

基于动态环境 CGE 模型的乌梁素海流域氮磷分期调控策略

邓祥征^{1,2}, 吴 锋¹, 林英志¹, 杨 军^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院农业政策研究中心, 北京 100101)

摘要: 氮、磷是湖泊富营养化的主导因子。为维持水资源的可持续发展, 进行氮、磷削减势在必行, 但此举势必会影响经济发展。为解决氮、磷削减与经济的矛盾关系, 本文以乌梁素海流域为例, 利用动态环境 CGE 模型, 通过综合考虑技术进步、人口、经济增长与氮磷排放的关系, 提出了氮磷分期调控策略。研究表明, 近期 (2010~2015), 乌梁素海流域氮磷调控应以源头控制 (主要是指工业) 为主, 并辅以提高种植业水、肥、药的利用效率来缩减农田面源污染的扩大; 中期 (2015~2020), 通过推广各种卓有成效的治理手段, 实现以点带面, 达到综合治理成效; 远期 (2020~2030), 强调稳定发展工农业, 以环境优化经济为发展路线, 构建可持续发展经济模式, 实现经济增长与水环境稳步改善的双重目标。

关键词: 乌梁素海; CGE 模型; 动态环境 CGE 模型; 湖泊富营养化

文章编号: 1000-0585(2011)04-0635-10

1 引言

随着社会经济的快速发展及人类活动的加剧, 氮、磷营养盐的点、面源排放量逐渐增大, 入湖氮、磷浓度不断增加, 湖泊富营养化日益严重, 湖泊水体富营养化已经成为威胁水生态系统安全和国民经济可持续发展的关键因素^[1, 2]。因此, 合理调控入湖氮磷总量对于湖泊水环境治理尤为重要。乌梁素海位于内蒙古自治区巴彦淖尔市乌拉特前旗境内, 现有水域面积约 293km², 是我国目前富营养化现象最严重的淡水湖泊之一^[3]。根据巴彦淖尔市乌梁素海综合治理规划, 到 2020 年, 通过生态补水、控源截污、修复治理等措施, 使湖区水体稳定保持地表Ⅳ类水质目标。为实现这一规划, 本文以社会经济与生态环境的协调发展为目标、以可持续发展为原则, 通过构建动态环境 CGE 模型, 制定出一套与流域水质目标相适应的氮磷分期调控策略。

环境 CGE 模型是环境与经济系统之间互动影响关系模拟的有利工具。环境 CGE 模型充分考虑了环境与经济系统各构成要素之间的紧密联系、环境或经济政策措施的交叉影响以及政策执行过程中的连锁反应和反馈效应, 因而能够全面刻画氮磷削减与经济系统和水生态系统安全之间的复杂作用关系, 准确预测政策变动或外部冲击的可能影响及其程度, 并依据流域发展规划制定分期调控策略。环境 CGE 模型的研究始于 20 世纪 80 年代末期。Forsund 等^[4], Dufoumaud 等^[5], Bergman^[6], Hazill 等^[7] 以及 Jorgenson 等^[8] 对其早期

收稿日期: 2010-08-01; 修订日期: 2011-01-10

基金项目: 国家水科技重大专项 (2009ZX07106-001-03、2009ZX07106-001-07)

作者简介: 邓祥征 (1971-), 男, 山东日照市人, 博士, 研究员, 主要从事土地系统变化与效应、区域环境变化与政策研究。E-mail: dengxz. ccap@igsrr. ac. cn

发展做出了重要贡献。20 世纪 90 年代以后, 环境 CGE 模型的研究开始飞速发展起来, 其应用范围覆盖了公共经济政策 (如环境税收、政府补贴等) 对环境的影响分析, 以及环境保育对经济、社会层面的影响分析。中国的环境 CGE 建模分析大致开始于 20 世纪 90 年代中期。李善同等^[9]以 OECD 发展中心贸易与环境项目的 CGE 模型为基础, 构建了可应用于贸易政策分析、能源政策和能源贸易、环境政策、收入分配机制以及中国经济的中长期增长和结构变化等方面分析的动态递推经济环境 CGE 模型。樊明太等^[10, 11]以与澳大利亚莫纳什大学构建的 PRGEM 模型为基础构建了中国的环境 CGE 模型, 并应用该模型对中国环境政策进行了分析。Xie 等^[12]构建了一个综合描述经济环境之间相作用关系的环境 CGE 模型, 该模型可以定量分析不同的污染物控制策略对社会经济系统的影响。本文所构建的动态环境 CGE 模型改进了 Xie 的模型结构, 通过区分资本的年代结构、引入资本积累和 GDP 增长等动态因素^[13], 并外生给定劳动力、人口的变化及全要素增长率 (TFP), 实现了模型的动态扩展。动态环境 CGE 模型在乌梁素海流域氮磷分期调控策略研究中的应用, 不仅能够为流域富营养化调控策略的制定提供支撑, 而且能够为协调流域水环境保育与经济可持续发展提供科学依据。

