

水环境约束分区与空间开发引导研究——以无锡市为例*

陈 雯, 褚振坤, 赵海霞, 崔 旭

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘 要: 基于区域开发与水环境保护的相互作用关系, 本文根据河湖水环境质量要求对地区开发的约束影响, 分析水环境约束的区域差异及相应区域开发中水污染物排放的控制. 以无锡市为例, 综合考虑河湖水文及流域地貌等自然地理要素, 将全市域划分为两个一级环境单元区, 34 个二级子环境单元区, 作为水环境约束评价的基本单元; 选择河湖水体使用功能、水体通达性、水质目标和引水通道、地貌特征等要素作为表征水环境约束的评价因子, 运用 GIS 空间分析和统计分析方法, 综合评价全市域水环境约束的等级分区. 以此作为空间开发引导的依据, 其中水环境约束较弱的地区可以适当布局水污染物排放量较大的生产生活项目, 而水环境约束较强的地区需要严格控制乃至禁止水污染物排放量大的项目建设.

关键词: 水环境约束分区; 环境单元; 区域开发; 无锡市

Regionalization of water environmental risk and spatial development guidance: a case study of Wuxi City

CHEN Wen, ZHUO Zhenkun, ZHAO Haixia & CUI Xu

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

Abstract: Based on the relationship between regional development and water environment protect and affection of water environment quality of river and lake on regional development, the paper analysed regional disparity of water environmental risk and controlling of water pollution discharge in regional development. Taking Wuxi as a case, comprehensively considering physical geographical factors such as river and lake hydrological condition, watershed geomorphic condition etc, the whole city had been divided into two sections of the first grade environmental cells, thirty four sections of the second grade environment sub-cells, as estimating cells of water environmental risk. According to the relationships between land development and change of water environments, several factors had been selected, such as function of water utilization, connecting condition to water body (Lake Taihu, Yangtze River, etc) outside, water quality needs and the channels of leading water, and geomorphic condition for evaluating and regionalize the risk of water environments for four grads by using GIS spatial analyzing and statistic analyzing methods. As a result, the area with big risk of water environments would not allow the development of water polluting factory and inhabitant quarter. It could be the one of guidances for the spatial development.

Keywords: Regionalization of water environmental risk; environmental units; spatial development; Wuxi City

水是制约和影响经济社会发展的重要自然要素; 水环境作为地表水覆盖地段的自然综合表征, 受到了水资源利用、污水排放等影响而出现恶化等状况^[1]. 水环境约束, 表征着水环境的构成、使用功能及相关自然人文因素对区域开发的限制性影响, 是指在一定的水质水量目标下, 基于水体自净和环境纳污能力的维护而形成对区域开发的排污行为的限制. 由于河湖及流域的自然属性和水功能要求乃至纳污能力具有多样性与区域差异性, 所能承载的区域开发规模、程度和内容也各异. 充分考虑水环境对区域开发的约束条件, 依照水环境约束分区, 进行产业及建设项目的合理布局、污染控制和环境保护, 对促进经济和环境的协调发展具有重要意义.

* 国家自然科学基金项目(40771053)和中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-YW-321)联合资助. 2007-01-26 收稿; 2007-04-30 收修改稿. 陈 雯, 女, 1967 年生, 博士, 研究员.

目前关于水环境与区域开发协调的研究,主要是通过水资源量和水文特征等测算水环境容量,运用排污总量控制、约束区域开发的排污行为.但水环境容量计算较为复杂,大都假设于封闭和半封闭状态的水体污染控制,较少考虑水系开放交换的影响;从国家、省域、大江大河大尺度开展地表水环境功能区划,围绕水质规划的功能目标进行分类分级^[2-3],体现了水质功能目标的约束,但是如何把对河湖的水功能要求,转化为流域土地开发的约束,实施水陆一体化空间管制则较少涉及.有的学者提出以水环境综合管理为中心的水生态环境分区研究,以及进行水环境容量的空间分异与工业生产力宏观布局的协调研究^[4-5],仍局限于大流域尺度宏观解读^[6-7].在国内外相关研究基础上^[8-9],针对都市区的市域范围,以流域土地利用变化对河湖水环境变化产生直接影响为依据^[10-13],将河湖水功能分异要求转化为对流域水环境约束的空间管制分区,进而指导空间合理开发秩序,是本文讨论核心.

