

表 1-1 巢湖流域主要岩性、岩类分布

主要地表岩性	主要岩类	分布范围	侵蚀特征
石英片岩、角闪片岩、片麻岩、角闪岩、浅料岩、大理岩、混合花岗岩、安山质岩、角砾岩、集块岩、花岗岩、石英正长岩	太古、元古界变质岩类、中生界火山碎屑岩、侵入岩类	大别山北麓低山及低山丘陵区	强烈水土流失
角闪斜长片麻岩、黑云片岩、石英角斑岩、斜长角闪岩、片麻岩、大理岩、砂岩、粉砂岩、灰质砾岩、砂质岩、安山质凝灰岩、角砾岩、集块岩	元古界变质岩类、中生界沉积碎屑岩类、火山碎屑岩类、侵入岩类	流域北部浮槎山区	以片状侵蚀为主的中度流失
石灰岩、白云岩、砂岩、页岩、砂质页岩、粉砂质泥岩、石英岩	古生界、中生界碳酸岩类、沉积碎屑岩类	流域东部团山、凤凰山及南部银屏山、耙耙山	以自然剥蚀为主的轻度流失
黏土、亚黏土、亚砂土	第四纪松散沉积物	主要沿湖周围,各河道两岸圩区冲刷平原	侵蚀现象不明显,基本无流失

4. 气象气候

巢湖流域属亚热带和暖温带过渡性的副热带季风气候区,气候温和湿润。年平均温度 $15^{\circ}\text{C}\sim 16^{\circ}\text{C}$, 1月平均气温 $2^{\circ}\text{C}\sim 3^{\circ}\text{C}$, 7月平均气温 $28^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ 。极端最高气温 39.2°C , 极端最低气温 -20.6°C 。无霜期 224~252天, 大于 10°C 的积温 $4900^{\circ}\text{C}\sim 5100^{\circ}\text{C}$ 。历年土壤最大冻结深度 9~11 cm。

流域主导风向, 夏季为东南风, 冬季为东北风, 历年最大风速 18 m/s, 多年平均风速 4.1 m/s, 年大风 (≥ 18 m/s) 出现日数为 20.8 天。多年平均湿度 77%, 最大湿度 81%, 出现在 3 月, 最小湿度 70%, 出现在 10 月。多年平均气压为 101.40 kPa, 最高 104.48 kPa。

多年平均降水量为 1100 mm, 流域各站最大年降水量均值为 1450 mm, 最小年均值为 630 mm, 倍比 2.3。降水在流域内空间分布不均, 西部降水量 947.0~1596.5 mm (最大年降水均量), 最高降水量 2248.8 mm。降水在时间分布上也不均匀, 3~5 月降水占年降水量的 28%, 6~8 月占年降水量的 39%, 9~11 月占年降水量的 21%, 12~2 月占年降水量的 11%。尤其是每年 6~7 月份由于副热带太平洋高压与北方冷空气交锋而形成的梅雨季节, 雨量集中, 局部地区 5~9 月降水量占全年降水量的 65%, 从而形成了较大的地面径流, 洪涝时有发生, 也导致

227.74亿元。

2. 工业

巢湖流域工业以机械、电子、化工、冶金、纺织、食品加工和建材工业为主,2005年巢湖流域实现工业总产值677.3亿元,其中合肥市区占75%。

3. 第三产业

2005年巢湖流域第三产业国内生产总值537.35亿元,占国内生产总值的46.25%,占全省的9.97%。社会消费品零售总额378.62亿元,占全省的21.45%。全年外贸进出口总额达43.25亿美元,占全省的47.43%,其中出口总额29.17亿美元,进口总额14.08亿美元。

流域旅游资源十分丰富,除了久负盛名的山川名胜之外,还有众多的人文景观,以巢湖为中心的主要旅游景点有巢湖、忠庙、姥山、半汤温泉等。近几年来,旅游业继续快速增长,2005年全年旅游总收入60.34亿元。

表 1-2 巢湖流域社会经济发展概况(2005年)

类别	合肥	肥东	肥西	居巢	庐江	含山	无为	和县	舒城	流域
国内生产总值(亿元)	674.16	71.76	69.02	99.13	48.91	29.61	85.78	38.44	44.93	1161.74
人均GDP(元/人)	38454	6736	7119	11509	4131	6699	6149	5907	4533	12475
地方财政收入(万元)	397670	30449	32510	30238	13615	10287	25222	12324	15754	568069
经济密度(万元/km ²)	667.23	13.77	14.13	14.89	5.80	9.84	10.37	8.01	7.50	34.22
年末总人口(万人)	175.31	106.35	97.04	86.13	118.21	44.24	139.50	64.97	99.13	930.90
人口密度(人/km ²)	2941	481	422	424	504	423	573	422	472	561
教育投入占GDP百分比	7.79	3.29	2.32	1.09	3.40	1.94	2.09	1.88	3.41	2.99
农民人均纯收入(元)	5183	3134	3172	3003	2724	3134	2814	3252	2304	3029

农药使用量大,利用率低,大量未吸收降解的化肥、农药随地面径流进入巢湖,成为巢湖水质总磷、总氮超标的重要原因之一。二是由于沿岸缺乏防风防浪林和水保工程防护林,属严重崩塌和轻微岸塌的土岸长 66 km,年崩塌入湖土方 $3.4 \times 10^5 \text{ m}^3$,约 $5.7 \times 10^5 \text{ t}$,损失农田 16 km^2 ,造成湖体淤积。沿岸植物因控制水位提高而减少,加剧了风浪淘蚀作用,破坏了湖泊景观与植被缓冲带,巢湖湿地生态系统退化,生物多样性减少,加速了湖泊衰老。

水体交换不畅。历史上的巢湖为天然吞吐型湖泊,每年与长江水体交换量为 $1.36 \times 10^9 \text{ m}^3$ 左右。自 1962 年巢湖、裕溪两大控制闸相继建成后,虽然发挥了巨大的防洪调控功能,但也使得巢湖与长江每年水体交换量减少了 $1.2 \times 10^9 \text{ m}^3$ 左右,水体自净能力急剧下降。同时由于水利、航运和城乡生产生活用水的需要,枯水季节也必须保持一定的水位,使得大量的滩涂被淹没,导致挺水植物和高等水生生物减少,一方面使氮、磷不能有效带出,另一方面又造成藻类得以大量繁衍。

3. 生态灾害

巢湖流域四周山高坡陡,地形起伏较大。从 20 世纪 50 年代后期开始,由于缺乏科学管理,人们滥垦乱伐,使得流域上游植被破坏,地表面状侵蚀严重,尤其是杭埠河流域,大部分坡耕地上耕作层迅速粗化瘠薄,使得土壤沙化,土地肥力下降,入湖泥沙量增多,湖盆淤积严重。据资料统计,全流域水土流失面积达 959 km^2 ,占山区总面积的 63.6%。据中科院南京地理所根据不同流失区的土壤侵蚀模数推算,年平均侵蚀模数为 1098 t/km^2 。大量泥沙入湖,增加了湖泊氮、磷营养负荷。严重的水土流失还使得流域水源涵养功能减弱,滞水保土能力下降,造成洪涝灾害频繁发生。近二十年来,水灾成灾率为 17.4%,旱灾成灾率为 8.2%。防御灾害能力越来越小,毁田压地现象日益严重,使得山塘报废、河道堵塞,影响航运和防洪、泄洪能力。从 1951~1983 年的 33 年中,平均每年入湖泥沙量约 $2.6 \times 10^6 \text{ t}$,除通过巢湖闸摆出 $6.0 \times 10^5 \text{ t}$ 外,其余约 $2.0 \times 10^6 \text{ t}$ 全部淤积于湖盆内,全湖平均每年淤高 1.9 mm。湖盆淤积变浅,使得湖面扩大,湖盆形态变异,水位升高,对湖岸构成威胁。湖盆淤积使得水体自净能力减弱,水质恶化,破坏了鱼类饵料场和产卵场的生态条件,降低了渔业产量。

4. 人地关系

巢湖流域是安徽省经济最发达、人口最稠密的地区之一。流域人口多而土地总面积有限,人均耕地面积少,人口与土地资源的矛盾尖锐。因此,被迫强化滥用土地资源,提高复种指数,毁林开荒,以及大量施用化肥农药,满足人口迅速增长对粮食和经济发展的需求,出现了上山毁林开荒以及下水围湖造田,使农业资源未得到合理利用,降低了农业生产力,造成大范围高强度的生态破坏和城乡环境质量恶化。人地矛盾造成农林矛盾,且矛盾的敏感区大都出现在水土流失严重、经济基础薄弱、生产条件差的地区,有的已形成恶性循环。

1.2.2 巢湖流域环境经济问题

1. 巢湖流域环境经济的研究基础

对巢湖流域环境经济的基础研究始于 20 世纪 60 年代初中科院南京地理所等

定的研究,但仍有如下重要问题亟待解决:

① 以往的研究途径和污染治理主要侧重于巢湖水体本身和点源污染,而对湖泊与流域相结合、污染防治与生态保护并重的整体性研究较少。

② 以往的研究侧重于生活污水和工业污染等点源污染,对非点源污染源控制的针对性不强,而巢湖流域非点源污染占污染总负荷的70%(单平等,2003)。

③ 以往的研究侧重于环境系统本身的分析,缺少环境经济系统的综合分析,尤其缺少定量分析评价方面的内容。

参考文献

- [1] 安徽省环境保护科学研究所. 巢湖水域环境生态环境评价及对策研究[R]. 1986.
- [2] 安徽省环境保护科学研究所. 巢湖流域生态环境现状调查报告[R]. 2003.
- [3] 陈斌. 巢湖流域水土流失现状、成因和综合治理对策[J]. 华东森林经理, 2000, 14(4): 1-3.
- [4] 单平, 殷福才. 巢湖水污染防治回顾评价及对策研究[J]. 安徽师范大学学报, 2003, 26(3): 289-293.
- [5] 董如增, 赵定涛, 尹志杰. 巢湖流域环境—经济协调发展实施战略[J]. 预测, 2002, 21(6): 73-77, 72.
- [6] 何开丽. 巢湖富营养化现状与治理对策[J]. 环境保护, 2002, (4): 22-24.
- [7] 金相灿. 中国湖泊环境[M]. 北京: 海洋出版社, 1995.
- [8] 李如忠, 洪天求. 巢湖流域农业非点源污染控制对策研究[J]. 合肥工业大学学报(社会科学版), 2006, 20(1): 105-110.
- [9] 孙贤斌. 巢湖生态环境污染与防治对策[J]. 国土与自然资源研究, 2001(3): 50-52.
- [10] 屠清瑛, 顾丁锡, 尹澄清等. 巢湖富营养化研究[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1990.
- [11] 王晓辉. 巢湖流域非点源 N、P 污染排放负荷估算及控制研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006.
- [12] 王晓铃, 巩吉力. 巢湖流域生态保护与建设初步研究[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2000, 23(3): 273-275.
- [13] 吴开亚. 巢湖流域农业循环经济发展的综合评价[J]. 中国人口, 资源与环境, 2008, 18(1): 94-98.
- [14] 阎伍玖, 吴防修, 汪国良. 巢湖区域主要环境问题及其整治对策的初步研究[J]. 长江流域资源与环境, 1994, 3(4): 358-364.
- [15] 殷福才, 张之源. 巢湖富营养化研究进展[J]. 湖泊科学, 2003, 15(4): 377-384.
- [16] 张文林. 巢湖流域水环境问题与可持续发展战略[J]. 水利科技与经济, 2005, 11(9): 516-518.
- [17] 赵定涛, 魏玖长, 洪进等. 巢湖流域环保政策的变迁分析[J]. 环境保护, 2005, (5): 23-26.

表 2-2 2005 年巢湖流域降水量及径流深

(单位:mm)

类别	合肥	肥东	肥西	居巢	无为	庐江	含山	和县	舒城
降水量	1 086.6	1 115.4	1 028.2	1 158.4	1 169.1	1 178.7	1 181.8	1 138.6	1 778.1
径流深	415.9	321.1	310.1	435.8	417.6	468.1	469.9	407.3	769.1

我国的淡水湖泊中,巢湖污染较重,有 6 项指标超标,主要污染物为总氮、总磷、高锰酸钾指数和溶解氧,平均超标 2~8 倍。巢湖流域生态保护“九五”行动计划的资料显示:1995 年巢湖的总氮、总磷年平均浓度分别为 4.62 mg/L 和 0.47 mg/L,超标 3.08 倍和 8.34 倍;1997 年,总氮、总磷年平均浓度分别为 4.14 mg/L 和 0.31 mg/L,超标 2.76 倍和 5.2 倍,劣于 V 类水标准。氮、磷是浮游藻类生长的物质基础,由于巢湖水体中氮、磷含量过高,加速了湖泊营养化过程,已使西半湖严重富营养化,失去饮用水水源地功能;其支流也均不能达到相应的功能区水域标准,流经合肥市的南淝河和十五里河水质为 V 类。巢湖流域作为我国重点控制的水污染区域,也从一个侧面反映了水环境问题面临的严峻形势。

(2) 土地资源紧张,土地退化严重

巢湖流域是安徽省经济最发达、人口最稠密的地区之一,土地总面积有限,其中耕地面积占 42.5%,林业用地占 12.6%,水域面积占 18.0%。由于人口密度高,人均耕地面积少,人口与土地资源的矛盾尖锐,被迫强化滥用土地资源、提高复种指数、大量施用化肥和农药,以满足人口迅速增长对粮食和经济发展的需求,出现为解决农业人口生存而进行的上山毁林开荒,下水围湖造田,使农业资源未得到合理利用,降低了农业生产力,造成较大范围的、高强度的生态破坏和城乡环境质量恶化。人地矛盾引发林粮矛盾,且矛盾的敏感区大都出现在水土流失严重、经济基础薄弱和生产条件差的地区,局部已形成严重的恶性循环(陈斌,2000)。

目前,巢湖流域水土流失面积达 959 km²,占山区总面积的 63.6%;中科院南京地理所根据不同流失区的土壤侵蚀模数推算,年侵蚀模数平均为 1 098 t/km²(表 2-3)。水土流失携带了土壤中农作物所需的大量营养物质,导致土壤肥力降低,生产力下降。营养物质进入水体后,增加了湖泊氮、磷营养负荷,严重污染巢湖水质,导致每年冲刷入湖的悬移质泥沙达 1.0×10⁶ t 之多,其中携带的氮约有 600 t,磷约有 10 t。水土流失导致的湖岸崩塌,年损失农田超过 16 hm²。

(3) 自然生态系统受损

巢湖流域地处江淮丘陵地带,气候温和、降水充沛,适宜多种植被生长。森林植被属于北亚热带落叶阔叶林和常绿阔叶混交林,以杉、松、杂木为主。但由于流域开发历史悠久,且以发展农业为主,天然林和次生天然林绝大多数已不复存在,取而代之的是人工林和次生亚热带灌丛及草类。除巢湖水体周围营造的防护林、水土保持林及零星散布的经济林、农田防护林外,森林资源主要集中分布在国营和乡村林场,空间上较分散。人工林受市场和人为干扰较大,在时序上易发生生态过程中断,森林植被的群落构成和食物链均不具备典型的完整性。由于流域过去

量多年来一直呈上升趋势(表 2-4)。

表 2-4 巢湖流域化肥和农药施用量 (单位: 10^3kg)

年份	N	P	K	复合肥	农药
1995	70 560	19 822	18 256	45 575	4 753
1996	78 028	22 748	17 997	52 423	5 039
1997	82 275	22 673	19 440	55 186	6 211
1998	155 923	40 971	23 622	69 302	7 153
1999	116 060	52 231	24 123	71 056	7 315

(2) 森林覆盖率低

森林在蓄水保土、保护水利设施以及防灾减灾等方面的作用,是其他任何措施都不能代替的,森林表土因地表径流引起的侵蚀深度只有 0.05 mm 左右,而无林地则为 5.0 mm,相差达 100 倍;有林地每年每公顷的泥沙流失量为 0.05 t,而无林地则为 2.22 t,相差 44 倍。巢湖流域森林覆盖率仅有 15%,低于全省 25.6% 的平均水平,林分质量差,郁闭度小,导致大面积的水土流失。在农业收获季节,流域内绝大部分地区处于裸露状态,降水直接冲刷地面,造成大量水土流失。特别是山区和丘陵地区的大量泥沙,通过大小河流源源不断地挟裹入湖,造成湖底上升,湖容锐减,使巢湖逐渐失去了应有的蓄洪防洪及自然净化能力。

(3) 治水措施不当

20 世纪 50 年代以来,国家花费了大量的人力和物力治理巢湖,但效果却不尽如意。从以往的工程治水措施来看,造成这种状况的原因包括两方面:一是未能同生物治水措施有机结合起来,工程措施不能发挥其应有的防护效果,甚至有些工程措施很快就丧失了防护功能。国家曾对巢湖流域的主要河流进行过多次拓宽挖深,裁弯取直,堤岸加高培厚,但因无生物措施作保障,总体效果不佳。如 1965 年交通部门对杭埠河入湖口进行疏浚,长度 3 720 m,底宽 30 m,挖土 $9.4 \times 10^4 \text{ m}^3$,工程结束不到一年又被泥沙淤积成原状;1977~1978 年,水利部门治理杭埠河并改变了入湖口,不到一年又被泥沙淤塞断航。二是水利措施违背了生态学原理,湖水中营养物质浓度高低与湖水水文动态和水量交换周期的关系甚为密切。1962 年巢湖建闸后,受闸堤控制,湖泊呈半封闭状态。建闸前长江入湖水量多年平均为 $1.36 \times 10^9 \text{ m}^3$,而建闸后长江倒灌入湖水量多年平均为 $1.6 \times 10^8 \text{ m}^3$,湖水换水周期增加,为氮磷营养物质的累积提供了有利条件。同时,由于湖闸控制,冬春水位较高,露滩面积减小,湖岸大型水生生物难以萌发生长,生态系统内部失去了与藻类争夺营养物质的竞争者,湖内藻类繁茂生长,加剧了湖泊富营养化的发展。

