

文章编号: 1008 - 2786 - (2017) 2 - 230 - 08

DOI: 10. 16089/j. cnki. 1008 - 2786. 000216

# 一种自适应定权地形复杂度模型

张倩宁<sup>1</sup> 黄泽纯<sup>1 2 \*</sup> 徐 柱<sup>1 2</sup> 洪安东<sup>1</sup> 张瑞芳<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学 地球科学与环境工程学院, 四川 成都 611756;

2. 西南交通大学 高速铁路运营安全空间信息技术国家地方联合工程实验室, 四川 成都 611756)

**摘 要:** 地形复杂度指标是数字地形分析中重要的参数。地形复杂度的定量表达能够为地形特征采样理论、数字地形分析(Digital terrain analysis, DTA)的不确定性分析、水文分析等方面提供重要依据。本文基于多因素地形因子指标,采用主成分分析方法构建一个自适应定权地形复杂度模型,以实现地形特征的综合描述:选取坡度(Slope,  $S$ )、全曲率(Total Curvature,  $Cur$ )、地形起伏度(Relief,  $Rel$ )和地形粗糙度(Rough,  $Rou$ )四个单一地形因子指标构建综合地形复杂度指标(Integrated terrain complexity index, ITCI, 后文简称  $C$ );通过实验训练数据实现地形复杂度指标的解算,得到  $C$  与  $S$ 、 $Cur$ 、 $Rel$ 、 $Rou$  之间的经验公式;根据经验公式计算实验区域的地形复杂度指标值,并结合实验区域的地形类型,得到地形复杂度指标值与地形类型之间的对应关系;选取了平原、丘陵和山区三个实验区域,计算  $C$  值对其对应关系进行验证。实验结果表明,本文构建的地形复杂度指标与地形特征之间的对应关系是合理的,能够有效描述地形特征。本文研究对于地形特征采样理论和 DTA 的不确定性分析等方面具有重要的参考价值和应用价值。

**关键词:** 地形复杂度指标;主因子分析;经验公式;地形特征采样

中图分类号: P237

文献标志码: A

地形复杂度指标是数字地形分析中重要的参数,定量地表示地形复杂度,能够为地形特征采样理论、DTA 的不确定性分析、水文分析等提供重要依据<sup>[1][2]</sup>。目前已有一些研究学者对地形复杂度进行了研究。例如,可以将坡度作为衡量地形复杂程度的指标<sup>[3]</sup>,研究地形复杂度与坡度坡向误差分布的关系,或者将地形复杂度应用于不确定性分析<sup>[4]</sup>,也有人将信息维数值作为衡量地形复杂度的指标讨论了 DEM 地形复杂度对坡度提取的影响<sup>[5]</sup>。还有一些学者采用元分形维值<sup>[6][7]</sup>、空间平

面之间的夹角<sup>[8][9]</sup>描述地形复杂程度。上述几种描述地形变化程度的地形复杂度指标多为单一的地形指标,仅反映了地形特征的某一方面,正如坡度用于描述地形曲面的起伏程度,地形粗糙度用于描述地表起伏的复杂程度。

部分学者提出了综合地形复杂度指标。例如,卢华兴等<sup>[10]</sup>基于多个单一地形因子,采用多因子分析方法提出了一种等权局部地形复杂度指标,但是该指标中单一地形因子指标的权重都相同,不具有差异性,很显然该地形复杂度指标具有一定的局限

收稿日期(Received date): 2016 - 10 - 11; 改回日期(Accepted date): 2017 - 02 - 17。

基金项目(Foundation item): 测绘地理信息公益性行业科研专项项目(201512028); 中央高校基本科研业务费专项资金(2682014CX017); 西南交通大学研究生创新实验实践项目(YC201514103) [Mapping Geographic Information Public Service Industry Research and Special Funds (201512028); Central Universities Fundamental Research Funds (2682014CX017); Graduate Innovative Experimental Practice Program Of Southwest Jiaotong University (YC201514103)]。

作者简介(Biography): 张倩宁(1992 -), 女, 山西夏县人, 博士研究生, 主要研究方向: 数字地形分析, GIS 时空数据挖掘与分析研究。 [Zhang Qianning(1992 -), female, born in Xiaxian, Shanxi province, China, Ph. D. candidate, research on digital terrain analysis and GIS spatial-temporal data analysis and mining] E-mail: zhangqianning1020@163.com

