

►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

水生态承载力研究

TAIHU LIUYU SHUISHENGTAI CHENGZAILI YANJIU

王西琴 刘子刚 等著

中国环境出版社

太湖流域水生态功能分区与质量目标管理技术示范 (2008ZX07526-001, 002, 003, 004, 005, 006, 007, 008, 009, 010, 011, 012, 013, 014, 015, 016, 017, 018, 019, 020, 021, 022, 023, 024, 025, 026, 027, 028, 029, 030, 031, 032, 033, 034, 035, 036, 037, 038, 039, 040, 041, 042, 043, 044, 045, 046, 047, 048, 049, 050, 051, 052, 053, 054, 055, 056, 057, 058, 059, 060, 061, 062, 063, 064, 065, 066, 067, 068, 069, 070, 071, 072, 073, 074, 075, 076, 077, 078, 079, 080, 081, 082, 083, 084, 085, 086, 087, 088, 089, 090, 091, 092, 093, 094, 095, 096, 097, 098, 099, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 259, 260, 261, 262, 263, 264, 265, 266, 267, 268, 269, 270, 271, 272, 273, 274, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 283, 284, 285, 286, 287, 288, 289, 290, 291, 292, 293, 294, 295, 296, 297, 298, 299, 300, 301, 302, 303, 304, 305, 306, 307, 308, 309, 310, 311, 312, 313, 314, 315, 316, 317, 318, 319, 320, 321, 322, 323, 324, 325, 326, 327, 328, 329, 330, 331, 332, 333, 334, 335, 336, 337, 338, 339, 340, 341, 342, 343, 344, 345, 346, 347, 348, 349, 350, 351, 352, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 359, 360, 361, 362, 363, 364, 365, 366, 367, 368, 369, 370, 371, 372, 373, 374, 375, 376, 377, 378, 379, 380, 381, 382, 383, 384, 385, 386, 387, 388, 389, 390, 391, 392, 393, 394, 395, 396, 397, 398, 399, 400, 401, 402, 403, 404, 405, 406, 407, 408, 409, 410, 411, 412, 413, 414, 415, 416, 417, 418, 419, 420, 421, 422, 423, 424, 425, 426, 427, 428, 429, 430, 431, 432, 433, 434, 435, 436, 437, 438, 439, 440, 441, 442, 443, 444, 445, 446, 447, 448, 449, 450, 451, 452, 453, 454, 455, 456, 457, 458, 459, 460, 461, 462, 463, 464, 465, 466, 467, 468, 469, 470, 471, 472, 473, 474, 475, 476, 477, 478, 479, 480, 481, 482, 483, 484, 485, 486, 487, 488, 489, 490, 491, 492, 493, 494, 495, 496, 497, 498, 499, 500, 501, 502, 503, 504, 505, 506, 507, 508, 509, 510, 511, 512, 513, 514, 515, 516, 517, 518, 519, 520, 521, 522, 523, 524, 525, 526, 527, 528, 529, 530, 531, 532, 533, 534, 535, 536, 537, 538, 539, 540, 541, 542, 543, 544, 545, 546, 547, 548, 549, 550, 551, 552, 553, 554, 555, 556, 557, 558, 559, 560, 561, 562, 563, 564, 565, 566, 567, 568, 569, 570, 571, 572, 573, 574, 575, 576, 577, 578, 579, 580, 581, 582, 583, 584, 585, 586, 587, 588, 589, 590, 591, 592, 593, 594, 595, 596, 597, 598, 599, 600, 601, 602, 603, 604, 605, 606, 607, 608, 609, 610, 611, 612, 613, 614, 615, 616, 617, 618, 619, 620, 621, 622, 623, 624, 625, 626, 627, 628, 629, 630, 631, 632, 633, 634, 635, 636, 637, 638, 639, 640, 641, 642, 643, 644, 645, 646, 647, 648, 649, 650, 651, 652, 653, 654, 655, 656, 657, 658, 659, 660, 661, 662, 663, 664, 665, 666, 667, 668, 669, 670, 671, 672, 673, 674, 675, 676, 677, 678, 679, 680, 681, 682, 683, 684, 685, 686, 687, 688, 689, 690, 691, 692, 693, 694, 695, 696, 697, 698, 699, 700, 701, 702, 703, 704, 705, 706, 707, 708, 709, 710, 711, 712, 713, 714, 715, 716, 717, 718, 719, 720, 721, 722, 723, 724, 725, 726, 727, 728, 729, 730, 731, 732, 733, 734, 735, 736, 737, 738, 739, 740, 741, 742, 743, 744, 745, 746, 747, 748, 749, 750, 751, 752, 753, 754, 755, 756, 757, 758, 759, 760, 761, 762, 763, 764, 765, 766, 767, 768, 769, 770, 771, 772, 773, 774, 775, 776, 777, 778, 779, 780, 781, 782, 783, 784, 785, 786, 787, 788, 789, 790, 791, 792, 793, 794, 795, 796, 797, 798, 799, 800, 801, 802, 803, 804, 805, 806, 807, 808, 809, 810, 811, 812, 813, 814, 815, 816, 817, 818, 819, 820, 821, 822, 823, 824, 825, 826, 827, 828, 829, 830, 831, 832, 833, 834, 835, 836, 837, 838, 839, 840, 841, 842, 843, 844, 845, 846, 847, 848, 849, 850, 851, 852, 853, 854, 855, 856, 857, 858, 859, 860, 861, 862, 863, 864, 865, 866, 867, 868, 869, 870, 871, 872, 873, 874, 875, 876, 877, 878, 879, 880, 881, 882, 883, 884, 885, 886, 887, 888, 889, 890, 891, 892, 893, 894, 895, 896, 897, 898, 899, 900, 901, 902, 903, 904, 905, 906, 907, 908, 909, 910, 911, 912, 913, 914, 915, 916, 917, 918, 919, 920, 921, 922, 923, 924, 925, 926, 927, 928, 929, 930, 931, 932, 933, 934, 935, 936, 937, 938, 939, 940, 941, 942, 943, 944, 945, 946, 947, 948, 949, 950, 951, 952, 953, 954, 955, 956, 957, 958, 959, 960, 961, 962, 963, 964, 965, 966, 967, 968, 969, 970, 971, 972, 973, 974, 975, 976, 977, 978, 979, 980, 981, 982, 983, 984, 985, 986, 987, 988, 989, 990, 991, 992, 993, 994, 995, 996, 997, 998, 999, 1000)

