太湖流域水敏性与建设用地扩张的关联评价

孙伟[1，2] 陈雯[1，2，3] 刘崇刚[1，41]

(1．中国科学院南京地理与湖泊研究所，江苏 南京 210008;

2．中国科学院流域地理学重点实验室，江苏 南京 210008;

3．中国科学院大学资源与环境学院，北京 100049;

4．安徽师范大学环境科学与工程学院，安徽 芜湖 241000)

【摘 要】: 水是流域空间管理最重要也是最敏感的要素,流域不同区段的水敏性差异会对建设用地扩张形成不同的限制性影响。从流域空间综合管理的视角出发,尝试从水资源、水生态、水环境、水灾害 4 个方面构建流域水敏性分区评价指标及方法,以太湖流域为例开展基于小流域单元的水敏性评价,并采用 1985、1995、2007、2017 年 4 个典型年份的土地利用数据,刻画了过去 30 余年太湖流域建设用地扩张与水敏性之间的关联关系。研究表明:(1)1985～1995 年间,太湖流域建设用地扩张与水敏性基本上没有关联,高水敏区建设用地扩展强度最高;(2)1995～2007 年间,空间扩张与水敏性的关联性增强,建设用地扩展强度随水敏性增强而下降,扩展强度较大区域以低水敏区域为主;(3)2007～2017 年,建设用地扩展强度显著提升,拓展空间主要布局在低水敏区域,水敏性对空间扩张的约束性在增强;(4)虽然太湖流域水敏性对建设用地扩张的限制作用在提升,但二者关联度还不够高,水敏性还没有成为建设用地扩张的关键约束。研究结果可为协调流域经济社会发展与资源环境关系、制定适应水敏性的空间管理政策提供科学依据。

【关键词】: 水敏性 空间分区 扩张强度 关联评价 太湖流域

【中图分类号】:TU992**【文献标识码】**:A**【文章编号】**:1004-8227(2019)07-1575-08

流域作为一种特殊的自然地理单元,是以水为纽带将上、中、下游组成一个普遍具有因果联系的复合生态系统,因而水是流域综合管理中最重要也是最敏感的要素[1～3]。流域不同区段的水敏性差异会对建设用地扩张形成不同的限制性影响,但是在快速城镇化和工业化过程中,建设用地无序开发,忽视水敏性的空间差异而改变自然下垫面水文条件,对水分循环产生影响,特别是农田和林地等被占用,使地表径流量增加,从而改变流域水资源量,影响营养盐进入水体的输入量和输移过程,加剧洪涝灾害风险,同时人类活动还会带来污染排放增加,加大对水环境容量的占用和胁迫等[4,5]。太湖流域是我国经济发展水平最高、人口最为密集的区域之一,同时也是重要的生态服务功能保护区,既承担高度化的人口和产业集聚功能,同时也有良好生态环境维护的要求,除了要进行生产内部分工外,还需要进行开发与保护之间的分工。但是长期的地方各自为阵发展,缺乏流域空间开发的统筹谋划,导致水资源水环境已经成为影响流域可持续发展的“硬约束”,问题具有典型性和代表性。因而,开展流域水敏性分区评价研究,识

[1]**作者简介**：孙伟(1980-),男,博士,副研究员,研究方向为区域发展与规划.E-mail:wsun@niglas.ac.cn。
基金项目：国家自然科学基金项目(41871119);美丽中国生态文明建设科技工程专项(XDA23020102)。

别流域不同区段水敏性的强弱,是流域地理学湖泊流域相互作用研究的一个重要问题,同时也可以为太湖流域实施科学的空间管理政策提供基础和依据。

1 水敏性概念及表征

水敏性(Water Sensitivity)最早是由澳大利亚学者 Whelans 于 1990 年代提出,是在气候变化背景下传统城市开发对水环境产生负面效应以及景观都市主义影响下产生的城市生态建设和景观设计思想[6,7]。关于水敏性的概念目前有多种解释,国际水文协会认为水敏性是城市设计与城市水循环的管理、保护和保存的前提,是城市管理对自然水文和生态过程反馈的敏感程度[8,9];澳大利亚水资源委员会认为水敏性评估是从城市规划的各个阶段将城市开发建设与水循环相结合的一种规划新方法,旨在最大限度地减少城市发展对周围环境的水文影响[10,11]。Ashley 等[12]将水敏性定义由城市拓展到了区域尺度,认为水敏性是区域水循环综合管理的前提,建立在水敏性基础上的空间管理政策能够很大程度的保护水生态环境、提高水资源利用效率、降低水灾害风险,对于区域可持续发展有重要作用。

