

## 近 50 年来黄土高原中部水土流失的时空演化特征

索安宁<sup>1,2</sup> 赵文<sup>2</sup> 王天明<sup>2</sup> 袁飞<sup>2</sup> 熊颖<sup>2</sup> 葛剑平<sup>2</sup>

(1 国家海洋环境监测中心 2 北京师范大学生态学研究所)

**摘要:**黄土高原是我国水土流失最严重的区域之一。近 50 年来,随着全球气候变化和人类活动对地表的影 响,水土流失发生了巨大变化。为了揭示黄土高原水土流失的时空演化特征,该文选择了黄土高原中部 4 种典型地貌区域,以年径流深度和年侵蚀模数为水土流失过程参数,采用波谱分析方法和多元回归分析方法对该地区水土流失的周期和演化趋势进行了探讨,分析了不同地貌区域的水土流失特征及近 50 年来各地貌区域水土流失的演化过程。结果表明,近 50 年来,黄土丘陵沟壑区水土流失无明显变化,黄土残塬沟壑区和水土流失较轻的土石山区水土流失总体上都存在着不同程度的持续减弱,而水土流失较轻的黄土山区则表现出总体递增的趋势。黄土高原各地貌区都存在 20~21 a、6~7 a 和 2~4 a 的变化周期。周期外延和多元回归的混合模型,可以很好地模拟预报黄土高原水土流失的周期波动与总体递变相叠加的演化趋势,可作为黄土高原水土流失监测与预测的有效方法。

**关键词:**黄土高原, 水土流失, 地貌区域, 演化趋势

中图分类号: S157.1; TV211.11 文献标识码: A 文章编号: 1000-1522(2007)01-0090-08

SUO An-ning<sup>1,2</sup>; ZHAO Wen-zhe<sup>2</sup>; WANG Tian-ming<sup>2</sup>; YUAN Fei<sup>2</sup>; XIONG Ying<sup>2</sup>; GE Jian-ping<sup>2</sup>.

**Spatial-temporal succession characteristics of soil and water loss in the central Loess Plateau during the last 50 years.** *Journal of Beijing Forestry University* (2007) 29(1) 90-97 [Ch., 24 ref.]

1 National Ocean Environment Monitor Center, Dalian, Liaoning Province, 116023, P. R. China;

2 Institute of Ecological Science, Beijing Normal University, 100875, P. R. China.

The Loess Plateau is one of the most serious regions of soil and water loss in China. Soil and water loss has changed extremely with the global climate change and rebuilding of LUCC in the last 50 years. Depth of annual runoff and annual erosion modulus were chosen as the indicators of soil and water loss, and the succession of soil and water loss in four typical morphogenetic zones in the central Loess Plateau during last 50 years was analyzed by Fourier transform. Based on this, period models were created to predict soil and water loss by spectrum analysis. The results showed that soil and water loss did not change significantly in the loess hilly zone and it decreased in the loess gully zone and loess-rock mountain zone, while it increased in the loess mountain zone. Periods of 20-21 years, 6-7 years and 2-4 years in the change of soil and water loss existed in all morphogenetic zones of the Loess Plateau. It is a good way to predict the succession trend of soil and water loss by mixed model of period change and multi-regression, and this is very useful in monitoring soil and water loss on the central Loess Plateau.

**Key words** the Loess Plateau, soil and water loss, morphogenetic zones, succession trend

黄土高原是黄河的主要产沙源地,也是中国甚至世界上水土流失最严重的区域之一,60%以上的土地存在着不同程度的水土流失,年平均泥沙流失量达到 2 000~2 500 t/km<sup>2</sup>[1]。水土流失不仅造成土地资源的损失和生态系统的衰退,影响到区域工农业生产,而且黄土高原流失的泥沙也是造成黄河下

游河床逐年增高的主要原因<sup>[2-3]</sup>。近 50 年来,随着黄土高原地表覆被变化和全球气候变化等的影响,黄土高原的水土流失发生了显著的变化<sup>[3-8]</sup>。近些年来,虽然有诸多科研单位开展了黄土高原中部水土流失变化的研究,在黄土高原侵蚀产沙规律、水沙输移变化原因、水土保持效应等方面取得了大量科

收稿日期: 2006-01-05

http://journal.bjfu.edu.cn

基金项目: “973”国家重点基础项目(2002CB111507)、“十五”国家科技攻关项目(2004BA508B22)。

第一作者: 索安宁, 博士。主要研究方向: 生态系统分析与区域评价。电话: 0411-84783329 Email: san720@sina.com 地址: 116023 辽宁省大连市沙河口区凌河路 42 号国家海洋环境监测中心。

研成果<sup>[9-14]</sup>,但对近几十年来黄土高原不同地貌区域下的水土流失演化特征尚缺乏系统的研究,而揭示不同地貌区域下水土流失的演化特征,对制定水土保持长远规划和进行水土流失动态监测等都具有重要意义。为此,本文选择了黄土高原中部4种典型地貌类型区,对不同地貌类型区近50年来的水土流失时空演化特征进行分析,以期为黄土高原中部生态建设和生态系统恢复提供依据。

