

太湖锡澄地区 TP 和 COD_{Mn} 水环境容量的影响因素

王思远¹, 许有鹏¹, 王丹青¹, 高斌¹, 王强¹, 温海燕²

(1. 南京大学 地理与海洋科学学院, 南京 210023; 2. 无锡市城市防洪工程管理处, 江苏 无锡 214000)

摘要: 针对高度城市化的平原河网地区水环境容量影响因素的复杂性,以太湖流域锡澄地区为例,结合 2005—2014 年的水位、雨量、水质监测数据,采用基于设计流量控制的完全混合法,选择该地区水体污染因子具有较大研究价值的总磷(TP)和高锰酸盐指数(COD_{Mn})的水环境容量进行了计算和分析。结果表明:(1) TP 水环境容量的季节性差异较为明显,呈现出秋季较高,冬季较低的特征; COD_{Mn} 四季水环境容量总体上均满足水功能区划要求的水质目标, COD_{Mn} 水环境容量的季节性差异不明显,夏、秋季略高于春季。(2) 除时间因素外,引水量对水环境容量影响也较大,对典型河道锡澄运河,水环境容量变化趋势与其一致,引水量越大,TP 和 COD_{Mn} 的水环境容量也越大,“引江济太”工程的启动对于改善平原河网的水质有一定作用。(3) 根据各河流两种污染物的水环境容量在典型年份间的差异,北兴塘河和古运河对于磷的纳污能力明显低于对于有机物的容纳能力。因此,在夏、秋季节,对太湖流域 TP 和有机污染物的治理要进一步加强,可通过一些调水工程对水体中两种污染物的水环境容量进行调控,将有助于太湖流域的水质治理以及河道水环境容量的控制与分配。

关键词: 水环境容量; TP; COD_{Mn} ; 影响因素; 锡澄地区

中图分类号: X824; X26

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)05-0371-06

Influencing Factors of TP and COD_{Mn} Water Environmental Capacity in Xicheng Area of Taihu Basin

WANG Siyuan¹, XU Youpeng¹, WANG Danqing¹, GAO Bin¹, WANG Qiang¹, WEN Haiyan²

(1. School of Geography and Oceanography Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2. Wuxi Urban Flood Control Project Management Office, Wuxi, Jiangsu 214000, China)

Abstract: In view of the complexity of the influencing factors of water environmental capacity in the highly urbanized plain river network area, taking Xicheng area of Taihu Lake Basin as an example, we calculated and analyzed the water environmental capacity of the total phosphorus (TP) and permanganate index (COD_{Mn}) by using the complete mixing method based on design flow control combined with the monitoring data of water level, rainfall and water quality data from 2005 to 2014. The results showed that: (1) the seasonal difference of TP water environmental capacity was obvious, showing higher level in autumn and lower level in winter; the water environmental capacity of COD_{Mn} in four seasons generally met the water quality objectives of water functional zoning requirements; the seasonal difference of COD_{Mn} water environmental capacity was not obvious, and it was slightly higher in summer and autumn than in spring; (2) in addition to time factors, the water diversion volume had a greater impact on water environmental capacity; for the typical Xicheng Area, the trend of water environmental capacity was the same to the water diversion volume; the larger the water diversion volume was, the larger the water environmental capacity of pollutants was; the start-up of the project of diversion from the Yangtze River to the Taihu Basin had a certain role in improving the water quality of the plain river network; (3) according to the differences of water environmental capacities of the two pollutants in different typical years, the phosphorus capacities of the Beixingtang River and the ancient canal were significantly lower than those of the organic pollutants.