太湖流域水生态承载力研究

王西琴 刘子刚 等 著



中国环境出版社·北京

图书在版编目(CIP)数据

太湖流域水生态承载力研究/王西琴, 刘子刚等著. —
北京: 中国环境出版社, 2013.5

(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)

ISBN 978-7-5111-1383-2

I. ①太… II. ①王…②刘… III. ①太湖—流域—
生态系统—水环境—环境承载力—研究 IV. ①X832

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 054897 号

出品人 王新程
责任编辑 王 焱 李恩军
责任校对 扣志红
封面设计 彭 杉

出版发行 中国环境出版社
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京中科印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2013 年 5 月第 1 版
印 次 2013 年 5 月第 1 次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 15.25
字 数 340 千字
定 价 45.00 元

【版权所有。未经许可, 请勿翻印、转载, 违者必究。】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

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环境质量改善具有重要意义。

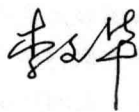
由中国科学院地理科学与资源研究所牵头并联合中国科学院南京地理与湖泊研究所、江苏省环境科学研究院、浙江省环境保护科学与设计研究院、中国人民大学、常州市环保局、宜兴市环保局、湖州市环保局等单位承担的“太湖流域水生态功能分区与质量目标管理技术示范”课题(2008ZX07526-007),作为水专项首批启动的课题之一,便是面向太湖流域水环境管理工作的实际需求而设立的。课题旨在构建面向水生态系统健康的新型水环境管理技术体系,从而实现太湖流域水环境管理工作的开拓与创新,并确保太湖流域污染物减排目标的顺利实现。

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，仍需要不断地改进与完善。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

水生态承载力是在对水环境问题认识的不断深入,以及水环境管理由过去单一的水质管理向水生态系统综合管理转变的背景下提出的,其宗旨是力图通过能够反映水生态系统健康的指标作为依据,实现水环境管理从忽视生态向重视生态的转变,达到真正意义上的水环境保护与综合管理。水生态承载力是一个具有生态和经济社会双重属性的综合概念。水生态系统的自然属性决定了水生态承载力具有生态学涵义,即存在最大可承载规模,经济社会系统的社会属性决定了存在最优的承载规模,即人类可通过自身的管理实现一定生态目标下的最大承载规模。在认识水生态承载力存在极限的同时,通过对水生态系统和经济社会系统的人为干预,实现承载力的最优化,使经济社会与水生态系统协调健康发展。通过水生态承载力的研究,能够建立水生态系统与经济社会系统之间的相互响应关系,实现水生态保护与经济社会的双赢。因此,水生态承载力的研究引起广泛关注,并成为国家水体污染控制与治理科技重大专项的一个重要研究内容,围绕这一主题设立了“流域水生态承载力与总量控制技术研究课题”,以及太湖流域和辽河干流 2 个示范课题。本书内容是“太湖流域水生态功能分区与质量目标管理技术示范”课题的部分成果。

由于水生态承载力是一个全新的概念,对于这一概念的认识和理解还存在异议。从目前来看,对于水生态承载力的理解存在着两种观点,一种观点是来源于生态学著名的逻辑斯蒂曲线,研究的视角集中在自然生态系统,将人类对生态承载力的干扰作为约束条件,表征承载力的指标采用能够支撑的最大生物种群数量表示,如采用种群的数量,承载体是自然生态系统。其特点是以自然生态系统为研究重点,虽然也考虑人类活动对承载力的影响,但是将人类活动对生态承载力的影响隐含在其中,通过现状生态系统这一限定来反映。另一种观点是将人口作为整个系统所能承载的对象,生态承载力的指标是人口数量,或者经济规模,或者两者兼有。这种观点的核心思想是将自然系统与经济社会融为一体,将两者看作一个综合的系统,研究对象不仅仅包括自然系统,而且包括自然系统、经济社会系统以及他们之间的相互依赖关系。其优点是能够建立水生态系统健康与经济社会发展目标之间的定量关系,为经济社会发展提供决策依据,实现了污染源控制与水生态系统的动态响应关系。本书依据后一种观点展开研究。

太湖流域是我国经济发达地区,其社会经济发展以及生态系统安全对于国家生态安全具有重要的意义。太湖也是我国重点污染防治的“三河”、“三湖”、“一库”的重要水体之一。近年来,在工业污染逐渐得到控制的情况下,农业非点源污染问题日益突出,一方面是农药化肥的大量使用及畜禽粪便等养殖废水,严重影响了太湖水质。另一方面是太湖流域的淡水养殖业非常发达,大量未经任何处理的,含有丰富氮、磷等营养物质的养殖废水进入太湖水体,加上大量投放饵料,加速了湖泊富营养化过程,破坏了水生态系统,使得湖泊水生态系统退化,生物多样性受损。水生态环境质量成为流域社会经济可持续发展的障碍。如何解决这一问题将对于保障太湖流域生态安全,实现流域可持续发展具有重要的现实

