

# 华北农业高产粮区地下水硝酸盐 污染环境价值损失评估技术研究\*

——以山东省桓台县为例

刘光栋 吴文良\*\*

(中国农业大学资源与环境学院 北京 100094)

靳乐山

Gabriel Gulis

(中国农业大学人文与发展学院 北京 100094) (南丹麦大学健康促进研究所 奥登塞 DK 6700)

**摘要** 应用人力资本法、防护支出法和支付意愿调查法评估了华北高产粮区桓台县地下水农业面源硝酸盐污染的环境经济损失,并分析了不同评估技术对农业面源硝酸盐污染地下水环境价值损失评估的适用性,其适用性优先序为防护支出法的深井工程法>脱硝工程法≥人力资本法>支付意愿调查法。2002年该县由农业地下水硝酸盐污染造成的年环境价值损失约为880万元(860.8~1170.1万元/a),占当年农业总产值的1.1%~1.5%。

**关键词** 地下水污染 硝酸盐 环境价值损失 评估

**Evaluation techniques on the losses of environmental value of groundwater nitrate pollution sourced from high-yielding farmlands in North China—A case study from Huantai County, Shandong Province.** LIU Guang-Dong, WU Wen-Liang (College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100094, China), JIN Le-Shan (College of Humanities and Development, China Agricultural University, Beijing 100094, China), GABRIEL GULIS (Institute of Health Promotion Research, Southern Denmark University, Esbjerg 6700, Denmark), *CJEA*, 2005, 13(2): 130~133

**Abstract** By using the human capital approach (HCA), preventive expenditure approach (PEA) and contingent valuation method (CVM), the losses of environmental value of groundwater nitrate pollution sourced from a typical highyielding farmland, Huantai County, are evaluated. And the suitabilities of different methods for estimating the agriculture-related groundwater problems are analyzed. The precedence order of suitability is PEA by well-drilling project > PEA by de-nitrate project ≥ HCA > CVM. For the whole county in 2002, the loss of environmental value of groundwater nitrate pollution caused by farming is about 8.8 million yuan/year, ranging from 8.608 to 11.701 million yuan/year. This value accounts for 1.1%~1.5% of the gross agricultural production.

**Key words** Groundwater pollution, Nitrate, Losses of environmental value, Evaluation

(Received Dec. 31, 2003; revised Feb. 25, 2004)

华北地区淡水资源缺乏,而集约化农业耕作带来的地下水硝酸盐污染日趋加重<sup>[1]</sup>,在以浅层水源作饮用水的地区必然产生健康风险。恰当评估农业环境经济损失是治理环境污染、分配社会资源和调整农业政策方向的重要决策依据,也是国家或区域绿色GDP核算的重要基础。环境质量的价值评估方法有多种<sup>[2]</sup>,但我国现阶段环境经济损失方面的大量研究结果<sup>[3,4]</sup>仍受制于缺乏可靠的剂量-反应关系而不得不做许多界定和假设,其所得评估只能向社会表达结果背后蕴含的价值倾向<sup>[3]</sup>,而远不能满足用于成本效益分析和决策的要求。本研究以山东省桓台县为例,采用不同方法研究分析了华北农业高产粮区地下水农业面源硝酸盐污染环境价值损失评估技术,为同类环境损失评估提供适宜的评价技术。

## 1 研究区域概况与研究方法

山东省桓台县于1990年全县实现单产15.3t/hm<sup>2</sup>高产,1990~2002年年均施N量为458.3(±59.7)

\* 国家自然科学基金项目(30270220)资助

\*\* 通讯作者

收稿日期:2003-12-31 改回日期:2004-02-25

kg/hm<sup>2</sup>,大大超过欧洲和国内专家推荐的环境安全用量,地下水硝酸盐污染日趋严重。至 2002 年底该县域内浅层地下水不同程度污染面积已达 54.1%,其中 17.6%超过 FAO 饮水标准(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量 10.1~20mg/L,下称 II 级),2.9%超过国家标准(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量超过 20.1mg/L,下称 III 级)。

