

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2016. 02. 025

# 山丘区水环境容量计算及限制排污总量分析

## ——以临海市“五水共治”规划为例

陈 玥<sup>1</sup>, 李一平<sup>2</sup>, 高小孟<sup>2</sup>, 章双双<sup>3</sup>, 孔 文<sup>4</sup>

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098;  
3. 苏州科技学院环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215009; 4. 南京智慧新城工程管理有限公司, 江苏 南京 210008)

**摘要:**为改善山丘区水环境,以典型山丘区城市临海市为研究对象,基于对临海市水环境现状、水环境功能及水污染负荷的充分调查,建立河网水量水质数学模型,计算了河网水环境容量,并提出了污染物排放总量控制和削减方案。结果表明:临海市河网的水环境容量 COD 为 15 904. 3 t/a, NH<sub>3</sub>-N 为 1 585. 2 t/a, 水质超标率分别为 COD 15. 61%, NH<sub>3</sub>-N 16. 67%。规划年工程实施后预计新增水环境容量 COD 1 137. 7 t/a, NH<sub>3</sub>-N 114 t/a, 削减污染物入河量 COD 10 610. 6 t/a, NH<sub>3</sub>-N 1 082 t/a, 水环境质量得到较大提升。

**关键词:**水环境容量; 排污总量; 数学模型; 总量控制; 山丘区

中图分类号: X832      文献标志码: A      文章编号: 1004 - 6933 (2016) 02 - 0123 - 06

# Calculation of water enviromental capacity and analysis of total quantity control of pollution discharge in hilly area: a case study of co-governance on five water categories in Linhai City

CHEN Yue<sup>1</sup>, LI Yiping<sup>2</sup>, GAO Xiaomeng<sup>2</sup>, ZHANG Shuangshuang<sup>3</sup>, KONG Wen<sup>4</sup>

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;  
2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;  
3. College of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China;  
4. Nanjing Wisdom New Town Project Management Co. Ltd., Nanjing 210008, China)

**Abstract:** Based on the full investigation on the present situation of water environment, water environment function, and the water pollution load, Linhai City, a typical hilly area city, was chosen in this study for improving the water environmental quality in hilly area. In this study, we established the water quantity and quality mathematical models, calculated the water environmental capacity of the river net, and put forward the water pollution total quantity control and water pollution reduction plan for Linhai City. Results show that the water environmental capacity of COD and NH<sub>3</sub>-N in Linhai City is 15 904. 3 tons per year and 1 585. 2 tons per year, respectively. The over-limit ratio of water quantity is 15. 61% for COD and 16. 67% for NH<sub>3</sub>-N. After the project is completed in the planning year, the increase of the water environmental capacity will be 1 137. 7 tons per year for COD and 114 tons per year for NH<sub>3</sub>-N, the water pollution reduction flowing into the river net will be 10 610. 6 tons per year for COD and 1 082 tons per year for NH<sub>3</sub>-N, and the water environmental quality of Linhai City can be improved.

**Key words:** water environmental capacity; pollution discharge; mathematical model; total quantity control; hilly area

基金项目: 霍英东教育基金 (141073)  
作者简介: 陈玥 (1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为生态水文与水环境保护。E-mail: 2504784595@ qq. com  
通信作者: 李一平, 副教授。E-mail: liyiping@ hhu. edu. cn