## 1 研究方法

### 1.1 水土流失空间单元的划分

黄土高原中部的地貌特征在很大程度上受古地貌的控制,基底平坦而未受流水切割的部分为黄土塬,受到较轻侵蚀的塬地则变为黄土残塬,侵蚀切割形成的沟谷为黄土沟壑,一般黄土残塬和黄土沟壑交错分布,在地貌上称之为黄土残塬沟壑区,其中以陕北南部和陇东大部分区域的黄土残塬、沟壑最为典型,如董志塬、洛川塬周边。在流水和重力作用下,黄土塬地连同基底遭到严重切割的地貌则成为黄土梁、峁,加上流水侵蚀形成狭窄的黄土冲沟和宽浅的黄土涧地,使梁、峁地貌起伏,沟壑纵横,地形支离破碎,称为黄土丘陵沟壑区。在黄土高原中部的部分山地,山体较高,黄土覆盖厚度一般不超过10~20 m,在局部较陡地段则有基岩裸露,为黄土区内石质山地向黄土丘陵或残塬过渡的土石山区。在黄土高原中部的部分较高山地,山体圆浑平缓,黄土层深厚,山势高低起伏,相对落差较大,为黄土山地区,如子午岭。

当前,在黄土高原水土流失的估算和空间分异特征的研究中,能够直接应用且比较可靠、系统的实测资料是这一地区的水文观测资料。根据黄土高原中部水文站点的布设情况和水文资料的历史观测,本文选取了黄土高原中部4种主要地貌类型区域,分别用来分析黄土丘陵沟壑区、黄土残塬沟壑区、黄土山地区和土石山区4种地貌类型区近50年的径流、输沙演化特征。

### 1.2 水土流失强度计算

单站控制区:流域上游或流域支流上游水文站控制的区域,其径流、输沙的计算以该站的径流、输沙量为依据。

多站控制区:流域(支流)下游水文站与上游(支流)一个或多个水文站之间的区域,用下游水文站点的径流、输沙量减去上游水文站点的径流、输沙量作为该区域的径流、输沙量。

单站水文控制区的径流深度和侵蚀模数直接应用下游水文监测站的径流量和输沙量,除以该站的

集水区面积。多站水文控制区,用下游水文站点的径流、输沙数据减去上游各水文站点的径流、输沙数据,除以该水文控制区间的面积。

本文以处于黄土丘陵沟壑区的环江上游为黄土丘陵沟壑区的代表区,其下游水文站点为庆阳站,水文监测序列为1952—2003年;以六盘山东麓的土石山区作为土石山区的代表,下游站点为平凉站和泾川站,水文序列为1952—2003年;以陇东黄土高原典型黄土残塬沟壑区的蒲河流域作为黄土残塬沟壑区的代表,其下游水文站点为杨家坪水文站点,该水文控制区包括六盘山土石山区,其径流、输沙量为杨家坪站和泾川站之差,杨家坪站水文序列为1956—2003年;以处于子午岭山区的合水川作为黄土山地区的代表区,下游水文站点为板桥站,水文监测序列为1958—2003年。选取以上水文监测站点的年径流量和年输沙量,分别转换为年径流深度和年侵蚀模数,作为水土流失的指示指标。

### 1.3 波谱分析在水土流失周期中的应用

水文要素及影响水文要素的大气环流和气候要素的长期变化,都存在不同程度的波动现象<sup>[15]</sup>。以傅立叶分析为基础的波谱分析是研究水文波动规律的一种重要手段,用波谱分析可以有效地提取水土流失变化的时间序列周期,并且可以做水土流失的周期外延预报,在水土流失的趋势分析方面非常有用<sup>[16]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 水土流失的区域分异特征

水土流失是气候条件和地表环境综合影响的产物<sup>[17-18]</sup>。黄土高原地区地表结构复杂,不同区域的地形、植被和人类活动影响等的区域差异较大,导致黄土高原水土流失具有明显的空间分异特征<sup>[19]</sup>。对黄土丘陵沟壑区、黄土残塬沟壑区、黄土山地区和土石山区近50年来的降水与水土流失指标进行统计分析,结果见表1。

表1 黄土高原不同地貌区域的水土流失特征

TABLE 1 Characteristics of soil and water loss in different morphogenetic zones on the Loess Plateau

地貌区域	降水量/径流深度/侵蚀模数/			侵蚀级别
	mm	mm	(t·km <sup>-2</sup> )	
黄土丘陵沟壑区 (环江流域)	403.38	20.32	8 054.02	强烈侵蚀
黄土残塬沟壑区 (蒲河流域)	514.59	25.67	5 031.61	强度侵蚀
黄土山地区 (合水川流域)	546.47	18.30	1 613.61	轻度侵蚀
土石山区 (泾河上游)	623.68	68.32	4 003.18	中度侵蚀

根据黄土高原不同地貌区域1952—2003年的

多年平均水土流失统计(表1),处于黄土丘陵沟壑区的环江流域,降水量比较小,径流深度仅为20.32 mm。但由于地形破碎,黄土丘陵绵延起伏,大部分地区以坡地、丘陵为主,集中于汛期的暴雨直接冲击地表,土壤侵蚀模数高达8 054.02 t/km<sup>2</sup>,属于强烈侵蚀区;黄土残塬沟壑区的蒲河流域,降水量增大,气候相对改善,在黄土残塬基面,地形平坦,一般很少发生水土流失,而黄土沟壑边缘的陡坡地带则是水土流失主要发生带<sup>[20]</sup>,整个流域多年平均径流深度增大到25.67 mm,侵蚀模数也达到了5 031.61 t/km<sup>2</sup>,属强度侵蚀区;在黄土山地区,海拔高度相对较大,降水随海拔增加也有所增加,气候条件的改善为植被发育提供了所需的水分,植被发育较好,对地表土壤具有保护、固定作用,而植被的强大蒸发散也消耗了区域很大一部分降水,因此径流量小,侵蚀模数也小,属于轻度侵蚀区;土石山区海拔也相对较高,年降水量可达600 mm以上,是黄土高原的“湿岛”。土石山区黄土层薄,降水下渗量较小,很大一部分降水直接形成地表径流,故流域地表径流较大,但这些山区地表植被受人类活动干扰大,使地表土壤失去了应有的植被保护,土壤侵蚀也达到了中度侵蚀级别。

