

基于公平性评估的滨湖城市水环境容量配置研究——以无锡市区COD配置为例^{*}

孙 伟

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘 要: 随着发达地区经济社会的快速发展, 水污染物排放量急剧增加, 甚至超出区域水环境容量, 致使水环境不断恶化, 并成为制约区域经济社会发展的重要因素. 本文综合考虑水环境容量供给能力和需求状况两方面要素, 以流域为基本评价单元, 采用综合分区技术和矩阵向量模型, 构建水环境容量总量指标分配方法, 并以无锡市区为例提出水环境容量的多情景配置方案. 在此基础上, 引入基尼系数方法测度不同方案的公平性, 据此进行情景方案的优选. 总体上, 中心城区及东北部地区配置较大的环境容量, 位于太湖上游的西部和西北部地区以及望虞河沿线地区环境容量供给能力较低, 配置较少的环境容量. 研究结果可为协调区域产业发展与水环境关系、制定差别化的产业准入政策提供科学依据.

关键词: 水环境容量; 空间配置; 公平性; 滨湖城市; 基尼系数

Allocation of water environmental capacity based on fairness assessment in lakeshore city area— a case study of COD configuration in Wuxi City

SUN Wei

(*Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China*)

Abstract: Along with the high speed development of economy and society in the developed area in China, the quantity of water pollution emissions increased sharply to a degree well beyond the regional water environmental capacity. The water environment has been deteriorated continuously and becomes a restrict factor to regional development. Taking the basins as a basic spatial unit, this paper discussed both sides of supply ability and demand conditions of water environmental capacity comprehensively, and proposed a method of total index allocation of water environmental capacity include regionalization technique and vector space model. Moreover, taking Wuxi City as an example, this paper proposed multi-scene configuration program of water environmental capacity. First, Gini coefficient method was used to measure the fairness of different programs. Then optimization of different programs was carried out, and the scientificity and operability of allocation scheme were enhanced. As a whole, the central city and northeast region had been allocated more water environmental capacity quantity than the upriver of Lake Taihu and the region along the Wangyu River. The results provide a scientific basis for harmonizing the relationship between regional industrial development and water environment, and policies-making of differentiated industrial access.

Keywords: Water environmental capacity; spatial allocation; fairness; lakeshore city; Gini coefficient

水环境容量是承载区域发展的重要因素, 人类经济社会活动的水污染物排放量要控制在环境容量允许的范围内. 随着城市化和工业化的快速发展, 工业废水和生活污水排放量都在持续增加, 对水生生态系统的健康和安造成了严重的影响^[1-4]. 与此同时, 水环境对人类开发活动的倒逼限制和容量约束也不断增强, 甚至成为影响发达地区产业转型和空间调整的关键因素^[5]. 由于地理差异性的存在, 不同区域的水环境容量不同, 允许容纳的污染物排放量及其产生影响也是不同的. 如果在环境容量高的地区利用不足, 则会降低资源利用效率; 在环境容量低的地区过度利用, 则会导致水环境污染严重. 然而, 目前我国的水污染物排放量

^{*} 国家自然科学基金项目(41201110)资助. 2012-07-18 收稿; 2012-09-13 收修改稿. 孙伟, 男, 1980年生, 博士, 助理研究员; E-mail: wsun@niglas.ac.cn.

配置主要是通过规划或计划调控来完成的^[6],由国家到省、市、县等自上而下按计划逐级分配确定,但是由于水污染物排放量空间配置技术方法的支撑不足,现实操作中往往是通过上级政府和下级政府协商博弈产生的,配置结果或过度集中于促进经济增长效率方面,或平均分配,始终难以协调公平和效率的均衡问题。基于区域资源环境承载能力和经济发展水平的差异,如何解决水环境污染物排放的空间均衡配置技术问题,成为近年地理学、环境学乃至管理学研究的热点之一。

近年地理学者将区域资源环境禀赋差异纳入经济学一般均衡的分析框架,构建了空间均衡理论模式,提出依据各地区经济、社会、资源环境条件和区位优势供给能力,进行经济社会开发与自然生态保护活动的合理空间配置,并通过建立人口、土地、环境容量空间配置规则予以实现^[7-8],为研究资源要素配置研究提供了崭新的理论视角和科学范式。按照空间均衡的理念以及主体功能区的要求,理性的政策选择必然是污染物排放总量优先向环境容量大和需求高的地区多配置,环境容量小的地区少配置。然而,从配置实施的关键技术上看,如何判断区域环境容量的大小?不同之间水污染物排放总量配置规模应该相差多大?往往成为理论指导实践、科学制定规划及决策的操作性难题,这些问题既影响着有限污染物排放总量指标的分配效率,也涉及到指标分配的公平性问题。也正因如此,水污染物排放总量空间优化配置需要在空间均衡理论的指导下,建立更加符合科学发展要求,又具有现实操作可能的理论分析框架和计量方法,为政府制定污染物排放总量指标空间配置决策提供针对性的参考意见和科学依据。

