

官厅水库及其上游流域水环境容量研究*

杨喆 程灿 谭雪 程荣 马中

(中国人民大学环境学院,北京 100872)

提 要:中国北方水系普遍水量较小,污染较重。水环境容量的测算可以为水污染防治提供科学依据。文中以官厅水库及其上游流域为例,依据流域水文特征选取合适的水环境容量模型,分别求出流域内各功能区段水环境容量。结果表明:流域内COD、NH₃-N的水环境总容量分别为5097.82 t/a,268.18 t/a;相比于污染负荷,水环境容量明显偏小;不同功能区段水环境容量差别较大;水环境容量偏小的主要人为因素在于上游流域大兴水利工程,农业用水量且用水效率低;污染负荷较大的主要原因是流域内产业结构不合理,农业面源污染未得到有效控制。

关键词:水环境容量;官厅水库;水功能区

中图分类号:TV211

文献标识码:A

人多水少、水资源时空分布不均是我国的基本国情和水情,而我国北方地区多处于干旱半干旱气候带,降水量较少,而蒸发量较大,水资源更为贫乏。除了水资源短缺,北方地区的水污染问题也相当严重。2012年中国水资源公报显示,北方水系普遍水质较差,其中,海河区水污染最为严重,I~III类水河长比例仅为34.6%,劣V类水河长比例高达46.1%。水污染控制面临巨大挑战。

水环境容量是指水体在设计水文条件和规定的环境目标下所能容纳的最大污染物质。理论上,水环境容量反映了污染物在水体中的迁移、转化和积存规律,也反映了特定功能条件下水体对污染物的接纳能力。实践中,水环境容量是水质目标管理的基本依据,是水污染控制规划的主要约束条件,也是污染物总量控制的关键参数^[1]。

国内学者对水环境容量的研究主要集中在水环境容量计算方法^[2-5]以及对某一具体区域水环境容量的测算上,案例研究主要以某一河流^[6,7]、湖泊^[8-10]为对象,两者结合起来计算某一流域水环境容量的研究较少。另外,目前水环境容量研究与具体水环境管理存在一定的脱节,研究者只是针对特定区域计算水环境容量,但没有进一步分析水环境容量对该区域水污染治理的启示作用。文中以官厅水库及其上游流域为例,通过河流一维稳态水质模型和物料衡算模型,分别求出官厅水库及其上游流域各功能区段COD和NH₃-N的水环境容量,并基于对水环境容量计算结果的分析提出流域内水污染治理的相应措施,以期使流域尽快达到目标水质,为流域内人民的健康生活以及北京张家口冬奥会的成功申办创造有利条件。

1 材料与研究方法

1.1 研究区概况

官厅水库地处北京和张家口的交界处,其上游流域包括永定河及其支流桑干河、洋河,属于海河水系。官厅水库于1954年5月竣工,是新中国成立后建设的第一座大型水库。水库中心坐标为北纬40°20'43",东经115°42'49",海拔490m,面积可达280km²,设计总库容41.6亿m³,控制流域总面积4.34万km²,具有防洪、供水、发电、灌溉等多种功能。永定河上游有桑干河和洋河两大支流,两河在张家口市怀来县汇合后

* 收稿日期:2014-6-19;修回日期:2014-7-15。

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项课题(2008ZX07633-02);国家社科基金重大项目(09&ZD052);北京高等学校青年英才计划资助。

作者简介:杨喆(1988-),男,辽宁铁岭人,博士研究生,主要从事水环境保护与水污染防治研究。E-mail: yz69env@163.com

通讯作者:马中(1954-),男,回族,北京人,教授,博士研究生导师,主要从事环境与资源经济学方面研究。

E-mail: zhongma@vip.sina.com

称永定河。文中主要研究张家口市境内的官厅水库上游流域,并按照河北省水功能区划将官厅水库上游流域河流分成 13 个水功能区(图 1)。

根据 2012 年海河流域水资源质量公报,全年官厅水库水质基本稳定在 IV 类水。官厅水库上游流域监测断面数据显示 2012 年洋河各监测断面水质多位于 IV 类水标准,个别处于 V 类水标准。桑干河水水质总体略好于洋河。官厅水库上游流域污染情况调查资料显示,流域内污染源主要为城镇、农村生活污染,工业废水污染和农业面源污染,2012 年官厅水库上游流域入河污染负荷 COD 为 10297.81t, NH₃-N 为 1219.63t。

