网络出版时间：2016-01-11 08:54:26
网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/21.1135.x.20160111.0854.004.html

第41卷 第6期
2015年12月
环境保护科学
Environmental Protection Science
Vol.41 No.6
Dec.2015,16~21

基于水质和水量视角下的水环境承载力研究

——以高淳固城湖流域为例

杨 喆，程 灿，谭 雪，程 荣，石 磊，马 中
（中国人民大学环境学院，北京 100872）

摘 要：以江苏高淳固城湖流域为例，从“水质”和“水量”不同角度综合分析流域水环境承载力。选取COD和NH_3-N为主要污染因子，通过一维稳态水质模型与物料衡算模型计算固城湖流域纳污能力，进而推算“水质”角度固城湖流域承载力；通过综合计算流域内可利用的水资源量推算其对流域内社会经济系统的支撑能力，即“水量”角度的承载力。结果表明，固城湖流域COD和NH_3-N的纳污能力分别为8 483.97 t/a和622.47 t/a；不同水功能区纳污能力差别较大；基于水资源量的承载力＞基于COD的水环境承载力＞基于NH_3-N的水环境承载力；NH_3-N污染是目前固城湖流域发展的主要限制性因子；基于水资源量的承载力虽然较高，但存在季节性缺水的风险；应从多角度、有重点地提高固城湖流域水环境承载力。

关键词：固城湖流域；水环境承载力；纳污能力；水资源量；固城湖
中图分类号：X321 **文献标志码：**A

Analysis of Water Environment Carrying Capacity from the Perspectives of Water Quality and Quantity

——A Case Study of Gucheng Lake Basin

Yang Zhe, Cheng Can, Tan Xue, Cheng Rong, Shi Lei, Ma Zhong
(School of Environment and Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China)

Abstract: In this paper, Gucheng Lake Basin of Gaochun region in Jiangsu Province is taken as an example and water environment carrying capacity (WECC) of the basin is comprehensively analyzed from the perspectives of water quality and quantity. COD and NH_3–N are selected as the major pollution factors and water environmental capacity of the basin is calculated by use of one–dimension steady–state water quality model and material balance model and then carrying capacity of the basin is further calculated from the perspective of water quality. By calculation of the water quantity that can be used in the basin, supporting capacity for socio–economic system of the basin is estimated from the perspective of water quantity. The results show that water environmental capacities of COD and NH_3–N in Gucheng Lake Basin are 8483.97 t/a and 622.47 t/a respectively. Environmental capacities in different water functional zones vary greatly. Carrying capacity based on water quantity is maximal, followed by those based on COD and NH_3–N in a descending order. NH_3–N pollution is currently the major limiting factor for Gucheng Lake Basin development. Although the carrying capacity based on water quantity is higher, there are risks of seasonal water shortage. Therefore, WECC in Gucheng Lake Basin should be improved from different perspectives with priorities.

Keywords: Gucheng Lake Basin; Water Environment Carrying Capacity; Water Environmental Capacity; Water Quantity; Gucheng Lake
CLC number: X321

随着人口与经济的快速增长，水资源短缺、水污染问题日益严重，水环境已经成为制约地区发展的关键性因素。水环境承载力作为区域可持续发展的重要指标，已经成为资源环境领域研究的重点与热点问题之一[1-3]。

目前对水环境承载力尚无统一的定义，一般

收稿日期：2015-06-13
基金项目：中国人民大学科学研究基金(中央高校基本科研业务费专项资金资助)（15XNH039）资助
作者简介：杨 喆（1988-），男，博士研究生。研究方向：水环境保护与水污染防治。E-mail: yz69env@163.com
通信作者：石 磊（1978-），男，副教授，硕士生导师。研究方向：环境与资源经济学、环境规划与管理。

认为水环境承载力有狭义和广义区分[4–5]。狭义水环境承载力是指水环境容量，即在给定的水文条件和规定的排污方式和水质目标前提下，某一水域最大允许纳污量，也即水体纳污能力。国内学者对水环境容量的研究主要在于方法探讨[6–7]与测算某一区域水环境容量[8–9]上。而国外对水环境容量的研究主要集中在每日最大污染负荷领域[10–12]。广义的水环境承载力比水环境容量内涵更广泛，还包括对水资源的开发利用，指在一定的经济技术条件下，在水环境能够可持续发展的前提下，水体对人口、社会经济的最大支撑能力[13]。广义水环境承载力的研究方法主要有层次分析法、向量模法、系统动力学法，承载率评价法，主成分分析法等，主要思路是通过构建指标体系，将各指标归一化，并赋予相应的权重，计算得到区域水环境承载力指数[14–16]。

