试验研究

黄土丘陵沟壑区不同空间尺度流域泥沙输移比研究

王志杰[1]，马丽梅[2]，焦菊英[1,3]

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所，陕西 杨凌 712100；
2. 湖北省水利水电科学研究院，湖北 武汉 430070；3. 西北农林科技大学 水土保持研究所，陕西 杨凌 712100)

摘　要：泥沙输移比是定量表征流域内侵蚀产沙—河道输沙特征的重要指标。探讨了不同尺度流域泥沙输移比计算的可能性与方法，以黄土丘陵沟壑区的径流小区、小流域、水文站实测资料为基础，利用径流小区观测资料和单元小流域侵蚀模数 2 种方法，对 4 种空间尺度流域的泥沙输移比进行了估算。结果表明：(1) 对于面积在 10～100 km^2 的小流域，利用 2 种方法计算的泥沙输移比结果非常接近，说明在没有小区观测资料时，用单元小流域计算流域泥沙输移比是可行的。(2) 对于土壤侵蚀类型单一的水文站控制流域，在没有面积＜1 km^2 单元小流域资料的情况下，可以用面积 1～10 km^2 小流域或面积 10～100 km^2 小流域作为单元小流域来计算泥沙输移比；而对于侵蚀类型不同的支流其误差范围有些偏大。(3) 流域治理措施的实施对于泥沙输移比的减少具有明显的效果，但治理措施减沙效应的发挥具有一定的滞后性。

关键词：泥沙输移比；侵蚀模数；输沙量；空间尺度；黄土丘陵沟壑区

文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2013)06-0001-08　　**中图分类号**：S157.1，P333.4

Sediment Delivery Ratio in Different Spatial Scale Watershed in Loess Hill-gully Region

WANG Zhi-jie[1], MA Li-mei[2], JIAO Ju-ying[1,3]

(1. *Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 2. *Hubei Water Resources Research Institute, Wuhan, Hubei* 430070, *China*; 3. *Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: Sediment delivery ratio(SDR) is the important indicator to represent the basin soil erosion and sediment: one of the sediment transport characteristics. Based on the measured data of runoff plots, small watersheds and hydrological stations of loess hill-gully region, using the methods of runoff plots measured data and unit watershed erosion modulus, the SDR of 4 spatial scales were analyzed. The results showed that: (1) The SDR of watersheds between area of 10 and 100 km^2 was approximated by two methods estimated. It was feasible to use unit watershed materials to calculate SDR, while there was no runoff plots data. (2) For the hydrological station controlled watershed, it could take the watersheds between 1 and 100 km^2 as the unit watershed to calculate SDR while there was no material of watershed below 1 km^2. However, it has too large error for tributary of different erosion types. (3) Watershed management measures have obvious effect for reducing SDR, but its effect has a degree of lags.

Keywords: sediment delivery ratio; erosion modulus; sediment discharge; spatial scale; loess hill-gully region

泥沙输移比是定量表征流域内侵蚀产沙—河道输沙特征的重要指标，它将河流输沙量与流域土壤侵蚀量紧密地联系起来，成为计算流域侵蚀量要解决的首要问题[1]。一般地，泥沙输移比是指流域出口处某一断面实测的输沙量与断面以上流域侵蚀产沙量之比。我国泥沙输移比的研究是在 20 世纪 70 年代后期由龚时旸和熊贵枢等[2]首先在黄土高原开始进行的，其后，学者在黄土高原地区多年平均泥沙输移比和次暴雨泥沙输移比进行了大量的研究，龚时旸[2]、景可[3]在黄土丘陵沟壑区的研究都证实黄土地区输

收稿日期：2012-12-12　　修回日期：2013-02-06
资助项目：中国科学院重点部署项目“黄土高原及周边沙地近代生态环境的演变与可持续性”子课题“不同区域典型支流水沙变化对坝库工程的响应”(KZZD-EW-04-03-04)
作者简介：王志杰(1986—)，男(汉族)，甘肃省会宁县人，博士研究生，研究方向为土壤侵蚀研究。E-mail：wzhijie86@gmail.com。
通信作者：焦菊英(1965—)，女(汉族)，陕西省宝鸡市人，研究员，主要从事流域侵蚀产沙、土壤侵蚀与植被关系及水土保持效益评价。E-mail：jyjiao@ms.iswc.ac.cn。

