

陶双骏, 邵光成, 苏江霖, 等. 小流域面源污染风险评估研究——基于多分类有序离散选择模型[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(7): 1293–1299.
TAO Shuang-jun, SHAO Guang-cheng, SU Jiang-lin, et al. Research on small watershed non-point source pollution risk assessment: Based on the ordered multi-classification discrete choice model[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(7): 1293–1299.

小流域面源污染风险评估研究 ——基于多分类有序离散选择模型

陶双骏¹, 邵光成^{1*}, 苏江霖², 李育飞², 张新宇³, 张邵华⁴

(1. 南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室, 河海大学水利水电学院, 南京 210098; 2. 淮安市淮安区水利局, 江苏 淮安 223200; 3. 沭河水利管理局, 山东 临沂 276000; 4. 山东水利职业学院, 山东 日照 276800)

摘要:在目前流域环境污染监测体系基础上, 筛选并建立小流域面源污染风险评估指标体系, 通过因子分析法提取小流域面源污染风险评估等级的潜在变量, 建立基于有序多分类离散选择模型的小流域面源污染风险评估模型, 提供具体的风险等级评判计算方法, 并利用 15 个流域的面源污染监测数据对模型进行了实例分析。结果表明, 该风险评估模型能够较好地挖掘污染风险等级与影响因子之间的关系, 并能够计算评估流域面源污染不同风险程度的概率, 同时可利用观测的指标变量表示潜在的指标变量, 满足小流域监测资料缺乏的实际情况。相比于其他预测模型, 该模型能更好地为小流域面源污染治理提供参考。

关键词:生态清洁小流域; 面源污染; 风险评估; 多分类有序离散选择模型

中图分类号: X592 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2017)07-1293-07 doi:10.11654/jaes.2017-0047

Research on small watershed non-point source pollution risk assessment: Based on the ordered multi-classification discrete choice model

TAO Shuang-jun¹, SHAO Guang-cheng^{1*}, SU Jiang-lin², LI Yu-fei², ZHANG Xin-yu³, ZHANG Shao-hua⁴

(1. Key Laboratory of Efficient Irrigation-Drainage and Agricultural Soil-Water Environment in Southern China, Ministry of Education, College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Water Conservancy Bureau of Huaian District, Huaian City, Huaian 223200, China; 3. Shuhe River Water Management Bureau, Linyi 276000, China; 4. Shandong Water Conservancy Vocational Collage, Rizhao 276800, China)

Abstract: The ordered multi-classification discrete choice model was introduced into the risk assessment of non-point source pollution in small watersheds. Based on small watershed environmental monitoring data, sediment concentration, ammonia nitrogen, total nitrogen, total phosphorus, and chemical oxygen demand, which influence the water environment of small watersheds, were selected as independent variables and pollution risk level as a dependent variable, to establish the discrimination formula of the non-point pollution risk. A Kaiser-Meyer-Olkin test of sampling adequacy and Bartlett's test of sphericity were carried out to test the correlation of the model sample data. Goodness of fit and model predictive ability test were used to evaluate the model correctness. The results show that the model sample data have good correlation, and the model has excellent performance and forecasting ability. Unlike other models, the logistic distribution model has no requirement for the variable distribution. It can evaluate different levels of nonpoint source pollution influencing factors quantitatively and calculate the probability of different non-point source pollution risks. This study used the potential indicators to calculate model param-

收稿日期: 2017-01-09

作者简介: 陶双骏(1990—), 男, 江苏南京人, 硕士生, 主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail: 1533044561@qq.com

* 通信作者: 邵光成 E-mail: sgcln@126.com

基金项目: 江苏高校优势学科建设工程项目

Project supported: The Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions

eters, which conforms to the current situation of small watersheds in China. As a result, source pollution risk assessment based on the ordered multi-classification discrete choice model is a better method for small watershed non-point source pollution risk assessment.

