

王晓燕, 张雅帆, 欧洋, 等. 2009 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, 29(11): 2440–2450

Wang X Y, Zhang Y F, Ou Y, *et al*. 2009 Predicting effectiveness of best management practices for control of nonpoint source pollution—a case of Taishitun Town, Miyun County, Beijing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 29(11): 2440–2450

# 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

王晓燕<sup>1\*</sup>, 张雅帆<sup>1</sup>, 欧洋<sup>1</sup>, 阎育梅<sup>2</sup>

1 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048  
2 北京市环境影响评价评估中心, 北京 100089

收稿日期: 2009-02-18      修回日期: 2009-05-14      录用日期: 2009-08-11

**摘要:** 选取北京市密云水库上游太师屯镇为研究区, 针对该区农业非点源污染特征, 设计了最佳管理措施 (BMPs). 同时, 在非点源污染损失估算的基础上, 率先尝试从经济学角度预测 8 种不同非点源污染措施在控制氮、磷和泥沙流失的效果及所获得的环境效益、经济效益, 并将各单项措施的控制效率进行了比较分析. 研究结果表明: 改变土地利用类型的 3 种措施中, 25° 以上荒草坡还林措施效果最好, 对总氮、总磷、泥沙流失的控制效果都超过 15%, 最高可达 30% 以上, 且经济效益最大; 25° 以上坡耕地还林效果次之, 对总氮、总磷、泥沙流失的控制效果都超过 5%, 最高可达 12%; 15° ~ 25° 坡耕地变果园措施最差, 对总氮、总磷、泥沙流失的控制效果一般为 4% ~ 8%. 坡度为 0° ~ 15° 坡耕地在土壤侵蚀控制中具有重要地位; 坡耕地植物篱和保护性耕作对土壤侵蚀类非点源污染的控制效果相近, 削减的污染损失占非点源污染损失总价值的 13%, 具有明显的环境效益. 针对畜禽养殖污染设计的农村户用沼气池, 其经济效率在 10% 左右; 测土施肥技术可减少氮素流失、节约大量化肥, 且削减的污染损失达到非点源污染损失总价值的 19%. 作为综合污染控制措施的河岸缓冲带, 可以有效地拦截氮、磷和泥沙的流失, 对泥沙的控制效果最好, 为 83%, 对氮的控制效果最低, 仅为 27%; 而从经济效益方面比较, 缓冲带减少氮素流失所获得的经济效益最大, 约为该措施总经济效益的 56%, 泥沙次之, 占 28%; 植被缓冲带削减非点源污染的总经济效率最高, 可达 35%, 折合经济价值约 1.69 × 10<sup>6</sup> 元.

**关键词:** 非点源污染; 最佳管理措施; 效果预测; 经济价值评估

文章编号: 0253-2468 (2009) 11-2440-11      中图分类号: X196      文献标识码: A

# Predicting effectiveness of best management practices for control of nonpoint source pollution— a case of Taishitun Town, Miyun County, Beijing

WANG Xiaoyan<sup>1\*</sup>, ZHANG Yafan<sup>1</sup>, OU Yang<sup>1</sup>, YAN Yumei<sup>2</sup>

1 College of Resources Environment & Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048  
2 Environmental Impact Assessment Center of Beijing, Beijing 100089

**Received** 18 February 2009;      **received in revised form** 14 May 2009;      **accepted** 11 August 2009

**Abstract** Best management practices (BMPs) are integrated approaches to prevent non-point source pollution by engineering and management practices. They are widely applied for agricultural nonpoint source pollution control because of their efficiency, economy and environmental benefits. Taishitun town located in the upper watershed of the Miyun reservoir, Beijing, was selected to study and predict the effectiveness of pollution control and to assess the environmental and economic benefits of several BMPs by using the methodology of environmental economics. After comparison of the efficiencies of various BMPs, the conclusions are as follows: ① Among three practices to change land use, returning grassland to forest on slopes 25° or greater has the best control effect on nitrogen, phosphorus and sediment, providing 15% ~ 30% reduction and the highest economic benefit. Returning farmland on slopes 25° or greater to forest has the second best control effect on nitrogen, phosphorus and sediment loads. Returning farmland on slopes 15° ~ 25° to orchard has the lowest reduction, ranging from 4% to 8%. Lands with slopes 0° ~ 15° have the key role in soil erosion control. There are notable environmental benefits of using hedgerows on sloping land and conservation cultivation. These practices reduce up to 13% of the total nonpoint source pollution. ② Marsh gas tanks for rural households have general economic efficiency that can reduce around 10% of nonpoint source pollution. Balanced fertilizer

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 40871219); 北京市科技项目 (No. D0704004000092)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 40871219) and the Science and Technology Project of Beijing (No. D0704004000092)

作者简介: 王晓燕 (1967—), 女, 教授 (博士); \* 通讯作者 (责任作者), E-mail: cnuwxy@sohu.com

Biography: WANG Xiaoyan (1967—), female professor (Ph.D.); \* Corresponding author, E-mail: cnuwxy@sohu.com

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

application technology can reduce the loss of nitrogen and save fertilizer, reducing the total loss up to 19%. Riparian vegetation buffers are an integrated pollution control practice which can decrease the load of sediment by 83% and that of nitrogen by 27%. The economic values of the decreased nitrogen and sediment losses are up to 56% and 28% of the total. Implementing riparian vegetation buffers is the most effective BMP with an economic efficiency of 35% of nonpoint source pollution control and its equivalent economic value amounts to 1.69 million RMB.

**Keywords** non-point source pollution; best management practices; effectiveness prediction; economic value assessment

### 1 引言 (Introduction)

在非点源污染的管理和控制方面, 美国提出的“最佳管理措施 (BMPs)”最具代表性. 它始于 20 世纪 70 年代后期, 以合理利用土地为基础, 通过技术、规章和立法等手段, 有效减轻非点源污染. BMPs 分为工程措施和管理措施, 管理措施主要针对污染源的控制, 从源头上控制污染物进入水体; 而工程性措施多从污染物迁移转化的途径入手, 改变或切断污染源的传播途径. 由于经济合算、简单、科学、高效以及符合生态原则, 最佳管理措施在非点源污染的控制中日益受到重视, 应用范围日益广泛. 美国环保局、农业部水土保持局及各州政府相应机构都有相应的“最佳管理措施”实施细则和办法 (王晓燕, 2003). 目前, 美国农业部提倡运用非生物工程、生物工程措施削减非点源污染, 以量化非点源污染为基础, 结合微观经济学方法, 在工程措施设计标准、效果评价和经济效益分析方面展开费用效益分析, 进行政策手段的设计和有效性评价. 一些学者应用计算机模型预测实施 BMPs 对农民纯收入及环境的影响, 量化流域所实施的 BMPs 的远期效益 (Dukes *et al.*, 1998; Sriwastava *et al.*, 2002; Drolic *et al.*, 2002; Braemort *et al.*, 2004; Hsieh *et al.*, 2007). 欧洲科学家提出了 AgriBMPW ater 工程体系, 对已存在的或设计的 BMP 进行比较分析, 从环境效应、经济效应和社会、农民或土地拥有者的可接受程度等 3 方面综合评价农业非点源污染管理措施, 并对法国西部的 Don 流域进行了示范性研究 (Turoin *et al.*, 2005). 目前, 对 BMPs 实施有效性的评价和模拟, 在实践基础上对 BMPs 进行丰富和修订, 估算 BMPs 措施提供的额外生态效益和经济效益等方面的研究, 已逐渐得到了欧美等国的重视, 成为今后研究发展的趋势.

