

黄土高原主要产沙河流输沙动态模拟

蒋定生 范兴科 刘国斌

(中国科学院 水土保持研究所·陕西杨陵·712100)
水利部

1 前言

土壤侵蚀预报的研究,国内外十分活跃。纵观其研究成果,多系山坡产沙模型,涉及流域产沙模型研究甚少。预报山坡降雨侵蚀量的美国著名“通用土壤流失方程式(USLE)”,自1965年提出以来,已在许多国家推广应用,对推动土壤侵蚀的预报工作起了积极作用,现已几易其版本,更趋成熟完善。而关于流域产沙量的预报,由于涉及因素复杂,至今还没有大的突破。

我国黄土高原水土流失极为严重,尤以河口镇至龙门区间的黄土丘陵沟壑区和高原沟壑区最为剧烈。有关土壤侵蚀产沙模型的研究,也多停留在山坡上,关于流域产沙量的估算,多以小流域为研究对象,其面积不超过1 000km²。

小流域产沙量的估算大都是根据资料推求经验方程,由于各研究者工作地区的差别,选择的因子不同,因而模型的结构也多种多样。

笔者从分析河流年输沙量与流域内各控制雨量站的一日最大降水量之间的关系出发,对皇甫川、窟野河、无定河、秃尾河、佳芦河、清涧河、延河、三川河、马连河、葫芦河(渭河支流)、祖厉河、汾川河、仕望川等13条河流的年输沙量动态进行模拟分析。这些河流的流域面积(测站以上)最小为1 121km²,最大为30 217km²。流域产沙问题十分复杂,受到降水、地质、地形地貌、土壤、植被、人类活动等多种因素的影响,而降水对流域产沙的影响,既是决定性的因素,也是一个不确定因素。譬如降水的量、强度、点面关系、雨型、降落的地点和季节、下垫面的状况及水土保持措施的配置等,这些都是随机的,基本上是一个灰箱。本文仅是对较大河流输沙量预测的一次尝试,谬误之处,尚祈读者教正。

2 流域输沙模拟建模的依据

黄土结构疏松,渗透性能较好,一般的小雨不会产生地表径流。根据中科院安塞水土保持综合试验站径流场和纸坊沟流域把口站多年的观测表明,严重的土壤侵蚀主要由少数几场大雨或暴雨所引起。有时一次降雨的土壤侵蚀量占年总侵蚀量的绝大部分。表1是该站1983~1989年径流小区的观测结果。可以看出,一次最大降雨的侵蚀量占年侵蚀总量的53%~98%,特别是坡耕地,一次最大降雨的侵蚀量占年总侵蚀量的80%以上,最大超过98%。据统计,黄土高原地区内陕、甘、宁、蒙、晋等5省(区)内坡耕地占总耕地面积的比例为71.34%~98.40%。正因如此,小流域的产沙也很集中。根据该站1985~1989年在纸坊沟小流域把口站的观测结果表明,历年

表 1 一次最大降雨的侵蚀量占年总侵蚀量的比例

土地利 用情况	年 份	一次最大降雨侵蚀量			年总侵蚀量 (t/km ²)	一次大雨侵蚀量	
		日 期	降雨量 (mm)	侵蚀量 (t/km ²)		占年总侵蚀量 (%)	
农 地	1985	8 月 5 日	62.1	3450.0	3556.0	97.0	
	1986	6 月 25 日~26 日	56.5	1753.2	1787.0	98.1	
	1987	4 月 20 日	38.4	4004.9	4312.5	92.9	
	1988	8 月 5 日~6 日	130.7	7095.9	8484.6	83.6	
柠 条 林 地	1983	9 月 7 日	79.2	446.5	748.9	59.6	
	1984	8 月 3 日	62.8	2363.4	3067.4	77.0	
	1985	8 月 5 日	62.1	747.3	1105.9	67.6	
	1986	7 月 6 日	12.2	87.0	138.0	63.0	
	1987	4 月 20 日	38.4	971.0	1346.0	72.1	
	1988	8 月 5 日	68.0	32.9	62.1	53.0	
	1989	7 月 16 日	108.3	89.0	132.0	67.4	