Keywords: water environmental capacity; TP; COD_{Mn} ; influencing factors; Xicheng Area

收稿日期: 2018-11-13

修回日期: 2018-12-13

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0401502); 国家自然科学基金(41371046, 41401035); 江苏水利科技基金重大项目(2015003)

第一作者: 王思远(1993—), 女, 河南驻马店人, 硕士研究生, 主要从事水资源与水环境方面研究。E-mail: siyuanwang6365@163.com

通信作者: 许有鹏(1956—), 男, 江苏南京人, 教授, 主要从事水文与水资源方面研究。E-mail: xuy305@163.com

随着社会经济的快速发展和城市化进程的不断推进,太湖流域生态环境急剧恶化,尤其是水域污染和富营养化日趋严重,总氮、总磷、生化需氧量(BOD)、化学需氧量(COD)等多项污染物指标超标,水质的急剧恶化逐渐成为经济发展的制约因素^[1-2]。为此各地政府开展了大量的河流污染治理工作,虽然局部水域污染状况得到一定程度改善,但是水环境恶化趋势并未得到有效遏制^[3]。水环境容量是水体中污染物总量控制的重要依据,尤其是对于高度城市化平原河网地区,其影响因素复杂多变,因此充分利用污染物在水体中的迁移、转化等机理,研究和控制水环境容量成为了国内外学者的热点话题^[4]。

水环境容量一般指水体在满足特定功能条件下所能容纳污染物的最大负荷量,其大小与水体特征、水质目标及污染物特性有关,因此,又称水域负荷量或纳污能力^[5]。水环境容量的计算及其在各功能区间的分配,是水污染总量控制的基础和核心^[6]。目前,国内外对河流污水环境容量计算和研究主要是通过公式法^[7]、模型试错法^[8]、概率稀释模型^[9]和盲数理论^[10]等方法。如李昆等人对丰水期不同程度富营养化的洪湖全湖,采用 GIS 空间插值技术,分析丰水期各污染物的变化趋势^[11];为改善山区水环境状况,陈玥等人对临海市 COD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的水环境容量进行计算分析,并提出污染物排放总量控制方案^[12];冯利忠等采用 MIKE 三维水动力和水质耦合模型,对“引黄入呼”取水口水环境容量进行动态分析^[13]。但是,这些研究多是基于实测流量作为设计水文条件进行计算,并且大多研究未考虑引排水对水环境容量的影响。对于太湖平原河网地区,各个河流流速缓慢,流向和流态呈现出随机性变化,河流流向不定,相较于流量控制,基于水位作为控制条件,计算设计流量,更适于太湖平原河网水环境容量的计算。

太湖流域平原河网区是我国经济最发达和最活跃的地区之一,但是城市化、工业化的快速推进也使得区域经济发展和水环境保护的矛盾十分突出。在此背景下,以流域典型区域锡澄地区为例,从多角度探讨分析平原河网区水环境容量的影响因素对区域经济可持续发展具有重要意义。本研究选取 COD_{Mn} 和 TP 两个典型污染因子开展一系列研究工作,旨在从年内四季、典型年、引水量三方面揭示锡澄地区骨干河流的典型因子的水环境容量变化规律及影响因素,以期对城市化下平原河网地区河网水质治理,河道水环境容量的控制与分配提供科学的参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于太湖流域平原河网地区,覆盖锡澄地

区的北塘区、南长区、惠山区、崇安区、滨湖区、锡山区、江阴市 7 个行政区,总面积 2 625.31 km^2 ,其中水域面积占 40% 左右,拥有各级河道 2 000 多条,以具有引排作用的纵向河道和调节作用的横向河道为框架,构成了研究区骨干河网(图 1)。该地区气候属亚热带湿润季风气候,四季分明,降水丰沛,根据近 30 a 的统计资料,年均降水量达 1 121.7 mm。区域经济较为发达,人民生活水平较高,据 2017 年统计资料,人均生产总值达到 16.07 万元,但水质状况不容乐观,在 2014 年,部分水质站点的污染物的浓度已低于 V 类水质,选择易导致河流富营养化的磷元素以及表示水体中有机物污染的高锰酸盐指数,开展对锡澄地区骨干河道水环境容量的研究。