关于区域水环境容量差异的评估,一般以流域等自然地理单元为基础,通过选择地形地貌、水质目标、清水通道、水体通达性、集中式饮用水源地分布等指标,评估水环境容量供给能力的相对差异^[9-10]。在水污染物排放总量配置方面,国外主要考虑水生态系统的最大污染承受能力,基于水环境功能区划进行总量指标配置的研究工作^[11-12]。由于我国水环境管理与国外体制不同,因而在水污染物排放总量分配方面考虑的因素与国外大不相同,配置单元以行政区单元为主。一方面侧重于微观企业主体间污染排放的分配,影响因素主要包括企业现状排污强度、企业产出规模、职工人数等^[13-14];另一方面侧重于区域分配实现总体调控,主要考虑人口规模、经济产值、排污口情况、土地面积、水资源量、水质现状等指标^[15-17]。此后,有学者提出要在社会因素中增加城市化水平、产业结构、文化水平等指标,同时要考虑单位经济产出的污染排放、污染物处理能力、科技进步贡献率等技术管理指标^[18-19]。总体上,原有研究基于行政区自上而下设定减排任务,基本上一刀切,忽视空间功能的差异,这样既会导致水环境容量利用效率的损失,也会因欠缺公平导致现实中难以操作。因而,近年有学者开始尝试在构建污染负荷分配模型时将公平作为分配准则,但在公平性的定量度量技术上仍显薄弱^[20-22]。因此,本文拟将经济学度量收入分配的基尼系数法引入水环境污染物总量分配的公平性评估中,尝试解决资源要素空间配置及其公平性定量测度的技术问题。

1 研究区域概况

无锡市区位于长江三角洲的长江和太湖之间的走廊地区(图1),总面积1650 km²,其中水域面积占40%左右,是城区距太湖最近的沿湖大城市之一。改革开放以来,经济社会发展成就显著,2010年地区生产总值达到5760亿元,人口密度达到2150人/km²,开发强度接近40%,是我国工业化和城市化水平最高的城市之一。但是支撑经济总量的制造业中,如纺织业、石油化工行业、冶金业等污染型制造业约占工业增加值40%左右,污染排放量却占到全部行业的85%以上,特别是污染型企业大部分延续着原有的分散布局,较少考虑水环境容量限制,带来入湖营养物大量增加,对太湖及其流域的生态环境影响明显^[23]。2007年,太湖蓝藻暴发,临近无锡城市的太湖水域成为水体富营养化最明显、蓝藻水华暴发最严重的湖区^①。太湖水危机暴发后,省市两级政府明确提出太湖污染排放“零容量”,倒逼无锡根据环境容量差异和限制性要求对污染企业进行布局调整。到2008年,无锡市区污染企业较2004年减少一半以上,布局也更为集中(图2)。截至2012年4月,竺山湾、贡湖湾和梅梁湾的水质虽然仍处于劣V类,但水体已由原来的富营养化转变为轻度营养化^②。可见,水体水质的好转,不仅限于湖泊水体自身污染的修复,还要从区域环境容量的差异出发,合理确定各地

① 太湖流域管理局. 太湖健康报告, 2008.

② 太湖流域水资源保护局. 太湖流域及东南诸河省界水体水资源质量状况通报, 2012.

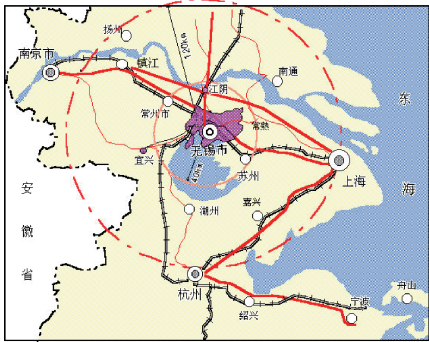


图 1 无锡市区在长三角的位置

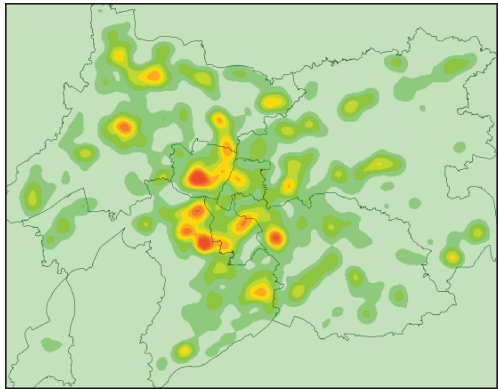
Fig. 1 Location of Wuxi City in Yangtze Delta

区污染物排放总量规模. 因此,开展基于水环境容量供给能力和需求的污染物排放总量配置方法研究,对于指导滨湖城市合理利用水环境容量,促进水环境与经济发展相协调,实现经济发达地区的率先转型、科学发展具有重要的现实意义.

