

DOI:CNKI:61-1390/S. 20111025. 2133. 036

网络出版时间:2011-10-25 21:33

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20111025.2133.036.html>

# 基于分形的中低分辨率坡度降尺度 变换方法研究

郭兰勤<sup>1</sup>, 杨勤科<sup>2,3</sup>, 胡洁<sup>1</sup>, 兰敏<sup>1</sup>, 刘红艳<sup>1</sup>, 李俊<sup>1</sup>

(1 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2 西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710069;

3 中国科学院/水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**[摘要]** **【目的】**针对中低分辨率数字高程模型(DEM)提取坡度的尺度效应问题, 建立一种能够对中低分辨率坡度进行降尺度变换的方法。**【方法】**利用地形分形特性和半变异函数理论, 可知坡度是分辨率和分维数的函数, 从而对县南沟流域设立的建模区和检验区的坡度进行降尺度变换, 并对变换结果进行精度评价。**【结果】**在 0.2~1.0 倍的原始分辨率坡度范围内, 100, 50 和 25 m 分辨率坡度分形变换后, 与目标较高分辨率坡度在统计意义上相似, 并且空间分布格局基本一致, 其中 0.2~0.25 倍的原始分辨率坡度为最佳变换范围。**【结论】**分形变换可以为坡度的降尺度变换问题提供理论支持, 对坡度变换方法的完善有重要意义。

**[关键词]** 坡度; 降尺度变换; 分形; 分辨率; 分形维数

**[中图分类号]** P208

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1671-9387(2011)12-0173-08

## Research on method of re-scaling coarser resolution slope based on fractal analysis approach

GUO Lan-qin<sup>1</sup>, YANG Qin-ke<sup>2,3</sup>, HU Jie<sup>1</sup>,  
LAN Min<sup>1</sup>, LIU Hong-yan<sup>1</sup>, LI Jun<sup>1</sup>

(1 College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 School of City and Environment, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China;

3 Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** **【Objective】**In view of the scale effect problem resulted from the slope extraction based on low resolution Digital Elevation Model (DEM), this paper introduced a method which can rationally re-scale the low resolution slopes. **【Method】**The fractal property of the topography and the theory of variogram demonstrate that slope is a function of the spatial resolution and the fractal dimension of a DEM, and by re-scaling the slopes we obtained a low resolution DEM based on the model experiments in Xiannangou Basin, and evaluated the accuracy of the re-scaled slope. **【Result】**This paper concludes that within 0.2—1.0 times original resolution slope range, the re-scaling results of 100 m, 50 m and 25 m resolution slope are similar to the slopes based on high resolution DEMs, in both slope value and slope spatial distribution, and the best re-scaling slope extent is 0.2—0.25 times of original resolution slope. **【Conclusion】**It is shown that the method provides theoretical support for slope scale problems, and has a significant meaning in perfecting slope transform methods.

\* **[收稿日期]** 2011-05-10

**[基金项目]** 国家自然科学基金项目(40971173)

**[作者简介]** 郭兰勤(1985—), 男, 陕西米脂人, 在读硕士, 主要从事数字地形分析及 GIS 应用研究。E-mail: guolanqing1@163.com

**[通信作者]** 杨勤科(1962—), 男, 陕西陇县人, 教授, 博士, 主要从事区域水土流失与 GIS 应用研究。E-mail: qkyang@nwu.edu.cn

**Key words:** slope; re-scaling; fractal; resolution; fractal dimension

坡度是对地面倾斜程度的定量描述,也是一个基本的地貌形态指标。坡度通过重力作用,对地表径流、土壤侵蚀的发生及侵蚀强度的大小、水土保持措施的制定与布设、地表物质能量的迁移转换等产生影响,因而是研究与建立土壤侵蚀与流域水文评价与预报模型的重要参数<sup>[1-4]</sup>。在大中流域、区域甚至全球尺度的土壤侵蚀和水文模型中,坡度一般基于中低分辨率数字高程模型(Digital elevation model, DEM)提取,但有一个显著的问题是随着 DEM 分辨率的降低,由其提取的坡度将发生严重的衰减<sup>[5-7]</sup>,所以迫切需要建立一种能对中低分辨率 DEM 中提取的、发生了衰减的坡度进行变换的有效方法。在国内,杨昕<sup>[2,8]</sup>提出了基于坡谱分析的坡度变换方法;Yang<sup>[9]</sup>提出了直方图匹配的坡度变换,并实现了 50 m(基于 1:250 000 的地形图)和 25 m(基于 1:100 000 地形图)2 种分辨率之间坡度的尺度转换;徐静等<sup>[10]</sup>利用分形方法将 54"和 27"分辨率 DEM 的坡度分别变换为 3"分辨率坡度。在国外,Zhang 等<sup>[5]</sup>通过分形特性和变异函数技术,实现了由千米级以上低分辨率 DEM 坡度到百米级的转换;Pradhan 等<sup>[11]</sup>将 1 000 m 低分辨率 DEM 坡度变换为 50~600 m 分辨率的坡度。目前,已有利用分形进行坡度变换的研究<sup>[5,10-11]</sup>,且对较宏观尺度(栅格尺寸 $\geq 1 000$  m)的坡度变换已取得了良好效果,