沙量与流域产沙量基本一致，泥沙输移比约为 1。这一结论在黄土高原使得输沙量代替土壤侵蚀量成为可能，很多学者用输沙量直接代替土壤侵蚀量，但这种做法是不科学的。通常情况下，在流域侵蚀与产沙达到平衡时，泥沙输移比等于 1[3-4]。但是，由于流域降雨、地形、地貌和土地利用等情况的变化，致使侵蚀产生的泥沙发生了沿路沉积而使得泥沙输移比小于 1。许炯心和孙季[5]研究认为在天然状况下，无定河流域的泥沙输移比近似等于 1，但从 20 世纪 60 年代以后在流域中大规模地展开水土保持工作以来，泥沙输移比急剧下降为 0.2～0.4。泥沙输移比的计算方法主要有定性判别法[6-7]，直接计算法[8-11]，模型计算法[12-15]，侵蚀单元法[16-18]和沙量平衡法[19-20]等。侵蚀单元法是牟金泽[16]结合我国黄土高原具有较多单元流域水沙观测资料的实际情况，且缺少计算流域总侵蚀量实用公式的情况下提出的采用单元流域（面积＜1 km^2）作为泥沙的产源地，将其它各种不同大小流域面积的中、小流域输沙模数与单元流域侵蚀模数之比作为泥沙输移比，以此达到单元流域实测水沙资料，推求缺乏泥沙观测资料地区小流域产沙量的方法，并依此计算了大理河流域各级面积下（团山沟—绥德）的多年平均泥沙输移比。曹文洪[18]、刘纪根[17]等学者应用该方法，采用单元小流域（面积＜1 km^2）观测数据，分别建立了计算不同尺度次暴雨泥沙输移比求算公式，赵晓光等[8]则利用径流小区测验资料，对 0.5～41.3 hm^2 的小集水区泥沙输移比进行了估算。然而，利用侵蚀单元法推求泥沙输移比的已有研究成果，大都采用面积＜1 km^2 的流域作为单元小流域，当研究区没有面积＜1 km^2 的小流域观测数据时，是否可以用其它尺度的流域水沙资料作为单元小流域来推求泥沙输移比鲜有报道，利用面积＞1 km^2 的流域作为单元小流域来推求泥沙输移比的适用范围也不得而知。基于此，以黄土丘陵沟壑区的径流小区、小流域、水文站实测资料为基础，用径流小区测验资料和单元小流域侵蚀模数 2 种方法，以不同尺度流域实测资料作为单元小流域，探索不同空间尺度泥沙输移比估算的可能性与科学方法，并考虑流域的水土保持措施治理状况，为分析不同尺度流域的土壤侵蚀量及其对河流冲淤状况的影响，人类活动影响下流域侵蚀与泥沙输移变化规律，以及利用河流输沙量推算不同尺度实际侵蚀产沙量提供支持。

1 材料与方法

1.1 数据来源

在黄土丘陵沟壑区分别选取不同尺度的小流域作为研究对象（表 1），面积＜1 km^2 的小流域为羊道沟、插财主沟、想她沟、团园沟，面积 1～10 km^2 的小流域为王茂庄沟、李家寨沟、蛇家沟、驼耳巷沟、离石王家沟，面积＜100 km^2 的小流域为韭园沟、裴家峁沟、三川口、西庄和杜家沟岔，面积 10～1 000 km^2 的单一侵蚀类型水文站控制区为殿市以上、青阳岔以上、李家河以上、曹坪以上、枣园以上、子长以上、志丹以上，面积＞1 000 km^2 的支流流域选择佳芦河、清涧河、延河、大理河、三川河；这些小流域、水文站控制区、支流位于黄河中游主要泥沙来源区，气候、地质、地貌等下垫面条件在黄土丘陵沟壑区具有一定的代表性，且始终是黄土高原水土流失规律与水土保持治理的重点流域[21]。

研究区的输沙量数据为各流域出口断面实测资料，该数据来源于黄河泥沙公报；淤地坝拦沙量数据来源于陕西省水土保持局；降雨数据来源于国家气象局，数据资料的序列为 1955—2009 年。以黄河中游 48 个气象站的降雨数据为基础，通过 Kriging 空间插值处理，采用面积加权法获得了黄河中游的面降雨数据。

表 1 不同空间尺度代表性小流域的基本情况

流域类型	面积＜1 km^2			面积 1～10 km^2			面积 10～100 km^2		
	流域名	面积/km^2	治理度/%	流域名	面积/km^2	治理度/%	流域名	面积/km^2	治理度/%
治理	插财主沟	0.193	78.30	王茂庄沟	5.97	30.00	韭园沟	70.1	30.00
	想她沟	0.454	62.14	大砭沟	3.70	38.37			
				王家沟	9.10	41.98			
未治理	羊道沟	0.206		李家寨沟	4.92		裴家峁沟	41.2	
	团园沟	0.491		蛇家沟	4.74		三川口	21.0	
				驼耳巷沟	5.74		西庄	49.0	
				小砭沟	4.05		杜家沟岔	96.1	

1.2 泥沙输移比计算方法

采用 2 种方法即基于小区测验资料和基于单元流域侵蚀模数，计算不同空间尺度治理与非治理流域的泥沙输移比。

1.2.1　**利用径流小区测验资料计算流域泥沙输移比**　首先根据流域内不同侵蚀地类或土地利用类型的径流小区测验资料,计算不同侵蚀地类或土地利用类型的侵蚀模数;再结合对应侵蚀地类或土地利用类型面积,计算不同侵蚀地类或不同土地利用类型的侵蚀量;然后将所有类型的侵蚀量相加获得流域的土壤侵蚀量。而小流域输沙量采用流域出口断面的实测值。计算公式为:

$$SDR=\frac{Y}{T} \tag{1}$$

式中:SDR——泥沙输移比;Y——流域出口断面实测的输沙量(t);T——出口断面以上流域的总侵蚀量(t)。当流域内有淤地坝时,流域总侵蚀量 T 为各侵蚀地类土壤侵蚀量与淤地坝拦沙量的总和。