山丘地区地形坡度大,河流驱动力较强,径流对地面的冲刷作用较强,水土容易流失;河网密度小,蓄水能力不足,水资源分布不均匀;地势低洼地区尾水外排能力差,且水体自净能力弱,这些特点决定了山丘区水体水环境容量较小<sup>[1]</sup>。水环境容量的研究是实行区域污染物总量控制、水环境保护的理论依据<sup>[2]</sup>。因此,进行山丘区水环境容量计算研究是实行山丘区污染物总量控制的前提,对改善山丘区水环境质量意义重大。临海市地处浙江省东南沿海中部,中部和西部山丘地区大多是单向流动的山区性河流,东部平原地区河网纵横交错,境内椒江临海段(灵江)是随着涨落潮而频繁改变流向的河口感潮河段。山区河道弯道多、比降大、流向单一,汛期洪水陡涨陡落、历时短、洪量集中,断面形态沿程变化大,局部河势急剧变化致使阻力变化对水流流态产生较大影响,导致糙率等水文因子较难确定。而感潮河网地区,水流流向往复,流态不稳定,运动复杂,流量、水位、水质受潮汐、污染源、径流等多种因素的多重影响,污染物质随水流迁移扩散,这给模拟污染物迁移、降解带来较大困难。近年来,随着临海市人口的聚集、经济社会的发展,生产、生活及工业用水量增加,农业灌溉回归水、工业废污水、生活污水剧增,水质持续恶化。

我国地域广阔,不同地形地貌下的河流特性差异较大。国内的学者针对不同类型的水体作了大量的研究。针对流向随着涨落潮变化的潮汐河流,郑英铭等<sup>[3]</sup>分析了影响潮汐河流水环境容量的主要因素,并建立了潮汐河流水环境容量的计算方法;韩龙喜等<sup>[4]</sup>运用水质平面二维解析解,针对宽浅型河道提出了水环境容量的计算公式;逢勇等<sup>[5]</sup>通过建立河网区水量水质数学模型,对鹤地水库(文官至石角段)的水环境容量进行了计算;罗缙等<sup>[6]</sup>通过建立太湖流域平原河网区的水环境数学模型,对苏南地区往复流河道进行了水环境容量的计算研究;朱维斌等<sup>[7]</sup>针对大江大河,应用有限容积法对二维动态水质模型进行求解,进一步研究污染物在水体中的二维浓度分布;胡维平等<sup>[8]</sup>针对平原河网区的湖泊,提出首先要对湖泊进行水功能区的划分,再分别计算每一个水功能区的水环境容量,将这些水功能区的水环境容量相加得到整个湖泊的水环境容量;考虑到污染物进入水体后的混合程度对水环境容量计算结果的影响;姚国金等<sup>[9]</sup>提出采用不均匀系数对水环境容量计算结果进行修正,并给出了不均匀系数的取值范围。

目前国内外对平原河网区水环境容量研究较

多,相对而言对山丘区水环境容量计算研究较少,而且针对污染物排放总量控制进行的水环境容量计算多选择最枯条件下的设计流量进行,未考虑水系连通及湿地工程增加的环境容量。本研究以临海市为例,对典型山丘区水环境容量进行研究,考虑“五水共治”工程的综合效益,对科学地制定山丘区污染防治措施,从而改善山丘区水环境质量具有一定的指导意义。

1 研究区概况及水环境现状

临海市地处浙江省东南沿海中部,东西长 85 km,南北宽 44 km,市域陆地面积 2 203 km<sup>2</sup>,其中山地丘陵面积 1 507 km<sup>2</sup>,占总面积的 68.4%;平原面积 553 km<sup>2</sup>,占总面积的 25.1%;水域面积 143 km<sup>2</sup>,占总面积的 6.5%。

临海自然水系主要属于椒江和洞港(含桃渚港)两大水系。椒江水系包括灵江、始丰溪、永安溪、大田港、义城港、双港溪、方溪以及流入椒江或台州湾的百里大河。洞港水系包括洞港、桃渚港以及桃渚平原内其他河流水系。市域内现有 2 831 条河道,总长约 3 368 km。

