

# 基于 DPSIR-TOPSIS 模型的黄河内蒙古段十大孔兑综合治理生态环境效应评估

赵振亚<sup>1</sup>, 姬宝霖<sup>1</sup>, 宋小园<sup>1</sup>, 李超<sup>1</sup>, 乔楠<sup>2</sup>

(1. 内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;

2. 鄂尔多斯市水土保持局, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

**摘要:** [目的] 对区域综合治理现状进行评估, 为政府制定政策提供相关理论依据。[方法] 将 DPSIR 概念模型引入流域综合治理生态环境效应评价指标体系, 并运用 AHP-熵权法和 TOPSIS 法对黄河内蒙古段十大孔兑综合治理现状进行生态环境效应评估。[结果] 十大孔兑综合治理现状评价价值由高到低为: 罕台川 > 西柳沟 > 哈什拉川 > 呼斯太河 > 毛不拉 > 木哈尔河 > 东柳沟 > 卜尔嘎色太沟 > 黑濛沟 > 壕庆河。综合效应指数呈中间高, 两边低的趋势, 仅罕台川等级为 II 级, 其他孔兑都为 IV 级, 各孔兑整体上生态环境效应指数较低, 综合治理现状较差。[结论] DPSIR-TOPSIS 模型内部结构清晰, 较好地解释了流域综合治理工程与环境—经济—社会系统间的内在联系, 评价方法采取了主客观相结合的方法, 也更为合理, 为流域综合治理生态环境效应提供了一种新的方法和思路。

**关键词:** 流域; 综合治理; 十大孔兑; 生态环境效应; DPSIR 模型; AHP-熵权法; TOPSIS 模型

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2016)01-0143-08

中图分类号: X821

文献参数: 赵振亚, 姬宝霖, 宋小园, 等. 基于 DPSIR-TOPSIS 模型的黄河内蒙古段十大孔兑综合治理生态环境效应评估[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1): 143-150. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbetb. 2016. 01. 025

## Eco-environmental Benefits Evaluation of Ten Tributaries Comprehensive Management Based on DPSIR-TOPSIS Model in Inner Mongolia Section of Yellow River

ZHAO Zhenya<sup>1</sup>, JI Baolin<sup>1</sup>, SONG Xiaoyuan<sup>1</sup>, LI Chao<sup>1</sup>, QIAO Nan<sup>2</sup>

(1. *Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China;* 2. *Soil and Water Conservation Bureau of Erdos City, Erdos, Inner Mongolia 017000, China*)

**Abstract:** [Objective] To assess the benefits of comprehensive management and provide support for government policy making. [Methods] The concept of DPSIR model was introduced into the eco-environment benefit evaluation index system. AHP-entropy and TOPSIS method was used to evaluate the eco-environment benefit of the comprehensive management in ten tributaries in Inner Mongolia section of the Yellow River. [Results] Value of the integrated management in ten tributaries from highest to lowest was: Hantaichuang > Xiliugou > Hashilachuang > Husitaihe > Maobula > Muhaerhe > Dongliugou > Boergasetaiyou > Heilaigou > Haoqinghe. The comprehensive effect index was high in the middle, but low in both sides. Hantaichuan was class II, while the other tributaries was class IV, and the comprehensive management in this region was poor. [Conclusion] The internal structure of the DPSIR-TOPSIS model was clear, and it well explained the intrinsic link between watershed comprehensive management engineering and environment-economy-society system. This study provides a new method for assessing the eco-environment benefit of comprehensive management.

**Keywords:** watershed; control; ten tributaries; eco-environmental effect; DPSIR model; AHP-entropy method; TOPSIS model

收稿日期: 2015-01-16

修回日期: 2015-03-07

资助项目: 国家自然科学基金项目“鄂尔多斯高原季节性河流高含沙洪水利用的机理研究”(50469001), “寒区湖冰形成过程模拟及其对环境影响效应研究”(51169017)

第一作者: 赵振亚(1987—), 男(汉族), 山东省临沂市人, 博士研究生, 主要从事农业水土环境研究。E-mail: zhaozhenya123456@126.com。

通讯作者: 姬宝霖(1956—), 男(汉族), 内蒙古达拉特旗人, 本科, 博士生导师, 主要从事农业水土环境研究。E-mail: 13904713097@139.com。

人口、资源、环境和发展是当今世界面临的重大问题。近些年来,随着全球经济快速发展和人口急剧膨胀,资源和环境危机日益严峻。在全球生态危机中,因人为活动而导致的流域生态系统退化已成为当今生态及水利等领域的中心问题之一<sup>[1]</sup>。目前,以流域为单元进行综合治理已经成为当今世界各国治理水土流失的主要形式。位于黄河内蒙古段的十大孔兑(蒙语音译:季节性河流),生态环境恶劣,水土流失严重,风沙灾害频繁,防洪形势严峻,严重制约区域经济社会发展,影响人民生命财产安全,特别是山洪泥沙,形成沙坝,堵塞黄河,严重威胁黄河内蒙古河段防洪防凌安全,加剧黄河悬河态势<sup>[2-5]</sup>。该区域严重退化的生态系统不仅影响着当地广大农民的生存环境和生活水平,而且制约着区域流域农业生产力提高的社会可持续发展,并进一步对黄河流域中下游地区的发展带来一定的影响。因此,该地区的生态环境及社会发展问题一直受到中央及地方各方面的关注。

以流域为单元综合治理的实施,强化了人民保护生态环境的意识,激发了群众进行生态水利等工程建设的积极性,推动了黄土高原水土流失的治理,表明人类行为(政策措施、工程建设等)在生态系统恢复和管理具有重要的驱动作用。系统的评估流域水土流失综合治理生态环境效应是目前众多学者研究的热点问题,而如何构建科学的指标体系和评价方法又是其中的重点<sup>[6-9]</sup>。