1.2.2　**基于单元小流域侵蚀模数计算流域泥沙输移比**　根据牟金泽等[16]提出的利用单元小流域计算泥沙输移比的思路,分别把面积<1 km^2,1～10km^2,10～100 km^2 的小流域作为单元流域,结合不同空间尺度流域出口的输沙量观测资料,计算泥沙输移比。即:

$$SDR=\frac{\text{大、中流域输沙模数}}{\text{单元小流域侵蚀模数}} \tag{2}$$

具体方法为:(1) 面积 1～10km^2 小流域泥沙输移比,利用面积<1 km^2 小流域的侵蚀模数计算;(2) 面积 10～100 km^2 小流域泥沙输移比,分别利用面积<1 km^2 小流域和面积 1～10 km^2 小流域的侵蚀模数计算;(3) 面积 100～1 000 km^2 流域泥沙输移比,分别利用面积<1 km^2 小流域,面积 1～10 km^2 小流域和面积 10～100 km^2 流域 3 个级别计算;(4) 面积 1 000～10 000 km^2 支流流域的泥沙输移比,分别利用面积<1 km^2 小流域,面积 1～10 km^2 小流域,面积 10～100 km^2 流域和面积 100～1 000 km^2 水文站控制区 4 个级别计算。

2　结果与分析

2.1　基于小区测验资料计算的流域泥沙输移比

2.1.1　**面积<1 km^2 流域的泥沙输移比**　治理流域插财主沟(治理度为 78.3%)的泥沙输移比变化在 0.01～0.53,多年平均(1963—1968 年)泥沙输移比为 0.41;想她沟(治理度为 62%)的泥沙输移比变化在 0.03～0.85,多年平均(1959—1961 年)泥沙输移比为 0.50。

未治理流域羊道沟各年的泥沙输移比均接近于 1,多年平均(1963—1968 年)泥沙输移比为 0.99;团园沟年平均(1959—1961 年)泥沙输移比为 0.99(表 2)。

表 2　面积<1 km^2 流域的泥沙输移比

年份	治理沟						未治理沟					
	侵蚀量计算值/t		实测输沙量/t		泥沙输移比		侵蚀量计算值/t		实测输沙量/t		泥沙输移比	
	插财主沟	想她沟	插财主沟	想她沟	插财主沟	想她沟	羊道沟	团园沟	羊道沟	团园沟	羊道沟	团园沟
1958	—	—	—	—	—	—	—	13 930	—	17 701	—	1.27
1959	—	11 123	—	6 737	—	0.61	—	12 410	—	12 350	—	0.99
1960	—	1 007	—	33	—	0.03	—	1 105	—	732	—	0.67
1961	—	15 872	—	13 488	—	0.85	—	23 115	—	23 300	—	1.00
1963	5 108	—	2 706	—	0.53	—	6 523	—	6 502	—	1.00	—
1964	2 107	—	527	—	0.25	—	2 538	—	2 539	—	1.00	—
1965	24	—	0.31	—	0.01	—	28	—	28	—	1.00	—
1966	9 645	—	4 015	—	0.42	—	11 894	—	11 926	—	1.00	—
1967	3 109	—	1 332	—	0.43	—	3 829	—	3 859	—	1.00	—
1968	551	—	61	—	0.11	—	696	—	675	—	0.97	—
平均	3 471	9 334	1 440	6 753	0.41	0.50	4 306	11 783	4 255	12 127	0.99	0.99

注:侵蚀量=各小流域内径流小区不同土地利用类型的侵蚀模数观测数据[t/(km^2·a)]×土地利用类型面积(km^2)。下同。

2.1.2　**面积 1～10 km^2 流域的泥沙输移比**　治理流域王茂庄沟治理面积占整个流域面积的 30%左右,流域多年平均(1960—1964 年)泥沙输移比为 0.37,1960 年最小,仅为 0.01。大砭沟流域治理度为 38.4%左右,流域多年平均(1959—1966 年)泥沙输移比为 0.41,而 1960 年虽然年降雨量不大,且全年产生径流的降雨只有 3 次,但均为短历时的强降雨(平均降雨强度为 28.1 mm/h,最大雨强达 54.5 mm/h),使得流域内侵蚀的泥沙全部输移到沟口,泥沙输移比达 1.00(表 3)。

未治理流域李家寨沟(1962—1963 年)、蛇家沟(1963—1968 年)多年平均泥沙输移比均为 0.86;驼耳巷沟 1963—1967 年的平均泥沙输移比为 0.86;小砭沟流域 1961—1967 年多年平均泥沙输移比为 0.89(表 4),1965 年泥沙输移比最小仅为 0.12,而其它年份泥沙输移比都接近于 1。

表 3 面积 1～10 km² 治理流域的泥沙输移比

年 份	实测输沙量/t		侵蚀量计算值/t		拦沙量/t		泥沙输移比	
	王茂庄沟	大砭沟	王茂庄沟	大砭沟	王茂庄沟	大砭沟	王茂庄沟	大砭沟
1959	—	16 228	—	5 766	—	5 122	—	0.76
1960	236	22 133	16 884	5 474	0	16 659	0.01	1.00
1961	153 292	2 218	140 925	8 423	37 133	17 926	0.86	0.07
1962	4 106	—	27 913	—	37 133	—	0.15	—
1963	19 429	10 760	53 301	7 510	31 932	24 328	0.23	0.39
1964	57 767	25 356	48 835	15 249	45 111	33 291	0.61	0.45
1965	—	670	—	12 400	—	43 535	—	0.01
1966	—	4 973	—	18 943	—	53 778	—	0.07
平均	4 6966	11 763	57 572	10 538	—	27 255	0.37	0.41

