

黄土高原典型区沟谷分布谐波分析

卜楠¹, 朱清科^{1*}, 安彦川¹, 张岩¹, 张青², 秦伟¹

(1. 北京林业大学水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 北京林业大学基础科学与信息工程学院, 北京 100083)

摘要: 为了研究黄土高原地形起伏的周期性, 从而探索支沟沟谷分布规律, 为黄土高原的土壤侵蚀评估提出新的思路。该文以甘肃西峰、山西吉县、陕西安塞、宁夏固原为研究区尝试利用谐波分析和周期图分析的方法研究黄土高原不同类型区沟谷分布规律。结果表明, 黄土高原不同类型区主沟沟谷的周期大小有明显不同, 总体来看, 高原沟壑区 > 过度地区 > 丘陵沟壑区; 黄土高原支沟周期主要分布在 400~800 m, 其周期个数占总周期数的 97.5%。对 4 个研究区的支沟沟谷周期数据进行 *t* 检验, 结果表明甘肃西峰、陕西安塞、山西吉县相互之间周期均值差异均无显著性 ($P > 0.05$); 宁夏固原与陕西安塞、山西吉县、甘肃西峰侵蚀支沟分布周期均值双尾检验概率 *P* 值均小于 0.01, 故可认为均值差异极显著。提取不同类型区大于 5°坡度的平均坡度分析发现, 研究区平均坡度的大小关系为: 甘肃西峰 > 山西吉县 > 陕西安塞 > 宁夏固原, 支沟沟谷的平均分布周期随平均坡度的增加而不断减小, 说明区域平均坡度的大小直接影响着黄土高原支沟的形成。

关键词: 谐波分析, 地形, 侵蚀, 黄土高原, 周期图分析, 数字高程模型, 坡沟系统

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.11.036

中图分类号: S715.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-11-0225-07

卜楠, 朱清科, 安彦川, 等. 黄土高原不同类型区沟谷分布谐波分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11): 225-231.
Bu Nan, Zhu Qingke, An Yanchuan, et al. Harmonic analysis of valley distribution in typical areas of Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(11): 225-231. (in Chinese with English abstract)

0 引言

黄土高原面积广阔, 区内地形、地貌、地表组成物质随着地理位置的不同变化较大, 黄秉维先生据此将黄土高原分为黄土丘陵沟壑区、黄土高原沟壑区、黄土阶地区、冲积平原区、高地草原区、干旱草原区、土石山区、风沙区和林区等九大类型区。在沟谷系统中, 每一条沟道都有其产生和变化的规律^[1-2]。不同类型区的沟壑密度以及不同立地类型的土地所占总面积的比例等特征都有所不同。已有的研究结果表明, 由于坡度和坡向等地形条件的变化形成的生境条件差异较大, 成为除降水之外制约植物生长的最重要的因子^[3-6]; 并且在反映沟道特征的众多指标中, 尤其是在土壤侵蚀的计算过程中, 坡度和坡长等地形因子对土壤侵蚀影响明显^[7], 因此有必要研究不同类型区沟谷系统的分布规律, 继而探求坡面的分布情况。这对因地制宜进行黄土高原植被恢复建设以及分析研究不同尺度坡面和沟谷造成径流和侵蚀产沙特征等方面都是至关重要的。

目前, 国内对黄土高原数字地貌的非线性研究主要集中在利用 Horton 定律研究水系形态和分维值。陈浩在

黄土高原沟壑区, 利用水系形态量计分析的方法, 研究了地表切割程度指标(沟谷密度)与沟道流域形态特征之间的关系^[8]; 李后强等研究了 Horton 比率与流域地貌发育阶段的关系^[9], 并导出了划分流域发育阶段的新参数, 认为分枝比越大, 流域越趋于侵蚀晚期。何隆华提出运用多维分形理论研究黄土地貌演化对于流域的侵蚀发育阶段具有更强的代表性^[10]; 雷会珠等根据沟网 Horton 定律推导出沟网的分维计算式, 据此可进行纸坊沟流域沟网的分维计算, 判断流域沟网的发育程度, 认为黄土高原沟网具有分形性。并且通过统计分析发现流域边界周长、长轴、短轴、长短轴比、汇合角等地貌指标随流域面积的变化而变化, 从而认为黄土高原流域具有自相似性^[11]。这些研究主要是从整体上研究流域的水系形态, 根据得到的特征值判断流域侵蚀情况, 而利用谐波分析直接探求研究区沟谷分布模型还未见有研究。本论文尝试利用地理信息系统和统计分析软件, 尝试提取所需要地形剖面数据, 应用谐波分析方法, 对黄土高原不同类型区沟谷的分布形态规律作初步的研究, 对得到的模型进行对比分析, 以求得到黄土高原不同类型区沟谷分布周期的差异。

