

2001-2015 年清水河流域土壤侵蚀变化分析

马小福¹ 宋天华¹ 杨吉山² 张晓华² 肖培青² 焦 鹏²

1. 宁夏大柳树水利枢纽工程前期工作中心 宁夏银川 750001

2. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院 河南郑州 450003

【摘要】为了研究清水河流域近年来土壤侵蚀的变化,基于中国土壤流失方程(CSLE)构建了土壤侵蚀计算模型,并以实测土壤侵蚀量为基础对模型参数进行了率定,计算了2001-2005年、2006-2010年、2011-2015年三个5年时段年均侵蚀强度,并定量分析了各影响因子的作用。分析表明,3个时段相比土壤侵蚀强度逐渐变小,主要表现为剧烈、极强烈和强度侵蚀面积所占比例显著变小,3个时段分别平均为22.94%、13.64%、6.84%。1-2时段间,降雨侵蚀力和植被是土壤减蚀的主要因素,贡献率分别为47.04%和35.71%;2-3时段期间,植被、降雨侵蚀力及耕作因子是主要影响因素,减蚀贡献率分别为126.25%、-62.90%和27.91%;1-3时段间植被是减蚀的最主要影响因子,贡献率为61.63%,耕作、降雨侵蚀力及工程因子贡献率分别为17.38%、15.58%和5.41%。综合分析表明在2001-2015时段内,植被盖度的提高是减轻清水河流域土壤侵蚀强度的最重要因素,其次是耕作措施的影响,降雨的波动和坡面工程的对侵蚀产沙的影响作用相对较小。

【关键词】清水河流域;土壤侵蚀;中国土壤流失方程;贡献率

清水河流域是黄河上游的一级支流,由于地处干旱、半干旱区,植被稀疏、地形破碎,土壤侵蚀剧烈,是黄河泥沙的重要来源区。近年来,清水河入黄泥沙明显减少,从多年平均的4940万t减少到2001-2015年15年平均的3342万t。导致土壤侵蚀的原因包括各种自然和人为原因,如降雨量的变化、退耕还林还草、修建梯田、水库、淤地坝等水土保持措施等,是多种因素相互作用的结果^[1],但是还没有学者在清水河流域对这些因素的作用进行定量的研究。本文基于中国土壤流失方程(CSLE)构建分布式经验流域侵蚀产沙计算模型,计算2001-2015年时段内清水河流域逐年侵蚀强度的变化,并据此定量计算不同影响因素对土壤侵蚀量的影响。

1 研究区概况

清水河是黄河的一级支流,流域面积为14481km²,是宁夏境内流域面积最大的河流。清水河主河道长320km,河道比降平均为1.49‰^[2],在泉眼山汇入黄河,由上至下设有固原、韩府湾、泉眼山三个水文站(图1)。清水河流域海拔一般为1500-2000m,南高北低,地貌以黄土丘陵为主,中上游为洪积、冲积平原区,中游西侧为黄土丘陵、盆、塬区,中游东侧为黄

土丘陵区,下游为河谷平原区^[3]。

清水河流域多年平均均降水量为349mm,大部分降雨集中在7、8、9三个月^[4]。年降雨量在流域范围内变化很大,上游固原的七营、苋麻河以南区域降雨量可达400-600mm,属于暖温带半湿润区,向上游逐渐递减到400-200mm,属于中温带干旱、半干旱区,全区平均干旱指数为3.8^[4]。清水河多年平均年径流量2.16亿m³,年平均悬移质含沙量229kg/m³,侵蚀产沙模数3410t/km²·a,呈现出水少、沙多、水土流失严重的干旱、半干旱区特点。例如,折死沟冯川里水文站1964年最大输沙模数为30000t/km²,1959年实测最大断面含沙量达到1580kg/m³。

2 资料和研究方法

2.1 清水河流域逐年侵蚀产沙量

在假定年时间尺度泥沙输移比等于1的条件下,流域年侵蚀产沙量可以用当年输沙量与工程拦沙量的和来表示。清水河流域中的拦沙工程主要有水库和淤地坝,泉眼山水文站是清水河的把口站,因此有:清水河流域年侵蚀产沙量=泉眼山站当年输沙量+水库和淤地坝当年淤积量。泉眼山水文站监测了清水河逐年的输沙

