

流域减沙效益拓扑分析

——以延河流域为例

苏光全 甘枝茂

(陕西师范大学地理系·西安市·710062)

提 要

该文以流域治理前径流站实测输沙值为依据,运用拓扑分析法预测流域治理后理论输沙值,与治理后实测输沙值对比,求得流域下垫面及坡面减沙效益。并以延河流域为例,与水保、水文法对照,取得令人满意的效果。

关键词: 拓扑预测 减沙效益 理论输沙值 延河

Topological Analyses on the Benefit of the Basin Decreasing Sandy Soil

——Taking the Yanhe Basin as an Example

Su Guangquan Gan Zhimao

(The Geography Department of Shaanxi Normal University, Xian Shaanxi, 710062)

Abstract

The dissertation utilizes the measured sandy soil values as a basis before the basin is sand-controlled, and then by using topological forecasts decides the theoretical sandy soil values during the basin is sand-controlled. Comparing with these values, we can get a new method to detect the basin decreased sandy soil benefit of its ground and its sloping fields. By taking the Yanhe basin as an example and contrasting with both the water-and-soil conservative way and the hydrologic way, we gain a satisfactory conclusion.

Key words topological forecasts the decreased sandy soil benefit theoretical sandy soil values the Yanhe basin

一、引 言

目前对水土保持减沙效益评估主要采用水保法或水文法。水保法用各项水保措施的减沙作用综合计算分析流域减沙效益。采用水保法要求治理措施面积准确无误,对照区流失量和效益指标要准确并具有代表性。在选取各种措施评价指标,划分质量等级,确定效益系数等方面,具有很强的实践性、经验性。

水文法以水文站或径流站实测资料为依据计算分析流域减沙效益。水文法中系数、参数等确定正确与否,直接影响计算成果,同时流域泥沙增减,一方面与下垫面治理有关;另一方面受降水影响。为区分降水与下垫面对流域产沙的影响,同时实现流域减沙效益的定量研究,本文采用拓扑预

测法,取得了满意的效果。

二、基本原理分析

(一) 拓扑预测

设有流域出口径流站治理前实测输沙值原始序列:

$$X = (X_{(1)}, X_{(2)}, \dots, X_{(n)}) \quad (1)$$

则序列 X 的第 K 段折线方程为:

$$X = \{X_k = X_{(k)} + (t - k)(X_{(k+1)} - X_{(k)})\} \quad (2)$$

式中: $k = 1, 2, \dots, n - 1; k \leq t \leq k + 1$ 。再取 $\sigma_{\max} = \max_{1 \leq k \leq n} \{X_{(k)}\}$, $\sigma_{\min} = \min_{1 \leq k \leq n} \{X_{(k)}\}$, $\epsilon \in [\sigma_{\min}, \sigma_{\max}]$,

得 ϵ_- 等高线:

$$X = \epsilon \quad (3)$$

联(2)和(3)两式可得折线 X 与 ϵ_- 等高线的交点。若同一 ϵ_- 等高线与系列折线段相交,则可得 ϵ_- 等高点序列:

$$X_\epsilon = (p_1, p_2, \dots, p_m) \quad (4)$$

其中 p_i 位于第 t_i 段折线上,其坐标为:

$$(t_i + \frac{\epsilon - X_{(t_i)}}{X_{(t_i+1)} - X_{(t_i)}}, \epsilon) \quad (5)$$

令:

$$q_i = t_i + \frac{\epsilon - X_{(t_i)}}{X_{(t_i+1)} - X_{(t_i)}}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

依(6)式建立 ϵ_- 等高时刻序列 GM(1,1)模型,求得 ϵ_- 等高时刻预测值。

若有 S 条不同等高线,可得 S 组不同 ϵ_- 等高时刻 GM(1,1)预测值:

$$\hat{q}_i(m_i + 1), \hat{q}_i(m_i + 2), \dots, \hat{q}_i(m_i + k_i) \quad i = 1, 2, \dots, S \quad (7)$$