注:拦沙量还原淤地坝的拦沙量。

表 4 面积 1～10 km² 未治理流域的泥沙输移比

年份	实测输沙量/t				侵蚀量计算值/t				泥沙输移比			
	小砭沟	驼耳巷沟	蛇家沟	李家寨沟	小砭沟	驼耳巷沟	蛇家沟	李家寨沟	小砭沟	驼耳巷沟	蛇家沟	李家寨沟
1961	30 626	—	—	—	31 631	—	—	—	0.97	—	—	—
1962	—	—	—	6 509.16	—	—	—	6 845	—	—	—	0.95
1963	19 971	—	21 055	41 436.24	19 327	—	37 212	53 905	1.00	—	0.57	0.76
1964	101 817	91 889	121 723	—	91 223	113 876	89 533	—	1.00	0.81	1.00	—
1965	846	8 213	161	—	7236.35	10 267	1 171	—	0.12	0.80	0.14	—
1966	42 849	219 505	270 640	—	37 799	218 453	217 121	—	1.00	1.00	1.00	—
1967	26 285	56 826	45 314	—	26 352	67 525	52 948	—	1.00	0.84	0.86	—
1968	—	—	112 575	—	—	—	114 909	—	—	—	0.98	—
平均	37 066	94 108	95 245	23 973	35 595	106 667	85 482	30 375	0.89	0.86	0.86	0.86

注:因驼耳巷沟内没有布设径流小区,该流域土壤侵蚀模数采用对比沟蛇家沟流域径流小区侵蚀模数观测数据。

2.1.3 面积 10～100 km² 流域的泥沙输移比 由表 5 面积尺度 10～100 km² 流域泥沙输移比可以看出,韭园沟流域治理度在 30%左右,流域的多年平均泥沙输移比为 0.62,由于 1964 为丰水年,泥沙输移比偏大且为 1,其它年份泥沙输移比均在 0.5 左右(表 5)。

未治理裴家峁沟多年平均泥沙输移比为 0.88。1961 年泥沙输移比偏小,其它年份的泥沙输移比接近于 1,从输沙量的变化来看,1961 年的输沙量较大仅次于 1964 年,侵蚀量也较大,仅次于 1964 年;从年产流降雨量来看,虽然 1961 年为丰水年,但是年内降雨次数多、雨强小,可能导致了流域内侵蚀的泥沙大部分在途中淤积,致使泥沙输移比偏小。

表 5 面积 10～100 km² 流域的泥沙输移比

年份	治理流域(韭园沟)				未治理流域(裴家峁沟)		
	侵蚀量计算值/t	实测输沙量/t	拦沙量/t	泥沙输移比	侵蚀量计算值/t	实测输沙量/t	泥沙输移比
1960	192 953	139 990	315 672	0.28	249 477	233 274	0.94
1961	1 541 729	1 190 298	171 396	0.69	606 289	286 834	0.47
1962	318 094	98 350	171 396	0.20	209 356	147 372	0.70
1963	648 820	453 617	173 565	0.55	491 282	441 252	0.90
1964	542 269	1 002 430	460 000	1.00	1 007 448	1 383 908	1.00
平均	648 773	576 937	205 675	0.62	512 770	498 528	0.88

注:由于裴家峁沟流域内未布设径流小区,裴家峁沟不同土地利用类型侵蚀模数数据用其对比沟韭园沟中未治理部分小区的代替。

2.2 基于单元小流域测验资料计算的泥沙输移比

2.2.1 面积 1～10 km² 流域的泥沙输移比 治理流域王家沟流域的多年平均(1956—1970 年)泥沙输移比为 0.44(表 6)。其中,1964 年泥沙输移比最大,为 1.00。

未治理流域蛇家沟和驼耳巷沟流域泥沙输移比的计算都是以团山沟为单元小流域的,蛇家沟平均(1960—1969 年)泥沙输移比为 0.85,驼耳巷沟平均(1960—1967 年)泥沙输移比为 0.86。表中,泥沙输移比出现了大于 1 的情况,可能是蛇家沟、驼耳巷沟

流域内地形、地貌等情况较团山沟复杂,会出现当年泥沙沿途沉积、来年再冲刷现象严重,使得计算中出现了泥沙输移比大于 1 的情况,但是多年平均情况下泥沙输移比仍然小于 1。

表 6　面积小于 10 km² 流域的泥沙输移比

年份	王家沟(治理)			蛇家沟(未治理)	驼耳巷沟(未治理)
	计算的侵蚀量/t	实测输沙量/t	泥沙输移比	泥沙输移比	泥沙输移比
1956	118 791	98 120	0.83	—	—
1957	35 598	14 037	0.39	—	—
1958	216 017	59 324	0.28	—	—
1959	346 469	211 687	0.61	—	—
1960	52 005	4 628	0.09	0.89	0.48
1961	4 134	19	0.01	0.67	0.50
1962	16 0155	153 048	0.96	0.81	1.07
1963	217 140	130 989	0.60	0.91	1.20
1964	86 075	86 072	1.00	0.91	0.85
1965	811	76	0.09	—	0.80
1966	466 720	131 259	0.28	0.87	0.91
1967	255 774	32 232	0.13	0.83	1.06
1968	168 794	4 220	0.02	0.88	—
1969	466 798	364 965	0.78	0.87	—
1970	148 418	67 003	0.45	—	—
平均	386 105	90 512	0.44	0.85	0.86