图 1 研究区区位图

1.2 数据来源

本研究涉及资料包括太湖流域锡澄地区的水系、水文、气象资料以及水质数据。水系资料包括基于矢量地形图获取的无锡市 2010s 水系图,以及根据无锡市河湖普查获取的 8 条骨干河道的断面与河长信息。水文、气象资料包括水位、雨量、引水量数据,水位数据包含研究区内的白茆站、无锡站、甘露站、陈墅站、青旻站 5 个水位站 2005—2014 年的水位资料,雨量数据是通过收集具有代表性的雨量站点的 2005—2014 年雨量资料获得的,引排水数据主要根据《长江流域水文资料》2010—2014 年年鉴综合整理分析获得,进而确定研究区骨干河流的引水量。水质资料为无锡市主要河道上的 8 个水质监测断面 2005—2014 年的月实测数据,根据水质监测点的水质数据,选取对河流水质影响较为突出的常规监测指标总磷(TP)和高锰酸盐指数(COD_{Mn})分析其水环境容量。

1.3 研究方法

由于本研究基于整条河流作为控制单元,是从较

为宏观的角度对研究区的 8 条河流的水环境容量进行研究。完全混合计算法是指污染物进入到河流水体后,在断面上污染物完全均匀混合,较好的符合本次研究的需求。在采用此方法的基础上,考虑河道宽度等河道特征以及不同污染物的降解系数,探讨该区域 TP 和 COD_{Mn} 水环境容量及其影响因素。主要从以下 3 个方面展开:(1) 考虑研究区功能区划分的复杂性,确定 8 条骨干河流作为研究对象;(2) 以近十年最枯月平均水位(90%保证率)作为设计水位,计算 2010—2014 年的水环境容量,分别从四季、引水量两方面考虑水环境容量的影响因素。(3) 根据近十年雨量观测数据,确定研究区枯、平和丰 3 种年型,计算对应年型的水环境容量。

考虑平原河网分布特征,参考研究区的水环境功能区划,将天然河道进行概化,确定研究区河网。将水体水质看作完全均匀混合类型,基于水位控制,完成对研究区河网水环境容量数学计算模型的构建。在 2020 年水质目标控制下,基于设计水文条件,利用研究区河网水环境容量数学模型,对研究区域最小空间单元(河段)和最小时间单元(月)的水环境容量进行计算,公式如下:

$$W = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^l \alpha_{ji} \times w_{ji} \quad (1)$$

式中: α_{ji} 为不均匀系数,范围为(0,1]; w_{ji} 为控制单元水环境容量(t/月)。

$$w_{ji} = Q_{0i} (C_{sjj} - C_{0ji}) + K (S_{ji} \cdot l_i) C_{sjj} \quad (2)$$

式中: Q_{0i} 为 i 河段的设计流量(m^3/s); C_{sjj} 为不同控制单元的水质标准下的水质浓度(mg/L); C_{0ji} 为不同河断面的每个月的水质浓度(mg/L); K 为污染物综合降解系数(d^{-1}); S_{ji} 为河道断面面积(m^2); l_i 为河长(km)。

1.4 水环境容量数学模型参数率定

(1) 近十年最枯月的平均流量。通过谢才—曼宁公式求得流速分布:

$$v_i = \frac{1}{n} H_i^{2/3} J_i^{1/2} \quad (3)$$

式中: v_i 为平均流速(m/s); n 为河道糙率; H_i 为水深(m); J_i 为水面比降。

根据苏州地区京杭运河等河道的实测流速,采用公式 $n = \frac{H_i^{2/3} j_i^{1/2}}{v_i}$ 率定太湖平原河网地区的糙率^[14],再根据各河流近十年最枯月的平均水位求得相应的水深,且实测河流宽度不超过 250 m,可认为断面内水面比降相同,由此计算得到各河流的近十年最枯月的平均流速,根据公式 $Q_{0i} = v_i \cdot S_i$ 计算求得各河流的设计流量,其中 S_i 为近 10 年最枯月的平均水深对应的设计断面面积。

(2) 水质目标。依据江苏省地表水功能区划所规定的水质目标,计算研究区骨干河道的水环境容量。确定 8 条河流的水质目标等级,进而得到每种污染物的水质目标浓度。

(3) 污染物的降解系数。污染物的降解系数是计算水环境容量的基础参数。本研究根据江苏省太湖流域污染物降解系数的研究成果,确定研究区主要河段的 TP 降解系数的变化范围为 0.05~0.1, COD_{Mn} 的降解系数的变化范围为 0.1~0.29^[15]。各河流的污染物降解系数是不同的,但相差甚微,故取其在各河段均值,以从宏观角度估算河流水环境容量。