删去(7)式中的无效预测时刻,再将所有预测值从小到大重新排序,则预测波型 $\hat{X}^{(0)}$ 为:

$$\hat{X}^{(0)} = \{\epsilon_{\hat{q}_i(k)} + \frac{(t - \hat{q}_i(k))(\epsilon_{\hat{q}_i(k+1)} - \epsilon_{\hat{q}_i(k)})}{\hat{q}_i(k+1) - \hat{q}_i(k)} \quad K = 1, 2, \dots, n\} \quad (8)$$

将预测年代所在时间序列值 l 代入(8)式系列折线段方程中与 l 相交折线段方程中的 t , 得流域治理后所在年份理论输沙值:

$$W_x = \epsilon_{\hat{q}_i(f)} + \frac{(l - \hat{q}_i(f))(\epsilon_{\hat{q}_i(f+1)} - \epsilon_{\hat{q}_i(f)})}{\hat{q}_i(f+1) - \hat{q}_i(f)}, \quad f \in [1, 2, \dots, n] \quad (9)$$

(8)式与(9)式形式相似,意义截然不同。同时需特别指出的是:建 GM(1,1)模型必须满足准指数规律和准光滑条件;(7)式中的预测值,不是预测理论输沙值,而是 S 条不同等高线分别反映的不同预测时刻序列值。

(二) 坡面减沙效益评判

坡面在降雨径流及其它因素影响下,其侵蚀产生的泥沙(C)进入河道(或沟道)后,可能有以下情况:1. 输出到流域外(W_l ——流域出口径流站输沙值);2. 库坝淤积(W_b);河道及灌溉淤积(W_{hg} , $W_h > 0$, 表示河道淤积, $W_h < 0$, 河道冲刷)。扣除因降水因素所减少泥沙(ΔW), 得流域治理后年均减沙值(C'):

$$C' = \Delta W_i - \Delta W_{kb} - \Delta W_{hg} - \Delta W_j \quad (10)$$

式中: ΔW_i 、 ΔW_{kb} 、 ΔW_{hg} 分别表示治理后相对治理前整个流域减沙、库坝增沙、河道灌溉淤积年均值。式中 C' 为坡面综合减沙值, 含开荒、修路及采矿等人为增沙值, 存在折减因素。实际上人们植树造林, 兴修梯田, 种植牧草等坡面措施减少的沙量为:

$$C = \Delta W_i - \Delta W_{kb} - \Delta W_{hg} - \Delta W_j + \Delta W_r \quad (11)$$

式中 ΔW_r 表示流域治理后相对治理前人为因素增沙量。

三、实例分析

以延河流域为例。延河是黄河中游较大的一级支流, 甘谷驿径流站以上流域面积 5 891 km², 河道全长 300 余 km。以黄土梁峁丘陵沟壑为主, 部分地区为梢林灌丛或草地, 水土流失严重, 年均输沙模数达 8 000 t/(km² · a), 上游区最高可达 16 000 t/(km² · a)。几十年来水土保持综合治理, 成绩显著, 分析研究其水保措施减沙效益具有一定代表性。

(一) 流域治理前后界线划分

延河流域大规模的综合治理是 60 年代开始的, 而林草措施的效益还要滞后。据延河流域 1956~1989 年(序号 1~34)甘谷驿站实测年输沙量(表 1), 作年输沙量累积过程曲线 $\Sigma W_i \sim t$ (图 1)。

从图 1 $\Sigma W_i \sim t$ 图的直线斜率变化可以看出, 1970 年后延河流域的泥沙发生明显变

化。1970~1989 年时段的直线斜率明显缓于 1956~1969 年时段斜率, 因此 1970 年(序号 15)作为分析水保拦沙效益、划分延河治理前后界线的依据。

(二) 延河流域理论输沙值拓扑预测

由 1956~1969 年(序号 1~14)延河实测输沙曲线图(图 2)及表 1 得系列折线段方程为:

$$A_1A_2: X_1 = -4 907t_1 + 14 029$$

$$A_2A_3: X_2 = 3 051t_2 - 1 887$$

$$A_3A_4: X_3 = 1 834t_3 + 1 764$$

$$A_4A_5: X_4 = -5 860t_4 + 32 540$$

$$A_5A_6: X_5 = -670t_5 + 6 590$$

$$A_6A_7: X_6 = -1 000t_6 + 8 570$$

$$A_7A_8: X_7 = 1 920t_7 - 11 870$$

$$A_8A_9: X_8 = 14 710t_8 - 114 190$$

$$A_9A_{10}: X_9 = -16 210t_9 + 164 090$$

$$A_{10}A_{11}: X_{10} = 8 610t_{10} - 84 110$$

$$A_{11}A_{12}: X_{11} = -5 720t_{11} + 73 520$$

$$A_{12}A_{13}: X_{12} = 3 392t_{12} - 35 824$$

$$A_{13}A_{14}: X_{13} = -672t_{13} + 17 008$$

为满足建模条件及预测精度, 取从 2 500 万 t 到 10 000 万 t, 间距为 500 万 t 的等高线 16 条。依拓扑预测基本原理, 可得表 2、表 3 和表 4。

表 1 延河甘谷驿站年输沙量

序号	序 号									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	输 沙 量 (10 ⁴ t)									
0		9 122	4 215	7 266	9 100	3 240	2 570	1 570	3 490	18 200
1	1 990	10 600	4 880	8 272	7 600	6 740	5 040	1 930	4 620	2 150
2	2 620	1 520	14 000	3 520	4 680	1 470	1 690	1 920	2 160	2 000
3	3 590	1 530	4 330	8 730	4 500	/	/	/	/	/

表2 延河流域 ϵ 等高时刻序列表(1956~1969年)

等高线 $\epsilon, 10^4 t$	序 号								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	序 列 值								
$\epsilon_1=2500$	6.07 000	7.48438	9.96854	10.0592	/	/	/	/	/
$\epsilon_2=3000$	5.35 821	7.74479	9.93769	10.1173	/	/	/	/	/
$\epsilon_3=3500$	4.95563	8.00068	9.90685	10.1754	/	/	/	/	/
$\epsilon_4=4000$	4.87031	8.03467	9.87600	10.2334	/	/	/	/	/
$\epsilon_5=4500$	1.94192	2.09341	4.78498	8.06867	9.84516	10.2915	/	/	/
$\epsilon_6=5000$	1.84002	2.25729	4.69966	8.10265	9.81431	10.3496	11.9790	12.0354	/
$\epsilon_7=5500$	1.73813	2.42117	4.61433	8.13664	9.78347	10.4077	11.8916	12.1828	/
$\epsilon_8=6000$	1.63623	2.58505	4.52901	8.17063	9.75262	10.4657	11.8042	12.3302	/
$\epsilon_9=6500$	1.53434	2.74893	4.44370	8.20462	9.72178	10.5238	11.7168	12.4776	/
$\epsilon_{10}=7000$	1.43244	2.91282	4.35836	8.23861	9.69093	10.5819	11.6294	12.6250	/
$\epsilon_{11}=7500$	1.33055	3.12759	4.27304	8.27260	9.66009	10.63995	11.54196	12.7724	/
$\epsilon_{12}=8000$	1.22865	3.40022	4.18771	8.30659	9.62924	10.6980	11.4545	12.9198	13.4048
$\epsilon_{13}=8500$	1.12676	3.67285	4.10239	8.34058	9.59840	10.7561	11.3671	/	/
$\epsilon_{14}=9000$	1.02486	3.94547	4.01706	8.37458	9.56755	10.8142	11.2797	/	/
$\epsilon_{15}=9500$	8.40857	9.53671	10.8722	11.1923	/	/	/	/	/
$\epsilon_{16}=10000$	8.44256	9.50586	10.9303	11.1049	/	/	/	/	/

