

基于水环境承载力的沁河流域系统优化调控

叶龙浩¹, 周 丰², 郭怀成¹, 高 伟¹, 何成杰¹, 王翠榆¹

(1. 北京大学环境科学与工程学院, 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100871;

2. 北京大学城市与环境学院, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要: 基于水环境承载力核算模型, 提出流域系统优化调控方法, 并应用于沁河流域。通过承载力核算模型计算出2015年和2020年流域水环境承载力, 当系统动力学预测的2015年和2020年经济发展规模高于承载力时, 通过约束条件中工业企业排放浓度、城镇生活污水收集率、水资源利用率、尾水回用率等4项调控指标进行敏感度分析, 最终确定最优的经济发展。结果表明: 沁河流域应该优先调控城镇生活污水收集率; 2015年, 执行工业污水排放二级标准, 收集率须达到71.4%以上, 优化后的经济规模阈值为475.6亿元; 2020年, 执行工业一级标准, 城镇生活污水收集率须为78.4%以上, 相应地经济规模阈值为816.0亿元。

关键词: 水环境承载力; 可持续性; 系统动力学; 系统优化; 沁河流域

1 引言

水环境承载力是指一定状态下某地区水环境所能承受的社会经济和人口增长阈值^[1], 在环境管理、资源利用^[2]、土地耕种^[3]等方面得到广泛应用。其并非一成不变, 而是与技术、产业结构和消费水平等密切相关^[4], 反映了社会经济与环境相互作用的界面特征, 也是流域可持续性的重要判据^[5]。然而, 水环境承载力的定量测度以及基于此的流域系统优化调控成为一类研究难题^[6]。目前, 水环境承载力的定量测度研究主要包括两个方面: ① 基于综合评价方法对水环境承载力状态进行评估^[7-10]; ② 基于系统动力学或优化模型方法计算特定状态下的水环境承载力^[11-13]。对于第一类方法, 主要通过对评价指标赋权, 以指数形态分辨水环境所处的综合状态, 计算和操作过程相对简洁, 可重复性强, 是目前应用较为广泛的量化方法^[14]。但该类方法的缺陷是预测能力较差, 主要作为鉴别手段而非调控手段^[15]。考虑到在水环境承载力研究体系中, 涉及的因子众多^[16], 反馈关系复杂, 大量的数据交叉重叠, 主次互相隐合, 且随着时间的变化而变化^[17]。为此, 针对环境承载力研究的系统性和复杂性, 引入系统动力学的方法进行整体分析、剖析系统所有要素的因果反馈关系^[18,19]。相比而言, 其优势在于: ① 从“社会—经济—环境”整体的角度来研究承载力; ② 将复杂的系统逐步分解, 使模型建立成为可能; ③ 允许开展相应预测工作。尽管如此, 对复杂系统的合理简化以及参变量变化的确定方法仍是困扰的难题^[20]。

自从20世纪30年代美国提出流域管理以来, 强调以流域方法为基础, 采用流域分析的途径, 在流域尺度上, 采取有效措施来维系、保护和恢复水环境及水生态系统完整

收稿日期: 2012-09-15; 修订日期: 2013-02-24

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07102-006, 2012ZX07503-002)

作者简介: 叶龙浩 (1989-), 男, 江西鹰潭人, 硕士, 主要从事环境规划及水环境承载力方面的研究。

E-mail: yelonghao2007@gmail.com

通讯作者: 郭怀成 (1953-), 男, 北京人, 教授, 博士生导师, 主要从事环境规划与管理以及水环境学研究。

E-mail: hcguo@pku.edu.cn

性^[21]。当前中国流域水质恶化、富营养化加剧、水生态严重破坏和水资源紧缺等问题十分严重^[22]。针对此，流域水环境承载力和水资源承载力的研究逐步应用到流域环境管理中，如太湖流域^[23]、淮河流域^[24]、黑河流域^[25]、辽河流域^[12]、黄河流域^[26]等。基于水环境承载力的应用体现在：① 通过指标体系评价识别影响水环境良性发展的因子，以有利于针对性的进行污染削减和治理；② 赋予水环境发展方案最优或非劣（多目标情况下）的社会经济发展极限，使人类社会、经济系统的发展与水环境保护相适应。然而，目前研究在得到社会经济发展承载力后，并没有继续分析约束条件和对承载力影响力最大的约束性指标，还没有办法从社会经济发展的角度定量分析其与环境保护协调发展的具体的、有针对性的对策措施。

鉴于此，本研究通过对案例地区建立社会经济发展与环境状态的定量映射关系，通过承载力核算模型得到现阶段流域水环境的承载阈值；并通过对约束指标的敏感度分析，找到影响水环境承载力的关键因子，从而提出更加具体、有针对性的宏观优化调控方案。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区域概况

