

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2024.02.009

引用格式:马青山,邓志辉,葛伟亚,等. 无锡市水环境承载力动态特征研究[J]. 华东地质, 2024, 45(2): 240-253.
(MA Q S, DENG Z H, GE W Y, et al. Dynamic characteristics of water resources and water environmental carrying capacity in Wuxi urban area[J]. East China Geology, 2024, 45(2): 240-253.)

无锡市水环境承载力动态特征研究

马青山¹, 邓志辉², 葛伟亚¹, 武健强³, 田福金¹, 张佳⁴, 王宏渤⁴

1. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016;
2. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051;
3. 江苏省地质调查研究院, 江苏 南京 210018;
4. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083)

摘要: 水资源和水环境问题已成为无锡市社会经济发展的重要制约因素。文章从社会经济-水资源-水环境系统互馈机理出发, 采用空间系统动力学方法建立“社会经济-水资源-水环境”耦合模型, 对不同气候和社会经济发展情景下无锡市水环境承载力的时空动态特征进行研究。结果显示: ①不同情景下各行政区水资源和水环境承载系数满足滨湖区>锡山区>惠山区>新吴区>梁溪区的关系; ②不同情景下水资源和水环境承载力有所差异, 节水型丰水年(C1)情景下梁溪区、滨湖区、锡山区、惠山区和新吴区水资源承载力系数和水环境承载力系数月平均值分别是发展型枯水年(B3)情景下的 2.23 倍和 2.36 倍、2.13 倍和 3.22 倍、2.13 倍和 2.55 倍、2.12 倍和 2.53 倍、1.58 倍和 1.74 倍。实践表明, 空间系统动力学模型能在时间和空间上协调处理社会经济与资源环境之间的关系, 使模拟结果更加接近实际情况, 可为同类地区的水资源管理提供科学依据。

关键词: 空间系统动力学; 水资源; 水环境; 承载力; 无锡市

中图分类号: X24; TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2024)02-240-14

水资源是人类生存不可或缺的重要基础资源, 同时也是城市发展至关重要的战略性资源。水资源的可持续利用直接关系到城市可持续发展战略的成功实施以及发展目标的达成^[1-2]。近年来, 受气候变化和人类活动的影响, 水环境污染问题日益严重, 我国许多城市水资源供需矛盾不断增大, 水资源和水环境承载力超载问题已成为社会经济可持续发展的双重制约因素^[3-6]。因此, 研究城市水资源与水环境系统承载力及其影响因素, 对实现社会经济、水资源和环境的可持续发展以及保障城市发展安全具有重要的理论意义和现实意义^[7-10]。

近年来, 基于系统思维概念的系统动力学方法(System Dynamics, SD)已经成为模拟城市水资源

及水环境状况和分析人类与环境系统相互作用关系的有效手段。虽然该方法可以充分整合各种社会经济和自然因素以及它们之间的动态反馈过程^[11-17], 但难以体现研究区域的空间差异性, 无法满足精度更高的水资源管理决策需要^[18-19]。因此, 在系统动力学方法的基础上, 形成了基于时间和空间动态反馈的建模方法——空间系统动力学(Spatial System Dynamics, SSD)^[20-22]。该方法将研究区域划分为多个能够反应空间参数差异性的任意单元, 并对各单元分别进行系统动力学建模, 从而实现空间差异分析, 在水资源、水环境评价与管理等多个领域具有广阔的应用前景。

无锡市在社会经济快速发展的同时, 出现了生

* 收稿日期: 2022-10-28 修订日期: 2024-02-19 责任编辑: 袁静

基金项目: 中国地质调查局“全国特大城市与城市群地质安全风险监测评估(编号: DD20221732)”和中国地质环境监测院开放课题基金“沧州平原区地面沉降机理与预测模型研究(编号: CGLOS-2022-02)”项目联合资助。

第一作者简介: 马青山, 1988年生, 男, 副研究员, 博士, 主要从事水文地质调查研究工作。Email: ssqm2007@163.com。

通信作者简介: 邓志辉, 1996年生, 男, 工程师, 硕士, 主要从事水资源评价及数值模拟研究工作。Email: dzhcugb@163.com。

态环境急剧恶化的现象,经过多年的治理虽已取得阶段性成效,但太湖无锡水域水体污染形势依然严峻。为此,众多学者针对无锡市水资源可持续利用和水环境容量评价等问题开展了大量研究^[23-28],然而关于水资源和水环境承载力动态评价的相关研究却鲜有报道。本文以无锡市区为例,在对社会经济、水资源和水环境系统间耦合机理分析的基础上,构建“社会经济-水资源-水环境”耦合概念模型,基于空间系统动力学方法建立水资源和水环境承载力动态评价模型,通过分析不同情景下水资源供需状况及水环境容量动态变化特征,对各子区的水资源承载力和水环境承载力进行动态评价,并结合评价结果提出相应的政策性建议。

1 研究区概况

研究区为无锡市区,包括梁溪区、锡山区、新吴区、惠山区和滨湖区 5 个行政区,总面积 1 643.88 km² (图 1)。区内以平原为主,中部为水网圩田平原,北部为高沙平原,零星散布着低山、残丘,地势总体特征为南北高、中间低,由南北向中间逐渐降低。

研究区地处北亚热带湿润季风气候区,属于季风副热带海洋性气候。年平均温度为 16.2℃,最高气温可达 41℃,最低气温为-9℃。多年平均降水量为 1 191.4 mm。区内水资源总量丰富,2017—2019 年平均水资源总量为 7.98×10^8 m³,其中地表水资源量为 7.12×10^8 m³。但是受到季风气候的影响,水资源量的年内分配十分不均匀,个别月份的水资源量无法满足用水需求^[29]。此外,太湖无锡水域总体水质处于 IV 类水平,水污染问题依然突出^[30]。

2 水资源与水环境承载力评价模型

系统动力学概念最初由 FORRESTER J W^[31]引入,作为工业管理和决策的模拟方法。20 世纪 70 年代,MEADOWS D H 等^[32]通过构建世界系统动力学模型,将此方法引入到水系统研究领域。系统动力学模型通过使用反馈回路、存量和流量来描述复杂系统。其中,存量表征系统的状态,流量则通过流入或流出影响存量,并将存量连接到系统内。系统动力学模型既有定性概念构建,也有定量数据模拟。定性建模(因果关系图)可以构建概念系统,定量建模(流图)则允许



图 1 研究区地理位置示意图

Fig. 1 Schematic geographical location of the study area

在可视化的基础上模拟概念系统中不同因素之间的影响。

空间系统动力学是在系统动力学方法的基础上发展而来的,基于时间和空间上的动态反馈关系,可通过系统动力学模型和地理信息系统之间的数据动态交换实现耦合计算。其中,地理信息系统提供空间信息,系统动力学则识别空间特征随时间变化的规律,并将其反馈给地理信息系统。

本研究采用系统动力学模拟软件 Vensim 来构建无锡市区“社会经济-水资源-水环境”耦合模型,该软件具有可视化、操作简便快捷的优点。

2.1 概念模型

从社会经济-水资源-水环境耦合内涵出发,分析无锡市区社会经济、水资源及水环境之间关系,建立“社会经济-水资源-水环境”的多系统耦合概念模型,为“社会经济-水资源-水环境”分布式系统动力学模型的建立奠定基础。

2.1.1 多系统耦合关系分析

社会经济、水资源、水环境系统之间是相互作用和影响的。水资源系统为社会经济发展提供必需的水量,而社会经济的发展又在某种程度上改变了水循环过程;水环境系统则容纳社会经济系统发展过程中所产生的污染物,同时又为社会经济系统提供发展的空间;水资源系统作为水环境系统的控制性要素,决定了水环境系统的纳污体量,而生态