1 研究方法 & 原理

1.1 研究区概况

黄土高原地跨山西、陕西、内蒙古、河南、甘肃、宁夏和青海等 7 省(区), 共 287 个县(旗), 总面积为 62.68 万 km²^[12]。其中典型黄土区 42 万 km², 严

收稿日期: 2011-11-02 修订日期: 2012-04-01

基金项目: “十一五”国家科技支撑项目(2006BAD03A03)

作者简介: 卜楠(1983-), 男, 博士生。主要研究方向: 复合农林规划, 数字资源环境工程。Email: 125048166@qq.com。

*通信作者: 朱清科(1956-), 男, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 水土保持和林业生态工程。Email: xiangmb@bjfu.edu.cn

重水土流失区 28 万 km^2 , 占区域面积的 45%, 平均侵蚀模数 3720 $\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$, 水土流失十分严重。该区降水量少, 气候干旱, 大多数地区年平均降雨量在 200~600 mm 之间变化, 从东南向西北逐渐减少。降雨量年内分布极不均匀, 一般集中在夏季, 年际之间变化大, 丰水年降雨量达 700 mm, 干旱年只有 200 mm。其中黄土丘陵沟壑分布最广以黄土梁、峁和沟壑组成, 沟壑密度 2~6 km/km^2 , 土壤年侵蚀模数一般为 5 000~10 000 t/km^2 , 最高达 30 000 t/km^2 以上。黄土高原沟壑主要分布在吕梁山、黄龙山、乔山以南和于午岭西南一带, 具有较平的黄土塬面, 塬面被沟壑切割得七零八落, 呈长条或鸡爪形, 侵蚀沟与塬面分布明显, 坡陡沟深, 深达可至 100 多米, 沟壑密度一般 1~3 km/km^2 。沟壑侵蚀逐渐蚕食塬面, 使塬面逐渐缩小, 不少已成残塬。土壤年侵蚀模数为 3 000~6 000 t/km^2 [13]。

本文在黄土丘陵沟壑区和黄土高原沟壑区 2 大类型区选取 4 个研究小区的 1:50 000 标准图幅的数字高程模型作为数据源:

甘肃西峰, 位于黄土高原沟壑区, 地理坐标: $\text{N}35^{\circ}40' \sim 35^{\circ}50'$, $\text{E}107^{\circ}30' \sim 107^{\circ}45'$;

山西吉县, 位于残塬沟壑区向丘陵沟壑区的过渡地带, 地理坐标: $\text{N}36^{\circ}10' \sim 36^{\circ}20'$, $\text{E}110^{\circ}30' \sim 110^{\circ}45'$;

陕西安塞, 位于黄土丘陵沟壑区第二副区, 地理坐标: $\text{N}36^{\circ}40' \sim 36^{\circ}50'$, $\text{E}109^{\circ}00' \sim 109^{\circ}15'$;

宁夏固原, 位于黄土丘陵沟壑区第五副区, 地理坐标: $\text{N}36^{\circ}00' \sim 36^{\circ}10'$, $\text{E}106^{\circ}15' \sim 106^{\circ}30'$ 。

1.2 数据提取方法

数字高程模型是描述地面高程属性空间分布的有序数值阵列, 其中蕴涵着丰富的地貌地形信息, 能有效地反映区域的基本地形空间分布规律与地貌特征 [14]。地貌特征的自动提取技术和沟谷系统提取技术也是基于数字高程模型的这个特征 [15-16]。因此, 本论文利用 arcGIS 软件, 在研究区的数字高程模型上, 应用 3D 分析中的剖面线 (interpolate line) 操作, 用来在已选择的表面上创建一条带有高程信息的 3D 线; 之后利用 3D 分析中的创建剖面图 (create profile graph) 操作, 为所选中的 3D 折线生成剖面图, 并以 EXCEL 表格的形式输出此 3D 线采样点的距离及高程数据 [17]。

1.3 数据处理方法

时间序列分析是通过分析地理要素随时间变化的历史过程, 揭示其发展变化规律, 并对其未来状态进行预测 [18-20]。在时间序列中周期性是最重要的一个特征, 识别提取周期项的方法有周期图分析和谐波分析 2 种方法。基于地形变化具有时间序列的周期特征, 因此可借用时间序列分析的方法, 探索黄土高原不同类型区地形起伏的规律。地形起伏周期时间序列可以认为是高程随着距离变化的周期性函数, 它由若干个不同频率、不同振幅的波形组成, 通过把复杂的组分 (或波形) 分解成简单的成分 (或波形), 使其固有的性质表现出来, 并可给出定量的结果。