但尚缺乏对中低分辨率 DEM(栅格尺寸 100 m 向更高分辨率的变换)的系统研究,同时也缺乏对不同分辨率差距变换效果的分析。考虑到 100 m 分辨率 DEM 已覆盖全国,90 m 分辨率 SRTM 已覆盖了全球的大部分地区<sup>[12]</sup>,因而本研究在 Zhang 等<sup>[5]</sup>的坡度分形变换方法的基础上,尝试对 100 m 分辨率坡度进行降尺度变换,以期为大中流域和区域土壤侵蚀评价提供较高精度的坡度数据,并为中低分辨率坡度变换方法的完善奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域与数据

以位于陕北典型黄土高原丘陵沟壑区的县南沟流域为例,将该地区 1:10 000 比例尺数字线划图(Digital line graphic, DLG)插值生成 5, 10, 25, 50 和 100 m 分辨率的 DEM<sup>[13-14]</sup>,以 ArcGIS 中计算的较高分辨率 DEM 的坡度为参照,尝试对较低分辨率坡度进行变换。根据表 1 的坡度变换方案,在研究区域(图 1)中从小到大选择 4 个区作为本次试验的建模区和检验区,如 100 m 分辨率坡度变换为 50 m,是以区 III 作为建模区,以区 IV 作为检验区,原始坡度为  $SLP_{100}$ ,参照坡度为  $SLP_{50}$ ,变换结果为  $SLP_{100-50}$ (其中下标 100-50 表示 100 m 变换为 50 m),其他分辨率坡度的变换以此类推。

表 1 坡度变换试验方案表

Table 1 Slope re-scaling scheme

建模区→ 检验区 Modeling → verification	原始 坡度 Original- slope	参照 坡度 Referred slope	变换 结果 Result	建模区→ 检验区 Modeling→ verification	原始 坡度 Original- slope	参照 坡度 Referred slope	变换 结果 Result	建模区→ 检验区 Modeling→ verification	原始 坡度 Original- slope	参照 坡度 Referred slope	变换 结果 Result
III→IV	$SLP_{100}$	$SLP_{50}$	$SLP_{100-50}$	III→IV	$SLP_{50}$	$SLP_{25}$	$SLP_{50-25}$	II→III	$SLP_{25}$	$SLP_{10}$	$SLP_{25-10}$
III→IV	$SLP_{100}$	$SLP_{25}$	$SLP_{100-25}$	II→III	$SLP_{50}$	$SLP_{10}$	$SLP_{50-10}$	I→II	$SLP_{25}$	$SLP_5$	$SLP_{25-5}$
II→III	$SLP_{100}$	$SLP_{10}$	$SLP_{100-10}$	I→III	$SLP_{50}$	$SLP_5$	$SLP_{50-5}$	I→II	$SLP_{10}$	$SLP_5$	$SLP_{10-5}$

### 1.2 坡度的分形变换方法

1) 分维数。曼德尔布罗特(Mandelbrot)于 1967 年创立了分形理论<sup>[15]</sup>。目前,分维数的计算方法主要有豪斯道夫维数、信息维数、关联维数、相似维数、盒维数、傅立叶维数等<sup>[16]</sup>。本研究采用豪斯道夫-波西科维奇维数的变异函数法,通过分形维数和标准差的关系来计算 DEM 的分维数。

2) 坡度分形变换模型。根据地形的分形特征和半变异函数方法,坡度是分维数和分辨率的函数<sup>[5,17]</sup>,即有:

$$\theta = \alpha d^{1-D} \quad (1)$$

式中: $\theta$ 为坡度, $\alpha$ 为分形系数, $d$ 为 DEM 分辨率, $D$ 为 DEM 分维数。

由于上式是针对一个区域 DEM 坡度的整体分析,所以无法对低分辨率栅格的每一个坡度值进行变换。

为了得到每个栅格的坡度,Zhang 等<sup>[5]</sup>通过对高分辨率 DEM 划分子区域的方式,将整个工作区的分形维数计算转换为对低分辨率 DEM 每个栅格单元的计算。其研究假设:(1)最小的子区域窗口由较低分辨率 DEM 的  $3 \times 3$  个像元组成;(2)每个子区域中,地形分形系数  $\alpha$  和分维数  $D$  保持不变;(3)

通过遍历计算, 可求得研究区分形维数表面。

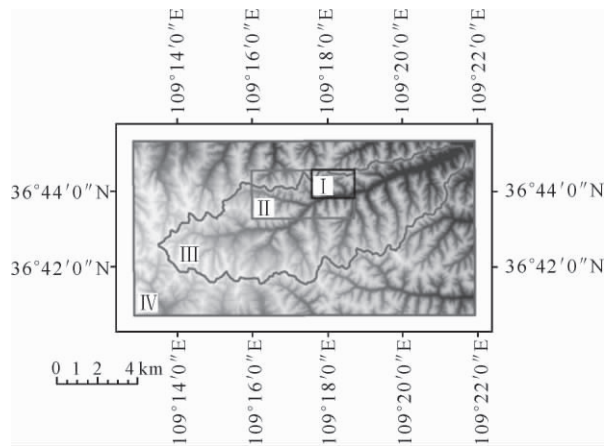


图 1 试验的建模区和检验区

Fig. 1 Modeling and verification area of test

本研究在较低分辨率 DEM 中分别用  $3 \times 3$  和  $5 \times 5$  个像元进行子区域划分(子区域数量大于 90 个), 针对这 2 种划分子区域的方案, 分别用抽样方法在每个子区域中用较高分辨率 DEM 计算分维数和标准差, 建立 2 种方案标准差和分维数的回归方程为:

$$D_n = f(\sigma'_n), (n=3, 5). \quad (2)$$

式中:  $D_n$  和  $\sigma'_n$  分别为较高分辨率 DEM 高程值在较低分辨率 DEM 子区域范围内的分维数和标准差,  $n$  表示较低分辨率 DEM 子区域窗口的大小, 取值为 3 或 5(以下  $n$  若无特别说明, 均表此意, 各参数下标  $n$  表示  $3 \times 3$  和  $5 \times 5$  2 种划分方案得到的结果)。