益等方面的研究, 已逐渐得到了欧美等国的重视, 成为今后研究发展的趋势.

在我国, 非点源污染对地表水环境的影响日益突出, 而相关研究主要集中在污染负荷模拟估算等方面, 有关非点源污染控制管理的最佳管理措施评价方面仅为综述性介绍 (韩秀娣, 2000; 章明奎等, 2005); 虽有针对流域水土流失的环境价值损失估算 (李云辉, 2002; 杨志新等, 2004; 吴开亚等, 2006) 以及单项措施的经济评价 (陈治谏等, 2003) 等方面的研究, 但少见最佳管理措施对流域非点源污染控制效益评价的具体实证研究.

因此, 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, 设计了最佳管理措施 (BMPs), 尝试运用环境经济学方法进行污染控制效果的经济效益评价, 从流域的生态效益和经济效益的整体目标出发, 为非点源污染的治理和控制措施的可行性评价提供科学依据.

### 2 研究方法 (Research method)

#### 2.1 研究区域

研究区北京密云县太师屯镇, 西临密云水库东岸, 镇域辖 34 个行政村, 含 108 个自然村, 总面积 202.5 km<sup>2</sup>. 据第 5 次人口普查数据, 全镇人口约 32937 人, 镇内以绿色农业和第三产业发展为主, 工业所占比例较小. 利用 ArcGIS 9.2 软件, 结合北京市行政区划图和密云县土地利用图, 对太师屯镇土地利用情况进行统计 (见表 1), 研究区林地 (包括果园) 面积约占总面积的 47%, 耕地占 24% 左右, 其中 76.9% 的耕地主要集中在坡度小于 15° 的区域; 草地占 21% 左右.

表 1 研究区不同坡度耕地、草地和林地面积  
Table 1 Areas of various landuse types on different slopes

| 土地<br>类型 | 坡度 0° ~ 15°         |       | 坡度 15° ~ 25°        |       | 坡度 > 25°            |       | 总面积 /km <sup>2</sup> |
|----------|---------------------|-------|---------------------|-------|---------------------|-------|----------------------|
|          | 面积 /km <sup>2</sup> | 比例    | 面积 /km <sup>2</sup> | 比例    | 面积 /km <sup>2</sup> | 比例    |                      |
| 耕地       | 37.22               | 76.9% | 5.02                | 10.4% | 6.14                | 12.7% | 48.38                |
| 草地       | 14.24               | 34.2% | 12.53               | 30.1% | 14.88               | 35.7% | 41.65                |
| 林地       | 22.62               | 23.4% | 28.19               | 29.2% | 45.86               | 47.4% | 96.67                |

## 2.2 非点源污染控制措施的选择

已有研究表明,密云水库流域污染以非点源污染为主,畜禽养殖是该区非点源污染的最主要来源.由于养殖废物没有得到有效处理,污染物随径流进入地表水体或通过土壤下渗影响地下水,最终对水库水质造成很大威胁(王晓燕等, 2002).因此,可对非规模化散养户推广农村户用沼气池,减少畜禽养殖污染.

土壤侵蚀是本区非点源污染的一个重要来源,其中包括养分流失、表土损失、泥沙淤积等方面.本区坡度大于 15°的坡耕地占耕地总面积的 23%,坡度大于 25°的草地约占草地总面积的 35.7%.由于该地区的降雨特征及当地土壤侵蚀状况,有必要改变坡耕地、荒草坡地的利用方式,从污染的源头进行控制,可以采取陡坡退耕还林、变耕地为等高种植的果园、荒草坡还林,缓坡设置等高植物篱,实施保护性耕作等措施.退耕还林有国家政策保护,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(杨旭东等, 2002).另外,密云县坡面小区监测结果表明,水土保持控制措施保水、保土、保肥效益明显,梯田与坡耕地相比,总氮流失量减少了 60.98%,总磷流失量减少了 85.29%(蔡新广, 2004;路炳军等, 2007).

流域内大量的农业活动及农村生活对该区的非点源污染有着重要贡献(Wang et al., 2001).近年来,京郊农田及菜田化学氮肥用量过大,有的地块全年用氮量超过作物需氮量的 50%~200%,造成地下水及地表水污染(宋秀杰等, 2007).研究表明,本区坡度在 0°~15°之间的坡耕地,养分流失主要来源施用的肥料,随着坡度的增加,肥料流失的比例逐渐增大(黄生斌等, 2007).因此,有必要通过调整流域的居民农业种植习惯,控制农村生活废弃物的随意排放,达到控制流域非点源污染的目的.

密云水库是北京市唯一的地表饮用水源,在河流和水库的敏感地带设置植被保护带,可起到拦截泥沙、总磷、总氮的目的.河岸缓冲带在减少耕地土壤侵蚀方面有很大的作用,它可增加地面的粗糙度,减少地表水流动速率,促进泥沙和营养物质的沉积,导致其在土壤地下水的富集,从而有利于反

硝化反应的发生,使硝酸盐被转化为氮气去除.在植物生长期,氮能够被植物所吸收,该项措施对区域内畜禽养殖及农村生活带来的非点源污染也有一定的控制效果.河岸植被保护带并非针对单一的污染源或土地利用类型,是对整个流域的污染进行最后的综合污染控制措施.

因此,结合研究区实际情况,针对不同污染源、污染途径、类型制定以下 8 项非点源污染控制措施: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采用平衡施肥技术,测土配方施肥.其中,第 1、2、3、4、6、7 种控制措施属于工程性措施,第 5、8 种属于非工程性措施.这 8 项措施即可单独使用也可结合使用,也可根据污染控制目的进行组合,以达到最好的结果.

## 2.3 非点源污染控制措施效果预测方法

流域非点源污染控制措施的经济评估是在流域非点源污染负荷估算的基础上,对规划的污染控制管理措施实施后的控制效果进行预测,并在此基础上,利用环境经济学方法,以币值的形式来衡量非点源控制措施的污染控制效果.

首先需要估算流域的非点源污染负荷.本文选择输出系数法模型(Johnes, 1996)对流域非点源负荷进行估算.输出系数法利用相对容易得到的土地利用状况等资料,直接建立土地利用与接纳水体非点源污染负荷的关系,在很大程度上避免了过多考虑非点源污染产生和迁移过程,适用于流域为单元的长期年均负荷估算.

$$L = \sum_{i=1}^n E_i [A_i (I_i)] + p \quad (1)$$

式中, $L$ 为污染物流失量(t); $E_i$ 是流域内不同土地利用类型的污染物输出系数( $\text{kg} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ); $A_i$ 为第  $i$  类土地利用类型面积( $\text{km}^2$ )或第  $i$  种牲畜数量、人口数量(头或人); $I_i$ 为单位面积或人、畜的第  $i$  种污染源污染物输入量( $\text{kg}$ ); $p$ 为降雨输入的污染物流量( $\text{kg}$ ).根据本区已有的研究结果,采用不同土地利用类型输出系数分类及取值(Wang et al., 2003);畜禽粪尿输出系数主要参考《全国饮用水水源地环境保护规划》技术培训讲义\*和王方浩等(2006)的

\*《全国饮用水水源地环境保护规划》技术培训讲义,中国环境科学研究院,2006年6月

全国畜禽粪尿输出系数进行确定; 农村人均生活污染物排放量及输出系数参考本区已发表的结果(郑玉涛等, 2008), 再根据各农村人口数、人均用水量及人均产污系数, 以排放量的 30% 造成流失进行测算。