1.3.1 谐波分析原理

谐波分析是利用傅里叶级数把时间序列表示成无数个不同周期的简 (单) 谐波和的形式来分析序列变化规律的一种方法 [21]。谐波分析是提取要素中已知的周期变化, 它根据傅里叶级数理论, 一个复杂的周期函数或周期序列都是由具有不同振幅和位相的正弦波叠加而成。基波的最长周期等于序列的长度; 谐波是基波以外的波 [22-26]。地形地貌中利用 arcGIS 提取的距离—高程数据是一系列的等距离高程值。这一系列的观测值构成以离散距离为参数的数据记录序列。这种序列在已知区间内, 满足傅里叶级数的狄利克雷充分条件, 因此可用谐波分析方法对它进行分析。

假设地形起伏周期是由随距离变化的 k 个简谐波的迭加, 那么这一序列可以用三角函数表示 [17]。通过对地形起伏周期的正弦波函数进行傅里叶变换, 可求得谐波模型 [27]。

$$y_t = a_0 + \sum_{k=1}^p A_k \sin(\omega_k t + \theta_k) \quad (1)$$

$$= a_0 + \sum_{k=1}^p (a_k \cos \omega_k t + b_k \sin \omega_k t)$$

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N y_t \quad (2)$$

$$a_k = \frac{2}{N} \sum_{t=1}^N y_t \cos \frac{2\pi k}{N}(t-1) \quad (3)$$

$$b_k = \frac{2}{N} \sum_{t=1}^N y_t \sin \frac{2\pi k}{N}(t-1) \quad (4)$$

$$\theta_k = \text{tg}^{-1} \frac{a_k}{b_k} \quad (5)$$

$$A_k^2 = a_k^2 + b_k^2 \quad (6)$$

$$\omega_k = \frac{2\pi k}{T_k} \quad (7)$$

$$T_k = N/k \quad (8)$$

其中 y_t 为高程值, t 为序列点个数, a_0 为平均高程, m , k 为谐波数, θ_k 为谐波的初相位, A_k 为谐波振幅, ω_k 为频率, N 为样本总量 (剖面线总距离), a_k 、 b_k 为幅值分量 (傅里叶常数), T_k 为对应周期。

利用最小二乘法可以求得式中的待定系数。但求出之后, 仅能说明地形起伏周期序列可能具有某些长度的计算周期, 并不能确定何种长度的周期为真正的周期。为了进一步验证, 引入 F 检验。对给定的周期序列 $y_t (t=1, 2, 3, \dots, n)$, 根据谐波分析原理, 检验第 k 个周期 (即谐波) 显著性的统计量 F 为:

$$F = \frac{(1/2)(a_k^2 + b_k^2)/2}{(S^2 - \frac{1}{2}a_k^2 - \frac{1}{2}b_k^2)/(N-2-1)} \rightarrow F(2, N-2-1) \quad (9)$$

$$S^2 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (y_t - \bar{y})^2 \quad (10)$$

统计量 F 服从自由度为 (2, $N-2-1$) 的 F 分布。其中, S^2 为给定的时间序列的方差。当给定显著性水平 α 时, 如果 $F > F_{\alpha}(2, n-2-1)$, 则表示第 k 个周期 T_k 为显著周期。

1.3.2 周期图分析

在谐波分析中，只考虑了整个序列的整数谐波振动，波数是整数，而对应的周期不一定是整数。周期图方法估计功率谱以整数为周期，由它所构成的谱图横轴常用整数周期表示。为了讨论序列在所给时间尺度内的所有整数周期，可截取序列的一部分以得到任意整数周期。周期图分析的基本原理是首先将离散资料按各种试验周期分组排列求平均值，组成试验周期的平均序列，然后对平均序列作基波的谐波分析，求其振幅平方，绘制以试验周期为横轴，以各试验周期的功率谱或者振幅平方 $A_k^2 = a_k^2 + b_k^2$ 为纵轴的周期图^[27]，从而比较各试验周期功率谱的大小，最后通过显著性检验确定最显著周期。

2 结果与分析

2.1 黄土高原不同类型区主沟沟谷周期分析

2.1.1 黄土高原不同类型区主沟沟谷周期图分析

周期图分析方法可以直观的找到显著性较高的整数周期，可以大概判断谐波数为多少时求取的周期检验的显著性最高。周期显著性检验公式为

$$C_\alpha(k) = (4S^2 \ln \frac{k}{\alpha}) / n \tag{11}$$

$$S^2 = \frac{1}{2}(a_k^2 + b_k^2) \tag{12}$$

其中： S^2 为序列方差， α 是显著性水平， k 为谐波数， n 为样本总量。如果 $(a_k^2 + b_k^2) > C_\alpha(k)$ ，则可认为波数 k 对应的周期 T_k 在显著性水平 α 上是显著的^[27]。