临海市地表水常规监测断面共布设 18 个监测断面,水环境功能区划和水质监测断面见图 1。本研究考虑其中 15 个断面(不包含牛头山水库 2 断面、溪口水库断面、童燎水库断面)。根据 2013 年水质例行监测资料,这 15 个断面中符合水功能区水质类别要求的断面有 11 个,占 73.3%,不符合水功能区水质类别要求的断面有 4 个,占 26.7%。Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ类水质断面占总断面数的比例为 46.7%、33.3%、6.7%、13.3%。2013 年丰、平、枯水期 DO、COD、NH<sub>3</sub>-N 等指标均存在不同程度超标现象,具体评价结果见表 1。

表 1 2013 年临海市丰、平、枯水期各指标超标率 %

| 指标                 | 丰水期   | 平水期  | 枯水期   | 全年    |
|--------------------|-------|------|-------|-------|
| DO                 | 12.28 | 3.70 | 11.90 | 10.32 |
| COD <sub>Mn</sub>  | 8.77  | 0    | 9.52  | 7.14  |
| BOD <sub>5</sub>   | 14.04 | 0    | 7.14  | 8.73  |
| NH <sub>3</sub> -N | 12.28 | 7.41 | 14.29 | 11.90 |
| 石油类                | 15.79 | 3.70 | 16.67 | 13.49 |
| TP                 | 10.53 | 3.70 | 11.90 | 9.52  |
| COD                | 10.53 | 0    | 9.52  | 7.94  |

2 水环境容量计算

2.1 水量方程

水量计算的微分方程是建立在质量和动量守恒定律基础上的圣维南方程组,以流量  $Q(x,t)$  和水位



图1 临海市水环境功能区划及水质监测断面位置分布

$Z(x,t)$ 为未知变量,并补充考虑了漫滩和旁侧入流的完全形式圣维南方程组为

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial x} + B_w \frac{\partial Z}{\partial t} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + 2u \frac{\partial Q}{\partial x} + (gA - Bu^2) \frac{\partial A}{\partial x} + g \frac{n^2 |u|}{R^{\frac{4}{3}}} Q = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $Q$ 为流量, $\text{m}^3/\text{s}$ ; $x$ 为沿水流方向空间坐标; $B_w$ 为调蓄宽度,指包括滩地在内的全部河宽, $\text{m}$ ; $Z$ 为水位, $\text{m}$ ; $t$ 为时间, $\text{s}$ ; $q$ 为旁侧入流流量,入流为正,出流为负, $\text{m}^3/\text{s}$ ; $u$ 为断面平均流速, $\text{m}/\text{s}$ ; $g$ 为重力加速度, $\text{m}/\text{s}^2$ ; $A$ 为主槽过水断面面积, $\text{m}^2$ ; $B$ 为主流断面宽度, $\text{m}$ ; $n$ 为糙率; $R$ 为水力半径, $\text{m}$ 。

### 2.2 水质方程

河网水体中污染物对流扩散方程表达如下:

$$\frac{\partial(A\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(Q\rho)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left( AE_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + S_c - S = 0 \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N (Q\rho)_{i,j} = (\rho\Omega)_j \left( \frac{dZ}{dt} \right)_j \quad (3)$$

式中: $E_x$ 为纵向分散系数; $\rho$ 为水流输送的污染物质量浓度, $\text{mg}/\text{L}$ ; $\Omega$ 为河道叉点-节点的水面面积, $\text{m}^2$ ; $j$ 为节点编号; $i$ 为与节点 $j$ 相关联的河道编号; $N$ 为与节点 $j$ 相关联的河道总数; $S_c$ 为与输送污染物质量浓度相关的衰减项,可写为 $S_c = K_d A \rho$ , $K_d$ 为衰减项, $\text{d}^{-1}$ ; $S$ 为外部的源汇项。在方程求解时,对时间项、对流项、扩散项分别采用向前差分格式、上风格式、中心差分格式。

模型流量边界计算条件:临海地区河流多为山区性河流,除始丰溪和永安溪有境外来水外,其余河

流来水都由境内降雨径流产生。河流边界流量根据2013年的逐日降雨资料、蒸发资料、临海市水系图、DEM高程图划分的流域面积,得到该流域产生的降水量,乘以径流系数得到汇入该条河流的流量。始丰溪和永安溪两条河流边界流量由境内降雨径流产生的流量加上境外来水得到。