Keywords: ecological clean small-watershed; non-point source pollution; risk assessment; ordered multi-classification discrete choice model

生态清洁小流域是指在传统小流域综合治理基础上,将水土资源保护、面源污染防治、农村垃圾及污水处理等相结合的一种新型综合治理模式^[1],最早是由北京市提出的^[2],其目标就是保护水源、改善环境、防治灾害、促进发展^[3]。近年来随着社会经济的发展,小流域内居民生产生活方式不断发生变化,由流域内的农业生产及居民生活所引起的面源污染已经成为流域水污染的主要因素^[4-5]。相对于城市生活及工业生产的点源污染,流域性的面源污染具有污染范围广、随机性大、成分形成复杂等问题,这也加大了流域面源污染的治理难度。

目前对于流域面源污染风险评估研究最常用的方法有事故树分析法、层次分析法、主成分分析法、随机抽样法等,这些方法虽然能为面源污染风险在系统属性评价上提供强大的技术支撑,但是没有考虑到系统中因子的有序性和结构性,而且在利用概率统计方法时将影响因子的贡献值限制在 0~1,忽略了单个因子贡献值可能大于 1 的情况^[6-8]。加上对小流域面源污染认识落后,导致现阶段各小流域没有系统的监测资料和详细的基本信息,因而需要探讨一种既符合小流域面源污染监测基础资料匮乏的实际,又能够为小流域面源污染预防与治理提供参考的新方法。本文尝试采用有序多分类离散选择模型对造成小流域面源污染的几个主要因子进行分析,以期建立一种方便、快捷、准确的小流域面源污染风险评估方法。

1 材料与方法

1.1 小流域面源污染风险评估体系构建

小流域面源污染主要来源有水土流失、农业面源污染、农村生产生活污染、大气干湿沉降等^[9]。由于面源污染具有随机性、多样性、广泛性和不易监测性等特点^[10-11],本文在小流域面源污染监测指标体系的基础上,选取泥沙含量、氨氮、总磷、总氮和化学需氧量 5 个基本环境监测指标,建立小流域面源污染风险评估指标体系,具体如表 1 所示。

1.2 指标体系描述与分析

设小流域面源污染风险评估指标集 $R=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 其中 $n \geq 2$, x_i 代表指标集中第 i 个指标,假定应用因子分析从指标集 R 中提取出的流域面源污染风险

表 1 小流域面源污染风险评估指标体系

Table 1 Risk assessment index system of non-point source pollution in small watershed

序号	评价指标	指标描述 ^[12-14]
1	泥沙含量(a1)	水土流失情况
2	氨氮(a2)	农业面源污染、水土流失、农村生活污水等情况
3	总磷(a3)	农业面源污染和水土流失情况
4	总氮(a4)	农业面源污染、水土流失、大气干湿沉降等情况
5	化学需氧量(a5)	农业生产生活污染等情况

潜在变量为 F_1, F_2, F_3 。参考环境质量标准对水质污染等级的划分,将污染风险程度设置为“良好、轻度污染、较重污染、重污染、严重污染”,分别用数字“1、2、3、4、5”表示,概率分别表示为 P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 。影响面源污染的因素有很多,而它们之间存在着多重共线性,因此利用因子分析法提取潜在变量,可有效解决多重共线性问题^[15]。因子分析的代数模型如下:

$$X_i = A_{i1}F_1 + A_{i2}F_2 + \dots + A_{im}F_m + \varepsilon_x \quad (1)$$

式中: $X \in R$, 为观测变量; F_m 为风险潜在变量; A_{im} 为潜在变量因子荷载,构成旋转后因子成分矩阵; ε_x 为观测误差或噪声。则有:

$$F_m = W_{m1}X_1 + W_{m2}X_2 + \dots + W_{mn}X_n \quad (2)$$

式中: W_{mn} 为标准化后的 X 的加权系数,构成成分得分系数矩阵。

通过因子分析可得出 A_{im} 和 W_{mn} 分别对应的系数矩阵,从而可用观测变量将潜在变量表示出来。

1.3 建立污染风险评估模型

1.3.1 有序离散选择模型

有序多分类离散选择模型不要求变量满足正态分布或等方差性,可对不同程度面源污染的影响因素进行定量评价,在面源污染风险评估中,利用数字来表示风险程度的高低次序,假设 y 表示在 $\{0, 1, 2, \dots, k\}$ 上取值的有序分类响应变量,对于其中某一个 K 值,解释变量为 $x_1, x_2, \dots, x_n$,则其对应的有序离散选择模型^[16-17]为:

$$y_i = \alpha + \sum_{i=1}^n X_i \beta_i + u_i \quad (3)$$

式中: y_i 为第 i 个研究区域面源污染的风险程度; X_i 为第 i 个区域面源污染风险程度的影响因素向量; α 为常数项; β 为待估计的系数向量; u_i 为独立同分布

