

► 太湖流域水生态功能分区与质量目标管理技术示范 (2008ZX07526-007) 系列丛书 ◀

太湖流域

水环境变化人文驱动力研究

TAIHU LIUYU SHUIHUAJING BIANHUA RENWEN QUDONGLI YANJIU

焦雯珺 闵庆文 等 编著

中国环境科学出版社

太湖流域水生态功能分区与质量目标管理技术示范（2008ZX07526-007）系列丛书

太湖流域水环境变化人文驱动力研究

焦雯珺 闵庆文 等 编著

中国环境科学出版社·北京

丛书编辑委员会

顾 问：李文华

主 任：闵庆文

委 员：（以姓氏笔画排列）

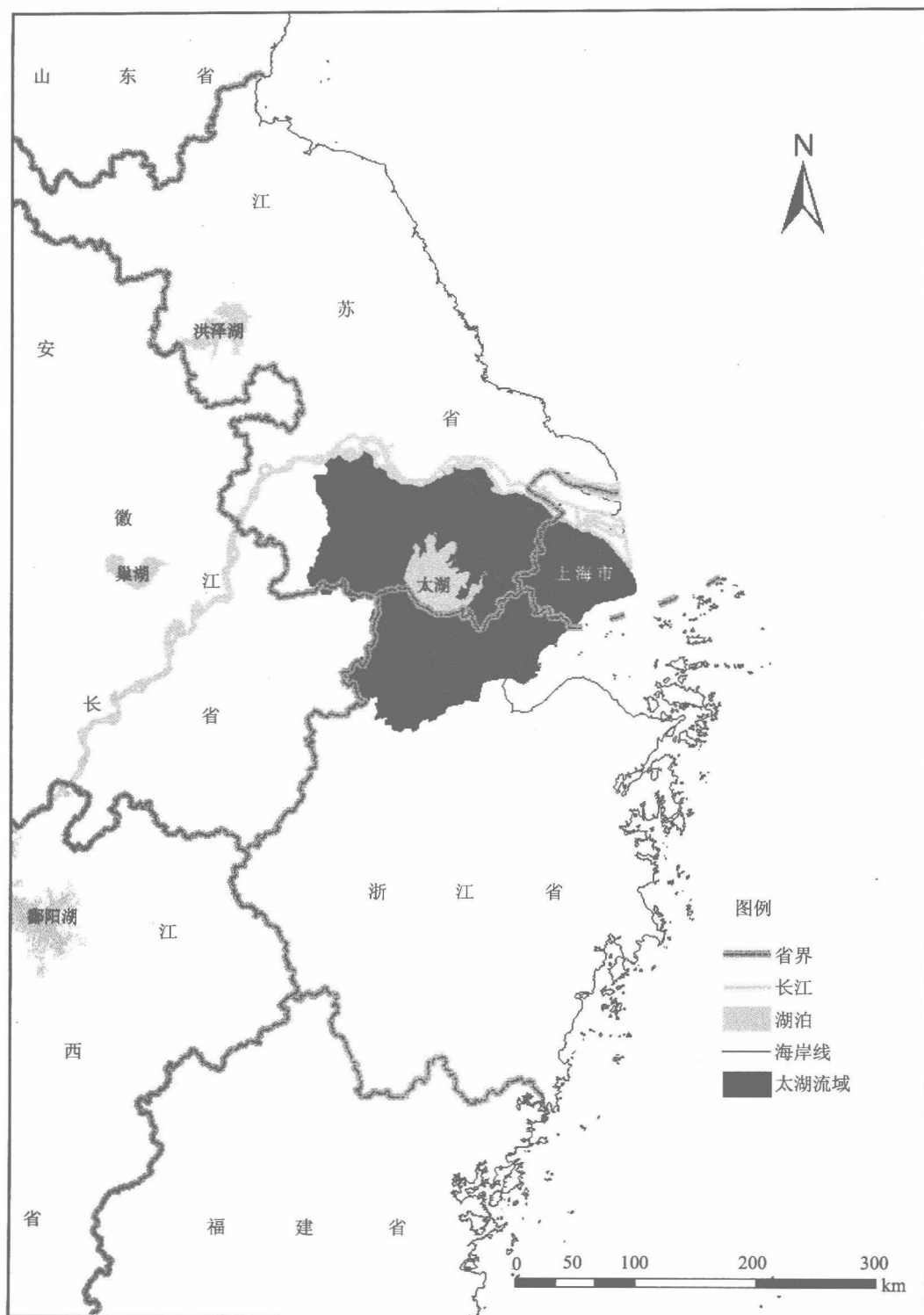
王西琴 刘子刚 刘庆生 刘高焕 杨丽韞
张 彪 陈宇炜 邵晓阳 范亚民 金 均
逢 勇 姚玉鑫 徐鹏炜 高永年 高俊峰
黄 燕 崔云霞 焦雯珺 谢卫平 滕加泉
颜润润