利用 SPSS 中的 spectral analysis 工具可以生成周期图，其中横轴 period 为 T_k (试验周期值)，纵轴 perigram 为 L_k (试验周期函数)，其计算式为：

$$L_k = [a_k^2 + b_k^2]n / 2 = 2 \ln \frac{k}{\alpha} S^2 \tag{13}$$

因为谐波数 k 为大于 1 的整数，当 $k=1$ ，做 $\alpha=0.05$ 显著性水平检验，然后计算每组数据的方差 S^2 ，求得横参照线值 $L_k = -2(\ln 0.05) S^2$ 。从周期图上可以直观的看出，凡是图上高于此参照线的部分，一定符合 $(a_k^2 + b_k^2) > C_\alpha(k)$ ，可认为谐波数 k 对应的周期 T_k 在显著性水平 $\alpha=0.05$ 上是显著的。

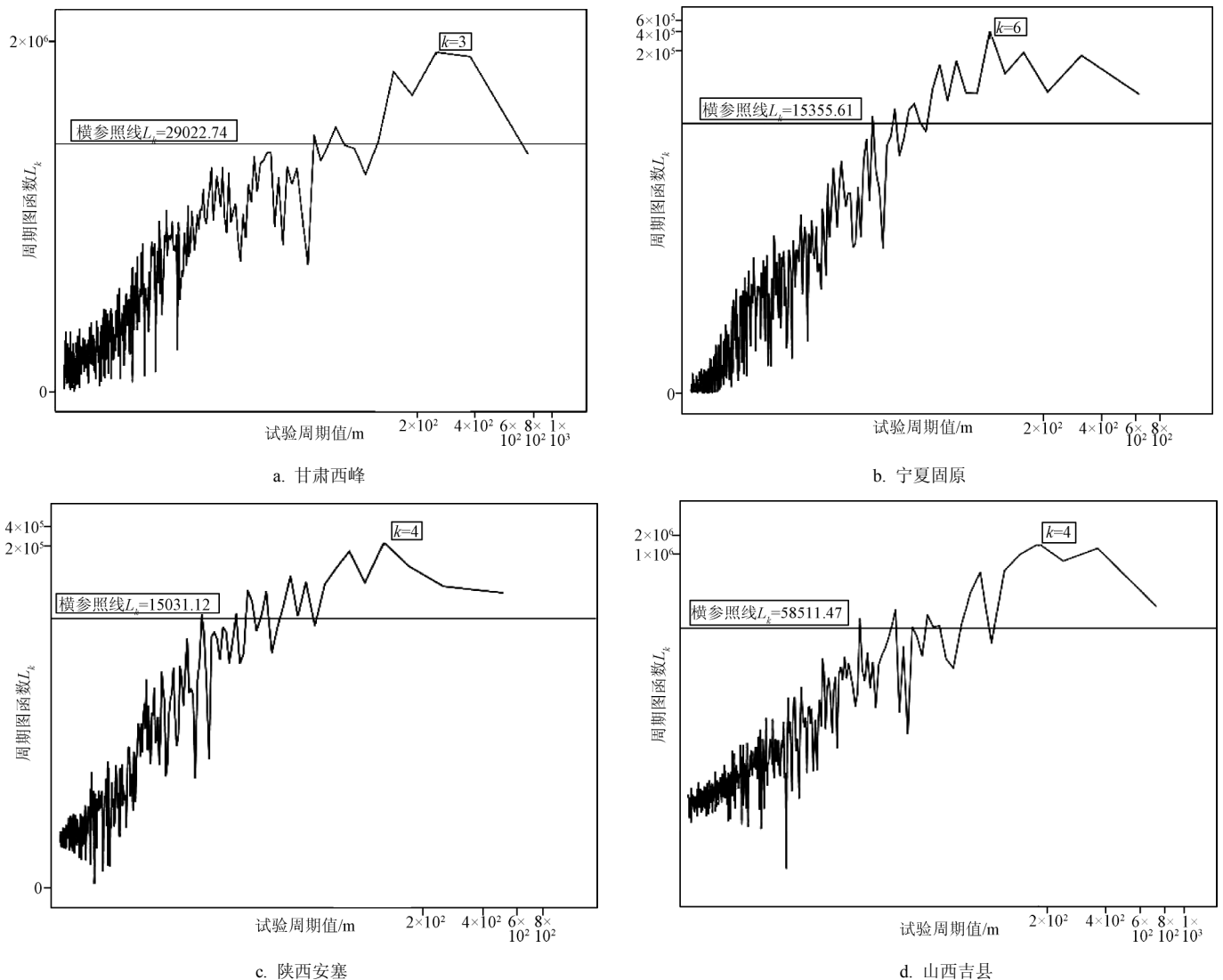


图 1 甘肃西峰、宁夏固原、陕西安塞、山西吉县小流域主沟周期分析图

Fig.1 Periodograms analysis of Xifeng in Gansu province, Guyuan in Ningxia provinc, Ansai in Shannxi provinc and Jixian in Shanxi provinc

