

## 水库对河流营养盐滞留效应研究进展\*

冉祥滨<sup>1</sup>, 于志刚<sup>1\*\*</sup>, 姚庆祯<sup>1</sup>, 陈洪涛<sup>1</sup>, 米铁柱<sup>2</sup>, 姚鹏<sup>1</sup>

(1: 中国海洋大学海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 青岛 266100)

(2: 中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室, 青岛 266100)

**摘要:** 综述了国内外水库对河流营养盐滞留效应的主要进展. 尽管在大型水库是否显著改变原有河流输送营养盐的问题上存在诸多争议, 反映在滞留效率的估算上, 存在前后矛盾的结果. 但大量的文献仍支持筑坝显著改变了河流原有输送营养盐的特性, 并对下游、河口产生深远的影响. 本文将“滞留”的主要过程分为泥沙过滤作用和生物过滤作用, 并列举了若干经典的估算滞留效率的方法和部分水库对营养盐的滞留效率.

**关键词:** 水库; 营养盐; 滞留效应

### Advances in nutrient retention of dams on river

RAN Xiangbin<sup>1</sup>, YU Zhigang<sup>1</sup>, YAO Qingzheng<sup>1</sup>, CHEN Hongtao<sup>1</sup>, MI Tiezhu<sup>2</sup> & YAO Peng<sup>1</sup>

(1: *Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, P.R.China*)

(2: *Key Laboratory of Marine Environment Science and Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, P.R.China*)

**Abstract:** The progress of reservoir nutrient retention was reviewed. Challenges had been risen about whether the huge reservoirs altered river-borne nutrient transport significantly since controversial results for nutrient retention of reservoirs were found. Most documents supported the conclusion that the reservoirs changed the riverine biogeochemistry process, which resulted in a serial of impacts on downstream and estuary. In this paper, we classified nutrient retention by “sediment filter” and “biological and biochemical filter”, and listed some estimating methods of nutrient retention and efficiencies.

**Keywords:** Reservoir; nutrient retention; efficiency

自 20 世纪 80 年代以来, 陆源物质通过河流向海洋输送及其对海洋环境的影响和对气候变化的响应已逐渐成为国际上全球变化科学的重点研究领域. 在生源要素(生源要素或营养盐是一种在功能方面与生物过程有关的元素, 习惯上营养盐特指水体中的硅酸盐、磷酸盐、硝酸盐、亚硝酸盐以及氨氮<sup>[1]</sup>)向海洋的输送中, 河流一直扮演着至关重要的角色. 河流是海洋中溶解硅和磷的主要来源, 分别占海洋总输入量的 82%<sup>[2]</sup>和 75%–94%<sup>[3]</sup>. 河流向海洋输送的氮更是海洋获得氮的主要途径, 尤其是那些流域面积大、沿岸工农业生产密集的河流<sup>[4–8]</sup>. 特别是随着社会经济的发展, 流域内各种人文活动强烈地冲击着河流原有的生物地球化学过程<sup>[9–11]</sup>, 人类正在给世界上的河流带来重大的影响. 地球上半数以上的大河流系统中修建了水坝, 这使得流入世界上沿海水域的沉积物减少了 20%<sup>[12]</sup>. 世界上 292 个大河系统中的 172 个受到水坝的影响<sup>[13]</sup>, 而即将完工的长江三峡水利工程则是当今世界最大的水利枢纽工程.

河流筑坝蓄水形成的“人造湖泊”, 改变河流原有的物质场、能量场、化学场和生物场, 可能显著

\* 国家自然科学基金重大项目(30490232)和国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB12405)联合资助. 2008–12–02 收稿; 2009–03–10 收修改稿. 冉祥滨, 男, 1980 年生, 博士研究生; E-mail: ranxiangbin@163.com.

\*\* 通讯作者; E-mail: zhigangyu@ouc.edu.cn.

影响河流中生源要素的生物地球化学行为(包括生源要素的输送通量、形态组成、利用方式等)<sup>[14]</sup>。人类活动已成为干扰河流物质输送的重要因素<sup>[11,15-16]</sup>。水坝拦截调蓄对河流生源要素生物地球化学过程及相关水生态环境的影响,正受到国内外科学家的越来越多的重视,逐渐成为流域地球化学和生态系统研究中一个新的重要领域。

本文所讨论的营养盐“滞留”,是指诸如溪流、河川、湖泊、水库以及滨岸湿地等水体中发生的物理、化学、生物的过程,将营养盐永久地去除或者临时地存储、延缓营养盐在流域内输运的过程<sup>[17]</sup>,这一概念初步形成于 Vollenweider<sup>[18]</sup>,而准确提出此概念的是 Dillon<sup>[19]</sup>。

## 1 筑坝对河流营养盐输送通量的影响

河流筑坝蓄水后,河流将产生一系列复杂的连锁反应,改变河流原有的物理、化学、生物特性。筑坝形成的“人造湖泊”效应,显著减少河流对下游的物质输出<sup>[14]</sup>。