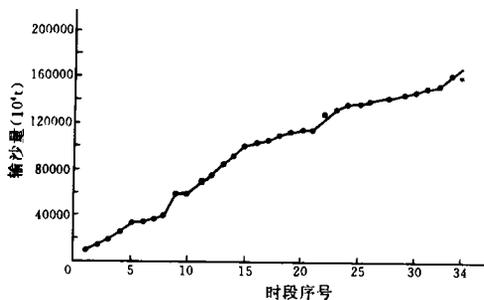


图1 延河甘谷驿站 $\Sigma W_s \sim t$ 曲线

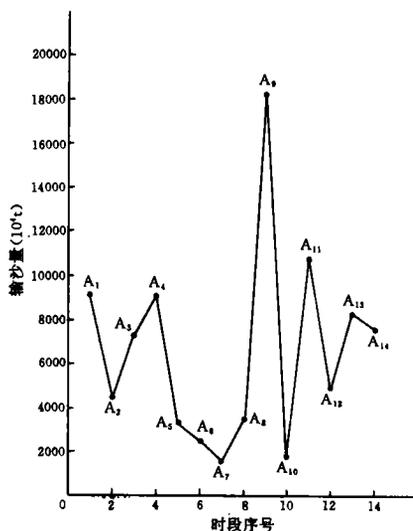


图2 延河流域治理前实测输沙值曲线图

表 3 延河流域 GM(1,1)响应式表

等高线 $\epsilon(10^4t)$	GM(1,1)响应式
2 500	$\hat{q}_1^{(1)}(k+1) = 55.408\ 422\ 26e^{0.134\ 258\ 76k} - 49.338\ 422\ 26$
3 000	$\hat{q}_2^{(1)}(k+1) = 62.021\ 952\ 32e^{0.123\ 339\ 133k} - 56.663\ 742\ 32$
3 500	$\hat{q}_3^{(1)}(k+1) = 69.728\ 645\ 11e^{0.112\ 321\ 447k} - 64.773\ 015\ 11$
4 000	$\hat{q}_4^{(1)}(k+1) = 68.932\ 035\ 94e^{0.114\ 029\ 729k} - 64.061\ 725\ 94$
4 500	$\hat{q}_5^{(1)}(k+1) = 12.546\ 004\ 38e^{0.272\ 002\ 559k} - 10.604\ 084\ 38$
5 000	$\hat{q}_6^{(1)}(k+1) = 26.047\ 128\ 5e^{0.172\ 443\ 069k} - 24.207\ 108\ 5$
5 500	$\hat{q}_7^{(1)}(k+1) = 26.011\ 924e^{0.172\ 761\ 291k} - 24.273\ 794$
6 000	$\hat{q}_8^{(1)}(k+1) = 25.976\ 487\ 22e^{0.173\ 120\ 324k} - 24.340\ 257\ 22$
6 500	$\hat{q}_9^{(1)}(k+1) = 25.934\ 647\ 36e^{0.173\ 456\ 522k} - 24.400\ 307\ 36$
7 000	$\hat{q}_{10}^{(1)}(k+1) = 25.963\ 603\ 35e^{0.173\ 387\ 363k} - 24.531\ 163\ 35$
7 500	$\hat{q}_{11}^{(1)}(k+1) = 26.029\ 582\ 98e^{0.173\ 552\ 534k} - 24.699\ 032\ 98$
8 000	$\hat{q}_{12}^{(1)}(k+1) = 34.104\ 907\ 69e^{0.146\ 033\ 79k} - 32.876\ 257\ 69$
8 500	$\hat{q}_{13}^{(1)}(k+1) = 21.476\ 634\ 41e^{0.197\ 212\ 399k} - 20.349\ 874\ 41$
9 000	$\hat{q}_{14}^{(1)}(k+1) = 22.349\ 444\ 8e^{0.192\ 792\ 984k} - 21.324\ 584\ 8$
9 500	$\hat{q}_{15}^{(1)}(k+1) = 121.024\ 930\ 2e^{0.077\ 298\ 379k} - 112.616\ 360\ 2$
10 000	$\hat{q}_{16}^{(1)}(k+1) = 126.329\ 811\ 2e^{0.074\ 526\ 184k} - 117.887\ 251\ 2$

表 4 延河流域 ϵ_{-} 等高时刻预测序列

等高线值 (10^4t)	序 号					
	1	2	3	4	5	6
	预 测 值					
2 500	15.57893122	17.81744794	20.37761427	23.30564763	26.65440636	30.48434395
3 000	15.08453219	17.06999383	19.30469106	21.83877936	24.70551239	27.94855574
3 500	14.61828235	16.36253725	18.31491683	20.50025453	22.94634694	25.68430734
4 000	14.72475634	16.50329258	18.4966501	20.730776	23.23475221	26.04117208
4 500	15.2801307	20.05655226	26.32603709	34.5553025	/	/
5 000	16.39180316	19.4768093	23.14242655	27.49792836	32.67315338	/
5 500	16.44348934	19.54483202	23.23110692	27.6126358	32.82054784	/
6 000	16.49527992	19.61303897	23.32008304	27.72779242	32.96859925	/
6 500	16.54243237	19.67571749	23.40247492	27.83511365	33.10733393	/
7 000	16.54569776	19.67824039	23.40385704	27.83483246	33.10470991	/