(4) 土地利用不合理

单一土地利用类型占主导的土地利用结构包括 3 类,即以林地为主、以耕地为

识别准则识别和排序,这样传统的评价方法如模糊综合评判、灰色聚类分析、物元分析等应用于生态安全评价中,其结果的合理性和科学性就值得探讨(吴开亚等,2004b)。属性识别模型是建立在属性空间基础上,以最小代价原则、最大测度准则、置信度准则和评分准则为基础的新型综合评价方法,能对事物进行有效识别和比较分析,较好地克服了其他识别方法如模糊识别理论的某些不足(程乾生,1997a),已在大气环境及水土资源系统的预测、评价、决策等问题中得到了成功应用(甄苓等,2000;门宝辉等,2002;郭奇等,2004)。但总体来看,这些研究的评价系统较为简单,评价指标过少,而在更为复杂的生态安全评价方面采用属性识别模型的研究较为少见。为此,在确定巢湖流域生态安全评价指标评价标准的基础上,采用层次分析法(AHP)确定各指标的权重,建立了生态安全评价的属性识别模型,对巢湖流域 9 市(县)及流域整体的生态安全状况进行综合评价和分析,研究结果较全面地反映巢湖流域生态安全的状态、程度和水平,为政府有关部门制定可持续发展战略和生态安全管理提供科学的参考依据,同时也将丰富流域生态安全评价的理论和方法。

1. 生态安全评价的属性识别模型

(1) 样本属性综合测度值的计算

设研究对象空间 X 中有 n 个样本 x_1, x_2, \dots, x_n , 各样本的 m 个评价指标为 I_1, I_2, \dots, I_m , 第 i 个样本 x_i 的第 j 个指标 I_j 的评价值为 x_{ij} , 因此, 第 i 个样本 x_i 可以表示为一个向量 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})$, $1 \leq i \leq n$ 。设 F 为 X 中元素的某类属性空间, (C_1, C_2, \dots, C_K) 为属性空间 F 的分割, 这里将 F (生态安全等级) 分为 5 级, 且彼此不相交, 满足 $(C_1 > C_2 > \dots > C_K)$, (C_1, C_2, \dots, C_K) 是属性空间 F 的有序分割(程乾生, 1997a)。根据已知的各指标等级分类标准, 写成分类标准判断矩阵为:

$$\begin{array}{c}
 C_1 \quad C_2 \quad \dots \quad C_K \\
 \begin{array}{l} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_m \end{array} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1K} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2K} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mK} \end{bmatrix}
 \end{array}$$

其中, α_{jk} 表示评价样本第 j 个属性第 k 个评价等级的值, 且满足 $\alpha_{j1} < \alpha_{j2} < \dots < \alpha_{jK}$ 或 $\alpha_{j1} > \alpha_{j2} > \dots > \alpha_{jK}$ 。

利用属性识别模型进行综合评价的关键是计算每个样本的属性测度, 也就是求 x_{ij} 具有属性 C_k 的程度 $\mu_{ijk} = \mu(x_{ij} \in C_k)$ 。为方便不妨假定 $\alpha_{j1} < \alpha_{j2} < \dots < \alpha_{jK}$, 定义单样本线性属性函数如图 2-1 所示(郭奇等, 2004)。

统响应 A_3 包含 $B_{23} \sim B_{29}$ 等 7 个指标, 表征政府与公众对生态环境问题所采取的对策与措施(吴开亚等, 2007)。

图 2-2 巢湖流域生态安全评价指标体系

评价标准设定的合理与否将直接影响评价结果的准确性。根据国际通用分类标准(如人均水资源量、第三产业比例、人均耕地等指标)、科学效应分析(如反映农业污染的指标)、生态建设标准(如水土流失面积、受保护土地占土地总面积比例等指标)、类似发达地区的水平(如经济密度、农民人均纯收入等指标), 将巢湖流域生态安全状况划分为 5 个等级: I 级为很不安全(恶劣)、II 级为较不安全(较差)、III 级为安全(一般)、IV 级为较安全(良好)、V 级为很安全(理想), 各安全等级的划分标准见表 2-6。

续表 2-6

序号	指标	生态安全等级				
		I	II	III	IV	V
16	水环境质量	[0%,50%]	[50%,70%]	[70%,80%]	[80%,90%]	[90%,100%]
17	秸秆综合利用率	[0%,60%]	[60%,70%]	[70%,80%]	[80%,90%]	[90%,100%]
18	粪便集中处理率	[0%,60%]	[60%,70%]	[70%,85%]	[85%,95%]	[95%,100%]
19	文盲和半文盲 人数比	[2%,5%]	[1%,2%]	[0.5%,1%]	[0.1%,0.5%]	[0%,0.1%]
20	城镇密度 (个/10 ² km ²)	[12,25]	[6,12]	[3,6]	[1,3]	[0,1]
21	农民人均纯 收入(元)	[0,2 000]	[2 000,3 000]	[3 000,4 000]	[4 000,5 000]	[5 000,8 000]
22	经济密度 (万元/km ²)	[0,100]	[100,300]	[300,400]	[400,600]	[600,1 000]
23	受保护土地占 国土面积比例	[0%,6%]	[6%,9%]	[9%,12%]	[12%,15%]	[15%,20%]
24	沼气普及率	[0%,5%]	[5%,15%]	[15%,20%]	[20%,30%]	[30%,50%]
25	科技教育投入 占 GDP 比例	[0%,1%]	[1%,3%]	[3%,4%]	[4%,6%]	[6%,10%]
26	农村发展 综合指数	[0%,60%]	[60%,80%]	[80%,85%]	[85%,95%]	[95%,100%]
27	人均固定资产 投资(元)	[0,2 000]	[2 000,4 000]	[4 000,6 000]	[6 000,8 000]	[8 000,10 000]
28	第三产业比例	[0%,20%]	[20%,30%]	[30%,50%]	[50%,64%]	[64%,80%]
29	人均 GDP (元/人)	[0,5 000]	[5 000,8 000]	[8 000,10 000]	[10 000,16 000]	[16 000,24 000]

(2) AHP 法确定指标权重

生态安全评价指标权重的确定可采用主观赋权、客观赋权及组合赋权等,这些方法各有优点和局限性。AHP 法是一种定性和定量相结合的、系统化、层次化的分析方法,特别适用于难以完全用定量进行分析的复杂问题(姜启源,1999)。

1) 构造比较判断矩阵。这是采用 AHP 法确定权重的数据基础,共采用 5 份专家调查问卷,使用两两比较法确定各指标之间的相对重要性,按 1~9 尺度量化,

续表 2-9

评价指标	合肥	肥东	肥西	居巢	庐江	含山	无为	和县	舒城	流域	权重
B_6 (kg/hm ²)	5.4	5.5	12.0	20.0	18.8	20.9	19.8	20.1	14.0	14.8	0.0175
B_7 (kg/hm ²)	0.5429	0.0478	0.2333	1.4908	0.4973	3.4786	0.0761	2.4118	1.1486	0.7854	0.0447
B_8 (人/km ²)	2654.8	481.8	417.2	384.7	504.6	419.0	561.2	457.7	467.9	534.9	0.0566
B_9	74.13%	74.01%	70.74%	58.04%	78.25%	84.95%	79.97%	70.00%	83.99%	75.54%	0.0093
B_{10} (元/人)	1670.8	157.5	169.7	120.9	157.6	217.2	143.8	177.5	208.8	397.4	0.0531
B_{11} [t/(km ² ·a)]	101.28	101.25	124.62	247.39	185.52	200.95	157.76	157.18	362.23	192.89	0.0094
B_{12}	11.8%	13.8%	11.3%	14.9%	20.9%	27.0%	18.1%	22.7%	43.8%	17.97%	0.0189
B_{13} (m ³ /万元)	146.3	125.3	392.9	181.8	526.0	276.4	477.6	160.6	150.0	201.4	0.0098
B_{14} (m ³ /万元)	4342	4472.3	8186.9	1005.8	1353.7	2534.2	1512.8	609.1	6900.0	2935.4	0.0270
B_{15} [L/(人·d)]	244.0	61.7	77.7	164.6	130.4	232.7	145.5	180.0	61.6	130.0	0.0122
B_{16}	69.22%	96.76%	23.08%	78.02%	91.19%	82.79%	74.87%	82.42%	69.13%	81.92%	0.0217
B_{17}	30.0%	70.0%	45.0%	20.0%	68.0%	22.0%	20.0%	28.0%	50.0%	45.2%	0.0138
B_{18}	70.0%	60.0%	70.0%	80.0%	83.9%	75.0%	72.6%	76.6%	77.0%	72.6%	0.0032
B_{19}	2.24%	6.27%	5.46%	5.88%	3.93%	8.34%	5.12%	2.92%	6.30%	5.36%	0.0115
B_{20} (个/10 ² km ²)	9	13	12	16	16	9	23	8	17	14	0.0126
B_{21} (元)	3877	2024	2004	2271	1984	2176	1960	2177	1683	2239	0.0126
B_{22} (万元/km ²)	5182.4	133.6	88.7	247.1	116.5	170.6	178.3	144.5	123.7	305.9	0.1016
B_{23}	1.24%	0.76%	0.02%	0.0024%	0.024%	0.027%	0.004%	0.03%	0.045%	0.016%	0.1082
B_{24}	0.20%	5.10%	2.20%	0.24%	0.10%	0.70%	0.50%	0.25%	2.70%	0.63%	0.0528
B_{25}	1.13%	4.06%	4.00%	1.17%	3.40%	1.80%	2.20%	1.89%	4.14%	1.86%	0.0818
B_{26}	75.77%	51.47%	52.31%	57.80%	55.20%	56.79%	70.39%	57.35%	52.35%	57.98%	0.0276
B_{27} (元)	8980.4	645.9	625.4	1057.8	677.8	1406.1	1178.8	1286.7	811.9	2160.8	0.0654
B_{28}	41.41%	35.46%	28.65%	36.70%	27.96%	29.30%	31.88%	30.27%	30.70%	37.11%	0.0275
B_{29} (元/人)	19520.92	773.3	2126.9	6425.1	2309.3	4072.5	3178.5	3157.5	2645.9	5719.5	0.0986