通过以上方法,分析得出甘肃西峰、山西吉县、陕西安塞、宁夏固原等 4 个研究区的主沟沟谷分布周期图。结果表明在甘肃西峰提取的主沟数据在谐波数 $k=3$ 时显著性检验值最高(图 1a),宁夏固原提取的主沟数据在谐波数 $k=6$ 时显著性检验值最高(图 1b),陕西安塞和山西吉县所提取的主沟数据在谐波数 $k=4$ 显著性检验值最高(图 1c、图 1d)。但是周期图分析仅能求得显著性最高的谐波数 k 值,并不能得到对应谐波模型的各个参

数,求取谐波模型的各个参数就需要谐波分析计算公式。

2.1.2 黄土高原不同类型区主沟沟谷谐波分析

根据谐波分析计算公式(2)、(3)、(4)、(5)、(6),可以计算出谐波模型的参数 a_0 、 a_k 、 b_k 、 θ_k 、 A_k 。根据计算公式(8)、(9)、(10)对求得的谐波模型进行 F 检验,判断所得模型是否满足检验要求,并计算显著周期 T_k 值。4 个研究区主沟沟谷谐波模型中的各个参数计算结果见表 1。

表 1 黄土高原不同类型小流域主沟谐波模型对比表

Table 1 Parameters of harmonic models of tributary gullies in different regions of Loess Plateau

研究区	谐波数	谐波模型参数值							谐波模型
		a_0	a_k	b_k	A_k	θ_k	T_k	F	
甘肃西峰	$k=3$	1305.0	-39.7	43.0	58.6	-42.8	6484.7	205.4	$y_t = 1305.0 + 58.6 \times \sin(\frac{1}{6484.7}t - 88.6)$
山西吉县	$k=4$	1012.0	54.6	30.3	62.5	61.0	4556.9	90.8	$y_t = 1012.0 + 62.5 \times \sin(\frac{1}{4556.9}t + 23.2)$
陕西安塞	$k=4$	1253.4	29.5	-5.0	30.0	-80.4	3185.8	54.9	$y_t = 1253.5 + 30.0 \times \sin(\frac{1}{3185.8}t - 25.2)$
宁夏固原	$k=6$	1693.1	34.6	-11.5	36.5	-71.7	2670.6	109.8	$y_t = 1693.1 + 1329.7 \times \sin(\frac{1}{2670.6}t + 89.6)$

注: T_k 为周期; θ_k 为初位相; A_k 为谐波振幅; k 为谐波个数; a_0 为平均高程, m; a_k , b_k 幅值分量; F 为检验值; t 为距离; y_t 为高程, m

表 1 列出 4 个研究区显著性水平最高的谐波数 k 以及对应周期值,甘肃西峰主沟分布的周期值(主沟间距)最大达 6 484.74 m,山西吉县周期值达 4 556.89 m,宁夏固原和陕西安塞的周期值分别为 2 670.58 和 3 185.76 m。可以看出,主沟周期值具有高原沟壑区 > 过度地带 > 丘陵沟壑区的变化趋势,这种趋势表现了不同类型区内地貌结构的不同,高原沟壑区地貌主要有塬面、坡、沟谷 3 种类型,并且塬面和坡所占比重较大,沟壑密度较小,因此高原沟壑区主沟周期值比较大,而相比高原沟壑区,丘陵沟壑区的坡和沟谷所占比重较大,沟壑密度较大,因此丘陵沟壑区主沟周期值相比高原沟壑区要小。在丘陵沟壑区内部不同副区间主沟周期差异不大,这主要是同属丘陵沟壑区,其地貌结构基本相同造成。

2.2 黄土高原不同类型区支沟周期分析

在所选研究区的数字高程模型上,寻找相同级别的一级支沟,利用 arcGIS 软件提取相同长度的剖面数据,利用周期图分析方法求取显著性检验值最高的谐波数 k ,然后根据谐波模型的计算公式计算黄土高原不同类型区支沟分布的周期。在每一个研究区提取 10 个不同支沟剖面数据,求取 10 个周期,结果见表 2。

在全部 40 个周期数值中,400~800 m 区间内支沟沟谷的分布周期个数占到总周期数的 97.5%。说明黄土高原不同类型区的支沟沟谷周期性出现的距离在 400~800 m 之间。其中,宁夏固原的支沟沟谷分布的平均周期达到 745 m,陕西安塞、山西吉县、甘肃西峰的支沟沟谷分布的平均周期分别为 602、594、592 m,明显低于宁夏固原。

对黄土高原不同类型区所求得的周期数据作两独立样本的 t 检验,检验结果见表 3。黄土高原沟壑区甘肃西峰、黄土丘陵沟壑区第二副区的陕西安塞、黄土残塬沟壑区的山西吉县相互之间周期均值差异都无显著性 ($P > 0.05$),黄土丘陵沟壑区第五副区的宁夏固原与陕西安塞、

