

新疆艾比湖流域精河县水资源优化配置 SD 仿真模型研究

来风兵, 陈蜀江*, 马莉婷 (新疆师范大学地理科学与旅游学院, 新疆乌鲁木齐 830054)

摘要 基于可持续发展理论, 依据系统动力学(System Dynamics, SD)原理方法, 选取艾比湖流域主要城市——精河县, 利用 SD 软件 VENSIM5.11A 构建精河县水资源的供需状况 SD 模型。利用 2000~2010 年的历史数据验证模型的有效性, 模拟 2010~2030 年精河县城市需水量预测。通过调节社会经济和人口、生态环境等变量参数, 提出 3 个比较方案, 在保护艾比湖流域生态环境平衡及生态安全前提下, 比较得出适合当地经济、社会和环境可持续发展的最优方案, 为精河县乃至整个艾比湖流域其他重要城市发展决策者提供科学依据。

关键词 SD 模型; 水资源; 优化配置; 精河县

中图分类号 S181.3; F062.2 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2015)01-192-04

Water Resources Optimal Allocation of Jinhe County in Xinjiang Ebinur Lake Basin Based on SD

LAI Feng-bing, CHEN Shu-jiang*, MA Li-ting (School of Geography and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi, Xinjiang 830054)

Abstract Based on the theory of sustainable development, according to system dynamics(SD), selecting Jinghe County as an example, software VENSIM5.11A was used to construct SD model of water resource supply and demand status. Through adjusting parameters of social economy, population, eco-environment, three schemes were proposed. Under the premise of protecting eco-environment and ecological safety in Ebinur Lake basin, the optimal scheme appropriate for economic, social and environment sustainable development was obtained, which will provide scientific basis for city development decision-makers.

Key words SD model; Water resource; Optimal allocation; Jinghe County

水资源是人类存在和发展的物质基础, 是影响经济和社会可持续发展的重要因素。精河县位于新疆艾比湖流域, 地处北疆交通要冲, 准噶尔盆地西南边缘, 天山支脉婆罗科努山北麓。精河县具有北温带大陆性气候的显著特点, 光照充足, 干燥少雨。精河县年均无霜期 171 d, 日照 2 710 h; 境内水资源较为丰富, 水质较好。年径流量达 $8.19 \times 10^8 \text{ m}^3$, 水能蕴藏量达 $15.19 \times 10^4 \text{ kW/h}$; 地表水平均年径流量 $8.96 \times 10^8 \text{ m}^3$, 地下水动储量 $3.18 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。全县有四季草场 $71.73 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 可耕地 $6 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 已耕地 $3 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (含兵团)。近年来, 随着工农业迅速发展、人口的增加, 导致需水量突增, 水资源供需矛盾日益尖锐, 已经严重制约着该地区的经济发展和环境保护。因此, 笔者运用系统动力学(System Dynamics, SD)方法建立该地区的 SD 仿真模型, 对精河县水资源的优化合理配置进行研究, 为该县水资源的合理利用和保护提供科学依据。

1 研究方法

1.1 系统动力学 系统动力学是 20 世纪 50 年代美国麻省理工学院的福雷斯特教授把控制论、系统论、信息论、计算机模拟技术、管理学及决策理论学融为一体的系统分析方法; 是一种用计算机对社会、经济、自然生态进行模拟研究的战略决策方法^[1-3]。采用计算机软件对系统动态行为进行模拟, 建立 SD 模型可以在时间序列上对城市水资源进行动态的模拟和预测。通过调节控制变量, 模拟在不同条件下的水资源动态变化, 为城市水资源的动态平衡和调配提供理论

依据, 从而有利于解决动态复杂的社会经济系统和水资源利用系统之间长期而复杂的矛盾^[4-7]。

1.2 SD 模型建立步骤 该方法解决问题的步骤大体分 4 步: 首先, 通过运用相关的系统动力学的理论和方法对所研究的问题进行深入分析和研究; 其次, 根据所研究区域的结构特点进行系统分类, 划分系统层次与相关系统子块, 确定总系统流图和分系统流图的反馈机制; 第 3 步, 通过应用相关软件 VENSIM 建立数学模型; 第 4 步, 以系统动力学理论为指导, 借助模型进行模拟, 通过调节参数变量, 预测相关方案, 检验评估结果和实际值, 发现新问题、改造模型、调节参数, 从而达到最优效果^[8-10]。

