

流域非点源污染控制管理措施的成本效益评价与优选

王晓燕¹, 张雅帆¹, 欧洋¹, 段淑怀²

1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 北京市水土保持总站, 北京 100038

摘要: 最佳管理措施是针对非点源污染的控制方案, 相关措施的效果评价和经济效益分析, 是进行政策手段设计和有效性评价的主要依据。针对北京市密云水库上游太师屯镇的农业非点源污染特征, 设计了多种不同最佳管理措施 (BMPs)。在对非点源污染控制措施控制效果的经济价值估算基础上, 综合考察各项措施的费用—效益关系, 对所选择措施的投入—产出中的各种经济因素进行研究, 通过计算出的不同控制措施的费用效益比、内部收益率、投资回收期、经济净现值等经济指标, 对各种控制措施进行对比分析, 从工程经济的角度分析、评价各种控制措施的合理性, 使污染控制方案既满足流域改善环境的目的, 又具有经济上的可行性。研究结果表明: 污染控制措施在经济上都是合理和接受的。经济优劣排序为: 15°~25°坡耕地变果园>河岸植被缓冲带>0°~15°坡耕地保护性耕作>户用沼气池>25°以上荒草坡还林>0°~15°坡耕地等高植物篱; 耕地变为果园和河岸植被缓冲带两项措施, 非常适合于该地区, 前者经济效益显著, 后者环境效益显著, 值得大力推广。

关键词: 非点源污染; 最佳管理措施; 经济评价; 成本-效益分析

中图分类号: S157.1, X196

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2009) 02-0540-09

在农业非点源污染控制中, 对最佳管理措施的成本与效益进行经济分析和评价, 是十分必要的。美国非常重视对工程措施设计标准、效果评价和经济效益分析等方面展开费用效益分析, 从环境效应、经济效应、农民或土地拥有者的可接受程度等方面, 量化流域所实施的 BMPs 的远期效益, 进行政策手段的设计和有效性评价, 反映出这一领域的研究发展趋势^[1-9]。

在我国, 非点源污染对地表水环境的影响日益突出, 有关非点源污染控制管理研究基本上处于引入介绍状态^[10-11], 少见相关管理措施的成本效益评价研究。

本文选定密云水库上游的太师屯镇, 针对研究区农业非点源污染特征所设计的多种不同最佳管理措施(BMPs), 在非点源污染控制措施控制效果的经济价值估算基础上^[12], 综合考察各项措施的费用-效益关系, 从工程经济的角度分析、评价各种控制措施的合理性, 并比较选择最佳方案, 使污染控制方案既满足流域改善环境的目的, 又具有经济上的可行性。

1 研究方法

1.1 研究区域概况

研究区域北京密云县太师屯镇, 位于密云水库上游清水河流域, 为国家级生态乡镇。镇内以绿色农业和第三产业发展为主, 工业所占比例较小。林地约占区域总面积的 45%, 草地与耕地各占 20%左右, 76.9%的耕地主要集中在坡度小于 15°的区域。

本区点源污染较少, 污染以非点源污染为主。畜禽养殖排泄物的所带来的养分流失是该区非点源污染的最主要来源; 而不合理的土地利用及耕作方式所造成土壤侵蚀是非点源污染的重要方面; 而生活垃圾和污水的不合理排放也对非点源污染有一定的贡献。可以采取的非点源污染控制措施有: ①25°以上坡耕地退耕还林, ②25°以上荒草坡还林, ③15°~25°坡耕地变耕地为等高种植的果园, ④0°~15°坡耕地设置等高植物篱, ⑤0°~15°坡耕地部分保护性耕作, ⑥非规模化散养户推广农村户用沼气池, ⑦在河流和水库的敏感地带设置植被保护带, ⑧平衡施肥技术—测土配方施肥^[12]。

1.2 经济评价方法

1.2.1 贴现

由于多数环保项目的实施都要经历几年到几十年的时间, 而同等数量的货币在不同时期其价值是不一样的, 因此必须把时间因素也考虑进来, 从而有可能对发生在不同时间的费用和效益进行对比。为了使不同时期的货币具有可比性, 在项目评估中通常是以一定的方式把发生在未来的费用和效益转换为现值, 即贴现。计算公式如下^[13]:

$$NBt = \sum_{t=0}^n \frac{NB}{(1+r)^t}$$

式中 NBt 代表净收益现值; n 是计算的时间范围, 即项目建设周期; r 是贴现率, 一般项目计算时取社会折现率; t 是时间变量, 由 0 到 n 。

基金项目: 国家自然科学基金项目(40871219); 北京市科技项目(D0704004000092)

作者简介: 王晓燕 (1967 年生), 女, 教授, 博士, 主要从事流域水环境污染研究。E-mail: cnuwxy@sohu.co

收稿日期: 2009-03-11

社会贴现率是指费用效益分析中用来作为基准的资金收益率，是从动态的和国民经济全局的角度评价项目经济效益的重要参数，本文社会贴现率取值 12%。进行贴现计算的原因是因为纯粹的时间偏好，即个人通常偏向于尽快享用效益而稍后承担费用。但对贴现的计算有助于帮助人们在资金不同用途之间进行比较，作出合理选择。

1.2.2 静态评价方法

是指对建设项目进行经济评价的时候，不考虑资金的时间价值。其优点是计算简便，缺点是没有考虑资金投入和回收的时间因素，无法预计整个项目存在其间的投资效果。其主要指标有投资回收期、投资利润率、投资利税率、投资净收益率等。

1.2.3 动态评价方法

动态评价方法考虑了资金的时间因素，因此比较符合资金的运动规律，是评价结果更符合实际，因此使用较多。常用的动态评价指标有以下几种^[13]：

经济效益费用比(BECR)：用项目的效益现值与费用现值之比表示，将效益现值除以费用现值之比，得到经济效益费用比，当经济费用效益比大于 1 或等于 1 的时候，项目在经济上才是合理的。