表2 黄土高原各地貌区域水土流失的年际统计

TABLE 2 Interannual statistics of soil and water loss in different morphogenetic zones on the Loess Plateau

地貌区域	$K_p$	频率				特少年 <0.79
		特大年 >1.46	偏大年 1.46~1.05	正常年 1.04~0.93	偏少年 0.92~0.79	
黄土丘陵沟壑区	径流深度	12.92	23.08	3.00	22.88	38.12
	侵蚀模数	20.00	16.00	0	12.00	52.00
黄土残塬沟壑区	径流深度	16.67	18.75	12.50	12.50	39.58
	侵蚀模数	14.58	18.75	2.08	10.42	54.17
黄土山地区	径流深度	10.26	20.51	15.38	25.64	28.21
	侵蚀模数	15.79	18.42	5.26	13.16	47.37
土石山区	径流深度	14.63	29.27	9.76	7.32	39.02
	侵蚀模数	23.08	12.82	10.26	7.69	46.15

注:表中  $K_p$  为径流或输沙的当年值与多年平均值的比值。

## 2.2 水土流失的演化趋势分析

河流下游出水断面口的径流、输沙能够较好地反映流域上游的水土流失特征。从图1可清楚地观察到,黄土丘陵沟壑区、黄土残塬沟壑区、黄土山地区和土石山区的水土流失呈现出不同的演化趋势。

黄土高原北部的黄土丘陵沟壑区,从20世纪50年代开始到20世纪60年代为持续的径流丰水期,到20世纪70年代径流量整体减少,只有在极少年份出现径流极大值,这种径流特征一直持续到20世纪80年代末期。20世纪90年代又普遍增大,出现新一轮的丰水期。进入2000年以后,径流又出现衰退之势。在植被相对稀少的黄土丘陵沟壑区,降水是径流的直接来源,也是土壤侵蚀的原动力<sup>[21]</sup>。时间序列分析表

明,黄土丘陵沟壑区的土壤侵蚀动态与径流的年际变化具有很好的相关性( $P < 0.005$ ),土壤侵蚀模数也表现出与径流深度相同的演化态势。

对近50年来的水土流失年际统计结果表明(表2),在黄土丘陵沟壑区,有30个以上年份的径流量、侵蚀量处于偏少、特少状态,而只有18个年份的径流量、侵蚀量为特大、偏大年,正常年占的比例极少,反映出黄土丘陵沟壑区水土流失年际变异大、发生年份集中的特点;在黄土残塬沟壑区,径流量和侵蚀量的年际变化出现分异,径流量的年际变化减小,偏少、特少年减少到25年,而正常年比例增大至12.50%;侵蚀量则仍表现出较大的年际变化,其中侵蚀量特大年的比例为14.58%,这一方面,可能与该地貌区域降水的年际变化有关,另一方面,可能与该地貌区域人类活动对地表的改造有关,如山坡梯田建设,兴修水库等;黄土山地区的水土流失年际变异相对较小,其中特大、偏大年为15~17个年份,特小、偏小年为25~30个年份,这可能与黄土山地区良好的植被覆被的调节作用有关;在土石山区,有43.9%的年份径流量处于特大、偏大年,有35.90%的年份侵蚀量处于特大、偏大年,径流量、侵蚀量正常年份的比例也分别达到9.76%、10.26%,反映出该区域的降水变异、土壤结构、植被覆被与其他地貌区域的差异。

明,黄土丘陵沟壑区的土壤侵蚀动态与径流的年际变化具有很好的相关性( $P < 0.005$ ),土壤侵蚀模数也表现出与径流深度相同的演化态势。

黄土高原中部的黄土残塬沟壑区,是黄土高原人类活动的主要集聚区。从20世纪50年代后期开始,为该区域的丰水期,径流深度最大,土壤侵蚀模数高达6 781.67 t/km<sup>2</sup>,丰水期持续到整个20世纪60年代。从20世纪70年代开始,径流深度和侵蚀模数都出现持续的走低趋势。20世纪70—90年代流域径流量和侵蚀模数都明显减少。这一方面可能与气候的周期波动有关;另一方面,可能与流域人类活动、大量的梯田建设,进而改变了流域水循环的过程有关。