(4) 不均匀系数。考虑到水资源时空分布的不均匀性,对每条河流求得的水环境容量进行修订。影响研究区水环境容量计算结果的主要因素是河宽、流量以及水深。根据太湖流域河流的调查结果表明,河宽基本上可以表征河流的水文特征,依据河宽和不均匀系数的关系,确定不同河道的不均匀系数^[4]。

2 结果与分析

2.1 季节性差异分析

根据我国在气候上划分四季的标准,一般以 3—5 月为春季、6—8 月为夏季、9 至 11 月为秋季、12 月到次年 2 月为冬季,以此标准划分研究区的四季。根据 2010—2014 年 TP 和 COD_{Mn} 的水环境容量计算结果,得到两种污染物四季水环境容量年均值,分别用 W_{TP} 和 W_{CODMn} 表示,单位为 t。

TP 水环境容量的季节性差异较为明显,呈现出秋季较高,冬季较低的特征。春季 TP 水环境容量范围为 -1.66~3.42 t,均值为 0.37 t;夏季的变化范围为 -1.33~3.38 t,均值为 0.82 t;秋季的变化范围为 0.21~3.43 t,均值最大为 1.11 t;冬季的变化范围为 -2.7~3.33 t,均值最小为 0.24 t,并且 TP 四季水环境容量显示为负值的河流百分比分别为 37.5%(春), 37.5%(夏), 0%(秋), 50%(冬),这充分表明大部分河流在秋季对磷的纳污能力较强,冬季有一半左右的河流水环境容量为负值,表明 TP 排放量已超出水体容纳能力,水环境质量较差。每年 5—10 月为太湖流域平原河网区的汛期,根据近十年的雨量资料,研究区汛期、非汛期的年平均降雨量分别为 740.73 mm, 352.35 mm,降雨量对水位有一定的贡献,而夏、秋季节正处于汛期,长历时雨量的积累有助于河道水位上涨,使河流水量有增大趋势,进而间接影响了 TP 的水环境容量的大小,因此降雨量的差异性对水环境容量具有一定的影响。另外,农业生产中水田与旱地主要污染来源于种植过程中化肥和农药的施用,造成磷

元素的污染较为严重。有研究表明氮磷肥料的使用和水产养殖的农业方式对环境的磷污染贡献很大^[16-17]。水域面积较大的太湖平原河网地区,种植水稻、水产养殖就是主要的农业方式,饵料是磷污染产生的原因之一,非点源污染主要以降雨为载体迁移到河流中,影响磷的浓度,而夏、秋季正是水产养殖业进行的重要时期,这就导致磷浓度有一定季节性差异,但结果显示秋季磷的水环境容量相对较大,水体中磷浓度相对较低,这可能是由于降雨对水环境容量的影响程度可能要大于水产养殖的影响(表 1)。

表 1 无锡骨干河流 TP 水环境容量的季节性分布 t

河名	春	夏	秋	冬
锡澄运河	-1.07	-0.83	-0.38	-0.80
京杭运河	0.03	0.26	0.33	-0.14
北兴塘河	0.47	-1.03	0.96	-0.44
新兴塘河	-0.05	3.59	2.41	1.84
九里河	0.24	0.22	0.36	0.46
伯渎港	3.06	3.02	3.07	2.98
古运河	-2.02	-0.19	0.32	-3.31
白屈港	0.56	0.95	0.96	0.02

COD_{Mn}水环境容量的季节性差异不显著,根据四季 COD_{Mn}水环境容量的变化范围,春、夏、秋、冬的变化范围分别为 17.49~151.16 t,17.72~163.75 t,19.60~155.15 t,23.19~165.01 t,呈现出春季偏低,夏、秋季节偏高的特征。在太阳辐射强度相对较高的季节(夏、秋季节),水体中有机物更易发生降解,使其浓度降低^[18],并且夏、秋季节降水较多,水位相对升高,水体体积也会随之变大,使得相应水体的水环境容量数值增大。在空间上,COD_{Mn}水环境容量存在一定的季节性特征,京杭运河四季的水环境容量均处于中