意义。

本书内容是“太湖流域水生态功能分区与质量目标管理技术示范课题”之子课题“太湖流域水生态承载力分析”的研究成果,主要围绕太湖流域2个重要的示范区:湖州市和常州市的水生态承载力进行研究。本书的特点主要表现在以下几个方面:(1)界定了水生态承载力的概念与内涵。在比较分析水资源承载力、水环境承载力、生态承载力等概念的基础上,界定了水生态承载力的概念,给出了狭义和广义2种水生态承载力内涵,分析了水生态承载力特点。(2)建立了水生态承载力系统动力学(system dynamics, SD)模型,该模型同时满足生态水量与环境容量动态模拟,实现水资源、COD、氨氮、TN和TP五种污染物的联合调控,使水量和多种污染物的同时控制成为可能,为正确模拟和优化水生态承载力提供技术支撑。(3)对湖州市水生态承载力和常州市水生态承载力进行了模拟优化,提出不同水生态保护目标下的水生态承载力方案,以及调控经济社会的关键指标,为示范区水质目标管理与经济发展提供定量化的可操作性依据。(4)建立了湖州市水生态承载力SD模型用户界面,将SD模型的参数数据输入窗口、子系统模块、结果输出模块等,均以图表形式显示,实现水生态承载力在水质目标管理中的可视化,为地方政府的水质目标管理提供了可操作的依据。

本书各章执笔人为:第1章王西琴、刘子刚;第2章王西琴、刘子刚;第3章刘子刚、王西琴、何芬;第4章王西琴、高伟;第5章王西琴、高伟、刘子刚、曾勇;第6章王西琴、高伟、刘子刚、曾勇;第7章王西琴。

此外,在数据整理、外文文献翻译以及实地调研过程中,以下同学均参与了不同程度的工作,他们是:季妍、郑瑜、刘江帆、陈茜、蔡鑫淼、陆琼、杜倩倩、冯迹、李兆捷、姜远驰、韦平平、卜中露、孙霖、张家瑞、王心宇、秦建明、王佳敏、吕青青、闫程等,在此一并表示感谢。

在课题研究和本书的编写过程中,得到中国科学院地理科学与资源研究所李文华院士的指导和帮助,得到中国水利水电科学研究院彭文启研究员、中国环境科学研究院张远研究员的大力帮助,在此表示衷心感谢!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、常州市环境保护局、湖州市环境监测中心站、安吉县水文局、湖州市水文局等单位同志的支持和帮助,在此一并表示衷心感谢!

水生态承载力的研究在我国刚刚起步,无论是对这一问题的认识还是定量的研究方法,还处于探索阶段。对于太湖流域水生态承载力的研究方兴未艾,可供参考的文献十分有限,希望本书的出版能对今后的研究提供一定的基础。相信随着水生态系统管理的需求,水生态承载力将会成为未来研究的重点和发展方向,希望本书的出版能够起到抛砖引玉的作用,推进水生态承载力的深入发展。

编 者

2012年12月于北京

目 录

1	绪论	1
1.1	研究背景	1
1.2	国内外研究进展	7
1.3	研究思路	12
1.4	研究内容	14
1.5	小结	15
2	水生态承载力概念与内涵	16
2.1	水生态承载力理论基础	16
2.2	水生态承载力概念与内涵	25
2.3	水生态承载力特点	31
2.4	小结	32
3	水生态承载力评价指标体系及评价方法	33
3.1	相关指标体系	33
3.2	水生态承载力评价指标体系构建	45
3.3	水生态承载力评价方法	52
3.4	权重与评价标准的确定	55
3.5	小结	57
4	水生态承载力模拟预测与调控方法	58
4.1	系统动力学特点与应用	58
4.2	水生态承载力 SD 模型	60
4.3	调控程序	66
4.4	模型检验	68
4.5	遗传投影寻踪法优选方案	69
4.6	小结	71
5	湖州市水生态承载力研究	73
5.1	概况	73
5.2	城市功能定位	81
5.3	经济发展对水环境的压力	82

5.4	水资源与水环境	88
5.5	湖州市水生态承载力现状评价	91
5.6	河流环境流量计算	104
5.7	水环境容量计算	115
5.8	水生态承载力模拟预测	126
5.9	水生态承载力调控	154
5.10	模型应用界面	159
5.11	小结	162
6	常州市水生态承载力分析	163
6.1	概况	163
6.2	城市未来发展目标	166
6.3	经济社会发展对水环境的压力	167
6.4	水资源水环境现状	169
6.5	常州市水生态承载力现状评价	171
6.6	水生态承载力模拟与预测	173
6.7	水生态承载力调控	200
6.8	小结	205
7	主要结论与进一步研究问题	206
7.1	主要结论	206
7.2	进一步研究问题	215
	附表	217
	参考文献	227

1 绪论

1.1 研究背景

1.1.1 问题的提出

随着水生态系统问题的日益复杂化,以及对流域水生态系统综合管理的需求,对承载力的概念也提出了更高的要求,水量和水质问题并存,水生生物数量和多样性大幅度减少,水生态系统退化等,迫使人们从更高的角度去认识水生态系统的承载能力。显然,过去的水资源承载力、水环境承载力等概念已经不能完全适应现实的需求。如何定义一个新的概念,既能够体现当前水生态问题,又能将经济社会发展与水生态系统相联系,并作为经济社会发展的重要依据,成为关注的热点。水生态承载力概念就是在这样的背景下被提出的。提出这一概念的目的在于建立水生态系统与经济社会系统之间的相互响应关系,通过经济社会系统的人为干预,使水生态系统的承载力达到最优化,实现水生态保护与经济社会的双赢,使经济社会与水生态系统协调健康发展。因此,水生态承载力概念是继水资源承载力、水环境承载力、生态承载力之后引起广泛关注的话题。成为国家水体污染控制与治理科技重大专项中一个重要的研究内容,围绕这一主题设立了“流域水生态承载力与总量控制技术研究课题”,以及太湖流域和辽河干流 2 个示范课题,本书内容是“太湖流域水生态功能分区与质量目标管理技术示范”课题的一部分内容。

