

晋陕蒙接壤地区环境演变与土壤侵蚀临界值估算的研究*

史培军 方修琦** 金争平 陈晋

摘要 水热环境的变化意味着土壤侵蚀动力条件的变化,它势必造成流域土壤侵蚀量与河流输泥量的变化,但土壤侵蚀不仅与侵蚀动力条件有关,同时还与地表状况有关,如切割程度、地表物质的抗蚀性、植被状况等。下面以研究区内黄河的重要支流之一皇甫川为例探讨土壤侵蚀与诸环境要素之间的关系问题。

1 流域土壤侵蚀模型的建立

皇甫川是黄河托克托至龙门段第一条大支流,它发源于鄂尔多斯高原与黄土高原的过渡地带,在陕西省境内流入黄河。皇甫川全长 120km,流域面积约 3204km²,流域地貌发育正处在壮年期,地形极其破碎,平均沟谷密度为 6.7km/km²,沟谷切割裂度为 35.90%,平均沟道频度为 33.9 条/km,地表物质主要为砒砂岩、黄土和风沙土三种类型,天然植被为半干旱典型草原。皇甫川土壤侵蚀严重,年平均入黄河泥沙量约为 5000 万 t,是黄河粗泥沙的主要来源之一。

根据皇甫川流域地表物质和侵蚀强度的差异,大体可把流域内 510 个小流域分为三种类型。一是沟道砒砂岩基本出露、坡面砒砂岩片状裸露、薄层黄土片状分布的剧烈水蚀小流域,二是沟道砒砂岩出露、坡面覆盖黄土和片沙的强度水蚀型小流域,三是沙地大片分布的水、风复合侵蚀型小流域,其中前二者的面积约占全流域的 92.5%。

利用 1988—1990 年对三类不同小流域的 65 座库坝和水文站调查测量的结果,分析了小流域侵蚀模数与 17 个影响土壤侵蚀因素之间的相关关系,发现在订正到平均降水侵蚀力(800mmj. mm/ha. h. a)后的小流域侵蚀模数与沟谷切割密度、切割裂度、平均坡度、砒砂岩面积比例、风沙土面积比例和植被盖度的相关十分显著。这些因素是皇甫川流域土壤侵蚀的主导因素。考虑到各因子之间的相关性以及对全流域的适用性,选择沟谷密度、砒砂岩面积比例和植被盖度三个因子建立适用于全流域的小流域土壤侵蚀强度的估算模型。其关系式为

$$y = (9.9 + 0.732D^{1.5} + 8.87S^{0.5} + 1291V^{-1.2})^2$$

式中 y 小流域土壤侵蚀模数 (t/km²·a); D 小流域沟网密度 (km/km²); S 小流域砒砂岩面积百分数 (%); V 小流域植被盖度 (%).

该模型说明,在一定的降水条件下,土壤侵蚀量是由地表切割状况、物质成分和植被覆盖度共同决定的。

与实测相比,该模型估计的整体误差为 29%,以估计值小于实测值为主,其中误差大于 30%的占 24.6%,20%-30%的占 21.7%,小于 20%的占 53.7%。利用该模型估算小流域侵蚀量是可行的。

2 现代土壤侵蚀模数与现代侵蚀临界值的估算

根据 1:5 万地形图、1:5 万彩红外航片(1987 或 1988)将整个流域划分为 510 个小流域,分别提取每个流域中的沟谷密度、砒砂岩面积、植被盖度等信息,运用上述模型对每个小流域的土壤侵蚀强度进行估算,并按侵蚀强度的差别划分为十个等级,结果如表 1 所示,计算结果表明:小流域侵蚀模数最大为 38470t/km²·a,最小为 874t/(km²·a),80%的小流域(占全流域面积的 86%)的侵蚀模数在 5000—20000t/(km²·a)。全流域平均为 12069t/(km²·a),比用降水侵蚀力订正后的实测值少 6.8%。

上述估算结果是自然和人类活动共同作用所造成的。假设在目前自然条件下,人类活动极小或不受人类活动影响,则在模型中所涉及的三因子中只有植被盖度有可能增加,其它两个因子的变化是非可逆的。由于皇甫川流域处于半干旱典型草原区,其植被盖度最大

