

## 基于快速城市化的饮用水系统适应能力评估——以江苏省太湖地区为例<sup>\*</sup>

沈莎莎<sup>1,2</sup>, 陈爽<sup>1\*\*</sup>, 高群<sup>1</sup>, 张殷俊<sup>3</sup>

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

(2: 中国科学院大学, 北京 100049)

(3: 中国环境监测总站, 北京 100012)

**摘要:** 江苏省环太湖地区快速城市化和工业化加剧饮用水危机, 整合研究水源地、供水、用水、排污处理和技术 5 个方面对于支撑该地区可持续发展的适应能力, 对揭示饮用水供需关系、存在问题、部门协调与综合决策等具有现实意义. 本文以构建 5 个子系统适应能力指标体系为主线, 通过分指数与综合指数评价的运算, 得出研究地区饮用水系统适应能力等级水平、地域分异特征及影响因素分析; 针对各子系统存在问题, 提出维护和提升适应能力的对策措施. 研究表明, 适应能力较强的地区占总面积 29.1%, 其 5 个子系统适应能力均较强. 适应能力中等地区占 41.2%, 一类是各子系统适应能力基本均等, 另一类是排污处理子系统适应能力较强, 但用水子系统得分较低. 适应能力较差地区占 29.7%, 主要是技术子系统分值低, 其它子系统适应能力处于中等偏下. 因此需加大对各子系统适应能力的调控与提升.

**关键词:** 适应能力; 城市饮用水系统; 快速城市化; 环太湖地区

## Adaptive capacity assessment of drinking water system based on rapid urbanization: The case of area around Lake Taihu in Jiangsu Province

SHEN Shasha<sup>1,2</sup>, CHEN Shuang<sup>1</sup>, GAO Qun<sup>1</sup> & ZHANG Yinjun<sup>3</sup>

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

(2: *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China*)

(3: *China National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012, P. R. China*)

**Abstract:** Based on a detailed discussion about the conception of urban drinking water system adaptation, the paper established an adaptive capacity assessment index system and model of drinking water system in areas around Lake Taihu from the aspects of adaptation factors in water sources, water supply system, water user system, sewage treatment system and social system. According to the model and the sub-index and integrated-index, the drinking water system adaptive capacity, including spatial differentiation, types and influencing factors of cities around Lake Taihu area in Jiangsu Province, was evaluated. The results showed that: regions with strong adaptivity accounted for 29.1% with all five sub-systems high value; regions with middle adaptivity accounted for 41.2% with two types—relatively equal and uneven; regions with poor adaptivity accounted for 29.7%, mainly due to the technical sub-system is in low values and other sub-systems are not high. Therefore it is necessary to increase the differentiation enhancement of the adaptive capacity of each sub-system.

**Keywords:** Adaptive capacity; urban drinking water system; rapid urbanization; areas around Lake Taihu

近 30 年我国区域和流域的水环境问题日益突出, 其中引起社会广泛关注的是饮用水安全问题, 主要反映在水源地污染严重、供排基础设施建设滞后、生产与生活节水意识不强、应对突发事件能力薄弱等方面<sup>[1-3]</sup>. 据世界卫生组织统计, 全世界 80% 的疾病是由不安全的水和恶劣的环境卫生条件造成的<sup>[4,5]</sup>. 江苏省

<sup>\*</sup> 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-EW-315) 资助. 2012-05-11 收稿; 2012-09-23 收修改稿. 沈莎莎, 女, 1986 年生, 硕士研究生; E-mail: jzshenshasha@163.com.

<sup>\*\*</sup> 通信作者; E-mail: schens@niglas.ac.cn.