从流域综合管理视角出发,水敏性可以理解为:流域水生态系统和水文过程对人类开发活动影响的敏感程度,表征了水资源、水生态、水环境、水灾害对流域建设用地扩张的限制性影响[13,14]。水敏性评估就是通过对流域水资源、水生态、水环境和水灾害的评价,判断流域上中下游不同区段空间开发适宜程度的高低,水敏性越高越不适宜承载高强度的空间开发。其中,水资源主要是指一个区域可利用水量,是对水资源能否满足合理的社会、经济及生态用水需求的综合评判,主要包括地表水和地下水两部分[15];水生态主要指流域生态系统健康和物种安全以及流域上下游生态安全的空间差异性,但是现有评估框架往往重视生态健康状况,而忽略了生态系统服务功能和所面临生态风险的评估[16];水环境主要是指水环境容量评价,即无人为措施条件下流域水环境纳污能力大小,不仅与水资源量、水动力学特性、水环境功能区划有关,还与排污口位置和排放方式有关,由于获取这些参数的实际值困难,且对宏观区域之间的对比研究意义不大,因而流域水环境容量分区评价主要考虑地貌特征、水环境功能、水质目标、水体与外界交换能力等因素[17,18];水灾害主要指流域遭受洪涝等灾害的风险程度,一般采用洪水和内涝以及易于引起洪涝灾害的台风、风暴潮等指标综合评价。

目前基于空间管理视角的水敏性评价大多局限于水环境分区,采用的指标多为环境本底因子,对于水陆空间联系考虑不够充分,也忽视了水资源量、水生态状况、水灾害风险等内容。流域综合管理,更强调可持续性和韧性,面临着从综合开发向生态保护与绿色发展双重导向转变,开发目标也从防治洪涝灾害、发展航运及灌溉水利工程的单一管理转向水资源综合利用、生态环境保护、灾害综合整治以及经济社会统筹发展,目标更多元化。因此,探索建立水陆统筹的水敏性分析框架及分区评价方法,不仅可以丰富流域地理学研究视角和相关技术方法,还可以探索将水敏性评价纳入流域空间规划方法体系,为流域空间管理政策制定提供科学依据。

2 研究区概况及数据方法

2.1 太湖流域概况

太湖流域地处长江三角洲的南翼,总面积约 $3.69\times10^4km^2$,其中湖泊水面面积 $0.61\times10^4km^2$,河道总长约 12×10^4km。2016 年,太湖流域以占全国 0.4%的土地面积,承载了全国 4.4%的人口和 9.8%的 GDP,在经济社会发展取得巨大成就的同时,对太湖及太湖流域的生态环境产生较大影响。太湖流域水功能区达标率仅为 53.4%,入太湖河道水质达到或优于Ⅲ类的比例为 54.5%,太湖平均营养指数为 62.3,处于中度富营养化;蓝藻平均数量 8282 万个/L,是 2015 年的 2.1 倍,整体上处于“亚健康”水平[19]。

引起这些问题的主要原因之一就是建设用地扩张,改变了下垫面自然状态,破坏了原有水系格局。根据 TM 遥感影像解译,2017 年太湖流域建设用地面积已达到 $9730.92km^2$,开发强度达到 26.41%,分别是 1985、1995、2007 年开发强度的 2.73、2.10、1.48 倍。苏州、无锡、湖州等一些沿湖城市建设用地增长速度高于流域建设用地扩张的平均水平,各行政区均以自身经济发展为出发

