

滇池入湖河流磷负荷时空变化及形态组成贡献*

李 乐^{1,2,3}, 王圣瑞^{1,2}, 王海芳³, 张 蕊^{1,2}, 焦立新^{1,2**}, 丁 帅^{1,2}, 余佑金^{1,2}

(1: 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012)

(2: 中国环境科学研究院国家环境保护湖泊污染控制重点实验室, 湖泊生态环境创新基地, 北京 100012)

(3: 中北大学化工与环境学院, 太原 030051)

摘 要: 研究了 2013 年滇池主要入湖河流总磷 (TP) 及各形态磷浓度的时空变化与入湖负荷特征, 并探讨了不同形态磷的入湖负荷贡献。结果表明: (1) 滇池河流入湖 TP 浓度在 0.11~1.93 mg/L 之间, 以溶解性无机磷 (DIP) 和颗粒态磷 (PP) 为主, 溶解性有机磷 (DOP) 浓度较低; (2) 滇池河流入湖磷负荷总量为 280.51 t/a, 绝大多数河流主要以 DIP 形态入湖, 平均贡献率为 43.48%; PP 形态入湖负荷次之, 平均贡献率为 31.64%; DOP 入湖负荷较低, 平均贡献率为 24.88%; (3) DIP 入湖负荷贡献率较高值出现在 3、4 和 11 月的枯水期, 平均入湖负荷贡献率达到 55.30%; PP 入湖负荷贡献率较高值出现在 1 和 7 月, 平均入湖负荷贡献率为 56.14%; DOP 入湖负荷贡献率月变化差异较小, 最高值出现在 12 月, 贡献率为 21.85%; (4) 研究滇池入湖河流污染负荷不仅要考虑溶解态无机磷的贡献, 而且需要重视 PP 和 DOP 负荷, 控制滇池入湖河流污染负荷需要考虑不同河流不同形态磷负荷组成及月变化差异特征, 有针对性地采取相应措施。

关键词: 滇池; 入湖河流; 磷负荷; 时空变化; 贡献

Temporal and spatial variations of phosphorus loading and the forms, compositions and contributions in inlet river of Lake Dianchi

LI Le^{1,2,3}, WANG Shengrui^{1,2}, WANG Haifang³, ZHANG Rui^{1,2}, JIAO Lixin^{1,2**}, DING Shuai^{1,2} & YU Youjin^{1,2}

(1: *State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, P.R.China*)

(2: *Research Center of Lake Eco-Environment, State Environmental Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, P.R.China*)

(3: *School of Chemical Engineering and Environment, North University of China, Taiyuan 030051, P.R.China*)

Abstract: The temporal and spatial changes of total phosphorus (TP) and various forms of phosphorus concentration, and the inlet load characteristics were studied in major inlet river of Lake Dianchi. At the same time, the contribution of different forms of phosphorus from the inlet load was discussed. The results showed: (1) The TP concentrations of the inlet river into Lake Dianchi were between 0.11–1.93 mg/L, and the particulate phosphorus (PP) and dissolved inorganic phosphorus (DIP) forms were the main part. (2) The TP loading of the inlet rivers of Lake Dianchi was 280.51 t/a, and DIP was the main form in most rivers into the lake with an average contribution of 43.48%. PP form into the lake load followed with an average contribution of 31.64%. DOP form into the lake load was relatively low with an average contribution of 24.88%. (3) DIP load into the lake with the higher contribution value appeared in dry season (March, April and November), which the average contribution rate reached to 55.30%. Higher values of PP forms into the lake load occurred in January and July, with the average contribution of 56.14%. Change of the DOP load into the lake was relatively low, with the highest value appeared in December and its contribution was 21.85%. (4) The river pollution load into Lake Dianchi not only needs to be considered the contribution of the dissolved inorganic phosphorus into the lake, but also to be paid an attention on the dissolved organic phosphorus and particulate phosphorus loading. During the process of

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07102-004) 和国家自然科学基金项目 (U1202235) 联合资助。2015-11-02 收稿; 2015-12-03 收修改稿。李乐 (1990~), 女, 硕士研究生; E-mail: 1195903350@qq.com.

** 通信作者; E-mail: jiaolx@craes.org.cn.

comprehensive improvement of the inlet river loading into the lake, we should take corresponding measures according to different forms of phosphorus loading in different rivers and in different months in order to attempt getting a better effect.

Keywords: Lake Dianchi; inlet river; phosphorus loading; spatial and temporal variations; contribution

磷是湖泊初级生产力的限制性营养元素^[1],也是导致水体富营养化的重要营养物质之一^[2].我国的水功能区水质达标率小于60%^[3],在滇池、太湖和巢湖流域,由于人口密集,农业生产集约化程度高,流域总磷(TP)浓度比20年前提高了10倍以上^[4,5].滇池是云贵高原最大的淡水湖泊,近些年来由于城市扩展,人口增长,经济快速发展,大量含磷污染物通过河流进入滇池,导致水体不断污染,富营养化趋势加重,蓝藻水华暴发更为频繁^[6-7].据统计,滇池每年约有70%~80%的入湖水量是来自河流水体的补给^[8].因此,滇池入湖河流不仅是滇池的主要水量来源,又是污染物汇入河流的主要通道,大部分点源与面源污染物通过入湖河流进入湖泊^[9].故控制入湖河流磷污染是减弱湖泊磷污染的重要途径^[10].进入滇池的磷营养负荷主要来自工业废水和城市污水等点源及农田地表径流流失和磷矿开采^[11].对美国与日本等国的研究表明,即使点源污染已完全控制,河流水质达标率仅为65%,湖泊的水质达标率仅为42%,而在中国,面源污染已接近甚至高于点源污染,一些流域的面源污染已成为水环境的主要威胁^[12-13].因而推行入湖河流磷负荷的控制是治理滇池富营养化的重要措施之一,也成为滇池流域磷总量控制的重要基础^[14].

