

太湖平原武澄锡虞区水系结构及 水文连通性变化分析

刘海针 许有鹏 林芷欣 张兴奇¹

(南京大学 地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023)

【摘要】: 河网水系在太湖平原地区水源供给、洪涝排泄、水质净化过程中发挥着重要作用, 但近几十年来该地区城镇化迅速, 土地利用改变、水资源过度开发等人类活动导致河网水系衰减, 水文连通受阻, 并引发一系列洪涝与水环境问题。为此, 以太湖平原武澄锡虞区为例, 构建水系结构与连通性评价指标, 分析该地区 1960s~2010s 水系结构和水文连通性变化特征。研究表明该地区: (1) 1960s~2010s 水系不断衰减, 武澄锡虞区河网密度、水面率、河网发育系数分别降低了 22.94%、25.09%和 22.35%, 河网复杂度急剧下降, 其中武澄锡区河网衰减程度大于澄锡虞区。(2) 水文连通性存在先下降后上升发展趋势, 1960~1980 年, 该地区的平均水文连通性为 0.89, 1980~2000 年平均水文连通性降至 0.82, 2000~2016 年平均水文连通性恢复到 0.91。(3) 城镇化发展导致水系结构大幅度衰减, 水系结构主干化以及水利工程建设使得水文连通性下降, 而疏浚、拓宽河道在一定程度上可提高区域水文连通性。本研究将为平原区水系利用与保护提供一定的支持与参考。

【关键词】: 城镇化 水系结构 水文连通 武澄锡虞区

【中图分类号】: TV11 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)05-1069-07

近几十年来, 我国城镇化进程不断加快, 在促进经济高速发展的同时, 下垫面与河流水系发生了较大改变^[1,2]。林地、草地、田地等面积不断缩减, 住宅用地、商业用地等不透水面大幅度增加, 导致水文过程发生变化^[3,4], 河道行洪压力加剧。同时人类活动使得水系大面积缩减、河流改道甚至断流, 致使水文连通性下降、河流排水能力不足, 河道水流净化能力下降, 且极易诱发洪涝灾害。因此, 深入认识水系结构和水文连通变化以及两者之间的关系对区域水系规划具有重要指导意义。

水文连通性表达不同景观单元之间的水流通达度, 它对一个地区的人水和谐具有重大意义, 可对地表径流进行再分配, 从而改善局部水资源、缓解洪涝灾害, 还能反映流域水文生态过程和调蓄能力^[5]。为了更好的描述水系结构和连通性变化, 地理信息科学、遥感以及水文观测技术广泛应用于该研究^[6~8]。人们相继构建和完善描述水系结构变化的指标^[9], 对其进行定性和定量分析。赵进勇^[10]和徐光来^[11]利用图论和计算河道水流阻力的方法探讨流域水系连通变化, 窦明和靳梦^[12]则从水系功能角度出发, 构建了水系连通评价指标, 研究均发现: 近年来平原水网区的水系结构趋于简单化^[13], 并且在城镇化的影响下, 水系结构特征和连通性发生了较大改变^[14], 使河流功能衰退^[15,16], 尤其在平原河网区极易引发洪涝灾害等问题。

武澄锡虞区是太湖平原典型河网密布地区, 为我国经济发展最为迅速的地区之一。城镇快速崛起, 下垫面土地利用变化, 导致该地区水域面积减少^[17], 河网调蓄能力减弱, 进而加剧了水涝灾害, 同时由于河道水文连通减弱, 水流不畅也使得水体换

¹作者简介: 刘海针(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水文学与水资源。E-mail:MG1827009s@mail.nju.edu.cn

许有鹏, E-mail:xuyp305163.com

基金项目: 国家重点研发计划专项项目(2018YFC1508201); 国家自然科学基金项目(41771032); 江苏水利基金项目(2019028)

水周期变长，自净能力减弱，河网水质恶化问题日趋加剧^[18]，亟需开展太湖平原水系结构及水文连通性变化研究。因此，本文将结合 GIS 与数理统计方法，对比分析 1960s~2010s 武澄锡虞区内部水系结构特征变化规律，并构建水系连通性指标，结合水文站点的最高水位数据，探讨高度城镇化区域内部水文连通性变化特征，为平原地区河流水系与连通性演变研究提供一定参考。