2 模型与方法

经济和环境以一种复杂的方式相互作用。对于产品的生产来说, 生产过程需要环境提供物质资料和能源^[14]。经环境提供的物质资料和能源在生产和消费过程中得到转化, 并且产生的副产品随后被排放到环境中, 并带来相应的环境问题。例如, 农业生产中使用的大量化肥及农药随地表径流汇集到湖泊中, 久之便导致了湖泊富营养化。环境不仅是物资资料和能源的提供者, 而且也是生产和消费过程中所产生污染物的接受者, 环境系统吸收经济活动中所产生污染物的环境容量是有限的, 这个有限的环境容量限制了经济的增长 (图 1)。经济系统不仅从环境中索取资源, 而且也将污染物排入环境。当排入环境中的污染物质 (W) 大于环境的吸收量 (A) 时 (图 1), 环境退化就会出现。环境质量的退化对消费者效用和资源的储存都有直接的负面影响。资源数量和质量的降低也将通过降低生产率而对效用产生间接影响。

动态环境 CGE 模型本质上是一个包含动态变化机制的多部门、多市场微观经济模型。通过在生产者追求利润最大化和消费者追求效用最大化的基础上, 分析消费者和生产者的最优行为受污染排放行为及污染控制政策实施的影响。对于主体优化决策的设定使得模型能够进行反馈调整和自发性决策, 从而在分析政策变动的效果方面相对于其他研究方法具有明显优势^[15]。通过对动态环境 CGE 模型进行求解, 能够同时得到产出与治理组成的均衡解、生产要素的分配、商品和要素的价格、污染排放和污染治理的水平等等。

2.1 扩展的氮磷营养盐排放核算模块

扩展的氮磷营养盐排放核算主要针对各产业部门, 从中间投入、生产、消费环节, 利用氮磷排放系数进行计算。

各产业部门在中间投入环节的氮、磷排放量:

$$EMI_{i,p}^n = \sum_j \frac{\Omega_{i,j,p}^n}{XA_{p,i,o}} XA_{p,j,i} \quad (1)$$

各产业部门在生产环节的氮、磷排放量:

$$EMI_{i,p}^o = \sum_j \frac{\Omega_{i,p}^n}{XP_{i,o}} XP_i \quad (2)$$

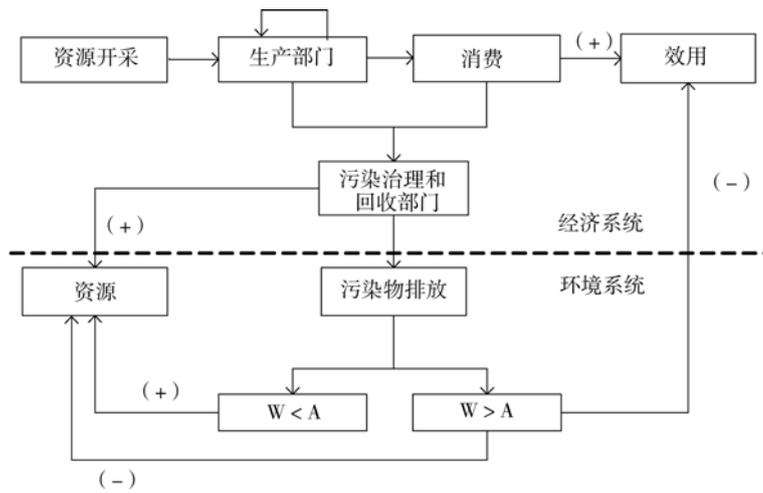


图 1 区域环境—经济的相互作用的概念模型

Fig. 1 Conceptual model of the interaction between regional environment and economy