经济内部收益率：指项目计算期内各年净效益现值累计等于零时的折现率或效益费用比为 1 的折现率。当内部收益率大于或等于社会折现率时，项目在经济上才是合理的，该指标是反映项目获利能力的动态指标，是一个相对指标，其经济含义是项目占用的投资对国民经济或企业的贡献能力。其计算公式如下：

$$\sum_{t=0}^n (C_1 - C_0)_t (1 + EIRR)^{-t} = 0$$

其中：EIRR 为经济内部收益率； C_1 为现金流入量， C_0 为现金流出量； $(C_1 - C_0)_t$ 为第 t 年的净现金流量； n 为计算周期。

经济净现值 (ENPV)：指项目计算期内各年净效益折算到计算期第一年的现值之和，是反映项目对国民经济贡献的动态指标。该指标用社会折现率将项目计算期内各年的净收益折现到项目初期。该指标为绝对指标。其计算公式如下：

$$ENPV = \sum_{t=0}^n (C_1 - C_0)_t (1 + i_s)^{-t}$$

其中：ENPV 是经济净现值； i_s 为社会折现率。

经济净现值大于零时，表示国家为拟建的项目付出代价后，除了得到符合社会折现率的社会盈余外，还可得到超额社会盈余，是被认为可以接受的

项目。

经济净现值率(ENPVR)：经济净现值率是项目净现值与全部投资现值之比，即单位投资现值的净现值，其经济含义是单位投资对国民经济或企业超额净贡献的大小，为相对指标。该指标适合于投资有限制、不可比的情况，投资小的方案更有吸引力。

由于经济分析设计的因素很多，工程的投入和产出也存在很多不确定因素，很多参数和指标都存在一定的误差，因此本文针对各项控制措施的情况分别选择选用不同经济评价指标，以尽力做到合理。

1.3 非点源污染控制措施的费用计算

在计算非点源污染控制措施的成本时，从不同角度考虑，对费用的计算方法不同。退耕还林、果园、荒草坡还林等属于国家推进政策，国家按照核定的退耕地还林面积，在一定期限内无偿向退耕还林者提供适当的粮食补助、种苗造林费和现金（生活费）补助，按照核定的宜林荒山荒地造林面积，补助种苗造林费，这部分补助可以看作该耕地的机会成本，即退耕还林耕地损失所造成的经济损失，计入费用部分。国家提供补助原粮的标准为，黄河流域及北方地区为退耕地每年补助 1 500 kg·hm⁻²。补助原粮的价款按 1.4 元·kg⁻¹ 折价计算，由中央财政拨付到省。退耕地和宜林荒山荒地补助种苗造林费 750 元·hm⁻²；退耕地每年补助现金 300 元·hm⁻²，宜林荒山荒地、荒滩、荒沙造林只一次性补助种苗和造林费。粮食和现金补助的期限，还生态林的至少为 8 a，还经济林的为 5 a，还草的为 2 a^[14]。8 a 内耕地还林国家要付出的成本即补贴的 19 950 元·hm⁻²，这就是此地在 8 a 内的机会成本，平均每年 2 490 元·hm⁻²。同理，荒草坡还林的机会成本与退耕还林相同，种植果园每年的机会成本为 2 550 元·hm⁻²。同时该措施还具有一定的建设费用，水保林投资为 1 450 元·hm⁻²，经济林投资为 6 000 元·hm⁻²。

由地区政府或农民自建的其他环境保护项目，其费用包括两部分，项目的投资建设费用和项目的后期运转、维护费用。因规划的非点源污染控制措施跟国内水土保持工程相似，故采取同样计算方法。根据大量水土保持工程特点，其投资费用共有建筑工程、临时工程、其他工程和预备费用四部分组成，具体计算如下：①建筑工程：如等高植物篱、户用沼气池、植被缓冲带等的初期建设费用，计算方法为将其工程量乘以工程代价即为投资；②临时工程：因工程由农民施工，设备只有工具、仓库等，仅占主费用的 3%；③其它工程：包括建筑管理、规划科研费用等，按建筑费用的 5% 计算；④预备

费用:分基本预备费用和价差预备费用,基本预备费用取10%,价差预备费用取2.5%。以上费用和即为工程的投资费用^[15-16]。

污染控制措施的年运行费及每年投入的维护费用,包括管理、施肥、农药、供水、人工技术、培训等费用,一般要对环境保护各项工程费分别计算年运行。经过调查分析,各项措施的运行费如下:①水保林的运行费用前4a为150元·hm⁻²,以后每年75元·hm⁻²^[14](退耕还林、荒草坡还林、等高植物篱、河岸植被缓冲带可按此费用复算);②经济林与果园在建设期为投资的5%,按300元·hm⁻²计算,试产期300元·hm⁻²,生产期900元·hm⁻²(坡耕地种植果园)^[14];③农村户用沼气池,每3~4a进行一次出渣清池费用分摊及其它直接使用费用约60元·a⁻¹。

非工程性措施费用组成与工程措施不同,费用涉及方面较广,建筑费用并不是他的主要组成部分,而多为人员工作、科技研究费用,很难定量计算且计算复杂,因此对此类措施的费用计算采用不同方法。①保护性耕作的主要支出费用为农机购买和使用费用,密云地区农业多为分散,很少大规模农场或种植户,因此单独购买农机费用较大也不合理,计算时按照河北省中种植农机专业户代替耕作业收取费用,免耕播种作业的收费约为450元·hm⁻²。②测土配方施肥技术,该技术现在处于国家大力推广阶段,北京市主要采取在区县建立测土配方施肥配肥站的方式帮助农户测土配肥,此费用较难统计,且很难分摊到单位土地,因此本文对此措施不再作评价。