1 研究区概况

本文选择太湖平原武澄锡虞水利片区作为研究区(图 1)，该地位于长江以南，太湖以北，主要包括常州、无锡等地，流域总面积达 3838km²。该地区为典型的低洼平原河网区，水系纵横，河流落差小，再加上长江的顶托作用，河流涨水迅速，退水缓慢，一旦遇到强降雨天气，排水困难，容易爆发洪涝灾害。武澄锡虞区又分为武澄锡区和澄锡虞区。武澄锡区北靠长江，南邻太湖，包含无锡、常州中心城区以及其他县市的 70 多个乡镇，是全国乃至长三角地区城镇化进程较大的地区。澄锡虞区夹在白屈港东控制线与望虞河之间，涵盖张家港市、常熟市以及无锡、江阴的部分地区。城镇化的迅速发展，占用大量水域面积，原有水生态环境改变，致使人水关系不协调。

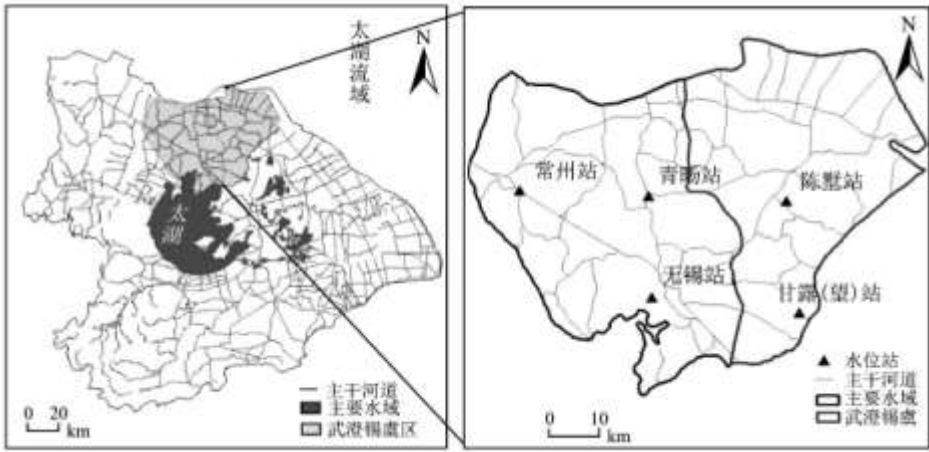


图 1 研究区概况

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文提取了研究区 1960s、1980s、2010s 水系数据。其中，1960s 和 1980s 的水系数据是根据 1：5 万纸质地图进行扫描、配准、数字化、拼接、切割、叠加和拓扑修正处理得到，2010s 的水系数据是根据 1：5 万的数字线化地图结合遥感影像校正得到^[8]。研究区地处平原河网区，水系复杂，传统的 Strahler 河流分级方法不适用于该地区。为此，本文结合河网的景观生态功能和社会属性，对河流进行分级，其中：河流宽度大于 20m 的双线河定义为主干(I 级)河流，包含湖泊；河流宽度在 10~20m 粗单线河的定义为 II 级河流；河流宽度小于 10m 细单线河的定义为 III 级河流。为保证水位数据在空间上具有代表性，分别选取研究区主干河道上的常州、青阳、无锡、陈墅和甘露水位站 1960~2016 年的月最高水位(单位:m)来反映该地区不同水系格局下的水文连通性。

2.2 水系结构指标

武澄锡虞区近几十年来水系衰减严重，加之该地区主要依靠河网水系进行洪涝调节，使得雨季泄洪困难，生命财产损失严

重。因此，足够的河网密度、水面率以及河网的充分发育和连通是该地区调节洪水和维持正常社会生产活动的保证。为了对水系变化特征进行定量描述，本文借助景观生态学的研究方法，选取：河网密度(D_r)、水面率(W_p)、河网发育系数(K_w)等指标来分析研究区水系变化的特征^[19, 20]。其中河网密度(D_r)表示单位面积上的河流长度^[19]。水面率(W_p)表征流域的水域占地百分比^[19]。河网发育系数(K_w)指的是该地区支流发育程度，其值越大表明该地区支流发育越好，水系径流调节能力越强。其中河网发育系数(K_w)的计算公式如下所示。

$$K_w = \frac{L_t}{L_m} \quad (1)$$

式中： L_t 表示水系支流总长度； L_m 表示主干河流长度。

2.3 水文连通性指标

研究区地处平原水网区，属同一水系单元片区，区内河流水系关系密切，且河道水流之间的关联性强，因此可用区内各控制站点的平均水位差反映水文连通性。本文选取常州、青阳和无锡站作为武澄锡虞区的代表水位站，陈墅和甘露站作为澄锡虞区的代表水位站。分别选取 5 个站点 1960~2016 年月最高水位数据，并将常州、青阳和无锡站点的月最高水位数据相加求平均值代表武澄锡区的水位，陈墅和甘露站的月最高水位平均值代表澄锡虞区的水位。

