

称钩河坝系流域水保措施减沙效益分析

王可壮¹, 张富¹, 喻权刚², 马安利², 赵怀礼³

(1. 甘肃农业大学 林学院, 兰州 730070; 2. 黄河水土保持生态监测中心,
西安 710021; 3. 甘肃省定西市安定区水保局, 甘肃 定西 743000)

摘要:以称钩河坝系流域降水、径流、泥沙和水土保持措施的 5 a 监测统计数据为依据, Quick Bird 卫星影像为主要数据源, 在 ArcGIS 9.3 及 Region Manager 5.5 软件支持下, 研究该坝系流域降雨变化和水保措施对径流和产沙量变化的影响, 分析坝系水土保持措施拦沙效益。结果表明: 2007—2011 年间, 水土保持措施建设是该流域径流和侵蚀产沙减少的主要原因, 其中坡面治理措施面积增加 133.04 hm², 坝系流域总控制面积达到 8 843.58 hm², 占流域总面积的 54.80%。坝控范围内年平均侵蚀模数为 18.80 t/km², 侵蚀模数减少 5 581.20 t/km²。

关键词:水土保持; 监测; 侵蚀产沙; 减水减沙; 坝系流域

中图分类号: S157.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2013)05-0013-05

Benefits of Sediment Reduction of Soil and Water Conservation Measures in Chenggou Dam System Watershed

WANG Ke-zhuang¹, ZHANG Fu¹, YU Quan-gang², MA An-li², ZHAO Huai-li³

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

2. The Yellow River Monitoring Center of Soil and Water Conservation, Xi'an 710021,

China; 3. Soil and Water Conservation Bureau of Gansu Anding, Dingxi, Gansu 743000, China)

Abstract: On the basis of observed data of 5 years of precipitation, runoff, slit and soil and water conservation measures as well as research in Chenggou Dam system watershed, QuickBird remote sensing images as the major information source, ArcGIS 9.3 and RegionManager 5.5, precipitation variation and soil and water conservation measures on runoff and sediment yield in the watershed were studied, the benefits of water and sediment interception under the conditions of different soil and water conservation measures were analyzed. Some results were gained as followings: from 2007 to 2011, soil and water conservation construction measures is the main reason of runoff and sediment reduction, the area of countermeasures increased 133.04 hm², the control dam system watershed area reached to 8 843.58 hm², accounting for 54.80% of the total basin. Annual average erosion modulus is 18.80 t/km² in Chenggou Dam system watershed, erosion modulus reduced by 5 581.20 t/km².

Key words: soil and water conservation; monitor; erosion sediment; water and sediment reduction; dam system watershed

流域径流和侵蚀产沙是气候条件与下垫面综合作用的产物^[1]。气候变化中降水变化是影响流域径流和侵蚀产沙过程最为直接的因素之一^[2], 人类活动(水保措施建设等)改变了流域下垫面, 影响流域的产流汇流和侵蚀产沙机制^[3], 对保护和改良人类及其社会赖以生存的自然环境条件及区域社会发展起着决定性作用^[4-5]。流域水土保持措施建设包括坡面

治理措施(梯田、林地、草地等)和沟道治理措施(坝系建设), 水利部把淤地坝建设列为 2003 年水利工作的三项新“亮点”工程之首^[6-7]。据统计, 黄土高原地区现已建成大、中、小型淤地坝 11 万余座, 淤成坝地 30 万 hm², 累计拦泥 210 亿 t, 年减少黄河输沙量 3 亿 t^[8]。近年来, 黄河流域出现水沙锐减现象^[9-10], 有关学者分别从不同立地条件^[11-14]、不同植被覆度及土地

收稿日期: 2013-02-26

修回日期: 2013-03-26

作者简介: 王可壮(1986—), 男, 甘肃白银人, 硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: wangkezhuang1017@126.com

通信作者: 张富(1961—), 男, 甘肃定西人, 博士, 研究员, 主要从事小流域水土保持防治措施对位配置研究。E-mail: fuzhang001@163.com

利用变化^[15-16]、产流产沙机制^[17-18]等方面进行了很多有益探讨,在小流域综合治理方面取得了很多新的成果。其中科学认识坡面治理措施和沟道治理措施(坝系建设)对径流和侵蚀产沙变化的影响,有利于进一步深化治理措施对水土保持功效的认识,也有益于水土保持措施体系的合理配置,提高水土保持治理效益。