传统的生态环境效应指标评价体系的构建主要采用 3 种方法:范围法,目标法,综合法,这 3 种方法都是树状结构体系<sup>[10-12]</sup>,表现形式就是以环境—社会—经济 3 大效益为目标的模型框架。这种结构体系综合效果比较好,但如果进行综合评价,就会有不同效益间的重复计算、概念和外延复杂等问题<sup>[13]</sup>。传统的生态环境效应评价方法主要有灰色关联分析法、主成分分析法、数据包络分析法、综合评价法等。然而,流域综合治理是以流域为单元,把流域内的生态环境、自然资源和社会经济视为相互作用相互依存和相互制约的统一完整的生态社会经济系统。上述评价方法及概念体系不能很好地表征人类行为与生态环境间这一相互作用。DPSIR 概念模型(driving force pressure state impact response)能够很好地揭示环境与人类活动的因果关系。DPSIR 概念模型由于评价侧重点的不同,评价的指标和方法也有较大差异,但核心仍是驱动力(人类行为)与自然力对系统构成了“压力”,使系统表现出不好的“状态”,出现了不

可持续的“影响”,为此人类制定措施(响应),以实现可持续发展<sup>[14-20]</sup>。采用 DPSIR 概念模型进行水土流失综合治理评估,能够更深入的理解人类行为与环境间的相互作用,为以流域为单元的水土流失综合治理提供新的方法和思路。

## 1 DPSIR-TOPSIS 评价模型

### 1.1 DPSIR 概念框架体系

社会经济体制系统构成的人类行为的驱动力,它的改变对环境系统产生压力,使得环境系统状态的改变,从而引发了环境系统功能的改变,由此对社会—经济—环境系统产生影响。决策者提出相应措施应对产生的影响。通过指标来描述、监测及量化上述过程就构成了 DPSIR 概念框架体系(图 1)。

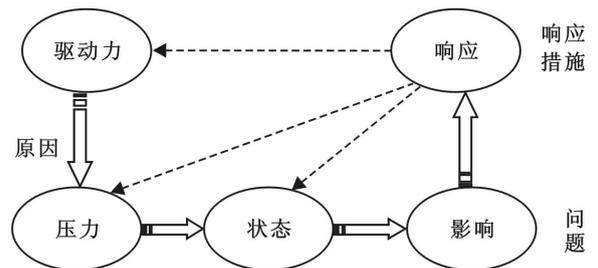


图 1 驱动力—压力—状态—影响—响应概念模型

### 1.2 评价方法

评价过程分 3 个阶段,第 1 阶段运用隶属度函数<sup>[21-22]</sup>计算 DPSIR 概念框架体系指标的隶属度;第 2 阶段为熵权-AHP 法<sup>[23-26]</sup>确定各指标权重,第 3 阶段运用 TOPSIS 法<sup>[27-29]</sup>计算各评价对象的生态环境效应评价价值。

1.2.1 规范化阶段 用隶属度函数对 DPSIR 概念框架体系指标进行归一化处理,对于正向指标用公式(1),对于逆向指标运用公式(2)。

$$Y = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} = \begin{cases} 1 & (X_i \geq X_{\max}) \\ \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} & (X_{\min} \leq X_i \leq X_{\max}) \\ 0 & (X_i \leq X_{\min}) \end{cases} \quad (1)$$

$$Y = \frac{X_{\max} - X_i}{X_{\max} - X_{\min}} = \begin{cases} 1 & (X_i \leq X_{\min}) \\ \frac{X_{\max} - X_i}{X_{\max} - X_{\min}} & (X_{\min} \leq X_i \leq X_{\max}) \\ 0 & (X_i \geq X_{\max}) \end{cases} \quad (2)$$

1.2.2 熵权-AHP 法确定各指标权重 运用 AHP 法确定主观权重,通过熵权法确定的客观权重对其进行调整,最终得出综合权重。

(1) 构造两两判断矩阵 A:

$$\mathbf{A}=(a_{ij})_{n \times n} \quad (i, j=1, 2, \dots, n)$$

(2) 计算矩阵最大特征值  $\lambda_{\max}$  及特征向量  $W$ 。

(3) 进行一致性检验。计算一致性指标  $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$ ; 找出相应的平均随机一致性指标  $RI$ ; 计算一致性比例  $CR = CI/RI$ ; 当  $CR < 0.1$  时, 可接受一致性检验, 否则对  $\mathbf{A}$  进行修改。特征向量  $W$  即为所求权重  $W_{jAHP}$ 。

(4) 计算各指标的熵  $H_j$ :

$$H_j = -K \sum_{i=1}^m f_{ij} \cdot \ln f_{ij} \quad (j=1, 2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

式中,  $f_{ij} = r_{ij} / \sum_{i=1}^m r_{ij}$ ,  $k = \frac{1}{\ln n}$ , 当  $f_{ij} = 0$  时, 令  $f_{ij} \cdot \ln f_{ij} = 0$ 。

(5) 计算第  $j$  向指标的权重:

$$\omega_{jsh} = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{j=1}^n H_j} \quad (0 \leq \omega_j \leq 1, \sum_{j=1}^n \omega_{jsh} = 1) \quad (4)$$

(6) 计算综合权重:

$$\omega = \frac{\omega_{jAHP} \cdot \omega_{jsh}}{\sum_{j=1}^n \omega_{jAHP} \cdot \omega_{jsh}} \quad (5)$$