本研究选择山西省晋城市境内沁河流域为案例区（图1）。沁河流域范围位于35°20'-35°50'N、112°-112°45'E之间。沁河流域干流长168 km，流域面积4858 km²；2009年流域总人口为76.8万，GDP为234.5亿元；多年平均（1956-2000年）降水量为623.5mm，水资源量12.42亿 m³，径流量为11.6亿 m³。晋城市东部的丹河流域城镇和工业发展相对较早，大规模的煤炭开采、化肥基地建设、城镇发展等已经造成了水资源过度利用、河流径流量锐减、水源污染、河流生态退化等严重的环境问题，形成了巨大的生态环境欠账。与此相比，西部的沁河流域大规模开发利用相对较晚，受到的扰动还相对较小。但是近年来流域的发展建设势头也较强劲，在地方政府强烈的发展意愿驱动下，这一区域将可能成为能源化工产业的战略布局和重要基地。2009年沁河流域工业COD排放达到1628.08 t，氨氮排放185.13 t；城镇生活COD排放2975.36 t，氨氮排放365.16 t，而丹河流域工业COD排放5527.88 t，氨氮排放560.79 t；城镇生活COD排放10342.92 t，氨氮排放1269.36 t。为了避免沁河流域像丹河流域一样在未来形成难以弥补的环境欠账，有必要对沁河流域的环境承载力状况进行科学评估，合理布局社会经济活动，有针对性地制定环境保护措施，保证水环境和水资源可持续发展。

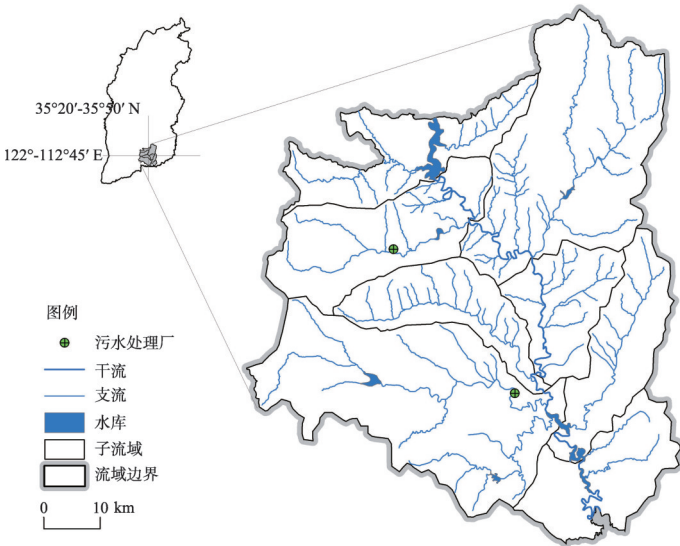


图1 山西省沁河流域区位图

Fig. 1 Map of Qinhe river basin in Shanxi province

为了表征沁河流域系统的关键特征,按照系统动力学要求^[27],本研究将沁河流域分为4个子系统,即社会发展子系统、经济发展子系统、水资源子系统和水环境子系统,其中以水环境子系统为核心。在经济子系统中,依据行业的相似性及社会经济参数的相似性对流域内工业行业进行细分,包括:采矿业($i=1$)、传统制造业($i=2$)、化工业($i=3$)、设备制造业($i=4$)、电力燃气及水的生产和供应业($i=5$)。在水资源子系统中,将流域用水分为生活用水、农业灌溉用水、畜禽养殖用水、工业生产用水4类。在水环境子系统中,选择水污染物COD和氨氮来表征流域水环境污染负荷。流域COD产生量和流域氨氮产生量主要来自于生活污染和工业排放,包括未经污水处理厂收集的部分和经过污水处理厂处理后残留的部分。

2.2 研究方法

本文通过对晋城市沁河流域社会经济发展状况和“十二五规划纲要”的分析,利用系统动力学模拟出2015年和2020年沁河流域的社会经济发展状况,同时利用承载力核算模型计算出对应时期的水环境承载力状况。通过承载力和社会经济发展规划的对比反映需要调控的力度。再通过对承载力核算模型中约束条件中相应指标的灵敏度分析,找到对承载力影响力最大的指标,从而为后续优化调控提供指导性意见(图2)。

目前传统环境承载力研究方法,提出若干社会经济发展情景,再通过环境承载力核算模型选择一种最为合理的社会经济发展情景。此方法较为被动,决策者只能通过设立的情景中进行选择。而且,对于限制经济发展和促进经济情景选择中,承载力显然更偏向于限制经济发展,与现实情况下决策者更希望促进经济发展的目标产生矛盾。