通过已有研究可以发现，狭义的水环境承载力分析并不能体现出水体纳污能力所能承载的社会经济指标，也没有考虑水资源量的社会经济承载力，对地区可持续发展的指导作用有限。而广义的水环境承载力研究虽然在指标选取上包含了资源、环境、经济和社会几个子系统，一般能较为全面地反映区域水环境的相对承载力，但无法得到所能承载的人口和经济规模的具体数值，且单一指标对水环境承载力的影响难以直接体现。基于此，文章从水环境的两个重要要素“水质”和“水量”角度出发，以固城湖流域为例，综合分析测算其水环境承载力。从“水质”角度，首先计算固城湖流域在一定的水质标准下的水体纳污能力，进而通过纳污能力计算其可承载的区域人口和社会经济规模等指标。从“水量”角度，通过流域内可利用的水资源量计算其对流域内社会和经济系统的支撑能力，最后将两种角度计算的人口与经济指标相比较，综合分析固城湖流域水环境状况，并为流域社会经济、环境的协调发展提供依据。

1 研究区概况

固城湖位于江苏省南京市高淳区（曾为高淳县，2013年撤县设区）境内，水阳江下游，属长江水系，固城湖是高淳区“鱼米之乡”的重要标志，是高淳区生态环境的支撑和窗口。固城湖湖泊面积30.9 km^2，流域涵盖高淳区淳溪镇、东坝镇、古柏镇、固城镇、漆桥镇、阳江镇、砖墙镇7镇和1个省级经济技术开发区，流域面积652.6 km^2，见图1。



图1 固城湖流域边界

固城湖流域主要分为10个水功能区，主要河流有港口河、官溪河、漆桥河、胥河、石固河等，均与固城湖相连，主要河流的水质目标见图1。固城湖是江苏省12个省管湖泊之一，水环境功能规划为饮用、渔业和景观，现有功能以生活饮用水为主，是高淳区最重要的饮用水源地，提供全区66%以上人口的饮用水，水产养殖、农田灌溉也是固城湖的重要功能。因此计算和分析固城湖流域的水环境承载力对区域水资源综合规划和水资源合理开发利用有重要的指导意义。

根据高淳区2012年环境质量报告，固城湖流域水质总体较好。其中，固城湖湖区各断面所测各项指标浓度值均符合Ⅲ类水标准。河流水环境功能区监测断面显示，有7个功能区达到Ⅲ类水标准，沛桥河高淳保留区为Ⅳ类水标准，而漆桥河高淳保留区仅为Ⅴ类水标准。

研究数据基于固城湖流域生态环境状况实地调研，并结合《江苏省地表水环境功能区划》，《高淳区水资源公报2012》，《高淳区统计年鉴2013》等相关资料。

2　研究方法

从“水质”角度分析水环境承载力首先根据固城湖流域内河流和湖库的具体情况，以COD和NH_3–N为主要污染因子，选取合适的水质模型，对其纳污能力进行核算。从“水量”角度研究水环境承载力则通过水资源量的不同指标推算出可用于生产的可利用水资源量，进而估算出固城湖流域水资源量的承载力。

2.1　计算模型

2.1.1　流域纳污能力计算模型

①河流纳污能力计算模型。固城湖流域内河流属于中小河流，自然径流量较小，污染物在较短的时间内基本能混合均匀，横向和垂向的污染物浓度梯度可以忽略。为解决排污口分布带来的计算复杂性，选取污染源概化的一维稳态水质模型[17]来计算固城湖流域内功能区河流的纳污能力。

$$W_R=\left[C_s-C_0\exp\left(\frac{-KL}{u}\right)\right]\times\exp\left(\frac{KL}{2u}\right)\times Q \quad (1)$$

式（1）中，W_R为河流纳污能力，g/s；C_s为功能区河段下游断面水质目标浓度值，mg/L；C_0为功能区上游断面的污染物浓度实测值，mg/L；K为污染物综合降解系数，d^{-1}；L为功能区河段长度，m；u为河流断面流速，m/s；Q为河流断面设计流量，m^3/s。