量,宁夏水利厅近期通过实测资料和分析给出了水库和淤地坝逐年的拦沙量¹,由此可以计算得到清水河流域逐年土壤侵蚀产沙量(图2),可以作为清水河流域的逐年侵蚀量的实测值对流域侵蚀量计算模型的参数进行率定。

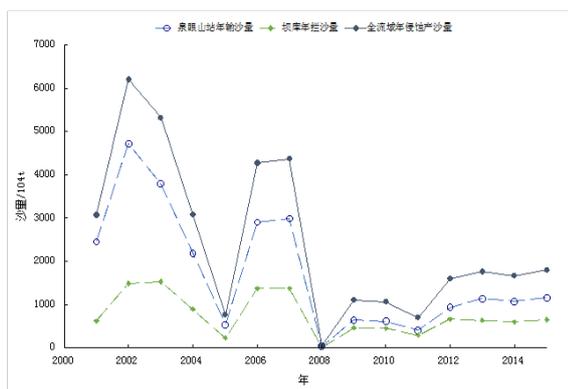


图2 泉眼山站输沙量、水库和淤地坝拦沙量及流域侵蚀产沙量随时间的变化

2.2 土壤侵蚀产沙量计算模型

土壤侵蚀强度的计算采用刘宝元等^[5]等提出的中国土壤流失方程(CSLE)模型,同时在模型中引入浅沟侵蚀因子:

$$A_w = RKLSBET \quad (1)$$

式中: A_w 为单位面积上土壤年侵蚀量, $t/(hm^2 \times a)$; R 为降雨侵蚀力因子, $MJ \times mm/(hm^2 \times h \times a)$; K 为土壤可蚀性因子, $t \times h/(MJ \times mm)$; L 为坡长因子(无量纲), G 为浅沟侵蚀因子,(无量纲); S 为坡度因子(无量纲); B 为生物措施因子(无量纲); E 为工程措施因子(无量纲); T 为耕作措施因子(无量纲)。

各因子的计算方法如下:

(1) 采用 Van Remorte^[9]提出的方法计算坡度和坡长。坡长因子(L)的计算采用刘宝元^[10]提出的计算公式:

$$L = (\lambda / 2.1)^m \quad (8)$$

其中:

$$m = \begin{cases} 0.2 & \theta \leq 1^\circ \\ 0.3 & 1^\circ < \theta \leq 3^\circ \\ 0.4 & 3^\circ < \theta \leq 5^\circ \\ 0.5 & \theta > 5^\circ \end{cases} \quad (9)$$

上式中: λ 为坡长, m ; θ 为坡度, $^\circ$; m 为坡长指数。

坡度因子的计算采用刘宝元等^[11]在黄土高原建立的公式:

$$S = \begin{cases} 0.8 \sin \theta + 0.0 & \theta < 5^\circ \\ 0.8 \sin \theta - 0.5 & 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \\ 0.9 \sin \theta - 0.6 & \theta \geq 10^\circ \end{cases} \quad (10)$$

(2) 浅沟侵蚀因子的计算采用江忠善^[12]提出的计算公式:

$$G = 1 + 1.60 \sin(\theta - 15) \quad (11)$$

坡长因子、坡度因子及浅沟侵蚀因子利用分辨率为30m的DEM资料计算。

(3) 生物措施因子(B)

参考有关研究成果^[13-16],根据流域侵蚀产沙量实测值(图2)进行试算后,赋予了不同土地利用类型及植被覆盖度条件下的 B 值(表1)。

表1 不同土地利用类型和植被覆盖度下的 B 值

土地利用类型	林地						
植被覆盖度	0-5%	5-20%	20-40%	40-60%	60-80%	80-100%	
B 值	0.80	0.50	0.25	0.10	0.07	0.04	
土地利用类型	草地						
植被覆盖度	0-5%	5-20%	20-40%	40-60%	60-80%	80-100%	
B 值	0.80	0.55	0.30	0.15	0.10	0.043	
土地利用类型	盐碱地	沙地	耕地	建设用地	水田	水体	戈壁
B 值	1.00	0.95	0.40	0.20	0.1	0.00	1.00