低值范围,而伯渎港的水环境容量四季均高于 85 t,即处于中高值偏上。京杭运河是江浙地区的水利重要枢纽,流经镇江、常州、无锡等经济较为发达的城市,京杭运河的水质受到的工、农业生产以及生活污水的影响要远高于伯渎港这样的小型河道^[19],导致京杭运河的有机物的浓度也相对较高,故京杭运河的 COD_{Mn}水环境容量要低于伯渎港(表 2)。

表 2 无锡骨干河流 COD_{Mn}水环境容量的季节性分布 t

河名	春	夏	秋	冬
锡澄运河	81.61	88.22	89.20	83.42
京杭运河	48.04	53.62	52.28	46.74
北兴塘河	132.14	126.35	140.00	154.48
新兴塘河	64.83	70.07	86.94	113.29
九里河	17.49	17.72	19.60	23.19
伯渎港	151.16	152.70	154.02	165.01
古运河	127.82	163.75	155.15	119.41
白屈港	84.65	88.39	92.14	89.92

2.2 引水量对水环境容量影响分析

在 2007 年太湖流域蓝藻爆发后,“引江济太”调水试验工程开始启动,以期改善太湖平原河网的水质。定波闸位于锡澄运河与长江交接处,在“引江济太”工程中发挥着重要作用,2010—2014 年,年平均引水量为 $1.05 \times 10^7 \text{ m}^3$,最大年引水量为 $1.64 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。以定波闸为例,分析引水量对锡澄运河水环境容量的影响。由于降雨量的不同,年内各月引水量存在一定的差异,为了更加准确的呈现引水量与水环境容量的关系,对 2010—2014 年引水量与水环境容量的五年月均值进行研究,两种污染物的水环境容量与引水量的对应关系如图 2 所示。

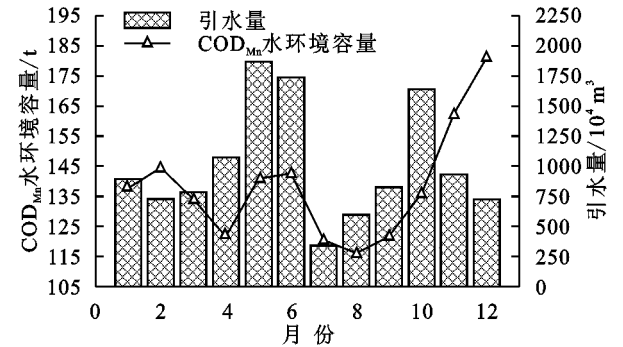
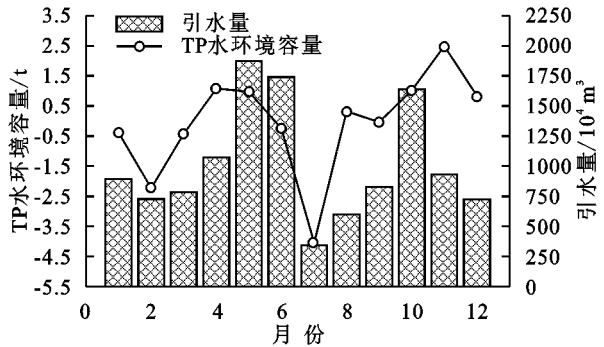


图 2 锡澄运河水环境容量与引水量的关系

通过观察分析,对于太湖平原河网区典型河道锡澄运河,引水量越大,污染物的水环境容量也越大,就 TP 而言,由于部分河流中磷的浓度较高,超出水质目标,故水环境容量表现为负值,表明磷的排放量大于河流对磷的容纳能力。图 2 中显示锡澄运河的 TP 水环境容量为负值的月份,对应的该月份的引水量也相对较少,但 TP