对于两个水系联系紧密的平原地区而言，水位不仅可以直观反映水情，还能够反映流域河流水系的水文连通状况。水位差的绝对值比较小，说明两个地区水系同步性较好，反之，相邻两个地区之间的水位差绝对值较大，则水文连通能力较弱。水位差与水文连通性之间的关系如下^[19]：

$$k = \frac{1}{|h_1 - h_2|} \quad (2)$$

式中： k 表征相邻两个地区的水文连通性； h_1 表示地区 1 的水位， h_2 表示地区 2 的水位。研究区属于平原河网，水系复杂，流向多变，因此水位差存在负值，考虑到水文连通的实际情况，取其绝对值以分析地区间的水文连通性。

两个地区之间的水位差在某些时段可能为 0，这样计算出的水文连通性就没有实际意义，因此衍生出如下公式：

$$k = \frac{1}{|h_1 - h_2| + 1} \quad (3)$$

式中： k 值介于 0 和 1 之间。如果两个地区的水文连通性越小， k 值越接近于 0；反之， k 值越接近于 1，表示水文连通性越强。

3 结果分析与讨论

3.1 水系结构变化分析

在 1960s~2010s，由于城镇化、河网化等人类活动的影响，武澄锡虞区的河网水系逐渐稀疏，且不同等级河道存在不同幅

度衰退(图 2)。武澄锡虞区 1960s~1980s 间 II 级河道衰减最严重:面积和长度分别减少 35.58%和 32.67%。1980s~2010s 武澄锡虞区 I、II、III 级河道长度分别减少 7.16%、8.85%和 12.21%; I 级河道面积增加 58.13%、II 级河道面积减少 8.85%、III 级河道面积减少 12.23%, I 级河道长度缩减,面积反而大幅增加。伴随城市扩张,围垦严重,造成河道淤塞与消失,20 世纪 80 年代以来,太湖流域进行了综合治理,需要保留和疏浚大型河道用来行洪,而低等级的小河道在城镇化过程中仍然被侵占,或者淤积消失^[21,22],尤其是澄锡虞区在城市扩张的过程中 II 级河道被侵占消失或退化为 III 级河道。