环境又作为水资源系统演变过程中的载体对水资源系统起到制约作用(图 2)。

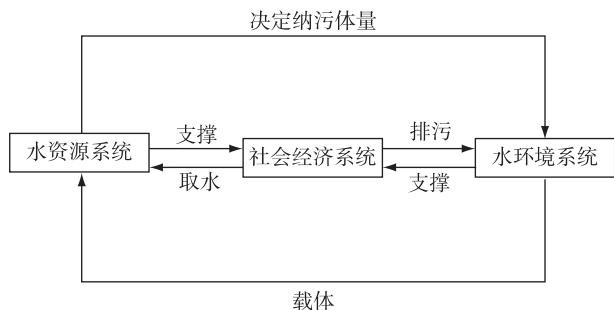


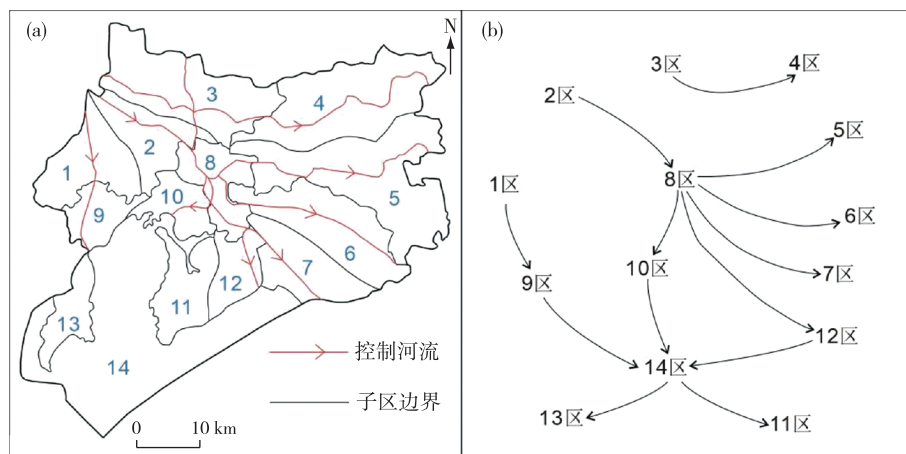
图 2 多系统耦合关系图

Fig. 2 Multiple system coupling relations

2.1.2 空间耦合分析

根据研究区水系分布特征对其进行子区划分,并确定子区之间的耦合关系,从而对水资源和水环境承载力的空间分布进行研究和讨论。

无锡市区水系发达,水网交织密布,同时地形平缓,自然坡降微小。根据研究区水网分布情况,将复杂的水系概化成由主要河流控制的若干子流域,同时考虑到各行政区之间管理的差异性和独立性,将行政区边界作为子流域的边界,最终将研究区划分为 14 个子区,并假定各子区(或子流域)间的汇水和排污相互独立并最终向该区的主控河流汇集。子区划分结果如图 3(a)和表 1 所示。



(a).子区划分结果图;(b).子区耦合空间关系示意图

图 3 研究区子区划分及其空间耦合关系图

Fig. 3 Subdivision of the study area and their spatial coupling relations

表 1 研究区各子区划分结果及主控水体

Table 1 The results of subregion of the study area and dominant water bodies

子区	所属行政区	主控河流或水体
1	惠山区	直湖港
2	惠山区	京杭运河
3	惠山区	锡北运河、锡澄运河
4	锡山区	锡北运河
5	锡山区	九里河
6	新吴区	伯渎港
7	新吴区	京杭运河
8	梁溪区	京杭运河、梁溪河
9	滨湖区	直湖港
10	滨湖区	梁溪河
11	滨湖区	太湖
12	滨湖区	蠡河
13	滨湖区	太湖
14	滨湖区	太湖

根据子区划分的依据,各子区为区内主要河流形成的子流域或同一条河流不同区段所形成的汇水区,各子区之间的耦合关系主要通过不同子流域之间的上下游关系实现。水历经上游子区流向下游子区,实现了子区之间水资源系统的耦合。同时,下游子区承接了上游子区全部的污染物,各子区之间的水环境系统的也建立了耦合关系。本次研究采用化学需氧量 (Chemical Oxygen Demand, COD) 表征水环境状况。而水资源、水环境系统对社会经济系统的支持与限制作用,使得子区间的社会经济系统产生了间接联系。子区间的空间耦合关系见图 3(b)。

2.2 数值模型

2.2.1 SD 模型的结构

无锡市区水资源水环境承载力模拟模型由社

会经济子系统、水资源子系统和水环境子系统 3 个模块组成,该模型可充分反映出社会发展、水资源和水环境的变化情况。就子系统间的关系来看,社会经济子系统为水资源和水环境子系统分别提供用水和污染排放数据。

(1)社会经济子系统。社会经济子系统主要用于

计算社会经济总需水量和 COD 入河总量。总需水量包括生活需水量、工业需水量和农业需水量;COD 入河总量包括生活源 COD 入河量、工业源 COD 入河量和农业源 COD 入河量,而农业源 COD 入河量又根据研究区的农业构成和特点分为种植业 COD 入河量、畜牧业 COD 入河量和水产养殖业 COD 入河量(图 4)。

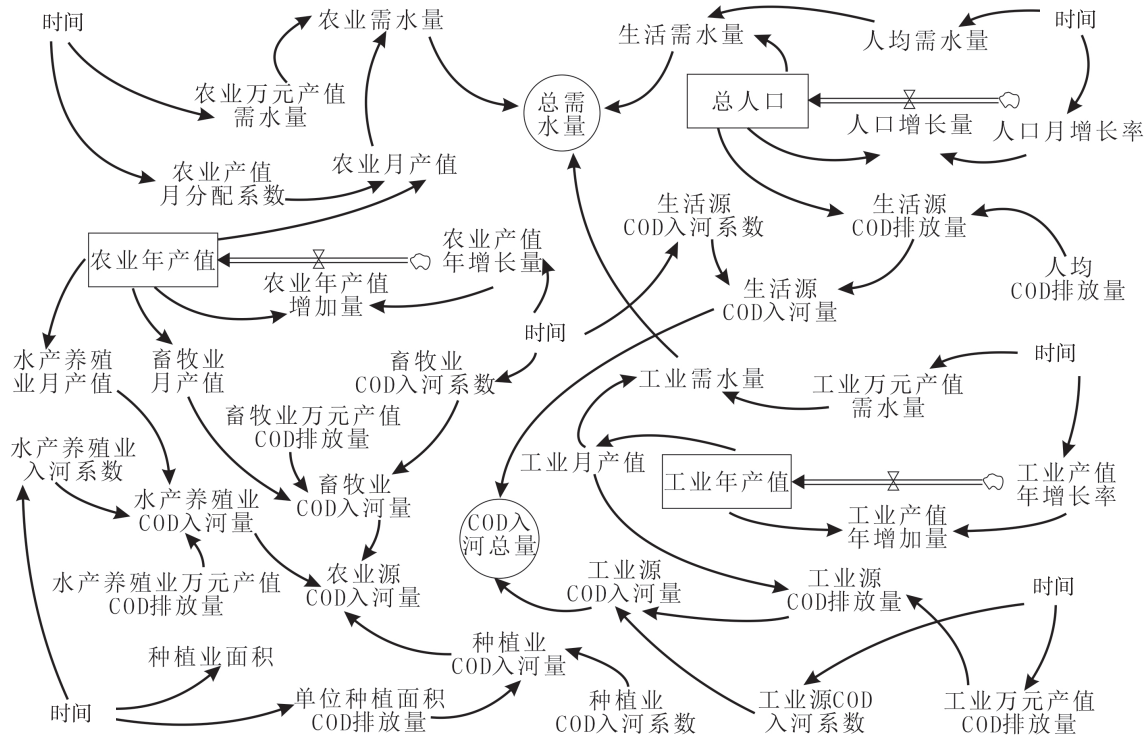


图 4 社会经济子系统模型流程图

Fig. 4 Flow chart of the socio-economic subsystem model

(2)水资源子系统。水资源子系统主要用于确定地表水可利用资源量和总需水量,二者是计算水资源承载系数的重要变量。降水的年内分配不均导致地表水净补给资源量的年内分布差异较大。在干旱月份可能出现水资源可利用量小于总需水量,而无法满社会济用水需求的情况。通过水均衡法得到地表水径流量,用于水环境系统中水环境承载系数的计算(图 5)。