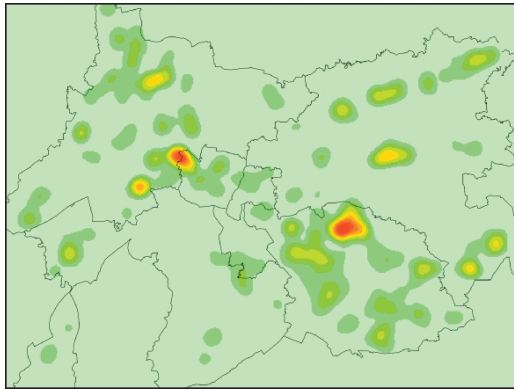
2 数据与方法

2.1 数据来源

水环境污染是指直接或间接向水体排放的,能导致水体污染的物质,监测指标包括 COD、氨氮、总磷、大肠菌群、重金属等^①,本文仅以国家明确的实施排放总量控制的 COD 为例进行研究. 污染物排放总量规模是指标分配的前提,其需求预测方法的研究也非常重要,本文重点在于污染物排放总量空间配置方法, COD 排放总量直接采用江苏省下达给无锡市的总量规模. 土地利用数据解译自 1.5 m 分辨率 Spot5 遥感影像,地形数据来自于 1:50000 地形图,水环境数据主要根据水利局的《水环境功能区划》和《水资源公报》,环保局的《环境统计公报》、《部分重点行业主要污染物排放情况统计(2008 年)》、《无锡集中式饮用水源地分布》和《无锡市污染源普查技术报告》等综合整理. 重要生态功能区数据根据江苏省环境保护厅的《江苏省重要生态功能保护区区域规划》以及无锡市相关专项规划整理而成. 其他统计数据,包括经济发展、人口规模、城市建设等数据,主要源于《无锡市统计年鉴》、《无锡市建设统计年报》等,提供部门包括统计局、建设局、公安局等.



2004 年



2008 年

图 2 无锡市区污染企业集聚程度的核密度分析

Fig. 2 Kernel density analysis of agglomeration degree of polluting enterprises in Wuxi City

2.2 水环境容量分配方法

水环境容量指标分配既要考虑区域水环境容量的供给能力,也要考虑经济社会发展的现实需求,通过两方面要素的综合评价确定环境容量分配指数. 在此基础上,建立容量分配指数与环境容量总量指标分配的同比例关联法,据此开展水环境容量指标分配.

水环境容量供给条件反映了流域水体纳污能力的大小,选用地形地貌、水质目标、清水通道和水体通达性来表征;水环境容量需求一方面表征人类活动对水环境的胁迫作用,另一方面表征空间开发、人口集聚、产业发展等人类活动污染排放对水环境容量的需求,主要选用表征经济社会发展的指标来评价,具体包括建设用地比例、人口密度、产业布局状况、相对污染排放强度等指标(图 3).

① 环境保护部. 水污染物名称代码(HJ525-2009),2009 年 12 月 30 日发布.

水环境容量供给能力评价主要选取流域单元,根据地形图、遥感影像图和水功能区划图,将无锡市区划分为望虞河、直湖港、梁溪河、小溪河 4 个一级流域单元,在此基础上,选择骨干河道为经络,按照所含河流的主导流向、分水区位置、干支流交汇特点、上中下游不同河段及两侧陆域汇水排水状况等,进一步划分 107 个二级流域单元. 水环境压力主要选择经济社会发展相关指标,考虑到指标的性质和可获性,主要选取 500 m × 500 m 的网格单元进行评价,不包括太湖水面共计 5535 个. 按照流域管理的现实要求,最终将各指标通过空间一致性方法赋值到流域单元^[10].

权重的确定主要考虑指标差异性和重要性,对于水环境容量要素还要考虑其可修复性和替代性,水环境需求指标主要考虑导向性. 为了使结果更为准确和科学,通过特尔非法和熵值法相结合确定各指标的计算权重(表 1).

表 1 水环境容量分配指标及权重
Tab. 1 The indicators and weights of water enviromental capacity

目标层	系统层	指标层	权重
水环境容量 分配指数	供给条件	水体通达性	0.4545
		水质目标	0.3455
		地貌特征	0.1474
		清水通道	0.0526
	需求状况	建设用地比例	0.3035
		人口密度	0.2558
		产业布局状况	0.2379
		相对污染排放强度	0.2028