表 2 安塞县纸坊沟流域一次大雨输沙情况

年 份	一次最大降雨输沙量		全年输沙总量 (t)	一次最大降雨输沙 量占全年输沙量(%)
	日 期	输沙量(t)		
1985	8 月 5 日	73189.4	97474.2	75.1
1986	6 月 26 日	1340.0	3667.0	36.5
1987	7 月 9 日	155.7	230.3	67.6
1988	8 月 5 日~6 日	47277.9	92010.2	51.4
1989	7 月 16 日~17 日	133330.0	134265.9	99.3

一次最大降雨的输沙量,分别占年输沙量的 36.5~99.3%(见表 2)。表 2 资料表明,愈是年输沙量较大的年份,产沙愈集中。如 1989 年,一次最大降雨的输沙量,占年输沙量的 99.3%。1986 年为少雨年,汛期雨量只有 246.2mm,没有大暴雨,所以一次最大降雨的输沙量也较少,只占全年输沙量的 36.5%。因此,笔者这次建立河流年输沙量动态模拟模型选择因素的一个主要依据就是:流域的产沙量主要由几场大暴雨所引起。

3 方法

3.1 建模因素的选择

根据上面论述,其选择了两大因素,作为模型的变量,即:(1)历年汛期(6~9 月)一日最大降水量极值,并考虑一日次最大降水量,一日第三大降水量和一日第四大降水量;(2)水土流失治理率。即某样本区内水土流失治理面积与水土流失未治理面积之比(%)。

3.2 建模方法

根据流域面积的大小,选择数个有代表性的雨量站,依照与流域输沙量测站相对应的时间序列建立数据序列。雨量站一般从县级气象站选取,这样也就方便其它因素数据(如水土流失治理率)的采集。

当数据矩阵建立之后,在计算机上采取自定义模型结构的方式,建立流域输沙量与一日最大降水量、水土流失面积治理率之间的多元回归关系。通过人机对话,逐步修改模型结构,直到模型达到最适的模拟结果时为止。

4 模拟结果

现择几条有代表性的河流将其模拟结果陈述于后。

(1)皇甫川:皇甫川是黄河的一级支流,源于内蒙古自治区准格尔旗的德胜西乡,经陕西省府谷县入黄河。皇甫川皇甫站以上的流域面积为 3 175km²,源头为库布齐沙漠的东南边缘,全流域都有大面积的披沙石露头,水土流失极为剧烈,河流含沙量高,曾测得 1 570kg/m³ 的高浓度含沙记录(1974 年 7 月 23 日)。在 1982 年全国第四次水土保持会议上,皇甫川被确定为全国八大重点治理区之一。经多年治理,截至 1988 年止,准格尔旗水土流失的治理率已达 51.5%。

皇甫川皇甫站输沙量动态模拟计算,选择了 7 个因子与输沙量进行多元逐步回归分析。这 7 个因子是: X_1 ——准旗沙圪堵每年汛期(6~9 月)一日最大降水量极值; x_2 ——沙圪堵历年汛期一日次最大降水量; x_3 ——沙圪堵历年汛期第三大一日最大降水量; x_4 ——沙圪堵历年汛期第四大一日最大降水量; x_5 ——皇甫川历年汛期一日最大降水量极值; x_6 ——海子塔历年汛期一日最大降水量极值; x_7 ——准格尔旗水土流失面积治理率(%)。模拟计算结果如下:

表 3 皇甫川流域皇甫站输沙动态模拟最适结果

独立变量	系数	标准误	t 值	显著水平
常数项	12.757409	9.3147	1.3696	0.1821
$x_1^{3.5}$	1.199117×10^{-7}	2.355597×10^{-8}	5.0905	0.0000
$x_3^{1.5}$	-0.002056	0.000903	-2.2776	0.0309
$x_4^{2.5}$	0.000306	0.000051	6.0814	0.0000
$x_5^{0.5}$	0.070645	0.025113	2.8131	0.0090
$x_7^{-0.01}$	-13.275644	9.643737	-1.3766	0.1799

表 4 全部回归方差分析

变异来源	平方和	自由度	均方	F 检验	精度
模型	4.59449	5	0.918899	18.4665	0.0000
误差	1.34353	27	0.0497604		
总计	5.93802	32			