外源负荷对浅水湖泊富营养化的影响往往至关重要^[15-16],滇池入湖河流所携带的污染物是造成滇池富营养化的重要原因之一.滇池流域入湖氮磷负荷已有较多报道^[17-20],但相关研究多集中在入湖流量模型验证以及总氮(TN)和TP入湖负荷总量评估方面,而系统研究入湖河流氮、磷负荷时空变化的报道较少,尤其是对不同形态氮、磷负荷及其对TN、TP贡献的报道罕见.本文通过研究入湖河流中TP和不同形态磷负荷及其负荷贡献的时空变化,了解并掌握各个入湖河流对湖泊磷负荷的贡献大小是准确评估入湖河流污染负荷的前提,可以为入湖河流污染现状和治理及滇池富营养化防治提供基础数据.

1 材料与方法

1.1 样品采集与流域特征

根据滇池流域入湖河流及子流域分布情况,于2013年1—12月,对盘龙江、新运粮河、老运粮河、广普大沟、老宝象河、东大河等28条主要入湖河流的河口布设监测点,采样时用GPS仪记录下滇池入湖河流位点的经纬度坐标及河流名称(图1).分别在每个月的15—25日期间(采样时间避开风雨天气)采集入湖河口表层水样,同时现场监测流量.每个水样充分混合后分别装入1L聚乙烯塑料瓶内,当天带回实验室并测定 $\rho(\text{TN})$ 、溶解性总磷浓度($\rho(\text{DTP})$)和溶解性无机磷浓度($\rho(\text{DIP})$)等指标.根据昆明市环境科学研究院监测结果,滇池28条主要入湖河流中达到劣V类水质标准的有20条,占74.1%;达到V类水质标准的有4条,占14.8%.河流入湖流速为0.01~0.50 m/s, pH值为6.22~9.92,4—10月水温在17.0~20.3℃之间.滇池入湖河流及子流域水量根据河口监测流速计算,并参考HSPF模型结果.滇池流域以盘龙江(24667.61 m³/a)和新运粮河(10438.82 m³/a)入湖水量最高,老运粮河、大清河、捞鱼河、老宝象河、新宝象河等次之,入湖水量在2000~4000 m³/a之间,西坝河、金家河、大沟河和六甲宝象河等入湖水量最低,小于200 m³/a.入湖水量以7—8月较高,8月最高达10703.65 m³/a.

1.2 分析及计算方法

$\rho(\text{TP})$ 和 $\rho(\text{DTP})$ 采用过硫酸钾-钼锑抗分光光度法测定, $\rho(\text{DIP})$ 采用钼锑抗分光光度法测定,具体方法参照文献[21].

$$\rho(\text{DOP}) = \rho(\text{DTP}) - \rho(\text{DIP}) \quad (1)$$

$$\rho(\text{PP}) = \rho(\text{TP}) - \rho(\text{DTP}) \quad (2)$$

式中,DOP为溶解性有机磷,DIP为溶解性无机磷,PP为颗粒态磷,单位均为mg/L.

入湖河流TP负荷计算公式为:

$$W_{ij} = C_{ij} \cdot Q_{ij} \quad (3)$$

式中, W_{ij} 为*i*年*j*月入湖河流TP负荷(t/a); C_{ij} 为*i*年*j*月河流入湖口 $\rho(\text{TP})$ 平均值(mg/L); Q_{ij} 为*i*年*j*月入

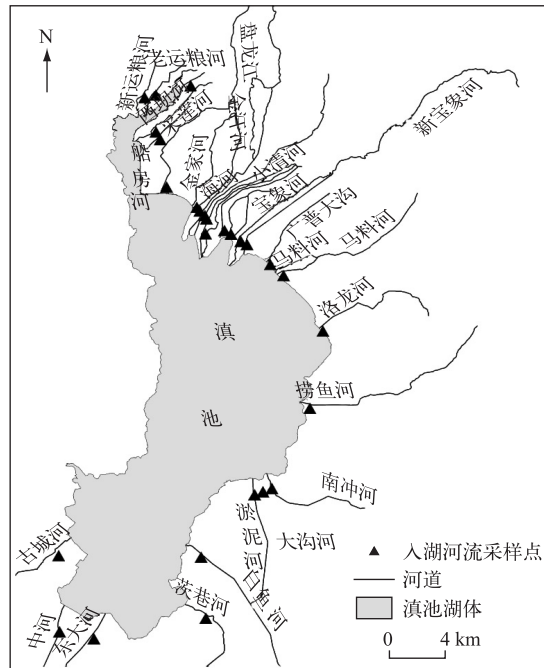


图 1 滇池入湖河流采样点

Fig.1 Sampling sites of the inlet rivers of Lake Dianchi

湖水量平均值(m^3/s),入湖负荷计算方法参考文献[22-24].

1.3 数据统计分析

数据统计分析及制图采用 Origin 8.5 和 ArcGIS 10.0 软件.

2 结果与讨论

2.1 入湖河流磷浓度的时空变化

通过计算不同月份入湖河流磷浓度的平均值得到磷浓度空间变化特征(图2).滇池不同入湖河流磷浓度差别显著, $\rho(\text{TP})$ 在0.11~1.93 mg/L之间,平均值为0.66 mg/L,最高值出现在广普大沟,茨巷河、海河和金家河浓度相对较高,为1.0~1.8 mg/L,绝大部分入湖河流 $\rho(\text{TP})$ 小于0.8 mg/L;水体 $\rho(\text{DIP})$ 在0.02~1.13 mg/L之间,平均值为0.28 mg/L,最高值出现在广普大沟,海河次之; $\rho(\text{PP})$ 在0.03~1.57 mg/L之间,平均值为0.25 mg/L,最高值出现在茨巷河,广普大沟次之(0.45 mg/L);而 $\rho(\text{DOP})$ 相对较低,在0.04~0.39 mg/L之间,平均值为0.13 mg/L.