太湖地区水网稠密、水量丰富,饮用水源主要分布在太湖、长江及其他中小湖泊。受近 30 年快速城市化和工业化影响,水源水质出现下降趋势<sup>[6]</sup>,特别是 2007 年太湖水危机事件,进一步敲响饮用水安全保障的警钟;饮用水适应能力的调控与提升是保障饮用水安全的重要方面,不仅要求水源地水质达标,而且还需要供水、用水、排水以及技术等领域的配套与支撑。本文所研究的饮用水系统适应性评估是指为满足区域社会经济可持续发展的需求,通过构建表征饮用水源地污染控制、给水与排水系统建设与完善、生产生活节水以及技术 5 个子系统适应能力指标体系、采用量化方法,进行综合评价,为改善与提升饮用水系统自身的适应能力提供科学依据<sup>[7-8]</sup>。此外,本文对各子系统量化指标的选定与组合,在环境科学与地理学的结合上开拓了新的视野,展示了饮用水源安全研究的新思路,为这一领域的深化研究提供一定启迪。

## 1 研究区概况

江苏省太湖地区包括苏州市、无锡市、常州市 3 市及其所辖 9 县市,总面积  $1.75 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。2010 年,总人口达 2143.36 万,地区生产总值达 28497 亿元,人均生产总值 13.30 万元。研究区是我国经济最活跃、人口和产业最密集的地区之一,土地开发利用程度高,生态环境脆弱,环境容量较小。区内共有 23 个地表集中式饮用水水源地,其中,沿江 8 个,太湖 7 个,其他河流型 1 个,湖库型 7 个(图 1)。全区取水总量为 161666.31 万吨,取水总量中 99.3% 满足饮用水水源地Ⅲ类水质的要求。

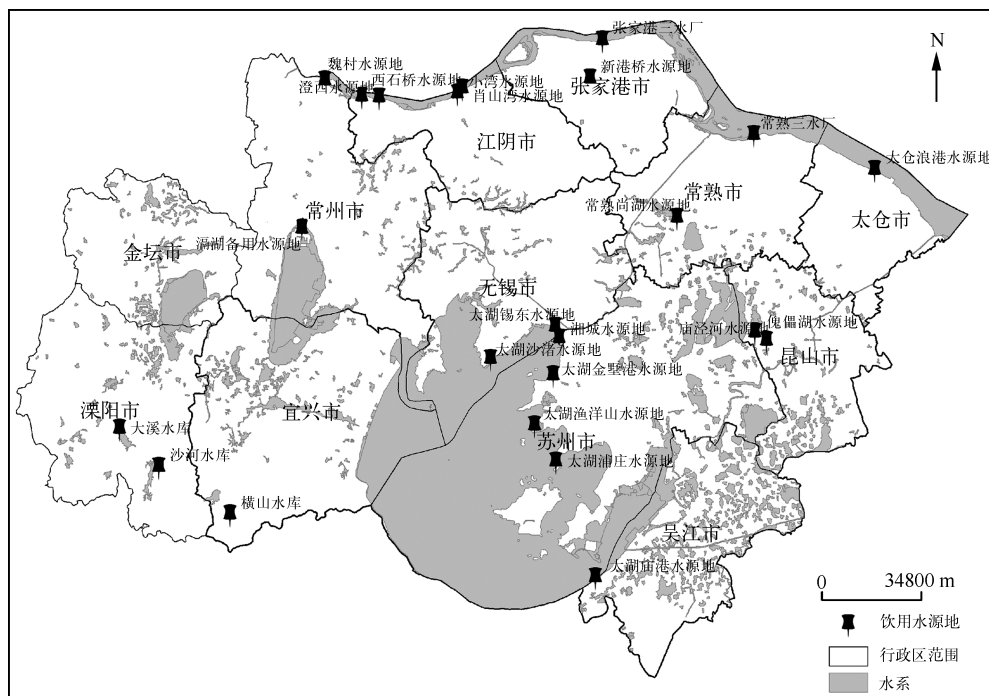


图 1 江苏省太湖地区集中式饮用水水源地分布

Fig. 1 Centralized drinking water source of area around Lake Taihu in Jiangsu Province

## 2 资料来源与研究方法

### 2.1 资料来源

水环境数据主要来源于江苏省 2010 年环境质量报告书和各地环境质量报告书;污染源数据主要来源于相关规划与实地调研;社会经济数据主要来源于 2010 年统计年鉴和城乡建设统计年报。