的随机扰动项。

当 $u_i \sim N(0,1)$ 时,式(3)为有序 Probit 模型,当 $u_i \sim \text{Logistic}$ 时,式(3)为有序 Logit 模型,而 Logistic 分布模型可以将由解释变量构成的非线性函数转换成线性函数,进而可以判断影响污染的某一种主要因素,并能够计算出不同的自变量,此时各种污染程度的发生概率满足面源污染风险评估的要求。因此,本文采用 $u_i \sim \text{Logistic}$ 分布的假设。

y 表示风险程度,是一个不可观测的值,当实际观测取值时有 k 种类别,相应取值 $y=1, y=2, \dots, y=k$,且各取值之间的关系为 $(y=1) < (y=2) < \dots < (y=k)$,这样风险取值就有 $k-1$ 个未知的临界点,这些点将各相邻的类别划分开^[18]。也可表述如下:

$$\begin{aligned} & \text{如果 } y_i \leq a_1, \text{ 那么 } y_i = 1 \\ & \text{如果 } a_1 < y_i \leq a_2, \text{ 那么 } y_i = 2 \\ & \dots \\ & \text{如果 } a_{k-1} < y_i, \text{ 那么 } y_i = k \end{aligned} \quad (4)$$

式中: a_k 表示风险的临界点,其值越大代表的风险程度越高; y 表示风险程度。

当 $u_i \sim \text{Logistic}$ 分布时,通常使用如下 Logistic 转换函数:

$$P_i = F(y_i) = \frac{1}{1 + e^{-y_i}} \quad (5)$$

可以得到给定 X 的 y 的条件分布,即可以计算 y 取各个值的概率:

$$\begin{aligned} P(y=1) &= F[a_1 - (\alpha + \sum \beta X_i)] \\ P(y=2) &= F[a_2 - (\alpha + \sum \beta X_i)] - F[a_1 - (\alpha + \sum \beta X_i)] \\ &\dots \\ P(y=k) &= 1 - F[a_{k-1} - (\alpha + \sum \beta X_i)] \end{aligned} \quad (6)$$

式中各项符号表示皆与式(3)、式(4)相同,且: $P(y=1) + P(y=2) + \dots + P(y=k-1) + P(y=k) = 1$

对于每一个 k ,都有其对应的似然函数,通过极大似然估计可得到对应临界值 a 和系数 β 的极大似然估计值。为简化计算,将似然函数取其对数,求解对数似然函数来估计 a 和 β 的值,对数似然函数如下所述^[19,17]:

$$l_i(a, \beta) = \ln[F(a_1 - \alpha - \sum \beta X_i)] + \ln[F(a_2 - \alpha - \sum \beta X_i) - F(a_1 - \alpha - \sum \beta X_i)] + \dots + \ln[1 - F(a_{k-1} - \alpha - \sum \beta X_i)]$$

1.3.2 基于有序离散选择模型的风险判别分析

有序 Logistic 回归模型用于污染风险评估时,通常用“序类数-1”个回归方程描述自变量(预报变量)与响应变量的关系,因此可以用 $k-1$ 个方程联立给出:

$$\begin{aligned} \ln\left[\frac{p(y \leq 1|x)}{1-p(y \leq 1|x)}\right] &= \beta_{1,0} - (\beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n) \\ \ln\left[\frac{p(y \leq 2|x)}{1-p(y \leq 2|x)}\right] &= \beta_{2,0} - (\beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n) \\ &\dots \\ \ln\left[\frac{p(y \leq k-1|x)}{1-p(y \leq k-1|x)}\right] &= \beta_{k-1,0} - (\beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n) \end{aligned} \quad (7)$$