1.2 数据来源

文中以官厅水库及其上游流域各功能区为研究对象计算其水环境容量。官厅水库上游流域水功能区划及水质目标来源于《河北省水功能区划》,河流流量取自洋河响水堡水文站和桑干河石匣里水文站监测数据,流域内各监测断面污染物浓度取自《张家口市 2012 年环境质量报告》。官厅水库相关水文资料取自张家口市环保局。部分水环境容量模型参数参考相关文献。

1.3 研究方法

文中以 COD、NH₃-N 为主要污染因子,根据水功能区划以及水文特征,选取模型计算河流水环境容量;根据库区水文特征、水质现状及水质目标,通过模型计算官厅水库水环境容量,两者之和即为官厅水库及其上游流域的水环境总容量。

1.3.1 官厅水库上游河流水环境容量模型

官厅水库上游流域河流属于中小河流,多年平均流量小于 3m³/s,且同时满足以下条件:1) 宽深比较小;2) 污染物在较短的时间内基本能混合均匀;3) 污染物浓度在断面横向方向变化不大,横向和垂向的污染物浓度梯度可以忽略。因而,污染物的浓度变化可以由一维稳态水质模型^[11]进行描述。

$$\text{一维稳态模型解析解为: } C_x = C_0 \exp\left(-K \frac{x}{u}\right) \quad (1)$$

式中:u 为河流断面平均流速, m/s; x 为沿河段的纵向距离, m; C_x 为流经 x 距离后的污染物浓度, mg/L; K 为污染物综合衰减系数, 1/d; C₀ 为上游断面的污染物浓度, mg/L。

在每个功能区段可能有多处污染源。为解决排污口分布所带来的环境容量计算的复杂性,将各功能区内的多个排污口概化为位于河段中点处的一个集中的排污口^[12]。概化后的污染物浓度公式为:

$$C_{x=L} = C_0 \exp\left(\frac{-KL}{u}\right) + \frac{m}{Q} \exp\left(\frac{-KL}{2u}\right) \quad (2)$$

当功能区下断面水质目标为 C_s 时,根据上式可以推导出水环境容量计算方程:

$$M = (C_s - C_0 \exp\left(\frac{-KL}{u}\right)) \times \exp\left(\frac{KL}{2u}\right) \times Q \quad (3)$$

式中: C_{x=L} 为计算河段下断面污染物浓度, mg/L; L 为功能区河段长度, m; m 为污染物入河速率, g/s; Q 为河道断面设计流量, m³/s; M 为水环境容量, g/s; C_s 为功能区河段下断面水质目标浓度值, mg/L。

1.3.2 官厅水库库区水环境容量模型

根据官厅水库多年平均水质监测结果,其水质空间分布比较均匀,宜采用均匀混合模型计算库区水环境容量,根据物料衡算方程,得到官厅水库水环境容量计算公式:

$$W = W_1 + W_2 + W_3 = (C_s - C_0) V_0 + KC_0 (V_0 + q_{in}) + C_s q_{in} \quad (4)$$



图 1 官厅水库上游流域水功能区划及水质目标
Figure 1 Upstream basin of Guanting Reservoir: regionalization of water function and targets of water quality

式中: W 为水环境容量; W_1 、 W_2 、 W_3 分别代表稀释容量、降解容量和输移容量。 C_s 为目标水质值, mg/L ; C_0 为库区水质现值, mg/L ; V_0 为现库容, 亿 m^3 ; q_{in} 为入库水量, 万 m^3 ; K 为污染物综合降解系数, $1/\text{d}$ 。

1.3.3 模型参数选取

(1) 河流模型主要参数选取。官厅水库上游流域主要处于山区和平原河网间的过渡区, 河流断面平均流速 u 取 0.2m/s ^[13]; 设计流量采用 90% 的保证率, 河道断面设计流量取洋河响水堡水文站和桑干河石匣里水文站的 10 年最枯月平均流量; 河流综合消减系数 K_{COD} 、 $K_{\text{NH}_3-\text{N}}$ 参考相关文献^[14](表 1)。