### 2.2 研究方法

2.2.1 饮用水系统构成 把饮用水按源-供-用-排等的递阶结构,构建出由饮用水水源地、供水、用水、排污

处理和技术 5 个子系统组成的综合饮用水系统。① 饮用水源地子系统:该子系统适应能力主要包括充足的水量、良好的水质、明确划定的饮用水源保护区以及较少的人类活动干扰<sup>[9]</sup>。② 供水子系统:城市供水系统是支撑和保证城市经济发展及人民生活的重要基础设施,其适应能力是指给水设施完善、工艺技术先进、输配水管网齐全、管护能力较强等<sup>[10]</sup>。③ 用水子系统:研究区人口密集,人均日生活用水量较高,高耗水行业比重大,对用水子系统自组织功能的适应性调控需求较大,因此,其适应能力是指水量水质对人口增长和产业保障能力。④ 排污处理子系统:研究区河湖水质污染对饮用水源地的水质达标有一定影响,因此其适应能力应包括工业废水达标排放、城市生活污水集中处理、污水管网配套等因素。⑤ 技术子系统:其适应能力是指支撑饮用水原水处理、给水系统、污水处理设施等正常运转与监控体系的先进工艺技术水平,如中水回用、工业废水重复利用、再生水生产等技术等。每个子系统均可通过政策、法规、管理、工程、技术实施,调节与优化功能以确保子系统和谐运转以及饮用水系统综合适应能力的整体提升与优化。

2.2.2 适应能力指标体系 根据指标选取的实用性、普遍性、整体性、可评价性和全面性等原则,在明确饮用水系统各环节影响因素的基础上,综合国内外权威研究成果<sup>[10-16]</sup>,构建城市饮用水系统适应能力评价指标体系<sup>[17-19]</sup>(表 1),选取 28 个反映饮用水源、供排水、用水等指标,其中,饮用水源地子系统 5 个,供水子系统 5 个,用水子系统 6 个,排污处理子系统 6 个,技术子系统 6 个。这 28 个指标均赋予相应的指数名称,这些指数中 90% 为可量化表示的指标,通过 GIS 空间分析、实地调查以及相关统计数据折算等手段获得,如:(1) 水源工程供水能力指数 = 现状综合生活供水量/设计综合生活供水量;(2) 饮用水源风险指数,根据临近敏感度计算公式  $z = 100/e^d$ ,其中,  $d$  是最近污染源到水源地的距离,利用 ArcGIS 空间测量和模型计算得到(图 2);(3) 饮用水源保护区指数 = ( $\Sigma$ 城市各饮用水源保护区面积)/城市集中式饮用水源地个数;(4) 综合生活缺水指数 = 城市综合生活缺水量/城市综合生活需水量;(5) 供水管网漏损指数 = 管网漏失量/供水总量;(6) 来水量保证指数 = 现状水平年枯水流量/设计枯水流量;(7) 人均 GDP 指数,即为当年 GDP 总量与常住人口的比值;(8) 供水投资指数、排污处理投资指数以及节水设施投资指数等都是与当年 GDP 的比值。另外有 10% 是半定性指标,根据同质数据但不同定量方法,结合分级标准进行经验综合打分而得,如水质状况指数(河流水质呈现较为明显的有机污染特征;主要湖库污染仍以总磷、总氮污染为主<sup>[20]</sup>)、供水方式指数和监测能力指数;鉴于各子系统内各指标贡献程度不同,采用五位专家的决策意见,利用层次分析法对各指标赋权重(表 1)。