点,较少考虑水敏性的约束,缺乏流域空间开发统筹与综合管理(图 1)。

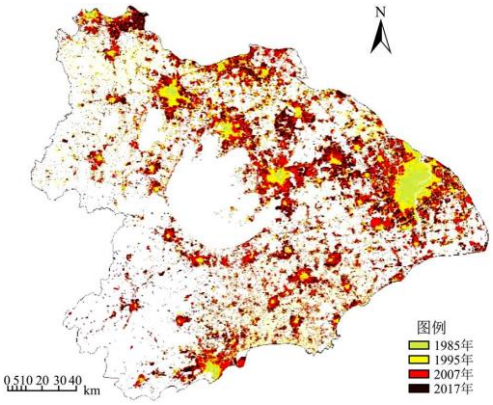

图 1 太湖流域 1985～2017 年建设用地变化

2.2 评价单元与指标

2.2.1 小流域评价单元

本文基于 SRTMDEM 数据生成的集水区划定小流域单元,空间精度约为 90m 分辨率。利用 DEM 数据,经过填洼、流向生成、流量分析等步骤的处理,划定太湖流域集水区,在此基础上,结合太湖流域水系分布格局进行人工调整,将太湖流域划分为 128 个小流域空间评价单元。

2.2.2 指标选择与数据处理

指标选择方面,由于气候条件引起的降水和蒸发变化,加之水体流动性,各种水资源的时空分布不均,可利用水量的计算十分复杂,水资源主要选择水网密度和可利用淡水资源相对丰度;水生态主要选择饮用水源地、清水通道维护区、水源涵养区、湿地和大型水面等生态功能区空间分布;水环境主要选择地貌特征、水质目标、使用功能、通达性、清水通道等;水灾害主要选择洪涝灾害和台风风险综合评价(表 1)。

表 1 太湖流域水敏性分区评价指标体系

因素层	指标层	权重
水资源(0.18)	水网密度	0.64
	相对水资源丰度	0.36
水生态(0.32)	水源地及涵养区(山体)	0.35
	清水通道维护区	0.22
	湿地	0.12
	大型水面	0.31

水环境(0.39)	地貌特征	0.21
	水质目标	0.18
	使用功能	0.10
	通达性	0.45
	清水通道	0.06
水灾害(0.24)	洪涝风险	0.71
	台风风险	0.29

数据来源方面,土地利用数据解译自 15m 分辨率 TM 和 Spot5 遥感影像,地形数据来自于太湖流域 1∶5 万地形图;水环境和水生态数据主要根据江浙沪两省一市水利和环保部门的《水环境功能区划》、《水资源公报》、《环境统计公报》、《集中式饮用水源地分布》、《生态保护红线区域规划》及相关专项规划整理而成;灾害数据根据国土资源部门《地质灾害规划》、《地质灾害隐患点分布图》、中科院南京地理与湖泊研究所编制的《太湖流域地图集》综合整理。

数据处理方面,水生态重要性和水网密度分布根据重要生态功能区和水面占所在单元比例确定;水资源相对丰度根据专家经验确定,沿长江地区水资源相对丰富、沿太湖地区次之、西南部山地区和东南部沿海地区总体上淡水资源较为缺乏;洪涝灾害及台风灾害风险,根据各单元内不同等级灾害影响区面积占比综合计算;其他指标采用赋值法进行计算(图 2)。相关指标赋值说明如下:

地貌特征。不同地貌类型持水和排水能力不同,对水环境产生的影响也并不一致,山地丘陵区径流汇集与冲刷强烈,水土易流失,水敏性较强;地势低洼地区,尾水外排能力差,水体自净能力弱,水环境也相对敏感;平原地区水流通畅,水敏性相对较弱。因此,对于山地丘陵、低洼地和平原区分别赋值为 5 分、3 分和 1 分。

水质目标。指一定时期内,为保证水体质量和水域使用目的而制定的目标水质类别,按照《地表水环境质量标准》一般分为Ⅰ-Ⅴ类,类别越低对汇水流域的排污控制越严格,水敏性越强。据此,Ⅱ类水质目标流域赋值为 7 分、III 类为 5 分、IV 类为 3 分、V 类及以上为 1 分。