表 2 黄土高原不同类型区侵蚀支沟分布

Table 2 Periods of tributary gullies in different regions of Loess Plateau

研究区	宁夏固原	陕西安塞	山西吉县	甘肃西峰	
支沟 1	583	513	545	585	
支沟 2	867	556	497	592	
支沟 3	784	543	498	582	
支沟 4	660	750	548	652	
支沟 5	830	639	551	594	
支沟的周期值/m	支沟 6	978	783	640	587
	支沟 7	692	557	633	510
	支沟 8	661	532	780	596
	支沟 9	740	559	594	524
	支沟 10	650	585	656	700
	平均周期	745	602	594	592

山西吉县、甘肃西峰侵蚀支沟分布周期均值双尾检验概率 P 均小于 0.01,可认为均值差异极显著。分析表明,塬边小流域坡面上形成的原生侵蚀支沟分布周期与侵蚀严重的丘二区小流域坡面形成的支沟分布周期没有显著差异,说明虽然黄土高原沟壑区沟壑密度远小于丘陵沟壑区,但塬边小流域坡面上侵蚀仍然非常严重,坡面上形成的侵蚀支沟与丘陵沟壑区坡面相似。

表 3 黄土高原不同类型区支沟沟谷周期 t 检验

Table 3 T-test for tributary gullies in different regions of Loess Plateau

	甘肃西峰	山西吉县	宁夏固原
山西吉县	0.95	—	—
宁夏固原	0.003	0.005	—
陕西安塞	0.784	0.854	0.008

2.3 黄土高原不同类型区平均坡度提取与分析

利用 arcGIS 提取剖面线的方法, 在各研究区提取支沟周期剖面线所在区域, 提取两条距离为 200 m, 与提取支沟周期剖面线平行的两条剖面线, 求取 2 条剖面线上对应点的高程差, 并除以水平距离 200 m, 得到两条剖面线上对应点之间的坡度。统计不同类型区剖面线间大于 5°坡度的平均坡度 (见表 4), 处于黄土高原沟壑区甘肃西峰的平均坡度最大, 达到 13.9°, 其次为处于黄土残塬沟壑区山西吉县, 平均坡度为 13.5°, 再次为处于黄土丘陵沟壑区第二副区的陕西安塞, 平均坡度为 13.0°, 最后为处于黄土丘陵沟壑区第五副区的宁夏固原, 平均坡度为 10.6°。与黄土高原不同类型区支沟平均分布周期对比可以发现, 随着平均坡度的增加, 支沟沟谷的平均分布周期不断减小, 这在一定程度上说明区域平均坡度的大小直接影响着黄土高原支沟的形成。

表 4 黄土高原不同类型区支沟沟谷周期与平均坡度对比
Table 4 Comparative analysis of tributary gullies and average slope in different regions of Loess Plateau

	宁夏固原	陕西安塞	山西吉县	甘肃西峰
平均坡度(°)	10.6	13.0	13.5	13.9
支沟平均分布周期/m	744.5	601.7	594.2	592.2

3 结 论

1) 黄土高原沟谷地貌具有连续波峰、波谷的特点, 利用 arcGIS 提取的沟谷距离—高程数据是一系列的等距离高程值, 这一系列的观测值构成以离散距离为参数的数据记录序列。这种时间序列在已知区间内, 满足傅立叶级数的狄利克雷充分条件, 因此可用谐波分析方法对它进行分析。通过对 4 个研究区主沟沟谷周期的分析发现, 黄土高原不同类型区主沟沟谷的周期有显著不同, 其中高原沟壑区 > 过渡地带 > 丘陵沟壑区。

2) 对黄土高原不同类型区支沟沟谷周期值进行提取, 发现黄土高原不同类型区 400~800 m 区间内支沟沟谷周期个数较多。甘肃西峰、陕西安塞、山西吉县 60% 以上周期分布在 400~600 m 区间内, 而宁夏固原 70% 的周期分布在 600~800 m 区间内。对周期数据作两独立样本的 *t* 检验表明, 黄土高原沟壑区甘肃西峰、黄土丘陵沟壑区第二副区的陕西安塞、黄土残塬沟壑区的山西吉县相互之间周期均值差异均无显著性 ($P > 0.05$), 黄土丘陵沟壑区第五副区的宁夏固原与陕西安塞、山西吉县、甘肃西峰侵蚀支沟分布周期均值双尾检验概率 *P* 均小于 0.01, 可认为均值差异极显著。

3) 提取不同类型区剖面线上大于 5°坡度的平均坡度进行分析发现, 研究区平均坡度的大小关系为: 甘肃西峰 > 山西吉县 > 陕西安塞 > 宁夏固原的, 与支沟平均分布周期对比发现, 随着平均坡度的增加, 支沟沟谷的平均分布周期不断减小, 这在一定程度上说明区域平均坡度的大小直接影响着黄土高原支沟的形成。

[参 考 文 献]