的水环境容量呈现出正值的月份,引水量也较大。图 2 中锡澄运河的 COD_{Mn}水环境容量均是正值,引水量较大的月份,COD_{Mn}水环境容量也相对较大。以上现象表明闸坝引水较大时,在一定程度上可以提高污染物的水环境容量,间接说明“引江济太”工程的启动对于改善平原河网的水质有一定作用^[20]。引水调控措施不仅可以

增加水体的稀释能力,还能促进水体流动和交换,进而增强水体的自净能力,从而增大水体对污染物的容纳能力,近年实践表明其是一种行之有效的改善水环境的措施^[21],张聃等人也曾就引配水对京杭运河水质的影响进行研究,得出引配水对河流水质具有一定的改善作用^[22]。

2.3 不同典型年下水环境容量差异分析

根据 2005—2014 年雨量资料,选择 2010 年为枯水年、2012 年为平水年、2013 年为丰水年,利用 3 种典型年的水质资料,分别计算 TP 和 COD_{Mn} 典型年的水环境容量,结果见图 3。

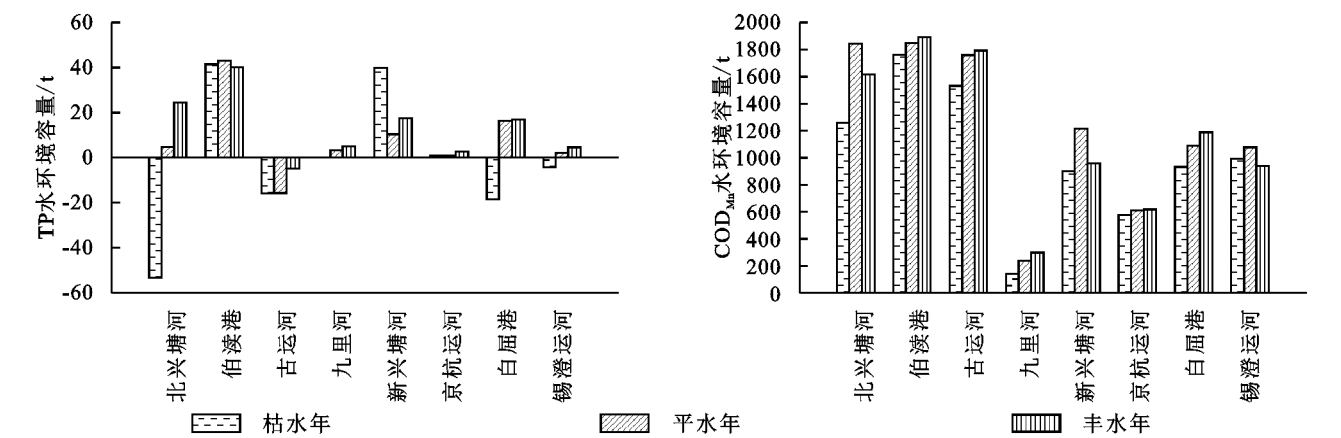


图 3 锡澄地区主要河流各典型年 TP 和 COD_{Mn} 水环境容量分布

3 结论

(1) TP 四季水环境容量显示为负值的河流百分比分别为 37.5%(春),37.5%(夏),0%(秋),50%(冬),这充分表明大部分河流在秋季对磷的纳污能力较强,夏季次之,春、冬季均有一半左右的河流水环境容量为负值,表明 TP 排放量已超出水体纳污能力,水环境质量较差。COD_{Mn} 水环境容量的季节性差异不太明显,相对而言,夏、秋季节较好,且无锡市夏季水体对其的容纳能力最强。

(2) 两种污染物的水环境容量与引水量的对应关系较为明显。污染物的水环境容量大的月份,引水量也较大。且引水量较大的月份大都处于非汛期,降雨量较少的月份,水体中污染物浓度较高,需要靠引水,增加河流的水量,污染物浓度被稀释,以达到降低污染物浓度的目的,改善了平原河网的水质,间接提高了水体对污染物的容纳能力。