Humborg<sup>[20]</sup>系统地研究了多瑙河向黑海溶解硅的输入,发现自 1970s 铁门大坝修建以来,多瑙河入海溶解硅(DSi)的通量减少了 80%,导致黑海浮游植物优势种由硅藻向非硅藻(鞭毛藻和颗石藻)种群转变,黑海生态系统结构发生了一定的变化。同样的情况在受筑坝影响的尼罗河、黄河、科罗拉多河都有体现,例如尼罗河口硅的浓度自阿斯旺大坝运行以后降低了 95%<sup>[21]</sup>;由于降雨减少和上游筑坝作用,已经导致黄河径流和泥沙通量锐减 50%<sup>[22]</sup>,其对渤海物质输入以及渤海生态系统的稳定的影响将不容忽视。通过对渤海的综合调查,并结合历史资料对比分析发现,渤海中部营养盐浓度和结构(N/P 比和 Si/N 比)均发生了显著的变化,表现为 N/P 比值升高, Si/N 比值下降,进一步研究表明黄河径流量的减少导致营养盐入海通量减少<sup>[23-24]</sup>,这可能与黄河上游梯级水坝对径流的拦截以及沿岸过度取水等复杂过程有关。长江数十年来溶解硅含量也下降显著,1959-1984 年减少了 53.3 $\mu\text{mol/L}$ <sup>[25]</sup>,而资料显示:长江流域土壤侵蚀面积从 1957 的 36.4 $\times 10^4\text{km}^2$  上升到 1986 年 56.2 $\times 10^4\text{km}^2$ ,同期森林覆盖率则从 22% 下降到 10%<sup>[26]</sup>。日益加剧的水土流失相应地反映在河流中的指示风化强度的溶解硅水平应该提高,这显然有悖于溶解硅含量显著下降的观测结果。一个可能的假设是:日益加强的长江流域水库化进程拦截了硅。这一假设正在被证实,如乌江流域,梯级水库已成为影响其营养盐输送的重要因素<sup>[27]</sup>。诸如筑坝、河道转向等大尺度水文变化将导致硅入海通量的减少已是不争的事实<sup>[20,28-29]</sup>。Conley 等<sup>[30]</sup>指出流域溶解硅的输出与流域湖泊或水库面积呈一定的指数关系,证明湖泊或水库通过硅藻生长和沉积作用减少溶解硅。进一步推导容易得知:这一过程伴随着河流系统的有机碳(初级生产力)的增加,说明逐渐水库化的河流比原始的河流状态能够产生更多的有机碳。Friedl 等<sup>[31]</sup>结合铁门大坝水库泥沙沉积量<sup>[32]</sup>以及悬浮颗粒物中生物硅(BSi)的浓度<sup>[33]</sup>,估算每年有多于 500kt BSi 滞留在水库中,这一结果与 Humborg<sup>[20]</sup>所估算的溶解硅滞留量大致相当,说明水库化后的河流比其自然状态能够产生更多的有机碳。

但是很多研究对于大坝是否显著改变生源要素生物地球化学循环提出了质疑。运用  $^{14}\text{C}$  示踪技术进行的一项研究表明:河口并没有发现大量水库化进程产生的大量“新鲜”的有机碳,河流向海洋输送的有机碳仍以“老碳”为主<sup>[34-35]</sup>。最新研究发现,铁门大坝每年因硅藻活动产生的生物硅颗粒的沉降仅减少 5%左右的溶解硅<sup>[31,36]</sup>。另有研究发现,上游输入到铁门水库的营养盐和颗粒物已经很少,是上游众多大坝对营养盐和颗粒物质的联合“滞留效应”导致下游营养盐输出通量的减少,而非蓄水规模控制着营养盐和颗粒物质的收支<sup>[37]</sup>。进一步研究认为多瑙河水体并不适合藻类大量的繁殖;在溶解硅滞留部分中,库湾起到了决定的作用,同样的情况在伊泰普水电站也存在<sup>[36-37]</sup>。特别是随着水库运行,铁门水库更多的表现为营养盐的“源”而非“汇”的作用。还有部分学者认为,河流输送硅的量减少,与筑坝后导致的流域低的风化率有关,低的风化率导致低的硅输送量<sup>[38]</sup>。另外,大坝建成后,打乱了河流同地下水的交换,导致河流输送硅的量的减少<sup>[39]</sup>,上述发现对于解释诸如密西西比河和长江硅减少<sup>[25,40]</sup>具有重要的意义。世界范围内河流输送硅的减少往往与河流富营养化以及水库效应有关<sup>[41]</sup>,一定程度上,河流富营养化增加了硅在水库中的滞留量<sup>[42]</sup>。

争论的出现说明了大坝问题的复杂性,但是大坝的修建的确改变了流域生物地球化学循环,困难在于如何去确定它的大小或者程度。大多数学者认为:大型水库系统的营养盐滞留可以显著减小区域河流

营养盐输出<sup>[43-45]</sup>。河流筑坝形成水库将引起河流水动力学条件的改变,导致颗粒物迁移、输运等发生显著变化<sup>[46]</sup>,颗粒物沉积作用加速,从而使颗粒物携带的营养盐从河流中去除,临时或永久地埋藏于水库中,并通过絮凝、吸附作用去除水体中溶解态和胶态物质。这种因河流物理过程变化导致的营养盐在水库中的滞留可形象的称作“泥沙过滤器(Sediment filter)”。水库效应还引起河流水流变缓、透明度增加,导致浮游藻类生物量增加,从而使溶解态营养盐从河流中去除;而随后的生物遗骸的沉积,加速了营养盐从河水中被去除,临时或永久地埋藏于水库中。这种“水库效应”导致的溶解态营养盐在水库中的滞留称作“生物过滤器(Biological and biochemical filter)”或“生物膜作用(Biofilm)”。生物过滤器效应对于溶解态硅的影响最为显著,这是由于水库是陆地表层水体有机碳沉积的重要场所,颗粒物的沉积速率是天然湖泊的4.7倍<sup>[47]</sup>,而具有硅质外壳的硅藻较其他浮游藻更容易沉积在水库库底,加之生物硅(硅质外壳)较低的溶出速率限制了硅的再生,从而导致在水库中溶解硅从水体中的去除<sup>[39]</sup>。