决定系数:0.773741;回归估计标准误:0.22307。

从表 1 可知, x_2 和 x_6 因其对流域的产沙量贡献不大,未能进入模型。

(2)窟野河:窟野河是黄河上一条较大支流,温家川测站以上流域面积 8 645km²,自内蒙古的伊金霍洛旗和准格尔旗,经神木注入黄河。窟野河上游和中游为毛乌素沙漠,下游为黄土丘陵沟壑区,水土流失极为严重。50~60 年代,该河多年平均输沙量 1.304 亿 t,占三门峡测站年输沙总量 16.3 亿 t 的 8%,侵蚀模数高达 15 084t/km²·a。经数十年的连续治理,截止 1988 年底,神木的水土流失面积已治理了 26.7%,伊旗治理了 50.55%,多年平均输沙量(80 年代)已降至 1.015 亿 t,减少了 22.2%。

窟野河温家川测站输沙量动态模拟,以神木为基本站,共选择了 9 个因子。即: X_1 ——神木每年汛期(6~9 月)一日最大降水量极值; x_2 ——神木每年汛期一日次最大降水量; x_3 ——神木每年汛期第三大一日最大降水量; x_4 ——神木每年汛期第四大一日最大降水量; x_5 ——伊金霍洛旗每年汛期一日最大降水量极值; x_6 ——石圪台(中上游)每年汛期一日最大降水量极值; x_7 ——温家川每年汛期一日最大降水量极值; x_8 ——神木县历年水土流失面积治理率(%); x_9 ——伊金霍洛旗历年水土流失面积治理率(%)。模拟结果如表 5、表 6。

由表 5 可知,在 9 个因素中, x_2, x_4, x_7, x_8 未能进入模型,而神木站汛期一日最大降水量极值 x_1 ,伊金霍洛旗汛期一日最大降水量极值 x_5 和石圪台汛期一日最大降水量极值 x_6 ,对窟野河泥沙的生成起着决定性的作用。

(3)无定河:无定河是黄河中游较大的一级支流之一,发源于陕西省的白于山,流经吴旗、安

塞、定边、靖边、乌审旗、横山、榆林、米脂、绥德、子洲、子长等县,由清涧入黄河,流域面积 30 274km²。

表 5 窟野河温家川站输沙量动态模拟最适结果

独立变量	系数	标准误	t 值	显著性水平
常数项	0.067809	0.205897	0.3293	0.7444
$x_1^{2.5}$	9.143763×10^{-6}	1.529517×10^{-6}	5.9782	0.0000
$(x_1, x_9)^2$	-5.978351×10^{-8}	3.194105×10^{-8}	-1.8717	0.0721
$x_3^{1.2}$	0.013128	0.004592	2.8590	0.0081
x_5^5	1.242115×10^{-10}	2.26647×10^{-11}	5.4848	0.0000
x_6^5	7.28569×10^{-11}	1.9433×10^{-11}	3.7491	0.0009

表 6 全部回归方差分析

变异来源	平方和	自由度	均方	F 检验	精度
模型	20.2302	5	4.04605	19.4303	0.0000
误差	5.62232	27	0.208234		
总计	25.8526	32			

决定系数:0.782524;回归估计标准误:0.456327

按水土流失类型全流域可分为风沙区、河源梁峁区和黄土丘陵沟壑区,其上游为河源梁峁区,面积 2 321.4km²,中上游经过毛乌素沙漠,面积 16 841.8km²,无定河水土流失十分严重,50~60 年代多年平均输沙量 2.121 亿 t,占三门峡测站多年平均输沙量的 13%。在 1982 年全国第四次水土保持会议上,无定河被确定为全国八大重点治理区之一。在 1983~1990 年的 8 年时间内,对流域内 169 条重点小流域进行了治理,取得了显著成绩。

表 7 无定河输沙量动态模拟最适结果

获得立变量	系数	标准误	t 值	显著性水平
常数项	0.050579	0.462933	0.1093	0.9140
$x_1^{2.5}$	0.000036	8.351877×10^{-6}	4.3280	0.0003
x_3^4	4.907316×10^{-8}	9.850342×10^{-9}	4.9819	0.0001
$(x_1, x_3)^{1.5}$	-8.024239×10^{-6}	1.988295×10^{-6}	-4.0357	0.0006
x_{11}	0.186175	0.067023	2.7778	0.0110
x_{12}	0.092505	0.043923	2.1061	0.0468
$x_4^{1.5}$	0.001057	0.000395	2.6737	0.0139
x_6	0.03055	0.009229	3.3102	0.0032
x_7	-0.421174	0.139188	-3.0259	0.0062
x_8	0.102054	0.058231	1.7526	0.0936