模型水位边界计算条件:选取灵江下游边界作为模型的水位边界。根据灵江潮汐特征,以灵江下游不利条件下的大、小潮潮位过程线作为下边界。该潮位过程线根据临海西门水文站2013年预报的潮位过程线结果得到。

其中2个重要水文站(沙段、柏枝岙水文站)的流量、水位和典型水质参数率定验证结果见图2。流量、水位计算值与实测值吻合较好,水位率定绝对误差最大约为15 cm,流量率定相对误差最大约为13.84%,故河道糙率值为0.02~0.04。COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度计算值与实测值平均相对误差为7.13%、8.39%,吻合度较好,故取COD降解系数为0.08~0.12  $\text{d}^{-1}$ , $\text{NH}_3\text{-N}$ 降解系数为0.05~0.08  $\text{d}^{-1}$ 。

以水功能区水质达标为目标,根据临海市柏枝岙站、沙段站、百步站、水家洋站、仙人桥站等水文站提供的水文资料,采用泰森多边形法对临海市12个雨量站1957—2010年连续54年的逐月降雨资料进行频率分析,将每年最枯月份降雨量排序后,得出临海市90%保证率下最枯月典型年为1988年。采用90%保证率下最枯月的平均流量作为水文设计条件,输入临海市水环境数学模型,计算临海市各分区水环境容量,结果见表2。