本书编写委员会

主 编：焦雯珺 闵庆文

编 委：（按姓氏笔画排列）

卢 佳 李 静 闫丽珍 周 李 周静
姚玉鑫 袁 正 滕加泉 戴 忱



太湖流域地理位置图

序

我国长期以来面临着水体污染、水资源短缺、水生态退化和洪涝灾害等多个方面水问题的压力，而水体污染在一定程度上加剧了其他三种水问题的恶化程度，造成一些地方水质性缺水、水环境恶化、洪涝灾害损失加大等现象。虽然从中央到地方大规模开展了流域水体污染防治，取得了一些成效，但从总体上来看，我国水体污染仍将是今后相当长时期内制约经济社会可持续发展的关键因素。“水体污染控制与治理”科技重大专项（简称水专项）应运而生、适得其时。

太湖流域地理位置优越，气候宜人，自然资源丰富，历史上是著名的富庶之地，目前更是我国经济最发达、人口最密集、城市化程度最高的地区之一。但同时也必须看到，太湖流域在取得经济快速发展的同时，也付出了沉重的生态环境代价，流域生态环境问题积重难返。太湖蓝藻暴发事件的频繁发生，折射出太湖水生态系统健康状况的衰退。据2011年5月公布的《2010年江苏省环境状况公报》，太湖湖体高锰酸盐指数和总磷分别达到Ⅲ类、Ⅳ类标准限值要求，受总氮指标影响全湖总体水质仍劣于Ⅴ类标准；太湖湖体综合营养状态指数为58.5，仍呈富营养化水平；太湖15条主要入湖河流中，有4条河流平均水质符合Ⅲ类标准，1条河流水质劣于Ⅴ类标准，其余处于Ⅳ类和Ⅴ类。

国家对太湖流域的水环境问题一直十分重视，将太湖治理列为国家“三江三湖”重点治理计划，先后实施了太湖水污染防治“十五”计划和“十一五”计划。太湖流域各级政府也十分关注流域的水环境问题，出台了一系列水环境管理政策，相继开展了生态省市建设、流域污染控制、节能减排、湖泊生态治理工程等，并实施了较为严格的污染排放限制。然而，太湖流域的水环境问题并没有得到有效解决，太湖水体环境质量也未得到根本性改变。原因是多方面的，其中现行的总量控制制度在具体应用中存在的污染控制与水生态保护相脱节、排放达标控制与环境质量达标相脱节、以行政区为单元的环境功能区划分与流域水污染调控相脱节等无疑是很重要的方面。因此，在借鉴国外水环境管理先进理念和方法的基础上，探索建立一套适合于我国国情、科学合理的水质目标管理技术体系并进行示范应用，对于太湖流域水生态系统健康和水质改善具有重要意义。

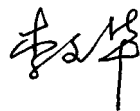
由中国科学院地理科学与资源研究所牵头并联合中国科学院南京地理与湖泊研究所、江苏省环境科学研究院、浙江省环境保护科学与设计研究院、中国人民大学、常州市环保局、宜兴市环保局、湖州市环保局等单位承担的“太湖流域水生态功能分区与质量目标管理技术示范”课题（2008ZX07526-007），作为水专项首批启动的课题之一，便是面向太湖流域水环境管理工作的实际需求而设立的。课题旨在构建面向水生态系统健康的新型水环境管理技术体系，从而实现太湖流域水环境管理工作的开拓与创新，并确保太湖流域污染物减排目标的顺利实现。

自课题启动以来，课题组在太湖流域开展了大量实地调查工作，如土地利用遥感解译、水生态系统调查、水环境质量监测、社会经济调查等，并取得了一系列具有创新性、前瞻

性和可操作性的研究成果。首次提出了湖泊型流域水生态功能区划分的理论和技术体系，并完成了太湖流域水生态功能三级分区划分方案；首次提出了湖泊型流域控制单元划分的原则、思路、指标和方法，完成了太湖流域控制单元的划分；首次提出了太湖流域基于控制单元的水质目标管理技术体系框架（TMML），开发了太湖流域水质目标管理系统，编写了指导手册，并在典型区进行了示范应用。这套《太湖流域水生态功能分区与质量目标管理技术示范（2008ZX07526-007）系列丛书》正是这个团队所取得成果的集中体现。

必须承认，太湖流域水环境质量的根本改善是一项长期而艰巨的任务，不可能一蹴而就，需要多学科和社会各方力量的共同努力，该课题组的工作虽然取得了一系列创新性成果，但无论从理论研究还是应用示范，仍需要不断的改进与完善。相信他们的成果对于我国水环境管理，特别是太湖流域水质目标管理将起到有力的推动作用，对于我国水环境管理体制与机制的创新和水环境质量的根本好转也将发挥重要的作用。

中国工程院院士



2012年2月18日

前 言

太湖流域地理位置优越，气候宜人，自然资源丰富，历史上即是著名的富庶之地，目前更是我国经济最发达、人口最密集、城市化程度最高的地区之一。然而在取得快速发展的同时，太湖流域也付出了沉重的生态环境代价。流域内河流和湖泊普遍受到污染，流域水质呈不断恶化的态势。太湖流域水环境的不断恶化已经严重威胁到太湖流域工农业发展所依赖的生态基础，影响到太湖流域的城市和集镇的供水安全，危害到流域内居民的身体健康，并对宝贵的自然资源和生态资源造成了破坏。