相比较,本研究使得决策者能更为主动地进行宏观调控,不必单纯的在若干情景中进行选择,而是可以针对每一种情景,都可以经过分析找到改善承载力的关键因子,并且通过具体的优化调控方案改善流域的承载力,使流域恢复到可载状态。

2.3 模型构建

沁河流域承载力核算模型的基本结构包括目标函数、约束条件和决策变量3个部分,其中目标函数是沁河流域社会经济总收益最大化。约束条件主要包括环境容量约束、水资源约束、土地资源约束、当地需求约束以及技术参数约束5部分。决策变量包括第一产业增加值、第二产业增加值、第三产业增加值、城镇人口、农村人口等。以下模型参数的解释见表1。

(1) 目标函数: 经济规模最大化。

流域经济由第一产业、

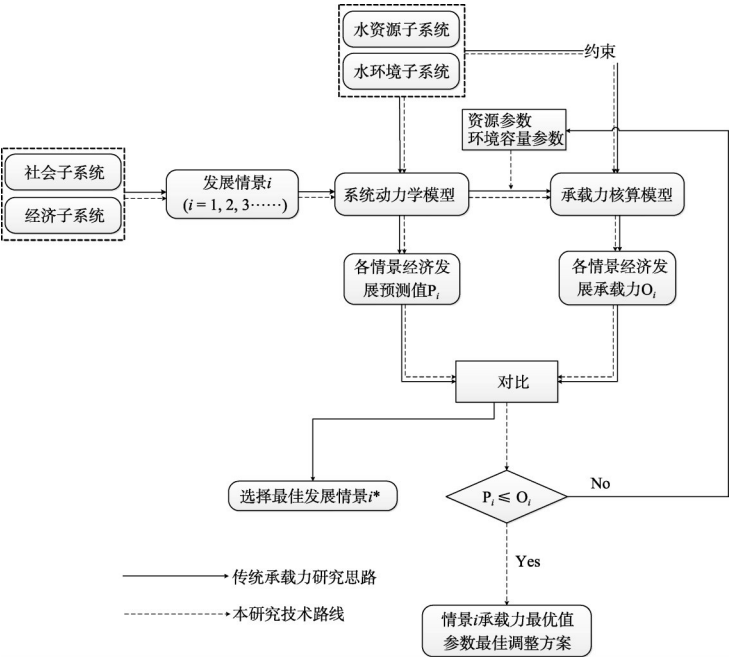


图2 本研究技术路线图

Fig. 2 Technology roadmap of this study

第二产业和第三产业构成。相应地,流域经济规模由三者之和表征。

$$\begin{aligned}\max &= PGDP + SGDP + TGDP \\ &= PRUR \times PRD + \left(\sum_{i=1}^5 IND_i \right) \times PURB/r + PURB \times TED\end{aligned}\tag{1}$$

(2) 约束条件

① 环境容量约束。

沁河流域有4个省控监测断面和一个国控监测断面,分别执行《地表水环境质量标准》Ⅲ级标准和Ⅳ级标准。通过沁河流域容量总量优化分配模型得到化学需氧量点源允排量4535.56 t,其中城镇生活允排量2050.89 t;氨氮点源允排量541.37 t,其中城镇生活允排量248.30 t。

城镇生活化学需氧量允排量约束:

$$URCOD \leq PDLCOD\tag{2}$$

$$\begin{aligned}URCOD &= PURB \times PCODUR \times (1 - UWWT) \\ &\quad + PURB \times PURDU \times UWWT \times CONCOD \times (1 - z)\end{aligned}\tag{3}$$

点源化学需氧量允排量约束:

$$(URCOD + INCOD) \leq (PDPCOD)\tag{4}$$

表 1 模型参数释义

Tab. 1 Paraphrase of the parameters in the model

参数	中文解释	单位	参数	中文解释	单位
<i>PGDP</i>	第一产业产值	万元	<i>WIRR</i>	灌溉用水量	t
<i>SGDP</i>	第二产业产值	万元	<i>WIND</i>	工业需水量	t
<i>TGDP</i>	第三产业产值	万元	<i>WPER</i>	生活用水量	t
<i>PURB</i>	流域城镇人口	人	<i>WPF</i>	畜禽养殖需水量	t
<i>PRUR</i>	流域农村人口	人	<i>WCAP</i>	流域可用水资源总量	t
<i>PRD</i>	第一产业人均产值	万元/人	<i>WRES</i>	水资源总量	t
<i>IND_i</i>	工业第 <i>i</i> 产业人均产值	万元/人	<i>WECO</i>	生态需水量	t
<i>TED</i>	第三产业人均产值	万元/人	<i>WIMP</i>	外流域调水量	t
<i>r</i>	工业生产总值与第二产业产值之比	—	<i>WREU</i>	尾水回用量	t
<i>ID_i</i>	工业第 <i>i</i> 行业生产总值	万元	<i>INDDU</i>	工业用水定额	t/万元
<i>PDPCOD</i>	点源化学需氧物允排量	t	<i>PURDU</i>	城镇居民用水定额	t/人
<i>PDLCOD</i>	城镇生活化学需氧物允排量	t	<i>PRUDU</i>	农村居民用水定额	t/人
<i>INCOD</i>	工业化学需氧物排放量	t	<i>IRRDU</i>	单位面积灌溉用水量	t/km ²
<i>URCOD</i>	城市生活化学需氧物排放量	t	<i>PFDU</i>	单位面积畜禽养殖用水量	t/km ²
<i>ICOD</i>	工业单位生产总值 化学耗氧物排放量	t/万元	<i>AARLD</i>	流域耕地面积	km ²
<i>PCODUR</i>	城市人均生活化学 耗氧物排放量	t/人	<i>AARLDD</i>	流域人均耕地面积	km ² /人
<i>CONCOD</i>	污水处理厂化学耗 氧物出水浓度	t/m ³	<i>x</i>	流域水资源开发利用率	%
<i>IWWT</i>	工业污水收集处理率	%	<i>y</i>	工业重复用水率	%
<i>UWWT</i>	城镇生活污水收集处理率	%	<i>z</i>	污水处理厂尾水回用率	%

$$INCOD = \left(\sum_{i=1}^5 ICOD_i \times ID_i \right) \times (1 - IWWT) + \left(\sum_{i=1}^5 ID_i \times INDDU_i \right) \times (1 - y) \times CONCOD \times IWWT \times (1 - z) \quad (5)$$

城镇生活氨氮允排量约束:

$$URNH_3N \leq PDLNH_3N \quad (6)$$

点源氨氮允排量约束:

$$(URNH_3N + INNH_3N) \leq PDPNH_3N \quad (7)$$

$$INNH_3N = \left(\sum_{i=1}^5 INH_3N_i \times ID_i \right) \times (1 - IWWT) + \left(\sum_{i=1}^5 ID_i \times INDDU_i \right) \times (1 - y) \times CONNH_3N \times IWWT \times (1 - z) \quad (8)$$

$$URNH_3N = PURB \times PNH_3NUR \times (1 - UWWT) + PURB \times PURDU \times UWWT \times CONNH_3N \times (1 - z) \quad (9)$$

② 水资源总量约束:

$$WIRR + WIND + WPER + WPF \leq WCAP \quad (10)$$

$$WCAP = WRES \times x - WECO + WIMP + WREU \quad (11)$$

$$WREU = PRUB \times PURDU \times UWWT \times z + \left(\sum_{i=1}^5 ID_i \times INDDU_i \right) \times (1 - y) \times IWWT \times z \quad (12)$$

$$WIRR = AARLD \times IRRDU \quad (13)$$

$$WPF = AARLD \times PFDU \quad (14)$$

$$WIND = \left(\sum_{i=1}^5 ID_i \times INDDU_i \right) \times (1 - y) \quad (15)$$

$$WPER = PRUB \times PURDU + PRUR \times PRUDU \quad (16)$$

③ 土地资源约束。根据《山西省沁河分区水资源规划配置报告》，沁河流域土地保有量不应低于 898.83 km²。

$$AARLD \geq TARLD \quad (17)$$

$$AARLD = AARLDD \times PRUR \quad (18)$$

④ 当地需求约束。根据《晋城市城市总体发展规划》所确立的城镇化发展战略，对沁河流域未来的农村人口规模进行趋势计算，2015 年农村人口不高于 56.11 万，2020 年农村人口不高于 53.10 万。

$$PRUR \leq PRUR^* \quad (19)$$

⑤ 技术参数约束:

$$ID_i = IND_i \times PURB \quad (20)$$

$$ID_i \geq 0, \forall i \quad (21)$$

$$PURB \geq 0 \quad (22)$$

$$PRUR \geq 0 \quad (23)$$

2.4 参数设置

以 2009 年作为基准年，基准年参数的数据来源包括 2009 年晋城市统计年鉴、晋城市社会经济普查数据库以及相关部门报表等。为使获得的社会经济数据符合流域尺度，对沁河流域所属的沁水县、阳城县全县及泽州县下属的 9 个行政村的社会经济数据进行统计。

2015 年和 2020 年预测参数值的确定是严格依据《晋城市城市总体规划（2008-2020 年）》、《晋城市工业经济发展“十二五”规划》、《晋城市“十二五”煤化工产业发展规划》、《晋城市水利发展“十二五”规划报告》和《中共晋城市委关于制定国民经济和社会发展第十二个五年规划的建议》等“十二五”规划发展需求，利用 Vensim 软件建立的可持续发展情景模拟仿真得到的结果。模型主要参数见表 2。