表 8 全部回归方差分析

变异来源	平方和	自由度	均方	F 检验	精度
模型	34.1369	9	3.79299	13.4464	0.0000
误差	6.20580	22	0.282082		
总计	40.3427	31			

决定系数:0.846 173;回归估计标准误:0.531 114。

无定河输沙量控制测站 1974 年以前设在川口,控制流域面积 30 217km²,1975 年测站移至白家川,控制流域面积 29 662km²。输沙量动态模拟计算,考虑了 12 个因素。即: x_1 ——绥德每年汛期(6~9 月)一日最大降水量极值; x_2 ——子洲每年汛期一日最大降水量极值; x_3 ——米脂每年汛期一日最大降水量极值; x_4 ——榆林每年汛期一日最大降水量极值; x_5 ——横山每年汛期一日最大降水量极值; x_6 ——靖边每年汛期一日最大降水量极值; x_7 ——绥德县水土流失面积历年治理率; x_8 ——子洲县水土流失面积历年治理率; x_9 ——米脂县水土流失面积历年治理

率; x_{10} ——榆林县水土流失面积历年治理率; x_{11} ——横山县水土流失面积历年治理率; x_{12} ——靖边县水土流失面积历年治理率。模拟计算结果如表 7 和表 8。

模拟分析表明, x_4, x_5, x_6 和 x_7, x_8 不是主要因素, 未能进入模型的独立变量之中。

(4)三川河:三川河源于吕梁山,北川河流经方山,东川河流经离石,南川河流经中阳,汇流后,由柳林进入黄河。后大成测站以上流域面积 $4\,102\text{km}^2 \cdot \text{a}$ 。流域内水土流失严重,50~60 年代多年平均输沙量 0.355 亿 t,土壤侵蚀模数 $8\,654\text{t}/\text{km}^2$ 。该河是全国八大重点治理区之一,据统计,截止 1988 年底,流域内的水土流失面积治理率已达 45.11%~47.37%。

三川河输沙动态模拟分析,共选取 8 个因素,即: x_1 ——柳林历年汛期(6~9 月)一日最大降水量极值; x_2 ——离石历年汛期一日最大降水量极值; x_3 ——中阳历年汛期一日最大降水量极值; x_4 ——方山历年汛期一日最大降水量极值; x_5 ——柳林历年水土流失面积治理率; x_6 ——离石历年水土流失面积治理率; x_7 ——中阳历年水土流失面积治理率; x_8 ——方山历年水土流失面积治理率。经模拟计算后,其结果列于表 9 和表 10 之中。计算结果表明,所取 8 个因素全都进入了方程。

表 9 三川河大成站输沙量动态模拟最适结果

独立变量	系数	标准误	t 值	显著性水平
常数项	203.074454	54.030406	3.7585	0.0010
x_1^4	2.118399×10^{-9}	6.66293×10^{-10}	3.1794	0.0042
x_2	0.000498	0.00138	0.3609	0.7215
x_3	0.001927	0.001252	1.5393	0.1374
x_4	0.001166	0.001467	0.7947	0.4349
$x_5^{1.5}$	0.004443	0.001471	3.0197	0.0061
$x_6^{-1.25}$	2.928906	1.826545	1.6035	0.1225
$x_7^{0.01}$	-195.718908	52.108804	-3.7560	0.0010
$x_8^{-0.5}$	-8.232001	2.150144	-3.8286	0.0009

表 10 全部回归方差分析

变异来源	平方和	自由度	均方	F 检验	精度
模型	1.09610	8	0.137012	7.70735	0.0001
误差	0.408866	23	0.0177768		
总计	1.50496	31			

决定系数:0.728321;回归估算标准误:0.13333。

(5)马连河:马连河系泾河的一条重要支流,源出环县,流经华池、庆阳、西峰市、合水和宁县,其雨落坪测站以上的流域面积 $19\,019\text{km}^2$ 。该河上游为梁、峁、塬地和丘陵,中、下游为残塬,水土流失严重。50~60 年代多年平均输沙量为 1.288 亿 t,流域平均侵蚀模数 $6\,772\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{a}$ 。经过数十年的治理,至 80 年代末,年均输沙量已下降至 1.023 亿 t,减少了 20.6%。