续表 4

等高线值 (10 ⁴ t)	序 号					
	1	2	3	4	5	6
	预 测 值					
7 500	16.62416687	19.77483177	23.52262068	27.98070245	33.28369403	/
8 000	14.90454044	17.24806018	19.96006393	23.09849038	26.73038823	30.93334858
8 500	15.28683818	18.61941041	22.67849245	27.62246539	33.64423787	/
9 000	15.11013669	18.32303125	22.21908914	26.94357258	32.67263112	/
9 500	14.31494789	15.46535989	16.70822405	18.11778377	19.50162536	21.06886152
10 000	14.1882862	15.28608431	16.46882297	17.74307432	19.11591902	20.59498559
等高线值 (10 ⁴ t)	序 号					
	7	8	9	10	11	12
	预 测 值					
2 500	/	/	/	/	/	/
3 000	31.61730693	/	/	/	/	/
3 500	28.74896145	32.179290399	/	/	/	/
4 000	29.18656662	32.71187903	/	/	/	/
4 500	/	/	/	/	/	/
5 000	/	/	/	/	/	/
5 500	/	/	/	/	/	/
6 000	/	/	/	/	/	/
6 000	/	/	/	/	/	/
6 500	/	/	/	/	/	/
7 000	/	/	/	/	/	/
7 500	/	/	/	/	/	/
8 000	/	/	/	/	/	/
8 500	/	/	/	/	/	/
9 000	/	/	/	/	/	/
9 500	22.76204764	24.59130563	26.56757082	28.70265735	31.00932879	33.50137447
10 000	22.18849281	23.90529533	25.75493279	27.74768364	29.80677461	32.20767352

据实际需要,表 4 中预测值取 14 与 34 之间数值(含一个超过 34 的最小值);同时为避免出现无效序列,使运算结果客观可靠,预测值取 10 位有效数字。

依照表 4 绘出延河流域甘谷驿站输沙预测波型(图 3),联系(8)式和(9)式求得延河甘谷驿站

1970~1989 年(序号 15~34)理论输沙值(表 5)。

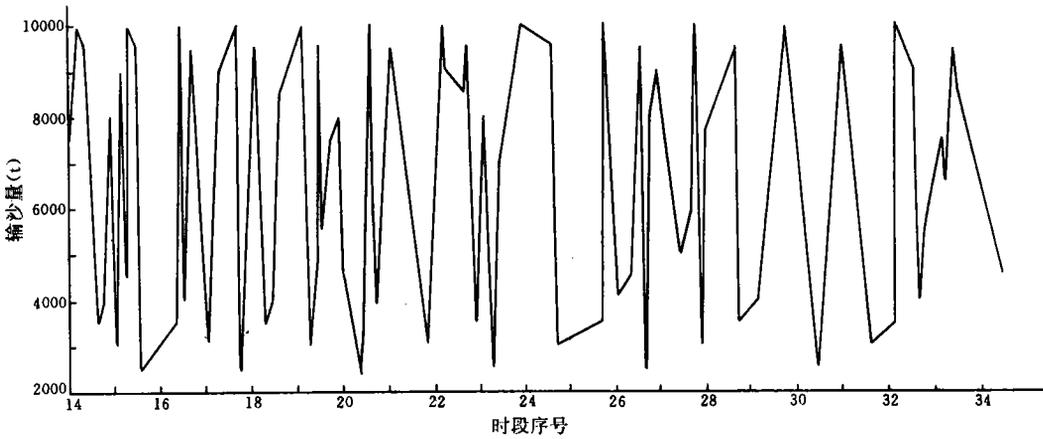


图 3 延河甘谷驿站输沙预测波型(1970~1989 年)

表 5 延河甘谷驿站 1970~1989 年理论输沙值

序号	序 号									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	输 沙 值 (10 ⁴ t)									
1	/	/	/	/	/	5348.22	3037.35	4257.60	6754.78	9649.80
2	6551.36	8379.76	6227.06	5086.92	8393.39	3150.43	4863.03	8592.84	7549.36	3786.83
3	7861.19	8438.61	3340.48	6230.70	6938.04	/	/	/	/	20 年均值 6221.89