因在相同的子区域范围内, 较高分辨率 DEM 的标准差  $\sigma'_n$  和较低分辨率 DEM 的标准差  $\sigma_n$  近似相等, 故利用邻域分析法, 在  $3 \times 3$  或  $5 \times 5$  的窗口中计算出较低分辨率 DEM 的整个标准差值表面  $\sigma_n$ , 用  $\sigma_n$  代替  $\sigma'_n$ , 并将其代入式(2), 则可得到较低分辨率 DEM 的  $D_n$  值表面。将  $D_n$  代入式(1), 式(1)

的  $D$  相当于此处的  $D_n$ , 就可用已知较低分辨率坡度  $\theta_c$  计算分形系数  $\alpha$ , 为了表示 2 种子窗口划分方案, 将  $\alpha$  表示为  $\alpha_n$ , 即:

$$\alpha_n = \frac{\theta_c}{d^{1-D_n}}, (n=3, 5). \quad (3)$$

式中:  $\theta_c$  为较低分辨率坡度,  $D_n$  为较低分辨率 DEM 分维数,  $\alpha_n$  为分形系数。

将由公式(3)计算的分形系数  $\alpha_n$  代入式(1), 化简得到坡度的最终变换模型为:

$$\theta_x = \theta_c \times \left( \frac{d_f}{d_c} \right)^{1-D_n}. \quad (4)$$

式中:  $\theta_x$  为变换后的坡度,  $d_c$  为较低分辨率 DEM 分辨率,  $d_f$  为目标 DEM 分辨率。根据式(4), 就可以利用分维数表面  $D_n$  和较低分辨率坡度表面估算较高分辨率的坡度表面。

3) 坡度变换与分析。决定系数的大小反映了两变量的相关程度, 故可通过计算表 1 中待变换坡度频率和参照坡度频率, 以及参照坡度频率与输出结果坡度频率的决定系数的方法, 完成对变换结果的评价。可表示为:

$$R^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}. \quad (5)$$

式中:  $R^2$  为决定系数 (Coefficient of determination),  $X_i, Y_i$  分别为变换后和原始目标分辨率坡度属性表中的坡度频率,  $\bar{X}, \bar{Y}$  分别为变换后和原始目标分辨率各坡度频率的平均值,  $n$  是坡度频率数组。

## 2 结果与分析

### 2.1 分维数表面特征分析

2.1.1 分形模型分析 用  $3 \times 3$  和  $5 \times 5$  划分子区域方法建立的部分建模区部分分形模型如表 2 所示, 表中 Sig 为重要性检验。

表 2 按照  $3 \times 3$  和  $5 \times 5$  划分子区域方法建立的部分建模区分维数的计算模型

Table 2 Part of fractal dimension model of the modeling area based on  $3 \times 3$  and  $5 \times 5$

变换坡度 Re-scaling slope	子窗口大小 Subwindow size	分维模型 Fractal model	$R^2$	Sig	建模区→检验区 Modeling→ verification
SLP <sub>100-50</sub>	3×3	$D = -0.0096\sigma + 1.3182$	0.65	0.00	III → IV
	5×5	$D = -0.0081\sigma + 1.592$	0.64	0.00	III → IV
SLP <sub>50-25</sub>	3×3	$D = 0.0001\sigma^2 - 0.0136\sigma + 1.355$	0.66	0.00	III → IV
	5×5	$D = -0.0071\sigma + 1.434$	0.65	0.00	III → IV
SLP <sub>25-10</sub>	3×3	$D = -0.0113\sigma + 1.210$	0.37	0.00	II → III
	5×5	$D = -0.0108\sigma + 1.310$	0.61	0.00	II → III
SLP <sub>10-5</sub>	3×3	$D = -0.0678\ln\sigma + 1.144$	0.34	0.00	I → II
	5×5	$D = -0.0092\sigma + 1.1305$	0.27	0.00	I → II

从表 2 可以看出,对于 100 和 50 m 分辨率坡度的降尺度变换,利用  $5 \times 5$  和  $3 \times 3$  划分子区域方法建立分形模型的  $R^2$  均比较高;对 25 m 分辨率 DEM,用  $3 \times 3$  划分子区域方法建立分形模型的  $R^2$  较低;对 10 m 分辨率 DEM 建立的模型,不管采用哪种划分子区域方法,所得  $R^2$  均比较低。说明与较低分辨率 DEM 相比,较高分辨率 DEM 在子区域变小的同时,标准差和分维数的相关性变弱。同时由表 2 还可看出,用  $3 \times 3$  划分子区域方法建立的分形模型既有线性回归方程,又有多项式和对数回归方程,而用  $5 \times 5$  划分子区域方法建立的分形模型均是