## 2 影响营养盐滞留效应的主要因素

影响水库营养盐“滞留效率(过滤效率)”的主要因素有水库特征(包括水库规模、水库形态、地质特征等)、水库运行方式、气候、生物组成等,这些因素中的大多又通过对河流物理场的改变影响河流的化学场和生物场的变化。目前对于水库营养盐滞留效应的研究主要集中在对于滞留量大小的估算,系统地研究上述因素对营养盐滞留效率的影响还十分缺乏。

大型水库系统的营养盐滞留可以显著减小区域河流营养盐输出<sup>[44]</sup>。就滞留效率而言,不同的水体表现形式差别较大。在人工型水库中,磷的滞留较多地受温度和流速控制,而在天然河道内,径流可能最重要<sup>[48]</sup>。在不同营养程度的小型河流水库中,贫营养的水体营养盐滞留效率超过70%,而富营养的水体中营养盐滞留效率仅为2%<sup>[49]</sup>。较小的流域面积有较高的磷滞留效率,特别在低的比径流和低的水力负荷情况下<sup>[50]</sup>。不同的水文情势和不同的水动力学条件对营养盐的滞留效率也不同,低水位、高流量有利于物质向下游输送,降低滞留效率,正在发挥防洪功能的水库较其它时期的水库能滞留更多的颗粒营养盐<sup>[51]</sup>,河川径流量的年内和年际间的变化等也对滞留效率产生影响,但此类研究并不多见。

### 2.1 生物过滤器的影响因素及特征

进行初级生产的生物将无机形态的营养盐转化为颗粒态营养盐的过程以及随后的沉积作用是生物过滤器的基本作用机制。绝大部分大型水库中初级生产者的生物构成主要是浮游藻类<sup>[52]</sup>,因此,此处所讨论的初级生产者主要指浮游藻类。影响初级生产的因素包含营养状况、光照、温度、透明度等,此外,水库水文条件、食物网结构等也是决定水库初级生产状况的重要因素,这些也是影响生物过滤器效率的因素。水体停留时间则是水库水文条件中最关键的影响因素之一,其长短对浮游植物生产量和生产力、群落的大小(size)和组成有很大的影响<sup>[53-54]</sup>,进而影响到生物过滤器效率(或者称生物膜(biofilm)的发育)。水停留时间作用于水库动水、静水生态系统存在一个阈值<sup>[53]</sup>。水滞留时间的长短决定了水库中浮游生物种群能否维持,滞留时间太短,浮游生物由于缺乏足够的时间进行繁殖,种群数量难以维持。当水停留时间达不到细胞分裂所需的时间时(0.12-7.5d<sup>[55]</sup>),藻类生物量的积累和生产力就会流失。对Asahi河水库的研究表明浮游植物充分的增长需要2周时间<sup>[54]</sup>。部分研究者<sup>[56]</sup>对Humborg<sup>[20]</sup>结果提出质疑的一个重要原因就是多瑙河水停留时间较短不足以使藻类大量地繁殖。如果水停留时间过长,提高流量以适当降低水停留时间往往会提高浮游植物利用营养盐的量<sup>[52]</sup>。有报道指出,在佛罗里达Tahquinn湖,将水停留时间由44d降低到22d,年内浮游植物总量提高了一倍<sup>[57]</sup>。水库水停留时间长适合于大型易沉降的浮游藻(如硅藻)生长,而不适合小型不易沉降的浮游藻(甲藻等)生长,可发挥生物过滤器的最大效率<sup>[58-59]</sup>。

在大型水库,生物作用主要表现为浮游植物对营养盐的利用<sup>[52]</sup>,相对于水体营养盐总量来说很小。从长远角度来说生物作用并不能显著改变营养盐的输运<sup>[60]</sup>,但是生物作用可以改变部分营养盐的物理、化学形态以及输运的时间<sup>[61]</sup>。对于溶解态生源要素滞留而言,水库扮演一种重要的临时的存储带(Transient storage zones)的角色<sup>[62]</sup>,也就是说,随着时间的推移,水库“源”、“汇”的角色会发生变化。因此,生物过滤器作用是“漏的”,即早期生物过滤器产生的有机体会被矿化再生出来,重新进入水体向下游输送。

## 2.2 泥沙过滤器的影响因素及特征

泥沙过滤器效用主要是由于河流筑坝后物理场变化所引起的泥沙沉积作用的改变所致, 主要影响因素包括流域产沙量、泥沙输送率、泥沙特性(泥沙级配、化学特性)、沉积作用、水库调节、水库类型(大小、形状)等<sup>[51,63-64]</sup>。根据最新的统计结果, 每年有 13% 的河流输送的沉积物因水库修建而滞留于水库内, 即有 13% 的颗粒形式的营养盐滞留其中<sup>[65]</sup>。稍早期的数据表明, 因水库存在, 河流每年减少了 25% 的颗粒态氮的输送量<sup>[66]</sup>; 世界范围内, 颗粒态磷在总磷中的比例要远远高于颗粒态氮占总氮的比例<sup>[67]</sup>, 据此可以推断, 颗粒态磷的滞留效率可能会更高。