(3)水环境子系统。水环境子系统主要用于计算表征水环境承载力的 COD 环境承载系数。COD 环境承载系数由 COD 现状浓度和河流断面 COD 目标浓度确定。COD 现状浓度受地表水体积和 COD 排放量共同影响,其中地表水体积决定了对污染物的稀释能力,而 COD 排放量由上游排泄量和本区入河量组成。此外,COD 综合衰减系数对现状

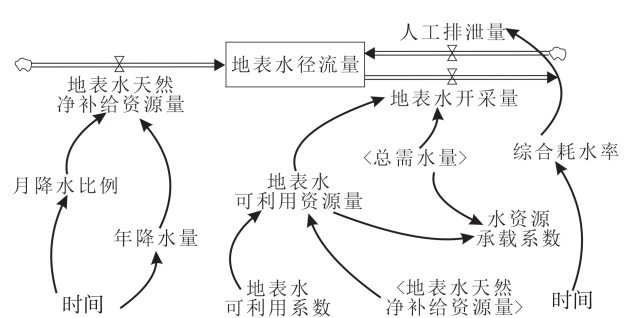


图 5 水资源子系统模型流程图

Fig. 5 Flow chart of the water resources subsystem model

浓度的影响也不容忽视(图 6)。

2.2.2 模型设置

(1)模型边界。模型的空间边界为无锡市区行

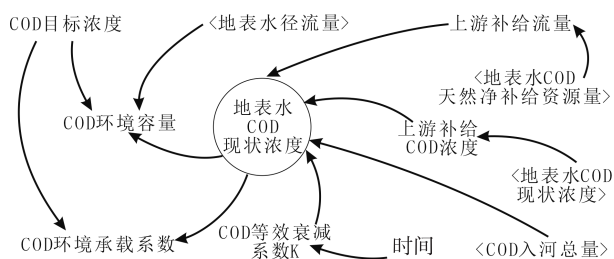


图6 水环境子系统模型流程图

Fig. 6 Flow chart of the water environment subsystem model

政边界,各子区模型的空间边界为各子区边界。模型的时间边界为 2017—2025 年,其中 2017—2019 年为模型的识别验证期,2020—2025 年为模型的预测期。基准年为 2019 年,时间步长为 1 个月。

(2)数据来源。本次研究数据类型主要包括社会经济、水资源和水环境数据。社会经济数据主要有总人口及其增长率、工业产值及其增长率、农业产值及其增长率和各行业用水定额;水资源数据主要包括地表水资源量及其可利用系数、径流量、地表水开采量和人工排泄量;水环境数据主要包括各行业 COD 排放量及入河系数、各断面 COD 浓度及

COD 等效衰减系数等。模型所需数据主要来源于《无锡市国民经济和社会发展统计公报》^[33]、《无锡统计年鉴—2019》^[34]、《无锡市水资源公报》^[29]和《太湖流域及东南诸河水资源公报》^[35]等。

2.2.3 主要方程和变量

(1)分区耦合计算方程。各子区主要根据上下游关系进行水环境系统的耦合模拟,各子区地表水 COD 浓度由本区水资源量、本区排污量、上游补给流量和补给浓度共同求得。各子区的地表水天然净补给资源量又作为下游子区上游补给流量,各子区的地表水 COD 现状浓度同时也是下游子区上游补给 COD 浓度。现假设 A 子区为上游,B 子区为下游,则传值变量及传值公式可以表示为:

$$B \text{ 区上游补给流量} = A \text{ 区地表水天然净补给资源量}, \quad (1)$$

$$B \text{ 区上游补给 COD 浓度} = A \text{ 区地表水 COD 现状浓度}. \quad (2)$$

(2)模型主要变量。模型中主要运用的变量有:状态变量、速率变量和辅助变量(辅助变量包括表函数变量、常量和中间变量),主要变量及说明见表 2。

表2 模型主要变量说明表

Table 2 Description table of major variables of the model

变量名称	计算公式	单位
总人口	INTEG(人口增长量,2 530 547)	人
工业年产值	INTEG(工业年产值增加量,2 214. 27)	亿元
农业年产值	INTEG(农业年产值增加量,41. 16)	亿元
生活需水量	总人口×人均需水量	m ³ /月
人均 COD 排放量	36×行政区城镇化率+27×(1-行政区城镇化率)	g/(人·天)
生活源 COD 排放量	总人口×人均 COD 排放量	t/月
生活源 COD 入河量	生活源 COD 排放量×生活源 COD 入河系数	t/月
工业源 COD 排放量	工业月产值×工业万元产值 COD 排放量×10 000	t/月
工业源 COD 入河量	工业源 COD 排放量×工业源 COD 入河系数	t/月
种植业 COD 入河量	种植业面积×单位种植面积 COD 排放量×种植业入河系数	t/月
畜牧业月产值	农业年产值×0. 033 75/12	亿元/月
畜牧业入河量	畜牧业月产值×畜牧业万元产值 COD 排放量×畜牧业入河系数×10 000	t/月
水产养殖业月产值	农业年产值×0. 085/12	亿元/月
水产养殖业 COD 入河量	水产养殖业月产值×水产养殖业万元产值 COD 排放量×水产养殖业入河系数×10 000	t/月
农业源 COD 入河量	种植业 COD 入河量+畜牧业 COD 入河量+水产养殖业 COD 入河量	t/月
总需水量	生活需水量+工业需水量+农业需水量	m ³ /月
COD 入河总量	农业源 COD 入河量+工业源 COD 入河量+生活源 COD 入河量	t/月
地表水天然净补给资源量	通过年降水量拟合全年量,再通过月降水比例求每月量	m ³ /月
地表水可利用资源量	地表水天然净补给资源量×地表水可利用系数	m ³ /月
地表水开采量	MIN(地表水可利用资源量,总需水量)	m ³ /月

人工排泄量	地表水开采量 $\times(1-\text{综合耗水率})$	$\text{m}^3/\text{月}$
地表水径流量	地表水天然净补给资源量-地表水开采量+人工排泄量	$\text{m}^3/\text{月}$
水资源承载系数	地表水可利用资源量/总需水量	无量纲
上游补给流量	上游子区地表水天然净补给资源量	$\text{m}^3/\text{月}$
上游补给 COD 浓度	上游子区地表水 COD 现状浓度	mg/L
地表水 COD 现状浓度	$(\text{COD 入河总量}/\text{地表水径流量}\times 10^6 + \text{上游补给 COD 浓度}\times \text{上游补给流量}/\text{地表水径流量})\times \text{EXP}(-\text{COD 衰减系数}\times \text{河道停留时间})$	mg/L
COD 环境容量	$(\text{COD 目标浓度}-\text{地表水 COD 现状浓度})\times \text{地表水径流量}\times 10^{-6}$	t
COD 环境承载系数	COD 目标浓度/地表水 COD 现状浓度	无量纲

2.3 模型有效性检验

系统动力学模型有效性检验的目的在于判断模型是否能够准确反映出系统的特征及变化规律。利用 2017—2019 年无锡市区各项实际数据与系统动力学模型模拟值进行对比分析,从而验证模型的有效性。鉴于模型变量较多,故选取总人口、工业总产值、农业总产值、总需水量和 COD 浓度等模型主要变量进行验证。