* 参加工作的还有赵焕勋、高志明、张志强等,国家基金委重大项目

** 内蒙古水利科学研究所

表 1 皇甫川流域单元小流域土壤侵蚀数量结构

级别(t/km ² ·a)	条数(条)	所占面积(%)	侵蚀总量(t)	侵蚀模数(t/km ² ·a)
I (<200)				
II (200-1000)	1	3.980	3478.76	874.06
III(1000-2500)	19	79.531	157560.18	1981.12
IV(2500-5000)	20	129.117	482099.43	3733.82
V (5000-8000)	90	557.359	3678789.31	6600.39
VI(8000-11000)	116	737.399	6994080.11	9484.79
VII(11000-15000)	125	768.359	9768303.32	12713.20
VIII(15000-20000)	75	720.443	11961760.01	16603.34
IX(20000-25000)	40	172.181	3832816.70	22260.39
X (>25000)	24	72.450	2236451.21	30868.89
总计	510	3240.813	39115339.00	12069

也难以达到 60%，若假设植被盖度为 60%，在以砒砂岩为主、以黄土为主和以风沙土为主的三类小流域中，分别以其沟网密度的平均值和最大频数为其上下限；在以砒砂岩为主的小流域，以砒砂岩占全流域面积的百分比为其下限，以砒砂岩面积占该类型区面积的百分比为上限；在以黄土为主的小流域，以砒砂岩面积频率最高的平均值为下限，以砒砂岩面积占该类小流域面积的百分比为上限；在以风沙土为主的小流域，用风沙土面积的比例替代砒砂岩面积的比例，并用 $y = (89.54 + 1.771D^{1.5} - 49.76S^{0.1} + 1534V^{-1.2})^2$ 估算土壤侵蚀强度，风沙土面积比例取值的上限和下限分别用本类型小流域风沙土面积的下限值和全流域风沙土面积的比例，据此估算出各类型小流域的土壤侵蚀量，分别为以砒砂岩为主的小流域 7000—10000t / km²·a，以黄土为主的小流域 2800—5100t / km²·a，以风沙土为主的小流域 1400~2500t / km²·a 该数值可以看作是各类型小流域现代自然侵蚀的临界值（表 2）。

表 2 皇甫川流域现代土壤侵蚀临界值估算

小流域类型	占全流域面积百分比	河网密度(km/km ²)		砒砂岩面积(%)		风沙土面积(%)		植被盖度(%)	侵蚀临界值(t / km ² ·a)
		上限	下限	上限	下限	上限	下限		
砒砂岩型	43.3	7.44	5	59.48	40			60(40)	7000-1000(8000-118000)
黄土型	42.2	6.8	4	26.75	10			60(40)	2800-5100(3500-7100)
风沙土型	14.5	4.2	1.5			35.5	16.98	60(40)	1400-2000(2300-3200)
全流域平均	100								5300(7000)

以各类小流域占全流域面积的百分比为权重，对各类型小流域中的侵蚀临界值加权求和，可以作为全流域的现代自然侵蚀临界值，其结果为 4200—6500t / km²·a，若考虑模型的 30%估算误差则可取临界值为 3700-6900t / km²·a，平均为 5300t / km²·a。

实际上目前自然植被极少能达到 60%的盖度，一般为 30—40%，假设植被盖度为 40%，其它条件不变，则由此估算的各类型区内的土壤侵蚀临界值为：砒砂岩区 8000-11800t / km²·a，黄土区为 3500—7100t / km²·a，沙土区为 2300—3200t / km²·a，全流域为 5200—85000t / km²·a，平均为 6950t / km²·a。

3 30 年来土壤侵蚀模数的变化及其中自然侵蚀贡献量的估算

皇甫川年输沙量的年际变化很大，最大值在 15000 万 t 以上，最小值仅 500 左右，30a 平均约为 5000 万 t。年输沙量的变化具有一定的周期性，大约每 6~7 年出现一次 8000 万 t 以上的高输沙年，大约每隔 10—11 年出现一次 12000 万 t 以上的极高输沙年。以 5 年平