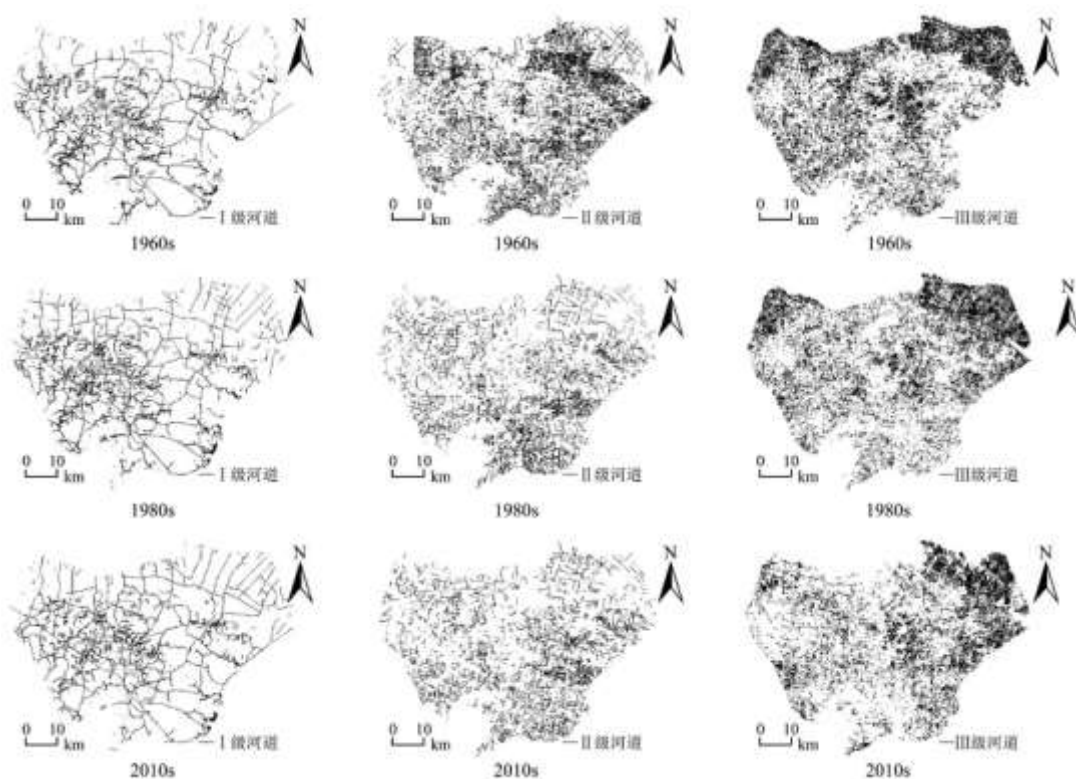


图 2 武澄锡虞区不同时期不同等级水系分布

各等级河道变化使得武澄锡虞区的水系结构发生改变(图 3)。1960s~2010s 该地区河网密度、水面率、河网发育系数分别减少 22.94%、25.09%和 22.35%,水系结构趋于简单化。各水系结构参数的减少与城镇发展占用水系面积有直接关系,高强度的人类活动限制了河网的自然发育,河流被裁弯取直,水系趋于主干化,河网发育系数越来越低。研究时段内武澄锡区和澄锡虞区水系结构变化情况存在差异。1960s~1980s 澄锡虞区河网密度均大于武澄锡区,1980s~2010s 武澄锡区河网密度下降到 $2.46\text{km}/\text{km}^2$,澄锡虞区河网密度下降到 $3.49\text{km}/\text{km}^2$ 。1960s~2010s 武澄锡区拥有较多主干河流,水面率均大于澄锡虞区。此外,同时期澄锡虞区 II、III 级支流较武澄锡区更稠密,澄锡虞区河网发育系数远大于武澄锡区。

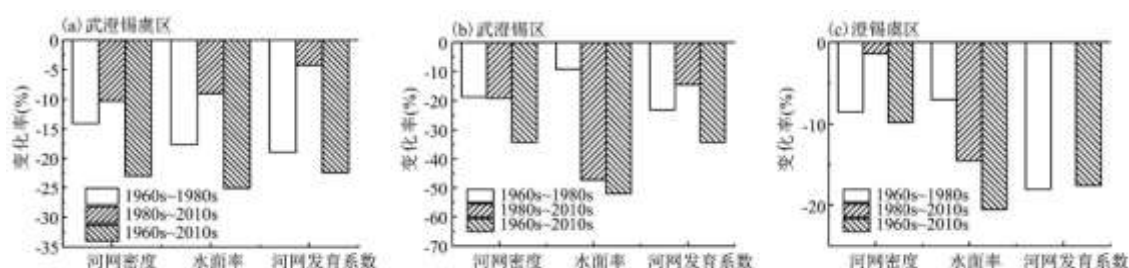


图 3 武澄锡虞区不同地区水系结构变化

人类活动对水系结构的影响是双向的,人为对水系进行围垦,使河流衰退消失,水文连通受阻,但是主干河道的疏浚一定程度上会促进水系连通,因此水系结构变化会引起水文连通性变化。武澄锡虞区的水面率降低以及河网发育系数减少会导致河流之间联系变弱,水文连通性会随之改变。

3.2 水文连通性变化分析

研究区河网结构变化的同时也导致河流水文连通性发生变化。基于 1960~2016 年的长时间序列月最高水位,将两个片区的水文连通性进行逐日统计,计算出每个月的平均水文连通性,如图 4a 所示:多年月平均水文连通性集中程度可以反应出武澄锡虞区和澄锡虞区之间的水文连通性分布在年内呈现一定规律性。总体看来,每年的非汛期(11 月至来年 4 月)水文连通性偏大,连通性均值为 0.89;每年汛期(5 至 10 月)该地区的水文连通性相对偏小,均值为 0.82;8 月份和 10 月份的水文连通性差异比较大。而由于全区采用“区内水面滞蓄,拓浚外排河道,建泵站将洪水分散排出区外”方法进行防洪规划^[22],且两个片区的洪水分排,因此汛期与非汛期水文连通性存在差异,汛期时两个地区的水位相差较大,水文连通性低^[22, 23]。