注:蛇家沟,驼耳巷沟 2 小流域泥沙输移比数据引自刘纪根[17]的研究结果。

2.2.2　面积 10～100 km² 流域的泥沙输移比　分别以面积<1 km² 的团山沟、羊道沟、水旺沟、黑矾沟、团园沟 5 个小流域的平均侵蚀模数,和面积 1～10 km² 未治理沟李家寨沟、蛇家沟、驼耳巷沟、小砭沟 4 小流域的平均侵蚀模数,作为单元小流域的侵蚀模数计算得到三川口、西庄、杜家沟岔、裴家峁沟的泥沙输移比分别为 0.83,0.87,0.90,0.87 和 0.82,0.82,0.89,0.82。2 种尺度单元小流域计算得到的各年份泥沙输移比大小不一,但多年平均泥沙输移比基本一致(表 7)。利用非园沟小流域内面积<1 km² 的单元小流域想她沟和团园沟的测验资料,以团园沟单元小流域的侵蚀模数作为非园沟流域未治理部分的侵蚀模数,以想她沟单元小流域的侵蚀模数作为治理部分的侵蚀模数,计算得治理流域非园沟多年平均(1959—1961 年)泥沙输移比为 0.55。利用面积 1～10 km² 的治理沟王茂庄沟、大砭沟侵蚀模数作为非园沟治理部分的侵蚀模数,利用李家寨沟、蛇家沟、小砭沟、驼耳巷沟的平均侵蚀模数作为未治理部分的侵蚀模数,非园沟流域 1960—1964 年的平均泥沙输移比为0.51。

表 7　面积 10～100 km² 流域的泥沙输移比

年份	利用单元小流域(面积<1 km²)计算					利用面积 1～10 km² 小流域的计算				
	未治理沟				治理沟	未治理沟				治理沟
	三川口	西庄	杜家沟岔	裴家峁沟	(非园沟)	三川口	西庄	杜家沟岔	裴家峁沟	(非园沟)
1959	—	—	—	—	1.00	—	—	—	—	—
1960	—	—	—	1.00	0.29	—	—	—	—	0.21
1961	—	—	—	0.79	0.36	—	—	—	0.72	0.61
1962	—	—	—	0.43	—	—	—	—	0.56	0.24
1963	0.69	0.68	1.14	0.60	—	1.05	1.03	1.74	0.92	0.62
1964	0.63	0.42	0.41	1.54	—	0.56	0.37	0.36	1.36	0.90
1965	1.56	1.30	0.88	—	—	0.55	1.08	0.79	—	—
1966	0.73	0.97	1.00	—	—	1.00	0.94	0.67	—	—
1967	0.65	0.99	1.11	—	—	0.92	0.68	0.87	—	—
1968	1.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1969	0.52	—	—	—	—	—	—	—	—	—
平均	0.83	0.87	0.90	0.87	0.55	0.82	0.82	0.89	0.89	0.51

2.2.3 面积 100～1 000 km² 水文站控制区泥沙输移比 将面积＜1 km² 单元小流域羊道沟、插财主沟、想她沟、团园沟这 4 个流域的平均侵蚀模数〔19 000 t/(km² · a)〕作为单元小流域的侵蚀模数，计算水文站控制区泥沙输移比在 0.78～0.96，7 个水文站控制区平均泥沙输移比为 0.72。

采用面积 1～10 km² 的小流域王茂庄沟、大砭沟、蛇家沟、小砭沟、驼耳巷沟 5 个流域的平均侵蚀模数〔13 301 t/(km² · a)〕作为单元流域侵蚀模数，计算水文站控制区的泥沙输移比在 0.73～1.00，7 个水文站控制区的平均泥沙输移比为 0.88。与利用面积＜1 km² 单元小流域计算结果相比，相对误差变化在－14.1%～11.1%，平均为 2.3%。

采用面积 10～100 km² 的小流域韭园沟、店房台沟、三川口、西庄、杜家沟岔 5 个流域的平均侵蚀模数〔19 390 t/(km² · a)〕作为单元流域的侵蚀模数，计算水文站控制区泥沙输移比在 0.85～1.07，7 个水文站控制区平均泥沙输移比为 0.89。与利用面积＜1 km² 单元小流域计算结果相比，相对误差变化在－14.1～24.4%，平均为 4.6%。

可见，对于土壤侵蚀类型单一的水文站控制流域，在没有面积＜1 km² 单元小流域资料的情况下，可以用面积 1～10 km² 小流域或面积 10～100 km² 小流域作为单元小流域来计算泥沙输移比（表 8）。