(3) 通过分析八条河流两种污染物典型年的水环境容量,总的规律是丰水年的水环境容量较大,水体所能容纳的污染物的负荷量较多。研究的大部分河流位于市中心位置,其水功能区划大部分是工业用水,表明所研究主要河流的主导功能是用于工业发

展,这与市区工业化的快速发展是分不开的,进而导致的水体污染也较为严重,相关部门需采取一定的措施,对工厂排放的废水废气处理达标再排放,从源头上防止污染趋势进一步恶化。

(4) 基于本研究已有数据,仅研究了总磷和高锰酸盐指数的水环境容量,对于浓度已经严重超标的总氮以及氨氮的水环境容量,其影响机制还有待进行较为深入的研究分析工作。

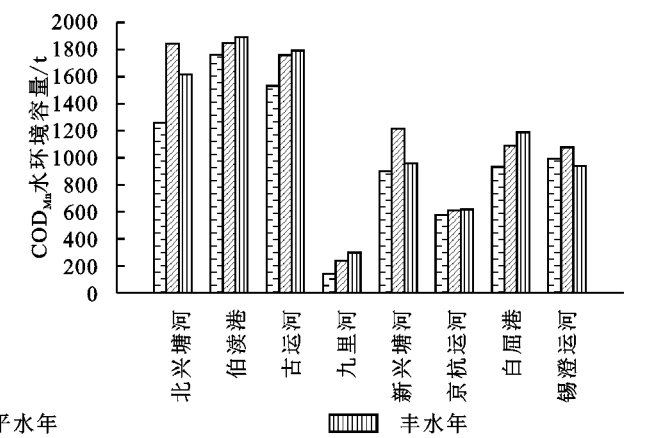


图 3 锡澄地区主要河流各典型年 TP 和 COD_{Mn} 水环境容量分布

展,这与市区工业化的快速发展是分不开的,进而导致的水体污染也较为严重,相关部门需采取一定的措施,对工厂排放的废水废气处理达标再排放,从源头上防止污染趋势进一步恶化。

(4) 基于本研究已有数据,仅研究了总磷和高锰酸盐指数的水环境容量,对于浓度已经严重超标的总氮以及氨氮的水环境容量,其影响机制还有待进行较为深入的研究分析工作。

参考文献:

- [1] 张涛,陈求稳,易齐涛,等.太湖流域上游平原河网区水质空间差异与季节变化特征[J].湖泊科学,2017,29(6):1300-1311.
- [2] 王若冰,赵钰,单保庆,等.海河流域典型重污染河流滄阳河沉积物氨化和硝化速率研究[J].环境科学学报,2018,38(3):858-866.
- [3] 焦雯珺,闵庆文,李文华,等.基于 ESEF 的水生态承载力评估:以太湖流域湖州市为例[J].长江流域资源与环境,2016,25(1):147-155.
- [4] 逢勇,陆桂华.水环境容量计算理论及应用[M].北京:科学出版社,2010.
- [5] 程声通,钱益春,张红举.太湖总磷、总氮宏观水环境容量的估算与应用[J].环境科学学报,2013,33(10):2848-2855.
- [6] 董飞,刘晓波,彭文启,等.地表水水环境容量计算方法

