

张汪寿, 耿润哲, 王晓燕, 等. 2013. 基于多准则分析的非点源污染评价和分区——以北京怀柔区北宅小流域为例[J]. 环境科学学报, 33(1): 258-266

Zhang W S, Geng R Z, Wang X Y, *et al.* 2013. Assessment and zoning of non-point source pollution by multi-criteria analysis: A case study in the watershed of Beizhai[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 33(1): 258-266

## 基于多准则分析的非点源污染评价和分区 ——以北京怀柔区北宅小流域为例

张汪寿<sup>1</sup>, 耿润哲<sup>1</sup>, 王晓燕<sup>1,\*</sup>, 段淑怀<sup>2</sup>, 欧春霞<sup>3</sup>, 李世荣<sup>2</sup>, 南哲<sup>1</sup>

1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048

2. 北京市水土保持工作总站, 北京 100038

3. 密云县水土保持工作站, 北京 101500

收稿日期: 2012-04-11

修回日期: 2012-06-25

录用日期: 2012-07-25

**摘要:** 非点源污染控制难度大、成本高, 因此有必要对污染源划分等级, 从而分别进行管理。本研究提出了“风险评价-规划分区-分别管理”的非点源污染规划思路。“风险评价”在借鉴已有的非点源风险评价模型基础上, 提出了基于多准则分析的非点源污染评价方法。该评价方法以土地利用因子、径流因子和距离因子为参评指标, 采用改进的理想解法 (Technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS) 确定因子权重, 减少了人为主观性; “规划分区”依据“适度保护、优先规划、重点管理”的原则, 结合风险评价结果, 可将流域划分为 5 类管理分区; “分别管理”是对各类管理区分别配以针对性的 BMPs 和生态工程措施。“风险评价-规划分区-分别管理”这套方法层层递进不仅能评价流域非点源污染, 也能定量为流域内非点源污染源的管理提供科学方案。最后将该方法在北宅小流域进行了应用, 结果表明, 该方法克服了传统方法的过于主观、局限性大的缺陷, 可为类似流域非点源污染评价和管理提供参考。

**关键词:** 非点源污染; 多准则分析; 规划; 风险评价

文章编号: 0253-2468(2013)01-258-09

中图分类号: X820.4, X171

文献标识码: A

## Assessment and zoning of non-point source pollution by multi-criteria analysis: A case study in the watershed of Beizhai

ZHANG Wangshou<sup>1</sup>, GENG Runzhe<sup>1</sup>, WANG Xiaoyan<sup>1,\*</sup>, DUAN Shuhuai<sup>2</sup>, OU Chunxia<sup>3</sup>, LI Shirong<sup>2</sup>, NAN Zhe<sup>1</sup>

1. College of Resources, Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048

2. Beijing Soil and Water Conservation Center, Beijing 100038

3. Miyun Soil and Water Conservation Station, Beijing 101500

Received 11 April 2012;

received in revised form 25 June 2012;

accepted 25 July 2012

**Abstract:** Due to difficulty and high cost in controlling non-point source pollution, it was necessary to categorize the sources for planning and management. In this study, the process of “Risk assessment-Planning and zoning-differentiated management” was developed to assess the non-point source pollution. A new “risk assessment” tool based on multi-criteria analysis was developed. Three criteria were formulated to characterize land cover indicator ( $L$ ), runoff indicator ( $R$ ) and distance indicator ( $D$ ), and the weight of pollution was also computed by improved method for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS). Combining with the results of risk assessment, the area was divided into five categories of management planning zones according to the principle of “appropriate protection, priority planning, focus and management”. Afterwards, by adopting the technology of BMPs and ecological engineering, “differentiated management” was carried out on these five categories of management planning areas. The process of “Risk assessment-Planning and zoning-Differentiated management” can not only evaluate the various sources of pollution, but also quantitatively provide the scientific scheme for the management of non-point pollution sources. In addition, the method was applied to the watershed of Beizhai. The results show that this process can avoid subjective and limited application, and can provide a reference to non-point source pollution assessment and management for watershed.

**Keywords:** non-point source pollution; multicriteria analysis; planning and zoning; risk assessment

基金项目: 中德政府间科技合作项目 (No. 2009DFA92440); 国家自然科学基金项目 (No. 40971258)

Supported by the Sino-German Intergovernmental S & T Cooperation Projects (No. 2009DFA92440) and the National Natural Science Foundation of China (No. 40971258)

作者简介: 张汪寿 (1987—), 男, E-mail: zhangwangshou@126.com; \* 通讯作者 (责任作者), E-mail: cnuwxy@sohu.com

Biography: ZHANG Wangshou (1987—), male, E-mail: zhangwangshou@126.com; \* Corresponding author, E-mail: cnuwxy@sohu.com

## 1 引言 (Introduction)

非点源污染的发生受土壤、地形、气候、水文、土地利用和管理方式等众多因素的影响,流域内不同景观单元单位面积的污染负荷差异十分显著 (Gao *et al.*, 2004). 少数景观单元输出的污染物往往占整个流域污染负荷的大部分 (Gburek *et al.*, 1998), 对接纳水体的质量有着决定性的影响. 如果首先识别出流域内污染高负荷区, 将治理重点和有限资源投入对水体危害可能性最大而范围相对较小的敏感地区和地段, 优先加强管理措施并安排治理工程布局, 则可以提高投资效益并节约土地资源, 大大降低污染控制工作的难度, 更好地协调人类开发活动和环境保护工作之间的矛盾.