(三) 拓扑分析法流域下垫面和坡面减沙效益及与水文、水保法对比

对惠养瑜等所著《延河水沙变化及发展趋势预测研究》有关资料分析,得延河流域治理后相对治理前年均库坝淤积、河道引洪灌溉淤积、人为因素增沙各项增加值分别为 2 003.95 万 t、50.63 万 t、238.76 万 t。结合表 1、表 5 及 11 式,得拓扑预测法延河流域减沙效益(表 6)。

表 6 拓扑法减沙综合分析

时 段 (年)	实测均值 (10 ⁴ t)	理论均值 (10 ⁴ t)	综合减沙 (10 ⁴ t)	降雨因素		下垫面因素		坡 面 因 素	
				绝对值	(%)	绝对值	(%)	绝对值	占下垫面减沙量(%)
.1956~1969	6 580	6 580	/	/	/	/	/	/	/
1970~1989	3 935	6 221.89	2 645	358.11	13.54	2 286.89	84.46	471.07	20.60

表7 水文、水保法减沙综合分析

项目	下 垫 面		坡 面	
	减沙量(10 ⁴ t)	占综合减沙量(%)	减沙量(10 ⁴ t)	占下垫面减沙量(%)
水文法	2 435	92.41	619.18	25.43
水保法	2 204	83.33	498.03	22.6

注:本表数据根据惠养瑜等《延河水沙变化及发展趋势研究》有关资料整理所得

对比拓扑预测法和水文、水保法流域减沙效益(表6、表7)可看出:拓扑法与水文、水保法下垫面减沙效益分别相差:5.95%,3.13%;坡面减沙效益分别相差:4.83%,2.00%。拓扑法与水文、水保法计算结果比较接近,最大相对误差只有5.96%,说明拓扑预测法所得计算结果是可信的。

四、结 论

1. 利用拓扑分析法计算流域减沙效益,经水文、水保法验证,具有较高的可信度,是可行的。但水文、水保法本身具有较强实践性、经验性,只有保证评价标准本身有较高精度,才能得出较为正确的对比结果。本文以陕西省水土保持勘测规划研究所所长、工程师惠养瑜等撰写的《延河水沙变化及其发展趋势预测研究》作为对比标准。

2. 流域治理前后界线划分是个比较困难的问题。不能以大规模治理开始年份为准,因流域治理减沙有“滞后”现象,不一定最初年份就立杆见影;人类自生产活动以来就逐步地、有目的地改造着流域,因此,建国后不存在绝对治理前流域。本文以 $\Sigma W_t \sim t$ 曲线为依据,将流域泥沙明显减少转折点作为流域治理前后的分界点。

3. 本文以作预测的原始序列为流域年输沙值,未考虑降水类型、暴雨中心位置移动、水沙特征值等对流域年输沙的影响。若能找出一个涉及流域各种产沙因子的变量关系式,则效果更佳。这有待继续研究。

参 考 文 献

[1] 刘思峰等. 灰色系统理论及其应用. 郑州市:河南大学出版社,1991年

(上接第11页)

调查研究,尽量采用一些新技术,完善成因分析法中的一些短缺环节,加强大小面积之间转化关系研究,解决单项措施与综合措施之间的群体作用,提高大面积水利水保措施减水减沙效益的计算精度。应当看到,基本规律的研究是当前水沙变化研究中的薄弱环节,如果水沙变化情况和成因若明若暗,水沙变化规律似清非清,是很难取得令人信服的结果。

3. 加强河道冲淤以及开矿、修路等人类活动新增水土流失对水沙变化影响的研究,全面权衡影响水沙变化的正负效应,使分析研究成果更有说服力。

4. 科学分析预测条件,研究预测方法,加强对今后半个世纪黄河水沙变化趋势预测的研究,特别是对最大、最小极值的研究。

当前的问题不仅仅在于取得水沙变化的数量,更重要的是加强基础研究工作,并在某些方面取得突破,在理论与实际结合上说清问题,那么黄河水沙变化研究便可望获得成功。