2 精河县水资源的优化配置

2.1 精河县水资源系统模型的建立 通过相关因素建立精河水资源 SD 模型, 其中需水总量是指工业、农业(种植业)、畜牧业(牲畜)、林地以及生态和生活用水的总需求之和。模型中用到的参数全部来自精河县 2004 年统计局相关资料以及政府工作报告。采用的基础数据有总人口数量 13.3 万人, 城镇总人口 4.54 万人, 农村总人口 8.76 万人, 城镇人口增长率 0.2%, 农村人口增长率 0.15%; 农村和城镇人口的用水标准分别为 $80, 50 \text{ m}^3 / (\text{a} \cdot \text{人})$; 牲畜的增长率 0.8%, 牲畜的数量 40.51 万头; 污水重复利用率为 0.03。根据系统动力学原理, 利用大量统计数据, 对系统模型中主要变量的特征进行细致研究分析, 设计出符合该城市实际情况的水资源 SD 模型(图 1)。

2.1.1 供水总量系统。 供水总量系统的变量主要由地表供水量和地下供水量组成。由于精河县是一个农业大县, 主要以种植业为主, 其二、三产业落后, 农业用水量占总用水量 90% 以上, 工业、生活的回归用水量可以忽略。 $W_{\text{总供水}} = W_{\text{地表供水}} + W_{\text{地下供水}} + W_{\text{农业回归}} - W_{\text{平均蒸发}}$ 。

基金项目 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2011211B18)。

作者简介 来风兵(1977-), 男, 回族, 新疆乌鲁木齐人, 讲师, 博士, 从事干旱区资源与环境可持续发展研究。* 通讯作者, 副教授, 硕士, 硕士生导师, 从事干旱区生态环境恢复与遥感监测研究。

收稿日期 2014-11-19

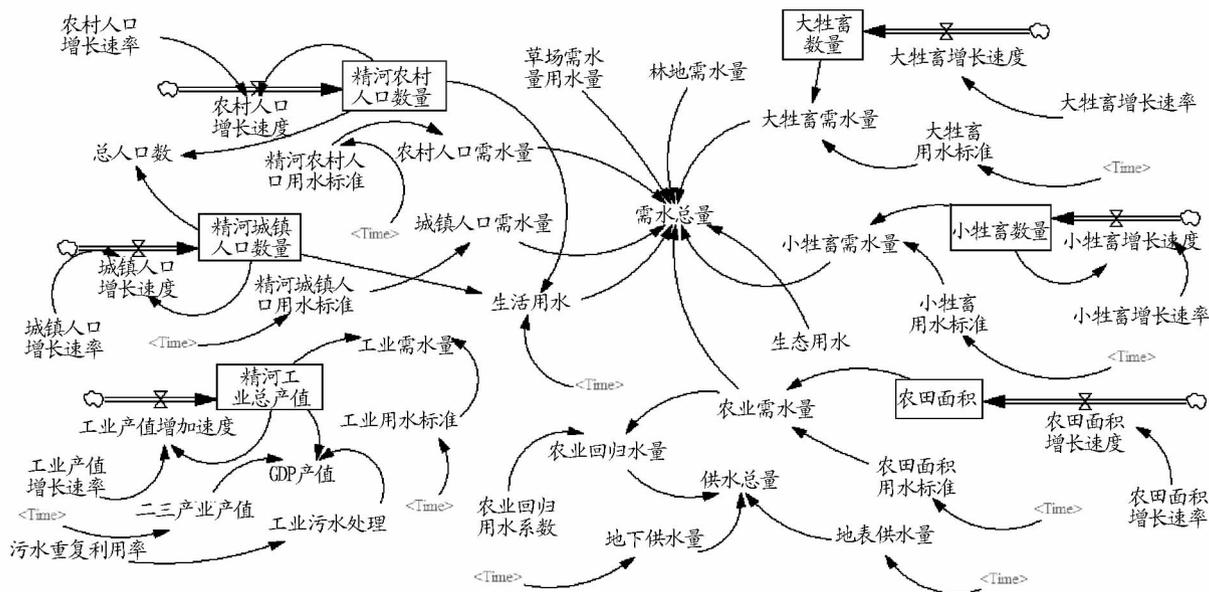


图1 精河县水资源 SD 仿真模型

2.1.2 需水总量系统。需水总量系统的变量有农村人口需水量、城镇人口需水量、工业需水量、农业需水量、草场需水量、林地需水量、生态用水以及大小牲畜需水量。 $W_{需水总量} = W_{农村人口需水量} + W_{城镇人口需水量} + W_{工业需水量} + W_{农业需水量} + W_{草场需水量} + W_{林地需水量} + W_{生态用水} + W_{大小牲畜需水量}$