其次是估算流域非点源污染损失。针对不同类型的非点源污染损失, 采用不同的环境价值损失计量方法。如耕作管理措施的经济损失, 可通过农业生产成本的变化或单位面积农作物产量的变化来计算。

土壤侵蚀造成的泥沙淤积所引起的环境损失用影子工程法计算(杨志新等, 2004)。

$$D_s = Z_s P_s / \rho_s \quad (2)$$

式中,  $D_s$  为土壤侵蚀造成的泥沙淤积所引起的环境损失(元);  $Z_s$  为研究区年度土壤侵蚀中泥沙流失总量(t);  $P_s$  为拦截泥沙工程的投资费用(元·m<sup>-3</sup>), 目前每 m<sup>3</sup> 库容造价为 100 元;  $\rho_s$  为泥沙容重(密度), 取值为 1.28 t·m<sup>-3</sup>。

因土地废弃而失去的年度经济损失价值采用机会成本法计算, 这里的土地废弃价值指因全部耕层丧失而废弃和因耕层变薄更加贫瘠而废弃两种情况。因此, 以土壤流失总体积按平均耕层厚度折算成土地面积来计算(周冰冰等, 2000)。

$$D_d = Z B / (0.3 \times 10000 \times \rho) \quad (3)$$

式中,  $D_d$  为土壤废弃的经济损失价值(元·a<sup>-1</sup>);  $Z$  为研究区年度土壤侵蚀总量(t·a<sup>-1</sup>);  $B$  为土地损失的机会成本, 按每 1 hm<sup>2</sup> 造价 1.5 × 10<sup>4</sup> 元计算;  $\rho$  为土壤容重, 取值为 1.10 t·m<sup>-3</sup>。

土壤养分和有机质流失所造成的环境损失, 可用恢复费用法来计算(杨志新等, 2004)。

$$S_i = \sum T K_i C_i \quad (4)$$

式中,  $S_i$  为 N、P 养分流失所损失的价值(元);  $i$  为 N 或 P 元素;  $T$  为研究区非点源污染土壤养分流失总量(t);  $K_i$  为 N、P 折算为磷酸二铵的系数;  $C_i$  为磷酸二铵肥料的价格(元)。

根据北京市农业生产资料公司的数据, 2005 年磷酸二铵的市场价格为 2200 元·t<sup>-1</sup>, 折算成纯氮、纯磷化肥的比例分别为 9.4 和 4.2。

畜禽养殖的非点源污染主要是未经处理的畜禽排泄废物和废水, 会对农田和周围水资源造成环境污染, 对大气环境和周边生态环境也存在很大影响, 因其较难统计, 本文现不作讨论。畜禽养殖排泄的废物可利用生物技术和工程进行有效处理并转

化为肥料, 达到综合利用的目的。因此, 对其造成的非点源污染的生态价值损失, 可用与土地养分流失评估相同的替代费用法及其公式(4)进行评估, 但式中系数意义略有变化, 式中:  $S_i$  为畜禽养殖废物养分流失所造成的生态损失价值(元);  $T$  为研究区畜禽非点源污染养分流失总量(t), 其他同公式(4)。农村生活污染损失, 植物缓冲带对非点源污染控制效果的经济价值等, 也采用与土壤流失及畜禽养殖污染相同的方法计算。

使用恢复费用法仍存在以下问题: ①当评估地受到环境影响较大, 致使较大部分人搬迁, 若研究滞留人员对环境变化的反应, 会低估环境的实际破坏程度; ②对于防护所支付的费用可能有部分不是因为环境影响因素, 还附带非环境因素, 计算时难以区分; ③防护费支付者可能对当前或跨时间风险有过高或过低估计, 从而出现防护费支出的超补或低补, 导致评估结果的偏差。

总之, 以上各类估算未考虑水库非点源污染物浓度的提高而对周边大气及生活环境的影响, 也为考虑畜禽对草地、林地破坏造成的生态经济损失及土地利用变化对土地持水能力的损失等, 因此, 比实际损失偏低。

非点源污染控制措施效果, 可以采用多年定位监测方法进行实测以及模型模拟的方法进行预测。国内对非点源污染控制措施的效果预测未全面展开, 存在时间较短、数据不足等问题。鉴于本研究对规划的非点源污染控制措施的效果无法做到全面的试验及监测分析, 因此, 对土地利用方式改变类非点源污染控制措施的控制效果是利用输出系数法, 在输出系数不变而土地利用类型面积改变的情况下, 计算出控制措施的污染负荷削减效果。对非土地利用方式改变类非点源污染控制措施的控制效果, 本文经过大量的文献比较和分析, 参考国内外已有研究的成果, 选择了一个平均比例作为实施效果的预测依据, 具体过程详见下节相关内容。经济效益计算是根据各类措施对损失的减少, 以货币形式反映出来。

### 3 流域非点源污染控制措施的效果预测及价值估算 (Effectiveness prediction and value estimation for best management practices in pollution control)

#### 3.1 非点源污染负荷和损失估算

根据 2.3 节中介绍的输出系数法, 估算出研究区不同土地利用方式下非点源污染负荷(见表 2)和

各种畜禽在不同养殖方式下的污染负荷 (见表 3). 来自生活污染的总氮、总磷分别为 48 67 t和 4. 26 t

| 表 2 不同土地利用方式下非点源污染负荷估算                    |                     |        |       |         |           |
|-------------------------------------------|---------------------|--------|-------|---------|-----------|
| Table 2 Load of nonpoint source pollution |                     |        |       |         |           |
| 类型                                        | 面积 /km <sup>2</sup> | 总氮 /t  | 总磷 /t | 泥沙 /t   | 土壤侵蚀总量 /t |
| 耕地                                        | 48 38               | 14. 38 | 1. 96 | 5143 28 | 31809. 85 |
| 林地                                        | 68 71               | 1. 66  | 0. 12 | 306 45  | 9962 95   |
| 果园                                        | 27 96               | 1. 75  | 0. 19 | 519 22  | 5084. 105 |
| 草地                                        | 41 65               | 6. 56  | 0. 52 | 1604 36 | 6701. 485 |
| 总计                                        | 186 70              | 24. 36 | 2. 80 | 7033 31 | 53558. 39 |

| 表 3 各种畜禽在不同养殖方式下的污染负荷                                                              |         |        |        |       |        |
|------------------------------------------------------------------------------------|---------|--------|--------|-------|--------|
| Table 3 Pollution load of various livestock under different cultivation conditions |         |        |        |       |        |
| 畜禽                                                                                 | 数量 /头   | 总氮 /t  |        | 总磷 /t |        |
|                                                                                    |         | 规模化养殖  | 非规模化养殖 | 规模化养殖 | 非规模化养殖 |
| 猪                                                                                  | 30238   | 1. 44  | 0. 72  | 0 53  | 0 27   |
| 牛                                                                                  | 4564    | 4. 05  | 2. 04  | 0 66  | 0 33   |
| 羊                                                                                  | 53525   | 35. 32 | 17. 78 | 14 95 | 7 52   |
| 鸡                                                                                  | 3081000 | 27. 25 | 13. 72 | 1 43  | 0 72   |
| 总计                                                                                 |         | 68. 06 | 34. 26 | 17 57 | 8 84   |

