

乌江流域梯级水库的氮磷分布及其滞留效率研究

向鹏^{1,2}, 王仕禄^{1*}, 卢玮琦^{1,2}, 杨玉雪^{1,2}, 黄强盛¹

(1. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 河流梯级水坝建设不仅造成营养元素在水库累积, 向下游的输送通量降低, 而且由于对不同元素的不同拦截效率会影响到元素的计量关系, 从而影响水库生态系统和水质变化。为了厘清水库对 N、P 的拦截效率, 本研究于 2013~2015 年分三次对乌江流域七个大型梯级水库水体总氮(TN)和总磷(TP)浓度进行了采样分析, 探讨了不同梯级水库中氮磷营养元素的分布及其滞留效率。结果发现, 乌江流域各梯级水库中 TN 浓度从上游到下游有逐级降低的趋势, 每一级水库拦截了 2%~13% 的氮。乌江流域梯级水库较低的生产力和较高的氧浓度使其对 TP 的拦截效率更高, 但水库较低的 TP 浓度使得拦截效果容易受到外源 P 输入的抵消。水库对 TN、TP 的拦截效率差异导致水库 N/P 比值发生了明显变化, 因而在流域管理控制 N、P 的方法选择上应充分考虑这一自然过程的影响。

关键词: 乌江流域; 水库; 氮、磷; 滞留效率

中图分类号: P593 文献标识码: A 文章编号: 1672-9250(2016)05-0492-10 doi: 10.14050/j.cnki.1672-9250.2016.05.002

河流是连接陆地和海洋系统的重要纽带, 物质从陆地生态系统输出后, 逐步汇入河流并最终输送到海洋, 启动了全球生物地球化学循环过程, 因而河流是全球物质循环最重要的通道之一^[1-4]。其中, 氮磷是河流输送的最重要的物质。作为营养元素, 氮磷直接关系到水体初级生产力、水生生态系统结构与功能、水环境质量等很多方面。氮是海洋生态系统的限制性因素, 从陆地生态系统输入到海洋的氮直接影响到整个海洋系统的生态环境。磷通常是淡水生态系统的限制性因素, 直接影响到沿途河流、河口、湖泊、水库等水生生态系统的环境质量。随着社会经济不断发展, 人为活动导致输入到河流的氮磷营养元素载荷不断增加, 给内陆及沿岸水环境带来越来越严重的影响。

河流修建水库大坝后会对营养元素输送产生直接影响。一方面, 河流拦截会减少陆地到海洋的营养元素输送通量, 进而影响到海洋生态与环境。另一方面, 氮磷等营养元素随着水库的拦截作用会逐渐在水库中累积, 从而对水库水环境质量产生重大影响。其次, 水库对不同营养元素拦截的机理、

效率不同, 从而影响到不同营养元素之间的计量平衡关系, 这种关系变化也会对水环境、水生态产生重大影响。如对 Si 的拦截导致下游 Si 含量降低, 从而使硅藻的生物量降低^[5]; 对 N、P 的不同拦截效率会影响到下游水体 N/P 比值, 从而影响到蓝藻的生长和水华爆发。因此, 加强水库对河流营养元素拦截效率的研究, 对认识人为活动影响下元素的生物地球化学循环及其环境效应, 加强流域管理, 维持河流生态环境和水库水质的健康状况具有重要意义。

乌江是长江上游南岸最大的支流, 同时也是营养元素的主要补给源之一。其中乌江输入到长江的磷占长江输送总磷的三分之一^[6-8], 乌江对长江营养元素载荷的影响可见一斑。乌江干流目前已建成并投入使用的水库依次有普定水库、引子渡水库、洪家渡水库、东风水库、索风营水库、乌江渡水库、构皮滩水库、思林水库、沙陀水库和彭水水库。这 10 级梯级电站开发使乌江成为一个全流域梯级开发河流, 这些梯级水库拦截削减了多少 N、P 进入三峡水库, 又有多少 N、P 累积到梯级水库, 影响到

收稿日期: 2016-00-00; 改回日期: 2016-00-00

基金项目: 国家重大科学研究计划项目(2013CB956700); 国家自然科学基金项目(91547117); 环境地球化学国家重点实验室开放课题(SKLEG2013809)。

第一作者简介: 向鹏(1989-), 男, 硕士研究生, 主要从事湖泊环境变化研究。E-mail: xiangpeng13@mails.ucas.ac.cn.

* 通讯作者: 王仕禄(1969-), 男, 博士, 研究员, 主要从事环境地球化学方面的研究。E-mail: wangshilu@vip.skleg.cn.

梯级水库的水环境,目前还不完全清楚。本次研究比较了乌江流域中上游的7个梯级水库总氮(TN)、总磷(TP)的浓度变化,分析了乌江流域梯级水库对氮、磷营养盐的滞留效率及其差异,初步揭示了造成这种差异的原因。

1 样品的采集与分析

1.1 研究区概况

乌江流域地处 $25^{\circ}56'N \sim 30^{\circ}01'N$, $105^{\circ}09'E \sim 109^{\circ}02'E$ 。乌江为贵州省内第一大河,南源三岔河,流域面积 $0.73 \times 10^4 \text{ km}^2$,河长325.6 km;北源六冲河,流域面积 $1.07 \times 10^4 \text{ km}^2$,河长268 km^[9]。流域内沉积岩发育良好,地层齐全,是我国碳酸盐类岩石分布面积最大、岩溶最发育的地区。其中贵州省境内碳酸盐岩出露面积达 $1.3 \times 10^5 \text{ km}^2$,占全省总面积的73.6%^[10]。乌江流域平均海拔高度约1000 m,地势起伏大,总的趋势是西部较高,海拔1400~2400 m,中部较低,海拔800~1400 m,流域

内坡地广为发育,平地仅占全流域面积的11.7%,其余88.3%均为坡地^[11]。乌江流域内年平均气温为 $13 \sim 18^{\circ}\text{C}$,年降雨量一般在900~1400 mm,多集中在5~10月,每年5~10月为丰水期,占全年总水量的80%左右,11月至次年4月为枯水期,仅占全年总降水量的20%。随着社会经济的发展,乌江流域内的自然环境也承受了巨大的压力。乌江流域贵州段内总人口达2300多万,其中城镇人口近640万,生活污水及工业废水排放,以及矿产资源开发利用等人为活动势必会对流域生态环境造成极大的影响^[12]。