2.1.2.1 工业需水量子系统。工业需水量主要考虑工业用水标准额和工业生产总值。2004 年工业总产值为 14 753 万元,工业用水定额为 75 m³/万元。依据 2000 ~ 2013 年的精河县社会经济统计数据可得,工业平均增长率 28.2%。2004 年工业需水量由工业产值乘以工业产值用水定额求出。计算如下: $W_{工业需水量} = 14\ 753 \times 75 = 1.1 \times 10^6\ m^3$ 。

2.1.2.2 农业需水量子系统。该子系统主要确定的参数是农田面积和农田用水标准额度,2004 年农田种植面积为 1.5 × 10⁴ hm²,农业用水定额为 9 327 m³/hm²。依据 2000 ~ 2013 年精河县社会经济统计数据可得,农田平均增长率为 0.72%。2004 年农业需水量由农田面积乘以农田用水标准额度。计算如下: $W_{农业需水量} = 1.5 \times 10^4 \times 9\ 327 = 1.4 \times 10^8\ m^3$ 。

2.1.2.3 城镇人口需水子系统。城镇生活用水量是由城镇人口总数乘以城镇人口人均生活用水额度得到的。城镇人口为 45 400 人,城镇人均生活用水额为 80 m³/(a · 人)。依据 2000 ~ 2013 年的精河县统计资料可得,2004 年精河县城镇人口年均增长率为 0.39%。2004 年城镇人口生活用水量计算如下: $W_{城镇人口需水量} = 45\ 400 \times 80 = 3.6 \times 10^6\ m^3$ 。

2.1.2.4 农村人口需水量系统。农村生活用水量由农村人口数乘以农村人均生活用水额得到的。2004 年精河县农村人口为 876 000 人,农村人均生活用水定额为 50 m³/(a · 人)。依据 2000 ~ 2013 年的精河县社会经济统计数据可得,农村人口年均增长率 0.41%。2004 年农村人口需水量计算如下: $W_{农村人口需水量} = 876\ 000 \times 50 = 4.4 \times 10^7\ m^3$ 。

2.1.2.5 大小牲畜需水量子系统。牲畜用水量主要是由大牲畜用水量和小牲畜用水量组成。其用水量主要由牲畜存栏数

决定,2004 年大牲畜数量为 4.1 万头,小牲畜为 21.5 万头。大小牲畜的用水额分别为 45、20 m³/(a · 头)。依据 2000 ~ 2013 年的精河县社会经济统计数据可得,大牲畜的年均增长率为 2.3%,小牲畜的平均增长率为 3.1%。2004 年牲畜用水量等于牲畜数量乘以牲畜用水额,其牲畜用水量计算如下: $W_{大小牲畜需水量} = 4.1 \times 10^4 \times 45 + 21.5 \times 10^4 \times 20 = 6.2 \times 10^6\ m^3$ 。

2.1.2.6 草场、林地及生态需水量子系统。生态需水量主要包括草场、林地需水量,它是一个较大的范畴,可以忽略不计,而草场和林地需水量主要考虑的因素有面积和单位面积的水资源需水量。根据 2005 年精河县林业部门的相关资料可知,2004 年精河县草场面积为 71.7 万 hm²,单位面积水资源需水量为 7 920 m³/hm²,林地面积为 57.1 万 hm²,单位面积水资源需水量为 7 215 m³/hm²。计算如下: $W_{草场林地需水量} = 71.7 \times 10^4 \times 7\ 920 + 57.1 \times 10^4 \times 7\ 215 = 9.8 \times 10^9\ m^3$ 。

表1 模拟值与实际值对比检验 × 10⁴ m³

项目	农村人口	城镇人口	工业	农业	大小牲畜
	需水量	需水量	需水量	需水量	需水量
2007 年实际值	216	268	365	4132	231
2007 年模拟值	221	273	372	4238	247
相对误差	0.02	0.01	0.01	0.02	0.06
2010 年实际值	473	396	428	4542	264
2010 年模拟值	485	389	435	4654	270
相对误差	0.01	0.06	0.01	0.02	0.02

2.2 系统模型有效性检验 对建好的模型一定要进行有效性检验,这样可以验证模拟系统模型与实际系统的吻合程度。通过把现有的历史数据输入系统模型可以得到相应的仿真结果,同历史实际行为数据进行比较分析,从而验证其吻合程度,对系统模拟结果可靠性、有效性和准确性做出判断。选用 2000 ~ 2010 年的历史数据进行检验。在运用系统动力学进行仿真模拟时,以 2000 ~ 2010 年的历史数据为基础,以 2004 年为基准年,预测 2007 ~ 2010 的有效数据。系统