式中:等式左边为污染发生比的对数形式,即表示出现某一类状态的机会大小的对数。等式右边 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 为预报变量; $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ 为待估计的参数,可通过极大似然估计得到; $\beta_{n,0}$ 表示回归方程截距及未知临界点的集合^[17]。

建立的联立方程式(7)经过统计检验后即可对面源污染进行风险分析。将一组污染影响因子数据 $X_1^*, X_2^*, \dots, X_n^*$, 带入式(7)中,即可求解出 $p_1, p_2, \dots, p_{n-1}$ 的值,进而得到序类 1、2、 $\dots$ 、 n 的概率 $P_1, P_2, \dots, P_n$:

$$\begin{aligned} P_1 &= p_1 \\ P_2 &= p_2 - p_1 \\ &\dots \\ P_{n-1} &= p_{n-1} - p_{n-2} \\ P_n &= 1 - p_{n-1} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $P_i = P(y=i), i=1, 2, \dots, k$, 表示发生某一程度风险的概率。

若 $P_i = \max_{0 \leq i \leq n} P(y=i)$, 则可评定区域面源污染的风险级别为 i 。

2 结果与讨论

在满足样本多样性的基础上,本文以 16 个污染程度各不相同的小流域的环境监测数据为基础,对基于有序多分类离散选择模型的小流域面源污染风险评估方法进行了实例分析,其中 15 个小流域建立模型,第 16 个为验证模型。分析步骤如下:

(1)在所选 15 个小流域数据中,依据小流域面源污染风险评估指标体系(表 1),选择对应流域某一年的监测数据建立小流域风险评估信息表,作为模型分析的样本数据(表 2)。

(2)对表 2 的评估信息数据进行 Bartlett 球体检验、KMO 检验,结果显示 KMO 抽样适度测定值为 0.536,大于 0.5, Bartlett 球形检验值为 23.821, $P(\text{Sig.}) = 0.008 < 0.05$,据此认为该数据可用于因子分析。结果详见表 3。

表2 小流域风险评估信息表

Table 2 Risk assessment information table of selected small watershed

流域	y	$x_1(a_1)$	$x_2(a_2)$	$x_3(a_3)$	$x_4(a_4)$	$x_5(a_5)$
h1	2	9.305	0.723	0.962	0.130	2.294
h2	3	74.341	0.718	0.958	0.059	2.283
h3	3	12.573	0.834	1.112	0.150	2.654
h4	5	78.747	0.803	1.070	0.144	2.552
h5	2	43.834	0.538	0.717	0.097	1.711
h6	4	26.249	0.825	1.100	0.149	2.623
h7	3	65.567	0.651	0.867	0.116	2.068
h8	2	53.209	0.074	1.703	0.058	5.342
h9	4	73.361	0.026	1.899	0.073	15.200
h10	4	52.159	0.063	2.077	0.101	13.726
h11	2	105.340	0.062	0.593	0.053	14.256
h12	5	77.983	0.677	1.419	0.302	3.079
h13	5	36.721	0.837	1.832	0.360	3.435
h14	1	14.369	0.199	0.392	0.096	1.162
h15	1	30.207	0.297	0.485	0.120	1.806

(3)通过因子分析得到成分得分系数(表4)和旋转成分矩阵和公共因子方差(表5),以及成分分析

表3 KMO 抽样适度测定值与 Bartlett 球形检验值

Table 3 KMO and Bartlett's Test

AdequacyKMO	Bartlett 球形检验值		
抽样适度测定值	Approx.Chi-Square	df	Sig.
0.536	23.821	10	0.008

表4 成分得分系数

Table 4 Component score coefficient table

因子	F_1	F_2	F_3
$x_1(a_1)$	0.209	-0.182	0.991
$x_2(a_2)$	0.506	-0.125	0.172
$x_3(a_3)$	0.042	0.711	-0.151
$x_4(a_4)$	0.488	0.322	0.08
$x_5(a_5)$	-0.258	0.319	0.142

表5 旋转成分矩阵和公因子方差

Table 5 Rotated component matrix and communalities

因子	F_1	F_2	F_3	公因子方差
$x_1(a_1)$	-0.127	0.07	0.984	0.989
$x_2(a_2)$	0.898	-0.21	-0.131	0.868
$x_3(a_3)$	0.034	0.955	0.063	0.917
$x_4(a_4)$	0.833	0.401	-0.063	0.858
$x_5(a_5)$	-0.635	0.558	0.433	0.902
方差	2.36	1.4	0.774	4.534
%	0.472	0.28	0.155	0.907