马连河已列入世界银行贷款《中国黄土高原水土保持项目》,并于 1993 年底开始启动。在马连河雨落坪测站输沙量动态模拟中,因缺乏甘肃省水土保持进展时间序列资料,在统计计算中,仅选择了下列 12 个因素。即: x_1 ——宁县历年汛期(6~9 月)一日最大降水量极值; x_2 ——合水历年汛期一日最大降水量极值; x_3 ——西峰历年汛期一日最大降水量极值; x_4 ——庆阳历年汛期一日最大降水量极值; x_5 ——华池历年汛期一日最大降水量极值; x_6 ——环县历年汛期一日最大降水量极值; x_7 ——宁县历年汛期一日次最大降水量; x_8 ——合水历年汛期一日次最大降水量; x_9 ——西峰历年汛期一日次最大降水量; x_{10} ——庆阳历年汛期一日次最大降水量;

x_{11} ——华池历年汛期一日次最大降水量; x_{12} ——环县历年汛期一日次最大降水量。

模拟计算结果如表 11 和表 12。从表 11 可以看出, $x_3, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}$ 和 x_{12} 等 7 个因素均未进入入选变量之中。这亦证明,流域的产沙主要是由几场大暴雨所引起。

表 11 马连河雨落坪站输沙动态模拟最适结果

独立变量	系数	标准误	t 值	显著性水平
常数项	-0.09354	0.192773	-0.4852	0.6312
x_1	3.315864×10^{-8}	5.248066×10^{-9}	6.3183	0.0000
$x_2^{3.5}$	1.070868×10^{-7}	4.126866×10^{-8}	2.5949	0.0147
$x_4^{1.5}$	0.000472	0.000318	1.4852	0.1483
x_5^6	1.963409×10^{-13}	5.24286×10^{-14}	3.7449	0.0008
$x_6^{1.2}$	0.005939	0.001395	4.2580	0.0002
$(x_1 \cdot x_5 \cdot x_6)^{0.5}$	-1.5815×10^{-13}	8.4235×10^{-14}	-1.8775	0.0705

表 12 全部回归方差分析

变异来源	平方和	自由度	均方	F 检验	精度
模型	18.4743	6	3.07905	14.1696	0.0000
误差	6.30169	29	0.21730		
总计	24.7760	35			

决定系数:0.745653;回归估计标准误:0.466154。

因限于篇幅,有关清涧河、延河、汾川河、仕望川、渭河支流葫芦河、祖厉河等河输沙量的模拟计算结果就不再一一列出。

5 模拟值误差检验

表 13 列出了皇甫川、窟野河、无定河、三川河、马连河、清涧河等 6 条大中型河流输沙量实测值与模拟计算值。在水文预报上一般认为,实测值与计算值之间的误差 $<20\%$ 为合格,根据这一标准,则合格率为 $53.1\% \sim 67.7\%$,模型具有较高的精度。如果将控制雨量站适当加密,估计模型的精度还会有所提高。

6 结 论

(1)通过对黄土高原主要产沙河流年输沙量与流域内各控制雨量站历年汛期(6~9 月)一日最大降水量之间的统计分析表明,一日最大降水量极值是决定河流年输沙量的主要因素。所得一些河流的输沙量模拟模型具有较高的精度,其模拟值的合格率可达 $53.1\% \sim 67.7\%$ 。

表 13 各主要河流年输沙量实测值与计算值之比较 亿 t

时序 (a)	皇甫川			窟野河			无定河		
	实测值	计算值	误差(%)	实测值	计算值	误差(%)	实测值	计算值	误差(%)
1956	1.030	0.719	30.2	0.718	0.843	-17.4			
1957	0.290	0.258	11.0	0.723	0.831	-14.9	0.930	1.472	-58.3
1958	0.604	0.498	17.5	1.180	1.397	-18.4	3.160	2.544	19.5
1959	1.710	1.657	3.0	3.030	2.920	3.6	4.400	3.718	15.5
1960	0.262	0.634	-135.0	0.172	1.034	501.1	0.886	1.254	-41.5
1961	0.911	1.328	-45.8	2.710	1.791	33.9	1.930	2.119	-9.8
1962	0.097	0.227	-134.0	0.232	0.324	39.7	0.683	1.336	-95.6
1963	0.356	0.482	-35.4	0.482	0.471	2.3	1.850	1.975	-6.8
1964	0.525	0.601	-14.5	1.160	0.979	15.6	3.100	2.799	9.7
1965	0.052	0.130	-149.0	0.053	0.101	-92.0	0.426	0.484	13.6
1966	0.603	0.520	13.8	3.010	2.886	4.1	3.750	3.839	-2.4