(2) 库区模型主要参数选取。官厅水库的目标水质为 III 类水, 现状水质为 IV 类水。由于官厅水库上游流域主要河流为桑干河和洋河, 且两河交汇后经八号桥断面流入官厅水库, 因此八号桥断面的年流量值可近似为官厅水库年入库水量。库区综合消减系数 K_{COD} 、 $K_{\text{NH}_3-\text{N}}$ 参考相关文献^[12](表 2)。

表 1 上游流水环境容量的主要参数

Table 1 Main parameters of water environmental capacity model for the upstream basin

参数	单位	数值
K_{COD}	1/d	0.17
$K_{\text{NH}_3-\text{N}}$	1/d	0.15
洋河断面设计流量	m^3/s	0.3582
桑干河断面设计流量	m^3/s	0.4915

表 2 库区水环境容量的主要参数

Table 2 Main parameters of water environmental capacity model for Guanting Reservoir

参数	单位	数值
K_{COD}	1/d	0.1
$K_{\text{NH}_3-\text{N}}$	1/d	0.012
现库容	亿 m^3	1.47
年均入库水量	万 m^3	10308.18

2 结果与分析

2.1 结果

根据相关数据及公式(3), 计算得到 2012 年官厅水库上游流域各功能区段水环境容量(表 3)。

表 3 官厅水库上游流域各功能区段水环境容量

Table 3 Water environmental capacity for each functional zone of the upstream basin of Guanting Reservoir

水系	水域	功能区名称	COD(t/a)	$\text{NH}_3-\text{N}(\text{t/a})$
洋河水系	洋河	洋河张家口农业用水区	358.84	21.43
		洋河张家口缓冲区	119.45	10.92
		南洋河张家口缓冲区	71.41	9.51
		南洋河张家口开发利用区	31.04	8.26
		东洋河张家口开发利用区	262.78	18.00
	清水河	清水河张家口开发利用区	354.53	20.46
		东沟张家口开发利用区	163.71	10.37
		西沟张家口开发利用区	158.02	10.16
		正沟张家口开发利用区	154.25	10.01
		洋河水系汇总		1674.02
桑干河水系	桑干河	桑干河张家口开发利用区	766.91	38.47
		壶流河张家口农业用水区	331.11	18.81
	壶流河	壶流河张家口缓冲区	131.33	11.50
		壶流河张家口开发利用区	852.56	46.21
桑干河水系汇总		2081.92	114.99	

将相关数据带入公式(4), 分别得到官厅水库库区在 II 类水和 III 类水标准下的水环境容量(表 4)。

表 4 官厅水库库区水环境容量

Table 4 Water environmental capacity of Guanting Reservoir

标准	COD(t/a)	$\text{NH}_3-\text{N}(\text{t/a})$
II 类标准	91.47	-90.96
III 类标准	1341.88	34.08

2.2 不同水功能区段环境容量的差异分析

流域内不同功能区段的水环境容量差异较大。功能区的水环境容量与河段长度、水质目标有很大关系, 一般来说, 功能区河段越长, 水质目标越低, 水环境容量越大。如表 3 所示, 仅洋河张家口农业用水区与清水河张家口开发利用区的 COD 环境容量就占了洋河水环境容量的 41.2%; 而桑干河张家口开发利

用区与壶流河张家口开发利用区的 COD 环境容量高达桑干河水环境容量的 77.8%。考虑不同功能区水环境容量差异,根据水环境容量合理安排污染负荷,可以使各功能区段尽快恢复目标水质,有效率有针对性地治理水污染。

2.3 水环境容量与污染负荷的比较分析

水体的环境容量与其污染负荷的比较是实施总量控制的重要依据。官厅水库目标水质为Ⅲ类水,因此,流域内水环境总容量为官厅水库上游流域各功能区段水环境容量与Ⅲ类水标准下官厅水库水环境容量相加之和。图 2 显示了流域内水环境总容量与入河污染负荷的比较。

官厅水库主要污染来源为洋河和桑干河,而八号桥断面为洋河和桑干河汇合入官厅水库的国控断面。因此,每年通过八号桥断面的污染量可近似为官厅水库污染负荷量。经计算,官厅水库污染负荷中 COD 为 2267.80t, $\text{NH}_3 - \text{N}$ 为 54.32t, 其与水环境容量比较(图 3)。