各产业部门在最终消费环节的氮、磷排放量：

$$EMI_{i,p}^n = \frac{\Omega_{i,p}^c}{XAc_{ih,o}} \sum_h XAc_{ih} \quad (3)$$

各部门总的氮、磷排放量：

$$EMI_{i,p}^t = EMI_{i,p}^o + EMI_{i,p}^c + EMI_{i,p}^n \quad (4)$$

氮、磷的总排放量：

$$TEMI_p = \sum_i (EMI_{i,p}^o + EMI_{i,p}^c + EMI_{i,p}^n) \quad (5)$$

方程中的参数 Ω 为基年各生产部门的氮、磷排放量（将其与基年相应的投入量、产出量或消费量相除即得到污染排放系数矩阵）， XAp 、 XP 和 XAc 分别表示各部门的中间投入需求、总产出和最终消费，下标 i （或 j ）、 h 、 p 分别代表产业部门（乌梁素海流域的主要排氮、磷产业涉及种植业、造纸业、畜牧业、食品加工业、餐饮业、医疗保健行业^①）、居民和污染物排放的种类（氮、磷）。

2.2 经济与环境元素动态递推模块

静态环境 CGE 模型只能模拟短期内的政策或者调控手段对环境经济系统的冲击影响，而长期效应分析则需要一个递推的动态模型^[15]。环境 CGE 模型区分经济与环境元素的动态变化机制。

经济元素的动态变化主要通过生产要素的递推变化来实现。考虑资本和劳动力两种要素，并假设其通过 Cobb-Douglas 生产函数进行生产活动，则生产要素的递推变化在市场作用下，能够引发经济系统的各个环节变动。对资本要素，在递推动态模型框架下，各部门的资本投入区分为“新”资本和“旧”资本，并假定既已形成的资本存量不能在部门间完全流动，而新资本可以完全流动。在总量水平上，当期的总资本等于上期的资本存量减

^①当然，乌梁素海流域的工业企业除了以上提到的部门外，还有采矿业、纺织业、塑料制品业、非金属矿物制品业、有色金属冶炼及压延加工业、黑色金属冶炼及压延加工业、电力、热力的生产与供应、水的生产与供应等其他工业部门，但由于这些企业把废水直接排放到黄河，因此，这里不考虑这些企业氮磷的排放。

去折旧再加上新投资；就部门水平来说，生产者通过确定跨期的产量来得到最佳的要素分配方案，即当某一部门在上期的资本存量水平下（除去折旧）获得的产出大于当期的外部需求时，该部门的资本将完全由“旧”资本构成，多余的资本转移到其他部门；若某部门的外部需求增加，它将获得新的投资并形成“新”资本。这样，旧资本的产出等于旧资本的最大产出和总产出的最小值。该过程用方程的形式可以表示为：

(1) 基于要素的初级生产函数：

$$Y_i = A(t)L(t)^{\alpha}K(t)^{\beta} \quad (6)$$

(2) 旧资本的资本/产出比：

$$X_i^{dd} = \frac{K_i^{d,dd}}{XP_i^{dd}} \quad (7)$$

(3) 旧资本结构的产出：

$$XP_i^{dd} = \min\left\{\frac{K_{i,o}^s}{X_i^{dd}}, XP_i\right\} \quad (8)$$

(4) 新资本结构的产出：

$$XP_i^{new} = XP_i - XP_i^{dd} \quad (9)$$

相应地，需要对静态模型中的有关方程进行修改，即对各参变量增加“时间”维度。而对劳动力要素，引入加入指数形式的劳动力动态变化方程：

$$L_{t+n} = L_t e^{k(n-1)} \quad (10)$$

动态环境 CGE 模型在实现经济系统的动态递推分析时，首先假定全要素生产率 (TFP)^[16] 和特定部门的生产率内生决定，以得到预先确定的 GDP 和部门产出的增长路径；在动态的参数标定结束后，再将 TFP 增长率设定为外生，真实 GDP 的增长率内生，进而求解多期的模型均衡解。

环境元素的动态变化主要通过氮磷营养盐的排放、削减、滞留等来体现，即以“氮磷营养盐的当期滞留量 = 期初产业氮磷排放总量 - 当期氮磷削减总量 + 氮磷营养盐的上一期滞留量”来刻画模拟期内的氮磷营养盐自然衰减与削减机制。设模拟期初的氮磷营养盐滞留量为 Stk_i^{NP} ，期初氮磷营养盐排放量为 Rsr_i^{NP} ，污染物在下一时期的滞留量 $NRsr_{t+n}^{NP}$ 表示为：

$$NRsr_{t+n}^{NP} = (1 - \zeta^d) Stk_i^{NP} + (1 - \zeta^r) Rsr_{t+n}^{NP} \quad (11)$$