②湖库纳污能力计算模型。固城湖属于中小型湖泊，多年平均入湖水量和出湖水量基本平衡，故该项研究采用均匀混合模型计算其纳污能力。根据物料衡算得到固城湖纳污能力计算公式：

$$W_L=(C_S\text{-}C_0)\ V+KC_SV+C_Sq_{out} \quad (2)$$

式（2）中，W_L为湖泊纳污能力，t/a；C_s为目标水质，mg/L；C_0为水质实测值，mg/L；V为枯水期湖泊的平均库容，m^3；q_{out}为枯水期多年平均出湖水量，m^3/a；K为污染物综合降解系数，d^{-1}。

2.1.2　流域水资源量承载力计算模型

针对高淳区的社会经济以及水资源状况，选择区域水资源可利用量、GDP总量、总人口数等指标基于评价模型分别计算出2012年高淳区水资源的人口和经济承载力2个度量指标，进而推算出固城湖流域水资源所能承载的人口以及GDP。水资源量承载力各评价指标的关系见图2。

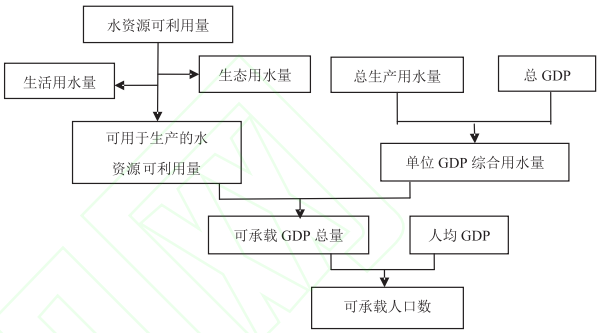


图2　水资源量承载力评价指标体系图

水资源可利用量是指在一定的经济技术条件下，在环境容许的前提下，在可预见的时期内，当地可以开发利用的最大水资源量[18]。水资源可利用量主要由地表水可利用量与地下水可利用量（去除重复部分）、水资源净调入量和污水回用量等组成[19]。水资源可利用量的计算公式表达为：

$$W_{AR}=W_{AS}+W_{AG}+W_T+W_{RW}-W_{RC} \quad (3)$$

式（3）中，W_{AR}指水资源可利用量；W_{AS}指地表水可利用量；W_{AG}指地下水可利用量；W_T指水资源调配量；W_{RW}指污水回用量；W_{RC}指可利用地表水与地下水的重复计算量。

可用于生产的水资源可利用量W_{ARP}的计算公式表达为：

$$W_{ARP}=W_{AR}-W_L-W_E \quad (4)$$

式（4）中，W_L指生活用水量；W_E指生态用水量。

以总生产用水量C_μ（包括农业用水量C_A、工业用水量C_I和公共事业用水量C_F）除以总GDP得到单位GDP综合用水量U_C，公式如下：

$$U_C=C_\mu/\text{GDP}=(C_A+C_I+C_F)/\text{GDP} \quad (5)$$

可承载的GDP C_E和可承载的人口数C_P的计算公式如下：

$$C_E=W_{ARP}/U_C \quad (6)$$

$$C_P=C_E/\text{人均GDP} \quad (7)$$

2.2 模型主要参数及相关数据

2.2.1 河流和湖泊纳污能力模型主要参数 固城湖流域内河流的设计流量和流速采用90%保证率下的流量和流速计算。固城湖设计库容和出湖水量采用90%保证率下的库容和出湖水量计算，分别为0.218亿m^3和1.189亿m^3/a。综合降解系数的确定方法主要有反推法、实验法和类比法，本文采用类比法，选择与固城湖流域水文条件相似的临近流域作为参考[20-23]，确定河流综合降解系数K_{COD}、K_{NH_3-N}分别为0.1 d^{-1}和0.08 d^{-1}，湖区综合降解系数K_{COD}、K_{NH_3-N}分别为0.064 d^{-1}和0.057 d^{-1}。具体取值见表1。