— 计算值 · 实测值

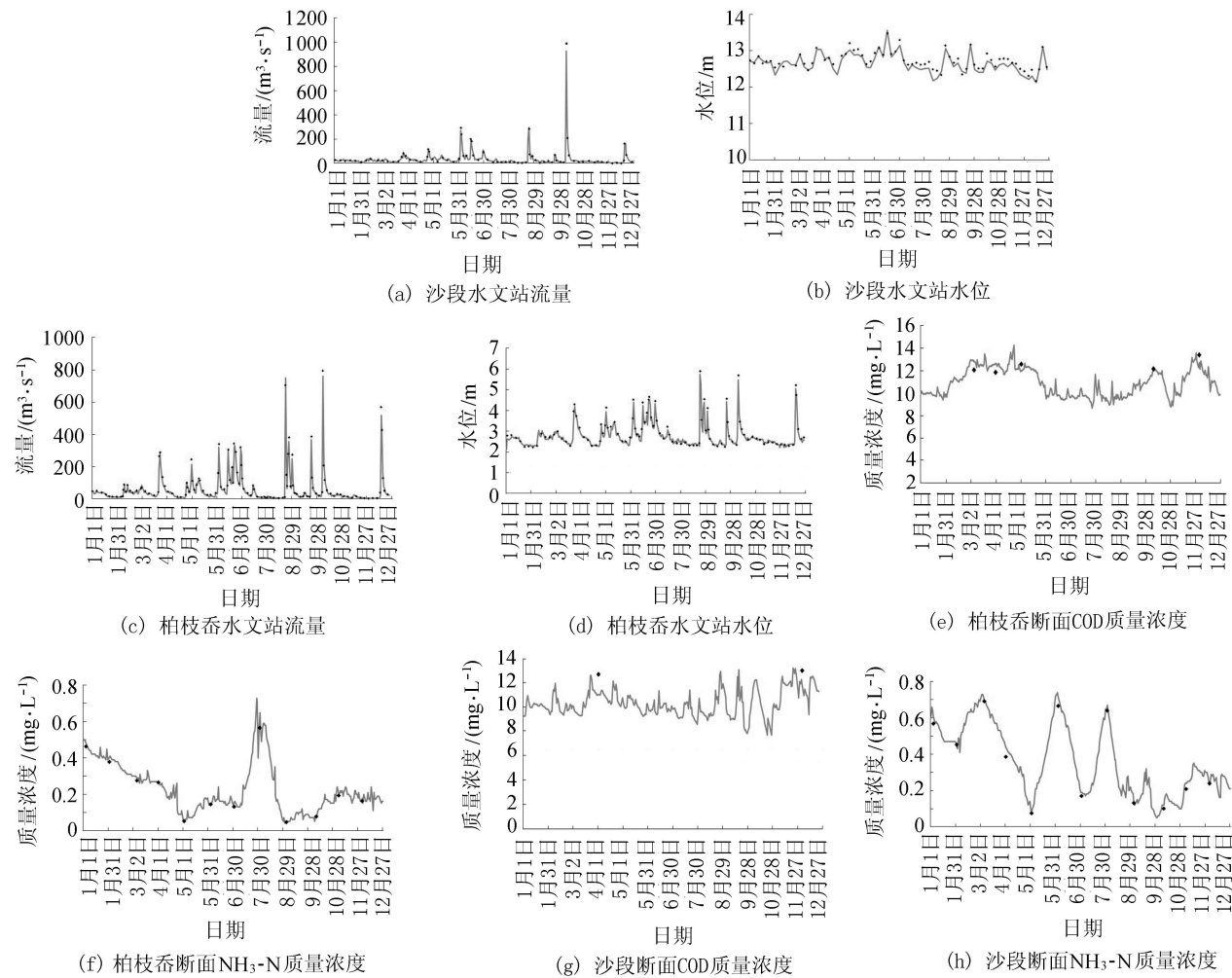


图 2 2013 年两个重要水文站流量、水位和典型水质参数模型计算值与实测值对比

表 2 临海市各区 2013 年水环境容量计算结果 t/a

| 分区   | COD     | NH <sub>3</sub> -N |
|------|---------|--------------------|
| 中部分区 | 5931.9  | 562.9              |
| 城南分区 | 3829.6  | 374.1              |
| 东部分区 | 1455.2  | 122.9              |
| 西部分区 | 4687.6  | 525.3              |
| 合计   | 15904.3 | 1585.2             |

根据临海市 2013 年现状污染物入河量及水环境容量值,可计算得到污染物削减率,结果见表 3。对比现状污染物削减率与水质超标率,二者的差距在 5% 以内,说明上述方法得到的水环境容量基本合理。

表 3 临海市污染物削减率与水质超标率

| 指标                 | 入河量总计/<br>(t·a <sup>-1</sup> ) | 环境容量总计/<br>(t·a <sup>-1</sup> ) | 现状<br>削减率/% | 水质<br>超标率/% |
|--------------------|--------------------------------|---------------------------------|-------------|-------------|
| COD                | 18 845.8                       | 15 904.3                        | 15.61       | 11.11       |
| NH <sub>3</sub> -N | 2 007.7                        | 1 585.2                         | 21.04       | 16.67       |

注:超标率为河流断面监测数据超标个数除以河流断面总监测数据断面个数。

3 污染物总量控制方案

为到达临海市规划年总量控制目标,根据临海

市河网区污染源特征及地区水环境治理现状,结合各类污染源削减潜力分析,提出相应的污染防治措施,具体如下:

- a. 生活污染源治理。新建城镇生活污水处理厂、污水管网和泵站,增加污水处理能力,扩大污水收集范围;对老城区污水管网进行改造;新建中水回用处理设施;加快农村生活污水治理进度。
- b. 工业污染源治理。在对企业污染源治理基础上,①要加强对重点工业企业的监管,对不符合国家、地方标准的企业实施关、停、并、转、迁等整治措施,并加强企业内部污水的预处理,对排放污水进行实时监测,达到排放标准后排放;②要加强中小企业的整治,要求对污染较高的中小型企业根据行业类别分别搬迁入相应的工业园区,污水进行集中分类处理;③要加强企业的清洁生产和节水型企业建设,实行“三条红线”中的用水总量控制,从源头减少污染量;④要加强工业污水处理厂的提标改造工程,从终端减少污染物的排放。
- c. 农业面源治理。进一步推广农作物测土配方

