

# 基于熵值法的高速公路施工过程对水土流失的影响评价

冯佳琳<sup>1</sup>, 殷黎明<sup>1</sup>, 赵丽君<sup>1</sup>, 蒲文明<sup>1</sup>, 任松<sup>1</sup>, 郭微<sup>1,2</sup>

(1. 重庆大学 资源及环境科学学院 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆市勘测院, 重庆 400020)

**摘要:** [目的] 研究高速公路施工过程对沿线山体植被、水土保持方面的影响, 为路段后期水土保持工作采取最优的防护措施提供参考依据。[方法] 基于高速公路施工期水土流失影响因素的分析基础, 建立多层次、多指标的高速公路施工期水土流失评价体系。通过现场工程参数分析, 将水土流失影响指数(SW II)引入同一高速公路不同路段水土流失影响的评价中。选用基于客观赋权法的熵值法确定评价体系中各评价指标对水土流失的影响程度。依托在建梁平至忠县高速公路项目, 针对初步选定的 9 段路段进行施工期水土流失评价。[结果] 确定研究区水土流失情况严重的 4 段重点路域, 并将其划定为水土流失重点防护区域。[结论] 验证了多层次、多指标的高速公路施工期水土流失影响评价体系的合理性, 排除了人为因素的干扰, 可以更加客观、科学地确定高速公路施工期水土流失重点路域。

**关键词:** 高速公路; 水土流失; 水土流失影响指数(SW II); 熵值法

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1000-288X(2017)02-0153-05

**中图分类号:** S157.1

**文献参数:** 冯佳琳, 殷黎明, 赵丽君, 等. 基于熵值法的高速公路施工过程对水土流失的影响评价[J]. 水土保持通报, 2017, 37(2): 153-157. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2017. 02. 023; Feng Jialin, Yin Liming, Zhao Lijun, et al. Soil Erosion Impact Assessment of Expressway Based on Entropy Method During Construction Period[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(2): 153-157. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2017. 02. 023

## Soil Erosion Impact Assessment of Expressway Based on Entropy Method During Construction Period

FENG Jialin<sup>1</sup>, YIN Liming<sup>1</sup>, ZHAO Lijun<sup>1</sup>, PU Wenming<sup>1</sup>, REN Song<sup>1</sup>, GUO Wei<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory for the Coal Mine Disaster Dynamics and Controls, Chongqing

University, Chongqing 400044, China; 2. Chongqing Survey Institute, Chongqing 400020, China)

**Abstract:** [Objective] Considering the disturbance to environment caused by highway construction in order to found the optimal protection measures of soil and water loss caused by highway construction was demonstrated. [Methods] Based on the comprehensive analysis of factors affecting soil erosion during the construction, a multi-level and multi-index highway construction evaluation system with respect to soil and water loss was established. Via engineering parameter analysis, a parameter, termed as SW II, was introduced into the evaluation of different sections of highway. The entropy method was chosen to determine the influence degree of each evaluation index of the evaluation system. 9 preliminary sections of liangping-zhongxian highway project were chosen to evaluate. [Results] 4 sections were classified as severe loss level and as key protection areas. [Conclusion] This article verified the rationality of the evaluation system and eliminated man-made interference. This evaluation system can determine key areas of soil and water loss under highway construction in a more objective and scientific way.

**Keywords:** expressway; water and soil loss; SW II; entropy evaluation method

“十二五”期间全国新增高速公路通车里程约 5.92×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>, 2015 年全国高速公路通车里程将超过 1.30×10<sup>5</sup> km<sup>2</sup>[<sup>1</sup>]. 另外, 中国高速公路项目的发展正逐步向西部地区转移[<sup>2</sup>]. 高速公路作为开发建

设项目的重要组成部分,对沿线原有地貌造成扰动、植被造成破坏<sup>[3]</sup>,产生的大量弃土和裸露边坡,诱发严重的水土流失,导致高速公路建设与环境保护的矛盾日益凸出。陈宗伟等<sup>[2]</sup>依托沪蓉西高速公路阐述了高速公路施工过程中水土保持措施体系;毛泽秦等<sup>[5]</sup>采用平凉地区已有工程资料建立了影响流域水土失量和关键影响因素之间的关联数学模型。因此,科学合理地选择在建高速公路中的水土流失重点路域,有针对性地采取水土保持措施<sup>[6]</sup>,对控制在建高速公路项目造成的水土流失具有重要意义。