线性回归方程,表明后者建立的模型比较稳定,易于进行模型之间的对比与分析。

2.1.2 纹理特征 由图 2 可知,子窗口大小不同,计算的分维数结果的纹理也有所不同。以区 I 为例,基于  $3 \times 3$  划分子区域计算的分维值表面比较离散,看上去较为粗糙;而基于  $5 \times 5$  划分子区域计算的分维数表面比较连续,过渡平滑,纹理清晰。区 II 和区 III 计算的分维数图具有相同的特征。图 3 是区 I 建立的模型(基于  $5 \times 5$  子区域)应用于区 II 估算的 3 个分维数表面。可见,所建立模型具有比较好的预测能力。

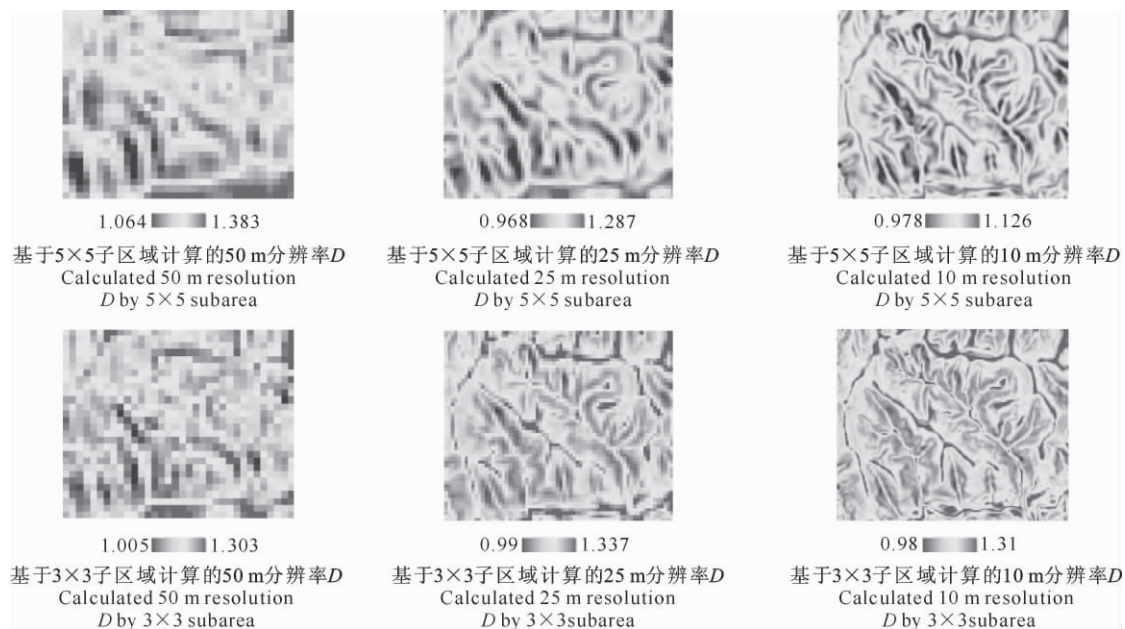


图 2 在区域 I 基于  $3 \times 3$  和  $5 \times 5$  划分子区域的不同分辨率 DEM 的分维数  $D$  表面

Fig. 2 Fractal surface  $D$  of the difference resolution DEM calculated by  $3 \times 3$  and  $5 \times 5$  subarea in area I

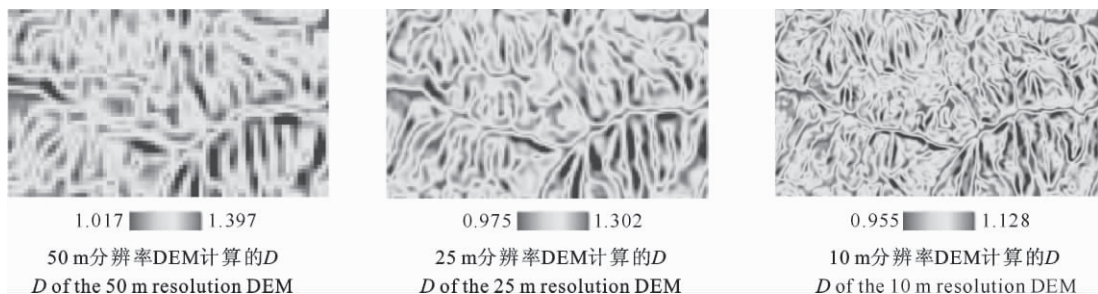


图 3 基于  $5 \times 5$  子区域计算的检验区 II 的不同分辨率 DEM 的分维数  $D$  表面

Fig. 3 Fractal surface  $D$  of the different resolution DEM calculated by  $5 \times 5$  methods in building area II

从  $D$  值表面还可看出,在 DEM 的山脊线和山谷线位置分维值比较大,在沟沿线附近分维值比较小。这是由于分维数和标准差具有负线性相关性,因而在山脊线和山谷线等比较平缓的部位,局地标准差小,因而分维值大。反之,在沟坡等比较陡、地形破碎的部位,局地标准差大,因而分维值小。

2.1.3 统计特征 采用不同划分子窗口的方法,计算的分维数统计特征如表 3 所示。由表 3 可见,100,50,25 m 分辨率 DEM 基于  $5 \times 5$  划分子区域的分维数平均值和标准差大于基于  $3 \times 3$  的计算结果,同时随着分辨率的提高,分维数最大值、平均值和标准差均逐渐变小。