可以发现,官厅水库上游流域 COD 和 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 的入河污染负荷均超过了总的水环境容量,且 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 的污染负荷远高于其环境容量。官厅水库库区的水环境容量较小,COD 的污染负荷分别是Ⅲ类和Ⅱ类水标准下环境容量的 1.7 倍和 24.8 倍; $\text{NH}_3 - \text{N}$ 在Ⅱ类水标准下已无环境容量,其污染负荷是Ⅲ类水标准下环境容量的 1.6 倍。

2.3.1 水环境容量较小的原因分析

水环境容量的大小与水体流量密切相关。而官厅水库来水量呈现出明显的递减趋势^[5](图 4), 直接导致水环境容量降低。分析其原因,除了流域内降水量逐年减少的自然因素外,人为因素可以归结为以下两点:

(1) 上游流域大兴水利工程。随着经济社会的发展,上游农田灌溉和生活需水量不断增加,同时为了解决流域十年九旱的缺水境况,流域上游大力兴建水库。几十年来,张家口市境内陆续修建水库 96 座,总库容 7.18 亿 m^3 。水库的集中建设隔断了水的正常流动,分流了大量水资源,使官厅水库上游流域流量逐年减少,部分河段甚至断流。另外,上游流域的两个大型水库(册田水库和友谊水库)分别归山西和内蒙古主管,由于属地管理和地方利益保护,近年来两个水库几乎不放水,使官厅水库来水量雪上加霜。

(2) 农业用水量大,利用效率低。2012 年张家口市农业用水量 7.72 亿 m^3 , 占总用水量的 73.1%, 比全国平均水平高出 9.5%。尽管“十一五”期间张家口市实施了“首水规划”农业节水项目等一大批以渠道防渗、低压管道输水、喷灌为主的农业节水工程,但官厅水库上游流域地区农业灌溉仍然存在大水漫灌等现象,灌溉水利用系数不高。张家口市地表水的平均渠系水利用系数在 0.4 左右,生产粮食量不足 $1.5\text{kg}/\text{m}^3$, 而发达地区为 $2.5\text{kg}/\text{m}^3$, 个别发达地区可达 $4\text{kg}/\text{m}^3$ ^[16]。较低的水利用效率使农业用水量居高不下,从而导致官厅水库上游流域流量减少。

2.3.2 污染负荷较大的原因分析

(1) 产业结构不尽合理。官厅水库上游流域以传统型产业为主,高新技术企业相对较少,低消耗、低污染、高效益的节约型产业比重低,目前流域内支柱产业仍以“两高一资”的黑色金属冶炼及压延、矿山采选和电力为主,产业结构不合理。钢铁、水泥、化工、制药、电力等高污染、高消耗企业主要分布于上游流域

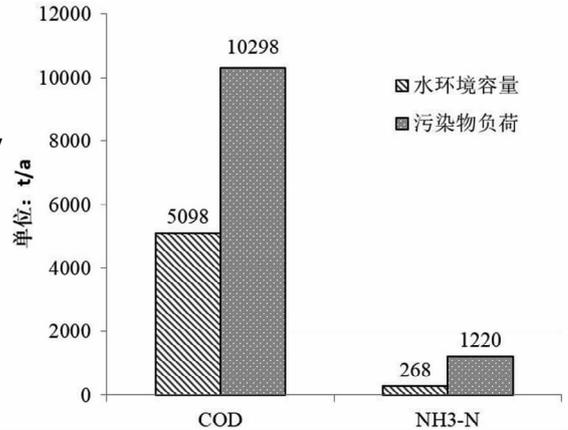


图 2 官厅水库及其上游流域水环境容量与污染负荷的比较

Figure 2 Comparison between total water environmental capacity of Guanting Reservoir and its upstream basin and their corresponding pollution load