碎石图(图1)和旋转成分图(图2)。

根据碎石图(图1)分析可知,成分1和成分2的特征值均大于1,综合考虑选择因子个数对原变量解释率要高于80%及选取因子的特征值大于1这两个限制条件,选取3个因子,解释率为90.7%。根据旋转成分图(图2),可认为变量 X_3 、 X_5 是第一组, X_2 、 X_4 是第二组, X_1 是第三组。

根据表4,得到如下成分系数方程:

$$F_1=0.209x_1+0.506x_2+0.042x_3+0.488x_4-0.258x_5$$

$$F_2=-0.182x_1-0.125x_2+0.711x_3+0.322x_4+0.319x_5$$

$$F_3=0.991x_1+0.172x_2-0.151x_3+0.08x_4+0.142x_5 \quad (9)$$

式中: F 代表潜在变量的成分; x 表示污染指标。

由式(9)可知,成分 F_1 ,基本支配 a_2 、 a_4 ,反映氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)和总氮(TN)的情况;成分 F_2 ,基本支配 a_3 、 a_5 ,反映总磷(TP)和化学需氧量(COD)的情况;成分 F_3 ,基本支配 a_1 ,反映泥沙含量的情况。

据表2和式(9)得到潜在变量评价结果如表6。

(4)根据提取的潜在变量,通过SPSS 19.0 统计分析软件进行有序 Logistic 回归分析,结果见表7。

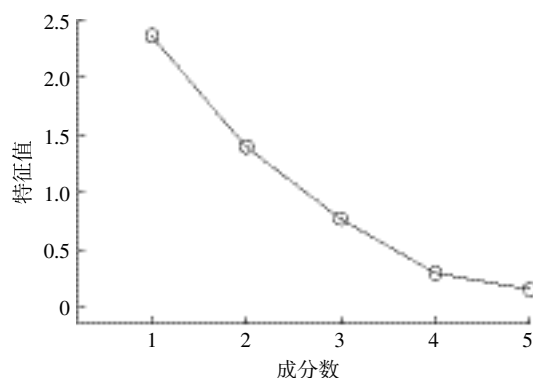


图1 成分分析碎石图

Figure 1 Scree plot of factor analysis

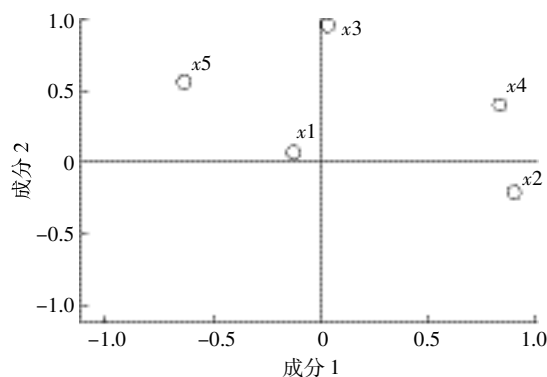


图2 旋转空间中的成分图

Figure 2 Component plot in rotated space

表 6 潜在变量评价

Table 6 Latent variable evaluation table

流域	F_1	F_2	F_3
h1	1.823	-0.326	9.536
h2	15.380	-12.192	73.980
h3	2.485	-0.707	12.824
h4	16.321	-12.811	78.389
h5	9.069	-6.958	43.674
h6	5.345	-3.214	26.373
h7	13.592	-10.701	65.261
h8	9.880	-6.759	53.249
h9	11.540	-7.133	74.583
h10	7.529	-3.613	53.344
h11	18.420	-14.193	106.341
h12	16.054	-12.189	77.644
h13	7.464	-4.274	36.774
h14	2.867	-1.960	14.387
h15	6.076	-4.575	30.179