综上,通过比较  $3 \times 3$  和  $5 \times 5$  2 种划分子区域方法建立的模型、计算的分维数表面以及分维数统计特征,可知  $5 \times 5$  划分子区域计算的分维值模型和

分维值表面效果较好,因此本研究采用  $5 \times 5$  划分子区域的方法对变换结果进行分析。

表 3 建模区 I 分维数表面的统计特征

Table 3 Fractal dimension surface statistics of the building area I

子窗口大小 Subwindow size	分辨率/m Resolution	分维数 Fractal dimension extent	分维数平均值 Fractal dimension mean	标准差 Std
3×3	100	1.02~1.45	1.24	0.070
	50	1.01~1.30	1.14	0.057
	25	0.99~1.34	1.09	0.049
	10	0.98~1.31	1.05	0.034
5×5	100	1.18~1.54	1.35	0.080
	50	1.06~1.38	1.22	0.058
	25	0.97~1.29	1.13	0.058
	10	0.98~1.13	1.06	0.026

2.2 相邻分辨率变换结果分析

利用基于  $5 \times 5$  划分子区域方法建立的坡度分形变换模型(式 4)对表 1 各方案进行降尺度变换,并将建模区的分形模型应用于对应的检验区,得到

各检验区坡度变换统计数据如表 4 所示,检验区中、低分辨率坡度变换前后和原始分辨率坡度的累积频率曲线见图 4。

表 4 各检验区相邻分辨率和跨分辨率坡度的分形变换统计数据

Table 4 Statistics of the adjacent and across resolution slope rescaling by fractal method

相邻/跨分辨率变换 Adjacent/Across resolution re-scaling	建模区→检验区 Modeling→Verification	原始和参照坡度及变换结果 Original and referred slope and re-scaling result	坡度值 Slope extent	平均值 Mean	标准差 STD
相邻分辨率变换 Adjacent re-scaling	Ⅲ→Ⅳ	<i>O-SLP</i> <sub>100</sub>	0.10~33.90	14.71	6.40
		<i>SLP</i> <sub>100-50</sub>	0.13~37.55	18.06	7.41
		<i>R-SLP</i> <sub>50</sub>	0.14~43.04	19.13	7.93
		<i>O-SLP</i> <sub>50</sub>	0.14~43.04	19.12	7.93
		<i>SLP</i> <sub>50-25</sub>	0.16~48.19	21.26	8.62
		<i>R-SLP</i> <sub>25</sub>	0.00~51.10	21.56	9.09
	Ⅱ→Ⅲ	<i>O-SLP</i> <sub>25</sub>	0.11~53.17	24.73	9.88
		<i>SLP</i> <sub>25-10</sub>	0.13~52.78	27.47	9.97
		<i>R-SLP</i> <sub>10</sub>	0.02~66.12	27.68	11.04
		<i>O-SLP</i> <sub>10</sub>	0.20~65.35	29.28	10.27
		<i>SLP</i> <sub>10-5</sub>	0.22~62.74	30.26	10.20
		<i>R-SLP</i> <sub>5</sub>	0.07~71.90	30.29	10.83
跨分辨率变换 Across re-scaling	Ⅲ→Ⅳ	<i>SLP</i> <sub>100-25</sub>	0.16~44.83	22.22	8.66
		<i>R-SLP</i> <sub>25</sub>	0.00~51.10	21.56	9.09
	Ⅱ→Ⅲ	<i>O-SLP</i> <sub>100</sub>	0.22~33.09	14.89	6.58
		<i>SLP</i> <sub>100-10</sub>	0.60~67.24	33.62	12.43
		<i>R-SLP</i> <sub>10</sub>	0.02~66.11	27.58	11.05
		<i>O-SLP</i> <sub>50</sub>	0.14~36.66	18.29	7.44
		<i>SLP</i> <sub>50-10</sub>	0.23~51.26	25.29	9.85
		<i>R-SLP</i> <sub>10</sub>	0.00~58.23	26.65	10.15
	Ⅰ→Ⅲ	<i>SLP</i> <sub>50-5</sub>	0.69~62.21	32.78	10.97
		<i>R-SLP</i> <sub>5</sub>	0.01~72.04	28.73	11.65
		<i>O-SLP</i> <sub>25</sub>	0.51~48.71	26.25	9.34
		<i>SLP</i> <sub>25-5</sub>	0.75~52.48	30.99	9.30
Ⅰ→Ⅱ	<i>R-SLP</i> <sub>5</sub>	0.07~71.90	30.30	10.84	

注:*O-SLP*<sub>100</sub>表示原始坡度;*SLP*<sub>100-50</sub>表示变换后结果;*R-SLP*<sub>50</sub>表示参照坡度;其他以此类推。表 5 同。

Note:*O-SLP*<sub>100</sub> means original slope;*SLP*<sub>100-50</sub> means re-scaling result;*R-SLP*<sub>50</sub> means referred slope;otherred in the same way. Table 5 is the same.