\* 通信作者(Corresponding author): 黄泽纯(1974 -), 男, 副教授, 主要研究方向: GIS 时空数据挖掘与分析研究。 [Huang Zechun(1974 -), male, associate professor, research on GIS spatial-temporal data analysis and mining] E-mail: zhuang2005@qq.com

性。为了克服等权局部地形复杂度指标的局限性,本文拟构建一种自适应定权的地形复杂度模型。研究思路为:首先采用多元统计分析中的主成分分析方法构建一种自适应定权的地形复杂度模型;然后对地形复杂度模型进行解算,得到地形复杂度指标经验公式;接着求取地形复杂度指标经验公式与地形类型之前的对应关系;最后通过实验验证地形复杂度模型和经验公式的合理性与有效性。

## 1 自适应定权地形复杂度模型

本文拟选取多个描述不同方面地形特征的单一地形因子进行融合以构建地形复杂度指标。卢华兴等<sup>[10]</sup>指出,多个地形因子融合时,相乘方式在总体上会造成地形复杂度值的压缩,不利于平衡各因子对地形复杂度指标的贡献。不难理解,构建地形复杂度模型时,当地形因子值小于 1 时,非线性模型会削弱该地形因子对地形复杂程度的描述程度;相反当地形因子值大于 1 时,非线性模型会增强该地形因子对地形复杂程度的描述。而线性模型可以更加客观地表达各地形因子对地形复杂度指标的贡献。同时,基于多个单一地形特征因子构建地形复杂度指标是一个多指标综合评价问题。因此本文拟采用主成分分析方法构建自适应定权地形复杂度模型。

主成分分析方法是通过数学转换,将原始指标进行线性组合表示为各主成分,然后根据一定的标准寻求最主要的主成分来分析描述事物特征。主成分分析方法能够去除指标间的冗余信息,须在原始指标数据间具有一定相关关系的基础上使用<sup>[11][12]</sup>。

使用主成分分析方法构建自适应定权地形复杂度模型的基本步骤为:1) 单一地形因子数据的标准化。由于对单一地形因子综合评价时,地形因子间的不同量纲对于分析结果影响十分巨大,因而需对单一地形因子数据标准化;2) 求取单一地形因子主成分分析矩阵,根据分析矩阵求取主成分分析矩阵的特征根、特征向量和贡献率。3) 确定主成分个数,解释主成分代表的现实意义。主成分个数一般依据实际数据及应用目的来确定,通常情况下根据累计贡献率来判断,当累计贡献率大于设定的阈值时,认为可解释原始数据中的大部分变异信息。4) 求取各地形因子指标的综合系数,对保留的主成分

进行综合,根据综合系数和地形因子指标构建自适应定权地形复杂度模型,具体见公式(1)。

$$C = \sum_{j=1}^m Coef_j \times T_j \quad (1)$$

其中,  $C$  为地形复杂度指标;  $Coef_j$  为指标  $j$  的综合系数;  $m$  为单一地形因子个数;  $T_j$  为第  $j$  个单一地形特征因子。

## 2 自适应定权地形复杂度指标

本文采用自适应定权地形复杂度模型构建地形复杂度指标时,首先选取适合的单一地形因子;然后采用样本数据构建地形复杂度指标。

### 2.1 单一地形因子选取

描述地形特征的单一地形因子主要有坡度、坡向、剖面曲率、平面曲率、全曲率、平均高程、地形起伏度、地形切割深度、地形粗糙度等<sup>[13]</sup>。

选取地形因子时,应遵循因子相对独立性和有效性<sup>[10]</sup>等基本原则。上述单一地形因子中,坡向和平均高程不适合用于描述区域内地形起伏特征和褶皱程度。全曲率已包含剖面曲率和平面曲率信息。地形起伏度和地形切割深度相关性较高,根据主成分分析方法和多因子分析理论可知,二者选择一个即可,此时本文选取地形起伏度。坡度用来反映地形曲面的倾斜程度。地形粗糙度用来刻画单位地表单元中地表起伏的复杂程度。综上所述,本文选取坡度、地形起伏度、全曲率和地形粗糙度四个单一地形因子来构建地形复杂度指标。四个单一地形因子的计算方法分别如下:本文采用三阶不带权差分方法<sup>[13]</sup>计算格网 DEM 坡度;地形起伏度<sup>[13]</sup>为区域内最大高程值与最小高程值之差;全曲率采用二次曲面方法<sup>[13]</sup>来计算;地形粗糙度通过地表的实际面积与投影面积比值来计算,本文采用 Hobson 方法<sup>[14]</sup>,根据邻域中九个像元的中心点依次构成八个三角形,三角形面积总和代表了九个像元中心点构成区域的表面积  $A_s$ ,水平投影面积  $A_p$  为 4 个单位像元面积,具体计算见公式(2)。