表 7 Logistic 回归分析结果

Table 7 Analysis of regression logistic

变量	参数估计	标准误	卡方	自由度	显著性
[Y=1]	13.412	5.976	5.037	1	0.025
[Y=2]	22.821	11.319	4.065	1	0.044
[Y=3]	25.312	11.768	4.626	1	0.031
[Y=4]	28.936	12.812	5.101	1	0.024
F_1	20.504	10.186	4.052	1	0.044
F_2	15.939	7.863	4.109	1	0.043
F_3	-1.292	0.67	3.718	1	0.054

根据以上回归结果建立有序 Logistic 回归模型:

$$\text{Logit}[P(Y \leq 1 | F_1, F_2, F_3)] = 13.412 - (20.504F_1 + 15.939F_2 - 1.292F_3)$$

$$\text{Logit}[P(Y \leq 2 | F_1, F_2, F_3)] = 22.821 - (20.504F_1 + 15.939F_2 - 1.292F_3)$$

$$\text{Logit}[P(Y \leq 3 | F_1, F_2, F_3)] = 25.312 - (20.504F_1 + 15.939F_2 - 1.292F_3)$$

$$\text{Logit}[P(Y \leq 4 | F_1, F_2, F_3)] = 28.936 - (20.504F_1 + 15.939F_2 - 1.292F_3) \quad (10)$$

(5)模型回代估计和预测能力检验

通过 Pearson 方法和 Deviance 方法,对模型进行拟合优度检验,结果均表明显著性大于 0.9(表 8),可认为拟合结果较好。

将建立模型的样本数据重新带入模型中,通过模型判断的风险程度与流域实际的风险程度的比较,对

表 8 拟合度检验结果

Table 8 Goodness-of-fit test results

拟合准则	卡方	自由度	显著性
Pearson	34.57	53	0.977
Deviance	18.249	53	1

模型准确性进行验证。准确率 $\eta = (1 - n/m)100\%$ (其中 n 表示判错个数, m 表示样本总个数), 根据表 2 数据, 利用式(9)、式(10)、式(5)、式(8)计算得到对应风险程度的概率值。结果显示, 15 个小流域判错 3 个, 准确率为 80%。判错的原因可能是样本个数偏少, 导致等级 3 和 4 的界限区分不够明确, 故应增加风险等级 3 和 4 的样本数量以明确两者之间的界限。回判分析结果见表 9。

(6)根据小流域面源污染风险评估模型, 对第 16 个小流域进行面源污染风险评估, 其面源污染信息如表 10。

根据式(9), 提取潜在变量 $F_1 = 5.418\ 68$, $F_2 = -3.713\ 11$, $F_3 = 27.676\ 6$, 根据式(10)求解得到待评估区域的 p 值 $p_1 = 0.059$, $p_2 = 0.998$, $p_3 = 0.999$, $p_4 = 0.999$, 根据式(8)得到 P 值, 如表 11。

$\max P_i = P(y=i) = P_2$, 则可评定区域农业面源污染的风险级别为“2 轻度污染”。

(7)通过以上小流域面源污染风险模型的判别分析, 认为第 16 个小流域面源污染风险程度较低, 其中污染物中总磷(TP)及化学需氧量(COD)指标较低, 泥沙含量、氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)、总氮(TN)指标居中。鉴于该小流域主要以农业和旅游业为主, 流域内植被丰富、覆盖良好, 水土流失量较少, 虽然模型预测的污染风险程度较低, 但是考虑到引起面源污染的污染物大多吸附在土壤中, 尚无随径流进入水体, 因此模型预测结果仅供参考。对于该流域, 在加强面源污染管理的同时, 也要提高流域内居民的环境保护意识, 统筹协调流域内的经济发展与生态治理。