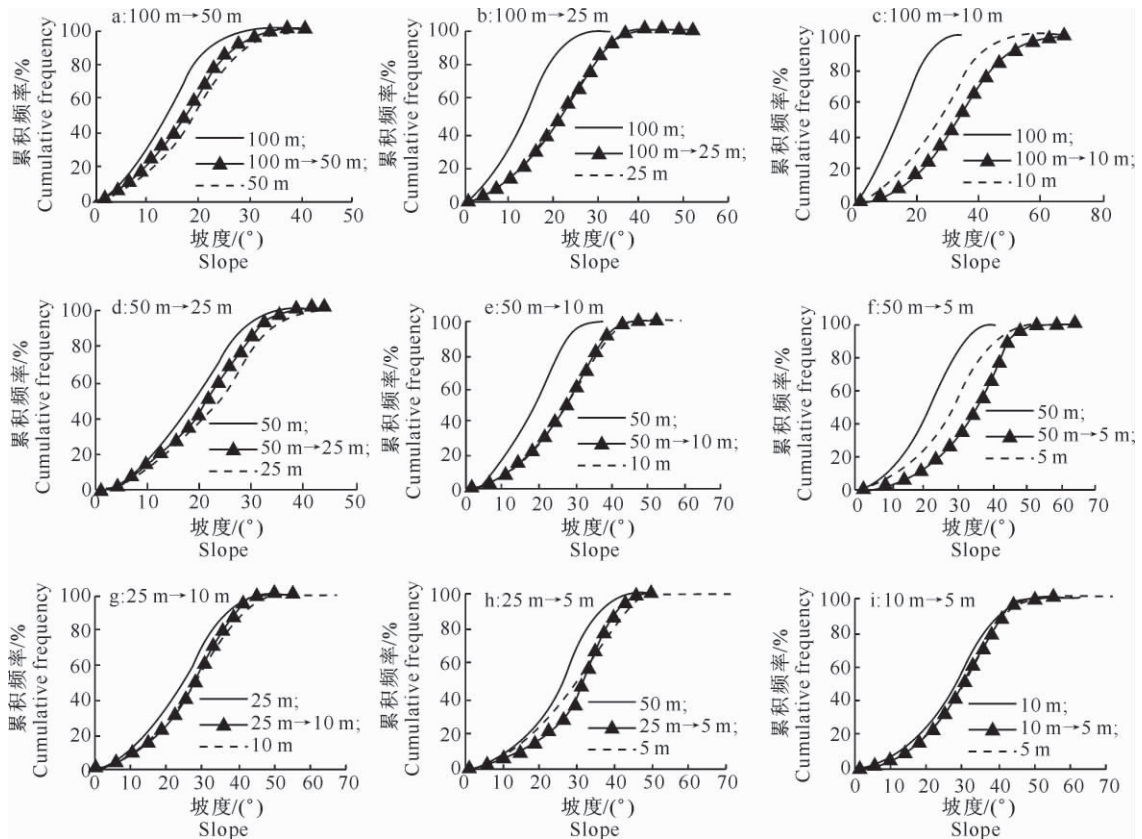


图 4 检验区各中低分辨率坡度变换前后和原始分辨率坡度的累积频率曲线

Fig. 4 Re-scaling and original slope cumulative frequency curve of the verification area

由表 4 可见,相邻分辨率坡度变换结果中,100 m 分辨率坡度变换为 50 m 后的坡度最大值、平均值和标准差比较接近原 50 m 分辨率坡度的统计值,其中平均值相差 1.07°,且累积频率曲线(图 4-a)也比较接近;50 m 变换为 25 m 得到了较好的变换效果,变换前后及原 25 m 分辨率坡度的累积频率曲线(图 4-d)说明,变换后坡度累计频率曲线更接近原 25 m 分辨率坡度的累积频率曲线;25 m 分辨率坡度变换为 10 m 和 10 m 分辨率坡度变换为 5 m 的坡度平均值均更接近原始分辨率坡度,但是变换后坡度最大值反而减小;10 m 变换为 5 m 分辨率时坡度标准差减小,没有达到变换目的,尚有待于进一步研究。

### 2.3 跨分辨率变换结果分析

检验区跨分辨率降尺度变换的坡度统计数据(表 4)表明,100 m 分辨率坡度变换为 25 m 和原始 25 m 分辨率坡度非常接近,平均值相差 0.66°,标准差相差 0.43,但是变换为 10 m 的结果均较原始 10 m 分辨率坡度的各统计特征值大,平均坡度大 6.04°;50 m 变换为 10 m 的坡度更接近原始 10 m 分辨率坡度,变换为 5 m 时的坡度则较原始 5 m 分

分辨率的平均值大 3.67°;25 m 变换为 5 m 分辨率的坡度平均值近似等于原始 5 m 时的分辨率坡度,坡度最大值有所增加,但标准差却略有减小。从图 4 各原始坡度跨分辨率降尺度变换的累积频率曲线可以看出,当变换为 0.2~0.25 倍原始坡度分辨率(图 4-b、4-e、4-h)时,变换后的坡度和原始坡度具有相似的累积频率曲线,也说明变换后衰减的坡度得到了一定的增加,并且与原始分辨率坡度较为相似。但是当待变换坡度分辨率和参照坡度分辨率差异更大时(图 4-c、4-f),变换后的坡度平均值将大于参照坡度,效果较差。

### 2.4 精度评价

通过计算检验区参照坡度频率与变换后坡度频率之间、以及待变换坡度频率与参照坡度频率之间决定系数的方法对变换结果进行评价。计算结果(表 5)表明,原 100 m 分辨率坡度频率和原 50、25 m 分辨率坡度频率的  $R^2$  均较小,变换后则提高到 0.943 和 0.978,说明 100 m 变换为 50 和 25 m 坡度更接近参照坡度;但是原 100 m 分辨率坡度变换为 10 m 后, $R^2$  只有 0.707,说明 100 m 变换为 10 m 后的坡度与原 10 m 分辨率参照坡度的相关性较弱,变