表 2 承载力核算模型主要参数

Tab. 2 Main parameters of the carrying capacity model

参数	基准年	2015 年	2020 年
第一产业人均产值 PRD	0.16	0.21	0.25
工业人均产值 IND	21.35	18.38	25.74
化工业 IND_1	1.32	2.94	5.86
传统制造业 IND_2	0.66	1.31	2.51
设备制造业 IND_3	0.93	2.29	5.58
煤炭、天然原油及天然气开采业 IND_4	13.44	8.50	8.02
电力燃气及水的生产和供应业 IND_5	5.00	3.35	3.76
第三产业人均产值 TED	3.97	6.17	10.68
工业生产总值与第二产业产值之比 r	1.51	1.21	1.23
工业单位生产总值化学耗氧物排放量 $ICOD$	6.74E-03	6.72E-03	6.70E-03
工业单位生产总值氮氮排放量 INH_2H	8.48E-04	8.51E-04	8.51E-04
城市人均生活化学耗氧物排放量 $PCODUR$	2.41E-02	2.41E-02	2.41E-02
城市人均生活氮氮排放量 PNH_2HUR	2.96E-03	2.96E-03	2.96E-03
工业用水定额 $INDDU$	165.32	125.85	109.00
流域城镇居民用水定额 $PURDU$	69.49	71.40	73.00
农村居民用水定额 $PRUDU$	19.06	18.48	18.00
单位面积灌溉用水量 $IRRDU$	42633.71	42160.24	41824.01
单位面积畜禽养殖用水量 $PFDU$	8367.42	8573.76	8823.31
流域人均耕地面积 $AARLDD$	1.62E-03	1.86E-03	1.96E-03
工业污水收集处理率 $IWWT^*$	0	0	0
城镇生活污水收集处理率 $UWWT^*$	0.36	0.36	0.36
流域水资源开发利用效率 x^*	0.304	0.304	0.304
工业重复用水率 y^*	0.88	0.88	0.88
污水处理厂尾水回用率 z^*	0.00	0.00	0.00

注：*标记的参数不在 Vensim 软件建立的仿真预测中，故在参数赋值中暂时保持和基准年一致。

3 结果分析

3.1 基年与预测年的计算结果

基于上述模型，可得到沁河流域在基准年（2009 年）、2015 和 2020 年水环境保护和产业技术水平下的最大经济发展规模和对对应的人口规模；并与预测的经济发展值及对应的人口规模进行对比。如图 3a 所示，基准年沁河流域 GDP 达到 234.52 亿元，流域可承载的社会经济为 226 亿元，现状的经济发展情况略超过承载水平；而预测 2015 年和 2020 年的经

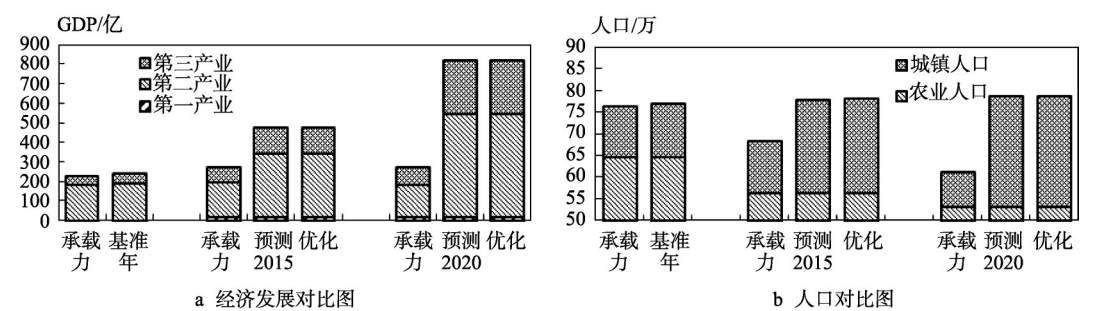


图3 沁河流域各时期经济发展和承载力对比
Fig. 3 Comparison of predicted GDP and carrying capacity in different periods

济发展值增长迅速,分别达到475.12亿元和814.41亿元,远远超过了流域的承载容量,这和当地政府强烈的经济发展意愿一致。为了避免造成未来当地资源和环境的过度利用,必须对承载力的资源约束和环境约束指标进行分析,找到优化调控的重点。由图3b,城镇化发展战略使得农村人口持续下降,但是由于城镇人均排污量高于农村人均排污量,故在承载力的制约下,可承载城镇人口的增长速度小于农村人口的减少速度,故未来承载的总人口下降。