随着“西电东送”工程的实施,乌江干流中上游目前已修建了7个梯级水库,分别是普定水库、引子渡水库、洪家渡水库、东风水库、索风营水库、乌江渡水库和构皮滩水库(图1)。表1列出了乌江干流中上游7个水库的基本特征。其中,库龄最长的是乌江渡水库,修建于1979年,库龄超过35年。较新的引子渡水库、洪家渡水库和构皮滩水库,库龄约

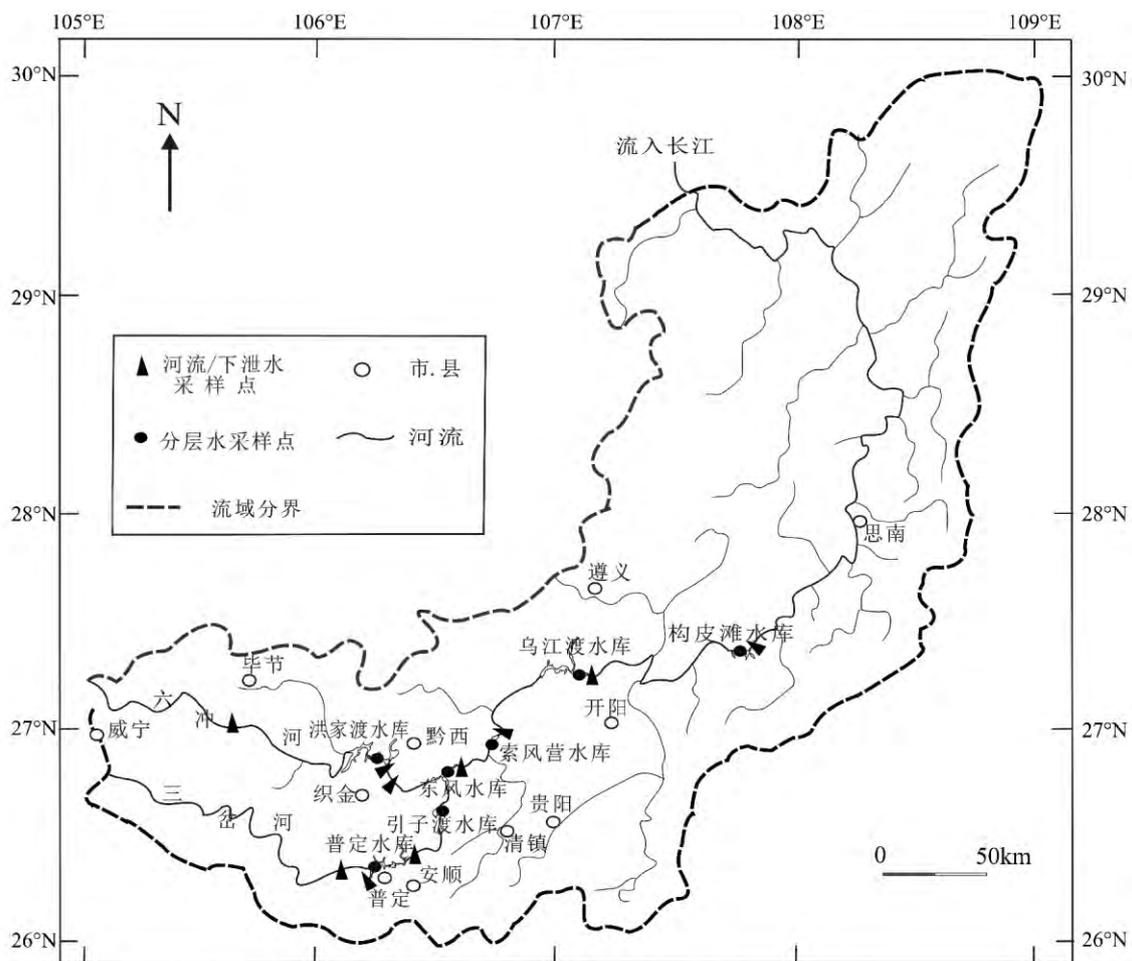


图1 乌江流域水库与采样点位置图

Fig.1 Map showing the locations of the study reservoirs and sampling sites in Wujiang River Basin

表1 乌江流域中上游7个水库的基本特征^[9,13]Table 1 Characteristics of the seven study reservoirs in Wujiang River Basin^[9,13]

项目	普定水库	引子渡水库	洪家渡水库	东风水库	索风营水库	乌江渡水库	构皮滩水库
坝址	普定县	平坝/织金	织金/黔西	黔西/清镇	黔西/修文	遵义	余庆县
修建时间	1993年	2004年	2004年	1994年	2002年	1979年	2003年
控制流域面积/km ²	5871	6425	9900	18161	21862	27790	43250
多年平均流量/(m ³ /s)	114	152	155	345	427	502	717
(正常蓄水位/死水位)/m	1 145/1 126	1 088/1 064	1 140/1 076	970/936	835/813	760/720	630/585
正常蓄水位水库面积/km ²	20.61	13.88	80.5	19.06	5.7	47.8	—
(总库容/调节库容)/(×10 ⁸ m ³)	4.209/2.653	5.43/3.97	49.25/33.61	8.63/4.9	1.57/0.85	21.4/13.5	55.64/31.54
调节性能	不完全年调节	季调节	多年调节	季调节	日调节	季调节	年调节
淹没耕地/hm ²	506.92	351.58	1940.97	583.22	16.68	1453.46	—
蓄水时间	1994年	2004年	2004年	1994年	2005年	1979年	2011年
水体滞留时间/天	40.6	41.3	368.8	28.1	4.3	49.3	89.8

10年。水库大小不一,最小的是索风营水库,库容约 $1 \times 10^9 \text{ m}^3$,最大的是构皮滩水库,库容超过 $50 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。换水周期变化很大,最短的是索风营水库,水体的滞留时间仅几天,最长的为洪家渡水库,水体的滞留时间长达1年。