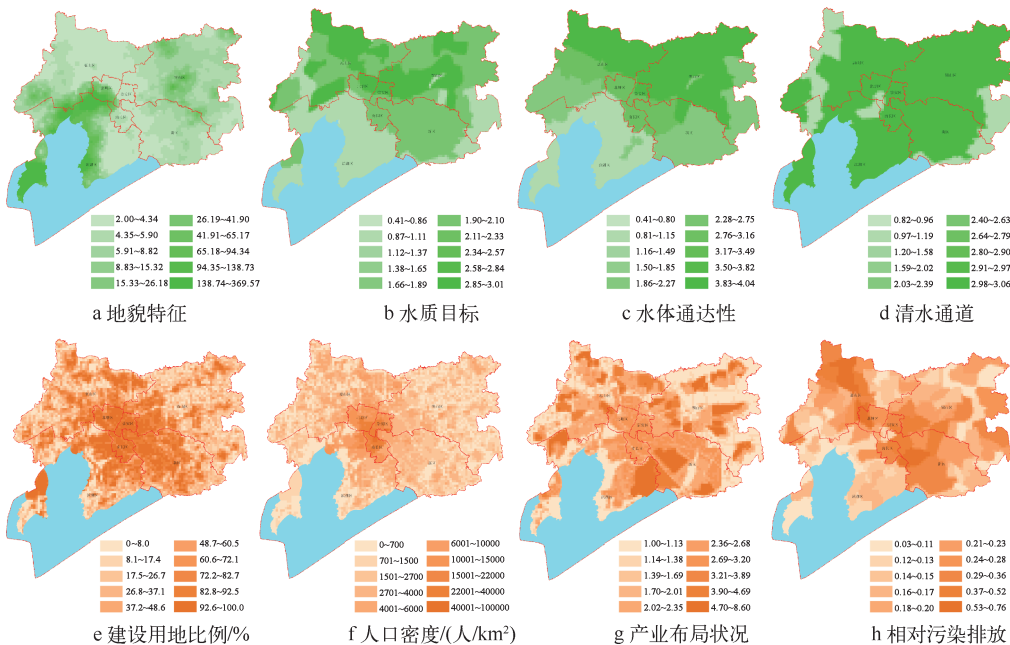


图 3 水环境容量评价指标

Fig. 3 Factors of water environmental capacity

对上述各指标采用逐级分层归并方法,将平行独立的指标根据公式(1)进行标准化,将指标值转换为[0, 1]之间的无量纲数值,然后根据公式(2)加权求和,得到各评价单元的水环境容量供给指数和需求指数. 从指标选择与组合来看,水环境容量供给与需求指数对于环境容量指标分配均为正向影响要素,即该项因素分值越高,分配的环境容量目标规模越大. 但是,两类要素表征的空间内涵却是完全不同的,并非简单的数学加权关系,因此采用空间矩阵向量模型计算各单元的环境容量分配指数.

$$X = (X' - X'_{\min}) / (X'_{\max} - X'_{\min}) \tag{1}$$

$$A_i(B_i) = \sum_{j=1}^n X_{ij} \cdot W_j \tag{2}$$

$$P_i = \sqrt{\frac{1}{2}([A_i]^2 + [B_i]^2)} \quad (3)$$

式中, A_i 指第 i 单元的环境容量供给指数, B_i 指第 i 单元的环境容量需求指数, X_{ij} 指第 i 单元的第 j 要素值, W_j 指第 j 要素值的权重, P_i 表示 i 单元环境容量分配指数。

根据各单元环境容量分配指数占评价区域全部单元环境容量分配指数之和的比例, 再乘目标年评价区域水环境容量总规模, 得到各单元 t 目标年的 COD 环境容量 (公式 (4)); 若该单元所分配的环境容量小于 i 单元的最大纳污能力 (C_i^k), 则方案成立; 否则, 该单元分配的环境容量为其可用的最大环境容量, 多分配的环境容量将重新计入总量参与循环分配。

$$C_{it} = \frac{P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \cdot C_t \quad (4)$$

$$C_{it} \leq C_i^k \quad (5)$$

式中, C_{it} 表示 i 单元 t 年时的水环境容量; C_t 表示到 t 年时研究区域全部环境容量; n 表示单元数; C_i^k 表示 i 单元可利用的最大环境容量。

2.3 公平性评估方法

上述指数分配法综合考量了各地区环境容量的自然本底条件和现实需求, 环境容量供给能力强、需求旺盛的区域分配较多的容量份额, 供给能力相对不足、需求小的地区分配较少的份额, 这充分体现了空间均衡的理念, 是一种比较理想的分配状态。实际上, 这种环境容量份额的分配也是区域发展权的重新配置, 环境容量分配少的地区未来的排污会受到更大的限制, 特别是在环境容量平均配置的现实状况下, 分配较少环境容量的区域, 意味着要承担更大的减排任务, 如果分配差距过大, 则会出现公平性欠缺的问题。为此, 本文将经济学衡量收入公平性的基尼系数法引入到环境容量分配中, 尝试建立水环境容量配置的公平性评估方法。

基尼系数 (Gini coefficient) 是意大利经济学家基尼于 1922 年提出的, 主要是根据劳伦茨曲线所定义的对收入分配公平程度的指标。如图 4a, 横轴代表人口数比例 x , 纵轴代表该比例的人口拥有的财富占社会总财富的比率 y , 黑色虚线代表绝对平均状态下, 财富占比等于人口数占比; 紫线实线代表实际情况, 虚线和紫线实线中间的面积越小, 收入分配越平等, 即基尼系数越小, 分配水平越平均。学术界一般认为, $Gini > 0.5$ 差距悬殊; $0.4 \leq Gini < 0.5$ 差距较大; $0.3 \leq Gini < 0.4$ 较为合理; $0.2 \leq Gini < 0.3$ 相对平均; $Gini < 0.2$ 高度平均。