- [1] 刘增文, 李雅素. 黄土残塬区侵蚀沟道分类研究[J]. 中国水土保持, 2003(9): 28—30.
Liu Zengwen, Li Yasu. Study on classification of gully erosion in the remained loess area[J]. Soil and Water Conservation In China, 2003(9): 28—30.
- [2] 关君蔚. 水土保持原理[M]. 中国林业出版社, 1996: 1—10
- [3] 贾志清, 宋红竹, 陈涛, 等. 黄家二岔小流域土壤水分空间分布特征[J]. 北京林业大学学报, 1999, 21(5): 88—91.
Jia Zhiqing, Song Hongzhu, Chen Tao, et al. Soil moisture space distribution features in Huangjiaercha small watershed[J]. Journal of Beijing Forestry University, 1999, 21(5): 88—91. (in Chinese with English abstract)
- [4] 何福红, 黄明斌, 党廷辉. 黄土高原沟壑区小流域土壤水分空间分布特征[J]. 水土保持通报, 2002, 22(4): 6—9.
He Fuhong, Huang Mingbin, Dang Tinghui. Soil water distribution characteristics in Wangdongguo watershed in gully region of Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2002, 22(4): 6—9. (in Chinese with English abstract)
- [5] 赵晓光, 吴发启, 刘秉正. 黄土高原坡耕地土壤水分主要受控因子研究[J]. 水土保持通报, 1999, 19(1): 10—14.
Zhao Xiaoguang, Wu Faqi, Liu Bingzheng. Effects of primary factors on soil moisture in cultivated slopland[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1999, 19(1): 10—14. (in Chinese with English abstract)
- [6] 李笑吟, 毕华兴, 张志, 等. 晋西黄土区坡面尺度地形因子对土壤水分状况的影响[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(4): 51—56.
Li Xiaoyin, Bi Huaxing, Zhang Zhi, et al. Impact of terrain factors on soil moisture in slopes of western Shanxi Province in loess area[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(4): 51—56. (in Chinese with English abstract)
- [7] 魏天兴, 朱金兆. 黄土残塬沟壑区坡度和坡长对土壤侵蚀的影响分析[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(1): 59—62.
Wei Tianxing, Zhu Jinzhao. Effects of slope length and grade on soil erosion in the gully regions in Loess Plateau[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2002, 24(1): 59—62. (in Chinese with English abstract)
- [8] 陈浩. 陕北黄土高原原道小流域形态特征分析[J]. 地理研究, 1986(1): 82—92.
Chen Hao. A preliminary study on geomorphic features of small drainage basins on the Loess Plateau in northern shanxi[J]. Geographical Research, 1986(1): 82—92. (in Chinese with English abstract)
- [9] 李后强, 艾南山. 分形地貌学及地貌发育的分形模型[J]. 自然杂志, 1991, 15(7): 516—519.
Li Houqiang, Ai Nanshan. Fractal geomorphology and the model for landform development[J]. Journal of Nature, 1991,