本文以称钩河坝系流域为例,通过对流域径流量和侵蚀产沙量的趋势性和阶段性分析,揭示降水变化、坡面治理措施和沟道治理措施等因素对流域径流和侵蚀产沙变化的影响,为协调流域水沙关系,水土保持生态建设等重大问题的决策提供科学依据。

1 实验材料与方法

1.1 研究材料

称钩河流域位于甘肃省定西市安定区西北部,属黄土丘陵沟壑区第五副区,系黄河流域祖厉河水系二级支流,流域总面积 161.37 km²。地理位置介于 104°14′15″—104°28′31″E,35°41′7″—35°35′10″N,海拔 1 957~2 273 m,相对高差 316 m。土壤主要有黄绵土、黑垆土、潮土及灰钙土 4 大类,其中以黑垆土分布最为普遍。属中温带半干旱气候,多年平均气温 6.3℃,≥10℃积温 2 239℃,年日照时数 2 500 h,无霜期 141 d,年均降水量 380 mm(降水在时间上分布严重不均,多集中在 7—9 月 3 个月,且多以暴雨形式出现),年蒸发量达 1 500 mm 以上。全流域均为水土流失面积,年平均侵蚀模数 5 600 t/km²,水力侵蚀和重力侵蚀是其主要侵蚀形式,包括面蚀、沟蚀、崩塌、泻溜、滑塌等。称钩河坝系根据《甘肃省发展和改革委员会甘肃省水利厅关于 2003 年淤地坝试点项目》(甘发改[2004]440 号),全流域共建坝系工程 74 座,其中骨干工程 20 座,中型淤地坝 22 座,小型淤地坝 32 座,截至 2008 年底已全部建设完成。2006 年,称钩河小流域被列为黄土高原第一批小流域坝系示范工程监测项目,并同步实施了以工程建设动态、坝系拦沙蓄水、输沙径流、工程安全等为主要内容的水土保持监测工作。流域 1:10 000 地形图及 Quick-Bird 影像(成像时间 2009 年 8 月 17 日,分辨率为 0.61 m×0.61 m)。

1.2 研究方法

1.2.1 雨量点布设 在称钩河流域内的高家岔坝、别杜川坝和阳山嘴坝布设 3 个雨量站。按《降雨量观测规范》(SL21-90)要求,采用自记雨量计方法观测降水,计算流域内降水量。

1.2.2 土地利用方式及数量 借助 Region

Manager 5.5 软件(以下简称 RM)对 1:10 000 地形图等高线矢量化,生成 DEM 图,以称钩河流域 5 m 分辨率的 DEM 数据为基础,利用集水区划分流域的方法^[19],进行淤地坝坝控范围划分,包括了 DEM 预处理、水流方向的确定、汇流累积量的提取、河网的提取及坝系流域的划分。具体方法如下:在 ArcGIS 中通过洼地提取和洼地深度计算得到填挖阈值,然后利用 Hydrology 中的 fill 工具实现填挖,得到无洼地的 DEM;将中心栅格的 8 个邻域栅格编码,水流方向便可以以其中的某一值来确定;利用 Fill Accumulation 工具确定所有淤地坝单元的累积上游单元数目来生成流域汇流能力栅格图;利用 reclassfy 工具进行河网的提取;利用淤地坝集水区栅格描绘、集水区矢量化命令进行坝系流域划分。

结合研究内容、目标以及遥感信息源的特点,以土地资源的利用特征与地表覆盖特征为主要依据,借助 ArcGIS 9.3 软件在 QuickBird 影像图(2009 年)对该流域淤地坝控制范围进行土地利用现状勾绘及统计,确定坝控范围内土地利用类型及面积。最后通过流域历年水土保持措施统计,加以实地抽样调查等资料进行核查,以 2009 年影像图土地利用现状为基础,确定流域内 2007—2011 年梯田、造林、种草等实际的水土保持措施面积。