施肥技术、农药减量控害增效技术;建设生态循环农业,推广农作物秸秆资源化利用示范工程、“三沼”资源化利用示范工程;科学地划定禁、限养区;优化生态畜牧业产业布局;对畜禽粪尿污染进行综合治理,建设畜禽粪便收集处理中心、养殖排泄物治理沼气工程和病死动物无害化处理设施。

d. 湖泊湿地建设。规划近期新建 4 个人工湖,中远期新建 4 个人工湖,增加河道调蓄能力,净化水体。

e. 河湖水系综合调控工程建设。对城区暗河和古河道进行优化调整,增加城区排涝能力,改善城区水环境;新建河道、湿地等对小流域来水进行分流,减少上游来水对城区防洪的压力;加强流域及河道整治,减轻城区防洪排涝压力。

f. 低影响开发工程建设。居民小区的雨水控制利用目标以削减地表径流及雨水滞蓄为主,建设植草沟、透沟渠等自然地表排水形式输送滞留雨水

径流,减少小区内雨水管道的使用;在广场、停车场、步行道等设计荷载较小的路面铺装透水材料,增加雨水的下渗利用。

g. 节水工程建设。生活节水需推广普及生活节水器具、加大供水管网的改造力度、提高非常规水的用水比例。工业节水要与水环境的治理和保护要求相协调,提高工业用水重复利用率、降低万元增加值取水,结合工业自身的产业结构调整、技术水平升级以及产品更新,以节水工业企业试点引导和带动,整体逐步达到国内先进用水水平。农业节水工程包括河道整治工程、农田改造工程、灌区续建配套及节水改造工程。

将计算得到的规划年(2030 年)污染物限制排放总量与规划年污染物入河量进行对比,进行污染物总量控制可达性分析(表 4),结果表明规划年污染物入河量全部达标。

表 4 临海市 COD、NH<sub>3</sub>-N 污染物总量控制分析结果

t/a

| 分区   | 2013 年环境容量 |                    | 新增环境容量 |                    | 2030 年环境容量 |                    | 2013 年入河量 |                    | 削减量     |                    | 2030 年入河量 |                    |
|------|------------|--------------------|--------|--------------------|------------|--------------------|-----------|--------------------|---------|--------------------|-----------|--------------------|
|      | COD        | NH <sub>3</sub> -N | COD    | NH <sub>3</sub> -N | COD        | NH <sub>3</sub> -N | COD       | NH <sub>3</sub> -N | COD     | NH <sub>3</sub> -N | COD       | NH <sub>3</sub> -N |
| 中部分区 | 5931.9     | 562.9              | 424.3  | 42.5               | 6356.2     | 601.4              | 7378.2    | 778.4              | 4245.5  | 420.7              | 3132.7    | 357.7              |
| 西部分区 | 3829.6     | 374.1              | 274.0  | 27.5               | 4103.6     | 401.6              | 4206.0    | 461.9              | 2324.3  | 239.6              | 1881.7    | 222.3              |
| 城南分区 | 1455.2     | 122.9              | 104.1  | 10.4               | 1559.3     | 133.3              | 1598.3    | 149.4              | 950.3   | 87.7               | 648.0     | 61.7               |
| 东部分区 | 4687.6     | 525.3              | 335.3  | 33.6               | 5022.9     | 558.9              | 5663.3    | 618.0              | 3090.5  | 334.1              | 2572.8    | 283.9              |
| 合计   | 15904.3    | 1585.2             | 1137.7 | 114.0              | 17042.0    | 1695.2             | 18845.8   | 2007.7             | 10610.6 | 1082.1             | 8235.2    | 925.6              |