- 15(7): 516—519. (in Chinese with English abstract)
- [10] 何隆华, 赵宏. 水系的分形维数及其含义[J]. 地理科学, 1996, 16(2): 124—128.
He Longhua, Zhao Hong. The fractal dimension of river networks and its interpretation[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1996, 16(2): 124—128. (in Chinese with English abstract)
- [11] 雷会珠, 武春龙. 黄土高原分形河网研究[J]. 山地学报, 2001, 19(5): 474—477.
Lei Huizhu, Wu Chunlong. The fractal study on drainage network in the loess plateau[J]. *Journal of Mountain Science*, 2001, 19(5): 474—477. (in Chinese with English abstract)
- [12] 高世铭. 陇中黄土丘陵沟壑区生态环境建设与农业可持续发展研究[M]. 黄河水利出版, 2003: 1.
- [13] 中国森林立地分类编写组. 中国森林立地分类[M]. 中国林业出版社, 1989: 169.
- [14] 毕华兴, 谭秀英, 李笑吟. 基于 DEM 的数字地形分析[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(2): 49—53.
Bi Huaxing, Tan Xiuying, Li Xiaoyin. Digital terrain analysis based on DEM[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2005, 27(2): 49—53. (in Chinese with English abstract)
- [15] Jenson S K, Domin G J. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographical information system analysis[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1988, 54(11): 1593—1600.
- [16] 徐涛, 胡光道. 基于数字高程模型自动提取水系的若干问题[J]. 地理与地理信息科学, 2004, 20(5): 11—14.
Xu Tao, Hu Guangdao. Several problems and their solutions in dem-based automatic drainage network extraction[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2004, 20(5): 11—14. (in Chinese with English abstract)
- [17] 安彦川, 张岩, 朱清科, 等. 基于谐波分析的黄土高原小流域沟谷分布规律研究[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(4): 84—89.
An Yanchuan, Zhang Yan, Zhu Qingke. Quantifying valley topographic distribution using harmonics analysis in the Loess[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2009, 31(4): 84—89. (in Chinese with English abstract)
- [18] 周俊, 张鹏, 刘成良. 基于时间序列分析的卡尔曼滤波组合导航算法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 254—258.
Zhou Jun, Zhang Peng, Liu Chengliang. Kalman filtering for integrated navigation based on time series analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(12): 254—258. (in Chinese with English abstract)
- [19] 张霞, 焦全军, 张兵, 等. 利用 MODIS_EVI 图像时间序列提取作物种植模式初探[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 161—165.
Zhang Xia, Jiao Quanjun, Zhang Bing, et al. Preliminary study on cropping pattern mapping using MODIS_EVI image time series[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2008, 24(5): 161—165. (in Chinese with English abstract)
- [20] 吴文斌, 杨鹏, 唐华俊, 等. 两种 NDVI 时间序列数据拟合方法比较[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 183—188.
Wu Wenbin, Yang Peng, Tang Huajun. Comparison of two fitting methods of NDVI time series datasets[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2009, 25(11): 183—188. (in Chinese with English abstract)
- [21] 林忠辉, 莫兴国. NDVI 时间序列谐波分析与地表物候信息获取[J]. 农业工程学报, 2006, 22(12): 138—144.
Lin Zhonghui, Mo Xingguo. Phenologies from harmonics analysis of AVHRR NDVI time series[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2006, 22(12): 138—144. (in Chinese with English abstract)
- [22] Sellers P J, Los S O, Tucker C J, et al. A revised land surface parameterization (SiB₂) for atmospheric GCMs. Part 2: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data[J]. *Journal of Climate*, 1996, 9: 706—737.
- [23] Sellers P J, Tucker C J, Collatz S O, et al. A global 1 by 1 NDVI data set for climate studies. Part 2: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from the NDVI[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15: 3519—3545.
- [24] Roerink G J, Menenti M, Verhoef W. Reconstructing cloudfree NDVI composites using Fourier analysis of time series[J]. *International journal of Remote Sensing*, 2000, 21(9): 1911—1917.
- [25] 陆文杰, 李正浩. 植被指数序列中的天气影响评估[J]. 中国农业气象, 1996, 17(2): 36—40.
- [26] 王丹, 姜小光, 唐伶俐, 等. 利用时间序列傅立叶分析重构无云 NDVI 图像[J]. 国土资源遥感, 2005(2): 29—32.
Wang Dan, Jiang Xiaoguang. The application of time—series Fourier analysis to reconstructing cloud—free NDVI images[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2005(2): 29—32.
- [27] 韦玉春, 陈锁忠. 地理建模原理与方法[M]. 科学出版社, 2005: 214—216.

Harmonic analysis of valley distribution in typical areas of Loess Plateau

Bu Nan¹, Zhu Qingke^{1*}, An Yanchuan¹, Zhang Yan¹, Zhang Qing², Qin Wei¹

(1. Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating of Ministry of Education, Beijing Forestry University, 100083, China; 2. College of Basic Sciences and Information Engineering, Beijing Forestry University, 100083, P.R. China)

Abstract: In order to study the topographic periodicity of the Loess Plateau, and to explore the distribution law of tributary valleys, so as to explore a new method for assessment of the Loess Plateau soil erosion, the paper briefly describes basic principles of harmonic analysis and periodgram analysis. Taking Xifeng in Gansu, Jixian in Shanxi, Ansai in Shaanxi, Guyuan in Ningxia as study areas, the valley distribution in the Loess Plateau was studied based on harmonic analysis and periodgram analysis. The results indicated that in the Loess Plateau regions of different types, the period of main channel differed significantly. Generally speaking, the period of the gully region of loess plateau was greater than the transitional region, and the period of the transitional region was greater than the hill and gully area of Loess Plateau; The period of branch gully in the Loess Plateau mainly ranged from 400 to 800 m, which accounted for 97.5% of the overall periods. Based on t-test of the period of branch gully in four different research areas, the results showed that the mean periods of Xifeng, Jixian and Ansai had no significant difference ($P>0.05$), while in the two side test, all the probability of mean period of branch gully in Guyuan, Xifeng, Jixian and Ansai was less than 0.01 ($P<0.01$), so it can be considered that the difference was extremely significant. On analyzing the average terrain slope greater than 5° in the regions of different types, it was found that Xifeng in Gansu is steeper than Jixian in Shanxi, and Jixian in Shanxi is steeper than Ansai in Shaanxi, which is steeper than Guyuan in Ningxia. It was also found that the average period of branch gully decreased continuously with the increasing of the average slope. Therefore, it can be concluded that the average terrain slope can directly affect the formation of branch gully in the Loess Plateau.

Key words: harmonic analysis, landforms, erosion, Loess Plateau, periodgram analysis, digital elevation model, slope-gully system