子午岭黄土山地区的水土流失,与黄土丘陵沟

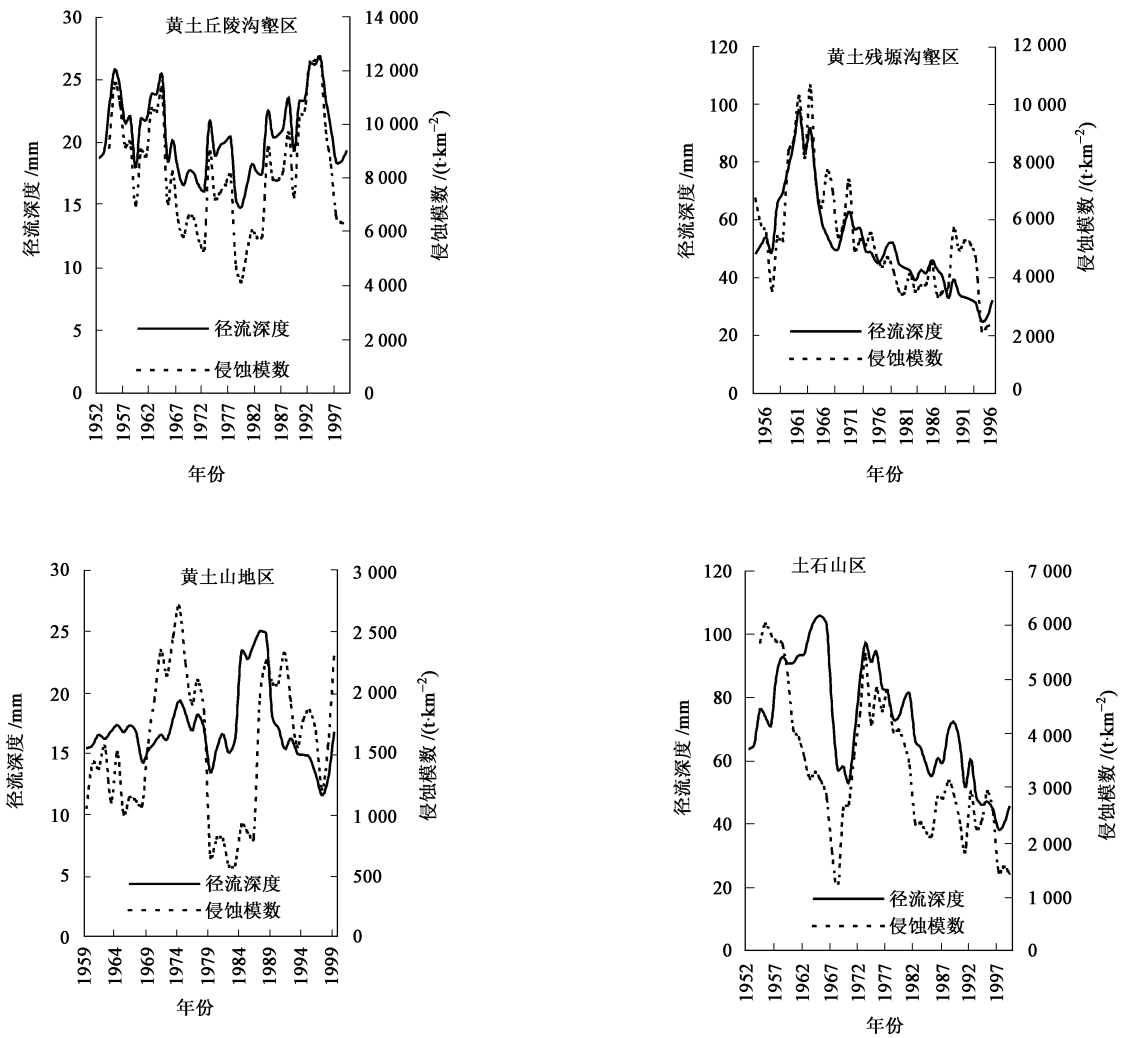


图1 黄土高原不同地貌区域水土流失的5年滑动变化趋势

FIGURE 1 Five years change trend of soil and water loss in different morphogenetic zones on the Loess Plateau

壑区和黄土残塬沟壑区的态势有所差别.从20世纪50年代开始,直到20世纪80年代中期,该区平均径流深度一直保持在13.54~19.37 mm之间.20世纪80年代后半期进入丰水期,径流深度陡然增至25 mm左右.20世纪90年代以后,又降低到20世纪80年代以前的水平.侵蚀模数则表现出很大的变化幅度,20世纪60年代和20世纪80年代侵蚀模数较小,而20世纪70年代和20世纪90年代为2个主要土壤侵蚀期,侵蚀模数达到2 000 t/km<sup>2</sup>左右,并且其在时间序列上与径流深度变化动态有一定的差异,这可能与降水的年内分配有关.

在六盘山的土石山区,从20世纪50年代开始径流不断增大,20世纪70年代达到最高值89.50 mm,20世纪70年代以后径流一直呈递减趋势,到21世纪的前4年平均径流深度达到最低值44.85 mm.土壤侵蚀的变化过程总体上与径流变化具有相同的趋势,20世纪70年代侵蚀模数达到最高值6 427.44 t/km<sup>2</sup>,近4年(2000—2003年)来,随着径流

的减少,侵蚀模数也减少到历史的最小值874.40 t/km<sup>2</sup>.

### 2.3 水土流失的演化特征

对黄土高原4种地貌区域的土壤侵蚀进行了功率谱、谐波及方差分析,并进行了显著性检验.图2为黄土丘陵沟壑区、黄土残塬沟壑区、黄土山地区和土石山区的土壤侵蚀波谱.在黄土丘陵沟壑区,功率谱曲线在波数 $k=2.3, 5.5, 14.1, 23.4$ 等处功率谱密度有最大值,由谐波曲线对应的峰点可知: $T_k=21.4 \text{ a} \approx 21 \text{ a}$ ,  $T_k=9.1 \text{ a} \approx 9 \text{ a}$ ,  $T_k=3.6 \text{ a} \approx 4 \text{ a}$ 和  $T_k=2.1 \text{ a} \approx 2 \text{ a}$ 是黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀的主要周期(上述周期的谱估计值均是周期函数值 $S(k)$ 大于周期趋势 $RS(k)$ );黄土残塬沟壑区的谱功率密度最大值有 $k=2.3, 6.8, 13.5, 22.5$ ,各谐波的峰值对应的周期分别是 $T_k=21, 7, 4, 2 \text{ a}$ ;在黄土山地区,功率谱曲线在 $k=1.9, 6.9, 9.4, 11.3, 15.6$ 和 $17.5$ 处有最大值,谐波波峰对应的周期分别是 $T_k=21.3, 5.8, 4.3, 3.6, 2.6, 2.3 \text{ a}$ ;土石山区相应的谱功