3.2 优化措施的调整方向

为了达到未来经济发展的预测值,需要提高沁河流域水环境承载力水平。考虑到流域水环境承载力核算模型的5个约束条件中,土地资源约束、当地需求约束以及技术参数约束优化空间不大,故对环境容量约束和水资源约束进行深入分析,探讨对工业污染物排放量、生活污染物排放量和水资源利用量的优化措施。

对于生活污染物排放量,可从生活污水收集率和尾水回收率2个指标进行优化。基准年,沁河流域由于污水管网铺设有限,城市生活污水收集率仅为36.1%;同时,基准年污水处理厂配套尾水回用设备还没开始运行,尾水回用率为0。有较大的优化空间。

对于水资源利用量,涉及的优化指标主要有水资源利用率和尾水回收率。水资源的利用主要包括工业用水、生活用水、灌溉用水和畜禽养殖用水。基准年水资源利用量占沁河流域水资源总量的30.4%,为1.219亿t。

对于工业污染物排放量,由2部分组成,一部分为经过工厂内部进行预处理后直接排出;另一部分是排出后通过污水管网进入污水处理厂进行再处理后排出。对于沁河流域,工业废水经过工厂内部进行预处理后并不再经过污水处理厂而直接排出,即工业污水收集率为0。考虑到《晋城市国民经济和社会发展的第十二个五年规划纲要(2011-2015年)》及其他规划并未针对工业废水的再处理有指导性意见,故不考虑工业污水收集率的优化。即保持工业污水收集率不变。为了控制工业污染物排放量,则需要对工厂内部预处理的效果进行控制。根据《污水综合排放标准(GB 897-1996)》对排入未设置二级污水处理厂的城镇排水系统的污水,化学需氧量和氨氮浓度设定两级标准,其中一级标准为化学需氧量100 mg/L,氨氮15 mg/L;二级标准为化学需氧量150 mg/L,氨氮25 mg/L。对于工业废水预处理的效果,要根据承载力的要求使其符合一级或二级排放标准。此时中承载力核算模型中的工业化学需氧物排放量和氨氮排放量表达式需要更改为式(24)、式(25)所示(其中CCOD、CNH₃N分别指未排入污水处理厂的污水COD、NH₃N浓度):

$$INCOD = \left(\sum_{i=1}^5 ID_i \times INDDU_i \right) \times (1-y) \times CCOD \times (1-IWWT) + \left(\sum_{i=1}^5 ID_i \times INDDU_i \right) \times (1-y) \times CONCOD \times IWWT \times (1-z) \tag{24}$$

$$INN{H_3}N = \left(\sum_{i=1}^5 ID_i \times INDDU_i \right) \times (1-y) \times CN{H_3}N \times (1-IWWT) + \left(\sum_{i=1}^5 ID_i \times INDDU_i \right) \times (1-y) \times CONN{H_3}N \times IWWT \times (1-z) \tag{25}$$

为了探索相关指标对承载力的影响，以预测 2015 年为研究对象，分别针对这两级标准，再分别基于城镇生活污水收集率、水资源利用率、尾水回用率对承载力的敏感度计算（图 4），得到每个指标增加对流域水环境承载力的贡献程度。

由以上结果可得：① 水资源利用率的改变并不影响流域水环境承载力。这是因为在预测 2015 年，水资源约束并不是一个紧约束。但是当其他指标优化提高增加流域水环境承载力后，水资源约束可能会成为紧约束，需要再次分析；② 随着城镇生活污水收集率的提高，流域水环境承载力有显著的提升。在收集率为 36.1%-80% 间，一级标准和二级标准没有区别，说明此时工业点源并非紧约束，经过验证，此时的紧约束为城镇生活 COD 排放量。当收集率大于 85% 后，一级标准和二级标准有差别，说明此时工业点源排放已经成为了紧约束。③ 随着尾水回用率的提高，流域水环境承载力有微弱的提升。且在尾水回用率的全范围内，一级标准和二级标准没有区别，说明工业点源排放量并非紧约束，经过验证，此时的紧约束为城镇生活氨氮排放量。④ 为了提高沁河流域水环境承载力，优先改善城镇生活污水收集率，且承载力要求在 582.3 亿元以内，执行工业二级标准即可，承载力要求超过 582.3 亿元，则执行工业一级标准。

最终计算结果显示，当城镇生活污水收集率为 71.4%，执行工业二级标准时，2015 年优化后的承载力为 475.6 亿元，能够满足预测的发展要求；同理，在 2020 年承载力优化模型中，当城镇生活污水收集率为 78.4%，执行工业一级标准时，2020 年优化后的承载力为 816.0 亿元，能够满足预测的发展要求（图 3）。

