

引用格式: 蒋圣, 汤国安, 杨昕, 等. 基于DEM的黄土高原地形纹理概念模型[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(6): 959-968. [ Jiang S, Tang G A, Yang X, et al. Conceptual model of terrain texture in Loess Plateau based on DEM[J]. Journal of Geo-information Science, 2021, 23(6): 959-968. ] DOI:10.12082/dqxxkx.2021.200411

# 基于DEM的黄土高原地形纹理概念模型

蒋 圣<sup>1,2,3</sup>, 汤国安<sup>1,2,3</sup>, 杨 昕<sup>1,2,3\*</sup>, 熊礼阳<sup>1,2,3</sup>, 钱程扬<sup>1,2,3,4</sup>

1. 虚拟地理环境教育部重点实验室(南京师范大学), 南京 210023; 2. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023;  
3. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023; 4. 苏州工业园区测绘地理信息有限公司, 苏州 215027

## Conceptual Model of Terrain Texture in Loess Plateau based on DEM

JIANG Sheng<sup>1,2,3</sup>, TANG Guoan<sup>1,2,3</sup>, YANG Xing<sup>1,2,3\*</sup>, XIONG Liyang<sup>1,2,3</sup>, QIAN Chengyang<sup>1,2,3,4</sup>

1. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;  
2. School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 3. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China; 4. Suzhou Industrial Park Survey, Mapping and Geoinformation Co., Ltd, Suzhou 215027, China

**Abstract:** The geomorphic characteristics of "thousands of gullies" in the Loess Plateau show significant self similarity in multi-scale space, and have obvious textural characteristics of local-irregular and macro-regular. Previous studies have shown that there have been specific research results on the selection of texture features, the uncertainty of scale effect, and the combination of texture features with other features in identification and classification of specific landforms. However, the current texture analysis methods are limited to the application of macro terrain classification. For the concept, classification, basic characteristics, and analysis methods of terrain texture, there is a lack of theoretical framework for application support. On the basis of the existing research results, this paper defines the Loess Plateau as the research scope, and puts forward the concept model of the Loess Plateau terrain texture, namely definition, characteristics, classification, and expression. In terms of the definition of terrain texture, this paper expands the scope of the definition. In addition to the existing macro morphological topographic texture, the terrain texture formed by the combination of the characteristics of typical loess geomorphic units (loess yuan, liang, mao, etc.) and the terrain texture formed by the slope characteristics of loess slope are proposed. This paper points out that the data expression based on Digital Elevation Model (DEM) will be more conducive to the quantification of terrain texture, especially the terrain factor derived from DEM can expand the feature space of terrain texture and enrich the data source of terrain texture analysis. In terms of the basic features of terrain texture, this paper puts forward three basic characteristics: regional difference, genetic complexity, and scale dependence. Among them, regional differences can be qualitatively distinguished by visualization or quantified by existing statistical methods, so as to effectively distinguish differences in texture between regions. In the classification system of terrain texture, this paper classifies the terrain texture

收稿日期: 2020-07-29; 修回日期: 2020-09-15.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41930102、41971333、41771415、41401440); 江苏高校优势学科建设工程资助项目。

[ **Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No.41930102, 41971333, 41771415, 41401440; Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions. ]

作者简介: 蒋 圣(1984—), 男, 江苏宜兴人, 博士, 高级工程师, 主要从事模式识别和数字地形分析研究。

E-mail: 214230267@qq.com

\*通讯作者: 杨 昕(1976—), 女, 陕西西安人, 教授, 主要从事数字地形分析和空间分析研究。E-mail: xxinyang@njnu.edu.cn

based on its element saliency, texture origin, and visual form. Taking loess liang in the loess hilly and gully region as an example, a single loess liang can be regarded as a texture element. Through a certain arrangement and combination of several loess liang, the terrain textural characteristics of the loess liang hilly and gully region are formed. However, a single loess liang cannot express the texture features. This paper aims to build a conceptual model of terrain texture oriented to the Loess Plateau, and promotes the application and development of texture analysis method in Loess Plateau.

**Key words:** Loess Plateau; terrain texture; conceptual model; DEM; terrain features; multi-scale; surface morphology; texture element; geo-information atlas

**\*Corresponding author:** YANG Xin, E-mail: xxinyang@njnu.edu.cn

**摘要:**黄土高原“千沟万壑”的地貌形态,在多尺度空间下表现出显著自相似性,具有“局部无规则,宏观有规律”的纹理特征。目前,黄土高原地形纹理的提取方法及应用已经得到初步发展,但依然缺乏在理论层面的框架体系。本文在已有学者研究成果的基础上,限定黄土高原为研究范围,明确提出黄土高原地形纹理的概念模型,即内涵、特征、分类及表达。将内涵进行扩展,除已有的宏观形态地形纹理外,提出黄土典型地貌单元(黄土塬、梁、峁等)特征组合形成的地形纹理,以及黄土坡面坡度特征形成的地形纹理;指出以数字高程模型为主的数据表达将更有利于地形纹理的量化,特别是基于DEM派生的坡面地形因子能够扩展地形纹理的特征空间,丰富地形纹理分析的数据源;明确地形纹理的基本特征,分别是区域差异性、成因复杂性和尺度依赖性;构建划分体系,以地形纹理的基元显著性、纹理成因以及可视化形态进行类别划分。本文以期构建面向黄土高原的地形纹理概念模型,推动纹理分析方法在黄土高原的应用和发展。

**关键词:**黄土高原;地形纹理;概念模型;DEM;地形特征;多尺度;地表形态;纹理基元;地学信息图谱

## 1 引言

我国黄土高原地区呈现出独特的地貌特征,具有很高的地学研究价值。黄土高原经历了两百多万年的黄土搬运和堆积,在风、水、生物、人类活动等多种因素综合影响下,以“下伏岩层古地貌”为基底,发育形成“千沟万壑”的地貌特征。自20世纪50年代以来,众多学者对黄土高原进行了研究,在黄土高原的成因<sup>[1-3]</sup>、物质的构成<sup>[4-5]</sup>、侵蚀的模式<sup>[6-7]</sup>等方面取得了诸多研究成果,明确了黄土高原在中国乃至全球的物质能量循环、生态环境保护中的意义,推动了黄土地理学、地貌学研究的发展。