确定各评价指标的权重值是进行高速公路路域评价的基础,直接关系到评价结果的科学性。以往的主观赋权法<sup>[7]</sup>,如层次分析法、德尔菲法等,往往由于受人为因素的影响夸大或者降低某些指标的影响,不能真实的反映实际情况。与之相对的客观赋权法,得到的权重值仅根据各项指标值之间的关系,或者是由

它们的变化程度来决定的,不受其他外界因素的影响,如熵值法、因子分析法等。本文拟通过水土流失影响指数(SW II),重新定义并筛选影响指标,并确定权重,设计出专门用于评价高速公路重点路域的水土流失影响指数值。

权重确定的主要方法<sup>[8]</sup>优缺点整理如表 1 所示。对比分析各权重确定方法,结合项目实际情况,考虑到样本数据中并未含有极端值或负值,为了确保评价结果的客观性,避免数据本身带来的信息重复,选用客观赋值法中的熵值法对评价体系中各评价指标的权重值进行确定。本研究依托在建梁平至忠县高速公路项目,结合权重确定方法的优缺点,以熵值法确定的权重值为基础,采用水土流失影响指数对高速公路路域进行水土流失情况评价,以确定在建高速公路水土流失较为严重的重点路域,为沿线水土保持提供参考。

表 1 不同权重确定方法优缺点对比

	主观赋权法		客观赋值法		
	层次分析法	德尔菲法	二项系数法	因子分析法	熵值法
优点	将评价对象视为一个系统;所需定量数据较少	可以避免群体决策的一些可能缺点,声音最大或地位最高的人没有机会控制群体意志;管理者可以保证没有忽视重要观点	无需样本数据,便于定性问题量化,计算简单,适用范围较广	解不具有唯一性,可以从中选择适合所考虑具体问题的解	根据各指标传输给决策者的信息量的大小来确定指标权重,排除主观影响,更为客观
缺点	指标过多时数据统计量大,权重难以确定;特征值和特征向量的精确求法比较复杂	过程比较复杂,花费时间较长。权威人士的意见影响他人的意见	需大量专家数,且受专家主观认识局限性的影响	因子之间所提供的变异信息就有可能重复,不利于做出客观评价;因子分析的工作量较大	当遇到一些极端值和负值情形时显得不足

## 1 水土流失影响指数确定方法

### 1.1 水土流失影响指数计算方法

水土流失影响指数(SW II)是将水土保持损益分析中的关键影响指标进行加权后求和,得到用于反映建设项目水土流失影响程度大小的水土流失数值<sup>[9]</sup>。SW II 值较高时,说明项目造成的水土流失影响严重,项目水土流失影响程度为重度影响;反之则越小。

张峥等<sup>[10]</sup>将水土流失影响指数引入到高速公路水土流失评价中,计算公式为:

$$SW II = \sum_{i=1}^n \alpha_j \cdot \chi_j \quad (1)$$

式中: $\alpha_j$ ——第  $j$  个水土流失影响指数关键指标的权重; $\chi_j$ ——第  $j$  个水土流失影响指数关键指标归一化后的值。 $j=1,2,\dots,n$ ; $i=1,2,\dots,n$ 。

一般地,评价对象的指标集记为 $\{X_{ij}\}$ , $x_{ij}$ ——第

$i$  个方案第  $j$  个指标的原始值, $i=1,2,\dots,m$ ; $j=1,2,\dots,n$ 。对于正向指标和逆向指标分别采用以下公式进行归一化处理<sup>[11]</sup>:

$$\text{正向指标: } x_{ij}' = \frac{x_{ij} - \min\{x_j\}}{\max\{x_j\} - \min\{x_j\}} \quad (2)$$

$$\text{逆向指标: } x_{ij}' = \frac{\max\{x_j\} - x_{ij}}{\max\{x_j\} - \min\{x_j\}} \quad (3)$$

基于张峥等<sup>[10]</sup>建立的针对不同高速公路项目水土流失评价体系,综合考虑同一高速公路水土流失影响因素的同一性和差异性指标,简化同一性指标,细化差异性指标,将高速公路施工期水土流失评价模型中的相关因素分为路基工程、桥隧涵、互通工程、取弃土场、临时工程五部分,建立多层次的评价指标体系。评价体系如表 2 所示。该体系中,由于路基填方高度影响填方断面的形式,进而直接影响施工期高速公路水土流失情况,因此将路基填方路段按填方高度分为