使用功能。水体使用功能不同,对水环境质量的影响则不同。按照水体使用功能,自然保护区及源头水、生活饮用水和水产养殖用水,水质要求最高,赋值 7 分;旅游及景观用水赋值 5 分;工业用水和农业灌溉用水赋值 3 分;其他用水赋值 1 分。

水体通达性。指河流水系与外围水系的沟通程度,间接表征人类活动污染排放路径的通畅程度。与外界大容量水体交换条件好的区域消纳污染物的能力也相对较强,水敏性较弱。大型湖泊入湖河道 9 分;一般河道 7 分;通京杭运河 5 分;通淮河和通钱塘江 3 分;通长江或通海 1 分。

清水通道。是跨流域调水输水的重要通道,水质要求较高,水源安全保障的约束较强。根据是否清水通道过境区域进行赋值,清水通道所在单元赋值为 3 分,否则为 1 分。

2.3 权重确定与分区综合

权重体现每个指标对评价目标的重要性和影响程度,其确定要充分体现地区资源条件的分异特点和内在差异性,对流域生态

系统维持具有较高影响的指标赋以较高的权重,对于那些相对不够稳定,或者能够通过工程技术条件改变的指标赋以较低的权重。如对于太湖流域来说,水资源相对充裕,高标准的水利工程建设也极大降低了水灾害风险,因而水环境和水生态是影响流域空间开发最主要的限制性因素,应赋予较高权重;再如水环境评价指标中,水体通达性很大程度上影响着尾水排放能力,通达性好则水体自净能力强、环境容量大,因而要赋予相对较高的权重。权重具体数值的确定采用主观与客观相结合分析方法,主观权重分析法采用基于专家问卷的层次分析法,客观权重分析方法主要采用熵值法[18]。主客观权重分别确定之后,基于多目标规划的方法,计算主观权重和客观权重组合权重向量的权重系数,其公式如下:

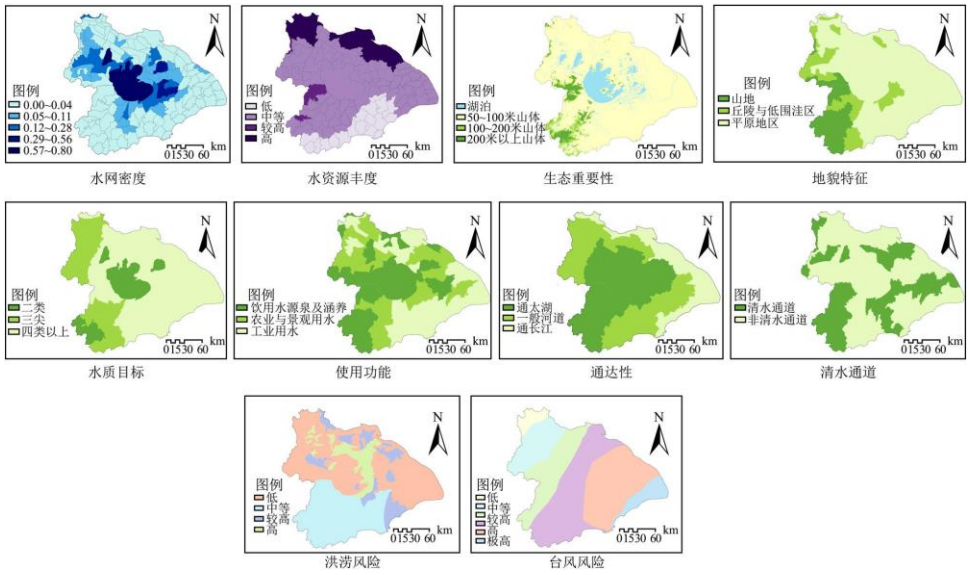

图 2 太湖流域水敏性分区评价指标

$$A = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(x_{ij} * w') / SQRT\left(\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(x_{ij} * w') + \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(x_{ij} * w'')\right) \quad (1)$$

$$B = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(x_{ij} * w'') / SQRT\left(\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(x_{ij} * w') + \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(x_{ij} * w'')\right) \quad (2)$$