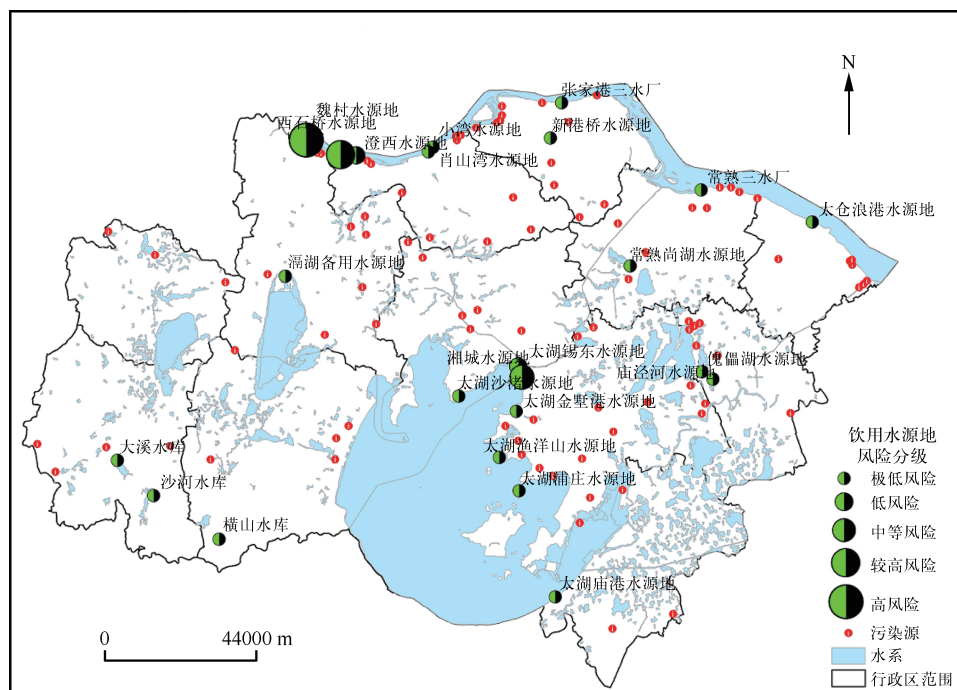


图 2 江苏省太湖地区饮用水源地风险指数表征

Fig. 2 Drinking water source risk of area around Lake Taihu in Jiangsu Province

表1 江苏省太湖地区饮用水系统适应能力评价指标体系及权重  
Tab. 1 Adaptive capacity indicators system and its weights for drinking water system  
of areas around Lake Taihu in Jiangsu Province

总系统	子系统	适应能力指标	释义
饮用水系统 适应能力	水源地子系统 (0.28)	水源工程供水能力指数(0.035)	水源工程的运行状况
		水质状况指数(0.045)	快速城市化背景下水源地水环境质量
		饮用水源保护区指数(0.104)	水源地受保护的程度,即抵御侵占的能力
		来水量保证指数(0.030)	环境变化对水源地来水量的影响
		水源风险指数(0.066)	城市扩张等人类活动对水源地的压力
	供水子系统 (0.24)	综合生活缺水指数(0.032)	城市供水实际缺水程度
		供水方式指数(0.043)	城市供水的先进程度和安全性
		供水管网漏损指数(0.082)	管网老化程度和供水漏失程度
		供水管道长度指数(0.060)	管网设施的人均水平
		供水投资指数(0.023)	供水系统的财政能力
	用水子系统 (0.15)	人口密度指数(0.015)	城市化人口增长压力
		人均生活用水量指数(0.042)	居民的用水习惯和节水意识
		用水普及指数(0.023)	用水的覆盖度
		人均GDP指数(0.018)	获取科技和资源的能力
		单位GDP水耗指数(0.023)	经济发展对水资源的压力
	排污处理子系统 (0.22)	绿地覆盖指数(0.029)	城市化进程中绿色环境适应能力
		污水排放量指数(0.031)	污水排放量对该子系统施加的压力
		排水管道密度指数(0.021)	排水基础设施对废污水量增多的适应能力
		排水投资指数(0.038)	排污的财政支持能力
		污水处理指数(0.084)	污水处理设施对污水量的适应能力
	技术子系统 (0.11)	COD削减指数(0.030)	处理设施对生活废水的适应能力
		排污处理投资指数(0.016)	污水处理的财政能力
		重复利用指数(0.018)	再生利用设施对有限水的适应能力
		再生水利用量指数(0.026)	再生利用的实际量
		再生水生产能力指数(0.020)	再生利用设施的技术水平
		节水设施投资指数(0.025)	节水方面的财政能力
		恩格尔系数(0.010)	除基本生活消费外对技术等支出的潜在财政能力
		监测能力指数(0.011)	对环境变化事件等风险的应急适应能力

2.2.3 适应能力评估方法 适应能力的评价涉及大量相互关联、相互影响、相互制约的因素,各个因素具有不同的量纲、数量级、变化幅度,不具可比性,为了排除由于各项指标的单位不同以及其数量级间的悬殊差别所带来的影响,需对各指标数值进行无量纲化处理,便于后期计算比较。所涉及评价指标可以分成两类:一类是收益性指标,这类指标值越大说明适应能力越高,采用公式(1)进行处理;一类是成本类指标,这类指标越小适应能力越高,采用公式(2)进行处理,计算公式为:

$$X_{ij} = (x_{ij} - [\sum_{i=1}^m x_{ij}]/m) / |[\sum_{i=1}^m x_{ij}]/m| \quad (1)$$

$$X_{ij} = ([\sum_{i=1}^m x_{ij}]/m - x_{ij}) / |[\sum_{i=1}^m x_{ij}]/m| \quad (2)$$