验证结果(表 3,图 7)表明,模型总人口、工业总产值、农业总产值和总需水量变量的相对误差均在 5%以内,大部分变量的相对误差保持在 1%以内,COD 实测浓度和模拟浓度整体拟合效果较好。模型主要变量的拟合结果表明,无锡市区系统动力学模型的结构合理且运行正确,能够较准确地模拟水资源水环境动态变化,且发展趋势与实际情况相符,可用于不同情景下的水资源和水环境承载力预测分析。

2.4 情景设置

2.4.1 社会经济发展情景

居民生活、工业发展和农业生产都依赖水资源和水环境的支撑,社会经济的发展是导致需水量和排污量增加的主要因素,随着用水量和排污量不断增加,水资源和水环境压力也不断增大。社会经济发展情景主要从各行业用水定额以及经济发展速度等方面进行分析,设定了以下 3 个社会经济发展情景。

(1)情景 A(现状型)。假设人口、工业产值和农业产值维持 2019 年的增速不变。

(2)情景 B(发展型)。在情景 A 基础上,注重社会经济发展,工业总产值增速提升至 15%/年。

(3)情景 C(节水减排型)。在情景 A 的基础上,人均需水量、工业万元产值需水量和农业万元产值

表 3 无锡市区主要社会经济变量的验证结果

Table 3 Results of validation of major socio-economic variables in Wuxi City

	变量	2017 年	2018 年	2019 年
总人口	模拟值/万人	257.65	262.77	268.01
	实际值/万人	259.23	263.13	268.45
	相对误差/%	-0.61	-0.14	-0.16
工业总产值	模拟值/亿元	2 574.50	2 795.65	2 661.87
	实际值/亿元	2 574.50	2 805.51	2 661.64
	相对误差/%	0.00	-0.35	0.01
农业总产值	模拟值/亿元	41.60	38.82	36.55
	实际值/亿元	41.73	37.49	36.50
	相对误差/%	-0.31	3.54	0.14
总需水量	模拟值/亿 m^3	6.21	6.36	6.25
	实际值/亿 m^3	6.06	6.36	6.48
	相对误差/%	2.40	0.08	-3.48

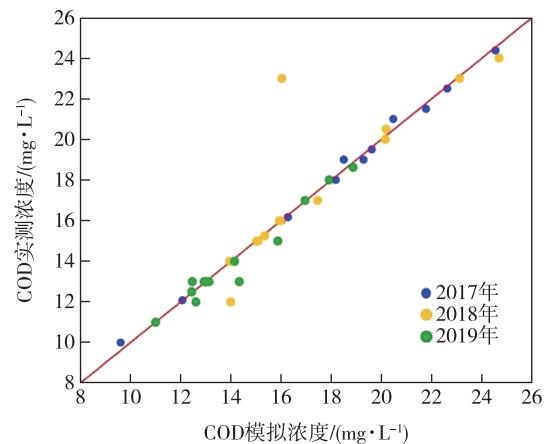


图 7 研究区模拟 COD 浓度与实测 COD 浓度拟合图
Fig. 7 Fitting diagram of simulated COD concentration and measured COD concentration

需水量到 2025 年均降低 10%,人均 COD 排放量、工业源万元产值 COD 排放量、单位种植面积 COD

排放量、畜牧业万元产值 COD 排放量和水产养殖业万元产值 COD 排放量到 2025 年也均降低 10%。

2.4.2 气候变化情景

气候变化作用下,流域水循环过程和水资源时空分布特征发生变化,从而影响水资源数量和水环境中污染物的来源与迁移转化,进而导致水资源和水环境承载力随之改变。根据研究区近 24 年的年降水量数据绘制降水累积保证率曲线,在此基础上将气候情景分为“丰、平、枯”三种类型,分别为:情景 1(丰水年)——年降水量为 1 330.3 mm;情景 2(平水年)——年降水量为 1 144.2 mm;情景 3(枯水年)——年降水量为 1 047.3 mm。

在综合考虑社会经济发展和气候变化的基础上,本文共设置了 9 种模拟情景(表 4)。

表 4 不同模拟情景设置一览表
Table 4 The list of different simulation scenarios

模拟情景	社会经济情景			
		现状型	发展型	节水减排型
气候变化情景	丰水年	A1	B1	C1
	平水年	A2	B2	C2
	枯水年	A3	B3	C3

3 结果与讨论

3.1 水资源承载力分析

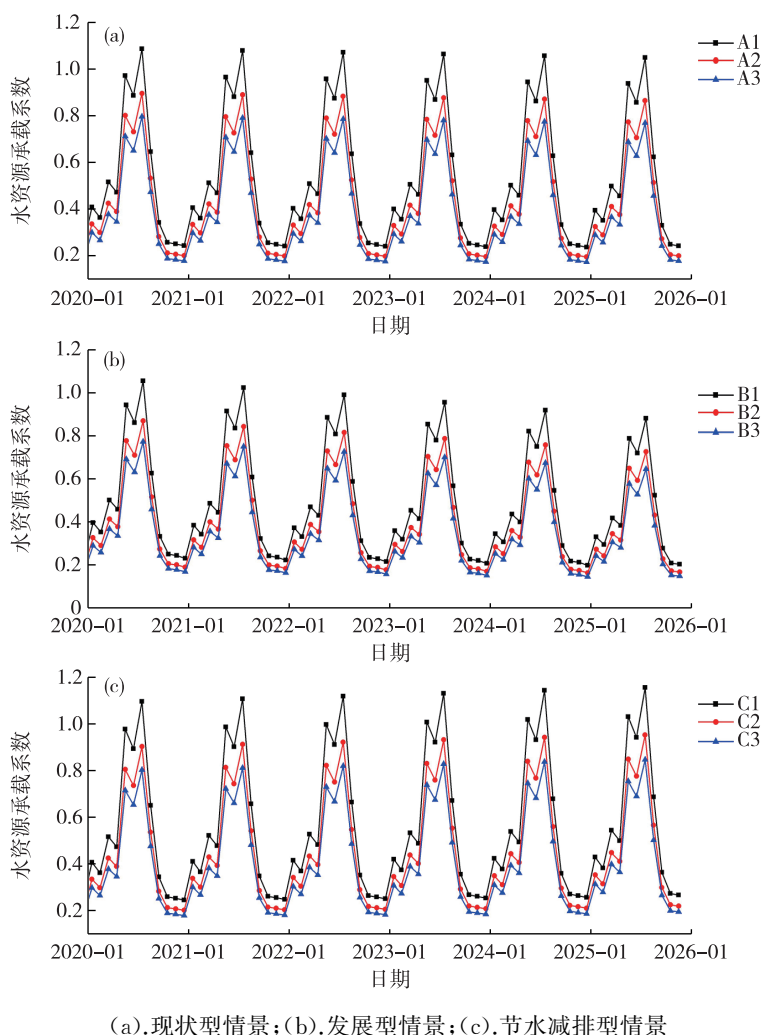
本研究以水资源承载系数作为水资源承载力的评价指标。水资源承载系数定义为可利用资源量与总需水量的比值。当总需水量大于可利用资源量时,水资源承载系数 <1 ,则会出现水资源供需失衡的问题。

不同情景下的水资源承载系数动态响应呈现相似的规律,整体来讲,各情景下的水资源承载系数的大小关系为:发展型 $<$ 现状型 $<$ 节水减排型;枯水年 $<$ 平水年 $<$ 丰水年。选择最具代表性的 8 号子区,分析不同情景下水资源承载系数响应特征(图 8)。现状型情景下,水资源承载系数大小依次为丰水年 $>$ 平水年 $>$ 枯水年,除 A1 情景下 8 月份水资源承载系数 >1 之外,A1 情景下其他时间段以及 A2 和 A3 情景下水资源承载系数均 <1 ,水资源供需处于失衡状态(图 8(a))。发展型情景下,水资源承载系数大小关系为丰水年 $>$ 平水年 $>$ 枯水年,除 A1 情景下 2020 年 8 月和 2021 年 8 月的水资源