$$Rou = A_s/A_p = A_s/4/g^2 \quad (2)$$

其中,  $Rou$  为地形粗糙度;  $A_s$  为图 1 所示的九个像元中心点构成区域的表面积;  $A_p$  为水平投影面积。

### 2.2 自适应定权地形复杂度指标

从 2.1 小节可知,本文选取坡度、全曲率、地形

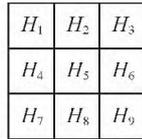


图1 3x3 局部窗口

Fig. 1 3x3 local window

粗糙度、地形起伏度四个指标作为构建地形复杂度模型的单一地形因子。根据自适应地形复杂度模型,得到本文的地形复杂度指标的数学表达式,见公式(3)。

$$C = a \times S + b + Cur + c \times Rel + d \times Rou \quad (3)$$

其中  $a$  为坡度因子在地形复杂度指标中系数值;  $b$  为全曲率因子在地形复杂度指标中系数值;  $c$  为地形起伏度因子在地形复杂度指标中系数值;  $d$  为地形粗糙度因子在地形复杂度指标中系数值。

### 2.3 通过实验构建地形复杂度指标

根据地形地貌分类标准,选取具有平原、盆地、丘陵、山地、高原等五种典型地形地貌区域作为实验区,总共选取了10个实验区域,在 <http://srtm.csi.cgiar.org/> 网站上下载每个实验区域 SRTM 系统测得的 90 m 分辨率 DEM 数据,10 个实验区域的遥感影像图如图 1 所示。

地形复杂度指标解算过程及结果具体如下:

(1) 在 10 个实验区域中,基于  $3 \times 3$  邻域,计算每个栅格的坡度、全曲率、地形起伏度、地形粗糙度四个单一地形因子值,得到 48 018 条样本数据。

(2) 由于计算的四个地形因子值不在同一量纲上,为了实现量纲的统一,且全面地反映单一地形因

子指标间的变异程度和相互影响程度,采用均值化方法对样本数据进行标准化。均值化标准化见公式(4)。

$$x_s = x/x_m \quad (4)$$

其中  $x_s$  为指标 X 均值化标准化后的值;  $x$  为指标 X 的原始值;  $x_m$  为指标 X 的均值。

(3) 进行主成分分析计算,基于四个单一地形因子的协方差矩阵,对样本数据进行分析,得到各主成分解释方差和载荷矩阵,具体见表 1 和表 2。

表 1 主成分分析中四个主成分解释方差大小以及累计方差大小

Tab. 1 The explained variance and total variance size in the four principal components

主成分	特征值	解释方差(%)	累积方差(%)
1	4.158	88.054	88.054
2	0.511	10.829	98.882
3	0.052	1.110	99.992
4	0.000	0.008	100.000

表 2 前两个主成分中各变量的载荷系数

Tab. 2 Load coefficient of each variable in the first two principal components

地形因子	主成分 1	主成分 2
坡度	1.599	-0.325
地形起伏度	1.023	0.051
地形粗糙度	0.091	-0.004
全曲率	0.738	0.635

