

黄河中游侵蚀量及趋势预测^{*}

景 可 李钜章 李凤新

(中国科学院地理研究所, 北京 100101)

提 要 本文研究了黄河中游黄土的侵蚀形态类型区划分指标与原则, 将黄河中游划分出 4 个 I 级区 20 个亚区, 约 556 个类型区图斑。利用黄河中游 155 个“闷葫芦”淤地坝沉积泥沙资料和相关侵蚀因子建立了侵蚀变权模型, 用该模型计算了每个图斑的侵蚀量。同时还研究了侵蚀因子变化趋势, 再利用侵蚀变数模型预测了下世纪中叶黄河中游的侵蚀量。

关键词 侵蚀量 趋势预测 黄河中游

黄河中游自 50 年代以来, 开展侵蚀产沙及治理的专题研究, 在许多方面取得举世瞩目的成果, 但侵蚀研究中的核心问题, 区域侵蚀强度的确定方法至今尚未解决。尽管这方面做过大量工作, 但多数是雷同于土壤侵蚀通用方程 (USLE)^[1]。由此, 黄河中游侵蚀量长期沿用输沙量替代。随着国民经济的发展, 水土保持规模扩大, 可持续发展研究的深入, 用输沙量替代侵蚀量的现象越来越不适应生产形势的需要。为此笔者研究了侵蚀量宏观计算模型, 用该模型计算了黄河中游的侵蚀量, 并进行了侵蚀量的趋势预测。

1 侵蚀形态类型区划分

侵蚀形态类型区划分以简便、实用的角度选择划分指标, 使选择的指标既能满足形态类型区划分的要求, 又具可操作性。为此选择海拔高度 (同时考虑相对高度) 划分 I 级类型区; 以形态类型的物质组成与形态特征划分 II 级类型区, 在 II 级类型区划分的过程中充分考虑到植被因素。当同一级类型区中植被覆盖存在明显差异时, 再分亚区。类型区指标确定以后, 就可在 1:50 万地形图上进行形态类型区的划分。黄河中游形态类型区分类系统如表 1, 类型区图斑图见图 1, 黄河中游共划分出 556 个类型区图斑。

2 侵蚀量计算模型

2.1 侵蚀量计算方法确定

侵蚀量 (或侵蚀强度) 是指单位面积上流失的土壤量。侵蚀量计算的方法很多, 大致有土壤发生学法、根据土壤发育层次和保留层次比较确定侵蚀量; 地貌标志法, 利用侵蚀地貌形态要素判断侵蚀强度。所有这些只能得到侵蚀的定性认识, 达不到定量目的。随着

* 国家自然科学基金资助项目, 批准号 49571012 (Supported by the National Natural Science Foundation of China, No. 49571012) 及中国科学院水土保持研究所土壤侵蚀及早作农业开放实验室基金项目研究成果。

来稿日期: 1997-09-09; 收到修改稿日期: 1997-10-05。

表 1 黄河中游形态类型区分类系统

Tab. 1 Classification system of landform type in the middle Yellow River Basin

指 标		海拔高度 /m	相对高度 /m	地表组成物	形态特征
山 地 (A)	石质高山(A ₁)	>3 500	>2 000	基岩	起伏大,坡陡
	石质中山(A ₂)	1 000~3 500	1 000~500	基岩	起伏中等,坡度较大
	低 石质低山(A ₃)	500~1 000	500~200	基岩	起伏较小,坡面较缓
	山 土石低山(A ₄)	500~1 000	500~200	表层为土状堆积物	起伏较小的浑园状山地
丘 陵 (B)	石质丘陵(B ₁)		<200	基岩	切割不深,顶面浑园、坡缓
	土石丘陵(B ₂)		<200	表层红土或其它土状	切割不深,顶面浑园、坡缓
	梁状丘陵(B ₃)		<200	黄土	顶部长条状延伸,切割深
	峁状丘陵(B ₄)		<200	黄土	顶面丘状或馒头状
	黄 梁峁状丘陵(B ₅)		<200	黄土	梁峁相间
	土 塬状丘陵(B ₆)		<200	黄土	地面平坦或缓倾斜
	丘 宽谷梁峁丘陵(B ₇)		<200	黄土	两列梁峁之间为宽谷
	梁塬丘陵(B ₈)		<200	黄土	顶面宽平的长条状地形
	残塬丘陵(B ₉)		<200	黄土	地面强烈切割的塬
	梁状缓坡丘陵(B ₁₀)		<200	黄土	坡度较缓的梁状地形
台地	黄土高台地(C ₁)			黄土	地面平坦前缘有陡坎
(C)	黄土低台地(C ₂)			黄土	地面平坦前缘有陡坎
平 原 (D)	河谷平原(D ₁)		<30	黄土及其他土状物	地面平坦有微起伏
	冲积平原(D ₂)		<30	土状堆积物	地面平坦
	冲洪积平原(D ₃)		<30	土状及砾土	地面倾斜
	剥蚀平原(D ₄)		<30	砂或基岩	地面波状起伏