表 8 面积 100～1 000 km² 流域的泥沙输移比

水文站控制区	控制面积/km²	＜1 km² 的单元小流域计算			1～10 km² 的小流域计算			10～100 km² 的小流域计算		
		输沙模数/(t·km²·a⁻¹)	泥沙输移比	资料年限	输沙模数/(t·km²·a⁻¹)	泥沙输移比	资料年限	输沙模数/(t·km²·a⁻¹)	泥沙输移比	资料年限
殷市以上	327	17 196	0.91	1959—1967	12 421	0.93	1960—1968	15 706	0.81	1957—1969
青阳岔以上	662	16 180	0.85	1959—1967	9 710	0.73	1960—1968	18 683	0.96	1957—1969
李家河以上	807	16 366	0.86	1959—1967	12 322	0.93	1960—1968	20 670	1.07	1957—1969
曹坪以上	187	18 328	0.96	1959—1967	13 301	1.00	1960—1968	17 394	0.90	1957—1969
枣园以上	719	14 762	0.78	1959—1967	10 194	0.77	1960—1968	12 985	0.67	1957—1969
子长以上	913	15 468	0.81	1959—1967	11 924	0.90	1960—1968	19 390	1.00	1957—1969
志丹以上	774	15 681	0.83	1959—1967	11 705	0.88	1960—1968	16 482	0.85	1957—1969

2.2.4 面积＞1 000 km² 支流的泥沙输移比 以未治理沟羊道沟、团园沟 2 个面积＜1 km² 单元小流域的平均侵蚀模数〔22 047 t/(km² · a)〕作为未治理部分的侵蚀模数，以治理沟插财主沟、想她沟 2 个面积＜1 km² 单元小流域的平均侵蚀模数〔18 681 t/(km² · a)〕作为治理部分的侵蚀模数，计算得各支流的泥沙输移比在 0.48～0.97，5 个支流的平均泥沙输移比为 0.84。

三川河区内因有部分侵蚀模数较小的高原土石山区，而计算中利用单元小流域侵蚀模数作为支流流域的侵蚀模数，使得计算得的侵蚀量较实际偏大，因此，导致泥沙输移比计算结果偏小（表 9）。

表 9 面积＞1 000 km² 流域的泥沙输移比

流域名	面积/km²			面积＜1 km² 的流域		面积＜10 km² 的流域		面积＜100 km² 的流域		面积＜1 000 km² 的水文站控制区	
	流域	治理	未治理	泥沙输移比	资料年限	泥沙输移比	资料年限	泥沙输移比	资料年限	泥沙输移比	资料年限
佳芦河	1 121	100	1 021	0.90	1959—1967	1.00	1961—1965	0.98	1960—1964	1.05	1955—1969
清涧河	3 468	127	3 341	0.92	1959—1967	0.96	1961—1965	0.91	1960—1964	0.99	1955—1969
延 河	5 891	304	5 587	0.95	1959—1967	0.97	1961—1965	0.67	1960—1964	0.80	1955—1969
三川河	4 102	166	3 936	0.48	1959—1967	0.69	1961—1965	0.66	1960—1964	0.68	1955—1969
大理河	3 893	105	2 112	0.97	1959—1967	0.94	1961—1965	1.00	1960—1964	1.00	1955—1969

以面积 1～10 km² 的治理沟王茂庄沟、大砭沟、王家沟的平均侵蚀模数〔10 126 t/(km² · a)〕作为支流流域治理部分的侵蚀模数，以小砭沟、李家寨沟、蛇家沟、驼耳巷沟的平均侵蚀模数〔9 240 t/(km² · a)〕作为支流流域未治理部分的侵蚀模数，计算得各支流泥沙输移比在 0.69～1.00，5 个流域的平均泥沙输移比为 0.91。与利用面积＜1 km² 单元小流域计算结果相比，相对误差变化在－31%～43.8%。

以面积 10～100 km² 的治理沟韭园沟流域的侵蚀模数〔12 189 t/(km² · a)〕作为治理部分的侵蚀模数，以面积 10～100 km² 未治理沟裴家峁沟的侵蚀模数〔12 446 t/(km² · a)〕作为未治理部分的侵蚀模数，

计算可得,各支流的泥沙输移比在 0.46～1.00 之间平均为 0.78。与利用面积<1 km² 单元小流域计算结果相比,相对误差变化在－29.5%～37.5%。

利用面积 100～1 000 km² 的单一侵蚀类型水文站控制区殿市以上、青阳岔以上、李家河以上、曹坪以上、枣园以上、子长以上、志丹以上的平均侵蚀模数〔14 506 t/(km² · a)〕,计算各支流的泥沙输移比在 0.68～1.05,平均为 0.90。与利用面积<1 km² 单元小流域计算结果相比,相对误差变化在－15.7%～41.7%。

可见,对于侵蚀类型不同的支流来说,利用面积 1～10 km² 小流域、面积 10～100 km² 小流域和面积 100～1 000 km² 的水文站控制流域作为单元小流域来计算泥沙输移比,误差范围有些偏大。