当期内氮磷营养盐的削减量 Y_i^r 表示为：

$$Y_i^r = \zeta^r Rsr_i^{NP} \quad (12)$$

其中， ζ^d 和 ζ^r 分别表示氮磷营养盐的自然衰减系数和人工削减系数，当氮磷营养盐的上一期自然净化量和当期削减余量恰好相等的时候，可以维持湖泊生态系统处于良性循环。假定考察期内氮磷营养物削减呈线性增长，即 $Rsr_i^{NP} = (1 + \nu) Rsr_{i-1}^{NP}$ ，其中 $\nu = \left\{ \frac{Rsr_i^{NP}}{Rsr_{i-1}^{NP}} \right\}^{\frac{1}{n}}$

表示 n 氮磷营养盐的年平均排放增长率，以递推动态形式表示为：

$$Rsr_i^{NP} = (1 - \zeta^r)^n (1 + \nu)^n Rsr_{i-n}^{NP} + (1 - \zeta^d)^n Stk_{i-n}^{NP} \quad (13)$$

式 (13) 反映了理想情况下的氮磷营养盐削减动态变化规律。而如果预期下一期氮磷削减价格将降低，若单纯追求利润最大，则氮磷营养盐削减部门会将氮磷营养盐滞留到下一期进行处理，即存在氮磷的滞留问题。从更接近现实的角度来说，参数 Rsr_{i-n}^{NP} 可以表达为氮磷营养物消减服务价格的函数。当真实价格上升时，生产者将有积极性去改进生产工

艺、提供生产效率及增加污水处理设施来减少氮磷营养物的排放；但在价格机制尚不完善的情况下，同时为简单起见，模型将 ζ^d 和 Stk_{NP}^d 作为外生变量进行处理。

3 情景模拟及案例分析

3.1 经济发展状况

经济的发展必然伴随资源的耗竭和各种污染物的排放，随着科技水平的提高，虽然单位 GDP 的资源消耗量和污染物排放量会有所降低，但无法完全抵消经济增长带来的污染物排放量的积累，尤其是近年来随着工业的迅猛崛起，在较长时期内，污染物的排放量依然会随经济总量的增长不断增加。二十一世纪是乌梁素海流域社会经济高速发展的时期。这种高速发展主要体现在三方面（图 2）：一是经济总量的持续增长，巴彦淖尔市实现了 GDP “五个翻番”，生产总值由 151.4 亿增到 2008 年的 439.06 亿元；二是产业结构的调整，三大产业结构由 35.3 : 29.4 : 35.3 演进为 21 : 52 : 27，工业经济主导地位基本确立；三是收入水平的提高和消费结构的变化。这三方面的变化，都不可避免地对流域生态环境产生一定的影响。第一产业的面源污染和第二产业点源污染是污染的主要来源。第二产业是全社会能源和资源消耗的主体，也是污染排放的主体。但在第二产业内部污染物的排放量也是不平衡的，大部分污染物的来源集中于化工、纺织印染、造纸等行业。