1.2 采样

本次研究分别于2013年9月,2014年7月和2015年6月,分三次利用Niskin深水采样器分别对乌江流域中上游7个水库(图1)收集不同深度的湖水样品。湖水采样垂直间距依据水化学参数(如温度、pH等)变化梯度,在2~30m之间:表层湖水按深度,依次采集0.3、5、10、20和30m样品;30m以下按20m间距采集分层水;100m以下按30m间距采集水样。其中2013年第一次采样时采样最大水深只采到50m,后两次采样最大深度接近底部沉积物表面。2013和2014年两次采样还分别收集了主要入库河流和水库的下泄水样品。现场用多参数水质参数仪(YSI6600V2-4)测定水化学参数,包括温度、溶解氧(DO)等指标。用于总氮总磷分析的样品,现场用浓 H_2SO_4 酸化、密封并低温保存。样品带回实验室后,一周内完成TN和TP的测定。

1.3 化学分析

TN的测定:取15mL水样,用2mol/L的NaOH调节水样的pH值,使其pH值在5~9之间。然后取调节后的样品10mL放入25mL的比色管中,加入5mL的碱性过硫酸钾消解,在压力为 $1.1 \sim 1.4 \text{ kg/cm}^2$ 、温度为 $124 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下,消解30min。自然冷却后取出样品并加入1mLHCl溶液(盐酸与超纯水的体积比为1:9),最后用超纯水将样品定容

至25mL,采用紫外分光光度计(UV9100,北京莱伯泰科仪器有限公司)测定总氮。本方法的最低检出浓度为 0.05 mg/L ,最高上限浓度为 4 mg/L (GB 11894-89)。标准曲线的 $R^2=0.999$ 。

TP的测定:取25mL水样于50mL的比色管中,加入4mL的过硫酸钾溶液,在压力为 $1.1 \sim 1.4 \text{ kg/cm}^2$ 、温度为 $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下,消解30min,在自然冷却的情况下,取出样品用超纯水定容至50mL,最后使用钼酸铵分光光度法测定总磷。本方法的最低检出浓度为 0.01 mg/L ,测定上限为 0.6 mg/L (GB 11893-1989)。标准曲线的 $R^2=0.999$ 。

2 结果与讨论

2.1 梯级水库水体温度、溶解氧、TN、TP垂直分布

2.1.1 温度与DO

深水水库受日照影响夏季水体会出现温度分层,稳定的热分层会阻碍水体的垂直交换,因而对水体理化指标(如溶解氧、氮、磷等)产生较大影响。温度的垂直变化在一定程度上反映了水库上下水体间的相对稳定性,直接影响着水团的垂向对流,对营养元素在水库内的垂直分布及形态特征也有一定的间接影响^[14]。图2显示了三次采样时不同深度湖水的温度变化。总体上,受到干流以及水库水体本身水动力条件影响,各水库的温度变化特点有所不同。上游的普定水库较浅,三次采样均未出现明显的分层现象;洪家渡水库湖水滞留时间最长,温度分层也最明显,2014年7月和2015年6月都在30~40m深度出现温跃层。其次是最下游的

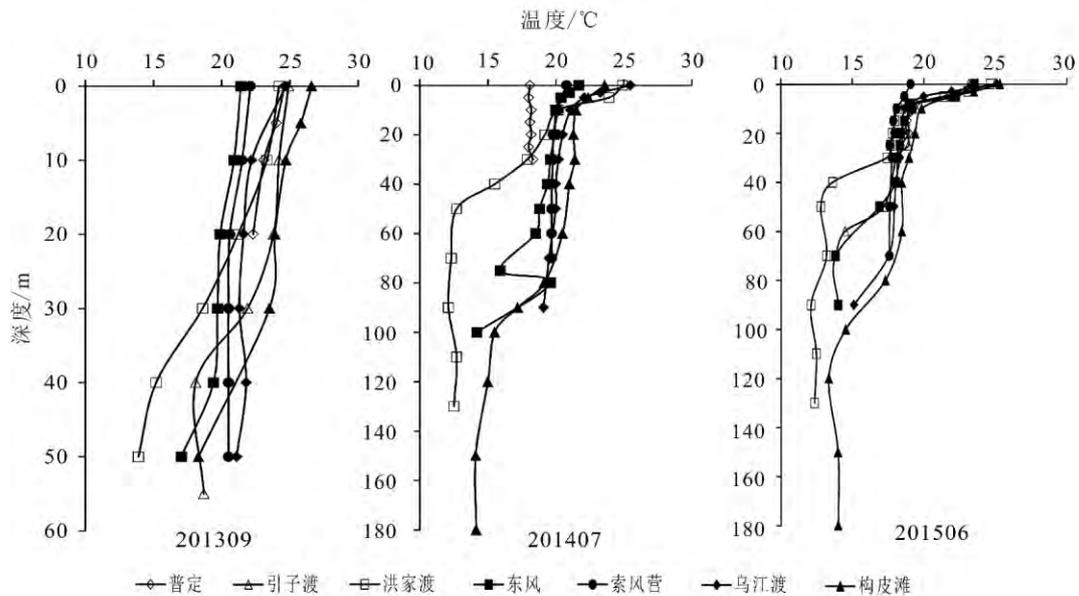


图2 乌江流域水库温度变化的垂直剖面

Fig.2 Vertical variations of water temperature for the study reservoirs in Wujiang River Basin

构皮滩水库 滞留时间达到 90 天,在 90 m 水深处出现明显的温度变化。其他水库虽然在底部也出现温度降低的现象,但分层不明显,这可能与相对较强的水动力条件有关。除此以外,表层 10 m 湖水受短期气候影响,水体温度明显升高。秋季 9 月(2013 年)温度分层消失。