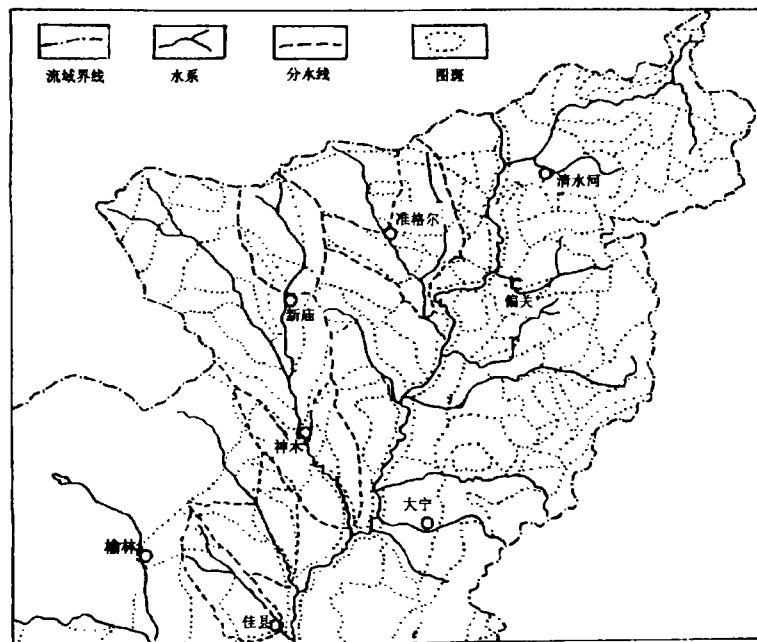


图 1 黄河中游类型区图斑 (部分)

Fig. 1 Map of erosional type in the middle Yellow River Basin (part)

科学技术的发展,确定侵蚀量方法不断地增多,如分析比较不同期遥感图象资料可以得到比较时段内的侵蚀强度定量数据,但受到资料系列、比例尺和区域规模的限制,目前尚属小范围的实验阶段;地图比较法,理论上也可以定量的反映侵蚀量,但同样要受到比例尺、制图精度的制约;重复精密水准测量也受到微地形和规模的限制;目前新近发展起来的放射性同位素 ^{137}Cs 测定侵蚀量,受到背景值确定的困难,使用也有难度;稀土元素示踪法虽无背景值的影响,但受到投放与收集技术的限制。以上方法都存在这样或那样的问题,而且使用的范围都限于坡面侵蚀量测定,无法用于流域侵蚀量的测定,尤其是沟谷侵蚀为主的黄土高原则更是如此。

大范围内侵蚀量的测定使用比较多的是用输沙量替代。但由于目前水文测站技术还存在不少问题,如推移质测不到,还有泥沙输移比的问题,即使泥沙输移比是1的条件下,由于测站控制着不同的侵蚀形态类型,结果也只能求得流域平均输沙量。到目前为止,真正能够用于计算中小流域侵蚀量的计算模型还不多见。笔者通过多因子分析建立了侵蚀变权模型,可用于较大范围侵蚀量的计算。