为了满足 2015 年城镇污水收集率的要求，需要对沁河流域污水收集管网进行规划和实施，同时新建和扩建污水处理设施。《晋城市环境保护“十二五”规划》中给出了重点乡镇新建污水处理设施及配套管网建设项目，在沁河流域共涉及 10 个项目，累计铺设污水管网 80 km。根据系统动力学预计 2015 年城镇生活 COD 排放量达到 5228.72 t，氨氮排放量 641.82 t，而城镇生活 COD 允排量为 2050.89 t，氨氮允排量为 248.30 t。故需要 2015

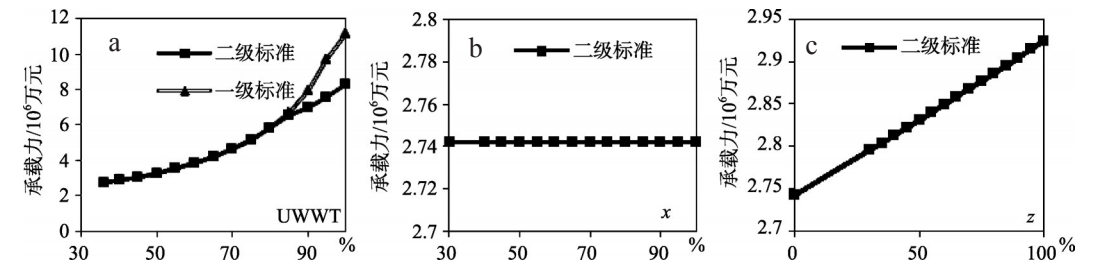


图 4 基于各指标的流域水环境承载力敏感性分析结果（2015 年）

Fig. 4 Carrying capacity sensitivity based on UWWT, *x* and *z* (year 2015)

注：后两张图由于一级标准和二级标准没有区别，故只标出二级标准结果

年污水处理COD日处理量达到8.71 t/日, 氨氮日处理量达到1.08t/日。同理, 2020年污水处理COD日处理量达到11.13 t/日, 氨氮日处理量达到1.38 t/日。

为了使工业污水排放时达到国家相应标准, 需要对流域未来的工业发展进行严格规划和控制。考虑到沁河流域正处于高速发展阶段, 未来工业应该以生态工业园为依托, 以清洁生产及技术改进、污水预处理、污水循环利用为主要措施, 进行宏观的生态工业园区发展定位, 到中观的产业链设计, 直至微观的工业企业清洁生产, 确保排放的污水达到相应标准。

4 结论与讨论

研究表明: 通过敏感性分析找到改善沁河流域承载力的主要指标为生活污水收集率。为了使承载力赶上经济发展步伐, 到2015年的城镇生活污水收集率应该达到71.4%, 并且工业污水排放执行二级标准; 到2020年的城镇生活污水收集率应该达到78.4%, 并且工业污水排放执行一级标准。

水环境承载力的研究目的不仅在于了解水环境系统的相对承载状况, 而且应能对特定时段环境系统所能承载的人类社会经济活动进行合理估算, 并且找出限制承载力的约束因子, 为流域的社会经济发展规划提供决策上的支持和依据。因此, 本文在模型构建、参数选取以及情景设计等方面都仍有待进一步完善。

参考文献 (References)

- [1] G H. Carrying capacity as an ethical concept. *Soundings*, 1976, 59: 120-137.
- [2] Cohen J E. Population-growth and earths human carrying-capacity. *Science*, 1995, 269(5222): 341-346.
- [3] Carver C, Mallet A L. Estimating the carrying-capacity of a coastal inlet for mussel culture. *Aquaculture*, 1990, 88(1): 39-53.
- [4] Arrow K, Bolin B, Costanza R et al. Economic growth, carrying capacity, and the environment. *Science*, 1995, 15(2): 91-95.
- [5] 郭怀成, 尚金城, 张天柱. 环境规划学: 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [6] 汪诚文, 刘仁志, 葛春风. 环境承载力理论及其实践: 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [7] 李新, 石建屏, 曹洪. 基于指标体系和层次分析法的洱海流域水环境承载力动态研究. *环境科学学报*, 2011, 31(6): 1338-1344.
- [8] 孙海洲, 路金喜, 王印, 等. 水资源承载力多属性决策评价研究. *人民黄河*, 2009, 31(3): 44-45.
- [9] Gong L, Jin C L. Fuzzy comprehensive evaluation for carrying capacity of regional water resources. *Water Resources Management*, 2009, 23(12): 2505-2513.
- [10] 朱一中, 夏军, 王纲胜. 张掖地区水资源承载力多目标情景决策. *地理研究*, 2005, 24(5): 732-740.
- [11] 蒋晓辉, 黄强, 惠洪河, 等. 陕西关中地区水环境承载力研究. *环境科学学报*, 2001, 21(3): 312-317.
- [12] 赵卫, 刘景双, 苏伟, 等. 辽宁省辽河流域水环境承载力的多目标规划研究. *中国环境科学*, 2008, 28(1): 73-77.
- [13] 王群, 章锦河, 杨兴柱. 黄山风景区水生态承载力分析. *地理研究*, 2009, 28(4): 1105-1114.
- [14] 刘佳骏, 董锁成, 李泽红. 中国水资源承载力综合评价研究. *自然资源学报*, 2011, 26(2): 258-269.
- [15] 文琦, 何彤慧. 近10年来我国水资源承载力研究综述. *水资源保护*, 2005, 21(6): 19-22.
- [16] Kozlowski J M. Sustainable development in professional planning-a potential contribution of the EIA and UET concepts. *Landscape and Urban Planning*, 1990, 19(4): 307-332.
- [17] Feng L H, Zhang X C, Luo G Y. Application of system dynamics in analyzing the carrying capacity of water resources in Yiwu City, China. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2008, 79(3): 269-278.
- [18] 陈冰, 李丽娟, 郭怀成, 等. 柴达木盆地水资源承载方案系统分析. *环境科学*, 2000, 21(3): 16-21.