根据研究区月最高水位,计算出年均最高水位,得出武澄锡区和澄锡虞区 1960~2016 年水文连通性(图 4b),可知 1960s~1980s 武澄锡虞区平均水文连通性较高,平均值为 0.89;改革开放之后,城镇化发展迅速,人类活动致使水系大面积衰减,水文连通性骤降,平均值跌至 0.82;2000 年之后拓浚完善了京杭运河、伯渎港等贯穿武澄锡区和澄锡虞区的骨干河道,并且建立了相对完善的防洪水利工程,这使得各河道联系紧密且水位差变化不大,水文连通性平均值增加到 0.91^[23]。

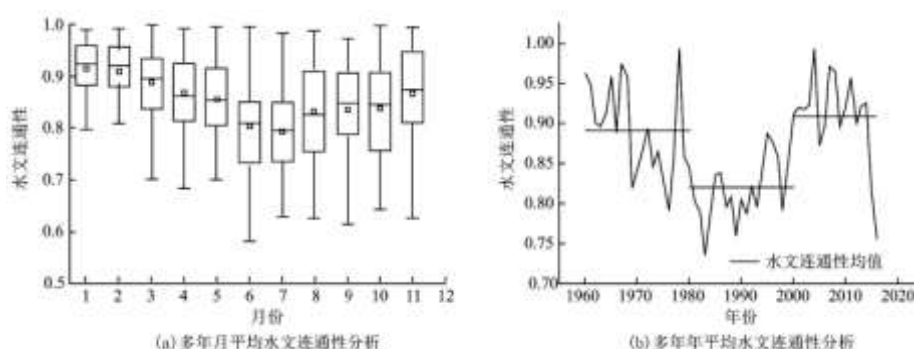


图 4 武澄锡虞区水文连通性分析

3.3 讨论

水文连通性受水系结构和水利工程影响深刻。一方面水系结构在趋于简单化的过程中,河道洪峰流量增加,水位涨跌幅大,造成水文连通性的变化;另一方面水系结构衰减,河流之间水流受阻,水文连通性降低。水利工程的建设一定程度上会引起水系支流淤塞消失,造成水文连通性降低;另一方面水利工程在调度过程中使得区域内河流之间出现较大水位差,而在河网密布地区大量建设水利工程,情况会加剧^[24];此外,城市大包围会阻碍城内外河网,降低水文连通性。

武澄锡虞区在城镇化过程中水面率以及河网复杂度不断下降,水文连通性也随之降低,尤其在改革开放后城镇化进程加快,无锡和常州的建成区面积由 80 年代初的不足 100km² 增加到 2010 年的 250 余 km²,全区水面率则由 1960s 的 6.10%降低到 2010s 的 3.66%,河网水流通达度下降。90 年代开始,为缓解水系简化和下垫面硬化带来的洪涝问题,武澄锡虞区加大防洪标准,修建闸坝泵站用来外排洪水,进一步阻碍了水流,水文连通性降低。而为防治洪水,该地区将防洪工作分了流域、城市和区域三

个层次, 县级城市防洪标准为 50 年一遇, 无锡市、常州市防洪标准为 100 年一遇, 无锡、常州中心城区的防洪标准为 200 年一遇, 常州和无锡的中心城区还进行了城市大包围, 进一步切断了城内外水系, 减小水文连通性。进入 21 世纪, 城镇化发展的同时, 开始注重水系的维护和建设, 进而疏浚和修缮了主干河道, 水流畅通, 水文连通性得以恢复和增加。

4 结论与展望

本文以太湖平原武澄锡虞区为例, 基于长时间序列的水位资料与不同时期的水系数据, 结合水系结构与水文连通性指标, 探寻了 1960s~2010s 时期快速城镇化下河网水系与水文连通性变化特征, 得出以下结论:

(1) 总体来说, 随着城镇化发展, 河网水系结构逐步衰减。1960s~2010s 间武澄锡虞区河网密度、水面率、河网发育系数分别降低了 22.94%、25.09%和 22.35%, 其中武澄锡区和澄锡虞区 1960s~2010s 间的河网密度、水面率以及河网发育系数也均有衰减。

(2) 不同时期的水文连通性也存在差异, 1960~1980 年水文连通性较高, 平均值为 0.89;1980~2000 年水文连通性平均值下降到 0.82;2000 年之后, 水文连通性均值上升为 0.91。水文连通性在年内也有一定的分布规律, 汛期水文连通性偏低, 非汛期水文连通性偏高。各个站点间的水文连通性变化也存在差异, 1990 年之后水文连通性变化剧烈。