1.2.3 通过 TOPSIS 模型计算各评价对象的综合值

TOPSIS 模型<sup>[27-29]</sup>是一种距离综合评价法, 是系统工程中多目标决策分析一种常用的决策技术, 它能够较客观全面的表征各个孔兑综合治理生态环境效应。依据前面所述得到隶属度的矩阵和权重, 构建加权规范化决策矩阵  $\mathbf{V} = (v_{ij})_{m \times n}$ , 其各列最大、最小值构成的最优、最劣向量分别记为  $V^+ (V_{\max 1}, V_{\max 2}, \dots, V_{\max n})$

$V^- (V_{\min 1}, V_{\min 2}, \dots, V_{\min n})$ ; 分别计算每个评价对象向量到  $V^+$  和  $V^-$  的距离。  $D^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{\max j} - V_{ij})^2}$

$D^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{\max j} - V_{ij})^2}$ , 第  $i$  个评价对象与最优方案的贴程度。

## 2 实证研究

### 2.1 研究区概况

十大孔兑介于东经  $108^\circ 47' - 110^\circ 58'$ , 北纬  $39^\circ 47' - 40^\circ 30'$ , 区域总面积  $10\ 767\ \text{km}^2$ 。涉及鄂尔多斯市的达拉特旗、杭锦旗、东胜区、准格尔旗 4 旗(区), 区域总人口 32.86 万人。从西向东依次为毛不拉、卜尔嘎色太沟、黑赖沟、西柳沟、罕台川、壕庆河、哈拉川、木哈尔河、东柳沟、呼斯太河<sup>[2-4]</sup>。十大孔兑区域属典型大陆性气候, 冬季严寒漫长, 夏季炎热短促, 冬春季风大沙多, 夏秋季暴雨、洪水频繁。区域降水量少, 气候干燥, 暴雨、洪水频繁。年均降水量  $200 \sim 350\ \text{mm}$ , 由东向西逐渐减少。降水年际变化

大, 降水年内分布不均, 主要集中于 7—9 月, 占全年降水量的 70%。

十大孔兑上游属于黄土丘陵沟壑区, 地表支离破碎, 沟壑纵横, 植被稀疏, 水土流失严重。面积为  $4\ 760.50\ \text{km}^2$ , 占十大孔兑总面积的 44.21%。地面坡度一般  $20^\circ \sim 40^\circ$ 。海拔  $1\ 300 \sim 1\ 500\ \text{m}$ , 相对高差  $200\ \text{m}$  左右, 沟壑密度  $3 \sim 5\ \text{km}/\text{km}^2$ 。中游属风沙区, 库布齐沙漠横穿东西, 西宽东窄, 最宽为  $28\ \text{km}$ , 最窄处  $8\ \text{km}$ , 海拔  $1\ 200 \sim 1\ 400\ \text{m}$ 。面积  $4\ 042.60\ \text{km}^2$ , 占十大孔兑总面积的 37.55%。地貌可分为固定、半固定沙地和流动沙丘, 沙丘高度一般在  $3 \sim 10\ \text{m}$ , 最高达  $50\ \text{m}$ 。下游为冲积平原区, 位于黄河南岸。该区面积  $1\ 963.9\ \text{km}^2$ , 占十大孔兑总面积的 18.2%。包括库布齐沙漠北缘一带的狭长地区, 该区沉积了南部丘陵区、风沙区大量碎屑物质, 地形上由南向北倾斜, 称为山前倾斜平原或冲洪积扇区。地势西高东低海拔在  $1\ 000\ \text{m}$  左右, 是内蒙古自治区重要商品粮基地。

国家和地方政府历来重视十大孔兑治理工作。早在 20 世纪 50, 60 年代, 人民群众已经自发的修建工程来进行治理。2002 年国务院批准的《黄河近期重点治理开发规划》将十大孔兑列为重要治理区域; 水利部[2004]93 号文件明确指出, 两川两河、十大孔兑是近期黄土高原水土保持坝系工程建设的重点。当地政府根据十大孔兑不同地形特点, 在上游开展了水土保持生态环境建设, 中游开展了防风固沙林草植被建设和引洪滞沙淤地工程建设, 下游开展了堤防工程建设<sup>[2-4]</sup>。

### 2.2 基于 DPSIR 概念框架指标体系

评价指标体系遵循目的性、科学性、系统性、可操作性、时效性和可比性等原则<sup>[14-18]</sup>, 围绕流域水土流失综合治理生态环境效应进行构建。

如图 2 所示, 人类活动与社会经济发展作为一种人类行为驱动力(人口数量、经济发展)影响着人与环境输入输出; 气候和地形因素作为一种驱动力(降雨量、 $>10\ ^\circ\text{C}$  积温、 $>15^\circ$  土地面积)对生态环境也有一定的影响。这些驱动力对该地区的环境产生不同的压力(自然偏离度、人口密度、人均纯收入、耕地面积、水资源开采量), 从而不同程度的影响生态系统的状态(植被盖度、水资源总量、土地垦殖率、土地利用率), 继而影响生态系统的健康(生物多样性、输沙模数、土地生产力); 决策者制定恰当的响应措施(人工造林(草)、水保工程、引洪淤地工程、退耕还林工程等), 来控制这些影响。