面向黄土高原的数字地形分析已经取得了丰富的成果,然而对于特定区域的宏观地形特征量化分析与成因机理则需要进一步研究<sup>[8-9]</sup>。常规的基于DEM的坡面特征,是针对地形特征分量的描述,其结果也多是统计指标来实现。地形是一个长期形成的复杂综合体,既要实现对其单个单元的形态描述,又要推演多个单元在空间上的分异规律,需要寻找综合了宏观和区域结构特征、空间自相似组织特征的研究对象。这种对象类同于基于遥感影像进行宏观地物识别和分类的判别标志之一:纹理<sup>[10]</sup>。

纹理分析方法在区域地貌学中被归类为信息

图谱分析方法。针对黄土高原的宏观地形显著的纹理特征,相关学者对其进行了研究并取得一定成果<sup>[11]</sup>。例如,陶旻<sup>[10]</sup>阐述了地形纹理的概念,使用不变矩、GLCM纹理算子、三维空隙度等方法,进行了尺度分析和量化特征对比,明确了黄土高原中基于纹理特征的地形分析的有效性。刘凯等<sup>[12]</sup>针对DEM和遥感影像在黄土高原所呈现出的纹理特征的差异性进行了分析,选取了8个不同的地貌类型样区,对比分析了纹理特征的有效性、稳定性和组间差异性,其结果表明,DEM较之遥感影像,能够更为直接描述地形的本质特征,而遥感影像受到黄土地表覆盖物的影响,在一定程度上掩盖了地形的基本特征。随后,针对黄土地貌中DEM纹理特征的稳定性,黄晓力等<sup>[13]</sup>和李可等<sup>[14]</sup>分别以GLCM和RILBP方法进行了纹理稳定性的分析。二者都认为DEM的分辨率对地形纹理的识别具有显著影响,不同的分辨率导致不同的识别效率和结果精度。黄晓力等<sup>[13]</sup>对GLCM算子进行了纹理参数的调整和逐项对比,发现了多个特征中的4项参数具有较好的识别率。而李可等<sup>[13]</sup>也在研究中认为DEM尺度对纹理特征具有显著影响,并且不同的黄土地貌具有不同的稳定尺度。Ding等<sup>[15]</sup>采用随机的48个黄土地区,使用地形纹理测度与沟壑密度、坡度等地形因子显著相关,表明基于稳定性分

析单元的地形纹理测度能够反映地形形态的基本特征。

上述研究主要面向黄土地貌中纹理特征的定量描述。近年来,出现了不少基于地形纹理的地质地貌学应用。例如,Zhao等<sup>[16]</sup>以SRTM DEM数据为基础,基于小流域尺度,构建了地形(如平均坡度和高程范围)和纹理相结合的特征,用于黄土地貌的识别。在7种典型黄土地貌中,黄土台地和黄土中山的精度最高,对黄土丘陵、黄土山脊、黄土坡脊的识别精度相对较低,但都证实使用纹理的特征有助于识别精度的提高。李勋等<sup>[17]</sup>基于DEM纹理特征及其他坡面因子等6项指标进行综合分析,使用神经网络进行非线性组合,并辅以NDVI指标进行滑坡识别,结果表明,对于滑坡的识别率为71.03%,能够较好识别滑坡范围。另外,陶旻<sup>[18]</sup>的研究表明,使用灰度共生矩阵结合辅助地形因子,对于黄土丘陵沟壑区的等地形纹理特征显著的区域尤其有效,其综合识别效率及精度最高,具有地貌识别的实际应用价值。

综上,目前黄土高原的地形纹理研究是从理论方法开始,逐步走向应用。虽然地形纹理的研究文献不多,但对于纹理特征及方法在黄土高原中的适用性已经给出了肯定的答案,从纹理特征的选择、尺度效应带来的不确定性、应用纹理结合其他特征在具体地貌中进行识别和分类,都已经有了切实的研究。然而,目前的研究对地形纹理的概念、分类、基本特征、分析方法等理论框架缺乏系统性研究。因此,本文构建面向黄土高原的地形纹理概念模型,将在概念、数据表达、基本特征、分类框架等方面进行阐述,以期推动纹理分析方法在黄土高原的应用和发展。

## 2 黄土高原地形纹理的基本概念

纹理的概念范畴包含地形纹理,而黄土高原地形纹理则是地形纹理的一个具体方面。在阐述黄土高原地形纹理之前,需要对纹理和地形纹理的概念及涵义进行描述。

### 2.1 纹理

纹理是图像中普遍存在的一种“宏观有规律,局部无规则”的特征<sup>[19]</sup>,在图像检索、分类、分割、识别等领域,扮演着重要的角色。虽然纹理在视觉上具有显著特征,然而由于它的形态及变化的多样性

和不确定性<sup>[20]</sup>,目前还未达成统一而全面的定义。文献[21]–[26]给出了具有代表性的6种纹理定义,其定义显示,虽然这些关于纹理的定义不尽相同,但它们仍具有共识,即:①纹理是一个区域性特征;②纹理具有模糊性和不确定性;③纹理是通过纹理基元的空间分布和组合来表现规律。

根据以上共识,可以从以下3个角度进行探讨:①从纹理基元的形态特征,可以把纹理分为精细纹理、粗糙纹理、粒状纹理、平滑纹理等<sup>[20]</sup>;②从纹理的来源进行区分,则可以将纹理分为自然纹理、人工纹理,其中,自然纹理通常是指自然形成的,而人工纹理常见的示例是人工图案所呈现出的模式重复;③从纹理的特征提取方法,可以分为统计型纹理和结构型纹理<sup>[10]</sup>,针对以上2种纹理的分析,可以采用基于统计模型的分析方法和基于纹理基元的结构化分析方法。