1.4 非点源污染控制措施的效益计算

非点源污染控制措施的效益也主要包括两个方面:一为措施实施削减的非点源污染带来的环境效益;另一部分为该措施对地区种植或养殖业产量的影响所带来的经济效益。主要为措施的经济效益计算。

①坡耕地退耕还林、荒草坡还林(水保林)和变耕地为果园(经济林)

此三项措施的费用效益分析从宏观角度分析,国家推行此政策的目的是保持水土,改善环境,因此对其效益计算时环境效益是不可缺少的主要部分,同时伴随有一定的经济效益。水保林的经济收益种植第四年开始收益,收益第一、二年为1125元·hm⁻²,第三年为1500元·hm⁻²。经济林种植第三年开始收益,收益第一年7500元·hm⁻²,第四年15000元·hm⁻²。退耕还林对经济林补贴为五年,计算的平均每年耕地可获得补贴2550元·hm⁻²^[17]。

②等高植物篱

等高植物篱需要定期修剪或者处理,修剪掉的枝条可以作为饲料或生产原料出售,可取得一定经济效益。以河北省曾种植的紫穗槐为例,紫穗槐为一到两年生植物,因此按一完成植物篱建设,则第二年开始就可以得到收益,每1hm²地埂可年产鲜条9000kg,将97年售价0.36元·kg⁻¹折合到2001年计算,地埂紫穗槐就可以收入4720元^[18]。紫穗槐为一到两年生植物,因此按两年完成植物篱建设,即每年要完成总量的50%,且第二年开始就可以得到收益,每1hm²地埂可年产鲜条9000kg,将97年售价0.36元·kg⁻¹折合到2001年计算,地埂紫穗槐就可以收入4720元。不同植物类型经济效益不同。

③保护性耕作

保护性耕作通过改善土壤物理性状,增加土壤肥力,增加土壤有机质含量,可以提高粮食产量13%~16%,按该地区2004年平均小麦4170kg·hm⁻²的产量水平,可增产600kg,按退耕还林标准中1.4元·kg⁻¹的价格,可增收840元·hm⁻²。

④农村户用沼气池

沼气池的经济效益主要集中在沼肥和沼气利用两方面。如沼肥代替化肥减少农业面源污染和沼气发酵残留物代替化学农药可以减少农药污染。一口8m³左右的沼气池,若正常运行使用,年产沼气450600m³,按一个农户每年实际用沼气500~550m³,与液化石油气等价比较,每年可节省燃料费用795~874元^[19]。一年提供的沼肥相当于50kg的硫酸铵,40kg的过磷酸钙和15kg的氯化钾。因此,沼气发酵残留物的应用可以取代部分农药化肥,同时还能提高肥料利用率,增加各种作物的产量,降低耕作成本。在我国北方,已推广12万多户以沼气池、猪舍、厕所、大棚四结合的“北方农村能源生态模式”,使户均年增收都在4000元以上^[21]。沼液用于浸种,提高幼苗抗病、抗虫、抗逆能力,增产5%~15%;用于叶面施肥,杀灭病虫害,增产5%~15%,年可节约农药费100多元^[20]。

⑤河岸植被缓冲带

植被保护带流域河岸植被保护带要求一年内完成,每五年重新种植。现今对其经济效益的开发利用较少,但此效益显著存在,因计算困难,此处忽略不计。

1.5 敏感性分析

在对环境保护项目的经济评价中,由于经济计算所采用的数据大部分来自经验预测或估算,其中必然包括某些不确定的因素和风险,为了使评价结果更符合实际,提高经济评价的可靠性,减少项目实施的风险,需要对其作敏感性分析。

敏感分析就是对项目中的主要参数指标，如成本、数量等变化最敏感的因素进行变化程度的预测分析，通过对可能出现的最理想和最不理想情况下的最高和最低数值，做出多种方案比较，从而确定较切合实际的指标来确定项目投资的效果，减少分析误差，提高分析可靠性。本文在对各项措施的费用效益分析基础上，取措施建设费用增加10%~20%，和建设费用减少10%~20%两种影响，分别对各项污染控制措施进行经济敏感性分析。

2 污染控制措施的经济分析与评价

2.1 改变土地利用方式类措施

改变土地利用方式类措施包括：①25°以上坡耕地退耕还林。②25°以上荒草坡还林。③15°~25°坡耕地变耕地为果园。由于此三项工程都需要较长施工时间，且经济效益回收期晚，要发挥全部效益的时间也较长，结合其他流域水土流失治理有关资料，将流域的非点源污染控制规划期定为十年。假设种植水土保持林五年完成，第一年完成总量的25%，第二年完成20%，第三年完成20%，第四年完成

20%，第五年完成15%。经济林也五年时间完成，第一年完成总量的30%，第二年完成20%，第三年完成20%，第四年及第五年分别完成15%^[21]。根据经济学的有关公式及收集到的工程预算数据，计算该三项措施的费用（投资、年运行费用）、效益（环境效益、经济效益）现值，以2001年为计算的基准年，具体计算过程见表1、表2、表3。

综合分析三项污染控制措施，退耕还林措施的环境效益最好，在较小面积内就可以达到很好的污染控制效果，但从经济上来说是不合理，项目最终经济净现值小于零且亏损较大；坡耕地变果园措施环境效益最小，污染控制效益两侧相对较低，但其内部收益率最大（47%）经济效益最显著，在该区15°~25°坡耕地上若全部改种果园，将得到约1665万元的总效益，得到这种结果是因为果园产生的大量经济效益，与它相比环境效益部分很小，可全部视为超额社会盈余；荒草坡还林措施的环境效益、经济效益、总效益、内部收益率、经济净现值均适中，经济上合理，环境效益也可全部视为超额