表1 流域纳污能力模型主要参数

河流/湖泊	C_0/mg·L^{-1}		C_s/mg·L^{-1}		L/km	Q/m^3·s^{-1}	u/m·s^{-1}	V/亿m^3	q_{out}/m^3·a^{-1}
	COD	NH_3-N	COD	NH_3-N					
官溪河	14	0.36	20	1.0	8.7	7.27	0.35	–	–
港口河	13	0.36	20	1.0	6.9	1.66	0.18	–	–
漆桥河	23	1.66	20	1.0	17.8	21.18	0.74	–	–
胥 河	17	0.89	20	1.0	15.1	3.68	0.37	–	–
水阳江	17	0.75	20	1.0	20.4	16.5	0.46	–	–
运粮河	15	0.89	20	1.0	5.6	7.27	0.35	–	–
石固河	18	0.74	20	1.0	12.6	1.34	0.27	–	–
沛桥河	23	0.44	30	1.5	3.1	3.68	0.44	–	–
漕塘河	20	0.64	20	1.0	5.8	3.68	0.44	–	–
固城湖	12	0.32	20	1.0	–	–	–	0.218	1.189

注：C_0取自2012年高淳区环境质量报告书，C_s取自《地表水环境质量标准（GB3838——2002）》，L取自《江苏省地表水环境功能区划》，Q、u、V和q_{out}取自《高淳县水资源综合规划》。固城湖流域内胥河起始-终止位置为：茅东闸-固城湖口，长度约为15.1 km。

2.2.2 水资源量承载力模型主要数据 2012年高淳区地表水资源量3.775亿m^3，水资源利用率为45.4%，有过境水与外调水的地区还应加上可利用的过境水量与外调水量[24]，2012年高淳区无外调水，高淳区过境水量为43.31亿m^3，但现状利用率不足10%。根据《高淳区统计年鉴2013》，高淳区2012年GDP总量为362.97亿元，人口数为43.26万人。高淳区相关水资源量和用水状况的具体数值见表2。

表2 高淳区相关水资源量和用水状况 亿m^3

W_{AS}	W_{AG}	W_T	W_{RC}	W_{RW}	W_L	W_E	W_{ARP}	C_A	C_I	C_F
5.179	0.325	0	0.531	0.126	0.134	0.023 5	4.942	2.890 1	0.0540 1	0.035 1

注：取自《高淳区水资源公报2012》。

3 结果与分析

3.1 结果

3.1.1 固城湖流域纳污能力测算 根据相关数据和公式（1）和（2），计算得到固城湖流域各功能区纳污能力，见表3。高淳固城湖流域COD纳污能力为8 483.97 t/a，NH_3-N纳污能力为622.47 t/a，各功能区纳污能力差异显著。

表3 固城湖流域各功能区纳污能力 t·a^{-1}

水功能区名称	COD	NH_3-N
固城湖高淳饮用水源区	1 864.38	63.94
官溪河高淳渔业用水区	1 487.88	150.33
水阳江缓冲区	2 055.71	148.81
港口河高淳缓冲区	404.86	34.77
运粮河高淳保留区	1 220.68	28.43
石固河古柏渔业用水区	127.92	12.58
漆桥河高淳保留区	0.00	0.00
沛桥河高淳保留区	837.45	123.75
漕塘河高淳保留区	35.41	42.94
胥河高淳保留区	449.68	16.91
合计	8 483.97	622.47

3.1.2　固城湖流域纳污能力可承载人口及GDP

通过固城湖流域纳污能力计算结果和生活污染源排污系数可以推算出流域纳污能力可承载人口数，进而得到可承载GDP总量。具体地，根据《高淳县水资源综合规划》，流域内主要湖泊河流的污染负荷来源中，COD城镇生活污染约占29.9%，农村生活污染约占2.1%；NH_3–N城镇生活污染约占39.2%，农村生活污染约占4.8%。根据污染负荷比例分配相应污染物的纳污能力，再除以对应的入河湖系数，可得到城镇生活污染可承载COD 6 445.53 t/a，NH_3–N 1 756.51 t/a；农村生活污染可承载COD 410.24 t/a，NH_3–N 296.62 t/a。流域内生活污染可承载量与生活污染源排污系数的比值，即为固城湖流域可承载人口数，再乘以人均GDP即可求出不同污染物可承载的GDP，结果见表4。

表4　固城湖流域不同污染物的承载力

承载项	2012 年实际值	承载力	
		COD	NH_3–N
人口数/万人	37.19	56.51	36.82
GDP/亿元	335.78	510.18	332.47