承载系数 >1 之外,A1 情景下其他时间段以及 A2 和 A3 情景下水资源承载系数均 <1 ,水资源供需处于失衡状态,且水资源承载系数呈现出逐年降低的趋势(图 8(b))。节水减排型情景下,水资源承载系数大小关系为丰水年 $>$ 平水年 $>$ 枯水年,A1 情景下 8 月的水资源承载系数 >1 且具有逐年增大的趋势;相比于现状型情景,节水减排型情景下 6 月份水资源承载系数在 2021 年超过 1,表明水资源供需失衡状况得到有效改善(图 8(c))。综上所述,在保持社会经济规模稳步提升的同时,应当注意水资源的合理利用,采取与之相适应的节水措施,才能在经济发展的同时不断提升水资源系统的承载力,水资源承载力的提升又进一步提升了水资源系统所能承载的社会经济规模,为社会经济的进一步发展提供了保障,由此形成了社会经济系统和水资源系统的良性循环。反之,则会导致水资源承载力逐年减小,而承载力的减小又对社会经济系统的发展起到反作用,从而形成社会经济系统和水资源系统的恶性循环。

从不同情景下各行政区水资源承载力的分布特征图(图 9)可以看出,无锡市区水资源承载系数存在明显的空间差异性,整体上各子区水资源承载系数大小顺序为:滨湖区 $>$ 锡山区 $>$ 惠山区 $>$ 新吴区 $>$ 梁溪区,并呈现出“两边高、中间低”的分布特点。水资源承载系数的空间分布特征与城镇、人口的分布有着密切关系。梁溪区、新吴区为市区中心,人口分布密集,其中梁溪区人口密度高达 13 700 人/平方公里,工业和第三产业发达,是需水量和用水压力最大的区域,而有限的水资源导致了该区域的水资源供需失衡、水资源承载系数较低。

对比分析不同情景下水资源承载系数变化特征,可以发现枯水情景(B3)下水资源承载系数最低,预测期(2020—2025 年)内,各行政区水资源承载力系数最大值均 <1 ,月平均值分别为:锡山区 0.91,滨湖区 0.86,惠山区 0.70,新吴区 0.54,梁溪区 0.35。相比 B3 情景,节水型丰水年(C1)情景的水资源承载力具有非常明显的提升,锡山区、滨湖区、惠山区、新吴区和梁溪区各子区水资源承载力系数最大值分别达到 3.03、3.47、2.39、2.35 和 1.16,且月平均值分别是 B3 情景的 2.13、2.13、2.12、1.58 和 2.23 倍。由此可以发现,节水型丰水年(C1)情景水资源承载力的空间分布情况较为乐观,除梁溪区外,所有子区的水资源承载力能够满足社会



(a).现状型情景;(b).发展型情景;(c).节水减排型情景

图 8 研究区不同情景下水资源承载系数动态变化图

Fig. 8 Dynamic variation of water resources carrying coefficient under different scenarios

经济发展需要,且还能够容纳一定的发展空间,是社会
经济系统和水资源系统最为理想的耦合模式。

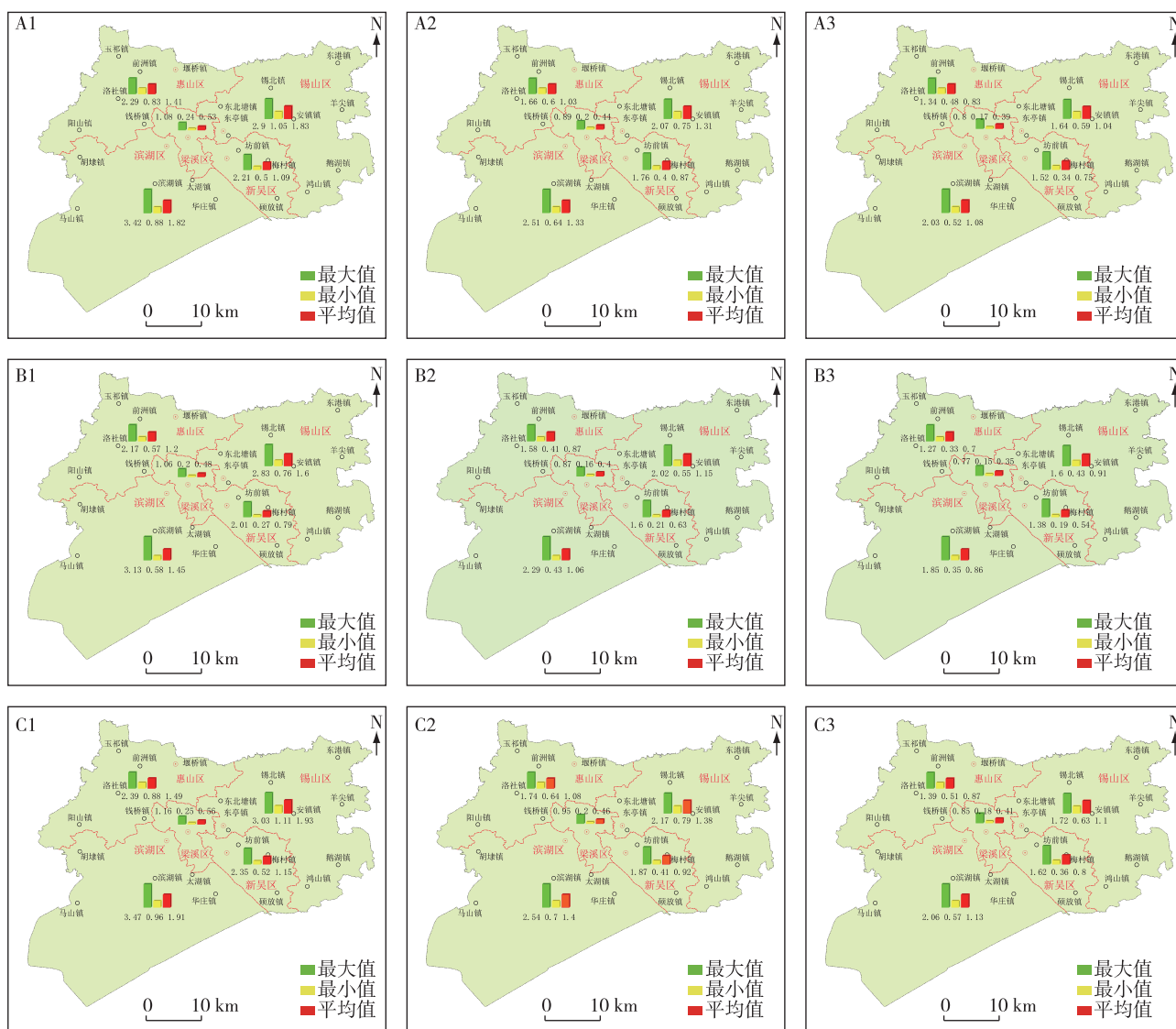
水资源承载力主要受两方面因素的影响和调控:一是气候变化,丰水年降水量增加所带来的水资源量增加对于水资源承载力的提升具有非常明显的作用;二是水资源管理政策,通过节水措施的实施,可显著降低需水量以达到对水资源承载系数的间接提升作用。

3.2 水环境承载力分析

本次以研究区水环境承载系数为指标评价水环境承载力,水环境承载系数为河流断面 COD 目标浓度与 COD 现状浓度的比值。随着社会规模不断扩大,COD 排污量也逐渐增加,当水体中的 COD 浓度大于该地区河流断面目标浓度时,水环境