总体来看,滇池草海及外海北部入湖河流较多,主要有新运粮河、老运粮河、盘龙江和广普大沟等较大河流.入湖河流流经昆明市主城区,以城市点源污染为主,大量工业废水及城市生活污水、雨水等汇入河流,故污染情况严重,磷浓度较高,且以DIP为主.其中,广普大沟污染最为严重,各形态磷浓度均较高,主要由于河道汇集了沿线居民小区生活污水、农村面源污水和工业生产废水,且均为直排河道,再加之污水管道堵塞,导致河水污浊且散发着阵阵恶臭^[25].外海东部及南部流域入湖河流相对较少,主要包括洛龙河、捞鱼河、茨巷河和东大河等,以农业面源污染为主,城市点源污染较少,除茨巷河外,大部分河流水质较好.茨巷河的磷浓度仅次于广普大沟,以PP为主,是典型的农业灌溉与养殖污染影响下的滇池入湖河流^[26].同时受到磷矿开采区的影响,在雨季降雨量很大时,其污染物浓度增长更为迅速^[27].由此可见,农田地表径流和磷矿的开采成为滇池水体富营养化亟需控制的重要内容^[28-29].除农业面源外,在开采磷矿的过程中,大量的扬尘随即产生,污染物会通过降雨进入河流,故茨巷河的磷浓度很高,并以PP为主.海河磷浓度较广普大沟和

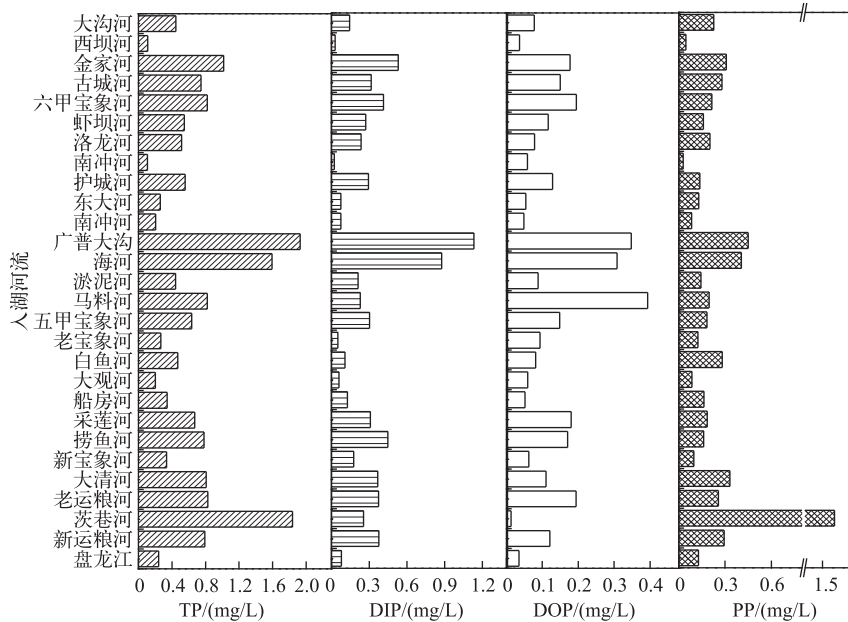


图 2 滇池入湖河流磷浓度的空间变化

Fig.2 Spatial variations of phosphorus concentrations of the inlet rivers of Lake Dianchi

茨巷河再次之,以 DIP 为主,其流域周围分布着农村、学校和工厂,污染物以农村生活污水、工业和企业废水为主。而滇池东部随着“十二五”城市重心的转移,呈贡新区的建设、生活污染源和城市面源污染的增加^[30],东部入湖河流水质面临着新的压力,使滇池入湖河流磷污染由北部逐渐向东部转移。

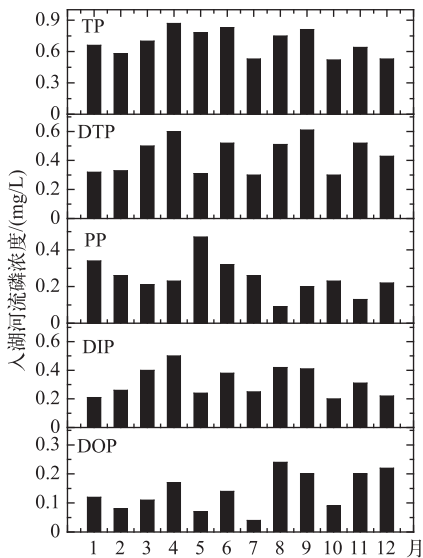


图 3 滇池入湖河流磷浓度的月变化

Fig.3 Monthly variations of phosphorus concentrations of the inlet rivers of Lake Dianchi

通过计算每月不同入湖河流磷浓度的平均值得出磷浓度月变化特征(图 3)。滇池入湖河流磷浓度总体呈波动式先升后降的趋势, $\rho(\text{TP})$ 在 0.53~0.87 mg/L 之间,4 月最高,7 月最低,6 月出现次峰值;不同月份 $\rho(\text{DTP})$ 在 0.30~0.61 mg/L 之间,4 月最高,9 月出现次峰值;不同月份 $\rho(\text{DIP})$ 在 0.20~0.50 mg/L 之间,4 月最高,8 月出现次峰值; $\rho(\text{PP})$ 在 5 月(0.47 mg/L)最高,8 月(0.09 mg/L)最低;DOP 浓度在 8 月(0.24 mg/L)最高,7 月(0.04 mg/L)最低。从图 3 中可以明显看出,冬季降雨量少,各指标相对较低,4-9 月降雨量大,各指标显著升高。 $\rho(\text{TP})$ 、 $\rho(\text{DTP})$ 和 $\rho(\text{DIP})$ 高峰值都出现在 4 月,主要原因可能是滇池西南地区干旱,降水稀少,排入河道的工业废水和生活污水中的磷污染物得不到稀释;较低值出现在 7 月和 10 月,原因可能是雨季的降水不断补给河流,使外源污染得到了稀释^[31]。总体来说,磷在水体中的浓度一般较低,主要吸附于土壤颗粒中^[32],降雨、开沟排水等产生的地表径流,使营养丰富的表层底泥被侵蚀从而进入河流,使水体中磷浓度升高。所以入湖河流在雨季时的磷浓度往往高于旱季,也就是说,降雨较少的时期,对土壤的冲刷作用较弱,流入河流的土壤颗粒较小,导致河流磷浓度较低。