无锡市地处经济发达的太湖流域和沿江地区,2005年全市总人口452.84万人,城市化水平为67%,全市土地总面积4788km²,其中水面面积占全市面积的31.4%,长江与太湖都属于重要生态功能保护区,水环境保护要求较为严格.而本区城市化、工业化程度高,对水环境污染影响很大,主要河流水系均呈不同程度的污染,主要以有机污染为主,总氮、氨氮污染较重.因此,依据河湖水功能要求,合理进行流域空间管制,对改善太湖乃至区域水环境都具有重要的现实意义,且对同类地区也具有推广应用价值.

1 水环境约束评价的关键技术问题

水环境约束分区,是按照河湖水功能差异性要求,进行不同排污限制的分区.分区的关键在于水环境评价单元的确定、评价指标的选择和管制要求的确定.

1.1 环境评价单元的确定

鉴于无锡市拥有河湖水系复杂、水网稠密、河湖相通等特点,根据水系格局特征,在研究中将全市域概化为两个一级环境单元(图1):市域中部与北部与通江河流相贯通的太湖水网环境单元和南部承接宜溧山地来水的南溪河环境单元.在此基础上,选择24条骨干河道为经络,按照所含河流的主导流向、分水区位置、干支流沿岸排污现状、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34个子环境单元.其中,19个为直通长江的子环境单元,8个为直接连通太湖的子环境单元,6个属南溪河流域的子环境单元,另外宜兴市西北部属漏湖流域,构成相对简单,整体作为一个子环境单元(图1,图2).



图1 无锡市34个子环境单元分布

Fig.1 Distribution of 34 basic environmental units

1.2 水环境约束因子的选择

水环境约束的内在决定要素主要是水文条件和水体物理、化学、生物特性以及水环境功能分区的水质要求、水体使用功能,同时,流域的地理条件及其向外开放性也对水环境容量有较大影响^[14]。根据无锡市水环境特点,选择了包括地貌类型、水体使用功能、水质目标、是否清水通道、水体通达性等作为反映水环境约束区域差异的评价因子,其中水质目标、水体使用功能、水体通达性、清水通道四项与水体的纳污能力有较密切关系,地貌类型则是反映流域或区域的汇水、排水以及外部开放程度的因子。在全市域形成五个方面约束因子(表 1),并确定与其相对应的评价指标和指标值。

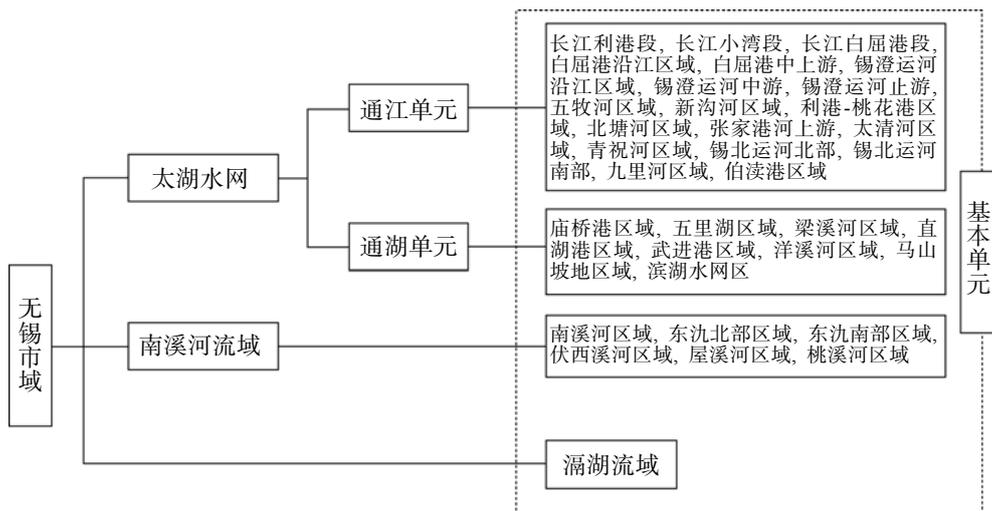


图 2 无锡市 34 个子环境单元的划分

Fig.2 Zoning of 34 basic environmental units

(1) 地貌类型: 无锡市地貌主要有丘陵、岗地、低洼水网、圩田和平原。其中,丘陵与岗地水土易流失,地表以坡面径流为主,水环境容量相对较小;低地辟成的水网与圩田,水量丰富,水面积大,水面坦荡,但由于外排能力差,环境容量受到一定影响。平原地区,水流相对通畅,水环境容量则相对较大。

(2) 水体使用功能: 水资源的用途不同,如饮用水源以及工业、农业、渔业与景观娱乐用水等,对水质目标乃至水环境容量控制的要求不同。如饮用水源地水质安全要求高,取水口一、二级保护区域禁止排污;农业、渔业、景观娱乐用水对水质要求也较高;工业用水区对水环境限制则较少。根据水(环境)功能二级区划将水体的使用功能分为 4 个等级赋值。