中所用到的数据均来自于精河县政府工作报告。主要选取农村人口需水量、城镇人口需水量、工业需水量、农业需水量及大牲畜需水量5个参数进行模拟分析,验证模型的准确性。运用系统动力学软件 VENSIM,经过运算得出模型的模拟值(表1)。

2.3 精河县水资源系统模拟分析 根据上述系统分析的

结果,建立精河县水资源配置的系统动力学模型,所用到的主要变量的初始值均采用2013年统计数值,部分变量的变化率参考有关部门的相关规定。通过控制相关的变量和动态方程进行系统仿真模拟,设置模拟步长为1年,模拟时间到2030年。通过模型预测出2030年城镇人口、农村人口需水量(图2)。

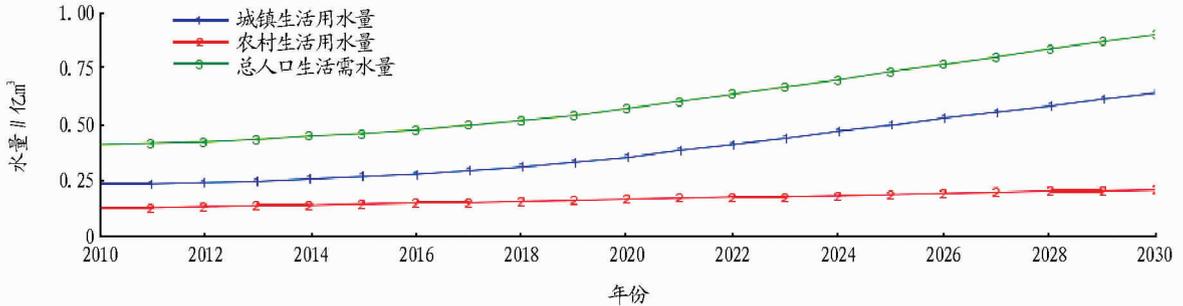


图2 精河县人口生活用水量

2.4 精河县水资源配置最优方案分析

2.4.1 方案1:以经济增长为重点的经济型方案。该方案主要是以全县的经济发展为重点,以环境保护为辅,所以工业产值增长率为23%、农田面积增长率为3.2%、城镇、农村人口增长速率均为0.9%,各项数值均为最大。到2030年,预测工业总产值猛增到 3.8×10^9 元,与方案二、三相比分别高出2和6倍。随着经济的增长,人们不断开垦荒地,此时的耕地面积由2010年的 1.8×10^4 hm²增加到2030年的 2.1×10^5 hm²。预计到2020、2030年,精河县人口可达到21万、26

万。经济和人口的快速增长使得水资源的供求关系紧张,水资源承载力不断下降。该方案下,精河县2030年的需水总量高达 6.8×10^4 m³,与此同时,供水量为 5.2×10^4 m³,供需赤字高达 1.6×10^4 m³,与二、三方案相比,分别高出1.6和2.7倍,水资源供需矛盾最为尖锐。长此以往,必将严重阻碍工农业的发展,导致水资源处于供不应求的状况。有鉴于此,该县在制定经济发展规划时,应当适当地放缓经济发展的速度,兼顾资源环境的协调发展。该方案下,该县供需水量模拟结果如图3所示。