2.2 多因子综合分析与建模

2.2.1 因子指标选择与指标体系建立 “指标选择”是从众多影响侵蚀强度的若干因子中选取,而且这些因子能在大范围中获得。据此,通过对侵蚀环境系统和侵蚀机制的综合分析,选取了植被盖度(Z_r)、地表组成物(W_r)、沟谷密度(G_m)、切割深度(Q_d)、汛期降水量(P_r)、 $>15^\circ$ 的坡耕地占土地面积的百分数($G_{>15}$)等因子。建立“指标体系”则是使单位不同的定量指标和定性指标的定量化,能够统一为对水蚀强度影响上可以互相对比的尺度。由于所选取的6个因子对水蚀强度的影响各不相同,具有不同关系。要使各因子间能够相互对比,就不单要使各因子的指标有相同的数量级,而且还要消除各因子与目标的不同关系的影响,“使各因子与目标都有线性关系。由此首先确定目标指标,为使估算的水蚀强度(侵蚀模数 T_m)无论其数量大小均具有相近的相对精度,取 $\log(T_m)$ 为目标。并通过对侵蚀机制的分析,总结已有的研究成果,建立植被指标(Z_r 由植被盖度通过指标标度表2转化)和地表组成物指标(W_r 由指标标度表3确定,地形指标 $[D_{m,r}=1.5/(0.9/G_m+10/Q_d)]$ 、降水指标 $[P_r=\text{Ln}(P_r)]$ 、人为因子指标 $[R_r=\log(1+1.5G_{>15}/100)]$ 等组成指标体系。

表2 植被因子指标标度

Tab. 2 Index of vegetation factor

植被盖度/%	<10	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70	>70
植被指标 Z_r	10	9.5	6.5	4	3	2.5	2.0	0.1

表3 地表物质因子指标标度

Tab. 3 Index of ground surface material

岩性	砒砂岩	沙黄土	黄土	粘黄土	红土	红砂岩	其他岩
地表物质指标	10	7.5	6.5	5.5	4.0	3	1

2.2.2 侵蚀模型 充分利用黄河中游不同类型区具有众多淤地坝的优势,收集了大量淤地坝淤积泥沙量及其相关资料,从中筛选出 155 个“闷葫芦”淤地坝。由每个坝的控制面积、总淤积量、淤积年限计算出其坝的年均侵蚀模数,作为实测的平均侵蚀强度,为建模的基础资料。分别作各因子与侵蚀强度分析,然后作综合分析,建立如下的侵蚀变权模型:

$$\log(T_m) = 2.35 + 6.31/(5/D_{mx} + 9/Z_x + 9/W_x + 3/P_x) + R_x \quad (2-1)$$

$$r = 0.83 \quad F = 344.44$$

式中符号意义同上。

3 侵蚀量计算

3.1 侵蚀量计算

用上述模型对流域各类型区图斑(556 个)进行侵蚀强度计算之前,首先是在每个图斑上采集参加模型计算的各侵蚀因子,将采集到的各因子赋值和量化,再将量化值代入上述模型,计算出每个图斑的侵蚀模数。由侵蚀模数乘以图斑面积,获得该图斑侵蚀总量,黄河中游 556 个图斑侵蚀量总和是 $14.655 \times 10^8 \text{ t/a}$ (1970 年~1989 年)。

3.2 不同空间尺度模型应用检验

为了验证计算值的精度,对此进行了不同空间尺度的模型应用检验。检验结果如下:

3.2.1 全流域的应用检验 运用模型计算的年侵蚀量是 $14.655 \times 10^8 \text{ t/a}$,然后将此与还原后的输沙量 $13.641 \times 10^8 \text{ t/a}$ 进行比较。两者相比侵蚀量大于输沙量 $1.014 \times 10^8 \text{ t/a}$,其误差为 7.4%。

3.2.2 区间流域的应用检验 将黄河中游划分两个大的区域,河口镇至龙门区间,龙门至三门峡区间。分别统计这两个区间的各图斑的计算侵蚀量,然后与同区间的输沙量比较,见表 4。比较的结果是河口镇至龙门,龙门至三门峡区间的误差分别是 10.8%和 3.6%。