常见的非点源污染识别和评价方法根据其建立机理和模拟过程主要分为两种: 第 1 类是机理模型, 主要是通过对污染物的迁移路径、转化过程机理及输出的连续模拟, 找出污染发生的时间与重点区域, 如: SWAT 模型 (Arnold *et al.*, 1998), AGNPS 模型 (Cho *et al.*, 2008) 等都属于此类. 机理模型方法的缺点是需要获取大量的数据进行模型的校准和验证, 操作复杂, 同时对操作者专业技术水平要求较高.

第 2 类是经验模型, 主要是通过建立污染负荷与土地利用类型或径流量间的相关关系. 该方法可迅速给出流域内污染负荷量或者污染潜力, 如常见的输出系数法 (王晓燕等, 2009a), 潜在污染指数 (Munafò *et al.*, 2005), 农业非点源污染潜在指数 (Petersen *et al.*, 1991) 等都属于此类. 这类方法需要的输入数据少, 计算简单, 但由于来自某一研究区的经验统计总结, 并不适合应用于其他的地区, 同时可能误差较大, 因子权重确定主观性强.

我国非点源污染研究起步较晚, 水质等监测数据并不健全, 针对当前非常严峻的非点源污染, 迫切需要一个操作简单, 数据输入少, 精度高, 能全面考虑非点源污染的主要因素的评价模型, 还能根据评价结果直接指导非点源污染管理的一套方法. 本文根据污染流失风险指数对污染源划分等级从而分别管理的思路, 提出了“风险评价-规划分区-分别管理”技术方法, 根据区内水环境保护目标, 优先安排生态工程的布局, 将有限的资源投入到最能发挥的地区, 以便提高投资效益和治理成效, 这对于推动区域可持续发展更具有重要的现实意义.

## 2 评价和分区方法 (Evaluation and partitioning)

### 2.1 风险评价

多准则分析 (Multicriteria analysis-MCA) 是一个有效的决策支持分析工具, 但其常会受到决策者的误解, 因为它更多的被视为技术专家的工具, 实际上十分容易人为操作 (Janssen *et al.*, 2001). 在决策过程中, 一个使决策者困惑的问题即是在决策中通常面对由多个领域而衍生出的不同的指标, 然而这些指标很难有统一的尺度. 多准则分析方法即是这样一个方法, 它为决策者提供了一个决策的框架, 提供接近真实的评价结果. 在非点源污染研究中常见的  $P$  指数 (Li *et al.*, 2007; Hughes *et al.*, 2005)、潜力污染指数 (PNPI) (Cecchi *et al.*, 2007; Munafò *et al.*, 2005) 等实际上都采用的是 MCA 的思想.

在进行非点源污染防治规划时, 多准则分析在选用指标上一方面保证涵盖非点源污染物的产生、迁移和消减的整个过程, 另一方面确保不至于特别复杂, 影响评价分区过程的进行. 多准则分析在确定因子权重上尽量避免主观因素, 使结果尽量接近真值. 鉴于此, 借鉴  $P$  指数及 PNPI 指标参数的选取原则, 对选取的指标进行了改进和优化, 确保规划结果客观. 本研究, 选用了土地利用因子 ( $L$ )、径流因子 ( $R$ ) 和距离因子 ( $D$ ) 进行评价非点源污染物进入水体的潜在风险, 最后采用改进的理想解法对 3 个因子赋予权重. 评价公式为:

$$NPA = w_1 \cdot L + w_2 \cdot R + w_3 \cdot D \quad (1)$$

式中, NPA 表示非点源风险评价分值.  $w_1$ 、 $w_2$ 、 $w_3$  分别表示  $L$ 、 $R$ 、 $D$  的权重.

首先必须要收集研究区的相关地理空间数据, 包括行政边界、土壤类型、土地覆盖、数字高程、水系等, 具体的数据处理流程见图 1.

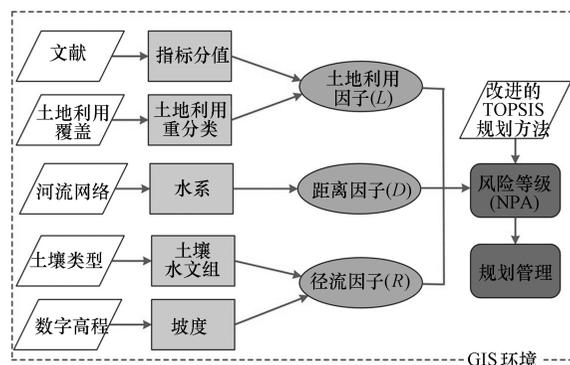


图 1 多标准分析数据处理流程

Fig. 1 Data processing for multi-criteria analysis

2.1.1 土地利用因子( $L$ ) 土地利用因子反映的是不同土地利用类型可能产生的污染负荷量,污染负荷产生量越大,则 $L$ 值越大(武晓峰等,2011)。一般而言,土地利用指标量化的方法有多种形式,主要原理是建立各土地利用方式与污染输出的定量关系。常见的如专家打分法,Cecchi等(2007)对非点源污染进行风险评价时,采用的是专家打分法直接给不同土地利用赋值。但该方法是针对欧洲的土地利用类型,并不适合我国,因为我国的农业生产模式、环境条件等与国外差异很大,此外其涵盖的土地利用不能全部囊括我国常见的土地覆盖,武晓峰等(2011)也指出一些常见的土地利用如村庄、旅游区和养殖场等都未包括在内。

此外,输出系数法(Johnes, 1996)也较为常用,如Zhang等(2010)采用输出系数法确定了淮河流域不同土地利用因子指标分值。该方法简单、可靠,能够反映不同土地利用的污染负荷量。基于此,本研究采用输出系数来确定土地利用因子。数据主要来源于王晓燕等(2003)对北京密云水库小流域进行长期观测,得出的不同土地利用N、P输出系数。土地利用因子的指标值直接由N、P输出系数相加得出,这样形成的土地利用因子考虑到了N、P对水体的综合影响。其中,林地、水浇地、果园、荒草坡、耕地、村庄等采用实测的数据。养殖场输出系数借鉴武晓峰等(2011)估算的数值,王晓燕等(2009a)对北京太师屯镇的研究结果表明,养殖场P的输出量为N输出量的0.234倍,这样推算出了养殖场P的输出系数(表1)。水域由于是汇,因此,我们假设其不产生负荷,直接赋值为0。这样就形成了涵盖主要土地利用的指标值。

