

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.06.001

长江三峡库区水渗漏引起的地下水污染问题讨论

陈建生^{1,2}, 张 茜¹, 马芬艳¹, 詹泸成³, 王 涛³

(1. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为明确三峡库区渗漏水对长江下游地区的影响, 根据长江径流量的时空分布变化、三峡库区的地质构造、区域水量平衡等, 分析长江下游地区地下水的污染源头。结果表明: 三峡库区存在深部断裂和暗河系统, 库区渗漏水可能通过深部循环通道向长江下游和流域外排泄; 长江下游的地下水污染源头不仅包括源区污染、采矿业污染、农业污染、城市生活和工业固废污染, 还包括通过深部循环通道的上游污水排泄; 上游的水源保护对下游的地下水污染治理至关重要。

关键词: 水库渗漏; 地下水污染; 污染源头; 长江; 三峡库区

中图分类号: X522 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2019)06-0487-05

Discussion on groundwater pollution caused by leakage of the Three Gorges Reservoir on the Yangtze River

CHEN Jiansheng^{1, 2}, ZHANG Xi¹, MA Fenyan¹, ZHAN Lucheng³, WANG Tao³

(1. College of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Civil and Transportation, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The sources of groundwater pollution and the influence of Three Gorges Reservoir on the downstream of the Yangtze River is analyzed based on spatial and temporal distribution of flow rate, geological structures of the Three Gorges Reservoir area, and regional water balance. The analysis result shows that there are deep fault structures and underground river systems in Three Gorges Reservoir area, through which the reservoir leakage may be recharged to the downstream areas or other outside basins. Therefore, pollution sources of groundwater in the lower reaches of the Yangtze River include not only upstream pollution, mining industry pollution, agricultural pollution, domestic and industrial solid waste pollution, but also the recharge of upstream polluted water through deep channels. Upstream protection should be taken into priority for thd groundwater pollution control in lower reaches.

Key words: reservoir leakage; groundwater pollution; source of pollution; Yangtze River; Three Gorges Reservoir

1 长江流域的径流量空间分布变化

围绕三峡大坝的争论持续了半个世纪, 三峡大坝的修建对生态、环境、地质灾害等方面有诸多影响。Zhang 等^[1]研究表明, 三峡大坝蓄水以来, 宜昌段的径流量减少了 5%。周建军等^[2]、王远坤等^[3]的研究表明, 三峡大坝蓄水以来, 宜昌段的径流量减少了 12.6%, 三峡库区的径流量减少了 18.6%, 达到 101 亿 m³/a。三峡库区的水域面积约 1 080 km², 其蒸发量约为 3.35 亿 m³/a^[4], 根据水量平衡关系, 库区径流量的减少应该存在其他形式。

基金项目: 国家自然科学基金(51578212); 江苏省研究生科研与实践创新计划(SJCX18_0205)

作者简介: 陈建生(1955—)男, 教授, 博士, 主要从事水文地质和同位素水文学研究。E-mail: jschen@hhu.edu.cn

引用本文: 陈建生, 张茜, 马芬艳, 等. 长江三峡库区水渗漏引起的地下水污染问题讨论[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(6): 487-491.

CHEN Jiansheng, ZHANG Xi, MA Fenyan, et al. Discussion on groundwater pollution caused by leakage of the Three Gorges Reservoir on the Yangtze River[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(6): 487-491.