影响沉积作用的最主要的物理条件是水停留时间, 经典的“Brune 曲线”<sup>[68]</sup>一直被用于预报水库中悬浮固体的沉积率, 它是停留时间的函数。而水库沿水流方向梯度变化, 决定了水库泥沙过滤器的选择性, 这种选择性除表现为纵向沉积率不同之外(库尾沉积速率高, 随距坝距离减少而迅速降低), 还表现为对颗粒物粒径的选择, 即大颗粒最先沉降、小颗粒后沉降或者较难沉降, 水库对泥沙具有“淤粗排细”作用<sup>[69-70]</sup>。另外, 选择性也表现在对溶解态和胶态的吸附、絮凝上。水库中, 泥沙浓度、沉降、级配纵向梯度变化导致了水库化学组分、生物组成的纵向梯度的变化<sup>[71]</sup>。相对于滞留而言, 水库水位的波动将提高颗粒物-水界面的相互作用, 提高水体中颗粒物、营养盐的浓度<sup>[71]</sup>, 补偿水库对泥沙的滞留作用。在水库调节方面, 出水口选择有很重要的影响, 如出现异重流, 可以选择异重流所在的层位泄水, 从而减少水库的淤积, 增加向下游的物质输送。

## 2.3 N、P、Si 滞留机制之间的差异

水库的营养盐主要是外源性的, 主要依靠水库上游水流的输送<sup>[71]</sup>。氮在库区或河流中的增加主要来源于农业生产中化肥的使用和流域盆地的大气沉降, 特别是大气湿沉降。磷是由沿岸流域土壤和水体中沉积物的重新释放而进入的。硅元素则主要来源于矿物的风化作用。水库对营养盐的滞留效率随营养盐种类不同而变化, 这也造成了水库营养盐比例(N:P:Si:N)的变化<sup>[72]</sup>。一方面, 人为输入的氮磷在大量增加; 另一方面硅在水库中的滞留, 这一过程将导致下游乃至河口和近岸水体中浮游植物由硅藻向非硅藻为主的初级生产力结构的转变<sup>[15,30]</sup>。然而, 从另外一层意义上讲, 水库对营养盐的滞留减缓了其下游、河口水体富营养化的趋势<sup>[58]</sup>。对磷而言, 水库的滞留效率比较高, 是磷的一个有效的汇, 而氮则稍弱一些<sup>[45,73]</sup>。一般而言, 水库对营养盐的滞留效率满足硅>磷>氮。滞留效率的差异实质上是由于滞留机理不同造成的。对于氮而言, 滞留率一般在 20%~70%之间不等, 主导机制是表层沉积物的脱氮反应<sup>[74-75]</sup>, 在水库对氮的滞留中, 脱氮反应受到水体溶氧水平、水力停留时间、磷负荷等因素的影响<sup>[76]</sup>, 尤其是水力停留时间<sup>[77]</sup>。水库可以延长水力停留时间<sup>[10]</sup>, 从一定程度上可以增加氮的去除<sup>[4]</sup>。不过, 在陆地表层水体氮循环过程中, 脱氮反应总量巨大, 因此从这个流域范围看, 水库效应产生的改变量有限<sup>[78]</sup>。对于磷而言, 滞留率在 30%~80%之间不等<sup>[74]</sup>, 主导机制为颗粒磷的沉降<sup>[43]</sup>。这主要是由于颗粒磷是水体磷营养盐的主要形式<sup>[67]</sup>, 而泥沙输送则受到水库效应的显著影响<sup>[65-66]</sup>。此外, 由于生物吸收转化作用, 水库对磷酸盐的滞留也较为显著<sup>[11,16,45]</sup>。在陆地表层水体, 磷是主要的限制性因子, 上述趋势将可能造成河流-水库体系浮游生物数量的降低<sup>[79]</sup>。硅的滞留率一般为 40%~90%<sup>[74]</sup>, 生物消耗是硅被滞留于水库中的主要机制<sup>[20,40,45]</sup>。

## 3 水库营养盐滞留效率的估算方法

对于水库营养盐滞留效率的估算, 一般考虑以下几个因素: 营养盐负荷、水停留时间、水域面积、温度、水深等。其常见的几个经验公式见表 1。

这些估算公式都是基于统计结果提出的, 且是针对溶解态营养盐而言的估算, 颗粒态营养盐并不包含其中。控制营养盐滞留的因素很多, 且每时每刻都在发生着变化, 这些变化都会对估算结果产生影响。随着时间的推移、水库的运行, 内源的释放作用逐渐显著, 而这一项又不包含在经验公式中, 因此估算结果的偏差会增大。精确的估算方法是进行收支平衡计算, 但是该方法费时费力, 而且通常只能给出一个时间段内比较准确的结果, 亦不能反映长期的水库对营养盐的滞留效应。此外, 尽管河流筑坝蓄水显著影响生源要素的生物地球化学过程, 但是这一过程通常伴随着流域富营养化过程<sup>[40]</sup>, 他们各自的贡献是

多大? 这一问题尚需要进一步研究. 尤其对溶解硅而言, 流域富营养化过程正在加速河流中溶解硅的消耗, 增加其在流域内的滞留量.