(4) 工程措施因子(E)

清水河流域坡面上水土保持工程措施主要考虑梯田的减沙效应。由于没有获得不同年份梯田分布的图像资料,本次研究的处理的方法是首先在 googleEarth 图像上圈出梯田的主要分布范围,梯田主要分布在固原县、海原县、西吉县、同心县山区 $3^\circ - 20^\circ$ 的坡面上,然后根据 DEM 和土地利用数据图提取出梯田分布的坡面。最后根据梯田分布坡面的平均侵蚀强度及各年梯田的统计面积数据进行减沙量的计算,并分配到相应坡面侵蚀强度的图像上。参考有关文献的研究成果^[17-19]与实测侵蚀产沙量的对比试算,梯田分布区域 E 值取 0.10,其他非梯田地块赋值为 1。

(5) 耕作措施因子(T)

耕作措施因子主要根据不同坡度条件下等高耕作减少土壤流失量的比例来确定。参考有关研究成果^[20-21]并对模型参数率定后,赋予不同坡度耕地的 T 值(表2)。由于大部分人工林地也采用了沿等高线种植的措施,因此对于林地 E 值取 0.7,其它土地利用类型 E 值取 1。

1 宁夏回族自治区水利厅.宁夏河段入黄沙量变化原因分析及趋势预测.2019:134-136.(内部资料)

表 2 不同坡度耕地 T 因子取值

坡度范围	≤5°	5°-10°	10°-15°	15°-20°	20°-25°	>25°
T 因子取值	0.100	0.221	0.305	0.575	0.705	1.00

3 计算结果分析

3.1 计算模型的验证

采用以上建立的 CSLE 模型可计算得到清水河流域逐年侵蚀量 (图 3)。将计算值与实测值对比, 可见二者的变化趋势比较一致。从侵蚀产沙总量上看, 2001 年-2015 年实测侵蚀产沙总量为 36835.85 万 t, 计算产沙总量为 39510.90 万 t, 计算值是实测值的 93.23%, 二者比较接近。但是, 也可以看到, 计算值与实测值相比部分年份有较大差值, 尤其是 2005-2008 年实测产沙量年际变化比较剧烈, 而模型计算值年际变化较小。

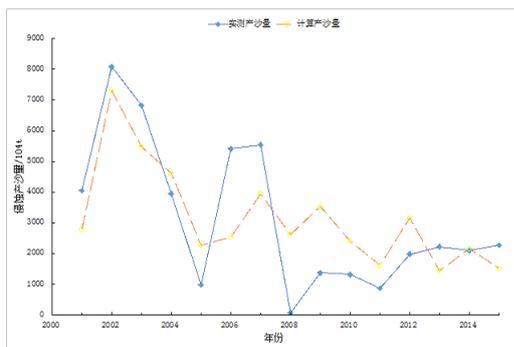


图 3 逐年侵蚀产沙量实测值与计算值

将 2001-2015 年分为 3 个 5 年的时段, 对比模型计算侵蚀量与实测侵蚀量的 5 年年平均值, 二者分布在 1:1 线附近的两侧 (图 4)。可见, 以 5 年时间尺度对清水河流域土壤侵蚀强度进行模拟计算是比较合适的。