(3) 水质目标: 水质目标越高的河流对汇水流域的排污控制越严格。根据无锡市水(环境)功能二级区划确定的 2010 年水质达标要求,将水域水质按 III 类以上、IV-V 类和 VI 类水,分 3 个等级进行赋值。

(4) 清水通道: 清水通道是调节区域水资源保障能力的引水措施,对调水水源地及沿岸水污染控制要求太

表 1 水环境约束因子权重与评分标准

Tab.1 Power and standard of factors for water environment risk

评价指标	权重	评分标准
地貌类型	0.105	0 丘陵
		1 岗地
		2 低洼水网
		3 圩田
		4 平原
水体使用功能	0.26	0 饮用水源
		1 农业、渔业用水
		2 景观娱乐用水
		3 工业用水
水体通达性	0.21	0 不通江
		1 间接通江
		2 直接通江
水质目标	0.275	0 III类以上
		1 IV-V类
		2 VI类
清水通道	0.15	0 经过
		1 不经过

为严格. 目前在无锡市域通过的主要清水通道有引江济太的望虞河和白屈港河. 对清水通道按其是否经过某环境单元进行区分, 分 2 个等级赋值.

(5) 水体通达性: 指河流水系与外围水系的沟通程度, 与外界大容量水体交换条件好的水体对污染物的承受能力相对更强. 无锡市水网密集, 北部通江河流较多, 南部多为入湖河流, 通江河道具有一定的引排功能, 而入湖河流周边区域的排污限制非常严格. 按水体与长江的连通性, 分 3 个等级赋值.

1.3 水环境约束评价

按照层次判别法分析要素因子的重要性, 确定各指标权重, 客观反映水环境各指标对区域开发的约束程度. 层次分析法是通过每一层次中各指标两两相比的相对重要性的判断, 引入合适的标度, 用数值加以量化, 从而构成各层次的判断矩阵^[15].

水环境约束的五个因子中, 水质目标、水体使用功能、清水通道是反映水环境内在要求的指标, 地貌特征和水体通达性是两个反映外部条件的指标. 与外部条件相比, 内部要求对水环境具有更为严格直接的制约; 在内在要素指标中, 又以水质目

标的约束最强, 因为它最终决定水环境容量的使用与开发程度, 所以该指标的影响权重最大; 水体使用功能可以决定水环境的相对容量或达到一定的水质标准, 权重次之; 清水通道是针对特殊水体对水质目标的强化和补充, 权重较低. 水体通达性, 反映了环境单元水体开放程度, 作为外部条件能相对改变水环境的约束条件, 对区域开发重要性的影响权重要低于水质目标和水体使用功能; 地貌特征等对水环境约束程度是通过地表物质输移而间接造成的, 赋以较低的权重. 在对要素基本判断的基础上, 本文还通过特尔非法进一步确定层次分析法所需的标度值, 即选择相关专业的专家及相关部门的专业技术人员对各要素的重要性进行打分, 通过对专家打分有效性和收敛结果分析, 确定各评价要素的重要性排序: 水质目标(0.275)>水体使用功能(0.26)>水体通达性(0.21)>清水通道(0.15)>地貌特征(0.105)(表 1).

2 分区结果与空间开发引导

运用 GIS 的空间叠加分析方法, 根据指标赋值和权重, 按表 1 中各项指标赋值, 根据公式(1), 采用加权因子法计算各子环境单元的得分(表 2).

$$S_i = \sum_{k=1}^5 B_{ki} W_k \quad (1)$$

式中, i 为分区单元编号; B_{ki} 为第 i 个分区单元的第 k 个评价因子分值; W_k 为 k 评价因子对第 i 个分区单元的权重值; S_i 为第 i 个分区单元的水环境综合评价得分.