表1 退耕还林控制措施费用-效益流程
Table 1 cost-benefit of control measures for returning arable land to forest

万元

年份	费用流程				效益流程		年净效益	累计效益
	建筑费用	其他费用	运行费	补贴	经济效益	环境效益		
2001	22.26	4.56	2.30	38.22	0	2.51	-64.84	
2002	15.90	3.26	3.70	61.42	0	4.03	-80.26	-145.1
2003	14.19	2.91	4.77	79.22	0	5.19	-95.91	-241.01
2004	12.67	2.60	5.57	92.50	41.79	6.06	-65.49	-306.49
2005	8.49	1.74	2.93	97.16	43.90	6.37	-60.05	-366.54
2006	0	0	2.61	86.75	52.26	5.69	-31.42	-397.96
2007	0	0	2.33	77.46	46.66	5.08	-28.05	-426.01
2008	0	0	2.08	69.16	41.66	4.53	-25.05	-451.06
2009	0	0	1.86	0	37.20	4.05	39.38	-411.66
2010	0	0	1.66	0	33.21	3.61	35.16	-376.51
Σ	73.51	15.07	29.82	601.90	296.68	47.1	-376.51	-376.51

表2 坡耕地变果园控制措施费用-效益流程
Table 2 cost-benefit of control measures for returning arable slope land to orchard

万元

年份	费用流程				效益流程		年净效益	累计效益
	建筑费用	其他费用	运行费用	补贴	经济效益	环境效益		
2001	90.36	18.52	4.52	38.22	0	2.51	-149.12	-1 491 182
2002	53.79	11.03	6.72	57.15	0	3.18	-125.50	-274.62
2003	48.02	9.84	8.40	71.43	210.10	3.98	76.37	-198.25
2004	32.1	6.59	9.11	77.45	227.79	4.31	106.79	-91.45
2005	28.71	5.89	9.57	81.35	239.27	4.53	118.28	26.83
2006	0	0	25.64	0	427.27	4.04	405.68	432.51
2007	0	0	22.89	0	381.49	3.61	362.22	794.72
2008	0	0	20.44	0	340.62	3.22	323.41	1 118.13
2009	0	0	18.25	0	304.12	2.88	288.76	1 406.88
2010	0	0	16.29	0	271.54	2.57	257.82	1 664.70
Σ	253.04	51.87	141.83	325.60	2 402.21	34.84	1 664.70	1 664.70

表 3 荒草坡还林控制措施费用-效益流程
Table 3 cost-benefit of control measures for returning barren land to forest

年份	费用流程				效益流程		年净效益	累计效益
	建筑费用	其他费用	运行费用	补贴	经济效益	环境效益		
2001	53.94	11.06	2.30	111.60	0	2.08	-176.82	-176.82
2002	38.53	7.90	8.97	0	0	3.35	-52.05	-228.86
2003	34.40	7.05	11.57	0	0	4.32	-48.7	-277.56
2004	30.71	6.30	13.50	0	101.28	5.04	55.81	-221.76
2005	20.57	4.22	2.93	0	106.36	5.29	83.97	-137.79
2006	0	0	2.61	0	126.65	4.73	128.77	-9.02
2007	0	0	2.33	0	113.08	4.22	114.97	105.95
2008	0	0	2.08	0	100.96	3.77	102.65	208.60
2009	0	0	1.86	0	90.15	3.37	91.65	300.25
2010	0	0	1.66	0	80.49	3.01	81.83	382.09
Σ	178.15	36.52	49.82	111.60	718.99	39.18	382.09	382.09

社会盈余。对该三项措施进行敏感性分析,建设及运行费用在 10%~20%范围内上下浮动,分析结果显示,此三种措施对费用变化较不敏感,小范围的费用浮动对措施的经济合理性影响不大,合理的措施依旧合理。

对比荒草坡还林和退耕还林两项措施,所得的经济效益方式相同,造成两者显著差异的是退耕措施的耕地损失的机会成本。而退耕还林措施与坡耕地变果园措施相比,两者耕地损失的机会成本相似(果园要略低于水保林),费用较大,且其环境效益与还水保林相比有较大差距,但果园作为经济林的巨大经济效益对耕地损失的弥补不可忽略,从农民的角度来说是一个更易于接受的方式。

该三项措施是分布在不同土地类型的不同方法,各有利弊,在实际规划时可三者结合使用,即能达到较好的环境效益也可以取得一定的经济效益,国家和农民也都可得到一定收益,达到双赢的效果。

当然,本文的环境效益中仅计算了污染源控制措施对非点源污染控制效果的经济价值,对水库水质浓度的改善所带来的环境效益部分未作考虑,这部分价值在不同地区及不同时期内数额会有很大变化,作为北京市重要水源地的密云水库,其水质情况直接影响北京地区的供水及饮用水安全,其价值不可小看在特殊时期甚至是无价的。因此,若将此部分计算入内,对退耕还林措施的经济评价可能会有质的改变,其他两项效益也会有较大的增加。

2.2 不改变土地利用方式类措施

2.2.1 0°~15°坡耕地种植等高植物篱经济评价

等高植物篱的费用效益分析中,费用部分包括建筑费用和维护费用两部分,其实际投入一般为 1 500~3 000 元·hm⁻² [22]。结合其他流域水土流失治理有关资料,将流域的非点源污染控制规划期为

10 a。植物篱面积占耕地面积约为 10%~30%计算,取建设费用中间值 2 000 元·hm⁻²,建设面积占耕地 20%计算,则共种植植物篱 7.44 km²,计划 2 a 建成,每年建设 50%。运行费用取水保林运行费用,以环境效益为主,约 42.72 万元·a⁻¹。因植物篱经济效益研究少,数据不足,本文只分析环境效益与费用之间的关系(见表 4)。