太湖流域水环境质量的变化虽然与流域的自然地理特征有着直接的关系，但与流域内工业化、城市化和农业生产等人类活动方式更是有着高度的敏感性和相关性。流域内工业总量的增长导致工业污染排放量的增加并加速水质的恶化，生活用水量和废污水排放量也随着流域内城市化水平的不断提高而急剧上升，农业生产过程中化肥和农药的大量使用也在一定程度上加速了水环境污染和富营养化过程。可以说，太湖流域水环境的演变过程虽然具有一定的自然背景，但是由于流域内人口密集、经济发达、人类活动强度大，导致大量污染物和营养盐加速进入水体，对加剧流域的水污染和富营养化起着主要的作用。

由于强烈的人类干扰是太湖流域水环境演变的主要原因，因此如何正确认识流域水环境变化的人文驱动因素、合理评估流域社会经济活动的水污染压力、科学制定流域污染物削减和控制措施成为太湖流域水环境管理中亟待解决的问题之一。目前有关太湖流域水环境变化的人文驱动力研究方兴未艾，但是大多数研究对人文驱动力系统的阐述都缺乏整体性、层次性和区域差异性，对人文驱动力的分析以定性分析为主而缺乏定量评估，各驱动因素也难以得出相互间的逻辑关系，以人文驱动力识别和评估为基础的水环境管理政策研究更是鲜有所见。

在国家水专项“太湖流域水生态功能分区与质量目标管理技术示范”课题（2008ZX07526-007）的资助下，我们自2008年9月至2010年12月在太湖流域特别是流域上游常州市和湖州市开展了多次实地调查工作，并结合文献调研、座谈咨询等方式收集了大量一手和二手数据，对太湖流域特别是上游地区的水环境质量状况、社会经济基本特征以及二者之间的响应关系都有了较为全面的了解。在此基础上，我们从生态经济复合系统的角度，利用所提出的“污染足迹模型”，对太湖流域水环境变化的人文驱动力进行了

评估,在一定程度上弥补了目前研究中难以定量化、综合化,难以揭示区域差异性,难以解释内部逻辑关系等缺陷;并利用该模型对流域水环境可持续发展、水污染压力、污染物削减与控制等问题进行了分析与探讨。

本书各章执笔人为:第1章闵庆文、焦雯璐、李静;第2章焦雯璐、闵庆文;第3章焦雯璐、袁正、李静、闵庆文、戴忱;第4章焦雯璐、李静、袁正、闵庆文、戴忱;第5章焦雯璐、闵庆文;第6章滕加泉、姚玉鑫、周李、周静;第7章焦雯璐、袁正、闵庆文、闫丽珍、卢佳;第8章闵庆文、焦雯璐。

在课题研究和本书的编写及出版过程中,得到了李文华院士的指导,在此谨表谢忱!得到了来自中国科学院地理科学与资源研究所、中国科学院南京地理与湖泊研究所、江苏省环境科学研究院、浙江省环境科学保护与设计研究院、中国人民大学、常州市环保局、湖州市环境监测中心站等单位同志的支持和帮助,以及常州、湖州两市相关局、委、处、室和有关乡镇等领导和工作人员的热心支持,在此一并致谢!

虽然目前有关太湖流域水环境变化的人文驱动力研究方兴未艾,但是可资参考的文献资料并不多,这使得本书的编写很有意义。尽管如此,污染足迹的理论创新及其在太湖流域的应用,虽能够在一定程度上弥补已有人文驱动力研究中的不足,但也必然会产生许多争议,敬请读者批评指正。

编者

2011年9月于北京

目 录

1	绪 论	1
1.1	水环境现状及变化特征	1
1.2	水环境变化的人文驱动力特征	4
1.3	水环境变化的人文驱动力研究进展	10
2	基于污染足迹模型的综合评估方案	12
2.1	生态足迹的研究进展	12
2.2	污染足迹的基本理论与模型构建	18
2.3	人文驱动力综合评估方案	21
3	水环境变化的直接人文驱动力评估	28
3.1	污染物排放特征分析	28
3.2	污染物污染足迹分析	44
3.3	人文驱动力综合评估	49
3.4	小结	56
4	水环境变化的间接人文驱动力评估	58
4.1	人类活动特征分析	58
4.2	污染源污染足迹分析	71
4.3	间接人文驱动力定量评估	77
4.4	小结	83
5	水污染压力评估与污染物削减方案	86
5.1	水环境可持续发展分析	86
5.2	水污染压力综合评估	90
5.3	污染物削减方案制定	95
5.4	小结	100
6	人文驱动力调控与污染物治理工程	102
6.1	直接人文驱动力调控	102
6.2	间接人文驱动力调控	105
6.3	区域人文驱动力调控	116
6.4	小结	122

7 农业生产的氮磷污染控制措施分析124

 7.1 种植结构调整的环境影响与成因124

 7.2 化肥过量施用的环境效应与影响因素132

 7.3 小结142

8 主要结论144

参考文献147

1 绪 论

太湖流域地理位置优越,气候宜人,自然资源丰富,历史上即是著名的富庶之地,目前更是我国经济最发达、人口最密集、城市化程度最高的地区之一。然而在取得快速经济发展的同时,太湖流域也付出了沉重的生态环境代价,流域内河流和湖泊普遍受到污染,流域水质呈不断恶化的态势。流域水环境演变与流域的自然地理特征有着直接的关系,与流域内社会经济发展更是密切相关。太湖流域水环境质量的变化与流域内工业化、城市化和农业生产等人类活动方式有着高度的敏感性和相关性。