换效果较差;50 m 分辨率坡度变换为 25 和 10 m 分辨率坡度时,变换后坡度与 25 和 10 m 分辨率参照坡度的  $R^2$  较大,但是变换为 5 m 时  $R^2$  较小,只有 0.773;25 m 分辨率坡度变换后, $R^2$  增加,但是 10 m 分辨率坡度变换为 5 m 后  $R^2$  不变,说明 10 m 分辨

率坡度变换为 5 m 并没有达到变换的效果。决定系数的大小再次说明,25,50 和 100 m 分辨率坡度合适的降尺度变换范围为 0.2~1.0 倍的原始分辨率坡度,而最佳变换坡度范围为 0.2~0.25 倍的原始分辨率坡度。

表 5 检验区坡度变换前后的频率与参照坡度频率的决定系数

Table 5  $R^2$  of the refer slope frequency and fore-and-aft re-scaling slope frequency in verification area

原始和变换后坡度 Original and re-scaling slope	参照坡度 Refer slope	$R^2$	原始和变换后坡度 Original and re-scaling slope	参照坡度 Refer slope	$R^2$	原始和变换后坡度 Original and re-scaling slope	参照坡度 Refer slope	$R^2$
SLP <sub>100-50</sub>	SLP <sub>50</sub>	0.943	SLP <sub>50-25</sub>	SLP <sub>25</sub>	0.933	SLP <sub>25-10</sub>	SLP <sub>10</sub>	0.941
O-SLP <sub>100</sub>	SLP <sub>50</sub>	0.341	O-SLP <sub>50</sub>	SLP <sub>25</sub>	0.279	O-SLP <sub>25</sub>	SLP <sub>10</sub>	0.834
SLP <sub>100-25</sub>	SLP <sub>25</sub>	0.978	SLP <sub>50-10</sub>	SLP <sub>10</sub>	0.956	SLP <sub>25-5</sub>	SLP <sub>5</sub>	0.828
O-SLP <sub>100</sub>	SLP <sub>25</sub>	0.006	O-SLP <sub>50</sub>	SLP <sub>10</sub>	0.016	O-SLP <sub>25</sub>	SLP <sub>5</sub>	0.748
SLP <sub>100-10</sub>	SLP <sub>10</sub>	0.707	SLP <sub>50-5</sub>	SLP <sub>5</sub>	0.773	SLP <sub>10-5</sub>	SLP <sub>5</sub>	0.978
O-SLP <sub>100</sub>	SLP <sub>10</sub>	0.051	O-SLP <sub>50</sub>	SLP <sub>5</sub>	0.104	O-SLP <sub>10</sub>	SLP <sub>5</sub>	0.978

### 3 讨论与结论

#### 3.1 分形维数表面的生成

以较低分辨率 DEM 的  $3 \times 3$  或  $5 \times 5$  子窗口大小划分子区域,计算落入该子窗口的较高分辨率 DEM 高程数据的分维数和标准差,发现分维数和标准差具有一定的相关性,可建立二者的回归方程。在相同子区域范围内,不同分辨率 DEM 高程的标准差比较稳定,利用  $3 \times 3$  或  $5 \times 5$  邻域分析法,只要计算出低分辨率 DEM 每一个栅格的标准差,则可以计算出较低分辨率 DEM 每一个栅格的分维数  $D$ 。

#### 3.2 分形坡度变换

利用地形分形特性和变异函数技术,得出坡度是分辨率和分形维数的函数,因此只要建立试验区的分形维数模型,就可以对中低分辨率坡度进行变换,将建模区模型应用于更大范围的检验区,可得到相似的坡度变换效果。在用  $3 \times 3$  和  $5 \times 5$  2 种子窗口划分方案得到的坡度分形变换模型中,以  $5 \times 5$  划分子窗口建立的坡度变换模型的效果较好。

#### 3.3 分形坡度变换的适宜范围

在分形变换的有效范围内,即变换范围为 0.2~1.0 倍的原始坡度分辨率时,100,50 和 25 m 分辨率坡度降尺度变换后的坡度与目标分辨率坡度具有统计意义上相似、分布基本一致的坡度值,其中最佳变换范围为 0.2~0.25 倍的原始分辨率坡度。

本研究发现,100 m 分辨率坡度变换为 10 m 时,出现了较原始 10 m 分辨率坡度平均值更大的情况;50 m 分辨率坡度变换为 5 m 亦是如此。25 m 分辨率坡度变换为 10 m 后,坡度最大值反而较原

25 m 分辨率坡度有所减小;25 和 10 m 分辨率坡度变换为 5 m 后,坡度标准差均较原始分辨率坡度有所减小,这些问题尚有待通过合适的点对点比较进行进一步的分析。由于分形变换模型与分维数、低分辨率坡度和 DEM 分辨率有关,故 DEM 生成方法、坡度算法和尺度范围不同,产生的结果也不同,这些均尚有待通过对坡度变换的不确定性分析进行研究和解决。