表 4 黄河中游侵蚀量与输沙量区间比较

Tab. 4 Comparison between the measured and calculated sediment yield from the class II zones in the middle Yellow River

区间	时段	实测输沙量	水库拦沙量	淤地坝拦沙量	引沙	合计	合计平均	计算侵蚀量	侵蚀量减产沙量	误差/%
河口镇至龙门	1970~1979	7.543	0.625	0.729	0	8.897	7.081	7.844	0.763	10.8
	1980~1989	3.708	0.510	1.048	0	5.266				
龙门至三门峡	1970~1979	6.06	1.167	0.162	0.283	7.672	6.574	6.811	0.237	3.6
	1980~1989	4.288	0.23	0.646	0.283	5.447				

3.2.3 典型流域的计算模型应用检验 在黄河中游选择了淤地坝相对少的 15 个中小流域,它们都有实测输沙量资料,分别对每个流域的计算侵蚀量与实测输沙量进行应用检验,见表 5 和图 2。可以看出大部分流域的计算侵蚀量与流域输沙量的误差都 $<10\%$,而且多数是计算侵蚀量大于输沙量,这是合理的。在这些流域中只有神木至温家川之间输沙量与计算侵蚀量误差达到 -65.1% ,其原因还有待于进一步研究。

表 5 黄河中游流域实测输沙量与计算侵蚀量比较

Tab. 5 Comparison between the measured and calculated sediment yield from the zones in the middle Yellow River

流 域	控制站	集水面积 /km ²	实测输沙模数 [*] /(t/km ² ·a)	计算侵蚀模数 [*] /(t/km ² ·a)	差值	误差 /%
皇甫川	皇 甫	3 246	16 183	15 334	-849	-5.5
牛 川	新 庙	1 527	11 575	12 651	1 056	8.3
秃尾河	高家堡以下	1 158	8 150	8 893	743	8.3
孤山川	高石崖	1 272	16 730	17 015	285	1.8
窟野河	神木以下	1 347	26 272	15 910	-10 362	-65.1
清涧河	子 长	913	8 377	9 195	818	8.9
湫水河	林家坪	1 989	8 100	8 875	776	8.7
偏关河	偏 关	2 040	5 658	6 427	769	11.97
洛 河	吴 旗	3 842	8 321	9 094	773	8.5
周 河	志 丹	747	13 691	13 310	-381	-2.86
马连河	洪 德	4 640	6 481	7 136	655	9.18
茹 河	彭 阳	1 544	5 033	5 416	383	7.1
葫芦河	北 峡	2 840	2 199	2 512	313	12.4
散渡河	甘 谷	2 484	6 634	7 304	670	9.2
渭 河	首 阳	833	6 802	7 059	257	3.7

* 1970 年~1989 年平均。

3.3 侵蚀量的空间分布

运用上述模型计算得到黄河中游每个类型区图斑的侵蚀量。由此编绘了黄河中游侵蚀模数等值线图。图 3 反映出的黄河中游侵蚀强度空间分布的基本规律是：

(1) 六盘山和吕梁山是黄河中游侵蚀强度区域分界线，六盘山以西和吕梁山以东两部分地区侵蚀模数都在 $5\,000\text{ t/km}^2\cdot\text{a}$ 以下，只有局部地块侵蚀模数大于 $5\,000\text{ t/km}^2\cdot\text{a}$ 。

(2) 六盘山和吕梁山之间是黄河中游侵蚀产沙的核心区；在区域内又大致以渭河北山、子午岭为界分成南北两大部分，此线以北侵蚀模数由延安的 $6\,500\text{ t/km}^2\cdot\text{a}$ 左右，增至到绥德、米脂的 $15\,000\text{ t/km}^2\cdot\text{a}$ 左右，再向北至府谷、准格尔旗的 $18\,000\text{ t/km}^2\cdot\text{a}$ 。此线以南的侵蚀模数一般都小于 $1\,000\text{ t/km}^2\cdot\text{a}$ 。