表1 不同土地利用类型输出系数和土地利用因子

土地利用类型	氮输出系数 $/(kg \cdot km^{-2} \cdot a^{-1})$	磷输出系数 $/(kg \cdot km^{-2} \cdot a^{-1})$	土地利用因子
林地	24.12	1.75	25.87
水浇地	36.66	5.30	41.96
果园	62.76	6.83	69.59
荒草坡	157.48	12.56	170.04
耕地	279.33	40.60	319.93
村庄	363.00	52.00	415.00
水域	0	0	0
养殖场	472.23	110.63	582.86

2.1.2 径流因子( $R$ ) 径流是控制非点源污染物从源区迁移到水系重要的因素,很多研究也表明非

点源污染物的流失直接与径流相关(Stalnacke *et al.*, 1997; Tomer *et al.*, 2003),因此径流因子也是非点源污染评价中重要的因子。

很多研究采用径流曲线方程(Soil Conservation Service, SCS)来估算径流量。SCS是美国农业部水土保持局在20世纪50年代提出的流域水文模型,具有所需资料简单易获取、对观测数据要求不是很严格等特点,能够客观描述不同土地利用方式、土壤类型、前期土壤含水量及流域水文、气象资料条件下的地表径流过程,对于小流域径流预报具有较强的能力(刘家福等,2010)。SCS曲线方程的核心是-CN值,-CN值代表着地表产生径流的能力,决定-CN值的主要因素为土壤前期湿度、土壤类型、覆盖类型、坡度等(王晓燕,2003)。

因此本研究采用-CN值来估算各土地利用的覆盖、土壤类型以及坡度等条件下,产生径流的能力,即径流因子 $R$ 。径流因子( $R$ )的确定一般分为3个步骤:

1)根据土壤水分的最小渗透速率或者土壤质地的划分标准(表2)(王晓燕,2003),将研究区土壤进行分类。

表2 SCS水文学土壤组定义指标

土壤类型	最小下渗率 $/(mm \cdot h^{-1})$	土壤质地
A	>7.26	砂土、壤质砂土、砂质壤土
B	3.81~7.26	壤土、粉砂壤土
C	1.27~3.81	砂黏壤土
D	0.00~1.27	黏壤土、粉砂黏壤土、砂黏土、粉砂黏土、黏土

2)根据划分的土壤类别,考虑前期湿度条件,查找对应的土地利用CN值。

通常土壤前期湿度可划分为3级:AMC I:土壤干旱,但未达到萎蔫点;AMC II土壤水分平均状况;AMC III土壤几乎呈饱和的水分状况。由于AMC II条件下CN值很容易获取(SCS Engineering Division, 1986),为了减少工作量,便于评价工作的进行,本研究采用AMC II作为前期湿度条件。

3)考虑坡度对CN的影响,Zhang等(2010)认为当坡度小于5%时CN值可直接查表获取,当坡度大于5%时,需要对CN进行坡度校正。校正公式为:

$$CN_2 = \frac{\exp[0.00673(100 - CN)] - 1}{3} \times [1 - 2\exp(-13.86\theta)]CN + CN \quad (2)$$

式中, CN 表示在前期湿度条件为 AMC II 时查表所得的值.  $CN_2$  表示当坡度大于 5% 校正后的值.  $\theta$  表示坡度.

2.1.3 距离因子 ( $D$ ) 距离因子反映出某种土地利用单元距离汇水路线的距离, 距离越近, 其进入水体的潜在污染量越多. 距离越远, 由于非点源污染物下渗或降解或被植被吸收, 所以进入水体的污染量可能越小. 一般来说, 距离因子的确定方法多种多样, 比如直接根据几何距离进行计算 (Zhang *et al.*, 2011); 采用关键阈值进行直接赋予权重分值 (Mallarino *et al.*, 2002). 本研究采用经验公式 (Cecchi *et al.*, 2007) 进行计算, 表达式为:

$$D_i = e^{-0.090533 \cdot d_i} \quad (3)$$

式中,  $D_i$  表示距离因子,  $d_i$  表示单元  $i$  到汇水路线的距离.  $-0.090533$  为经验指数.

该公式在我国也有部分应用, 比如武晓峰等 (2011) 对蛇鱼川小流域进行非点源污染评价时, 也采用了该算法. 该算法计算简单, 所需数据输入少, 且能较好反映实际状况, 因此本文也采用该算法.

2.1.4 权重的确定 ( $w$ ) 指标的权重对被评价对象的最后得分影响很大, 过于激进或者过于保守都会导致评价结果不准确. 确定指标权重通常有两类方法: 一类是主观方法, 如专家直接打分法、层次分析法、经验判断法等, 常见的  $P$  指数、潜在污染指数等权重的确定属于此类; 另一类是客观方法, 如熵权计算法、主成分分析法等 (姜灵敏, 2002), 在非点源污染风险评价中应用不多.

传统的专家打分法有很大的缺陷, 每个专家打分结果差异很大, 再加上由于不同区域自然、社会、经济等条件差异很大, 一个区域打分的结果往往并不适合于另外一个区域. 因此, 迫切需要一个既客观, 又具有普适性的权重确定方法.