续表 13

1967	1.540	1.441	19.2	2.410	2.390	0.3	2.730	3.016	-10.5
1968	0.247	0.223	9.7	0.979	0.809	17.4	1.590	1.666	-4.8
1969	0.444	0.509	-14.6	0.640	0.949	-48.3	1.720	1.432	16.7
1970	0.598	0.615	-2.8	1.990	1.799	9.6	2.560	1.415	114.5
1971	0.507	0.518	-2.1	1.980	2.340	-18.2	1.340	1.420	6.0
1972	0.899	0.834	7.3	0.830	0.456	45.1	0.596	1.842	-213.6
1973	0.588	0.392	33.3	0.789	1.188	-50.5	0.684	0.576	17.1
1974	0.300	0.360	-20.0	0.524	0.833	-54.0	0.526	0.074	85.9
1975	0.170	0.369	-117.0	0.423	1.225	-189.6	0.346	0.411	-18.8
1976	0.591	0.624	-5.6	2.880	2.913	-1.1	0.316	0.218	31.0
1977	0.260	0.391	-50.4	1.380	1.414	-2.5	2.690	2.931	-9.0
1978	0.860	0.947	-10.1	1.420	1.239	12.7	1.920	1.692	11.9
1979	1.470	1.374	6.5	1.770	1.943	-9.8	0.619	0.691	-11.6
1980	0.104	0.123	18.3	0.139	0.458	-229.5	0.446	0.400	10.3
1981	0.770	0.325	57.8	0.741	0.731	1.30	0.653	0.822	-19.6
1982	0.439	0.317	27.8	0.521	0.469	10.0	0.611	0.275	55.0
1983	0.237	0.386	-62.9	0.292	0.431	-47.6	0.254	0.412	-62.2
1984	0.496	0.278	44.0	0.780	0.893	-14.5	0.410	0.999	-143.7
1985	0.258	0.374	-45.0	1.510	0.801	47.0	0.728	0.213	70.7
1986	0.580	0.415	28.4	0.200	0.381	-90.5	0.240	0.197	17.9
1987	0.600	0.718	19.7	0.330	0.385	-16.7	0.560	0.610	-8.9
1988	1.220	1.187	2.7	1.280	1.025	19.9	1.02	1.111	-8.9
合格率			54.5			60.6			65.6
时序	三川河			马连河			清涧河		
(a)	实测值	计算值	误差(%)	实测值	计算值	误差(%)	实测值	计算值	误差(%)
1952				0.458	0.549	-19.9			
1953				0.823	0.844	-2.6			
1954				0.459	0.550	-19.8			
1955				0.994	1.128	-13.5			
1956				2.040	1.133	44.5	0.775	0.817	-5.4
1957	0.151	0.176	-16.6	0.608	0.871	-43.3	0.158	0.185	-17.5
1958	0.414	0.377	8.9	2.820	2.287	18.9	0.616	0.387	37.2
1959	0.835	0.695	16.8	2.04	2.389	-17.1	1.230	1.186	3.6
1960	0.046	0.164	-256.5	0.619	0.696	-12.4	0.281	0.277	1.4
1961	0.140	0.065	53.6	0.995	0.966	2.8	0.195	0.164	15.9
1962	0.408	0.207	49.3	0.906	0.996	9.9	0.197	0.278	-41.1
1963	0.309	0.368	-19.1	0.844	0.878	4.0	0.246	0.269	-9.3
1964	0.336	0.333	0.9	3.490	3.445	1.30	1.160	0.996	14.1
1965	0.068	0.145	-113.2	0.231	0.479	-107.3	0.104	0.210	-101.9
1966	0.826	0.686	16.9	2.670	2.377	11.0	0.713	0.630	11.6
1967	0.573	0.465	18.8	0.608	0.634	-4.3	0.405	0.383	5.4
1968	0.125	0.052	58.4	1.450	1.315	9.3			
1969	0.560	0.292	47.9	0.971	0.801	17.5			
1970	0.232	0.236	1.7	1.500	1.992	-32.8	0.627	0.545	13.1
1971	0.096	0.255	-165.6	1.060	1.834	-73.0	0.516	0.361	30.0
1972	0.117	0.293	-150.4	0.243	0.484	-99.2	0.239	0.200	16.3
1973	0.158	0.182	15.2	2.470	1.754	29.0	0.441	0.442	0.2
1974	0.160	0.291	-81.9	0.889	0.402	54.6	0.198	0.160	19.2
1975	0.161	0.190	18.0	0.934	1.279	-36.9	0.106	0.150	-41.5