(3) 中小流域内侵蚀也存在空间差异，中游的侵蚀最强，其次是下游，上游侵蚀较弱。

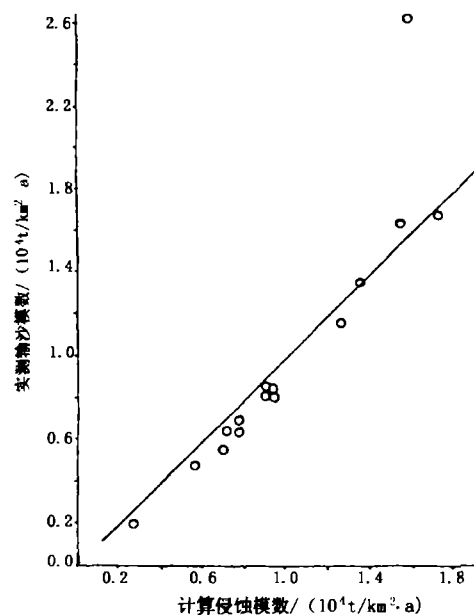


图 2 流域输沙量与计算侵蚀量关系图

Fig. 2 Relation between measured and calculated sediment yield from the dasins

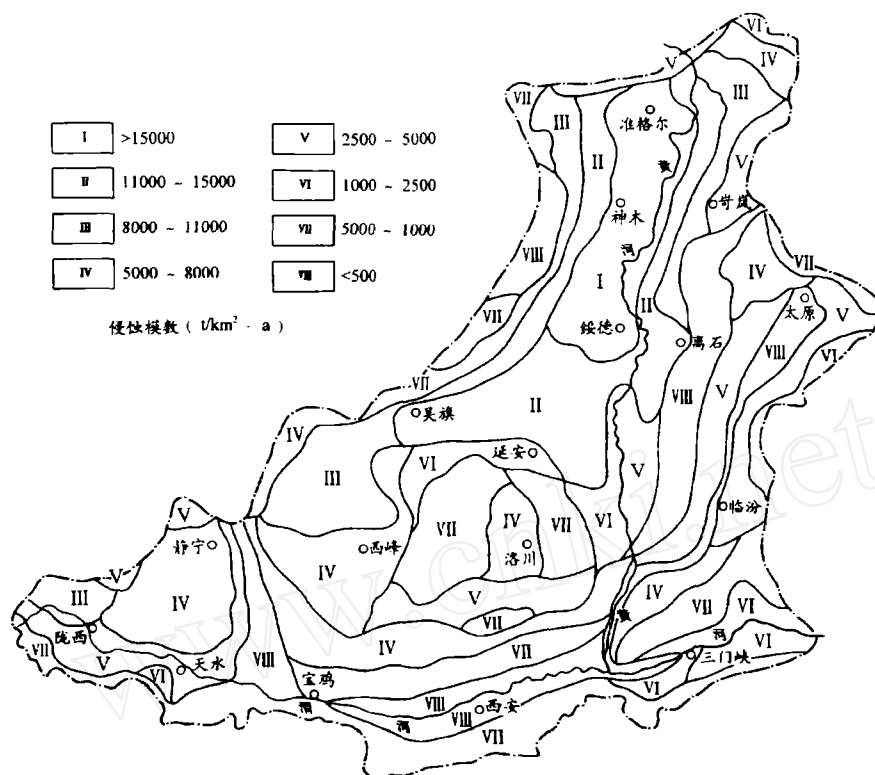


图 3 黄河中游侵蚀模数等值线图

Fig. 3 Contour map of erosional module of the middle Yellow River Basin

4 侵蚀量趋势预测

4.1 侵蚀因子趋势预测^①

侵蚀的产生是多种因素相互作用相互制约的结果。侵蚀量的预测,首先是要对侵蚀因子进行预测。为了更好地预测参与模型计算的所有因子值,将这些因子分为静态因子和动态因子;静态因子是指在一个相当长的时段内不发生变化,或变化小的因子。动态因子是指在不长的时间内就可能发生明显变化的那些因子。参与模型计算的因子中,地形因子与地表组成物质为静态因子,预测时段值相同于现在值,而降雨因子、植被因子、人为因子属动态因子。