3 类,分别记为填方路段 I, II, III;填方高度 ≤ 10 m 时,采用一坡到底,填方边坡率为 1 : 1.5;当 10 m < 路基填方高度 < 18 m 时,第 1 级填高为 10 m,填方边坡率为 1 : 1.5,第 2 级填高为 10 m,填方边坡坡率为 1 : 1.75,第 1,2 级之间设边坡平台一道,平台宽 2 m,外倾坡度 3%。当填方高度 > 18 m,每填高 10 m 设一道边坡平台,填方边坡坡率均为 1 : 2,填方边坡平台宽度为 2 m,外倾坡度 3%。挖方路基段采用挖方总高度与路基长度的比值为评价指标。桥梁、涵洞工程施工扰动土地范围为其在地面上的垂直投影<sup>[12]</sup>,由于桥梁宽度、涵洞跨距基本相同,因此选取桥梁、涵洞的长度为评价指标。隧道工程主要由洞身和洞门组成。扰动地表的范围为隧道明洞和洞门开挖范围<sup>[12]</sup>,因此选取隧道明洞/洞口土石挖方总量为隧道工程的评价指标。

表 2 高速公路施工期水土流失评价体系及评价指标

高速公路施工期水土流失影响评价	路基	路基长度
		路基挖方总高度/路基总长度
		路基填方路段 I 百分比
		路基填方路段 II 百分比
		路基填方路段 III 百分比
		路基土石挖方总量/路基总长度
	桥隧涵	桥梁长度
		涵洞长度
		隧道明洞/洞口土石挖方总量
	互通工程	互通最小半径
		土石挖方总量
		土石挖方总量
	取、弃土场	弃土场单位面积实际堆土量
		取土场单位面积实际取土量
	临时工程	施工便道占地
		临时弃土场单位面积弃土量
		施工生产生活区占地
		临时堆土场

1.2 熵值法

熵的概念来源于热力学,主要反映系统的混乱程度,现已广泛应用于信息论、工程技术、经济管理和决策控制等方面<sup>[13-14]</sup>。熵值法是一种客观赋权法<sup>[15]</sup>,它根据评价体系中各参考指标的熵值所提供的信息量大小对评价指标的权重进行计算,尽可能的保证了指标权重值的客观性。

在由  $m$  个待评方案、 $n$  个评价指标所构成的指标数据中,若各评价对象的某项指标值相差较大,其提供的信息量越大,对综合评价的影响越大,信息熵越小,其权重应越大。当评价系统中某个指标的值完全

相同时,熵值法得出的权重值为 0,表明这个指标在整个评价系统中不起任何作用,可以考虑忽略这个指标。

熵值法确定权重的主要步骤为:

评价对象的指标集记为  $\{X_{ij}\}$ ,  $x_{ij}$  —— 第  $i$  个方案第  $j$  个指标的原始值,。

(1) 原始数据处理。由于部分原始数据的取值在  $[0,1]$ ,为了避免取对数无意义,将数据进行平移,即对数据进行了  $(+1)$  处理<sup>[14]</sup>。

$$x_{ij}' = x_{ij} + 1 \tag{4}$$

(2) 计算指标信息熵。第  $i$  个指标的熵值<sup>[16]</sup>为:

$$e_j = \frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n) \tag{5}$$

式中:  $p_{ij} = \frac{x_{ij}'}{\sum_{i=1}^m x_{ij}'}$

(3) 计算指标权重。第  $j$  个指标的权重<sup>[16]</sup>为:

$$w_j = \frac{1 - e_j}{n - \sum_{j=1}^n e_j} \tag{6}$$

最终得到系统内各指标的权重值,  $W = (w_1, w_2, \dots, w_j, \dots, w_n)$ 。

2 实例分析

以在建梁平至忠县高速公路项目为评价对象,综合考虑高速公路沿线的施工情况,初步选取 9 段路段进行水土流失影响评价,桩号分别为 K7+000—K8+740, K9+000—K13+664, K16+382—K19+500, K33+300—K37+200, K37+200—K40+700, K43+335—K45+536, K46+045—K51+440, K51+440—K55+000, K55+400—K57+500,各路段原始参数值详见表 3。