按照研究方法 2 3节中的损失估算方法, 计算出改变土地利用方式类措施的经济效益 (见表 4). 养殖污染造成的生态损失为总氮  $1. 48 \times 10^6$ 元 (占总损失 36 47% )、总磷  $1. 73 \times 10^5$ 元 (占总损失 4. 23% ); 农村生活污染损失为总氮  $1. 01 \times 10^6$ 元 (占总损失 24 77% )、总磷  $4. 01 \times 10^6$ 万元 (占总损失 0. 98% ).

| 表 5 改变土地利用方式类非点源污染控制措施效果预测                                   |      |                         |        |          |         |          |        |          |        |
|--------------------------------------------------------------|------|-------------------------|--------|----------|---------|----------|--------|----------|--------|
| Table 5 Effectiveness prediction of BMPs for land use change |      |                         |        |          |         |          |        |          |        |
| 控制措施                                                         | 比例   | 调整后总面积 /km <sup>2</sup> |        | 总氮削减量 /t | 削减率     | 总磷削减量 /t | 削减率    | 泥沙削减量 /t | 削减率    |
|                                                              |      | 耕地 /草地                  | 林地 /果园 |          |         |          |        |          |        |
| 25°以上坡耕地还林                                                   | 50%  | 45. 31                  | 71 78  | 0 84     | 5. 84%  | 0. 12    | 6 12%  | 312 68   | 6 08%  |
|                                                              | 75%  | 43. 77                  | 73 32  | 1 26     | 8. 76%  | 0. 18    | 9 18%  | 469 02   | 9 12%  |
|                                                              | 100% | 42. 24                  | 74 82  | 1 68     | 11. 68% | 0. 24    | 12 25% | 625 36   | 12 16% |
| 15°~ 25°坡耕地还林                                                | 50%  | 45. 87                  | 30 47  | 0 59     | 4. 10%  | 0. 085   | 4 34%  | 220 23   | 4 28%  |
|                                                              | 75%  | 44. 62                  | 31 73  | 0 88     | 6. 12%  | 0. 13    | 6 63%  | 330 34   | 6 42%  |
|                                                              | 100% | 43. 36                  | 32 98  | 1 18     | 8. 21%  | 0. 17    | 8 67%  | 440 45   | 8 56%  |
| 25°以上荒草坡还林                                                   | 50%  | 34. 12                  | 76 15  | 0 99     | 15. 09% | 0. 080   | 15 38% | 253 41   | 15 80% |
|                                                              | 75%  | 30. 49                  | 79 87  | 1 50     | 22. 86% | 0. 12    | 23 08% | 380 11   | 23 69% |
|                                                              | 100% | 26. 77                  | 83 59  | 1 98     | 30. 18% | 0. 16    | 30 76% | 506 81   | 31 59% |

| 表 4 非点源污染的生态损失价值估算                                                   |       |       |        |        |
|----------------------------------------------------------------------|-------|-------|--------|--------|
| Table 4 Economic loss of nonpoint source pollution 10 <sup>4</sup> 元 |       |       |        |        |
| 土地类型                                                                 | 养分流失  |       | 废弃地    | 泥沙淤积   |
|                                                                      | 总氮    | 总磷    |        |        |
| 耕地                                                                   | 29 84 | 1 84  | 14. 46 | 40 18  |
| 林地                                                                   | 3 44  | 0 11  | 4. 53  | 2 39   |
| 果园                                                                   | 3 64  | 0 18  | 2. 31  | 4 06   |
| 草地                                                                   | 13 61 | 0 49  | 3. 05  | 12 53  |
| 累计                                                                   | 50 52 | 2 62  | 24. 34 | 59 17  |
| 比例                                                                   | 12 4% | 0 64% | 5. 97% | 15 52% |

3 2 土壤侵蚀类非点源污染控制措施

土壤养分流失中, 固态氮、磷的输出和泥沙流失量主要受土壤侵蚀的影响, 而溶解态氮与溶解态磷的流失主要受地表径流的影响. 磷与氮不同, 大多数吸附在土壤颗粒上, 在土壤中不易移动, 吸附态磷是磷流失的主要形态. 不同土地利用类型的吸附态磷占总磷的比重都在 90% 以上, 由此可见, 土壤泥沙随径流流失是导致土壤磷流失的重要原因. 控制土壤侵蚀就可以控制磷的流失 (王晓燕等, 2002; 黄生斌等, 2007).

3 2 1 改变土地利用方式类 此类控制措施包括以下 3种: ①25°以上坡耕地 (总面积为 6 14 km<sup>2</sup>) 退耕还林; ②15°~ 25°坡耕地 (总面积为 5 02 km<sup>2</sup>) 变耕地为果园; ③25°以上荒草坡 (总面积为 14 88 km<sup>2</sup>) 还林. 针对不同政策实行时可能存在反对及不能完全实行的情况, 本文模拟了实行 50%、75% 和 100% 3个不同级别措施的控制效果. 在输出系数不变而土地利用类型面积改变的情况下, 计算出以上 3种控制措施的污染负荷削减量, 削减量与表 2 中各类土地利用下的负荷的比值即为削减率 (见表 5).

分析以上 3 种措施对非点源污染负荷的削减结果, 从表 5 可以看出: 25°以上荒草坡还林措施效果最好, 对总氮、总磷、泥沙流失的控制效果都超过 15%, 最高可达 30% 以上; 25°以上坡耕地还林效果次之; 对总氮、总磷、泥沙流失的控制效果都超过 5%, 最高可达 12% 以上; 15°~ 25°坡耕地变果园措施最差, 对总氮、总磷、泥沙流失的控制效果一般为 4% ~ 8%。邵妍 (2006) 利用 AGNPS 模型对密云县小流域坡耕地还林的控制效果进行模拟, 结果表明, 退耕比例 50% 以上时, 总磷消减率为 6% ~ 12%, 与本文计算的控制效果相近。由于这 3 种措施

为针对不同坡度不同土地利用的控制措施, 并非互斥方案, 因此, 3 种措施同时实施, 则对土壤侵蚀类污染的控制效果为 3 种方式效益的加和, 约为 24% ~ 59%, 能取得较好环境效益。从表 2 可知, 不同土地利用下非点源污染负荷小于农村生活和畜禽养殖, 因此, 仅仅通过改变土地利用方式控制并不能有效地控制该区的非点源污染, 需要采取其他非点源污染控制措施。