1.2.3 淤地坝径流泥沙观测

(1) 单坝径流泥沙观测。淤地坝拦沙量监测采用平均淤积高程法破冰施测。先布设若干断面,在每一断面布设若干个测点,测量每一点的冰面高程,再破冰测量冰面至泥面的垂直距离,计算出各测点泥面高程,同时测量各测点间的水平距离,根据平均淤积高程法计算每个断面的平均高程;然后根据各断面的平均高程和所布设的断面间距,计算坝内淤积面的平均高程。最后,根据水位—库容—淤积量关系曲线推求淤积量,通过淤积量和泥沙容重计算拦沙量(重量)。各断面的平均高程和淤积面的平均高程采用下式计算(单位均为 m):

$$Z_i = 0.5/B_i \sum (Z_j + Z_{j+1}) \Delta B_j \quad (1)$$

$$Z = 0.5/L \sum (Z_i + Z_{i+1}) \Delta L_i \quad (2)$$

式中: Z_i ——第 i 断面的平均淤积高程; Z_j ——第 i 断面第 j 测点的淤积高程; B_i ——第 i 断面淤积面的宽度; ΔB_j ——第 i 断面相邻测点间的水平距离, $B_i = \sum \Delta B_j$; Z ——坝区淤积面的平均高程; L ——坝前到淤积末端的长度; ΔL_i ——相邻断面的间距, $L = \sum \Delta L_i$ 。

(2) 卡口站径流泥沙观测。在流域出口处建成过水断面高 4 m、宽 20 m 的卡口站一座

(35°40′32.3″N,104°25′12.5″E),进行径流泥沙观测。径流观测采用流速仪在断面水深 2/3 处测量,测速时间在 100 s 以上。以纵坐标为流速,横坐标为面积,绘成流速面积曲线,该曲线所包围的面积,即为断面流量。利用断面平均含沙量和径流测验中的断面流量,计算断面输沙率及输沙量。含沙量观测,在断面中心垂直测线上用三点法(即 0.2 h,0.6 h 和 0.8 h)取样,平水期以二段制(8:00,20:00)观测,洪水期以 6 min 的倍数加密测次,可以完整控制洪水含沙量的变化过程。取样与测速同时进行。取得水样后,记录体积,然后将每次水样通过静置、排清、烘干、干泥沙称重后,将重复样相加(浑水体积与泥沙干重)求平均值,得该次该点的泥沙样值,根据浑水体积与泥沙干重计算出单位含沙量。测流侧面含沙量用混合法测

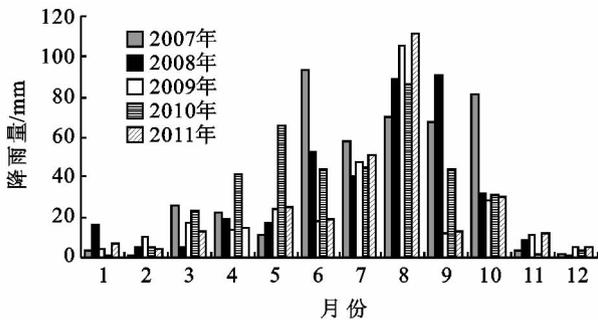


图 1 称钩河流域年(汛)降雨量变化

2.2 土地利用变化观测

借助 DEM 图,通过 RM 软件将称钩河流域按照坝系将 74 座坝划分为 24 个坝系小流域。如表 1 所示,为坝系流域 2009 年坝系坝控范围内土地利用类型及面积。最后将流域内 24 个坝系小流域历年水土保持措施进行核查统计,确定流域内沟间水保措施(梯田、造林、种草)实际面积和沟谷水保措施(淤地坝控制)面积,结果见表 2。

从表 2 中可以看出,流域内坡面治理措施从 2007 年的 5 940.957 hm² 提高到 2011 年的 6 073.998 hm²,主要治理措施为坡耕地改为梯田治理措施面积增加 133.041 hm²;到 2008 年底坝系建设完成后,坝系流域总控制面积达到 8 843.58 hm²,占流域总面积的 54.80%,占定西界内流域面积的 74.96%。

表 2 称钩河坝系流域水保措施面积统计

年份	坡面治理措施				沟谷措施
	累计治理面积/hm ²	梯田/hm ²	造林/hm ²	种草/hm ²	坝控面积/hm ²
2007	5940.957	4471.797	1406.84	62.32	3688.87
2008	5951.467	4482.307	1406.84	62.32	6414.36
2009	5982.300	4513.140	1406.84	62.32	8843.58
2010	6037.522	4568.362	1406.84	62.32	8843.58
2011	6073.998	4604.838	1406.84	62.32	8843.58