本研究采用人力资本法、防护支出法和支付意愿调查法分别评估该区地下水硝酸盐污染环境价值损失。人力资本法包含反映环境恶化导致健康损害的 3 方面,即医疗期间生产损失、治疗费用和过早死亡而造成的收入损失。本研究调查了全县 1990~2002 年间发生的 908 个病例主要相关病症(胃癌、食道癌、淋巴瘤和结直肠癌)发病年龄、死亡年龄、住院天数、住院费用、医疗费用及患者性别等信息,同时搜集了当地 4 个定点监测区 1991~2002 年间汇总资料,包括分病因死亡人数、年龄组别及各年度监测区覆盖人口等信息。防护支出法即用人们为防治或改善环境质量恶化后果的发生,用所实施的趋避行为所需投入或支出间接反映环境价值损失的方法,以开采深层地下水或水质净化方法所增加的全成本用于间接评价地下水污染的损失。支付意愿调查法即采用问卷方式调查以农民为主体的公众对地下水污染的改善所愿意支付的费用,调查问卷包括公众对地下水污染的基本认识、公众反应态度和面源污染防治的支付意愿、公众对农业面源污染的行为反应以及受访人社会经济信息。

## 2 结果与分析

### 2.1 人力资本法

剂量-反应函数的建立。剂量-反应关系是评估环境污染损害价值的必要前提,本研究根据斯洛维国家公众健康研究所的研究结果<sup>[10]</sup>分析桓台县饮水中硝酸盐浓度和某些癌症标化发病比(SIR)之间的关系(见表 1),这些回归模型被用作人力资本法评估的基础。由于观测样本时间跨度长,被假定不存在各种病变潜伏期的影响。表 1 中剂量-反应关系达不到人群受控试验的一般要求,以剥离其他因素的影响,笔者认为相关性显著关系可用于发病率的趋势性评估。鉴于我国新病例登记制度不完善,只能根据实际地区所调查的分病因发病死亡率,间接推算标化发病比。故采用相对标化发病比概念,且假定同一地区相对标化发病比近似于相对标化死亡比,进而用以估算因污染导致的分病因死亡人口增加数。

分病因计算预期死亡人口增加数。引用表 1 中剂量-反应关系,推断长期处于硝酸盐污染威胁中的人群因饮用污染水,而显著提高结直肠癌、食道癌、淋巴瘤发病率,按式 1 分别计算增加的死亡人数(M<sub>ij</sub>):

$$M_{ij} = P_{ej}P_i \left[ \frac{A_{ij} \ln(C_j) + B_{ij}}{A_{i0} \ln(C_0) + B_{i0}} \right] \quad (1)$$

式中,A<sub>ij</sub>、B<sub>ij</sub>分别为相应病因*i*、污染级*j*的剂量-反应关系的系数项,C<sub>0</sub>、A<sub>i0</sub>、B<sub>i0</sub>分别为非污染区硝酸盐浓度及相应剂量-反应关系的系数项。以当前监测区发病率*P<sub>i</sub>*为 1,即以目前观测人群视作标准人群,根据不同污染区暴露人口*P<sub>ej</sub>*即可概算预期增加的分病因发病人口死亡数*M<sub>ij</sub>*。这里取趋势概率*P*≤0.1的病因,包括胃癌(女)、结直肠癌、食道癌和淋巴瘤等疾病 4 种病因。据相应数据共得因污染而导致增加死亡人口 47 人。

健康损害价值评估。根据人力资本的含义,健康损失由收入损失、住院费用和医疗费用 3 部分组成。按照流行病学衡量疾病负担的潜在寿命损失人年的计算思路<sup>[5]</sup>,构造如下人力资本损失总量(*H*)估算函数(由于各相关病因死亡率很高,故忽略了存活病例的损失):

$$H \cong \sum_{ii} M_{ij} \left[ \sum_1^{j=4} (T - t_j) \sum_1^{T-t_j} \frac{I}{(1+r)^{(T-t_j)}} + \sum_1^{j=4} (D_j I / 365 + S_j + H_j) \right] \quad (2)$$

式(2)中病因*j*包括表 2 中 4 种,M<sub>ij</sub>代表 II 级和 III 级污染区各种癌症死亡人口增加数,*T*和*t<sub>j</sub>*分别代表当地期望寿命和各病因平均死亡年龄,*I*代表人均年收入,*D<sub>j</sub>*、*S<sub>j</sub>*、*H<sub>j</sub>*分别代表各病因平均住院天数、医