表1 估算营养盐滞留效率的经验公式

Tab.1 Mathematics formulations for estimating the efficiency of nutrient retention

公式	参数
$R_p = (1 - \frac{1}{1 + 1.86\sqrt{HRT}})$ $L_{ret} = R_p \cdot P_{load}$	<sup>[17]</sup> $R_p$ : 磷滞留率; $HRT$ : 水停留时间; $P_{load}$ : 年内磷负荷; $L_{ret}$ : 总滞留量
$R_N = (1 - \frac{1}{1 + 7.3\sqrt{HRT/z}})$ $L_{ret} = R_N \cdot N_{load}$	<sup>[17,80]</sup> $R_N$ : 氮滞留率; $HRT$ : 水停留时间; $z$ : 平均水深; $N_{load}$ : 年内氮负荷; $L_{ret}$ : 总滞留量
$R_N = a\theta^{(T-20)} \cdot N_{max}$	<sup>[81]</sup> $R_N$ : 氮滞留率; $T$ : 水温; $a = 0.455$ ; $\theta = 1.087$ ; $N_{max}$ : 氮负荷
$R_N = 88.45(Z/T)^{-0.3677}$	<sup>[78]</sup> $R_N$ : 氮滞留率; $Z$ : 平均水深; $T$ : 年平均水停留时间
$R_N \% = Sn / (z/t + Sn)$	$R_N$ : 氮滞留率; $Sn$ : 物质输运系数; $z/t$ : 水深/水停留时间

因此, 合理地考虑各种影响因素, 构建水库生物地球化学模型是必要的. 这方面的工作已有开展<sup>[82]</sup>, 主要是考虑流域内营养盐的输送, 水库仅仅是其中的一部分内容. 特别是我国水电开发日益增强, 梯级水库上下关联, 可能出现比较复杂的联合水库效应. 因此, 除了考虑水库过程(水库调度、水动力学过程及物质运移规律、泥沙过程及颗粒物-水界面化学、营养盐动力学、浮游植物动力学过程等)以外, 从区域和流域角度研究营养盐输送规律显得尤为重要. 不同水库滞留效率的研究结果见表2.

表2 水库生源要素的滞留效率\*

Tab.2 Comparison of the efficiencies of nutrient retention in some world reservoirs

水库	蓄水时间(年)	调查时间(年)	水停留时间	结论
罗马尼亚 Iron Gate I 水库	1972	2001	1-15d	DSi: 4% <sup>[31]</sup>
		-		DSi: 80% <sup>[20]</sup>
		2001		DSi: <5% <sup>[56]</sup>
法国 Marne, Aube, Seine 水库	1974, 1990, 1966	1993-1995	0.3-0.8 年	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> : 40%; DSi: 50%; DIP: 60% <sup>[45]</sup>
美国 Falcon 水库	1951	1996-1998	0.8 年	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> : 80%; DIP: 95% <sup>[16]</sup>
美国 Amistad 水库	1969		1.6 年	DIN: 40% <sup>[16]</sup>
美国 Lower Columbia 水库	1970		<0.02 年	DSi: -5% <sup>[16]</sup>
三峡水库	2003	-	10-30d	DIN: 2%-7%; DIP: 13%-42% <sup>[83]</sup>
		1997		DIN: 10%; DIP: 50%-60% <sup>[11]</sup>

\* DSi: 溶解硅; DIP: 溶解无机磷; DIN: 溶解有机氮; NO<sub>3</sub><sup>-</sup>: 硝酸盐氮.

#### 4 结论

(1) 河流筑坝蓄水形成的“人造湖泊”产生一系列复杂的连锁反应, 改变河流原有的物质场、能量场、化学场和生物场, 可能显著影响河流中生源要素的生物地球化学行为, 减少河流向下游的物质输出, 并对下游和河口乃至毗邻海域产生深远的影响.

(2) 影响水库营养盐“滞留效率(过滤效率)”的主要因素是水库特征、水库运行方式、气候、生物组成等, 这些因素中的大多又通过对河流物理场的改变影响河流的化学场和生物场的变化.

(3) 对于溶解态生源要素滞留而言, 水库扮演临时存储带的角色, 随着时间的推移, 水库“源”、“汇”

的角色会发生变化。一般而言, 水库对营养盐的滞留效率满足硅>磷>氮, 滞留效率的差异实质上是由于滞留机理不同造成的。

(4)河流筑坝蓄水显著影响生源要素的生物地球化学过程, 但是这一过程通常伴随着流域富营养化过程, 他们各自的贡献是多大? 这一问题尚需要进一步研究。显然, 从整个流域入手进行系统研究, 建立水库、河流水文生物地球化学模型是解决这一问题的一条重要途径。