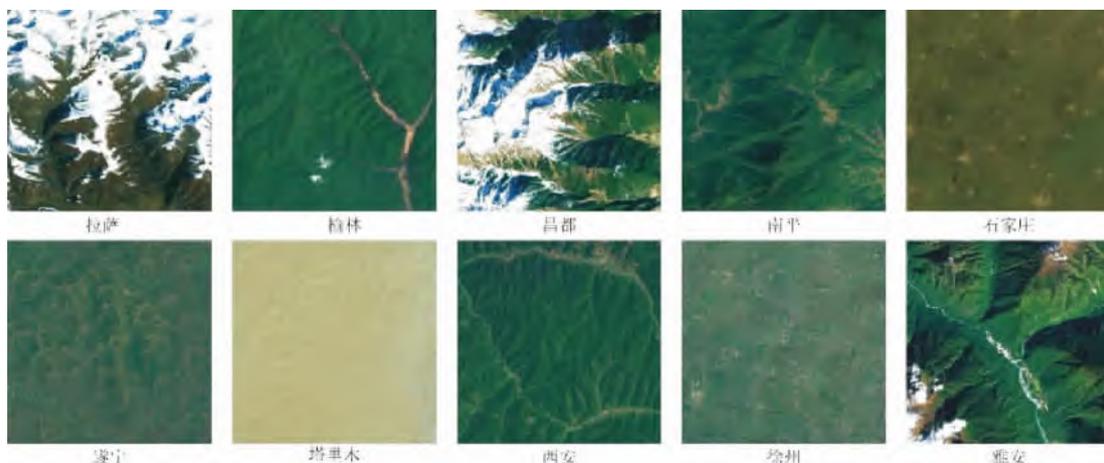


图 2 十个实验区域遥感影像图

Fig. 2 Remote sensing images at ten experimental areas

(4) 根据实验结果选取用于描述和表达地形特征的主成分。本文认为当累积贡献率达到 90% 时, 则这些主成分可近似解释原始变量中所包含信息。从表 1 可看出前两个主成分的方差累计贡献率可达到 98.882%, 说明前两个主成分可以解释原始变量 98.882% 的信息, 该数值已经远远达到选取主成分要求, 因此此处选取前两个主成分, 即第一和第二主成分来描述和表达地形特征。

从表 1 和表 2 中可得出, 第一个主成分方差贡献率为 88.054%, 第一主成分中坡度载荷系数为 1.599, 在四个地形因子载荷系数中最大, 其次是地形起伏度, 由此说明该主成分主要用来描述地形的起伏程度; 第二个主成分方差贡献率为 10.829%, 第二个主成分中全曲率载荷系数最大, 可以看出该主成分在一定程度上用来描述地形的平均突变程度。

(5) 计算主成分中各单一地形因子变量的系数, 计算公式见式(5)。基于表 1 中载荷矩阵和表 2 中特征值, 求得四个单一地形因子在前两个主成分中的系数, 具体见表 3。

$$a_{ij} = l_{ij} / \sqrt{e_i} \quad (5)$$

其中  $a_{ij}$  为指标  $j$  在第  $i$  个成分中的系数值;  $l_{ij}$  为指标  $j$  在第  $i$  个主成分中的载荷系数;  $e_i$  为第  $i$  个主成分对应的特征值。

表 3 前两个主成分中各变量的系数

Tab. 3 Coefficient of each variable in the first two principal components

地形因子	主成分 1	主成分 2
坡度	0.784	-0.455
地形起伏度	0.502	0.071
地形粗糙度	0.045	-0.005
全曲率	0.362	0.888

(6) 计算各地形因子变量的综合系数。根据表 1 中各主成分方差贡献率和表 3 中各地形因子变量在各主成分中的系数, 基于公式(6)对前两个主成分中各单一地形因子的系数进行计算, 得到均值标准化后的坡度、地形起伏度、地形粗糙度、全曲率的综合系数。标准化的地形复杂度指标  $C_s$  与四个标

准化后的单一地形因子间关系见公式(7)。

$$Coef_j = \frac{\sum_{i=1}^n a_{ij} \times CR_i}{\sum_{i=1}^n CR_i} \quad (6)$$

其中  $Coef_j$  为指标  $j$  的综合系数;  $n$  为保留的主成分个数;  $CR_i$  为第  $i$  个主成分贡献率;  $a_{ij}$  为指标  $j$  在第  $i$  个主成分中的系数值。

$$C_s = 0.648 \times S_s + 0.420 \times Cur_s + 0.455 \times Rel_s + 0.040 \times Rou_s \quad (7)$$

其中  $C_s$  为标准化的地形复杂度指标;  $S_s$  为均值化标准化后的坡度因子指标;  $Cur_s$  为均值化标准化后的全曲率因子指标;  $Rel_s$  为均值化标准化后的地形起伏度因子指标;  $Rou_s$  为均值化标准化后的地形粗糙度因子指标。

(7) 标准化后的地形因子的综合系数归一化处理。将公式(7)中各地形因子的综合系数之和作为归一化计算的分子, 标准化后的单一地形因子的综合系数作为归一化计算的分子, 得到归一化处理后的综合系数, 地形复杂度指标  $C_N$  与归一化后的标准化地形因子之间的关系见公式(8)。

$$C_N = 0.415 \times S_s + 0.269 \times Cur_s + 0.291 \times Rel_s + 0.025 \times Rou_s \quad (8)$$