式中:A、B 分别表示客观权重和主观权重向量的权重系数;x_{ij}表示第 i 个评价指标第 j 个评价单元对应的指标值,W′ 表示熵值法测算的指标权重向量,W″ 表示层次分析法测算的指标权重向量。

对 A、B 权重系数进行标准化,得到熵值法权重向量和层次分析法权重系数,公式如下:

$$a = \frac{A}{A+B} \quad (3)$$

$$b = \frac{B}{A+B} \quad (4)$$

最后,根据公式 W=a×W′ +b×W″ 计算各指标组合权重向量,作为各指标参加流域水敏性评价的最终权重值。

在指标评价与权重确定基础上,采用逐级分层归并方法,将平行独立的各项指标加权求和,根据公式 5 计算各小流域单元的水敏性。

$$C_i = \sum_{j=1}^{n} X_{ij} * W \qquad (5)$$

式中:C_i 指第 i 小流域单元的水敏性指数;X_{ij} 指第 i 单元的第 j 项指标值;W 指第 j 项指标的权重。

2.4 建设用地扩张强度测算

建设用地扩张强度指数一般用某空间单元在特定时段内年均建设用地扩张面积占期初建设用地总面积的百分比来表达,测算公式为:

$$LE_i = \frac{LA_{t+\Delta t} - LA_t}{LA_t * \Delta t} * 100\% \qquad (6)$$

式中:LE_i 表示 i 流域单元在 Δt 年内的建设用地扩张指数;LA_t 表示期初建设用地总面积;$LA_{t+\Delta t}$ 表示期末建设用地总面积;Δt 表示年份。

总体来看,建设用地扩张强度受到原有建设用地规模和新增建设用地规模的双重影响,因此其格局与扩张强度不同,各设区市的市区因其建设用地基数大,反而扩张速率较慢,而县市的扩张速度要更快。1985～1995 年,高速扩张区域主要集中在流域北部的苏南沿江地区,常熟、太仓、武进、丹阳、锡山等地十分突出;1995～2007 年,上海郊区以及苏锡常城市周边、杭州西北及临安建设用地扩张较快,太湖流域上游地区的空间开发活动明显高于前一阶段;2007～2017 年,建设用地扩张强度大幅提升,而且空间上更为离散,呈现出扁平化的态势,但太湖流域上游地区的扩张强度要相对弱于其他地区(图 3)。

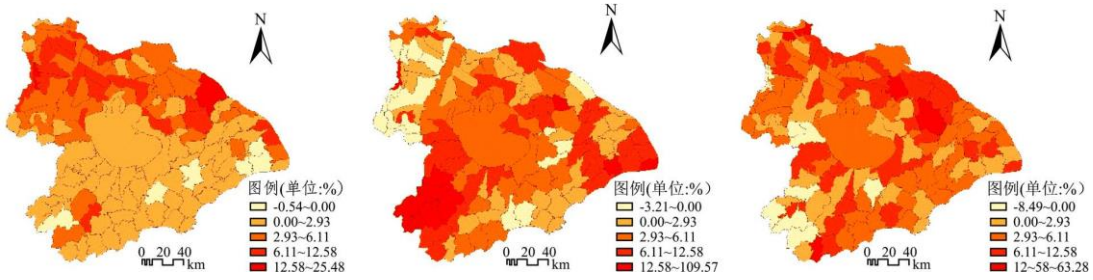

图 3 1985～1995、1995～2007、2007～2017 年 3 个阶段建设用地扩张强度

3 结果分析

3.1 水敏性分区评价结果

采用水敏性综合分区评价方法,可以得出太湖流域 128 个小流域单元位于[0.11,0.83]的无量纲水敏性指数,采用“NatureBreak”方法进行聚类分析,可以将小流域单元划分为高、中、低 3 种水敏性类型区(图 4)。