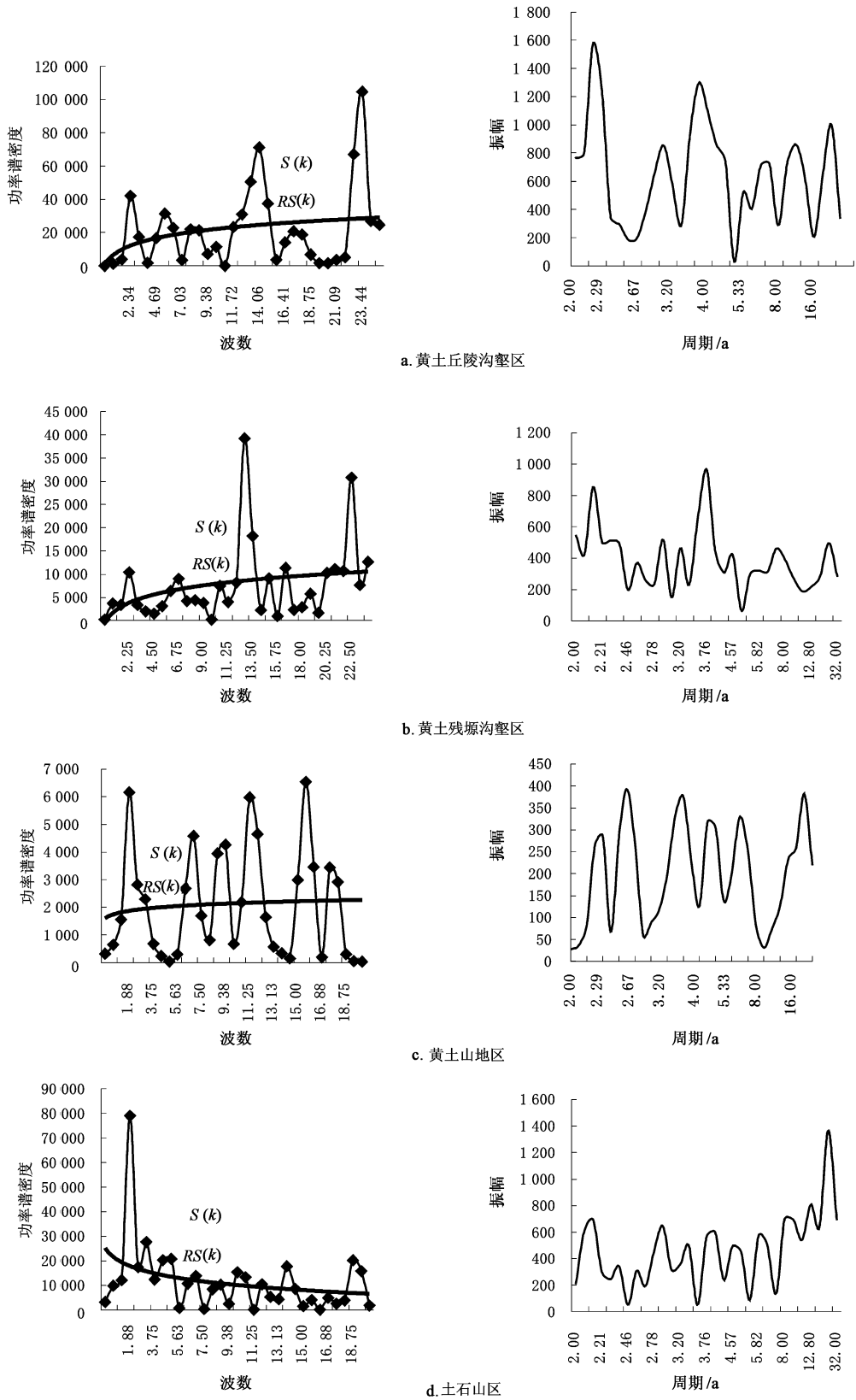


图 2 黄土高原各地貌区域的土壤侵蚀序列曲线

FIGURE 2 Time serial curves of soil erosion in different morphogenetic zones on the Loess Plateau

率曲线周期分别为  $T_k \approx 21$  a、 $T_k \approx 13$  a、 $T_k = 5.0$  a、 $T_k = 4.0$  a、 $T_k \approx 3$  a 和  $T_k \approx 2$  a。可以看出,黄土高原中部不同地貌区域,土壤侵蚀都存在 20~21 a、6~7 a 和 2~4 a 的变化周期,其中,20~21 a 和 2 a 的周

期最为显著。另外,由于各地貌区域的差异,还存在 9 a(黄土丘陵沟壑区)和 13 a(土石山区)的变化周期。用方差分析方法对黄土高原中部不同区域水土流失的周期进行分析,其方法是:当实验周期  $T$  的

方差分布  $F$  大于  $F_{\alpha}(\alpha=0.05)$  的分布值时,则认为周期  $T$  存在,否则不存在.对黄土高原中部 4 个地貌区域的水土流失年序列资料进行方差分析,4 个区域都通过置信度  $\alpha=0.05$  显著性检验的有 20~21 a、6~7 a 和 2~4 a 周期.通过上述分析可以得出,黄土高原中部水土流失总体存在 2~4 a、6~7 a 和 20~21 a 的周期,各地貌区域由于各自的差异,还存在 9~13 a 不等的小周期.