(8) 在公式(8)中, 各地形因子指标为均值化标准化后的指标, 为了更加直接地反映地形复杂度指标与四个单一地形因子之间的关系, 需将公式(8)中的标准化地形因子进行反标准化处理, 由公式(4)可知:

$$\left. \begin{aligned} S_s &= S/S_m \\ Cur_s &= Cur/Cur_m \\ Rel_s &= Rel/Rel_m \\ Rou_s &= Rou/Rou_m \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

其中  $S_m$  为坡度地形因子的均值;  $Cur_m$  为全曲率地形因子的均值;  $Rel_m$  为地形起伏度地形因子的均值;  $Rou_m$  为地形粗糙度地形因子的均值。

根据公式(8)和公式(9), 得到地形复杂度指标  $C$  与坡度  $S$ 、全曲率  $Cur$ 、地形起伏度  $Rel$ 、地形粗糙度  $Rou$  之间的经验公式, 具体见公式(10)。

$$C = 3.415 \times S + 107.486 \times Cur + 0.005 \times Rel + 0.018 \times Rou \quad (10)$$

### 3 地形复杂度指标与地形特征之间的关系

#### 3.1 地形复杂度指标与地形特征对应关系

为了探讨地形复杂度指标与地形特征之间的关系,本文基于构建的地形复杂度指标经验公式,对选取的10个实验区域计算了地形复杂度指标值,并对区域内地形复杂度指标值的最小值、最大值、平均值和标准差进行了统计,统计结果见表4。

根据表4中10个实验区域的先验地形信息以及求得地形复杂度指标值,我们可初步得出地形复杂度指标值 $C$ 与地形特征之间的对应关系,当 $0 \leq C < 0.1$ 时,区域的地形比较平坦,无明显起伏和褶皱,呈现出明显的平原地形特征;当 $0.1 \leq C < 1.5$ 时,区域地形有一定的起伏和褶皱,呈现出丘陵地形特征,其中当 $0.1 \leq C < 0.5$ 时,认为此时地形特征介于平原与丘陵地形特征之间,呈现出低丘陵地形特征;当 $C \geq 1.5$ 时,区域地形起伏较大,褶皱程度十分明显,呈现出山区地形特征。

表4 不同地形实验区域的地形复杂度指标值的基本统计信息

Tab. 4 Statistics of terrain complexity index in the experimental areas with different terrains

实验区名称	地形	最小值	最大值	平均值	标准差
石家庄	平原	0.024	0.159	0.064	0.016
塔里木	盆地平原	0.024	0.246	0.075	0.023
徐州	平原	0.029	0.205	0.082	0.022
遂宁	盆地丘陵	0.060	2.721	0.625	0.428
榆林	高原丘陵	0.130	1.779	0.923	0.248
西安	丘陵	0.264	3.570	1.290	0.420
南平	丘陵	0.073	6.312	1.298	0.751
拉萨	高原山区	0.095	5.889	1.760	0.816
昌都	山区	0.137	9.099	2.637	0.992
雅安	山区	0.053	10.681	2.697	1.424

#### 3.2 实验区域内地形复杂度指标适用性自验证

为了进一步说明地形复杂度指标值与地形特征之间的对应关系,本文统计并绘制了10个实验区域地形复杂度指标值的概率分布累计图,具体见图3。从图3可以看出:

石家庄实验区域中地形复杂度指标值小于0.1

的数目占整个区域的97%,塔里木实验区域中地形复杂度指标值小于0.1的数目占整个区域的87%;徐州实验区域中地形复杂度指标值小于0.1的数目占整个区域的81%。由此可得,这三个实验区域中大部分局部区域的地形复杂度指标值与平原地形特征是相对应的,说明当 $0 \leq C < 0.1$ 时,区域地形呈现出平原地形特征。

遂宁实验区域地形复杂度指标值属于0.1-1.5之间的数目占整个区域的95%;榆林实验区域地形复杂度指标值属于0.1-1.5之间的数目占整个区域的98%;西安实验区域地形复杂度指标值属于0.1-1.5之间的数目占整个区域的74%;南平实验区域地形复杂度指标值属于0.1-1.5之间的数目占整个区域的72%。由此可得,这四个实验区域中大部分局部区域的地形复杂度指标值与丘陵地形特征是相对应的,说明当 $0.1 \leq C < 1.5$ 时,区域地形呈现出丘陵地形特征。

拉萨实验区域地形复杂度指标值大于1.5的数目占整个区域的65%;昌都实验区域地形复杂度指标值大于1.5的数目占整个区域的88%;雅安实验区域地形复杂度指标值大于1.5的数目占整个区域的80%。由此可得,这三个实验区域中大部分局部区域的地形复杂度指标值与山区地形特征是相对应的,说明当 $C \geq 1.5$ 时,区域地形呈现出山区地形特征。