综上所述,可以得到:①纹理是一种表征物体表面或结构的属性,应用广泛;虽然在视觉上的具有“宏观有规律,局部无规则”的显著特点,但由于变化广泛,目前尚无统一的定义;②对于统计型纹理,纹理在一定区域范围内具有统计特征;对于结构型纹理,纹理基元表现出的精细、粗糙、平滑等特征,能够为其结构化方法提供识别和分类的依据。可见,纹理具有二元性特征,即纹理是在一定尺度下结构性和统计性特征的统一。因此,对于地形纹理及黄土高原地形纹理,选择合适的尺度,进行特征计算及特征提取,适用于地形等自然纹理对象。

### 2.2 地形纹理

地貌是自然界长期演进的结果,在地面物质组成与内外动力条件相似,发育时间相近的条件下,其形态在空间上具有自相似和非线性的特征<sup>[27]</sup>。常规的坡面尺度的特征如坡度、坡向、曲率等,面向微观层面上的统计指标,难以准确描述地形的宏观特征。Pentland<sup>[28]</sup>提出自然表面粗糙度,定性地将地表归类为“光滑的”和“粗糙的”,将地形的自相似特征以“纹理”的角度来审视。纹理是基元按照一定规则,排列组合形成的近似重复模式。可以看出,“基元”和“规则”是解决问题的关键。在数字地形分析中,地形纹理单元可以在很大程度上代表地貌单元,利用纹理分析方法对地貌单元进行空间分布规律的研究,能够获得地貌单元的空间分布规律,为地貌的分类和识别提供新的特征指标。

本文定义的地形纹理是:地表形态在空间中呈



现出的宏观有规律、局部无规则的展布及排列模式。其中,地表形态由内外营力相互作用而形成,包括地壳运动等所造成的地形起伏,也包括光、水、气、生物、人的作用对地表的分解、搬运和堆积。基本特征是:根据尺度的不同,地形纹理具有结构特征和统计特征的二元特征。在一定尺度下,地形纹理中的纹理基元对应到各个地貌单元,这些“单元”结构在不同数据源下的可视化特征,组成了地形纹理的纹理基元,纹理基元具有显著的结构特征;在更为宏观的尺度下,纹理基元通过按照一定规则,排列组合形成的近似重复模式,表现为“局部无规则,宏观有规律”的统计特征。上述特征在一定空间尺度上的结构性相似、近周期性重复变化特征,在信息介质或人的视觉上的映射,即为地形纹理。地形纹理是客观的存在,是地球表面所固有的一种自然特征。

### 2.3 黄土高原地形纹理

黄土高原地形纹理是指黄土高原区域范围内地貌形态及其特征,按照一定排列组合形成的空间分布,在一定空间尺度下,表现出“宏观有规律,局部无规则”的分布模式。其中,纹理基元是一组地形特征要素集合,如宏观尺度的塬、梁、峁等地貌单元特征,微观尺度下人工梯田所形成的条带状纹理特征等。

由于地形纹理具有尺度依赖性,当尺度不同时,黄土地形纹理的特征基元也不同。本文参考已

有学者<sup>[29-30]</sup>对地貌特征的分类框架图,将黄土高原地形纹理对应到相应的分类体系中。如图1所示,黄土地貌类型可以由2个分类因素决定:①成因因素;②形态因素。在成因因素中,主要由形态纲的基本地貌和作用类的地貌营力组成。地形纹理通常在形态纲的第一级,宏观形态亚纲中发挥作用。已有地形纹理的研究<sup>[10,13]</sup>已经应用于黄土高原宏观形态亚纲中。同时,黄土高原地形纹理特征在形态因素上具有显著特征,在第五级分类和第七级分类均具有显著纹理特征,分别是黄土典型地貌单元(黄土塬、梁、峁等)特征组合形成的地形纹理,以及黄土坡面坡度特征形成的地形纹理,第六级是地貌实体单元特征亚型,主要表现的是单个地貌单元的特征,因此不具有地形纹理特征。

基于上述对黄土地貌类型的分类框架图的分析,本文基于黄土高原整个范围,将黄土高原地形纹理共分为2个尺度,分别是面向宏观尺度范围(面向区域范围)及面向微观尺度范围(面向小流域范围)的地形纹理。如图2所示,面向区域范围的地形纹理包含黄土宏观形态的地形纹理及黄土典型地貌单元(塬、梁、峁等)特征组合形成的地形纹理,前者以随机纹理特征为表现形式,后者则包含随机纹理特征及结构纹理特征。微观尺度的地形纹理主要是指黄土小流域中包含的地形纹理,其既包含随机纹理特征,也包含结构纹理特征。根据侵蚀程度不同,不同的沟谷区域表现为不同的纹理。无侵蚀或者侵蚀轻微的区域,表现为较为光滑的纹理,侵