(3) 评价结果分析

根据所建立的生态安全评价属性识别模型步骤,对巢湖流域9市(县)以及流域整体共10个评价单元(样本)的生态安全状况进行综合评价,各样本生态安全指标

安徽省的省会,经济较发达,社会发展较完善,环境保护意识强,环保投入也较大,生态安全状况良好,评级结果为较安全。而巢湖流域其他8个县以农业为主要产业,水土流失严重,经济实力和环保意识相对较弱,生态环境保护投入力度不够,生态安全处于较不安全等级(肥西处于很不安全等级)。尽管合肥的生态安全状况较好,但绝大部分地区的生态安全状况较差,就全流域整体而言,仍处于较不安全等级。该评价结果可以识别巢湖流域生态安全状况,为促进巢湖流域资源—社会—经济的协调发展提供了科学的决策依据。

生态安全评价方法选择和数学模型建立是生态安全状况定量化的一个难点,采用AHP赋权方法与属性识别模型相耦合的途径,来建立有效的流域生态安全评价模型,这在一定程度上丰富和发展了生态安全评价方法。基于属性识别模型的流域生态安全评价方法涵义明确、计算过程简单,能同时实现生态安全等级的分类和排序,克服了模糊综合评价等方法在样本对各级评价标准的从属度数值相差不大时可能无法做出正确判别的问题,提高了评价结果的分辨率,在具有评价标准的其他生态系统综合评价问题中具有一定的应用价值。当然,属性识别模型与AHP赋权方法相耦合的途径,在生态安全评价领域的应用尚属尝试,该模型与其他赋权方法耦合的适用性问题还有待进一步探讨。

2.1.3 巢湖流域生态安全对策

巢湖流域生态安全态势已引起当地政府和有关部门的高度重视,在实现流域整体管理和协调发展的基础上,必须采取有效可行的措施,促进生态安全态势向良性循环转变。

1. 大力植树造林

巢湖流域水土流失严重的主要原因在于长期盲目的毁林开荒,加之巢湖处于红壤区,土壤易受侵蚀。根据流域地势差异,因地制宜,在上游地区及其他水源涵养林区,实行封山育林和退耕还林。动员民众行动起来,在全流域大范围种草植树,扩大植被面积,建立健全的林草生态系统,形成区域系统的良性循环(孙贤斌,2001),有效防止水土流失,减缓湖体淤积速度。

2. 减轻农用化学物质污染

近年来,巢湖流域化肥和农药施用量呈现逐年增长的趋势,必须采用各种措施,减缓农用化学物质的污染。积极推广生态农业,实行秸秆还田,减轻化肥施用量;推广生物防治技术,防止大量农药施用带来的污染;改良土壤结构,增施有机肥料,提高土壤环境容量。这些措施已在一些地区获得一定成效,应加大力度在全流域范围内广泛推广使用。

3. 转变经济增长方式

产业结构和经济增长方式是影响生态环境的重要因素,也是实现可持续发展的关键。要充分发挥合肥市的科技中心作用,带动巢湖市及周边城镇大力发展精深加工、科技含量大和附加值高的产业,使产业结构由资源型向质量效益型转变,改善巢湖水域生态环境。根据巢湖独特的湖光山色旅游资源,积极发展旅游业,带

加大环保执法力度,对危害生态安全的行为予以严厉制裁,才能遏制在生态保护方面的违法行为,有效地实现巢湖流域生态保护目标,更好地保护水体生态环境。

11. 完善生态安全资金保证系统

完善生态安全资金保证系统,防止因资金投入不足而影响生态安全建设的实施。可通过以下几个渠道获得资金保证:一是利用国家投资,保证专款专用;二是积极筹措资金,争取专项贷款,如目前已实施的巢湖污染治理项目很多是由亚洲开发银行资助;三是遵循谁污染谁治理的原则,征收排污费,将排污企业收费罚款用于污染治理;四是鼓励地方企业开展生态工程建设,按照谁投资谁受益的原则,鼓励企业、个人和外商投资建设。另外,还要加强资金管理,确定治理各种污染的合理投资比例。

12. 构建生态安全预警系统

构建流域生态安全信息数据库与智能决策系统,及时快捷地发现警情、确定警源、判断警度,并及时采取相应的措施。建立生态安全预警示范区,以生态经济学原理为指导,协调经济、社会和环境建设,在区域生态良性循环的基础上,实现经济社会可持续发展。20世纪80年代,瑞典就开始建立生态安全预警机制并从行业和区域两方面运作,推出“生态循环城”模式。借鉴瑞典经验,可在庐江建立以生态农业型的生态安全预警示范区,在巢湖建立生态旅游型的生态安全预警示范区,在合肥建立城市化的生态安全预警示范区,在巢湖湖区建立生态恢复型的生态安全预警示范区。

13. 制定流域生态规划

流域生态规划的制定是实现人与自然和谐发展的重要环节。巢湖目前缺乏强有力的统一协调的流域生态管理机构,在这种情况下,流域生态规划的制定和执行可作为在短期内改善流域生态安全态势的重要措施。建议由省级主管部门协调流域各行政单位制定流域整体的生态规划,作为流域生态安全“软”调控的重要组成部分。

2.2 巢湖流域水安全分析

2.2.1 巢湖流域水安全问题

20世纪60年代初修建的巢湖闸,将巢湖从一个大型的天然湖泊变为人工调节的半封闭水体。20世纪90年代,整个湖区生态环境功能严重退化,甚至出现全湖水水质超V类的严重情况,氮、磷浓度高达 2.94 mg/L 和 0.264 mg/L (李如忠等,2004;张之源等,1999)。加之流域社会经济快速发展导致的污水大量排放、化肥农药过量使用、水土流失和湖体淤积加快,使得整个流域呈现出水资源短缺、水环境恶化、水灾害频发等一系列的水安全问题,严重威胁着巢湖流域社会、经济和生态环境的可持续发展。

洪涝灾害、天然降水量过少引发的干旱灾害。水旱灾害主要表现在农业减产导致贫困和饥荒,工矿业资产受损或停产导致城市经济衰退等方面(谢永刚,2003),造成的破坏和经济损失相当严重。巢湖流域内纵横交错有 33 条大小河流,由于历史等客观原因,流域周边县、市大多依水而建。长期以来,巢湖流域以其丰富的自然资源孕育着周边的城市,促进着周边城市的发展和繁荣。但由于流域降水不均,水土流失严重,形成了“上月防洪,下月抗旱”、“丘陵高岗地抗旱,圩田防洪”等水灾害特点,干旱和洪涝灾害时有发生,对沿岸居民生活和城市的稳定发展带来了不可估量的损失和威胁。2003 年流域洪水受灾面积率、洪水人口受灾率和洪涝损失占 GDP 比例分别为 17.93%、27.27%和 3.02%,流域干旱受灾面积率、干旱人口受灾率和干旱损失占 GDP 比例分别为 7.83%、13.83%和 0.56%,处于较不安全状态。

2. 水安全成因分析

水安全系统是由自然、社会、经济和环境组成的复合系统,水系统与其载体相互联系、相互作用构成了具有一定结构和功能的,以人为主体、水安全为目标的开放复杂的动态巨系统(陈绍金,2005)。水安全的系统性决定了其影响因子众多和表现形式多样。这里主要从影响水安全的自然因素和人为因素出发,分析巢湖流域水资源短缺、水环境恶化和水灾害发生等水安全问题的成因。