表 4 0°~15°坡耕地种植等高植物篱控制措施费用-效益流程

Table 4 cost-benefit of control measures for contour hedgerow on land with slopes 0°~15°

年份	费用流程		效益流程	静效益	累计效益
	建筑费用	运行费用	环境效益		
2001	-74.4	-5.58	21.36	-58.62	-58.62
2002	-66.43	-9.96	38.14	-38.25	-96.87
2003	0	-8.9	34.06	25.16	-71.71
2004	0	-7.94	30.41	22.47	-49.24
2005	0	-3.55	27.15	23.60	-25.64
2006	0	-3.17	24.24	21.07	-4.57
2007	0	-2.82	21.64	18.82	14.25
2008	0	-2.52	19.32	16.80	31.05
2009	0	-2.25	17.25	15.00	46.06
2010	0	-2.01	15.41	13.40	59.45
总计	-140.83	-48.7	248.98	59.45	59.45

可以看出,在 0°~15°坡耕地上种植植物篱十年内所能获得的动态环境效益为 248.98 万元,高于总费用 59.45 万元,即此项措施的动态效益为 59.45 万元,说明在流域建设此项非点源污染控制措施的效益是可观的,若将植物篱所能获得的经济效益也计算入内,则控制措施效益将更加可观,有利于流域居民积极参与到该项控制措施当中。

由于本文对种植面积和价格都选择的是市场均值,而不同植物篱品种或种植技术等,存在很多不确定因素,为了分析这些不确定因素发生变化时,经济分析的可行性,取植物篱的建筑和维护费

用增加 10%~20%的不利影响和费用减少 10%~20%有利因素（即种植价格的变化）的进行计算，分析经济的敏感性影响。计算分析结果见表 5。

表 5 0°~15°坡耕地种植等高植物篱的经济敏感性分析
Table 5 Economic sensitivity of contour hedgerow on land with slopes 0°~15°

方案	费用/万元	效益/万元	效费比	投资回收/年	内部收益率
基本方案	140.83	248.98	1.77	5.03	25%
费用增加 10%	154.91	248.98	1.61	5.88	17%
费用增加 20%	169.00	248.98	1.47	6.59	12%
费用减少 10%	126.75	248.98	1.96	4.6	28%
费用减少 20%	112.66	248.98	2.21	4.02	37%

可以看出，在流域建设等高植物篱的环境效益十分可观，费用效益比均大于 1，在经济上是可行的，投资该措施用于非点源污染控制是有利可图的；投资回收期为 5.04 a，即在流域非点源污染规划期内即可收回治理污染的全部费用，说明用该种措施控制非点源污染的经济回报率是较高的。在不同种植费用下，费用增加 20%的情况时，效益费用比虽大于 1，但经济内部收益率为 12%，与社会折现率持平，这种情况下的方案在经济上是可接受的，但是社会盈余很小。敏感分析可以说明植物篱的建设费用是经济分析中的一个敏感因素，对投资收益和合理性有一定影响，在实际规划应用时要对种植的投资做到合理控制。

2.2.2 0°~15°坡耕地保护性耕作的经济评价

保护性耕作为非工程性措施的费用部分较复杂，其中科技和人员费用较难估计，因此计算时费用部分以为农机购买、使用和折旧费用为主。根据密云地区多为分散农业的特点，参考河北省种植农机专业户代替耕作所收取的费用代替农机购买及相关费用，当年投入当年产出，计算其定为一年。按每亩地免耕播种作业的收费约为 30 元，该区可最保护性耕作耕地面积 37.22 km²，则实行保护性耕作每年要比原本多投入 167.49 万元。同时，该措施每年可获得经济效益按增收 840 元·hm⁻²计算，可增收 312.65 万元，费效比为 1.87。仅增加的经济收益就比未实行前多出 145.16 万元，约增加农民收入 6.7%，此外该措施还可以减少农民作业程序，减少人力投入。因费效比较高，敏感性分析中费用水平在一定范围内（10%~20%）上下浮动，不会对该措施的经济合理性造成大的影响。这样，由于减少非点源污染而取得的 48.54 万元的环境效益，可全部视为超额社会盈余。可看出，推广保护性耕作为农民节本增收方面，以及控制污染、保护环境方面，效益丰厚、值得大力推广。

2.2.3 农村户用沼气池的经济评价

若村庄统一规划，建设池容为 6~10 m³的水压式沼气池，建池成本约 1 500~2 000 元。为保证沼气池的正常使用和人畜粪便能够方便地全部进入沼气池，可建设沼气池、猪圈、厕所“三位一体”配套设施，建设成本约 2 500~4 000 元^[23]。取中间价为 3 000 元，则其他临时工程、其他工程、预备费用 615 元，每个总工程费用 3 615 元。该区共规划建设沼气池 328 个，则按一年建成，4 a 的清理周期为规划计算周期，对农村户用沼气池进行经济计算结果见表 6。

表 6 农村户用沼气池的费用-效益流程
Table 6 cost-benefit of Marsh gas tank for rural household

经济指标	2001	2002	2003	2004	总计
建筑费用/万元	-118.57	0	0	0	-118.57
运行费用/万元	-1.97	-1.76	-1.58	-1.40	-6.69
经济收益/万元	36.53	32.61	29.12	26.0	124.26
年净累计/万元（不计环境效益）	-83.81	30.86	27.55	24.6	-0.81
经济内部收益率				11%	
效益费用比				0.99	
环境收益/万元	39.63	35.38	31.59	28.21	134.81
年净累计/万元（计入环境效益）	-44.18	66.24	59.14	52.81	134.00
经济内部收益率				93%	
效益费用比				2.07	