多准则分析为我们提供了一个确定权重的思路. 假设权重的选取是任意的, 每组权重构成一个方案, 那么在无限个方案中求解最优方案就构成了多准则分析 (MCA) 的基本框架. MCA 中最具有挑战的环节即是建立可信的权重指数 (孟博等, 2011), 改进的理想解法 (Technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS) 可很好的解决该问题 (陈红艳, 2004), 该方法在水资源承载力 (屈吉鸿等, 2008)、环境质量评价 (史东生等, 2007)、水量分配 (张先起等, 2006) 等领域得到了广泛的应用. 基本思路是采用指标的数值信息建

立目标规划优化评标模型, 最后通过一定的高等数学方法来求解权重.

在计算权重之前, 首先必须将  $L$ 、 $R$ 、 $D$  3 个因子归一化, 归一化方法如下:

$$r_{ij} = \begin{cases} (x_{ij} - x_{j\min}) / (x_{j\max} - x_{j\min}) & x_{j\max} \neq x_{j\min} \\ 1 & x_{j\max} = x_{j\min} \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $x_{ij}$  表示第  $i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, m$ ) 个土地单元第  $j$  ( $j = 1, 2, 3$ ) 个指标分值,  $r_{ij}$  表示归一化的值.  $x_{j\min}$  和  $x_{j\max}$  分别表示第  $j$  指标最小值与最大值.

对于任何一个土地单元  $i$ , 若  $(r_{i1}, r_{i2}, r_{i3})$  为  $(1, 1, 1)$  时, 那么认为说风险最高; 若  $(r_{i1}, r_{i2}, r_{i3})$  为  $(0, 0, 0)$  时, 可认为不存在风险. 假设对于指标  $L$ 、 $R$ 、 $D$ , 对应的权重分别为  $w_1$ 、 $w_2$ 、 $w_3$ , 对于研究区内第  $i$  个土地利用单元与污染最为严重  $(1, 1, 1)$  及污染最轻  $(0, 0, 0)$  土地利用单元的加权距离平方和为:

$$f_i(w) = f_i(w_1, w_2, w_3) = \sum_{j=1}^3 w_j^2 (1 - r_{ij})^2 + \sum_{j=1}^3 w_j^2 r_{ij}^2 \quad (5)$$

风险评价目标是在  $m$  个土地利用单元中识别出潜在污染严重的区域, 总体要求是客观, 接近真实值, 评价过程中既不要过于保守, 也不要过于激进. 因此, 在这种程度上说, 假设  $f_i(w)$  趋于最小的话, 即第  $i$  个土地利用单元与最严重的单元和污染最轻的单元的加权距离平方和最小, 那么  $i$  趋向于收敛于风险最高与风险最低的中间, 即中值  $(0.5, 0.5, 0.5)$ . 相反那些风险较高或者较低由于距  $(0, 0, 0)$  或  $(1, 1, 1)$  较远, 都能被优先识别出. 因此, 这样去确定权重才合情合理, 才更有利于规划. 在距离意义下,  $f_i(w)$  ( $f_i(w) > 0$ ) 越小越好, 由此建立如下的单目标规划模型:

$$\min f(w) = \sum_{i=1}^m f_i(w) \quad (6)$$

其中  $\sum_{j=1}^3 \omega_j = 1$ ,  $\omega_j \geq 0$ ,  $j = 1, 2, 3$ .

构造拉格朗日函数

$$F(w, \lambda) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^3 w_j^2 ((1 - r_{ij})^2 + r_{ij}^2) - \lambda (1 - \sum_{j=1}^3 w_j) \quad (7)$$

$$\text{令} \begin{cases} \frac{\partial F}{\partial w_j} = 2 \sum_{i=1}^m w_j ((1 - r_{ij})^2 + r_{ij}^2) - \lambda = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial \lambda} = 1 - \sum_{j=1}^3 w_j = 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{解之得 } w_j = \mu_j / \sum_{j=1}^3 \mu_j, \quad (9)$$

$$\text{其中 } \mu_j = 1 / \sum_{i=1}^m [(1 - r_{ij})^2 + r_{ij}^2] \quad (10)$$

这样,  $L$ 、 $R$ 、 $D$ 、 $w$  都已经被确定, 最后可根据公式(1)计算污染风险分值(NPA). NPA 的范围为(0, 1), 数值越大表示可能的风险越大.

## 2.2 分区管理

本研究的非点源分区管理是通过风险指数(NPA)进行定性划分, 根据定性划分结果分别进行管理.

(1) 主要技术手段: 生态工程技术、非点源污染最佳管理措施(BMPs).

(2) 指导思想: “适度保护、优先规划、重点管理”——对基本无污染, 对环境有一定的缓冲能力的区域, 在遵循生态规律的基础上根据其风险的高低, 进行一般性及重点保护; 对于潜在污染的污染区域, 合理规划, 将污染物削减在生态系统中, 最大地保证物质循环的效率, 降低对环境的影响; 对于主要的污染源, 当采用当前管理措施无法满足防治要求时, 应该积极采取工程措施, 进行重点管理, 最大限度削减污染.

(3) 划分依据: 由于 TOPSIS 规划方法确定权重时目的为了使污染相对严重的源区能被优先识别, 这样使得 NPA 是 0 ~ 1 的范围内呈正态分布, 而不是均匀分布. 因此在进行划分的时候不能简单的均匀进行划分, 这样会使得结果不准确. 因此, 依据“适度保护、优先规划、重点管理”的指导思想, 将管理分区划分如下(表 3).