(1) 流域降水量时空分布不均,易引起水资源短缺和水灾害

巢湖流域属亚热带和暖温带过渡性的副热带季风气候区,流域降水量受季风影响明显,季节分配很不均匀(安徽省水利厅,1999),多年平均降水量为 1 100 mm,夏季多暴雨,一日最大雨量超过 100 mm,如 1969 年庐江县境内出现了 449.91 mm 雨量。流域降水量时空分布不均明显,呈现出自北向南的递增趋势、年际变化大的特征(表 2-11)。对于以雨水补给为主的巢湖流域来说,流域降水量的时空分布不均必然会导致流域水资源呈现时空不均衡,影响了水资源的供需平衡。表 2-12 是 2005 年流域各市县水资源状况,水资源量以舒城县最高,达 $1.64 \times 10^9 \text{ m}^3$,其次为肥西与和县,含山最低;人均占有水资源量为 $960.01 \text{ m}^3/\text{人}$,低于同期全省人均水资源量($1\,103.82 \text{ m}^3/\text{人}$),低于国际公认的人均 $1\,700 \text{ m}^3$ 缺水警戒线。可见,巢湖流域已处于重度缺水的状态。加上在降水集中的季节,更易形成较大的地面径流,加重对原有河床的冲击和侵蚀,导致洪涝灾害时有发生,部分地区水土流失加剧,因此形成了较为突出的流域水安全问题。

表 2-11 2005 年巢湖流域主要城市降水量 (单位:mm)

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
合肥市	24.5	72.8	51.9	71.7	87.0	44.3	272.0	212.6	134.9	27.1	84.2	8.3
巢湖市	24.4	81.2	54.0	102.8	73.4	60.9	289.9	199.2	176.2	38.0	58.3	11.3

数据来源:《2006 年安徽省统计年鉴》、《2006 年合肥市统计年鉴》、《2006 年巢湖市统计年鉴》

城镇污水处理设施不完善或根本没有。2005年,合肥市废水排放量在100 t/a以上的大中型工矿企业有48家之多,主要污染源有合肥钢铁公司、合肥化工厂、合肥造纸厂、东风化工总厂、合肥啤酒厂、合肥化肥厂、合肥发电厂等。正是由于如此多的污染物排入湖区,导致流域的水环境严重恶化。

水环境恶化降低了水资源的使用价值,使其不能满足社会经济发展的需求,水资源供求矛盾进一步加剧,形成了“污染性缺水”或“水质性缺水”。流域水体污染造成的环境恶化,已成为制约城市化快速发展的环境瓶颈,使该地区不能形成良好的人居环境,也不能形成健康和安全的投资环境,严重影响和制约了流域社会经济的可持续发展(董如增等,2002)。

(5) 过量施用农药化肥,流域农业面源污染越来越严重

目前,巢湖流域工业废水和生活污水的治理工作取得一定进展,而流域农业面源污染的治理尚未得到应有的重视,导致了农业面源污染进一步加剧对湖泊水质的累积污染效应,如大面积的水质恶化,水生生物不能正常生长,水生态系统平衡被破坏。1986年流域的耕地面积为 $7.13 \times 10^5 \text{ hm}^2$,农药施用量为 $5.97 \times 10^3 \text{ t}$,单位面积施用量为 10.3 kg/hm^2 ;1999年流域的耕地面积为 $6.86 \times 10^5 \text{ hm}^2$,农药施用量为 $9.53 \times 10^3 \text{ t}$,单位面积施用量为 $14.8/\text{hm}^2$ 。短短的十几年间,流域的农药施用量增加了60%,再加上肥料结构和施肥方法的不科学,肥料的实际使用效率不高,大量的氮、磷流入湖区,成为流域富营养化面源污染氮、磷的重要来源。农药和化肥施用在保证农业生产顺利进行的同时,也形成了农业面源污染,对生态环境系统构成威胁。作为安徽省重要的商品粮生产基地的巢湖流域,其水质受农业面源污染的程度在加剧,流域水安全受到了严重挑战。

2.2.2 巢湖流域水安全评价

流域水安全问题是指流域水量、水质及其时空分布与人的合理需求之间的差异超过相应阈值时所产生的各种现象,主要包括因水资源短缺而产生的水资源安全问题(畅明琦等,2006)、因水环境恶化而产生的水环境安全问题(陈绍金,2006)和因水旱灾害而产生的水灾害防治安全问题(张海仑,1997),它已成为自然资源可持续开发利用中最重要的问题(Loucks D P,2000;洪阳,1999)。流域水安全评价,就是在特定的自然和技术条件、经济和社会发展水平下,在流域水量、水质及其时空分布与人的合理需求之间的平衡分析及其影响因子综合分析的基础上,建立相应的评价指标体系及其评价标准,采用流域不同时期评价指标样本值和评价模型,对研究期内流域的水资源、水环境和水灾害防治等子系统能够持续支撑经济社会可持续发展规模,维系良好的生态环境条件并使系统处于正常的健康发展的状况在总体上的差异性进行分类和排序(金菊良等,2002;金菊良等,2006),它是流域水安全管理系统的重要组成部分,可客观及时地对流域水安全状态进行总体评价,为监控和优化管理流域水资源持续利用状况提供重要依据(畅明琦等,2006;陈绍金,2006;陈守煜,2005)。受自然演化和人类活动的双重影响,流域水安全评价系统是由众多自然、经济、社会、人口和科学技术因子组成的典型复杂系统(吴今培,2006)。

$$\begin{aligned} \omega_{jk} &> 0 \quad (k = 1, 2, \dots, n_j), \\ \sum_{k=1}^{n_j} \omega_{jk} &= 1 \end{aligned} \quad (2-4)$$

式中,目标函数 $CIC(n_j)$ 称为一致性指标系数(Consistency Index Coefficient); d 为非负参数,根据笔者的经验可从 $[0, 0.5]$ 内选取;其余符号同前。式(2-4)中权重 $\omega_{jk} (k=1, 2, \dots, n_j)$ 和修正判断矩阵 $Q=(q_{kl})$ 的上三角元素为优化变量,为子系统 j 的 n_j 阶模糊互补判断矩阵 P 共有 $\frac{n_j(n_j+1)}{2}$ 个独立的优化变量。模拟生物优胜劣汰规则与群体内部染色体信息交换机制的加速遗传算法(AGA),是一种通用的全局优化方法(金菊良等,2002),用它来求解式(2-4)所示的问题较为简便和有效。当 $CIC(n_j)$ 小于某一临界值时,可认为 P 具有满意的一致性,据此计算的各要素的排序权值 ω_{jk} 是可以接受的;否则就需要提高参数 d 或修改原判断矩阵 P ,直到具有满意的一致性为止(金菊良等,2007)。

为提高指标筛选的可靠性,可请 N_e 位专家独立地建立 N_e 个模糊互补判断矩阵 P ,用 AGA-FAHP 解得 N_e 组评价指标的权重 $\{\omega_{jkl} | j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, n_j; l=1, 2, \dots, N_e\}$,选取评价指标权重的均值

$$\bar{\omega}_{jk} = \frac{\sum_{l=1}^{N_e} \omega_{jkl}}{N_e} \quad (j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n_j) \quad (2-5)$$

最大、标准差相对较小的 N_j 个指标,组成最终的流域水安全评价指标体系 $\{x_{jk} | k=1, 2, \dots, N_j\}$ 。

步骤 3:根据流域水安全评价指标体系的物理含义及其对流域经济、社会、资源与环境可持续性的作用等方面,建立流域水安全评价等级标准 $\{s_{gjk} | g=1, 2, \dots, G; j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, N_j\}$,对应的各指标的样本数据集记为 $\{x_{ijk} | i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, N_j\}$ 。其中 n, m, N_j 和 G 分别为评价样本(某流域某时期水安全系统的总体状态)数目、水安全评价系统的子系统数目、子系统 j 的评价指标数目和评价等级标准的等级数目。这里约定流域水安全评价标准等级中,1 级为“非常安全”, G 级为“不安全”,余类推。

步骤 4:用 SPA 构造样本 i 子系统 j 指标 k 的样本值 x_{ijk} 与水安全评价标准之间的(单)指标联系数 u_{ijk} 。其中 $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, N_j$ 。SPA 的基本思想是在给定问题背景情况下对所论的两个集合 $\{x_{ijk} | k=1, 2, \dots, N_j\}$ 和 $\{s_{gjk} | g=1, 2, \dots, G; k=1, 2, \dots, N_j\}$ 的安全属性(程乾生,1997b)进行同、异、反三方面的定量比较分析,用式(2-6)计算 G 元联系数(赵克勤,2000;汪新凡等,2006):

$$u_{ijk} = \nu_{ijk1} + \nu_{ijk2} I_1 + \nu_{ijk3} I_2 + \dots + \nu_{ijk(G-1)} I_{G-2} + \nu_{ijkG} J \quad (2-6)$$