(3) 水文连通性受水系结构变化影响深刻, 同时也受水利工程施工等人类活动的影响。武澄锡虞区在改革开放之后尤其是 90 年代开始城镇化迅速发展, 水系结构大幅度衰减, 水文连通性也呈下降趋势;进入 21 世纪, 水系结构虽仍在衰退, 但通过水系合理规划建设, 水文连通性明显增加。而在汛期, 水文连通性受到水利工程施工的影响, 明显偏低。

为缓解平原地区水系变化带来的一系列水安全、水环境问题, 要确保平原区一定河网密度和水面率, 并可考虑恢复和重建一些对水文连通影响较大的河道, 进一步对该地区城镇化下水系结构和水资源、水环境之间关系进行定量化研究, 合理规划城市水网, 为流域防洪减灾提供参考依据。

参考文献:

- [1]徐小峰. 小流域土地利用结构变化对河流水环境的影响研究[D]. 苏州:苏州科技大学, 2018.
- [2]虎陈霞, 郭旭东, 连纲, 等. 长三角快速城市化地区土地利用变化对生态系统服务价值的影响——以嘉兴市为例[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(3):333-340.
- [3]荣洁, 曾春芬, 王腊春. 太湖流域 LUCC 对水文过程的影响[J]. 湖泊科学, 2014, 26(2):305-312.
- [4]赵阳, 余新晓, 贾子利. 基于景观尺度的流域土地覆被变化及其水文响应[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(11):1356-1362.
- [5]高常军, 高晓翠, 贾朋. 水文连通性研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(3):586-594.
- [6]戚晓明, 杜培军, 周玉良, 等. 基于遥感和 GIS 的城市景观格局演变与水文效应关系研究[J]. 国土资源遥感, 2010, 22(4):103-107.
- [7]李道峰, 刘昌明. 基于 RS 与 GIS 技术的分布式水文模型模拟径流变化刍议[J]. 水土保持学报, 2004, 18(4):12-15.

-
- [8]吴雷, 许有鹏, 王跃峰, 等. 水文实验研究进展[J]. 水科学进展, 2017, 28(4):632-640.
- [9]李景保, 何蒙, 吕殿青, 等. 水利工程对长江荆南三口水系连通功能变化的影响[J]. 热带地理, 2019, 39(1):137-145.
- [10]赵进勇, 董哲仁, 翟正丽, 等. 基于图论的河道-滩区系统连通性评价方法[J]. 水利学报, 2011, 42(5):537-543.
- [11]徐光来, 许有鹏, 王柳艳. 基于水流阻力与图论的河网连通性评价[J]. 水科学进展, 2012, 23(6):776-781.
- [12]窦明, 靳梦, 张彦, 等. 基于城市水功能需求的水系连通指标阈值研究[J]. 水利学报, 2015, 46(9):1089-1096.
- [13]黄奕龙, 王仰麟, 刘珍环, 等. 快速城市化地区水系结构变化特征——以深圳市为例[J]. 地理研究, 2008, 27(5):1212-1220.
- [14]杨凯, 袁雯, 赵军, 等. 感潮河网地区水系结构特征及城市化响应[J]. 地理学报, 2004, 59(4):557-564.
- [15]高俊峰. 太湖流域土地利用变化及洪涝灾害响应[J]. 自然资源学报, 2002, 17(2):150-156.
- [16]韩昌来, 毛锐. 太湖水系结构特点及其功能的变化[J]. 湖泊科学, 1997, 9(4):300-306.
- [17]刘敏, 许世远, 侯立军, 等. 长江三角洲土地利用/土地覆被动态变化及其环境效应[J]. 资源科学, 2010, 32(8):1533-1537.
- [18]HU W P, ZHAI S J, ZHU Z C, et al. Impacts of the Yangtze River water transfer on the restoration of Lake Taihu[J]. Ecological Engineering, 2008, 34(1):30-49.
- [19]邓晓军. 太湖平原水系格局与连通变化及其对河网调蓄与自净功能的影响研究[D]. 南京:南京大学, 2015.
- [20]李普林, 陈菁, 孙炳香, 等. 基于连通性的城镇水系规划研究[J]. 人民黄河, 2018, 40(1):31-35, 49.
- [21]展永兴. 太湖流域武澄锡虞区防洪规划[D]. 南京:河海大学, 2005.
- [22]黄宣伟. 太湖流域规划与综合治理[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2000.
- [23]梁瑞驹, 程文辉. 从 1991 年特大洪水看太湖流域综合治理规划[J]. 河海科技进展, 1991, 11(4):1-6.
- [24]何蒙. 水利工程对长江荆南三口水系结构及连通功能的影响[D]. 长沙:湖南师范大学, 2018.