从计算结果中可看出，沼气池在建设的第四年其所能收到的经济效益与付出成本基本持平，即“三位一体”的沼气池成本回收期约为 4 a。在以后的使用过程中，仅需要付出一定的运行和折旧费用，而这部分费用与建设费用相比很小，与每年所能获得的经济效益比也不大，因此可认为此措施对农民本身来说也是利大于弊，经济上合理可接受的。若从宏观角度考虑，将环境效益在计算入内，则四年内该措施共可获得总效益约合人民币 134 万元，对非点源污染控制的效益非常可观，几乎可全部认为是该建设项目的超额社会效益。

对其进行敏感性分析（表 7）发现，若将环境效益全部计算入内，则建设费用在一定范围内的浮动对建设项目的合理性影响不大。费效比均大于 1，且数值较大，计算其经济净现值最低 97 万元，因此该措施效益显著，值得大力推广。

表 7 农村户用沼气池的经济敏感性分析
Table 7 Economic sensitivity of Marsh gas tank for rural household

方案	不计入环境效益			计入环境效益		
	费用 /万元	效益 /万元	效费 比	费用 /万元	效益 /万元	费效比
基本方案	125.27	124.26	0.99	125.27	259.07	2.07
费用增加 10%	137.79	124.26	0.90	137.79	259.07	1.88
费用增加 20%	150.32	124.26	0.83	150.32	259.07	1.72
费用减少 10%	112.74	124.26	1.10	112.74	259.07	2.30
费用减少 20%	100.21	124.26	1.24	100.21	259.07	2.59

2.2.4 河岸植被缓冲带的经济评价

假设设置在河岸的缓冲带可均匀拦截该流域输出的所有非点源污染物,其拦截效率不随时间的改变而改变,且所有缓冲带建设可在 1 a 内完成。植被保护袋的使用期限一般为 5 a,即每 5 a 重新种植,因此对其进行经济分析的周期也为 5 a。太师屯境内河岸线长 128 km、水库堤岸长 13 km,河岸双侧建设,水库单侧建设,缓冲林带的营造一般采用工程造林,工程造价约为:3 500~9 000 元·hm⁻² (包括建筑费用和其他临时工程费用),计算时按 5 000 元·hm⁻²,管理运行费用按水保林计算,则不同建设宽度的情况下(25 m、50 m)该措施的费用效益流程(见表 8)如下:

从对河岸植被缓冲带的费用-效益流程计算可以看出,在 25 m 的建设宽度情况下,不管是效费比、内部收益率还是经济净现值,都是经济合理且有较大盈利的,对其作敏感性分析(费用在 10%~20%范围内波动),分析结果在经济合理范围内,对措施的合理性无较大影响。但在同样污染控制效果下建设宽度若为 50 m 的时候,项目在经济上是不合理的。这就提醒我们,在污染控制措施项目规划和建设的时候不能单从环境保护方面考虑,而是要综合分析污染控制效果与付出的成本之间的关系,做出合理的决定。当然,要分析控制效果和成本之间的对应关系,需要通过更详细的试验和长时间的监测,才能得到准确的结果,本文的估算过于粗略。同时,在本文的效益估算中,未统计该措施对降低水库水质浓度的环境效益,而这部分效益也是相当可观的,若将其计算入内,结果可能会有较大的改变。

3 流域非点源污染控制方案比较

综合对比分析选择的多项控制措施,从经济

上和技术上综合分析方案的可行性,选择最优的非点源控制方法及组合,以期在经济效益最优的情况下,使污染物的削减最优。其中技术因素包括对非点源污染物的去除效率(总氮、总磷、泥沙);经济因素包括非点源控制措施的经济效益、效益费用比、投资回收期、内部收益率、资金限制等。见表 9。

综合分析 7 种非点源污染控制措施,除了 0°~15°坡耕地等高植物篱和 0°~15°坡耕地保护性耕作两方案为互斥方案外,其余均为适用于不同地区的独立方案。

其中前 3 种改变土地利用方案均所需投资较大,建设时间和投资回收期较长,而其环境收益在短时间内并不十分显著,尤其是退耕还林措施,风险很大。但从长远的角度来看,它们又是控制非点源污染的重要措施,因此在水土流失不是很严重的地区可逐步开展应用于长期环境保护规划。其中坡耕地变果园在经济上最优,但其环境保护效果明显不如其余两种方式显著,退耕还林措施经济上不合理,但污染控制效果明显好于其他地区,因此建议 3 种方式结合使用,以达到环境与经济双赢的效果。

等高植物篱和保护性耕作均为适用于 0°~15°坡耕地的控制方案,两方案均为经济合理。与保护性耕作相比,等高植物篱建设期和回收期均较长,经济效益部分不明确,费用效益比不如保护性耕作,单从经济上来说保护性耕作优于等高植物篱。但对比两者在相同投资情况下的环境效益,可发现,等高植物篱在相同投资下的环境效益要显著高于保护性耕作,但年平均环境效益又低于保护性耕作,因此在实际规划中的不同时期,两方案可选择性使用。在长期的环境保护规划中,较大范围的推

表 8 河岸植被缓冲带的费用-效益流程
Table 8 cost-benefit of Riparian vegetation buffer

							万元
方案		2001	2002	2003	2004	2005	总计
缓冲带宽度 25 m	建设费用/万元	336.25	0	0	0	0	336.25
	运行费用/万元	10.09	9.01	8.04	7.18	6.41	40.73
	环境效益/万元	168.92	150.82	134.66	120.23	107.35	681.99
	年累计/万元	-177.42	141.81	126.62	113.05	100.94	305.01
	内部收益率	81%					
	经济净现值/万元	272.33					
缓冲带宽度 50 m	效费比	1.81					
	建设费用/万元	672.50	0	0	0	0	672.50
	运行费用/万元	20.18	18.01	16.08	14.36	12.82	81.45
	环境效益/万元	168.92	150.82	134.66	120.23	107.35	681.99
	年累计/万元	-523.76	132.81	118.56	105.87	94.53	-53.87
	内部收益率	5%					
	经济净现值/万元	-62.25					
	效费比	0.90					