4.1.1 降雨因子值的确定 降雨因子受天文因素和局地条件的影响,存在不同周期性的变化,短周期贯穿于长周期之中,使得降雨周期性复杂化。黄河中游降雨周期性变化有 130、53 年的长周期,还迭加 23 年、11 年和 3 年的准周期^[2]。又根据 1 500 年以来气候变化的长周期和短周期迭加的研究认为在下世纪中叶处于相对湿润期^[3],降雨量相当于 50 年代和 60 年代的降雨量,因而降雨因子值用 50 年代和 60 年代的平均值。

① 预测阶段为下世纪中叶。

4.1.2 植被因子值的确定 下世纪中叶理想植被盖度到底达到什么程度,其中牵涉到众多社会因素,如国民经济实力、人口与粮食的供求矛盾、环境保护意识等等。本文建立在粮食自给的原则上,预测下世纪中叶的植被盖度,具体过程如下:

$$R = R_{86}(1 + a)^n \quad (4-1)$$

式中 R 为下世纪中叶人口总量; R_{86} 为 1986 年人口总量; a 为人口增长率; n 是预测年数。下世纪中叶 R 人口需要的粮食 (L) 为:

$$L = R \cdot I \quad (4-2)$$

式中 I 为下世纪中叶人均粮食定为 400 kg, 即

$$L = 400R$$

设生产 L 粮食需要的土地 (T):

$$T = 400R/[t \cdot (1 + b)^n]$$

式中 t 为粮食平均亩产 (kg); b 为粮食增长率; n 为年数。可以用于植被治理的土地 T_i :

$$T_i = T_z - T - T_f$$

式中 T_z 为土地总面积; T_f 为非农业用地; 最大林草面积 (G), 即可以用于造林种草的面积占总土地面积的比例:

$$G = T_i/T_z$$

通过以下分析, 由此得到下世纪中叶的林草盖度 (G_z)

$$G_z = C + X \quad (4-4)$$

式中 C 为治理植被盖度; X 为现有植被盖度; G_z 与 G 可能出现以下三种关系:

$$G - G_z = 0$$

$$(G - G_z) < 0$$

$$(G - G_z) > 0$$

(1) 与 (2) 说明下世纪中叶可以较好地完成流域的治理面积; (3) 式说明按现在的治理进展, 到下世纪中叶还不能完成治理任务。通过以上分析与计算, 最后得到下世纪中叶每个类型图斑的植被因子值。

4.1.3 人为因子值的确定 本文选择 $>15^\circ$ 的坡耕地与总土地面积比为人为因子指标。之所以要选择 $>15^\circ$ 的坡耕地, 这是考虑到黄河中游的侵蚀产沙主要是来自坡耕地; 坡耕地中主要又是来自 $>15^\circ$ 坡耕地, 这已被观测资料所证实。下世纪中叶 $>15^\circ$ 坡耕地的数量是通过以下程序得到:

首先采集到 $<15^\circ$ 的土地面积 (H), 而 $<15^\circ$ 的耕地面积为 H_z

$$H_z = (H - H_f) \quad (4-5)$$

式中 H_f 为 $<15^\circ$ 的非农业用地面积。某一地区耕种 $>15^\circ$ 的土地及耕种的数量, 由下列情况决定, T 和 H_z 的关系有以下三种情况:

$$T = H_z$$

$$T < H_z$$

$$T > H_z$$

说明不增加非农业用地的情况下, 可以不耕种 $>15^\circ$ 的坡耕地; 为了满足粮食需要, 仍要耕种 $>15^\circ$ 的坡地。耕种 $>15^\circ$ 坡地数量取决于 T 与 H_z 的差值; 设差值为 H_d , 那么耕种