太湖流域是我国经济发达地区,其社会经济发展以及生态系统安全对于国家生态安全具有重要的意义。太湖是我国重点污染防治的“三河”、“三湖”、“一库”的重要水体之一,太湖流域的水质性缺水问题已经极为突出,湖泊的水生态环境质量对流域的社会经济发展有重大的影响。如何解决这个问题将对于保障太湖流域生态安全,实现流域可持续发展具有重要的现实意义。为此,中央政府对这些重要的水体提出了严格的水质目标,并制定了相应的水环境保护规划。然而,由于长期以来水资源、水环境的过度超载,以及污染问题的累计效益,使得采用传统的研究方法,已经很难适应现实的需求。因此,如何采用新的理念,新的技术方法去研究太湖流域的水环境问题,成为当前迫切需要解决的问题。

“太湖流域水生态承载力分析”子课题就是基于这样的背景立项。该课题是水专项“太湖流域水生态功能分区与质量目标管理技术示范课题”之子课题。其主要的研究目标是为示范研究提供技术支撑。研究目标是科学合理界定水生态承载力,提高和恢复水生态承载力,并确定流域合理的经济社会发展模式,保证经济发展与水生态保护之间的协调。本课题的研究,不仅对于恢复太湖流域的水生态环境具有指导意义,同时将对其他水质性缺水地区(流域)的水环境管理与保护也具有重要的示范作用。

1.1.2 水生态问题

水是生命之源,是生态系统中最活跃、关键的因子,也是最敏感、不可替代的重要的自然资源和环境要素。如果没有水,人类和其他生物都将无法生存,工农业生产无法进行,社会经济就不能持续发展。河流、湖泊和湿地占地球表面积的比例不到 1%,却为地球上 40% 的鱼类以及 1/4 的脊椎动物提供了栖息地。

我国水资源总量约 2.8 万亿 m^3 , 占全球水资源的 6%, 仅次于巴西、俄罗斯和加拿大, 居世界第四位。而人均淡水资源量仅为 2 100 m^3 , 排在世界第 121 位, 仅及世界人均水平的 1/4 强。我国已被联合国粮农组织列入全球 13 个人均水资源最贫乏的国家之一。我国水资源时空分布不均, 降水主要集中在夏季。大部分地区每年汛期 4 个月的降水量占全年的 60%~80%, 容易形成春旱夏涝。降水量北少南多, 水资源分布与经济社会发展布局不相匹配。北方地区以 19% 的水资源支撑了 47% 的人口、65% 的耕地和 45% 的 GDP。

随着全球变化、人口增长和人类社会活动干扰的日益加剧, 我国水生态问题十分严重。许多河流、湖泊、湿地面临着水资源过度开发和不合理利用、污染物排放、生态占用和破坏等多重威胁, 导致天然径流过程改变, 河流径流量减少, 河道断流、水质恶化、地下水位下降、水体富营养化、生物多样性减少、湿地萎缩退化、海水入侵、水灾害频繁等多种水生态问题, 已经严重影响经济社会可持续发展, 威胁人类健康和福祉。

我国的水生态问题主要表现在以下几个方面:

水污染严重, 水环境质量恶化, 湖泊水体富营养化严重, 蓝藻水华频频爆发。2011 年, 全国地表水总体为轻度污染。湖泊(水库)富营养化问题仍突出。长江、黄河、珠江、松花江、淮河、海河、辽河、浙闽片河流、西南诸河和内陆诸河十大水系监测的 469 个国控断面中, I~III 类、IV~V 类和劣 V 类水质断面比例分别为 61.0%、25.3% 和 13.7% (中国环境状况公报, 2012)。2011 年, 监测的 26 个国控重点湖泊(水库)中, 中营养状态、轻度富营养状态和中度富营养状态的湖泊(水库)比例分别为 46.2%、46.1% 和 7.7%。水体富营养化导致水华频繁出现, 面积逐年扩散, 持续时间逐年延长。太湖、滇池、巢湖、洪泽湖都有水华产生。太湖自 20 世纪 90 年代开始整体进入富营养化状态, 蓝藻水华几乎年年爆发, 大型水生植物严重退化, 2006 年, 蓝藻水华覆盖了约 2/5 的湖面, 2007 年, 蓝藻事件再度爆发, 且太湖出现 50 年来最低水位, 21 个国控监测点位中, IV 类、V 类和劣 V 类水质的点位比例分别为 23.8%、19.0% 和 57.2%, 造成大量鱼类死亡和严重的用水危机, 引起全球关注(邵鹏, 2010)。

由于地表水污染以及水量的减少, 导致地下水也受到了一定程度的污染。2004—2008 年, 海河流域水质劣于 III 类的地下水面积平均占评价总面积的 48.3%, 也就是说近一半地下水受到污染, 造成水质性缺水(朱梅, 2011)。

气候变化引起降雨、蒸发、径流等水分循环的变化, 导致水资源在时间和空间上的重新分配和水资源数量的改变(张利平, 2008)。1956—2002 年, 全国年平均降水量线性减少趋势为 $-2.9 \text{ mm}/10 \text{ a}$, 中国西部、东北北部地区和南方地区降水量呈现增加趋势, 增幅接近 5%, 而东北南部、华北以及西北地区等降水量呈现减少趋势。黄河、淮河、海河和辽河区不同保证率下降水量均出现减少, 地表水资源量减少 17%, 水资源总量减少 12%。海河流域降水的极值变化致使降水时空分布不均, 致使近 20 年水资源量减少迅速, 2000—2009

年水资源总量平均为 256.2 亿 m^3 , 低于多年平均水资源量 30.8% (海河水资源公报, 2000—2009)。黄河自 20 世纪 50 年代以来, 河道内流量呈下降趋势, 以利津站为例, 从 1950 年的 514 亿 m^3 减少到 1999 年的 68 亿 m^3 。北方部分流域已从周期性的水资源短缺转变成绝对性短缺, 水资源紧张状况趋于严峻 (任国玉, 2007)。