这种不同周期的水土流失变化分别具有不同的全球变化意义.首先,2~4 a 和 6~7 a 的变化周期与副高脊线位置的准 3 a 周期及地极移动变化的 7 a 左右的周期是一致的<sup>[22]</sup>.它们均是影响我国西北部广大地区降水的重要系统,并且其变化将会引起地球离心力系统、大气环流以及空气质量、水分输送的变化.9~13 a、20~21 a 周期的存在,可能与天体运行规律和太阳黑子强弱变化的中长期变化有关<sup>[20]</sup>.研究表明,太阳黑子活动有 22 a 和 11 a 左右的中短期变化,这些变化与气候变化,尤其是降水的变化有密切关系<sup>[23]</sup>.黄土高原作为中国北方重要的自然地理单元,其水土流失的年际变化无疑要受到它们的影响.当太阳黑子活动增强时,经向(E 型)环流会发展,纬向(W 型)环流会减弱,经向环流的加强有利于空气的南北交换,同时,纬向环流的减弱会使青藏高原热低压加强,黄土高原地区的降水就会增加,从而使流域的水土流失加剧.反之,经向环流减弱,纬向环流发展,黄土高原的水土流失就会减弱.有资料表明<sup>[24]</sup>,1990 年是太阳黑子活动 22 a 周期的峰值年,故这一年黄土高原各地貌区域水土流失都是近期来较严重的一年.

### 2.4 水土流失的演化趋势预测

考虑到水土流失本身具有的周期波动和气候及地表特征的演变趋势,应用周期外延与多元回归混合模式,对黄土高原中部 4 个典型地貌区域流域水土流失的变化趋势进行定量预测.预报模型的组成包括周期项、趋势项、随机项.具体如下:

$$Y(t) = Y(t) + \epsilon(t)$$

$$= \sum_{i=1}^m \beta_i P_i(t) + \sum_{j=1}^k \varphi_j X_j(t) + \epsilon(t)$$

式中,  $Y(t)$  为实际径流深度;  $Y(t)$  为径流值的预测值;趋势项  $\sum_{j=1}^k X_j(t)$  反映降水和地表受人类活动影响下的长期变化趋势;周期项  $\sum_{i=1}^m P_i(t)$  为所提取的各个周期;  $\beta_i$  和  $\varphi_j$  为权重系数;随机项  $\epsilon(t)$  表示随机误差,即  $\epsilon(t) = Y(t) - Y(t)$ ,在预报中应尽量减少  $\epsilon(t)$ .

从原始径流深度数据中提取 20、6 和 2 a 的显著周期数据序列,降水趋势采用各个地貌区域多年来的降水数据序列.由于人类活动对地表的改造较难量化,数据也较难获取,这里采用各个地貌区域同期的农业人口密度作为代表该区域地表人类活动的间接指标.应用多元回归方法,对黄土高原中部不同地貌区域水土流失的演化趋势进行回归模拟,得到预报 4 个地貌区域的周期外延与回归分析的混合径流预测模式.利用每个流域的径流深度和侵蚀模数数据做回归模拟,得到每个地貌区域侵蚀模数的预测模式(表 3).

利用上述不同地貌区域的水土流失预测模式,对黄土高原 4 种地貌区域水土流失进行模拟预测(图 3).对各个地貌区域的水土流失指标的模拟值与实测值进行配对检验,发现各个地貌区域的径流深度与侵蚀模数的模拟值与实测值之间均无显著差异,说明周期外延与多元回归混合模式可较好地预测黄土高原中部水土流失的变化趋势.

### 3 结论与讨论

由于人类活动对地表改造程度的区域差异,近 50 年来,黄土高原不同地貌区域的水土流失变化表现出各自不同的演化特征:黄土丘陵沟壑区水土流失没有明显的增减趋势;黄土残塬沟壑区则表现出明显的递减趋势,与 20 世纪 60 年代相比,90 年代平均 10 年径流深度减少了 6.21 mm,侵蚀模数减少了

表 3 黄土高原各地貌区域水土流失预报模型

TABLE 3 Prediction models of soil and water loss in different morphogenetic zones on the Loess Plateau

地貌区域	预报模型	$R^2$
黄土丘陵沟壑区	径流深度 $R=0.048 4 P+1.229 X_2-0.621 X_6+0.915 X_{20}+0.077 L-36.462$	0.540
	侵蚀模数 $E=2.253 Q^2+514.24 Q-3 617.9$	0.967
黄土残塬沟壑区	径流深度 $R=0.106 P+0.553 X_3+0.069 8 X_6-0.272 X_{20}-0.268 L+15.547$	0.786
	侵蚀模数 $E=5.759 Q^2-92.322 Q+2 157.9$	0.840
黄土山区	径流深度 $R=0.043 4 P+0.703 X_2+0.095 6 X_6+0.175 X_{20}+0.011 8 L-23.824$	0.510
	侵蚀模数 $E=8.633 Q^2-79.191 Q+525.49$	0.800
土石山区	径流深度 $R=0.167 P+0.67 X_2-0.218 X_6-0.327 X_{20}-0.453 L+61.991$	0.732
	侵蚀模数 $E=-0.263 Q^2+87.641 Q-1 211.2$	0.853

注:  $Q$  为年径流深度,  $P$  为年降水量,  $E$  为年侵蚀模数,  $X_2$  为 2 a 周期序列,  $X_6$  为 6 a 周期序列,  $X_{20}$  为 20 a 周期序列,  $L$  为地表变化.