对于水环境容量分配来说, 其分配份额取决于环境容量分配指数的大小, 也就是取决于各指标的差异程度及其在区域总体评价中的影响。也就是说, 指标间差距越大, 环境容量分配的差距越大, 反之亦然。据此, 可以考虑用水环境容量份额替代收入, 用各指标标准值替代人口规模, 计算水环境容量分配的基尼系数及洛伦兹曲线 (图 4b)。

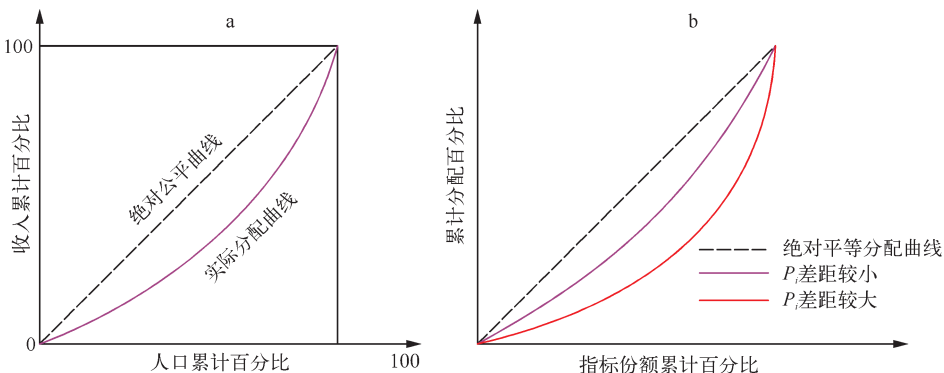


图 4 基尼系数的洛伦兹曲线 (a) 及其在环境容量分配中的修正 (b)

Fig. 4 Lorenz curve of Gini coefficient (a) and its amendment in environmental capacity allocation (b)

3 结果与分析

3.1 初始分配方案

按照上述方法将无锡市区的环境容量分配到各流域单元,整体上西南部太湖上游地区和东南部望虞河等入湖河道所在区域的环境容量分配较少,符合控制太湖入湖河道地区污染物排放的预期。但是,与现状的水环境容量配置格局比较来看,无锡市区整体排污削减13%,而按此分配方案削减最少的区域削减量不足1%,而最高的达到70%(图5)。采用基尼系数法对此方案进行评估,各指标的基尼系数值基本上都在0.5~0.6之间,总体基尼系数也达到了0.54,属于分配差距悬殊的方案,虽然体现了污染排放高度集中的发展趋势,但公平性有所欠缺,短期难以实现(图6)。