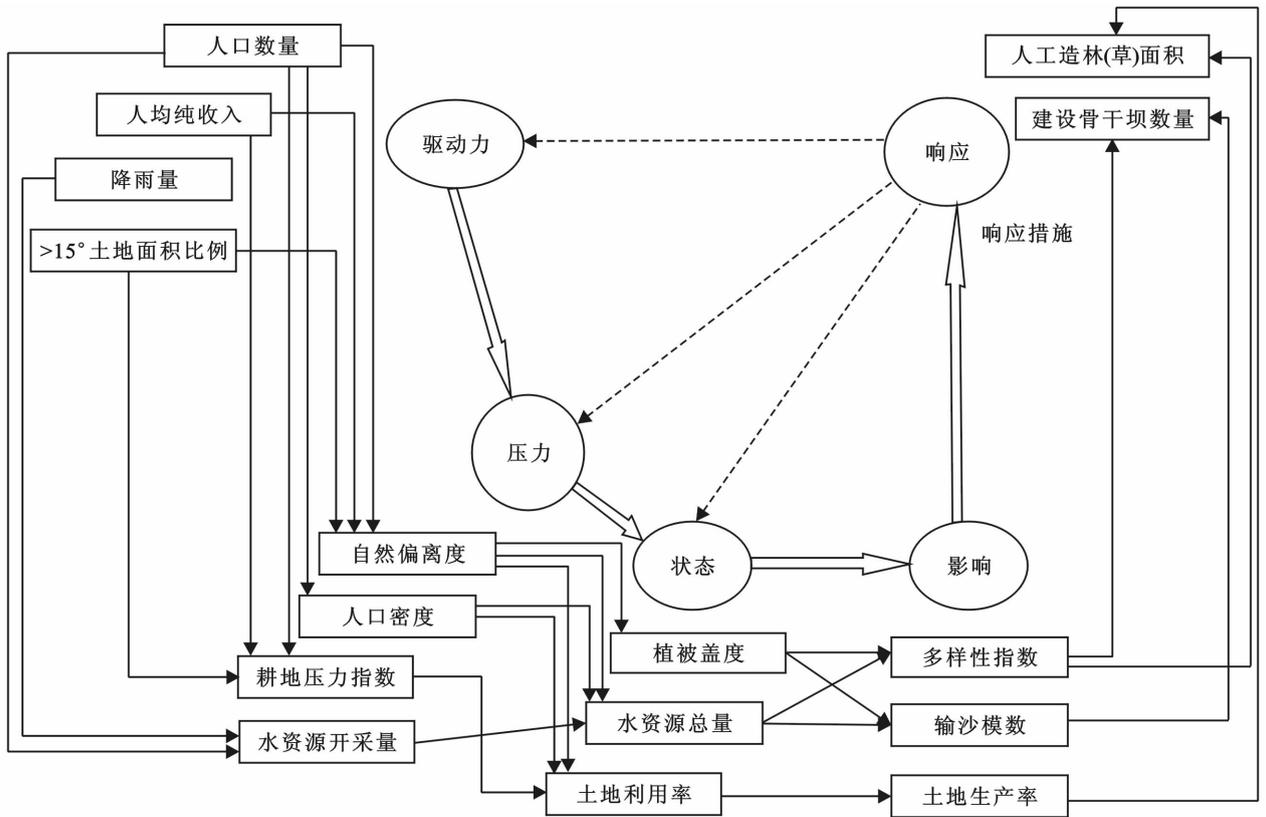


图 2 基于 DPSIR 流域综合治理生态效应概念模型

### 2.3 数据来源及各指标计算方法

基础数据主要来源于 2010 年实地调研和研究区域及周边水文站、气象站监测数据。社会经济数据及土地利用数据(人口数量、人均纯收入、人口密度、耕地面积、粮食产量、播种面积)来自国土资源局、统计局收集资料和统计年鉴以及实地调研(以村为单位);降雨、温度及泥沙资料来自各水文站、气象站,通过 ArcGIS 进行数据插值,得出各指标的空间分布图,然后求出各孔兑的降雨、温度;研究区现有 3 个水文站,分别是图格日格(毛不拉),龙头拐(西柳沟),响沙湾(罕台川),这 3 个孔兑的输沙模数直接测得,其他孔兑 3 个水文站资料推算得出<sup>[16-18]</sup>。

自然偏离度,它是表征人类活动对生态环境的干扰程度,计算公式为:

$$N_D = \frac{J+S+G+Y+M+F+C}{T} \quad (6)$$

式中: $J$ ——建设用地面积( $\text{km}^2$ ); $S$ ——人工水域面积( $\text{km}^2$ ); $G$ ——耕地面积( $\text{km}^2$ ); $Y$ ——园地面积( $\text{km}^2$ ); $M$ ——苗圃面积( $\text{km}^2$ ); $F$ ——人工绿化及防护林带面积( $\text{km}^2$ ); $C$ ——人工草地面积( $\text{km}^2$ ); $T$ ——土地利用总面积( $\text{km}^2$ )。

耕地压力指数,耕地压力指数( $K$ )是指最小人均耕地面积与实际人均耕地面积之比。它是耕地保护

的阈值,当  $K < 1$  时,耕地满足该地区粮食需求后有盈余;当  $K = 1$  时,粮食供需平衡;当  $K > 1$  时,耕地不能满足粮食需求。

$$K = \frac{S_{\min}}{S} \quad (7)$$

式中: $K$ ——耕地压力指数; $S_{\min}$ ——最小人均耕地面积( $\text{km}^2$ ),是指在一定区域范围内一定食物自给水平和耕地综合生产能力条件下,为了满足人偶正常生活的义务消费所需的耕地面积; $S$ ——实际人均耕地面积( $\text{km}^2$ )。

植被盖度,选取 Landsat 卫星影像作为数据源,得到归一化植被指数 NDVI $[-1, 1]$ ,NDVI 值在  $[0.15, 0.85]$  之间时为被认为是植被,通过 ArcGIS 确定研究区域在这个区间内的比例。