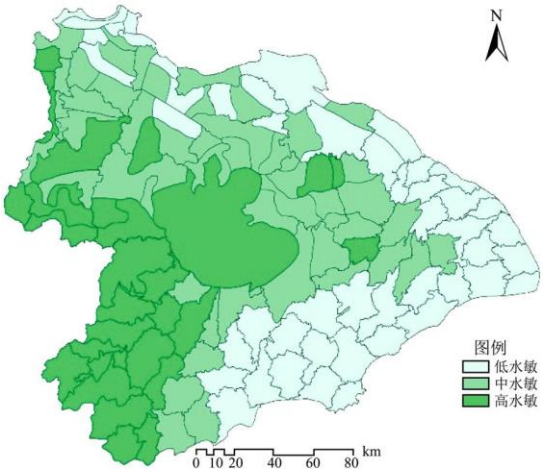

图 4 太湖流域水敏性分区

高水敏区。水敏性指数在[0.53,0.83]之间,这类区域生态服务功能非常重要,水环境容量很小,空间上主要位于太湖流域上游西部和南部以及入湖河道沿线地区,地貌类型以山地丘陵为主,是重要的饮用水源及涵养区,对于水质要求比较高,大规模开发建设对水文条件和水循环过程影响要明显高于中下游地区。根据发达国家的流域管理经验,这类区域多为国家公园(皇室用地)或绿带(GreenBelt),属于禁止开发的区域,而太湖流域上游地区仍分布着一定数量的村镇,从太湖水质保护角度出发,对于这些地区应严格限制建设用地数量的增加,调减水源及涵养区、清水通道维护区、入湖河道沿线地区的无关建设用地,恢复自然下垫面,将建设用地开发控制在水环境可承受的范围之内。

中水敏区。水敏性指数在[0.32,0.52]之间,主要位于太湖流域中游和上游北部地区,地貌类型以丘陵和平原为主,分布有重要生态保护区及少量入湖河道,水网密度相对较高,受洪涝灾害影响较大,水体通达性较差,虽然水资源较为丰富,但是水环境和水灾害限制性较强,水敏性处于中等水平。位于沿湖中水敏区的苏州、无锡、常州等城市地区要推进建设用地减量化,盘活和优先使用存量建设用地,特别是太湖沿岸 1km 核心区及 5km 缓冲区,要将水敏性作为严格划定城镇开发边界和生态保护红线的依据。

低水敏区。水敏性指数在[0.11,0.31]之间,主要分布在太湖流域下游地区及沿江地区,地貌类型以平原为主,受洪涝灾害和台风风险的影响较低,水体直接通长江和钱塘江,通达性较好,水资源相对丰度较高,水体功能以工业和农业灌溉用水为主,对水环境和水质要求较小,水敏性相对较低。这些地区仍有一定的空间扩张潜力,可以适度扩大建设用地规模,引导建设空间集中集聚,同时注意提高土地利用与水敏性的协调程度,尽量避免改变水系格局的空间开发方式。

3.2 建设用地扩张与水敏性的关联分析

将空间扩张强度和水敏性计算结果进行标准化处理,在此基础上进行二者的关联性分析,结果表明:

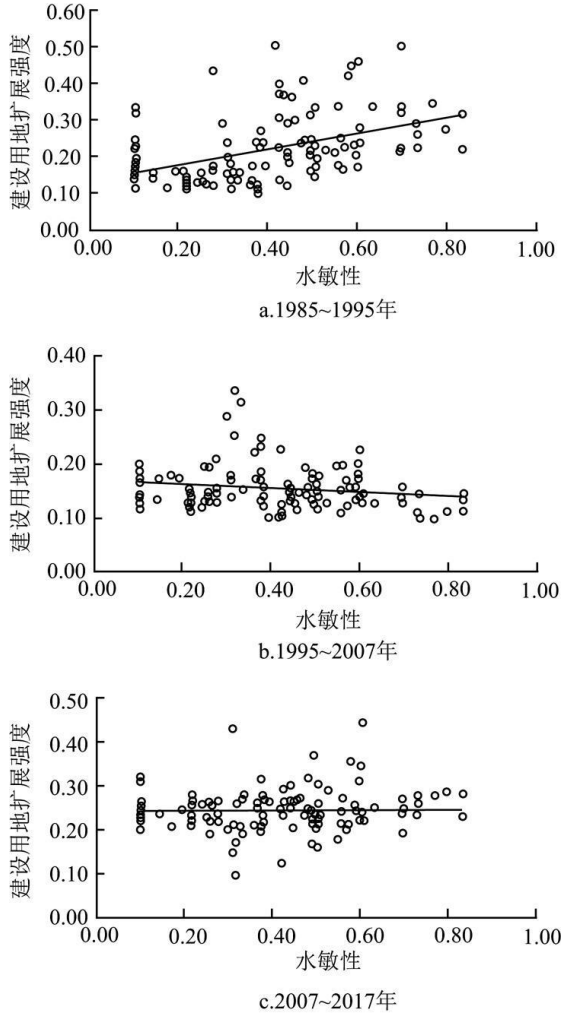

图 5 1985～2017 年建设用地扩展强度与水敏性关联分析

(1)1985～1995 年,各地区建设用地扩展强度指数都在 0.1 以上,并且扩展强度较大区域的水敏性指数主要集中在 0.4～0.7 之间,高水敏区反而建设用地扩展强度更高,建设用地扩张与水敏性基本上没有关联,主要原因在于当时为寻求农村剩余劳动力出路,太湖流域大部分地区瞄准短缺经济的市场空隙,大力发展乡镇工业,实现了农村快速工业化和城镇化,但受资金和技术等条件限制,不得不就地生产,形成“离土不离乡”的生产和就业模式,也形成了“村村点火,户户冒烟”的空间格局,造成建设空间碎化,也较少顾及水敏性的影响。

(2)1995～2007 年,建设用地扩展强度指数呈现出随水敏性增强而下降的趋势,扩展强度较大区域以低水敏区域为主,水敏性指数主要集中在 0.2～0.6 之间,相对于第一阶段有所下降,空间扩张与水敏性的关联性增强。这一时期,太湖流域抓住国际制造业转移和浦东开发开放的战略机遇,大力发展开放型经济,建设了大量作为招商引资平台的开发区,建设用地扩张主要在城市周边,虽然空间上呈现出城市蔓延态势,但相较于分散化的乡村建设用地扩张,对水生态和水环境的影响要小很多。

(3)2007～2017 年,由于快速的城镇化和工业化扩张,特别是新城新区的大规模建设,建设用地扩展强度相对于前两个阶段整体上显著提升,扩展强度指数整体提高到 0.2 以上,但与水敏性的关联度基本保持 1995～2007 年的水平,建设用地扩展强度较大区域的水敏性主要集中在 0.2～0.5 之间,说明水敏性对空间扩张的约束性在增强。但是,从关联拟合曲线来看,各个阶段二者的关联度都比较低,还不具有明显的相关关系(图 5)。

4 结论与讨论

流域具有维护生态服务功能和承载经济社会发展的综合功能,因而空间管理需要明确保护与开发的分工,而这种分工首要表现在空间开发强度即建设用地配置方面。工业化城市化快速发展阶段,区位条件、城镇化水平、人均 GDP、建设用地增长惯性等成为影响建设用地配置的关键要素,近年来随着生态文明理念的广泛深入,宏观尺度的生态环境要素开始被纳入土地资源配置研究之中,但对其影响的重视程度仍然不够。特别是对于一个流域单元,水是最关键的生产生活生态要素,而对建设用地配置及空间管理的约束较少考虑。本文基于流域综合管理视角,从水资源、水生态、水环境、水灾害 4 个方面构建流域水敏性分区评价指标体系与方法,以太湖流域为例,开展了基于小流域单元的水敏性分区评价,并采用 1985、1995、2007、2017 年 4 个典型年份的土地利用数据,刻画了过去 30 余年太湖流域建设用地扩展与水敏性之间的关联关系。总体上,太湖流域水敏性较强,特别是位于上游的丘陵山区和入湖河道沿线地区,虽然水敏性对建设用地扩张的限制作用在增强,但是高、中、低不同水敏性类型区的建设用地扩张强度并未表现出明显差别,水敏性空间差异对于太湖流域建设用地扩张的限制性作用仍有待发挥。未来空间开发中,应充分考虑上中下游水敏性的差异,合理安排建设用地指标及布局调整政策,提高水陆空间统筹开发及水土资源利用的协调性。