2.2 入湖河流磷负荷的时空变化

根据滇池入湖河流水量及水质数据,计算得到滇池入湖河流 TP 及不同形态磷的入湖负荷. 滇池入湖河流 TP 负荷为 280.51 t/a,其中,DIP 入湖负荷为 124.81 t/a,占 TP 负荷的 44.49%;PP 入湖负荷为 116.18 t/a,占 TP 负荷的 41.42%;DOP 入湖负荷为 39.52 t/a,占 TP 负荷的 14.09%. 总体来看,各河流不同形态磷负荷均以 DIP 和 PP 负荷为主,DOP 负荷较低(图 4).

从滇池主要入湖河流磷负荷的空间变化来看,TP 负荷量较大的(>20 t/a)有新运粮河、盘龙江、老运粮河和大清河,其中新运粮河(75.35 t/a)和盘龙江(55.78 t/a)分别占 TP 负荷的 26.86%和 19.89%. 与国内学者^[33-34]对盘龙江的研究结论一致:盘龙江主要污染因子为 TP,是引起水体富营养化的重要因素. 盘龙江流域城镇众多,人口密集,生活污水及工业废水排放量大,湖水流速较快,形成较大的水环境容量,故 TP 负荷很高. 对于水流速度较小的新运粮河,由于分布在河流两岸的 323 个排污口持续汇入大量污染物,同时在河道整治过程中忽视了河道整体的生态治理和修复,河流磷负荷持续升高^[35]. 因而,盘龙江和新运粮河的磷负荷很高的最主要原因是入湖水量极高,其中盘龙江入湖水量高达 24667.61 m³/a. 可见,滇池入湖河流磷负荷主要来源于北部的 2 条主要入湖河流,总体来说东部和南部的入湖河流磷负荷均较低. 蔡佳亮等^[36]的研究发现,滇池入湖河流污染状况严重程度为北部入湖河流>南部入湖河流>东部入湖河流,与本研究印证. 因此亟需加强对滇池北部(特别是新运粮河、盘龙江及其流域)的综合治理,以减少该河流的入湖磷负荷.

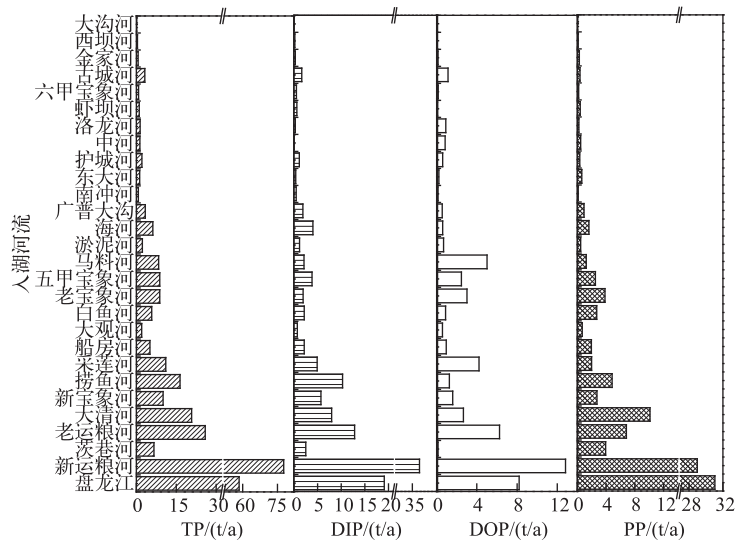


图 4 滇池入湖河流磷负荷的空间变化

Fig.4 Spatial variations of phosphorus loading of the inlet rivers of Lake Dianchi

滇池入湖河流 TP 及不同形态磷入湖负荷季节性差异显著(图 5),TP 负荷呈现先升后降的趋势,8 月最高,占入湖河流磷负荷总量的 20.93%,最低值出现在 5 月. PP 负荷在 7 月最高,占全年的 23.44%;DIP 负荷和 DON 负荷均在 8 月最高,分别占全年的 23.48%和 21.86%. 入湖河流中 PP 负荷所占比例较高,尤其是在水中含有大量泥沙的雨期(7—8 月),这与水体 TP 浓度在入湖河流较高相互印证. 滇池一年内干湿季节分明^[37],在汛期的 7、8 月,TP 及不同形态磷负荷均最高;11 月至次年 4 月的旱季,雨量稀少,磷负荷变化平稳且处于较低水平. 总体来讲,全年的磷浓度在时空分布上均具有较大差异,变化趋势是夏季高于冬季,入湖河流的磷负荷均主要集中在 7—10 月,占全年 TP 负荷的 62.04%. 入湖河流 TP、DIP 及 DOP 负荷均在 8 月出现最大值,而 PP 负荷在 7 月出现最大值,之后随时间推移显著降低. 入湖河流各形态磷负荷均在 5 月出现最低值,故此时水质状况最佳. 之后随着降雨量的增加各种磷负荷持续增加,8 月达到最大值(8 月入湖水量是 5 月的 9 倍多),故控制滇池河流入湖磷负荷,可以考虑在雨季之初加以控制.