研究发现,三峡库区存在深大裂谷与暗河系统,而且这些处于活动断裂带地区的水系在不断变迁^[5]。三峡大坝蓄水后,库水位上升造成暗河水系的补给、径流与排泄规律发生变化,库水通过洞穴管道系统及深大断裂带向流域外排泄。例如,龙桥-天水暗河系统是一条穿过长江和清江流域分水岭的地下暗河,它的入口在分水岭北坡,但暗河流向是向南切穿 2 000 m 的分水岭主脉,在板桥境内流入沐抚大峡谷,形成清江支流云龙河。另外,在三峡库区还存在齐岳山东北断裂、龙桥断裂等,形成深度达千余米的超级大峡谷,还有一些天坑地缝。三峡库区水位升高后,水系不断变迁,发生新一轮的河流袭夺,形成新的洞穴管道系统。由于在清江中未发现径流量增加的现象,渗漏水去向以及地下径流方式尚不清楚。库区减少的水可能是通过其他的地下径流方式补给到下游或在其他地区排泄。

近 60 年来,长江全流域的径流量基本没有变化。1958—2000 年,长江的水资源年平均径流量为 9 958.3 亿 m³,1998—2016 年长江的水资源年平均径流量为 9 955.9 亿 m³,二者相差 2.4 亿 m³,总流量减少了仅 0.02%^[6-8]。但是,长江三峡上游与下游流域的径流量却出现了完全相反的变化,2000—2016 年,三峡上游地区的平均径流量减少了 233.8 亿 m³,而下游地区的径流量增加了 228.9 亿 m³,上游减少的径流量与下游的增加量基本相等,如图 1 所示。这种关系暗示着长江上游地区的渗漏水可能向下游地区排泄。

在长江总径流量基本不变的情况下,下游的径流量出现了明显的增加,认为从三峡库区渗漏水可能通过深大断裂带传输到了下游地区。由于深循环地下水的导水通道类似于管道流,上下游之间被深循环管道连通,符合连通器原理,上游渗漏水位的升高,下游排泄区水位也将随之升高,实现水压的快速传递。1998—2016 年,长江中下游的降水量略有下降^[9-10],而下游的径流量增加了,我们有理由怀疑,三峡水库的渗漏水传输到了下游。由于水库都是修建在两山夹一沟的河谷,大型的河谷底部都是顺河向发育的大型断裂带,地质学有句俗语:“逢沟必断”,就是说,凡是河谷地带都存在断裂带。长江上游地区是青藏高原与云贵高原,高原隆升的年代为新生代,这些断裂带基本都属于活动断裂带。

新生代以来,印度板块与欧亚板块碰撞造成了青藏高原与云贵高原的隆升,目前印度板块向北的运动速度约为 5 cm/a,但西藏高原与云贵高原内部地块之间的运动速度不断下降,地块与地块之间可以观测到明显的位移,这表明这些断裂带都是活动的,东西走向的断裂带在挤压下呈压型,而南北走向的断裂带呈张性,这些张性断裂带可能导水,上游的河水渗漏到断裂带并在下游排泄。如果在张性断裂带上修建水库,渗漏量将随着水位的升高而增大。

2 地下水导水通道

传统的水文地质理论将含水介质分为 3 种,即孔隙、裂隙与岩溶介质。地下水的循环深度在几千米之内,地下水越深,渗透流速越小,而且地下水不存在跨流域的补给。而实际上地下水存在着跨流域远距离的补给,除了上述 3 种导水介质之外,岩石圈中还存在其他类型的导水构造。

第一种导水通道存在于中地壳的高导低速层中,该导水构造沿着缝合带或深大断裂带分布,呈现不连续分布,一般都位于地震带上,地震的震中一般都在上地壳的下部,中地壳高导低速层的上部。大地震发生后可能引起地下水位上升或下降,有些地区出现井喷。例如 2004 年 12 月 26 日在印度尼西亚苏门答腊岛发生了 8.9 级地震,地震发生在缝合带上,地震发生 12 min 后,远在 3 000 km 之外的广东省梅州平远县差干镇地震地下水观测井发生了井喷奇观,喷水高度达到 60 m,井喷持续了 10 d^[11]。大地震发生后还会出现地陷,表明地壳中存在着空虚层,地陷往往都伴随着涌水现象,例如,1920 年海原 8.5 级地震,可谓“地陷成河,可以行筏”^[12]。