由于强烈的人类干扰是太湖流域水环境变化的主要原因,如何正确认识流域水环境变化的人文驱动力、合理评估流域人类活动的水污染压力、科学制定流域水污染控制措施便成为太湖流域水环境管理中亟待解决的问题之一。目前,有关太湖流域水环境变化的人文驱动力研究方兴未艾,但是大多数研究对人文驱动力系统的阐述都缺乏整体性、层次性和区域差异性,对人文驱动力的分析以定性分析为主而缺乏定量评估,各驱动因素之间也难以得出相互间的逻辑关系,以人文驱动力识别和评估为基础的水环境管理政策研究更是鲜有所见。

1.1 水环境现状及变化特征

1.1.1 太湖流域概况

1.1.1.1 自然条件

太湖是我国长江中下游地区著名的五大淡水湖之一,位于长江三角洲的南翼坦荡太湖平原上,介于北纬 $30^{\circ}55'40''\sim 31^{\circ}32'58''$ 、东经 $119^{\circ}52'32''\sim 120^{\circ}36'10''$ 。流域总面积 $36\,895\text{ km}^2$,西部山丘区面积 $7\,338\text{ km}^2$,中部平原区面积 $19\,350\text{ km}^2$,沿江滨海平原面积 $7\,015\text{ km}^2$,太湖湖区面积 $3\,192\text{ km}^2$ (包括部分湖滨陆地)。太湖流域地势特点为西南高、东北低,四周略高、中间略低,整个地形呈碟状。属亚热带季风气候,区内气候温和湿润,雨量充沛。年平均气温为 $14.9\sim 16.2^{\circ}\text{C}$,无霜期年平均为 $220\sim 240$ 天;多年平均降水量 $1\,100\sim 1\,150\text{ mm}$,降水总量平均为 414 亿 m^3 ;降雨主要集中在每年的 4—10 月,呈西南向东北递减趋势。

太湖流域河网如织,湖泊星罗棋布。水面总面积约 $5\,551\text{ km}^2$,水面面积在 0.5 km^2 以上的大小湖泊共有 189 个,湖泊面积 40 km^2 以上的 6 个;流域内河道总长约 $12\times 10^4\text{ km}$,河网密度 3.3 km/km^2 ,主要水系有苕溪水系、合溪水系、南溪水系、洮涌水系、黄浦江水系、沿长江水系和运河水系。2007 年,太湖流域河流水质评价总河长 $2\,508.6\text{ km}$,全年期 85.7% 的评价河长水质劣于 III 类,主要超标项目为氨氮、高锰酸盐指数,五日生化需氧量、溶解氧、石油类、总磷和化学需氧量;太湖 7.4% 的水域水质为 IV 类,11.5% 的水域为 V 类,

其余 81.1%均劣于 V 类, 主要超标项目为总氮、总磷、氨氮、五日生化需氧量和化学需氧量。

1.1.1.2 社会经济

太湖流域行政区划隶属江苏、浙江、上海、安徽三省一市, 分别占流域总面积的 52.6%、32.8%、14%和 0.6%。流域内分布有特大城市上海市, 江苏省的苏州、无锡、常州、镇江 4 个地级市, 浙江省的杭州、嘉兴、湖州 3 个地级市, 共计 30 县(市)。根据土地利用遥感解译结果, 2008 年太湖流域耕地面积 $188.0 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 林地面积 $49.2 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 草地面积 $1.7 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 水域面积 $48.1 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 建设用地面积 $82.4 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 未利用地面 $0.1 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 分别占流域总面积的 50.9%、13.3%、0.4%、13.0%、22.3%和 0.1%。

2007 年太湖流域总人口为 4.917×10^4 人, 约占全国总人口的 3.7%。流域内国内生产总值(GDP)达 28.648×10^8 元, 约占全国 GDP 的 11.6%。人均 GDP 为 5.8×10^4 元, 约为全国的 3.1 倍。2007 年流域总用水量 $372.7 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中生活用水量 $26.6 \times 10^8 \text{ m}^3$, 生产用水量 $343.6 \times 10^8 \text{ m}^3$, 生态用水量 $2.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。流域用水消耗总量 $112.6 \times 10^8 \text{ m}^3$, 平均耗水率 30%。2007 年流域废污水排放总量 $63.0 \times 10^8 \text{ t}$, 其中城镇居民生活废污水排放量 $16.5 \times 10^8 \text{ t}$, 第二产业废污水排放量 $35.7 \times 10^8 \text{ t}$, 第三产业废污水排放量 $10.8 \times 10^8 \text{ t}$ 。

1.1.2 水环境变化特征

1.1.2.1 水资源变化特征

太湖作为流域内的开放型水体, 接纳四面八方来水, 流域内的人类活动对水土资源的影响最终都会在太湖水体的量和质上得到反映。太湖流域多年(1956—1979 年)平均年水资源量 $162 \times 10^8 \text{ m}^3$, 平均产水系数约 0.38, 其中多年平均地表水资源量为 $137 \times 10^8 \text{ m}^3$ (林泽新, 2002)。