2.1 评价指标权重值确定

利用公式(4)—(6)计算得到各评价指标的熵值分别为 0.726 2, 0.572 0, 0.727 7, 0.659 3, 0.727 5, 0.686 2, 0.656 2, 0.478 2, 0.611 3, 0.357 2, 0.373 4, 0.348 3, 0.343 4, 0.698 0, 0.459 8, 0.698 4, 0.696 2, 0.293 4 和 0.626 0,由此得到各评价指标的权重向量,  $W = (0.033 1, 0.051 8, 0.033 0, 0.041 2, 0.033 0, 0.038 0, 0.041 6, 0.063 2, 0.047 1, 0.077 8, 0.075 8, 0.078 9, 0.079 5, 0.036 6, 0.065 4, 0.036 5, 0.036 8, 0.085 5, 0.045 3)$ 。

2.2 水土流失影响影响指数计算(SW II)

归一化后的各指标值详见表 4。根据表 4 中的数据,利用公式 计算水土流失影响指数 SW II,计算结果如表 5 所示。以水土流失影响指数为依据,评价对

象中的 K16 + 382—K19 + 500, K37 + 200—K40 + 700, K43 + 335—K45 + 536, K55 + 400—K57 + 500 段为水土流失较为严重的区域, 划定为水土流失防治重点路域。

表 3 梁平—忠县高速公路各路段原始指标值

评价指标	第 1 段	第 2 段	第 3 段	第 4 段	第 5 段	第 6 段	第 7 段	第 8 段	第 9 段
路基长度/m	740.00	4 664.00	3 118.00	3 900.00	3 500.00	2 201.00	5 395.00	3 560.00	2 100.00
路基挖方总高度/路基总长度	0.19	11.38	0.97	0.18	0.81	0.69	0.15	0.23	0.31
路基土石方挖方总量/路基总长度	272.55	153.77	137.99	260.29	92.75	165.01	160.20	286.89	200.50
路基土石方填方总量/路基总长度	239.87	173.34	219.58	0.65	11.32	233.42	91.10	263.33	274.58
路基填方 I 百分比/%	74.94	19.09	44.28	66.45	50.64	60.56	66.48	59.87	33.66
路基填方 II 百分比/%	22.90	4.86	8.15	19.21	16.27	6.47	24.35	23.47	47.90
路基填方 III 百分比/%	2.16	76.05	47.57	14.35	33.09	32.97	9.16	16.66	18.44
桥梁长度/m	0.00	283.22	0.00	957.81	1 866.77	0.00	2 583.87	112.00	392.57
涵洞长度/m	173.46	0.00	0.00	270.51	35.25	275.43	463.06	485.39	392.75
隧道明洞/洞口土石挖方总量/m <sup>3</sup>	0.00	8 842.00	0.00	0.00	5 264.00	11 740.00	0.00	0.00	0.00
互通最小半径/m	1 800.00	0.00	0.00	1 382.20	0.00	0.00	0.00	1 304.20	0.00
互通土石挖方总量/m <sup>3</sup>	48 807.00	0.00	0.00	123 177.0	0.00	0.00	0.00	126 342.0	0.00
互通土石填方总量/m <sup>3</sup>	98 411.00	0.00	0.00	99 291.00	0.00	0.00	0.00	229 868.0	0.00
弃土场单位面积实际弃土方量/(m <sup>3</sup> ·m <sup>-2</sup> )	4 029.08	6 642.32	5 044.02	3 380.98	5 968.87	5 662.50	6 900.05	0.00	6 408.43
取土场单位面积实际弃土方量/(m <sup>3</sup> ·m <sup>-2</sup> )	0.00	0.00	60 552.00	108 736.3	0.00	0.00	58 905.56	81 402.33	0.00
施工便道占地/hm <sup>2</sup>	0.00	0.72	0.00	1.56	2.94	0.12	2.65	0.91	0.00
临时弃土场单位面积弃土方量/(m <sup>3</sup> ·m <sup>-2</sup> )	3 659.86	3 665.81	3 666.84	6 709.32	0.00	3 638.25	3 146.79	3 666.39	3 666.87
施工生产生活区占地/hm <sup>2</sup>	0.00	106.00	1.60	1.80	4.40	2.70	4.10	0.90	1.70
临时堆土场占地/hm <sup>2</sup>	6.38	1.69	0.00	5.53	1.16	0.00	10.76	0.00	1.38