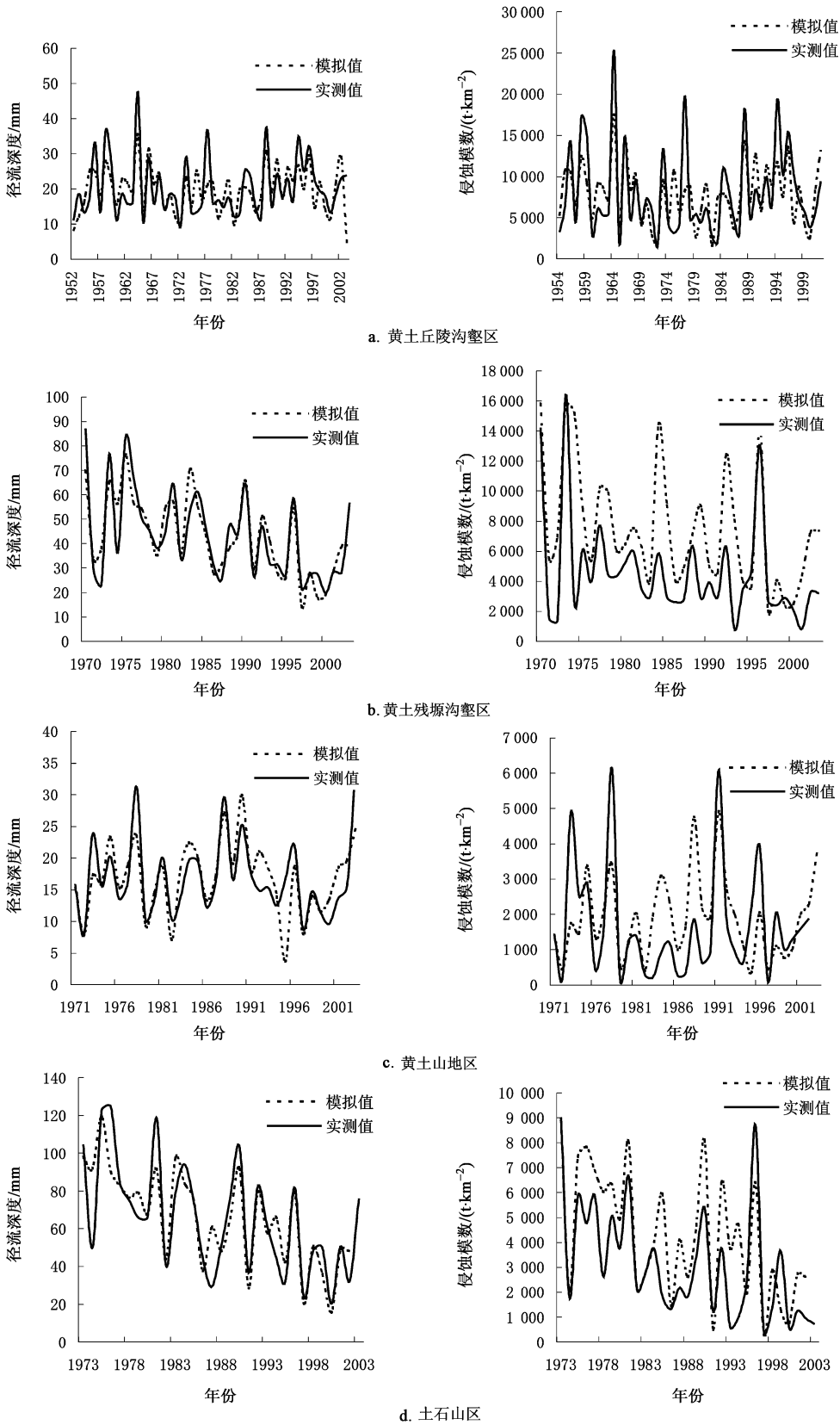


图 3 黄土高原各地貌区区域水土流失趋势预测

FIGURE 3 Trend prediction of soil and water loss in different morphogenetic zones on the Loess Plateau

1 387.33 t/km<sup>2</sup>;黄土山地区的径流深度没有明显变化,侵蚀模数则有增大趋势,20 世纪 90 年代平均 10 年侵蚀模数比 20 世纪 60 年代增加 1 409.03 t/km<sup>2</sup>;土石山区径流深度和侵蚀模数都有减少趋势.各地

貌区域水土流失均表现出明显的周期波动变化,20 世纪 50—60 年代的丰水期,为各地貌区域的水土流失加重期;到 20 世纪 70—80 年代的枯水期,水土流失总体有所减轻;20 世纪 90 年代,随着新一轮丰水

期的到来,水土流失又进入增加期.波谱分析表明,黄土高原各个地貌区域都存在着20~21 a、6~7 a和2~4 a的水土流失变化周期.此外,各个地貌区域各自还存在着9~13 a不等的小周期.各个地貌区域水土流失除具有周期波动的特征外,还表现出总体的演化趋势,利用周期外延和多元回归混合模拟方法,可以较好地对黄土高原各地貌区域水土流失的周期波动和总体演化趋势进行模拟预报.