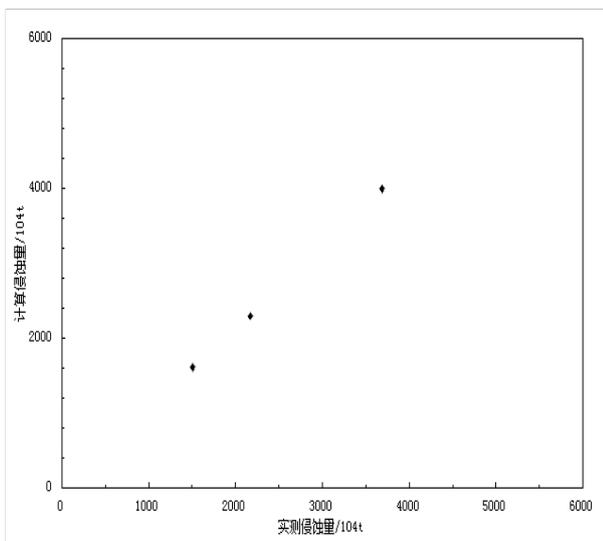


图 4 清水河流域 5 年平均侵蚀产沙量实测值与计算值比较

3.2 不同时段土壤侵蚀强度分布

通过叠加计算得到清水河流域 2001-2005 年、

2006-2010 年、2011-2015 年三个时段年平均土壤侵蚀强度图 (图 5)。可见, 清水河流域土壤侵蚀强度随降雨量、地形、植被等因素的变化在不同的地点有显著的差异。沿河谷形成的冲积、洪积平原及下游河谷平原区部分由于地形平缓, 侵蚀强度较小; 中、上游丘陵和山地区域由于地势坡度大、降雨强度也较大, 侵蚀强度较大。三个时段相比土壤侵蚀强度明显变小, 年平均侵蚀产沙量计算值分别为 3992.59 万 t、2295.21 万 t、1614.38 万 t。

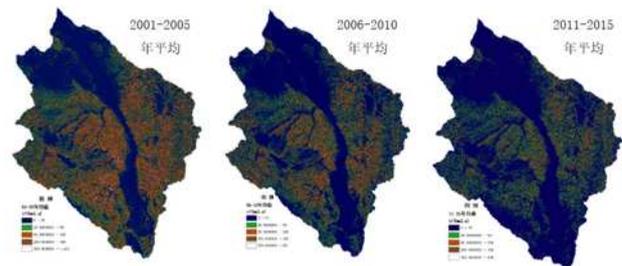


图 5 年平均土壤侵蚀强度分布

根据水利部制定的土壤侵蚀分级标准 (SL190-96) [22], 在黄土高原地区, <1000t/(km².a) 为微度, 1000-2500 为轻度 t/(km².a), 2500-5000 t/(km².a) 为中度, 5000-8000 t/(km².a) 为强度, 8000-15000 t/(km².a) 为极强度, >15000 t/(km².a) 为剧烈。对 3 个时段不同侵蚀强度分级面积占流域面积的比例进行统计 (表 3), 可见在平均侵蚀量显著减少的情况下, 3 个时段相比, 侵蚀强度的变化的主要表现为强度以上面积所占比例显著变小, 3 个时段分别为 22.94%、13.64%、6.84%; 微度和轻度侵蚀强度面积所占比例的显著增加, 3 个时段分别为 66.41%、66.59%、81.36%; 而中度侵蚀强度面积所占比例变化不大。

表 3 清水河流域 3 个时段不同侵蚀强度面积占全流域面积的比例 单位: %

时段	微度	轻度	中度	强度	极强度	剧烈
2001-2005 年	52.61	11.80	12.65	9.38	9.40	4.16
2006-2010 年	50.07	14.52	13.78	7.62	5.01	1.01
2011-2016 年	64.13	17.23	11.79	4.68	1.95	0.21

3.3 影响因素分析

在构成侵蚀产沙量计算模型各因子中, 土壤可蚀性 (K)、地形因子 (LS) 因子和浅沟侵蚀因子 (G) 在短时间内变化不明显, 土壤侵蚀产沙量的变化主要是由降雨侵蚀力因子 (R)、植被覆盖因子 (B)、工程措施因子 (E) 和耕作措施因子 (T) 4 个因子的乘积的变化导致的。

可以证明, 上式中关于 R、B、E、T 的交叉项中, 如果在计算时段内如果交叉项组成因子的相对变化率相

同, 则每个因子对该项计算值的贡献率相同, 例如在交叉项中, 和对该项乘积的贡献率各为 50%; 如果在计算时段内交叉项组成因子的相对变化率不同, 如果仍然按照相同的比例计算各因子的贡献率则会产生一个小的误差, 由于交叉项的积相对于非交叉项是一个很小的数, 这个误差值更小, 因此可以将这个误差忽略不计, 仍然按照各因子具有相等的贡献率计算。