水库中 DO 的分布受浮游植物光合作用产氧和呼吸作用耗氧之间的平衡所控制,并与水动力条件、光合作用和呼吸作用强度以及化学氧化等因素有关^[15]。在水库环境中,表层浮游植物的光合作用会释放氧气,而下部呼吸作用以及有机残体的降解过程会消耗氧气,还原性物质的输入也会引起水体中的 DO 含量降低。乌江流域水库中 DO 浓度分布与温度变化基本一致,9 月(2013 年)湖水的垂直混合使上下层水 DO 差异很小,在垂直剖面上比较稳定。而在 6、7 月份,表层到 10 m 之间强烈的光合作用导致 DO 升高,浓度均超过 8.5 mg/L(图 3)。相对而言,干流较强的水动力条件会带入较多的氧气,致使底部未出现缺氧现象,甚至有相对较高的 DO 浓度。

2.1.2 TN 氮垂直分布特征

从时间上看,2014 年和 2015 年两次采样时,各水库 TN 浓度比较接近,而 2013 年时水库 TN 浓度较低,仅相当于 2014 年和 2015 年采样时的一半(图 4)。本次研究三次采样属于不同年份的不同月份,

不宜直接比较,因此不能准确区分上述变化属于季节性变化还是年际变化。朱俊(2005)^[16]通过对一个完整水文年的采样分析发现,水体中 TN 含量在垂直方向上的季节变化表现为夏季大于冬季和春季。本次研究结果与这一认识是相符的,即秋季 TN 浓度低于夏季。这可能是由于夏季丰水期降雨量大,面源污染通过径流输入导致的。

除了 2013 年 9 月 TN 浓度明显低于 2014 年 7 月和 2015 年 6 月外,2014 年 7 月与 2015 年 6 月每个水库两次采样不仅 TN 浓度值比较接近,而且垂向分布也很相似。相比较而言,各个水库之间显示出一些差异,表明水库内部的水文及生物地球化学过程是控制水体 TN 浓度变化的因素之一。源头的的第一级水库普定水库 TN 含量最高,从 15 m 左右向上 TN 浓度逐渐增加(图 4a),暗示了外源输入是控制源头水库 TN 的重要因素。引子渡、洪家渡、索风营在 30 m 左右出现最大值,向上逐渐降低,表明光合作用的消耗可能是影响这些水库表层 TN 浓度变化的重要因素。相对应的,洪家渡、索风营水库表层 30 m 内,溶解态硅浓度梯度较大^[14],也与浮游植物光合作用的吸收有关,其他水库 TN 浓度垂向变化不显著,可能与来水扰动作用较大有关。

2.1.3 TP 垂直面分布特征

与 TN 浓度相比,各水库 TP 浓度显示出更复杂的变化,这实际上与水库磷循环比氮循环活跃是一

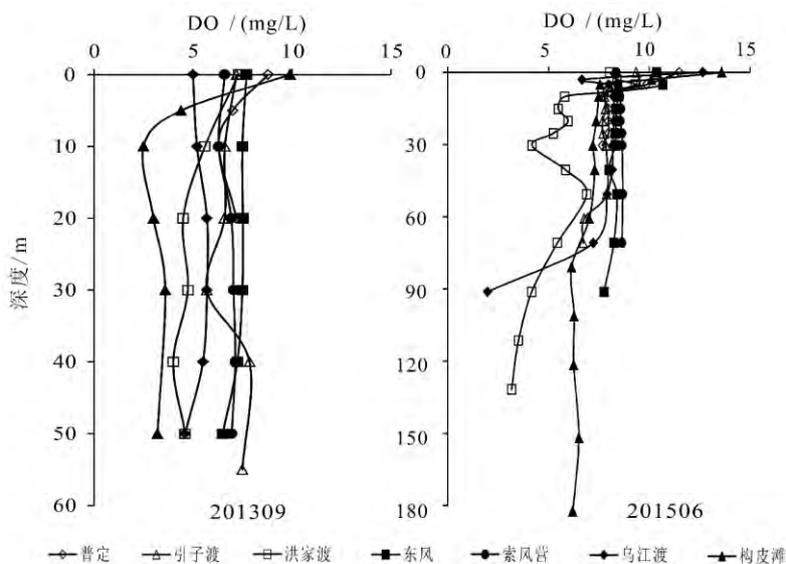
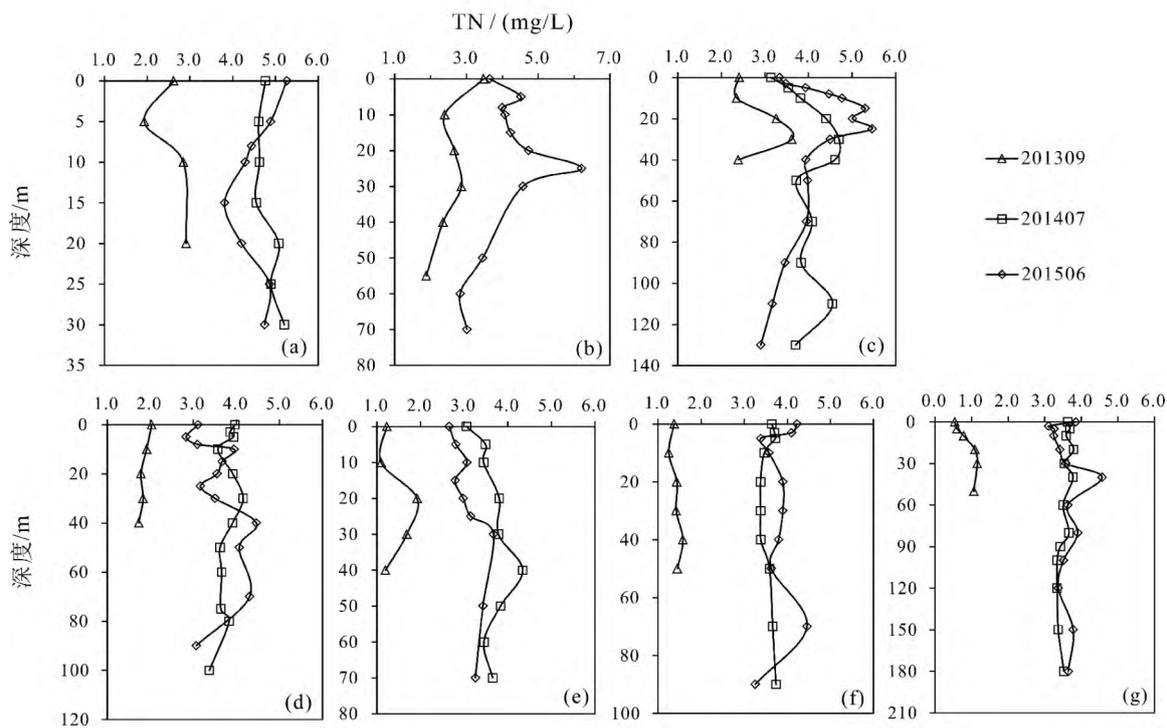