式中, ν_{ijkG} 是单指标联系数 u_{ijk} 的样本值 x_{ijk} 与水安全评价标准等级 g 之间的联系分量,均为非负值且满足 $\sum_{g=1}^G \nu_{ijkG} = 1$,其中 ν_{ijk1} 和 ν_{ijkG} 分别称为同一度分量和对立度分量,其余分量称为差异度分量; I_1, I_2, \dots, I_{G-2} 为指标样本值与 2 级到 $(G-1)$ 级标准的差异度系数, J 为对立度系数,这些系数可按“均分原则”在 $[-1, 1]$ 中取值。

$$u_{ijk3} = \begin{cases} -1 & (\text{正向指标 } x_{ijk} \leq s_{1jk} \text{ 或反向指标 } x_{ijk} \geq s_{1jk}) \\ 1 - 2 \frac{s_{2jk} - x_{ijk}}{s_{2jk} - s_{1jk}} & (\text{正向指标 } s_{1jk} < x_{ijk} \leq s_{2jk} \text{ 或反向指标 } s_{1jk} > x_{ijk} \geq s_{2jk}) \\ 1 & (\text{正向指标 } x_{ijk} < s_{2jk} \text{ 或反向指标 } s_{2jk} > x_{ijk} \geq s_{2jk}) \\ 1 - 2 \frac{x_{ijk} - s_{3jk}}{s_{4jk} - s_{3jk}} & (\text{正向指标 } s_{3jk} < x_{ijk} \leq s_{4jk} \text{ 或反向指标 } s_{3jk} > x_{ijk} \geq s_{4jk}) \\ -1 & (\text{正向指标 } x_{ijk} > s_{4jk} \text{ 或反向指标 } x_{ijk} < s_{4jk}) \end{cases} \quad (2-11)$$

$$u_{ijk4} = \begin{cases} -1 & (\text{正向指标 } x_{ijk} \leq s_{2jk} \text{ 或反向指标 } x_{ijk} \geq s_{2jk}) \\ 1 - 2 \frac{s_{3jk} - x_{ijk}}{s_{3jk} - s_{2jk}} & (\text{正向指标 } s_{2jk} < x_{ijk} \leq s_{3jk} \text{ 或反向指标 } s_{2jk} > x_{ijk} \geq s_{3jk}) \\ 1 & (\text{正向指标 } s_{3jk} < x_{ijk} \leq s_{4jk} \text{ 或反向指标 } s_{3jk} > x_{ijk} \geq s_{4jk}) \\ 1 - 2 \frac{x_{ijk} - s_{4jk}}{s_{5jk} - s_{4jk}} & (\text{正向指标 } s_{4jk} < x_{ijk} < s_{5jk} \text{ 或反向指标 } s_{4jk} > x_{ijk} \geq s_{5jk}) \end{cases} \quad (2-12)$$

$$u_{ijk5} = \begin{cases} -1 & (\text{正向指标 } x_{ijk} \leq s_{3jk} \text{ 或反向指标 } x_{ijk} \geq s_{3jk}) \\ 1 - 2 \frac{s_{4jk} - x_{ijk}}{s_{4jk} - s_{3jk}} & (\text{正向指标 } s_{3jk} < x_{ijk} \leq s_{4jk} \text{ 或反向指标 } s_{3jk} > x_{ijk} \geq s_{4jk}) \\ 1 & (\text{正向指标 } s_{4jk} < x_{ijk} \leq s_{5jk} \text{ 或反向指标 } s_{4jk} > x_{ijk} \geq s_{5jk}) \end{cases} \quad (2-13)$$

式中, $s_{1jk} \sim s_{5jk}$ 分别为 1~5 级评价标准等级的限值, s_{0jk} 为各指标 1 级评价标准等级的另一端点值; $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, N_j$ 。式(2-9)~式(2-13)这种“紧凑梯形式”的函数结构充分利用了作为点值信息的样本值 x_{ijk} 与作为区间值信息的评价标准等级 g 之间的同、异、反三方面的定量信息。根据式(2-7)和式(2-8),即可由 u_{ijk} 计算单指标联系数分量 v_{ijk} ,再经式(2-6)可计算 u_{ij} 。在系统综合评价中,由于各评价标准等级一般是以区间形式表示的, $s_{1jk} \sim s_{Gjk}$ 分别只是 1~G 级评价标准等级的限值,直接根据样本值 x_{ijk} 与限值 s_{gjk} 的大小关系构造属性数学的单指标属性测度(程乾生,1997b),并把该测度作为单指标联系数分量 v_{ijk} 的计算方法存在明显的局限性,容易产生与实际情况存在明显偏差的评价结果。

步骤 5:对式(2-6)两边同乘以各子系统指标的权重并求和,可得样本 i 子系统 j 与水安全评价标准之间的子系统联系数 u_{ij} :

$$u_{ij} = \nu_{j1} + \nu_{j2} I_1 + \nu_{j3} I_2 + \dots + \nu_{j(G-1)} I_{G-2} + \nu_{jG} J \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad (2-14)$$

式中,

$$\nu_{ijg} = \sum_{k=1}^{N_j} \tau_{jk} \nu_{ijk} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m; g = 1, 2, \dots, G) \quad (2-15)$$

镇都坐落于巢湖及其支流沿岸,是重要的粮食生产基地。降水在流域内的时间分布、空间分布和季节分布都不均匀,年际变化大,容易发生洪涝灾害,干旱灾害也时有发生。近年来随着流域社会经济的快速发展和人口的不断增长,水资源供需矛盾日益突出。巢湖流域是当前我国重点污染治理的“三河三湖”之一,因受人类活动和地理环境的双重影响,流域内水土流失显著,非点源污染日趋严重,水体富营养化有加剧趋势,已成为当前安徽省环巢湖经济圈发展和合肥现代化滨湖城市建设的重要制约因素。可见,巢湖流域水安全状况是人类活动和自然演化双重影响的结果,正确评价流域的水安全状况,不仅是流域水安全管理的重要内容,而且对进一步识别影响和控制流域水安全的主要因子、优化产业布局、提高流域水安全保障能力等方面具有重要意义。

(1) 评价指标筛选和权重确定

根据指标选择的系统性、独立性、可比性、真实性和实用性,考虑到本流域的具体情况和资料收集的可行性,在参考其他流域水安全评价指标体系案例基础上(畅明琦,2006;陈绍金,2006;宋松柏等,2005),根据 CN-AM 步骤 1,初步确立的巢湖流域水安全评价指标体系包括水资源安全、水环境安全、水灾害防治安全和社会经济安全 4 个子系统(金菊良等,2008)。其中:水资源安全子系统包括指标 $C_{1.1}$ “水资源利用率”、指标 $C_{1.2}$ “湖泊面积率”、指标 $C_{1.3}$ “人均水资源量”、指标 $C_{1.4}$ “单位面积水资源量”、指标 $C_{1.5}$ “人均日生活用水量”、指标 $C_{1.6}$ “万元工业产值耗水量”、指标 $C_{1.7}$ “工业用水重复利用率”、指标 $C_{1.8}$ “万元农业产值用水量”、指标 $C_{1.9}$ “农业灌溉面积率”、指标 $C_{1.10}$ “灌溉水综合利用系数”和指标 $C_{1.11}$ “灌溉面积占播种面积比例”;水环境安全子系统包括指标 $C_{2.1}$ “森林覆盖率”、指标 $C_{2.2}$ “土壤侵蚀模数”、指标 $C_{2.3}$ “水土流失面积比例”、指标 $C_{2.4}$ “水土流失治理率”、指标 $C_{2.5}$ “工业废水处理率”、指标 $C_{2.6}$ “万元产值污水排放量”、指标 $C_{2.7}$ “人均生活污水排放量”、指标 $C_{2.8}$ “生活污水处理率”、指标 $C_{2.9}$ “单位面积化肥施用量”、指标 $C_{2.10}$ “单位面积农药施用量”、指标 $C_{2.11}$ “工业 SO_2 排放密度”、指标 $C_{2.12}$ “工业废水排放密度”、指标 $C_{2.13}$ “生态环境用水率”、指标 $C_{2.14}$ “水域面积率”和指标 $C_{2.15}$ “环保投资占 GDP 比例”;水灾害防治安全子系统包括指标 $C_{3.1}$ “洪水受灾面积率”、指标 $C_{3.2}$ “洪水人口受灾率”、指标 $C_{3.3}$ “洪灾频率”、指标 $C_{3.4}$ “洪涝损失占 GDP 比例”、指标 $C_{3.5}$ “干旱受灾面积率”、指标 $C_{3.6}$ “干旱人口受灾率”、指标 $C_{3.7}$ “干旱频率”、指标 $C_{3.8}$ “干旱指数”、指标 $C_{3.9}$ “干旱损失占 GDP 比例”、指标 $C_{3.10}$ “堤防保护耕地面积率”、指标 $C_{3.11}$ “单位面积蓄水工程总库容”、指标 $C_{3.12}$ “防洪抗旱信息化程度”和指标 $C_{3.14}$ “水利工程投资占 GDP 比例”;社会经济安全子系统包括指标 $C_{4.1}$ “区域开发指数”、指标 $C_{4.2}$ “城市化程度”、指标 $C_{4.3}$ “人口密度”、指标 $C_{4.4}$ “经济密度”、指标 $C_{4.5}$ “人均 GDP”、指标 $C_{4.6}$ “人均耕地”、指标 $C_{4.7}$ “人均粮食产量”、指标 $C_{4.8}$ “饮用卫生水达标人口率”、指标 $C_{4.9}$ “家庭水费支出占家庭可支配收入的比例”、指标 $C_{4.10}$ “科技教育投入占 GDP 比例”、指标 $C_{4.11}$ “水利科技人员占科技人员比例”、指标 $C_{4.12}$ “水资源相关法律法规体系健全程度”、指标 $C_{4.13}$ “公众节水意识普及率”和指标 $C_{4.14}$ “农村文盲半文盲比例”。