- [19] 惠洪河, 蒋晓辉, 黄强, 等. 二元模式下水资源承载力系统动态仿真模型研究. 地理学报, 2001, 20(2): 191-198.
- [20] 段春青, 刘昌明, 陈晓楠, 等. 区域水资源承载力概念及研究方法的探讨. 地理学报, 2010, 65(1): 82-90.
- [21] 郭怀成, 刘永, 贺彬. 流域环境规划典型案例. 北京: 北京大学出版社, 2007.
- [22] 周丰, 郭怀成, 刘永, 等. 湿润区湖泊流域水资源可持续发展评价方法. 自然资源学报, 2007, 22(2): 290-301.
- [23] 戴薇, 汪群, 王华. 太湖流域水资源承载力研究. 水利经济, 2005, 23(6): 13-17.
- [24] 严子奇, 夏军, 左其亭, 等. 淮河流域水环境承载能力计算系统的构建. 资源科学, 2009, 31(7): 1150-1157.
- [25] 王家骥, 姚小红, 李京荣, 等. 黑河流域生态承载力估测. 环境科学研究, 2000, 13(2): 44-48.
- [26] 彭少明, 黄强, 张新海, 等. 黄河流域水资源可持续利用多目标规划模型研究. 河海大学学报(自然科学版), 2007, 35(2): 153-158.
- [27] Guan D J, Gao W J, Su W C et al. Modeling and dynamic assessment of urban economy-resource-environment system with a coupled system dynamics - Geographic Information System model. Ecological Indicators, 2011, 11(5): 1333-1344.

Optimal regulation of Qinghe River watershed system based on water carrying capacity

YE Longhao¹, ZHOU Feng², GUO Huaicheng¹, GAO Wei¹, HE Chengjie¹, WANG Cuiyu¹

(1. Laboratory of Water and Sediment Sciences, College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Laboratory for Earth Surface Process, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Optimal watershed system regulation approach is proposed based on water carrying capacity model, and it is applied in the Qinhe River Watershed, one of tributaries of Yellow River. The proposed approach consists of three parts: (i) to calculate watershed-scale water carrying capacity for 2015 and 2020 subject to aquatic, water resources and the others constraints; (ii) to compare the computed water carrying capacity with the economic sizes of 2015 and 2020 predicted by system dynamics; (iii) to analyze the sensitivity of industrial emission standard, collection rate of municipal sewage wastewater, utilization efficiency of water resources, reuse rate of recycled water, leading to determine optimal economic development mode. The results indicate that: (i) it is essential to give priority to adjust collection rate of municipal sewage wastewater; (ii) for 2015, industrial emission standard and collection rate of municipal sewage wastewater would be set as the second level and more than 71.4%, respectively, the corresponding the threshold of economic size of Qinhe River Watershed is 47.6 billion; (iii) for 2020, industrial emission standard should be enhanced to the first level, while the collection rate of municipal sewage wastewater is also increased to 78.4%, leading to the threshold of economic size of 81.6 billion; (iv) For more specific suggestions, By 2015, daily capacity of urban domestic sewage treatment should reach 8.71 t for COD and 1.08t for $\text{NH}_4^+\text{-N}$; By 2020, daily capacity of urban domestic sewage treatment should reach 11.13t for COD and 1.38 t for $\text{NH}_4^+\text{-N}$.

Key words: water carrying capacity; sustainability; system dynamics; system optimization; threshold; Qinhe River Watershed