为使变换后的指标数据能进行比较,又能真正反映指标数据原有的规律和特性,可以在各指标数据平均值的基础上引入中间变量,将不同量纲的数据统一在 $[-1, 1]$ 之间,然后再利用指数函数将其变换到 $[0, 1]$ 区间。

采用递阶多层次评价方法对饮用水系统的适应能力展开评估,第一步,对每个子系统的指数进行加权和,得到子系统的分指数( $AC_i$ ),计算公式为: $AC_i = \sum x_{ij}w_j$ ,式中, $AC_i$ 为子系统适应能力, $i$ 为水源地、供水

子系统、用水子系统、排污处理子系统和技术子系统; $x_{ij}$ 为各具体指标的标准化值, $w_j$ 为指数的权重值;第二步,将五个子系统的分指数进一步加权求和,得到整个系统的适应能力综合指数得分值,根据公式  $AC = \sum AC_i \times w_i$ ,式中, $AC$  为饮用水系统适应能力, $w_i$ 为各子系统的权重,各指标权重通过 AHP 方法计算得到(表 1);第三步,根据综合指数值域范围划分相应的等级及类型区,揭示其地域分异特点和存在问题;提供维护、提升与优化适应性的对策措施,为多部门饮用水综合管理与污染综合整治提供科学依据。

3 结果与分析

3.1 适应能力等级

根据上述研究方法,计算出江苏省环太湖地区 12 个市(县)饮用水系统的适应能力( $AC$ ),综合得分在 0.61~0.75 之间,将评价单元的  $AC$  值按降序排列,结合 28 个指标聚类分析的结果,将其分为高适应区、中等适应区和低适应区 3 个等级(表 2),分别占研究区总面积的 29.1%、41.2% 和 29.7%。在适应能力综合指数计算过程中,各分指数重要性排序依次为:水源地子系统>供水子系统>排污处理子系统>用水子系统>技术子系统。

根据以上计算结果和分类标准,获得江苏省太湖地区饮用水系统适应能力空间分布(图 3)。

表 2 江苏太湖地区饮用水系统适应能力分级统计  
Tab. 2 Statistics of adaptive capacity of drinking water system in region around Lake Taihu in Jiangsu Province

适应能力分级	高	中等	低
适应能力指数	>0.715	0.690~0.714	<0.689
面积/km <sup>2</sup>	5089	7203	5195
占全区面积百分比/%	29.1	41.2	29.7

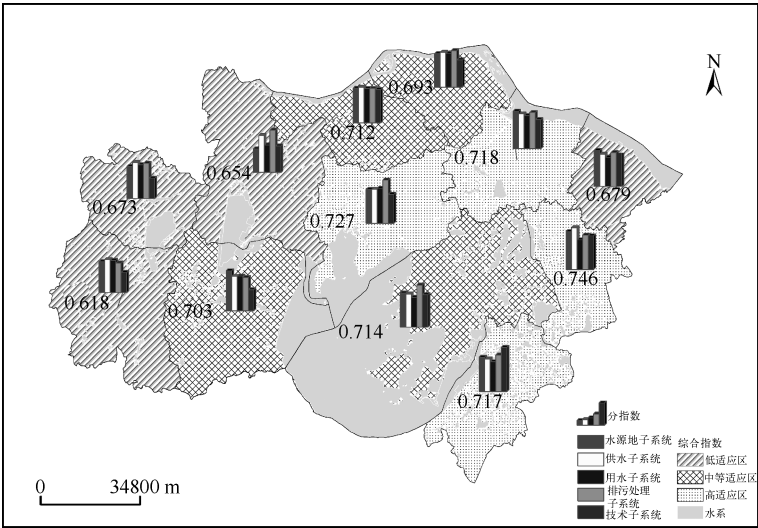


图 3 江苏省太湖地区饮用水系统适应能力空间分布

Fig.3 Adaptive capacity classification of drinking water system region around Lake Taihu in Jiangsu Province