第二种深循环导水通道与新生代火山通道有关,20 世纪 20 年代地质学家发现了一种新型地下水——新生代玄武岩地下水,导水介质为熔岩隧道与孔洞,孔洞的直径可以达到数米以上,形成水平空洞层,厚度

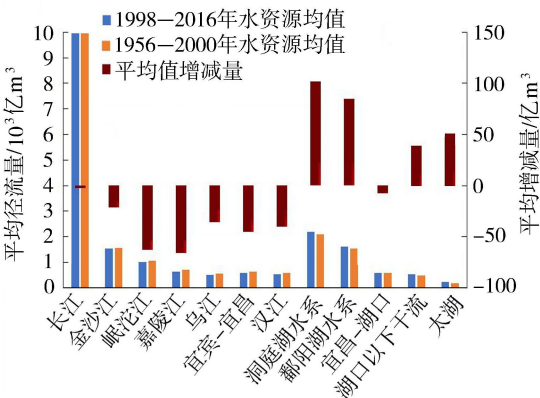


图 1 1956—2000 年及 1998—2016 年长江干流与支流径流量分布

Fig.1 Runoff variations of mainstream and branches in the Yangtze River during 1956—2000 and 1998—2016

0.2 ~ 0.3 m, 宽度 1 ~ 15 m^[13]。火山喷发停息后, 原来喷岩浆的通道成为导水通道, 例如, 长白山天池最后一次喷发时间是 1702 年, 五大连池火山最后一次喷发在 1721 年, 距今只有 300 a 左右, 但是当年喷岩浆的火山口如今都成为导水通道。气体中的氮、碳等同位素分析为幔源, 水中的氢、氧同位素分析确定涌水来自于大气降水, 但比当地降水贫化, 地下水来自于外源, 地下水经历了深循环过程。一些河流从火山口涌出, 例如长白山天池(松花江源头)、阿尔山火山口(哈拉哈河源头)、腾冲火山口(黑鱼河源头)、镜泊湖火山口、五大连池等, 所以, 火山熔岩隧道导水通道类似于管道流。

无论是火山口涌水还是地震引起的井喷现象都表明, 在岩石圈中除了孔隙、裂隙与岩溶导水介质之外, 还存在类似于管道流的深循环导水通道。地下水可以通过深循环导水通道实现快速流动与水资源传输, 水资源在深循环地下水网络的调解下实现了一种平衡。西藏高原的渗漏水补给到鄂尔多斯、华北平原和长白山的年龄分别约为 20 a、30 a 和 40 a^[14-15]。新生代以来在长江流域西藏高原、云贵高原、安徽、江苏等地区都发生过火山玄武岩喷发, 很多地区都位于地震带上。虽然尚不清楚三峡库区的渗漏水去向以及其传输方式, 但还是可以判断渗漏水可能的排泄区: (a) 补给到长江流域下游, 如洞庭湖、鄱阳湖、太湖等; (b) 补给到华南或苏北地区; (c) 补给到海沟或海底上升泉。

如果渗漏水是在中地壳高导低速空虚层或熔岩隧道中传输, 上下游之间通过断裂带及导水通道连通起来, 上游库水压力通过“导水管道”传递到下游排泄区, 于是上游水位增加后, 在压力传递作用下, “连通器”下游的排水量就会很快增加, 据此推断, 下游洞庭湖、鄱阳湖、太湖以下地区多出的径流量可能与库水的渗漏有关。

3 长江水污染现状

2003 年三峡大坝蓄水后, 长江水流速变缓, 延长了污染物停留的时间, 加剧了水质的恶化。受污染的三峡库区渗漏到深部导水通道后, 含水构造中的地下水将逐渐被污水所替换, 地下水受到污染的范围将延续到下游更广泛的地区。通道周边的地下水都将受到污染, 并持续很长一段时间, 即使今后三峡库区水质得到改善, 受到污染的地下水还要经过几十年甚至上百年才能从含水构造中排出, 必将影响到子孙后代。