表 2-14 用 AGA-FAHP 筛选巢湖流域水安全评价指标体系的计算结果

子系统 j	权重 的特 征值	评价指标序号 k														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
水资源 安全 子系统	均值	0.133	0.060	0.117	0.084	0.074	0.101	0.084	0.094	0.070	0.097	0.086				
	标准差	0.024	0.042	0.046	0.038	0.049	0.023	0.035	0.028	0.029	0.029	0.022				
	标准差 /均值	0.180	0.700	0.393	0.452	0.662	0.228	0.417	0.299	0.414	0.299	0.256				
环境 安全 子系统	均值	0.064	0.047	0.049	0.063	0.082	0.075	0.057	0.064	0.066	0.059	0.043	0.071	0.080	0.093	0.089
	标准差	0.027	0.023	0.025	0.027	0.017	0.031	0.024	0.028	0.022	0.032	0.025	0.040	0.029	0.013	0.015
	标准差 /均值	0.418	0.484	0.509	0.431	0.212	0.419	0.430	0.439	0.336	0.540	0.587	0.564	0.365	0.140	0.167
水灾 防 治安 全 子 系 统	均值	0.074	0.102	0.064	0.102	0.063	0.092	0.060	0.060	0.099	0.048	0.063	0.066	0.105		
	标准差	0.020	0.037	0.021	0.025	0.019	0.031	0.019	0.027	0.022	0.013	0.016	0.024	0.021		
	标准差 /均值	0.267	0.359	0.328	0.241	0.301	0.342	0.323	0.457	0.223	0.266	0.246	0.363	0.202		
社会 经济 安全 子 系 统	均值	0.073	0.086	0.070	0.083	0.093	0.055	0.049	0.101	0.058	0.082	0.069	0.071	0.051	0.058	
	标准差	0.032	0.011	0.029	0.028	0.010	0.032	0.035	0.020	0.043	0.021	0.044	0.029	0.029	0.032	
	标准差 /均值	0.438	0.128	0.414	0.337	0.108	0.582	0.714	0.198	0.741	0.256	0.638	0.408	0.569	0.552	

续表 2-15

评价指标	水安全等级				
	1 (不安全)	2 (较不安全)	3 (临界安全)	4 (较安全)	5 (非常安全)
C _{2.8} 生态环境用水率	<1%	1%~2.5%	2.5%~4%	4%~5.5%	>5.5%
C _{2.9} 水域面积率	<5%	5%~10%	10%~15%	15%~20%	>20%
C _{2.10} 环保投资占 GDP 比例	<0.3%	0.3%~0.6%	0.6%~1.0%	1.0%~1.5%	>1.5%
C _{3.1} 洪水受灾面积率	>8%	6%~8%	4%~6%	2%~4%	<2%
C _{3.2} 洪水人口受灾率	>20%	10%~20%	5%~10%	2%~5%	<2%
C _{3.3} 洪涝损失占 GDP 比例	>5.5%	4%~5.5%	2.5%~4%	1%~2.5%	<1%
C _{3.4} 干旱受灾面积率	>30%	20%~30%	10%~20%	5%~10%	<5%
C _{3.5} 干旱人口受灾率	>20%	10%~20%	5%~10%	2%~5%	<2%
C _{3.6} 干旱损失占 GDP 比例	>5.5%	4%~5.5%	2.5%~4%	1%~2.5%	<1%
C _{3.7} 单位面积蓄水工程总库容(10 ⁴ m ³ /km ²)	<10	20	30	40	>40
C _{3.8} 防洪抗旱信息化程度	低	较低	中等	较高	高
C _{3.9} 水利工程投资占 GDP 比例	<0.2%	0.2%~0.5%	0.5%~0.8%	0.8%~1.0%	>1.0%
C _{4.1} 区域开发指数	>85%	60%~85%	45%~60%	30%~45%	<30%
C _{4.2} 城市化程度	<10%	10%~20%	20%~30%	30%~50%	50%~70%
C _{4.3} 人口密度(人/km ²)	>500	350~500	200~350	100~200	<100
C _{4.4} 经济密度(万元/km ²)	<100	100~300	300~400	400~600	600~5 000
C _{4.5} 人均 GDP(10 ³ 元)	<2	2~5	5~8	8~12	>12
C _{4.6} 饮用卫生水达标人口率	<60%	60%~70%	70%~85%	85%~95%	>95%
C _{4.7} 科技教育投入占 GDP 比例	<1%	1%~3%	3%~4%	4%~6%	6%~10%
C _{4.8} 水资源相关法律法规体系健全程度	低	较低	中等	较高	高

(2) 评价结果分析

把巢湖流域的 9 个区域(分别为合肥、肥东、肥西、居巢、庐江、含山、无为、和县、舒城)和全流域评价年的评价指标样本值(表 2-16)和表(2-15)数据代入式(2-9)~

续表 2-16

评价指标	合肥	肥东	肥西	居巢	庐江	含山	无为	和县	舒城	流域
C _{2.8} 生态环境用水率	1.2%	1.4%	1.1%	1.5%	2.1%	2.7%	1.8%	2.3%	4.4%	1.8%
C _{2.9} 水域面积率	23.08%	21.39%	21.19%	29.95%	16.48%	13.84%	14.62%	12.05%	7.99%	17.90%
C _{2.10} 环保投资占 GDP 比例	0.38%	0.05%	0.03%	0.42%	0.29%	0.16%	0.35%	0.16%	0.18%	0.22%
C _{3.1} 洪水受灾面积率	0.44%	4.80%	4.67%	6.99%	7.67%	3.07%	14.59%	7.03%	8.25%	7.74%
C _{3.2} 洪水人口受灾率	0.18%	13.70%	12.36%	19.74%	17.82%	8.58%	30.28%	19.58%	25.23%	17.14%
C _{3.3} 洪涝损失占 GDP 比例	0.02%	12.00%	11.30%	1.36%	2.52%	0.79%	4.11%	2.77%	15.20%	2.34%
C _{3.4} 干旱受灾面积率	0.30%	5.40%	4.57%	0.15%	0.51%	1.89%	0.40%	0.87%	4.95%	3.23%
C _{3.5} 干旱人口受灾率	0.20%	0.43%	0.41%	0.05%	0.04%	0.18%	0.30%	0.08%	0.42%	0.27%
C _{3.6} 干旱损失占 GDP 比例	0.03%	0.56%	0.71%	0.02%	0.04%	0.12%	0.03%	0.09%	0.59%	0.33%
C _{3.7} 单位面积蓄水工程总库容(10 ⁴ m ³ /km ²)	15.69	15.69	15.69	3.61	3.61	3.61	3.61	3.61	40.41	25.24
C _{3.8} 防洪抗旱信息化程度	较高	中	中	较高	中	中	中	中	中	中
C _{3.9} 水利工程投资占 GDP 比例	0.06%	0.20%	0.51%	0.11%	0.20%	0.24%	0.17%	0.60%	0.27%	0.17%
C _{4.1} 区域开发指数	74.14%	74.01%	70.74%	58.04%	78.25%	84.95%	79.97%	70.00%	83.99%	74.54%
C _{4.2} 城市化程度	78.89%	13.20%	11.57%	34.67%	11.12%	16.51%	9.67%	13.83%	15.65%	24.48%
C _{4.3} 人口密度(人/km ²)	2 844.54	489.83	435.59	412.31	500.77	416.84	560.83	417.70	465.57	536.45
C _{4.4} 经济密度(万元/km ²)	4 690	130	90	280	170	210	200	140	120	290
C _{4.5} 人均 GDP(元)	16 652	2 717	2 055	6 919	3 349	5 159	3 500	3 362	2 515	5 435
C _{4.6} 饮用卫生水达标人口率	100.00%	83.64%	100.00%	98.06%	100.00%	100.00%	99.76%	91.67%	93.86%	96.33%
C _{4.7} 科教投入占 GDP 比例	0.81%	2.49%	2.67%	1.00%	1.59%	0.99%	1.49%	1.39%	2.47%	1.27%
C _{4.8} 水资源相关法律法规体系健全程度	较高	中	中	较高	中	中	中	中	中	中