#### 3.3 地形复杂度指标适用性验证

为了进一步验证地形复杂度指标值 $C$ 与地形特征之间对应关系的合理性,本文随机选取了平原、丘陵和山区三个实验区域,计算地形复杂度指标平均值对其对应关系进行验证,三个区域遥感影像图如图4所示。

分别在三个实验验证区域计算地形复杂度的最小值、最大值、平均值以及标准差,得到数据如表5所示。从表5可以看出,区域1的平均地形复杂度指标值为0.066,根据地形复杂度指标平均值与地形特征的对应关系,可知实验区域1属于平原地形特征;区域2的平均地形复杂度指标值为1.098,根据地形复杂度指标平均值与地形特征的对应关系,可得出实验区域2属于低丘陵地形特征;区域3的平均地形复杂度指标值为1.895,根据地形复杂度指标平均值与地形特征的对应关系,可得出实验区

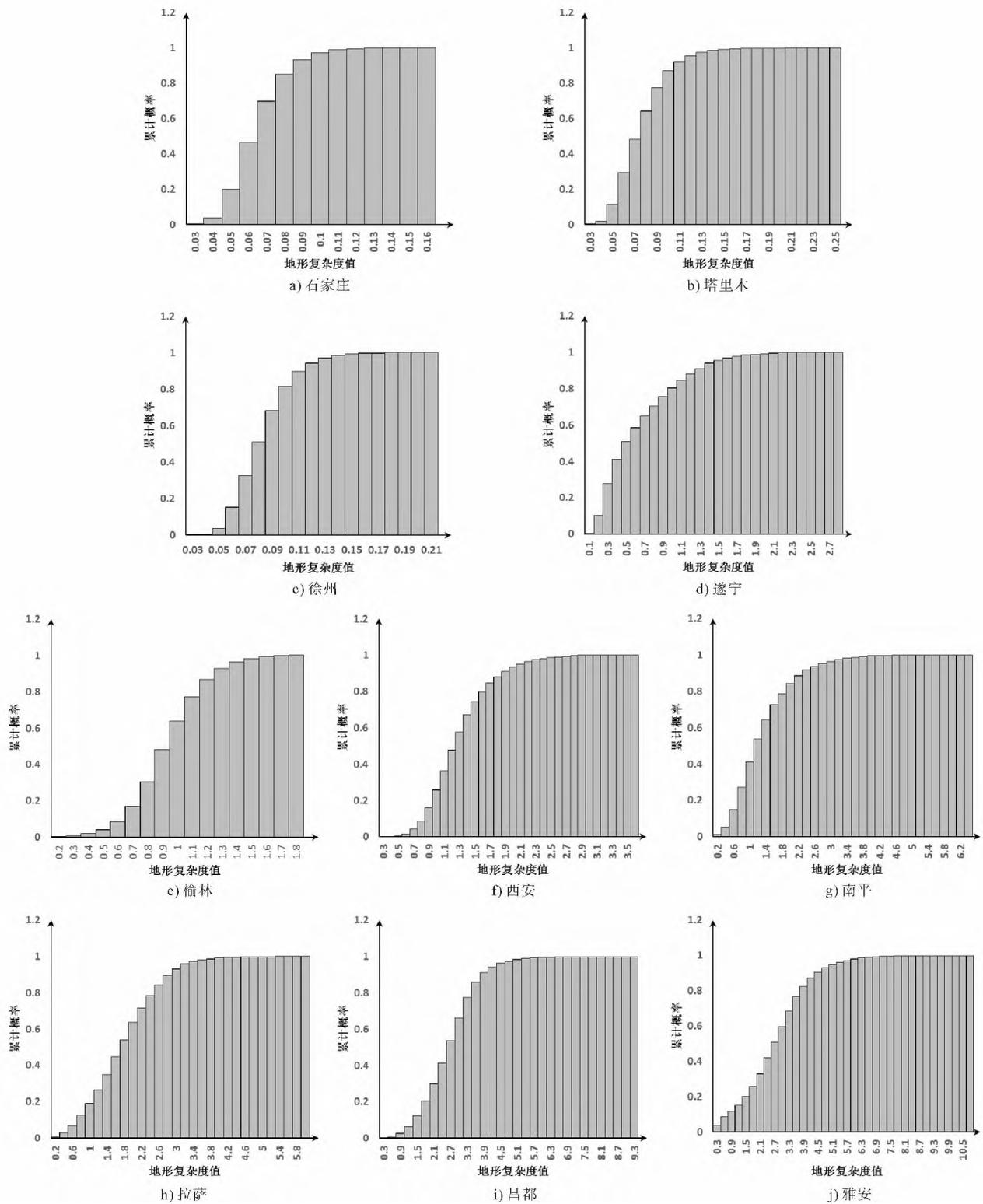


图 3 地形复杂度指标值概率分布累计图

Fig. 3 Cumulative probability distribution graph of terrain complexity index

域 3 属于山区地形特征。根据地形复杂度指标平均值 C 得出的地形特征信息与先验地形特征信息是相互吻合的。由此说明,本文提出的地形复杂度指

标与地形特征之间的对应关系是合理的,基于主成分分析方法构建的地形复杂度模型能够有效表达地形特征。



图4 验证区域遥感影像图

Fig. 4 Remote sensing images of the verified experimental areas

表5 实验验证区域地形复杂度指标值统计信息

Tab. 5 Statistics of terrain complexity index in the verified experimental areas

实验区名称	地形	最小值	最大值	平均值	标准差
区域1	平原	0.024	0.147	0.066	0.017
区域2	丘陵	0.023	3.745	1.098	0.513
区域3	山区	0.184	5.156	1.895	0.737

## 4 结论与展望

### 4.1 结论

(1) 本文采用主成分分析方法,构建了一种自适应定权的地形复杂度模型,并得出地形复杂度指标  $C$  与坡度  $S$ 、地形粗糙度  $Rou$ 、地形起伏度  $Rel$  和全曲率  $Cur$  的经验公式:  $C = 3.415 \times S + 107.486 \times Cur + 0.005 \times Rel + 0.018 \times Rou$ 。

(2) 根据经验公式计算实验区域的地形复杂度指标值,结合实验区域的地形类型,得出地形复杂度指标值与地形类型之间的关系:当  $0 \leq C < 0.1$  时,区域呈现出平原地形特征;当  $0.1 \leq C < 1.5$  时,区域呈现出丘陵地形特征;当  $C \geq 1.5$  时,区域呈现出山区地形特征。

(3) 选取平原、丘陵和山区实验区域,对地形复杂度指标值与地形类型之间的对应关系进行验证,实验结果表明,本文提出的地形复杂度指标与地形特征之间的对应关系是合理的,基于主成分分析方法构建的自适应定权地形复杂度模型能够有效表达地形特征。

### 4.2 展望

本文研究对于地形特征采样理论、DTA 的不确定性分析等具有重要的参考价值和应用价值。但由

于主成分分析对于样本数据具有一定的依耐性,不同的实验样本可能会得到不同的实验结果。在今后的研究中,可通过增加实验样本数据,对实验样本数据分组等方法对地形复杂度指标经验公式进行进一步研究和优化。