根据表 5 中各种措施的消减量, 按照研究方法 2.3 节中的损失估算公式 (2)、公式 (3) 和公式 (4), 计算出各措施效果的经济效益 (见表 6)。

表 6 改变土地利用方式类控制措施效果的经济价值评价  
Table 6 Economic value assessment on effectiveness of BMPs for land use change

| 控制措施           |      | 土壤养分流失 /10 <sup>4</sup> 元 |       | 废弃地 /10 <sup>4</sup> 元 | 泥沙淤积 /10 <sup>4</sup> 元 | 总计 /10 <sup>4</sup> 元 | 控制效率   | 土壤侵蚀总效率 |
|----------------|------|---------------------------|-------|------------------------|-------------------------|-----------------------|--------|---------|
|                |      | 总氮                        | 总磷    |                        |                         |                       |        |         |
| 25°以上坡耕地还林     | 50%  | 1.74                      | 0.11  | 0.72                   | 2.44                    | 5.01                  | 5.80%  | 3.67%   |
|                | 75%  | 2.61                      | 0.17  | 1.07                   | 3.66                    | 7.52                  | 8.71%  | 5.50%   |
|                | 100% | 3.48                      | 0.22  | 1.43                   | 4.89                    | 10.02                 | 11.61% | 7.33%   |
| 15°~ 25°坡耕地变果园 | 50%  | 1.22                      | 0.079 | 0.54                   | 1.72                    | 3.56                  | 4.12%  | 2.61%   |
|                | 75%  | 1.83                      | 0.12  | 0.81                   | 2.58                    | 5.35                  | 6.20%  | 3.91%   |
|                | 100% | 2.44                      | 0.16  | 1.09                   | 3.44                    | 7.13                  | 8.26%  | 5.22%   |
| 25°以上荒草坡还林     | 50%  | 2.06                      | 0.075 | 0.05                   | 1.98                    | 4.17                  | 14.05% | 3.05%   |
|                | 75%  | 3.09                      | 0.11  | 0.08                   | 2.97                    | 6.25                  | 21.06% | 4.57%   |
|                | 100% | 4.12                      | 0.15  | 0.11                   | 3.96                    | 8.33                  | 28.07% | 6.10%   |

注: 控制效率为该措施削减量的经济价值在原土地利用方式下非点源污染负荷价值中的比例; 土壤侵蚀总效率为该措施削减量的经济价值在原土壤侵蚀类非点源污染负荷总损失中的比例。

比较 3 种控制措施效果的经济价值可以发现: 25°以上坡耕地还林措施的经济效益最大, 这主要是由于坡耕地的严重土壤侵蚀情况所造成; 25°以上荒草坡还林措施控制的效率最高, 在 14% ~ 28% 左右, 这主要是由于该区地处水库保护区, 坡耕地和缓草坡面积不大, 限制利用坡地, 因此, 控制效率一般。

进一步分析 3 种措施经济效益的组成 (图 1), 发现 25°以上坡耕地还林措施中泥沙淤积量削减所带来的经济效益是其主要组成部分, 约占 49%, 其次是总氮量削减价值, 约 35%, 废弃地约 14%; 15°~ 25°坡耕地变果园措施与退耕还林措施的价值组成结构相似; 而 25°以上荒草坡还林措施的控制效果组成与前两者不同, 其对总氮流失量削减的效益与控制泥沙淤积的经济效益相当, 几乎没有废弃地减少的价值, 这是由于荒草坡基本未种植利用, 因而没有废弃地损失, 相对坡耕地的土壤养分流失较小, 而土壤侵蚀情况与林地更近, 与坡耕地土壤侵

蚀差别较大。

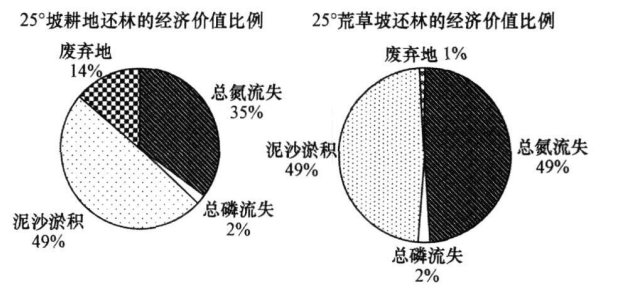


图 1 不同控制措施效果的经济价值组成

Fig. 1 Composition of economic value for different BMPs

3.2.2 非土地利用方式类 针对土壤侵蚀类非点源污染的单项控制措施还包括: ①0°~ 15°坡耕地部分采取保护性耕作; ②0°~ 15°坡耕地设置等高植物篱。

国内外的保护性耕作实践表明, 旱地保护性耕作能减少土壤风蚀水蚀, 抑制沙尘暴, 具有比较明显的经济效益、生态效益和社会效益, 尤其在北方

旱作区具有极为广阔的应用前景. 根据农业部保护性耕作研究中心 9 年的试验测定, 保护性耕作技术与传统耕作技术相比, 可以减少地表径流量 50% ~ 60%, 减少土壤流失 80% 左右 (胡伟, 2002 师江澜等, 2006).

由于评估方法复杂性和数据的有限等原因, 本文参照以上结果对该区规划的 0°~ 15°坡耕地采取保护性耕作, 对非点源污染控制效果进行评估, 预测此措施对土壤养分流失的削减效果. 泥沙流失削减预测以土壤侵蚀控制效果为依据, 该区共有 0°~ 15°坡耕地 37. 22 km<sup>2</sup>, 对 0°~ 15°坡耕地部分采取保护性耕作措施的控制效果及经济效益进行评估, 结果见表 7.

植物篱农业技术是坡地农业利用的一种新型技术体系, 由植物篱笆与农地两大利用类型所构成. 植物篱依据生态经济原则筛选适宜草灌植物, 依据不同坡度、岩性和侵蚀强度设计篱带宽度和密度, 等高种植形成密集型篱笆, 达到防止水土流失的目的. 篱带间为农业耕作利用, 使之与植物篱笆共同构成农林复合经营技术模式. 等高植物篱 - 农作系统在减轻土壤侵蚀方面的效果接近于田间工程措施, 而在控制非点源污染、增加系统产出和低成本投资方面的优势则为后者所不及. 植物篱的主要功

能是保持水土, 通过植物篱的机械拦截, 降低地表径流速度和改善土壤水分参数, 增加水分的入渗量.

中国科学院成都生物研究所宁南持续发展实验站的研究结果表明, 与传统顺坡耕作方式相比, 利用新银合欢或山毛豆在坡耕地上每隔 4m 培植高密度的双行等高植物篱可使坡耕地的径流量平均减少 49. 6% 以上, 土壤侵蚀及其产生的养分流失均减少 98% 以上 (孙辉等, 2004). 夏立忠等经过 3 年的观测表明, 与常规种植管理方式相比, 采用香椿、紫花苜蓿植物篱, 分别使坡面径流泥沙减少 77. 09% 和 74. 27% (夏立忠等, 2007). 蔡强国等 (2004) 对三峡库区和河北张家口等地研究后, 总结出植物篱具有显著的减水 (22% ~ 66. 2%)、减沙 (72. 2% ~ 98%) 效果, 并可通过拦沙和截茬还田两种途径提高土壤养分.

对该区规划的 0°~ 15°坡耕地设置等高植物篱控制效果评估, 根据其对地表径流控制 26% ~ 66% 和减少土壤侵蚀 50% ~ 97% 的经验效果, 取平均值. 再根据此平均值预测此措施对土壤养分流失及泥沙流失的削减效果, 经济评估方法不变. 对 0°~ 15°坡耕地设置等高植物篱措施的控制效果及经济效益见表 7.