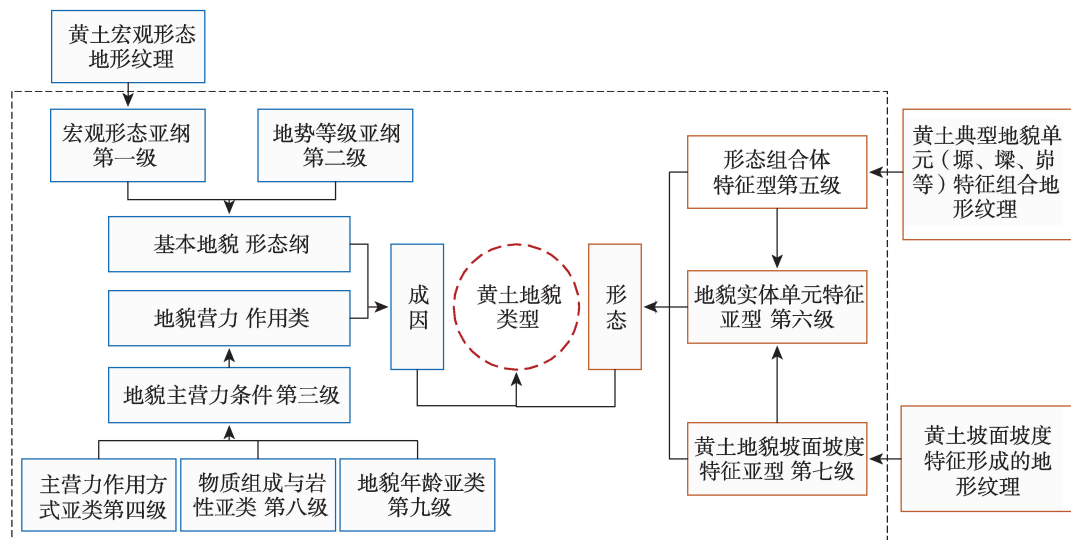


图1 黄土地貌分类体系中的地形纹理(改编自程维明等<sup>[30]</sup>)

Fig. 1 Terrain texture in loess geomorphic classification system(modified from Cheng<sup>[30]</sup>)



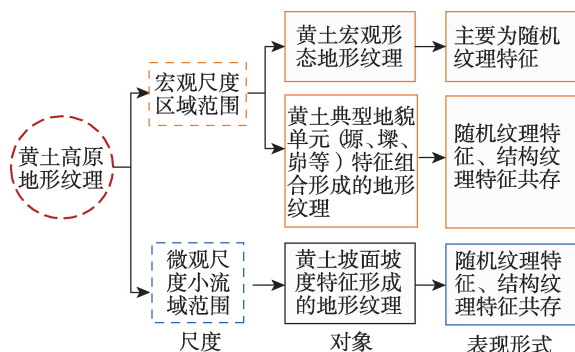


图2 黄土高原地形纹理在不同尺度下的对象及表现形式

Fig. 2 Objects and forms of terrain texture in different scales in Loess Plateau

蚀程度剧烈的区域,表现为粗糙纹理;而人工梯田则表现为近似规则纹理,呈现出条带状纹理特征。

### 3 黄土高原地形纹理数据表达

纹理特征在遥感应用中使用广泛。然而,通过遥感影像这一介质进行地形地貌特征的表达存在限制,主要原因在于遥感影像上所存在大量地表覆盖物。如果地表覆盖物的属性不一致,将很大程度上干扰、甚至掩盖下覆地形的结构特征,为地形分析带来了困难。

文献[12]阐述了遥感影像数据和DEM数据所表达的地形纹理特征差异性,其研究表明:面向黄土高原地貌,DEM数据在表达地形差异性方面具有显著优势。DEM是对地理空间的网格化表达<sup>[31]</sup>,其网格类似于数字影像中的像素。因此,基于DEM的地形纹理分析,可以借鉴图像处理中的纹理分析方法,也能够基于DEM自身的地学属性进行分析。综合以上分析进行归纳,黄土高原地形纹理分析以DEM为数据基础,具有以下优势:① DEM所反映的黄土高原地形纹理不受地面覆盖物的干扰,具有反映地形特征的纯粹性;② DEM数据能够借鉴数字图像处理中的纹理分析方法,如纹

理谱、灰度共生矩阵、局部二元模式等纹理特征分析方法,将其用于地形地貌的表征和度量;③ 由于黄土高原千沟万壑的地形特征,基于DEM派生的坡面地形因子能够扩展地形纹理的特征空间,丰富地形纹理分析的数据源。根据已有文献<sup>[10-12]</sup>对于DEM及其派生因子的纹理特征分析,除了高程之外,通常采用的派生因子包括:坡度、坡向、光照模拟、平均曲率。而坡度变率及坡向变率由于其属于高阶导数类参数,已有文献均未使用。如图3所示<sup>[32]</sup>,图3(a)—图3(e)分别是DEM数据的高程、坡向、曲率、光照模拟、坡度在ArcGIS 10.4软件中的可视化图。这些因子通过分级量化后,能够表达地形中具有特定涵义的形态特征,能够为面向黄土高原地形纹理分析提供具有明确地学涵义的数据源。

### 4 黄土高原地形纹理基本特征

#### 4.1 区域差异性

黄土高原地形纹理的特征是地表形态的一种“宏观有规律,局部无规则”的规律特征,因此,地形纹理的定性和定量指标,与黄土地貌形态之间存在着相关性。对于黄土宏观形态地形纹理,平缓的沙盖黄土区表现为光滑或者细密的纹理特征;大巴中山由于峰谷起伏,呈现出粗糙的纹理状态;黄土丘陵沟壑区又由于沟壑纵横,呈现出较黄土山区更为粗糙的纹理。同时,黄土高原小流域中特有的人工梯田呈现出的近似规则的条块状纹理,沟蚀区则呈现出极不规则的自然纹理形态,上述这些纹理特征,表现出不同区域之间的纹理差异性。这些差异性可以通过可视化进行定性判别,也可以通过已有的统计方法进行量化,从而能够有效区别区域之间的纹理差异性。