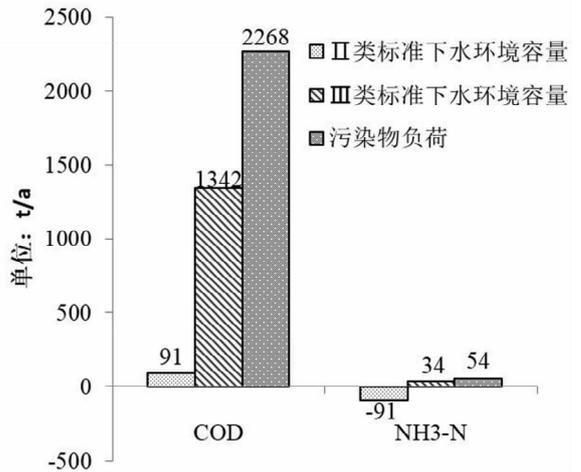


图 3 官厅水库库区水环境容量与污染负荷的比较

Figure 3 Comparison between water environmental capacity of Guanting Reservoir and its corresponding pollution load

两条主要支流洋河与桑干河附近,对河流水质影响较大,进而对官厅水库水环境产生不利影响。

(2) 农村面源污染未得到有效控制。官厅水库上游流域农村面源污染问题越来越突出。在农业生产活动中,氮、磷等营养物质和农药通过农田地表径流、渗漏或挥发形成污染。具体地,2012年官厅水库上游流域农用化肥施用量82418t,占张家口全市农用化肥施用量的80.02%,其中氮肥施用量41411t。由于近年来畜禽养殖业的快速发展,流域内分散养殖逐渐变为规模化集约养殖,但是相应的污染物集中处置设施建设相对不足,由此产生的污染问题比较严重;另外,农村生活污水处理尚未有效开展,大部分农村生活污水无处理排放,成为流域内重要污染源之一。

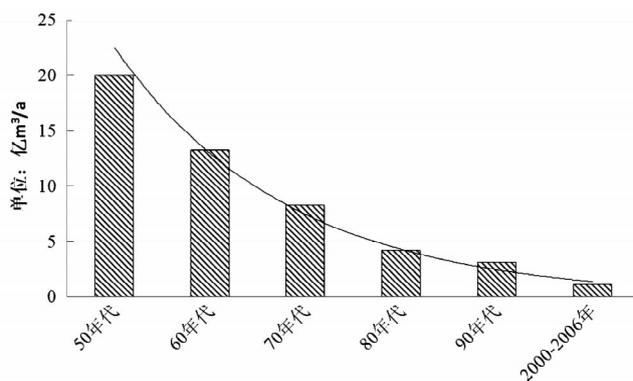


图4 官厅水库来水量变化趋势

Figure 4 Trend of the inflow of Guanting Reservoir

3 讨论

文中采用了河流一维稳态水质模型和物料衡算模型计算了官厅水库及其上游流域水环境容量,这一研究视角是对当前单纯研究河流或湖库水环境容量的有效补充。文中参照水功能区划将官厅水库上游流域划分为13个功能区段,根据水文特征和水质目标分别求出各个功能区段水环境容量,加总的结果应比直接计算整个上游流域的水环境容量更准确,且从管理的角度更具有针对性。文中着重分析了流域内水环境容量与污染负荷差异较大的原因,为流域水污染控制与管理指明了方向,也为其他地区从环境容量视角研究污染控制问题提供借鉴。

从前面的分析可以看出,为了使流域内各功能区达到目标水质,一方面应当采取措施提高水环境容量,即"扩容";另一方面,应当采取污染物削减措施,即"减排"。

(1) 通过和上游地区水权交易来增加流域内来水水量。同时,大力发展节水型农业,提高灌溉水利用系数。充分发挥水价的调节作用,基于全成本定价,实行工商业和居民差别水价,以节约用水。这些措施将增加流域内河水流量和水库蓄水量,从而提高水环境容量。

(2) 为降低污染负荷,应开展流域产业结构调整,淘汰高耗水、重污染、低效益的企业。同时,减少经济作物大面积种植造成的氮磷污染,加强规模化畜禽养殖厂污染物集中处理设施建设。在官厅水库上游流域增加人工湿地项目,以解决传统污水处理厂难以处理的 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 消减问题。根据水环境容量的差异性,新增企业应建立在水环境容量较大的功能区内,环境容量较小的功能区应减少或禁止新建排污企业。工业点源污染物排放应参考流域内各个水功能区段的水质目标和环境容量,执行更加严格的排放标准。流域内宜实行污染物总量控制,将所有排污企业纳入总量控制范围,以水功能区段水环境容量为基础将排污量进行科学分配,探索并逐步放开排污权交易。