随着社会经济的迅猛发展, 太湖流域用水总量逐年增长。1980 年用水总量为 $234 \times 10^8 \text{ m}^3$, 2000 年为 $316 \times 10^8 \text{ m}^3$, 净增用水量 $82 \times 10^8 \text{ m}^3$, 年均增长率为 1.5% (靳晓莉等, 2006)。太湖流域用水主要由生活用水、工业用水和农业用水三部分构成。在 1980—2000 年的 20 年里, 生活用水量随着生活水平的提高而不断上升, 年均增长率达 5.5%, 占用水总量的比重上升了 6.4 个百分点; 工业用水量总体呈上升趋势, 年均增长率达 3.4%, 占流域总用水量比重上升了 16.2 个百分点; 农业用水量和其占流域用水总量的比重则逐年减少, 相对缓和了全流域用水量的增长速度 (靳晓莉等, 2006)。

2007 年, 太湖流域地表水资源量 $155.4 \times 10^8 \text{ m}^3$, 地下水资源量 $43.8 \times 10^8 \text{ m}^3$, 扣除重复计算量 $26.5 \times 10^8 \text{ m}^3$, 水资源总量为 $172.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。2007 年, 太湖流域总供水量 $372.7 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中流域本地水源供水 $221.7 \times 10^8 \text{ m}^3$, 长江水源供水 $147.4 \times 10^8 \text{ m}^3$, 钱塘江水源供水 $3.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。太湖流域自身的水资源量已经难以满足流域内用水需求, 流域外引水量已经超过流域总供水量的 40%, 长江干流的过境水量已然成为太湖流域的主要补充水源。

1.1.2.2 湖体水环境变化特征

根据现行的国家地表水水环境质量标准(GB 3838—2002), 太湖 20 世纪 60 年代属 I 类水体, 70 年代发展至 II 类, 80 年代初平均为 II~III 类, 至 80 年代末全面进入 III 类, 局部 IV 类和 V 类, 90 年代中期平均已达到 IV 类, 三分之一为 V 类, 到 2000 年 III 类水体占 6.7%,

IV类水体占 85%，V类和劣于V类的水体占 8.2%，表现出太湖平均每 10 年左右水质下降一个级别（国家环境保护总局，2000）。2007 年，太湖全年期仅东太湖水质为IV类，占全湖面积的 7.4%；东部沿岸区为V类，占 11.5%；其余湖区均劣于V类，占 81.1%。

太湖的水体营养状态也由中营养—中富营养转为以富营养为主，湖泊富营养化以及所带来的夏季蓝藻暴发已经成为太湖的主要水环境问题。根据 1981 年的调查结果，太湖 83% 的面积为中营养状态，只有 16.9% 为富营养状态，表明大部分湖体处于良好状态（孙金华等，2006）。而 2000 年太湖水体以富营养化为主，太湖 24 个监测点监测数据表明，全年平均 29% 的水体为中—富营养水平，71% 已达到富营养水平（林泽新，2002）。到 2007 年，太湖水体以中度富营养为主，东太湖与东部沿岸区全年期为轻度富营养，占湖区面积的 18.8%，其他湖区全年期为中度富营养，占 81.2%。

研究表明，太湖是有机物和营养物污染型湖泊，由各种途径进入湖体的污染物有 26 种，影响太湖水质的主要污染物为氮（凯式氮）、磷和高锰酸盐指数（ COD_{Mn} ），主要来自环湖河道，其含量不断增加（范成新，1996）。由于太湖流域的水环境不断恶化，具有表征意义的太湖水体的高锰酸盐指数（ COD_{Mn} ）、总磷（TP）、总氮（TN）浓度不断上升。1981 年高锰酸盐指数（ COD_{Mn} ）、总磷（TP）、总氮（TN）平均浓度分别为 2.83 mg/L、0.020 mg/L、0.900 mg/L，而 2000 年分别上升为 5.10 mg/L、0.120 mg/L、3.012 mg/L，分别上升了 80%、500%、234.7%（杨桂山等，2003；秦伯强等，2004）。目前，太湖流域水环境污染不仅有西方发达国家水污染第一阶段出现的以 BOD、重金属为主的特征，更有西方国家主要由 N、P 引发水体富营养化的第二阶段特点，还兼有西方国家水体以微量有毒有害有机物为特征的第三阶段的特点（虞孝感等，2001）。

1.1.2.3 入湖河道水环境变化特征

20 世纪 80 年代以来，太湖入湖河道水质受污染程度呈明显上升趋势，且日益严重，河流水质不断恶化。1983 年太湖流域河网的污染河道长度比例大约在 40%（孙金华等，2006）；1990 年太湖流域河网（评价长度 1163.2 km）的污染河道长度比例为 57.6%；1994 年太湖流域河网（评价长度 1072.6 km）的污染河道长度比例大幅度提高，达到 72.6%（靳晓莉等，2006）；2000 年太湖流域河网（评价长度 1598 km）的污染河道长度比例已高达 80.6%（秦伯强等，2004）。