极端天气增加导致水旱灾害频繁发生。水旱灾害引起粮食减产, 甚至危害人类生命财产, 其带来的损失往往不可估量。近 15 年来, 年均洪涝灾害损失约占同期全国 GDP 的 1%, 发生流域性大洪水的年份, 洪涝灾害损失占同期全国 GDP 比例高达 2%~3%; 我国的干旱事件几乎年年出现。据《中国水旱灾害公报》公布的数据, 1950 年至 2007 年, 全国农业平均每年因旱受灾面积 3.26 亿亩^①, 其中成灾面积 1.86 亿亩, 年均因旱损失粮食 158 亿 kg, 占各种自然灾害造成粮食损失的 60% 以上。全国农作物年均因旱损失粮食由 20 世纪 50 年代的 43.5 亿 kg 上升到 90 年代的 209.4 亿 kg, 而 2000 年以来更是高达 372.8 亿 kg。

河道断流和淤积增加。上游引水增加, 下游来水减少, 致使不少河流发生断流, 并由此引发了一系列严重的生态问题。例如, 1972 年至 1999 年的 27 年中, 黄河下游有 21 年出现断流, 累计 1 091 天。又如, 1980—1997 年, 京津以南平原区 17 条主要河流, 各河年平均河干天数 355 天。河道内流量减少, 两岸水土流失加剧, “水少沙多” 进而引起河床淤积。河床淤积使得河床抬高形成 “地上悬河”, 更进一步加剧了洪涝灾害的风险。长江上游每年土壤侵蚀量高达 15 亿 t 以上, 其中 1/3 的泥沙进入干流, 2/3 的粗沙、石砾淤积在支流河道和水库中, 是造成 1998 年长江发生全流域性的大洪水灾害的主要原因 (林新波, 2011)。1980—2005 年黄河输沙量比 1956—1979 年期间的输沙量减少达 55.3% (信忠保, 2009)。内蒙古河道巴彦高勒—浦滩拐河段 1962—1982 年、1982—1991 年、1991—2000 年、2000—2008 年的年均淤积量分别为 0.009 亿 t、0.379 亿 t、0.540 亿 t、0.620 亿 t (周丽艳, 2012)。

天然湿地大面积丧失, 生态服务功能退化, 生态环境比较脆弱。湿地介于水生生态系统和陆生生态系统之间, 对水分变化极其敏感。在气象因子和人类活动的耦合作用下, 湿地发生了结构性的变化和功能性的衰退。在我国的一些重要湿地, 如三江平原湿地、辽河三角洲湿地、黄河三角洲等, 均出现不同程度的湿地退化、湿地面积缩小以及生物多样性迅速减少。其主要原因有以下三个方面: 一是农业开垦和围垦导致湿地被占用。例如, 因大面积开垦, 三江平原天然湿地大量丧失, 平原区的沼泽率由 80% 降至 20%。二是河流上游修建蓄水、引水工程以及沿河的堤防工程, 切断了洪泛区湿地与河流的水力联系, 导致湿地退化甚至完全干涸。例如, 黑龙江省扎龙湿地, 因主要补给水源乌裕尔河上游修建水库、塘坝 67 座, 使进入扎龙湿地的水量由 20 世纪 50—60 年代平均 4.92 亿 m^3 , 减小到平均 2.02 亿 m^3 , 最少年仅 0.4 亿 m^3 , 导致核心区的水面缩小了 3/4, 芦苇湿地退化, 年产芦苇由最高 50 万 t 降到 3 万 t 左右。又如, 1980—2007 年, 海河流域自然湿地面积由 5 360 km^2 缩减到 4 331 km^2 , 人工湿地面积从 1990 年的 5 245 km^2 减少到 2007 年的 4 499 km^2 (Lu Shanlong, 2011)。三是泥沙淤积、污染、疏干排水导致湿地功能退化。湿地丧失和退化加剧了水旱灾害、水资源短缺和生物多样性丧失等水生态问题。

生物多样性丧失。污染、生物资源过度利用、生物入侵、栖息地减少、水利工程阻隔

① 1 亩=1/15 hm^2 。

导致生物多样性大量丧失,渔业资源受损。由于污染等影响,太湖优质鱼类如翘嘴鲌(*Culter alburnus*)和鳊(*Siniperca chuatsi*)数量不断减少,具有地域性经济价值的鱼类如蛇鲈(*Saurogobio dabryi*)、银鲌(*Xenocypris argentea*)和洄游性鱼类几近消失(毛志刚,2011)。水利工程阻隔使得一些洄游鱼类不能正常繁衍生息,长江的白鲟、中华鲟、达氏鲟、江豚已成为濒危物种。洞庭湖的年平均产鱼量已由20世纪50年代的3070万t,降至20世纪90年代的1500万t左右,鱼类的种数也从114种减少到80种。与20世纪50年代相比,黄河水系鱼类产量减少了80%~85%。1983—1993年,渤海鱼类群落多样性指数从3.61(85种)降到2.52(74种),很多种类已经绝迹,渤海湾著名的大黄鱼等优良鱼种基本消失。

1.1.3 经济社会发展对水生态系统的压力

水是人类生存发展必不可少的基础性的自然资源,水是社会经济系统的重要组成部分,与社会经济系统的其他构成要素之间相互作用,构成了一个相互联系的整体。在社会经济系统中,工农业生产、居民生活都离不开水。水资源是工农业生产中不可缺少的生产元素之一,也是居民日常生活的必需品。人类活动影响水文循环和水文生态过程,相反,水文循环过程和水文生态过程的变化又影响着人类生活环境。水资源的数量和质量深刻影响着经济社会的各个方面,直接关系到国家经济安全、社会稳定和可持续发展。