3　结 论

(1) 对于面积在 10～100 km² 的小流域,利用 2 种方法计算的泥沙输移比结果非常接近,说明在没有小区测验资料时,用单元小流域(面积<10 km²)计算流域泥沙输移比是可行的。对于土壤侵蚀类型单一的水文站控制流域,在没有面积<1 km² 单元小流域资料的情况下,可以用面积 1～10 km² 小流域和面积 10～100 km² 小流域作为单元小流域来计算泥沙输移比。而对于侵蚀类型不同的支流来说,利用面积<10 km² 小流域、面积<100 km² 小流域和面积 100～1 000 km² 的水文站控制流域作为单元小流域,来计算泥沙输移比,误差范围有些偏大。由此可见,侵蚀单元法推求流域泥沙输移比时,单元小流域的选取范围具有一定的可扩展性。但随着流域面积的增大,其地形、地貌等下垫面条件变化趋于复杂,沿途泥沙沉积、再侵蚀情况更为复杂。因此,利用面积>1 km² 的流域作为单元小流域进行大流域(面积>1 000 km²)泥沙输移比计算时,其精度难以保证。

(2) 对于面积<1 km² 单元小流域,在未治理情况下,泥沙输移比接近于 1;而在治理情况下(治理度 62%～78%),泥沙输移比在 0.41～0.50。对于面积在 10～100 km² 之间的小流域,在未治理情况下,泥沙输移比在 0.83～0.90;而在治理情况下(治理度 30%～40%),泥沙输移比在 0.37～0.62。说明流域治理措施的实施对于泥沙输移比的减少有明显的效果,陈浩等[21]认为大理河流域在治理度达到 70%条件下与治理前相比泥沙输移比减少约 50%,许炯心等[5]在无定河流域的研究也表明水土保持措施极大地改变了流域的泥沙收支关系,使泥沙输移比从天然状况下的近似等于 1,急剧下降为 0.2～0.4。但治理措施的减沙效应的发挥具有一定程度上的滞后性。如对本研究中面积<100 km² 流域(插财主沟、想她沟、王茂庄沟、大砭沟、韭园沟、王家沟)的泥沙输移比和治理度分析发现,由于计算中采用的时期均处于治理初期,虽然短期内治理措施面积提高了,但是受降雨特性和暴雨洪水的影响,措施未完全发挥蓄水拦沙效益,使得泥沙输移比变化趋势不稳定,二者之间的相关系数仅为－0.069,即泥沙输移比并未随治理度的大小而增减。一般而言,水土保持措施通过改变流域下垫面特征和流域中泥沙输移比的条件,从而改变产流、侵蚀和产沙过程,并使侵蚀产生的泥沙在流域中沉积,减少侵蚀泥沙、增加沉积量对泥沙输移比产生影响[5]。

(3) 通过各单元小流域不同水文年的泥沙输移比的分析表明,枯水年各流域的泥沙输移比普遍比其它年型小。但产流降雨量并不是影响泥沙输移比的唯一水文气候因素,甚至其对泥沙输移比并没有显著的影响[22]。在降雨次数多,降雨量大,但降雨强度小的丰水年,流域内侵蚀的泥沙也可能在沿途淤积,致使泥沙输移比相对其它年型小,如裴家峁沟 1961 年为丰水年,但泥沙输移比为 0.47,小于其它年份。相反,在年降雨量不大,但短历时、强降雨集中的水文年型,流域内侵蚀的泥沙则可能全部输移到沟口,泥沙输移比达到 1 甚至大于 1。值得注意的是,关于影响泥沙输移比的水文气候因素,应考虑到尺度的概念(包括时间尺度和空间尺度),在不同尺度上,影响泥沙输移比的水文气候因素也不尽相同。诚然,产流降雨量、降雨强度、降雨动能等因子是影响泥沙输移比的主要水文气候因素[21-24],但基于不同尺度进行泥沙输移比研究时,须选择恰当的因子进行分析。如次暴雨尺度通常比较 30 min 最大雨强、降雨量、降雨动能等降雨特征与产沙输沙的关系;在年内尺度上,不同时段水文特征就成为影响产沙输沙的最主要的因子;在多年平均尺度上,不同年份雨量变化对输沙产沙的影响是最主要的[25-26]。

(4) 泥沙输移比涉及流域泥沙的侵蚀、输移和沉积等过程,而在每个过程中,又包括许多次级的过程。因此,其影响因素极其复杂,主要包括流域的地质地貌因素[10,27-29]、下垫面条件[30,31]、水文气候条件[23,32-33]以及流域治理情况[5]等。本研究仅从治理度、年产流降雨量和降雨强度等方面进行了简要的分析,不同时期、不同空间尺度上影响泥沙输移比的因素可能并不相同,同一影响因素在不同时期,不同尺度上也可能贡献不同,特别是流域治理措施实施后,对流域的下垫面条件、降雨径流过程、地貌单元结构

等产生影响，影响泥沙输移比的自然和人为因素将更加复杂。因此，在今后的研究中，需对不同时空尺度流域泥沙输移比的影响因素进行综合分析，揭示不同时空尺度下泥沙输移比的主要影响因素，为调控流域土壤侵蚀、产沙输沙过程提供科学支持。

[参 考 文 献]

[1] 李智广，刘秉正. 我国主要江河流域土壤侵蚀量测算[J]. 中国水土保持科学，2006，4(2)：1-6.

[2] 龚时旸，熊贵枢. 黄河泥沙来源和地区分布[J]. 人民黄河，1979，1(1)：7-17.