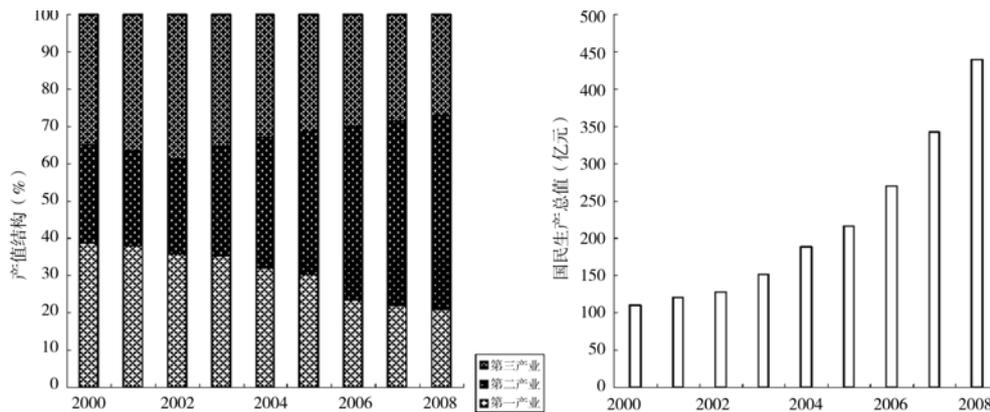


图 2 乌梁素海流域产业结构及国民经济发展状况

Fig. 2 Industrial structure and economy conditions in Wuliangsu Hai catchment

3.2 水环境状况

乌梁素海流域水资源十分缺乏，社会经济发展主要依赖于黄河过境水。经过多年的建设，流域内已逐步形成了独立的灌排水体系，年引黄河水在 45 亿~50 亿 m^3 之间，排水量在 3 亿~5 亿 m^3 之间。总排干沟是排水系统的主体工程，主要纳入各级排水沟系的农田排水、狼山山洪和城镇污水，经乌梁素海调节后排入黄河。近年来，随着灌区工业生产的发展和城镇人口的增加，工业污水和城镇生活污水逐年增多，总排干沟的污染日益严重，乌梁素海富营养化态势严峻（表 1），湖水总磷、总氮、化学耗氧量超过国家地表水 V 类标准的 0.1~4.5 倍，水质为劣 V 类。并且，富营养化的飞速发展加快了流域的生物填平速度，乌梁素海流域生态功能逐渐消退，如不加以治理，若干年后该流域可能彻底消

失。而且,在汛期之前,为了留有足够的蓄洪库容,需要开启总排干沟出口段节制闸向黄河泄水,流域内大量积存的污水对黄河也造成了严重的威胁。

据孙惠民^[17]测试分析得乌梁素海芦苇中氮的平均含量为 1.65%,上覆水中 TN 含量的平均值为 1.78mg/L。在推算乌梁素海营养盐蓄积时,按每年收割 5×10^4 t 计算,则每年收割芦苇可转移氮素 825t;而每年由乌梁素海排水入黄河的水量按 2×10^8 m³ 计算,则每年排入黄河的氮素约为 356t。磷素的估算与此类似,则每年由排入黄河、收割芦苇等途径输出的磷素的量为 38t。农田退水、工业废水和城市生活污水每年输入乌梁素海营养盐的数量按表 2 计算。

3.3 模型运行数据及流域环境-经济分析

乌梁素海的点污染源主要包括城市生活污水和工业废水。向乌梁素海排放城市生活污水的只有杭锦后旗、临河市和五原县,这三个城市分别通过三排干、五排干和七排干将废污水排入总排干,最后由总排干输入乌梁素海。乌梁素海流域的目前具有八大工业园区,包括磴口经济开发区、青山工业园区、沙海工业园区、杭锦后旗工业园区、临河化学工业园区、乌拉特五金冶化工基地、五原工业园区、金泉工业园区。杭锦后旗有河套酒业、河套木业和飞来调味品厂等工业企业,临河市有金川啤酒厂、5303 服装厂和维信羊绒衫厂等工业企业,五原县有大名才纸业、红昌化学工业有限公司和润泽稀土有限公司等工业企业。临河市的金川啤酒厂、5303 服装厂和城市生活污水经过污水处理厂处理后由五排干进入总排干,维信羊绒衫厂的工业废水直接排入五排干,再进入总排干;而其它两个城市的城市生活污水和工业废水则未经任何处理直接由三排干和七排干排入总排干,最后汇入乌梁素海。

以上提到的八个工业企业中,工业废水排放体积所占百分比最大的是红昌化学工业有限公司,其次为大名才纸业和飞亚调味品厂;对 TP 贡献率最大的为飞亚调味品厂,每年排放 7.1t,几乎占工业废水所携带 TP 量的 60%,其次为大名才纸业和金川啤酒厂;对 TN 贡献率最大的为红昌化学工业有限公司,每年排放 512t,约占工业废水所携带 TN 量的 70%,其次为大名才纸业和飞亚调味品厂(表 3)。

以上提到的八个工业企业中,工业废水排放体积所占百分比最大的是红昌化学工业有限公司,其次为大名才纸业和飞亚调味品厂;对 TP 贡献率最大的为飞亚调味品厂,每年排放 7.1t,几乎占工业废水所携带 TP 量的 60%,其次为大名才纸业和金川啤酒厂;对 TN 贡献率最大的为红昌化学工业有限公司,每年排放 512t,约占工业废水所携带 TN 量的 70%,其次为大名才纸业和飞亚调味品厂(表 3)。

3.4 方案设计及结果分析

(1) 变量的设定

表 1 乌梁素海 2005~2007 年水质变化趋势

Tab. 1 The change trend of water quality in Wuliangshuai catchment from 2005 to 2007

	2005	2006	2007	V 类水质标准
总氮 (mg/L)	8.50	10.97	7.09	2.00
超标倍数	3.25	4.49	2.55	
总磷 (mg/L)	0.30	0.28	0.28	0.20
超标倍数	0.49	0.42	0.14	
COD (mg/L)	73.00	103.00	114.00	40.00
超标倍数	0.83	1.58	1.85	