土地生产率,它是反映一个生产周期内单位耕地面积农产品产量或产值的指标。本文用农产品总值/区域耕地面积表示土地生产率。

### 2.4 结果与分析

2.4.1 评价指标隶属度及属性划分 基于 DPSIR 的流域水土流失综合治理生态环境效应评价指标体系需要对每个指标进行环境、经济和社会属性的归类(表 1)。

运用公式(1)和公式(2)求出所有指标的隶属度,属于正向指标的有人工造林(草)面积、骨干坝数量、

人均收入、年降雨量、植被盖度、水资源总量、土地利用、多样性指数、土地生产率;属于逆向指标的有人

口数量、>15°土地面积比、自然偏离度、人口密度、耕地压力、水资源开采量、输沙模数,结果见表 1。

表 1 各孔兑各指标隶属度值

指标	属性	毛不拉	卜尔嘎色太沟	黑赖沟	西柳沟	罕台川	壕庆河	哈什拉川	木哈尔河	东柳沟	呼斯太河	
驱动力	人口数量	S	0.76	0.60	0.44	0.03	0.34	0.77	0.10	0.94	0.98	0.98
	人均收入	$E_{co}$	0.23	0.35	0.03	0.04	0.69	0.18	0.09	0.45	0.31	0.95
	年降雨量	$E_{nv}$	0.28	0.13	0.16	0.20	0.42	0.32	0.45	0.41	0.55	0.47
	>15°土地面积比	$E_{nv}$	0.27	0.26	0.25	0.27	0.30	0.32	0.32	0.27	0.26	0.51
压力	自然偏离度	$S, E_{co}$	0.74	0.33	0.40	0.27	0.15	0.11	0.08	0.28	0.16	0.24
	人口密度	S	1.00	0.88	0.86	0.82	0.82	0.52	0.80	0.87	0.89	0.93
	耕地压力	$S, E_{co}$	0.87	0.94	0.93	0.90	0.81	1.00	0.88	1.00	0.98	0.97
	水资源开采量	$S, E_{co}, E_{nv}$	0.40	0.80	0.58	0.44	0.62	0.99	0.50	0.88	0.86	0.88
状态	植被盖度	$E_{nv}$	0.54	0.46	0.49	0.61	0.63	0.56	0.67	0.65	0.59	0.47
	水资源总量	$S, E_{co}, E_{nv}$	0.59	0.19	0.41	0.55	0.37	0.01	0.49	0.11	0.14	0.11
	土地利用	$S, E_{co}$	0.58	0.54	0.49	0.29	0.11	0.33	0.15	0.21	0.35	0.47
影响	多样性指数	$E_{nv}$	0.79	0.90	0.91	0.88	0.83	0.91	0.93	0.84	0.85	0.77
	输沙模数	$E_{nv}$	0.39	0.44	0.46	0.66	0.71	0.62	0.71	0.66	0.60	0.46
	土地生产率	$S, E_{co}$	0.22	0.30	0.19	0.29	0.95	0.01	0.36	0.12	0.12	0.33
响应	人工造林(草)面积	$S, E_{co}, E_{nv}$	0.23	0.12	0.16	0.57	0.73	0.05	0.80	0.17	0.12	0.09
	建设骨干坝数量	$S, E_{co}, E_{nv}$	0.24	0.00	0.00	0.67	0.55	0.00	0.31	0.00	0.00	0.16

注:S表示社会属性;  $E_{co}$ 表示经济属性;  $E_{nv}$ 表示环境属性。

2.4.2 指标权重的确定 按照 1.2.2 的计算步骤求各指标的权重,分布权重及综合权重见表 2。

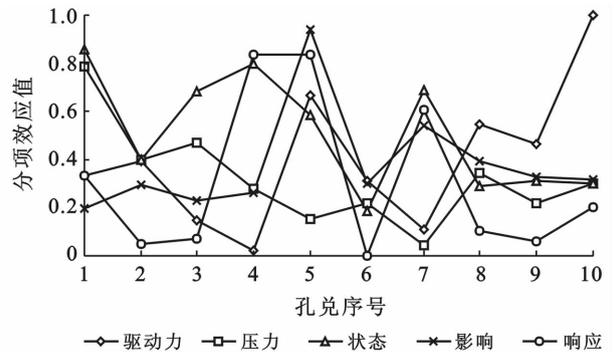
表 2 各孔兑各指标隶属度值

指标	熵权法	AHP 法	权重	
驱动力	人口数量	0.075	0.003	0.039
	人均收入	0.128	0.060	0.094
	年降雨量	0.031	0.016	0.023
	>15°土地面积比	0.009	0.030	0.019
压力	自然偏离度	0.068	0.100	0.084
	人口密度	0.004	0.034	0.019
	耕地压力	0.001	0.028	0.014
	水资源开采量	0.015	0.035	0.025
状态	植被盖度	0.003	0.086	0.044
	水资源总量	0.092	0.024	0.058
	土地利用	0.037	0.019	0.028
影响	多样性指数	0.001	0.099	0.050
	输沙模数	0.007	0.225	0.116
	土地生产率	0.110	0.023	0.067
响应	人工造林(草)面积	0.127	0.111	0.119
	建设骨干坝数量	0.292	0.107	0.200

2.4.3 各孔兑综合治理生态环境效应评估 各孔兑驱动力—压力—状态—影响—响应系统评估

(1) 驱动力分项。如图 3 所示,各孔兑驱动力效应值范围在 0.023~0.998。不同孔兑的驱动力差异较明显,主要是由于人均收入和人口数量的差异导致

的,驱动力效应值较大的呼斯太河人口 4 320 人,是西柳沟人口的 24%,人均收入 5 341 元/a,是西柳沟 2.12 倍。年降雨量变化不大,各孔兑年降雨量大致“东高西低”的趋势。