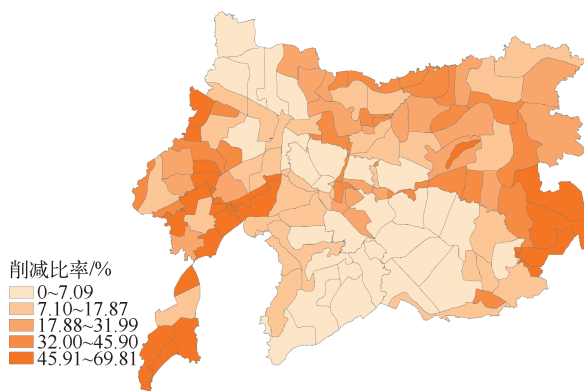


图5 水环境容量分配削减比率

Fig. 5 Allocation reduction ratio of water environmental capacity

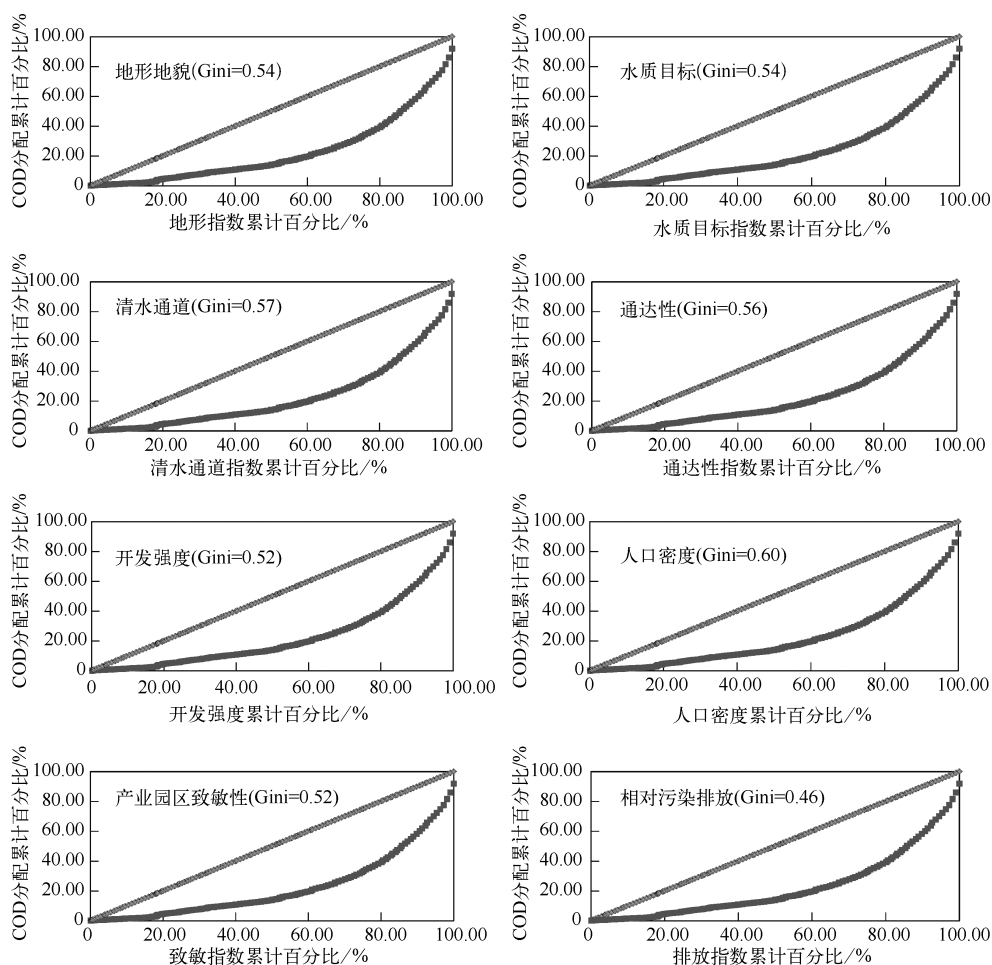


图6 初始分配的基尼系数评估(标准化区间为[0,1])

Fig. 6 Gini coefficient assessment of initial allocation (normalized interval [0,1])

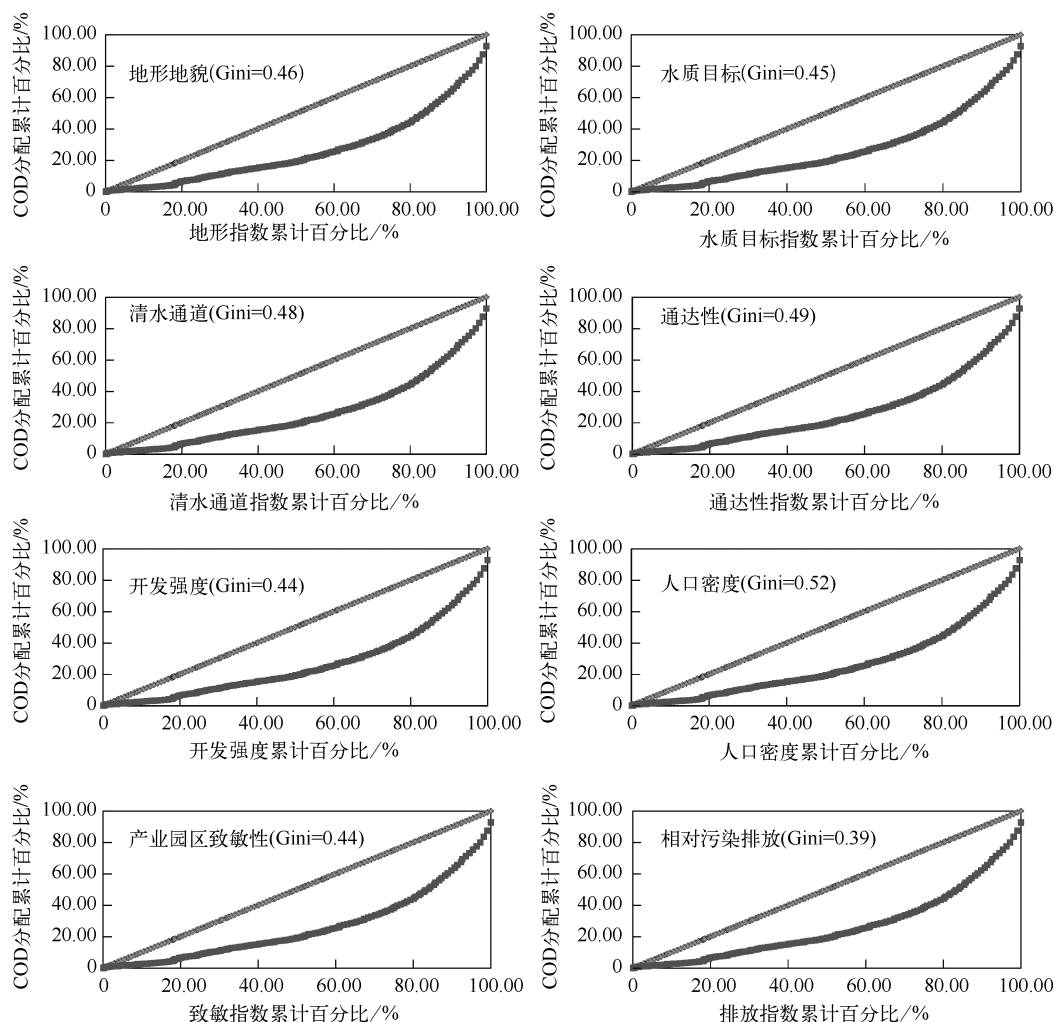


图7 调整方案的基尼系数评估(标准化区间为 $[0.2, 0.8]$)