图3 乌江流域水库 DO 垂直剖面分布

Fig.3 Vertical variations of DO for the study reservoirs in Wujiang River Basin



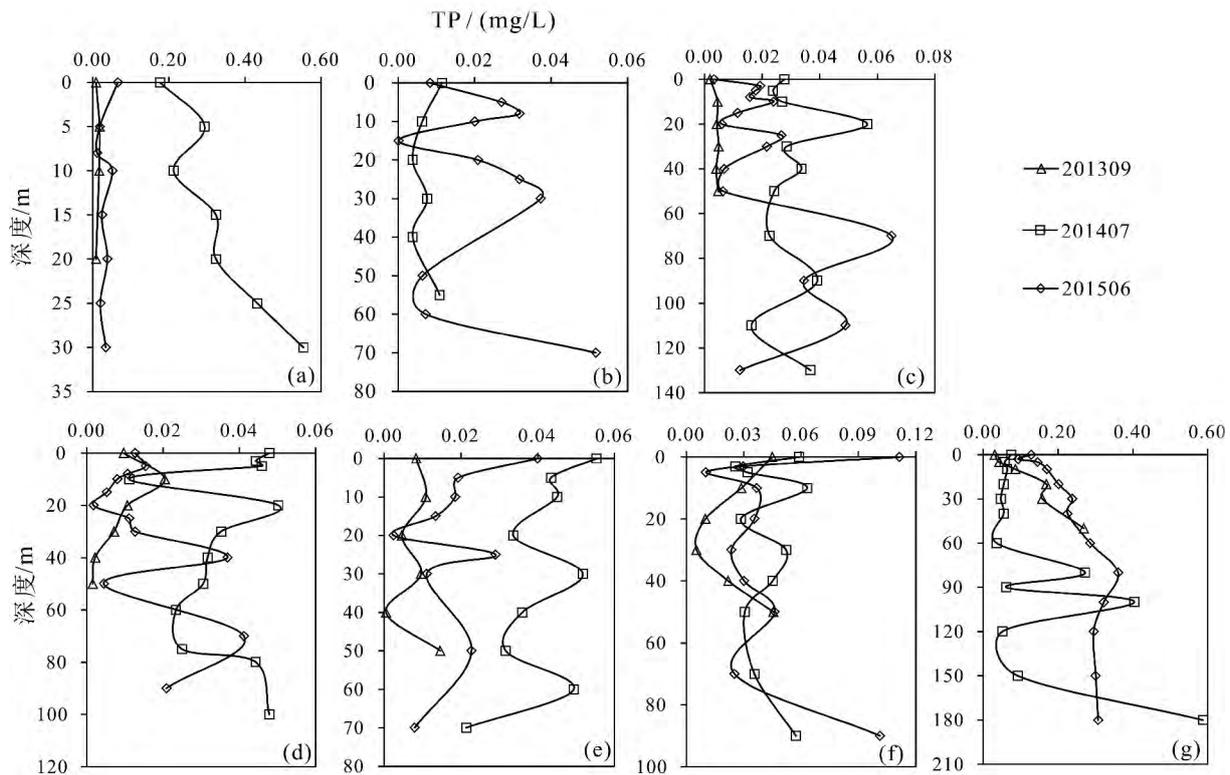
(a) 普定水库; (b) 引子渡水库; (c) 洪家渡水库; (d) 东风水库; (e) 索风营水库; (f) 乌江渡水库; (g) 构皮滩水库

图4 各水库 TN 浓度的垂向变化

Fig.4 Vertical variations of TN concentration for the study reservoirs

致的。总体上,乌江流域水库除下游构皮滩水库 TP 浓度较高以外,其他水库 TP 浓度较低,一般都低于 0.06 mg/L (图 5)。各水库 TP 的变化也各有差异。普定水库 2013 年 9 月和 2015 年 6 月垂直分布比较

均匀,维持在 0.02 mg/L 左右,2014 年 7 月水体 TP 含量最高,表层达到 0.18 mg/L,并随深度增加而逐渐升高。引子渡水库在 2013 年 9 月时,TP 浓度随深度变化不大,但 2015 年 6 月 TP 的垂向变化很大。