4 结论

(1) 通过河流一维稳态水质模型和物料衡算模型计算的流域内水环境总容量COD为5097.82t/a, $\text{NH}_3 - \text{N}$ 为268.18t/a,明显小于该流域内对应的污染物负荷。

(2) 流域内不同功能区段的水环境容量差异较大。应根据水环境容量合理分配不同功能区的污染负荷,有针对性的解决流域水污染问题。

(3) 流域内水环境容量较小的主要人为因素是上游流域大兴水利工程,农业用水量大且用水效率低;污染负荷较大的主要原因在于流域内产业结构不合理,农业面源污染未得到有效控制。水污染控制和管理应同时做好"扩容"和"减排"。

参考文献

- [1]张永良. 水环境容量基本概念的发展[J]. 环境科学研究, 1992, 5(3): 59-61.
- [2]孙卫红, 姚国金, 逢勇. 基于不均匀系数的水环境容量计算方法探讨[J]. 水资源保护, 2001, 17(2): 25-26, 44.
- [3]周刚, 雷坤, 富国, 毛光君. 河流水环境容量计算方法研究[J]. 水利学报, 2014, 45(2): 227-234, 242.
- [4]于雷, 吴舜泽, 范丽丽, 徐毅. 河流水环境容量一维计算方法[J]. 水资源保护, 2008, 24(1): 39-41.
- [5]胡开明, 逢勇, 王华, 范丽丽. 大型浅水湖泊水环境容量计算研究[J]. 水力发电学报, 2011, 30(4): 135-141.
- [6]Wang Tao, Zeng Weihua, He Mengchang. Study of the seasonal water environmental capacity of the central Shaanxi reach of the Wei River[J]. Procedia Environmental Sciences, 2012(13): 2161-2168.
- [7]熊风, 杨立中, 罗洁, 查坤. 我国西部内陆河流水环境容量研究[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(10): 88-92.
- [8]黄真理, 李玉梁, 李锦秀, 陈永灿. 三峡水库水环境容量计算[J]. 水利学报, 2004, 35(3): 7-14.
- [9]范丽丽, 沙海飞, 逢勇. 太湖湖体水环境容量计算[J]. 湖泊科学, 2012, 24(5): 693-697.
- [10]Yan Bangyou, Xing Jiusheng, Tan Huiru, et al. Analysis on water environment capacity of the Poyang Lake[J]. Procedia Environmental Sciences, 2011(10): 2754-2759.
- [11]杨杰军, 王琳, 王成见, 等. 中国北方河流环境容量核算方法研究[J]. 水利学报, 2009, 40(2): 194-200.
- [12]李红亮, 李文体. 水域纳污能力分析研究方法与应用[J]. 南水北调与水利科技, 2006, 4(6): 58-60, 97.
- [13]汪诚文. 环境承载力理论研究及其实践[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [14]刘德文, 于卉, 王立明. 海河流域纳污能力与限制排污总量分析[J]. 海河水利, 2006(6): 4-6.
- [15]陈月平. 官厅水库水资源现状分析[J]. 北京水务, 2007(6): 7-11.
- [16]张克阳, 苏亮, 班富孝. 张家口市水资源优化配置探讨[J]. 现代农业科技, 2010(14): 235-237.

Analysis of water environmental capacity of Guanting Reservoir and its upstream basin

YANG Zhe, CHENG Can, TAN Xue, CHENG Rong, MA Zhong

(School of Environment and Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China)

Abstract: Water basins in Northern China have generally small water quantity and were polluted heavily. The calculation of water environmental capacity can provide a scientific basis for water pollution control. Taking the Guanting Reservoir and its upstream basin as an example, according to the hydrological characteristics of the basin, one-dimensional steady-state water quality model was chosen to calculate the water environmental capacity of each functional zone of in this basin. Results showed that the total water environmental capacity of COD and $\text{NH}_3\text{-N}$ in the basin were 5097.82t/a, 268.18t/a respectively; compared with the pollution load, water environmental capacity was significantly smaller; the water environmental capacity of different functional zones was quite different; large numbers of water conservancy projects in the upstream basin and high consumption but low efficiency of agricultural water led to the small water environmental capacity; improper industrial structure and poor control of agricultural non-point source pollution were the leading causes of the large pollution load.

Key words: water environmental capacity; Guanting Reservoir; water functional zone