注:水资源子系统(C_{1.1}~C_{1.8}),水环境子系统(C_{2.1}~C_{2.10}),水灾害子系统(C_{3.1}~C_{3.9}),社会经济子系统(C_{4.1}~C_{4.8})

表 2-17、表 2-18 和表 2-19 说明:

① 基于联系数的式(2-14)和式(2-16)的均分原则方法的评价结果与基于式(2-18)和式(2-19)的属性数学的置信度准则方法的评价结果总体上是一致的,两者在评判等级方面存在的差异(相差 1 级),不是发生在联系数方法根据“均分原则”进行等分的子区间的端点值附近、并与属性数学的置信度准则方法的评价结果相接近,就是发生在属性数学的置信度为 50%附近、并与均分原则方法的评价结果相接近。这说明这两种基于联系数的水安全等级评判方法的计算结果具有一致性和互补性,联合应用可进一步提高评价结果的可靠性。

图 2-3 巢湖流域水安全等级状况的空间差异分布

② 水资源安全等级值从大到小(从不安全到非常安全)依次为肥西(较不安全)、无为(介于较不安全与临界安全之间)、舒城(介于较不安全与临界安全之间)、肥东(介于较不安全与临界安全之间)、庐江(临界安全)、全流域(临界安全)、合肥(临界安全)、含山(临界安全)、居巢(临界安全)及和县(较安全)。就全流域而言,人均水资源量和单位面积水资源量低,万元农业产值用水量高是导致全流域处于临界安全的重要原因(吴开亚等,2008)。因此,控制人口增长,推广节水农业技术、降低万元农业产值用水量应是提高该流域水安全保障程度的主要战略措施。

③ 水环境安全等级值从大到小依次为肥东(较不安全)、肥西(较不安全)、舒城(介于较不安全与临界安全之间)、无为(临界安全)、和县(临界安全)、合肥(临界安全)、庐江(临界安全)、含山(临界安全)、全流域(临界安全)和居巢(临界安全)。就全流域而言,单位面积化肥施用量和环保投资占 GDP 比例指标处于不安全状态,生活污水处理率和生态环境用水率指标处于较不安全状态,森林覆盖率和水土流失

约化方向发展,努力协调各地的经济结构比例与水资源承载力相一致。其次,各级相关环境主管部门应统筹规划,从流域全局出发编制流域水安全防治方案,认真做好水体功能分区、水质动态监测、环境执法等工作,实现资源的合理分配和有效利用。第三,大力提高流域人口素质,开展专题讨论、讲座、辩论和发放大众化的环保书籍和手册等多种形式的环保教育,使全流域民众形成水安全忧患意识,使环境保护成为全流域一种自觉的行为。

2. 加强流域水资源调控,最大化水资源使用价值

针对目前流域重度缺水的现状,应在不破坏水资源和水环境正常功能的前提下,依据水资源作为经济调整的边界条件,大力加强流域水资源利用的调控工作,在有计划、有步骤地将其合理开发利用的基础上,进一步挖掘有限水资源的使用价值,使其服务于整个流域生态系统。首先,加强流域水资源的管理工作,充分利用经济、行政和法律等手段实现水资源利用方式由粗放型向集约型的根本转变。其次,加强水资源开发利用的监管工作,全面提高水资源的利用率,因地制宜地制定适合本地区的产业机制和科技创新机制,有效利用科研单位的技术发明成果,大力推行节约用水新技术、新工艺、新思路,发展节水型工业、农业和服务业,缓解流域水安全的压力,达到水资源的优化配置,建设节水型社会。

3. 加强流域水环境整治,最优化水环境质量

流域城市化的进程是不可阻挡的,在城市改扩建、工矿等企业大发展的过程中科学合理处理好净水需求与污水处理矛盾,确保流域水环境质量的安全,奠定良好的流域水安全基础,必须对流域目前的水环境质量及其相关的污染源情况进行充分的论证评估,进而实行有效的整治方案,最优化水环境质量。首先,要转变以往“先污染,后治理”,甚至“只污染,不治理”的错误观念,结合流域社会经济发展和生态环境变迁的特色,研究一条适合流域整体协调发展的开发性治理思路。其次,水污染治理行为纳入市场经济体系当中,在其产生社会效率的同时,也相应地带来经济效率(姚文兵,2002)。第三,针对流域工业废水、生活污水、农业面源污染的特征,相关政府部门应出台有效的整治对策。

4. 完善水土保持措施,最小化水灾害损失

长期以来,流域内大小河流河道淤积、河床侵蚀现象比较严重,防洪工程和排涝设备不同程度破坏和失修,降水集中的季节,洪涝灾害时有发生,对沿岸居民的人身安全和财产形成威胁。有必要制定可行的洪涝灾害预防措施,将损失降至最低。在充分利用现有水利工程设施的基础上,以不破坏水环境质量为前提,兴建水利工程,加大洪涝灾害的调控能力;大力植树造林、退耕还林、扩大自然保护区、禁止乱砍乱伐,减轻水土流失,减少水灾害发生的人为因素;强化防洪抗灾的非工程措施,提高防洪抗灾的科技含量,努力将防洪抗灾的基础事业做到最好。

5. 建立水安全预警系统,确保流域水安全

水安全影响因素的动态辨识、监测和调控是流域可持续发展建设的重要环节。水资源开发利用、水环境质量以及水灾害频率和规模,在不同的经济发展阶段呈现出不同的特征。为更准确、更快捷地识别水安全的现状,可以借助相关技术获取预

- [17] 贾艳红,赵军,南忠仁等.基于熵权法的草原生态安全评价:以甘肃牧区为例[J].生态学杂志,2006,25(8):1003-1008.
- [18] 姜启源.数学模型[M].北京:高等教育出版社,1999.
- [19] 金菊良,丁晶.水资源系统工程[M].成都:四川科学技术出版社,2002.
- [20] 金菊良,洪天求,王文圣.基于熵和FAHP的水资源可持续利用模糊综合评价模型[J].水力发电学报,2007,26(4):22-30.
- [21] 金菊良,黄慧梅,魏一鸣.基于组合权重的水质评价模型[J].水力发电学报,2004,23(3):13-19.
- [22] 金菊良,王文圣,洪天求等.流域水安全智能评价方法的理论基础探讨[J].水利学报,2006,37(8):918-925.
- [23] 金菊良,吴开亚,魏一鸣.基于联系数的流域水安全评价模型[J].水利学报,2008,39(4):401-409.
- [24] 李凡修,辛焰,陈武.集对分析用于湖泊富营养化评价研究[J].重庆环境科学,2000,22(6):10-11,16.
- [25] 李俊然.土地利用结构对非点源污染的影响[J].中国环境科学,2000,20(6):78-82.
- [26] 李如忠,汪家权,钱家忠.巢湖流域非点源营养物控制对策研究[J].水土保持学报,2004,18(1):119-123.
- [27] 刘布春,梅旭荣,李玉中等.农业水资源安全的定义及其内涵和外延[J].中国农业科学,2006,39(5):947-951.
- [28] 刘红,王慧,张兴卫.生态安全评价研究述评[J].生态学杂志,2006,25(1):74-78.
- [29] 刘勇,刘友兆,徐萍.区域土地资源生态安全评价:浙江嘉兴市为例[J].资源科学,2004,26(3):69-75.
- [30] 卢敏,张洪海,宋天文等.区域水安全研究理论及方法探析[J].人民黄河,2005,27(10):6-8.
- [31] 门宝辉,梁川.属性识别方法在水资源系统可持续发展程度综合评价中的应用[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2002,28(6):675-678.
- [32] 宋松柏,蔡焕杰.区域水资源可持续利用指标体系及评价方法研究[M].杨凌:西北农林科技大学出版社,2005.
- [33] 孙贤斌.巢湖生态环境污染与防治对策[J].国土与自然资源研究,2001,(3):50-52.
- [34] 汪新凡.投资风险综合评价的联系数学模型[J].统计与决策,2006,(10):19-20.
- [35] 王顺久,李跃清,丁晶.基于指标体系的水安全评价方法研究[J].中国农村水利水电,2007,(2):116-119.
- [36] 王顺久,李跃清.投影寻踪模型在区域生态环境质量评价中的应用[J].生态学杂志,2006,25(7):869-872.
- [37] 吴今培.复杂性管理初探[J].五邑大学学报(自然科学版),2006,20(2):5-11.
- [38] 吴开亚,何琼,孙世群.区域生态安全的主成分投影评价模型及应用[J].中国管理科学,2004a,12(1):106-109.
- [39] 吴开亚,李如忠,孙世群等.区域生态环境的未确知测度模型评价及应用[J].环境科学研究,2004b,17(2):24-28.
- [40] 吴开亚,金菊良,周玉良等.流域水资源安全评价的集对分析:可变模糊集耦合模型[J].四川大学学报(工程科学版),2008,40(3):6-12.