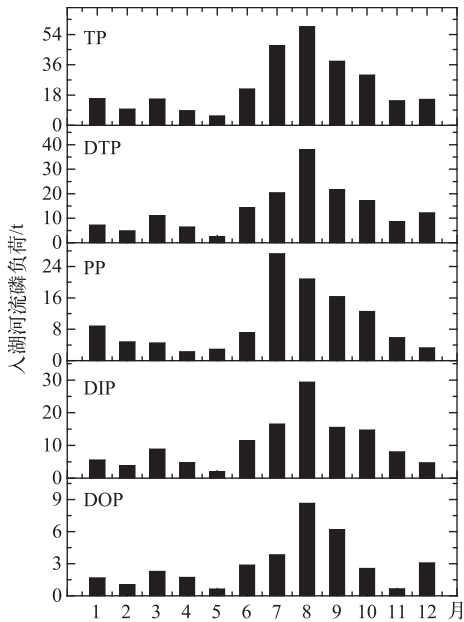


图5 滇池入湖河流磷负荷的月变化
Fig.5 Monthly variations of phosphorus loading of the inlet rivers of Lake Dianchi

2.3 不同形态磷的入湖负荷贡献

根据滇池不同河流各形态磷入湖负荷占总磷入湖负荷的百分比计算得到各形态磷的入湖负荷贡献率(图6). 总体来讲,滇池绝大多数河流以 DIP 和 PP 入湖负荷为主,其中 DIP 占 TP 入湖负荷的 5.14%~64.36%,平均贡献率为 43.48%;PP 占 TP 入湖负荷的 12.07%~59.77%,平均贡献率为 31.64%. DOP 负荷贡献相对较小,占 TP 入湖负荷的 1.95%~64.12%,平均贡献率为 24.88%. 故不同入湖河流各形态磷对 TP 入湖负荷的贡献差异显著. 茨巷河、盘龙江和东大河 PP 入湖负荷占有相对较高的比例,其对 TP 负荷的贡献率可达到 50%以上,而洛龙河、中河和马料河 PP 入湖负荷占有相对较高的比例,其对 TN 负荷的贡献率可达到 60%以上,其中 PP 负荷贡献率最高值出现在茨巷河, DON 负荷贡献率最高值出现在洛龙河(图6). PP 和 DOP 均是河流入湖磷负荷的重要组成部分,以往针对滇池及其流域的研究多集中在 TP 和 DIP 入湖负荷方面,而有关 PP 和 DOP 入湖负荷的报道较少. 近几十年,随着滇池周边工、农业的发展,不仅无机磷入湖负荷逐年增加,而且 DOP 和 PP 入湖负荷也显著提高,并已经成为影响滇池水质的重要因素之一^[38]. 茨巷河流域的农田有大量的蔬菜、花卉等作物种植区,雨水冲刷和灌溉流失的农田土壤绝大多数进入茨巷河,从而导致 PP 负荷最高. 要减少茨巷河等河流的 PP 负荷,首先要避免农业生产

中过量施放磷肥,然后进行水土保持工作,使附着于土壤颗粒中的磷减少流失. 洛龙河流经人口较为密集的龙城镇,龙城镇是呈贡县城所在地,人口较为集中,每天约有 0.22×10^4 t 的城市污水流入洛龙河,加之农田灌溉是洛龙河的主要功能(2007 年前共灌溉农田 284.4 km^2)^[39],主要污染源为来自流经区域的农业面源,使得 DOP 负荷贡献占主导地位.

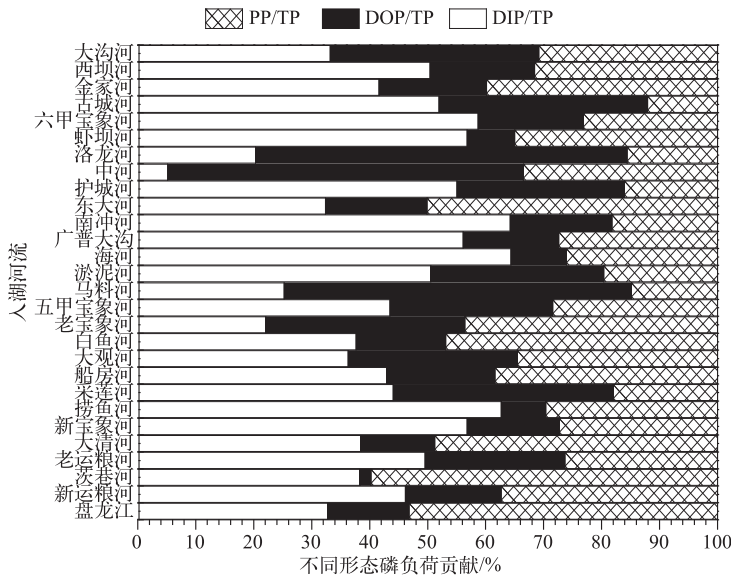


图6 滇池入湖河流中不同形态磷负荷贡献的空间变化

Fig.6 Contribution of different forms of phosphorus loading of the inlet rivers of Lake Dianchi by space

不同形态磷入湖负荷贡献率的月变化差异明显(图7),DIP入湖负荷贡献率较高值出现在3、4和11月的枯水期,平均入湖负荷贡献率达到55.30%;PP入湖负荷贡献率较高值出现在1和7月,平均入湖负荷贡献率为56.14%;DOP入湖负荷贡献率较高值出现在12月,为21.85%。PP与DIP月负荷贡献率呈此消彼长的震荡趋势,而DOP月负荷贡献率在全年中都处于较低地位,也就是说全年以PP与DIP负荷贡献率为主,两者波动明显,但DOP与DIP总体趋势相近。PP负荷贡献率在1—4月持续下降,而DOP和DIP负荷贡献率持续上升,这是因为磷在DTP和PP两种形态之间转化并达到动态平衡。而随着颗粒物进入水体的磷通常有两种运移方式:一部分附着在悬浮颗粒物表面,可以很快解吸附进入水体^[40];另一部分与固体颗粒物基质紧密相连的磷有较小的释放速率,这部分含磷固体颗粒物易沉降形成沉积物,也将成为内源磷负荷的主要来源^[40]。故合理并有效控制PP负荷至关重要,如适当地河道清淤,内布设人工水草、浮床、沉床等,以减弱PP负荷贡献。