水是农业的命脉,我国是以灌溉农业为主的国家,降水与农作物生长季节的不一致性,更突出了灌溉的重要性,目前农业用水仍然占总用水的67%。北方大部分地区,由于长期以来过度灌溉,不仅引起了水资源短缺,而且导致水体的污染。太湖流域土地肥沃,河网如织灌溉方便,自古以来就是国家重要的“粮仓”,历史上江南地区的粮食通过运河等漕运系统集散到全国各地,素有“苏湖熟、天下足”之誉。2010年农田灌溉用水76.6亿m³,占农业用水的83%。农业灌溉用水高峰出现在7、8月份,如遇空梅或枯水年份,大量农业灌溉用水将导致流域河湖水位过低,与河道内生态用水产生矛盾。农业既是用水大户,也是重要的面污染源。近年,在耕地面积逐渐减少的情况下,为了保持粮食稳产高产,高投入、高产出成为流域种植业的显著特点,化肥施用量持续增加,导致了高强度的氮磷排放。

随着城市化的迅速发展,对水资源的需求和水环境的压力日益加剧、增多,不仅要保证居民生活用水,还要为城市的旅游、休闲娱乐以及美化环境提供水源。城市内的河流被人类高度控制和开发,例如,修筑大量的闸坝控制流向下游的水量,使得城市河流成为静止不动的河流。尽管在河流污染治理与保护上投入了大量资金,也取得了一些成效,但是河流受污染的趋势并没有得到根本解决,有些城市和地区河流的污染仍在加重。河流枯竭和水质恶化已经成为限制我国城市发展的关键因素。目前,我国正处在城市化加快的阶段,城市规模不断扩大,人工建筑物不断增多,使得城市内河水系不断萎缩、内湖富营养化不断加重、水环境质量不断恶化,城市水生态系统不断衰退,人居环境不断下降。

由于社会经济的发展对水资源的需求量不断增加,当超出水资源一定承载力时,就会对水资源系统产生压力,水资源系统反过来制约社会经济的发展(高铤,2008)。未来全球城市化进程无疑将大幅度增加淡水需求,25年前,不到40%的人居住在城市,而25年之后,这一比例会达到60%,2030年,城镇人口会增加到近2/3,从而造成城市用水需求

激增。随着城市化进程加快,人口和工业的快速增长所带来的城市河流退化情况日益严重。

在水资源开发利用过程中,人类往往更关注的是经济利益,很少真正把水资源开发与产业发展、居民生活、生态环境等因素看作一个有机的整体,忽视了对水生态系统的保护,给水生态系统带来了一系列生态环境问题(HU et al., 2010)。很多研究表明,大多数水生态问题是由经济社会发展给水生态系统带来的压力过大所导致。社会经济发展对水生态系统的压力主要表现为以下几个方面:

(1) 水资源过度开发,用水效率低下。我国水资源开发利用规模属于世界前列。目前,我国七大河流域:松花江、辽河、海河、黄河、淮河、长江、珠江水资源开发利用率分别为 24%、67%、94%、75%、68%、15%、18%(王西琴, 2008)。我国北方大多数河流的水资源开发利用率都超过了国际警戒线规定的 40%。通常认为,当径流量利用率超过 30%时就会对水环境产生很大影响,超过 50%时则会产生严重影响。在我国北方很多地区,浅层地下水和深层地下水资源也已经被过度开采。例如,海河流域平原区浅层地下水开采率为 104%(李原园, 2010)。用水浪费严重,用水效率较低。农业灌溉用水利用系数为 0.49,发达国家为 0.7~0.8。我国单方水 GDP 产出仅为世界平均水平的 1/3(刘昌明, 2010)。

(2) 社会经济用水增加挤占了生态用水。在水资源短缺的情况下,社会经济系统中各类水资源需求(工业、农业、生态等需水)之间发生了相互冲突与竞争,主要表现为生活与工业用水挤占农业用水,而农业用水又挤占了生态用水。生态用水不足造成了很多生态问题,比如地面沉降、海水倒灌、地下水位下降等,严重影响了水生态系统的健康,对河流、湖泊和湿地生态系统的健康造成了威胁。我国是经济社会和生态环境用水竞争最为强烈的国家之一,部分地区水资源过度开发利用以及经济社会用水挤占生态用水等引发的生态与环境问题,相比其他国家更为突出(李原园, 2010)。例如,从 20 世纪 50 年代到 90 年代,黄河上、中、下游灌溉面积分别增加 0.9 倍、2.1 倍和 6.4 倍,农业耗水量增加 0.8 倍、1.0 倍、4.6 倍。全流域工业及城乡生活每年引用黄河河川径流也都在逐渐增加,占总可用河川水量的 17%,加剧了黄河水资源的供求矛盾。

(3) 污染物大量排放导致水质恶化和水生态系统退化。随着工业的快速发展、人口的增加、城市化率大幅度提高和农药化肥施用量的增加,污染物排放量不断增加,大量工业废水以及未被农作物吸收的营养物质经过雨水冲刷和渗透,直接排入或流入自然水体,导致河流、湖泊和海洋水质恶化、地下水污染、生物群落健康指数下降、水体富营养化、蓝藻赤潮灾害频发等水生态环境问题(易仲强, 2010)。例如,太湖流域由于大量施用化肥、居民生活污水和工业废水大量排放,致使水体中氮、磷含量上升,造成蓝藻水华现象频发。2010 年,太湖流域点源污废水排放量已达 63.0 亿 t;点源化学需氧量(COD_{Cr})排放量为 116.1 万 t,氨氮(NH₃-N)排放量 10.0 万 t,污染物排放总量远超过流域水域的纳污能力,流域水污染严重(叶建春, 2011)。