表 3 等级划分标准

Table 3 Categories of management planning areas

评价分值	定性划分
0 ~ 0.4	一般保护区
0.4 ~ 0.5	重点保护区
0.5 ~ 0.7	潜在污染区
0.7 ~ 0.8	中等污染区
0.8 ~ 1.0	重点管理区

## 3 案例研究(Case study)

北宅小流域位于北京市怀柔区南部, 地处怀柔区桥梓镇境内, 距怀柔水库上游 1.6 km, 流域总面积 13.48 km<sup>2</sup>. 属于典型的山区流域, 高程 43 ~ 493 m. 近年来经济的快速发展带来的对自然环境的破坏、农业、生活污染加剧, 对境内河流造成严重的威胁, 影响了怀柔水库入库水质. 因此选取该流域进行非点源污染防治规划的研究具有重要的现实意义.

### 3.1 非点源污染风险评价

图 2a、图 2b、图 2c 分别为北宅流域的土地覆盖、土壤类型和坡度数据. 首先计算土地利用因子( $L$ ), 根据表 3 土地利用分值, 分别对各个土地类型进行赋值, 赋值后进行归一化(参照公式(4)), 得出了流域  $L$  因子分布图, 见图 3a. 从图中看出颜色最深、分值最高为养殖场, 其次为菜地, 水域最低, 这与实际情况相符.

计算  $R$  因子需要土地覆盖、土壤类型及坡度等空间数据, 首先是查表获取不同土壤水文组下各土地利用的 CN 值(表 4), 然后根据坡度数据(图 2c)

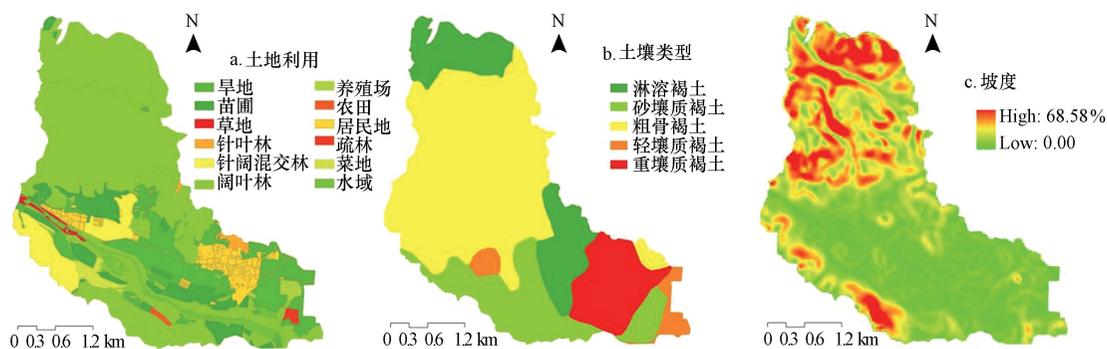


图 2 基础地理数据

Fig. 2 Basic geographic data

分别提取出坡度大于 5% 和小于 5% 的区域. 坡度大于 5% 区域采用公式(2)进行校正. 最后将坡度大于

5% 的区域的 CN 与坡度小于 5% 的区域叠加, 采用 ArcGIS 软件 Spatial Analysis 模块 Raster Calculator

进行计算,归一化后生成  $R$  因子见图 3b。 $R$  因子不仅体现了不同下垫面产流的能力,也考虑到了坡度对产流的影响。尤其在研究区的北部区域,由于坡

度较大,相应的径流指数应该高于坡度低的区域,这是符合实际情况的。

表 4 土地利用因子分值( $L$ )及 CN 值

Table 4 The scores of land use indicator and the values of curve number

名称	土地利用因子/ $L$	不同土壤水文组下 CN 值			
		A	B	C	D
养殖场	582.86	61	75	83	87
旱地	319.93	63	75	83	87
居民地	415.00	77	85	90	92
水域(池塘、水库、河流)	0	100	100	100	100
苗圃	319.93	77	86	91	94
荒草坡(裸地、草地)	170.04	45	66	77	83
水浇地	41.96	77	86	91	94
林地(疏林、针叶林、阔叶林、针阔混交林)	25.87	36	60	73	79

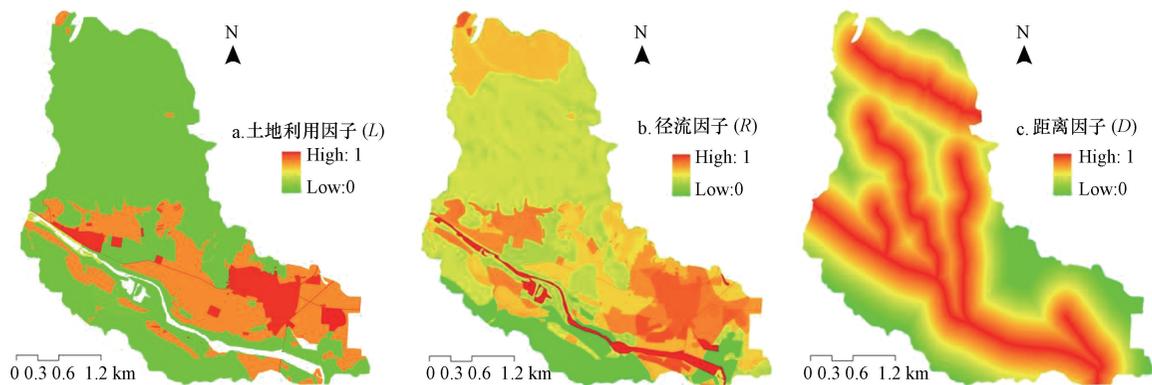


图 3 参评因子的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of indicators

距离因子的计算需要汇水路线的数据,汇水路线即降雨产流后径流的迁移路线,包括流域内的常规河道、及潜在的河道(降雨时有径流,降雨停止后随即干枯的自然沟渠)。汇水路线由 DEM 水文分析模块计算结合实地考察生成。得出汇水数据后,首先采用 ArcGIS 软件中 Spatial Analysis 工具集中 Distance 模块计算得出欧式距离,然后根据公式(3)生成距离的空间分布,最后归一化后形成  $D$  因子见图 3c。 $D$  代表了污染物汇流过程中的降解、下渗、植被拦截吸收等削减作用,与计算单元到汇水路线的流长密切相关。污染物削减量应与到汇水路线的距离成正相关,距离越远,削减作用影响越大, $D$  越小,符合定性分析的结果。