(a) 普定水库; (b) 引子渡水库; (c) 洪家渡水库; (d) 东风水库; (e) 索风营水库; (f) 乌江渡水库; (g) 构皮滩水库

图 5 各水库 TP 浓度的垂向变化

Fig.5 Vertical variations of TP concentration for the study reservoirs

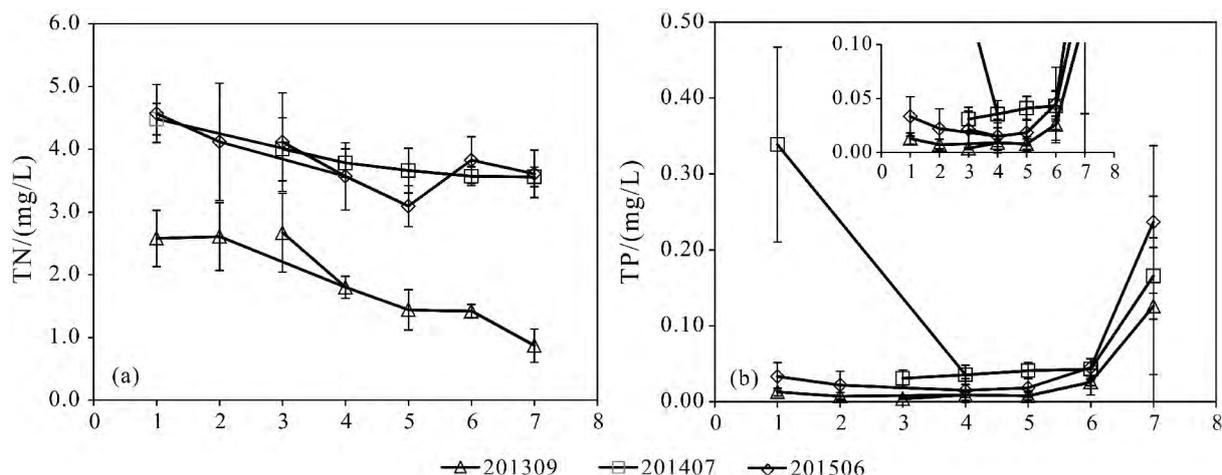
最下游的构皮滩水库 TP 浓度最高,垂向上一一般表层较低,向下逐渐升高。这些水库在时间上,都表现为 2014 年 7 月的浓度都比其他两次高。2014 年采样时间是在雨季的暴雨之后,地表径流和地下水带入了较多的外源磷输入,显示了水库 TP 浓度受外源输入影响较大。

2.2 乌江流域各梯级水库 TN、TP 浓度比较

N、P 等营养元素从流域输出后,随河流向下游输送,这一过程会极大地受到水库修建以及其他人为活动的影响。对比乌江流域不同梯级水库 TN 浓度变化,可以发现: 2013 年、2014 年、2015 年三次采样,从上游到下游, TN 浓度都表现为逐渐降低。对比最上游的普定水库、洪家渡水库和采样最下游的构皮滩水库, 2013 年采样, TN 浓度分别从 2.58 ± 0.45 mg/L 和 2.67 ± 0.63 mg/L 下降到 0.87 ± 0.27 mg/L, 分别下降了 66% 和 67%; 2014 年 7 月采样 TN 浓度分别从 4.48 ± 0.25 mg/L, 4.00 ± 0.50 mg/L 降低到 3.56 ± 0.15 mg/L, 下降了 21.5% 和 20.0%; 2015 年分别从 4.57 ± 0.46 mg/L 和 4.11 ± 0.78 mg/L 降低到 3.61 ± 0.38 mg/L, 降低

了 21% 和 12% (图 6a)。平均每一级水库 TN 浓度在 2013 年下降 11% ~ 13%, 2014 年下降 2.2% ~ 3.4%, 2015 年下降 2.4% ~ 3.5%, 平均为 5.9%。这一结果与前人在三峡的研究中发现的 2% ~ 7% 的氮截留是一致的^[17]。

TP 浓度显示了与 TN 浓度变化不同的趋势,从上游第一级水库到下游采样点最后一级水库, TP 表现为先下降,后上升的“U”型分布,而且 TP 浓度的变化幅度更剧烈,显示了外界条件对水库水体 TP 有非常大的影响(图 6b)。在 2014 年 7 月采样过程中,恰逢一次大的降雨事件,使得源头一级水库普定水库 TP 浓度超过 0.4 mg/L,下一级水库引子渡水库由于山洪暴发没有能够收集到样品,但在一级水库东风水库 TP 浓度已经降低到 0.036 mg/L,降低了 91%。从乌江渡水库开始 TP 浓度开始升高,下游的构皮滩水库 TP 浓度三次采样均超过 0.2 mg/L。乌江下游是我国主要的磷矿开采区,高 P 浓度的地下水输入以及地表工业含磷废水排放是水库 TP 浓度升高的主要原因。这进一步凸显了人为活动对水体 TP 浓度升高的决定性影响。



1-普定水库; 2-引子渡水库; 3-洪家渡水库; 4-东风水库; 5-索风营水库; 6-乌江渡水库; 7-构皮滩水库

图6 乌江流域水库的TN、TP浓度变化

Fig.6 Variation in concentrations of TN and TP for the study reservoirs in Wujiang River Basin

2.3 乌江流域梯级水库TN、TP的滞留

乌江流域各水库TN、TP既受人为输入的影响,也受到水库拦截作用的调节。TN从上游到下游逐渐降低,主要受后者控制;TP的“U”型分布受到两个方面的影响。但各个水库受地质、水文、水动力条件以及人为活动影响强度的影响,TN、TP的变化各不相同。本文利用入库、出库的TN、TP浓度,估算水库的表观滞留效率 RET_f ^[18],分析上游普定水库、中游东风水库以及下游乌江渡水库对TN、TP的截留效率(表2)。

$$RET_f = (M_{in} - M_{out}) / M_{in} \quad (1)$$

式中, RET_f 代表表观滞留效率; M_{in} 、 M_{out} 分别代表营养盐入、出库通量; $M = CQ$, C 代表营养盐浓度(mg/L), Q 为径流量(m^3)。

计算结果(表2)显示,各水库TN、TP的滞留效率变化比较复杂,不同水库,以及同一水库不同年份之间都显示出较大的差异。乌江流域最上游的一级水库普定水库两次采样的结果相差很大:在2013年9月TN的输入、输出分别为8592.1t和6183.4t,截留了2408.7t,滞留效率为28%,TP的输入输出分别为39.6t,43.1t,拦截了-3.5t,滞留效率为-9.1%;2014年TN的输入、输出分别为18301.4t,16968.4t,截留了1333t,滞留效率分别为7.3%,TP的输入输出分别为3386.6t,1714.8t,拦截了1671.8t,滞留效率为49.4%。从时间上而言,2014年7月TN、TP的输入输出量远大于2013年9月,从滞留效率而言,2014年7月TP的滞留效率远大于TN(49.4%对7.3%),2013年9月

表2 普定、东风和乌江渡水库氮、磷营养盐的年输送通量及表观滞留效率

Table 4 Flux and retention of TN and TP for Puding, Dongfeng and Wujiangdu Reservoirs