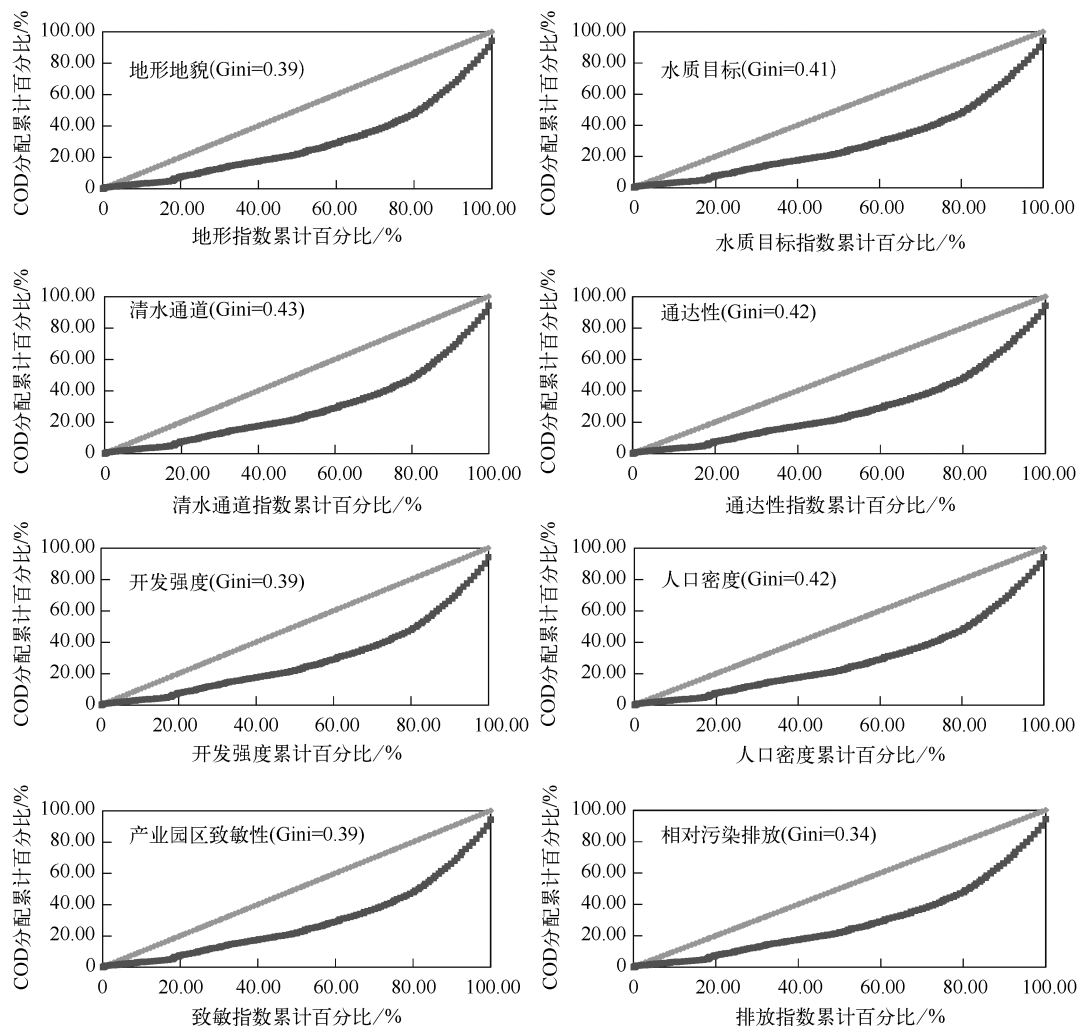
Fig. 7 Gini coefficient assessment of adjustment scheme (normalized interval $[0.2, 0.8]$)

3.2 基尼系数法分配优化

分配的差距主要源于指标标准值之间的差距和权重的选择. 其中, 权重采用主客观多重方法结合确定, 相对较为合理, 因而方案调整主要基于指标标准值的调整. 在初始分配方案中, 各指标的标准化区间为 $[0, 1]$, 如果将标准化区间不断压缩, 则在相同指标和权重下, 分配的差距仍将是缩小的. 为此, 采用 $[0.2, 0.8]$ 和 $[0.4, 0.6]$ 两种标准化区间, 重新进行水环境容量分配指数的计算和方案调整. 对于标准化区间位于 $[0.2, 0.8]$ 的方案来说, 各指标的基尼系数值大多在 $0.4 \sim 0.5$ 之间, 整体基尼系数为 0.39 , 仍属于差距较大的分配方案(图7); 对于标准化区间位于 $[0.4, 0.6]$ 的方案来说, 各指标的基尼系数值大多在 $0.35 \sim 0.45$ 之间, 整体基尼系数为 0.45 , 按照基尼系数标准, 属于公平性较为合理的分配方案(图8), 按此方案污染物排放削减量最大的不超过 40% , 最小也有近 10% , 现实的操作性相对较强.