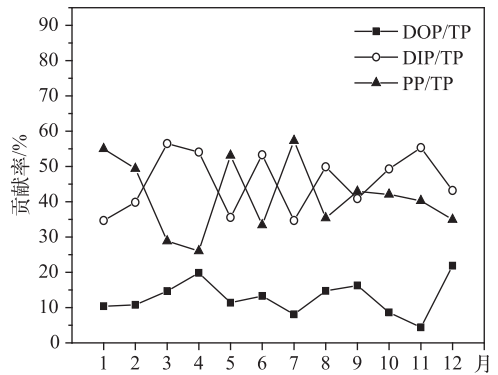


图7 滇池入湖河流不同形态磷的月负荷贡献

Fig.7 Contribution of different forms of phosphorus loading of the inlet rivers of Lake Dianchi by months

3 结论

1)滇池全湖入湖河流水体TP浓度在0.11~1.93 mg/L之间,平均值为0.66 mg/L,最高值出现在广普大沟,茨巷河、海河和金家河浓度相对较高,为1.0~1.8 mg/L,绝大部分入湖河流水体TP浓度小于0.8 mg/L。各河流以DIP和PP浓度较高,平均浓度分别为0.28和0.25 mg/L;而DOP浓度相对较低,平均值为0.13 mg/L。

2)2013年滇池河流入湖磷负荷总量为280.51 t,绝大多数河流以DIP入湖负荷为主,平均贡献率分别为43.48%;PP入湖负荷次之,平均贡献率为31.64%;DOP入湖负荷较低,平均贡献率为24.88%。不同形态磷入湖负荷贡献率的月变化差异明显,DIP入湖负荷贡献率较高值出现在3、4和11月的枯水期,平均入湖负荷贡献率达到55.30%;PP入湖负荷贡献率较高值出现在1和7月,平均入湖负荷贡献率为56.14%;DOP入湖负荷贡献率月变化差异较小,最高值出现在12月,贡献率为21.85%。

3)滇池入湖河流PP和DOP入湖负荷贡献率占有一定的比例,不同季节有机磷和无机磷入湖负荷贡献率差异显著。滇池入湖河流污染负荷评估,不仅要考虑对DIP的入湖负荷,而且需要重视PP和DOP负荷,在入湖河流河道综合整治过程中应根据不同河流磷负荷组成及其月变化差异,有针对性地采取相应措施,力求得到事半功倍的效果。

4 参考文献

- [1] Søndergaard M, Jensen JP, Jeppesen E. Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes. *Hydrobiologia*, 2003, **506**(1/2/3): 135-145.
- [2] Sanclements MD, Fernandez IJ, Norton SA. Soil and sediment phosphorus fractions in a forested watershed at Acadia National Park, ME, USA. *Forest Ecology and Management*, 2009, **258**(1): 2318-2325.
- [3] Zhang Ping, Gao Linna, Sun Chong *et al.* Integrated evaluation on aquatic ecosystems of main rivers and lakes in China. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, **47**(1): 94-100 (in Chinese with English abstract). [张萍, 高丽娜, 孙冲等. 中国主要河湖水生生态综合评价. 水利学报, 2016, **47**(1): 94-100.]
- [4] Xi Shanshan, Zhou Chuncai, Liu Guijian *et al.* Spatial and temporal distributions of nitrogen and phosphate in the Chaohu Lake. *Environmental Science*, 2016, **37**(2): 542-547 (in Chinese with English abstract). [奚姗姗, 周春财, 刘桂建等. 巢湖水体氮磷营养盐时空分布特征. 环境科学, 2016, **37**(2): 542-547.]
- [5] Zhang Weili, Wu Shuxia, Ji Hongjie *et al.* Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating

- strategies. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, **37**(7): 1008-1017 (in Chinese with English abstract). [张维理, 武淑霞, 冀宏杰等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策. 中国农业科学, 2004, **37**(7): 1008-1017.]
- [6] Guo Huaicheng, Sun Yanfeng. Characteristic analysis and control strategies for the eutrophicated problem of the Lake Dianchi. *Progress in Geography*, 2002, **21**(5): 500-506 (in Chinese with English abstract). [郭怀成, 孙延风. 滇池水体富营养化特征分析及控制对策探讨. 地理科学进展, 2002, **21**(5): 500-506.]
- [7] Wang Hongmei, Chen Yan. Change trend of eutrophication of Dianchi Lake and reason analysis in recent 20 years. *Environmental Science Survey*, 2009, **28**(3): 57-60 (in Chinese with English abstract). [王红梅, 陈燕. 滇池近 20 a 富营养化变化趋势及原因分析. 环境科学导刊, 2009, **28**(3): 57-60.]
- [8] Li Yuexun, Xu Xiaomei, He Jia *et al.* Point source pollution control and problem in Lake Dianchi basin. *J Lake Sci*, 2010, **22**(5): 633-639 (in Chinese with English abstract). DOI: 10.18307/2010.0502. [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.]
- [9] Jin Xiangcan, Xin Weiguang, Lu Shaoyong *et al.* Effect of polluted inflow river on water quality of lake bay. *Research of Environmental Sciences*, 2007, **20**(4): 52-56 (in Chinese with English abstract). [金相灿, 辛玮光, 卢少勇等. 入湖污染河流对受纳湖湾水质的影响. 环境科学研究, 2007, **20**(4): 52-56.]
- [10] Xia Yu, Yan Bangyou, Fang Yu. Nutrient loading and its controlling factors in Le'an River watershed, Lake Poyang basin. *J Lake Sci*, 2015, **27**(2): 282-288 (in Chinese with English abstract). DOI: 10.18307/2015.0212. [夏雨, 鄢帮有, 方豫. 鄱阳湖区乐安河流域营养盐负荷影响因素分析. 湖泊科学, 2015, **27**(2): 282-288.]
- [11] Yu Xiaofei, He Shuzhuang, Hu Bin *et al.* Study on the in the storm runoff of Chaihe reaches of Dianchi Lake. *Environmental Pollution & Control*, 2012, **34**(10): 61-70 (in Chinese with English abstract). [余晓飞, 和树庄, 胡斌等. 滇池柴河小流域暴雨径流中 COD 的输移特征研究. 环境污染与防治, 2012, **34**(10): 61-70.]
- [12] Li XY, Weller DE, Jordan TE. Watershed model calibration using multi-objective optimization and multi-site averaging. *Journal of Hydrology*, 2010, **380**(3/4): 277-288.
- [13] Shen ZY, Liao Q, Hong Q *et al.* An overview of research on agricultural non-point source pollution modelling in China. *Separation & Purification Technology*, 2012, **84**(2): 104-111.
- [14] Schindler DW, Hecky RE, Findlay DL *et al.* Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: results of a 37-year whole-ecosystem experiment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, **105**(32): 11254-11258.
- [15] Xia XH, Yang ZF, Zhang XQ *et al.* Nitrification in natural waters with high suspended-solid content—A study for the Yellow River. *Chemosphere*, 2004, **57**(8): 1017-1029.
- [16] Xia XH, Yang ZF, Zhang XQ. Effect of suspended-sediment concentration on nitrification in river water: importance of suspended sediment—water interface. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(10): 3681-3687.
- [17] Liu Yan, Zhou Feng, Zhao Zhijie. Forecasting and early-warning system for riverine TN and TP loadings of Lake Dianchi Watershed. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(9): 2916-2923 (in Chinese with English abstract). [刘岩, 周丰, 赵志杰. 滇池流域 TN、TP 入湖负荷预报预警系统. 环境科学学报, 2015, **35**(9): 2916-2923.]
- [18] Liu ZH, Liu XH, He B *et al.* Spatio-temporal change of water chemical elements in Lake Dianchi, China. *Water and Environment Journal*, 2009, **23**(3): 235-244.
- [19] Liu Zhonghan, He Bin, Wang Yiming *et al.* Effects of rainfall runoff on total nitrogen and phosphorus flux in different catchments of Dianchi Lake, Yunnan, China. *Geogr Res*, 2004, **23**(5): 593-604 (in Chinese with English abstract). [刘忠翰, 贺彬, 王宜明等. 滇池不同流域类型降雨径流对河流氮磷入湖总量的影响. 地理研究, 2004, **23**(5): 593-604.]
- [20] Chen QW, Tan K, Zhu CB *et al.* Development and application of a two-dimensional water quality model for the Daqinghe River Mouth of the Dianchi Lake. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(3): 313-318.
- [21] Wei Fusheng, Bi Tong, Qi Wenqi eds. *Methods for monitoring and analysis of water and wastewater* (Fourth Edition). Beijing: Chinese Environmental Science Press, 2002 (in Chinese). [魏复盛, 毕彤, 齐文启. 水和废水检测分析方法(第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.]
- [22] Zhao Haichao, Wang Shengrui, Jiao Lixin *et al.* Characteristics of temporal and spatial distribution of nitrogen loading in Erhai Lake in 2010. *Res Environ Sci*, 2013, **26**(4): 389-395 (in Chinese with English abstract). [赵海超, 王圣瑞, 焦立新等. 2010 年洱海全湖氮负荷时空分布特征. 环境科学研究, 2013, **26**(4): 389-395.]