(4) 片面强调水生态系统的产品生产功能,忽视对水生态服务功能的保护。水生态系统有多种服务功能,可分为两大类,一类是具有直接使用价值的产品生产功能,例如供水功能、提供水产品功能、休闲娱乐功能等;另一类是具有间接使用价值的生命支持功能,例如水分调节功能、净化功能、栖息地功能和固氮放氧功能等(张亮等, 2011)。而人类在经济发展过程中往往只注重水生态系统的产品生产功能,而忽略了其提供的各种间接服务功能,使水生态系统健康受损,水生态系统服务功能价值的重大损失,不利于区域经济、

资源和环境的健康协调发展。

(5) 水坝改变了河流的天然水文情势、环境质量和生态状况。在我国,随着河流的上中游地区水利工程不断修建,极大地改变了河流的天然水文情势,层层拦截利用地表水,致使河流上游及平原地区地表径流减少,河长缩短,尾间湖泊水面萎缩甚至消失。水坝改变了河流形态,切断了河流廊道自身的连续性,扰乱了河流生态系统上下游之间的物质和能量迁移以及物种传递的正常运转,从而导致物质迁移受阻、营养物或沉积物被截留和湿地干涸,极大地改变了受影响河流生态系统的生态条件。例如,淮河流域支干流因拦蓄工程日益增多,截至2000年流域修建了约1.1万座蓄水水库和拦河节制闸蓄水工程,引起了天然径流过程大幅度改变(蒋艳,2011)。

(6) 调水工程改变了水资源的时空分配,对工程全线的水资源、生物、气候乃至人类的社会生活、经济的发展产生影响,尤其是水资源区的生态环境的影响显著。例如,我国南水北调工程将使丹江口水库坝址断面径流量减少约24%,汉江口中下游河道多年平均水位下降0.49~1.00 m,汉江中下游出现800~1 000 m³/s中水流量的天数将减少约20 d,出现1 000~3 000 m³/s大水流量的天数将减少约100 d。在丰、平两个水期下泄水的水温将降低,对汉江中下游流域水生植物群落的组成结构和鱼类种类产生不利影响,水生物种群将大大减少。

1.1.4 太湖流域水生态系统现状及问题

太湖是我国的第三大淡水湖,位于长江下游地区,流域总面积达2.97万 km²地跨江苏、浙江两省,湖泊面积2 338 km²,平均水深2.12 m(黄漪平,2001)。属于亚热带季风气候,上游地区地势西高东低,流域地表水体通过大的河道最终汇入太湖。并且太湖流域位于我国三大经济圈之首的长江三角洲地区,是我国人口、经济要素最集中的地区之一,区域内核心城市上海、苏州、无锡、常州、镇江、杭州、嘉兴、湖州均是我国经济重要城市,在我国经济社会中占有重要的地位(于文金等,2012)。

2009年太湖流域总人口5 159万人,占全国总人口的3.9%;国内生产总值36 824亿元,占全国国内生产总值的11.0%;人均国内生产总值7.1万元,是全国人均国内生产总值的2.8倍(太湖流域水资源公报,2009)。由于经济的较快发展,吸引了众多的外来人口,使得人口增长较为迅速,并且城市化水平也大大提高。由于几年人口的快速增加和经济社会的较快发展,对太湖流域的水资源需求日益增加,流域用水年均增长率达到5.5%,占用水总量的比重上升了6.4个百分点。2009年,太湖流域总供水量353.3亿 m³(含地表水源供水量352.1亿 m³,地下水源供水量1.1亿 m³,其他水源供水量0.1亿 m³)。总用水量353.3亿 m³(含生活用水量28.5亿 m³,生产用水量321.8亿 m³,生态用水量3.0亿 m³)。流域片用水消耗总量253.8亿 m³,平均耗水率37%。其中,太湖流域用水消耗总量102.2亿 m³,平均耗水率29%(太湖流域水资源公报,2009)。

太湖流域水污染严重,湖泊富营养化形势十分严峻,蓝藻水华现象更是频繁发生。20世纪80年代太湖水质还是II、III类,21世纪却是以V类水质为主,有些断面甚至是劣V类,水质严重恶化,严重危害供水安全,影响了周边地区的经济发展及人民生活(王雪等,2012)。

工业排污是太湖水生态环境恶化的主因。太湖流域的苏州、无锡、常州、杭州、嘉兴

和湖州等地区的工业规模都十分庞大,因此,随之而来的排放的废水总量也持续迅猛地增加。在污水处理技术、能力以及管理水平上相对滞后,加上地方保护主义严重、法律不健全和不严等种种因素的干扰,极大地加重了太湖水生态系统的负担。

太湖流域农业面源污染问题十分突出。农药化肥的大量使用、畜禽粪便等养殖废水未经处理排放,严重影响了太湖水质。太湖流域的淡水养殖业非常发达,大量未经任何处理的、含有丰富氮、磷等营养物质的养殖废水进入太湖水体,加上大量投放饵料,加速了湖泊富营养化过程,破坏了水生态系统,使得湖泊水生态系统退化,生物多样性受损。

由此可见,水资源和水环境的问题恶化不仅影响人民生活,还严重制约经济发展。在水资源承载力范围内,合理开发与保护水资源,是实现水生态环境系统和社会经济系统可持续发展的重要保障。

1.2 国内外研究进展

承载力(carrying capacity)一词较早出现在马尔萨斯的《人口原理》一书中,其对承载力进行了研究。随后 Barbier (1994)把承载力研究推展到群落生态学。Joardar (1998)立足于供水角度来分析研究城市水资源承载力,并指出城市发展规划要纳入此指标。Harris (1999)把承载力推展到农业领域。Rijsberman (2000)等研究指出城市水资源承载力是城市水资源安全的保障。但从国外文献来看较少专门来研究水环境承载力、水资源承载力、水生态承载力,大多把这类研究归入到可持续发展研究范畴。而国内对水生态承载力的研究也经历了从水资源承载力到水环境承载力,从生态承载力到水生态承载力的探索过程。