#### [参考文献]

- [1] 杨勤科,贾大韦,李锐,等.基于 DEM 的坡度研究:现状与展望[J].水土保持通报,2007,27(1):146-150.  
Yang Q K, Jia D W, Li R, et al. Researches on DEM derived slope: A review and prospective [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2007, 27(1): 146-150. (in Chinese)
- [2] 杨昕,汤国安.多尺度 DEM 坡度的分形特征:以陕北黄土高原地区为例[M]//林振山.中国地理学会 2007 年学术年会论文摘要集.江苏南京:南京师范大学出版社,2007:22-25.  
Yang X, Tang G A. The fractal property of multi-scale DEM slope: Taking loessial landform as a case study [M]//Lin Z S. The Paper Sets Conference of the Chinese Geographical Social in 2007. Nanjing, Jiangsu: Nanjing Normal University Publisher, 2007: 22-25. (in Chinese)
- [3] 杨勤科,李锐,曹明明.区域土壤侵蚀定量研究的国内外进展[J].地球科学进展,2006,21(8):849-856.  
Yang Q K, Li R, Cao M M, et al. Advances of quantitative assessment on regional soil erosion [J]. Advance in Earth Sciences, 2006, 21(8): 849-856. (in Chinese)
- [4] 周启鸣,刘学军.数字地形分析[M].北京:科学出版社,2006.  
Zhou Q M, Liu X J. Digital terrain analysis [M]. Beijing: Science Publisher, 2006. (in Chinese)
- [5] Zhang X Y, Drake N A, Wainwright J, et al. Comparison of slope estimates from low resolution DEMs: Scaling issues and a fractal method for their solution [J]. Earth Surface Processes

- and Landforms, 1999, 24: 763-779.
- [6] 汤国安, 赵牡丹, 李天文, 等. DEM 提取黄土高原地面坡度的不确定性 [J]. 地理学报, 2003, 58(6): 824-830.  
Tang G A, Zhao M D, Li T W, et al. Modeling slope uncertainty derived from DEMs in Loess Plateau [J]. Journal of Geographical Science, 2003, 58(6): 824-830. (in Chinese)
- [7] 汤国安, 杨勤科, 张 勇, 等. 不同比例尺 DEM 提取地面坡度的精度研究: 以在黄土丘陵沟壑区的试验为例 [J]. 水土保持通报, 2001, 21(1): 53-56.  
Tang G A, Yang Q K, Zhang Y, et al. Research on accuracy of slope derived from DEMs of diferent map scales: Taking loess hilly and gully region as a case study [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001, 21(1): 53-56. (in Chinese)
- [8] 杨 昕. 基于 DEM 地形指数的尺度效应与尺度转换 [D]. 南京: 南京师范大学, 2007.  
Yang X. Scale effect and scaling model of topographic index based on DEMs [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2007. (in Chinese)
- [9] Yang Q K, David J, Li R, et al. Re-scaling lower resolution slopes by histogram matching [C]//Zhou Q M, Lees B, Tang G A. Advances in Digital Terrain Analysis. Berlin: Springer, 2008: 193-210.
- [10] 徐 静, 任立良, 程媛华, 等. 不受 DEM 空间分辨率影响的地形指数计算 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2008, 48(6): 983-986, 990.  
Xu J, Ren L L, Cheng Y H. Topographic index calculation that is independent of the DEM spatial resolution [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2008, 48(6): 983-986, 990. (in Chinese)
- [11] Pradhan N R, Tachikawa Y, Takara K. A downscaling method of topographic index distribution for matching the scales of model application and parameter identification [J]. Hydrol Processes, 2006, 20(6): 1385-1405.
- [12] 蔡清华, 杨勤科. SRTM 与地形图生成 DEM 的地形表达能力对比 [J]. 水土保持通报, 2009 29(3): 183-186.  
Cai Q H, Yang Q K. Comparison of terrain representation of SRTM and topographic dirived DEMs [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29(3): 183-186. (in Chinese)
- [13] 杨勤科, 师维娟, McVicar T R, 等. 水文地貌关系正确 DEM 的建立方法 [J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(4): 1-6.  
Yang Q K, Shi W J, McVicar T R, et al. On constructing methods of hydrologically correct DEMs [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007, 5(4): 1-6. (in Chinese)
- [14] Yang Q K. Developing a digital elevation model using ANU-DEM for the coarse sandy hilly catchments of the loess plateau, china [J]. CSIRO Land and Water Technical Report, 2005, 7(5): 1-74.
- [15] 张济忠. 分形 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.  
Zhang J Z. Fractal [M]. Beijing: Tsinghua University Publisher, 1995. (in Chinese)
- [16] 朱永清, 李占斌, 鲁克新, 等. 地貌形态特征分形信息维数与像元尺度关系研究 [J]. 水利学报, 2005, 36(3): 333-338.  
Zhu Y Q, Li Z B, Lu K X, et al. Relationship between fractal dimensions of watershed topography characteristics and grid cell size [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(3): 333-338. (in Chinese)
- [17] Klinkenberg K, Goodchild M F. The fractal properties of topography: A comparison of methods [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1992, 17(3): 217-234.

(上接第 172 页)

- [23] 刘贤赵, 衣华鹏. 渭北旱塬土壤水分空间变异性 [J]. 山地学报, 2004, 22(5): 521-527.  
Liu S Z, Yi H P. The spatial heterogeneity of soil moisture in Weibei dry highland [J]. Journal of Mountain Science, 2004, 22(5): 521-527. (in Chinese)
- [24] Cambardella C A, Moorman A T, Novak J M, et al. Field-scale heterogeneity of soil properties in central Iowa soil [J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58: 1501-1511.