表 1 饮用水硝酸盐含量与相关癌症的剂量-反应关系

Tab. 1 Dose-response associations between nitrate in drinking water and SIR

病变类型 Diseases types	人群性别 Sex group	剂量-反应关系* Dose-response	X <sup>2</sup> 概率(P) X <sup>2</sup> trend	SIR <sub>0</sub> **
胃 癌	女 性	Y = 0.2002ln(X) + 0.4753	0.100	0.81
胃 癌	男 性	Y = -0.0706ln(X) + 1.1338	0.180	1.08
结直肠癌	男性+女性	Y = 0.2312ln(X) + 0.3777	<0.001	0.71
淋 巴 瘤	男性+女性	Y = 0.4406ln(X) - 0.2010	0.021	0.36
食 道 癌	男性+女性	Y = 0.1701ln(X) + 0.5269	<0.001	0.78
膀 胱 癌	男性+女性	Y = -0.1427ln(X) + 1.4250	0.160	1.22

\* Y 代表分病因标化发病比,X 指饮水硝酸盐含量 3 级划分的平均值(0~10mg/L, 10.1~20mg/L, >20.1mg/L); \*\* SIR<sub>0</sub> 饮水硝酸盐含量为 0~10mg/L 时的标化发病比,标化发病比指某地区新发病例与按标准人口发病率估计的预期发病人数之比,当人群年龄结构差异较大时,按年龄结构调整后的标化发病比被认为比标化死亡比(SMR)更精确,标化死亡比指实际观察死亡人数与按标准人口死亡率估计的预期死亡人数之比,其计算方法<sup>[10]</sup>为  $SMR_j = \frac{\sum r_i}{\sum n_i p_i}$ ,式中 *r<sub>i</sub>* 为年龄组*i*,病因*j*的病人数,*n<sub>i</sub>*为年龄组*j*的人口数,*p<sub>i</sub>*为年龄组*j*的病因*j*的死亡率。

疗费和住院费。 $r$ 为潜在寿命资本损失的折现率(15%),考虑到人力资本不同于一般物质和货币资本,具有伴随教育培训、知识技能提高和经验积累等因素产生人力资本的增值特点,所取折现率应高于一般社会平均折现率。根据实际调查结果统计的751个病例样本平均发病年龄、死亡年龄、住院天数、医疗费和住院费等指标,并根据人均年收入和平均消费支出等指标,应用上述人力资本损失总量估算函数,按社会平均贴现率15%计算出(见表2)相应病因死亡增加数的年总人力资本损失为860.8万元。假定地下水污染已处于相对稳定平衡状态,从污染范围及其污染程度看若不再进一步迅速恶化,2002年后每年地下水硝酸盐污染的环境健康损失则约为860.8万元,占当年农业总产值的1.1%,相当于每公顷农田年增加外部环境成本293.9元。

## 2.2 防护支出法

开采深层水资源防护法。对该县1978~2002年间135个村125口井深度和开采费用调查结果统计表明,1990年前地下水开采深度及其费用相对稳定,1978年、1983年、1986年段平均地下水开采深度及其费用分别为196.4m和5.8万元、187.5m和8.3万元、178.2m和6.8万元;1991年后地下水开采深度及其费用不断增长,平均开采深度及其费用由1992年的224.1m和9.0万元增至1997年的231.2m和10.7万元、2000年的318.4m和14.8万元,年开采深度增深7.9m,每眼井年开采费用递增4847.5元(未考虑物价指数的影响)。开采深层水源虽不完全以防止农业污染的健康危害为最初动机,但其根本目的是追求更清洁卫生而无污染威胁的水源,故开采深层水资源也是浅层地下水面源污染的必然因素之一,该县农业面源硝酸盐污染已影响地下150~200m深度,故新打水井至少应埋深 $>200\text{m}$ 。为减少污染风险,保证深井长期使用寿命,需开采至300m左右深度。按1999~2002年平均开采深度318m,每眼井平均开采成本14.8万元计算,扣除非污染威胁下正常饮用浅层水源开采成本,可估算出每开采1眼深井所增加的投入。2002年实际超标的Ⅱ级和Ⅲ级污染区共覆盖77个村(每村1.2眼井),需改打深井92眼。所有其他饮用水井266眼,开采深度需200m,共计1次性增加水资源生产成本3735.2万元。按20年使用寿命计,平均每年折旧186.8万元。由于取水深度增加,年维护费用和运行费用相应提高,平均单井年分别增加1.4万元和1.8万元,2项合计该县年需增加深层地下水资源生产成本881.2万元(见表2),该计算未计入资源使用成本,间接用生