权重的计算是采用  $L$ 、 $R$ 、 $D$  因子,参照公式(9)和公式(10)进行计算。在 GIS 平台采用 Spatial Analysis 模块中 Raster Calculator 以及 Spatial

Analysis 工具集中 Zonal Statistics 模块,最后生成评价表达式为:

$$NPA = 0.3836L + 0.3283D + 0.2881R \quad (11)$$

相应的该流域风险评价结果见图 4。从图中可以发现,NPA 的空间分布有以下特点:

1) 整体上,风险最低的区域表现为距离河道较远、人为干扰少的特征,如研究区最南部的区域,土地利用方式偏向于自然,主要为针阔混交林和阔叶林;风险最高的区域表现为人为活动明显,距离河道较近,比如东南部区域,主要分布有居民地、养殖场、农田等。

2) 在研究区的北部,NPA 的分值随  $D$  的增加而递减,相反在南部人为活动密集的区域随河道距离变化规律不是很明显。因为北部区域主要为阔叶林、针叶林等,人为干扰少,人为污染少,距离成为影响非点源污染的主导因素。相反,在南部人类活

动集中,由于生产生活导致下垫面的变动,使得径流量及营养物的输出随土地利用变化而变化,所以也成为威胁河流水质主导因素.得出的结果与实际情况也是相符的.

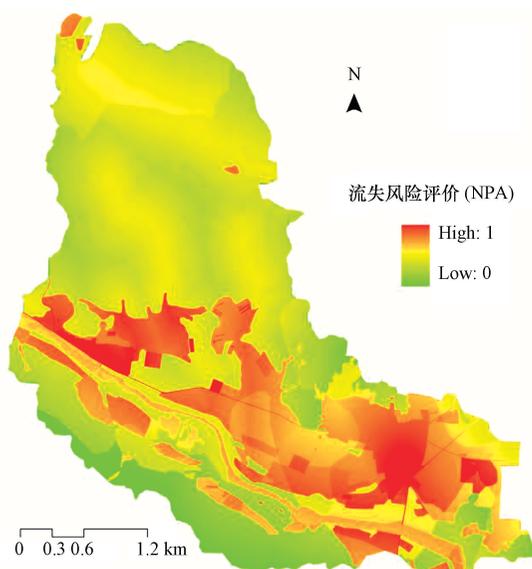


图4 风险评价结果

Fig. 4 Result of risk assessment

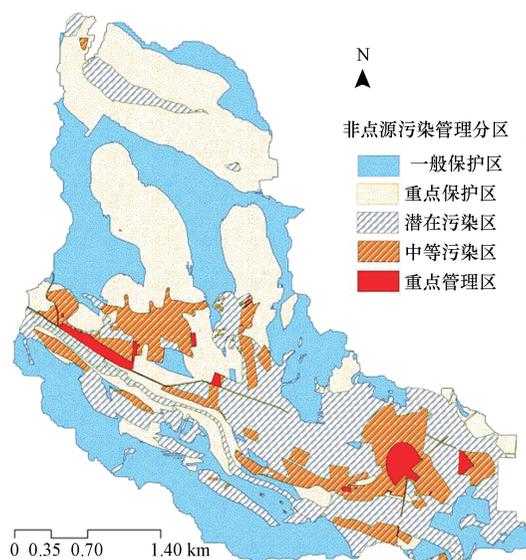


图5 管理分区

Fig. 5 Categories of management planning areas

### 3.2 非点源污染分区与管理

计算得出的 NPA 分值还需进行划分,这样才能有针对性对该研究区进行管理和规划结合,最大程度上削减非点源污染.参照表 3 的划分依据,对北宅小流域进行划分,结果见表 5.

表5 非点源污染规划管理分区

Table 5 Categories of management planning areas for the watershed of Beizhai

评价分值	定性划分	面积比例	土地利用组成	采取的管理和规划措施
0~0.4	一般保护区	34.56%	针阔混交林、阔叶林	一般保护
0.4~0.5	重点保护区	29.74%	阔叶林、针阔混交林、疏林	重点保护
0.5~0.7	潜在污染区	23.30%	阔叶林、旱地、居民地、水浇地、苗圃、草地	以生态和管理措施为主:加强耕作管理和养分管理,村户沼气池
0.7~0.8	中等污染区	10.75%	农田、居民地、苗圃	工程措施与管理措施相结合:滞留池、湿地、草沟、缓冲草带、生物滞留槽等
0.8~1.0	重点管理区	1.64%	居民地、养殖场	工程措施为主:植被缓冲带、人工湿地等

1) NPA 分值在 0~0.4 之间,离河道较远,产污能力小,能对非点源污染有一定的削减能力.可以有限度地计划开发,比如木材的取用等.但同时应该做好保护措施,避免生境被破坏.

2) 当 NPA 在 0.4~0.5 之间时,被划分为“重点保护区”.目前该区域对河流无影响,如若生态环境遭到破坏,则会导致严重的污染.因此对该区域予以重点保护,避免大的破坏.

3) NPA 分值为 0.5~0.7,人类活动开始体现,涵盖土地利用方式为靠近河道的部分林地,以及距离河道较远的部分居民地和农田等.在污染来源

上,首先需注意控制农资的投入,王晓燕等(2009b)在密云上游流域开展的研究表明:化肥、饲料添加剂和农药是流域磷输入的重要来源,占直接磷输入总量的 52.9%;在污染物的迁移上,磷的流失浓度和流失量在一定范围内都随坡度的增加而上升(王晓燕等,2008).研究区北部坡度较高,加上靠近水体较近,应特别注意防止非点源污染物直接进入水体.