4 结 论

a. 由于山丘河网区地形地貌复杂,污水处理设施、配套管网及泵站建设滞后,临海市水环境现状较差。临海市各控制断面达标时,临海市河网的水环境容量 COD 为 15904.3 t/a, NH<sub>3</sub>-N 为 1585.2 t/a,水质超标率分别为 COD 11.11%, NH<sub>3</sub>-N 16.67%,削减率分别为 COD 15.61%, NH<sub>3</sub>-N 20.04%,超标率和削减率相差小于 5%,说明临海市水环境容量计算结果合理。

b. 山丘地区由于河网密度小、蓄水能力不足、水体自净能力弱、人类活动污染严重等原因,临海市现状污染物入河量大于水环境容量。目前临海市的城镇生活和农村生活污染源的污染物排放量占排放总量的 80% 以上,为实现上述总量控制目标,改善临海市水生态环境质量,应重点控制这两类污染源。

c. 规划年(2030 年)工程实施后预计新增环境容量 COD 1137.7 t/a, NH<sub>3</sub>-N 114 t/a,削减污染物入河量 COD 10610.6 t/a, NH<sub>3</sub>-N 1082.1 t/a,水环境质量得到较大提升。

参考文献:

[1]赵海霞,王梅,段学军. 水环境容量约束下的太湖流域产业集聚空间优化[J]. 中国环境科学,2012,32(8):1530-1536. (ZHAO Haixia, WANG Mei, DUAN Xuejun. Spatial optimization of industrial clustering under the constraint of water environmental capacity in Taihu Lake Basin[J]. China Environmental Science, 2012, 32(8): 1530-1536. (in Chinese))

[2]叶碎高,郑世宗,刘红. 山区性河道水环境容量及合理配置研究[J]. 水利学报,2007(10):573-576. (YE Suigao, ZHENG Shizong, LIU Hong. Research on water environment capacity and reasonable configuration for mountainous rivers [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007(10): 573-576. (in Chinese))

[3]郑英铭,高建群. 潮汐河流水环境容量的研究[J]. 环境科学,1990(3):63-69. (ZHENG Yingming, GAO Jianqun. Study on environmental capacity of a tidal river [J]. Environmental Science, 1990(3): 63-69. (in Chinese))

[4]韩龙喜,朱党生,姚琪. 宽浅型河道纳污能力计算方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2001,29(4):72-75. (HAN Longxi, ZHU Dangsheng, YAO Qi. Water environment capacity calculating method for shallow-broad

rivers[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2001, 29(4): 72-75. (in Chinese))

[5] 逢勇,程伟,赵玉萍. 鹤地水库文官至石角段水环境容量研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003, 31(1): 76-79. (PANG Yong, CHENG Wei, ZHAO Yuping. Calculation of water environment capacity for wenguan to shijiao section of Hedi reservoir [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2003, 31(1): 76-79. (in Chinese))

[6] 罗缙,逢勇,罗清吉,等. 太湖流域平原河网区往复流河道水环境容量研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(2): 144-146. (LUO Jin, PANG Yong, LUO Qingji, et al. Study on water environment capacity for reversing current channels in plain river network region in Taihu Lake Basin[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2004, 32(2): 144-146. (in Chinese))

[7] 朱维斌,张逢甲,卓诚翔. 河流混合带污染物二维浓度分布的计算[J]. 河海大学学报(自然科学版), 1989, 17

(4): 108-113. (ZHU Weibin, ZHANG Fengjia, ZHUO Chengxiang. Evaluation of two-dimensional distribution of pollutant concentration in river mixing zones[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 1989, 17(4): 108-113. (in Chinese))

[8] 胡维平. 平原水网地区湖泊的水环境容量及允许负荷量[J]. 海洋湖沼通报, 1992(1): 37-45. (HU Weiping. Water environmental capacity and allowable water load capacity of the lake in the region of plain water network[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1992(1): 37-45. (in Chinese))