#### 4.2 成因复杂性

地球表面的形态呈现出多样性,其成因是错综复杂的,但总体上是由内动力和外动力共同作用形

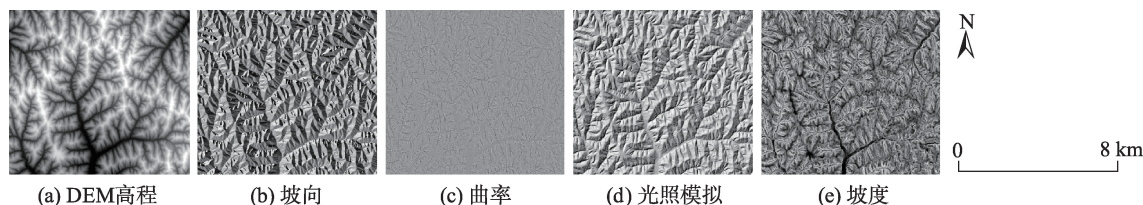


图3 DEM及其派生特征因子的可视化图

Fig. 3 Visualization of DEM and its derived feature factors

成。内动力形成宏观的地势形态,外动力在宏观形态的基础上进行雕琢,如通过流水侵蚀、风蚀作用等,对地面表层的物质进行分化、搬运、堆积,从而最终形成现代地面的各类形态。对黄土高原的地貌单元及坡度坡面特征形成的纹理特征,亦来自于地表分化过程中的各种营力作用。黄土高原地形纹理特征,形成的有序-无序、宏观-微观、整体-局部之间的联系,已有分形方法、自组织理论等进行分析描述,而地形纹理可以视为是地貌发育自组织现象或分形理论的一种表征。黄土高原所产生的纹理特征,是由于系统内部过程和非独立的外部控制变成近似有序和重复的空间模式。正如自组织和非自组织行为在地貌学中分别对应“历史之矢”和“时间之矢”,利用纹理属性中的“光滑-粗糙”、“规则-随机”、“单一-多样”等来描述地形特征,能够为研究地形特征提供新的思路。

#### 4.3 尺度依赖性

黄土高原地形纹理具有尺度依赖性。在不同的地理尺度下,黄土高原地形纹理呈现出不同的特征及形态。在宏观形态亚纲中,黄土地形纹理主要体现在宏观形态上,如粗糙程度较低的沙盖黄土区,具有坡度突变特征的黄土塬区,沟壑纵横的黄土丘陵沟壑区等。随着尺度变小,地形数据的空间分辨率变高,黄土高原的地形细节将会得到放大。以高分辨率DEM数据下的小流域为例,沟谷中的侵蚀剧烈的区域表现为粗糙度高的纹理,而侵蚀程度低的区域则表现为细密或者光滑的纹理。纹理的尺度依赖性主要体现在纹理基元上,当尺度不同时,黄土地貌的地形纹理所对应的纹理基元也不同。如宏观尺度的塬、梁、峁等地貌单元,也有在微观尺度下沟道侵蚀剧烈的区域和人工梯田所形成的条带状纹理。

## 5 黄土高原地形纹理分类

根据科学性、系统性及实用性原则,同时考虑黄土高原地形纹理具有显著的地形及地貌特征,基于黄土地貌学的基本理论以及黄土高原地形纹理的自身特点,将黄土高原地形纹理按照基元显著性、成因类型、及地貌形态进行划分。

### 5.1 显著性纹理和非显著性纹理

一个图像区域是否具有纹理特征,与纹理基元

的性质和数量有着密切关系。纹理是由一些简单的纹理基元按照一定的规律性的排列组合而形成的模式,并指出纹理具备的2层结构:①确定纹理基元内部的局部性质;②纹理基元之间的空间关系。关于黄土高原地形纹理的两层结构,可以从图4中看到。图4样区数据的比例尺是1:10 000,空间分辨率为5 m,该数据由陕西省测绘局生产,制作过程中遵循《数字高程模型生产技术规定》<sup>[32]</sup>中的数据生产流程。图4表现的是黄土丘陵沟壑区的梁状地貌,可以将单个黄土梁看成是纹理基元,多个黄土梁经过一定的排列方式,组成了黄土梁状丘陵沟壑区的梁状纹理特征。如果不考虑纹沟、细沟和浅沟等高分辨率下的细小特征,单个黄土梁是不存在纹理特征的(图4(c)),少数梁的排列组合形成了较弱的纹理特征(图4(b)),而在较大空间范围内,多数梁的排列组合则形成了显著的纹理特征(图4(a))。

根据黄土高原地貌单元的显著性,可以将地形纹理分为基元显著和基元不显著2类。图5的数据来源和图4一致。图5(a)显示的是沙盖黄土区的高

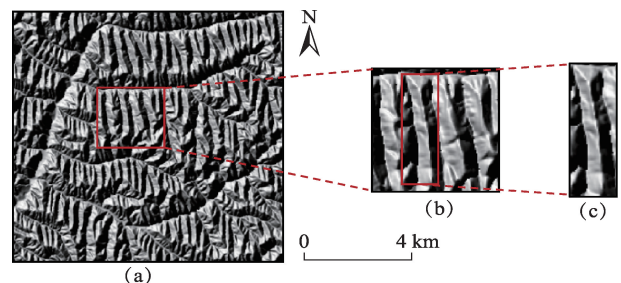


图4 黄土高原地形梁状丘陵沟壑区的纹理基元示意图(改自陶畅<sup>[10]</sup>)

Fig. 4 Texture elements in hilly and gully region of Loess Plateau (modified from Tao<sup>[10]</sup>)

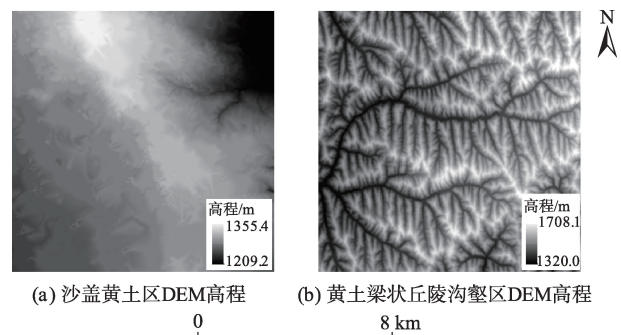


图5 黄土高原纹理基元显著性分类示意图

Fig. 5 Saliency classification of texture elements in Loess Plateau



程,该区位于陕西省北部,主要分布在榆林、横山靖边连线以西。风成堆积作用形成的沙地或沙丘,纹理基元不显著。图5(b)是黄土梁状丘陵沟壑区的高程可视化图,该区顶面保存较好的沟间地类型,梁坡上面蚀、细沟和切沟侵蚀处于加速阶段。纹理特征表现为规则的长方形基元分布,具有显著的纹理基元特征。