类似地可以得到植被因子、工程因子、耕作因子的变化对侵蚀量的影响的计算式。利用 ArcGis 软件对图像几何计算及统计功能, 即可计算得到不同时段间各因子变化对土壤侵蚀量的影响。把 2001-2005 年作为第 1 时段、2006-2010 年作为第 2 时段、2011-2015 年作为第 3 时段, 可以计算不同时段间由于降雨、植被、工程及耕作因子导致的减蚀量 (表 4)。

表 4 不同时段对比各因子年均减蚀量 单位: 104t

比较时段	影响因子	年均减蚀量			
	R 因子	B 因子	E 因子	T 因子	
1-2 时段	798.62	606.13	69.25	223.38	1697.38
2-3 时段	-428.24	859.55	59.50	190.02	680.83
1-3 时段	185.19	732.84	64.38	206.70	1189.105

分别计算不同对比时段 4 个因子的减蚀量占流域土壤总减蚀量的比例可得到各因子变化对流域减蚀量的贡献率 (表 5)。

表 5 不同时段各因子对减蚀的贡献率 单位: %

比较时段	R 因子	B 因子	E 因子	T 因子
1-2 时段	47.04	35.71	4.07	13.16
2-3 时段	-62.90	126.25	8.74	27.91
1-3 时段	15.58	61.63	5.41	17.38

可见, 1-2 时段期间, 由于降雨量有所减小, 同时植被盖度提高, R 因子和 B 因子成为土壤侵蚀减蚀量的主要因子。2-3 时段期间, 由于降雨量有所增加, 降雨侵蚀力因子对流域土壤的减蚀作用是负值, 但是由于该时段内植被盖度增长显著, B 因子的减蚀作用达到年均 859.55 万 t, 成为影响减蚀量最主要因素。1-2 和 2-3 时段内 E 因子和 T 因子的减蚀量相对稳定。1-3 时段间对比可代表 2001-2015 年间各因子的变化, 可见在此较长的时间段内植被变化是减蚀的最主要影响因子, 年均减蚀量达到 732.84 万 t, 对总减蚀量的贡献率为 61.63%; 其次是耕作因子 T, 年均减蚀量为 206.70 万 t, 对减蚀的贡献率为 17.38%。降雨侵蚀力因子居于第三位, 年均减蚀量为 185.19 万 t, 对减蚀的贡献率为 15.58%。坡面上修筑梯田等工程因子的减蚀作用居于第四位, 年均减蚀量为 64.38 万 t, 对减蚀的贡献率为 5.41%。

4 结论

本文基于中国土壤流失方程 (CSLE) 构建了清水河流域分布式经验流域侵蚀产沙计算模型, 计算了清水河流域 2001-2005 年、2006-2010 年、2011-2015 年三个时段年均土壤侵蚀强度的分布, 并分析了不同时段间各因子变化对侵蚀量变化的影响及贡献率。

分析表明, 3 个时段相比清水河流域侵蚀强度的变化的主要表现为强度以上面积所占比例显著变小, 3 个时段分别为 22.94%、13.64%、6.84%; 微度和轻度侵蚀强度面积所占比例的显著增加, 3 个时段分别为 66.41%、66.59%、81.36%; 而中度侵蚀强度面积所占比例变化不大。

1-2 时段期间, 降雨侵蚀力降低和植被盖度提高是清水河流域土壤减蚀量的主要原因。2-3 时段期间, 降雨侵蚀力增大, 但是由于该时段内植被盖度增长迅速, 植被因子的减蚀作用超过了降雨侵蚀力增大的影响, 土壤侵蚀强度仍然是降低的。1-3 时段植被盖度增加是土壤减蚀的最主要影响因子, 对总减蚀量的贡献率为 61.63%; 其次是耕作因子, 贡献率为 17.38%; 降雨侵蚀力的贡献率为 15.58%, 工程因子的贡献率为 5.41%。总之, 在一个较短时段内, 降雨的波动可能成为清水河流域土壤侵蚀变化的最大影响因素, 但是从 2001-2015 年全时段看, 植被盖度的变化是影响土壤侵蚀强度的最重要的因素, 其次是耕作因素的影响, 降雨的波动和坡面上工程因素对侵蚀产沙的影响作用相对较小。