承载力已不能支撑社会经济发展。

不同情景下的水环境承载系数动态响应规律呈现相似特征,整体来看,各情景下的水环境承载系数的大小关系为:发展型<现状型<节水型;枯水年<平水年<丰水年。选择最具代表性的 8 号子区,分析不同情景下的水环境承载系数变化特征(图 10)。现状型情景下,水环境承载系数大小关系为丰水年>平水年>枯水年,不同情景下 6、7、8 和 9 月份的水环境承载系数基本>1,表明现状型情景下的水环境承载力较高,其他月份均处于水环境承载力超载的状态,并且水环境承载力具有逐年降低的趋势(图 10(a));发展型情景下,水环境承载系数大小关系为丰水年>平水年>枯水年,不同情景下 6、7 和 8 月份的水环境承载系数基本>1,其他月份



A1.现状型丰水年;A2.现状型平水年;A3.现状型枯水年;B1.发展型丰水年;B2. 发展型平水年;B3. 发展型枯水年;C1. 节水减排型丰水年;C2. 节水减排型平水年;C3. 节水减排型枯水年

图9 不同情景下无锡市区各行政区水资源承载系数空间变化特征

Fig. 9 Spatial variation characteristics of water resources carrying coefficient for each administrative district under different scenarios

均处于水环境承载力超载状态,并且水环境承载力逐年降低的趋势相比现状型更加明显(图 10(b));节水减排型情景下,水环境承载系数大小关系为丰水年>平水年>枯水年,不同情景下水环境承载系数>1 的时间约占一半,并且水环境承载系数有明显增长的趋势,节水减排情景能够有效地减少 COD 排放量,从而间接使水环境容量增大(图 10(c))。综上所述,在保持社会经济规模稳步提升的同时,应当注意对于水环境的保护和治理,采取与之相适

应的减排措施,才能在经济发展的同时不断提升水环境系统的承载力,进而提升水环境系统所能承载的社会经济规模,为社会经济的进一步发展提供保障,由此形成社会经济系统和水环境系统的良性循环。相反,若在经济发展的同时不注重减排措施,则会导致水环境承载力逐年减小,而承载力的减小又对社会经济系统的发展起到反作用,限制着它的进一步发展,从而形成社会经济系统和水环境系统的恶性循环。

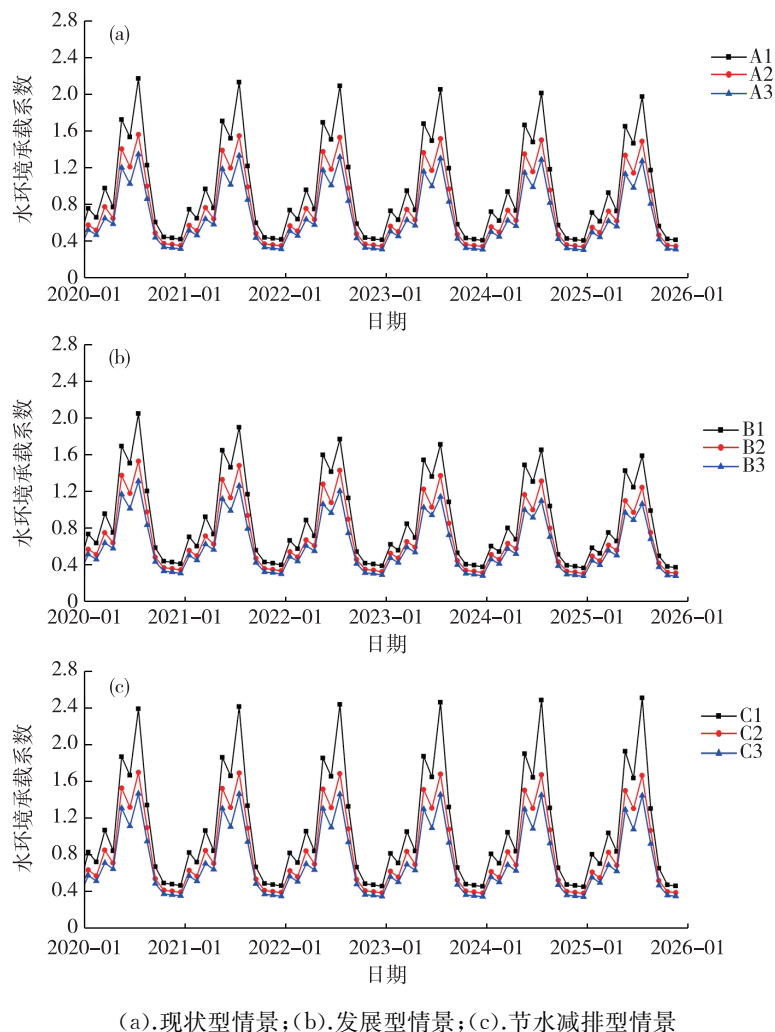


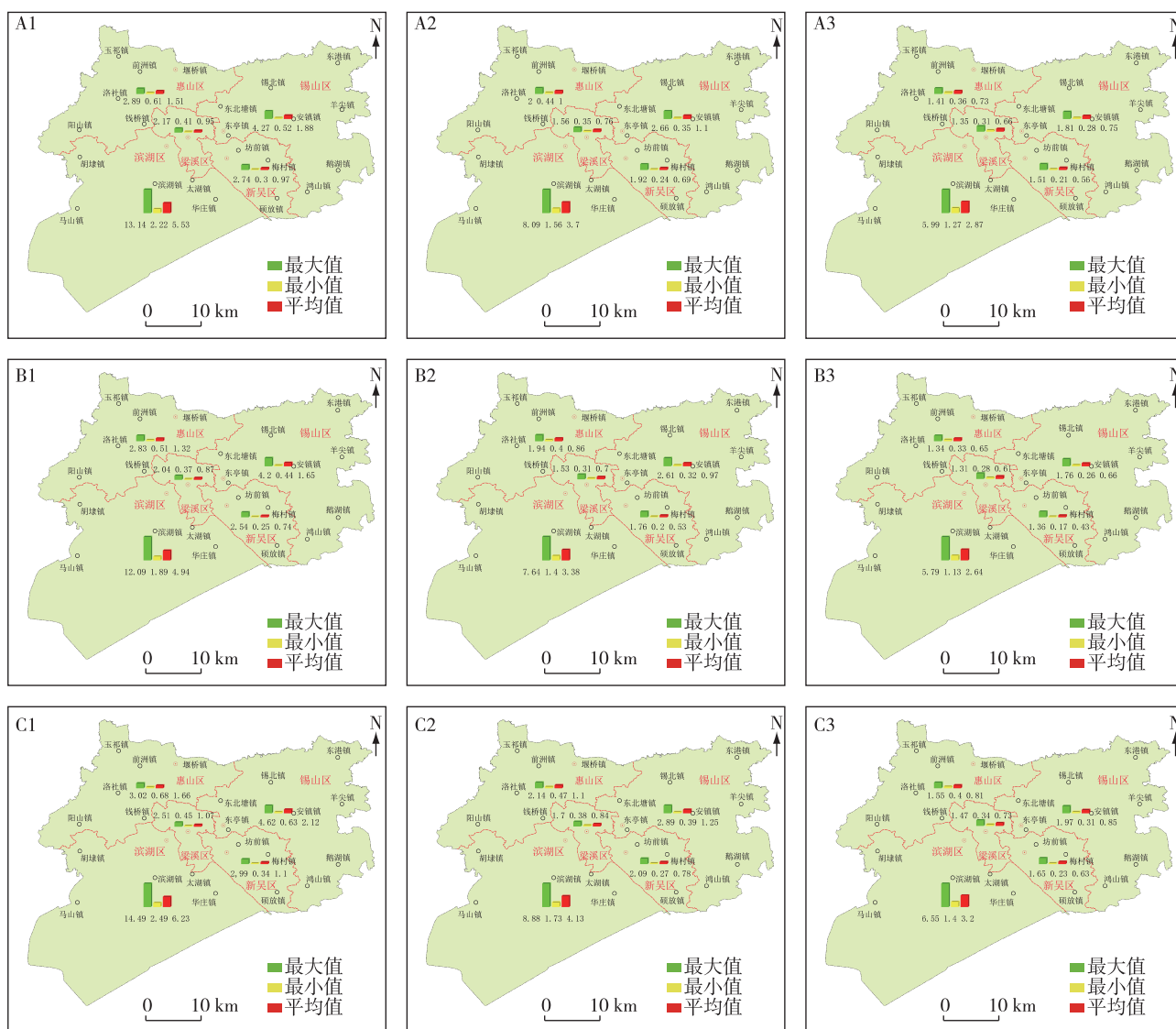
图 10 不同情景下水环境承载系数动态变化图

Fig. 10 Dynamic variation of water environment carrying coefficient under different scenarios