4 结论和讨论

本文以经济发达的无锡市为例, 探讨 COD 环境容量配置及其公平性评估方法, 以期为滨湖城市地区合理利用水环境容量, 促进经济社会发展与流域水质保护相协调提供了重要科学依据, 对于未来合理有序进

图 8 调整方案的基尼系数评估 (标准化区间为 $[0.4, 0.6]$)Fig. 8 Gini coefficient assessment of adjustment scheme (normalized interval $[0.4, 0.6]$)

行流域资源开发和水环境容量利用具有一定的指导意义. 按照基于公平性度量的水环境容量配置方案, 位于太湖上游的大部分地区和望虞河沿岸地区未来配置较低的环境容量, 需要推进产业转型升级, 严格限制甚至调整迁出制造业特别是污染制造业企业, 培育发展环境友好型的绿色产业等. 中心城区的环境容量配额也有所减少, 未来重点发展现代服务业和以科技创新为核心的战略性新兴产业, 将污染排放控制在水环境可承受的范围之内.

从研究方法来看, 基尼系数方法可以较好地应用于水环境容量配置的公平性评估, 也为基于适宜性分区评价的要素配置方案优选提供了较好的支撑, 有助于提高要素配置方法的科学性和操作性. 当然, 这一方法仍是基于指标数据间的数学关系, 方案优选的关键实际上是不同水环境容量配置所带来的生态环境和经济社会效益, 而关于这种效益的定量评估以及与分配方案相匹配的产业准入及财政政策支撑等, 都需要进一步深化研究.

5 参考文献

- [1] 秦伯强, 胡维平, 陈伟民等. 太湖水环境演化过程与机理. 北京: 科学出版社, 2004: 9-33.

- [2] 邓伟,何岩. 水资源;21世纪全球更加关注的重要资源问题之一. 地理科学,1999,12(2):97-101.
- [3] 李昌丰,高俊峰,曹慧. 土地利用变化对水资源影响的研究现状与趋势. 土壤,2002,4:191-196.
- [4] 黄艺,蔡佳亮,郑维爽等. 流域水生态功能分区以及区划方法的研究进展. 生态学杂志,2009,28(3):542-548.
- [5] 陈雯,嵇振坤,赵海霞等. 水环境约束分区与空间开发引导研究——以无锡市为例. 湖泊科学,2008,20(1):129-134.
- [6] 国家环境保护总局总量控制办公室. 主要污染物总量减排管理手册. 北京:中国环境科学出版社,2008:1.
- [7] 樊杰. 我国主体功能区划的科学基础. 地理学报,2007,62(4):339-350.
- [8] 陈雯. 空间均衡的经济学分析. 北京:商务印书馆,2008.
- [9] 孙伟,陈雯,陈诚. 水环境协同约束分区与产业布局引导研究——以江苏省为例. 地理学报,2010,65(7):819-827.
- [10] 孙伟. 经济发达地区水环境约束分区与产业准入研究——以无锡市市区为例. 长江流域资源与环境,2011,20(7):879-885.
- [11] Snelder TH, Biggs BJF. Multiscale river environment classification for water resources management. *Journal of the American Water Resources Association*, 2002, 38(5):1225-1239.
- [12] 翁明华,聂秋月,蔡峰等. 聊城市水环境承载力研究. 水资源保护,2009,25(2):41-44.
- [13] 林巍,傅国伟. 公平规划及其在区域水环境综合整治规划中的应用. 污染防治技术,1994,7(2):4-8.
- [14] 陈丁江,吕军,金树权等. 曹娥江上游水环境容量的估算和分配研究. 农机化研究,2007,(9):197-201.
- [15] 李云生. 基于公平性的水污染物总量分配评估方法研究. 环境科学研究,2006,19(2):66-70.
- [16] 崔振平. 天津滨海新区水环境容量计算及总量分配方法研究[学位论文]. 天津:天津大学,2008:40-47.
- [17] 钱骏,廖瑞雪,佟洪金等. 基于公平性的水环境容量分配研究——以沱江流域为例. 成都信息工程学院学报,2009,24(1):66-71.
- [18] 李如忠,汪家权,钱家忠. 区域水污染负荷分配的 Delphi-AHP 法. 哈尔滨工业大学学报,2005,37(1):84-88.
- [19] 范平,吴纯德,张帆等. 南方某城市水污染物总量控制分配研究. 水资源保护,2009,25(4):21-23.
- [20] Burn DH, Yulianti JS. Waste-load allocation using genetic algorithms. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2001, 127(2):121-129.
- [21] 林高松,李适宇,江峰. 基于公平区间的污染物允许排放量分配方法. 水利学报,2006,37(1):52-57.
- [22] 肖伟华,秦大庸,李玮等. 基于基尼系数的湖泊流域分区水污染物总量分配. 环境科学学报,2009,29(8):1765-1771.
- [23] 高爽,魏也华,陈雯等. 发达地区制造业集聚和水污染的空间关联——以无锡市市区为例. 地理研究,2011,30(5):902-912.