注:数据来源于巴彦淖尔市环保局。

表 2 乌梁素海营养盐负荷蓄积量

Tab. 2 The loading stock volume of nutritive salt in Wuliangshuai catchment

部门	输入量 (E_{in})		输出量 (E_o)	
	TN (t)	TP (t)	项目	TN (t) TP (t)
农业生产排放	1100	32	削减	825 0
中间投入排放	700	12	流失	356 38
消费排放	340	47		
合计	2140	91	合计	1181 38
蓄积量	TN=959		蓄积量	TP=53

注:数据来源于文献^[17]。

表 3 乌梁素海流域主要排污企业

Tab. 3 The primary enterprises discharging pollutants in Wuliangsuhai catchment

	5303 服装厂	大名才 纸业	飞亚 调味品	河套 酒业	红昌 化工	金川 啤酒厂	润泽 稀土厂	维信 羊绒衫
废水排放量 ($\times 10^3 \text{ m}^3$)	110	1790	808	233	3800	482	21	90
TP (t)	0.3	2.2	7.1	0.4	0.7	1.2		0.2
TN (t)	0.4	24	140	1	512	3.2	16	0.6

注：数据来源于内蒙古湖泊恢复治理项目——乌梁素海综合整治研究中污染源的调查，见文献^[17]。

基线预测的基准情景为流域在人口、技术与经济等增长率外生给定的情况下，不考虑其他政策措施时，对相关内生变量的增长率（本文主要是指产业产值变化与氮磷营养盐排放浓度变化）进行预测。在进行基线预测时，主要外生变量的设定描述如表 4。

(2) 方案设计依据

分期减排方案设计依据的是乌梁素海水体中氮、磷的现有储量和湖泊水环境容量。其中，氮（或磷）的流域环境容量可以按照式（14）～式（16）进行计算。

$$M_N = L_s A \quad (14)$$

$$L_s = \frac{P_s h Q_a}{(1 - R_p) V} \quad (15)$$

$$R_p = 1 - \frac{W_{\text{出}}}{W_{\text{入}}} \quad (16)$$

式中， M_N 为氮（或磷）的流域环境容量，t/a； L_s 为单位湖水面积氮（或磷）的流域环境容量， $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$ ； A 为流域面积， m^2 ； P_s 为流域中氮（或磷）的年平均控制浓度， g/m^3 ； h 为流域平均深度，m； V 为流域库容； Q_a 为流域年出流量， m^3 ； $W_{\text{出}}$ 为流域年出湖的氮（或磷）量，t/a； $W_{\text{入}}$ 为流域年入湖的氮（或磷）量，t/a。

根据以上公式和巴彦淖尔市环境保护规划，乌梁素海水质要达到国家地表水环境质量 III 类标准，则氮、磷营养盐的流域环境容量分别为：

$$M_{\text{氮}} = 300.02 \text{ t/a}, M_{\text{磷}} = 28.09 \text{ t/a}$$

(3) 结果分析

结合乌梁素海流域发展规划，巴彦淖尔市近期仍以大力发展工业产业为工作重点，工业迅猛发展是乌梁素海流域近年国民经济生产总值翻番的主要因素，初期湖泊滞留的氮、磷量比较大（表 5，表 6），污水处理率不断提高的同时，工业园区的规模又在不断扩大，近期（2010～2015）氮磷营养物的排放仍有一个量上的持续增长，以计算的 TN 的年平均排放量为 2430 t 比基期排放量 2140 t 有大幅度的增长，其增长主要是工业迅速发展的效应。此阶段的调控应以源头（主要是以工业为主）控制作为当前的主要任务，提高种植业水、肥、药的利用效率，即提高种植业的技术进步率，合理布局畜禽水产禁养区和集

表 4 基期参数的值

Tab. 4 Value of coefficients of basic period

参数类型	参数名称	取值
社会经济	GDP (亿元)	439.06
	年度劳动力的自然增长率 (%)	2.4
	全要素生产率	0.96
V 类水质 ^[18]	氮浓度 (mg/L)	2.0
	磷浓度 (mg/L)	0.2
IV 类水质 ^[18]	氮浓度 (mg/L)	1.5
	磷浓度 (mg/L)	0.1
湖泊特征	湖泊蓄水量 (m^3)	3×10^8