3.1.3　固城湖流域水资源可承载人口及GDP　根据相关数据及公式（6）和（7），可得到固城湖流域水资源量的承载力，见表5。

表5　固城湖流域水资源量承载力

流域内实际GDP/亿元	流域内可承载GDP/亿元	流域内实际人口数/万人	流域内可承载人口数/万人
335.78	556.98	37.19	61.69

3.2　分析

3.2.1　计算结果合理性分析　根据2012年高淳区环境质量报告书，固城湖流域内监测断面的达标率达到90%，说明流域内水环境质量整体状况良好，而计算所得的基于水质的水环境承载力接近或超过了流域内的实际值，同样说明目前流域的水质状况良好，两者相符。环境质量报告书中显示，流域内主要超标项目为氨氮，同样与计算结果一致（基于NH_3–N的水环境承载力明显小于基于COD的水环境承载力）。另外，根据高淳区水资源公报，固城湖流域过境水量非常丰富，导致基于水资源量的承载力明显高于其现状值，计算结果具有合理性。

3.2.2　不同功能区纳污能力差异分析　流域内不同功能区段的纳污能力差异明显，见图3。

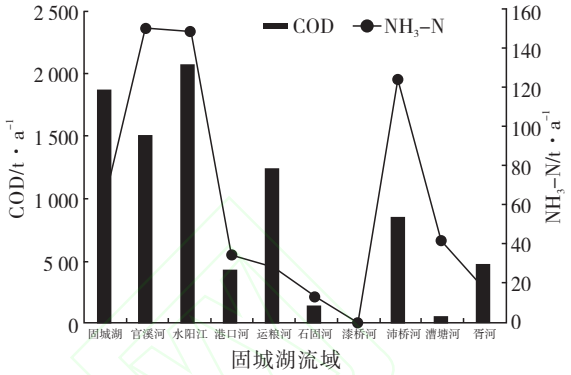
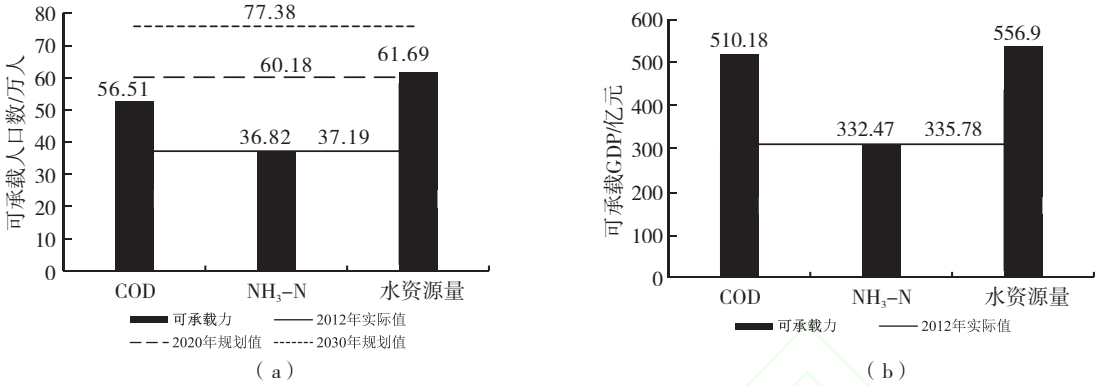


图3　固城湖流域各功能区纳污能力

河流功能区的纳污能力与河段长度、水质现状、水质目标和流量关系密切，功能区河段越长、水质现状越好、水质目标越低、流量越大，其纳污能力越强。固城湖流域内河流除沛桥河目标水质为Ⅳ类水，其他河流目标水质均为Ⅲ类水。因此，不同功能区纳污能力差异的主要原因在于现状水质、河段长度以及流量。在各功能区中，水阳江现状水质较好，河段最长，流量较大，COD的纳污能力最大；官溪河虽然长度和流量不及水阳江，但其NH_3–N的现状浓度最低，使其NH_3–N的纳污能力在9条河流中居首；漆桥河虽然流量最大，但水质较差（COD为Ⅳ类水标准，NH_3–N仅为Ⅴ类水标准），导致其已无相应的纳污能力，亟需通过污染治理措施改善水质。考虑到不同功能区纳污能力的差异，根据纳污能力合理分配污染负荷，可以有效率地维持或改善水环境质量，使各功能区均达到目标水质。