3.2 适应能力的地域差异分析

饮用水系统高适应区,主要分布在无锡市区、常熟、昆山和吴江 4 市(县)(图 4a),面积占江苏环太湖地区的 29.1%,人口占 37.20%,GDP 占 36.32%。该等级区内,① 各子系统得分均比较高,特别是供水子系统、用水子系统和排污处理子系统对饮用水系统适应能力综合指数的贡献很大,对于维护现状适应能力起到很大作用,这与其经济发展水平高、供排基础设施建设完善以及相关部门对饮用水安全的高度重视有关。但同时也存在某些指数相对偏低的现象,多数地区的饮用水源地和技术子系统得分较低,这与两个方面的因素有关:一是太湖水质富营养化对太湖水源地有一定影响,二是长江下游岸线高强度开发对水源地水质有一定影响,应重点优化和提升这两个子系统的适应能力;② 昆山市的饮用水源地子系统和供水子系统得分均

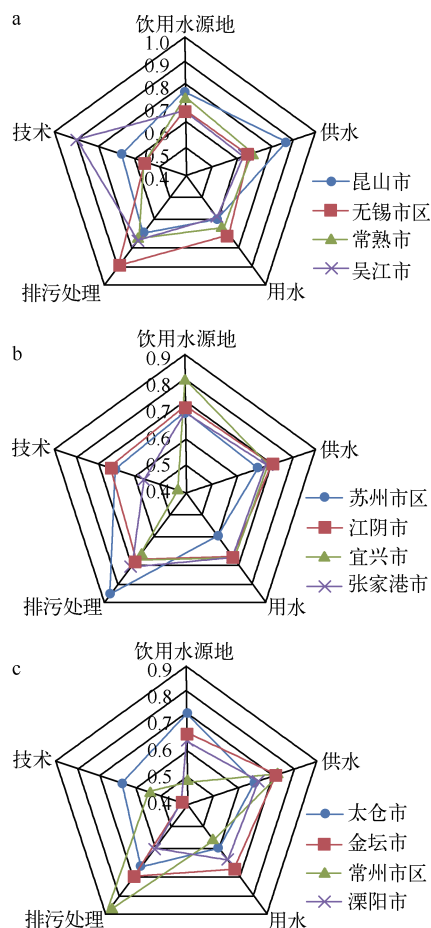


图4 饮用水系统各类型适应区  
子系统得分情况比较

Fig. 4 Score comparisons between zones  
of adaptive capacity

居首位,吴江市的技术子系统得分最高,无锡市的用水子系统和排污处理子系统得分最高;③ 无锡和吴江需要加大饮用水水源保护区的保护力度,特别是无锡水源保护区内仍存在污染源,无锡的澄西水源地位于长江,周边污染企业和码头相对集中,对水质产生很大威胁.无锡的沙渚和锡东水源地位于太湖,湖库型水源地的氮、磷超标,主要原因是太湖流域人口密集、经济发达,工业企业、鱼塘养殖业集聚,工业和污水排入湖中,使得水源地水质的氮、磷超标,航运和旅游业等开发活动对饮用水源地水质造成一定影响,所以无锡的饮用水源地水质仍需进一步提高;④ 该区除应加大饮用水源保护区外,还需重点保护森林公园和湿地,包括:惠山国家森林公园、长广溪重要湿地、肖甸湖森林公园以及元荡等重要湿地;⑤ 无锡市小湾里水源地作为应急备用水源,已停止取水;而昆山、吴江和常熟等地虽未设设备用水源地,但已实现联网供水.

饮用水系统中等适应区主要分布在江阴市、宜兴市、苏州市区和张家港市等(图4b),面积占江苏环太湖地区的41.2%,人口占38.04%,GDP占47.86%.① 该等级区内,各子系统得分相对均衡,略低于高值区,水源地、供水子系统和排污处理子系统对适应能力贡献大,而技术子系统有待进一步提升优化;② 苏州市区排污处理子系统得分最高,用水、供水和技术子系统得分的最高值均位于江阴市,宜兴市的饮用水源地子系统得分最高,同时技术子系统得分最低;③ 张家港市的三水厂水源地和新港桥水源地保护区内均有重点污染企业和码头,水质为Ⅲ类水,其他地区水质均为Ⅱ类,④ 该区内应重点保护:东太湖重要湿地、要塞森林公园、长江(江阴市和宜兴市)湿地、横山水源涵养区和长江段重要湿地;⑤ 无备用饮用水水源地,但已实现联网供水.