算,即在测深垂线上按照 1:1 的比例取样,混合处理求得平均含沙量。

2 结果与分析

2.1 年(汛)降雨量及降雨强度变化

称钩河流域年均降水量为 380 mm,从图 1—2 中可以看出,2007 年降雨量高于年均降雨量,2008 年、2010 年降雨量与年均降雨量相当,2009 年、2011 年降雨量低于年均降雨量。在 2007—2011 年期间,汛期降水量分别为 385.5,303.5,205.7,248.7,227.9 mm,占年降水的 87.6%,80.7%,69.1%,63.7%,74.5%;对流域内最大 60 min 降雨强度观测发现,2008 年降雨强度最大为 2.35 mm/h,2011 年降雨强度最小为 0.87 mm/h。

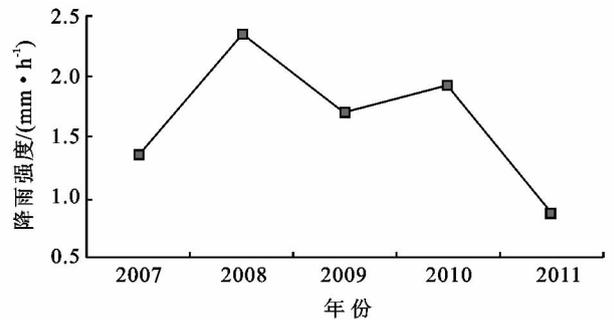


图 2 称钩河流域降雨强度变化

表 1 坝系流域 2009 年各类土地利用面积统计

一级分类	地类	面积/hm ²
耕地	川台地	248.67
	坡耕地	524.10
	梯田	4513.14
林地	经济林	72.39
	灌木林	118.70
	有林地	884.23
	疏林地	73.36
	未成林造林地	258.16
牧草地	草地	62.32
交通运输用地	公路	18.34
居民点及工矿用地	居民地	284.98
水域及水利设施用地	水域	18.14
	荒坡	301.49
	荒沟	1464.76
未利用土地		
总计		8843.58

2.3 径流泥沙观测

2.3.1 淤地坝拦沙量分析 根据监测项目要求,在流域内 74 座坝系工程中所有 20 座骨干坝、22 座中型淤地坝及 10 座小型淤地坝等 52 座淤地坝布设监测

站对其拦沙量进行观测。未规划实施拦沙监测的还有 22 座小型淤地坝,可根据所监测同类淤地坝单位控制面积平均拦沙量推算其拦沙量,得出 2007—2011 年坝系拦沙量(表 3)。

表 3 称钩河坝系流域淤地坝工程拦沙监测

年份	坝系		骨干坝			中型坝			小型坝		
	数量/ 座	拦沙量/ 万 t	数量/ 座	拦沙量/ 万 t	拦沙比/ %	数量/ 座	拦沙量/ 万 t	拦沙比/ %	数量/ 座	拦沙量/ 万 t	拦沙比/ %
2007	24	1.89	10	1.42	75.13	8	0.24	12.70	6	0.23	12.17
2008	48	20.01	19	9.26	46.29	19	9.14	45.66	10	1.61	8.05
2009	74	9.32	20	2.14	22.93	22	4.15	44.58	32	3.03	32.49
2010	74	10.82	20	5.33	49.29	22	3.27	30.18	32	2.22	20.53
2011	74	2.85	20	0.49	17.19	22	1.25	43.51	32	1.11	38.95

由表 3 可以看出,2007—2008 年由于坝系建设未完成,2007 年实测 24 座淤地坝拦沙量为 1.89 万 t,其中 10 座骨干坝占 75.13%,8 座中型坝占 12.7%,6 座小型坝占 12.17%,2008 年实测 48 座淤地坝的拦沙量为 20.01 万 t,其中 19 座骨干坝占 46.29%,19 座中型坝占 45.66%,10 座小型坝占 8.05%;2009—2011 年全流域淤地坝全部建成,对 52 座拦沙监测坝全部进行拦沙量监测后,根据同类淤地坝单位控制面积平均拦沙量对该坝系工程拦沙量进行推算,2009 年 74 座淤地坝拦沙量为 9.32 万 t,其中 20 座骨干坝占 22.93%,22 座中型坝占 44.58%,32 座小型坝占 32.49%;2010 年 74 座淤地坝的拦沙总量为 10.82 万 t,其中 20 座骨干坝占 49.29%,22 座中型坝占 30.18%,32 座小型坝占 20.53%;2011 年 74 座淤地坝的拦沙总量为 2.85 万 t,其中 20 座骨干坝占 17.19%,22 座中型坝占 43.51%,32 座小型坝占 38.95%。