本文研究跳出了国际上多关注城市内部水敏性评价的局限,将水敏性研究视角拓展到流域尺度,但是本文的研究结果是基于实证区域封闭的假设,由于水资源流动性和流域尺度性的存在,更大尺度的流域水敏性评价方法仍需进一步探索。本文刻画了水敏性指数与建设用地扩张强度的统计相关关系,结果表明两者并非简单的线性关系,建设用地扩张还受到国家区域发展政策、地方经济社会发展诉求、其他资源环境条件等因素影响,关于空间扩张与水敏性间的相互作用机理及影响程度的定量研究仍可深入。此外,水作为串联城市、半城市化地区、乡村地域景观和功能的主要因素,也是各类空间规划都会涉及的资源环境要素,因而在各种保护-开发、城市-乡村、湖泊-流域等不同规划中都要统筹考虑,并在此基础上探索自然资源管理与空间规划体系重构的互馈模式。

参考文献:

[1]杨桂山.流域综合管理导论[M].科学出版社,2004.

[2]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[J].湖泊科学,2012,24(1):1-8.

[3]孙伟.太湖流域空间开发适宜性分区与失衡性评估[J].湖泊科学,2012,24(1):9-16.

[4]王艳君,吕宏军,施雅风,等.城市化流域的土地利用变化对水文过程的影响——以秦淮河流域为例[J].自然资源学报,2009,24(1):30-36.

[5]孙伟,陈雯,陈诚.水环境协同约束分区与产业布局引导研究——以江苏省为例[J].地理学报,2010,65(7):819-827.

[6]WHELANS, MAUNSELL H G.Planning and management guidelines for water sensitive urban (Residential) design [R].The Water Authority of Western Australia and the Environmental Protection Authority,1994.

[7]刘颂,李春晖.澳大利亚水敏性城市转型历程及其启示[J].风景园林,2016(6):104-111.

[8]BRINCKERHOFF P.Water sensitive urban design guidelines [J].Gold Coast, 2005,14(2):1391-1400.

[9]何培根,张成.基于水敏性城市设计的雨洪管理实践及启示——以墨尔本为例[C].中国城市规划年会,2016.

[10]LLOYD S D, WONG T H F, CHESTERFIELD C J.Water Sensitive Urban Design:A Stormwater Management Perspective [J].Catchment Hydrology, 2002.

[11]WONG T H F.Water sensitive urban design:The journey thus far [J].Australian Journal of Water Resources, 2006, 10 (3) :213-222.

[12]ASHLEY R, LIAN L, WARD S, et al.Water-sensitive urban design:Opportunities for the UK [J].Proceedings of the Institution of Civil Engineers Municipal Engineer, 2013, 166 (2) :65-76.

[13]LOW CHOY D.Join-up Metropolitan planning:State and local governments ‘rowing in the same direction’:An australian case study [C].10th IACP Conference “Governance and Planning in Transitional China”, Beijing, 2016.

[14]彭建,赵会娟,刘焱序,等.区域水安全格局构建:研究进展及概念框架[J].生态学报,2016,36(11):3137-3145.

[15]鲍超,贺东梅.京津冀城市群水资源开发利用的时空特征与政策启示[J].地理科学进展,2017,36(1):58-67.

[16]张远,高欣,林佳宁,等.流域水生态安全评估方法[J].环境科学研究,2016,29(10):1393-1399.

[17]张昌顺,谢高地,鲁春霞.中国水环境容量紧缺度与区域功能的相互作用[J].资源科学,2009,31(4):559-565.

[18]孙伟.空间功能分区理论、方法与应用实践[M].科学出版社,2013.

[19]张红举,石亚东,徐兆安,等.2016 太湖健康状况报告[R/OL].上海:水利部太湖流域管理局,2017.http://www.tba.gov.cn/contents145114731.html