从对水环境承载力的研究来看,王莉芳等(2011)利用层次分析法对山东省济南市的城市水环境承载力进行评价,并根据可承载隶属度值大小,确定水环境承载力等级。李新等(2011)采用指标体系和层次分析法建立了洱海流域水环境承载力概念模型,对洱海流域的水环境承载力进行了评价,定量分析了人口增长、经济发展、资源短缺和环境污染等因素对流域水环境的综合影响。石建屏等(2012)通过建立湖泊水环境承载力多目标优化模型,对滇池流域的水环境承载力及其动态变化特征进行了研究,其结果可为滇池流域的社会经济发展规划、生态环境保护和水资源可持续利用提供科学依据。张会涓等(2012)在综合分析区域水环境特点的基础上选取了7项研究指标,运用模糊物元模型与熵权法计算了烟台市牟平区2005—2009年各年水环境承载力与标准样本之间的贴近度,揭示了区域水环境承载力的现状及变化趋势。解海静等(2012)针对密云地水环境承载力系统的复杂性,利用系统动力学的动态分析优势和政策实验室功能,建立水环境承载力系统动力学模型,构建指标体系,并结合层次分析法和水环境承载力量化方法,对2008—2020年水环境承载力进行模拟与预测,分析不同优化策略下水环境承载力变化特征。

从水资源承载力的研究来看,宰松梅等(2011)基于支持向量机理论,以河南省新乡市为研究对象,建立了新乡市水资源承载力评价支持向量机模型,并根据水资源承载力影响因素,提出了8项指标评价体系,利用水资源承载力指数对研究区的水资源承载能力进行评价。张斌等(2011)采用系统动力学方法建立深圳市水资源承载力模型,在综合考虑社会、经济、环境现状,以及水资源质和量的基础上,对深圳市水资源承载力进行计算评价。曹麟等(2011)根据山西省的自然、社会、经济发展状况,选取了水资源总量、产业

需水量、分项用水量、生态供用水量 4 项指标构成水资源承载力的评价指标体系,并根据统计数据设置不同情境,分析对比了典型年区域水生态的典型问题和生态供水配置。韩晓军等(2011)提出了利用多项式曲线拟合的计算方法,并以河南省人民灌区地下水资源承载能力为实例进行验证,从而为灌区地下水资源的可持续发展提供了一种简便的评价方法。王文国等(2011)根据水资源生态足迹的基本原理和计算模型,对四川省 2001—2009 年水资源生态足迹、生态承载力进行了分析。王勇等(2011)在综合考虑水资源需求、水资源供给、非常规水源利用、南水北调供水、缺水程度的影响等因素的情况下,采用系统动力学方法,建立了天津市水资源承载力系统动力学模型,通过该模型对天津市 2011—2030 年的水资源承载力进行了预测和分析,最后提出了 3 种发展模式。刘佳骏等(2011)从系统论的角度出发,研究了中国经济、社会发展、生态环境与水资源的协调发展关系,运用水资源承载力综合评价模型,通过选取特定年份相关数据计算其水资源承载力综合评价指数,描述中国各省区水资源承载力状况,以此综合分析评价中国水资源的承载能力。

水生态承载力的研究方兴未艾,已经有一些初步的研究成果。王卫军等(2011)针对水生态承载力的系统动力学软件开发进行了介绍和讨论。刘子刚等(2011)以浙江省湖州市为例,通过水生态足迹模型计算了湖州市 2000—2007 年的水生态足迹和水生态承载力。张星标(2011)采用 BP 神经网络和 AHP 层次分析法以及模糊数学隶属度法建立了江西水生态承载力评价指标体系,在结合统计数据分析 1999—2008 年的江西水生态承载力的状况,为提升江西省水生态承载力提供决策依据。谭红武等(2011)以太子河流域为例,在二元水循环为驱动的“水资源—水环境—水生态—社会经济”互动机制基础上,建立了流域社会-经济-河湖复合生态系统概念模型和流域水生态承载力分区耦合概念模型。刘晓波等(2011)根据流域水生态承载力研究中的需求,提出基于水生态功能分区、流域总量控制管理的集成系统总体架构,建立流域水环境系统综合数据库,研发适宜流域水环境综合管理的流域数字水环境系统多种可视化技术,将流域水生态承载力和总量控制的模型、数据、方案等成果与三维数字流域技术相结合,构建基于三维数字流域技术的流域水生态承载力与总量控制技术集成系统。张万顺等(2011)分别采用模糊数学的隶属度方法和系统动力学方法,在考虑了水生态承载力评价因子和评价过程的不确定性的情况下对常州市武进区的水生态承载力的评价进行量化研究。刘晓玉(2011)基于赣江流域水资源供给和消耗、污染物的产生和削减两条物质流作为主线,构建了赣江流域水生态承载力上限的主导结构模型和赣江流域水生态承载力系统动力学模型,对赣江流域水生态承载力进行静态模拟,从而提出水生态承载力的政策设计与政策效率的系统仿真。李靖等(2011)采用系统动力学和隶属度相结合的方法,从分析流域的人口、社会经济、水资源、水环境、水生态系统之间的相互关系入手,考虑到各分区之间的水流、水质交替关系,建立了基于水生态分区的太子河流域水生态承载力大系统动力学仿真模型和量化模型。从而为实现太子河流域水生态系统的分区、分期保护和水生态环境与社会经济协调发展提供理论支持。宋策等(2012)为实现太子河流域水生态系统的分区保护,采用系统动力学方法,建立了基于水生态分区的水生态承载力模型,模拟了太子河流域水生态系统的动态变化。近年关于水生态承载力研究成果列于表 1-1。