表2 深层水资源生产成本增加投入计算

Tab.2 Production cost of deep groundwater increasing with drill depth

项目	深度/m	成本/万元	井数/个	工程费增加/万元	年折旧/万元	年维护及运行费/万元	年增加成本/万元
Items	Depth	Drill cost	Num. of wells	Total drill cost increase	Annual discount	Annual maintenances	Annual cost increase
浅井	80	0.8	-	-	-	1.7	-
深井	200	9.2	266	2447.2	122.4	3.1	494.8
深井	318	14.8	92	1288.0	64.4	3.5	386.4

产成本增加方法评估环境损失。深层水资源与浅层水的不同是浅层水源可通过地表水回灌或降水补给等实现再生,而深层水形成于数百万年前,几乎是不可再生的资源,故随深层水资源利用日渐稀缺,其开采深层水方法也将隐含越来越大的资源使用成本,这正是该评估方法的局限性之一。

表3 不同饮水脱硝酸盐工艺性能及其费用比较

Tab.3 Cost and technology comparisons among various de-nitration of drinking water

工艺类型	优点	缺点	成本增加/元·m <sup>-3</sup>	年增加费用/万元
Removal tech	Advantages	Disadvantages	Cost increase	Annual cost increase
物理化学法	反渗透	处理彻底	1.0~2.0	444.9~889.8
	离子交换	费用高、无选择性、 费水且需废水排放	0.8~1.0	355.9~444.9
生物法	反应器法	选择性好 且实用性强	0.2~0.5	89.0~222.5
	膜分离法	需废水排放		
		C源污染、有污泥		

水质净化工程防护法。欧美等国已开始投入使用水质净化方法去除地下水中硝酸盐<sup>[6,11]</sup>。去除地下水硝酸盐方法有离子交换法、生物脱硝酸盐法、化学还原法、反渗透及电渗析法,其中离子交换法与生物脱硝酸盐法相对可行且实用,二者只是适用水处理规模不同<sup>[7,12]</sup>。综合不同工艺优缺点和脱硝酸盐增加的成本,以3种技术为设计基础,估算了该研究区超标范围内77个城乡居民点采用不同生产工艺进行地下水处理年增加生产费用(见表3)。表3表明该污染区77个城乡居民点10.6万人口,人均日消费水量115L,以离子交

换法成本 0.8~1.0 元/m<sup>3</sup> 作为平均脱硝酸盐成本,估算该污染区居民生活必需用水年增加脱硝酸盐成本 355.9~444.9 万元,若按全境地下水硝酸盐含量≥5mg/L 均需进行脱硝酸盐处理,则全县年增加脱硝酸盐成本 936.0~1170.1 万元。

### 2.3 支付意愿调查法

本调查 331 份有效问卷中有 15.7% 的受访人拒绝支付,即支付意愿为零 ( $WTP = 0$ )。统计结果发现拒付组 ( $WTP = 0$ ) 的社会经济变量显著区别于支付组 ( $WTP > 0$ )。故依据是否包含拒付受访者的平均  $WTP$  给出总体支付意愿的上下限<sup>[8]</sup>,并将社会总体分农民和非农民分别予以估算,最后加总社会总体支付意愿,该县在现有社会经济水平下,全社会对保护和治理农业地下水面源污染问题的总体支付意愿为 1005~1215 万元/a。统计结果还发现支付意愿与职业、教育水平和家庭收入等因素极显著相关,为此采用 SPSS 回归分析中变量逐步进入法,进行多元线性回归。经剔除受教育水平因素 ( $P_t = 0.954$ ),建立仅含虚拟变量职业 ( $P = 0.030$ ) 和家庭收入对数 ( $P < 0.001$ ) 的回归模型 ( $P < 0.001$ )。

$$\text{个人 } WTP = -58.4 + 5.5 \times \text{职业} + 7.9 \times \ln \text{家庭收入} \quad (3)$$