注:1. 毛不拉;2. 卜尔嘎色太沟;3. 黑赖沟;4. 西柳沟;5. 罕台川;6. 壕庆河;7. 哈什拉川;8. 木哈尔河;9. 东柳沟;10. 呼斯太河。下同。

图 3 各孔兑驱动力—压力—状态—影响—响应系统效应值

(2) 压力分项。各孔兑压力效应值范围在 0.046~0.789。驱动力的改变影响着压力的变化,各孔兑自西向东压力的变化趋势和驱动力变化趋势基本相同。其中毛不拉的压力最大,哈什拉川的压力最小,压力分项的核心因素是自然偏离度,哈什拉川的自然偏离度的隶属度最低,毛不拉的最高。

(3) 状态分项。各孔兑状态效应值范围在 0.184

~0.857。状态分项从空间上看,由西向东波动变化。状态分项中的关键因子是水资源总量,毛不拉和西柳沟的水资源总量较多,分别为  $6.30 \times 10^7$ ,  $5.96 \times 10^7$   $\text{m}^3$ ,壕庆河的水资源量最少,仅为  $0.106 \text{ m}^3$ 。

(4) 影响分项。各孔兑影响效应值范围在 0.194~0.938。在影响分项中关键因素是输沙模数,十大孔兑上中游的输沙模数范围  $3\ 000 \sim 9\ 000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。罕台川的影响效应最高,输沙模数相对较低,土地生产率较高,多样性指数也比较高。

(5) 响应分项。各孔兑响应效应值范围在 0.001~0.838。罕台川和西柳沟的响应措施比较多,壕庆河没有建设骨干坝,仅人工种林草  $75.99 \text{ km}^2$ 。

## 2.5 环境、社会和经济分项评价

如图 4 所示,环境分项值、经济分项值和社会分项值在空间变化上都基本相同,3 个分项值都是西柳沟和罕台川比较高,壕庆河 3 个分项值都比较低。环境分项值大于经济分项值和社会分项值。

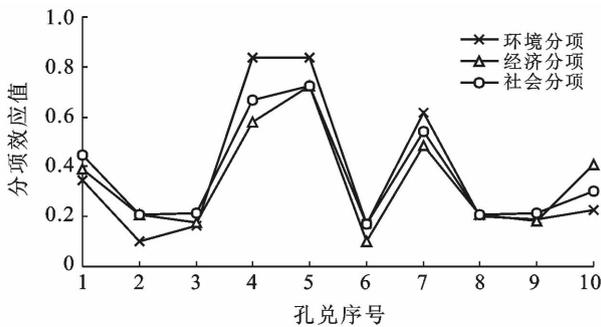


图 4 各孔兑环境分项—经济分项—社会分项效应值

环境分项方面:主要受气候条件和生态系统自身的影响,由于人工造林(草)、淤地坝建设等治理措施(响应措施)的实施,且各孔兑治理面积的不同,环境分项值也不同。从人工造林(草)面积上,排在前几位的依次是哈拉川、罕台川、西柳沟、毛不拉。骨干坝建设方面,依次是西柳沟、罕台川、哈拉川、毛不拉、呼斯太河,其他孔兑上游没有建设骨干坝。从环境分项值结果看出,人工造林(草)面积多的和骨干坝建设

较多的孔兑,环境分项值较高,造成这一原因是人工造林(草)和骨干坝等作为十大孔兑综合治理主要措施,对区域内生态恢复及其生态环境质量改善具有很强的导向性。

经济和社会分项方面:经济和社会分项值与环境分项值在空间上的本部基本相同。各孔兑的响应措施实施的同时社会经济也得到了极大的发展,表现为生活观念的改变,生活水平的提高,教育程度的提高等方面。社会经济的发展引发人类行为的改变(响应措施)对生态环境的影响,且其影响力在不断增强,已成为生态环境效应评估中不可忽视的一部分。响应措施的实施改变了原有的土地利用结构,增加了劳动就业,种植面积,植被面积,减小了洪水对人类和农田危害,使得社会经济分项在治理措施较多的孔兑的效应相对较高。

## 2.6 各孔兑综合评价

由图 5 可以得出:各孔兑综合评价的结果大小排序:罕台川>西柳沟>哈拉川>呼斯太河>毛不拉>木哈尔河>东柳沟>卜尔嘎色太沟>黑滩沟>壕庆河。综合值最高孔兑(罕台川)比综合值最低的孔兑(壕庆河)高出了 0.517。按照研究区流域生态经济发展现状,在广泛征求专家和可研人员意见的基础上,把流域生态环境效应综合指数划分为 4 个等级。综合指数在  $[0.8, 1.0]$  为 I 级(优),  $[0.7, 0.8)$  为 II 级(良),  $[0.6, 0.7]$  为 III 级(中), 0.6 以下为 IV 级(差)。从评价结果来看,各孔兑等级划分情况见表 3。

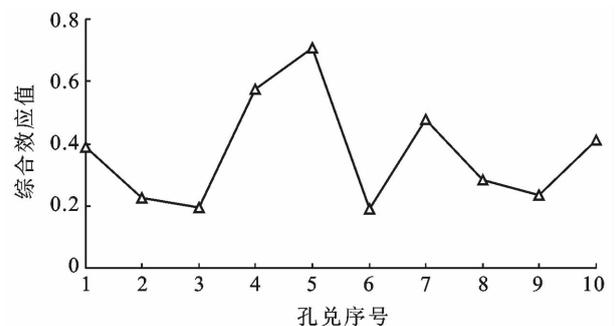


图 5 基于 DPSIR-TOPSIS 模型各孔兑生态环境效应综合值

表 3 各孔兑生态环境效应等级划分

孔兑名	毛不拉	卜尔嘎色太沟	黑滩沟	西柳沟	罕台川	壕庆河	哈拉川	木哈尔河	东柳沟	呼斯太河
综合效应指数	0.391	0.224	0.195	0.575	0.707	0.190	0.477	0.281	0.235	0.412
等级	IV	IV	IV	IV	II	IV	IV	IV	IV	IV