### 参 考 文 献

- [1] SHI H, SHAO M A. Soil and water loss from the Loess Plateau in China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2000, 45: 9-20.
- [2] 王万忠, 焦菊英. 黄土高原降雨侵蚀产沙与黄河输沙[M]. 北京: 科学出版社, 1996.  
WANG W Z, JIAO J Y. *Sediment producing from rainfall erosion in the Loess Plateau and sediment transporting of the Yellow River*[M]. Beijing: Science Press, 1996.
- [3] QIAO Y L, WANG Y, TANG J Y. Study of remote sensing monitoring of dynamic change of the Loess Plateau forest resources [J]. *Advances in Space Research*, 2004, 33(3): 302-306.
- [4] 王万忠, 焦菊英. 黄土高原侵蚀产沙强度的时空变化特征[J]. *地理学报*, 2002, 57(2): 210-216.  
WANG W Z, JIAO J Y. Temporal and spatial variation features of sediment yield intensity on the Loess Plateau[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(2): 210-216.
- [5] SMIT B, CAI Y. Climate change and agriculture in China [J]. *Global Environment Change*, 1996, 6: 205-214.
- [6] HAGEBACK J, SUNDBERGE J. *Climate variations in relation to local scale land use and farmer's perception of climate in Da'nangou Watershed on the Loess Plateau, China* [M]. Goteborg: Goteborg University Press, 2002: 355.
- [7] QIAN W H, ZHU Y F. Climate change in China from 1880 to 1998 and its impact on the environmental condition[J]. *Climate Change*, 2001, 50(4): 419-444.
- [8] CHEN L D, WANG J, FU B J, et al. Land-use change in a small catchment of northern Loess Plateau, China [J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2001, 86(2): 163-172.
- [9] HUANG M B, ZHANG L. Hydrological responses to conservation practices in a catchment of the Loess Plateau, China [J]. *Hydrological Processes*, 2004, 18(10): 1885-1898.
- [10] 叶青超. 黄河流域环境演变与水沙运行规律研究[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1994.  
YE Q C. *Study on the laws of environmental change and water-sediment transport in the Yellow River Basin* [M]. Ji'nan: Shandong Science and Technology Press, 1994.
- [11] 唐克丽. 黄河流域的侵蚀与径流泥沙变化[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1993.  
TANG K L. *Erosion and runoff-sediment change in the Yellow River Basin* [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1993.
- [12] LIU G B. Soil conservation and sustainable agriculture on the Loess Plateau: Challenge and prospects[J]. *Ambio*, 1999, 28(8): 663-668.
- [13] HUANG Y F, CHEN X, HUANG G H, et al. GIS-based distributed model for simulating runoff and sediment load in the Malian River Basin[J]. *Hydrobiologia*, 2003, 494: 127-134.
- [14] 黄河水利委员会黄河中游管理局. 河龙区间水土保持措施减水减沙效益分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.  
Institute of Middle Yellow River Management of Yellow River Hydrological Committee. *Analysis effect of soil and water conservation measurments* [M]. Beijing: Water Resources & Hydro Power Press of China, 1998.
- [15] 黄嘉佐. 气象状态变化的预测模式[J]. *气象*, 1995, 21(11): 54-57.  
HUANG J Z. Prediction models of weather change [J]. *Meteorological Monthly*, 1995, 21(11): 54-57.
- [16] 蓝永超, 康尔泗, 金会军, 等. 黑河出山径流量年际变化特征与趋势研究[J]. *冰川冻土*, 1999, 21(1): 49-53.  
LAN Y C, KANG E S, JIN H J, et al. Numerical analyses of the temperature and stress fields of channel in frozen soil regions [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1999, 21(1): 49-53.
- [17] United States Department of Agriculture. *Predicting rainfall erosion losses—A guide to conservation planning* [G]. Washington, DC: USDA, 1978: 537.
- [18] FLANAGAN D C, NEARING M A, LAFLEN J M. USDA—Water erosion prediction project: Hillslope profile and region model documentation [C]. Washington, DC: USDA, 1995.
- [19] 索安宁, 洪军, 林勇, 等. 黄土高原景观格局与水土流失关系研究[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(9): 1719-1723.  
SUO A N, HONG J, LIN Y, et al. Relationships between soil and water loss and landscape pattern on the Loess Plateau [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(9): 1719-1723.
- [20] 蒋定生. 黄土高原水土流失与治理模式[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997: 282-283.  
JIANG D S. *Soil and water loss and its conservation models on the Loess Plateau* [M]. Beijing: Water Resources & Hydro Power Press of China, 1997: 282-283.
- [21] 黄河水利委员会水土保持局. 黄河流域水土保持研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1997.  
Soil and Water Conservation Institute of the Yellow River Hydrological Committee. *Study on soil and water conservation in the Yellow River Basin* [M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 1997.
- [22] 徐国昌, 董安祥. 我国西部降水量的准三年周期[J]. *高原气象*, 1982, 1(2): 11-16.  
XU G C, DONG A X. The quasi-three year period of precipitation in the west of China [J]. *Plateau Meteorology*, 1982, 1(2): 11-16.
- [23] 陈兴芳. 1994年西太平洋副高异常变化及成因分析[J]. *气象*, 1995, 21(2): 3-7.  
CHEN X F. The anomaly change of subtropical high and its formation cause in west Pacific [J]. *Meteorological Monthly*, 1995, 21(2): 3-7.
- [24] 霍世青, 温丽叶. 黄河径流变化与太阳活动关系初探[C]//黄河水利委员会. 黄河水文科技成果与论文选集. 郑州: 黄河水利出版社, 1996: 184-188.  
HUO S Q, WEN L Y. Primary study of relations between runoff change of the Yellow River and sun movement [C]// The Yellow River Hydrological Committee. *Florilegium of the Yellow River hydrological papers*. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 1996: 184-188.