表 7 非土地利用方式下 0°~ 15°坡耕地污染削减效果预测及经济评价  
Table 7 Economic value assessment and effectiveness of non land use BMPs for 0°~ 15° slope land

| 控制措施  | 削减量 / t |       |          |           | 经济效益 /10 <sup>4</sup> 元 |       |        |        | 总经济效益 /10 <sup>4</sup> 元 | 总削减效率   |
|-------|---------|-------|----------|-----------|-------------------------|-------|--------|--------|--------------------------|---------|
|       | 总氮      | 总磷    | 泥沙       | 废弃地       | 总氮                      | 总磷    | 泥沙     | 废弃地    |                          |         |
| 保护性耕作 | 8. 63   | 1. 57 | 4114. 62 | 25447. 88 | 17. 40                  | 1. 47 | 32. 14 | 11. 57 | 53. 08                   | 13. 02% |
| 等高植物篱 | 6. 61   | 1. 45 | 3806. 03 | 23539. 29 | 13. 72                  | 1. 36 | 29. 73 | 10. 70 | 55. 51                   | 13. 62% |

此两种措施是针对同一坡度同一土地利用的两种不同措施, 为互斥措施. 其中, 保护性耕作为管理措施, 而等高植物篱为工程性措施. 对比两种措施的经济效果发现, 两种措施在对土壤侵蚀类非点源污染的控制效果相近, 且它们的削减的污染损失价值能达到总污染损失的 13% 左右, 由此可见, 0°~ 15°坡耕地在土壤侵蚀控制中的重要地位. 另外, 两种措施控制类型的组成类似, 减少的泥沙淤积价值均占最大比例, 其次为总氮价值及废弃地价值. 单从对土壤侵蚀的控制效果来讲, 保护性耕作的效果要略好于等高植物篱. 但两种措施的成本、优势和经济效益有所不同, 所以, 在后期选择中应综合平衡多方面情况再进行选择.

3.3 畜禽养殖污染类非点源污染控制措施

畜禽养殖已成为本区非点源污染的最大贡献来源, 进一步分析畜禽养殖的污染负荷组成, 会发现仅占养殖总量 25% 的非规模化养殖却占据了养分流失总量的 50% 以上 (王晓燕等, 2002 黄生斌等, 2007), 非规模化养殖场粪便处理率低是造成这种现象的主要原因. 针对非规模化养殖中的畜禽排泄污染, 农村户用沼气池是最佳的处理方式.

一般 6~ 8m<sup>3</sup>的农户沼气池, 需要饲养 3~ 5 头存栏猪, 才能满足沼气池发酵原料 (指猪粪尿) 的需要. 根据 2005 年密云县统计年鉴, 太师屯镇共有生猪 30238 头, 非规模化养殖 7560 头, 其中, 未处理的 983 头. 现仅针对这些未处理的散养畜禽采取措施, 因还养殖有其他畜禽, 按每 3 头猪可建 1 个 8m<sup>3</sup>沼

气池换算, 共建 328 个户用沼气池. 根据收集的效果数据和对该镇畜禽养殖污染的统计, 估算户用沼气池对该镇非点源污染的控制效果及经济效益 (表 8). 在计算经济效益中化肥替代的效益时, 为保持数据的同一性, 将硫酸铵和过磷酸钙换算成含等量氮、磷的磷酸二铵. 本文前期污染负荷估算中畜禽养殖部分以养分流失为主, 为植物所提供的养分作用暂不考虑, 因此, 计算所得该措施的环境效益应小于其实际价值.

计算通过户用沼气池削减散养畜禽养殖带来的非点源污染时, 仅针对该镇 25% 非规模养殖中未对畜禽粪污进行回收处理的 13% 比例部分进行, 仅此部分的控制效果就可以达到总损失的 10.46%. 根据现有发展水平, 其余 87% 的非规模养殖中多以

传统的统堆沤造肥方法为主, 畜禽粪便投入沼气发酵氨态氮增加 20% 以上, 磷、钾等养分没有明显损失. 沼气发酵全氮保存率比敞口池沤肥保存率增加 46%, 敞口池沤肥中磷、钾保存率仅为 63.36% 和 66.67% (孙忠孝, 2005). 沼肥还可以促进作物增产, 改良品种, 有效地杀灭粪便中的病原菌和病毒, 减少寄生虫污染, 改善空气质量. 同时, 农村实施“一池三改”基本单元后, 厕所、圈舍、沼气池三位一体, 人畜粪便、种植业、养殖业的残余物全部直接进入沼气池发酵, 沼气发酵技术不仅可以有效控制畜禽污染, 还可以将农村生活中的污水、垃圾通过微生物的作用转化为可再利用的新能源, 即提高了物质的利用率, 又减少了环境污染, 在此处不再计算.

表 8 农村户用沼气池削减效果预测及经济评价

Table 8 BMPs' economic value assessment and effectiveness of marsh gas tanks for rural households

| 控制类型   | 单位控制效率 |       | 削减量                      | 经济效益 /10 <sup>4</sup> 元 | 总计 /10 <sup>4</sup> 元 | 总削减效率  |
|--------|--------|-------|--------------------------|-------------------------|-----------------------|--------|
| 减少养分流失 | 总氮     | 90%   | 17.11 t                  | 35.49                   |                       |        |
|        | 总磷     | 90%   | 4.42 t                   | 4.14                    |                       |        |
| 替代化肥   | 硫酸铵    | 50 kg | 16.4 t                   | 3.61                    | 50.08                 | 10.46% |
|        | 过磷酸钙   | 40 kg | 13.12 t                  | 3.56                    |                       |        |
| 替代农药   | 100元   |       | 3.28 × 10 <sup>4</sup> 元 | 3.28                    |                       |        |

注: 总削减效率为该措施削减污染的价值占该区非点源污染经济损失的比例.

3.4 化肥施用类污染控制-测土配方施肥技术

测土施肥技术对化肥利用率提高效果按经验值的中位数 7.5% 计算, 研究区 2005 年氮肥施用量共 1244 t 则平衡施肥措施对该区氮肥流失削减效果为 6.44 t 利用最简单的市场价值法将其折合成等量磷酸二铵肥料, 其经济价值为  $1.42 \times 10^4$  元. 磷肥使用及磷素流失由于文献不足, 本文暂不作讨论.

平衡施肥技术除提高肥料利用效率外, 还可以达到节约肥料使用, 增加产量的效果. 按施氮量超过作物需求的 50% 计算, 则可节约 1/3 的氮肥使用量, 约 411 t 折合经济价值  $9.03 \times 10^5$  元. 则该区实行测土施肥技术仅节约氮肥流失方面的经济价值就为  $9.17 \times 10^5$  元, 约占总污染损失的 19%. 且该措施与针对 0°~15° 坡耕地的部分工程性措施并不矛盾, 可以结合使用. 当然两种措施的叠加效果会有所不同, 本处不作讨论.

3.5 综合污染控制措施——河岸植被保护带

邓红兵等 (2001) 总结河岸植被保护带宽度 25m 以上, 种植芦苇可削减总氮 30% ~ 50%, 总磷

65% ~ 95%, 削减泥沙 75% ~ 90%. 比较挪威、瑞典和德国关于缓冲带的相似试验发现, 一般情况下, 缓冲带可以截留 30% ~ 50% 的氮、65% ~ 95% 的磷和 75% ~ 90% 的泥沙 (罗晓娟等, 2006). 这种缓冲带模式在美国东南部平原上收到了很好的农业非点源污染防治效果 (周早弘等, 2007). 除了对非点源污染的控制效果外, 河岸缓冲带还可改善区域环境, 增加生物多样性, 增加植被覆盖率, 提高抗灾能力等. 此外, 缓冲带的设计和效果受多方面影响, 如宽度、坡度、植物选择等大量生态、地形地貌等自然因素, 更主要的还要考虑社会、经济等因素.

本文对经验削减效率取平均值, 预测河岸缓冲带对该区非点源污染控制效果. 本区共有河岸和水库岸边长 141 km, 可根据地区情况设置不同的缓冲带建设比例, 如 25%、50%、75% 和 100%. 假设整个区域的非点源污染最后都会经过缓冲带被其截流, 并且整个区域的污染负荷总量在可建设的缓冲带的承担范围内不会造成污染外溢的情况下进行的, 为一种理想状态, 根据环境经济评估方法, 对其经济价值进行估算, 结果如表 9 所示.