对于靠近河道的林地,可通过采用提高植被覆盖度的方法来削减土壤侵蚀.除此之外还应在坡地上沿等高线布设密植灌木或灌化乔木以及灌草结

合的植物篱带(孙辉等,2004),减少径流量,从而提高靠近河道林地对径流的缓冲能力.带间布置植物篱带,周期性刈割避免其对周边植物的遮光.

对于远离河道的部分农用地等,可通过加强耕作管理和养分管理来减少侵蚀和营养物质的流失(陈洪波等,2006),比如免耕-少耕法(Aulakh *et al.*, 1984)、保护性耕作(Blevins *et al.*, 1993)、保护性作物轮作、肥料深施、平衡施肥等措施来减少流失.此外,也可以合理安排与林地的搭配,张汪寿等(2011)在北运河下游灌区开展的径流监测证实,林地具备相对较强的拦截、纳污和缓冲能力.

对于居民地,由于生活污染及非规模化家禽的养殖构成了主要污染来源,王晓燕等(2009c)认为推广农村户用沼气池,一定程度上可削减污染.及时清扫路面,也能去除大约 50% 的污染物(曹风中等,1993).

4)当 NPA 分值为 0.7~0.8,主要表现为人为污染.应该采用工程措施和非工程措施相结合的方法.对于农林用地,除采用相应的耕作和养分管理措施外,可选用滞留池、湿地、草沟、缓冲草带等类型的 BMP,金可礼等(2008)认为不同类型组合时具有更好的去污效果;居民用地,除了及时清扫路面,维持环境清洁等措施外,可选用生物滞留槽、生物滤槽等结构相对复杂的 BMP,占地少、去污效果好.

5)当 NPA 大于 0.8,由于大多靠近河道较近,且潜在污染负荷大,应该予以重点管理.部分居民地紧邻河道,可在紧邻河道、湖泊等水体一侧,设立林、草或湿地植物覆盖的区域(通常为带状),去除过境的养分和泥沙等污染物.

养殖场是重点污染源,由于负荷量比较大,污染比较集中,可采用生态工程技术的手段,比如建立大型沼气池,促使污染循环使用,沼气渣作为肥料回投农田.除此之外还可以采取工程措施,比如人为设置人工湿地、植被缓冲带等.Lee 等(2010)认为还可以通过适当调整家禽的养殖周期来减少污染,尽量避免在雨季大量养殖.

此外,除针对当前的现有的土地利用原地进行修复和管理外,还可以对区域农田作物进行优化配置,改善和提高农业生态系统的总体功能,减少农业化学品的投入.如在时间上,作物的耕作期和施肥期应考虑避开当地的降水集中季节;空间上,敏感水体周围及水土流失易发生的地段多种植对养分投入需求较少和对地表覆盖较好的作物.高超等

(2004)还认为应该在居民地和农田等人工系统为基质的景观中增加自然斑块和廊道,这样可提高人工景观的稳定性和自我调节能力,“从而使生态系统的抗逆能力和内部物质循环增强,负熵输入(如农田生态系统的化肥、农药等)可以大大减少,这样也就在很大程度上减轻了非点源污染物的源强”.此外,欧洋等(2012)认为 100 m 宽岸边带内景观格局与水质关系最为显著,因此在非点源污染管理中还应重点关注.

#### 4 结论(Conclusions)

1)本文提出了因子权重确定客观、普适性强、基于多准则分析的非点源污染评价方法,该方法不仅考虑了非点源产生、迁移、削减的各个过程,而且计算方便、便于操作,评价结果能直观反映各土地单元的非点源污染风险.

2)提出了“风险评价-规划分区-分别管理”的非点源污染规划思路,依据“适度保护、优先规划、重点管理”原则,划分出了重点管理区、中等污染区、潜在污染区、重点保护区和一般保护区 5 个管理分区,通过层层递进的方法确定了不同的分区采取不同的管理手段.该套方法不仅可为流域内非点源污染评价及关键源区的识别提供了一个有力的工具,也为流域内非点源污染源的管理提供科学方案.

3)该方法在北京市北宅小流域进行了应用.NPA 的空间分布图揭示了流域内潜在污染空间分布情况,参照划分标准划分出了管理分区,根据划分标准分别对其采取不同的手段,进一步表明该方法可操作性强、使用简单,可以为类似流域非点源污染评价和管理提供参考.

**责任作者简介:**王晓燕(1967—),女,博士,教授/博士生导师,从事非点源污染及流域水质管理等方面的研究.出版专著 2 部,在国内外学术刊物上发表论文 120 余篇. E-mail: cnuwxy@sohu.com.

#### 参考文献(References):

- Aulakh M S, Rennie D A, Paul E A. 1984. Gaseous nitrogen losses from soils under zero-till as compared with conventional-till management systems [J]. *Journal of Environmental Quality*, 13: 130-160
- Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, *et al.* 1998. Large area hydrologic modeling and assessment Part 1: Model development[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1): 73-89