库名	年份	TN			TP		
		入库总量/t	出库总量/t	滞留效率/%	入库总量/t	出库总量/t	滞留效率/%
普定水库	2013	8592.05	6183.4	28.0	39.6	43.14	-9.1
	2014	18301.4	16968.4	7.3	3386.6	1714.8	49.4
	2005 ^[16]	35436.8	30592.4	13.7	326.1	147.8	54.7
东风水库	2013	19913.0	15884.8	20.2	129.6	97.9	24.4
	2014	49588.5	44172.0	10.9	2846.5	554.9	80.5
	2005 ^[16]	48591.4	48408.5	0.4	557.9	833.9	-49.5
乌江渡水库	2010 ^[19]	31020.0	30720.0	1.0			
	2013	35499.6	23429.9	34.0	605.0	744.1	-23.0
	2014	59811.6	62215.8	-4.0	1309.8	1155.7	13.4

TN的滞留效率远大于TP(28%对-9.1%)。对元素而言,从2013年9月到2014年7月,TN的滞留效率从28%减小到7.3%;TP的滞留效率从-9.1%增加到49.4%。

中游的东风水库TN、TP的滞留情况与普定水库具有一定的可比性:2014年7月输入输出量大于2013年,从滞留效率而言,两次采样TN、TP的滞留效率分别为15.6%和52.4%,这与朱俊(2005)^[16]利用整个水文年的计算结果(13.7%和54.7%)非常一致。这也可以看出TP的滞留效率高于TN,几乎是TN的3倍。

乌江渡水库在2013年9月和2014年7月TN、TP的截留特点与其他水库也具有一定的相似性,即2014年7月TN、TP输入输出大于2013年7月,其中在2014年7月TP的滞留效率大于TN,在2013年9月TN的滞留效率大于TP。TP的滞留效率在2013年9月低至-23%,与朱俊(2005)^[16]2005年全年的分析结果(-49.5%)具有可比性;TN的滞留效率在2014年7月的结果低到-4.0%,与朱俊(2005)^[16]和刘小龙(2010)^[19]的结果也具有可比性,他们的研究结果分别为0.4%和1.0%。

对比这三个水库的计算结果可以发现,外界环境对水库营养盐输入和滞留有很大的影响,使得同一水库不同年份、月份的计算结果差异很大。三个水库在2013年,营养盐的输入、输出通量都较低,相比较而言,N的滞留效率较高,P的滞留效率较低。而在2014年营养盐的输入、输出通量都较大,P的滞留效率大于N的滞留效率。在不同年份、不同月份,外界环境的差异会通过生物地球化学循环过程放大N、P形态上的差异。如,有机质降解作用较强的季节,P的释放使得P的滞留效率减小,而有机质降解导致的反硝化作用可能会加大N的滞留效率。2014年7月一次大的降雨事件后,各水库TP输入输出量较大,暴雨事件带入大量的颗粒物并沉积在水库中,使得对P的滞留效率加大。

水库的地理位置对营养盐滞留也有较大的影响,位于上、中、下游不同河段的梯级水库对N、P截留的影响相差很大。上游普定水库对流域输出变化很敏感,因而更容易受到流域气候、水文条件的影响。普定水库从2013年9月到2014年7月,TN的滞留效率从28%减小到7.3%,TP的滞留效率从-9.1%增加到49.4%。

中游的东风水库TP的滞留效率(52.4%)高于

TN(15.6%)。这与深水型干流水库的变化特征是一致的,张恩仁和张经(2003)^[17]对三峡水库研究发现,三峡水库蓄水后发育出的水库生态系统可将上游输入的2%~7%的溶解无机氮和13%~42%的溶解无机磷转化为有机颗粒态营养盐。Jossette(1999)^[20]对法国Seine河上不同支流的三个水库进行了三年的监测,发现水库对氮、磷、硅的滞留比例分别为40%、60%和50%。另一方面,我们的结果与浅水富营养湖泊明显不同。胡春华(2012)^[21]研究表明,鄱阳湖TP的滞留效率为29.4%,溶解无机氮(DIN)为43.62%。

乌江流域水库磷的滞留高于氮的滞留与滞留机制、泥沙沉降和吸附等因素有关。水库对河流营养盐的拦截主要通过物理沉降和生物吸收利用后有机颗粒物的沉积。乌江流域河流TP通量中大约80%是颗粒态磷(PP)^[22],因而P容易受水库颗粒物的沉积作用而被拦截。另一方面,乌江流域水库中缺少底部无氧层,使P容易被氧化态的颗粒物吸附保存在沉积物中,增大了磷的滞留效率^[23]。东风水库沉积物中总无机磷占到总磷的81.9%是一个直接的证据。相对而言,乌江流域各水库底层缺少无氧层,抑制了反硝化作用,使得N的滞留效率相对较小。

位于下游的乌江渡水库TN具有较低的表现滞留效率。原因之一是一些人为输入的氮未被考虑在内,网箱养鱼中饵料的投放是一个重要方面。除此以外,乌江渡水库周围地区人口的增加也增大了人为N的输入,使得计算的TN表现滞留效率较低。乌江渡水库TP的滞留效率多为负值,表明有较多P的输入没有计算在内,其中地下水输入和周边磷化工企业输入的P是主要输入源。乌江渡水库至下游的构皮滩水库,地处磷矿区,存在较多途经的磷输入。林少华(2011)^[24]在乌江渡岸边发现了一个总磷浓度高达8334.77 mg/L的泉水样品,充分说明了地下水输入是一个重要的磷输入源。

总体上,乌江流域梯级水库对P的截留效率大于对N的截留效率,使得从上游到下游,不同梯级水库的N/P比值逐渐增加。上游源头水库的TN/TP一般在300左右,到中游水库增加到500左右,到下游的乌江渡水库,由于人为P的输入,使得N/P比值降低到100~200之间,再到下游的构皮滩水库,N/P比值降至50以下,水体也由原来的P限制转变为N限制。这种转变在环境治理和流域管

理上是必须要考虑的。

3 结论

通过对乌江流域梯级水库氮磷分布及其滞留效率的分析,得出以下结论:

1) 乌江流域梯级水库受水库拦截作用影响, TN 的浓度随水流方向逐级降低, 相邻一级水库 TN 浓度在 2013 年平均降低下降了 11%~13%, 2014 年下降 2.2%~3.4%, 2015 年 2.4%~3.5%。这一结果意味着每一级水库拦截了 2%~13% 的氮。