表 9 非点源污染控制措施对比
Table 9 Comparison of various control measures for nonpoint source pollution control

控制方案	总费用/万元	环境效益/万元	经济效益/万元	回收期/a	效费比	内部收益率
25°以上坡耕地还林	720.3	47.1	296.68	>10	0.48	无法计算
15°~25°坡耕地变果园	772.35	34.84	2 402.21	4.24	3.16	47%
25°以上荒草坡还林	376.09	39.18	718.99	5.33	2.02	32%
0°~15°坡耕地等高植物篱	189.53	248.98	—	5.03	1.77	25%
0°~15°坡耕地保护性耕作	167.49	48.54	312.65	<1	2.16	—
户用沼气池	125.26	134.81	124.26	1.67	2.07	93%
河岸植被缓冲带	376.98	681.99	—	1.81	2.28	81%

广等高植物篱技术，可以用较少资金达到较高的环境保护效果。但若想在短期内急需减少污染，则保护性耕作是更合适的方法。

农村户用沼气池和河岸植被缓冲带均为回收期较短，效益费用比较高，经济上较优的控制措施。其中户用沼气池的投资、环境收益与经济收益相当，长期使用不需要再投入很大的费用，而环境和经济效益不会有所削减，适合于长时间的污染控制。而河岸植被缓冲带建设投资较大，适用期为 5 a，之后需要重新投资，总体来说所需费用较大，但其环境效益非常显著，将近投资的两倍，且对整个流域的非点源污染都能达到较好的控制效果，在急需控制污染的和污染源分散不易识别的地区非常适用，可以取得很好的经济效益。

4 结论

(1) 运用经济学原理对流域的各种非点源污染控制措施进行费用-效益分析，通过计算出的不同控制措施的费用效益比、内部收益率、投资回收期、经济净现值等经济指标对措施进行对比分析，为污染控制规划时方案的优选提供依据。

(2) 污染控制措施在经济上都是合理和接受的。经济优劣排序为：15°~25°坡耕地变果园 > 河岸植被缓冲带 > 0°~15°坡耕地保护性耕作 > 户用沼气池 > 25°以上荒草坡还林 > 0°~15°坡耕地等高植物篱；耕地变为果园和河岸植被缓冲带两项措施，非常适合于该地区，前者经济效益显著，后者环境效益都显著，值得大力推广。其余措施均在经济上合理，其中河岸植被缓冲带经济上最优，环境效益也最显著，但其外投资也相对较大。在措施选择的时候可根据不同污染控制需求、投资限制和技术可行性等方面，选择不同措施或多种措施结合使用，以达到环境与经济双赢效果。

(3) 单项措施中改变土地利用方式的投资较大，环境效益的较好效果需要很长时间才能显现，经济效益有很大差异，尤其是退耕还林措施，风险比较大。但作为从最根本上控制水土流失的措施，十分重要，因此需要与其他措施结合使用

效果更好。

参考文献：

- [1] 王晓燕. 非点源污染及其管理[M]. 北京：海洋出版社，2003：130-131.
WANG Xiaoyan. Non-Point Source Pollution And Its Management[M]. Beijing: Ocean Press, 2003: 130-131.
- [2] SUN Henglun, HOUSTON J, BERGSTORM J. 加姆河流域水质最佳管理措施的效益分析[J]. 水土保持科技情报, 1998(1): 13-16.
- [3] DUKES M D, RITTER W F. Modeling BMPs to optimize municipal wastewater land treatment system[J]. Journal of Environmental Engineering, 1998, (12): 1178-1187.
- [4] SRIWASTAVA P, HANLETT J M, ROBILLARD P D. Water optimization of best management practices using AnnAGNPS and a genetic algorithm[J]. Water Resources Research, 2002, 38(3): 1029-2001.
- [5] NOVOTNY V. Water Quality: Diffuse Pollution And Watershed Management (second edition)[M]. New York: John Wiley & Sons, 2003, 264.
- [6] BRACMORT K S, ENGLE B A, FRANKENBERGER J R. Evaluation of Structural best management practices 20 years after installation: Black Creek Watershed, Indiana[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, (5): 191-1961.
- [7] DROLIC J, ZAGORC K. Estimation of sources of total phosphorus in a river basin and assessment if alternatives for river pollution reduction [J]. Environment International, 2002, 28: 393-400.
- [8] HSIEH, C D, YANG, W F. Optimal nonpoint source pollution control strategies for a reservoir watershed in Taiwan[J]. Journal of Environmental Management, 2007, 85(4): 908-917.
- [9] TUROIN N, BONTEMS P, ROTILLON G, et al. AgriBMPWater: systems approach to environmentally acceptable farming[J]. Environmental Modelling & Software, 2005, 20: 187-196.
- [10] 章明奎, 李建国. 农业非点源污染控制的佳管理实践[J]. 浙江农业学报, 2005, 17(5): 244-250.
ZHANG Mingkui, LI Jianguo. Best management practices for controlling agricultural non-point pollution[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2005, 17(5): 244-250.
- [11] 韩秀娣. 最佳管理措施在非点源污染防治中的应用[J]. 上海环境科学, 2000, 19(3): 102-104, 128.
HAN Xiudi. Application of optimal management practice to NPSP control[J]. Shanghai Environmental Sciences, 2000, 19(3): 102-104, 128.
- [12] 王晓燕, 张雅帆, 欧洋, 等. 最佳管理措施对非点源污染控制效果的预测——以北京密云县太师屯镇为例[J]. 环境科学学报, 2009, 29(12). (已接收).