均计算，1960—1964 年，1980—1984 年和 1985—1989 年三个时段的输沙量低于平均值，1965—1979 年时段的输沙量高于平均值。

与降水变化对比，输沙量的变化趋势与降水变化趋势大体一致，反映了降水因素对输沙量变化的控制作用。

上述变化是在自然因素与人为因素共同作用的结果，为了区分出自然因素与非自然因素对土壤侵蚀模数的影响，将皇甫川流域土壤侵蚀估算模型用逐年降水侵蚀力进行修正，同时把沟网密度、砒砂岩面积比例和植被盖度看做是随时间变化的变量，则任意一年的土壤侵蚀模数可表示为

$$y_t = (9.9 + 0.743D_t^{1.5} + 8.87S_t^{0.5} + 1291V_t^{-1.2})^2 \cdot R_t/R_m$$

式中 y_t —— t 年土壤侵蚀模数； R_m ——平均降水侵蚀力； R_t —— t 年降水侵蚀力； D_t —— t 年沟网密度； S_t —— t 年砒砂岩积比例； V_t —— t 年植被盖度。

在没有人类干扰的情况下， R_t 和 V_t 都随年降水量的波动而变化，根据观测，结果，三者的关系可表示为：

$$R_t = 0.742P^{1.126}$$

$$V_t = 0.1868 + 0.0758P_t \quad (n=25 \quad r=0.904)$$

$$V_t = 2.1R_t^{0.425}$$

D_t 和 S_t 均取决于初始值和沟道扩展速率。根据小区观测结果，在草高 10—30cm，植被覆盖度 30%—40% 的情况下，沟道扩展速率为 0.16×10^{-3} ，基本可以认为属自然扩展，则对于任意一年的沟谷切割裂度可表示为

$$X_t = X_0 + 0.0016t$$

X_0 为初始沟网切割裂度， t 为距初始年的年数。

统计发现，沟网密度与沟网切割裂度之间存在以下关系：

$$D = 1.27411X^{9.4974}$$

则

$$X_0 = (D_0 / 1.27411)^{-0.4974}$$

$$D_t = 1.27411 (X_0 + 0.0016t)^{0.4974}$$

$$D_t = 1.27411 [(0.78486D_0)^{-0.4974} + 0.0016t]^{0.4974}$$

同样，假定砒砂岩出露面积的增长率与沟道扩展率一致，则对于任意一年的砒砂岩面积可表示为

$$S_t = S_0 + 0.0016t$$

若以 1988 年为初始年，根据彩红外像片的解释结果 $D_0 = 6.7 \text{ km} / \text{km}^2$ ， $S_0 = 40\%$ ，则对于 1988 年以前各年的沟网密度和砒砂岩面积可以根据以上公式反演出来。

在自然状况下， R_t 、 V_t 是与降水有关的周期变量， D_t 、 S_t 是单调增函数，因此，土壤侵蚀临界值是随时间的增加而增大的。

利用以上公式推算 1960 年以来各参数的逐年变化，据此进一步计算各年土壤侵蚀模数，该数值可以看作是土壤自然侵蚀的最低估计值。

与实测值对比，自 60 年代后期以后两曲线波动的不一致性增强，可能反映了人类活动增强的影响。在极端少雨年份，计算值一般比实际值高或者两者接近，这可能是少雨年份部分坡面侵蚀泥沙在沟坡脚、谷底或沟道中堆积而未被搬运出流域造成的，在极端多雨年份，计算值比实测值明显偏少，可能是估算有误差。每 5 年平均的计算值占实测值的比例一般大于 50%，1960—1989 年平均为 55%，对于小于 50% 的 1965—1969 年和 1975—1979 年如果不考虑 1967 和 1979 两个极值年份，计算值占实测值的比值分别为 55% 和近 50%。因此，若考虑估计值偏低的影响则自然侵蚀对土壤总侵蚀量的贡献占主要地位（表 3）。

4 不同时间尺度土壤侵蚀临界值的估算

由于影响土壤侵蚀的因素是动态变化的，因此，即使在纯自然状态下，土壤侵蚀的临

界值也绝不是固定不变的，特别是沟网密度和砒砂岩面积的单调增加，必然使得土壤侵蚀临界值随着时间的增加而增大。下面根据三因子估算模型，估算 1 万年以来不同时间尺度上特征时期的土壤侵蚀临界值。