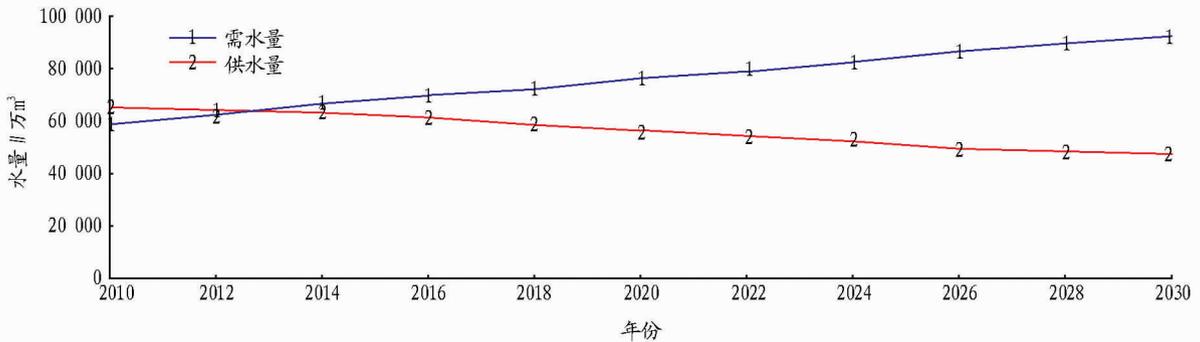


图3 经济型方案模拟结果

2.4.2 方案二:环境保护为重点的环保型方案。该方案与其他两个方案相比,2020、2030年该县总人口达到23.6万和27.8万。把环境保护放在发展的首位,在工业投资中用于环境保护和改善的经费将占到很大一部分,用于扩大再生产的经费将减少,使得经济增长速度放缓。与方案一、三相比,工业产值将会明显减少,2020年减少 1.8×10^8 元,2030年减少 1.2×10^8 元。由于环境保护为主,所以农田耕地面积的增长率也最低。与方案一相比,2020和2030年分别减少了 9.5×10^3 和 1.4×10^4 hm²,与方案三相比减少 8.0×10^3 和 1.1×10^4 hm²。但在环保方面,污水重复利用率不断提高,由2010年的3%提高到2030年的6%,水资源得到最大程度的保护,水环境的质量也较好。在水资源供需矛盾方面,农业用水额

度由方案一的 9315 m³/hm²降低为 7305 m³/hm²,农业需水量也得到最大幅度的减少,2020和2030年总供水量有盈余,处于供大于需的状况,其剩余水量分别为 8659 和 8314 m³,有效地解决了水资源供需矛盾。该方案下,该县供需水量模拟结果如图4所示。

2.4.3 方案三:经济增长与环境保护协调型方案。片面地追求经济的高速增长和过分地强调环境的保护都是不可取的,因此该方案介于前两个方案之间,这样可以同时兼顾经济发展和环境环境保护。方案三农田耕地面积2020年为 4.3×10^5 hm²,到2030年则为 7.8×10^5 hm²,2020年相比方案二高出了1.7倍,2030年则高出了3.2倍。该方案也注重对环境的保护,加大了对环境污染治理力度,2020和2030年污

水重复利用率分别为 4% 和 6%。此时,工农业需水量保持在一定的限度,水资源的供需状况有了很大的改善,并且略有结余,2020 年达到 1 964 m³,在 2030 年达到 2 682 m³,基本