到 2007 年，对太湖流域总河长 2508.6 km 的入湖河道进行的监测结果表明，有 85.7% 的评价河段水质劣于III类，其中V类和劣于V类的河段占到 75.1%，而水质达到III类和优于III类的河段仅占 14.3%。全年期监测的 36 个省界河流断面，有 75.0% 的断面水质劣于III类，其中苏沪界河 87.5% 的断面水质劣于III类，苏浙界河 73.3% 的断面水质劣于III类，浙沪界河 75.0% 的断面水质劣于III类，浙皖省界断面水质为II类。

1.1.2.4 水质区域差异

太湖流域湖泊水质以天目湖最好，为II、III类水；其他依次为太湖、溇湖、洮湖；为III、IV至V类水；阳澄湖为V至劣V类水；五里湖为劣V类水。太湖湖面水质以东北、东部、望虞河来水区、东太湖区较佳，为II类至III类水；其次为南部和西部，小梅口区为III类至V类水，贡湖为IV类水，梅梁湖为IV类至V类水；最差的为西部直湖港—武进港—太滬运河区，为劣V类水。流域入湖河道中以苏州、湖州市的入湖河道的水质较好，常州、无锡地区的入湖河道水质最差，出湖河道的水质总体上来说要优于入湖河道的水质（刘兆

德等, 2003)。

太湖流域水质的区域差异比较明显, 不仅仅局限于河道水质与湖泊水质的差异。近年来, 由于各城市市区大量企业向郊区及农村地区的迁移和农村集镇化程度的提高, 太湖流域地表水体污染呈现出由市区向郊区蔓延的趋势(陈振楼等, 2001); 同时, 由于城乡环境管制的区域差异, 大中城市水环境质量有所改善, 而农村地区污染依然十分严重, 且有加剧的趋势。

1.2 水环境变化的人文驱动力特征

1.2.1 水环境变化的人文驱动力系统

1.2.1.1 全球环境变化研究对驱动力的界定

根据全球环境变化研究中的驱动力研究成果, 影响生态环境演变的因素可以分为自然驱动因素和人文驱动因素。从长远尺度上来看, 自然驱动因素塑造了生态环境演变的过程与格局, 但在一个较短的时间尺度内, 社会经济及政策因素却成为生态环境演变的决定性因子(王黎明等, 2003)。

影响生态环境演变的因素还具有明显的层次结构, 生态环境发生变化的影响因素分为直接驱动力和间接驱动力两大类(MA, 2003)。直接驱动力直接影响生态系统的演变过程, 可以通过不同的精度对其进行识别和度量; 而间接驱动力常常通过改变一个或多个直接驱动力作用的效果, 而产生比较广泛的影响, 其影响大小是根据它对直接驱动力的作用效果来确定的。间接驱动力通常包括人口、经济、社会政治、科技、文化以及宗教因素。直接驱动力主要是指物理、化学或生物因素, 如土地覆盖变化、气候变化、空气及水污染、化学肥料的使用以及外来物种入侵等。直接驱动力和间接驱动力之间存在着明显的相互作用与影响。

1.2.1.2 流域水环境变化与人类活动的关系

流域水环境演变与流域的自然地理特征有着直接的关系, 与流域内社会经济发展更是密切相关。人类活动与水环境相互作用、相互影响, 构成一个复杂的巨系统。人类经济活动通过索取水资源和排放废弃物对水环境质量产生影响; 相反, 水环境不但为人口和经济的发展提供必要的物质基础和条件, 而且还是废弃物的受纳体。

太湖流域水环境演变受自然、人口、社会、经济等多方面因素影响: 太湖流域水环境变化过程虽然有一定的自然背景, 但是由于流域内人口密集、经济发达、人类活动强度大, 导致污染物和营养盐加速进入水体, 对加快太湖流域水污染和富营养化起着主要的作用。谢红彬等(2001)运用系统分析方法, 将太湖流域水环境变化的人文影响因素归为四大类, 即人口发展水平、经济发展水平、城市化水平和土地利用水平, 并总结了人类活动与水环境变化的互动关系。

1.2.1.3 人文驱动力层次系统构建

在“国际全球环境变化人文因素计划”等一系列全球变化研究计划提供的驱动力概念框架下, 针对太湖流域人类活动与水环境相互作用的基本特征, 本研究构建了太湖流域水环境变化的人文驱动力层次系统。

根据驱动力的种类、性质和特征,首先将太湖流域水环境变化的驱动力分为自然驱动力和人文驱动力两大类。在较短的时间尺度上,自然驱动力相对较为稳定,有着累积性效应,人文驱动力则相对较活跃。人文驱动力又分为直接驱动力和间接驱动力两类:直接驱动力直接影响水环境的质量变化,间接驱动力则通过改变一个或多个直接驱动力作用的效果而产生比较广泛的影响,二者共同构成了太湖流域水环境变化的人文驱动力层次系统(图 1-1)。