2.3.2 卡口站径流泥沙量观测 2007—2011 年卡口站坝系流域各年径流及泥沙量资料见表 4。称钩河流域径流主要来源于大气降水,流域内径流的变化

直接受降水变化的制约,从表 4 中可以看出,流域卡口站径流量与降水量的变化保持一致,总的特征是年内分配不均衡,季节性变化剧烈。径流主要集中在主汛期的 7—9 月,2007—2011 年汛期径流量分别占全年径流量的 42.14%,72.03%,59.62%,69.08%,72.23%。泥沙量主要来源于坡耕地与河槽冲刷,当暴雨集中,则容易崩塌和滑塌,片蚀和沟蚀强烈,因而河流含沙量很大,易形成高含沙水流。称钩河流域输沙量的年际变化趋势与径流量的变化趋势大体相应,水大沙大,水小沙小,呈准周期性波动。输沙量的时程分布极不均匀,从输沙量的年内分配看,流域的产沙时期主要集中在汛期,汛期泥沙量分别占全年泥沙量的 47.53%,99.65%,86.90%,97.09%,99.05%。因此,汛期降雨量是流域产沙的主要动力因子。其中 2008 年水小沙大的原因是① 2007—2011 年间,2008 年的 60 min 最大降雨强度为 2.35 mm/h,降雨强度的大小直接影响到径流量和侵蚀量的大小;② 2008 年淤地坝建设处于工程量最大一年,由于这类淤地坝在建设过程中的人为扰动影响尚未消除,致使该年坝系拦沙量较大。

表 4 流域卡口站(河道断面)年径流泥沙量

年份	雨量/ mm	径流量/ m^3		泥沙量/万 t		断面平均含沙量/ $(kg \cdot m^{-3})$		最大含沙量/ $(kg \cdot m^{-3})$	最大含沙量 出现日期
		全年	汛期	全年	汛期	全年	汛期		
2007	440.0	175700	74040	0.101	0.048	5.33	6.46	176	9月1日
2008	376.2	454000	327000	2.830	2.820	63.80	86.20	696	7月18日
2009	297.6	1332000	794200	0.252	0.219	1.90	2.76	139	8月3日
2010	390.3	949000	655600	0.446	0.433	4.70	6.60	363	9月8日
2011	305.9	1303000	941200	0.211	0.209	1.63	2.11	303	8月25日

2.3.3 坡面措施拦沙量分析 根据《水土保持综合治理效益计算方法》(GB/T15774-2008),在坝系流域内前庄里控制区花园沟 45 km^2 小流域对不同水土保持治理措施进行计算分析,得到该流域单位面积的年保土效益为:梯田 72.45 t/hm^2 ,水保林 39.15 $t/$

hm^2 ,经济林 39.15 t/hm^2 ,种草 46.5 t/hm^2 。根据土地利用现状调查流域内水土保持措施实际面积可计算出 2007—2011 年称钩河坝系小流域治坡措施拦沙量依次为 45.71 万 t、45.80 万 t、46.06 万 t、46.54 万 t、46.85 万 t。

2.3.4 坝系拦沙量分析 小流域产沙量由坡面工程拦沙量、坝系拦沙量、卡口站输沙量三部分构成。从表5可以看出,自2009年坝系工程完全运行后,小流域平均拦沙率达到99.45%,年平均侵蚀模数18.78 t/km²。

表5 称钩河小流域综合治理措施拦沙量分析

年份	拦沙量 合计/万 t	坝系		坡面		卡口站输沙 量/万 t	小流域产沙 量/万 t	小流域拦沙 率/%
		拦沙量/万 t	拦沙比/%	拦沙量/万 t	拦沙比/%			
2007	47.60	1.89	3.97	45.71	96.03	0.10	47.70	99.79
2008	65.81	20.01	30.41	45.80	69.59	2.83	68.64	95.88
2009	55.38	9.32	16.83	46.06	83.17	0.25	55.63	99.55
2010	57.36	10.82	18.86	46.54	81.14	0.45	57.81	99.23
2011	49.70	2.85	5.73	46.85	94.27	0.21	49.91	99.58