满足了各方面的用水需求。该方案下,该县供需水量模拟结果如图 5 所示。

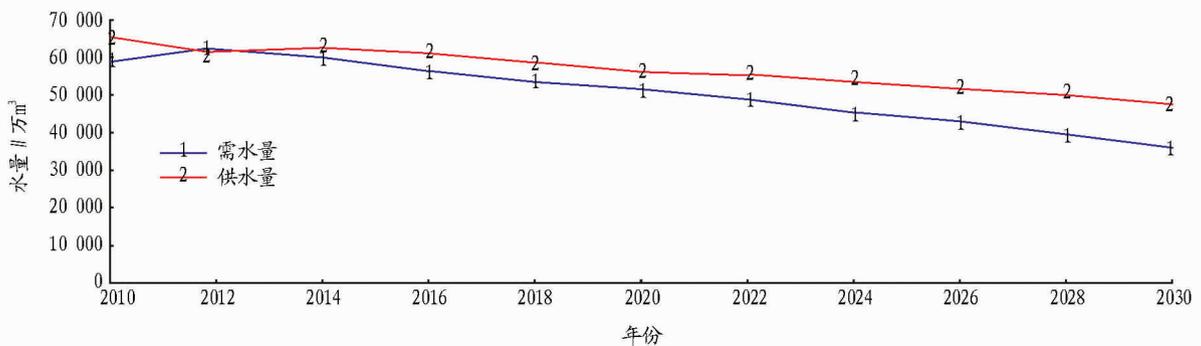


图 4 环保型方案模拟结果

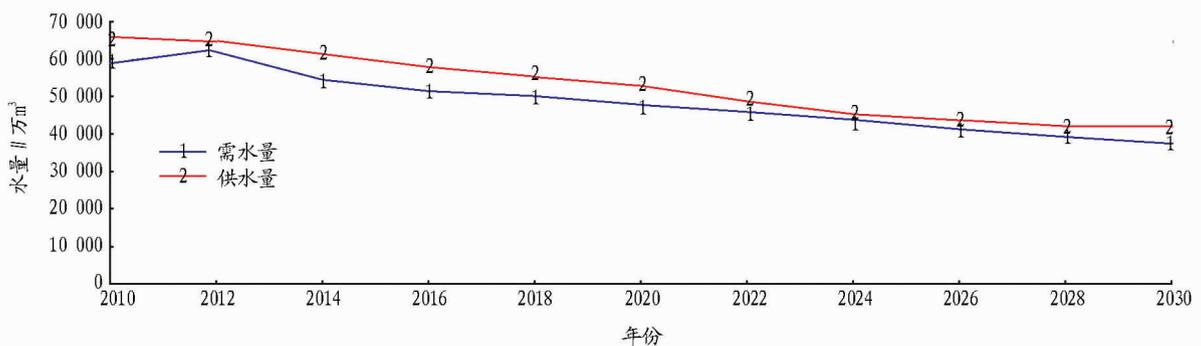


图 5 协调型方案模拟结果

由表 3 可知,协调型方案模拟的 2030 年需水量和用水量在其他两种方案之间(城镇人口需水量最高),不仅有利于保护生态环境,同时还兼顾了经济发展,达到了双赢局面。

表 3 2030 年需水量与供水量 3 个方案模拟比较 $\times 10^4 \text{ m}^3$

方案	城镇人口	农村人口	工业	农业	牲畜
	需水量	需水量	用水量	用水量	用水量
经济型	586	698	465	4 854	287
环保型	572	684	417	4 256	256
协调型	588	680	438	4 571	269

3 结论与讨论

(1) 从模拟仿真预测可知,方案三不仅有利于保护生态环境,同时还兼顾了经济发展,达到了双赢局面。通过 SD 模型可以调整相应的参数以此来实现水资源的合理优化配置和社会经济的可持续协调发展。

(2) 虽然精河县水资源丰富,但是其水资源承载力是有限的,随着社会经济的发展,供需矛盾会越来越突出。因此,要对地表水和地下水进行系统科学的管理规划,合理开发,统一调配,充分发挥已有水库的蓄水和调水能力,这样才能使该地区的水资源得到可持续的开发和利用。

(3) 精河县经济以农业主导,其农业用水量占总需水量的 90% 以上,但是农田灌溉的水资源利用率较低,浪费现象严重。所以要加大对农田水利设施的投资力度,加大防渗渠的修建,变农田大水漫灌、畦灌模式为膜上灌、滴灌模式,大

力推广滴灌技术,提高农田水资源利用率、渠道防渗率,积极应用科学技术节水灌溉,大力发展节水型农业,减少农作物用水量。

(4) 随着当地水泥厂、油脂化工厂以及火电厂的快速发展,其对水资源的需求量急剧扩大,加剧水资源的供需矛盾。因此,要建立价格调节机制,提高工业用水效率和污水重复利用率,通过调节水价以促进工业水资源的可持续利用。

(5) 积极倡导资源节约型,环境友好型的消费模式,提高居民生活节水意识,加大宣传力度,加大当地农产品深加工的发展,淘汰环境污染严重、需水量大的企业,如水泥厂,限制高耗水污染企业;全面推广节水技术,实现水资源的循环利用和优化配置,实现该县社会经济的可持续发展。

参考文献

- [1] 王其藩. 系统动力学[M]. 北京:清华大学出版社,1995:25-58.
- [2] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京:高等教育出版社,1996:199-265.
- [3] 蒙古军,吴秀芹. 包头市旅游资源及其空间结构评价[J]. 干旱区资源与环境,2004,15(4):46.
- [4] 任保平. 经济发展成本分析:可持续发展经济学的理论基础[J]. 中国人口·资源与环境,2003(2):1-5.
- [5] 吴叶君. 中国可持续发展系统动力学仿真模型——能源部分[J]. 计算机仿真,1998(1):11-13.
- [7] 许庆瑞,徐德才. 杭州市可持续发展系统动态模拟及政策建议[J]. 技术经济与管理研究,2004(3):83.
- [8] 王艳. 中国可持续发展系统动力学仿真模型——社会部分[J]. 计算机仿真,1998(1):5-7.
- [9] WURBS R A. Reservoir-system simulation and optimization model[J]. Journal of Water Resources Planning and Management,1993,119(4):461-482.