饮用水系统低适应区,主要分布在太仓、金坛、常州市区和溧阳(图4c),面积占江苏环太湖地区的29.7%,人口占24.76%,GDP占15.82%.① 该区各项得分在0.61~0.69之

间,无明显高值子系统,饮用水源地和技术子系统的适应能力亟待提升和优化;② 常州市区的供水和排污处理子系统得分最高,太仓市的饮用水源地子系统和技术子系统得分均位列首位,金坛市的用水子系统得分最高;③ 部分河流型饮用水源地受上游来水水质影响,航运和旅游业等其它开发活动也对饮用水源地水质造成一定影响,如常州河流型饮用水源地存在码头等环境污染隐患,应加大对西石桥等饮用水水源地的保护力度,魏村饮用水源地保护区需进一步严格保护区内环境准入条件,搬迁与整治重点污染源;金坛市从常州取水,水源工程供水能力不高,导致其饮用水源地子系统得分偏低;④ 重点保护的生态用地包括:西庐园森林公园、长江段重要湿地、溧湖重要湿地、太湖(武进区)重要湿地、天目湖湿地、长荡湖(溧阳)重要湿地和瓦屋山森林公园;⑤ 主要备用水源地为常州的溧湖备用水源地,该区内已基本实现联网供水.

### 3.3 保护与提升适应性水平的对策措施

根据以上对各等级区综合分析,可以看出,为确保饮用水源具有较强的适应能力,应针对不同子系统存在的问题,提出相应的维护、调整与提升的对策措施.

1) 水源地子系统:首先要加快水源地在线监测能力和备用水源地的建设,提倡水源地共建共享、联防联控,实现“前有预警、后有保障”;其次减少饮用水源地数量,集中力量有效保护集中供水水源地,同时明确划定水源保护区级别范围,加强水源保护区域的管制,禁止设置城市污水处理厂排污口、企业排污口、有污染

源的项目、垃圾填埋场、码头、有毒有害化学物品仓库及堆栈,严禁人工养殖、捕捞、游泳、停靠船只和一切可能污染水源保护区内水体的活动。

2) 供水子系统:增加对供水基础设施和新技术研发的投入,更新老化管网。集中在常州及其所辖市(县)等地区,具体表现在以下几方面:①升级改造现有自来水厂的技术,建立深度处理自来水厂,通过技术措施,加大处理力度,根据源水的水质状况采取调整运行、强化处理或者参数优化等常规工艺;②加强供水管网的改造和建设,把旧管网改成新管网,编制城市供水设施建设和改造的规划,从自来水处理的工艺和管网系统配置上,为饮用水安全提供基础;③加强提供供水监测能力的建设,强化全过程的政府监督和检测。

3) 排污处理子系统,加快城镇及开发区集中式污水处理厂及污水管网的建设,强化集中治污减排,加强对工业和生活污水的处理,提高区域中水利用,集中在无锡、宜兴、张家港等地区;加大入江河流的污染治理力度,提高入江河流的达标率,在控制环湖和沿江企业排污的基础上,从整体把握污染源,加大对沿岸地区生活污水排放的控制,并提高污水处理率和排放达标率。

4) 用水子系统和技术子系统,首先要优化开发区、城镇空间布局,调整产业结构和布局,节水与治污并举。实行清洁生产,加大节水处理技术设施的投入力度,推进产业生态化进程。推广污染治理新技术、加强重点污染源的节能减排工程、区域中水回用设施建设等措施,集中布置环湖和沿江石化、电力、纺织等污染性企业到规定的园区;其次要大力发展经济,缩减环太湖地区的经济差距,应寻求新的经济增长点,避免以环境为代价的发展模式。

5) 环境风险防范,将饮用水源地、供水、排污环境预警系统建设纳入突发性环境事件预警体系,予以统一规划,制定饮用水突发环境事件应急预案。重点建设水质在线自动监控、重点风险源数据库、突发事件专家决策支持和水环境恢复周期检测反映评估系统,为饮用水环境预警工作提供信息和基础支撑。