长江流域工业和生活废污水排放量逐年上升, 绝大多数区县和重点场镇未建污水处理厂和垃圾处理厂。污染企业治理进展缓慢, 很多污染企业的污染处理设备处于闲置状态, 超标污水直接排入水体。目前长江流域沿江分布着上海、武汉、攀枝花、马鞍山、重庆等地的五大钢铁基地, 上海、南京、安庆、九江、岳阳、荆门、武汉等地的七大炼油厂, 以及上海、南京、仪征等地的石油化工基地。全国 2 万多家石化企业中有超过半数分布在长江流域。高污染、高能耗、低效益的原材料生产加工企业占相当大比例, 加剧了长江水质恶化。

长江是 4 亿多人口赖以生存的饮用水源, 南水北调工程将饮用长江水的人口数字扩大到超过 5 亿。由此可见, 长江水质关系到大半个中国。长江既是城市居民的饮用水源, 又是城市与乡村的排污通道。全国总投资近 10 152 亿元的 7 555 个化工石化建设项目, 大部分建在长江流域。长江流域内的化工企业, 产量占全国的近一半, 数量达到 40 多万家, 干线港口危险化学品年吞吐量超过 2 亿 t^[16]。流域工业和生活污水处理能力低下, 生活污水处理率仅为 15%, 中小城市的污水处理比例更低, 企业废水直排、偷排率高达 90%, 长江每年的排污量占到全国废污水总量的 42%, 引起长江流域水环境不同程度污染^[17]。长江流域废污水排放总量呈逐年增加趋势, 1979 年废污水排放量为 95 亿 t, 2012 年已达到 347.4 亿 t。目前长江干流 60% 的水体都已受到不同程度的污染, 其中工业和人口比较密集的长江中下游沿岸水质基本都在Ⅲ类和Ⅳ类之间, Ⅳ类及Ⅳ类以下不适合饮用的水占到了 37.8%。

长江流域水资源总量较丰沛, 但水质性缺少问题严重, 虽然出台了很多政策进行治理, 但收效并不明显, 水污染程度仍然逐年加重, 污染势头没有得到有效抑制。回顾长江水质变化, 1995 年, 长江全流域Ⅲ类以上的可饮用水占 93.1%, 劣Ⅴ类水为 0; 2004 年, 长江全流域Ⅲ类以上的可饮用水占 68.0%, 劣Ⅴ类水占到 11.3%; 2014 年长江全流域Ⅲ类以上的可饮用水仅占 56.2%, 而劣Ⅴ类水占到 23.9%^[18]。目前废水向长江的排泄总量已经达到 400 亿 t, 中下游地区居民的饮用水安全受到巨大的威胁。

航运船舶也是重要的污染源。长江是横贯我国东西的水上运输大动脉, 常年在水上运营的船舶有 21 万艘, 这些船舶每年向长江排放的含油废水和生活污水达 3.6 亿 t, 排放生活垃圾 7.5 万 t。另外, 因海损事故造成的油品、化学品污染事件也时有发生, 对长江水环境构成了极大威胁。

长江水还受到抗生素污染, 地表水中含有 68 种抗生素, 另有 90 种非抗生素类医药成分被检出, 近一半

地表水不适合做水源。在南京市居民自来水中检测到抗生素,其中阿莫西林含量为 8 ng/L,6-氨基青霉烷酸为 19 ng/L。现代医学研究证实,人的疾病 80% 与水有关,当被污染的动植物食品和饮用水进入人体后,就可能使人体罹患癌症或其他疾病。