[3] 景可. 黄土高原泥沙输移比的研究[C]//黄河粗泥沙来源及侵蚀产沙机理研究文集. 北京：气象出版社，1989：14-26.

[4] 龚时旸，熊贵枢. 黄河泥沙的来源和输移[C]//河流泥沙国际学术讨论会论文集. 北京：光华出版社，1980.

[5] 许炯心，孙季. 水土保持措施对流域泥沙输移比的影响[J]. 水科学进展，2004，15(1)：29-34.

[6] 蔡强国，范昊明. 泥沙输移比影响因子及其关系模型研究现状与评述[J]. 地理科学进展，2004，23(5)：1-9.

[7] 景可. 黄土高原的新构造运动对侵蚀影响的研究[J]. 水土保持通报，1982，2(6)：10-15.

[8] 赵晓光，石辉. 黄土塬区坡面及小集水区泥沙输移比变化特征[J]. 山地学报，2002，20(6)：718-722.

[9] 卜兆宏，刘绍清. 土壤流失量及其参数实测的新方法[J]. 土壤学报，1995，32(2)：210-220.

[10] Maner S B. Factors influencing sediment delivery ratios in the Blackland Prairie land resource area[M]. Fort Worth, Tex: U. S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, 1962.

[11] Williams J R, Berndt H D. Sediment yield computed with universal equation[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1972, 98(12):2087-2098.

[12] Haith D A, Tubbs L J. Watershed loading functions for nonpoint sources[J]. Journal of the Environmental Engineering Division, 1981, 107(1):121-137.

[13] Mutchler C K, Bowie A J. Effect of Land Use on Sediment Delivery Ratios[C]// Proceedings of the Third Federal Inter: Agency Sedimentation Conference. U. S Water Resources Council, Washington, D. C., Sedimentation Committee, Denver, Colorado, 1975: 111-112.

[14] Robert H F, Paul K B, Tomlin C D. SEDMOD: A GIS-based method for estimating distributed sediment delivery ratios[C]. Fort Lauderdale, Florida: Symposium on Geographic Information Systems and Water Resources, American Water Resources Association, 1996:137-146.

[15] 张光科，刘东，方铎. 山区流域泥沙输移比计算公式[J]. 成都科技大学学报，1996，94(6)：85-90.

[16] 牟金泽，孟庆枚. 论流域产沙量计算中的泥沙输移比[J]. 泥沙研究，1982(2)：60-65.

[17] 刘纪根，蔡强国，张平仓. 岔巴沟流域泥沙输移比时空分异特征及影响因素[J]. 水土保持通报，2007，27(5)：6-10.

[18] 曹文洪，张启舜，姜乃森. 黄土地区一次暴雨产沙数学模型的研究[J]. 泥沙研究，1993(1)：1-13.

[19] Leopold L B. Channel and hill slope processes in semi-arid area[R]. New Mexico: Unite states geological survey professional paper, 1966: 193-253.

[20] Trimble S W. A sediment budget for Coon Creek Basin in the Drift less area, Wisconsin, 1855—1977[J]. American Journal of Science, 1985, 283(5):454-474.

[21] 陈浩，蔡强国，陈金荣，等. 黄土丘陵沟壑区人类活动对流域系统侵蚀、输移和沉积的影响[J]. 地理研究，2001，20(1)：68-75.

[22] 郑添发，黄炎和，卢程隆，等. 闽东南花岗岩侵蚀区土壤侵蚀规律与治理(Ⅲ)：泥沙输移动态的研究[J]. 福建农学院学报，1991，20(2)：196-199.

[23] 蔡强国，王贵平，陈永宗. 黄土高原小流域侵蚀产沙过程与模拟[M]. 北京：科学出版社，1998：172-187.

[24] 唐政洪，蔡强国，张光远，等. 基于地块间水沙运移的黄土丘陵沟壑区小流域侵蚀产沙模型[J]. 泥沙研究，2001(5)：48-53.

[25] Wischmeie W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Agricultural Handbook No. 537[M]. Washington D C: US Department of Agriculture, 1978:1-58.

[26] Wischmeie W H, Smith D D. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains[M]. USDA Agricultural Handbook No. 282, 1965.

[27] 范诺尼. 泥沙工程[M]. 黄河水利委员会水科所及长办水科所等译. 北京：水利出版社，1981：330-350.

[28] 李秀霞，李天宏. 黄河流域泥沙输移比与流域尺度的关系研究[J]. 泥沙研究，2011(2)：33-37.

[29] 孙厚才，李青云. 应用分形原理建立小流域泥沙输移比模型[J]. 人民长江，2004(3)：12-13.

[30] Harvey A M. Quaternary soil and river terrace sequences in the Aguas/Feos river systems, Sorbas basin, southeast Spain. Mediterranean Quaternary River Environments[M]. Rotterdam: Balkema, 1995: 263-281.

[31] 许炯心. 黄土高原地区沙尘暴形成的自然地理因素Ⅱ：多元回归分析与地带性特征[J]. 中国沙漠，2005，25(4)：552-556.

[32] 陈浩. 黄土丘陵沟壑区流域系统侵蚀与产沙关系[J]. 地理学报，2000，55(3)：354-363.

[33] 许炯心. 黄河下游洪水的泥沙输移特征[J]. 水科学进展，2002，13(5)：563-568.