按照所得的综合分值, 将计算结果进行

表 2 各环境单元的水环境约束评价分值

Tab. 2 Evaluation of water environment risk for each sub-cell

名称	地貌特征	使用功能	通达性	水质目标	清水通道	综合得分
新沟河	4	3	2	3	0	2.7
利港—桃花港	4	3	2	2	0	2.55
锡北运河南部	4	3	1	3	0	2.425
张家港中游太清河	4	3	1	2	1	2.375
锡澄运河沿江部分	4	1.5	2	2	1	2.35
锡北运河北部	4	3	0	3	0	2.15
锡澄运河中游	2	3	2	2	1	2.1
锡澄运河上游	2	2	2	2	1	1.9
白屈港上中游	3	1	2	2	0	1.875
洋溪河	3	3	0	2	1	1.825
北塘河	3	1	1	2	1	1.7
五牧河	3	1	1	2	1	1.7
直湖港	4	1	0	2	1	1.7
武进港	4	1	0	2	1	1.7
白屈港沿江部分	4	0	2	0	0	1.65
九里河	3	2	0	2	1	1.625
张家港上游	0	3	2	2	1	1.55
东沏北部	3	1	0	2	1	1.425
东沏南部	3	1	0	2	1	1.425
梁溪河	3	1.5	0	1	1	1.375
鹅真荡	3	1	0	1	1	1.275
沈淩港	3	1	0	1	1	1.275
漏湖流域	2	1	0	2	1	1.15
滨湖水网	2	1	0	2	1	1.15
青祝河	2	1	1	0	1	1.125
南溪河流域	3	0	0	0	1	0.925
长江干流*	0	1	2	1	0	0.9
五里湖	1	2	0	0	1	0.775
桃溪河	1	1	0	0	1	0.575
屋溪河	1	0	0	0	1	0.375
伏西溪河	0	0	1	0	0	0.275
马山河	0	0	0	0	1	0.1

* 长江干流含利港段、小湾段和白屈港段三个子环境单元.

聚类,得分高的单元是进行区域开发的水环境弱约束区,得分低的单元是水环境强约束区,34个流域单元可分为从强到弱的五类水环境约束区(表3)。

(1)水环境强约束区域:主要包括两类区域,约占区域总面积26.5%。一类是太湖沿岸的马山河、五里河,宜兴的南溪河、屋溪河、桃溪河、伏西溪河入湖河流。这类区域主要属于通湖的集水域,受到太湖生态保护的严格约束,不宜发展水污染排放较大的生产生活项目,尤其在五里湖地区目前正在进行的蠡湖新城建设,无疑要对新城的功能、规模和强度有较严格控制,对旅游业发展要严格控制,防止形成新的水污染源。另一类区域是长江干流的利港段、小湾段和白屈港等饮用和调水水源保护区段等环境单元区,是长江重要区域性饮用水水源保护区,基于饮用水安全必须对这一区域实行严格保护,禁止与取水活动无关的建设行为,保护该区域长江沿岸湿地资源,增强对岸边污染的净化能力。

表3 无锡市水环境约束评价结果

Tab.3 Regionalization evaluation of water environmental risk in Wuxi City

约束等级	所含流域单元	所占面积比重(%)
强	利港、小湾和白屈港,马山河,五里河,南溪河,屋溪河,桃溪河,伏西溪河	26.5
较强	溇湖流域,滨湖水网,青祝河,伯渎港,鹅真荡	14.7
中等	白屈港沿江部分,张家港上游,九里河,北塘河,五牧河,直湖港,武进港,梁溪河	23.5
较弱	锡澄运河中游,锡澄运河上游,锡澄运河沿江部分,白屈港上中游,洋溪河,锡北运河北部,东沏北部,东沏南部	23.5
弱	利港—桃花港,新沟河,张家港中游太清河,锡北运河南部	11.8

(2)水环境较强约束区域:包括溇湖流域,滨湖水网,青祝河,沈渎港,鹅真荡等环境单元,约占总面积的14.7%。该类型区域或者位于滨湖地区,或具有较高生态服务价值的湖荡湿地,水质保护要求高,但因其地貌类型等原因,较之水环境强约束区域,稍有一定水环境容量,但开发的水环境风险仍较大,要限制水污染项目的发展和布局,设置严格的环境准入门槛,提高污染处理的尾水排放标准。

(3)水环境中等约束区域:包括白屈港沿江部分、张家港上游、九里河、北塘河、五牧河、直湖港、武进港和梁溪河等环境单元,约占区域面积的23.5%。该区域水质目标有较高要求,地势平坦,水体流通性较好;或者由于通达性好,可以接受一定的排污,但不适合大规模发展水污染排放项目,应制定较严格的环境准入门槛。

(4)水环境较弱约束区域:包括锡澄运河、白屈港上中游、洋溪河和锡北运河北部等地区,占区域总面积23.5%。水环境受到水体使用功能、引水通道保护等因素的限制,但河流直接通江且地势较平坦,排污条件较好,流域开发的排污限制不大,适合有一定水污染排放需求的项目布局,也适合大规模建设生活集中区,便于污水处理厂就近设置。在保证相应水质目标下,设置合适环境准入门槛,增强污水处理能力。