2) 相比较而言, 乌江梯级水库对 TP 的拦截效率更高, 这与乌江流域水库总体营养水平较低, 初级生产力较低, 水体含氧量较高是一致的。由于水体 TP 浓度较低, 水库对 TP 的拦截效果容易被外界 P 输入所抵消, 因而表现出较复杂的变化。

3) 梯级水库对 N、P 拦截效率的差异导致各级水库的 N/P 比值发生变化, 进一步会影响到水库生态和水质, 因而在流域管理控 N 还是控 P 的选择上, 应该充分考虑水库的拦截作用机制。

参 考 文 献

- [1] Meybeck M. Carbon, nitrogen, and phosphorus transport by world rivers [J]. *American Journal of Science*, 1982, 282(4): 401-405.
- [2] Ittekkot V. Global trends in the nature of organic matter in river suspensions [J]. *Nature*, 1988, 332: 436-438.
- [3] Schkesinger W H, Melack J M. Transport of organic carbon in the world's rivers [J]. *Tellus*, 1981, 33(2): 172-187.
- [4] Karr J R, Chu E W. Sustaining living rivers [J]. *Hydrobiologia*, 2000, 422/423(4): 1-14.
- [5] Humborg C, Conley D J, Rahm L, et al. Silicon retention in river basins: Far-reaching effects on biogeochemistry and aquatic food webs in coastal marine environments [J]. *Ambio: A Journal of the Human Environment*, 2000, 29(1): 45-50.
- [6] 沈志良. 长江磷和硅的输送通量 [J]. *地理学报*, 2006, 61(7): 741-751.
- [7] 段水旺, 章申, 陈喜保, 等. 长江下游氮、磷含量变化及其输送量的估计 [J]. *环境科学*, 2000, 21(1): 53-56.
- [8] 黄真理, 李玉梁, 李锦秀, 等. 三峡水库水环境容量计算 [J]. *水利学报*, 2004, 35(3): 7-14.
- [9] 贵州省地方志编纂委员会编. 贵州省水利志 [M]. 贵阳: 贵州省人民出版社, 1997.
- [10] 万国江, 等. 碳酸盐岩与环境(卷一) [M]. 北京: 北京地震出版社, 1995.
- [11] 肖进原. 乌江流域自然植被遥感解译分析研究 [J]. *贵州地质*, 1996, 13(4): 357-362.
- [12] 周智, 喻元秀, 熊际翎. 乌江流域水环境污染现状及容量与对策 [J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2004, 22(4): 42-45.
- [13] 中国水力发电史编辑委员会. 中国水力发电史(1904-2000) 第三册 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [14] 张翊鹏, 刘丛强, 吴攀, 等. 乌江中上游水库-河流体系夏秋季 N、Si 分布特征 [J]. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(4): 331-336.
- [15] 刘丛强. 生物地球化学过程与地表物质循环-西南喀斯特流域侵蚀与生源要素循环 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [16] 朱俊. 水坝拦截对乌江生源要素生物地球化学循环的影响 [D]. 贵阳: 中国科学院研究生院(地球化学研究所), 2005.
- [17] 张恩仁, 张经. 三峡水库对长江 N、P 营养盐截留效应的模型分析 [J]. *湖泊科学*, 2003, 15(1): 41-48.
- [18] 冉祥滨. 三峡水库营养盐分布特征与滞留效应研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [19] 刘小龙. 梯级水库开发对流域氮的生物地球化学过程的影响-以乌江中上游干流及支流猫跳河为例 [D]. 贵阳: 中国科学院研究生院(地球化学研究所), 2010.
- [20] Jossette G, Leporcq B, Sanchez N, et al. Biogeochemical mass-balances (C, N, P, Si) in three large reservoirs of the Seine Basin (France) [J]. *Biogeochemistry*, 1999, 47(2): 119-146.
- [21] 胡春华, 楼倩, 丁文军, 等. 鄱阳湖氮、磷营养盐的滞留效应研究 [J]. *环境污染与防治*, 2012, 34(9): 1-4.
- [22] 刘丛强. 河流筑坝拦截的水环境响应-来自地球化学的视角 [J]. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(4): 384-394.
- [23] 尹然, 汪福顺, 梅航远, 等. 乌江流域不同营养水平的梯级水库沉积物中磷形态特 [J]. *生态学杂志*, 2010, 29(1): 91-97.
- [24] 林少华, 丁坚平, 刘杰, 等. 贵州乌江渡水电站至楠木渡磷迁移转化机制分析 [J]. *地下水*, 2011, 33(2): 17-19.

Distribution and Retention Efficiency of Nitrogen and Phosphorus in Cascade Reservoirs in Wujiang River Basin

XIANG Peng^{1,2}, WANG Shilu¹, LU Weiqi^{1,2}, YANG Yuxue^{1,2}, HUANG Qiangsheng¹

(1. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Guiyang 550081;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: Cascade dams constructed in rivers have remarkable influences on global cycles of nutrient elements and aquatic environment through not only accumulating nutrients in the reservoirs and reducing the downstream output fluxes, but also changing the stoichiometric relations of different elements due to different retention mechanism and efficiency. In this paper, water samples were collected from seven large cascade reservoirs in Wujiang River Basin in September of 2013, July of 2014, and June of 2015; concentrations of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) were determined, and the retention efficiency of N and P in the reservoirs were estimated. Results show that concentration of TN in the reservoirs of Wujiang River Basin gradually decrease from upstream to downstream, by 2% ~ 13% in average, for each step reservoir. Low productivity and high oxygen concentration in the cascade reservoirs of the Wujiang river basin lead to a more efficient interception for P. However, the impact of highly-efficient retention of P is prone to be offset by exogenous P input due to the low P concentration in the reservoirs. The difference in interception efficiency of N and P in reservoirs leads to remarkable change in N:P in the water, and consequently causes change in environment and ecology in the water. Thus, the influence of interception of dams should be taken into account in the watershed management of controlling N and P.

Key words: Wujiang River Basin; cascade reservoir; nitrogen; phosphorus; retention efficiency