- Blevins R L, Frye W W. 1993. Conservation tillage: an ecological approach to soil management [J]. *Advances in Agronomy*, 51: 33-78
- Cecchi G, Munafò M, Baiocco F, *et al.* 2007. Estimating river pollution from diffuse sources in the Viterbo province [J]. *Ann Ist Super Sanità*, 43(3): 295-301
- Cho J S, Park S, Im S. 2008. Evaluation of Agricultural Nonpoint Source (AGNPS) model for small watersheds in Korea applying irregular cell delineation [J]. *Agricultural Water Management*, 95(4): 400-408
- 曹风中, 戴天有. 1993. 地表水污染及其控制[M]. 北京: 中国环境科学出版社
- 陈红艳. 2004. 改进理想解法及其在工程评标中的应用[J]. *系统工程理论方法应用*, 13(5): 471-473
- Cronshey R. 1986. *Urban hydrology for small watersheds* [M]. Washington D C: Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, Engineering Division. 1-24
- Gao C, Zhu J G, Zhu J Y, *et al.* 2004. Nitrogen Export from an Agriculture Watershed in the Taihu Lake Area, China [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 26(2): 199-207
- Gburek W J, Sharpley A N. 1998. Hydrologic controls on phosphorus loss from upland agricultural watersheds [J]. *Journal of Environmental Quality*, 27(2): 267-277
- 高超, 朱继业, 窦贻俭, 等. 2004. 基于非点源污染控制的景观格局优化方法与原则[J]. *生态学报*, 24(1): 109-116
- Hughes K J, Magette W L, Kurz I. 2005. Identifying critical source areas for phosphorus loss in Ireland using field and catchment scale ranking schemes[J]. *Journal of Hydrology*, 304(1/4): 430-445
- Janssen R. 2001. On the use of multi-criteria analysis in environmental impact assessment in The Netherlands [J]. *Journal of Multi-criteria Decision Analysis*, 10(2): 101-109
- 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 modelling approach [J]. *Journal of Hydrology*, 183(3/4): 323-349
- 金可礼, 赵彬斌, 陈俊, 等. 2008. 茜坑水库流域面源污染最佳管理措施研究[J]. *水资源与水工程学报*, 19(5): 94-97
- 姜灵敏. 2002. 理想解法及其在商业银行经营绩效综合评价中的应用[J]. *系统工程理论方法应用*, 9: 227-230
- 刘家福, 蒋卫国, 占文凤, 等. 2010. SCS模型及其研究进展[J]. *水土保持研究*, 17(2): 120-124
- Lee C S, Chang C H, Wen C G, *et al.* 2010. Comprehensive nonpoint source pollution models for a free-range chicken farm in a rural watershed in Taiwan [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 139(1/2): 23-32
- Mallarino A P, Stewart B M, Baker J L, *et al.* 2002. Phosphorus indexing for cropland: Overview and basic concepts of the Iowa phosphorus index [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 57(6): 440-447
- Munafò M, Cecchi G, Baiocco F, *et al.* 2005. River pollution from non-point sources: a new simplified method of assessment [J]. *Journal of Environmental Management*, 77(2): 93-98
- 孟博, 李国平, 刘茂, 等. 2011. 基于洪水风险感知与空间多标准分析方法的土地使用类型研究[J]. *中国公共安全(学术版)*, 1: 14-22
- 欧洋, 王晓燕, 耿润哲. 2012. 密云水库上游流域不同尺度景观特征对水质的影响[J]. *环境科学学报*, 32(5): 1219-1226
- Petersen G W, Hamlett J M, Baumer G M, *et al.* 1991. Evaluation of agricultural nonpoint pollution potential in Pennsylvania using a geographic information system [R]. Final report ER9105. Harrisburg, PA: Pennsylvania Department of Environmental Resources. 60-61
- 屈吉鸿, 陈南祥, 黄强, 等. 2008. 改进的逼近理想解在地下水资源承载力评价中的应用[J]. *水利学报*, 39(12): 1309-1315
- Stalnacke P, Grimvall A, Sundblad K, *et al.* 1999. Estimation of riverine loads of nitrogen and phosphorus to the Baltic Sea, 1970—1993 [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 58: 173-200
- 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(2): 114-117
- 史东生, 弟宇鸣, 周春林. 2007. 改进的TOPSIS法在辐射环境质量评价中的应用[J]. *辐射防护*, 27(1): 53-57
- Tomer M D, Meek D W, Jaynes D B, *et al.* 2003. Evaluation of nitrate nitrogen fluxes from a tile-drained watershed in central Iowa [J]. *Journal of Environmental Quality*, 32: 642-653
- 武晓峰, 李婷. 2011. 流域内污染负荷分布的评价模型研究—以密云县蛇鱼川小流域为例[J]. *中国环境科学*, 31(4): 680-687
- 王晓燕. 2003. 非点源污染及其管理[M]. 北京: 海洋出版社
- 王晓燕, 王静怡, 欧洋, 等. 2008. 坡面小区土壤—径流—泥沙中磷素流失特征分析[J]. *水体保持学报*, 22(2): 1-5
- 王晓燕, 张雅帆, 欧洋. 2009a. 北京密云水库上游太师屯镇非点源污染损失估算[J]. *生态与农村环境学报*, 25(4): 37-41
- 王晓燕, 阎恩松, 欧洋. 2009b. 基于物质流分析的密云水库上游流域磷循环特征[J]. *环境科学学报*, 29(7): 1549-1560
- 王晓燕, 张雅芳, 欧洋, 等. 2009c. 最佳管理措施对非点源污染控制效果的预测——以北京市密云县太师屯镇为例[J]. *环境科学学报*, 29(10): 2440-2450
- Zhang H, Huang G H. 2011. Assessment of non-point source pollution using a spatial multicriteria analysis approach [J]. *Ecological Modelling*, 222(2): 313-321
- 张汪寿, 李晓秀, 王晓燕, 等. 2011. 北运河下游灌区不同土地利用方式非点源氮素输出规律[J]. *环境科学学报*, 31(12): 2698-2706
- 张先起, 梁川, 刘慧卿, 等. 2006. 改进的TOPSIS模型及其在黄河置换水量分配中的应用[J]. *四川大学学报: 工程科学版*, 38(1): 30-33