从不同情景下各行政区水环境承载力的分布特征图(图 11)中可以看出,不同发展情景下水资源承载系数存在较大差异,并且表现出明显的空间差异性。相比于其它情景,发展缺水情景(B3)下水环境承载系数最小,各子区水环境承载系数大小顺序为滨湖区>锡山区>惠山区>新吴区>梁溪区,预测期(2020—2025 年)内,各子区水环境承载力系数最大值均<1,月平均值分别为:锡山区 0.66,滨湖区 2.64,惠山区 0.65,新吴区 0.43,梁溪区 0.61。太湖水体水环境容量最大,其余区均处于负荷载状态。生活源 COD 污染是研究区 COD 污染的最主要来源,占 B3 情景下 2025 年 COD 入河总量的 74.7%。这与研究区的社会经济结构有关,区内工农业已基本达到饱和状态,取而代之的是第三产业

的快速发展,其 COD 的排放主要由生活源体现,且市区人口密度较大,以上原因导致了生活源 COD 排在总排放量中占主导地位,所以对于生活源污染的治理应成为今后环境治理的重点。

相比 B3 情景,节水型丰水年(C1)情景下的水环境承载力具有非常明显的提升,锡山区、滨湖区、惠山区、新吴区和梁溪区各子区水环境承载力系数最大值分别达到 4.62、14.49、3.02、2.99 和 2.51,且月平均值分别是 B3 情景下的 2.55 倍、3.22 倍、2.53 倍、1.74 倍和 2.36 倍。由此可以发现,节水型丰水年(C1)情景下水资源承载力的空间分布情况较为乐观,所有子区的水环境容量均>0,且大部分子区还有 50 t 以上的 COD 容量盈余,能够较好地满足社会经济发展的纳污需求,并且还存在一定的



A1.现状型丰水年;A2.现状型平水年;A3.现状型枯水年;B1.发展型丰水年;B2. 发展型平水年;B3. 发展型枯水年;C1. 节水减排型丰水年;C2. 节水减排型平水年;C3. 节水减排型枯水年

图 11 不同情景下各行政区水环境承载系数空间变化特征

Fig. 11 Spatial variation characteristics of water environment carrying coefficient for each administrative region under different scenarios

发展空间,水环境系统处于持续向好的模式。

以上分析表明,水环境承载力主要受两方面因素的影响和调控:一是气候变化,丰水年降水量增加所带来的水资源量增加对于水环境承载力的提升具有非常明显的作用;二是环境管理政策,减排措施尤其是生活源的减排对环境容量的提升具有明显作用。

4 结论

(1)模型主要变量拟合结果表明,研究区系统

动力学模型结构合理且运行正确,能够较准确地反映出社会经济、水资源和水环境系统的特征及变化规律,可以用于不同情景下水资源和水环境承载力的预测分析。

(2)预测结果显示,不同情景下研究区水资源和水环境承载系数均表现为滨湖区>锡山区>惠山区>新吴区>梁溪区的特征。在节水型丰水年(C1)情景下,梁溪区、滨湖区、锡山区、惠山区和新吴区水资源和水环境承载力系数月平均值分别是

发展型枯水年(B3)情景下的 2.23 倍和 2.36 倍、2.13 倍和 3.22 倍、2.13 倍和 2.55 倍、2.12 倍和 2.53 倍、1.58 倍和 1.74 倍。

(3)研究区水资源和水环境承载力存在空间差异。水资源承载力表现为“两边高、中间低”的特点,中部梁溪区和新吴区由于人口密度大、水资源量有限等原因,水资源承载力较弱,无法满足现有规模社会经济的发展需要。水环境承载力方面,除太湖水体外,锡山区拥有较大的 COD 环境容量盈余,可作为“发展潜力区”,未来可考虑在生态环境稳定的前提下进一步扩大发展规模。其他区域的 COD 环境容量大多接近阈值,应加大污染治理力度,控制发展规模,加快产业转型。

参考文献

- [1] 陈定贵, 吕宪国, 王艳平. 长春市城市发展与水资源环境约束关系研究[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2008, 40(2): 130-135.
CHEN D G, LÜ X G, WANG Y P. Study on constraint of urbanization of Changchun City from urban water resources and environments[J]. Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition), 2008, 40(2): 130-135.
- [2] FAN Y P, FANG C L, ZHANG Q. Coupling coordinated development between social economy and ecological environment in Chinese provincial capital cities—assessment and policy implications [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 229: 289-298.
- [3] XU Z Q, XIAO S H, DU C, et al. Temporal variation of water environment carrying capacity in a highly urbanized region of China [J]. Water, 2020, 12(12): 3362.
- [4] 卢亚丽, 徐帅帅, 司保江, 等. 黄河流域九省(区)水资源环境承载力动态演变特征研究[J]. 人民黄河, 2021, 43(11): 103-108.
LU Y L, XU S S, SI B J, et al. Study on dynamic evolution characteristics of water resources environmental carrying capacity of nine provinces and regions of the Yellow River Basin[J]. Yellow River, 2021, 43(11): 103-108.
- [5] 张礼兵, 胡亚南, 金菊良, 等. 基于系统动力学的巢湖流域水资源承载力动态预测与调控[J]. 湖泊科学, 2021, 33(1): 242-254.
ZHANG L B, HU Y N, JIN J L, et al. Dynamic prediction of water resources carrying capacity of Chaohu Basin and system optimization regulation based on system dynamics simulation[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(1): 242-254.
- [6] YAN B Q, WANG Y Q, LI G P, et al. Comprehensive evaluation of the water environment carrying capacity of a river basin: a case study of the Weihe River Basin in China[J]. Water Policy, 2022, 24(1): 31-48.
- [7] 胡若漪. 基于系统动力学的水环境承载力及其影响因素研究——以辽源市为例[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
HU R Y. Research on the influencing factor of water environment carrying capacity based on a system dynamic model in Liaoyuan[D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [8] ZHANG M, LIU Y M, WU J, et al. Index system of urban resource and environment carrying capacity based on ecological civilization[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2018, 68: 90-97.
- [9] 郝奇琛, 孙倩, 李亚松, 等. 厦门市多水源多目标联合配置研究[J]. 华东地质, 2022, 43(1): 79-86.
HAO Q C, SUN Q, LI Y S, et al. Study on the combined allocation of multiple water sources with multiple objectives in Xiamen City[J]. East China Geology, 2022, 43(1): 79-86.
- [10] 宋立东, 佟智强, 刘浩, 等. 牡丹江市资源环境承载力评价[J]. 华东地质, 2021, 42(2): 185-192.
SONG L D, TONG Z Q, LIU H, et al. Evaluation on carrying capacity of resources and environment in Mudanjiang City[J]. East China Geology, 2021, 42(2): 185-192.
- [11] 冯丹, 宋孝玉, 晁智龙. 淳化县水资源承载力系统动力学仿真模型研究[J]. 中国农村水利水电, 2017(4): 117-120, 124.
FENG D, SONG X Y, CHAO Z L. Research on system dynamics simulation model of water resources carrying capacity in Chunhua County, 2017(4): 117-120, 124.
- [12] 李玲, 潘雪倩, 夏威夷, 等. 基于 SD 模型的重庆市水资源承载力模拟分析[J]. 中国农村水利水电, 2018(5): 128-133.
LI L, PAN X Q, XIA W Y, et al. Simulation and analysis of water resources carrying capacity in Chongqing based on SD model[J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(5): 128-133.
- [13] 秦欢欢, 赖冬蓉, 万卫, 等. 基于系统动力学的北京市需水量预测及缺水分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(21): 175-182.
QIN H H, LAI D R, WAN W, et al. Water demand prediction and water deficit analysis in Beijing based on