表 3 皇甫川流域每年年平均的侵蚀量的实测值和估算值的对比

土壤侵蚀模数	1960—1964	1965—1969	1970—1974	1975—1979	1980—1984	1985—1989	1960—1989
实测值 $t / \text{km}^2 \cdot \text{a}$	13492.4	18044	18080	209.50	12991	13895.8	16224.2
估算值 $t / \text{km}^2 \cdot \text{a}$	9546.2	8665.0	10429.0	10194	7103	7511.8	8908.37
估算值占实测值百分比	70.75	48.02	57.68	48.66	55.53	53.71	55.0

4. 1 不同时间尺度下有关土壤侵蚀参数的确定 各时间尺度下的特征时期的降水量根据前面讨论的结果给出。

在 10^2 — 10^1 a 尺度上，本区土壤侵蚀过程基本上与现代侵蚀过程一致的。这时期的人为活动由诱发逐渐转为加强因素，该尺度上新构造运动的上升量仅数 15—1.5cm，对沟道加速扩展影响可忽略不计，故假定沟道侵蚀发展仍按前述 0.16% 计算，降雨侵蚀力与植被覆盖度的关系维持不变，即可直接用估算模型估算 10^0 — 10^1 a 尺度特征段的土壤侵蚀过程。

在 10^3 a 尺度上，土壤侵蚀的外营力过程仍同其它尺度基本一致，但其特征段的水热场配置及沟道扩展率与现代相比已不完全一致，因此，对用现代降水与植被盖度建立的相关关系反演的植被盖度必须订正，同时，由于本区新构造运动的阶段性和加速性，现代沟道扩展率远较当时为大，故只能利用地貌发育过程反演当时的沟网密度和砒砂岩面积。

本区河流共发育三级河流阶地，一级高河漫滩阶地，对应时代由低到高分别距今 6000a. B. P, 12000~10000a. B. P, 125000a. B. P 左右, 200000a. B. P 左右。阶地作为河流侵蚀与堆积过程的产物，与河流侵蚀扩展有直接对应关系，即高河漫滩阶地形成时代与流域内第四级沟道形成时代相当；第二级阶地形成时代与流域内第五级沟道形成时代相当，据此，推断距今 6000—4000a. B. P 时，沟网密度大约为 $4.7 \text{ km} / \text{km}^2$ ，距今 10000—12000a. B. P 时，沟网密度大约为 $3.8 \text{ km} / \text{km}^2$ 。

本区黄土呈不连续层状分布，自西北向东南由几米到 30 多米，由于表层黄土剥蚀速度一般为 $1 \sim 5 \text{ mm/a}$ ，故砒砂岩面积的出露时间自西北向东南逐渐增长，即在 1000 尺度的 1 万年时期，已有砒砂岩的带状分布。

从本流域现代黄土分布看，厚度从西北向东南递减，西北最薄处黄土仅几米，而平均厚度约为 10 米左右。根据黄土区沟网密度与砒砂岩面积百分数的关系式：

$$y=0.13576x^{2.6111} \quad n=58 \quad r=0.738$$

式中：y 为砒砂岩面积百分数，x 为流域平均沟网密度，则相应上述 6000—4000a. B. P, 12000—10000a. B. P 期间沟网密度，砒砂岩面积分别占本流域面积的 4.43% 和 7.72%。

由于降水量的变化，必然引起植被盖度的变化，根据本流域小区观测建立的降水与植被盖度的关系式：

$$v=0.1868+0.0758p \quad n=25 \quad r=0.90$$

式中：v 为植被盖度，P 为年降水量，由此可估算相应时段的植被盖度，但由于在 10^3 a , 10^4 a 尺度上，由于干湿变化足以引起植被带的摆动；另外，自然环境被人为改造逐渐趋弱，我们利用上式计算了 1960—1989 年平均植被盖度与本流域的模拟值（降水平均值的 10%）40% 进行了相应的订正。