(5)水环境弱约束区域:包括沿江的利港—桃花港、新沟河、张家港中游太清河、锡北运河南部等地区,占区域总面积11.8%。这类地区基本不受使用功能和水质目标的限制,主要河流直接通江,且地势平坦,通达性较好,水环境容量相对较大,适合污水排放量相对较大的企业和项目布点,并可以作为污水处理厂的排放的主要选址。但鉴于周边分布有沿江集中式饮用水源地保护区以及长江水质的保护要求,仍不能忽视环境保护问题,尤其需要注重污水排放治理。

3 讨论

总体来看,水环境约束强度从南向北递减。滨太湖和无锡西南的丘陵地区水环境约束较大。沿长江地区,除了取水口所在的几个重要饮用水源地外,都属于水环境弱约束和较弱约束区,这进一步验证了

表 4 2005 年无锡市主要河流水质监测数据
Tab.4 Supervised data of most river's
water quality in Wuxi City

类别 河段	COD _{Mn} (mg/L)	水质 类别	是否 达标
锡澄运河	7.53	IV	是
利港	2.1	III	是
张家港	7.14	IV	是
梁溪河	5.4	V	否
锡北运河	6.1	V	否
伯渎港	18.2	V	否
京杭运河	6.3	V	否
直湖港	5.0	V	否

沿江相对于其他地区更适合布局基础产业的论点; 较弱和弱约束区, 但面积仅占全市的 35.3%, 从侧面反映出无锡市可供高强度开发的区域已经相当有限。根据 2005 年主要河流的水质监测数据(表 4), 锡澄运河、利港、张家港水质以 III、IV 类为主, 水质基本达标, 作为水环境相对弱约束地区尚有一定的水环境容量。而梁溪河、锡北运河、伯渎港、京杭运河、直湖港水质为 V 类, 没有达到预期的水质目标, 不仅水环境约束相对较大, 而且容量基本超载, 需对这些河段所在的环境单元进一步严格控制乃至禁止水污染物排放量大的项目建设。从水环境约束的地域分异视角, 研究空间开发区位导向、特别水污染项目的布局引导, 是生态、人文紧密结合的区域分析方法, 具有很强的探索性, 但是有些地方仍需进一步完善和提高, 如划

分的水环境区域作为涵盖河流及其流域的单元, 在界线确定上受水网地区水系复杂等因素的影响, 精准度有待进一步提高, 表征水环境约束的地理生态因子的内涵、涵盖范围、约束指标的界定与量化等都有待进一步拓展与深入研究。

4 参考文献

- [1] 秦伯强, 胡维平, 陈伟民等主编. 太湖水环境演化过程与机理. 北京: 科学出版社, 2004.
- [2] 侯国祥, 张 豫, 苏 海等. 基于 Arc/GIS 的长江流域水环境功能区划研究. 华中科技大学学报(自然科学版), 2004, 32(6): 105-107.
- [3] 纪 强, 史晓新, 朱党生等. 中国水功能区划的方法与实践. 水利规划设计, 2002, (1): 44-47.
- [4] 鲍全盛, 姜文来. 论我国河流水环境容量空间分异与工业生产力的宏观布局. 地理科学, 1998, 18(3): 205-211.
- [5] 韩兵兵, 王 东. 城市分类的水环境容量目标控制研究. 中国水利, 2005, 13: 145-149.
- [6] 曹 慧, 高俊峰, 李昌峰. 土地利用变化对水资源影响研究的现状和趋势. 土壤, 2002, (4): 191-195.
- [7] Wilson KB. Water used to be scattered in the landscape: local understandings of soil erosion and land use planning in southern Zimbabwe. *Environment and History*, 1995, 3: 281-296.
- [8] 陈 雯, 段学军, 陈江龙等. 空间开发功能区划的方法. 地理学报, 2004, 59(增刊): 53-58.
- [9] 孙 伟, 陈 雯, 段学军等. 基于生态-经济重要性的滨湖城市土地开发适宜性分区研究——以无锡市为例. 湖泊科学, 2007, 19(2): 190-196.
- [10] 林泽新. 太湖流域水环境变化及缘由分析. 湖泊科学, 2002, 14(2): 111-116.
- [11] 焦 锋, 秦伯强. 太湖水环境污染的社会经济因子分析. 地域研究与开发, 2002, 21(2): 89-92.
- [12] 罗 缙, 逢 勇, 林 颖等. 太湖流域主要入湖河道污染物通量研究. 河海大学学报(自然科学版), 2005, 33(2): 131-135.
- [13] 许朋柱, 秦伯强. 2001-2002 水文年环太湖河道的水量及污染物通量. 湖泊科学, 2005, 17(3): 213-218.
- [14] 方子云. 水资源保护手册. 南京: 河海大学出版社, 1988.
- [15] Satty TL. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 1977, 15(3): 234.