表 9 河岸缓冲带削减效果预测及经济评价  
Table 9 BMPs' economic value assessment and effectiveness of riparian vegetable buffers

| 建设比例 | 污染物 | 削减量 /t  | 消减率   | 经济价值 /10 <sup>4</sup> 元 | 经济效率   | 削减总价值 /10 <sup>4</sup> 元 | 消减效益 比例 | 总经济 效率 |
|------|-----|---------|-------|-------------------------|--------|--------------------------|---------|--------|
| 25%  | 总氮  | 10.96   | 6.3%  | 22.73                   | 4.75%  | 40.41                    | 56.28%  | 8.82%  |
|      | 总磷  | 6.70    | 20.0% | 6.28                    | 1.31%  |                          | 15.54%  |        |
|      | 泥沙  | 1459.41 | 21.0% | 11.40                   | 2.38%  |                          | 28.21%  |        |
| 50%  | 总氮  | 21.92   | 12.5% | 45.47                   | 9.50%  | 80.82                    | 56.26%  | 17.65% |
|      | 总磷  | 13.40   | 40.0% | 12.55                   | 2.62%  |                          | 14.85%  |        |
|      | 泥沙  | 2918.82 | 41.0% | 22.80                   | 4.76%  |                          | 28.21%  |        |
| 75%  | 总氮  | 32.88   | 18.7% | 68.20                   | 14.23% | 121.24                   | 56.25%  | 26.47% |
|      | 总磷  | 20.10   | 60.0% | 18.83                   | 3.93%  |                          | 15.53%  |        |
|      | 泥沙  | 4378.23 | 62.0% | 34.21                   | 7.15%  |                          | 28.22%  |        |
| 100% | 总氮  | 47.35   | 27.0% | 98.21                   | 19.00% | 168.92                   | 58.14%  | 35.29% |
|      | 总磷  | 26.79   | 80.0% | 25.10                   | 5.24%  |                          | 14.86%  |        |
|      | 泥沙  | 5837.65 | 83.0% | 45.61                   | 9.30%  |                          | 27.00%  |        |

从表 9 可以看出,缓冲带可以有效地拦截泥沙、总氮、总磷,其中,对泥沙流失的控制效果最好为 83%,总磷次之,总氮最差,仅为 27%;而从经济效益方面比较,缓冲带减少氮素流失所获得的经济效益最大,约为该措施总经济效益的 56%,泥沙次之,占 28%,这是因为氮流失造成的污染在整个研究区非点源污染损失中所占比例最大所造成.以上结果说明,植被缓冲带对非点源污染削减效果明显,总经济效率最高到达 35%,在污染控制中有着非常重要作用.当然,植被缓冲带会占用土地,造成一定的经济损失,所以,应该在缓冲带建设的成本效益中加以综合考虑.衡量控制措施效果的一个重要参考是费用问题,将另文讨论.

4 结论 (Conclusion)

1) 针对控制土壤侵蚀的 3 种改变土地利用类型的措施中, 25°以上荒草坡还林措施效果最好,对总氮、总磷、泥沙流失的控制效果都超过 15%,最高可达 30% 以上; 25°以上坡耕地还林效果次之;对总氮、总磷、泥沙流失的控制效果都超过 5%,最高可达 12% 以上; 15~ 25°坡耕地变果园措施最差,对总氮、总磷、泥沙流失的控制效果一般为 4% ~ 8%.

2) 坡度为 1~ 15°坡耕地在土壤侵蚀控制中具有重要地位,坡耕地植物篱和保护性耕作对土壤侵蚀类非点源污染的控制效果相近,削减的污染损失价值占总污染损失的 13%,具有明显的环境效益.

3) 针对畜禽养殖污染设计的农村户用沼气池总经济效率在 10% 左右;测土施肥技术可减少氮素流失,节约大量化肥,且削减的污染损失价值达到

总污染损失的 19%.

4) 作为综合污染控制措施的河岸缓冲带,可以有效地拦截氮、磷和泥沙的流失,对泥沙的控制效果最好为 83%,氮最低仅为 27%;而从经济效益方面比较,缓冲带减少氮素流失所获得的经济效益最大,约为该措施总经济效益的 56%,泥沙次之,占 28%;植被缓冲带削减非点源污染的总经济效率最高,可达 35%,折合经济价值约  $1.69 \times 10^6$  元.

责任作者简介: 王晓燕 (1967—),女,博士,教授,博士生导师.主要从事流域水污染控制与管理的研究.出版专著 2 部,在国内外学术刊物上发表论文 90 余篇.

参考文献 (References):

Brammott K S, Engel B A, Frankenberger J R. 2004. Evaluation of structural best management practices 20 years after installation Black Creek Watershed Indiana [J]. Journal of Soil and Water Conservation 59(5): 191—196

蔡强国,卜崇峰. 2004 植物篱复合农林业技术措施效益分析 [J]. 资源科学, 26(S1): 7—15

Cai Q G, Bu C F. 2004. Benefit of hedgerow agro-forestry technical measure [J]. Resources Science 26(S1): 7—15 (in Chinese)

蔡新广. 2004. 石匣小流域水土保持措施蓄水保土效益试验研究 [J]. 资源科学, 26(S1): 144—150

Cai X G. 2004. Benefits from soil and water conservation measures on reducing runoff and sediments in Shixia Small Watershed [J]. Resources Science 26(S1): 144—150 (in Chinese)

陈治谏,廖晓勇,刘邵权. 2003 坡地植物篱农业技术生态经济效益评价 [J]. 水土保持学报, 17(4): 125—127, 160

Chen Z J, Liao X Y, Liu S Q. 2003. Improvement of slope cropland productivity by applying agricultural technique of plant hedge-rows [J]. Journal of Soil and Water Conservation 17(4): 125—127,