3 结论

(1)小流域面源污染风险评估指标体系能够满足现阶段小流域面源污染基础资料匮乏的现实, 在污染物及污染途径上较好地反映了小流域面源污染的实际情况。

(2)统计样本的回代表明, 该模型能够较好地对发生污染的风险进行预测, 预测准确率达 80%。但由于 Logistic 模型的判断能力取决于样本数据的准确性

表9 回归分析结果
Table 9 Result of return judgment

序号	观测变量					潜在变量				实际 y
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	F_1	F_2	F_3	y	
1	9.305	0.723	0.962	0.130	2.294	1.823	-0.326	9.536	2	2
2*	74.341	0.718	0.958	0.059	2.283	15.380	-12.192	73.980	4*	3
3	12.573	0.834	1.112	0.150	2.654	2.485	-0.707	12.824	3	3
4	78.747	0.803	1.070	0.144	2.552	16.321	-12.811	78.389	5	5
5	43.834	0.538	0.717	0.097	1.711	9.069	-6.958	43.674	2	2
6*	26.249	0.825	1.100	0.149	2.623	5.345	-3.214	26.373	3*	4
7	65.567	0.651	0.867	0.116	2.068	13.592	-10.701	65.261	3	3
8*	53.209	0.074	1.703	0.058	5.342	9.880	-6.759	53.249	4*	2
9	73.361	0.026	1.899	0.073	15.200	11.540	-7.133	74.583	4	4
10	52.159	0.063	2.077	0.101	13.726	7.529	-3.613	53.344	4	4
11	105.340	0.062	0.593	0.053	14.256	18.420	-14.193	106.341	2	2
12	77.983	0.677	1.419	0.302	3.079	16.054	-12.189	77.644	5	5
13	36.721	0.837	1.832	0.360	3.435	7.464	-4.274	36.774	5	5
14	14.369	0.199	0.392	0.096	1.162	2.867	-1.960	14.387	1	1
15	30.207	0.297	0.485	0.120	1.806	6.076	-4.575	30.179	1	1

注: *: 判错样本区域, y : 面源污染风险等级。

Note: *: the error sample area, y : risk level of non-point source pollution.

表10 小流域面源风险评估信息

Table 10 Risk assessment information of small watershed

区域	$x_1(a_1)$	$x_2(a_2)$	$x_1(a_3)$	$x_2(a_4)$	$x_1(a_5)$
h16	27.611	0.34	0.72	0.17	2.47

表11 风险评估 P 值

Table 11 P value of risk assessment

区域	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
h16	0.059	0.939	0.001	0.001	0

及代表性,本模型在样本回代时“较重污染”和“重污染”出现误判,还需进一步增加这两个风险程度在样本中比例。

(3) Logistic 模型能够较好地挖掘污染风险等级与影响因子之间的关系,能计算待评估流域面源污染不同风险程度的概率,通过利用观测变量表示潜在变量,从一定程度上解决概率统计方法对影响因子限制的问题。相对于其他判别模型,Logistic 模型可为面源污染风险治理提供更多的风险信息,因而是一个相对更优的小流域面源污染风险判别方法。

参考文献:

[1] 郝咪娜. 浙江省生态清洁小流域建设措施研究[D]. 西安:西北农林

科技大学, 2013: 1-2.

HAO Mi-na. Research on construction measures of eco-clean small watershed in Zhejiang Province[D]. Xi'an: Northwest A&F University, 2013: 1-2.

[2] 毕小刚, 杨进怀, 李永贵, 等. 北京市建设生态清洁型小流域的思路与实践[J]. 中国水土保持, 2005(1): 18-20.

BI Xiao-gang, YANG Jin-huai, LI Yong-gui, et al. Reasons and practice on establishing ecological and clean-type small watersheds in Beijing municipality[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2005(1): 18-20.

[3] 祁生林. 生态清洁小流域建设理论与实践[D]. 北京林业大学, 2006: 23-24.

QI Sheng-lin. Study on the eco-clean small watersheds construction theory and practice[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2006: 23-24.

[4] 可欣, 于维坤, 尹炜, 等. 小流域面源污染特征及其控制对策[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(7): 201-205.

KE Xin, YU Wei-kun, YIN Wei, et al. Some aspects of non-point pollution in small watershed: Characteristics and control strategies[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 32(7): 201-205.

[5] 杨艳霞, 曾红娟, 张亚玲. 流域面源污染危害及治理与管理对策分析[J]. 林业调查规划, 2008, 33(6): 43-46.

YANG Yan-xia, ZENG Hong-juan, ZHANG Ya-ling. Analysis on harmfulness control and management of non-point source pollution of watershed[J]. *Forest Inventory and Planning*, 2008, 33(6): 43-46.

[6] 刘建昌, 严岩, 刘峰, 等. 基于多因子指数集成的流域面源污染风险研究[J]. 环境科学, 2008, 29(3): 599-606.