## 参考文献(References)

- [1] 马锦娟. 地形复杂度量化研究 [D]. 南京师范大学 2012: 3 - 5. [MA Jinjuan. A quantitative research on terrain complexity [D]. Nanjing Normal University 2012: 3 - 5.]
- [2] 徐静,任立良,阮晓红. 不同地形复杂度下的水文尺度效应研究 [J]. 水土保持研究 2010, 17(1): 35 - 39. [XU Jing, REN Liliang, RUAN Xiaohong. Hydrologic responses to spatial scale in the area with different terrain complexity [J]. Research of Soil & Water Conservation 2010, 17(1): 35 - 39.]
- [3] 李天文,刘学军,汤国安. 地形复杂度对坡度坡向的影响 [J]. 山地学报, 2004, 22(3): 272 - 277. [LI Tianwen, LIU Xuejun, TANG Guoan. Influence of terrain complexity on slope and aspect [J]. Journal of Mountain Research 2004, 22(3): 272 - 277.]
- [4] ZHOU Qiming, LIU Xuejun, SUN Yizhong. Terrain complexity and uncertainties in grid based digital terrain analysis [J]. International Journal of Geographical Information Science 2006, 20(10): 1137 - 1147.
- [5] 韩羽,赵牡丹,安巧绒,等. DEM 地形复杂度对坡度提取的影响分析 [J]. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2008, (S2): 78 - 79. [HAN Yu, ZHAO Mudan, An Qiaorong, et al. Effect of terrain complexity on deriving slope from DEM [J]. Journal of Shaanxi Normal University 2008, (S2): 78 - 79.]
- [6] 龙毅,周侗,汤国安,等. 典型黄土地貌类型区的地形复杂度分形研究 [J]. 山地学报, 2007, 25(4): 385 - 392. [LONG Yi, ZHOU Tong, TANG Guoan, et al. Research on terrain complexity of several typical regions of loess landform based on fractal method [J]. Journal of Mountain Science 2007, 25(4): 385 - 392.]
- [7] 周侗,龙毅,汤国安,等. 面向 DEM 地形复杂度分析的分形方法研究 [J]. 地理与地理信息科学 2006, 22(1): 26 - 30. [ZHOU Tong, LONG Yi, TANG Guoan, et al. A fractal method to describe the terrain complexity reflected by the raster DEM [J]. Geography