- system dynamics[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(21): 175-182.
- [14] GHASEMI A, SAGHAFIAN B, GOLIAN S. System dynamics approach for simulating water resources of an urban water system with emphasis on sustainability of groundwater[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(18): 637.
- [15] ZARGHAMI M, AKBARIYEH S. System dynamics modeling for complex urban water systems; application to the city of Tabriz, Iran[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2012, 60: 99-106.
- [16] MADANI K, MARIÑO M A. System dynamics analysis for managing Iran's Zayandeh-Rud River Basin[J]. *Water Resources Management*, 2009, 23 (11): 2163-2187.
- [17] NIAZI A, PRASHER S, ADAMOWSKI J, et al. A system dynamics model to conserve arid region water resources through aquifer storage and recovery in conjunction with a dam [J]. *Water*, 2014, 6 (8): 2300-2321.
- [18] WANG X Y, LIU L, ZHANG S L. Integrated model framework for the evaluation and prediction of the water environmental carrying capacity in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay area [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 130: 108083.
- [19] CHEN S Y, HE Y H, TAN Q, et al. Comprehensive assessment of water environmental carrying capacity for sustainable watershed development[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 303: 114065.
- [20] AHMAD S, SIMONOVIC S P. Spatial system dynamics; new approach for simulation of water resources systems[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2004, 18(4): 331-340.
- [21] ROACH J, TIDWELL V. A compartmental-spatial system dynamics approach to ground water modeling [J]. *Groundwater*, 2009, 47(5): 686-698.
- [22] 丁聿, 付佳鑫, 唐旭, 等. 基于 SD-GIS 方法的天然气需求量中长期变化趋势及其空间格局预测——以北京市为例[J]. *天然气工业*, 2021, 41(4): 176-185.
- DING Y, FU J X, TANG X, et al. Prediction of medium-and long-term change trend and spatial distribution of natural gas demand based on the SD-GIS method: a case study of Beijing[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(4): 176-185.
- [23] 胡恒博, 甘升伟, 俞芳琴, 等. 基于投影寻踪法的太湖流域主要城市水资源利用效率评估[J]. *人民珠江*, 2018, 39(3): 49-53.
- HU H B, GAN S W, YU F Q, et al. Assessment of water resources utilization efficiency in major cities of Taihu Basin based on projection pursuit method[J]. *Pearl River*, 2018, 39(3): 49-53.
- [24] FENG L, LI Q Q, ZHANG L, et al. Exploring the effect of floodgates operation systems on water environmental capacity in a regulated river network of Wuxi, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 299: 126743.
- [25] 许刚, 朱振国, 黄建光, 等. 无锡市社会经济发展对水环境的影响[J]. *湖泊科学*, 2002, 14(2): 166-172.
- XU G, ZHU Z G, HUANG J G, et al. Effects of socio-economic development on the water environment in Wuxi City, Taihu Watershed[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2002, 14(2): 166-172.
- [26] 胡芳芳. 无锡市水资源可持续利用评价与优化配置研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- HU F F. Study on sustainable utilization evaluation and optimized allocation of water resources in Wuxi City[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012.
- [27] 许文雯. 基于水环境容量的无锡市市区城市规模预测研究[D]. 南京: 南京大学, 2012.
- XU W W. Research on forecasting the city size of Wuxi urban district based on water environmental capacity[D]. Nanjing: Nanjing University, 2012.
- [28] 孙伟. 基于公平性评估的滨湖城市水环境容量配置研究——以无锡市区 COD 配置为例[J]. *湖泊科学*, 2013, 25(1): 82-90.
- SUN W. Allocation of water environmental capacity based on fairness assessment in lakeshore city area——a case study of COD configuration in Wuxi City[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2013, 25(1): 82-90.
- [29] 无锡市水利局. 无锡市水资源公报[R]. 无锡: 无锡市水利局, 2018.
- Wuxi Municipal Bureau of Water Resources. Wuxi City water resources bulletin[R]. Wuxi: Wuxi Municipal Bureau of Water Resources, 2018.
- [30] 无锡市生态环境局. 无锡市生态环境状况公报[R]. 无锡: 无锡市生态环境局, 2019.
- Wuxi Ecological Environment Bureau. Bulletin on the ecological environment of Wuxi City[R]. Wuxi: Wuxi Ecological Environment Bureau, 2019.
- [31] FORRESTER J W. Industrial dynamics: a major breakthrough for decision makers [J]. *Harvard Business Review*, 1958, 36(4): 37-66.
- [32] MEADOWS D H, MEADOWS D L, RANDERS J, et al. The Limits to growth: a report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind[M]. New York: Universe Books, 1972.

- [33] 无锡市统计局. 无锡市国民经济和社会发展统计公报[R]. 无锡: 无锡市统计局, 2017.
Wuxi Bureau of Statistics. Statistical communique of Wuxi City on national economic and social development [R]. Wuxi: Wuxi Bureau of Statistics, 2017.
- [34] 无锡市统计局, 国家统计局无锡调查队. 无锡统计年鉴-2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
Wuxi Bureau of Statistics, Wuxi Survey Team of National Bureau of Statistics. Wuxi statistical yearbook 2019[M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.
- [35] 水利部太湖流域管理局. 太湖流域及东南诸河水资源公报[R]. 上海: 水利部太湖流域管理局, 2018.
Taihu Basin Authority of Ministry of Water Resources. Taihu Basin and Southeast Rivers water resources bulletin[R]. Shanghai: Taihu Basin Authority of Ministry of Water Resources, 2018.

Dynamic characteristics of water resources and water environmental carrying capacity in Wuxi urban area

MA Qingshan¹, DENG Zhihui², GE Weiya¹, WU Jianqiang³, TIAN Fujin¹, ZHANG Jia⁴,
WANG Hongbo⁴

(1. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China;

2. Center for Hydrogeology and Environmental Geology, China Geological Survey, Baoding 071051, Hebei, China;

3. Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210018, Jiangsu, China;

4. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Water resources and water environmental issues have emerged as significant constraints on the socio-economic development of Wuxi City. Based on the mechanism of mutual feedback within this system, a coupled model of the social-economy-water resources-water environmental was developed by means of spatial system dynamics. Subsequently, this model was employed to study the spatiotemporal dynamic characteristics of water resources and water environment carrying capacities in each subregion of Wuxi, considering various climate and socio-economic development scenarios. The results show that: ① Both water resources carrying capacity coefficients and water environmental carrying capacity coefficients of each administrative district display in following order under different scenarios: Binhu District > Xishan District > Huishan District > Xinwu District > Liangxi District. ② There are distinctions of water resources carrying capacity and water environment carrying capacity under different settings. Compared with B3 scenario (a developing society in a dry climate), the monthly average values of water resources carrying capacity coefficients and water environmental carrying capacity coefficients in Liangxi District, Binhu District, Xishan District, Huishan District, and Xinwu District under C1 scenario (a water saving and emission reduction society in a wet climate) are 2.23 and 2.36, 2.13 and 3.22, 2.13 and 2.55, 2.12 and 2.53, 1.58 and 1.74 times, respectively. The practice shows that the spatial system dynamics model effectively harmonizes the relations between social economy and resource environment in both time and space, modeling simulation results that closely align with actual conditions. Thus, it provides a robust scientific foundation for regional water resource management in similar areas.

Key words: spatial system dynamics; water resources; water environment; carrying capacity; Wuxi urban area