- 滨:哈尔滨工业大学,2010:5.
- [2] 郭静波,崔凤国,杨世东.生物强化技术在污水中的应用研究现状及发展展望[J].东北电力大学学报,2011,31(5):1-8.
- [3] 刘洋,陈双基.生物强化技术[J].安全与环境学报,2007,7(1):65-66.
- [4] 熊贵珊,陈瑾,叶文衍.生物强化技术及其在污水治理中的应用[J].环境科学与管理,2013,38(4):82-86.
- [5] XIANGCHUN Q, HANGCHANG S, HONG L, et al. Removal of 2,4-dichlorophenol in a conventional activated sludge system through bioaugmentation[J]. Process Biochemistry, 2004, 39:1701-1707.
- [6] 徐炜,曾明,刘田.生物强化技术处理冷轧废水实践研究[J].工业水处理,2009,29(8):69-72.
- [7] 山丹,马放,王金生,等.生物强化技术提高SBR系统对低温苯胺废水处理能力的研究[J].环境工程学报,2009,3(4):577-580.
- [8] TEENA S, ANITA R, AMRIT P T. Degradation of imidacloprid in liquid by *Enterobacter* sp. strain ATAI using Co-metabolism[J]. Bioremediation Journal, 2014, 18:227-235.
- [9] 郎成明,师晓春,汪国刚.处理硝基苯废水的新型微电解-生物强化技术[J].安全与环境学报,2007,7(1):65-66.
- [10] 胡志峰,孙静.生物强化技术治理伟伦废水研究[J].安徽农业科学,2007,35(29):9320-9321,9328.
- [11] 谢宏端,马溪平.生物强化技术提高焦化废水处理效果的研究[J].中国给水排水,2007,23(15):90-93.
- [12] 宋秀娟,张春燕,荣国海.生物强化技术处理化纤废水[J].化工环保,2015,25(4):296-297.
- [13] DONGHUI W, JING Z, RUILIN X. Bioaugmentation with a pyridine-degrading bacterium in a membrane bioreactor treating pharmaceutical wastewater [J]. Journal of Environmental Science, 2013, 25(11):2265-2271.
- [14] PENG X, WENCHENG M, HONGJUN H. Isolation of a naphthalene-degrading strain from activated sludge and bioaugmentation with it in a MBR treating coal gasification wastewater [J]. Bull Environ Contam Toxicol, 2014, 14:1366-1367.
- [15] 宋卫锋,严明,孙水裕.浮选废水中苯胺类药与外加基质的共代谢特性[J].中国有色金属学报,2012,22(7):9320-9321,9328.
- [16] 邵凤琴,韩庆祥.酶工程在污染治理中的应用[J].石油化工高等学校学报,2003,16(2):36-40.
- [17] 陈俊,陈树培,王洪丽,等.基因工程菌在精对苯二甲酸废水处理中的应用[J].工业用水与废水,2006,37(1):32-35.
- [18] 王建芳,赵庆良,林佳凯,等.生物强化技术及其在生物处理中的应用[J].环境工程学报,2007,1(9):40-45.
- [19] 刘春,黄霞,杨景亮.废水生物强化中基因工程菌的流失和环境生存状态研究[J].环境科学,2008,29(9):2571-2575.
- [20] 聂鑫,高原.细菌水平基因转移所面临的现实与挑战[J].内蒙古民族大学学报,2012,27(3):324-328.
- [21] 刘江江,陈吕军,温东辉,等.水平基因转移应用于污染治理的研究进展[J].北京大学学报,2006,42(4):556-560.
- [22] 柏耀辉,温东辉,唐孝炎.水平基因转移及其在污染修复中的应用[J].应用与环境生物学报,2007,13(5):741-747.
- [23] 柏耀辉,孙庆华,赵翠,等.焦化废水处理系统中嗜酸降解菌的种群特征[J].中国环境科学,2008,28(5):449-455.
- [24] MOHAN S V, FALKENTOFT C, NANCHARAI V, et al. Bioaugmentation of microbial communities and pilot scale sequencing batch biofilm reactors using the TOL plasmid[J]. Bioresource Technology, 2009, 100:1746-1753.
- [25] KISASHI S, SATOSHI O, YUKI Y, et al. Evaluation of the impact of bioaugmentation by in situ hybridization and microelectrode [J]. Water Resource, 2003, 37:2206-2216.
- [26] 刘涉江,李鑫纲,纪智勇,等.甲基叔丁基醚高效降解菌的分离鉴定及其生物强化技术[J].天津大学学报,2010,43(5):435-439.
- [27] MEIZHEN W, GUIQIN Y, HANG M, et al. Bioaugmentation with the nicotine-regarding bacterium *Pseudomonas* sp. HF-1 in a sequencing batch reactor treating tobacco wastewater: Degradation study and analysis of its mechanisms [J]. Water Resource, 1997, 31(7):1687-1693.
- [28] 黄玲,李习武,李旭东,等.应用QC-PCR技术研究高效菌株 *Rhodococcus rubr* Eml 在废水处理中的作用[J].微生物学报,2007,47(2):307-312.
- [29] SARAVANANE R, MURTHY D V S, KRISHNAIAH K. Bioaugmentation and treatment of cephalixin drug-based pharmaceutical effluent in an upflow anaerobic fluidized bed system [J]. Bioresource Technology, 2001, 43:279-281.