- WANG Xiaoyan, ZHANG Yafan, OU Yang, et al. Predicting effectiveness of Best Management Practices for control of nonpoint source pollution—a case of Taishitun Town, Miyun County, Beijing[J]. *Journal of environmental Science*, 2009, 29(12). (Accepted).
- [13] 姚建. 环境经济学[M]. 成都: 西南财经大学出版社, 2001, 55-70.
- YAO Jian. *Environmental Economy*[M]. Chengdu: Press of Southwestern university of Finance and Economics, 2001, 55-70.
- [14] 杨旭东, 李敏, 杨晓勤. 试论退耕还林的经济理论基础[J]. 北京林业大学学报: 社会科学版, 2002, 1(4): 19-22.
- YANG Xudong, LI Min, YANG Xiaoqin. An Analysis of the economics foundation of the “Grain for Green” program [J]. *Journal of Beijing Forestry University: Social Sciences*, 2002, 1(4): 19-22.
- [15] 张鸿茂. 系统工程在水利水电工程中的应用(上册)[R]. 河北省水利学会, 1984.
- ZHANG Hongmao. Application of system engineering on hydraulic and hydro-power engineering (vol 1)[R]. The society of water conservancy of Hebei Province, 1984.
- [16] 国家计划委员会. 建设项目经济评价方法与参数[M]. 北京: 中国计划出版社, 1987: 20-50.
- State Planning Commission. Method and parameters of economic evaluation on construction projects[M]. Beijing: Chinese Planning Press, 1987: 20-50.
- [17] 施熙灿, 蒋水心, 赵宝璋. 水利工程经济[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997: 32-44.
- SHI Xican, JIANG Shuixin, ZHAO Baozhang. *Hydraulic Engineering Economy*[M]. Beijing: China water power Press, 1997, 32-44.
- [18] 周兴魁, 孙国亮, 蔡强国. 黄土丘陵区的地埂植物篱—紫穗槐[J]. 山西水土保持科技, 1997, 25(2): 32-35.
- ZHOU Xinkui, SUN Guoliang, CAI Qiangguo. *Amorpha fruticosa—the terrace hedgerows in the hilly loess regions*[J]. *Soil and Water Conservation Science and Technology in Shanxi*, 1997, 25(2): 32-35.
- [19] 臧峥峥, 孔凡标, 徐宗进. 农村户用沼气池效益分析[J]. 安徽农学通报, 2007, 13(11): 184.
- ZANG Zhengzheng, KONG Fanbiao, XU Zongjin. Analysis on the benefits of Methane-generating pit for farm household[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2007, 13(11): 184.
- [20] 蒙照民. 农村发展沼气池经济性分析[J]. 可再生能源, 2003, 4: 43-44.
- MENG Zhaomin. Economic Analysis on Rural Methane-generating Pit Development[J]. *Renewable Energy*, 2003, 4: 43-44.
- [21] 毛战坡. 黑河流域非点源污染控制规划研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2000.
- MAO Zhanpo. Planning on nonpoint source pollution control in Heihe river[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2000.
- [22] 蔡强国, 卜崇峰. 植物篱复合农林业技术措施效益分析, 资源科学: 增刊, 2004, 26: 7-15.
- CAI Qiangguo, BO Congfeng. Benefit of Hedgerow Agro-Forestry Technical Measure[J]. *Resources Science(S1)*, 2004, 26: 7-15.
- [23] 周弘弘, 张敏新. 防治农业面源污染的工程技术[J]. 环境与可持续发展, 2007, (6): 55-57.
- ZHOU Zaohong, ZHANG Minxin. Engineering technology of prevention and control for agricultural non-point source pollution[J]. *Environment and Sustainable Development*, 2007, (6): 55-57.

Optimization and economic evaluation on cost-benefit of Best Management Practices in nonpoint source pollution control

WANG Xiaoyan¹, ZHANG Yafan¹, OU Yang¹, DUAN Shuhuai²

1. College of Resources, Environment & Tourism, Capital Normal University, Beijing 10004, China;

2. Water soil conservation station of Beijing, Beijing 100038, China

Abstract: Best management practices (BMPs) are integrated approaches to prevent non-point source pollution by engineering and management practices. They are widely applied in agricultural nonpoint source pollution controls for their efficiencies, economic and environmental benefits. Policy design and efficiency evaluation refer on cost-benefit analysis of Best Management Practices in non-point source pollution control. Taishitun town, locates at upper watershed of Miyun reservoir, Beijing, was selected to evaluate the environmental benefit and economic benefit of several BMPs by using the methodology of environmental economics. Based on the economic value evaluation on effectiveness of Best Management Practices for control of nonpoint source pollution, the cost-benefit relation and various economic factors in input and output of various BMPs have been investigated by calculating the ratio of cost-benefit, internal rate of return, payback period and economic net present value. The results are as follows: All the practices are economic feasible and acceptable with exception of returning farmland to forest, the order of practices by the economic assessment from high to low is: returning farmland to orchard on land with slopes 15°~25°, riparian vegetable buffers, conservational cultivation on land with slopes 0°~15°, marsh gas tank for rural household, returning grassland to forest on land with slopes 25° or greater, and returning farmland to contour hedgerow on land with slopes 0°~15°. Especially the practice of farmland to orchard has more economic benefit whereas riparian vegetable buffers has more environmental benefit, both are very suitable for this area and worthy of extension and promotion.

Key words: non-point source pollution; Best management practices; economic evaluation; cost-benefit analysis