3.2.3　“水质”和“水量”不同视角下的水环境承载力　单纯从“水质”或“水量”角度分析区域水环境承载力并不全面，某些区域可能水量较大，但水质较差，无法保障人民群众的用水安全；而有些区域可能水质较好，但水量较少，也不能满足人们的用水需求。因此应从不同角度分析水环境承载力，为水环境综合管理提供依据。固城湖流域从“水质”和“水量”不同角度测算的水环境承载力见图4。



（a） （b）

图4 固城湖流域“水质”和“水量”不同角度可承载人口数和GDP

由图4可以发现，不同视角下的水环境承载力差别较大。基于NH_3–N的水环境承载力最小，可承载人口数为36.82万人，甚至低于2012年流域内实际人口数37.19万人，可承载GDP总量为332.47亿元，同样低于2012年流域内实际GDP总量335.78亿元。因此，NH_3–N污染是地区发展的主要限制性因子；究其原因主要在于流域内水产养殖和农业污染物排放量大。螃蟹养殖在高淳区已具有一定的规模，2012年全区螃蟹产量达到1.56万t，其产生的尾水污染物量大且处理率低；农村生活污水绝大部分未经处理直接排放，垃圾倾倒河塘等现象仍然存在。

基于COD的水环境承载力居中，可承载人口数为56.51万人，可承载GDP为510.18亿元，均高于2012年实际值。基于COD的水环境承载力较高主要得益于工业企业的废水排放得到有效控制，根据《高淳县固城湖水资源保护规划纲要及分期治理计划》，全区关闭和搬迁了86家对固城湖具有水污染的企业，对固城湖内外源实施综合治理和规范化管理。但是，流域内COD的可承载人口数要低于《高淳区城乡总体规划（2013–2030）》中的2020年和2030年的规划值（分别为60.18万人和77.38万人），COD的污染防治还需要进一步加强。

基于流域内水资源量的承载力最高，可承载人口数为61.69万人，可承载GDP为556.98亿元，均高于2012年实际值。其中，可承载人口数高于2020年规划值，但低于2030年规划值。水资源量承载力较大主要原因是水阳江的过境水量丰富，约为高淳区地表径流量的10倍。但由于过境水主要是汛期暴雨汇流成的洪水，加之工程调蓄能力不足，对其利用率还较小，过境水开发利用有很大潜力。

尽管不同指标下承载力不同，但考虑到“水桶效应”，应着力削减NH_3–N排放量，有效控制COD排放量，保持和完善水资源的开发和利用。

4 讨论

通过对比分析固城湖流域“水质”和“水量”不同角度的水环境承载力，探索出区域水环境管理的重点，以有针对性的采取措施，提高管理效率，同时为其他流域水环境承载力研究提供借鉴。由于监测数据不够全面，仅以COD和NH_3–N两个污染因子来研究“水质”角度的水环境承载力。固城湖流域应加强功能区的水质监测，监测范围和监测频次均需增加，若条件允许，可以探讨多种污染因子的水环境承载力，使分析更加全面。

水环境承载力不是一成不变的，可以通过加强管理、新建工程等措施逐步提高。对于加强固城湖流域水环境承载力，有如下建议：（1）严格执行各功能区段污染物总量控制，对于已无纳污能力或纳污能力较小的功能区施行更加严格的污染物排放标准和排污费征收标准。（2）针对固城湖流域水产养殖污染较为严重，应加强围网养殖污染综合治理，实施湖泊围网养殖清理工程，池塘循环水养殖技术示范工程，并分阶段实施退圩还湖，这样既能提高固城湖纳污

能力，又能有效减少养殖污水。（3）固城湖流域虽然过境水量丰富，但本地水资源不足，2012年过境水可利用量占总水资源可利用量的68%，由于过境水季节性较强，若调引存蓄工程缺失，可能有季节性缺水的风险。因此，应通过新建引水工程，增加河湖水系调蓄能力，提高过境水利用率，这样通过水量的增加还可以提高流域纳污能力。同时，应落实水资源总量控制、效率控制管理，加强行业用水大户节水管理，大力推广先进的节水型或无水型工艺、技术和设备，提高灌溉水利用系数，促进水资源节约。

5　结论

（1）通过一维稳态水质模型与物料衡算模型计算得到固城湖流域总体纳污能力，COD为8483.97 t/a，NH_3–N为622.47 t/a，各功能区纳污能力差别较大，应施行不同功能区段的污染物总量控制。