4 长江源区污染源分析

由于三峡等水库存在渗漏,所以必须更加关注长江三峡及上游的水质污染情况,因为上游的污染物将会通过渗漏进入地下水中,对下游的地下水、河流与湖泊造成长久的污染^[19-20]。所以,三峡及上游的污染治理应该是长江大保护中的重中之重。

a. 长江源头地区修建了大量的水库与塘坝,“跑马圈水”现象十分突出,大大小小的塘坝与水库遍布源区,仅水库就有 4 万多座,还有数量巨大的塘坝。塘坝水用于养鱼、养禽类、牲畜等,已被严重污染,大量的化肥农药进入塘坝,造成富营养化严重,塘坝水汇入到水库后造成库水的氮、磷偏高。由于上游的溪水被塘坝截留,在枯水期一些河道呈现干涸或流量大幅度减少,但是,生活污水及各种污染物向河道中的排泄却没有停止。所以,在枯水期大量的污染物聚集到了河道中,河道对氮素有较为明显的滞留作用,滞留率甚至能达到 70% ~ 80%^[21-22],河水的水质严重恶化,形成了黑臭水体。洪水期间,小水库与塘坝向河道集中泄洪,河道中的劣质水被带到下游水库,最终汇入长江干流,富营养化的水对生态产生了不良影响,造成长江干流生态退化加快。另外,一些企业为了节省开支,将工业废水存储在污水槽中,在雨季趁着暴雨开闸排污,储存在隐蔽水槽中的工业污水集中向长江排放。正是由于上述原因,在洪水季节,长江水的氮含量呈现增长趋势^[23],洪水将河道中严重富营养化的污水带到了干流中,长江成为名副其实的排污通道,汛期时中下游居民的饮用水受到严重威胁。

b. 长江源头地区的采矿业也是污染的重灾区,开矿造成的山体沟谷大量裸露,采坑没有得到修复,污染继续威胁着长江源头。不合理的采煤方法导致采煤的岩石块需要用大量清水进行分级,因此留下了大量的洗废水。采矿地区通常处在偏远山区,因当地农民法律和环保意识很薄弱,信息闭塞,使得不法分子在山上打孔放药浸矿,导致当地环境污染、植被破坏、水土流失。由于水体受到污染,各种水生物受害死亡后腐烂,进一步污染了水源,威胁源区人们生活饮水安全。

c. 长江上游的农业面源污染严重,主要包括:化肥、农药、畜禽养殖业、农业固体废弃物、农村生活污水等^[24]。笔者在长江源区的调查发现,塘坝及溪流被污染后,周围的农户已经不饮用塘坝与溪水,饮用水基本上是泉水或井水。家庭养殖的牲畜数量虽然不多,但是污染却十分严重,很多家庭养殖户的猪圈都建在溪流或塘坝周边,家畜排泄的粪便直接用水冲洗汇入塘坝或河水中,有些农户冲洗厕所粪便的水也是直接排到河水中。塘坝与河水的富营养化严重,水的颜色呈现黄绿色,上游源区的这种状态目前还无人问津。据估计,长江流域农业面源污染物总量与工业、城市生活等点源排放的污染物总量相当。

d. “白色污染”有增无减,许多沿江城镇的生活垃圾和工业固体废弃物沿江堆放,三峡库区及其上游地区情况更为严重。目前三峡库区生活垃圾堆存总量达 380 万 t,工业固体废物堆存量已超过 3 000 万 t。每到汛期,大量垃圾和固体废物随暴雨、洪水沿江而下,形成“白色污染”。位于长江源区的贵州省 20 座代表性水库的总磷、总氮、叶绿素和透明度分别是 0.01 ~ 0.63 mg/L、0.48 ~ 7.75 mg/L、1.60 ~ 130.11 mg/m³ 和 0.30 ~ 8.00 m,枯水期水质好于丰水期,枯水期大多数水库处于中营养状态,在丰水期富营养状态的水库明显增多,而且珠江流域的水库水质明显好于长江流域水库水质^[25]。由于部分养殖户违规地使用了抗生素,抗生素残留物进入长江水后对中下游人民的身体危害很大,但是抗生素迄今尚未列入 106 项水质检测指标,所以,目前的水质检测标准不能满足实际要求,水质检测标准的完善应该引起管理部门的重视。

参考文献:

[1] ZHANG Q, LI L, WANG Y G, et al. Has the Three-Gorges Dam made the Poyang Lake wetlands wetter and drier? [J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(20): 20402. 1-20402. 7.