[9] 姚国金,逢勇,刘智森. 水环境容量计算中不均匀系数求解方法探讨[J]. 人民珠江, 2000, 21(2): 47-50. (YAO Jinguo, PANG Yong, LIU Zhisen. Apporach to the method of solving for non-uniformity factor in computing the aquatic environmental capacity[J]. Pearl River, 2000, 21(2): 47-50. (in Chinese))

(收稿日期:2016-01-06 编辑:王 芳)

+++++

(上接第 122 页)

[3] 王圣瑞,金相灿,崔哲,等. 沉水植物对水-沉积物界面各形态氮含量的影响[J]. 环境化学, 2006(5): 533-538. (WANG Shengrui, JIN Xiangcan, CUI Zhe, et al. Effects of submerged plant on the concentrations of different nitrogen species in water-sediment interface [J]. Environmental Chemistry, 2006(5): 533-538. (in Chinese))

[4] 孔祥龙,叶春,李春华,等. 苦草对水-底泥-沉水植物系统中氮素迁移转化的影响[J]. 中国环境科学, 2015(2): 539-549. (KONG Xianglong, YE Chun, LI Chunhua, et al. Effect on nitrogen transfer and migration by *Vallisneria natans* (Lour.) Hara in water-sediment-submerged macrophytes system [J]. China Environmental Science, 2015(02): 539-549. (in Chinese))

[5] 耿楠,王沛芳,王超,等. 水动力条件下苦草对沉积物氮释放的影响[J]. 生态环境学报, 2014(7): 1193-1198. (GENG Nan, WANG Peifang, WANG Chao, et al. The impact of *Vallisneria spiralis* L. on the release of nitrogen from sediment [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(7): 1193-1198. (in Chinese))

[6] 张敏,尹传宝,张翠英,等. 沉水植物菹草的生态功能及其应用现状[J]. 中国水土保持, 2015(3): 50-53. (ZHANG Min, YIN Chuanbao, ZHANG Cuiying, et al. Ecological function and application of *Patamogeton crispus* L. [J]. Soil and Water Conservation in China, 2015(3): 50-53. (in Chinese))

[7] 夏倩,刘凌,王流通,等. 连续流动分析仪在水质分析中

的应用[J]. 分析仪器, 2012(2): 64-68. (XIA Qian, LIU Ling, WANG Liutong, et al. Application of continuous flow analyzer in water analysis [J]. Analytical Instrumentation, 2012(2): 64-68. (in Chinese))

[8] 宋金明,李延,朱仲斌. Eh 和海洋沉积物氧化还原环境的关系[J]. 海洋通报, 1990(4): 33-39. (SONG Jinming, LI Yan, ZHU Zhongbin. Relationship between Eh value and redox environment in marine sediments [J]. Marine Science Bulletin, 1990(4): 33-39. (in Chinese))

[9] LI E H, LI W, LIU G. The effect of different submerged macrophyte species and biomass on sediment resuspension in a shallow fresh water lake [J]. Aquatic Botany, 2008, 88(2): 121-126.

[10] 张智,林艳,梁健. 水体富营养化及其治理措施[J]. 重庆环境科学, 2002(3): 52-54. (ZHANG Zhi, LIN Yan, LIANG Jian. Water eutrophication and controls [J]. Chongqing Environmental Science, 2002(3): 52-54. (in Chinese))

[11] 胡俊,刘永定,刘剑彤. 滇池沉积物间隙水中氮、磷形态及相关性的研究[J]. 环境科学学报, 2005, 25(10): 1391-1396. (HU Jun, LIU Yongding, LIU Jiantong. Studying on the form and the relativity of nitrogen and phosphorus in the pore water of sediment in Dianchi Lake [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(10): 1391-1396. (in Chinese))

(收稿日期:2015-12-28 编辑:徐 娟)