## 5.2 自然纹理和人工纹理

黄土高原地形纹理根据成因划分,可以分为人工地形纹理以及自然地形纹理,该划分通常是指黄土小流域尺度范围内。

### (1) 黄土高原人工地形纹理

黄土地貌是世界范围内最具特色也最具研究价值的地貌景观之一,这不仅仅是来自于其复杂而又有序的塬、梁、峁的组合形态,同时,黄土高原的梯田也是重要的人工地貌之一。中国高原修筑梯田的历史悠久,有历史记载,早在秦汉时代人类就通过农业实践,根据地形的不同起伏而构建起因地制宜的梯田,从而确保能够充分利用土地,并且能够利用梯田良好的蓄水性,从而能够缓解当地的雨水不足的情况,从而起到有利于作物生产、提高亩产量的作用。根据国家的统计数据<sup>[33]</sup>,截止到2012年年底,黄土高原地区共有梯田面积为371.3万 $\text{hm}^2$ ,占黄土高原地区坡耕地面积的83.4%。

就其形态而言,黄土高原的梯田是典型的近似规则纹理<sup>[34]</sup>。图6是2014年作者在黄土高原韭园沟地区现场考察时拍摄的梯田照片,可以从照片中看到,人工改造而成的梯田在每个山坡上形成了具有近似规则的条带状形态,从一定尺度上观察,具有显著的条带状纹理特征。

图7数据来源于课题组的无人机摄影测量<sup>[35]</sup>,数据采集的时间是2016年。根据高分辨率的DEM数据生成的光照模拟图以及坡度图,能够直观地了解和感受人工梯田所形成的纹理。图7显示的是黄土高原的安塞小流域地区的1:1000比例尺DEM生成的光照模拟图及坡度图,图7(a)能够看到梯田呈现出显著的条带状纹理,并且呈现出近似规则的间



图6 黄土高原韭园沟梯田实景照片  
Fig. 6 Photos of Jiuyuangou terrace in Loess Plateau

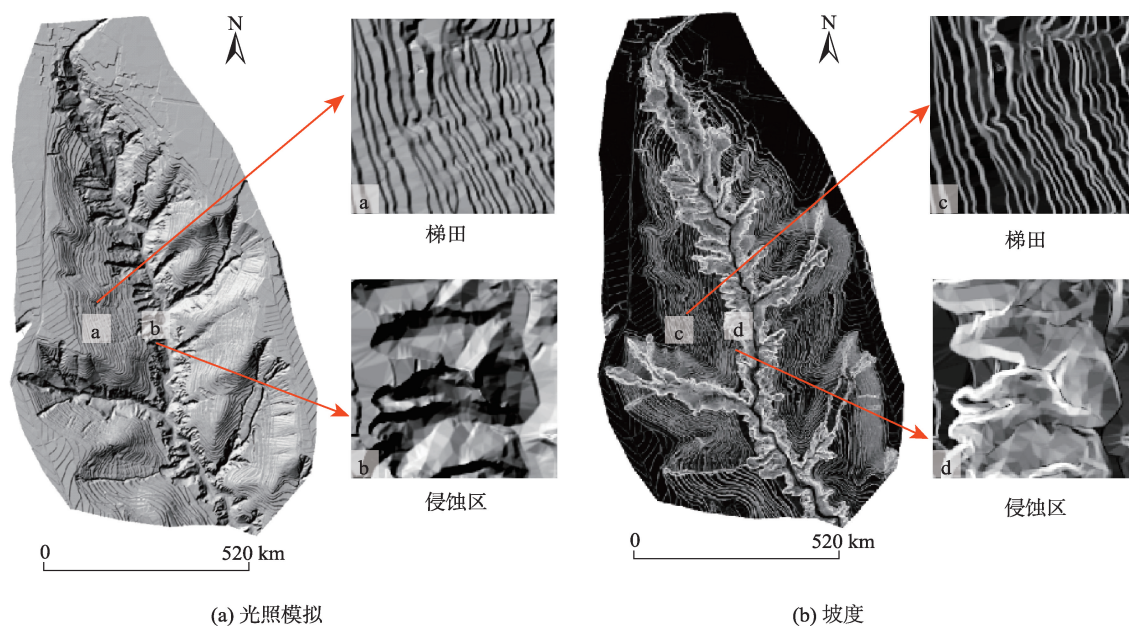


图7 安塞地区小流域的光照模拟及坡度示意  
Fig. 7 Light simulation and slope diagram of small watershed in Ansai area



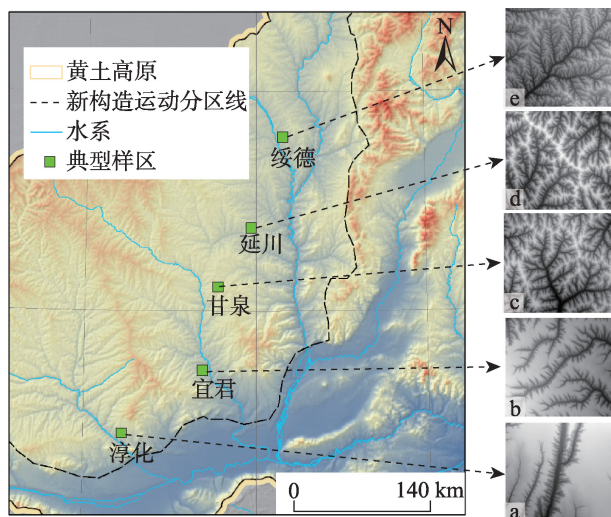
隔,图7(c)能够看到梯田的坡度是在不同田块间的田埂处出现坡度的突变,可以认为是黄土高原坡度坡面特征所形成的地形纹理。

### (2) 黄土高原自然地形纹理

黄土高原自然地形纹理不仅是与指与人工地形纹理相对应的分类,也泛指黄土高原上自然形成的其他纹理。图7(b)中的区域是沟道内侵蚀较为剧烈的区域,呈现出不规则的纹理状态;图7(d)是侵蚀剧烈的区域的坡度图,坡度呈现出随机、不规则的变化,与人工梯田形成的近似规则纹理相对应,认为是图7(b)区域为自然纹理,表现为随机性的粗糙纹理特征。同时,黄土高原中其他的自然形成的纹理,也可以认为是自然地形纹理,如黄土高原的塬、梁、峁所形成的空间自相似性显著的纹理特征。