理论上对每个人  $WTP$  进行积分得到社会总体  $WTP$ 。根据 2002 年全县农民家庭年平均纯收入 1.2362 万元,非农民家庭年均收入为 1.8828 万元,总人口 48.895 万人,农民人口比例 84.6%,估算出全县社会支付意愿为 1119.5 万元,农业导致的地下水污染环境价值损失约为 1119.5~1215 万元/a,约占 2002 年农业总产值 7.56 亿元的 1.5%,相当于耕地单位面积年增加外部环境成本 383.5 元/hm<sup>2</sup>。

### 3 小结与讨论

本研究所用 3 类 4 种评估方法的结果是依据客观调查数据,尽可能地控制假定基础上的评估结果。其中开采深井水趋避环境损害的方法其市场信息最充分,能客观地反映地下水污染的直接代价。水质净化工程评估法虽较客观,但市场信息尚不够完备。人力资本法适用性在很大程度上决定于流行病学研究的结果,人力资本法利用直接市场信息其结果稳定可靠,主观影响小,客观性强,应用价值较大,是理想的健康损害价值计量工具。在我国还不具备应用隐含价格法的市场条件,现阶段该法仍为必要的方法。影响支付意愿调查法应用于农业环境问题的障碍主要是农民的环境意识、支付能力以及公众对潜伏性环境问题的态度,在环境消费对农民公众尚嫌奢侈的现阶段,他们真实的支付意愿难以准确揭示出来。本研究结果表明农业面源污染问题评估方法适用性依次为防护支出法的深井工程法 > 脱硝工程法 ≥ 人力资本法 > 支付意愿调查法。在进行区域农业面源污染的环境价值损失评估中存在地理边界和行政边界的界定矛盾,鉴于地下水污染是流域内农业长期租用的结果,农业面源污染问题不能简单地以行政边界来划分,而社会经济要素又在相当程度上受制于行政边界,不同方法之间评估必然在评估的起点和区域界定上出现不一致性,故农业面源污染环境价值损失不能简单地归结为某时某地区农业生产的外部性后果。此外农业对地下水面源污染也不仅是硝酸盐污染问题<sup>[9]</sup>,集约化农业中农药危害具有与硝酸盐相类似的特点,这也是当前国内外所非常关注而客观存在的问题,对此尚待进一步研究,以便使农业面源污染问题评估技术更加完善。

### 参 考 文 献

- 1 刘光栋,吴文良. 高产农田土壤硝态氮淋失与地下水污染动态研究. 中国生态农业学报, 2003, 11(1): 91~93
- 2 厉以宁,章 铮. 环境经济学. 北京: 中国计划出版社, 1995. 94~135
- 3 李 季,靳乐山,崔玉亭等. 中国水稻生产的环境成本估算——湖北、湖南案例研究. 生态学报, 2001, 21(9): 1474~1483
- 4 徐嵩龄. 中国环境破坏的经济损失计量——实例与理论研究. 北京: 中国环境科学出版社, 1998. 5~59
- 5 靳乐山. 2000 年北京大气 SO<sub>2</sub> 浓度削减 50% 的健康效益——人力资本法研究. 中国环境科学, 1998, 18(3): 280~283
- 6 范 彬,孟光辉. 饮用水中硝酸盐的脱除. 环境污染治理技术与设备, 2000, 1(3): 44~50
- 7 范 彬,黄 霞. 化学反硝化法脱除地下水中的硝酸盐. 中国给水排水, 2001, 17(11): 27~31
- 8 李 莹,白 墨等. 居民为改善北京市大气环境质量的支付意愿研究. 城市环境与城市生态, 2001, 14(5): 6~8
- 9 吴文良,张新明等. 桓台县麦玉两熟系统化肥投入及土壤养分资源研究. 中国生态农业学报, 2003, 11(2): 67~69
- 10 Gabriel Gulis, Monika Czompolyova, James R. Cerhan. An ecologic study of nitrate in municipal drinking water and cancer incidence in Trnava District, Slovakia. Environmental Research Section A, 2002, 88: 182~187
- 11 William J., Conlon F., Anibal Blandon, et al. Cost comparison of treatment alternatives for the removal of nitrates and DBCP from Southern California groundwater. Desalination, 1995, 103: 100
- 12 Van der hoek J. P. Nitrate removal from ground water. Environmental Technology, 1986. 37~42