- [23] Liu Xincheng, Shen Huanting, Huang Qinghui. Concentration variation and flux estimation of dissolved inorganic nutrient from the Changjiang River into its estuary. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2002, **33**(3): 332-340 (in Chinese with English abstract). [刘新成, 沈焕庭, 黄清辉. 长江入河口区生源要素的浓度变化及通量估算. 海洋与湖沼, 2002, **33**(3): 332-340.]
- [24] Tohru S, Hirofumi I, Etsuji D. Benthic nutrient remineralization and oxygen consumption in the coastal area of Hiroshima Bay. *Water Research*, 1989, **23**(2): 219-228.
- [25] Guan Xipeng. Temporal and spatial variations of nitrogen and phosphorus in main into-lake rivers for Dianchi Lake and the impact of rain force [Dissertation]. Kunming: Yunnan Agricultural University, 2009 (in Chinese with English abstract). [管锡鹏. 主要入滇池河道氮磷污染物的时空变化及强降雨对其影响 [学位论文]. 昆明: 云南农业大学, 2009.]
- [26] Li Xiaoming, Yang Shuping, Zhang Yu *et al.* Planktonic algae diversity and its water quality monitoring in Chai River, Baoxiang River and Panlong River, three inflow river of Dianchi Lake. *Journal of Yunnan University: Natural Science Edition*, 2014, **36**(6): 950-958 (in Chinese with English abstract). [李晓铭, 杨树平, 张宇等. 入滇池河流柴河、宝象河与盘龙江浮游藻类多样性调查及其水质监测研究. 云南大学学报: 自然科学版, 2014, **36**(6): 950-958.]
- [27] Li Farong, Qiu Xueli, Zhou Jing *et al.* Surface runoff and pollutants characteristics of inflowing rivers in the agricultural and phosphorus-rich region on the southeast coast of the Lake Dianchi. *China Environmental Monitoring*, 2014, **30**(6): 93-101 (in Chinese with English abstract). [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.]
- [28] Zhan Fangdong, Fu Zhixing, Yang Jing *et al.* Effects of maize intercropping on characteristics of surface runoff pollution from vegetables fields in Dianchi watershed. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(4): 847-855 (in Chinese with English abstract). [湛方栋, 傅志兴, 杨静等. 滇池流域套作玉米对蔬菜农田地地表径流污染流失特征的影响. 环境科学学报, 2012, **32**(4): 847-855.]
- [29] Kong Yan, He Shuzhuang, Hu Bin *et al.* The settlement and transfer rule of phosphorus in stormwater runoff from phosphorus-rich area in Dianchi Watershed. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(9): 2160-2166 (in Chinese with English abstract). [孔燕, 和树庄, 胡斌等. 滇池流域富磷地区暴雨径流中磷素的沉降及转移规律. 环境科学学报, 2012, **32**(9): 2160-2166.]
- [30] Liu Ruizhi, Zhu Lina, Lei Kun *et al.* Comprehensive treatment effect analysis of river inflowing into Dianchi Lake during 'Eleventh Five Year Plan' period. *Environmental Pollution & Control*, 2012, **34**(3): 95-100 (in Chinese with English abstract). [刘瑞志, 朱丽娜, 雷坤等. 滇池入湖河流“十一五”综合整治效果分析. 环境污染与防治, 2012, **34**(3): 95-100.]
- [31] Wang Huaguang, Liu Bibo, Li Xiaoping *et al.* Seasonal variation of water quality of Xinyunliang River, Dianchi Basin and the impact of the riparian ecological restoration. *J Lake Sci*, 2012, **24**(3): 334-340 (in Chinese with English abstract). DOI: 10.18307/2012.0302. [王华光, 刘碧波, 李小平等. 滇池新运粮河水水质季节变化及河岸带生态修复的影响. 湖泊科学, 2012, **24**(3): 334-340.]
- [32] Jin Xiaodan, Wu Hao, Chen Zhiming *et al.* Phosphorus fractions, sorption characteristics and its release in the sediments of Yangtze Estuary Reservoir, China. *Environmental Science*, 2015, **36**(2): 448-456 (in Chinese with English abstract). [金晓丹, 吴昊, 陈志明等. 长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性. 环境科学, 2015, **36**(2): 448-456.]
- [33] Cai Longyan, Li Ying, Zheng Zihang. Temporal and spatial distribution of nitrogen and phosphorus of lake systems in China and their impact on eutrophication. *Earth & Environment*, 2010, **38**(2): 235-241 (in Chinese with English abstract). [蔡龙炎, 李颖, 郑子航. 我国湖泊系统氮磷时空变化及对富营养化影响研究. 地球与环境, 2010, **38**(2): 235-241.]
- [34] Hu Xiaolei. Summing up the research on eutrophication mechanisms of lakes and reservoirs. *Water Resources Protection*, 2009, **25**(4): 44-47 (in Chinese with English abstract). [胡晓镭. 湖、库富营养化机理研究综述. 水资源保护, 2009, **25**(4): 44-47.]
- [35] Chen C, Wang GX, Zhu ZY *et al.* Study on eco-remediation in urban-ponds; restoring submerged macrophytes. *J Lake Sci*, 2006, **18**(5): 523-527 (in Chinese with English abstract). DOI: 10.18307/2006.0514. [陈灿, 王国祥, 朱增银等. 城市人工湖泊水生植被生态恢复技术. 湖泊科学, 2006, **18**(5): 523-527.]
- [36] Cai Jialiang, Su Yu, Wen Hang *et al.* Characteristics of macrozoobenthic assemblages and their relationship with aquatic environmental factors in streams of Lake Dianchi watershed in the wet season. *Environmental Science*, 2011, **32**(4): 982-

- 989 (in Chinese with English abstract). [蔡佳亮, 苏玉, 文航等. 滇池流域入湖河流丰水期大型底栖动物群落特征及其与水环境因子的关系. 环境科学, 2011, 32(4): 982-989.]
- [37] Chen Jianjun. Analysis of water quality of main into-lake rivers in Dianchi Lake. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2005, 20(4): 569-572 (in Chinese with English abstract). [陈建军. 滇池主要入湖河流水质分析. 云南农业大学学报, 2005, 20(4): 569-572.]
- [38] Wu Fengchang, Jin Xiangcan, Zhang Ruiyu *et al.* Effects and significance of organic nitrogen and phosphorous in the lake aquatic environment. *J Lake Sci*, 2010, 22(1): 1-7 (in Chinese with English abstract). DOI: 10.18307/2010.0101. [吴丰昌, 金相灿, 张润宇等. 论有机氮磷在湖泊水环境中的作用和重要性. 湖泊科学, 2010, 22(1): 1-7.]
- [39] Gao Lu, Pan Min. Analysis of the water quality of the main rivers flowing into Dianchi Lake in Chenggong new city of Kunming. *Journal of Yunnan University of Nationalities*, 2011, 20(3): 225-228 (in Chinese with English abstract). [高路, 潘珉. 昆明呈贡新区入滇池主要河流水质分析. 云南民族大学学报: 自然科学版, 2011, 20(3): 225-228.]
- [40] House WA, Denison FH, Armitage PD. Comparison of the uptake of inorganic phosphorus to a suspended and stream bed-sediment. *Water Research*, 1995, 29(3): 767-779.
- [41] Hu Zhengfeng. Seasonal variation of phosphorus forms and mutual transformation in Grand River watershed, Canada [Dissertation]. Chongqing: Southwestern University, 2013 (in Chinese with English abstract). [胡正峰. 加拿大格兰德河水体磷素形态转化及水生生物对磷素吸收释放研究 [学位论文]. 重庆: 西南大学, 2013.]