【参考文献】

- [1] 李秀霞, 倪晋仁. 土壤侵蚀及其影响因素空间相关性分析 [J]. 地理科学进展, 2009, 28(2): 161-166.
- [2] 艾成, 丁环. 宁夏清水河流域水文特性分析 [J]. 宁夏农林科技, 2010(3): 71-72.
- [3] 李帅, 魏虹, 刘媛等. 气候与土地利用变化下宁夏清水河流域径流模拟 [J]. 生态学报, 2017, 37(4): 1252-1260.
- [4] 苏新礼. 宁夏清水河流域干旱演变特征分析 [J]. 宁夏农林科技, 2011, 52(12): 266-268.
- [5] 刘宝元, 毕小刚, 符素华等. 北京土壤流失方程 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 7-13.
- [6] 国务院第一次全国水利普查领导小组办公室编著. 第一次全国水利普查培训教材之六: 水土保持情况普查 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 209-210.
- [7] Williams J R, Renard. IPIC-A new method for assessing erosion's effect on soil productivity [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1983, 38: 381-383.
- [8] 张科利, 彭文英, 杨红丽. 中国土壤可蚀性及其估算 [J]. 土

- 壤学报,2007,44(1):7-13.
- [9] Van Remortel R D, Maichle R W, Hickey R J. Computing the LS factor for the Revised Universal Soil Loss Equation through array-based slope processing of digital elevation data using a C++ executable[J]. Computers & Geosciences, 2004,30(9/10):1043-1053.
- [10] Liu B. Y., Nearing, M. A., Shi M. A., et al. Slope length effects on soil loss for steep slopes[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(5): 1759-1763.
- [11] Liu B. Y., Nearing, M. A., Shi M. A., et al. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes [J]. Transactions of the ASAE, 1994, 37(6): 1835-1840.
- [12] 江忠善, 郑粉莉, 武敏. 中国坡面水蚀预报模型研究 [J]. 泥沙研究, 2005(4): 1-6.
- [13] 侯喜禄, 曹清玉. 陕北黄土丘陵沟壑区植被减沙效益研究 [J]. 水土保持通报, 1990.10(2):33-40.
- [14] 江忠善, 王志强, 刘志. 黄土丘陵区小流域土壤侵蚀空间变化定量研究 [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996.2(1):1-10.
- [15] 杨子生. 滇东北山区坡耕地土壤侵蚀的作物经营因子 [J]. 山地学报, 1999,17(增):19-21.
- [16] 张岩, 刘宝元, 史培军, 江忠善. 黄土高原土壤侵蚀作物覆盖因子计算 [J]. 生态学报, 2001(7):1050-1056.
- [17] 焦菊英, 王万中. 黄土高原水平梯田质量及水土保持效果的分析 [J]. 农业工程学报, 1999, 15(2): 59-63.
- [18] 吴发启, 张玉斌, 王健. 黄土高原水平梯田的蓄水保土效益分析 [J]. 中国水土保持科学, 2004, 2(1): 34-37.
- [19] 马红斌, 李晶晶, 何兴照, 刘晓燕, 王富贵. 黄土高原水平梯田现状及减沙作用分析 [J]. 人民黄河, 2015,37(2):89-93.
- [20] 李洪勋, 吴伯志. 用径流小区法研究不同耕作措施对土壤侵蚀的影响 [J]. 土壤, 2006,38(1):81-85.
- [21] 郭乾坤, 刘宝元, 朱少波等. 中国主要水土保持耕作措施因子 [J]. 中国水土保持, 2013,(10):22-25.
- [22] 中华人民共和国水利部. 中华人民共和国行业标准 SL190-96: 土壤侵蚀分类分级标准 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.