>15°的坡耕地面积 H_d 占总土地面积 (T_z) 的百分比 (R_r) 为:

$$R_r = H_d / T_z \quad (4-6)$$

式中 R_r 就是预测的人为因子值。

4.2 侵蚀量预测

将上述动态因子的预测值和静态因子值归一、量化并赋值, 然后代入上述变权模型。由模型计算得到每个图斑的预测侵蚀量。本文预测下世纪中叶侵蚀量的前提条件是在粮食自给和不增加非农业用地的条件下, 黄河中游到下世纪中叶的年侵蚀量为 $12.286 \times 10^8 \text{ t/a}$ (表 6)。

表 6 黄河中游下世纪中叶侵蚀量 (10^8 t/a)

Tab. 6 Sediment yield from the middle Yellow River Basin in the middle of the next century

区 域	侵蚀区域	现状侵蚀量	下世纪中叶侵蚀量	(I) - (II)	(I) - (II)
		(I)	(II)	数量 (II)	II / I (%)
河口镇—龙门	全区	7.844	5.847	1.966	25.1
	其中坡耕地*	0.981 2	0.778 7	0.203	20.6
龙门—三门峡	全区	6.811	6.439 3	0.372	5.5
	其中坡耕地*	0.782	1.126 6	-0.345	-44.1
中游	全区	14.655	12.286	2.369	16.2
	其中坡耕地*	1.764	1.905	0.141	8.0

* 是指>15°的坡耕地。

参 考 文 献 (References)

- Kirkby M J et al. Soil Erosion. John Wiley and Sons Ltd, 1980. 28~68.
- Wu Xiangding et al. Changes in Environment and Runoff and Sediment Yield in the Yellow River Basin. Beijing: Meteorology Press, 1993. 21~32. (In Chinese) [吴祥定等, 历史时期黄河流域环境变迁与水沙变化. 北京: 气象出版社, 1993. 21~32.]
- Chen Jiaqi. Historical testing of the 1500 years chronological series of drought in the middle Yellow River Basin and the major floods. *Yellow River*, 1993, 15(12): 8~12. (In Chinese) [陈家其, 黄河中游 1500 年旱序列的历史检验与黄河大洪水. 人民黄河, 1993, 15(12): 8~12.]

EROSION YIELD FROM THE MIDDLE YELLOW RIVER BASIN AND TENDENCY PREDICTION

Jing Ke Li Juzhang Li Fengxing

(Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

Key words sediment yield, tendency prediction, middle Yellow River Basin

Abstract

The principle and indexes for dividing zones of erosional landform type are discussed in the paper. Based on the principle and indexes, the whole middle Yellow River Basin is divided into 4 zones of 1 class, 20 class II zones, and 556 type patches. Using data of 155 sediment detention

barriers which check all oncoming sediment and water flow, a erosion model with different weight is constructed. The model relates the amount of sediment deposited in the barriers with 5 factors influencing erosion in the basins upstream of the barriers.

The yield of sediment erosion of every type patches was calculated by the model, and a map of erosional module contour was edited. It is found that most of the error between the calculated and measured sediment yield in various space scales are about $\pm 10\%$. The total sediment yield of the patches is 14.655×10^8 t/a in the period of 1970~1989.

The spatial distribution of erosion intensity is revealed by the map clearly. It is lower than $5\,000\text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$ to the west of Liupan Mt., and to the east of Luliang Mt. In the area between Liupan and Luliang Mts, the erosion intensity declines southward from over $18\,000\text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$ at Jungar and Fugu, $15\,000\text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$ at Suide and Mizhi, $6\,500\text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$ at Yan'an, to lower than $1\,000\text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$.

The landform and ground surface material are defined as static factors, vegetation, precipitation and human impact as dynamic ones in the paper. Under the prerequisite of self-sufficiency in grain in the area, the values of dynamic factors in the middle of the next century are predicted for every patches. The sediment yield from these patches are reckoned by using the same model, and the total yield is 12.28×10^8 t/a in the middle of the next century.

作者简介

景可, 研究员, 1939年12月生, 1965年毕业于南京大学地理系, 长期从事侵蚀地貌、河流地貌、区域地貌及自然环境领域的研究, 发表有关专著、论文及图件100余篇(部)。