中养殖区,推广畜禽排泄物收集与再利用模式,加大畜禽养殖场改造和大中型沼气工程建设,加强污水和粪便无害化处理,提高农业从业人员的知识及环保意识。在近期使乌梁素海生态系统退化趋势得到遏制,湖泊内水体污染基本得到控制,生物多样性下降趋势减缓,水土流失减少,湖体萎缩变缓,湖周居民生活环境质量有所改善,实现湖泊资源优势的初步利用,湖水中氮、磷浓度达到水功能区划的Ⅳ水质标准。中期(2015~2020)随着工业发展的逐渐成熟,GDP增长率较近期的19%将有明显的下降,技术进步明显,全要素生产率大于1。且随着全民环保意识的增强以及污染治理措施的不断成熟和完善,氮、磷营养物在乌梁素海的滞留量明显减少,水质出现明显好转。此阶段随着经济的发展逐步推广应用各种卓有成效的治理手段,达到以点带面的成效;规模化生态农业发展,形成较为成熟的经济结构优化思路,使乌梁素海生态系统趋于良性循环,湖泊水体污染得到有效控制;保持水环境的自净能力,恢复流域的生物多样性,使得流域范围内的水土流失现象逐步得到控制,湖体趋于平衡;保持湖区与周边生态系统与流域社会、经济的协调发展,湖水中氮、磷浓度达到水功能区划的Ⅳ类水质标准。远期(2020~2030)以工农业稳定发展和环境优化经济为发展路线,重点培植第三产业发展,构建可持续发展的经济模式,保持整体经济稳定增长,使乌梁素海生态系统更加和谐健康,水体污染得到全面控制,水环境质量优良,湖体面积略有增加,生态系统实现良性循环,湖泊功能优势互补,湖光秀美景观宜人,湖泊基本恢复原始状态。

表 5 乌梁素海流域经济发展及氮调控状况

Tab. 5 The condition of regulating and controlling nitrogen and the economic development in Wuliangsu hai catchment

	GDP 增长率 (%)	全要素生产率	氮营养物排放量 (t)	氮营养物滞留量 (t)	乌梁素海水质
2010~2015	19.00	0.97	2430	620	V~Ⅳ
2015~2020	11.40	1.02	2180	412	Ⅳ
2020~2030	3.60	1.23	1800	300	Ⅲ

表 6 乌梁素海流域经济发展及磷调控状况

Tab. 6 The condition of regulating and controlling phosphorus and the economic development in Wuliangsu hai catchment

	GDP 增长率 (%)	全要素生产率	磷营养物排放量 (t)	磷营养物滞留量 (t)	乌梁素海水质
2010~2015	19.00	0.97	100	57	V~Ⅳ
2015~2020	11.40	1.02	81	42	Ⅳ
2020~2030	3.60	1.23	68	28	Ⅲ

4 结论与讨论

本文所阐释的动态环境 CGE 模型以环境经济学理论为基础,分析环境经济系统变化机理,以非线性方程组来表达系统主体行为,通过优化方法求解系统总体效益达到最大时各变量的数值解,并通过外生设定政策参数模拟在政策变动下的系统状态。基于动态环境 CGE 模型,结合乌梁素海的水质监测数据、污染源普查数据、国民经济核算数据、巴彦

淖尔市统计年鉴等数据, 通过消费者价格指数变化率、劳动力增长率、资本增长率的外生设定, 模拟了近、中、远期的经济增长率、全要素生产率以及氮磷排放量和滞留量的变化情况, 为流域氮、磷营养盐的分期控制策略制定提供了有利的分析工具。

乌梁素海流域水质环境修复面临严峻挑战, 通过分析明确各阶段的水质目标要求, 结合流域的经济发展和技术进步, 模拟了不同时期控制手段的表征参数变化对环境经济系统的影响, 分析了产业发展与氮磷营养盐排放、削减之间的关系。调控策略的量化分析结果表明, 近期 (2010~2015) 乌梁素海氮磷营养盐的调控应以源头 (主要是指工业) 控制为主, 此外, 通过提高种植业水、肥、药的利用效率来缩减农田面源污染扩大的趋势也是有效手段; 中期 (2015~2020), 要实现氮磷营养盐的分期调控目标, 各种卓有成效的治理手段都需要进一步推广, 力求实现以点带面, 达到综合治理成效, 并为期间的生态农业的规模化发展与经济结构优化提供基础。远期 (2020~2030), 以湖泊生态系统健康发展为目标, 调控策略强调稳定发展工农业, 以环境优化经济为发展路线, 构建可持续发展的经济模式, 实现经济增长与水环境稳步改善的双重目标。

参考文献:

- [1] 肖化云, 刘从强. 湖泊外源氮输入与内源氮释放辨析. 中国科学(D辑), 2003, 33(6): 576~582.
- [2] 冷志明. 武陵源水体环境质量现状及评价. 地理研究, 2010, 29(6): 997~1004.
- [3] 尚士友, 杜健民, 李旭英, 等. 乌梁素海富营养化及其防治研究. 内蒙古农业大学学报, 2003, 24(12): 7~12.
- [4] Forsund F, Storm S. Environmental Economics and Management: Pollution and Natural Resources. New York: Croom Helm Press, 1988.
- [5] Dufoumaud M, Harrington J, Rogers P, *et al.* Environmental repercussions and the economic structure revisited: A general equilibrium formulation. Geographical Analysis, 1988, (4): 318~327.
- [6] Bergman L. General equilibrium costs and benefits of environmental policies: Some preliminary results based on Swedish data. In: The Fourth CGE Modeling Conference Paper. 1993.
- [7] Boyd R, Noel D U. The cost of improving the quality of the environment. Journal of Policy Modeling, 1991, 13(1): 115~140.
- [8] Jorgenson D W, Wilcoxon P J. Intertemporal general equilibrium modeling of U. S. environmental regulation. Journal of Policy Modeling, 1990, (12): 715~744.
- [9] 李善同, 翟凡. 一个中国经济的可计算一般均衡模型. 数量经济技术经济研究, 1997, (3): 38~44.
- [10] 樊明太, 郑玉歆, 马纲. 中国 CGE 模型: 基本结构及有关应用问题(上). 数量经济技术经济研究, 1998, (12): 39~47.
- [11] 樊明太, 郑玉歆, 马纲. 中国 CGE 模型: 基本结构及有关应用问题(下). 数量经济技术经济研究, 1999, (4): 24~30.
- [12] Xie J, Saltzman S. Environmental policy analysis: An environmental computable general-equilibrium approach for developing countries. Journal of Policy Modeling, 2000, 22(4): 453~489.
- [13] 高颖, 李善同. 可持续发展框架下的递推动态 CGE 模型构建研究. 发展研究, 2009, (1): 12~20.
- [14] 关伟. 区域水资源与经济社会耦合系统可持续发展的量化分析. 地理研究, 2007, 26(4): 685~692.
- [15] 李雪松. 一个中国经济多部门动态的 CGE 模型. 数量经济与技术经济研究, 2002, 12: 49~53.
- [16] 吴新博. 我国各地区全要素生产率的测定与比较分析. 运筹与管理, 2006, 15(5): 149~153.
- [17] 孙惠民. 乌梁素海富营养化及其机制研究. 内蒙古: 内蒙古大学博士学位论文, 2006.
- [18] 国家环境保护总局. 地表水环境质量标准. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 1~20.

Stage regulation measures of nitrogen and phosphorus in Wuliangshuai catchments based on the dynamic environmental CGE model

DENG Xiang-zheng^{1, 2}, WU Feng¹, LIN Ying-zhi¹, YANG Jun^{1, 2}

(1. Institute of Geographic Sciences and National Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. Center for chinese Agricultural Policy, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Nitrogen and phosphorus as the dominant factors of lake eutrophication are the key to maintaining the aquatic ecosystem health, which mainly come from the human living and production process. It is imperative to reduce the nitrogen and phosphorus nutrients to maintain the harmonious relationship among human society, economy and water resources, which would have some influence on economic development. Therefore, it is the prerequisite for solving the contradiction between environment and economy to take measures suitable for the sustainable development of catchments. We analyzed the relationship between the emissions of nitrogen and phosphorus and the population growth and economic development in Wuliangshuai catchments with the dynamic environment CGE model on the basis of the statistical data and environmental quality monitoring data in 2008, and put forward suggestions of nitrogen and phosphorus according to different stages. The result indicates that the regulation of nitrogen and phosphorus in Wuliangshuai catchments should mainly focus on control of the industrial source as well as reduction of the increasing non-point source pollution from farmland by improving the efficiency of irrigation and utilization of fertilizer and pesticide in the short-term stage (2010—2015). In the medium-term (2015—2020) stage, it is necessary to take effective measures to realize the stage regulation of nitrogen and phosphorus; besides, it is also necessary to thrive to use the experience of one point to lead the whole area to realize the comprehensive regulation and provide the basis for the large-scale development of ecological agriculture and economic structure optimization during this period. In the long-term stage (2020—2030), aiming at the healthy development of aquatic ecosystem, the regulation should emphasize the stable development of industry and agriculture; and it is necessary to construct the sustainable economic pattern by taking the environment optimization economics as the development line to realize the dual goal of economic growth and steady improvement of water environment.

Key words: Wuliangshuai catchment; CGE model; environmental CGE model; lake eutrophication