各孔兑综合治理生态环境效应综合值与治理措施的实施由极大的相关性,表现为治理措施多的孔兑其综合值相对较大,治理措施小的孔兑,其综合值相对较小。结合以上驱动力—压力—状态—影响—响

应系统和环境—经济—社会系统的分析情况,综合治理实施较少的孔兑,其对该孔兑地区生态环境与人类行为的调节能力较弱,对极端气候条件适应力也较差;综合治理实施较多的孔兑,其对地区生态环境和

人类行为的调节能力较强,对适应极端气候条件的能力也较强。

## 3 讨论

### 3.1 模型及方法讨论

从流域综合治理生态恢复环境效应评估指标体系来看,传统树状指标体系不能很好的表征人类行为与生态环境指标间的相互作用,而 DPSIR-TOPSIS 模型中的 DPSIR 概念模型能够很好地揭示环境与人类活动的因果关系。评价指标体系方面:DPSIR 概念体系划分了指标的属性,树状指标体系则无法计算指标的多重属性;从评价方法上来看,本文采用的 AHP-熵权-TOPSIS 模型是主客观相结合的方法,因而其评价结果也较为合理。

### 3.2 流域综合治理措施生态环境响应机理

退耕还林工程的实施,使得 $\geq 15^\circ$ 的坡荒地转化为林(草)地,改变了原来的土地利用类型,影响着景观多样性;同时,更多的工程的建设使得该地区从事农业劳动人员数量转移工程建设中,进而广中薄收的概念也发生了变化,以发展高效设施农业的模式开始出现,水资源的开采量增加,农民收入有所提高并且来源开始多元化,此外,植被面积的增加及骨干坝的建设减少了水土的流失同时对气候产生了一定的影响。这些响应指标和驱动力指标直接或间接影响着自然偏离度、人口密度、耕地压力、水资源量、土地生产率等压力指标。上述的流域生态环境响应机理也较好的解释了各孔兑综合治理现状生态环境效应评价与工程措施实施的关系——工程措施实施较多的孔兑其生态环境效应值较高。

## 4 结论

(1) 综合治理工程实施较多的孔兑,生态环境综合效应值较高,其中以罕台川的综合效应值最高;反之,壕庆河上游没有建设骨干坝,其上中游人工造林(草)面积最少,它的综合效应值最低。各孔兑综合治理生态环境效应综合值与治理措施的实施有极大的相关性。

(2) 从空间上看,各孔兑的生态环境效应环境分项值和社会分项值与经济分项值分布规律基本上相同。其综生态环境综合效应指数呈中间高,两边低的趋势。

(3) 各孔兑生态环境效应综合值仅有罕台川的综合值超过了 0.6,其他的都在 0.6 以下,仅罕台川等级为 II 级,其他孔兑都为 IV 级,各孔兑整体上生态环境效应指数较低,综合治理现状较差。

(4) 本文构建的 DPSIR-TOPSIS 综合模型,其评价指标体系可以很好地反映人类行为与生态系统间复杂的相互作用,评价方法采用主客观相结合的方法也更为合理。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 李生宝. 半干旱黄土丘陵区退化生态系统恢复技术与模式[M]. 北京:科学出版社,2011.
- [2] 姬宝霖,申向东,吕志远,等. 利用高含沙洪水治沙淤地的土壤养分、粒径分布特征分析[J]. 水土保持学报,2007,21(2):69-72.
- [3] 索全义,姬宝霖,高聚林,等. 高泥沙洪水淤地治沙后土壤养分分布特征的分析[J]. 华北农学报,2007,22(5):134-137.
- [4] 赵振亚,姬宝霖,宋小园,等. 基于层次分析和模糊数学法的公乌素土壤质量评价[J]. 干旱区研究,2014,31(6):1010-1016.
- [5] 宋小园,朱仲元,韩永明,等. 基于改进的突变级数法在复垦区土壤质量恢复评价中的应用[J]. 干旱区地理,2014,37(5):1012-1017.
- [6] 徐燕,周华荣. 初论我国生态环境质量评价研究进展[J]. 干旱区地理,2003,26(2):166-172.
- [7] 周华荣,潘伯荣,海热提·吐尔逊. 新疆生态环境现状综合评价研究[J]. 干旱区地理,2001,24(1):23-29.
- [8] 岳天祥,淦九河. 生态环境质量评价方法研究[J]. 水土保持学报,1993,7(4):33-37,43.
- [9] 张峥,朱琳,张建文,等. 我国湿地生态质量评价方法的研究[J]. 中国环境科学,2000(S1):55-58.
- [10] 国庆喜,王天明. 丰林自然保护区景观生态评价:量化与解释[J]. 应用生态学报,2005,16(5):825-832.
- [11] 许明祥,刘国彬,赵允格. 黄土丘陵区土壤质量评价指标研究[J]. 应用生态学报,2005,16(10):1843-1848.
- [12] Yin Runsheng, Yin Guiping, Li Lanying. Assessing China's ecological restoration programs: What's been done and what remains to be done[J]. Environmental Management, 2010,45(3):442-453.
- [13] 何兴照. 小流域综合评价方法与模型研究[M]. 北京:中国计划出版社,2008.
- [14] 王兵,张光辉,刘国彬,等. 黄土高原丘陵区水土流失综合治理生态环境效应评价[J]. 农业工程学报,2012,28(20):150-161.
- [15] 王兵,刘国彬,张光辉,等. 黄土丘陵区中尺度流域水土流失治理环境效应评估[J]. 农业机械学报,2012,43(7):28-35.
- [16] OCSE. Environmental Indicators: A preliminary Set [M]. Washington D C: Congressional Information Service, 1991.
- [17] Pearce D, Hamilton K, Atkinson G. Measuring sustainable development: Progress on indicators[J]. Environment