3 结论

(1) 2007—2011年间,水土保持措施建设是流域径流和侵蚀产沙减少的主要原因。流域内坡面治理措施坡耕地改为梯田治理措施面积增加133.041 hm²,沟道治理措施坝系流域总控制面积达到8 843.58 hm²,占流域总面积的54.80%。

(2) 年平均侵蚀模数由5 600 t/km²降到18.80 t/km²,侵蚀模数减少5 581.20 t/(km²·a),说明该流域内坡面治理程度较高,拦沙量大,淤地坝作为径流调控综合防护体系的最后一道水土保持防护措施,在坡面拦蓄基础上进一步拦截泥沙,做到了泥不出沟,小流域综合治理措施拦沙效果显著。

坡面水土保持措施的水土保持功能具有持续性,沟道淤地坝水土保持功能受设计年限限制,具有非持续性。从长期生态环境效益来看,应在加强坡面治理措施建设的同时,加强对已建工程的维护和废弃工程措施的替换工作,以提高水保措施体系功能的持续性。

经过5 a的监测探索研究,定量分析了2007—2011年称钩河流域水沙在人类活动和自然因素条件下的演变规律。针对该流域产汇流特点,基于流域下垫面抗蚀力概念及RS, GIS技术,提出下垫面综合抗蚀能力的定量表达方法,研发基于下垫面抗蚀力的人类活动对产沙影响的综合评价方法,全面系统地揭示了黄河流域的水沙演变规律。

参考文献:

[1] 唐克丽,史立人,史德明,等. 中国水土保持[M]. 北京: 科学出版社,2004.

[2] Nearing M A, Jetten V, Baffaut C, et al. Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover[J]. Catena,2005,61(3):131-154.

[3] Defries R, Eshleman K N. Land-use change and hydrologic processes: A major focus for the future[J]. Hydrological Processes,2004,18(11):2183-2186.

[4] 余新晓,吴岚,饶良懿,等. 水土保持生态服务功能价值

估算[J]. 中国水土保持科学,2008,6(1):83-86.

[5] 柳仲秋. 水土保持功能研究[J]. 科学之友,2010(20):110-111.

[6] 焦居仁. 对黄土高原淤地坝建设的几点认识和建议[J]. 中国水土保持,2003(7):1-3.

[7] 段菊卿. 小流域淤地坝建设的水土保持效益浅析[J]. 水土保持研究,2012,19(1):144-147.

[8] 白晓刚,康瑞敏. 黄土高原地区淤地坝建设的地位及发展思路[J]. 山西水土保持科技,2010(9):6-8.

[9] 马永来,高亚军,王玲,等. 窟野河流域实测水沙量锐减原因分析[J]. 人民黄河,2011(11):12-13.

[10] 魏霞,李占斌,李勋贵,等. 大理河流域水土保持减沙趋势分析及其成因[J]. 水土保持学报,2007,21(4):67-71.

[11] 王莎,王占礼,袁殷,等. 黄土坡面细沟水流输沙能力变化特征[J]. 水土保持学报,2012,26(4):104-107.

[12] 杨春霞,姚文艺,肖培青,等. 不同立地条件下坡面水土流失的差异性试验研究[J]. 水土保持研究,2010,17(1):222-224.

[13] 申震洲,姚文艺,李勉,等. 不同立地条件下坡面入渗与侵蚀关系试验研究[J]. 水土保持学报,2008,22(5):43-46.

[14] 陈安强,马文贵,高福军,等. 土石山区径流小区坡长对径流量和侵蚀量影响的研究[J]. 水土保持研究,2007,14(4):190-193.

[15] 柳长顺. 土地利用变化研究方法的探讨:以西吉县80年代土地利用变化为例[J]. 水土保持学报,2002,16(5):60-66.

[16] 赵丽,张蓬涛,朱永明. 退耕还林对河北顺平县土地利用变化及生态系统服务价值的影响[J]. 水土保持研究,2010,17(6):74-77.

[17] 王随继. 黄河中游多沙粗沙区侵蚀产沙与植被相互作用的临界现象[J]. 水土保持学报,2004,18(4):20-23,28.

[18] 王升,王全九,董文财,等. 黄土坡面不同植被覆盖度下产流产沙与养分流失规律[J]. 水土保持学报,2012,26(4):23-27.

[19] 程峥,李永胜,高微微. 基于 ArcGIS 的 DEM 流域划分[J]. 地下水,2011,33(6):128-130.