表 4 梁平—忠县高速公路各路段指标归一化值

评价指标	第 1 段	第 2 段	第 3 段	第 4 段	第 5 段	第 6 段	第 7 段	第 8 段	第 9 段
路基长度/m	1.000 0	0.200 0	0.623 0	0.409 0	0.518 5	0.873 9	0.000 0	0.502 1	0.901 5
路基挖方总高度/路基总长度	0.996 8	0.000 0	0.927 5	0.997 8	0.941 3	0.951 6	1.000 0	0.992 7	0.985 5
路基土石方挖方总量/路基总长度	0.073 9	0.685 7	0.767 0	0.137 0	1.000 0	0.627 8	0.652 6	0.000 0	0.445 0
路基土石方填方总量/路基总长度	0.126 7	0.369 6	0.200 8	1.000 0	0.961 0	0.150 3	0.669 8	0.041 1	0.000 0
路基填方 I 百分比/%	0.000 0	1.000 0	0.549 0	0.152 0	0.435 0	0.257 4	0.151 4	0.269 8	0.739 1
路基填方 II 百分比/%	0.580 8	1.000 0	0.923 5	0.666 7	0.734 9	0.962 8	0.547 1	0.567 7	0.000 0
路基填方 III 百分比/%	1.000 0	0.000 0	0.385 5	0.835 1	0.581 4	0.583 0	0.905 2	0.803 7	0.779 6
桥梁长度/m	1.000 0	0.890 4	1.000 0	0.629 3	0.277 5	1.000 0	0.000 0	0.956 7	0.848 1
涵洞长度/m	0.642 6	1.000 0	1.000 0	0.442 7	0.927 4	0.432 6	0.046 0	0.000 0	0.190 9
隧道明洞/洞口土石挖方总量/m <sup>3</sup>	1.000 0	0.246 8	1.000 0	1.000 0	0.551 6	0.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
互通最小半径/m	0.000 0	1.000 0	1.000 0	0.232 1	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.275 4	1.000 0
互通土石挖方总量/m <sup>3</sup>	0.613 7	1.000 0	1.000 0	0.025 1	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.000 0	1.000 0
互通土石填方总量/m <sup>3</sup>	0.571 9	1.000 0	1.000 0	0.568 1	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.000 0	1.000 0
弃土场单位面积实际弃土方量/(m <sup>3</sup> ·m <sup>-2</sup> )	0.416 1	0.037 4	0.269 0	0.510 0	0.135 0	0.179 4	0.000 0	1.000 0	0.071 2
取土场单位面积实际弃土方量/(m <sup>3</sup> ·m <sup>-2</sup> )	1.000 0	1.000 0	0.443 1	0.000 0	1.000 0	1.000 0	0.458 3	0.251 4	1.000 0
施工便道占地/hm <sup>2</sup>	1.000 0	0.755 1	1.000 0	0.469 4	0.000 0	0.959 2	0.098 6	0.690 5	1.000 0
临时弃土场单位面积弃土方量/(m <sup>3</sup> ·m <sup>-2</sup> )	0.454 5	0.453 6	0.453 5	0.000 0	1.000 0	0.457 7	0.531 0	0.453 5	0.453 5
施工生产生活区占地/hm <sup>2</sup>	1.000 0	0.000 0	0.984 9	0.983 0	0.958 5	0.974 5	0.961 3	0.991 5	0.984 0
临时堆土场占地/hm <sup>2</sup>	0.407 1	0.842 9	1.000 0	0.486 1	0.892 2	1.000 0	0.000 0	1.000 0	0.871 7

表 5 各路段的水土流失影响指数(SW II)值

路段	第 1 段	第 2 段	第 3 段	第 4 段	第 5 段	第 6 段	第 7 段	第 8 段	第 9 段
SW II 值	0.659 0	0.621 3	0.815 2	0.554 3	0.805 2	0.744 6	0.613 9	0.517 7	0.771 8

### 3 结论

综合考虑造成同一高速公路各路段沿线水土流失的施工因素,建立了多层次、多指标的针对同一高速公路施工期水土流失影响的评价体系,以水土流失影响指数(SW II)作为高速公路施工期水土流失影响严重程度的最终评价指标,并结合客观赋权法中的熵值法确定各评价指标的权重值,根据评价体系中各参考指标的熵值所提供的信息量大小得到各评价指标的权重值。