- and Development Economics, 1996,1(1):85-101.
- [18] Agency. E E. Effectiveness of Urban Wastewater Treatment Policies in Selected Countries[M]. Copenhagen: European Environment Agency, 2005.
- [19] Jeunesse I L, Rounsevell M, Vancloster M. Delivering a DSS tool to a river contract: A way to implement the participatory approach principle at the catchment scale[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2003,28(12):547-554.
- [20] Giupponi C, Mysiak J, Fassio A, et al. MULINO-DSS: A computer tool for sustainable use of water resources at the catchment scale[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2004,64(1):13-24.
- [21] 李鹏,刘澄玉,李丽萍,等. 多尺度多变量模糊熵分析[J]. 物理学报,2013,62(12):1205121-1205129.
- [22] 吴杰康,祝宇楠,韦善革,等. 采用改进隶属度函数的梯级水电站多目标优化调度模型[J]. 电网技术,2011,35(2),48-52.
- [23] 倪九派,李萍,魏朝富,等. 基于 AHP 和熵权法赋权的区域土地开发整理潜力评价[J]. 农业机械学报,2009,25(5):202-209.
- [24] 章海波,骆永明,赵其国,等. 香港土壤研究 VI 基于改进层次分析法的土壤肥力质量综合评价[J]. 土壤学报,2006,43(4):577-583.
- [25] 邹志红,孙靖南,任广平. 模糊评价因子的熵权法赋权及其在水质评价中的应用[J]. 环境科学学报,2005,25(4):552-556.
- [26] 龙腾锐,赵欣,林于廉,等. M-AHP-熵权组合赋权法在垃圾渗滤液处理技术评价中的应用[J]. 环境工程学报,2010,4(11):2455-2460.
- [27] 李灿,张凤荣,朱泰峰,基于熵权 TOPSIS 模型的土地利用绩效评价及关联分析[J]. 农业工程学报,2013,29(5):217-227.
- [28] 胡永宏. 对 TOPSIS 法用于综合评价的改进[J]. 数学的实践与认识,2002,32(4):572-575.
- [29] 董璟琦,杨晓华,杨海真,等. 基于改进 TOPSIS 法的规划环评情景方案建立方法及应用[J]. 环境科学与管理,2009,34(7):162-169.

(上接第 142 页)

- [10] Ziyang Jiang, Bo Xu. Geographically weighted regression analysis of the spatially varying relationship between farming viability and contributing factors in Ohio [J]. Regional Science Policy & Practice, 2014,6(1):69-83.
- [11] 丁刚,陈奇玲. 省域政府效率对经济发展方式转变影响作用的空间关联模式探析:基于 GWR 模型与 ESDA 方法[J]. 中国行政管理,2014(8):90-93.
- [12] 曹天邦,黄克龙,李剑波,等. 基于 GWR 的南京市住宅地价空间分异及演变[J]. 地理研究,2013,32(12):2324-2333.
- [13] 戈冬梅,姜磊. 基于 GWR 模型的省域旅游影响因素空间差异分析[J]. 生态经济:学术版,2013(7):93-97.
- [14] Wang shaojian, Fang chuanglin, Ma haitao, et al. Spatial differences and multi-mechanism of carbon footprint based on GWR model in provincial China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(4):612-630.
- [15] 邵一希,李满春,陈振杰,等. 地理加权回归在区域土地利用格局模拟中的应用:以常州市孟河镇为例[J]. 地理科学,2010,30(1):92-97.
- [16] 李雪松,孙博文. 区域经济一体化视角下的长江中游地区市场整合测度:基于湘鄂赣皖四省面板数据的分析[J]. 江西社会科学,2014(3):34-40.
- [17] Sokal R R, Oden N L. Spatial autocorrelation in biology: 1. Methodology [J]. Biological Journal of the Linnean Society, 1978,10(2):199-228.
- [18] Chau K W, Ng F F, Hung E C T. Developer's good will as significant influence on apartment unit prices [J]. Appraisal Journal, 2001,69(1):26-34.
- [19] 柏东亮,王颖,王树涛,等. 廊坊市土地利用与区域空间耦合关系[J]. 水土保持通报,2015,35(3):278-282.
- [20] Fotheringham A S, Brunson C, Charlton M. Geographically Weighted Regression: The Analysis of Spatially Varying Relationships[M]. UK: Jone Wiley & Sons, LTD, 2002.
- [21] 吴群,郭贯成. 城市化水平与耕地面积变化的相关研究:以江苏省为例[J]. 南京农业大学学报,2002,25(3):95-99.
- [22] Deng Xiangzhen, Huang Jikun, Scott R, et al. Impact of urbanization on cultivated land changes in China[J]. Land Use Policy, 2015(45):1-7.
- [23] 何伟. 耕地资源节约和集约利用的对策研究[J]. 国土资源导刊(湖南),2006,3(2):45-46.
- [24] 汪朝辉,王克林,熊艳,等. 湖南省耕地动态变化及驱动力研究[J]. 长江流域资源与环境,2004,13(1):53-59.
- [25] 李彬,武恒. 安徽省耕地资源数量变化及其对粮食安全的影响[J]. 长江流域资源与环境,2009,18(12):1115-1120.