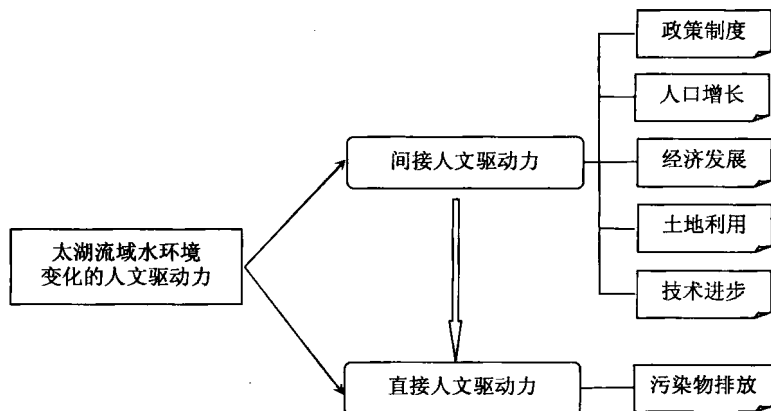


图 1-1 太湖流域水环境变化的人文驱动力层次系统

从图 1-1 中可以看出,太湖流域水环境变化的间接驱动力包括政策制度、人口增长、经济发展、土地利用、技术进步等多种因素,直接驱动力则主要是污染物的排放。污染物的排放能够直接影响流域水环境质量的变化,而人口增长、经济进步、土地利用等间接驱动力则是通过影响污染物的排放而间接影响水环境质量的变化。

1.2.2 人口增长及其对水环境的影响

1.2.2.1 人口变化

20 世纪 80 年代以来,太湖流域总人口一直呈不断攀升的态势。在 1980 年太湖流域总人口为 $3\,169 \times 10^4$ 人,到 2000 年总人口上升为 $3\,887 \times 10^4$ 人,人口净增 718×10^4 人(靳晓莉等,2006)。据太湖流域水资源公报统计,2003 年太湖流域总人口达到 $4\,069 \times 10^4$ 人,约占全国总人口的 3.1%;到 2007 年,流域总人口已经达到 $4\,917 \times 10^4$ 人,约占全国总人口的 3.7%;与 2003 年相比,2007 年流域总人口增加了 848 万人,人口密度也由 $1\,103$ 人/ km^2 增加至 $1\,333$ 人/ km^2 。

在 1980—2000 年间,太湖流域上游区增长了 135×10^4 人,下游区增长了 583×10^4 人,上游区年均增长率略高于下游区,流域人口整体呈现东密西疏的分布态势(靳晓莉等,2006)。这种显著的空间差异与人口分布的基本规律是相一致的,即经济越发达的地区人口集聚越多。太湖流域东部地区交通便利,经济发展迅速,吸引了大量的外来人口,致使当地的人口密度普遍较高;而流域西部地区地形因素制约了该区域的经济的发展,当地部分人口流转到经济发达的城市,同时相对落后的经济也制约了外来人口的流入。

1.2.2.2 外来人口

在太湖流域的人口增长中,虽然人口的自然增长率有所降低,但是由于人口基数庞大,

自然增长仍占有一定的比重。尽管如此,欠发达区域由于经济社会发展落后、就业压力大,必然导致人口向发达区域大量流动,这一人口流动规律在太湖流域表现得格外突出。可以说,人口迁移增长是新时期太湖流域人口增长的主要因素。

2000年,太湖流域共有外来人口 711×10^4 人,大概占流域总人口的16.5%,其中80%的外来人口分布在城镇地区,余下约20%分布在农村地区(陈爽等,2004)。外来人口中平均75%以上来自外省(市),其中苏、浙、沪以外地区的又占到来自外省外来人口的近80%;而在25%省内迁移的外来人口中,来自乡镇的外来人口所占比例达到了85%。流域内不同级别的行政单元的外来人口来源也存在差异,地级市的外来人口中来自省内其他城市的占50%以上,远高于县和县级市,而县和县级市的外来人口更多来自外省(市)(陈爽等,2004)。

研究表明,太湖流域外来人口占城镇人口的比重平均为20%,湖州、嘉兴和镇江地区较低,大约在10%~13%,苏州地区较高,大于22%;太湖流域外来人口对城镇化率的贡献在1.24~4.66个百分点,平均为2.34个百分点,杭州和苏州的外来人口对城镇化率的贡献较高,而上海和镇江的外来人口的贡献率则较低(陈爽等,2004)。

1.2.2.3 人口增长对水环境的影响

人口增长与水环境质量的变化有着十分密切的联系。随着人口膨胀和人类经济活动的发展,粗放的经济增长与生活消费方式,使生活用水量和生活污水排放量与日俱增。

太湖流域人口众多,城乡居民点密集,其本身就是巨大的污染源。近年来,随着流域人口的不断增长和生活水平的逐步提高,流域生活用水量和生活污水排放量也在不断上升。2007年太湖流域总人口较2003年增长了20.8%,流域生活用水量增长了18.2%,生活污水排放量增长了20.4%。可以看出,流域生活用水量和生活污水排放量与流域人口数量的增长幅度十分一致。在不考虑污水处理设施的情况下,生活污染物的排放将随着人口数量的增加而线性增加,庞大的人口规模产生巨量的污染物,其对太湖流域水环境产生的影响是十分巨大的。