(下转第 55 页)

2、显示了同一元素在不同成土条件下迁移能力的变化。在林地土壤中,大多数元素较在其它土类中相对活跃。这与森林土壤较优越的水分条件,及较丰富的土壤有机质的积累与分解,土壤溶液相对偏酸性等土壤环境条件有关。因在这种条件下有利于大多数土壤元素的析出与迁移。

3、在黄土高原土壤中迁移能力较强的元素,除在较干旱的成土环境中易于迁移并在表层富集的 Hg、Se 外,还有碱土金属 Sr、Ca、Mg。值得注意的是在土壤剖面上 Sr、Ca、Mg 的迁移强度较表生环境中活跃的 K、Na 还要强一些。这可能反映了黄土物质在沉积前后已经过了一定的风化成土过程,K、Na 等易于从风化中析出的元素曾发生过强度可观的迁移与流失,在黄土母质发育为现代土壤的过程中,碱土金属 Sr、Ca、Mg 在剖面上的淋溶积聚再分配表现得比 K、Na 更为显著。两者的这种差异为黄土高原土壤的一个重要地球化学特征。

4、进一步显示了大多数铁族元素或具有亲铁性质的元素,几乎在所有土类中都表现得相对稳定,而亲铜元素如 Hg、Zn、Cd、U 等却相对活跃。这与两元素的化学性质所决定的在黄土高原弱碱性条件氧化环境中的表生地球化学行为相一致。

5 结 语

通过上述讨论,可以看出本文利用相对富集系数计算剖面元素 Q 值的方法,可对元素在剖面上的相对迁移强度进行分类,且分类结果总体上与元素在成壤环境中的表生地球化学行为相符。对土壤剖面元素迁移强度的定量研究,除可揭示更为丰富的土壤发生学信息外,也有可能为研究黄土高原环境气候的变迁提供土壤地球化学佐证。

(上接第 50 页)

续表 13

1976	0.131	0.108	17.6	0.689	0.629	8.7	0.087	0.343	-294.3
1977	0.465	0.619	-33.1	3.090	2.993	3.1	1.170	1.284	-9.7
1978	0.254	0.124	49.4	1.160	1.322	-14.0	0.505	0.600	-18.8
1979	0.067	0.105	-56.7	0.751	0.853	-13.6	0.384	0.349	9.1
1980	0.049	0.046	6.1	0.696	0.786	-12.9	0.130	0.120	7.7
1981	0.117	0.096	17.9	0.980	1.470	-50.0	0.087	0.317	-262.1
1982	0.037	0.041	-10.8	0.416	0.480	-15.4	0.107	0.097	9.3
1983	0.020	0.146	-630.0	0.339	0.896	-164.3	0.061	0.123	-101.6
1984	0.043	0.037	14.0	1.450	0.844	41.7	0.053	0.141	-166.0
1985	0.104	0.094	9.6	1.120	0.411	63.3	0.112	0.047	58.0
1986	0.110	0.016	85.5	0.648	0.603	6.9	0.081	0.056	19.8
1987	0.058	0.215	-270.7	0.492	0.546	11.0	0.220	0.201	8.6
1988	0.345	0.296	14.2				0.390	0.380	2.6
合格率			53.1			63.9			67.7

(2)流域产沙预报是一个复杂的系统,而影响流域产沙的一些主要因素(诸如降水),具有随机性,这就更增加了预报的难度。从本文分析来看,若要提高预报的合格率,必须增加流域控制雨量站的密度,并重视对暴雨点面关系的研究。

参考文献

1 蒋定生等. 黄土高原丘陵区水土流失规律与水土保持措施优化配置研究. 水土保持学报,1992,6(3)
2 刘元宝等. 黄河水沙时空图谱. 北京:科学出版社,1993
3 叶青超等. 黄河流域环境演变与水沙运行规律研究. 济南:山东科学技术出版社,1994