(1) 排除了人为因素的干扰,更加客观、科学的确定高速公路施工期水土流失重点路域,为水土保持措施的实施提供参考。

(2) 通过对梁平至忠县 9 段路段水土流失影响评价,确定了水土流失较为严重的区域,并将其划定为水土流失重点防护区域。

(3) 通过梁平至忠县 9 段路段的水土流失影响评价,验证了该多层次、多指标的高速公路施工期水土流失影响评价体系的合理性,为其他路段的水土流失影响评价提供了有力的参考。

#### [ 参 考 文 献 ]

[1] 赵廷宁,张峥,陈吉虎. 高速公路项目水土流失影响指数的应用研究[J]. 水土保持通报,2014,34(2):116-119.  
 [2] 王金娟,陈宗伟,江玉林. 高速公路施工期水土流失影响因素及其防治措施[J]. 水土保持研究,2006,13(5):120-123.  
 [3] 明道贵. 高速公路建设水土流失与水土保持研究[D]. 河北 石家庄:河北工业大学,2006.

[4] 王金娟,陈宗伟,江玉林. 高速公路施工期水土流失影响因素及其防治措施[J]. 水土保持研究,2006,13(5):120-123.  
 [5] 王进鑫,毛泽秦. 平凉纸坊沟流域水土流失影响因素及其相关关系分析[J]. 水土保持研究,2011,18(1):101-104.  
 [6] 尹晓静. 高速公路建设水土流失成因与水土保持策略[J]. 水土保持应用技术,2012(4):48-49.  
 [7] 宋马俊. 安全评价方法科学性与适应性论证研究[J]. 电力安全技术,2007,9(4):28-31.  
 [8] 陈雷. 我国水上交通安全宏观评估的研究[D]. 辽宁 大连:大连海事大学,2007.  
 [9] 姜德文. 开发建设项目水土保持损益分析研究[D]. 北京:北京林业大学,2007.  
 [10] 张峥高速公路项目水土流失影响指数应用研究[D]. 北京:北京林业大学,2014.  
 [11] 方青,邓其,潘晓东. 基于可拓理论的高速公路事故动态预警方法[J]. 公路工程,2013,38(4):115-119.  
 [12] 张翔宇. 公路建设项目水土流失防治分区探讨[J]. 山西建筑,2011(18):120-122.  
 [13] 叶斌. 基于改进熵值法的内河水运评价研究[D]. 四川 成都:成都理工大学,2012.  
 [14] 杨元玲. 寿险公司信用评级的财务状况研究[D]. 四川 成都:西南财经大学,2013.  
 [15] 贾明璐,王富喜,毛爱华. 基于熵值法的山东省城镇化质量测度及空间差异分析[J]. 地理科学,2013,33(11):1323-1329.  
 [16] 曹银贵,赵丽,朱永明. 主成分分析法和熵值法在农村居民点集约利用评价中的比较[J]. 农业工程学报,2012,28(7):235-242.

(上接第 152 页)

[7] 刘芬. 黄土高原梯田 DEM 地形特征研究[D]. 陕西 西安:西北大学,2015.  
 [8] Liu Baoyuan, Zhang Keli, Xie Yun. An Empirical Soil Loss Equation [C]. Beijing: 12th ISCO Conference, 2002.  
 [9] 章文波,付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J]. 资源科学,2003,25(1):35-41.  
 [10] 刘宝元. 西北黄土高原区土壤侵蚀预报模型开发项目研究成果报告[R]. 北京:水利部水土保持监测中心,2006.

[11] 杨勤科,郭伟玲,张宏鸣,等. 基于 DEM 的流域坡度坡长因子计算方法研究初报[J]. 水土保持通报,2010,30(2):203-206.  
 [12] 李京忠. 区域水土流失结构性植被因子遥感提取研究:以延河流域为例[D]. 陕西 西安:西北大学,2009.  
 [13] 谢红霞. 延河流域土壤侵蚀时空变化及水土保持环境效应评价研究[D]. 陕西 西安:陕西师范大学,2008.  
 [14] 宋向阳,吴发启,赵龙山,等. 基于 DEM 的延河流域水文特征提取与分析[J]. 干旱地区农业研究,2012,30(4):200-206.