## 5 参考文献

- [1] 赖利 JP, 斯基罗 G, 切斯特 R. 化学海洋学(第二卷). 第二版. 北京: 海洋出版社, 1982: 268.
- [2] Tréguer P, Nelson DM, Van Bennekom AJ *et al.* The silica balance in the world ocean: A reestimate. *Science*, 1995, **268**: 375-379.
- [3] Benitez-Nelson CR. The biogeochemical cycling of phosphorus in marine systems. *Earth Science Review*, 2000, **51**: 109-135.
- [4] Howarth RE, Billen G, Swaney D *et al.* Regional nitrogen budgets and riverine N & P fluxes for the drainages to the North Atlantic Ocean: Natural and human influences. *Biogeochemistry*, 1996, **35**: 75-139.
- [5] Vitousek PM, Aber JD, Howarth RW *et al.* Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecological Applications*, 1997, **7**: 737-750.
- [6] Xing GX, Zhu ZL. Regional nitrogen budgets for China and its major watersheds. *Biogeochemistry*, 2002, **57-58**: 405-427.
- [7] Shen ZL, Liu Q, Zhang SM *et al.* A nitrogen budget of the Changjiang River catchment. *Ambio*, 2003, **32**(1): 65-69.
- [8] Bouwman AF, Dreht V, Knoop G *et al.* Exploring changes in river nitrogen export to the world's oceans. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005(GB1002, doi: 10.1029/2004GB002314).
- [9] Degens ET, Kempe S, Richey JE *et al.* Biogeochemistry of major world rivers. SCOPE Rep. 42, New York: John Wiley & Sons, 1991.
- [10] Vörösmarty CJ. The storage and aging of continental runoff in large reservoir systems of the world. *Ambio*, 1997, **26**: 210-219.
- [11] Zhang J, Zhang ZF, Liu SM *et al.* Human impacts on the large world rivers: Would the Changjiang (Yangtze River) be an illustration? *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, **13**: 1099-1105.
- [12] Syvitski JPM, Vörösmarty CJ, Kettner AJ *et al.* Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. *Science*, 2005, **308**: 376-380.
- [13] Nilsson C, Reidy CA, Dynesius M *et al.* Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems. *Science*, 2005, **308**: 405-408.
- [14] Bennekom VAJ, Salomons W. Pathways of nutrients and organic matter from land to ocean through rivers. In: Martine JM, Burton JD, Eisma D eds. River inputs to ocean systems. Rome: UNEP/UNESCO, 1981: 33-51.
- [15] Humborg C, Coley DJ, Rahm L *et al.* Silicon retention in river basins: far-reaching effects on biogeochemistry and aquatic food webs in coastal marine environments. *Ambio*, 2000, **29**(1): 45-50.
- [16] Kelly VJ. Influence of reservoirs on solute transport: a regional-scale approach. *Hydrological Processes*, 2001, **15**: 1227-1249.
- [17] Kronvang B, Hezlar J, Boers P *et al.* Nutrient Retention Handbook. Software Manual for EUROHARP NUTRET and Scientific review on nutrient retention, EUROHARP report 9-2004, NIVA report SNO 4878/2004, Oslo, Norway, 2004: 103.
- [18] Vollenweider RA. Möglichkeiten und Grenzen elementarer Modelle der Stoffbilanz von Seen. *Arch Hydrobiol*, 1969, **66**: 1-36.
- [19] Dillon PJ, Rigler FH. A test of a simple nutrient budget model predicting the phosphorus concentration in lake water. *J Fish Res Board Can*, 1974, **31**: 1771-1778.
- [20] Humborg C, Ittekkot V, Cociasu A *et al.* Effect of Danube river dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure. *Nature*, 1997, **386**: 385-388.
- [21] Whaby SD, Bishara NF. The effect of River Nile on Mediterranean water before and after the construction of the High Dam at Aswan. In: Matin IM, Burton JD, Eisma D eds. River inputs to ocean systems. New York: United Nations, 1980: 311-318.
- [22] Milliman J. Blessed dams or dammed dams. *Nature*, 1997, **386**: 325-327.
- [23] Yu Zhigang, MI Tiezhu, YAO Qingzhen *et al.* The nutrients concentration and the changes in decade-scale in the central Bohai

- Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, **20**(1): 65-75.
- [24] 孟伟, 于涛, 郑丙辉等. 黄河流域氮磷营养盐动态特征及主要影响因素. *环境科学学报*, 2007, **27**(12): 2046-2051.
- [25] 李茂田, 程和琴. 近50年来长江入海溶解硅通量变化及其影响. *中国环境科学*, 2001, **21**(3): 1-5.
- [26] 史德明. 长江流域水土流失与洪涝灾害关系剖析. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1999, **5**(1): 1-7.
- [27] 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. 北京: 科学出版社, 2007: 387-443.
- [28] Milliman JD, Quraishie GS, Beg MNA. Sediment discharge from the Indus river to the ocean: Past, present and future. In: Haq Bu, Milliman JD eds. *Marine geology and oceanography of the Arabian Sea*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1984: 65-70.
- [29] Halim Y. The impact of human alterations of the hydrological cycle on ocean margins. In: Mantoura RFC, Martin JM, Wollast R eds. *Ocean margin processes in global change*. Chichester(UK): John Wiley & Sons, 1991: 301-327.
- [30] Conley DJ, Stalnache P, Pitkanen H *et al.* The transport and retention of dissolved silicate by rivers in Sweden and Finland. *Limnol & Oceanogr*, 2000, **45**: 1850-1853.
- [31] Friedl G, Teodoru C, Wehrli B. Is the Iron Gate I reservoir on the Danube River a sink for dissolved silica? *Biogeochemistry*, 2004, **68**: 21-32.
- [32] Panin N, Jipa DC, Gomoiu MT *et al.* Importance of sedimentary processes in environmental changes: Lower River Danube Delta Western Black Sea System. In: Besiktepe ST, Unluata U, Bologa AS eds. *Environmental degradation of the Black Sea: Changes and remedies*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999: 23-42.
- [33] Reschke S. Biogeochemische Variabilitäten in der Schwebstofffracht der Donau und deren Einfluß auf das Sedimentationsgeschehen im nordwestlichen Schwarzen Meer[Ph. D. Thesis]. Hamburg, 1999.
- [34] Raymond PA, Bauer JE. Riverine export of aged terrestrial organic matter to the North Atlantic Ocean. *Nature*, 2001, **409**: 497-500.
- [35] Blair NE, Leithold E, Ford ST *et al.* The persistence of memory: The fate of ancient sedimentary organic carbon in a modern sedimentary system. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, **67**: 63-73.
- [36] Mcginnis DF, Bocaniov S, Teodoru C *et al.* Silica retention in the Iron Gate I reservoir on the Danube River: The role of side bays as nutrient sinks. *River Res Appl*, 2006, **22**: 441-456.
- [37] Teodoru C, Wehrli B. Retention of sediments and nutrients in the Iron Gate I reservoir on the Danube River. *Biogeochemistry*, 2005, **76**: 539-565.
- [38] Humborg C, Blomqvist S, Avsan E *et al.* Hydrological alterations with river damming in northern Sweden: Implications for weathering and river biogeochemistry. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, **1039**(doi:10.1029/2000GB001369).
- [39] Humborg C, Pastuszak M, Juris A *et al.* Decreased silica land-sea fluxes through damming in the Baltic Sea catchment significance of particle trapping and hydrological alterations. *Biogeochemistry*, 2006, **77**(2): 265-281.
- [40] Turner RE, Rabalais NN. Linking landscape and water quality in the Mississippi river basin for 200 years. *Bioscience*, 2003, **53**: 563-572.
- [41] Ragueneau O, Conley DJ, Leynaert A *et al.* Responses of coastal ecosystems to anthropogenic perturbations of silicon cycling. in: *The Silicon Cycle*. In: Ittekkot V, Unger D, Humborg C eds. Washington DC: Island Press, 2006: 197-213.
- [42] Humborg C, Smedberg E, Mörth CM *et al.* Dissolved silica dynamics in boreal and arctic rivers: vegetation control over temperature? In: Ittekkot V, Unger D, Humborg C eds. *The silicon cycle*. Washington DC: Island Press, 2006: 53-69.
- [43] Kennedy RH, Walker WW. Reservoir nutrient dynamics. In: Thornton KW, Kimmel BL, Payne FE eds. *Reservoir limnology: Ecological perspectives*. New York: John Wiley & Sons Inc, 1990: 109-132.
- [44] Caraco NF, Cole JJ. Human impact on nitrate export: An analysis using major world rivers. *Ambio*, 1999, **28**: 167-170.
- [45] Garnier J, Leporcq B, Sanchez N, Philippon X. Biogeochemical mass-balance(C, N, P, Si) in three large reservoirs of the Seine Basin (France). *Biogeochemistry*, 1999, **47**: 119-146.
- [46] Dynesius M, Nilsson C. Fragmentation and flow regulation of river systems in the Northern Third of the World. *Science*, 1994, **266**(4): 753-762.
- [47] Dean WE, Gorham E. Magnitude and significance of carbon burial in lakes, reservoirs, and peatlands. *Geology*, 1998, **26**:

- 535-538.
- [48] D'angelo DJ, Webster JR, Benfield EF. Mechanisms of stream phosphorus retention: an experimental study. *J N Am Benthol Soc*, 1991, **10**: 225-237.
- [49] Stanley EH, Doyle MW. A geomorphic perspective on nutrient retention following dam removal. *Bioscience*, 2002, **52**: 693-701.
- [50] Behrendt H, Opitz D. Retention of nutrients in river systems: dependence on specific runoff and hydraulic load. *Hydrobiologia*, 1999, **410**: 111-122.
- [51] Morris GL, Fan J. Reservoir sedimentation handbook: design and management of dams, reservoirs and watersheds for sustainable use. New York: McGraw-Hill, 1998.
- [52] Kimmel BL, Lind OT, Paulson LJ. Reservoir primary production. In: Thornton KW, Kimmel BL, Payne FE eds. Reservoir limnology: Ecological perspectives. New York: John Wiley & Sons Inc, 1990: 133-194.
- [53] Soballe DM, Kimmel BL. A large-scale comparison of factors influencing phytoplankton abundance in rivers, lakes, and impoundments. *Ecology*, 1987, **68**: 1943-1954.
- [54] Kawara O, Yura E, Fujii S *et al.* A study on the role of hydraulic retention time in eutrophication of the Asahi River Dam Reservoir. *Hydrobiologia*, 1998, **37**: 245-252.
- [55] Westlake DF. Primary production. In: Lecren, Lowe-McConnell RH eds. The functioning of freshwater ecosystems. London: Cambridge Univ. Press, 1980.
- [56] Daniel FM, Serghei B, Cristian T *et al.* Silica retention in the Iron Gate I Reservoir on the Danube River: The role of side bays as nutrient sinks. *River Res Applic*, 2006, **22**: 441-456.
- [57] Turner RE, Laws EA, Andharris RC. Nutrient retention and transformation in relation to hydraulic flushing rate in small impoundment. *Freshwater Biology*, 1983, **13**: 113-127.
- [58] Pütz K, Benndorf J. The importance of pre-reservoirs for the control of eutrophication of reservoirs. *Wat Sci Technol*, 1998, **37**(2): 317-324.
- [59] Paul L. Nutrient elimination in pre-dams: results of long term studies. *Hydrobiologia*, 2003, **504**: 289-295.
- [60] Newbold JD. Cycles and spirals of nutrients. In: Pettsm GE, Calow P eds. River flows and channel forms. Blackwell Science, Oxford, UK, 1996.
- [61] Webster JR. Analysis of potassium and calcium dynamics in stream ecosystems on three southern Appalachian watersheds of contrasting vegetation[Ph D thesis]. Athens: University of Georgia, 1975.
- [62] Emily HS, Martin WD. A geomorphic perspective on nutrient retention following dam removal. *Bioscience*, 2002, **52**(8): 693-701.
- [63] Ford DE. Reservoir transport processes. In: Thornton KW, Kimmel BL, Payne FE eds. Reservoir limnology: ecological perspectives. New York: John Wiley & Sons, 1990: 15-41.
- [64] 杨志达[美]著. 李文学等译. 泥沙输送: 理论与实践. 北京: 中国水利水电出版社, 2000: 181-210.
- [65] Beusen AHW, Dekkers ALM, Bouwman AF *et al.* Estimation of global river transport of sediments and associated particulate C, N, and P. *Global Biogeochem Cycles*, 2005, **19**(GB4S05, doi:10.1029/2005GB002453).
- [66] Seitzinger SP, Kroeze C, Bouwman AF *et al.* Global Patterns of Dissolved Inorganic and Particulate Nitrogen Inputs to Coastal Systems: Recent Conditions and Future Projections. *Estuaries*, 2002, **25**(4): 640-655.
- [67] Meybeck M. Carbon, nitrogen, and phosphorus transport by world rivers. *American J Sci*, 1982, **282**: 401-450.
- [68] Ward PRB. Sediment transport and a reservoir siltation formula for Zimbabwe-Rhodesia. *Die Siviele Ingenier in Suid-Afrika*. Januarie, 1980: 113-143.
- [69] Mchenry JR, Cooper CM, Ritchie JC. Sedimentation in Wolf Lake, lower Yazoo River basin, Mississippi. *Journal of Freshwater Ecology*, 1982, **1**: 547-558.
- [70] Olness A, Rausch D. Callahan Reservoir: III Bottom Sediment-Water-Phosphorus Relationships. *Transaction of the ASAE*, 1977, **20**: 291-297, 300.



- [71] Thornton KW, Kimmel BL, Payne FE. Reservoir limnology: ecological perspectives. In: Thornton KW, Kimmel BL, Payne FE eds. Reservoir limnology: Ecological perspectives. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1990: 1-14.
- [72] Jennerjahn TC, Ittekkot V, Klöpffer S *et al.* Biogeochemistry of a tropical river affected by human activities in its catchment: Brantas River estuary and coastal waters of Madura Strait, Java, Indonesia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004, **60**: 503-514.
- [73] Uhlman D, Hupfer M, Paul L. Longitudinal gradients in the chemical and microbial composition of the bottom sedimentation in a channel reservoir(Saidenbach, Saxony). *Int Revueges Hydrobiol*, 1995, **80**: 15-25.
- [74] Billen G, Lancelot C, Meybeck M. N, P and Si retention along the aquatic continuum from land to ocean. In: Mantoura RFC, Martin JM, Wollast R eds. Ocean margin processes in global change. Chichester: Wiley & Sons, 1991: 19-44.
- [75] Garnier J, Leporeq B, Sanchez N *et al.* Biogeochemical mass-balances (C, N, P, Si) in three large reservoirs of the Seine Basin (France). *Biogeochemistry*, 1999, **47**: 119-146.
- [76] Garnier J, Billen G, Sanchez N *et al.* Ecological functioning of the Marne reservoir (upper Seine basin, France). *Regul Rivers Res Mgmt*, 2000, **16**: 51-71.
- [77] David MB, Wall LG, Royer TV *et al.* Denitrification and the nitrogen budget of a reservoir in an agricultural landscape. *Ecological Applications*, 2006, **16**(6): 2177-2190.
- [78] Seitzinger SP, Styles RV, Boyer EW *et al.* Nitrogen retention in rivers: model development and application to watersheds in the northeastern U.S.A.. *Biogeochemistry*, 2002, **57**(1): 199-237.
- [79] Friedl G, Wuest A. Disrupting biogeochemical cycles – consequences of damming. *Aquatic Sciences*, 2002, **64**: 55-65.
- [80] Kelly CA, Rudd JWM, Hesslein RH *et al.* Prediction of biological acid neutralisation in acid-sensitive lakes. *Biogeochemistry*, 1987, **3**: 129-140.
- [81] Windolf J, Jeppesen E, Jensen JP *et al.* Modelling of seasonal variation in nitrogen retention: a four-year mass balance study in 16 shallow lakes. *Biogeochemistry*, 1996, **33**: 25-44.
- [82] Garnier J, Billen G, Hannon E *et al.* Modeling the transfer and retention of nutrients in the drainage network of the Danube River. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2002, **54**: 285-308.
- [83] 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. 湖泊科学, 2003, **15**(1): 41-48.