- [30] FANGBO Y, SHINAWAR W A, LIBO G, et al. Bioaugmentation of a sequencing batch reactor with *Pseudomonas putida* ONBA-17, and its impact on reactor bacterial communities [J]. Journal of Hazardous, 2010, 176:20-26.
- [31] JINGYUN M, XIANGCHUN Q, ZHIFENG Y, et al. Biodegradation of a mixture of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid and multiple chlorophenols by aerobic granules cultivated through plasmid pJP4 mediated bioaugmentation [J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 181:144-151.
- [32] HIROFUMI T, YASUTAKA A, MASAMA M, et al. Plasmid-mediated bioaugmentation of sequencing batch reactors for enhancement of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid removal in wastewater using plasmid pJP4 [J]. Biodegradation, 2013, 24:343-352.
- [33] 邓旭,李清彪,孙道华,等.利用基因工程菌去除电解废水中的汞离子[J].厦门大学学报,2002,41(3):330-333.
- [34] 张迎明,尹华,叶锦韶,等.基因工程菌 *E. Coli* BL21-NiCoT 吸附镍的性能研究[J].环境污染与防治, 2006, 28(12):895-898.
- [35] KYOUNG S R, ROGER W, MACHAEL, et al. Demonstration of bioaugmentation in a fluidized-bed process treating 1-naphthylamine [J]. Water Resource, 1997, 31(7):1687-1693.
- [36] 马溪平,王延刚,徐成斌,等.微生物降解硝基苯废水的研究进展[J].生态科学,2011,30(5):562-567.
- [37] ASHMITA A, ADEMOLA O, OLANIRAN, et al. Enhanced 1,2-dichloroethane degradation in heavy metalco-contaminated wastewater undergoing biostimulation and bioaugmentation [J]. Chmosphere, 2013, 93:1826-1834.
- [38] 王聪颖,王芳,王涛屹,等.生物强化和生物刺激对土壤中PAHs降解的影响[J].中国环境科学,2010,30(1):121-127.
- [39] 董春娟,李炳南,陈志强.处理生物难降解物质的有效方式——共代谢[J].化工环保,2003,23(2):82-85.
- [40] DONGHE P, DAESUNG L, YOUNGMO K, et al. Bioaugmentation of cyanide-degrading microorganisms in a full-scale cokes wastewater treatment facility [J]. Bioresource Technology, 2008, 99:2092-2096.
- [41] 唐宁,柴立元,闵小波.含汞废水处理技术的研究进展[J].工业水处理,2004,24(8):5-13.
- [42] PARDI J, LUIS A, SAYAVEDRA S, et al. Bioaugmentation of butane-utilizing microorganism to promote cometabolism of 1,1,1-trichloroethane in groundwater microcosms [J]. Biodegradation, 2001, 12:11-22.
- [43] ZHONGQIN C, MEI C, LIUQUN X, et al. Bioaugmentation of a sequencing batch biofilm reactor with *Comamonas testosteroni* and *Bacillus cereus* and their impact on reactor bacterial communities [J]. Biotechnol Lett, 2014, 26. [Epub ahead of print]
- [44] ABEYSINGHE D H, VIRAJ D G, STAHL A, et al. The effectiveness of bioaugmentation in nitrifying systems stressed by a washout condition and cold temperature [J]. Water Environment Research, 2002, 74(2):187-199.
- [45] SHIQIANG Z, SHUO Y, JINREN N. High-efficient nitrogen removal by coupling enriched autotrophic-nitrification and aerobic-denitrification consortiums at cold temperature [J]. Bioresource Technology, 2014, 116:288-296.
- [46] 赵立军,马放,赵庆建,等.生物强化技术在污水厂快速启动中的工程应用[J].哈尔滨工业大学学报,2007,39(12):1886-1889.
- [47] 赵立军.低温污水生物强化处理技术应用研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007:19.

(上接第195页)

- [10] LUMLEY S, ARMSTRONG P. Some of the Nineteenth Century Origins of

the Sustainability Concept [J]. Environment, Development and Sustainability, 2004, 6(3):367-378.