### 5.3 不同形态特征纹理

黄土高原的黄土塬、黄土梁、黄土峁的纹理特征分别具有不同形态。如图8所示<sup>[32]</sup>,示意图显示的是从黄土高原地区从南向北,根据侵蚀强度的不同,不同的黄土地貌呈现出不同的纹理。淳化地区是黄土塬地区,塬面的地形较为平缓,其面积也相对较大,流水侵蚀作用较弱,但塬面往往被沟谷分割,塬边坡面陡峭且沟壑密布,呈现出块状平滑的纹理。宜君是黄土残塬区,是黄土塬被冲沟侵蚀切割后所剩的残存状态。因此总体形态上比黄土塬



注:a 淳化的黄土塬、b 宜君的黄土残塬、c 甘泉的黄土梁状丘陵沟壑、d 延川的黄土梁状丘陵沟壑、e 绥德的梁状丘陵沟壑区。

图8 黄土高原多个样区显示出的不同形态的纹理特征

Fig. 8 Texture characteristics of different shapes in several sample areas of the Loess Plateau

破碎,呈现出花瓣状的纹理特征。甘泉是黄土梁状丘陵沟壑,黄土正地形(沟间地)多呈狭长状分布,往往呈现多条平行排列。梁坡上面蚀、细沟、浅沟侵蚀活跃,负地形(沟坡地)切沟冲沟广布,重力侵蚀强烈,形态呈侧柏状纹理特征。延川为黄土梁状丘陵沟壑,其基本形态和甘泉相似,但其纹理基元更偏向于粒状。绥德是黄土梁状丘陵沟壑,该地区正地形多呈浑圆状,土壤侵蚀剧烈,在整体区域上表现为沟壑纵横密布,地形自相似性较强,形态呈树枝状纹理分布。

## 6 结论与展望

本文以黄土高原为研究范围,明确黄土高原地形纹理的基本内涵,除宏观形态地形纹理外,提出黄土典型地貌单元(黄土塬、梁、峁等)特征组合形成的地形纹理,以及黄土坡面坡度特征形成的地形纹理;首先阐述黄土高原地形纹理的数据表达,明确基于DEM数据为基础的表达方式具有反映地形特征的纯粹性,DEM派生的地形因子也能够扩展地形纹理的特征空间;阐述黄土高原地形纹理的基本特征,分别是区域差异性、成因复杂性和尺度依赖性;阐述黄土高原地形纹理的划分体系,分别是按照纹理基元显著性划分、按照成因划分和按照形态划分。本文构建面向黄土高原的地形纹理概念模型,以期推动纹理分析方法在黄土高原的应用和发展。

在下一步的研究工作中,将与黄土高原侵蚀相关工作相关联,同时将开展地形纹理特征的提取方法研究。以期将地形纹理与黄土高原的侵蚀模式结合,在黄土高原数字地形分析中发挥作用。

### 参考文献(References):

- [1] 刘东生. 中国的黄土堆积[M]. 北京: 科学出版社, 1965. [Liu D S. Loess Accumulation in China[M]. Beijing: Science Press, 1965.]
- [2] 鹿化煜, 安芷生. 前处理方法对黄土沉积物粒度测量影响的实验研究. 科学通报, 1997, 42(23): 2535-2538. [Lu H Y, An Z S. Experimental study on influence of pretreatment methods on grain size measurement of loess sediment[J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(23): 2535-2538.]
- [3] Jia Y, Li T, Shao M, et al. Disentangling the formation and evolution mechanism of plants-induced dried soil