- 160( in Chinese)
- 邓红兵, 王青春, 王礼庆, 等. 2001 河岸植被缓冲带与河岸带管理 [J]. 应用生态学报, 12( 6): 951—954.
- Deng H B, Wang Q C, Wang L Q, *et al*. 2001 On riparian forest buffers and riparian management [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 12( 6): 951—954( in Chinese)
- Drole A, Koncan J Z. 2002 Estimation of sources of total phosphorus in a river basin and assessment if alternatives for river pollution reduction [J]. Environment International 28 393—400
- Dukes M D, Riter W F. 1998 Modeling BMPs to optimize municipal wastewater land treatment system [J]. Journal of Environmental Engineering ( 12): 1178—1187
- 韩秀娣. 2000 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, 19(3): 102—104 128
- Han X D. 2000 A pplication of optimal management practice to NPS control [J]. Shanghai Environmental Sciences 19(3): 102—104; 128( in Chinese)
- Hsieh C D, Yang W F. 2007. Optimal nonpoint source pollution control strategies for a reservoir watershed in Taiwan [J]. Journal of Environmental Management 85(4): 908—917
- 黄生斌, 刘宝元, 刘江, 等. 2007 密云县密云水库流域耕地养分流失特征 [J]. 生态与农村环境学报, 23(3): 51—54
- Huang S B, Liu B Y, Liu J. 2007 Characteristics of nutrient loss from sloping fields in M iyun Reservoir watershed [J]. Journal of Ecology and Rural Environment 23(3): 51—54( in Chinese)
- 胡伟. 2002 保护性耕作推广项目简介 [J]. 农机市场, (7): 29
- Hu W. 2002 Brief introduction to promotion projects of conservation tillage [J]. Agricultural Machinery Market (7): 29
- Johnes P J. 1996. Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters the export coefficient modeling approach [J]. Journal of Hydrology 183 323—349
- 李云辉. 2002 云南金沙江流域水土流失直接经济损失测算方法与区域特征分析 [J]. 山地学报, 20(12): 36—42
- Li Y H. 2002 The calculating methods and analysis on the regional characteristics of direct economic loss of soil erosion in Jinsha river basin of Yunnan Province [J]. Journal of Mountain Research, 20 (12): 36—42( in Chinese)
- 路炳军, 袁爱萍, 李永贵, 等. 2007. 密云水库上游典型水保措施减少面源污染效益分析 [J]. 中国水土保持, (1): 30—31
- Lu B J, Yuan A P, Li Y G, *et al*. 2007 Analysis on benefits of area-source pollution reduction through typical soil and water conservation measures conducted in upper stream of M iyun Reservoir [J]. Soil and Water Conservation in China (1): 30—31( in Chinese)
- 罗晓娟, 余勇利. 2006 植被缓冲带结构与功能对水质的影响 [J]. 水土保持应用技术, (4): 1—3
- Luo X J, Yu Y L. 2006 The impact of structure and function of vegetation buffer strand on water quality [J]. Technology of Soil and Water Conservation (4): 1—3( in Chinese)
- 邵妍. 2006 AnnAGNPS模型在土门西沟小流域退耕还林模拟中的应用 [D]. 北京: 北京林业大学. 50—70
- Shao Y. 2006 An application study of AnnAGNPS Model on returning land for farming to forestry of Tunenxigou Watershed [D]. Beijing Beijing Forestry University. 50—70( in Chinese)
- 师江澜, 刘建忠, 吴发启. 2006 保护性耕作研究进展与评述 [J]. 干旱地区农业研究, (1): 205—213
- Shi J L, Liu J Z, Wu F Q. 2006 Research advances and comments on conservation tillage [J]. Agricultural Research in the Arid Areas (1): 205—213( in Chinese)
- 宋秀杰, 陈博. 2007 北京市农药化肥非点源污染防治的技术措施 [J]. 环境保护, 9: 30—33
- Song X J, Chen B. 2007. Prevention control technical measures for non-point source pollution of chemical fertilizer and pesticide in Beijing [J]. Environmental Protection 9: 30—33( in Chinese)
- Srivastava P, Hanlett J M, Robillard P D. 2002 Water optimization of best management practices using AnnAGNPS and a genetic algorithm [J]. Water Resources Research 38(3): 1029—2001
- 孙辉, 唐亚, 谢嘉穗. 2004. 植物篱种植模式及其在我国的研究和应用 [J]. 水土保持学报, 18(4): 114—118
- Sun H, Tang Y, Xie J S. 2004 Research and application of hedgerow intercropping in China [J]. Journal of Soil Water Conservation, 18 (4): 114—118 ( in Chinese)
- 孙忠孝. 2005. 沼气技术能有效治理农村面源污染 [J]. 吉林农业, (12): 9
- Sun Z X. 2005. Effective in the treatment of biogas technology in rural non-point source pollution [J]. Jilin Agriculture (12): 9( in Chinese)
- Turner N, Bontems P, Rotillon G, *et al*. 2005. AgrBMP water systems approach to environmentally acceptable farming [J]. Environmental Modelling & Software 20: 187—196
- 王方浩, 马文奇, 窦争霞, 等. 2006 中国畜禽粪便产生量估算及环境效应的研究 [J]. 中国环境科学, 26(5): 614—617
- Wang F H, Ma W Q, Dou Z X. *et al*. 2006 Research of estimate the quantities of animal excretion and analyze its environmental impact in China [J]. China Environmental Science, 26(5): 614—617 ( in Chinese)
- Wang X Y, Li T F, Xu Q. *et al*. 2001 Study on the distribution of non-point source pollution in the watershed of M iyun reservoir Beijing China [J]. Water Science and Technology, 44(7): 35—40
- 王晓燕, 王一岫, 蔡新广, 等. 2002 北京密云水库流域非点源污染现状研究 [J]. 环境科学与技术, 26(3): 1—3
- Wang X Y, Wang Y X, Cai X G. *et al*. 2002 Investigation of non-point pollution in watershed of M iyun Reservoir [J]. Environmental Science and Technology, 26(3): 1—3( in Chinese)
- 王晓燕. 2003 非点源污染及其管理 [M]. 北京: 海洋出版社, 130—131
- Wang X Y. 2003. Non-point Source Pollution and Its Management [M]. Beijing Ocean Press 130—131( in Chinese)
- 吴开亚, 王玲杰. 2006 巢湖流域水土流失的环境经济损失研究 [J]. 生态经济, (11): 56—59
- Wu K Y, Wang L J. 2006 Research on environmental economic costs of soil erosion in Chaohu Basin [J]. Ecological Economy (11): 56—59( in Chinese)
- 夏立忠, 杨林章, 李运东. 2007 生草覆盖与植物篱技术防治紫色

- 土坡地土壤侵蚀与养分流失的初步研究 [ J]. 水土保持学报, 21 (2): 28—31
- Xia L Z, Yang L Z, Li Y D. 2007 Perennial alfalfa and contour hedgerow on reducing soil nitrogen and phosphorus losses from uplands of purple soil [ J]. Journal of Soil Water Conservation, 21 (2): 28—31( in Chinese)
- 杨旭东, 李敏, 杨晓勤. 2002 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), 1(4): 19—22
- Yang X D, Li M, Yang X Q. 2002 An analysis of the economics foundation of the “Grain for Green” program [ J]. Journal of Beijing Forestry University (Social Sciences), 1(4): 19—22( in Chinese)
- 杨志新, 郑大玮, 李永贵. 2004 北京市土壤侵蚀经济损失分析及价值估算 [ J]. 水土保持学报, 18(6): 175—178
- Yang Z X, Zheng D W, Li Y G. 2004 Value estimation of economic loss of soil erosion in Beijing region [ J]. Journal of Soil Water Conservation, 18(6): 175—178( in Chinese)
- 臧峥峥, 孔凡标, 徐宗进. 2007 农村户用沼气池效益分析 [ J]. 安徽农学通报, 13(11): 184
- Zang Z Z, Kong F B, Xu Z J. 2007. Analysis on the benefits of methane-generating pit for farm household [ J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 13(11): 184( in Chinese)
- 章明奎, 李建国. 2005 农业非点源污染控制的 最佳管理实践 [ J]. 浙江农业学报, 17(5): 244—250
- Zhang M K, Li J G. 2005. Best management practices for controlling agricultural non-point pollution [ J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 17(5): 244—250( in Chinese)
- 周冰冰, 李忠魁. 2000 北京市森林资源价值 [ M]. 北京: 中国林业出版社, 77—91
- Zhou B B, Li Z K. 2000. Value of Forestry Resource in Beijing [ M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 77—91( in Chinese)
- 周早弘, 张敏新. 2007 防治农业面源污染的工程技术 [ J]. 环境与可持续发展, (6): 55—57
- Zhou Z H, Zhang M X. 2007. Engineering technology of prevention and control for agricultural non-point source pollution [ J]. Environment and Sustainable Development, (6): 55—57( in Chinese)