[2] 周建军,张曼. 当前长江生态环境修复重点[J]. 水资源保护, 2016, 32(6): 163-165. (ZHOU Jianjun,ZHANG Man. Key points for ecological rehabilitation of the Yangtze River[J]. Water Resources Protection,2016, 32(6): 163-165. (in Chinese))

[3] 王远坤,王栋. 基于样本熵理论的长江干流径流序列复杂性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2015,43(3):203-207. (WANG Yuankun, WANG Dong. Analysis of complexity of runoff series based on sample entropy in Yangtze River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2015,43(3):203-207. (in Chinese))

[4] 孙志禹, 刘晓志, 李翀. 三峡水库库区蒸发损失水量估算[C]//中国大坝协会. 水库大坝建设与管理中的技术进展. 北京:中国大坝协会,2012;6-10.

[5] 叶许春, 孟元可, 张永生, 等. 三峡库区香溪河回水区营养状态变化特征与驱动因子[J]. 水资源保护, 2018, 34(4): 80-85. (YE Xuchun, MENG Yuanke, ZHANG Yongsheng, et al. Variation characteristics of trophic states of Xiangxi River backwater area in Three Gorges Reservoir and its driving factors[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(4): 80-85. (in Chinese))

[6] 陈进, 刘志明. 近 20 年长江水资源利用现状分析[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(1): 1-4. (CHEN Jin, LIU Zhiming. Analysis of water resources utilization in the Changjiang River Basin in recent two decades[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(1): 1-4. (in Chinese))

[7] 崔东文. 基于极限学习机的长江流域水资源开发利用综合评价[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(2): 14-19. (CUI Dongwen Comprehensive evaluation of water resources development and utilization in Yangtze River Basin based on extreme learning machine[J]. Advance in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(2): 14-19. (in Chinese))

[8] 王文鹏, 陈元芳, 刘波. 长江上游时空相关气候要素的区域趋势诊断[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(1): 14-21. (WANG Wenpeng, CHEN Yuanfang, LIU Bo. Regional climatic trend analysis in upper Yangtze River with consideration of both temporal and spatial correlation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(1): 14-21. (in Chinese))

[9] 周建军, 张曼. 长江鄱阳湖问题的原因及湖口建闸的影响[J]. 水资源保护, 2019, 35(2): 1-12. (ZHOU Jianjun, ZHANG Man. Eco-problem of Poyang Lake in Yangtze River and effect of sluice gate construction at lake's outlet[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2): 1-12. (in Chinese))

[10] LAI Xijun, WANG Ziming. Flood management of Dongting Lake after operation of Three Gorges Dam [J]. Water Science and Engineering, 2017, 10(4): 303-310.

[11] 车用太, 鱼金子, 刘成龙, 等. 差干井同震井喷现象的调查与分析[J]. 地震地质, 2009, 31(2): 226-232. (CHE Yongtai, YU Jinzi, LIU Chenglong, et al. Investigation and analysis to coseismic blowout in Chagan Well[J]. Seismology and Geology, 2009, 31(2): 226-232. (in Chinese))

[12] 邱泽华, 张宝红. 关于地壳中存在大规模真空区的问题[J]. 地质科学, 2007, 42(1): 58-69. (QIU Zehua, ZHANG Baohong. An approach to existence of large scale geo-vacuum zones in earth's crust[J]. Chinese Journal of Geology, 2007, 42(1): 58-69. (in Chinese))