（2）“水质”和“水量”角度计算的水环境承载力差别明显，基于水资源量的承载力 > 基于COD的水环境承载力 > 基于NH_3–N的水环境承载力。NH_3–N污染是目前固城湖流域发展的主要限制性因子。NH_3–N的承载力较低与流域内水产养殖和农业污染物排放量大，处理率低有关。水资源量承载力虽然较高，但存在季节性缺水的风险。

（3）应多角度，有重点地提高固城湖流域水环境承载力，政策措施应从“治污”、“节水”与“提高过境水利用率”方面着手。

参考文献

[1]刘臣辉, 申雨桐, 周明耀, 等. 水环境承载力约束下的城市经济规模量化研究[J]. 自然资源学报, 2013,28(11): 1903–1910.

[2]崔兴齐, 孙文超, 鱼京善, 等. 河南省近十年水环境承载力动态变化研究[J]. 中国人口・资源与环境, 2013,23(11): 359–362.

[3]付桂珍, 贾　磊, 李　昌. 武汉城市圈水环境承载力研究[J]. 中国农村水利水电, 2013(11): 48–51.

[4]李　玮, 肖伟华, 秦大庸, 等. 水环境承载力研究方法及发展趋势分析[J]. 水电能源科学, 2010,28(11): 30–32.

[5]杨　维, 刘　萍, 郭海霞. 水环境承载力研究进展[J]. 中国农村水利水电, 2008 (12): 66–69.

[6]周　刚, 雷　坤, 富　国, 等. 河流水环境容量计算方法研究[J]. 水利学报, 2014,45(02): 227–234.

[7]孙卫红, 姚国金, 逄　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(02):25–26.

[8]罗慧萍, 逄　勇, 徐心彤. 江苏省太湖流域水功能区纳污能力及限制排污总量研究[J]. 环境工程学报, 2015,9(04): 1559–1564.

[9]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,(03): 7–14.

[10]Havens K E, Schelske C L. The importance of considering biological processes when setting total maximum daily loads(TMDL) for phosphorus in shallow lakes and reservoirs[J]. Environmental Pollution, 2001, 113(1):1–9.

[11]Chen D J, Dahlgren R A, Shen Y, et al. A Bayesian approach for calculating variable total maximum daily loads and uncertainty assessment[J] . Science of The Total Environment, 2012, 430(15):59–67.

[12]Fakhraei H, Driscoll C T, Selvendiran P, et al. Development of a total maximum daily load (TMDL) for acid-impaired lakes in the Adirondack region of New York[J]. Atmospheric Environment, 2014, 95:277–287.

[13]彭　静, 李　翀. 广义水环境承载理论与评价方法[M]. 北京: 中国水利水电出版社,2006.

[14]李　磊, 贾　磊, 赵晓雪, 等. 层次分析—熵值定权法在城市水环境承载力评价中的应用[J]. 长江流域资源与环境, 2014,23(04): 456–460.

[15]张　军. 基于向量模法的陕西省水环境承载力评价[J]. 河南科学, 2012,30(11): 1634–1637.

[16]许　朗, 黄　莺, 刘爱军. 基于主成分分析的江苏省水资源承载力研究[J]. 长江流域资源与环境, 2011,20(12): 1468–1474.

[17]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(02): 194–200.

[18]贾绍凤, 周长青, 燕华云, 等. 西北地区水资源可利用量与承载能力估算[J]. 水科学进展, 2004,15(06): 801–807.

[19]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.

[20]鲍　琨, 逄　勇, 孙　瀚. 基于控制断面水质达标的水环境容量计算方法研究——以殷村港为例[J].资源科学, 2011,33(02): 249–252.

[21]王　涛, 张　萌, 张　柱, 等. 基于控制单元的水环境容量核算研究——以锦江流域为例[J]. 长江流域资源与环境, 2012,21(03): 283–287.

[22]吴颖靖, 彭昆国, 黄建美, 等. 湖塘水库污染负荷与水环境容量分析研究[J]. 江西化工, 2014,(04): 89–94.

[23]王寿兵, 马小雪, 张韦倩, 等. 上海淀山湖水环境容量评估[J]. 中国环境科学, 2013,33(06): 1137–1140.

[24]袁　鹰. 区域水资源承载能力评价方法研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2006.