- and Geo-Information Science 2006 **22**(1):26-30.]
- [8] 王雷,汤国安,刘学军,等. DEM 地形复杂度指数及提取方法研究[J]. 水土保持通报,2004,**24**(4):55-58. [WANG Lei, TANG Guoan, LIU Xuejun, et al. Terrain complexity index and its derivation from DEMs [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2004 **24**(4):55-58.]
- [9] 刘春,孙伟伟,吴杭彬. DEM 地形复杂因子的确定及与地形描述精度的关系[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2009,**34**(9):1014-1020. [LIU Chun, SUN Weiwei, WU Hangbin. Terrain complexity factor and its relationship with accuracy of DEM terrain representation [J]. Geomatics & Information Science of Wuhan University, 2009 **34**(9):1014-1020.]
- [10] 卢华兴,刘学军,汤国安. 地形复杂度的多因子综合评价方法[J]. 山地学报,2012,**30**(5):616-621. [LU Huaxing, LIU Xuejun, TANG Guoan. Terrain complexity assessment based on multivariate analysis [J]. Journal of Mountain Science, 2012 **30**(5):616-621.]
- [11] 苏为华. 多指标综合评价理论与方法问题研究[D]. 厦门大学,2000:151-166. [SU Weihua. Study on comprehensive evaluation theory and methodological issues [D]. Xiamen: Xiamen University, 2000:151-166.]
- [12] WU Dianting, WU Di, GEOGRAPHY S O, et al. Some problems in comprehensive evaluation of the principal component analysis [J]. Mathematics in Practice & Theory, 2015.
- [13] 周启鸣,刘学军. 数字地形分析[M]. 科学出版社,2006:35-38,87-93,111-112. [ZHOU Qinming, LIU Xuejun. Digital terrain analysis [M]. Science Press, 2006:35-38,87-93,111-112.]
- [14] HOBSON R. D. Surface roughness in topography: quantitative approach [M]. 1972:51-64.

## An Adaptive Weighting Terrain Complexity Model

ZHANG Qianning<sup>1</sup>, HUANG Zechun<sup>1,2\*</sup>, XU Zhu<sup>1,2</sup>, Hong Andong<sup>1</sup>, ZHANG Ruifang<sup>1</sup>

(1. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 611756, China;

2. State-province Joint Engineering Laboratory of Spatial Information Technology for High-speed Railway Safety, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

**Abstract:** Terrain Complexity Index (TCI) is an important parameter in digital terrain analysis. Proper determination of TCI would well serve terrain feature sampling theory, uncertainty analysis of digital terrain and hydrological analysis, etc. Most available topographic feature indexes scarcely arrive at an appreciable approximation for terrain due to poor inclusion of necessary physical factors into TCI.

In this study, an integrated terrain complexity index (ITCI) was introduced to define terrain using multiple topographic factors. The procedure of ITCI construction is described consecutively as below: Principle component analysis was conducted to develop an adaptive weighting terrain complexity model, in which four single topographic feature indexes, including slope, total curvature, terrain roughness and relief, were collected to build ITCI; Based on training data from experiments, ITCI was examined and an empirical formula of ITCI was shaped accordingly; According to the empirical formula, ITCI values at experimental areas were computed for formulating connections between ITCI and landform classification; In order to verify our suggested formulation of ITCI with landform types, three experimental regions with characteristic feature attributes were selected and then calculated. Results showed that ITCI could effectively describe topographic features and the formulation of ITCI with landform types was agreeably matched. The study has great value for terrain sampling and uncertainty analysis in digital terrain analysis.

**Key words:** integrated terrain complexity index (ITCI); principle component analysis; empirical formula; terrain sampling