[13] 贾福海, 秦志学, 韩子夜. 我国玄武岩地下水研究现状及今后研究的主要问题[J]. 水文地质工程地质, 1988(5): 5-8. (JIA Fuhai, QIN Zhixue, HAN Ziyue. Research status and main problems about groundwater of basalt in China [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1988(5): 5-8. (in Chinese))

[14] 汪集旻, 陈建生, 陆宝宏, 等. 同位素水文学的若干回顾与展望[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(5): 406-413. (WANG Jiyang, CHEN Jiansheng, LU Baohong et al. Review and prospect of isotope hydrology[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015, 43(5): 406-413. (in Chinese))

[15] 张文卿, 王文凤, 刘淑芹, 等. 长白山矿泉水补给径流与排泄关系[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(2): 108-113. (ZHANG Wenqing, WANG Wenfeng, LIU Shuqin, et al. Relationship of recharge runoff and drainage for the mineral water in the Changbai Mountain[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(2): 108-113. (in Chinese))

[16] 杨小林, 李义玲. 长江流域跨界水污染事故应急响应联动机制[J]. 水资源保护, 2014, 30(2): 78-81. (YANG Xiaolin, LI Yiling. Cooperating mechanism of emergency response to cross-boundary water pollution accidents in Yangtze River Basin[J]. Water Resources Protection, 2014, 30(2): 78-81. (in Chinese))

[17] 蒋玉芳, 石自堂, 韩超. 长江流域水污染及其防治[J]. 科学, 2008, 60(3): 38-40. (JIANG Yufang, SHI Zitang, HAN Chao. Water pollution and control in the Yangtze River Basin[J]. Science, 2008, 60(3): 38-40. (in Chinese))

[18] 郑建华, 王世梅, 王卓娟. 长江水质的综合评价及其预测[J]. 贵州水力发电, 2006, 20(6): 7-12. (ZHENG Jianhua, WANG Shimei, WANG Zhuojuan. Comprehensive evaluation and prediction of water quality of the Changjiang River[J]. Guizhou Water Power, 2006, 20(6): 7-12. (in Chinese))

[19] 郭清斌, 邹结富, 陈积微, 等. 基于面板数据的中国区域水环境污染 EKC 分析[J]. 水利经济, 2018, 36(2): 49-53. (GUO Qingbin, ZOU Jiefu, CHEN Jiwei, et al. EKC of regional water environment in China based on panel data[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2018, 36(2): 49-53. (in Chinese))

[20] 刘美玲, 石高平. 流域水污染的协作治理研究[J]. 水利经济, 2018, 36(2): 54-58. (LIU Meiling, SHI Gaoping. Collaborative governance of water pollution in basins[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2018, 36(2): 54-58. (in Chinese))

[21] SEITZINGER S P, STYLES R V, BOYER E W, et al. Nitrogen retention in rivers: model development and application to watersheds in the northeastern USA[J]. Biogeochemistry, 2002, 57(1): 199-237.

[22] WANG Ai, TANG Lihua, YANG Dawen. Spatial and temporal variability of nitrogen load from catchment and retention along a river network: a case study in the upper Xin'anjiang catchment of China[J]. Hydrology Research, 2015, 31: DOI: 10.2166/nh2015055.

[23] 王艾. 流域人类活动净氮输入的时空变化及其对河道水质的影响[D]. 北京:清华大学, 2016.

[24] WANG Xiaoqing, LIU Zhaojun, MIAO Jilun, et al. Relationship between nutrient pollutants and suspended sediments in upper reaches of Yangtze River[J]. Water Science and Engineering, 2015, 8(2): 121-126.

[25] 李秋华. 贵州高原水库富营养化特征及评价[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2018, 36(2): 1-8. (LI Qiuhua. Characteristics and evaluation of eutrophication in Guizhou plateau reservoirs[J]. Journal of Guizhou Normal University(Natural Sciences), 2018, 36(2): 1-8. (in Chinese))