根据以上边界条件，对不同时间尺度土壤侵蚀临界值估算结果如表 4。

从表 4 可以看出，湿润阶段的降水随时间尺度的降低而减少，而土壤侵蚀模数则呈增加的趋势。干燥阶段的降水随时间尺度的降低而增加，土壤侵蚀模数也增加，因此，土壤侵蚀模数是随时间而波动增加的。湿润阶段与干燥阶段降水的差值随时间尺度的降低而减

小，但土壤侵蚀模数的差值反而增大。上述特征反映了土壤侵蚀系统的非线性反馈作用过程。其中也含有人为因素的作用。人类活动作用是使土壤侵蚀临界值增加的重要因素之一。

表 4 皇甫川流域不同时间尺度土壤侵蚀临界值估算结果

项目 时段		特征 段性 质	年降 水量 (mm)	降雨侵 蚀力	植被 盖度 (%)	订正 后植 被盖 度(%)	沟网 密度 (km/k m ²)	砒砂 岩面 积百 分数	估算自然侵 蚀临界值 (t/km ² ·a)	估算自然侵 蚀临界值平 均值(t/km ² ·a)
104a 尺度	3.0-5.0 × 10 ⁴ aBP	湿润 段	700- 650	2364.7- 1916.9	57- 52	67-61	3.4	3.31	1308.4-1162.8	112.04
	1.8-2.0 × 10 ⁴ aBP	干燥 段	250- 200	357.4- 289.8	25- 23	29-28	3.4	3.32	1273.8-1071	1172.4
103a 尺度	6.5-5.5 × 10 ³ aBP	湿润 段	550- 525	1259.6- 1134.1	43.6- 41.7	51-49	3.8	4.43	3274.4-3022	3148.8
	3.5-2.5 × 10 ³ aBP	干燥 段	270- 250	388.7- 357.4	26.5- 25	31-29	4.7	7.72	1932.8- 1876.9	1904.8
102a 尺度	11.0-8.8 × 10 ² aBP	湿润 段	500- 450	1021- 827.7	40.5- 38	48-44	6.27	16.38	6286.1- 3321.8	5796.2
	5.0-2.5 × 10 ² aBP	干燥 段	350- 300	543.9- 440.9	30.5- 28	36-32	6.27	16.38	3822-3321.8	3571.9
10a 尺度	1955-1965	湿润 段	450- 400	827.7- 671	36.5- 33.4	43-39	6.67	38.29	8706.9- 7331.8	8019.4
	1925-1935	干燥 段	360- 310	567.2- 459.8	31- 28.4	36.5- 33	69.4	36.21	6103.8- 5187.1	5645.5

从表 4 中还可以看出，3000a 以来平均土壤侵蚀临界值在 10³ 年尺度上为 4790kt / km² · a, 400a 来在 10² 年尺度上为 5750kt / km² · a 近 100a 来在 10¹ 年尺度上为 6800t / km² · a, 其中 100a 以来平均土壤侵蚀临界值的估算结果与前面假设植被覆盖度为 40% 的情况下，对全流域土壤侵蚀临界值的估算结果 6950t / km² · a 十分接近。

5 结论

通过以上讨论我们可以得出以下几点结论：

- (1) 自然状况下的土壤侵蚀是降水、地表切割程度、地表物质成分和植被盖度等因素共同作用的。
- (2) 人为因素不仅造成土壤侵蚀量的增加，而且还改变土壤侵蚀系统的边界条件，使土壤侵蚀的临界值增加。
- (3) 在地貌演化进入老年期以前，即使在自然状况下，土壤侵蚀临界值也是单调增加的，人为因素的作用则使这种增加值更大。
- (4) 皇甫川流域现代自然侵蚀临界值在 40% 的植被盖度的情况下为 6900t / km² · a 左右，在 60% 的植被盖度下为 5300t / km² · a 左右。

作者简介史培军，1959 年 3 月 10 日生，1988 年毕业于北京师范大学地理系，获理学博士学位。现在北京师范大学地理系从事环境演变与自然灾害研究，是副教授，副系主任。

国家教委，国务院学位办；中国有突出贡献博士

1987 年：内蒙科技进步一等奖

1989 年：内蒙科技进步二等奖

1991 年：国家教委科技进步三等奖