1.2.3 城市化及其对水环境的影响

1.2.3.1 城市化发展特征

太湖流域自然条件优越、经济基础雄厚,是我国经济最发达的地区之一,也是我国城镇密集、区域城市化水平较高的地区之一。太湖流域城市化过程与传统的城市化模式有所不同,它是以农村城市化与区域内不同等级中心城市发展相结合的类型。

1980年以来,太湖流域乡镇企业的迅速崛起推动了小城镇的快速发展,小城镇、中小城市的土地扩张和人口增长明显快于大城市,在整个地区城市化进程中,农村城市化占有重要的份额。90年代以来,太湖流域地区涌现了一大批中小城市,如苏州吴县、常州武进、无锡锡山等都是最新设立的县级市。随着改革开放形势的深入发展,太湖流域经济发展十分迅速,城市区域的基础设施日臻完善,城市之间的各种社会、经济和科技文化联系加强,区域集聚、轴线发展由点到面不断扩大,城镇工业化、现代化水平不断提高,城乡一体化成为经济发达地区城市空间演化的最大特征和基本发展趋势。

除了城市化模式与其他地区有所不同,太湖流域的城市化程度和城市化发展速度都大大高于全国平均水平。太湖流域非农业人口占总人口的比重从1987年的38%上升到1995

年的 44%，到 1999 年已达到 51%，而同期全国城市化水平分别为 27%、28%和 31%（谢红彬等，2001；孙金华等，2006）。

1.2.3.2 城市化对水环境的影响

太湖流域快速的城市化进程对流域内水环境的影响主要表现在两个方面。一方面，太湖流域城市化进程的加速导致城镇土地利用总量呈高速增长。在整个太湖流域，1986 年建设用地的面积为 $4\,143\text{ km}^2$ ，而到 1996 年已提高到 $6\,603\text{ km}^2$ ，10 年间增加了 59.4%（孙金华等，2006）。据统计，2008 年太湖流域建设用地面积为 $8\,234\text{ km}^2$ ，较 1996 年又增加了 24.7%。有研究表明，营养盐污染的输出变化主要源于土地利用向面源污染高产出的建设用地转变以及径流总量的增加（李恒鹏等，2008）。

另一方面，随着城市化水平的提高，太湖流域生活用水量和废污水排放量急剧上升。以无锡市为例，1980 年平均每人生活用水量为 105 L/d ，1999 年增加到 284 L/d ，生活用水量从 $8\times 10^4\text{ t/d}$ 提高到 $32\times 10^4\text{ t/d}$ 。如果按排放系数 0.8 计算，城市生活污水排放量由原来的 $6.4\times 10^4\text{ t/d}$ 增加到 $25.4\times 10^4\text{ t/d}$ （林泽新，2002）。生活污水对流域水环境污染的贡献率十分可观， COD_{Cr} 中生活污染源贡献率占 57.2%，氨氮中生活污染源贡献率占 62.6%（靳晓莉等，2006）；总磷指标中生活污水贡献率亦达到 60%以上（孙金华等，2006）。

1.2.4 工业化及其对水环境的影响

1.2.4.1 经济发展状况

太湖流域历史上就是我国著名的富庶之地，改革开放后凭借优越的区位优势和良好的经济基础、强大的科技实力、高素质的人才队伍和日益完善的投资环境，流域经济社会得到了高速发展，成为长江三角洲的核心地区 and 我国经济最发达的地区之一。

据统计，1990 年太湖流域的 GDP 为 $1\,540\times 10^8$ 元，人均 GDP 为 0.44×10^4 元；1995 年流域的 GDP 为 $5\,803\times 10^8$ 元，人均 GDP 为 1.61×10^4 元；2000 年 GDP 增加至 $10\,193\times 10^8$ 元，而人均 GDP 增加至 2.58×10^4 元；2005 年流域 GDP 为 $21\,221\times 10^8$ 元，人均 GDP 达 4.68×10^4 元；到 2007 年流域 GDP 已高达 $28\,648\times 10^8$ 元，人均 GDP 已增加至 5.80×10^4 元。不难看出，太湖流域经济社会一直保持着快速发展的态势。

1.2.4.2 产业结构变化

自 1990 年以来，太湖流域的地区生产总值中第二产业一直占据主导地位，但是第二产业比重则呈持续下降趋势。同样呈下降趋势的还有第一产业，其在流域 GDP 中的比重从 10%左右持续下降到 5%左右。与之相反，太湖流域第三产业比重却一直攀升，从不足 30%上升为 40%左右。可以看出，90 年代以来太湖流域为生产服务的金融、保险、房地产、综合科研技术等第三产业发展十分迅速。

在太湖流域第二产业产值中，工业产值一直占据着主导地位。太湖流域是我国最大的综合工业基地之一，也是我国工业化进程最快的地区之一。在工业化初期，太湖流域主要以纺织业为主，纺织业是当地的支柱产业。随着工业化和开放型经济的发展，工业结构发生了转变，逐步转向以制造业为主的工业结构，又重点培育了以机械、电子、石油化工、汽车制造为主的新兴优势产业，形成了以电子及通信设备制造业、交通运输设备制造业、电器机械及器材制造业、化学原料及制品制造业为支柱行业的格局。可以看出，太湖流域的工业化已经进入高级发展阶段，呈现出重工业化和高工业化的特点。