- 回顾与展望[J].水科学进展,2014,25(3):451-463.
- [7] Deng Y, Lei K, Critto A, et al. Improving optimization efficiency for the total pollutant load allocation in large two-dimensional water areas: Bohai Sea(China) case study[J]. Marine Pollution Bulletin, 2016, 114(1): 269-276.
- [8] Hassanin S A K. Evaluation of water quality of elnasr-3 main drain in egypt using qual2k model[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 40 (33): 10401-10409.
- [9] Liu Y, Zhao J, Huang Y, et al. Water quality probability forecasting model based on Monte Carlo simulation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(1): 51-57.
- [10] Gazzaz N M, Yusoff M K, Ramli M F, et al. Artificial neural network modeling of the water quality index using land use areas as predictors[J]. Water Environment Research, 2015, 87(2): 99-112.
- [11] 李昆,王玲,李兆华,等.丰水期洪湖水水质空间变异特征及驱动力分析[J].环境科学,2015,36(4):1285-1292.
- [12] 陈玥,李一平,高小孟,等.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[J].水资源保护,2016,32(2):123-128.
- [13] 冯利忠,裴国霞,吕欣格,等.“引黄入呼”取水口动态性水环境容量计算[J].环境科学学报,2016,36(10): 3848-3855.
- [14] 李葵,曾凡棠.河道型水库中谢才—曼宁公式的适用性研究[J].环境科学与技术,2008,31(4):30-32.
- [15] 冯帅,李叙勇,邓建才.太湖流域上游平原河网污染物综合衰减系数的测定[J].环境科学学报,2017,37(3): 878-887.
- [16] 吕忠贵,杨圆.浅析氮磷化肥的使用、利用及对农业生态环境污染[J].农业资源与环境学报,1997,14(3):30-34.
- [17] 黄欢,汪小泉,韦肖杭,等.杭嘉湖地区淡水水产养殖污染物排放总量的研究[J].中国环境监测,2007,23(2): 94-97.
- [18] 夏星辉,许嘉琳,陆维德.利用日光能催化降解水体有机污染物研究进展[J].环境科学,1999(3):107-111.
- [19] 张聃,钱蔚,潘向忠,等.京杭运河(杭州段)河网水质模拟[J].环境科学与技术,2010,33(4):39-41.
- [20] 熊鸿斌,张斯思,匡武,等.基于 MIKE 11 模型的引江济淮工程涡河段动态水环境容量研究[J].自然资源学报,2017,32(8):1422-1432.
- [21] 吴时强,范子武,周杰,等.引江济太措施对望虞河西部污染物滞留和转移风险分析[J].中国工程科学,2011, 13(1):102-108.
- [22] 张聃,周蔚,徐海岚,等.引配水对京杭运河杭州段水质的改善预测[J].水资源保护,2010,26(3):45-48.

(上接第 370 页)

- [12] 巩铁雄.黄土区坡面钙质结核分布及其水分特征研究[D].北京:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心),2017.
- [13] 巩铁雄,朱元骏.黄土高原水蚀风蚀交错带六道沟小流域坡面表土钙质结核分布[J].中国水土保持科学, 2016,14(4):42-49.
- [14] 李长安,吴金平,曹江雄.冀西北黄土钙质结核形态及其成因动力学特征与地层环境意义[J].地球科学, 1995,20(5):511-514.
- [15] 杨立国,乔冬云,胡鹏宇,等.全自动消解—电感耦合等离子体质谱法测定环境土壤中 13 种元素[J].中国土壤与肥料,2019,279(1):190-195.
- [16] 高宝云,邱涛,李荣华,等. 疏基改性玉米秸秆粉对水体重金属离子的吸附性能初探[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2012,40(3):185-190.
- [17] 覃海富,张卫民.石英砂负载羟基磷灰石对铅镉吸附性能[J].科学技术与工程,2018,18(20):353-357.
- [18] Tsao T M, Chen Y M, Sheu H S, et al. Red soil chemistry and mineralogy reflect uniform weathering environments in fluvial sediments, Taiwan[J]. Journal Soils Sediments, 2012,12:1054-1065.
- [19] Zhu H, Chen W, Li Y, et al. Aggregation kinetics of natural soil nanoparticles in different electrolytes[J]. European Journal of Soil Science, 2014,65:206-217.
- [20] Zhang Z Y, Huang L, Liu F, et al. The properties of clay minerals in soil particles from two Ultisols, China [J]. Clays and Clay minerals, 2017,65:273-285.
- [21] Chou Y M, Song S R, Tsao M T, et al. Identification and tectonic implications of nano-particle quartz (<50 nm) by synchrotron X-ray diffraction in the Chelungpu fault gouge, Taiwan. Tectonophysics, 2014, 619/620 (21):36-43.
- [22] 叶涛,黄丽,张克强,等.皂角苷和柠檬酸联合对污泥中 Cu, Pb 和 Zn 的去除及其稳定性特征[J].环境科学, 2017,38(11):4850-4859.