## 4 结论

通过对环太湖地区饮用水系统适应能力的评估,可以看出经济发达地区饮用水系统中各组分存在的问题,适应能力的水平、地域分异特点对水务、环保、市政、城建等部门协同整治区域集中式饮用水源地具有指导意义。

饮用水系统适应能力综合指数由饮用水源地、供水子系统、排污处理子系统、用水子系统和技术子系统的相关指标组成,依综合得分划分出3个适应能力类型区,形成两头小中间大的基本格局:按面积占比从高到低依次为中等适应区>低适应区>高适应区。无锡和苏州部分地区高适应面积较大,与其经济发展水平高,饮用水源保障投资强度较大,相关给排水基础设施建设完善,以及工艺技术支持能力强有关。中等适应区和低适应区需加大给排水和污水处理的投入,完善和提升适应能力。

## 5 参考文献

- [1] 符淙斌,董文杰,温刚等. 全球变化的区域响应和适应. 气象学报, 2003, 61(2): 245-250.
- [2] 朱党生. 中国城市饮用水安全保障方略. 北京: 科学出版社, 2008: 8-70.
- [3] International water association. Drinking water safety, 2010: 547-553.
- [4] 王硕,朱华平,柴志妮等. 国际饮用水安全评价. 食品研究与开发, 2009, 30(11): 182-185.
- [5] Haward G, Bartram J. The resilience of water supply and sanitation in the face of climate change—Technical report. WHO vision 2030.
- [6] 陈雯. 流域土地利用分区空间管制研究与初步实践——以太湖流域为例. 湖泊科学, 2012, 24(1): 1-8.
- [7] Review A. Climate change risks: An adaptation and mitigation agenda for Indian cities. Environment and Urbanization, 2008, 20(1): 207-229.
- [8] 崔胜辉,李旋旗,李扬等. 全球变化背景下的适应性研究综述. 地理科学进展, 2011, 30(9): 1088-1098.
- [9] 周晓铁,韩宁宁,孙世群等. 安徽省河流和湖库型饮用水水源地水质评价. 湖泊科学, 2010, 22(2): 176-180.
- [10] WHO. Water Safety Plans: Managing drinking-water quality from catchment to consumer, 2005.
- [11] Lvey JL, Smithers J, de Loë C. Community capacity for adaptation to climate-induced water shortages: linking institutional complexity and local actors. Environmental Management, 2004, 33(1): 36-47.



- [12] Poelmans L, Rompaey AV, Ntegeka V. The relative impact of climate change and urban expansion on peak flows-a case study in central Belgium. *Hydrological Process*, 2011, **25**(18): 2846-2858.
- [13] Wilson CO, Weng Q. Simulating the impacts of future land use and climate changes on surface water quality in the Des Plaines River watershed, Chicago Metropolitan Statistical Area, Illinois. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**(20): 4387-4405.
- [14] 朱党生, 张建永, 程红光等. 城市饮用水水源地安全评价. 水利学报, 2010, **41**(8): 914-920.
- [15] Holway J. Adaptive Water Quantity Management: Designing for sustainability and resiliency in water scarce regions. *The Water Environment of Cities*, 2010, (12): 235-258.
- [16] Water for life-water White Paper, Department for environment food and rural affairs, 2009, England.
- [17] Reza B, Sadiq R, Hewage K *et al.* Sustainability assessment of flooring systems in the city of Tehran: An AHP-based life cycle analysis. *Construction and Building Materials*, 2011, **25**(4): 2053-2066.
- [18] Cifdaloz O, Regmi A, Anderies JM *et al.* Robustness, vulnerability and adaptive capacity in small-scale social-ecological systems: The Pumps Irrigation System in Nepal. *Ecology and Society*, 2010, **15**(3): 39-68.
- [19] Vishnu PP, Mukand SB, Sangam S *et al.* A framework to assess adaptive capacity of the water resources system in Nepalese river basins. *Ecological Indicators*, 2011, **11**: 480-488.
- [20] 燕姝雯, 余 辉, 张璐璐等. 2009 年环太湖入出湖河流量及污染负荷通量. 湖泊科学, 2011, **23**(6): 855-862.