- layers on China's Loess Plateau[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019,269-270:57-70.
- [4] 汪海斌,于英鹏,刘现彬,等.黄土高原S<sub>1</sub>古土壤的地球化学特征及其对物源的指示[J].*第四纪研究*,2011,31(2):338-346. [Wang H B, Yu Y P, Liu X B, et al. Geo-chemical characteristics of last interglacial paleosols in the Chinese Loess Plateau and its implications to Loess Provenance[J]. *Quaternary Sciences*, 2011,31(2):338-346. ]
- [5] Fenn K, Stevens T, Bird A, et al. Insights into the provenance of the Chinese Loess Plateau from joint zircon U-Pb and garnet geochemical analysis of last glacial loess [J]. *Quaternary Research*, 2018,89(3):645-659.
- [6] Yang F, Zhou Y. Quantifying spatial scale of positive and negative terrains pattern at watershed-scale: Case in soil and water conservation region on Loess Plateau[J]. *Journal of Mountain Science*, 2017,14(8):1642-1654.
- [7] 夏积德,吴发启,周波.黄土高原丘陵沟壑区坡地耕作方式对土壤侵蚀的影响研究[J].*水土保持学报*,2016,30(4):64-67. [Xia J D, Wu F Q, Zhou B. The study of influence of tillage patterns on soil erosion of slope farmland in the hilly-gully region of Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016,30(4):64-67. ]
- [8] 汤国安,那嘉明,程维明.我国区域地貌数字地形分析研究进展[J].*测绘学报*,2017,46(10):1570-1591. [Tang G A, Na J M, Cheng W M. Progress of digital terrain analysis on regional geomorphology in China[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017,46(10):1570-1591. ]
- [9] Zhou Y, Lei X, Yang F, et al. Characteristics and influencing factors of proximity distance index on the northern Shaanxi Loess Plateau in China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2019,16(12):2844-2855.
- [10] 陶旻.基于纹理分析方法的DEM地形特征研究[D].南京:南京师范大学,2011. [Tao Y. Texture analysis based research on terrain morphology characteristics[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2011.]
- [11] 汤国安,李发源,熊礼阳.黄土高原数字地形分析研究进展[J].*地理与地理信息科学*,2017,33(4):1-7. [Tang G A, Li F Y, Xiong L Y. Progress of digital terrain analysis in the Loess Plateau of China[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2017,33(4):1-7. ]
- [12] 刘凯,汤国安,黄晓力,等.面向地形特征的DEM与影像纹理差异分析[J].*地球信息科学学报*,2016,18(3):386-395. [Liu K, Tang G A, Huang X L, et al. Research on the difference between textures derived from DEM and remote-sensing image for topographic analysis[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2016,18(3):386-395. ]
- [13] 黄晓力,汤国安,刘凯. DEM分辨率对地形纹理特征提取的影响[J].*地球信息科学学报*,2015,17(7):822-829. [Huang X L, Tang G A, Liu K. Influence of DEM resolution on the extraction of terrain of terrain texture feature [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2015,17(7):822-829. ]
- [14] 李可,晏实江.基于RILBP的地形结构尺度稳定特征分析[J].*地理与地理信息科学*,2017,33(4):63-68. [Li K, Yan S J. Scale stability investigation based on RILBP for terrain structure[J]. *Geography and Geo-information Science*, 2017,33(4):63-68. ]
- [15] Ding H, Na J, Huang X, et al. Stability analysis unit and spatial distribution pattern of the terrain texture in the northern Shaanxi Loess Plateau[J]. *Journal of Mountain Science*, 2018,15(3):577-589.
- [16] Zhao G, Kondolf G M, Mu X, et al. Sediment yield reduction associated with land use changes and check dams in a catchment of the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2017, 148:126-137.
- [17] 李勋,杨环,殷宗敏,等.基于DEM和遥感影像的区域黄土滑坡体识别方法研究[J].*地理与地理信息科学*,2017,33(4):86-92. [Li X, Yang H, Yin Z M, et al. Regional loess landslide recognition method research based on DEM and remote sensing image[J]. *Geography and Geo-information Science*, 2017,33(4):86-92. ]
- [18] 陶旻,王春,蒋圣.一种基于改进双树复小波变换的地形纹理特征提取方法[J].*地理与地理信息科学*,2017,33(4):47-50. [Tao Y, Wang C, Jiang S. A new method on terrain texture characteristics extraction based on improved dual-tree complex wavelet transform[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2017,33(4):47-50. ]
- [19] 刘丽,谢毓湘,魏迎梅,等.局部二进制模式方法综述[J].*中国图象图形学报*,2014,19(12):1696-1720. [Liu L, Xie Y X, Wei Y M, et al. Survey of local binary pattern method [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2014,19(12):1696-1720. ]
- [20] Sonka M, Hlavac V, Boyle R. Image processing, analysis, and machine vision[M]. Boston: Cengage Learning, 2014.
- [21] Sklansky J. Image segmentation and feature extraction[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1978,8(4):237-247.
- [22] Tamura H, Mori S, Yamawaki T. Textural features corresponding to visual perception[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1978,8(6):460-473.
- [23] Bovik A C, Clark M, Geisler W S. Multichannel texture analysis using localized spatial filters[J]. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 1990, 12(1):55-73.
- [24] Tuceryan M, Jain A K. Texture analysis. in *Handbook of Pattern Recognition & Computer vision*[M]. Singapore:

- World Scientific, 1993.
- [25] 王润生. 图像理解[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1995. [Wang R S. Image Understanding[M]. Changsha: National Defense University of Science and Technology Press, 1995.]
- [26] Chaudhuri B B, Sarkar N. Texture segmentation using fractal dimension[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1995, 17(1): 72-77.
- [27] 李旭涛, 彭复员, 曹汉强, 等. 地形表面的自相似程度与分类感知[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(6): 1480-1482. [Li X T, Peng F Y, Cao H Q, et al. Self-similarity degree of terrain surface and class perception[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(6): 1480-1482.]
- [28] Pentland A P. Fractal-based description of natural scenes [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1984(6): 661-674.
- [29] 周成虎, 程维明, 钱金凯, 等. 中国陆地 1:100 万数字地貌分类体系研究[J]. 地球信息科学学报, 2009, 11(6): 707-724. [Zhou C H, Cheng W M, Qian J K, et al. Research on the classification system of digital land geomorphology of 1: 1 000 000 in China[J]. Journal of Geo-information Science, 2009, 11(6): 707-724.]
- [30] 程维明, 周成虎. 多尺度数字地貌等级分类方法[J]. 地理科学进展, 2014, 33(1): 23-33. [Cheng W M, Zhou C H. Methodology on hierarchical classification of multi-scale digital geomorphology[J]. Progress in Geography, 2014, 33(1): 23-33.]
- [31] 晏实江, 汤国安, 李发源, 等. 利用 DEM 边缘检测进行黄土地貌沟沿线自动提取[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2011, 36(3): 363-367. [Yan S J, Tang G A, Li F Y, et al. An edge detection based method for extraction of loess shoulder-line from grid DEM[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(3): 363-367.]
- [32] 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.]
- [33] 马红斌, 李晶晶, 何兴照, 等. 黄土高原水平梯田现状及减沙作用分析[J]. 人民黄河, 2015, 37(2): 89-93. [Ma H B, Li J J, He X Z, et al. The status and sediment reduction effects of level terrace in the Loess Plateau[J]. Yellow River, 2015, 37(2): 89-93.]
- [34] 于浩, 刘志红, 张晓萍, 等. 基于傅立叶变换的梯田纹理特征提取[J]. 国土资源遥感, 2008, 20(2): 39-42. [Yu H, Liu Z H, Zhang X P, et al. Extraction of terraced field texture features based on fourier transformation[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2008, 20(2): 39-42.]
- [35] 刘凯. 基于多源数据的黄土高原(重点流失区)侵蚀沟提取及区域差异性研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2017. [Liu K. Gully features extraction and the regional difference analysis in the severe soil erosion region of Loess Plateau of China based on multisource data[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2017.]