LIU Jian-chang, YAN Yan, LIU Feng, et al. Risk assessment and safety

- evaluation using system normative indexes integration method for non-point source pollution on watershed scale[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(3):599-606.
- [7] Lloyd D K, Lipow M. Reliability: Management, methods, and mathematics[M]. New Jersey: Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1962:291-299.
- [8] Saaty T L. How to make a decision: The analytic hierarchy process[J]. *European Journal of Operational Research*, 1990, 48(1):9-26.
- [9] 余志敏, 袁晓燕, 施卫明. 小流域面源污染治理与评估模型研究进展[J]. 中国人口. 资源与环境, 2010, 20(5):1-4.
- YU Zhi-min, YUAN Xiao-yan, SHI Wei-ming. Research evolvement of small watershed pollution management and evaluation model[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2010, 20(5):1-4.
- [10] 徐建华. 现代地理学中的教学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002:84-92.
- XU Jian-hua. Mathematical methods in contemporary geography[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002:84-92.
- [11] 张玉斌, 郑粉莉, 武敏. 土壤侵蚀引起的农业非点源污染研究进展[J]. 水科学进展, 2007, 18(1):123-132.
- ZHANG Yu-bin, ZHENG Fen-li, WU Min. Research progresses in agricultural non-point source pollution caused by soil erosion[J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(1):123-132.
- [12] 章茹, 周文斌, 金可礼. 深圳茜坑水库小流域非点源污染负荷估算[J]. 江西师范大学学报(自然科学版), 2008, 32(5):627-630.
- ZHANG Ru, ZHOU Wen-bin, JIN Ke-li. Loss of non-point source pollutants from Xikeng Reservoir small watershed in Shenzhen[J]. *Journal of Jiangxi Normal University(Natural Science)*, 2008, 32(5):627-630.
- [13] 卢宝鹏, 张瑞霞. 小流域面源污染监测技术指标体系及监测方法初探[J]. 吉林农业, 2010(9):157, 190.
- LU Bao-peng, ZHANG Rui-xia. Preliminary study on monitoring index system and monitoring method of non-point source pollution in small watershed[J]. *Jilin Agricultural*, 2010(9):157, 190.
- [14] 魏曦, 史明昌, 郭宏忠, 等. 小流域面源污染监测技术体系的构建[J]. 中国水土保持, 2010(11):14-16.
- WEI Xi, SHI Ming-chang, GUO Hong-zhong, et al. Construction of monitoring system for non-point source pollution in small watershed[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2010(11):14-16.
- [15] 牟鹏飞, 张东玲. 有序多分类离散选择模型的信用评级与风险预警研究: 以国内 20 家上市企业为例[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2012, 42(9):90-96.
- MU Peng-fei, ZHANG Dong-ling. Ordered discrete choice model based credit rating and risk warning: Illustrated by an example of twenty domestic listed companies[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2012, 42(9):90-96.
- [16] 张冬玲, 高齐圣. 基于多分类离散选择模型的农产品安全风险评价研究[J]. 农业系统科学与综合研究, 2009, 25(1):5-9.
- ZHANG Dong-ling, GAO Qi-sheng. Agricultural food safety risk evaluation based on multi-classification discrete choice model[J]. *System-sciences and Comprehensive Studies Inagriculture*, 2009, 25(1):5-9.
- [17] 张冬玲. 农产品质量安全综合评价理论与方法研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2009:82-103.
- ZHANG Dong-ling. Study on theory and method of synthetically evaluation of agricultural products quality and safety[D]. Qingdao: Qingdao University, 2009:82-103.
- [18] 李璧涛. 有序多分类回归模型及其在判断空气质量等级方面的应用[D]. 昆明: 云南大学, 2015:11-14.
- LI Bi-tao. The ordinal classification and regression model and its application in judgement the rank of air quality[D]. Kunming: Yunnan University, 2015:11-14.
- [19] 段鹏. 离散选择模型理论与应用研究[D]. 天津: 南开大学, 2010:27-29.
- DUAN Peng. Theoretic research of discrete selection model and its applications[D]. Tianjin: Nankai University, 2015:27-19.