周 丰, 郭怀成等. 滇池流域高分辨率氮、磷排放清单. 环境科学学报, 2013, **33**(1): 240-250.
- [ 10 ] 赵晨辰, 张世彦, 毛献忠. 深圳湾流域 TN 和 TP 入海年通量变化规律研究. 环境科学, 2014, **35**(11): 4111-4117.
- [ 11 ] 何 佳, 郑一新, 徐晓梅等. 滇池北岸面源污染的时空特诊与初期冲刷效应. 中国给水排水, 2012, **28**(23): 51-54.
- [ 12 ] 昆明市环境保护局, 中国环境科学研究院, 昆明市环境科学研究院等. 滇池流域水污染防治“十二五”规划研究报告. 昆明, 2010.
- [ 13 ] 徐晓梅, 李跃勋, 何 佳等. 基于 GIS 的昆明主城区排水系统诊断研究. 中国给水排水, 2011, **27**(13): 1-6.
- [ 14 ] 中国环境保护部. 重点流域水污染防治规划(2011—2015 年). 北京, 2012.
- [ 15 ] 何 佳, 徐晓梅, 陈云波等. 滇池流域点源污染负荷总量变化趋势及原因分析. 中国工程科学, 2010, **12**(6): 75-79.
- [ 16 ] 李跃勋, 徐晓梅, 何 佳等. 滇池流域点源污染控制与存在问题解析. 湖泊科学, 2010, **22**(5): 633-639. DOI 10.18307/2010.0502.
- [ 17 ] 何 佳, 徐晓梅, 杨 艳等. 滇池水环境综合治理成效与存在问题. 湖泊科学, 2015, **27**(2): 195-199. DOI 10.18307/2015.0201.
- [ 18 ] 郭有安. 滇池流域水资源演变情势分析. 云南地理环境研究, 2005, **17**(2): 28-32.
- [ 19 ] 段昌群, 何 峰, 刘嫦娥等. 基于生态系统健康视角下的云南高原湖泊水环境问题的诊断与解决理念. 中国工程科学, 2010, **12**(6): 60-70.
- [ 20 ] Zhang W, Wang XJ. Modeling for point-non-point source effluent trading: perspective of non-point sources regulation in China. *Science of the Total Environment*, 2002, **292**(3): 167-176.
- [ 21 ] 倪艳芳. 城市面源污染的特征及其控制的研究进展. 环境科学与管理, 2008, **33**(2): 53-57.
- [ 22 ] 赵建伟, 单保庆, 尹澄清. 城市面源污染控制工程技术的应用及进展. 中国给水排水, 2007, **23**(12): 1-5.
- [ 23 ] 李发荣, 邱学礼, 周 璟等. 滇池东南岸农业和富磷区入湖河流地表径流及污染特征. 中国环境监测, 2014, **30**(6): 93-101.